



清华大学能源环境经济研究所
INSTITUTE OF ENERGY, ENVIRONMENT and ECONOMY
TSINGHUA UNIVERSITY

博士学位论文答辩

碳中和目标下中国能源转型 协同效应与不确定性研究

答辩人：张枢

指导教师：陈文颖 教授

2024年5月16日

CONTENTS 目录



- 1 研究问题及研究框架
- 2 中国碳中和转型综合评估模型体系构建
- 3 碳中和目标下中国能源系统转型路径
- 4 中国能—粮—水—空气质量协同转型路径
- 5 中国能源环境经济转型不确定性研究
- 6 研究结论与展望

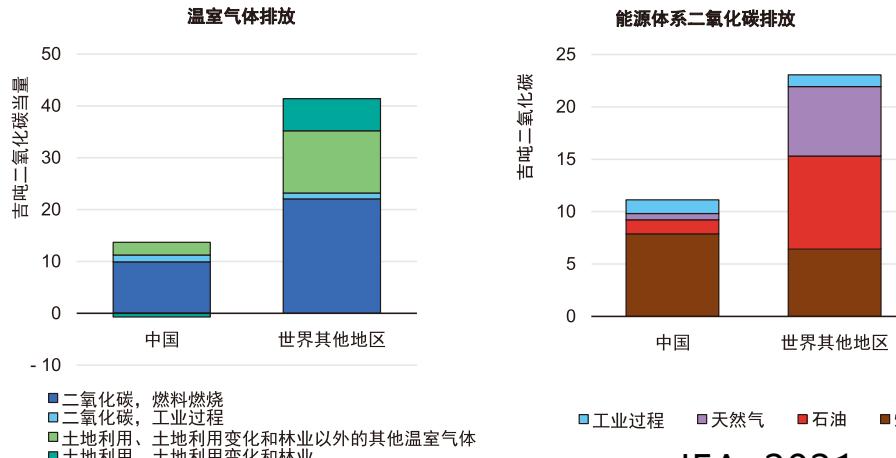
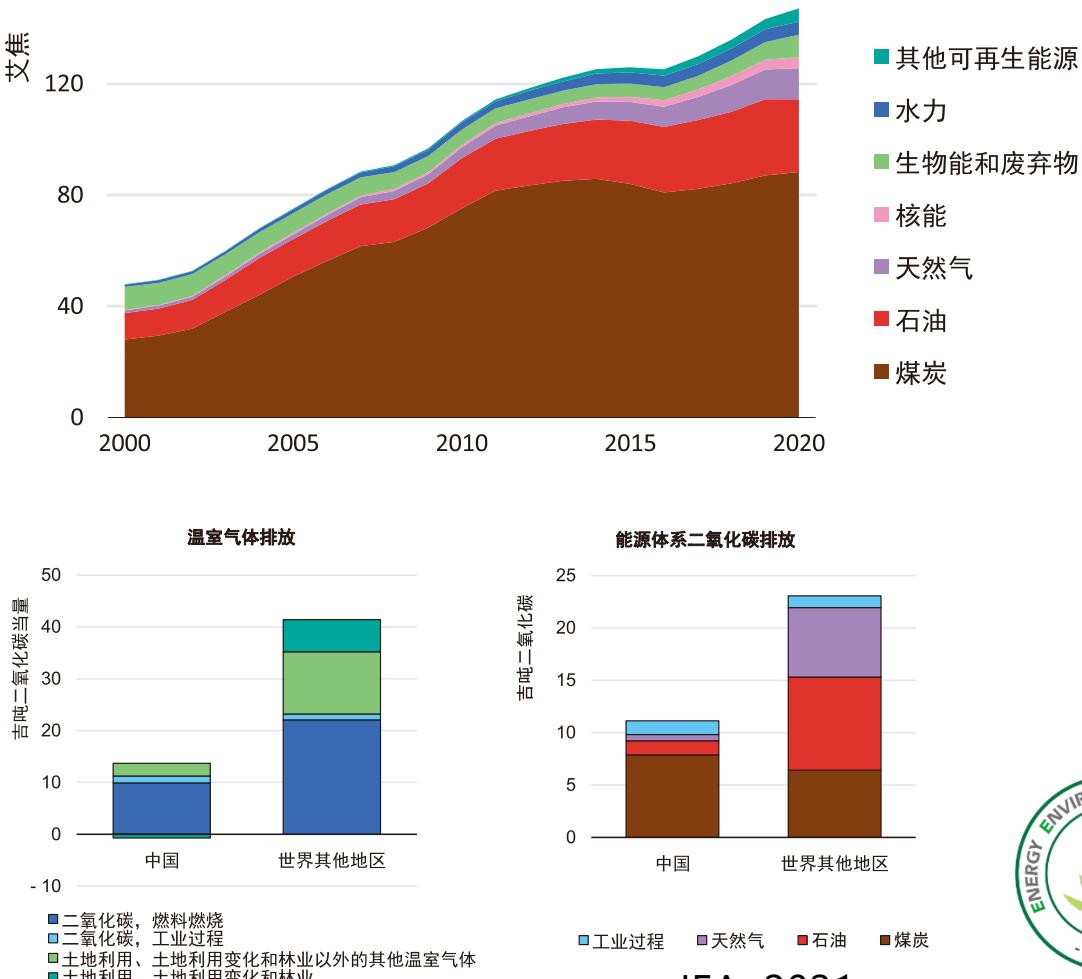
Part 01

研究问题及研究框架



研究背景——碳中和目标倒逼能源转型

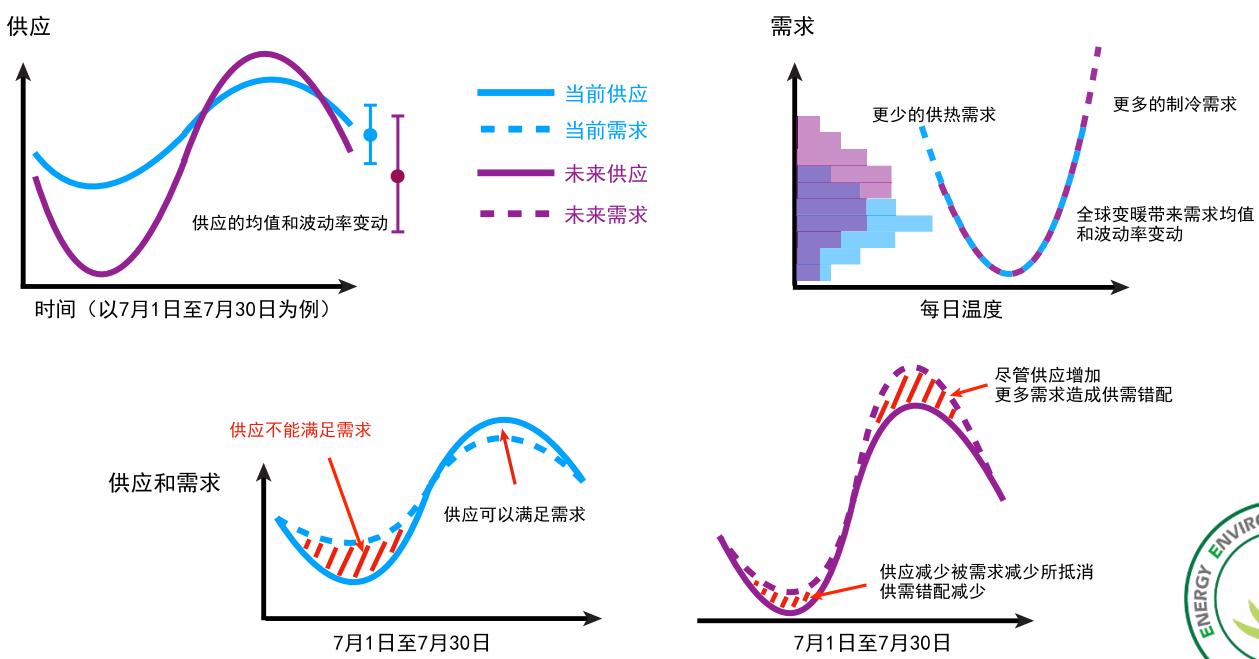
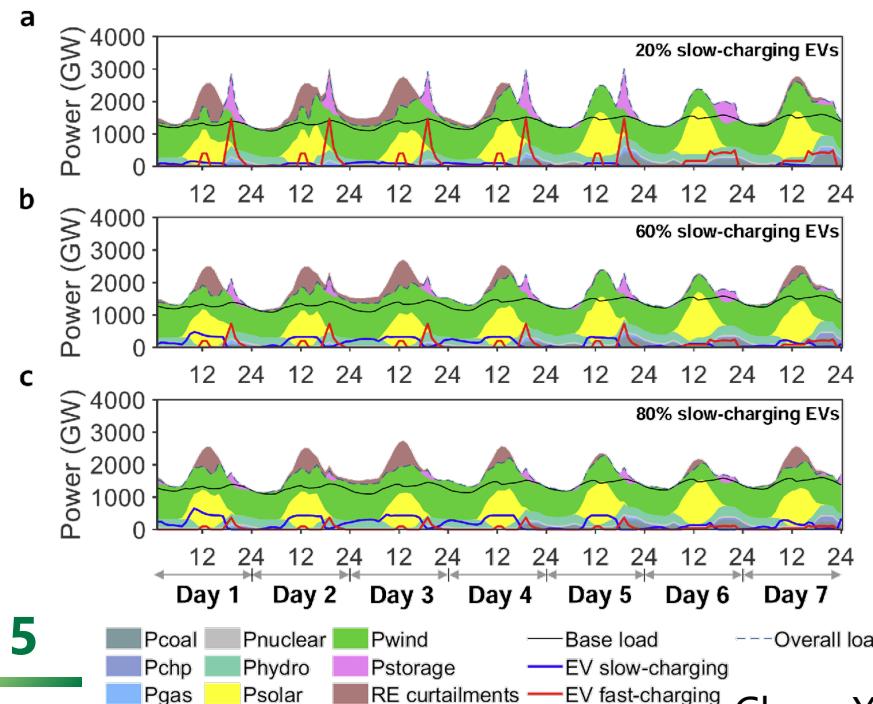
- 中国是世界最大的能源消费国，超过85%的一次能源供应依赖化石燃料
- 中国是世界最大的温室气体排放国，化石燃料和工业过程排放占温室气体排放近90%，能源转型势在必行
- 在碳达峰和碳中和目标的实现进程中，能源系统转型大势所趋



IEA, 2021

研究背景——碳中和转型带来系统灵活性挑战

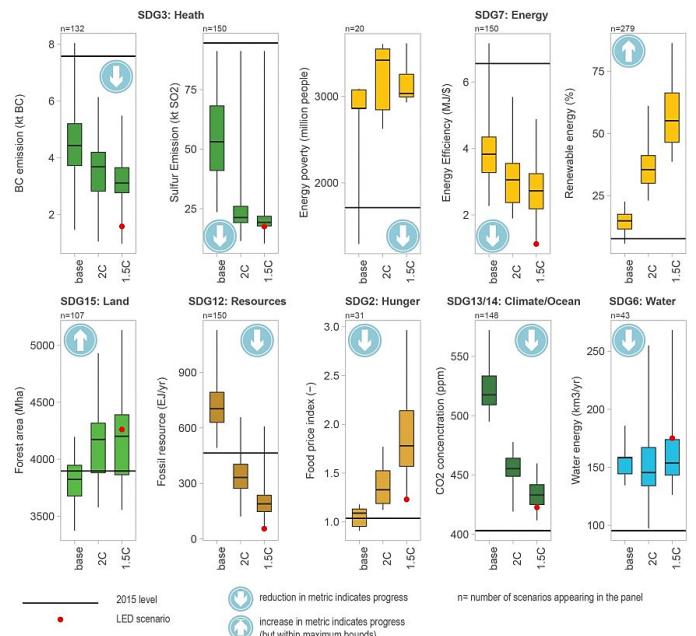
- 供应侧：可再生能源普及和煤电转型削弱电力系统的调节性能
- 消费侧：电动汽车、绿氢发展扩展了电能使用范围，影响未来用能曲线
- 气候影响：气候变化造成用能需求变化和电力机组运行方式偏移



研究背景——碳中和转型与SDGs相互关联

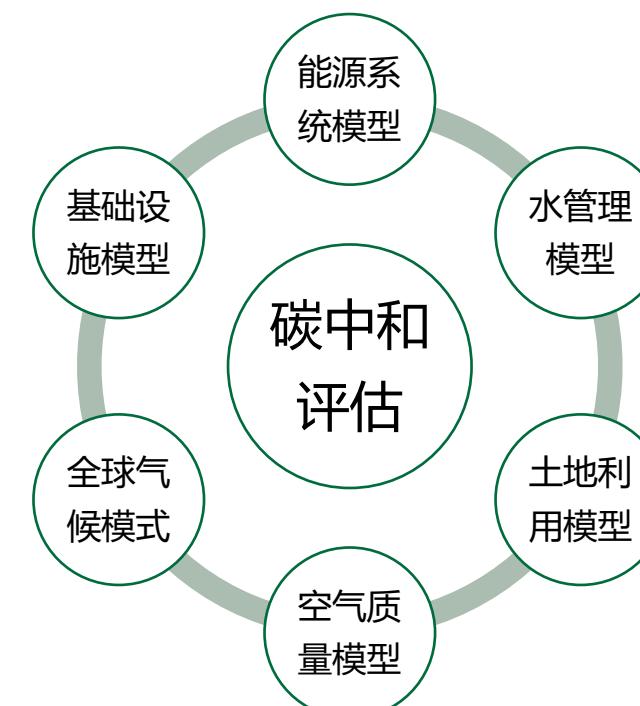
碳中和转型带来SDGs间的协同和权衡

- 协同效应
能源系统耗水、森林碳汇、空气质量
- 潜在权衡
生物质生产耗水量、粮食供应和粮食价格



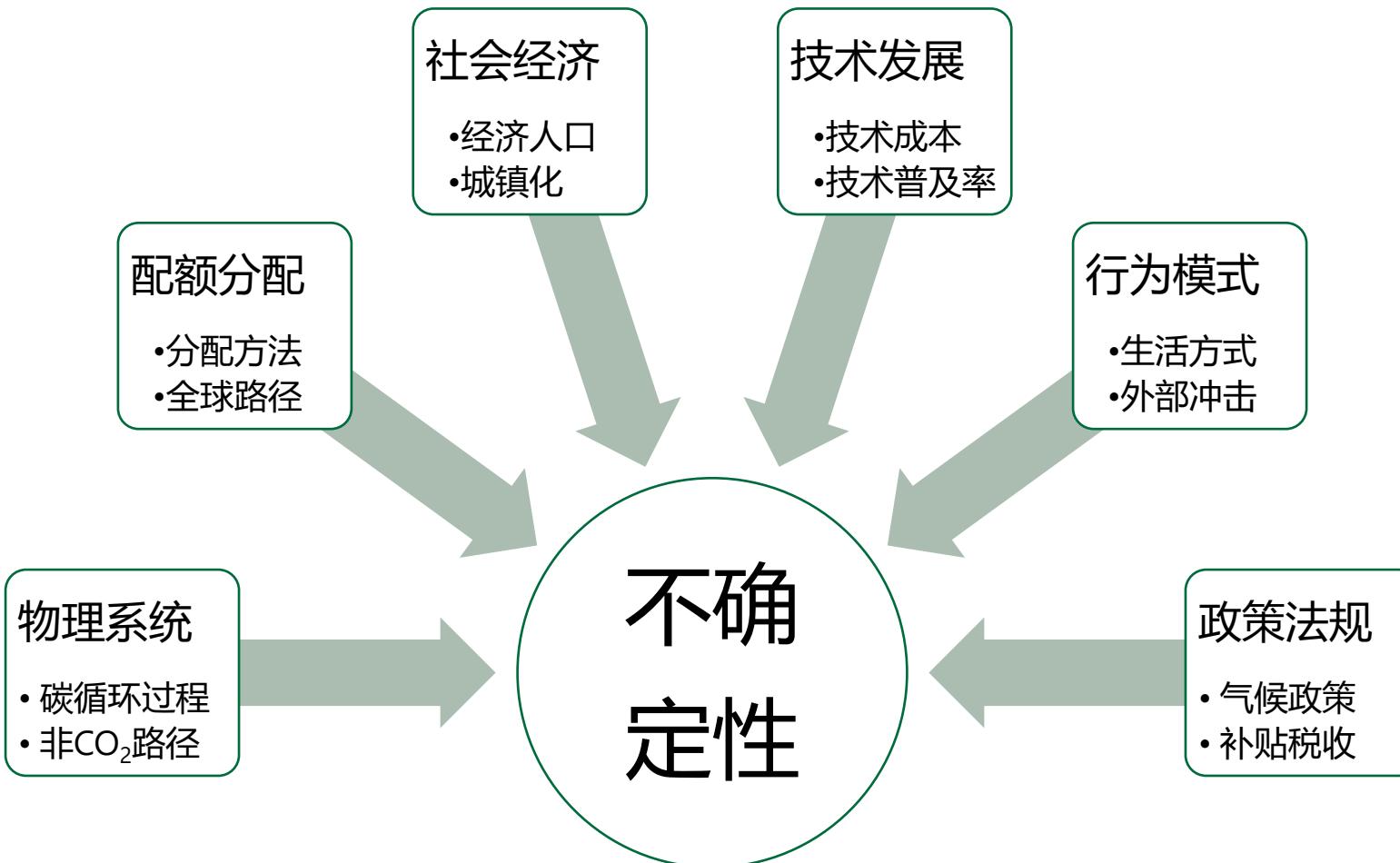
碳中和综合评估需要多模型紧密配合

- 单一模型难以深入描述多个领域的变化动态
- 多模型互联成为碳中和综合评估的发展趋势



研究背景——气候变化治理存在深刻不确定性

气候变化治理和能源转型进程存在大量的不确定性因素



研究问题

研究目标：

在考虑气候政策和能源政策的基础上，认知我国面向碳达峰碳中和目标转型的复杂特征，科学描述碳中和转型过程中的不确定性，提出综合考虑气候变化应对、能源系统转型、能-粮-水-空气质量系统协同发展的碳中和路径和政策综合评估理论和方法，探究经济、安全、可实现的碳达峰碳中和路径。

关键科学问题：

- 多时间尺度碳中和路径动态优化和决策选择方法
- 能-粮-水-空气质量系统综合评估建模
- 量化转型的不确定性因素并形成不确定性下路径优化方法



文献综述

能源环境经济模型

时空分辨率

不确定性建模

SDGs刻画

转型情景设计

协同效应与潜在权衡

能源与水资源

能源与土地/粮食

能源与空气质量

SDGs综合评估

不确定性分析

不确定性分析价值

不确定性分析方法

蒙特卡洛分析案例



文献综述——主流能源环境经济模型

• 时间分辨率

主流模型开始考虑
亚年度级建模，但均
局限于电力调度

• 不确定性刻画

主流模型开始进行
复杂不确定建模，但
全栈式研究较少

• SDGs目标

绝大部分模型关注
空气污染，国外模型
多有AFOLU模块和
水管理模块

模型	机构	空间分辨率	时间分辨率	不确定性	非CO ₂	空气污染	水资源	AFOLU
AIM/Hub	NIES	世界26区	年	多情景	包含	包含	不包含	包含
COFFEE-TEA	COPPE	世界18区	年	多情景	包含	不包含	不包含	包含
GCAM	PNNL	世界32区	小时级	概率密度	包含	包含	包含	包含
IMAGE	PBL	世界26区	年	多情景	包含	包含	包含	包含
MERGE-ETL	PSI	世界9区	年	概率密度	包含	不包含	不包含	仅排放
MESSAGEix	IIASA	世界11区	季节、日夜	多情景	包含	包含	包含	包含
POLES	JRC	世界60区	年	多情景	包含	包含	仅电力	包含
REMIND	PIK	世界11区	小时级	多情景	包含	包含	仅电力	包含
TIAM	UCL	世界16区	小时级	概率密度	包含	不包含	不包含	仅排放
WITCH	FEEM	世界17区	年	概率密度	包含	包含	不包含	包含
C3IAM	北京理工大学	世界17区	年	多情景	包含	包含	不包含	包含
C-GEM	清华大学	世界16区	年	多情景	不包含	不包含	不包含	仅排放
C-REM	清华大学	中国30区	年	多情景	不包含	包含	不包含	仅排放
CE3METL	中科院大学	中国单区	年	多情景	不包含	不包含	不包含	仅排放
CHEER-BE	清华大学	中国单区	年	多情景	不包含	不包含	不包含	包含
China MAPLE	清华大学	中国单区	年	多情景	包含	包含	不包含	仅排放
China TIMES	清华大学	中国单区	日夜	多情景	不包含	包含	仅电力	仅排放
China TIMES 30PE	清华大学	中国30区	季节、日夜	多情景	不包含	包含	仅电力	仅排放
GCAM-TU	清华大学	世界32区	年	多情景	包含	包含	包含	包含
IMED CGE	北京大学	中国30区	年	多情景	包含	包含	包含	包含
IPAC	能源研究所	世界9区	年	多情景	包含	包含	包含	包含

文献综述——国内外模型团队情景设计发展

情景作为表征人类和环境相互作用中不确定性的手段，在全球变化研究中发挥重要作用，情景设计在近年也有新的发展和创新需求 (O'Neill *et al.*, 2020)

RCP-SSP或
全球温控目标

考虑NDC和
中长期目标

考虑可行性
和可操作性

多目标
综合评估

- Rogelj *et al.*, NCC, 2011
- van Soest *et al.*, NC, 2021
- Rode *et al.*, Nature, 2021
- Meinshausen *et al.*, Nature, 2022

- Pye *et al.*, NE, 2017
- Ou *et al.*, Science, 2021
- van Soest *et al.*, NC, 2021
- Sognaes *et al.*, NCC, 2021
- Dubash *et al.*, Science, 2021
- Yang *et al.*, One Earth, 2021
- Duan *et al.*, Science, 2021
- Van de Ven *et al.*, NCC, 2023
- Gidden *et al.*, Nature, 2023

- Grubler *et al.*, NE, 2018
- Kikstra *et al.*, NE, 2021
- Fujimori *et al.*, NCC, 2021
- Tong *et al.*, NCC, 2021
- Wang *et al.*, NC, 2021
- Auer *et al.*, One Earth, 2021
- Wang *et al.*, Nature, 2023
- Nemet *et al.*, Joule, 2023
- Gernaat *et al.*, NCC, 2023

- van Vuuren *et al.*, NCC, 2018
- Fuso Nerini *et al.*, NS, 2019
- Fuhrman *et al.*, NCC, 2020
- Soergel *et al.*, NCC, 2021
- Hasegawa *et al.*, NS, 2021
- Drouet *et al.*, NCC, 2021
- Riahi *et al.*, NCC, 2021
- van Vuuren *et al.*, One Earth, 2022
- Moallemi *et al.*, One Earth, 2024

- RCP-SSP情景框架用于研究**全球成本最优减排路径**
- 整合气候和社会发展未来时，越来越多的研究关注不同地区**已有的减排进展和承诺**
- 由统计数据走向**微观实证数据**，进一步增强模拟结果的可行性
- 将水、土地、空气质量等SDG目标纳入**统一研究框架**，形成协同增效的政策方案

文献综述——协同效应和潜在权衡（能—水）

- 能源—水耦合密切，水资源约束成为能源规划和产业规划的关键考虑因素
- 农业、电力和工业部门是中国用水的前三大部门

能源与水资源管理耦合应用

- 电力部门自底向上静态考虑用水量和电力生产 (Zhang et al., 2018, Qin et al., 2023)
- 电力部门自顶向下情景分析水压力，缺乏空间异质性 (Huang et al., 2017; Li et al., 2019)
- 工业部门自底向上研究较少，集中于采矿业和钢铁行业 (Wang et al., 2017)
- 农业部门聚焦于能源作物发展(Khan et al., 2017)

能源环境经济模型对水资源建模

- MESEIC：气候目标下的煤电转型 (Li et al., 2021)
- MESSAGE-CWatM：连接全球能-水-气候研究框架 (Vinca et al., 2020)
- GCAM：节水技术在终端的普及 (Dolan et al., 2021)
- IMED|CGE：灌溉与碳减排的相互关系 (Guo et al., 2020, Liu, et al., 2022)
- REMIND-MAgPIE：评估气候目标对农业用水的协同作用 (Soergel et al., 2021)

- 清单法对单部门进行**高分辨率**水压力评估，但通常为**静态**，难以评估全部门长期水资源管理问题
- 情景分析工具可以生成**长期模拟**情景，但**时空分辨率低**，对水资源压力的时空异质性认识不足
- 目前研究主要关心**存量**，较少研究电解水制氢、生物能源生产、CCS应用等**增量**情况



文献综述——协同效应和潜在权衡（能—粮/土地）

- 国际团队考虑气候变化减缓与粮食生产的竞争关系，国内团队能源和土地系统耦合研究较少

能源转型与粮食/土地的耦合关系

- 应对气候变化降低农业物理风险，但碳定价引发粮食价格上涨 (Stevanović *et al.*, 2017)
- 发展第二代和第三代生物燃料一定程度避免了生物能源与粮食的直接竞争(Nazari *et al.*, 2021)
- 中国快速的植树造林对土地、水和粮食造成了潜在挑战 (Wise *et al.*, 2009)
- 中国的植树造林也挤占了适用于可用于生物质生产的土地 (Fuhrman *et al.*, 2019)
- 提高食物系统效率是实现碳中和的关键 (Ren *et al.*, 2023)

能源模型与土地利用模型的链接研究

- AIM、MESSAGE、IMAGE、POLES、REMIND、WITCH多模型比较表明，粮食安全与气候变化减缓间存在负面权衡 (Fujimori *et al.*, 2020)
- IMAGE团队发现，为实现RCP1.9目标，必须依赖BECCS或者植树造林，生物能源用地和粮食用地存在明显竞争 (van Vuuren *et al.*, 2018)
- GLOBIOM团队发现，中国的农业部门减排，可能造成比世界平均水平更大的粮食安全问题 (Frank *et al.*, 2017)

文献综述——协同效应和潜在权衡（能—空气质量）

- 空气污染物和温室气体排放同根同源，大部分均来自于化石燃料的燃烧，气候变化减缓行动能够带来明显的空气质量改善和健康效益

从科学发现走向政策评估

- 对比RCP2.6/4.5/6/8.5下过早死亡率情况，气候治理对空气质量有协同效应 (Silva et al., 2016)
- GCAM和POLES团队发现气候治理对健康的协同效益超过了气候治理的政策成本 (Markandya et al., 2018; Vandyck et al., 2018)
- 利用GAINS和ABaCAS，中国气候治理的协同效应更加明显 (Li et al., 2019; Xing et al., 2020)
- 人口老龄化加剧中国因PM_{2.5}污染造成的过早死亡(Xu et al., 2023)

