

挑战杯（正赛）参赛作品

碳中和目标下的中国碳减排因素分析

——基于 LMDI 和 SDA 分解方法

指导老师： 戴瀚程

作者： 马啸天 环境科学与工程学院 2019 级本科生

房 晨 环境科学与工程学院 2019 级本科生

周珊羽 环境科学与工程学院 2019 级本科生

李卓超 环境科学与工程学院 2019 级本科生

碳中和目标下的中国碳减排因素分析

——基于 LMDI 和 SDA 分解方法

马啸天¹² 房晨¹ 周珊羽¹² 李卓超¹³

(1 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871; 2 北京大学国家发展研究院, 北京 100871;
3 北京大学心理与认知科学学院, 北京 100871)

摘要 中国在 2020 年做出了 2060 年实现碳中和的承诺, 要实现这样一个伟大的目标, 需要在能源结构调整、产业结构调整、能源效率提高等多方面努力。本文使用 SDA 分解方法对于中国 2002-2017 年的历史数据进行碳排放结构分解, 分析了不同部门的碳排放变化历史趋势。除此之外, 本文还对与中国实现碳中和的发展路径相匹配的“2℃温升目标情景”下的碳排放数据进行了因素分解, 进而对于未来中国实现碳中和路径进行了分析。最终提出对于中国实现碳中和路径的展望, 认为中国的能源结构转型是实现碳中和道路上最为艰巨且重要的任务, 产业结构的转型和能源强度的变化也同样是实现碳中和的重要驱动力。

关键词 碳中和 SDA 分解 LMDI 分解 2℃情景

目录

| | |
|------------------------|----|
| 1. 前言..... | 5 |
| 1.1 碳排放、气候变化与国际共识..... | 5 |
| 1.2 国际碳排放形势..... | 6 |
| 1.2.1 欧盟碳减排现状..... | 6 |
| 1.2.2 美国碳减排现状..... | 6 |
| 1.2.3 中国碳减排现状..... | 7 |
| 1.2.4 各国对比..... | 8 |
| 1.3 研究目标..... | 11 |
| 2. 数据与分析方法..... | 12 |
| 2.1 方法综述..... | 12 |
| 2.2 历史数据收集..... | 13 |
| 2.2.1 历史能源消费数据..... | 13 |
| 2.2.2 排放因子数据..... | 14 |
| 2.3 IMED CGE 模型..... | 15 |
| 2.3.1 模型介绍..... | 15 |
| 2.3.2 数据..... | 16 |
| 2.3.3 情景设置..... | 16 |
| 2.4 SDA 分解方法..... | 17 |

| | |
|--------------------------------|----|
| 2.4.1 方法介绍..... | 17 |
| 2.5 IDA——LMDI 分解方法..... | 20 |
| 2.5.1 kaya 恒等式..... | 20 |
| 2.5.2 因素分解介绍..... | 20 |
| 3. 结果分析..... | 21 |
| 3.1 中国历史数据二氧化碳排放结构分解..... | 21 |
| 3.1.1 数据处理简述..... | 21 |
| 3.1.2 历史结果分析..... | 21 |
| 3.2 2°C情景下未来中国二氧化碳排放因素分解..... | 25 |
| 3.3 2°C情景下中国六部门二氧化碳排放因素分解..... | 26 |
| 4. 讨论与总结..... | 29 |
| 4.1 挑战与展望..... | 29 |
| 4.1.1 疫情冲击下的碳减排..... | 29 |
| 4.1.2 国际合作形势..... | 30 |
| 4.2 总结..... | 30 |

1. 前言

1.1 碳排放、气候变化与国际共识

地球碳循环曾处于动态平衡的状态，碳循环的平衡及其伴随的、一定程度的温室效应使得地球拥有了适合生物生存的温度环境。工业革命以来，技术发展（尤其是能源技术的发展）使得人类拥有了释放化石燃料中能量以供生产的能力，而化石燃料中能量的释放伴随的是碳排放的急剧增加，使得温室效应逐渐增强，进而引发了全球性的气候变暖。2015 年，各国对于应对气候变化的若干措施达成共识并签署《巴黎协定》，其中要求：联合国气候变化框架公约的缔约方，立即明确国家自主贡献减缓气候变化，碳排放尽早达峰值，在 20 世纪下半叶实现碳中和，在 20 世纪末将全球地表温度相对于工业化前上升的幅度控制在 2°C 以内，并为争取实现 1.5°C 的温控目标努力。

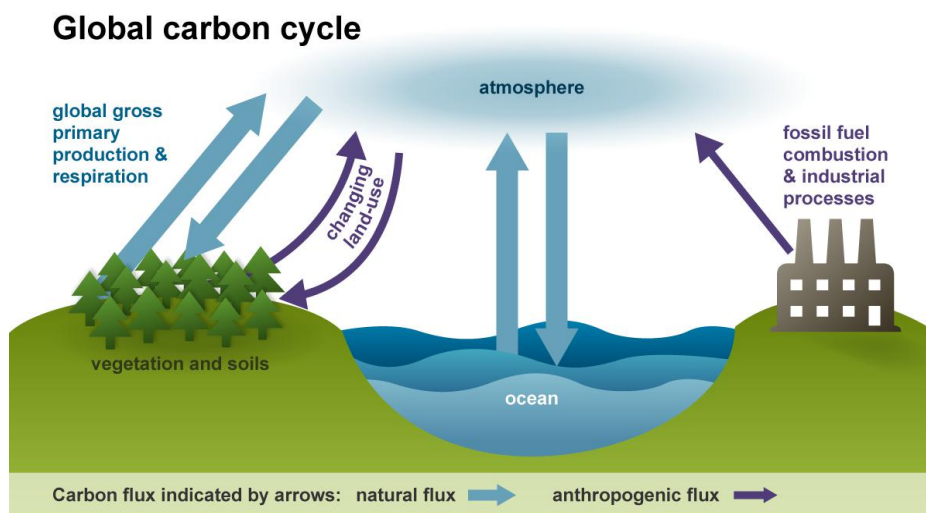


图 1 全球碳循环示意图¹

碳达峰（Peak Carbon Dioxide Emissions），指二氧化碳的年排放量达到峰值后不再增长，趋势转为稳步下降。碳中和（Carbon Neutral），指人类经济社会活动所必需的碳排放，通过森林碳汇和其他人工技术或工程手段加以补集利用或封存，而使排放到大气中的二氧化碳净增量为零。碳达峰与碳中和是控制碳排放过程中最重要的两个阶段性目标。

^[1] 来源: adapted from Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Figure 7.3(UK.,2007)

1.2 国际碳排放形势

国际碳排放形式也不容乐观，但相比于碳排放大国中国，很多对国际碳排放有重要贡献的国家和地区走在碳减排的前列，我们分析了欧盟，美国的碳排放形式，并与中国进行一定的对比。

Carbon Monitor 致力于收集每日更新的 CO₂ 排放数据，并监测 CO₂ 变化。该机构的网站可以大量可用于估算 CO₂ 排放影响的数据：29 个国家每小时/每日发电数据、62 个国家/地区工业过程的每月生产数据和生产指数，世界 416 个城市的流动数据和道路运输流动指数、206 个国家每日经过气温修正的每月燃料消耗数据来估算商业和住宅建筑的排放量。²我们基于这一数据库对于全球碳排放形式进行了一个概述。

