

IMED 模型体系简介

模型架构、研究进展及 LEEEP 团队介绍

戴瀚程（著）

能源环境经济与政策研究室 (LEEEP)

北京大学环境科学与工程学院



欢迎扫二维码关注微信公众号

版权所有 © 2018 戴瀚程

引用方式：

戴瀚程, 2018, IMED 模型体系简介, [HTTP://SCHOLAR.PKU.EDU.CN/HANCHENGDAL/IMED_GENERAL](http://SCHOLAR.PKU.EDU.CN/HANCHENGDAL/IMED_GENERAL)

COLLEGE OF ENVIRONMENTAL SCIENCES AND ENGINEERING
PEKING UNIVERSITY, BEIJING, CHINA
北京大学环境科学与工程学院, 北京, 中国

[HTTP://SCHOLAR.PKU.EDU.CN/HANCHENGDAL/IMED_GENERAL](http://SCHOLAR.PKU.EDU.CN/HANCHENGDAL/IMED_GENERAL)

Contents

1	LEEEP 团队介绍	25
1.1	PI 介绍：戴瀚程	27
1.2	团队成员	28
2	IMED 模型体系	31
2.1	前言	31
2.2	IMED 模型概览	34
2.2.1	IMED 模型：各主要模块简介	35
2.2.2	IMED 模型：多学科多模型集成研究	38
2.3	IMED 模型培训	39
2.3.1	首届碳中和综合评估模型培训会助力我国双碳事业综合性人才培养	39
2.4	IMED 成员网络	45
3	IMED CGE 模型	47
3.1	IMED CGE 模型概述	47
3.2	IMED CGE 模型应用案例	49
3.3	IMED CGE 模型技术性介绍	50
3.3.1	生产函数	51
3.3.2	最终需求	52
3.3.3	商品供应和区域贸易	54
3.3.4	市场出清	55
3.3.5	宏观闭合	55

3.3.6 动态过程	56
3.3.7 数据来源	57
3.3.8 碳交易政策评估模块	58
3.3.9 地区间产业竞争力评估模块	58
3.3.10 资源消费评估模块	60
3.3.11 评估可再生能源发展的宏观社会经济影响模块	61
3.3.12 IMED CGE 与自下而上模型的软连接模块	63
4 IMED TEC 模型	69
4.1 IMED TEC 模型概述	69
4.2 IMED TEC 模型应用案例	71
4.3 IMED TEC 模型技术性介绍	71
4.3.1 模型技术系统和能源服务	71
4.3.2 模型技术选择	72
5 IMED HEL 模型	73
5.1 IMED HEL 概述	73
5.2 IMED HEL 模型：室外空气污染健康影响	74
5.2.1 健康终端	74
5.2.2 健康风险评估	74
5.3 IMED HEL 模型：室内空气污染健康影响	76
5.4 IMED HEL 模型：货币化	77
5.4.1 健康支出	77
5.4.2 人均每年工作时间损失	78
5.4.3 支付意愿	79
6 IMED 云端平台	83
6.1 IMED 模型云端平台	83
6.2 IMED 模型暑期培训会	83
6.2.1 培训会概况	84
6.2.2 培训会安排	84
7 LEEEP 研究综述	87
7.1 写在前面：IMED 模型及相关研究简介	87
7.2 主题一：碳限额的经济影响分析	88
7.2.1 美国退出《巴黎协定》对中印碳排放空间和碳减排成本的影响	89
7.2.2 美国退出《巴黎协定》对中欧日碳排放空间和减排成本的影响	90
7.2.3 我国出口结构调整对国民经济和碳排放的影响	92
7.2.4 家庭消费模式对区域发展的影响：以上海市为例	94
7.2.5 低碳发电政策对广东省碳减排的影响	96

7.2.6	基于自上而下和自下而上模型评估中国区域能源使用和碳排放	98
7.2.7	绿色增长：中国大规模可再生能源发展的经济影响	101
7.3	主题二：碳减排对产业竞争力的影响探究	103
7.3.1	IMED 省级两区 CGE 模型分析产业竞争力影响的机制	103
7.3.2	碳减排政策的产业竞争力影响——基于 IMED 模型的相关研究	105
7.3.3	碳税对中国重庆的产业竞争力的影响	105
7.3.4	碳减排对中国产业竞争力的影响：以上海为例	106
7.3.5	地区间不均等碳税对辽宁省碳排放和产业竞争力的影响	108
7.3.6	中国省级不均衡碳强度目标经济影响的一般均衡评估：以广西为例	110
7.3.7	差异化碳减排目标的经济影响评估：以天津为例	112
7.4	主题三：我国碳交易与环境税政策影响评估	114
7.4.1	碳交易政策对实现哥本哈根气候目标的影响：以广东省为例	115
7.4.2	碳交易政策对广东省空气污染物排放的影响	117
7.4.3	碳排放交易助力实现 NDC 目标：以上海市为例	118
7.4.4	新能源政策与碳排放交易对实现中国 INDC 目标的经济影响	120
7.4.5	国家碳排放交易市场对地区的影响研究：以上海市为例	121
7.4.6	初始排放权分配对我国地区及部门碳排放权交易市场的经济影响	123
7.4.7	碳税对我国省级工业部门碳排放影响研究	125
7.4.8	京津冀地区硫税及可再生能源开发对 CO ₂ 、NO _x 、SO ₂ 排放的影响	126
7.5	主题四：气候政策与可持续发展目标 (SDG) 关联分析	128
7.5.1	气候政策与可持续发展目标 (SDG) 关联分析框架图	128
7.5.2	中国各省大气污染物减排的协同效益	129
7.5.3	中国各省电力部门面向 2030 年的节水潜力分析	130
7.5.4	碳减排对中国地方工业用水和减污潜力分析	132
7.5.5	快速城市化流域中碳-能源-水耦合关系模拟	134
7.5.6	中国碳减排对资源消耗的协同效益	136
7.6	主题五：控污与气候政策的健康与经济影响分析	138
7.6.1	中国 PM _{2.5} 污染健康效应的省级经济影响分析	139
7.6.2	PM _{2.5} 污染相关的健康损失——以上海市为例	140
7.6.3	中国道路交通 PM _{2.5} 相关的健康影响的经济影响	142
7.6.4	气候减缓对亚洲地区空气质量和人群健康的协同效益	143
7.6.5	结构调整和技术升级对京津冀空气质量和健康的影响	145
7.6.6	京津冀地区居民清洁取暖措施的健康和经济效益	146
7.6.7	PM _{2.5} 和臭氧污染对中国的健康及经济影响比较	147
7.6.8	2 度目标下中国道路交通部门气候减缓的协同效益	148
7.6.9	韩国减缓气候变化的空气质量与人群健康协同效益	149
7.7	LEEEP 组 2020 年度研究一览	151
7.7.1	IMED 研究 中国逐步淘汰钢铁产能的气候和健康效益	151
7.7.2	IMED 研究 气候减缓对韩国人类健康的空气质量协同效益	152
7.7.3	IMED 研究 中国 2030 年实现 2 度目标路径的综合评估	152
7.7.4	IMED 研究 中国温室气体减排的健康效益和经济效益	155
7.7.5	IMED 研究 中国碳交易体系中不同初始限额分配的情景分析	156
7.7.6	LEEEP 合作 京津冀水泥行业能效提升的能源-排放-健康影响	159

7.7.7 LEEEP 合作 政策执行在实现印度清洁电力转型的关键作用	161
7.7.8 LEEEP 合作 柳叶刀健康与气候变化倒计时：中国 2020 年度报告	161
7.8 LEEEP 组 2021 年度研究一览	163
7.8.1 IMED 研究 从供给和需求两侧助力中国钢铁行业实现碳中和	163
7.8.2 IMED 研究 四川省深度碳减排对空气质量和人群健康的协同效益	164
7.8.3 IMED 研究 电动汽车政策对京津冀地区环境与健康的影响	175
7.8.4 IMED 研究 中国清洁空气政策的健康和经济效益：以京津冀为例	177
7.8.5 LEEEP 合作 广东省交通和工业 PM _{2.5} 控制的健康和经济影响	183
7.8.6 LEEEP 合作 我们需要逆转趋势来阻止全球变暖	184
7.8.7 LEEEP 合作 中国多模型对比：碳税的一般均衡分析	184
7.8.8 LEEEP 合作 柳叶刀健康与气候变化倒计时：中国 2021 年度报告	198
7.9 LEEEP 组 2022 年度研究一览	200
7.9.1 IMED 研究 全球客运交通碳中和有助于节约铂金需求	200
7.9.2 IMED 研究 One Earth: 碳中和能使中国实现工业用水目标	203
7.9.3 IMED 研究 深度脱碳协同减污的关键机制：以粤港澳大湾区为例	212
7.9.4 IMED 研究 京津冀减污降碳政策的异质性协同效应和互馈影响	220
7.9.5 LEEEP 研究 LEEEP 组研究成果支撑 IPCC AR6 多个关键内容	227
7.9.6 LEEEP 研究 IPCC AR6 特辑：课题组支撑 IPCC AR6 的论文一览	230
7.9.7 LEEEP 合作 IPCC AR6 报告历史排放趋势和驱动因素核心结论解读	232
7.10 LEEEP 组 2023 年度研究一览	239
7.10.1 LEEEP 研究 Nature Food: 粮食系统增效是实现中国碳中和的关键	239
7.10.2 LEEEP 研究 Nature Comm.: 中国农村现代能源转型助力碳中和与健康改善	248
7.10.3 LEEEP 研究 GEC: 气候变化下日本 PM _{2.5} 和臭氧相关的健康挑战	255
7.10.4 LEEEP 研究 iScience: 我国发展可再生能源的空气质量和健康协同效益	261
7.10.5 LEEEP 研究 负排放技术：中国水泥行业脱碳的关键	267
7.10.6 LEEEP 研究 水-能源-碳关系：中国城市综合排水系统的温室气体排放	276
7.10.7 LEEEP 研究 通过减少印度道路交通部门的化石燃料消费实现碳中和	283
7.10.8 LEEEP 研究 电动汽车助力印度各州实现道路交通碳中和及清洁空气	290
7.10.9 LEEEP 研究 中国大气污染控制政策的成本和收益评估研究综述	296
7.10.10 LEEEP 研究 中国生物能源进口增加对全球土地利用和可持续性影响	303
7.10.11 LEEEP 研究 气候变化对中国发电基础设施的潜在影响	311
7.10.12 LEEEP 研究 考虑环境和人体健康影响的中国电动汽车区域差异化推广	317
7.10.13 LEEEP 研究 差异化的碳中和政策对中国高碳产业跨区域转移的影响	324
7.10.14 LEEEP 研究 中国交通部门实现碳中和需要电力和氢气供应合力脱碳	333
7.10.15 LEEEP 研究 碳限额约束对我国区域经济发展均衡性的影响	340
7.10.16 LEEEP 研究 气候变化对空气污染影响的模拟研究	348
7.10.17 LEEEP 研究 经济增长与结构变化对亚洲国家碳污排放的影响	352
7.10.18 LEEEP 研究 粤港澳大湾区低碳发展的空气质量改善健康经济效益研究	352
7.10.19 LEEEP 合著 张远航、戴瀚程：生态文明时代大气环境治理的变革与转型	359
7.11 LEEEP 组 2024 年度研究一览	364
7.11.1 LEEEP 研究 One Earth: 碳中和与清洁空气政策助力我国低成本实现《关于汞的水俣公约》目标	364
7.11.2 LEEEP 研究 iScience: 我国 60 年来极端气温事件的健康经济影响评估	375
7.11.3 LEEEP 研究 iScience: 碳中和政策下的煤脱钩与隐含煤转移	380

7.11.4 LEEEP 研究 碳中和目标下我国煤炭主产省区的减排贡献及经济代价	389
7.11.5 LEEEP 研究 碳中和目标下中国西北地区碳减排路径研究	390

8 LEEEP 新闻频道 399

8.1 国内外交流	400
8.1.1 国际交流 LEEEP 课题组访问国际应用系统分析研究所	400
8.1.2 国际交流 LEEEP 组负责人受邀出席联合国 GEO-7 全球作者会	403
8.1.3 北京大学碳中和研究院正式成为综合评估模型联盟 (IAMC) 成员单位	405
8.1.4 北京大学 LEEEP 组与韩国延世大学携手探索全球低碳转型之路	409
8.1.5 活动回顾 气候变化政策的健康协同效益综合评估研讨会顺利举办	413
8.1.6 讲座回顾 “美国的新气候行动”讲座成功举办	418
8.1.7 讲座回顾 “全球气候变化的威胁”讲座成功举办	422
8.1.8 讲座快讯 应用综合评估模型应对区域大气污染	425
8.1.9 活动回顾 LEEEP 负责人受邀作气候环境政策建模评估报告	427
8.2 人才培养	428
8.2.1 LEEEP 最新研究成果获潘基文与李干杰高度关注	428
8.2.2 LEEEP 组研究生赵梦丹同学获得第 29 届 AIM 国际研讨会最佳 Poster	432
8.3 IMED 模型培训	435
8.3.1 2023 年碳中和综合评估模型暑期研讨会活动通知	435
8.3.2 北京大学第一届碳中和综合评估模型研讨会顺利开幕	436
8.3.3 北京大学第一届碳中和综合评估模型研讨会圆满落幕	442
8.4 学术会议	448
8.4.1 环院·学术 首届“气候与环境管理”全国研究生论坛成功举办	448
8.4.2 会议征稿 华人环境与资源经济学家大会暨中国环境与资源经济学家协会 (CAERE) 第三届学术年会	452
8.5 年度总结	454
8.5.1 2023 年度总结 北京大学 LEEEP 公众号最受关注的 15 篇推送	454
8.5.2 2022 年度总结 北京大学 LEEEP 公众号最受关注的 15 篇推送	459
8.5.3 2021 年度总结 北京大学 LEEEP 公众号最受关注的 15 篇推送	464

9 附录：延伸阅读 469

A.1 科研项目	469
A.2 团队成员	470
A.3 更多资料	474
A.4 加入我们	475
A.4.1 加入 LEEEP：研究生	475
A.4.2 加入 LEEEP：暑期夏令营	476
A.4.3 加入 LEEEP：博士后	476
A.4.4 博士后项目	478
A.4.5 加入 LEEEP：实习生	481
A.4.6 加入北京大学环境管理系	482

Index 485

Bibliography 485

List of Figures

1.1 LEEEП 课题组研究概况	26
1.2 基于 IMED 的研究成果受到国内外同行的关注	27
1.3 LEEEП 组 2023 年度成员照片墙	29
2.1 实现可持续发展目标需要社会经济系统变革	32
2.2 相互关联的 能源 • 环境 • 经济 系统	32
2.3 能源 • 环境 • 经济 系统建模	33
2.4 急需综合评估模型探寻“双碳”转型路径	33
2.5 综合评估模型是气候环境政策战略研究的大国重器	34
2.6 综合评估模型建模的难点和挑战	34
2.7 IMED 模型发展历程	35
2.8 IMED 模型主要模块	36
2.9 IMED 模型体系和展望	38
2.10 IMED 模型代表性应用案例之一	39
2.11 IMED 模型代表性应用案例之二	39
2.12 2023 年 IMED 模型暑期培训会	41
2.13 李善同研究员主旨报告（图片来源：北京大学）	42
2.14 滕飞教授主旨报告（图片来源：北京大学）	42
2.15 姜克隽研究员主旨报告（图片来源：北京大学）	43
2.16 讲师团队讲授模型培训（图片来源：北京大学）	44
2.17 分组讨论与讲师答疑（图片来源：北京大学）	44
2.18 LEEEП 组微信公众号二维码	45
3.1 经济系统：面向减污降碳的宏观社会经济评估	48
3.2 CGE 概念图	48
3.3 IMED CGE 整体结构	51

3.4 生产函数嵌套关系。a, 非电部门; b, 电力部门. σ 投入品替代弹性。 $VAE_{r,j}$, $VA_{r,j}$, $E_{r,j}$, $FOS_{r,j}$ 分别为 CES 函数中增加值与能源、增加值、能源与化石能 源复合品	52
3.5 本地生产、国内其他地区生产和进口商品复合函数。a, 国际地区; b, 中国地 区. σ 替代弹性	54
3.6 部门间碳排放交易机制	59
3.7 区域间产业竞争机制	60
3.8 两个全球模型之间的软连接框架—以中国地区为例	64
4.1 能源系统: 减污降碳微观能源技术路径选择	69
4.2 IMED TEC 模型框架	70
5.1 IMED HEL 模型体系	75
6.1 IMED 模型云端平台	83
6.2 2023 年 IMED 模型暑期培训会	85
7.1 IMED 模型应用主题概览	88
7.2 基于 IMED 模型评估碳限额的经济影响	88
7.3 NDC 和 2°C 目标下与美国完全履行减排义务相比各国的 GDP 变化 (2002 年不变价格) (a) 2016-2030 (b) 2030 年	90
7.4 NDC 和 2°C 目标下的碳价 (2002 年不变价格): (a) 2016-2030, (b) 2030 年; NDC 和 2°C 目标下与美国完全履行减排义务相比额外的 GDP 变化 (2002 年不变价格): (c) 2016-2030, (d) 2030 年	92
7.5 (a) 不同情景下的经济影响和碳排放变化; (b) 2030 年出口结构调整对全 球 GDP 和消费的影响	94
7.6 (a) 2030 年直接和间接能源消耗总量 (单位: 百万吨煤当量); (b) 2030 年直接和间接碳排放总量 (单位: 百万吨二氧化碳); (c) HC 和 LC 情景下 不同行业的产出变化	96
7.7 碳排放和碳强度	98
7.8 (a) 模型链接框架; (b) CGE 及其与 TIAM 模型软链接结果; (c) 基准情 景下本研究结果与全球 AME 模型结果对比	100
7.9 (a) 非化石发电的投资和可再生能源投资占总投资份额; (b) 对空气污染 和 CO ₂ 排放的影响; (c) 2050 年可再生能源发展对就业、产出、其他行业 增加值的刺激效果	102
7.10 基于 IMED CGE 模型评估碳减排对产业竞争力的影响	103
7.11 IMED CGE 模型中地区间产业竞争力影响机制	104
7.12 不同情景下 2030 年 (a) 受益部门和 (b) 受损部门相比 C4P4 情景的宏观 指标变化	106
7.13 相比 tax44 情景, 2030 年其他情景下不同部门的宏观指标变化	108
7.14 相比 taxC4P4 情景, 2030 年其他情景下受损部门的宏观指标变化	110
7.15 相比 P63C65 情景, 2030 年其他情景下受益部门的宏观指标变化	111
7.16 相比 P65C65 情景, 2030 年其他情景下受益部门的宏观指标变化	113
7.17 基于 IMED 模型的碳交易与环境税影响评估研究	114
7.18 (上半部分) 为两种情景 (左为 SAV, 右为 LCE) 下四个部门的碳价; (下 半部分) 两种情景 (同上) 下四个部门各自的碳交易量, 负号代表买入	116
7.19 广东省四个部门在碳交易情景下三种排放物的交易量 (负号代表买入)	118

7.20(a,b) 2020 和 2030 年上海各部门碳强度下降率 (与同年 BaU 相比)、减排成本 (泡泡的大小) 和 ETS 下的均衡碳价 (红线); (c) ETS 情景下各部门的碳排放交易量	119
7.21(a) 2017-2030 年四种情景下 (非全部门参与的 ETlim) 买方部门的碳购买量; (b) 四种情景下 (所有部门参与的 ETall) 买方部门的碳购买量; (c) 四种情景下 (ETlim) 卖方部门的碳卖出量; (d) 四种情景下 (ETall) 卖方部门的碳卖出量	121
7.22(a) 上海市 2020-2030 年碳交易市场总量及各部门交易量; (b) 其他地区 2020-2030 年碳交易市场总量与各部门交易量; (c) 2030 年两种情景下 (ETsec 与 ETreg) 上海及其他地区碳市场总量 (泡泡大小), 碳交易总量的货币价值占 GDP 比重 (横轴)、碳市场总量占排放量比重 (纵轴)	122
7.23(a) P65SHRbau 情景下上海市 2030 年碳强度下降率 (横轴, 相比于 BaU)、各部门碳减排成本 (纵轴)、各部门初始份额 (泡泡大小) 和碳均衡价格 (黑色虚线); (b) P65SHR07 情景, 其他同 (a); 2030 年上海市在四种情景下的碳市场交易量 (c)、碳市场交易量的货币价值 (d)	124
7.24 (a) 各情景下各部门碳排放量 (b) 各省份 GDP 与碳排放 (b) 2030 年 TAX120 相较于 BaU 情景下各省份 GDP 损失 (d) 各省份能源结构变化	126
7.25 (a) 不同情景下大气污染物及碳排放 (b) 与 2005 年相比能源强度和碳强度变化 (c) 2020 年与基准情景相比各部门减排潜力 (d) 硫税与可再生能源政策的宏观经济影响	127
7.26 基于 IMED 模型的气候减缓与 SDG 关联研究	128
7.27(a) 2020 年省际间差异 (b) 右 1 不同情景下的二氧化碳和空气污染物排放 (c) 右 2 S2 和情景 S4 大气污染物减排成本 (d) 2020 年 SO ₂ 、NO _x 、PM _{2.5} 协同效益分析	130
7.28(a) 发电用水量的地理分布 (b) 2015-2030 年不同情景下不同发电来源的用水量 (c) 2015~2030 年不同情景下中国发电总用水量 (d) 2015-2030 年各效应对减少用水量的贡献	131
7.29(a) 部门 CO ₂ 排放量和相对 CO ₂ 强度的变化 (b) 不同情况下一次能源的使用和相对能量强度的变化 (c) 选择的宏观经济指标 (d) 2020 年和 2030 年 NDC 和 BaU 情景之间的部门产出的相对变化	133
7.30(a) 不同情况下年度部门取水量和相对水强度的变化 (b) 2020 年和 2030 年的碳排放量变化与水使用变化 (c) 不同情况下年度部门污染物负荷的变化	134
7.31(a) 不同情景下的总需水量、WSI 和部门需水量的年度变化 (b) 2010-2025 年不同情景下 BOD ₅ 和 NH ₃ -N 排放 (c) 2025 年不同情景下退潮和洪涝期间 BOD ₅ 和 NH ₃ -N 浓度的空间分布 (d) COEO 和 C1EO 情景下深圳一次能源消费总量、CO ₂ 排放、GRP 和劳动力的年变化 (e) 2010-2025 年 4 个站点在不同情景下的 BOD ₅ 和 NH ₃ -N 浓度变化	135
7.32(a) 中国 2012-2030 年二氧化碳排放 (b) 中国 2012~2030 年资源消费 (c) 不同资源在 2012~2030 年间变化趋势	137
7.33 基于 IMED 模型评估空气污染的健康和经济影响	138
7.34(a) 2030 年 30 个省份的年均 PM _{2.5} 浓度 (b) 2030 年 PM _{2.5} 控制的成本与效益 (c) 2030 年 WPol 和 WoPol 情景下 PM _{2.5} 污染导致的 GDP 损失和 (d) 福利损失	140
7.35(I) 各情景下 PM _{2.5} 致病、导致的过早死亡人数、疾病支出和工作时间损失 (II) 不同情景下气候减缓政策的净效益	141

7.36(a) 2015-2030 年道路交通部门健康影响 (b)2030 年道路交通部门空气污染控制措施的成本效益	143
7.37(a) 亚洲各地区由 PM _{2.5} 导致的过早死亡人数与及气候减缓的影响 (b) 不同 SSP 情景下各地区气候减缓的净效益	144
7.38(a) 不同情景下 2012 年 1 月、7 月地表 PM _{2.5} 浓度 (b) 不同情景下 PM _{2.5} 和 O ₃ 污染造成的健康影响	145
7.39(a) 不同情景下京津冀一次污染物排放量和 PM _{2.5} 浓度 (b) 京津冀煤改电政策的成本效益分析	147
7.40 不同情景下中国 (a)PM _{2.5} 、(b)O ₃ 浓度分布及削减量	148
7.41 2050 年气候减缓为中国各省带来的健康及经济效益	149
7.42 2050 年气候变化减缓在韩国带来的健康协同效益及净效益	150
7.43 综合评估框架	166
7.44 情景设置	167
7.45 2017-2035 年四川省能源消费: (a) 一次能源消费; (b) 最终能源消费; (c) 无进出口的能源平衡表; 单位: Mtoe	168
7.46 二氧化碳和空气污染物排放量: (a) 分部门的空气污染物排放量; (b) 二氧化碳和空气污染物的排放; (c) 1.5deg_MFR 情景下的协同减排率	169
7.47 PM _{2.5} 浓度: (a) 2025 年和 2035 年的 PM _{2.5} 年均浓度以及政策情景和 BaU_REF 情景之间的差异; (b) 四川省 PM _{2.5} 地区加权平均浓度、PM _{2.5} 人口加权平均浓度。水平线表示中国现行国家空气质量标准中 PM _{2.5} 浓度的 2 类限值 (35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)、WHO 的空气质量标准中 PM _{2.5} 浓度的 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; 单位为 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	170
7.48 不同情景下与 PM _{2.5} 相关的疾病负担和工作损失: (a) 致病; (b) 过早死亡; (c) 工作损失天数	172
7.49 与 BaU_REF 情景相比的健康协同效益: (a) 避免疾病支出和统计生命的价值损失; (b) 疾病支出和统计生命价值损失占国内生产总值的比例	173
7.50 四川省 2020-2035 年 1.5°C 情景的成本效益分析: 单位为 10 亿美元 (2017 年不变价)	174
7.51 基于不同暴露效应函数的 1.5deg_MFR 情景下避免的过早死亡	175
7.52 研究框架	179
7.53 不同情境下京津冀地区的年均 PM _{2.5} 浓度	179
7.54 不同情景与年份下京津冀地区的健康影响。A 表示发病率与死亡率的影响, B 表示额外健康支出、生命统计价值与工作时间损失的影响	180
7.55 不同情景与年份下京津冀地区发病率和死亡率的减少量 (千例) 和工作时间损失的减少量 (小时/人/年)。(条形图对应左轴, 三角与圆圈对应右轴)	181
7.56 不同情景与年份下京津冀地区生命统计价值变化量和成本变化量的协同效益分析。(条形图对应左轴, 三角形对应右轴)	182
7.57 不同情景与年份下京津冀地区生命统计价值变化量与成本变化量的比值	182
7.58 不同情景与年份下京津冀地区排放控制成本	183
7.59 模型团队简介	187
7.60 人口、城市化率和 GDP 增速路径	188
7.61 本文三种碳税情景假设	188
7.62 八种模型基准情景 GDP 及各分项结果 (2012-2050 年)	189
7.63 八种模型基准情景总一次能源供给及分能源品种结果 (2012-2050 年)	190
7.64 基准情景下的碳排放结果 (2012-2050 年)	190
7.65 2030 年和 2050 年各模型宏观经济指标的情景差异	191

7.66 2030 和 2050 年一次能源消费 (柱子) 和能源价格 (点) 的情景差异	192
7.67 总一次能源消费 (上) 和电力价格 (下) 的情景差异 (2020-2050 年)	193
7.68 碳排放的情景差异	194
7.69 各模型能源品-其他要素的替代弹性	195
7.70 碳税对部门产出的影响 (a: 电力、钢铁和水泥; b: EITE, Energy-intensive-trade exposed 部门; c: 工业部门总产出)	195
7.71 不同情景下碳强度的下降趋势	196
7.72 研究框架	202
7.73 2020 年全球汽车保有量和电动汽车存量	202
7.74 2020 年全球汽车产业铂金流量	203
7.75 2020-2050 年三种情景下传统燃油汽车、电池电动汽车和燃料电池汽车的 累计存量。情景 1: 技术替代情景 2: 多样化市场情景 3: 转型	203
7.76 基准和碳中和情景下的碳排放 (A: 2017 年和 2060 年中国主要行业碳排放 和碳强度; B: 2060 年基准和碳中和情景下 31 省不同行业的碳排放变化及 其比例)。从行业层面看 (图中 A), 能源和第三产业是主要的碳排放行业, 碳 减排的三大主要贡献行业是电力、第三产业和金属冶炼。从省级层面看 (图 中 B), 东部和北部省份碳减排以电力部门为主, 其他地区碳减排主要归功 于第三产业	205
7.77 2060 年中国 31 省的部门产出变化及总产出在基准情景和碳中和情景之 间的变化率。行业层面, 石油、电力、采矿和金属冶炼及制品四个高耗能行业 产出下降幅度最大; 省市层面, 山东、河北等高碳行业为支柱的地区将遭受 更大负面影响	206
7.78 基准和碳中和情景下各部门用水及其两情景下的变化 (A: 2017 年和 2060 年中国用水强度和各部门用水的变化; B: 2060 年中国各部门碳排放和用水 的变化; C: 2060 年中国 31 省各部门碳排放和用水的变化)。碳中和情景 下 2060 年全国工业用水总量将减少 24%, 电力、轻工业、化工、采矿和金 属冶炼部门的节水贡献度最大。南方省份的电力部门节水占主导地位, 北方 和西南省份的轻工业和化工将是主要节水部门	207
7.79 2060 年中国 31 省 6 部门新增资本和存量资本生产活动导致的用水净变化。 碳限额政策将抑制新资本投向竞争力较低的行业, 新增投资比现有资本存量 的用水效率和能源效率都更高, 水密集型行业带来的节水归因于存量资本生 产活动的收缩	208
7.80 2060 年用水增加的空间和部门异质性 (A: 与基准情景相比, 31 省在碳中 和情景下用水量的增加、减少和净变化 (黑点); B: 与基准情景相比, 在碳中 和情景下工业用水的增加、减少和净变化 (黑点); C: 31 省用水量增加和不 同用水部门的比例)。15 个省份的额外工业用水将抵消碳中和带来的节水潜 力, 其中一半位于北部和西部地区, 主要来自电子行业和轻工业、金属冶炼 和化工等水密集型行业, 从而在缺水地区引发水资源短缺的风险	209
7.81 工业用水和预估的工业用水指标 (红色阴影代表误差范围)。2060 年, 实现 碳中和将使全国工业用水降低 24%, 12 省将实现工业用水红线目标, 大部 分位于水资源短缺的北方, 而 9 个华南和西北省份不足以达到工业用水目标	210
7.82 碳中和与水红线目标相关关系。实现碳中和将使 2060 年全国工业用水降低 24% 至 119 km ³ , 低于 2017 年用水量, 预计将实现全国水红线目标	211
7.83 粤港澳研究框架图	213
7.84 情景设置	214

7.85 最终能源消耗和二氧化碳排放量。 (a) 最终能源需求, (b) BaU 情景下各部门的 CO ₂ 排放, (c) CO ₂ 排放量, (d) 2050 年各部门的减排贡献 (按减排量排序) .	214
7.86 气候政策下产业结构与经济影响。 (a) 2050 年 2 度和 1.5 度情景下的产出和碳强度变化; (b) 2050 年与 BaU 相比, 1.5 度情景下的 GDP 变化; (c) 碳和能源强度; (d) 与 BaU 相比, GBA 贸易 (柱状图) 和 CO ₂ 强度 (散点) 变化	215
7.87 基于 (a) LMDI 和 (b) SPD 方法 1.5 度情景下碳减排的关键贡献因素。在 b 中, 左边的节点是提供原材料的供应部门 (不同颜色区分不同部门数量的供应链), 数字符号代表行业在供应链中的位置 (例如数字 "2" 或 "3" 代表该部门在供应链中处于第二或第三位置), 供应链末端的部门是最终需求部门。 "CI" 代表碳强度效应, "IO" 代表投入-产出系数变化效应, "FD" 代表最终需求效应。	216
7.88 粤港澳地区大气污染物排放和减排成本。 (a) 总排放趋势, (b) 2015 年和 2050 年所有情景下的分部门排放, (c) 2050 年减排成本和协同效应指数。其中单位减排成本被定义为每单位减排量的部门产出损失。协同指数 (SI) 定义为部门空气污染物减排量与二氧化碳减排量的比率。这里蓝色阴影所覆盖的部门占总排放量的 5% 以上, 具有较高的协同效益和较低的减排成本	217
7.89 2015-2030 年粤港澳地区气候政策对于空气污染物的边际影响	218
7.90 2030-2050 年粤港澳地区气候政策对于空气污染物的边际影响	219
7.91 综合评估框架	221
7.92 京津冀地区 2017-2030 年 CO ₂ (A) 和空气污染物 (B) 排放	222
7.93 京津冀地区分行业 CO ₂ (A) 和大气污染物 (B) 排放。图 A 内嵌图为 CO ₂ 在各部门排放占比	223
7.94 (A) 与 REF 相比, 2030 年 CAP 和 1.5D 情景与 REF 相比北京、天津和河北不同部门的产出变化和排放强度变化; (B) 2030 年 CAP 和 1.5D 情景与 REF 相比北京、天津和河北一次能源消费和能源强度变化	224
7.95 区域和行业视角下, CAP 情景 CO ₂ 减排对大气污染物变化的贡献率 (A), 区域和行业视角下 2030 年大气污染物排放和 CO ₂ 排放变化与 REF 的贡献率 (B)	225
7.96 (A) 与 REF 相比, CAP 和 1.5D 情景下 CO ₂ 排放减少和空气质量改善的协同效益, 圆的大小表示与 REF 相比避免的过早死亡。 (B) 在三个区域的两个情景中与空气质量相关的健康利益和减少 CO ₂ 排放的经济效益	226
7.97 LEEEP 课题组支撑 IPCC AR6 的论文一览	231
7.98 2010—2019 年不同部门温室气体排放的主要驱动因素	235
7.99 2000—2019 年可再生能源技术学习曲线	236
7.10 中国部署生物质能对国内土地利用、农产品生产、消费和贸易的影响。 a-c, 6 个高生物质能情景与 Reference 情景相比, 中国土地利用的绝对变化 (a), 粮食生产、消费和净进口的绝对变化 (b), 牲畜产品 (c) 的生产、消费和净进口的绝对变化。 d-f, 2060 年小麦 (d), 水稻 (e) 和玉米 (f) 的自给率	242
7.10 中国生物质能部署对国内 2060 年的可持续性的影响	243
7.10 农产品进口导致的中国从其贸易伙伴虚拟进口的环境影响。不同情景下的环境影响 (左) 和 2060 年 FoodSystem 情景相对于 Reference 的预计变化 (右)。 a, 2020-2060 年累计虚拟进口的 GHGs 排放量 (左), 中国从不同地区累计虚拟进口的 GHG 的变化; b-d, 中国从不同地区虚拟进口的氮肥 (b)、灌溉水 (c) 和农业用地 (d) (左); 中国从不同地区虚拟进口的氮肥 (b)、灌溉水 (c) 和农业用地 (d) 在 2060 年的变化 (右)	244

7.10农产品进口及其隐含的环境影响。a-d, 农产品进口 (a), 隐含在农产品进口中的虚拟环境影响 (b-d), a 和 b 是 Reference 情景中 2060 年的数值, c 是 Reference 情景中的环境影响, d 是 2060 年的环境影响。a 中的单位是百万吨 (Mt)。b 和 d 中, 农产品可进一步细分为乳制品 (DRY)、反刍动物肉类 (RUM)、猪和禽类产品 (NRM)、谷物 (CER)、油料作物 (OSD) 和其他作物 (OCR)。图中也包含了饲养牲畜所需粮食 (LSP_EMB) 在生产过程中的环境影响	246
7.10不同未来情景下在中国部署生物质能对 2060 年可持续性的影响。前 9 个指标代表了中国国内的可持续性, 包括人均每日卡路里摄入量、农产品价格、灌溉用水、农业用地、氮肥、AFOLU 部门的 GHG 排放以及小麦、水稻和玉米的自给率。后 4 项指标是中国从其贸易伙伴进口产生的虚拟环境影响, 包括虚拟进口的累积 GHG 排放、氮肥、灌溉用水和农业用地。不同情景中的不同线条因不确定性参数的不同假设各异, 包括 GDP, 人口, 贸易, 作物单产, 饮食变化, 生物能源供应 (组成) 和它们的不同组合	247
7.10研究框架	249
7.10中国农村炊事、取暖的能源消耗和现代能源占比	250
7.10农村炊事、取暖的能源消耗和现代能源占比的空间分布	251
7.10全国 CO ₂ 和污染物排放、PM _{2.5} 浓度和避免的 PM _{2.5} 相关过早死亡人数	252
7.10农村炊事、取暖活动的技术转型趋势和年度技术成本	253
7.11农村炊事、取暖脱碳对应的技术转型成本和货币化人群健康效益 (基于中 VSL)	254
7.11研究方法	256
7.11模型情景设置	257
7.11各个情景下日本 2010、2030 和 2050 年 PM _{2.5} 和臭氧浓度	258
7.11日本每百万人因 PM _{2.5} 和臭氧暴露造成的过早死亡和致病	259
7.11日本 PM _{2.5} 和臭氧造成的经济损失和劳动时间损失	260
7.11研究框架图	262
7.112030 年和 2050 年中国发展可再生能源对空气质量的改善情况 (图中显示的是污染物浓度在 B2 和 SP 情景下的差值)	263
7.11不同情景下与空气污染相关的过早死亡人数 (A 表示在 2017 年、2030 年和 2050 年各省避免的与空气污染有关的过早死亡人数; B 表示不同情景下与空气污染相关的过早死亡人数; C 表示由 PM _{2.5} 和 O ₃ 造成的避免的过早死亡人数的比例)	264
7.11不同情景下空气污染导致的致病人数 (A) 与工作时间损失 (B)	265
7.12发展可再生能源的成本效益分析 (A 代表中国各省发展可再生能源的经济效益和成本指标; B 代表中国五个区域的未来可再生能源投资份额和可避免的与空气污染相关的过早死亡人数)	266
7.12本研究综合模型框架	268
7.12水泥行业 IMED TEC 模型简化框架	269
7.12模型情景设置	269
7.12BAU 与碳中和情景下中国水泥需求预测 (2020-2060)	270
7.12典型碳中和情景 (DemL _{Convpollut0})	271
7.12不同情景下的能源强度	272
7.12不同情景下水泥行业未来一次能源消费	272
7.12未来水泥行业生物质与电力消耗	273
7.12不同情景水泥行业与上游电力行业 (部分) 碳排放路径	274

7.13 不同情景水泥行业总成本与边际减排成本	274
7.13 不同情景下水泥行业转型的多维环境影响	275
7.13 Conceptual integration of the computable general equilibrium (CGE) and the System Dynamics and Water Environmental Model (SyDWEM).	277
7.13 Annual variations of (a) direct CO ₂ -equiv GHG emissions in different systems and relative direct GHG emission intensity, (b) direct GHG emissions by types and total wastewater treated, (c) CODCr treated, (d) TN treated, (e) CODCr discharge, and (f) TN discharge under BaU and NDC scenarios	278
7.13 Annual variations of (a) electricity consumption and electricity intensity and (b) electricity-related indirect GHG emissions and relative GHG intensity under BaU and NDC scenarios during 2007 - 2025	279
7.13 Annual variations of indirect external GHG emissions and relative GHG emission intensity from chemical use, maintenance, and administration of WWTPs under BaU and NDC scenarios during 2007 - 2025	280
7.13 (a) Wastewater flow and GHG emissions in individual systems under the BaU scenario; (b) comparison of direct and indirect GHG emissions under BaU scenario; and (c) difference in GHG emissions between NDC and BaU in 2025	281
7.13 Variations of (a) total GHG emissions and (b) GHG emission intensity from the integrated urban drainage systems under different scenarios during 1990~2025, spatial distribution of (c) BOD5 and (d) NH ₃ -N concentration during the ebb slack in 2025 (EN_low and NDC scenarios are taken as examples), and (e) BOD5 and (f) NH ₃ -N concentration during the dry period at station S01 under different scenarios in 2025. Shading indicates the 95% confidential interval. Boxplots show the 25th, 50th, and 75th percentiles, and extremes	282
7.13 MED TEC 模型框架	285
7.13 印度的国家发电和道路交通部门	285
7.14 情景设计矩阵	286
7.14 道路交通 CO ₂ 排放。 (a) 不同情景的 CO ₂ 排放随时间变化; (b) 道路客运 CO ₂ 排放; (c) 道路货运 CO ₂ 排放; (d) 道路交通部门不同技术的排放占比	287
7.14 道路交通部门能源消耗。 (a) 交通部门能源消费总量; (b) 客运能源消耗总量; (c) 货运能源消耗总量; (d) 同情景的年度总能源消耗量; (e) 不同技术的能源消耗量	288
7.14 (a) 不同车辆技术造成的空气污染排放总量; (b) 不同情景下的空气污染排放变化; (c) 不同情景下的空气污染减少与 CO ₂ 减排的协同效应	289
7.14 研究情景	291
7.14 印度道路交通部门 CO ₂ 排放	292
7.14 印度各地区道路交通部门 CO ₂ 排放 (分车辆类型)	293
7.14 印度各地区道路交通部门能源需求 (分能源品种)	293
7.14 印度各地区道路交通部门能源需求 (分车辆类型)	294
7.14 印度道路交通部门的 NO _x 、PM _{2.5} 、PM ₁₀ 排放趋势和分车辆类型排放情况	295
7.15 印度各地区道路交通部门的 NO _x 排放趋势和分车辆类型排放情况	296

7.15 左柱状图：研究成果文章发表数量；右柱状图：被引数量；饼状图：文章类型；折线图：单篇文章平均被引	298
7.15 最热门的研究领域和关键词	299
7.15 按发表文章和被引量的期刊排序	299
7.15 研究成果质量与影响力	300
7.15 传统事后-成本效益分析	300
7.15 大气污染防控综合评估模型 (IAM) 与集成平台	301
7.15 研究框架图	304
7.15 敏感性分析框架	304
7.159 “固定贸易” 条件下不同生物能源进口情景下额外生物质能的生产原料	305
7.16 (a) 与 Ref 相比，不同情景下土地覆盖的累积变化和温室气体排放的 (b) 变化，以及 Ref 和单区域供应情景下的 (c) 热量可用性。更改将用于相应场景下的供应区域。 (b) 中的三角形表示净差异	305
7.16 2060 年主要进出口地区 (a) 大豆和 (b) 小麦的贸易流量 (1000 t)	306
7.16 2060 年不同生物能源供应过剩对当地和全球 (a) 农田面积、(b) 管理森林面积、(c) 平均热量利用率、(d) 温室气体排放以及 (e) 和 (f) 不同生物能源供应情景 (与参考文献情景相比) 下的水和氮肥需求的影响	307
7.16 2030-2060 年 BioCHN_World 和 BioCHN_Optim 情景。(a) 生物能源原料分布；(b) 2060 年参考情景生物能种植园空间分布；(d) 2060 年 BioCHN_World 和 (c) BioCHN_Optim 情景额外生物能种植园	308
7.16 不同生物量供应情景下全球土地相关指标的比较	308
7.16 气候参数对电源技术的影响方式	312
7.16 本研究所用电厂数据空间信息	313
7.16 不同发电技术所受气候影响 (国家层面)	313
7.16 不同气候模式和温升情景下的电力产出影响分布	314
7.16 不同气候模式和温升情景下的经济成本影响分布	314
7.17 不同电源技术在不同省份所受气候影响 (区域层面)	315
7.17 累计容量与气候引致损失的关系 (煤电)	315
7.17 累计容量与气候引致损益的关系 (光伏)	316
7.17 累计容量与气候引致损益的关系 (风电)	316
7.17 中国燃煤电厂碳排放与气候引致损失的耦合关系	317
7.17 情景设计及研究结构	319
7.17 a, 2011-2018 年不同情景下的排放分布；b, 五种情景的二氧化碳排放差异	320
7.17 a, 2011 - 2018 年 PM _{2.5} 、SO ₂ 、NO _x 和 VOCs 排放的时间分布；b, 2018 年中国 31 个省区大气污染物排放空间分布	321
7.17 b, 2018 年不同情景下 PM _{2.5} 浓度变化及其与二氧化碳减排的协同效应。a, BEVI 与 REF 的变化。b, BEVI 与 BEVF 的变化。c, 相对于 REF 情景，中国 31 个省区在 BEVI 情景下 PM _{2.5} 浓度和 CO ₂ 排放量的变化。d, 31 个省区在 BEVI 情景下 PM _{2.5} 浓度和 CO ₂ 排放量相对于 BEVF 情景的变化	322
7.17 a, 2018 年相对于 REF 情景，BEVI 情景避免了发病率和死亡率。b, 2018 年相对于 BEVF 情景，BEVI 情景避免了发病率和死亡率。c, 2018 年中国 31 个省区 BEVI 方案相对 REF 方案对中风、肺癌、缺血性心脏病 (IHD)、下呼吸道感染 (LRI) 和慢性阻塞性肺疾病 (COPD) 的健康益处：顶部的饼状图显示了中国每个行政区域的这些健康福利的区域份额。d, BEVI 方案中的健康福利	323
7.18 中国 31 个省级地区的电动汽车推广梯度	324

7.18 两地碳排放量分析	326
7.18 两地重点产业碳排放量变化因素	327
7.18 两地 GDP 变化分析	328
7.18 两地省际贸易隐含碳排放	330
7.18 两地贸易隐含碳排放	331
7.18 两地省际调出贸易隐含碳变化	331
7.18 研究框架	335
7.18 单独交通部门模拟的碳排放路径	336
7.18 交通部门耦合电力、氢能的碳排放路径	337
7.19 交通部门耦合电力、氢能部门的技术发展路径	338
7.19 交通部门耦合电力、氢能部门的技术优化路径和成本变化	339
7.19 CGE 模型生产函数嵌套结构与链式影响机制的回归设计	341
7.19 本文主要的情景设计：基于不同原则的碳配额省际调度方案	342
7.19 2060 年中国各省各行业从 BaU 与 SaCI 情景的绝对和相对产出差距 (a). 各省绝对产出损失。饼图显示 2017 年一次能源消费中煤炭使用的比例；(b). 各省相对产出损失。条形图显示 2060 年总产出损失中的贸易和国内供应的 占比；(c). 不同行业在各省的绝对损失；(d). 中国各行业的绝对 (上图) 和相 对 (下图) 损失。此外，(b) 中的 'Export' 意味着出口到其他国家，'Provex' 意味着从一个省份流向其他省份，'Import' 意味着从外国进口，'Provim' 意味着从其他省份流入。'domSupl' 意味着某一省份生产的商品供应给其自己 的国内市场	343
7.19 各省在 BaU 和 SaCI 情景下的基尼系数和宏观经济指标 (a). 宏观经济损失 (x 轴) 与基尼系数 (y 轴) (b). 每个宏观经济指标在 BaU 和 SaCI 情景下 的 2060 年最大值、中位数和最小值。所有宏观经济指标均以人均水平计算	344
7.19 不同情景下的 2060 年碳生产率、Theil 系数和产出损失的变化。上部面板 采用深色表示碳生产率，下部面板采用浅色柱子表示 Theil 系数。此外，上 部面板中的实线代表绝对值的总产出损失，下部面板中的虚线代表相对损失	345
7.19 碳政策的影响链条和回归模型影响系数及其统计显著性 (每列中的结果是公 式第 12-14 式中关键解释变量和区域虚拟变量之间的交叉项估计系数。代 表政策约束松紧度对碳影子价格的边际影响，代表政策约束松紧度对煤炭价 格的边际影响，评估煤炭价格对煤炭消费的边际影响，估计能源对产品价格 的边际影响。这里以电力部门的生产价格为例。所有变量均为情景损失的组 成部分。统计显著性：* p<0.1；** p<0.05；*** p<0.01)	346
7.19 以 GDP 损失和二氧化碳减排率为计的敏感性弹性值，(a) 总要素生产率 (TFP)，(b) 能源效率改进参数 (EEI)，(c) 能源和其他要素投入之间的替代 弹性 (VABE)，(d) 2060 年碳约束总量 (EMS)	347
7.19 2016 年以来 “未来预测型” 模式研究文献汇总	349
7.20 京津冀、长三角和珠三角地区 7 月臭氧浓度日变化的情景差异	350
7.20 京津冀 (第一行) 与中国南方地区 (第二行) 各情景与基线情景之间月平均 近地面臭氧浓度差异的空间分布	350
7.20 气候变化 (Clim) 情景下中国东部地区 2050 年 7 月 (右列) 地面温度 (T_2m) 与相对湿度 (RH) 模拟结果相较于 2015 年 7 月 (左列) 的变化	351
7.20 研究框架图	353
7.20 2015-2050 不同情景下 PM _{2.5} 和 O ₃ 浓度	355
7.20 2015-2050 不同情景下 PM _{2.5} 和 O ₃ 浓度	356
7.20 不同情景下由 PM _{2.5} 和 O ₃ 污染导致的过早死亡人数 (A) 和致病人数 (B)	357

7.20 不同情景下由 PM _{2.5} 和 O ₃ 污染导致的工作时间损失 (A) 和生命价值损失 (B)	358
7.20 不同情景下由 PM _{2.5} 和 O ₃ 污染导致的医疗支出 (柱状图, 对应左 Y 轴) 和 相比于 2015 年的医疗支出变化 (折线图, 对应右 Y 轴)	359
7.20 全球变局下的中国机遇与发展	360
7.21 近 20 年我国大气污染主要指标变化趋势 (2000 年或 2013 年指标值为 1) 左: 排放量; 右: 环境浓度 (PM _{2.5} 和 O ₃ 为 74 城市平均)	361
7.21 大气复合污染形成机制及环境与气候效应	361
7.21 减污降碳协同增效的精细化调控技术体系	362
7.21 生态文明引领下空气质量根本改善与碳中和的融合发展	362
7.21 研究框架	366
7.21 2030 年和 2060 年在碳中和情景下与基准情景下的煤炭消费量差异	367
7.21 不同情景下 2060 年中国的 Hg 减排潜力: (A) 不同情景下 Hg 减排的变化; (B) 与基准情景相比, 碳中和情景下各省的 Hg 减排潜力; (C) 与基准情景相 比, 碳中和情景下各部门的 Hg 减排潜力	369
7.21 不同汞减排政策对中国 CO ₂ 排放的影响: (A) 不同气候政策和 Hg 上限情景 下中国 2017 年至 2060 年 CO ₂ 排放趋势; (B) Hg 排放基准情景与 Hg 排 放上限情景相比, 2060 年不同部门的 CO ₂ 排放量	371
7.21 2060 年碳汞协同效益与汞减排技术成本: (A) 各地区气候情景下的碳 Hg 协 同效益及其 Hg 排放; (B) 各行业的碳 Hg 协同效益及其 Hg 排放; (C) 各情 景的 Hg 减排技术成本	373
7.21 结果敏感性分析	374
7.22 累积热浪和寒潮事件相关的超额死亡 (1961-2020 年)。 (a) 累积热浪事件 相关超额死亡; (b) 累积寒潮事件相关超额死亡; (c) 每十年热浪事件相关超 额死亡; (d) 每十年寒潮事件相关超额死亡	376
7.22 超额死亡比例和每十年平均变化 (1961-2020 年)。超额死亡比例指的是当 年超额死亡人数与当年所有死亡人数的比值。 (a) 热浪事件相关超额死亡比 例; (b) 热浪事件相关超额死亡比例每十年的平均变化量; (c) 寒潮事件相关 超额死亡比率; (d) 寒潮事件相关超额死亡比率每十年的平均变化量	377
7.22 每五年因热浪 (红线) 和寒潮 (蓝线) 事件而导致的经济损失 (1961-2020 年)	378
7.22 地区每十年的标准死亡率。 (a) 热浪事件; (b) 寒潮事件	379
7.22 研究框架	382
7.22 情景设置	382
7.22 我国 2017-2060 年 30 省单位 GDP 的煤炭消费 (因煤炭消费数据缺失, 港 澳台及西藏除外)	383
7.22 不同情景下 2060 年省级能源供应部门的煤炭强度与变化比例	384
7.22 2060 年不同区域在各情景下的人均 GDP 变化	385
7.22 2060 年中国和四个煤炭依赖省份的部门产出和相对变化 (柱代表基准情景)	386
7.23 在种情景下省际双边贸易的隐含煤炭消费量桑基图 (左侧 y 轴上的是生产 者, 右侧是消费者)	387
7.23 2060 年西北 (a)、华北 (b)、东北 (c) 和华东 (d) 隐含煤炭消费流量的情 景差异 (左侧的节点为供应部门, 不同颜色代表不同部门数量的供应链。数 字代表行业在供应链中的位置。供应链末端的部门为最终需求部门。 CI、IO 和 FD 分别代表煤炭强度效应、投入产出系数变化效应和最终需求效应)	388
7.23 研究区域	391
7.23 研究框架	392
7.23 不同情景下 2020-2050 年终端能源需求量 (a) 和结构特征 (b)	394

7.23 不同情景下各省份碳排放量 (a)、各部门碳排放占比 (b) 和各部门碳减排潜力 (c)	395
7.23 不同情景下大气污染物排放量的减少情况	396
7.23 不同情景下 PM _{2.5} 浓度	396
7.23 不同情景下 GDP 变化和碳减排成本	397
8.1 戴瀚程研究员在 BNR 组作学术报告	401
8.2 戴瀚程研究员在 ECE 组作学术报告	402
8.3 LEEEП 团队成员与部分 IIASA 学者进行交流	402
8.4 GEO-7 全体作者	403
8.5 戴瀚程研究员在 GEO-7 主会场	404
8.6 戴瀚程研究员与荷兰皇家科学院院士、PBL IMAGE 模型团队 Detlef 教授 (右一) 等著名学者共同解析 IAM 模型	404
8.7 戴瀚程研究员向各地区作者讲解 IAM 模型情景结果 (左上: 亚太地区; 右上: 拉美地区; 左下: 东欧地区; 右下: 西欧北美地区)	405
8.8 北京大学碳中和研究院正式成为 IAMC 成员单位 (图片源: IAMC 主页)	406
8.9 刻画人类—自然系统多元复杂构造的典型综合评估模型体系	406
8.10 IAMC 历届终身成就奖得主	407
8.11 北京大学碳中和研究院战略愿景	408
8.12 第一届碳中和综合评估模型研讨会	409
8.13 东北亚电力供应模型研讨会合影 (摄于 2023 年 4 月)	410
8.14 中日韩主流综合评估模型专家研讨	410
8.15 戴瀚程研究员与 Tae Yong Jung 教授探讨双方合作意向 (摄于 2023 年 4 月)	411
8.16 2023 年 11 月会议合影 (摄于 2023 年 11 月)	412
8.17 LEEEП 团队成员朱衍磊向国际同行汇报 (摄于 2023 年 11 月)	412
8.18 研讨会现场	414
8.19 日本国立环境研究所 Kainuma 博士做主题报告	415
8.20 日本国立环境研究所 Masui 教授做主题报告	416
8.21 LEEEП news_2019_AIMBUAA6	416
8.22 与会人员合影	418
8.23 报告人马里兰大学公共政策学院 Nathan Hultman 教授	418
8.24 美国气候联盟成员	419
8.25 情景设置关键政策与措施	420
8.26 不同情景下美国温室气体净排放	420
8.27 All-in 情景下美国小镇生活愿景	421
8.28 问答环节	422
8.29 戴瀚程研究员致欢迎辞	423
8.30 Mark D. Levine 教授作学术讲座	424
8.31 观众踊跃提问	425
8.32 讲座现场	426
8.33 讲座现场	427
8.34 会议情况	429
8.35 联合国第八任秘书长、韩国国家气候和空气质量委员会委员长潘基文致欢迎辞	430
8.36 李干杰部长发表主旨演讲: 中国大气污染防治和气候变化的相关行动、取得的成就与展望	430
8.37 LEEEП 课题组同学与参会人员交流科研内容	431

8.38 LEEEП 课题组同学为潘基文先生、李干杰部长介绍研究内容	432
8.39 第 29 届 AIM 国际研讨会大合照	433
8.40 赵梦丹同学与 Poster 合照	433
8.41 获奖证书 (左) Mikiko Kainuma 教授为获奖同学颁奖 (右)	434
8.42 研讨会开幕合影	437
8.43 张海滨院长致辞	437
8.44 刘永院长致辞	438
8.45 刘欣主任致辞	438
8.46 戴瀚程研究员作主旨报告	439
8.47 偶阳博士作报告	440
8.48 潘羽杰博士研究生作报告	440
8.49 马腾博士研究生作报告	441
8.50 冷餐会现场	441
8.51 冷餐会合影	442
8.52 研讨会学员合影	442
8.53 李善同研究员主旨报告	443
8.54 滕飞教授主旨报告	444
8.55 姜克隽研究员主旨报告	444
8.56 讲师团队讲授模型培训	445
8.57 分组讨论与讲师答疑	446
8.58 结营汇报	446
8.59 戴瀚程研究员做总结发言	447
8.60 研讨会学员聚餐交流	448
8.61 刘永致开幕词	449
8.62 戴瀚程致开幕词	450
8.63 分论坛报告现场	450
8.64 论坛闭幕式现场	451
8.65 论坛合影留念	452
A.1 LEEEП 组 2017 年度成员照片墙	470
A.2 LEEEП 组 2018 年度成员照片墙	471
A.3 LEEEП 组 2019 年度成员照片墙	471
A.4 LEEEП 组 2020 年度成员照片墙	472
A.5 LEEEП 组 2021 年度成员照片墙	472
A.6 LEEEП 组 2022 年度成员照片墙	473
A.7 LEEEП 组 2023 年度成员照片墙	473
A.8 能源环境经济与政策研究室 (Laboratory of Energy & Environmental Economics and Policy, LEEEП)	475
A.9 加入 LEEEП: 博士后	477

List of Tables

3.6 资源强度及其每年减少或增加的速度	61
3.1 IMED CGE 模型地区划分（港澳台除外）	65
3.2 IMED CGE 模型部门划分：22 部门	66
3.3 IMED CGE 模型部门划分：25 部门	66
3.4 IMED CGE 模型部门划分：33 部门	67
3.5 IMED CGE 模型部门划分：91 部门	68
5.1 室内空气污染相关的健康终点和相对风险	77
5.2 生命统计价值	79
5.3 PM _{2.5} 暴露响应方程	80
5.4 臭氧暴露响应方程	81
7.1 中国经济和碳排放的影响研究的情景参数设置	93
7.2 不同情景下 2030 年上海家庭支出份额	95
7.3 广东省碳减排的影响的情景设置	97
7.4 中国区域能源使用和碳排放研究的情景设置	99
7.5 重庆研究情景设置	105
7.6 上海研究情景设置	107
7.7 辽宁研究情景设置及不同情景下的碳税值（美元/吨）	109
7.8 广西研究情景设置和碳强度目标	110
7.9 天津研究情景设置和碳强度目标	112
7.10 情景设置：碳交易政策对实现哥本哈根气候目标影响研究	116
7.11 情景设置：碳交易政策对广东省空气污染物排放影响研究	117
7.12 情景设置：碳排放与 NDC 目标关联研究	119
7.13 情景设置：新能源政策与碳排放交易对实现中国 INDC 目标的经济影响研究	120
7.14 情景设置：国家碳排放交易市场对地区的影响研究	122
7.15 情景设置：初始排放权分配对碳交易市场的经济影响研究	123

1. LEEEП 团队介绍

北京大学能源环境经济与政策研究室（LEEEП）针对绿色低碳转型的关键科学问题与政策管理重大需求，在多个国家科技计划项目连续支持下，自主创新开发了适用于国家、省级及全球多层次的**能源—环境—经济可持续发展综合评估模型（IMED 模型）**，被认为是我国原创研发的气候环境政策研究代表性 IAM 模型，为突破“从过去依赖国际模型转向开发本地化、精细化综合评估模型”做出了贡献，并被联合国环境署（UNEP）列为旗舰综合评估模型之一，支撑《全球环境展望 7》的情景分析和路径优化。

近年来，LEEEП 团队成员基于 IMED 模型系统分析，揭示未来社会经济发展与能源资源、碳污排放的关联关系与脱钩机制，综合评估实现环境和发展多维目标的协同机制与成本效益。IMED 综合评估模型体系相关成果发表于 Nature Food (1 篇)、Nature Communications (1 篇)、Lancet 子刊 (1 篇)、One Earth (2 篇)、Global Environmental Change (1 篇)、ES&T (5 篇)、iScience (3 篇) 等主流期刊。其中，15 篇论文被政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 2022 年最新发布的第六次评估报告 (AR6) 正面引用 20 余次（[报道链接：LEEEП 课题组多篇研究论文被 IPCC AR6 正面引用](#)），多篇论文被 IAMC 顶级学会主页重点报道，有力支撑了能源环境与气候政策综合决策，助力实现碳达峰碳中和、“美丽中国”及全球可持续发展目标。

LEEEП 团队近年来积极参与、支撑并发起多项国内外学术交流活动，为学术共同体交流合作贡献力量。团队成员通过深度参与联合国 IPCC 与 UNEP 国际大科学计划、受邀承担欧盟地平线项目、积极构建中日韩三国低碳研究网络、担任北大驻综合评估模型领域全球顶级学会 IAMC 首席代表等多种形式，建立了与全球知名综合评估模型主流团队的实质性合作关系和常态化交流机制，共同致力于推动亚洲和全球的低碳转型和可持续发展研究与人才培养。与此同时，LEEEП 还发起了北京大学第一届碳中和综合评估模型研讨会暨培训会，助力我国双碳事业综合性人才培养（[报道链接：北京大学第一届碳中和综合评估模型研讨会圆满落幕](#)）。

LEEEP 北京大学能源环境经济与政策研究室 Laboratory of Energy & Environmental Economics and Policy, PKU 

北京大学能源环境经济与政策研究室（LEEEP）针对绿色低碳转型的关键科学问题，自主创新开发了气候与环境政策分析的综合评估模型（IMED），揭示未来社会经济发展与能源资源、碳污排放的关联关系与脱钩机制，综合评估环境和发展多维目标的协同机制与成本效益，支撑实现双碳目标及全球可持续发展目标的综合决策。

IMED 北京大学IMED能源-环境-经济可持续发展综合评估模型 Integrated Model of Energy, Environment and Economy for Sustainable Development at Peking University



戴瀚程 长聘副教授

- 环境管理系主任
- LEEEП课题组负责人
- 北大驻顶级学会IAMC联络代表
- 联系方式: dai.hancheng@pku.edu.cn

■ 多篇团队成果发表于Nature Food、Nature Communications、One Earth、GEC等主流综合类期刊
 ■ 1 篇论文入选国家自然科学基金委年度报告**优秀成果巡礼**，15篇论文被IPCC AR6引用20余次
 ■ 发起了北京大学第一届碳中和综合评估模型年度培训会，助力我国双碳事业综合性人才培养

粮食安全 Food security

nature food 粮食系统增效支撑碳中和实现
 Fan M., Dai H., Nature Food 2023
 全球化肥、灌溉水、利用效率变化

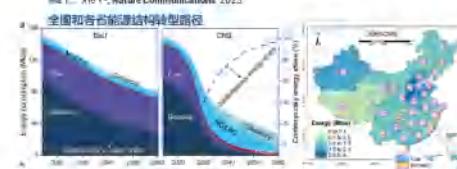

可持续水资源 Water sustainability

One Earth 碳中和可使中国实现工业用水目标
 Lu F., Dai H., Guo Y., One Earth 2022
 全国及各省耗水效率的分布特征


更多信息:

个人主页: <http://scholar.pku.edu.cn/hanchengdai>
 IMED在线模型平台: <https://www.imedmodel.com>

健康改善 Human health

nature communications 我国农村生活能源转型助力碳中和与健康改善
 Mai T., Xie Y., Nature Communications 2023
 全国和各省的能源结构转型路径


模型培训 IAM Training

北京大学2023年度第一届碳中和综合评估模型研讨&培训会
 ✓ 碳中和碳汇、环境学龄的办
 ✓ 8月7-11日为期一周的研讨会
 ✓ 培训GGE和技术创新模型
 ✓ 30余所高校近50位本硕博师生，
 万余人关注



团长长期招收博士后，
 详情请关注微信公众号 

Figure 1.1: LEEEП课题组研究概况

LEEEP课题组研究成果受到国内外同行的密切关注与认可。最新研究连续多年受到欧

盟气候变化评估模型进展追踪报导。多篇研究成果支撑了 IPCC AR6 中的多个章节关键内容(图1)，相关论文涉及绿色低碳转型和政策减排效果、经济代价和协同效益评估等重要议题。被引论文贯穿了第一工作组、第三工作组报告的 11 个关键章节([报道链接：LEEEP 研究 | 课题组支撑 IPCC AR6 的论文一览](#))，如聚焦社会经济系统全局性分析的第二章(排放趋势与驱动因素)、第三章(长期减缓路径)、第四章(近中期减缓与发展路径)、第五章(减缓的社会服务需求)，以及侧重关键高能耗部门的第六章(能源系统)、第十章(交通部门)及第十一章(工业部门)。此外，还共同领衔组织了中国能源模型论坛(CEMF)CGE 多模型对比活动，提升了国内模型透明度和可比性([报道链接：IMED 合作 | 中国多模型对比：碳税的一般均衡分析](#))。在国家重点研发项目支持下，牵头评估了 20 年来中国大气污染控制成本效益分析领域的办法、发现与演变历程([报道链接：IMED 研究 | 我国大气污染控制政策成本效益评估文献综述](#))。模型评估方面的最新研究连续多年受到欧盟气候变化评估模型进展追踪报导。

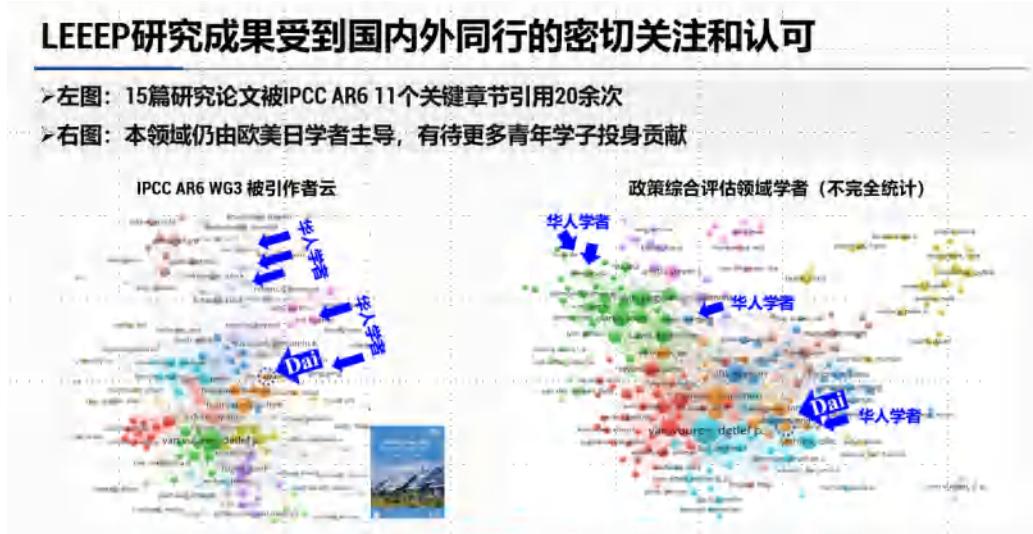


Figure 1.2: 基于 IMED 的研究成果受到国内外同行的关注

1.1 PI 介绍：戴瀚程

戴瀚程，北京大学环境科学与工程学院院长聘副教授、研究员，博士生导师，国家优青。任环境管理系主任，北京大学能源环境经济与政策实验室(LEEEP)负责人，兼任北京大学碳中和研究院研究员、全球健康发展研究院研究员、区域与国别研究院研究员。先后入选北京大学博雅青年学者、北京市国家治理青年人才培养计划、国家级青年人才。2006 年获北京大学学士学位，2009 年获德国慕尼黑理工大学硕士学位，2012 年获日本东京工业大学博士学位。

研究方向为能源环境与气候政策分析，针对社会经济绿色低碳转型的多维影响与路径优化，以能源—环境—经济综合评估模型为手段开展系统性研究。**IMED** 模型介绍可在此处下载：[中文或英文](#)。基于**IMED** 模型发表的期刊文章综述可在此处下载：[中文或英文](#)。最新文章参见[个人主页](#)、[Google Scholar](#) 或 [Researchgate](#)。更多个人信息请见最新简历：[中文或英文](#)。



主持国家自然科学基金委青年项目（结项后评估“特优”）、优秀青年科学基金项目、面上项目、重点项目课题、国际（地区）合作与交流项目课题、科技部国家重点研发计划课题等**国家级项目**，以及京津冀自科基金基础研究专项、香港大学教育资助委员会（UGC）项目课题、英国 Wellcome Trust 基金项目、美国能源基金会、美国环保协会及自然资源保护协会等**省部级或国际机构资助项目**二十余项。在国内外能源环境经济与政策领域学术期刊上发表论文 100 余篇，含在 Nature Food、One Earth (Cell 姊妹刊) 等期刊上发表的第一/通讯作者 SCI 论文 57 篇，ESI 前 1% 高被引 17 篇，热点论文 4 篇，**1 篇论文入选国家自然科学基金委 2023 年度报告优秀成果巡礼**。总被引用次数 8794 (Web of Science 数据)、6881 (Researchgate 数据) 及 8514 (Google Scholar 数据) 次，Web of Science H 指数为 40。

基于上述工作成果，2020 至 2023 连续四年入选全球排名前 2% 高被引科学家榜单、2021 年度“全球顶尖前 10 万科学家名单”。作为主笔作者撰写联合国环境规划署（UNEP）《全球环境展望 6：城市》(GEO-6 for Cities) 特别报告（[报道链接：LEEEП 组助力联合国报告向全球推介北京市减污降碳经验](#)）、《全球环境展望 7》(GEO-7) 主报告。作为贡献作者撰写了联合国气候变化旗舰报告《IPCC AR6》第三卷相关内容（[报道链接：北大环境学院戴瀚程课题组研究成果支撑 IPCC AR6 多个关键内容](#)）。受国家科技部和国家节能中心两次邀请，代表中方审阅《IPCC AR6》第三卷决策者摘要内容。

担任中国系统工程学会生态环境系统工程专业委员会常务委员、城市大气环境综合管理与低碳行动伙伴关系委员、中国可持续发展研究会气候变化专业委员会委员、中国能源研究会能源系统工程专业委员会委员、中国生态学学会产业生态专委会委员、中国优选法统筹法与经济数学研究会青年工作委员会委员、中国工程院院刊《工程管理前沿》(英文刊) 特约通讯专家、“中美健康二轨对话”中方成员、美国能源基金会（中国）项目评估总体专家组成员、国际性项目全球疾病负担研究合作者。为美国环保协会、自然资源保护协会等非政府组织提供科技咨询服务。

1.2 团队成员

在过去数年间，LEEEП 课题组吸引了来自全球及全国各大高校的优秀学子，一道从事环境与气候政策综合影响评估方向研究。

共指导博士后 9 名（出站 3 名）、博士生 13 名（含联合指导，毕业 2 名）、硕士生 5 名（毕业 3 名），本科生科研和毕设 23 人次，获得国家奖学金、校长奖学金、北京大学学术创新奖等各类奖励 40 余人次，多名学生入选 IIASA YSSP 暑期青年科学家项目。



Figure 1.3: LEEEP 组 2023 年度成员照片墙

2. IMED 模型体系

2.1 前言

人为温室气体排放引起的全球气候变化，是本世纪人类面临的重大挑战之一。随着全球温室气体排放的增加，全球温度比工业革命前显著上升，导致冰川萎缩、海平面上升、极端天气频繁、农作物减产等诸多后果^[1]。联合国气候变化框架公约 2015 年缔约方会议均呼吁各国采取切实措施减少温室气体排放，以实现本世纪末全球平均温度上升不超过工业革命前的 2 度目标，并力争控制在 1.5 度以内^[2]。

中国不仅是温室气体主要排放国，也是面临包括空气污染在内的重要环境压力的发展中国家。改革开放以来，我国经济增长取得举世瞩目的成就。然而长期以来，以投资和出口拉动的增长方式和以煤炭等化石能源为主的能源结构，形成了以高耗高污产业为主的产业结构^[3]，并导致产能过剩、环境恶化、资源耗竭、碳排放剧增等一系列问题。面对国内环境问题和国际减排的双重压力，中国政府提出 2030 年单位 GDP 二氧化碳强度比 2005 年降低 60%-65% 的郑重承诺，并力争在 2030 年之前达到碳排放峰值^[4]。

气候变化和环境问题的产生与解决不仅与污染排放相关，更与能源、产业结构、消费模式和宏微观决策相关，并具有重要的人群健康和社会经济影响（图2.1）。如何通过采取恰当的应对气候变化的战略和政策，使之有助于寻求能源-环境-经济-社会的共同发展，并推动社会的长期可持续发展，是学术界和政策制定者高度关注的问题。基于能源-产业-发展模式-污染控制-健康保障和社会发展等诸多方面关系认知基础上的综合模型研发与应用（图2.1），既是学术前沿问题，也具有重要决策支持意义。

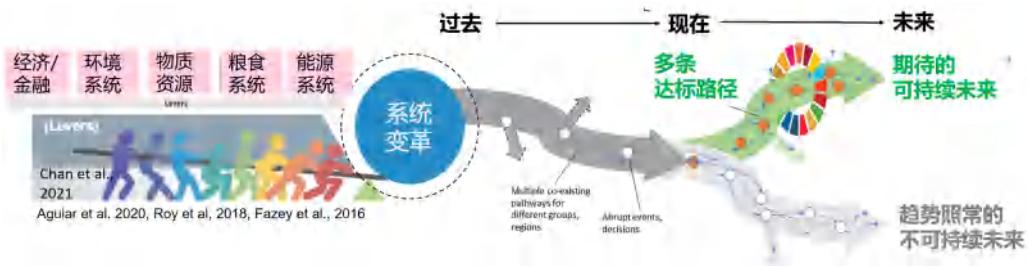


Figure 2.1: 实现可持续发展目标需要社会经济系统变革

鉴于此，北京大学环境科学与工程学院能源环境经济与政策研究室（LEEEP）¹致力于开发能源-环境-经济可持续发展综合评估模型（IMED模型），为实现绿色低碳可持续发展的学术研究和政策制定贡献力量。IMED模型，全称为Integrated Model of Energy, Environment and Economy for Sustainable Development，是一套包括经济能源环境资源数据库和模型的体系，目的是以系统和定量的方法，在市区、省级、国家、全球尺度上，分析经济、能源、环境和气候政策，为相关决策提供科学支撑。IMED模型近年来被系统地应用于综合评价我国国家层面和省级层面的空气污染减排[5]、人群健康[6, 7]、资源效率[8]以及能源和气候政策[9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16]。

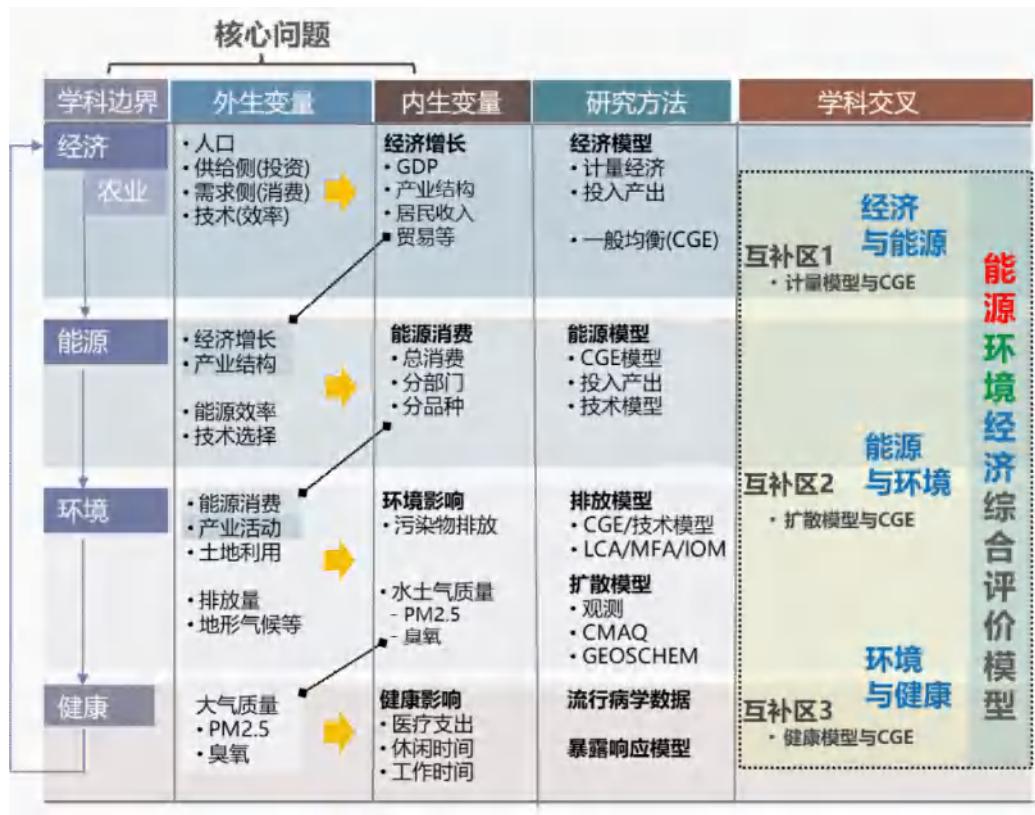


Figure 2.2: 相互关联的**能源** · **环境** · **经济**系统

¹研究组主页：<http://scholar.pku.edu.cn/hanchengdai>

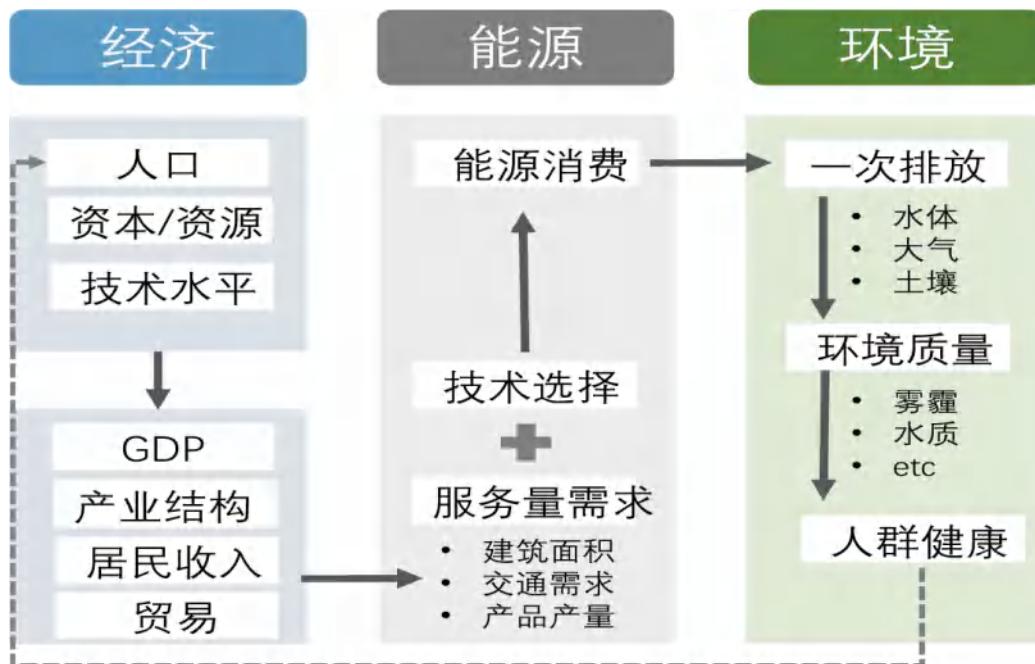


Figure 2.3: 能源 • 环境 • 经济 系统建模

急需综合评估模型探寻“双碳”转型路径

综合评估模型（IAM）是一类跨学科大规模复杂仿真模型，是气候环境政策评估领域前沿方法。



Figure 2.4: 急需综合评估模型探寻“双碳”转型路径

综合评估模型是气候环境政策战略研究的大国重器

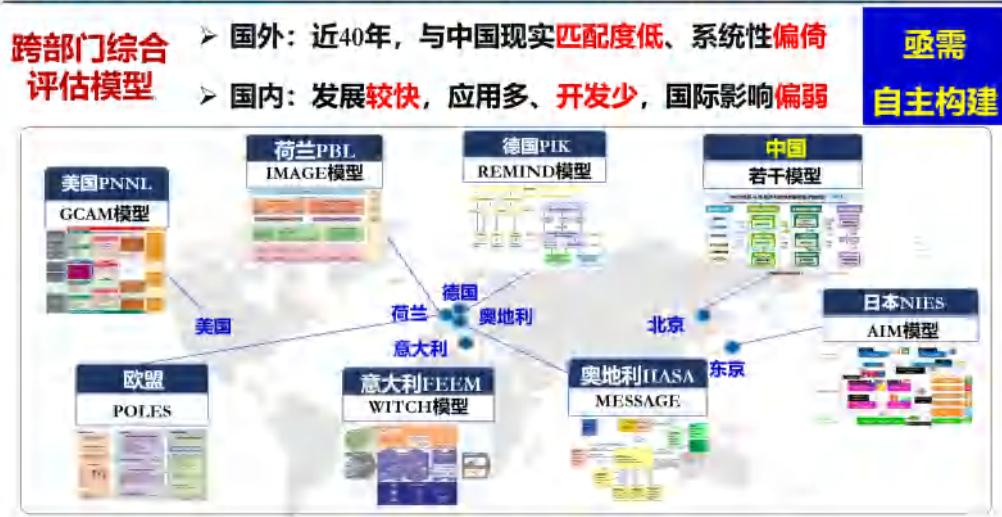


Figure 2.5: 综合评估模型是气候环境政策战略研究的大国重器



Figure 2.6: 综合评估模型建模的难点和挑战

2.2 IMED 模型概览

LEEEP 课题组针对社会经济发展、环境污染治理与气候变化应对的内在关联, 采用系统仿真、人工智能等前沿信息技术和数值模拟手段, 建立多元融合数据平台与决策支持系统, 支撑碳中和战略对策与路径选择综合决策。重点研究领域包括: 多维度社会经济与环境气候大数据多元融合, 温室气体与污染物排放预测, 社会经济-能源气候-环境生态系统综合评估。为我国在日趋复杂的国际形势及省市尺度严峻的环境挑战下应对气候变化和生

态环境问题路径选择提供科学决策支持。

课题组自主创新开发的能源-环境-经济可持续发展综合评价模型（IMED 模型），是一套针对能源-环境-经济复杂系统分析的综合评估模型系统是一套相对较为成熟的综合评估系统，适用于研究中国、区域和全球绿色低碳转型中的一系列关键问题。IMED 模型从整体架构、基础数据库、底层源代码均由北京大学能源环境经济与政策研究室（LEEEP）等多个团队历时十余年联合自主开发和维护，适用于中国、区域和全球的绿色低碳转型研究。近年来，围绕全球气候变化经济学与政策分析、能源与环境经济学等领域，IMED 模型体系已被系统地应用于不同时空尺度的绿色转型政策的综合评价，以及转型关键技术、最佳转型路径的识别。旨在为实现绿色低碳可持续发展的学术研究和政策制定贡献力量。

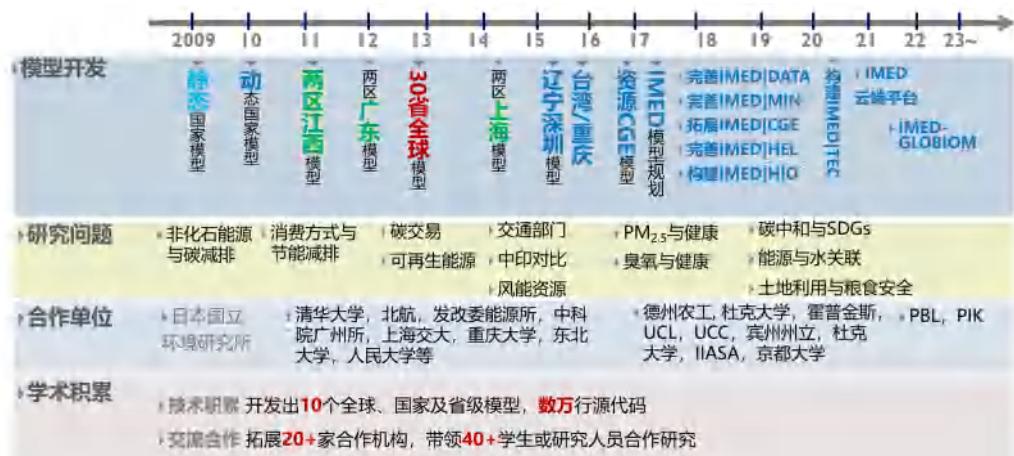


Figure 2.7: IMED 模型发展历程

2.2.1 IMED 模型：各主要模块简介

IMED 模型体系聚焦于模拟社会经济运行和能源供需系统（图2.2.1），具体包括宏观经济模型（IMED|CGE）、能源技术优化模型（IMED|TEC）和人群健康模型（IMED|HEL）几大模块，并有不断完善的经济、能源、环境、资源数据库作为坚实的数据支撑。通过模型之间的耦合分析，该模型体系旨在以系统和定量的方法，在市区、省级、国家、全球等不同尺度上，模拟能源、环境、经济发展路径，探索经济增长宏观演进规律，刻画不同经济增长方式对资源消耗、能源需求、环境与健康影响及其它环境外部性，并分析转型的成本和效益。

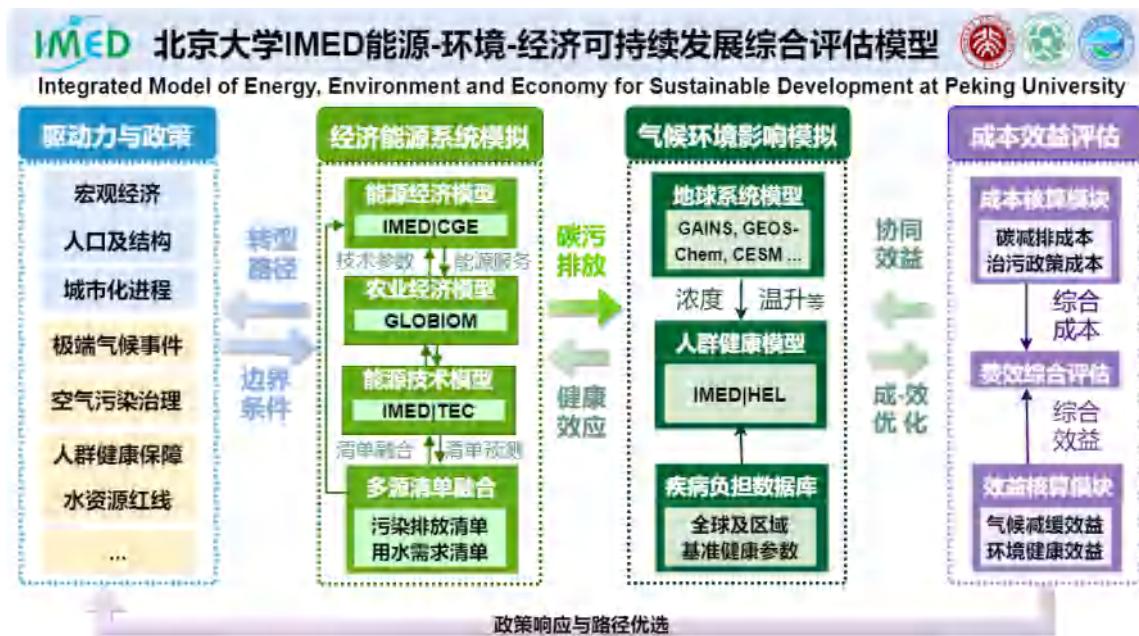


Figure 2.8: IMED 模型主要模块

IMED数据库和模型平台将有机整合不同类型模型（图2.2.2）由**IMED**团队自主原创开发和维护，服务于不同的研究问题，在区域和全球层次上模拟能源、环境、经济发展路径，探索经济增长宏观演进规律，刻画不同经济增长方式对资源、能源的需求和经济增长的环境外部性，并分析转型的成本和效益。基于**IMED**模型发表的期刊文章简要综述可在此处下载：[中文](#)或[英文](#)幻灯片。**IMED**核心模型主要集中在社会经济和能源系统方面，主要包括：

- **宏观经济模型 (IMED | CGE)**: CGE 意指 Computable General Equilibrium, 是过去数年间自主开发的全球多部门、多区域动态可计算一般均衡 (CGE) 模型。本模型包含 22 个经济部门，以 2002 年 (全球模型) 或 2012 年 (国家和省级模型) 社会经济数据为基础，结合能源平衡表，产业统计年鉴数据。模型由 GAMS/MPSGE 建模并用 PATH 算法器求解，以 1 年为步长动态模拟 2002 至 2030 年期间全球各国经济走势、产业结构变化、能源消费及其碳排放趋势。模型将全球划分为若干个地区。国内区域可灵活配置为 31 个省区市 (港澳台除外)、7 个地区或者东中西 3 个地区，而国际区域可划分为 1 个区、3 个区或 14 个区。模型中还设定了相应的人口增长路径与技术进步率 (全要素生产率和能效改进参数)。IMED | CGE 模型可被应用于评估不同全球不同国家、中国及中国各省市的低碳转型政策。目前，本模型及其衍生版本已被系统地应用于综合评价我国国家层面和省级层面的空气污染减排、人群健康、能源和气候变化的应对政策。模型的详细技术性介绍参见文献[5, 6, 9]。
- **技术优化模型 (IMED | TEC)**: TEC 意指 Technology optimization。对能源系统的模拟是研究能源气候政策不可或缺的重要一环。IMED | TEC (IMED | Technology) 模型通过模拟各部门从原料到最终产品过程中的物质流、能量流和技术流，计算能源消耗和各类主要污染物排放量，用于量化多区域维度、多时间维度、多行业的节能减排潜力，还可用来评估节能减排政策成本与效益，进而为政策优化提供扎实的决策依据。IMED | TEC 模型从工艺系统角度构建分析框架，相比于其他模型，这种“自底向上”建模思想的显著优点是能够对用于提供服务需求的各类技术进行详细刻

画，使得技术成本分析与实际生产情况较为接近，节能减排的政策目标也较易分解。IMED | TEC 模型的核心思想是通过优化技术选择实现给定节能减排目标下的能源系统优化。因此，模型的目标函数为每年的系统总成本最小化。所谓总成本主要包括选定技术的年化投资成本、运营维护成本（含能源、资源使用成本），以及因可能征收的排放税、碳税或能源/资源税带来的税收成本。模型的数学函数为多约束单目标线性优化方程组，约束条件包括排放量约束、服务需求量约束、技术普及率约束、技术运行情况约束和资源可能性约束等。模型的输出结果为预测年各生产技术数量、行业能耗和排放状况，还可进一步与其他模型耦合，满足更多系统问题的研究需求。

- **人群健康模型 (IMED | HEL)**: HEL 意指 Health，为人群健康模型，该模型以环境流行病学研究的暴露-效应函数和环境经济学的货币化评估手段为基本原理方法，计算给定社会经济发展和控制措施情景下的空气污染的健康影响和经济损失。通过对不同情景的健康评估结果，该模型可用于分析气候变化减缓和大气污染防控政策在改善全球和局地空气质量和人群健康方面的协同效益等问题。IMED | HEL 模型包括健康影响分析和经济损失货币化分析两个模块，分别计算不同情景下空气污染程度所对应的疾病负担和健康影响的经济损失。该模型的亮点在于其适用于不同尺度的政策研究，既可兼容大数据量的全球格点数据分析，也能够进行国家、区域层面的分析。此外，在健康影响部分，IMED | HEL 模型可以同时考虑室外、室内空气污染的健康影响，进行较为全面的健康评估。IMED | HEL 模型还能够与 IMED | CGE 模型进一步结合，量化对宏观经济的影响、进行成本效益分析。
- **IMED 模型云端平台 (IMED | Cloud)**: IMED 模型云端平台已于 2022 年中发布，包括 IMED | CGE 和 IMED | TEC 模型，平台将向学术界免费开放，可供国内外同行远程免费使用，可用于支撑各省市双碳路径评估及成本效益分析，推动本领域学术研究和决策支撑。与此同时，LEEEP 组每年将开展 IMED 模型平台暑期培训，向国内外师生介绍本领域研究前沿，传授模型操作经验，模拟低碳政策的能源、环境、经济影响，整合多方力量开展学术研究，开展政策评估支撑双碳决策。具体信息请见本报告附录介绍。

2.2.2 IMED 模型：多学科多模型集成研究

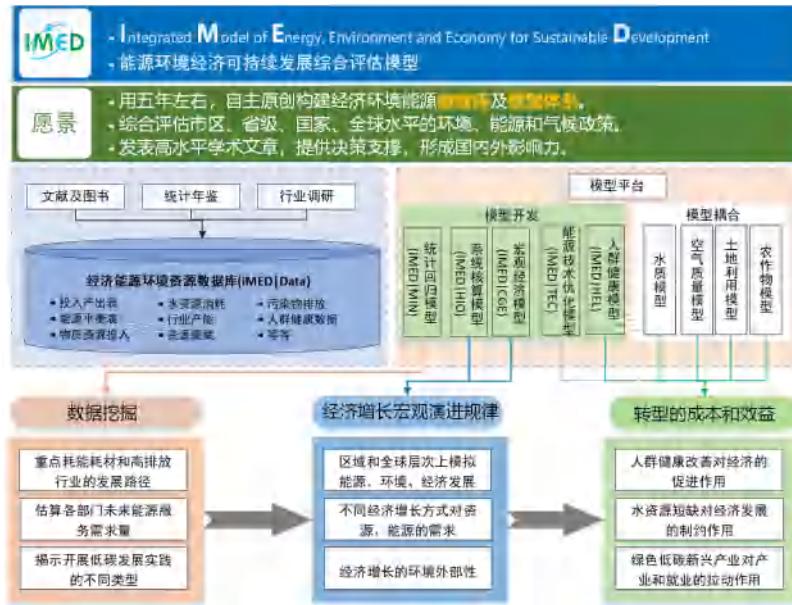


Figure 2.9: IMED 模型体系和展望

IMED 模型已经实现了和空气质量模型、水文水质模型的对接耦合，这种深度耦合将使 IMED 体系具备从社会-经济-产业-能源-环境-气候全链条角度分析评估多学科复杂系统问题的能力。近年来，IMED 模型及其耦合成果已被系统地应用于我国国家层面和省级层面的经济、能源、环境和气候政策的综合评价研究工作。例如，IMED 模型中的可计算一般均衡模型 (IMED|CGE)、人群健康模型 (IMED|HEL) 可以与空气质量模型实现无缝耦合，实现经济活动-环境质量-人群健康-经济影响 (反馈经济系统) 的闭环结构，形成完整的气候政策和空气污染控制政策健康、经济影响评估体系。IMED|CGE 模型能够提供经济活动强度和能源消费量信息，进而得出的温室气体和一次污染物排放量；将区域总排放量按照一定方法进行降尺度，即可得到一次污染物网格化排放清单。使用这一排放清单，空气质量模型就能够对 PM_{2.5} 或 O₃ 等大气污染物进行模拟估计。最后，人群健康模型 (IMED|HEL) 运用暴露-效应方程定量评估空气污染程度对应的疾病负担并货币化经济影响，将生产相关的经济影响重新反馈到 CGE 模型中，并可进行相应的成本-效益分析，从社会-经济-产业-能源-环境-气候等全链条的角度分析评估多学科复杂系统问题，为相关决策提供科学依据。

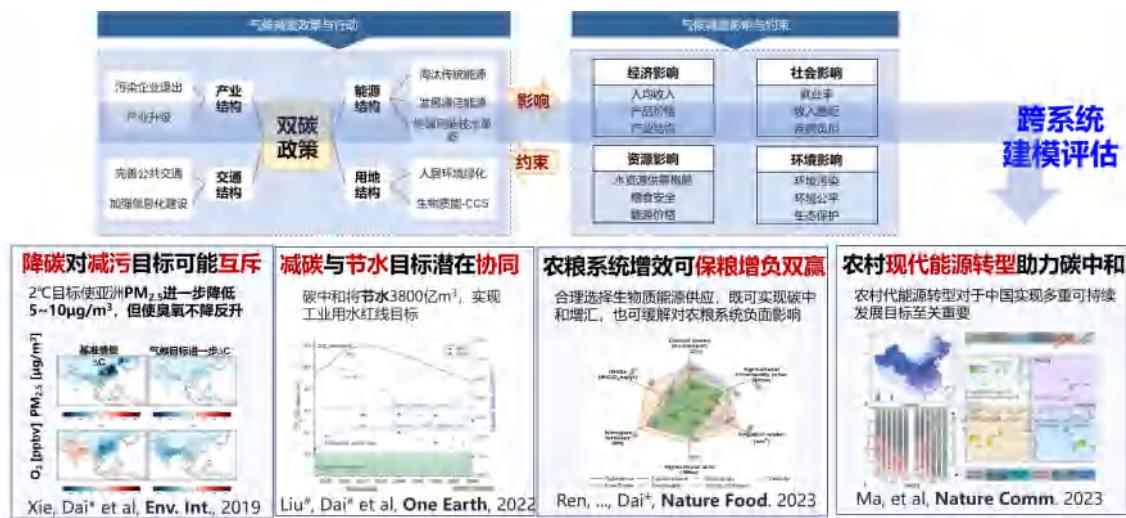


Figure 2.10: IMED 模型代表性应用案例之一



Figure 2.11: IMED 模型代表性应用案例之二

2.3 IMED 模型培训

2.3.1 首届碳中和综合评估模型培训会助力我国双碳事业综合性人才培养

- 相关报道：2023年碳中和综合评估模型暑期研讨会活动通知
- 相关报道：北京大学第一届碳中和综合评估模型研讨会顺利开幕
- 相关报道：首届碳中和综合评估模型研讨会圆满落幕

2023年8月7日，第一届“碳中和综合评估模型研讨会”在北京大学召开。研讨会由北京大学碳中和研究院主办，北京大学环境科学与工程学院、北京大学城市与环境学院协办，能源基金会等机构支持，旨在为学员提供成体系的“能源-环境-经济”领域综合评估模型培训，促进不同背景跨学科交流，激发对低碳政策的创新思考，为我国双碳事业培养宏观视野开阔、基础理论过硬、模型运用有感的综合性人才。来自国内外30余所知名高校的近50位本硕博学生和青年学者受邀来到燕园，进行为期5天的培训交流。本次研讨会开幕式由北京大学环境科学与工程学院环境管理系主任戴瀚程研究员主持，北京大学碳中和研究院副院长张海滨，北京大学环境科学与工程学院院长刘永，能源基金会环境管理项目主任刘欣出席并发言。

本次活动在模型开发与应用培训的基础上，还邀请了国内外知名的专家学者作主旨报告。美国国家西北太平洋实验室偶阳博士、国务院发展研究中心李善同研究员、清华大学能源环境经济研究所滕飞教授、中国宏观经济研究院能源研究所姜克隽研究员等多位专家学者为学员带来前沿讲座，分享了专业的模型理论知识和丰富的模型应用解析。

活动背景

推进碳达峰碳中和是以习近平同志为核心的党中央经过深思熟虑作出的重大战略决策，也是我国应对气候变化、引领全球气候治理的必然选择。需要学术界发挥**描绘碳中和实现路径、评估潜在多维影响、提出稳健应对策略**的重要作用，为国家前瞻性双碳战略规划和产业链布局提供科学支撑。

综合评估模型是双碳政策研究的利器。开发**底层逻辑科学可靠、能够反映国家经济社会现实**的综合评估模型是一项刻不容缓的艰巨任务。综合评估模型平台的开发与应用是北京大学碳中和研究院重点支持的领域之一。与此同时，碳中和研究院也肩负着“双碳”青年人才培养的重要使命。为此，在国家自然基金委、中国21世纪议程管理中心、能源基金会等机构的支持下，由**北京大学碳中和研究院主办**，环境科学与工程学院、城市与环境学院协办**首届碳中和综合评估模型暑期研讨会**。

在此期间，北京大学相关模型团队将介绍底层知识构件与建模技术，开展综合评估模型应用培训，激励低碳战略与政策的创新研究，尽早跨越陡峭学习曲线开展长期、连贯、有传承性的科研工作，为构建模型研究人才队伍提供“源头活水”，进而为我国碳中和事业发展并培养青年人才。欢迎广大有志青年踊跃报名！

培训会安排

- **时间：**2023年8月7日-11日
- **地点：**北京大学环境科学与工程学院
- **参与方式：**全程线下参加
- **课程设置：**
 1. 自上而下可计算一般均衡模型原理、算法与建模；
 2. 自下而上能源系统优化模型的原理、算法与建模；
 3. 社会—自然跨系统多模型耦合原理与案例；
 4. GAMS 程序语言建模；
 5. 模型练习、案例应用与展示。

北京大学2023年度第一届碳中和综合评估模型研讨&培训会

- ✓ 北大碳中和院主办、环院及城环协办
- ✓ 8月7~11日为期一周培训会
- ✓ 培训CGE和技术优化等模型
- ✓ 30余所院校近50位本硕博师生，万余人关注



Figure 2.12: 2023 年 IMED 模型暑期培训会

张海滨副院长在致辞中强调了“双碳目标”对于我国的历史性意义及其带来的系统性变革。他提出，为更好地服务科学决策，推动各行业战略协同，碳中和综合评估模型需要将定性和定量分析相结合。北京大学基础学科扎实，政策与技术研究深入，人文社科底蕴深厚，战略视野国际化，有实力也有意愿来培养知晓模型底层逻辑、具有模型开发完善能力的人才。

当前，我国需要扎实的基础研究来支持科学决策，而模型所扮演的角色至关重要。刘永院长向青年学者提出期许，需明确模型要干什么、能干什么，了解模型的底层逻辑，明白模型的假设和边界，判断模型所得结果的合理性；还要扎根于模型开发完善的基础工作，增强对数据的把握，产生自身的核心竞争力。

刘欣主任表示，双碳战略能够帮助我国破除资源约束，满足人民日益增长的生态环境需求，因此亟需系统治理、主动作为。当前需要厘清碳减排和经济发展的关系，实现多部门、多区域、多目标的可持续发展，使双碳行动创造出发展的新动能、新优势，进而推动我国乃至全球的繁荣发展和气候安全。青年学者需要具有战略思维、强化技术基础、打造中国原创的本土化模型，从而利用模型解释现象、解决问题。

开幕式后，多位资深专家在接下来数日给与会学者带来了精彩的前沿讲座。



Figure 2.13: 李善同研究员主旨报告 (图片来源：北京大学)

偶阳博士以自身深度参与国际领先模型 GCAM 及中国模块 GCAM-China 研发的经历为引，分享了全球宏观视角下的多类政策的组合结果和分析展望。李善同研究员则介绍了 DRCCGE 可计算一般均衡模型的“中国经验”，梳理了该模型在中国宏观经济政策研究中的适用性和典型案例。



Figure 2.14: 滕飞教授主旨报告 (图片来源：北京大学)

滕飞教授以《温室气体社会成本研究进展与展望》为题带来讲座，并强调对模型作用保持辩证态度。他指出，模型中重要的是对结果产生机制的解释，关键作用在于能提出可

证伪的假设和观点，这要求青年学者了解多个跨学科的系统，并捋清系统间的交互影响。



Figure 2.15: 姜克隽研究员主旨报告 (图片来源：北京大学)

姜克隽研究员介绍了中国能源环境综合评估模型 (IPAC) 框架，分析了钢铁、水泥、钢材、发电、居民、建筑、化工等重点行业未来低碳发展路径、国内外发展现状及趋势、关键技术和政策等，展示了可再生能源和核电对经济产业布局的决定作用，揭示了“碳中和不再是温室气体减排事务，而是技术和经济竞争”。同时，他强调“人”的作用，鼓励青年学者发挥主观能动性，深度理解模型背后机理及其适用范围，针对不同问题使用合适的模型。

培训期间，学员按学习意愿分为一般均衡 (CGE) 和技术优化 (TEC) 两个平行模型小组，由北京大学能源环境经济与政策研究室 (LEEEP) 讲师团队带来更具针对性、实操性的模型培训，引领学员熟悉模型理论知识和线上模型操作。最终，学员们利用 IMED 线上模型分组对自己感兴趣的地区、行业、政策进行了分析并作汇报展示。



Figure 2.16: 讲师团队讲授模型培训 (图片来源: 北京大学)



Figure 2.17: 分组讨论与讲师答疑 (图片来源: 北京大学)

本次为碳中和综合评估模型研讨会的首次尝试，未来计划将于每年暑期举办，并在会

场容量等条件允许的情况下扩大规模，邀请更多有志于运用综合评估模型解决碳中和相关问题的学生和青年学者参加。研讨会也将充分吸收营员反馈，不断完善内容与形式，增加从零开始的模型搭建过程等学员们感兴趣、实用性强的内容，共同将这一活动打造成学界高质量的公共品。

2.4 IMED 成员网络

IMED模型力求打造为一个面向全体学术界开放的技术平台，热烈欢迎各院校和研究机构加入**IMED**成员网络，携手一起发展壮大。

模型的开发和日常维护依托北京大学能源环境经济与政策研究室²，欢迎扫下方二维码关注微信公众号。



Figure 2.18: LEEEP 组微信公众号二维码

²主页：<http://scholar.pku.edu.cn/hanchengdai>

3. IMED | CGE 模型

3.1 IMED | CGE 模型概述

可计算一般均衡 (Computable General Equilibrium, CGE) 模型通常是在一个处于均衡态的经济系统中，对某些变量进行一定程度的政策干扰，在该经济系统再次回到均衡态时，评估各个经济变量的变化所产生的影响，政策的目标变量选择可根据需要进行设定。CGE 模型是全面刻画经济发展、能源需求、温室气体及空气污染物排放之间关系的综合评估模型。在国内外被广泛地应用于事前定量评价税收、贸易、能源、温室气体减排等政策的效果和经济影响。

IMED | CGE 模型是自主开发的全球多部门、多区域动态 CGE 模型 (图3.1)。模型以各年投入产出表数据为社会经济方面的数据基础，结合能源平衡表，产业统计年鉴数据形成了 CGE 模型所需的基本年数据。模型由 GAMS/MPSGE 建模并用 PATH 算法器求解，以 1 年为步长动态模拟基准年至未来某一目标年 (如 2030 年或 2050 年) 期间全球经济走势、产业结构变化、能源消费及其碳排放趋势。模型的部门划分可根据研究问题和目标的不同而灵活设置，常见的划分方式有：22 部门 (表3.1), 25 部门 (表 3.1), 33 部门 (表3.1), 和 91 部门 (表 3.1)。模型将全球划分为若干个地区 (表3.1)。国内区域可灵活配置为 30 个省区市 (港澳台、西藏除外)、7 个地区、东中西 3 个地区或任意一个省，而国际区域可划分为 1 个区、3 个区或 14 个区。



Figure 3.1: 经济系统：面向减污降碳的宏观社会经济评估

模型包括一个生产模块、国内外贸易的市场模块以及政府和居民的收支模块。企业生产行为由常替代弹性生产函数刻画，生产投入品分为物料投入、能源投入、劳动力和资本投入等，模型仅模拟能源消费相关的碳排放，不考虑其他排放源如生产过程排放和土地利用排放。模型的详细技术性介绍参见文献[5, 6, 9]。此外，在模型中设定了相应的人口增长路径与技术进步率（全要素生产率和能效改进参数）。能效参数（单位经济产出所需要的能源投入）设定比较复杂，区分了不同燃料品种、发达国家和发展中国家。固体燃料和液体燃料在发达国家年均效率提高 1%-2%，在发展中国家年均提高 3%-5%；气体燃料在发达国家年均提高 0-1%，在发展中国家年均 2% 左右（负号代表发展中国家未来对天然气的消费偏好提高而非效率降低）。用电效率在发达国家年均提高约 0.5%，而发展中国家年均提高 3% 左右。大体而言，各国未来能源与二氧化碳排放主要由经济增长速度、能源效率提高速度以及能源的相对价格变化的复杂机制驱动。除此以外，没有考虑各国特定的能源和气候政策，如美国的清洁电力计划。



Figure 3.2: CGE 概念图

3.2 IMED | CGE 模型应用案例

近年来, IMED | CGE 模型近年来被系统地应用于综合评价我国国家层面 [15, 17, 18] 和省级层面 [5, 6, 11, 12, 13, 19, 20, 21, 22] 的空气污染减排、人群健康、能源和气候变化应对政策。模型最新的介绍参见¹。基于 IMED | CGE 模型发表的期刊文章简要综述可在此处下载: [中文或英文幻灯片](#)。主要的案例研究包括以下几个方面:

1. 代表性作品
 - One Earth: 碳中和能使中国实现工业用水目标 [23]²
2. 碳税、污染税和可再生能源政策
 - **碳税** [10, 24, 25, 26]^{3 4 5 6}
 - **空气污染税** [14]⁷
 - **可再生能源对实现碳强度目标的贡献** [15, 17, 20, 27]^{8 9}
3. 碳交易政策
 - 碳交易政策: 广东 [13, 19]、上海 [11, 28, 29]、全国 [16]^{10 11 12 13 14 15}
4. 水-资源-能源耦合分析
 - 中国碳减排与资源消费协同效益 [8]¹⁶

¹<http://scholar.pku.edu.cn/hanchengdai/imedcge>

²Xiaoyu Liu[#], Hancheng Dai[#], et al (2022). "Achieving carbon neutrality enables China to attain its industrial water-use target." *One Earth* 5(2): 188-200 ([文章链接](#))

³Z. Li, H. Dai* et al. (2018). "Exploring the impacts of regional unbalanced carbon tax on CO₂ emissions and industrial competitiveness in Liaoning province of China." *Energy Policy* 113: 9-19 ([文章链接](#))

⁴H. Dai* et al. (2017). "The impacts of U.S. withdrawal from the Paris Agreement on the carbon emission space and mitigation cost of China, EU, and Japan under the constraints of the global carbon emission space." *Advances in Climate Change Research* 8(4): 226-234 ([文章链接](#))

⁵H. Dong, H. Dai* et al. (2017). "Exploring impact of carbon tax on China's industrial CO₂ reductions and provincial disparities." *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 77: 596-603 ([文章链接](#))

⁶H. Dai* et al. (2018). "Effects of the US withdrawal from Paris Agreement on the carbon emission space and cost of China and India." *Frontiers in Energy* 12(3): 362-375 ([文章链接](#))

⁷Y. Xie, H. Dai* et al. (2018). "Impacts of SO₂ taxations and renewable energy development on CO₂, NO_x and SO₂ emissions in Jing-Jin-Ji region." *Journal of Cleaner Production* 171: 1386-1395 ([文章链接](#))

⁸H. Dai* et al. (2016). "Green growth: The economic impacts of large-scale renewable energy development in China." *Applied Energy* 162: 435-449. ([文章链接](#))

⁹B. Cheng, H. Dai* et al. (2016). "Impacts of low-carbon power policy on carbon mitigation in Guangdong Province, China." *Energy Policy* 88: 515-527. ([文章链接](#))

¹⁰B. Cheng, H. Dai* et al. (2015). "Impacts of carbon trading scheme on air pollutant emissions in Guangdong Province of China." *Energy for Sustainable Development* 27: 174-185. ([文章链接](#))

¹¹W. Peng, H. Dai* et al. (2015). "Achieving Copenhagen target through carbon emission trading: Economic impacts assessment in Guangdong Province of China." *Energy* 79: 212-227. ([文章链接](#))

¹²R. Wu, H. Dai* et al. (2016). "Achieving China's INDC through carbon cap-and-trade: Insights from Shanghai." *Applied Energy* 184: 1114-1122. ([文章链接](#))

¹³Z. Yu, H. Dai* et al. (2018). "A general equilibrium analysis of the impacts of regional and sectoral emission quota allocation on carbon trading market." *Journal of Cleaner Production* 192: 421-432. ([文章链接](#))

¹⁴H. Dai* et al. (2018). "Aligning renewable energy targets with carbon emissions trading to achieve China's INDCs: A general equilibrium assessment." *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 82: 4121-4131. ([文章链接](#))

¹⁵Z. Liu, H. Dai* et al. (2018). "Regional impacts of launching national carbon emissions trading market: A case study of Shanghai." *Applied Energy* 230: 232-240. ([文章链接](#))

¹⁶H. Wang, H. Dai* et al. (2018). "Co-benefit of carbon mitigation on resource use in China."

- 中国碳减排与水资源消费协同效益 [30, 31, 32]^{17 18 19}
 - 中国碳减排与空气污染控制协同效益 [5]²⁰
5. 其他议题：消费方式、产业竞争力及与技术模型软连接
- 家庭消费方式对能源排放的影响 [18, 33]^{21 22}
 - 碳强度目标对地区产业竞争力影响：辽宁省 [10]、上海市 [12]、广西省 [34] 和中国 [24, 26]^{23 24 25 26 27}
 - 与技术模型软连接 [9]²⁸

3.3 IMEDICGE 模型技术性介绍

以下章节介绍IMEDICGE 模型的生产、最终需求、商品供应与贸易、市场出清、宏观闭合及动态化过程模块。

[Journal of Cleaner Production](#) 174: 1096-1113 ([文章链接](#))

¹⁷M. Li, H. Dai* et al. (2017). "Water conservation from power generation in China: a provincial level scenario towards 2030." [Applied Energy](#) 208: 580-591 ([文章链接](#))

¹⁸Q. Su, H. Dai* et al. (2018). "Modeling the carbon-energy-water nexus in a rapidly urbanizing catchment: A general equilibrium assessment." [Journal of Environmental Management](#) 225: 93-103 ([文章链接](#))

¹⁹Q. Su, H. Dai* et al. (2019). "A general equilibrium analysis of co-benefits and trade-offs of carbon mitigation on local industrial water use and pollutants discharge in China." [Environmental Science & Technology](#) Accepted ([文章链接](#))

²⁰H. Dong, H. Dai* et al. (2015). "Pursuing air pollutant co-benefits of CO₂ mitigation in China: a provincial leveled analysis." [Applied Energy](#) 144: 165–174 ([文章链接](#))

²¹X. Tian, H. Dai* et al. (2016). "The effects of household consumption pattern on regional development: A case study of Shanghai." [Energy](#) 103: 49-60 ([文章链接](#))

²²H. Dai* et al. (2012). "The impacts of China's household consumption expenditure patterns on energy demand and carbon emissions towards 2050." [Energy Policy](#) 50: 736-750 ([文章链接](#))

²³Z. Li, H. Dai* et al. (2017). "Exploring the impacts of regional unbalanced carbon tax on CO₂ emissions and industrial competitiveness in Liaoning province of China." [Energy Policy](#) 113: Page ([文章链接](#))

²⁴X. Tian, H. Dai* et al. (2016). "The effects of household consumption pattern on regional development: a case study of Shanghai." [Energy](#) 103: 49-60 ([文章链接](#))

²⁵Z. Weng, H. Dai* et al. (2018). "A general equilibrium assessment of economic impacts of provincial unbalanced carbon intensity targets in China." [Resources, Conservation and Recycling](#) 133: 157-168 ([文章链接](#))

²⁶H. Dai* et al. (2017). "The impacts of U.S. withdrawal from the Paris Agreement on the carbon emission space and mitigation cost of China, EU, and Japan under the constraints of the global carbon emission space." [Advances in Climate Change Research](#) 8(4): 226-234 ([文章链接](#))

²⁷H. Dai* et al. (2018). "Effects of the US withdrawal from Paris Agreement on the carbon emission space and cost of China and India." [Frontiers in Energy](#) 12(3): 362-375 ([文章链接](#))

²⁸H. Dai* et al. (2016). "Closing the gap? Top-down versus bottom-up projections of China's regional energy use and CO₂ emissions." [Applied Energy](#) 162: 1355-1373 ([文章链接](#))

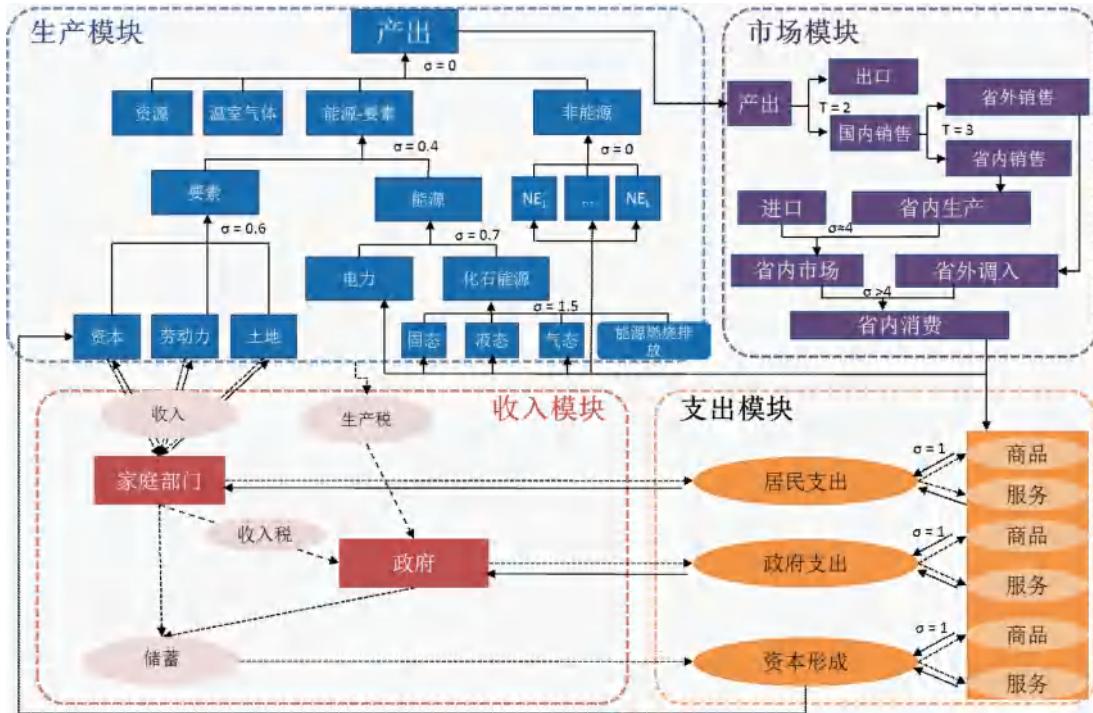


Figure 3.3: IMED | CGE 整体结构

3.3.1 生产函数

地区(r)的部门(j)，总产出 $Q_{r,j}$ 由各投入品嵌套生产而得，包括劳动力($L_{r,j}$)，资本($K_{r,j}$)，能源($E_{r,j}$)—，如煤炭 $Coal_{r,j}$ 、石油 $Coil_{r,j}$ 、天然气 $Cgas_{r,j}$ 和电力 $Celec_{r,j}$ ，和物质($M_{r,j}$)投入等。某些部门如农业、采煤、采油、采矿等，资源($R_{r,j}$)也作为投入品。如图 3.3.1 和公式 3.2 所示，生产行为由一个四层嵌套的常替代弹性(CES)函数刻画。在顶层，行业水平的总产出是中间投入品、增加值要素及其他投入的列昂惕夫生产函数组合；第二层，中间投入的复合商品由国内品和进口品 CES 合成，允许进口品和国内商品之间的不完全替代。复合能源投入与增加值也采用 CES 合成；第三层，增加值由基本生产要素通过 CES 函数合成，主要包括资本，劳动力，土地等；能源投入由化石能源和电力投入的 CES 合成，化石能源包括固体、液体和气体化石燃料。最底层是化石燃料与污染物排放的组合。在给定的投入品价格(公式 3.1)和生产技术水平(公式 3.2)条件下，生产者选择合适的投入品数据，最大化其利润，进而确定生产量。

$$\max : \pi_{r,j} = p_{r,j} \cdot Q_{r,j} - \left(\sum_{i=1}^N p_{r,i} \cdot X_{r,i,j} + \sum_{v=1}^V \omega_{r,v} \cdot V_{r,v,j} \right) - T_{r,j}^z \quad (3.1)$$

约束条件：

$$Q_{r,j} = LEO_{1rj} \{ M_{r,j}, R_{r,j}, CES_{2vae} [CES_{3va} (K_{r,j}, L_{r,j}, CES_{3e} (ele_{r,j}, CES_{4fos} \langle coal_{r,j}, gas_{r,j}, oil_{r,j} \rangle))] \} \quad (3.2)$$

其中：

- $\pi_{r,j}$ 地区 r, j 行业生产部门的利润;
- $Q_{r,j}$ 地区 r, j 行业生产部门的总产出;
- $X_{r,i,j}$ 地区 r, i 行业部门对 j 行业生产部门的中间投入, 如图3.3.1所示, $X_{r,i,j}$ 包括物质投入 $M_{r,i,j}$, 电力 $ele_{r,j}$, 煤炭 $coal_{r,j}$, 天然气 $gas_{r,j}$, 原油 $oil_{r,j}$, 成品油 $pet_{r,j}$ 和资源 $RES_{r,j}$;
- $V_{r,v,j}$ 地区 r 行业 j 生产部门的要素 v 投入;
- $p_{r,j}$ 地区 r, 对 j 行业生产部门生产产品的价格;
- $\omega_{r,v}$ 地区 r 生产部门生产要素 v 的价格;
- CES_{krj} CES 生产函数。

注:

- 土地只作为农业部门的投入, 其他资源开采部门如原油、天然气、原煤及矿物开采等部门需要使用资源作为投入;
- 能源转换部门, 如炼油、制气中, 一次能源被认为是物质投入, 不发生燃料;
- 电力部门分为三种火力发电 (煤、油、气) 和五种非化石能源发电 (水力、核能、风能、太阳能、生物质) (图3.3.1b)。

模型假设劳动力可在地区内部的部门间自由流动, 而不能在地区间流动。资本流动方式遵从 putty-clay 方式, 即已有资本不可在部门间或地区间流动, 而新增投资可在地区内部部门间自由流动。

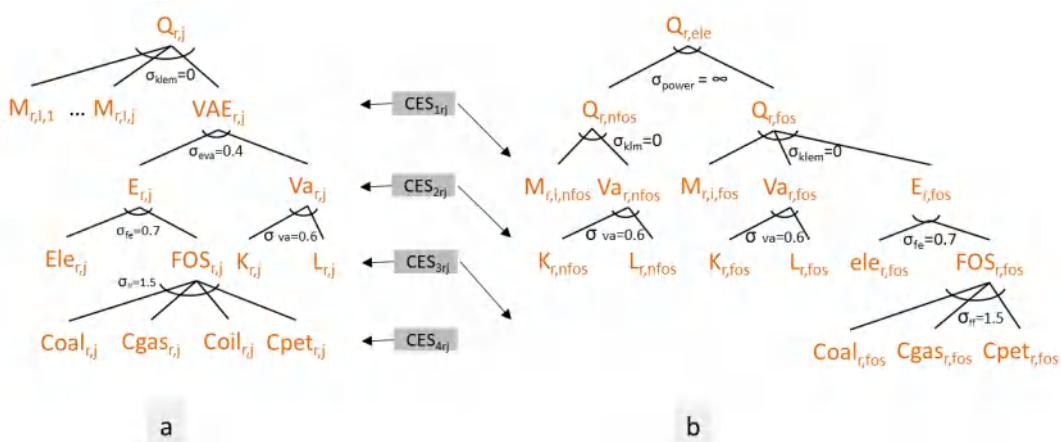


Figure 3.4: 生产函数嵌套关系。a, 非电部门; b, 电力部门. σ 投入品替代弹性。 $VAE_{r,j}$, $VA_{r,j}$, $E_{r,j}$, $FOS_{r,j}$ 分别为 CES 函数中增加值与能源、增加值、能源与化石能源复合品

3.3.2 最终需求

对于消费者, 其决策过程表现为选择适当的消费与储蓄结构, 同时确定各种消费品在总消费支出中的比例, 使消费者在给定预算水平约束下实现其效用函数的最大化。

居民和政府分别被模拟为两个不同的最终消费部门。如公式3.4所示, 居民部门的收入来源是要素供应 ($\sum_{v=1}^V (\omega_{r,v} \cdot V_{r,v}) + \sum_j (pld_r \cdot QLAND_{r,j}) + \sum_{s,j} (p_{r,s}^s \cdot QRES_{r,j,s})$) 和来自政府的转移支付。税后收入 (直接税: T_r^d) 用于储蓄投资 (S_r^p) 或最终消费 ($\sum_i p_{r,i} \cdot X_{r,i}^p$)。居民在收入 (公式3.4) 和价格的约束下, 通过选择最佳消费商品组合实现效用的最大化。总投资为外生给定 (公式 3.16)。另一方面, 政府通过征税作为收入 ($T_r^d + \sum_j T_{r,j}^z + \sum_j T_{r,j}^m$), 并向社会提供公共服务 ($p_{r,i}^i \cdot x_{r,i}^g$) (公式3.5)。碳税收入 (T_r^{cab}) 作为转移支付返还给居民。居民、

政府和资本形成的最终需求 (DEM_r^d) 由 Cobb-Douglas 效用函数 (或需求函数) 表征 (见公式 3.3)。

$$DEM_r^d = A_r^d \cdot \prod_i^N (X_{r,i}^d)^{\alpha_{r,i}^d}, d \in (\text{居民, 资本形成和政府}) \quad (3.3)$$

约束条件:

$$\sum_{v=1}^V (\omega_{r,v} \cdot V_{r,v}) + \sum_j (pld_r \cdot QLAND_{r,j}) + \sum_{s,j} (p_{r,s}^s \cdot QRES_{r,j,s}) + T_r^{cab} - T_r^d = \sum_i p_{r,i} \cdot X_{r,i}^p + S_r^p \quad (3.4)$$

$$T_r^d + \sum_j T_{r,j}^z + \sum_j T_{r,j}^m = \sum_i p_{r,i} \cdot X_{r,i}^g + S_r^g \quad (3.5)$$

一阶条件下可以导出针对居民、政府和资本形成的最优解:

$$X_{r,i}^p = \frac{\alpha_{r,i}^p}{p_{r,i}} \cdot (\sum_{v=1}^V (\omega_{r,v} \cdot V_{r,v}) + \sum_j (pld_r \cdot QLAND_{r,j}) + \sum_{s,j} (p_{r,s}^s \cdot QRES_{r,j,s}) - S_r^p - T_r^d) \quad (3.6)$$

$$X_{r,i}^g = \frac{\alpha_{r,i}^g}{p_{r,i}} \cdot (T_r^d + \sum_j T_{r,j}^z + \sum_j T_{r,j}^m - S_r^g) \quad (3.7)$$

$$X_{r,i}^n = \frac{\alpha_{r,i}^n}{p_{r,i}} \cdot (S_r^p + S_r^g + \varepsilon \cdot S_r^f) \quad (3.8)$$

其中:

- DEM_r^d 最终需求; 居民 - p, 资本形成 - n 和政府 - g;
- $\omega_{r,v}$ 地区 r 生产部门生产要素 v 的价格;
- $V_{r,v}$ 居民家庭可提供的第 v 种要素禀赋量;
- pld_r 土地价格;
- $QLAND_{r,j}$ 部门 j 土地投入;
- $p_{r,s}^s$ 资源 s 价格;
- $QRES_{r,j,s}$ 部门 j 资源投入量;
- T_r^{cab} 碳税收入;
- T_r^d 直接税;
- S_r^p 居民储蓄;
- $T_{r,j}^z$ 部门 j 生产税;
- $T_{r,j}^m$ 商品 j 进口税;
- S_r^g 政府储蓄;
- S_r^f 国际净收支;
- ε 汇率;
- $p_{r,i}$ 商品价格;
- $X_{r,i}^p$, $X_{r,i}^g$ 和 $X_{r,i}^n$ 分别是居民, 政府和资本形成的需求量;
- A_r^d CES 生产函数的规模参数;
- $\alpha_{r,i}^d$ CES 生产函数的份额比例。

3.3.3 商品供应和区域贸易

市场模块表示商品的消费流向，供给本地消费或调出口，结构如图所示。生产模块中完成生产后，需根据生产商品的国内外价格，决定总产出中用于出口和内销的份额，以追求利润最大化。假设国内总产出中用于出口的产品和用于国内销售的产品具有不完全转换弹性，依据相应的弹性参数，用常转换弹性（CET）函数描述国内总产出在出口和国内销售之间分配比例。对于进口需求量，采用 Armington 假设 [35]，即进口商品和国内生产的商品具有不完全替代性，用 CES 函数合成为复合商品（公式3.9 和 3.10），该复合商品在国内需求包括居民、政府、投资和中间投入需求间进行分配。

- 向国外市场供应 (f) :

$$X_{f,i} = CES_{s1} \{ D_{f,f,i}, CES_{s2} [F_{1,f,i}, \dots, F_{f',f,i}, CES_{s3} (P_{1,f,i}, \dots, P_{p,f,i})] \} \quad (3.9)$$

- 向中国国内市场供应 (p) :

$$X_{p,i} = CES_{s1} \{ F_{1,p,i}, \dots, F_{f',p,i}, CES_{s2} [D_{p,p,i}, CES_{s3} (P_{1,p,i}, \dots, P_{p',p,i})] \} \quad (3.10)$$

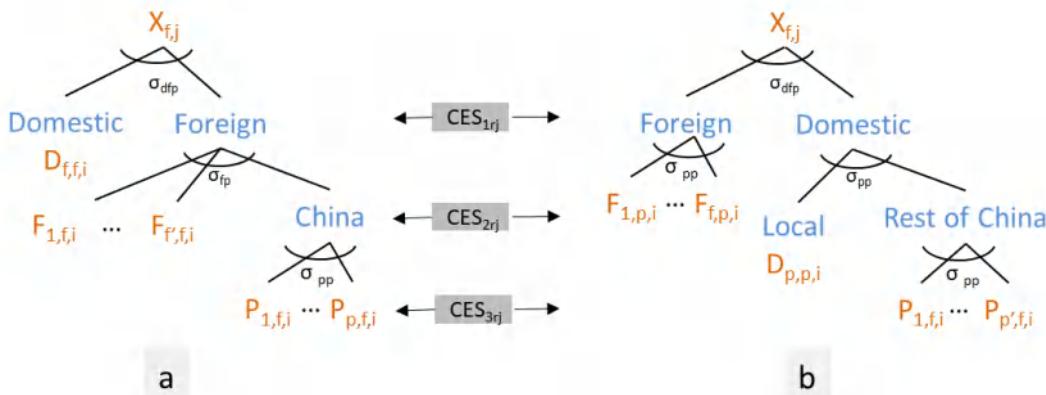


Figure 3.5: 本地生产、国内其他地区生产和进口商品复合函数。a, 国际地区; b, 中国地区. σ 替代弹性

其中：

- $D_{f,f,i}$ 世界其他地区生产的商品；
- $P_{p,f,i}$ 中国生产且出口至世界其他地区的商品；
- $F_{f,p,i}$ 世界其他地区生产且进口至中国的商品；
- $D_{p,p,i}$ 本省生产且销售至本省的商品；
- $P_{p',p,i}$ 其他省份生产的商品。

不同类型商品的价格有所区分。其中一类是用本国货币计价的商品价格 p_i^e 和 p_i^m ；另一类是用国外货币计价的商品价格 p_i^{We} 和 p_i^{Wm} 。它们的相互关系如下：

$$p_i^e = \varepsilon \cdot p_i^{We} \quad (3.11)$$

$$p_i^m = \varepsilon \cdot p_i^{Wm} \quad (3.12)$$

此外，也假设国际收支均衡（即指进出口净额和国外储蓄之间平衡）受名义汇率、外国净储蓄和价格指数的变动影响：

$$\sum_i p_i^{We} \cdot E_{r,i} + S_r^f = \sum_i p_i^{Wm} \cdot M_i \quad (3.13)$$

其中：

- $E_{r,i}$ 出口；
- $M_{r,i}$ 进口；
- p_i^{We} 以国外货币计价的出口价格；
- p_i^e 以国内货币计价的出口价格；
- p_i^{Wm} 以国外货币计价的进口价格；
- p_i^m 以国内货币计价的进口价格。

3.3.4 市场出清

模型的均衡约束条件包括要素市场均衡、商品市场均衡、国际收支均衡及投资储蓄均衡四类。商品市场中必须满足商品的总供给等于总需求，总供给包括本地供给量与进口量，总需求包括中间投入的总需求、家庭消费的总需求、政府消费总需求、固定投资总需求等，同时考虑了存货的变动。

商品市场出清见公式 3.14，某一产品的产量 $Q_{r,i}$ 等于中间投入、居民消费、政府消费、资本形成 ($\sum_d X_{r,i}^d$)、向国外出口 ($\sum_f F_{r,f,i}$) 和向省外调出 ($\sum_p P_{r,p,i}$)，以及存货变动 ($STK_{r,i}$)：

$$Q_{r,i} = \sum_d X_{r,i}^d + \sum_f F_{r,f,i} + \sum_p P_{r,p,i} - \sum_f F_{f,r,i} - \sum_p P_{p,r,i} - STK_{r,i} \quad (3.14)$$

要素市场见公式3.15，总的要素供应 ($V_{r,v}$) 等于每个部门的要素投入 ($v_{r,v,j}$) 之和：

$$V_{r,v} = \sum_j v_{r,v,j} \quad (3.15)$$

3.3.5 宏观闭合

市场均衡对于供求关系平衡具有重要的意义，主要包括商品市场均衡、要素市场均衡、储蓄-投资均衡、政府预算均衡和国际市场收支均衡等。商品市场均衡是指各个部门不同种类商品的总供给需求平衡；要素市场均衡包括劳动力市场均衡与资本市场均衡；政府预算均衡是指政府的总收入支出平衡，用政府储蓄或者赤字来实现政府预算的均衡，政府储蓄是政府收入与消费支出的差额；国际收支均衡是指进出口净额和国外储蓄之间平衡，名义汇率、外国净储蓄和价格指数的变动都可以影响该平衡；储蓄投资均衡是指总储蓄量与总投资量保持均衡，总储蓄量是指政府、居民、企业和国外储蓄的总合，其中，政府储蓄是

指政府收入和消费支出的差额，企业和居民储蓄则是按照固定的比率得到，外国储蓄则是外生给定的固定值。CGE 模型的宏观经济均衡主要包括政府预算均衡、国际收支均衡与储蓄-投资均衡。

在宏观闭合规则方面，目前 CGE 模型常用的宏观闭合规则主要有以下四种：凯恩斯闭合，凯恩斯闭合不要求劳动力市场和商品市场同时达到均衡，其前提是劳动力和资本大量闲置，生产要素劳动和资本的供应不受限制，就业率成为内生变量，完全由需求单方面决定，要素的价格也是固定的。新古典主义宏观闭合，其特征是假定投资不是自由给定的，投资是内生变量，并且应等于计划的储蓄，投资与储蓄的均衡是有模型外的利率调节机制来实现；约翰森闭合规则，其假定总投资水平外生给定，就必须把政府消费作为内生变量，或者通过外部财政政策即政府预算盈余或赤字来使得投资和储蓄均衡。新凯恩斯闭合，其假设如果投资水平和政府消费外生给定，那么要素市场的优化条件将无法实现，即实际工资不等于劳动力边际产出，而是通过收入分配机制使得投资和储蓄均衡。

在此模型中，闭合规则是政府储蓄 (S_r^g)、总投资和国际收支 (S_r^f) 是外生固定，而汇率 (ε) 是内生变动的。

3.3.6 动态过程

此模型以 1 年为步长递归动态计算，如下列公式所示，下一期的资本存量（公式3.16 和 3.17）、劳动力（公式3.18）、土地、自然资源、效率参数（公式3.19）、化石能源开采成本与上一期的相应参数紧密关联。

- 资本存量累积过程：

$$TI_{r,t+1} = \sum_j CAPSTK_{r,j,t} \cdot [(1 + gr_{r,t+1})^T - (1 - dr)^T] \quad (3.16)$$

$$CAPSTK_{r,j,t} = (1 - dr)^T \cdot CAPSTK_{r,j,t-1} + T \cdot I_{r,j,t} \quad (3.17)$$

其中：总投资 ($TI_{r,t}$) 为外生给定，各部门分配到的新增投资 ($I_{r,j,t}$) 基于各部门的资本回报率决定，资本存量累积 ($CAPSTK_{r,j,t}$) 过程见公式 3.17， dr 为折旧率 (5%)，T 是时间步长 (1 年)。

- 劳动力、土地和自然资源：

$$V_{r,v}^t = V_{r,v}^{t-1} \cdot (1 + gr_{r,v}^t) \quad (3.18)$$

其中： $V_{r,v}^t$ 为初级要素 (v) 如劳动力、土地和自然资源， $gr_{r,v}^t$ 为相应增长率。

- 效率参数：

IMED | CGE 模型区分新增资本的新技术和资本存量的已有技术的技术效率是不同的。对新增资本而言，其能源效率、土地生产率和全要素生产率为外生给定的情景，而对已有的资本存量，其效率 $EFF_{r,par,j}^{ext,t}$ 是上一期的资本存量效率 ($EFF_{r,par,j}^{ext,t-1}$) 和上一期新增资本效率 ($EFF_{r,par,j}^{new,t-1}$) 的加权平均，如公式 3.19所示：

$$EFF_{r,par,j}^{ext,t} = \frac{(EFF_{r,par,j}^{ext,t-1} \cdot CAPSTK_{r,j,t-1} + EFF_{r,par,j}^{new,t-1} \cdot I_{r,j,t-1}) \cdot (1 - dr)^T}{CAPSTK_{r,j,t}} \quad (3.19)$$

3.3.7 数据来源

投入产出表是构建社会核算矩阵（Social Accounting Matrix, SAM）的重要数据来源。**IMED** | CGE 模型中，国内数据为中国国家和各省投入产出表[36] 以及能源平衡表 [37]，目前国内每五年进行一次全国投入产出表调查核算，迄今为止共发表了 5 份投入产出表。而国际经济数据为 GTAP6 [38] 和 IEA 的国际能源平衡表 [39]。

由于一般的 CGE 模型中各个部门均以价值量为单位，而实际需求的能源消耗及二氧化碳排放则是以实物物理量的形式。为了将价值量转换成实物量，则需参考能源平衡表中的数据，得到当年能源消耗的实物量。由于能源平衡表中各个部门的消费数据与投入产出表中的价值量不一致，但是根据当年能源消费总量与当年能源消费价值量得出的不同能源的平均价格是一致的。因此求出每一种能源品种的当年平均价格，就可以根据投出产表转换成各个部门能源消费及二氧化碳排放。

由于统计口径差异，能源平衡表和投入产出表中各部门能源消费不一致，一般认为能源平衡表中的物质质量信息更为可靠。为解决这一问题，本研究基于各部门能源消费比例，并根据能源消费数据合并分解，使之与投入产出表行业分类对应一致，再利用最小二乘法和交叉熵法（公式3.20 - 3.23）调整并重新平衡了投入产出表。

此外，模型还需要能源价格和二氧化碳排放系数（IPCC 推荐方法），并将所有价格都调整到基准年。

最小化：

$$\varepsilon = \sum_{en,i} (Shr_{en,i}^{IOT} - Shr_{en,i}^{EBT})^2 \quad (3.20)$$

约束条件：

$$Shr_{en,i}^{IOT} = \frac{EN_{en,i}^{IOT}}{TCON_{en}^{IOT}} \quad (3.21)$$

$$Shr_{en,i}^{EBT} = \frac{EN_{en,i}^{EBT}}{TCON_{en}^{EBT}} \quad (3.22)$$

$$\sum_i EN_{en,i}^{IOT} \cdot P_{en} = \sum_i EN_{en,i}^{EBT} \quad (3.23)$$

其中：

- ε : 目标误差；
- en : 能源商品 (煤, 气, 油, 电)；
- i : 部门划分；
- $Shr_{en,i}^{IOT}$: IOT 里的各部门能源消费比例 (%)；
- $Shr_{en,i}^{EBT}$: EBT 里的各部门能源消费比例 (%)；
- $EN_{en,i}^{IOT}$: IOT 里的各部门能源消费 (USD)；
- $EN_{en,i}^{EBT}$: EBT 里的各部门能源消费 (PJ)；
- $TCON_{en}^{IOT}$: IOT 里的总能源消费 (USD)；
- $TCON_{en}^{EBT}$: EBT 里的总能源消费 (PJ)；
- P_{en} : 能源价格 (USD/PJ)。

3.3.8 碳交易政策评估模块

中国的碳排放交易体系 (ETS)，包括较早的上海、广东、湖北、重庆等试点地区，一般涵盖工业企业二氧化碳排放量在 2 万吨以上、非工业企业二氧化碳排放量在 1 万吨以上的一定规模以上企业。小型企业被排除在 ETS 之外。然而，在模型中，所有参与部门的排放都包括在内，因为大型和小型企业都包含在一个部门中。港口、酒店、商场和金融中介行业也被排除在模型中的 ETS 之外。在该模型中，模型中仅考虑与能源燃烧相关的 CO₂ 排放。

出于排放交易研究的目的，IMED | CGE 模型中自 2014 年开始首次增加了一个可以在部门层面实施 ETS 政策的碳排放交易模块 [11, 13, 16, 19, 28, 29]。如图 3.3.8 所示，C1 和 C2 分别为排放配额 Q1 和 Q2 分配给没有碳交易的每个部门（或地区）。CGE 模型确定均衡点 A 和 B，其中部门 1 和部门 2 的碳影子价格分别为 P1 和 P2 (P1 < P2)。相比之下，当允许自由碳交易时，就会形成一个完全相同的碳交易市场。行业（或地区）1 倾向于向市场出售 Q1 单位的碳排放权，行业（或地区）2 倾向于从市场购买 Q2 单位的碳排放权。CGE 模型将找到一个新的平衡点 A' 和 B'，具有相同的碳影子价格 P'，通过满足方程中的条件来清除碳市场。

售出碳排放等于购入碳排放量：

$$\Delta Q_1 = \Delta Q_2 \quad (3.24)$$

碳销售收入等于支出：

$$\Delta Q_1 P' = \Delta Q_2 P' \quad (3.25)$$

相应地，当更多的行业参与碳排放交易时，上述条件将成立，如以下方程所示。

$$\sum_s \Delta Q_s = \sum_b \Delta Q_b \quad (3.26)$$

$$\sum_s \Delta Q_s P' = \sum_b \Delta Q_b P' \quad (3.27)$$

其中：

- s 和 b: 分别是碳交易市场的卖方和买方（一个部门或一个地区）
- Q: 碳交易量（吨）
- P: 碳影子价格

3.3.9 地区间产业竞争力评估模块

IMED | CGE 多区域模型版本也被用于评估碳政策对中国各省产业竞争力的影响 [10, 34, 40].^{29 30 31}

²⁹Z. Li, H. Dai* et al. (2017). "Exploring the impacts of regional unbalanced carbon tax on CO₂ emissions and industrial competitiveness in Liaoning province of China." *Energy Policy* 113: Page (文章链接)

³⁰X. Tian, H. Dai* et al. (2016). "The effects of household consumption pattern on regional development: a case study of Shanghai." *Energy* 103: 49–60 (文章链接)

³¹Z. Weng, H. Dai* et al. (2018). "A general equilibrium assessment of economic impacts of provincial unbalanced carbon intensity targets in China." *Resources, Conservation and Recycling* 133: 157–168 (文章链接)

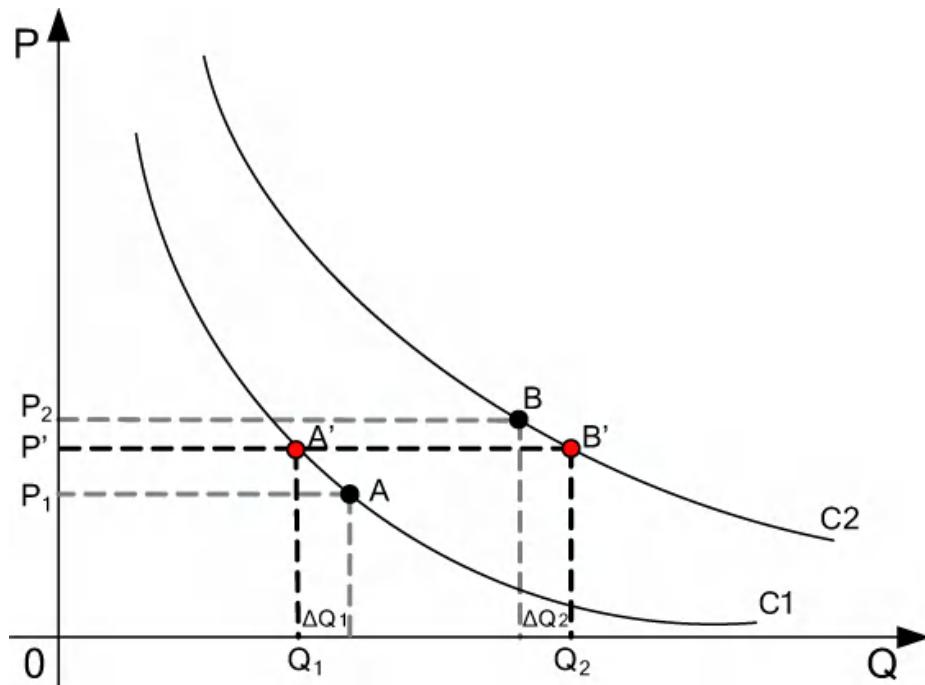


Figure 3.6: 部门间碳排放交易机制

我们提供了区域竞争力如何受到影响的机制，特别是当不同区域面临不同的碳减排负担时。

一个部门是输家还是赢家是通过产出水平的变化来衡量的。如果干预场景中的输出高于参考场景，则它是赢家。相反，如果输出低于参考情景，则成为输家。

在 CGE 模型中，基本假设之一是市场出清，这意味着任何商品的供应都等于需求。因此，省内一种商品的产量水平取决于对该商品的需求。如图3.3.9所示，需求再次通过三个指标表示的三个市场中的两种机制来确定。三个市场包括省内市场、中国其他地区市场和国际市场。如下式所示，三个指标包括本省市场的本地供应 (domSup)、对国外市场的出口和对中国其他地区的流出 (provex)。他们的关系如下：

$$output_{r,i} = export_{r,i} + provex_{r,i} + domSup_{r,i} \quad (3.28)$$

此外，从需求方来看，存在以下关系：某商品的本地消费 (domCons) 等于 (或由) 进口、省级流入 (provim) 和本地生产 (domSup)。

$$domCons_{r,i} = domSup_{r,i} + import_{r,i} + provim_{r,i} \quad (3.29)$$

两种机制是价格效应和规模效应。价格效应是指如果某省某商品的价格涨幅高于全国其他地区，则该商品的需求将在三个市场下降。因此，出口减少，省级流出减少，国内消费减少，反之，进口增加，省级流入增加，导致地方产出减少。这种情况代表以下几种情况：1) 当省分配更多的碳 (强度) 减排目标时；2) 当省征收较高的碳税时；3) 即使两个地区都面临相同的减排成本，但目标省份生产的碳强度高于中国其他地区。

除了价格效应，规模效应也起着重要作用，有时与价格效应相反。假设中国其他地区碳减排负担较重，产品价格上涨大于目标省份，仅在价格效应机制下，该省行业将受益于这种情况，因为其商品相对其他地区便宜。但是，由于中国其他地区的经济规模受到较高的碳成本的影响，该省对商品的需求将下降，这是价格效应的反作用力。对产出的净影响决定了商品的主要市场是中国其他地区或其他地方（省内或国际市场）。在前一种情况下，规模效应通常会超过价格效应。因此，这种商品的产量将下降。

对于这个模型，世界其他地区没有明确建模，因此，价格效应是出口和进口的主导因素。

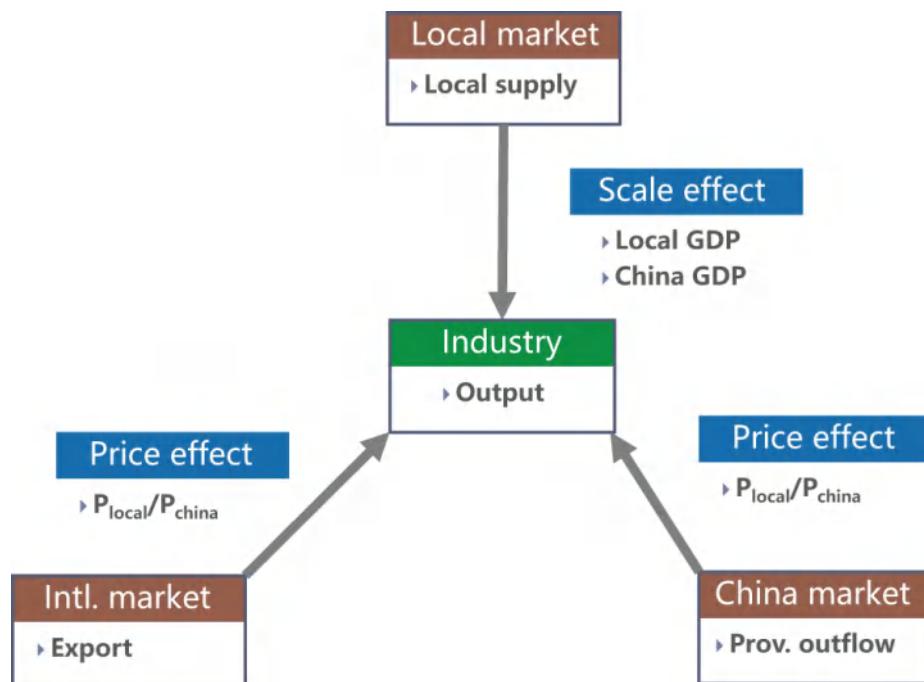


Figure 3.7: 区域间产业竞争机制

3.3.10 资源消费评估模块

为了评估碳减排政策与资源消耗之间的协同作用或权衡，我们扩展了 IMED | CGE 模型以纳入资源使用和相关的环境负担，包括水资源和水污染物排放。根据 EW-MFA 指南 [41] 的分类考虑了四个主要材料组。资源投入被视为各产业生产函数中的物质投入，表述为列昂捷夫型固定系数生产函数。如方程3.30所示，某个部门对资源的需求 ($R_{r,s,y}$) 是通过乘以该部门的产出值 ($O_{s,y}$) 由 2012 年的资源强度 ($I_{r,s,2012}$) 和年度强度降低率 ($D_{r,s,y}$) 得

出。有关此主题的论文可在此处获得: [8, 30, 31, 32]^{32 33 34 35}.

2013-2030 年金属矿石和非金属矿年强度降低率根据我国 1992-2012 年历史数据确定; 确定化石燃料的削减率, 使未来能源强度改善趋势与历史趋势一致。

$$R_{r,s,y} = O_{s,y} \cdot I_{r,s,2012} \cdot D_{r,s,y} \quad (3.30)$$

其中:

- $R_{r,s,y}$: y 年部门 s 中资源类型 r 的输入 [单位: 吨];
- $O_{s,y}$: CGE 模型生成的 y 年行业 s 产值 [单位: 元];
- $I_{r,s,2012}$: s 部门 2012 年资源类型 r 的产出强度 [吨/元], 使用统计数据校准;
- $D_{r,s,y}$: y 年部门 s 资源 r 的年强度降低率, 见表 3.6³⁶.

Table 3.6: 资源强度及其每年减少或增加的速度

Resource	Intensity reduction or increase rate
Metal ores	Reduction rate: 1.1%
Nonmetallic minerals	Reduction rate: 2.9%
Biomass	Increasing rate: 2.4%.
Fossil fuels	Same as autonomous energy efficiency improvement rate.

3.3.11 评估可再生能源发展的宏观社会经济影响模块

可再生能源 (RE) 投资产生的影响发表在 [15]³⁷。影响可分为两类: 直接影响和间接影响。每个类别由三类指标组成: 产出、增加值和就业。直接影响仅指电力部门, 而间接影响是指对与可再生能源开发相关的上游行业的刺激影响。

直接影响

直接产出影响 [DO_i]

电力部门 i 的直接输出等于电价 (P_i) 乘以发电量 (Q_i), 如下式所示:

$$DO_i = P_i \times Q_i \quad (3.31)$$

直接增加值影响 [DV_i]

³²M. Li, H. Dai* et al. (2017). "Water conservation from power generation in China: a provincial level scenario towards 2030." *Applied Energy* 208: 580-591 ([文章链接](#))

³³Q. Su, H. Dai* et al. (2018). "Modeling the carbon-energy-water nexus in a rapidly urbanizing catchment: A general equilibrium assessment." *Journal of Environmental Management* 225: 93-103 ([文章链接](#))

³⁴Q. Su, H. Dai* et al. (2019). "A general equilibrium analysis of co-benefits and trade-offs of carbon mitigation on local industrial water use and pollutants discharge in China." *Environmental Science & Technology* Accepted ([文章链接](#))

³⁵H. Wang, H. Dai* et al. (2018). "Co-benefit of carbon mitigation on resource use in China." *Journal of Cleaner Production* 174: 1096-1113 ([文章链接](#))

³⁶由于中国的生物质消费量与经济发展和政策的关系并不密切, 我们假设 2013-2030 年中国的生物质消费量将以与 1992-2012 年相同的年均增长率 (2.4%) 增长。此外, 在本研究中, 我们不考虑可能受能源政策影响的生物质燃料。

³⁷H. Dai* 等人 (2016 年)。"绿色增长: 中国大规模可再生能源开发的经济影响。" *Applied Energy* 162: 435-449. ([文章链接](#))

电力部门 i 的直接增加值等于直接产出 (DO_i) 乘以增加值份额 (sh_i^{VA})，如下式所示：

$$DV_i = DO_i \times sh_i^{VA} \quad (3.32)$$

直接就业 [DE_i]

电力部门的直接就业 i 等于直接产出 (DO_i) 乘以劳动投入的份额 (sh_i^L)，再除以平均工资 W_i ，公式如下所示：

$$DE_i = \frac{DO_i \times sh_i^L}{W_i} \quad (3.33)$$

中间投入 [$I_{i,j}$]

电力部门 i 的直接中间输入等于直接输出 (DO_i) 乘以中间输入的份额 ($sh_{i,j}^I$)，如下式所示：

$$I_{i,j} = DO_i \times sh_{i,j}^I \quad (3.34)$$

间接影响

间接产出 [$IDO_{i,m}$]

电力部门 i 刺激的部门 m 的间接输出更为复杂，但却是整个研究的重点。如以下等式所示，它由两部分组成。第一部分是发电中间投入刺激，对应运维成本；第二部分是电力行业投资的刺激（下式右边第二项）。

$$IDO_{i,m} = \sum_j I_{i,j} \times C_{j,m} + \sum_j INV_i \times SINV_{i,j} \times C_{j,m} \quad (3.35)$$

间接增加值 [$IDV_{i,m}$]

电力部门 i 刺激的部门 m 的间接增加值等于间接产出乘以增加值份额 (sh_m^{VA})，如下式所示：

$$IDV_{i,m} = IDO_i \times sh_m^{VA} \quad (3.36)$$

间接就业 [$IDE_{i,m}$]

由电力部门 i 刺激的部门 m 的间接就业等于间接产出 (IDO_i) 乘以劳动投入的份额 (sh_m^L)，然后除以平均工资 W_m ，如下式所示：

$$IDE_i = \frac{IDO_{i,m} \times sh_m^L}{W_m} \quad (3.37)$$

对 RE 的投资 [INV_i]

可再生能源投资来自 EDO 模型，等于单位装机成本乘以新增容量：

$$INV_i = COST_i \times CAP_i \quad (3.38)$$

其中：

- DO_i : 电力部门 i 的直接输出, 单位: 元;
- DV_i : 电力部门直接增加值 i , 单位: 元;
- DE_i : 电力部门直接就业 i , 单位: 人;
- $IDO_{i,m}$: 电力部门 i 刺激部门 m 的间接产出, 单位: 元;
- $IDV_{i,m}$: 电力部门 i 刺激下的部门 m 间接增加值, 单位: 元;
- $IDE_{i,m}$: 电力部门 i 刺激下的部门 m 的间接就业, 单位: 人;
- Q_i : 电力部门 i 的发电量, 来自 EDO 模型, 单位: KWh;
- INV_i : 电力行业投资 i , 来自 EDO 模型, 单位: 元;
- $COST_i$: 电力部门 i 的单位成本, 来自 EDO 模型, 单位: 元/MW;
- CAP_i : 电力部门新增容量 i , 来自 EDO 模型, 单位: MW;
- $I_{i,j}$: 电力部门 i 中部门 j 的中间投入, 来自投入产出表, 单位: 元;
- sh_i^{VA} : 电力部门增加值份额 i , 来自投入产出表, 单位:
- sh_i^L : 电力部门劳动力占比 i , 来自投入产出表, 单位:
- $sh_{i,j}^I$: 电力部门中间投入份额 i , 来自投入产出表, 单位:
- $C_{j,m}$: 扇区 j 乘扇区 m 的完整输入系数, 来自投入产出表, 单位: 无量纲量;
- $SINV_{i,j}$: 电力部门 i 单位投资对部门 j 的投入系数, 自查, 单位:
- W_m, W_i : m 或 i 部门的平均工资, 自查, 单位: 元/人;

3.3.12 IMED | CGE 与自下而上模型的软连接模块

IMED | CGE 模型还与全球知名的自下而上能源系统技术优化模型进行了耦合。例如, 这篇文章 [9]³⁸ 选取了两个能够代表中国能源与经济区域特征的全球模型, 并为中国未来能源系统提供新的见解。由北京大学和丹麦技术大学联合开展的一项研究工作将 IMED | CGE (以下简称 CGE) 模型和 TIMES 综合评估模型 (以下简称 TIAM) 进行了软链接。TIAM 是一个技术丰富的 BU 模型, 代表了全球能源系统和依赖能源的经济部门。国际能源署能源技术系统分析计划 (IEA ETSAP) 下的多个能源研究小组正在开发 TIAM, 多年以来, 在 IEA-ETSAP 和有效的开放源代码文件中有广泛的文献记载。本章将重点介绍主要的公共模型属性, 以突出将这两个独立开发的全球模型用于中国特定研究的软连接的优势。

这两种模型都基于一个优化框架。在 CGE 模型的优化框架内, 家庭, 企业和政府的个体行为是基于市场平仓、零利润和收入平衡条件, 同时解决一组价格和支持一般均衡的商品和因素的分配。TIAM 框架是基于一系列技术、经济和政策约束条件下的总能源系统成本的优化, 以每年成本减去收入的折现金额为基础。这两种模型都能代表能源密集型产业, 并且在两个模型中都被划分为不同的部门, 适用于钢铁工业、非金属矿工业、化学工业和制浆造纸工业。就中国而言, 这些行业占中国 2017 年 GDP 总量的 13, 2008 年中国最终能源消耗量的 40 左右。其他部门, 如交通、住宅、公共和商业服务的详细程度, 在两种模式之间有所不同。两种模式对全球和中国特定地区的划分是一致的。本文根据国家“七五”计划确定了东、中、西部地区, 该计划提出了三个主要经济区, 以促进中国经济的专业化和分工。

本文所采用的软链接方法将作为我们中国特有的全球模型比较和场景分析的分析框架(见图 3.3.12)。这种方法建立在我们之前的工作基础上, 范围有限, 仅对两个模型中的中国区域进行了测试。在本研究中, 我们扩展并记录了这两个全球模型的迭代软链接方法, 讨论了我们对后续模型比较的场景假设, 并将重点放在了中国。

³⁸H. Dai* et al. (2016). "Closing the gap? Top-down versus bottom-up projections of China's regional energy use and CO₂ emissions." *Applied Energy* 162: 1355-1373 ([文章链接](#))

TD 到 BU 的链接——能源服务需求驱动因素

如图 3.3.12 所示, TD CGE 模型提供了主要输入, 作为 BU 能源系统模型 TIAM 的未来能源服务需求驱动因素。一般来说, CGE 模型的一个 TD 部门产出的相对变化为 TIAM 中相应的未来 BU 能源服务需求提供了一个相对变化。这些能够构建协调一致的未来能源消费能源情景的变化率被称为能源服务需求驱动因素, 这些为能源服务需求优化提供了基准。在全球和国家的案例研究中, 采用了类似的 TD to BU 软连接方法。

因为 BU 模型和 TD 模型的应用和发展是相对独立的, 所以两者在模型结构和部门数据细节方面的差异也是客观存在的。这也是研究者们始终无法将“自上而下” CGE 模型中所有经济部门与“自下而上” TIAM 模型所有能源终端消费部门直接连接的原因。为此, 本研究针对性采用了几种不同的“translation”的方法来测算“自下而上”模型中的未来能源需求, 方法如下:

- 对两种模型中相同的部门采取一种直接连接的方法
- 对两种模型中相近的部门采取一种间接连接的方法
- 对于直接使用 GDP 和人口数据获取能源需求的部门所采取的连接

BU 到 TD 链接——能效改进

正如图 3.3.12 所示, 自 TIAM 模型计算出每个部门的最小成本技术组合和最终能源消费之后, CGE 模型中的能源效率改进因子(以下简称 EEI)随之改变, 所以 TD 模型计算出能源消费才能与 BU 模型相匹配。在本研究中, CGE 模型里每一个部门不同的能源类型下, EEI 因子都有所不同。在建立 BU 模型和 TD 模型的软连接后, 通过 CGE 模型中测算出的能源消费需求也会近似地改变, 如果改变量显著, 那么新值就会再一次传导入 TIAM 模型中。在没有软连接的前提下, 根据过往文献和历史趋势的结果, CGE 模型中能源效率系数每年的变动区间通常在 2%-4% 左右。当建立了两种模型之间的软连接时, 能源效率系数与外生变量“Autonomous energy efficiency improvement”(自主能源效率改进因子, 简称 AEEI)相关, 这个变量产生自 TIAM 模型计算出相应的最终能源消费量中。

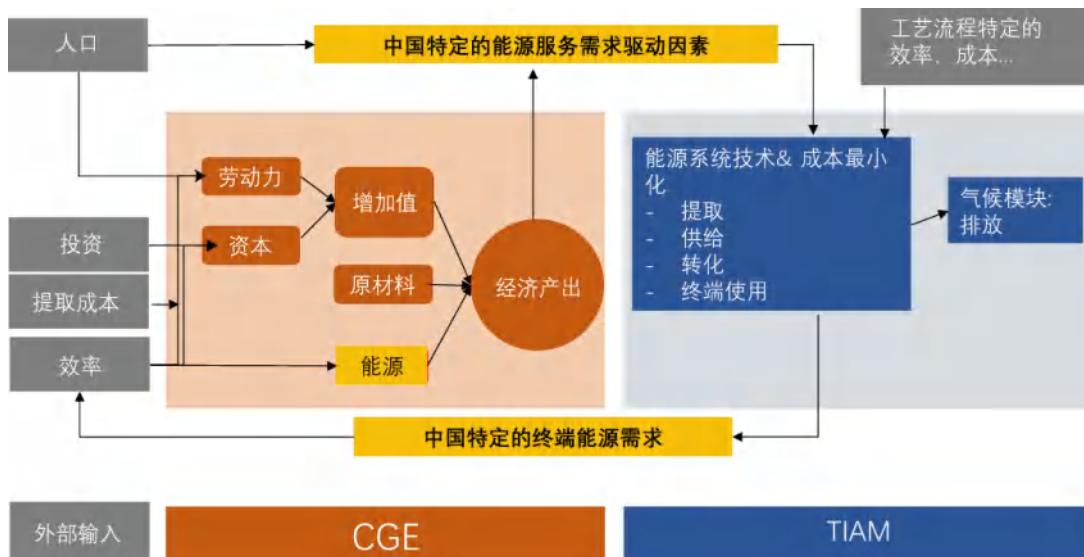


Figure 3.8: 两个全球模型之间的软连接框架—以中国地区为例

Chinese Region (3)	Chinese Provinces (30)	International Region (14)	
East	Beijing	AFR	Africa
	Tianjin	AUS	Australia-New Zealand
	Hebei	CAN	Canada
	Liaoning	CSA	Central and South America
	Shanghai	EEU	Eastern Europe
	Jiangsu	FSU	The Former Soviet Union
	Zhejiang	IND	India
	Fujian	JPN	Japan
	Shandong	SKO	South Korea
	Guangdong	ODA	Other Developing Asia
Central	Hainan	MEA	Middle East
	Shanxi	MEX	Mexico
	Jilin	USA	United States
	Heilongjiang	WEU	Western Europe
	Anhui		
	Jiangxi		
	Henan		
	Hubei		
	Hunan		
	Inner Mongolia		
West	Guangxi		
	Chongqing		
	Sichuan		
	Guizhou		
	Yunnan		
	Shaanxi		
	Gansu		
	Qinghai		
	Ningxia		
	Xinjiang		

Table 3.1: IMED | CGE 模型地区划分 (港澳台除外)

No.	Code	Note	No.	Code	Note
1	Cagri	Agriculture	16	CothManuf	Other manufacturing
2	Coal	Coal	17	Celec	Power generation
3	Coil	Crude oil	18	Cgas	Manufactured gas
4	Cmin	Other Mining	19	Cwater	Water production
5	CfdTbc	Food and Tabaco	20	Censt	Construction
6	Ctxt	Textile	21	Ctrsp	Transport
7	Cpaper	Paper	22	Csvc	Service
8	Cpet	Petrol oil	i	CoalP	Coal power
9	Cchem	Chemicals	ii	CoilP	Crude oil power
10	CnonMPrd	NonMetal product	iii	Cngs	Natural gas power
11	CmetSmlt	Metal smelting and processing	iv	Hydro	Hydro power
12	CmetPrd	Metal product	v	Nuclear	Nuclear power
13	Cmchn	Machinery	vi	Wind	Wind power
14	CtspEq	Transport equipment	vii	Solar	Solar power
15	CelcEq	Electronic equipment	viii	Biomass	Biomass power

Table 3.2: IMED | CGE 模型部门划分：22 部门。

No.	Sector	No.	Sector
1	Agriculture	14	Metal smelting and pressing
2	Mining and washing of coal	15	Metal products
3	Extraction of petroleum	16	Machinery
4	Extraction of natural gas	17	Transport equipment
5	Other Mining	18	Electronic equipment
6	Food and tobacco	19	Waste manufacturing
7	Textiles	20	Electricity production and supply
8	Textiles and clothing	21	Gas production and supply
9	Other manufacturing	22	Water production and supply
10	Paper and paper products	23	Construction
11	Petroleum and nuclear fuel processing	24	Transport and storage
12	Chemicals	25	Services
13	Non-metal products		

Table 3.3: IMED | CGE 模型部门划分：25 部门。

No.	Code	Note	No.	Code	Note
1	AGR	Farming, forestry, animal husbandry and fishery	18	TPQ	Manufacture of transportation equipment
2	COA	Mining and washing of coal	19	ELP	Manufacture of electrical machinery and equipment
3	COL	Extraction of petroleum	20	WST	Waste and scrap
4	GAS	Extraction of natural gas	21	ELE	Production and supply of electric power
5	MMN	Mining and dressing industry	22	GDT	Production and supply of gas
6	OMN	Mining and dressing of other ores	23	WTR	Production and supply of water
7	FOD	Manufacture of food	24	CNS	Construction
8	TEX	Textile industry	25	TSP	Transportation and storage industry
9	OMN	Other manufacturing	26	TRL	Road transport
10	PAP	Paper making and printing industry	27	TRD	Railway transport
11	PET	Petroleum processing and coking	28	TWT	Waterway transport
12	COK	Coking	29	TAR	Air transport
13	CHM	Chemical industry	30	TPL	Public transport
14	NMT	Nonmetal mineral products industry	31	TSV	Handling and transport agents
15	MET	Smelting and pressing of metals	32	MED	Hygiene
16	MPD	Metal products	33	SVC	Service industry
17	MCN	Manufacture of machinery			

Table 3.4: IMED | CGE 模型部门划分：33 部门。

No.	Sector	No.	Sector	No.	Sector
1	Crop cultivation	31	Raw chemical materials	61	Other electronic and communication equipment
2	Forestry	32	Chemical fertilizers	62	Measuring equipment
3	Livestock and livestock products	33	Chemical pesticides	63	Other manufacturing products
4	Fishery	35	Other chemical products	64	Scrap and waste recycling
5	Coal mining and processing	34	Chemical products for daily use	65	Electricity and heat supply
6	Crude petroleum	36	Medical and pharmaceutical products	66	Gas production and supply
6(2)	Natural gas	37	Chemical fibers	67	Water production and supply
7	Ferrous metal ore mining	38	Rubber products	68	Construction
8	Non-ferrous metal ore mining	39	Plastic products	80	Railway transport
9	Other mining	40	Building materials (Cement)	69	Highway transport
10	Grain mill, oil and feeding stuff	41	Glass and glass products	70	Water transport
11	Sugar refining	42	Ceramic products	71	Air transport and other transport
12	Slaughtering and meat processing	43	Fireproof products	72	Pipeline transport
13	Prepared fish and seafood	44	Other non-metallic mineral products	73	Warehousing
14	Other food processing and production	45	Ferrous metal smelting and processing	74	Post and Telecommunication
15	Wines, spirits and liquors	46	Non-ferrous metal smelting	75	Eating and drinking places
16	Non-alcoholic beverage	47	Metal products	76	Finance
17	Tobacco products	48	Boiler, engines and turbine	77	Insurance
18	Cotton textiles	49	Metalworking machinery and other general machinery	78	Real estate
19	Woolen textiles	51	Other special equipment	79	Wholesale and retail trade, and business services
20	Hemp textiles	50	Agriculture machinery	81	Scientific research and experiment
21	Knitted mills	53	Motor vehicles	82	Science and technology services
22	Wearing apparel	52	Railroad transport equipment	83	Water conservancy, public infrastructure management
23	Leather, furs, down etc	54	Ship building	84	Other social services
24	Sawmills, fiberboard, and products of wood, bamboo, etc.	55	Other transport machinery	85	Education services
25	Furniture	56	Generators	86	Health services
26	Paper and paper products	58	Other electric machinery	87	Social security and social welfare
27	Printing and record medium reproduction	57	Household appliances	88	Culture, arts, radio, television etc
28	Cultural products, toys, sporting and athletic and recreational products	59	Electronic computer	89	Sports
29	Petroleum refining and nuclear fuel	60	Electronic appliances and elements	90	Public administration
30	Coking			91	Other services

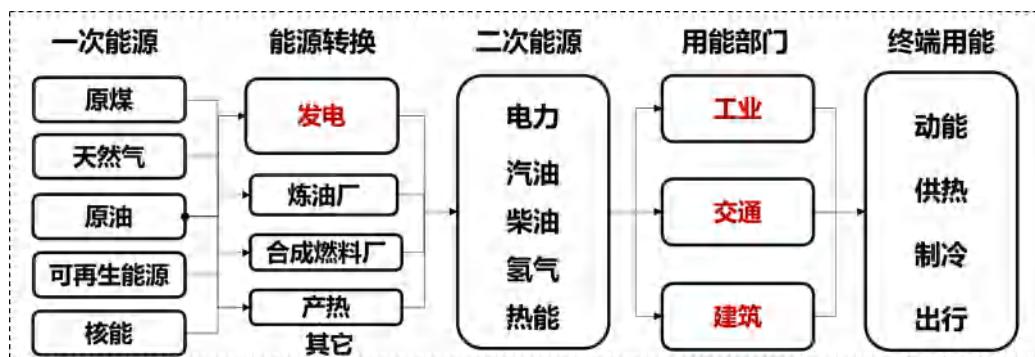
Table 3.5: IMED | CGE 模型部门划分: 91 部门。

4. IMED | TEC 模型

4.1 IMED | TEC 模型概述

TEC 意指 Technology Optimization，与IMED|HIO 模型相比，IMED|TEC 模型将考虑各部门不同技术的成本，详细刻画技术的投入和产出过程，并得出以成本最小化为目标前提下的最优技术组合与相应的能源需求和污染物排放。

IMED | TEC 模型属于能源系统模型（图4.1），是拥有能源-经济-环境系统的具体的技术选择框架的自下而上模型，其核心思想是在节能减排目标约束下通过成本最小化实现技术优化。该模型通过模拟各部门从原料到最终产品过程中的能源流动、物质流动和技术选择，计算产品生产过程中的能源消耗量、碳排放量和污染物排放量，因此可以用来量化多区域、长时间、全行业的节能减排潜力和评估实施节能减排政策的成本和效益。相比 CGE 等自上而下模型，IMED | TEC 的“自下而上”建模思想能够对于提供服务需求的各类技术进行更加详细的刻画，更加贴近实际生产情况，并且更有利于节能减排政策目标的分解。



Nature Communications, 2023; ERL, 2023; Applied Energy, 2021; 2023等

Figure 4.1: 能源系统：减污降碳微观能源技术路径选择

IMED | TEC 模型借鉴了国际知名的能源系统分析模型的建模技术，如 AIM/Enduse 模型、TIAM 模型和 MESSAGE 模型。这些模型具有详细的技术选择框架，模拟经济系统

中从一次能源和物质供给、转化、二次能源和物质供给到最终服务需求的各个环节的能源和物质流，用详细的技术表示能源和物质流在经济系统中的流动过程，在能源价格等因素的动态波动下，再现技术替代过程。这类模型是分析温室气体减排、空气污染物控制和能源相关政策各自和联合效果的强有力的工具。然而，通常而言，这类模型还存在进一步的提升和拓展空间。（1）该模型的能源服务需求是通过情景设定确定的，没有与自上而下的经济模型链接，从而无法估计经济损失；（2）在技术选择过程中没有考虑社会成本，比如体制障碍、交通部门充电成本，因而可能会高估碳减排量；（3）没有包含最新的节能低碳技术，可能会低估碳减排潜力。

在保留相关模型以线性优化和核心技术选择机制的基础上，经过 LEEEP 团队历届硕博士、博士后们的不懈努力，IMED | TEC 模型对底层作了进一步改进和创新，拓展和优化其功能、机制和可操作性。这些改进和创新突破常规模型的禁锢，与其他模型（诸如 CGE 模型、大气模型和健康模型等）的深度耦合奠定基础，也使得模型能够更加方便的引入新的技术竞争机制。其主要改进包括：

1. 重构了模型底层代码，增加模型的通用性和灵活性，大大增加了可读性；
2. 加入了成本新机制，如新能源车的充电成本，还将开发跨期成本最小化的动态机制；
3. 优化了模型数据输入结构，使数据表的结构和操作更符合逻辑和思维习惯；
4. 重构了模型运行方法，使用 Batch 批处理程序和 Gams 程序交互调用，使模型能够灵活控制各情景及情景组合的运行及结果分析；
5. 构建了模型结果分析模块和可视化模块，实现模型运行结果批量作图和报告的全自动化流程，弃用基于 EXCEL 进行分析作图框架，提升研究效率。

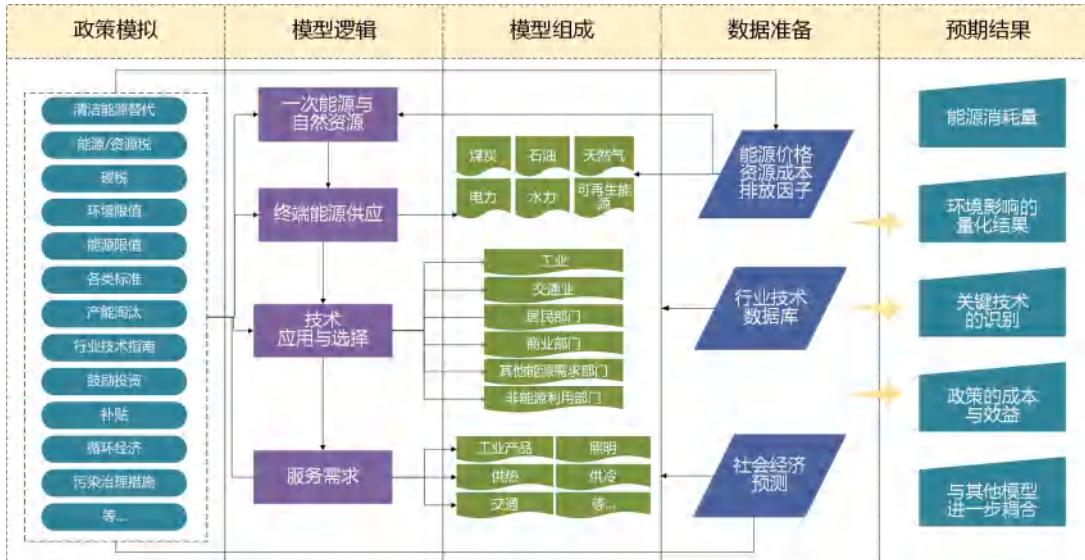


Figure 4.2: IMED | TEC 模型框架

与传统的能源系统优化模型类似，IMED | TEC 模型对能源系统的模拟是实际生产流程的逆推：

1. 由其他模型或情景计算得到部门的服务需求量；
2. 优化选择生产技术，满足未来部门服务需求；
3. 计算生产技术优化选择之后所需成本、能源消费量和各类污染物排放量。

因此，IMED | TEC 主要特征如下：

1. 拥有最优化详细技术选择框架的自下而上 (Bottom-up) 模型；

2. 递归动态模型，正在开发跨期成本最小化动态模型；
3. 能够评估技术随时间变化趋势；
4. 能够模拟各种政策，诸如清洁能源替代、能源/资源税、碳税、环境限值、能源限值、各类标准、产能淘汰、行业技术指南、鼓励投资、补贴、循环经济、污染治理措施等，并评估各项政策带来的经济环境效应；
5. 能够计算多种气体的排放量： CO_2 、 CH_4 、 N_2O 、HFCs、PFCs、 SF_6 、 SO_2 、 NO_x 、CFCs 等；
6. 能够评估单部门或多部门节能减排效果。

未来，IMED | TEC 模型还将持续不断地从数据、模型机理及建模方式上进行底层创新，并与 IMED 其他模型和其他资源环境模型进行集成，分析多学科交叉问题。

4.2 IMED | TEC 模型应用案例

IMED | TEC 模型近年来被系统地应用于综合评价我国国家层面重点耗能行业低碳转型政策分析。主要的案例研究包括以下几个方面：

- 农村能源转型 [42]¹；
- 中国水泥行业脱碳路径 [43]²；
- 我国钢铁行业低碳转型评估 [44]³；
- 中国交通部门实现碳中和路径 [42]⁴；
- 印度交通部门实现碳中和路径：国家层面分析 [45]⁵；
- 印度交通部门实现碳中和路径：州级层面分析 [46]⁶；
- 全球交通行业低碳转型的协同效益评估 [47]⁷。

4.3 IMED | TEC 模型技术性介绍

4.3.1 模型技术系统和能源服务

IMED | TEC 模型关键是计算能源技术服务流动。所谓的能源技术是指通过消费能源提供有用的能源服务的设备，而能源服务则是指必须通过设备的输出来满足的部门可测量需求。能源服务可以是有形的，也可以是无形的。诸如在家庭部门中，空调由于消费电力来提供制冷服务，因此空调是能源技术，而冷却的空间则是能源服务，其是无形的。但是

¹Teng Ma and Silu Zhang and Yilong Xiao et al (2023). "Costs and health benefits of the rural energy transition to carbon neutrality in China." *Nature communications*

²Ming Ren, Teng Ma, Chen Fang et al (2023). "Negative emission technology is key to decarbonizing China's cement industry." *Applied Energy* 329: 120254 ([文章链接](#))

³Ming Ren and Pantao Lu et al (2021). "Decarbonizing China's Iron and Steel Industry from the Supply and Demand Sides for Carbon Neutrality." *Applied Energy* 298: 117209 ([文章链接](#))

⁴Yan Ru Fang, Wei Peng, Johannes Urpelainen et al (2023). "Neutralizing China's transportation sector requires combined decarbonization efforts from power and hydrogen supply." *Applied Energy* 57(3): 517-528 ([文章链接](#))

⁵M.S. Hossain, Yan Ru Fang*, Teng Ma et al (2021). "Narrowing fossil fuel consumption in the Indian road transport sector towards reaching carbon neutrality." *Energy Policy* 172: 113330 ([文章链接](#))

⁶M.S. Hossain, Yan Ru Fang et al (2021). "The role of electric vehicles in decarbonizing India's road passenger toward carbon neutrality and clean air: A state-level analysis ." *Energy* 273: 127218 ([文章链接](#))

⁷Xin Tong and Hancheng Dai et al (2022). "Saving global platinum demand while achieving carbon neutrality in the passenger transport sector: linking material flow analysis with integrated assessment model." *Resources, Conservation and Recycling* 179: 106110 ([文章链接](#))

在钢铁部门中，不同的熔炉则是钢铁部门的能源技术，因为通过消耗煤炭来炼制粗钢，而粗钢则是能源服务，是一个有形的概念。

4.3.2 模型技术选择

IMED | TEC 模型的数学函数是多约束单目标线性优化方程组，是一个递归动态优化模型。模型对技术选择主要取决于技术的固定成本和可变成本。新旧技术选择和替代可以分为以下三种情况：

1. 在原有技术寿命到期退出市场或者为了满足增长的服务需求时选择新技术；
2. 改进寿命未到期的原技术的能源效率；
3. 现有技术提前退役，使用新技术替代寿命未到期的现有技术。

IMED | TEC 模型的技术选择可以反映现实行业技术选择的过程。

5. IMED | HEL 模型

5.1 IMED | HEL 概述

伴随着中国经济高速增长，工业化和城市化进程迅速推进，中国已超过美国成为第一大碳排放国家，同时环境问题日益突出，空气质量呈现恶化趋势。国内外大量流行病学研究证实，颗粒物是对人体危害最大的大气污染物，长期暴露在颗粒物中，会对人体呼吸系统和心血管系统造成损害。其中细颗粒物（PM_{2.5}）直径更小，表面可以吸附重金属和微生物，并且可以突破屏障进入细胞和血液循环，对人体的危害更大。调查显示，2010年，中国人群前三大死因分别为中风、缺血性心脏病、慢性阻塞性肺病，而大气颗粒物污染已经成为第四大致病因素 [48]。如何定量评估空气污染造成的人群健康影响并将其货币化，以便决策者在制定相关政策过程中能更好地权衡利弊，采取最具经济效益的政策，实现治理污染、改善人群健康与经济发展的协同，是摆在研究者眼前的重大问题和挑战。IMED | HEL 模型（图5.1）便是在这样的背景下应运而生。

近年来，IMED | HEL 健康模型被广泛用于评估亚洲、中国省级、京津冀和长三角地区碳减排和空气污染治理政策的健康协同效益 [6, 42, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55]^{1 2}

¹Teng Ma and Silu Zhang and Yilong Xiao et al (2023). "Costs and health benefits of the rural energy transition to carbon neutrality in China." *Nature communications*

²Y. Xie, H. Dai* et al. (2018). "Co-benefits of climate mitigation on air quality and human health in Asian countries." *Environment International* 119: 309 - 318. ([文章链接](#))

3 4 5 6 7。此外，也有文献评估了臭氧污染及控制对人群健康和经济的影响 [7, 56] 8 9 10

¹¹. 基于 IMED | HEL 模型发表的期刊文章简要综述可在此处下载：[中文或英文幻灯片](#)。

IMED | HEL 模型贡献作者：谢杨、戴瀚程、张翔、吴雅珍。模型最新的介绍参见¹²。其中室外污染健康影响部分基于谢杨博士的博士论文工作[6, 57]。

5.2 IMED | HEL 模型：室外空气污染健康影响

5.2.1 健康终端

暴露-效应系数来源于流行病学揭露长期暴露对人体健康的队列研究。美国哈佛六城市研究和美国癌症协会队列研究是被广泛认可的大气污染暴露与人群健康关系的队列研究。最新研究表明，PM_{2.5} 浓度与致死率之间呈现非线性关系[58, 59, 60]。此外，本文还采用了我国关于 PM₁₀ 和 TSP 污染的长期健康影响研究的结果[61]，并且对三种不同的暴露-效应关系引起的结果做了对比。本研究采用[62]中使用的暴露-效应系数（表格 5.4 和 5.3）[6]评估 PM_{2.5} 污染引起的各相关疾病发病情况。

5.2.2 健康风险评估

健康终端指暴露在高浓度 PM_{2.5} 浓度下会引起一系列的健康问题，包括致病、致死以及劳动时间损失。PM_{2.5} 污染与健康效应的相对风险（relative risk, RR）显示了暴露程度与健康效应之间的关系（方程5.1）。早期研究显示 PM_{2.5} 污染与慢性暴露致死之间为线性关系[63, 64]，即污染浓度每升高一定数量时相对风险增加同样的百分比。而最近研究显示 PM_{2.5} 的健康影响暴露效应关系为非线性关系[59, 60, 65]。IMED | HEL 模型考虑了包括最新非线性关系 (GEMM) 等在内的不同暴露-效应函数，当 PM_{2.5} 浓度超过引起健康影响的浓度阈值（相对风险 RR>1）时，通过方程5.2可以计算得出因 PM_{2.5} 污染引起的过早死亡人数和全年龄段致病人数。而 15-65 岁之间的疾病和过早死亡都会减少劳动力供

³Y. Xie, H. Dai* et al. (2016). "Economic impacts from PM_{2.5} pollution-related health effects in China: A provincial-level analysis." *Environmental Science & Technology* 50 (9): 4836 - 4843. ([文章链接](#))

⁴谢杨，戴瀚程等 (2016). "PM_{2.5} 污染对京津冀地区人群健康影响和经济影响." *中国人口资源与环境* 26(11): 20-28. ([文章链接](#))

⁵X. Zhang, Y. Jin, H. Dai et al. (2019). "Health-related economic impacts of "coal to electricity" policy in residential sector in Beijing-Tianjin-Hebei region." *Energy Policy* (127): 165-178. ([文章链接](#))

⁶R. Wu, H. Dai*, Y. Geng*, Y. Xie, et al. (2017). "Economic Impacts from PM_{2.5} Pollution-Related Health Effect: A Case Study in Shanghai." *Environmental Science Technology*. 51(9):5035-5042. ([文章链接](#))

⁷X. Tian, H. Dai, et.al.. (2018). "Economic Impacts from PM_{2.5} pollution-related health effects in China's road transport sector: a provincial-Level analysis." *Environment International* (115): 220 - 229. ([文章链接](#))

⁸Y. Xie, H. Dai* et al. (2017). "Economic impacts from ozone pollution-related health effects in China: A provincial-level analysis." *Atmospheric Chemistry and Physics*, Discussion paper. ([文章链接](#))

⁹Y. Xie, H. Dai* et al. (2019). "Comparison of health and economic impacts of PM_{2.5} and ozone pollution in China." *Environment International* ([文章链接](#))

¹⁰X. Tian, H. Dai, et.al.. (2019). "Toward the 2-degree target: evaluating co-benefits of road transportation in China." *Journal of Transport & Health* (15): 100674 ([文章链接](#))

¹¹S. Kim, Y. Xie, H. Dai, et.al.. (2020). "Co-benefits of air quality and health from mitigating climate change in South Korea." *Environment International*. 136:105507. ([文章链接](#))

¹²<http://scholar.pku.edu.cn/hanchengdai/imedhel>



Figure 5.1: IMED | HEL 模型体系

给。根据分年龄段死亡率可以得到过早死亡劳动者人数，结合由致病影响导致的劳动时间损失，可估算出因空气污染导致的总的工作损失时间（见方程5.8）。

$$RR_{p,lat,lon,s,y,m,e,g}(C) = \begin{cases} 1, & \text{当 } C_{p,lat,lon,s,y} \leq C0_p \\ 1 + CRF_{m,e,g} \times (C_{p,lat,lon,s,y} - C0_p), & \text{致病影响线性方程, 当 } C_{p,lat,lon,s,y} > C0_p \\ e^{\beta \times (C_{p,lat,lon,s,y} - C0_p)}, & \text{致死影响线性方程, 当 } C_{p,lat,lon,s,y} > C0_p \\ 1 + \alpha \times e^{(-\gamma \times (C_{p,lat,lon,s,y} - C0_p)^\delta)}, & \text{致死影响 IER 方程, 当 } C_{p,lat,lon,s,y} > C0_p \\ e^{(\theta \log(\frac{C_{p,lat,lon,s,y} - C0_p}{\alpha} + 1)) / (1 + e^{-\frac{C_{p,lat,lon,s,y} - C0_p - \mu}{v}})}, & \text{致死影响 GEMM 方程, 当 } C_{p,lat,lon,s,y} > C0_p \end{cases} \quad (5.1)$$

有关空气污染的致死影响，不同剂量-效应方程所使用的阈值浓度 ($C0_p$) 有一定的差异，近年来也不断有新的流行病学领域文献提出对“空气污染的阈值浓度”的新见解。IMED | HEL 模型中使用的阈值浓度数据也基于最新研究逐步更新，并且对于不同剂量-效

应方程，也根据相应的文献资料采用了不同的阈值浓度。

$$EP_{p,lat,lon,s,y,m,e,g}(C) = \begin{cases} P_{lat,lon,y,m} \times (RR_{p,lat,lon,s,y,m,e,g}(C) - 1), & \text{线性致病方程} \\ P_{lat,lon,y,m} \times \frac{RR_{p,lat,lon,s,y,m,e,g}(C) - 1}{RR_{p,lat,lon,s,y,m,e,g}(C)} \times I_{lat,lon,e}, & \text{线性或非线性致死方程} \end{cases} \quad (5.2)$$

其中：

- RR(C): 浓度为 C 的时候的相对风险 [例/人/年或者天/人/年];
- EP: 健康终端 [例/人/年或者天/人/年];
- C: 污染物浓度;
- CO: 产生健康影响的浓度阈值 (PM_{2.5} 年均浓度 10 μg/m³, 臭氧为 8 小时最大年均浓度 70 μg/m³);
- P: 人口, 劳动损失人口年龄 15-65, 缺血性疾病年龄 25 岁-65 岁, 和脑血管疾病年龄 25 岁-65 岁, 其他健康终端适用于全人群;
- $I_{lat,lon,e}$: 疾病 e 的年均基准死亡率;
- β : 慢性死亡率线性方程参数;
- α, γ, δ : 慢性死亡率非线性方程参数;
- 下标 p, lat, lon, r, s, y, m, e, g 分别代表污染物 (PM_{2.5} 或 O₃)、纬度、经度、地区、情景、年份、健康终端分类 (治病率或死亡率)、健康终端、取值范围 (中, 低和高).