从政策评估走向工程实际

- 末端治理和气候行动共同作用，2060年78%人口PM_{2.5}暴露低于10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Cheng et al., 2021)
- 关停高排放的落后机组 “靶向” 治理空气污染的减排策略 (Tong et al., 2021)
- 考虑到未来布置BECCS或者采用植树造林政策可能对于空气质量的影响(Fuhrman et al., 2021)
- 共同部署空气质量和气候政策，能够每年避免超过200万人的过早死亡(Cheng et al., 2023)

- 大多数模型都已考虑空气污染物排放和气候变化减缓产生的协同效应，但视角多集中于科学发现，难以形成具有政策价值的建议



文献综述——协同效应和潜在权衡 (SDGs耦合)

- 气候变化与可持续发展目标耦合的研究中，SDGs耦合的研究是当前的学术热点

耦合评估的意义	中国能-粮-水耦合研究进展	能-粮-水耦合评估的模型实践
<ul style="list-style-type: none">忽视能-粮-水耦合或产生偏颇结果 (Mannan et al., 2018)能-粮-水系统变化对气候和生态系统有重大直接影响 (Lotz-Sisitka et al., 2016)，并间接影响到其他SDGs (Olawuyi et al., 2020)应对气候变化增加了实现粮食安全成本，但减少空气污染治理成本 (McCollum et al., 2018)加快SDG进展需要积极解决协同增效和权衡问题，更加注重SDG相互联系的政策影响评估(Bennich et al., 2023)	<ul style="list-style-type: none">中国能-粮-水关系的可持续性远非最佳状态 (Wang et al., 2018)中国农业、建筑业和服务业能-粮-水足迹最大 (Deng et al., 2020)中国粮食生产对能源生产产生负面影响，粮食生产对供水影响尚不显著 (Yan et al., 2020)中国能-粮-水关系存在广泛的空间差异性 (Liang et al., 2020)中国低碳能源发展具有与SDG协同的潜力，也存在与四分之三的目标进行权衡的风险(Pan et al., 2023)	<ul style="list-style-type: none">REMIND团队发现NDC目标能增强水资源利用和土地利用的可持续性 (Soergel et al., 2021)AIM团队量化了CO₂减排对于可持续发展指标的边际影响(Fujimori et al., 2020)MESSAGE团队发现通过降低需求和转变用能模式可以增进粮食安全和水资源集约利用 (Grubler et al., 2018)利用GCAM模型发现多样化的负排放技术可以缓解气候行动对中国水压力和土地利用权衡 (Wang et al., 2024)

文献综述——不确定性分析

- 不确定性分析能够产生更加全面、透明、鲁棒的结果，传统灵敏性分析难以提供可靠结论
- 蒙特卡洛分析包含**最全面的概率密度信息**，可用于影响量化、关键变量识别、交叉关系研究
- 目前全栈式的能源系统不确定性建模，尤其是自底向上模型建模仍较少

不确定性分析主要价值

- 提高鲁棒性 (Huppmann *et al.*, 2018)
- 增加多样性 (Guivarch *et al.*, 2016)
- 实现多目标决策 (Watson *et al.*, 2017)
- 融合多尺度数据 (Schweizer *et al.*, 2016; Guivarch *et al.*, 2017)

不确定性分析实现方法

- 多情景&灵敏度分析 (Gi *et al.*, 2020; Peng *et al.*, 2021)
- 随机规划 (Babonneau *et al.*, 2012)
- 多准则优解法 (Rosenberg, 2015)
- 多主体行为建模 (Hughes *et al.*, 2013)
- 蒙特卡洛分析 (Baležentis *et al.*, 2017, Panos *et al.*, 2023)

蒙特卡洛分析应用案例

- 排放水平 (Webster *et al.*, 2002)
- 气候敏感度 (Gillingham *et al.*, 2018, Panos *et al.*, 2023)
- 碳预算 (王鑫, 2018; Marcucci *et al.*, 2019)
- 技术进步 (Kypreos *et al.*, 2008; Jakob *et al.*, 2016)
- 变量重要性排序 (Bastien-Olvera *et al.*, 2021)



论文框架

第一章

第二章

第三、四、五章

第六章

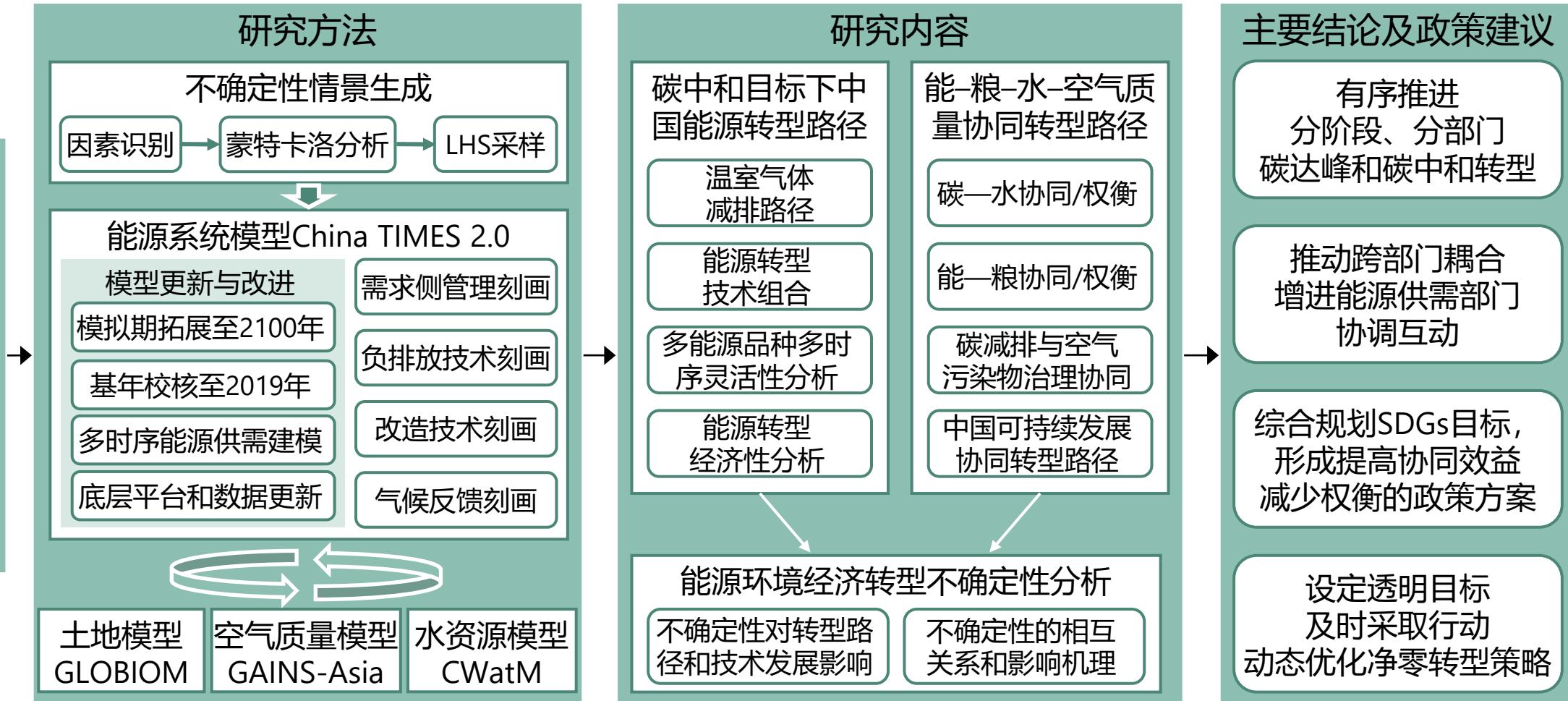
研究背景

气候变化与
碳中和目标

系统灵活性
与能源安全

SDGs协同
与潜在权衡

转型路径
不确定性



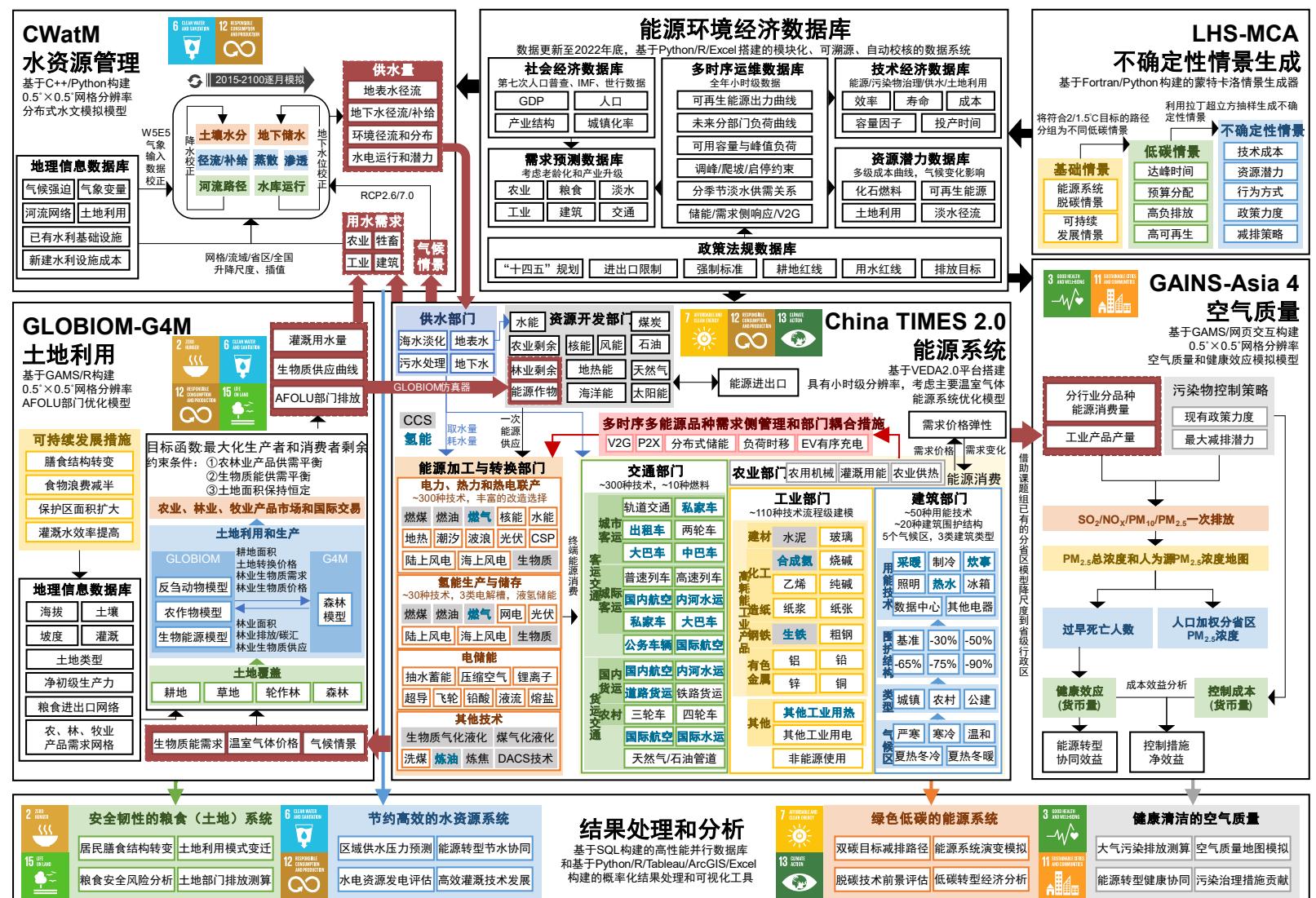
Part 02

中国碳中和转型综合评估 模型体系构建



中国碳中和转型综合评估模型体系

- 能源环境经济数据库
- 不确定性情景生成模块
- 能源环境经济模块
- 农林及土地利用模块
- 空气质量评估模块
- 水资源管理和利用模块
- 不确定性结果分析模块



能源系统模型China TIMES 2.0

- **中国能源系统模型 (China TIMES 2.0)**

- 自底向上线性优化模型，跨期动态方式求解
- 区域：中国单区 + 建筑部门5个气候区
- 排放：CO₂、CH₄、N₂O
- 部门：电力、上游、工业、交通、建筑、AFOLU
- 需求：基于需求价格弹性的弹性需求

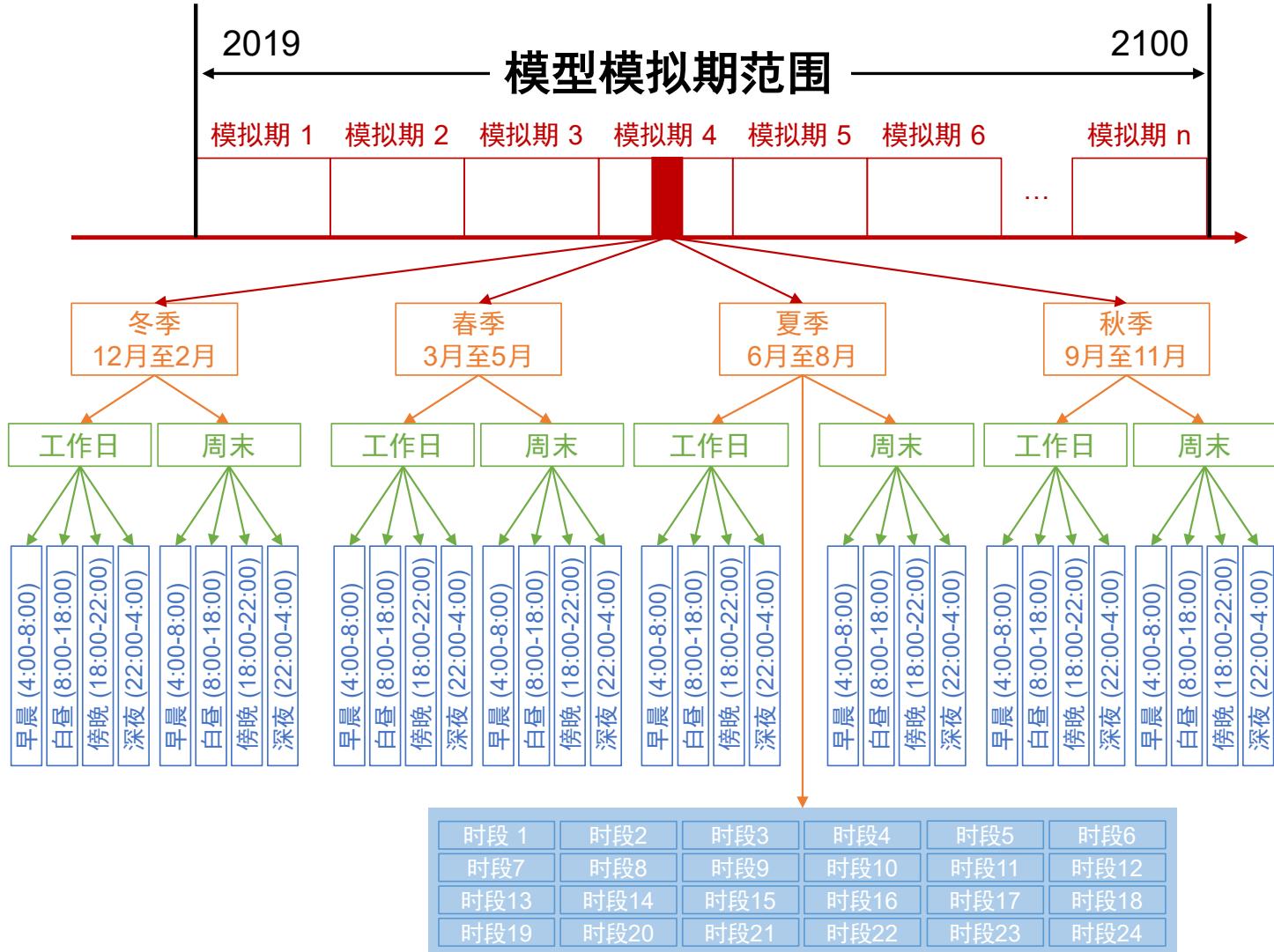
- **模型刻画2000余个已有、新建、改造技术**

- 建筑：考虑围护结构节能标准及各类改造选项
- 工业：高耗能工业产品流程级建模
- 交通：新增氢基燃料在航空航天领域的使用
- 电力：基于机组级数据聚合，考虑各类改造选项
- 上游：新增DACS、离网制氢、核能供暖

- **丰富的模型连接接口和模块化自动运行设计**

主要改进 China TIMES China TIMES 2.0		
平台	ANSWER	VEDA2.0(C#.NET)
数据库	MS Access	PostgreSQL
基年	2010	2019
模拟期	2010-2050 5年步长	2019-2100 1, 5, 15年变步长
GHG覆盖	能源CO ₂	能源、工业过程、AFOLU主要温室气体 (CO ₂ +CH ₄ +N ₂ O)
水资源	仅电力部门	电力、工业、建筑、农业部门
时间分辨率	日夜时序	年-季节-星期-日度-小时级嵌套 56时序建模
灵活性负荷	仅日夜储能	考虑日内和跨期储能、V2G、 需求侧响应、P2X和工业有序生产

China TIMES 2.0模型多时间尺度嵌套建模



年度

2019-2030: 每一期1年
2030-2060: 每一期5年
2060以后: 每一期15年

季节

四个季节

星期

工作日: 周一至周五
双休日: 周六和周日

日度

早晨: 4小时
白昼: 10小时
傍晚: 4小时
深夜: 6小时

32+24
时间片

小时 (典型日)
24个时段



China TIMES 2.0模型基于行为的负荷曲线生成方法

• 电动汽车充电

- 全年平均 (大多数IAM)
- 夜间充电 (老China TIMES)
- **有序充电 (配合可再生能源出力)**
- **V2G技术 (容量用于电网调峰)**

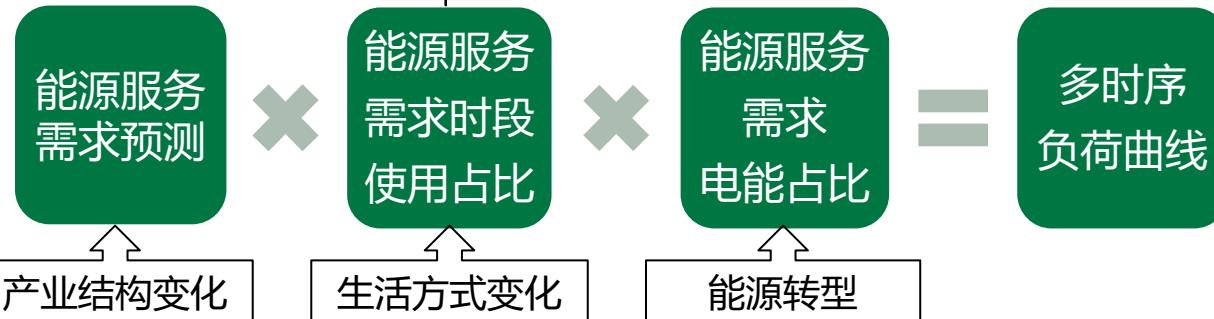
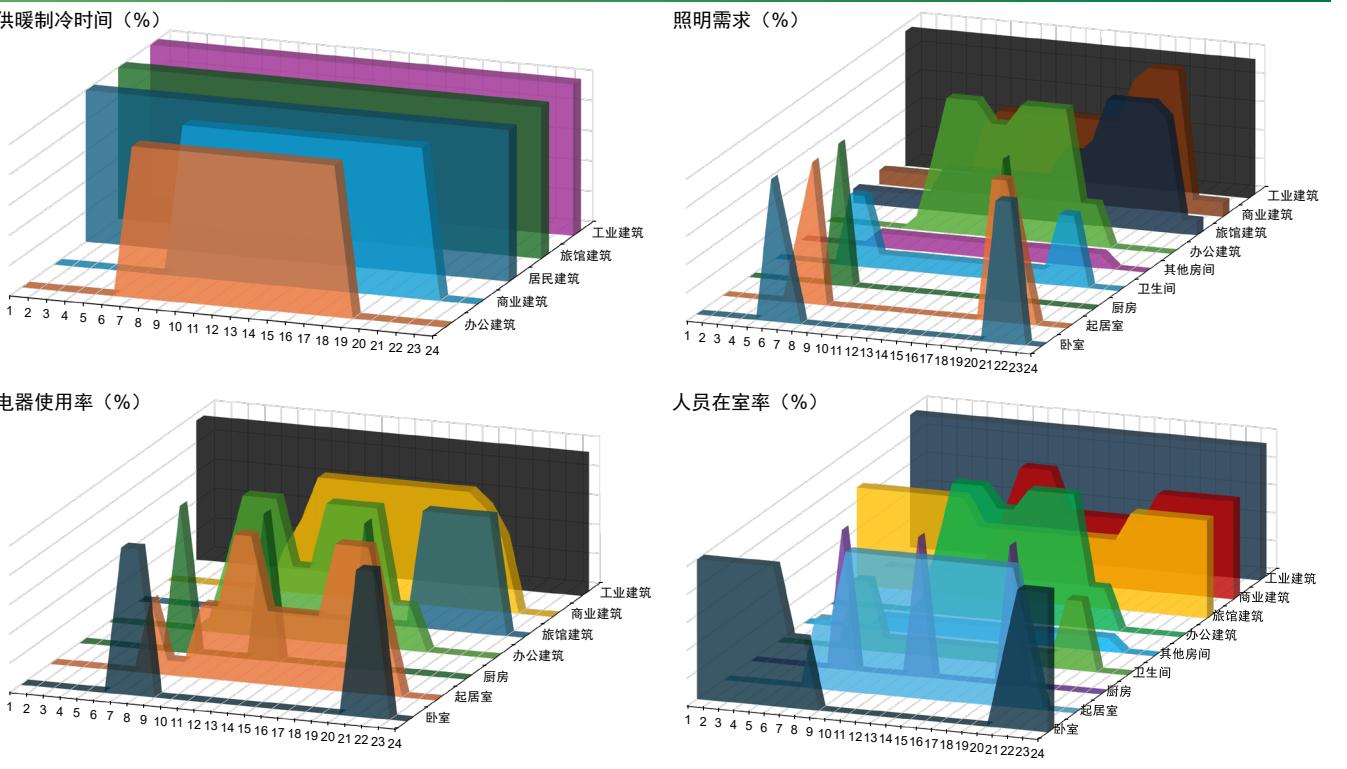
• 氢能生产

- 全年平均 (大多数IAM)
- **有序生产 (配合可再生能源出力)**
- **氢能调峰 (氢储能及氢能发电调峰)**

• 分布式可再生能源自利用与并网

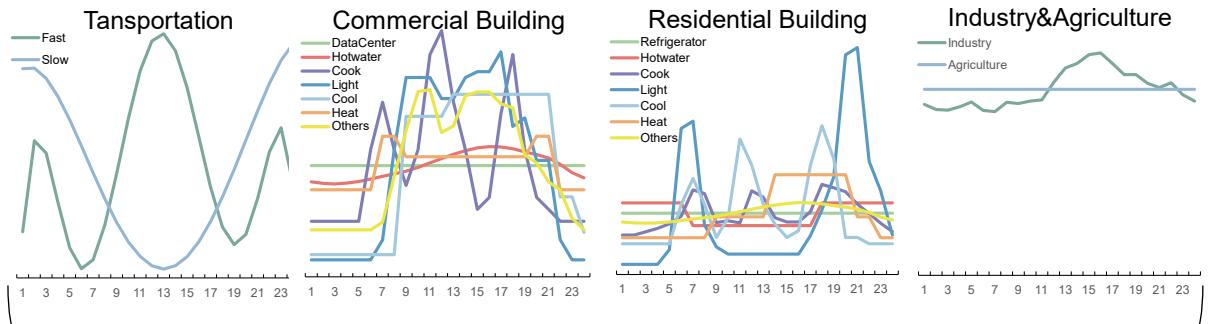
- 独立考虑分布式和集中式可再生能源
- 分布式可再生能源优先在配电网消纳

22

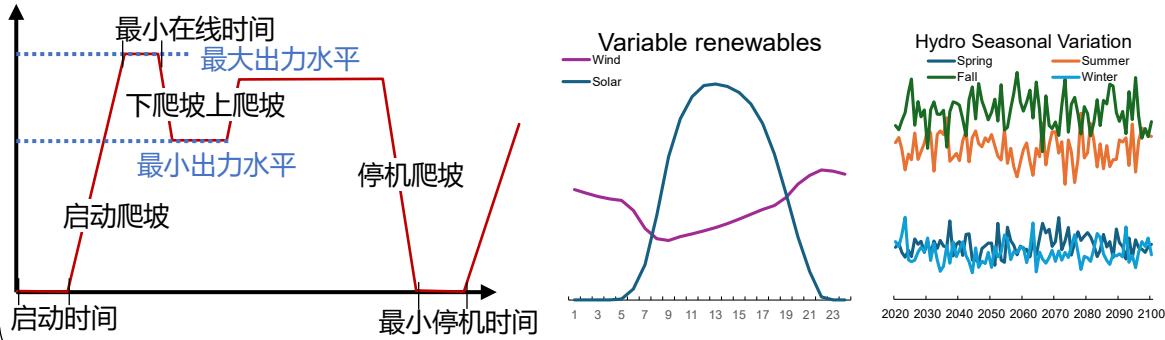


China TIMES 2.0模型小时级电力功率实时平衡

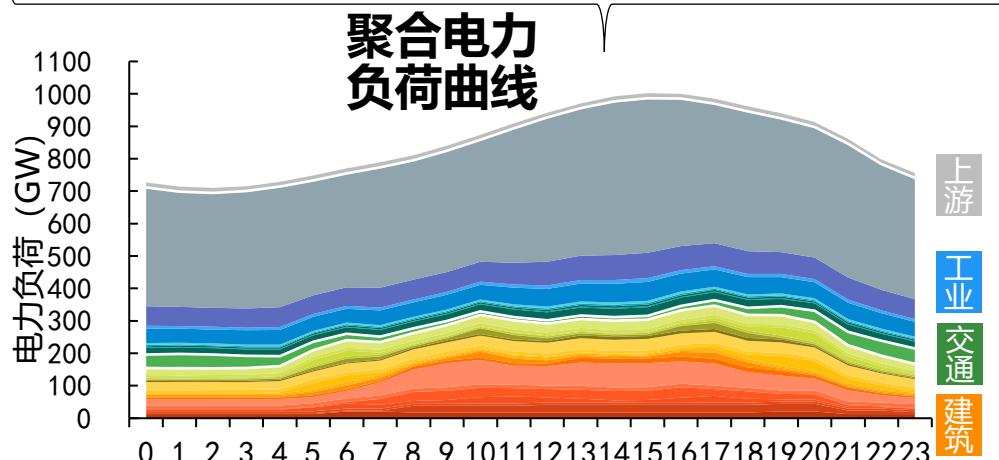
能源转型引发未来电力负荷曲线变化



长期能源规划模型嵌套考虑短期运行约束



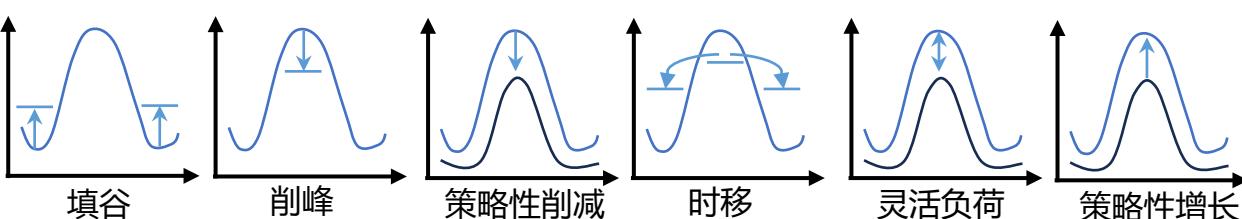
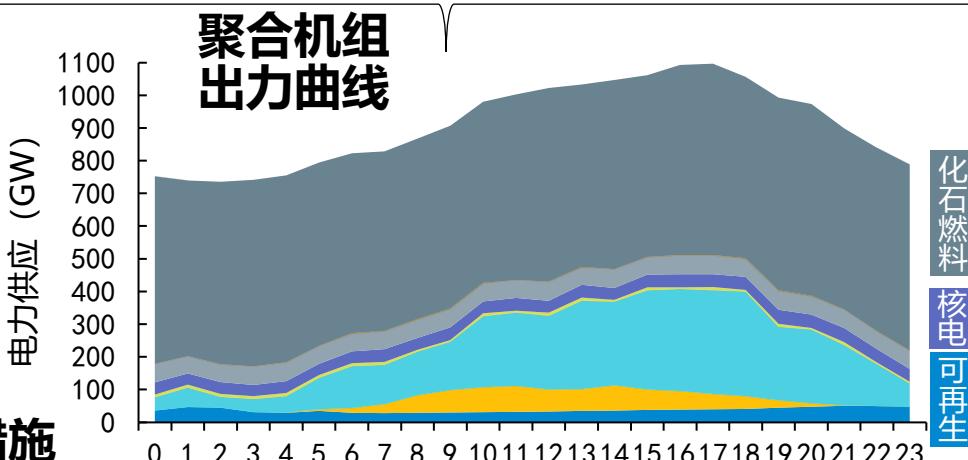
聚合电力
负荷曲线