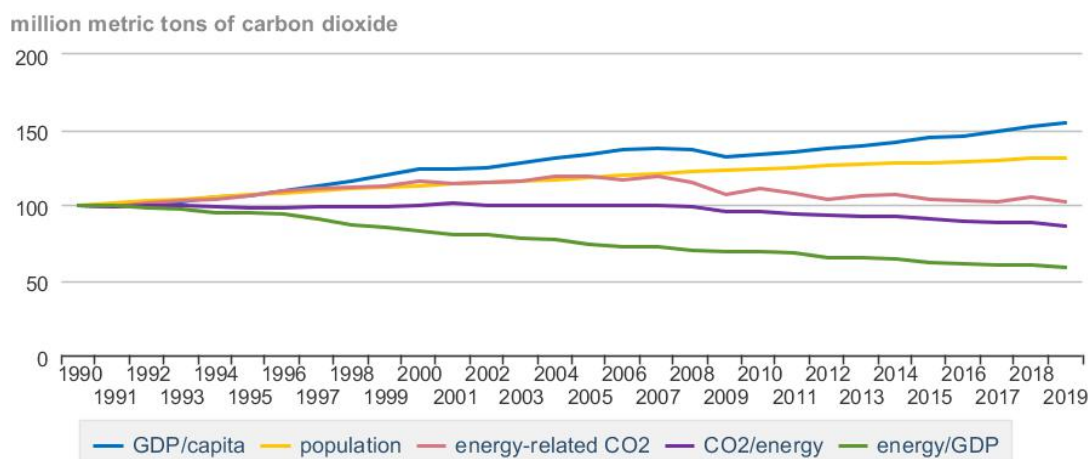
1.2.1 欧盟碳减排现状

欧盟已经制定了明确的碳中和建设方案——《绿色新政》（*European Green Deal*）。作为全球气候治理的领导者之一，欧盟在碳中和领域处于引领地位，《绿色新政》提出了在 2050 年前实现碳中和的目标，作为一项应对气候变化的经济社会长期战略及投资计划，涵盖了农业、工业、交通、建筑等领域的全面转型，欧盟希望借此更好的应对气候变化，最大限度降低碳排放。郑国权(2013)基于森林土壤碳汇和碳排放比较角度,提出建设碳中和城市是广义上的碳中和，要求城市各项社会经济活动不造成额外的温室气体排放。一方面，通过发展低碳产业、低碳交通、低碳建筑、开发利用可再生能源等途径最大限度地降低城市碳排放；另一方面，通过各种方式抵消温室气体排放，充分发挥城市森林、湿地、生态系统等的碳汇功能，吸收温室气体，同时强调通过负责任的投资行为，尽量抵消城市正常运行中无法避免的二氧化碳排放，推动城市实现碳中和。2012 年，丹麦哥本哈根市政府制定了《2025 气候行动计划》，提出世界上首个碳中和城市建设目标。计划涵盖能源消费、能源生产、交通及市政行动计划等多个领域，充分调动社会各界的积极性和参与度，将哥本哈根打造成绿色低碳技术展示平台，创造绿色低碳领域的就业机会，激发经济增长潜力。

1.2.2 美国碳减排现状

^[2] 来源：<https://www.carbonmonitor.org.cn>.

在碳减排方面，许多发达国家已经做出了规划，并取得了一定的成绩。以美国为例：美国碳排放已于 2007 年达峰；2020 年，美国能源工业产生的 CO₂ 仅有 45.74 亿吨，与 2019 年相比下降 11%。其碳减排规划大致是：在 2021-2025 年间，由能源消耗带来 CO₂ 排放量持续下降；到 2035 年，通过能源结构向可再生能源方向的过渡，实现无碳发电；到 2050 年实现碳中和。从美国信息署发布的数据来看，自 1990 年起，美国在保持 GDP 持续增长的同时，成功使得单位 GDP 能耗和单位能耗 CO₂ 排放逐步下降，这一定程度上说明，国民经济发展与碳减排是可能被兼顾的。但引发巨大国际争议的是，2017 年，特朗普声称美国将退出《巴黎协定》，这表明未来美国在碳减排方面的预期贡献并不容乐观。



来源：U.S. Energy Information Administration

图 2 1990-2019 年美国国内人均生产总值、人口，碳排放强度、能源强度指数变化

1.2.3 中国碳减排现状

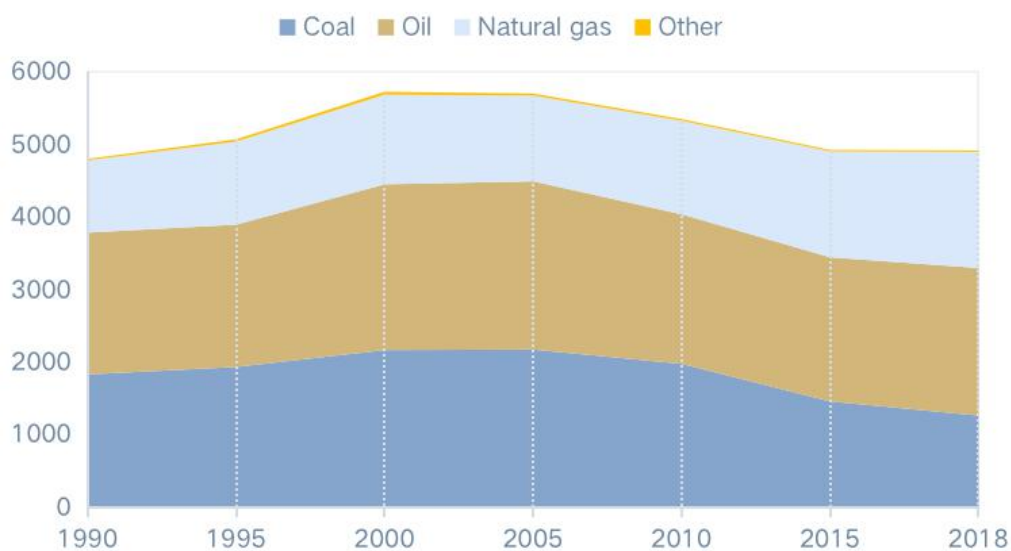
2021 年 1 月，国务院国资委研究制定了《中央企业能源节约与生态环境保护监督管理办法（征求意见稿）》，明确提出中央企业应持续提升能源利用效率，控制温室气体排放，积极参加碳达峰与碳中和行动。据不完全统计，目前已有 29 家中央企业提出了碳中和行动计划，涉及电力、能源、化工、钢铁、交通、有色金属、节能环保等行业，提出加强节能与提高能效，推进能源结构清洁低碳化，加