5.3 IMEDIHEL 模型：室内空气污染健康影响

居民源燃烧固体燃料进行炊事和取暖不仅是室外空气污染的重要贡献源，也是发展中国家重要的室内空气污染的来源。在中国华北地区农村家庭开展的基于实测的调研表明家庭户燃煤导致的室内 PM_{2.5} 日均浓度达到 280 μg/m³，打开煤炉填料时的瞬时浓度可达 8000 μg/m³。然而室内 PM_{2.5} 浓度受到煤炭质量、炉灶性能、通风条件和其他因素的影响，因此在家庭户之间有很大的差异，导致基于实地测量的室内浓度可能并不具有代表性。因此，目前利用浓度-反应函数来计算室内空气污染的健康影响存在一定困难，我们应用如公式5.3至5.5所示的“二元暴露分类”(Binary classification scheme for exposure)的方法[66, 67, 68]进行分析。虽然应用“二元”分类的方法并没有直接利用室内 PM_{2.5} 浓度，但是这种方法在原理上与我们用于分析室外 PM_{2.5} 污染健康影响的模型是非常类似的。

IMEDIHEL 健康模型参照文献[50, 51]¹³。

$$PE_{i,g} = PS_i \times VC_g \quad (5.3)$$

$$AF_{i,j,g} = \frac{PE_{i,g} \times RR_{j,g} + (1 - PE_{i,g} \times 1) - 1}{PE_{i,g} \times RR_{j,g} + (1 - PE_{i,g} \times 1)} \quad (5.4)$$

$$AB_{i,j,g} = AF_{i,j,g} \times CDL_{i,j,g} \quad (5.5)$$

¹³Xiang Zhang, Yana Jin, Hancheng Dai, Yang Xie and Shiqiu Zhang (2019). "Health-related economic impacts of "coal to electricity" policy in residential sector in Beijing-Tianjin-Hebei region." Energy Policy (127): 165-178 ([文章链接](#)).

其中：

- i, j, g：分别代表地区，健康终端和暴露人群（性别，年龄）；
- PE：代表暴露人口的比例（%）；
- PS：代表使用固体燃料的人口比例（%）；
- VC：代表通风系数；
- AF：表示的是贡献率；
- RR：是相对风险；
- AB：贡献的负担（因燃料固体燃料室内空气污染的健康影响）；
- CDL：表示当前疾病水平。

模型中的贡献率 (AF) 用于识别在当前所有相关健康终端的患病或致死案例中由固体燃料使用导致的部分。燃烧固体燃料的家庭户暴露在室内空气污染中，在相关的健康终端中会比没有暴露的人群面临更高的风险（相对风险 $RR > 1$ ）。成人和儿童在相同的室内污染中受到的暴露是不同的，根据文献[68]将中国成年人的通风系数设定为 0.5，儿童设定为 0.25。

目前有稳健流行病学证据支持的与固体燃料燃烧室内空气污染相关的健康终点只有五岁以下儿童的急性下呼吸道感染 (ALRI)，30 岁以上男性女性的慢性阻塞性肺炎 (COPD) 和肺癌 (LC)。也有研究表明除了急性下呼吸道感染有即时健康效应，即停止暴露后健康效应改善即时显现；其他健康终点，从停止暴露到消除健康影响之间存在着时滞，目前具体的时滞尚未确定，根据戒烟和健康影响之间的流行病学证据[69]，可以取时滞为 20 年。固体燃料燃烧室内空气污染相关的健康终点和相对风险取值如表5.3所示。

End-points	Exposed group	Medium	C.I. (95%)		Current disease level	
			Low	High	Morbidity	Mortality
ALRI	children<5 years old	2.3	1.9	2.7	1.21%	0.04%
COPD	women≥30	3.2	2.3	4.8	0.31%	0.10%
Lung cancer	women≥30	1.9	1.1	3.5	0.05%	0.05%
COPD	men≥30	1.8	1	3.2	0.81%	0.13%
Lung cancer	men≥30	1.5	1	2.5	0.08%	0.08%

Table 5.1: 室内空气污染相关的健康终点和相对风险

5.4 IMED I HEL 模型：货币化

5.4.1 健康支出

$PM_{2.5}$ 污染除了引起过早死亡，还会增加一些疾病的发病率（表格5.3），增加额外健康支出。根据对 2003 年-2012 年中国卫生统计年鉴[70]中 30 省门诊病例平均支出、住院病例平均支出与人均 GDP 的关系回归分析得到 30 省医疗价格的回归参数 β 和 θ 。同时中国卫生统计年鉴还提供了全国 30 种病例平均支出。考虑到不同病种的支出差别比较大，再根据全国分病种的数据，回归分析得出各省市各种心血管疾病住院、脑血管疾病住院以及呼吸系统疾病住院的平均价格（方程5.7），再乘以发病例数（方程5.2）可以算出 $PM_{2.5}$

污染引起的额外健康支出 (方程5.6)。

$$HE_{p,lat,lon,s,y,g} = PR_{lat,lon,s,y,e,g} \times EP_{p,lat,lon,s,y,m,e,g} \quad (5.6)$$

$$PR_{lat,lon,s,y,e} = \beta \times GDPPC_{lat,lon,s,y} + \theta_{lat,lon,e} \quad (5.7)$$

其中：

- HE: 总的额外健康支出 [十亿元/年];
- PR: 医疗价格 [元/例];
- GDPPC: CGE 模型中人均 GDP;
- β, θ : 回归分析得到的医疗价格参数.

5.4.2 人均每年工作时间损失

劳动时间损失包含两部分，一部分因为疾病引起的误工时间，另一部分来自因为暴露于高浓度 PM_{2.5} 中而导致劳动力过早死亡 (见方程5.8)。劳动损失天数与工作总天数的比则为劳动损失率 (方程5.9)，而劳动损失后的劳动力供给为方程5.10。在 CGE 模型中，劳动力为完全就业状态，每年人均劳动日为 260 天，每天工作时间 8 小时。因为疾病和过早死亡而引起的劳动力供给减少会对经济产生负面影响。

$$WLD_{p,lat,lon,s,y,g} = \sum_m (EP_{p,lat,lon,s,y,m,"wld",g}) + \sum_{e,y' < y} (EP_{p,lat,lon,s,y',"mt",e,g}) \times SHR_{lat,lon,"15-65"} \times DPY \quad (5.8)$$

$$WLR_{p,lat,lon,s,y,g} = \frac{WLD_{p,lat,lon,s,y,g}}{DPY \times P_{lat,lon,y,"15-65"} \quad (5.9)}$$

$$LAB_{p,lat,lon,s,y,g} = LAB0_{lat,lon,"ref",y} \quad (5.10)$$

其中：

- WLD: 年均劳动损失日 [天/年];
- WLR: 年均劳动损失率;
- "wld": 劳动损失天;
- "mt": 慢性死亡;
- $SHR_{lat,lon,"15-65"}$: 空气污染早死中 15 至 65 岁人群比例;
- LAB: 劳动损失后的劳动力供给;
- LAB0: 参考情景下的劳动力供给;
- DPY: 每年人均劳动日 (5 天/周 * 52 周/年 = 260 天/年).

5.4.3 支付意愿

如公式5.11所示，本研究参照文献[71]用支付意愿法 (WTP)量化各健康终端的货币化价值。表5.4.3展示了为避免过早死亡和疾病居民的支付意愿。生命统计价值 (VSL)与居民的收入水平呈正相关，因此，各省在当前和未来年份的生命统计价值根据 CGE 模型提供的人均 GDP 相对 2010 年全国平均人均 GDP 计算而得（公式5.11），其中，VSL 对人均 GDP 的弹性系数取 0.5 [72]。

$$VoE_{p,lat,lon,s,y,e} = WTP_{lat,lon,y,e} \times EP_{p,lat,lon,s,y,m,e,y} \times \left(\frac{GDP_{lat,lon,y}}{GDP_{China}, "2010"} \right)^{0.5} \quad (5.11)$$

其中：

- $VoE_{p,lat,lon,s,y,e}$: 健康终端价值;
- $WTP_{lat,lon,y,e}$: 为避免过早死亡和患病的支付意愿.

Health endpoint	Unit	Value
<i>Value of statistical life (VSL)</i>	USD/life	8.15-31.1 million
<i>Hospital admission</i>	USD/admission	2000
<i>Emergency room visits for respiratory illness</i>	USD/visit	670
<i>General practitioner visits asthma</i>	USD/consultation	53
<i>General practitioner visits lower respiratory sympto</i>	USD/consultation	75
<i>Restricted activity day</i>	USD/day	130
<i>Cough day</i>	USD/day	38
<i>Symptom day</i>	USD/day	38
<i>Work loss day</i>	USD/day	82
<i>Minor restricted activity day</i>	USD/day	38
<i>Chronic bronchitis</i>	USD/day	190000
<i>Mortality from acute exposure</i>	USD/case	662
<i>New case asthma</i>	USD/case	60000

Table 5.2: 生命统计价值.

Category	Population	Endpoint	Medium	C.I. (95%) Low	C.I. (95%) High
Morbidity	Adult	Work loss day	0.0207	0.0176	0.0238
	All ages	Respiratory hospital admissions	1.17E-05	6.38E-06	1.72E-05
	Adult	Cerebrovascular hospital admission	8.4E-06	6.47E-07	1.16E-05
	Adult	Cardiovascular hospital admissions	7.23E-06	3.62E-06	1.09E-05
	Age 27+	Chronic bronchitis	4.42E-05	-1.8E-06	9.02E-05
	All ages	Asthma attacks	0.000122	4.33E-05	0.001208
	All ages	Respiratory symptoms days	0.217	0.025	0.405
	Age 30+	All cause (international)	0.004	0.0003	0.008
	Age 30+	All cause (China specific)	0.0009	-0.0003	0.0018
	Adult	RR_COPD			
Mortality	Adult	RR_LNC			
	Adult	RR_IHD_25y_65y		Non-linear function	
	Adult	RR_STR_25y_65y			
	Children under 5	RR_LRI			

Table 5.3: PM_{2.5} 暴露响应方程.

Endpoint	Population	Impact category	ER function	C.I.95% low	C.I.95% high
Morbidity	Entire age groups	Respiratory hospital admissions<65	3.54E-06	6.12E-07	6.47E-06
	Adults	Respiratory hospital admissions 65+	1.25E-05	-5.00E-06	3.00E-05
	Adults	Bronchodilator usage	1.04E-02	-3.64E-03	2.24E-02
	Adults	Lower respiratory symptoms	2.29E-03	-6.14E-03	1.16E-02
	Adults	Asthma	4.29E-03	3.30E-04	8.25E-03
	Adults	Minor restricted activity day	1.15E-02	4.40E-03	1.86E-02
	Adults	Consultation for allergic rhinitis	1.60E-04	1.22E-04	2.03E-04
	Children	Consultation for allergic rhinitis	3.03E-04	1.89E-04	4.29E-04
	Children	Cough	9.30E-02	-1.90E-02	2.22E-01
	Children	Lower respiratory symptoms(wheeze)	1.60E-02	-4.30E-02	8.10E-02
Mortality	Children	Consultation for allergic rhinitis	3.03E-04	1.89E-04	4.29E-04
	Adults	Consultation for allergic rhinitis	1.60E-04	1.22E-04	2.03E-04
	Children	Acute respiratory symptoms days	9.30E-02	-1.90E-02	2.22E-01
	Adults	Acute respiratory symptoms days	1.60E-02	-4.30E-02	8.10E-02
Mortality	Adult 30+	Mortality from chronic exposure	2.00E-03	6.50E-04	3.35E-03
Work loss	Adults	Work loss day	4.13E-03	1.65E-03	6.63E-03
VSL	Entire age groups	Value of statistical life (million USD)	2.50E-01		

Table 5.4: 臭氧暴露响应方程

6. IMED 云端平台

6.1 IMED 模型云端平台

IMED 模型云端平台已于 2022 年发布，包括 IMED | CGE 和 IMED | TEC 模型，平台将向学术界免费开放，可供国内外同行远程免费使用，可用于支撑各省市双碳路径评估及成本效益分析，推动本领域学术研究和决策支撑。与此同时，LEEEEP 组每年将开展 IMED 模型平台暑期培训，向国内外师生介绍本领域研究前沿，传授模型操作经验，模拟低碳政策的能源、环境、经济影响，整合多方力量开展学术研究，开展政策评估支撑双碳决策。



Figure 6.1: IMED 模型云端平台

6.2 IMED 模型暑期培训会

- 相关报道：2023 年碳中和综合评估模型暑期研讨会活动通知

- 相关报道：北京大学第一届碳中和综合评估模型研讨会顺利开幕
- 相关报道：2023 年度首届碳中和综合评估模型研讨会圆满落幕

6.2.1 培训会概况

2023 年 8 月 7 日，第一届“碳中和综合评估模型研讨会”在北京大学召开。研讨会由北京大学碳中和研究院主办，北京大学环境科学与工程学院、北京大学城市与环境学院协办，能源基金会等机构支持，旨在为学员提供成体系的“能源-环境-经济”领域综合评估模型培训，促进不同背景跨学科交流，激发对低碳政策的创新思考，为我国双碳事业培养宏观视野开阔、基础理论过硬、模型运用有感的综合性人才。来自国内外 30 余所知名高校的近 50 位本硕博学生和青年学者受邀来到燕园，进行为期 5 天的培训交流。

在燕园的 5 天学习生活中，学员们学习了前沿讲座、理论基础、建模技术等内容。本次活动邀请了国内外知名的专家学者作主旨报告。美国国家西北太平洋实验室偶阳博士、国务院发展研究中心李善同研究员、清华大学能源环境经济研究所滕飞教授、中国宏观经济研究院能源研究所姜克隽研究员等多位专家学者为学员带来前沿讲座，分享了专业的模型理论知识和丰富的模型应用解析。

除高水平 IAM 模型学者的前沿学术报告以外，研讨会另一重要学习模块是模型培训。全体学员按学习意愿分为一般均衡（CGE）和技术优化（TEC）两个平行小组。北京大学能源环境经济与政策研究室（LEEEP）讲师团队给两组学员分别介绍了自上而下 CGE 模型和自下而上 TEC 模型的数理基础、建模技术、政策冲击传导机制等基础理论。讲师们为全体学员讲解了主要建模软件 GAMS 的基本语法及操作，同时，指导学员们熟悉 IMED 线上模型平台，为下一步运用成熟模型开展政策分析做好准备。

在熟悉了 CGE 和 TEC 模型理论知识和线上模型操作之后，学员们利用北京大学自主开发的 IMED 线上模型分组对自己感兴趣的重点行业和地区减污降碳的减排潜力、经济影响及协同效益等内容开展了分组合作研究，并作了汇报展示。在 8 个小组精彩的结营展示报告之后，研讨会圆满落幕。具体信息请见本报告附录介绍。

6.2.2 培训会安排

- **时间：**2023 年 8 月 7 日-11 日
- **地点：**北京大学环境科学与工程学院
- **参与方式：**全程线下参加
- **课程设置：**
 1. 自上而下可计算一般均衡模型原理、算法与建模；
 2. 自下而上能源系统优化模型的原理、算法与建模；
 3. 社会—自然跨系统多模型耦合原理与案例；
 4. GAMS 程序语言建模；
 5. 模型练习、案例应用与展示。

北京大学2023年度第一届碳中和综合评估模型研讨&培训会

- ✓ 北大碳中和院主办、环院及城
环协办
- ✓ 8月7~11日为期一周培训会
- ✓ 培训CGE和技术优化等模型
- ✓ 30余所院校近50位本硕博师
生，万余人关注



Figure 6.2: 2023 年 IMED 模型暑期培训会

7. LEEEP 研究综述

7.1 写在前面：IMED 模型及相关研究简介

合作应对气候变化、着力解决环境污染，已经成为各国的普遍共识，兼具强烈的政治和公众意愿。中国和世界经济都处于转变增长方式的关键时期，全球能源生产和消费正经历深刻革命，地区与国家高质量发展目标不断明晰，世界范围内低碳技术与气候融资方兴未艾，环境污染治理成效与挑战兼具。着眼未来，我们需要统筹好“发展”与“减排”的要求，加强能源、环境、经济的协同治理并实现多方共赢。

探索未来发展路径具有高度的不确定性，协同实现环境与发展的多重目标也错综复杂。在面向未来进行科学决策的过程中，系统分析模型可作为有力的支撑工具。模型模拟研究可以通过对社会-经济-环境复杂系统进行抽象化，运用机理公式、核算方法或优化函数，刻画自然环境系统与能源经济系统、社会系统之间的联动和相互作用，基于情景模拟和定量分析辅助决策者提出适当的科学解决方案和政策建议。

由北京大学环境科学与工程学院能源环境经济与政策研究室（LEEEP）、流域科学实验室（PKUWSL）、环境经济学与政策研究小组（EEPS）、痕量有机污染物控制-全球环境问题对策研究组，以及环境模拟与污染控制国家重点联合实验室等多个团队联合自主开发的**IMED**模型（Integrated Model of Energy, Environment and Economy for Sustainable Development，能源-环境-经济可持续发展综合评估模型），是一套适用于中国、区域和全球绿色低碳转型研究的模型体系。这一体系聚焦于模拟社会经济和能源环境系统，主要包括宏观经济模型（**IMED** | CGE）、能源技术优化模型（**IMED** | TEC）和人群健康模型（**IMED** | HEL）等分析模块。

目前，通过与其他地球环境系统模型的集成耦合，这一模型体系已被运用于中国中长期低碳发展路径与政策、气候变化与空气污染及其减缓政策的健康影响、气候-能源-经济-农业-水耦合分析等主题的分析。本章节旨在介绍运用 **IMED** 模型针对经济系统绿色低

碳转型中关键问题的分析成果，以期抛砖引玉，并鼓励更多的交叉学科研究。



Figure 7.1: IMED 模型应用主题概览

7.2 主题一：碳限额的经济影响分析

IPCC 第五次评估报告进一步确认人为活动造成的温室气体排放是当前气候变暖的主要原因，为应对全球气候变化，2015 年巴黎气候大会达成“在本世纪末实现全球平均温度相比工业革命前上升幅度不超过 2 摄氏度，并力争将温升控制在 1.5 摄氏度以内”的共识，各国提出相应的自主减排方案和碳限额目标。中国政府在《中国国家自主贡献》中确定了到 2030 年的自主行动目标：二氧化碳排放在 2030 年左右达到峰值并争取尽早达峰；单位国内生产总值的二氧化碳排放比 2005 年下降 60%-65%，非化石能源占一次能源消费比重达到 20% 左右。如何实现中国碳减排目标、实现碳减排目标对中国经济会产生怎样的影响？都是迫切需要探索的问题，也是本篇介绍的内容。本篇从能源的供给侧（例如，电力和可再生能源供给）、能源消费侧（例如，居民部门）、不同区域等角度介绍如何实现碳减排目标以及实现目标的成本及其经济影响。

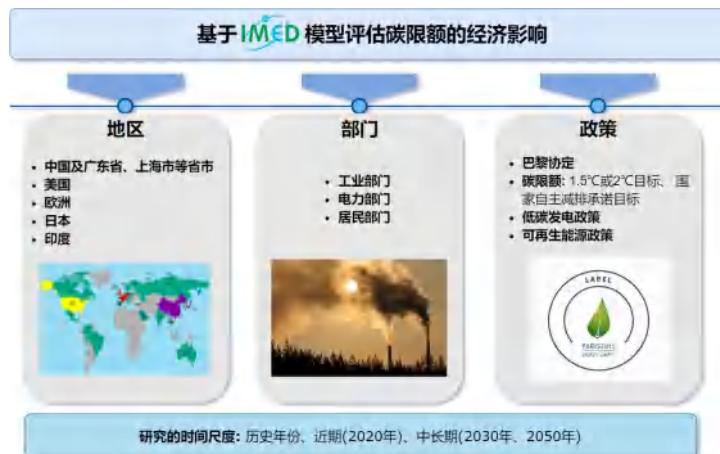


Figure 7.2: 基于 IMED 模型评估碳限额的经济影响

以下为我们在本节甄选的相关已发表文章：

1. 美国退出《巴黎协定》对中印碳排放空间和碳减排成本的影响
2. 美国退出《巴黎协定》对中欧日碳排放空间和减排成本的影响
3. 我国出口结构调整对国民经济和碳排放的影响
4. 家庭消费模式对区域发展的影响：以上海市为例
5. 低碳发电政策对广东省碳减排的影响
6. 基于自上而下和自下而上模型评估中国区域能源使用和碳排放
7. 绿色增长：中国大规模可再生能源发展的经济影响

7.2.1 美国退出《巴黎协定》对中印碳排放空间和碳减排成本的影响

- **原文标题:** Effects of the US withdrawal from Paris Agreement on the carbon emission space and cost of China and India [26]
- **期刊:** Frontiers in Energy
- **发表年份:** 2018
- **作者:** Hancheng Dai, Yang Xie*, Haibin Zhang, Zhongjue Yu, Wentao Wang
- **关键词:** 巴黎协定；中国和印度；美国退出巴黎协定；碳排放空间；减排成本
- [文章链接](#)

研究内容

基于美国退出《巴黎协定》的事实，本文¹利用IMED | CGE 模型，考虑美国不同程度的退约情景，定量评估美国退出《巴黎协定》对中国和印度在碳排放空间和气候减缓成本方面的影响。研究设定美国不退约情景 (27, 即减排 27%) 和三种依次增强退约情景 (20; 13; 00, 即分别减排 20%、13% 和不减排 00%)，同时分别考虑 NDC 和 2°C 减缓目标。

研究发现

美国退出《巴黎协定》将对中国和印度的排放空间产生影响。在全球碳排放空间固定以及按人均分配的前提下，美国退出《巴黎协定》，NDC20、NDC13 和 NDC00 情景下，在 2030 年将增加美国的排放空间分别为 14%、28% 和 54%；然而，与此同时中国和印度将需要减少更多的 CO₂ 排放，在 NDC20、NDC13 和 NDC00 情景下分别减少 0.8%、1.6% 和 3.2%。与美国完全执行其责任的 2 摄氏度 27 情景相比，在 2 摄氏度目标下美国将会得到更多额外的排放空间，在 2 摄氏度 20、2 摄氏度 13 和 2 摄氏度 00 情

¹Hancheng Dai, Yang XIE, Haibin ZHANG, Zhongjue YU, Wentao WANG(2018). Effects of the US withdrawal from Paris Agreement on the carbon emission space and cost of China and India. *Frontiers in Energy* 12(3): 362-375. ([Paper Link](#))

景下分别增加 48%、66% 和 100%，同时中国增加的额外碳减排率分别为 1.7%、2.8% 和 5.0%，印度增加的额外碳减排率分别为 1.7%、2.9% 和 5.1%。（如图7.3）

美国减排力度的大小将直接影响中印实现 NDC 和 2 摄氏度目标时的碳价。2030 年，美国退约将使其自身的碳价显著下降，在 NDC20、NDC13、NDC00 这 3 种情景下，其碳价分别降至 90 美元/吨、59 美元/吨和 20 美元/吨。然而，其他地区将承受更高的碳价。如中国的碳价将从 NDC 27 情景的 23 美元/吨增长至 NDC20、NDC13、NDC00 情景的 24 美元/吨、25 美元/吨和 28 美元/吨。

美国的退约将导致中印更多的 GDP 损失。以中国为例，在美国实现其减排承诺情景下，2030 年中国的 GDP 损失为 1270 亿美元（95 美元/人）；而在 NDC00 情景下，这一损失将增长至 1460 亿美元（相当于人均 GDP 损失将额外增加 15 美元）。

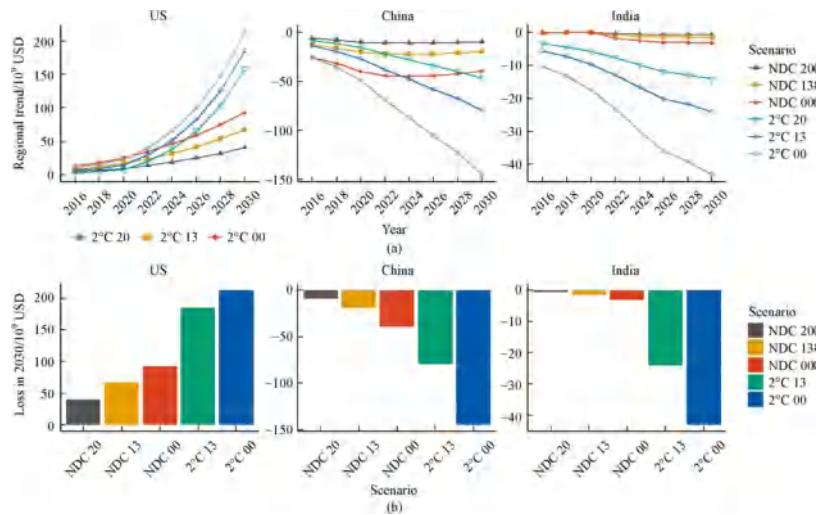


Figure 7.3: NDC 和 2°C 目标下与美国完全履行减排义务相比各国的 GDP 变化（2002 年不变价格）(a) 2016-2030 (b) 2030 年

7.2.2 美国退出《巴黎协定》对中欧日碳排放空间和减排成本的影响

- **原文标题:** The impacts of U.S. withdrawal from the Paris Agreement on the carbon emission space and mitigation cost of China, EU, and Japan under the constraints of the global carbon emission space [73]
- **期刊:** Advances in Climate Change Research
- **发表年份:** 2017
- **作者:** Hancheng Dai, Haibin Zhang, Wentao Wang
- **关键词:** 美国退出巴黎协定；碳排放空间；减排成本
- **文章链接:** [https://doi.org/10.1016/j.adcc.2017.03.001](#)

研究内容

基于美国退出《巴黎协定》的事实，本文²利用IMED | CGE 模型，考虑美国不同程度的退约情景，定量评估美国退出《巴黎协定》对中国、欧盟和日本在碳排放空间和气候减缓成本方面的影响。研究设定美国不退约情景（27，即减排 27%）和三种依次增强退约情景（20; 13; 00，即分别减排 20%、13% 和不减排 00%），同时分别考虑 NDC 和 2°C 减缓目标。

研究发现

美国退出《巴黎协定》对中国、欧盟、日本碳排放空间的压缩效应非常明显。在 NDC20、NDC13 和 NDC00 情景下，2030 年美国可分别增加 12%、28% 和 54% 的排放，然而，中国的碳排放空间将分别压缩 0.8%、1.6% 和 3.2%，欧盟的碳排放空间将分别压缩 1.1%、1.8% 和 3.3%，日本的碳排放空间将分别压缩 0.9%、1.8% 和 3.7%。2 摄氏度目标下，与 2 摄氏度 27 情景相比，在 2 摄氏度 20、2 摄氏度 13 和 2 摄氏度 00 情景下，中国的碳排放分别被压缩 1.7%、2.8% 和 5.0%，欧洲的碳排放分别被压缩 1.7%、2.9% 和 5.5%，日本的碳排放分别被压缩 1.5%、3.0% 和 4.5%。

美国的退约将导致其自身碳价格大幅下降，而其他地区将承受更高的碳价。与美国不退约相比，在 NDC 00 情景 2030 年美国碳价从 136.2 美元/吨降至 20 美元/吨，而中国碳价则从 23 美元/吨升至 27.6 美元/吨（如图7.4 (b)）。

美国的退约将导致中国、欧盟、日本承受更多的 GDP 损失。以中国为例，与中国为例，与 BaU 情景相比，NDC27 情景下，2030 年中国的 GDP 损失为 1263 亿美元（人均 GDP 损失 94.4 美元），占总 GDP 的 1.35%，远高于美国；在 NDC00 情景下，GDP 损失将会上升为 1461 亿元（人均 GDP 损失增加 14.8 美元），占总 GDP 的 1.56%。（如图7.4 (d)）

²DAI Hancheng, ZHANG Hai-Bin, WANG Wen-Tao(2017). The impacts of U.S. withdrawal from the Paris Agreement on the carbon emission space and mitigation cost of China, EU, and Japan under the constraints of the global carbon emission space. *Advances in Climate Change Research* 8(4): 220-225. ([Paper Link](#))

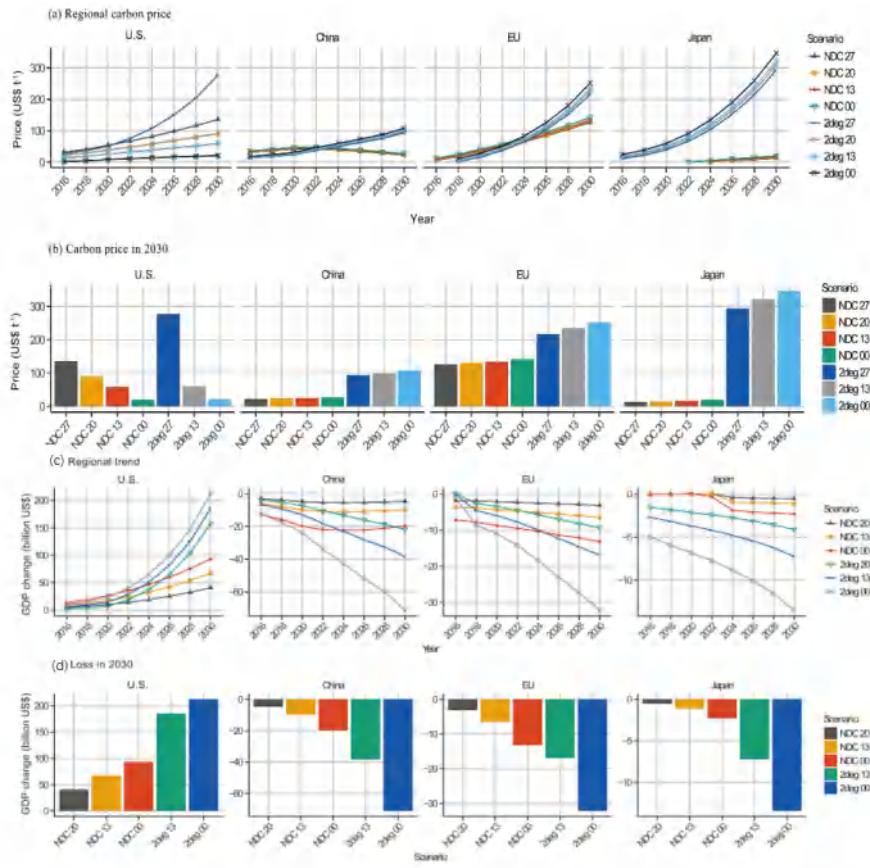


Figure 7.4: NDC 和 2°C 目标下的碳价 (2002 年不变价格)：(a) 2016-2030, (b) 2030 年；NDC 和 2°C 目标下与美国完全履行减排义务相比额外的 GDP 变化 (2002 年不变价格)：(c) 2016-2030, (d) 2030 年

7.2.3 我国出口结构调整对国民经济和碳排放的影响

- **原文标题:** Impacts of export restructuring on national economy and CO₂ emissions: A general equilibrium analysis for China [74]
- **期刊:** Applied Energy
- **发表年份:** 2019
- **作者:** Rui Wu, **Hancheng Dai***, Yong Geng*, Yang Xie, Xu Tian
- **关键词:** 出口结构调整; IMED | CGE 模型; 二氧化碳排放; 中国; 治理
- **文章链接:** [https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114342](#)

研究内容

本文³将我国与 2014 年发达国家（德国、日本、美国）的出口结构进行对标，同时考虑 NDC 目标，基于 IMED | CGE 模型结合情景分析定量评估了气候政策和出口结构调整对中国经济和碳排放的影响。具体的情景设置如表 7.1。

Table 7.1: 中国经济和碳排放的影响研究的情景参数设置

No.	Code	Note	No.	Code	Note
1	CAgri	Agriculture	12	CMetPrd	Metal product
2	Coal	Coal mining	13	CMchn	Machinery
3	Coil	Crude oil and natural gas	14	CTspEq	Transport equipment
4	Cmin	Other mining	15	CElcEq	Electronic equipment
5	CFdTbc	Food production	16	COthManuf	Other manufacturing
6	CTxt	Textile	17	Celec	Power generation
7	Cpaper	Paper	18	CGas	Manufactured gas
8	Cpet	Petrol oil	19	Cwater	Water production
9	Cchem	Chemicals	20	CCnst	Construction
10	CNonMPrd	Nonmetal product	21	CTrsp	Transport
11	CMetSmlt	Metal smelting and processing	22	Csvc	Service

研究发现

国家层面。出口结构调整将降低出口量，并造成轻微失业，但同时将降低碳排放量。气候政策能显著降低碳排放。例如，2030 年 NDC 减排目标情景与 BaU 情景相比，二氧化碳排放总量将减少 42-43%，碳强度将减少 40-41%。综合两种政策，ndc_usa 情景（对标美国）是实施气候政策时最优的出口模式，能以 GDP 损失最小但就业增长最多的方式实现相同的碳排放强度。（如图 7.5 (a)）

部门层面。出口结构调整将增加交通设备部门和服务业的出口，减少纺织品和其他制造业的出口。大多数部门的产出变化和出口量变化相一致。而气候政策将大幅减少能源密集型产品的出口量，包括原油、金属冶炼和电力部门。如 NDC 目标情景下，到 2030 年出口电力将减少近 87%，而农业、粮食生产、其他制造业和服务业的出口将显著增加。

全球层面。至 2030 年，中国的出口结构调整将提高全球 GDP 和消费水平，其中 ndc_usa 情景下全球 GDP 增长 (0.2%) 最高。（如图 7.5 (b)）

对碳价的影响。在实施气候政策的情况下，将会建立碳市场并且在所有情景下 2020-2030 年的碳价几乎翻倍。2030 年，ndc_jpn 情景下的碳价最高约为 173 美元/吨，其次是 ndc_ger 情景和 bau_usa 情景，碳价分别为 170 美元/吨和 166 美元/吨，ndc_chn 情景下的碳价最低为 161 美元/吨。

³Rui Wu, Hancheng Dai, Yong Geng, Yang Xie, Xu Tian(2019). Impacts of export restructuring on national economy and CO₂ emissions: A general equilibrium analysis for China. *Applied Energy* 248: 64-78. ([Paper Link](#))

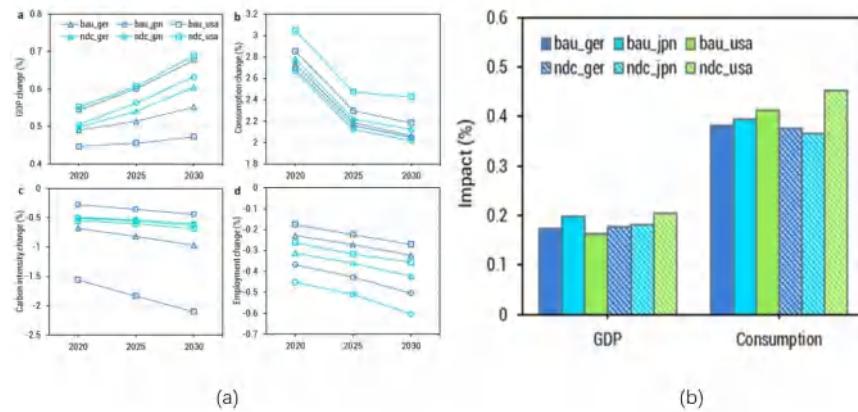


Figure 7.5: (a) 不同情景下的经济影响和碳排放变化; (b) 2030 年出口结构调整对全球 GDP 和消费的影响

7.2.4 家庭消费模式对区域发展的影响：以上海市为例

- **原文标题:** The effects of household consumption pattern on regional development: A case study of Shanghai^[12]
- **期刊:** Energy
- **发表年份:** 2016
- **作者:** Xu Tian, Yong Geng*, **Hancheng Dai***, Tsuyoshi Fujita, Rui Wu, Zhe Liu, Toshihiko Masui, Xie Yang
- **关键词:** 上海; 居民消费模式; 计算一般均衡模型 (CGE); 能值
- **文章链接**

研究内容

中国经济结构正由出口投资导向型转为内需增长型，家庭消费模式对能源消耗和碳排放的影响愈发重要。本文⁴基于IMED|CGE 模型，定量分析 **2030 年上海市高碳 (HC) 和低碳 (LC) 两种家庭消费模式对能源消耗和碳排放的影响**。家庭高碳和低碳消费模式的家庭支出份额如表7.2。

⁴Xu Tian, Yong Geng, **Hancheng Dai***, Tsuyoshi Fujita, Rui Wu, Zhe Liu, Toshihiko Masui, Xie Yang(2016). The effects of household consumption pattern on regional development: A case study of Shanghai. Energy 103: 49-60. ([Paper Link](#))

Table 7.2: 不同情景下 2030 年上海家庭支出份额

Per capita expenditure (2007 current price)	Whole Shanghai	HC	LC
	53,619	53619	53619
Food	20.74%	17.76%	22.50%
Clothing	4.87%	6.51%	3.64%
Housing	12.12%	10.20%	14.20%
Facilities	3.02%	5.53%	0.50%
Health	7.48%	8.85%	6.39%
Transport and Communications	24.03%	27.50%	20.47%
Education	20.34%	21.38%	18.21%
Others	7.41%	2.27%	14.09%

研究发现

能源消费。2007 年至 2030 年间，上海市直接和间接能源消费总量将分别增长 2555 万吨煤当量和 8146 万吨煤当量，增长幅度约 151% 和 186%。与低碳情景相比，上海市 2030 年高碳情景下直接能源消费和间接能源消费分别增加 3.96 倍和 0.33 倍，因此低碳情景下可节约 3400 万吨煤当量的直接能源消耗和 3100 万吨煤当量的间接能源消耗（如图7.6 (a)）。

碳排放。2007 年至 2030 年间，直接和间接碳排放总量将分别增长 2206 万吨和 4249 万吨，增长幅度约为 307% 和 161%。与低碳情景相比，上海市 2030 年高碳情景下直接碳排放和间接碳排放分别增加 0.1 倍和 1.1 倍，因此低碳情景下可减少 310 万吨 CO₂ 的直接排放和 3630 万吨 CO₂ 的间接排放（如图7.6 (b)）。

宏观经济。2007 年至 2030 年间，上海的地区生产总值增长 3.4 倍，而在高碳和低碳情景下，工业总产值分别为 20.10 万亿元和 19.53 万亿元。在部门产出层面，与低碳情景相比，高碳情景中除农业部门产值下降 17% 和服务业产值下降 6% 外，其余部门的产出均增加（如图7.6 (c)）。



Figure 7.6: (a) 2030 年直接和间接能源消耗总量 (单位: 百万吨煤当量); (b) 2030 年直接和间接碳排放总量 (单位: 百万吨二氧化碳); (c) HC 和 LC 情景下不同行业的产出变化

7.2.5 低碳发电政策对广东省碳减排的影响

- 【ESI 前 1% 高被引文章】
- 原文标题: Impacts of low-carbon power policy on carbon mitigation in Guangdong Province, China [20]
- 期刊: Energy Policy
- 发表年份: 2016
- 作者: Beibei Cheng, **Hancheng Dai***, Peng Wang, Yang Xie, Li Chen, Daqing Zhao, Toshihiko Masui
- 关键词: 低碳电力政策; CGE 模型; 广东省

• 文章链接

研究内容

本研究⁵运用两区域动态 CGE 模型分析了电力行业低碳政策对广东省节能减排的影响。文章根据是否实施低碳电力政策、设定碳排放限额、允许碳排放交易设置了基准情景和 6 种政策情景（如表7.3）。

Table 7.3: 广东省碳减排的影响的情景设置

情景	低碳电力政策	碳排放限额	碳排放
			交易
BaU	无	无	无
RE	发展可再生能源	无	无
RE-NG	发展可再生能源 和天然气	无	无
CAP	无	■ 2005-2020 年碳强度下降 45%;	无
CAP-	发展可再生能源	■ 碳排放年增长率:	
RE-NG	和天然气	•2013-2015 年: 电力 0.3%, 炼油厂 2%, 水泥 1%, 钢铁 6% •2016-2020 年: 电力 0.5%, 炼油厂 2%, 水泥 1%, 钢铁 5%	
ETS	无	无	有
ETS-	发展可再生能源	无	有
RE-NG	和天然气		

研究发现

如果没有额外的政策干预，广东省乃至我国都无法实现当下设定的碳强度目标。而在实施碳排放限额、碳排放交易和清洁能源鼓励政策的情景下，能源强度和碳强度目标都可以实现（如图7.7）。

实施碳约束会对 GDP 产生负面影响，并且 GDP 损失会随着时间逐渐增加，但总是在 1% 以内。清洁能源发展和碳交易市场都会减少碳减排的 GDP 损失，但是前者的效果要大于后者。实施碳交易市场减少的 GDP 损失约为 0.037%，小于发展清洁能源减少的 GDP 损失 0.10%。

政策情景下就业结构由第一、二产业向第三产业转移，其中 CAP-RE-NG 和 ETS-RE-NG 情景下效果尤为明显。碳交易和鼓励清洁能源使用都能降低减排成本，但同时实施碳

⁵Beibei Cheng, Hancheng Dai*, Peng Wang, Yang Xie, Li Chen, Daiqing Zhao, Toshihiko Masui(2016). Impacts of low-carbon power policy on carbon mitigation in Guangdong Province, China. *Energy Policy* 88: 515-527. ([Paper Link](#))

排放交易和使用清洁能源时碳减排成本最低。

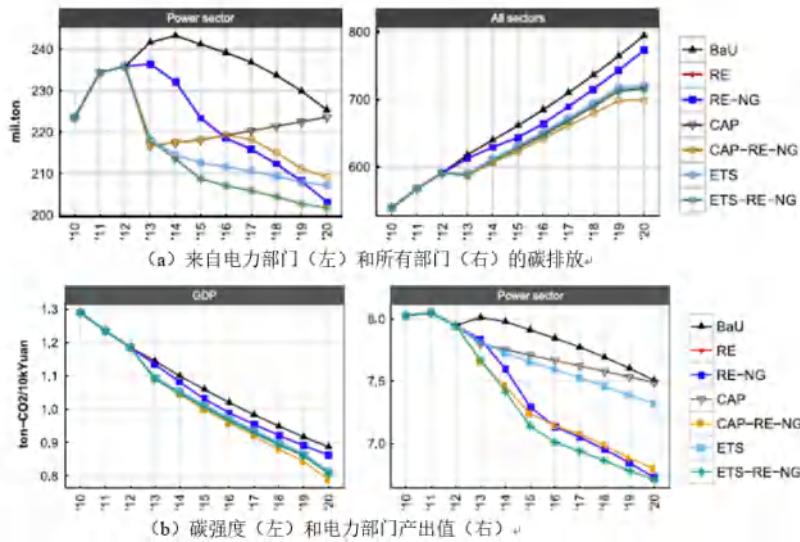


Figure 7.7: 碳排放和碳强度

7.2.6 基于自上而下和自下而上模型评估中国区域能源使用和碳排放

- **原文标题:** Closing the gap? Top-down versus bottom-up projections of China's regional energy use and CO₂ emissions ^[9]
- **期刊:** Applied Energy
- **发表年份:** 2016
- **作者:** Hancheng Dai, Peggy Mischke, Xuxuan Xie, Yang Xie, Toshihiko Masui
- **关键词:** 能源系统分析；情景分析；中国；TIAM；自上而下和自下而上模型的连接
- [文章链接](#)

研究内容

本研究⁶ 采用两种新开发的全球自上而下的中国多区 CGE 模型（即由作者独立开发的 IMED | CGE 模型早期版本）和自下而上的 TIAM 模型，模型软链接框架如图 7.8 (a) 所示。其中，自上而下的 CGE 模型为自下而上的能源系统 TIAM 模型提供未来能源服务需求相关的驱动因素；TIAM 模型计算出不同部门成本最小的技术组合、最终能源需求后，CGE 模型中的能效提升参数可以据此作出相应的调整，从而使得自上而下的 CGE 模型与 TIAM 模型计算出的能源消费量匹配。

⁶Hancheng Dai, Peggy Mischke, Xuxuan Xie, Yang Xie, Toshihiko Masui(2016). Closing the gap? Top-down versus bottom-up projections of China's regional energy use and CO₂ emissions. *Applied Energy* 162: 1355-1373. ([Paper Link](#))

以中国为研究区域，比较中国到 2050 年的能源消耗和二氧化碳排放路径。研究采用了共享社会经济路径 2 (SSP2) 的社会经济发展模式，依据是否实施碳税政策设置了基准情景和碳税情景。(如表7.4)

Table 7.4: 中国区域能源使用和碳排放研究的情景设置

情景	社会经济发展模式	是否征收碳税
基准情景	参考 SSP2 发展模式	无
碳税情景	参考 SSP2 发展模式	对所有地区和部门征收碳税

研究发现

(1) 两个模型初始能源、最终能源消耗和碳排放结果表明，尽管在中国总能源消耗增长、部门能源消耗增长、碳排放增加结果一致，但是自上而下模型预测中国未来会有更高的能源使用增长以及在钢铁化工等部门会有更多的煤炭消耗，并且在短期内相比自下而上模型会有更快更多的碳排放增长，而自下而上模型预测未来部门能源结构方面更加多元化，并且相比自上而下模型中国地区减排潜力更小。

(2) 研究发现，当 CGE 模型中不同能源载体和不同部门的能源效率参数大幅度调整后，软链接的 CGE 模型和 TIAM 模型之间的差异会在一定程度上得到减少。尤其是通过软链接这两个模型，部门的电力消耗差异得以显著减小。但是在煤、气、油三个能源载体依然存在差异。例如煤炭，最大的差异在电力部门和非金属生产部门。与 TIAM 模型相比，CGE 模型显示电力生产需要使用更多的煤炭，但是非金属生产需要更少的煤炭（图7.8 (b)）。总之，本研究表明，没有在部门水平上更详细的用能调查，完全消除自上而下和自下而上模型之间的差距是非常具有挑战的。各区域能源消费均呈现增长，工业部门是中国主要的耗能部门，中国的能源结构将由煤向天然气和电转型。能源部门和工业部门是主要的排放源。碳税情景下两模型均在 2050 年之前碳排放达峰；相较基准情景，均有约 50% 的减排；在长期来看，发电部门是主要的减排部门。

(3) 对于本文讨论的大多数定量指标（例如，一次能源、最终能源和二氧化碳排放）而言，软链接模型 CGE-TIAM 的预测结果处于 AME 模型预测结果的中等范围内（如图7.8 (c)）。TIAM 的基准情景略低于 AME 模型预测的全球排放量。2005-2040 年 CGE 模型的基准情景下的一次能源略低于 AME 模型的预测范围。

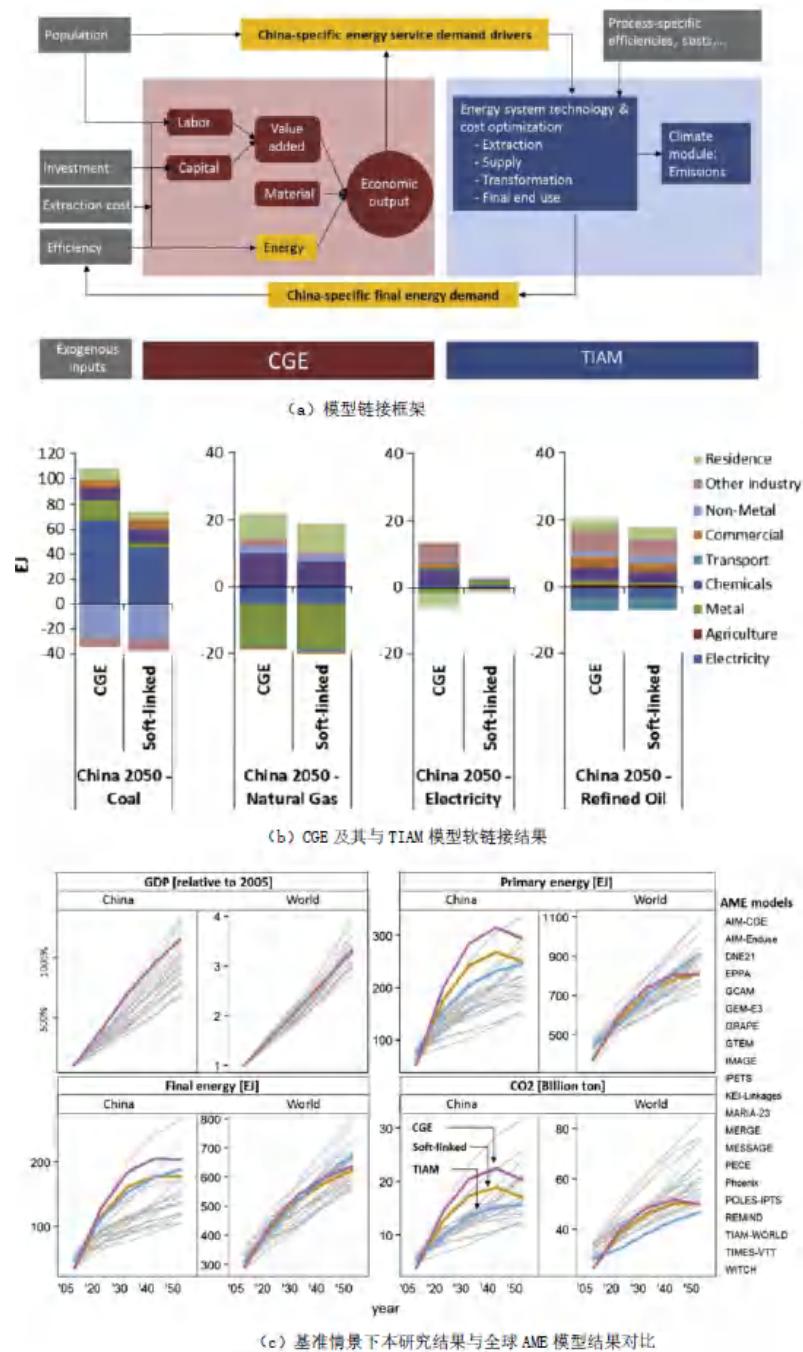


Figure 7.8: (a) 模型链接框架; (b) CGE 及其与 TIAM 模型软链接结果; (c) 基准情景下本研究结果与全球 AME 模型结果对比

7.2.7 绿色增长：中国大规模可再生能源发展的经济影响

- **【ESI 前 1% 高被引文章】**
- **原文标题：**Green growth: The economic impacts of large-scale renewable energy development in China^[15]
- **期刊：**Applied Energy
- **发表年份：**2015
- **作者：**Hancheng Dai, Xuxuan Xie, Yang Xie*, Jian Liu, Toshihiko Masui
- **关键词：**可再生能源；经济影响；绿色增长；可计算一般均衡模型 (CGE)；中国
- **文章链接**

研究内容

本研究⁷采用 CGE 模型，研究中国大规模开发可再生能源对经济部门的影响及其产生的环境效益。本文根据可再生能源发展速度构建了两种情景：新能源以正常、平稳速度发展（基准情景）；新能源高速发展（REmax）。

研究发现

实现可再生能源发展目标需要大量的投资。在基准情景下，发展可再生能源的总投资 2040 年为 3500 亿美元（图7.9a），到 2050 年变为 3000 亿美元。大部分的投资用于发展风能和太阳能发电，相对少的投资用于核能和水电。相反，在 REmax 情景下，可再生能源的投资会更多。2040 年，风能和太阳能的投资达到最大值分别为 2400 亿美元和 5300 亿美元。这意味着超过 9% 的总投资用于发展可再生能源。

大规模发展可再生能源不会导致大量的宏观经济成本。相反，会有助于上游行业的生产、重塑能源结构、带来大量环境协同效益。如果在 2050 年可再生能源在总一次能源中的比例达到 56%，非化石能源发电将会成为支柱行业，其增加值占 GDP 的 3.4%，可与其他行业相媲美，包括农业（2.5%）、钢铁（3.3%）、建筑业（2.1%）。

在 REmax 情景中，到 2050 年，大规模发展可再生能源将刺激与可再生能源相关的行业产出值 1.18 万亿美元，创造 412 万个就业机会。除此之外，还能显著减少 CO₂ 和空气污染物排放（如 SO₂ 和 NO_x）。2050 年，CO₂、SO₂、NO_x 和 N₂O 的减排率分别为 34%、42%、31% 和 24%（如图7.9 (b)）。更重要的是，与基准情景相比，2010-2050 年，能够累计减少 CO₂ 排放量 61Gt，这有助于实现碳减排目标，考虑到 2 摄氏度目标下，全球碳预算约为 960-1500Gt。

大量的投资可再生能源会对就业、产出和其他行业产值产生影响（图7.9 (c)）。在基准情景下，2050 年风能和太阳能发电的刺激效果大于水电和核电。在 REmax 情景下，由

⁷Hancheng Dai, Xuxuan Xie, Yang Xie, Jian Liu, Toshihiko Masui(2016). "Green growth: The economic impacts of large-scale renewable energy development in China." *Applied Energy* 162: 435-449. ([Paper Link](#))

非化石能源和可再生能源刺激产生的其他行业的总间接产值分别为 13320 亿美元和 1179 亿美元。因此，非化石能源和可再生能源分别产生了 3420 亿美元和 3020 亿美元的增加值，分别占 GDP 的 0.99% 和 0.88%，分别创造 487 万和 412 万个就业。在 2010 年至 2020 年的短期内，可再生能源发展的技术和市场将趋于成熟。2020 年到 2030 年将会是可再生能源快速渗透的十年。从 2030 年到 2050 年的较长时期来看，中国能源体系将大规模替代化石能源，建立以可再生能源为主导的现代能源体系。

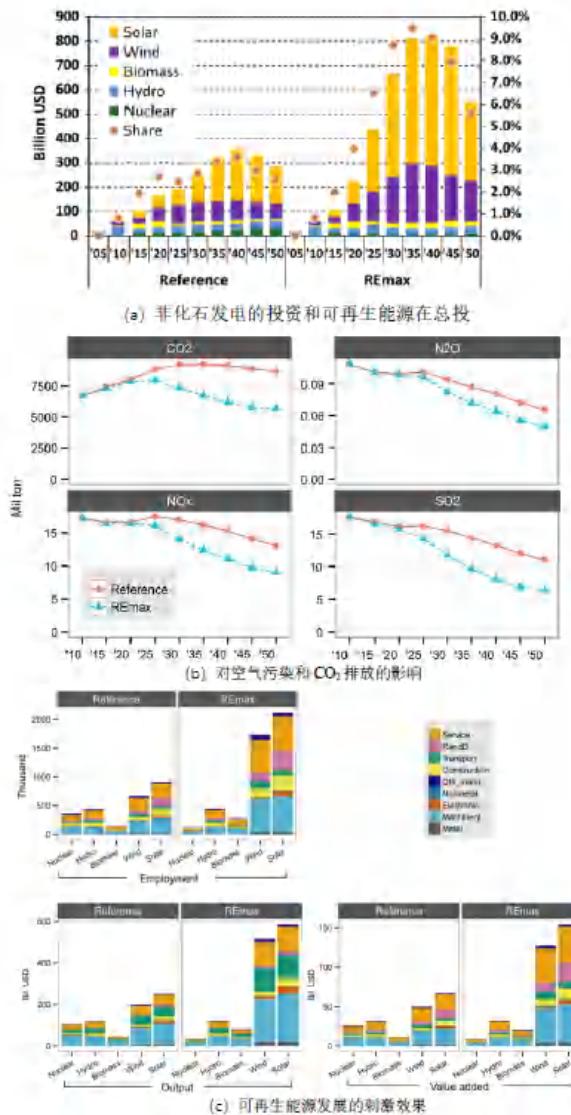


Figure 7.9: (a) 非化石发电的投资和可再生能源投资占总投资份额；(b) 对空气污染和 CO_2 排放的影响；(c) 2050 年可再生能源发展对就业、产出、其他行业增加值的刺激效果

编辑/校阅：任明、马腾、张思露

7.3.1 主题二：碳减排对产业竞争力的影响探究

气候变化是人类本世纪面临的重大挑战，碳排放则是气候变化问题的根源。为应对全球气候变化，2015年巴黎气候大会达成“在本世纪末实现全球平均温度相比工业革命前上升幅度不超过2摄氏度，并力争将温升控制在1.5摄氏度以内”的共识，中国政府在《中国国家自主贡献》中确定了到2030年的自主行动目标：二氧化碳排放在2030年左右达到峰值并争取尽早达峰，单位国内生产总值二氧化碳排放（碳强度）比2005年下降60%-65%，非化石能源占一次能源消费比重达到20%左右。同时，在“十三五”规划中，中国政府也提出了2016-2020年间碳强度下降18%的近期目标。

为实现自主贡献承诺和发展规划目标，我国需要自上而下和自下而上结合的碳减排措施与行动，也需要全地区、多产业的协同努力。值得注意的是，碳限额目标以及为实现碳减排而征收的碳税，将给经济体不同产业产生广泛而差异较大的影响，引起产业竞争力变化和新一轮的产业结构调整。部分产业部门，尤其是能源强度高、碳排放密集型产业的竞争力可能受到负面冲击，而另一些产业部门则可能受到正向拉动。

更重要的是，由于地区经济社会发展情况和产业结构均有所不同，因此，同样的碳减排政策对各地区产业部门竞争力和经济产生的影响也不尽相同；地区间不均等的减排政策则更会为各地区带来异质性的影响。**IMED**|CGE综合评估模型的省级版本可详细刻画我国30省几十种经济部门的能源消费与产业发展错综复杂的关联，是探究这类碳减排政策影响及其异质性的较理想的分析手段。因此，LEEEP课题组基于**IMED**|CGE模型，选取了几个有代表性的省市——东北老工业基地辽宁、西南工业重镇重庆和广西、沿海外向型经济为主的上海和天津作为典型案例，系统性地研究了地区间不均等的碳税或碳强度减排目标对不同地区经济发展和部门竞争力的影响。



Figure 7.10: 基于**IMED**|CGE模型评估碳减排对产业竞争力的影响

7.3.1.1 IMED省级两区 CGE 模型分析产业竞争力影响的机制

CGE模型的假设之一是任何商品的供给量等于其需求量。如图7.11所示，需求是由三个市场中的两种效应通过三项指标决定的，CGE模型中蕴含的这种影响机制是其在经济分析中的独特优势。了解这些影响机制对于理解后续5篇文章中不同产业面临不同碳税或碳强度目标的异质性响应

结果极其重要。

三个市场包括当地市场、中国其他地区市场（国内市场）和国际市场。如下列方程所示，三项指标包括当地市场向当地供给（domSup）、向国外市场出口（export）和流入（provex）到国内其他市场（国内市场）。他们之间的关系如公式 A(1) 所示：

方程 A(1):

$$\text{output}_{r,i} = \text{export}_{r,i} + \text{provex}_{r,i} + \text{domSup}_{r,i}$$

另一方面，从需求端来讲，存在以下关系：特定商品的当地消费量（domCons）等于进口量、中国其他地区的流入量（provim）和当地生产量（domSup）之和。

方程 A(2):

$$\text{domCons}_{r,i} = \text{domSup}_{r,i} + \text{import}_{r,i} + \text{provim}_{r,i}$$

两种效应包括价格效应和规模效应。价格效应是指如果某种商品的当地价格增长幅度高于中国其他地区，这种商品在三个市场中的需求量都会下降。从而导致出口量、流出量和当地消费量都下降。反之，会有更多的进口量和中国其他地区的流入量，从而导致当地产出下降。如果上海被分配更高的碳减排目标、上海的碳税率高于中国其他地区或者上海当地产品的碳强度高于中国其他地区就会出现上述这种结果。

除了价格效应外，**规模效应也起着重要的作用**，且规模效应有时会产生完全不同的影响。假设中国其他地区承担更多的碳减排量，其产品价格就会高于目标省市。如果仅考虑价格效应，目标地区的行业将会受益，因为其商品价格相对低于中国其他地区。然而，由于中国其他地区的经济规模可能受到更高碳成本而受损，导致对目标省市的商品需求也会下降，进而间接伤害到本地区的经济增长，产生的效果与单纯考虑价格效应相反。对本地产业产出的净影响取决于商品的主要市场是在中国的其他地区还是在别处（在当地市场或者国际市场）。在前一种情况下，规模效应通常会超过价格效应，从而使本地产业的产出将会受损。在IMED|CGE 省级模型中，没有对世界其他地区的生产消费活动进行详细模拟，亦即全球商品价格是不变的，从而使得价格效应是进口和出口的主要控制因素。

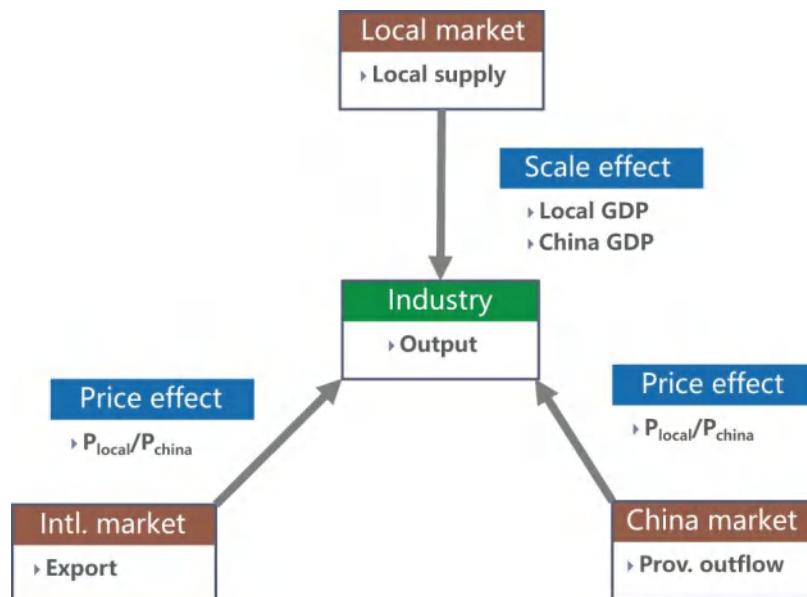


Figure 7.11: IMED|CGE 模型中地区间产业竞争力影响机制

7.3.2 碳减排政策的产业竞争力影响——基于 IMED 模型的相关研究

以下 5 篇为我们在本节甄选的运用 **IMED | CGE** 模型分析碳减排政策的产业竞争力影响的已发表成果；需要说明的是，为保证不同省市模拟结果的可对比性，5 篇文章在碳税或碳强度目标方面均采用了类似的情景设置框架：

1. 碳税对中国重庆的产业竞争力的影响
2. 碳减排对中国产业竞争力的影响：以上海为例
3. 地区间不均等碳税对辽宁省碳排放和产业竞争力的影响
4. 中国省级不均等碳强度目标经济影响的一般均衡评估：以广西为例
5. 不同碳减排目标的经济影响评估：以天津为例

7.3.3 碳税对中国重庆的产业竞争力的影响

- **原文标题:** Effect of carbon tax on the industrial competitiveness of Chongqing, China [75]
- **期刊:** Energy for Sustainable Development
- **发表年份:** 2018
- **作者:** Jiaoyan Xie, **Hancheng Dai**, Yang Xie*, Lixuan Hong
- **关键词:** 碳税；产业竞争力；碳减排；IMED | CGE 模型；中国重庆
- **文章链接:**

研究内容

本文⁸ 使用两区域动态可计算一般均衡模型 (**IMED | CGE**)，以西南重镇重庆市为案例，考查地区差异化碳税如何影响当地产业竞争力。本文设置了一个无碳减排目标的基准情景 (BaU) 和五个碳税情景（表7.5）；碳税情景中，重庆市和中国其他地区实施碳税政策以实现中国 NDC 目标，各情景下两区域碳税比例有所差异。

Table 7.5: 重庆研究情景设置

情景	有无碳排放限额	有无碳税
BaU	无	无
taxC2P4	NDC 目标	非固定碳税
taxC3P4	NDC 目标	非固定碳税
taxC4P4	NDC 目标	非固定碳税
taxC6P4	NDC 目标	非固定碳税
taxC8P4	NDC 目标	非固定碳税

⁸Jiaoyan Xie, **Hancheng Dai**, Yang Xie*, Lixuan Hong (2018). Effect of carbon tax on the industrial competitiveness of Chongqing, China. Energy for Sustainable Development. ([文章链接](#))

注：情景名中 P 代表重庆，C 代表中国其他地区，而数字代表两地区间碳税的比值，如 taxC2P4 和 taxC3P4 分别表示中国其他地区的碳税是重庆的 $2/4$ 和 $3/4$ ，taxC4P4 表示两个地区碳税相等，而 taxC6P4 和 taxC8P4 情景表示中国其他地区的碳税率分别是重庆的 1.5 和 2 倍。

研究发现

碳税的实施在降低一次能源消耗和碳强度的同时，也会增加重庆市企业的生产成本，对经济带来负面冲击。与 BaU 情景相比，实施碳税后的 C2P4、C3P4、C6P4 和 C8P4 情景下，重庆市 2030 年一次能源消费量分别减少 39.04%、34.88%、31.70% 和 27.94%，碳排放强度分别降低 31.06%、28.34%、26.38% 和 23.95%，地区生产总值则分别下降 1.54%、1.63%、2.01% 和 2.49%。

由于贸易在重庆市经济中有较为重要的地位，且重庆市商品大量出口于中国其他地区而非国际市场，因此对重庆市而言，**碳税的“规模效应”大于“价格效应”，当中国其他地区承担的碳税相对升高时，由于出口需求降低，重庆市 GDP 反而下降**。到 2030 年，与公平碳税的 C4P4 情景相比，重庆市的 GDP 在中国承担较低碳税的 C2P4 和 C3P4 情景下将分别高出 0.22% 和 0.13%，在 C6P4 和 C8P4 情景下则分别低 0.25% 和 0.74%。

差异化碳税政策将对各产业的竞争力产生异质性影响，与 C4P4 情景相比，在中国承担较低碳税的 C2P4 情景下，2030 年重庆市农业、纺织、食品生产、金属产品、运输设备、机械、电子制造业等部门的竞争力将提升，产业产出分别增加 1.16%、2.13%、0.97%、0.32%、1.14%、0.26%、0.55% 和 0.77%；而采煤、造纸、化工、非金属、金属冶炼、发电等行业的竞争力将相对降低，产业产出分别下降 11.79%、1.50%、3.45%、3.59%、5.83% 和 15.84%。

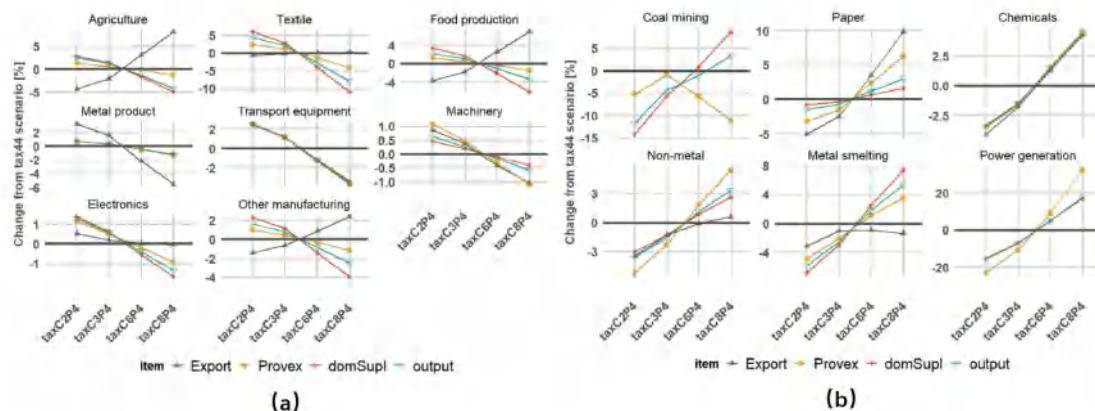


Figure 7.12: 不同情景下 2030 年 (a) 受益部门和 (b) 受损部门相比 C4P4 情景的宏观指标变化

7.3.4 碳减排对中国产业竞争力的影响：以上海为例

- **原文标题：**The effects of carbon reduction on sectoral competitiveness in China: A case of Shanghai [40]
- **期刊：**Applied Energy

- **发表年份:** 2017
- **作者:** Xu Tian, **Hancheng Dai***, Yong Geng*, Zhen Huang, Toshihiko Masui, Tsuyoshi Fujita
- **关键词:** 碳减排；产业竞争力；碳税；可计算一般均衡模型；上海
- [文章链接](#)

研究内容

本文⁹ 使用两区域动态可计算一般均衡模型IMED|CGE，研究差异化碳税对上海产业竞争力的影响。研究设置了基准情景(BaU)和五种碳税情景，不同的碳税情景中，上海和其他中国地区均实施碳税政策以使中国实现NDC目标，但碳税相对高低不同。

Table 7.6: 上海研究情景设置

情景	有无碳排放限额	有无碳税
BaU	无	无
tax24	NDC 目标	非固定碳税
tax34	NDC 目标	非固定碳税
tax44	NDC 目标	非固定碳税
tax54	NDC 目标	非固定碳税
tax64	NDC 目标	非固定碳税

注：情景名中的两个数字代表其他地区与上海市的碳税比值，如 tax24 和 tax34 分别表示其他地区的碳税是上海的 2/4 和 3/4，tax44 表示两个地区碳税相等，而 tax54 和 tax64 情景表示其他地区的碳税分别是上海的 1.25 和 1.5 倍。

研究发现

碳税政策将显著降低上海市能源消耗和碳排放，但也当地经济增长造成一定的负面影响。相比 BaU 情景，在 tax24、tax34、tax44、tax54 和 tax64 情景下，2030 年上海市一次能源消耗分别下降 21.68%、21.05%、20.39%、19.72% 和 19.04%，碳排放分别下降 25.96%、25.27%、24.60%、23.96% 和 23.37%，同时 GDP 分别下降 1.08%、1.12%、1.17%、1.22% 和 1.28%。

由于省际贸易的影响，当中国其他地区碳税升高时，上海市 GDP 下降。与公平碳税的 tax44 情景相比，2030 年上海市 GDP 在 tax24 和 tax34 情景下分别高出 0.09% 和 0.05%，在 tax54 和 tax64 情景下则分别更低 0.05% 和 0.11%。这表明，当中国其他地区由于更高的碳税而产品需求降低时，也会通过省际贸易对上海经济产生负面影响。

上海市不同产业的产出和竞争力受到不均等碳税的影响不尽相同。与 tax44 情景相比，2030 年 tax24 情景下上海市农业、纺织、运输设备和电子行业将进一步受益，产出分别增加 2.02%、1.47%、1.08% 和 3.05%；而食品生产、石油化工、非金属、金属冶炼、金属产品、机械、其他制造业、发电、水路和航空行业的竞争力将有所下降，产出分别减少 2.02%、0.87%、0.03%、2.39%、0.88%、0.30%、0.01%、0.14%、3.93%、1.96% 和 2.08%。

⁹Xu Tian, **Hancheng Dai***, Yong Geng*, Zhen Huang, Toshihiko Masui, Tsuyoshi Fujita (2017). The effects of carbon reduction on sectoral competitiveness in China: A case of Shanghai. Applied Energy. ([文章链接](#))

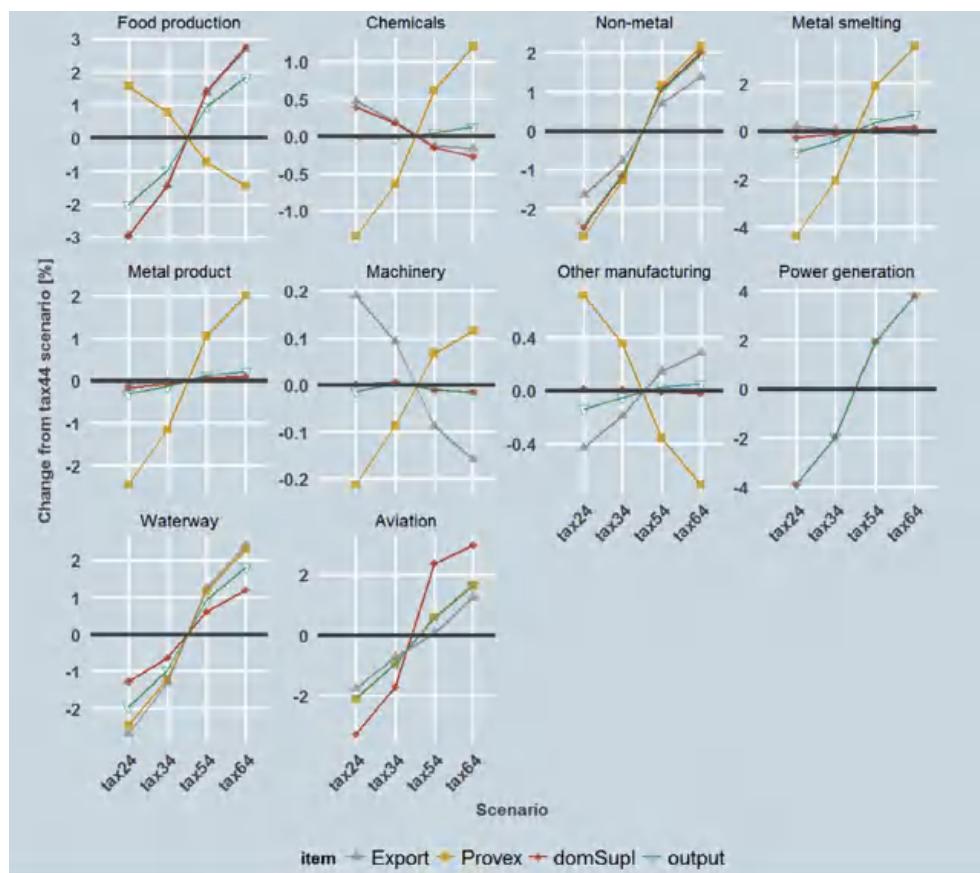


Figure 7.13: 相比 tax44 情景，2030 年其他情景下不同部门的宏观指标变化

7.3.5 地区间不均衡碳税对辽宁省碳排放和产业竞争力的影响

【ESI 前 1% 高被引文章】

- **原文标题:** Exploring the impacts of regional unbalanced carbon tax on CO₂ emissions and industrial competitiveness in Liaoning province of China ^[10]
- **期刊:** Energy Policy
- **发表年份:** 2018
- **作者:** Zhaoling Li, **Hancheng Dai***, Lu Sun, Yang Xie, Zhu Liu, Peng Wang, Helmut Yabar
- **关键词:** 碳税；国家自主贡献（INDCs）；可计算一般均衡模型；中国辽宁
- **文章链接:** <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2017.11.031>

研究内容

本文¹⁰以两区域模型IMED|CGE，研究了地区差异化碳税对中国辽宁省CO₂排放和产业竞争力的影响。研究针对辽宁和其他地区的碳税差异设置了基准情景(BaU)和九种碳税情景。

Table 7.7: 辽宁研究情景设置及不同情景下的碳税值(美元/吨)

Scenário	Region	2015	2020	2025	2030
taxC2P4	Liaoning	14.36	46.53	78.71	110.89
	ROC	7.18	23.27	39.36	55.45
taxC3P4	Liaoning	14.36	46.53	78.71	110.89
	ROC	10.77	34.90	59.03	83.17
taxC4P4	Liaoning	14.36	46.53	78.71	110.89
	ROC	14.36	46.53	78.71	110.89
taxC5P4	Liaoning	14.36	46.53	78.71	110.89
	ROC	19.14	62.05	104.95	147.85
taxC8P4	Liaoning	14.36	46.53	78.71	110.89
	ROC	28.71	93.07	157.43	221.78
taxC4P2	Liaoning	7.18	23.27	39.36	55.45
	ROC	14.36	46.53	78.71	110.89
taxC4P3	Liaoning	10.77	34.90	59.03	83.17
	ROC	14.36	46.53	78.71	110.89
taxC4P5	Liaoning	19.14	62.05	104.95	147.85
	ROC	14.36	46.53	78.71	110.89
taxC4P8	Liaoning	28.71	93.07	157.43	221.78
	ROC	14.36	46.53	78.71	110.89

注：情景名中 P 代表辽宁，C 代表中国其他地区，数字代表两地区间碳税的比值，如 taxC2P4 和 taxC3P4 分别表示中国其他地区的碳税是辽宁省的 2/4 和 3/4，taxC4P4 表示两个地区碳税相等，taxC5P4 则表示中国其他地区的碳税是辽宁省的 1.25 倍。

研究发现

碳税政策有助于降低辽宁省的能源消耗和碳排放量。碳税可成为减少煤炭消费的有效政策工具，且效果与辽宁省相对税率正相关；例如，2030 年辽宁省煤炭消耗在 taxC2P4 情景和 taxC8P4 情景分别减少 33.89% 和 27.42%。在碳排放方面，相比 BaU 情景，辽宁省 2030 年碳排放量在均等碳税情景(taxC4P4)下可降低 29.96%；相较于能源消费量，不同的碳税情景所对应的碳减排差异更不明显。

区域间不均等碳税将通过价格效应和规模效应影响辽宁省 GDP 和工业产出。在 GDP 方面，当中国其他地区将碳税从 taxC2P4 增加到 taxC5P4 时，辽宁省 2030 年 GDP 在价格效应主导下由 9373 亿美元增加至 9414 亿美元，但 taxC8P4 情景下由于规模效应下降至 9385 亿美元。在工业产出方面，中国其他地区的高碳税将增强工业在辽宁省的相对竞争力，从 taxC2P4 情景到 taxC8P4 情景，工业产出在辽宁省产值中的占比将从 46.37% 增长至 47.18%。

不均等碳税对辽宁省各部门的产出和竞争力影响不一。到 2030 年，与 taxC4P4 情景相比，在中国其他地区承担更低碳税的 taxC2P4 和 taxC3P4 情景下，辽宁省的农业、运输、机械、电子、其他制造业和铁路行业将有所获益，受损行业是采矿、纺织、造纸、石油等能源密集型行业的竞争力将受到更大的负面冲击。

¹⁰Zhaoling Li, Hancheng Dai*, Lu Sun, Yang Xie, Zhu Liu, Peng Wang, Helmut Yabar (2018). Exploring the impacts of regional unbalanced carbon tax on CO₂ emissions and industrial competitiveness in Liaoning province of China. Energy Policy. ([文章链接](#))

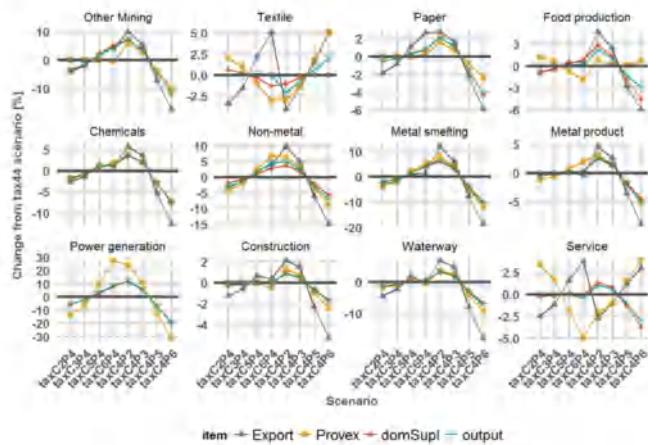


Figure 7.14: 相比 taxC4P4 情景，2030 年其他情景下受损部门的宏观指标变化

7.3.6 中国省级不均衡碳强度目标经济影响的一般均衡评估：以广西为例

- 原文标题:** A general equilibrium assessment of economic impacts of provincial unbalanced carbon intensity targets in China^[34]
- 期刊:** Resources, Conservation Recycling
- 发表年份:** 2018
- 作者:** Zhixiong Weng, **Hancheng Dai***, Zhongyu Ma, Yang Xie, Peng Wang
- 关键词:** 气候变化；经济影响；价格效应；规模效应；IMED 模型
- 文章链接:** [文章链接](#)

研究内容

本文¹¹ 利用两地区IMED|CGE 模型分析了广西与中国其他地区在有差异的碳强度目标下的经济影响。本文设置了 8 个情景，包括一个没有碳强度约束的基准情景 (BaU) 和七个碳强度约束情景。具体的情景设置图表7.8。

Table 7.8: 广西研究情景设置和碳强度目标

Scenario	Carbon Intensity Reduction Target, from 2005 to 2030	
	Guangxi	Rest of China
BaU	No carbon cap	No carbon cap
P65C65	65%	65%
P55C65	55%	65%
P60C65	60%	65%
P65C55	65%	55%
P65C60	65%	60%
P75C65	75%	65%
P65C75	65%	75%

¹¹Zhixiong Weng, **Hancheng Dai***, Zhongyu Ma, Yang Xie, Peng Wang (2018). A general equilibrium assessment of economic impacts of provincial unbalanced carbon intensity targets in China. Resources, Conservation Recycling. ([文章链接](#))

注：情景名中 P 代表广西，C 代表中国其他地区，而数字代表与 2005 相比 2030 年的碳强度减少的比例。差异化的碳减排目标代表广西省和中国其他地区的不同的碳减排责任。

研究发现

严格的碳强度目标能够有效减少碳排放。 P75C65 情景下，2030 年广西省总碳排放量与 BaU 情景相比，减少 6973 万吨，其中食品生产是最大的碳排放源（8522 万吨），占广西总排放量的 25.89%，其次是金属冶炼行业，排放量约为 7585 万吨。

差异化碳减排目标对碳价、人均 GDP 和福利损失产生重要影响。 对于碳价，以 P65C75 情景为例，2030 年中国其他地区的碳价为 124.04 美元/吨，与 P65C65 情景相比，增加了 55.8 美元/吨；对于广西省，碳价将从 P65C65 情景下的 29.88 美元/吨增加至 49.38 美元/吨（增幅为 19.5 美元/吨）。对于人均 GDP 而言，当广西和中国其他地区的减排目标低于 P65C65 时，人均 GDP 都会增加；而当中国其他地区实施更严格的碳强度目标时，2025 年和 2030 年，其人均 GDP 将会分别下降 0.22% 和 0.61%。至于福利损失，在广西省的减排目标为 65% 并且保持不变，中国其他地区的碳强度目标由 65% 增加至 75% 时，2025 年和 2030 年，中国其他地区福利损失分别为 0.52% 和 1.35%。

同时，差异化碳减排目标还会对工业产出和竞争力产生重要影响。 从 P55C65 情景到 P75C65 情景，广西省农业、纺织业、其他制造业和供水行业的产出将会增加，其中 2030 年农业的产出由 1116.2 亿美元上升为 1131.2 亿美元。

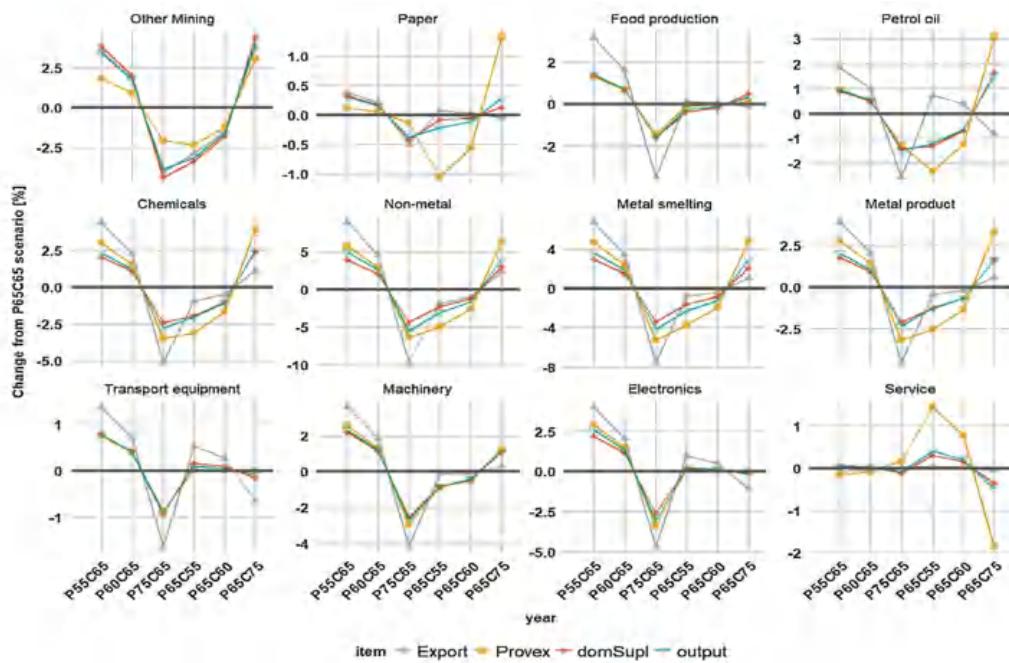


Figure 7.15: 相比 P65C65 情景，2030 年其他情景下受益部门的宏观指标变化

7.3.7 差异化碳减排目标的经济影响评估：以天津为例

- **原文标题:** Assessment of economic impacts of differentiated carbon reduction targets: A case study in Tianjin of China [⁷⁶]
- **期刊:** Journal of Cleaner Production
- **发表年份:** 2018
- **作者:** Yu Qi, Hancheng Dai*, Yong Geng*, Yang Xie
- **关键词:** 可计算一般均衡模型；不同碳减排目标；经济影响；中国天津
- **文章链接**

研究内容

本文¹² 以中国天津市为例，采用两区域IMED|CGE 模型，分析了差异化碳减排目标的经济影响。研究设置八个情景，包括一个无碳约束的基准情景（BaU）和七个碳约束情景。具体的情景设置以及不同情景下 2005 至 2030 年的碳强度减少目标如表7.9。

Table 7.9: 天津研究情景设置和碳强度目标

Scenario	Carbon Reduction Target	
	Tianjin	Rest of China
BaU	No carbon cap	No carbon cap
P55C65	55%	65%
P60C65	60%	65%
P65C65	65%	65%
P75C65	75%	65%
P65C55	65%	55%
P65C60	65%	60%
P65C75	65%	75%

注：情景名中 P 代表天津市，C 代表中国其他地区，而数字代表与 2005 相比 2030 年的碳强度减少的比例。差异化的碳减排目标表示天津市和中国其他地区的不同的碳减排责任。

研究发现

碳约束将对天津市的宏观经济和碳排放产生重要影响。与 BaU 情景相比，2030 年 P55C65、P60C65、P75C65、P65C55、P65C60、P65C65 和 P65C75 情景下天津市的 GDP 将会分别下降 0.07%、0.16%、0.58%、0.37%、0.32%、0.27% 和 0.21%。BaU 情景下，相比 2012 年，2030 年天津市的碳强度仅降低 14.87%；而在 P65C65 情景下，天津市的碳强度降幅将达到 39.43%，中国其他地区为 29.41%；P75C65 情景下，天津市的碳强度降幅最大，为 44.77%。

同时，差异化的减排目标，即碳配额的分配，也将显著影响碳价和宏观经济。对于碳价而言，当天津市碳强度高于中国其他地区时（即 P75C65 情景），2030 年天津市的碳价为 88.79 美元/吨；而在 P55C65 情景下，天津市的碳配额相对较多，碳价将降低至 40.78 美元/吨。对于 GDP 而言，

¹²Yu Qi, Hancheng Dai*, Yong Geng*, Yang Xie (2018). Assessment of economic impacts of differentiated carbon reduction targets: A case study in Tianjin of China. Journal of Cleaner Production. ([文章链接](#))

在 P55C65 和 P60C65 情景下，当天津市承担较少的碳减排义务时，2030 年 GDP 将会分别提高 0.21% 和 0.11%；相反，在 P75C65 情景下，2030 年天津的 GDP 将损失 0.31%。

碳减排也会对工业产出和工业竞争力产生重要影响，产出受到碳减排影响较大的部门包括：煤炭开采、天然气制造、金属冶炼等行业。具体来说，与 P65C65 情景相比，P55C65 情景下煤炭开采部门产出增幅最多，为 15.03%；而在 P75C65 情景下，煤炭开采部门产出降幅最大，为 14.84%。对于产业竞争力，与 P65C65 情景相比，当天津市和中国其他地区承担更多的碳减排责任时，产出增长率将会降低，甚至为负。如图 7.16 所示，与 P65C65 情景相比，P60C65 情景下天津市金属冶炼行业的产出将增加 1.78%，P55C65 情景下增加 3.45%，P65C75 情景下增加 3.72%。

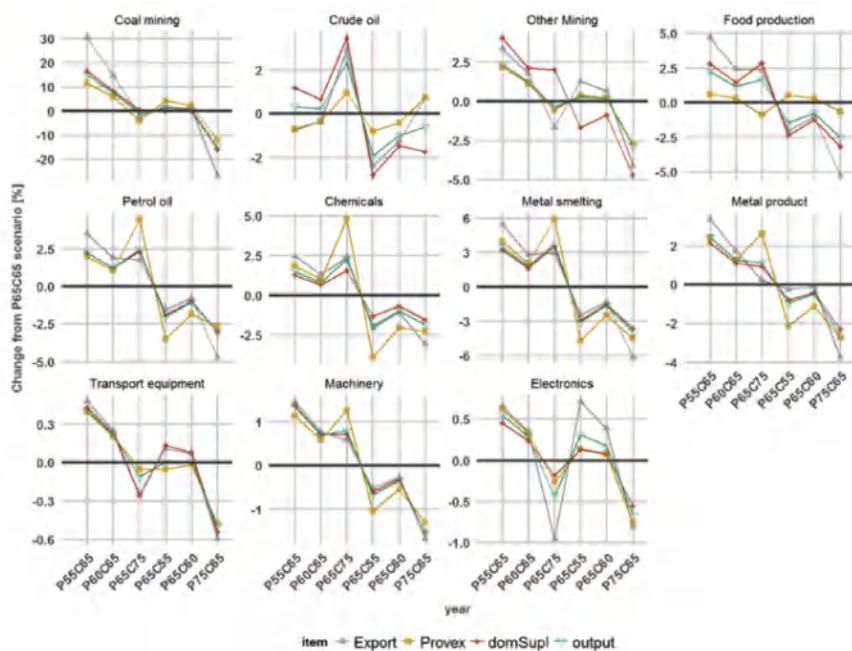


Figure 7.16: 相比 P65C65 情景，2030 年其他情景下受益部门的宏观指标变化

编辑/校阅：陆潘涛；任明；马腾

7.4 主题三：我国碳交易与环境税政策影响评估

实现低碳转型是我国应对全球气候变化，实现全人类可持续发展的必经之路，也是我国提升经济发展质量，推进生态文明建设的必由之路。根据《联合国气候变化框架公约》的国际承诺，我国于 2015 年 6 月呈交了国家自主减排方案，在碳排放强度下降率、达峰时间段、化石能源消费总量占比和森林覆盖率等方面列出了具体目标。自上而下类型的行政措施在实现减排目标方面效果有限，基于市场机制的碳交易和环境税政策无疑是实现上述目标的有力措施，同时还有利于降低全社会减排成本，推动经济向绿色低碳转型升级。

我国先后启动了包括广东和上海在内的 7 个碳排放交易试点，采用配额交易机制。**2017 年 12 月，中国碳排放权交易体系正式开始全国统一运行**，在发电行业（含热电联产）率先启动，并逐步扩大参与碳市场的行业范围。此外，我国于 2018 年 1 月 1 日起正式施行《中华人民共和国环境保护税法》，征税污染物主要涵盖二氧化硫、氮氧化物等在内的大气污染物、水污染物、固体废物和噪声等多种常见污染物，不包括二氧化碳。相比于排污收费制度，环境税充分发挥了“税收杠杆”的作用，可以有效地激励排放主体控制污染，减少排放。**随着技术水平的不断提高，碳税也可以成为我国应对气候变化、实现碳减排目标的可考虑政策之一**。从长远来看，适时对二氧化碳排放征税，配合碳交易的实施，这两者都具有积极意义。

在减排政策的评估中，仍有许多问题值得讨论。例如：各省应当如何更好地制定本省碳限额目标？碳交易在全国、全部门推广之后，各省份各部门所受影响又会有何不同？若在环境税中纳入碳税，其系统影响有多大？新能源政策与碳减排政策之间是互为取舍，还是相互补充？

拥有更详细中国省级地区和多部门的可计算一般均衡（CGE）模型无疑是回答上述问题的有效工具之一。LEEEP 课题组近几年通过对 IMED | CGE 模型的开发和拓展，使其逐渐成为可以评估区域更细尺度碳减排和环境税政策宏观经济影响的分析工具。近年来，IMED | CGE 单区域和多区域版本已被广泛用于评估全国和重点省市碳交易和环境税政策的宏观影响。这方面的评估工作将在以下的精选文献中为您一一呈现，希望对各位读者有所帮助！



Figure 7.17: 基于 IMED 模型的碳交易与环境税影响评估研究

以下为我们在本节甄选的相关已发表文章：

PART 1 碳交易

1. 碳交易政策对实现哥本哈根气候目标的影响：以广东省为例
2. 碳交易政策对广东省空气污染物排放的影响
3. 碳排放交易助力实现 NDC 目标：以上海市为例
4. 新能源政策与碳排放交易对实现中国 INDC 目标的经济影响
5. 国家碳排放交易市场对地区的影响研究：以上海市为例
6. 初始排放权分配对我国地区及部门碳排放权交易市场的经济影响

PART 2 环境税

1. 碳税对我国省级工业部门碳排放影响研究
2. 京津冀地区硫税及可再生能源开发对 CO₂、NO_x、SO₂ 排放的影响

基于IMED模型的碳交易与环境税影响评估研究：PART 1 碳交易政策

7.4.1 碳交易政策对实现哥本哈根气候目标的影响：以广东省为例

【ESI 前 1% 高被引文章】

- **原文标题:** Achieving Copenhagen target through carbon emission trading: Economic impacts assessment in Guangdong Province of China [13]
- **期刊:** Energy
- **发表年份:** 2015
- **作者:** Peng Wang, **Hancheng Dai***, Songyan Ren, Daqing Zhao, Toshihiko Masui
- **关键词:** 碳排放交易；一般均衡模型；碳交易价格
- **文章链接**

研究内容

本文¹³是IMED|CGE 模型首次用于评价碳交易政策经济影响，也是最早利用 CGE 模型评估中国省级碳排放交易政策的文章之一。本文改进了多区域动态 CGE 模型，在其中加入了碳交易的模块功能，使之能分析在同一区域内不同部门之间实行碳交易措施所带来的影响。同时，本文所使用的 CGE 模型清晰地刻画了资本积累过程，并处理了投入产出表和能源平衡表在能源消费统计上的误差，这些都是较突出的创新点。

本文基于两区域、多部门动态递归IMED|CGE 模型研究了中国广东实施碳排放交易制度对重点部门减排成本、碳价、各部门产值和就业、GDP，以及引入碳交易时的均衡交易量的影响。情景设置(表7.10)考虑了三种碳排放路径：基准(BASE)、减排情景(SAV)、强减排情景(LCE)。

¹³W. Peng, H. Dai* et al. (2015). "Achieving Copenhagen target through carbon emission trading: Economic impacts assessment in Guangdong Province of China." Energy 79: 212-227. ([文章链接](#))

Table 7.10: 情景设置：碳交易政策对实现哥本哈根气候目标影响研究

情景	可再生能源 发展水平	是否引入碳 交易	碳排放限额
BASE	低发展水平	否	无限额
SAV		否	2010-2020 年碳强度下降
SAVET		是	34%
LCE	高发展水平	否	2010-2010 年碳强度下降
LCET		是	40%

研究发现

碳交易的经济影响：碳交易显著减轻碳排放限额带来的 GDP 损失，同时大幅提高钢铁和冶金行业的增加值，但会使电力、水泥等部门增加值下降。**碳交易下的减排量与成本：**碳交易使以电力为首的各部门减排量明显增加。但碳价却有所上升，如钢铁行业将可能面临高达 180 美元/吨的减排成本。而广东省在碳交易情景下，2020 年碳强度大约为 0.9ton-CO₂/1000USD，较 2007 年下降约 50%，可完成哥本哈根气候目标 (图7.18)。**碳交易下的部门交易量：**在碳交易情景下，电力部门是最大的买家，预计到 2020 年该部门将购入近 2000 万吨碳，且碳限额程度越紧，它所需购入的额度越高。炼油部门也是四个部门中的主要买家，只不过数量上远不如电力。水泥和钢铁则因较高的减排潜力而成为四部门中的主要卖家，其中钢铁部门的卖出量逐年上升，水泥部门平稳中有下降。有趣的一是旦实施较紧的碳限额，钢铁部门的卖出量将显著提高，达到 2020 年的 2000 万吨左右，而水泥部门则迅速由 2013 年的 1250 万吨下降至 500 万吨左右。

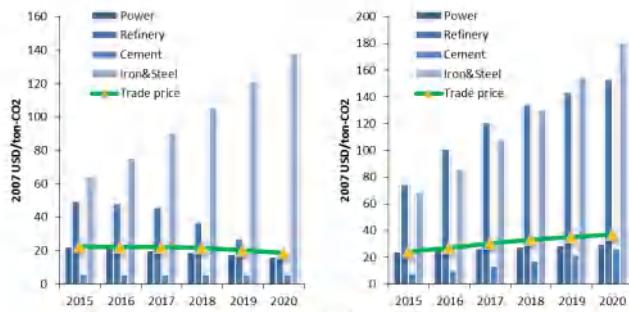


Figure 5: The carbon prices of four sectors in SAV (left) and LCE (right) scenarios with (bar) and without (line) emission trading

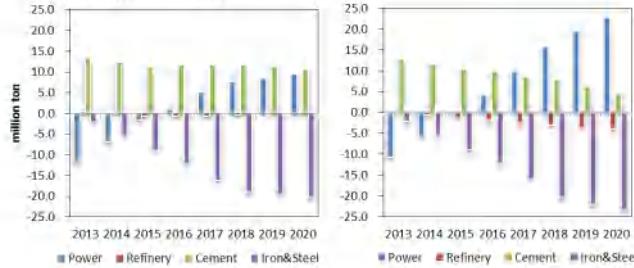


Figure 6: Trade volume in SAVET (left) and LCET (right) scenarios with emission trading. Negative value means purchasing emission credit whereas positive value means selling.

Figure 7.18: (上半部分) 为两种情景 (左为 SAV, 右为 LCE) 下四个部门的碳价；(下半部分) 两种情景 (同上) 下四个部门各自的碳交易量，负号代表买入

7.4.2 碳交易政策对广东省空气污染物排放的影响

- 原文标题: Impacts of carbon trading scheme on air pollutant emissions in Guangdong Province of China^[19]
- 期刊: Energy for Sustainable Development
- 发表年份: 2015
- 作者: Beibei Cheng, **Hancheng Dai***, Peng Wang, Daiqing Zhao, Toshihiko Masui
- 关键词: 碳交易政策; CGE 模型; 空气污染; 协同效益
- [文章链接](#)

研究内容

本文¹⁴建立了一个包含广东省的多区域、多部门动态递归 CGE 模型 (**IMED | CGE**)，并运用对 2007-2020 年两类情景（有无政策）下的碳和大气污染物排放路径预测，定量评估了**碳排放交易机制 (ETS)** 政策对广东省大气污染物减排的影响，特别是对碳排放交易机制造成的隐含大气污染物排放流的影响。具体的情景设置如表 7.11 所示。

Table 7.11: 情景设置：碳交易政策对广东省空气污染物排放影响研究

情景	有无碳排放限额	是否引入碳交易
BaU	无	无
BaU_RE	无，但提高清洁能源比重	无
SAV	有	无
SAVET	有	有

研究发现

政策具有正面作用和协同效益：新能源、碳限额和碳交易均有助于降低广东省乃至全国的能源和碳强度，并减少当地空气污染物排放（协同效益），如 2010-2020 年能源强度和碳排放强度下降的同时，SAV 情景下 SO₂ 和 NO_x 排放分别下降 35% 和 30%；SAVET 情景下 SO₂ 和 NO_x 排放分别下降 33% 和 31%。

ETS 的显著贡献：ETS 政策将使 2020 年 SO₂ 和 NO_x 的排放量在 2010 年的基础上分别减少 33% 和 31%（协同效益）。随着 ETS 在 SAVET 情景下的实施，存在 3.8 万吨空气污染物的隐含交易量（潜力市场）。这在创造约 5500 万美元碳市场的同时，将带来约 5000 万美元的额外空气污染物交易量。而在交易市场上，钢铁部门将成为重要的买方，特别是在 CO₂ 和 SO₂ 市场上，该部门将在 2020 年分别购入 2000 万吨和 2500 万吨左右。而电力部门将成为主要的卖方，NO_x 市场上该部门将卖出约 3000 万吨左右（市场格局）(图 7.19)。

¹⁴B. Cheng, H. Dai* et al. (2015). "Impacts of carbon trading scheme on air pollutant emissions in Guangdong Province of China." *Energy for Sustainable Development* 27: 174-185. ([文章链接](#))

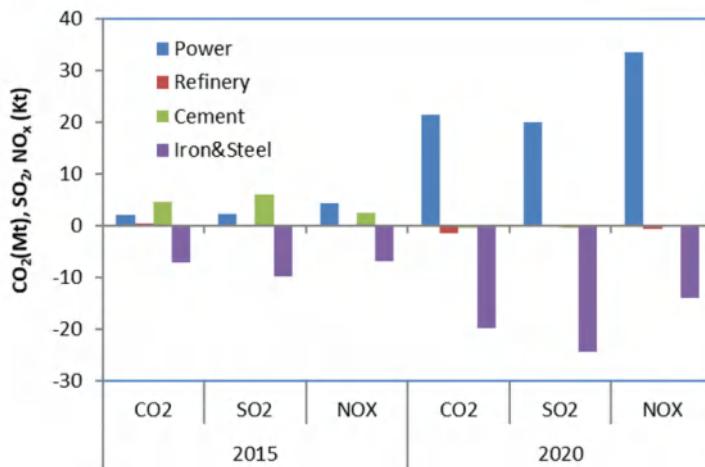


Figure 7.19: 广东省四个部门在碳交易情景下三种排放物的交易量（负号代表买入）

7.4.3 碳排放交易助力实现 NDC 目标：以上海市为例

【ESI 前 1% 高被引文章】

- **原文标题:** Achieving China's INDC through carbon cap-and-trade: insights from Shanghai^[11]
- **期刊:** Applied Energy
- **发表年份:** 2016
- **作者:** Rui Wu, Hancheng Dai*, Yong Geng*, Yang Xie, Toshihiko Masui, Xu Tian
- **关键词:** 碳排放交易；可计算一般均衡模型；上海
- **文章链接:** [\[文章链接\]](#)

研究内容

本文¹⁵构建了一个包含上海市的两区域、多部门递归动态的 CGE 模型 (IMED|CGE)，旨在探究根据 NDC (国家自主减排承诺) 而设计的碳限额 (CAP) 和碳交易对上海市乃至全国社会经济发展的影响。本研究包括三个情景：基准情景 (BaU)、限额情景 (无碳交易) (CAP)、限额 + 碳交易情景 (ETS) (表7.12)。

研究发现

在本研究假设的有碳排放限额、但不允许碳交易的情况下，航空运输和炼油炼焦部门的减排成本相对较高，而钢铁部门的减排成本较低。因此，在碳排放权交易情景下，航空运输业将是最大的买家 (由 2020 年的 200 万吨上升至 2030 年的 500 万吨左右)，而钢铁 (2020 年约卖出 500 万吨，而 2030 年下降至 200 万吨左右) 和电力部门 (2020 年为 0, 2030 年为 300 万吨左右) 将是最大的卖家。

¹⁵R. Wu, H. Dai* et al. (2016). "Achieving China's INDC through carbon cap-and-trade: Insights from Shanghai." *Applied Energy* 184: 1114–1122. ([文章链接](#))

Table 7.12: 情景设置：碳排放与 NDC 目标关联研究

情景	可再生能源占比	排放限额	碳排放交易	GDP 增长率	人口增长率
BaU	10%	无排放限额	不允许		
CAP	2020 为 15%; 2030 为 21%	2020 年, 每个参与 ETS 的部门排放量相对于 BaU 情景下降 18%;	不允许	2007-2020 年平均 增长率为	2007-2020 年间平均 增长率为
		2030 年下降 28%		7.7%; 2007- 2030 年为 6.5%	1.26%, 2007-2030 年为 0.84%
		2030 年下降 28%			
ETS	同 CAP	同 CAP	允许		

在 2020-2030 年期间，由于更严格的碳限额设置，均衡交易价格从 2020 年的 38 美元/吨上升到 2030 年的 69 美元/吨。2020 年和 2030 年的碳排放量将分别为 4.9 和 6.2 亿吨二氧化碳。

为了实现中国的 NDC 目标，碳排放交易情景下上海的 GDP 损失 (-2.2%) 将低于 CAP 情景下的 GDP 损失 (-2.3%)，碳排放交易可以减少对各部门产出和就业的负面影响。此外，碳交易价格和交易量对不同的配额分配方案非常敏感 (图7.20)。

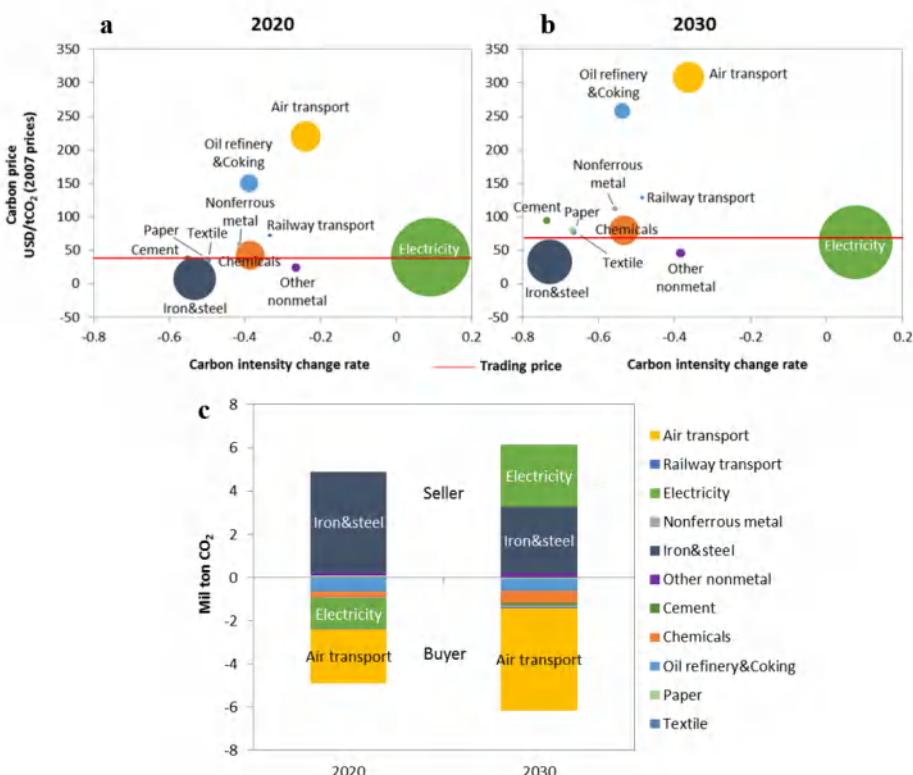


Figure 7.20: (a,b)2020 和 2030 年上海各部门碳强度下降率 (与同年 BaU 相比)、减排成本 (泡泡的大小) 和 ETS 下的均衡碳价 (红线); (c) ETS 情景下各部门的碳排放交易量

7.4.4 新能源政策与碳排放交易对实现中国 INDC 目标的经济影响

- 原文标题: Aligning renewable energy targets with carbon emissions trading to achieve China's INDCs: A general equilibrium assessment^[16]
- 期刊: Renewable and Sustainable Energy Reviews
- 发表年份: 2018
- 作者: Hancheng Dai*, Yang Xie*, Jingyu Liu, Toshihiko Masui
- 关键词: 碳交易; 新能源; 经济影响; 可计算一般均衡模型; 中国
- 文章链接: [文章链接](#)

研究内容

碳排放权交易市场是我国实现 NDC 自主减排承诺的重要政策工具, 而发展新能源也是我国实现能源结构转型的重要举措, 这两种政策将如何互相影响呢? 本研究¹⁶采用一个单区域(中国)、多部门的递归动态IMED|CGE 模型, 以考察**新能源政策**、**初始限额分配**和**碳交易市场推广**等**三大类政策的环境、经济综合影响**, 并依照以上三类政策的自由组合设置了共 14 个情景(表7.14):

Table 7.13: 情景设置: 新能源政策与碳排放交易对实现中国 INDC 目标的经济影响研究

Intensity target		No target	carbon intensity reduced by around 45% in 2020 and 65% in 2030 from 2005 levels		
		D1			
Emission trade arrangement		D4	BaU	EToff	ETlim
Burden sharing scheme	Renewable energy target	D2	D3		
	REFix		BaUREfix		
	REtag		BaURERtag		
BSshr	REFix			BSshrREFixEToff	BSshrREFixETlim
	REtag			BSshrREtagEToff	BSshrREtagETlim
BSrat	REFix			BSratREFixEToff	BSratREFixETlim
	REtag			BSratREtagEToff	BSratREtagETlim

研究发现

宏观经济: 碳减排会对 GDP 造成一定的损失, 但新能源发展程度越高、参与碳交易的部门数量越多, GDP 损失越小。另外, 以“一刀切”的形式制定各部门减排份额会比按照历史排放比例分配减排份额的方式造成更大的 GDP 损失。同时, 碳交易政策的推行可以减轻部门产出损失, 但由于模型假设了劳动力自由流动, 所以在次情景下就业结构会发生一定改变, 比如就业人口逐渐从产出损失较大的部门转移到损失较小的部门(从电力、航空部门转移到服务业、农业部门)。

碳减排成本: 施行碳交易, 且参与部门越多, 综合碳价越低, 从数量上来说, 综合碳价可以因政策的施行由原先的 420 美元/吨降至 140 美元/吨左右。

碳市场: 若能将碳交易在全国所有部门推广, 2030 年碳交易总量将可以从原先 5 亿吨左右上升至 30 多亿吨左右, 而一旦实施较高程度的新能源政策, 2030 年碳交易总量将下降至 2-5 亿吨

¹⁶H. Dai* et al. (2018). "Aligning renewable energy targets with carbon emissions trading to achieve China's INDCs: A general equilibrium assessment." *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 82: 4121-4131. ([文章链接](#))

左右其中。在全部门参与情景下，电力部门是最大买方（交通、采矿紧随其后），2030 年买入额能达到 20 亿吨左右，但若实施新能源政策，电力部门却能成为主要卖方，2030 年卖出额达到 3 亿吨。其他制造业、化学和煤炭等部门也会在不同的分配方式下成为主要卖方（图7.14）。

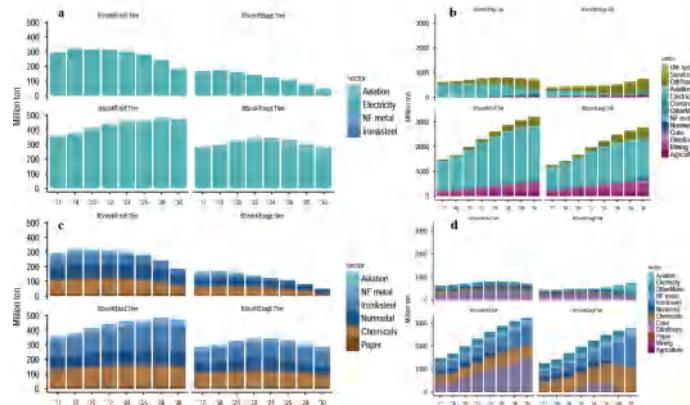


Figure 7.21: (a) 2017-2030 年四种情景下（非全部门参与的 ETlim）买方部门的碳购买量；(b) 四种情景下（所有部门参与的 ETall）买方部门的碳购买量；(c) 四种情景下（ETlim）卖方部门的碳卖出量；(d) 四种情景下（ETall）卖方部门的碳卖出量

7.4.5 国家碳排放交易市场对地区的影响研究：以上海市为例

- **原文标题:** Regional impacts of launching national carbon emissions trading market: A case study of Shanghai [29]
- **期刊:** Applied Energy
- **发表年份:** 2018
- **作者:** Zhiqing Liu, Yong Geng*, **Hancheng Dai***, Jeffrey Wilson, Yang Xie, Rui Wu, Wei You, Zhongjue Yu
- **关键词:** 全国碳排放交易；IMED|CGE 模型；NDC 减排目标；上海；城市治理
- **文章链接:** [\[文章链接\]](#)

研究内容

本研究¹⁷采用多区域（上海市与其他区域 ROC）、多部门（37 个部门）的递归动态IMED|CGE 模型以考察碳交易和碳限额对上海市乃至全国的综合影响，包括碳排放量、交易额、GDP、部门产出等指标。对此，本文依据无政策（BaU）、碳限额（部门限额、地区限额）和碳交易（部门交易、地区交易）设立 5 种情景（表7.14）：

¹⁷Z. Liu, H. Dai* et al. (2018). "Regional impacts of launching national carbon emissions trading market: A case study of Shanghai." *Applied Energy* 230: 232-240. ([文章链接](#))

Table 7.14: 情景设置：国家碳排放交易市场对地区的影响研究

情景名	情景描述
BaU	无碳排放限额、无碳交易市场
CAPsec	对 ETS 部门进行碳排放限额，无碳交易
CAPreg	对上海及其他地区进行碳排放限额，无碳交易
ETsec	对 ETS 部门进行碳排放限额，允许区域内各部门碳交易
ETreg	对上海及其他地区进行碳排放限额，运行区域间碳交易

研究发现

碳排放：所有碳减排政策均能使上海市乃至全国碳排放和碳强度下降。但碳交易政策可能会使上海市单区域无法在 2030 年达到强度下降 65% 的目标，而在全国碳市场上，上海市倾向于成为一个庞大的买家 ((图7.22)。

碳价：在全国区域间统一碳市场下，上海市 2030 年的平均碳价为 200 美元/吨左右，其中石油制品和纺织业的碳减排成本是最高的。

宏观经济：碳交易扩展范围越大，GDP 损失越低，部门总产损失越低。从部门来看，金属冶炼和化学的产出损失最大，而食品业和纺织业使总产出唯一增加的部门。

碳市场：在上海市的碳交易中，买方部门数量大于卖方，其中电力与航空是主要买方，购买额度分别由 2020 年的近 1000 万吨，250 万吨，增加至 2030 年的 1800 万吨和 100 万吨。而金属冶炼部门将成为主要卖方，额度在 1600 万吨 (2020 年)，3200 万吨 (2030 年) 左右。相反，在其他地区的碳交易市场中，卖方数量要多于买方。电力部门仍是最主要买家，额度能达到 2.5 亿吨 (2020 年) 和 7 亿吨 (2030 年) 左右，而金属冶炼也仍是主要卖家，但造纸、航空和化学等部门都成为了卖方。

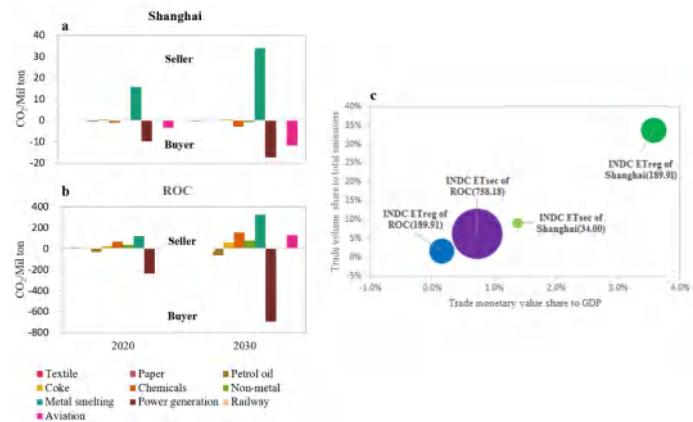


Figure 7.22: (a) 上海市 2020-2030 年碳交易市场总量及各部门交易量；(b) 其他地区 2020-2030 年碳交易市场总量与各部门交易量；(c) 2030 年两种情景下 (ETsec 与 ETreg) 上海及其他地区碳市场总量 (泡泡大小)，碳交易总量的货币价值占 GDP 比重 (横轴)、碳市场总量占排放量比重 (纵轴)

7.4.6 初始排放权分配对我国地区及部门碳排放权交易市场的经济影响

- 原文标题: A general equilibrium analysis on the impacts of regional and sectoral emission allowance allocation at carbon trading market [28]
- 期刊: Journal of Cleaner Production
- 发表年份: 2018
- 作者: Zhongjue Yu, Yong Geng*, **Hancheng Dai***, Rui Wu, Zhiqing Liu, Xu Tian, Raimund Bleischwitz
- 关键词: 碳交易方案; 排放权; 可计算一般均衡模型; 城市治理; 上海
- [文章链接](#)

研究内容

本研究¹⁸采用两区域（上海与中国其他地区）、多部门，递归动态的IMED|CGE 模型来考察碳交易、碳限额程度和初始排放分配方式对上海市乃至全国的系统性影响。本文依据是否存在碳交易、碳约束程度（P55 代表上海市 2030 年相较于 2005 年碳强度应下降 55%）和初始排放权分配形式（SHRbau 代表初始分配按照 bau 预测的 2030 年排放量比例进行分配）三类政策划分情景（表7.15）：

Table 7.15: 情景设置：初始排放权分配对碳交易市场的经济影响研究

划分依据	情景名
基准情景	BaU
是否存在碳交易	CAP, ET
碳强度下降幅度	P55, P65, P75
初始排放权分配	SHRbau, SHR07

研究发现

碳排放: 减排目标越严格，碳排放总量越低。2030 年上海市在 P55、P65、P75 情景下，碳排放量依次为 4.10、3.66、3.37 亿吨。此外，若按照 SHRbau 的趋势，电力部门得到了最多的初始排放权：电力为 32.1%，化工部门为 14.7%，水运为 8.5%，金属冶炼为 8.3%。

宏观经济: 碳交易政策可以减轻碳限额带来的 GDP 损失和部门总产出损失，而不同的初始权分配方式对 GDP 损失有影响，但对社会总福利几乎没有影响，总的来看，按照 bau 预测值的方式分配减排额度所造成的损失更小。另外，因航空业在模型模拟中有稳定的需求，所以其部门产出不降反升。

¹⁸Z. Yu, H. Dai* et al. (2018). "A general equilibrium analysis of the impacts of regional and sectoral emission quota allocation on carbon trading market." *Journal of Cleaner Production* 192: 421-432. ([文章链接](#))

减排成本：初始排放额度越高，自然减排潜力越大，减排成本越低。典型如减排成本最低的金属冶炼部门，通常来说，金属冶炼部门的减排成本最低，与基准情景（BaU）相比，其碳强度减少率最高，约为-41%。同时，在 SHR07 的初始额度下，该部门碳减排成本为 0，而一旦让该部门承受更少的额度（SHRbau 下），它的碳减排成本便上升至 100 美元/吨左右（图7.24a, b）

碳市场：不同的初始分配对碳市场规模存在影响，根据 BaU 预测量分配部门碳初始额度的方式所产生的碳市场交易总量将远小于按照 07 年固定比例分配的方式，2030 年在 P65 下两者之比达到近两倍（1500 万吨，3000 万吨左右），占总排放量分别为 3% 和 7.1% 左右。若以货币价值量衡量，P65SHRbau 下上海市碳交易总量约有 20 亿美元（占当年 GDP 约 0.25%），而在 SHR07 下交易总量能达到 43 亿美元左右（占当年 GDP 约 0.51%）。

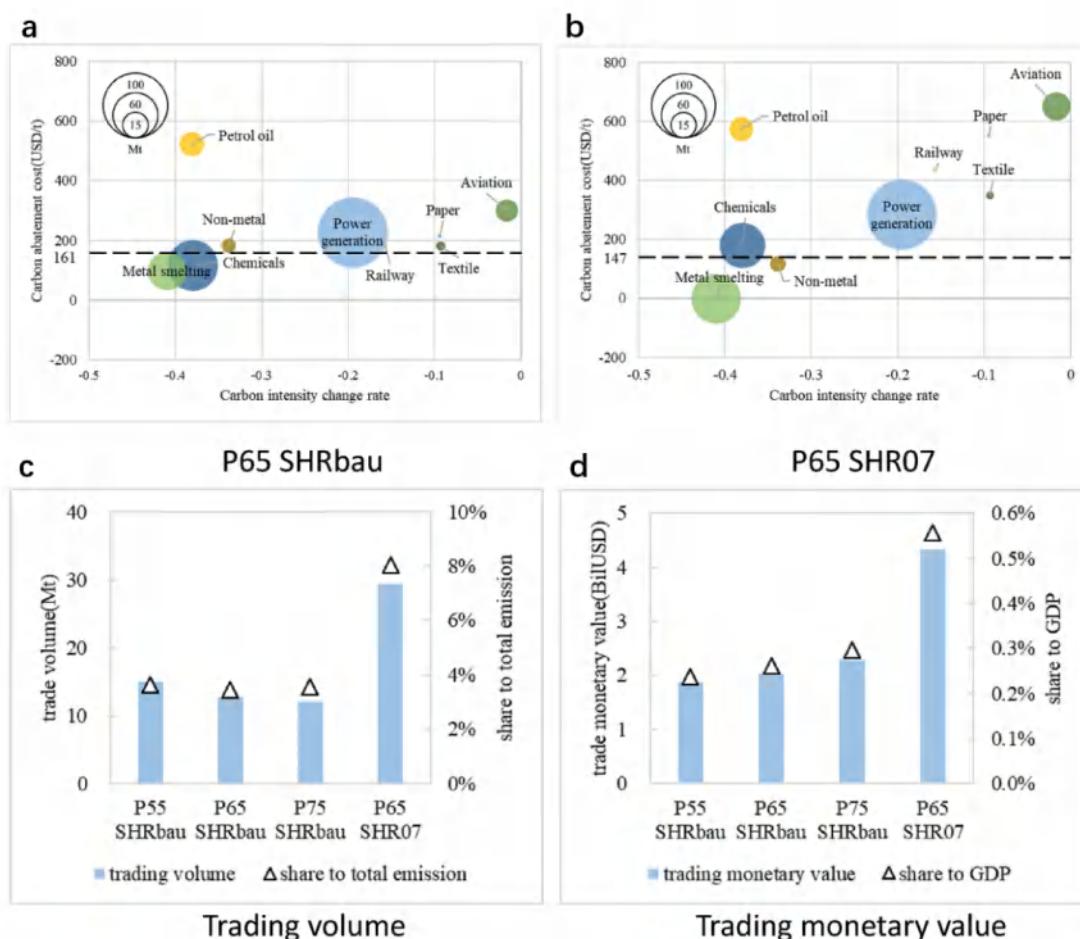


Figure 7.23: (a) P65SHRbau 情景下上海市 2030 年碳强度下降率（横轴，相比于 BaU）、各部门碳减排成本（纵轴）、各部门初始份额（泡泡大小）和碳均衡价格（黑色虚线）；(b) P65SHR07 情景，其他同 (a)；2030 年上海市在四种情景下的碳市场交易量 (c)、碳市场交易量的货币价值 (d)

基于IMED模型的碳交易与环境税影响评估研究：PART 2 环境税**7.4.7 碳税对我国省级工业部门碳排放影响研究**

- **原文标题:** Exploring impact of carbon tax on China's CO₂ reductions and provincial disparities [25]
- **期刊:** Renewable and Sustainable Energy Reviews
- **发表年份:** 2017
- **作者:** Huijuan Dong, **Hancheng Dai**, Yong Geng*, Tsuyoshi Fujita, Zhe Liu, Yang Xie, Rui Wu, Minoru Fujii, Toshihiko Masui, Liang Tang
- **关键词:** 碳税；经济损失；碳减排；IMED | CGE 模型；省级差异
- **文章链接:** [文章链接](#)

研究内容

本研究¹⁹采用了包含我国 30 个省和 22 个经济部门的多区域递归动态IMED | CGE 模型，探究碳税给各省份带来的经济和环境综合影响。根据不同的碳税价格水平设置了 1 个无碳税的基准情景 (BaU) 和 6 个不同水平的碳税政策情景 Tax20、Tax40、Tax60、Tax80、Tax100 和 Tax120，分别表示 2030 年每吨二氧化碳征收 20、40、60、80、100 和 120 美元。

研究发现

研究发现，所征收的碳税越高，碳减排效果就越明显，但 GDP 损失越大。在 TAX120 情景下，2030 年我国碳排放总量较基准情景低 43.2%，GDP 损失为 5%。部门层面，作为碳排放量最大的部门，电力部门减排潜力最大，相较于基准情景 TAX120 情景下减排潜力约 19 亿吨 (图7.24a)。

省级层面，各省 GDP 规模与碳排放呈正相关关系 (图7.24b)，但碳减排潜力与 GDP 没有明确关系。在 TAX120 情景下，广东、江苏和山东省 GDP 最高、同时也是碳排放前三位省份，但化石燃料消费占比较高的内蒙古和山西省碳减排潜力最大。同时，碳税对各省份的宏观经济将产生一定的负面影响 (图7.24c)，其中宁夏、贵州、新疆和内蒙是损失较为严重的几个省份，而东部省份虽然损失绝对值大，但相对值都不大。

此外，碳税政策的实施也将对各省能源消费结构产生一定影响 (图7.24d)，具体来说将主要使得各省份的煤炭消费在不同程度上降低，其中甘肃、四川、青海、吉林和内蒙降幅最大，在 TAX120 情景下，这五个省份的煤炭占比分别减少 19.03%、2.85%、12.71%、12.35% 和 12.23%。由于模型中天然气价格高于原油，因此大部分省份减少的煤炭消费份额将被原油所替代。

¹⁹H. Dong, H. Dai* et al. (2017). "Exploring impact of carbon tax on China's industrial CO₂ reductions and provincial disparities." *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 77: 596-603 ([文章链接](#))

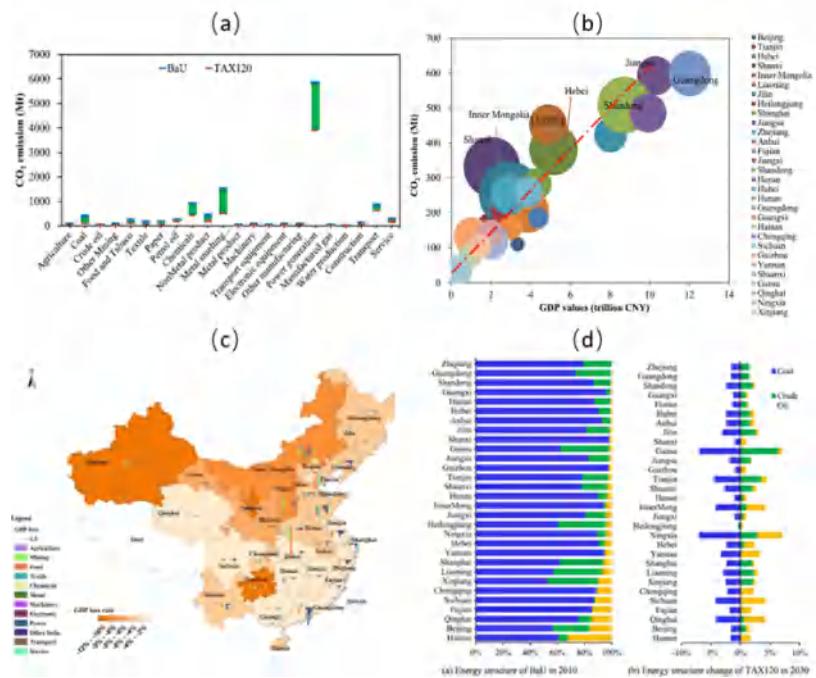


Figure 7.24: (a) 各情景下各部门碳排放量 (b) 各省份 GDP 与碳排放 (b) 2030 年 TAX120 相较于 BaU 情景下各省份 GDP 损失 (d) 各省份能源结构变化

7.4.8 京津冀地区硫税及可再生能源开发对 CO₂、NO_x、SO₂ 排放的影响

- 原文标题: Impacts of SO₂ taxations and renewable energy development on CO₂, NO_x and SO₂ emissions in Jing-Jin-Ji region [14]
- 期刊: Journal of Cleaner Production
- 发表年份: 2017
- 作者: Yang Xie, **Hancheng Dai***, Huijuan Dong
- 关键词: 碳/空气污染物排放; 可再生能源; 环境税; 可计算一般均衡模型 (CGE); 京津冀地区
- [文章链接](#)

研究内容

本研究²⁰采用IMED | CGE 模型, 选取了我国最大的城市群以及空气污染最严重的地区之一——京津冀地区作为研究对象, 探究硫税与可再生能源政策对于该地区的能源、环境和经济影响。本研究设置了六种情景, 包括没有任何硫税与可再生能源政策的基准情景 (BaU)、单独实施低硫税政策情景 (TAX1)、高硫税政策情景 (TAX2) 和可再生能源政策情景 (RE), 以及这三种政策的不同组合情景 (TAX1RE、TAX2RE)。

²⁰Y. Xie, **H. Dai*** et al. (2018). "Impacts of SO₂ taxations and renewable energy development on CO₂, NO_x and SO₂ emissions in Jing-Jin-Ji region." *Journal of Cleaner Production* 171: 1386-1395 ([文章链接](#))

研究发现

在高硫税和可再生能源鼓励政策同时实施的情景下 (TAX2RE)，碳减排与空气污染物效果最好 (图7.25a)。可再生能源的发展在降低能源强度方面作用有限，但是可以显著降低碳强度，而硫税政策则有助于同时降低能源强度和碳强度。在 TAX2RE 情景下，2020 年北京市碳强度下降超过 55%，在地区层面可以实现我国的哥本哈根目标，而天津和河北仅分别下降 34%、17%，需要更严格有效的政策 (图7.25b)。

在部门层面，征收硫税可以同时降低各部门 CO_2 、 NO_x 和 SO_2 的排放，且硫税越高，减排效果越好 (图7.25c)。其中，电力部门是三个地区二氧化碳和空气污染物贡献最大的部门，同时也是减排潜力最大的部门。

同时需要注意的是，征收环境税是降低空气污染物和碳排放的有效政策，但也会对各省市宏观经济产生一定的负面影响 (图7.25d)。2020 年天津的 GDP 损失最高，其次为北京和河北。当环境税与可再生能源发展相结合时，GDP 损失将低于单独实施环境税下的 GDP 损失，其中河北省 TAX1RE 情景和 TAX2RE 情景下 GDP 甚至还会增加 (分别为 0.34% 和 0.22%)，可见发展可再生能源有助于京津冀地区的低碳发展。

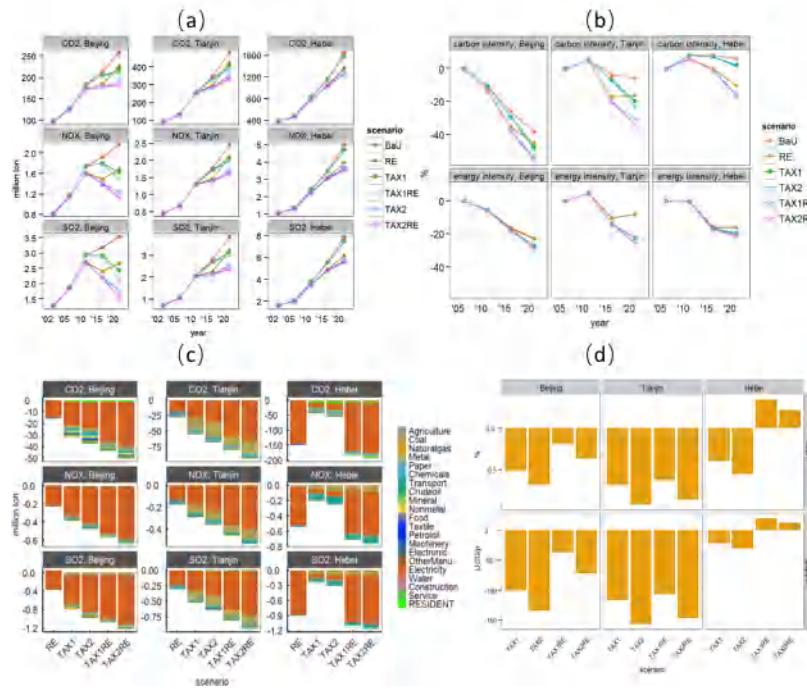


Figure 7.25: (a) 不同情景下大气污染物及碳排放 (b) 与 2005 年相比能源强度和碳强度变化 (c) 2020 年与基准情景相比各部门减排潜力 (d) 硫税与可再生能源政策的宏观经济影响

7.5 主题四：气候政策与可持续发展目标 (SDG) 关联分析

由于化石燃料在燃烧过程中同时释放温室气体和大气污染物，很多高能耗部门同时也是水密集型及高资源强度部门，因此这种同源性使得在采取碳减排政策的同时，可以改善空气质量、降低资源消耗、提高水质等，对实现可持续发展目标 (Sustainable Development Goals, SDGs) 具有显著的协同效益，并且与我国建设资源节约型、环境友好型社会的发展目标一致。加强国内经济、能源、环境和应对气候变化的协同治理，可实现多方共赢的发展目标。

那么，减缓气候变化行动可以在多大程度上有利于大气污染治理？发电结构的低碳化对电力部门用水有多大影响？碳排放与能源利用、经济增长、水资源压力和水质变化之间又有什么关系？为回答上述问题，LEEEP 课题组近几年来拓展了IMED体系中的经济模型、添加用水和水污染物排放模块，并通过耦合温室气体与大气污染物协同效益模型 (GAINS)、系统动力学与水环境模型 (SyDWEM)、电力调度优化 (EDO) 等模型，在不同的时间和空间尺度上，评估了减排政策的能源-经济-大气-水的综合影响 (图7.26)。

7.5.1 气候政策与可持续发展目标 (SDG) 关联分析框架图



Figure 7.26: 基于 IMED 模型的气候减缓与 SDG 关联研究

以下为我们在本节甄选的相关已发表文章：

1. 中国各省大气污染物减排的协同效益
2. 中国各省电力部门面向 2030 年的节水潜力分析
3. 碳减排对中国地方工业用水和减污潜力分析
4. 快速城市化流域中碳-能源-水耦合关系模拟
5. 中国碳减排对资源消耗的协同效益

7.5.2 中国各省大气污染物减排的协同效益

【ESI 前 1% 高被引文章】

- **原文标题:** Pursuing air pollutant co-benefits of CO₂ mitigation in China: A provincial leveled analysis [5]
- **期刊:** Applied Energy
- **发表年份:** 2015
- **作者:** Huijuan Dong, **Hancheng Dai**, Liang Dong, Tsuyoshi Fujita, Yong Geng, Zbigniew Klimont, Tsuyoshi Inoue, Shintaro Bunya, Minoru Fujii, Toshihiko Masui
- **关键词:** 空气污染物排放; 协同效益; 中国省份; GAINS-China 模型; CGE 模型
- **文章链接**

研究内容

本文²¹结合 CGE (IMED|CGE 早期版本) 和 GAINS-China 模型, 预测了中国未来二氧化碳和空气污染物排放成本降低及其协同效益, 为此本文根据是否采取碳减排政策以及是否采取空气污染物减排措施设置了 4 个情景。

研究发现

CO₂ 减排措施可以显著降低 SO₂ 和 PM_{2.5} 的减排成本, 但对 NO_x 的减排成本影响较小。SO₂ 减排成本在 S4 情景下将从 2005 年的 68 亿欧元增加到 2030 年的 212 亿欧元, S2 情景下将增加到 2030 年的 301 亿欧元; S2 和 S4 情景下的 PM_{2.5} 减排成本也将发生显著变化, 2030 年分别为 124 亿欧元和 105 亿欧元; 而对于 NO_x, S2 和 S4 情景下的减排成本几乎相同, 仅从 2005 年的 16 亿欧元增加到 2030 年的 760 亿欧元。三种空气污染物传统视角的减排协同效益(即仅采取 CO₂ 减排措施所带来的空气污染物减少) 均高于实际的减排协同效益, 说明大多数传统的协同效益研究往往高估了实际减排协同效益(图 7.27)。

从省级层面分析可知, CO₂ 及空气污染物的排放和减排潜力与区域经济规模有着密切的关系, 但 GDP 并不是影响排放的唯一因素。减排量与减排成本的协同效益具有相似的特点, 即区域差异较大, 但区域差异与 GDP 值并没有绝对的关系, 在三种大气污染物中, SO₂ 的减排成本协同效益最为显著。

总而言之, CO₂ 减排政策不仅可以降低大气污染物排放, 还可以降低减排成本。中国各省区各种污染物排放存在明显区域差异, 协同效益也有类似的特征, 但与 GDP 的关系较小。合理的投资配置机制应考虑当地资源禀赋、成本效益和减排潜力。

²¹Huijian Dong, **Hancheng Dai**, Liang Dong et al. (2015). Pursuing air pollutant co-benefits of CO₂ mitigation in China: a provincial leveled analysis. *Applied Energy* 144: 165-174. ([文章链接](#))

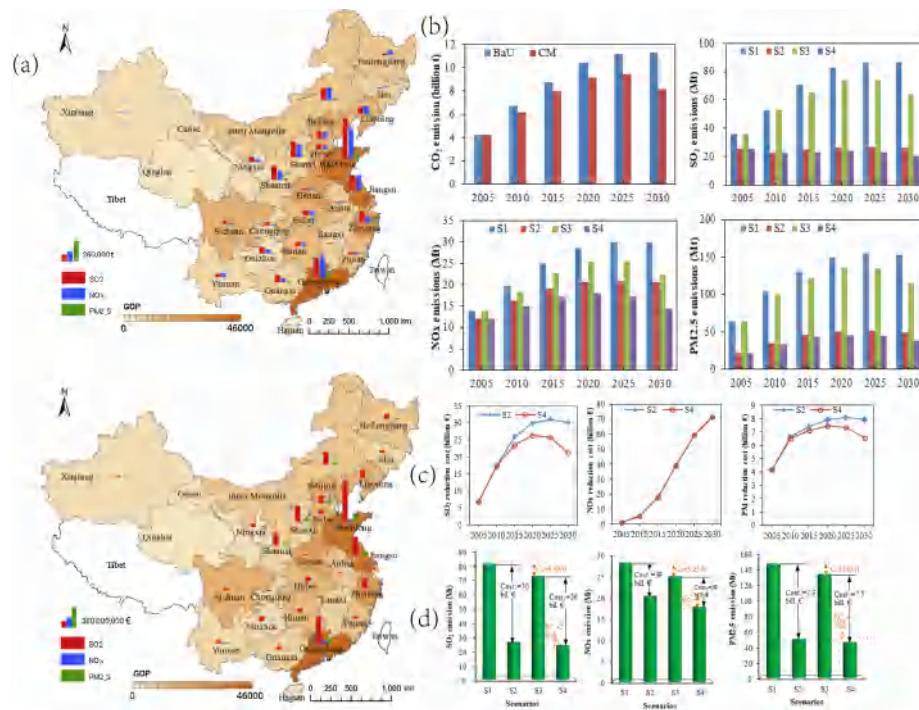


Figure 7.27: (a) 2020 年省际间差异 (b) 右 1 不同情景下的二氧化碳和空气污染物排放 (c) 右 2 S2 和情景 S4 下的大气污染物减排成本 (d) 2020 年 SO₂、NO_x、PM_{2.5} 协同效益分析

7.5.3 中国各省电力部门面向 2030 年的节水潜力分析

- 原文标题: Water conservation from power generation in China: A provincial level scenario towards 2030) [30]
- 期刊: Applied Energy
- 发表年份: 2017
- 作者: Mingquan Li; **Hancheng Dai***; Yang Xie; Ye Tao; Lars Bregnbaek; Kaare Sandholt
- 关键词: 发电; 可再生能源; 冷却技术; 分解分析
- [文章链接](#)

研究内容

本研究²²基于电力调度优化 (EDO) 模型, 考虑不同的发电结构和用水强度情景, 量化 2015 年至 2030 年中国发电用水量, 并分析了不同电力来源的用水量及其地区差异, 研究设置 6 个情景,

²²Mingquan Li and **Hancheng Dai*** and Yang Xie and Ye Tao and Lars Bregnbaek and Sandholt, Kaare (2017). Water conservation from power generation in China: a provincial level scenario towards 2030. *Applied Energy*208: 580-591. ([文章链接](#))

包括两种发电结构（可再生能源发展政策和可再生能源高渗透率）和低、中、高三种发电用水强度。

研究发现

发电结构和用水技术将显著影响用水量，开发核电厂等用水密集型能源会增加用水量，而可再生能源的使用则避免大量用水。各省的用水量存在显著差异，2015年，发电用水量集中在中国北方和沿海地区，而2030年仍将集中在这些地区，主要是因为现有的燃煤电厂，以及天然气和核电厂都集中在上述地区。随着未来天然气和核电厂发电量的增加，用水量将从2015年的0.06 Gt和0.10 Gt增加到2030年的0.75 Gt和0.64 Gt（图7.28(a)）。发电规模、结构和技术的变化分别对用水量产生不同方向和程度的影响，发电结构和技术的改进有利于节约用水，有效抵消了正向规模效应。

总而言之，6种情景下，**2015~2030年的电力行业用水量均将下降，很大程度上归功于非化石能源的发展；我国发电用水量存在明显的区域差异，中国北方和沿海地区过去和将来都是电力消费的集中地区，改善发电结构和发展节水技术是缓解这些地区缺水问题的有效途径。通过驱动力分解分析可知，结构效应和技术效应都有利于节水，而技术效应对六种情景的节水效果最好。所以新建和改进燃煤、天然气、核电站的节水型冷却系统的部署，对于未来降低用水量具有重要意义。**

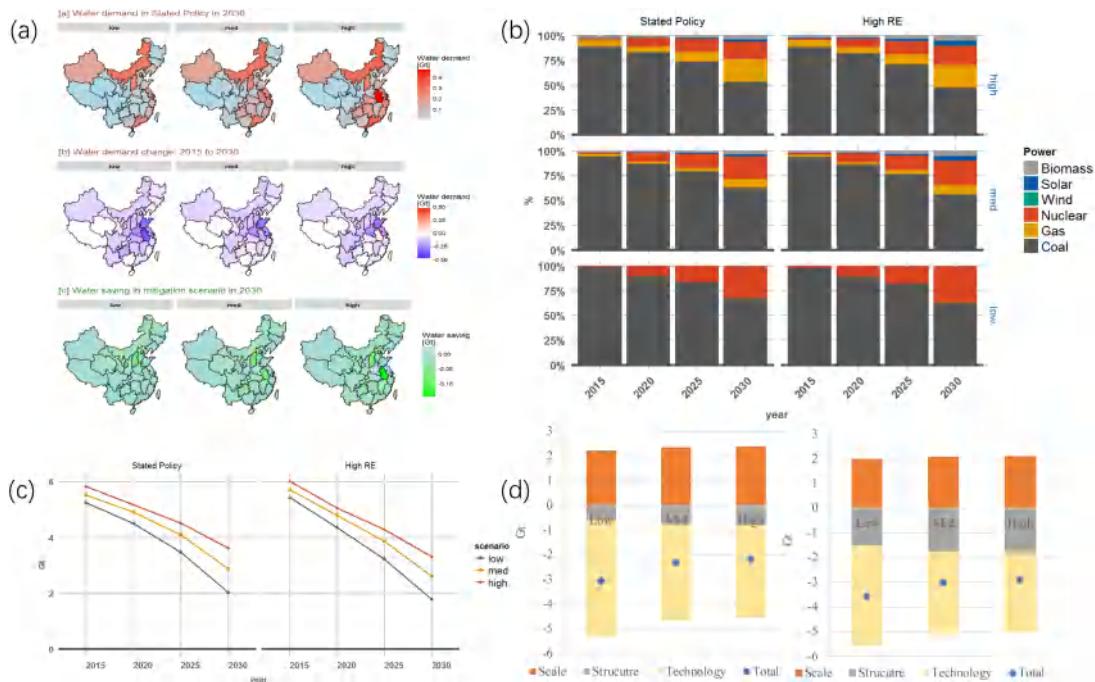


Figure 7.28: (a) 发电用水量的地理分布 (b)2015-2030 年不同情景下不同发电来源的用水量 (c) 2015~2030 年不同情景下中国发电总用水量 (d) 2015~2030 年各效应对减少用水量的贡献

7.5.4 碳减排对中国地方工业用水和减污潜力分析

- **原文标题:** General Equilibrium Analysis of the Co-benefits and Trade-Offs of Carbon Mitigation on Local Industrial Water Use and Pollutants Discharge in China^[32]
- **期刊:** Environmental Science Technology
- **发表年份:** 2019
- **作者:** Qiong Su; **Hancheng Dai***; Huan Chen; Yun Lin; Yang Xie; Raghupathy Karthikeyan
- **关键词:** 能源-水关系; 二氧化碳排放控制; IMED | CGE 模型; 中国污染物减排
- **文章链接**

研究内容

本文²³结合IMED | CGE 模型和中国深圳市的取水和污染物排放模块，评估碳减排策略对当地工业用水和与水相关的污染物排放的影响，为此本文根据是否采取碳减排政策和节水政策设置 BaU 和 NDC 两个情景。

研究发现

碳减排政策大大减少了深圳的二氧化碳排放和一次能源使用量，到 2030 年分别减少了 67% 和 55%，但可能由于深圳可用的低碳技术很少或可再生能源价格上涨，碳减排成本会提高所有部门的生产价格（图7.29(b)）。

碳减排政策的实施对深圳的宏观经济指标产生不同程度的负面影响，其中对出口和进口的影响最大，到 2020 年分别下降 3.3% 和 3.6%，到 2030 年分别下降 11.2% 和 8.8%（图7.29(c)）。劳动密集型部门、运输部门、碳和能源强度较高的工业部门在碳减排情景下将会遭受较大的经济损失，而发电部门、电子工业和造纸部门的产出将略有增长（图7.29(d)）。

碳减排政策通过限制碳和能源密集型产业来加速当地产业结构升级，而其中许多行业都是水密集型，所以可以看出减碳对当地工业用水具有协同效益，深圳的总用水量将从 2007 年的 1192 万吨增加到 2020 年的 1317 万吨、2030 年的 1252 万吨。但是碳减排政策对部门用水影响不均衡，用水强度相对较高的工业部门会出现协同效益，但影响有限；对于发电、造纸和电子部门来说，碳减排会促进生产，所以要着重减少在这些部门用水强度（图7.30(b)）。

碳减排政策可以减少 COD_{Cr}、NH₃-N、石油和 V-ArOH 的排放，但会稍微加重 Pb、Hg、Cd 和 As 等重金属（胶体）的排放，而且减少重金属排放时需要进行权衡取舍。技术导致的污染物排放减少量大于工业结构变化引起的减少量，所以应大力发展清洁技术（图7.30(c)）。

²³Qiong Su and **Hancheng Dai*** and Yun Lin and Yang Xie and Huan Chen and R. Karthikeyan (2019). General equilibrium analysis of the cobenefits and trade-offs of carbon mitigation on local industrial water use and pollutants discharge in China. *Environmental Science & Technology* 53(3): 1715-1724. ([文章链接](#))

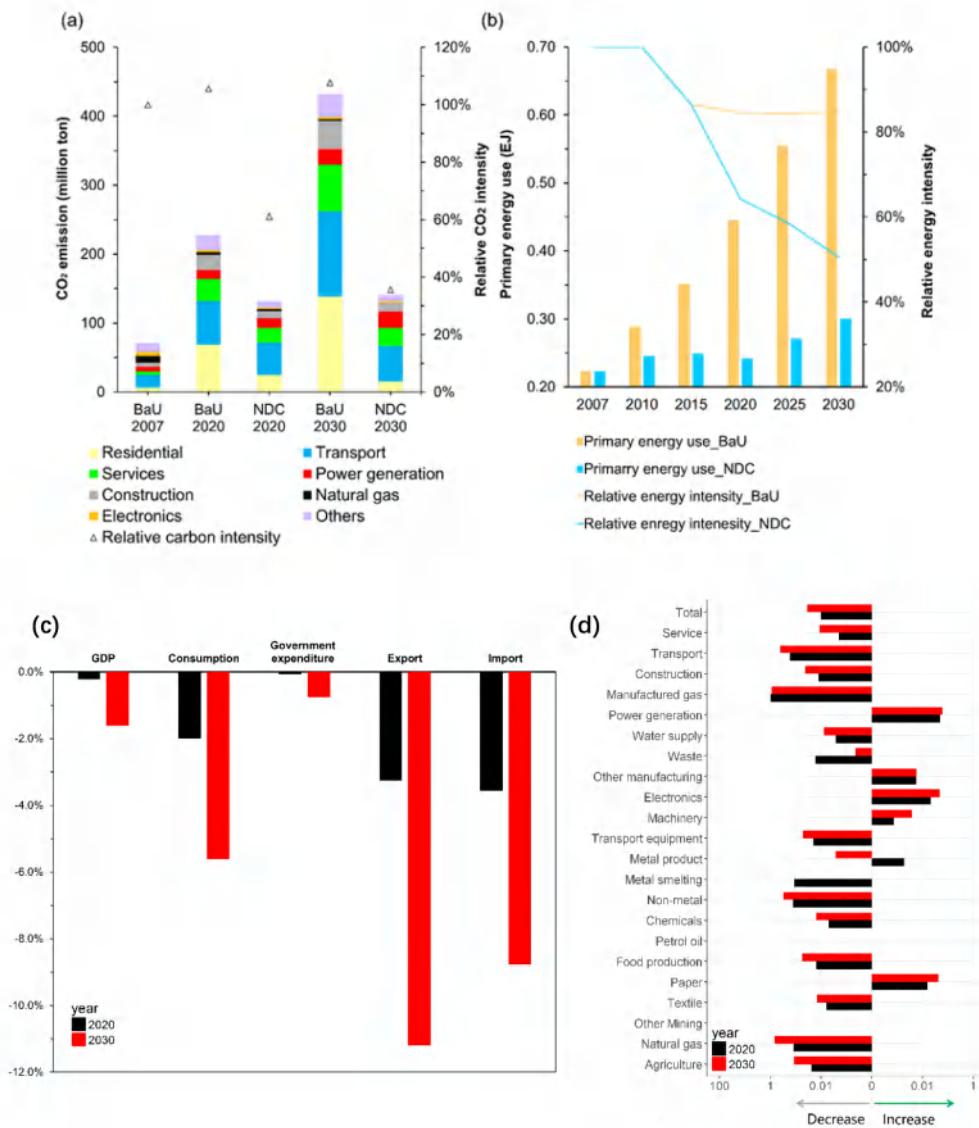


Figure 7.29: (a) 部门 CO₂ 排放量和相对 CO₂ 强度的变化 (b) 不同情况下一次能源的使用和相对能量强度的变化 (c) 选择的宏观经济指标 (d)2020 年和 2030 年 NDC 和 BaU 情景之间的部门产出的相对变化

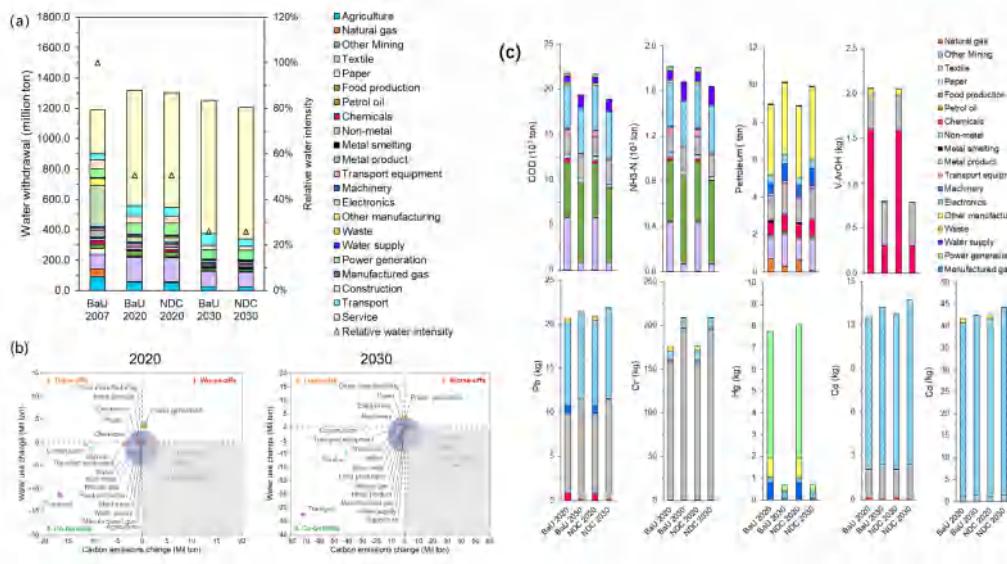


Figure 7.30: (a) 不同情况下年度部门取水量和相对水强度的变化 (b)2020 年和 2030 年的碳排放量变化与水使用变化 (c) 不同情况下年度部门污染物负荷的变化

7.5.5 快速城市化流域中碳-能源-水耦合关系模拟

- 原文标题: Modeling the carbon-energy-water nexus in a rapidly urbanizing catchment: A general equilibrium assessment [31]
- 期刊: Journal of Environmental Management
- 发表年份: 2018
- 作者: Qiong Su, **Hancheng Dai***, Yun Lin, Huan Chen, Raghupathy Karthikeyan
- 关键词: 碳-能源-水关系; 中国 CO₂ 排放控制; 工程措施; 水质; 可计算一般均衡(IMED | CGE)模型
- [文章链接](#)

研究内容

本研究²⁴结合IMED | CGE 模型和系统动力学与水环境模型 (SyDWEM)，对中国快速城市化流域未来的能源利用、二氧化碳排放、经济增长、水资源压力和水质变化进行了预测，评估了二氧化碳减排策略和水工程措施的效果。研究设置了 COE0、C1E0、COE1 和 C1E1 四个情景，分别代表是 (1) 否 (0) 采取碳减排政策以及是 (1) 否 (0) 采取工程节水措施。

²⁴Qiong Su and **Hancheng Dai*** and Yun Lin and Huan Chen and R. Karthikeyan (2018). Modeling the carbon-energy-water nexus in a rapidly urbanizing catchment: A general equilibrium assessment. *Journal of Environmental Management* 225: 93-103. ([文章链接](#))

研究发现

碳减排可大幅度减少能源消费、提高能效、降低碳强度，引导产业结构低碳化转型。COEO 情景下的一次能源消费总量在 2025 年将增加到 0.46 EJ，在 C1EO 情景下，一次能源消费在 2015 - 2020 年呈下降趋势，到 2025 年略有增加，但也仅为参考情景的 41%（图 7.30(d)）。劳动力转移是深圳人口增长的主要决定因素，但近年来由于经济增速的放缓和劳动生产率的提高，平均年增长率远低于城市化初期。对于深圳河口可能面临严重的水资源短缺，单独实施水工程措施和碳减排策略都使得 2025 年水总需求有所减少，两者共同实施则效果更为明显，使得 2025 年水总需求相对于 COEO 情景减少 12.2%。碳减排策略对消减污染物产生有协同效应；而水工程措施可以进一步减少污染物排放（图 7.31(b)）。

总而言之，水工程措施可以大大缓解水资源压力。从需求侧方面，通过提升工业水循环利用技术、减少管道泄漏等工程措施可以提高用水效率；从供水方面看，工程措施可以通过增加输水定额和污水回用来增加潜在的供水。但单靠工程措施无法达到研究区水质改善目标，需要与二氧化碳减排的相关政策“双管齐下”。碳减排政策可以降低能源和水资源密集型产业的产出，从而促进当地产业结构调整，进而对生活和工业节水、污染物减排产生协同效益，对于满足当地用水需求和实现水质改善目标具有重要意义。

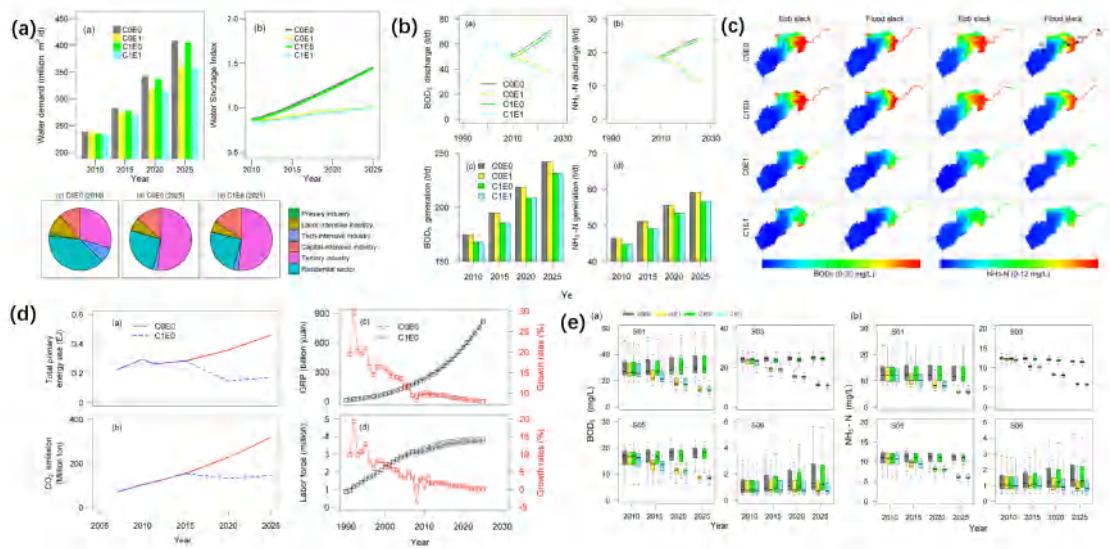


Figure 7.31: (a) 不同情景下的总需水量、WSI 和部门需水量的年度变化 (b)2010 - 2025 年不同情景下 BOD_5 和 NH_3-N 排放 (c)2025 年不同情景下退潮和洪涝期间 BOD_5 和 NH_3-N 浓度的空间分布 (d)COEO 和 C1EO 情景下深圳一次能源消费总量、 CO_2 排放、GRP 和劳动力的年变化 (e)2010 - 2025 年 4 个站点在不同情景下的 BOD_5 和 NH_3-N 浓度变化

7.5.6 中国碳减排对资源消耗的协同效益

- 原文标题: Co-benefit of carbon mitigation on resource use in China [8]
- 期刊: Journal of Cleaner Production
- 发表年份: 2017
- 作者: Heming Wang, **Hancheng Dai***, Liang Dong, Yang Xie, Yong Geng, Qiang Yue, Fengmei Ma, Jian Wang, Tao Du
- 关键词: 经济发展; 物质及能源使用; 碳排放; 物质流分析 (MFA); 可计算一般均衡 (IMED | CGE)
- [文章链接](#)

研究内容

本研究²⁵结合IMED | CGE 模型和 EW-MFA 方法来估计中国未来的二氧化碳排放和资源消耗以及协同效益影响, 设置了 BaU、NDC 和 2-degree 三个情景。

研究发现

2012 ~2030 年, BaU 情景下中国二氧化碳 CO₂ 排放量持续增加。与 BaU 情景相比, NDC、2-degree 减少量依次增加。BaU 情景下, 2030 年 CO₂ 排放量将增长 50%, 达到 120 亿吨左右, 而 NDC 和 2deg 情景的 CO₂ 排放量将分别减少 26.8% 和 47.0% (图7.32(a))。自 2002 年以来, 我国金属矿物、非金属矿物和化石燃料的消耗迅速增加, 而生物质消费的增长一直较为缓慢。在 BaU、NDC、2deg 不同碳约束设定下, 2030 年的中国金属矿物消费量分别增长到 64 亿吨、58 亿吨和 50 亿吨, 非金属矿物消费量分别增长到 339 亿吨、331 亿吨和 319 亿吨 (图7.32(b))。碳减排会使资源消费量减少, 且碳约束越强, 资源消耗减少量会更加显著。化石燃料消耗与二氧化碳排放的路径相似, 因为它们具有很强的相关性。

中国 CO₂ 排放和资源消耗的快速增长与经济增长密切相关, 实现 CO₂ 排放达峰有利于节约资源消耗并减少对环境的负面影响。本研究认为在总资源消耗仍将增加的背景下, 虽然中国实现 NDC 和 2 度目标对经济增长存在潜在负面影响, 但碳减排将对资源节约产生显著的协同效益, 这一协同效益将在很大程度上缓解对经济发展的制约, 进而有利于经济的可持续发展。

碳排放和资源消费还存在明显的行业差异。高排放、高资源利用的行业是传统重工业和能源相关行业, 应该在这些部门采用额外的缓解政策, 不仅因为它们具有最大的协同效应, 而且成本最低。此外, 第三产业的迅速发展可以弥补这些目标部门的产出损失。

²⁵Heming Wang and **Hancheng Dai*** and Liang Dong and Yang Xie and Yong Geng and Qiang Yue and Fengmei Ma and Jian Wang and Tao Du (2018). Co-benefit of carbon mitigation on resource use in China. *Journal of Cleaner Production* 174: 1096-1113. ([文章链接](#))

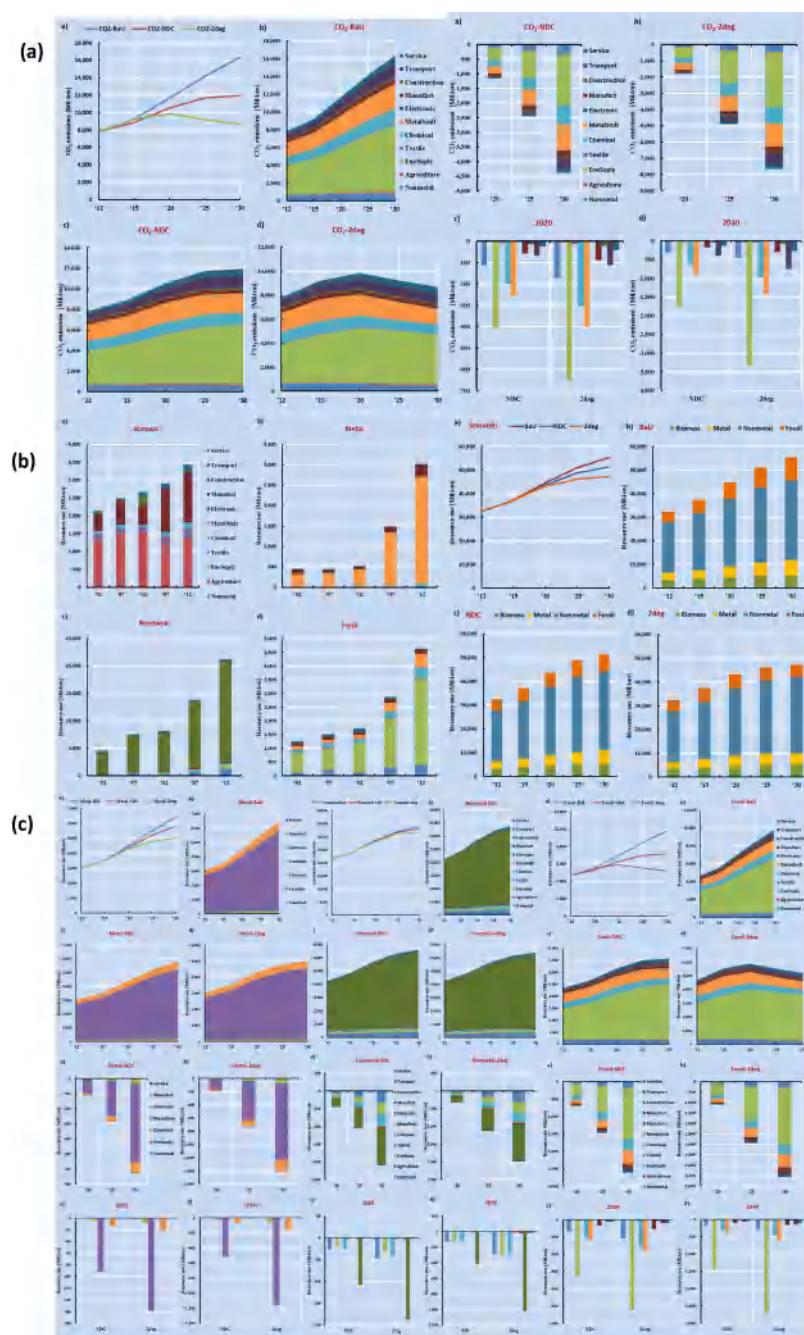


Figure 7.32: (a) 中国 2012-2030 年二氧化碳排放 (b) 中国 2012~2030 年资源消费 (c) 不同资源在 2012~2030 年间变化趋势