系统
灵活性

储能和需求侧管理措施

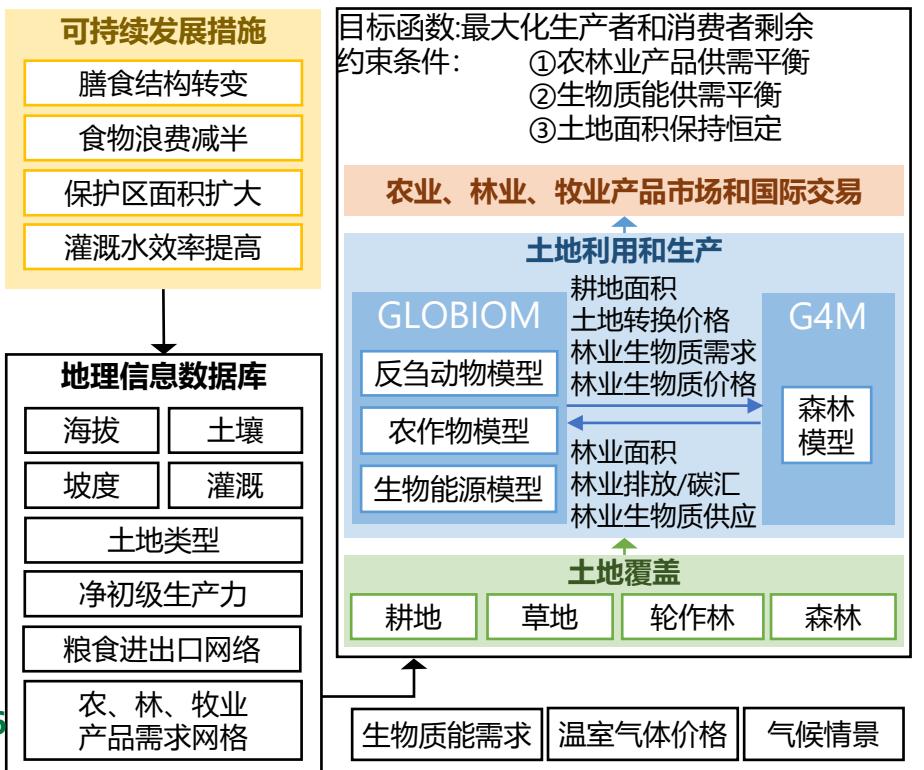
聚合机组
出力曲线



农、林、生物质能及土地利用模型 GLOBIOM-G4M

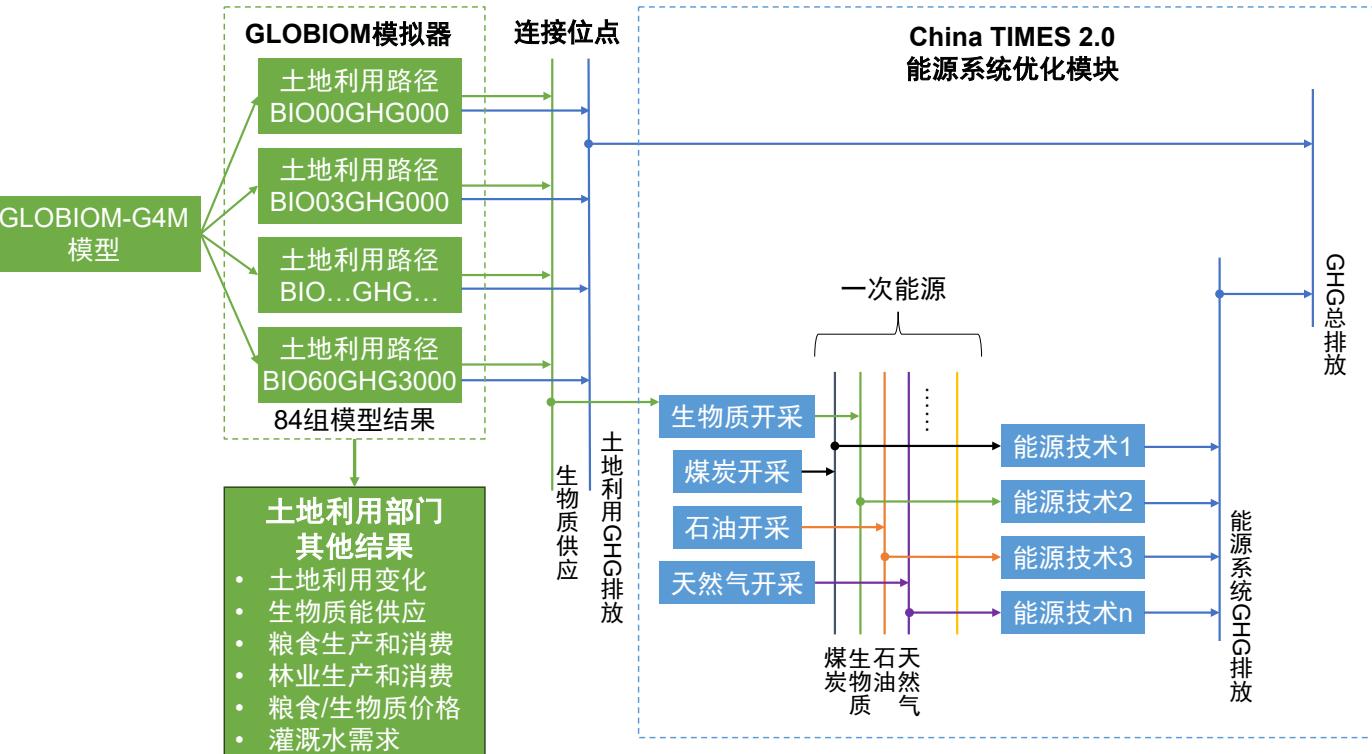
全球生物圈管理-全球林业模型 (GLOBIOM-G4M)

- 部分均衡模型，递归动态方式求解
- 模拟期到2100年
- 0.5°精度的网格数据
- AFOLU部门温室气体覆盖



建模范围

- 土地覆盖: 6大类土地利用类型
- 农业模块: 18种农作物
- 牧业模块: 7种牲畜
- 生物质能模块: 能源作物



水资源开发、管理和利用模型CWatM

• 社区供水模型 (CWatM)

- 开源模型
- 0.5°精度的网格数据
- 最高日级的动态模拟

• 地表类型和水循环过程

- 地表类型: 森林、草原、耕地、稻田、城市、水面
- 土壤过程: 渗透、毛细管、地表径流、间流、霜冻
- 降水过程: 降雨、降雪、融雪
- 地表水自然蒸发、蒸腾作用

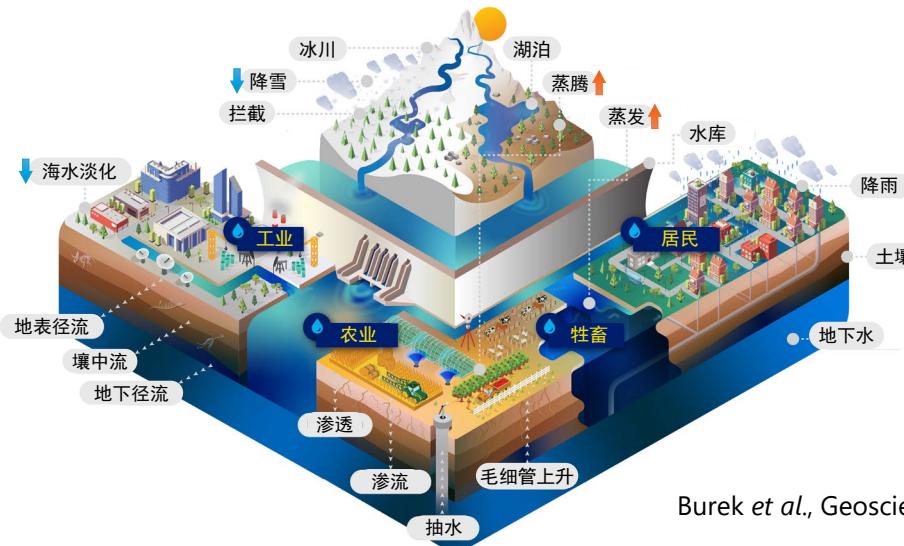
• 水资源需求

- 农牧业、建筑、工业、电力
- 生态流量

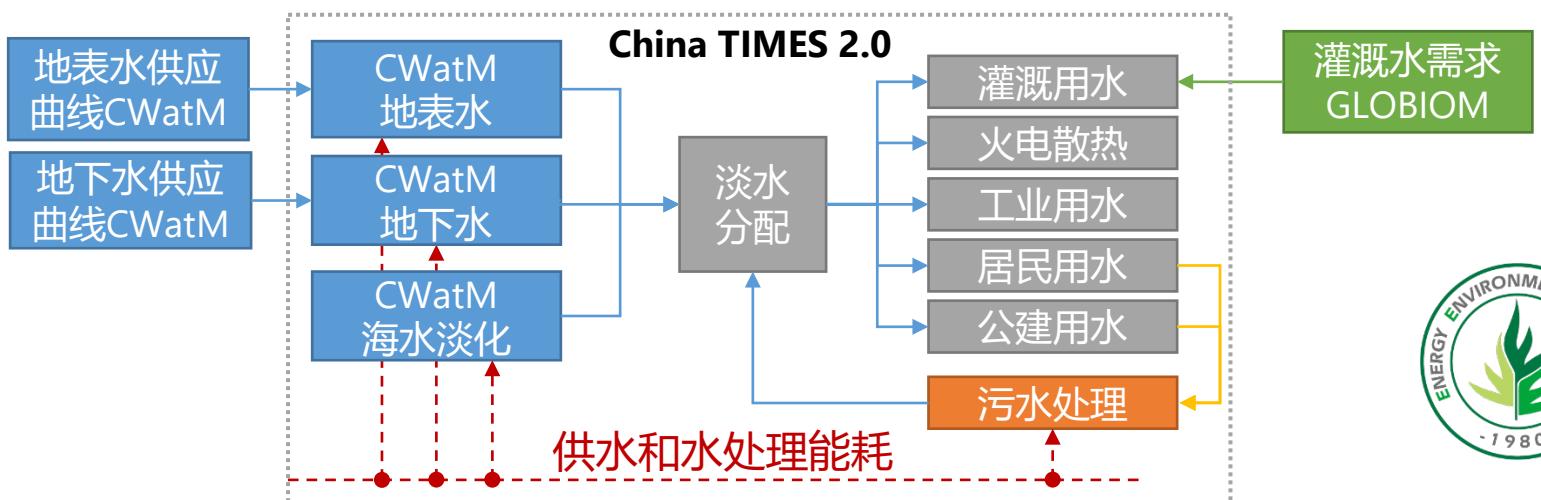
• 水资源供应

- 河流、湖泊、水库取水
- 抽取地下水、海水淡化
- 水资源供应、调配成本

25



Burek et al., Geoscientific Model Development, 2020



空气质量评估模型GAINS-Asia

- 温室气体与空气污染相互作用和协同效应模型-亚洲 (GAINS-Asia)

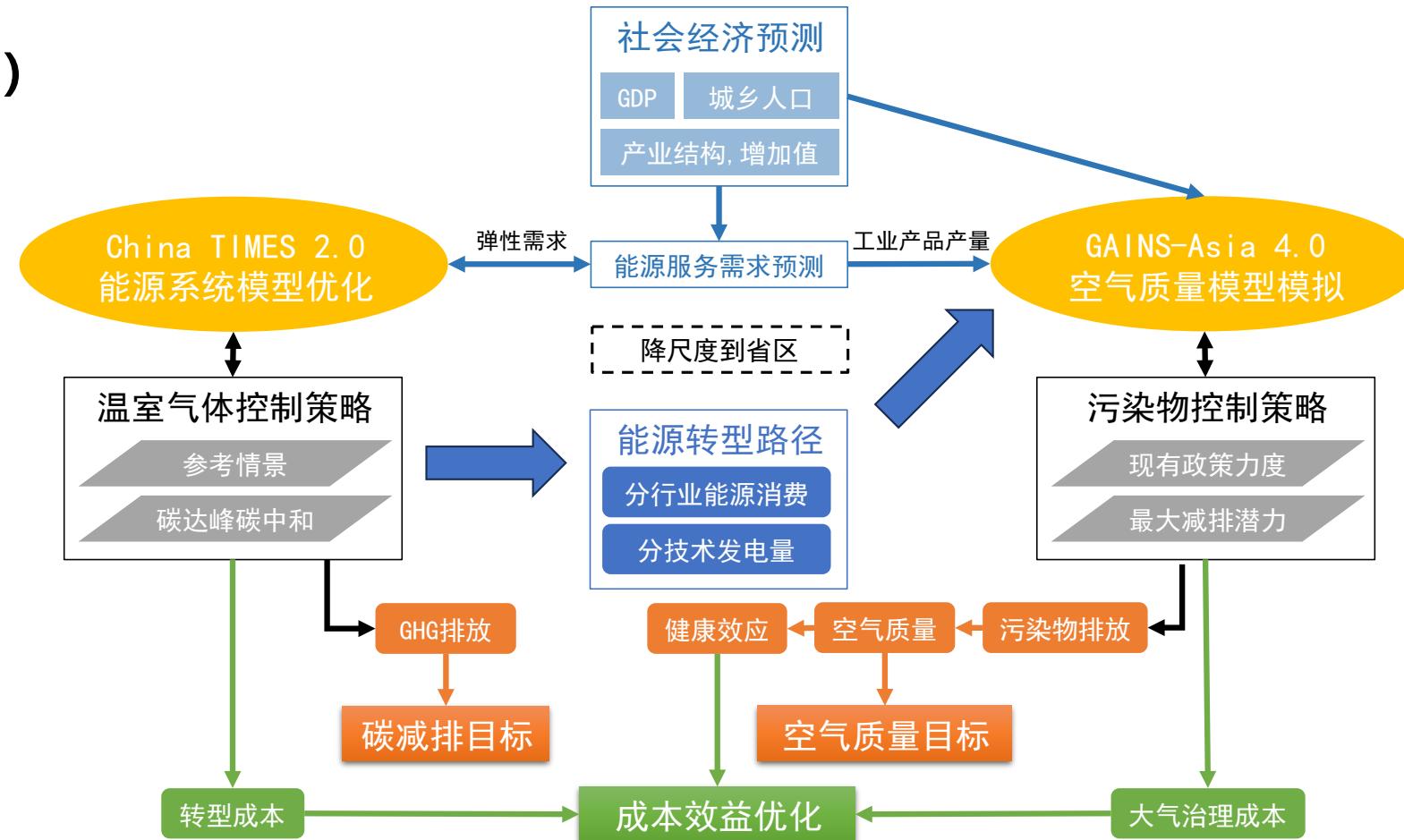
- 部分开源模型
- 模拟期1990-2050
- 0.5°精度的网格浓度数据

- 空气污染物和温室气体排放清单

- 包含电力、工业、交通、农业、建筑以及非能源等6个部门
- SO_2 、 NO_x 、 NH_3 、PM、VOC等5种大气污染物
- CO_2 、 CH_4 、 N_2O 以及含氟气体在内的温室气体

- 模型连接方法

- China TIMES 2.0利用分省区模型
China TIMES 30PE降尺度到省区



基于蒙特卡洛的不确定性情景生成模块LHS-MCA

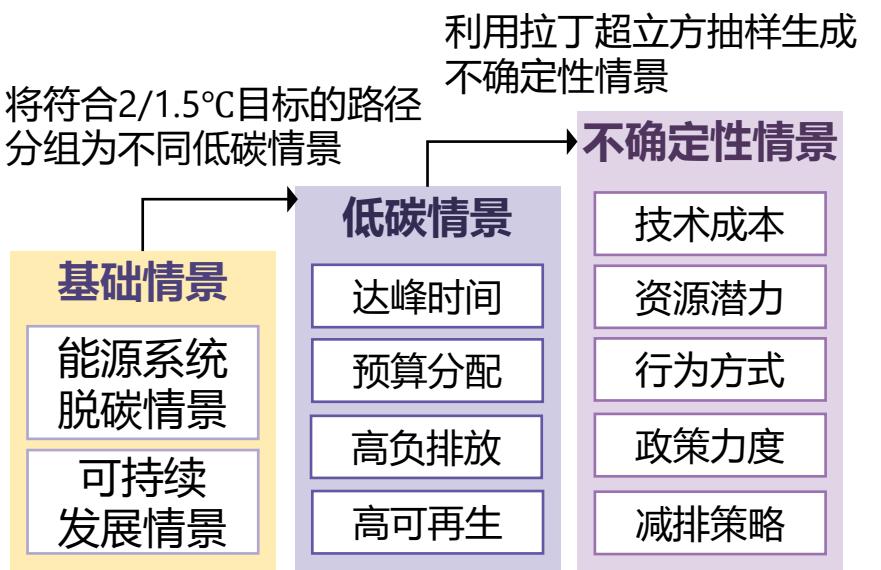
影响转型的因素识别和量化

情景分组: 将对路径影响最为明显的参数单独分组

因素识别: 选定对研究问题影响最大的变量组合

范围量化: 通过增长率/数值等方法约束不确定性

分布选择: 根据变量不确定性特征选择适当分布

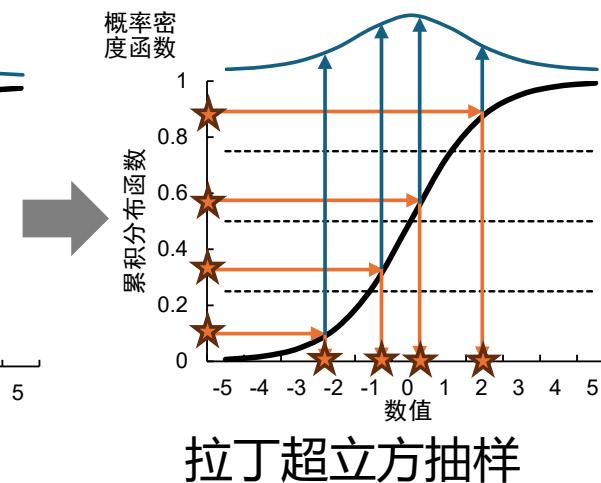
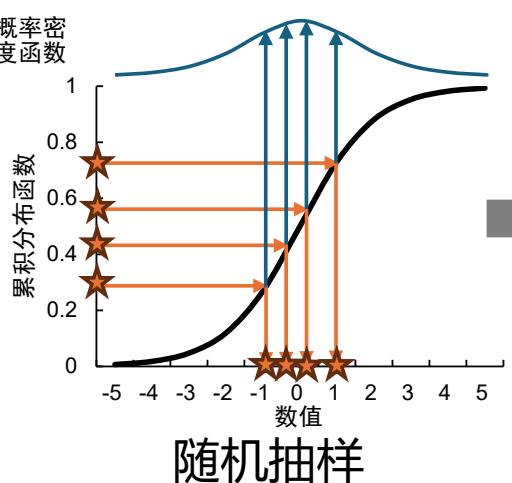


用拉丁超立方分层抽样替代随机抽样

随机抽样: 利用随机数, 从总体抽取样本的方法

拉丁超立方抽样: 近似于随机抽样的分层抽样方法

优势: 以较少的采样数量重建原始分布, 解决随机采样中出现的聚集问题, 确保低概率事件准确体现



多模型连接框架及情景设计

• 参考情景

包含2020年前发布的政策及更新NDC

- REF
- REF-SDG

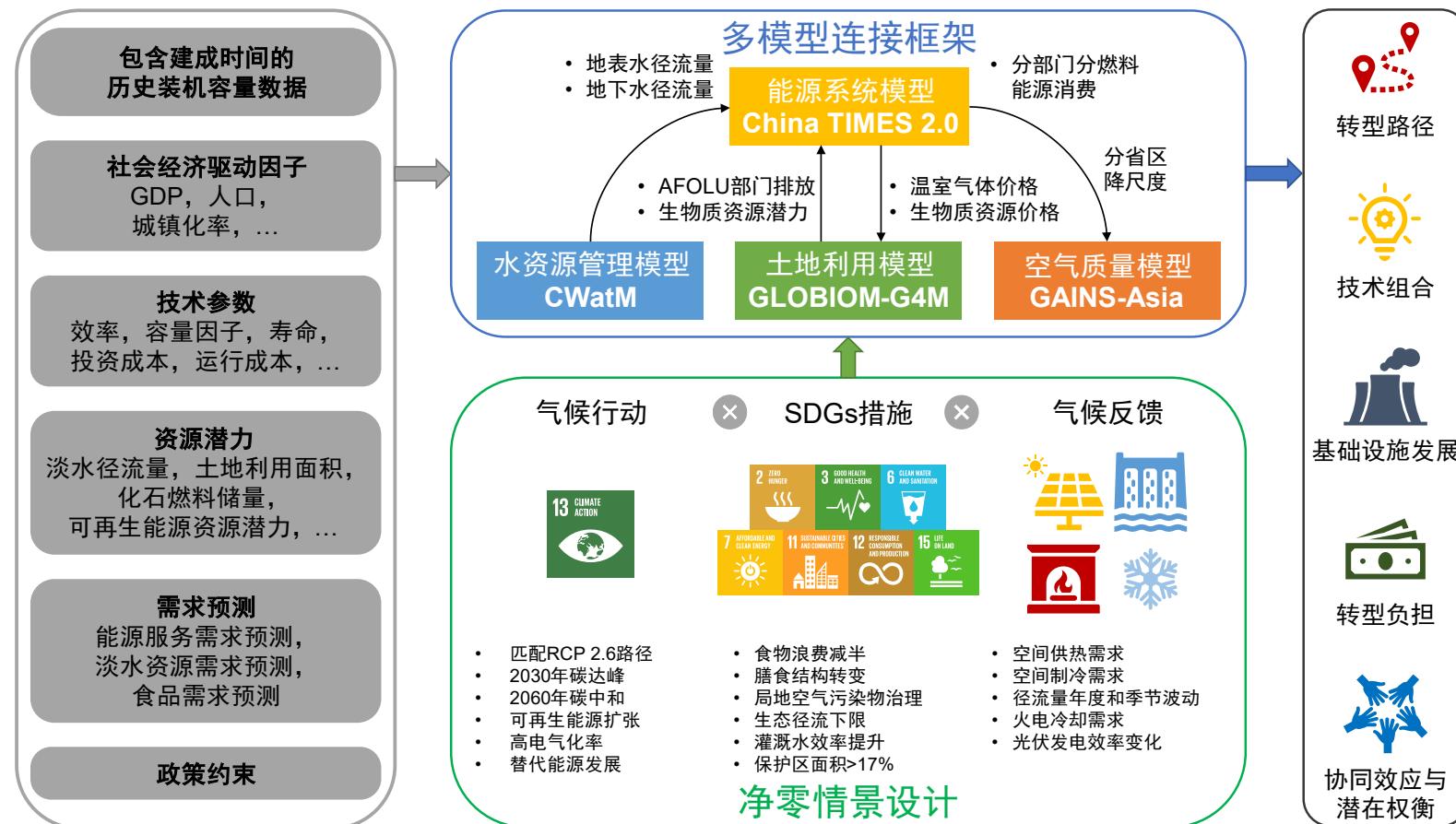
• 碳中和情景

2030年前遵循参考情景，2030年后快速减排
2060年实现二氧化碳中和
2020-2050累计碳排放限额为232.7GtCO₂

- CN60
- CN60-SDG
- CN60-LM (积极需求侧管理)
- CN60-noCF (移除气候反馈)

• 气候反馈

- 参考情景假设全球路径为AR6-C7 (RCP7.0)
- 碳中和情景假设全球路径为AR6-C3b (RCP2.6)