快技术创新进步，加快碳汇林建设，实施碳捕捉、封存与利用，增加绿色低碳投资等一系列碳中和行动举措。

1.2.4 各国对比

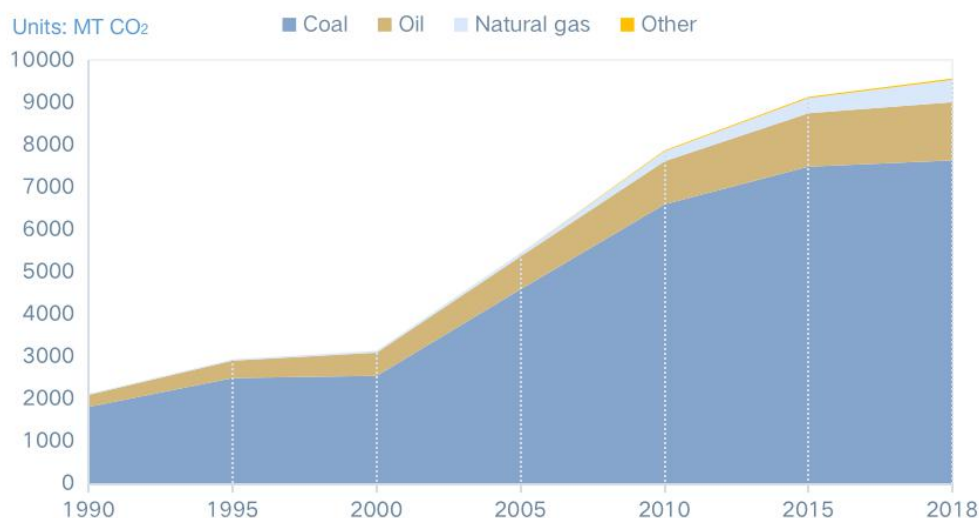
刘晓龙等(2021)比较了中国和日本、美欧盟等主要国家和地区的二氧化碳排放趋势及构成变化，指出中国的碳中和还面临三大挑战：一是中国能源需求总量和二氧化碳排放量还会继续增加，二是中国提出的碳中和目标相比其他国家更有挑战性，三是中国能源结构转型相比其他国家更困难。田慧芳(2020)基于国际碳中和的今早和趋势，提出我国为在 2030 年后加速脱碳需要从能源和产业层面、生产和生活角度加速转型升级，具体可以从这些方面入手：一要优化能源结构，加速“去煤化”进程；二要推动交通电气化，实现交通领域的碳中和；三要加快建筑绿色和智能化；四要促进消费低碳化；五要加快金融绿色化；六要完善碳定价机制，推动碳金融产品创新。

对中美两国当前各部门、各产业的 CO₂ 排放情况和生产布局进行对比，可以得出一些有助于中国推进碳减排的思路。



数据来源: Carbon Monitor

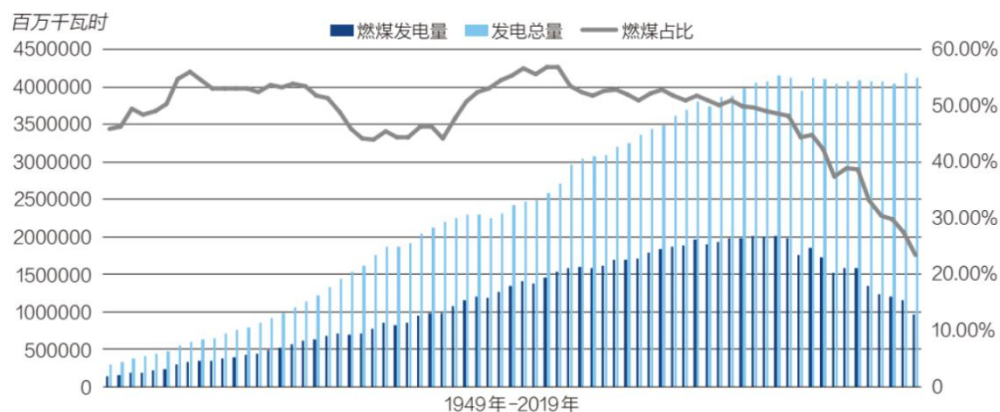
图 3 1990-2018 年美国分能源种类的 CO₂ 排放(单位: Mt CO₂)



数据来源: Carbon Monitor

图 4 1990-2018 年中国分能源种类的 CO₂ 排放(单位: Mt CO₂)

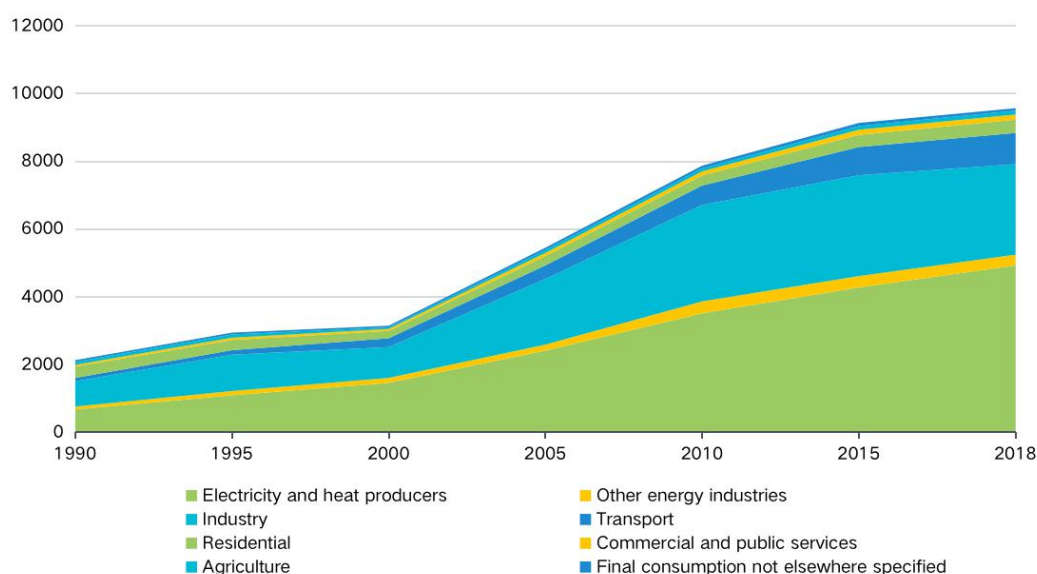
从各能源种类的 CO₂ 排放量变化可以看出, 2005 年后, 美国煤、石油、天然气的碳排放比重更为均衡, 并在整体能源结构中均逐渐下降; 而对中国而言, CO₂ 排放始终处于增加状态, 且煤和石油所占比重相对天然气具有绝对优势。结合美国单位 GDP 能耗不断降低这一事实, 说明美国得益于先进的科学技术和较高的生产率, 在 21 世纪初进入信息化时代以来, 能源结构得到了较大优化。其中最具有标志性的变化发生在 2019 年, 由水力发电、风能、太阳能、地热能、木柴等构成的可再生能源, 首次超过煤炭, 成为第三大能源。这说明了能源结构调整、清洁能源比重的增加对于碳减排的重要性。而这对于还处在经济快速发展的中国来说是一个调整, 如何在保证效率的情况下进行能源结构调整, 是我们实现碳中和面临的一大挑战。