编辑/校阅：张思露，刘晓瑞，郭超艺

7.6 主题五：控污与气候政策的健康与经济影响分析

当前，空气污染在全球和中国都造成了较为严重的健康影响，并进一步导致了直接、间接的经济影响和社会福利损失。空气污染带来的健康和疾病负担已被学术界广泛研究并引起了公众和决策者的关注，推进空气质量改善的各项政策计划和措施也在逐步落实并取得了较为显著的功效。

然而，在空气污染健康影响方面，仍有许多问题有进一步研究和讨论的空间。例如：空气污染导致的健康影响如何对经济系统造成进一步的影响？空气污染控制政策是否具有净效益和经济可行性，政策的成本效益在国家层面、在不同区域和省市之间又有怎样的不同？污染防治方面的区域协同行动的重要性多高？我们是否能以较低的成本协同解决气候变化和空气污染问题？这些问题的回答，无疑需要借助健康风险评估手段。而通过与能源经济模型、空气质量模型等工具结合，相应的情景分析和健康评估研究将能够实现较为系统的政策成本效益分析，从而尝试提供政策启示和建议。

LEEEP 课题组近几年通过将 IMED 体系中的经济模型和健康评估模型与空气污染物排放和空气质量模型进行深度耦合，在不同的时间和空间尺度上评估了空气污染控制技术、气候减缓目标和地区性空气污染防治措施（如“煤改电”政策）、部门层面的技术渗透（如交通部门）等措施在空气质量和人群健康改善方面所能够实现的效益大小，评估了空气污染控制的必要性、政策的经济可行性以及区域协同、政策协同等协调措施所能起到的总体优化作用（图 7.33）。



Figure 7.33: 基于 IMED 模型评估空气污染的健康和经济影响

以下为我们在本节甄选的相关已发表文章：

1. 中国 PM_{2.5} 污染健康效应的省级经济影响分析
2. PM_{2.5} 污染相关的健康损失——以上海市为例
3. 中国道路交通 PM_{2.5} 相关的健康影响的经济影响
4. 气候减缓对亚洲地区空气质量和人群健康的协同效益
5. 结构调整和技术升级对京津冀空气质量和健康的影响
6. 京津冀地区居民清洁取暖措施的健康和经济效益

7. PM_{2.5} 和臭氧污染对中国的健康及经济影响比较
8. 2 度目标下中国道路交通部门气候减缓的协同效益
9. 韩国减缓气候变化的空气质量与人群健康协同效益

7.6.1 中国 PM_{2.5} 污染健康效应的省级经济影响分析

【ESI 前 1% 高被引文章】

- **原文标题:** Economic Impacts from PM_{2.5} Pollution-Related Health Effects in China: A Provincial-Level Analysis^[6]
- **期刊:** Environmental Science Technology
- **发表年份:** 2016
- **作者:** Yang Xie, **Hancheng Dai***, Huijuan Dong, Tatsuya Hanaoka, Toshihiko Masui
- **关键词:** PM_{2.5} 污染; 全球疾病负担; 生产力
- **文章链接**

研究内容

本研究²⁶耦合了 GAINS-China 模型和IMED | HEL 健康模型，将健康相关损害纳入可计算一般均衡 (CGE) 模型框架，从省级层面考察了完全无控制措施的 Reference 情景、污染控制渗透率维持在 2005 年水平的 WoPol 情景和广泛采取污染控制技术的 WPol 情景下，中国 PM_{2.5} 污染所分别带来的健康、经济影响以及减排的效益。

研究发现

污染控制对 PM_{2.5} 浓度有显著的影响。2030 年，WoPol 情景下大多数省份的 PM_{2.5} 浓度远远超过国家标准的 35 μg/m³，特别是人口稠密且重工业集中的华北平原 (图7.34(a))；全国人均工作损失时间将达到 56.8 小时，占全年工作时间的 2.7%。而在 WPol 即政策情景下，空气污染控制技术使大多数省份 PM_{2.5} 浓度显著降低约 65-80%，避免 75% 的患病数量且人均工作损失时间降至 24.9 小时。

成本效益分析进一步表明，成本占中国 GDP 的 0.79% 的污染物治理技术投资可显著改善空气质量、健康水平，减少工作时间损失并使 GDP 增加 1.17%，对中国整体有净效益 (图7.34(b))。然而，技术投资净效益在各省表现出较大的异质性：尽管近三分之二的省份都可以从中受益，欠发达和人口较少的省份却可能面临较大的经济负担。这也意味着通过转移支付加强区域协同、进一步改进总体福利的可能性。

²⁶Yang Xie, **Hancheng Dai***, Huijuan Dong, Tatsuya Hanaoka, Toshihiko Masui(2016). Economic Impacts from PM_{2.5} Pollution-Related Health Effects in China: A Provincial-Level Analysis. *Environmental Science Technology*. 50(9): 4836-4843. ([文章链接](#))

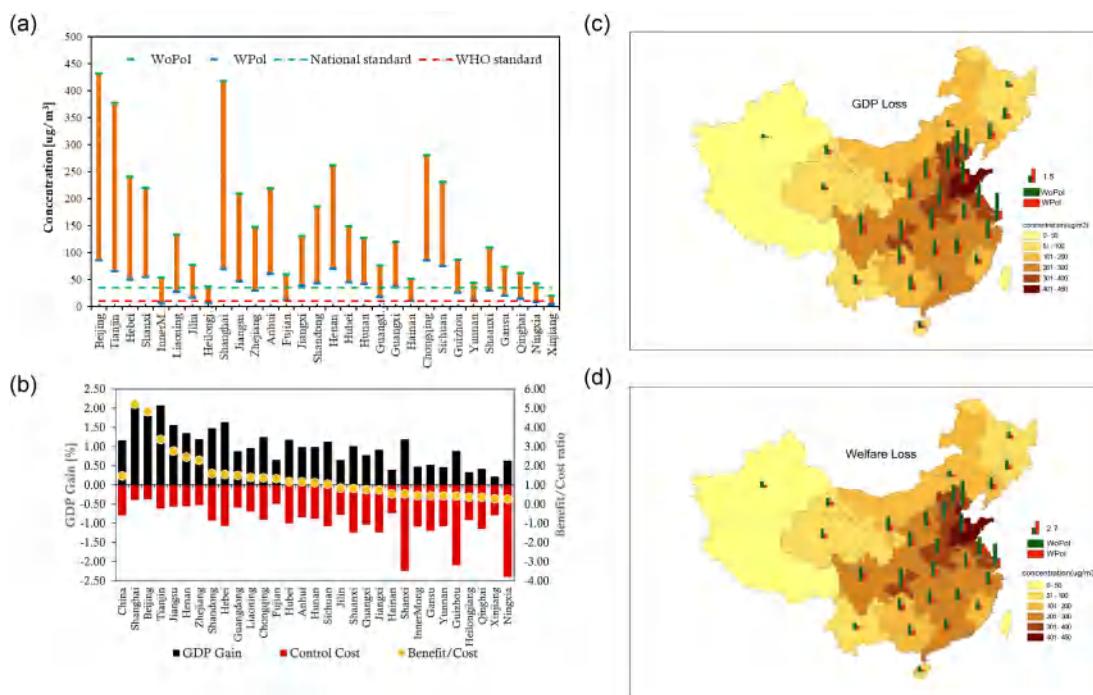


Figure 7.34: (a) 2030 年 30 个省份的年均 PM_{2.5} 浓度 (b) 2030 年 PM_{2.5} 控制的成本与效益 (c) 2030 年 WPol 和 WoPol 情景下 PM_{2.5} 污染导致的 GDP 损失和 (d) 福利损失

7.6.2 PM_{2.5} 污染相关的健康损失——以上海市为例

- 原文标题: Impacts from PM_{2.5} Pollution-Related Health Effects: A Case Study in Shanghai [49]
- 期刊: Environmental Science Technology
- 发表年份: 2017
- 作者: Rui Wu, **Hancheng Dai***, Yong Geng*, Yang Xie, Toshihiko Masui, Zhiqing Liu, and Yiyang Qian
- 关键词: PM_{2.5} 污染; 健康影响; 气候政策; 空气污染控制措施
- [文章链接](#)

研究内容

本研究²⁷以特大城市上海为例, 耦合了空气污染物排放预测模型 (GAINS)、IMED|HEL 模型和 IMED|CGE 模型, 评估了不同的程度的空气污染控制政策 (以数字 0-3 表示力度增加) 和气

²⁷R. Wu, H. Dai*, Y. Geng*, Y. Xie, et al. (2017). "Economic Impacts from PM_{2.5} Pollution-Related Health Effect: A Case Study in Shanghai." *Environmental Science Technology*. 51(9):5035-5042. ([文章链接](#))

候减缓政策组合下（INDC 和 BaU 分别表示有、无气候政策）的空气质量与健康影响。

研究发现

空气污染控制和气候减缓措施对上海市未来空气质量与 PM_{2.5} 相关健康风险有着十分重要的影响 (图7.35(I))。 2030 年，在基准情景 (BaU0) 下上海市 PM_{2.5} 浓度将超过 300 μg/m³，因空气污染导致的疾病为人均 0.31 例，过早死亡人数将达 19.24 万人。而采取强污染控制和减缓措施的情景下，PM_{2.5}、SO₂ 和 NO_x 的一次排放量显著降低，2030 年 PM_{2.5} 浓度最低可降至 71.7 μg/m³；INDC1、INDC2、BaU3 情景可分别避免为 10.15、10.82、15.92 万人过早死亡和一半以上的致病案例数。

两类气候减缓措施的实行将很大程度上避免空气污染相关的经济和福利损失，具有高效益-成本比 (图7.35(II))。 2020 年，除 INDC2 情景的货币化效益接近但略低于减缓成本外，所有情景的经济效益均超过了减排成本；2030 年，各减缓政策情景的净 GDP 收益将接近或超过 1%。此外，区域协同控制也十分重要，到 2030 年，仅上海本地采取空气污染控制或气候减缓措施所能获得的空气质量与人群健康改善有限；浙江和江苏也采取控制措施将可进一步避免一半以上的经济损失，价值相当于 348 亿元人民币。

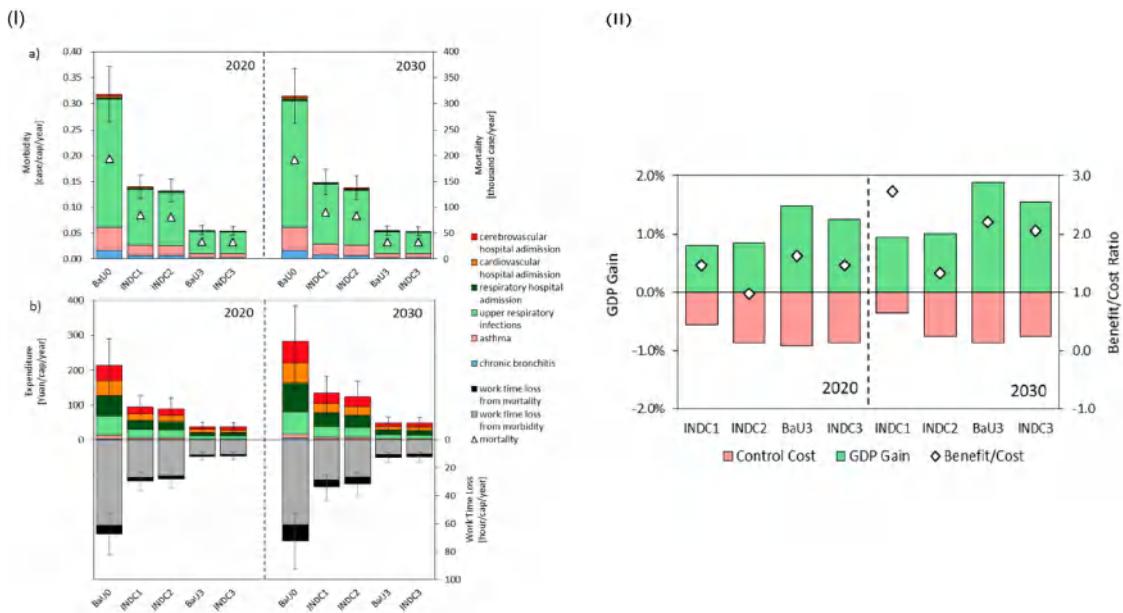


Figure 7.35: (I) 各情景下 PM_{2.5} 致病、导致的过早死亡人数、疾病支出和工作时间损失
(II) 不同情景下气候减缓政策的净效益

7.6.3 中国道路交通 PM_{2.5} 相关的健康影响的经济影响

- **原文标题:** Economic impacts from PM_{2.5} pollution-related health effects in China's road transport sector: A provincial-level analysis [52]
- **期刊:** Environment International
- **发表年份:** 2018
- **作者:** Xu Tian, **Hancheng Dai***, Yong Geng*, Jeffrey Wilson, Rui Wu, Yang Xie, Han Hao
- **关键词:** 交通部门; PM_{2.5} 污染; 健康影响; 空气污染控制技术
- **文章链接**

研究内容

本研究²⁸耦合了空气污染物排放预测模型 (GAINS)、可计算一般均衡模型 (IMED | CGE) 和健康评估模型 (IMED | HEL)，评估了不同的空气污染控制政策情景下 2030 年 **中国国家和省级层面道路交通部门相关 PM_{2.5} 污染引起的健康和经济影响**。情景设置为忽略空气污染健康影响和无任何控制措施的 BaU 情景，维持当前控制措施的情景 REF，有较低/较高程度额外措施的情景 TECL/TECH，以及完全杜绝道路交通部门空气污染排放的情景 TSPO。

研究发现

道路交通排放是 PM_{2.5} 污染的一个重要来源。在 2015 年，道路交通源对湖南、安徽、湖北、江西、重庆等地 PM_{2.5} 浓度的贡献尤其重要（均超过了 $6\mu\text{g}/\text{m}^3$ ），在这些省份，交通排放造成的过早死亡人数超过 10000 人、疾病支出达到 1 亿元人民币以上 (图7.36(a))。如果仍维持现有控制措施而不采用额外的控制技术，则到 2030 年，中国绝大部分省份的道路交通源贡献和导致的健康影响程度将进一步上升。

采用一定的空气污染控制技术 (TECL) 即能够减少交通源一次污染物排放量达数万吨；而更高技术渗透的情景下各类污染物排放量还能进一步下降至少 34%，对应 PM_{2.5} 浓度下降 $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上。在 TECL 情景下，有 6.04 万人的过早死亡、1330.5 亿元生命价值损失和 0.012% 的 GDP 损失可被避免，减轻的疾病开支达到 13.9 亿元；在 TECH 情景下，相关健康影响还将进一步减轻。在全国层面和半数的省份，空气污染控制的净效益均为正 (图7.36(b))，意味着在道路交通领域采取措施控制空气污染具有经济可行性。

²⁸X. Tian, H. Dai, et.al.. (2018). "Economic Impacts from PM_{2.5} pollution-related health effects in China's road transport sector: a provincial-Level analysis." *Environment International*. (115): 220 - 229. ([文章链接](#))

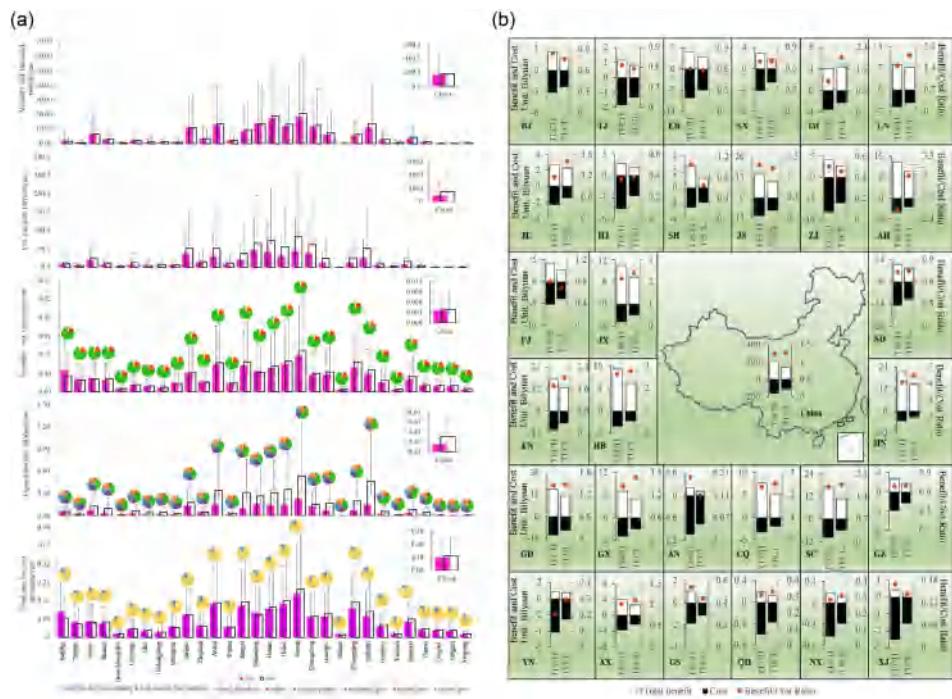


Figure 7.36: (a) 2015-2030 年道路交通部门健康影响 (b) 2030 年道路交通部门空气污染控制措施的成本效益

7.6.4 气候减缓对亚洲地区空气质量和人群健康的协同效益

- 原文标题: Co-benefits of climate mitigation on air quality and human health in Asian countries [53]
- 期刊: Environment International
- 发表年份: 2018
- 作者: Yang Xie, **Hancheng Dai***, Xinghan Xu, Shinichiro Fujimori, Tomoko Hasegawa, Kan Yi, Toshihiko Masui, Gakuji Kurata
- 关键词: 空气质量; 健康协同效益; 气候变化减缓; 经济影响; CGE 模型
- [文章链接](#)

研究内容

本研究²⁹耦合了宏观经济模型 (AIM/CGE)、空气质量模型 (CMAQ) 和健康评估模型 (IMED | HEL)，评估了气候变化减缓可为亚洲地区带来的空气质量和人群健康改善的协同效益。

²⁹Y. Xie, H. Dai* et al. (2018). "Co-benefits of climate mitigation on air quality and human health in Asian countries." *Environment International*. 119: 309 - 318. ([文章链接](#))

情景设置包括不采取/采取气候减缓政策 (BL/MT)、不考虑/考虑空气污染经济影响 (NO/AP) 两个维度，共 4 种不同的情景组合。

研究发现

研究表明，气候减缓政策可显著减轻中国、印度的 PM_{2.5} 污染，使中国东部、印度北部的 PM_{2.5} 浓度相比基准情景下降 30 μg/m³。相较于 PM_{2.5}，各情景下 O₃ 浓度变化较小，但仍被气候减缓所影响。在健康影响方面，虽然基准情景下亚洲大部分地区因 PM_{2.5} 和 O₃ 导致的过早死亡人数在中长期 (2050 年) 已经有所下降，但气候变化减缓将能够进一步减轻各亚洲国家和地区因空气污染导致的疾病、过早死亡人数和工作时间损失 (图7.37(a))。2050 年，气候减缓共可为亚洲降低 2% 的致病风险、避免 79 万人过早死亡，为亚洲各国避免巨大的经济和福利损失；并且这种协同效益在印度和东南亚地区较为明显。

在 SSP2 情景下，到 2050 年，气候减缓可以为亚洲地区带来 7-10%GDP 的健康效益，而减缓成本则相当于 GDP 的 1.8%；这意味着，仅考虑空气质量改善的协同效益，气候减缓在亚洲地区就已经能够带来 1 万亿美元的净效益 (图7.37(b))。而在 SSP3 情景下，净效益可接近 3 万亿美元。可见气候减缓具有非常高的效益-成本比，决策者应当通过大力推进气候减缓行动的落实。

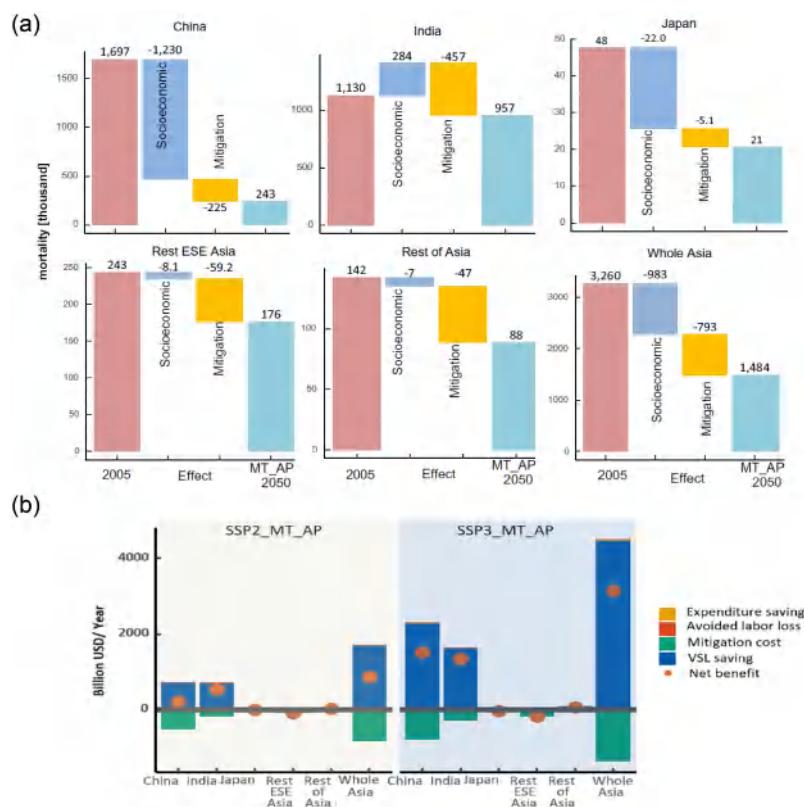


Figure 7.37: (a) 亚洲各地区由 PM_{2.5} 导致的过早死亡人数与及气候减缓的影响 (b) 不同 SSP 情景下各地区气候减缓的净效益

7.6.5 结构调整和技术升级对京津冀空气质量改善和健康效益的影响

- 原文标题: The impacts of economic restructuring and technology upgrade on air quality and human health in Beijing-Tianjin-Hebei region in China [77]
- 期刊: Frontiers of Environmental Science Engineering
- 发表年份: 2019
- 作者: Chao Liu, Hancheng Dai*, Lin Zhang, Changchun Feng
- 关键词: 经济结构调整; 清洁生产; 空气污染; 健康效益; IMED 模型
- 文章链接: [文章链接](#)

研究内容

本研究³⁰通过耦合大气污染物排放模型 (GAINS)、空气质量模型 (GEOS-Chem) 和健康评估模型 (IMED|HEL)，以 2012 年为情景分析年份，设置了基础情景和清洁生产、产业结构对标调整、强制高耗能产业比重下降等政策干预情景，定量评估了产业结构调整和生产技术升级措施可以给京津冀地区带来的空气质量改善和健康效益。

研究发现

通过清洁生产、末端控制技术以及产业结构调整，2012 年京津冀地区排放量可以减少 50% 以上。然而，单纯参照珠三角的产业结构对京津冀产业结构进行调整并不十分有效，反而可能导致污染物排放量、空气污染 (图 7.38(a)) 和疾病负担增加。清洁生产和技术创新在短期内是应对空气污染的非常有效的政策，通过实施过去十年出现的成熟污染控制技术，可以较为显著地减轻空气污染物排放，同时降低因 PM_{2.5} 和 O₃ 导致的疾病数量和过早死亡人数 (图 7.38(b))。

另外，由于 O₃ 生成具有非线性的特点，因此目前的大气污染防治措施对主要污染物和细颗粒物的治理效果较好、对 O₃ 污染的治理效果较差；未来，O₃ 污染的控制应得到更多的政策关注。

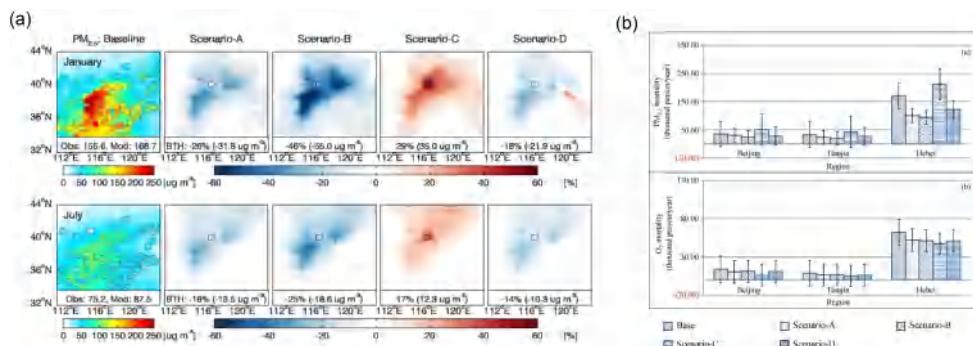


Figure 7.38: (a) 不同情景下 2012 年 1 月、7 月地表 PM_{2.5} 浓度 (b) 不同情景下 PM_{2.5} 和 O₃ 污染造成的健康影响

³⁰C. Liu, H. Dai* et al. (2019). "The impacts of economic restructuring and technology upgrade on air quality and human health in Beijing-Tianjin-Hebei region in China." *Frontiers of Environmental Science and Engineering*. 13(5):70. ([文章链接](#))

7.6.6 京津冀地区居民清洁取暖措施的健康和经济效益

- **原文标题:** Health and economic benefits of cleaner residential heating in the Beijing-Tianjin-Hebei region in China [50]
- **期刊:** Energy Policy
- **发表年份:** 2019
- **作者:** Xiang Zhang, Yana Jin*, **Hancheng Dai***, Yang Xie, Shiqiu Zhang
- **关键词:** 煤改电政策；室外空气污染；室内空气污染；健康效益；居民取暖需求；IMED 模型
- **文章链接**
- **点击 LEEEP 微信公众号链接阅读推送原文**

研究内容

本研究³¹耦合了 GAINS 空气污染物排放模型、IMED | CGE 经济模型和 IMED | HEL 健康模型，评估了京津冀地区居民清洁取暖（“煤改电”）政策的健康和经济效益，并核算了该政策可以获得的净收益。情景设置包括基准情景 Ref，以及北京市和全京津冀的部分煤改电情景（BJ_partial 和 BTH_partial）和清洁能源完全替代情景（BJ_all 和 BTH_all）。

研究发现

模型分析表明，京津冀地区居民清洁取暖政策（“煤改电政策”）可显著降低京津冀地区 PM_{2.5} 和 SO₂ 的一次排放量，进而减轻大气 PM_{2.5} 污染(图7.39(a))。也因此，“煤改电”政策可显著减轻京津冀地区由空气污染带来的健康影响和相应的经济负担。在 BTH_partial 情景下，到 2030 年，北京、天津、河北由于室外空气污染的改善可分别避免 46 万（占基准情景的 43%）、12 万（23%）和 61 万（19%）的 PM_{2.5} 致病例数，以及 6700（19.7%）、2500（13.1%）和 13200（11.2%）人过早死亡。对政策的成本效益进行货币化分析发现，仅考虑室外空气污染的减缓，该政策为京津冀地区整体带来的净效益即达到 195.6 亿元；进一步考虑室内空气污染改善时，净效益可达 378.8 亿元。值得注意的是，同样的政策在京津冀三地有着截然不同的成本效益比(图7.39(b))；例如，河北地区可由煤改电政策中所获得的人群健康改进的货币化效益不足以抵消政策成本。这种异质性在京津冀大气污染联防联控中需要得到充分的关注；北京和天津或许应对河北进行补贴，使京津冀地区整体和每个省份都能从煤改电政策中获得净效益。

³¹X. Zhang, Y. Jin, H. Dai et al. (2019). "Health-related economic impacts of "coal to electricity" policy in residential sector in Beijing-Tianjin-Hebei region." Energy Policy. (127): 165-178. ([文章链接](#))

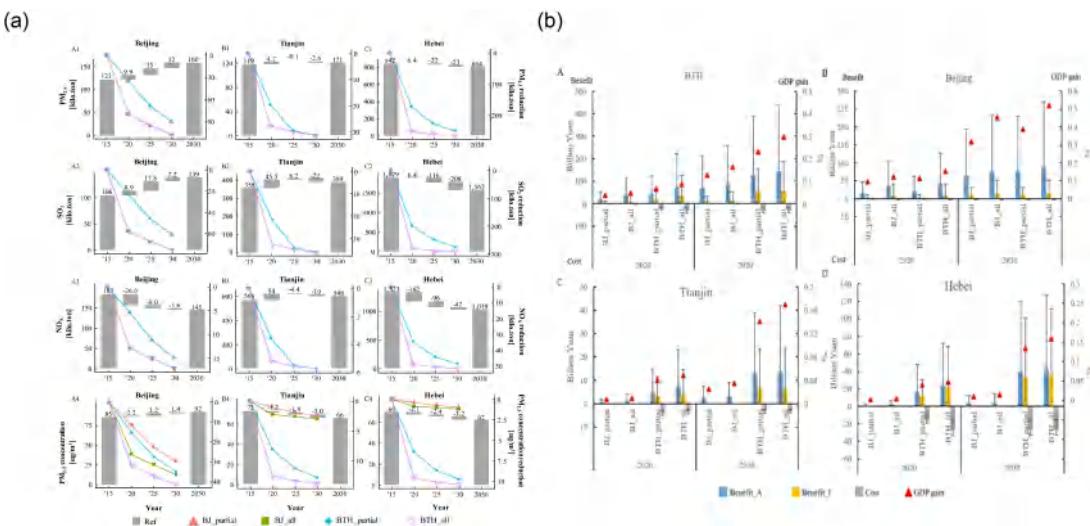


Figure 7.39: (a) 不同情景下京津冀一次污染物排放量和 PM_{2.5} 浓度 (b) 京津冀煤改电政策的成本效益分析

7.6.7 PM_{2.5} 和臭氧污染对中国的健康及经济影响比较

- 原文标题:** Comparison of health and economic impacts of PM_{2.5} and ozone pollution in China [56]
- 期刊:** Environment International
- 发表年份:** 2019
- 作者:** Yang Xie, **Hancheng Dai***, Yanxu Zhang, Yazhen Wu, Tatsuya Hanaoka Toshihiko Masui
- 关键词:** PM_{2.5} 和臭氧污染；健康评估；经济影响；IMED 模型
- 文章链接:**

研究内容

本研究³²基于综合评估体系，耦合了可计算一般均衡模型 (IMED | CGE)、空气污染物排放预测模型 (GAINS)、空气质量模型 (GEOS-Chem) 和健康评估模型 (IMED | HEL)，运用最新的暴露-效应方程和疾病支出、统计生命价值参数，分析对比了 PM_{2.5} 和 O₃ 这两种污染物在中国各省造成的健康和经济影响。

研究发现

我国东部省份因 PM_{2.5} 导致的经济和健康损失较为严重，也可由空气污染控制获得更大的收益；而西部省份则更多受到 O₃ 污染导致的影响 (图7.40)。南部和中部省份所受的健康影响相对较轻。在 woPol 情景下，2030 年，由 PM_{2.5} 导致人均劳动时间损失最多的省份为上海 (99h)、天津

³²Y. Xie, H. Dai* et al. (2019). "Comparison of health and economic impacts of PM_{2.5} and ozone pollution in China." *Environment International*. 130:104881.([文章链接](#))

(98h)、北京 (88h) 和河南 (83h)，而由 O_3 导致人均劳动时间损失最多的省份则为青海 (5.7h)、四川 (5.5h)、甘肃 (4.3h) 和新疆 (3.3h)。

到 2030 年，若不采取空气污染控制措施，中国 $PM_{2.5}$ 和 O_3 健康影响所致经济损失可分别达到 GDP 的 2% 和 0.09%，统计生命价值损失将分别为 38 和 2.3 万亿美元；而在采取控制情景下，相关损失明显降低。研究还发现，虽然 O_3 污染在中国导致的健康和经济影响相对 $PM_{2.5}$ 较低，但其更难被污染控制措施减轻，因此 O_3 在长期的健康风险也应得到足够的政策关注。

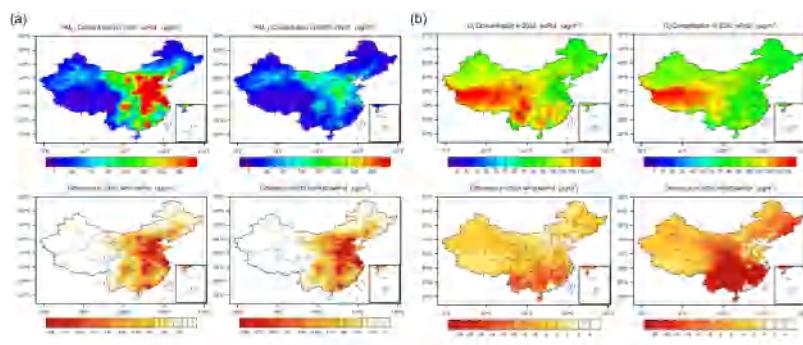


Figure 7.40: 不同情景下中国 (a) $PM_{2.5}$ 、(b) O_3 浓度分布及削减量

7.6.8 2 度目标下中国道路交通部门气候减缓的协同效益

- **原文标题:** Toward the 2-degree target: evaluating co-benefits of road transportation in China [55]
- **期刊:** Journal of Transport Health
- **发表年份:** 2019
- **作者:** Xu Tian, **Hancheng Dai***, Yong Geng*, Shaohui Zhang, Yang Xie, Xiaorui Liu, Pantao Lu, Raimund Bleischwitz
- **关键词:** 2°C 目标；协同效益；公共健康；空气污染；中国；环境治理
- [文章链接](#)

研究内容

本研究³³耦合了能源经济模型 (IMED|CGE)、大气污染物排放模型 (GAINS) 以及健康评估模型 (IMED|HEL)，基于不同严格程度的气候变化减缓和空气污染控制政策构建了五种情景，分析了在道路交通部门实行两类措施所能实现的空气质量改善和健康改善协同效益。

研究发现

结果表明，实现 2°C 以内温升控制目标能同时显著减轻全国 $PM_{2.5}$ 污染程度和导致的健康与经济损失，而道路交通行业将在其中扮演着重要的角色。在 2°C 情景下，道路交通部门的温室气体和空气污染物的减排将能够使全国 $PM_{2.5}$ 平均浓度下降 10.6% 左右，帮助减轻全国 10% 的疾病

³³Xu Tian, Hancheng Dai*, Yong Geng et al. (2019). "Towards the 2-degree target: evaluating co-benefits of road transportation in China." *Journal of Transport Health*. (15): 1-12. ([文章链接](#))

负担、贡献 10.6% 的净经济效益 (图7.41)。同时，社会经济发展情况的不同将使得中国各省因实现 2°C 目标的受益程度存在较为明显的异质性，人口和产业较多的省份将受益更多。这启示决策者应当认识到不同省份公路运输部门发展情况和减排难度的差异，采取更灵活的政策措施。

研究还发现，在交通部门，实现 2°C 气候目标的各类措施能显著降低交通源贡献的 PM_{2.5} 浓度。更为重要的是，相较于仅采取最严格空气污染控制措施的 TECH 情景，气候减缓措施所能减轻的 PM_{2.5} 浓度达到 TECH 情景对应值的 72.7%，所避免的过早死亡人数和劳动损失时间分别达到对应值的 72.9% 和 88.0%。这意味着气候减缓的目标和政策与大气污染防治有非常强的协同性，气候目标的实现能够对中国的“蓝天保卫战”起到十分重要的帮助。

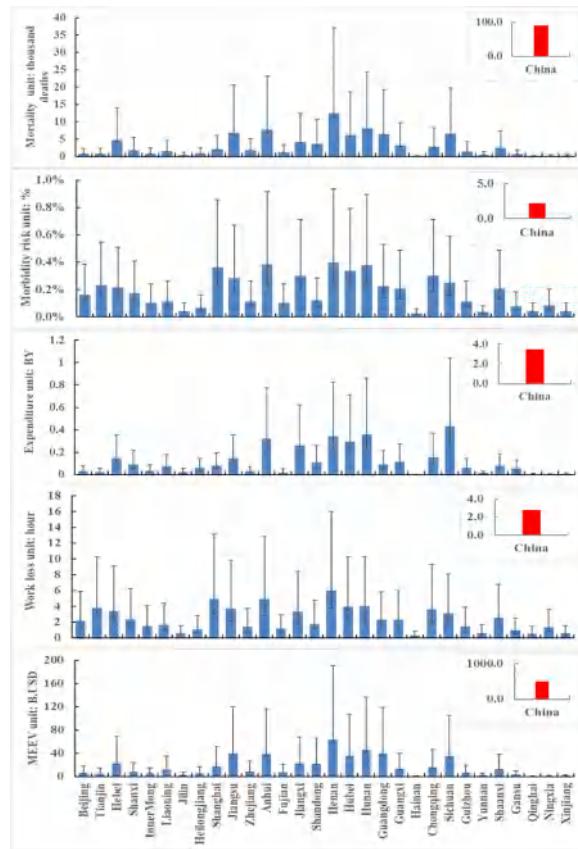


Figure 7.41: 2050 年气候减缓为中国各省带来的健康及经济效益

7.6.9 韩国减缓气候变化的空气质量与人群健康协同效益

- **原文标题:** Air quality co-benefits for human health from climate mitigation in South Korea [54]
- **期刊:** Environment International
- **发表年份:** 2020
- **作者:** Satbyul Estella Kim, Xie Yang*, **Hancheng Dai***, Shinichiro Fujimori, Yasuaki Hijioka, Yasushi Honda, Masahiro Hashizume, Toshihiko Masui, Tomoko Hasegawa,

Xinghan Xu, Kan Yi, and Ho Kim

- **关键词:** 气候变化减缓; 协同效益; 韩国; 空气污染; 人群健康
- [文章链接](#)

研究内容

本研究³⁴通过能源经济模型 (IMED | CGE)、空气质量模型 (CMAQ/WRF) 以及健康评估模型 (IMED | HEL) 之间的耦合, 模拟了不同可持续程度的社会经济发展路径 (SSP1-SSP3) 所对应的基准情景与气候变化减缓 (将辐射强迫稳定在 3.4W/m^2 水平) 情景下的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 污染及其健康影响, 评估了气候变化减缓在韩国所能实现的空气质量改善和健康改善协同效益。

研究发现

气候变化减缓能够显著减轻 2050 年韩国的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 污染程度, 从而显著减轻相关疾病负担。在 SSP2 和 SSP3 基准情景下, 韩国的人口加权 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均仍然无法达到目前 WHO 的参考值以下, 而 O_3 浓度更可能超过 $80\mu\text{g/m}^3$ 。这种程度的空气污染无疑将带来较为严重的健康危害。而在减缓气候变化的情景下, 由于空气质量有显著改善, 在 SSP2(或 SSP3) 社会经济发展路径下, 共有 20000 人 (或 10100 人) 的过早死亡、236 亿 (或 504.3 亿) 生命价值损失可被避免。

综合考虑气候减缓带来的韩国空气质量改善所能避免的生命价值损失、疾病负担和劳动时间损失, 研究发现, 这样的人群健康改善协同效益已能抵消韩国采取气候变化减缓行动的成本 (GDP 损失)。仅从协同效益的角度来衡量成本、效益, 到 2050 年, 基于不同的综合评估模型所得到的气候变化减缓为韩国带来的净效益就能够达到 300-450 亿美元 (图7.42)。这一研究发现与针对其他国家或地区的研究相似, 无论在全球范围还是在韩国, 气候变化减缓都表现出极高的经济可行性; 这种协同效益应得到更多的关注, 推动决策者以更大的信心和行动落实气候变化减缓政策。

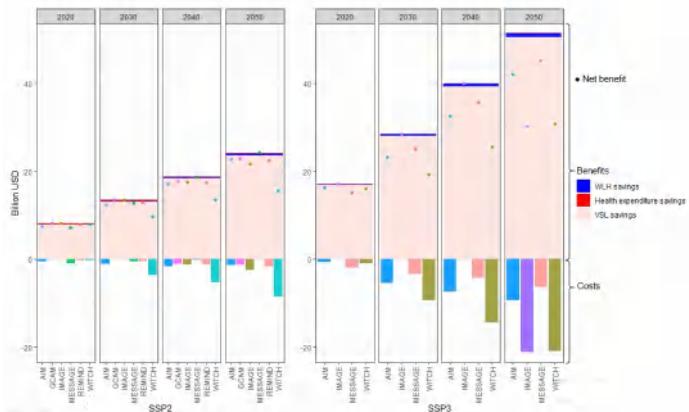


Figure 7.42: 2050 年气候变化减缓在韩国带来的健康协同效益及净效益

编辑/校阅: 吴雅珍

³⁴S. Kim, Y. Xie, H. Dai, et.al.. (2020). "Co-benefits of air quality and health from mitigating climate change in South Korea." *Environment International*. 136:105507. ([文章链接](#))

7.7 LEEEP 组 2020 年度研究一览

2020 年度，LEEEP 团队在能源气候政策相关期刊上就以下主题发表了研究成果。

以下为我们在本节甄选的相关已发表文章：

1. IMED 研究 | 中国逐步淘汰钢铁产能的气候和健康效益
2. IMED 研究 | 气候减缓对韩国人类健康的空气质量协同效益
3. IMED 研究 | 中国 2030 年实现 2 度目标路径的综合评估
4. IMED 研究 | 中国温室气体减排的健康效益和经济效益
5. IMED 研究 | 中国碳交易体系中不同初始限额分配的情景分析
6. LEEEP 合作 | 京津冀水泥行业能效提升的能源-排放-健康影响
7. LEEEP 合作 | 政策执行在实现印度清洁电力转型的关键作用
8. LEEEP 合作 | 柳叶刀健康与气候变化倒计时：中国 2020 年度报告

7.7.1 IMED 研究 | 中国逐步淘汰钢铁产能的气候和健康效益

- **原文标题:** Climate and Health Benefits of Phasing Out Iron Steel Production Capacity in China: Findings from the IMED Model^[78]
- **期刊:** Climate Change Economics
- **发表年份:** 2020
- **作者:** Bo-Shu Li, Yan Chen, Shaohui Zhang, Zheru Wu, Janusz Cofala, **Hancheng Dai***
- **关键词:** Production capacity phase-out policy; health impact assessment; co-benefits analysis; iron and steel industry; Beijing-Tianjin-Hebei region in China; IMED model
- **文章链接:**

研究内容

认识到不利的气候变化和不断恶化的空气质量，中国钢铁行业受到产能淘汰政策（PCPP）的影响，这对产业结构调整和国家减排目标产生了深远的影响。然而，对这种结构调整政策的综合影响进行定量估计的研究仍然很少。为此，本研究扩展了 GAINS 和 IMED 模型之间的软链接，以表征气候变化的影响和 PM_{2.5} 归因于健康的协同效益。结果显示，京津冀地区基于规模限制淘汰落后产能的 PCPP 总收益为 349 亿元（42 亿美元），其中 89% 来自节能减排，超过政策成本（200 亿元），但 2020-2030 年效益成本差距将继续缩小至 -28 亿元（-3 亿美元），表明长期需要政策改进。为进一步增加政策协同效益，实现多项政策目标，政策制定者应通过将规模限制转为能效限制来重新调整 PCPP。如果这样做，收益成本的差异将达到 425 亿元人民币（51 亿美元）。由于所选省份的收益成本比率不同，区域差异也存在，需要对欠发达地区（例如河北）进行必要的财政激励，以促进更紧密的一体化。

7.7.2 IMED 研究 | 气候减缓对韩国人类健康的空气质量协同效益

- **原文标题:** Air quality co-benefits from climate mitigation for human health in South Korea [54]
- **期刊:** Environment International
- **发表年份:** 2020
- **作者:** Ho Kim Satbyul Estella Kim, Yang Xie, **Hancheng Dai***, Shinichiro Fujimori, Yasuaki Hijioka, Yasushi Honda, Masahiro Hashizume, Toshihiko Masui, Tomoko Hasegawa, Xinghan Xu, Kan Yi
- **关键词:** Climate mitigation; Air pollution; Health impact assessment; Co-benefit analysis; CGE; IMED Model
- [文章链接](#)

研究内容

为减少温室气体 (GHG) 排放而做出的气候变化减缓努力会产生相关成本，但改善空气质量也有潜在好处，例如改善公共卫生和节省相关成本。多学科建模方法可以更好地评估气候减缓对人类健康的协同效益，并为制定适当的气候变化减缓政策和公共卫生行动提供合理的基础。采用综合研究框架，结合可计算的一般均衡模型、空气质量模型和健康影响评估模型，探索韩国到 2050 年减缓气候变化的长期经济影响。不同社会经济和气候变化减缓情景下与健康相关的经济效益。实现雄心勃勃的目标（即辐射强迫水平稳定在 3.4 W/m^2 ）到 2050 年将花费 1.3-85 亿美元，这取决于不同综合评估模型的不同碳价格。相比之下，实现这些相同的目标将使避免过早死亡的估值减少 230 亿美元，卫生支出减少 1.4 亿美元，减少工作时间减少 3.8 亿美元，这表明仅健康福利就显着抵消了削减成本韩国的温室气体排放量。

7.7.3 IMED 研究 | 中国 2030 年实现 2 度目标路径的综合评估

- **原文标题:** An integrated assessment for achieving the 2D target pathway in China by 2030 [79]
- **期刊:** Journal of Cleaner Production
- **发表年份:** 2020
- **作者:** Yang Xie, Xiaorui Liu, Qi Chen, Shaohui Zhang
- **关键词:** Carbon emissions peak, IMED_CGE model, NDC (Nationally determined contributions), 2 degree target, Co-benefit
- [点击 LEEEП 微信公众号链接阅读推送原文](#)

研究内容

为了减缓全球变暖的负面影响，中国以国家自主贡献 (NDC) 的形式在《巴黎协定》中面向国际承诺了温室气体减排目标。本研究试图探讨中国如何通过不同减排对策与路径，实现碳排放达峰与经济脱碳。为定量评估不同减排路径带来的影响，本研究利用动态 CGE 模型建立了十种不同情景，包含不同严格程度的碳排放限制与不同减排方案两个维度。

研究方法

本研究使用由北京大学能源环境经济与政策研究室自主开发的 IMED/CGE 模型对于中国减排路径进行评估。IMED/CGE 模型根据具体的研究目标和内容具有一定的灵活性。在本研究中，模型选取 2005 年作为基准年，到 2030 年为止逐年求解；同时，模型可以具体刻画 41 个部门，总体而言可以被分为基础部门、资源需求部门、土地需求部门和能源供应部门；除此之外，该模型充分考虑了技术路径，它可以描述供电技术、非化石燃料供应、碳捕集与封存（CCS）技术等一系列重要的能源供应技术，这使得该模型可以更合理地评估碳减排成本。模型中使用的数据包括投入产出表（IOT）、能源平衡表（EBT）等。构建环境核算系统时，碳排放因子、能源价格、可再生能源技术成本等数据集统一转换以 2005 年作为基准年。

本研究将情景设置划分为基准情景和干预情景。

其中，基准情景假设了基本的社会经济驱动力，包括人口增长率、全要素生产率（TFP）和自主能源效率等，这些假设主要基于十二五规划、十三五规划以及到 2030 年的长期规划。基准情景认为，随着中国进入发展“新常态”阶段，经济增速将会放缓，但是增长质量将有所提高；人口增长趋势则与 SSP2 情景一致，这是一种中间路径情景，以较快的人口增长为特征；此外，本研究区分了电力和化石燃料不同的能源效率，并且对于空气污染物末端治理去除率，基准情景基于技术改进和立法规定的加强假设每年去除率增加 2%。

另一方面，干预情景的建立考虑了两个维度：碳排放约束和各种低碳方案的选择。本研究对于中国 2030 年的碳排放约束设置了两个不同尺度：Level1 符合中国在 NDCs 中承诺的碳强度目标，即 2030 年碳强度相比 2005 年降低 65%；Level2 与 2 度目标一致，相较而言会更加严格，在这个目标下，中国温室气体排放将在 2030 年下降至 65 亿吨。就低碳方案的选择而言，我们描述了低碳消费（LC）、大规模开发非化石能源（NFE）、碳捕集与封存技术（CCS）等多种减排方案。

研究结果

社会经济总体发展趋势：在 BL_HC 情景下，由于缺乏气候政策，中国人均 GDP 从 2005 年到 2030 年增长约 5.2 倍；能源消费和碳排放也将随着经济的高速增长而持续上升。到 2030 年，全国用电量、终端能源和一次能源消费量将分别达到 10.11PWh、63.2 亿吨标准煤和 68 亿吨标准煤，与 2005 年相比分别增长至 4.06 倍、3.43 倍以及 2.88 倍。同时，碳排放量在 2030 年将增加到 147.2 亿吨，而碳强度相较于 2005 年在 2020 年与 2030 年将分别下降 35.1% 和 52.4%，不足以实现 NDC 目标。

同时在 NDC 情景和 2 度情景下，碳减排将对经济指标、能源消费等造成不同程度的影响。首先，一次能源消费量和碳排放量将由于低碳消费转型分别减少 12.9% 和 16.3%，这将导致 2020 年和 2030 年的碳强度额外下降 5.2% 和 6.6%。此外，在实行碳限额后，碳排放量在 NDC 情景下将于 2025 年达峰，在 2 度情景下将于 2020 年达峰，并且能源消费量也会随着化石能源成本上升而持续下降。

碳排放关键要素：理论上，在一般均衡分析框架中，碳减排由两种机制触发：非价格效应和价格效应。前者主要包括技术改进等外生假设，如能源效率的提高、非化石能源供应和 CCS 技术的采用。而价格诱发的因果链则是由碳排放约束导致的碳价格触发的。碳排放额度可以看作是政府提供的商品，是生产部门和终端消费者的需求。没有碳限制的情况相当于碳配额的无限供应，因此碳配额的价格保持为零。相反，当政府对整个经济系统施加碳排放约束时，碳价格会对碳排放限额产生影响。均衡价格水平由供给曲线和需求曲线决定。碳价格将根据各行业的碳排放强度在不同程度上推高各行业的生产价格。因此，市场价格也会受到影响，从而对经济体制产生广泛的影响。

从需求方的角度来看，由于碳密集型产品的价格将比不那么密集的产品上涨得更快，消费者将

把支出转向低碳商品，从而进一步向供应方的生产部门发出信号。为了应对能源和碳密集型行业产品需求的下降，生产商将通过加大对低碳行业的投资来调整自己的活动，从而实现一种新的平衡。在限制碳密集型产业扩张的情况下，经济结构可以实现脱碳。

研究结果表明，与 NDC 情景相比，2 度目标情景需要在 2030 年额外减少 27% 的碳排放。经过分部门分解可知各种低碳方案的减排贡献。结果表明，最有效的措施是逐步淘汰燃煤和燃气发电厂，以非化石能源发电技术取代它们，最终实现电力部门的脱碳。具体而言，通过提高发电效率，发展非化石能源，在 2 度情景下可减少碳排放总量的 33.3%。在 NDC 目标下，可再生能源效应和核电是最有效的措施，其次是电力需求和能源效率。CCS 技术的采用和最终用途结构的改变对减少碳排放的贡献相当有限。相比之下，在 2 度情景下，可再生能源的发展贡献了 26.0% 的碳减排 (2.0 GtCO₂)，电力需求将占总减排的 20.3% (1.6 GtCO₂)，第三大贡献者是终端使用效率的提高 (1.6 GtCO₂, 20.2%)。核电对碳减排的贡献率为 18.8% (1.5 GtCO₂)。CCS 技术将为所需的碳排放贡献 8.9%，而行业结构调整、采用和燃料转换的效果将相对较差。观察不同部门的排放，我们发现碳减排可归因于几个关键部门。有趣的是，我们注意到，在所有情景中，不同部门贡献的顺序相对稳定。例如，电力部门是最大的贡献者，在 NDC 和 2 度情景下分别实现了约 57.1% 和 54.8% 的所需碳减排。第二是生活部门，分别占 NDC 和 2 度情景下总减排的 15.8% (0.69 GtCO₂) 和 11.2% (0.93 GtCO₂)；剩下的分别是金属生产部门、机械部门、交通运输部门、非金属生产部门和煤炭开采部门，它们的合计贡献率分别约为 19.7% 和 22.4%；其余的降幅 (分别约 7.4% 和 11.6%) 来自其他部门。

研究结论

本研究进行的模拟为中国实现 NDC 和更宏伟的 2030 年碳减排目标提供了有益的见解。研究结果表明，无论是在 NDC 目标下，还是在 2 度目标下，低碳政策对降低碳排放都是非常有用的。然而，在不同的碳目标下，关键因素是不同的。在 NDC 目标下，可再生能源的发展是碳减排的主要贡献者 (42.4%)；其次是核能，将贡献 30.2% 的碳减排；第三个最有效的措施是提高最终需求部门的能源效率，最终需求部门的碳减排贡献率为 13.4%。在 NDC 情景下，功率效率的提高、终端结构的改变和燃料替代对碳减排的贡献较小。相比之下，在 2 度情景下的研究结果表明，电力部门具有最高的减排潜力，尤其是推行可再生能源发电等技术。

本研究除了探究碳减排的有效性外，还研究了碳减排的经济成本，以确定最具成本效益的减排方式。在一个假设的情况下（例如 NDC HC 和 2 度 HC 情景），经济体制并没有结构性变化，依然沉迷于传统发展模式，不进行低碳转型。那么，2030 年碳排放价格可以相当高 (97.9 美元/吨 CO₂ NDC 情景和超过 326.9 美元/吨 CO₂ 2 度情景下)，从而导致 2030 年 GDP 分别损失 3.8% (NDC) 和 11.6% (2 度目标)。尽管这种假设并不现实，但本研究也指出了低碳对策落地的必要性。如果所有的低碳对策都被引入，NDC 和 2 度情景下的碳价格将大幅下降，GDP 损失将分别下降至 0.007% 和 1.6%。此外，研究结果还表明，低碳转型在减少空气污染物排放的同时，也能带来显著的协同效益，同时有利于人类健康。对于降低经济成本，最被强烈建议部署的低碳对策是在采用非化石能源，采用更有效的技术，引导居民采用绿色和低碳行为，减少能源密集型产业的产量，调整产业结构，从长远来看，采用 CCS 技术也意义深远。并且，这些对策中的大多数可以相互补充。

7.7.4 IMED 研究 | 中国温室气体减排的健康效益和经济效益

- **原文标题:** Health and economic benefit of China's greenhouse gas mitigation by 2050 [80]
- **期刊:** Environmental Research Letters
- **发表年份:** 2020
- **作者:** Yang Xie, Yazhen Wu, Mingjun Xie, Baodi Li, Hui Zhang, Teng Ma, Yuqiang Zhang
- **关键词:** Carbon emissions peak, IMED|CGE model, NDC (Nationally determined contributions), 2 C target, Co-benefit
- **文章链接:** [点击 LEEEP 微信公众号链接阅读推送原文](#)

研究背景

全球气候变化和空气污染是人类在本世纪面临的重大挑战之一，全球大部分国家已经向联合国气候变化框架公约（UNFCCC）提交了国家自主减排目标（NDCs）。中国是目前最大的温室气体排放国。本研究评估了当中国采取更强的气候政策以实现 2°C 目标时，中国和其他国家所获得的健康和经济效益。

研究方法

本研究构建了 C0 和 C1 两个情景，C0 情景是中国和其他国家均在关键部门采取减排措施并履行 NDCs 的基准情景，而在 C1 情景中，其他国家履行 NDCs 而中国则采取更严格的气候政策以实现 2°C 目标。

本研究耦合 GAINS 模型、CAM-Chem 模型、IMED | HEL 模型，使用 GAINS 模型预测不同气候政策下未来的空气污染物排放，使用 CAM-Chem 模型模拟未来的空气质量，使用 IMED | HEL 模型量化空气污染的健康和经济影响，包括致病、致死、工作时间损失、疾病支出、统计生命价值等。

研究结果

1. 空气质量改善情况

2050 年 C1 情景较 C0 情景的空气污染物排放变化情况。中国实施更强的气候政策后，2030 年六种空气污染物排放量平均减少 5%，2050 年 CO、NOx 和 SO2 排放量分别减少 17.1 Tg、10.6 Tg 和 3.3Tg。在区域分布方面，中国北部和东部的空气污染物排放变化更显著。

C0 (b, c) 和 C1 (d, e) 情景下 2015 年 (a)、2030 年 (b, d) 和 2050 年 (c, e) 的 PM_{2.5} 浓度变化情况。在 C0 情景下，至 2030 年中国华北地区的 PM_{2.5} 浓度将下降 20 μg/m³，至 2050 年更多省份的 PM_{2.5} 浓度将下降超过 20 μg/m³。在 C1 情景下，2030 年和 2050 年 PM_{2.5} 浓度下降超过 20 μg/m³ 的区域将扩展到中国东北地区和西南地区，而西北地区的 PM_{2.5} 浓度也将明显下降。

2030 年和 2050 年不同情景下的 PM_{2.5} 浓度变化情况。东亚地区的 PM_{2.5} 浓度在 2030 年下降 2-4 μg/m³，在 2050 年下降 4-6 μg/m³。同时，中国实施更严格的气候政策也给其他东亚地区带来空气质量改善的协同效益，特别是朝鲜半岛和日本西部地区。

2. 空气污染相关的健康效益和经济效益

以避免 PM_{2.5} 相关过早死亡为例，中国实施更强的气候政策将带来显著的全球健康效益，2030 和 2050 年 C1 情景较 CO 情景分别避免 17 万人和 36 万人的 PM_{2.5} 相关过早死亡。中国是最大受益国，其避免的过早死亡人数占全球的 96%。韩国等东南亚国家也获得明显的健康效益，如韩国到 2050 年避免 3800 人的过早死亡，东南亚国家到 2030 和 2050 年分别避免 2700 和 6600 人的过早死亡。

本研究使用支付意愿法评估中国采取更严格气候政策改善空气质量所带来的经济效益。CO 情景下，2030 和 2050 年全球因 PM_{2.5} 暴露而造成的经济损失分别是 9 万亿和 13 万亿美元。在全球层面，中国采取更强的气候政策后将在 2030 和 2050 年避免 0.406 万亿和 1.206 万亿美元的经济损失。在区域层面，中国获得最大的经济效益并在 2030 年和 2050 年分别避免 0.4 万亿和 1.2 万亿美元的经济损失，而东南亚国家在 2030 年和 2050 年分别避免 26 亿和 103 亿美元的经济损失。

3. 劳动时间改变情况

改善劳动人口的健康状况可进一步增加其劳动时间。CO 和 C1 情景下 2030 和 2050 年因空气污染造成的人均劳动时间损失。在 CO 情景下，中国、印度和亚洲其他国家因 PM_{2.5} 暴露而造成的人均劳动时间损失较高，在 2030 年分别为 16.5 小时、15.9 小时和 17.1 小时，在 2050 年分别为 40.0、44.3 和 39.0 小时。中国实施更强的气候政策后，中国和其他亚洲国家在 2030 年所避免的人均劳动损失并不显著；但这种情况在 2050 年有所改善，如 2050 年中国和日本可分别避免 5.6 小时和 0.21 小时的人均劳动时间损失。

研究结论

本研究应用综合评估模型研究中国气候减缓政策对中国及其他地区空气质量和人群健康的影响。研究发现，中国的气候政策将给中国、韩国和日本等东南亚国家的空气质量改善带来协同效益，特别是中国华北和华东地区的空气质量和人群健康得到明显改善。中国各省实施气候减缓政策的“成本-效益”差异较大，山东、河南、湖北等人口密度较大、重工业较多的省份能获得显著的协同效益，而云南、贵州等空气质量较好、人口较少的省份获得的协同效益较少。

7.7.5 IMED 研究 | 中国碳交易体系中不同初始限额分配的情景分析

- **原文标题:** Allowance allocation matters in China's carbon emissions trading system [81]
- **期刊:** Energy Economics
- **发表年份:** 2020
- **作者:** Yana Jin, Xiaorui Liu, Xiang Chen, **Hancheng Dai***
- **关键词:** Computable general equilibrium (CGE); IMED model; Emissions trading system (ETS); Output-based allocation; Mass-based allocation; Benchmarks
- **点击 LEEEP 微信公众号链接阅读推送原文**

研究背景

作为世界上最大的二氧化碳排放国，中国郑重承诺通过 2015 年《巴黎协定》规定的国家自主贡献（NDC）为全球气候变化减缓做出贡献。到 2030 年或之前，中国的二氧化碳排放量将达到峰值，单位国内生产总值（GDP）的二氧化碳排放量将比 2005 年减少 60-65%。2020 年 9 月 25

日，中国习近平主席进一步宣布，中国将在 2060 年内实现碳中和。除了实施各种基于规划的政策外，中国正在构建一个国家碳排放交易系统（ETS），以帮助实现国家自主贡献和新的碳中和目标。

中国于 2017 年 12 月公布了第一阶段国家 ETS 计划，因其与传统 ETS 不同的设计选择和特点，学界对此关注频频。为了更好地研究中国 ETS 的特点和未来可能的发展方向，本文研究了几个事实基础：首先，在几个 ETS 计划草案中，哪些设计选择已经改变或保持不变；第二，最终在官方声明中确定下来的第一阶段 ETS 计划；第三，作为中央政府庄严承诺的中国自主减排贡献。

在此基础上，本文提出了四点中国 ETS 未来的发展前瞻。首先，尽管目前的 ETS 只在发电行业起步（因为它有最好的数据基础），但未来的 ETS 将扩大到涵盖更多行业。第二，尽管中国 NDC 没有对碳排放总量上限做出明确约束，但隐含的绝对量减排目标量是巨大的。第三，中国目前单一部门排放交易机制的初始排放配额遵循“基于比例”（rate-based）的基于产出的分配（output-based allocation, OBA）。OBA 指的是以产出为条件的分配，通常利用基准排放强度（即排放产出比标准）。排放配额的估算方法是将部门基准排放强度乘以排放交易机制参与者的产出。然而值得关注的是，中国现行 ETS 中的 OBA 是“基于比例”而不是“基于量”（mass-based）。基于比例的 OBA 意味着免费排放分配额度取决于部门强度基准，并且配额在每个政策周期内动态更新。这激励 ETS 参与者以能够影响其在政策期间内排放配额的方式进行生产。因此，基于比例的 OBA 使得总体排放量对于参与者和社会而言都是内生的。相比之下，在基于总量的 OBA 中，当前政策期间的排放分配取决于参与者在前一时期的产出。本期生产行为影响的是下期分配份额的百分比变化。因此每个时期的总排放量上限仍由监管机构外生预先确定。

第四个问题是所使用的排放强度基准。由于 ETS 参与者的限额是排放强度基准和产出的乘积，排放强度基准的水平和数量对分配有着实质性的影响。当高度异质性的参与者面对同样的基准时，排放强度更高、更不清洁的参与者将受到惩罚，因为他们得到的配额相对较少。在实践中，设置多个基准可以解释政策成本分配的这种异质性。在 OBA 下，已有研究发现更多的基准会降低减排的成本效益。然而，在 mass-based 的 OBA-ETS 下，不同数量基准的成本效益和分配影响的大小尚不清楚。

梳理完这四个发展前瞻之后，本文提出了两个问题：如果中国未来的 ETS 既涵盖多个行业，同时采用 mass-based 的 OBA 会怎样呢？在这样一个 ETS 中，设置更少的排放强度基准有什么利弊？本文建立了这样一个 ETS，并探讨了它的影响和潜在机制。本文使用多部门动态递归可计算一般均衡（CGE）模型进行分析。模拟的 ETS 具有以下特点：它模拟了 mass-based OBA 的使用；根据中国 NDC 目标实施了一个总量排放上限；覆盖了国家层面的十个高碳强度行业。

本文的分析遵循四个步骤：首先建立了几个可实现 NDC 的碳排放情景，将排放配额分配给十个部门，并在不进行排放交易的情况下研究部门减排反应。之后，允许跨部门排放交易，并重新分析部门反应。然后对不同情景下的部门和宏观经济影响进行比较。为了便于解释结果，在这三个步骤中，本文分别比较了两组配额分配方案，一组使用 mass-based 的 OBA，另一组使用基于历史排放水平的分配（称为“grandfathering”，后文记为“历史法”）。本文的研究重点不在“历史法”的结果，但它提供了一个比较基础。在主要分析之后，本文减少了 OBA 中的排放强度基准数量，即对部门进行分组并根据组内平均值确定基准分配配额，随后进行了重新分析。

这项研究有两个方面贡献。首先，本文将 ETS 建模为一个全国性的、多部门的、mass-based 的 OBA 体系，其基准各不相同，这为未来 ETS 可能的演进方向提供了模型基础。本文的设定和分析并不是对中国目前单一部门、rate-based 的 ETS 与 mass-based ETS 进行比较。相反，本文提供了未来 ETS 发展的预分析。第二，本文的 CGE 模型中有着丰富的部门细节，本文清楚地评估了模型化的 ETS 是否以及在多大程度上反映了一些重要的效率和分配原则。本文关注了四个原

则：(1) 相对污染的部门是许可证的购买者，即“污染者付费”原则；(2) 所有参与部门都做出了重大的减排努力，即在各部门之间更加平均地分配减排努力；(3) ETS 可能补贴的部门较少；(4) 经济中需求显著增加的部门不受到 ETS 的严重约束。本文的详细部门结果有助于评估 ETS 是否达到这些期望的特征。

研究方法

本文使用 mass-based OBA 研究了覆盖多个行业的中国全国 ETS，并将其与历史法的结果进行了比较。为了模拟部门经济的动态变化，本文使用了全国尺度版本的 IMED/CGE（能源-环境-经济可持续发展综合评价模型/可计算一般均衡）模型。IMED/CGE 涵盖中国 37 种经济商品和行业。本文在 CGE 模型中加入了碳排放许可证交易模块。ETS 从 2016 年开始，共涵盖十个行业：发电、焦炭、非金属、金属冶炼、汽油、化工、纺织、造纸、铁路和航空。

在 CGE 计算过程中，本文通过以下方式规定排放上限、部门分配和跨部门贸易：假设市场中有两个 ETS 参与部门。C1 和 C2 是部门 1 和部门 2 碳排放要求的需求曲线。当排放配额 E1 和 E2 分配给每个部门时，市场会找到两个平衡点 A 和 B，这两个平衡点使得碳市场的碳价格分别为 P1 和 P2 ($P_1 < P_2$)。相比之下，如果允许各部門之間自由进行排放交易，则 CGE 模型将找到新的平衡点 (A' 和 B')，其中部门 1 选择向碳市场出售 E_1 单位的碳排放许可证，而部门 2 从市场上购买 E_2 许可证。碳价格 (P) 在部门 1 和部门 2 之间是相同的，并通过满足以下条件出清碳市场：碳排放许可销售额 (E_1) 等于购买额 (E_2)；买方许可购买支出 (E_1P) 等于卖方许可销售收入 (E_2P)。相应地，当更多的部门参与排放贸易时，上述条件继续保持不变。

情景设定：表 1 总结了本文设定的情景及其假设。由于 NDC 设定了到 2030 年的二氧化碳峰值时间和排放强度降低目标，并对中国的能源和部门经济发展进行了预测，因此可以计算出政策期间和各部门排放量的合理范围。本文预测了直至 2030 年参照情景 (REF) 下的经济发展路径，然后本文在建模分析中使用 2005 年的碳排放强度和 NDC 的降低目标来确定政策期间的国家排放上限。所有的政策情景都接近于对整个经济实施相同的总量排放上限。政策情景都是基于两个维度设计的：(1) 是否存在排放交易 (“CAP” 仅限制上限，“ET” 代表限制上限且允许交易) 和 (2) 部门排放分配方法是否属于 “历史法” (标记为 “GF”) 还是 OBA。主要关注的情景是 ET OBA，其他情景有助于得出部门应对机制和影响。

OBA 情景中的排放强度基准的数量：在上述 OBA 情景中，每个部门以部门平均排放强度为基准。由于 ETS 有 10 个参与者，有 16 个详细的部门，因此有 16 个基准。本文通过将排放强度相对相似的部门进行归为同一组，测试在 ETS 参与者中设置较少基准的影响。此时，在所有其他设置不变的情况下，每个部门根据其组内平均基准而不是部门特定基准来发放配额。具体来说，本文将这些部门分为四组。发电仍然是一个独立的集团，遵循同样的分配。其他 15 个详细部门首先根据 REF 情景中的排放强度结果从高到低进行排名，然后分为三组，每一组约占其总产量的 33%。各集团的平均排放强度成为集团内各部门共享的新基准。部门特定配额是产出乘以该集团平均基准。

研究结论

如果中国气候政策的最终目标包括以较低的社会成本实现脱碳，而排放交易机制仍然是选择的主要市场化政策工具，那么中国未来的排放交易机制就有可能覆盖更多的部门，并采用 mass-based 且基于产出的排放配额分配。在本研究中，本文使用 IMED/CGE 模型来评估这样一个排放上限符合中国 NDC 目标的国家多部门 ETS。本文的分析并不是直接模拟中国目前 rate-based 的单一部门 ETS。相反，本研究旨在探讨 ETSs 下的部门和宏观经济影响，并引出和解释 ETS 参与部门的减排行为。为了便于分析，本文将 OBA 与历史法配额方案进行了比较，并对比了有无跨部

门排放交易的情景。本文还研究了在 ETS 参与者中设置较少基准的影响。减少基准的做法也具有实际意义，因为当很难仔细核实许多规模较小和更为多样化的部门的排放量和基准时，这种做法提供了一种选择。

2030 年，在 ET-OBA 的主要情景下，碳许可证的均衡价格为 67 美元/吨。NDC 所暗含的严格碳减排目标是以适度的福利损失实现的。随着碳排放量降至参考水平的 74%，国内生产总值和消费的损失将分别为 1.14% 和 2.28%。在均衡市场条件的决定上，总体排放上限和排放权交易的存在起主导作用，而 OBA 和历史法的差别影响有限。部门行为反应与理论预测一致，也就是说，与历史法政策相比，实行 OBA 政策部门受到的影响较小。因此，最初分配给各部门的配额将更好地满足各部们的发展需要。各部门的产出和技术改进将更接近其 REF 预测，各部门的减排工作将更加协调一致。发电和汽油等上游基础产业的产出损失和生产成本变化将减少。在 OBA 下，排放交易量和 ETS 经济规模将远小于历史法。这可能是一个好的特点，因为限制 ETS 市场的交易量可以节省行政资源并降低交易成本。

总的来说，在所有情景中，受影响最大的部门是那些排放强度更高、在经济中发挥更重要作用的部门（例如，发电和汽油等上游部门）和需求将显著变化的行业（如发电和航空业）。在 ET 情景下，本文确实观察到，排放量较大的部门更倾向于购买许可证，并且所有 ETS 参与部门与参考情景相比显著减少了碳排放。经济中需求增加的部门却没有受到 ETS 太多的限制。

与有 16 个特定部门基准的 OBA 主要情景相比，设定较少的基准会对每个部门和宏观经济产生理想的影响，比如产出减少、排放降低和排放强度降低。此外，ETS 的参与者必须在碳减排方面付出更多的努力，以实现远离自身行业平均表现的政策目标。它们加大减排力度，共同导致宏观经济损失略高，ETS 市场规模扩大。越来越多的行业获得了 ETS 政策的净补贴，这需要其他政策的配合进而纠正这种潜在的负面影响。

7.7.6 LEEEP 合作 | 京津冀水泥行业能效提升的能源-排放-健康影响

- **原文标题:** Potentials of energy efficiency improvement and energy-emission-health nexus in Jing-Jin-Ji's cement industry^[82]
- **期刊:** Journal of Cleaner Production
- **发表年份:** 2020
- **作者:** Shaohui Zhang, Yang Xie, Robert Sander, Hui Yue, Yun Shu
- **关键词:** Energy efficiency, Emissions, Health effects, Nexus assessment, Cement industry, Jing-jin-ji
- **文章链接:** [点击 LEEEP 微信公众号链接阅读推送原文](#)

研究内容

中国的水泥产量占全球的 52%，水泥产量占中国能源消费总量的 8%。此外，京津冀 (JJJ) 占中国水泥市场份额的 4%。2018 年，中国 8% 的人口居住在京津冀，对 GDP 总量的贡献为 9.5%。而水泥是用于建设基础设施的基本材料，京津冀地区的水泥行业对二氧化碳排放有显著贡献，并需要大量的石灰石和能源，因而对京津冀地区的水泥行业能效提升及能源环境分析十分值得关注。本

文³⁵构建了综合评价模型定量评估 2010 年到 2030 年在不同尺度上京津冀水泥产业的：能源效率改进、CO₂ 及空气污染物减排以及与空气污染相关的公共健康效益的潜力。

研究方法

情景设置：本研究构建了三种情景：基准 (BL) 情景、有经济潜力的能效提高情景 EEC 和有技术潜力的能效提高情景 EET。在 BL 情景中，高效水泥厂的自主能效提升为每年 0.2%，而由于预期水泥产量的下降，低效水泥厂将逐步淘汰。在 EEC 和 EET 情景中，我们假设，当对每个地区的熟料和水泥的未来动态分布进行建模时，效率低下的水泥厂将被逐步淘汰，而每项能效措施的未来执行率将下降。

模型框架：本研究耦合了 IU 曲线以及基于 GIS 技术能量模型，GAINS 模型，和 IMED | CGE 和健康影响评估 (IMED | HEL) 模型。用于定量评估京津冀水泥行业在不同尺度模型的节能潜力，并模拟相关的能源效率关系，包括清洁空气和公共健康效益，以及这些因素对 GDP 增长的影响。

研究发现

能源消耗及节能潜力：到 2030 年，在所有情景下，总能源消耗都将逐渐减少。在 BL 情景下，2020 年和 2030 年的总能源消耗分别比 2010 年显著下降 6% 和 46%。在研究过程中，通过在 EEC 情景中实施具有成本效益的能源效率技术，与基线情景相比，我们在 2020 年及 2030 年分别可以实现 21% 及 44% 的能源节约。在 EET 方案中，由于应用了七种不具成本效益的技术，还能够额外观察到可观的 3% 的能源节约潜力。京津冀水泥行业在 EEC 和 EET 情景下到 2030 年的节能潜力分布。如图 2b 所示，城市间的节能潜力差别很大。在 EEC 和 EET 情景下，唐山总节能潜力最大，占 32%，其次是邢台和石家庄，共占 25%。廊坊市、沧州市和衡水市的节能潜力最小，因为缺乏足够的资金支持来实施先进的节能措施。

总而言之，通过对 EEC 情景下具有成本效益的能源效率技术的预计实施率进行假设，研究发现，到 2030 年，京津冀地区的年均 PM_{2.5} 浓度下降不到 0.5 mg/m³。在 EET 情景下，充分运用所有最佳能效措施，年均 PM_{2.5} 浓度下降约 0.7 mg/m³。在与 PM_{2.5} 相关的健康影响方面，在 EEC 情景下，北京、天津和河北的发病率分别下降了 2600、2800 和 12400 人次。在 EET 情景下，所有选定的能效技术的应用使北京、天津和河北的发病率分别降低了 5200、5600 和 31100。如图 5 所示，在 EEC 情景下，节能措施的直接节能效益可能比节能措施的成本低 15-30%，而在 EET 情景下，总成本将进一步增加，比节能措施的成本高 47%。然而研究期间发现，如果考虑到能源排放与健康的关系，其全部效益 (即节能效益、二氧化碳减排效益和健康效益) 将比能源效率措施的总成本高出 1.3-3.6 倍。

研究结论

研究表明，通过制定恰当的政策可以为提高能源效率、清洁空气和延长人类寿命创造更多的可能性，因此建议设计和实施一项综合政策 (将碳、空气质量和健康因素整合到能源效率中)，可以提高污染治理效率降低政策实施成本。与此同时，使用综合评估的方法来评估应对多方挑战的解决方案，如能源和资源安全、减缓气候变化以及环境污染和健康等等也是有益的。

³⁵ Shaohui Zhang, Yang Xie et al. (2020). Potentials of energy efficiency improvement and energy-emission-health nexus in Jing-Jin-Ji's cement industry. *Journal of Cleaner Production* 278: 123335. ([文章链接](#))

7.7.7 LEEEP 合作 | 政策执行在实现印度清洁电力转型的关键作用

- **原文标题:** The critical role of policy enforcement in achieving health, air quality, and climate benefits from India's clean electricity transition [83]
- **期刊:** Environmental science & technology
- **发表年份:** 2020
- **作者:** Wei Peng, **Hancheng Dai**, Hao Guo, Pallav Purohit, Johannes Urpelainen, Fabian Wagner, Yazhen Wu, Hongliang Zhang
- **关键词:** Energy efficiency, Emissions, Health effects, Nexus assessment, Cement industry, Jing-jin-ji
- **文章链接:** [文章链接](#)

研究内容

以煤为主导的电力系统对印度应对空气污染和气候变化提出了重大挑战。尽管政府发布了一系列清洁空气政策和低碳能源目标，但关键障碍仍然是执行。在这里，我们使用基于排放情景、空气质量模拟和健康影响评估的综合评估方法来量化印度电力部门政策实施的重要性。我们发现，空气污染控制政策的有限执行会导致未来的空气质量和健康损害（例如，2040 年与 PM_{2.5} 相关的死亡人数增加 14200 至 59000），因为采用末端控制的燃煤电厂已经很少排放空气污染。但是，如果低碳和清洁煤政策没有成功实施（例如，2040 年将增加 400 至 8 亿吨二氧化碳），将会排放更多的二氧化碳。因此，我们的结果强调了有效实施现有空气污染和能源政策以同时实现印度空气污染、健康和碳减排目标的重要作用。

7.7.8 LEEEP 合作 | 柳叶刀健康与气候变化倒计时：中国 2020 年度报告

- **原文标题:** The 2020 China Report of The Lancet Countdown on Health and Climate Change [84]
- **期刊:** Lancet Public Health
- **发表年份:** 2021
- **作者:** Wenjia Cai et al
- **文章链接:** [文章链接](#)

执行摘要

如果气候变化的趋势得不到控制，它将对全球的人群健康造成巨大的威胁，因此迫切需要各国密切协作，积极应对气候变化。中国拥有全球五分之一的人口，也是世界上最大的二氧化碳排放国，在中国开展气候行动对人群健康和全球变暖的趋势都至关重要。和其他国家一样，减缓和适应气候变化将极大地造福于中国 14 亿人的健康状况，而将这些考虑纳入新冠疫情下的经济复苏计划和 2060 年碳中和目标的具体实现路径之中，将确保中国人当今和未来的福祉得到改善。未来数月乃至数年做出的决策将决定后续数十年气候政策的进程。为应对这一挑战，清华大学联合英国伦敦大学学院和另外 17 所国内和国际机构，在《柳叶刀倒计时：跟踪健康和气候变化进展》(Lancet Countdown: Tracking Progress on Health and Climate Change) 全球报告工作的基础上，聚焦国内情况，共同发布了针对中国的柳叶刀倒计时报告。本报告借鉴了国际方法和框架，旨在更全

面地了解和跟踪中国国内人群健康与气候变化之间的联系。本报告是柳叶刀倒计时为深入了解世界不同区域的健康与气候变化联系所做出的尝试。相比全球报告而言，本报告的特点在于尽可能地使用省级数据、展示省级结果，以便地方决策者制定有针对性的应对策略。

研究结论

首份《柳叶刀倒计时中国报告》对国家、地区和省级层面的 23 项健康与气候变化指标进行了跟踪。报告汇聚了 19 家国内外机构、77 位专家的工作成果，本报告首次全面介绍了气候变化对中国人群健康的影响以及中国所采取的应对措施。报告中的指标将不断完善，同时每年会增加新的指标和数据集。为此，本研究形成的合作平台是开放的，欢迎全国的专家和学术机构加入并开展合作研究。

显而易见，本报告跟踪的气候变化健康风险（包括高温、极端气候事件和气候敏感型疾病）在中国正迅速增加。每个人都无法逃脱气候变化对其健康的影响，而贫困人口、社会弱势群体、老年人、户外工作者等脆弱人群面临的风险尤其高。2019 年，每个老年人平均多经受了 13 个热浪天，这对他们来说可谓巨大的健康风险。同年，全年龄段热浪相关死亡人数达到了 26,800 人，据估计，由此导致的经济损失达 136 亿美元。

中国在适应气候变化和减缓气候变化方面获得的进展喜忧参半。一方面，中国尚未出台单独的国家健康适应计划，且各省很少开展气候变化和健康风险评估。此外，煤炭使用量和化石燃料补贴的下降趋势已然逆转。各部门进展缓慢，部分是因为媒体、学术界、公众和政府参与健康和气候变化议题的程度较低。另一方面，中国在可再生能源发展和空气污染治理方面取得了显著进展。在新增发电投资中，90% 的资金都投向了非化石燃料能源。中国可再生能源行业的就业人数占全球总数的三分之一，高于其他任何国家。在中国，空气污染继续改善，PM_{2.5} 相关死亡人数减少了 10%，由此产生的经济成本减少了 4 亿美元。中国正在建立覆盖全国 33% 排放量的全国碳排放交易体系(ETS)，预计将于 2021 年正式启动。

2000 年以来我国受到的气候变化健康影响的变化情况以及我国采取的应对措施，这里选取的指标是本报告中时间序列最长、评分含义最明确的一组指标。每一项指标的分值都在 0-1 之间，每个色块中的颜色深浅对应着该指标在该年的得分情况。颜色越深，表示影响越令人担忧，或者应对措施的力度越大。比如，某年的指标得分为 1.0，代表气候变化对这个方面的健康影响在此年最为严重。对于图中的应对措施指标，如逐步淘汰煤炭、使用清洁家用能源、削减化石燃料补贴等，指数得分 1.0 则表示采取了最大力度的应对措施，比如，完全实现了煤炭的退出。大多数指标的得分远低于 1.0，突显中国在多个方面仍有较大提升空间。关于图中各指标的详细解释，可参见附录第 102-103 页，后续发布的每份报告都会更新该图，并可能在图中增加额外的指标。

及时果断地采取措施应对气候变化将减少中国因气候变化而死亡的人数。相反，在气候行动中犹豫不决将阻碍健康中国 2030 目标 103 的实现，影响 14 亿中国人的健康与福祉。虽然新冠疫情的爆发已促使中国对社会和卫生政策进行了一系列反思、改革和调整，但仍未深入思考气候变化与健康之间的联系。如果不能做到这一点，那么新冠疫情这场健康危机的经济恢复计划可能会加剧气候变化这场健康危机的长期风险。

7.8 LEEEPEP 组 2021 年度研究一览

2021 年度，LEEEPEP 团队在能源气候政策相关期刊上就以下主题发表了研究成果。

以下为我们在本节甄选的相关已发表文章：

1. IMED 研究 | 从供给和需求两侧助力中国钢铁行业实现碳中和
2. IMED 研究 | 四川省深度碳减排对空气质量和人群健康的协同效益
3. IMED 研究 | 电动汽车政策对京津冀地区环境与健康的影响
4. IMED 研究 | 中国清洁空气政策的健康和经济效益：以京津冀为例
5. LEEEPEP 合作 | 广东省交通和工业 PM_{2.5} 控制的健康和经济影响
6. LEEEPEP 合作 | 中国多模型对比：碳税的一般均衡分析
7. LEEEPEP 合作 | 我们需要逆转趋势来阻止全球变暖
8. LEEEPEP 合作 | 柳叶刀健康与气候变化倒计时：中国 2021 年度报告

7.8.1 IMED 研究 | 从供给和需求两侧助力中国钢铁行业实现碳中和

- **原文标题:** Decarbonizing China's Iron and Steel Industry from the Supply and Demand Sides for Carbon Neutrality [85]
- **期刊:** Applied energy
- **发表年份:** 2021
- **作者:** Ming Ren, Pantao Lu, Xiaorui Liu, M. S. Hossain, Yanru Fang, Tatsuya Hanaoka, Brian O' Gallachoir, James Glynn, **Hancheng Dai***
- **关键词:** Iron and steel industry; Direct reduction iron; Carbon capture and storage; IMED model; Cross-sector decarbonization
- [文章链接](#)
- [点击 LEEEPEP 微信公众号链接阅读推送原文](#)

研究内容

实现气候目标需要所有部门一起努力。全球钢铁行业能源消费和碳排放分别占工业部门总量的 22% 和 28%。因此，钢铁行业脱碳对实现气候目标至关重要。本文结合自上而下的 IMED/CGE 模型和自下而上的技术选择模块建立综合评估方法，考虑供给侧的跨部门技术优化组合和需求侧的减排措施，探索中国钢铁行业低碳发展路径。

基于 IMED/CGE 模型预测基准情景和碳中和情景下的粗钢需求量。基于 CCS 技术的可用性、CO₂ 排放约束、电弧炉比例等因素在自下而上的技术选择模块中设置六个情景。

研究结果

需求侧采取措施减少粗钢需求量能够减少 21% 的 CO₂ 排放量（2050 年）。需求侧的措施（例如，调整经济结构、改善物质效率）在钢铁行业实现碳中和目标中具有重要作用，应该受到决策者的关注。

在生产侧，推广节能技术、提高基于废钢的电弧炉炼钢比例有助于促进钢铁行业的短期减排。创新技术，例如 CCS 技术和基于氢气的直接还原铁技术，在 2030 年以后将逐步发挥重要作用。

在 CCS 技术不可用的情况下，基于氢气的直接还原铁技术将在 2035 年左右进入市场，其技术比例到 2050 年增长为 23%-25%。在 CCS 技术可用的情况下，CCS 技术将在 2034 年左右进入市场，其技术比例到 2050 年增长为 30%。

与 CCS 技术相比，基于氢气的直接还原铁技术不会减少总能源消费量，反而会增加总能源消费量，因为氢气生产和运输过程中存在能源损失等。增加的电力消费量主要来自可再生能源，增加的氢气消费量主要来自电力和生物质能，这能够有效改善弃风弃光现象。

7.8.2 IMED 研究 | 四川省深度碳减排对空气质量和人群健康的协同效益

- **原文标题:** Impact of the Electric Vehicle Policies on Environment and Health in the Beijing–Tianjin–Hebei Region^[86]
- **期刊:** Environmental Research Letters
- **发表年份:** 2021
- **作者:** Silu Zhang, Yazhen Wu, Xiaorui Liu, Jun Qian, Junhui Chen, Li Han, **Hancheng Dai***
- **关键词:** Climate change mitigation, air pollution control, health co-benefits, IMED | CGE model, IMED | HEL model, Sichuan
- **文章链接:** [点击 LEEEP 微信公众号链接阅读推送原文](#)

研究概要

本研究将北京大学 LEEEP 团队自主开发的 IMED 体系中能源经济模型和人群健康模型与空气污染物排放模型深度耦合，聚焦于未来中短期（2025-2035 年）的省市尺度，选取近年来经济发展迅速且碳排放量高的四川省为例，定量分析空气污染控制技术、气候减缓目标和地区性空气污染防治等措施在空气质量和人群健康改善方面所能实现的效益，以评估空气污染控制的必要性、碳减排政策的经济可行性以及部门协同、减污降碳等协调措施所能起到的总体优化作用，为我国各省市提供研究范式和政策支撑。

研究背景

气候变化和空气污染已成为我国最紧迫的两大环境挑战。随着二氧化碳排放和空气污染造成的健康负担，我国也在不断付诸努力解决这两个问题，试图找到更好的协同解决方案。截至 2019 年，我国已提前完成国家自主贡献在 2020 年的气候变化目标——与 2005 年相比，碳排放强度下降 48.1%，非化石燃料占一次能源消费总量的比重下降 15.3%。在大气污染防治方面，2013 年以来《大气污染防治行动计划》实施力度空前，政府还采取一系列政策和行动，使得主要污染物排放量大幅下降，PM_{2.5} 污染严重程度大幅下降。我国于 2018 年启动了新的清洁空气三年行动计划（常被称为“蓝天保卫战”），还强调在 2030 年之前达到排放峰值、2060 年之前实现碳中和。

已有文献揭示了我国绿色低碳转型的潜在路径、机遇和挑战。Jiang 等于 2018 年利用能源与环境政策综合评估模型分析了我国温升 1.5°C 情景，发现如果实现深度减排目标，我国的化石能源系统需要迅速向零排放能源转型，同时碳捕获和存储技术需要发挥重要作用。Zhou 等 2021 年的研究基于全球变化评估模型对不同能源系统转型情景进行评估，发现我国的二氧化碳排放在 2025 年或 2030 年达到峰值，以实现 2°C 或 1.5°C 目标。Tong 等于 2020 年确定了有效的部门排放

控制政策，以降低我国不同社会经济和气候变化情景下的人为污染物排放，并指出积极的空气污染控制政策是改善空气污染的关键。

与此同时，许多研究揭示了气候变化减缓和空气污染控制之间的潜在协同作用。无论是在全球还是国家层面，碳减排政策都可以通过促进产业升级和改善能源消费结构，直接或间接改善当地空气质量，带来显著的协同效益。对于我国，许多协同效益研究都聚焦于国家层面，或者侧重于特定的政策，这为我国的减缓路径提供了广泛的见解。然而地区层面的研究则相对较少。Peng 等 2018 年的研究发现终端能源需求电气化与煤电化转型相结合，可以同时改善二氧化碳排放和空气污染，到 2030 年每年避免 55-69 万人死亡。Cheng 等于 2021 年的研究调查了我国当前和未来碳中和下的空气质量改善路径，并强调了气候减缓政策对我国 2030 年后空气质量改善的重要性。

由于我国存在显著的区域异质性，不同省份具有成本效益的减缓路径可能完全不同。因此，我国各省需要开展更具体的区域研究，以研究政策之间可能产生的协同效益。已有文献研究了能源转型与我国地方大气污染控制政策之间的协同效应，其中一些研究还探索了我国多个城市或省份的健康协同效益的差异。例如，Li 等 2019 年的研究指出工业和电力将是空气污染控制的关键部门，从长远来看，低碳政策可以减缓因更严格的控制策略而导致的空气污染控制成本的增加。Li 等 2018 年的研究发现在我国每年排放强度降低 4% 的情景下，碳减排的空气质量协同效益在不同省份可达 1.6-537 亿美元，货币化的健康协同效益是否可以部分或完全抵消政策成本将取决于死亡率估值参数的选择。Xing 等 2020 年的研究强调，在实现空气污染深度减缓方面，我国的气候变化减缓努力与现在的自主贡献目标之间存在差距。Ramaswami 等于 2017 年评估了我国 637 个城市气候减缓政策的效果，发现健康协同效益存在显著异质性。部分已有研究还评估了气候变化减缓对一个省或城市的空气质量和人类健康的协同效益，特别是东部发达地区（如北京、上海、天津和山东），发现每年可以避免数十万人过早死亡，协同效益的大小取决于低碳转型政策的力度和覆盖范围，以及基础人口数量和基线死亡率。

目前的研究已经证明了低碳转型在中长期发展的重要性，并为有效控制区域大气污染提供了思路。然而，对我国各区域或各省的气候减缓路径开展成本效益分析的研究较少，但这可能会影响区域气候政策的目标。更重要的是，现有的研究大多采用部分均衡模型或能源系统优化模型预测能源路径，仍缺乏对于能源系统的演变与区域经济增长和经济竞争力的相互作用分析，为地方决策者提供更好的成本效益支撑。

本研究基于可计算一般均衡 (CGE) 模型，以我国四川省为例，研究了气候变化减缓和空气污染控制政策的协同效应以及气候政策的成本效益。四川省是近年来快速发展的省份，经济增长状况好于大部分中西部省份，2019 年全省人口 8375 万人，GDP 总量占西部地区比重超过 20%。尽管自 2000 年初以来，四川的碳强度持续下降，但其 CO₂ 排放量仍居西部第三位，2017 年达到 309 MtCO₂，占全国 CO₂ 排放总量的 3.1%。此外，四川地处我国西南部的四川盆地，大气污染物排放量高，地理条件特殊，空气污染严重，识别和实施有效的空气污染治理政策仍是巨大挑战。根据四川省生态环境厅公报，尽管四川的雾霾污染已经大大改善，但仍有大约一半的城市 PM_{2.5} 年均浓度超过国家环境空气质量标准 (35 μg/m³)。在这种形势下，找到一条在空气污染改善的同时碳排放减少的协调途径，对四川的可持续发展至关重要，尤其是四川水资源丰富、水电潜力巨大，通过推进清洁电力和能效提升，以实现绿色转型、空气质量改善、率先达到碳排放峰值，具有得天独厚的优势。

针对四川省，已有文献构建了该地区的碳排放清单或碳足迹，并揭示了其空气污染的时空变化和来源贡献。然而，对于四川省中长期低碳转型和空气污染治理的途径、成本和效益，目前仍缺乏足够的共识。仅有以省份为单位的全国研究评估了四川省二氧化碳减排的健康协同效益或污染改善

的成本，发现四川的成本效益与其他省份相比不是很突出。同时，很少研究讨论四川中长期的碳减排和空气污染控制政策在部门层面的协同效应。因此，四川如何在自主贡献目标下实现碳达峰目标，以及在多大程度上能够以成本效益的方案协调气候和空气质量目标，仍有待研究。

本文构建了综合评估模型，包括能源经济模型 (IMED | CGE)、GAINS 模型 (温室气体-空气污染相互作用和协同作用) 和人群健康模型 (IMED | HEL)，以研究气候减缓和空气污染控制政策对空气污染物和碳排放的影响、中短期 (2020-2030 年) 减排目标下的 PM_{2.5} 污染与人群健康影响。对于气候政策，本文关注与我国最近更新的 NDC 一致的深度减缓情景，这也对应于全球 1.5°C 的目标；对于空气污染控制政策，本文着重于研究各省的中短期减排目标，对应“2035 美丽中国”目标，旨在实现环境质量的根本改善。本文主要解决以下三个问题：(a) 四川省通过末端控制措施减缓空气污染的最大潜力是多少？(b) 除末端控制措施外，气候变化减缓政策对空气质量与公众健康有哪些协同效益？(c) 货币化的健康协同效益与碳政策的成本相比如何？旨在为协调实现空气污染控制和低碳发展提供政策启示，支撑地方地区协调、经济有效的可持续转型。

研究方法

本研究耦合宏观经济 (IMED | CGE) 模型、GAINS 模型和人群健康 (IMED | HEL) 模型，定量评价四川省碳减排政策和空气污染控制政策的效果，总体框架如图 7.43 所示。

本文研究 2015-2035 年四川省不同的碳减排政策和空气污染控制的路径，届时我国将达到国家二氧化碳排放峰值，并实现“2035 美丽中国”目标。本文基于碳减排政策和空气污染末端控制政策，利用 GAINS 模型评估不同情景下的空气污染物排放和 PM_{2.5} 浓度，随后使用 IMED | HEL 模型评估不同情景下的健康影响和货币化损失，并分析空气污染控制和碳减排政策的影响，最后对比低碳情景下的减排成本与可避免的 PM_{2.5} 相关经济损失，以评估低碳政策的成本效益比。研究中的所有经济成本和收益均为不变价 (2017 美元)。

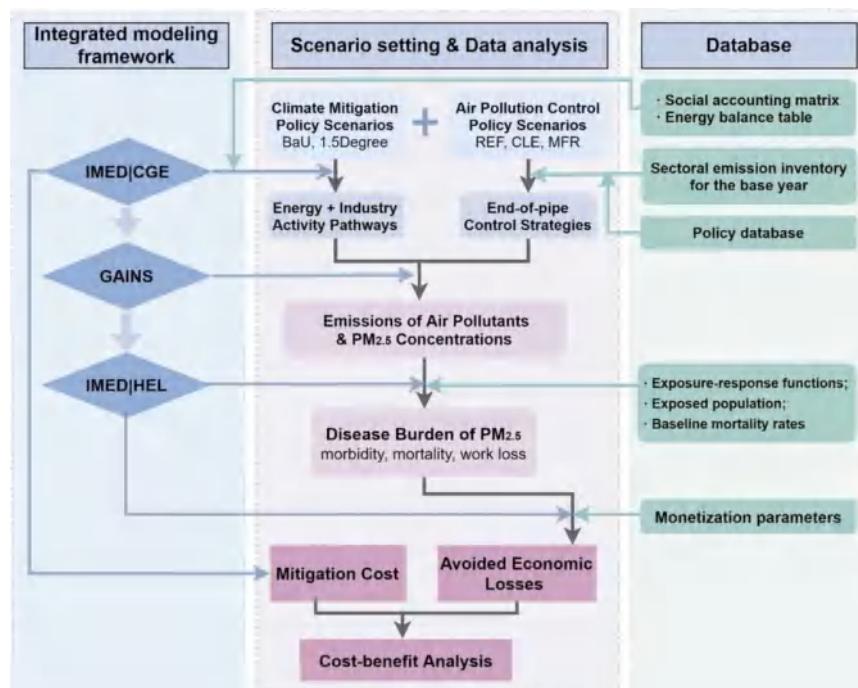


Figure 7.43: 综合评估框架

本文构建一个二维情景框架，通过四个具体情景综合评估四川省碳减排政策和空气污染政策的影响，重点关注与能源和工业过程相关的空气污染排放和引致的人群疾病负担。本文分析了气候减缓政策的社会系统成本和效益，希望能对具有成本效益的省级绿色转型路径提供启示。

第一个维度是碳减排，包括基准情景 (BaU) 和低碳发展情景 (1.5°C)。在 BaU 情景下，我国实现了最初提交的自主贡献目标，即到 2030 年比 2005 年减少 60%-65% 的碳强度。本文使用更接近“当前政策”情景而不是“没有政策”的冻结情景，是因为我国有很大的可能性实现 NDC 目标，在此基础上，分析我国强有力的气候目标的协同效益会更有直接和更有意义。 1.5°C 情景描述了与全球 1.5°C 气候目标和我国最近加强的 NDC 目标相适应的减缓路径。通过对比 1.5°C 情景与基准情景 (BaU) 下的能源和部门产出结果，揭示污染物排放驱动力的变化。第二个维度是空气污染末端控制，包括排放控制水平固定在 2015 年水平的参考情景 (REF)、当前立法趋势下的控制情景 (CLE) 和实现最大可行减排的控制情景 (MFR)。

Scenarios	Air pollution control policies	Carbon mitigation policies
Air pollution policies (end-of-pipe control)	BaU_REF	End-of pipe control strategies fixed at 2015 level
	BaU_CLE	Stronger end-of-pipe control measures under stated air quality policies and targets
	BaU_MFR	Stringent end-of-pipe controls to achieve maximum feasible emission reduction
Carbon mitigation policies	1.5deg_MFR	Stringent end-of-pipe controls to achieve maximum feasible emission reduction (same with BaU_MFR)
		• Deep mitigation in line with the 1.5 degree climate target

Figure 7.44: 情景设置

研究结果

碳减排政策将重塑能源体系

实施更强有力的碳减排政策将在很大程度上重塑四川省 2020 年后的能源体系（图7.45）。在 1.5°C 情景下，一次能源消费将在 2020 年达峰，与 BaU 情景对比，达峰时间提前且峰值量显著降低（图7.45a）。在 BaU 情景下，最终能源消费从 2017 年的 97 Mtoe 增加到 2035 年的 157 Mtoe；而在 1.5°C 情景下，电力将占最终能源需求的 50% 左右。与 2017 年相比，2035 年的煤炭、石油、天然气和焦炭的消费量将分别下降 58%、31%、0.9% 和 64%，电力需求将增长两倍，从 2017 年的 16Mtoe 增至 2035 年的 66 Mtoe。

从行业角度看，电力部门的低碳转型将显著降低化石燃料在一次能源中的份额。在 BaU 情景下，化石能源发电将在 2031 年将达到 23Mtoe 的峰值，其中煤炭、天然气、石油和焦炭分别占 85%、10%、4.8% 和 0.3%（图7.45c）。但是在 1.5°C 情景下，化石能源消费将在 2024 年达到峰值，约为 18Mtoe，其中煤炭占比最大（73%），天然气、石油和焦炭分别占 19%、7.8% 和 0.7%。同时，能源效率的提高以及需求的减少也推动了化石燃料使用量的大幅降低。

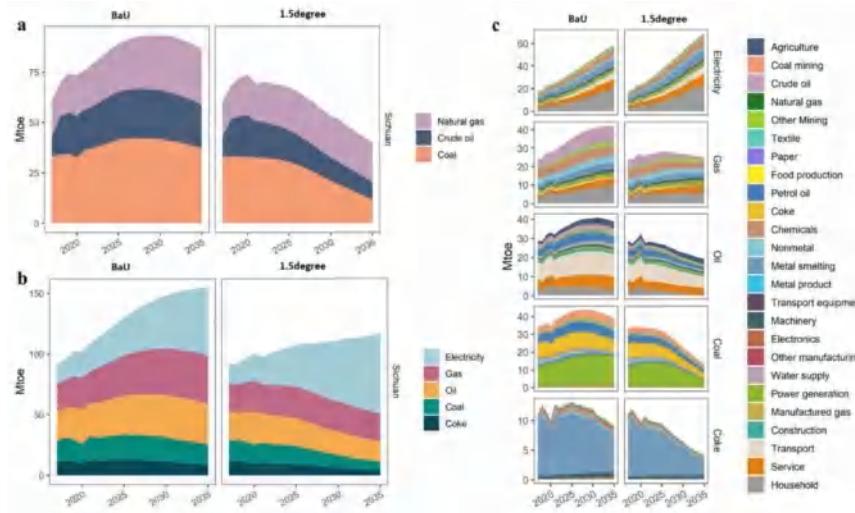


Figure 7.45: 2017-2035 年四川省能源消费：(a) 一次能源消费；(b) 最终能源消费；(c) 无进出口的能源平衡表；单位：Mtoe

减污降碳协同效益巨大

在 1.5°C 情景下，严格的碳限额将导致二氧化碳排放的大幅降低、峰值提前（图7.46b）。在基准情景 (BaU) 下，四川碳排放在 2017-2030 年间保持增长趋势，随后下降。而在 1.5°C 的情景下，四川的碳排放将提前在 2020 年左右达到峰值。在基准情景下，与 2017 年相比，2025 年碳排放量将增加约 7300 万吨 (+24%)、2030 年增加 8700 万吨 (+28%)、2035 年增加 5700 万吨 (+19%)。在 1.5°C 情景下，2025 年碳排放量将比 2017 年显著减少约 19 Mt(-6.0%)、2030 年减少 76 Mt(-25%)、2035 年减少 129 Mt(-42%)。

实施深度碳减排政策和空气污染物末端控制措施可以在不同程度上减少污染物排放(图7.46b)。在没有碳限制的情况下，BaU_CLE 和 BaU_MFR 方案中的污染物末端控制措施将有助于减少未来 20 年所有空气污染物的排放。BaU_CLE 情景下，2035 年 SO_2 排放比 2015 年增加 50kt (5.6%)， NO_x 、VOCs、 NH_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放分别比 2015 年减少 190 kt(22%)、385 kt(42%)、79 kt(8.7%) 和 240 kt(40%)。当实施最大程度的末端控制时 (BaU_MFR)，主要污染物的排放将进一步减少，与 2015 年相比，2035 年 SO_2 的排放量将增加 50 kt (5.5%)， NO_x 、VOCs、 NH_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放量将减少 230 kt(27%)、427 kt(46%)、102 kt(11%) 和 329 kt(55%) (图7.46a)。

不同空气污染物排放的驱动力和政策力度导致了未来年减排率的差异。在 MFR 情景下，末端控制措施可显着减少农业部门 SO_2 、 NO_x 、VOCs 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放，2035 年约下降 86%~100%，这是因为四川省在 2020 年就基本消除了农业部门的秸秆露天焚烧。然而，根据四川省的排放清单，以氨肥使用和畜牧业养殖为主的农业源 NH_3 排放相对难以减少，限制了未来氨排放的进一步下降。四川省因经济发展对电力需求的增加，将导致 2015-2030 年 REF 情景下 SO_2 排放量略有增加，大约 75%。电力和供热厂的末端控制的减排潜力很低，2030 年仅下降 3.1%，这与“超低排放”目标的基本实现息息相关。四川省制定了石化、医药、汽车制造等行业 VOCs 的一系列末端去除率目标，预计到 2035 年 VOCs 排放量减少 24%。

除了严格的末端控制之外，深度的碳减排政策可以进一步减少空气污染物的排放。在 1.5deg_MFR 情景下，预计未来 20 年所有空气污染物的排放量将进一步下降 (图7.46 (b))。与

2015 年水平相比，1.5deg_MFR 情景的低碳政策将导致 SO₂、NO_x、VOCs、NH₃ 和 PM_{2.5} 排放量分别减少 370 kt(41%)、465 kt(54%)、478 kt(52%)、109 kt(12%) 和 374 kt(63%)。

在 1.5 度情景下，由于能源生产和最终能源需求结构的转变，预计污染物排放将大幅下降。四川省预计到 2035 年可再生能源发电的比例将进一步增加，因此电力部门的排放将大幅减少。与 BaU 情景相比，2035 年一次 PM_{2.5} 总排放量将分别下降 21%、42% 和 35%，而 VOCs 和 NH₃ 排放减少的协同效益较小。考虑到 VOCs 和 NH₃ 也是二次 PM_{2.5} 污染的重要前体物，未来的清洁空气计划可能仍需要更多地关注非甲烷 VOCs 和 NH₃ 的末端控制。

对于不同年份的不同空气污染物，从 NDC 目标到 1.5°C 的特点是减排量相对于二氧化碳排放的减少程度不同。图7.46c 比较了 2025 年和 2035 年 1.5deg_MFR 情景下 CO₂ 和不同空气污染物的减排率，预计到 2035 年，氮氧化物、二氧化硫和一次 PM_{2.5} 等与化石燃料燃烧关系更密切的污染物将获得更大的减排协同效益。2025 年，1.5 度情景下的碳和空气污染物减排率分别为-24%(碳减排) 和- 43% (PM_{2.5} 减排)，2035 年分别为- 51% 和- 55%。在所有污染物中，二氧化碳和 NO_x、SO₂、PM_{2.5} 有较大的协同减排空间，2035 年可分别减排 47%、45% 和 55%；NH₃ 和 VOC 的空间较小，分别 17% 和 31%。

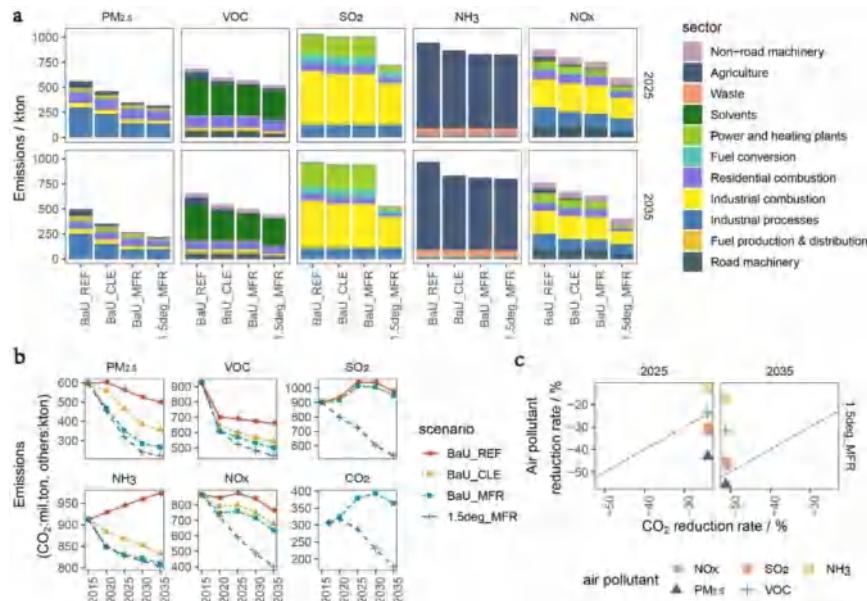


Figure 7.46: 二氧化碳和空气污染物排放量：(a) 分部门的空气污染物排放量；(b) 二氧化碳和空气污染物的排放；(c) 1.5deg_MFR 情景下的协同减排率

PM_{2.5} 浓度与“2035 美丽中国”目标存在很大差距

四川省地处四川盆地，有利于局部环流和污染传输，PM_{2.5} 污染较为严重，东部污染尤为严重，成都平原城市群聚集了四川省 60% 的人口和 60% 的工业活动。在政策情景下，2015-2030 年四川省 PM_{2.5} 浓度将显著下降，尤其是在污染较严重的地区。BaU_REF 是一个反事实的情景，我们假设在 2015 年后有额外的碳减排政策，但没有新增的末端控制措施。在 BaU_REF 情景下，2025 年 PM_{2.5} 浓度为 35 μg/m³，2035 年为 32 μg/m³（图7.47b），但是中东部地区 PM_{2.5} 浓度仍高于中国空气质量标准（图7.47a）。实施污染物控制措施将在不同程度上改善 PM_{2.5} 浓度，而深度碳减排政策将在更大的区域带来更显著的空气质量改善（图7.47a）。BaU_CLE 情景下，

2025 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降低 $1.3\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2035 年降低 $1.7\mu\text{g}/\text{m}^3$; 当实施最大潜力的末端控制措施时 (BaU_MFR), 2025 年和 2035 年分别降低 $2.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $2.6\mu\text{g}/\text{m}^3$, 这反映出末端控制措施的效果已经“消耗殆尽”。当实施深度碳减排政策 (1.5degMFR) 时, 2025 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度将进一步减少 $4.5\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2035 年将进一步减少 $5.4\mu\text{g}/\text{m}^3$, 导致区域平均浓度低于 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$, 符合我国空气质量的二级标准。

然而, 从人口加权浓度 $\text{PM}_{2.5}$ 的角度来看, 2035 年的空气质量与世界卫生组织 (WHO) 推荐的空气质量指导标准 (AQG)、“美丽中国”目标仍有很大差距 (图 7.47b)。由于四川省东南地区工业密度高、人口密度高, 2035 年人口加权 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度仍超过国家标准, 在常规政策情景下达到 $64\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。即使采用最强有力的末端控制, 人口加权的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度也只能略微下降到 $58\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。随着传统的末端措施的改善潜力耗尽, 气候政策将发挥更重要的作用。在 1.5deg_MFR 情景下, 2030 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度将进一步降低至 $52\mu\text{g}/\text{m}^3$, 这表明迫切需要在减少空气污染方面作出进一步努力, 应当考虑到浓度和人口的空间分布, 以及污染控制的区域协调。

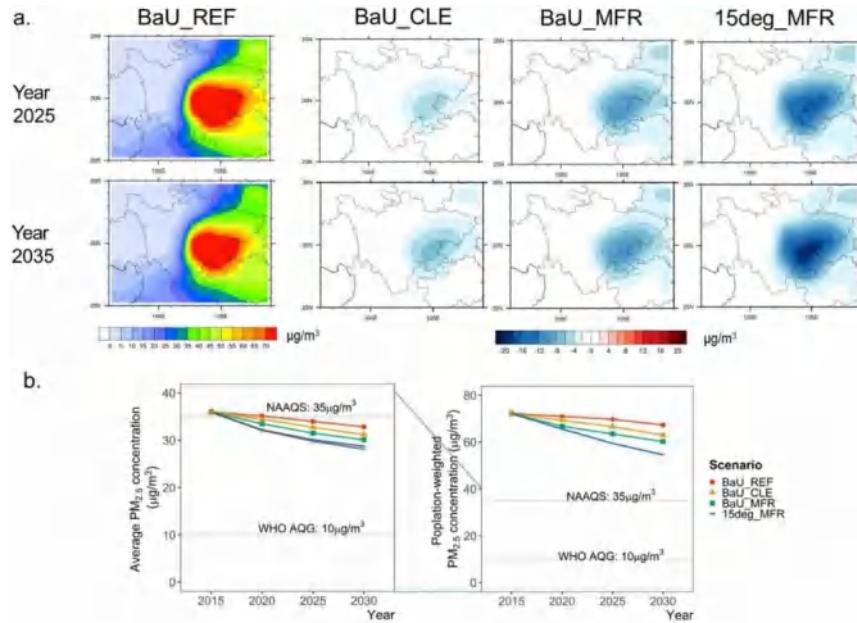


Figure 7.47: $\text{PM}_{2.5}$ 浓度: (a) 2025 年和 2035 年的 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度以及政策情景和 BaU_REF 情景之间的差异; (b) 四川省 $\text{PM}_{2.5}$ 地区加权平均浓度、 $\text{PM}_{2.5}$ 人口加权平均浓度。水平线表示中国现行国家空气质量标准中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的 2 类限值 ($35\mu\text{g}/\text{m}^3$)、WHO 的空气质量标准中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$; 单位为 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

减缓措施大幅降低致病致死人数

四川省实现 2060 年碳中和目标的低碳转型, 具有显著的空气质量协同效益, 进而降低空气污染造成的疾病负担。本文基于 GEMM 暴露效应函数估算了四川省 $\text{PM}_{2.5}$ 在不同情景下引致的 5 种疾病的过早死亡, 包括缺血性心脏病 (IHD)、中风、慢性阻塞性肺疾病、肺癌和下呼吸道感染 (图 7.48b)。其中 IHD 导致大多数与 $\text{PM}_{2.5}$ 相关的过早死亡, 其次是中风。通过实施更严格的末端控制措施与深度碳减排措施, 可以避免与 $\text{PM}_{2.5}$ 相关的大量过早死亡。在基准情景 (BaU_REF) 中, 2025 年与 $\text{PM}_{2.5}$ 相关的过早死亡约为 150(CI95: 100-190) 万人, 到 2035 年将减少至 140

(CI95: 99-180) 万人。实施末端控制措施 (BaU_CLE 和 BaU_MFR) 可在 2035 年分别避免 4500 和 7200 例过早死亡；当实现深度碳减排政策 (1.5deg_MFR) 时，到 2035 年可避免的过早死亡可高达 14 000 人，占基准情景总死亡率的 10%。在人口加权 PM_{2.5} 浓度降低的情况下，预计过早死亡率的增加主要是由人口增长和老龄化推动的，这表明改善空气污染的努力对保护公众健康是必不可少的，特别是在未来人口迅速老龄化和人群易感性增加的背景下。

减少碳排放还有助于进一步降低 PM_{2.5} 暴露导致的疾病发生率，包括慢性支气管炎、哮喘、上呼吸道、呼吸道医院入院、心脏医院入院和脑血管医院入院（图7.48a）。在基准情景 (BaU_REF) 下，人均发病风险将从 2015 年的 $5.4 \times 10E - 8 (CI95 : 0.3E - 8 \sim 2.1E - 8)$ 到 2035 年的 $4.7 \times 10^{-8} (CI95 : 0.3E - 8 \sim 1.8E - 8)$ ，PM_{2.5} 的 $1.1 \times 10E - 8 (23\%)$

在政策情景下，四川预计可以避免工作损失天数。通过避免疾病病例和过早死亡，降低污染可以减少劳动力损失，进而促进社会效益和经济发展。在基准情景 (BaU_REF) 中，与 PM_{2.5} 相关的劳动日数损失将从 2025 年的 1.09 亿天减少到 2035 年的 9700 万天（图7.48c）。严格的末端控制和碳减排政策将有助于进一步减少劳动损失，到 2035 年最大避免劳动损失时间可达 2000 万天，相当于人均每年劳动时间损失 5 小时。

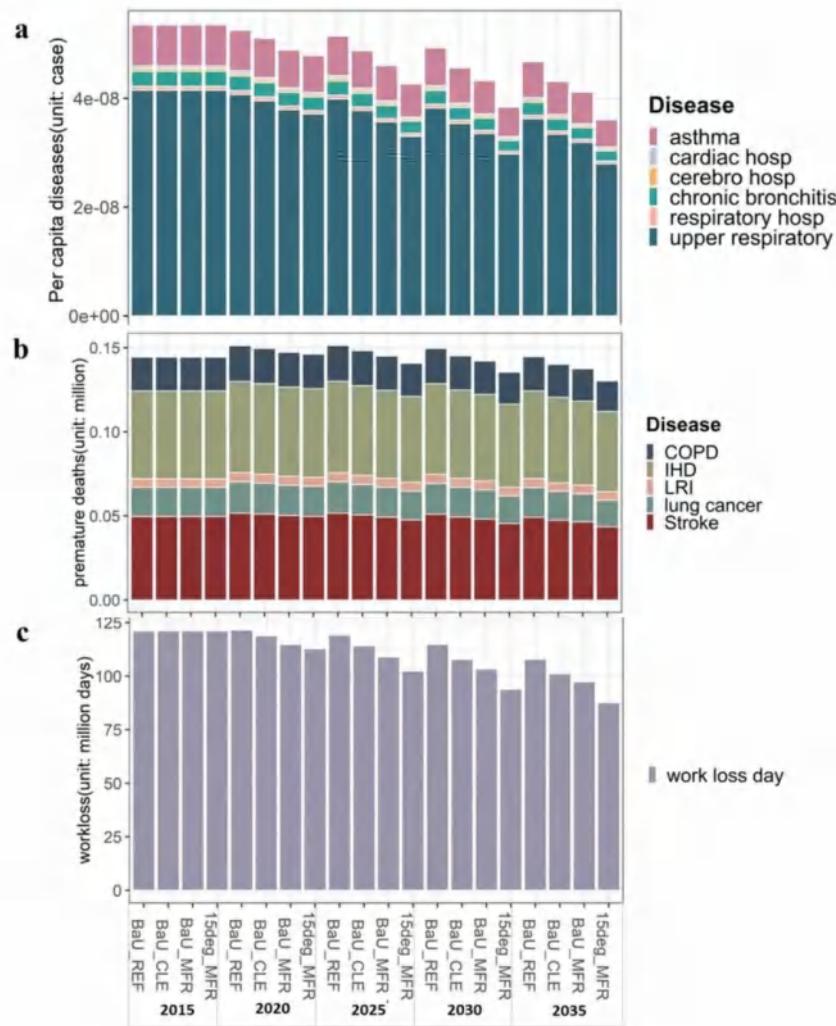


Figure 7.48: 不同情景下与 PM_{2.5} 相关的疾病负担和工作损失: (a) 致病; (b) 过早死亡; (c) 工作损失天数

减缓情景的货币化健康效益非常可观

这两种减缓政策的货币化健康效益相当可观。在减缓政策情景下, 可避免的 PM_{2.5} 相关疾病的门诊和住院费用将随时间增加 (图7.49)。2015 年至 2035 年, PM_{2.5} 引起的疾病支出总体呈下降趋势, 与主要污染物排放和 PM_{2.5} 浓度结果一致 (图7.49a)。在 1.5deg_MFR 情景下, 四川省疾病支出到 2025 年占当年 GDP 的 0.12‰, 到 2035 年占 0.068‰ (图7.49b); 与 BaU_MFR 情景相比, 2025 年避免的疾病支出将分别达到 2000 万美元和 2035 年的 2300 万美元, 这意味着碳减排政策将避免大量的疾病支出成本并减轻家庭支出负担。

碳减排措施的实施可以有效避免 PM_{2.5} 污染造成的统计生命损失。在基准情景 (BaU_REF) 下, 四川省的统计生命价值损失将随着时间的推移而减少, 在 2025 年和 2035 年分别达到 1700 亿美元和 2300 亿美元 (2017 年不变价)。如果实施碳减排政策 (1.5deg_MFR), 统计生命价值损失占国内生产总值的比例将显著降低, 到 2035 年降至 16% (图7.49b)。与基准情景相比, 2025

年的生命价值损失将减少 120 亿美元，2035 年将减少 230 亿美元（图7.49a）。

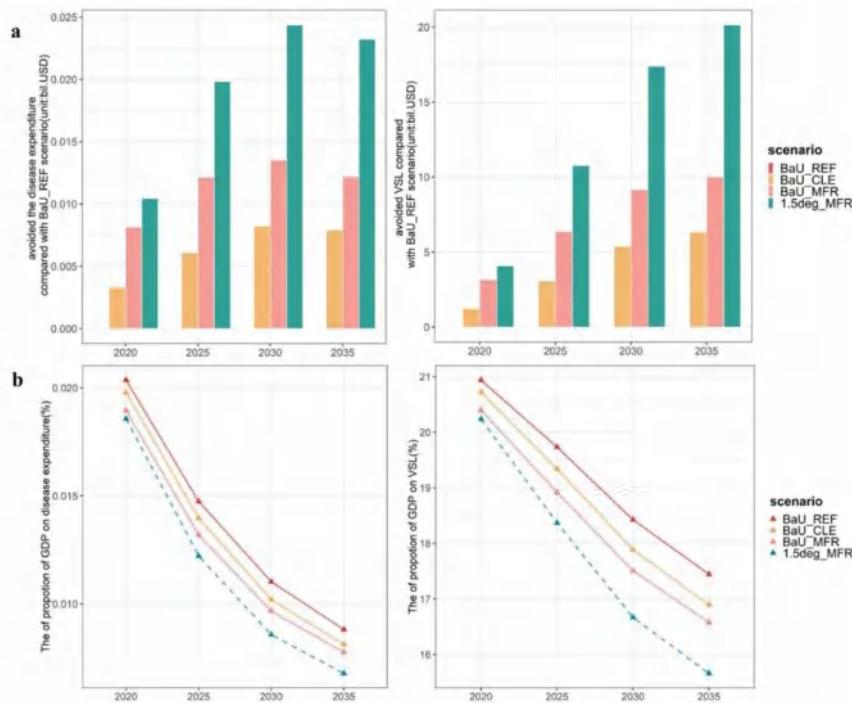


Figure 7.49: 与 BaU_REF 情景相比的健康协同效益：(a) 避免疾病支出和统计生命的价值损失；(b) 疾病支出和统计生命价值损失占国内生产总值的比例

健康协同效益远大于减排成本

本文对比 IMED|CGE 模型中相对于 BaU 的 1.5°C 情景的减缓成本（以消费损失表示）与货币化的健康协同效益和可避免的末端控制成本，以开展成本效益分析（图7.50）。本研究中的消费损失指标是碳减排情景下家庭消费相对于基准情景的变化，反映了家庭福利水平的变化。IMED|HEL 模型的健康协同效益包括可避免的统计生命价值损失和疾病支出；末端控制成本来自于 GAINS-China 模型，涵盖所有污染物，贴现率为 4%。

结果表明，仅考虑人口健康改善，协同效益就可以完全覆盖碳减排的成本，在 1.5deg_MFR 情景下，净效益会随着时间的推移而增加（图7.50）。由于更高的活动水平和更严格的控制措施，2020 年四川省污染物控制总成本约为每年 2300 万美元，2035 年继续增加至 7.66 亿美元，增长 32 倍。2025 年消费损失为 31 亿美元，2030 年增加至 39 亿美元。2035 年的碳减排成本下降主要是由于住宅部门的服务需求增加，这主要是由于住宅领域的服务需求增加，可能是与 1.5°C 目标下的产业结构调整有关。碳减排的净效益将在 2025 年达到 90 亿美元，2030 年达到 160 亿美元，2035 年达到 220 亿美元。

碳减排情景中可避免的末端排放控制的成本将无法抵消消费损失，而且远低于健康效益。例如，到 2035 年可避免的排放控制成本将为 7.7 亿美元，消费损失为 17 亿美元，而健康效益将达到 230 亿美元。这一结论与已有研究一致，即减少空气污染控制成本不会抵消与深度脱碳相关的增量 CO_2 减排成本，因此健康协同效益非常重要。

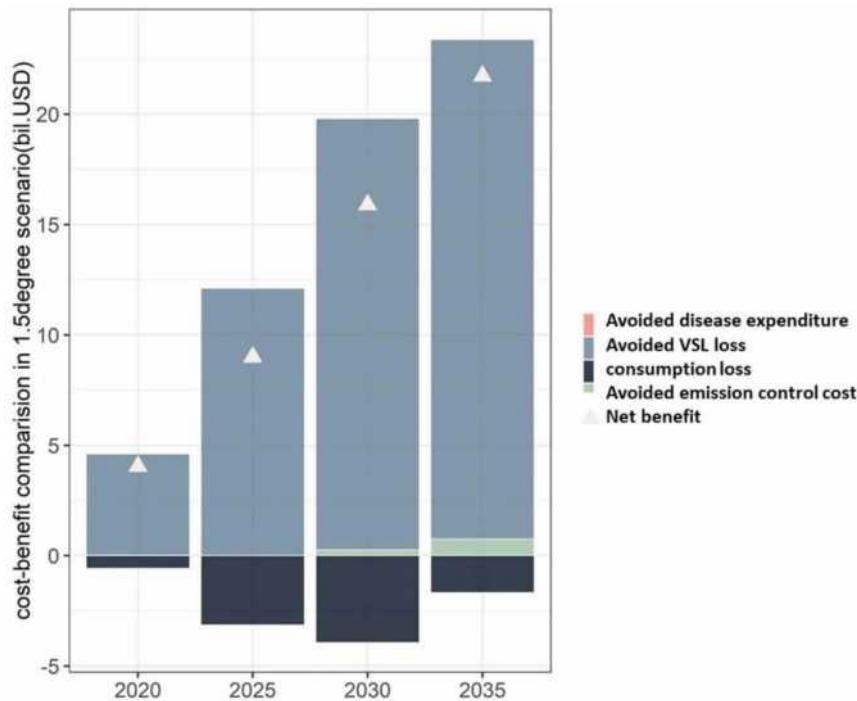


Figure 7.50: 四川省 2020-2035 年 1.5°C 情景的成本效益分析：单位为 10 亿美元（2017 年不变价）

健康影响评估的不确定性

已有研究表明，ERFs 的选择可能会导致 PM_{2.5} 相关健康影响评估存在较大的不确定性，因此本文使用三种不同的 ERFs 来估算不同情景下四川省可避免的 PM_{2.5} 相关过早死亡，并分析潜在的不确定性（图7.51）。

根据不同 ERFs 估计，四川省到 2035 年可避免过早死亡的健康效益在 8.0% 至 20% 之间。使用非线性 IER 函数估计的过早死亡比使用对数线性或 GEMM 函数估计的要低（图7.51）。根据 IER 函数，四川省 2015 年与 PM_{2.5} 相关的过早死亡为 98 人（95% CI: 46-133）；到 2035 年，BaU_MFR 和 1.5deg_MFR 情景下的过早死亡人数将比 BaU_REF 情景减少 3900 人（3.9%）和 7900 人（8.0%）。根据 GEMM 函数，预计 2015 年 PM_{2.5} 相关的过早死亡人数将为 140 万人（95% CI: 100-180）；到 2035 年，BaU_MFR 和 1.5deg_MFR 情景下的过早死亡将分别减少到 7200 人（5.0%）和 14500 人（10.0%）。结果发现，即使使用 IER 函数（GAINS-China 模型中量化健康影响的默认选择），结果依旧稳健，即深度气候变化减缓带来的健康协同效益将远高于减缓成本：2035 年 IER 方程计算的可避免健康损失为 110 亿美元，总成本仅为 17 亿美元。这与已有研究一致，即健康影响评估的不确定性可能会影响成本收益比的结果，但不会对定性结果产生决定性影响。

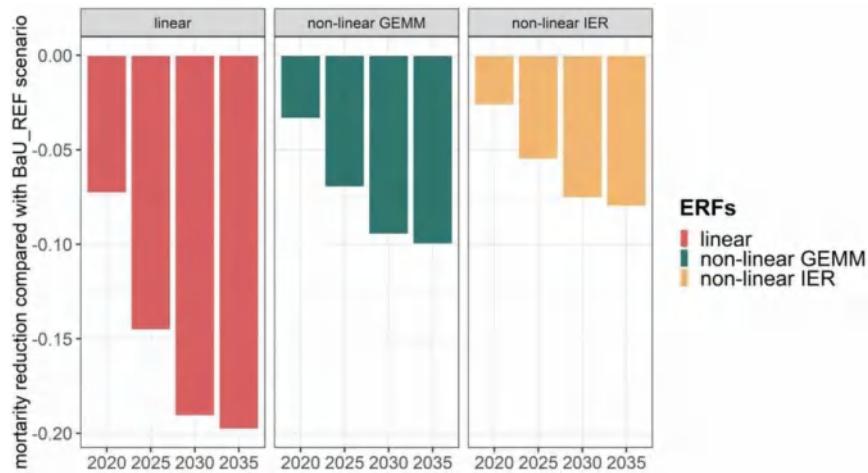


Figure 7.51: 基于不同暴露效应函数的 1.5deg_MFR 情景下避免的过早死亡

研究结论

本研究基于北京大学 LEEEP 团队自主研发的 IMED 综合评估模型，结合地方出台的政策文件，定量评价了中国内陆快速发展省份——四川的碳减排政策和污染末端控制措施的影响。此外还将未来的空气污染物排放与基准年的空气污染物排放清单相结合，分析行业的减排潜力。研究发现，四川省碳减排政策的实施可以降低碳排放，在 2020 年前实现碳排放峰值，并带来显著的空气质量改善和人群健康协同效益。

到 2035 年，实施污染物末端控制措施可以减少四川的空气污染物排放，但该省部分地区的 PM_{2.5} 浓度仍达不到国家空气质量标准。通过最大限度地利用末端控制的技术潜力 (BaU_MFR)，2035 年 SO₂、NO_x、VOCs、NH₃ 和 PM_{2.5} 的排放将比 2015 年减少 5.5%、27%、46%、11% 和 55%，但是减排的空间仍然很大。

碳减排政策不仅可以减少 CO₂ 的排放，还可以进一步减少大气污染物的排放，显著改善四川省东南地区的空气质量。在 1.5°C 情景下，碳排放将在 2020 年左右达到峰值，与 2017 年相比，2025 年减少约 6.1%，2035 年减少 42%。实现 1.5deg_MFR 情景将带来更显著的减排效果，2035 年的 SO₂、NO_x、VOCs、NH₃ 和 PM_{2.5} 年比 2015 年分别下降 41%、54%、52%、12% 和 63%。PM_{2.5} 地区平均浓度进一步降低到 27 μg/m³，达到国家环境空气质量二级标准。然而，PM_{2.5} 的人口加权浓度为 51 μg/m³，这意味着暴露在相对较高水平的 PM_{2.5} 中的人群仍然存在健康风险。

人群的健康协同效益可以完全覆盖碳减排的成本。1.5°C 情景下，碳减排的净效益在 2025 年和 2035 年分别为 90 亿美元和 220 亿美元。此外，除了在短期内改善空气污染外，碳减排将通过降低严重气候变化导致的更频繁的极端气候和自然灾害的频率等，在长期内带来更广泛的经济效益。

7.8.3 IMED 研究 | 电动汽车政策对京津冀地区环境与健康的影响

- **原文标题:** Impact of the Electric Vehicle Policies on Environment and Health in the Beijing-Tianjin-Hebei Region [87]
- **期刊:** International Journal of Environmental Research and Public Health

- **发表年份:** 2021
- **作者:** Chenen Ma, Lina Madaniyazi, Yang Xie
- **关键词:** electric vehicle policies; Beijing–Tianjin–Hebei; air pollution; health impact; co-benefit
- **文章链接**
- **点击 LEEEP 微信公众号链接阅读推送原文**

研究内容

中国大多数城市 PM_{2.5} 浓度远超世界卫生组织的标准。PM_{2.5} 会导致多种疾病，进而导致人群过早死亡和劳动时间减少，影响城市经济效益。而城市 PM_{2.5} 的重要来源之一便是交通部门的化石能源汽车。中国已成为世界最大汽车销售国，且仍有巨大的市场潜力，交通部门的化石能源消耗对于环境的影响不容小觑。中国大力发展战略性新兴产业，以期减少交通部门的污染物排放。但中国目前能源结构主要依赖火力发电，电动汽车的发展同时会导致能源部门污染物排放增多。京津冀地区是中国人口最密集的地区之一，也是汽车保有量最高的地区之一，探讨京津冀地区电动汽车发展对于人群健康效益的影响，具有十分重要的意义。

研究方法

本研究使用综合评估模型，来评估京津冀地区电动汽车发展引起的健康效益。以往电动汽车健康效益的研究关注于国家层面，较少有关注区域的，比如京津冀地区，更少有文章使用实证数据进行分析。文章建立两个情景，情景一是不考虑电动汽车政策（认为汽车增量没有电动汽车），情景二为考虑电动汽车发展（认为汽车增量包括电动汽车，且符合政策目标），基准年定为 2010 年（市场无电动汽车）。本研究首先使用历史数据对各类汽车保有量、能源生产使用情况等进行多项式回归预测 ($R^2 >= 0.7$)，预测至 2030 年。然后使用本文建立的化石能源计算方法计算不同情景下化石能源的消耗情况，方法考虑了多种汽车类型的不同能耗、年里程等，也考虑了输电来源地、线损率等。之后使用温室气体和空气污染协同效应模型 (GAINS)，根据化石能源消耗更改设定后，评估不同情景下污染物排放情况和 PM_{2.5} 浓度。最后根据 PM_{2.5} 浓度，使用 IMED | HEL 模型评估人群的健康效益，计算致病数、过早死亡数、劳动损失等。本研究分别计算了京津冀地区三个省市的环境健康效益，并货币化过早死亡带来的经济影响。

研究发现

该地区由于电动汽车发展而引起的化石能源消耗量变化情况。研究发现未来电动汽车，尤其是电动乘用车会呈指数级增长，进而导致道路交通部门直接化石能源消耗量显著降低，同时也引起了电力部门化石能源消耗的略微提高（包括本地发电和电力输入）。电动汽车政策使得京津冀地区在 2015 年节省了约 14% 的化石能源消耗，到 2030 年将节省约 33%。河北的效果最为明显，在 2015 年，电动汽车政策可节省约 18% 的化石能源消耗，到 2030 年将节省约 37%。

电动汽车发展将导致本地 PM_{2.5} 排放量显著降低，在 2030 年北京降低约 11%，天津约 15%，河北约 22%。在考虑 PM_{2.5} 地区转移的因素后，发现电动汽车政策同样可以带来 PM_{2.5} 浓度下降的效果。根据 GAINS 模型网格浓度数据，京津冀地区西南部污染最为严重，例如邢台市，而京津冀地区北部 PM_{2.5} 浓度最低。如果没有电动汽车的发展，在 2015 年北京和天津某些地区的年均 PM_{2.5} 浓度甚至达到 78g/m³。电动汽车政策将降低 PM_{2.5} 浓度，尤其是在污染严重的地区。到 2030 年，北京的年均 PM_{2.5} 浓度降低约 18.8%，达到 37g/m³，天津降低 20% 达到 43g/m³，

河北降低 19.6% 达到 $35\text{g}/\text{m}^3$ 。

电动汽车政策可能大大降低患病风险。预计 $\text{PM}_{2.5}$ 将导致大量呼吸系统症状病例（约占总发病率的 99%），而河北省约占总发病率的 65%，北京占约为 19%。电动汽车政策到 2030 年，将使京津冀地区避免约 2350 (2029~3903, 95% C.I.) 万病例，包括 1.953 (0.831~2.845, 95% C.I.) 万住院病例。电动汽车政策也可以降低过早死亡人数，电动汽车政策使京津冀地区在 2015 年避免约 3.2 (1.1 ~ 6.3, 95% C.I.) 千例过早死亡，2030 年约 4.6 (1.5 ~ 9.3, 95% C.I.) 千例。河北省的过早死亡人数最多，因而其电动汽车政策的健康效益最为明显。2030 年河北可以避免 3.5 (1.2 ~ 7, 95% C.I.) 千人过早死亡。如果考虑统计生命价值，京津冀地区将在 2030 年避免 201.5 (67~403, 95% C.I.) 亿人民币的损失，北京约 37.8 (13~76, 95% C.I.) 亿，天津约 29.9 (10~59, 95% C.I.) 亿，河北约 133.8 (45~268, 95% C.I.) 亿。电动汽车政策将有效避免工作时长损失。由于电动汽车政策，在 2030 年京津冀地区将避免工作时长损失 1.5×10^7 ~ 1.27×10^7 ~ 1.73×10^7 , 95% C.I. 25%~24%

研究结论

电动汽车政策可以为京津冀地区环境和公共健康带来重大利益。政策可以显著减少城市地区的污染物排放，尤其是 $\text{PM}_{2.5}$ 。 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高的区域总是位于排放源周围，例如发电厂或城市地区，因此对电动汽车政策更加敏感。河北省 $\text{PM}_{2.5}$ 本地排放和浓度下降最为明显，因为河北省当前的汽车保有量较低，电动汽车将在未来汽车增长中占很大比例。同时，由于京津冀地区人口密度很高，因此电动汽车的健康效益十分显著。由于河北省人口众多且 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较高，其病例数、过早死亡数和劳动损失最高，因此河北省环境的改善将使更多的人受益。尽管北京天津的过早死亡数量较低，但由于统计生命价值更高，其带来的经济效益也不容小觑。即使没有电动汽车政策，随着时间的流逝，京津冀地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度也会不断降低，健康益处也会不断增加。但是电动汽车政策可以通过减少化石燃料的使用来加快这一进程。

7.8.4 IMED 研究 | 中国清洁空气政策的健康和经济效益：以京津冀为例

- **原文标题:** Health and economic benefits of clean air policies in China: A case study for Beijing-Tianjin-Hebei region [88]
- **期刊:** Environmental Pollution
- **发表年份:** 2021
- **作者:** Meng Xu, Zhongfeng Qin, Shaohui Zhang, Yang Xie
- **文章链接:** [点击 LEEEP 微信公众号链接阅读推送原文](#)

研究背景

随着中国的快速工业化与城镇化，空气污染问题日益突出。大量人口生活的地区年均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度超过世界卫生组织的中期目标 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，也是中国国家二级标准。空气污染将导致严重的健康问题，流行病学证据表明， $\text{PM}_{2.5}$ 暴露会增加患呼吸、心血管和脑血管疾病的风险，甚至会导致过早死亡。根据世界疾病负担的一项研究，2016 年 $\text{PM}_{2.5}$ 污染导致 409 万人死亡，包括缺血性心脏病、慢性阻塞性肺疾病、下呼吸道感染和肺癌。中国 $\text{PM}_{2.5}$ 污染已经成为一个迫切需要解决的问题。 $\text{PM}_{2.5}$ 污染对健康的不利影响也会导致经济成本，包括额外支出和劳动生产率降低。

中国实施了多项空气污染控制计划来降低 PM_{2.5} 污染。2013 年启动《大气污染防治行动计划》旨在将城市 PM₁₀ 水平降低 10%，并减少 PM_{2.5} 浓度。以往的大多数研究都集中在《大气污染防治行动计划》的健康和经济改善方面。对于后来实施的蓝天保卫战计划，很少有研究涉及或对其健康和经济影响的系统评估。

本研究旨在解决两个关键问题。首先，本研究侧重于评估京津冀地区到 2030 年蓝天保卫战计划的健康和经济影响。其次，本研究将分析京津冀地区到 2030 年蓝天保卫战计划的成本和收益。它从三个方面对现有的研究做出了贡献。（1）量化京津冀区域内蓝天保卫战计划的健康影响。（2）评估包含卫生支出和生命统计价值（VSL）的经济影响。（3）探索清洁空气政策的成本效益比。本研究将为论证蓝天保卫战计划在京津冀中的可行性和必要性做出一定贡献，并为决策者提供参考。

研究方法

本研究采用综合评估方法，将温室气体和空气污染的相互作用和协同效应（The Green House Gas and Air Pollution Interactions and Synergies version IV-Asia, GAINS IV-Asia）模型与能源、环境与经济可持续发展综合模型/健康（The Integrated Model for Energy, Environment and Economy for Sustainable Development/Health, IMED/HEL）相结合，用于评估京津冀地区实施蓝天保卫战计划的健康和经济影响。

1. GAINS 模型。GAINS IV-Asia 模型用于评估各种大气污染控制和政策的效果。它考虑了活动路径（例如，发电和供热厂、工业和运输）以及不同部门五年一次的不同污染物的空气污染控制措施，并量化了排放量和控制措施实施成本。本研究将原始参数整合并校准到 GAINS IV-Asia 模型中。具体而言，考虑了燃料类型和部门的能源消耗、工业活动、空气污染控制技术的利用率以及其他数值和假设等参数。根据蓝天保卫战计划的政策限制，改变模型中的情景假设，来模拟该政策对于能源结构、PM_{2.5} 浓度、污染物排放以及控制成本的影响。
2. IMED/HEL 模型。IMED/HEL 模型评估 PM_{2.5} 对健康的影响。使用浓度反应函数（CRF）对六个疾病终端和慢性死亡率的暴露进行计算。在本研究中，非线性浓度反应函数用于评估六个疾病终端、不同原因的过早死亡（包括缺血性心脏病、中风、脑血管病、慢性阻塞性肺病、肺癌和急性下呼吸道感染）和工作时间损失。
3. 成本效益分析。本研究还估计了在京津冀地区实施蓝天保卫战计划的净收益。货币化福利，包括与降低发病率节约的医疗支出和因避免过早死亡而带来的经济价值。总成本等于 GAINS IV-Asia 模型估算的蓝天保卫战计划排放控制成本，包括所有污染物控制措施的实施成本（即前期投资和运营成本）。

情景设定

GAINS IV-Asia 模型模拟排放情景以五年为单位，本研究基准年是 2015 年。蓝天保卫战的主要目标年是 2020 年，2025 年和 2030 年也被列为次要目标年，以显示空气质量改善的长期健康和经济效益。

本研究开发了两个情景来模拟政策效果：基准情景（Baseline Scenario）与政策情景（Policy Scenario）。基准情景假设京津冀地区没有实施蓝天保卫战计划来改善空气质量，政策情景则实施这一计划。情景建立基于 GAINS 模型中的世界能源展望的当前情景（The World Energy Outlook 2018 Current Policy Scenario, WEO-2018-CPS）。

数据来源

本研究的数据来源于《中国空气污染排放清单指南》（MEEC, 2015）、省级经济年鉴（BSB, 2016; HSB, 2016; TSB, 2016）、《中国统计年鉴》（NBS, 2016）、《第十三个能源发展五年计划》（NEA, 2017a），《中国北方冬季清洁供热计划（2017-2021）》（国家能源局, 2017b）、《可再

生能源发展第十三个五年计划》(国家发改委,2016)、《产业转型升级第十三个五年计划》(GOHB, 2016)、《输运系统综合发展第十三个五年计划》(GOBJ, 2016; GOHB, 2016; GOTJ, 2016),《电力行业发展第十三个五年计划》(PGC, 2016) 和多项最新研究 (Xiong 等, 2015; Zhang 等, 2015; Su 等, 2018)。

整体研究框架如图7.52所示。

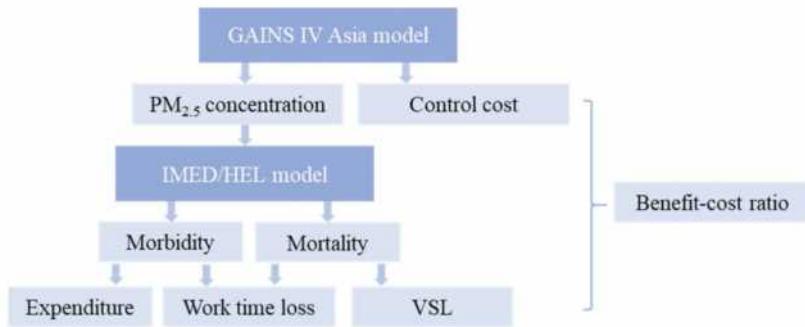


Figure 7.52: 研究框架

研究结果

图7.53展示了不同情境下京津冀地区的年均 PM_{2.5} 浓度。结果显示，在实施蓝天保卫战计划后，京津冀地区的年均 PM_{2.5} 浓度将显著降低。到 2030 年，天津将成为 PM_{2.5} 浓度最高的城市。其次是河北和北京。与基准情景相比，PM_{2.5} 政策情景的集中度将下降 8.7% (河北, 2030 年) 至 32.1% (北京, 2020 年)。然而，政策情景下的年均 PM_{2.5} 浓度仍将高于 35 μg/m³ 的国家标准，且仍将对暴露人群产生影响。

Regions	2015		2020		2025		2030	
			Baseline	Policy	Baseline	Policy	Baseline	Policy
Beijing	78.7	69.5	47.1	63.2	45.5	54.5	39.4	
Tianjin	69.1	66.3	55.1	63.3	52.9	60.6	46.0	
Hebei	65.2	58.3	48.4	54.0	43.8	45.4	41.5	

Figure 7.53: 不同情境下京津冀地区的年均 PM_{2.5} 浓度

发病率：与 PM_{2.5} 污染相关的主要疾病包括哮喘、心血管疾病住院、脑血管疾病住院、慢性支气管炎、呼吸系统疾病住院和上呼吸道疾病住院。图7.54表示不同情景与年份下京津冀地区的健康影响，图7.54A 表示发病率与死亡率的影响。

发病率病例在基准情景和政策情景中均呈下降趋势，政策情景下 PM_{2.5} 浓度的降低更为显著，在降低发病率方面更为有效。即使不实施蓝天保卫战计划（如基准情景所示），2020 年基线情景中的发病率病例也将低于 2015 年。

图7.55中的条形图表示每年基准情景和政策情景之间发病率的下降数量（千例）。实施蓝天保卫战计划后，到 2020 年，北京、天津和河北将分别避免 37.8 (38%)、10.5 (20%) 和 64.4 (20%) 万例发病。到 2030 年，避免的发病率将达到 26.6 (34%)、14.1 (29%) 和 26.8 (11%) 万例。

死亡率：对于死亡率而言，在基准情景和政策情景中，死亡率都将有轻微下降趋势。由 PM_{2.5} 浓度的减少，相比于基准情景，政策情景中的死亡率病例将显著降低。

图7.55中的黄色三角形表示每年基准情景和政策情景之间死亡率的降低数量（千例）。我们的研究表明，实施蓝天保卫战计划可以显著降低京津冀地区的发病率。河北省避免过早死亡的人数远高于北京和天津。从降低死亡率的百分比来看，北京受益最多。

同时 2020 年基准情景下的死亡率将与 2015 年水平相当，甚至更高。因此，有必要实施蓝天保卫战计划以实现健康效益，降低死亡率。

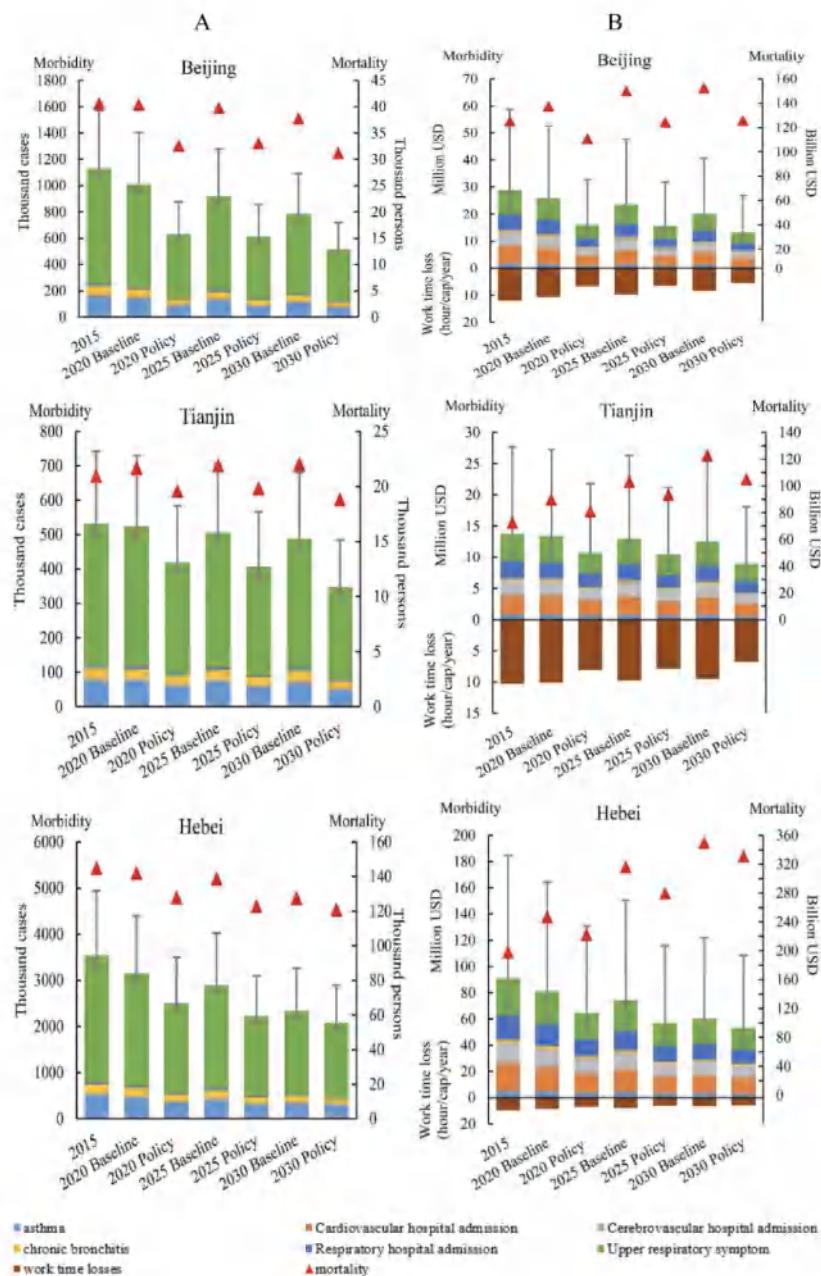


Figure 7.54: 不同情景与年份下京津冀地区的健康影响。A 表示发病率与死亡率的影响，B 表示额外健康支出、生命统计价值与工作时间损失的影响

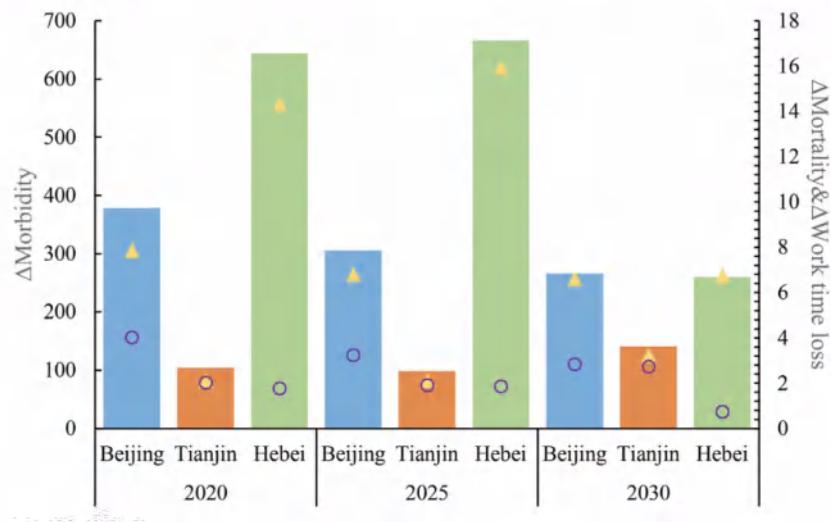


Figure 7.55: 不同情景与年份下京津冀地区发病率和死亡率的减少量（千例）和工作时间损失的减少量（小时/人/年）。(条形图对应左轴，三角与圆圈对应右轴)

疾病和死亡会导致工作时间损失，计算为 15-64 岁的人因疾病和死亡而停止工作的小时数。图7.55中的紫色圆圈表示基准情景和政策情景之间工作时间损失的绝对减少量（小时/人/年）。在省级层面上，2015 年北京、天津和河北的年人均工时损失分别为 11.98 小时、10.30 小时和 9.63 小时。在政策情景下，2020 年北京的人均工时损失将降至 6.69 小时 (38%)，天津为 8.11 小时 (20%)，河北为 6.91 小时 (20%)。人均工作损失将减少到 5.52 小时 (34%)、6.76 小时 (29%) 和 5.92 小时 (11%)。

PM_{2.5} 污染还会导致额外的医疗支出，如图7.54B 所示。蓝天保卫战计划的实施将有助于减少京津冀地区的额外医疗费用。基准情景和政策情景下额外医疗支出的下降趋势与不同情景下发病率病例的下降趋势一致。

避免死亡的好处通过生命统计价值 (VSL) 货币化表示，如图7.54B 中的三角形所示。死亡率损失明显高于发病率损失。同时，随着人均 GDP 和收入的增加，未来 VSL 总量将显著增加。在区域层面，河北省的 VSL 显著高于北京和天津。在我们的研究中，京津冀地区的蓝天保卫战计划具有很高的经济效益。我们的分析还表明，经济效益主要通过节省的生命统计价值（避免过早死亡）体现，远远超过节约的额外医疗支出。

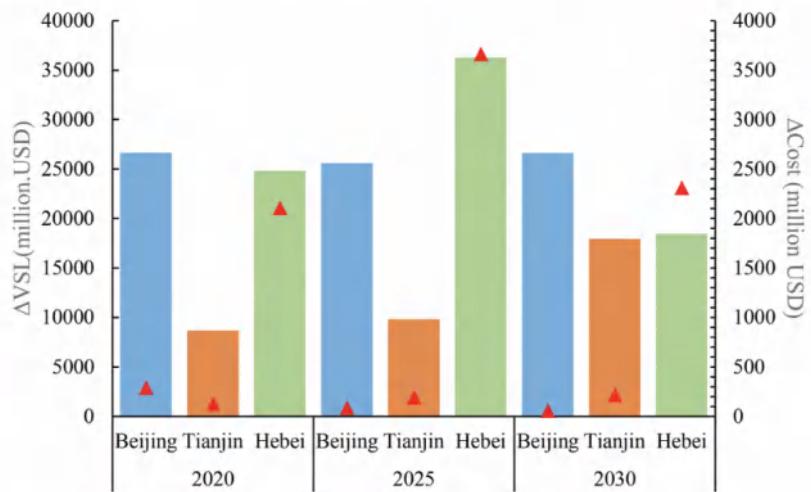


Figure 7.56: 不同情景与年份下京津冀地区生命统计价值变化量和成本变化量的协同效益分析。(条形图对应左轴, 三角形对应右轴)

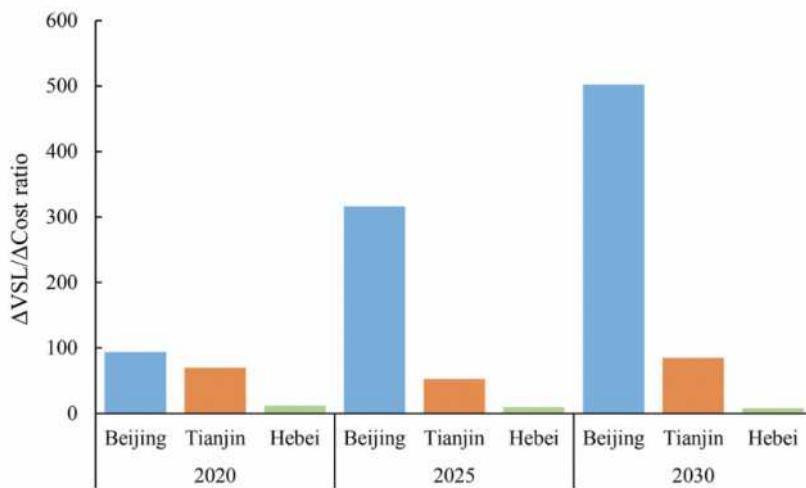


Figure 7.57: 不同情景与年份下京津冀地区生命统计价值变化量与成本变化量的比值

我们的结果表明, 蓝天保卫战计划在降低发病率、死亡率、工作时间损失、医疗支出和生命统计价值方面具有协同效益, 其协同效益如图7.56、图7.57所示。使用 GAINS IV-Asia 模型估算排放控制成本, 各区域不同情景下的成本如图7.58所示。

健康效益主要包括两个方面的健康支出的节约, 这两个方面的节约归因于发病率的降低与死亡率降低相关的生命统计价值的降低。其中, 生命统计价值占经济效益的主导地位。因此, 蓝天保卫战计划的详细效益成本评估是通过比较货币化健康效益(包括生命统计价值相关货币节约)与污染终端技术成本来进行的。对省级结果观察表明, 政策情景中的成本低于基准情景中的成本, 这表明蓝天保卫战计划的技术改进将改善空气质量, 同时降低控制成本。

Regions	2015		2020		2025		2030	
	baseline	policy	baseline	policy	baseline	policy	baseline	policy
Beijing	970.8	1506.2	1222.0	2075.1	1994.1	2411.3	2358.3	
Tianjin	1476.3	2158.9	2034.9	2660.0	2473.1	2963.0	2751.9	
Hebei	6951.3	11558.0	9454.1	13778.4	10119.2	13252.5	10947.0	

Figure 7.58: 不同情景与年份下京津冀地区排放控制成本

研究结论

在本研究中，我们结合 GAINS IV-Asis 模型和 IMED/HEL 模型来量化在京津冀地区实施蓝天保卫战计划的益处。我们的综合评估表明，蓝天保卫战计划可以显著改善京津冀地区的空气质量、健康状况。该地区与 PM_{2.5} 相关的死亡率和发病率大幅降低，河北省将占多数。由于 PM_{2.5} 浓度的降低可以有效减少工作时间损失。

本研究还通过比较货币化健康效益（生命统计价值相关节约）和污染物控制技术成本，对京津冀地区的蓝天保卫战计划进行了详细的效益成本评估。由于可以获得大量的健康收益，可抵消京津冀地区的控制成本。

本研究还存在一定局限性，部分内容尚未提及。首先，蓝天保卫战计划对于 CO₂ 减排具有共同效益；其次，本研究只讨论了空气污染对于劳动供给的影响，并未讨论其对劳动生产率的影响；最后，本研究忽略了室内空气污染对健康的影响。

7.8.5 LEEEP 合作 | 广东省交通和工业 PM_{2.5} 控制的健康和经济影响

- **原文标题:** Health and Economic Impact Assessment of Transport and Industry PM_{2.5} Control Policy in Guangdong Province [89]
- **期刊:** Sustainability
- **发表年份:** 2021
- **作者:** Songyan Ren et al
- **文章链接:** [\[89\]](#)

研究内容

PM_{2.5} 污染相关疾病导致额外的医疗费用和工作时间的损失，从而影响宏观经济。为了评估 PM_{2.5} 与健康相关的经济影响，气候、经济和环境综合评估模型 (ICEEH) 结合可计算一般均衡 (CGE) 模型、温室气体和空气污染相互作用和协同效应 (GAINS) 模型，并构建了健康影响评估模块。通过建立无控制 (WOC) 情景、空气控制 (AIC) 情景和蓝天 (BLK) 情景，分析了广东省不同空气污染控制策略的影响。结果显示，在 2035 年的 WOC 情景中，广东省的死亡率为 71,690 人/年，工作时间损失为 0.67 小时/人/年。在 AIC 和 BLK 情景中，与 2035 年 WOC 相比，工时损失分别减少 29.8% 和 34.3%，过早死亡分别减少 33.0% 和 37.5%；通过严格的污染控制政策，GDP 将分别增长 0.05% 和 0.11%。此外，空气条件改善带来的劳动力素质提高将促进劳动密集型行业的增加值，如农业 (0.233%)、其他制造业 (0.172%)、纺织 (0.181%)、食品 (0.176%)、铁路运输 (0.137%) 和服务 (0.129%)。垃圾 (-0.073%)、天然气 (-0.076%) 和原油 (-0.072%) 行业增加值将因 PM_{2.5} 处理设备投资分期增加而下降。

7.8.6 LEEEП 合作 | 我们需要逆转趋势来阻止全球变暖

- **原文标题:** A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018 [90]
- **期刊:** Environmental Research Letters
- **发表年份:** 2021
- **作者:** William F Lamb et al
- **文章链接:** [点击 LEEEП 微信公众号链接阅读推送原文](#)

研究内容

即使新型冠状肺炎的流行导致全球温室气体排放下降，但是未来会逐渐回升，尤其是在部分部门和地区，驱动因素的影响依然强劲。迄今为止，尽管大量的政策措施被发布，但仍未取得重大的进展。本研究是由气候研究机构 MCC 的全球研究团队精心筹备的一项前所未有的评估结果，已发表于《Environmental Research Letters》期刊。

来自六大洲的大约 30 位著名学者参与了这个项目。MCC 应用可持续性科学工作组的研究员、本研究第一作者威廉·兰姆（William Lamb）指出：“为解决气候危机，我们必须了解各部门面临的主要挑战，以便进行快速且深度的转型。所以我们基于主要数据来源，研究了温室气体排放的趋势和驱动因素，并回顾了已有研究工作。清单根据能源、工业、建筑、运输和土地利用五大部门编制。研究人员聚焦于这些部门及其组成（例如发电厂、公路运输或牲畜养殖等）的趋势，以及不同人类活动的经济增长、能源使用、能源效率和碳强度的驱动因素。其中每个因素对不同部门和地区的影响程度都经过精确计算。根据这项研究，从 2010 年至 2018 年，全球温室气体排放量增加 11%，其中仅有少数行业的排放显著下降，例如欧洲的能源行业；而亚洲的煤炭发电行业的排放有所增加，对气候造成严重的负面影响。在全球几乎所有地区，交通和建筑部门的排放量都呈现上升趋势，一定程度上是因为发达国家的人旅行越来越多，挤占了越来越多的生活空间。在过去 20 年里，全球的货运出行量增加了 68%：其中最大的排放源是工业（包括电力部门的工业相关排放），2018 年排放了 201 亿吨二氧化碳当量，占总排放量的 35%，相比 2010 年增加了 14%。土地利用的改变贡献了高达 1/4 的气候变化：从 1990 年至 2018 年，原始森林面积减少了 700 多万平方公里，几乎相当于澳大利亚的国土面积，这大部分来源于南半球的人为开垦农田和生产粮食，以出口欧洲或中国；人们饮食西方化的生活方式也会增加排放，因为从传统的季节性农产品转向消费肉类和国际采购的精制产品。本研究的合著者、MCC 工作组组长简·明克斯（Jan Minx）总结：“总体而言，在新型冠状肺炎流行的前十年，行业趋势显示的脱碳方面的进展有限。在全球层面，尽管越来越多的国家强调，成功的气候政策和经济竞争力往往齐头并进，但是技术进步引致的减排大多被经济增长所抵消。所以各国需要可持续地利用土地、限制过度需求、提高能源效率以及迅速淘汰化石燃料，以使得全球变暖与各国气候协议保持一致。”

7.8.7 LEEEП 合作 | 中国多模型对比：碳税的一般均衡分析

- **原文标题:** The General Equilibrium Impacts of Carbon Tax Policy in China: A Multi-model Comparison [91]

- **期刊:** Energy Economics
- **发表年份:** 2021
- **作者:** Jing Cao, **Hancheng Dai***, Shantong Li*, Chaoyi Guo, Mun Ho, Wenjia Cai, Jianwu He, Hai Huang, Jifeng Li, Yu Liu, Haoqi Qian, Can Wang, Libo Wu, Xiliang Zhang
- **关键词:** Multi-model comparison; CGE model; Carbon tax; China
- **文章链接:** [点击 LEEEP 微信公众号链接阅读推送原文](#)

研究项目背景

在美国环保协会(EDF)支持下,中国能源模型论坛(China Energy Modeling Forum, CEMF)汇集了八个在当前中国学界较为代表性的CGE模型团队,历时三年共同评估了2050年中国碳税影响。考察在保持相同的GDP增速、人口等增长驱动力假设的基础上,施加相同的碳税政策,评估其对经济、产业、能源和排放的影响以及各模型间的差异。

CEMF提供了一个互相交流和学习的平台,既有助于建模者相互学习与借鉴,也有助于政策决策者理解模型研究的长处和不确定性,增加学术透明度,为我国碳达峰和碳中和政策定量评估工具做出了基础性学术贡献。希望未来能涌现出更多具有不同特征、面向中国实际问题的CGE模型。

研究背景

低碳政策评估的重要性:自《巴黎协定》以来,世界各国纷纷承诺降低自身碳排放,中国作为最大的发展中国家和当前碳排放最高的国家,于2020年9月在联合国大会上庄严承诺将于2060年前实现碳中和,此外将于2030年左右实现碳达峰。碳排放税无疑是实现上述宏伟目标的重要政策工具/手段之一,它的本质就是对每一单位的碳排放标价。对于研究界而言,需要对碳税可能造成的影响和中国可能的减排路径进行合理评估,这对于科学决策至关重要。

特别是在中国这样的发展中国家,社会转型需求很旺盛,经济和产业始终处在变化和升级中。若要对一项即将颁布的政策进行评估,社会管理者或许很难在事前组织一项庞大的社会实验,所以利用模型进行科学评估在政策事前分析中尤为重要。事后评估是一种有效手段,比如对电价补贴或燃油税等类似碳税的政策进行事后分析可以局部并类比地考察潜在碳税对特定行业的影响。但这种局部均衡分析很难勘察一项政策对经济全局的影响,因此很多研究者选择使用一般均衡分析来模拟碳税、碳排放权交易和新能源补贴的影响,因为这类模型可以提供经济全局和整个产业视角的分析。

CGE模型扮演关键角色:可计算一般均衡模型(Computable General Equilibrium, CGE)往往细分部门和地区,对能源的分部门使用和碳的分部门排放有详细的刻画。考虑到碳税政策一般都是通过影响上游的能源供给者,抬高他们的化石能源使用成本,而后自上而下影响整条产业链,进而对经济全局产生影响,CGE模型凭借其对经济体中生产者、消费者和政府行为的一般总结与周密刻画,成为这一领域应用最为广泛的分析工具。同时CGE模型相比于其他宏观经济模型,更适合分析长期性问题。

CGE模型在中国的气候和环境政策已有不少研究贡献,大量研究关注我国碳排放权交易和碳税政策的潜在影响。一类研究专注于在CGE模型内部开发不同的碳排放权交易或税收机制,并分析其影响;另一类研究则将CGE模型与其他自底而上(Bottom-up)的技术模型、环境生态模型或健康模型进行耦合,在传统的宏观经济结果之外提供一些更具有交叉性的研究结果,比如碳减排政策空气质量改善协同效益以及伴生的健康效益。

但是，CGE 模型常被人诟病其结果具有较大不确定性，在很多研究同行看来这是一个黑箱。这毕竟是一个包含了成百上千个外生参数和方程系统，并利用计算机中一种超越人脑容量上限的求解器求出均衡解，如此这般研究者很难不怀疑均衡结果中蕴藏着的不确定性。同时，通过文献总结可以发现不同的 CGE 模型针对同一个问题往往产生截然不同的结果，差异一般来源于模型之间不同的部门/区域划分、不同的外生参数取值（比如人口增长率，全要素生产率进步率、经济主体的偏好）、不同的模型机理（比如不同的闭合规则，有的模型假设投资不变，有的模型假设价格粘性）、政策的设置（比如碳税财政收入的不同分配方式）。

模型比较研究的必要性：在同一个模型里，通过敏感性分析可以观察不同外生参数对模型结果的影响。但由于不同模型之间具有更大的鸿沟，比如参数选择和模型机理，若能观察同一种政策假设下不同模型的结果，则可以帮助研究者来比对模型内生机理对结果的影响，进而更好地定位模型之间的差异，减少同行对于模型研究不确定性的怀疑。在过去的二十年间，最为人熟知的模型比较工作来自于斯坦福能源模型论坛（Stanford Energy Modeling Forum, EMF），其中包含了能源经济模型、综合评估模型和局部均衡模型等多种模型类别。在中国的政策评估研究中，很少见到这样的模型比较工作，在能源-环境领域甚至找不到可考的 CGE 模型比较研究记录。因此，在美国环保协会 (EDF) 的支持下，中国能源模型论坛（China Energy Modeling Forum, 以下简称为 CEMF），为讨论和研究相关问题提供了一个专业平台。

研究方法

本文一共囊括了目前中国研究界八个比较主流的能源-环境-经济 CGE 模型团队。有些团队起源自澳大利亚 Monash CGE 模型团队，有些团队源自美国哈佛和 MIT 的著名 CGE 模型团队，有些团队则通过自主开发建构本国模型。无论参数选择、内生机理还是政策意涵，这八种模型各不相同。在本文的研究中，我们为八个模型设定共同的外生假定，比如人口、GDP 增速等，进而考察相同的碳税情景下八种模型的模拟结果。就本文关心的能源消费、碳排放和经济影响而言，八种模型结果的确有很大不同，本文的后半段会展示这些不同并尝试分析、找寻背后原因。

CEMF 的工作始于 2018 年，其中八个代表性模型团队参与了本次对比研究，他们的模型机构、代表性作者、开发软件和主要数据库等基本信息均列于文中图 7.59，北京大学 LEEEPEP 团队作为协调团队之一全程参与这项模型对比工作。其中可以发现所有模型都是动态递归优化，都可以提供包含中国这一单独地区的结果。C-GEM 模型可以提供全球区域中的中国地区结果，DREAM 和 DRC-CGE 模型既可以提供中国省级版本结果，也可以提供中国作为一个单独地区的结果，此外 IMED | CGE 模型也囊括了全球、全国和分省模型，参与本轮模型对比的是中国单国 CGE 模型版本。即使各个模型版本不同，但在本轮对比中所有模型结果均以中国作为一个整体区域。另外一些值得注意的则是模型细节，比如 CHEER 模型对不同阶层的人口有不同的家庭收入刻画，同时亦可以提供分省结果。HTCGE 模型中消费函数的外生参数源自对中国家庭级样本数据的实证估计。CHINAGEM 和 SI-CGE 模型与别的模型不同，它们的建模基础是 GEMPACK，他们分别源于和澳大利亚著名团队 CoPS (Center of Policy Studies) 和 Monash CGE 团队。

Table 1
Summary of eight Chinese CGE models for model comparison exercises.

Model Name	Institution	Authors	Software Platform	Model Use	Model version and Number of Sectors	Major Applications	Notes on Data and Parameters
China-in-Global Energy Model, C-GEM	Tsinghua Univ., MIT	Xiang Zhang, Da Zhang, Tianyu Qi, Xiaodan Huang, Chenfei Qu	GAMS/MPSGE	2011–now	2011 version – 20 sectors	National and Global Carbon Market, Energy and Environmental Tax, Energy Policies, Renewable Policies	Global Data is based on GTAP 9; China's Energy Data is calibrated to energy data of 2011/2018 in Chinese Energy Statistical Yearbook; 2014/2019; Reference: Zhang et al. (2016a, 2016b), Qu et al. (2016), Huang et al. (2020)
CHER(CGE Model/China Hybrid Energy Economic Research Model)	Tsinghua Univ.	Wenjia Cai, Cao Wang	GAMS	2001–now	Model 2012 (Base Year 2012) – 42 sectors	National Model and Provincial Model; Climate Policies, Energy Policies; Detailed Aggregation on household income and employment; integration with the atmospheric model, health models;	2012 benchmark year; National I.O. and energy balance sheet; natural capital as share of capital input is based on GTAP data base; Reference: Mu et al. (2018a), Mu et al. (2018b), Wang et al. (2020)
CHINAGEM	Institutes of Science and Development, CAS	Yi Liu	GEMPACK	2005–now	National Model (Base Year 2012) – 135 sectors	Energy Policy, Carbon Tax, Emission trading and environmental tax	2012 National I.O. data; Reference: Cai et al. (2020)
DRC CGE	Development Research Council	Shantong Li, Jianwu He	GAMS	90s – now	National Model (Base Year 2015) – 64 sectors	Energy, Climate and Development Policies	2015 National I.O. data, projection 2019–2050; Reference: Venkateso, He and Li et al. (2014)
DREAM Dynamic Regional Economy-Energy-Environment Analysis Model)	Fudan Univ.	Lubo Wu, Haqiq Qian, Weiqi Tang, Ying Zhou	GAMS	2011–now	Global Model (2011 Base Year 2011) – 42 sectors	Energy Policies, Climate carbon pricing policies, Renewable policies	Apply GTAP-POWER + GTAP-E Structure, energy part refer to GTAP-EG setting; Reference: Qian et al. (2017, 2018)
HTCGE Harvard-Tsinghua CGE	Harvard Univ., Tsinghua Univ.	Jing Cao, Ming Bi, Dale Jorgenson	GAMS	90s – now	National Model 2014 (Base Year 2014) – 33 sectors	Energy and Climate Policies, Environmental Tax Reform and integration with spatial sectoral emission inventory, atmospheric, and health models	2014 SAM data based on 2012 National I.O. table, empirically estimated parameters in consumption module; Reference: Cao and Bi (2017), Cao et al. (2016)
IMED CGE Model (Integrated Model of Energy, Environment and Economy for Sustainable Development CGE)	Peking Univ.	Hanliang Dai, Yang Xie	GAMS/MPSGE	2009–now	Global Model (2002), National and Provincial Model (2012) – 91 sectors	Environmental Energy and Climate Policy Analysis, IAM as integration with atmospheric, hydrology and crop yield models	China National and Provincial Model use 2012 National and Provincial I.O. tables; Global CGE use 2002 data based on GTAP 6 database and IEA energy balance sheet; Reference: Dai et al. (2016a, 2016b), Dai et al. (2016), Xie et al. (2016)
STCGF State Information Center General Equilibrium Model)	State Information Center	Li Jifeng, Cai Songfeng	GEMPACK	2007–now	Model 2012 (Base Year 2012) – 162 sectors	Macroeconomic Policies, Energy and Environmental Policies	2012 National I.O. table; Reference: Li et al. (2014)

* Elasticities across different electricity technologies based on Papageorgiou & Saari (2015); ** Elalaitzis & Zaynulimova (2016); set substitute elasticity between transmission and other electricity as zero, renewable and fossil as 1.84, elasticity within fossil energy is 0.8.

Figure 7.59: 模型团队简介

我们要求每一个模型都先将人口增长、城市化率和 GDP 增速校准至同样的路径，可参考文中图7.60，人口增长率、偏好和全要素生产率（TFP）在每个模型中都是外生变量，人口增长率在模型中被用以校准人口和城市化率，TFP 则主要影响模型中的 GDP 增长结果。除此之外，本研究并未要求各个模型提供一致的劳动力增长率。比如 DRC-CGE 模型详细区分了三种不同类型的劳动力，HTCGE 模型也根据数量、年龄结构和受教育程度区分了不同类型劳动者。同时，出于简化考虑，本文仅考虑石油作为主要的能源进口品，并基于美国能源署的预测设定相同的世界石油价格增长路径，排除世界能源价格波动对中国碳税情景结果的影响。

	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Population (mil.)	1375	1411	1426	1428	1418	1395	1366	1331
Urban	771	869	943	998	1032	1045	1042	1033
Rural	603	542	483	430	386	351	323	298
2015~2020~2025~2030~2035~2040~2045~2050	2015~2020~2025~2030~2035~2040~2045~2050	2020~2025~2030~2035~2040~2045~2050	2025~2030~2035~2040~2045~2050	2030~2035~2040~2045~2050	2035~2040~2045~2050	2040~2045~2050	2045~2050	2050
GDP growth rate (%)	6.5	5.5	4.5	4.0	3.4	3.4	2.9	

Source: Projection Estimates from Development Research Center, China.