Part 03

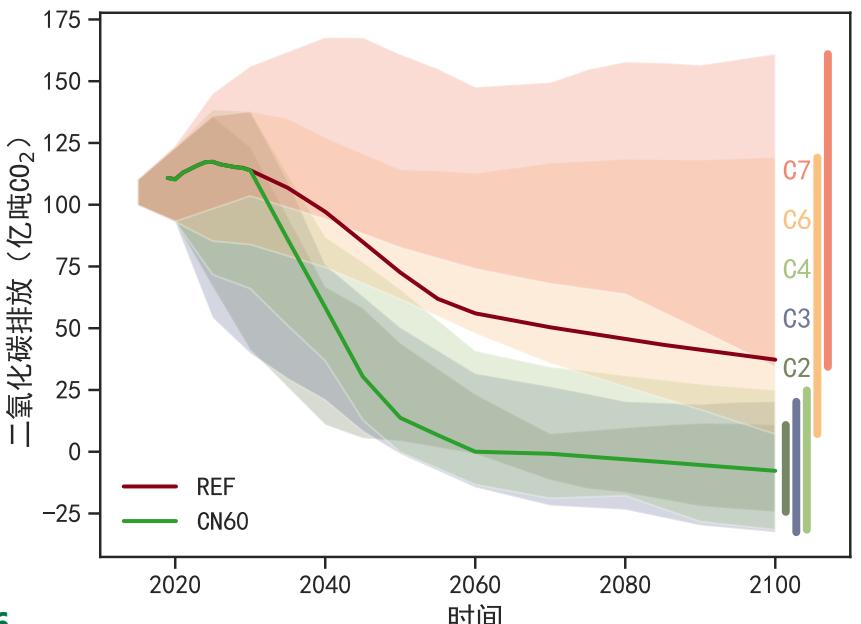
碳中和目标下中国能源 系统转型路径

本章节相关研究成果已发表于《Engineering》
China's Energy Transition Pathway in a Carbon Neutral Vision

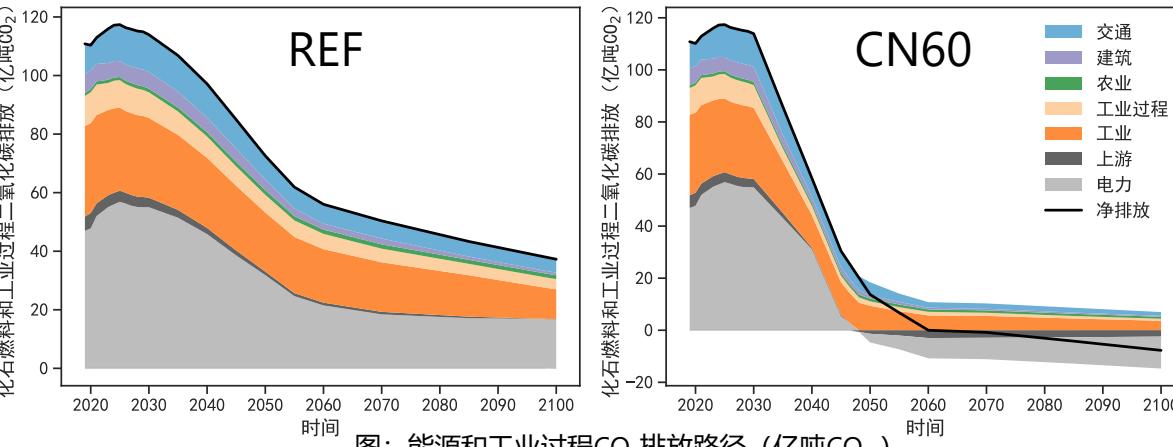


中国的碳中和目标富有雄心，符合1.5/2°C减排要求

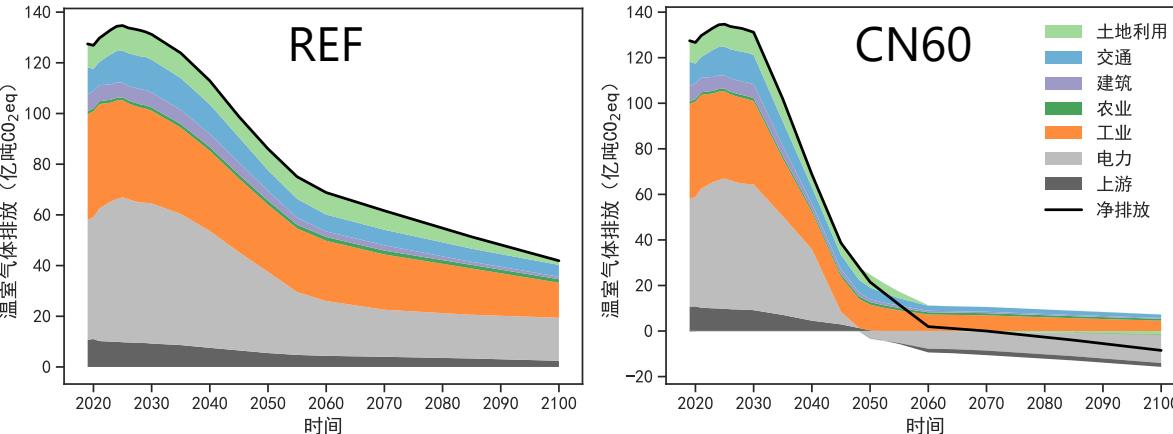
- 中国能源相关CO₂排放预计“十五五”前期达峰
- 电力部门在2050年提前中和，2060/2100贡献8/12亿吨负排放
- 森林碳汇在2060年后难以抵消剩余排放，其他碳移除技术使用不可或缺



能源和工业过程CO₂2060年中和



主要温室气体 (CO₂, CH₄, N₂O) 2070年中和

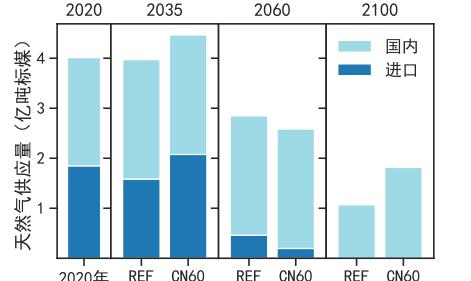
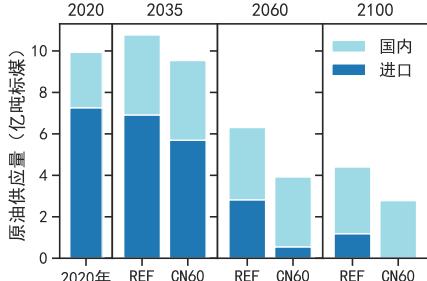


能源系统低碳转型巩固能源供应安全

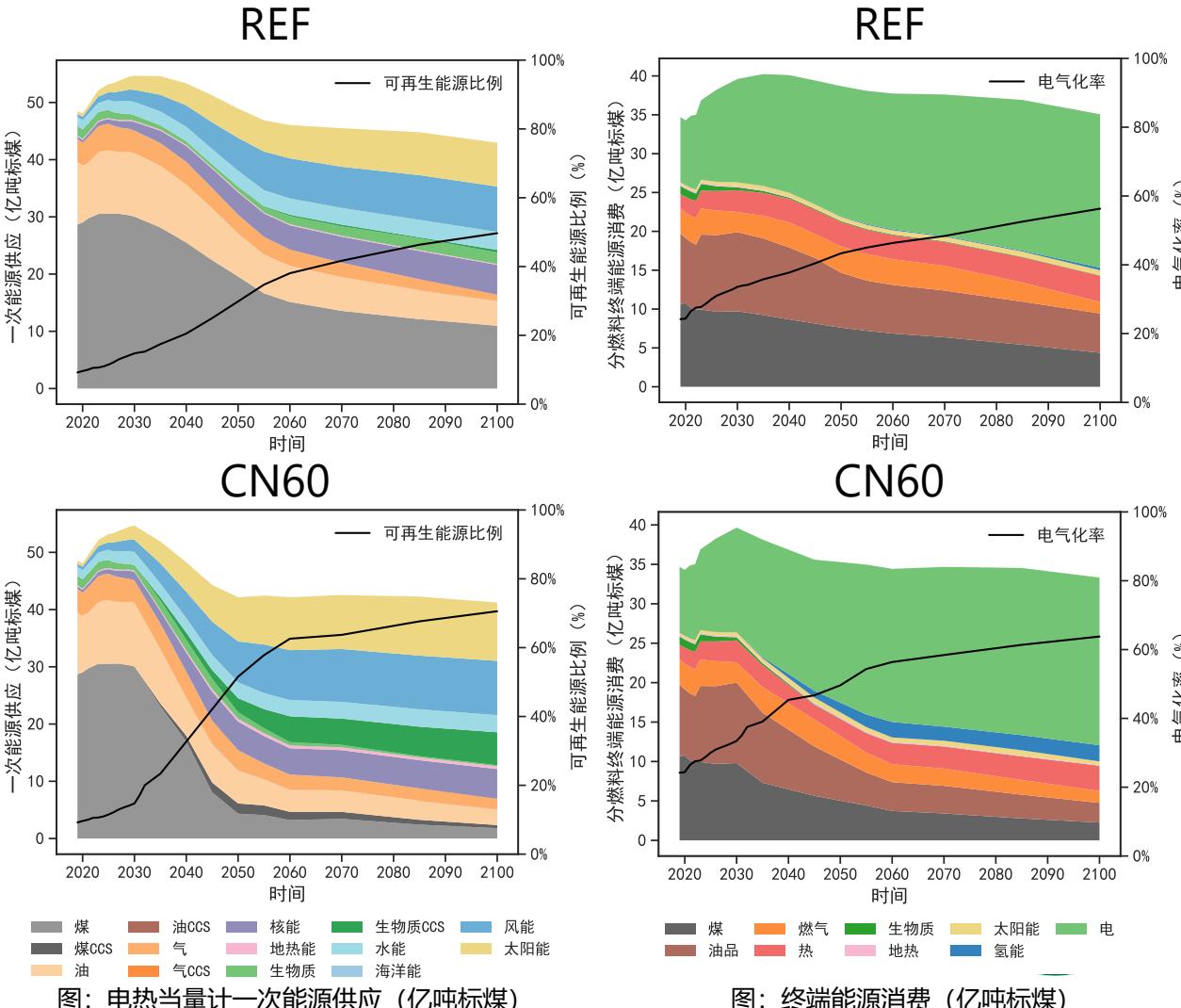
- 一次能源和终端能源在2030年左右达峰，
2030年分别为55亿tce / 40亿tce
2060年分别为42亿tce / 35亿tce

2060年

- 一次能源可再生能源占比10%上升至63%
- 终端能源电气化率23%上升至56%
- 氢能占终端用能比重约7%
- 基本实现油气自给自足



2024/5/16 图：原油进口和国内生产量 (亿吨标煤) 图：天然气进口和国内生产量 (亿吨标煤)

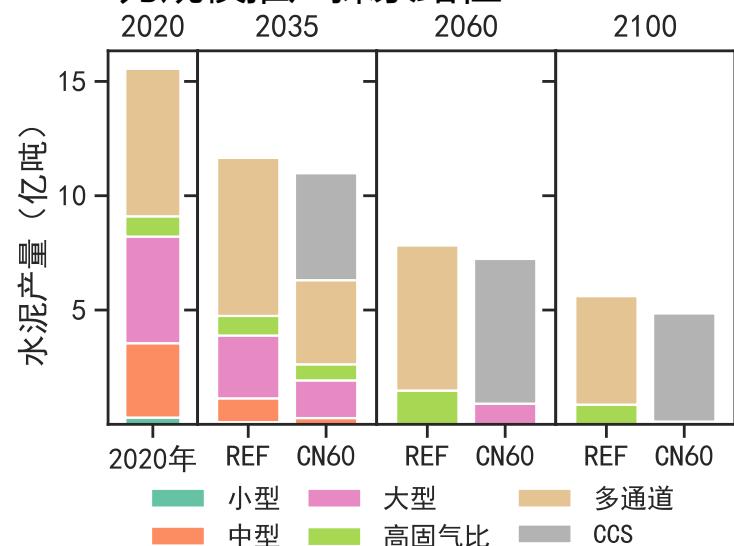


碳捕集与封存技术在碳中和进程中发挥独特作用

技术验证期

2020-2035

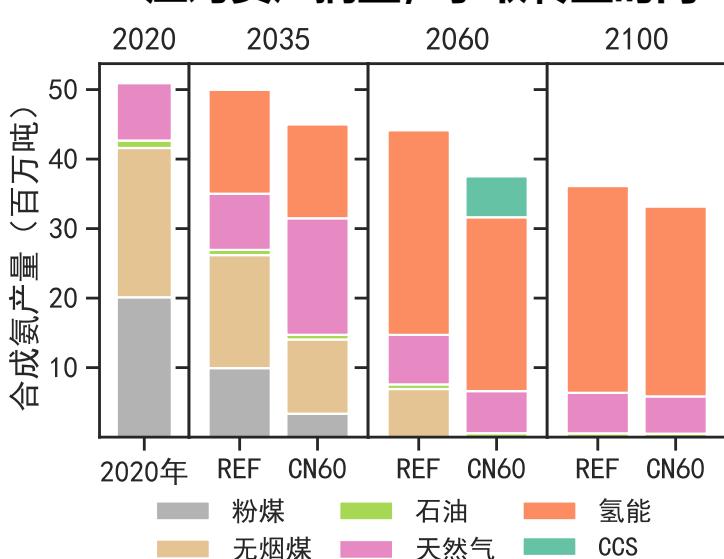
- 在**电力、钢铁、水泥行业部署**
- 捕集量约3亿吨CO₂
- 为规模推广探索路径



系统转型权宜期

2035-2060

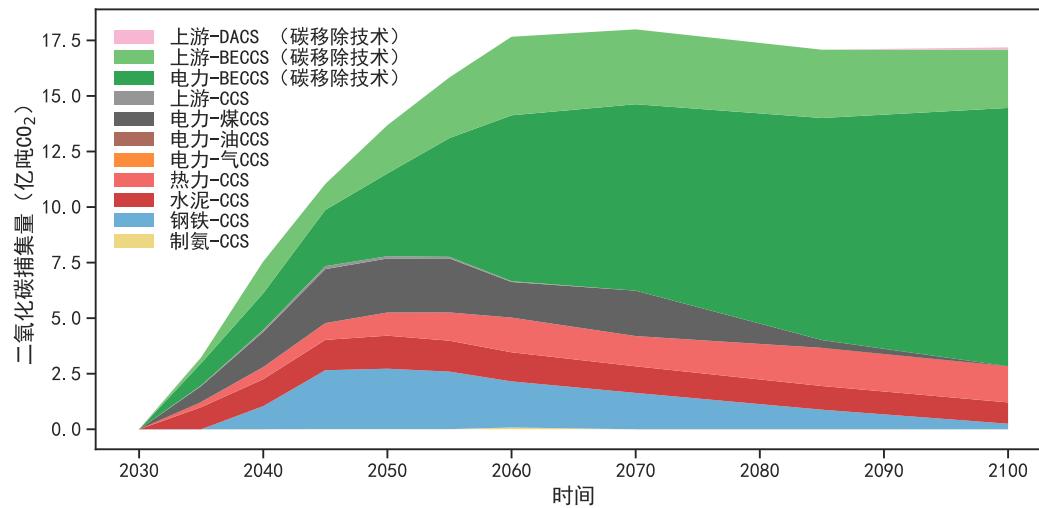
- 负排放比重提升至60%以上
- 捕集量约17亿吨CO₂
- **应对资产搁置，争取转型时间**



负排放贡献期

2060-2100

- 负排放比重增长到80%以上
- **捕集量约17亿吨**
- 基于技术的负排放解决方案



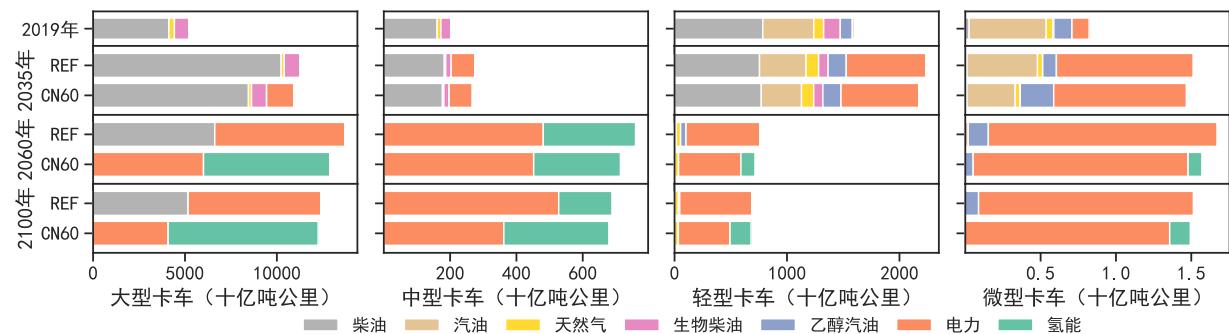
绿氢成为化工、钢铁、重卡、航空的脱碳抓手

• 氢能生产

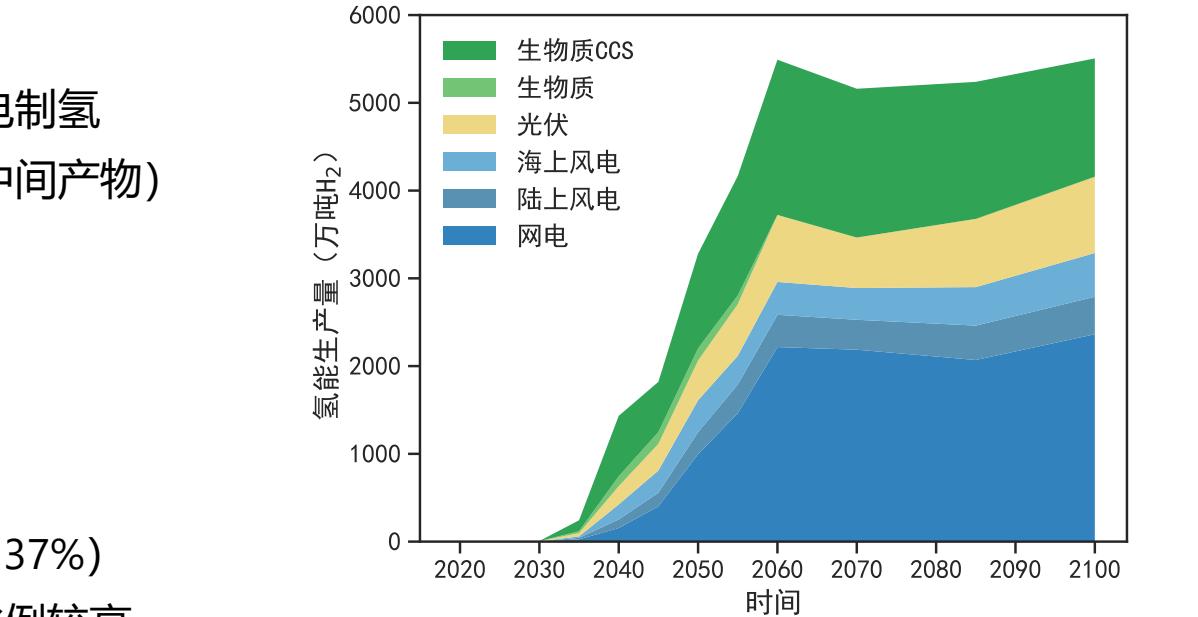
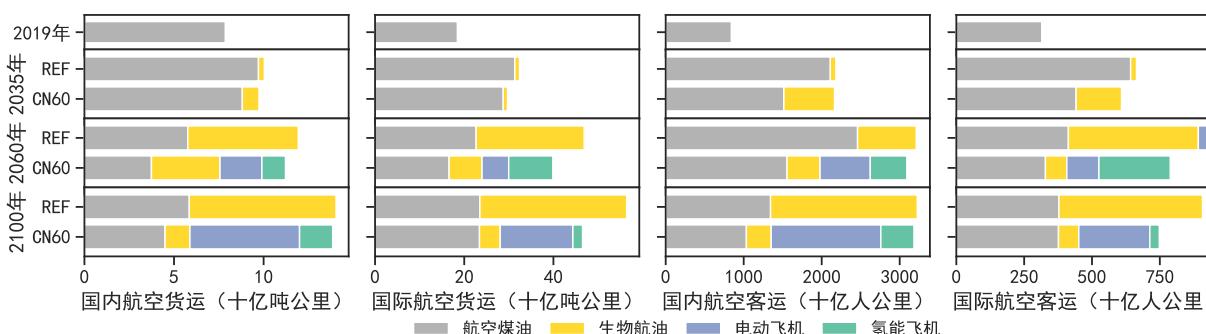
- 2030年后产量快速提高，2040年后绝大部分为绿氢和网电制氢
- 2060年绿氢和网电制氢生产约5500万吨（不计工业环节中间产物）
- 离网可再生能源制氢占比在25%左右
- 氢能BECCS占比近30%，成为负排放重要来源

• 氢能消费

- 氢能首先在合成氨、炼油等环节替代现有煤基燃料
- 2060年氢能道路交通内快速渗透，重卡（53%）、中卡（37%）
- 2060年，氢能占航空周转量19%，国内航空和客运航空比例较高



图：货运道路交通周转量 (十亿吨公里)

注：不考虑现有工业环节氢气中间产物消费
图：CN60情景绿氢和网电制氢生产量 (万吨氢气)

图：航空运输周转量 (十亿吨公里)

高比例可再生能源接入带来海量储能需求

• 发电量 (8900TWh→17640TWh)

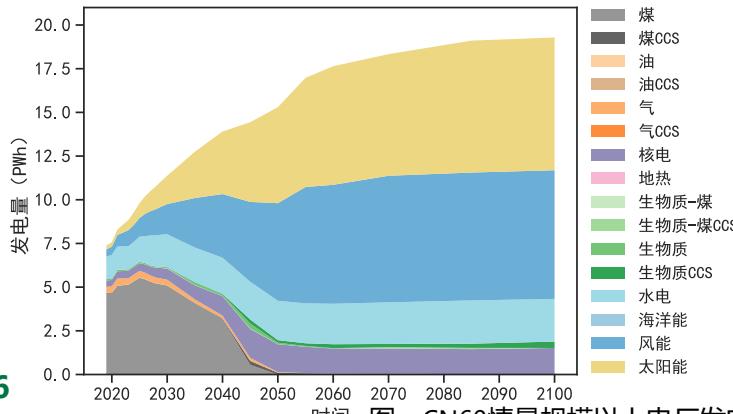
- 2030年煤电占比低于50%
- 2050年无CCS的煤电基本退役
- 2050年时变可再生能源比例达到72%并稳定在70-75%

• 电池储能 (单位GWh)

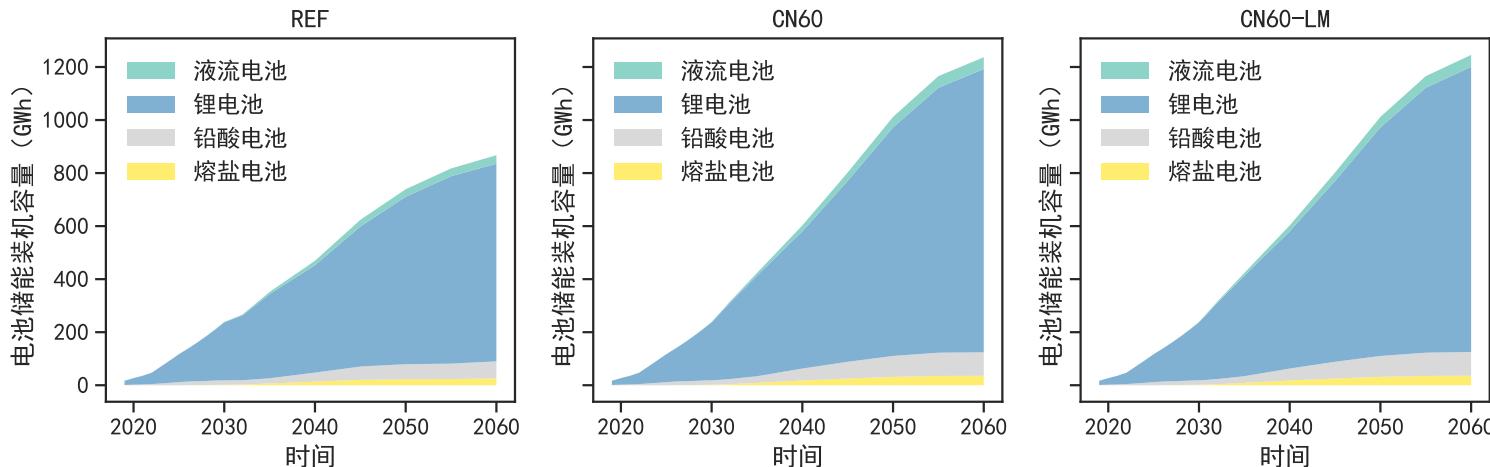
- 锂电池占85%，2060年达到**1068GWh**
- 需求侧管理影响不大 (↓1.5%)

• 机械和电磁储能 (单位GW)

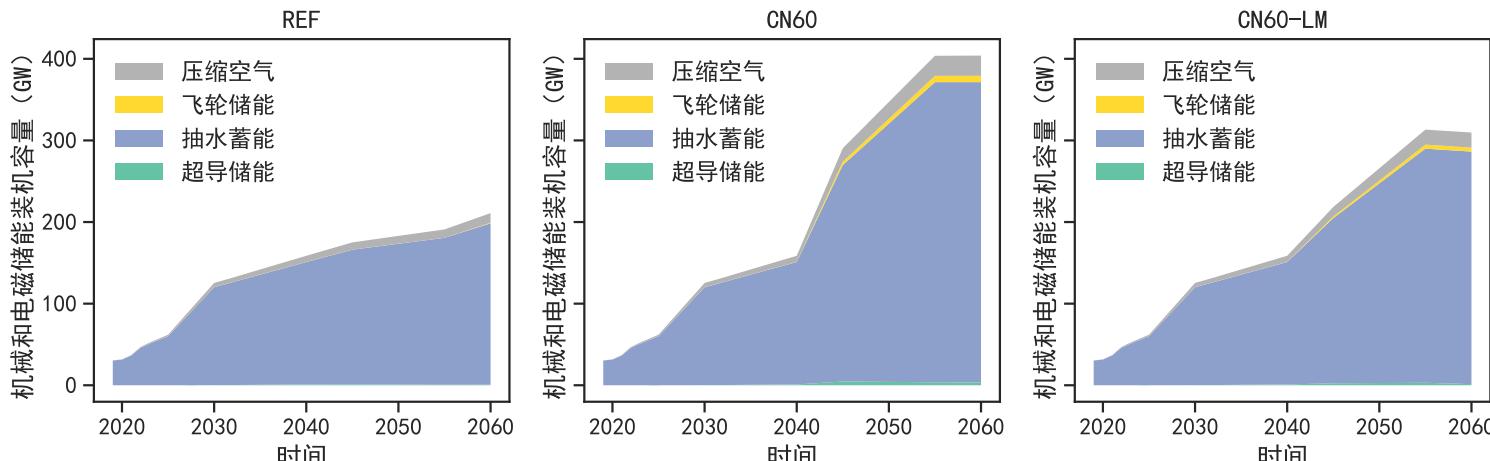
- 抽水蓄能占90%，2060达到**368GW**
- 需求侧管理显著减少需求到**287GW**