来源：美国能源信息署

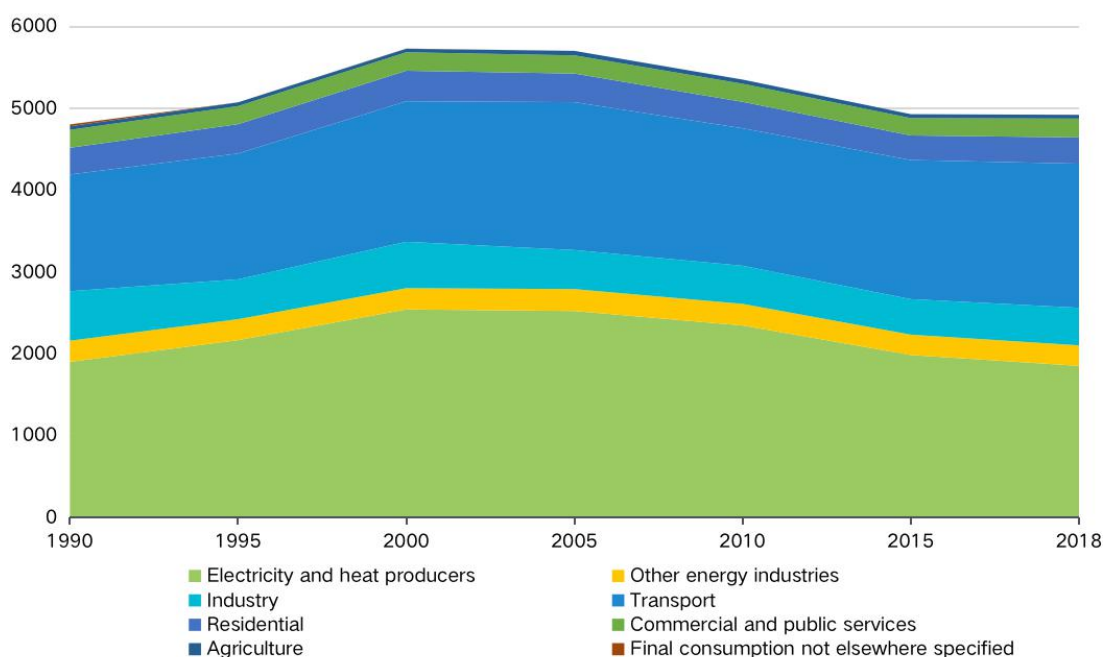
图 5 1949 年-2019 年美国燃煤发电占总发电量的比重变化

除了能源结构的调整，各行业通过不断发展生产技术和改进生产效率带来的碳排放变化也是对于实现碳中和目标的关键。就发电业来说，从美国 1949 年-2019 年燃煤发电占总发电量的比重变化看，美国实现了煤炭发电占比和煤炭发电量逐年下降的同时实现了总发电量的稳定增长。2005 年至 2019 年，发电行业累计减排 54.74 吨，其中 33.51 吨来自天然气对煤炭的替代。不仅仅在发电业，美国在碳排放逐年下降的同时，各部门的碳排放都在逐年下降，说明美国已经在行业转型升级上走上了正轨。



数据来源：Carbon Monitor

图 6 1990 年-2018 年美国分部门碳排放(单位: Mt CO₂)



数据来源: Carbon Monitor

图 7 1990 年-2018 年中国分部门碳排放(单位: Mt CO₂)

与美国相比,我国还处在劳动密集型产业、重工业占主导地位的阶段,巨大的人口体量和经济增长目标使得我国各行业碳排放依旧呈现出明显增长。当然,中美之间的差距受各种现实因素的影响,但美国的成功经验是值得我们学习的。能源科技革命是实现碳中和的根本力量。碳中和涉及能源结构和各部门生产方式、能源利用的深刻变革。

《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五远景目标的建议》顺应了在 2060 年实现中国碳中和目标的布局,相应的要求包括:关键核心技术实现重大突破,进入创新型国家前列;基本实现新型工业化、信息化、城镇化、农业现代化、建成现代化经济体系;广泛形成绿色生产生活方式;碳排放达峰后稳中有降,生态环境根本好转,美丽中国建设目标基本实现;人民生活更加美好、人的全面发展、全体人民共同富裕取得更为明显的实质性进展;加强各个领域的发展,包括但不限于经济、卫生、人均GDP、区域公平和技术。

1.3 研究目标

本文研究目标在于分析中国碳减排的驱动力,《环境研究快报》(Environmental

Research Letters)发表题为《1990-2018 年分行业温室气体排放趋势及驱动因素综述》的文章指出：随着基本驱动因素的延续，几乎没有迹象表明需求受到限制，也没有迹象表明各行业向低碳与零碳服务发生深刻转变。该文章也提出了“识别，理解并应对跨部门的最持久，最具破坏性的气候趋势是相关研究与政策最应该关注的基本问题之一。”³

本文即试图基于结构分解分析等数据分析方法，在部门尺度上定量考察人口增长、经济发展、能源强度变化、碳强度变化和结构转型等因素对于我国历史碳排放量变化的贡献，分析历史碳排放增加的“基本驱动因素”；并进一步分析在未来不同发展情景下各类驱动力影响的可能变化趋势，深入分析中国碳排放的关键驱动因素，探讨我国绿色低碳转型发展路径的有效性和具体政策需求，为我国制定合理的绿色低碳发展政策提供支撑。

2. 数据与分析方法

2.1 方法综述

对于我们使用到的研究方法模型，包括 Kaya 恒等式(袁路，潘家华，2013)^[12]，LMDI 分解方法（鲁万波等，2013；林伯强，2009；郭朝先，2010）^[11]，SDA 分解方法（郭朝先，2010）^[7]，有很多研究给出了较为详细的方法介绍及一些应用上的分析。

一些研究对于世界上不同地区的二氧化碳排放历史数据进行了分解分析。Lin 等使用了 SDA 分解方法分析了中国储蓄对于世界碳排放的影响（Lin et al., 2020）^[4]；Dong 等使用 CEI 分解模型对于中国不同部门的二氧化碳排放进行了因素分解（Dong et al., 2018）^[1]。Mi 等使用了扩展的投入产出表及 SDA 分解分析了 2007-2012 年中国贸易对碳排放的影响（Mi etc., 2017）^[5]。Fan 等使用了 LMDI 分解方法对于中国不同省份城市化带来的碳排放效应进行了分析（Fan, & Zhou, 2019）^[2]。

这些研究利用不同的分解方法对于中国不同地区，不同部门的碳排放进行一些有意义的分析，但这些都是基于历史数据进行的分析。本研究在使用 SDA 方法对于历史数据进行分析的同时，也应用 LMDI 方法对于未来情景数据进行了分析。

情景是描述未来的重要工具，在气候变化、政策影响和能源可持续等全球性

^[3] 参见：《气候变化科学动态监测快报》，中国科学院兰州文献情报中心，2021 年第一期。

问题评估中起着关键作用（翟建青等，2020）^[13]。基于“巴黎协议”中提出的 2 度温升目标，中国主要的三种二氧化碳减排情景为“基准情景”、“1.5℃情景”、“2℃情景”。⁴⁵如果要在 2060 年之前实现碳中和目标，中国需要立刻开始行动并沿着 1.5℃路径不懈努力。而 2℃情景是可行性更高的备用计划——考虑到技术和经济不确定性较大，难以贯彻 1.5℃减排路径时，可采用 2℃减排路径。

本文对于 2005-2050 年（以 2005 年为基年）的 2℃情景数据进行了分析，虽然这一情景距离碳中和的目标达成依然有一定的差距，但我们仍然可以从中看到中国碳减排需要的发展趋势。