Figure 7.60: 人口、城市化率和 GDP 增速路径

情景设置

在 CGE 模型中，碳税一般首先作用于化石能源生产者，进而影响宏观经济。在本研究中，考虑到不少模型并不包含过程排放，故我们只考虑化石能源相关碳排放，碳税也仅对此征收。本文一共设置了低、中、高三种不同的碳税情景，税收起始年份为 2020 年，终止年份为 2050 年，所有情景下单位碳税呈增长趋势：低碳税情景下从 2020 年的 5 元/吨，2030 年的 84 元/吨增至 2050 年的 284 元/吨。中等碳税情景下这一组数字为 10 元/吨、167 元/吨和 567 元/吨。高碳税情景下这一组数字分别为 20 元/吨、334 元/吨和 1134 元/吨（如图 7.61）。此外，我们允许模型自由处理碳税收入的分配方式，比如 CHEER 模型设定这笔收入记入政府收支并允许政府赤字，HTCGE 消减了原有的增值税，用收入税来替代。而 DRC-CGE、DREAM 和 IMED | CGE 模型则将碳税收入一次性全部转移支付给居民。

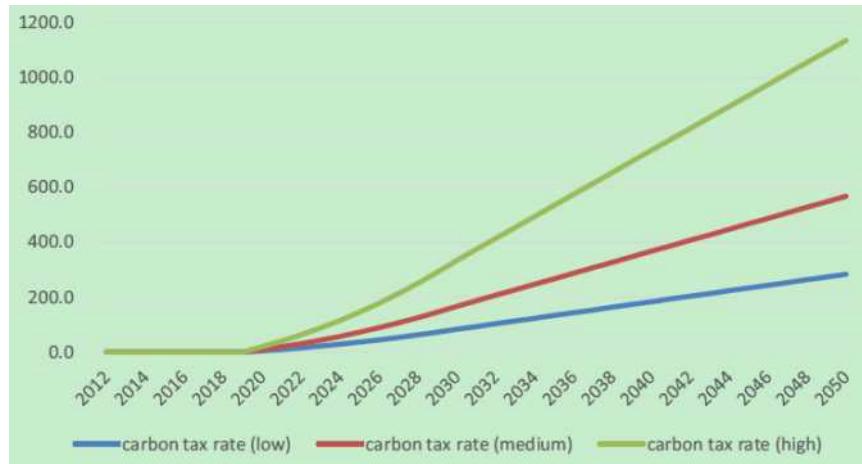


Figure 7.61: 本文三种碳税情景假设

综上所述，本轮模型对比的考察年份始于 2015 年，终止年份为 2050 年，大部分模型都以 2012 年国家投入产出表为数据基础。八种模型经过校准，拥有一致的 GDP 增速、总人口增速、城市化率、世界石油价格增长路径和碳税情景，但允许在劳动力划分、外生参数选择和碳税收入分配等模型机理细节方面有所不同。

研究发现

基准情景

从各模型在基准情景下 GDP 总量、消费、投资、进口、出口和净出口的值可知（图7.62），各模型基准年 GDP 和未来年 GDP 增速保持一致，但如前所述，各个模型的外生参数、消费函数、政府收支和贸易等机制不同，所以其 GDP 分项结果有很大的不同，主要体现在数量级上。

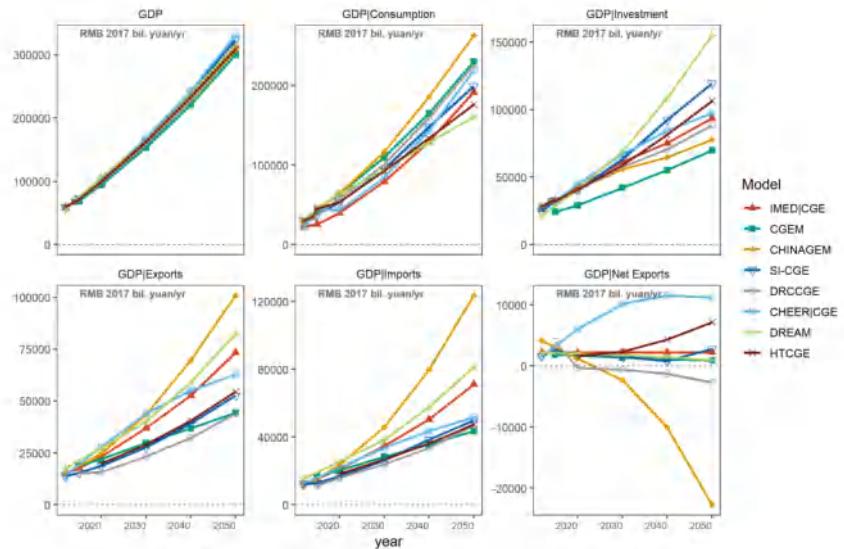


Figure 7.62: 八种模型基准情景 GDP 及各分项结果 (2012-2050 年)

观察基准情景的能源结果可以发现模型之间的更大不同（图7.63）。首先是对于基准情景的假设不同，比如 CHEER|CGE 和 SI-CGE 模型，他们将现行减排政策也考虑在基准情景中，导致能源消费尤其是煤炭会在 2030 年明显达峰随后下降。但其他模型并未将这些政策纳入基准情景的范畴。其次是模型对于中国未来的能源消费，从总量到结构，有着各不相同的预测。数量级明显不太一致。模型们预测 2050 年我国总一次能源供给的区间是 140-210EJ/yr，其中 IMED|CGE 模型预测基准情景下我国将保持相对较高增速的能源增长，煤油的比例都很高，不过煤炭会在 2030 年左右达峰，随后下降。但 DREAM 模型预测 2020 年之后油气消费都将趋于平稳。最后，总结来看，各模型一致预测在基准情景下，至少未来十年我国的煤炭消费都将呈现增长趋势，达峰年份可能在 2030 年。

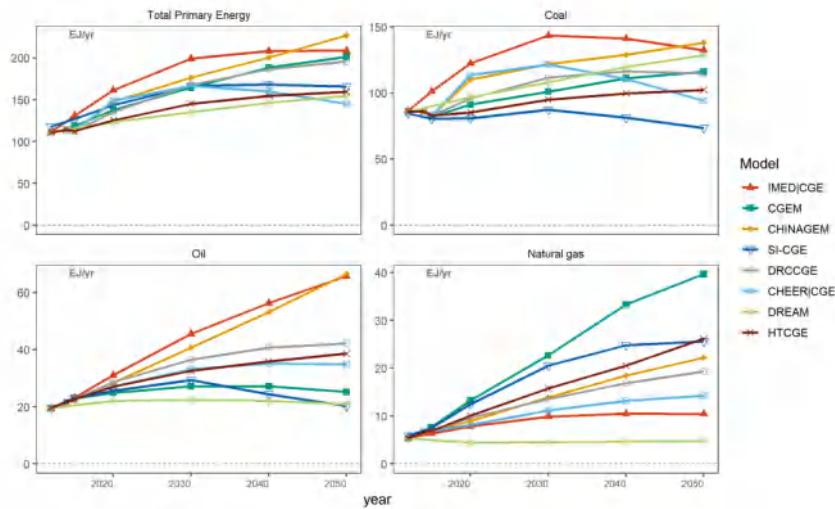


Figure 7.63: 八种模型基准情景总一次能源供给及分能源品种结果（2012-2050 年）

基准情景下的碳排放由于在我国大部分碳排放都与化石能源特别是煤炭有关（图7.64），所以碳排放结果与煤炭的一次能源消费结果很接近。有趣的结果体现在电力部门碳排放，各个模型不论从趋势还是数量级上都差异明显。这反映了模型内部电力部门技术选择的不同。比如相比于其他模型，DREAM 模型在基准情景中假设可再生能源的技术渗透率在 2030 年前就极大地增加，导致其电力部门碳排放在未来十年将持续走低，与其他所有模型的结果都不一样。

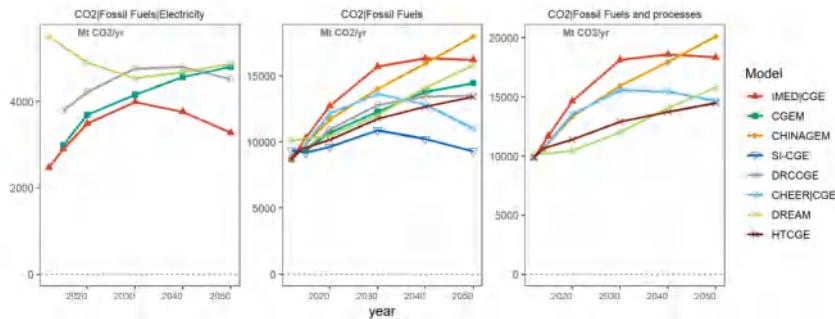


Figure 7.64: 基准情景下的碳排放结果（2012-2050 年）

碳税情景

在模型中施加碳排放税将不可避免对宏观经济指标产生影响，这是因为模型各主体相比于基准情景需要额外负担一笔税费。本节将碳税情景结果与基准情景结果做百分比差值，并列出八种模型结果，以对比分析其中不同。

宏观经济影响

人均 GDP、GDP 总量及分项的情景差异方面（图7.65），各模型的结果呈现一个基本结论：碳税越严苛，对宏观经济的负面影响越大。不过就数量级以及 GDP 分项结果的角度而言，各模型结果不尽相同，其中原因既包括外生参数选择，也包括不同的内生机制。一般地，低碳税情景下 2050 年 GDP 损失在-0.2% 至-0.8% 之间，中碳税情景下为-0.5% 至-1.8% 之间而高碳税情景

下为-1.5% 至-2.2% 之间。SI-CGE 模型则与别的模型不同，GDP 和人均 GDP 将会受到更大的负面影响，这是因为 SI-CGE 模型采用了与别的模型不同的宏观闭合方式，以价格刚性作为假设，所以 GDP 所受负面影响更大。还有一个例外是 DRC-CGE2030 年碳税情景下的消费比基准情景更高，这是由于 DRC-CGE 将碳税收入全部转移支付给居民导致消费增加，但由于投资的减少和 GDP 总量的减少，2050 年消费影响也同样转为负值。与此同时，DREAM 和 IMED|CGE 模型设置了同款转移支付方式，但结果也略有不同，比如 IMED|CGE 模型下消费的负面影响更大。这是因为 IMED|CGE 模型中以总投资外生固定为闭合方式，所以转移支付收入一部分转化为真实储蓄，所以相对而言消费的负面影响更大些。而在 HTC GE 模型机制中，碳税征收后其他增值税按比例下降，居民和企业都将受益，所以 GDP 特别是消费和投资的负面影响比较中庸，但由于贸易弹性参数的选择，HTC GE 的结果中出口和进口所受影响显著高于其他模型。

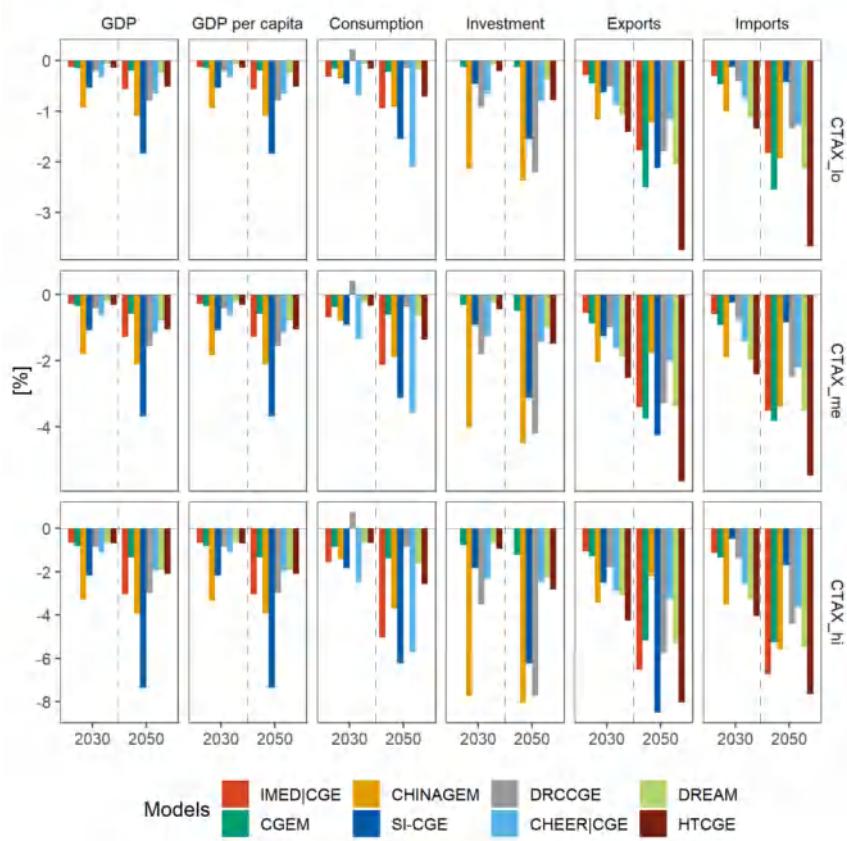


Figure 7.65: 2030 年和 2050 年各模型宏观经济指标的情景差异

能源消耗影响

2030 年和 2050 年煤炭、原油和天然气消费及其价格的情景差异方面（图7.66），一般地，碳税会提升煤炭和原油的价格并降低对它们的一次能源使用，这一点在八种模型中基本一致。天然气的结果也符合这个趋势，不过略有些分歧。不过因为各模型各不相同的外生参数和内生机理，由图7.65可见 GDP 情景结果差异较大，我们也可以很明显地观察到模型之间的差异在能源结果中也是如此。就煤炭而言，CHEER|CGE 模型预测在碳税情景下煤炭消费将大幅度减少，价格将显

著提升，这是由于八个模型中 CHEER|CGE 模型对电力部门技术选择刻画最为详细，对可再生能源的未来成本下降假设最为乐观。大部分模型认为，相比于基准情景，2030 年煤炭消费将减少 15%-30%，2050 年减少 20%-40%，但 CHEER|CGE 模型的结果是高碳税情景下 2030 年煤炭消费下降 50%。原油在中国并不是煤炭直接的替代品，模型结果显示原油消费也受到碳税的打击，不过影响不如煤炭，特别是在 2030 年。但 2050 年，基本所有模型结果均表明碳税对原油消费的负面影响与 2030 年相比将显著更低。这是因为模型们除了 DREAM，均假设在基准情景下原油消费将遵循一条不断增长的路径。就天然气而言，由于天然气的含碳量不高，所以在工业或其他部门中也会作为替代能源，故 SI-CGE 和 DDRC-CGE 的碳税情景显示天然气消费相比于基准情景反而增加。

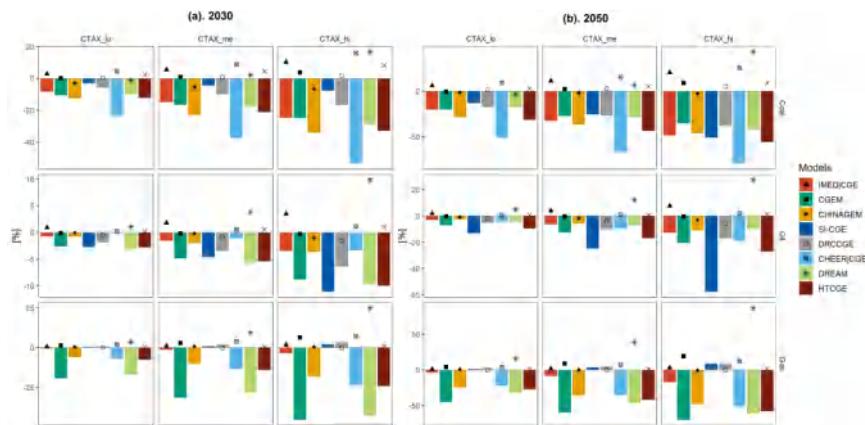


Figure 7.66: 2030 和 2050 年一次能源消费（柱子）和能源价格（点）的情景差异

图7.67则综合展示了总一次能源消费（上）和电力价格（下）的情景变动。如前所述，CHEER|CGE 因其更为积极的可再生能源假设，故总一次能源相较于基准情景下降幅度最大，高碳税情景下 2050 年幅度达到-60%。电力价格的情景差异在各模型之间变动很大，但共同的趋势是：随着碳税的不断提高，电价也是逐渐上升的。

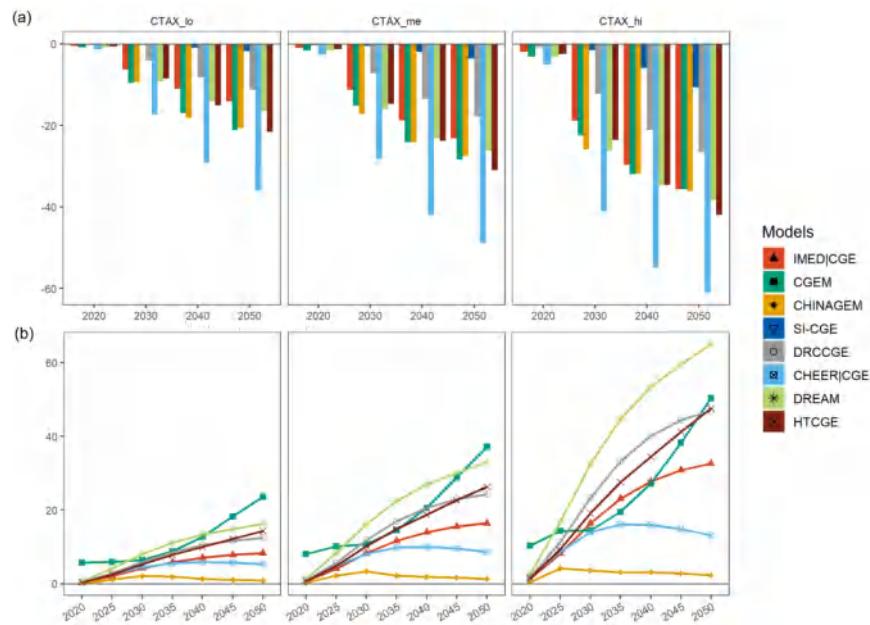


Figure 7.67: 总一次能源消费（上）和电力价格（下）的情景差异（2020-2050 年）

碳排放影响

图7.68展示了三种情景与基准情景相比碳排放结果的变化方面，颜色越深表示碳税对碳排放的负面影响越大。共同的趋势是：碳税越高，碳减排效果越好。各模型之间存在差异，原因和能源结果差异类似。由于本研究中统一规定碳排放税只施加于模型中的化石能源相关排放，所以过程排放的变化与碳排放税并无直接关联。直至 2050 年，在中等碳税情景下，与化石能源相关的碳排放下降范围在-21.3% 至-81% 之间。与众不同的是 C-GEM 模型，电力部门有关碳排放在碳税情景下略有增加，这是因为 C-GEM 模型中允许内生技术进步，且刻画了 CCS 技术，在电能替代的进一步影响下呈现出与其他模型不同的结果。

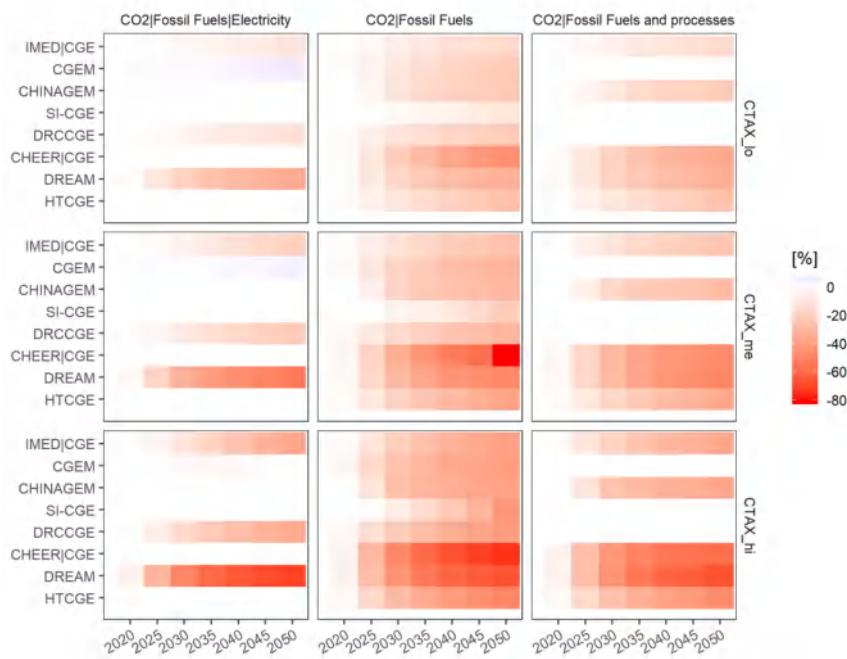


Figure 7.68: 碳排放的情景差异

能源与碳排放结果差异：弹性的影响

由上两个小节可知，各模型之间能源和碳排放结果之间差异较大，每个模型对未来的能源结构展望不尽相同，这不仅因为内生机制不同，也与模型所选择的与能源品相关的替代弹性不同有关（图7.69）。在一般的生产函数中，CGE 模型往往采用 CES（常替代弹性）函数，而能源品与要素合集（value-added aggregate，包括资本与劳动），或直接与资本品形成竞争替代，模型中用一个替代弹性来表示两者之间的替代程度。这一弹性的大小可以反映出在低碳转型中，化石能源作为一种投入品能否以更低成本被其他要素替代。图7.53列举了八种模型内能源与其他投入品，从结果上也可以看到，CHEER|CGE 和 HTC|CGE 模型比 IMED|CGE 和 CGEM 模型的减排量更显著，而 SI-CGE 模型和 DRC-CGE 的减排量是模型之中最小的，这是因为弹性较小导致能源替代并不显著。此外，在 CHEER|CGE 模型中，能源品之间的替代弹性比较大，煤炭、原油、天然气和电力之间的替代弹性为 1.2，这也合理地解释 CHEER|CGE 在碳税影响下能源替代更为剧烈，煤炭消费下降得比较多。

模型名称	能源-其他要素替代弹性
CHEER CGE	0.5 ^a
HTCGE ^a	0.5 ^a
IMED CGE ^a	0.4 ^a
C-GEM ^a	0.4 ^a
CHINAGEM ^a	0 ^a
DRC-CGE ^a	能源-旧资本品: 0.25 ^a 能源-新资本品: 1.01 ^a
SI-CGE ^a	0.2-0.8 ^a
DREAM ^a	1.0 ^a

Figure 7.69: 各模型能源品-其他要素的替代弹性

工业产出影响

我们选取了几个重点部门进行分析，尤其是能源密集型或碳密集型部门（7.70）。可以总结出一个基本结论：碳税政策抬升了化石能源和电力价格，提高了能源密集型部门的生产成本，进而可能导致其产出下降。在钢铁、水泥和 EITE 部门，所有模型结果均体现了这一点。其中 SI-CGE 和 CHINAGEM 模型中，部门所受负面影响最大，这或许是因为它们拥有非常细致的部门划分以及产品需求弹性不同于别的模型。还有一个例外是 CGEM 模型显示碳税情景下电力部门产出高于基准情景。理由如前所述，CGEM 模型中允许内生技术进步，可再生能源的成本较低以及 CCS 的应用，这一点与其他模型相比颇为独特。

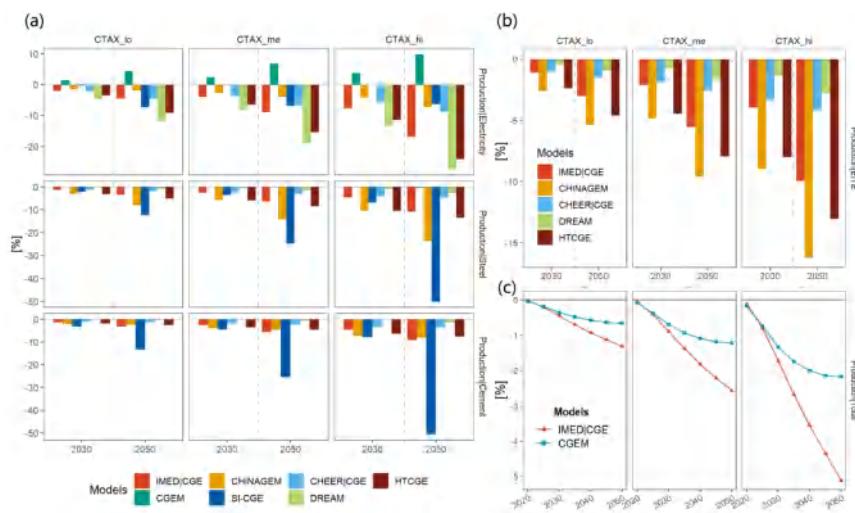


Figure 7.70: 碳税对部门产出的影响 (a: 电力、钢铁和水泥; b: EITE, Energy-intensive-trade exposed 部门; c: 工业部门总产出)

与现行减排目标的比较

这里我们选取了中国国家自主贡献中以碳强度为代表的 NDC 目标为参考标准，将各模型不同情景未来年的碳强度计算出来，并与 2005 年进行比较。模型结果显示，即使是基准情景，碳强度也在逐渐下降，而碳税政策使得碳强度的下降更为显著。由于各模型之间的 GDP 影响差别不大，造成各模型碳强度下降幅度和趋势不同的影响因素主要是碳排放。模型结果普遍对中国完成 2030 年 NDC 目标比较乐观，有六个模型结果显示即便是按照基准情景，中国也能完成目标（图 7.71）。

若观察碳排放总量在 2050 年的下降量，我们可以发现大多数模型的碳排放总量即使在高碳税情景下，碳价从 20 元/吨上升至 1134 元/吨，2050 年的碳排放总量也才下降 20% 至 40%（DREAM 模型是个例外，将下降 80%）。可见本文所模拟的碳税政策远远不够实现 2060 年碳中和目标。这说明了在现行碳中和的模型研究中，或许存在两点问题：（1）模型并未足够地考虑高强度技术创新和负碳技术；（2）单一的碳税政策恐怕不足以完成碳中和目标，需要配套其他措施。

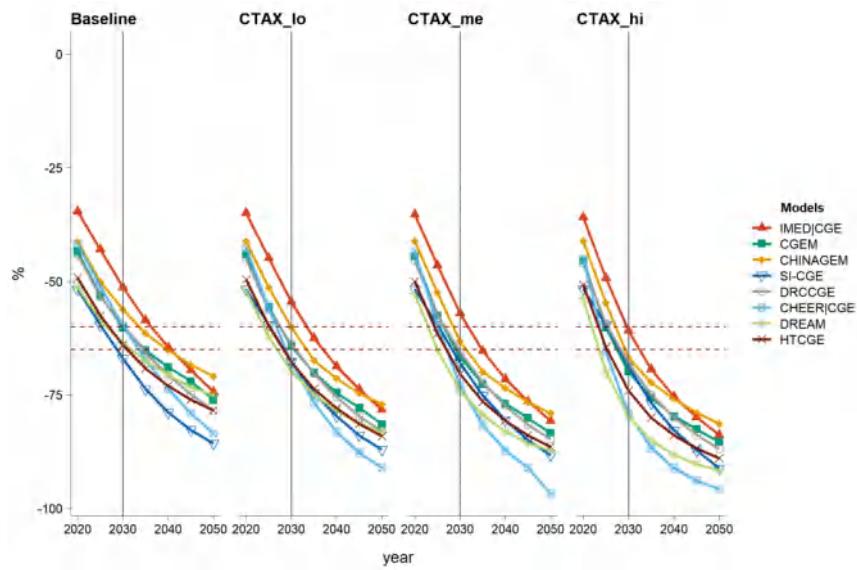


Figure 7.71: 不同情景下碳强度的下降趋势

研究结论

本文的工作汇集了当前中国学界应用较为广泛的八个 CGE 模型，在保持相同的 GDP 增速、人口等假设基础上，施加相同的政策外生变量，观察政策对经济、能源和排放的影响以及各模型之间的差异。尽管研究结果表明各模型结果之间差异的确显著，但创设这样一个模型对比论坛，对比这些模型结果（值得注意的是本文的模型之前从未参与过任何相似的模型比较工作）有助于模型社区内部成员相互理解与借鉴，也有助于政策决策者理解模型研究的长处和不确定性。

本文也发现基准情景下的总需求结构、能源和排放结果在各个模型之间存在不同，这首先由于有些模型对于基准情景的政策内涵定义不同，比如 CHEER|CGE 和 SI-CGE 模型将现行对可再生能源的鼓励政策也考虑在基准情景中。其次结果显示碳税对经济、能源和排放所造成的影响也是各不相同的，这既和模型某些内生机制有关，比如不同的碳税收入分配方式、内生技术进步，也和外生参数的选择直接相关，比如能源和其他投入品的替代弹性。

就政策意义而言，所有模型均对中国完成甚至超额完成 2030 年 NDC 目标表示相当乐观，但本文中即便是高碳税情景也距离 2060 年碳中和有一定差距，这说明在模型研究中，为了匹配减排

现实，需要考虑更详细的技术选择，比如负排放技术。

经过本轮模型对比，即便没能囊括更多中国具有代表性的 CGE 模型，但结果也可以为各个模型团队及其他同行提供一些认识。此外，本轮对比为了简便考虑，仅考虑了中国这个单一地区，且并未将研究尺度具体到某个单一因素对模型结果差异产生的影响，而是从模型假设和参数选择的角度做一个大致的归因。尽管未来还有许多工作需要完成，但本轮研究着实为各个模型团队创造了一个互相交流和学习的平台，我们希望未来能涌现出更多具有不同特征，面向中国实际问题的 CGE 模型。

7.8.8 LEEEP 合作 | 柳叶刀健康与气候变化倒计时：中国 2021 年度报告

- **原文标题:** The 2021 China Report of The Lancet Countdown on Health and Climate Change [92]
- **期刊:** Lancet Public Health
- **发表年份:** 2021
- **作者:** Wenjia Cai et al
- **文章链接:** [点击 LEEEP 微信公众号链接阅读推送原文](#)

研究内容

随着人口的增长和经济的发展，中国面临着气候变化带来的健康风险，但也面临着解决这些风险和保护后代健康的机遇。如果没有及时和充分的应对措施，气候变化将加速影响人们的生活。2020 年，由清华大学领导的“柳叶刀倒计时”亚洲区域中心在全球“柳叶刀倒计时”工作的基础上，评估中国气候变化的健康状况，旨在启动快速和健康响应行动。这份 2021 年的报告是第一次年度更新，在五个领域提出了 25 个指标：气候变化的影响、暴露程度和脆弱性；适应、规划和健康复原力；缓解行动和健康协同效益；社会经济投资；以及公众和政治参与度。这份报告汇集了来自国内外 25 个领先机构的 88 位专家的贡献。较 2020 年，2021 年新增了 5 项指标，多项指标方法有所改进，在国家和省级层面提出指标结果。在 2019 新冠流行 (COVID-19) 的这一年，本报告还揭示了中国的绿色复苏之路，确保其与碳中和目标相一致。

研究结论

本报告全面评估并更新了气候变化对健康的影响。虽然 2020 年的影响低于 2019 年，但 Section 1 中每个指标的影响都高于其历史基线，表明气候变化造成的健康威胁有持续增加的趋势。2020 年，估计有 14540 人死于热浪，其中 77% 是老年人 (即 65 岁以上的人)。在过去的几十年里，洪水和干旱事件的强度和频率有所增加或保持不变，但受影响的人口持续减少，表明适应方面取得了进展。不同地区有其特殊的健康威胁，例如西南地区通过蚊子传播登革热，东北和西北地区受野火影响，以及东南地区与高温有关的健康影响，这都需要有针对性的应对措施。如果不及时采取行动，气候变化造成的健康威胁在未来几年和几十年可能会恶化。尽管取得了总体进展，但在应对气候变化的健康威胁方面仍存在巨大差距。

在适应和减缓气候变化对健康的影响方面取得了喜忧参半的进展。在报告 2 年的跟踪期间，应对与气候变化有关的健康风险 15 个指标中，12 个指标有改善的趋势，2 个指标有恶化的趋势，1 个指标有多种变化趋势。在适应方面，显现出积极的趋势，市级和省级健康影响评估增多，城市绿化水平提高，健康应急管理提高。在缓解方面，尽管在新冠疫情封锁期间能源消耗和碳排放大幅减少，2020 年煤炭消费和碳排放的反弹令人担忧。中国迫切需要一个更环保的复苏计划。因此，中国应加快对低碳产业的投资，逐步取消化石燃料补贴，扭转后新冠肺炎大流行时代令人担忧的趋势，使排放路径朝着促进健康的碳中和目标发展。通过对新冠疫情的反思以及新提出的气候雄心，今年因此出台了若干关键的卫生、气候和宏观经济政策。若独立进行政策制定，并阻碍不同决策者之间的对话，社会整体可能无法很好的应对气候变化。从长远来看，气候变化可能是比新冠更大的全球公共健康威胁者，社会要抓住机遇之窗，实现低碳发展和公共健康的双赢未来。

编辑/校阅：张思露，刘晓瑞，郭超艺

7.9 LEEEП 组 2022 年度研究一览

2022 年度, LEEEП 团队在能源气候政策相关期刊上就以下主题发表了研究成果。

以下为我们在本节甄选的相关已发表文章:

1. IMED 研究 | 全球客运交通碳中和有助于节约铂金需求
2. IMED 研究 | One Earth: 碳中和能使中国实现工业用水目标
3. IMED 研究 | 深度脱碳协同减污的关键机制: 以粤港澳大湾区为例
4. IMED 研究 | 京津冀减污降碳政策的异质性协同效应和互馈影响
5. LEEEП 研究 | LEEEП 组研究成果支撑 IPCC AR6 多个关键内容
6. LEEEП 研究 | IPCC AR6 特辑: 课题组支撑 IPCC AR6 的论文一览
7. LEEEП 合作 | IPCC AR6 报告历史排放趋势和驱动因素核心结论解读

7.9.1 IMED 研究 | 全球客运交通碳中和有助于节约铂金需求

- **原文标题:** Saving global platinum demand while achieving carbon neutrality in the passenger transport sector: linking material flow analysis with integrated assessment model [47]
- **期刊:** Resources, Conservation and Recycling
- **发表年份:** 2022
- **作者:** Xin Tong*, **Hancheng Dai**, Pantao Lu, Anying Zhang, Teng Ma
- **文章链接:** [点击 LEEEП 微信公众号链接阅读推送原文](#)

文章导读

确保关键材料的供应对全球低碳转型至关重要。交通运输行业在降低碳排放的同时提高资源效率是这一背景下的热点研究问题之一。交通运输行业占目前全球碳排放近四分之一。其低碳转型严重依赖几种关键金属以实现大规模部署新兴的电气化技术。目前电池电动汽车市场在一些国家已经快速起飞, 各国研究者针对相关的关键金属开展了广泛深入的物质流分析。而燃料电池技术在未来几年有望实现量产, 这也促使研究者开始关注其中不可或缺的铂金的供需平衡。铂族金属在汽车工业中一方面用于传统燃油汽车的尾气净化, 另一方面则在汽车低碳化转型的关键技术之一, 燃料电池中用作催化剂。作为地球上最稀有的金属之一, 铂族金属的供给安全对于改善汽车环境表现意义突出。按照现有燃料电池技术水平, 目前全球铂的年产量只能支持不到全球汽车年产量的 10% 采用氢燃料电池技术, 即使未来技术不断改进, 大幅降低单台车的铂用量, 仍然将对全球铂族金属供应产生巨大压力。作为目前全球铂金属在用存量最大的汽车用三元催化器, 其废弃后的高效回收利用对确保未来铂金属供应至关重要。

本文以乘用车为例, 着重探讨动态技术变革对关键材料使用与碳减排之间的关系。汽车作为上个世纪伟大的技术发明, 不仅改变了人们的出行方式, 也重塑了工业生产模式、基础设施和社会景观, 造就了车轮上的社会。已有研究基于多层次技术转型理论, 对比分析了上世纪美国和荷兰在二次世界大战前与战后汽车产品扩散的技术转型路径, 可以看到新技术扩散有着巨大的后发优势。这也在中国近年来的电动车发展历程中展现的淋漓尽致。这些历史经验为全球尺度更加激进的低碳转

型路径提供了重要参考。这需要在微观的技术选择与宏观的社会经济系统变迁之间建立起有效的沟通连接。

为了揭示在高度不确定和动态的社会技术系统中，技术选择对稀有金属物质流的影响，需要将物质流分析 (MFA) 嵌入大尺度综合评估模型 (IAMs)。MFA 具有量化稀有金属流量和存量变动过程的优势。而 IAMs 提供了一个强大的平台模拟多种社会经济路径以及气候和环境目标下的长期情景。本文以多层次技术转型理论 (MLP) 作为情景分析设定的基础，重点比较了 IPCC 提供的共享经济发展路径 (Shared Socioeconomic Pathways, SSPs) 中的可持续发展情景 (SSP1) 与较小结构变化情景 (SSP2) 两种社会发展路径下，产品替代、技术路径分化与智能交通系统转型的影响。研究聚焦乘用车使用阶段的直接排放。结果显示必须依靠更加深入的技术系统转型，挖掘智能交通的技术潜力，以更少的产品消费满足交通出行需求，才能保证在更加平等包容的可持续发展情境下，以较少的铂金消费量，实现 2050 年达到全球私人乘用车部门使用环节的直接净零排放目标。

研究内容

燃料电池汽车 (FCV) 是未来具有重要发展前景的交通低碳转型技术之一，确保铂族金属 (PGMs) 的供应对于燃料电池汽车 (FCV) 的发展至关重要。已有研究采用自下而上的技术竞争模型，评估了 21 世纪全球电动汽车铂族金属实现供需平衡的可能性。然而，由于地球上铂族金属的稀缺性，如果要在全球范围内积极向“碳中和”目标过渡，那么评估铂族金属的减排效率就非常重要。本研究通过整合物质流分析 (MFA) 与自下而上的综合评估模型，即能源-环境-经济可持续发展综合评估模型 (IMED | TEC)，以加强这一领域技术发展与社会经济系统分析之间的对话。通过运用这一前沿模型，本研究以乘用车为例，对比分析激进的碳中和目标下，全球实现汽车电动化转型的三种不同技术转型路径，2020-2050 年汽车使用阶段铂金需求与碳排放之间的关系。结果表明，技术发展的后发优势导致电池电动汽车和燃料电池汽车之间市场渗透率的区域差异，带来铂金供需的地域差异，从而重塑全球铂金物质流。在逐步向碳中和汽车技术过渡的过程中，汽车使用阶段的减排效率很大程度上依赖于当地回收部门与全球汽车生产网络的协调程度。因此，为了提高低碳转型中的稀有金属的减排效率，需要跨越不同区域和车型，整合全球汽车生产的闭环供应链建设。

文章亮点

1. 2020-2050 年全球范围三种情景下，私人乘用车使用阶段铂金消费的减排效率。
2. 对比传统燃油车的铂族金属报废峰值与燃料电池车日益增长的铂需求之间的时间间隔，探讨汽车产业铂族金属闭环供应链的可行性。
3. 针对全球不同区域汽车产业技术转型路径差异，提出相应的铂族金属循环经济策略。

图表概览

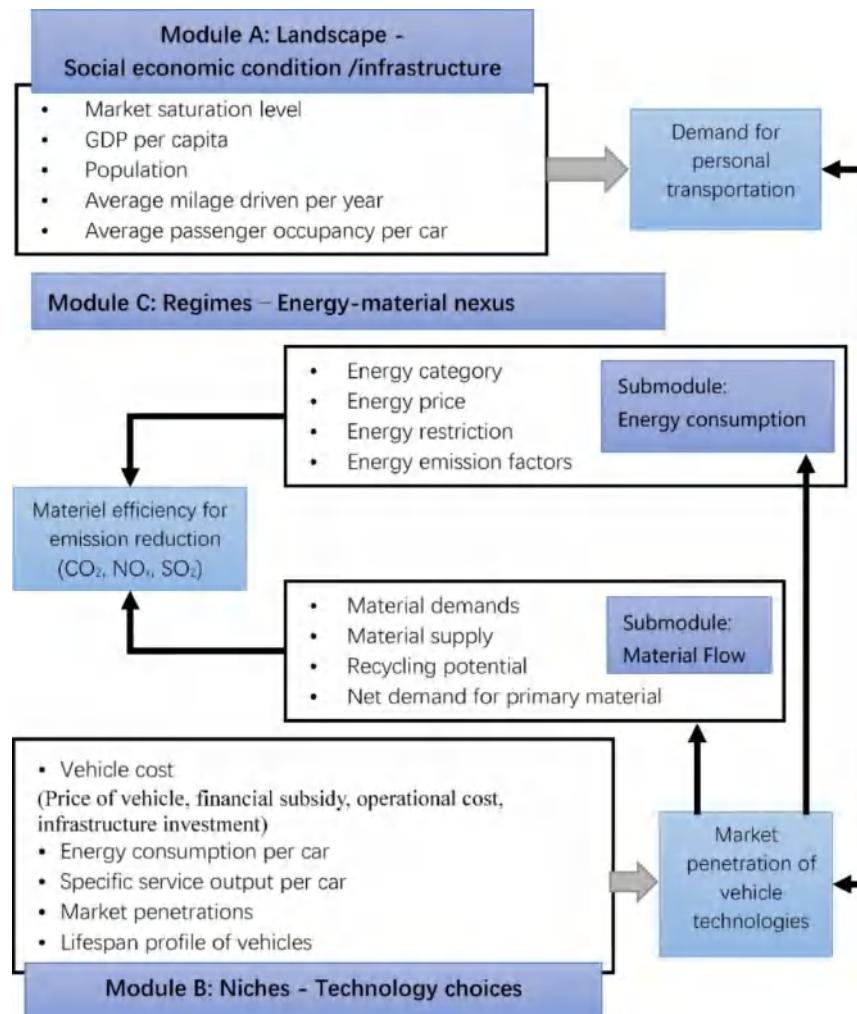


Figure 7.72: 研究框架

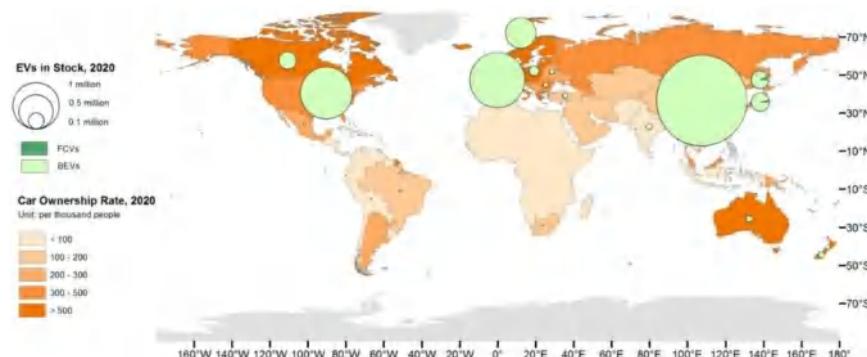


Figure 7.73: 2020 年全球汽车保有量和电动汽车存量

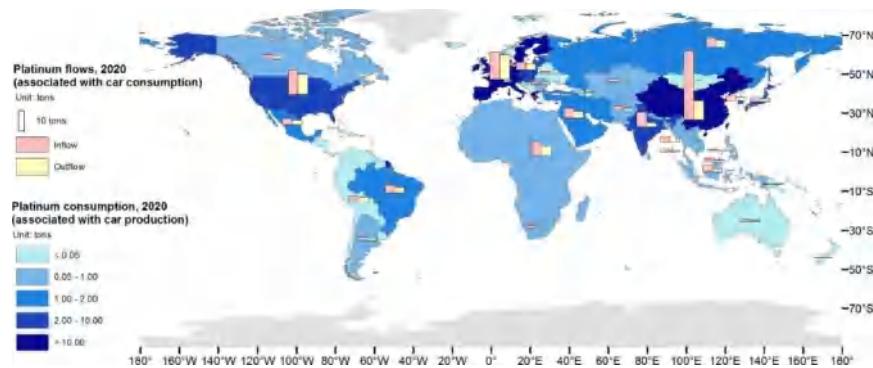


Figure 7.74: 2020 年全球汽车产业铂金流量

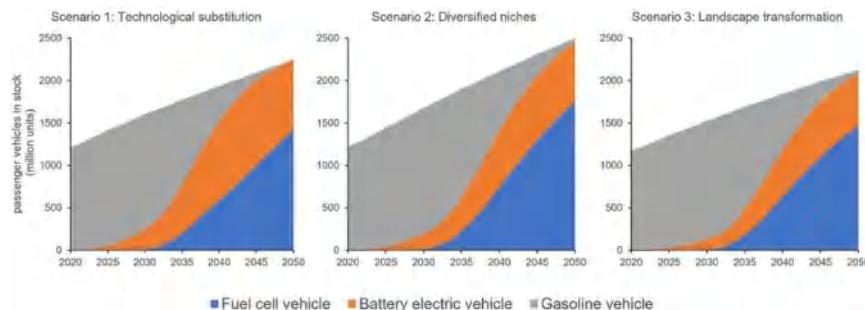


Figure 7.75: 2020-2050 年三种情景下传统燃油汽车、电池电动汽车和燃料电池汽车的累计存量。情景 1：技术替代情景 2：多样化市场情景 3：转型

7.9.2 IMED 研究 | One Earth: 碳中和能使中国实现工业用水目标

- **原文标题:** Achieving carbon neutrality enables China to attain its industrial water use target [23]
- **期刊:** One Earth
- **发表年份:** 2022
- **作者:** Xiaoyu Liu[#], **Hancheng Dai[#]**, Yoshihide Wada, Taher Kahil, Jinren Ni, Bin Chen, Yan Chen, Chaoyi Guo, Chen Pan, Xiaorui Liu, Yong Liu*
- **文章链接:** [点击 LEEEP 微信公众号链接阅读推送原文](#)

精简摘要

本文首次揭示了 2060 年我国省级层面碳中和与水红线目标的链式联级协同及权衡效应。

研究项目背景

在国家自然基金委的支持下，北京大学环境科学与工程学院与国际应用系统分析研究所（IIASA）、生态环境部环境规划院、北京师范大学、中国社会科学院通过暑期青年科学家

(YSSP) 等项目开展密切合作，构建了中国省级工业分部门用水强度清单，研发了中国省级水-能耦合 IMED|CGE 模型工业用水模块，揭示了 2060 年我国省级层面碳中和与用水红线目标的链式联级协同及权衡效应。

研究背景

中国是世界上主要二氧化碳排放国（约占全球 30%）和水资源消耗国（约占全球 15%），其中工业部门约占全国碳排放的 50% 和工业用水的 20%，是实施减碳和节水政策的关键部门。此外，由于水资源禀赋地区差异性，三分之一省份的人均水资源低于国际严重缺水阈值。为了解决这两大问题，中国政府于 2012 年制定了水资源“三条红线”政策，并于 2020 年承诺 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和的目标。实现节水降碳两大目标往往伴随着工业结构和能源结构的调整，会产生潜在的协同及权衡效应。以往研究表明，碳限额政策可以助力节水目标的实现。反之，“三条红线”政策要求 2030 年全国用水总量在控制在 7000 亿立方米以内，2030 年工业用水预计需控制在 1484 亿立方米以内，这一节水政策也将促进碳减排。然而，由于地区资源禀赋、经济发展和产业结构的差异，区域间碳减排协调不佳可能会加剧局部水资源短缺问题，即权衡效应。因此，对于能否同时实现工业减排和节水目标还缺乏共识。此外，不同的地区间碳减排成本差异会重塑产业竞争力和产业结构，进而可能会导致地区间产业转移和不合意的减排和节水效应。然而，目前尚不清楚碳中和目标是否会推动产业转移，以及这种产业转移会如何影响水资源政策下的工业用水。可计算一般均衡模型 (CGE) 被广泛应用于评估多个社会经济与气候环境目标之间的复杂链式联级关系，同时也被用于分析未来碳减排与水资源利用的关联效应。但是以往研究的用水测算往往只包括能源部门的用水而忽视了水密集型工业部门，或者只覆盖一个地区而未触及区域异质性。由于各地区在资源禀赋、工业结构和经济发展等方面存在巨大差异，工业部门用水也有巨大的地区和行业差异，因此，有必要建立多区域、多行业的水-能耦合 CGE 模型，进而从水-能-碳耦合的角度开展多目标时空协同和风险分析。

研究方法

本研究采用了北京大学环境科学与工程学院能源环境经济研究室 (LEEEP)、流域科学实验室 (PKUWSL) 等机构联合自主研发的水-能耦合 IMED|CGE 模型，涵盖了 2017 年中国大陆 31 省市最新投入产出数据的 25 个经济部门，并利用 1998 - 2015 年覆盖中国大陆 31 个省市 14 万多家企业的高分辨率工业普查数据，构建了中国省级工业用水清单，从而构建了 IMED|CGE 模型中工业用水模块。该研究根据没有和有碳中和目标设计了两种情景——基准 (BaU) 和碳中和 (CNS) ——以评估未来多部门碳排放、经济指标和工业用水。

研究结果

各部门对碳中和的贡献

在基准情景下，2060 年碳强度与 2017 年相比降幅达 81%。碳中和目标下碳强度将进一步下降 71% 至 0.04 吨/千美元，二氧化碳排放总量降至 24.84 亿吨（图7.76A）。从行业层面看，能源相关产业和第三产业是主要的碳排放行业，碳减排的三大主要贡献行业是电力（33%）、第三产业（23%）和金属冶炼（17%）部门。从省级层面看（7.76B），不同省市碳减排主要贡献部门差异显著。东部和北部省份碳减排以电力部门为主，占部分省份总减排量的 40% 以上。相比之下，其他地区由于火力发电相对较少和清洁能源相对更多，碳减排主要来源于第三产业。例如，云南以水电为主，在碳中和情景下电价相对较低，但由于与邻近的广东省签订了省际电力贸易合同，而本省水电发电潜力有限，必须扩大火电以应对不断上涨的省内外用电需求，因此云南省电力行业是

全国唯一的碳排放不降反升的行业。北京作为中国第一个全部使用清洁能源发电的城市，火力发电厂很早被淘汰，因此电力部门在减少碳排放方面发挥的作用并不大。此外，在矿产丰富的省份，采矿、金属冶炼和金属制品行业是碳减排的主要贡献行业。

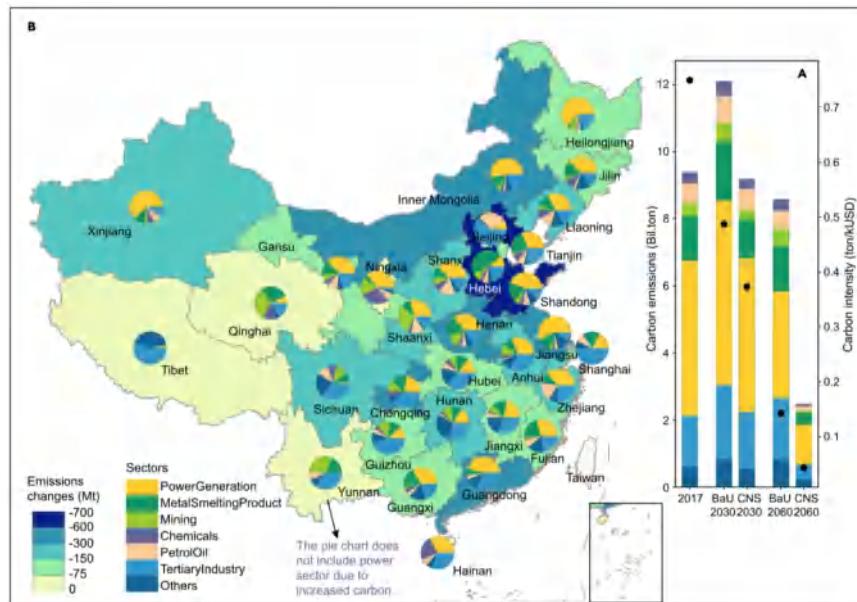


Figure 7.76: 基准和碳中和情景下的碳排放 (A: 2017 年和 2060 年中国主要行业碳排放和碳强度；B: 2060 年基准和碳中和情景下 31 省不同行业的碳排放变化及其比例)。从行业层面看 (图中 A)，能源和第三产业是主要的碳排放行业，碳减排的三大主要贡献行业是电力、第三产业和金属冶炼。从省级层面看 (图中 B)，东部和北部省份碳减排以电力部门为主，其他地区碳减排主要归功于第三产业

低碳转型的宏观经济影响

如果没有重大的减碳技术创新替代常规技术和新兴产业替换增长动能，2060 年碳中和情景下几乎所有省份的 GDP (-6%，各省-1%~17% 不等) 和家庭消费 (-11%，各省-4%~31% 不等) 相比于基准情景都将遭受不同程度的负面影响，但西藏、北京和宁夏的居民消费预计将分别增长 8%、8% 和 11%。GDP 和消费的收缩导致大多数部门工业产出不同程度的下降 (图 7.77)。全国总量层面，石油 (-69%)、电力 (-47%)、采矿 (-34%) 和金属冶炼及制品 (-23%) 四个行业产出下降幅度最大。大多数省份的传统能源密集型产业将受到重大影响。2060 年，以高碳产业为支柱的山东省各工业部门产出显著下降，特别是金属冶炼、化工等支柱产业产出损失将分别达到 6620 亿美元和 4260 亿美元，占其总产值损失的 24%；河北省约 55% 的产出损失是由炼钢和炼钢产品造成的。另一方面，许多省份的电子、机械等相对低碳的产业的产值相比基准情景预计将有所增加。例如，云南和西藏的电力部门，重庆、山西和江苏的电子产品，新疆和江苏的机械设备产值将小幅上升。由于各省产值变化的异质性，产业结构调整在省域层面的效应更为复杂。在需求侧，碳减排成本较低的省份在向省内、省际和国际消费者提供产品时将更具竞争力。在生产侧，随着时间的推移，需求的变化将导致现有资本和新资本活动向碳减排成本较低的地区和部门转移。一般来说，新投资比现有资本存量的用水效率和能源效率都更高。然而，碳限额政策将抑制新资本投向竞争力较

低的行业，因此这些高能耗高耗水的行业只能依靠现有的低效率存量资本满足未来产品需求。电力、化工、金属冶炼、电子和机械等部门的产出变化就是碳限额政策对产业竞争力影响的例子。

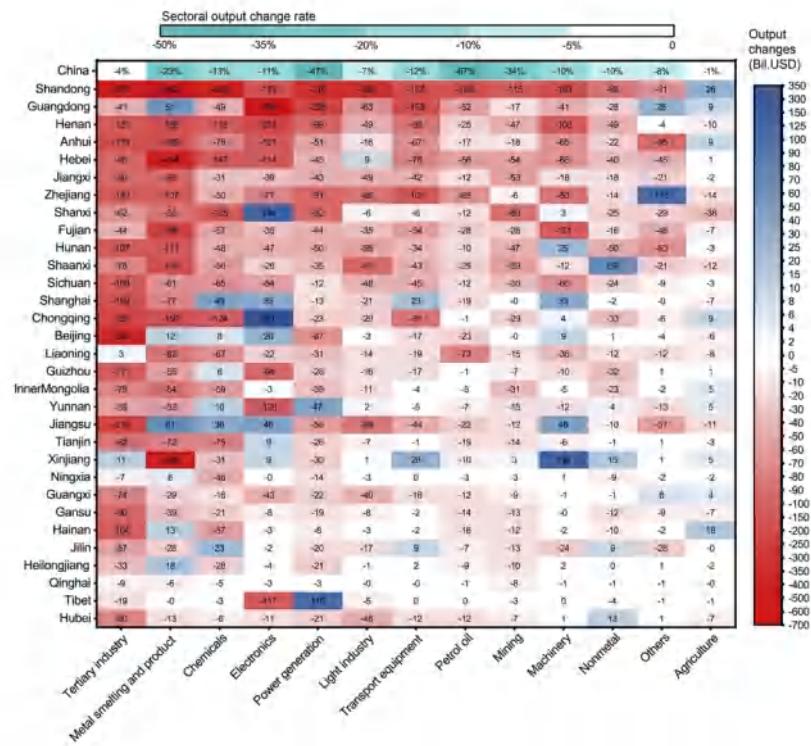


Figure 7.77: 2060 年中国 31 省的部门产出变化及总产出在基准情景和碳中和情景之间的变化率。行业层面，石油、电力、采矿和金属冶炼及制品四个高耗能行业产出下降幅度最大；省市层面，山东、河北等高碳行业为支柱的地区将遭受更大负面影响

工业部门节水的机遇与风险

碳限额政策下，碳和/或水密集型行业将受到严重打击，更多的工业产值损失或更少的火力发电将减少工业用水，因此会对工业用水总量和用水强度产生显著的协同效益。与基准情景下的 157 km³ 用水需求相比，碳中和情景下 2060 年全国工业用水总量将减少 24% 至 119 km³ (7.78A)。减碳的节水协同效益在能源和/或水密集型行业最为显著，电力、轻工业、化工、采矿和金属冶炼等部门的节水量分别占 2060 年总节水量的 48%、14%、13%、9% 和 9% (图7.78B)。由于能源、产业结构和用水效率的区域异质性，各省之间的协同效益差异很大 (图7.78C)。降水量相对丰富、用水强度高的南方省份将是节水的主要贡献者。由于火力发电厂将逐步淘汰，电力部门在大多数南方省份的节水总量中占主导地位，给南方省份带来了 65% 的节水。在北方，由于电力部门用水效率更高，节水潜力更低，电力部门并非最显著的节水贡献部门，而是多个水密集型行业，如轻工业和化工。此外，由于西南地区的水电、西北地区的太阳能和风能等可再生能源比例较高，其电力部门带来的节水效益比例更低 (10%)，其他水密集型行业占西部地区总节水量的 82% 左右，其中重庆的化工行业和陕西的轻工业对节水的贡献最大。水密集型行业带来的节水归因于存量资本生产活动的收缩 (图7.79)。

与此同时，工业用水的增加可能会抵消碳中和带来的节水潜力，从而在缺水地区引发水资源短

缺的风险。大多数省份都出现了权衡效应或双输效应，其中 15 个省份的额外用水量将超过 3000 万立方米，其中一半位于北部和西部地区（图7.80A）。北京将面临碳减排和用水之间最明显的权衡效应（图7.80B），其增加的总用水量预计将完全抵消其他行业实现的节水，导致净工业用水量增加 100 万立方米。河北、山西和新疆约 8% 的节水将分别被轻工业、电子和其他行业占等高耗水行业的用水增加所抵消，这表明碳减排将加剧当地的水资源短缺。碳限额政策抑制新的高效投资进入碳和水密集型行业，这些行业必须依赖水资源利用率低的现有资本，从而导致用水增加（图7.79）。随着产业搬迁和结构调整，用水量的增加主要来自电子行业和轻工业、金属冶炼和化工（图7.80C）等水密集型行业，占全国总用水量的 66%。此外，一些在国家层面不重要的行业却在某些省份的节水权衡效应中十分关键。例如，陕西的非金属以及新疆的采矿和非金属行业将增加约 5000 万立方米的用水量。

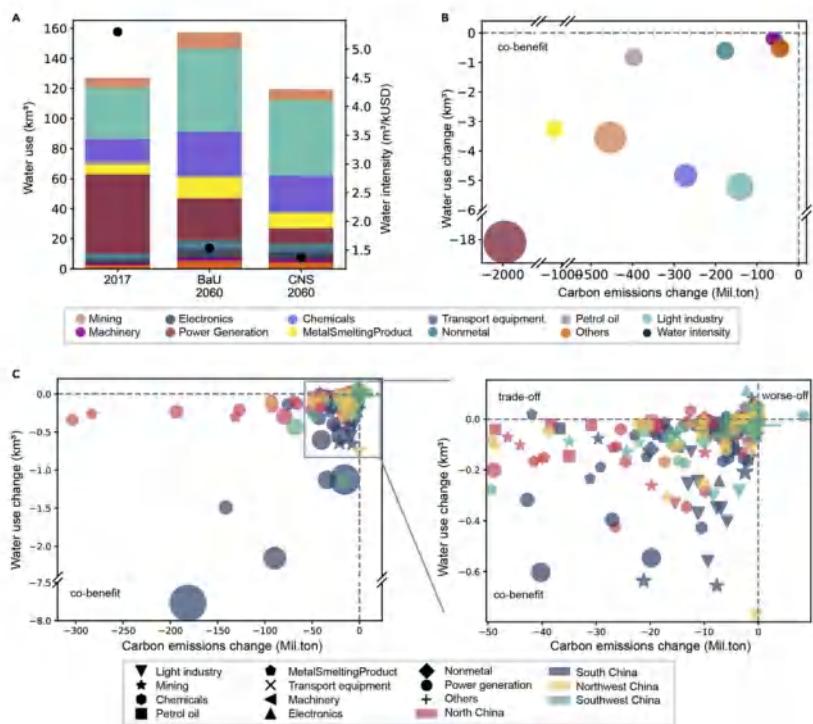


Figure 7.78: 基准和碳中和情景下各部门用水及其两情景下的变化 (A: 2017 年和 2060 年中国用水强度和各部门用水的变化; B: 2060 年中国各部门碳排放和用水的变化; C: 2060 年中国 31 省各部门碳排放和用水的变化)。碳中和情景下 2060 年全国工业用水总量将减少 24%，电力、轻工业、化工、采矿和金属冶炼部门的节水贡献度最大。南方省份的电力部门节水占主导地位，北方和西南省份的轻工业和化工将是主要节水部门

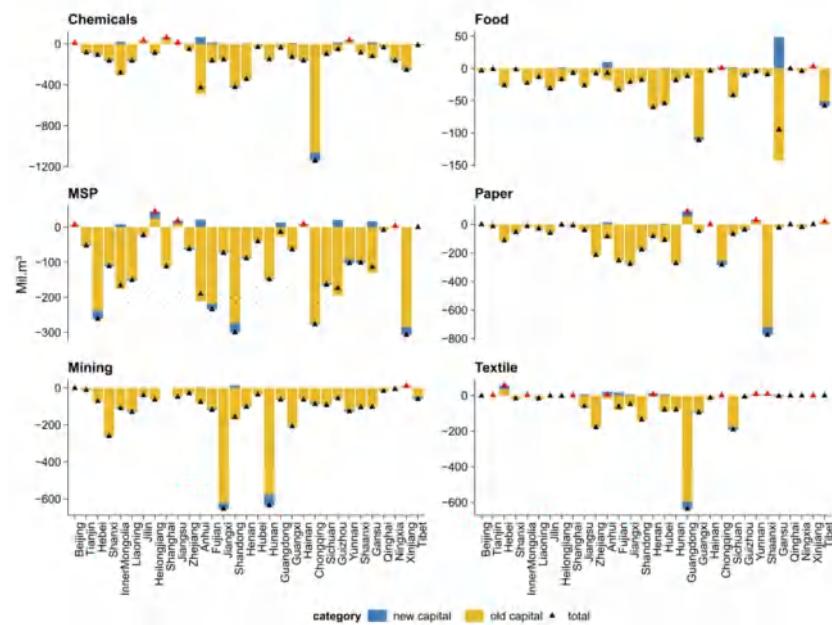


Figure 7.79: 2060 年中国 31 省 6 部门新增资本和存量资本生产活动导致的用水净变化。碳限额政策将抑制新资本投向竞争力较低的行业，新增投资比现有资本存量的用水效率和能源效率都更高，水密集型行业带来的节水归因于存量资本生产活动的收缩。

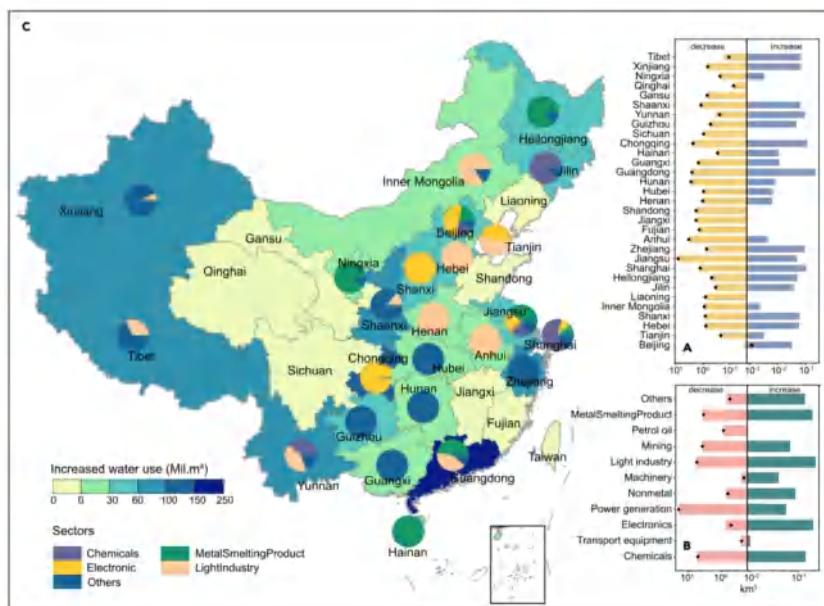


Figure 7.80: 2060 年用水增加的空间和部门异质性 (A: 与基准情景相比, 31 省在碳中和情景下用水量的增加、减少和净变化 (黑点); B: 与基准情景相比, 在碳中和情景下工业用水的增加、减少和净变化 (黑点); C: 31 省用水量增加和不同用水部门的比例)。15 个省份的额外工业用水将抵消碳中和带来的节水潜力, 其中一半位于北部和西部地区, 主要来自电子行业和轻工业、金属冶炼和化工等水密集型行业, 从而在缺水地区引发水资源短缺的风险

与节水目标相比

该研究表明, 实现碳中和将在 2060 年节省 38 km^3 的用水, 相当于全国工业用水的 24% (不同省份 5%-48% 不等)。与水资源“三条红线”政策相比, 2030 年和 2060 年工业用水节水将分别占工业用水目标的 8% 和 26%。如图 7.81 和图 7.82 所示, 在基准情景下, 从 2017 年到 2030 年工业用水预计将稳步增长, 并持续到 2060 年。而在碳中和情景下, 由于减碳的协同效应, 2060 年 (119 km^3) 的全国工业用水总量将显著低于 2030 年 (148 km^3), 甚至低于 2017 年 (127 km^3)。由于地区产业结构和水资源禀赋的异质性, 节水的机遇与风险并存。实现碳中和目标可以使 8 个和 12 省分别在 2030 年和 2060 年实现工业用水红线目标 (图 7.81), 其中大部分位于水资源短缺的北方。然而, 2060 年仍有 9 个省份不足以达到工业用水目标, 其中大部分位于南部和西北部地区。一方面, 产业结构调整以及由此产生的溢出效应在省内和省际都会带来风险, 这表明仅仅依靠用水强度控制和碳减排的共同效益进行用水管理不足以实现用水总量目标, 因此对总用水量进行限制是非常必要的。另一方面, 对于水资源丰富的地区, 过于严格的用水上限可能会限制当地经济的结构和发展。例如, 广西支柱产业轻工业可能会遭受不必要的重大损失。

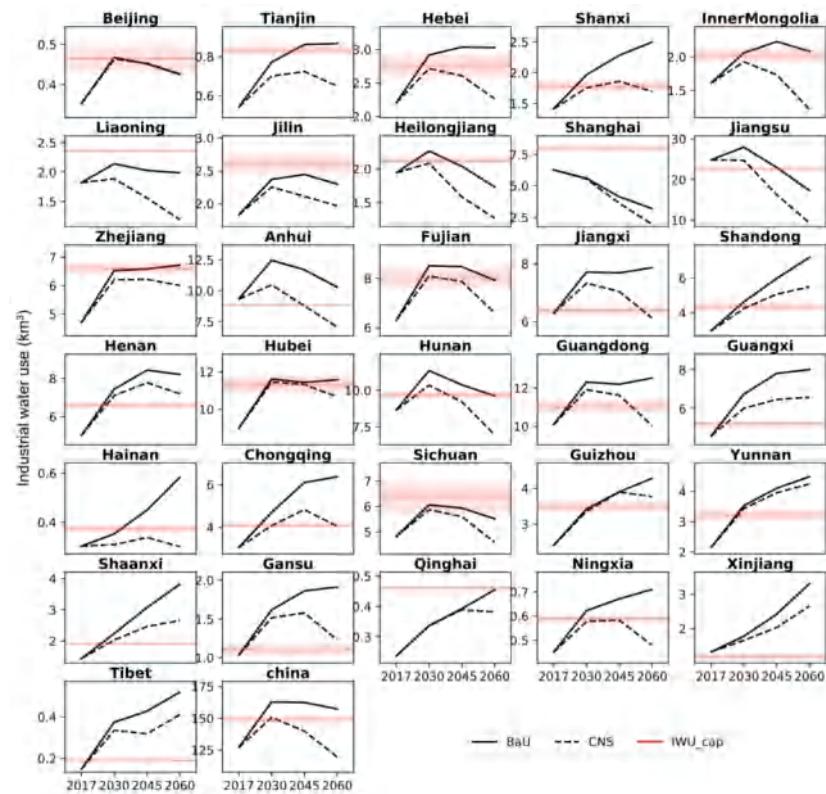


Figure 7.81: 工业用水和预估的工业用水指标（红色阴影代表误差范围）。2060 年，实现碳中和将使全国工业用水降低 24%，12 省将实现工业用水红线目标，大部分位于水资源短缺的北方，而 9 个华南和西北省份不足以达到工业用水目标

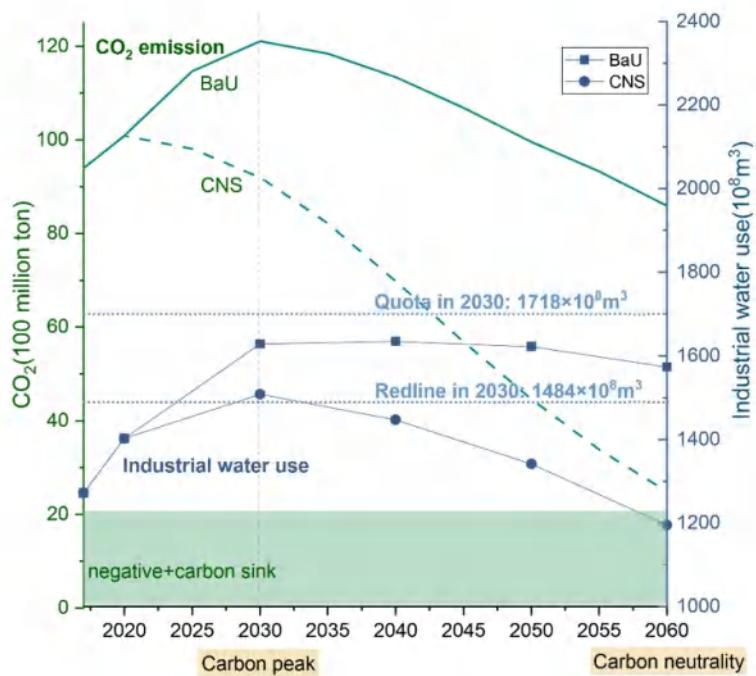


Figure 7.82: 碳中和与水红线目标相关关系。实现碳中和将使 2060 年全国工业用水降低 24% 至 119 km³, 低于 2017 年用水量, 预计将实现全国水红线目标

讨论与结论

与现有大多数回顾性研究不同, 本研究基于综合评估方法的事前分析依赖于许多社会经济因素以及难以预测的 GDP、人口、投资和技术进步等外生假设, 而捕获所有这些因素的动态变化是相当困难的, 因此本研究包含了巨大的不确定性。同时, CGE 模型中的影子价格是由模型产生的内生价格, 通常高于现实世界中的碳价格或碳税, 因为 CGE 模型通常以基准年相对静态的投入产出数据来模拟未来的经济发展, 在技术进步方面相对保守, 进而会高估碳减排成本, 也可能会高估各地区的宏观经济损失。而在现实中, 碳价格信号更有效地刺激技术创新, 从而研发更先进的低碳和零碳技术和新的产业形态, 弥补高碳产业退出带来的经济损失。这种现象很难通过确定性结构模型(如 CGE) 内生地捕捉到, 需要在未来的研究中加以改进。尽管存在不确定性和局限性, CGE 模型在气候政策评估方面比宏观经济模型、统计模型和工程模型更具优势。虽然 CGE 模型无法揭示某个行业内的技术流动或运营过程, 但它能够连接微观和宏观因素, 以评估多个全社会或经济目标之间的联系。同时, 本研究对包括山东、河北等省的巨大宏观经济成本的预估也表明, 如果这些地区继续依赖现有高碳产业和技术, 不提前进行技术创新、产业转型以切换增长动能, 其社会经济发展将在碳中和的时代浪潮下遭受巨大损失而不可持续。

本研究还探讨了水资源的后“三条红线”时代(2030 年以后)的工业用水前景。鉴于中国的碳政策和水政策由不同主管部门制定, 为了最大限度地发挥协同效益的潜力, 减少潜在的权衡效应或双输效应, 本研究建议制定更严格的全国工业用水总量目标和更差异化的省级用水目标, 并更好地利用和促进关键部门的协同效益, 在实现碳中和的同时实现更有效率的水资源配置。建议相关部门制定更加协调的政策:

- 各省应充分考虑协同效益，以最大限度地降低实现节水目标及 2030 年以后水资源目标的成本。
- 避免省际和省内产业结构调整造成的水资源短缺加剧，尤其是在北部和西部干旱地区。
- 根据水资源禀赋和省和地方层面的碳排放限制，因地制宜地制定产业升级和/或重组规划。此外，在短期内，为现有企业提供升级节水技术的优惠政策将有助于实现总用水目标。

7.9.3 IMED 研究 | 深度脱碳协同减污的关键机制：以粤港澳大湾区为例

- 原文标题:** Uncovering the key mechanisms of how deep decarbonization benefits air pollution alleviation in China [93]
- 期刊:** Environmental Research Letters
- 发表年份:** 2022
- 作者:** Xiaorui Liu, Chaoyi Guo, Xiaotian Ma, Kai Wu, Peng Wang, Zhijiong Huang, Ziqiao Zhou, Chen Huang, Silu Zhang, Minghao Wang, Hancheng Dai*
- 文章链接:** [点击 LEEEП 微信公众号链接阅读推送原文](#)

研究概要

近十年来，我国在应对气候变化和空气污染方面取得了初步成就，但仍面临着碳减排和空气质量改善的双重压力，协同减排潜力仍有待进一步释放。

本研究选取粤港澳大湾区为案例，有别于多数现有基于工程核算方法的减污降碳路径研究，本研究得益于动态多区域环境多要素融合的能源—经济模型，可进一步从部门关联、贸易通道、减排成本边际效果等经济分析的视角，探讨不同路径表象背后分阶段协同的关键机制和节点，弥补了已有文献核算分析视角的不足，重点关注以下问题：

- 气候目标将如何通过改变能源和工业结构而影响经济发展？
- 不同社会经济技术驱动因素对中长期碳排放水平有何贡献？
- 碳减排政策协同降低空气污染物排放的关键机制是什么？
- 粤港澳地区上述指标相比全国有何异质性特征？

本研究基于北京大学 LEEEП 团队自主开发的 IMED | CGE 能源经济可计算一般均衡模型，创新性地交叉融合了学界主流的分解法和回归法，动态模拟了全国和大湾区未来社会经济发展趋势和产业层面的碳和大气污染物排放路径。重点考察了碳减排的经济影响和驱动力，以及碳减排对于空气污染物减排的协同程度与边际影响，识别了协同减排的关键部门和作用通道，可为制定协同政策提供关键科学支撑。

研究背景

粤港澳大湾区是中国规模最大、经济最具活力的城市群之一，有望成为世界第四大湾区。粤港澳地区在实现经济与环境协调发展方面一直走在中国前列。随着减排的不断推进，区域气候和环境治理面临着日益增加的困难和快速增长的成本，迫切需要创新协作治理体系。粤港澳地区已经进入了实现生态和环境质量根本性改善的关键窗口期，肩负着引领我国其他地区探索实现生态文明发展模式的任务。同时，粤港澳地区也是连接丝绸之路经济带和 21 世纪海上丝绸之路的重要地区，在促进全球低碳和可持续发展上发挥着重要作用。

了解碳排放的驱动因素将有助于制定有针对性的减排政策。各种分解方法被广泛用于阐明各种因素如何驱动能源消耗和碳排放的变化。然而大多数现有的研究是基于历史数据，并且这些研究忽略了由产业链和省际贸易引起的碳排放的变化。与此同时，许多研究也已经量化了气候政策对空气质量的协同效益，然而多数研究对于气候政策对空气污染物的边际影响还缺乏深入的讨论。

以上文献回顾表明了识别深度脱碳改善空气污染的关键经济路径的迫切性。因此，本研究以粤港澳大湾区（GBA）和中国其他地区（ROC）为例，基于 IMED | CGE 模型，并耦合了分解法和回归法构建了评估框架，回答以上研究概要提出的研究问题。

研究方法

本研究以两区 IMED | CGE 模型为基础，结合分解分析和回归方法（图7.83），分析在不同严格程度的气候政策对能源-经济-环境的影响。

本研究首先构建了两区 CGE 模型，包括大湾区和中国其他地区，用于预测基准年 2015 年至 2050 年的碳排放路径和相关的经济能源环境发展趋势。同时，通过将 CGE 模型与回顾性研究中经常应用的分解分析和回归方法相结合，本研究进一步分析了主要驱动因素和减排机制。

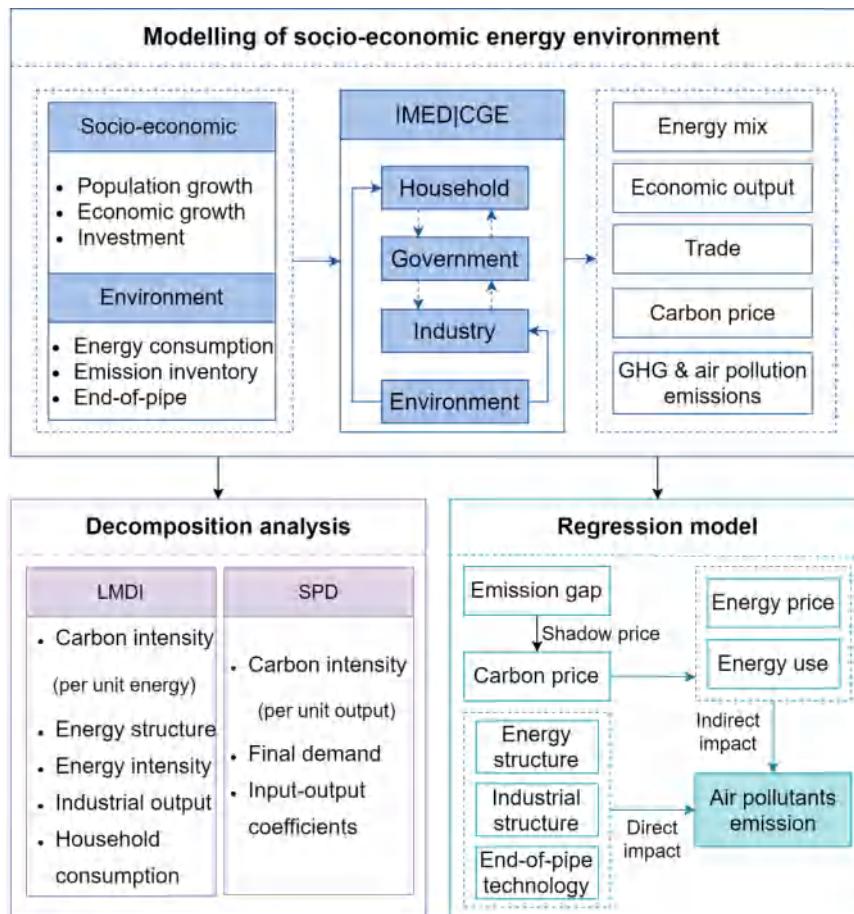


Figure 7.83: 粤港澳研究框架图

本研究从两个维度设置了 6 个情景来探究碳减排与空气污染末端控制的影响（表7.84）。气候

政策方面包括当前政策参考情景 (BaU)、温升 2 度和 1.5 度三个情景，末端控制包括末端去除率控制在 2020 年的冻结情景 (frozen) 和延续现有控制力度的情景 (CLE)。

	气候目标 BaU	2-Degree	1.5-Degree
末端控制	BaU_frozen	2-Degree_frozen	1.5-Degree_frozen
CLE	BaU_CLE	2-Degree_CLE	1.5-Degree_CLE

Figure 7.84: 情景设置

研究结果

能源消费和碳排放趋势

在没有任何碳排放限制的基准情景下 (BaU)，经济发展和人口增长的规模效应将刺激能源需求的增加。随着发电结构的低碳化和人口增长的放缓，碳排放量将在 2030 年达峰后缓慢下降。

实现 1.5 度目标要求在 2037 年左右将碳排放减少到 2020 年的一半，这意味着能源系统的深刻变革。化石燃料消费逐渐被电力取代 (图7.85a)。在 GBA 地区，服务业的电力需求占比最高，交通是电力需求增长的主要动力。

碳减排贡献部门存在明显的地区差异。如图 2d 所示，在 2050 年，与 BaU 相比，在 2 度目标下，交通将是 GBA 中最关键的部门，贡献了 26.6% 的减排量，其次是制造业。相比之下，在 ROC，在 2 度情景下，金属冶炼是减排的最大贡献者，其次是发电部门。

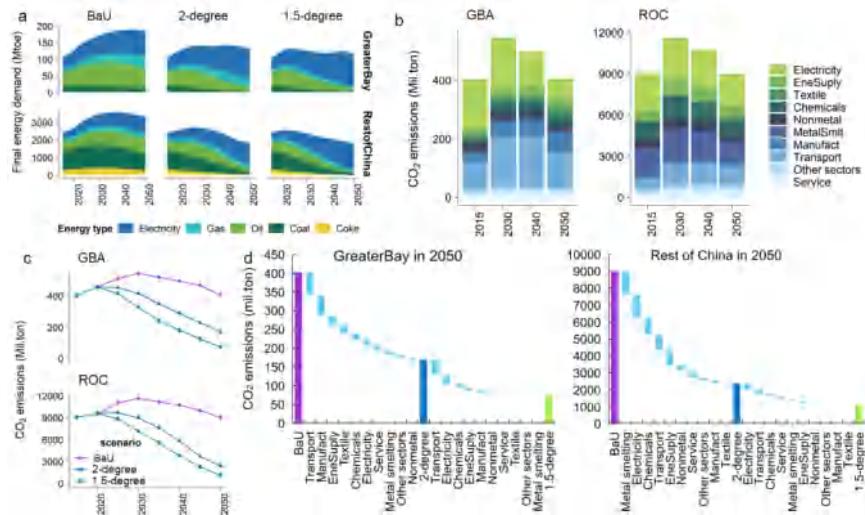


Figure 7.85: 最终能源消耗和二氧化碳排放量。 (a) 最终能源需求, (b) BaU 情景下各部门的 CO₂ 排放, (c) CO₂ 排放量, (d) 2050 年各部门的减排贡献 (按减排量排序)

产业结构变化与经济影响

在气候政策情景下 (图7.86)，碳减排提高了能源使用成本，使得能源密集型产业成本上升，产量下降，使得经济系统总产出和 GDP 出现了不同程度的下降。2050 年 GBA 和 ROC 总产出分别降低 2.3%-3.7% 和 3.6-4.9%，GDP 分别降低 3.3-4.3% 和 1.8%-3.2%。

碳强度和能源强度这两个指标随着技术发展而逐渐下降。GBA 的能源效率要高于 ROC，且在气候政策下会持续增加。从贸易上来看，GBA 地区碳强度较低而增加值较高的纺织业和电子产品出口增加，有利于降低 GDP 损失。而碳排放强度较高的水运和航空进口增加、省际调出显著降低，有利于缓解碳减排压力。

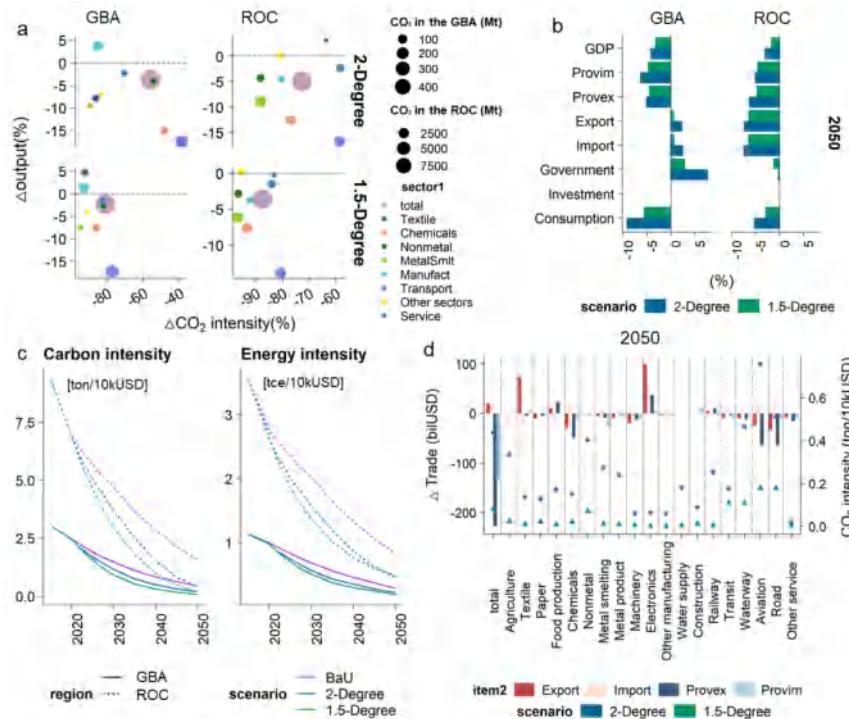


Figure 7.86: 气候政策下产业结构与经济影响。(a) 2050 年 2 度和 1.5 度情景下的产出和碳强度变化; (b) 2050 年与 BaU 相比, 1.5 度情景下的 GDP 变化; (c) 碳和能源强度; (d) 与 BaU 相比, GBA 贸易 (柱状图) 和 CO₂ 强度 (散点图) 变化

碳减排关键驱动因素分解

在时间尺度上来看，1.5 度情景下能源强度的降低是两个地区最主要的减排驱动力，同时能源结构优化的贡献将逐渐增加，而总产出的增加是拉动碳排放增长最大的因素（图7.87a）。

在部门角度，两个地区最重要的减排因素都是各部门碳排放强度 (CI) 的降低，但产业链层面减排路径差异显著。在 GBA，纺织品 (TEX) 和公路运输 (TRD) 是核心减排部门。相反，在 ROC，电力 (ELE) 和服务 (CSS) 部门对直接碳减排贡献最大。在 GBA 中，由于电力行业碳排放强度的降低，从电力行业 (ELE) 到服务行业 (CSS) 的供应链可以减少 530 万吨碳排放。在 ROC，从电力部门到非金属到建筑 (ELE-ONM-CNS) 的三阶供应链减少了 1.25 亿吨的碳排放。

与碳强度效应 (CI) 的关键贡献相比，投入产出系数 (IO) 和最终能源需求 (FD) 这两种因素对于碳排放变化的影响在两个地区都相对不大。

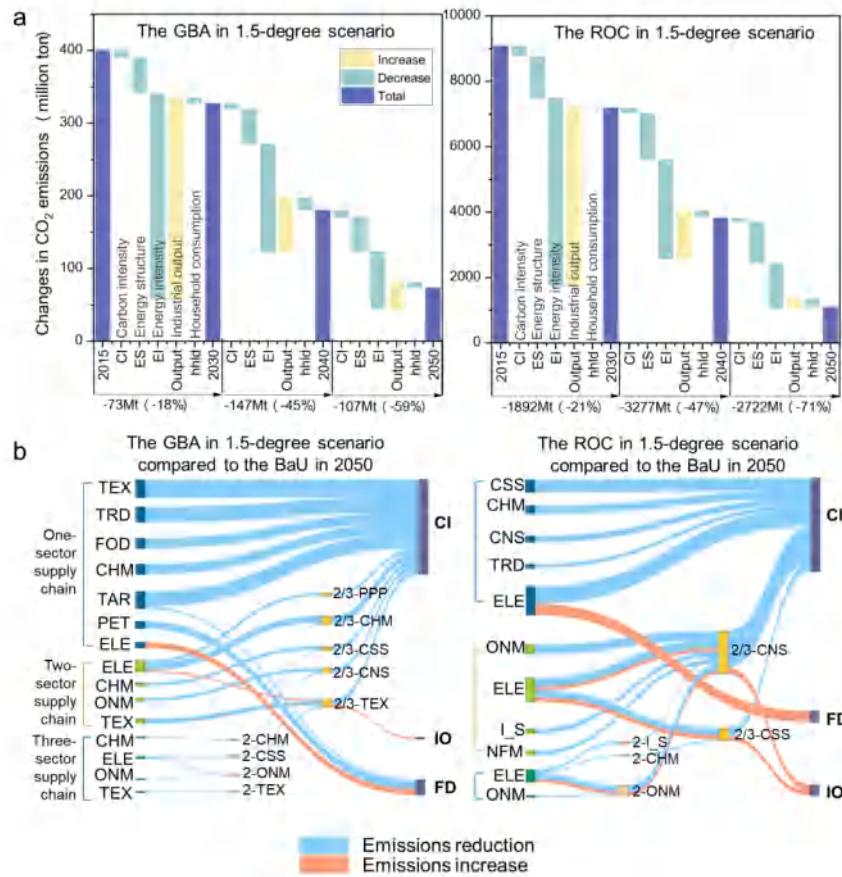


Figure 7.87: 基于 (a) LMDI 和 (b) SPD 方法 1.5 度情景下碳减排的关键贡献因素。在 b 中, 左边的节点是提供原材料的供应部门 (不同颜色区分不同部门数量的供应链), 数字符号代表行业在供应链中的位置 (例如数字"2" 或 "3" 代表该部门在供应链中处于第二或第三位置), 供应链末端的部门是最终需求部门。"CI" 代表碳强度效应, "IO" 代表投入-产出系数变化效应, "FD" 代表最终需求效应。

气候政策对于大气污染物的协同减排效应

在施加了碳减排的约束条件后, 空气污染物排放出现了不同程度的下降。NO_x、SO₂ 主要来源于交通与发电部门化石能源的燃烧, 气候情景下协同减排效益较大。而 VOC、NH₃、一次 PM_{2.5} 与碳减排协同效果较差, 主要来自于过程排放, 依赖于末端减排控制。随着气候目标和末端控制变得更加严格, 不同空气污染物的部门排放占比也将发生变化。

考虑到协同减排效果和单位减排成本, 本研究进一步确定了在减排时具有较高优先级的部门 (图7.88b)。结果发现, 减排成本较低的部门通常协同减排效果也较高, 这意味着针对性的协同治理有助于降低减排成本。例如, 对于 NO_x, 在 1.5-degree_{frozenTWTRD}

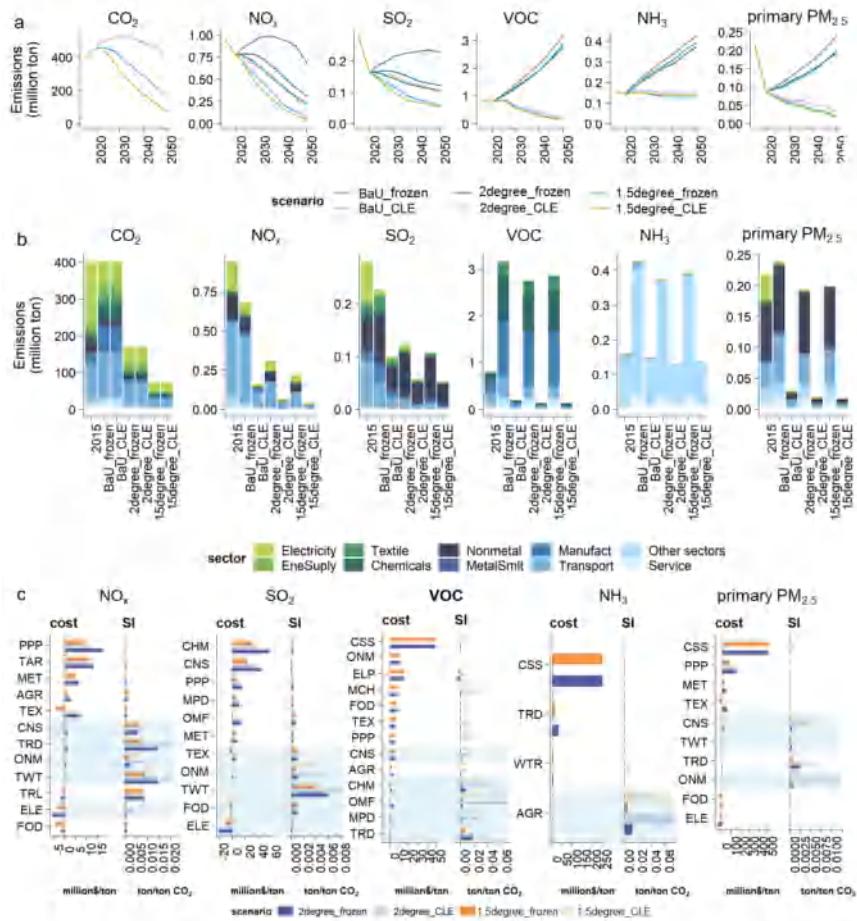


Figure 7.88: 粤港澳地区大气污染物排放和减排成本。(a) 总排放趋势, (b) 2015 年和 2050 年所有情景下的分部门排放, (c) 2050 年减排成本和协同效应指数。其中单位减排成本被定义为每单位减排量的部门产出损失。协同指数 (SI) 定义为部门空气污染物减排量与二氧化碳减排量的比率。这里蓝色阴影所覆盖的部门占总排放量的 5% 以上, 具有较高的协同效益和较低的减排成本

气候政策对大气污染物减排的边际效应

本研究计算了基于 CLE 假设的 1.5 度和 2 度下, 碳政策和其他解释因素对五种空气污染物排放的边际影响。结果显示, 更严格的气候政策将对空气污染物减排产生更显著的影响。此外, 我们发现碳影子价格不同阶段的影响不一。

在 2030 年后, 末端去除对于一次 PM_{2.5}、SO₂、NO_x 和 NH₃ 减排起着更重要的作用, 特别是在相对不严格的 2 度温升情景下 (图7.90)。此外, 末端去除对 VOC 的影响是模糊的, 可能是因为 GBA 仍然有较多的化工产业, 2030 年的排放与 2015 年相比几乎没有变化 (图7.89)。

Climate target	Variable	Primary PM _{2.5}	SO ₂	VOC	NO _x	NH ₃
1.5°C	Carbon shadow price	-0.25*	-0.29**	-0.12	0.03	0.07
		(0.13)	(0.12)	(0.36)	(0.37)	(0.08)
	EndofPipe _n	0.05	0.51	0.08	-0.83	-0.04
		(1.60)	(0.79)	(0.82)	(1.10)	(0.16)
	EnergyStructure	-11	-14	-18	4.3	3
		(29.00)	(30.00)	(54.00)	(44.00)	(11.00)
	IndStructure	0.67	0.03	-0.11	0.77	-1.50**
		(1.50)	(1.50)	(2.60)	(2.20)	(0.57)
	Constant	5.10	4.10	6.80***	9.40***	4.80***
	Observations	13	13	13	13	13
2°C	Adjusted R ²	0.90	0.87	0.04	0.80	0.73
	F Statistic	30.0***	21.0***	1.1	13.0***	9.3***
	Carbon shadow price	-0.1	-0.1	0.01	0.16	0.07
		(0.12)	(0.10)	(0.31)	(0.16)	(0.05)
	EndofPipe _n	-1.7	-0.39	-0.18	-0.96**	-0.04
		(1.30)	(0.53)	(0.59)	(0.41)	(0.08)
	EnergyStructure	0.25	-0.56	-13.00	0.23	0.19
		(32.00)	(25.00)	(62.00)	(35.00)	(14.00)
	IndStructure	1.1	0.53	0.32	0.62	-1.40**
		(1.10)	(0.88)	(2.20)	(1.30)	(0.50)
	Constant	12.00**	7.00***	7.20***	9.30***	4.80***
	Observations	13	13	13	13	13
	Adjusted R ²	0.90	0.88	-0.07	0.84	0.65
	F Statistic	29.0***	22.0***	0.8	17.0***	6.5**

Notes: values in the first line are estimators of β , γ , δ , and θ . Values in parentheses are stand errors. Stars are the level of significance in the t-test. The p-value classification are: *p<0.1, **p<0.05; ***p<0.01

Figure 7.89: 2015-2030 年粤港澳地区气候政策对于空气污染物的边际影响

Climate target	Variable	Primary PM _{2.5}	SO ₂	VOC	NOx	NH ₃
1.5°C	Carbon shadow price	-0.51*** (0.10)	-0.07*** (0.01)	-0.50*** (0.10)	-0.63*** (0.11)	0.02*** (0.01)
	EndofPipe _n	1.60 (2.20)	-1.80*** (0.08)	-1.10 (0.88)	-1.80** (0.66)	-0.35*** (0.04)
	EnergyStructure	0.82 (0.91)	0.05 (0.23)	0.13 (3.20)	1.4 (2.50)	0.04 (0.19)
	IndStructure	3.90** (1.70)	0.67 (0.46)	3.3 (6.50)	0.67 (5.20)	-1.00** (0.38)
	Constant	-0.14 (9.00)	12.00*** (0.29)	14.00*** (3.10)	17.00*** (2.10)	6.20*** (0.12)
	Observations	20	20	20	20	20
	Adjusted R ²	0.99	1.00	0.94	0.98	0.92
	F Statistic	478.0***	2016.0***	71.0***	247.0***	56.0***
	Carbon shadow price	-0.16*** (0.05)	-0.06*** (0.02)	-0.55*** (0.06)	-0.51*** (0.06)	0.03*** (0.01)
	EndofPipe _n	-6.20*** (1.20)	-2.50*** (0.18)	-0.67 (0.59)	-2.10*** (0.36)	-0.48*** (0.04)
2°C	EnergyStructure	4.3 (2.70)	1.1 (1.20)	5.50 (5.00)	7.10* (3.60)	0.00 (0.41)
	IndStructure	2.5 (3.10)	0.06 (1.30)	-0.18 (5.70)	-1.60 (4.20)	-0.86* (0.48)
	Constant	31.00*** (4.90)	15.00*** (0.68)	12.00*** (2.10)	17.00*** (1.20)	6.70*** (0.12)
	Observations	20	20	20	20	20
	Adjusted R ²	0.98	0.99	0.97	0.99	0.96
	F Statistic	255.0***	586.0***	151.0***	533.0***	122.0**

Notes: values in the first line are estimators of β , γ , δ , and θ . Values in parentheses are stand errors. Stars are the level of significance in the t-test. The p-value classification are: *p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01

Figure 7.90: 2030-2050 年粤港澳地区气候政策对于空气污染物的边际影响

结论与展望

本研究的结果揭示了气候政策和空气污染之间的机制，为协同治理提供了有益的见解：

- 经济损失和减少碳排放的压力可以通过出口高附加值、低碳排放强度的产品来部分解决，但需要注意它们造成的空气污染物排放。
- 发达的交通网络是大湾区经济发展的纽带和支撑，但它也是碳排放最高的部门，同时也排放了大量的污染物。为了实现交通部门的减排，需要采取各种措施，如提高排放标准，增加电气化和促进公共交通。
- 降低能源强度，即提高能源使用效率和优化产业结构，是减少碳排放的重要动力。因此，政府应加大对科技创新的支持，加快制造业结构调整，发展先进制造业。长期来看，气候政策对大气污染物的协同减排效果将更加显著，要注意协同控制，优先考虑重点行业，降低减排成本。

本研究也有一些局限性。首先，本研究使用的 IMED | CGE 模型考虑了非化石能源发电，但只是作为一个大类，而没有区分非化石能源的具体类型。其次，本研究中工业过程相关空气污染物排放简化为由产出驱动。第三，本模型没有考虑控制大气污染物的成本。

7.9.4 IMED 研究 | 京津冀减污降碳政策的异质性协同效应和互馈影响

- **原文标题:** Mutual effects of CO₂ emission reduction and air pollution control policies in beijing-tianjin-hebei region [94]
- **期刊:** Frontiers in Environmental Science
- **发表年份:** 2022
- **作者:** Kai Wu, Xiaorui Liu, Hancheng Dai, Silu Zhang, Ziqiao Zhou, Teng Ma, Chaoyi Guo, Xiaoja He*, and Yan Ru Fang*
- **文章链接:** [点击 LEEEP 微信公众号链接阅读推送原文](#)

研究概要

减污降碳协同控制是解决气候变化和环境污染双重挑战的一个基本战略。本研究选取生态文明先行示范区京津冀地区作为研究对象，聚焦于未来中短期（至 2030 年）时间尺度，重点关注以下几个问题：

1. 倚重末端治理的减污政策还有多少潜力？
2. 双碳政策的实施能否协同实现深度减污目标？
3. 减污降碳政策应怎样协同实现减排效果最大化？

通过深度耦合北京大学 LEEEP 团队自主开发的 IMED 能源经济模型、IMED 人群健康模型和 IIASA 开发的空气污染物排放模型 (GAINS)，定量分析碳减排目标和空气污染控制技术的环境改善和碳减排效果，本研究重点考察通过碳减排、污染物排放、空气质量改善和人群健康影响等方面来刻画不同政策带来的协同效益，以探究碳中和目标与空气质量改善目标之间的相互协同影响，为制定气候与环境协同控制战略的经济可行性路径提供参考，同时也为我国其他省市提供相应的研究范式和政策参考。

研究背景

京津冀地区 (BTH) 作为中国北方的“首都经济圈”，一直是全球发展最快的经济区之一，但同时也面临着严重的碳排放和空气污染物排放问题。2019 年，京津冀地区的二氧化碳排放量占中国碳排放总量的 12%，京津冀及周边地区的年平均 PM_{2.5} 浓度为 38 至 51 μg/m³，远高于世界卫生组织新指南空气质量 5 μg/m³ 的标准。这表明，京津冀地区在控制碳排放和环境污染方面面临着很大挑战。

为缓减气候变化和空气污染问题，中国推出了许多政策与行动。20 世纪 90 年代末期，中国的酸雨问题第一次引起了公众的高度关注，2013 年“雾霾”成为了全国性的热门话题，相应的《酸雨控制区和二氧化硫污染控制区划分方案》、《打赢蓝天保卫战三年行动计划》、《大气污染防治行动计划》以及“大气十条”等污染物防控方案相继执行，对大气防控产生了突破性进展。中国政府 2020 年 9 月提出了 2030 年前碳达峰和 2060 年前碳中和的气候承诺，“双碳”目标正成为中国大气质量根本改善的重要推动力。

减污降碳协同增效路径成为解决气候、环境问题的主力军。2022 年 6 月，生态环境部等七部门印发的《减污降碳协同增效实施方案》提出，把实现减污降碳协同增效作为促进经济社会发展全面绿色转型的总抓手。此外，前人研究也探讨了低碳转型和改善空气质量的相关问题。有研究指出协同控制对于实现碳减排目标和控制空气污染至关重要。能源强度提高、产业规模结构调整和电气化可以实现中国钢铁、水泥等重工业的空气污染和碳排放减缓的双重效益。碳减排措施可能反而会

促进颗粒物的形成，但引入可用的空气污染末端控制技术可以抵消这些负面效益，而交通部门的能源结构调整可实现空气质量、气候和健康的协同效益。

当前已有研究主要是单方面探讨减污或降碳政策的社会经济影响和健康影响，或单向探究碳减排对空气污染改善的协同作用，鲜有研究分析污控政策对减碳效果的反向协同效应。大多数现有研究缺乏对各种协同效益的反向评估，即空气污染控制政策对碳减排、避免过早死亡、健康效益和控制成本的影响研究还处于空白。在此背景下，本研究将以京津冀地区为例，探讨减碳和降污政策分别对环境质量改善及碳减排的协同效益及其互馈作用。

研究方法

本研究旨在填补上述研究不足，主要关注碳中和目标和空气污染控制政策，以寻找京津冀地区气候减缓和空气质量改善的协同路径。为此，研究采用了一个综合分析框架来评估碳中和目标和空气质量改善政策的协同效益，通过顺次深度耦合北京大学 LEEEP 团队自主开发的 IMED|CGE 模型、IIASA 研发的 GAINS 模型以及人群健康影响评估模型 (IMED|HEL)，识别在京津冀地区协同控制空气污染物和碳排放的成本优化路径。总体研究框架如图7.91所示。

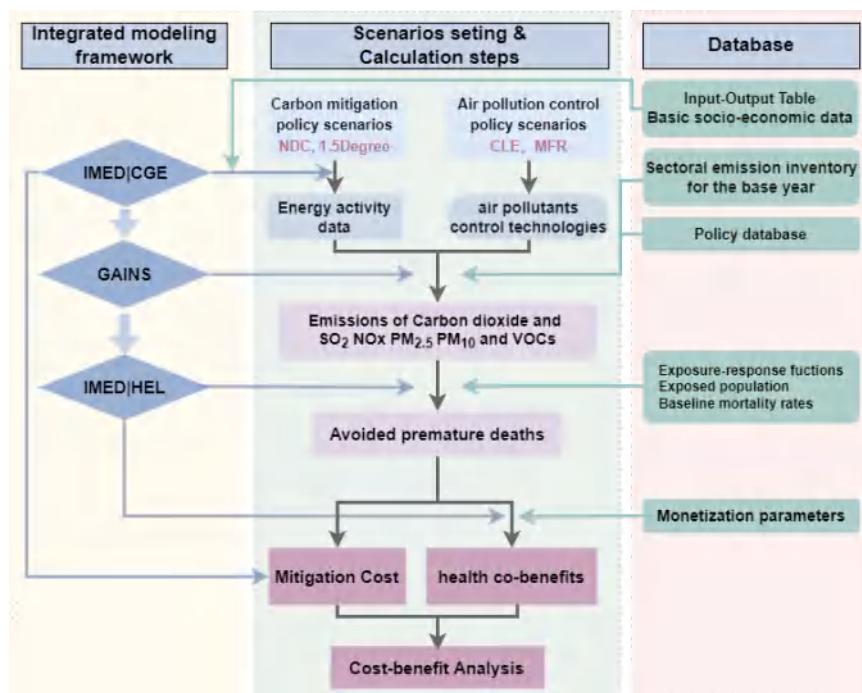


Figure 7.91: 综合评估框架

情景设置

本研究设计了三个情景以综合评估碳中和目标与空气质量改善目标的双向协同效益、协同控制战略的经济可行性以及成本优化路径。

第一个是参考情景 (REF)。在参考情景下，我国碳排放强度满足 NDC 目标，2030 年二氧化碳排放强度相较于 2005 年下降 65%；对空气污染物的控制维持现有的措施和相关政策。

第二个是空气污染控制情景 (CAP)。在 CAP 情景下，气候减缓行动与 REF 情景相同，也即没有加入新的控制策略；设置了空气污染排放限额，主要是通过实施严格的末端控制技术来实现。

第三种是与 1.5 度目标一致的气候减缓政策情景 (1.5D)。在 1.5D 情景下, 京津冀地区到 2030 年的碳排放将被严格控制, 符合至本世纪末将全球气温上升幅度限制在工业化前水平的 1.5 摄氏度以内, 主要是通过模型内部优化能源结构及产业结构来实现。

研究结果

不同情景下碳排放与空气污染物排放变化趋势

不管是气候减缓政策还是空气污染控制政策, 都可以实现京津冀地区的空气污染物的大幅减排。与 REF 相比, 两种不同政策情景均可以实现京津冀地区碳及污染物的减排 (图7.92)。从碳排放趋势可以发现, 污染物控制政策对碳的减排协同作用相对较低, 而以减碳为目标的 1.5D 情景实现了深度的减碳效果 (图7.92A)。三种情景中, 空气污染物排放从 2017 年到 2030 年均呈现下降趋势, 而只有 REF 的 VOCs 排放量在 2025 年略有增加 (图7.92B)。这主要是因为 VOCs 在现有的控制政策中没有得到足够的重视; 此外, 其成分复杂且来源广泛, 也造成了 VOCs 减排的困难。在 REF 情景中, 随着 GDP 和能源消耗持续增长, 2030 年京津冀地区的 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 排放量较 2017 年均减少了 20% 以上, 这表明当前空气污染控制政策对污染物的防控仍然有效。在 1.5D 情景下, 2030 年空气污染物排放量相较于 2017 年减少了 40% 左右。CAP 情景则使得 SO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 得到了有效的控制, 减排力度高于 1.5D 情景。这表明气候减缓政策可以同时减少氮氧化物和 VOCs 的排放。然而, 对于 SO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} , 直接的空气污染控制政策可能更为有效。

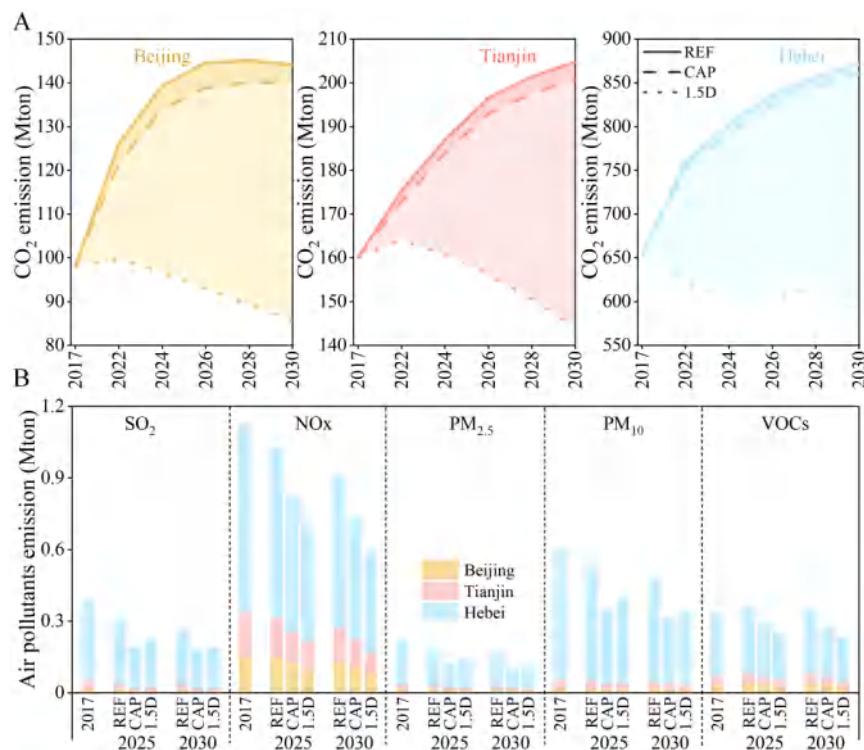


Figure 7.92: 京津冀地区 2017-2030 年 CO₂ (A) 和空气污染物 (B) 排放

80% 以上的碳排放来源于工业和能源供应部门, 交通部门是重要的污染物排放源 (图7.93)。在 REF 中, 各部门的碳排放随着时间的推移呈现出增长趋势, 且部门排放份额在年际间比较接近。

能源供应部门和工业部门是碳排放的重要来源，各占京津冀地区碳排放总量的 40% 左右。与 REF 相比，1.5D 情景中碳减排最多的是能源供应部门，2030 年的减排量达 179.5 Mton (35.2%)。而在 CAP 情景中，其碳排放量在各部门中与 REF 相比差异很微弱，在居民部门和交通部门中有少量的碳减排效果。三种情景中 SO₂ 排放量最大的都是居民、能源供应和工业部门，这主要是由于煤炭的高消耗。由此看来，居民部门是京津冀地区 SO₂ 减排潜力最大的部门。对于氮氧化物和挥发性有机化合物，排放最多的是交通部门，主要是由于京津冀地区交通强度高，另外交通部门中化石燃料的使用占比较大。然而，PM_{2.5} 和 PM₁₀ 主要来源分别来自居民和工业部门（图7.93B）。此外，1.5D 中能源供应和运输部门的空气污染物减排量低于 CAP。这表明大气污染控制在这两个部门中可能需要重点关注末端污染控制技术。CO₂ 减排政策对 NO_x 和 SO₂ 有比较好的协同作用，主要是由于它们与 CO₂ 有同根同源性。

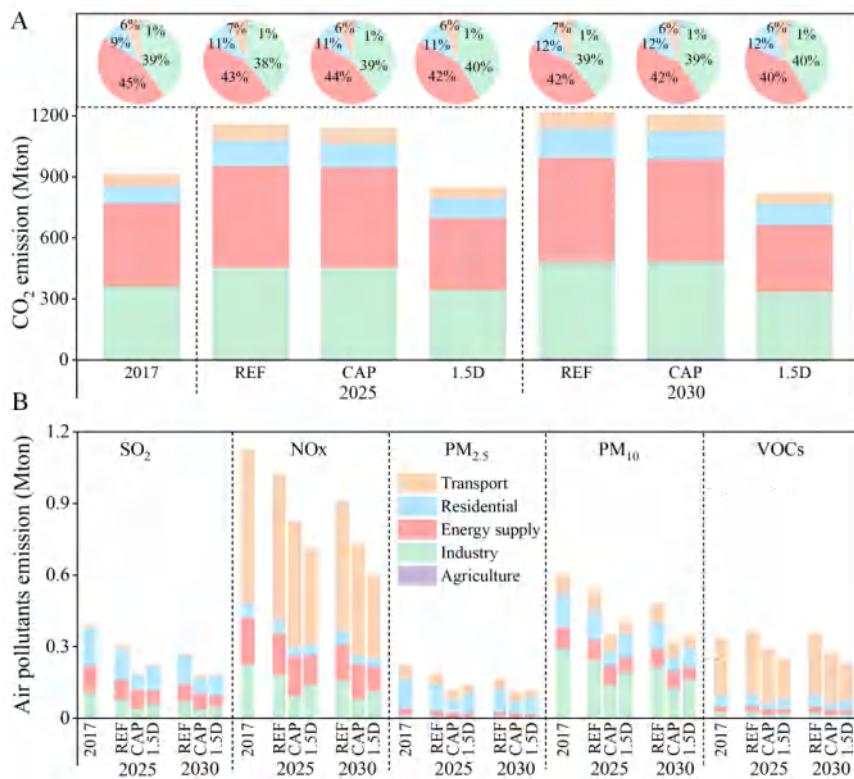


Figure 7.93: 京津冀地区分行业 CO₂ (A) 和大气污染物 (B) 排放。图 A 内嵌图为 CO₂ 在各部门排放占比

气候减缓目标和空气污染政策的经济能源影响

气候减缓目标和空气污染政策都会对经济产生短期的负面影响（图7.94A）。1.5D 情景下，各部门产出变化要比 CAP 情景下大得多。2030 年，相对于 REF 情景，在 CAP 情景下，北京、天津和河北总产出分别减少 55.4、58.7 和 98.9 亿美元。而在 1.5D 情景下，北京、天津和河北的总产出分别减少了 447、563 和 1224 亿美元。北京由于略清洁的能源结构和相对先进的技术结构，致使两种政策所带来的经济损失相比天津和河北较少。从部门角度来看，在 1.5D 情景下，三个地区能源供应部门的产出相对于 REF 情景有明显的下降，净下降值从天津的 265 亿美元到北京的 421

亿美元不等。在北京、天津和河北，CAP 相对于 REF 的产出减少主要在于运输部门。与 REF 相比，在 1.5D 情景中，北京运输和能源供应部门产出减少量接近，减少的产值分别为 374 亿美元和 421 亿美元。然而，在 1.5D 情景下，工业和居民部门的产出相对于北京的 REF 有所增加。

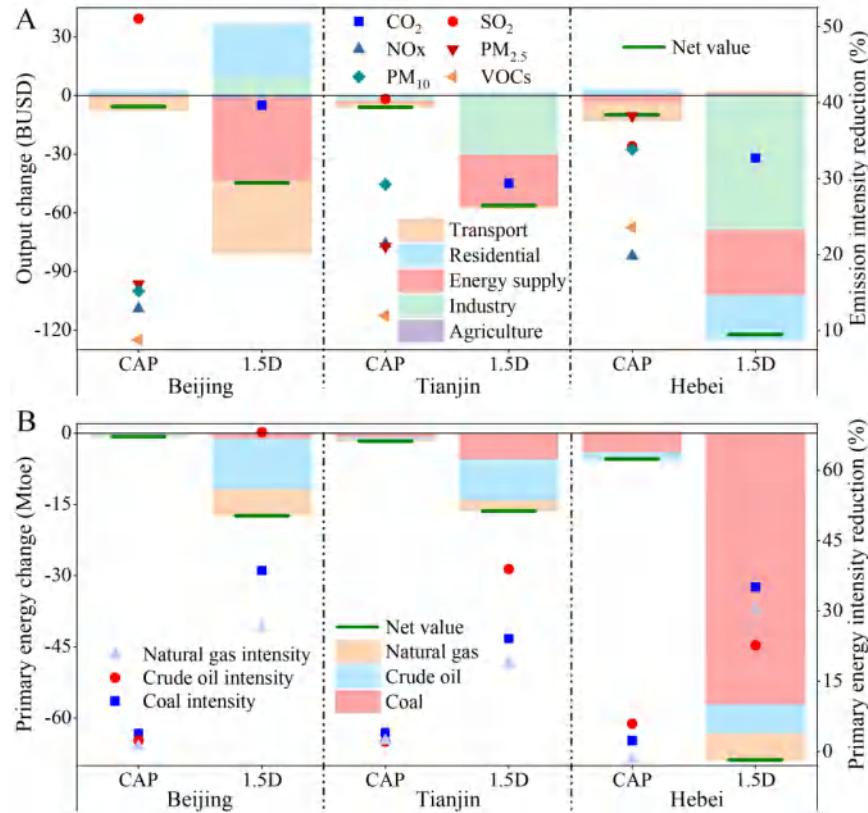


Figure 7.94: (A) 与 REF 相比，2030 年 CAP 和 1.5D 情景与 REF 相比北京、天津和河北不同部门的产出变化和排放强度变化；(B)2030 年 CAP 和 1.5D 情景与 REF 相比北京、天津和河北一次能源消费和能源强度变化

降碳政策对能耗削减的影响远大于减污政策。在 1.5D 情景下，为实现气候目标，北京、天津和河北在 2030 年的一次能源消费分别减少 1740 万吨 (-45.0%)、1640 万吨 (-29.1%) 和 6890 万吨 (-32.7%)，而在 CAP 情景下只有 75 万吨 (-1.9%)、170 万吨 (-3.0%) 和 260 万吨 (-2.6%) (图7.93B)。两种情景之间的重大差异主要源于碳排放与能源消费紧密相连，气候变化目标要求大幅减少化石燃料；而空气污染控制政策主要集中在末端技术上。此外，三个地区的能源消耗减少潜力也不同。在 1.5D 情景下，河北的煤炭消费减排潜力最大 (57.3Mtoe)，占总减排量的 83.2%，而北京的煤炭消费较低，其减排潜力最小 (7.3%)。然而，石油消费在北京 (61.0%) 和天津 (52.5%) 的减排潜力最大，反映了各省的异质性。

气候减缓政策和空气污染控制政策的相互协同影响

在 CAP 情景下，北京的空气污染控制政策具有相对较高的 CO₂ 协同减排效果 (图7.95A)。从研究区域的角度来看，本文发现北京和天津的 VOCs 减排对 CO₂ 的减排有很高的影响。在北京，碳排放和空气污染物相对减排量的比例从 5% 到 30% 不等；在天津，从 5% 到 16% 不等；在河

北, 从 3% 到 8% 不等。京津冀地区和河北的数值是一致的, 因为河北的排放在京津冀地区的总排放中占主导地位。此外, 结果表明, 能源供应和运输部门对北京地区的 CO₂ 削减有更高的协同效应, 而工业部门的协同效应最小。然而, 在能源供应部门, PM_{2.5} 的减少对 CO₂ 的缓解有很大的潜力, 而对于运输部门, 四种空气污染物对 CO₂ 的减少作用几乎相同。

在 1.5D 情景下, 所有类型的空气污染物都与各地区和各部门的 CO₂ 削减有正向影响 (图7.95B), 这意味着 CO₂ 缓解政策具有空气污染物削减的协同效应。从区域角度看, 天津和北京在 CO₂ 减排政策下的空气污染减排量高于河北, 尤其是北京, 这可能是由于能源结构和产业构成的差异造成的。

从部门的角度来看, 与其他三个部门相比, 能源供应部门的碳减排量和空气污染物减排量最高。在居民部门, 氮氧化物和二氧化硫, 与 CO₂ 减排有很好的协同作用, 因为这两种空气污染物与 CO₂ 有相同的同根同源性, 主要来自化石燃料的燃烧。此外, 交通部门各种污染物的协同效应差异很大, 主要是由于交通部门不同大气污染物的排放源不同。

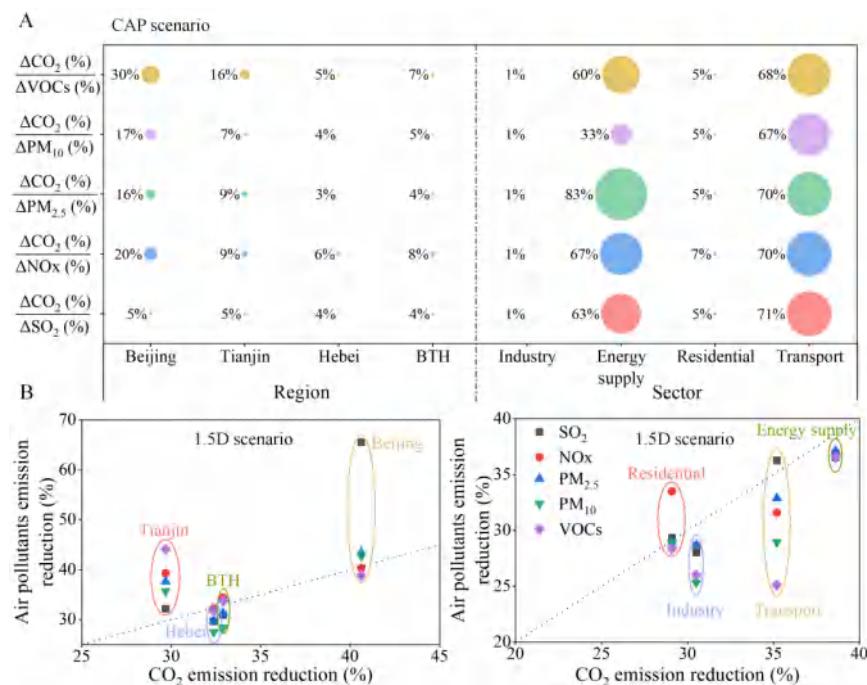


Figure 7.95: 区域和行业视角下, CAP 情景 CO₂ 减排对大气污染物变化的贡献率 (A), 区域和行业视角下 2030 年大气污染物排放和 CO₂ 排放变化与 REF 的贡献率 (B)

气候目标和空气质量改善目标对健康影响的协同效益

气候减缓政策和空气污染控制政策都避免了与 PM_{2.5} 暴露相关的过早死亡, 三个地区的空气质量得到了明显改善 (图7.96A)。在 CAP 方案中减少的与 PM_{2.5} 暴露有关的死亡 (相对于 REF 估计减少了 3488 例), 在京津冀地区略高于 1.5D 方案 (3466 例)。这意味着末端污染控制技术仍有很大的近期减排潜力和健康影响。由于人口众多, 污染严重, 河北获得了最多的避免死亡数量 (相对于 REF, CAP 和 1.5D 分别为 2881 和 2455), 其次是北京 (相对于 REF, CAP 和 1.5D 分别为 499 和 724) 和天津 (相对于 REF, CAP 和 1.5D 分别为 108 和 285)。值得注意的是, 北京和天津在 1.5D 中避免的过早死亡人数多于 CAP, 而河北得到的结果则相反。这些结果表明,

空气污染控制政策对高水平的 PM_{2.5} 浓度有重大影响。

结果表明，在每个地区，气候减缓政策的成本比空气质量改善的成本都要高（图7.96B）。与 REF 相比，北京、天津和河北在 CAP 和 1.5D 情景下的净经济变化几乎为负值，只有河北在 CAP 情景下的净值为正值。这表明河北控制大气污染物排放的健康效益可以抵消政策成本，这表明大气污染控制政策在空气质量较差的地区具有明显的健康效益。然而，在北京和天津的 CAP 方案下，净经济价值接近于零。这说明在空气质量相对较好的地区，环境改善政策带来的健康效益很低。相反，在 1.5D 情景下，它不能用健康效益来抵消所有三个地区的气候减缓成本，特别是在北京，其经济损失（120 亿美元）远远超过健康效益（15.7 亿美元）。这一现象表明，2030 年之前的气候减缓政策很难体现出健康效益，而在严格的气候变化减缓政策下，如碳中和及 1.5°C 气候目标，健康风险将长期下降。

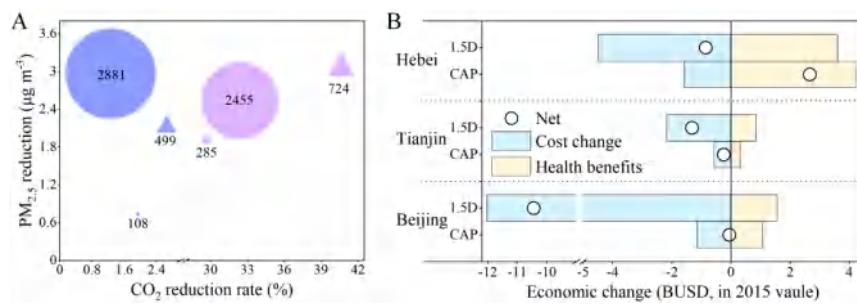


Figure 7.96: (A) 与 REF 相比，CAP 和 1.5D 情景下 CO₂ 排放减少和空气质量改善的协同效益，圆的大小表示与 REF 相比避免的过早死亡。(B) 在三个区域的两个情景中与空气质量相关的健康利益和减少 CO₂ 排放的经济效益

研究结论

本研究通过深度耦合 IMED | CGE 模型、GAINS 空气污染控制模型和 IMED | HEL 健康影响评估模型提供了一个综合分析框架，以评估京津冀地区气候减缓和空气污染控制措施的整体影响。本研究量化了三种情景下不同政策对碳和空气污染物排放以及减排经济成本的影响，探讨了减污降碳政策的相互影响，分析了不同政策的成本效益，以期为制定更合理的减污降碳政策提供决策参考。

研究表明，京津冀当前力度的减污降碳措施难以达到碳中和目标或空气质量标准。降碳和减污政策是相互影响的。从区域来看，减污降碳政策在北京和天津的协同减排效果相对高于河北。此外，从部门角度看，减污政策在能源供应和交通部门的减污与降碳的协同度最好而降碳政策在能源供应和居民部门与空气污染减排的协同效应最好。

研究还发现，在 PM_{2.5} 浓度较高的情况下，空气污染控制政策具有更明显的健康效应。在京津冀地区，CAP 方案中减少的与 PM_{2.5} 暴露有关的过早死亡（相对于 REF 估计减少了 3488 例）略高于 1.5D 方案（3466 例）。然而，脱碳政策将在减污最后“1 微克”的攻坚阶段发挥突出作用，实现深度减排。此外，能源系统转型带来的短期经济冲击使 2030 年前气候减缓政策的成本很难仅靠健康效益所抵消。

这些结果显示，尽管气候减缓政策可以有很好的协同空气污染减排效果，但它们在经济上可能无法承受。为了以较低的成本更好地实现气候和空气质量目标，这两类政策应该在各部门和地区之间更好地协调。本文建议短期内强调减污政策以获得更大的健康效益，中长期混合使用减污降碳措施，实现深度减污的同时有序完成清洁能源平稳转型，特别是在能源供应和运输部门，以最大限度

地发挥协同作用。此外，考虑到不同的效益成本比和区域财政状况，需要有必要的财政激励措施。

7.9.5 LEEEP 研究 | LEEEP 组研究成果支撑 IPCC AR6 多个关键内容

- **原文标题:** The IPCC Sixth Assessment Report
- **出版物:** IPCC 第六次评估报告 (AR6)
- **发表年份:** 2022
- **作者:** IPCC, Hancheng Dai et al.
- [点击 LEEEP 微信公众号链接阅读推送原文](#)

在 IPCC 的组织领导下，来自世界各地的顶尖学者定期评估气候变化前沿研究成果，为各国决策者和公众提供有关气候变化的最新科学认知，包括气候变化的影响、适应与脆弱性和减缓气候变化的政策选择等方面内容。IPCC 评估报告对人类未来经济社会发展路径和应对气候变化对策起到导向作用，已分别于 1990、1995、2001、2007 和 2014 年发布了五次评估报告，第六次评估报告 (AR6) 自 2021 年底开始陆续发布，其中聚焦温室气体深度减排政策评估和决策建议的第三工作组报告《气候变化 2022：减缓气候变化》于 2022 年 4 月初发布。此次第三工作组报告系统全面地归纳和总结了第五次评估报告 (AR5) 发布以来国际科学界在减缓气候变化领域取得的新进展，科学地评估了全球温室气体排放、不同温升水平下的减排路径以及可持续发展背景下的气候变化减缓和适应行动，提出以下几点重要结论：

1. **2010-2019 年间，全球年均温室气体排放处于人类历史最高水平；**
2. **除非所有部门都立即、深度减排，否则 1.5°C 温控目标将不能实现；**
3. **实施有力度和高效的减排，需要政府和社会协同运用各类政策措施，加强气候治理，促进系统性变革；**
4. **快速深度的减排需要弥补资金缺口并促进技术创新；**
5. **加速气候行动对实现可持续发展至关重要。**

北京大学环境学院能源环境经济与政策研究室 (LEEEP) 课题组自 2017 年成立以来，在科技部重点研发计划、国家自然基金委国际 (地区) 合作交流项目、面上项目等国家级项目的支持下，自主研发了适用于国家、省级及全球多层次“双碳”政策分析的 IMED 模型。该模型为全球少数几个由中国学者自主设计研发的主流复杂系统综合评估模型之一，旨在以系统、定量的方法模拟中长期内经济增长、产业转型等对能源和资源消耗、环境污染排放及脱钩等的影响，以寻求促进绿色低碳转型的协同度高、效益成本比高的最佳能源环境与气候政策组合，为减缓转型的负面影响并改善全球环境和人类健康水平提供决策支撑，助推我国及全球实现碳达峰、碳中和及可持续发展目标。

近年来，LEEEP 团队基于 IMED 模型系统分析了经济发展与资源投入和空气污染的脱钩机制，评估了不同减排政策组合的经济代价和协同效益，取得了丰硕的成果。在 Cell 子刊 One Earth 等国内外能源环境经济与政策领域核心期刊上发表研究论文 80 余篇，为我国及全球绿色低碳转型路径优化提供了坚实支撑，研究成果受到国内外同行的广泛关注。据统计，在本次发布的 IPCC AR6 系列报告中，LEEEP 课题组基于 IMED 等综合评估模型所发表的 15 篇研究论文被正面引用 21 次，相关论文涉及绿色低碳转型政策减排效果、经济代价和协同效益评估分析等重要议题，研究成果支撑 IPCC AR6 多个关键内容。引用章节贯穿了第一工作组、第三工作组报告的 11 个关键章节，如聚焦社会经济系统全局性分析的第二章（排放趋势与驱动因素）、第三章（长期减缓路径）、第四章（近中期减缓与发展路径）、第五章（减缓的社会服务需求），以及侧重关键高能耗部门的第六章（能源系统）、第十章（交通部门）及第十一章（工业部门）。

受到 IPCC 贯穿始终的正面引用既表明国际同行对 LEEEП 组研究工作的高度认可和关注，也表明 LEEEП 组针对绿色低碳转型前沿议题出色的问题识别能力和研究水平。由于突出的研究业绩，LEEEП 课题组戴瀚程研究员受 IPCC 委任，作为贡献作者参与撰写《IPCC AR6》第三卷中关于全球温室气体排放社会经济驱动力等方面内容，并两次受国家政府部门邀请代表中方审阅《IPCC AR6》第三卷决策者摘要，为国际和国内绿色低碳转型重大战略政策评估做出了一定贡献。

1. 【WGI, 第六章、WGIII, 第三章、第十三章】 Xie, Y., H. Dai, X. Xu, S. Fujimori, et al., 2018: Co-benefits of climate mitigation on air quality and human health in Asian countries. *Environment International*, 119, 309–318. 文章基于 IMED/HEL 健康模型量化了减缓气候变化对亚洲空气质量和人类健康的共同效益，被 WGI, 第六章（短寿命气候影响因素）、WGIII, 第三章（长期减缓路径）、第十三章（国家及亚国家政策制度）引用 3 次。<https://doi:10.1016/j.envint.2018.07.008>
2. 【WGI, 第六章、WGIII, 附录 III】 Fujimori, T. Hasegawa, T. Masui, K. Takahashi, D. S. Herran, H. Dai, Y. Hijioka, and M. Kainuma, 2017: SSP3: AIM implementation of Shared Socioeconomic Pathways. *Glob. Environ. Chang.*, 42, 268-283, 文章使用 AIM/CGE（亚太综合评估/可计算一般均衡）对共享社会经济路径（SSPs）进行量化，作为 IPCC 旗舰情景，被 WGI, 第六章（短寿命气候影响因素）、WGIII, 附录 III（情景与模型方法）引用 2 次。<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.06.009>
3. 【WGIII, 第二章】 Lamb, W., T. Wiedmann, et al. 2018: A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018. *Environ. Res. Lett.*, 16, 073005, 文章分析了 1990 至 2018 年全球各地区分部门各种温室气体排放趋势，被 WGIII, 第二章（排放趋势与驱动因素）引用 1 次。<https://doi:10.1088/1748-9326/abee4e>
4. 【WGIII, 第二章、第四章】 Jiang, K., C. He, H. Dai, J. Liu, X. Xu, 2018: Emission scenario analysis for China under the global 1.5 °C target. *Carbon Manag.*, 9(5), 481–491, 文章基于 IPAC 模型研究超越 2°C 目标路径的关键选项，对中国在全球 1.5°C 路径和预算下的情况进行了分析，被 WGIII, 第二章（排放趋势与驱动因素）、第四章（近中期减缓与发展路径）引用 2 次。<https://doi:10.1080/17583004.2018.1477835>
5. 【WGIII, 第三章】 Mittal, S., H. Dai, S. Fujimori, T. Hanaoka, and R. Zhang, 2017: Key factors influencing the global passenger transport dynamics using the AIM/transport model. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, 55, 373–388. 本文通过结合行为参数和运输技术细节，开发了自下而上的 AIM/交通模型。WGIII, 第三章（长期减缓路径）引用 1 次。<https://doi:10.1016/j.trd.2016.10.006>
6. 【WGIII, 第四章】 Dai, H., H. Zhang, and W. Wang, 2017: The impacts of U.S. withdrawal from the Paris Agreement on the carbon emission space and mitigation cost of China, EU, and Japan under the constraints of the global carbon emission space. *Adv. Clim. Chang. Res.*, 8(4), 226–234, 文章基于 IMED/CGE 模型分析了全球碳排放空间约束下美国退出《巴黎协定》对中、欧、日碳排放空间和减缓成本的影响，被 WGIII, 第四章（近中期减缓与发展路径）引用 1 次。<https://doi:10.1016/j.accre.2017.09.003>)
7. 【WGIII, 第四章】 Dai, H., X. Xie, Y. Xie, J. Liu, and T. Masui, 2016: Green growth: The economic impacts of large-scale renewable energy development in China. *Appl. Energy*, 162, 435–449. 文章通过使用 IMED/CGE 模型量化了中国大规模发展可再生能源促进碳减排和经济增长的作用，被 WGIII, 第四章（近中期减缓与发展路径）引用 1

- 次。(<https://doi:10.1016/j.apenergy.2015.10.049>)
8. 【WGIII, 第四章】Wu, R., H. Dai, Y. Geng, Y. Xie, and X. Tian, 2019: Impacts of export restructuring on national economy and CO₂ emissions: A general equilibrium analysis for China. *Appl. Energy*, 248, 64–78, 文章基于 IMED/CGE 全球模型评估中国的出口结构调整以及气候变化减缓可能引起的潜在经济和环境影响, 被 WGIII, 第四章 (近中期减缓与发展路径) 引用 1 次。(<https://doi:10.1016/j.apenergy.2019.04.024>)
9. 【WGIII, 第四章】Zhang, H.-B., H.-C. Dai, H.-X. Lai, and W.-T. Wang, 2017: U.S. withdrawal from the Paris Agreement: Reasons, impacts, and China's response. *Adv. Clim. Chang. Res.*, 8(4), 220–225, 文章结合定性和定量分析方法, 解释了美国决定退出《巴黎协定》背后的驱动力, 并评估了这种退出对协定履约前景的影响, 被 WGIII, 第四章 (近中期减缓与发展路径) 引用 1 次。(<https://doi:10.1016/j.accre.2017.09.002>)
10. 【WGIII, 第三章、第五章】Fujimori, S., M. Kainuma, T. Masui, T. Hasegawa, and H. Dai, 2014: The effectiveness of energy service demand reduction: A scenario analysis of global climate change mitigation. *Energy Policy*, 75, 379–391. 文章 AIM/CGE 模型对 2015-2050 年期间各种情景下建筑、交通和工业部门减少能源服务需求的效果进行量化, WGIII, 第三章 (长期减缓路径)、第五章 (减缓的社会服务需求) 引用 2 次。(<https://doi:10.1016/j.enpol.2014.09.015>)
11. 【WGIII, 第六章】Su, Q., H. Dai, Y. Lin, H. Chen, and R. Karthikeyan, 2018: Modeling the carbon-energy-water nexus in a rapidly urbanizing catchment: A general equilibrium assessment. *J. Environ. Manage.*, 225, 93–103, 文章结合 IMED/CGE 和系统动力学与水环境模型 (SyDWEM), 对中国快速城市化流域的未来能源使用、二氧化碳排放、经济增长、水资源压力和水质变化等方面进行预测, 被 WGIII, 第六章 (能源系统) 引用 1 次。(<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.071>)
12. 【WGIII, 第八章】Xie, Y., H. Dai, and H. Dong, 2018: Impacts of SO₂ taxations and renewable energy development on CO₂, NO_x and SO₂ emissions in Jing-Jin-Ji region. *J. Clean. Prod.*, 171, 1386–1395, 文章基于 IMED/CGE 模型针对污染相对严重的京津冀地区研究缓解碳排放和空气污染物排放的潜力, 被 WGIII, 第八章 (城市系统) 附录引用 1 次。(<https://doi:10.1016/j.jclepro.2017.10.057>)
13. 【WGIII, 第三章、第十章】Zhang, R., S. Fujimori, H. Dai, and T. Hanaoka, 2018: Contribution of the transport sector to climate change mitigation: Insights from a global passenger transport model coupled with a computable general equilibrium model. *Appl. Energy*, 211, 76–88. 文章建立了 AIM/交通模型, 并将旅客的选择方式和交通技术细节考虑其中。被 WGIII, 第三章 (长期减缓路径)、第十章 (交通) 引用 2 次。(<https://doi:10.1016/j.apenergy.2017.10.103>)
14. 【WGIII, 第十一章】Cao, Z., G. Liu, S. Zhong, H. Dai, and S. Pauliuk, 2019: Integrating Dynamic Material Flow Analysis and Computable General Equilibrium Models for Both Mass and Monetary Balances in Prospective Modeling: A Case for the Chinese Building Sector. *Environ. Sci. Technol.*, 53(1), 224–233, 文章集成动态物质流分析和可计算的一般平衡模型, 评估了建筑行业的社会经济影响, 被 WGIII, 第十一章 (工业) 引用 1 次。(<https://doi:10.1021/acs.est.8b03633>)
15. 【WGIII, 附录 III】Fujimori, S., H. Dai, 2020: Measuring the sustainable development

implications of climate change mitigation. Environ. Res. Lett., 15, 85004, 文章基于 AIM/CGE 模型展示了与二氧化碳减排相关的可持续发展目标影响, 被 WGIII, 附录 III (情景与模型方法) 引用 1 次。(<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9966>)

7.9.6 LEEEП 研究 | IPCC AR6 特辑: 课题组支撑 IPCC AR6 的论文一览

- **出版物:** IPCC 第六次评估报告 (AR6)
- **发表年份:** 2022
- **作者:** IPCC, Hancheng Dai et al.
- **点击 LEEEП 微信公众号链接阅读推送原文**

在联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 的组织领导下, 来自世界各地的顶尖学者定期评估气候变化前沿研究成果, 为各国决策者和公众提供有关气候变化的最新科学认知与解决方案。IPCC 评估报告对指引全球未来经济社会发展路径和应对气候变化对策起到导向性作用, 已分别于 1990、1995、2001、2007 和 2014 年发布了五次评估报告。2022 年 4 月初, IPCC 发布了第六次评估报告第三工作组报告《气候变化 2022: 减缓气候变化》(IPCC AR6 WGIII), 重点聚焦面向本世纪 1.5~2 度温控目标的温室气体深度减排技术措施评估和政策建议。

北京大学能源环境经济与政策课题组 (LEEEП) 相关研究注重识别绿色低碳转型的前沿关键科学与政策管理问题, 受到国内外同行的密切关注和高度认可。在本次发布的 IPCC AR6 系列报告中, LEEEП 课题组基于自主研发的 IMED 等综合评估模型所发表的 15 篇研究论文支撑了 AR6 多个关键章节, 被正面引用 20 余次。相关论文涉及减污降碳政策的减排效果、经济代价和协同效益评估等重要议题, 被引论文贯穿了第一工作组、第三工作组报告的 11 个关键章节, 如聚焦社会经济系统全局性分析的第二章 (排放趋势与驱动因素)、第三章 (长期减缓路径)、第四章 (近中期减缓与发展路径)、第五章 (减缓的社会服务需求), 以及侧重关键高能耗部门的第六章 (能源系统)、第十章 (交通部门) 及第十一章 (工业部门)。相关推送详细报道如下:

1. **北大环境学院戴瀚程课题组研究成果支撑 IPCC AR6 多个关键内容**
2. **北京大学 LEEEП 课题组多篇研究论文被 IPCC AR6 正面引用**

此前, LEEEП 公众号陆续推出了“LEEEП 研究之 IPCC AR6 特辑”, 向读者简要介绍了被 AR6 正面引用的相关论文研究内容和主要结论, 且专设了“研究背后”专栏讲述了每一篇论文背后的小故事, 也顺便回顾了笔者入行 IAMs 学界十余年以来通过近距离合作遇到的世界各地的奇人逸事, 在公众科学传播方面取得了良好反响。本篇推送将这 15 篇被引论文集于一处, 以飨读者。

最后, 欢迎有志于利用复杂系统模型分析手段为我国和全球寻找实现“双碳”目标解决方案的同学们加入 LEEEП, 也请各位同行推荐合适的小伙伴成为 LEEEPer! 对你的期望是数理基础强、文字功底好, 可以攻读研究生, 也可以开展博士后研究。关于 IMED 模型架构、LEEEП 研究进展及团队介绍、研究生及博士后招聘等信息可阅读在线文档:

- **《IMED 模型体系简介》**
- **关于我们 | LEEEП 课题组简介**
- **IMED 综合评估模型体系介绍**
- **北京大学 2022 年度博士后招聘 | “碳中和与环境及健康效应” 方向**

 LEEEP IPCC AR6特辑

01 快速城市化流域中碳-能源-水关系的一般均衡分析

[点击链接查看全文](#)

标题: Modeling the carbon-energy-water nexus in a rapidly urbanizing catchment: A general equilibrium assessment

作者: Qiong Su, Hancheng Dai, Yun Lin, Huan Chen, Raghupathy Karthikeyan

期刊: Journal of Environmental Management

时间: 2018年

链接: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.071>

摘要: 本研究结合IMED|CGE和系统动力学与水环境模型 (SyDWEM)，对中国快速城市化流域的未来能源使用、二氧化碳排放、经济增长、水资源压力和水质变化等方面进行预测，被IPCC AR6第三工作组在第六章（能源系统）引用。本文是发挥LEEEP组在能源经济模型的专长，以及美国德州农工大学苏琼博士在水文水质模型方面的长年积累，在Energy-Carbon-Water Policy Nexus方面的交叉性成果。

02 美国宣布退出《巴黎协定》的原因、影响及中国的对策

[点击链接查看全文](#)

标题: U.S. withdrawal from the Paris Agreement: Reasons, impacts, and China's response

作者: Hai-Bin Zhang, Han-Cheng Dai, Hua-Xia Lai, Wen-Tao Wang

期刊: Advances In Climate Change Research

时间: 2017年

链接: <https://doi.org/10.1016/j.accre.2017.09.002>

摘要: 本文结合定性和定量分析方法，解释了美国决定退出《巴黎协定》背后的驱动力，并评估了这种退出对协定履约前景的影响，被WGIII第四章（近中期减缓与发展路径）引用。本文是作者与北京大学国际关系学院张海滨老师的跨学科合作成果，张老师是深耕全球气候与环境治理方向30余年的权威专家。

Figure 7.97: LEEEP 课题组支撑 IPCC AR6 的论文一览

- 点击 LEEEП 微信公众号链接阅读推送原文

7.9.7 LEEEП 合作 | IPCC AR6 报告历史排放趋势和驱动因素核心结论解读

- 原文标题: IPCC AR6 报告历史排放趋势和驱动因素核心结论解读 [95]
- 出版物: 气候变化研究进展
- 发表年份: 2022
- 作者: 谭显春, 戴瀚程, 顾佑和, 黄晨, 朱开伟, 马啸天, 闫洪硕, 刘心远, 朱衍磊
- 文章链接

摘要

IPCC 报告第三工作组中“历史排放趋势和驱动因素”章节是历次评估报告的核心内容之一。2022 年 4 月发布的第六次评估报告 (AR6), 在简要回顾 1850—2019 年历史累计排放趋势后, 主要分析了 1990—2019 年间温室气体排放趋势与驱动因素。相比于第五次评估报告 (AR5), 在历史排放趋势方面, AR6 在时间尺度上重点分析 2010—2019 年的近期变化, 在研究内容上更加突出 1.5°C 温控目标的重要性, 强化了对土地利用变化相关温室气体排放的关注, 强调生产与消费视角下碳排放趋势及其区域演变趋势, 探究了新冠肺炎疫情对全球碳排放的短期影响; 在驱动因素方面, 除了考虑全球和区域层面, 还增加了基于能源、工业、建筑、交通、农林及其他土地利用 (AFOLU) 等部门视角的经济驱动因素分解及地区间差异分析, 系统体现全球、区域和部门三层次下驱动因素的异同, 指出区域层面存在能源转型成效, 肯定了现有气候政策对气候减缓的积极影响以及突出技术变革与创新对气候减缓的益处, 明确了化石能源基础设施碳锁定效应的不利影响等。最后, 结合本章节关键结论, 评估了相关结论对中国低碳发展的可能影响和启示。

引言

由政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 定期发布的历次科学评估报告旨在系统总结气候变化领域相关研究进展, 截至目前已经发布到第六次评估报告 (AR6)。文中主要解读 AR6 第三工作组 (WGIII) 第二章“历史排放趋势与驱动因素”的最新研究结论。该章节主要讨论了温室气体历史累计排放趋势, 并分析了背后的驱动因素。AR6 报告中, 该章节内容为第三、四章提供了近、中、远期减缓路径的历史排放依据, 为第五章提供了消费视角下的部门排放趋势、关于行为选择和生活方式对影响排放的最新经验证据, 为第六至十二章提供了关于不同部门历史排放趋势的系统性视角, 为第十三、十六章提供了排放趋势、此前政策和现有技术水平的关系。可见, 该章节强有力地支撑了其他章节的内容, 因而“温室气体排放趋势与驱动因素”是历次评估报告的核心内容之一。文中将在综合评估 AR6 WGIII 第二章内容有关历史排放趋势和驱动因素的基础上, 讨论相关核心结论和解读及其对中国的政策启示, 以期为中国未来气候合作和“双碳”目标的实现提供借鉴。

1 AR6 有关历史排放趋势的主要内容和关键结论

在历史排放趋势方面, AR6 第二章全面概述了全球、区域、部门的温室气体累积排放与逐年趋势。在时间尺度上, 相比 AR5 着重评估 1970—2010 年间的温室气体排放趋势, AR6 除了简要回顾 1850—2019 年历史累计排放趋势外, 着重评估了 1990—2019 年温室气体排放趋势, 并重点分析 2010—2019 年的趋势和变化。在统计口径层面, 该章节主要讨论化石燃料燃烧与工业过程 CO₂ 排放 (FFI), 土地利用、土地利用变化和林业的 CO₂ 排放 (CO₂-LULUCF), 甲烷 (CH₄), 一氧化二氮 (N₂O) 与包括氢氟烃 (HFCs)、全氟化碳 (PFCs)、六氟化硫 (SF₆) 以及三氟化氮

(NF_3) 在内的含氟气体排放。报告根据 100 年全球增温潜势 (GWP100), 将不同温室气体统一转换为 CO_2 当量 (CO_2 -eq)。在数据支撑方面, 该章节以 EDGAR V6 数据库作为主要数据源, 并在不同的尺度下同时与《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC) 的通用报告格式 (CRF)、全球碳项目 (Global Carbon Project) 等数据来源相比较, 以提升该章节数据透明度和可信度。

整体来看, 相比于以 $2^\circ C$ 温控目标为主线的 AR5 报告, AR6 报告更加突出 $1.5^\circ C$ 温控目标的重要性并估计其剩余排放预算, 阐述了区域与部门间的排放差异, 并强化了对非 CO_2 温室气体排放与 CO_2 -LULUCF 的关注, 总结了历史排放趋势与不确定性。同时, 在 AR5 的基础上, AR6 进一步强调生产与消费视角下碳排放趋势及其区域演变趋势, 拟为全球供应链脱碳提供新启示。此外, 还探究了新冠肺炎疫情对全球碳排放的短期影响。关键结论如下。

(1) 全球温室气体排放量持续上升, 累计排放量正逐步逼近 $1.5^\circ C$ 目标排放预算

AR6 报告指出, 工业革命以来全球人类活动累积排放 CO_2 持续攀升, 1850—2019 年间的净排放量已达到 24000 (±2400) 亿 t (单位: CO_2 -eq, 下同), 其中 58% 是 1990 年前产生的。截至 2019 年, 不考虑 LULUCF 排放情况下, 亚太地区历史累积排放仅占全球 21%, 发达国家占 57%。即使考虑 LULUCF 排放, 前者排放也仅增至 24%, 发达国家占比仍高达 45%, 且人均排放量仍旧维持在较高水平。

2010—2019 年全球温室气体排放年均增速为 1.3%, 低于 2000—2009 年 2.1% 的增速, 其增速放缓主要得益于中国温室气体排放增速的大幅下降。在区域层面, 除了东欧、亚洲中西部外, 全球各地区 2010—2019 年的平均温室气体排放增速也都低于 1999—2010 年的增速。虽然全球排放增速放缓, 但近 10 年的年均温室气体排放总量约为 560 亿 t, 比前 10 年增加约 91 亿 t, 且在 2019 年达到 590 (±66) 亿 t, 已达到工业革命以来最高水平。

研究发现, 当前全球 CO_2 历史累积排放量已经逼近 $1.5^\circ C$ 和 $2^\circ C$ 温控目标排放预算, 已经占 $1.5^\circ C$ 情景碳预算的 4/5 (50% 概率) 和 $2^\circ C$ 情景碳预算的 2/3 (67% 概率)。结合 2018 年发布的《全球增暖 $1.5^\circ C$ 特别报告》[2] 来看, AR6 报告明显强化了全球实现 $1.5^\circ C$ 目标的图景描述和预算差距分析, $1.5^\circ C$ 目标的剩余排放预算与 2010—2019 年间累积排放大致相同, 凸显了各国减排行动在时间上的紧迫性, 因此未来十年的减排力度是关乎能否实现 $1.5^\circ C$ 目标的关键。

(2) 全球主要部门的温室气体净排放量持续增加, 但各部门贡献和增速各异

从历史排放趋势来看, 近 10 年 (2010—2019 年) 全球主要部门温室气体排放量继续上升。截至 2019 年, 能源部门依旧是全球直接排放的主要贡献部门 (200 亿 t, 34%), 其次是工业 (140 亿 t, 24%), 农业、林业和其他土地利用部门 (AFOLU) (130 亿 t, 22%), 交通 (87 亿 t, 15%) 和建筑部门 (33 亿 t, 6%)。从历史排放增速来看, 近 10 年各部门贡献和增速各异。其中, 能源部门排放增速放缓, 交通和工业部门增长较快, 交通替代工业成为增速最快的部门。然而, 2020 年开始, 新冠疫情的全球传播已对航空、航运、道路交通行业短期内造成极大负面影响, 全球疫情态势和防疫政策变化使交通部门未来排放趋势难以确定。

总之, 当前学界对能源与工业部门的排放趋势和总量认知是最清晰准确的, 并且二者年均排放约占总量的 60%, 控制煤电规模、加快提升可再生能源占比与实现工业过程低碳化是未来推进深度减排的重中之重。并且, 需要进一步重视 AFOLU 部门排放及其不确定性, 进一步明晰其减排的手段、成本与效益。此外, 无论未来疫情对终端用能部门影响几何, 继续推动交通电气化、强化建筑部门对工业余热的有效利用、加强未来电动汽车与建筑的用能统合管理都将是实现节能降碳的重要抓手。

(3) 非 CO_2 温室气体排放增速居高不下, 但 CO_2 -LULUCF 排放不确定性高的问题仍悬而未决

在 AR5 报告中,IPCC 就已强调了非 CO₂ 温室气体和 CO₂-LULUCF 的重要性。2010—2019 年,每种非 CO₂ 温室气体年均排放水平均高于历史上任何一个十年,但各自增速不同,其中 CH₄ 增量最大,十年间增长 24 亿 t,年均增速约 29%;含氟气体年均增速最快,十年间增长 9.7 亿 t,年均增速约 250%;CO₂-LULUCF 排放不确定性最大,2019 年为 66 亿 t (±46 亿 t)。同时,AR6 报告还指出短寿命气候污染物稳中有降,其中 SO₂ 和 NO_x 排放下降,CH₄、OC (有机碳) 和 NMVOC (非甲烷挥发性有机物) 的排放水平保持相对稳定。

总体上看,将非 CO₂ 温室气体纳入温室气体排放重新计算历史累积排放及分布的结果,在一定程度上弱化了发达国家的历史排放和未来减排责任 [3]。在 AR5 和 AR6 中,针对 CO₂-LULUCF 的评估始终存在着高度不确定性,现有科学认知仍难以估算其长期变化趋势。如若持续搁置这一问题,将使全球净零排放概念变得模糊。未来亟需学界进一步提升这一领域的国内外评估精度,这将对历史责任的科学划分与该部门未来碳源、碳汇规模确定提供关键保障。

(4) 强调消费侧排放核算对全球深度脱碳的重要性,突出亚太地区对 1990 年以来碳排放增量的贡献已超过发达国家

除生产侧排放外,AR6 报告还兼顾从消费侧视角描绘了由终端消费引致的碳排放趋势,研究发现 2015 年以来亚太地区已经超越发达国家成为消费侧排放最多的地区。2018 年发达国家消费侧排放占全球 32%,而亚太地区占比 39%,且亚太地区贡献了 1990—2018 年间碳排放增量的 77%,而非洲、拉丁美洲和加勒比以及中东地区仅分别贡献 10% 左右。

消费侧核算有助于从需求端识别不同消费模式与产业链对全球排放的贡献,避免全球碳泄露。AR6 突出了发展中国家对 1990 年以来的排放增量贡献已经超过了发达国家,可能会使发展中国家承担更大的减排责任和压力。然而,必须看到发达国家仍是历史累积排放的最大贡献者,且是主要隐含碳进口地区,而亚太地区是主要的隐含碳出口地区。此外,相较于生产侧,消费侧排放的核算方法仍缺乏国际共识,这将阻碍其在决策过程中的运用,未来各国应进一步对核算方法和数据来源形成一致意见。另一方面,随着中国国内消费水平的逐步提升,未来消费侧排放也将增加,实现国内减排的同时也必须关注其他高碳国家对中国的隐含碳出口。

(5) 新冠疫情冲击使全球碳排放短期急剧下降,但未来持续性影响并不明朗

2020 年各国应对新冠疫情的封锁政策使当年 CO₂ 排放量比 2019 年降低约 22 亿 t (19 亿 24 亿 t),降幅约为 5.8% (5.1%~6.3%),无论从相对量还是绝对量层面,这都是 1970 年以来的最大降幅。然而,与实现 1.5°C 目标所需的减排量相比,疫情冲击造成的全球排放下降是远远不够的 [4],也是暂时性的,2020 年 12 月底全球碳排放量已出现反弹。由此可见,疫情对未来碳排放持续性影响并不明朗。

在各国后疫情复苏政策工具中,将包括大规模的基础设施投资。若这些投资以化石能源投资为主,那么全球复苏政策导致的碳锁定排放将很有可能抵消甚至超过疫情冲击带来的被动碳减排效果。后疫情时代下,绿色能否成为经济复苏政策的底色,将对全球温室气体减排路径产生深远影响,这也关乎 1.5°C 温控目标能否实现。

2 AR6 有关驱动因素的主要内容和关键结论

从报告内容整体来看,AR6 继承了 AR5 对驱动因素的分析架构,基本涵盖了 AR5 的相关内容:1) 使用 KAYA 分解方法研究 2010—2019 年间不同区域和部门排放的驱动因素,包括人口、人均 GDP、能源强度和能源碳强度这 4 种因素,涵盖经济增长与能源转型两个层面;2) 采用文献综述方法评估了技术创新、行为方式、基础设施和气候政策等对温室气体排放的影响。在 AR5 的全球和区域框架基础上,AR6 还对以下几个方面进行了丰富和拓展:1) 增加了能源、工业、建筑、交通、AFOLU 等部门视角的经济驱动因素分解及地区间差异分析;2) 明确了技术变革在减缓气候变化过

程中起到的核心作用;3) 突出了长寿命化石能源基础设施带来的碳锁定效应对减缓气候变化的负面影响;4) 丰富了消费和生活方式对碳排放的影响研究;5) 增加了气候政策和非气候政策对温室气体减排的影响。整体而言,AR6 报告关于温室气体排放驱动因素的核心内容如下。

(1) 经济增长仍是全球化石燃料燃烧 CO₂ 排放增长的最重要因素, 完全抵消了能源转型的减缓效果

经济增长仍是全球化石燃料燃烧 CO₂ 排放增长的最重要驱动因素, 人均 GDP 和人口增长在 2010—2019 年间分别贡献了 2.3% 和 1.2% 的年均排放量增加。在此期间, 能源转型发挥重要的减缓作用, 但是由于能源碳强度的改善幅度有限, 且能源强度下降幅度始终低于人均 GDP 的增长, 能源转型不足以抵消经济增长的影响, 这一点与 AR5 的评估结果一致。AR6 报告指出, 经济增长在中国和印度地区的驱动作用尤其显著, 中国虽然通过改变产业结构和消费模式减缓了在 2010 年以后的排放增长, 但是仍然难以抵消经济增长、消费和投资带来的驱动作用。评估结果表明经济增长对排放增长的驱动作用持续显著, 未来需要更大的能源转型力度来抵消经济增长的影响。

(2) 经济增长也是全球所有地区和部门排放增长的主要因素, 对发展中地区排放增长的驱动尤为明显

自 2010 年以来, 全球各部门的生产效率都得到提升, 推动能源、工业、建筑和交通部门的能源强度下降, 以及 AFOLU 部门的单位产出所需要的土地量减少 (表 1)。然而, 由于经济增长拉动各个部门的产品和服务需求增加, 效率提升的减缓成果基本上已经被抵消, 这一特征在发展中地区尤为明显。伴随着快速的经济增长, 推进工业化和城市化进程的发展中地区对能源消费、工业产品、交通运输、人均建筑面积、高热量饮食的需求不断增加, 成为推动各个部门排放增长的主要贡献者。AR6 报告通过对各个部门排放的驱动因素分解及地区间差异分析, 进一步突出了近年来经济增长在发展中地区显著的驱动作用, 可能会导致未来更加聚焦发展中国家的减排力度和举措。

表 1

部门	正向驱动因素	负向驱动因素
能源	经济增长, 推动能源消费需求增加	能源强度下降
工业	经济增长, 推动中间产品需求增加	能源强度下降
建筑	经济增长, 推动人均建筑面积增加	能源强度下降
交通	经济增长, 推动交通活动水平提高	能源强度下降
AFOLU	经济增长, 推动食物结构高热量转型和人均食物需求增加	土地利用效率提高

Figure 7.98: 2010—2019 年不同部门温室气体排放的主要驱动因素

注: 根据 AR6 第二章内容整理得出。

(3) 技术变革在减缓气候变化过程中起到的核心作用, 是未来实现气候变化目标的关键

AR6 指出技术变革在减缓气候变化过程中起到核心作用, 且认为促进能源高效生产和利用的技术变革是减少碳排放的关键因素。与此同时, 报告指出碳定价等公共政策是推动技术变革的重要因素; 然而, 受经济社会发展水平的限制, 发展中国家仍需要提高能力建设水平, 以促进技术变革。自 AR5 以来多项低碳技术得到了快速发展, 且应用成本仍存在下降的空间。2000—2019 年光伏发电 (PV) 和岸上风电 (onshore wind) 成本持续下降, 二者现有成本已与化石燃料相当; 聚光太阳能 (CSP) 和海上风电 (offshore wind) 的成本自 AR5 以来也呈现快速下降的趋势 (图 1)。虽然技术进步使可再生能源的装机量达到了相当大的份额, 但是仍不足以推动现有能源系统的低碳转型, 技术变革需要加速。因此, 更快的采用低碳技术和推动持续的技术变革, 将保障技术变革在减缓气候

变化方面发挥关键作用。

图 1

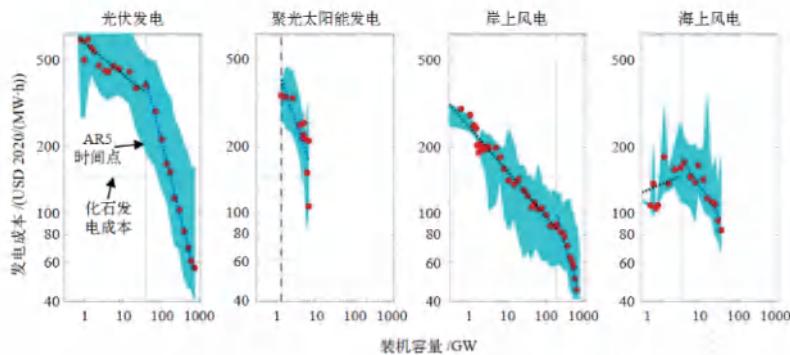


Figure 7.99: 2000—2019 年可再生能源技术学习曲线

注: USD 2020 表示按照 2020 年美元价格计算。

(4) 现有化石燃料长寿命基础设施产生的未来 CO₂ 排放预估值, 已超过 1.5°C 目标下剩余累计净 CO₂ 排放量

相比 AR5 仅以交通部门和美国为案例, 探讨了化石能源长寿命周期基础设施对碳减排的影响, AR6 从全球、地区和部门视角更加系统全面地评估了化石能源长寿命基础设施对未来温室气体排放的影响。报告指出, 全球既有和规划中的化石能源长寿命基础设施产生的未来 CO₂ 排放量约为 850 Gt CO₂, 已经超过达到 1.5°C 目标的累计净 CO₂ 排放总量, 与实现 2°C 目标的均值累计排放量接近。与此同时, 报告指出化石能源长寿命基础设施将会把社会锁定在碳密集型生活方式和实践中, 影响转型速度。结合上述结论, 化石燃料长寿命基础设施未来需致力于提前退役, 减少现有化石能源基础设施的利用, 取消化石燃料基础设施新建计划, 或者通过碳移除技术进行负减排, 否则巴黎气候目标可能无法实现。

(5) 气候政策有效地减缓了温室气体排放, 且不同气候政策间具有协同效益

相比 AR5, AR6 肯定了气候政策在减缓气候变化方面的作用, 并将其单独成章, 凸显了气候政策在减缓气候变化方面的重要性。在广泛的气候政策工具中, AR6 报告认为碳定价、气候立法和可再生能源政策, 有效地减缓了温室气体排放。与此同时, AR6 报告指出气候政策存在着广泛的协同效益。在实现 CO₂ 减排的同时, 与气候相关的政策也有助于减少其他温室气体排放, 大气污染物排放控制政策和立法也具有气候协同效益。AFOLU 部门相关政策也会对温室气体排放产生重要影响。

(6) 贫富差距导致个体排放差异巨大, 行为选择与生活方式对排放影响显著

相比 AR5, AR6 对行为选择与生活方式对 CO₂ 排放的影响也进行了系统分析。报告指出, 由于发展水平、经济结构、经济周期、可用公共基础设施、气候和居民生活方式的差异, 导致碳足迹在国家之间和国家内部各不相同。在全球范围内, 收入前 10% 的家庭温室气体排放量占 36%~45%, 而收入排名后 50% 的家庭仅占 13%~15%。在各国内部, 收入前 1% 的人均碳排放会是收入后 10% 的 175 倍。同时, 报告指出收入水平是影响家庭消费碳排放最重要的因素。随着经济发展和收入的提高, 低收入群体会对高收入人群的生活方式, 追求新的消费模式, 这使新兴经济体在全球范围内的碳排放增长最快。

3 对中国低碳发展的启示

AR6 有关历史排放趋势和驱动因素的关键结论也为我国“双碳”目标的制定和实施提供了借鉴, 具体启示如下。

(1) 中国应保持应对气候变化的战略定力, 谨防高位达峰, 要将碳达峰碳中和作为高质量发展的新机遇和重要新动能

IPCC AR6 报告表明, 若要实现 1.5°C 温控目标, 全球未来剩余碳预算仅剩 5000 亿 6500 亿 t CO₂。这意味着全球若按当前的排放体量发展, 则 15 年内即将超过该碳预算。中国提出的“双碳”目标是对全球应对气候变化及时的重要贡献。“双碳”目标将加速我国社会经济绿色转型, 将显著改善社会的生产方式、生活方式和生态方式, 最终实现创新、协调、生态、开放、共享的低碳高质量发展。我国应立足自身国情, 保持“双碳”目标定力, 分阶段设立近、中、远期减排目标, 有序推进“双碳”目标 [5-6]。特别是在 2030 年前的短期内, 应谨防各地碳冲峰导致的高位达峰和高碳路径锁定, 重点是严控煤炭消费, 深入挖掘能效提升空间, 使 CO₂ 排放峰值不超过 120 亿 t。2045 年前的中期进入快速降碳期, 应大力发展可再生能源, 全面促进传统乘用燃油汽车电气化。2060 年前为深度脱碳与中和期, 充分发挥碳捕获、利用与封存技术 (CCUS)、负排放技术和碳汇的降碳增汇作用, 全面建成清洁低碳、安全高效的现代能源体系和新型电力系统。

(2) 要高度重视技术创新在实现碳中和过程中的引领和核心作用

IPCC AR6 高度重视技术创新在温室气体减排中的作用, 近 10 年来, 光伏、风电、电池等技术的成本大幅下降, 普及率也远超预期, 但与实现全球 2°C 或 1.5°C 温控目标仍有相当大的距离。虽然当前节能低碳技术更多被发达国家掌握和垄断, 但对于碳中和, 无论是发达国家还是发展中国家, 都面临着巨大的技术缺口。根据国际能源署发布的报告, 在推动全球能源行业 2050 年实现净零排放的关键技术中, 有 50% 的技术尚未成熟。碳中和将催生新一轮科技变革并将引发技术竞赛, 掌握关键核心技术将在新一轮经济社会变革中获取先机。当前我国低碳科技整体创新能力不足, 重大关键、核心技术储备存在缺口, 实现碳中和面临着多重挑战。事实上, 我国在光伏、风电、工业节能等很多技术部署和应用方面已经走在全球前列, 已奠定较好的基础。所以我们不能坐等技术创新, 要有引领全球碳中和技术创新的雄心和务实行动, 要通过系统部署、重点攻关、市场引导以及国际科技合作等, 从跟跑、并跑到引领碳中和技术创新的最前沿, 为经济社会稳定增长提供源源不断的动能。

(3) 持续推动气候变化领域的国际合作和良性竞争

AR6 报告从消费端看, 发达国家往往是碳排放净进口国, 而中国等发展中国家是排放净出口国, 且发展中国家对近 30 年来碳排放增量的贡献已超过发达国家。同时, 发达国家正考虑使用碳边境调节机制等有争议的手段减少贸易隐含的碳排放转移, 如处理不当, 有可能与地缘政治、技术封锁等去全球化浪潮合流。鉴于此, 中国应坚定不移地扩大和推动气候变化国际合作和良性竞争。一方面, 将非 CO₂ 温室气体减排等作为下一阶段合作的突破口, 进一步落实《中美关于在 21 世纪 20 年代强化气候行动的格拉斯哥联合宣言》[7] 中突出的 CH₄ 减排战略, 积极推动含氟气体减排等全球环境协议的履约。同时, 谨防以碳转移为借口的新型贸易壁垒。另一方面, 中国应大力完善关键行业的低碳标准体系, 有侧重地为非 CO₂ 温室气体高排放行业制定可行性高且成本有效的减排方案, 使之与国际标准逐步对接的同时, 提高国内产业的国际竞争力。

(4) 将应对气候变化置于可持续发展和高质量发展框架下布局, 探索多领域协同发展路径, 为全球气候治理探索新模式

IPCC AR6 强调了气候政策与大气污染物排放控制政策的协同作用, 也证实了能源、交通、农林等部门层面政策的温室气体减排效果。实际上, 在当前全球疫情危机、能源危机叠加地缘政治局部冲突的背景下, 应将应对气候变化嵌入更综合的框架下考虑。要妥善处理好减污降碳与能源安全、

粮食安全、产业链和供应链安全的关系，在可持续发展的大系统中统筹考虑，努力实现经济、社会、环境、能源、粮食、健康、科技等多领域的协同发展。以减污降碳协同增效为重要抓手，推动产业结构、能源结构、交通运输结构与土地利用结构调整，朝着绿色低碳的方向加速转型、创新，实现系统性变革，提升中国高质量发展水平，为全球气候治理和务实行动探索可行模式，在全球生态文明建设中发挥更重要的参与者、贡献者和引领者作用。

7.10 LEEEП 组 2023 年度研究一览

2023 年度, LEEEП 团队在能源气候政策相关期刊上就以下主题发表了研究成果。

以下为我们在本节甄选的相关已发表文章:

1. LEEEП 研究 | Nature Food: 粮食系统增效是实现中国碳中和的关键
2. LEEEП 研究 | Nature Comm.: 中国农村现代能源转型助力碳中和与健康改善
3. LEEEП 研究 | GEC: 气候变化下日本 PM_{2.5} 和臭氧相关的健康挑战
4. LEEEП 研究 | iScience: 我国发展可再生能源的空气质量和健康协同效益
5. LEEEП 研究 | 负排放技术: 中国水泥行业脱碳的关键
6. LEEEП 研究 | 通过减少印度道路交通部门的化石燃料消费实现碳中和
7. LEEEП 研究 | 电动汽车助力印度各州实现道路交通碳中和及清洁空气
8. LEEEП 研究 | 水-能源-碳关系: 中国城市综合排水系统的温室气体排放
9. LEEEП 研究 | 中国大气污染控制政策的成本和收益评估研究综述
10. LEEEП 研究 | 中国生物能源进口增加对全球土地利用和可持续性影响
11. LEEEП 研究 | 气候变化对中国发电基础设施的潜在影响
12. LEEEП 研究 | 考虑环境和人体健康影响的中国电动汽车区域差异化推广
13. LEEEП 研究 | 差异化的碳中和政策对中国高碳产业跨区域转移的影响
14. LEEEП 研究 | 中国交通部门实现碳中和需要电力和氢气供应合力脱碳
15. LEEEП 研究 | 碳限额约束对我国区域经济发展均衡性的影响
16. LEEEП 研究 | 气候变化对空气污染影响的模拟研究
17. LEEEП 研究 | 经济增长与结构变化对亚洲国家碳污排放的影响
18. LEEEП 研究 | 粤港澳大湾区低碳发展的空气质量改善健康经济效益研究
19. LEEEП 合著 | 张远航、戴瀚程: 生态文明时代大气环境治理的变革与转型

7.10.1 LEEEП 研究 | Nature Food: 粮食系统增效是实现中国碳中和的关键

- **原文标题:** Enhanced food system efficiency is the key to China's 2060 carbon neutrality target [96]
- **期刊:** Nature Food
- **发表年份:** 2023
- **作者:** Ming Ren, Chen Huang, Yazhen Wu, Andre Deppermann, Stefan Frank, Petr Havlik, Yuyao Zhu, Chen Fang, Xiaotian Ma, Yong Liu, Hao Zhao, Jinfeng Chang, Lin Ma, Zhaohai Bai, Shasha Xu, **Hancheng Dai***
- **文章链接:** [点击 LEEEП 微信公众号链接阅读推送原文](#)

研究项目背景

生物质能-碳捕捉与封存技术 (BECCS) 对实现《巴黎协定》的气候减缓目标至关重要。为应对气候变化而大规模种植生物质能会引发与土地相关的多维可持续性问题，包括粮食安全、水资源短缺、温室气体 (GHGs) 排放和生物多样性减少等。

本研究的关键假设是：我国 2060 年大规模部署生物质能 +CCS 技术，总能耗约 16EJ（文献中位值），占我国当年一次能源的 17%，使得农林土地利用部门合计产生约 13 亿吨负排放潜力，连同已经被确认的 10-13 亿吨 CO₂/年现有陆地有机碳汇（朴世龙，2022），为我国 2060 年碳中和目标创造 23~26 亿吨温室气体排放空间，极大缓解其他国民经济部门的碳减排压力和减排代价，社会效益巨大。亟待解决的科学问题是：如何在不危及我国粮食安全、不加重粮食贸易伙伴国环境负担的前提下，提供如此大规模的生物质能源？

在北京大学环境科学与工程学院、北京大学碳中和研究院和国际应用系统分析研究所（IIASA）等机构密切合作下，LEEEP 课题组创新性地构建并应用 IMED-GLOBIOM 综合评估模型，探讨了碳中和目标与生物质能发展、负排放技术与粮食系统之间的联动关系，揭示了中国部署生物质能对中国和全球可持续发展的影响，识别出适度开放贸易与提高粮食系统效率在将缓解潜在负面影响方面的作用，研究成果于 2023 年 7 月 3 日在线发表于 *Nature Food*。

该成果是 LEEEP 课题组长期围绕气候环境政策复杂系统建模与多维影响评估，基于自主构建的北京大学 IMED 综合评估模型体系取得的又一研究进展，以期为统筹生物质能负排放技术布局、粮食系统政策、全球粮食贸易合作等多维度政策以实现碳中和提供学理支撑和前瞻见解。

研究背景

中国既是全球最大的温室气体排放源，也是全球气候治理的关键贡献者，揭示中国在 2060 年前实现其碳中和目标的可行性，对同样面临粮食和能源需求增长的其他新兴经济体具有重要示范效应。中国仅用全球 7% 的耕地养活了全球 20% 的人口，这一惊人的成就在很大程度上依赖于其持续的农业集约化。尽管中国粮食产量在 1978-2020 年间增加了 120%，但化肥使用量却增加了 494%。此外，中国还存在较大的粮食单产差距，粮食浪费和损失近 30%。尽管中国能够维持三大主粮（小麦、玉米和水稻）95% 的粮食自给率（SSR）红线，但其他农产品（如大豆、反刍动物肉类和奶制品等）的进口依存度较大。

考虑到中国有限的耕地和不断增长的粮食需求，厘清大规模生物质能部署如何威胁土地利用相关的可持续发展目标尤其重要。多数全球综合评估聚焦于不同措施如何降低生物质能部署带来的土地压力，包括提高农业生产效率、减少动物性产品消费和减少粮食浪费等。然而，这类评估中全球一般化的假设不足以精确刻画区域异质性。与之对应，国家层面的研究通常关注具体国家粮食、贸易、资源和环境政策对本国的影响，而没有在全局层面上考察多维政策交互作用下对多项可持续性指标的跨地区溢出效应。

研究方法

基于北京大学 IMED-GLOBIOM 模型，本文探索大规模生产生物质能如何助力中国碳中和目标实现而不对国内外可持续发展产生负面影响。本研究将各国实际粮食、贸易、资源和环境政策纳入全球模型，在自上而下的综合评估视角和自下而上的国家研究视角中建立耦合关系。本研究假设所有中国生物质能原料来自国内种植的短轮作能源作物。考虑对中国和其贸易伙伴五个维度的可持续性影响，包括粮食安全、耕地和草场扩张、GHG 排放、氮肥使用和农业灌溉用水。研究情景包括：

1. Reference：该情景沿着共享社会经济路径中的中间路径（SSP2）发展，小规模发展生物质能源；
2. Bioenergy：为中国实现碳中和目标增加生物质能供给，同时维持三大主粮 95% 的自给率红线；
3. FreeTrade：放松了 Bioenergy 情景中的三大主粮自给率红线约束；
4. YieldUp：在 FreeTrade 基础上，缩小单产差距；