图：CN60情景规模以上电厂发电量 (PWh)



图：电池储能装机容量 (GWh)

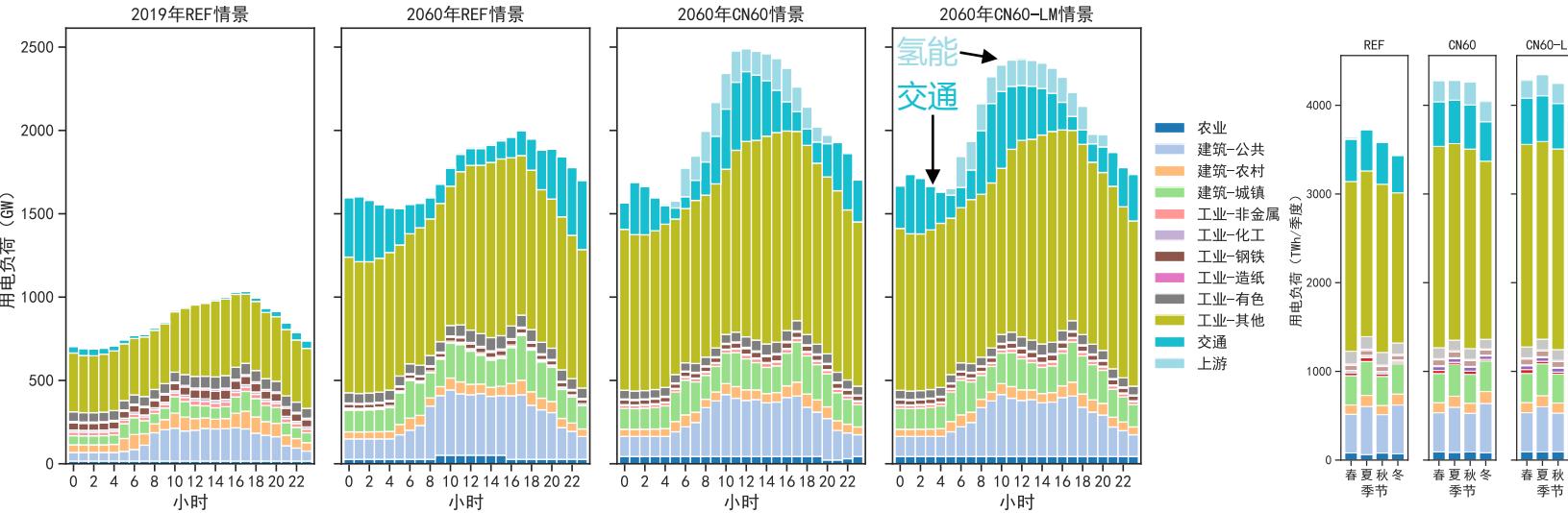


图：机械和电磁储能装机容量 (GW)

碳中和转型要求能源系统供需互动更加灵活

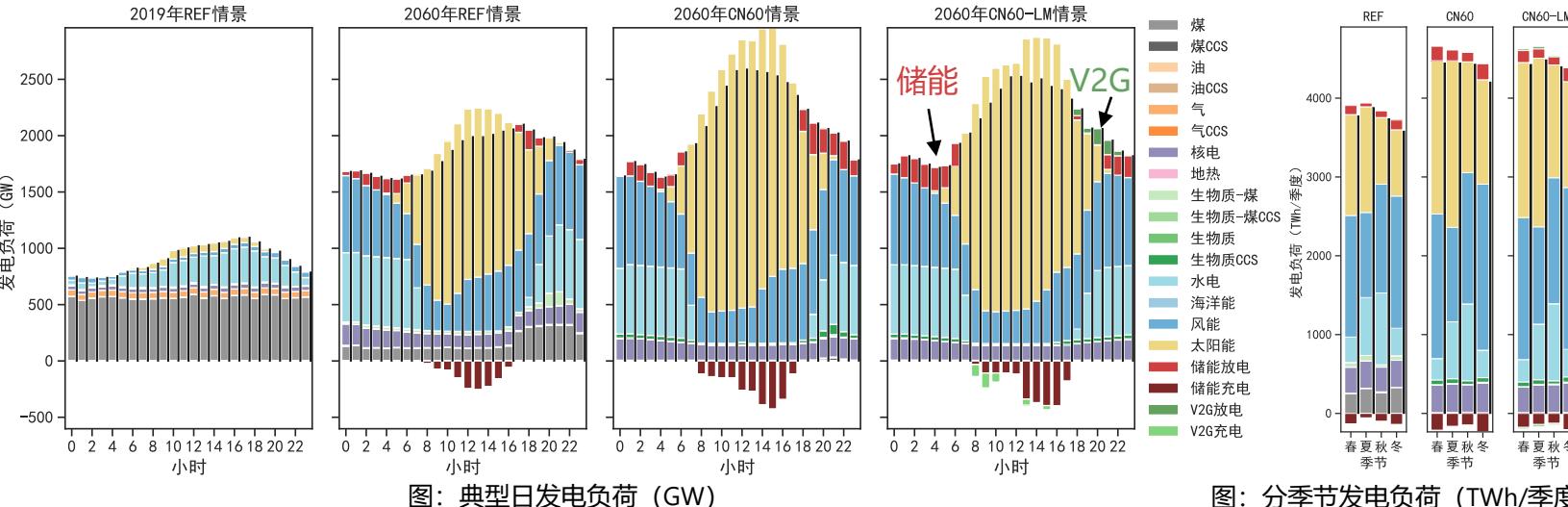
- 深度电气化带来电力负荷曲线发生明显转变**

- 形态：昼高夜低单峰→日夜双峰
- 最大用电负荷 $1.3\text{TW} \rightarrow 2.4\text{TW}$
- 交通充电模式影响系统负荷波动
- 有序网电制氢帮助消纳光伏电量



- 可再生能源为主体的系统灵活性成为稀缺资源**

- 水电是夏秋季主要调节电源
- 化学电池承接削峰填谷作用
- 需求侧响应支持爬坡和尖峰负荷
- 源随荷动→源荷互动**



储能和需求侧管理措施有效应对系统灵活性挑战

• 氢能

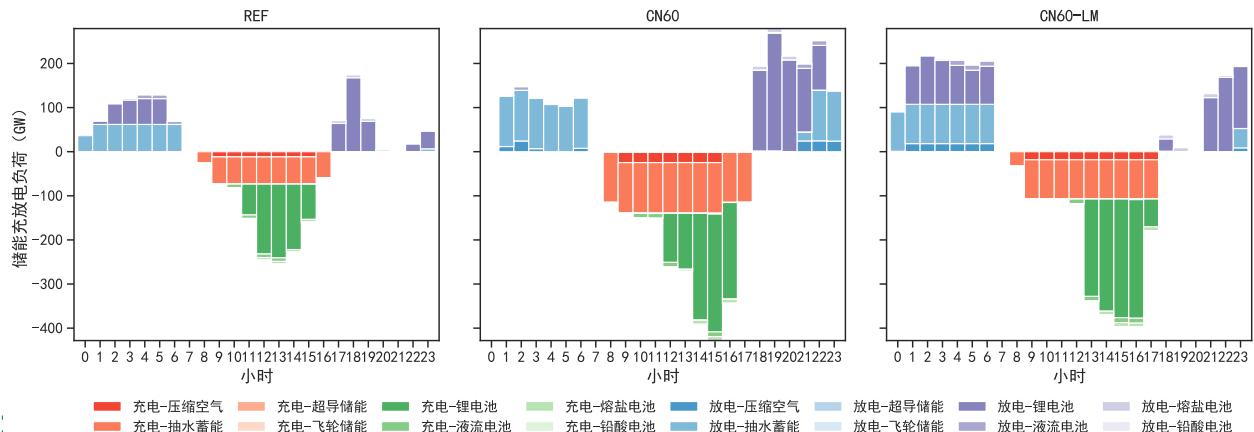
- 资源集约:** 有序氢能生产充分利用可再生能源制氢
- 日内储能:** 日间生产的氢能大规模储存到夜间使用
- 跨季节储能:** 春秋季氢能存储可供夏冬季使用

• 电储能

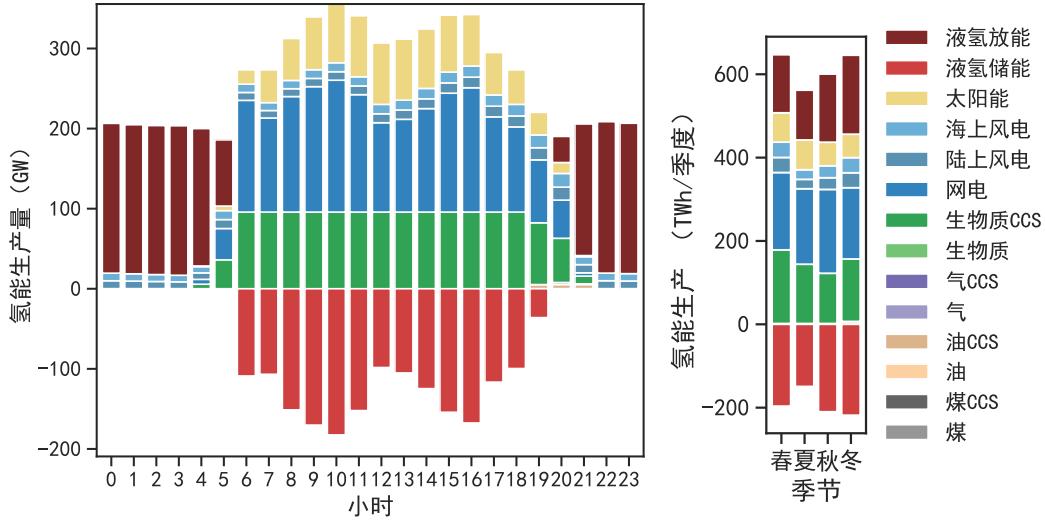
- 抽水蓄能和压缩空气储能贡献昼夜储能** (>5小时转移)
- 锂电池储能满足14%高峰负荷** (20-24时) 和**负荷爬坡支持**

• 需求侧管理 (V2G、负荷时移等措施)

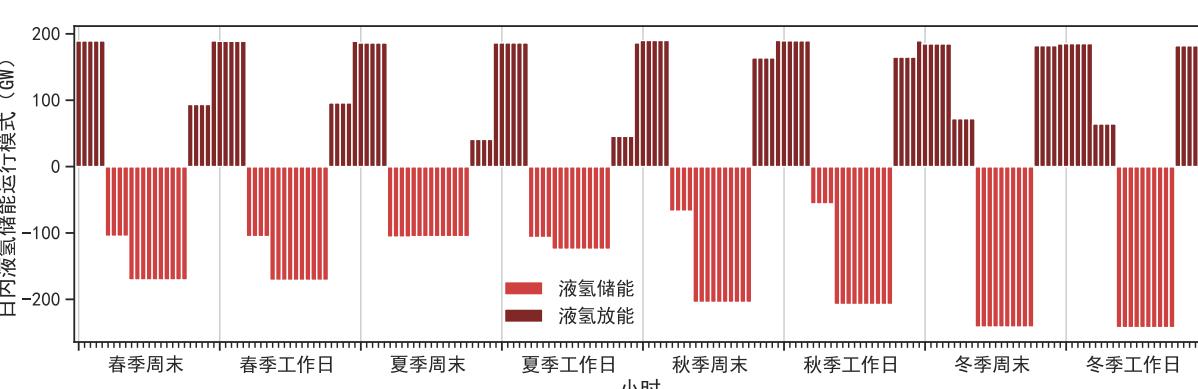
- 负荷尖峰和爬坡时段提供8%功率支持**, 替代抽水蓄能



图：储能系统充放电负荷 (GW)



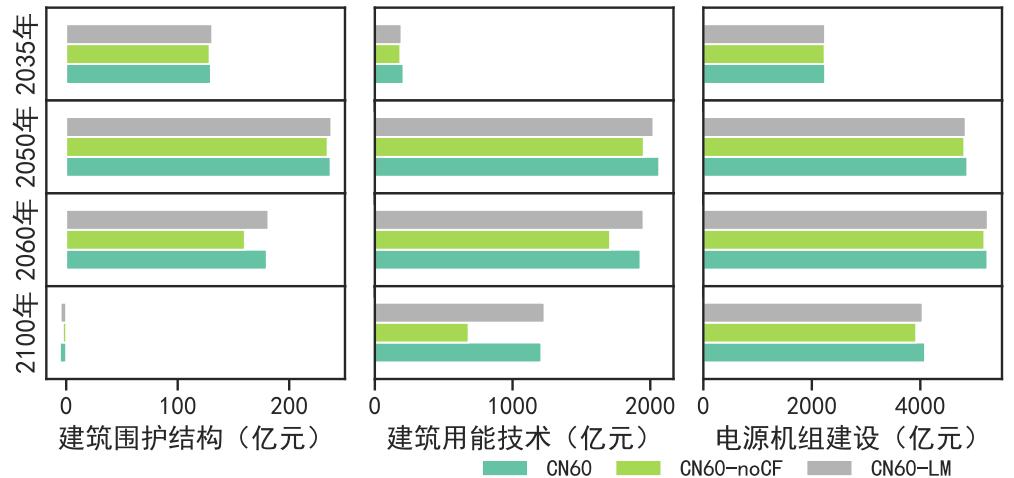
图：CN60情景典型日氢能生产 (GW) 图：CN60情景分季节氢能生产 (TWh/季节)



图：CN60情景分季节份工作日氢能储能活动量 (GW)

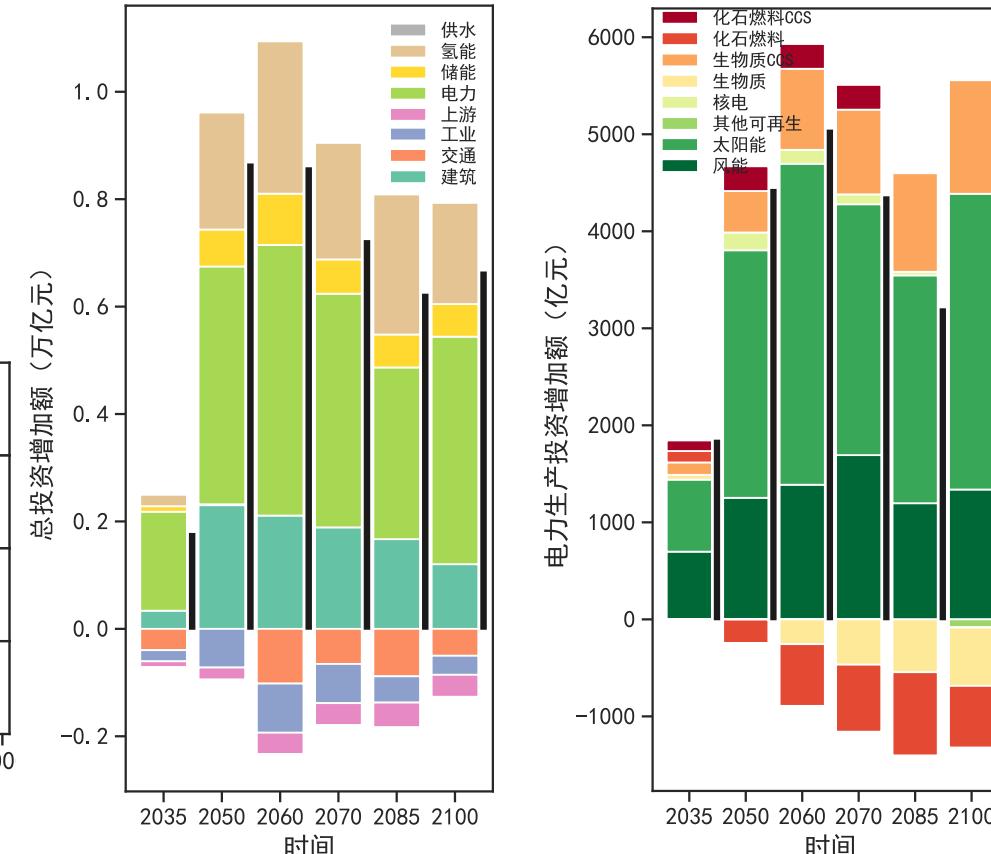
能源转型带动62万亿能源供应部门新增投资

- 较REF情景，2019-2060年能源转型带动62万亿能源供应部门新增投资，80%集中于电源机组建设
- 2050年，V2G激励成本约**50亿元**，节约**200亿元**电力建设成本，其他措施收益成本比**超过3倍**
- 对比有无气候反馈情景，**气候变化反馈使得2060年**
 - 建筑空间制冷技术投资年均上升220亿元
 - 光伏和火电成本上升约1%
 - 水电年出力上升3%，但季节波动扩大
 - 电储能投资增加2.4%



2024/5/16

图：核心情景、无气候反馈情景、需求侧管理情景建筑和电力部门年均投资需求（亿元）



图：CN60较REF年均投资增额（万亿元） 图：CN60较REF年均电源投资增额（亿元）

Part 04

中国能—粮—水—空气质量 协同转型路径



本章节相关研究成果已被《Nature Sustainability》原则性接收

Targeting net-zero emissions in China without neglecting efforts
towards other sustainable development goals

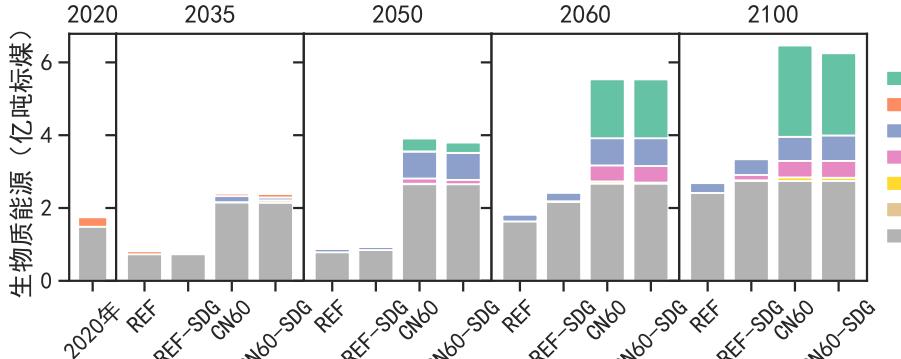
森林面积逐步提高，生物质生产要求能源作物种植

• 土地利用类型

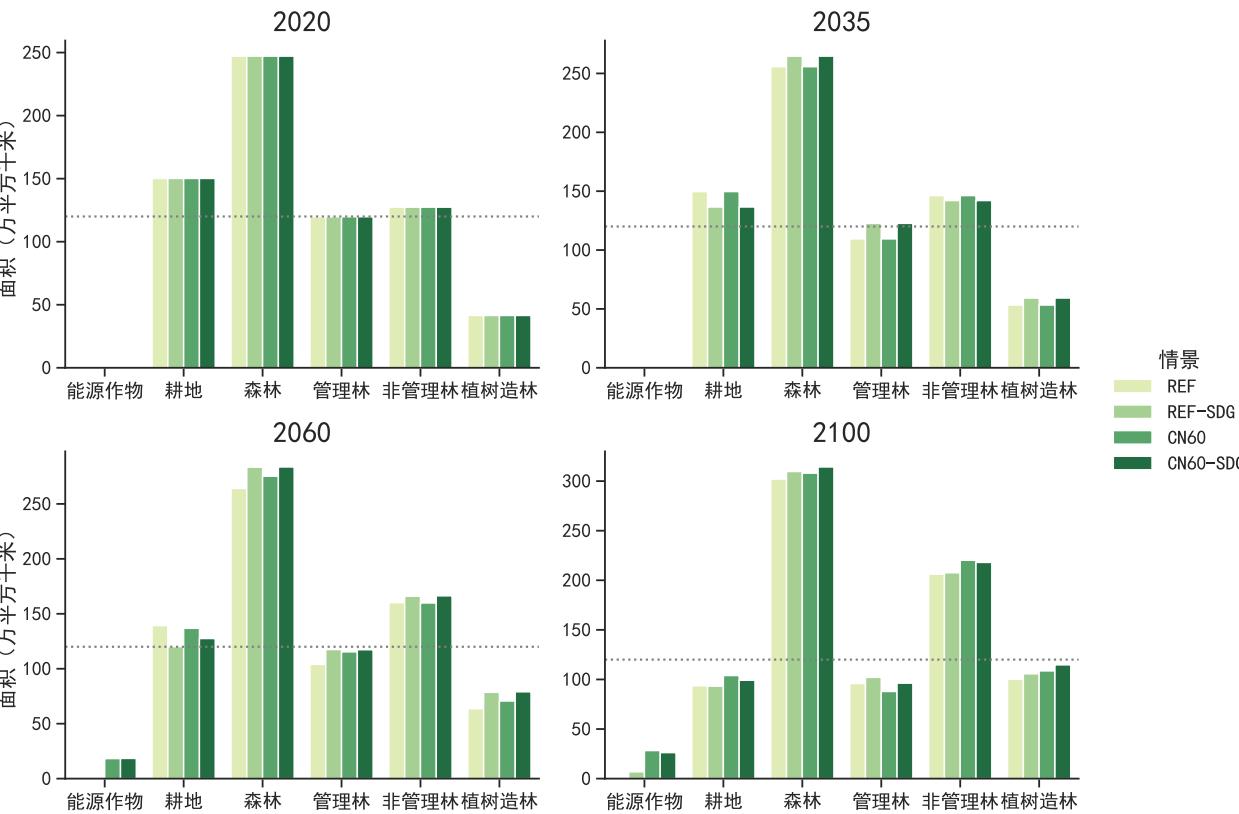
- 2060年森林面积较2020年扩大11.3%
 - 能源作物2060年开始种植，~18万km²
 - 人均耕地面积保持稳定
- 国土面积1.9%

• 生物质能生产

- 2050年以前主要依靠农林剩余
- 2060年后生物质能快速发展，达5.5亿tce
- 2100年能源作物占比达到39%



图：生物质能供应（亿吨标煤）



图：土地利用类型面积（万km²）



膳食结构调整平抑农产品价格波动，巩固粮食安全

当前膳食能量摄入

- 人均每日能量摄入为2700kcal
- 23%能量来自动物性食物

若延续当前膳食方式趋势

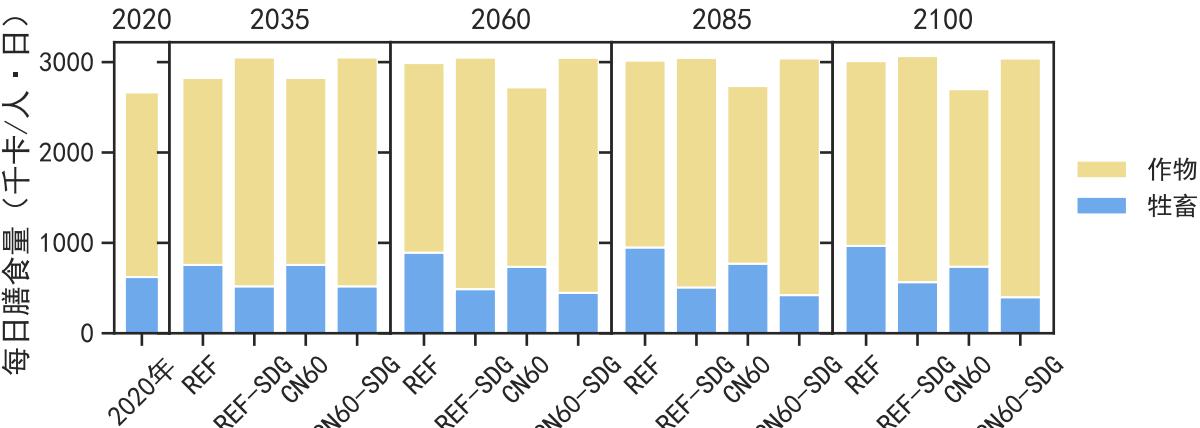
- 人均每日能量摄入为3000kcal
- 动物性食物摄入将增长41%
- 增加GHG排放，饲料挤出粮食生产

考虑可持续的粮食需求

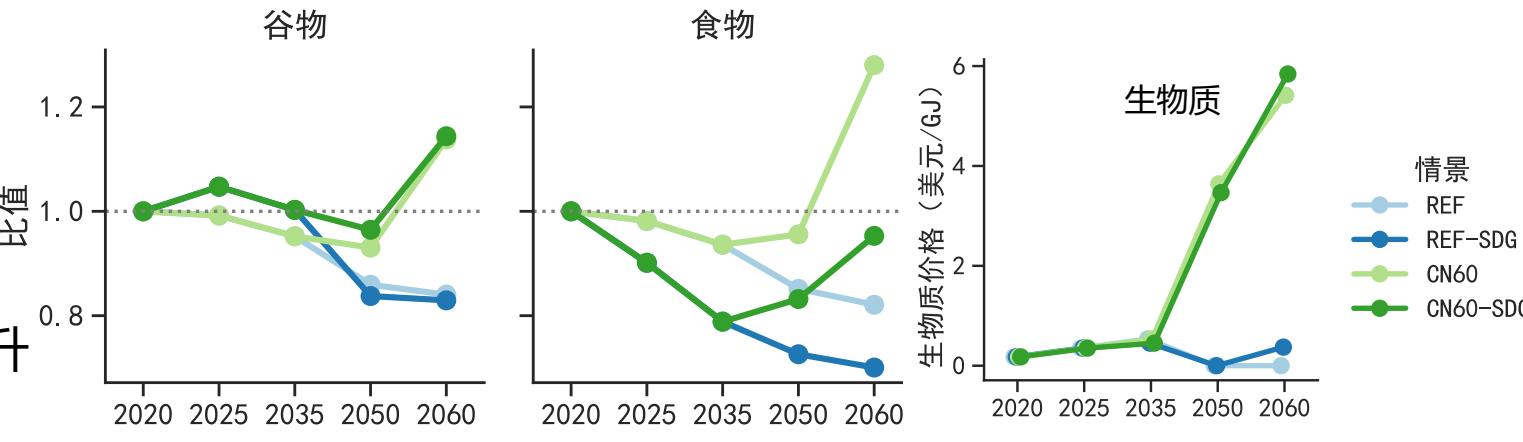
- 维持3000kcal的能量摄入
- 食品浪费减半
- 减少动物性食物占比为15%

农产品价格

- 由于BECCS需求，2035后价格上升
- SDG措施下，食品价格低于当前
- 生物质价格2050年后超过5美元/GJ



图：人均每日膳食能量摄入 (kcal/人·日)



图：农产品和生物质能价格 (指数)