2.2 历史数据收集

在进行部门尺度 CO₂ 排放量变化因素分解分析时，首先要获得各部门 CO₂ 排放量的数据，在进行 IDA 和 SDA 分解时，还需要各部门不同能源种类下的 CO₂ 排放量数据。

在我国，通常没有官方公布的 CO₂ 排放数据。国外部分机构，比如美国能源情报署(EIA)，国际能源总署(IEA)，CO₂ 信息分析中心（CDIAC）等，虽然有对于我国 CO₂ 排放数据进行估算，但通常只有较为宏观的数据，不同产业不同能源种类的数据难以获得（鲁万波等，2013）。基于这些现状，我们需要对于不同部门不同能源种类的 CO₂ 排放数据进行估算。

进行估算时，我们主要采用 IPCC/OECD 推荐的方法⁶，主要基于公式：

$$Emission = AD * EF$$

- AD（Activity Data）：人类活动相关数据，主要为各部门各类能源用量数据
- EF（Emission Factors）：单位用量产生的 CO₂ 排放。

2.2.1 历史能源消费数据

不同部门能源消费量数据主要采用了国家统计局中的数据，主要考虑三种能

^[4] 参见《中国低碳发展战略与转型路径研究项目成果介绍》，清华大学气候变化与可持续发展研究院，何建坤，2020.10.12.

^[5] 参见《中国碳中和气候路径报告》，BCG，2020.10.

^[6] 参加 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 1.1 introductions.

源（煤炭、石油和天然气）带来的碳排放，并在分析历史数据时加入了能源加工和转换部门，并将能源平衡表中的中间消费计入其中。

对于历史数据进行分解分析时⁷，我们采用 2002-2017 年的能源平衡表作为能源数据的来源。这里需要简单简要说明各类能源与标准煤的折合关系，在《中国能源统计年鉴》中对于这一点有较为详细的论述。中国普遍采用的折合系数如下表⁸：

表 1： 本文采用的折标准煤系数和排放因子数据

| 能源名称 | 折标准煤系数 | 平均低位发热量 | | 燃料 CO ₂ 排放因子 (kgCO ₂ /TJ) |
|------|--------|---------|-----------------------|---|
| | | 数值 | 单位 | |
| 煤炭 | 0.7143 | 20908 | MJ/t | 87300 |
| 天然气 | 1.215 | 38931 | MJ/k(m ³) | 54300 |
| 原油 | 1.4286 | 41816 | MJ/t | 71100 |

2.2.2 排放因子数据

通常排放因子也需要经过一定的计算得到，参考文献中的方法，不同部门不同能源种类（i 代表能源种类，j 代表部门）CO₂ 排放因子可以通过以下公式计算得到（Guan et al., 2018）：

$$EF_{ij} = NCV_i * EF_i * O_{ij}$$

- NCV（Net Caloric Value）：i 种能源的净热值
- EF：i 中能源单位热值二氧化碳排量
- O：氧化效率

气候变化专门委员会（IPCC）编制的《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》⁹也提供了不同能源的碳排放系数数据的默认值，也进行了参考，同样在上面表中

^[7] 数据来源：国家统计局，年度数据。

^[8] 数据来源：《中国能源统计年鉴》，附录四：各种能源折标准煤参考系数。

^[9] 参见：《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》

一同列出。

2.3 IMED|CGE 模型

我们也采用了 IMED|CGE 模型计算所得的未来 2℃ 情景数据，主要有 2005-2050 年中国劳动力数量，中国总产出数据以及各部门产出数据，中国各部门的碳排放数据，以及全国能源结构数据（煤炭，石油，天然气，以及非化石能源用量），全国一次能源使用量和各部门能源使用量数据。并使用 LMDI 方法利用这些数据进行了因素分解分析。

2.3.1 模型介绍

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价模型。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。

本文中所用的 IMED|CGE¹⁰ (Integrated Model of Energy, Environment and Economy for Sustainable Development, IMED) 模型是由北京大学能源环境经济与政策研究室 (Laboratory of Energy & Environmental Economics and Policy, LEEEP) 自主开发的全球多部门、多区域动态 CGE 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目标年 (2050 年) 期间我国经济走势、产业结构变化、能源消费及其碳排放趋势。

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，不考虑其它排放源如生产过程排放和土地利用排放。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。大体而言，未来能源与二氧化碳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。

^[10] 模型最新介绍可见：<http://scholar.pku.edu.cn/hanchengdai/imedcge>

2.3.2 数据

本模型包含 41 个部门，以 2005 年社会经济数据为基础，包括投入产出表与能源平衡表，以一年为步长动态求解至 2050 年，模拟我国产业结构变化、经济走势、能源消费及污染物排放趋势。

人口和经济数据基于国际应用系统分析研究所(International Institute For Applied Systems, IIASA)的社会经济数据，碳限额基于 ADVANCE (Advanced Model Development and Validation for the Improved Analysis of Costs and Impacts of Mitigation Policies)、CD-LINKS (Linking Climate and Development Policies - Leveraging International Networks and Knowledge Sharing)及其他文献。

2.3.3 情景设置

如表 1 所示，根据温升目标，将情景分为三类：基准情景（Baseline）、2℃温升目标情景和 1.5℃温升目标情景。这三类情景的区别在于二氧化碳排放路径，即逐年排放量的不同。如果中国沿 1.5℃温升目标情景发展，可以达到 2060 年碳中和目标，而 2℃情景是考虑到社会经济不确定性的情况下，1.5℃情景的可替代情景。

接下来进一步将其根据社会经济发展路径（SSP）分为 SS1、SSP2 和 SSP3 三类。SSP 情景即是“共享社会经济情景” (Shared-socioeconomic Pathways)。不同的 SSP 情景即代表着不同的社会经济发展路径。它是 IPCC 第五次评估报告[6]提出的最新一代情景，较详细地刻画了社会经济发展的各类定性和定量指标，包括人口与经济增长、能源结构、技术发展水平、社会平等性、社会偏好等。其中，SSP1 为可持续发展情景，此情景下全球加强协作、共同走绿色发展道路，全球面临的减缓和适应性挑战均最低；从 SSP2 到 SSP3 情景，减缓和适应性挑战逐渐增强。

此外，考虑到温升目标的不确定因素，设置了高、中、低三种碳排放路径。由此形成了一个包括三个维度的情景矩阵，一共有 21 个情景。

表 2：情景设置

| | |
|--|----------|
| | 社会经济发展路径 |
|--|----------|

| | | SSP1 | SSP2 | SSP3 |
|-------------------|--------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Baseline | | Base SSP1 | Base SSP2 | Base SSP3 |
| 2 Degree | High end | 2 Degree SSP1 High | 2 Degree SSP2 High | 2 Degree SSP3 High |
| | Medium range | 2 Degree SSP1 Medium | 2 Degree SSP2 Medium | 2 Degree SSP3 Medium |
| | Low end | 2 Degree SSP1 Low | 2 Degree SSP2 Low | 2 Degree SSP3 Low |
| 1.5 Degree | High end | 1.5 Degree SSP1 High | 1.5 Degree SSP2 High | 1.5 Degree SSP3 High |
| | Medium range | 1.5 Degree SSP1 Medium | 1.5 Degree SSP2 Medium | 1.5 Degree SSP3 Medium |
| | Low end | 1.5 Degree SSP1 Low | 1.5 Degree SSP2 Low | 1.5 Degree SSP3 Low |