5. FoodLossDown：在 FreeTrade 基础上，粮食损失和浪费减半；
6. DietHealth：在保证足够营养摄入的基础上，转向更健康的饮食；
7. FoodSystem：综合 YieldUp, FoodLossDown, DietHealth 三种措施。

研究结果

生物质能扩张将增加中国国内粮食安全压力

(1) Reference 情景下，中国 2060 年的粮食和牲畜产品产量将分别比 2020 年高 13% 和 24%。国内人均每日卡路里摄入量增长 15%。相应的，耕地面积由 2020 年的 1.2 亿公顷增长到 2030 年的 1.3 亿公顷，逐渐下降到 2060 年的 1.2 亿公顷；灌溉用水由 2020 年的 4000 亿立方米增加到 2030 年的 4200 亿立方米，逐渐下降到 2060 年的 3800 亿立方米。

(2) Bioenergy 情景下，生物质能种植面积逐步扩张并不断挤占其他用途的土地，2060 年生物质能的种植面积约为 5100 万公顷，约为整个泰国的土地面积（图7.100 (a)）。与 Reference 情景相比，Bioenergy 情景下，到 2060 年中国牧草地面积将减少 12%（1600 万公顷），其他自然用地面积减少 32%（1500 万公顷），耕地面积下降至 1.0 亿公顷（下降 16%）。相应的，粮食和牲畜产品产量将分别下降 15% 和 13%（图7.100 (b) - (c)），这会导致国内农产品价格提高 23%，人均每日卡路里下降 8%（242 千卡）（图7.101）。与 Reference 情景相比，Bioenergy 情景下国内灌溉用水、氮肥使用、农林和其他土地利用（AFOLU）部门的 GHG 排放分别下降 5%、8% 和 43%。

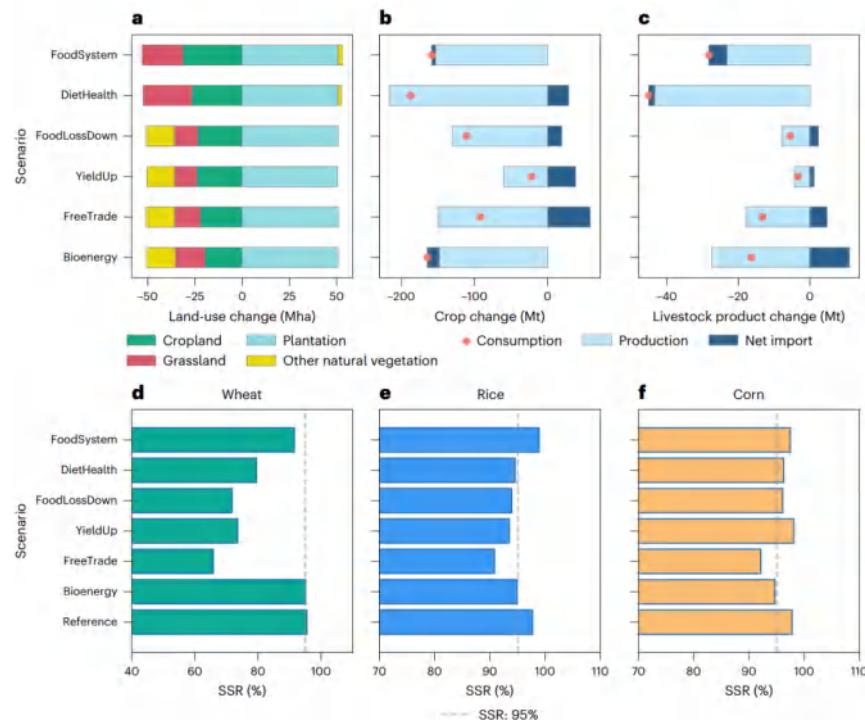


Figure 7.100: 中国部署生物质能对国内土地利用、农产品生产、消费和贸易的影响。a-c, 6 个高生物质能情景与 Reference 情景相比, 中国土地利用的绝对变化 (a), 粮食生产、消费和净进口的绝对变化 (b), 牲畜产品 (c) 的生产、消费和净进口的绝对变化。d-f, 2060 年小麦 (d), 水稻 (e) 和玉米 (f) 的自给率

放松粮食贸易约束可将中国国内粮食困境减半

FreeTrade 情景中, 适度放松了三大主粮的 SSR 约束, 主要通过增加农产品进口缓解生物能源部署造成的国内粮食供需之间的紧张关系。与 Reference 情景相比, FreeTrade 情景下, 2060 年人均每日卡路里摄入量仅下降 5% (149 千卡), Bioenergy 情景中下降 8%; 农产品价格提高 14%, Bioenergy 情景中增加 43% (图7.101)。然而, 在 FreeTrade 情景中, 2060 年小麦的 SSR 由 Reference 情景中的 96% 下降至 FreeTrade 情景中的 66%, 水稻的 SSR 由 98% 下降至 91%, 玉米的 SSR 由 98% 下降至 92% (图7.100 (d) - (f))。与 Reference 情景相比, 2060 年中国小麦、玉米和水稻的进口量将分别增加 610% (4200 万吨)、281% (1300 万吨) 和 221% (1400 万吨)。这将使中国成为全球最大的小麦和水稻净进口国, 以及第二大玉米净进口国。

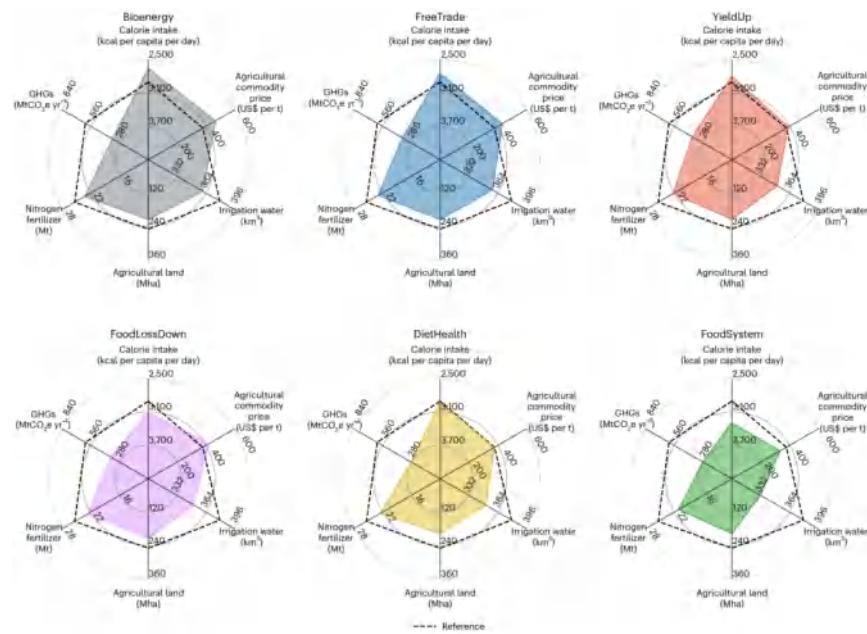


Figure 7.101: 中国生物质能部署对国内 2060 年的可持续性的影响

然而，放松主粮的 SSR 约束会将负面影响转移给中国的贸易伙伴，特别是农业大国，比如澳大利亚、加拿大和巴西。与 Reference 情景相比，在 FreeTrade 情景下 2060 年中国谷物和牲畜产品的进口量分别增加 290% 和 23%（图7.100 (b) - (c)）。农产品进口增加将向中国贸易伙伴额外转移 2320 万公顷的农业用地、166 亿立方米的农业灌溉用水和 4620 万吨 CO₂e（二氧化碳当量）的 GHGs 排放量（图7.102）。值得注意的是，放松中国三大主粮的 SSR 约束会增加全球农产品（尤其是通过增加粮食和反刍动物的生产率）生产同时减少全球总环境负担。这说明将粮食生产从资源密集型的中国转移到世界其他地区，会提高全球农产品生产效率。与 Bioenergy 情景相比，在 FreeTrade 情景中，中国粮食和反刍动物产品的生产量将增加，使全球人均每日卡路里摄入量增加 0.4%。然而，2060 年全球农业灌溉用水将减少 0.11%。这是因为在 FreeTrade 情景中，中国的贸易伙伴生产更多的免灌溉小麦，其中大部分出口到中国以替代中国的灌溉小麦。

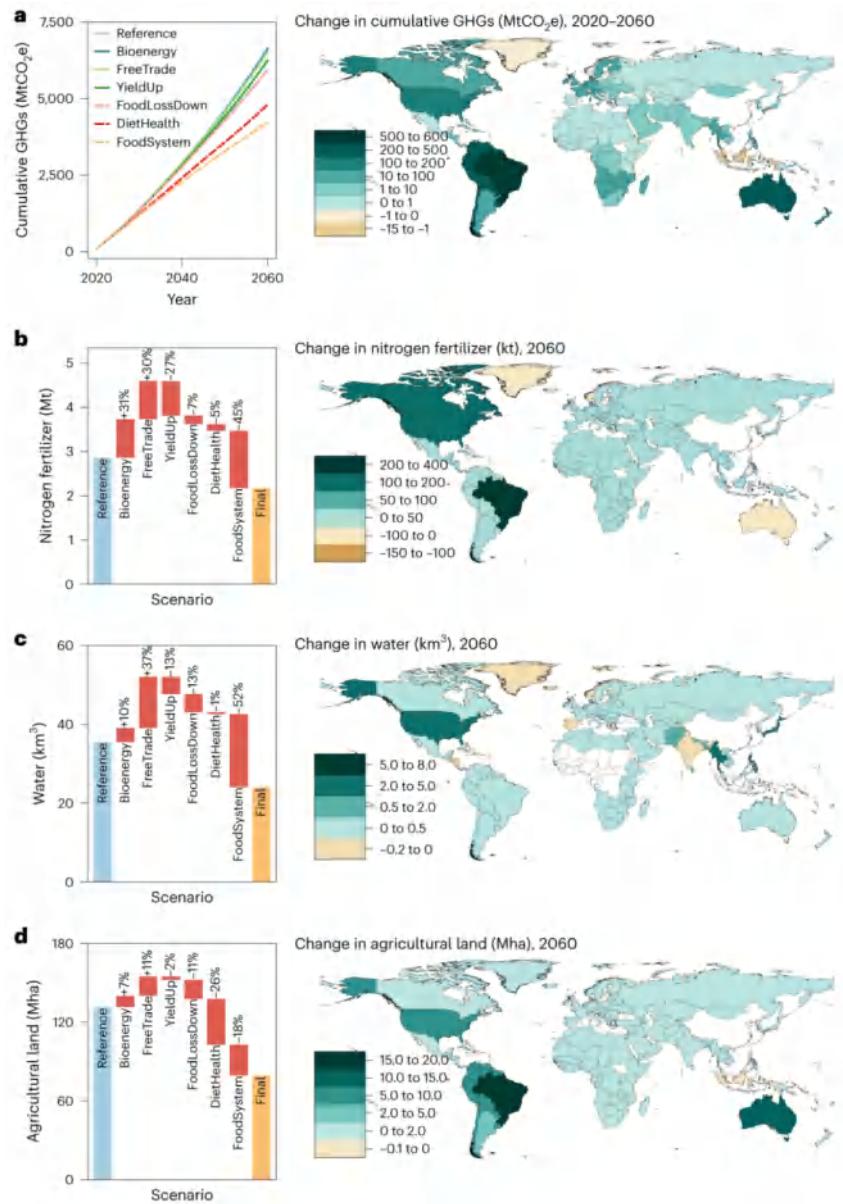


Figure 7.102: 农产品进口导致的中国从其贸易伙伴虚拟进口的环境影响。不同情景下的环境影响（左）和 2060 年 FoodSystem 情景相对于 Reference 的预计变化（右）。a, 2020-2060 年累计虚拟进口的 GHGs 排放量（左），中国从不同地区累计虚拟进口的 GHG 的变化；b-d, 中国从不同地区虚拟进口的氮肥（b）、灌溉水（c）和农业用地（d）（左）；中国从不同地区虚拟进口的氮肥（b）、灌溉水（c）和农业用地（d）在 2060 年的变化（右）

放松贸易和国内措施结合的综合影响

以上研究结果表明，中国很难协调国内大规模生物质能部署、国内粮食安全和全球可持续性。因此，除放松 SSR 约束外，本研究还对提高我国国内粮食系统效率的其他措施进行评估了，包括粮食损失和浪费减半、转向更健康的饮食和缩小作物单产差异。

粮食损失和浪费减半。减少粮食损失和浪费能够在一定程度上缓解粮食-生物质能困境，但是，中国依然会进口大量的农产品进而将环境影响转移给其贸易伙伴。调查数据表明中国每年损失或浪费粮食约 27%。通过改进技术、提高节约意识和改变烹饪方式等措施可以大大减少粮食浪费。在 FoodLossDown 情景中，假设粮食损失和浪费率从当前水平逐步下降，到 2060 年实现减半的目标。与 FreeTrade 情景相比，FoodLossDown 情景下 2060 年国内人均每日卡路里摄入量将增加 12%，农产品价格下降 4%，国内农业用地、灌溉用水、施肥量和 GHG 排放量分别减少 0.1%、2.2%、1.5% 和 0.8% (图7.101)。减少粮食浪费能够改善全球的可持续性。

转向健康的饮食可缓解用地竞争。在保证足够营养摄入的基础上，转变饮食能够有效减少生物质能部署对中国国内农产品价格、农业用地和 GHGs 排放的影响，同时能有效减少转移给贸易伙伴的环境负担。1961 年以来，中国人均动物性食品的消费量增加了约 12 倍。中国当前人均肉类消费（例如，猪肉）已经超过了《中国膳食指南》的推荐水平。向肉类密集型饮食的快速转变对环境和人类健康产生了越来越大的影响。遵循中国营养学会的膳食摄入量建议将改善人类健康，同时大大减少环境负担。在 DietHealth 情景中，我们考虑转变饮食，将当前动物性食物消费量与建议消费量之间的差距减少 20%。与 FreeTrade 情景相比，饮食转变将使中国 2060 年的牲畜产品消费量减少 15% (3200 万吨) (图7.100 (b) - (c))。尽管用于食用的粮食增加了 15% (8100 万吨)，但粮食消费总量下降了 8% (9600 万吨)，主要源于饲料用粮的消费量减少了 40% (2 亿吨)。饮食转变还能有效减少农业用地，有助于缓解粮食作物和生物能源作物之间的用地竞争，减少对粮食安全的威胁。

提升作物单产可有效减少转移给贸易伙伴的环境负担，但不能完全消除。过去几十年中，农业集约化大大提高了中国主粮作物的产量，然而，依然存在较大的单产差距。田间试验表明，采取推荐的种植方法能够在不增加氮肥使用的情况下进一步增加小麦、玉米和水稻的单产。YieldUp 情景中，假设小麦、玉米和水稻的单产从当前水平逐步增加到可实现水平的 75%，这导致 2060 年人均每日卡路里摄入量比 FreeTrade 情景高 1.8%，粮食价格下降 9.1% (图7.101)。增加国内粮食作物单产将降低饲料成本进而增加牲畜产品的消费。因此，国内牲畜产品产量增加，进口量减少，进而减少中国转移给贸易伙伴的环境负担。

综合措施可一举多得。结合以上提到的三种可持续性措施能够提供额外的生物质能且不会增加中国贸易伙伴的资源和环境负担。FoodSystem 情景中，2060 年国内人均每日卡路里摄入量将增加到 3294 千卡，比 FreeTrade 情景高 20%，比 Reference 情景高 14% (图7.101)。到 2060 年，粮食价格分别比 FreeTrade 和 Reference 情景中的价格低 22% 和 12%。与 Reference 情景相比，2060 年国内农业用地、灌溉水、氮肥和 GHG 排放量分别减少 21%、13%、17% 和 12%。此外，小麦、水稻和玉米的 SSR 分别增长至 92%、99% 和 98% (图7.100 (d) - (f))。FoodSystem 情景下，2060 年虚拟农业用地进口量为 7900 万公顷，分别比 FreeTrade 和 Reference 情景中低 49% 和 40% (图7.102-图7.103)。

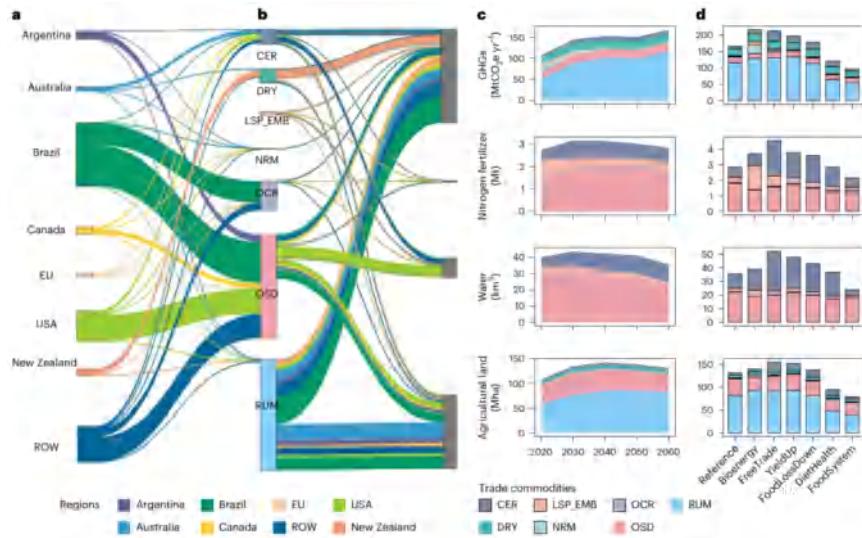


Figure 7.103: 农产品进口及其隐含的环境影响。a-d, 农产品进口 (a), 隐含在农产品进口中的虚拟环境影响 (b-d), a 和 b 是 Reference 情景中 2060 年的数值, c 是 Reference 情景中的环境影响, d 是 2060 年的环境影响。a 中的单位是百万吨 (Mt)。b 和 d 中, 农产品可进一步细分为乳制品 (DRY)、反刍动物肉类 (RUM)、猪和禽类产品 (NRM)、谷物 (CER)、油料作物 (OSD) 和其他作物 (OCR)。图中也包含了饲养牲畜所需粮食 (LSP_EMB) 在生产过程中的环境影响

稳健性分析

模型结果对人口、贸易和饮食转变的假设较为敏感, 对生物质能源供给水平、生物质能原料组成和作物单产的假设的敏感性较弱, 对国内 GDP 和全球其他地区的生物质能供给量的假设的敏感性最低 (图7.104)。相较于 FreeTrade 情景中的贸易假设, 更低的贸易障碍将使农业用地和灌溉用水的虚拟进口量分别增加 7.2% 和 7.3%; 而更高的贸易障碍则会使以上两个指标分别减少 18.7% 和 31.8%。相较于 DietHealth 情景中的饮食, 将动物性食物消费量降低 10% 将会使 2060 年国内农业用地、灌溉用水、施肥量和 GHG 排放分别降低 16.4%、1.0%、0.5% 和 28.0%; 虚拟进口的农业用地、灌溉用水、施肥量和 GHG 排放分别下降 26.6%, 25.3%, 27.7% 和 26.3%。尽管不同假设下的可持续性影响与 7 个核心情景下的数值有较大的差异, 但本文的核心结论保持不变, 即提高粮食系统效率有助于中国实现碳中和目标且不影响全球可持续发展, 研究发现的政策启示也是较为可靠的。

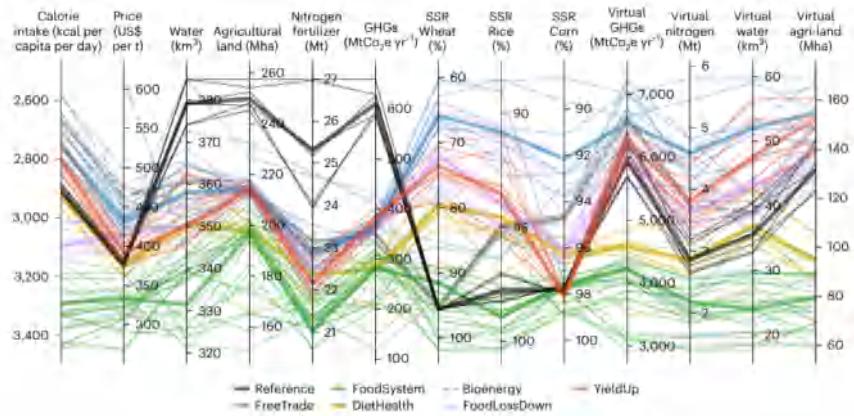


Figure 7.104: 不同未来情景下在中国部署生物质能对 2060 年可持续性的影响。前 9 个指标代表了中国国内的可持续性，包括人均每日卡路里摄入量、农产品价格、灌溉用水、农业用地、氮肥、AFOLU 部门的 GHG 排放以及小麦、水稻和玉米的自给率。后 4 项指标是中国从其贸易伙伴进口产生的虚拟环境影响，包括虚拟进口的累积 GHG 排放、氮肥、灌溉用水和农业用地。不同情景中的不同线条因不确定性参数的不同假设各异，包括 GDP、人口、贸易、作物单产、饮食变化、生物能源供应（组成）和它们的不同组合

结论与讨论

本研究不仅对中国实现碳中和目标和粮食安全政策具有重要启示，对其他人口多的新兴经济体也具有重要的参考意义。协调大规模生物质能源生产、国内粮食安全和全球可持续性极富挑战性。在 95% 的粮食自足率约束下，生物质能源扩张会增加地租和农产品价格，而去除粮食自足率约束可能会将环境负担转移给贸易伙伴。因此，从供给侧和需求侧共同发力是理想的政策组合。

将当前的粮食损失和浪费系数（27%）减半能够减少国内卡路里摄入量损失且腾出 4000 万公顷的耕地，相当于 2060 年中国种植生物质能所需面积的 79%。实际上，中国政府已经发布了一系列政策以减少粮食损失和浪费，包括加强公众教育和监管政策。例如，2012 年发布的“八项规定”、2020 年的“光盘行动”和 2021 的“反食物浪费法”等。其次，转向健康的饮食对减少农业用地相关的负担至关重要。尽管中国当前人均动物性食物的消费量（2019 年为 108.46 千克）远低于大部分发达国家，尤其是美国（2019 年为 375.77 千克），但本研究结果表明，在不降低人均总卡路里摄入量的情况下，转向较低动物性食物摄入的饮食是成本低且可行的。但饮食的转变受到许多社会惯性因素的影响，需要多重措施结合起来，才能促进改变。

缩小单产差距是实际可行。如果主粮作物的单产能够达到可实现水平的 80%，农业用地将减少 22%（2000 万公顷）。尽管过去二十年中国主粮作物的单产显著增加，但由于小农模式的技术和管理缺陷，中国主粮作物的单产依然显著低于可实现水平，这可以通过使用绿色技术和增强管理水平得到提升。

单独实施以上任意一项措施都无法消除生物质能部署对全球可持续性的负面影响。只有通过在粮食生产和消费系统采取综合的效率措施，并且将小麦的自给率适当从 95% 降低到 90% 就可以同时实现碳中和、粮食安全和全球可持续性的三重目标。因此，为了实现可持续发展目标，需要采用一种全面提升粮食系统效率的方法，应用综合模型工具，能够使用一致的框架来考虑生产者和消费者、气候和环境影响以及社会和经济影响、国内影响以及对贸易伙伴的影响。科学合理的制定可

行性政策，避免多项措施同时实施的边际效应递减或反弹效应。

7.10.2 LEEEП 研究 | Nature Comm.: 中国农村现代能源转型助力碳中和与健康改善

- **原文标题:** Costs and health benefits of the rural energy transition to carbon neutrality in China [42]
- **期刊:** Nature communications
- **发表年份:** 2023
- **作者:** Teng Ma, Silu Zhang, Yilong Xiao, Xiaorui Liu, Minghao Wang, Kai Wu, Guofeng Shen, Chen Huang, Yan Ru Fang*, Yang Xie*
- **文章链接:** [点击 LEEEП 微信公众号链接阅读推送原文](#)

研究摘要

农村居民能源向现代能源转型对于中国实现“碳中和”目标、空气质量改善目标至关重要。本研究通过构建“居民能源-空气质量-公众健康”的模型框架，在省级层面探究中国农村居民部门实现碳中和目标的低碳转型路径，分析空气质量改善带来的健康影响，发现推广电炊事设备和空气源热泵有助于农村家庭向现代能源转型、实现“碳中和”目标、显著改善北方地区的空气质量，且大部分省份的货币化人群健康效益可抵消技术转型成本。研究成果于2023年9月29日在线发表于Nature Communications。

该成果是在北京大学碳中和研究院交叉学科平台的支持下，发挥跨院校多学科团队综合优势，基于多方自主构建的IMED综合评估模型体系在双碳政策评估方面取得的又一重要研究进展。论文由北京航空航天大学经济管理学院谢杨副教授指导博士生马腾和博士后方艳茹共同完成，主要合作者来自北京航空航天大学经济管理学院、北京大学环境科学与工程学院、北京大学城市与环境学院、北京大学碳中和研究院等机构。本研究得到国家自然科学基金委管理学部青年项目“中国碳减排与空气污染控制政策的成本效益分析”、重点项目“温室气体减排、空气污染治理的健康效益评估与协同政策设计”、北京大学必和必拓“碳与气候”博士研究生未名学者项目等支持。

研究背景

农村居民部门是重要的能源消费领域，同时排放大量的温室气体和空气污染物。农村居民用能向现代能源转型有助于协同实现多个可持续发展目标（SDGs），如获取清洁能源（SDG7）、良好的健康与福祉（SDG3）等。在“双碳”战略背景下，农村居民能源如何实现低碳转型及其协同影响值得关注。

先前研究主要集中在两个方面：一是基于农村能源调查及排放清单回溯性地静态评估居民能源使用的空气质量与人群健康影响；二是构建能源规划模型分析建筑部门的中长期节能减排潜力。但由于缺乏精细化数据和综合性模型，鲜有研究在省级层面关注农村居民部门实现碳中和目标的转型路径，能源转型的成本与健康效益分析尤其缺乏。

鉴于此，本研究聚焦农村炊事和取暖活动（占农村居民能源消耗的80%以上），通过构建“省级居民能源系统模型-空气质量模型-健康评估模型”综合模型框架，基于情景分析法从省级层面模拟农村居民部门实现碳中和目标的能源转型路径，识别关键减排技术，进一步探究空气质量协同改善产生的货币化健康效益能否抵消技术转型成本。

研究方法

本研究拓展了北京大学 IMED | TEC 能源技术优化模型，深度融合了陶澍院士/沈国锋研究员团队编制的全国农村居民能源调查和排放清单等特征数据库，极大提升了 IMED 模型农村居民模块的精准度。进一步将本土化的省级居民能源系统模型（IMED | TEC 居民部门）与 IIASA 的空气质量模型（GAINS）、北航谢杨团队主导开发的公众健康评估模型（IMED | HEL）深度耦合，形成了双碳政策成本与效益分析的全链条综合评估框架。

本研究设置了两个主情景：基线情景（BaU）与碳中和情景（CNS）。BaU 情景是无碳排放限制的参考情景，农村炊事和取暖活动的技术结构延续历史趋势进行自发、缓慢的技术升级。CNS 情景是有省级碳限额的碳中和情景，假设各省 2035 年的碳排放较 2014 年下降 25-35%，2060 年的碳排放较 2014 年下降 90-95%。此外，为检验结果的稳健性，本研究在主情景 BaU 和 CNS 的基础上，通过构建 116 个敏感性情景对农村炊事、取暖服务需求、现代技术初始成本、现代技术效率、现代能源价格、暴露-响应函数、生命统计价值等关键输入变量进行敏感性分析。

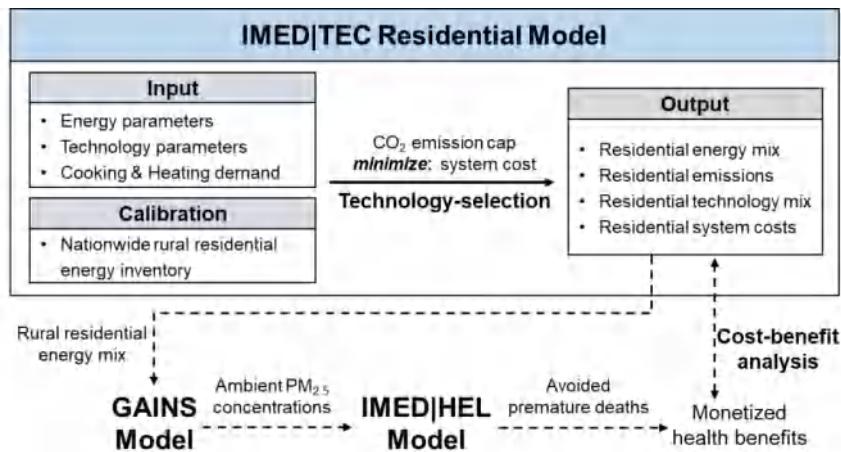


Figure 7.105: 研究框架

研究结果

农村炊事和取暖能源向现代能源转型，能源贫困在全国范围内明显改善。

1) 国家层面。在 BaU 和 CNS 情景中，由于持续的城镇化趋势，全国农村炊事和取暖能源消费在 2014 至 2060 年间均下降，但在 CNS 情景中下降趋势更加显著。在 BaU 情景中，农村炊事和取暖能源消费由 2014 年的 1.51 亿吨标准油下降至 2060 年的 0.79 亿吨标准油；而在 CNS 情景中，农村能源首先向天然气转型，再向电力转型，由于现代技术和能源的效率高于传统的生物质和煤炭，2060 年的能源消费仅为 0.26 亿吨标准油。另一方面，未来农村传统固体燃料的使用量逐渐减少，但在 BaU 情景中煤炭和传统生物质仍为 2060 年的主导能源；而在 CNS 情景中，2060 年电和气等现代能源消费较 2014 年增加 2 倍，其中电力成为主导能源，农村炊事和取暖分别消耗 0.14 和 0.04 亿吨标准油的电力。

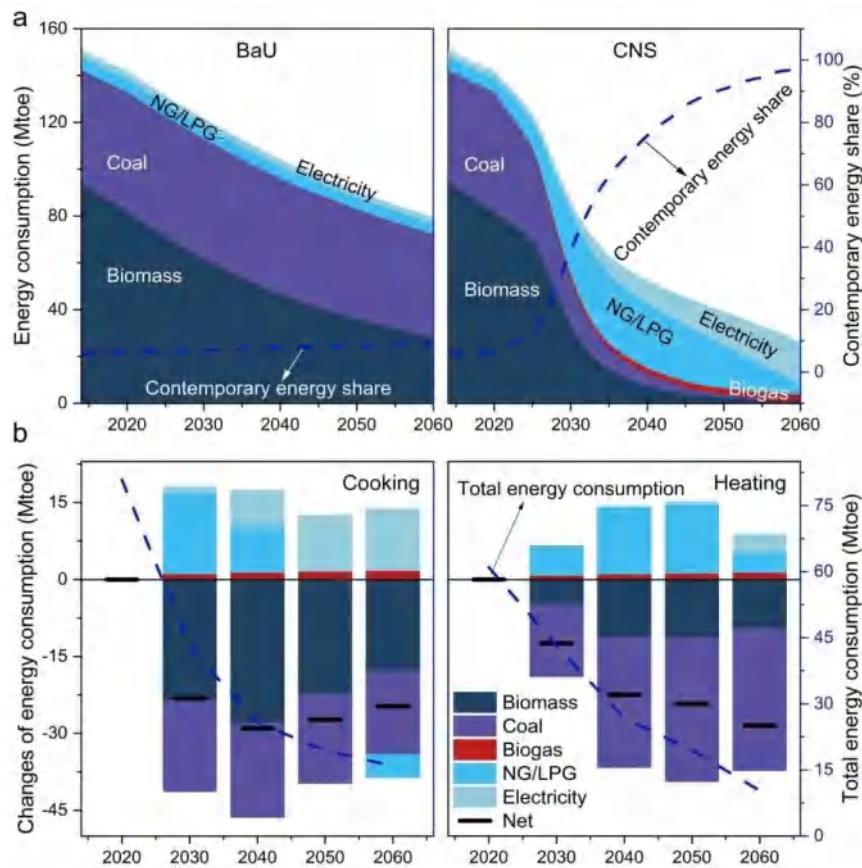


Figure 7.106: 中国农村炊事、取暖的能源消耗和现代能源占比

2) 省级层面。2014 年, 除沿海发达地区外, 传统固体燃料是大部分省份农村炊事、取暖的主要能源, 如广西、四川、辽宁的生物质使用占比分别为 91%、79% 和 73%, 而山西、贵州煤炭使用占比约 50%。此外, 由于北方地区的冬季取暖需求大且传统固体燃料效率低, 北方省份的能源消费一般高于南方省份。在 CNS 情景中, 现代能源成为 2060 年所有省份农村炊事、取暖的主要能源, 占比超过 90%; 此时, 全国人均现代能源消费达到 80 千克标准油 (kgcoe), 远超 2014 年 (14kgcoe) 和同时期 BaU 情景 (23kgcoe) 水平。根据国际能源署定义的能源发展指数 (EDI), 人均现代能源消费量和现代能源占比是衡量居民能源贫困的重要指标, 因此碳中和目标有利于在全国范围内大幅改善农村能源贫困, 但人均现代能源消费的省际不平等可能扩大。

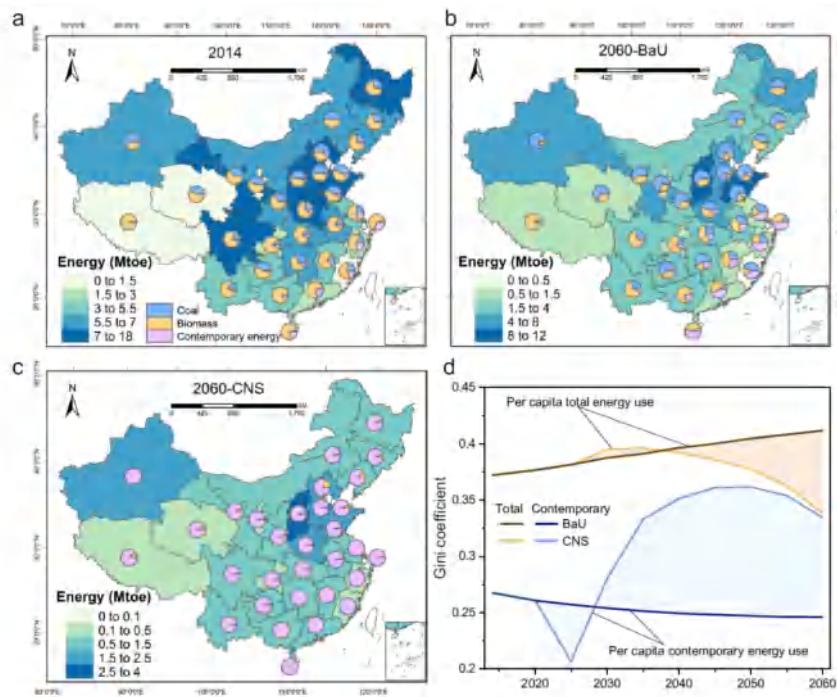


Figure 7.107: 农村炊事、取暖的能源消耗和现代能源占比的空间分布

农村现代能源转型促进空气污染减排，协同改善空气质量人群健康。农村炊事、取暖活动脱碳有利于协同减少 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 排放，BaU 情景中农村居民部门的三类空气污染物直接排放分别由 2014 年的 121、58、256 万吨下降至 2060 年的 108、27、124 万吨，而 2060 年 CNS 情景较 BaU 情景分别继续下降 99%、97% 和 99%。值得注意的是，由于传统生物质和煤炭的快速淘汰， SO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 排放在 2040 年之前显著下降；另一方面，电力将居民部门的排放转移到上游发电部门，因此全生命周期的 CO_2 和空气污染物减排要求电力部门采取减污减碳措施。北方地区因此获得显著的空气质量改善和人群健康效益，2050 年，北方大部分省份的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降低超过 $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，避免约 52000 例/年过早死亡，占全国 70%。其中山西 ($5.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、河北 ($5.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、陕西 ($4.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降低最多，而山东 (9288 例/年)、河南 (9280 例/年)、河北 (8014 例/年) 避免的过早死亡人数最多。

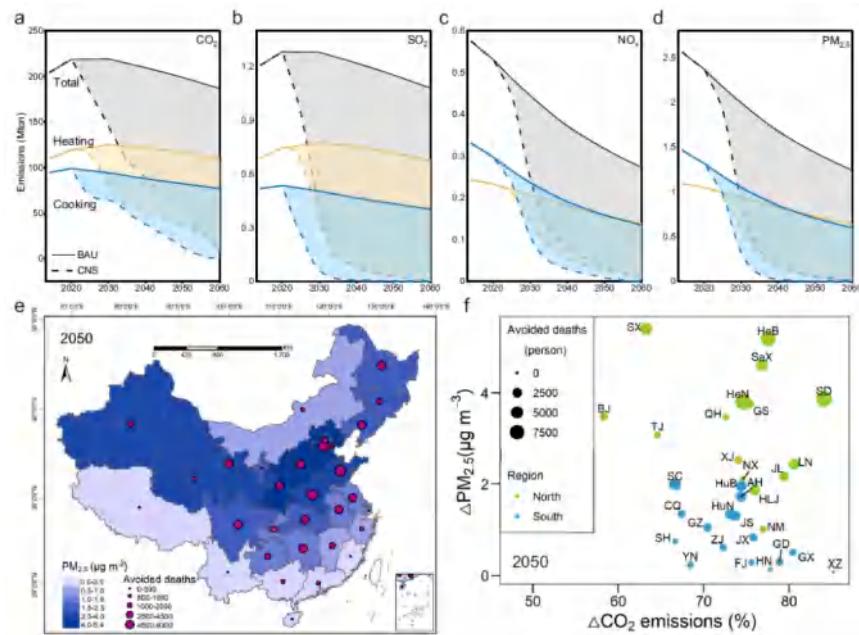


Figure 7.108: 全国 CO₂ 和污染物排放、PM_{2.5} 浓度和避免的 PM_{2.5} 相关过早死亡人数

碳中和目标促使农村炊事和取暖向电炊事炉具、空气源热泵转型。在碳中和目标下，使用传统固体燃料的秸秆炉灶、薪柴炉灶、煤炉等设备逐步淘汰，在 2040 年之前主要向天然气/LPG 设备转型，而随后逐步向电炊事炉和空气源热泵转型，至 2060 年后两类设备分别满足 94% 的炊事需求和 72% 的取暖需求。现代技术设备伴随着更高的成本，2060 年全国技术转型成本约 130 亿美元，其中主要由山东、山西、河北、黑龙江等华北、东北省份承担，对应的人均转型成本更高。在省级层面，由于 CNS 情景中南方省份的碳约束更紧，技术升级发生得更快，2040 年时电炊事炉具、空气源热泵已成为大部分南方省份的炊事、取暖主导技术。

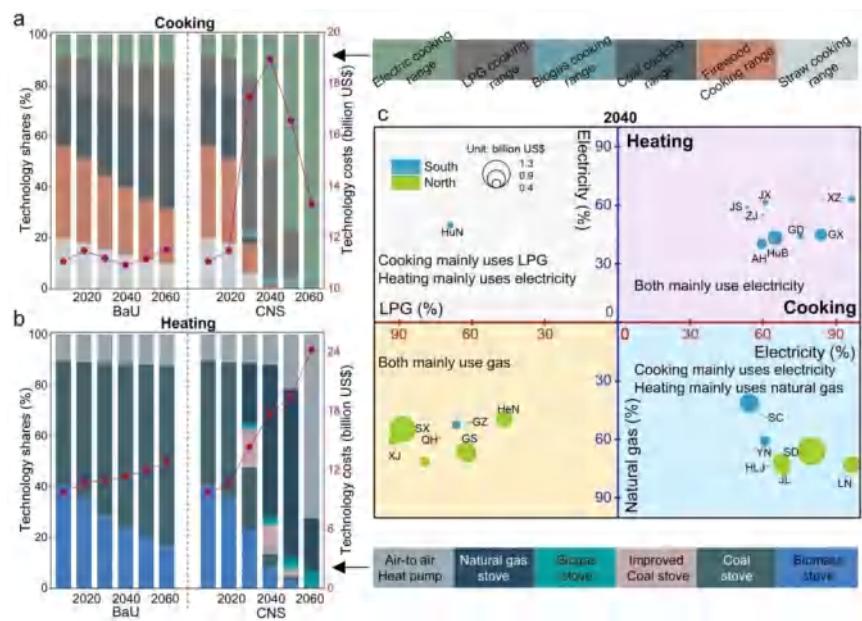


Figure 7.109: 农村炊事、取暖活动的技术转型趋势和年度技术成本

农村居民部门脱碳的健康效益可观，大部分省份的货币化人群健康效益可抵消转型成本。研究通过比较 2035 年（“美丽中国”目标年）和 2050 年省级层面的技术转型成本和货币化人群健康效益，构建简易的“成本-效益”框架。无论 2035 年或 2050 年，在中 VSL 水平下，全国大部分省份的货币化人群健康效益高于转型成本，2050 年全国效益-成本比为 11.9。北方地区的技术转型成本和健康效益都相对更大，其中净效益最大的省份是山东、河南和河北，2050 年的净效益分别为 32、19、14 亿美元。即使在低 VSL 水平下，大部分省份的货币化人群健康效益可抵消转型成本的结论依旧成立。对于技术转型成本高于 PM_{2.5} 相关室外健康收益的少数西南地区，主要原因包括 1) 本底 PM_{2.5} 浓度很低，造成的 PM_{2.5} 相关过早死亡人数很少；2) 社会经济发展水平相对落后，代表避免过早死亡支付意愿的 VSL 参数估计值相对较低。

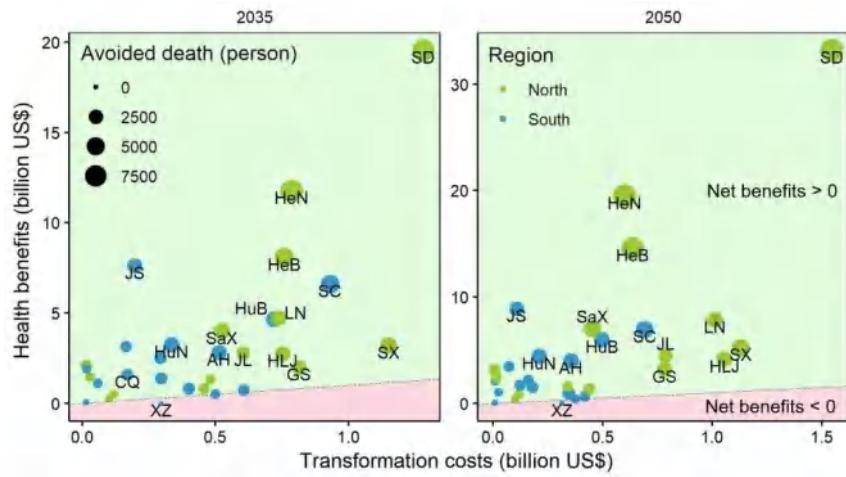


Figure 7.110: 农村炊事、取暖脱碳对应的技术转型成本和货币化人群健康效益（基于中VSL）

敏感性分析。敏感性分析发现农村社会经济发展相关的炊事、取暖需求是影响能源使用、CO₂和污染物排放、居民能源系统成本等最显著的输入参数。然而，尽管敏感性情景中的研究结果与主情景（BaU 和 CNS）在定量方面略有不同，但本研究的主要结论是稳健的。

研究总结

在碳中和目标下，农村炊事、取暖能源由传统固体燃料向电力和气转型，现代能源消费在2014至2060年间增加2倍，全国范围内的农村能源贫困明显改善。全国农村居民将广泛使用电炊事炉和空气源热泵，2060年的技术转型成本约130亿美元，主要由华北和东北地区承担。农村居民部门的低碳转型明显改善北方地区的空气质量，2050年全国预计避免约75500例PM_{2.5}相关过早死亡，其中北方地区占69%。值得注意的是，农村居民部门实现碳中和目标的健康效益可观，大部分省份的货币化人群健康效益可抵消转型成本。

作者简介

第一作者：马腾，北京大学环境科学与工程学院环境管理专业2020级直博生，研究方向为能源环境经济与政策评估，聚焦居民能源系统的气候适应与低碳转型及成本效益分析，以第一作者在Nature Communications发表论文1篇，共同作者论文7篇。

通讯作者：方艳茹，博士，时任北京大学环境科学与工程学院博士后，现任中国环境科学研究院环境管理研究中心助理研究员。主要从事能源环境与气候政策研究，着重运用综合评估模型探索不同行业（如电力、交通和建筑）的可持续低碳转型。综合考虑经济、环境、能源、人群健康等多方面因素，明晰不同行业的碳中和优化发展路径。以一作及通讯作者在Nature Communications、Resources, Conservation and Recycling、Applied Energy、Renewable Sustainable Energy Reviews等期刊发表论文10余篇。

通讯作者：谢杨，北京航空航天大学经济管理学院副教授，博士生导师。主要从事环境与气候变化的健康经济影响研究，主导开发了全球和地区多层次人群健康综合评估模型，定量评估清洁空气与气候政策的成本与效益。主持国家自然科学基金委青年项目、面上项目、重点项目课题、科技部国家重点研发计划课题等项目，入选北航“青年拔尖人才支持计划”、“卓越百人计划”等。以第

一或通讯作者在 Nature Communications、Lancet Regional Health、Global Environmental Change、EST 等主流期刊发表论文 30 余篇，ESI 前 1% 高被引论文累计 8 篇。担任 Energy, Ecology and Environment 期刊领域编辑、中国优选法统筹法与经济数学研究会青年委员、IPCC AR6 报告评审人、《全球疾病负担》Collaborator。

7.10.3 LEEEP 研究 | GEC: 气候变化下日本 PM_{2.5} 和臭氧相关的健康挑战

- **原文标题:** PM_{2.5} and ozone pollution-related health challenges in Japan with regards to climate change [97]
- **期刊:** Global Environmental Change
- **发表年份:** 2023
- **作者:** Yin Long, Yazheng Wu, Yang Xie*, Liqiao Huang, Wentao Wang, Xiaorui Liu, Ziqiao Zhou, Yuqiang Zhang, Tatsuya Hanaoka, Yiyi Ju, Yuan Li, Bin Chen, Yoshikuni Yoshida
- **文章链接:** [点击 LEEEP 微信公众号链接阅读推送原文](#)

摘要

人类活动造成的空气污染严重威胁着人类健康。而空气质量改善措施会产生额外的经济成本。本研究通过耦合 AIM/Enduse 模型、CAM-chem 模型和 IMED | HEL 模型，分析了基于空气质量控制和气候变化减缓情景下的未来日本 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度分布，进而评估末端控制技术和电气化的环境效益，同时评估了对人群健康和社会经济的影响。结果显示在 2010-2050 年，日本建筑和交通部门的末端控制技术和电气化将使由 PM_{2.5} 和 O₃ 暴露造成的过早死亡人数每年减少 65500 人；此外，可使 2050 年的人均工作时间损失和经济损失分别减少 3.64 小时和 54.3 亿美元。从区域角度分析日本西部从 PM_{2.5} 空气质量改善中受益较多，而整个日本将从 O₃ 污染减少中受益。

研究背景

空气污染会导致多种健康问题，不同国家相继制定了多种的措施来减少空气污染。联合国政府间气候变化专门委员会提出全球努力的目标是将本世纪全球平均气温上升幅度控制在 2 °C 以内，并努力把升温幅度控制在 1.5 °C 之内。在老龄化背景下，在空气质量较好的发达国家为实现气候减缓目标而采取的措施依旧可以减少空气污染物排放，改善空气质量，带来健康效益。

此外，多种措施已被用来改善当前的环境污染问题，如调整能源消费结构、采用预燃烧和末端控制技术等。但是，其中一些措施可能会减缓经济增长和加剧贫困。只有绿色转型才能实现社会可持续发展。因此，在制定政策时应该考虑对人群健康的协同效益。

PM_{2.5} 和 O₃ 是目前主要的大气污染物，而作为发达国家的日本依旧面临着空气污染的威胁，特别是 O₃ 污染；同时，日本有大量的老年人口，是全世界有着高老龄化率的国家之一，人口老龄化加剧了健康负担。因此，本研究模拟了基于 2 °C 目标和空气质量控制技术情景下的 PM_{2.5} 和 O₃ 污染情况和浓度分布，评估了对健康和经济的协同效应。研究结果有助于了解 2 °C 目标、末端控制技术和电气化将如何影响日本各地的 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度和分布，以及相关的健康终点、医疗支出、工作时间和经济损失。

研究方法

本研究综合运用了 AIM/Enduse 模型、CAM-Chem 模型和 IMED | HEL 模型。首先，使用 AIM/Enduse 模型，预测空气污染物（包括 SO₂、NO_x、PM_{2.5}、PM₁₀、OC、CO、NMVOC 和 NH₃）的排放情况。其次，运用 CAM-Chem 模型来模拟年平均 PM_{2.5} 和 O₃ 日最大 8 小时平均浓度。然后，使用 IMED | HEL 模型来计算健康和经济效益，包括致病、致死、工作时间损失、医疗支出和经济损失。

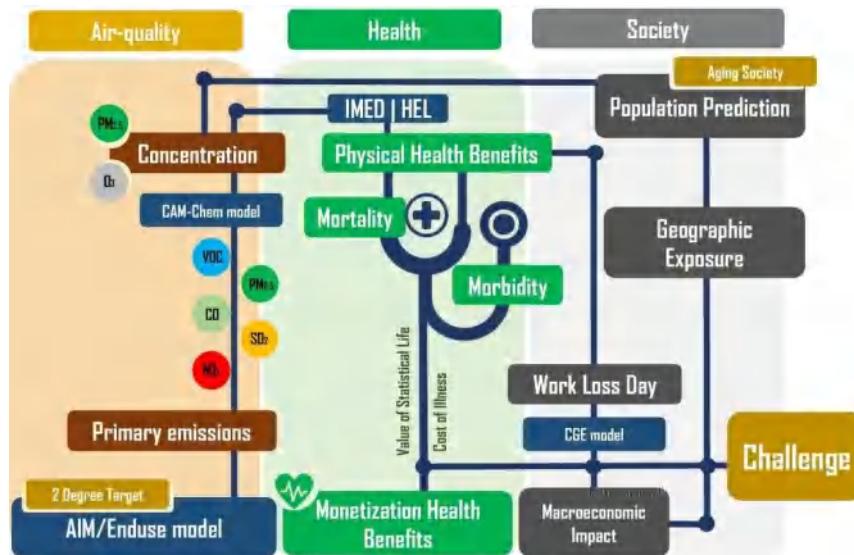


Figure 7.111: 研究方法

情景设置

本研究设定了五种情景，包括基准情景（不考虑 2 °C 目标）、EcoPmid 情景（考虑 2 °C 目标和中等末端控制技术），以及其他三种情景（将电气化措施分别加入到住宅、建筑和交通部门）。

情景		描述	
基准情景		基准情景不考虑气候目标，发达国家拥有比较先进的空气污染物末端治理技术和较高的技术渗透率；发展中国家拥有较低的新技术渗透率，并且未来技术增长速度显著低于发达国家。	
技术情景 度目标	无 2 度目标		中等水平的空气污染物控制技术，不考虑气候目标约束。
	2 度目 标	CCSBLD	中等水平空气污染物控制技术，考虑气候目标，采用 CCS 技术，并且假设居民部门较高的电气化
		RESTRRT	中等水平空气污染物控制技术，考虑气候目标，采用 CCS 技术，并且假设居民部门和交通部门较高的电气化
	RESBLDTRT	中等水平空气污染物控制技术，考虑气候目标，采用 CCS 技术，并且假设居民部门、交通部门和建筑部门较高的电气化	
2D: 2-degree target CCS: Carbon Capture and Storage RES: Residential sector BLD: Building sector TRT: Transportation sector			

Figure 7.112: 模型情景设置

研究结果

未来 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度分布

各情景下的未来 PM_{2.5} 浓度均有所下降，不同情景之间的 PM_{2.5} 浓度差异较小。对 PM_{2.5} 而言，2010 年日本年均 PM_{2.5} 浓度为 16 μg/m³，在 2050 年，EoPmid 情景中的年均 PM_{2.5} 浓度将下降至 8 μg/m³。与 CCSBLD、RESTRRT 和 RESBLDTRT 情景对比发现，电气化只能将 PM_{2.5} 的浓度降低 1-2 μg/m³。与日本东北部相比，日本西部和中部的 PM_{2.5} 浓度更高，这与工业分布是一致的。在基准情景下，2050 年日本西部地区的 PM_{2.5} 浓度将达到 30 μg/m³，这一数值 EoPmid 情景下 2030 年 PM_{2.5} 浓度水平 (35 μg/m³) 相近。这表明，相比于基准情景，EoPmid 情景下采取的末端控制技术和电气化措施可以帮助日本西部提前 20 年实现相近水平的空气质量。

与 PM_{2.5} 相比，日本 O₃ 污染更严重。2010 年日本 O₃ 日最大 8 小时平均浓度为 127 μg/m³，基准情景下，在 2010-2050 年，基准情景下的 O₃ 浓度十分稳定，EoPmid 情景中的 O₃ 浓度有所下降。与 PM_{2.5} 浓度的地理分布不平衡现象有所差异，日本各地的 O₃ 污染均较为严重。在基准情景下，2050 年日本 O₃ 浓度为 106 μg/m³，EoPmid 情景下的 2050 年 O₃ 浓度将下降 8 μg/m³。相比于基准情景，EoPmid 情景下采取的末端控制技术和电气化措施可以显著降低 O₃ 浓度。

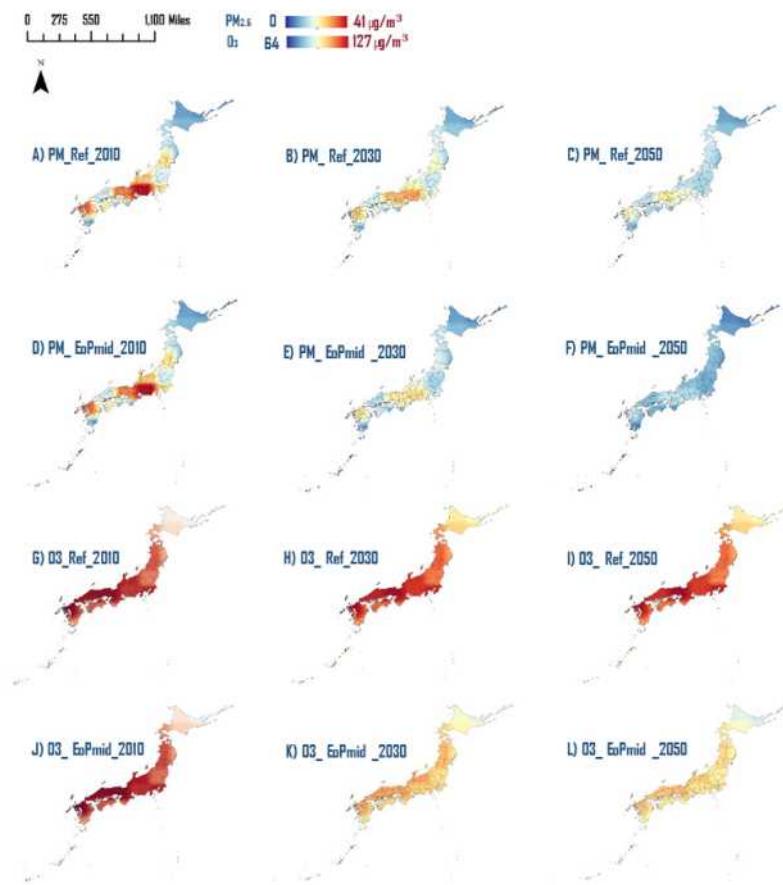


Figure 7.113: 各个情景下日本 2010、2030 和 2050 年 PM_{2.5} 和臭氧浓度

控制措施的协同效益

尽管日本的 PM_{2.5} 浓度较低，但实施控制措施对死亡率的影响是超出预期的。2010 年，日本每百万人口中因 PM_{2.5} 暴露而过早死亡的人数约为 10.3 万。实施末端控制技术可在 2050 年避免 3.5 万人过早死亡。2050 年，2D_EoPmid_RESBLDTRT 情景中的可避免的过早死亡人数为 2 万人。由 O₃ 暴露导致的过早死亡率远低于 PM_{2.5}。2010 年，日本每百万人口中因 O₃ 暴露而过早死亡的人数约为 5.3 万。2050 年，分别由实施末端控制技术和电气化而避免的 O₃ 暴露过早死亡人数仅为 1.8 和 1.0 万人。

与 PM_{2.5} 相关的发病显著低于比 O₃。2010 年，日本每百万人口中因 PM_{2.5} 和 O₃ 暴露而导致的致病例数分别为 160 万和 1.04 亿，总致病例数为 1.06 亿。在 2050 年，EoPmid 情景中的可避免总致病例数为 3100 万，其中与 PM_{2.5} 暴露相关的致病例数分别为 55 万。慢性支气管炎和哮喘在发病率中占主导地位。实施末端控制技术可在 2050 年分别减少的慢性支气管炎和哮喘致病例数为 3000 万和 1200 万。

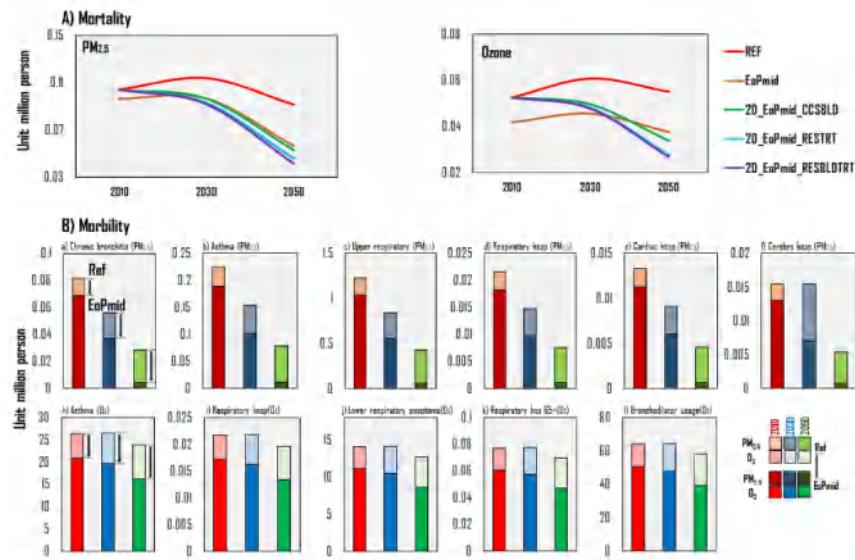


Figure 7.114: 日本每百万人因 PM_{2.5} 和臭氧暴露造成的过早死亡和致病

采用末端控制技术和电气化措施可以减少由 PM_{2.5} 和 O₃ 暴露造成的工作时间损失。在基准情景下，2030 年人均工作时间损失为 5.5 小时。在 2D_EoPmid_RESBLDTRT 情景中 2030 年人均工作时间损失将减少 2.6 小时。经济效益方面，采取应对措施可减少由过早死亡造成的经济损失。在基准情景下，2030 年由 PM_{2.5} 和 O₃ 暴露造成的经济损失分别为 8080 亿美元（占 GDP 的 12%）和 2560 亿美元（占 GDP 的 3.5%），2D_EoPmid_RESBLDTRT 情景中 2030 年可减少的经济损失分别为 1550 亿美元（占 GDP 的 2%）和 550 亿美元（占 GDP 的 0.7%）。

由于 PM_{2.5}、O₃ 浓度和暴露人口的变化，基准情景中日本的健康支出将有 2010 年的 75 亿美元上升至 2050 年的 104 亿美元。实施末端控制技术可减少日本的健康支出，在 2030 年和 2050 年分别节省 24 亿和 34 亿美元健康支出。与基准情景相比，采用电气化技术将在一定程度上增加 2030 年日本的健康支出，而在 2050 年可减少健康支出。对比由 PM_{2.5} 和 O₃ 暴露造成的健康支出发现，控制措施对减少与 O₃ 有关的健康支出要高于 PM_{2.5}。此外，暴露于 PM_{2.5} 和 O₃ 的人口数量在空间分布上有所差异。2050 年，区域内暴露于 PM_{2.5} 的最大人口数为 32,763 人，而暴露于 O₃ 的最大人口数为 1,919,365 人。O₃ 的影响在大型城市地区更为明显，如东京、大阪和名古屋；受影响的人数呈现出从西到东的下降趋势。

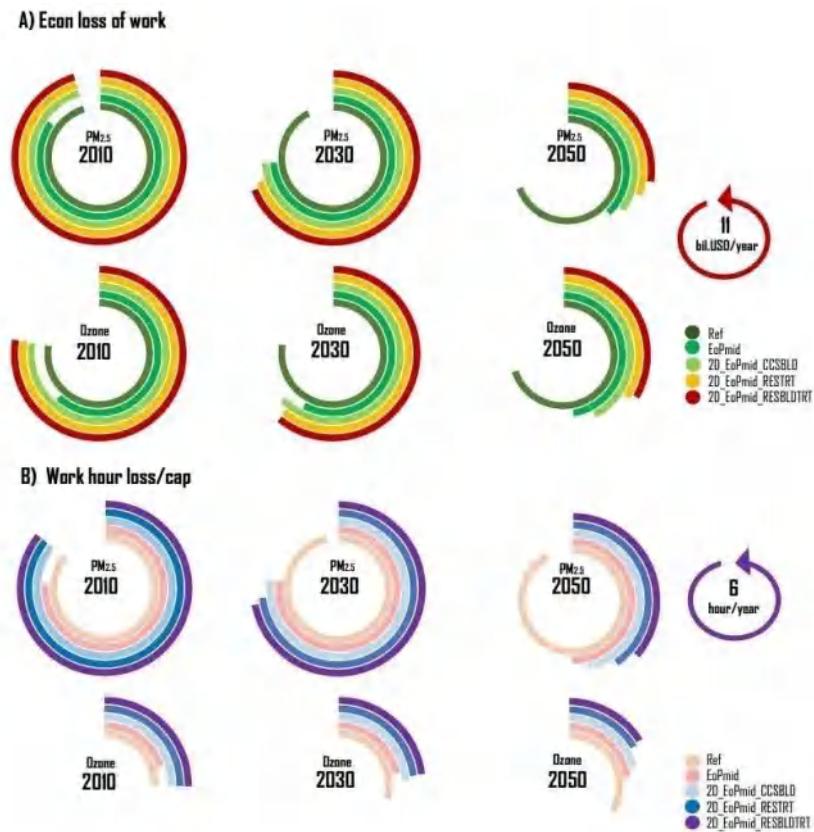


Figure 7.115: 日本 PM_{2.5} 和臭氧造成的经济损失和劳动时间损失

研究结论

本研究深度耦合 AIM/Enduse 模型、CAM-chem 模型和 IMED | HEL 模型，以评估日本基于气候目标和不同末端技术情景下的 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度，以及其带来的人群健康和社会经济影响。

研究表明，在综合政策情景下，日本 2030 年 PM_{2.5} 浓度将达到 WHO 空气质量指导值，而 O₃ 浓度在 2050 年仍难以达到 WHO 空气质量指导值。从区域来看，最明显的改善发生在日本中部和西部地区，且与基准情景相比，综合政策情景可以帮助日本西部提前 20 年实现类似的环境目标。

研究还发现，虽然 PM_{2.5} 造成的健康后果比 O₃ 更严重，但 O₃ 造成的致病数量远高于 PM_{2.5}。通过评估经济损失发现，通过采用最前沿的技术，到 2050 年，由 PM_{2.5} 造成的经济损失可以减少 46.3 亿美元，而与 O₃ 相关的经济损失将减少 14.6 亿美元。对日本 2050 年暴露于 PM_{2.5} 和 O₃ 的人口地理分布分析表明，与 PM_{2.5} 相比，受 O₃ 影响的人数更多，且集中在发达城市，如日本中部和西部的东京、大阪和名古屋。值得注意的是，即使日本社会呈现人口老龄化特征，但大多数人生活在大城市，这是否会加剧由 PM_{2.5} 和 O₃ 暴露导致的健康经济影响，仍有待进一步的观察。这些结果显示，除了努力缓解的气候变化外，日本应加强与邻国的生态和环境合作，以促进绿色发展。同时，日本也可以为其他国家实现空气质量目标提供一个发展思路。

7.10.4 LEEEP 研究 | iScience: 我国发展可再生能源的空气质量与健康协同效益

- **原文标题:** Large-scale renewable energy brings regionally disproportional air quality and health co-benefits in China [98]
- **期刊:** iScience
- **发表年份:** 2023
- **作者:** Yang Xie, Meng Xu, Jinlu Pu, Yujie Pan, Xiaorui Liu, Yanxu Zhang, Shasha Xu*
- **文章链接:** [点击 LEEEP 微信公众号链接阅读推送原文](#)

研究项目背景

中国是全球可再生能源装机容量最高的国家。大规模发展可再生能源可减少对化石燃料的使用，从而减少温室气体的排放、降低空气污染，有助于增强经济和环境的可持续性。本研究通过耦合 IMED | CGE、EDO、GOES-CHEM 和 IMED | HEL 模型，在中国省级层面探讨了可再生能源部署对空气质量与人群健康的影响，并评估了发展可再生能源的成本效益。该成果是基于北京大学 LEEEP 课题组与北京航空航天大学等机构合作自主构建的 IMED 综合评估模型体系取得的阶段性研究进展，以期为气候目标、能源安全、空气质量、人类健康等多维度政策提供决策支持。研究成果于 2023 年 8 月 18 日发表于 iScience。

本文第一作者为北京航空航天大学经济管理学院谢杨副教授，通讯作者为北京大学环境科学与工程学院徐沙沙博士后。本研究得到了科技部重点研发项目（2022YFE0138300）、国家自然科学基金（71903010 和 72134006）、中国博士后基金（2023M730072）等项目支持。

研究背景

发展可再生能源有助于减少温室气体排放和空气污染，并产生健康协同效益。已有研究探讨了中国碳减排带来的与空气污染改善相关的健康协同效益，并指出从健康视角来看，中国可再生能源是值得投资的。然而，现有研究缺乏在更精细化的尺度上探讨部署可再生能源的投资成本和健康经济效益。因此，本研究通过耦合多学科模型，在省级层面上量化中国发展可再生能源带来的健康经济效益，并最终提出具有可行性和可操作性的政策建议，为建设美丽中国和健康中国提供科学支撑。

研究方法

本研究通过耦合 IMED | CGE、EDO、GOES-CHEM 和 IMED | HEL 模型以评估中国发展可再生能源的环境、健康和经济效益（7.116）。具体地，利用 IMED | CGE 和 EDO 模型预测可再生能源（包括水电、风能、太阳能和生物质能）的需求和装机布局，基于 GEOS-Chem 模型计算 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度，再耦合 IMED | CGE 和 IMED | HEL 模型评估人群健康和社会经济影响。本研究构建的情景包括：

(1) State Policy (SP)：该情景假设能源部门相关政策得到全面实施，其中碳排放约束根据中国目前的碳排放强度目标设定，即到 2030 年，碳强度降低 60%-65%。

(2) Below 2 °C (B2)：为实现将全球温升控制在 2°C 以下的目标，中国政府将减少化石燃料的消耗，并发展可再生能源。该情景假设中国 2030 年和 2050 年的 CO₂ 排放上限分别为 80 亿吨和 30 亿吨。

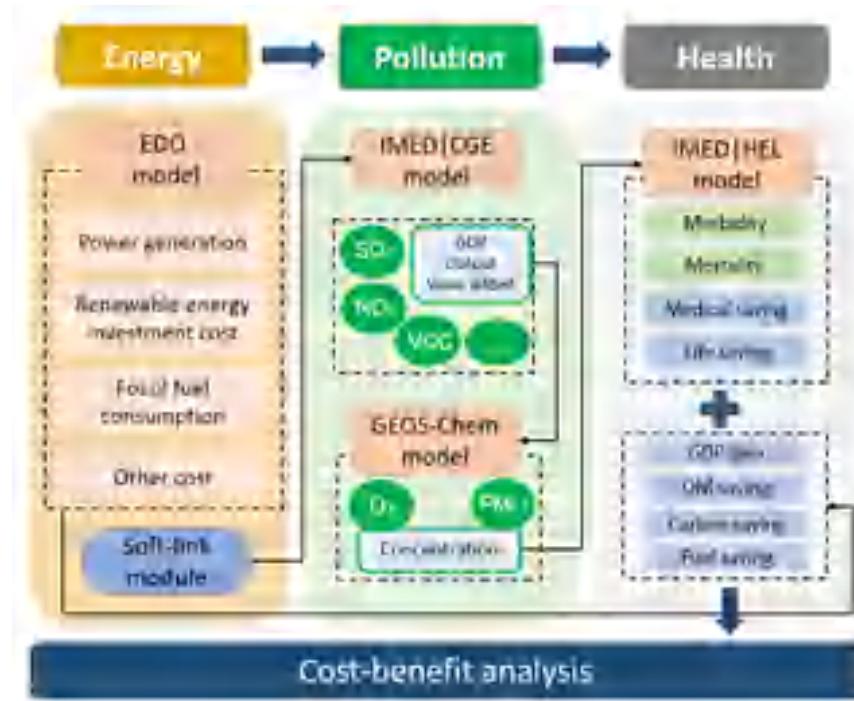


Figure 7.116: 研究框架图

研究结果

空气质量改善

发展可再生能源对中部地区的PM_{2.5}污染改善效果较显著，对西部地区的影响则较不明显（图7.117）。例如，在北京、河北、河南等地区，发展可再生能源可使2030年的PM_{2.5}浓度降低约10 μg/m³；而在青海、西藏、新疆等地区，不同情景下PM_{2.5}浓度几乎没有变化。除此之外，O₃污染仍问题严峻。相较于SP情景，B2情景下中国大部分地区的O₃浓度下降并不显著。

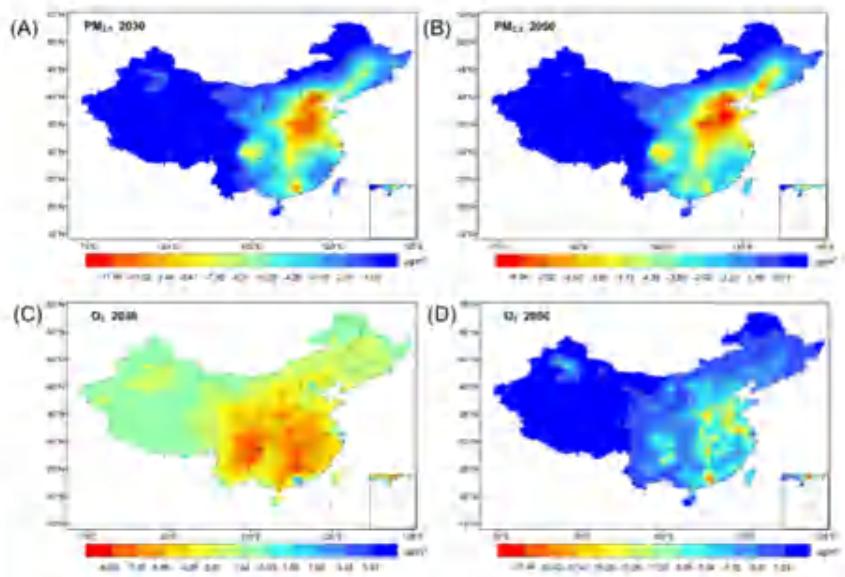


Figure 7.117: 2030 年和 2050 年中国发展可再生能源对空气质量的改善情况 (图中显示的是污染物浓度在 B2 和 SP 情景下的差值)

与空气污染相关的过早死亡人数

发展可再生能源将大幅度减少与空气污染相关的过早死亡人数，且该正效应在东部和中部地区较为显著。中国东部和中部地区通过发展可再生能源可在 2030 年和 2050 年分别避免 0.29 万 (占减少的空气污染相关死亡总人数的 73%) 和 0.44 万 (73%) 与空气污染相关的过早死亡人数 (7.118)。在省级层面，发展可再生能源可显著降低人口密度高、能源消费量大地区与空气污染有关的过早死亡人数。例如，广东、山东和河南 (中国人口最多的三个省份) 可在 2030 年分别避免 0.032 万人 (8%)、0.035 万人 (9%) 和 0.041 万人 (10.5%) 与空气污染有关的过早死亡人数。从不同污染物种类来看，PM_{2.5} 是导致与空气污染相关过早死亡的主要原因。例如，在 2030 年，可避免的与 PM_{2.5} 相关的过早死亡人数将是 O₃ 的 7.5 倍。此外，本研究还估计了每个省每千人中与空气污染有关的过早死亡人数。结果表明，中国北部和中部地区 (包括北京、天津、河北、山东和河南) 的每千人空气污染死亡率远高于其他地区。在 SP 情景中，到 2030 年，由于华北的空气污染，1000 人中有 3.3 人将过早死亡。

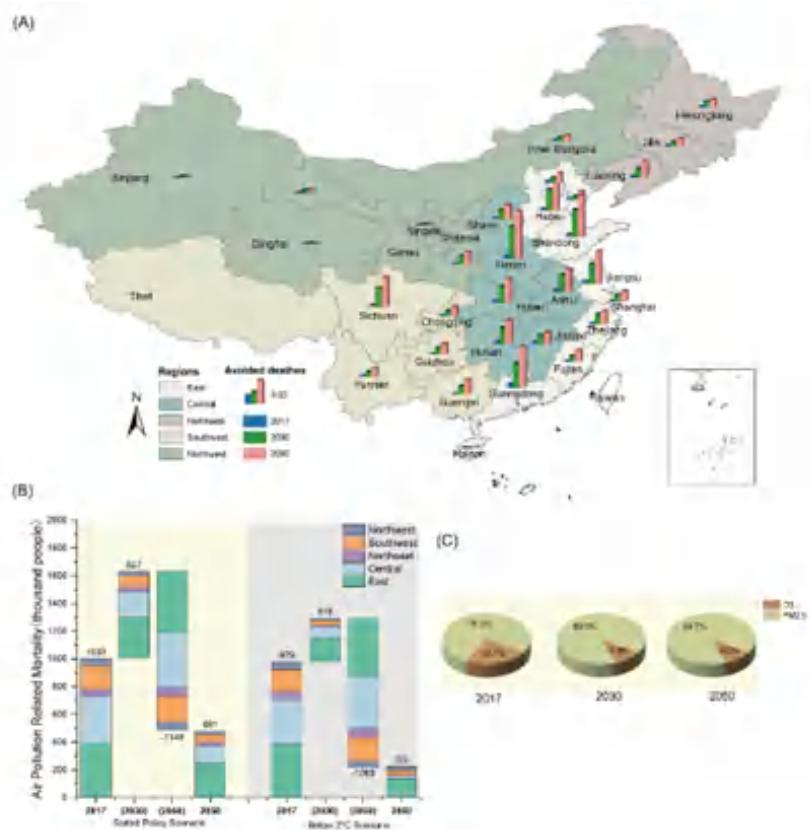


Figure 7.118: 不同情景下与空气污染相关的过早死亡人数 (A 表示在 2017 年、2030 年和 2050 年各省避免的与空气污染有关的过早死亡人数; B 表示不同情景下与空气污染相关的过早死亡人数; C 表示由 PM_{2.5} 和 O₃ 造成的避免的过早死亡人数的比例)

与空气污染相关的致病人数和劳动时间损失

不同地区与空气污染相关的致病人数和劳动时间损失存在显著差异。2017 年, 中国中部地区与空气污染相关的致病人数为 1200 万, 而东部地区仅为 300 万; 南方省份的致病人数 (1100 万) 高于北方 (500 万)。到 2030 年, SP 情景下西部地区大多数省份的发病率将在 60% 以上, 而大多数东部和中部省份的发病率低于 40% (7.119)。发展可再生能源将大幅度减少与空气污染相关的致病人数。在全国层面, B2 情景下空气污染相关的致病人数 (2030 年为 4.8 亿, 2050 年为 1.4 亿) 将远低于 SP 情景 (2030 年为 5.9 亿, 2050 年为 2.9 亿)。

东部和中部地区因空气污染造成的工作时间损失远高于其他地区。随着时间的推移, 这两个地区工作时间损失在全国所占比例也在不断增加。2017 年, 东部和中部地区工作时间损失占比分别为 39% 和 34%, 在 SP 情景下, 到 2050 年将分别增长为 51% 和 26%。发展可再生能源对减少工作时间损失具有积极作用。在全国层面, 2030 年, B2 情景下的工作时间损失比 SP 情景降低 20%。

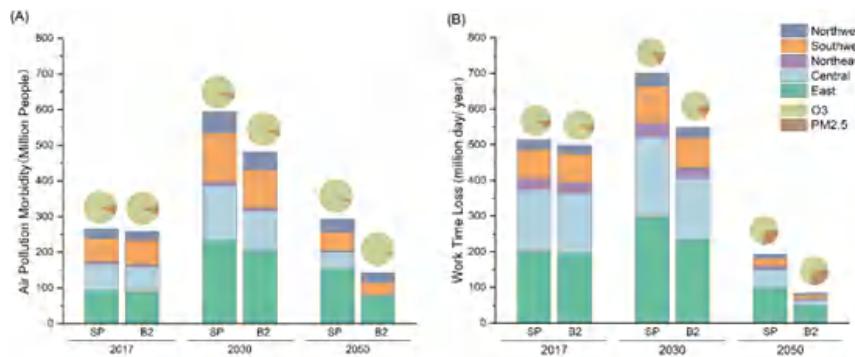


Figure 7.119: 不同情景下空气污染导致的致病人数 (A) 与工作时间损失 (B)

成本效益分析

发展可再生能源将带来一定的经济效益与成本。2030 年, 中国可再生能源的投资成本将高达 2.3 万亿元, 且投资成本远高于经济效益; 到 2050 年, 中国发展可再生能源的净收益将由负转正 (7.120)。在区域层面, 中国东部地区和中部地区发展可再生能源的净效益显著, 2050 年的净效益分别达 1.6 万亿元和 1.7 万亿元。中国大多数省份 (除内蒙古、福建和陕西外) 发展可再生能源的净效益将在 2030 年后加速增长。此外, 本研究还发现, 可再生能源的投资成本在区域上不成比例地降低了与空气污染相关的过早死亡人数。2030 年, 中部地区的投资占可再生能源总投资的 20%, 但该地区对减少过早死亡人数的贡献却高达 34%。相反, 西北地区的投资占可再生能源总投资的 20%, 相应的过早死亡人数却仅减少了 5%。到 2050 年, 这种不平衡现象将更加明显, 仅在东部和中部地区投入 20% 的投资成本, 可使过早死亡人数减少 76%。

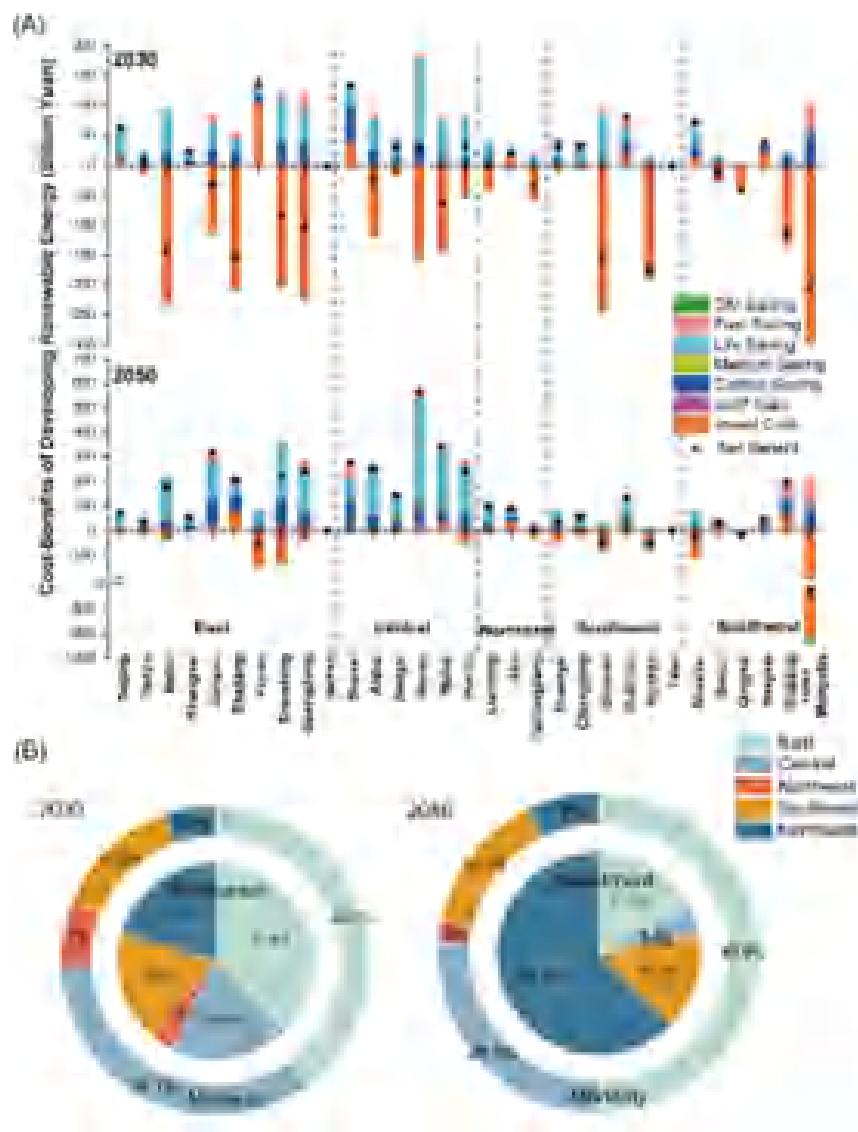


Figure 7.120: 发展可再生能源的成本效益分析 (A 代表中国各省发展可再生能源的经济效益和成本指标; B 代表中国五个区域的未来可再生能源投资份额和可避免的与空气污染相关的过早死亡人数)

结论

可再生能源发展将为提高空气质量、改善人类健康和促进经济发展做出巨大贡献。可再生能源投资为各省份带来的健康经济影响存在明显的区域异质性。由于在制定相关政策时常常忽视了健康效益这一指标，因此在进行可再生能源发展战略部署时需要考虑所有空气质量及健康效益的公平性。此外，由于可再生能源发展初期投资大，短期内的健康经济效益并不显著，但其长期效益却很明显，因此在制定政策时需综合考虑短期和长期效益。

7.10.5 LEEEP 研究 | 负排放技术：中国水泥行业脱碳的关键

- **原文标题：**Negative emission technology is key to decarbonizing China's cement industry^[43]
- **期刊：**Applied Energy
- **发表年份：**2023
- **作者：**Ming Ren, Teng Ma, Chen Fang, Xiaorui Liu, Chaoyi Guo, Silu Zhang, Ziqiao Zhou, Yanlei Zhu, Hancheng Dai, Chen Huang*
- **文章链接：**[点击 LEEEP 微信公众号链接阅读推送原文](#)

研究概要

水泥行业，贡献了全球 8% 的二氧化碳排放和大量的空气污染物，其在全球实现碳中和进程中扮演着关键角色。水泥行业是全社会脱碳的核心部门，具有显著的产业链关联特征，在上游拉动采矿、化石能源、电力等行业，在下游支撑建筑、交通等部门，其未来技术选择路径将对自身水泥产量、上下游行业减排潜力产生深刻影响，可谓牵一发而动全身。然而，目前学界针对水泥行业如何实现净零排放以及产生多大经济环境影响的研究略显不足。

北京大学 LEEEP 团队任明与黄晨博士后基于自上而下的可计算一般均衡模型 (IMED | CGE)、自下而上的技术优化模型 (IMED | TEC) 和生命周期评估，构建了探索水泥行业的碳中和路径和相应环境影响的综合评估框架，开展如下分析：

1. 预测全社会碳中和背景下未来中国水泥需求
2. 识别水泥行业碳中和的技术路径与关键技术
3. 评估不同碳中和情景下产生的环境经济影响

本研究将为我国重点行业深度脱碳路径及其伴生影响提供学术支撑。

研究背景

实现 1.5°C 的气候变化目标需要到本世纪中叶全球净二氧化碳排放量达到净零。水泥行业占全球二氧化碳排放量的 8%，对于实现雄心勃勃的巴黎气候目标至关重要。中国是世界上最大的二氧化碳排放国，承诺到 2030 年二氧化碳排放量达到峰值，到 2060 年实现碳中和。中国是全球最大的水泥生产国，水泥行业约占中国全国工业二氧化碳排放量的三分之一。

实现水泥行业二氧化碳净零排放将是中国 2060 年碳中和承诺的基石，也为将全球平均气温升幅控制在 2°C 以下提供了坚实的基础。作为中国大气污染物排放大户，水泥行业正在努力满足超低排放标准。水泥生产中的 CO₂ 排放来自化石燃料的直接燃烧（约占 CO₂ 总排放量的 30-40%）、化学反应产生的过程相关排放（50-60%）以及上游电力生产排放（5-12%）。石灰石化学反应产生的大量过程排放使水泥行业成为实现净零排放最具挑战性的行业之一。因此，探索中国水泥行业的低碳转型路径并评估其环境经济影响具有重要意义。

尽管现有研究探索了水泥行业的减排路径，但是针对实现净零排放的路径与手段研究较少。其次，现有研究多聚焦于供给侧减排措施，欠缺对需求侧减排措施（如下游水泥材料利用效率提升）的分析。另外，除了需要关注水泥下游需求侧减排影响，还需注重水泥行业与上游产业（如电力行业）的关联作用。最后，水泥行业采取脱碳措施也会对当地的资源和环境产生影响，然而，这在现有研究中尚未完全量化。

因此,为弥补以上研究不足,作者选取中国水泥行业作为研究案例,预测全社会碳中和背景下未来中国水泥需求,识别水泥行业碳中和的技术路径与关键技术,评估不同碳中和情景下产生的环境经济影响。

研究方法

本研究综合运用了自上而下的 IMED | CGE 模型、自下而上的 IMED | TEC 模型和 LCA 模型(图7.121)。

首先,使用 IMED | CGE 模型,识别碳中和目标对中国水泥需求的影响,分析碳中和背景下中国国民经济的动态演变和行业间的相互作用。

其次,运用 IMED | TEC 模型优化未来的技术路径,以在满足水泥需求和二氧化碳净零排放目标约束下最大限度地降低总成本(图7.122)。

此外,本研究还使用了 LCA 方法,从生命周期的角度考虑一次能源(煤炭、天然气、生物质和核燃料)供应活动对环境的影响。一方面,可评估水泥生产过程和电力生产的直接环境影响,另一方面,可涵盖与初级能源生产活动相关的环境影响。

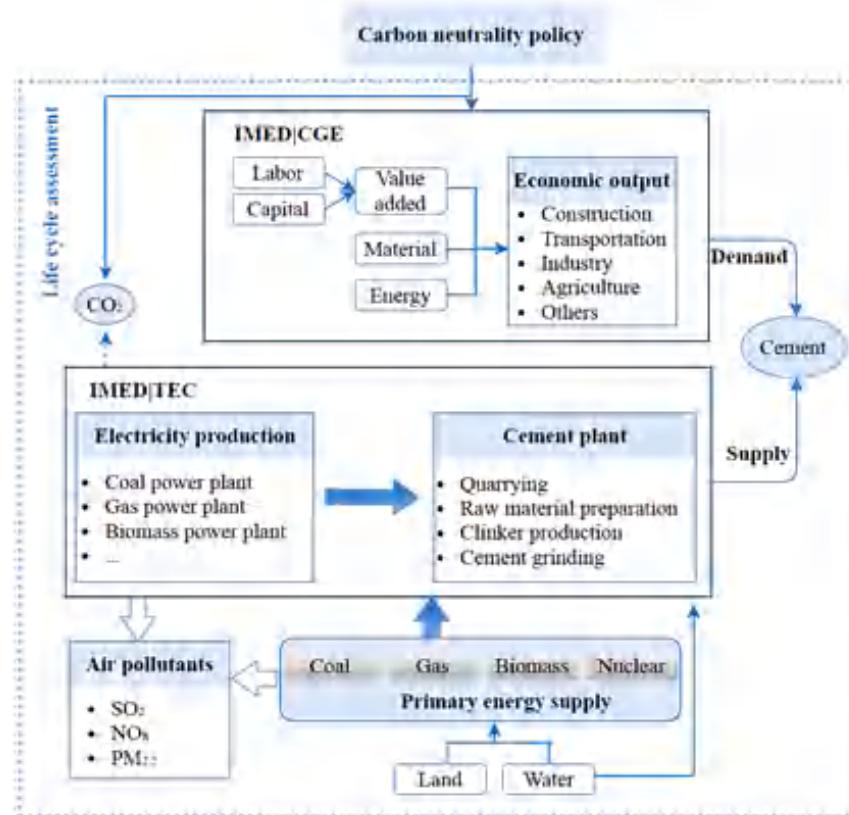


Figure 7.121: 本研究综合模型框架

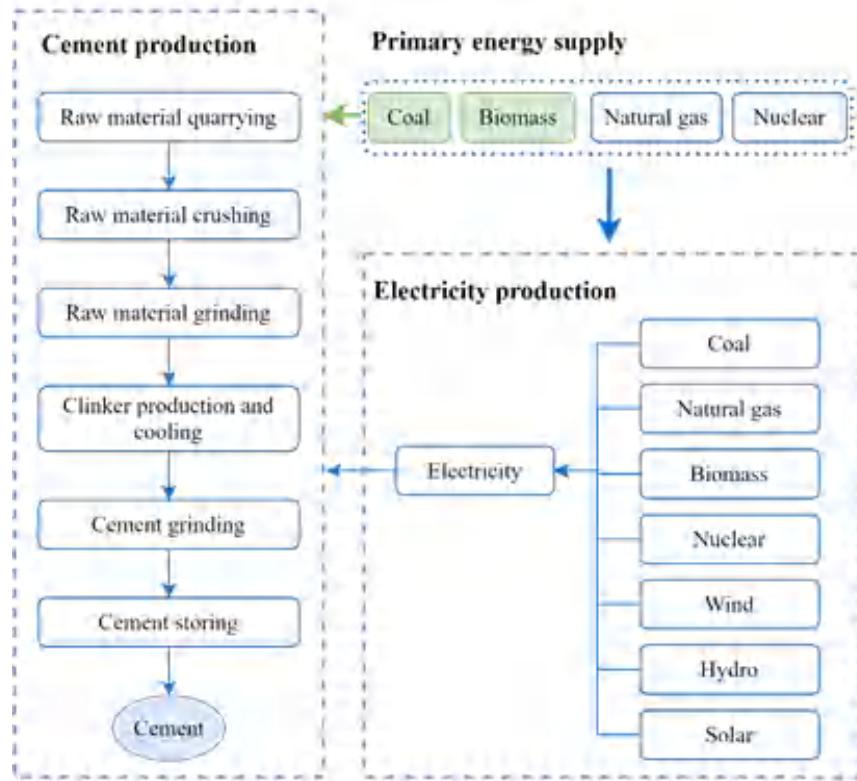


Figure 7.122: 水泥行业 IMED | TEC 模型简化框架

Scenario	Technology availability of electricity production	Climate policy	Cement demand in IMED CGE	End-of-pipe control devices
DemH_Base_Pollu0	Base	No CO ₂ constraint	BAU	Pollu0
DemH_Conv_Pollu0	Conv	CN	CN	Pollu0
DemL_Conv_Pollu0	Conv	CN	CN	Pollu0
DemL_Wwsn_Pollu0	WWSN	CN	CN	Pollu0
DemL_Conv_Pollu1	Conv	CN	CN	Pollu1
DemL_Wwsn_Pollu1	WWSN	CN	CN	Pollu1

Figure 7.123: 模型情景设置

研究结果

未来水泥需求预测

在 BAU 情景，水泥需求预计将从 2020 年的 23.94 亿吨减少到 2060 年的 13.13 亿吨。建筑行业是最大的水泥消费行业，其次是运输、工业和农业行业。预计 2060 年建筑行业的水泥需求为 5.04 亿吨，交通行业为 2.99 亿吨（图7.124）。

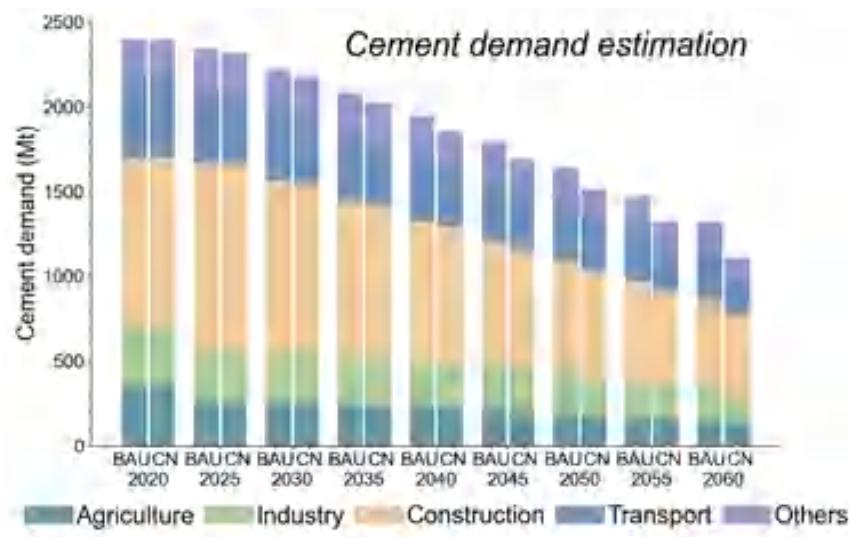


Figure 7.124: BAU 与碳中和情景下中国水泥需求预测 (2020-2060)

在碳中和情景，**2060 年水泥需求量为 11.1 亿吨，比 BAU 情景下低 15%**。到 2060 年，建筑用水泥需求预计为 4.82 亿吨，比 BAU 情景下的需求低 4% (2.2 亿吨)，仍是水泥最大消费者。此外，交通部门受到影响最大，其次是工业部门。在碳中和情景下，2060 年交通和工业的水泥需求将分别为 2.10 亿吨和 1.56 亿吨，分别比 BAU 情景降低 30% 和 24%。农业是受影响最小的行业，其在碳中和情景下对水泥的需求与 BAU 情景下几乎相同。

水泥行业碳中和技术路径

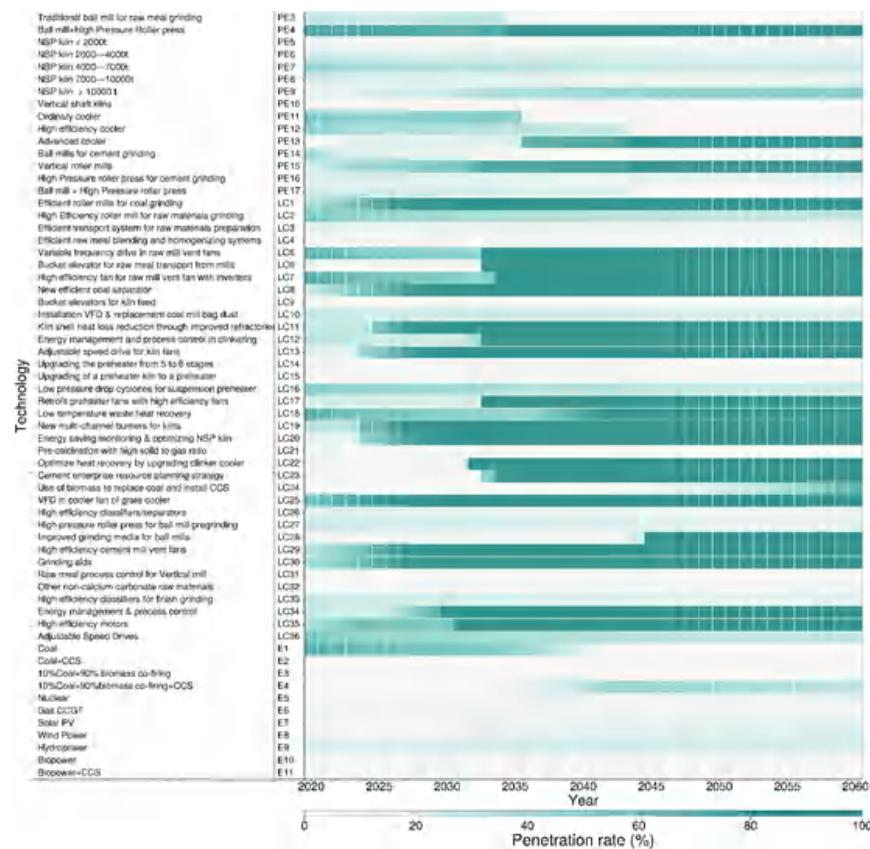


Figure 7.125: 典型碳中和情景 (DemL_Conv_Pollu0)

图7.125展示了典型碳中和 (DemL_Conv_Pollu0) 情景下的最优技术发展路径。不同碳中和情景下，实现能耗和碳排放降低的节能技术表现了相似的发展趋势，表明碳中和目标下节能技术的演进路径结果是稳健的，并且对电力生产和未来水泥需求路径不敏感。此外，到 2030 年所有选定的节能技术将迅速达到最大普及率。

然而，由于热力学限制和大量过程排放，推广节能技术远不足以实现水泥行业净零排放。长远来看，实施其他突破性技术对于净零排放至关重要。其中，CCS 是最有前途的创新技术之一，预计到 2030 年将完全商业化。CCS 预计将在 2030 年后逐步引入水泥行业，期间伴随着燃料转换过程（用生物质替代 30% 的煤炭，BECCS）。到 2060 年，CCS 在水泥行业的渗透率预计为 68-75%。到 2060 年，包括水电、风能、太阳能和核能在内的可再生/清洁能源在总电力供应中所占的份额将逐渐增加到 65%。联合发电 CCS 技术（90% 是生物质能，10% 是煤炭）将在 2032 年出现，2060 年其份额增加到 32%。燃料转换 CCS 技术（BECCS）预计在 2043 年出现，其在水泥行业的渗透率将增加到 69%。

能耗强度与能源消费

在 BAU 情景下（图7.126），由于节能技术的推广，能源强度从 2020 年的 106 kgce 下降到 2060 年的 92 kgce。在碳中和情景下，能源强度首先会随着能效技术的快速推广而下降，然后随着 CCS 的引入而增加。以 DemL_Conv_Pollu0 情景为例，到 2033 年能源强度先下降到 68 kgce，到 2060 年增加到 104 kgce，比 DemH_Base_Pollu0 情景下高出 13%。这是因为部署 CCS 会

消耗额外的电力。到 2060 年，碳中和情景下水泥电耗强度预计将比 BAU 情景增加 41-60%。因此，未来 CCS 用电量应引起足够的重视。

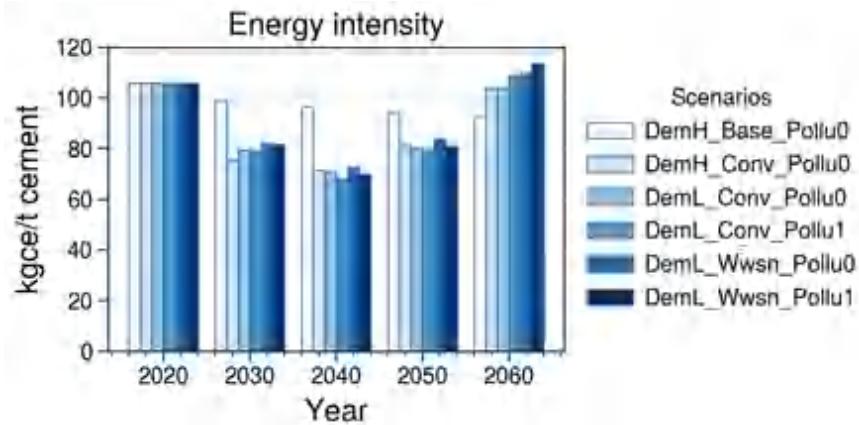


Figure 7.126: 不同情景下的能源强度

如图7.127所示，在 BAU 情景，由于水泥需求减少和节能技术的推广，一次能源消费总量将从 2020 年的 253 Mtce 减少到 2060 年的 121 Mtce。在碳中和情景，消费总量先是快速下降，然后在 130 Mtce 左右小幅波动。此外，煤炭正逐渐被可再生能源，尤其是生物能源所取代。生物能源主要是用于电力生产，到 2060 年占生物能源总消费的 67%（图7.128）。用电量趋势未来呈 U 型，2043 年后电力消耗的增长趋势是由 CCS 推动的，预计到 2060 年将达到 23 Mtce。

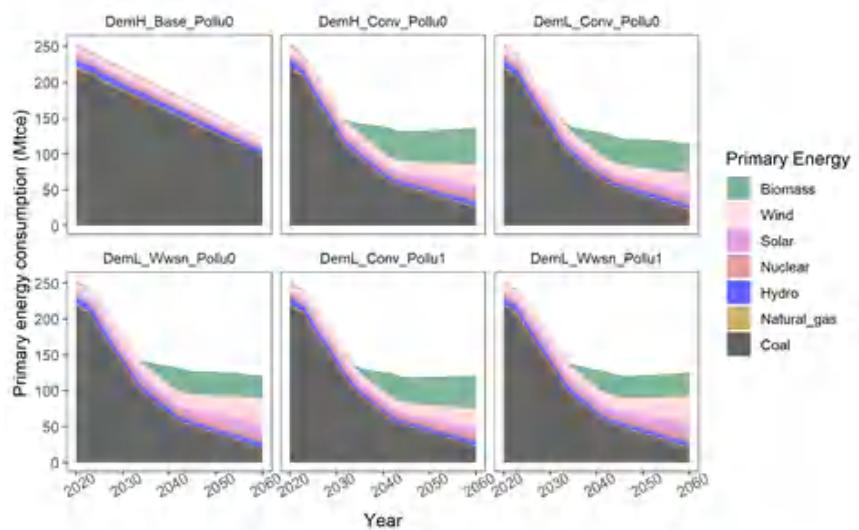


Figure 7.127: 不同情景下水泥行业未来一次能源消费

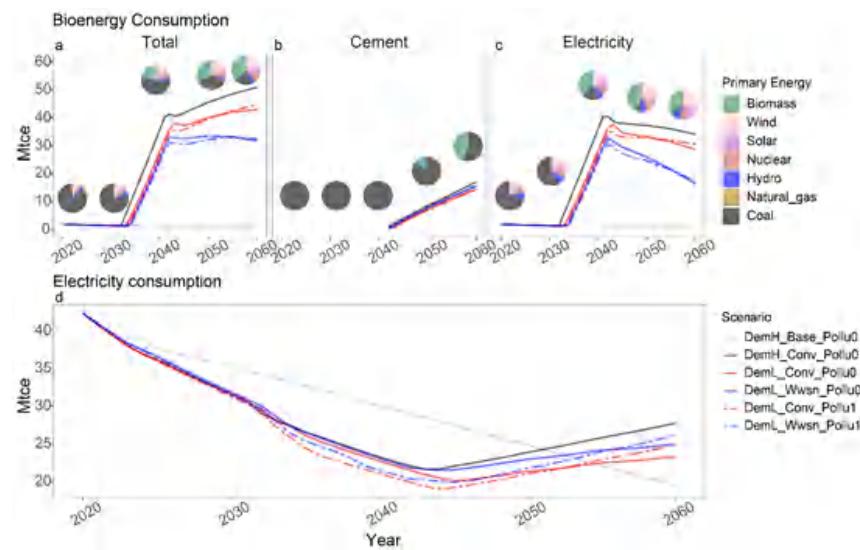


Figure 7.128: 未来水泥行业生物质与电力消耗

碳排放与经济成本

在水泥行业实现碳中和的技术路径中, BECCS 是核心技术, BECCS 产生的 CO₂ 负排放对于中和难以减排的 CO₂ 排放, 尤其是对降低过程排放至关重要, 能够产生 5 亿吨负排放 (图7.129), 其中 75% 来自水泥生产, 25% 来自电力生产。实施需求侧减排, 将使所需负排放量降低 15% (约 8000 万吨), 在碳中和情景下, 2060 年系统成本可能提升至约 5800 亿元。但实施需求侧减排令其降至 4500 亿元 (约 21%)。综上, 相比单一行业碳中和政策, 考虑产业链耦合的碳中和政策有助降低转型负担 (图7.130)。

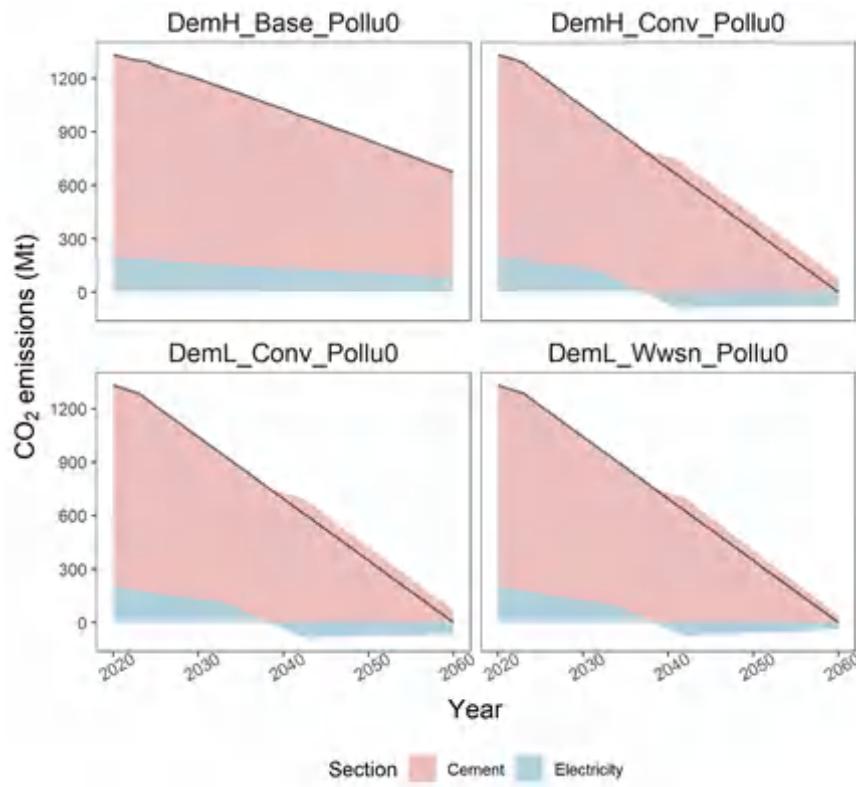


Figure 7.129: 不同情景水泥行业与上游电力行业（部分）碳排放路径

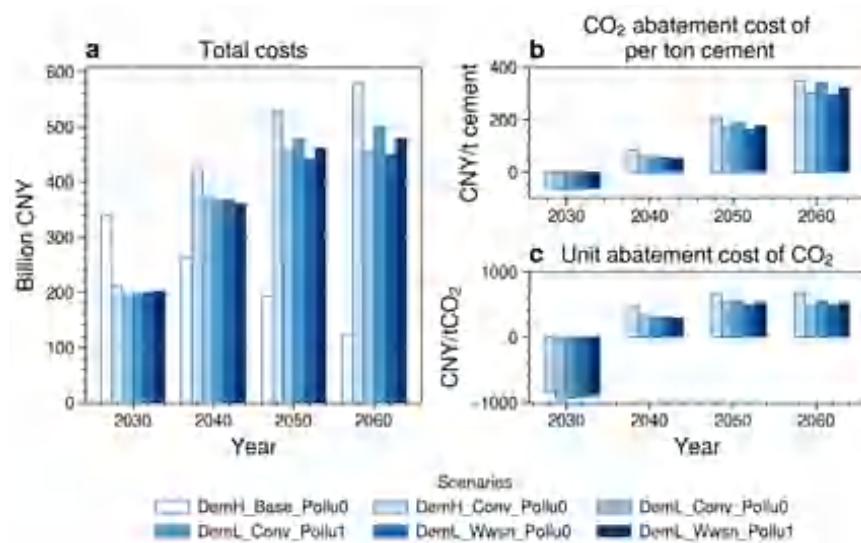


Figure 7.130: 不同情景水泥行业总成本与边际减排成本

水泥行业的碳中和政策也会带来一定的环境影响, BECCS 将使水资源和土地资源消耗将大幅提升(图7.131)。与基准情景比, 碳中和情景水耗将提升近3倍, 土地使用将增加2.6至4.3百万公顷, 约占我国陆地总面积的0.27%至0.44%。而在污染物控制方面, 燃料转换和能效提升将显著减少二氧化硫和氮氧化物排放(64%和54%), 但对降低PM_{2.5}排放作用有限(11%), PM_{2.5}部分源于过程排放, 需要推广末端治理技术来进行治理, 这将提高水泥生产的成本(年均300至440亿元)。

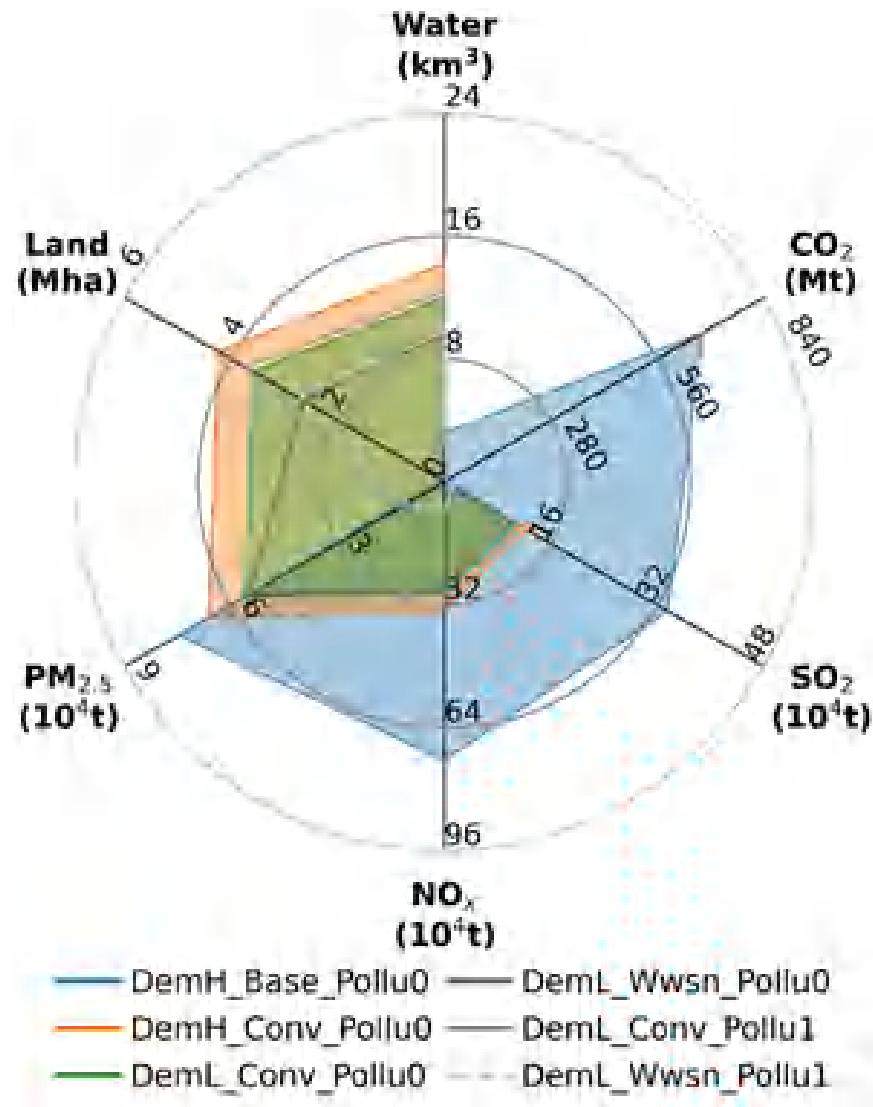


Figure 7.131: 不同情景下水泥行业转型的多维环境影响

研究结论

本研究通过构建综合评估框架评估了未来水泥行业碳中和转型的可行路径、关键技术与相应环境经济影响。可从中得出如下几点政策启示:

- 在近期要加快能效技术普及; 远期要依赖 BECCS 技术与需求侧控制手段;

2. 碳中和将带来额外经济成本，考虑产业链耦合的政策优于单一行业政策，将降低转型经济负担；
3. 碳中和可能会深度加剧碳-水，碳-土地权衡，要降低生物质和捕集技术水耗、提升单位土地生物质产出，推动碳中和与负面影响解耦。

7.10.6 LEEEП 研究 | 水-能源-碳关系：中国城市综合排水系统的温室气体排放

- **原文标题:** Water-energy-carbon nexus: greenhouse gas emissions from integrated urban drainage systems in China [99]
- **期刊:** Environmental Science & Technology
- **发表年份:** 2023
- **作者:** Qiong Su*, Hancheng Dai*, Shuyan Xie, Xiangying Yu, Yun Lin, Vijay P. Singh, Raghupathy Karthikeyan
- **文章链接:** [点击 LEEEП 微信公众号链接阅读推送原文](#)

摘要

由于缺乏模型工具，城市综合排水系统（包括下水道、污水处理厂和供水系统）的温室气体（GHG）排放尚未被纳入研究。本研究耦合更新了可计算的基于一般均衡的系统动力学和水环境模型（CGE-SYDWEM），模拟了流域水平上的水-能-碳关系，以计算考虑碳缓解策略和水工程实践的IUDS的直接和间接（用电量和外部）温室气体排放量。将改进后的CGE-SYDWEM模型应用于中国第四大城市深圳的河口流域。随着社会经济发展和水利基础设施系统的升级，温室气体排放量预计将从2007年的129.2（95%CI: 95.9~162.5）kt增加到2025年的190.7（144.8~236.6）kt，其中89%来自污水处理厂，10%来自下水道，1%来自接收水（直接）。到2025年，碳减排可使温室气体排放量减少7%，排放强度减少6%，其中63%来自化学用途的外部减排。该模型可以帮助水、能源和碳决策者在未来找到具有成本效益的水和能源安全解决方案。

引言

废水处理厂（WWTPs）已被公认为城市系统中最大的能源消耗和温室气体（GHG）排放者之一。仅处理生活废水就占全球用电量的3%和全球二氧化碳当量（二氧化碳当量）温室气体排放量的2%。废水处理厂也是主要的非二温室气体排放者，例如甲烷（CH₄）和一氧化二氮（N₂O）。从2005年到2030年，占全球非二温室气体排放量的4.6%和5.2%，由于快速城市化和发展中国家执行的更严格的水质标准，预计未来全球污水处理厂的能源消耗和温室气体排放量将增加。这可能会影响中国的国家自主贡献目标，即到2030年将二氧化碳排放强度（单位国内生产总值的二氧化碳排放量）在2005年水平的基础上降低60%至65%，以及到2060年实现碳中和的长期气候目标。因此，了解长期城市化过程中污水处理的能源消耗和温室气体排放及其与社会经济和水环境系统的动态相互作用，有助于决策者更有效地实现水质改善和碳减排目标。

到目前为止，废水处理中的水和能源与碳关系的研究主要集中在评估城市综合排水系统（IUDS）的单个组成部分的温室气体排放。例如下水道系统、污水处理厂或评估下水道系统的直接温室气体排放的实地研究。

生命周期评估已被广泛用于量化直接温室气体排放和间接温室气体排放，例如电力使用。生命周期评估可以评估污水处理厂和不同处理技术的个别过程，但由于系统边界狭窄，它不能模拟供应

链组件。因此，间接外部温室气体排放，即在污水处理厂边界以外使用的所有材料和资源（化学品、维修和维护）中的体现排放量，被排除在生命周期评估研究之外。最近的一项研究使用了一种结合了环境输入和输出的混合生命周期评价方法来模拟间接的外部温室气体排放。然而，用于发电和化学用途的碳强度是恒定的，这忽视了它们对社会经济系统的反馈，因此不能用来评估碳缓解减少废水处理温室气体排放的潜力。此外，流入/流出的数量和质量的动态模拟很重要，因为它们显著影响直接的温室气体排放和间接的温室气体排放，并高度依赖于人口增长和社会经济发展。

尽管在提高对各子系统温室气体排放的了解方面取得了重大进展，但对 IUDS 中各组成部分的相对贡献，特别是在社会经济发展和碳缓解战略影响下的相对贡献，仍然缺乏了解和量化。本研究选择了深圳市作为研究区域。在 2020 年，深圳排放了中国污水处理总量的 3.3%，由于环境容量有限，在完成国家水质改善目标方面面临挑战。深圳市被选为 2015 年中国国家发展中心试点城市，也是发展中国家的第一个碳减排实践城市。

因此，研究目标是（1）量化 1990 年 ~2025 年期间来自下水道、污水处理厂和接收水系统的温室气体排放量的相对贡献；（2）评估中国的国家发展中心和升级的废水处理和工程实践对能源使用、温室气体排放和城市生活污水排放系统水质的影响（图 7.132）。

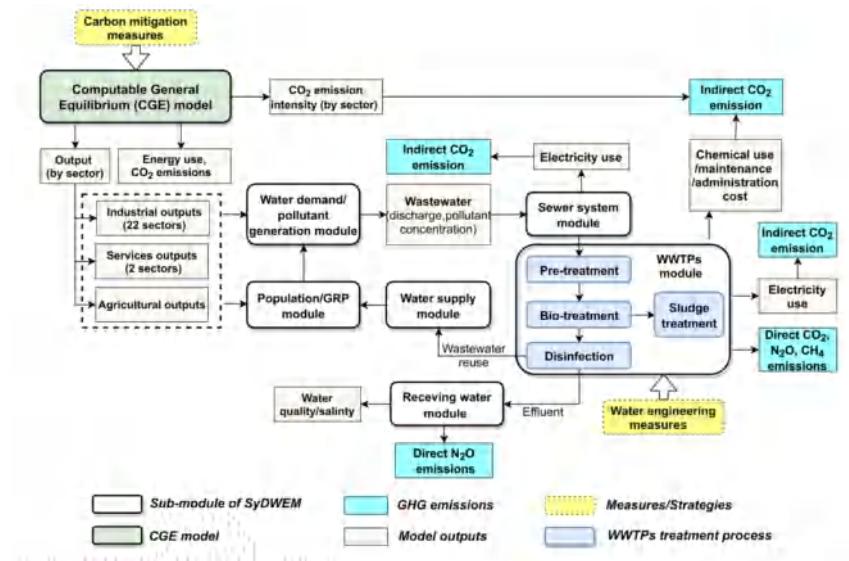


Figure 7.132: Conceptual integration of the computable general equilibrium (CGE) and the System Dynamics and Water Environmental Model (SyDWEM).

结果

（1）温室气体直接排放

BaU 方案下的温室气体直接排放量预计将在 2007 年至 2025 年期间持续增长，从每年 2.1 万吨增加到 3.6 万吨（图 7.133a）。然而，到 2025 年，直接温室气体排放强度将比 2007 年的水平降低 15%（图 7.133a）。这是因为随着社会经济的发展，污水处理厂进水污染物浓度（CODcr 和 TN）预计会下降。在 BaU 情景，污染物强度较低的部门，如服务部门和居民部门的用水和废水产生预计将占越来越大的比例。因此，2025 年处理的废水总量（290 万立方米/天）将是 2007 年（140 万立方米/天）的两倍，但处理的 CODcr 和 TN 仅分别增加 50% 和 36%（图 7.133b）。碳减排可以通过减少废水产生和水基污染物排放，到 2025 年将温室气体直接排放量减少 4%（每年

1.5kt), 排放强度减少 3%。与 BaU 情景相比, 碳减排减少了 1% (30 万立方米/天) 的处理废水总量, 减少了总 CODcr 和 TN 的产生; 即处理和排放, 分别减少了 4.2% (21.1t/d) 和 4.4% (3.4t/d) (图7.133c)。

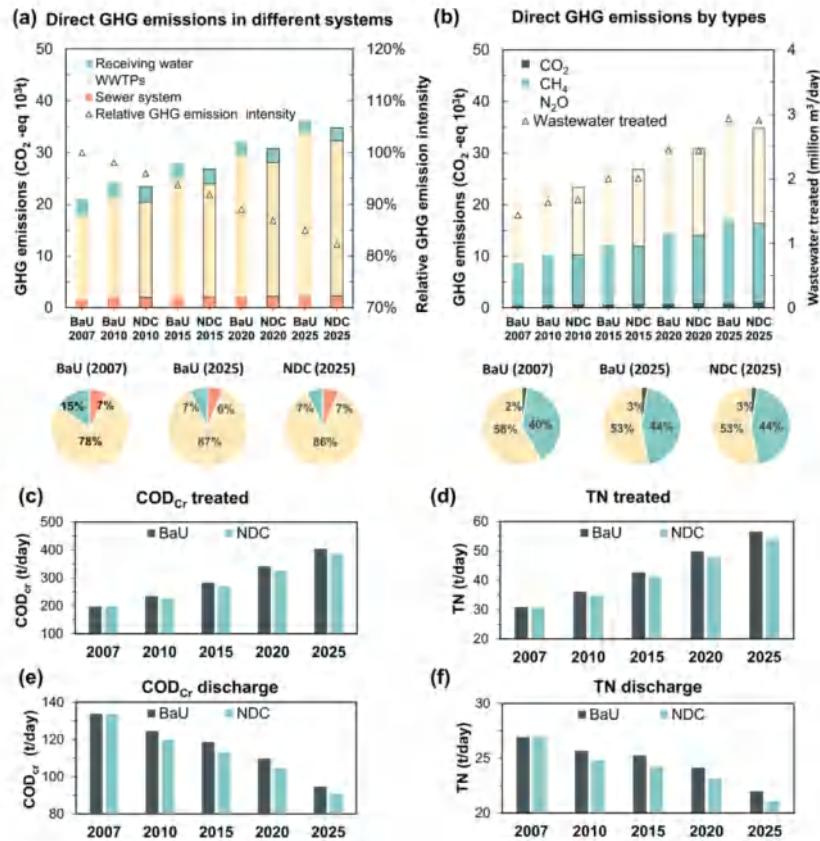


Figure 7.133: Annual variations of (a) direct CO₂-equiv GHG emissions in different systems and relative direct GHG emission intensity, (b) direct GHG emissions by types and total wastewater treated, (c) CODCr treated, (d) TN treated, (e) CODCr discharge, and (f) TN discharge under BaU and NDC scenarios

(2) 电力有关的温室气体排放

平均处理每立方米废水需要 0.33 千瓦时的电力 (2007 年 ~2025) (图7.134a)。在所有废水收集和处理工艺中, 生物处理耗电量最大, 占总用电量的 49%, 其次是 2025 年的前处理 (21%)、抽水 (12%)、污泥处理 (10%) 和消毒 (8%)。在 BaU 情景下, 总用电量将从 2007 年的 170 兆瓦时增加到 2025 年的 349 兆瓦时 (增长 105%), 与废水处理总量的增长趋势保持一致。在 BaU 情景 (图7.134a) 下, 电力产生的间接温室气体排放量显示出相对稳定的增长率 (每年 1.7%), 从 2007 年的 104kt 增加到 2025 年的 141kt, 远低于废水处理总量的增长率 (每年 4.0%)。如图7.134b 所示, 在 BaU 方案下, 到 2025 年, 其温室气体排放强度将比 2007 年的水平降低 33%。

到 2025 年, 碳减排可以略微减少与电力相关的温室气体排放 1% (每年 1.4 千吨), 这是因

为（1）减少了用电量，废水流入的数量/质量发生了变化，以及（2）当地电力部门的碳强度降低。在国家发展方案下，到 2025 年，大多数工业部门的碳排放强度将比 BaU 方案降低 20~83%。

在 NDC 情景下，到 2025 年，电力部门的碳强度将出现有限的下降（1%）。2007 年，当地电力部门的碳强度为 0.50 千克/千瓦时，远低于进口电力（0.66 千克/千瓦时）和全国平均水平（0.84 千克/千瓦时）。由于南方电网的进口电量约占总用电量的 70%，如果中国的其他地区，特别是南方电网实施碳减排战略，预计温室气体排放强度将进一步降低。

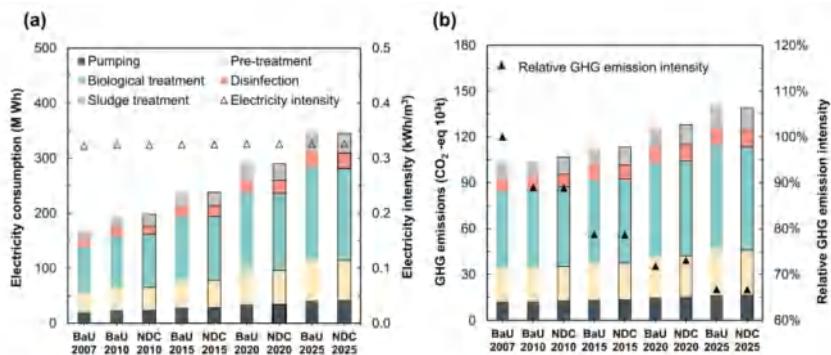


Figure 7.134: Annual variations of (a) electricity consumption and electricity intensity and (b) electricity-related indirect GHG emissions and relative GHG intensity under BaU and NDC scenarios during 2007 - 2025

（3）间接外部温室气体排放

碳减排大大减少了间接外部温室气体排放，即到 2025 年减少 72%（9.8 千吨）（图7.1334）。化学品使用对总减少量的贡献最大，即 82%（8.0kt），其次是行政（14%）和维护（4%）。在 BAU 情景下，污水处理厂的化学品使用量将从 2007 年的 2.9kt 增加到 2025 年的 9.1kt，占间接外部温室气体排放的 61~67%。污水处理厂的化学品使用在减少废水处理的间接外部温室气体排放方面发挥着重要作用。为了实现碳减排目标，化工部门产量降至最低，因此，经济损失较大，对减排做出最大贡献。

相反，碳减排有利于机械部门，因为它可以通过采用低碳技术来降低其碳强度，正如 CGE 模型中以资本取代能源所代表的那样。因此，机械行业通过低碳转型提高了生产效率，因此，它在碳减排方面受到的影响最小。在 NDC 情景下，到 2025 年，污水处理厂的维护将贡献一半以上的间接外部温室气体排放（57%），而化学部门的份额将减少到 29%。

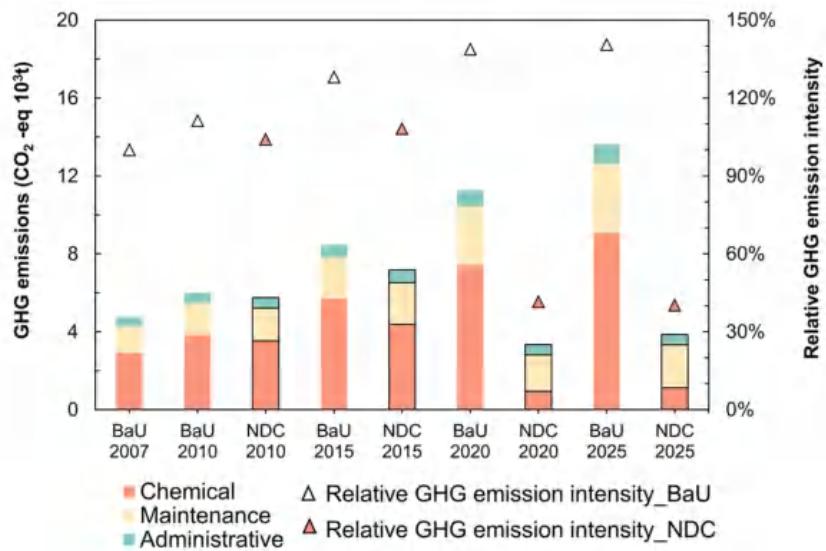


Figure 7.135: Annual variations of indirect external GHG emissions and relative GHG emission intensity from chemical use, maintenance, and administration of WWTPs under BaU and NDC scenarios during 2007 - 2025

(4) 综合城市排水系统温室气体排放

图7.1335a 显示了 2025 年 BaU 方案下各个系统的废水流量和温室气体排放量。城市污水处理厂温室气体排放量的 89% 来自污水处理厂。10% 来自下水道系统，以及 1% 来自接收水（直接排放）。与电力有关的温室气体排放占总排放量的 74%，包括生物处理过程、污泥处理和消毒。

到 2025 年，碳减排可将温室气体排放总量减少 6.6%（每年 12.6 万吨）（图7.1335b, c），其中 77% 来自外部温室气体排放，直接温室气体排放 12%，电力间接温室气体排放 11%。2025 年温室气体排放强度也降低了 5.8%。

在 BaU 情景下，温室气体排放量的趋势与社会经济发展和污水处理能力的增加相一致，从 1990 年的 5.1kt 显著增加到 2007 年的 129.2kt，到 2025 年增至 190.7kt，相当于 1990 年 ~2006 年和 2007 年 ~2025 年期间分别 12.2% 和 2.0% 年增长率。

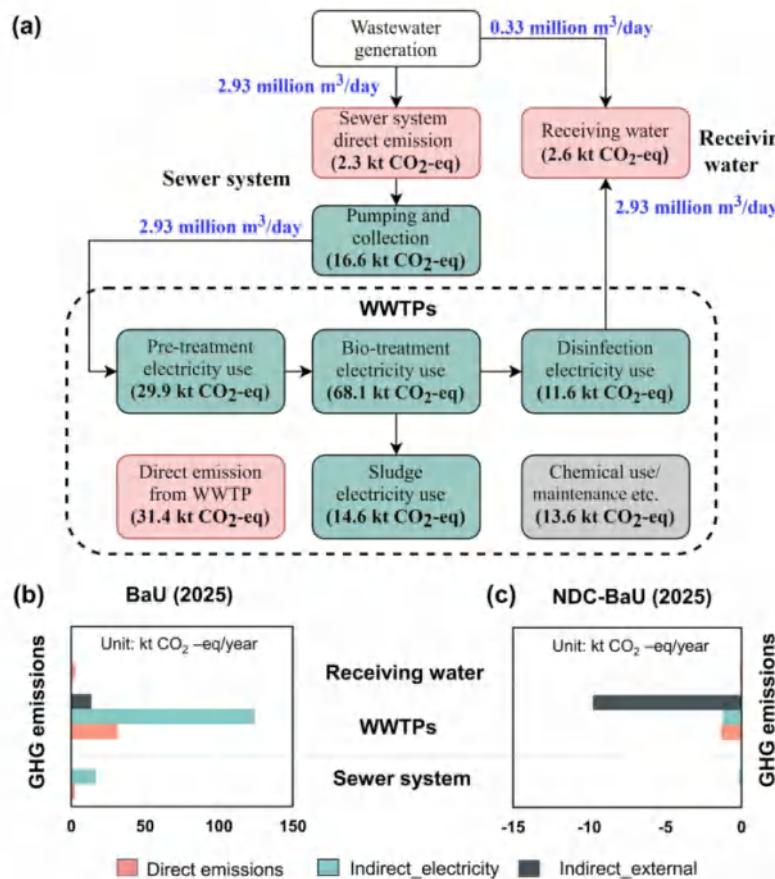


Figure 7.136: (a) Wastewater flow and GHG emissions in individual systems under the BaU scenario; (b) comparison of direct and indirect GHG emissions under BaU scenario; and (c) difference in GHG emissions between NDC and BaU in 2025

讨论

(1) 不确定性分析

鉴于长期预测中可能存在相当大的不确定性，对其他几种情景进行了审查。主要的不确定性来自（1）CGE 模型中对社会经济系统的假设；（2）未来工程措施的假设；以及（3）在进口电力的燃料组合中的变化，如图7.1336 所示。第一个不确定性是通过考察 CGE 模型中国内生产总值增长率的两个额外情景来评估的。第二个不确定性，分析了工程实践中两个附加情景。第三个不确定性通过设置情景进行评估，假设在中国的其他地区实施碳减排战略，进口电力碳强度降低 10%（2014 年 - 2025 年）。

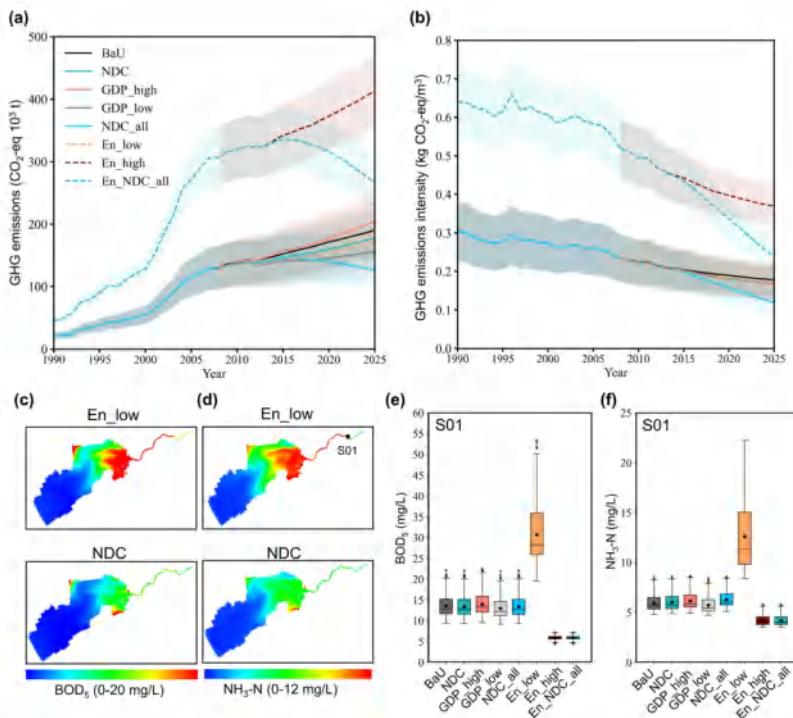


Figure 7.137: Variations of (a) total GHG emissions and (b) GHG emission intensity from the integrated urban drainage systems under different scenarios during 1990~2025, spatial distribution of (c) BOD5 and (d) NH₃-N concentration during the ebb slack in 2025 (EN_low and NDC scenarios are taken as examples), and (e) BOD5 and (f) NH₃-N concentration during the dry period at station S01 under different scenarios in 2025. Shading indicates the 95% confidential interval. Boxplots show the 25th, 50th, and 75th percentiles, and extremes

(2) 政策启示

在中国的水和能源管理中，水与能源和碳的关系并没有得到太多的关注。污水处理行业目前的目标主要是去除营养物质和污染物，以改善水环境。考虑到两种情景下废水产生的预测增长趋势，废水行业对实现中国国家发展中心承诺的目标的潜在贡献是巨大的。综合模型可以帮助能源、碳和水部门的决策者了解拟议的碳减排战略、废水处理和工程实践对当地/区域能源消耗、温室气体排放和水环境变化的复杂协同效应，并制定更有效的政策，以确保未来的能源和水安全。

碳减排在减少污水处理厂的直接和间接温室气体排放以及改善当地水质方面具有共同效益。为了促进水、能源和碳的协同效益，发电的碳强度应该进一步降低，因为它对废水处理产生的温室气体排放最敏感。然而，当地的碳减排战略对降低发电的碳强度影响有限。应推广低碳技术补贴等激励措施，以提高发电部门的能效。

废水处理和工程实践在能源使用和温室气体排放方面进行了权衡。尽管 AAO/MBR 具有较高的能耗和温室气体排放，但由于其具有较高的污染物去除效率，是一项能够满足水质改善目标的成熟技术，因此对水利工程规划者来说是一项有吸引力的技术。此外，中国加强环境监管和改善水质

的政策是使用 AAO/MBR 的主要驱动力。为了缓解这一水-能源和碳冲突，新兴的碳捕获和储存技术，如微生物电解碳捕获、微生物电合成和微藻培养，可以与污水处理相结合。这些技术有可能最大限度地减少排放，并增加水环境保护的好处。

(3) 优势与不足

CGE-SyDWEM 模型改进了对废水处理的理解，以应对社会经济发展，并在考虑到碳缓解战略和水利工程措施的情况下，对 IUDS 的直接和间接温室气体排放进行了全面评估。使用 CGE-SyDWEM 的优点如下：(1) 根据人口增长和社会经济发展动态模拟废水进/出水量和水质；(2) 通过包括间接外部排放，即在污水处理厂边界以外使用的所有材料和资源的隐含排放和接收水体的直接排放，改善温室气体排放量化；以及 (3) 评估碳减排战略在减少废水处理温室气体排放方面的潜力。首次量化了污水处理厂边界外使用的所有材料和资源对废水产生和水载污染物排放、发电的碳强度和体现温室气体排放的影响。

局限性包括 (1) 在计算下水道系统的间接温室气体排放量时，没有考虑污水收集的地形。(2) 由于数据的限制，相同的污水处理厂技术使用的是恒定的电力强度。研究表明，污水处理厂的容量也会影响电力强度，大型污水处理厂的电力强度相对较高。这些限制可以通过获得现场数据来减少。

7.10.7 LEEEP 研究 | 通过减少印度道路交通部门的化石燃料消费实现碳中和

- **原文标题:** Narrowing fossil fuel consumption in the Indian road transport sector towards reaching carbon neutrality [45]
- **期刊:** Energy Policy
- **发表年份:** 2023
- **作者:** M.S. Hossain, Yan Ru Fang*, Teng Ma, Chen Huang, Wei Peng, Johannes Urpelainen, Chetan Hebbale, **Hancheng Dai***
- **文章链接:** [点击 LEEEP 微信公众号链接阅读推送原文](#)

研究导读

到本世纪末，将温升控制在 2°C 甚至 1.5°C 内需要各国的共同努力。本研究选取世界第三大碳排放国-印度为研究区域，聚焦于未来中长期（至 2050 年）时间尺度，重点关注印度道路交通低碳发展路径，研究如下问题：

- 1) 印度道路交通单纯依靠电动汽车能否实现碳中和？
- 2) 道路交通的减碳政策能实现多大程度的污染物排放控制？
- 3) 印度道路交通应该制定和实施怎样的政策以实现碳中和目标？

通过应用北京大学 LEEEP 团队自主开发的 IMED 能源技术优化模型，本研究定量分析了印度道路交通部门的碳减排目标带来的空气污染控效果。探究纯电动汽车和燃料电池汽车的不同渗透率对碳中和目标与空气污染物减排的影响，为印度道路交通制定气候与环境协同控制战略的经济可行性路径提供参考。

研究背景

印度作为世界第三大碳排放国，已承诺到 2030 年减少其林业、废物、工业、交通和能源部门的二氧化碳排放，但是这仍然达不到《巴黎协定》的长期目标，即将全球变暖控制在 2°C 以下。因此，印度除了批准 2030 年的国家自主贡献 (NDCs) 目标，还在 COP26 上宣布了到 2070 年的碳

中和承诺。为了实现如此雄心勃勃的气候目标，交通运输等碳密集型行业需要更严格的政策和更长期的脱碳战略。

客运和货运对气候有多种影响，包括长寿命温室气体（主要是二氧化碳）、短寿命气溶胶、黑碳和有机碳等气溶胶前体、氮氧化物等短寿命化学活性气体。在乘用车、公共汽车和大型货运卡车类别中，公路运输的排放占所有人为温室气体排放的很大一部分。汽油车释放更多的二氧化碳、一氧化碳和碳氢化合物，柴油车辆排放更多的颗粒物和氮氧化物。由于印度拥有世界第二大公路网，道路运输已成为主要的交通方式。因此，道路运输部门的碳和空气污染物排放量较大，且污染物对健康产生重大影响。例如，在印度进行的几项研究将空气污染暴露的增加与癌症、心血管和呼吸系统疾病的风险增加以及死亡率联系起来。油基燃料是大多数公路交通的主要能源。因此，印度需要大力发展电动汽车，这将减少石油需求（柴油、汽油、天然气等）和温室气体排放，另外，印度还需要鼓励大规模可再生能源部署。

许多研究人员使用不同的模型来模拟当前国家或地区的交通政策，但没有关注有助于减少能源需求的新技术和基础设施对未来的影响。大多数研究在特定时间专注于单个点或使用特定于行业的模型/计算。这种单一视角的方法通常忽略了从低到高的 BEV 与 FCV 的渗透率在能源需求方面的相互作用。为了解决这一研究差距，本文基于核心技术系统，主要关注道路客运的能源需求，CO₂ 排放，以及国家层面的空气污染减少。通过多种情景，模拟 BEV 和 FCV 在印度道路运输部门中不同的比例对道路脱碳中的关键作用。

研究方法

我们使用由北京大学 LEEEП 团队开发的 IMED | TEC 模型，利用该模型估算了印度道路运输部门在不同情景下的碳排放量。该模型由两部分组成：即能源、环境和经济可持续发展综合模型（图7.138）。

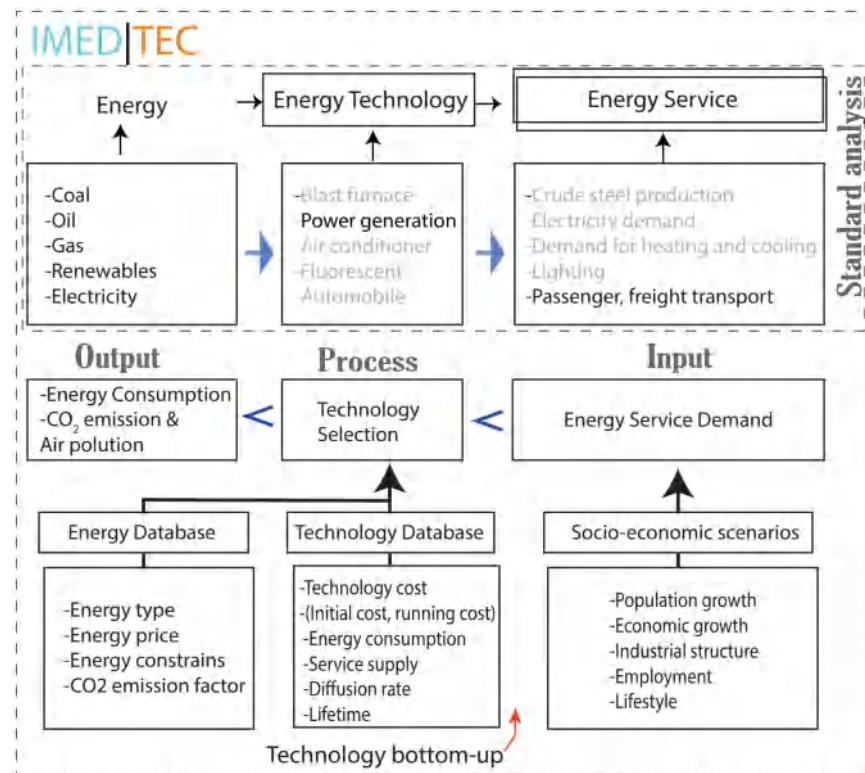


Figure 7.138: IMED | TEC 模型框架

该研究针对印度道路交通部门中的主要客运和货运进行深入分析，分析的道路交通的构成及其分析设计如图7.139所示。

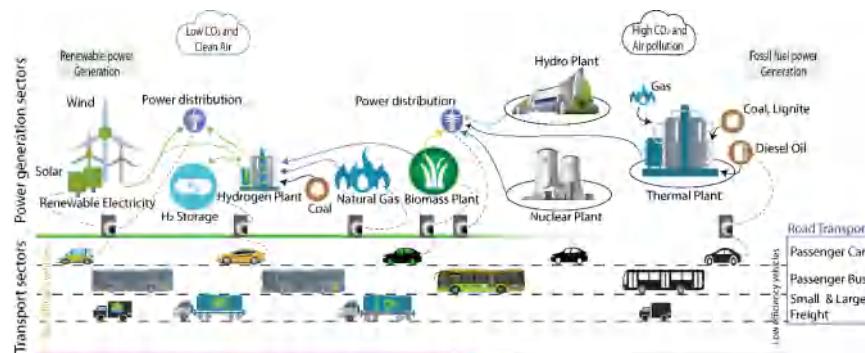


Figure 7.139: 印度的国家发电和道路交通部门

本研究建立了电动汽车长期脱碳分析的四个情景：电动汽车的低、中、高渗透率，以及一个基准情景。情景的设计取决于现有电动汽车政策和新车辆技术设定的参数，包括插电式混合动力车、混合动力车、电池和燃料电池。我们将 BEV 定义为 “BE”，FCV 定义为 “F”，渗透率为低 (l) (BEV 为 0.05%-60%，FCV 为 0.02%-0.04%)，中 (m) (BEV 为 0.05%-85%，FCV 为 0.07%-40%) 或高 (h) (BEV 为 1%-95%，FCV 为 1%-75%)。参考情景是在没有针对 BEV 和

FCV 的政策和技术改进的情况下定义的。在基准情景下，印度碳排放强度满足 NDC 目标，2030 年二氧化碳排放强度相较于 2005 年下降 65%；对空气污染物的控制维持现有的措施和相关政策。情景设计矩阵如（图7.140）所示。

Transports	2005	2010	2015	2020*	References
Cars	2,01.5	2,31.5	3,38.3	4,03.8	(Mittal et al., 2016; Mittal et al., 2015) (Road Transport Yearbook, 2016-17) (Pinna et al., 2014).
Buses	5,23.9	9,71.7	1,050.5	1,125.2	(Mittal et al., 2016; Mittal et al., 2015; Road Transport Yearbook, 2016-17) (Raghav, 2011) (Road Transport Yearbook, 2016-17) (Pinna et al., 2014).
Freight trucks	7,28.2	1,287.1	2,025.8	2,114.9	(OECD, Acc. 2021-06) (EconStats, Acc. 2021-06) (Pinna et al., 2014).

Note: *2010 to 2050 data is assumed.
[PKM = number of passengers × Total Distance covered (km)].

Figure 7.140: 情景设计矩阵

主要研究结果

1. 印度道路交通部门 CO₂ 排放和能源消耗

基准情景中的大多数排放主要来自使用基于石油内燃机的运输工具。图7.141d 表示道路交通部门中不同技术的直接 CO₂ 排放占比，也就是不包括电力生产部门的排放量。一般来说，减少对内燃机运输技术的需求或增加更高效技术（BEV 和 FCV）的渗透将减少 CO₂ 的排放。本研究对各种情景的车辆排放和能源消耗进行了估算，并与基准情景进行了比较。到 2050 年，基准情景总能耗将达到 213 Mtoe（图 7.141d），说明传统燃油车的继续使用对能源减少和碳减排具有很大的阻碍，需要迅速转向替代燃料和更有效的技术来改善。由于情景假设是基于印度的 EV 政策，该政策不仅配备了技术渗透率，而且还配备了运输需求和技术改进的整合，因此比较四个情景（Reference, BEf1, BEmFm 和 BEhFh）之间的能源需求和减排是对政策制定的有力检验。

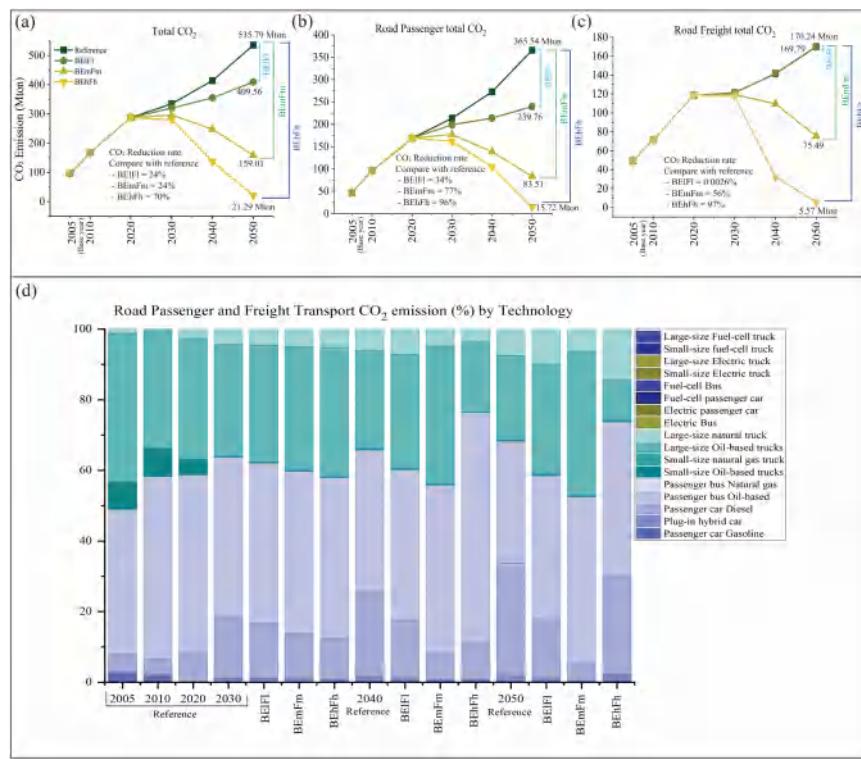


Figure 7.141: 道路交通 CO₂ 排放。 (a) 不同情景的 CO₂ 排放随时间变化; (b) 道路客运 CO₂ 排放; (c) 道路货运 CO₂ 排放; (d) 道路交通部门不同技术的排放占比

BEf1 情景表示通过结合 BEV 和 FCV 技术来减少总 CO₂ 排放和能源消耗。由于 BEV 和 FCV 的技术改进和政策限制，其对深度脱碳的贡献还远未实现。BEf1 情景还表明，2050 年总能耗和碳排放量相对低于基准情景（图7.141，图7.142a）。此方案的 CO₂ 减少程度较低与当前电动汽车的电池价格高、低碳能源需求技术较少、有效载荷能力较低有很大关联。印度政府正在根据 NDC 开发 FAME，但电动汽车的采用率低于预期。另一方面，FCV 技术可能由于政策实施范围较小对 CO₂ 总排放量不会有较大影响。BEmFm 情景显示，客运和货运可以减少道路交通部门的 CO₂ 排放量。BEmFm 情景结果表明，由于电动汽车政策，2050 年的总能耗和碳排放量相对低于 BEf1 和基准情景都低。由于缺乏净零政策和技术改进，这种程度的 CO₂ 减少仍然无法实现印度国家道路交通部门的深度脱碳。目前重要的是要指出哪种技术正在产生更多的排放，以及可以采取哪些政策来减少排放。BEhFh 情景结果显示了车辆技术的改进和减排雄心的转变，也就是除了增加 EV 政策之外，还制定了净零政策。因此，这种情况迫使 BEV 和 FCV 与传统汽车竞争，并可能在 2050 年接近深度脱碳。

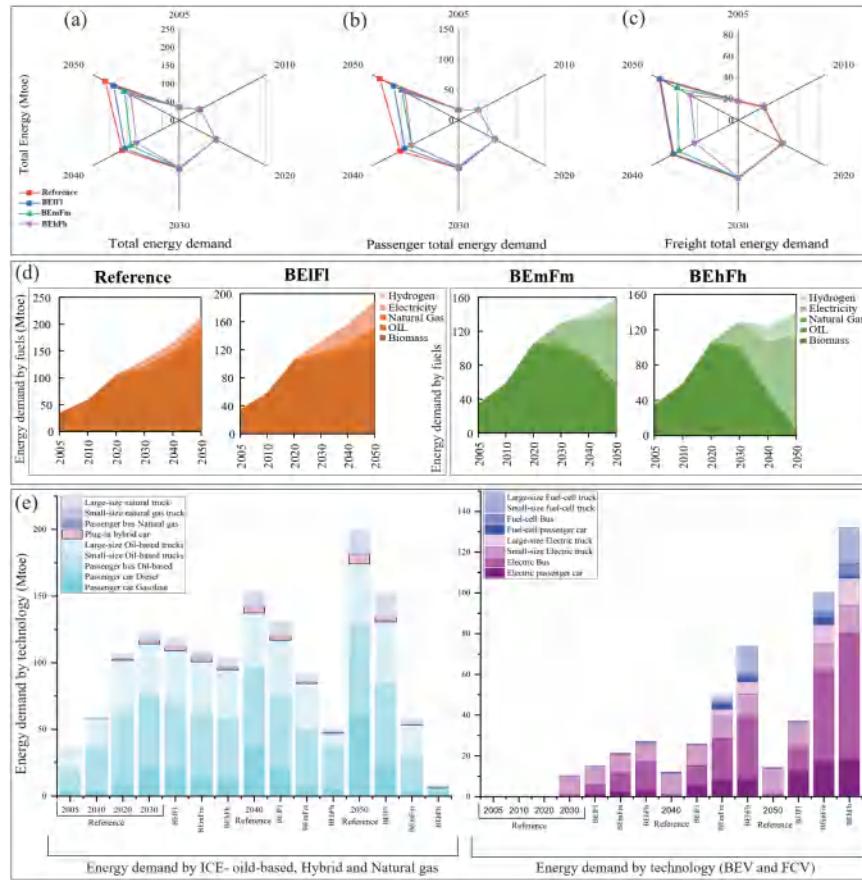


Figure 7.142: 道路交通部门能源消耗。(a) 交通部门能源消费总量; (b) 客运能源消耗总量; (c) 货运能源消耗总量; (d) 同情景的年度总能源消耗量; (e) 不同技术的能源消耗量

2. 空气污染物减排

基于技术优化评估框架，这项研究强调需要解决所有道路交通现有车辆类别的排放问题。印度道路运输业有专门用于控制空气污染的排放控制法规。已实施的政策对 CO₂ 减排和空气污染物的控制有协同效果。印度存在严重的空气污染问题，尤其是颗粒物 (PM)。客运 (汽车和公共汽车) 和货运 (小型和大型卡车) 交通部门是全国空气污染问题的两个主要贡献者，占颗粒物污染的近三分之一，氮氧化物的比例更高。图7.143a、b 和 c 显示了减少空气污染的协同效益。

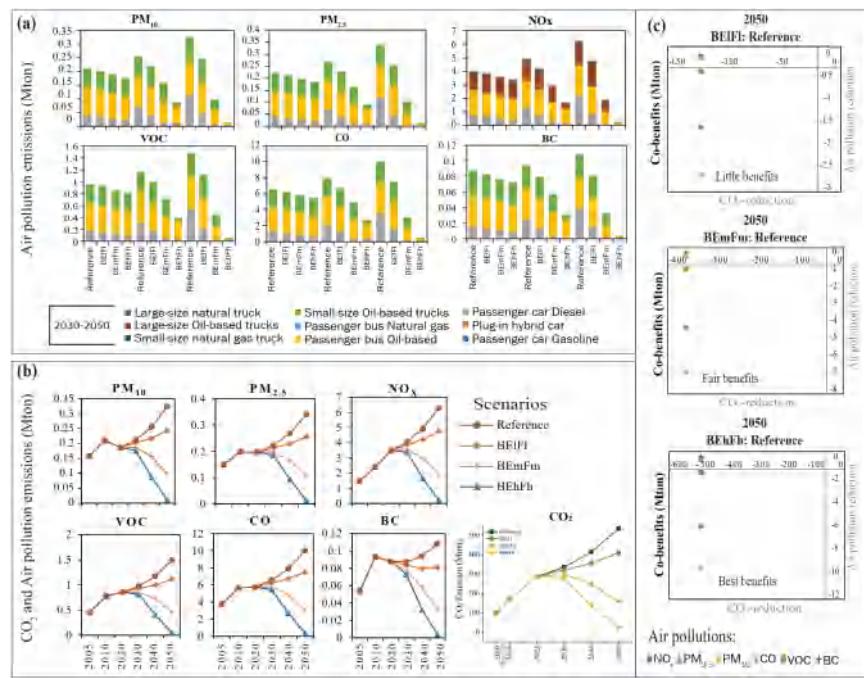


Figure 7.143: (a) 不同车辆技术造成的空气污染排放总量；(b) 不同情景下的空气污染排放变化；(c) 不同情景下的空气污染减少与 CO₂ 减排的协同效应

在 BEhFh 情景中，改进的电动汽车政策和先进技术的高度渗透将导致空气污染的显著减少（图7.143b 和 c）。在基准情景中，印度全国道路交通部门的空气污染水平在 2030 年至 2050 年间继续上升（图7.143）。在 BEIF1 情景中，道路运输中的空气污染将在 2050 年达到峰值（图7.143b）。在 BEmFm 情景中，空气污染在 2030 年达到峰值，此后出现下降。结果表明，大部分空气污染首先来自油基客车，其次是大型油基货车，然后是柴油乘用车（图7.143a）。由于大量基于石油的技术，天然气作为替代燃料无法完全有助于减少空气污染，因此印度政府正在致力于 BEV 基础设施。印度的国家级 CO₂ 由于电动汽车政策和缺乏高效技术，空气污染减排过程缓慢，导致道路运输部门严重影响空气质量。因此，从图7.143b 可以清楚地看出，BEV 和 FCV 的高渗透率可以在 PM 方面实现显著的空气污染减少。图7.143c 将净零政策影响情景与基准情景进行了比较。BEhFh 情景是一项净零政策，旨在控制车辆排放并减少空气污染，能源消耗结构的变化可能导致污染物排放的大幅减少。与基准情景相比，BEhFh 情景中 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 到 2050 年将分别下降 25%、69%。

结论

对电动汽车渗透情景的评估表明，在中短期内，支持基础设施的前期投资以及为电动汽车购买者提供直接的政策和技术改进可以帮助印度的电动汽车份额上升。然而，从长远来看，电动汽车可以与传统汽车竞争实现深度减排。鉴于印度庞大且不断扩大的乘用车市场，在不久的将来增加电动乘用车份额的潜力很大。此外，印度将有机会扩大其国内电动汽车市场，并促进大型电动汽车的广泛使用。客运和货运部门对印度经济至关重要，多年来，印度政府已经开放了经济，使其成为全球许多汽车制造商和制造商的热门商业地点。然而，印度的总能源需求主要来源于化石燃料，这被认为是碳排放和空气污染的主要原因。根据我们的分析，在国家道路运输部门实施政策可以降低碳排放，从而在 2030 年之前实现排放峰值，并为减少空气污染提供实质性的共同效益。到 2050 年，

政策改进的实施可以减少碳排放以及客运和货运带来的空气污染。如果政策不够完善，要达到理想的国家货运空气质量标准将具有挑战性。燃料电池技术的实施也是印度交通部门减少碳及污染物排放的重要手段。

7.10.8 LEEEП 研究 | 电动汽车助力印度各州实现道路交通碳中和及清洁空气

- **原文标题:** The role of electric vehicles in decarbonizing India's road passenger toward carbon neutrality and clean air: A state-level analysis [46]
- **期刊:** Energy
- **发表年份:** 2023
- **作者:** M.S. Hossain, Yan Ru Fang, Teng Ma, Chen Huang, **Hancheng Dai***
- **文章链接:** [点击 LEEEП 微信公众号链接阅读推送原文](#)

研究导读

印度 2070 年碳中和目标要求各行各业深度脱碳。在道路客运部门引入电动汽车 (EV) 可能是实现这一目标的一种清洁替代选择。本研究评估了印度地方层面电动汽车的渗透率和交通能源需求对碳中和的影响。使用自下而上的能源系统优化模型，我们估算了促进电池和燃料电池技术的电动汽车政策对能源消耗和 CO₂ 排放的影响。根据国家政策制定的碳中和目标，研究制定了三种情景：参考情景、低碳情景和净零情景。该分析框架还提出了针对特定区域的气候政策，以增加地方层面的净零排放和低碳车辆的份额。我们发现，仅通过使用低碳交通技术，CO₂ 排放和空气污染减少在地方层面是困难的。相比之下，高效技术的综合渗透可以显着减少碳排放和空气污染。到 2070 年，模型评估表明净零排放技术可以在印度地方层面将道路客运的 CO₂ 总排放量减少 80% 以上。

研究概述

印度提出 2070 年实现碳中和目标，这要求几乎所有部门深度脱碳。对于道路交通部门，推进车辆电气化是实现碳中和目标的潜在选项之一。这项研究使用自下而上的能源系统优化模型 (IMED|TEC)，在地区层面 (state-level) 评估推广电动汽车对印度道路交通部门节能减排的影响，主要回答以下三个问题：

1. 如何加强印度各地区的电动汽车政策以在 2070 年前实现碳中和目标？
2. 车辆电气化将导致印度各地区道路交通部门的能源消费和 CO₂ 排放呈现何种区域异质性？
3. 车辆电气化将在多大程度上协同减排 NO_x、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 等空气污染物？

研究方法

本研究将印度的邦和直辖区重新划分为 18 个研究地区，并利用北京大学 IMED|TEC 能源系统优化模型在地区层面模拟了印度道路交通部门在不同情景下的交通运输需求、车辆结构、能源消耗、二氧化碳和大气污染物排放。研究主要设定了三种情景：参考情景 (Ref)、低碳情景 (LowC) 和净零排放情景 (NetZ)。参考情景考虑了印度国家气候变化行动计划 (NAPCC)、混合动力和电动汽车政策 (FAME I 和 II) 等政策。在此基础上，低碳情景考虑了更积极的电动汽车政策，增加了天然气汽车、插电式混合动力汽车和电动汽车等车型的渗透率。净零排放情景进一步加强了电动汽车政策。具体的研究情景如图7.144所示。

Policy Implement	Reference Scenario (Ref.)	Low-carbon Scenario	Net-zero Scenario
Indian states level EV current and drafted policies in line with their announced carbon neutrality commitment by 2070	The continuation of transport-related government policies (Table A3)	Limited technology improvements and policy limitations exist for battery electric and fuel cell vehicles.	Implementing climate and energy policies in combination with EV policies and an ambitious target toward carbon neutrality by 2070
Technology types	<p>The ICE vehicle share is higher than that of natural gas, plug-in hybrid, battery-electric, and fuel cell vehicles.</p> <p>The EV fuel cell technology and energy price (battery price) are higher than ICE.</p>	<p>Adopting low-carbon and inefficient vehicle policies (battery EVs, natural gas, plug-in hybrids). The EVs' share is higher than that of the ICE. The plug-in hybrid and natural gas vehicles have direct emissions.</p> <p>Fuel cell technology and energy prices are higher than those of EV batteries and ICE. Policies with more adoption and high penetration of inefficient technology are identified.</p>	<p>Net-zero technology (BEV and FCV). EV battery and fuel cell shares are higher than the ICE and other road passenger vehicle technologies and without direct emissions of fuel cell vehicles.</p> <p>Specific technology for clean electricity and hydrogen production for EVs. EV batteries, fuel cell technology, and energy prices are comparatively lower than ICE. An intelligent electric grid that can allow the usage of EVs for storage and as a source of electricity combines with a higher capacity grid.</p>

Figure 7.144: 研究情景

研究结果

印度道路交通部门的能源消耗和 CO₂ 排放。印度人口和人均收入的增长将推动道路交通需求持续增加，预计到 2070 年，道路交通的总能源服务需求将达到约 136Mtoe。在参考情景下，预计到 2070 年，印度道路交通部门的 CO₂ 排放将增加至 380Mton，其中燃油公交车、柴油车等传

统车型将消耗大量能源并排放大量 CO₂。在低碳情景中，天然气汽车、插电式混合动力车和纯电动车等新能源车型将逐步普及，预计到 2070 年，相较于参考情景，CO₂ 排放将减少 29%，石油消耗将减少 34%，而电力使用将增加 82%。在零排放情景中，效率更高的电动汽车（为内燃机的 5 倍）的比例将增加，预计到 2070 年，相较于参考情景，CO₂ 排放将减少 80%，石油消耗将减少 79%，而电力和氢能的使用量分别将增加 90% 和 95%。

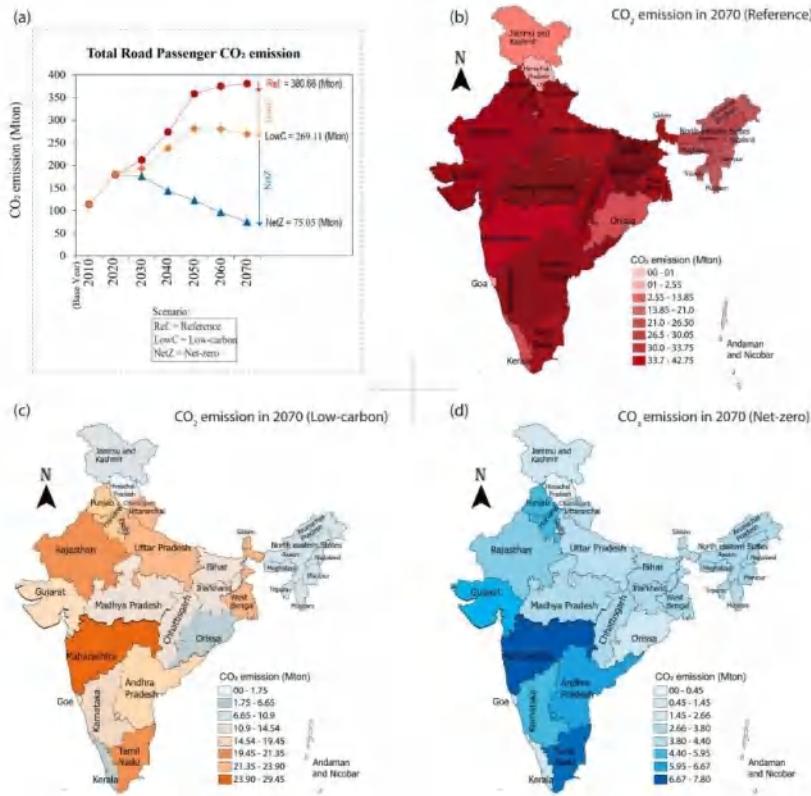


Figure 7.145: 印度道路交通部门 CO₂ 排放

印度各地区对道路交通部门节能减排的贡献。在参考情景、低碳情景和净零排放情景中，图7.145、图7.146、图7.147、图7.148分别展示了印度 18 个子地区的 CO₂ 排放和能源消耗情况。在这项研究之前，印度已有超过 10 个邦或直辖区发布了促进电动汽车发展的草案或政策，例如德里计划减少石油车的数量。在净零排放情景中，到 2070 年，德里、哈里亚纳邦-旁遮普邦-昌迪加尔、查谟-克什米尔、喜马偕尔邦等个地区的道路交通部门的 CO₂ 排放相比参考情景预计分别减少 74%、79%、81% 和 84%，石油需求预计减少 73%、79%、81% 和 84%。安得拉邦、泰米尔纳德邦、喀拉拉邦、卡纳塔克邦等地区的政府特别关注车辆的电气化，鼓励相关的创新研发并投资充电设施、氢气和燃气站等。这些地区可通过更高效的乘用车辆和燃料电池公交车实现减少碳排放。在北方邦-北阿坎德和西孟加拉邦等收入较低、人口更加稠密的地区，摩托车的数量正在增加。然而，在净零排放情景下，电动汽车、燃料电池车、公交车等车型的份额增加促进了 CO₂ 减排和石油需求减少。对于古吉拉特邦和马哈拉施特拉邦等经济发达的工业化地区，它们相较于其他地区更容易采用更高效的电动汽车和燃料电池乘用车。因此，它们的碳减排速度更快。与参考情景相

比, 到 2070 年, 在净零排放情景下, 马哈拉施特拉邦和古吉拉特邦的 CO₂ 排放分别减少了 7.11、6.24Mton, 石油消耗分别减少了 2.82、2.31Mtoe。

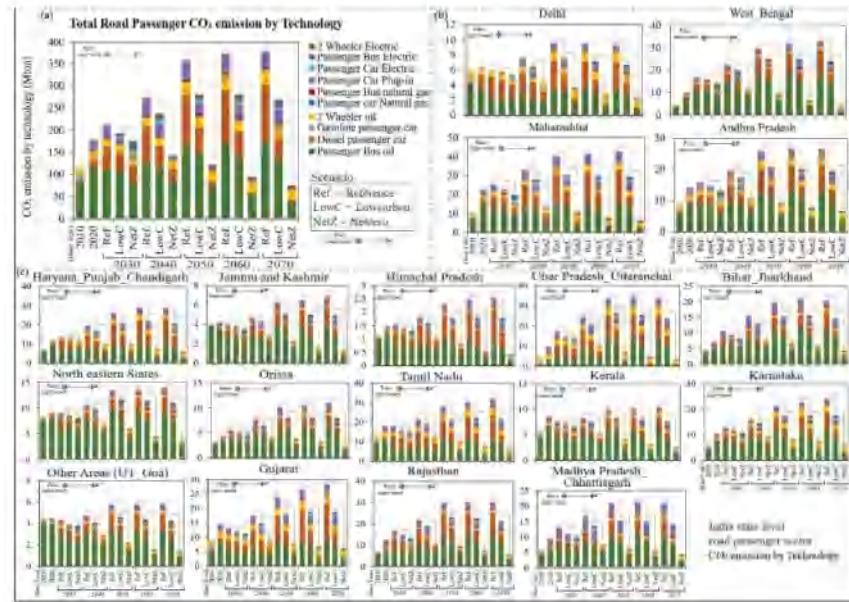


Figure 7.146: 印度各地区道路交通部门 CO₂ 排放 (分车辆类型)

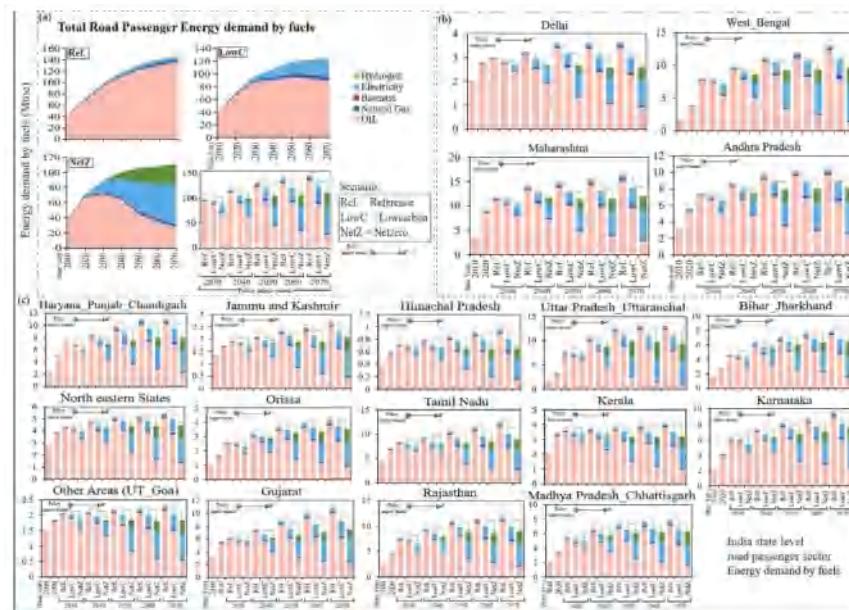


Figure 7.147: 印度各地区道路交通部门能源需求 (分能源品种)

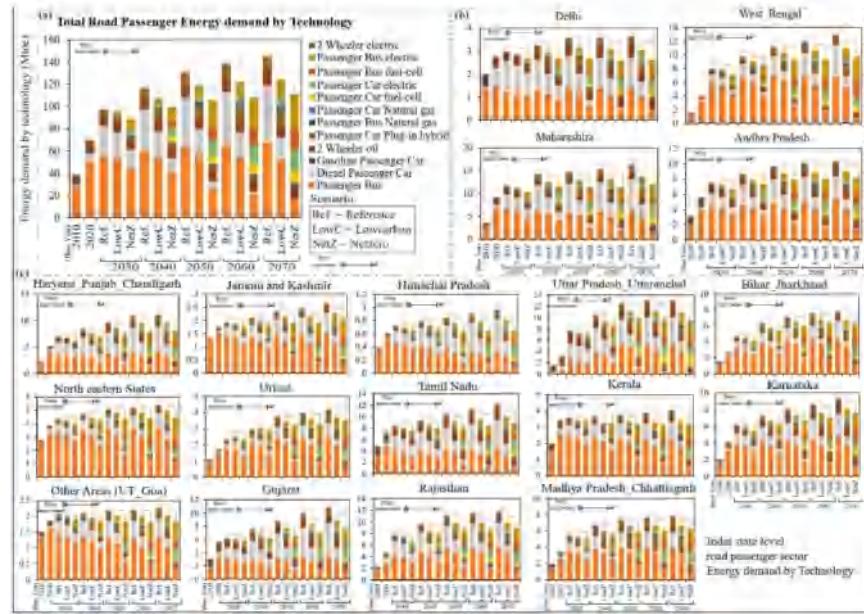
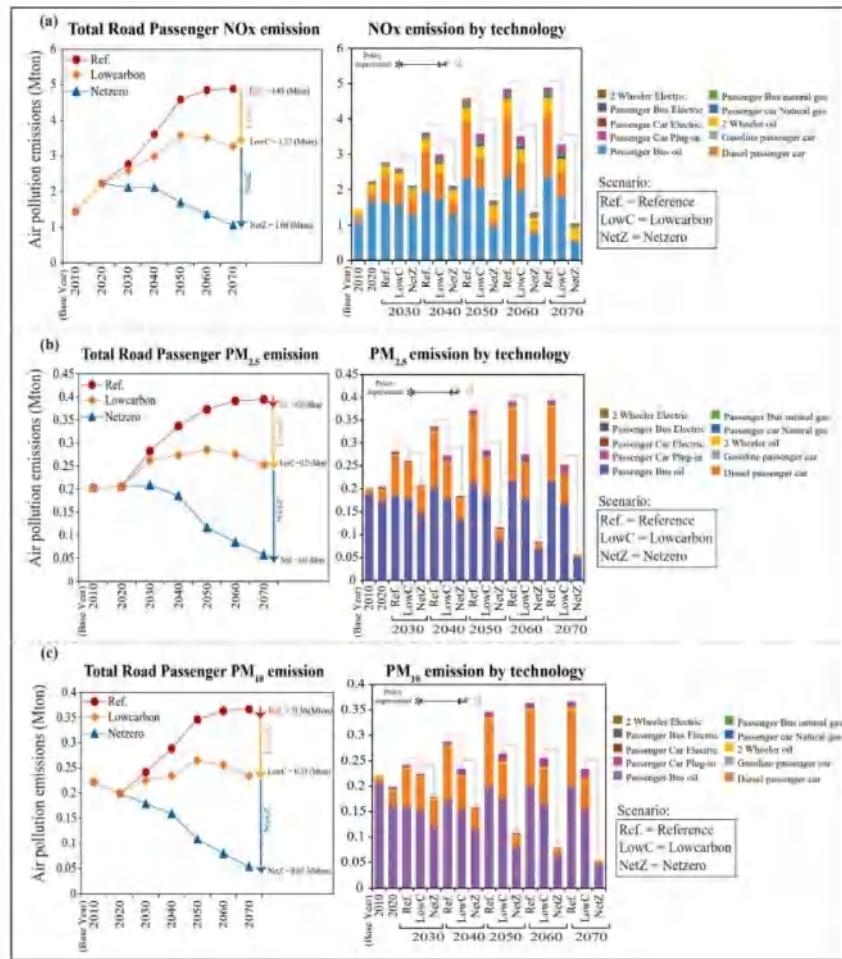


Figure 7.148: 印度各地区道路交通部门能源需求（分车辆类型）

空气污染物减排。印度道路交通部门的车辆电气化在减少二氧化碳排放和石油消耗的同时，也协同减少了PM_{2.5}、PM₁₀和NO_x等空气污染物的排放。在参考情景下，预计到2070年，印度道路交通部门的PM_{2.5}、PM₁₀和NO_x排放将增长至0.39、0.36、4.88Mton；而在低碳排放情景下，上述三类空气污染物的排放量预计将分别下降至0.25、0.23、3.27 Mton；在净零排放情景下，这些排放量将进一步降至0.05、0.05、1.06 Mton。PM_{2.5}、PM₁₀和NO_x的排放主要来自消耗石油的摩托车、客运公交车和轿车。燃油车向高效电动汽车(BEV)和燃料电池汽车(FCV)的转型是净零排放情景下空气污染物减排的主要原因。在地区层面，由于地区间的经济、人口等社会经济禀赋的异质性，导致相应道路交通部门的转型路径存在差异。在低碳情景下考虑了现有政策后，像马哈拉施特拉邦这样的高收入地区未来NO_x排放的增长趋势并不明显，这是因为相对较低效的电动汽车的推广；然而对于像比哈尔邦和贾坎德邦这样的低收入地区，未来NO_x排放则将缓慢增长。而在政策加强的净零排放情景下，各地区的污染物排放则显示出明显的下降趋势。

Figure 7.149: 印度道路交通部门的 NO_x、PM_{2.5}、PM₁₀ 排放趋势和分车辆类型排放情况

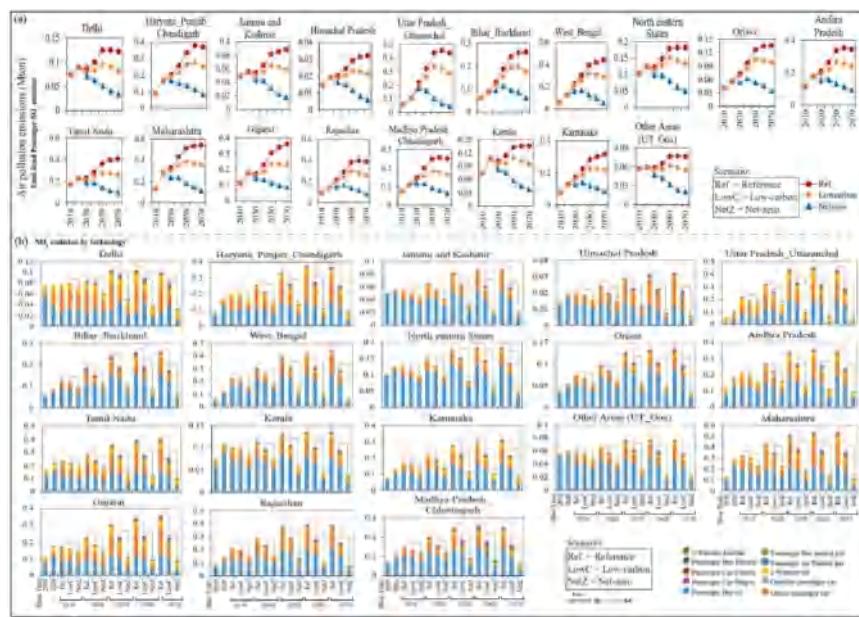


Figure 7.150: 印度各地区道路交通部门的 NO_x 排放趋势和分车辆类型排放情况

研究总结

本研究以印度道路交通部门作为研究对象，在地区层面构建了参考情景、低碳情景以及净零排放情景，模拟了印度交通能源系统的低碳转型路径。在净零排放情景下，通过燃油车向高效电动车和燃料电池车的转型，预计到 2070 年，印度道路交通部门的 CO₂ 排放将下降 80% 以上，并且协同减少 NO_x 和颗粒物的排放量分别达到 78% 和 85%，这将有助于改善印度的空气质量。

7.10.9 LEEEP 研究 | 中国大气污染控制政策的成本和收益评估研究综述

- **原文标题:** Evaluating cost and benefit of air pollution control policies in China: a systematic review^[100]
 - **期刊:** Journal of Environmental Sciences
 - **发表年份:** 2023
 - **作者:** Xinyuan Liu, Chaoyi Guo, Yazhen Wu, Chen Huang, Keding Lu, Yuanhang Zhang, Lei Duan, Miaomiao Cheng, Fahe Chai, Fengqiao Mei*, **Hancheng Dai***
 - **文章链接**
 - **点击 LEEEP 微信公众号链接阅读推送原文**

研究导读

过去几年，中国在大气污染防控方面做出了巨大的努力，近年还承诺要实现气候目标。成本效益分析方法被广泛用于防控政策的事后评估、技术措施的未来减排潜力评估以及直接和间接影响评估。为了解中国大气污染控制成本效益分析研究进展，北京大学 LEEEP 课题组与合作者一道，对过去 20 年发表的 100 多篇核心成本效益研究，进行了文献计量系统性综述，梳理了该领域的研究进展、成本效益研究的常用方法、核心发现与演变历程。回顾过往研究，我们发现污染物防控目标

经历了三个阶段：第一阶段为单一和一次污染物控制，第二阶段为多污染物和二次污染物联防联控，第三阶段转向大气污染和碳的协同控制。随着时空研究范围的不断扩大，中长期、多地区、复杂环境下的政策措施模拟变得尤为关键，综合评估模型因此逐渐成为了主流评估方法。现有研究结果表明，为了确保未来长期空气质量、气候、人群健康和经济的可持续发展，中国需持续加强多区域与多部门的协同配合，系统性深入调整上游能源系统和产业结构。本综述为相关决策者提供了当下中国大气污染防控战略研究的不足，以及未来挑战的应对方向。

研究背景

纵观大气污染防控成本效益分析，研究人员对于控制措施的直接间接影响、成本效益比以及不同时空尺度地区和行业间的异质性较为关注。成本效益方法也经历了多个演进阶段，不管是时空尺度、目标范围还是评估复杂程度，都发生了改变。早期阶段的成本效益分析普遍较为简单，多用于微观层面的事后评估，较少涵盖可能存在的其他间接影响；而近期的成本效益分析更聚焦于复杂环境变量下的多时空尺度分析。以下是本综述的三个主要研究目标：

1. 统计大气污染防控成本效益分析的核心研究与发表现状；
2. 梳理不同尺度范围内成本效益分析方法的演变趋势；
3. 总结有关防控目标、地区行业控制策略的趋势走向和核心发现。

研究发现

文章发表、引用趋势、热门研究领域、文章影响力

基于 Web of Sciences (WoS) 文献库的计量结果显示，随着 2018 年“大气十条”收官，“蓝天保卫战”开局，大气污染防治成本效益的分析研究进入了高峰期，被引用总次数高为 3516 次，单篇平均被引 25 次，这意味着大气污染防治政策的影响评估研究热度持续攀高（图7.151）。基于 WoS 研究领域分类来看，大气污染防治成本效益分析主要集中在环境科学的研究领域；此外，环境工程、能源与燃料、气象学也多涉及该领域研究（图7.152）。为了解该领域研究的质量与影响力，我们对各期刊发表文章数量和总被引量进行排序（图7.153）。5 篇在 Atmospheric Environment 发表的期刊被引用超 750 次；7 篇在 Applied Energy 期刊发表的文章被引用达 463 次，平均每篇文章被引用 66 次以上，核心研究主要围绕地区和行业层面大气污染防控战略与能源政策之间的协同效益。此外，我们还根据 2019 年中国科学院期刊影响因子标准对文章进行了分类。可以看出，自 2015 年以来，随着论文数量的不断增加，该领域总体文章质量较高，1 区文章平均占比近 75%（图7.154）。

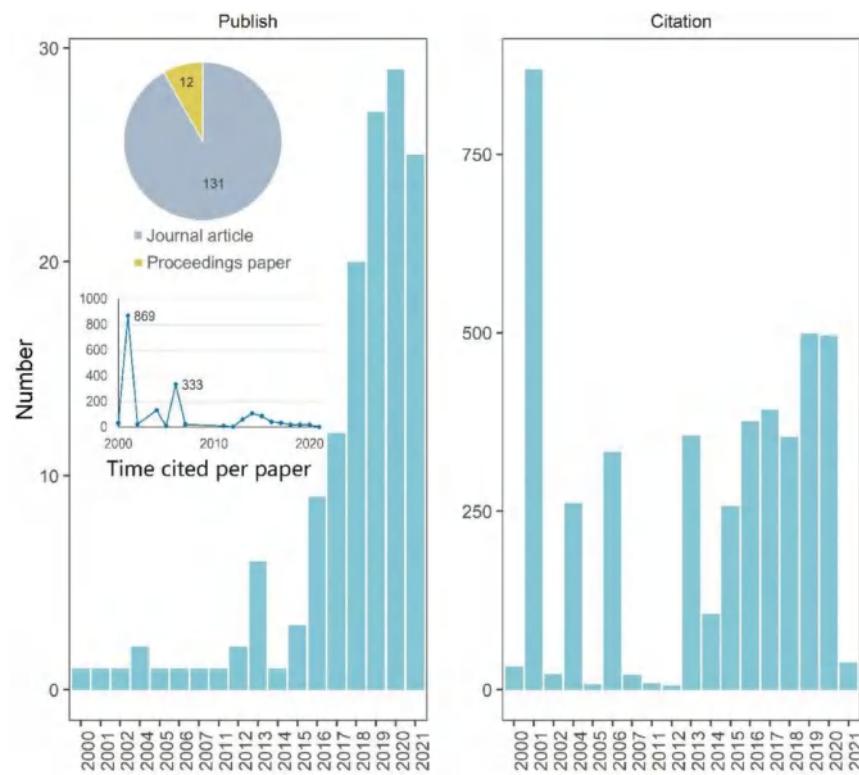


Figure 7.151: 左柱状图：研究成果文章发表数量；右柱状图：被引数量；饼状图：文章类型；折线图：单篇文章平均被引

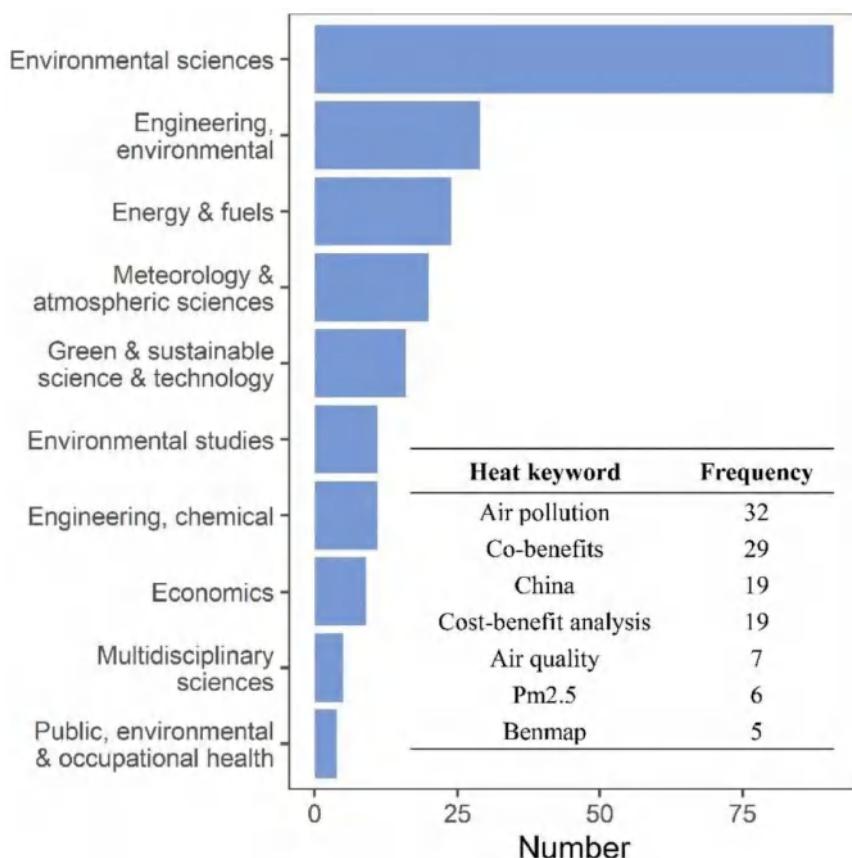


Figure 7.152: 最热门的研究领域和关键词

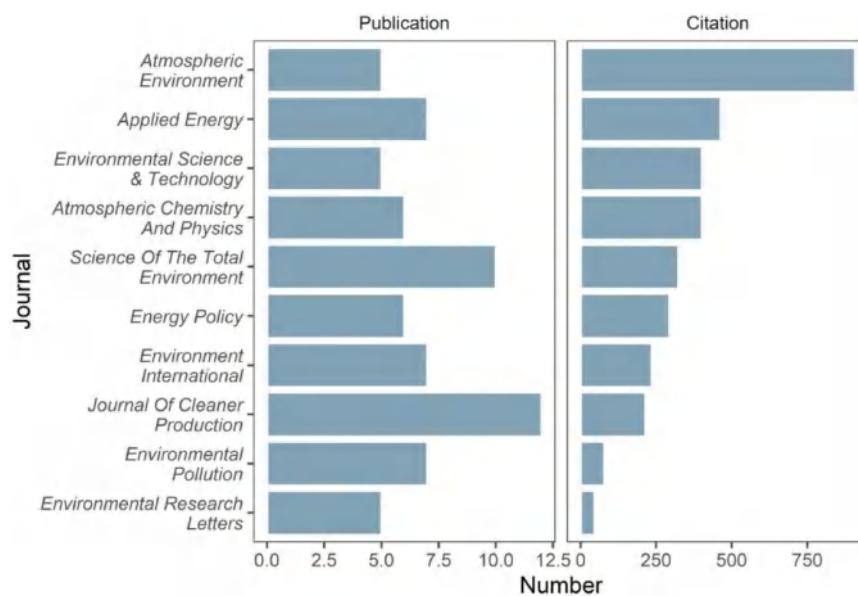


Figure 7.153: 按发表文章和被引量的期刊排序

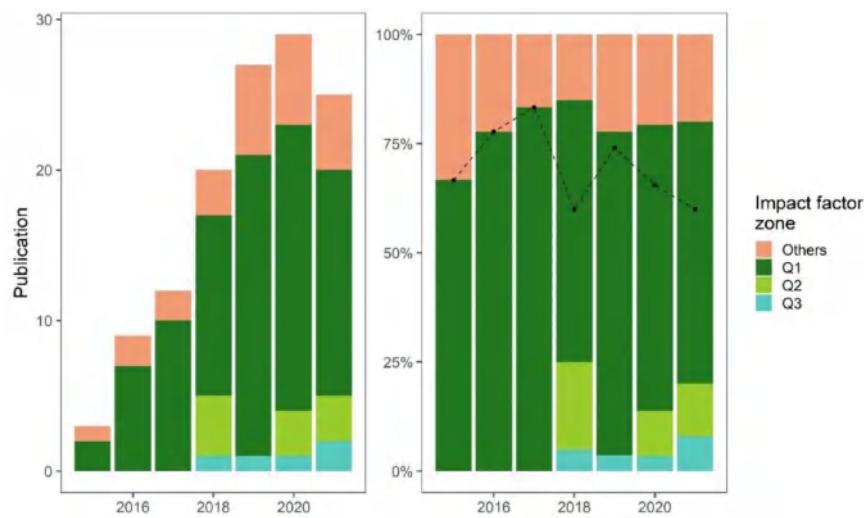


Figure 7.154: 研究成果质量与影响力

早期的成本效益分析 (CBA) 多基于减排政策作事后评估

早期成本效益分析多针对已出台的减排政策和拟建的工程投资，对其进行事后影响评估和中短期投资收益分析，两个主要指标通常出现在这类事后-成本效益分析中：净现值 (NPV) 和成本效益比 (CBR)。净现值通过各个时期资金流入流出的现值系数折算得到；成本效益比通常反映了政策措施的有效性。传统事后-成本效益方法首先被用于微观技术层面，为企业、局部行业和地区提供污染物减排效果评估，如实际产生多少成本，会达到怎样的污染物治理效果。随后逐渐被用于更大范围的国家层面评估，服务于整体量化政策措施的净效益。传统的事后-成本效益分析优点是操作步骤简单明了，但该方法很大程度取决于微观数据质量和可得性。随着研究不断深入，政策标准不断趋严，前沿技术不断涌现，各类间接成本效益不断被纳入，传统事后-成本效益分析在复杂环境变量下，较难刻画中长期的综合成本效益影响（图7.155）。

Table 1 – Methodology for traditional ex-post evaluation.