电力冷却取水快速下降，节水灌溉助力取水量下降

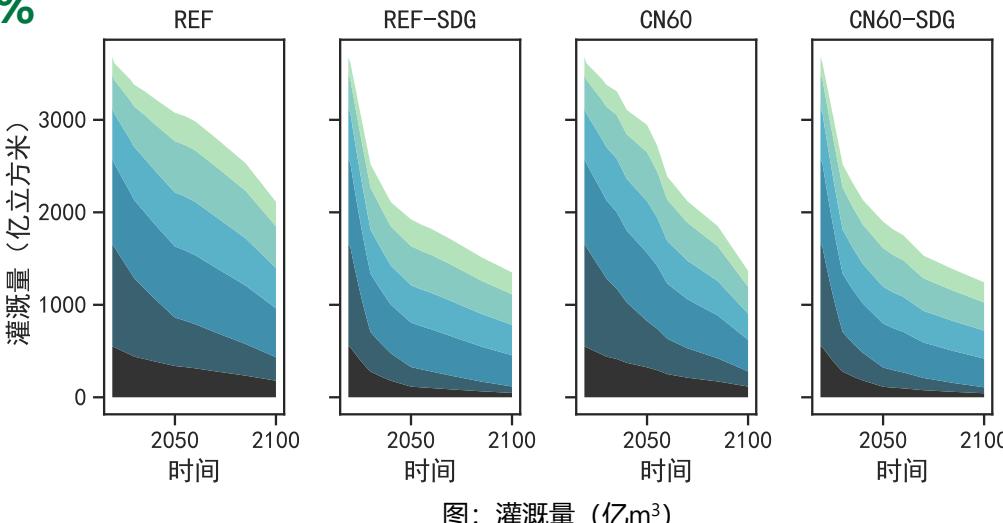
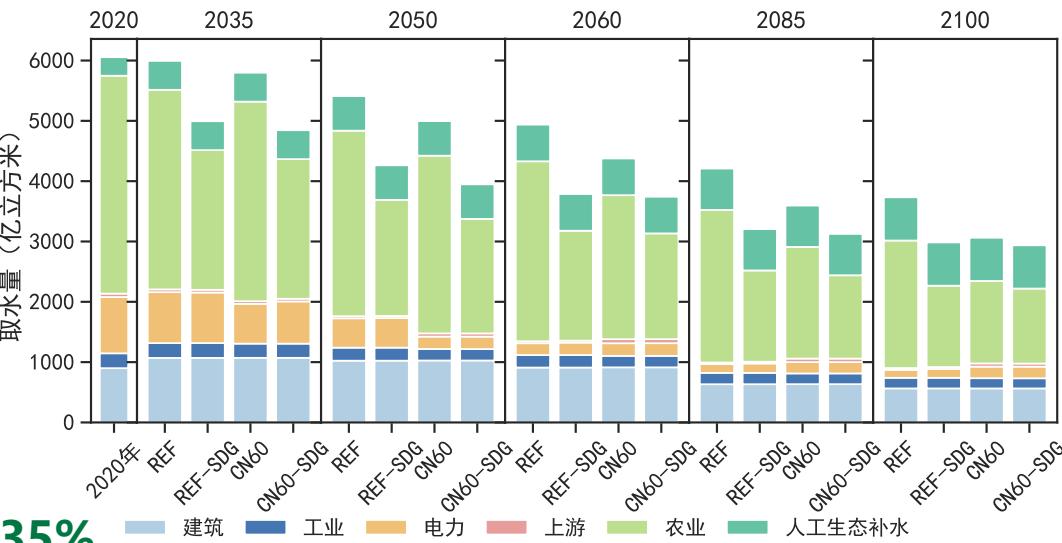
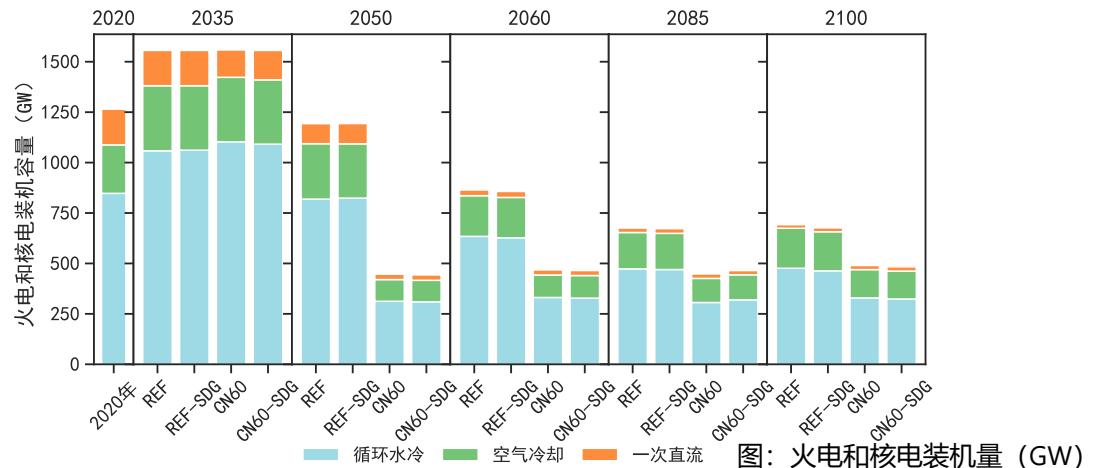
• 电力部门取水量

- 能源系统最大取水部门，2019年用水946亿m³
- 2050年取水205亿m³，后因BECCS建设而停止下降
- 2060年空冷机组比例由18%扩大到24%

• 农业部门取水量

较2019年下降78%

- 最大取水部门（61%），2019年取水3682亿m³
- 低效灌溉**（漫灌、渠灌）占比高达45%
- 2060年**低效灌溉<27%**，取水2387亿m³ 较2019年下降35%
- SDG情景灌溉效率提高，取水1753亿m³ 较2019年下降52%



碳中和转型有望缓解地下水超采问题

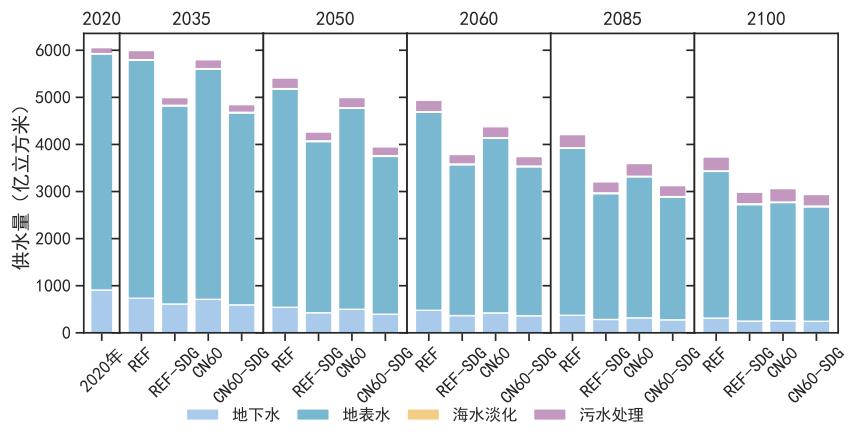
• 供水量变化趋势

- 未来10年供水量均在6100亿m³左右
- 2060年, CN60情景下降到4376亿m³ 较2019年下降28%
CN60-SDG情景下降到3742亿m³ 较2019年下降38%

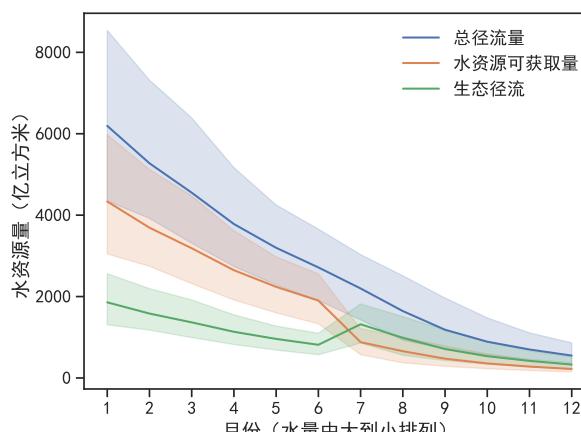
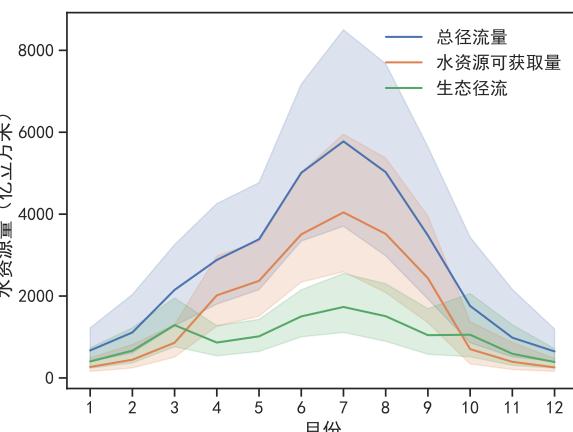
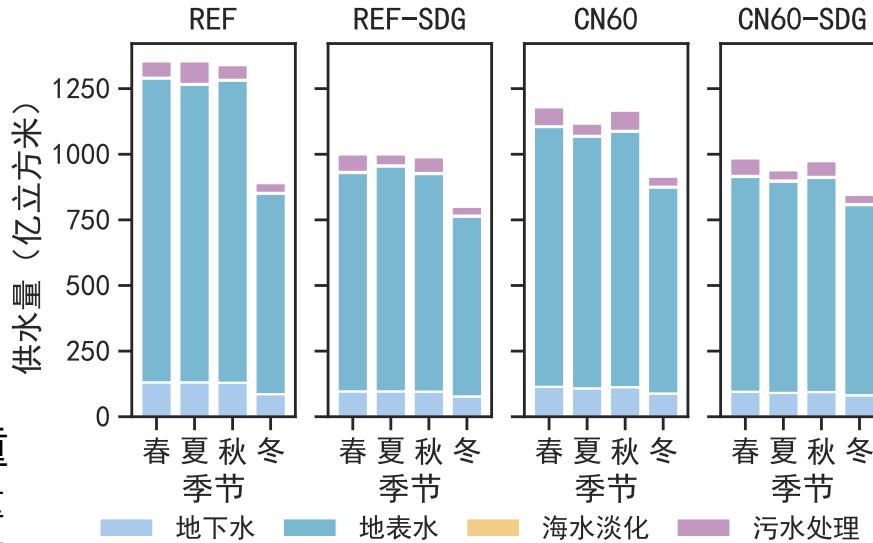
• 地下水超采问题 (红线: 800亿m³)

- 2019年: 902亿m³
- CN60情景**2030年**789亿m³
- CN60-SDG情景**2025年**799亿m³ **提前五年**

• 污水从当前占总供水的2%提高到2100年的9%

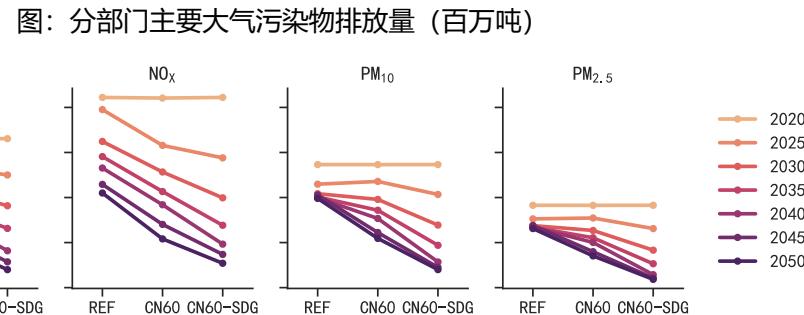
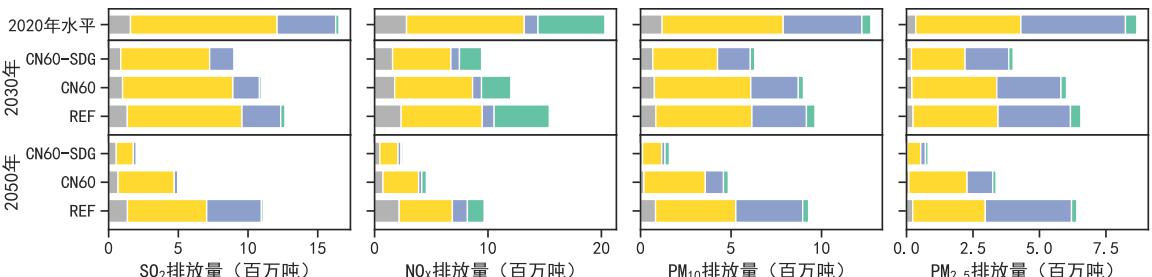


Pastor方法确定
生态径流保留权重
丰水期：30%流量
枯水期：60%流量

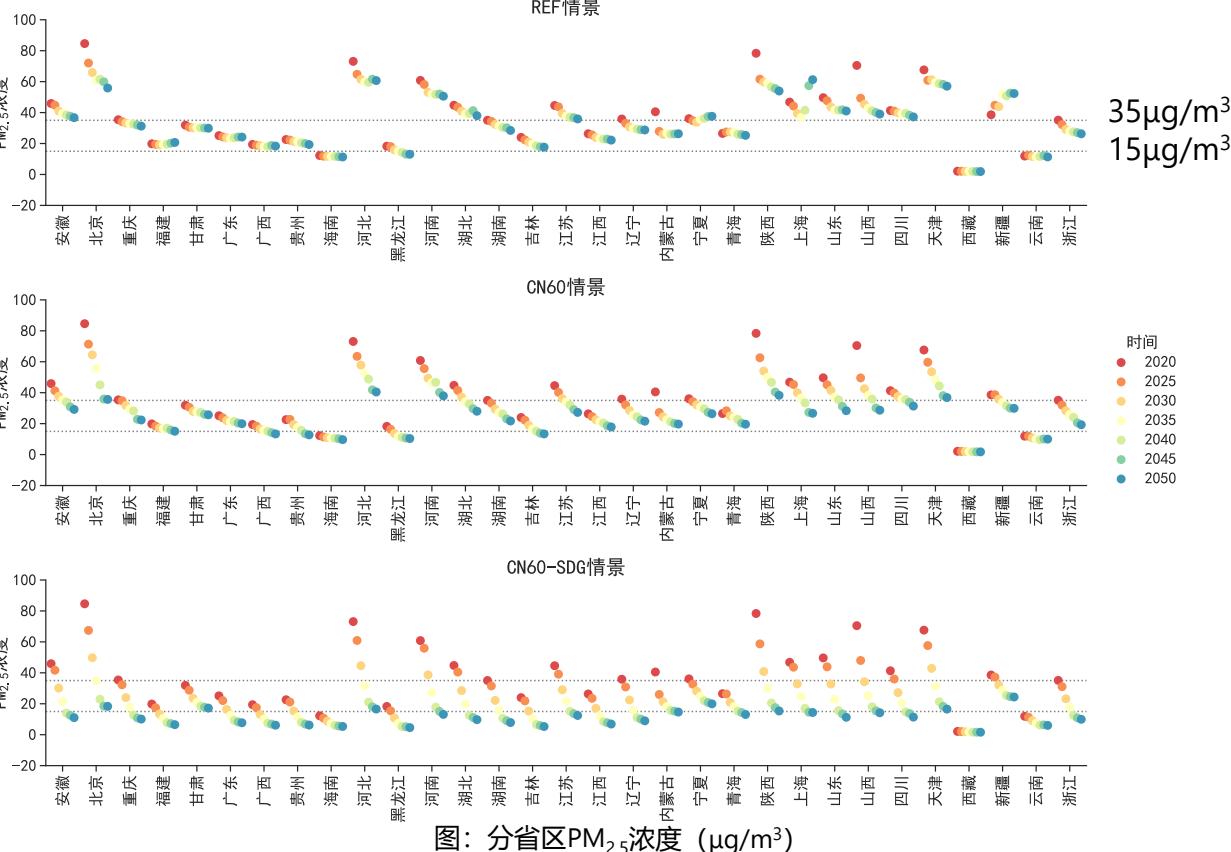


转型对空气质量协同明显，但需强化末端治理措施

- 实现碳达峰，污染物较2020年下降30%
- 实现碳中和，污染物较2020年下降65%
- 工业部门是最大排放源，减排潜力最大
- 协同集中于电力、工业、交通部门，建筑部门为主的PM排放仍需针对性治理措施

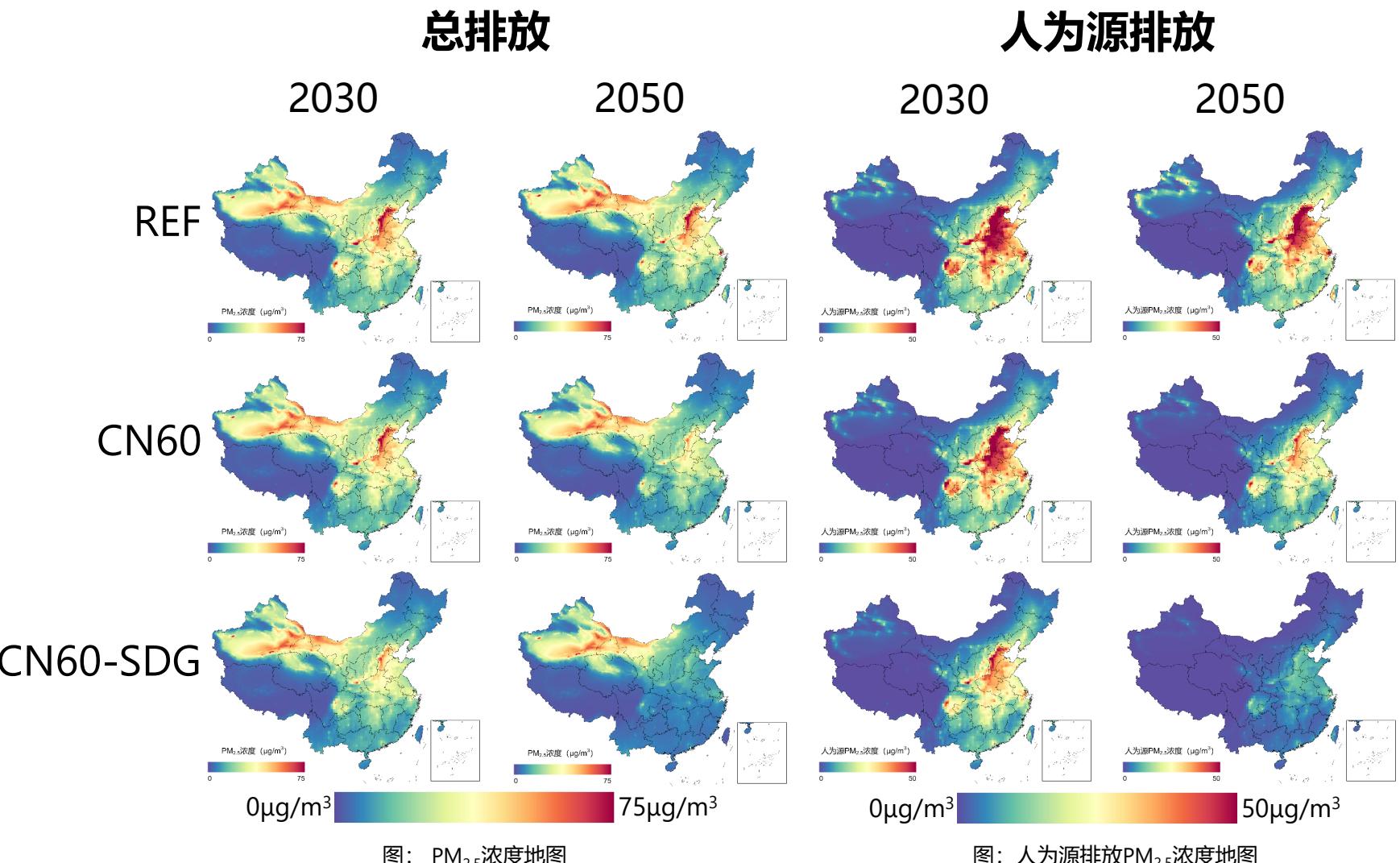


省区数量 内地31省区	2020		2030		2050	
	REF	CN60	+SDG	CN60	+SDG	
二级<35μg/m ³	12/39%	18/58%	26/84%	26/84%	31/100%	
一级<15μg/m ³	3/10%	4/13%	6/19%	7/23%	24/77%	



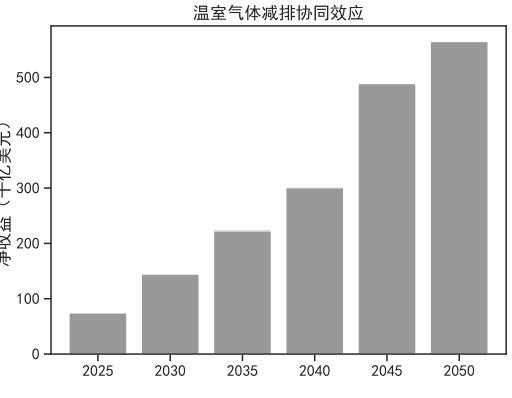
人为源是PM_{2.5}主要来源，未来需重视自然源治理

- 京津冀、长三角、成渝、西北地区空气质量较差
- 能源转型华北地区PM_{2.5}浓度下降最为明显
- 人为源是东部地区PM_{2.5}污染主要因素，西部地区受到自然源影响较大

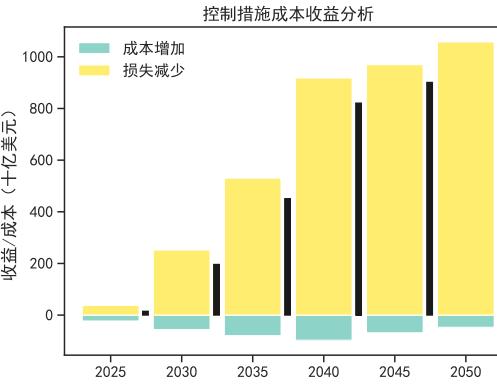


碳中和带来2万亿健康收益，强化治理成本效益显著

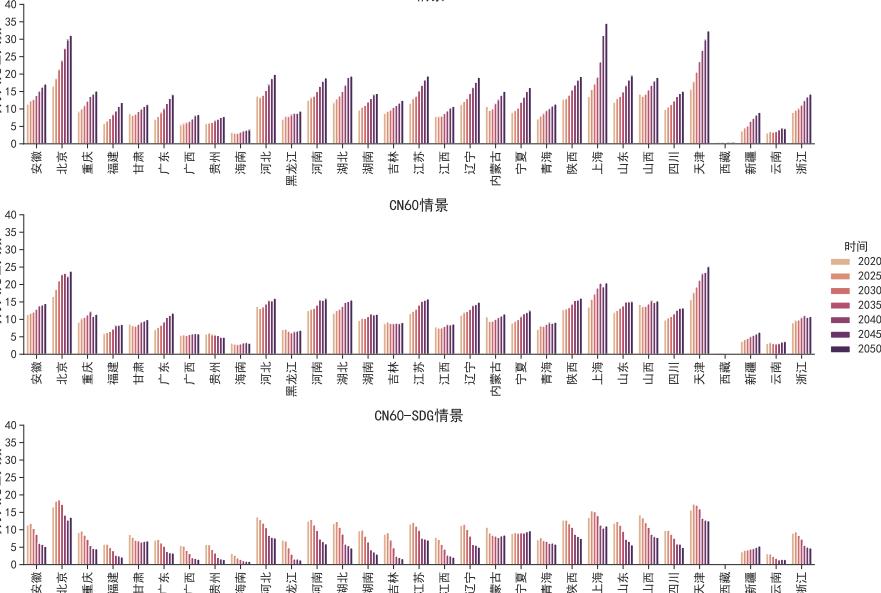
- 人口老龄化程度加深，碳中和转型不能逆转过早死亡人数增加的趋势 假设VSL为100万美元
- 因空气污染造成过早死亡经济损失
 - 2020: 9.4% 较当年GDP
 - NDC: 6.7% (碳达峰), 4.4% (碳中和)
 - CN60: 6.4% (碳达峰), 3.5% (碳中和)
 - +SDG: 5.3% (碳达峰), 1.4% (碳中和)
- 健康效益 (CN60较NDC情景)
 - 2025年740亿美元, 2050年5600亿美元
 - 2020-2050年净收益**2.05万亿美元** (5%折现)
- 治理措施 (CN60-SDG较CN60情景)
 - 2030: 投资回报比4.5, 净收益2000亿美元
 - 2050: 投资回报比22.4, 净收益>1万亿美元
 - 2020-2050年净收益**5.4万亿美元** (5%折现)



图：中国碳中和转型协同效应净收益 (十亿美元)
REF情景



图：强化末端控制措施收益/成本 (十亿美元)



图：分省区分年份每万人过早死亡人数



Part 05

中国能源环境经济转型 不确定性研究



本章节相关研究成果已发表于《Nature Communications》

Assessing the energy transition in China towards carbon neutrality with
a probabilistic framework

不确定性变量与情景设计

设置11个核心不确定性变量

- 风电成本 (对数正态分布)
- 风电装机增速 (正态分布)
- 光伏成本 (对数正态分布)
- 光伏装机增速 (正态分布)
- BECCS成本 (对数正态分布)
- 核电成本 (对数正态分布)
- 核电装机增速 (正态分布)
- 电储能成本 (对数正态分布)
- 氢能生产成本 (对数正态分布)
- 需求价格弹性 (正态分布)

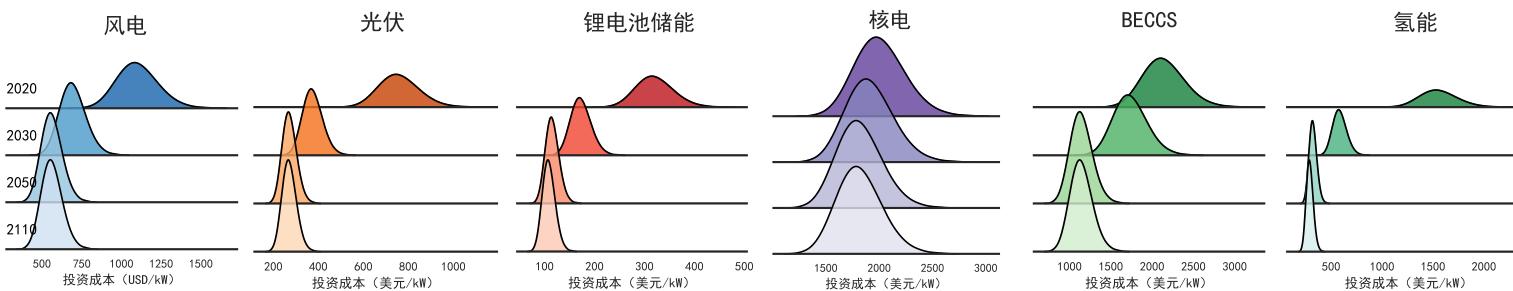
47.