2.4 SDA 分解方法

2.4.1 方法介绍

基于顾阿伦（2016）的 IO-SDA 研究方法主要以郭朝先学者于 2010 年的论文中提出的 SDA 的“双层嵌套式”结构分解表达式为基础（郭朝先，2010）^[8]，主要原理如下：

通过获取若干年的投入产出表与能源平衡表构建下述的（进口）竞争型经济—能源—碳排放投入产出表表式。其中表格最左侧的“中间投入”至“总投入”三行的内容从投入产出表整理获得，“能源消费”至“碳排放量”三行的内容则根据相对应年份的能源平衡表的整理填入。

表 3：（进口）竞争型经济—能源—碳排放产出

| | 中间使用 | 最终需求（Y） | 进口 | 总产出 |
|--|------|---------|----|-----|
|--|------|---------|----|-----|

| | | 消费 | 资本形成 | 出口 | | |
|------|------------|-----|------|------|------|-----|
| 中间投入 | AX | C | I | EX | IM | X |
| 增加值 | V | | | | | |
| 总投入 | X^T | | | | | |
| 能源消费 | $E\hat{X}$ | | | | | |
| 能源结构 | F | | | | | |
| 碳排放量 | Q^T | | | | | |

其中：

- A 是投入产出直接消耗系数矩阵，
- X 是总产出列向量，
- X^T 是总投入行向量（ X^T 是 X 的转置），
- Y 是最终需求矩阵（包括三个部分，即消费向量 C 、资本形成向量 I 和出口向量 EX ），
- IM 是出口列向量，
- E 是分产业部门的能源消费强度行向量，
- $E\hat{X}$ 表示分产业部门的能源消费量（ \hat{X} 表示 X 的角阵），
- F 表示能源结构矩阵（指所选取的若干类能源在各部门分别所占比重）

由上述表格可以看出，碳排放总量可以表示为 $Q = cF\hat{E}X$ （ c 是二氧化碳排放系数向量），若令 $S = c \times F$ ，并将其写成角阵的形式，则 $Q = \hat{S}\hat{E}X$ 。则碳排放量变化值可以直接表示记作 $\Delta Q = Q_1 - Q_0 = \hat{S}_1\hat{E}_1X_1 - \hat{S}_0\hat{E}_0X_0$ ，其中，下标 1,0 分别表示变量在报告期与基期的取值。

首先，可将 ΔQ 分解为 $\Delta \hat{S}\hat{E}_0X_0 + \hat{S}_1\Delta \hat{E}X_0 + \hat{S}_1\hat{E}_1\Delta X$ 或者为 $\Delta \hat{S}\hat{E}_1X_1 + \hat{S}_0\Delta \hat{E}X_1 + \hat{S}_0\hat{E}_0\Delta X$ 。在对 ΔQ 进行下一步细化的分解分析上，通常有四种形式（①保

留交叉项；②不保留交叉项，将其以不同权重方式分配给各自变量；③加权平均法；④两极分解法或中点权分解法），主要区别在于对其中出现的交叉项的处理方式不同，我们选择的是其中误差较小，操作流程较为直观的两极分解法：

$$\text{即 } \Delta Q = \frac{(\Delta \hat{S}E_0X_0 + \Delta \hat{S}E_1X_1)}{2} + \frac{\hat{S}_1\Delta \hat{E}X_0 + \hat{S}_0\Delta \hat{E}X_1}{2} + \frac{\hat{S}_1\hat{E}_1\Delta X + \hat{S}_0\hat{E}_0\Delta X}{2}$$

之后，根据投入产出表平衡关系式，经济规模变化 ΔX 可以进行细分为国内需求变动效应、出口扩张效应、进口替代效应、技术变动效应，因此将 ΔX 进一步分解后的结果代入则可以形成“双层嵌套”的结构分解。

下述恒等式成立：总产品=国内生产国内使用的中间产品+国内生产国内使用的最终需求产品+出口产品

$$X_0 = \hat{U}_0 A_0 X_0 + \hat{U}_0 (C_0 + I_0) + EX_0; \text{ 以及, } X_1 = \hat{U}_1 A_1 X_1 + \hat{U}_1 (C_1 + I_1) + EX_1$$

\hat{U} 为国内供给比率的对角矩阵，对角元素 u_i 为各部门产品的国内供给比率，计算公式为 $u_i = \frac{x_i - e_i}{x_i - e_i + m_i}$ 其中， m_i 为进口列向量 IM 、 e_i 为出口列向量 EX 、 x_i 为总产出列向量 X 相应的元素。

代入（廖明球，2009）后，令 $R_0 = (I - \hat{U}_0 A_0)^{-1}$ 、 $k = (\hat{S}_1 \hat{E}_1 - \hat{S}_0 \hat{E}_0)/2$ ，最后可以得到：

$$\begin{aligned} \Delta Q = & (\Delta \hat{S}E_0X_0 + \Delta \hat{S}E_1X_1)/2 \dots\dots \text{能源消费结构变动效应} \\ & + (\hat{S}_1 \Delta \hat{E}X_0 + \hat{S}_0 \Delta \hat{E}X_1)/2 \dots\dots \text{能源消费强度变动效应} \\ & + k(R_0 \hat{U}_0 + R_1 \hat{U}_1) \Delta C/2 \dots\dots \text{消费扩张效应} \\ & + k(R_0 \hat{U}_0 + R_1 \hat{U}_1) \Delta I/2 \dots\dots \text{投资扩张效应} \\ & + k(R_0 + R_1) \Delta EX/2 \dots\dots \text{出口扩张效应} \\ & + k[R_0 \Delta \hat{U}(A_1 X_1 + C_1 + I_1) + R_1 \Delta \hat{U}(A_0 X_0 + C_0 + I_0)]/2 \dots\dots \text{进口替代效应} \\ & + k(R_0 \hat{U}_0 \Delta A X_1 + R_1 \hat{U}_1 \Delta A X_0)/2 \dots\dots \text{投入产出系数变动效应} \end{aligned}$$