Main content	Indicator	Author/date, policy (Scenario) and results (Temporal range)	Features	
			Advantages	Limitation
Cost-benefit analysis (CBA)	NPV: Net present value of the costs and benefits at the required discount rate. CBR: Cost-benefit ratio	Mao et al. (2002); Coal-to-gas in Beijing; NPV: [6, 27] billion RMB Yuan Aman et al. (2004); Coal reduction in Shanxi; Significant health benefit Wang et al. (2012); Ground-Level Ozone Control in Beijing; Significant health benefits. Zhang et al. (2019a); Action plan in China; BCR: 1.49; NPV: \$18. billion RMB Yuan. Li et al. (2020); Phase-out steel production in Beijing-Tian-Hebei; BCR: 3.5; NPV: 47.2 billion RMB Yuan. Feng et al. (2021); Coal-to-gas in 2+26 cities; BCR: 4.49; NPV: 35 million RMB Yuan.	(a) Simple to use (b) Results are relatively easy to understand (c) Short-run, historical trend	(a) No simulation module (b) Hard to capture complicated systems. (c) Hard to estimate long-run effects.

Figure 7.155: 传统事后-成本效益分析

大气污染防控成本效益综合评估模型 (IAMs) 与集成平台

由于传统事后成本效益分析的局限性，近些年诸多前沿研究采用的综合评估模型（IAMs）成为了热门研究方法，更系统化地模拟复杂环境变量下的路径走势，如（图7.156）所示。IAMs 的核心特征是多个系统和模块的连接耦合，纳入一系列环境、能源、经济和健康等参数条件，通过大数据优化计算给出一个最优解决方案。例如将空气质量模型与能源经济模型或健康模型连接起来，以评估污染物减排措施的综合影响。在这里，我们着重介绍了当前大气污染防治领域使用较多的三个综合模型集成平台：**中国空气污染控制成本效益与达标评估系统（ABaCAS）**，**温室气体与大气污染相互作用与协同效应模型（GAINS）**，以及**能源-环境-经济可持续发展综合评估模型（IMED）**。

Table 2 – Methodology for atmospheric Integrated Assessment Model (IAM) analysis.					
Main Content	Example	Author-data, control policy (scenario) with IAMs, and results (Temporal range)	Features		
			Advantages	Limitations	
Integrated Assessment Models (IAMs)	ABaCAS: Air Benefit and Cost and Attainment Assessment System IMED: Integrated Model of Energy, Environment and Economy for Sustainable Development. GAINS: GHG-Air pollution Interactions and Synergies model GCAM: Global Change Analysis Model DICAE: Dynamic Integrated model of Climate, Air pollution and the Economy Other combinations: Air quality model & BenMAP & WTP & HC	Ying et al. (2021b): Air quality improvement in Shenzhen using ABaCAS; Road transportation can be better mitigated [2014, 2025]. Xie et al. (2019): Air pollutant control in China using IMED; O ₃ negative effects < PM _{2.5} negative effects [2005, 2030]. Zhang et al. (2015a): Energy saving can help to greatly reduce CO ₂ and air pollutants in the cement industry under stimulation by GAINS [2011-2030]. Wang et al. (2016): Air pollutant control and non-fossil fuel energy in China using GCAM, combining can lower costs [2010, 2050]. Xie et al. (2018a): Climate policy in China using DICAE; More stringent carbon reduction will have a more significant synergistic effect on NOx reduction [2010-2050]. Chen et al. (2017): Action plan in Beijing-Tianjin-Hebei; Significant health benefits using BenMAP; Willingness to Pay (WTP) and Human Capital (HC) [2014].	Long-term effects (b) Diversified scenarios (c) Large regional and temporal scale (d) Various impacts from multiple aspects	Over-complicated model systems (e) High uncertainty	

Figure 7.156: 大气污染防治综合评估模型 (IAM) 与集成平台

ABaCAS 是在中国环境保护部、美国环保署、美国能源基金会共同支持下，由清华大学、华南理工大学、田纳西大学等联合开发的一个大气污染控制成本效益及空气质量达标规划辅助决策系统平台。旨在综合利用区域空气质量改善获得的人体健康效益及相应的污染治理成本货币化结果，优化得出污染控制策略。该综合模型涉及 8 个模块，其中使用较多的模块包括，空气质量评价模块 (pf-RSM)、空气质量达标模块 (SMAT-CE)、成本估算模块 (ICET) 和健康模块 (BenMAP-CE)。ABaCAS 对于多种污染物的非线性相互作用的模拟刻画过程较好。多研究通过在成本最小化 (LEast-Cost) 中加入机器学习遗传算法，进一步提升了该综合模型的智能优化性和预测能力。通过设置给定空气质量目标，实现更快、更大规模的优化计算，找到成本最低的减排组合策略，然后通过 BenMAP-CE 进一步计算出健康效益。

GAINS 模型是国际应用系统分析研究所 (IIASA) 开发的典型综合评估模型。 GAINS 模型的数据输入为能源消费活动路径和控制措施路径，相关数据来自其底层数据库中基于《全球能源展望》等国际研究和报告等。研究者可以在 GAINS 模型中定义和分析多个不同的大气污染控制情景，通过情景分析评估污染控制政策的成本效益。该模型内置了大气化学传输模块和气候影响模块，可以同时考察各部门污染物排放所引起的环境影响，包括细颗粒物 (PM_{2.5}) 和地面臭氧污染及其健康影响，以及空气污染和温室气体排放对陆地和水生系统的多重效应。GAINS-China 和 GAINS-City 是国家和城市层面进一步的扩展版本。Zhang 等 (2015) 采用 GAINS 评估了 2011-2030 年水泥行业节能技术升级对空气污染和碳排放的长期影响；Zheng 等 (2016) 利用 GAINS-China 模拟了

2005-2030 年长三角工业部门的大气污染物和气候减缓战略。

IMED 模型是北京大学能源环境经济与政策研究室独立开发的 IAM 集成模型平台，旨在结合能源-环境-气候-健康和社会经济系统多个模块，用于揭示大气环境政策如何在不同时空尺度上影响各模块系统，探寻复杂交互作用背后的影响机制。该模型的核心模块包括宏观经济模型 IMED | CGE、人群健康模型 IMED | HEL 和能源系统优化模型 IMED | TEC。IMED | CGE 是一个自上而下全球多部门、多区域动态可计算一般均衡模型。多研究根据历史社会经济数据或大气污染防治政策模拟未来的社会经济发展走势、能源消费、产业结构和排放趋势变化。IMED | HEL 基于暴露-反应函数，可用于评估大气污染防控政策对人群健康相关的疾病致死率和致病率的变化影响。IMED | TEC 是一个自下而上的能源系统优化模型，研究通过模拟各部门间的物质流、能源流、技术流来计算政策变化下的能源消耗和各类污染物的排放量变化，可评估大气污染防治政策和技术的成本效益。

总的来看，大气污染防控成本效益分析的研究方法，经历了从局部分析到综合评估的演进过程。从以前的中短期事后成本效益评估，逐渐过渡到基于复杂系统的综合评估模型 IAM，以预测未来中长期的政策影响；评估范围也从直接空气质量改善扩大到各类潜在的间接因素，为政策制定者提供了前瞻性的解决方案。

我国大气污染控制成本效益研究进展及核心成果

(1) 从一次、单一污染物到多目标协同控制

梳理过往中国大气污染防控成本效益分析相关研究，从大气污染物减排目标角度来看，中国大气污染防控随着不同发展阶段经历了 3 次主要转变，从单一污染物及一次污染物总量控制，到以空气质量为目标的多污染物协同控制，再到污染物与二氧化碳协同减排。

(2) 从单地区单部门、重大活动保障管控转向多地区多部门联防联控

从部门和地区角度看，大气污染防控的成本效益研究经历了三个发展阶段：第一阶段，主要面向高耗能高排放的单部门和重点示范区；第二阶段，以重大活动保障、突发应急区域协同管控为过渡阶段；第三阶段，随着更严格的空气质量标准和气候政策的推出，多地区多部门联防联控成为核心战略。

(3) 从末端治理向产业结构、能源结构转型

从大气防控措施的角度来看，根据现有的成本效益分析总结发现，大气污染防控相关措施也在近年来不断演进，经历了两个主要阶段：第一阶段核心政策是围绕下游末端治理，大批高排放产业无需改变生产模式，只需安装环保装置达到污染物排放的降低；第二阶段随着中国空气质量标准不断加强，并在近两年逐渐融入以气候减缓为导向的政策措施，末端治理在中长期潜力显示不足，上游系统性结构升级的必要性凸显，与之相关的能源结构、产业结构政策措施的成本效益分析也逐渐增加。

研究结论

结合近年来大气污染防治成本效益研究，我们对未来研究进行展望并总结了以下几点关键信息：

1. 随着碳中和目标的提出，中国大气防控路径会逐渐从污染物防控转向减污降碳协同增效的长期发展目标。未来研究应纳入更广泛的前沿低碳零碳和负排放技术，积极开展减污降碳协同治理的成本效益分析。
2. 多区域多部门联防联控已逐渐成为多污染物和二氧化碳协同控制的关键。未来研究应进一步评估区域和部门之间的异质性，分解细化减排目标和区域管理责任，以实现更公平有效的政策机制。

3. 成本效益分析证实，上游产业的源头治理、能源消费结构的改革是应对大气污染和气候变化的有效解决方案。未来应提升集中式和分布式可再生能源与电网灵活消纳的顶层布局设计，更稳定的向下游最终部门提供清洁能源。
4. 为了更好服务于政策的顶层设计，解决中国复杂的大气环境问题，促进综合评估模型（IAM）本地化自主创新是核心关键。未来综合评估模型需更全面的刻画区域间和产业链的关联特征，同时提升应急综合预案模型的研发，为突发性重污染和极端天气提供应急响应预案和成本效益分析。
5. 为了更全面的成本效益分析，未来研究应纳入更多潜在的间接影响因素，如考虑对农业、水资源、生物多样性等间接影响，以及可能出现的新型污染物，如抗生素、分泌干扰物和微塑料环境污染。

7.10.10 LEEEP 研究 | 中国生物能源进口增加对全球土地利用和可持续性影响

- **原文标题:** Global land-use and sustainability implications of enhanced bioenergy import of China [101]
- **期刊:** Applied Energy
- **发表年份:** 2023
- **作者:** Yazhen Wu, Andre Deppermann, Petr Havlík, Stefan Frank, Ming Ren, Hao Zhao, Lin Ma, Chen Fang, Qi Chen, **Hancheng Dai***
- [文章链接](#)
- [点击 LEEEP 微信公众号链接阅读推送原文](#)

研究导读

在本研究中，我们探究了 1.5°C 目标下，为满足中国在 2060 年增加的生物能源需求所采用的生物质进口组合引发的多样化的全球土地使用影响。我们发现，在不过分损害其他地区土地使用可持续性的情况下，中国生物能源进口增加为原本的两倍是有可能的，但需要更灵活的国际贸易和更严格的土地使用规定，以解决潜在的环境泄漏效应。

研究方法

我们应用 GLOBIOM 模型，以中国 2060 年净零排放目标为目标，研究了不同假设生物能源进口方案下的农业和林业部门动态以及全球土地利用影响。在得出一致的生物能源需求预测后，我们设置了一系列生物能源进口情景。然后将这些情景输入到 GLOBIOM 模型中，以评估中国不断增长的生物能源进口对区域和全球土地利用部门以及相关可持续性指标的影响（图7.157）。

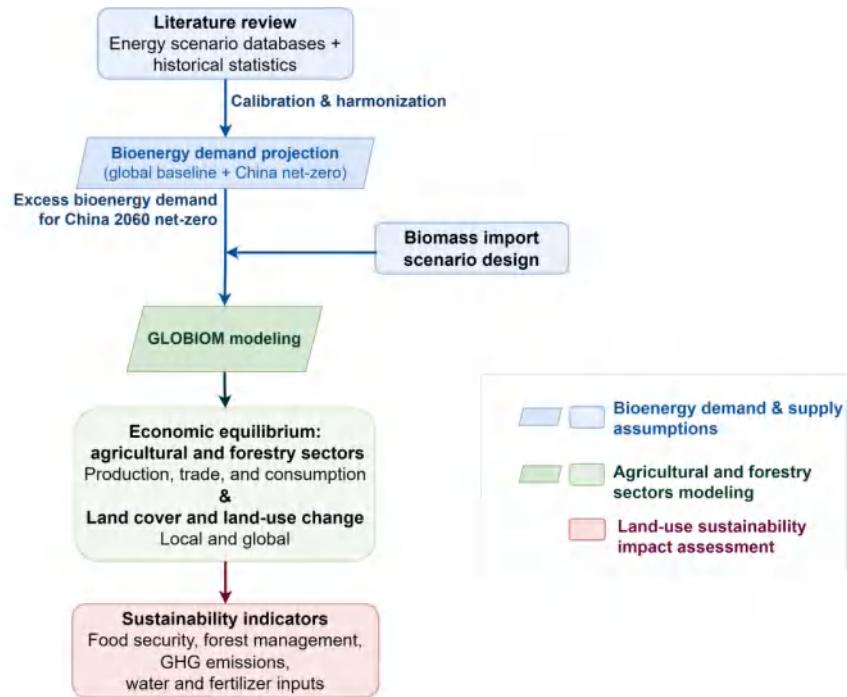


Figure 7.157: 研究框架图

生物能源扩张的土地利用和可持续性影响可能受到许多因素的影响，包括生物能源需求水平、生物质原料来源，以及一系列边界条件，包括土地可用性或土地利用变化监管设置，由此进行了敏感性分析框架如图（7.158）所示。

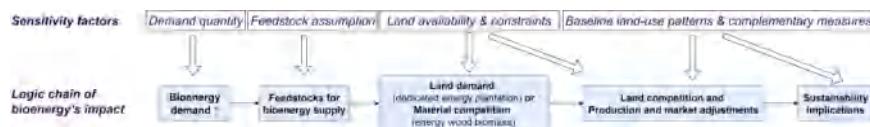


Figure 7.158: 敏感性分析框架

研究结果

对世界不同地区的异质性可持续性的影响

首先，我们分析了当所有其他贸易量都固定在参考情景（固定贸易情景）时，不同生物质能源进口情景下的生物质能源原料结构，因为原料选择是生物质能源影响土地利用的关键驱动因素。如图7.102所示，具有不同土地禀赋的地区在提供相同数量的额外供应量时，所使用的原料结构会有不同。一般来说，专门的能源种植园在多数情景下占据优势，占到额外供应量的 47.9%-98.0%。例如，在 BioCHN_LAM 情景下，到 2030 年，能源种植将占额外供应量的 73.5%，2040 年后将超过 96.6%。这主要是由于木材用于能源和森林部门残留物的供应潜力有限，以及将圆木用于能源的高机会成本。需要注意的是，到 2060 年，中国大部分森林残留物已经用作能源，但在参考情景下这仅仅相当于 1 EJ 能量；同时，全球作为材料使用的圆木总量为 2803Mn3，等效能量含量只有 20 EJ（图7.159）。

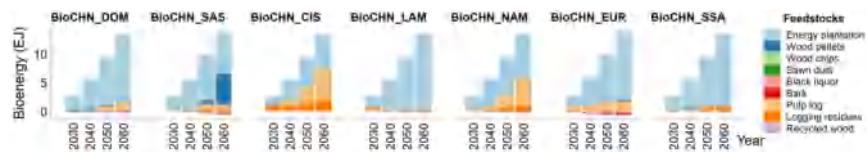


Figure 7.159: “固定贸易”条件下不同生物能源进口情景下额外生物质能的生产原料

然而，在我们的设想中，拥有竞争力较强，管理潜力大的森林部门的地区也将部分依赖木材来提供额外生物能源。如果中国从前苏联或北美进口额外生物能源，在 2050 年和 2060 年，大约 30-50% 的额外生物能源将来自能源木材。原因是当这些地区对生物能源的需求进一步增加时，圆木被用作生物能源将具有成本效益，而建立更大的专用能源种植园可能导致巨大的土地需求（由于低能源作物产量）并与农业生产形成竞争（图7.160）。

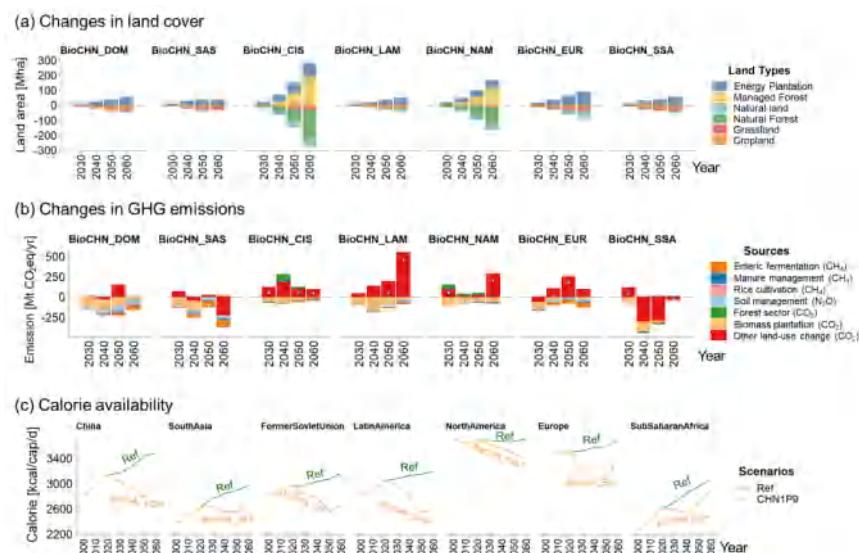


Figure 7.160: (a) 与 Ref 相比，不同情景下土地覆盖的累积变化和温室气体排放的 (b) 变化，以及 Ref 和单区域供应情景下的 (c) 热量可用性。更改将用于相应场景下的供应区域。(b) 中的三角形表示净差异

图7.160展示了在固定贸易情景下，相关供应地区对土地利用、温室气体排放和粮食供应的影响。如果将额外生物能源进口到中国，在相应的供应地区将会出现土地的重新分配以及有关温室气体泄漏和粮食安全的可持续性担忧。由于低生物质产量，从前苏联或欧洲进口额外生物能源到 2060 年需要分别建立 92.7 和 90.7 公顷能源种植园（图7.159a），这几乎是中国当前耕地面积的 70%（2019 年为 127.9 兆公顷）。此外，当进口地区为前苏联或北美，到 2060 年更大面积的无管理森林将变为受管理森林（分别相当于 2000 年这两个地区 25% 和 17% 的受管理森林面积），这意味着潜在的生物多样性风险碳储存损失。如果拉丁美洲或北美来提供额外生物能源，导致的温室气体排放将分别达到 447.3 和 185.0 MtCO₂eq/yr，这将成为被担忧的核心问题（主要源于土地竞争加剧以及能源作物或粮食作物向含碳量较高的自然土地的扩张）将成为一个主要问题，这些温室气体泄漏水平大约相当于中国农业部门温室气体排放量的 1/2 和 1/5（在 2014 年为 829.8

MtCO₂eq/yr)。此外，从几乎所有地区（北美或欧洲以外）进口额外生物能源都会导致当地可用食物显著下降（由图7.159c，在大多数情况下超过人均 500 千卡/天），这将引起严重的粮食安全问题，特别是对于粮食供应基线水平相对较低的地区（例如南亚和撒哈拉以南非洲）。

地方和全球土地利用溢出效应的比较

通过放松贸易限制（“自由贸易”情景下），调整农业和林业产品的贸易流动以及过剩的生物能源进口，将减轻供应（即出口）地区的土地竞争，同时通过间接的土地使用变化，在全球范围内对可持续性影响产生溢出效益。虽然额外生物能源的原料结构与固定贸易情景下的原料结构相似，但预期的生物能源出口地区将调整关键食品和林业产品的生产和贸易，以平衡农田占用或与木材使用的竞争，导致农业和林业生产的大规模外包。图7.161以大豆和小麦贸易量为例，说明在特定生物能源进口情景下全球双边农产品贸易流量的潜在调整。图7.161a 显示，在参考情景下，北美和拉丁美洲对其他地区的大豆净出口量分别为 176.5 万吨和 93.1 万吨。如果假设额外生物能源供应地为这两个区域中的任何一个，那么该区域大豆产量将显著减少，其大豆出口将在很大程度上被另一个区域所取代。同样，如果欧洲是为中国供应额外生物能源，到 2060 年它将大幅增加从前苏联和北美地区的小麦进口（图7.161b），从参考情景中的小麦出口地区（净出口 = 58.3 吨）变为 BioCHN_EUR 情景下的净进口地区（净进口 = 32.9 吨）。

在林业部门也可以发现这种趋势。全球圆木在参考情景下总产量仅为 2.94 Gm³，到 2060 年，南亚和欧洲在 BioCHN_SAS 情景下额外的锯材进口将超过 750Mm³ 和 400Mm³（图 S16），表明全球木材市场将遭受巨大冲击。

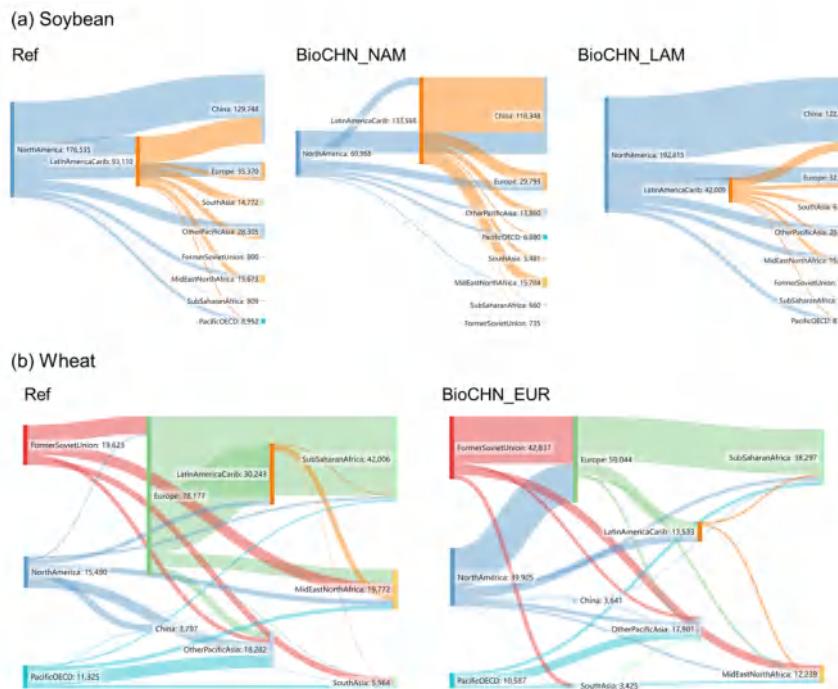


Figure 7.161: 2060 年主要进出口地区 (a) 大豆和 (b) 小麦的贸易流量 (1000 t)

这些全球范围内的农林贸易调整，以及中国的额外生物能源进口进一步表明除供应地区以外地区的间接土地利用变化具有可比规模。图7.162比较了到 2060 年，不同生物量供应情景下的当地

和全球土地相关指标的变化，包括农田需求、森林管理、粮食安全、温室气体排放和农业资源投入。结果表明，世界其他区域（合计为“世界其他地区”）的全球土地利用溢出效应可能与额外生物能源供应区域的直接影响相似，甚至更大。在农田需求方面（图7.162a），2060年当地的专用能源作物种植面积为21.4-35.7公顷，因此还需要增加3.6-13.8公顷的农田，用于提供补偿性作物的生产和出口。在林地利用方面（图7.162b），需要加强森林管理以补偿当地林业生产的减少，这是由于供应地区的木材进口需求增加。在食品供应、导致的温室气体排放、灌溉用水需求和化肥需求方面也发现了溢出效应（图7.162c-图7.162f），其中在世界其他地区产生的影响通常会加剧全球温室气体足迹，或在很大程度上抵消了供应地灌溉或化肥投入的减少。例如，当由欧洲供应额外生物能源，到2060年欧洲的氮肥投入将减少1.56吨，而世界其他地区的氮肥使用将增加3.26吨，导致全球化肥需求净增加。

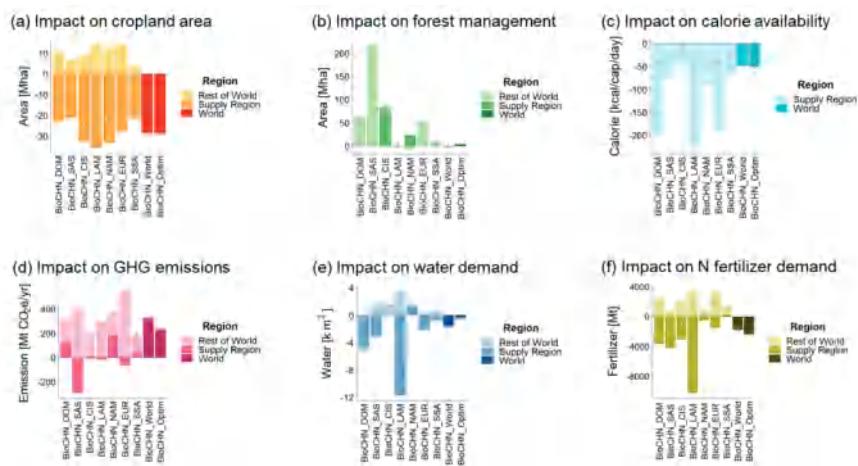


Figure 7.162: 2060年不同生物能源供应过剩对当地和全球 (a) 农田面积、(b) 管理森林面积、(c) 平均热量利用率、(d) 温室气体排放以及 (e) 和 (f) 不同生物能源供应情景（与参考文献情景相比）下的水和氮肥需求的影响

生物能源进口的经济优化和减轻可持续性的权衡

从单区域供应情景转移到多区域供应情景（BioCHN_World, BioCHN_Optim），额外生物能源进口的来源区域显著多样化。在BioCHN_World情景中，假设生物能源基线产量较大的地区供应中国过剩的生物能源需求，而在BioCHN_Optim情景中，供应区域和数量完全由以经济效率为基础的模型决定。如图7.161所示，到2060年，在这两种情景下，中国本身将只产生额外生物能源的约10%，剩余的生物能源需求从拉丁美洲、撒哈拉以南非洲和其他8个供应地区进口。

与单一区域进口情景不同的是，在2030年，大量过剩的生物能源将来自能源木材，而不是能源种植园（图7.161a）。这是因为在满足当地地区的基本生物能源需求后，可以获得分布在世界不同地区的森林残留物和回收木材。当允许从多个地区进口生物质时，这些低成本的原料将会受到青睐。然而，到2050年和2060年，专门的生物质种植园将再次成为主导地位，占额外生物能源供应的85%。原因是森林残留物的规模有限，因此当长期额外生物能源需求增加时，由于其更大的资源潜力和成本效益，能源种植而不是木材将再次盛行。此外，与BioCHN_World场景相比，成本优化情景（BioCHN_Optim）中额外的生物能源种植将更集中在拉丁美洲（图7.161b），主要是由于其更高的生物能源产量，更大的国家领土面积和较低的平均人口密度和粮食需求，这意味着在这

一地区建立生物质种植园有较低的机会成本。

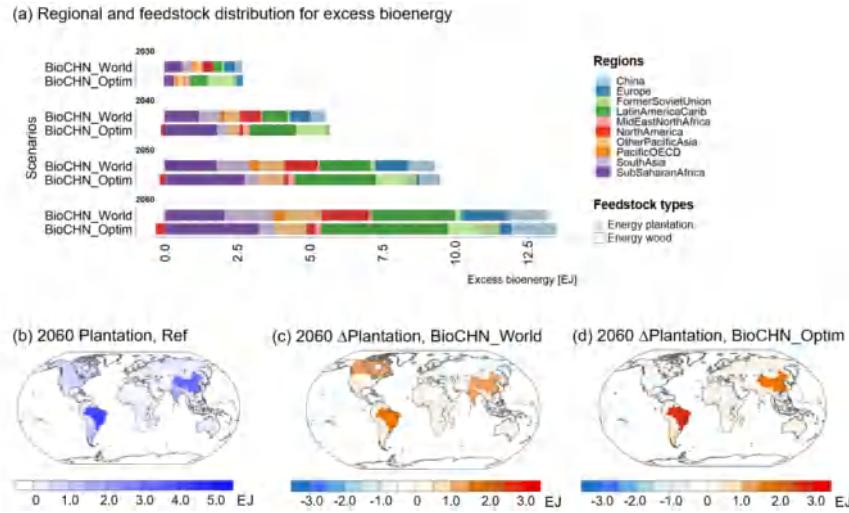


Figure 7.163: 2030-2060 年 BioCHN_World 和 BioCHN_Optim 情景。(a) 生物能源原料分布; (b)2060 年参考情景生物能种植园空间分布; (d) 2060 年 BioCHN_World 和 (c) BioCHN_Optim 情景额外生物能种植园

在森林保护方面，生物能源进口（BioCHN_Optim）的经济优化意味着，到 2060 年，无管理森林向受管理森林的转换面积几乎最小（2020 年以来共 86.8Mha；图7.162b），仅略高于 Ref (73.6 Mha) 或 BioCHN_LAM (76.1 Mha) 情景。此外，BioCHN_Optim 情景与整个时期内的大多数其他情况相比，导致的 GHG 排放将处于较低的水平 (-98.8 MtCO₂，图7.162)。最后，在 BioCHN_Optim 情景下，对水和肥料的需求将是适中的，尽管该情景对应于 2060 年最低的农田面积（农田 + 草地）。这是因为在经济优化的条件下，从低投入生产系统到高投入生产系统的转变更加广泛。

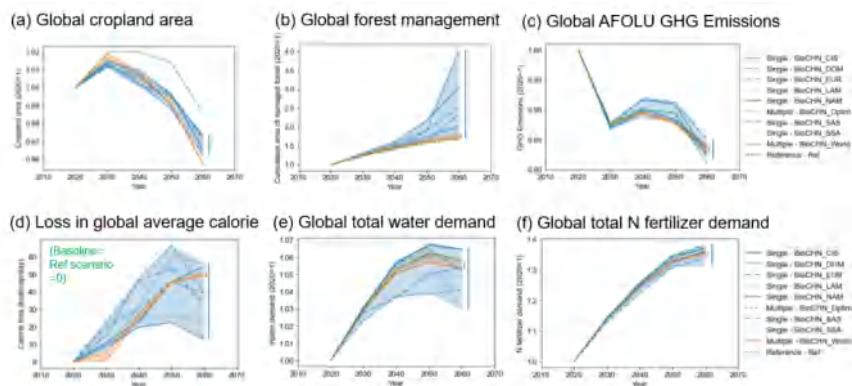


Figure 7.164: 不同生物量供应情景下全球土地相关指标的比较

讨论与政策建议

生物能源进口情景设置的合理性

本研究以中国为例，建立了一系列生物能源进口情景，以评估生物能源目标与全球土地利用可持续性的兼容性。一方面，它对于区域生物能源战略和不同生物能源贸易方案进行了深入的比较；另一方面，它根据其碳中和目标来了解中国的生物质需求。此外，它还从静态的、封闭的经济分析扩展到动态的、全球规模的评估，包括直接的和间接的影响。

虽然分析大规模生物质进口像是一个飞跃，因为在世界上，生物能源贸易只占很小的规模（= 1.25 EJ，相当于 2% 的全球生物能源生产或 2015 年全球原油贸易的 1%），但这一情景设置具有一定的合理性。全球脱碳情景表明，随着化石燃料替代需求和负排放量的迅速上升，在全球区域生物能源需求与供应潜力不匹配的情况下，全球生物能源贸易将显著提高。到 2050 年，用于能源使用的生物质贸易可占全球生物能源需求的 25%。中国、北美和欧洲预计到 2050 年将成为生物质进口国，而拉丁美洲、中东和非洲可能是生物质出口国。因此，评估区域生物能源进口战略的可能影响具有重要意义，特别是当大多数国家的政策议程都纳入了 1.5°C 目标时。对中国来说，政府正在推广生物经济，并在其最新发布的“十五”规划中增加了生物燃料的利用，但详细的生物能源发展路线图以及如何与国内土地限制相协调仍不清楚。这使得分析生物能源进口情景并与国内生产情景进行比较变得十分必要。

同样值得注意的是，在模拟情景中假设的额外木材生物质进口数量，要远高于历史木材生产和贸易。例如，按照 BioCHN_World 或 BioCHN_Optim 情景的设置，大约 90% 的额外生物质进口到中国，那么木材进口量将达到中国 2017 年木材进口总量的 10 倍。在特定情景下，额外生物质出口的纸浆木生产量可能超过供应地区的历史总纸浆木生产水平。因此，中国或全球能源木材进口规模是否能接近或超过历史木材贸易总量，值得进一步研究。然而应该指出的是，研究模拟的生物质贸易情景并不意味着能够预测未来，而是用于识别和比较生物能源扩张的边际效应，这使我们能更好地理解从不同地区采购生物质时所面临的挑战。另一方面，随着全球长途生物能源运输技术的进步，大规模的固体生物能源贸易并非不可能，历史上活跃的生物质出口商和新兴市场有机会增加生物能源供应。

区域生物能源目标下的可持续性担忧

这项研究揭示了随着生物能源生产增加而出现的关于地区土地使用可持续性的突出问题。结果表明，如果想实现中国的宏伟气候目标，到 2060 年可能会引发 13.2 EJ 的额外生物能源需求，这将对全球参考生物能源水平（约 70 EJ）带来 20% 的扩张，并可能对全球的粮食安全和其他可持续性造成不可忽视的影响。这是因为当生物质需求急剧增加时，所有世界地区都可能面临重大（尽管存在异质性）的土地资源限制，特别是在没有允许农业和林业贸易进行调整的国际贸易环境的情况下。如果过剩生物质是从特定区域进口的，受管理森林面积的扩大或土地利用领域的大规模间接温室气体排放可能会大大抵消生物能源利用的气候缓解效益。因此，研究结果有助于识别不同区域的负面影响以及优先的补充措施。

这项研究揭示了随着增加生物能源生产的突出的区域土地利用可持续性问题。研究结果表明，到 2060 年，实现中国雄心勃勃的气候目标可能会触发 13.2 EJ 的过剩生物能源需求，导致全球参考生物能源水平（70 EJ）增长 20%，并可能在全球范围内引发不可忽视的粮食安全和其他可持续性担忧。这是因为，当生物量需求大幅上升时，特别是如果没有开放的国际贸易环境，世界所有区域都可能面临重大的（尽管存在差异的）土地资源限制。如果多余的生物量从选定区域进口，管理森林的大幅扩大或土地利用部门大规模诱导的间接温室气体排放可能在很大程度上抵消生物能源利用的潜在气候缓解效益。因此，这些结果有助于确定在不同地区的不利影响和优先考虑的补充措施。

此外，这一综合分析框架和关于全球土地利用影响的研究结果，对除中国以外的世界其他地区的生物能源发展战略也具有一定的参考价值。通过隐含的生物质贸易表示和可比较的土地利用影响

评估，对中国生物能源进口计划的源地的模拟影响可以从另一个角度看作是相应出口地内部生物能源生产的同等规模增长的影响。因此，分析有助于了解生物能源用地影响的可能方向和规模，适用于在 1.5°C 目标背景下需求量类似于中国的地区（按照现有的 IAM 预测包括撒哈拉以南非洲，北美和东南亚）。应该注意的是，在“极低碳预算”情景下，预计全球生物能源需求可能在 2050 年达到 100-280 EJ，在 2100 年达到 230-440 EJ；这意味着生物能源水平的增加将远高于中国气候目标（15EJ）的额外需求。因此，当更多地区按照 1.5°C 目标增加生物能源需求时，在设计生物能源发展战略时，应该仔细评估难以预料的可持续性影响。

全球生物能源贸易面临的机遇与挑战

生物能源贸易如果被较好地实施，可以缓解全球土地利用的可持续性影响。由于全球土地利用部门间存在高度联系，增加生物质进口可能引发其他地区农业或林业贸易和二次土地利用调整。我们的研究结果表明，灵活的生物质进口组合可以有利于保护森林和减少温室气体排放，并在 2040 年之前缓解生物能源扩张和食品安全之间的矛盾关系，这得益于对林业废弃物的充分利用。这意味着生物能源贸易有机会提高全球土地使用效率和可持续性，就像先前的研究已经证明的更开放的食品贸易是一项关键的气候变化适应措施。

因此，不应完全排除为 1.5°C 目标而增加生物能源进口的选择。虽然有人认为，本地食品系统效率的快速提高（例如，饮食变化）或提高替代原料利用率（例如，农业剩余物，边缘地的能源作物）可以改善国内生物能源供应，但这些解决方案可能面临特定的挑战。在这种情况下，可持续实施生物质贸易可以作为一项补充计划，以加强生物能源在替代化石燃料方面日益增长的作用，并在不损害全球可持续性的情况下提供所需的负排放。在过去的 20 年里，生物能源贸易稳步增长，特别是在欧洲。此外，东亚其他国家，特别是日本和韩国，也在积极促进固体生物质的进口和利用，预计未来几年木材进口将显著增加。因此，对于中国等面临土地限制的国家，将当地生物能源生产与进口结合起来，以促进更可持续的全球土地利用的方案值得进一步关注。

尽管如此，只有通过充分和合理的土地利用法规来解决潜在的泄漏影响，才能确保生物能源贸易免于威胁全球土地利用的可持续性。我们的研究结果还显示，如果没有进一步的补充措施，在生物能源贸易（BioCHN_Optim）最灵活的情况下，2050 年后，生物能源扩张与粮食生产的竞争可能会加剧。此外，敏感性分析表明，更严格的土地利用法规可以使灵活的生物质进口在减少全球土地利用溢出效应方面更有利，而放松环境法规将意味着开放的生物质贸易将在全球范围内产生更大的可持续性溢出效应。因此，在生物质贸易计划下可能存在的土地利用变化的规模值得关注。如今，各国和地区已经在实施和改进土地使用法规，以应对潜在的风险。例如，欧盟已经推出政策，解决随着生物质生产或生物能源贸易增加可能出现的土地利用变化，并一直在推进生物能源的可持续认证。未来的区域生物能源战略应与有效的土地使用法规和支持计划一起设计，以协调与当地和全球可持续性土地管理的冲突。

局限性和未来的研究方向

我们目前的分析确定了不同生物能源进口方案的全球土地利用影响。然而，本研究在情景设置中使用生物能源贸易的表示方法时，并未考虑生物能源进口的运输成本或贸易成本，这可能是影响生物能源贸易实际实施的关键障碍。因此，未来的研究可以详细阐述成本、替代弹性以及生物质贸易的制度和其他障碍，以更好地探索生物能源进口组合的可行性和优化。

此外，在本研究中，未来生物能源预测是基于现有 IAM 实践得出的，并被视为固定的外生输入。因此，它未能考虑温室气体排放对生物能源需求潜在的反向反馈效应。由于生物能源种植和植树造林/森林再造之间的竞争，土地利用变化引起的温室气体或“碳汇机会成本”可能会影响全球或区域的碳预算，并因此影响相同的气候目标下生物能源需求。在有限的使用到 IAM 的全球研究

中，这些关系被通过迭代求解完全集成的评估系统得到。未来有关生物能源影响的区域研究可以通过内生地描述不同的以土地为基础的缓解措施的竞争，并应用具有更精细的区域分辨率的 IAMs 来考虑能源和土地之间的关系。

我们的研究主要关注土地利用可持续性的潜在意外风险，以及如何减少区域生物能源扩张引起的土地利用矛盾。然而，发展现代生物能源也可以带来经济和生态效益。2019 年，生物能源相关行业在全球创造了 358 万个就业岗位，在创造就业上成为第二大可再生能源部门。据估计，BECCS 作为一种缓解方案可以降低实现 2°C 或 1.5°C 目标所需的碳价格，并避免 1.5°C 情景下 70% 的消费损失。在电力领域用生物质替代化石燃料也可以减少空气污染物的排放，因为其燃烧效率更高。此外，生物能源的发展有机会增加森林覆盖，防止沙漠化和土地退化，特别是当生物质种植在边缘土地上时。因此，有关生物能源发展的可行性和系统性影响的进一步研究也应考虑在分析中包括相关的经济和环境效益，并与潜在的土地利用矛盾进行比较，以识别出多目标优化的解决方案。

最后，在模拟生物能源引起的与土地利用相关的影响时，更精确地描述当地的生物多样性保护和土地利用法规，将有助于为区域提供更切实可行的见解。一方面，我们研究中对生物多样性保护的控制可能被过度利用，禁止所有与生物多样性热点重叠的地方的主要土地利用变化。另一方面，我们没有考虑森林管理对生态系统功能的影响，或单一的生物质种植体系的脆弱性，这意味着可能存在对生物多样性影响的忽略。此外，在计算土地使用部门的温室气体流量时，我们仅考虑了来自活体生物的碳吸收影响，没有考虑对土壤有机碳 (SOC) 存储的影响，尽管这些影响被证实是可观的（但具有较强的不确定性）。然而，本研究的结果可以为中国和世界在气候变化减缓和能源系统深度脱碳的背景下，提供环境友好、协调可持续性的生物能源战略带来新的见解。

7.10.11 LEEEP 研究 | 气候变化对中国发电基础设施的潜在影响

- **原文标题:** Prospective climate change impacts on China's fossil and renewable power-generation infrastructure: Regional and plant-level analyses^[102]
- **期刊:** Resources, Conservation and Recycling
- **发表年份:** 2023
- **作者:** Chen Huang, Yuyao Zhu, Ming Ren, Pei Zhang, Yingchao Chen, **Hancheng Dai**, Xianchun Tan*
- **文章链接:** [点击 LEEEP 微信公众号链接阅读推送原文](#)

研究概要

历史上，电力行业排放大量了温室气体，但现实证据表明其供应又深受气候负面影响，这使得其既是气候变化主要贡献者，又是未来气候风险典型受害者。中国，目前拥有全球规模最大的电力基础设施的国家，其 2060 碳中和目标正推动其可再生能源发展与退煤进程，在不同空间尺度（国家、区域和电厂级），评估未来中国电力行业受到的潜在气候变化影响将具有重要学术价值和现实意义。

因此，在北京大学 LEEEP 团队与中国科学院科技战略咨询研究院碳中和战略研究中心的支持下，LEEEP 团队黄晨博士后基于自主开发的气候影响评估模型，结合自主构建的高覆盖度、高空间分辨率的电力基础设施数据库，开展如下研究：

1. 科学评估未来气候变化对中国电力基础设施产出影响；

2. 识别区域与厂级所受气候影响的空间格局与分布特征;
3. 探究中国电力行业的气候适应与减缓的潜在协同效益。

本研究将为构建以保障安全为前提的现代能源体系、实现富有气候韧性的碳中和提供科学决策支撑。

研究背景

最新 IPCC 第六次评估报告指出，当前全球二氧化碳历史累积排放量已经逼近 1.5°C 和 2°C 温控目标排放预算，这预示着未来数十年全球气候变化可能不会停止。作为维持人类社会经济系统运行的核心部门，发电基础设施是历史上全球变暖的核心贡献者，也将会是未来气候风险的重要受害者。然而，以上事实也使得电力行业将同时在减缓和适应两类行动中扮演关键角色。因此，定量评估气候变化对电力部门造成的潜在不利或有利影响将提供有价值的气候风险信息，也有助于气候适应决策，以增强城市能源基础设施的韧性。

尽管现有研究指出了气候变化对电力部门的可能影响，但考虑不同电源品种、针对区域电力基础设施的综合量化评估较为缺失。其次，气候影响存在显著区域差异，这凸显了构建高质量电力基础设施空间数据库的重要性。另外，尽管现在普遍强调要加强减缓与适应的协同，但针对电力行业二者协同的量化研究近乎为零。因此，为弥补以上研究不足，作者选取中国作为研究案例，量化未来气候变化对中国主流电源品种的气候影响，分析其空间特征，量化电力行业减缓与适应协同的潜在效益。

研究方法

首先，研究梳理了气候变化对发电基础设施的影响方式，基于工程技术文献经验公式构建针对五类电源品种（燃煤、燃气、生物垃圾、风电、光伏）的影响传导模型。

The impact of climate change on different power-generation technologies.					
	Air temperature	Water temperature	Solar radiation	Precipitation/runoff	Wind speed
Coal-fired	✓	✓		✓	
Gas-fired	✓	✓		✓	
Biomass/waste	✓	✓			
Hydro	✓				
Nuclear	✓	✓		✓	
Wind					✓
Photovoltaic	✓		✓		

Figure 7.165: 气候参数对电源技术的影响方式

其次，基于多个开源与商业数据库构建高容量占比、高空间分辨率的中国发电厂级设施数据库。并获取 CMIP6 六个主流气候模式预估数据（BCC-CSM2-M, FGOALS-G3, CAS-CSM1-0, CAMS-CSM1-0, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0）。

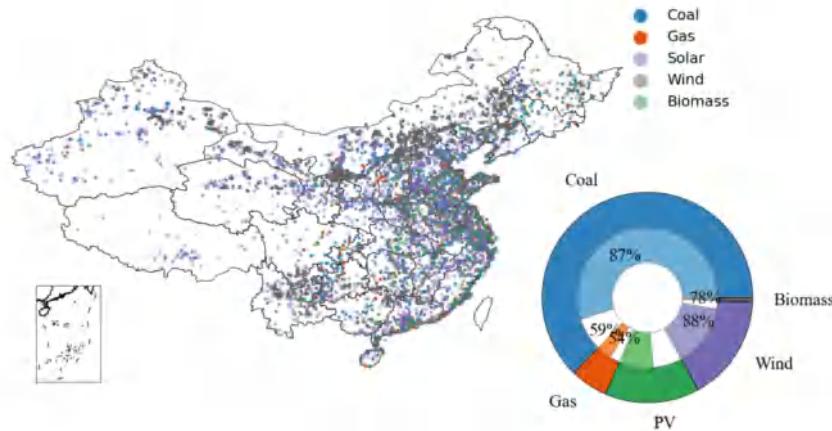


Figure 7.166: 本研究所用电厂数据空间信息

最后，基于 Python 及相关依赖环境（Xarray, Pyomo, GeoPands 等）编写高分辨率气候影响并行评估模型程序，使本研究可以模拟出不同气候模式和不同温升情景下，气候变化导致的发电设施产出变动，及其额外经济成本或收益。

研究结果

国家层面影响

如图7.167 所示，中国煤电技术面临着较为负面且随时间增加的气候影响。在两个研究时段下，其 75% 概率的损失区间：近期（2020-2035 年）累计为 214 至 342TWh，远期（2045-2060）累计为 268 至 397TWh。从中值来看，光伏与风力发电产出将会在短期逐步受益于气候变化，但面向长期，光伏收益呈增加趋势（1TWh 增至 27TWh），风电则呈下降趋势（12TWh 降至负 11TWh），与煤电相比，风光发电损益的评估结果不确定性更大。由于燃气和生物质垃圾发电容量占比较低，二者预估结果的不确定性较低，近期累计产出损失为 3 至 5TWh，远期则为 4 至 6TWh。

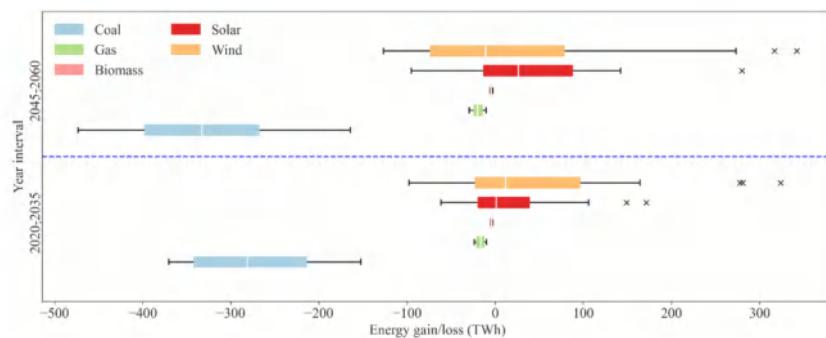


Figure 7.167: 不同发电技术所受气候影响（国家层面）

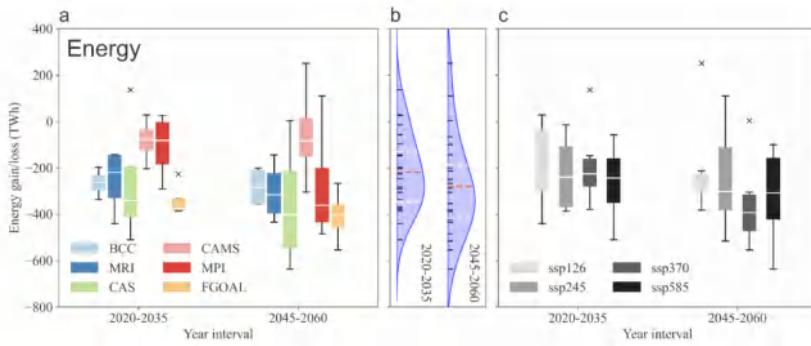


Figure 7.168: 不同气候模式和温升情景下的电力产出影响分布

研究还分析了不同气候模式与温升情景下的气候影响分布特征（图7.168和图7.169）。总的来看，气候变化对中国发电基础设施的影响是负面的并且随时间增大。大部分气候模式下近期和远期总损失都将超过 200TWh。在排除极端值情况下，有一半以上的概率，近期（2020-2035）的累计总产出损失在 132 至 346TWh 之间，货币化的经济损失则为 100 至 220 亿美元（2018 年价格）；远期的产出损失则在 187 至 419TWh 之间（货币化损失：170 至 260 亿美元）（图7.168b 和图7.169b）。鉴于 2020 年中国电力消费总量约为 7500TWh，那么对于近期和远期两个时段的累积气候损失约占中国目前总发电量的 1.8% 至 5.6%。

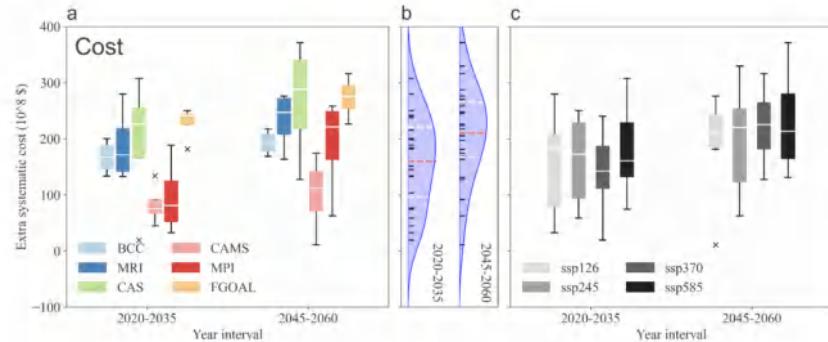


Figure 7.169: 不同气候模式和温升情景下的经济成本影响分布

省级层面影响

未来气候影响呈现显著的空间异质性（图7.170）。其中，山东、河南、安徽、江苏和广东等将是受气候影响最大的省份（每一时期累计损失超过 20TWh）。尤其是山东和江苏二省，它们未来在两个时期内、所有情景下的煤电累计气候损失都将超过 40TWh。

对于大部分省份，其光伏和风力发电下都将会获得气候增益。在低温升情景（SSP126），所有省份的省级光伏发电产出将会受益于气候变化，这是由于太阳辐射量这一气候参数的提升。其中，内蒙古将会获得超过 15TWh 的气候增益。

但是，在高温升情景（SSP585），许多省份的气候收益将会降低，例如山东、河南、安徽、江苏、广东等；并且一些省份的整体产出变动将由收益转为损失（西藏、四川、内蒙古、海南、贵州和甘肃）。

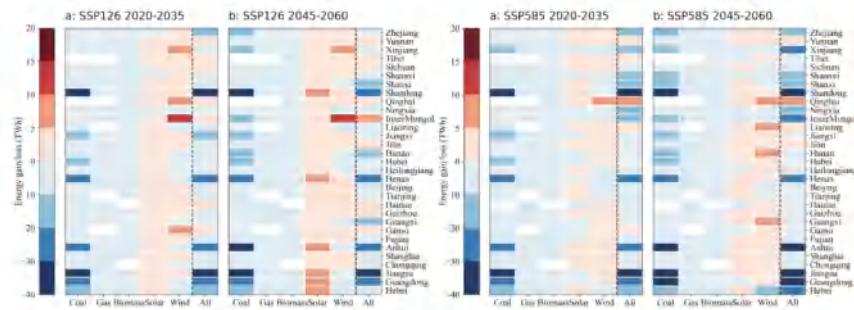


Figure 7.170: 不同电源技术在不同省份所受气候影响（区域层面）

厂级特征

厂级视角的分析表明，对于煤电、光伏和风电，三者都存在一些关键少数电厂，即以较低容量占比贡献较高气候损益（图7.171-7.173）。例如，在 SSP585 情景下的近期（2020-2035 年），累计容量占比分别为 42%（燃煤），27%（光伏），25%（风电）的少数电厂贡献了超过 70% 的总气候损失。

比较 SSP126 与 SSP585 情景，后者将显著地提升燃煤电厂气候损失并大幅减少潜在的光伏发电收益。这一现象也证明了发电基础设施如何既是全球变暖的贡献者，又是全球温升的主要受害者。其他温升情景分析详见文章附录。

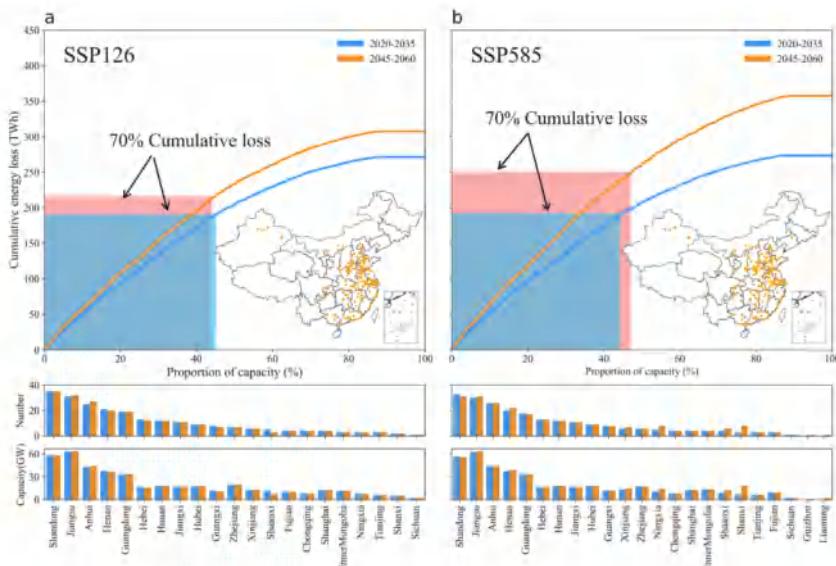


Figure 7.171: 累计容量与气候引致损失的关系（煤电）

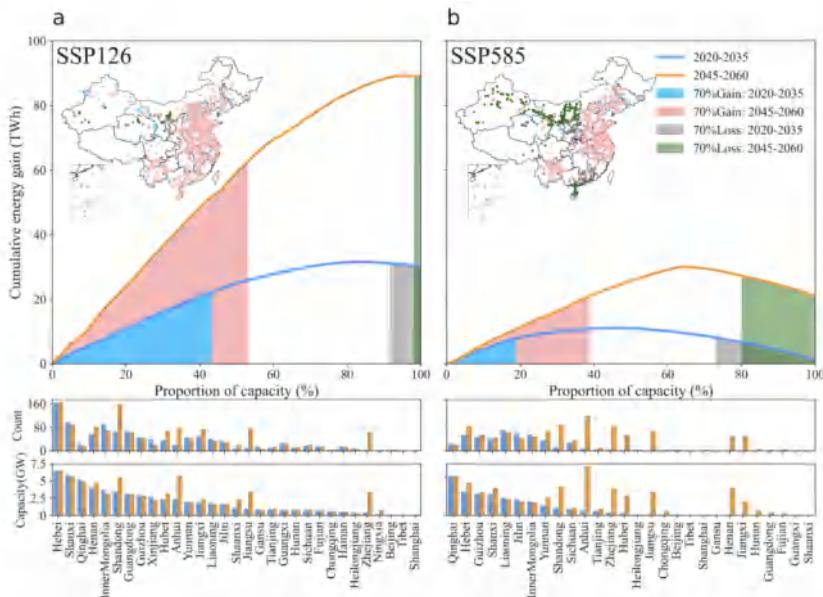


Figure 7.172: 累计容量与气候引致损益的关系（光伏）

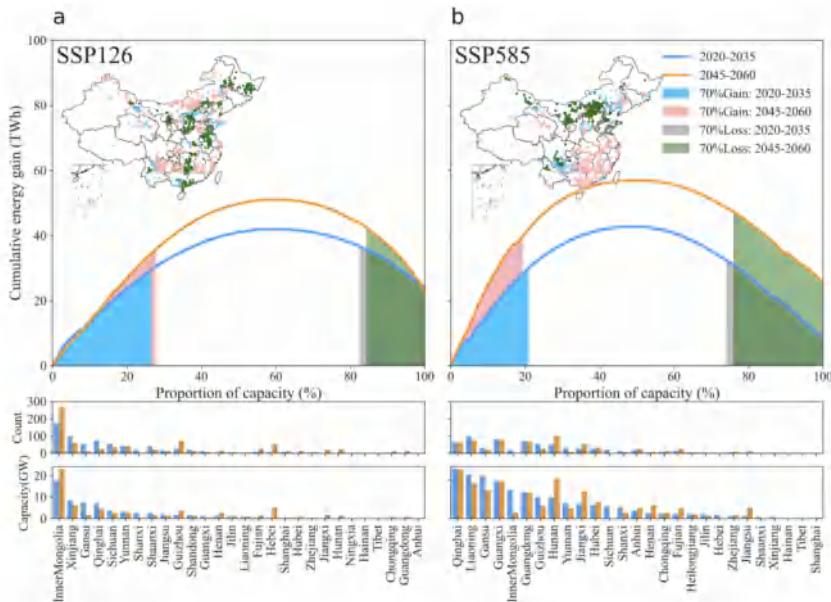


Figure 7.173: 累计容量与气候引致损益的关系（风电）

燃煤发电的碳排放与气候损失耦合分析

研究还发现，中国煤电行业的电厂碳排放与气候引致损失之间具有显著的正相关关系（图7.174）。即那些历史排放量更高的燃煤电厂，其受到的潜在气候变化损失可能更大。本研究以潜在效率损失为依据，将所有“关键少数”燃煤电厂划分为三个退役层级。

例如在 SSP126 情景中，层级 3 的煤电厂退役将会每年减少 10 亿吨二氧化碳排放并避免

160TWh 的单位时期累计气候损失（每年 10TWh）。此外，作者还对不同层级电厂的平均寿命开展了统计分析。不同情景下的厂级退役优先顺序可能是类似的，这一研究结果将为电力行业实现深度减排的同时提升自身气候韧性提供学术依据。

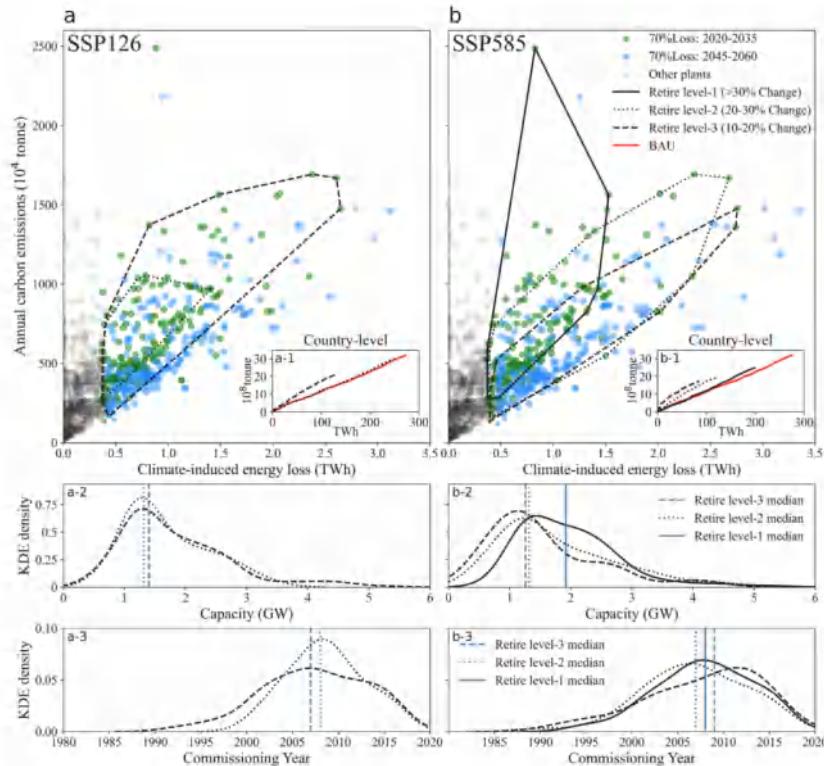


Figure 7.174: 中国燃煤电厂碳排放与气候引致损失的耦合关系

研究结论

本研究量化了未来气候变化对中国发电基础设施的潜在影响，主要发现如下：

1. 未来气候变化将对中国电力行业造成广泛且普遍的影响，整体来看偏向负面；
2. 电力行业所受气候变化影响具有复杂的空间、时间、情景异质性，存在核心省份；
3. 高温升情景比低温升情景带来的负面影响更大，也会弱化可再生能源所受气候变化增益；
4. 气候变化对可再生能源发展存在潜在助益，但煤电为当下主要矛盾；
5. 存在“关键少数”电厂，以较低容量占比贡献较高气候损益；
6. 碳排放与气候损失存在强正向关系，科学有序的煤电退役将产生减缓和适应协同效益。

7.10.12 LEEEP 研究 I 考虑环境和人体健康影响的中国电动汽车区域差异化推广

- **原文标题:** Regionally differentiated promotion of electric vehicles in China considering environmental and human health impacts [103]
- **期刊:** Environmental Research Letters
- **发表年份:** 2023

- **作者:** Yan Ru Fang, Xin Sun, Silu Zhang, Gang Liu, Xiaorui Liu, Peng Zhang, Yifei Kang, **Hancheng Dai***
- [文章链接](#)
- [点击 LEEEП 微信公众号链接阅读推送原文](#)

研究概要

运输部门在深度脱碳中发挥着重要作用，因此被认为是实现全球可持续发展的关键瓶颈。本研究选取世界第一大碳排放国-中国，以 31 省份为研究区域，分析道路交通低碳发展的电气化路径，研究问题如下：

1. 中国道路交通电气化推广碳排放及污染物排放的省间异质性如何？
2. 道路交通电气化推广带来的空气质量改善效应的省间差异如何？
3. 道路交通电气化发展的人群健康效益及其省级推广梯度如何？

通过应用北京大学 LEEEП 团队自主开发的 IMED 人群健康模型，定量分析中国省级道路交通部门的电气化带来的碳减排和空气污染控效果。探究不同省级区域电动汽车渗透对空气质量改善的影响，进一步分析人群健康，为中国道路交通电气化推广的省级推广梯度制定提供参考。

研究背景

运输部门在深度脱碳和减轻污染排放方面发挥了重要作用，因此被认为是实现全球可持续性发展的关键。2019 年，交通运输部门排放占全球二氧化碳排放总量的 24.5%。与此同时，中国交通排放占全球交通运输二氧化碳排放总量的 10%，其中道路运输占比较大，客运作为道路运输的重要模式，其碳排放量不容忽视。

电动汽车 (EV) 目前是全球范围内讨论最广泛、最受欢迎的降低二氧化碳排放和节约运营成本的解决方案，此外，电动汽车的普及也为减少空气污染物的排放提供了协同效益。因此，中国的中央和省级政府一直致力于制定各种补贴和基础设施安排，以鼓励电动汽车的采用和实施。中国作为全球最大的汽车市场和生产国，电动汽车占其汽车总量的比例不断上升。越来越多的学者试图评估中国乘用车转型对气候和/或健康的影响。像中国这样的大国，电力结构、社会经济发展水平、车队状况和转型途径的不同将对电气化发展带来的相关的气候和健康效益有较大的省间异质性。

由于中国 31 个省级地区在经济发展、人口动态、电动汽车普及现状、汽车保有量和电力结构等方面的差异，电动汽车和电动汽车的转型路径可能在省级层面存在差异。然而，目前以火电为主的不同省份的电力结构中，电动汽车的普及对减排、空气质量改善、人类健康和健康效益的综合影响缺乏明确探讨。因此，有必要在省级层面从减排、空气质量改善、人群健康效益角度制定电动汽车推广异质性策略。

研究方法

研究将中国 2011 年至 2018 年的历史数据整合到一个综合模型中进行回顾性分析。我们设计了一套反事实情景，以确定电动汽车和电动汽车的发展对中国 31 个省份的二氧化碳排放、空气污染物、空气质量、人类健康和健康效益的影响。模型结果有助于实现最大的减排、空气质量改善和健康效益，为电动汽车推广的梯度发展顺序排序，为国家和地区交通运输部门的气候变化减缓政策提供参考。我们使用由北京大学 LEEEП 团队开发的 IMED | HEL 模型，利用该模型估算了不同省份电气化发展的健康效益异质性（图7.175）。

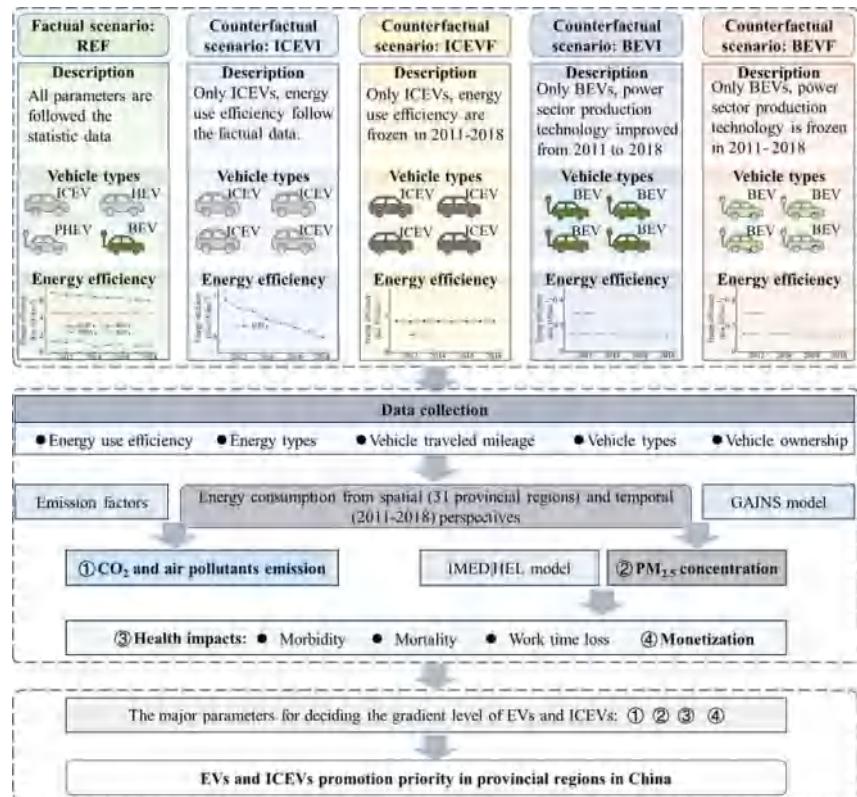


Figure 7.175: 情景设计及研究结构

研究结果

电气化推动了二氧化碳排放量的大幅减少

从时间维度分析发现，2011 - 2018 年 REF 和其他四种反事实情景下的二氧化碳排放量均呈现增加趋势 (图7.176a)。二氧化碳排放量已从 2011 年的 6400 万吨增加到 2018 年的 2.105 亿吨，在 REF 情景下的平均年增长率为 18.5%。2018 年中国二氧化碳排放量递减顺序为 ICEVF > BEVF > REF > ICEVI > BEVI。2011 年至 2018 年，ICEVI 情景下的二氧化碳排放趋势与 REF 情景相似，表明车辆结构的小规模变化对这类排放的影响很小。原因之一是从电动汽车转向电动汽车的幅度很小，后者仅从 2011 年的 82.5% 下降到 2018 年的 70.4%。因此，以热电为燃料的电动车的二氧化碳排放量与高能效的 ICEV 相似。

2011 年至 2013 年，BEVI 情景下的二氧化碳排放量高于 REF 情景下的排放量，主要原因是电力部门的排放量增加。然而，2013 年之后，随着电力行业的清洁程度略高于 2011 年，BEVI 的二氧化碳总排放量低于 REF，显示出 BEV 的高减排潜力。在所有情况下，二氧化碳排放量都随着时间的推移而增加，这主要是因为车辆库存的增加。在 ICEVF 和 BEVF 情景下，2011 年至 2018 年，二氧化碳排放量分别增加了 1.784 亿吨和 1.629 亿吨 (图7.176b)。2018 年，ICEVF 的二氧化碳排放量最高，这表明即使是 BEVF 的电力部门也以热为主，而其二氧化碳排放量高于 REF，这表明电动汽车在不明确的电力系统中可能不会产生预期的减排效果；尽管如此，与内燃机汽车的冻结能效相比，纯电动汽车仍具有很高的减排潜力。

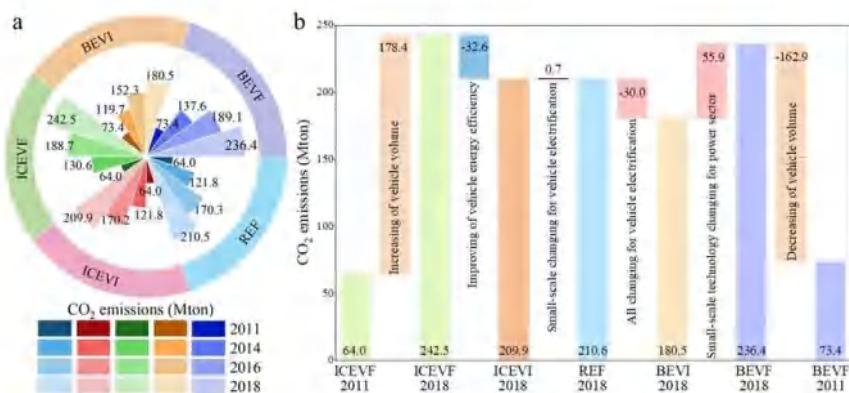


Figure 7.176: a, 2011-2018 年不同情景下的排放分布；b, 五种情景的二氧化碳排放差异

空气污染物减排

2011 - 2018 年 REF 中 SO₂ 和 VOCs 排放量呈现先增加后减少的趋势 (图7.177a)。二氧化硫排放量从 2011 年的 59.5 千吨增加到 2014 年的 85.1 千吨，但在 2018 年下降到 49.6 千吨。然而，从 2011 年到 2018 年，REF 的 PM_{2.5} 持续增加，主要是因为在此期间车辆保有量大幅增加。即使引入高标准车辆也无法抵消汽车拥有率上升导致的能源需求增加所产生的排放。REF 的氮氧化物排放量随着时间的推移而下降，这可能是受到 2011 年至 2018 年高排放标准车辆使用量增加的影响。从 2011 年到 2018 年，ICEVI 和 REF 情景对两种空气污染物的排放趋势相似，这表明能源效率的提高和技术结构的小规模变化对空气污染物的影响几乎相同。5 种情景下 PM_{2.5}、NO_x 和 VOCs 排放量最高的是 ICEVF。低能效的电动汽车排放大气污染物的潜力很大。然而，在纯电动汽车情景下，二氧化硫排放量最高，主要是由于不清洁电源的排放增加，这些电源共同供应了许多纯电动汽车。

从空间上看，在 5 种情景下，2018 年 31 个省区中，PM_{2.5}、SO₂、NO_x 和 VOCs 的大气污染物排放水平最高的是广东 (图7.177b)。与 NO_x 和 VOCs 相比，PM_{2.5} 和 SO₂ 在各省区的排放水平都相对较低。在 31 个省区中，ICEVI 情景与 REF 情景的大气污染物排放量基本相似，大多数地区两者的差异 < 0.01 千吨。相比之下，中国东部地区 ICEVI 与 REF 的 VOCs 排放差异大于 2 Kton。

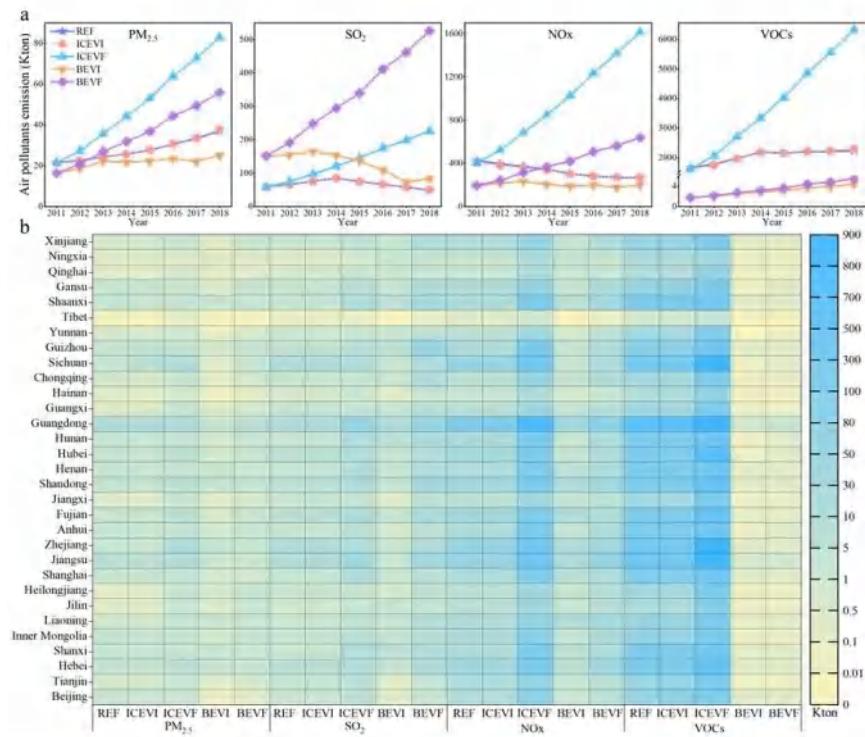


Figure 7.177: a, 2011 - 2018 年 PM_{2.5}、SO₂、NO_x 和 VOCs 排放的时间分布; b, 2018 年中国 31 个省区大气污染物排放空间分布

空气质量与区域健康效益

与 REF 相比, BEVI 情景下的 pv 电气化持续降低了中国所有省区的 PM_{2.5} 浓度, 但黑龙江除外, 其 BEVI 情景下的 PM_{2.5} 浓度比 REF 情景高 $0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (图7.178a)。黑龙江的特殊结果可能是由于 PM_{2.5} 的高一次排放量和对火力发电的相对高度依赖。与 REF 相比, BEVI 情景下 PM_{2.5} 浓度下降, 西藏下降幅度为 $0.001 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 北京下降幅度为 $1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。中国中部和南部大部分省区在 BEVI 情景下具有较高的可避免发病率和死亡率风险。根据空气质量分析, 汽车电气化很容易使环境 PM_{2.5} 浓度得到更大的降低。由于在 BEVI 情景下的电力开发略微清洁, 相对于 BEVF 情景, 空气质量有了显著改善(图7.178b)。这一结果凸显了电力部门在电动汽车减少空气污染物方面发挥的重要作用。与 BEVF 相比, 中国中西部部分地区在 BEVI 情景下 PM_{2.5} 浓度下降幅度更大 ($> 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$)。这一结果表明, 在道路上使用纯电动汽车时, 热电比例略低的电厂对空气质量的影响较大。我们还发现, 从电动汽车到高效节能的 ICEV 的小规模转移中, PM_{2.5} 浓度没有显著差异。相比 REF, 在 BEVI 情景下, 中国超过 15 个省级地区的空气质量得到了显著改善(图7.178c)。综上所述, 这些结果表明, 使用略微清洁的电力的车队电气化将改善空气质量并减少二氧化碳排放(图7.178d)。

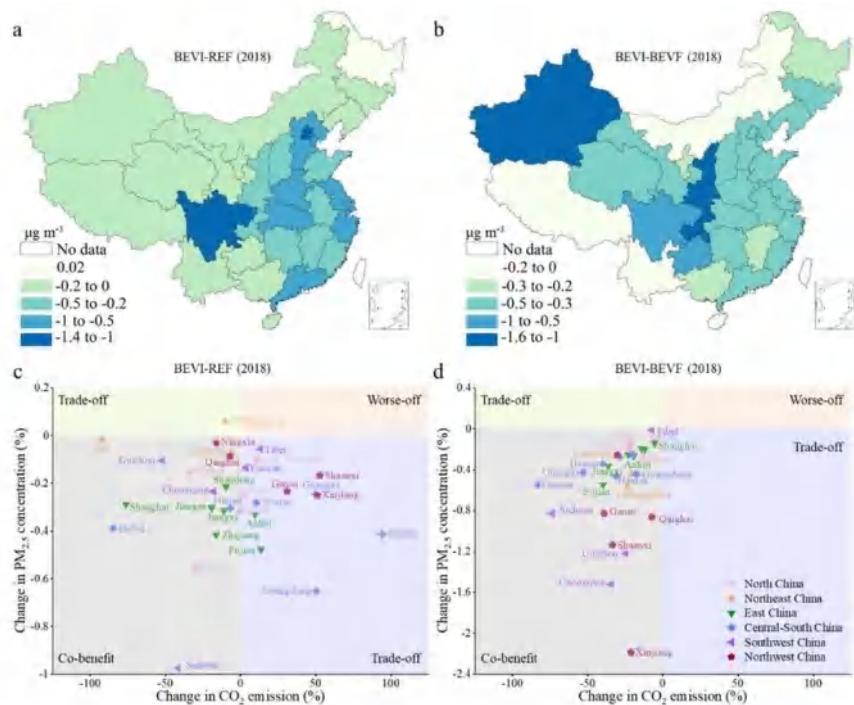


Figure 7.178: 2018 年不同情景下 PM_{2.5} 浓度变化及其与二氧化碳减排的协同效应。a, BEVI 与 REF 的变化。b, BEVI 与 BEVF 的变化。c, 相对于 REF 情景, 中国 31 个省区在 BEVI 情景下 PM_{2.5} 浓度和 CO₂ 排放量的变化。d, 31 个省区在 BEVI 情景下 PM_{2.5} 浓度和 CO₂ 排放量相对于 BEVF 情景的变化

与 REF 情景相比, 在 BEVI 情景下, 2018 年中国避免了 638599 例发病率和 3167 例过早死亡 (图7.179a)。最显著的影响出现在中国东部, 特别是在广东, 避免了 72216 例发病和 657 例过早死亡, 在四川, 避免了 98517 例发病和 632 例过早死亡。与 BEVF 情景相比, BEVI 情景避免了 554144 例发病, 避免了 3916 例死亡, 原因是电力部门比 BEVF 情景更清洁, 在 BEVF 情景中, 电力生产结构在 2018 年前一直保持在 2011 年的水平。相对于 BEVF, 四川省在 BEVI 情景中避免的发病率和死亡率最高, 分别为 65381 例和 421 例 (图7.179b)。大多数中部和南部省份在 BEVI 情景下的避免发病率和死亡率高于 REF 情景。我们进一步分析了与 REF 和 BEVF 相比, BEVI 改善人类健康的经济效益。由于车队完全电气化和略微清洁的能源, 中国大部分地区积累了健康福利 (图7.179c)。与 REF 相比, BEVI 方案下的总健康效益为 4.269 亿美元。然而, 在中国, 稍微清洁一点的电力将带来更高的整体健康效益 (图7.179d)。中国西南地区相对于 BEVF 而言, BEVI 的健康效益最高, 为 1.732 亿美元。结果表明, 电力部门的清洁生产是实现车队电气化低排放和健康效益的关键。

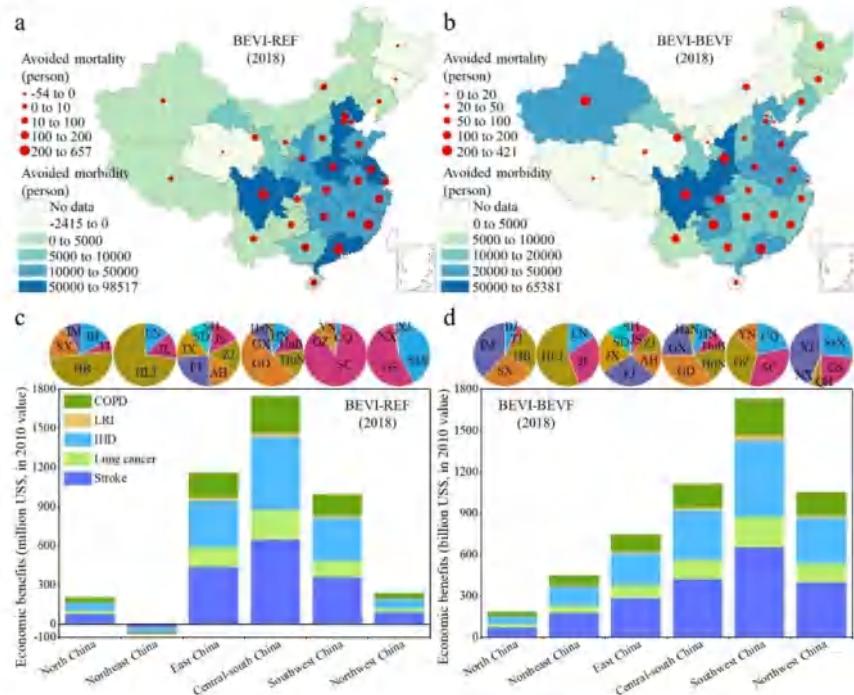


Figure 7.179: a, 2018 年相对于 REF 情景, BEVI 情景避免了发病率和死亡率。b, 2018 年相对于 BEVF 情景, BEVI 情景避免了发病率和死亡率。c, 2018 年中国 31 个省区 BEVI 方案相对 REF 方案对中风、肺癌、缺血性心脏病 (IHD)、下呼吸道感染 (LRI) 和慢性阻塞性肺疾病 (COPD) 的健康益处; 顶部的饼状图显示了中国每个行政区域的这些健康福利的区域份额。d, BEVI 方案中的健康福利

考虑区域异质性的纯电动汽车推广优先级

本研究采用回顾性分析的方法, 分析了二氧化碳、空气污染物、PM_{2.5} 浓度的时空分布、避免过早死亡以及纯电动汽车普及带来的统计生命价值。在综合考虑这些参数的基础上, 我们在 31 个省区中划分了 3 个推广纯电动汽车的梯度得分 (1、2、3), 其中 9 个省区在推广纯电动汽车方面排名第一 (即梯度得分 = 1)(图7.180)。

Region	CO ₂	PM _{2.5}	Morbidity	Mortality	Health benefits	Comprehensive	Sorting
Beijing	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★	★★	★★★★★	2
Tianjin	★★	★★★★★	★★★	★★	★★	★★★★★	2
Hebei	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	1
Shanxi	★★	★★★★★	★★★★	★★★★	★★★★	★★★★	2
Inner Mongolia	★★★★	★★★	★★★	★★★	★★★	★★★	3
Liaoning	★	★★	★★	★★	★★	★★	3
Jilin	★★	★	★	★	★	★	3
Heilongjiang	★★	★	★	★	★	★	3
Shanghai	★★	★★★★★	★★★★★	★★★	★★★	★★★★★	2
Jiangsu	★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	2
Zhejiang	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	1
Anhui	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	1
Fujian	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	1
Jiangxi	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	2
Shandong	★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	2
Henan	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	1
Hubei	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	1
Hunan	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	1
Guangdong	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	1
Guangxi	★★★★★	★★★	★★★	★★★	★★★	★★★★★	2
Hainan	★★★★★	★★★	★★★	★★★	★★★	★★★★★	3
Chongqing	★★★★★	★★★★★	★★★	★★★	★★★	★★★★★	3
Sichuan	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	1
Guizhou	★★★★★	★★★	★★★	★★★	★★★	★★★★★	3
Yunnan	★★★★★	★★★	★★★	★★★	★★★	★★★★★	2
Tibet	★★★★★	★	★	★	★	★★★★★	3
Shaanxi	★★	★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	2
Gansu	★★★★★	★★★	★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	2
Qinghai	★★	★	★	★	★	★	3
Ningxia	★★	★	★	★	★	★	3
Xinjiang	★	★★	★★	★★	★★	★★	3

Figure 7.180: 中国 31 个省级地区的电动汽车推广梯度

研究结论

为了对中国 31 个省区的电动汽车推广顺序进行排名，我们选择了减排、空气质量、人体健康和健康效益进行评估。本研究量化了二氧化碳和空气污染物排放、空气质量、人类健康和健康效益货币化价值的时空异质性。结果表明，在广东等发达地区，采用清洁能源的汽车电气化可以显著减少二氧化碳排放，改善整体空气质量。然而，在内蒙古等高热电和欠发达省份，在减缓气候变化、改善空气质量和健康效益方面，推进高能效电动汽车的发展比采用电动汽车更好。我们提出的发展电动汽车和电动汽车的梯度水平可以在减少二氧化碳排放和改善空气质量方面带来显著的协同效益。我们可以利用电动汽车推广梯度发展电动汽车而避免发病率并获得许多健康益处。我们的研究为在考虑中国区域异质性的情况下制定交通转型和最大化旨在提高气候和健康效益的政策提供了有价值的参考。

7.10.13 LEEEP 研究 I 差异化的碳中和政策对中国高碳产业跨区域转移的影响

- 原文标题: Uncovering the key mechanisms of differentiated carbon neutrality policy on cross-regional transfer of high-carbon industries in China [104]
- 期刊: Journal of Cleaner Production
- 发表年份: 2023
- 作者: Yu Qi, Xiaotian Ma, Yang Xie*, Wen Wang, Junfeng Wang*
- 文章链接
- 点击 LEEEP 微信公众号链接阅读推送原文

研究简介

2020 年 9 月 22 日，国家主席习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上，首次提出中国二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和。2021 年 9 月，《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》正式发布，标志着碳达峰碳中和战略上升为国家战略。决策者显然注意到中国区域差异显著的特点，提出了碳减排“一省一策”的政策思路，各省根据自身的经济发展阶段、资源禀赋基础以及环境承载能力等实际情况，陆续出台了相应政策。

本文以天津市作为“工业化程度高，新兴产业突出的超大城市”的代表，以甘肃省作为“工业化程度低，但有绿色能源潜力的省份”的代表，探讨如何统筹中央与地方的减排分工，地方与地方之间的减排责任，真正形成政策合力，成为未来碳减排约束政策动态优化的努力方向。

已有研究对碳减排约束政策的关注很多，主要从 3 个维度展开探讨，一是空间维度，二是时间维度，三是产业维度。碳减排约束政策研究的核心内容是碳配额，较多的研究是从空间维度入手分析的，从城市级、省级到国家级，碳配额的初始化分配方式也是一个研究焦点。其中一些文献已经注意到区域差异的存在对于碳减排约束政策实施效果的显著影响，但这些基于具体学科方法的分析手段多数难以深入分析碳政策影响的整体性、关联性和区域差异性。很少有文献对省际间碳减排约束政策产生的协同经济影响进行分析，特别是这种协同经济影响可否被作为产业空间转移的政策工具加以应用，之相对应的，综合评估模型能够更全面且定量地模拟自然环境系统与能源经济系统、社会系统之间的联动和相互作用，可能是全面分析碳政策协同影响、碳减排路径优化和碳政策作用机制的更适宜方法。

本文深入探讨典型区域“差异化的碳减排约束政策”对天津市和甘肃省的经济影响，重点通过对省际调入调出导致的隐含流的对比分析，考察在碳中和政策约束下，这些流动的变化规律，进而提炼碳中和转型的可行模式，以天津市作为“工业化程度高，新兴产业突出的超大城市”的代表，以甘肃省作为“工业化程度低，但有绿色能源潜力的省份”的代表，希望在两地的对比分析中，探索出不实施碳减排约束政策（BAU 情景）、实施无区域差异化的碳减排约束政策（CI 情景）和实施有区域差异化的碳减排约束政策（DE 情景）3 类政策情景作用下 3 类产业空间转移的碳政策作用机制。

研究结果

两地碳排放量总体分析

由图7.181可以看出，从两地碳排放量总体情况看，甘肃省 2017 年情景 134.87Mt，2060 年 BAU 情景 132.58Mt，2060 年 CI 情景 18.00Mt，天津市 2017 年情景 150.70Mt，2060 年 BAU 情景 130.55Mt，2060 年 CI 情景 33.51Mt，两地相比，2060 年 CI 情景即无区域差异化的碳强度约束政策的减排效果，甘肃省比天津市效果明显很多。从主要的排放部门看，甘肃省碳排放量最主要的部门是电力行业、金属冶炼业和能源供给业，3 类情景三部门合计占比分别为 80.94%，74.15% 和 73.50%，天津市碳排放量最主要的部门同样是电力行业、金属冶炼业和能源供给业，3 类情景三部门合计占比分别为 70.34%，66.92% 和 61.98%，天津市相比于甘肃省占比稍小。

值得关注的是，甘肃省农业碳排放量虽然占比不高，但是一个重要的碳排放产业，3 类情景分别为 1.85Mt、3.58Mt 和 0.33Mt。交通运输业碳排放量同样占比不高，但在 2060 年也会成为重要的碳排放源，3 类情景分别为 9.04Mt、7.49Mt 和 1.25Mt。天津市服务业碳排放量占比由 2017 年情景的 4.42% 大幅提高到 2060 年 BAU 的 10.27%，表明到 2060 年会成为主要的碳排放源。

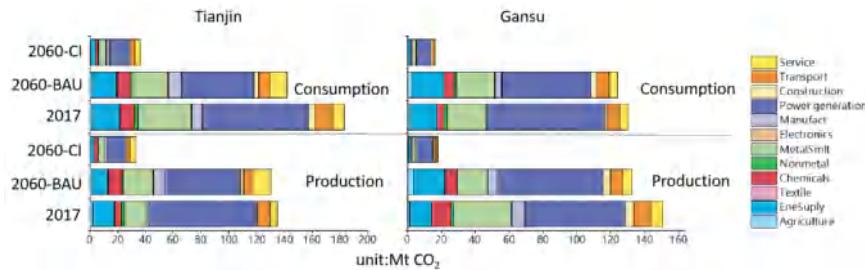


Figure 7.181: 两地碳排放量分析

两地重点产业碳排放量趋势对比分析

以能源供给业这一高耗能产业为例，甘肃省直接碳排放 3 类情景分别为 12.83Mt、18.41Mt 和 1.72Mt，2060 年 BAU 情景较 2017 年情景不降反升而且升幅达到 43.49%，说明在没有碳减排约束政策影响下，能源供给业中产业链的中低端环节在甘肃省有较大规模的扩张；但隐含碳 3 类情景分别为 5.46Mt、3.19Mt 和 0.04Mt，2060 年 BAU 情景较 2017 年情景下降 41.58%，说明在没有碳减排约束政策影响下，能源供给业中产业链的高端环节即最终产品呈现较大幅度的下降。

为了考察是否存在产业转移现象，需进一步对比天津市的相应情况，天津市的能源供给业直接碳 3 类情景分别为 15.69Mt、11.54Mt 和 2.73Mt，2060 年 BAU 情景较 2017 年情景下降 26.45%，说明在没有碳减排约束政策影响下，能源供给业中产业链的中低端环节在天津市有一定幅度的收缩；隐含碳 3 类情景分别为 7.36Mt、2.17Mt 和 0.15Mt，2060 年 BAU 情景较 2017 年情景下降 70.52%，能源供给业中产业链的高端环节即最终产品呈现大幅度的下降。

对比甘肃省和天津市在没有碳减排约束政策影响下的 2060 年 BAU 情景，可以看到产业发展趋势是产业链的中低端环节有从东部向西部转移的趋势，甘肃省很大程度上是作为能源类中间产品即原料生产基地，而产业链的高端环节甘肃省能源类最终产品更多的转为出省外供，天津市则可能是产业结构的优化升级导致对能源类最终产品的需求大幅减少。

继续对比 2060 年 CI 情景发现，甘肃省直接碳 2060 年 CI 情景较 2017 年情景下降 86.59%，隐含碳 2060 年 CI 情景较 2017 年情景下降 99.27%，天津市直接碳 2060 年 CI 情景较 2017 年情景下降 82.60%，隐含碳 2060 年 CI 情景较 2017 年情景下降 97.96%，说明碳减排约束政策影响下均会大幅降低高耗能产业的产能，但产业转移趋势相较于没有碳减排约束政策时很不显著。

再以金属冶炼业这一高耗能产业为例，甘肃省直接碳 3 类情景分别为 34.04Mt、17.71Mt 和 1.86Mt，2060 年 BAU 情景较 2017 年情景下降 47.97%，隐含碳 3 类情景分别为 2.84Mt、17.73Mt 和 2.05Mt，2060 年 BAU 情景较 2017 年情景大幅提高 524.30%，说明在没有碳减排约束政策影响下，产业结构的调整趋势是产业升级，即减少产业链的中低端环节产能，转而大比例增加高端环节产能。

为了考察是否存在产业转移现象，需进一步对比天津市的相应情况，天津市的金属冶炼业直接碳 3 类情景分别为 16.69Mt、21.43Mt 和 4.49Mt，2060 年 BAU 情景较 2017 年情景上升 28.40%，隐含碳 3 类情景分别为 15.73Mt、2.45Mt 和 0.55Mt，2060 年 BAU 情景较 2017 年情景下降 84.42%，产业结构调整的趋势是大幅降低最终产品的产能。说明金属冶炼业在甘肃省整体呈转入趋势，在天津市整体呈转出趋势，存在产业转移现象。

甘肃省直接碳 2060 年 CI 情景较 2017 年情景下降 94.54%，隐含碳 2060 年 CI 情景较 2017 年情景下降 27.82%，天津市直接碳 2060 年 CI 情景较 2017 年情景下降 73.10%，隐含碳 2060 年 CI 情景较 2017 年情景下降 96.50%，说明碳减排约束政策影响下均会大幅降低高耗

能产业的产能，产业转移趋势相较于没有碳减排约束政策时很不显著。

两地重点产业碳排放量变化因素对比分析

电力部门是两地共同的碳排放重点产业，“碳排放强度变化效应”起主导作用，说明技术、管理等方面的创新是降碳的主要驱动力，“投入产出系数变动效应”均为碳排放量增加的正向驱动力，天津市占比 36.34%，甘肃省占比 73.30%，说明在碳减排约束政策影响下，两地的能源结构同向电力部门升级，甘肃省是天津市的约 2 倍，说明甘肃省的升级需求更迫切；同时，甘肃省煤炭开采行业的“投入产出系数变动效应”为负向驱动力，占比 43.14%，说明在碳减排约束政策影响下，甘肃省的能源结构有显著的调整，成为碳减排的关键因素。

甘肃省向天津市的调入中，电力部门起主导作用的是“最终需求变动效应”，天津市的最终需求变动成为甘肃省电力部门的正向驱动力，占比 80%，说明对东部省份的碳减排约束政策会通过省际调入影响西部省份，发生显著的产业转移，以及相对应的碳排放溢出效应。

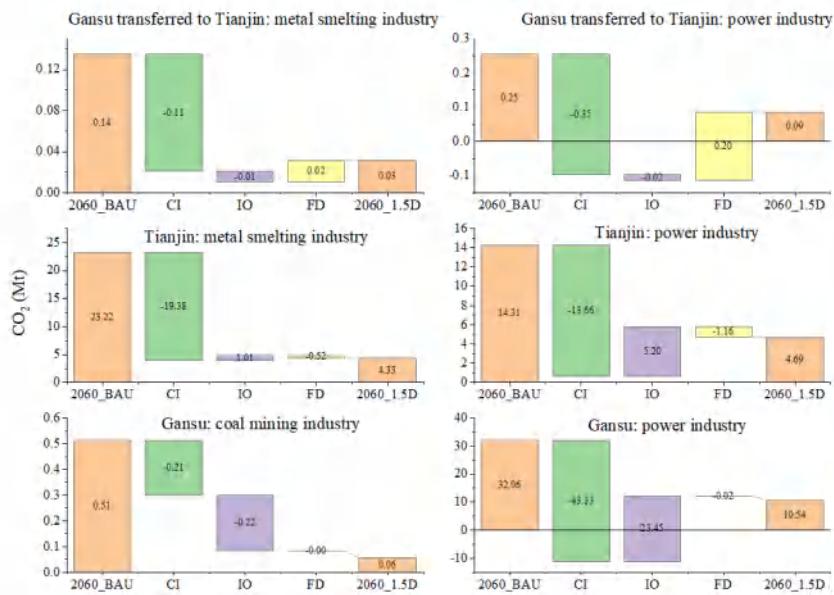


Figure 7.182: 两地重点产业碳排放量变化因素

对两地高碳经济总体影响对比分析

碳减排约束政策对于两地高碳经济影响很大，如图7.183所示，天津市 2060 年 BAU 情景 GDP 为 2769 百万美元，2060 年 CI 情景为 2391 百万美元，下降 13.65%，甘肃省 2060 年 BAU 情景 GDP 为 1245 百万美元，2060 年 CI 情景为 754 百万美元，下降 39.43%，下降幅度是天津市的近 3 倍，说明无区域差异化的碳强度约束政策对于以甘肃省为代表的西部省份经济的影响大于以天津市为代表的东部省份，碳政策的影响具有产值异质性。

天津市损失最大的是电力产业，下降了 100.44 百万美元，降幅为 75.32%，第二位是能源供给业，下降了 70.15 百万美元，降幅为 55.25%，第三位是化工业，下降了 69.01 百万美元，降幅为 38.83%，均为高碳产业，碳政策效果较为精准，甘肃省损失最大的是能源供给业，下降了 169.74 百万美元，降幅为 86.11%，第二位是电力行业，下降了 87.35 百万美元，降幅为 84.22%，第三位是纺织业，下降了 50.80 百万美元，降幅为 82.63%，碳政策效果有偏差，一定程度上说明无区域差异化的碳政策约束效果存在西部省份和东部省份的产业结构异质性。

2060 年 DE 情景下，天津市 GDP 为 2069.66 百万美元，下降 25.25%，甘肃省 GDP 为 1147.08 百万美元，下降 7.89%，下降幅度仅为天津市的三分之一左右，说明给以甘肃省为代表的西部省份更多的碳配额，对于经济的冲击要比以天津市为代表的东部省份小得多，区域差异化的碳政策能够起到显著的经济效果，即具有较强的产值异质性。

2060 年 DE 情景下，天津市损失最大的化工产业，下降了 159.30 百万美元，降幅为 69.49%，第二位是制造业，下降了 146.67 百万美元，降幅为 27.42%，第三位是金属冶炼业，下降了 128.77 百万美元，降幅为 68.92%，甘肃省损失最大的是制造业，下降了 41.80 百万美元，降幅为 28.70%，第二位是金属冶炼业，下降了 38.30 百万美元，降幅为 27.15%，第三位是服务业，下降了 32.44 百万美元，降幅为 6.33%，通过对比可以看出，区域差异化的碳政策更为显著的降低了天津市高碳产业的比重，说明碳政策影响具有较强的产业结构异质性。

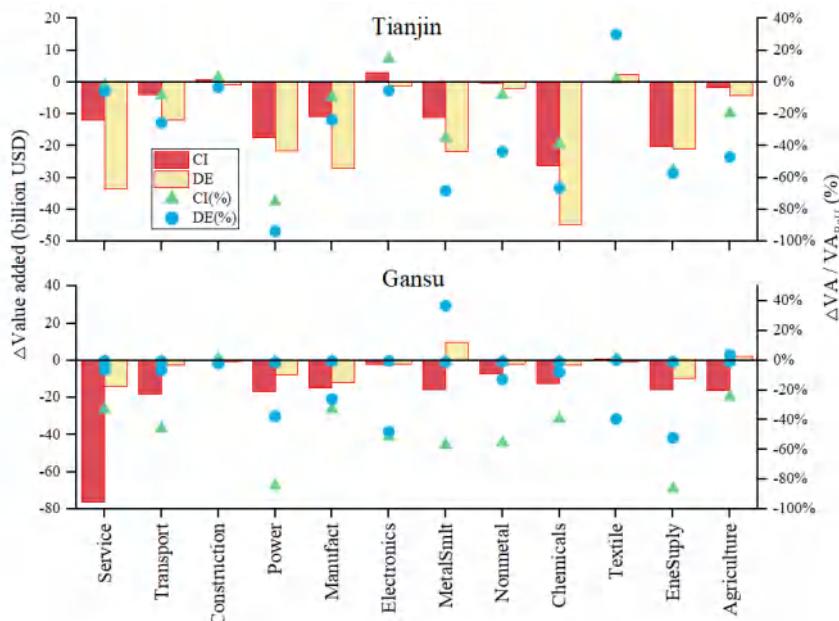


Figure 7.183: 两地 GDP 变化分析

两地重点产业对比分析

以服务业这一低耗能产业为例，服务业是甘肃省第一大产业，3 类情景占比分别为 41.18%，45.51% 和 41.88%，均达到 4 成以上，第二大产业是制造业，3 类情景占比分别为 11.70%，12.58% 和 9.05%，第三大产业是金属冶炼业，3 类情景占比分别为 11.33%，7.12% 和 15.64%，服务业占比远远高于制造业和金属冶炼业，说明甘肃省工业化程度较低，碳倾斜政策并没有从根本上改变这一特征；同时，2060 年 DE 情景与 BAU 情景、2060 年 CI 情景相差无几，一定程度上反映出给甘肃省更多的碳配额，并不会促使产业结构向非服务业的方向调整，从而实现工业化程度的提高，而 2060 年 CI 情景高于 BAU 情景 4.33%，反映出无区域差异的碳约束政策会强化服务业的主导地位。此外，金属冶炼业的 2060 年 CI 情景明显低于 BAU 情景，2060 年 DE 情景明显高于 BAU 情景，说明对于高耗能产业，有区域差异的碳倾斜政策正向作用效果明显，而无区域差异的碳约束政策负向影响更大。

服务业同样是天津市第一大产业，3 类情景占比分别为 42.36%，47.56% 和 52.89%，第二

大产业是制造业，3类情景占比分别为 19.32%，19.48% 和 18.76%，第三大产业是化工业，3类情景占比分别为 8.28%，5.38% 和 3.38%，服务业占比远远高于制造业和化工业。值得关注的是，2060 年 DE 情景比 BAU 情景高出 10.53%，说明给天津市更少的碳配额，会极大的促进服务业这样的低耗能产业发展，产业结构朝着低碳的方向升级，同时 2060 年 CI 情景比 BAU 情景高出 5.20%，说明无区域差异的碳约束政策也会一定程度上促进服务业的发展，碳政策对于以天津市为代表的东部地区向低碳化的产业结构升级效果显著。此外化工业随着碳约束政策越来越严厉，占比也越来越小，说明对高耗能产业的限制作用很灵敏。

碳排放溢出效应

如图7.184所示，总体上看，天津市服务业、制造业和电力部门等的需求引致的外省碳排放较高，主要有江苏省、安徽省、河北省等；2060 年 BAU 情景下天津市省际调入贸易隐含碳排放显著高于省际调出，在 CI 情景下延续了这一特征。外省服务业、制造业和金属冶炼业需求引致甘肃省碳排放较高，主要有江苏省、安徽省、河北省等；甘肃省在碳强度约束情景下与外省贸易碳排放明显降低，省际调出隐含碳也不再显著高于省际调入隐含碳。

综合多省贸易碳排放的数据，可以大体看出东、西部地区受碳政策影响的共性趋势，天津市 2060 年 BAU 情景和 2060 年 CI 情景的贸易隐含碳省际调入均显著高于省际调出，说明碳强度约束政策对天津市这种工业化程度较高、新兴产业突出的特大城市来说，其产业结构的贸易碳优势影响较小；相反，甘肃省 2060 年 BAU 情景贸易隐含碳省际调出显著高于省际调入，但是 2060 年 CI 情景两者差距明显缩小，说明碳强度约束政策对甘肃省这种工业化程度低，但有绿色能源潜力的省份来说，弥补其产业结构的贸易碳劣势帮助很大，而且数值明显下降，说明降碳潜力较大，但同时省际贸易水平的下降对于产业发展的长期潜在影响应给予关注。产业方面，两地的服务业和制造业均是影响贸易碳地位的主要产业，特别对甘肃省的影响尤为重要。以上分析一定程度上成为甘肃省“产业转移”的隐含碳证据。

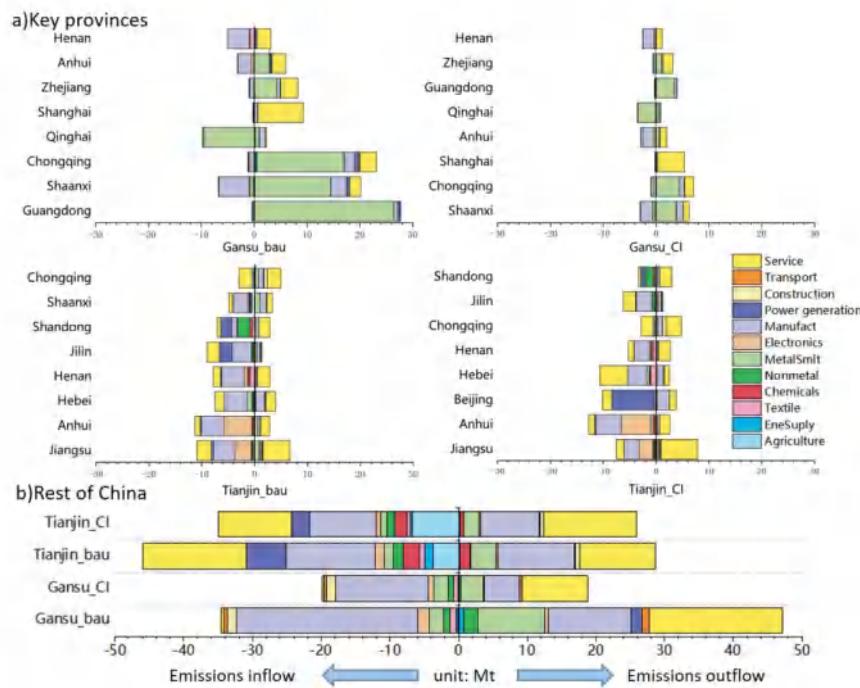


Figure 7.184: 两地省际贸易隐含碳排放

如图7.185所示，虽然两地之间贸易隐含碳排放总量不大，但通过3类情景的比较，能够看出产业结构调整及产业转移的趋势，例如，甘肃省通过省际调入天津市方面，DE情景相比于CI情景，甘肃省电力部门和金属冶炼业的贸易隐含碳排放显著提高，说明给予甘肃省较高的碳排放配额，高耗能产业以贸易隐含碳的方式从天津市向甘肃省转移，又如，天津市通过省际调出甘肃省方面，BAU情景相比于CI情景和DE情景，天津市制造业和金属冶炼业的贸易隐含碳排放显著降低，说明对天津市进行碳排放配额限制，某种程度上促使高耗能产业向甘肃省转移，从而诱导高耗能产业通过省际调入和省际调出实现产业转移的“叠加效应”。

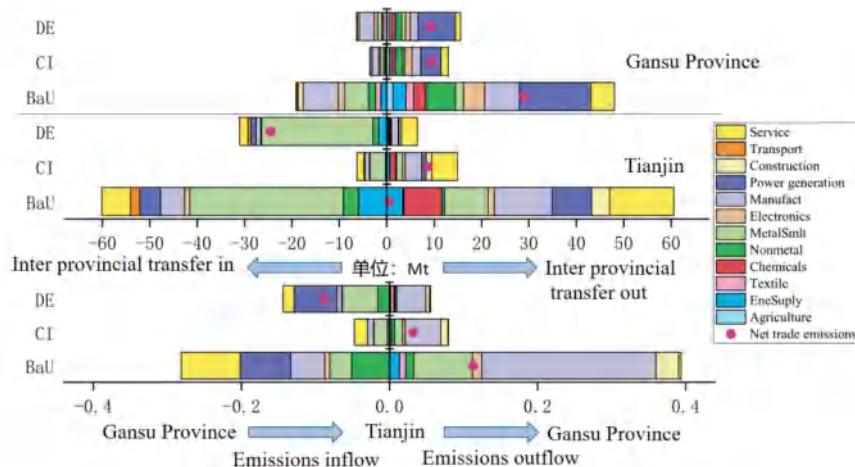


Figure 7.185: 两地贸易隐含碳排放

图7.186展现了三类情景下两地省际调出贸易隐含碳的变化情况。在 2060 年 CI 情景下，天津市多数行业省际调出隐含碳降低，其中化工业降幅最大，下降了 63%，甘肃省多数行业的下降幅度远大于天津市，其中电力部门降幅最大，下降了 99%。在 2060 年 DE 情景下，天津市的电力部门省际调出隐含碳进一步下降，但服务业会显著上升，而甘肃省的电力部门和能源供给业显著上升，分别为 2783% 和 577%，服务业进一步下降，说明“转移的产业”带有高耗能特点。

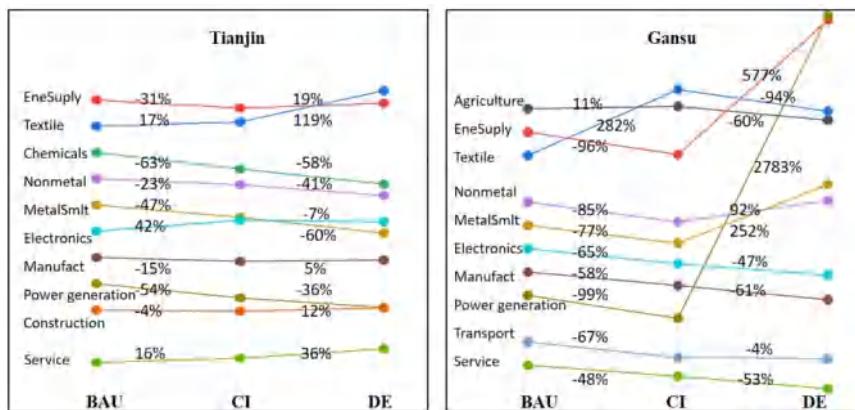


Figure 7.186: 两地省际调出贸易隐含碳变化

讨论

产业跨区域转移的碳政策作用机制

通过前文对产业跨地区转移的讨论，综合对比甘肃省和天津市的 BAU、CI 和 DE 政策情景，总结出 3 类产业跨地区转移的碳政策作用机制。

1、不实施碳减排约束政策（BAU 情景），两地高耗能产业会自发实现产业转移化结构化的变化趋势。

以能源供给业这一高耗能产业为例，我们观察到的现象是，甘肃省产业链的中低端环节在甘肃省有较大规模的扩张，但产业链的高端环节即最终产品呈现较大幅度的下降；天津市产业链的中

低端环节在天津市有一定幅度的收缩，同时产业链的高端环节即最终产品呈现大幅度的下降。说明产业发展趋势是产业链的中低端环节有从东部向西部转移的趋势，甘肃省很大程度上是作为能源类中间产品即原料生产基地，而产业链的高端环节甘肃省能源类最终产品更多的转为出省外供，即从西部向东部转移的趋势，天津市则可能是产业结构的优化升级导致对能源类最终产品的需求大幅减少。

再以金属冶炼业这一高耗能产业为例，甘肃省产业结构的调整趋势是产业升级，即减少产业链的中低端环节产能，转而大比例增加高端环节产能；天津市产业结构调整的趋势是大幅降低最终产品的产能。说明产业发展在甘肃省整体呈转入趋势，在天津市整体呈转出趋势，存在产业转移现象。

2、实施无区域差异化的碳减排约束政策（CI 情景），会对两地高耗能产业产生本地化结构化影响，分别大幅降低两地高耗能产业的产能，但跨地区的产业转移趋势并不显著，对能源供给业和金属冶炼业的重点考察均存在相似的趋势。

3、实施有区域差异化的碳减排约束政策（DE 情景），“转移的产业”带有高耗能特点，能够诱导高耗能产业通过省际调入和省际调出实现显著的产业转移的“叠加效应”。例如，甘肃省通过省际调入天津市，DE 情景相比于 CI 情景，甘肃省电力部门和金属冶炼业的贸易隐含碳排放显著提高，说明给予甘肃省较高的碳排放配额，高耗能产业以贸易隐含碳的方式从天津市向甘肃省转移，又如，天津市通过省际调出甘肃省，DE 情景相比于 BAU 情景，天津市制造业和金属冶炼业的贸易隐含碳排放显著提高，说明对天津市进行碳排放配额较为严格的区域差异化限制，某种程度上促使高耗能产业向甘肃省转移。

政策启示

本研究的目标，是希望在天津市和甘肃省两地的对比分析中，探讨典型区域“差异化的碳减排约束政策”对两地高碳经济的影响，进而提炼碳中和转型的可行模式，以天津市作为“工业化程度高，新兴产业突出的超大城市”的代表，以甘肃省作为“工业化程度低，但有绿色能源潜力的省份”的代表，就目前的工作进展看，能够较为清晰的看到，碳中和转型的“产业转移模式”，它的运行机理是：给甘肃省（发展中地区）更多的碳配额，即实施有区域差异化的碳减排约束政策，通过更多的省际调出，实现产业的空间转移。例如，在碳排放溢出效应分析中，在 2060 年 DE 情景下，天津市的电力部门省际调出隐含碳进一步下降，但服务业会显著上升，而甘肃省的电力部门和能源供给业显著上升，分别为 2783% 和 577%，服务业进一步下降，说明“转移的产业”带有高耗能特点。又如，在碳减排路径分析中，通过对比分析发现，在 2060 年 DE 情景下，给予甘肃省这样的 GDP 较低省份较高的碳排放配额，通过更多的省际调出，外省对于甘肃省高碳行业的需求上升，说明存在一定的产业转移，而且通过 DE 情景与 CI 情景的比较，发现 DE 情景下产业转移的程度更高。

同时，无区域差异化的碳减排约束政策实施效果同样值得关注，在对能源供给业的考察中，对比甘肃省和天津市在没有碳减排约束政策影响下的 2060BAU 情景，可以看到产业发展趋势是产业链的中低端环节有从东部向西部转移的趋势，甘肃省很大程度上是作为能源类中间产品即原料生产基地，而产业链的高端环节甘肃省能源类最终产品更多的转为出省外供，天津市则可能是产业结构的优化升级导致对能源类最终产品的需求大幅减少；在对金属冶炼业的考察中，对比甘肃省和天津市在没有碳减排约束政策影响下的 2060BAU 情景，产业结构调整的趋势是大幅降低最终产品的产能，说明金属冶炼业在甘肃省整体呈转入趋势，在天津市整体呈转出趋势，存在产业转移现象。但对比甘肃省和天津市在没有区域差异化的碳减排约束政策影响下的 2060CI 情景，发现均会大幅降低高耗能产业的产能，但产业转移趋势相较于没有碳减排约束政策时很不显著。

综上，将产业跨地区转移的碳政策作用机制概括为：1、不实施碳减排约束政策（BAU 情景），两地高耗能产业会自发实现产业转移化结构化的变化趋势。2、实施无区域差异化的碳减排约束政

策 (CI 情景), 会对两地高耗能产业产生本地化结构化影响, 分别大幅降低两地高耗能产业的产能, 但跨地区的产业转移趋势并不显著。3、实施有区域差异化的碳减排约束政策 (DE 情境), “转移的产业” 带有高耗能特点, 能够诱导高耗能产业通过省际调入和省际调出实现显著的产业转移的“叠加效应”。

2022 年 7 月, 甘肃省发布《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的实施意见》中明确, 到 2025 年, 全省绿色低碳循环发展的经济体系初步形成, 重点行业能源利用率大幅提升, 非化石能源消费比重达到 30%, 风电、太阳能发电总装机容量达到 8000 万千瓦以上。围绕电力部门相关产业链的能源利用效率提高和绿色电力替代, 是甘肃省近期降低碳排放强度的典型路径。以发展中地区甘肃省和发达地区天津市为代表的结对型绿色电力传输交易, 是两地贸易隐含碳分析成果在未来碳达峰碳中和实践中的重要政策应用。此外, 两地的传统高碳产业在碳减排约束政策影响下有比较大的损失, 着力催生和培育低碳政策环境下的新兴产业, 以便更早地切换经济发展动能, 避免掉入低碳陷阱。

局限和未来研究展望

本研究采用 CGE 模型开展了对中国 31 省经济指标和碳排放指标进行了基础性模拟工作, 特别是使用 EEBT 方法核算区域间贸易隐含碳流动情况, 并建立省际碳排放流动关联模型反映产业转移趋势。但是, 本文存在一些局限性, 确切地说, 目前模型评估的是对传统产业的消除效应, 因此经济损失显得很大。但模型还不能刻画新兴产业的弥补效应, 因此要对文中的数据进行合理解读, 并不能认为两地未来就会受这么大损失, 而是两地的传统高碳产业会有这么多损失, 政策含义是要立刻催生、培育低碳环境下的新兴产业, 以便更早地切换增长动能, 避免掉入低碳陷阱。未来, 我们会开展中国发达省份和发展中省份新兴产业碳减排竞争力的评估和比较研究。

7.10.14 LEEEP 研究 | 中国交通部门实现碳中和需要电力和氢气供应合力脱碳

- **原文标题:** Neutralizing China's transportation sector requires combined decarbonization efforts from power and hydrogen supply [105]
- **期刊:** Applied Energy
- **发表年份:** 2023
- **作者:** Yan Ru Fang, Wei Peng, Johannes Urpelainen, M. S. Hossain, Yue Qin, Teng Ma, Ming Ren, Xiaorui Liu, Silu Zhang, Chen Huang, **Hancheng Dai***
- **文章链接:** [点击 LEEEP 微信公众号链接阅读推送原文](#)

研究概要

交通部门的低碳发展是实现我国全面碳中和目标的关键。我国主要包括五大交通子部门: 道路、铁路、航空、水运以及管道运输。然而, 各交通子部门低碳发展的异质性, 碳中和路径以及交通部门与能源供应部门之间的相互反馈尚不明晰, 有待深入研究。因此, 该研究通过开发并耦合交通部门, 电力、氢能三部门的能源技术优化模型来创新性的实现:

1. 单独交通部门低碳发展的综合政策评估;
2. 交通部门结合电力、氢能的整体低碳政策评估;
3. 代表性负排放技术引入的低碳发展路径研究。

本文的主要研究问题如下:

1. 单独交通部门能否实现碳中和？
2. 交通部门耦合能源供应端碳中和路径如何？
3. 交通部门中各子部门在实现碳中和中的异质性有哪些？

该研究通过应用北京大学 LEEEPEP 团队自主开发的 IMED | TEC 能源技术优化模型，定量分析中国交通部门实现碳中和的优化路径，为我国交通部门及其他部门的碳中和路径研究提供思路和参考。

研究背景

气候变化对人类生存构成了严重威胁，对自然生态系统造成了很多不可逆转的伤害。截至 2019 年，中国的二氧化碳排放量占全球的近 30%，成为全球碳排放最多的国家。交通部门是主要的化石燃料消费行业之一，且在日常生活中占据关键地位，并在实现减碳和应对气候变化方面面临重要的挑战。如果不出台新的政策，随着经济持续发展和车辆拥有量的增加，中国交通运输部门的碳排放预计在未来几十年内将大幅增加，从而严重影响整个经济系统的碳减排发展。因此，实现绿色低碳交通对于中国实现碳排放峰值和在未来 40 年内实现碳中和目标至关重要。

以前的研究多集中在目标部门（如交通运输）的终端用能减排，却较少考虑能源供应上游部门（如发电），探讨氢在减少重型交通运输排放中的潜力研究就更加少了。在这一背景下，特别是在中国，关于交通运输子部门的异质性以及交通运输与能源供应之间相互反馈的综合性考虑尚未得到充分展开。

因此，本研究目标是构建一个综合性的交通部门结合能源供应端的能源系统优化模型，引入以下三个方面的创新性研究内容：

1. 全面评估交通部门内的政策：IMED | TEC 模型涵盖了中国交通系统的各个方面，包括道路、铁路、水运、航空和管道运输模式；该研究基于经典的 A-S-I（避免-转移-改进）框架对交通低碳政策进行全面模拟。
2. 跨交通部门的整体政策评估：该研究扩展了模型的分析范围，建立了不同交通模式与上游能源供应部门（发电和氢能）之间的联系。该方法严格遵循能源消耗平衡原则，并依据成本最小化原则进行优化。
3. 涵盖典型的先进碳去除技术：研究使用的模型将碳捕集和储存（CCS）、生物能源与碳捕集和储存（BECCS）等先进碳去除技术纳入能源供应系统的发电和氢能生产部门。

研究方法

本研究采用了北京大学能源与环境经济政策实验室自主开发的自下而上的能源技术优化模型-IMED | TEC 模型。该模型充分考虑了全国范围内交通运输部门需求的变化，并同时考虑了交通对电力和氢能需求的变化。IMED | TEC 模型在满足交通出行需求的同时，和对电力、氢能能源需要的前提下，通过优化技术选择，最小化系统成本得出最优的技术组合。

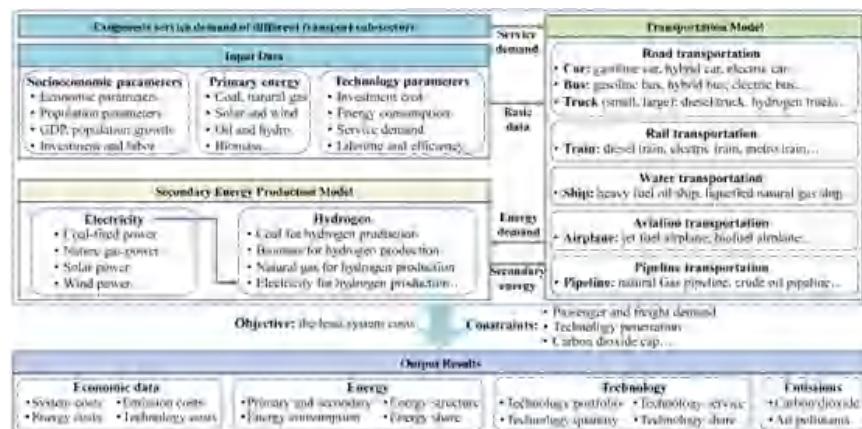


Figure 7.187: 研究框架

研究结果

单独交通部门 CO₂ 排放

模型结果表明，在单独交通部门模型情景中，将交通部门的间接碳排放考虑在内，即由电力和氢生产带来的排放也计算在内，本研究中的几条路径不能在 2060 年实现碳中和。此外，结果显示，在电力和氢的碳排放因子保持不变的情况下，高电气化技术（IMP 情景）可能导致比 REF 情景更高的 CO₂ 排放。减少或转移的出行需求将导致不同程度的 CO₂ 排放消减。出行需求避免情景（AVO）展示了比出行需求转移（SHI）和技术提升（IMP）方法更高的减排。因此，该情景表明交通部门难以实现碳中和，这些结果强调了清洁的电力和氢生产对交通部门脱碳发展的必要性。

考虑交通部门直接碳排放的情景结果表明，在 ASI 情景下，尽管结合了避免、转移和提升策略实现了交通的大幅碳减排，但该情景路径与碳中和目标仍然相差甚远。由于 NASI 情景还包括了出行需求避免和转移，其 CO₂ 排放较 NOI 情景更低。根据研究表明，避免、转移和改进策略具有显著的脱碳效果。例如，仅避免 1% 的交通服务需求就可以使 CO₂ 排放比 REF 情景减少 1.7%。

除了避免和转移策略，改进策略在减少 CO₂ 排放方面也非常有效。通过将乘客交通从私人汽车转移到公共交通工具，如地铁、火车，以及将货运交通从道路转移到水路和铁路，到 2060 年，CO₂ 排放可以比 REF 情景减少 35%。值得注意的是，这种排放减少效果超过了避免策略的影响。此外，与避免和转移方法相比，提升策略显示出更高的 CO₂ 减排潜力。在 NOI 情景下，从 2015 年到 2030 年，道路和铁路交通的排放减少相对较小。然而，从 2030 年到 2060 年，道路、铁路、水路、航空和管道交通的 CO₂ 排放将显著减少。相比之下，NASI 情景在 2015 年到 2030 年的碳减排水平高于 NOI 情景。这是因为 NASI 情景同时采用了 NOI 情景中的避免、转移策略以及技术提升措施。这突显了早期脱碳行动对实现低排放的重要性。

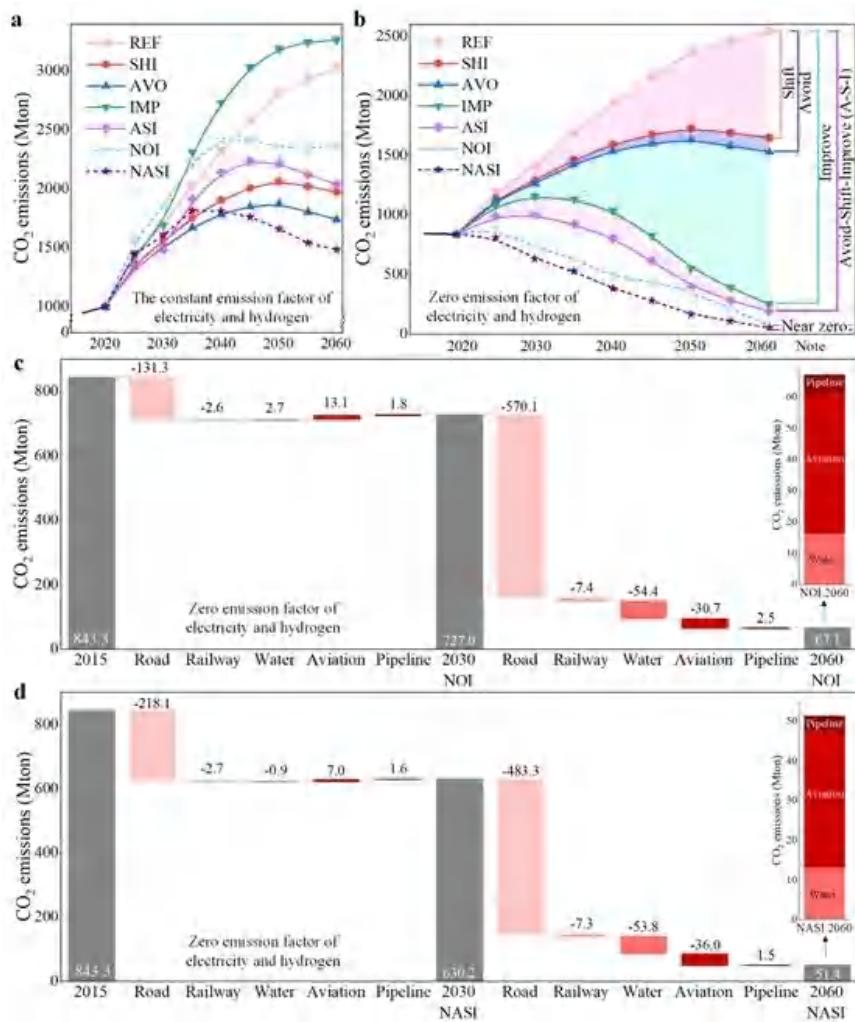


Figure 7.188: 单独交通部门模拟的碳排放路径

交通与能源系统耦合的碳排放

由于 REF-EHfix 和 REF-EHadv 情景假设的交通部门的技术组合相同，因此在这两种情景下，交通部门的 CO₂ 排放是相同的。同样，IMP-EHfix 情景和 IMP-EHadv 情景下的交通部门的 CO₂ 排放量相同。在 2060 年，在 IMP-EHfix 和 IMP-EHadv 情景中，交通部门的 CO₂ 排放量分别为 249 百万吨 (Mton)，远高于零，也就是不考虑上游电力和氢能部门，交通部门的碳排放放在当前情景的设置下是不可能实现碳中和的。此外，交通部门在 2060 年的排放主要来自水运、航空和管道运输部门。在 IMP-EHadv 情景中，电力和氢能部门的 CO₂ 排放量从 2015 年至 2060 年出现先上升后下降的趋势，甚至到 2060 年其排放量为负值。

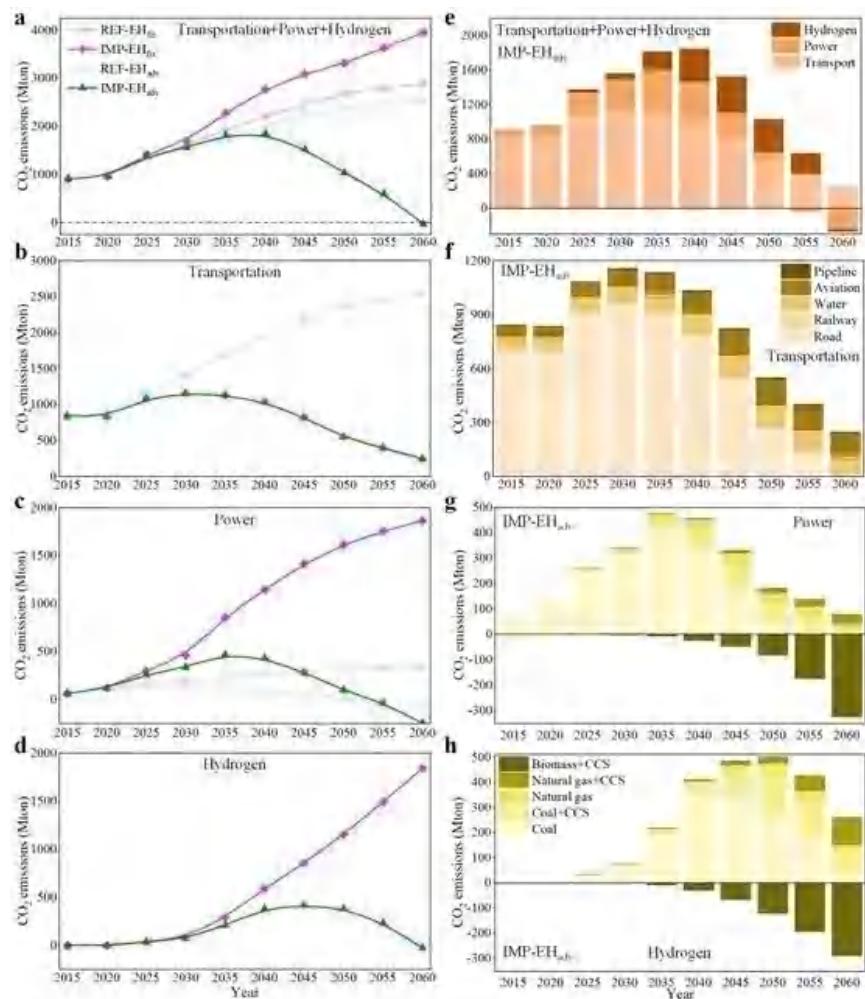


Figure 7.189: 交通部门耦合电力、氢能的碳排放路径

三部门耦合的能源结构

清洁可再生能源，如水力、风能、太阳能和生物质能，为减少结合交通、电力和氢能三部门的系统碳排放提供了重大机会。因此，碳中和目标的实现很大程度上取决于可再生能源来替代化石燃料的程度。从 2015 年到 2060 年，石油产品在交通部门的使用份额不断下降，取而代之的是较为清洁的生物质能、电力和氢能。然而，交通部门的总能耗将随着时间的推移而增加，尤其是氢能，2060 年其使用量与用电量接近。作为交通部门的重要能源，氢能主要是由清洁可再生能源生产的。此外，氢燃料具有更长的行驶距离和更快的加氢速度，在商业应用方面具有巨大的潜力。由低碳能源产生的电力或氢能是传统化石燃料最具减排潜力的能源替代品，以此来提供交通部门的动力技术。

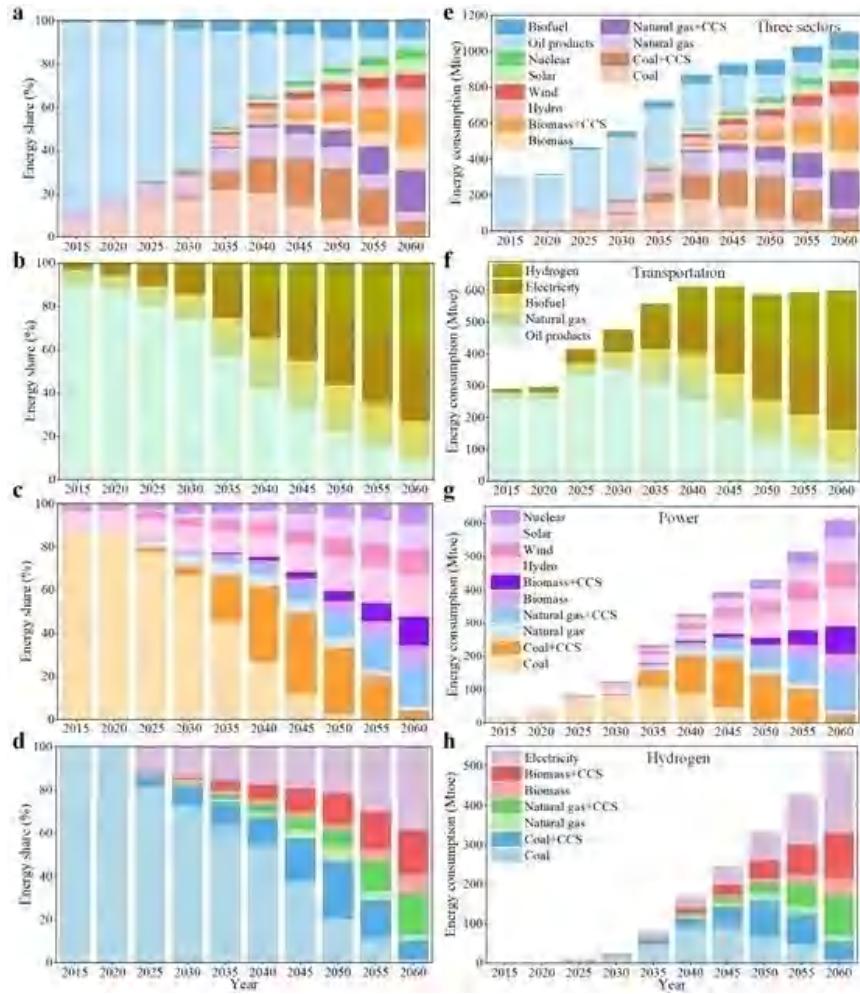


Figure 7.190: 交通部门耦合电力、氢能部门的技术发展路径

三部门耦合的技术优化路径和成本

综合考虑三部门结合系统的，2060 年的该系统的碳中和路径 (IMP-EHadv) 下技术的总体组合如下图所示。该路径涵盖了上游的电力和氢能生产部门，还包含下游的终端能源利用的交通部门。对于私人汽车、公共汽车和卡车等道路运输方式，其主要得能源是电力和氢能。因此，道路运输中的 CO₂ 直接排放量可以实现净零。铁路部门利用的主要能源类型是电力，另有一小部分的氢能利用，可以用于长距离和重型运输。水运和航空运输的能源利用结构相似，包括生物质燃料、石油产品、氢能，以及一小部分的电力，天然气主要用于水路运输。天然气是管道输送的重要能源，电力是其补充能源。

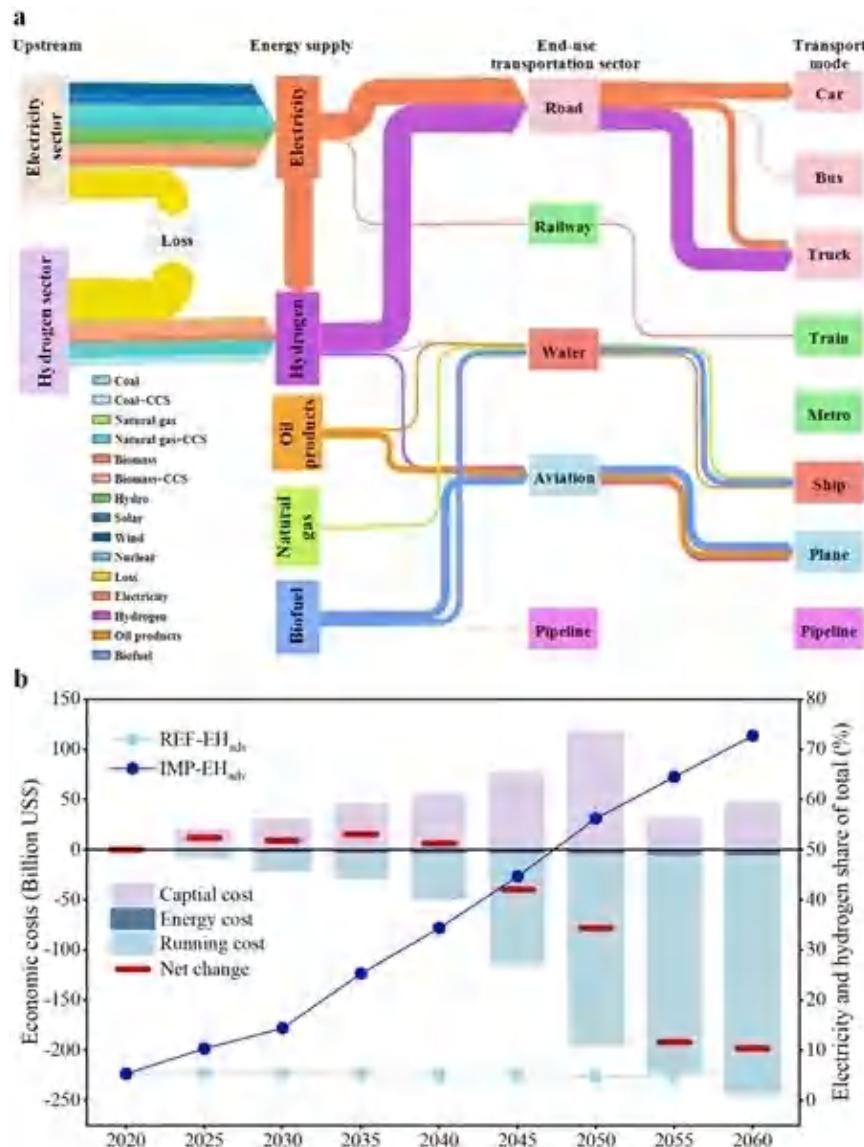


Figure 7.191: 交通部门耦合电力、氢能部门的技术优化路径和成本变化

为了实现碳中和目标，不只是交通部门需要低碳发展努力实现净零排放，其他部门也将增加技术成本并加大投资成本来实现低碳发展。例如，电力和氢能部门将大大增加能源生产成本。在第一阶段，从 2015 年到 2040 年，IMP-EHadv 情景下的总成本将会增加，与 REF-EHadv 情景相同。然而，从 2040 年到 2050 年，IMP-EHadv 的总成本会先略高一些，然后下降到低于 REF-EHadv 的水平。从 2040 年到 2060 年，在 IMP-EHadv 情景下，当引入新技术时，交通部门的投资成本将比 REF-EHadv 情景低，这个结果可能有点违反直觉。然而，成本会随着未来科学技术的提升而下降，也就是“learning by doing”，从而减少技术投资。因此，IMP-EHadv 情景下交通部门总的经济成本比 REF-EHadv 情景要低。这说明，即使在交通运输领域有了新的先进技术和较低的排放，也可以通过技术进步来减少经济投资。

研究结论

这项研究显示，仅仰赖单一的交通部门努力实现碳中和是一项极为艰巨的任务。然而，通过将电力和氢能源部门进行整合，交通部门实现碳中和在技术和经济上是可行的。研究指出，为了实现碳中和目标，交通部门的能源消费结构需要经历重大变革，预计到 2060 年，电力和氢能源的使用将成为交通用能的主力军。与此同时，电力和氢能源部门将需要大量的可再生能源，并在其生产中应用碳捕获和封存技术，以实现大规模减排并抵消交通部门中难以减排的部分。

这项研究将终端用能的交通部门与能源供应端的电力和氢能部门整合，进行系统碳中和路径的探究，为交通部门实现碳中和提供了可行的技术路径。这不仅对交通部门的可持续发展具有重要意义，还为其他部门的低碳发展政策制定提供了有价值的参考依据和研究思路。

7.10.15 LEEEPEP 研究 | 碳限额约束对我国区域经济发展均衡性的影响

- **原文标题:** The unintended dilemma of China's target-based carbon neutrality policy and provincial economic inequality^[106]
- **期刊:** Energy Economics
- **发表年份:** 2023
- **作者:** Chaoyi Guo and Ziqiao Zhou and Xinyuan Liu and Xiaorui Liu and Jing Meng and **Hancheng Dai***
- **文章链接:** [点击 LEEEPEP 微信公众号链接阅读推送原文](#)

研究概要

碳限额将对北方省份传统产业造成冲击，影响我国区域发展均衡性。

在我国“双碳”战略以及“1+N”顶层设计的政策背景下，由中央政府发起向各个省份约定自上而下的碳减排目标是一种行之有效的减排手段，既往研究从事前模拟与事后评估的角度指出这一制度安排具备可观的减排潜力，也有一些研究担心过于严格的目标约束有可能导致宏观经济受到负面影响。此外，自上而下的约束政策有可能会忽视一部分地区的经济发展利益，进而地与另一些低碳基础较好的地区拉开差距，造成发展不均衡问题。面向 2060 年碳中和深度减排目标，我国区域经济与产业发展是否面临这种不均衡问题？若有，其背后的机制是怎样的？是否可以通过合理的省际碳配额调度加以解决？本文创新性地耦合了北京大学 IMED/CGE 省级模型与多阶段回归模型，探讨了基于各种省际配额方案的碳限额政策对我国区域经济与产业发展均衡性的影响，分析了造成这种不均衡影响的机制原因。同时，通过不确定性分析识别了影响宏观经济模型结果的若干重要因素。本文着重刻画了碳目标约束对各省传统产业和经济发展方式造成的冲击。研究发现，北方地区的传统产业和以高碳密集型工业为主的产出需要引起格外重视，如果延续这种发展方式，这些主要税收支柱将可能遭受比较大的损失，需要早做打算。研究成果于 2023 年 9 月在线发表于能源经济领域重要期刊 Energy Economics。本文第一作者为北京大学环境科学与工程学院 LEEEPEP 课题组博士生郭超艺，通讯作者为环境科学与工程学院戴瀚程长聘副教授，合作作者包括同组成员与伦敦大学学院的孟婧教授。

研究背景

在《巴黎协定》全球低碳减排的框架下，我国基于发展转型与国际责任的内外需求，提出了“3060”减排目标，计划在 2030 年前实现碳达峰，2060 年之前实现碳中和，这意味着我国将要实

现能源与经济结构的巨大调整与转型，同时也需要稳定经济增长，兼顾区域均衡。故减排路径与政策的设计与选择将对全社会产生多维度，多层次影响。中国政府自 2005 年以来的主要议程之一为“能源消耗与强度双控”，同时亦实现了碳排放权交易市场从试点到全国统一的政策过程，并在新形势下提出 3060 减排目标与颁布 1+N 为主体的碳中和顶层规划。如何在长期深度碳减排规划下既能又快又好地实现国家减排全局目标，尽可能减少对国家经济的负面影响，同时避免地区发展差距过大，是本文思考的课题。自上而下的减排目标约束作为一种数量型减排政策，在一定条件下具有减排见效快，政策执行成本低等相对优势。但我国幅员辽阔，地区禀赋、发展现状差异极大，如何将国家减排目标分配给不同地区或排放相关方是一个关键挑战。一刀切的分配很可能妨碍地方经济发展，但过分强调地方利益可能降低整体减缓效果，需要在政策实施效率和地区公平之间寻求平衡。

研究方法

基于北京大学自主研发的 31 省份动态多部门可计算一般均衡 (IMED/CGE) 模型，本文创新性地耦合了 CGE 模型与多阶段回归模型，揭示了碳政策影响宏观经济与产业的链式影响机制 (图 7.192)。在情景设计中，本文在总结文献的基础上，基于减排效率优先与经济发展均衡优先，设计了六大省际碳配额调度的情景 (图 7.193)。此外，当前 CGE 模型中比较重要的生产函数设置、参数数值、技术进步与能效参数均为外生设置。同时，结合了大量文献参考的基础上，本文基于全要素生产率 (TFP)、能源效率改进参数 (EEI)、2060 年允许的最大正排放 (EMS)、生产函数中能源与其他要素的替代弹性 (VABE) 四个指标构建了共计 84 个不确定性分析情景。用意在于尽可能排查对结果影响最为敏感的变量，以期对结果分析、政策启示提供自我纠偏视角，并对往后研究形成借鉴。

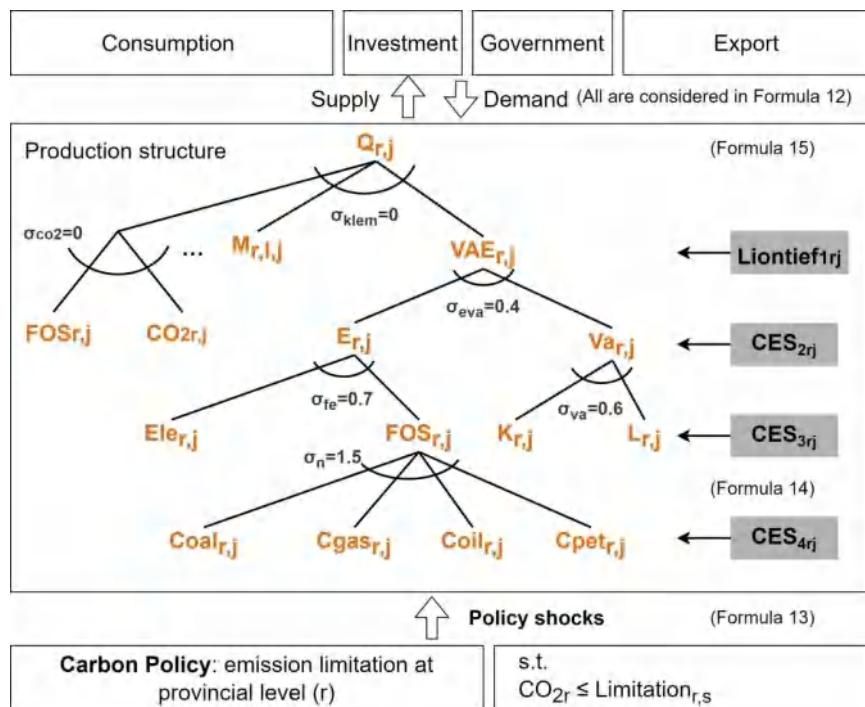


Figure 7.192: CGE 模型生产函数嵌套结构与链式影响机制的回归设计

分配原则	情景名称	具体解释
无政策原则	BaU	无政策情景
	SaCI	每个省份在2060年都达到碳中和所要求的相同碳强度
减排效率原则	E	每个省份的平均碳排放下降率相同
	F	每个省份在2060年的人均排放量趋于一致
经济发展均衡原则	HS	历史累积排放较多的省份配额较多
	CA	2060年预测拥有较高人均GDP的省份配额较少
	DE	2020年已有较高人均GDP的省份配额较少

- 上述为本文所使用的基本情景，一共为7种
- 其中SaCI与现实中的碳强度目标约束较为类似
- HS与当下我国碳市场的配额分配制度较为类似
- F则源自当下气候谈判中“气候正义”倡导，也是发展中国家“共同但有区别责任”的观点基础
- 可以进一步参考: Jin et al (2020), Goulder et al (2022)

Figure 7.193: 本文主要的情景设计：基于不同原则的碳配额省际调度方案

研究结果

在自上而下的碳强度目标约束下，2060 年国家为实现碳中和目标可能会与潜在产出之间存在-8% 左右的 GDP 差距。2060 年 SaCI 情景下的 GDP 与 BaU 情景下的差距为-8%，其中，北方地区的经济增长相对损失较为严重，内蒙古与甘肃分别达到了-49.6% 与-39.5%，与之形成对比的是，江苏与浙江仅有-1.1% 与-6.5%。尽管从结果中得知，东部沿海地区的 GDP 损失绝对值要更大，因为这些地区的经济基础价值高，损失绝对量大。而北方地区受限于经济基础薄弱，韧性差，比东部沿海地区更无法接受这种长期经济潜力的损失。这些经济损失是由于大量原本占优势地位的传统工业与服务业萎缩导致的。2060 年 SaCI 与 BaU 相比，制造业、金属冶炼与服务业的产出损失，分别达到-12.1%，-25.3% 与-3.5%，这构成了中国 2060 年碳中和目标下产出损失的基本盘。其中，北方很多地区以这些传统产值、化石能源为地方经济增长的基石，他们可能会面临比较痛苦的转型过程。这里的痛苦体现在产出的百分比损失非常高，例如内蒙古与甘肃总体的产出损失达到了-49.6% 与-39.5%，数十倍于南方发达省份。而这些损失中，近两、三成均是来自于化工、金属冶炼与制造业。究其上游，主要是因这些地区以化石能源为主体的能源结构，比如山西、内蒙古与河北，其煤炭占一次能源消费比分别为 96.1%，95.4% 和 84.3%。而南方发达地区，其产出的绝对损失实则要高于一些北方地区，但相对损失却更小。以广东与浙江为例，其 2060 年产出损失将达到 1.19 与 0.62 万亿元 (-6.2% 与-6.7%)。而内蒙与甘肃的产出绝对损失为 0.54 与 0.49 万亿元 (-49.6% 与-39.5%)。从能源结构的角度也可以观察出南方地区更少依赖化石能源，比如广东与浙江的煤炭占比仅 42.6% 和 17.6%，其产出损失的最大来源是碳密集程度相对更低的电子信息产业（广东电子信息业损失占比为全局损失的 86.3%，其中 53.9% 由海外需求减少导致）。可见发展方式截然不同的地区，其面对碳中和约束的响应也不同，东部沿海地区显然更具经济韧性。

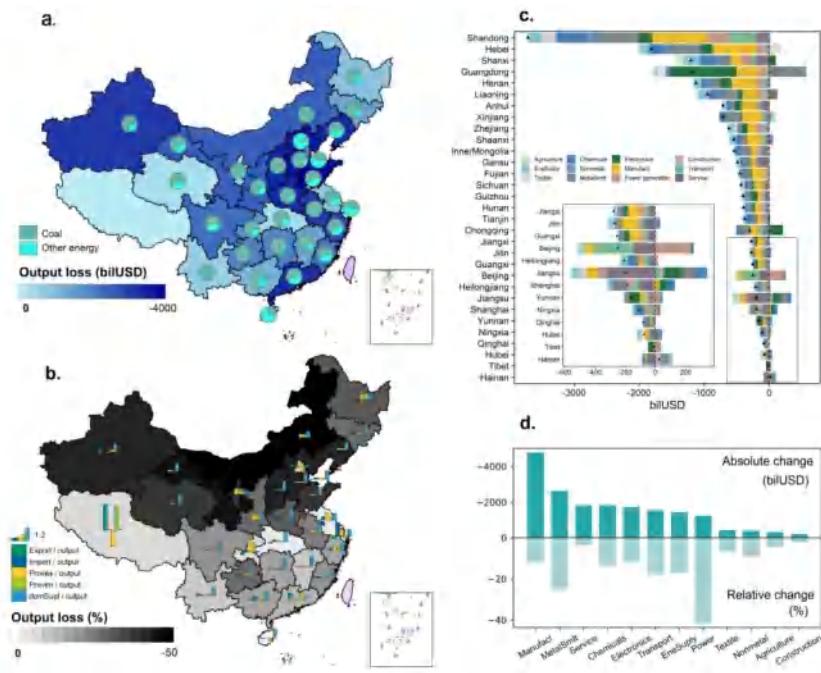


Figure 7.194: 2060 年中国各省各行业从 BaU 与 SaCI 情景的绝对和相对产出差距 (a). 各省绝对产出损失。饼图显示 2017 年一次能源消费中煤炭使用的比例; (b). 各省相对产出损失。条形图显示 2060 年总产出损失中的贸易和国内供应的占比; (c). 不同行业在各省的绝对损失; (d). 中国各行业的绝对 (上图) 和相对 (下图) 损失。此外, (b) 中的'Export' 意味着出口到其他国家, 'Provex' 意味着从一个省份流向其他省份, 'Import' 意味着从外国进口, 'Provim' 意味着从其他省份流入。'domSupl' 意味着某一省份生产的商品供应给其自己的国内市场

区域经济发展呈现不平等, 形成两级分化趋势。以人均 GDP 为基本单位, 本文计算发现全国基尼系数中枢上移, 自 0.27 增至 0.31。极差也在增加。2060 年 BaU 情景下, 人均 GDP 最低与最高的省份分别为甘肃 (19.8k\$) 和北京 (98.5 k\$), 而 SaCI 下分别为内蒙古 (11.1 k\$) 与北京 (97.2 k\$), 人均 GDP 的中位数在下降, 由安徽的 39.3 k\$ 下降至湖南为 36.9 k\$。从 GDP 总需求角度进行分类考察, 发现出口进口的省际差异是最大的, 基尼系数能达至 0.48 至 0.5 这个区间。由此可见, 总需求结构的省际变迁或许是这种地区经济发展不平衡的一种关键原因。其中, 能源供给业的产出结构性变化最明显, 渐趋集中于至生产成本较低的西南地区。以电力生产行业为例, 行业不平等指数 (同样以基尼系数为指标单位) 上升幅度很大, 自 0.48 上升至 0.79。2060 年, 模型结果显示天然气生产将大量集中于重庆与四川, 集中度可能从 55.7% 上升至 80.9%。基于模型的投资外生这种闭合方式, 造成这种生产的区域间变迁的原因大部分是由于需求的变化, 即各消费主体倾向于购买价格更为低廉的产品。故这些产品的生产将更多地在那些禀赋较好, 成本较低的地区来完成。这一建模过程可能相对忽视了生产主体的内生技术进步与自主性产业转移的影响, 这一点留待以后验证与探讨。

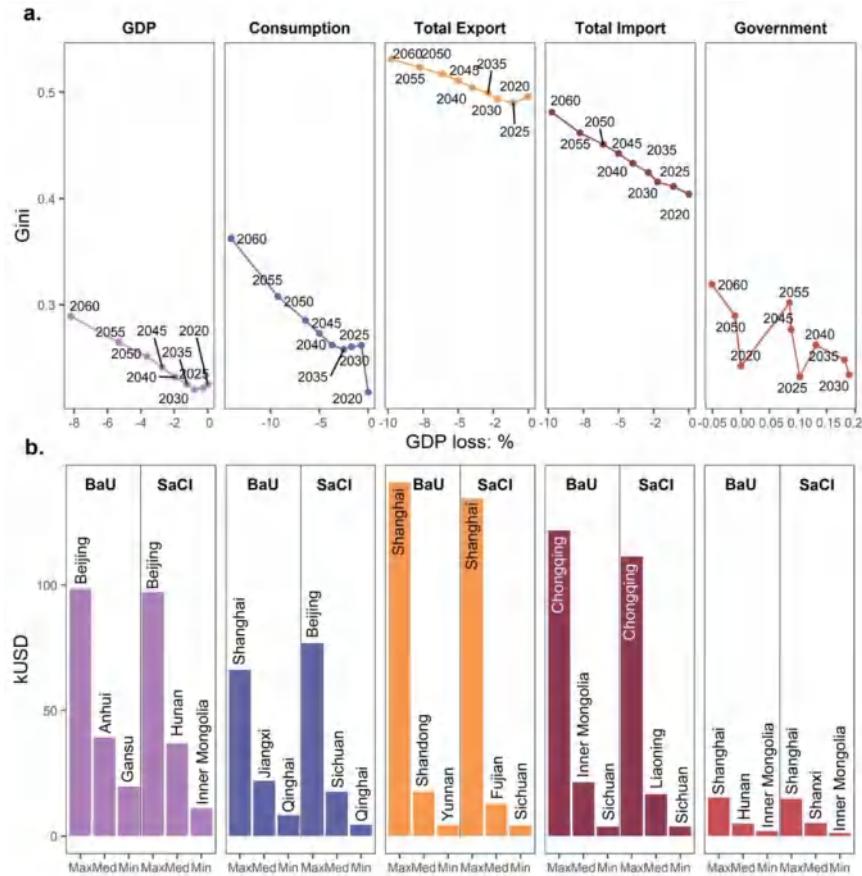


Figure 7.195: 各省在 BaU 和 SaCI 情景下的基尼系数和宏观经济指标 (a). 宏观经济损失 (x 轴) 与基尼系数 (y 轴) (b). 每个宏观经济指标在 BaU 和 SaCI 情景下的 2060 年最大值、中位数和最小值。所有宏观经济指标均以人均水平计算

东部沿海发达地区的产业结构愈发低碳化的同时，并没有改变太多其原本的产出结构比例。碳中和抬升了化石能源的使用成本，北方地区的支柱产业因此失去了大部分竞争力，但其他产业都暂无替代优势。北方地区作为一个整体，其能源生产产值占比下降：9.25% (2017bau) 0.49% (2060SaCI)，但在产值越发倚重服务业的同时，其服务业实则也经受了较大的产值损失 (-10%~30% 不等)。尽管北方地区被迫低碳，但以产值除以碳排放为衡量的碳生产力 (1 单位碳排放量所能带来的产出金额) 仍然低于东部发达地区。比如上海 2060 年 SaCI 情景下 1 吨碳排放能产出 \$85348，而内蒙古只有 \$20448。如果继续延续现行技术条件和经济趋势下，要想单纯用约束额度分配的方式既公平又效率地实现碳中和，有可能事与愿违。本文尝试了一共六种约束分配情景 (图7.193)，基于能力原则的分配，要求富裕省份多负担减排责任的方式确实能够缓解上文提到的区域不均衡发展问题。比如 CA 和 DE，使得人均 GDP 越高的省份得到更少的碳配额，这会降低总体的基尼系数。同样地，HS 要求累计排放越大的省份获得越高的碳配额，也有相似效果。但发达地区将会因此蒙受更大的经济压力，全国的 GDP 会提高，排放也会增加。最关键的是，发达地区蒙受的这些损失无法被传统地区因此获得的利益而补偿。比如自 SaCI 至 HS 情景，内蒙古的经济损失由 5379.1 亿美元下降至 2085.0 亿美元，但广东的损失由 11892.7 上升至 20943.5

亿美元。

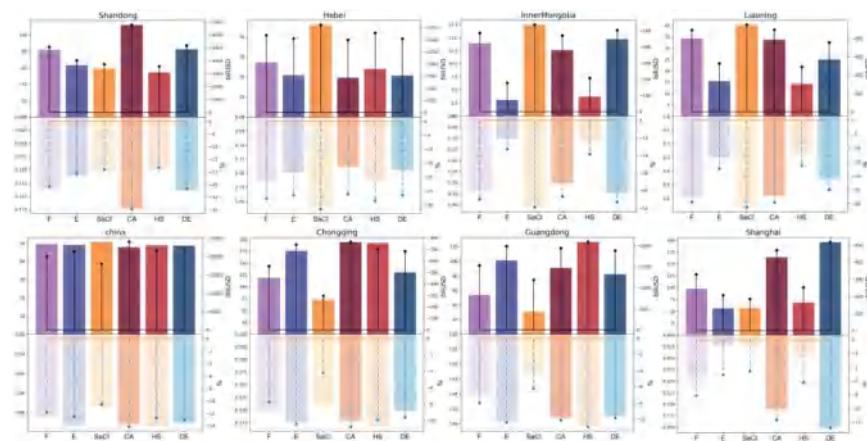


Figure 7.196: 不同情景下的 2060 年碳生产率、Theil 系数和产出损失的变化。上部面板采用深色表示碳生产率，下部面板采用浅色柱子表示 Theil 系数。此外，上部面板中的实线代表绝对值的总产出损失，下部面板中的虚线代表相对损失

引起区域差距的原因在于各省不同的碳减排成本，以及其对价格传导机制环节（碳 能源 宏观经济）的影响。我们运用多阶段回归的方法拆解出了碳政策的影响链条：政策 影子价格 能源价格 能源使用 + 产品价格 产出。可见当采用国家统一的碳减排目标时，因禀赋与发展程度的差异，各省份内部面临的压力是不同的。这种区域不同的压力不仅造成了不同的碳减排成本，也在价格传导机制中产生不同的影响。比如不同省份能源对于碳影子价格的边际响应是不同的。比如 SaCI 情景下，碳配额约束与潜在排放的差距每缩小一倍（这里，我们用 bau 的排放减去政策情景的约束目标排放，作为政策约束松紧度的一种近似表征），北方地区的人均产出会下降 \$23，而南方地区如江浙沪，仅下降 \$6.3。而前文提及的 DE 等情景将更加青睐北方地区的经济增长也在回归模型的边际政策响应关系中得到了进一步描述。图7.197详细描述了这种影响链条与响应关系。