2020-2100年累计碳排放

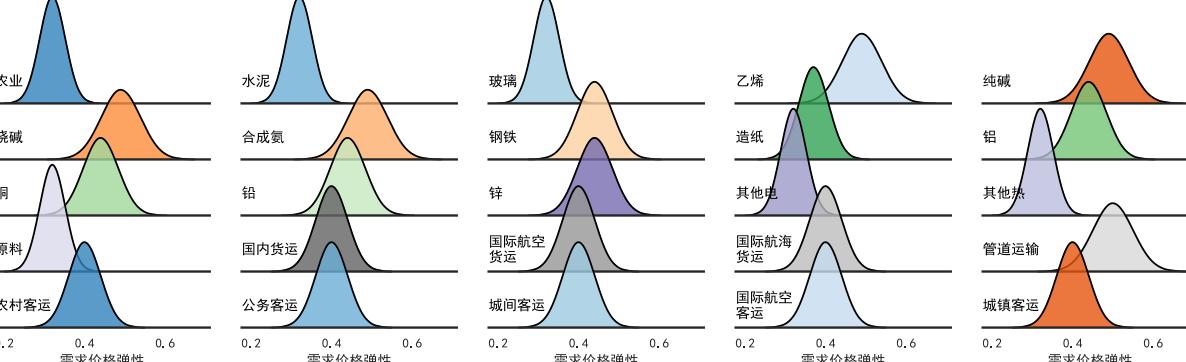
2024/5/16 (2000-2500亿吨均匀分布)

情景设计	参考情景	2030行动	2025行动
无其他SDG措施	REF	CN60	CN60E
考虑其他SDG措施	REF-SDG	CN60-SDG	CN60-SDGE

每组碳中和情景均运行1000个算例



图：不确定性情景投资成本分布假设 (美元/kW)



图：不确定性情景需求价格弹性分布假设



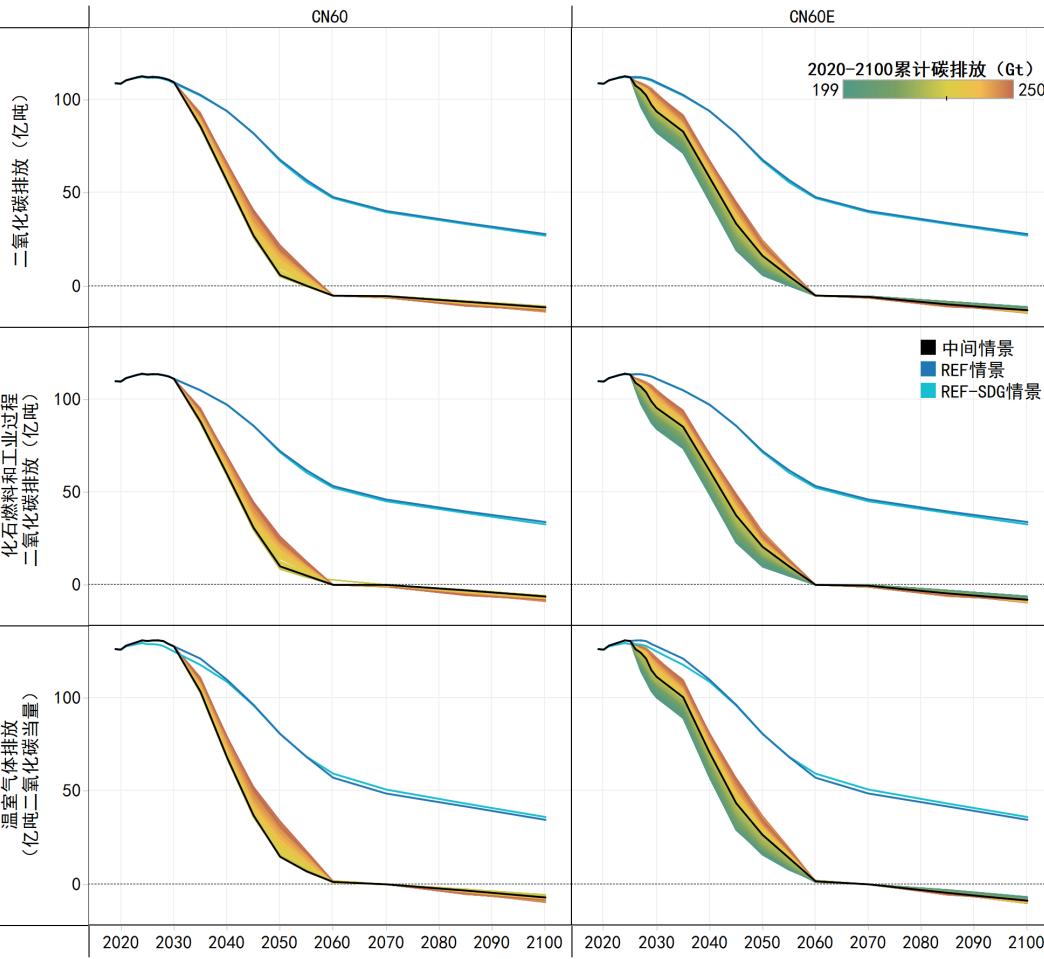
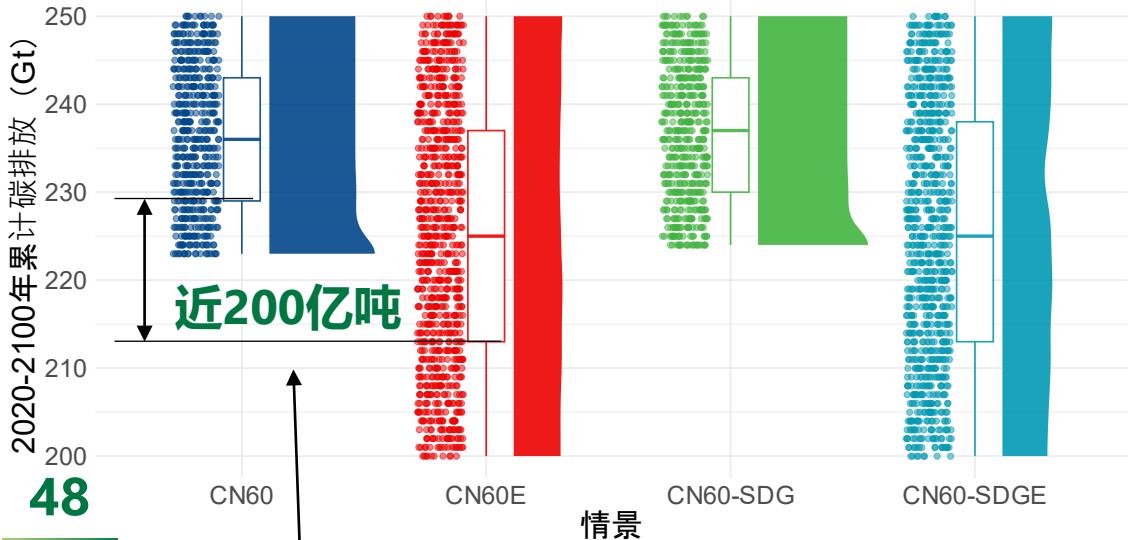
尽早行动助力更经济的转型，实现更具雄心的目标

• 尽早行动的减排贡献

尽早行动更有效控制累计碳排放，支持更有雄心的气候行动

• 碳中和倒逼尽早行动

越早行动系统总成本越低，尽早行动为转型提供更多时间

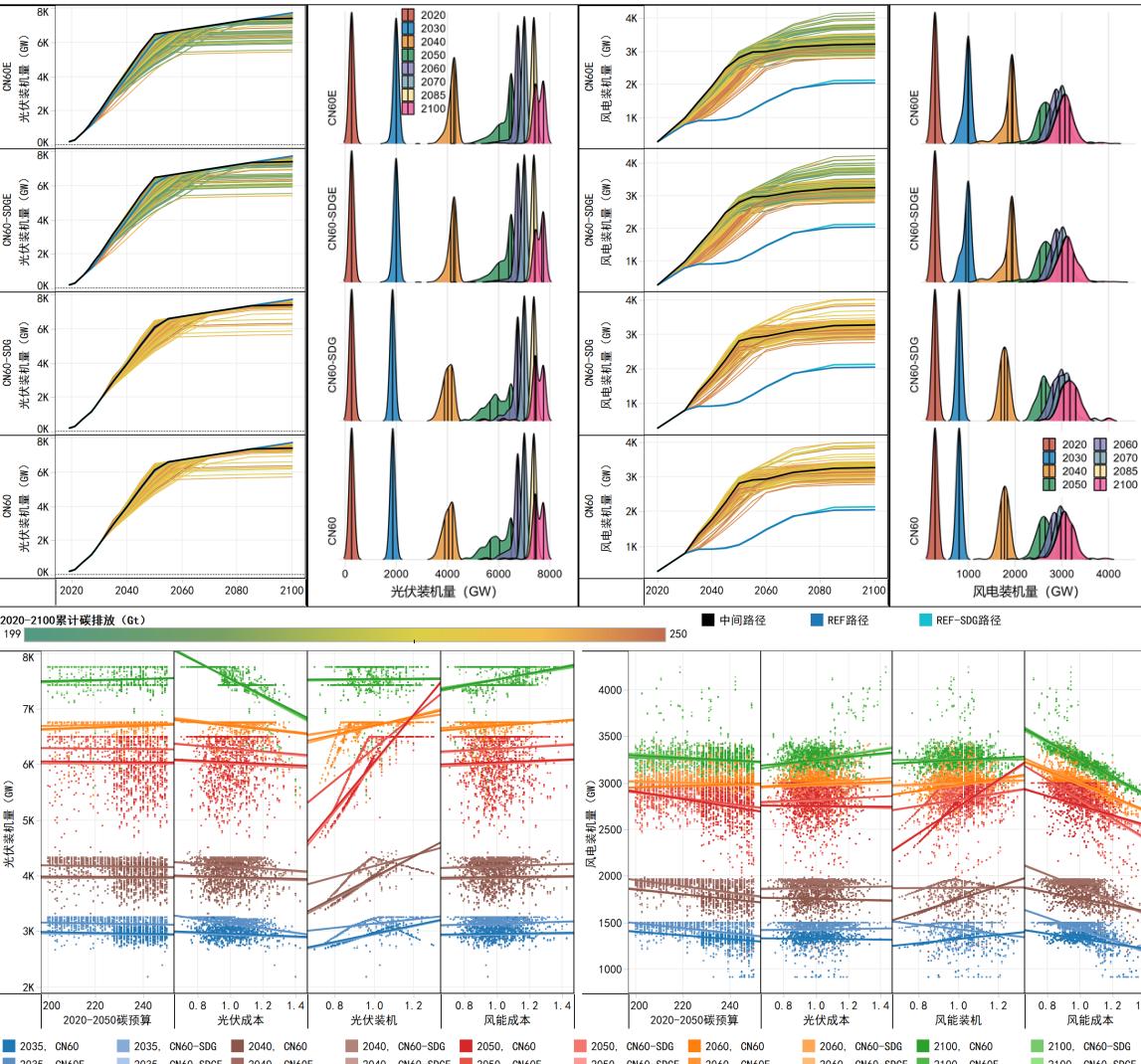


图：碳排放 (亿吨CO₂) 和温室气体排放 (亿吨CO₂eq)

风电、光伏容量快速增长，但影响因素不同

- 2030年风电和光伏总装机
 - CN60情景超2.3TW
 - CN60E情景2.5-3TW
- 2060年光伏装机5.6-6.8TW
 - 不确定性范围较窄
 - 光伏装机发展主要受**光伏增长潜力**、**光伏成本**、**风能成本**影响
- 2060年风电装机2.6-3.5TW
 - 不确定性范围较宽
 - 风电装机发展主要受**风电成本**、**光伏成本**、**碳预算**影响

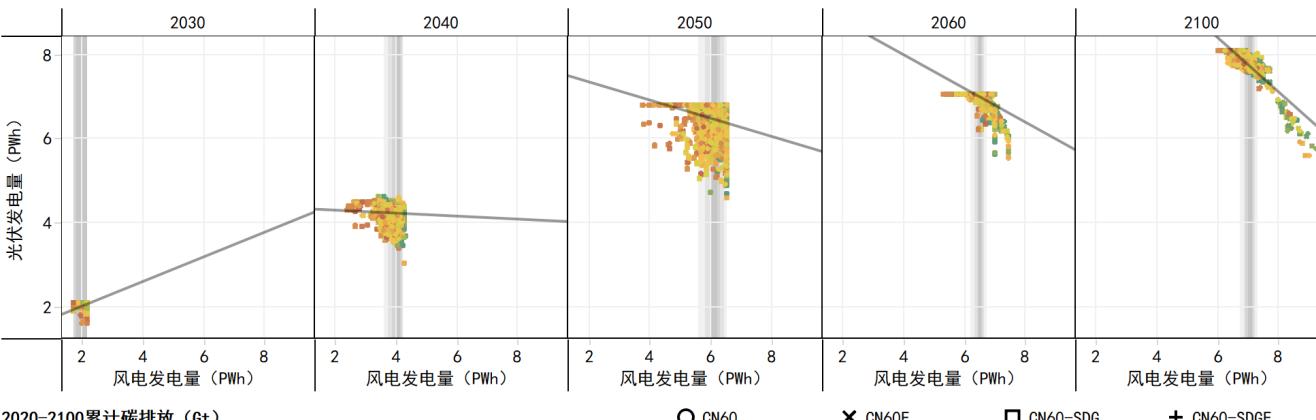
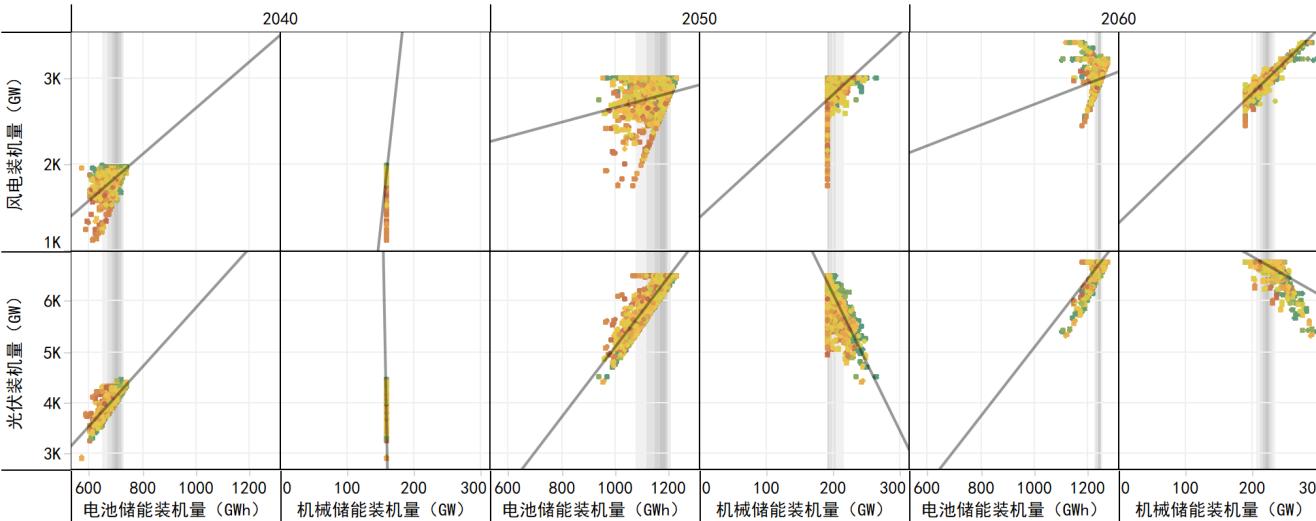
49 • 风电受碳预算影响较光伏更大



图：光伏、风电装机容量概率分布、相关因素

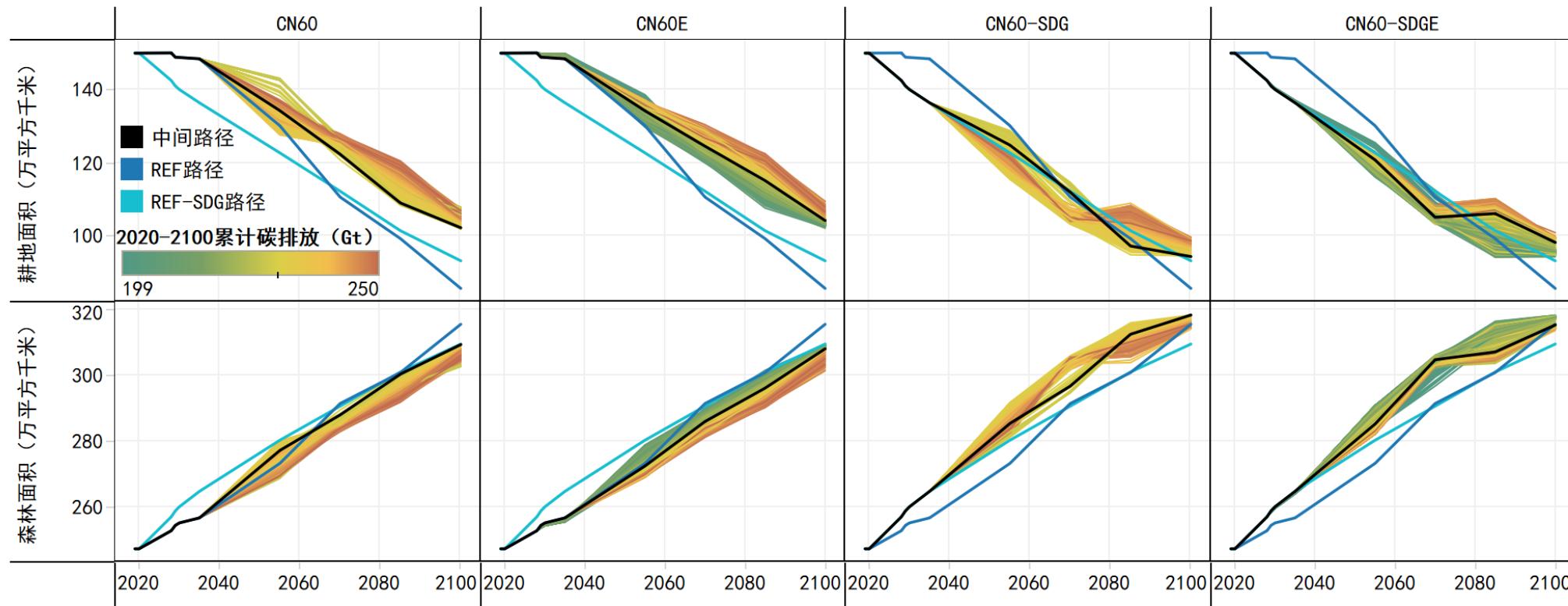
风电、光伏、储能的耦合关系随时间出现转变

- **机械储能**: 平抑波动、提供惯性
- **电池储能**: 削峰填谷、尖峰负荷
- **风电和储能关系**
 - 2050年前，风电与**各类储能**呈正相关
 - 2060年后，风电与**机械储能**呈现正相关，与**电池储能**关系不再显著
- **光伏和储能关系**
 - 与**电池储能**呈正相关
 - 与**机械储能**呈负相关
- **风电和光伏关系**
 - 2035年前**协同替代化石燃料**
 - 2035年后开始出现相互**竞争**



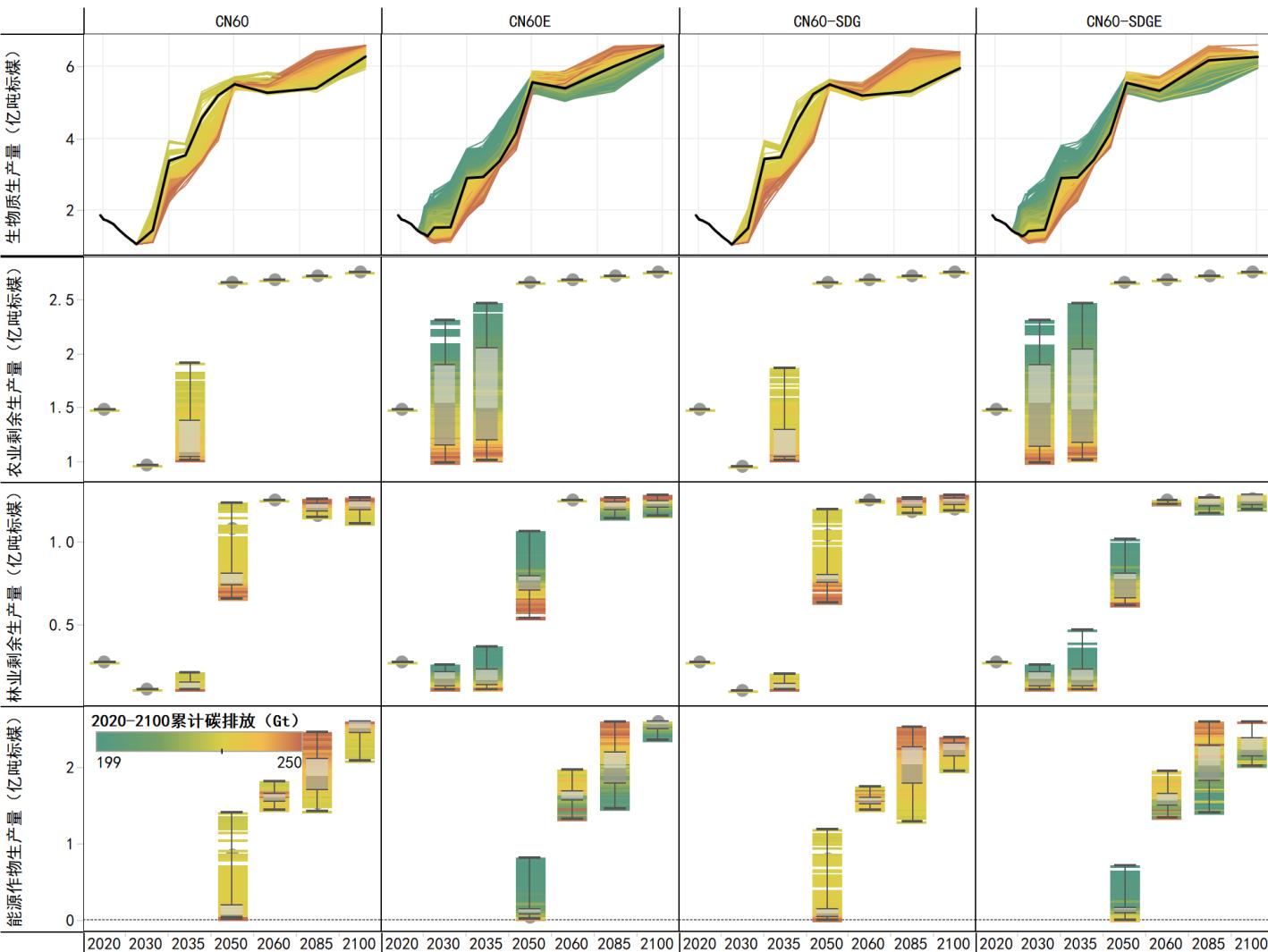
碳减排促进森林面积增长，SDG措施森林更快扩张

- 到2100年，碳约束不同激励森林面积扩大比例不同，情景间差距可达**10万km²** **增长3%**
- 到2060年，SDG措施减缓土地利用模式竞争，森林面积得以进一步增加**17万km²**
- 到2060年，CN60情景耕地面积仍在**120万km²** (**18亿亩**) **红线以上**



农林剩余无法满足生物质需求，能源作物差异明显

- 生物质需求**
 - 2035年: ~1亿吨标煤
 - 2060年: 5.4~5.7亿吨标煤
 - 2100年: >5.9亿吨标煤
- 农林剩余最多提供3.9亿吨标煤**
- 能源作物产量**
 - 2050-2085年间不确定性明显
 - 2060年后能源作物占比>35%
 - 2100年>2亿吨标煤
- 尽早布局生物能源，能更晚、更小规模种植能源作物，减少潜在权衡**



图：分种类生物质使用情况 (亿吨标煤)

电力和工业取水量受碳减排不确定性影响

取水总量

- 2060年: 4200~4400亿m³
- 2100年: 3000~3300亿m³
- 2035年SDG情景 **节约800亿m³**

用水部门

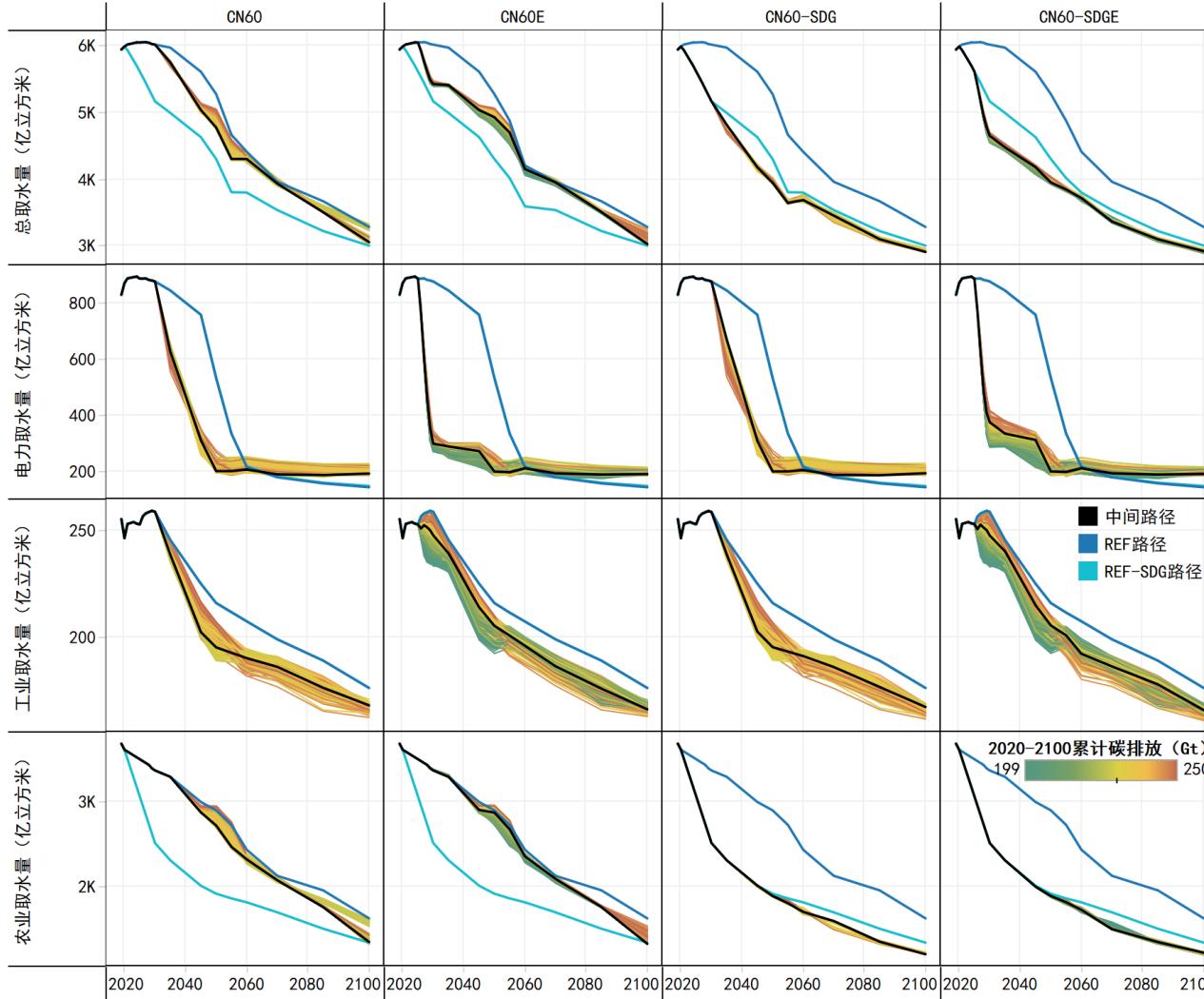
- 农业取水受耕地面积、作物类型
小幅波动 (约120亿m³不确定性范围)
- 农业**节水措施效果明显**
较非SDG情景下降>500亿m³
- 尽早行动情景**火电更早转型**
2035年较正常行动情景节水>250亿m³