2.5 IDA——LMDI 分解方法

2.5.1 kaya 恒等式

借助 kaya 恒等式，可以将二氧化碳总排放量分解为碳密度、能源强度，经济结构和经济规模四要素的乘积形式（在具体应用时乘积形式会有所变化）：

$$CE^t = \sum_i CE_i^t = \sum_i \frac{CE_i^t}{E_i^t} \times \frac{E_i^t}{GDP_i^t} \times \frac{GDP_i^t}{GDP^t} \times GDP^t = \sum_i CI_i^t \times EI_i^t \times ES_i^t \times G^t$$

i ：第 i 个经济部门；

CE^t ： t 时期的碳排放总量；

CE_i^t ：部门 i 在第 t 年度内的碳排放总量；

E_i^t ：部门 i 在第 t 年度内消耗的能源总量；

GDP^t ：第 t 年度内的国内生产总值；

GDP_i^t ：第 t 年度内部门 i 的产出；

CI_i^t ：第 t 年度部门 i 的碳排放密度 ($CI_i^t = CE_i^t / E_i^t$)；

EI_i^t ：第 t 年度部门 i 的能源强度 ($EI_i^t = E_i^t / GDP_i^t$)；

ES_i^t ：第 t 年度部门 i 的经济份额 ($ES_i^t = GDP_i^t / GDP^t$)；

G^t ：即 GDP^t 。

2.5.2 因素分解介绍

在碳排放变化影响因素分解领域，对数均值迪氏指数分解法(logarithmic mean Divisia index approach, LMDI)因具备诸多优良的特征被广泛应用，该方法可以消除不能解释的残差项，也能够合理处理数据中的 0 值问题，并且计算过程简单，分解结果直观。在进行全国数据计算时，我们选取了人口、GDP、能源强度、能源结构碳强度四个影响碳排放的最主要直观的方面为分解因素；在对各部门进行分解时，主要选用了部门产出，部门能源强度，碳排放强度三个因素，分别进行 LMDI 分解。其中：“能源强度”即单位产出一单位能源消费量，反映经济结构、经济体制、技术水平、能源结构等对能源的依赖程度；“能源结构碳强度”则衡量不同一次能源消费结构的清洁程度。

LMDI 模型中运用了上述 kaya 恒等式，进行分解时我们运用了加法形式，分解式如下：

$$\begin{aligned}\Delta C_{\text{tot}} = & \sum_i \sum_j L(\omega_{ij}^t - \omega_{ij}^{t-1}) \ln\left(\frac{P^t}{P^{t-1}}\right) + \sum_i \sum_j L(\omega_{ij}^t - \omega_{ij}^{t-1}) \ln\left(\frac{Y^t}{Y^{t-1}}\right) \\ & + \sum_i \sum_j L(\omega_{ij}^t - \omega_{ij}^{t-1}) \ln\left(\frac{M^t}{M^{t-1}}\right) + \sum_i \sum_j L(\omega_{ij}^t - \omega_{ij}^{t-1}) \ln\left(\frac{S^t}{S^{t-1}}\right) \\ & + \sum_i \sum_j L(\omega_{ij}^t - \omega_{ij}^{t-1}) \ln\left(\frac{I^t}{I^{t-1}}\right) = \Delta C_P + \Delta C_Y + \Delta C_M + \Delta C_S + \Delta C_I\end{aligned}$$

式中 P, Y, M, S, I 分别代表人口，总产出，能源强度，能源结构，碳排放强度。

$$\text{式中 } L(x, y) = \begin{cases} (x - y) / (\ln x - \ln y), & x \neq y > 0 \\ x, & x = y > 0 \end{cases}$$

3. 结果分析

3.1 中国历史数据二氧化碳排放结构分解

3.1.1 数据处理简述

我们选取 2002、2007、2012、2017 这四个年份，试图利用 SDA 方法对每两个年份之间，每个部门的二氧化碳排放量及其占比进行计算与分解。

首先，我们搜集了国家统计局网站上公布的四个年份的投入产出表数据。由于年度的投入产出表对部门做了很细致的分类，因此在此次研究中，为了操作的可行性与数据之间的匹配性，我们将其内部的部门合并后，统一划分调整为六部门，分别是“农林牧渔业”“工业”（除能源部门）“能源转换部门”“建筑业”“交通运输、仓储和邮政业”“服务业”。

之后，我们根据能源年鉴里“煤”、“石油”、“天然气”在以上四个年份、六个部门所分别对应的消耗数据建立能源强度与能源结构矩阵，最后加上三种能源相应的排放因子即可利用 Matlab 软件编程进行 SDA 的分解计算。

3.1.2 历史结果分析

从分析结果来看，2002 年到 2017 年，我国的二氧化碳始终处于不断增长的态势，但增长量呈现出逐渐下降的趋势，二氧化碳排放量上升幅度的减缓尤其体现

在 2012 到 2017 年之间，相比 2002-2007 与 2007-2012 五年间二氧化碳排放量的增长均达到了 20 亿吨以上，2012-2017 年排放量仅增长约 2.7 亿吨，这表明我国在“十二五”与“十三五”期间在减排上付出的努力起到了比较显著的成效。但 2030 年碳达峰的目标仍约束着国内经济生产降低二氧化碳排放量，以按时实现零增长。