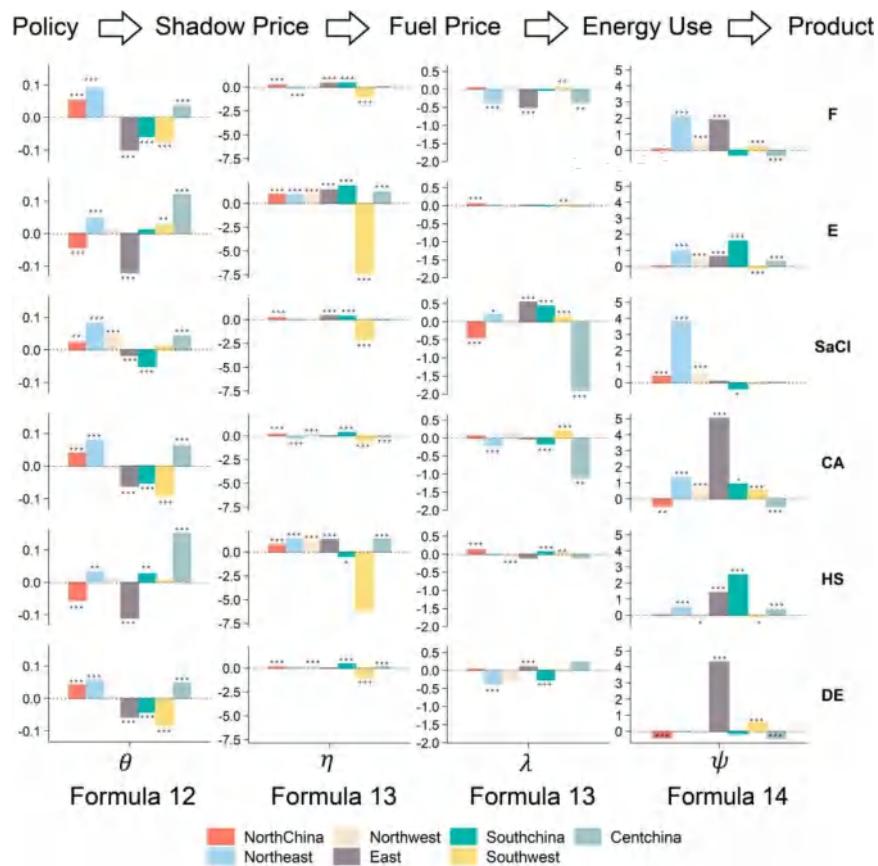


Figure 7.197: 碳政策的影响链条和回归模型影响系数及其统计显著性 (每列中的结果是公式第 12-14 式中关键解释变量和区域虚拟变量之间的交叉项估计系数。代表政策约束松紧度对碳影子价格的边际影响，代表政策约束松紧度对煤炭价格的边际影响，评估煤炭价格对煤炭消费的边际影响，估计能源对产品价格的边际影响。这里以电力部门的生产价格为例。所有变量均为情景损失的组成部分。统计显著性：* $p<0.1$; ** $p<0.05$; *** $p<0.01$)

根据敏感性分析结果，外生设置的全要素生产率 (TFP) 对模型结果影响比较大，其次是能源与其他要素的替代弹性 (VABE) 和能源效率改进参数 (EEI)。换言之，CGE 中生产函数的设置对结果影响最大。TFP 每变动 1%，GDP 损失这一结果可能会变动 10%-20%。而改变其他如 EEI 和 VABE，其结果变动程度均在 1% 以内。鉴于当前 CGE 模型的生产函数设置，闭合规则以及经济增长假设，建模者对于未来经济增长的假设和技术进步的预估将很大程度影响模型政策模拟的结果。这是需要研究者格外注意的。

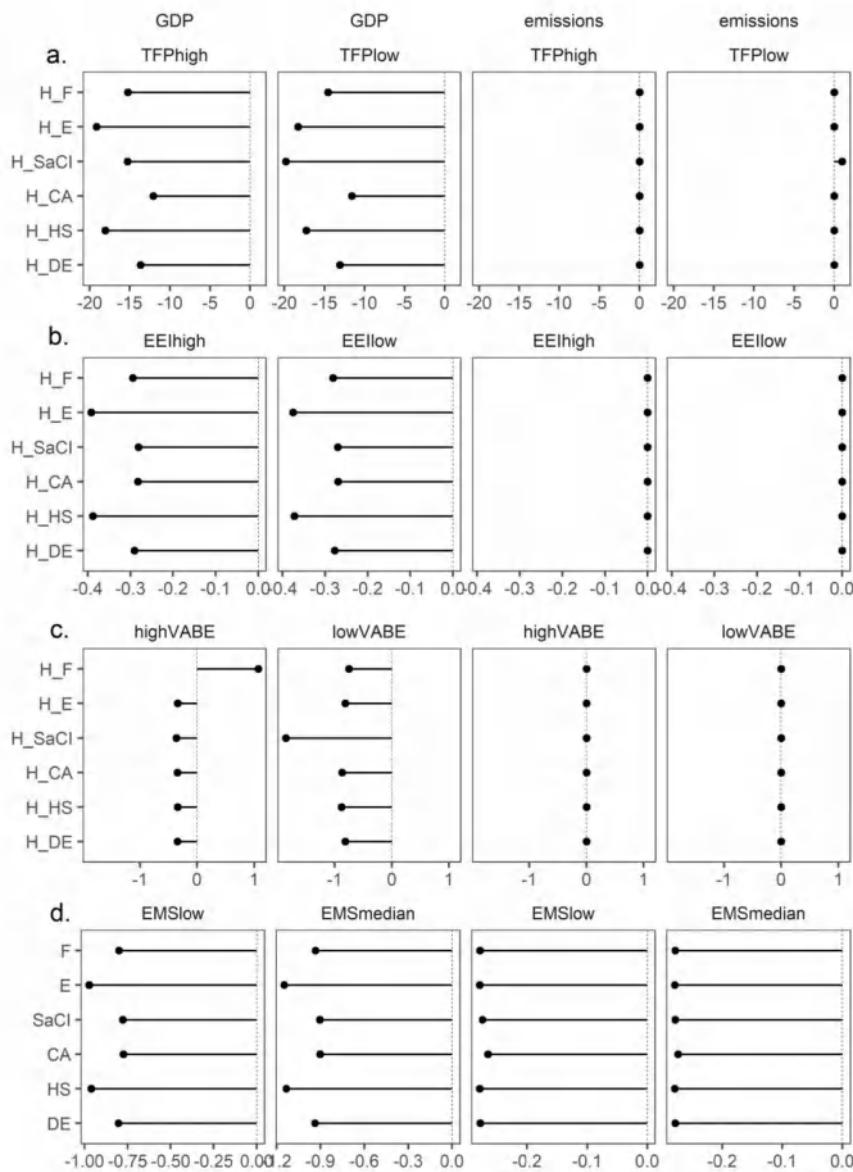


Figure 7.198: 以 GDP 损失和二氧化碳减排率为计的敏感性弹性值, (a) 总要素生产率 (TFP), (b) 能源效率改进参数 (EEI), (c) 能源和其他要素投入之间的替代弹性 (VABE), (d) 2060 年碳约束总量 (EMS)

研究结论

综上而言，本文着重刻画碳目标约束对各省传统产业和经济发展方式造成的冲击。冲击造成的损失可以视为未来碳中和催生的新经济业态所需要弥补的产出空白。北方地区的传统产业和以高碳密集型工业为主的产出需要引起格外重视，如果延续这种发展方式，很可能在碳中和政策下，这些重点的税收支柱将遭受比较大的损失。需要早做打算。中东部发达省份的经济韧性较强，产业结构平稳。结合过去十年的实际情况而言，或许正是因为这些地区转型及时，对新经济产业的布局比较

具有前瞻性。而这些都反应在了本文所使用的 2017 年基准年数据中。例如重庆的电子信息产业, 江浙沪的制造业 (新能源, 电池等)。在经济发展方式彻底革新之前, “区域均衡-减排效率”是矛盾权衡, 而非双赢目标。再公平的分配政策, 或许也没办法从根本上解决这一问题。各省份会根据自己的地区利益在碳目标分配中有不同的博弈需求, 这一多省份多部门的分析结果可用于地区识别自身利得与损失的定量工具, 在制定全盘政策中考察各地区各部门潜在得失分析中作为参考。

7.10.16 LEEEП 研究 | 气候变化对空气污染影响的模拟研究

- 原文标题: 气候变化对空气污染影响的模拟研究 [107]
- 发表年份: 2023
- 发表期刊: 北京大学学报自然科学版
- 作者: 吴雅珍, 李丹阳, 张霖, 戴瀚程 *
- [文章链接](#)
- [点击 LEEEП 微信公众号链接阅读推送原文](#)

摘要

该研究梳理了近年来气候变化对空气污染的影响相关主题的文献。进一步使用 WRF-Chem 模型, 基于 CMIP5 项目得到的 RCP8.5 情景气象数据和对未来人为排放变化的评估, 探究 2050 年相比于 2015 年的气候和排放变化对中国东部地区夏季臭氧浓度的影响, 并重点选取京津冀、长三角和珠三角 3 个地区进行分析。结果表明, 在 RCP8.5 情景下, 气候和排放变化都将对本世纪中叶中国夏季臭氧浓度产生较明显的影响。在中国大部分区域, 排放变化对臭氧浓度的影响较大, 但东海附近地区气候的影响也非常显著。

引言

气候变化和空气污染仍是全球广泛关注的焦点问题。针对全球和区域未来气候变化与空气污染的可能路径开展情景分析研究, 对于各国制定合理的政策来应对空气污染和气候变化问题具有重要意义。

气候变化与空气污染之间存在重要的相互影响链条。大气污染物可能改变辐射强迫, 进而影响气候, 而气候变化亦可能造成空气质量的恶化, 加剧空气污染造成的环境和健康负担。未来气候变化会通过温度和排放等机制加剧室外臭氧污染, 同时使室内空气污染也更加严重。基于此, 考察气候变化对空气污染的影响程度及其作用机理, 尤其是未来不同气候变化路径下这一影响的程度和时空分布, 具有重要的学术与现实意义。

该研究首先基于文献调研方法, 梳理和总结“气候变化对空气污染影响”主题研究的技术路线及各类模式的研究进展。在此基础上, 以中国京津冀、长三角和珠三角地区为研究对象, 使用 CMIP5 气候模式比较项目数据和 WRF-Chem 大气化学传输模式, 研究全球气候变化背景下, 未来气候变化与污染物排放路径趋势对 2050 年中国夏季近地面臭氧浓度的潜在影响, 评估臭氧对气候路径的敏感性, 比较气候与前体物排放变化对未来臭氧污染的影响程度以及相关影响的时空分布。

结果与讨论

气候变化对空气污染影响研究进展回顾

考察气候变化空气污染影响的文献可分为两类, 一类为使用统计方法开展的研究, 另一类为基于大气化学传输模式的研究。

统计类研究主要通过建立历史气象数据与空气污染之间的统计回归关系（例如地表臭氧浓度与近地面温度的关联），结合未来气象预测，估计气候变化情景下污染物浓度的变化。

按所研究时间的范围，模式研究可分为历史回溯型和未来预测型。回溯性研究主要基于气象再分析资料（数据源包括 NCEP、NASA-MERRA 和欧洲气象中心等）开展，使用全球或区域大气化学传输模式（空气质量模式），考察较长时期内平均气候变化对 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度等的影响。未来预测型研究可直接使用全球气候化学模式或地球系统模式开展，亦可使用 CMIP5 或 CMIP6 项目提供的其他全球气候模式或气候化学模式的气象结果驱动全球或区域大气化学传输模式，预测未来变化对空气质量的影响。

下表汇总了基于全球气候化学模式、全球大气化学传输模式、区域空气质量模式 3 类方法的研究进展。

文献来源	类别	具体模式	区域	年份	物种	情景
Nassikas 等[31]	区域模式	全球气象场: CESM, CM3 区域空气质量: WRF-CMAQ	美国	2000—2095	PM _{2.5}	RCP8.5
Ingraham 等[32]	全球 CTM	TM5-FASST	全球	2010—2050	PM _{2.5}	SSP1-2.6 + RCP2.6/RCP8.5
Guzman 等[33]	区域模式	WRF-Chem	欧洲	1991—2050	PM _{2.5} +NO _x	RCP8.5
徐北周等[34]	区域模式	RegCM-Chem-YIBs	中国	2015—2030	PM _{2.5} +O ₃	RCP4.5 “气象场+中国碳中和情景排放路径”
Nguyen 等[35]	区域模式	WRF-CMAQ	东南亚	2014—2050	PM _{2.5} +O ₃	RCP4.5
Faure 等[36]	区域模式	全球气象场: CESM1-CCSM4, CM3 区域空气质量: WRF-CMAQ	美国	2000—2095	O ₃	RCP8.5
Zanis 等[37]	全球 CCM	对比 5 个全球 CCM	全球	2015—2100	O ₃	SSP3-7.0
Ban 等[38]	全球 CCM	UKESM1-0-L1	全球	1995—2080	O ₃	SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5
Zhang 等[39]	区域模式	WRF-Chem	美国	2001—2055	O ₃	A1B, B2
Coelho 等[40]	区域模式	WRF-CAMx	葡萄牙	2013—3030	PM ₁₀ , PM _{2.5} , NO _x , O ₃	RCP8.5
Huang 等[41]	区域模式	WRF-Chem	中国	2010—2040	PM _{2.5}	RCP4.5
Liu 等[42]	区域模式	WRF-CMAQ	中国	2015—2050	PM _{2.5}	RCP8.5
Ascenso 等[43]	区域模式	WRF-ChIMERE	欧洲南部	2003—2097	O ₃	RCP8.5
Woo 等[44]	全球 CTM	GEOS-Chem	美国阿拉斯加州	2000—2050	PM _{2.5} (野火相关)	A1B
Iglesias-Suarez 等[45]	全球 CCM	CESM (CAM-Chem)	全球	2000—2100	O ₃	RCP2.6, RCP6.0, RCP8.5
Moghani 等[46]	兼有	区域模式: WRF-CAMx 全球 CTM: CESM, GEOS-Chem	美国加州	2016—2050	O ₃	RCP8.5
Nguyen 等[47]	区域模式	CMIP5-CESM+WRF+CMAQ	东南亚	2014—2100	PM _{2.5} +O ₃	RCP4.5, RCP8.5

Figure 7.199: 2016 年以来“未来预测型”模式研究文献汇总

研究结果

(1) 时空变化特征

气候变化对中国东部地区臭氧浓度的影响存在较明显的时空差异。在京津冀地区，未来气候和排放的变化都使臭氧浓度升高，且对日间臭氧浓度的影响大于夜间。与 2015 年相比，在 2050 年的气候条件下，相同的人为排放增加将使臭氧浓度升高更多。与气候变化相比，人为排放的增加对中国东部地区近地面臭氧浓度的影响更大。同时，气候变化的影响与排放变化的影响之间存在相互作用，即气候变化可能会通过影响臭氧生成化学机制的改变来影响臭氧浓度对排放变化的响应。

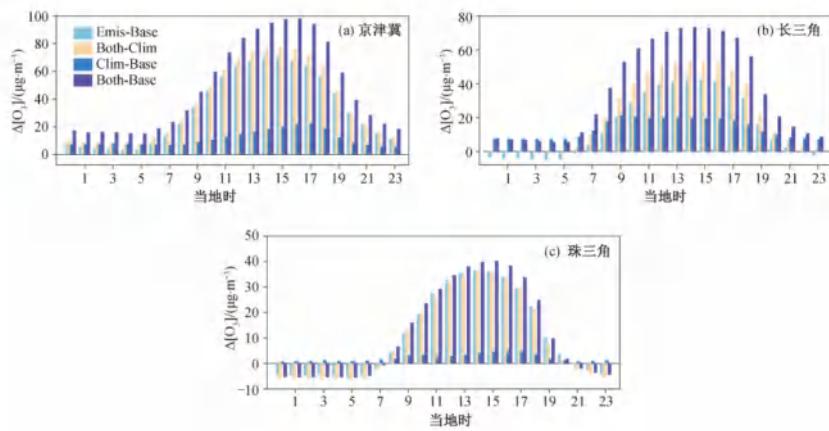


Figure 7.200: 京津冀、长三角和珠三角地区 7 月臭氧浓度日变化的情景差异

(2) 空间分布特征

气候和人为排放变化对北方地区臭氧浓度的影响大于南方地区。人为排放的增加使京津冀地区地表臭氧浓度平均升高 $32.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，远大于对长三角和珠三角地区的影响（两地臭氧浓度分别升高 15.4 和 $10.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ）。气候变化对陆地近地面臭氧浓度的影响比排放变化的影响小，但却使得长江入海口以北的东海洋面上臭氧浓度升高 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上。

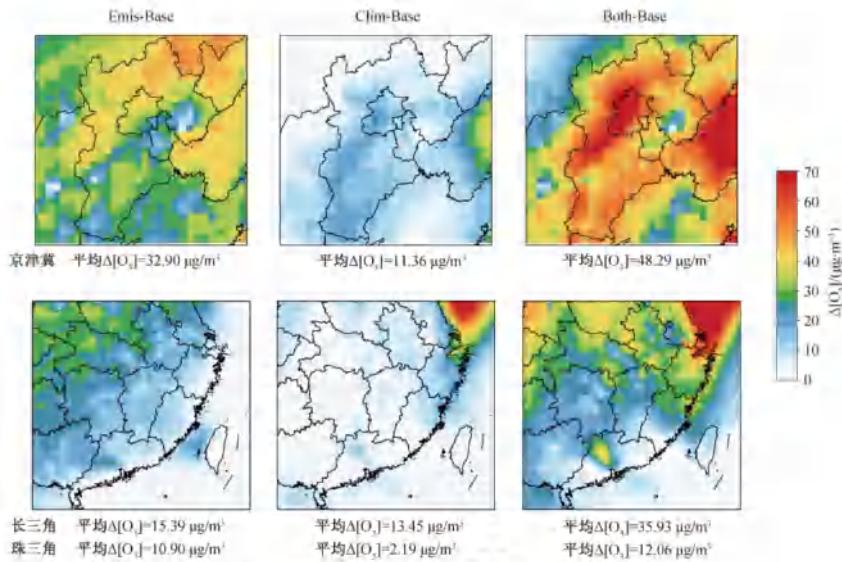


Figure 7.201: 京津冀（第一行）与中国南方地区（第二行）各情景与基线情景之间月平均近地面臭氧浓度差异的空间分布

该研究进一步考察 Clim 情景下模拟得到的 2050 年气象要素和 2015 年之间的差异，分析其对未来臭氧生成、传输等过程的潜在影响机制。臭氧生成的光化学反应速率是影响区域臭氧浓度的重要因素，而气温和辐射等气象条件对光化学反应速率有显著影响。特别是在诸如长三角等前体物

排放强度较高的地区，气候变化的这一影响可能更显著。其次，气候变化将带来近地面水平风速和风向的变化，从而可能改变臭氧的传输模式，影响臭氧的扩散清除和空间分布。

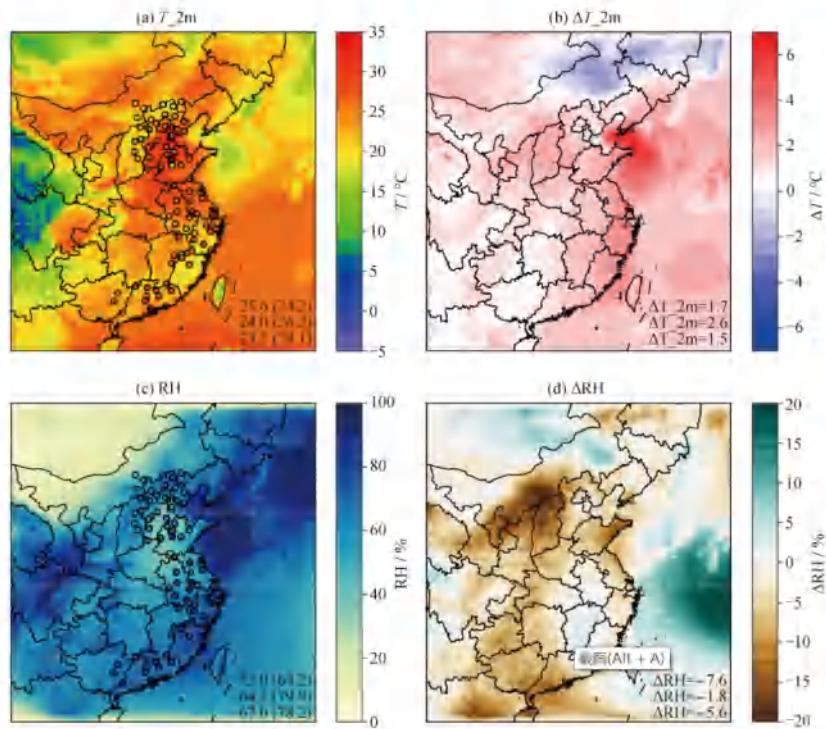


Figure 7.202: 气候变化 (Clim) 情景下中国东部地区 2050 年 7 月 (右列) 地面温度 (T_{2m}) 与相对湿度 (RH) 模拟结果相较于 2015 年 7 月 (左列) 的变化

结论与讨论

研究结果表明未来气候变化和人为排放导致的臭氧前体物的增加均会使中国东部地区地表臭氧浓度增加，且人为排放的增加对臭氧浓度的影响比气候变化的影响更大。由于对流层臭氧污染的增加将通过增加辐射强迫引起进一步的气候反馈，到 2050 年，在京津冀地区和长三角地区，气候变化下的气象场变化将使同等污染排放水平下的臭氧污染更严重，而在珠三角地区该现象并不显著；在多数时段，二者综合作用的影响略小于二者单独影响的加和。这说明气候与排放变化之间存在较复杂的反馈机制。

通过梳理“气候变化对空气污染影响”主题的文献可以发现，直到近期针对“气候变化对未来空气污染影响”的模式研究绝大多数仍基于 CMIP5 项目的全球气象场数据或全球气候模式开展，相应地，所使用的情景为 IPCC 第三代 SRES 情景或第四代 RCP 情景。目前，新一阶段气候比较项目 CMIP6 的全球气象场数据结果以及相应的第五代 SSP 情景在本领域研究中的应用相对缺乏。预期未来将有更多的研究基于 CMIP6 气候模拟框架和 SSP 情景，进一步优化全球和区域尺度上气候变化与空气污染交互影响的研究。此外，虽然目前全球气候化学模式和部分区域模式已实现气候模块和大气化学模块之间的在线反馈，但对其中物理化学作用机制的认识及模型中的参数化方案还有改进的空间。由于污染物对气象反馈作用的影响不可忽视，未来的理论研究和模型应用都可以加强此方面的探索，以期提高气候化学模式和大气化学传输模式对污染模拟的准确性。

7.10.17 LEEEП 研究 | 经济增长与结构变化对亚洲国家碳污排放的影响

- **原文标题:** 经济增长与结构变化对亚洲国家碳排放与空气污染物排放的影响 [108]
- **发表年份:** 2023
- **发表期刊:** 生态经济
- **作者:** 吴雅珍, 马啸天, 吴凯, 黄晨, 戴瀚程 *

摘要

为考察 21 世纪以来亚洲不同国家和地区碳排放与空气污染物排放的驱动因素, 尤其是社会经济发展和结构转型引起的经济体量和结构变化对各国排放的影响, 论文使用两类分解研究方法, 分析了中国、印度、日本等 9 个亚洲国家和地区 2004—2014 年碳排放与空气污染物排放的主要驱动因素, 定量识别了各因素对排放量变化的绝对与相对贡献。在经济结构因素方面, 首先基于 KAYA 和 LMDI 分解法初步分析了经济结构可能的贡献大小, 并进一步基于 SDA 分解法具体考察了 GDP 部门产出结构比例的影响, 以及 GDP 中投资、消费、出口占比及其结构对排放的分别影响。研究发现, 经济规模增长是亚洲各个发展中国家排放量上升最重要的驱动力; 同时, 排放系数的下降对绝大部分亚洲地区排放量影响也很大。与此二者相比, 经济结构变化对于各国排放量变化的影响较小, 约小一个数量级, 这也意味着各国在经济结构方面可能尚有较大的减排潜力。

7.10.18 LEEEП 研究 | 粤港澳大湾区低碳发展的空气质量改善健康经济效益研究

- **原文标题:** Health and economic benefits of reducing air pollution embodied in GBA's green and low-carbon development [109]
- **发表年份:** 2023
- **发表期刊:** Urban Climate
- **作者:** Xie Yang, Liu Xiaorui, Li Danyang, Zhao Mengdan, Weng Zhixiong, Zhang Lin, Xu Meng*
- **文章链接:** [点击 LEEEП 微信公众号链接阅读推送原文](#)

研究背景

中国工业化和城市化的快速发展造成严重的 PM_{2.5} 和 O₃ 污染。2022 年, 中国 PM_{2.5} 年均浓度 (以下简称 PM_{2.5} 浓度) 达 29.0 μg/m³, 约为 WHO 标准值的 6 倍; O₃ 日最大 8 小时平均浓度年均值 (以下简称 O₃ 浓度) 达 145.0 μg/m³, 与 2021 年相比增加了 5.8%, 约为 WHO 标准值的 1.4 倍。PM_{2.5} 的高浓度水平和 O₃ 浓度的上升趋势反映了大气污染的复杂性和严重性, 也将带来人群健康和社会经济损失。为治理大气污染并减少其带来的不利影响, 我国近年来颁布了一系列清洁空气行动方案。与此同时, 中国作为世界上最大的碳排放国, 已明确提出双碳战略目标, 并制定了一系列气候变化减缓措施。评估气候变化减缓与大气污染防治背景下空气质量改善健康经济效益, 有助于社会应对减缓气候变化、控制空气污染和改善公众健康的多重挑战, 促进以协同的方式实现碳减排目标、空气质量目标和健康中国目标。

粤港澳大湾区由广东省的九个城市和两个特别行政区 (香港和澳门) 组成, 它是中国经济最发达、城市化程度最高的地区之一, 其面积占中国国土面积的 1% 以内, 却贡献了约 11% 的经济产

出。经济的快速发展带来了一定程度的空气污染，对居民健康构成了巨大威胁。因此，有必要详细评估粤港澳大湾区不同气候变化减缓和大气污染治理情景下空气质量改善健康经济效益，以推进区域绿色低碳可持续发展。

本研究通过应用北京大学 LEEEP 团队自主开发的 IMED | CGE 能源经济模型，进一步耦合 WRF-Chem 空气质量模型和 IMED | HEL 健康评价模型，定量评估粤港澳大湾区 1.5°C 目标与大气污染治理情景下 $\text{PM}_{2.5}$ 与 O_3 空气质量改善程度及其健康经济协同效益，分析各类措施在不同时期对空气质量改善、人群健康水平提升的贡献度。研究结果有助于识别未来影响粤港澳大湾区空气质量的主要污染物类别及其健康经济影响，可为优化区域减污降碳协同路径提供政策启示。

研究方法

基于课题组前期关于粤港澳大湾区绿色低碳背景下能源转型路径与碳减排潜力的研究，本研究通过耦合 IMED | CGE、WRF-Chem 和 IMED | HEL 模型，建立了碳减排与清洁空气政策综合评价体系，从“能源—环境—健康—经济”层层递进的角度深入研究实现碳减排与清洁空气目标的综合影响（图7.203）。在情景设计中，基于不同气候目标设置了基准情景（BAU）和 1.5°C 目标情景（ 1.5degree ），基于不同清洁空气治理措施设置了冻结情景（Frozen）和清洁空气情景（CLE），在此基础上，最终构建 BAU_CLE、 $1.5\text{degree}_\text{Frozen}$ 和 $1.5\text{degree}_\text{CLE}$ 三类情景，用以模拟实施不同气候策略和清洁空气政策对区域空气质量和健康经济效益的影响。

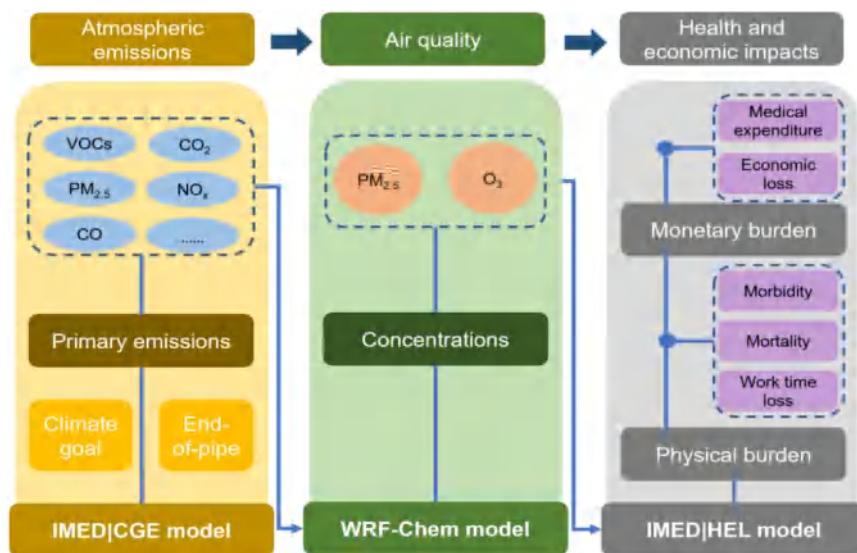


Figure 7.203: 研究框架图

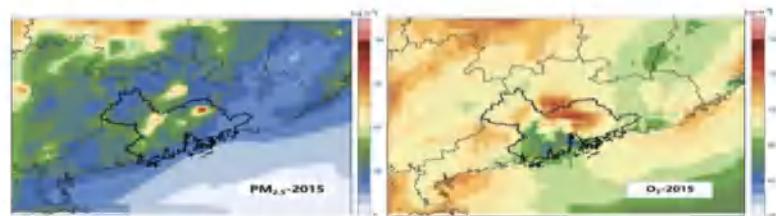
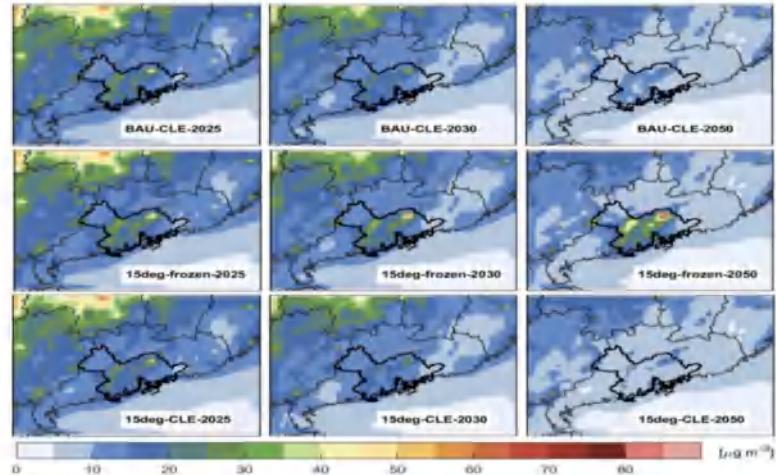
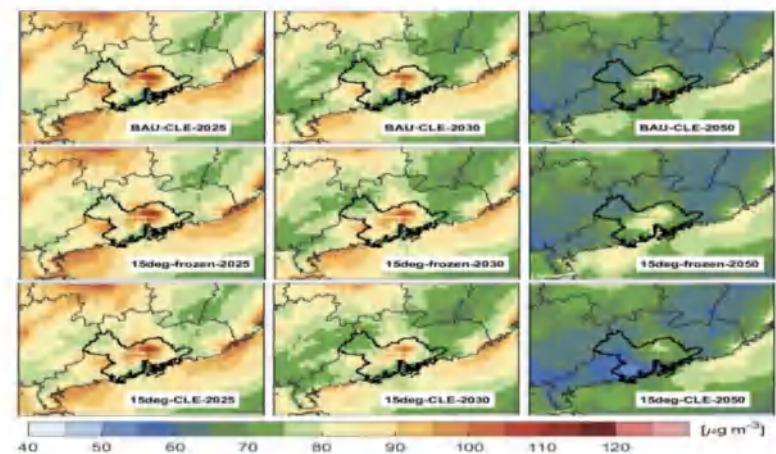
研究结果

空气污染浓度

2015 年，大湾区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度为 $27.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。2015-2050 年，除 $1.5\text{degree}_\text{Frozen}$ 情景外，所有情景下 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均呈下降趋势。BAU_CLE 情景下，2025 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度为 $17.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，2050 年将下降至 $9.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。 $1.5\text{degree}_\text{CLE}$ 情景下，2025-2050 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度将从 $16.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 下降到 $8.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。而在 $1.5\text{degree}_\text{Frozen}$ 情景下，2025-2050 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化呈 u 型分布，最低水平出现在 2030 年 ($17.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)，并将增加至 2050 年的 $19.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，

表明仅实施减缓气候变化策略无法有效降低未来大湾区 PM_{2.5} 浓度，有必要实施清洁空气政策。

2015 年，大湾区 O₃ 浓度为 201.2 μg/m³。2015-2050 年，所有情景下 O₃ 浓度均呈下降趋势。BAU_CLE 情景下，2050 年 O₃ 浓度将比 2015 年下降 23.0%。与 1.5degree_Frozen 情景相比，1.5degree_CLE 情景下 2030 年和 2050 年 O₃ 浓度将分别下降 8.5 和 22.1 μg/m³，实施清洁空气政策在一定程度上有利于减少大湾区 O₃ 污染。对比 BAU_CLE 和 1.5degree_CLE 情景的结果发现，实现 1.5°C 目标将有助于 O₃ 浓度在 2030 年和 2050 年分别减少 1.6 μg/m³ 和 13.1 μg/m³，实现气候目标带来的 O₃ 污染改善效果低于由实施清洁空气政策带来的效果。

A) PM_{2.5} and O₃ concentrations in 2015**B) PM_{2.5} concentrations in 2025-2050****C) O₃ concentrations in 2025-2050**Figure 7.204: 2015-2050 不同情景下 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度

浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	情景	年份			
		2015	2025	2030	2050
$\text{PM}_{2.5}$	BAU_CLE	28.0	17.1	14.8	9.6
	1.5degree_Frozen	28.0	18.2	17.5	19.2
	1.5degree_CLE	28.0	16.1	13.5	8.4
O_3	BAU_CLE	204.5	191.4	182.3	157.5
	1.5degree_Frozen	204.5	193.0	189.3	166.4
	1.5degree_CLE	204.5	191.7	180.7	144.4

Figure 7.205: 2015-2050 不同情景下 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 浓度

健康影响—过早死亡人数

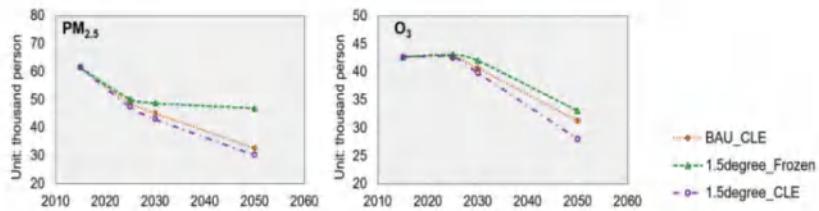
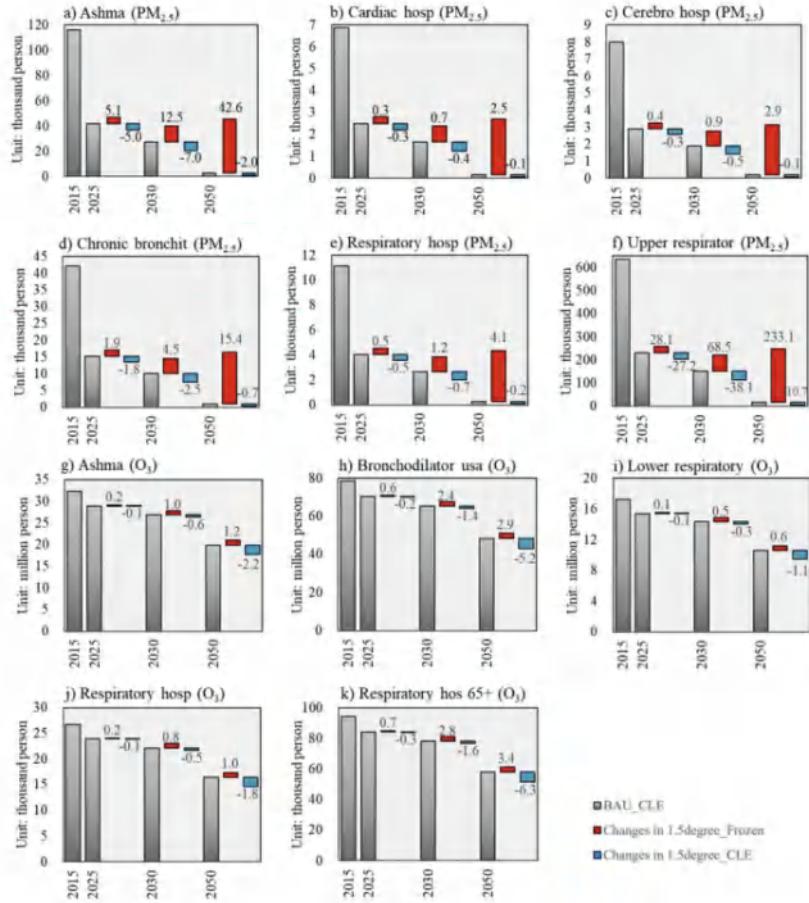
2015 年，大湾区由 $\text{PM}_{2.5}$ 污染造成的过早死亡人数约为 6.14 万人。对比 BAU_CLE 和 1.5degree_CLE 情景的结果发现，实现 1.5°C 目标将在 2025 年、2030 年和 2050 年分别减少 1400 (2.8%)、2200 (4.8%) 和 2500 (7.7%) 过早死亡人数。实施清洁空气政策将在 2025 年、2030 年和 2050 年分别减少 2700 (5.4%)、5600 (11.6%) 和 16700 (35.6%) 过早死亡人数。

与 $\text{PM}_{2.5}$ 相比，由 O_3 污染造成的过早死亡人数较少。2015 年，大湾区与 O_3 污染相关的过早死亡人数约为 4.27 万人。实现 1.5°C 目标将使过早死亡人数在 2025 年、2030 年和 2050 年分别减少 0.3%、2.0% 和 10.4%。实施清洁空气政策将使过早死亡人数在 2025 年、2030 年和 2050 年减少 1.1%、5.2% 和 15.2%。

健康影响—致病人数

2015 年，大湾区由 $\text{PM}_{2.5}$ 污染造成的致病人数达 81.92 万人，其中上呼吸道疾病发病率最高 (77.3%)，其次是哮喘 (14.2%)、慢性支气管炎 (5.1%)。实现 1.5°C 目标将在 2025 年和 2050 年分别减少 3.5 万例 (11.8%) 和 1.38 万例 (67.3%) 致病数。对比 1.5degree_Frozen 和 1.5degree_CLE 情景的结果发现，实施清洁空气政策可使 2025 年和 2050 年致病人数分别减少 7.13 和 31.44 万人。与气候减缓战略相比，实施清洁空气政策对减少与 $\text{PM}_{2.5}$ 相关的疾病发病率的贡献更大。

由 O_3 污染引起的致病数显著高于 $\text{PM}_{2.5}$ 。此外，实现 1.5°C 目标将使 2025-2050 年致病人数减少 0.3%-10.8%，可避免的致病人数显著低于 $\text{PM}_{2.5}$ 。对比 1.5degree_Frozen 和 1.5degree_CLE 情景的结果发现，实施清洁空气政策可使由 O_3 污染导致的致病人数显著减少。

A) Mortality**B) Morbidity by disease type**Figure 7.206: 不同情景下由 PM_{2.5} 和 O₃ 污染导致的过早死亡人数 (A) 和致病人数 (B)**健康影响—工作时间损失**

2015 年，大湾区由 PM_{2.5} 污染造成的人均工作时间损失为 3.1h。实现 1.5°C 目标对减少由 PM_{2.5} 污染造成的工作时间损失的影响十分有限，2030 年为 0.1 小时，2050 年为 0.06 小时。实施清洁空气政策可使由 PM_{2.5} 造成的人均工作时间损失在 2030 年和 2050 年分别减少 0.5 小时和 1.4 小时，显著高于由实现 1.5°C 目标带来的效果。

由 O₃ 污染造成的工作时间损失显著高于 PM_{2.5}。2015 年，O₃ 污染造成的人均工作时间损失为 4.8h。此外，实现 1.5 °C 目标可在 2030 年和 2050 年使 O₃ 污染造成的工作时间损失减少

0.1 小时和 0.4 小时。实施清洁空气政策可使由 O_3 污染造成的人均工作时间损失在 2030 年和 2050 年分别减少 0.3 小时和 0.5 小时，高于由实现 1.5°C 目标带来的效果。

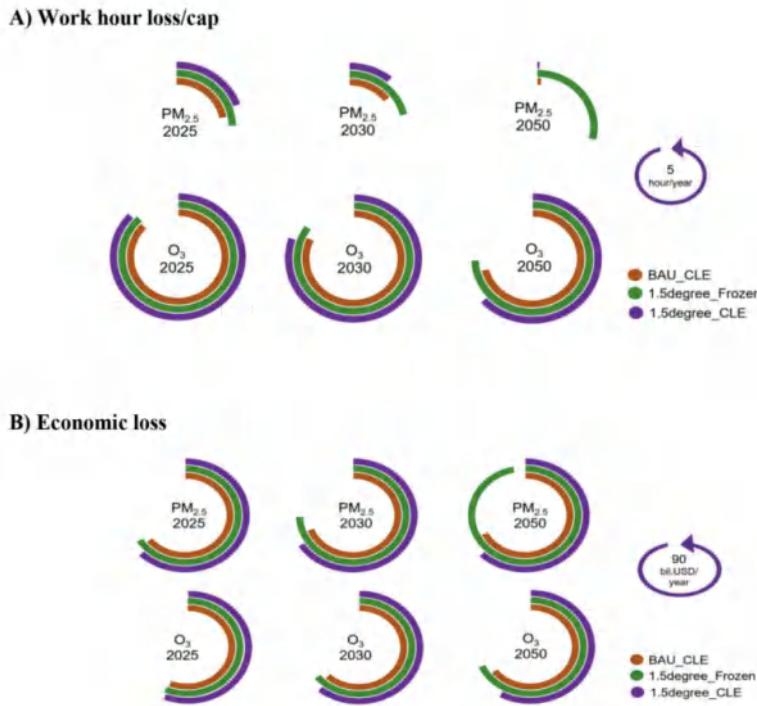


Figure 7.207: 不同情景下由 $PM_{2.5}$ 和 O_3 污染导致的工作时间损失 (A) 和生命价值损失 (B)

与健康相关的经济影响—生命价值损失

2015 年，大湾区由 $PM_{2.5}$ 污染造成的生命价值损失为 533 亿美元。2025-2030 年，各类情景下由 $PM_{2.5}$ 造成的生命价值损失均呈上升趋势；2030 之后，BAU_CLE 和 1.5degree_CLE 情景下的生命价值损失呈下降趋势，而 1.5degree_Frozen 情景下相应的生命价值损失将增加。实现 1.5°C 目标可在 2030 年和 2050 年分别节省 30 亿美元和 47 亿美元生命价值损失。实施清洁空气政策可使由 $PM_{2.5}$ 造成的生命价值损失在 2030 年和 2050 年分别减少 78 亿美元和 310 亿美元。实施清洁空气政策在减少与 $PM_{2.5}$ 污染相关的生命价值损失方面效果更为显著。

与 $PM_{2.5}$ 相比，由 O_3 污染造成的生命价值损失较低。2015 年，大湾区由 O_3 暴露造成的生命价值损失约为 371 亿美元。在 2025-2050 年，各类情景下由 O_3 暴露造成的生命价值损失均呈上升趋势。实现 1.5°C 目标可在 2030 年和 2050 年分别节省 11 亿美元和 61 亿美元生命价值损失。实施清洁空气政策可使由 O_3 污染造成的生命价值损失在 2030 年和 2050 年分别减少 30 亿美元和 93 亿美元。实施清洁空气政策在减少与 O_3 污染相关的生命价值损失方面的效果是显著的。在大湾区，与 O_3 污染相关的生命价值损失随着时间的推移而增加，这意味着 O_3 暴露将给当地造成不可忽视的经济负担。

与健康相关的经济影响—医疗支出

2015 年，大湾区由 $PM_{2.5}$ 污染导致的医疗支出为 2110 万美元。除 1.5degree_Frozen 情景下 2030-2050 年外，其他情景的医疗支出在未来均呈现出下降的趋势。实现 1.5°C 目标可在

2030 年和 2050 年分别节省 130 万美元和 40 万美元医疗支出。实施清洁空气政策可使由 PM_{2.5} 造成的医疗支出更为显著的降低，在 2030 年和 2050 年分别减少 350 万美元和 810 万美元。

O₃ 污染造成的医疗支出显著高于 PM_{2.5}。2015 年，大湾区由 O₃ 污染造成的医疗支出为 13.482 亿美元。各类情景下未来年份相应的医疗支出均呈现出下降的趋势。实现 1.5°C 目标可使与 O₃ 污染相关的医疗支出在 2030 年和 2050 年分别减少 2330 万美元和 8980 万美元，相应的，实施清洁空气政策可使与 O₃ 污染相关的医疗支出在 2030 年和 2050 年分别减少 6370 万美元和 1.386 亿美元。结果表明，推动绿色低碳发展在降低与 O₃ 污染相关的医疗支出方面的效果显著高于 PM_{2.5}。

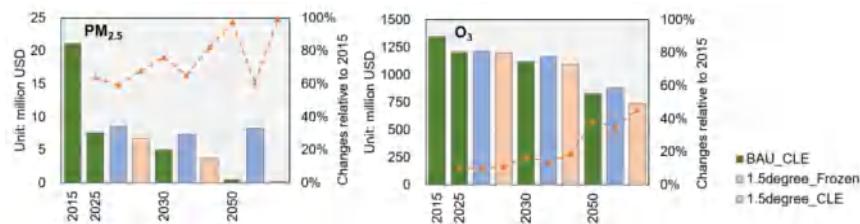


Figure 7.208: 不同情景下由 PM_{2.5} 和 O₃ 污染导致的医疗支出（柱状图，对应左 Y 轴）和相比于 2015 年的医疗支出变化（折线图，对应右 Y 轴）

研究结论

本研究评估了在粤港澳大湾区 1.5°C 目标和清洁空气政策情景下与 PM_{2.5} 和 O₃ 暴露相关的健康经济影响。结果发现：(1) 在 1.5°C 目标和清洁空气政策作用下，2050 年大湾区 PM_{2.5}(8.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 和 O₃ (144.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 浓度仍远超 WHO 规定的指导值；(2) 大湾区未来治理 O₃ 污染难度较大，绿色低碳背景下，2050 年 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度分别下降约 55.2% 和 12.8%；2050 年 O₃ 污染造成的过早死亡人数与 PM_{2.5} 污染相当，而 O₃ 污染导致的致病人数显著高于 PM_{2.5}。因此大湾区需要采取更积极的 O₃ 污染治理措施；(3) 与清洁空气政策相比，减缓气候变化对空气质量改善的额外改善作用较小，2050 年，实现 1.5°C 目标可避免的与 PM_{2.5} 污染相关的过早死亡人数、致病人数和工作时间损失分别为实施清洁空气政策情景下的 15.0%、4.3% 和 76.5%，实现 1.5°C 目标可避免的与 O₃ 污染相关的过早死亡人数、致病人数和工作时间损失分别为实施清洁空气政策情景下的 65%、11.4% 和 98.7%。因此应实施积极的清洁空气行动方案，以有效避免由空气污染导致的健康影响和相关的经济后果。

7.10.19 LEEEP 合著 | 张远航、戴瀚程：生态文明时代大气环境治理的变革与转型

- 原文标题：生态文明时代大气环境治理的变革与转型 [110]
- 书名：全球变局下的中国机遇与发展
- 发表年份：2023
- 作者：张远航、戴瀚程
- 点击 LEEEP 微信公众号链接阅读推送原文

写在前面

日前，由北京大学环境科学与工程学院张远航院士、戴瀚程研究员联名撰写的《生态文明时代大气环境治理的变革与转型》观点性文章，收录于由中共北京市委委员，北京市科学技术研究院党组书记方力研究员主编的《全球变局下的中国机遇与发展》（ISBN：9787010249667）公开发表，由人民出版社出版、发行。本书由中关村全球高端智库联盟推出，汇聚了 20 位知名科学家，经济学家，传媒学家的前沿观点，并由中共第十九届中央委员，中国科学院原院长白春礼院士作序。

本书通过经济、科技、高新产业、环境和传播五个篇章，解读了在全球大变局下，中国应该如何应对各种挑战，优化经济布局，强化科创引擎，参与全球治理，携手国际社会来抓住机遇，实现长足发展。其中环境篇聚焦于生态文明时代的环境污染治理及能源技术创新的现状与机制。

本文作为本书环境篇首讲，详尽梳理了我国大气污染特征与防治历程的演变，深度分析了大气复合污染与气候变化的关联，并进一步探究了“双碳”战略推动减污降碳深度融合的机制和潜力，最后从多元视角讨论了深度生态文明理念下实现碳中和与空气质量根本改善的转型之道。以下是全文转摘。



Figure 7.209: 全球变局下的中国机遇与发展

摘要

伴随着大气污染防治攻坚战和蓝天保卫战的全面扎实推进，我国空气质量已取得阶段性显著改善，更多的蓝天白云取代了灰霾天气，越来越多的城市空气质量实现了达标。但近年来，臭氧污

染成为大气环境管理的新难题，**大气复合污染**问题仍然突出。与此同时，在国内高质量发展转型需求和国际应对气候变化行动的共同推动下，我国加快减污降碳的决心和信心也在不断增强，提出了“二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和”的战略目标（简称“双碳”战略）。在经济发展转型关键期和环境质量优化攻关期叠加的当下，如何抓住新一轮**科技革命和产业变革**这一前所未有的历史机遇，同时实现空气质量根本改善和碳达峰、碳中和的目标，其关键是推动生态文明理念下的**减污和降碳的深度融合**。本文将梳理我国大气污染特征与防治历程的演变，分析大气复合污染与气候变化的关联，考察“双碳”战略推动减污降碳深度融合的机制和潜力，探讨生态文明理念下实现碳中和与空气质量根本改善的转型之道。

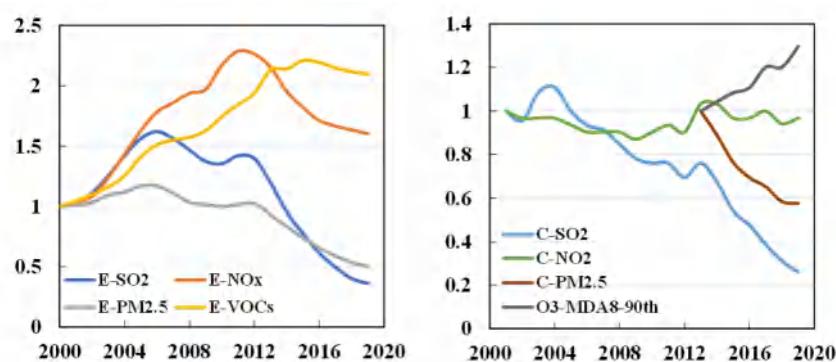


Figure 7.210: 近 20 年我国大气污染主要指标变化趋势（2000 年或 2013 年指标值为 1）左：排放量；右：环境浓度（PM_{2.5} 和 O₃ 为 74 城市平均）

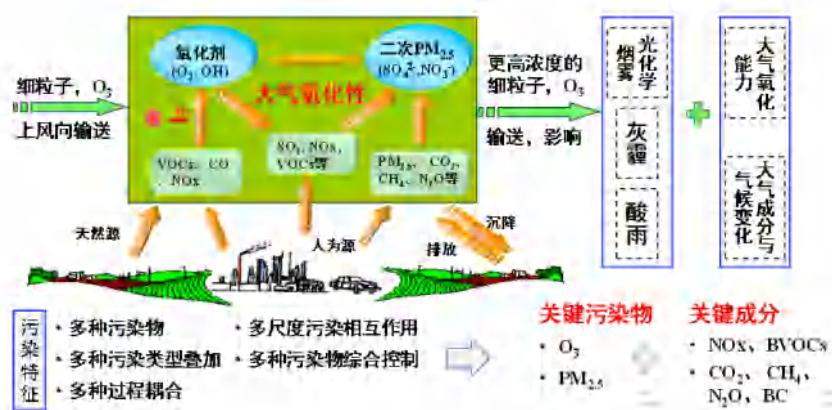


Figure 7.211: 大气复合污染形成机制及环境与气候效应

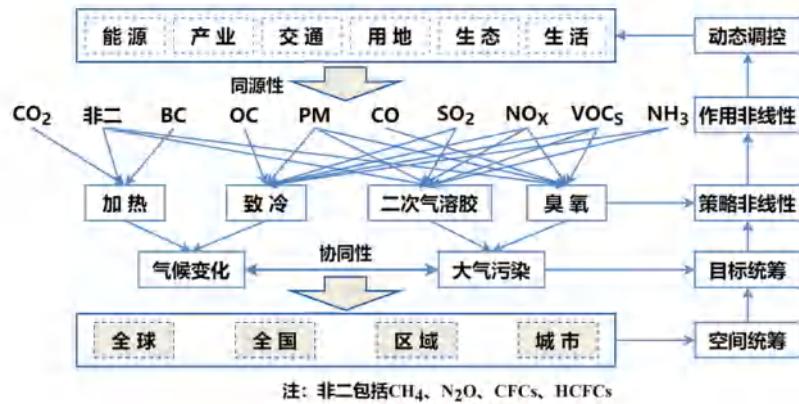


Figure 7.212: 减污降碳协同增效的精细化调控技术体系

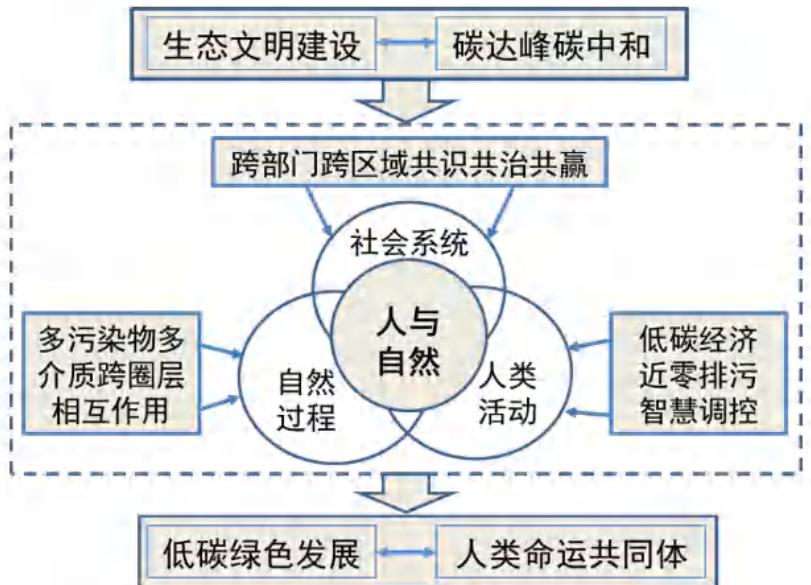


Figure 7.213: 生态文明引领下空气质量根本改善与碳中和的融合发展

结束语

我国大气污染防治经历了 50 余年的艰辛探索，先后针对煤烟型污染、酸雨、灰霾、光化学烟雾、大气复合污染等开展了大量工作，在经济社会快速发展过程中，实现了大气污染与经济发展明显脱钩，城市和区域空气质量逐步得到改善。特别是近十年，“大气十条”和“蓝天保卫战”强有力地推动了大气污染的高效治理，环境空气质量明显好转，重污染天气显著减少，取得了大气污染治理历史上的重大突破。同时，也应该清醒看到，我国 PM_{2.5} 污染负荷依然较高，区域臭氧污染日渐突出并有恶化趋势，大气污染进入到 PM_{2.5} 与 O₃ 协同控制的新阶段。此外，大气污染与气候变化存在显著的相互作用和叠加效应，进一步增加了大气复合污染治理的复杂性、艰巨性和长期性。

在空气质量目标的牵引下，传统的污染末端减排潜力日渐收窄、四大结构调整的减污潜力很难释放，而碳达峰碳中和为破解这一难题提供了新动能和新机遇。大气污染与气候变化问题具有同根同源性，也具有协同治理的重要潜力，“双碳”战略将加速社会经济绿色转型和四大结构低碳化，同步推进 CO₂ 等温室气体和 PM_{2.5}、NO_x、VOCs、CO₂ 等大气污染物高效源头减排。更加重要的是，生态文明和“双碳”战略将引发一场广泛而深刻的经济社会系统性变革，将显著改善社会的生产方式、生活方式和生态方式，提升企业和公众的自觉社会行为，形成自上而下和自下而上的广泛共识，提升减污减碳协同增效的经济红利和环境效益。因此，在生态文明和“双碳”战略的引领下，推动“空气质量改善行动计划（2021-2025）”与碳达峰碳中实施方案的深度融合，聚焦污染物与温室气体的同根同源性，建立两大战略在目标协同、路径协同和政策协同等方面的协同推进机制，有效落实四大结构调整对污染物源头大幅减排的功用，将显著提升 PM_{2.5} 与 O₃ 污染协同治理的成效，助力空气质量根本改善和碳达峰碳中和目标的早日实现。

7.11 LEEEП 组 2024 年度研究一览

2024 年度，LEEEП 团队在能源气候政策相关期刊上就以下主题发表了研究成果。

以下为我们在本节甄选的相关已发表文章：

1. LEEEП 研究 | One Earth: 碳减排措施使中国能够以较低的减排成本实现碳中和和水俣公约目标
2. LEEEП 研究 | iScience: 我国 60 年来极端气温事件的健康经济影响评估
3. LEEEП 研究 | iScience: 碳中和政策下的煤脱钩与隐含煤转移
4. LEEEП 研究 | 碳中和目标下我国煤炭主产省区的减排贡献及经济代价
5. LEEEП 研究 | 碳中和目标下中国西北地区碳减排路径研究

7.11.1 LEEEП 研究 | One Earth: 碳中和与清洁空气政策助力我国低成本实现《关于汞的水俣公约》目标

- **原文标题:** Carbon neutrality and clean air acts can enable China to meet the Minamata Convention goals with substantial cost savings [111]
- **发表年份:** 2024
- **发表期刊:** One Earth
- **作者:** Yujie Pan, Xiaorui Liu, Ziqiao Zhou, Yaqin Guo, Zhuoer Feng, Shuxiao Wang, Qingru Wu, Daiwei Ouyang, Yang Xie*, Kai Wu, Shasha Xu, Chaoyi Guo, Emily Welsch, Chen Huang, Jiashuo Li*
- **文章链接:** [点击 LEEEП 微信公众号链接阅读推送原文](#)

摘要

中国作为全球最大的发展中国家，面临着发展经济、改善民生、减污降碳多重挑战，迫切需要以较低的经济代价实现减污降碳协同增效。如何有效地利用协同减排措施来取得燃煤部门的碳汞减排最佳效果，即如何以较小的成本有效地减少二氧化碳和汞排放仍是一个难题。本研究通过构建“能源-环境-经济”综合评估模型框架，运用情景分析法从省级层面来模拟识别更具成本效益的碳汞协同减排优化路径及关键减排技术。结果发现，中国将碳中和政策与当前的空气污染控制政策相结合，是具有成本效益的协同减排路径，这将在 2060 年减少 6914 百万吨（88%）的二氧化碳和 71 吨（88%）的汞排放，并将为中国节省了 3.84 亿元的汞减排技术成本。研究结果可为我国寻求成本低、协同减排效果佳的政策策略提供理论支撑，并为其它面临相似环境问题的发展中国家提供以成本效益为导向的实用经验教训，为碳中和目标的实现及《关于汞的水俣公约》的履行助力，从而为全球可持续发展目标的实现提供科学见解。成果于 2024 年 3 月 15 日在线发表在 Cell 子刊《One Earth》期刊上。

该成果是在北京大学环境科学与工程学院与碳中和研究院交叉学科平台的支持下，发挥跨院校多学科团队综合优势，基于多方合作共建的 IMED 综合评估模型在双碳政策评估方面取得的又一重要研究进展。论文由北京航空航天大学经济管理学院谢杨副教授和山东大学威海前沿交叉科学研究院李佳硕教授共同指导北京大学环境科学与工程学院博士生潘羽杰完成。合作者来自北京大学环境科学与工程学院、北京大学碳中和研究院、清华大学环境学院、北京航空航天大学经济管理

学院以及山东大学威海前沿交叉科学研究院等机构。本研究得到国家自然科学基金委管理学部青年项目“中国碳减排与空气污染控制政策的成本效益分析”、面上项目“中国燃煤电厂重金属协同控制策略设计与最优模拟：基于微观层面的实证研究”，以及科技部国家重点研发计划“面向减污降碳协同增效的四大结构调整优化技术”等项目支持。

研究背景

面对持续的气候变化和严峻的有毒汞污染双重环境挑战，中国政府已实施了一系列旨在减少二氧化碳和汞排放的政策，如我国已经制定了碳中和目标、空气污染控制措施（如大气“十条”），并签署了《关于汞的水俣公约》，以下简称水俣公约。然而，前人研究表明我国燃煤部门的二氧化碳减排和大气汞的控制成本都较为高昂。我国作为世界上最大的发展中国家，仍面临着发展经济、改善民生、减污降碳多重挑战，亟需寻找以较低的经济代价实现减污降碳协同增效的政策路径。

先前的研究表明，CO₂ 和 Hg 具有同根同源性，煤炭燃烧为两者的重要排放源，这提供了碳汞协同减排的基础。前人对碳汞协同的研究主要专注两个方面，一是专注气候政策对大气汞排放减缓的影响。集中于 CO₂ 减排对 Hg 的直接影响，Hg 控制政策如何影响 CO₂ 减排缺乏研究。忽略了 CO₂ 和 Hg 排放的地区和部门差异，识别具有重点减排潜力和成本较小的区域和部门将有助于因地制宜地制定有针对性的本地化和部门减排措施。二是前人研究认为减排的经济成本是政府制定减排政策的关键因素，但缺乏针对煤炭消费量变化对汞的技术成本（规模效应）影响的量化分析，可能造成减排成本的高估或者低估。如何最有效地利用减排措施来取得最佳碳汞协同减排效果，即以最小的成本有效减少排放和污染，仍是一个难题。

鉴于此，本研究通过构建“省级能源-环境-经济”综合评估模型框架，基于情景分析法从省级层面来模拟识别更具成本效益的碳汞协同减排最优路径及关键减排技术。研究结果可以指导制定出针对性的碳汞协同减排措施，以确定气候、空气污染和汞减排政策的最佳实践组合，为其他面临类似环境问题的国家提供见解，以实现碳中和及《水俣公约》目标，从而实现全球可持续发展目标。

研究方法

本研究构建了一个“能源-环境-经济”系统综合评估模型框架，技术路线如图7.2.14所示。本研究将燃煤相关行业的大气汞排放清单嵌入到中国省级 IMED | CGE 模型中，以预测未来二氧化碳和汞的排放趋势，并根据汞去除装置的技术成本估算汞减排成本，从而形成一个全链条综合评估框架，以分析双碳政策的成本与效益。

研究设置了两组组合情景：首先，研究设置了八个碳中和政策对汞减排影响的情景。构建了两个气候情景，即基准（REF）与碳中和（CNS）情景。CNS 情景的碳排放上限与中国的碳中和目标一致。在此基础上，研究建立了四个末端控制情景，即 FRE、BAU、EEC 和 ALT，它们在洗煤率（%）和末端控制设备组合比例（APCDS, %）方面有所不同。接下来，为进一步量化《水俣公约》对二氧化碳排放的影响，我们在 IMED | CGE 模型中设置了八个汞限额情景（Hg cap_1 至 Hg cap_8）。Hg cap_1 代表中国将清洁空气政策冻结在 2017 年水平的场景；Hg cap_2 至 Hg cap_6 代表中国现有的汞限额水平；Hg cap_7 包括规定的专门除汞的 SMR 技术部署；Hg cap_8 是增加 SMR 技术份额超过 Hg cap_7 的理想情景。最后，根据国内生产总值（GDP）和汞去除装置的技术成本分别对二氧化碳减排的社会成本和汞减排的技术成本进行了分析，以识别更具成本效益的碳汞协同减排最优路径。此外，为检验结果的稳健性，本研究在主情景的基础上，构建了 128 个敏感性情景，对技术进步效率、二氧化碳限额、洗煤比例及 APCD 去除效率等关键参数进行敏感性分析。

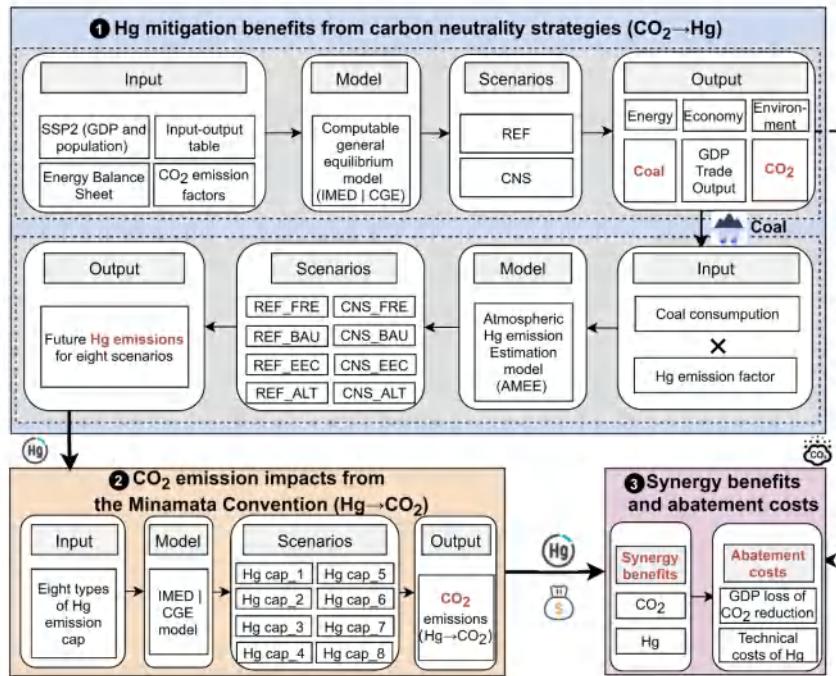


Figure 7.214: 研究框架

研究结果

(1) 不同气候情景下的煤炭消费趋势预测

碳中和政策将使煤炭消耗大幅下降(图7.215)。2060年,在碳中和情景下中国的煤炭消费总量比基准情景下降了1439 Mtoe(百万吨标准油,降幅84%),得益于可再生能源对化石能源的成功替代以及中国各地能效的提高。相比其它地区,中国山东、山西和内蒙古等北部的富煤省份的煤炭消耗量下降幅度更为显著,如2060年,碳中和情景比基准情景的煤炭消费减少了150 Mtoe。在部门层面,在2030和2060年,煤电行业耗煤分别降低54%和67%,说明煤电行业仍是主要

去煤部门。在碳中和情景下，家庭煤炭消耗量在 2060 年将大幅减少。

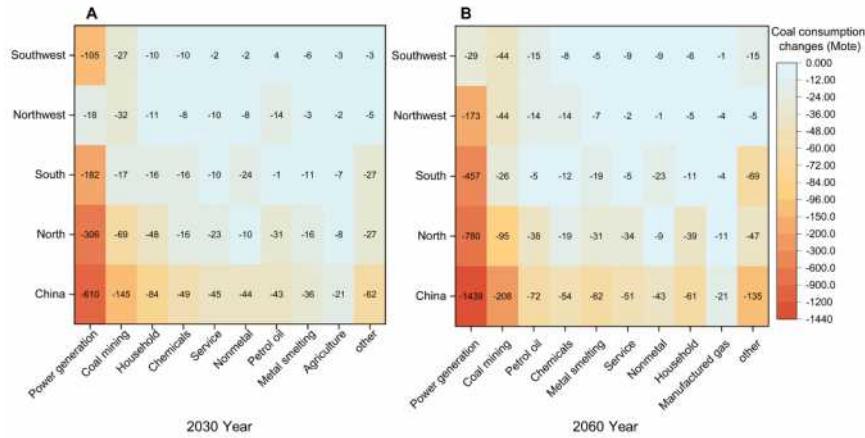


Figure 7.215: 2030 年和 2060 年在碳中和情景下与基准情景下的煤炭消费量差异

(2) 碳中和政策对大气汞的协同减排潜力

1) 从全国尺度来看，实施碳中和政策，将使中国燃煤相关部门的大气汞排放基本实现近零排放（图7.216）。从全国尺度来看，2060 年碳中和情景将比基准情景减少 124 吨 (85%) 的汞排放。在将末端控制维持在 2017 年水平的假设下，2060 年采用低碳燃料政策的碳中和情景将比基准情景减少汞排放 124 吨 (减少 85%)。同时，与碳中和政策相比，实施碳中和政策和当前的末端控制政策情景将进一步减少汞排放 10 吨。然而，在实施加强的汞污染控制情景下的汞排放量仅比

实施碳中和政策和当前的末端控制政策情景下的汞排放量少 3 吨。这意味着，实施碳中和及当前的末端控制政策可以在不需要额外特定汞去除 (SMR) 设备的情况下对大气汞减排产生实质性影响。

2) 就区域而言，2060 年的内蒙古、山西、山东和安徽四省的汞减排量相当于全国总减排量的 30%。此外，由于煤炭中汞的含量较高，贵州省未来汞排放的减排潜力很大。值得注意的是，天津、北京、青海和海南四省的减排贡献总和不到 1.6%。南方省份应加大有色金属冶炼、交通运输和服务业的减排政策投入来解决汞污染问题，而不是燃煤。相比之下，北方省份应该投资于燃煤发电厂和家庭部门的减排措施，因为它们更依赖火力发电和以煤为基础的冬季供暖。

3) 就部门而言，煤电行业、煤炭开采和金属冶炼行业的汞减排量占全国总减排量的 69%。到 2060 年，中国最大的汞排放源仍将是煤电行业，此外服务业的减排潜力也相当可观。

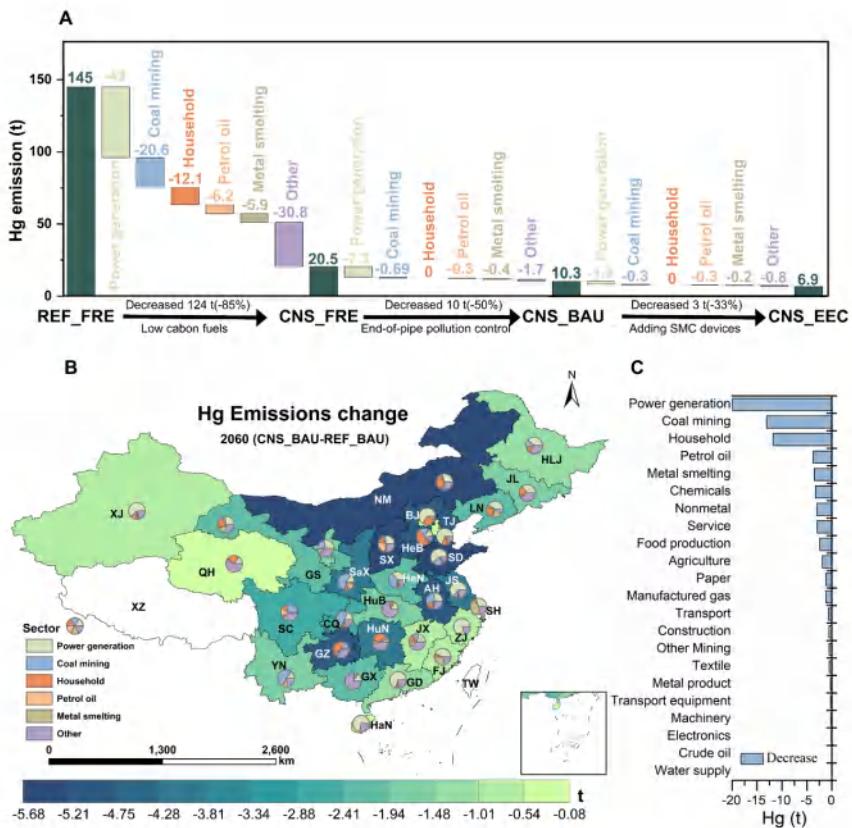


Figure 7.216: 不同情景下 2060 年中国的 Hg 减排潜力：(A) 不同情景下 Hg 减排的变化；(B) 与基准情景相比，碳中和情景下各省的 Hg 减排潜力；(C) 与基准情景相比，碳中和情景下各部门的 Hg 减排潜力

(3) 大气汞减排政策对二氧化碳排放的影响

即使实施最严格的汞减排政策，也只能在 2060 年实现减少碳中和政策所要求的 27% 的二氧化碳减排目标（见图7.217）。由于实施汞减排政策，需要加强或更新末端去除装置（如选择性催化还原 [SCR]），导致设备的电力消耗增加，部分北方省份的发电部门的二氧化碳排放出现增加的趋势（如河北省）。此外，实施不增加专门除汞设备的汞减排情景（Hg cap_6），将减少煤炭使

用，从而减少了 19 亿吨二氧化碳排放，但是相比于安装更多的大气污染物控制装置（APCD）情景，APCD 会增加 3 亿吨的二氧化碳排放。在 Hg cap_6 情景下，一些与煤炭消费相关的特定部门的二氧化碳排放量将会增加。金属冶炼、化工、非金属和服务业二氧化碳排放量分别增加 723、191、177 和 81 百万吨。这主要是由于电力需求增加，因此增加了空气污染物末端排放控制装置（如选择性催化还原（SCR）、湿法烟气脱硫（WFGD）和静电除尘器（ESP）装置）造成的二氧化碳排放。煤电行业仍然是实现二氧化碳减排的关键，其 2060 年二氧化碳减排潜力为 27 亿吨。

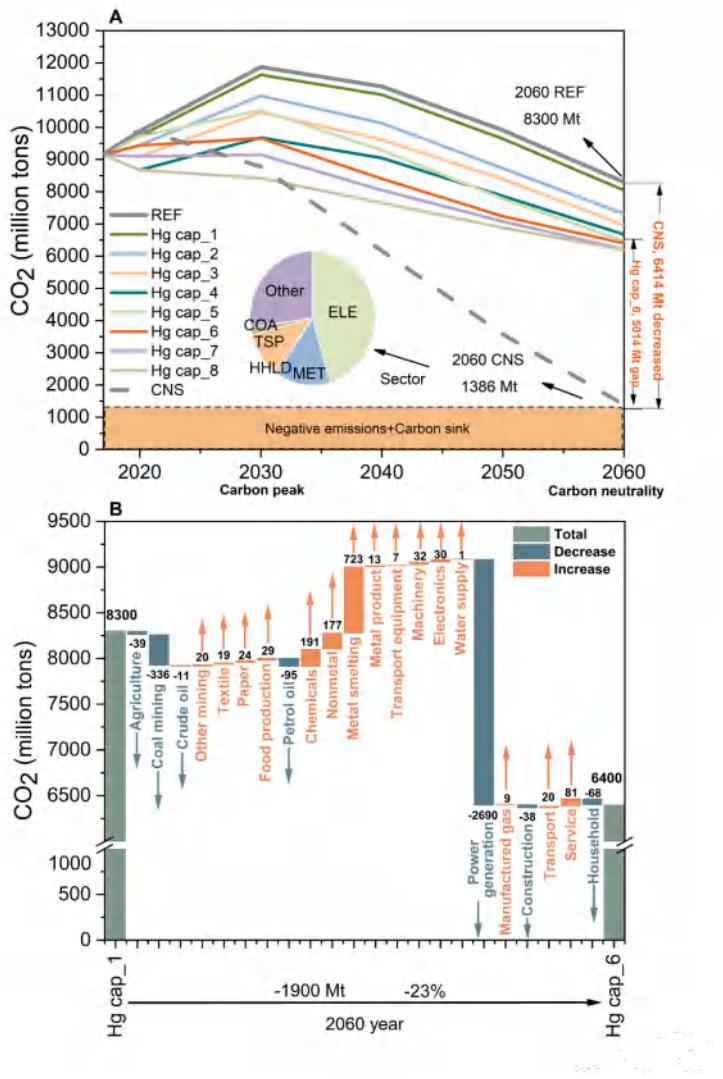


Figure 7.217: 不同汞减排政策对中国 CO₂ 排放的影响：(A) 不同气候政策和 Hg 上限情景下中国 2017 年至 2060 年 CO₂ 排放趋势；(B)Hg 排放基准情景与 Hg 排放上限情景相比，2060 年不同部门的 CO₂ 排放量

(4) 碳汞协同减排效益与减排成本分析

碳中和政策可以对汞排放产生显著的协同缓解效益，应把减排重点放在去煤潜力较大的省份和行业（图7.218）。在碳中和情景下，二氧化碳和汞之间的协同效应在更依赖煤炭能源的北方省份比中国的南部、西北部和西南部地区更大。减排潜力最大的省份是山东、山西和内蒙古，它们在2060年占全国减排份额的22%（二氧化碳）和23%（汞），这得益于中国《大气污染防治行动计划》

划》《燃煤发电机组改造升级规划》的实施。发电、金属冶炼、煤炭开采和家庭是最关键的二氧化碳和汞减排部门，占 2060 年全国减排份额的 18%。中国北部的山东省和电力部门有机会获得最大的协同效益。**基准情景中的汞减排技术成本是碳中和情景中的 2-9 倍**，主要由于碳中和下的煤炭使用量大幅减少，将自动减少汞排放，从而消除了进一步技术干预的需要，显著降低了汞减排成本。此外，由于应用专门除汞设备的成本较高，因此实施碳中和政策和当前的末端控制政策情景认为是中国实现二氧化碳和汞减排的最具成本效益路径，并减少了对其他技术实施的需求。

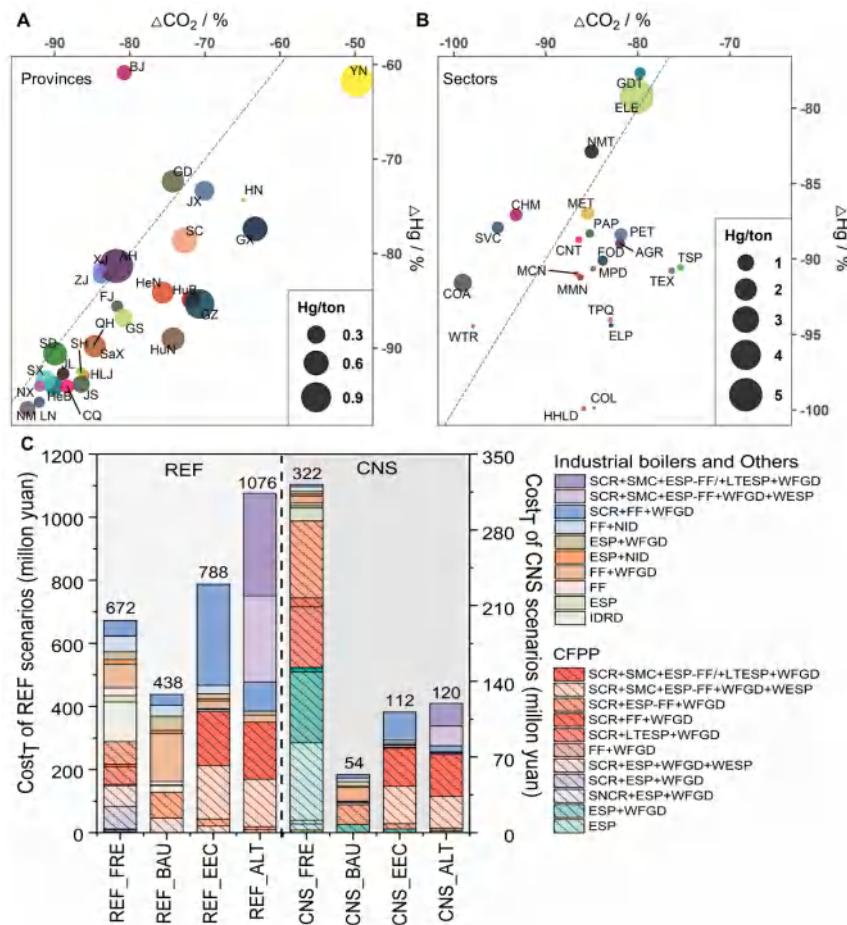


Figure 7.218: 2060 年碳汞协同效益与汞减排技术成本：(A) 各地区气候情景下的碳 Hg 协同效益及其 Hg 排放；(B) 各行业的碳 Hg 协同效益及其 Hg 排放；(C) 各情景的 Hg 减排技术成本

(6) 敏感性分析

研究通过构建 128 个敏感性情景对技术进步率、 CO_2 排放限额、洗煤比例及 APCD 去除效率等关键输入变量进行敏感性分析，评估 2060 年中国的煤炭使用量、Hg 排放量、 CO_2 排放量、汞控制装置技术成本以及汞减排政策带来的 CO_2 排放量等相关结果的稳健性（图7.219）。敏感性分析表明，在所有变量中，模型结果对 CO_2 上限假设和 APCD 去除效率最为敏感。与 REF 情景

相比，CNS 情景的结果更为稳定。尽管替代影响与双向情景有很大不同，但最佳碳中和情景可以刺激煤炭使用量和 CO₂ 排放量的大幅减少，并显著降低 Hg 排放量。另一方面，仅对 Hg 进行控制可使中国的 CO₂ 排放量适度减少，因此本研究的主要结论是稳健的。

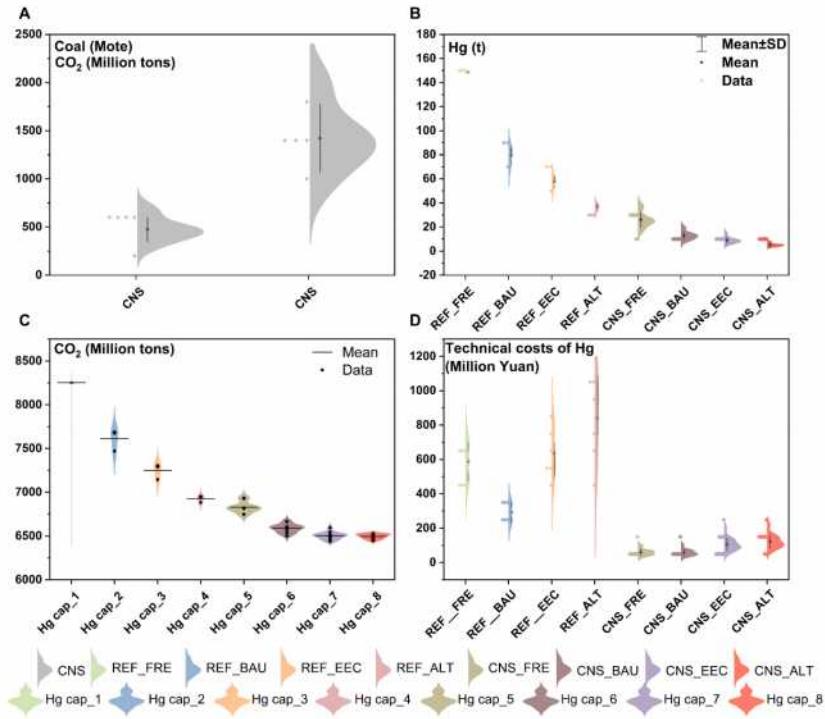


Figure 7.219: 结果敏感性分析

讨论与政策启示

中国将碳中和政策与当前的空气污染控制政策相结合，是具有成本效益的协同减排途径。相比于基准情景，这将在 2060 年减少 6914 百万吨（88%）的二氧化碳和 71 吨（88%）的汞排放，并将为中国节省了 3.84 亿元的汞减排技术成本。这项研究补充了之前对二氧化碳-汞政策反馈的有

限理解，从而为未来研究环境政策中的其他协同作用提供了启示。通过确定具有较大二氧化碳和汞溢出效应的区域和燃煤部门（如北方煤炭资源丰富的省份），对制定有针对性的协同减排措施提供了见解。此外，可为面临相似环境问题的其他国家寻求成本低，协同减排效果佳的策略提供科学参考，以实现碳中和及水保公约目标，从而实现全球可持续发展目标。

基于上述研究结果，本文引出以下几点政策启示：

(1) **实施碳中和和清洁空气政策可以实现“一石二鸟”的效果。**政府应根据研究中的将碳中和政策与当前的大气污染控制政策相结合的情景路径，调整不同省份的燃煤部门汞排放目标限值。如建议将 2030 年和 2060 年的燃煤电厂的 Hg 减排目标分别比 2017 年低 29% 和 94%。

(2) **中国北方的富煤省份应优先部署去煤和碳汞协同减排措施。**政策制定者若要探索更具成本效益的二氧化碳和汞污染协同减排路径，应优先考虑山东、河北、内蒙古和山西等北方产煤省份的政策制定。

(3) **需要制定因地制宜的碳汞协同缓解政策措施。**对于煤电消费大省，如山西省应建议建立跨省电力市场，集中控制排放来减少运输排放。对于煤炭中汞含量较高的地区，如贵州、安徽、重庆和云南，建议更多地利用洗煤等前端技术，以提高煤炭的清洁度，特别是在排放控制措施不充分的燃煤部门。对于欠发达地区来说，减排成本已经远远超出了其承受能力。因此，实现具有成本效益的整体减排更为关键。如在可再生能源产能丰富的青海和甘肃，可以发展地热和风能基础设施，以减少对燃煤发电的依赖。

7.11.2 LEEEP 研究 | iScience: 我国 60 年来极端气温事件的健康经济影响评估

- **原文标题:** Social-economic transitions and vulnerability to extreme temperature events from 1960 to 2020 in Chinese cities [112]
- **发表年份:** 2024
- **发表期刊:** iScience
- **作者:** Yang Xie, Ziqiao Zhou, ..., Tiantian Li*
- **文章链接:** [点击 LEEEP 微信公众号链接阅读推送原文](#)

研究背景

气候变化已经无法避免，全球范围内热浪和寒潮天气等极端温度事件的频率和强度都在增加。研究证实，长时间暴露于高温和严寒环境中会导致各种疾病，如呼吸系统疾病、心血管疾病甚至死亡，从而导致巨大的经济损失。

在过去的五十年里，中国经历了更频繁的高温热浪事件和相对较少的寒潮事件，但无论是高温热浪还是寒潮事件，其强度都在增加。极端温度事件在我国造成了巨大的健康风险，然而大多数研究主要关注特定年份的健康和经济影响，很少有研究量化了我国由热浪和寒潮事件引起的长期影响。此外，我国的热浪和寒潮事件的强度及其影响存在着显著的空间差异。考虑到时间尺度、地理、气候特征和经济发展的差异，有必要研究我国不同地区、不同经济发展水平下受热浪和寒潮事件影响的健康经济影响的时空分布。

本文是北京航空航天大学经管学院、北京大学环境学院及中国疾病预防控制中心环境所的合作成果。研究了 1961 年至 2020 年我国热浪和寒潮事件导致的非意外超额死亡的情况，并进一步通过支付意愿方法评估了与这些事件相关的经济损失。通过分析长时间跨度的数据，有助于捕捉我国

受高温和寒潮事件影响的潜在周期性趋势，更深入地理解极端温度对人类健康和经济的影响，为政策制定者在应对气候变化、规划长期可持续性和适应性策略时提供科学支撑。

研究方法

本研究使用中国疾病预防控制中心数据，对我国热浪和寒潮事件导致的非意外超额死亡的情况进行分析，并基于可支付意愿进行货币化计算。本研究中，高温热浪被定义为温度连续 2 天超过研究时期温度的第 99 百分位，而寒潮的定义为温度连续 7 天低于研究时期温度的第 5 百分位。生命统计价值使用的是基于 2016 年调研结果的最新研究，并转换为当年价格。

研究结果

健康影响

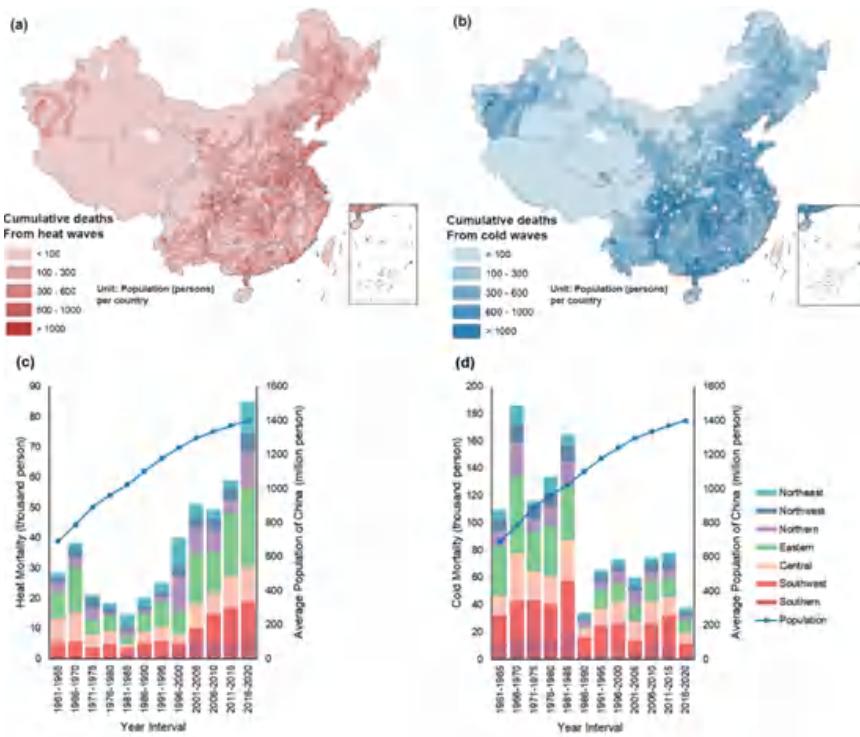


Figure 7.220: 累积热浪和寒潮事件相关的超额死亡 (1961-2020 年)。(a) 累积热浪事件相关超额死亡；(b) 累积寒潮事件相关超额死亡；(c) 每十年热浪事件相关超额死亡；(d) 每十年寒潮事件相关超额死亡

我国频繁受到热浪和寒潮事件的不利影响。许多对极端温度事件的研究表明，发生在我国的热浪和极端寒潮事件的频率明显增加，2000 年之后尤为突出。本研究结果表明，从 1961 年到 2020 年，热浪事件造成的累积超额死亡数量为 45 万人，主要集中在华北、西南和华南地区（图7.221a）。由寒潮事件引起的死亡总数为 113.3 万，是由热浪事件引起的死亡人数的 2.5 倍。寒潮事件导致的死亡主要集中在华中和西南地区（图7.221b）。

热浪和寒潮事件引起的超额死亡时空特征明显。研究发现，七个区域每五年的热浪事件相关死亡呈现出 V 形模式，在早期逐渐减少，于 1981-1985 年达到最低值，死亡人数约为 1.5 万人，

1985 年后出现反弹（图7.221c）。反弹的情况可能是由于热浪事件强度和频率增加，也有可能是因为上世纪 80 年代人口增长迅速。从历史上看，高温热浪事件引起的死亡高峰年份为 2010 年、2012 年和 2017 年。而 2016-2020 年间的死亡人数越来越严重，五年内热浪事件引起的累积超额死亡总数增长到了 8.5 万人。

由寒潮事件引起的超额死亡先上升后大幅下降。1961-1985 年，寒潮事件相关超额死亡数量上升，1966-1970 年的达到峰值，五年内累积死亡人数超过 18.6 万人，比热浪事件更具危害性（图7.221d）。这主要归因于 1969 年的极端寒冷事件，一年内超过 6.6 万人由于寒潮事件而早逝。上世纪 80 年代引入的区域供热可能有助于减少死亡人数，寒潮事件相关死亡人数从 1981-1985 年间的 16.5 万/五年下降到了 1986-1990 年间的 3.4 万/五年。在随后的 25 年中，寒潮事件相关超额死亡人数保持相对稳定。

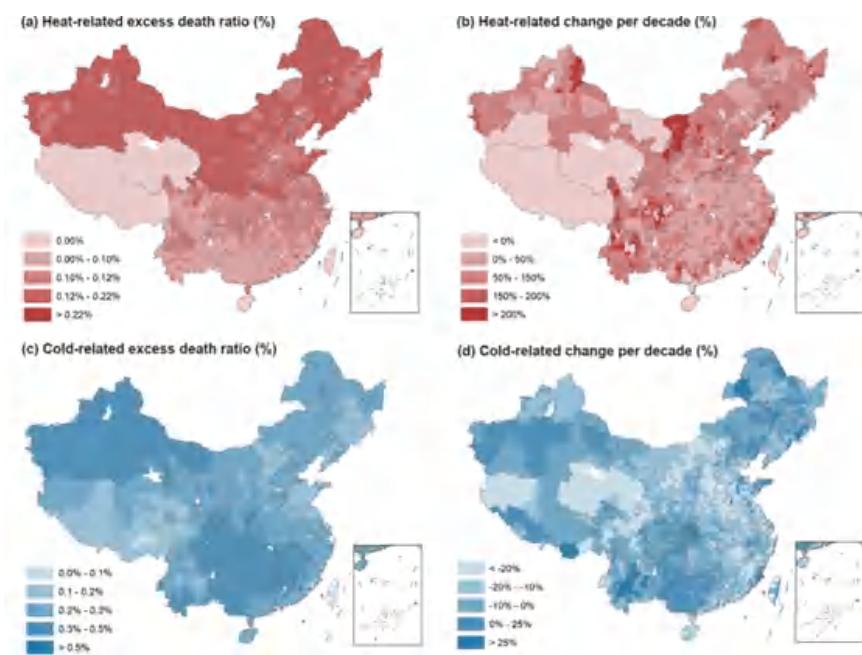


Figure 7.221: 超额死亡比例和每十年平均变化（1961-2020 年）。超额死亡比例指的是当年超额死亡人数与当年所有死亡人数的比值。(a) 热浪事件相关超额死亡比例；(b) 热浪事件相关超额死亡比例每十年的平均变化量；(c) 寒潮事件相关超额死亡比率；(d) 寒潮事件相关超额死亡比率每十年的平均变化量

总体而言，寒潮事件引起的超额死亡比例远高于热浪事件。在 2852 个县中，热浪事件导致的总体超额死亡比例在 0-0.45% 之间（图7.222a），而寒潮事件相关的比例在 0-1.22% 之间（图7.222c）。然而，在观察时间范围内，热浪事件相关比例在我国几乎所有区县中都呈增长趋势，而大多数寒潮事件相关比例则呈下降趋势。在第一个记录的十年（1961-1970 年）中，平均热浪事件相关比例为 0.01%。在同一时期，平均寒潮事件相关比例为 0.07%，表明寒潮事件是中国极端温度引起的超额死亡的主要原因。在最近的十年（2011-2020 年），平均热浪事件相关和寒潮事件相关的超额死亡比率均为 0.03%。

我国热浪事件和寒潮事件相关的超额死亡比例存在显著地区差异。极端高温引起的超额死亡比

例在华北、东北和西北的区县中更高，而极端寒潮事件引起的比例在华中、华南和西南的区县中更为严重。此外，内蒙古自治区和华南以及西南的一些区县的热浪事件相关超额死亡率每十年的百分比变化超过了 200%，需要重点关注这些地区的高温热浪事件适应问题。

经济负担

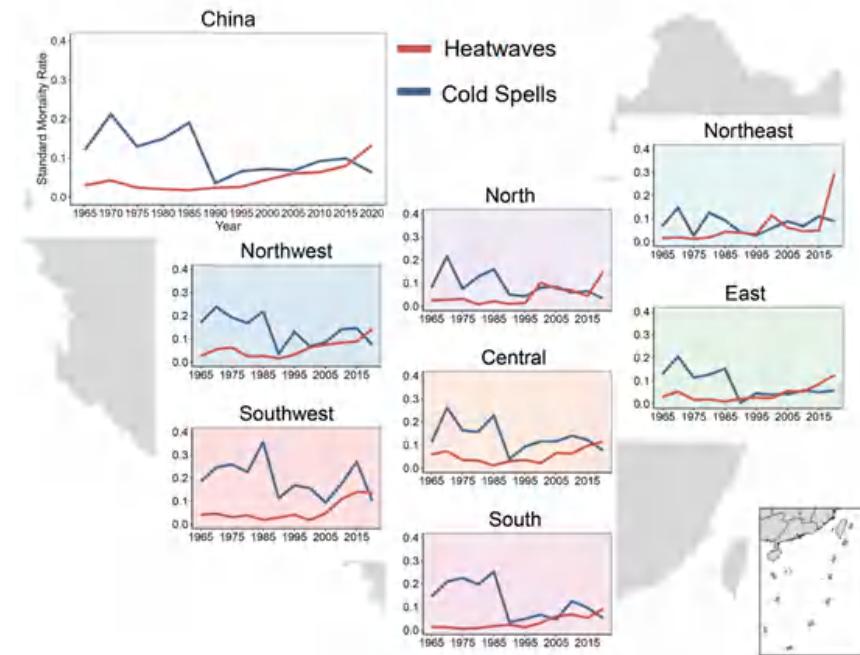


Figure 7.222: 每五年因热浪（红线）和寒潮（蓝线）事件而导致的经济损失（1961-2020 年）

热浪和寒潮事件导致的巨额经济损失旗鼓相当，但存在显著的地区差异。总体而言，从 1961 年到 2020 年，热浪事件导致的死亡货币化价值估计约为 12840 亿元人民币，而寒潮事件相关的经济损失为 15100 亿元人民币。在不同的地区中，东部地区总的热浪事件相关经济损失达到 4460 亿元人民币，成为我国热浪事件相关经济损失最大的地区。具体而言，山东省的绝对经济损失最大，热浪事件造成的累积经济损失达到了 1290 亿元人民币。相比之下，我国西北的热浪事件相关经济损失不到东部地区的五分之一。寒潮事件造成的经济损失更为严重。西南地区是除了华东以外最容易受到寒潮事件的影响的区域，经济损失接近 3000 亿元人民币。相比之下，东北和西北地区的寒潮事件相关累积经济损失相对较低。

寒潮事件相关经济损失占 GDP 比值高于热浪事件。为了避免偏见评估，本文进一步计算了 1961-2020 年生命统计价值与地区 GDP 的比值（图 7.223）。研究结果显示，所有地区的热浪事件相关经济损失比值逐年增加，在 2018 年达到了峰值，全国 GDP 损失估计为 0.18%。在地区层面，华北、西北和东北的热浪事件引起的经济损失相对更严重，相比之下，华南的热浪事件引起的经济损失比值相对较低。对于寒潮事件，年均 GDP 损失约为 0.12%。然而，与热浪事件不同，近年来寒潮事件相关比值有所下降。此外，寒潮事件在西南、华中和华南造成的经济负担相对更为严重，历史最大损失比值出现在 1985 年，分别占这些地区 GDP 的 0.80%、0.75% 和 0.70%。寒

潮事件几乎没有导致东北和华北的 GDP 损失。

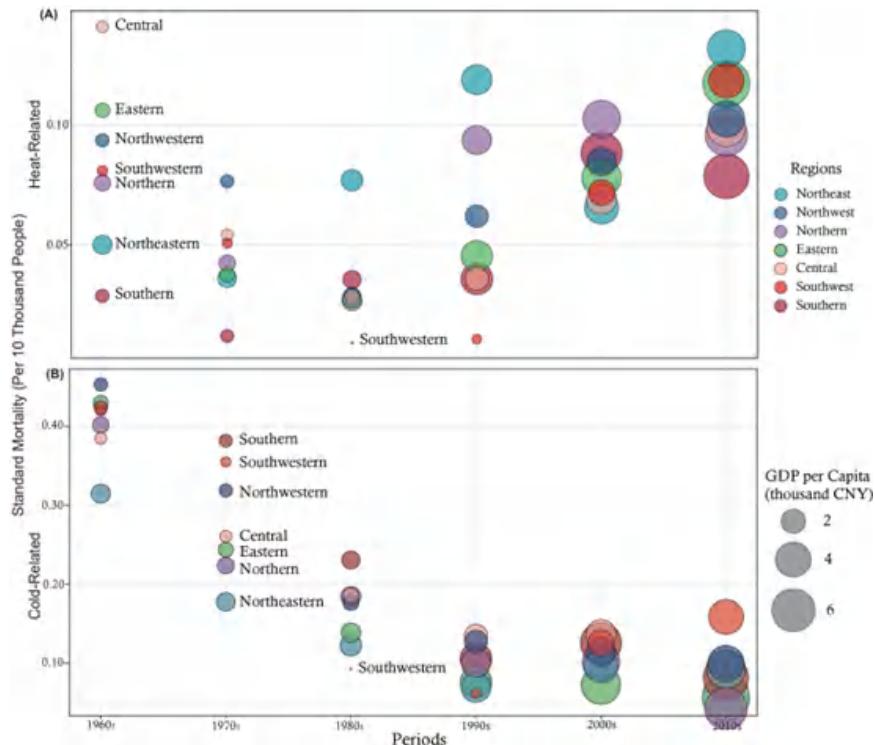


Figure 7.223: 地区每十年的标准死亡率。 (a) 热浪事件；(b) 寒潮事件

地区人口密度显著影响各地超额死亡人数的差异。高密度人口会导致暴露于极端事件的人数更多。因此，我们用图7.223展现了不同经济发展水平的 7 个地区在不同十年中的死亡率。结果表明，单纯经济发展不能有效解决由热浪事件频率和强度增加引起的死亡率上升问题。另一方面，对于寒潮事件，人均 GDP 增加与死亡率下降存在显著相关关系。

研究结论

本研究的结果显示：**第一，20世纪80年代左右是高温热浪和寒潮两种极端温度事件引起的超额死亡的转折点。**这可能与中国经济改革开始引入区域供暖有关，有助于减少寒潮事件造成的死亡人数。**第二，经济发展似乎无法缓解自20世纪80年代以来与热浪事件相关的死亡率增加。**这与传统观点相悖，可能是因为全球变暖加剧了热浪事件的强度和频率，导致能源供应系统未能为高峰时段做好准备，以及某些热浪和寒潮事件的突然袭击导致规划和应对不足。**第三，两种极端温度事件引起的超额死亡分布主要位于人口稠密的城市，但死亡比例存在显著的区域异质性。**我国北方城市受热浪事件影响更严重，南方城市却更容易受到寒潮事件影响。国家级别的分析表明，经济发展可能在一定程度上增加居民对寒潮事件的抵抗力，这可以解释寒潮事件相关超额死亡比率在发达省份和直辖市中相对较低。

根据研究结果，本文提出以下几点建议：

1. **因地制宜建立极端温度的早期预警系统至关重要。**热浪事件的早期预警系统更应该考虑在华北、西北和东北地区，而寒潮事件预警则更应该考虑在华中、华南和西南，从而防止生命和资产的损失，促进长期经济韧性；

2. **政府应更加注重保护弱势群体。**高强度的工作群体、低收入家庭和老年人群要么无法获得制冷场所和设备，要么在生理上更容易受到伤害。因此，政府应为有需要的脆弱人群提供工作补贴，并为他们提供公共制冷设施。地方社区应建议老年人待在空调室内；
3. **西南地区应确保在寒潮事件期间当地的电力供应稳定。**尽管中国大多数城市的寒潮事件相关死亡率呈明显下降趋势，但在控制人口变化后，西南地区 2000 年后出现了反弹。由于该地区居民通常使用空调供暖，政府应确保在寒潮事件期间当地的电力供应稳定。

本研究得到了国家自然科学基金面上项目“中国高温热浪健康影响与经济成本研究”及中央高校基本科研业务专项资金项目支持。

第一作者简介

谢杨，北京航空航天大学经济管理学院副教授，博士生导师。主要从事空气污染和气候变化对人群健康和宏观经济影响研究，定量评估清洁空气与气候政策的成本与效益。主持国家自然科学基金青年项目、面上项目和重点项目课题、科技部国家重点研发计划课题等项目，入选北航“青年拔尖人才支持计划”、北航“卓越百人计划”等。以第一或通讯作者在 *Nature Communications*, *One Earth*, *Lancet Regional Health*, *Global Environmental Change*, *ES&T*, *iScience* 等环境与健康领域权威期刊发表 40 余篇，ESI 前 1% 高被引论文累计 9 篇。担任 *Energy*, *Ecology and Environment* 期刊的领域编辑、《中国碳中和与清洁空气协同路径》执笔作者、《全球疾病负担》Collaborator。

共同一作简介

周子乔，北京大学环境科学与工程学院博士研究生，主要研究方向为极端气候健康经济、适应政策评估。

通讯作者简介

李洁洁，博士，研究员，博士生导师，中国疾病预防控制中心环境与健康相关产品安全所环境健康风险评估室主任。2007 年毕业于北京大学，获博士学位。2009-2010 年在美国哥伦比亚大学公共卫生学院从事博士后研究工作。主要研究方向为气候变化、空气污染与健康，健康大数据与风险预测。获 Cell Press 2022 年度中国女科学家奖，入选全球前 2% 科学家。以第一/通讯作者在 *Nature*、*The Lancet*、*Lancet Public Health*、*Lancet Planetary Health*、*Nature Climate Change*、*Science Advances*、*JACC*、*Circulation*、*EHP* 等期刊发表论文百余篇。获发明专利 5 项。任世界心脏联盟气候变化、空气污染专委会委员、国家环境与健康专家咨询委员会委员、中国疾控中心环境与人群健康重点实验室执行副主任、中华预防医学会环境卫生分会常委等。

7.11.3 LEEEП 研究 | iScience: 碳中和政策下的煤脱钩与隐含煤转移

- **原文标题:** Equity-Based Carbon Neutral Plan Induces Cross-Regional Coal Leakage and Industrial Relocation [113]
- **发表年份:** 2024
- **发表期刊:** iScience
- **作者:** Ziqiao Zhou, Xiaotian Ma, Silu Zhang, Chaoyi Guo, Xiaorui Liu, Lin Zhang*, Yang Xie*
- **文章链接:** [点击 LEEEП 微信公众号链接阅读推送原文](#)

研究背景

在全球变暖的大背景下，世界各国已经就减少化石燃料消耗、限制温室气体排放的举措达成共识。2021 年，格拉斯哥气候协议进一步强调逐步降低煤炭使用的重要性。2023 年，第 28 届缔约方大会明确了全球目标之一是“加速转型脱离化石燃料”。因此，如何平衡经济发展和温室气体减排仍是我国面对的重大挑战之一。

目前，煤炭在我国的能源结构中仍然起到主导作用。减少煤炭使用不仅是我国迈向能源转型的重要一步，也是实现碳中和目标的关键。然而，以往的研究主要集中于从煤炭单一行业的供应或需求端评估相关政策的影响，例如限制煤矿行业数量和工作时间，以解决产能过剩问题，但这些政策要么产生负面环境影响，要么导致煤炭产能过剩和价格飙升；另一方面，由需求驱动的市场型政策在减少煤炭方面的效果也不尽如人意。很少有研究从全行业视角开展深度脱碳情形下对煤炭供需和贸易影响的整合性分析。本文通过考察碳中和减排政策实施后对煤炭使用的约束作用，重点关注依赖煤炭的省份和行业影响，旨在回答以下三个问题：第一，不同碳限额分配方式对我国去煤行动的影响如何？第二，碳中和政策驱动的去煤行动所导致的社会经济影响如何？第三，碳限额分配方式的不同是否能减缓省份间的不平衡？

本文是北京大学环境学院、北京航空航天大学经管学院及香港城市大学能源与环境学院的合作成果。研究揭示了未来碳约束情景下省级煤炭减排的有效性，并识别碳减排的关键地区、重点行业和节点性环节。研究结果还可对能源结构类似的其他发展中国家碳减排目标的规划与设计提供借鉴。

研究方法

本文耦合了北京大学与北京航空航天大学相关课题组合作自主研发的中国 31 省可计算一般均衡模型 (IMED | CGE)、环境拓展投入产出分析 (EIOA) 和结构路径分解 (SPD)，以定量评估 2017-2060 年不同碳配额情景下的煤炭消耗与 GDP 变化趋势、分析省际贸易中的隐含煤炭消耗，进一步识别降低煤炭消耗的关键驱动因素 (图 7.224)。

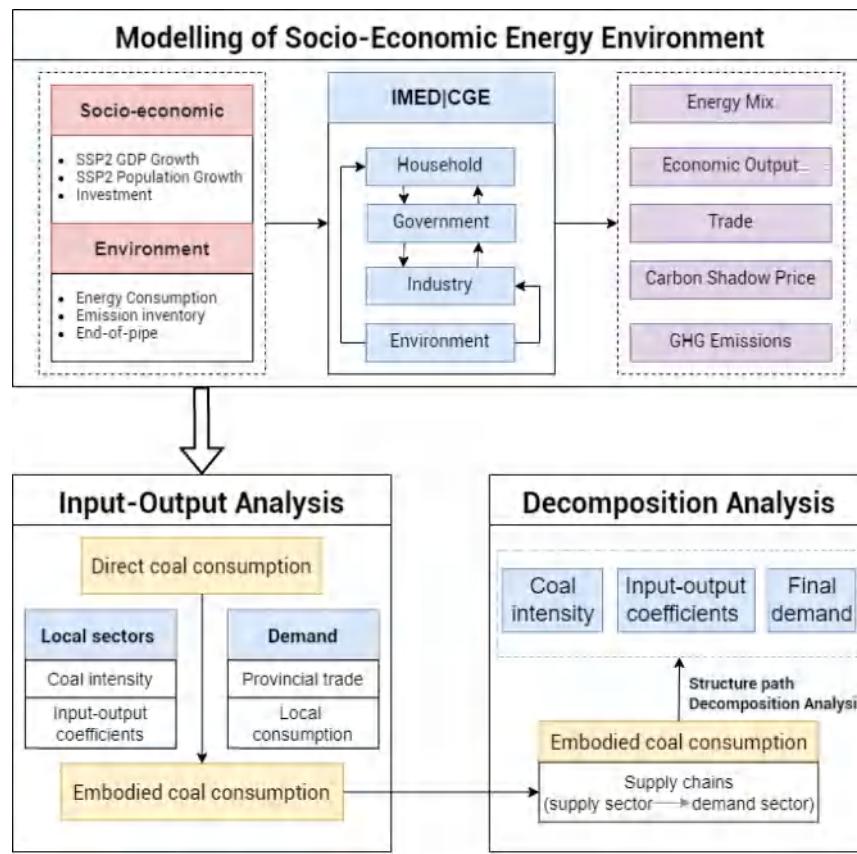


Figure 7.224: 研究框架

基于效率原则和公平原则（表7.231），本文构建了6个碳限额情景来探讨碳中和政策对去煤行动的影响，其中主要分析的Consistent Command (CC) 和 Robin Hood (RH) 情景分别属于效率原则和公平原则。

基本原则	情景
/	BaU (基准情景)
效率原则	Consistent Command (CC)
	Consistent Decline
公平原则	Consistent Emission per Capita
	Grandfathering
	Capacity
	Robin Hood (RH)

Figure 7.225: 情景设置

研究结果

去煤成效

我国煤炭强度的省级差异明显，碳中和政策可以显著推动各省去煤行动，省级差异逐渐缩小，基于不同原则的碳中和政策对不同经济发展水平和煤依赖程度的省份产生差异性影响。2017年，

我国煤炭消费差异显著：从北京的 5.90 ktoe/BilUSD 到宁夏的 1130 ktoe/BilUSD 不等。整体来看，北方地区（西北、北部和东北）的煤炭强度更高，尤其宁夏、内蒙古、山西、新疆和甘肃。到 2060 年，各省的煤炭强度均有明显下降趋势，省级差异逐渐缩小。值得注意的是，如果没有碳中和政策的强力干预，煤炭依赖的省级空间特征并不会发生改变。在碳中和政策的干预下，预计 2060 年全国煤炭强度平均下降幅度约为 95%，其中煤炭强度最低达到 7 ktoe/BilUSD 左右（图7.226）。然而，北京和云南分别在效率原则和公平原则情景中出现煤炭强度的反弹：在效率原则的 CC 情景中，北京历史极低的碳排放决定了它相对于其他省份更容易达成情景的碳限额要求，反而未来可能会消耗更多的煤炭；在公平原则下的 RH 情景中，碳限额被更多地分配给了经济发展相对落后的省份。例如，云南的碳约束将更宽松，可能会使其发展碳密集型产业以促进经济增长，导致煤炭强度的反向上升。

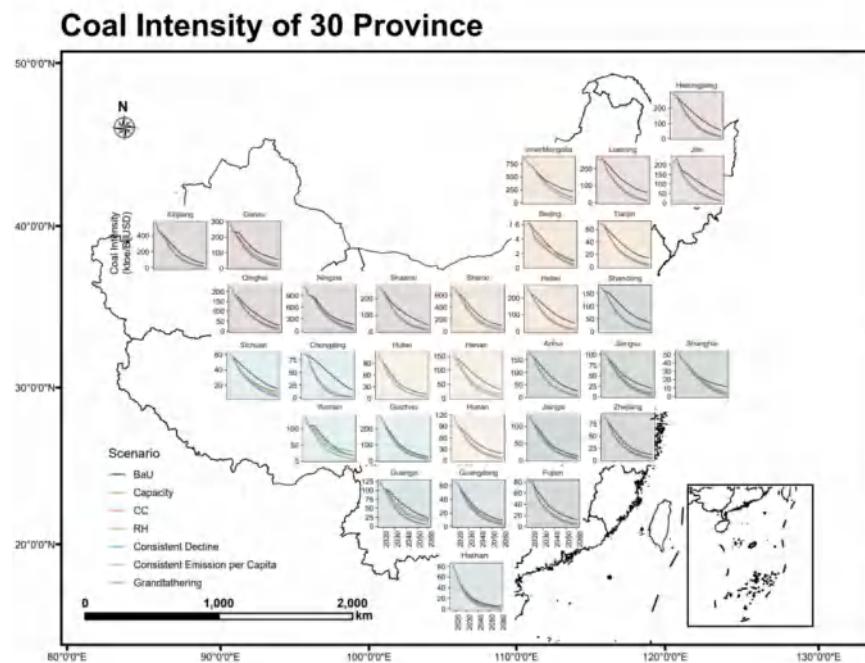


Figure 7.226: 我国 2017-2060 年 30 省单位 GDP 的煤炭消费（因煤炭消费数据缺失，港澳台及西藏除外）

2060 年，各省部门的煤炭强度均显著下降，一些部门甚至出现了“无煤炭”的情况，上海、江苏、浙江、陕西和新疆的能源供应部门的产值受到严重打击。基准情景中，全国能源供应部门的煤炭强度从 2017 年的 262 ktoe/BilUSD 下降至 2060 年的 249 ktoe/BilUSD。碳中和政策情景中，全国大部分省份的能源供应部门受到碳配额的约束，煤炭消耗减少，但是仍有少数省份（上海、江苏、浙江、陕西和新疆）部门的煤炭强度上升（图7.227）。通过进一步分解煤炭强度，发现这些省份能源供应部门的产值下降幅度快于去煤速度，说明煤炭消耗与能源供应部门产值脱钩存在一定的困难。

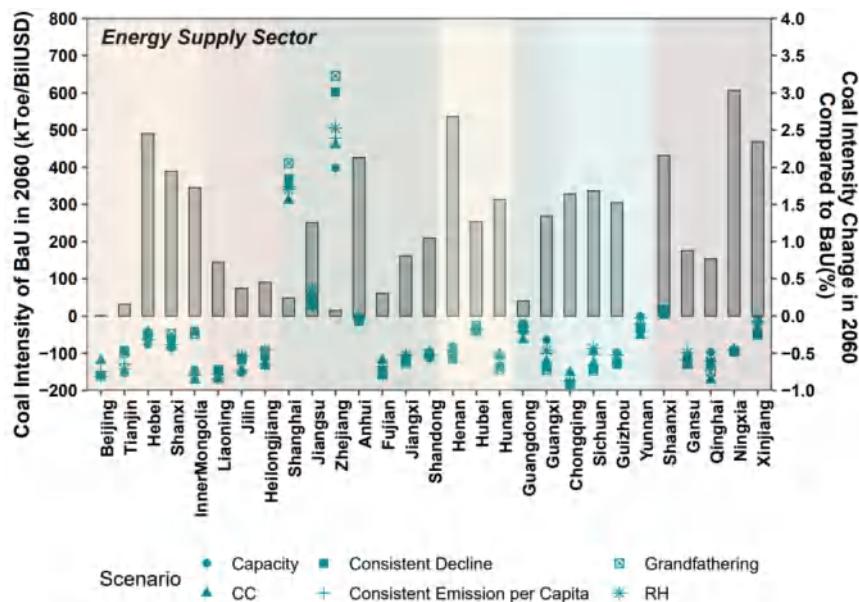


Figure 7.227: 不同情景下 2060 年省级能源供应部门的煤炭强度与变化比例

经济影响

公平原则情景下全国的经济损失要比效率原则情景下更大，且存在显著的空间异质性。2060 年，在 CC 和 RH 情景下全国人均 GDP 损失分别为 8.20% 和 9.69%。我国西北、华北和东北地区的损失比其他地区更大（图7.228）。效率原则情景下，对煤炭依赖程度低的省份经济受影响较小，甚至可能有正向影响，如海南和西藏；尽管并没有改变整个国家的经济总量，但公平原则下北部地区的经济损失下降，并促进部分发展中地区的经济发展，例如云南和广西。

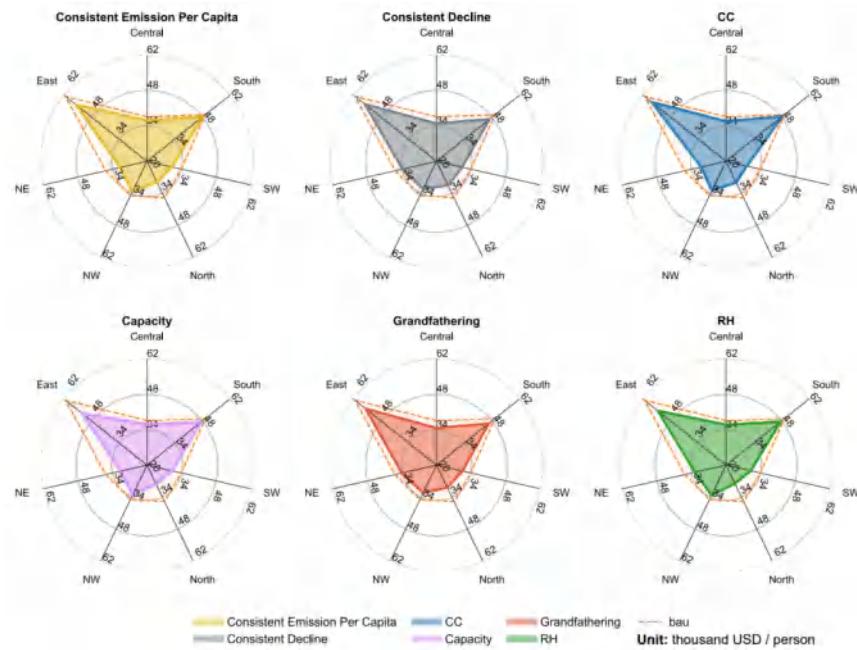


Figure 7.228: 2060 年不同区域在各情景下的人均 GDP 变化

2060 年，由于碳中和政策的影响，各部门的总产出有所下降，且更多转向第三产业，传统能源产业的产值下降明显。在效率原则（CC）情景下，能源供应行业的产值比基准情景时减少约 69%，而在公平原则（RH）情景下则增加到 71%（图7.229）。CC 下，基准情景下 2060 年煤炭强度最大的四个省份——内蒙古、宁夏、山西和辽宁，经济损失显著高于全国平均水平，某些行业甚至可能面临退出的风险，例如内蒙古的非金属冶炼行业和宁夏的发电行业可能在碳配额的约束下产量损失大半，说明仅靠碳中和政策不足以推动内蒙古经济结构向低碳转型。

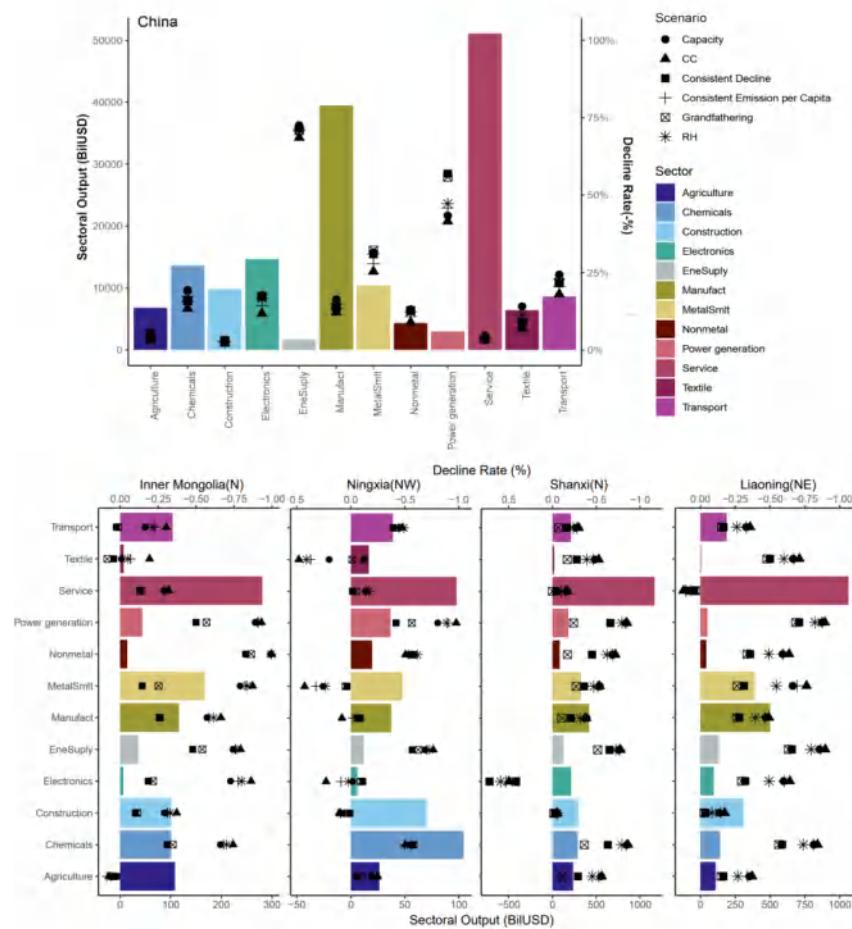


Figure 7.229: 2060 年中国和四个煤炭依赖省份的部门产出和相对变化 (柱代表基准情景)

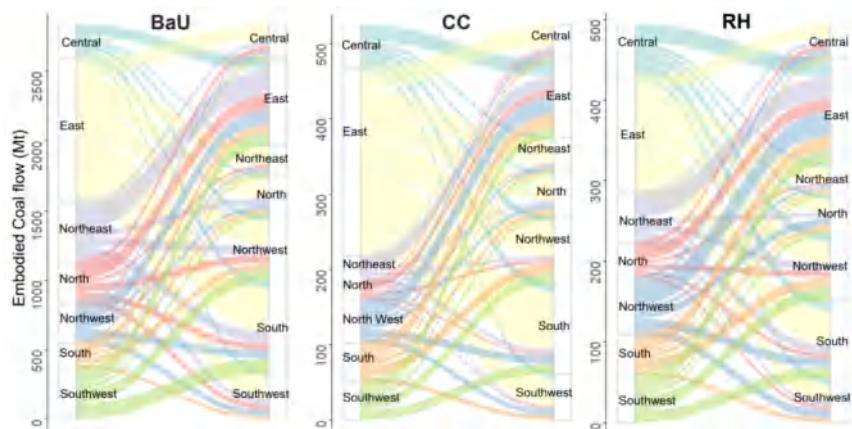


Figure 7.230: 三种情景下省际双边贸易的隐含煤炭消费量桑基图（左侧 y 轴上的是生产者，右侧是消费者）

基于效率原则的碳中和政策不仅降低了全国的煤炭消费总量，还改变了煤炭使用集中在北部地区的空间特征。在基准情景下，华东地区是最大的煤炭省际贸易供应地，而华南地区则是华东地区此类产品的主要消费地。在效率原则的 CC 情景中这一贸易关系更加显著（图7.230）。然而，在公平原则的 RH 情景下，政策制定者为欠发达的省份提供更多的碳预算，并将负担转移给相对发达的省份，煤炭密集型产品生产活动将进一步北移。华北、东北和西北地区等地区的产业结构将实现转型，碳中和政策导致的 GDP 损失也被缓解。在公平原则的 RH 情景下，发电部门需求的转移可能是欠发达地区的经济损失下降、发达地区煤炭强度进一步降低的原因。对供应链的分解结果显示，煤炭强度的下降是隐含煤炭消费减少最关键的因素，尤其是能源供应行业的煤炭强度。服务业、制造业和建筑业是供应链中最重要的需求部门。公平原则情景下，欠发达地区发电部门的隐含煤炭消费量会显著增加（图7.231）。其中西北地区的隐含煤炭消费最大。在效率原则的 RH 情景下，西北地区的隐含煤炭消费总量比 CC 情景下增加了 4000 万吨，其中 45%（1800 万吨）是由于其他地区的最终电力需求增加所致。

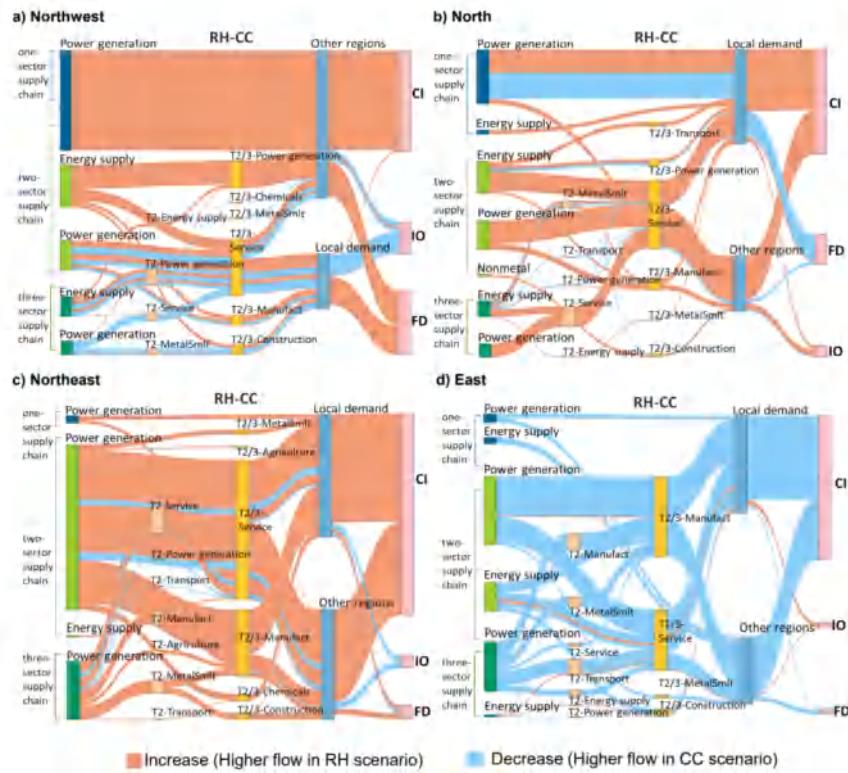


Figure 7.231: 2060 年西北 (a)、华北 (b)、东北 (c) 和华东 (d) 隐含煤炭消费流量的情景差异 (左侧的节点为供应部门, 不同颜色代表不同部门数量的供应链。数字代表行业在供应链中的位置。供应链末端的部门为最终需求部门。CI、IO 和 FD 分别代表煤炭强度效应、投入产出系数变化效应和最终需求效应)

图片

研究结论与讨论

本研究的结果显示：第一，碳中和政策实施将导致煤炭强度大幅降低，并减少煤炭强度的省际差异。碳中和情景下 2030 年煤炭强度下降至 2017 年的一半，到 2060 年下降约 96%。第二，碳中和政策的影响下工业结构实现绿色低碳转型。大部门经济部门都将减少煤炭消耗。能源供应部门可能保留部分煤炭使用，在极端情况下可作为调峰的备用能源。第三，我国北方地区的经济发展十分依赖煤炭消耗，在碳配额的约束下受到的负面影响更大。然而，基于公平原则的碳中和政策可以将部分减排负担转移，给予北方地区更多排放空间。同时，碳中和政策可能导致煤炭密集型产业进一步向北方地区转移，缓解其经济损失的同时会增加煤炭消耗。

基于研究结果，本文提出以下几点政策建议：

(1) 根据区域经济发展水平和能源结构合理确定碳配额分配方案。基于效率原则可更有效地减少煤炭消耗和碳排放，而基于公平原则可降低后发省份的经济损失，尽管也会导致其煤炭强度的增加。

(2) 加大对于清洁能源和负排放技术的投资。应增加清洁能源投资，以帮助北方地区的省份顺利去煤。同时，大力发展负排放技术也能为这些省份提供一定的碳排放空间。

(3) 保留部分煤炭作为调峰的备用能源。碳汇和负排放技术允许部分碳排放的存在。这与国家能源局发布的《2021 年能源工作指导意见》建议一致，部分煤炭应作为备用能源以应对峰值需求，例如夏季用电高峰。

7.11.4 LEEEP 研究 | 碳中和目标下我国煤炭主产省区的减排贡献及经济代价

- 原文标题：碳中和目标下我国煤炭主产省区的减排贡献及经济代价^[114]
- 发表年份：2024
- 发表期刊：煤炭经济研究
- 作者：张思露 and 郭超艺 and 周子乔 and 潘羽杰 and 马啸天 and 戴瀚程 *
- 文章链接
- [点击 LEEEP 微信公众号链接阅读推送原文](#)

摘要/关键词

摘要：选择山西、内蒙古、陕西、新疆和贵州 5 个煤炭主产省作为主要研究对象，基于省级动态可计算一般均衡模型，从生产者责任和消费者责任视角，分析不同碳配额方案下的煤炭脱钩、贸易隐含碳及经济损失，旨在为煤炭主产省的低碳转型路径优化提供参考依据。结果表明：碳中和政策显著推动各省份煤炭消费与经济发展的脱钩。从生产者责任视角分配碳配额时，煤炭主产省将会遭受严重的负面经济冲击，尤其是山西 (58.3%) 和内蒙古 (65.3%)；东南部发达省份则会从中西部省份进口高碳密集型的商品来实现碳减排。当从消费者责任视角分配碳配额时，我国整体 GDP 损失将降低，煤炭主产省将会有更长的转型发展时间，但仍然需要尽快转型，以免被困于高碳和能源密集型的重工业中。

关键词：煤炭主产区；消费者责任；隐含碳排放转移；可计算一般均衡分析

创新点

本研究考虑到产品间接排放及省际隐含碳转移，侧重评估了消费者视角下碳配额分配对煤炭主产区的减排贡献与经济效应。具体而言，本研究重点关注山西、内蒙古、陕西、新疆和贵州 5 个煤炭主产区，基于宏观能源经济模型 IMED | CGE，模拟了 2017—2060 年 31 省市的能源消费和经济发展趋势，分析对比煤炭主产区在不同的碳配额方案下的煤炭脱钩趋势、碳减排贡献及相应的经济损失，从生产者责任和消费者责任 2 种视角确定 5 省的碳转移关键省份和关键减排部门。

研究结果表明

：

1. 碳中和政策的实施显著推动了我国煤炭消费与经济发展的脱钩，其中，CP_PBA 情景对山西和内蒙古等煤炭主产省区的经济发展冲击过大，GDP 损失分别高达 58.3% 和 65.3%。
2. CP_PBA 情景的碳配额分配方式会使得生产端碳排放格局发生颠覆性的变化，消费端碳排放大省同时也变成了生产端碳排放大省；而产煤大省在其工业部门生产大受打击的同时，居民消费也大幅降低。

建议

1. 山西省、内蒙古自治区、陕西省等主要煤炭基地实现低碳转型的难度较大，简单从生产侧“一刀切”的分配碳限额，会使得这些地区的经济社会发展将面临较大负面冲击。因此这些地区应

当以煤炭的清洁高效利用为基础,发展绿色电力,如太阳能、风力发电等新能源,逐步取代传统发电方式。

2. 在生产者视角的碳配额分配方式下,煤炭主产省的产量大幅削减,将会影响到全国的煤炭供应;在消费者视角的碳配额分配方式下,尽管我国整体GDP损失有所降低,但高碳密集型工业依旧面临严格的制约。因此国家在制定碳减排政策时,宜考虑省际的隐含碳排放转移,适当减轻煤炭主产区的减排责任,从区域协同的角度来因地制宜地推动各省的碳中和路径。

7.11.5 LEEEP 研究 | 碳中和目标下中国西北地区碳减排路径研究

- **原文标题:** Energy-related carbon emission reduction pathways in Northwest China towards carbon neutrality goal^[115]
- **发表年份:** 2024
- **发表期刊:** Applied Energy
- **作者:** Meng Xu, Silu Zhang, Panwei Li, Zhixiong Weng, Yang Xie*, Yan Lan**
- **文章链接:** [点击 LEEEP 微信公众号链接阅读推送原文](#)

研究背景

人类活动排放的温室气体是全球气候变暖的主要原因。为了应对这一挑战,《巴黎协定》就21世纪末全球气温升高不超过2°C,且要向控制在1.5°C之内努力达成政治共识。在这一全球背景下,中国作为世界上最大的碳排放国,提出了2030年前实现碳达峰和2060年前实现碳中和的目标。为了实现这一目标,需要采取多方面的努力,包括加快优化产业结构和能源供应去碳化等。评估减缓气候变化政策将如何影响能源、环境和经济链条,对于制定中长期碳减排路径至关重要。

实现气候目标对不同具有经济水平、能源禀赋和产业结构的地区的影响各不相同。然而,目前关于实现气候目标的影响研究大多集中在国家层面或经济较发达的地区,对欠发达地区的研究还相对匮乏,这导致无法为决策者因地制宜制定碳减排策略提供决策支持。除了地理区位因素以外,已有研究从行业(如钢铁、交通)层面分析了气候变化减缓目标下的碳减排潜力,但关于整体能源系统相关碳排放的研究还十分有限,这可能导致难以精准捕捉能源相关部门技术升级改造所带来的碳排放变化。因此,有必要对能源相关碳排放部门进行全面的评估。

本研究通过耦合IMED|CGE等多学科模型,从不同时间、空间和部门层面分析不同气候变化减缓情景下我国西北四省(青海、宁夏、甘肃和新疆)能源、环境和经济影响,阐明了欠发达地区在应对气候变化方面面临的挑战和所做出的努力,为因地制宜制定科学合理的碳减排路径提供决策支持。具体而言,本研究的结果将提供四个方面的启示:(1)气候变化减缓目标约束下西北四省的终端能源需求和能源消费结构如何;(2)气候变化减缓目标约束下各省份及其重点部门能源相关碳减排潜力如何;(3)气候变化减缓目标约束下大气污染治理协同效应如何;(4)实现不同碳减排目标的经济成本如何。

该成果是基于IMED综合评估模型体系取得的阶段性研究进展。IMED模型是在多个国家科技计划项目连续支持下,由北京大学LEEEP课题组联合国内外多个团队自主创新开发的综合评估模型,适用于国家、省级及全球多层次气候环境政策分析,揭示未来社会经济发展与能源资源、碳污排放的关联关系与脱钩机制,综合评估实现环境和发展多维目标的协同机制与成本效益。IMED模型体系相关成果发表于Nature Food(1篇)、Nature Communications(1篇)、One

Earth (2 篇)、Global Environmental Change (1 篇)、ES&T (5 篇)、iScience (3 篇) 等主流期刊。IMED 模型被联合国环境署 (UNEP) 列为旗舰综合评估模型之一，支撑《全球环境展望 7》(UNEP GEO-7) 的情景分析和路径寻优，服务于能源环境与气候政策综合决策，助力实现碳达峰碳中和、“美丽中国”及全球可持续发展目标。

研究方法

研究地区位于中国西北部的青海、宁夏、甘肃和新疆四省因其丰富的能源储量而成为主要的能源生产地 (图??)。2020 年，该地区煤炭、石油和天然气储量分别占全国资源储量的 15.0%、31.8% 和 21.0%，同时它也是风能和太阳能储量丰富的地区。该地区当地的能源消耗仍以煤炭为主，导致与能源相关的碳排放量巨大，2020 年占全国碳排放总量的 8.7%。为了减少碳排放，政府已经制定了严格的目标，包括青海 2025 年非化石能源消费比重达 18% 以上、宁夏 2030 年非化石能源消费占比超过 20% 等。在此背景下，西北四省在实现气候目标方面将面临巨大挑战，这也凸显了评估气候变化减缓情景下区域能源、环境和经济链条将如何相互作用的重要性。

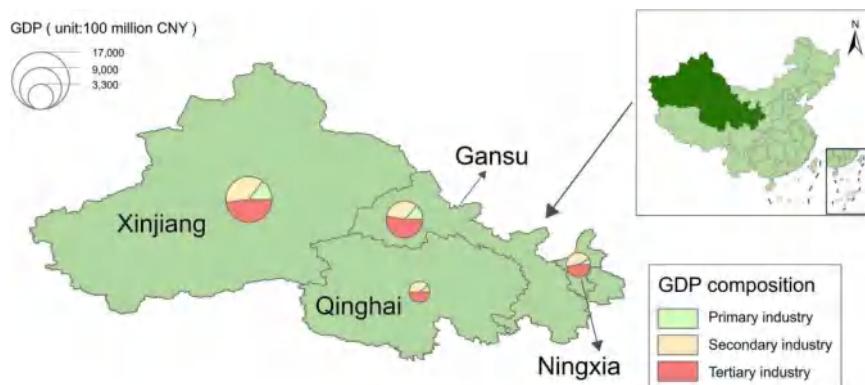


Figure 7.232: 研究区域

研究框架

本研究通过耦合 IMED|CGE 和 GAINS 模型，从“能源—环境—经济”层层递进的角度深入研究实现不同气候变化减缓目标的综合影响。在情景设计中，基于不同气候目标设置了基准情景 (BAU)、 2°C 目标情景 (2°C) 和 1.5°C 目标情景 (1.5°C)。具体研究框架如图7.233所示。

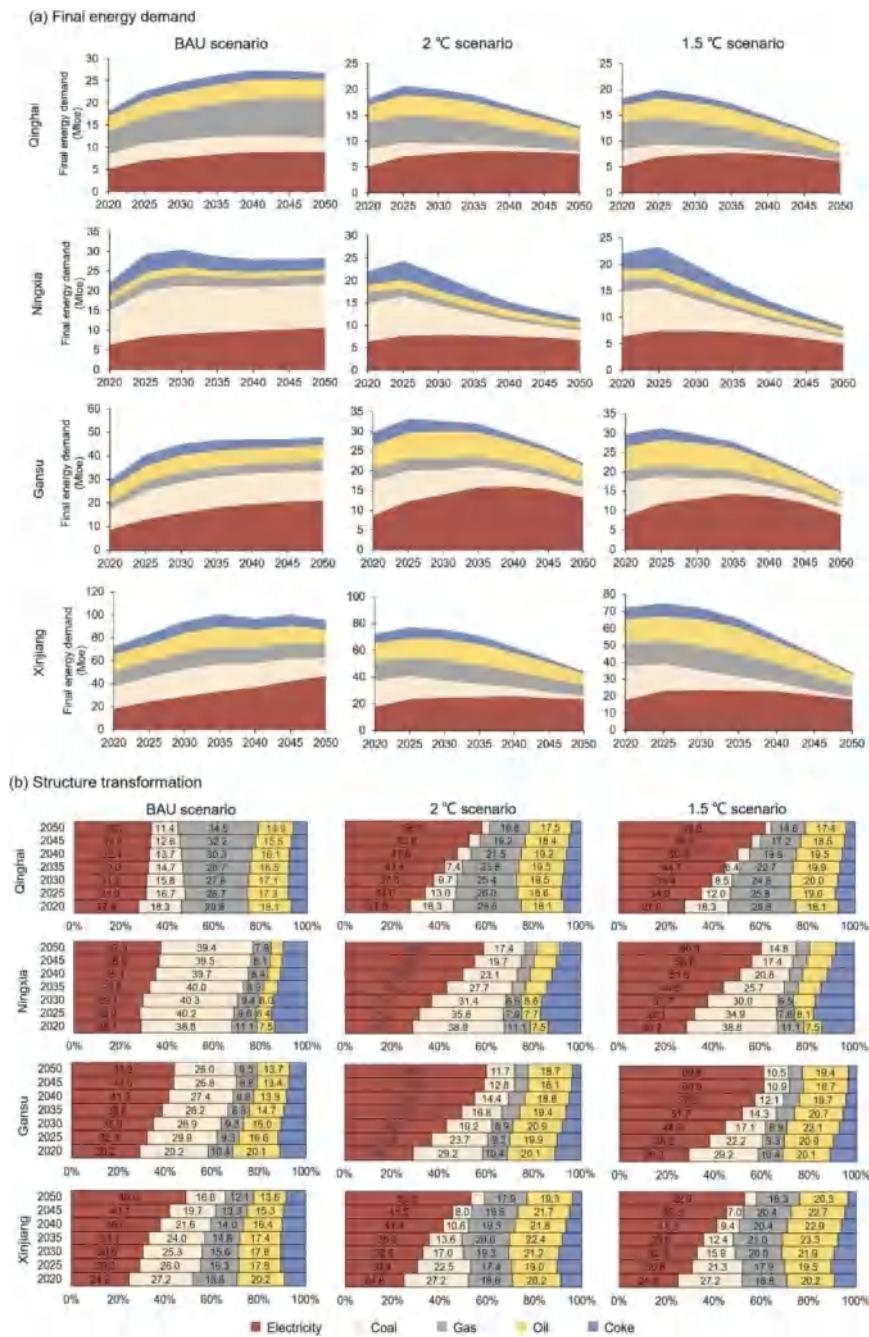


Figure 7.233: 研究框架

研究结果

终端能源需求

从发展趋势来看，不同情景下西北四省的能源需求量均呈先上升后下降的倒 U 型趋势（图7.234a）。与 BAU 情景相比，气候变化减缓情景下终端能源需求达到峰值的时间提前了数年，且煤炭、石油和天然气等化石燃料能源需求量下降大幅下降。BAU 情景下，青海、宁夏、甘肃和

新疆的终端能源消费将分别在 2040 年 (27.4 Mtoe)、2030 年 (30.4 Mtoe)、2050 年 (47.9 Mtoe)、2035 年 (100.3 Mtoe) 左右达到峰值，然后开始下降。在 2°C 情景下，对应省份的能源需求均会提前达到峰值，分别在 2025 年前后达到 20.6、24.4、33.2 和 77.3 Mtoe，2050 年的能源需求相比峰值将分别减少 37.3%、52.3%、33.5% 和 42.6%，且四省煤炭需求占比将从 2025 年的 13.0-35.8% 下降到 2050 年的 3.5-11.7%。在 1.5°C 情景下，能源需求将在 2025 年左右达到峰值，2050 年的能源需求相比峰值将分别减少 51.5%、64.7%、52.0% 和 54.5%，2025-2050 年期间，四省煤炭需求将减少 9.6-20.0%。

从能源结构来看，气候变化减缓情景下，四省能源需求结构得到显著优化，电力能源在所有能源中的占比显著增加（图7.234b），这也意味着未来西北四省将面临着电力需求加速增长的挑战，须尽早加快电网优化建设。BAU 情景下，青海、宁夏、甘肃和新疆 2050 年电力能源需求占比仅为 33.3-49.0%；在 2°C 情景下，电力能源需求 2050 年占比达 52.9-60.0%； 1.5°C 情景下终端能源电气化率更高。此外，气候变化减缓情景的能源需求量将大幅下降。BAU 情景下，青海、宁夏、甘肃和新疆 2050 年终端能源需求分别为 26.8、28.3、47.9 和 95.3 Mtoe；在 2°C 情景下，2050 年各省终端能源消费总量将分别下降至 12.9（相比 BAU 减少了 51.9%）、11.6（59.0%）、22.1（53.9%）和 44.4（53.4%）Mtoe。整体来看，为实现温控目标，应加快能源结构去碳化，限制能源总需求的激增。

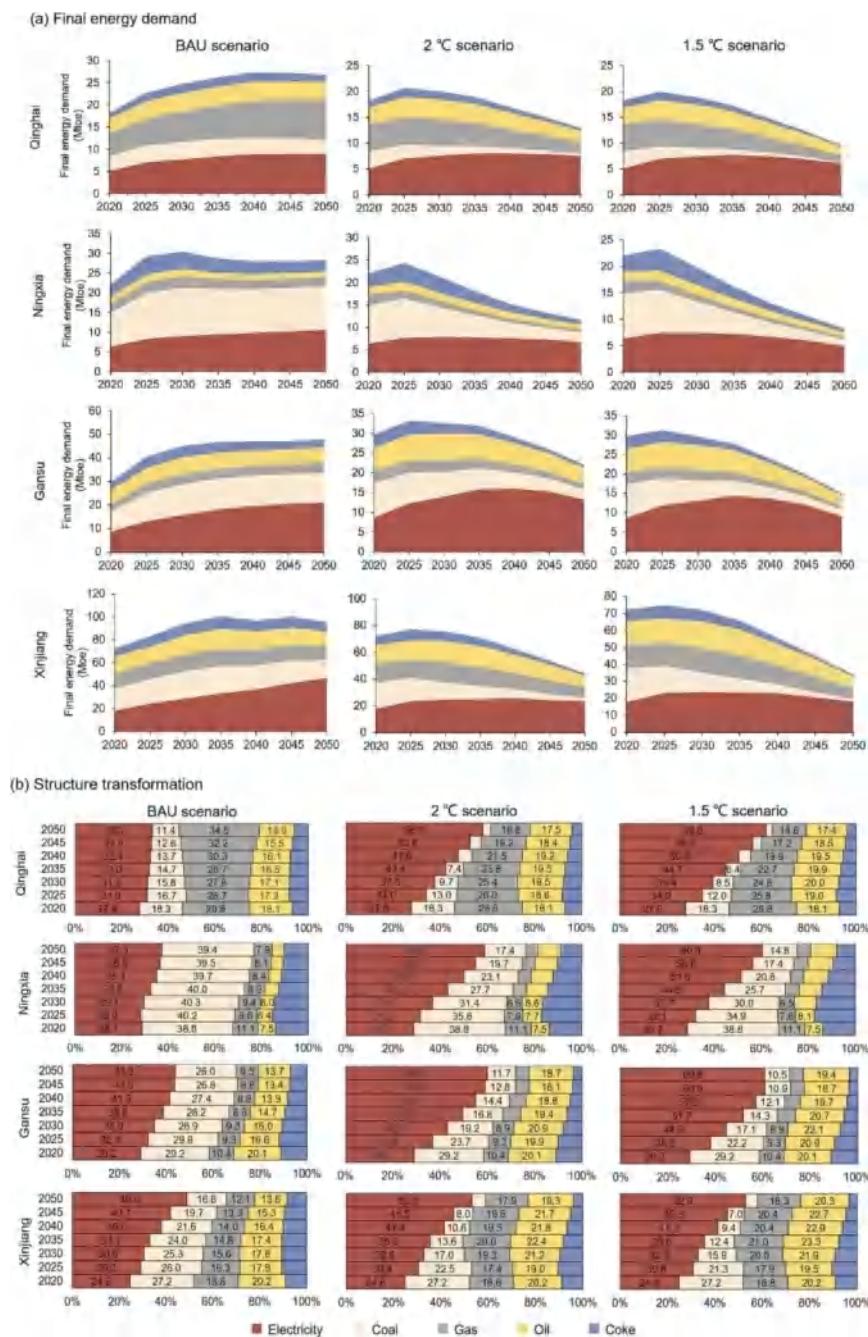


Figure 7.234: 不同情景下 2020-2050 年终端能源需求量 (a) 和结构特征 (b)

碳排放

气候变化减缓情景下，四省能源相关碳排放显著减少，且提前实现碳达峰（图7.235a）。BAU 情景下，青海、宁夏、甘肃和新疆碳排放将在 2030 年左右达到峰值，约为 60.6、208.0、187.7 和 466.7 Mt；然后分别下降到 2050 年的 53.0、143.9、159.7 和 335.0 Mt。在 2°C 情景下，四省碳排放将在 2025 年左右达到峰值，约为 53.7、192.8、155.4 和 424.8 Mt；与 BAU 相比，

2°C 情景下的峰值提前了约 5 年，峰值分别降低了 11.4%、7.3%、17.2% 和 9.0%；到 2050 年， 2°C 情景下四省碳排放分别为 22.4、61.1、77.1 和 161.3 Mt。在 1.5°C 情景下，四省 2025 年碳排放相比 2°C 情景将分别降低 2.9%、7.9%、4.3% 和 2.2%。尽早实现碳峰值将赢得时间，并增加以低成本实现碳中和的可能性，同时可增加其他部门的碳减排空间。

从不同部门来看，发电部门和工业燃烧过程是四省主要的碳排放源，同时也是影响碳达峰和碳中和的关键行业，在不同气候变化减缓情景下的减排贡献十分显著（图7.235b 和 c）。例如，2020 年青海、宁夏、甘肃和新疆的这些部门碳排放量分别占总碳排放量的 66.2%、87.9%、69.4% 和 81.3%。在 2°C 情景下，相应省份工业燃烧过程 2050 年碳减排量将分别占总减排量的 78.0%、32.2%、30.1% 和 25.5%；四省份发电部门 2030 年碳减排贡献率分别为 5.9%、59.6%、42.2%、58.9%。其他部门，如居民和交通部门，对碳减排的贡献相对有限。例如，与 BAU 相比， 2°C 情景下四省 2050 年居民和交通部门的碳减排贡献率分别仅为 1.2-5.7% 和 3.3-13.7%。

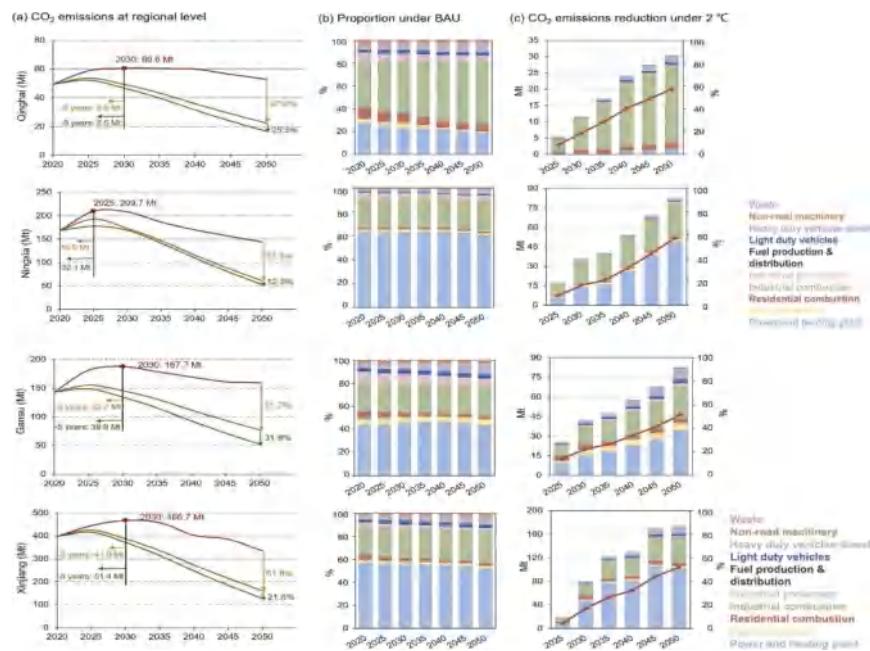


Figure 7.235: 不同情景下各省份碳排放量 (a)、各部门碳排放占比 (b) 和各部门碳减排潜力 (c)

大气污染物协同减排与空气质量改善

实现气候变化减缓目标进程中的减碳措施可协同减少大气污染物排放。从减排绝对量来看，在气候变化减缓情景中， NO_x 的绝对减少量普遍高于 SO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ （图7.236）。从减排百分数来看，与 NO_x 和 $\text{PM}_{2.5}$ 相比，实现气候目标能更有效减少 SO_2 排放，例如，与 BAU 相比， 2°C 情景下，2025-2050 年四省 SO_2 、 NO_x 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量将分别减少 9.3-45.5%、1.8-38.8% 和 6.4-26.2%；与 2°C 情景相比， 1.5°C 情景下，2025-2050 年四省 SO_2 、 NO_x 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量将分别减少 2.1-11.8%、0.9-11.7% 和 1.0-3.9%。研究结果还表明，深度碳减排带来的额外大气污染物减排量的边际效应逐渐下降，主要体现在 1.5°C 情景与 2°C 情景之间的大气污染物减排潜力显著低于 2°C 情景与 BAU 情景之间的减排潜力。

从大气污染物浓度来看，与 BAU 相比， 2°C 情景下 2030 年青海、宁夏、甘肃和新疆 $\text{PM}_{2.5}$

浓度将分别下降 $0.95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (4.4%)、 $0.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (2.6%)、 $0.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (2.8%) 和 $2.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (7.2%); 2050 年四省 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度将分别下降 5.4%、4.8%、2.3% 和 5.8%，**但仍高于世界卫生组织空气质量指导值**。

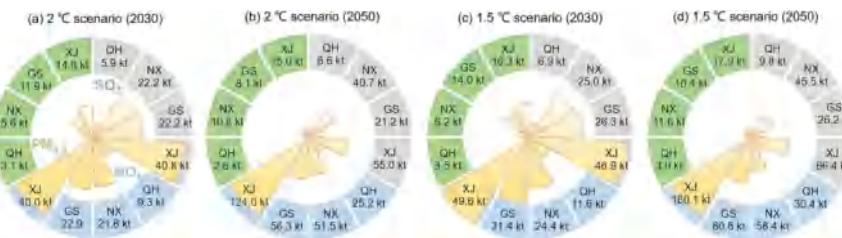


Figure 7.236: 不同情景下大气污染物排放量的减少情况

$\text{PM}_{2.5}$ concentration under different scenarios (unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$).							
Region	Scenario	Period	2020	2025	2030	2035	2040
							2045
Qinghai	BAU	22.3	21.7	21.7	21.5	21.4	21.5
	2°C	22.3	21.0	20.7	20.5	20.4	20.5
	1.5°C	22.3	20.8	20.7	20.4	20.3	20.1
Ningxia	BAU	31.6	30.9	30.7	30.4	30.3	30.1
	2°C	31.6	30.5	29.9	29.7	29.2	28.9
	1.5°C	31.6	30.4	29.8	29.6	29.1	28.4
Gansu	BAU	29.8	29.3	29.2	29.2	29.5	29.7
	2°C	29.8	28.4	28.4	28.5	28.9	29.2
	1.5°C	29.8	28.3	28.2	28.3	28.6	28.9
Xinjiang	BAU	44.3	40.5	38.6	36.9	35.8	35.3
	2°C	44.3	38.9	35.8	34.9	34.1	33.6
	1.5°C	44.3	38.3	35.8	34.5	33.7	33.0

Figure 7.237: 不同情景下 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度

碳减排成本

各省 GDP 将不可避免地因减缓气候变化而遭受差别化损失，这也是向低碳转型的经济成本。本研究评估了不同情景下的 GDP 绝对值、损失量和损失率（图7.238）。从绝对值来看，**整个评估期内各情景下的 GDP 最高的是新疆，其次是甘肃、宁夏和青海**。在 BAU 情景下，2050 年四省 GDP 将分别为 7,691、4,004、1,694 和 1,217 亿美元；在 2°C 情景下，2050 年这四个省份的 GDP 损失将分别约为 206、217、156 和 50 亿美元。就 GDP 损失率而言，与 BAU 相比，2°C 情景下 2050 年 GDP 损失率为 2.7% (新疆) - 9.2% (宁夏)。1.5°C 情景下，四省的 GDP 损失高于 2°C 情景下的 GDP 损失，2050 年分别为 393 (5.1%)、527 (13.1%)、287 (16.9%) 和 115 (9.4%) 亿美元。

从发展趋势来看，GDP 损失值随着时间的推移逐渐增加。具体而言，2°C 情景下 2030 年四省的，GDP 损失值分别为 3.7、14、22 和 12 亿美元左右，2050 年将增加至 50、156、217 和 206 亿美元。此外，在 1.5°C 情景下，四省的 GDP 损失值更高，在 2030 年和 2050 年的分别达到 66 和 115 亿美元、19 和 287 亿美元、35 和 528 亿美元、18 和 393 亿美元。这也可以说，碳减排的成本在未来将逐渐增加，未来应更多地发展新兴战略产业和对资源依赖程度较低的产业，使经济发展与碳排放脱钩。

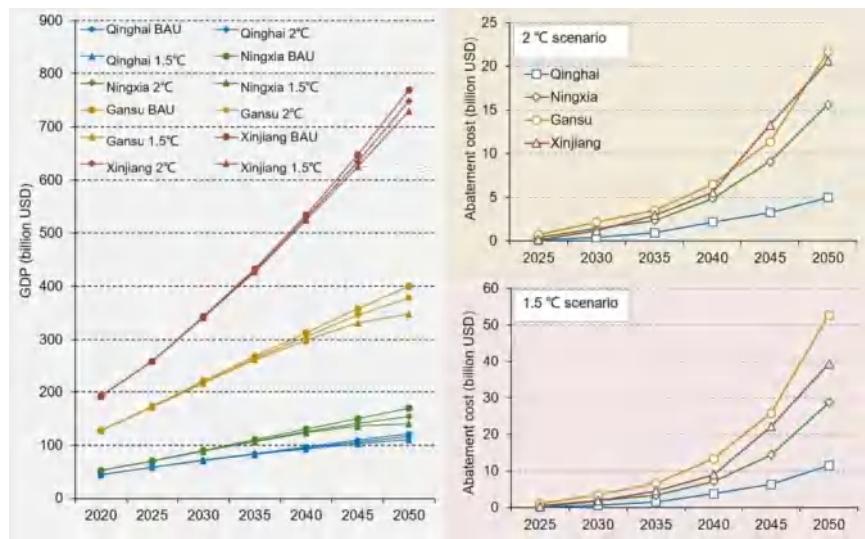


Figure 7.238: 不同情景下 GDP 变化和碳减排成本

研究结论

面对经济发展与减缓气候变化的双重压力，我国尤其是欠发达地区面临着严峻挑战。在此背景下，本研究分析了实现气候变化减缓目标对西北地区能源、环境和经济的影响，可为制定和优化低碳发展策略提供决策支持。为实现气候变化减缓目标，应加强能源结构去碳化，并限制能源总需求的激增。在 2°C 情景下，2050 年四省电力能源占能源需求总量的比例约为 52.9-60.0%，终端能源需求总量与 BAU 相比将下降 51.9-59.0%。发电部门和工业燃烧过程是四省主要的碳排放源，同时也是碳减排潜力较大的重点部门，然而，除了在这些行业实施常规碳减排措施外，还应加强对难以实现碳减排的行业（如居民和交通部门）的关注，并在全社会引导低碳消费模式。

实现气候变化减缓目标对空气污染治理具有协同作用。在 2°C 情景下，2025-2050 年四省 SO₂、NO_x、PM_{2.5} 排放量较 BAU 将分别下降 9.3-45.5%、1.8-38.8% 和 6.4-26.2%，并有效提升空气质量。实现气候变化减缓目标将带来一定的经济损失，在 2°C 情景下，2050 年四省 GDP 与 BAU 相比将下降 2.7%（新疆）-9.2%（宁夏）。因此，在制定碳减排路径时，既要确保实现气候变化减缓的目标，同时也要关注当地经济的优化和大气污染的改善。

图片

作者简介

第一作者简介

徐萌，武汉工程大学管理学院讲师（2022~）。2012 年获中央民族大学学士学位，2015 年获中央民族大学硕士学位，2022 年获北京航空航天大学博士学位。主要从事能源环境与气候政策研究，着重运用综合评估模型探索不同地区和行业可持续低碳转型路径及其环境、健康、经济影响。主持湖北省教育厅高等学校哲学社会科学研究青年项目，参与国家自然科学基金青年项目、面上项目和重点项目课题等，入选奥地利国际应用系统分析研究所 2020 年度青年科学家项目。以第一或通讯作者在 Transportation Research Part D: Transport and Environment、Applied Energy、Environmental Research Letters、Environmental Pollution、Science of The Total Environment 等环境领域权威期刊发表 SCI/SSCI 检索论文 9 篇（中科院 TOP 期刊 6 篇，ABS3

级 1 篇)。

通讯作者简介

谢杨, 北京航空航天大学经济管理学院副教授, 博士生导师。主要从事空气污染和气候变化对人群健康和宏观经济影响研究, 定量评估清洁空气与气候政策的成本与效益。主持国家自然科学基金青年项目、面上项目和重点项目课题、科技部国家重点研发计划课题等项目, 入选北航“青年拔尖人才支持计划”、北航“卓越百人计划”等。以第一或通讯作者在 *Nature Communications*, *One Earth*, *Lancet Regional Health*, *Global Environmental Change*, *Environmental Science & Technology* 等环境与健康领域权威期刊发表 40 余篇, ESI 前 1% 高被引论文累计 8 篇。担任 *Energy, Ecology and Environment* 期刊的领域编辑、《中国碳中和与清洁空气协同路径》执笔作者、《全球疾病负担》Collaborator。



A photograph showing an aerial view of a coastal landscape. The foreground is dominated by a bright green field, likely a rice paddy, with a small body of water reflecting the sky. A winding river or path cuts through the greenery. In the background, the ocean is visible with some white foam, suggesting waves crashing against a shore.