• 工业受碳预算影响较大

• 对于累计碳排放较为严格的算例

前期能效提高→**节水显著**

后期CCS使用→**节水效果减弱**

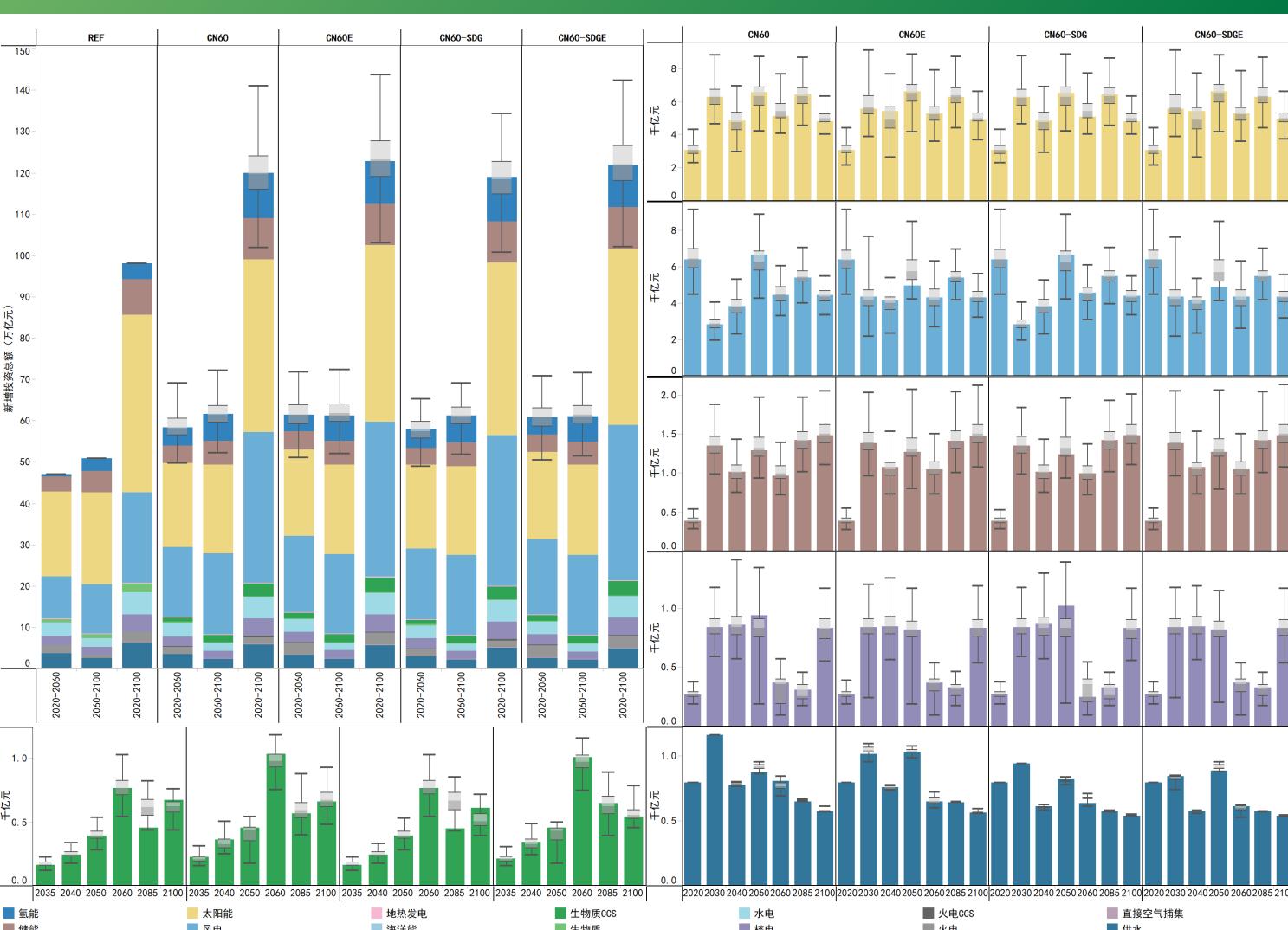


图：分来源取水情况 (亿立方米)



碳中和转型带来大量投资，较REF成本上升有限

- 2020-2100年供应部门投资
 - CN60: 102-141万亿
 - CN60E: 103-144万亿
- 2060前后40年供应部门投资
 - 2060年后更多投资转向氢能、储能、负排放技术
- 投资、运维成本占GDP比重
 - 2035:3.3-3.8% 较REF↑0.1%
 - 2060:2.0-2.4% 较REF↑0.6%
 - 2100:0.9-1.1% 较REF↑0.3%
- 光伏风电年均投资超5000亿
- 负排放技术年均投资超600亿



图：能源供应部门投资总额及其不确定性区间

Part 06

研究结论与展望



主要结论——能源转型与碳减排稳中求进

碳中和转型路径决策需要系统规划，统筹考虑安全、发展、低碳的权衡

- 能源相关二氧化碳排放争取在“十五五”期间尽早达峰，2060年净零，电力部门2050年前净零
- 一次能源供应在2030年前后达峰，2020-2060年间能源强度年均下降近4%
- 2060年可再生能源在一次能源占比约63%，电能和氢能在终端能源占比约56%和7%
- 碳中和转型基本解决油气对外依赖问题，高比例可再生能源带来电能消纳和电力系统灵活性挑战
- 新型电力负荷带来负荷曲线显著变化，需求侧管理和储能分别贡献8%和14%的峰值功率
- CCS、氢能、生物质能在支撑系统减排、保障能源安全、缓解减排压力等方面发挥独特作用
- 碳中和带动62万亿元能源供应部门额外新增投资



主要结论——能—粮—水—空气质量协同转型

碳中和目标下，气候变化减缓与可持续发展间的关联更加显著，存在广泛协同与权衡

- 农林剩余不足以满足实现碳中和目标所需的生物质需求（5.1亿吨标煤），1.9%国土需种植能源作物
- 减半食物浪费和调整膳食结构可以减少碳减排对于粮食价格的影响，弱化减排与粮食安全的权衡
- 碳减排带动电力冷却取水和农业取水下降78%和35%，节水农业进一步减少农业取水27%
- 节水灌溉和工业水效提升措施，能够使得地下水超采问题解决时间提前5年
- 碳中和转型下2050年26个省区达到国家二级空气质量标准，2020-2050年健康效益达2.1万亿美元
- 碳中和转型不能逆转因空气污染造成的过早死亡人数增加趋势，强化污染物末端治理措施显著减少过早死亡人数，2020-2050年采取治理措施的净收益达5.4万亿美元



主要结论——能源环境经济转型不确定性影响

碳中和进程受多维不确定性影响，关键不确定性因素对转型路径、转型成本影响深远

- 尽早行动平均减少200亿吨碳排放，边际减排成本下降20%，支持实现更有雄心的气候目标
- 2060年煤炭和石油在一次能源比重均降低至10%以下，能源服务需求较REF下降7-15%
- 光伏2060年装机5.6-6.8TW，主要受光伏电站部署潜力限制
- 风电2060年装机2.6-3.5TW，主要受风电装机成本限制
- 风电和光伏2035年前协同替代化石燃料，2035年后出现竞争
- 农业剩余、林业剩余、能源作物分别在2035、2050、2060年规模使用
- 电力和工业取水量受碳中和转型影响较大，农业节水主要受土地利用模式和节水措施双重影响
- 碳中和需要能源供应部门50-69万亿元新增投资，2060年能源系统总成本占当年GDP约2-2.4%



政策建议

统筹能源生产脱碳、能源消费升级、碳移除节奏，有序推进分阶段、分部门转型

- 近期由能耗总量、强度双控向碳排放总量强度双控转变，尽力控制碳排放峰值水平
- 中期采用清洁能源快速替代化石能源使用，完善电能、氢能、二氧化碳跨区输配网络
- 长期最大限度压低剩余排放，并发展各类碳汇和碳移除技术

推动跨部门耦合，增进能源供需协调互动，应对能源系统灵活性挑战

- 大幅提高电网调节能力，火电机组灵活性改造能改尽改，增强水电、核电负荷跟踪性能
- 完善跨省跨区电网建设，重点推进西北、西南、内蒙等清洁能源基地送出通道建设
- 挖掘需求侧灵活性潜力，建立激励相容的辅助服务市场机制，激励需求侧主动参与系统调节
- 扩大多样化的储能部署，持续优化新型储能调度机制，保障新型储能合理高效利用



政策建议

加快创新技术研发和试点，构建碳中和技术储备

- 鼓励多样化低碳技术创新，重点聚焦CCS、绿色氢能、生物质能等领域的研发和早期试点
- 提前谋划CCS和氢能运输管网建设，逐步完善生物质收集、运输、加工、利用产业链布局

促进碳中和转型与SDGs协同，形成提高协同效益，减少权衡的政策方案

- 增进能—粮—水—空气质量系统协调，强化目标协同和政策协同
- 协同效益成为巴黎协定NDC和2030可持续发展议程报告机制VNR必要组成部分

及时采取行动，设定透明目标，动态优化策略，探索可实现的碳中和道路

- 加快应对气候变化立法工作，采取及时果断的减排行动，确定公开透明的减排目标
- 充分发挥综合评估模型在路径规划、策略支持、现实反馈的作用，持续评估和优化转型策略



主要创新点

- 构建了中国碳中和转型综合评估模型体系，搭建了涵盖主要温室气体、模拟期覆盖2019-2100年、多能源品种多时序嵌套的能源系统模型China TIMES 2.0，实现了能源系统模型与土地利用模型模拟器、水模型、空气质量模型连接，开发了基于蒙特卡洛分析方法的不确定性分析模块
- 通过用户行为模式内生成未来多时序负荷曲线，将长期能源系统规划与亚年度级能源系统运行有机结合，量化了中国碳中和目标下温室气体减排、能源低碳转型、亚年度级能源供需格局、转型的投资需求与经济代价，研究了低碳能源系统面临的灵活性挑战及其应对措施
- 评估了碳中和转型对能—粮—水—空气质量系统的协同效应和潜在权衡，识别并量化了碳减排和可持续发展措施对于夯实能源安全、保障粮食供应、扩大森林面积、发展生物质能、减缓供水压力、改善空气质量的作用，形成了中国能-粮-水-空气质量系统可持续发展的协同转型路径
- 构建了贯穿样本采样、模型计算、数据储存和结果处理的全栈式不确定性分析流程，量化了技术发展、行为模式和政策法规等多维不确定性对碳中和转型脱碳路径、技术组合和转型成本的影响，评估了风电、光伏、储能等新兴技术的相互关系和未来发展趋势，形成不确定性下路径优化方法



参考文献 (部分)

1. IEA. An Energy Sector Roadmap to Carbon Neutrality in China. (IEA,2021).
2. Grubler A, et al. A low energy demand scenario for meeting the 1.5 °C target and sustainable development goals without negative emission technologies. *Nature Energy* **3**, 515-527 (2018).
3. O'Neill BC, et al. Achievements and needs for the climate change scenario framework. *Nature Climate Change*, 1-11 (2020).
4. Rogelj J, et al. Emission pathways consistent with a 2 °C global temperature limit. *Nature Climate Change* **1**, 413-418 (2011).
5. van Soest HL, den Elzen MGJ, van Vuuren DP. Net-zero emission targets for major emitting countries consistent with the Paris Agreement. *Nature Communications* **12**, 2140 (2021).
6. Rode A, et al. Estimating a social cost of carbon for global energy consumption. *Nature* **598**, 308-314 (2021).
7. Pye S, Li FGN, Price J, Fais B. Achieving net-zero emissions through the reframing of UK national targets in the post-Paris Agreement era. *Nature Energy* **2**, (2017).
8. Ou Y, et al. Can updated climate pledges limit warming well below 2 °C? *Science* **374**, 693-695 (2021).
9. van Soest HL, et al. Global roll-out of comprehensive policy measures may aid in bridging emissions gap. *Nature Communications* **12**, 6419 (2021).
10. Sognaes I, et al. A multi-model analysis of long-term emissions and warming implications of current mitigation efforts. *Nature Climate Change* **11**, 1055–1062 (2021).
11. Dubash NK, et al. National climate institutions complement targets and policies. *Science* **374**, 690-693 (2021).
12. Yang P, Mi Z, Yao Y-F, Cao Y-F, Coffman DM, Liu L-C. Solely economic mitigation strategy suggests upward revision of nationally determined contributions. *One Earth* **4**, 1150-1162 (2021).
13. Duan H, et al. Assessing China's efforts to pursue the 1.5 °C warming limit. *Science* **372**, 378-385 (2021).
14. Grubler A, et al. A low energy demand scenario for meeting the 1.5 °C target and sustainable development goals without negative emission technologies. *Nature Energy* **3**, 515-527 (2018).
15. Kikstra JS, et al. Climate mitigation scenarios with persistent COVID-19-related energy demand changes. *Nature Energy*, (2021).
16. Fujimori S, et al. A framework for national scenarios with varying emission reductions. *Nature Climate Change* **11**, 472-480 (2021).
17. Tong D, et al. Health co-benefits of climate change mitigation depend on strategic power plant retirements and pollution controls. *Nature Climate Change* **11**, 1077-1083 (2021).
18. Wang P, Lin C-K, Wang Y, Liu D, Song D, Wu T. Location-specific co-benefits of carbon emissions reduction from coal-fired power plants in China. *Nature Communications* **12**, 6948 (2021).
19. Auer C, et al. Climate change scenario services: From science to facilitating action. *One Earth* **4**, 1074-1082 (2021).
20. van Vuuren DP, et al. Alternative pathways to the 1.5 °C target reduce the need for negative emission technologies. *Nature Climate Change* **8**, 391-397 (2018).
21. Fuso Nerini F, et al. Connecting climate action with other Sustainable Development Goals. *Nature Sustainability* **2**, 674-680 (2019).
22. Fuhrman J, McJeon H, Patel P, Doney SC, Shobe WM, Clarens AF. Food–energy–water implications of negative emissions technologies in a +1.5 °C future. *Nature Climate Change* **10**, 920-927 (2020).
23. Soergel B, et al. A sustainable development pathway for climate action within the UN 2030 Agenda. *Nature Climate Change* **11**, 656-664 (2021).



参考文献 (部分)

24. Hasegawa T, et al. Land-based implications of early climate actions without global net-negative emissions. *Nature Sustainability* **4**, 1052-1059 (2021).
25. Drouet L, et al. Net zero-emission pathways reduce the physical and economic risks of climate change. *Nature Climate Change* **11**, 1070-1076 (2021).
26. Riahi K, et al. Cost and attainability of meeting stringent climate targets without overshoot. *Nature Climate Change* **11**, 1063-1069 (2021).
27. Köberle AC, et al. The cost of mitigation revisited. *Nature Climate Change* **11**, 1035-1045 (2021).
28. Huppmann D, Rogelj J, Kriegler E, Krey V, Riahi K. A new scenario resource for integrated 1.5 °C research. *Nature Climate Change* **8**, 1027-1030 (2018).
29. Guiavarch C, Rozenberg J, Schweizer V. The diversity of socio-economic pathways and CO₂ emissions scenarios: Insights from the investigation of a scenarios database. *Environmental Modelling & Software* **80**, 336-353 (2016).
30. Watson AA, Kasprzyk JR. Incorporating deeply uncertain factors into the many objective search process. *Environmental Modelling & Software* **89**, 159-171 (2017).
31. Schweizer VJ, Kurniawan JH. Systematically linking qualitative elements of scenarios across levels, scales, and sectors. *Environmental Modelling & Software* **79**, 322-333 (2016).
32. Guiavarch C, Lempert R, Trutnevyte E. Scenario techniques for energy and environmental research: An overview of recent developments to broaden the capacity to deal with complexity and uncertainty. *Environmental Modelling & Software* **97**, 201-210 (2017).
33. Gi K, Sano F, Akimoto K, Hiwatari R, Tobita K. Potential contribution of fusion power generation to low-carbon development under the Paris Agreement and associated uncertainties. *Energy Strategy Reviews* **27**, 100432 (2020).
34. Peng W, et al. The surprisingly inexpensive cost of state-driven emission control strategies. *Nature Climate Change* **11**, 735-745 (2021).
35. Babonneau F, Haurie A, Loulou R, Vielle M. Combining Stochastic Optimization and Monte Carlo Simulation to Deal with Uncertainties in Climate Policy Assessment. *Environmental Modeling & Assessment* **17**, 51-76 (2012)..
36. Rosenberg DE. Blended near-optimal alternative generation, visualization, and interaction for water resources decision making. *Water Resources Research* **51**, 2047-2063 (2015).
37. Hughes N, Strachan N, Gross R. The structure of uncertainty in future low carbon pathways. *Energy Policy* **52**, 45-54 (2013).
38. Baležentis T, Streimikiene D. Multi-criteria ranking of energy generation scenarios with Monte Carlo simulation. *Applied Energy* **185**, 862-871 (2017).
39. Webster MD, et al. Uncertainty in emissions projections for climate models. *Atmospheric Environment* **36**, 3659-3670 (2002).
40. Gillingham K, et al. Modeling Uncertainty in Integrated Assessment of Climate Change: A Multimodel Comparison. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists* **5**, 791-826 (2018).
41. 王鑫.中国多温室气体优化减排评价模型构建研究.北京: 清华大学, 2018.
42. Bastien-Olvera BA, Moore FC. Use and non-use value of nature and the social cost of carbon. *Nature Sustainability* **4**, 101-108 (2021).
43. Zhang C, Zhong L, Fu X, Wang J, Wu Z. Revealing Water Stress by the Thermal Power Industry in China Based on a High Spatial Resolution Water Withdrawal and Consumption Inventory. *Environmental Science & Technology* **50**, 1642-1652 (2016).
44. Zhang C, Zhong LJ, Wang J. Decoupling between water use and thermoelectric power generation growth in China. *Nature Energy* **3**, 792-799 (2018).
45. Huang W, Ma D, Chen W. Connecting water and energy: Assessing the impacts of carbon and water constraints on China's power sector. *Applied Energy* **185**, 1497-1505 (2017).



参考文献 (部分)

46. Li N, Chen WY. Energy-water nexus in China's energy bases: From the Paris agreement to the Well Below 2 Degrees target. *Energy* **166**, 277-286 (2019).
47. Wang C, Wang R, Hertwich E, Liu Y. A technology-based analysis of the water-energy-emission nexus of China's steel industry. *Resources, Conservation and Recycling* **124**, 116-128 (2017).
48. Khan Z, Linares P, García-González J. Integrating water and energy models for policy driven applications. A review of contemporary work and recommendations for future developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **67**, 1123-1138 (2017).
49. Li H, et al. Catchment-level water stress risk of coal power transition in China under 2°C/1.5°C targets. *Applied Energy* **294**, 116986 (2021).
50. Vinca A, et al. The NExus Solutions Tool (NEST) v1.0: an open platform for optimizing multi-scale energy–water–land system transformations. *Geoscientific Model Development* **13**, 1095-1121 (2020).
51. Dolan F, Lamontagne J, Link R, Hejazi M, Reed P, Edmonds J. Evaluating the economic impact of water scarcity in a changing world. *Nature Communications* **12**, 1915 (2021).
52. Guo C, Dai H, Liu X, Wu Y, Liu X, Liu Y. Impacts of climate change mitigation on agriculture water use: A provincial analysis in China. *Geography and Sustainability* **1**, 189-199 (2020).
56. Fujimori S, et al. A multi-model assessment of food security implications of climate change mitigation. *Nature Sustainability* **2**, 386-396 (2019).
57. Fujimori S, et al. Measuring the sustainable development implications of climate change mitigation. *Environmental Research Letters* **15**, 085004 (2020).
58. Stevanović M, et al. Mitigation Strategies for Greenhouse Gas Emissions from Agriculture and Land-Use Change: Consequences for Food Prices. *Environmental Science & Technology* **51**, 365-374 (2017).
59. Nazari MT, Mazutti J, Basso LG, Colla LM, Brandli L. Biofuels and their connections with the sustainable development goals: a bibliometric and systematic review. *Environment, Development and Sustainability* **23**, 11139-11156 (2021).
60. Wise M, et al. Implications of Limiting CO₂ Concentrations for Land Use and Energy. *Science* **324**, 1183-1186 (2009).
61. Fuhrman J, McJeon H, Doney SC, Shobe W, Clarens AF. From Zero to Hero?: Why Integrated Assessment Modeling of Negative Emissions Technologies Is Hard and How We Can Do Better. *Frontiers in Climate* **1**, (2019).
62. van Vuuren DP, et al. Alternative pathways to the 1.5 °C target reduce the need for negative emission technologies. *Nature Climate Change* **8**, 391-397 (2018).
63. Frank S, et al. Reducing greenhouse gas emissions in agriculture without compromising food security? *Environmental Research Letters* **12**, 105004 (2017).
64. Silva RA, et al. The effect of future ambient air pollution on human premature mortality to 2100 using output from the ACCMIP model ensemble. *Atmos Chem Phys* **16**, 9847-9862 (2016).
65. Markandya A, et al. Health co-benefits from air pollution and mitigation costs of the Paris Agreement: a modelling study. *The Lancet Planetary Health* **2**, e126-e133 (2018).
66. Vandyck T, et al. Air quality co-benefits for human health and agriculture counterbalance costs to meet Paris Agreement pledges. *Nature Communications* **9**, 4939 (2018).
67. Li N, et al. Air Quality Improvement Co-benefits of Low-Carbon Pathways toward Well Below the 2 °C Climate Target in China. *Environmental Science & Technology* **53**, 5576-5584 (2019).

参考文献 (部分)

68. Xing J, et al. The quest for improved air quality may push China to continue its CO₂ reduction beyond the Paris Commitment. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **117**, 29535-29542 (2020).
69. Cheng J, et al. Pathways of China's PM_{2.5} air quality 2015–2060 in the context of carbon neutrality. *National Science Review*, (2021).
70. Zhang S, et al. Incorporating health co-benefits into technology pathways to achieve China's 2060 carbon neutrality goal: a modelling study. *The Lancet Planetary Health* **5**, e808-e817 (2021).
71. Tong D, et al. Health co-benefits of climate change mitigation depend on strategic power plant retirements and pollution controls. *Nature Climate Change* **11**, 1077-1083 (2021).
72. Fuhrman J, et al. The role of negative emissions in meeting China's 2060 carbon neutrality goal. *Oxford Open Climate Change* **1**, (2021).
73. Mannan M, Al-Ansari T, Mackey HR, Al-Ghamdi SG. Quantifying the energy, water and food nexus: A review of the latest developments based on life-cycle assessment. *Journal of Cleaner Production* **193**, 300-314 (2018).
74. Lotz-Sisitka H, et al. Co-designing research on transgressive learning in times of climate change. *Current Opinion in Environmental Sustainability* **20**, 50-55 (2016).
75. Olawuyi D. Sustainable development and the water-energy-food nexus: Legal challenges and emerging solutions. *Environmental Science & Policy* **103**, 1-9 (2020).
76. McCollum DL, et al. Energy investment needs for fulfilling the Paris Agreement and achieving the Sustainable Development Goals. *Nature Energy* **3**, 589-599 (2018).
77. Wang Q, Li S, He G, Li R, Wang X. Evaluating sustainability of water-energy-food (WEF) nexus using an improved matter-element extension model: A case study of China. *Journal of Cleaner Production* **202**, 1097-1106 (2018).
78. Deng H-M, Wang C, Cai W-J, Liu Y, Zhang L-X. Managing the water-energy-food nexus in China by adjusting critical final demands and supply chains: An input-output analysis. *Science of The Total Environment* **720**, 137635 (2020).
79. Yan X, Fang L, Mu L. How does the water-energy-food nexus work in developing countries? An empirical study of China. *Science of The Total Environment* **716**, 134791 (2020).
80. Liang Y, et al. Quantifying Direct and Indirect Spatial Food–Energy–Water (FEW) Nexus in China. *Environmental Science & Technology* **54**, 9791-9803 (2020).
81. Burek P, et al. Development of the Community Water Model (CWatM v1.04) – a high-resolution hydrological model for global and regional assessment of integrated water resources management. *Geoscientific Model Development* **13**, 3267-3298 (2020).
82. Liu, L. et al. Climate change impacts on planned supply–demand match in global wind and solar energy systems. *Nature Energy* **8**, 870-880 (2023).
83. Lin, J., Abhyankar, N., He, G., Liu, X. & Yin, S. Large balancing areas and dispersed renewable investment enhance grid flexibility in a renewable-dominant power system in China. *iScience* **25** (2022).
84. Moallemi, E. A. et al. Coupling net-zero modeling with sustainability transitions can reveal co-benefits and risks. *One Earth* **7**, 175-179 (2024).
85. Gidden, M. J. et al. Aligning climate scenarios to emissions inventories shifts global benchmarks. *Nature* **624**, 102-108 (2023).
86. Wang, J., Duan, Y., Jiang, H. & Wang, C. China's energy-water-land system co-evolution under carbon neutrality goal and climate impacts. *Journal of Environmental Management* **352**, 120036 (2024).
87. 张宏钧. 新常态下中国低碳发展路径模拟分析体系构建与应用. 北京: 清华大学, 2017.
88. 黎楠. 中国分省区低碳协同发展模型构建与应用. 北京: 清华大学, 2018.
89. 张强. 双碳目标下中国分省区深度脱碳路径研究. 北京: 清华大学, 2023.



谢谢！
请各位老师批评指正！



清华大学能源环境经济研究所
INSTITUTE of ENERGY, ENVIRONMENT and ECONOMY
TSINGHUA UNIVERSITY