8. LEEEP 新闻频道

8.1 国内外交流

2023 年是北京大学的国际战略年，LEEEП 课题组积极响应学校号召，推进科研国际协同创新，实现高质量合作，促进了气候环境方面的国际交流。近年来，LEEEП 组与本领域国际顶尖的综合评估模型团队开展了多项高水平实质性合作，包括受邀参与日本 AIM 团队年度研讨会（[链接：LEEEП 组研究生获第 29 届 AIM 年会最佳海报奖](#)），与韩国延世大学 IAM 模型团队签署战略合作协议（[链接：LEEEП 组与韩国延世大学携手合作](#)），与奥地利 IIASA 模型团队深度合作（[链接：LEEEП 课题组访问国际应用系统分析研究所](#)），与荷兰 PBL IMAGE 模型团队围绕《全球环境展望 7》（GEO-7）报告的密切合作，受邀与德国 PIK REMIND 团队联合申请欧盟地平线项目，以及与美国 PNNL GCAM 团队教员互访（[链接：马里兰大学 Nathan Hultman 教授来访环境学院](#)）等。

与此同时，LEEEП 组负责人戴瀚程研究员深度参与国际性大科学计划。例如，代表北京大学加入气候政策评估领域的全球顶级学会—综合评估模型联盟（IAMC）（[链接：北京大学碳中和研究院正式成为综合评估模型联盟成员单位](#)），作为贡献作者撰写了联合国气候变化旗舰报告《IPCC AR6》（[链接：LEEEП 组成果支撑 IPCC AR6 多个关键内容](#)）。作为主笔作者撰写联合国环境规划署（UNEP）环境变化旗舰报告 GEO-7 主报告（[链接：LEEEП 负责人出席联合国 GEO-7 全球作者会](#)）、GEO-6 城市特别报告（[链接：联合国报告推介北京市减污降碳经验](#)）。相关成果在高层级国际场合受到时任生态环境部长李干杰与联合国前秘书长潘基文高度关注（[链接：IMED 最新研究成果获潘基文与李干杰高度关注](#)）。

LEEEП 课题组的国际交流与合作进一步彰显了我国青年一代研究团队参与全球气候环境治理的活跃度，推进了我国综合评估模型的发展，并促进了气候治理人才的培养。这些合作不仅加深了全球对中国科研团队的了解，还增强了国际社会对中国科研实力的认可，有效传递了中国声音，为应对气候环境危机贡献了中国的智慧和方案。展望未来，LEEEП 课题组将持续加强在国际科研合作领域的作用，为实现全球可持续发展目标贡献积极力量。

8.1.1 国际交流 | LEEEП 课题组访问国际应用系统分析研究所

- [详情请见公众号](#)

2024 年 1 月 14 日，北京大学 LEEEП 课题组一行 6 人抵达位于奥地利拉克森堡的国际应用系统分析研究所（IIASA），开启了为期 11 天的短期交流访问，期间与多名资深学者深入探讨交流，展望未来合作方向。

北京大学与 IIASA 的合作历程

IIASA 是于 1972 年成立的多学科交叉、非盈利、非政府国际学术组织，其总部位于奥地利维也纳，成立宗旨是联络世界各国科学家和学者，开展以政策为导向的研究工作，解决单个国家或学科难以独立承担的复杂问题。IIASA 专注于全球、区域性的热点问题进行跨学科研究，如能源、都市、生态、环境、气候变化、人口、粮食与水、经济、贫困与公平等社会问题，在国际学术界享有极高声望。

北京大学与 IIASA 的深入合作展现了科学研究跨国界的巨大潜力。双方的合作关系自 2002 年国家自然科学基金委员会代表中国加入 IIASA 以来稳步发展，在环境科学、人口学、经济学等多个领域开展了深入合作，实现了两个机构在教育和科研上的互补和共同进步。

2018 年以来，北京大学历任校领导多次访问 IIASA，在深化合作领域的同时，探索了包括博士后联合培养在内的多类合作，迄今累计联合培养了近 20 名青年科研人才。2023 年 4 月，龚旗

煌校长的再次专程访问标志着双方合作迈上一个新台阶。龚校长对 IIASA 长期以来的支持表示感谢，并承诺将在气候变化和“双碳”领域进一步加强合作，共同构建国际顶尖人才的交流平台。双方多年的合作不仅巩固了学术友谊，也对全球气候环境挑战的解决做出了重要贡献，展示了国际科研合作在推动全球可持续发展中的关键角色。

LEEEP 课题组与 IIASA：交流与成果

在北大与 IIASA 校所层面的合作框架下，LEEEP 课题组自 2017 年成立以来，与 IIASA 多个项目组以暑期青年科学家项目（YSSP）、联合培养博士后、欧盟地平线项目、国家科技部双边合作项目等形式建立了深入的高水平合作关系。双方通过耦合 LEEEPP 组自主开发的 IMED 综合评估模型与 IIASA 多个模型，逐步建成了适用于国家、省级及全球多层次政策分析的北京大学综合评估模型体系，在 *Nature Food*, *Nature Communications*, *One Earth* 等高水平期刊上合作发表了 20 余篇学术论文，并培养了 10 余名博士生、博士后。

本次访问期间，戴瀚程研究员受邀在 IIASA 的 BNR（生物多样性与自然资源）和 ECE（能源、气候与环境）两个研究中心分别作了题为 “**A tale of two institutions between IIASA and PKU (LEEEP): 7-year joint research and education**” 的主旨报告。报告系统回顾了 7 年来 LEEEPP 课题组与 IIASA 在模型研发、项目合作、人才培养等各方面的合作状况与成果，并展望了未来深化合作的具体研究方向，获得了现场听众热烈反响。



Figure 8.1: 戴瀚程研究员在 BNR 组作学术报告



Figure 8.2: 戴瀚程研究员在 ECE 组作学术报告

报告结束后，LEEEPE 课题组成员与 IIASA 十余名项目主管及骨干进行了一对一的深入讨论，涉及了气候减缓目标的土地利用影响、生物多样性保护、居民部门减排以及气候能源安全等议题。通过这些讨论，双方分享了最新的研究成果，并进一步探讨了未来潜在的合作要点。



Figure 8.3: LEEEPE 团队成员与部分 IIASA 学者进行交流

8.1.2 国际交流 | LEEEP 组负责人受邀出席联合国 GEO-7 全球作者会

- 详情请见公众号：LEEEP 组负责人受邀出席联合国 GEO-7 全球作者会

联合国全球环境展望

全球环境展望是联合国环境规划署（UNEP）的一项核心倡议，旨在提供全面、权威的环境评估报告，指导全球环境治理和可持续发展政策的制定。自 1995 年首次发布以来，GEO 报告已为评估全球环境状况和趋势、指明政策干预方向做出了重要贡献。

2020 年发布的 GEO-6 报告中再次强调了环境问题的紧迫性，指出不能在环境问题发生后再进行治理，当前环境损害的速度远超人类的常规应对能力。报告呼吁必须从根本上转变经济、能源、食物和物质/废物等引发环境损害的关键系统。

2023 年启动的新一轮 GEO-7 报告将探讨如何采用系统转型的方法来实现既定的全球环境目标，解决多重环境危机。与以往报告侧重在“需要转型”不同，GEO-7 将聚焦于“如何转型”，旨在填补过去 30 年的评估中未能指明“如何实现”转型的空白。报告将通过量化模型评估系统转型的社会经济以及环境影响，为政策制定者提供具体的解决方案和行动路径，以最大化协同效益并最小化负面影响。

多年来，北京大学环境科学与工程学院相关教员以从基础科学到智库决策相融合的全链条研究体系，多层次、持续支撑环境履约与全球环境治理。十余人次多期参与到环境公约的科学技术国际团队并提供关键科学证据，4 人担任共同主席，多次获联合国等国际机构表彰。



Figure 8.4: GEO-7 全体作者

GEO-7 旗舰报告

北京大学 LEEEP 课题组自成立以来，逐步自主建成了适用于国家、省级及全球多维度政策分析的北京大学综合评估模型体系（IMED），研究工作为寻求绿色低碳转型优化路径提供了坚实的决策依据。有鉴于此，戴瀚程研究员继在 GEO-6 城市专题报告中担任主笔作者后，再次被邀请作为

主笔作者参与到最新一期 GEO-7 旗舰报告的撰写工作中。借此契机，戴瀚程研究员与国际顶尖的 IAM 模型团队（荷兰 IMAGE 与日本 AIM）合作开发和应用新一代综合评估模型。**IMED 模型**也作为首个由中国高校团队主导开发的综合评估模型（IAM），被选为支撑 GEO-7 情景研究的旗舰模型之一。



Figure 8.5: 戴瀚程研究员在 GEO-7 主会场

2024 年 1 月 15 日，戴瀚程研究员受邀作为亚太地区作者团队成员赴维也纳召开 GEO-7 第二次作者会议，围绕亚太地区的转型路径进行了深入的讨论，提出了具有中国视角和全球视野的科学建议。会议期间，戴瀚程研究员还基于对 IAM 模型研发的丰富经验，与荷兰 PBL 模型团队 Detlef P. van Vuuren 教授等著名学者一道（图 3），以 “How to “consume” GEO-7 FOD results from the global models: a preliminary Analysis” 为题，向全球作者解析了综合评估模型的核心情景结果，有效推动了会议的进程，获得了与会学者的高度赞扬。此外，戴瀚程研究员还负责以中国为典型国家案例，继 GEO-6 介绍北京经验后（[链接：联合国报告推介北京市减污降碳经验](#)），再次向国际社会展示中国在绿色低碳转型方面的最新进展和重要经验。



Figure 8.6: 戴瀚程研究员与荷兰皇家科学院院士、PBL IMAGE 模型团队 Detlef 教授（右一）等著名学者共同解析 IAM 模型

此外，在会议期间戴瀚程研究员也同全球亚太、西欧、拉美、东欧、非洲等地区的高水平学者进行了分组研讨，深入讨论了因地制宜的环境、能源、粮食系统未来转型路径。一方面，给与会大同行学者们进一步普及了 IAM 模型的基础知识和适用性，讲解了全球 IAM 模型在地区层面的关键结果。另一方面，也通过与各国资深专家现场研讨，识别了各地不一的气候环境挑战和优先关切议程，有望促进 LEEEP 组未来开展更有现实意义的全球气候环境政策研究。

与会期间，戴瀚程研究员也同亚太、西欧、拉美、东欧、非洲等全球地区的高水平学者进行了分组研讨（图 4）。一方面，给与会学者们进一步普及了 IAM 模型的基础知识和适用性，讲解了全球 IAM 模型在地区层面的关键结果。另一方面，也通过与各国资深专家现场研讨，识别了各地不一的气候环境挑战和优先关切议程，深入讨论了因地制宜的环境、能源、粮食系统未来转型路径。这些交流有望促进 LEEEP 组未来开展更有现实意义的全球气候环境政策研究。



Figure 8.7: 戴瀚程研究员向各地区作者讲解 IAM 模型情景结果（左上：亚太地区；右上：拉美地区；左下：东欧地区；右下：西欧北美地区）

8.1.3 北京大学碳中和研究院正式成为综合评估模型联盟（IAMC）成员单位

- 详情请见公众号：北京大学碳中和研究院正式成为综合评估模型联盟（IAMC）成员单位

2023 年 9 月，经过多轮筹备和严格审议，北京大学碳中和研究院作为成员单位正式加入了气候政策评估领域的全球顶级学会—综合评估模型联盟（Integrated Assessment Model Consortium, IAMC），通讯代表为碳中和研究院双聘研究员戴瀚程。这意味着北京大学碳中和研究院在综合评估模型领域获得了国际同行的认可，也标志着北京大学在全球气候变化研究领域的国际参与度和影响力进一步提升。



Figure 8.8: 北京大学碳中和研究院正式成为 IAMC 成员单位 (图片源: IAMC 主页)

综合评估模型 (IAM)

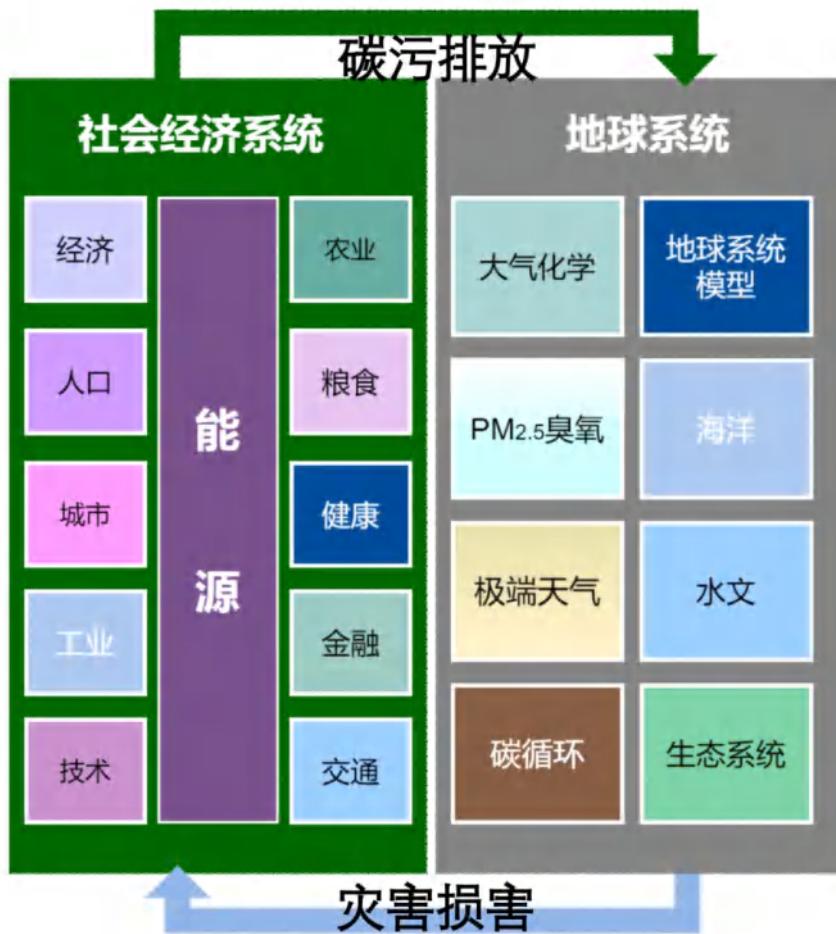


Figure 8.9: 刻画人类—自然系统多元复杂构造的典型综合评估模型体系

气候变化综合评估模型依托多学科底层基础理论支撑，刻画人类—自然系统的多元复杂构造，旨在系统而定量地模拟自然环境系统和人类能源经济系统、社会系统之间的联动和反馈，可以有效弥补基于单一学科研究方法而难以全面分析整体温室气体减排和社会经济绿色转型的不足。IAM 模型对于气候政策的量化评估一直是联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）历届《气候变化评估报告》以及国际气候谈判、各国减排目标制定的重要科学基础。耶鲁大学的威廉·诺德豪斯教授因创立全球首个综合评估模型（DICE）而获得 2018 年度诺贝尔经济学奖。

全球综合评估联盟（IAMC）

IAMC (Integrated Assessment Modeling Consortium) 是聚集了全球近百所顶级研究机构的国际联盟，致力于应对气候变化和可持续发展的重大挑战。该组织利用多种类型的综合评估模型（Integrated Assessment Models, IAMs）来评估气候变化、能源系统和环境政策的跨系统综合影响。IAMC 发起单位包括奥地利国际应用系统分析研究所（IIASA）、美国西北太平洋国家实验室（PNNL）、日本国立环境研究所（NIES）、德国波茨坦气候影响研究所（PIK）以及荷兰环境规划院（PBL）等全球知名综合评估模型开发团队。成员组织包括斯坦福大学、哥伦比亚大学、苏黎世联邦理工学院、英国帝国理工学院等世界知名学府，美国能源部多所国家实验室以及联邦环保署等政府研究机构，以及世界银行等非政府组织。IAMC 成员积极参与 IPCC 历届《气候变化评估报告》的编写和审查工作，担任包括首席主笔作者、主笔作者等重要职务。

IAMC 历届终身成就奖得主



Figure 8.10: IAMC 历届终身成就奖得主

北京大学碳中和研究院

北京大学碳中和研究院是北京大学面向国家“双碳”战略需求重点布局建设的四大交叉平台之一，针对气候变化与生态环境问题的数据库与模型模拟平台建设是研究院的优先支持方向之一。成为 IAMC 成员之后，研究院将在科学研究、人才培养、社会服务和国际合作等方面依托 IAMC 平台，强化有组织的科研，深入研究全球气候变化与能源环境政策，积极推动全球气候合作与创新，为持续推进国家“双碳”目标和全球应对气候变化进程贡献北大力量和中国智慧。



Figure 8.11: 北京大学碳中和研究院战略愿景

北京大学综合评估模型体系

北京大学相关团队在 IAM 模型方面开展了长期理论研究与应用实践，通过自主研发建模与引进国际先进模型相结合，开发/引进了如 IMED, GCAM, GAINS, GLOBIOM 等国内外知名综合评估模型体系，形成了深厚的底层建模技术积累和人才梯队储备。基于综合评估模型方法的研究成果已逐步获得国内外同行的认可，相关成果发表于 Nature Climate Change, Nature Sustainability, Nature Food, Nature Water, Nature Plants, Nature Communications, One Earth 等国际主流期刊。此外，在碳中和院等机构支持下，北京大学于 2023 年 8 月组织了第一届碳中和综合评估模型研讨培训会，30 余所国内外院校近 50 位本硕博师生参与，万余人次线上关注。



Figure 8.12: 第一届碳中和综合评估模型研讨会

8.1.4 北京大学 LEEEП 组与韩国延世大学携手探索全球低碳转型之路

- 详情请见公众号：北京大学 LEEEП 组与韩国延世大学携手探索全球低碳转型之路

近年来，北京大学 LEEEП 组通过深度参与联合国 IPCC 与 UNEP 国际大科学计划、受邀承担欧盟地平线项目、积极构建中日韩三国低碳研究网络、担任北大驻综合评估模型领域全球顶级学会 IAMC 首席代表等多种形式，建立了与全球知名综合评估模型主流团队的实质性合作关系和常态化交流机制，共同致力于推动亚洲和全球的低碳转型和可持续发展研究与人才培养。作为 LEEEП 组国际交流的重要系列活动之一，2023 年 4 月 24-26 日，应韩国潘基文基金会可持续发展项目主任、延世大学 Tae Yong Jung 教授的邀请，LEEEП 团队负责人戴瀚程研究员带队抵达首尔，参加“东北亚电力供应模型国际研讨会”。这一学术盛会汇聚了日本国立环境研究所芦名秀一研究员与增井利彦教授、韩国国家环境研究院 Kim Yong-Gun 研究员、延世大学 Tae Yong Jung 教授、北京大学戴瀚程研究员、美国威斯康星大学等机构的杰出建模学者，共同探讨电力规划模型的构建、低碳转型策略，以及区域合作的实践路径，分享在能源转型和气候变化适应方面的创新成果和策略。



Figure 8.13: 东北亚电力供应模型研讨会合影 (摄于 2023 年 4 月)



Figure 8.14: 中日韩主流综合评估模型专家研讨



会议期间，戴瀚程研究员与 Tae Yong Jung 教授书面明确了延世大学—北京大学相关团队

合作意向，确定了未来于中韩两国定期召开国际研讨会、互派访问学生学者等常态化交流机制。本次会上，戴瀚程研究员系统介绍了基于团队自主开发的 IMED 综合评估模型开展的绿色低碳政策多维影响的前沿研究进展。**LEEEP 团队博士后黄晨以及博士生朱衍磊展示了关于中国电力低碳发展的研究。**

据悉，IAMC 下一届年度顶级学会将于 2024 年 11 月 5-7 日在延世大学举办，并由延世大学 **Tae Yong Jung 教授**与韩国国家环境研究院 **Kim Yong-Gun 研究员**担任承办方共同主席。本次研讨会不仅为低碳转型政策制定提供了科学依据，也促进了与本领域优势核心团队的对话与合作，进一步拓展了 LEEEP 团队成员的国际视野。



Figure 8.15: 戴瀚程研究员与 Tae Yong Jung 教授探讨双方合作意向（摄于 2023 年 4 月）

继 4 月的交流后，作为双方合作的重要后续活动，LEEEP 团队在 11 月 2 日再次受邀赴韩，参与在首尔举办的“**国际工业和电力部门建模技术研讨会**”。本次研讨会集聚了日本地球创新技术研究所、韩国国家环境研究院、北京大学、首尔大学、延世大学、美国威斯康星大学麦迪逊分校以及亚洲理工学院等机构的行业建模学者，聚焦于工业与电力行业在实现碳中和目标中的关键角色，尤其是在模型建立和能源需求预测、低碳技术发展方面的前沿研究。会议期间，**LEEEP 团队的博士后任明和博士生朱衍磊就钢铁行业**（相关推送：LEEEP 研究 | 从供给和需求两侧助力中国钢铁行业实现碳中和）、**水泥行业**（相关推送：LEEEP 研究 | 负排放技术：中国水泥行业脱碳的关键）以及**电力行业**（相关推送：LEEEP 研究 | 气候变化对中国发电基础设施的潜在影响）**的净零排放路径**的最新研究进行了汇报，并与全球专家就模型在政策制定和实践中的应用进行了深入交流。



Figure 8.16: 2023 年 11 月会议合影 (摄于 2023 年 11 月)



Figure 8.17: LEEEП 团队成员朱衍磊向国际同行汇报 (摄于 2023 年 11 月)

北京大学与韩国延世大学之间的协作，体现了国际学术界在气候变化这一全球性问题上的高度关注和紧密合作。未来数年，通过双方的合作努力，不仅可提升研究质量，也将促进人才培养，助力实用解决方案提出，进而为全球环境的可持续发展贡献力量。

延伸阅读

延世大学 (Yonsei University) 位于韩国首尔，建于 1885 年，是韩国历史上最为悠久的大学之一，是韩国大学入学考试成绩前百分之一的学生才能考进的超一流大学之一，在 2023 年 QS 世界大学排名中位列第 73 位，与首尔国立大学 (Seoul National University) 和高丽大学 (Korea University) 并称为韩国三大超一流大学，简称 “SKY”。

此外，LEEEP 团队近年来积极参与、支撑并发起多项国内外学术交流活动，受到国内外同行的密切关注，最新研究连续多年受到欧盟气候变化评估模型进展追踪报导。戴瀚程研究员作为贡献作者撰写了联合国气候变化旗舰报告《IPCC AR6》第三卷 ([报道链接：LEEEP 组成果支撑 IPCC AR6 多个关键内容](#))。作为主笔作者撰写联合国环境规划署 (UNEP) 环境变化旗舰报告《全球环境展望 7》主报告、《全球环境展望 6：城市》特别报告 ([报道链接：LEEEP 组助力联合国报告向全球推介北京市减污降碳经验](#))。共同组织了中国能源模型论坛 (CEMF) CGE 多模型对比，提升了国内模型透明度和可比性 ([报道链接：IMED 合作 | 中国多模型对比：碳税的一般均衡分析](#))。发起了北京大学第一届碳中和综合评估模型研讨会暨培训会，助力我国双碳事业综合性人才培养 ([报道链接：北京大学第一届碳中和综合评估模型研讨会圆满落幕](#))。同时，团队多篇研究成果支撑了 IPCC AR6 报告，被正面引用 20 余次 ([报道链接：LEEEP 组多篇论文被 IPCC AR6 引用](#))，涉及减污降碳政策的政策减排效果、经济代价和协同效益评估等重要议题 ([报道链接：LEEEP 研究 | 课题组支撑 IPCC AR6 的论文一览](#))。

8.1.5 活动回顾 | 气候变化政策的健康协同效益综合评估研讨会顺利举办

• 详情请见公众号

全球气候变化对地球系统和社会经济的影响受到广泛关注。为进一步推动应对气候变化研究与学术合作，2019 年 7 月 1 日，由北京航空航天大学经管学院主办、北京大学环境科学与工程学院协办的“气候变化政策的健康协同效益综合评估”双边研讨会正式举办。

会议邀请到了日本国立环境研究所 (National Institute for Environmental Studies, NIES) 亚太综合模型 (Asia-Pacific Integrated Model, AIM) 团队的参与，同时参会的还有国家发展和改革委员会能源研究所姜克隽研究员、日本全球环境战略研究所的 Kuriyama 研究员等专家，以及北京航空航天大学、北京大学、清华大学、南京大学、北师大及中科院等院校的数十位师生。与会人员共同就气候变化应对政策、空气质量改善与人群健康等相关议题展开了充分的探讨。



Figure 8.18: 研讨会现场

北京航空航天大学经管学院院长范英对与会人员的到来表示了热烈欢迎，并介绍了北京航空航天大学经管学院的历史、组织结构、教员员工组成、学术成就等学院概况。最后，范英老师指出，面向未来，北航经管学院必须更开放、更有创造力和更国际化；而举办这种促进知识交流和科研合作的研讨会，正是非常重要的工作内容。

随后进行的是学者报告，第一个环节的主题是“气候变化减缓”。NIES 高级顾问 Mikiko Kainuma 博士介绍了全球温升的现状和趋势及气候变化减缓政策，指出气候变化将导致严重的生态环境破坏、人群健康和经济损失，进一步介绍了应对气候变化的一系列政策，以及气候政策与联合国可持续发展目标中的“健康与福祉”等目标的重要关系。



Figure 8.19: 日本国立环境研究所 Kainuma 博士做主题报告

姜克隽研究员就《中国到 2050 年的能源转型净零排放和 1.5°C 气候目标》展开了主旨演讲，分析了不同情景下的中国低碳转型路径及对应的碳排放和污染物排放情况，并着重介绍了交通行业电动化和清洁能源发电对转型的影响。

Toshihiko Masui 教授 (NIES) 介绍了 AIM 模型在气候减缓政策方面的应用。他着重介绍了 AIM 模型的整体框架、发展历程、原理及应用，并介绍了 AIM 模型家族的重要模型成员，包括 ExSS、AIM/Enduse 和 AIM/CGE 等目前已经成为日本及亚洲地区应对气候变化研究基础的模型。



Figure 8.20: 日本国立环境研究所 Masui 教授做主题报告

第二个环节主题为气候变化减缓的协同效益。NIES 的 Tatsuya Hanaoka 教授作了题为《 2°C 减排目标下的亚洲空气污染物排放》的学术报告，详细介绍了在 NDC 和 2°C 目标情景下，全球与亚洲的能源消费、碳排放和其他空气污染物排放情况。研究采用 AIM/Enduse 模型开展，刻画了多项可能存在的技术进步，研究结果对现实减排政策有显著的积极意义。

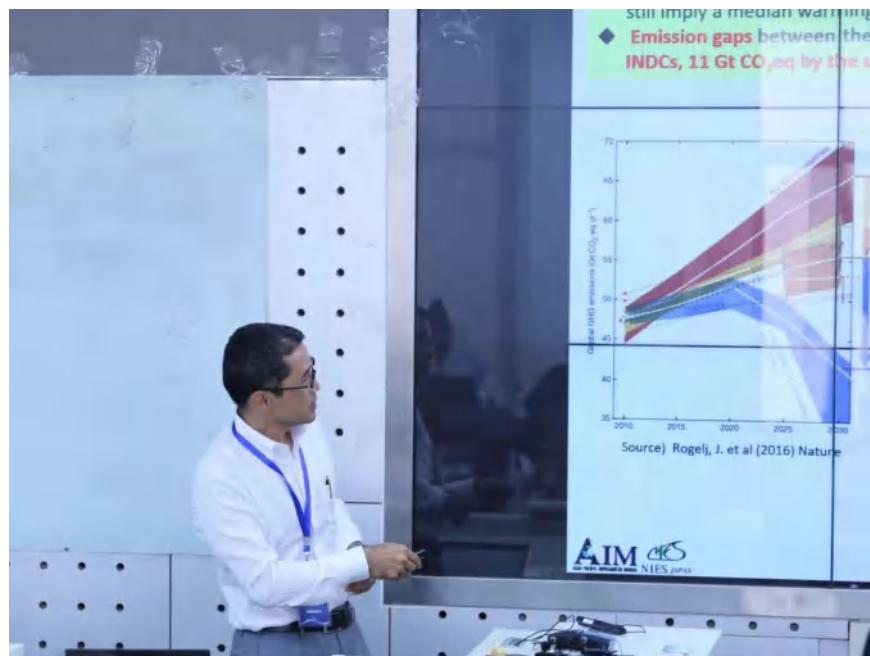


Figure 8.21: LEEEPPnews_019_IMBUAA6

北航经管学院李明全助理教授介绍了基于自底而上动态系统建模方法对我国电力需求与供给、技术选择、排放和政策影响等进行模拟的成果。在介绍研究的主体框架以及 SCUC-SCED 模型在体系中的作用的基础上，展示了对我国电力未来需求进行高精度预测的结果，并针对电力部门低碳转型改革与在场嘉宾进行了较深入的探讨。

日本国立环境研究所 Tatsuya Nagashima 教授作了题为《空气质量模型及其在健康效益评估中的作用》的学术报告。报告详细介绍了空气质量模型的原理、计算方式和适用范围，并以东亚空气污染跨界传输为例介绍了空气质量模型在源解析、区域传输贡献分析方面的运用，同时对模拟结果的偏倚和不确定性进行了探讨。

北京大学戴瀚程研究员介绍了其课题组自主开发构建的能源-环境-经济-健康综合评价模型体系 (IMED) 的建模思路及其在健康协同效益分析等方面的运用，并以“京津冀煤改电政策的健康效益分析”为案例，展现了 IMED 分析工具对环境政策的健康效益进行评估的思路、方法和结果。

下午的研讨会由北京航空航天大学经济管理学院谢杨副教授主持。谢教授做了题为《中国 PM2.5 及臭氧污染的健康及经济影响比较》的报告，分析了气候变化背景下中国气候政策在减轻 PM2.5 及臭氧污染及其所导致的健康影响方面的协同效益和异质性，并提出了未来工作展望。

随后，日本全球环境战略研究所 (Institute for Global Environmental Strategies, IGES) 的 Akihisa Kuriyama 研究员做了题为《日本能否进一步加强其 2030 年温室气体减排目标》的报告，分享了使用能源经济模型和 LMDI 方法对日本温室气体减排路径及其经济技术可行性进行分析的结果，探讨了日本 2030 年温室气体减排的重要部门和经济影响。

北京航空航天大学经济管理学院助理教授刘宁以《不同的过去，共同的未来：代际责任与公平的达成》为题，介绍了其基于博弈论理论和社会调查实验对“共同风险应对决策”及所涉及到的责任界定、资源分配问题的研究结果，并指出了其研究结果对于分析全球气候变化合作应对的意义。

最后，日本国立环境研究所的李照令博士做了题为《基于 AIM/Enduse 模型的中国钢铁行业未来排放模式研究》的报告，详细介绍了其具有较精确尺度的中国钢铁行业分布模式选择、技术进步情况、能源消费及温室气体排放情况的模型模拟研究，指出了技术进步、能源效率提高和相关环境政策对钢铁行业低碳转型的重要意义。

在热烈的掌声中，本次研讨会圆满落幕。在此次研讨会中，来自日本国立环境研究所、日本全球环境战略研究所、北京大学、北京航空航天大学的专家、教师和学生充分探讨了全球应对气候变化的可行路径及成本效益问题；会议中既有相关模型团队在气候变化健康协同效益方面的最新研究成果报告，又有基于自然科学或社会科学的理论分析与研究方法交流，充分展现了相关领域研究人员对全球及亚洲绿色低碳转型以及相关的经济影响、环境健康问题的关注。本次研讨会的顺利举行，有效推进了中日双方研究人员的互相了解以及在气候、能源、环境、经济、健康等领域的交流探讨，为双方在可持续发展、绿色转型等领域的进一步科研合作打下了良好的基础。



Figure 8.22: 与会人员合影

8.1.6 讲座回顾 | “美国的新气候行动”讲座成功举办

- [详情请见公众号](#)

2020年1月7日上午，马里兰大学公共政策学院（University of Maryland, School of Public Policy）全球可持续发展中心Nathan Hultman副教授应邀于北京大学环境科学与工程学院开展了主题为“New Climate Action in the United States and What It Means for Emissions in 2030”专题讲座。讲座吸引了中国科学院大学、北京师范大学、外交学院、中国社会科学院大学、北京理工大学、北京林业大学、北京信息科技大学、中国人民大学等十余所高校和科研院所的师生及研究人员参加，讲座由戴瀚程研究员主持。



Figure 8.23: 报告人马里兰大学公共政策学院 Nathan Hultman 教授

作为专题讲座的开场，戴瀚程研究员首先对Nathan Hultman教授的来访表示诚挚的感谢，

并对到场听众表示欢迎。戴瀚程研究员简要介绍了北京大学能源环境经济与政策研究室（LEEEP）的团队成员及研究方向，并介绍了由北京大学环境科学与工程学院多个团队联合自主开发的社会-经济-能源-环境系统 IMED 综合评估模型体系（能源-环境-经济可持续发展综合评价模型），展示了基于该模型在全球和中国绿色低碳转型路径方面的综合评估工作。

随后，Nathan Hultman 教授系统和全面地介绍了《Accelerating America's Pledge》报告。Hultman 教授指出，尽管特朗普政府将退出《巴黎协定》，但是美国 20 余个州自发成立了气候联盟以加强气候行动，为美国实现巴黎协议目标而努力。自 2017 年以来，这一承诺倡议显示了美国各州、城市和企业在联邦政府不作为期间追求脱碳的决心和力量。

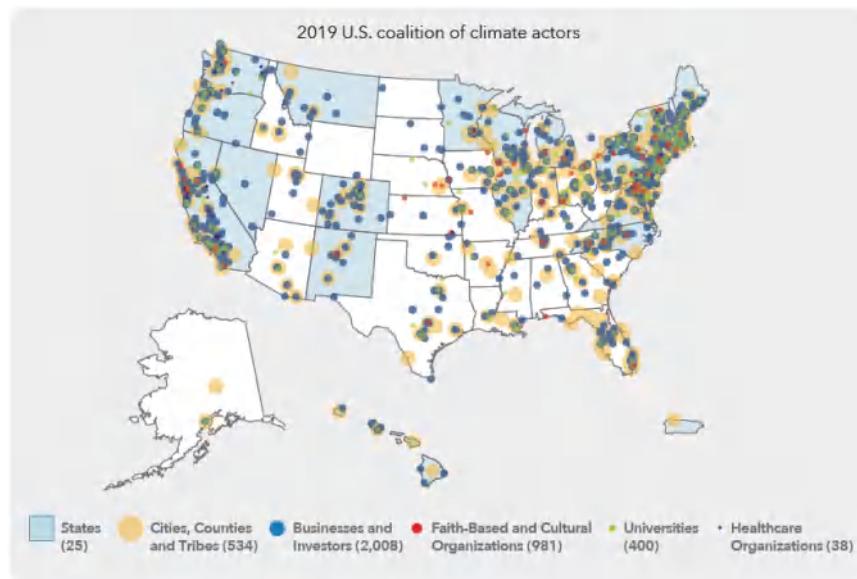


Figure 8.24: 美国气候联盟成员

本报告设置了三个情景：现有政策情景（Current Measures Scenario）、自下而上行动情景（Bottom-up Scenario）、全力行动情景（All-in Scenario）。Bottom-up 情景用以回答在没有联邦政府的干预下、各州市以及商业团队竭力开展气候行动能在多大程度上减少温室气体排放这一问题。而 All-in 情景则评估全面的国家气候行动能进一步实现的温室气体减排潜力。

情景围绕以下三类关键政策与措施展开：

- (一) 加速实现 100% 的清洁电力和能源供应；
- (二) 清洁电力用于建筑、交通和工业，同时提高能源生产率；
- (三) 利用生态系统基于自然的解决方案。

其中在 Bottom-up 情景中实现 60% 清洁电力，在 All-in 情景中实现 50% 可再生能源和 75% 清洁能源电力。



Figure 8.25: 情景设置关键政策与措施

如图 3 所示，本研究发现，在没有额外减排政策的情况下，美国 2030 年排放将比 2005 年增加 4%。而在 Current Measures 情景中碳排放将有所下降，表明即使联邦政府不作为，各州和地方当前的积极行动在经济脱碳方面将发挥重要作用。在 Bottom-up 情景下，仅自下而上的大规模行动就可以使美国的碳排放量减少 2435Mt，比 2005 年降低 37%；而在 All-in 情景下，2030 年碳排放量可减少 3245Mt，相比 2005 年降低 49%，为 2050 年零排放奠定基础，这与《巴黎协定》中 1.5°C 温控目标相一致。

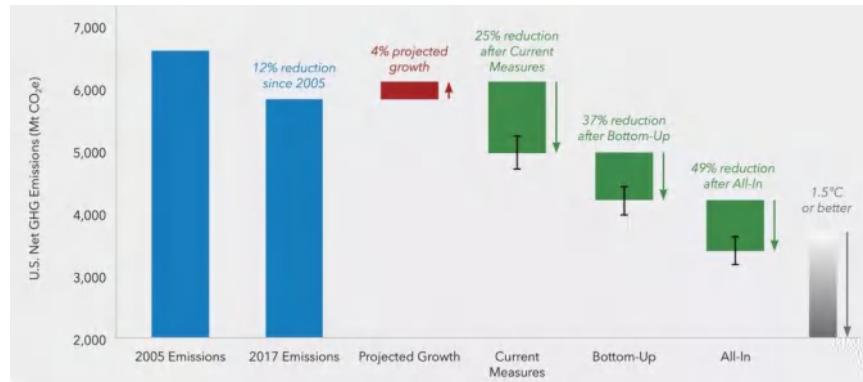


Figure 8.26: 不同情景下美国温室气体净排放

实现这一温室气体减排水平（All-in 情景）需要全面、有力的政策和大量投资。令人鼓舞的是，美国已经朝着这个未来稳步前进。如报告中所说：“We are already on our way to this future”。在过去的一年里，各州、城市和企业加强了减缓气候行动以弥补联邦政府气候政策倒退所造成的负面影响。这些致力于气候行动的美国行动者联盟继续持续扩大，特别是在 2018 年中期选举之后。这些联盟现在占美国国内生产总值的近 70%、美国人口的近三分之二和温室气体排放量的一半以上。

全面（All-in）的气候战略与行动将促使美国经济发生根本性转变，如果实施得当，将使得美国社区、产业和景观焕发活力，并创造大量就业机会，同时降低消费者和企业能源成本，还可以改善公共卫生、带来更清洁的空气和更干净的水，降低气候变化带来的经济成本和风险（图 4）。未来几年对减缓目标的实现至关重要，美国气候联盟将继续行动，“We can, and must be, all in”。

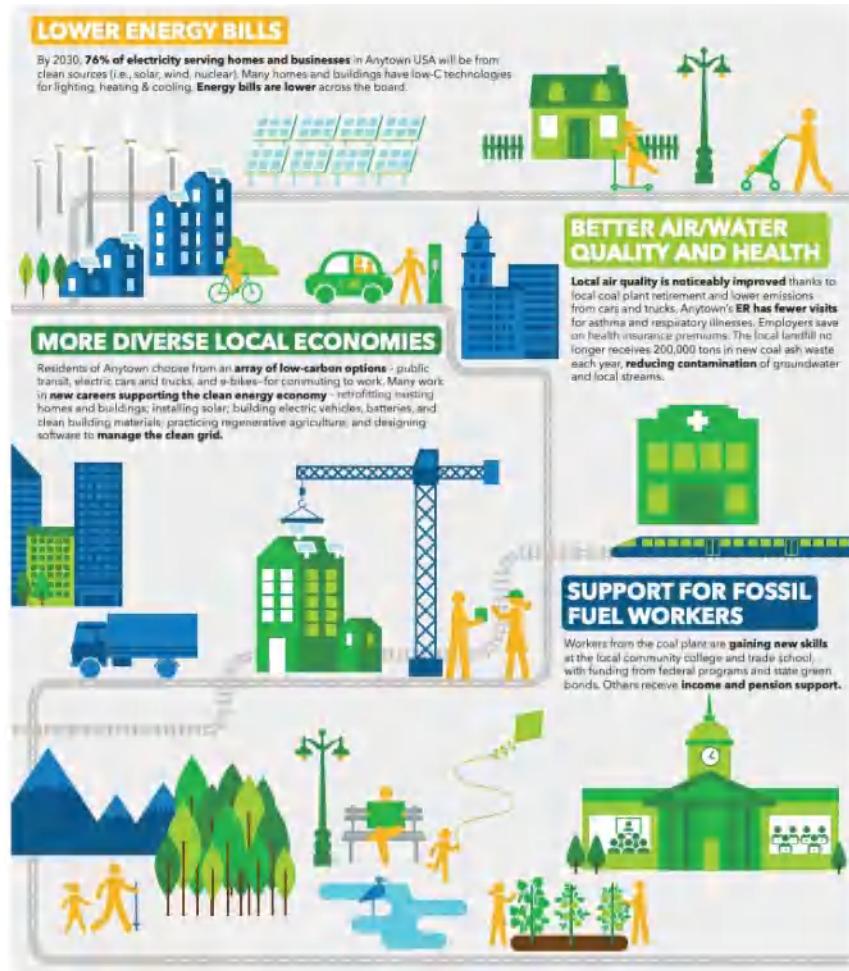


Figure 8.27: All-in 情景下美国小镇生活愿景

Nathan Hultman 教授的讲座内容丰富充实，引人入胜，引导在场听众对美国应对气候变化问题进行更深入的思考。在互动提问环节，现场互动气氛热烈，听众们分别就情景实现的可行性、可再生能源成本、美国其他各州的应对气候决心等问题踊跃提问。Nathan Hultman 教授——进行回答，与听众展开了气氛活跃的互动交流。

讲座结束，戴瀚程研究员和听众们再次对 Nathan Hultman 教授的到来和演讲表示了真挚的感谢。本次专题讲座不仅使年轻一代的学生和研究者对美国应对气候行动和相关方的博弈有了更深的了解，也增进了该领域科研人员的相互了解和学术交流，为有关高校和机构就全球气候变化领域展开进一步研究提供了指引。



Figure 8.28: 问答环节

8.1.7 讲座回顾 | “全球气候变化的威胁”讲座成功举办

• 详情请见公众号

全球气候变化是当前全世界面临的重大挑战，也是当下最受关注的全球环境问题之一。2019年11月22日上午，加州伯克利大学Mark D. Levine教授和劳伦斯伯克利国家实验室(LBNL) Lynn Price研究员应邀于北京大学环境科学与工程学院开展了主题为“全球气候变化的威胁(The Threat of Global Climate Change)”专题讲座。

Mark D. Levine教授是诺贝尔奖获得者、加州伯克利大学教授、政府间气候变化专门委员会(IPCC)高级顾问、劳伦斯伯克利国家实验室(LBNL)资深科学家、LBNL中国能源小组(China Energy Group)共同发起人和高级顾问。Lynn Price研究员是劳伦斯伯克利国家实验室(LBNL)资深科学家，环境能源技术部中国能源组组长。本次讲座旨在推动气候变化科学传播和影响，加强能源-气候-环境领域高校师生及研究人员的交流讨论，吸引了来自北京大学、中国人民大学、北京理工大学等十余所高校的师生、科研院所研究人员以及相关领域期刊编辑等听众参加。讲座由戴瀚程研究员主持。

作为专题讲座的开场，戴瀚程研究员首先对Mark D. Levine教授和Lynn Price研究员的来访表示诚挚的感谢，并对到场听众表示欢迎。戴瀚程研究员简要介绍了北京大学能源环境经济与政策研究室(LEEEP)的团队成员及研究方向，并介绍了适用于全球和区域绿色转型分析的、北京大学环境科学与工程学院多个团队联合自主开发的IMED综合评估模型体系(能源-环境-经济可持续发展综合评价模型)，为Levine教授、Lynn Price研究员和到场师生展示了北京大学环境科学与工程学院在绿色低碳转型路径综合分析和社会-经济-能源-环境-气候复杂体系建模方面所开展的工作。



Figure 8.29: 戴瀚程研究员致欢迎辞

随后，Mark D. Levine 教授就全球气候变化问题展开了系统和全面的探讨。Levine 教授首先从身边的气候变化现象及其影响讲起，在介绍气候变化科学的背景知识后，又针对全球气候变化现象、气候变化的归因、未来的气候变化预测、气候变化的可能影响、中国应对气候变化的措施和进展等气候变化相关的多个议题进行了深入的阐述。



Figure 8.30: Mark D. Levine 教授作学术讲座

Levine 教授强调，已有充分的科学事实证明全球气候在持续变暖，且气候变化确实由人为活动产生的大量温室气体所导致，并非由怀疑论者所认为的太阳活动水平变化。气候变化造成了极端气候事件频率增加、使地球生态系统面临威胁，更使人类置身于自然灾害、粮食减产和区域冲突的危机。值得庆幸的是，以经济可行的方式适应和减缓气候变化的路径是存在的，可再生能源技术的一系列突破和国际上成功的气候实践经验也给了我们信心和乐观的理由。在应对气候变化方面，中国已取得了领先于巴黎协定国家自主贡献承诺的显著成就，并在国际气候治理中发挥着重要的作用。与此同时，须知 2°C 甚至 1.5°C 气候目标的实现绝非易事，我们必须采取及时的、更进一步的行动和广泛的区域与全球合作，才有可能尽快扭转高能源消费和高碳排放增长的现实，将气候变化的影响和损失减小到可接受范围内。Levine 教授的讲座内容丰富充实，引人入胜，引导在场听众对气候变化问题进行更深入的思考。

在互动提问环节，现场互动气氛热烈，听众们表现出对全球气候变化议题的强烈兴趣和充分思考，分别对中国在国际气候行动中起到的领导性作用、2050 年实现全球“碳中和”的可能性、长寿命化石能源设施提前退出的相关影响等问题踊跃提问。Levine 教授和 Lynn Price 研究员一一进行回答，与听众展开了气氛活跃的互动交流。



Figure 8.31: 观众踊跃提问

讲座结束，戴瀚程研究员和听众们再次对 Mark D. Levine 教授和 Lynn Price 研究员的到来和演讲表示了真挚的感谢。本次专题讲座不仅使年轻一代的学生和研究者对全球气候变化的基本事实、应对气候变化的当前进展和前沿问题有了更深的理解，也增进了该领域科研人员的相互了解和学术交流，为有关高校和机构就全球气候变化领域展开进一步合作奠定了良好的基础。

8.1.8 讲座快讯 | 应用综合评估模型应对区域大气污染

- [详情请见公众号](#)

从科学到政策 - 应用综合评估模型应对区域大气污染

时间：2018 年 3 月 26 日周一上午 10:00-12:00

地点：北京大学环境大楼 B112

讲座内容简介

本讲座将回顾一些欧洲和亚洲关于空气污染的环境政策制定实例，以及如何使用综合评估模型(IAMs)来支持决策过程。本讲座也将介绍如何使用 GAINS 模型来勾画挑战，以便采取明确的行动选项，并且可以在很多方面进行评估。GAINS 模型是一种通用模型，可以用来全面评估非二氧化碳温室气体减排的潜力和成本，框定和量化空气污染共同效益，根据过去的影响和未来的潜力对措施组合进行评估。主讲人还将说明不同空间和时间尺度、以及地方、跨界和全球问题尺度之间的关系。

主讲人简介

Fabian Wagner 是空气质量与温室气体 (AIR) 计划的高级研究员，并在 2014-2016 年期间担任普林斯顿大学安德林格中心的能源与环境客座教授和伍德罗威尔逊公共与国际事务学院的访问

教授。

在 2004 年加入 IIASA 之前, Wagner 博士是日本叶山全球环境战略研究所 (IGES) 的 IPCC 国家温室气体清单计划的研究员。在此之前, 他是劳伦斯伯克利国家实验室 (LBNL) 的国际能源分析小组的博士后。Wagner 博士获得剑桥大学 (英国) 的博士学位 (理论物理学) 和两个硕士学位 (数学, 历史和科学哲学)。1998 年, Wagner 博士荣获剑桥大学的 J.T. 骑士的数学奖。Wagner 博士作为联名作者, 在 PNAS 和 Nature Climate Change 等期刊发表多篇学术论文。

讲座记录

应北京大学环境科学与工程学院环境管理系戴瀚程研究员邀请, 奥地利国际应用系统分析研究所 (IIASA) 的 Fabian Wagner 博士于 2018 年 3 月 26 日上午在环境大楼 B112 做了题为《Europe's air quality 2030》的学术报告。该讲座吸引了来自清华大学、北京理工大学、北京林业大学、中国矿业大学以及发改委能源所、人木咨询和美国环保协会等各界参会者。短短两个小时的讲座, 交流讨论气氛热烈。



Figure 8.32: 讲座现场

讲座内容共分为三部分。

首先, Wagner 博士开门见山, 追本溯源, 详细讲解了 2005 年前后欧洲地区面临的主要环境问题、污染状况成因、危害及其挑战, 回顾和分析了欧洲自上世纪以来环境政策的过程和演进, 以及欧盟和各界利益攸关者个中所处的位置和采取的主要解决思路。该思路启发于学界所提出的成本有效原则 “cost-effectiveness approach”, 根据这一原则, Wagner 博士进一步引出今天所要讨论的主题: 综合评价模型 (Integrated assessment model)。

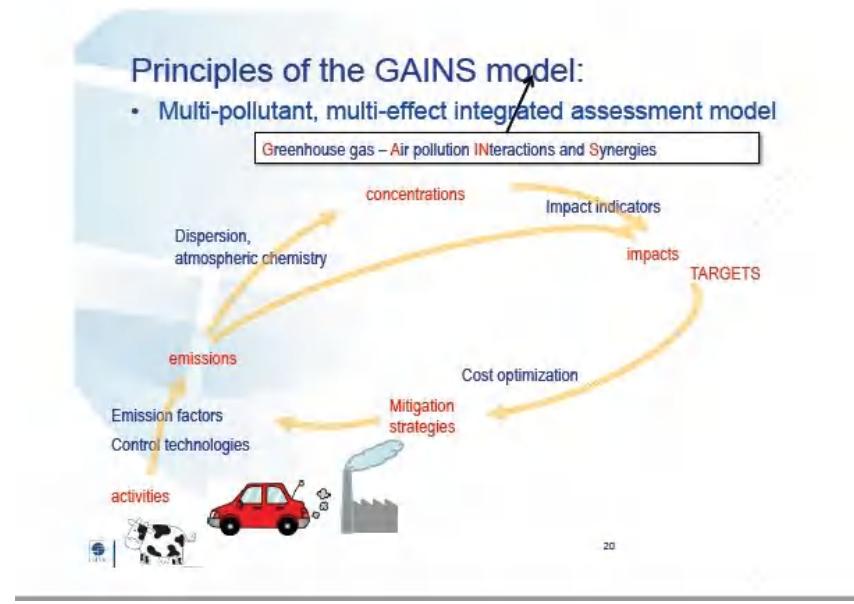


Figure 8.33: 讲座现场

第二部分，Wagner 着重为大家介绍了综合评价模型（IAMS）的 GAINS 模型，以及 IIASA 如何运用综合评价模型提供政策咨询的过程和影响。综合评价分析在模型中通盘考虑空气污染发生和影响的可能链条，包括气象与大气物理、大气化学、技术水平、社会经济活动、排放路径与强度和人类健康等，可以在理论上为包括“多大程度上污染影响得以消除？”、“如何在成本有效的原则下控制污染”和“解决污染的成本几何”等类似的政策制定者最为关心的问题提供理论答案。同时，Wagner 博士也用思维导图的形式为大家展示了 GAINS 模型的理论过程和原则，比如多元的污染来源，多元的影响效应和综合的评价分析等和该模型值得注意的一些细节。从与会者的反响看，大部分讨论也集中于这一环节。

第三部分主要由 Wagner 博士为我们详细展示了“初始计划-对基本演进规律的研究-咨询与讨论-对原始计划的更新和补充-政策目标的理论确定-最终咨询”的欧盟面对环境问题政策挑战时的政策咨询过程，也介绍了 IIASA、欧盟成员国及其他利益集团在其中扮演的角色和作出的贡献。最后，Wagner 博士根据 IIASA 模型所计算的结果，生动地阐明了“欧盟区每人仅需负担 8 美元/年的成本参与环境改善，便可获得 1 个月左右的人均期望寿命的提升”的理论结果。

撰稿：郭超艺，陆潘涛

排版：刘晓瑞

8.1.9 活动回顾 | LEEEP 负责人受邀作气候环境政策建模评估报告

- 详情请见公众号

2023 年 3 月 4 日，中国人民大学环境学院主办的“明德环境学术讲坛”第十八讲以线上线下结合的方式成功举办。本次讲坛邀请北京大学环境科学与工程学院戴瀚程研究员作了题为“气候环境政策复杂系统建模与多维影响评估”的学术报告。中国人民大学环境学院院长庞军教授首先致辞，

代表学院对戴瀚程研究员为师生作学术报告表示诚挚感谢，表达了学院对明德环境学术讲坛的高度重视，并对参会师生在交流学习过程中能够有所收获提出了殷切期望。会议由中国人民大学环境学院昌敦虎副教授主持。

首先，戴瀚程研究员从碳中和的时间紧迫性简要描述了研究背景，并提出快速、深度、立即实现碳减排的必要性。综合评估模型（IAM）包含调整产业结构、能源结构、交通结构、土地结构这四大抓手在内的“双碳”实现路径，代表了跨学科大规模复杂仿真模型，为气候环境政策评估提供兼具科学知识和科学决策需求的评估方案。戴瀚程研究员指出，发展面向“双碳”目标的本地化、精细化综合评估模型具有重要性。

戴瀚程研究员提出，减污降碳的公共政策设计应当充分考虑社会经济问题。面对更复杂的政策冲击，估算能源经济部门的碳排放量在简化为碳排放驱动力、能源服务强度、能源效率和 CO₂ 强度四方面的基础上，应当更精细化地考察驱动因子对能源排放的作用。因此，戴瀚程研究员团队创新性地构建了 IMED 环境-经济模型，涵盖了能源经济、大气质量、人群健康等模块，以实现多要素复杂系统模拟仿真，形成了减排政策协同效果和成本效益的综合评估体系，可用于模拟市场供需受价格机制调控的过程，评估环境气候政策对增长、就业、产业等影响及政策宏观成本。

戴瀚程研究员指出，IMED 模型触及多学科知识融合与数值模拟，贯穿了理论-数据-建模-仿真的全过程，可与全球和省级清单耦合，并适用于四大结构调整分析。IMED 能源-环境-经济模型作为我国兼顾减污降碳政策评估的代表性模型之一，提升了对减排政策协同效果的评估质量。钢铁行业碳中和路径、水泥行业碳中和路径、碳排放-水资源耦合研究等案例，则将 IMED-CGE、TEC 模型进行了综合运用，反映出 IMED 模型在分析减污降碳协同机制持续进化中的作用。

来自中国人民大学、北京大学、清华大学、中国科学院地理科学与资源研究所、南京大学、南开大学、四川大学、湖南大学、北京林业大学、中南财经政法大学、华东师范大学、上海财经大学、上海外国语大学、上海师范大学等三十余所国内外高校与科研机构的 200 余名师生参加了本次讲坛。

在交流讨论环节，来自线上线下的多位高校师生针对学术报告中关于多环境要素耦合模拟对象归一、模型参数设置、农业系统能源开发与负排放的关系、碳减排潜力挖掘、不同类型模型的融合、未来情景模拟精度等问题，与戴瀚程研究员进行了深入探讨，气氛活跃，师生反响热烈。

在最后的点评环节，庞军院长高度评价了戴瀚程研究员的精彩报告，指出在当前我国积极稳妥推进碳达峰碳中和、减污降碳协同增效的大背景下，基于系统观念开展气候环境政策研究具有重要意义，利用综合评估模型（IAM）开展气候环境政策复杂系统的多维影响评估可以为我国更好地实现“双碳”目标提供很多有价值的参考结论。综合评估模型的开发需要发挥“十年磨一剑”的刻苦钻研精神，戴瀚程研究员通过自己的不懈努力开发出具有自主知识产权的 IMED 综合评估模型，并取得了一系列高水平的学术成果，值得青年教师和学生们学习。最后，庞军院长勉励环境学院的同学们向戴瀚程研究员学习，认真学习专业理论和方法，密切跟踪本专业最新研究成果，注意加强定量分析能力的提升，力争做出高水平的学位论文，产生更多高质量的学术成果。

明德环境学术讲坛同时得到中国人民大学生态文明研究院的支持。

8.2 人才培养

8.2.1 LEEEP 最新研究成果获潘基文与李干杰高度关注

- 详情请见公众号

2019年11月4日-5日，由韩国国家气候和空气质量委员会（The National Council on Climate and Air Quality, NCCA）与联合国亚太经济与社会理事会（U.N. Economic and Social Commission for Asia and the Pacific, UN ESCAP）联合举办的首届空气污染与气候变化国际论坛（The 1st International Forum on Air Pollution and Climate Change）在韩国首尔召开。



Figure 8.34: 会议情况

该论坛以“更高的目标、更进一步的行动”（Higher ambition, further action for climate and air pollution）为主题，旨在提升亚洲地区环境保护和大气污染控制的区域性与全球性合作。论坛针对空气污染和气候变化应对问题，围绕“建立最佳实践经验分享与合作”、“推动有效的空气污染应对政策”、“识别关键技术创新与解决方案”和“强化区域与国际污染防治合作”等议题展开了深入的探讨。

本届论坛由联合国前秘书长、韩国国家气候和空气质量委员会委员长潘基文邀请和组织，共有来自十余个国家的相关领域组织机构负责人和高校师生参加了论坛，参会人员包括中国生态环境部部长李干杰、韩国国务总理 Lee Nak-yon、蒙古国自然环境与旅游部部长 Namsrai Tsedenbat、韩国首尔市市长 Park Won-soon、联合国环保署办公室主任 Dechen Tsering、绿色气候基金、全球绿色发展署和国际应用系统分析研究所等国际机构高级代表。



Figure 8.35: 联合国第八任秘书长、韩国国家气候和空气质量委员会委员长潘基文致欢迎辞



Figure 8.36: 李干杰部长发表主旨演讲：中国大气污染防治和气候变化的相关行动、取得的成就与展望

大会首日特别安排了“未来一代的声音”(The Voice of the Future Generation)海报展示环

节，该环节旨在鼓励青年人发表自己对气候变化等全球环境问题的理解、认识、研究发现和行动决心，促进信息交流、知识分享，推动青年人在应对气候变化和解决空气污染问题中发挥更重要的作用。这一海报展示环节共进行了 5 次，在论坛午餐前后、每节论坛内容之间都有活跃的海报展示交流环节。

北京大学环境科学与工程学院能源环境经济与政策研究室（LEEEP）的两位研究生——2018 级硕士生刘晓瑞、2019 级博士生吴雅珍作为气候变化研究领域的青年学生应邀参加了本次论坛，并在海报环节中进行了展示和讲解了 IMED 最新研究成果。

刘晓瑞同学的研究通过应用 LEEEP 自主开发的 IMED | CGE 评估了全球温升 1.5°C 与 2°C 目标下碳减排对于我国能源、经济和环境影响，研究结果表明，碳减排政策的实施可以同时大幅降低其他温室气体与空气污染物排放，并且通过成本效益分析发现在气候减缓情景下，所有部门呈现正的净效益，并且随着减排力度的加大，净效益也越高。

吴雅珍同学的研究通过耦合能源经济模型（AIM | CGE）、空气质量模型（GEOS-Chem）和健康评估模型（IMED | HEL），在全球经纬度格点和地区尺度上评估了由气候变化减缓所能带来的空气质量与人群健康改善的协同效益。研究发现，在中等社会经济发展情景下，到 2050 年，全球实现 2°C 气候目标将能够同时降低 PM2.5 浓度 30%，避免超过 100 万人因空气污染而过早死亡。在全球层面，仅考虑这种健康协同效益，实现 2°C 气候目标也能够在短期和中期内表现出正的净效益，具有很高的经济可行性。



Figure 8.37: LEEEP 课题组同学与参会人员交流科研内容

论坛期间，联合国前秘书长潘基文、我国现任生态环境部部长李干杰等对大会的海报展示环节给予了很高的关注，并且特别停留在两位同学的海报内容前，聆听了她们对科研内容和科研感受的介绍。刘晓瑞和吴雅珍同学为潘基文先生和李干杰部长简要讲解了他们的研究内容和研究成果，指出其结果表明全球和国家气候目标的实现将能带来显著的空气污染改善协同效益，更多决策者应认识到气候行动的这种高效益成本比和经济可行性，采取及时有力的措施、加强全球合作以应对气候

变化。

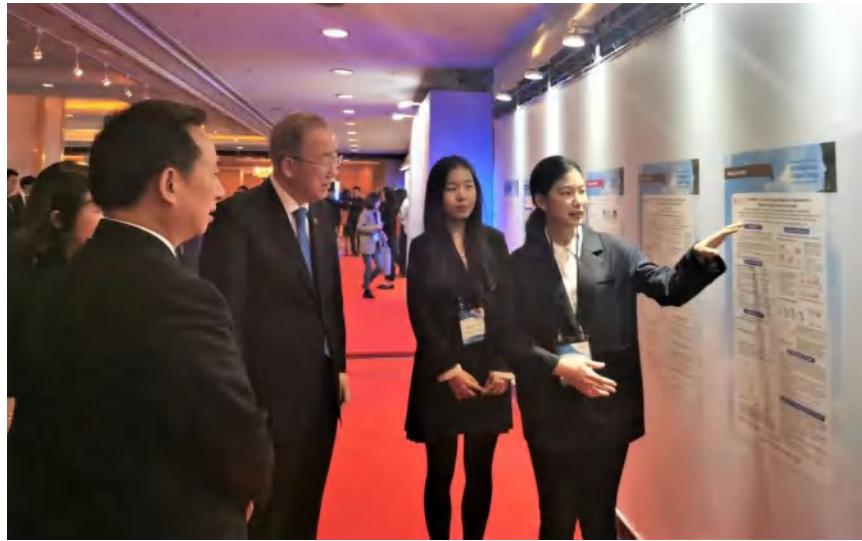


Figure 8.38: LEEEP 课题组同学为潘基文先生、李干杰部长介绍研究内容

两位同学讲解内容充实、有条不紊、大方得体，得到了潘基文先生和李干杰部长真切的肯定与赞扬。李干杰部长与同学们交流了北大环境学科建设的情况，并向潘基文先生介绍道，北京大学是中国的知名学府，有着非常高的办学质量；北大师生在环境领域开展了严谨而具有前沿性的研究，中国生态环境部与北京大学在环境保护工作方面有许多重要的合作。潘基文先生也对两位同学的研究和展示给予了很高的认可，表示“你们所做的研究非常有意义，希望你们能继续努力，和更多的年轻人一起，在环境保护事业上发挥更大的力量”。

通过参与本届大会，LEEEP 课题组的两位同学不仅和与会的高校师生充分交流了科研方法和研究发现、和国际组织负责人探讨了国家和地区绿色转型中的关键问题，更认识到了青年力量对环境事业的重要意义以及青年学子的声音在国际舞台上所得到的重视。

同学们在参与、学习、交流过程中收获了学术知识、感受了各界热情、理解了青年责任，这种收获和启迪同样也感染了 LEEEP 的各位成员和身边的同学。在今后，环院学子们将继续牢记“绿水青山”的初心和使命，争取完成更多高质量、具有现实意义和影响力的科学研究，为生态文明建设事业、为可持续发展目标的实现贡献自己的力量。

8.2.2 LEEEP 组研究生赵梦丹同学获得第 29 届 AIM 国际研讨会最佳 Poster

- 详情请见公众号

会议介绍

2023 年 9 月 13-16 日，日本国立环境研究所召开了第二十九届“亚太地区气候变化综合评价模型”(AIM) 国际研讨会，与来自日本环境省、中国国家发展和改革委员会能源所、北京大学、美国西北太平洋国家实验室、京都大学、美国农业部、印度、巴西、马来西亚和泰国等地区的专家学者们在气候变化应对与适应领域进行了线上与线下模式相结合的学术交流。



Figure 8.39: 第 29 届 AIM 国际研讨会大合照

获奖同学介绍

大会青年学者 Poster 展示环节，来自北京航空航天大学经济管理学院研究生赵梦丹同学展示了题目为 “Health and Economic Impacts of High Temperature and Heatwaves in China”的最新研究，本研究介绍了气候变化背景下高温热浪经济影响。

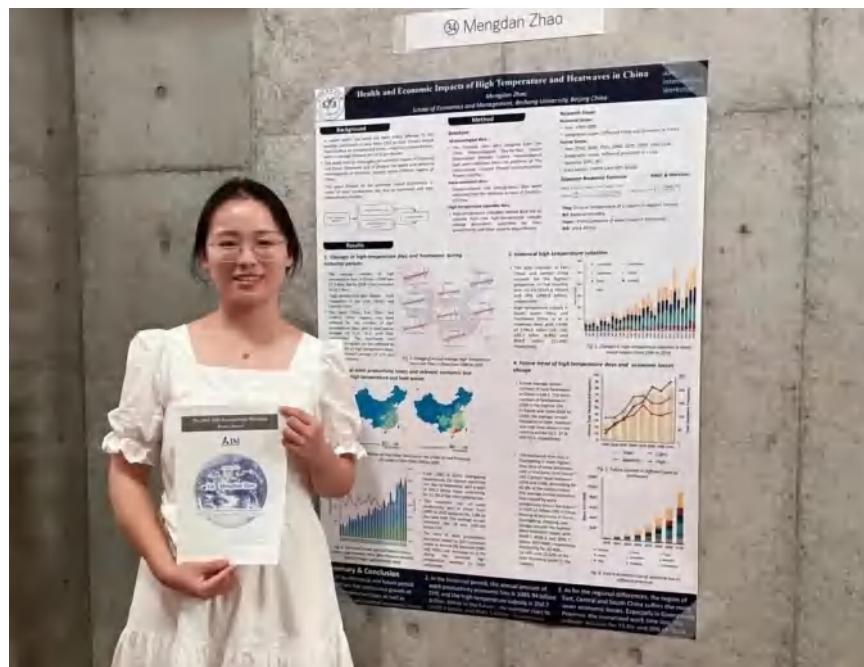


Figure 8.40: 赵梦丹同学与 Poster 合照

全场共有 34 名来自各国的青年学者们展示了自己的最新研究，通过各国专家的匿名投票结果，赵梦丹同学所展示的研究获得了气候变化领域专家的广泛认可，被评为 34 个 Poster 中的第一名，获评“最令人印象深刻、最具创新性的海报展示者”称号。



Figure 8.41: 获奖证书 (左) Mikiko Kainuma 教授为获奖同学颁奖 (右)

赵梦丹同学是自北京航空航天大学经济管理学院的 2021 级硕士研究生，指导老师谢杨副教授专注于气候变化与空气污染、健康经济影响评估等领域的研究。自 2021 年初，赵梦丹同学学习 IMED 综合评估模型，专注健康经济影响评估，并且连续三年参加了日本 AIM 国际研讨会，积累了丰富的研究经验、专业的研究素养与研究技能，并在硕士研究期间参与了多项气候变化与健康经济相关的模型研究。

以下为赵梦丹同学在研究生期间参与的部分研究以及论文投稿情况：

- Air Quality and Health Benefits from Different Mitigation Scenarios under 2-Degree Target: A Provincial Level Study in China, 一作, Environmental Research Letters 在投中;
- Accelerated attainment of global air quality standards with disproportional health co-benefits under the 1.5°C target: a modelling study, co-author, The Lancet Planetary Health 审稿中;
- Health and Economic Benefits of Reducing Air Pollution Embodied in GBA's Green and Low-Carbon Development, co-author, Urban Climate 在投中;
- Social-economic transitions and vulnerability to extreme temperature events from 1960 to 2020 in Chinese Cities, co-author, iScience 在投中。

导师招生简章

谢杨，现任北京航空航天大学经济管理学院副教授，博士生导师。北京大学医学博士、东京工业大学管理科学与工程专业博士，日本国立环境研究所环境经济研究室博士后，Energy, Ecology and Environment 期刊的领域编辑，中国优选法统筹法与经济数学研究会青年委员。研究方向为健康经济学、全球健康、气候变化应对和空气污染健康影响以及社会可持续发展。主要从事空气污染和气候变化对人群健康和宏观经济影响的定量分析。开发了健康综合评估模型定量评估全球、亚洲、国家和地区空气污染、气候变化及应对的健康和经济影响。主持国家自然科学基金青年项目、面上项目和重点项目子课题，科技部国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项参与单位课题负责人，香港大学项目资助委员会 (UGC)，合作研究基金 (CRF) 项目参与单位负责人，北航“青年拔尖人才支持计划项目”，北航“卓越百人计划”等。在环境健康领域 Nature 子刊 Nature Communications, Lancet 子刊 Lancet Regional Health, Global Environmental Change,

iScience, Environmental Science Technology、Environment International, Environmental Research Letters 等环境健康领域顶级期刊发表 60 余篇, 引用 3400 余次, ESI 前 1% 高被引论文累计 8 篇。国家自然科学基金委员会项目评审人, IPCC 报告评审人, 《中国碳中和与清洁空气协同路径》、《柳叶刀健康与气候变化倒计时 2020: 中国报告》执笔作者, 《全球疾病负担》Collaborator。

谢杨老师团队现招收 2024 级博士, 欢迎对气候变化健康研究感兴趣, 编程能力较强的学生的同学联系。

邮箱地址: xieyangdaisy@buaa.edu.cn

8.3 IMED 模型培训

8.3.1 2023 年碳中和综合评估模型暑期研讨会活动通知

碳中和综合评估模型夏令营培训活动¹。

活动背景

推进碳达峰碳中和是以习近平同志为核心的党中央经过深思熟虑作出的重大战略决策, 也是我国应对气候变化、引领全球气候治理的必然选择。需要学术界发挥描绘碳中和实现路径、评估潜在多维影响、提出稳健应对策略的重要作用, 为国家前瞻性双碳战略规划和产业链布局提供科学支撑。

综合评估模型是双碳政策研究的利器。开发底层逻辑科学可靠、能够反映国家经济社会现实的综合评估模型是一项刻不容缓的艰巨任务。综合评估模型平台的开发与应用是北京大学碳中和研究院重点支持的领域之一。与此同时, 碳中和研究院也肩负着“双碳”青年人才培养的重要使命。为此, 在国家自然基金委、中国 21 世纪议程管理中心、能源基金会等机构的支持下, 由北京大学碳中和研究院主办, 环境科学与工程学院、城市与环境学院协办首届碳中和综合评估模型暑期研讨会。

在此期间, 北京大学相关模型团队将介绍底层知识构件与建模技术, 开展综合评估模型应用培训, 激励低碳战略与政策的创新研究, 尽早跨越陡峭学习曲线开展长期、连贯、有传承性的科研工作, 为构建模型研究人才队伍提供“源头活水”, 进而为我国碳中和事业发展并培养青年人才。欢迎广大有志青年踊跃报名!

研讨会安排

- 时间: 2023 年 8 月 7 日-11 日
- 地点: 北京大学环境科学与工程学院
- 参与方式: 全程线下参加
- 课程设置:
 1. 自上而下可计算一般均衡模型原理、算法与建模;
 2. 自下而上能源系统优化模型的原理、算法与建模;
 3. 社会—自然跨系统多模型耦合原理与案例;
 4. GAMS 程序语言建模;
 5. 模型练习、案例应用与展示。

注: 具体时间与地点请关注后续通知, 本次研讨会不收取任何费用, 交通及食宿费用自理。

¹活动详情请见公众号通知: <https://mp.weixin.qq.com/s/XCUUdpukUwBgP1AZ3U0qQ>

申请须知

1. 对能源环境系统方向学术研究等相关领域有浓厚兴趣的高年级本科生和研究生；
2. 优先考虑具有环境科学、管理学、经济学等专业背景人员，或具有算法开发、数理统计、编程基础人员；
3. 本次研讨会拟招收 30 人，择优录取，招满为止。

申请流程

(一) 报名及材料提交

1. 截止时间：2023 年 7 月 10 日
2. 报名材料：为更好地了解申请人的学术背景和研究兴趣，请提交以下材料：
 - 个人简历；
 - 个人陈述：限定在 1000 字以内，内容应包含：(1) 研究计划：以模型应用为主题；(2) 当前研究基础：个人及目前所在团队研究基础简介。
3. 材料提交方式：申请资料(PDF 格式)以邮件形式发送至**指定邮箱**(gtzhyjybgs@pku.edu.cn)。邮件主题统一命名为“2023IAM-姓名-所在学校-本科生/研究生”，所有报名者信息将严格保密。

(二) 入选确认及名单公示

1. 入选审核：评审小组将根据报名人学科背景、个人简历与陈述、研究基础等信息筛选。
2. 入选通知：7 月 20 日前，入选的申请者将收到主办团队的“入选邮件”通知。
3. 入选确认：最终入选人员名单以主办团队收到入选者回复的“确认参加”邮件为准。所有入选人员将统一建群，后续相关活动及通知均以群消息为准。

(三) 其他注意事项

1. 研讨会旨在邀请各位同行及学员共同学习综合评估建模技术，探索**模型在碳中和领域的交叉应用**，理论性和技术性较强；
2. **个人陈述**是考察候选者兴趣、背景、能力的主要依据，也是更好地提供教学与培训服务的**重要参考**，请各位同学认真准备；
3. 希望参加学员能够**提前阅读**与培训内容相关的文献，包括但不限于**领域内相关论文、北京大学 IAM 模型资料**：
 - 全球主流 IAM 模型介绍：<https://www.iamconsortium.org/resources/models-documentation>
 - 北京大学 IAM 模型简介：IMED 综合评估模型体系介绍：<https://mp.weixin.qq.com/s/4Z1PAkEKQFUrqHg2KM1FgQ>
 - 北京大学 IAM 模型云端平台：IMED 综合评估模型云端平台发布：<https://mp.weixin.qq.com/s/ZyweGyMDHURp5aMTwQBrUg>
 - 北京大学 IAM 模型架构、研究进展在线文档：<https://www.jianguoyun.com/p/DVrcIwsQ1L7CBhjE13M>

8.3.2 北京大学第一届碳中和综合评估模型研讨会顺利开幕

- 点击 LEEEП 微信公众号链接阅读本活动推送原文

写在前面

2023年8月7日，第一届碳中和综合评估模型研讨会在北京大学环境科学与工程学院顺利召开。来自国内外30余所知名高校的近50位本硕博学生和青年学者受邀来到燕园，进行为期5天的培训交流。

本研讨会由北京大学碳中和研究院主办，北京大学环境科学与工程学院、北京大学城市与环境学院协办，国家自然基金委、中国21世纪议程管理中心、能源基金会支持。研讨会将底层知识理论、建模技术方法、在线模型应用、专家前沿报告等多个模块穿插结合，旨在为学员提供成体系的能源-环境-经济领域综合评估模型培训，促进不同背景跨学科交流，激发对低碳政策的创新思考，从而为我国双碳事业培养“宏观视野开阔、基础理论过硬、模型运用有感”的综合性人才。



Figure 8.42: 研讨会开幕合影

开幕仪式

上午的开幕仪式由北京大学环境科学与工程学院环境管理系主任戴瀚程研究员主持。研讨会邀请到了北京大学碳中和研究院张海滨副院长致辞，张教授指出了碳达峰、碳中和对于我国的历史性意义及其所带来的系统性变革。为服务科学决策，综合评估模型需要将定性和定量分析相结合，进而系统地推动各行业战略协同。北京大学有着基础学科扎实、政策与技术研究深入、人文社科底蕴深厚、战略视野国际化的综合优势，面对综合评估模型开发的艰巨任务，有实力也有意愿来培养知晓模型底层逻辑、具有模型开发完善能力的人才，为我国双碳政策制定贡献力量。



Figure 8.43: 张海滨院长致辞

北京大学环境科学与工程学院刘永院长在致辞中指出，我国当前需要扎实的基础研究来支持科学决策，而模型所扮演的角色非常关键，“模型不是万能的，但没有模型是万万不能的”。作为青年学者，大家应当明确模型要干什么，能干什么，选择合适的分辨率。同时，也要了解模型的底层逻辑，尤其是对于复杂模型，应当明白模型的假设和边界，从而能够判断模型所得结果的合理性。此外，还要扎根于模型开发完善的基础工作，增强对数据的把握，产生自身的核心竞争力。



Figure 8.44: 刘永院长致辞

能源基金会环境管理项目刘欣主任在致辞中指出，双碳战略能够帮助我国破除资源约束，满足人民日益增长的生态环境需求，亟需系统治理、主动作为。当前需要厘清碳减排和经济发展的关系，实现多部门、多区域、多目标的可持续发展，使双碳行动创造出发展的新动能、新优势，进而推动我国乃至全球的繁荣发展和气候安全。学术界，尤其是青年学者需要具有战略思维、明确挑战和机遇、强化技术基础、打造中国原创的本土化模型。同时，刘欣主任还鼓励大家深度分析感兴趣的行业领域，从而利用模型解释现象，解决问题。



Figure 8.45: 刘欣主任致辞

主旨报告

开幕致辞之后，戴瀚程研究员为学员作了以《气候环境政策复杂系统建模与多维影响评估》为题的主旨报告。戴老师点明了碳中和的紧迫性，阐述了减污降碳行动的多维影响及其“牵一发动全身”的显著特征，说明了跨学科大规模复杂模型开发的必要性。此外，他介绍了国内外有关模型研究的现状与趋势，并结合过去十几年建模的亲身经验，以 IMED 模型为案例，总结了环境-经济多要素复杂系统建模的挑战与难点，展示了模型在水-能-粮食-环境多要素协同治理方面的相关研究前沿，为学员们本周研讨学习和未来研究提供了方向。



Figure 8.46: 戴瀚程研究员作主旨报告

前沿研究报告

多系统动态下的能源系统综合评估偶阳博士

午餐后，来自美国国家西北太平洋实验室的地球科学家偶阳博士给大家作了题为《多系统动态下的能源系统综合评估》的研究报告。偶阳博士深度参与了国际领先模型 GCAM 及其美国模块 GCAM-USA 与中国模块 GCAM-China 的研发。他系统地介绍了 GCAM 模型各个部门的模型细节，在政府及国际报告、咨询、学术等多个领域的应用及情景设计，以及全球宏观视角下的多类政策的组合结果和分析展望。除此之外，偶阳博士还列出了综合评估模型未来的研究方向及挑战，强调了对空间时间尺度、不确定性、运算效率、可信度验证等方面把控的重要性。学员们对报告积极回应，提出了自己在应用 GCAM 模型时的疑问并和偶博士进行讨论。



Figure 8.47: 偶阳博士作报告

模型应用前沿研究介绍

之后，北京大学能源环境经济与政策研究室（LEEEP）博士研究生潘羽杰、马腾同学分别作了以《碳中和助力中国工业节水目标》、《水泥行业碳中和路径及其影响》为题的模型应用前沿研究汇报，向学员们展示了如何使用多区域动态可计算一般均衡、能源系统优化模型对重点区域、重点部门的减污降碳路径进行动态评估和选择，支撑因地、因行业制宜的最优政策制定。



Figure 8.48: 潘羽杰博士研究生作报告



Figure 8.49: 马腾博士研究生作报告

分组互动欢迎冷餐会

在一天获益匪浅的学术报告之后，研讨会学员们组建了自己的学习小组并进行了破冰互动。随后大家在学院下沉广场举行了冷餐会，第一天就此圆满结束，期待后面几天大家能在燕园学有所成，收获知识和友谊，为我国的双碳事业贡献力量。



Figure 8.50: 冷餐会现场



Figure 8.51: 冷餐会合影



Figure 8.52: 研讨会学员合影

编辑排版：冯卓尔

审核：戴瀚程

8.3.3 北京大学第一届碳中和综合评估模型研讨会圆满落幕

- 点击 LEEEPE 微信公众号链接阅读本活动推送原文

写在前面

2023 年 8 月 11 日，北京大学第一届碳中和综合评估模型研讨会圆满落幕。本次研讨会由国家自然基金委、中国 21 世纪议程管理中心、能源基金会等机构支持，北京大学碳中和研究院主办，环境科学与工程学院、城市与环境学院协办，来自 30 余所国内外知名高校的近 50 位本硕博学生和青年学者来到燕园，进行为期 5 天的培训交流。研讨会旨在为学员提供一系列完整实用的能源-环境-经济领域综合评估模型的培训，鼓励不同学术背景的参与者开展跨学科交流与合作，为我国的双碳人才培养提供源头活水。

在燕园的 5 天学习生活中，学员们学习了前沿讲座、理论基础、建模技术等内容，并基于北京大学自主开发的 IMED 线上综合评估模型，对重点行业和地区减污降碳的减排潜力、经济影响及协同效益等内容开展了分组合作研究，在 8 个小组精彩的结营展示报告之后，研讨会圆满落幕。

前沿讲座



Figure 8.53: 李善同研究员主旨报告

第二天上午（8月8号），国务院发展研究中心的李善同研究员为大家介绍了适用于中国宏观经济政策研究的 DRCCGE 可计算一般均衡模型。李老师介绍了 DRCCGE 模型的开发历程和基本框架，展示了模型中符合中国经济实情的重要机制，以及近 30 年来 DRCCGE 模型在省、地区、国家、全球不同层面研究中的数十个典型案例。除此之外，李老师还系统梳理了目前国内主要 CGE 团队、研究领域及学术成果，拓宽了学员们的领域视野。



Figure 8.54: 滕飞教授主旨报告

第三天上午（8月9号），清华大学能源环境经济研究所副所长滕飞教授为大家作了《温室气体社会成本研究进展与展望》专题讲座，介绍了碳社会成本（SCC）相关的基础理论及政策应用。滕教授接着比较了三个主流IAM模型对SCC估计结果的异同之处，并解析了其中原因。最后，滕教授总结道：“所有的模型都是错的，但其中有些模型是有用的”。模型中的数字本身不是最重要的，重要的是对结果产生机制的解释，模型的关键作用在于能提出可证伪的假设和观点，而这就需要我们了解多个跨学科的系统，并捋清系统间的交互影响。



Figure 8.55: 姜克隽研究员主旨报告

当天下午，中国宏观经济研究院能源研究所姜克隽研究员为大家介绍《多重目标下中国和全球能源和经济转型路径》。姜老师介绍了中国能源环境综合评估模型（IPAC）的框架，分析了钢铁、水泥、钢材、发电、居民、建筑、化工等重点行业未来低碳发展路径、国内外发展现状及趋势、关键技术和政策等，展示了可再生能源和核电对经济产业布局的决定作用，揭示了“碳中和不再是温室气体减排事务，而是技术和经济竞争”。姜老师指出，modeler 和 modeling 比 model 更重要，大家需要深度理解模型背后机理及其适用范围，针对不同问题使用合适的模型。

模型培训

除高水平 IAM 模型学者的前沿学术报告以外，研讨会另一重要学习模块是模型培训。全体学员按学习意愿分为一般均衡（CGE）和技术优化（TEC）两个平行小组。第二天上午，北京大学能源环境经济与政策研究室（LEEEP）讲师团队给两组学员分别介绍了自上而下 CGE 模型和自下而上 TEC 模型的数理基础、建模技术、政策冲击传导机制等基础理论。下午，讲师们为全体学员讲解了主要建模软件 GAMS 的基本语法及操作，同时，指导学员们熟悉 IMED 线上模型平台，为下一步运用成熟模型开展政策分析做好准备。

第三天，在初步掌握 CGE 和 TEC 的理论知识和编程工具之后，学员们以案例为导向，分组进一步深入学习两类模型。CGE 小组的学员们在讲师团队的讲解下，理论与代码双管齐下，学习了 CGE 基础模型——牛奶巧克力模型，了解了 CGE 经济模型中生产者和消费者的行为。进一步学习了中国 31 省和粤港澳大湾区的 CGE 模型应用案例。TEC 小组的学员们则主要聚焦于钢铁、交通、电力、居民四个减污降碳重点行业，了解不同行业各具特点的技术链以及如何在模型中定量刻画，理解单个部门以及多部门-能源生产消费耦合下的碳中和路径分析，为之后的小组作业打下了模型应用基础。



Figure 8.56: 讲师团队讲授模型培训

分组练习与结营汇报

在熟悉了 CGE 和 TEC 模型理论知识和线上模型操作之后，学员们利用 IMED 线上模型分组对自己感兴趣的地区、行业、政策进行了分析并作了汇报展示。最终，“非正式毛豆乐”组和“摇

“摇车”组脱颖而出，分别被评为 CGE 组和 TEC 组中的优秀组。“非正式毛豆乐”组着眼于《碳中和路径下河北省脱碳减污协同效应研究》，在基于能力最大化的碳配额分配原则下，研究了不同温升情景下河北省分行业的二氧化碳和大气污染物协同减排效果。“摇摇车”组以《基于 IMED | TEC 模型的四川省电力部门能源结构研究》为题，设计了八个情景，提出了四川省未来减排工作重心不应该是 CCS 的部署，而是电力系统结构优化的观点。



Figure 8.57: 分组讨论与讲师答疑



Figure 8.58: 结营汇报

最后，戴瀚程研究员感谢大家对研讨会的信任与支持，希望大家通过本次研讨会的学习，对综

合评估模型的理论和应用有了初步了解，也期待本次尝试能够成为模型学习和后续合作的开始。此外，作为综合评估模型培训的初次尝试，希望大家在包涵不完善之处的基础上反馈改进意见，共同将这一活动打造成学界高质量的公共品。同时，很多报名的优秀同学未能参加，未来研讨会将在会场容量允许的情况下适当增加名额，希望有志于模型学习的同学持续关注。当然，短短一周的时间无法让大家完全掌握模型理论或具有独立建模能力，需要大家在今后的研究中久久为功，早日成为优秀的 modeler。



Figure 8.59: 戴瀚程研究员做总结发言

营后感言

CGE 优胜小组代表、来自东北大学的博士生王尧说，CGE 模型作为综合评估模型的重要组成部分，能够对自己所感兴趣的研究领域——金属物质流作有力补充，包括对未来情景预测的比较和社会经济影响的评估。他希望在今后的博士研究中深入学习并运用中国本土化的模型，掌握模型的底层逻辑，将自己的研究与 CGE 模型有效衔接。此外，王同学也被本次研讨会邀请到的专家学者的风范所折服，希望自己能够扎根于自己的研究领域，像他们一样对关键数据和模型结果做到信手拈来。

TEC 优胜小组代表、来自生态环境部环境规划院的博士生严妍表示，通过本次研讨会，她解开了之前对能源技术优化模型的困惑，发现了 TEC 模型与自己关于重点行业减排研究的衔接点，并希望以后继续了解 CGE 和 TEC 两类模型的耦合。除此之外，还为本次研讨会提出了宝贵的意见，例如希望从零开始介绍 TEC 模型的具体搭建过程、主旨报告层面增加对经济学基础较弱同学的考虑、增加培训内容与小组作业的关联性和技术性交流等。

结语

快乐的时光总是短暂的，大家在燕园 5 天的学习生活很快迎来了尾声。希望本次研讨会能够激发大家对综合评估模型的兴趣，迈出模型学习的第一步，并将自身研究与模型应用有机结合，成为宏观视野开阔、理论基础扎实、模型运用熟练的优秀 modeler，为各行业各地区的双碳事业作出贡献。



Figure 8.60: 研讨会学员聚餐交流

编辑排版：冯卓尔

审核：戴瀚程

8.4 学术会议

8.4.1 环院学术 | 首届“气候与环境管理”全国研究生论坛成功举办

- 点击 LEEEP 微信公众号链接阅读本活动推送原文：[首届“气候与环境管理”全国研究生论坛成功举办](#)

2022 年 11 月 13 日下午，在北京大学环境学科建设 50 周年之际，由北京大学环境科学与工程学院主办的首届“气候与环境管理”全国研究生论坛成功举办。论坛邀请了相关领域的专家学者和各高校研究生齐聚云端，围绕“环境污染治理”、“减污降碳协同”、“环境气候政策”和“低碳经济转型”四大方向，共同探讨气候与环境管理研究前沿。为响应疫情防控要求，论坛以线上线下相结合的形式进行，共吸引来自国内高校和科研院所师生 3400 余人次参加。

论坛开幕式

下午 13:30，论坛正式开幕，北京大学环境科学与工程学院副院长刘永，环境管理系主任戴瀚程分别致辞。

刘永首先代表北大环境学院对来自全国各高校和科研院所的与会嘉宾及同学们表示热烈的欢迎。他从学院概况、科研进展和教学成果等方面，简洁而全面地介绍了北京大学环境科学与工程学院的发展历程和学科建设情况。他指出，当前我国“双碳”目标在国内和国际社会均得到了广泛关注，在此背景下开展首届“气候与环境管理”全国研究生论坛对于推动我国环境学科发展和深化环境人才培养具有重要意义，希望同学们能够借助本次论坛的平台，在学术报告交流中畅所欲言、互学互进，在思想碰撞中深化认识、凝聚共识。



Figure 8.61: 刘永致开幕词

戴瀚程回顾了北京大学环境科学与工程学院环境管理系的发展历程。他指出，北大环境管理系在全国率先建立了“环境规划与管理”研究方向，一直以来面向国家重大战略需求，积极创建原创思想理论，建设自主产权知识分析方法体系，在过去几十年间提出了许多具有原创性和重大影响力的理论和方法。近年来，气候与环境的议题越来越受到重视，作为北京大学环境学科建设 50 周年的系列活动之一，戴瀚程表示希望通过此次论坛激发参会人员对气候与环境问题的重视，助推气候与环境管理领域研究人才培养。



Figure 8.62: 戴瀚程致开幕词

分论坛报告

开幕式结束后，论坛进入分会场报告环节。本次论坛共设置“环境污染治理”、“减污降碳协同”、“环境气候政策”和“低碳经济转型”四个主题分会场，论坛学术委员会从前期 80 余份摘要投稿报名中择优选取来自北京大学、上海交通大学、浙江大学、中国科学院大学等 24 所高校和科研院所的 36 位同学进行学术报告。同时，四个论坛分别邀请了上海交通大学魏文栋副教授、中国石油大学（北京）潘勋章副教授、厦门大学张增凯教授、吉林大学宋俊年教授和中山大学陈绍晴教授担任点评专家。分论坛进行过程中，青年学子思路清晰、表达凝练，展现了精彩纷呈的报告；与会同学踊跃提问，互动交流，碰撞学术思想火花。点评老师对每位同学的报告均进行了细致点评，并提出了宝贵建议。



Figure 8.63: 分论坛报告现场

论坛闭幕式

分论坛结束后，四位点评专家分别对分论坛的报告情况进行了总结，并公布论坛获奖名单。经论坛专家评委讨论，共评选出4名最佳报告奖和4名优秀报告奖。戴瀚程对本次论坛进行总结致辞，充分肯定了本次论坛的重要意义及取得的良好学术交流效果。他表示，北大环境学院将继续完善发展论坛平台，搭建气候与环境管理领域学术交流桥梁，希望与会的同学们能够学有所获、学以致用，为助力我国“双碳”目标实现贡献自己的智慧与力量。



Figure 8.64: 论坛闭幕式现场

至此，2022年首届“气候与环境管理”全国研究生论坛圆满结束。本届论坛在我国“双碳”战略背景下，聚焦于气候与环境管理，获得了全国各高校和科研院所师生的广泛关注，对于推动我国环境学科发展、深化环境人才培养产生了积极影响。北京大学环境科学与工程学院将继续深化打造研究生学术交流品牌活动，为环境领域学子搭建高起点、跨学科的学术交流平台，引导广大研究生在互学共进的氛围中直面科学问题、拓宽学术视野、培养创新能力，共同助力稳步推进碳达峰碳中和战略和人与自然和谐共生的中国式现代化，让青春在全面建设社会主义现代化国家的火热实践中绽放绚丽之花！



Figure 8.65: 论坛合影留念

本论坛受北京大学研究生院教育创新计划支持

图片供稿 | 戴一双向雅馨潘羽杰张旭朱衍磊

照片 | 石益路李雨浓王一惠

责编 | 汤默然吴宗治

时间 | 2022.11.19

8.4.2 会议征稿 | 华人环境与资源经济学家大会暨中国环境与资源经济学家协会 (CAERE) 第三届学术年会

- 点击 LEEEP 微信公众号链接阅读本活动推送原文

会议简介

中国环境与资源经济学家协会 (CAERE) 将在 2024 年 5 月 11 日-12 日于浙江大学 (中国·杭州) 举办第三届年会。CAERE 在 2015 年注册于中国香港，是一个非营利性专业组织，旨在促进全球范围内环境、气候、生态和资源经济学领域的研究合作与学术交流。

会议议题涵盖环境、资源、生态和气候经济学等方面，欢迎来自国内外的学者广泛投稿。投稿论文可以是聚焦于中国或其他任何国家和地区的理论或实证研究，中英文均可。

投稿流程

请将论文全文或长摘要 (PDF 格式)、作者简介及联系方式发送至 CAERE@163.COM”——

建议需要签证的参会者尽早开始签证申请流程，如有需要可联系主办方提供邀请函。

时间节点

- 2024 年 3 月 1 日：会议论文投稿截止
- 2024 年 3 月 25 日：论文接收通知发布
- 2024 年 4 月 10 日：会议注册报名截止
- 2024 年 5 月 11-12 日：会议举办

协会成员

组织委员会

主席：石敏俊，浙江大学求是特聘教授

成员：

陈帅，浙江大学公共管理学院长聘教授，教育部青年长江学者

何国俊，香港大学经管学院教授，Journal of Environmental Economics and Management (JEEM) 主编

李善军，康奈尔大学应用经济与管理学院教授，Journal of the Association of Environmental and Resource Economists (JAERE) 主编

龙显灵，北京大学国家发展研究院助理教授，海外优秀青年基金获得者

徐晋涛，北京大学国家发展研究院教授

徐袁，香港中文大学地理与资源管理系副教授

吴力波，复旦大学经济学院教授，国家杰出青年基金获得者

张鹏，香港中文大学（深圳）经管学院副教授，Journal of Development Economics (JDE)

副主编

张蔚文，浙江大学公共管理学院副院长、教授

朱磊，北京航空航天大学经济管理学院教授，国家优秀青年基金获得者

学术委员会

主席：

赵金华，康奈尔大学戴森应用经济管理学院院长、教授

何国俊，香港大学经管学院教授，Journal of Environmental Economics and Management (JEEM) 主编

成员：

曹静，清华大学经济管理学院教授

陈帅，浙江大学公共管理学院长聘教授，教育部青年长江学者

陈晓光，西南财经大学经济与管理研究院教授

戴瀚程，北京大学环境科学与工程学院环境管理系主任、长聘副教授

龚亚珍，中国农业大学环境学院教授

李传忠，瑞典乌普萨拉大学经济系教授

李善军，康奈尔大学应用经济与管理学院教授，Journal of the Association of Environmental and Resource Economists (JAERE) 主编

刘蓓蓓，南京大学环境学院教授

秦萍，中国农业大学应用经济学院教授

邵帅，华东理工大学商学院副院长、教授

张鹏，香港中文大学（深圳）经管学院副教授，Journal of Development Economics (JDE)

副主编

最佳论文评选委员会

主席：

李善军，康奈尔大学应用经济与管理学院教授，Journal of the Association of Environmental and Resource Economists (JAERE) 主编

成员：

徐晋涛，北京大学国家发展研究院教授
林立国，上海财经大学经济学院教授
唐曲，暨南大学经济与社会研究院副教授
李智，厦门大学经济学院副教授

8.5 年度总结

8.5.1 2023 年度总结 | 北京大学 LEEEPE 公众号最受关注的 15 篇推送

- [点击 LEEEPE 微信公众号链接阅读本活动推送原文](#)

写在前面

星燧贸迁，岁序流转。历史不断向前奔腾，回首 2023，北京大学 LEEEPE 组汇聚众多学子，共同徜徉学术星辰，见证岁月的荡漾与磨砺。能源环境经济与政策研究公众号如一艘承载着精品知识之舟，驶过知识的海洋，坚守着传播的使命，为绿色低碳的未来撒下智慧的种子。

2023 年，LEEEPE 公众号累计推送各类文章 149 篇，阅读总量达 16 万余次，单篇阅读量过千次的文章 61 篇。截止到 2023 年 12 月 31 日，累计关注人数已突破 1.6 万人，比上一年增长逾 30%。订阅者遍布大陆 31 省市与港澳台地区，常读用户数量持续增长，26-35 岁的用户占比超过一半，18-25 岁用户量显著提升。

新年伊始，向各位读者呈送过去一年中最受大家青睐的 15 篇文章。上榜文章涵盖了中国农村能源转型、粮食系统效率、新能源部署与减污降碳协同、气候变化的健康效应、碳减排政策对地区均衡发展影响等重要议题。

2023 年度总结 | LEEEPE 公众号最受欢迎的 15 篇推送

15 水 能 碳关系：中国城市综合排水系统温室气体排放

- **原文标题：**WaterEnergyCarbon Nexus: Greenhouse Gas Emissions from Integrated Urban Drainage Systems in China
- **期刊：**Environmental Science & Technology
- **作者：**Qiong Su,* Hancheng Dai,* Shuyan Xie, Xiangying Yu, Yun Lin, Vijay P. Singh, and Raghupathy Karthikeyan
- **研究亮点：**本研究耦合更新了可计算的基于一般均衡的系统动力学和水环境模型 (CGE-SYDWEM)，模拟了流域水平上的水-能 碳关系，以计算考虑碳缓解策略和水工程实践的 IUDS 的直接和间接 (用电量和外部) 温室气体排放量。
- **阅读次数：**1694
- [点击 LEEEPE 微信公众号链接阅读推送原文](#)

14 环境空气污染与老年人的健康相关生活质量：来自中国山东的证据

- **原文标题:** Ambient air pollution and the health-related quality of life of older adults: Evidence from Shandong China
- **期刊:** Journal of Environmental Management
- **作者:** Jialong Tan, Nuo Chen, Jing Bai, Peizhe Yan, Xinyu Ma, Meiling Ren, Elizabeth Maitland, Stephen Nicholas, Wenjing Cheng, Xue Leng, Chen Chen, Jian Wang
- **研究亮点:** 空气污染是全球主要的公共健康问题，对中国老年人与健康相关的生活质量 (HRQoL) 影响的研究尚不足。研究为政策制定者提供了有力的证据，呼吁实施更有针对性的公共政策，减少污染物排放，改善老年人主观的与健康有关的生活质量。
- **阅读次数:** 1694
- **点击 LEEEP 微信公众号链接阅读推送原文**

13 中国能源端大气污染物和二氧化碳的厂级排放及协同控制

- **原文标题:** Facility-Level Emissions and Synergistic Control of Energy-Related Air Pollutants and Carbon Dioxide in China
- **期刊:** Environmental Science Technology
- **作者:** Qingru Wu, Licong Han, Shengyue Li, Shuxiao Wang,* Yan Cong, Kaiyun Liu, Yu Lei, Haotian Zheng, Guoliang Li, Bofeng Cai,* and Jiming Hao
- **研究亮点:** 研究聚焦中国市区 18.5 万余台现役锅炉，整合多种数据源，采用多种技术手段，构建了全国性、设施级排放数据集。研究为中国的锅炉空气污染和二氧化碳排放的精确控制提供了基本信息。
- **阅读次数:** 1748
- **原文链接**

12 气候变化对空气污染影响的模拟研究

- **原文标题:** 气候变化对空气污染影响的模拟研究
- **期刊:** 北京大学学报 (自然科学版)
- **作者:** 吴雅珍, 李丹阳, 张霖, 戴瀚程 *
- **研究亮点:** 该研究基于文献调研方法，总结了“气候变化对空气污染影响”主题研究的技术路线及各类模式的研究进展。未来应提高气候化学模式和大气化学传输模式对污染模拟的准确性。
- **阅读次数:** 1776
- **原文链接**

11 中国屋顶光伏的碳减排潜力

- **原文标题:** Carbon mitigation potential afforded by rooftop photovoltaic in China
- **期刊:** Nature Communications

- **作者:** Zhixin Zhang, Min Chen, Teng Zhong, Rui Zhu, Zhen Qian, Fan Zhang, Yue Yang, Kai Zhang, Paolo Santi, Kaicun Wang, Yingxia Pu, Lixin Tian, Guonian Lü Jinyue Yan
- **研究亮点:** 该研究量化了 2020 年 354 个中国城市的 RPV 碳减排潜力，阐明了 RPV 碳减排潜力的地理异质性，并通过聚类分析揭示了变化的原因。研究结果可以通过趋势模拟、影响分析和区域比较来帮助确定当地 RPV 发展的关键因素。
- **阅读次数:** 1848
- [原文链接](#)

10 有关可持续发展动态系统建模的研究进展

- **原文标题:** Progress in modeling dynamic systems for sustainable development
- **期刊:** PNAS
- **作者:** Noelle E. Selin, Amanda Giang, William C. Clark
- **研究亮点:** 研究为了说明建模方法在支持可持续发展的研究中的潜在应用，考虑了建模实践的四个阶段，并介绍了基于上述建模方法和初步进展的经验教训以及前进方向，指出了正在发展的建模方法，具有增进理解的潜力。
- **阅读次数:** 1884
- [原文链接](#)

9 衡量中国城市的低碳能源转型

- **原文标题:** Measuring the low-carbon energy transition in Chinese cities
- **期刊:** iScience
- **作者:** Shen, Yifan; Shi, Xunpeng; Zhao, Zhibo; Sun, Yongping; Shan, Yuli
- **研究亮点:** 研究亮点：研究以中国为例，旨在通过从能源系统转型绩效和转型准备度两个维度考察城市的能源转型指数 (ETI)，开发一个全面的次国家能源转型测量，为 282 个城市能源转型的时空进展提供了定量证据，以及未来路径的潜在影响。
- **阅读次数:** 1903
- [原文链接](#)

8 可能低估的燃煤电厂对中国空气污染的影响

- **原文标题:** Possible underestimation of the coal-fired power plants to air pollution in China
- **期刊:** Resources, Conservation Recycling
- **作者:** Zhixiong Weng, Yuqi Song, Cuiyun Cheng, Dan Tong, Meng Xu, Minghao Wang, Yang Xie*

- **研究亮点:** 本文基于 2020 年初的 COVID-19 疫情构建了一个双重差分模型 (DID)，以分析燃煤电厂是否仍然是中国空气污染的重要来源，为解决空气污染问题提供了宝贵的政策启示。
- **阅读次数:** 1944
- [原文链接](#)

7 空气污染治理降低医疗不平等

- **原文标题:** Improved air quality from China's clean air actions alleviates health expenditure inequality
- **期刊:** Environment International
- **作者:** Zhixiong Weng, Dan Tong, Shaowei Wu, Yang Xie
- **研究亮点:** 研究表明中国大规模的清洁空气行动有助于减少医疗支出的不平等，尤其在经济欠发达和医疗保健覆盖面少的城市。预计到 2035 年，随着空气质量的改善，带来的医疗费用收益将不断增加。实施“美丽中国”计划不仅能缓解地区医疗支出的不平等，还将带来更多的健康效益，从而弥补经济和医疗资源方面的地区差距。
- **阅读次数:** 2123
- [原文链接](#)

6 我国大规模部署可再生能源带来各省有别的空气质量改善和健康协同

- **原文标题:** Large-scale renewable energy brings regionally disproportional air quality and health co-benefits in China
- **期刊:** iScience
- **作者:** Yang Xie, Meng Xu, Jinlu Pu, Yujie Pan, Xiaorui Liu, Yanxu Zhang, Shasha Xu*
- **研究亮点:** 本研究通过耦合 IMED | CGE、EDO、GOES-CHEM 和 IMED | HEL 模型，在中国省级层面深入探讨了可再生能源部署对空气质量的影响，并评估了发展可再生能源的成本效益。
- **阅读次数:** 2155
- [原文链接](#)

5 电动汽车在中国省级地区差异化推广路径探究：从环境和人群健康角度进行评估

- **原文标题:** Regionally differentiated promotion of electric vehicles in China considering environmental and human health impacts
- **期刊:** Yan Ru Fang, Xin Sun, Silu Zhang, Gang Liu, Xiaorui Liu, Peng Zhang, Yifei Kang, Hancheng Dai*
- **作者:** Environmental Research Letters

- **研究亮点:** 研究定量分析中国省级道路交通部门的电气化带来的碳减排和空气污染控效果，并探究了不同省级区域电动汽车渗透对空气质量改善影响，及与之相关的人群健康影响，为中国道路交通电气化推广的省级推广梯度制定提供了参考。
- **阅读次数:** 2377
- [原文链接](#)

4 空气污染对中国城市居民心理健康的影响

- **原文标题:** Urbanites' mental health undermined by air pollution
- **期刊:** Nature Sustainability
- **作者:** Zhi Cao, Jingbo Zhou, Meng Li, Jizhou Huang Dejing Dou
- **研究亮点:** 该研究重点探讨了空气污染对中国城市居民心理健康的影响，发现发展中国家城市人口的心理健康差异可能归因于高度的空气污染。每增加一个标准差 (26.3g/m³) 细颗粒物，中国心理健康问题患者人数将激增约 115 万人。
- **阅读次数:** 3066
- [原文链接](#)

3 碳限额约束对我国区域经济发展均衡性的影响

- **原文标题:** The unintended dilemma of China's target-based carbon neutrality policy and provincial economic inequality
- **期刊:** Energy Economics
- **作者:** Chaoyi Guo, Ziqiao Zhou, Xinyuan Liu, Xiaorui Liu, Jing Meng, Hancheng Dai
- **研究亮点:** 该研究将 IMED/CGE 省级模型与多阶段回归模型耦合，深入探讨了基于不同省际配额方案的碳限额政策对我国区域经济与产业发展均衡性的影响，同时分析了造成这种不均衡影响的机制原因。
- **阅读次数:** 3256
- [原文链接](#)

2 粮食系统增效是实现中国碳中和的关键

- **原文标题:** Enhanced food system efficiency is the key to China's 2060 carbon neutrality target
- **期刊:** Nature Food
- **作者:** Ming Ren, Chen Huang, Yazhen Wu, Andre Deppermann, Stefan Frank, Petr Havlik, Yuyao Zhu, Chen Fang, Xiaotian Ma, Yong Liu, Hao Zhao, Jinfeng Chang, Lin Ma, Zhaohai Bai, Shasha Xu and Hancheng Dai*
- **研究亮点:** 该研究创新性地构建并应用 IMED-GLOBIOM 综合评估模型，探讨了碳中和目标与生物质能发展、负排放技术与粮食系统之间的联动关系，揭示了中国部署生物质能对中

国和全球可持续发展的影响，识别出适度开放贸易与提高粮食系统效率在将缓解潜在负面影响方面的作用。

- 阅读次数: 5315

- [原文链接](#)

1 中国农村现代能源转型成本有效助力碳中和与健康改善

- **原文标题:** Costs and health benefits of the rural energy transition to carbon neutrality in China
- **期刊:** Nature Communications
- **作者:** Teng Ma, Silu Zhang, Yilong Xiao, Xiaorui Liu, Minghao Wang, Kai Wu, Guofeng Shen, Chen Huang, Yan Ru Fang*, Yang Xie*
- **研究亮点:** 本研究构建了“居民能源-空气质量-公众健康”的模型框架，发现推广电炊事设备和空气源热泵有助于农村家庭向现代能源转型、实现“碳中和”目标、显著改善北方地区的空气质量，且大部分省份的货币化人群健康效益可抵消技术转型成本。
- 阅读次数: 8385
- [原文链接](#)

编辑: 安思洁、潘羽杰

排版: 安思洁、徐采珺

8.5.2 2022 年度总结 | 北京大学 LEEEP 公众号最受关注的 15 篇推送

- [点击 LEEEP 微信公众号链接阅读本活动推送原文](#)

写在前面

林花谢了春红，太匆匆。转眼间，2022 年已翻篇。能源环境经济与政策研究已相伴大家走过了不平凡的 2022 年。2022 年，全球新冠疫情警报频响，各国全力艰难中抗疫，年末中国各省恢复正常，砥砺前行，恢复常态。在这一年里，IPCC 第六次评估报告发布，拓宽了广大学者对气候变化认识。中国遭受历史最热高温热浪袭击，南方用水和能源需求空前紧张。同时，二十大提出我国仍需“积极稳妥推进碳达峰碳中和”。

在此背景下，北京大学 LEEEP 组的能源环境经济与政策研究公众号始终坚持为读者呈递能源环境经济学领域的精品知识传播与学术交流，以期为达成双碳目标贡献浅薄见解。以“IMED 研究”为学术窗口，将 LEEEP 组最新成果整理展示，供读者们学习交流。此外，我们不定期发布“讲座会议”及“工作机会”信息，力争推广高端讲座会议，提供优质工作平台，助力大家在科研路上扬帆远航！2022 年度，公众号累计推送各类文章 153 篇，阅读总量达 20.9 万余次，其中 82 篇推送文章单篇阅读量过千次。截至目前，公众号订阅者近 1 万 2 千人，遍布大陆 31 省市与港澳台地区。

壬寅之虎稍纵，癸卯兔年初迎。我们回顾 2022 年最受大家青睐（单篇阅读量最高）的 15 篇文章，主要聚焦于碳中和、能源、空气质量与人群健康等热点议题。

2022 年度总结 | LEEEP 公众号最受欢迎的 15 篇推送

01 碳中和能使中国实现工业用水目标

- **原文标题:** Achieving carbon neutrality enables China to attain its industrial water-use target
- **期刊:** One Earth
- **作者:** Xiaoyu Liu, Hancheng Dai, Yoshihide Wada, Taher Kahil, Jinren Ni, Bin Chen, Yan Chen, Chaoyi Guo, Chen Pan, Xiaorui Liu, and Yong Liu*
- **研究亮点:** 研究表明实现碳中和将在 2060 年节省 38 km³ 用水，相当于全国工业用水的 24%。
- **阅读次数:** 3739
- [原文链接](#)

02 我国大气污染控制政策成本效益评估文献综述

- **原文标题:** Evaluating cost and benefit of air pollution control policies in China: a systematic review
- **期刊:** Journal of Environmental Sciences
- **作者:** Xinyuan Liu, Chaoyi Guo, Yazhen Wu, Chen Huang, Keding Lu, Yuanhang Zhang, Lei Duan, Miaomiao Cheng, Fahe Chai, Fengqiao Mei*, Hancheng Dai*
- **研究亮点:** 本综述为相关决策者提供了当下中国大气污染防控战略研究的不足，以及未来挑战的应对方向。
- **阅读次数:** 3739
- [原文链接](#)

03 京津冀地区减污降碳政策的异质性协同效应和互馈影响

- **原文标题:** Mutual effects of CO₂ emission reduction and air pollution control policies in beijing-tianjin-hebei region
- **期刊:** Frontiers in Environmental Science
- **作者:** Kai Wu, Xiaorui Liu, Hancheng Dai, Silu Zhang, Ziqiao Zhou, Teng Ma, Chaoyi Guo, Xiaojia He*, and Yan Ru Fang*
- **研究亮点:** 研究探究碳中和目标与空气质量改善目标之间的相互协同影响，为制定气候与环境协同控制战略的经济可行性路径提供参考。
- **阅读次数:** 2653
- [原文链接](#)

04 深度脱碳协同减污的关键机制：以粤港澳大湾区为例

- **原文标题:** Uncovering the key mechanisms of how deep decarbonization benefits air pollution alleviation in China
- **期刊:** Environmental Research Letters
- **作者:** Xiaorui Liu, Chaoyi Guo, Xiaotian Ma, Kai Wu, Peng Wang, Zhijiong Huang, Ziqiao Zhou, Chen Huang, Silu Zhang, Minghao Wang, Hancheng Dai*.
- **研究亮点:** 研究重点考察了碳减排的经济影响和驱动力, 以及碳减排对于空气污染物减排的协同程度与边际影响, 识别协同减排的关键部门和作用通道, 可为制定协同政策提供关键科学支撑。
- **阅读次数:** 2047
- **原文链接**

05 气候变化对中国发电基础设施的潜在影响

- **原文标题:** Prospective climate change impacts on China's fossil and renewable power-generation infrastructure: Regional and plant-level analyses
- **期刊:** Resources, Conservation and Recycling
- **作者:** Chen Huang, Yuyao Zhu, Ming Ren, Pei Zhang, Yingchao Chen, Hancheng Dai*, Xianchun Tan
- **研究亮点:** 研究将为构建以保障安全为前提的现代能源体系、实现富有气候韧性的碳中和提供科学决策支撑。
- **阅读次数:** 1969
- **原文链接**

06 工厂级减排战略可在 2060 年前实现碳中和, 并减少中国钢铁行业的非二氧化碳排放

- **原文标题:** Plant-level mitigation strategies could enable carbon neutrality by 2060 and reduce non-CO₂ emissions in China' s iron and steel sector
- **期刊:** One Earth
- **作者:** Zhaoling Li, Tatsuya Hanaoka
- **研究亮点:** 研究于运用工厂尺度的详细信息分析不同减排措施的实施效果, 评价了中国钢铁行业对实现碳中和目标的贡献。
- **阅读次数:** 1887
- **原文链接**

07 对电力的渴求: 水供应对中国发电的影响

- **原文标题:** The Thirst for Power: The Impacts of Water Availability on Electricity Generation in China
- **期刊:** The Energy Journal

- **作者:** Yao An and Lin Zhang*
- **研究亮点:** 研究识别了水资源供应和电力短缺之间的联系背后的机制，为如何在有限的资源约束下实现可持续性这一问题提供了科学支持。
- **阅读次数:** 1874
- **原文链接**

08 脱贫攻坚对国家和全球碳排放的影响

- **原文标题:** Impacts of poverty alleviation on national and global carbon emissions
- **期刊:** Nature Sustainability
- **作者:** Benedikt Bruckner, Klaus Hubacek*, Yuli Shan*, Honglin Zhong and Kuishuang Feng
- **研究亮点:** 研究阐明了减轻贫困在多大程度上会与减缓气候变化的努力相冲突。
- **阅读次数:** 1754
- **原文链接**

链接查看原文:

09 2017 年的异常热浪和全因死亡率: 对中国全国健康和经济影响的评估

- **原文标题:** The exceptional heatwaves of 2017 and all-cause mortality: An assessment of nationwide health and economic impacts in China
- **期刊:** Science of the Total Environment
- **作者:** Meilin Yan, Yang Xie, Huanhuan Zhu, Jie Ban, Jicheng Gong, Tiantian Li
- **研究亮点:** 研究系统评估了 2017 年中国异常热浪的死亡率和经济影响。
- **阅读次数:** 1608
- **原文链接**

10 我国碳排放提前达峰的空气质量和健康协同效益

- **原文标题:** Air quality and health co-benefits of China's carbon dioxide emissions peaking before 2030
- **期刊:** Nature Communications
- **作者:** Rong Tang, Jing Zhao, Yifan Liu, Xin Huang, Yanxu Zhang, Derong Zhou, Aijun Ding, Chris P. Nielsen, Haikun Wang
- **研究亮点:** 研究考虑了结合社会经济发展特征和气候政策目标的九种情景，分别以共享社会经济路径 (SSPs) 和代表浓度路径 (RCPs) 表示。
- **阅读次数:** 1596
- **原文链接**

11 气候变化下极端气候对全球光伏发电的影响

- **原文标题:** Climate change extremes and photovoltaic power output
- **期刊:** Nature Sustainability
- **作者:** Sarah Feron, Raúl R. Cordero, Alessandro Damiani and Robert B. Jackson
- **研究亮点:** 研究结果为能源规划者提供了有效的参考与相关科学基础，适当的应对策略指定可补偿未来气候变化带来的影响。
- **阅读次数:** 1568
- [原文链接](#)

12 1990 年至 2019 年十年间中国与 PM2.5 相关的健康影响变化以及对当前和未来排放控制的影响

- **原文标题:** Decadal changes in PM2.5-related health impacts in China from 1990 to 2019 and implications for current and future emission controls
- **期刊:** Science of the Total Environment
- **作者:** Shuai Yin
- **研究亮点:** 研究结果将为决策者提供理论支持，帮助他们考虑复杂的因素和未来的挑战，如人口老龄化和气候变化带来的挑战，并制定具体的减排目标，以有效缓解 PM2.5 带来的有害影响。
- **阅读次数:** 1525
- [原文链接](#)

13 1978–2017 年中国畜牧业生产的氧化亚氮排放

- **原文标题:** Policy-enabled stabilization of nitrous oxide emissions from livestock production in China over 1978–2017
- **期刊:** Nature Food
- **作者:** Peng Xu, Benjamin Z. Houlton, Yi Zheng, Feng Zhou, Lin Ma, Bin Li, Xu Liu, Geng Li, Haiyan Lu, Feng Quan, Shiyao Hu, Anping Chen
- **研究亮点:** 本研究高质量、精确规模的清单有助于确定排放和减排热点，并建议采取有针对性的干预措施，通过重新调整牲畜和农田生产减少排放，对动物粪便加以循环利用。
- **阅读次数:** 1505
- [原文链接](#)

14 低碳城市交通的健康协同效益的人口分布

- **原文标题:** Scenarios of demographic distributional aspects of health co-benefits from decarbonising urban transport

- **期刊:** The Lancet Planetary Health
- **作者:** Chenxi Lu, W Neil Adger, Karyn Morrissey, Shaohui Zhang, Sergey Venevsky, Hao Yin, Taochun Sun, Xuanren Song, Chao Wu, Xinyu Dou, Binqing Zhu, Zhu Liu
- **研究亮点:** 研究以 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ (约 1 平方公里) 的空间分辨率分析了整个北京中心城区，以评估城市层面的交通减排战略的潜在效益。这一分析也使政策制定者能够比较不同的交通减排战略的碳减排和健康协同效益。
- **阅读次数:** 1471
- [原文链接](#)

15 全球粮食和能源的用水竞争

- **原文标题:** Global competing water uses for food and energy
- **期刊:** Environmental Research Letters
- **作者:** Yue Qin
- **研究亮点:** 研究旨在全面描述历史趋势和气候变暖情景下粮食和能源生产的用水竞争情况，揭示跨部门水资源管理机会，以更好地应对水资源危机。
- **阅读次数:** 1446
- [原文链接](#)

明朝望平远，相约在春台。感谢读者朋友们 2022 年的相伴，2023 年我们亦将满怀热忱，为大家呈递学术佳肴，敬请大家关注和投稿！

最后，预祝各位老师，同学和读者朋友们，新年快乐，心想事成，诸事顺遂！

作者：潘羽杰，戴瀚程等

排版：潘羽杰

8.5.3 2021 年度总结 | 北京大学 LEEEП 公众号最受关注的 15 篇推送

- [点击 LEEEП 微信公众号链接阅读本活动推送原文](#)

写在前面

不知庭霰今朝落，疑是林花昨夜开。转眼间，2021 年已翻过最后一页。在这一年里，全球新冠疫情警报频响，各国在艰难中全力抗疫、布局复苏，在迷雾中跋涉，在变局中前行；在这一年里，美加遭受历史性高温，西欧遭遇“千年一遇”洪灾，台风“烟花”、“雷伊”先后给人类带来重创，引发特大暴雨和城市内涝灾害。也是在这一年里，人类将韦伯望远镜送上太空，将宇宙探索的视线投射到百亿年前；神舟十二、神舟十三号载人飞船顺利升空，续写“红”“蓝”篇章，见证航天强国；中国加快碳中和长远布局，低碳经济成为顶层设计并正式部署。没有哪座孤岛能够置身事外，没有哪项事业可以单枪匹马；没有哪个冬天不可逾越，没有哪个春天不会来临。

在过去的一年中，作为学术社区一分子，北京大学 LEEEП 组陪伴大家共同见证、经历了或震撼、或艰难、或温暖、或感动的每个时刻。在过去的一年中，作为 LEEEП 组的智识会客厅，“能源环境经济与政策研究”微信公众号始终坚持精品知识传播、深度学术交流与优质信息发布的定位，

为绿色低碳发展事业贡献知识和见解。在公众号栏目设置上，以“文献阅读”为重要抓手，每周推出三到五篇前沿论文分享，并对每篇文献进行精读，致力于打造能源环境经济学领域的学术前沿信息集散地；以“研之有效”为交流载体，分享科研拾贝路上所获所得，以期学习有方，科研有法；以“IMED 研究”为科研窗口，将课题组最新成果进行整理展示，供读者们学习交流，互助前行。此外，LEEEP 公众号不定期发布“讲座会议”及“工作机会”信息，力争推广高端讲座会议，提供优质工作平台，助力大家在科研路上扬帆远航！2021 年，公众号累计推送各类文章 132 篇，阅读总量达 18.1 万余次，其中 36 篇推送文章单篇阅读量过千次。截至 2022 年 1 月 20 日，公众号订阅者达 7780 余人，遍布大陆 31 省市与港澳台地区，常读用户接近五分之一，85

2021 已是步履匆匆的过往，2022 正是充满朝气的当下。站在辞旧迎新的节点上，我们回顾一路以来的收获，期待更好地开启未来。那么，让我们一起看看，2021 年最受大家青睐的文章有哪些吧！下面，我们将带大家回顾 2021 年文章单篇阅读量最高的十五篇文章。在这 15 篇文章中，能源和环境领域的期刊深受青睐，其中 Nature、Science 和 Lancet 及其子刊的系列研究占半壁江山；LEEEP 公众号始终紧跟热点，及时推出最新发表的科研成果（发表于 2021 年的文章有 12 篇），带领读者探知科研最新动态；备受关注的文章主题主要聚焦于碳中和、空气质量和人群健康等热点议题；基于 IMED 模型的综合评估研究受到越来越多的关注，3 篇上榜文章的阅读量总计达到 5093 人次。

2021 年度总结 | 北京大学 LEEEP 公众号最受关注的 15 篇推送

01 IMED 合作 | 中国多模型对比：碳税的一般均衡分析

- **原文标题:** The General Equilibrium Impacts of Carbon Tax Policy in China: A Multi-model Comparison
- **期刊:** Energy Economics
- **作者:** Jing Cao, Hancheng Dai*, Shantong Li*, Chaoyi Guo, Mun Ho, Wenjia Cai, Jianwu He, Hai Huang, Jifeng Li, Yu Liu, Haoqi Qian, Can Wang, Libo Wu, Xiliang Zhang

02 中国实现碳中和对改善空气质量的协同效益

- **原文标题:** Air quality benefits of achieving carbon neutrality in China
- **期刊:** Science of the Total Environment
- **作者:** Xurong Shi, Yixuan Zheng, Yu Lei, Wenbo Xue, Gang Yan, Xin Liu, Bofeng Cai, Dan Tong, Jinnan Wang.

03 对十种低碳政策工具的系统性评估

- **原文标题:** Systematic review of the outcomes and trade-offs of ten types of decarbonization policy instruments
- **期刊:** Nature Climate Change
- **作者:** Cristina Peñasco, Laura Díaz Anadón Elena Verdolini

04 京津冀清洁空气政策与二氧化碳减排的协同效益分析

- **原文标题:** Carbon dioxide mitigation co-effect analysis of clean air policies: lessons and perspectives in China's Beijing–Tianjin–Hebei region
- **期刊:** Environmental Research Letters
- **作者:** Meng Xu, Zhongfeng Qin, Shaohui Zhang

05 IMED 研究 | 四川省深度碳减排对空气质量改善的协同效益

- **原文标题:** Co-benefits of deep carbon reduction on air quality and health improvement in Sichuan Province of China
- **期刊:** Environmental Research Letters
- **作者:** Silu Zhang, Yazhen Wu, Xiaorui Liu, Jun Qian, Junhui Chen, Li Han and Hancheng Dai
- **研究亮点:**
- **阅读次数:**
- [原文链接](#)

06 用地理加权回归方法分析具有空间相关性的中国省级 CO₂ 排放影响因素

- **原文标题:** Spatial correlation of factors affecting CO₂ emission at provincial level in China: A geographically weighted regression approach
- **期刊:** Journal of Cleaner Production
- **作者:** Yanan Wang, Wei Chen, Yanqing Kang, Wei Li, Fang Guo.
- **研究亮点:**
- **阅读次数:**
- [原文链接](#)

07 2007 年-2017 年中国省市碳减排评估分析

- **原文标题:** Provinces with transitions in industrial structure and energy mix performed best in climate change mitigation in China
- **期刊:** Nature Communications
- **作者:** Zhifu Mi Xinlu Sun

08 碳中和背景下中国中长期空气质量改善路径

- **原文标题:** Pathways of China's PM2.5 air quality 2015–2060 in the context of carbon neutrality

- **期刊:** National Science Review
- **作者:** Jing Cheng, Dan Tong, Qiang Zhang, Yang Liu, Yu Lei, Gang Yan, Liu Yan, Sha Yu, Ryna Yiyun Cui, Leon Clarke, Guannan Geng, Bo Zheng, Xiaoye Zhang, Steven J Davis, Kebin He

09 从供给和需求两侧助力中国钢铁行业实现碳中和

- **原文标题:** Decarbonizing China' s Iron and Steel Industry from the Supply and Demand Sides for Carbon Neutrality
- **期刊:** Applied energy
- **作者:** Ming Ren, Pantao Lu, Xiaorui Liu, M. S. Hossain, Yanru Fang, Tatsuya Hanaoka, Brian O' Gallachoir, James Glynn, and Hancheng Dai

10 中国与能源有关的二氧化碳排放变化的驱动因素

- **原文标题:** Drivers of change in China' s energy-related CO₂ emissions
- **期刊:** Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America
- **作者:** Xiaoqi Zheng, Yonglong Lu, Jingjing Yuan ,Yvette Baninla, Sheng Zhang, Nils Chr. Stenseth, Dag O. Hesseng , Hanqin Tian,Michael Obersteiner , and Deliang Chen

11 极端气候事件增加了全球粮食安全风险和适应性措施需求

- **原文标题:** Extreme climate events increase risk of global food insecurity and adaptation needs
- **期刊:** Nature Food
- **作者:** Tomoko Hasegawa, Gen Sakurai, Shinichiro Fujimori, Kiyoshi Takahashi, Yasuaki Hijikata Toshihiko Masui

12 2017 年的异常热浪和全因死亡率: 对中国全国健康和经济影响的评估

- **原文标题:** The exceptional heatwaves of 2017 and all-cause mortality: An assessment of nationwide health and economic impacts in China
- **期刊:** Science of the Total Environment
- **作者:** Meilin Yan, Yang Xie, Huanhuan Zhu, Jie Ban, Jicheng Gong, Tiantian Li

13 经济结构变化对中国二氧化碳排放峰值的影响

- **原文标题:** Role of economic structural change in the peaking of China's CO₂ emissions: An input-output optimization model
- **期刊:** Science of the Total Environment
- **作者:** Yuqi Su, Xin Liu, Junping Ji , Xiaoming Ma

14 中国燃煤电厂改造措施带来重大汞相关健康效益

- **原文标题:** China' s retrofitting measures in coal-fired power plants bring significant mercury-related health benefits
- **期刊:** One Earth
- **作者:** Jiashuo Li, Sili Zhou, Wendong Wei, Jianchuan Qi, Yumeng Li, Bin Chen, Ning Zhang, Dabo Guan, Haoqi Qian, Xiaohui Wu, Jiawen Miao, Long Chen, Kuishuang Feng and Sai Liang
- **研究亮点:**
- **阅读次数:**
- **原文链接**

15 短期暴露于大气颗粒物污染显著增加我国城市人群呼吸道与心脑血管疾病住院人次和医疗花费

- **原文标题:** Short-Term Ambient Particulate Air Pollutionand Hospitalization Expenditures of Cause-Specific Cardiorespiratory Diseasesin China: A Multicity Analysis
- **期刊:** THE LANCET Regional Health
- **作者:** Yang Xie, Zichuan Li, Hua Zhong, Xing Lin Feng,Pantao Lu, Zhouyang Xu, Tongjun Guo, Yaqin Si, Jinxi Wang, Libo Chen, Chen Wei,Furong Deng, Andrea A. Baccarelli, Zhijie Zheng, Xinbiao Guo, Shaowei Wu

志合者，不以山海为远。值此辞旧迎新之际，要感谢读者朋友们一路相伴，我们亦以最大的热情，欢迎各位同仁推而广之！青山遮不住，毕竟东流去，2022 年，我们将继续集全组之力，以最纯粹的学术热情和最宽阔的科研视野，为大家倾情奉献最新鲜的学术佳肴。

最后，祝大家工作顺利，生活幸福！

作者：吴凯、郭超艺、张思露、吴雅珍、戴瀚程等

排版：吴凯

9. 附录：延伸阅读

A.1 科研项目

近年来，LEEEP 课题组先后主持了国家自然科学基金委青年项目（结项后评估“特优”）、优秀青年科学基金项目、面上项目、重点项目课题、国际（地区）合作与交流项目课题、科技部国家重点研发计划课题等**国家级项目**，以及京津冀自科基金基础研究专项、香港大学教育资助委员会项目课题、英国 Wellcome Trust 基金项目、美国能源基金会、美国环保协会及自然资源保护协会等**省部级或国际机构资助项目**二十余项。

1. 2023/01-2025/12: 国家自然科学基金优秀青年科学基金项目，气候与环境政策研究，**主持人**
2. 2023/04 – 2025/03: 科技部国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项，面向碳中和目标的“水-能-粮”权衡协同及环境与健康效应综合评估，**课题负责人**
3. 2023/01-2025/12: 科技部国家重点研发计划，面向减污降碳协同增效的四大结构调整优化技术，**课题一负责人**，我国社会经济转型的协同减排效果与经济影响研究
4. 2023/01-2027/12: 国家自然科学基金重点项目，基于复杂系统建模的碳中和多维政策模拟仿真研究，**课题负责人**
5. 2022/06 – 2025/05: 大学项目资助委员会（香港 UGC）合作研究基金（CRF）项目，实现 2060 碳中和：粤港澳大湾区气候变化减排情景下空气污染与健康的协同效应研究，**课题负责人**
6. 2022/01 – 2024/12: 京津冀基础研究合作专项项目，京津冀面向双碳目标的协同发展及其优化设计研究，**主持人**
7. 2021/01 – 2024/12: 国家自然科学基金面上项目，中国省级碳减排与节水目标的协同与互斥效应研究，**主持人**
8. 2020/06 – 2023/05: 英国 Wellcome Trust 基金会，Electric vehicles' health and climate benefits in China and India，**共同主持人**
9. 2021/06 – 2022/05: 美国能源基金会，中国臭氧与温室气体的内在关系及协同控制的目标指标，**课题骨干**

10. 2020/06 – 2021/05: 美国能源基金会, 粤港澳大湾区气候协同的空气质量改善战略研究, **课题骨干**
11. 2019/12 – 2021/12: 科技部国家重点研发计划, 区域空气质量的调控原理与技术途径, **课题骨干**
12. 2019/01 – 2023/12: 国家自然科学基金国际合作与交流项目, 中国社会经济绿色低碳发展的规律研究, **课题负责人**
13. 2018/01 – 2021/12: 中爱自然科学基金委员会双边合作项目, 可持续能源转型之路: 全球和中爱能源-经济-环境-气候多模型创新集成模拟, 51861135102, **课题负责人**
14. 2018/01 – 2020/12: 国家自然科学基金青年科学基金项目, 钢铁水泥行业去产能政策的绿色低碳协同效益研究: 基于综合评价模型的分析, 71704005, **主持人** (结项后评估“特优”)
15. 2017/01 – 2021/12: 国家自然科学基金重大项目, “绿色低碳发展转型中的关键管理科学问题与政策研究”, 课题一“经济发展新常态下的绿色低碳转型特征与模式研究”, 专题一“我国经济绿色低碳发展的制约因素和特征研究”, **专题一负责人**
16. 2017/12 – 2021/05: 科技部国家重点研发计划, 京津冀及周边地区大气污染联防联控及重污染应急技术与集成示范, 2017YFC0213000, **课题六参与人**: 区域大气污染联防联控机制体制和实施方案研究
17. 2017/12 – 2021/05: 科技部国家重点研发计划, 京津冀及周边地区大气污染联防联控及重污染应急技术与集成示范, 2017YFC0213000, **课题三负责人**: 典型重污染过程成因分析与来源识别技术
18. 2017/09 – 2020/08: 国家自然科学基金应急管理项目, 美国退出《巴黎协定》对全球气候治理的影响及我国的应对策略, 71741011, **课题骨干**

A.2 团队成员

在过去数年间, LEEEP 课题组吸引了来自全球及全国各大高校的优秀学子, 一道从事环境与气候政策综合影响评估方向研究。共指导博士后 9 名 (出站 3 名)、博士生 13 名 (含联合指导, 毕业 2 名)、硕士生 5 名 (毕业 3 名), 本科生科研和毕设 23 人次, 获得国家奖学金、校长奖学金、北京大学学术创新奖等各类奖励 40 余人次, 多名学生入选 IIASA YSSP 暑期青年科学家项目。



Figure A.1: LEEEP 组 2017 年度成员照片墙



Figure A.2: LEEEPEP 组 2018 年度成员照片墙



Figure A.3: LEEEPEP 组 2019 年度成员照片墙



Figure A.4: LEEEП组 2020 年度成员照片墙



Figure A.5: LEEEП组 2021 年度成员照片墙



Figure A.6: LEEEPEP 组 2022 年度成员照片墙



Figure A.7: LEEEPEP 组 2023 年度成员照片墙

- **IMED | CGE 模型贡献作者:** 戴瀚程
- **IMED | TEC 模型贡献作者:** 戴瀚程、陆潘涛

- IMED | HIO 模型贡献作者：戴瀚程、刘晓瑞、韩亚龙
- IMED | HEL 模型贡献作者：谢杨、戴瀚程、张翔、吴雅珍
- IMED 模型文献综述：任明、马腾、张思露、陆潘涛、郭超艺、刘晓瑞、吴雅珍、黄晨、刘心远、方艳茹、戴瀚程等课题组成员
- 校稿：李博抒、陆潘涛、刘晓瑞、吴雅珍、戴瀚程

A.3 更多资料

- 导师简历：<https://www.jianguoyun.com/p/DZfzYYwQ1L7CBhi1z3M>
- 课题组主页：<http://scholar.pku.edu.cn/hanchengdai>
- 课题组公众号介绍：<https://www.jianguoyun.com/p/DZfzYYwQ1L7CBhi1z3M>
- IMED 模型介绍：<https://mp.weixin.qq.com/s/4Z1PAkEKQFUrqHg2KMlFgQ>
- IMED Book 中文：<https://www.jianguoyun.com/p/DVrcIwsQ1L7CBhjE13M>
- IMED Book English：<https://www.jianguoyun.com/p/DZnI8a8Q1L7CBhi913M>
- LEEEPEP 研究 | Nature Food: 粮食系统增效是实现中国碳中和的关键：<https://mp.weixin.qq.com/s/Kqq3CBBkwjSfCddkefvFOw>
- LEEEPEP 研究 | Nature Communications: 中国农村现代能源转型助力碳中和与健康改善：<https://mp.weixin.qq.com/s/oV5gCD-oRssP-wOghiy27w>
- LEEEPEP 研究 | One Earth: 碳中和能使中国实现工业用水目标：https://mp.weixin.qq.com/s/S9Icpn_zCc9zN7_1-5jIDA
- LEEEPEP 研究 | 污染控制与气候政策的健康与经济影响分析：https://mp.weixin.qq.com/s/ZCp_YQh9_ueM180EPQXGPQ
- LEEEPEP 研究 | 中国多模型对比：碳税的一般均衡分析：<https://mp.weixin.qq.com/s/u3rxqmSJXKDdVVvJ31qTmg>
- LEEEPEP 研究 | 我国大气污染控制政策成本效益评估文献综述：https://mp.weixin.qq.com/s/kzdTbEexFAhPwPrOG_F7TQ
- LEEEPEP 组支撑 IPCC AR6 论文一览：<https://mp.weixin.qq.com/s/a8-SKPYmEBGRBdu8dyqPCg>
- LEEEPEP 课题组多篇研究论文被 IPCC AR6 正面引用：https://mp.weixin.qq.com/s/FT_1qrud05V_h_M1M3w_Q

A.4 加入我们

A.4.1 加入 LEEEPEP：研究生



Figure A.8: 能源环境经济与政策研究室 (Laboratory of Energy & Environmental Economics and Policy, LEEEPEP)

课题组每年招收博士研究生。请关注北京大学环境科学与工程学院每年举办的全国优秀大学生夏令营活动，活动中可与导师直接见面交流，并后续申请免试推荐研究生资格。课题组适合运筹学或理工科背景同学，欢迎在以下方面有兴趣或特长的同学加入本课题组：

- **数理基础优秀，系统分析有条理，逻辑思维能力强**
- **计算机程序语言基础优秀，有算法开发专长**
- **对能源-环境-经济系统建模及系统分析有强烈兴趣**
- **较强的心理韧性和抗压能力，能平衡好繁重的个人与小组科研任务**
- **直博申请人需成绩靠前，并有与本课题组方向相关的科研训练经历**
- **普通批次申请考核制申请人必须有规范的科研训练经历，如在国际期刊上发表过至少一篇学生一作论文，或同等水平证明材料**

注：

1. 注 1：读博需谨慎，非必要不读博，鼓励对钻研问题有纯粹兴趣的同学申请本组博士。
2. 注 2：有意读博者请先阅读本组研究综述（[此处下载](#)），以便对本组研究有更深入的了解。
3. 注 3：每年 6-7 月夏令营通知见环境学院主页通知。
4. 注 4：2024 年 9 月入学博士名额仅剩少数民族专项、港澳台籍及留学生名额。

A.4.2 加入 LEEEP：暑期夏令营

招生 | 北京大学 2022 年度优秀大学生夏令营：环境管理专业

- 点击 LEEEP 微信公众号链接阅读本活动推送原文：[招生 | 北京大学 2022 年度优秀大学生夏令营：环境管理专业](#)

北京大学环境科学与工程学院拟定于 2022 年 7 月上旬举办环境科学与工程学科优秀大学生夏令营，在全国范围内招收优秀本科生集中交流与进一步深造。

欢迎有志于从事环境相关研究的同学报名，特别欢迎报名环境管理专业（不限本科专业）！

为什么选择环境管理专业？

1. 前沿的科学方向

北京大学在中国最早设立了环境规划与管理研究方向，率先提出了“环境文明”和可持续发展等前瞻性理论框架，是推动我国环境经济协调发展及全球环境治理的先行者。近年来，针对生态文明、碳中和等国家战略与需求，在自主研发大气、水、能源、健康等复杂系统仿真模型以及全球和国家尺度综合评估模型方面做出了突出贡献。

环境管理专业下设环境规划与管理、环境与资源经济学及环境政策、环境与发展三个研究方向。

环境规划与管理：以城市或区域（流域）为主要研究对象，重点开展评价、模拟、优化、集成等技术方法的研发与应用，把基础研究的成果转化为相关政府的规划决策与管理措施。

环境与资源经济学及环境政策：研究环境与经济的相互作用、能源与资源配置理论、环境与发展公共管理理论、方法与政策；基于面向绿色低碳发展的综合决策理论与方法，服务于环境污染治理、资源有效利用以及气候变化应对政策和制度的设计。

环境与发展：基于国家或区域之间经济与环境关系的作用机理，研究经济发展或产业结构调整对不同利益主体的生态环境的影响，探讨人类社会可持续发展与生态文明建设的理论体系与实现途径。

2. 高水平的导师队伍

现有 12 名教研系列全职教员，近年来通过不断引进海内外青年优秀人才，形成了一支高水平的学术队伍。详情请见：<http://cese.pku.edu.cn/szdw/zzjs/index.htm>

3. 充满活力的研究团队

近 70 名在读硕士、博士生及在站博士后，各个课题组之间有深入的合作、讨论与互动，定期举办高水平活动，如向全国师生开放的在线博士生论坛活动。

如何报名？

网上申报：登录北京大学研究生招生网申请（网址：<https://admission.pku.edu.cn>）。

报名时间：2022 年 5 月 17 日-6 月 15 日

详情请见学院官网通知，或点击阅读原文：<https://cese.pku.edu.cn/tzgg/140474.htm>

A.4.3 加入 LEEEP：博士后

近日，作为响应全球气候治理与中国环境管理重大变革与转型的关键举措，**北京大学碳中和研究院（Institute of Carbon Neutrality, Peking University）**正式宣布成立。统筹推进 2035 美丽中国、2060 碳中和等国家战略亟待从系统观、全局观考虑社会经济、资源能源、环境质量等

多维度综合决策，构建多要素交互、多尺度嵌套、多过程耦合的综合模型系统并开展政策事前综合评估是有效应对中国与全球气候与环境挑战的科学基础。

北京大学环境科学与工程学院院长长期开展面向碳中和目标的政策仿真评估创新研究，综合模拟“双碳”目标与“水-能-粮”及环境与健康多维约束下的权衡协同效应，已具备坚实的模型研发和集成能力，并与众多国内外知名学术机构开展合作研究。现诚邀致力于气候与环境政策综合评估模型研发与应用的青年学者，依托 LEEEP 课题组申请北大-IIASA 联合培养博士后（每年 4 月或 11 月中下旬截止）或者博雅博士后（每年 3 月或 10 月截止），开展“碳中和”复杂系统建模与多维政策模拟仿真方向研究工作。

LEEEP团队：欢迎加入我们

博后招聘 | 北京大学LEEEP组“碳中和”系统建模与政策评估方向

本年度**优先研究方向**包括：

- 温室气体与大气污染物**协同减排政策**
- 高碳行业深度碳减排技术与路径优化
- 粮农系统土地利用**温室气体减排分析**

依托LEEEP课题组申请博雅博后或北大-IIASA联合培养博士后 (**每年都有名额**)

有竞争力的 薪酬	国内外 合作资源	专业技能和 职业规划指导
宽松 愉悦的科研氛围	量质兼优的 科研产出	高质量的 科研训练

对你的期望是：**数理基础强、文字功底好**，2~3篇代表作，具有较强的基于R、Python、Matlab等程序语言的数据分析能力，或掌握投入产出、能源系统等模型模拟分析方法。

欢迎有志于利用**复杂系统模型分析**手段探索实现“双碳”目标解决方案的学子加入LEEEP！

更多消息请见：[公众号推送](#)

Figure A.9: 加入 LEEEP: 博士后

北京大学能源环境经济与政策研究室（LEEEP）基于自主开发的 **IMED** 综合评估模型，分析绿色低碳政策的成本效益和优化路径，助力实现“双碳”目标及可持续发展目标。诚邀广大学子与我们一道，开展前沿交叉的“双碳”政策综合评估研究。LEEEP 组不但提供有竞争力的薪酬，还将提供宽松愉悦的**科研氛围**、优质多元的**国内外合作资源**、高水平的**专业技能和职业规划指导**、高质量的**科研项目申请及实施训练**、量质兼优的**科研产出**等对青年科研人员尤为重要的**科研创新环境**。

欢迎有志于利用复杂系统模型分析手段探索实现“双碳”目标解决方案的学子加入 LEEEP！对你的期望是**数理基础强、文字功底好**，2~3 篇代表作，具有较强的基于 R、Python、Matlab 等程序语言的数据分析能力，或掌握投入产出、能源系统等模型模拟分析方法，本年度优先研究方向包括：

1. 温室气体与大气污染物**协同减排政策**
2. 高碳行业深度碳减排技术与路径优化
3. 粮农系统土地利用**温室气体减排分析**

A.4.4 博士后项目

申请人可申请博雅博后、北大-IIASA 联合培养博后等项目：

- “博雅”博士后项目
- 北大-IIASA 联合培养博士后
- 博士后创新人才支持计划
- 北京大学自然-社会系统模式开发与耦合方向博士后

待遇均为每年 30 至 35 万元（因个人业绩而异）。申请材料提交方式：请将所有申请材料在规定的截止日期前以“应聘 xxx 博士后 + 姓名 + 单位 + 手机”为邮件标题发送至 hancheng.dai@pku.edu.cn。不完整的申请材料将不予受理，初选通过后，将邮件或电话通知候选人。

1. “博雅”博士后项目

项目概况

北京大学自 2016 年设立博雅博士后项目，旨在吸引汇聚全球优秀年轻人才来校从事博士后研究工作，成就学术卓越的梦想。该项目为年轻的研究人员从事理学、信息与工程、社会科学、人文、经济与管理、跨学科领域的博士后研究提供了机会。基础年薪 20 万元（税前），五险一金约 9.1 万元/年、租房补助 6 万元/年。

申请条件

- 年龄不超过 35 岁，获得博士学位不超过三年（以每个批次申请截止日期为准）或将于次年 7 月 1 日前获得博士学位者。其中，将于当年内毕业的应届博士生可以申请第一批次，将于次年 7 月 1 日前毕业的应届博士生可以申请第二批次。已获得终身教职或进入终身教职系列者不能申请本项目。
- 进站后须全职从事博士后研究工作；
- 具有较高的英语口头及书面写作水平；
- 热爱科研工作，具有较强的系统分析思维和数据建模能力，具备独立从事科研及项目工作的能力，团队合作和组织协调能力突出。

评选标准主要包括申请者的教育背景、学术能力、个人研究计划水平、研究项目与拟申请进站院系科研方面的契合度、推荐信、北京大学博士后合作导师对申请人进站申请方面的承诺等。

申请材料

- 北京大学博雅博士后项目申请书（在合作导师的指导下完成），项目公告网页下载附件后填写，2021 年度公告：<https://postdocs.pku.edu.cn/tzgg/125151.htm>；
- 两封推荐信（必含博士期间导师推荐信一封）并签字；
- 北京大学博士后合作导师的确认函一封（明确招收意见，并就申请人科研学术经历、科研成果、科研能力与自身所从事研究之间的关系、申请人综合素质、拟进站从事研究计划内容、合作导师为申请人提供的科研条件和支持等方面做出说明）。

申请时间

第一批次申请截止日期：每年 3 月 25 日，第二批次申请截止日期：每年 10 月 15 日（每年可能微调，以最新通知为准）。2019 年“博雅”博士后项目：<https://postdocs.pku.edu.cn/tzgg/90438.htm>

2. 北大-IIASA 联合培养博士后项目

项目概况

北京大学 (PKU) 与国际应用系统分析研究所 (International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA) 发布联合博士后项目申请通知, 希望招收有学术研究能力与潜力的博士后, 为其提供高水平的学术训练、跨学科的资源支持、良好的科研环境以及多层次的国际交流机会。本项目是经济、能源、环境、生态等学科领域的高水平人才加入北京大学与国际应用系统分析研究所的良好机会, 资助期限为两年。

申请条件

- 年龄不超过 35 岁, 获得博士学位不超过三年;
- 学术能力、研究计划水平、研究方向与导师契合度等评选标准。

申请材料

- 北京大学-IIASA 博士后项目申请书 (在合作导师的指导下完成), 在本项目公告网页下载附件后填写, 2021 年度公告: <https://postdocs.pku.edu.cn/tzgg/125561.htm>;
- 个人简历;
- 两封推荐信 (必含博士期间导师推荐信一封);
- 双方博士后合作导师的确认函各一封。

申请时间

每年 4 月中旬截止, 7 月下旬公布结果。

3. 博士后创新人才支持计划

项目概况

“博新计划”结合国家实验室等重点科研基地, 瞄准国家重大战略、战略性高新技术和基础科学前沿领域, 遴选一批应届或新近毕业的优秀博士, 进入国内博士后设站单位从事博士后研究工作, 给予每人每年不少于 30 万元的资助 (含博士后日常经费、科研启动经费和国际学术交流经费), 国家资助期为 2 年。设站单位根据资助人选在站期间科研工作业绩, 按一定标准或比例给予资助。

北京大学为获得国家“博新计划”资助者两年在站期间额外提供各类保险、职业年金、公积金和住房补贴等福利待遇。获资助人选可申请学校博士后公寓或租房补贴 12 万元/两年; 根据申请人情况, 博士后合作导师或院系可给予每年 3 万元、6 万元或 9 万元等不同档次的额外配套资助; 获得“博新计划”资助者来校报到后同时享有北京大学“博雅博士后”荣誉称号; “博新计划”资助的博士后在站两年可按学校评审程序申请专职研究人员系列特聘副研究员或特聘研究员岗位; 正常在站三年后, 北京大学全职博士后研究人员可申请由北京大学评定副研究员资格。

申请条件

- 年龄不超过 35 岁, 获得博士学位不超过三年;
- 学术能力、研究计划水平、研究方向与导师契合度等评选标准。

申请材料

申请材料包括《博士后创新人才支持计划申请书》、《博士导师推荐意见表》、《博士后合作导师推荐意见表》、身份证明和学术及科研成果材料。申请人无需提交纸质申请材料, 所有申请材料均为在线生成或上传原件扫描件, 上传文件须为 PDF 格式。

申请时间

每年 2 月 15 日至 3 月 15 日, 申请人网上提交申请材料。3 月 16 日至 22 日, 设站单位网上审核。3 月下旬, 通讯评审。5 月上中旬, 会议评审。5 月下旬, 公布获选结果。

注：每年时间可能有轻微调整，请随时关注学校通知，2023年博士后项目：<https://postdocs.pku.edu.cn/tzgg/9e>

4. 北京大学自然-社会系统模式开发与耦合方向博士后

项目概况

推进碳达峰、碳中和是以习近平同志为核心的党中央经过深思熟虑作出的重大战略决策，也是我国应对气候变化、引领全球气候治理的必然选择。需要学术界发挥描绘碳中和实现路径、评估潜在多维影响、提出稳健应对策略的重要作用，为国家前瞻性双碳战略规划和产业链布局提供科学支撑。

支撑碳中和综合决策需要准确辨识人类活动与其他地球表层系统相互作用。为此，开发底层逻辑科学可靠、能够反映国家经济社会现实的自然-社会系统耦合模式是一项刻不容缓的艰巨任务。需要构建融合自然—社会系统多要素交互、多尺度嵌套、多过程耦合的综合模型系统，从系统观、全局观的角度考虑社会经济、资源能源、环境质量等多维度开展政策事前综合评估，为我国应对全球气候与环境挑战提供坚实的科学基础。

北京大学相关团队已初步具备模型研发和集成能力，拟重点支持开发气候-能源-经济多维要素综合评估模型以及耦合社会经济模型的本土化地球系统模式，并与众多国内外知名学术机构开展合作研究。现诚邀致力于模式研发与应用的青年学者，依托相关课题组申请博士后或工程师岗位若干名，开展自然-社会系统模式开发与耦合研究工作。

研究任务

- 综合评估模型建模方向：候选人主要负责结合降尺度和数据同化等技术，在综合评估模型中构建与地球系统模式的多层次耦合算法与数据接口，满足不同模拟步长和空间精度的需求，评估气候变化对能源需求、社会经济或土地利用的影响，以在全球、国家、省域多尺度下模拟自然-社会系统双向反馈，开展政策评估和路径优化。
- 地球系统模式建模方向：候选人将主要负责搭建可扩展、模块化的自然-社会系统双向耦合器，包括地球系统模式内各模块之间的耦合，以及地球系统模式与综合评估模型的耦合。候选人需开发具有通用性的耦合器，并负责对耦合模型的测试、维护和更新，进一步围绕后续科学问题运行相关模拟试验。

以上工作需要与北京大学多个相关的团队讨论和协商，这些团队分布在北京大学物理学院、城市与环境科学学院、环境科学与工程学院、现代农学院和能源研究院等。在模式开发的过程中，注重模式的模块化与可持续发展性，表现优异的候选人将获得签订长期或永久合同的机会。

申请条件

- 年龄不超过 35 岁，获得博士学位不超过三年；
- 学术能力、研究计划水平、研究方向与导师契合度等评选标准。

合作导师介绍

- **综合评估模型建模方向：**合作导师戴瀚程长聘副教授，博士生导师，碳中和研究院双聘研究员，国家优青。研究方向为环境与气候政策评估与综合决策，领衔自主开发了气候环境政策分析的能源—环境—经济综合评估模型（IMED）。主持国家自然科学基金青年项目、优秀青年科学基金项目、科技部国家重点研发计划课题等二十余项。在国内外能源环境经济与政策领域学术期刊上发表论文 100 余篇，含在 Nature Food、One Earth (Cell 姊妹刊) 等期刊上发表的第一/通讯作者 SCI 论文 50 余篇，被 IPCC AR6 报告正面引用 20 余次。2020~2022 连续三年入选全球前 2% 高被引科学家榜单。担任 IPCC AR6 贡献作者、UNEP GEO-7 主笔作者。

- **地球系统模式建模方向：**合作导师刘永岗长聘副教授，博士生导师，碳中和研究院双聘研究员，国家杰青。主要通过地球系统模拟的方法研究气候在多时间尺度上和不同外强迫下的变化、响应和机理，在包括 Nature, Nature Communications, Science Advances 等的主流期刊上发表论文共 50 余篇。除此之外，独立开发了冰后回弹/海平面变化模式和硅酸盐风化模式，并成功地对一个气候模式和一个冰川/冰盖模式进行了耦合及应用。在《Global and Planetary Change》,《National Science Review》,《冰川冻土》和《海洋科学进展》等期刊任编委或青年编委。

申请条件

- 年龄不超过 35 岁，获得博士学位不超过三年（以每个批次申请截止日期为准）或将于次年 7 月 1 日前获得博士学位者；
- 进站后须全职从事研究工作；
- 具有较高的英语口头及书面写作水平；
- 热爱科研工作，具有较强的系统分析思维和数据建模能力，对综合评估模型和地球系统模式的开发有一定的前期基础，对耦合开发工作有较高热情，具备独立从事科研及项目工作的能力，团队合作和组织协调能力突出。

申请材料

- 研究计划；
- 两封推荐信（必含博士期间导师推荐信一封）并签字。

申请材料提交方式

请将所有申请材料在规定的截止日期前以“应聘博士后或工程师（二选一）+姓名+单位+手机”为邮件标题发送至 dai.hancheng@pku.edu.cn 或 ygliu@pku.edu.cn。不完整的申请材料将不予受理，初选通过后，将邮件或电话通知候选人。

评选标准主要包括申请者的教育背景、学术能力、个人研究计划水平、研究项目与拟申请进站院系科研方面的契合度、推荐信、北京大学博士后合作导师对申请人进站申请方面的承诺等。

A.4.5 加入 LEEEP：实习生

招募 | 北京大学 LEEEP 课题组招实习生

- 详情请见公众号：[招募 | 北京大学 LEEEP 课题组招实习生](#)

团队简介

北京大学能源环境经济与政策研究室（LEEEP）注重识别绿色低碳转型的关键科学前沿与政策管理的重大需求问题。多年来，在多个国家科技计划项目的连续支持下，原创自主开发了适用于国家、省级及全球多层次气候环境政策分析的综合评估模型（IMED 模型）。团队负责人担任北京大学驻全球顶级学会—综合评估模型联盟（IAMC）的首席联络代表。

团队基于 IMED 模型揭示未来社会经济发展与能源资源、碳污排放的关联关系与脱钩机制，综合评估实现环境和发展多维目标的协同机制与成本效益，相关成果发表于 Nature Food、Nature Communications、One Earth、Global Environmental Change、EST 等主流期刊。其中，15 篇论文被 IPCC AR6 正面引用 20 余次，多篇论文被 IAMC 顶级学会主页重点报道，支撑实现我国双碳目标及全球可持续发展目标综合决策。同时，LEEEP 研究室发起北京大学第一届碳中和综合评估模型研讨会暨培训会，助力我国双碳事业综合性人才培养。

招募简介

课题组正承担国家自科基金委重点项目课题、国际（地区）合作与交流项目课题、科技部国家重点研发计划课题、科技部政府间国际科技创新合作重点专项课题、国家社科基金重点项目课题等国家级项目。现因研究工作需要，课题组招募兼职实习生，诚挚邀请对能源-环境-经济系统模拟和绿色低碳发展政策定量分析等方向有强烈兴趣的同学加入 LEEEP 组开展相关研究工作。

招募信息

1. 招募人数：5 名实习生；
2. 实习期限：2023 年 12 月 2024 年 6 月（约半年）；
3. 时间投入：每周确保至少 12 天的工作时间；
4. 实习方式：京内学生线下实习；京外学生可线上远程；
5. 申请条件：本科生/研究生 1 年级以上，踏实细心，有研究兴趣，熟练使用 python 和 R 等编程软件，欢迎有相关专业背景（数学建模、计算机编程、经济管理等），具有良好的英语读写能力，有相关研究经验者优先。

申请方式

1. 申请人将个人陈述及简历发送到邮箱：dai.hancheng@pku.edu.cn；
2. 截止时间：2023 年 11 月 30 号。
(注：简历初选后将通知入选者，未入选者不再逐一回复。)

实习内容

协助课题组科研项目执行和模型开发，涉及文献整理及数据处理等工作，包括但不限于：

1. 模型输入数据整理、模型情景调试、模型结果分析等研究任务；
2. 协助团队开展文献资料整理、项目执行管理等日常事务。

薪酬福利

1. 薪酬待遇：每个月固定支付薪酬 1500 元；
2. 福利待遇：实习期满后可开具实习证明材料，表现优异者，导师可写攻读博士推荐信。

参考信息

- LEEEP 课题组主页：<http://scholar.pku.edu.cn/hanchengdai>
- LEEEP 团队研究进展在线文档介绍：<https://www.jianguoyun.com/p/DVrcIwsQIL7CBhjE13M>
- LEEEP 团队公众号，可及时获得更多相关资讯

A.4.6 加入北京大学环境管理系

招生 | 北京大学 2022 年度优秀大学生夏令营：环境管理专业

- 点击 LEEEP 微信公众号链接阅读本活动推送原文：招聘 | 诚邀海内外英才加入北京大学环境管理系

北京大学环境管理学科是在中国第一代环境科学工作者的努力下，始建于 1982 年，至今已 40 余年。1982 年成立的环境科学中心环境规划与管理教研室（环境管理系前身），是中国最早开

展环境规划与管理和可持续发展研究、也是最早招收环境规划与管理方向硕士与博士研究生的单位。目前，环境管理系拥有一支文理交叉、具有多学科综合学术背景的教师及科研队伍，现有全职教师 11 人，包括教育部“长江学者奖励计划”特聘教授 1 人，国家级青年人才入选者 4 人次，国务院特殊津贴获得者 1 人。

环境管理系致力于综合应用自然科学和社会科学的交叉思路与方法，研究在中国和全球尺度上的自然环境与人类社会系统协同发展的交互影响机制、环境政策和制度体系，为环境善治、环境公共管理和环境发展综合决策提供科学支持。重点研究领域包括：环境与发展、环境经济与政策、自然资源管理、环境规划、全球环境治理、人-地系统可持续性、综合评估模型、气候变化与碳中和等。

环境管理系面向海内外长期公开招聘，诚挚欢迎海内外优秀人才加入。

学科方向

包含但不局限于环境经济学、环境规划与管理、资源管理与政策、气候变化减排与适应、综合评估模型、可持续发展、环境大数据与人工智能等。

青年人才申请方式

1. 通过“诚邀海内外英才参加 2024 年北京大学环境学科优秀青年人才国际论坛”(点击阅读原文可跳转)申请。有意申请者请于 2023 年 12 月 1 日前向戴瀚程老师邮箱(dai.hancheng@pku.edu.cn)提交简历与 5 篇以内代表性论著，邮件标题请命名为“姓名 + 环境管理”。

2. 论坛组委会对申请人进行初审后，将陆续通过邮件发出邀请，请及时关注并返回参会回执。如有疑问可与论坛组委会联系。

资深学者申请方式

一事一议，联系方式：dai.hancheng@pku.edu.cn。本广告长期有效。

应聘条件及待遇

应聘条件：

1. 自然科学、社会科学或相关学科交叉领域，青年学者年龄不超过 40 周岁，具有博士学位；
2. 引进后全职来校工作。

相关待遇：

(一) 岗位

教研系列：助理教授 (Assistant Professor)、副教授 (Associate Professor)、教授 (Full Professor)。

(二) 支持措施

1. 薪酬待遇：提供具有国际竞争力的薪酬待遇；
2. 科研启动经费：国家级科研经费及学院配套经费；
3. 资源配置：博士生导师资格，优质研究生资源，良好科研平台，办公和科研空间等；
4. 服务保障：符合政策的福利性住房；优质的医疗服务保障；附属幼儿园、小学和初中优质教育资源。



Index

CGE 概述, 47

CGE 模型地区划分, 65

Expenditure, 77

IMED CGE, 36, 47

IMED Cloud, 37, 83

IMED HEL, 37, 73

IMED TEC, 36, 69

IMED 培训, 39, 83, 435, 436, 442

IMED 成员网络, 45

IMED 模型培训, 39, 435

IMED 模型概览, 34

健康终端, 74

健康风险, 74

动态过程, 56

商品供应和区域贸易, 54

市场出清, 55

支付意愿, 79

时间损失, 78

最终需求, 52

生产函数, 51

生命统计价值, 79

相对风险, 74



Bibliography

- [1] Susan Solomon. Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC. Vol. 4. Cambridge University Press, 2007.
- [2] United Nations Framework Convention on Climate Change, (UNFCCC). Adoption of the Paris Agreement. Proposal by the President. 2015. URL: http://unfccc.int/documentation/documents/advanced_search/items/6911.php?preref=600008831 (visited on 02/01/2017).
- [3] Nicholas R Lardy. "China: Rebalancing economic growth". In: The China balance sheet in 2007 and beyond (2007), pp. 1–24.
- [4] National Development and Reform Commission (NDRC). Enhanced Actions on Climate Change: China's intended nationally determined contributions. 2015. URL: http://news.xinhuanet.com/english/china/2015-06/30/c_134369837.htm (visited on 02/01/2017).
- [5] Huijuan Dong, Hancheng Dai, Liang Dong, Tsuyoshi Fujita, Yong Geng, Zbigniew Klimont, Tsuyoshi Inoue, Shintaro Bunya, Minoru Fujii, and Toshihiko Masui. "Pursuing air pollutant co-benefits of CO₂ mitigation in China: a provincial leveled analysis". In: Applied Energy 144 (2015). **ESI 1% Highly Cited Paper in 2015-16**, pp. 165–174. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191500197X>.
- [6] Yang Xie, Hancheng Dai, Huijuan Dong, Tatsuya Hanaoka, and Toshihiko Masui. "Economic impacts from PM_{2.5} pollution-related health effects in

- China: A provincial-level analysis". In: Environmental science & technology 50.9 (2016). **ESI 1% Highly Cited Paper in 2018-19**, pp. 4836–4843. URL: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.5b05576>.
- [7] Yang Xie, Hancheng Dai, Yanxu Zhang, Tatsuya Hanaoka, and Toshihiko Masui. "Economic impacts from ozone pollution-related health effects in China: A provincial-level analysis". In: Atmospheric Chemistry and Physics (Discussion paper). URL: <https://www.atmos-chem-phys-discuss.net/acp-2017-849>.
- [8] Heming Wang, Hancheng Dai, Liang Dong, Yang Xie, Yong Geng, Qiang Yue, Fengmei Ma, Jian Wang, and Tao Du. "Co-benefit of carbon mitigation on resource use in China". In: Journal of Cleaner Production 174 (2018), pp. 1096–1113. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617327282>.
- [9] Hancheng Dai, Peggy Mischke, Xuxuan Xie, Yang Xie, and Toshihiko Masui. "Closing the gap? Top-down versus bottom-up projections of China's regional energy use and CO₂ emissions". In: Applied Energy 162 (2016), pp. 1355–1373. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261915008272>.
- [10] Zhaoling Li, Hancheng Dai, Lu Sun, Yang Xie, Zhu Liu, Peng Wang, and Helmut Yabar. "Exploring the impacts of regional unbalanced carbon tax on CO₂ emissions and industrial competitiveness in Liaoning province of China". In: Energy Policy 113 (2018). **ESI 1% Highly Cited Paper in 2018-19**, pp. 9–19. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421517307218>.
- [11] Rui Wu, Hancheng Dai, Yong Geng, Yang Xie, Toshihiko Masui, and Xu Tian. "Achieving China's INDC through carbon cap-and-trade: Insights from Shanghai". In: Applied Energy 184 (2016), pp. 1114–1122. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916307863>.
- [12] Xu Tian, Yong Geng, Hancheng Dai, Tsuyoshi Fujita, Rui Wu, Zhe Liu, Toshihiko Masui, and Yang Xie. "The effects of household consumption pattern on regional development: A case study of Shanghai". In: Energy 103 (2016), pp. 49–60. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054421630202X>.

- [13] Peng Wang, Hancheng Dai, Songyan Ren, Daiqing Zhao, and Toshihiko Masui. "Achieving Copenhagen target through carbon emission trading: Economic impacts assessment in Guangdong Province of China". In: Energy 79 (2015). **ESI 1% Highly Cited Paper in 2015-16**, pp. 212–227. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544214012638>.
- [14] Yang Xie, Hancheng Dai, and Huijuan Dong. "Impacts of SO₂ taxations and renewable energy development on CO₂, NO_x and SO₂ emissions in Jing-Jin-Ji region". In: Journal of Cleaner Production 171 (2018), pp. 1386–1395. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617323508>.
- [15] Hancheng Dai, Xuxuan Xie, Yang Xie, Jian Liu, and Toshihiko Masui. "Green growth: The economic impacts of large-scale renewable energy development in China". In: Applied Energy 162 (2016). **ESI 1% Highly Cited Paper in 2018-19**, pp. 435–449. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261915012763>.
- [16] Hancheng Dai, Yang Xie, Jingyu Liu, and Toshihiko Masui. "Aligning renewable energy targets with carbon emissions trading to achieve China's INDCs: A general equilibrium assessment". In: Renewable & Sustainable Energy Reviews 82 (2018), pp. 4121–4131. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211731434X>.
- [17] Hancheng Dai, Toshihiko Masui, Yuzuru Matsuoka, and Shinichiro Fujimori. "Assessment of China's climate commitment and non-fossil energy plan towards 2020 using hybrid AIM-CGE model". In: Energy Policy 39.5 (2011), pp. 2875–2887. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421511001558>.
- [18] Hancheng Dai, Toshihiko Masui, Yuzuru Matsuoka, and Shinichiro Fujimori. "The impacts of China's household consumption expenditure patterns on energy demand and carbon emissions towards 2050". In: Energy Policy 50 (2012), pp. 736–750. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421512007057>.
- [19] Beibei Cheng, Hancheng Dai, Peng Wang, Daiqing Zhao, and Toshihiko Masui. "Impacts of carbon trading scheme on air pollutant emissions in Guangdong Province of China". In: Energy for Sustainable Development 27 (2015), pp. 174–185. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0973082615000563>.

- [20] Beibei Cheng, Hancheng Dai, Peng Wang, Yang Xie, Li Chen, Daiqing Zhao, and Toshihiko Masui. "Impacts of low-carbon power policy on carbon mitigation in Guangdong Province, China". In: *Energy Policy* 88 (2016), pp. 515–527. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421515301841>.
- [21] Hancheng Dai. "Integrated assessment of China's provincial low carbon economy development towards 2030: Jiangxi province as an example". Ph.D. Dissertation. Tokyo Institute of Technology, 2012.
- [22] Xu Tian, Hancheng Dai, and Yong Geng. "Effect of household consumption changes on regional low-carbon development: A case study of Shanghai". In: *China Population, Resources and Environment* 26.5 (2016), pp. 55–63.
- [23] Xiaoyu Liu et al. "Achieving carbon neutrality enables China to attain its industrial water use target". In: *One Earth* 5 (2 2022), pp. 188–200. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590332222000458>.
- [24] Hancheng Dai, Haibin Zhang, and Wentao Wang. "The impacts of U.S. withdrawal from the Paris Agreement on the carbon emission space and mitigation cost of China, EU, and Japan under the constraints of the global carbon emission space". In: *Advances in Climate Change Research* 8.4 (2017), pp. 226–234. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674927817301016>.
- [25] Huijuan Dong, Hancheng Dai, Tsuyoshi Fujita, Yong Geng, Yang Xie, Toshihiko Masui, and Zhe Liu. "Exploring impact of carbon tax on China's industrial CO₂ reductions and provincial disparities". In: *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 77 (2017), pp. 596–603. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117305488>.
- [26] Hancheng Dai, Yang Xie, Haibin Zhang, Zhongjue Yu, and Wentao Wang. "Effects of the US withdrawal from Paris Agreement on the carbon emission space and cost of China and India". In: *Frontiers in Energy* 12.3 (2018), pp. 362–375. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%5C2Fs11708-018-0574-y>.
- [27] Shivika Mittal, Hancheng Dai, Shinichiro Fujimori, and Toshihiko Masui. "Bridging greenhouse gas emissions and renewable energy deployment target: Comparative assessment of China and India". In: *Applied Energy* 166 (2016), pp. 301–313.

- [28] Zhongjue Yu, Yong Geng, Hancheng Dai, Rui Wu, Zhiqing Liu, and Xu Tian. “A general equilibrium analysis of the impacts of regional and sectoral emission quota allocation on carbon trading market”. 2018. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618313337>.
- [29] Zhiqing Liu, Yong Geng, Hancheng Dai, Jeffrey Wilson, Yang Xie, Rui Wu, Wei You, and Zhongjue Yu. “Regional impacts of launching national carbon emissions trading market: A case study of Shanghai”. In: *Applied Energy* 230 (2018), pp. 232–240. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191831287X>.
- [30] Mingquan Li, Hancheng Dai, Yang Xie, Ye Tao, Lars Bregnbæk, and Kaare Sandholt. “Water conservation from power generation in China: a provincial level scenario towards 2030”. In: *Applied Energy* 208 (2017), pp. 580–591. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917313764>.
- [31] Qiong Su, Hancheng Dai, Yun Lin, Huan Chen, and R. Karthikeyan. “Modeling the carbon-energy-water nexus in a rapidly urbanizing catchment: A general equilibrium assessment”. In: *Journal of Environmental Management* 225 (2018), pp. 93–103. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030147971830834X>.
- [32] Qiong Su, Hancheng Dai, Yun Lin, Yang Xie, Huan Chen, and R. Karthikeyan. “General equilibrium analysis of the cobenefits and trade-offs of carbon mitigation on local industrial water use and pollutants discharge in China”. In: *Environmental Science & Technology* 53 (3 2019), pp. 1715–1724. URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.8b05763>.
- [33] Xu Tian, Yong Geng, Hancheng Dai, Tsuyoshi Fujita, Rui Wu, Zhe Liu, Toshihiko Masui, and Yang Xie. “The effects of household consumption pattern on regional development: A case study of Shanghai”. In: *Energy* 103 (2016), pp. 49–60. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054421630202X>.
- [34] Zhixiong Weng, Hancheng Dai, Zhongyu Ma, Yang Xie, and Peng Wang. “A general equilibrium assessment of economic impacts of provincial unbalanced carbon intensity targets in China”. In: *Resources, Conservation and Recycling* 133 (2018), pp. 157–168. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344918300326>.
- [35] P. A. Armington. “A Theory of Demand for Products Distinguished by Place of Production”. In: *IMF Staff Papers* 16.1 (1969), pp. 159–178.

- [36] Shantong Li, Shuchang Qi, and Zhaoyuan Xu. Extended regional input-output table of China in 2002: compilation and application. Beijing: Economic Science Press, 2010.
- [37] National Bureau of Statistics of China (NBS). China Energy Statistical Year Book 2003 (in Chinese). Beijing: China Statistics Press, 2003.
- [38] Dimaranan and Betina V. Global Trade, Assistance, and Production: The GTAP 6 Data Base. 2006.
- [39] International Energy Agency. World energy outlook 2009. Paris: OECD/IEA, 2009.
- [40] Xu Tian, Hancheng Dai, Yong Geng, Zhen Huang, Toshihiko Masui, and Tsuyoshi Fujita. “The effects of carbon reduction on sectoral competitiveness in China: a case of Shanghai”. In: Applied Energy 197 (2017), pp. 270–278. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917304221>.
- [41] Eurostat. Economy-wide Material Flow Accounts (EW-MFA): Compilation Guide 2013. 2013.
- [42] Teng Ma, Silu Zhang, Yilong Xiao, Xiaorui Liu, Minghao Wang, Kai Wu, Guofeng Shen, Chen Huang, Yan Ru Fang*, and Yang Xie*. “Costs and health benefits of the rural energy transition to carbon neutrality in China”. In: Nature Communications 14.6101 (2023). doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41707-7>. URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-023-41707-7>.
- [43] Ming Ren, Teng Ma, Chen Fang, Xiaorui Liu, Chaoyi Guo, Silu Zhang, Ziqiao Zhou, Yanlei Zhu, Hancheng Dai, and Chen Huang. “Negative emission technology is key to decarbonizing China’s cement industry”. In: Applied Energy 329 (2023), p. 120254. issn: 0306-2619. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120254>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261922015112>.
- [44] Ming Ren, Pantao Lu, Xiaorui Liu, M.S. Hossain, Yanru Fang, Tatsuya Hanaoka, Brian O’Gallachoir, James Glynn, and Hancheng Dai*. “Decarbonizing China’s Iron and Steel Industry from the Supply and Demand Sides for Carbon Neutrality”. In: Applied Energy 298 (2021), p. 117209. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261921006334>.

- [45] M.S. Hossain, Yan Ru Fang*, Teng Ma, Chen Huang, Wei Peng, Johannes Urpelainen, Chetan Hebbale, and Hancheng Dai*. “Narrowing fossil fuel consumption in the Indian road transport sector towards reaching carbon neutrality”. In: Energy Policy 172 (2023), p. 113330. ISSN: 0301-4215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113330>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421522005493>.
- [46] M.S. Hossain, Yan Ru Fang, Teng Ma, Chen Huang, and Hancheng Dai. “The role of electric vehicles in decarbonizing India’s road passenger toward carbon neutrality and clean air: A state-level analysis”. In: Energy (2023), p. 127218. ISSN: 0360-5442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127218>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544223006126>.
- [47] Xin Tong, Hancheng Dai, Pantao Lu, Anying Zhang, and Teng Ma. “Saving global platinum demand while achieving carbon neutrality in the passenger transport sector: linking material flow analysis with integrated assessment model”. In: Resources, Conservation and Recycling 179 (2022), p. 106110. URL: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106110>.
- [48] 谢杨, 戴瀚程, 花岡達也, and 増井利彦. “PM_{2.5} 污染对京津冀地区人群健康影响和经济影响”. In: 中国人口资源与环境 26.11 (2016), pp. 20–28. URL: <http://www.cqvip.com/qk/97796x/201611/670596305.html>.
- [49] Rui Wu, Hancheng Dai, Yong Geng, Yang Xie, Toshihiko Masui, Zhiqing Liu, and Yiying Qian. “Economic Impacts from PM_{2.5} Pollution-Related Health Effect: A Case Study in Shanghai”. In: Environmental Science & Technology 51.9 (2017), pp. 5035–5042. URL: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.7b00026>.
- [50] Xiang Zhang, Yana Jin, Hancheng Dai, Yang Xie, and Shiqiu Zhang. “Health and economic benefits of cleaner residential heating in the Beijing-Tianjin-Hebei region in China”. In: Energy Policy 127 (2019), pp. 165–178. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421518308048?dgcid=author>.
- [51] 张翔, 戴瀚程, 靳雅娜, and 张世秋. “京津冀居民生活用煤“煤改电”政策的健康与经济效益评估”. In: 北京大学学报(自然科学版) 55 (2 2019), pp. 367–376. URL: <http://xbna.pku.edu.cn/fileup/0479-8023/HTML/2019-2-367.html>.

- [52] Xu Tian, Hancheng Dai, Yong Geng, Jeffrey Wilson, Rui Wu, Yang Xie, and Han Hao. "Economic Impacts from PM_{2.5} pollution-related health effects in China's road transport sector: a provincial-Level analysis". In: Environment International 115 (2018), pp. 220–229. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412018301338>.
- [53] Yang Xie, Hancheng Dai, Xinghan Xu, Shinichiro Fujimori, Tomoko Hasegawa, Kan Yi, Toshihiko Masui, and Gakuji Kurata. "Co-benefit of climate mitigation on air quality and human health in Asian countries". In: Environment International 119 (2018), pp. 309–318. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412018305841>.
- [54] Satbyul Estella Kim et al. "Air quality co-benefits from climate mitigation for human health in South Korea". In: Environment International 136 (2020), p. 105507. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412019319257>.
- [55] Tian Xu, Hancheng Dai, Yong Geng, Shaohui Zhang, Yang Xie, Xiaorui Liu, Pantao Lu, and Raimund Bleischwitz. "Toward the 2-degree target: evaluating co-benefits of road transportation in China". In: Journal of Transport & Health 15 (2019), p. 100674. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214140519303391?via%5C3Dihub>.
- [56] Yang Xie, Hancheng Dai, Yanxu Zhang, Tatsuya Hanaoka, and Toshihiko Masui. "Comparison of health and economic impacts of PM_{2.5} and ozone pollution in China". In: Environment International 130 (2019), p. 104881. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412019310530?via%5C3Dihub>.
- [57] Yang Xie. "Quantitative analysis of economic impacts on health damages caused by air pollution in China". Ph.D. Dissertation. Tokyo Institute of Technology, 2017.
- [58] Joshua S Apte, Julian D Marshall, Aaron J Cohen, and Michael Brauer. "Addressing global mortality from ambient PM_{2.5}". In: Environmental science & technology 49.13 (2015), pp. 8057–8066.
- [59] R. T. Burnett et al. "An integrated risk function for estimating the global burden of disease attributable to ambient fine particulate matter exposure". In: Environmental health perspectives 122.4 (2014), pp. 397–403.

- [60] Richard Burnett et al. "Economic impacts of EU clean air policies assessed in a CGE framework". In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115.38 (2018), pp. 9592–9597.
- [61] B. Chen, C. Hong, and H Kan. "Exposures and health outcomes from outdoor air pollutants in China". In: *Toxicology* 198.1 (2004), pp. 291–300.
- [62] J Berry, M Holland, and P Watkiss. *ExternE: Externalities of energy* Vol. 2. Methodology. Tech. rep. European Commission, 1995.
- [63] C Arden Pope III and D. W. Dockery. "Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect". In: *Journal of the air & waste management association* 56.6 (2006), pp. 709–742.
- [64] C Arden Pope III and R. T. et al. Burnett. "Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution". In: *Jama* 287.9 (2002), pp. 1132–1141.
- [65] C Arden Pope III and R. T. et al. Burnett. "Lung cancer and cardiovascular disease mortality associated with ambient air pollution and cigarette smoke: shape of the exposure-response relationships". In: *Environmental health perspectives* 119.11 (2011), p. 1616.
- [66] Xuxuan Xie. "The Value of Health: Applications of Choice Experiment Approach and Urban Air Pollution Control Strategy". PhD thesis. 2011.
- [67] Xiaoqi Guo. "The economic value of air-pollution-related health risks in China". PhD thesis. The Ohio State University, 2006.
- [68] Xiao Zhang. "Valuing mortality risk reductions using the contingent valuation methods: evidence from a survey of Beijing Residents in 1999". In: Centre for Environment and Development, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing, China (2002).
- [69] Yana Jin. "Valuation of Health Risks with Discrete Choice Experiment and Cost-Benefit Analysis of Air Pollution Control Strategies". PhD thesis. 2017.
- [70] 中华人民共和国卫生部. "中国卫生统计年鉴 (2003-2010)". In: 北京: 中国协和医科大学出版社 (2004-2012).
- [71] J Jason West, Steven J Smith, Raquel A Silva, Vaishali Naik, Yuqiang Zhang, Zachariah Adelman, Meridith M Fry, Susan Anenberg, Larry W Horowitz, and Jean-Francois Lamarque. "Co-benefits of mitigating global greenhouse gas emissions for future air quality and human health". In: *Nature climate change* 3.10 (2013), pp. 885–889.

- [72] W Kip Viscusi and Joseph E Aldy. "The value of a statistical life: a critical review of market estimates throughout the world". In: *Journal of risk and uncertainty* 27.1 (2003), pp. 5–76.
- [73] Haibin Zhang, Hancheng Dai, Huaxia Lai, and Wentao Wang. "US withdrawal from the Paris Agreement: Reasons, impacts, and China's response". In: *Advances in Climate Change Research* 8.4 (2017), pp. 220–225. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674927817301028>.
- [74] Rui Wu, Hancheng Dai, Yong Geng, Yang Xie, and Xu Tian. "Impacts of export restructuring on national economy and CO₂ emissions: A general equilibrium analysis for China". In: *Applied Energy* 248 (2019), pp. 64–78. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261919306567>.
- [75] Jiaoyan Xie, Hancheng Dai, Yang Xie, and Lixuan Hong. "Effect of carbon tax on the industrial competitiveness of Chongqing, China". In: *Energy for Sustainable Development* 47 (2018), pp. 114–123. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0973082618304101>.
- [76] Yu Qi, Hancheng Dai, Yong Geng, and Yang Xie. "Assessment of economic impacts of differentiated carbon reduction targets: a case study in Tianjin of China". In: *Journal of Cleaner Production* 182 (2018), pp. 1048–1059. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618304025>.
- [77] Chao Liu, Hancheng Dai, Lin Zhang, and Changchun Feng. "The impacts of economic restructuring and technology upgrade on air quality and human health in Beijing-Tianjin-Hebei region in China". In: *Frontiers of Environmental Science and Engineering* 13 (5 2019), p. 70. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11783-019-1155-y>.
- [78] Boshu Li, Yan Chen, Shaohui Zhang, Zheru Wu, Cofala Janusz, and Hancheng Dai*. "Climate and health benefits of phasing out iron steel production capacity in china: findings from the IMED model". In: *Climate Change Economics* 11 (3 2020), p. 2041008. URL: <https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S2010007820410080>.
- [79] Yang Xie, Xiaorui Liu, Qi Chen, and Shaohui Zhang. "An integrated assessment for achieving the 2 C target pathway in China by 2030". In: *Journal of Cleaner Production* 268 (2020), p. 122238.
- [80] Yang Xie, Yazhen Wu, Mingjun Xie, Baodi Li, Hui Zhang, Teng Ma, and Yuqiang Zhang. "Health and economic benefit of China's greenhouse gas mitigation by 2050". In: *Environmental Research Letters* 15.10 (2020), p. 104042.

- [81] Yana Jin, Xiaorui Liu, Xiang Chen, and Hancheng Dai. "Allowance allocation matters in China's carbon emissions trading system". In: Energy Economics 92 (2020), p. 105012.
- [82] Shaohui Zhang, Yang Xie, Robert Sander, Hui Yue, and Yun Shu. "Potentials of energy efficiency improvement and energy–emission–health nexus in Jing-Jin-Ji' s cement industry". In: Journal of Cleaner Production 278 (2021), p. 123335.
- [83] Wei Peng, Hancheng Dai, Hao Guo, Pallav Purohit, Johannes Urpelainen, Fabian Wagner, Yazhen Wu, and Hongliang Zhang. "The Critical Role of Policy Enforcement in Achieving Health, Air Quality, and Climate Benefits from India' s Clean Electricity Transition". In: Environmental Science & Technology 54.19 (2020). PMID: 32856906, pp. 11720–11731. doi: 10.1021/acs.est.0c01622. eprint: <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01622>. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01622>.
- [84] Wenjia Cai[#] et al. "The 2020 China Report of The Lancet Countdown on Health and Climate Change". In: The Lancet Public Health 6.1 (2021). **ESI 1% Highly Cited Paper in March 2020**, e64–e81.
- [85] Ming Ren, Pantao Lu, Xiaorui Liu, MS Hossain, Yanru Fang, Tatsuya Hanaoka, Brian O'Gallachoir, James Glynn, and Hancheng Dai. "Decarbonizing China' s iron and steel industry from the supply and demand sides for carbon neutrality". In: Applied Energy 298 (2021), p. 117209.
- [86] Silu Zhang, Yazhen Wu, Xiaorui Liu, Jun Qian, Junhui Chen, Li Han, and Hancheng Dai*. "Co-benefits of deep carbon reduction on air quality and health improvement in Sichuan Province of China". In: Environmental Research Letters (2021). url: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac1133>.
- [87] Chenen Ma, Lina Madaniyazi, and Yang Xie. "Impact of the Electric Vehicle Policies on Environment and Health in the Beijing–Tianjin–Hebei Region". In: International journal of environmental research and public health 18.2 (2021), p. 623.
- [88] Meng Xu, Zhongfeng Qin, Shaohui Zhang, and Yang Xie. "Health and economic benefits of clean air policies in China: A case study for Beijing-Tianjin-Hebei region". In: Environmental Pollution (2021), p. 117525.

- [89] Songyan Ren, Peng Wang*, **Hancheng Dai**, Daiqing Zhao, and Toshihiko Masui. “Health and Economic Impact Assessment of Transport and Industry PM_{2.5} Control Policy in Guangdong Province”. In: Sustainability 13.23 (2021), p. 13049. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/23/13049>.
- [90] William F Lamb, Thomas Wiedmann, Julia Pongratz, Robbie Andrew, Monica Crippa, Jos GJ Olivier, Dominik Wiedenhofer, Giulio Mattioli, Alaa Al Khourdajie, Joanna House, et al. “A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018”. In: Environmental Research Letters (2021).
- [91] Jing Cao, Hancheng Dai, Shantong Li, Chaoyi Guo, Mun Ho, Wenjia Cai, Jianwu He, Hai Huang, Jifeng Li, Yu Liu, et al. “The general equilibrium impacts of carbon tax policy in China: A multi-model comparison”. In: Energy Economics 99 (2021), p. 105284.
- [92] Wenjia Cai[#] et al. “The 2021 China Report of The Lancet Countdown on Health and Climate Change”. In: The Lancet Public Health 6.12 (2021), e932–e947. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468266721002097?via%3Dihub>.
- [93] Xiaorui Liu et al. “Uncovering the key mechanisms of how deep decarbonization benefits air pollution alleviation in China”. In: Environmental Research Letters 17 (2022), p. 115002. URL: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac9746>.
- [94] Kai Wu, Xiaorui Liu, Hancheng Dai, Silu Zhang, Ziqiao Zhou, Teng Ma, Chaoyi Guo, Xiaoja He*, and Yanru Fang*. “Mutual effects of CO₂ emission reduction and air pollution control policies in beijing-tianjin-hebei region”. In: Frontiers in Environmental Science 10 (2022). doi: 10.3389/fenvs.2022.1006142. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2022.1006142>.
- [95] 谭显春, 戴瀚程, 顾佰和, 黄晨, 朱开伟, 马啸天, 闫洪硕, 刘心远, and 朱衍磊. “IPCC AR6 报告历史排放趋势和驱动因素核心结论解读”. In: 气候变化研究进展 18.5 (2022), pp. 538–545.
- [96] Ming Ren et al. “Enhanced food system efficiency is the key to China’s 2060 carbon neutrality target”. In: Nature Food (2023). URL: <https://www.nature.com/articles/s43016-023-00790-1>.

- [97] Yin Long et al. "PM2.5 and ozone pollution-related health challenges in Japan with regards to climate change". In: *Global Environmental Change* 79 (2023), p. 102640. ISSN: 0959-3780. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102640>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378023000067>.
- [98] Yang Xie, Meng Xu, Jinlu Pu, Yujie Pan, Xiaorui Liu, Yanxu Zhang, and Shasha Xu*. "Large-scale renewable energy brings regionally disproportional air quality and health co-benefits in China". In: *iScience* 26.18 (2023), p. 107459. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.107459>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589004223015365>.
- [99] Qiong Su*, Hancheng Dai*, Shuyan Xie, Xiangying Yu, Yun Lin, Vijay P. Singh, and Raghupathy Karthikeyan. "Water-energy-carbon nexus: greenhouse gas emissions from integrated urban drainage systems in China". In: *Environmental Science & Technology* (2023).
- [100] Xinyuan Liu et al. "Evaluating cost and benefit of air pollution control policies in China: a systematic review". In: *Journal of Environmental Sciences* 123 (2023), pp. 140–155. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.02.043>.
- [101] Yazhen Wu, Andre Deppermann, Petr Havlik, Stefan Frank, Ming Ren, Hao Zhao, Lin Ma, Chen Fang, Qi Chen, and Hancheng Dai*. "Global Land-use and Sustainability Implications of Enhanced Bioenergy Import of China". In: *Applied Energy* 336 (2023), p. 120769. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120769>.
- [102] Chen Huang, Yuyao Zhu, Ming Ren, Pei Zhang, Yingchao Chen, Hancheng Dai, and XianChun Tan*. "Prospective climate change impacts on China's fossil and renewable power-generation infrastructure: Regional and plant-level analyses". In: *Resources, Conservation and Recycling* 188 (2023), p. 106704. URL: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106704>.
- [103] Yan Ru Fang, Xin Sun, Silu Zhang, Gang Liu, Xiaorui Liu, Peng Zhang, Yifei Kang, Hancheng Dai, and Hancheng Dai*. "Regionally differentiated promotion of electric vehicles in China considering environmental and human health impacts". In: *Environmental Research Letters* (2023). DOI: [10.1088/1748-9326/acdbde](https://doi.org/10.1088/1748-9326/acdbde). URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/acdbde>.

- [104] Yu Qi, Xiaotian Ma, Yang Xie, Wen Wang, and Junfeng Wang. "Uncovering the key mechanisms of differentiated carbon neutrality policy on cross-regional transfer of high-carbon industries in China". In: *Journal of Cleaner Production* (2023), p. 137918. issn: 0959-6526. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137918>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623020760>.
- [105] Yan Ru Fang, Wei Peng, Johannes Urpelainen, M. S. Hossain, Yue Qin, Teng Ma, Ming Ren, Xiaorui Liu, Silu Zhang, and Chen Huang **Hancheng Dai***. "Neutralizing China's transportation sector requires combined decarbonization efforts from power and hydrogen supply". In: *Applied Energy* 349 (2023), p. 121636. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261923010000?dgcid=author>.
- [106] Chaoyi Guo, Ziqiao Zhou, Xinyuan Liu, Xiaorui Liu, Jing Meng, and Hancheng Dai*. "The unintended dilemma of China's target-based carbon neutrality policy and provincial economic inequality". In: *Energy Economics* (2023), p. 107002. issn: 0140-9883. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.107002>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988323005005>.
- [107] 李丹阳[#] 吴雅珍[#], 张霖, and 戴瀚程 *. "气候变化对空气污染影响的模拟研究". In: *北京大学学报自然科学版* 59.5, 854 (2023), pp. 854–870.
- [108] 吴雅珍, 马啸天, 吴凯, 黄晨, and 戴瀚程 *. "经济增长与结构变化对亚洲国家碳排放与空气污染物排放的影响——基于 KAYA、LMDI 与 SDA 分解的驱动力分析". In: *生态经济* 39.12 (2023), pp. 191–205.
- [109] Yang Xie, Xiaorui Liu, Danyang Li, Mengdan Zhao, Zhixiong Weng, Lin Zhang, and Meng Xu. "Health and economic benefits of reducing air pollution embodied in GBA's green and low-carbon development". In: *Urban Climate* 52 (2023), p. 101755. issn: 2212-0955. doi: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101755>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212095523003498>.
- [110] 戴瀚程 张远航. "生态文明时代大气环境治理的变革与转型". In: *全球变局下的中国机遇与发展*. 人民出版社, 2022, pp. 333–358.
- [111] Yujie Pan et al. "Carbon neutrality and clean air acts can enable China to meet the Minamata Convention goals with substantial cost savings". In: *One Earth* 7.3 (2024), pp. 483–496. issn: 2590-3322. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.01.001>.

- org/10.1016/j.oneear.2024.02.006. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590332224000897>.
- [112] Yang Xie[#], Ziqiao Zhou[#], Qinghua Sun, Mengdan Zhao, Jinlu Pu, Qiutong Li, Yue Sun, Hancheng Dai*, and Tiantian Li*. “Social-economic transitions and vulnerability to extreme temperature events from 1960 to 2020 in Chinese Cities”. In: *iScience* 27 (2024), p. 109066.
- [113] Ziqiao Zhou, Xiaotian Ma, Silu Zhang, Chaoyi Guo, Xiaorui Liu, Lin Zhang*, and Yang Xie*. “Equity-Based Carbon Neutral Plan Induces Cross-Regional Coal Leakage and Industrial Relocation”. In: *iScience* 27 (2024), p. 109079.
- [114] 张思露, 郭超艺, 周子乔, 潘羽杰, 马啸天, and 戴瀚程 *. “碳中和目标下我国煤炭主产省区的减排贡献及经济代价”. In: *煤炭经济研究* 44.1 (2024), pp. 6–13.
- [115] Meng Xu, Silu Zhang, Panwei Li, Zhixiong Weng, Yang Xie, and Yan Lan. “Energy-related carbon emission reduction pathways in Northwest China towards carbon neutrality goal”. In: *Applied Energy* 358 (2024), p. 122547. ISSN: 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122547>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261923019116>.