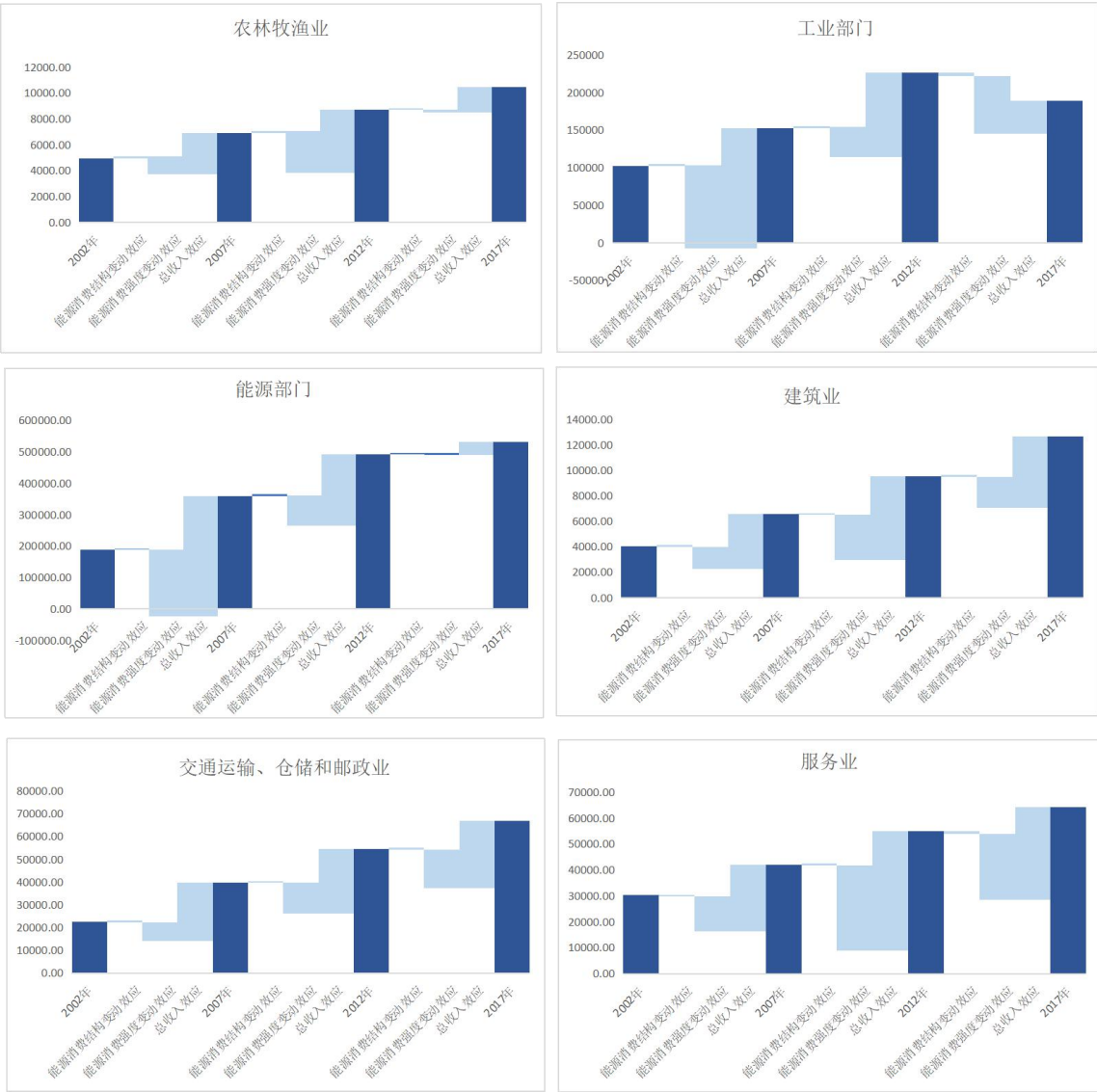


图 8 2002-2017 年中国 6 部门二氧化碳排放因素结构分解结果（单位为万吨二氧化碳）

根据 SDA 分解方法对六大部门与七种效应的结果分析，我们可以发现：

能源消费结构的变动在 2002-2012 的十年之间并没有对减排做出明显贡献，相反还使二氧化碳排放量出现了一定的增长，这可能是由于工业在快速增长发展的过程中产生了对煤炭、石油等非清洁能源的重度依赖，从而使得整个行业体系的能源消费长时间处于一种较为稳定但对于减排而言并不合理的结构。

而在 2012-2017 的五年期间，国家对于能源结构转型做出了更多的举措，包括政府方面对可再生能源价格的下调，同时适度提高一次能源的价格倒逼企业进行技术升级与能源结构调整，这些政策与举措在一定程度上推动了清洁能源的发展与应用，另外能源价格的市场化改革也使得市场的力量充分发挥了出来，对能源部门的调控发挥出了更为显著的减排优势，计算结果显示 2012-2017 五年间能源结构变动为减排贡献了 0.6 亿吨，但事实上这相比于能源消费强度对减排的贡献还很不足。

能源强度的变动一直以来都为减排做出了巨大的贡献，从 2002-2007 年的 34.8 亿吨、2007-2012 年为 18.9 亿吨、2012-2017 年则为 12.4 亿吨，减排成效可见一斑。

能源消费强度变动在 2002-2007 年减排 34 亿吨，2007-2012 年减排 19 亿吨，到 2012-2017 年减排仅 12 亿吨，由此可见其对于减排的积极作用与优势正在逐渐减弱，且下降趋势明显。这主要是因为之前的粗放式经济发展模式积累了大量冗余的消耗，随着技术的进步与政策的落实，一旦对减排的环保目标有足够重视，则在能源消费的总量上进行削减是比较容易的。但最终经济发展离不开不同部门对能源的消耗，因此当能源强度已经快要到达较低的水平时，很难再利用强度的削减来提供显著的减排效果。由此可以预测，未来的减排措施不应当再将重心放在能源消费强度之上，而是应当努力在其他方面寻求合适的减排路径。

考虑其他效应可以发现：

消费扩张效应和投资扩张效应始终维持在 10~20 多亿吨的二氧化碳排放水平，并且对二氧化碳排放量增长的贡献呈现出先上升后下降的变化趋势，可以认为是市场中消费和投资逐渐趋于科学与理性化的结果。

出口扩张效应则呈现出明显的减弱趋势，从最初的 17 亿吨（2002-2007 年增加的排放量）的排放水平降至不到 4 亿吨（2012-2017 年增加的排放量），由此可见，出口扩张对我国二氧化碳排放增长的贡献越来越小。

进口替代效应，投资产出系数变动效应则从 21 世纪最初几年的贡献 15 亿吨的二氧化碳的增长一直降低到近年来减少 16 亿吨二氧化碳的排放。这背后反映出的是技术进步如今在减排中正在扮演的越来越重要的角色，例如科学技术进步、管理集约化、产业结构变动等等影响投资产出系数的“隐形”调整会在根本上改善产业的生产与经营模式，从而有效降低碳排放量。

从部门角度进行分析，农业部门、建筑业、交通运输业、服务业的碳排放呈

现的是稳步增长的趋势，并且在不同效应中能源消费结构的贡献与能源消费强度以及总收入效应相比均微不足道。后两者中，能源消费强度的变动一定程度上降低了碳排放量，但总收入效应则贡献了更大的碳排放量的增长，因此从整体角度来看，2002 到 2017 年我国二氧化碳排放量保持加速度不断放缓的增长模式。

而工业部门作为碳排放的重中之重，变动的趋势也呈现出明显的复杂性，有必要进行单独与具体的分析。在 2002 到 2007 年间，能源消费强度与总收入效应分别贡献了大量的减排与增排效果（能源消费强度减少了约 10 亿吨的碳排放，而总收入效应增加的碳排放量则高达约 15 亿吨），最终使得碳排放量有显著上升；2007 到 2012 年间，这两类效应的减排效果则有所减弱（能源强度减排量下降了约 65%，仅提供了近 4 亿吨的减排贡献，总收入效应下降了 30% 左右，增加排放量约 11 亿吨），但综合效果仍然是碳排放的显著增长；2012 到 2017 年间，能源消费强度的二氧化碳排放量减少的贡献明显增加（降低 7.7 亿吨碳排放），与此同时总收入效应的势头有所减弱（仅增长 4.4 亿吨碳排放），最终使得 2017 年的二氧化碳排放量有比较显著（3 亿吨）的下降，但相对来看排放水平仍然处于较高的状态。

另一个值得重点分析的是能源部门，尽管从 2002 年到 2017 年始终呈现出增长态势，但不同效应的贡献程度变化情况很大，并且排放量的增速有所减缓。2002 到 2007 年，能源消费强度和总收入效应的影响很大，甚至超过了 2002 年总排放的二氧化碳量（18.9 亿吨），由于总收入效应远远超出能源强度变动效应，因此最后反映的效果为 2007 年碳排放量显著增长；2007 到 2012 年的变化趋势大致同之前五年（2002-2007）一致，能源强度与总收入效应都有所减弱，但最终实际的增长量仍然属于显著上升的状态（二氧化碳排放增长 13 亿吨）；2012 到 2017 年，不同效应的贡献度则发生了较大的变动，能源强度与总收入效应的贡献都明显放缓，能源强度更是下降至能源结构变动的量级（百万至千万吨量级），碳排放量的增速相较于之前年度有了明显放缓。可以推测，能源部门的改革对于碳排放量的增长产生了深刻的影响。

3.2 2°C情景下未来中国二氧化碳排放因素分解



图 9 2005-2050 年 LMDI 分解结果

分析三个时间阶段的碳排放变化因素分解结果，可以发现，未来人口效应会提供负的碳排放贡献，同时产出效应会有较为明显的下降，虽然我国的不变价 GDP 在 2050 年能够达到 2005 年的 6 倍左右，但未来我国的经济增速会逐渐趋缓，这也是碳排放量能够较为有效地控制的重要原因。

在 2020-2035 年间，我国的化石能源强度下降明显，2035 年我国总产出能够达到 2020 年的 1.5 倍，而能源消费却几乎持平，能源强度的下降，是这一阶段碳排放下降的重要驱动力。

而在 2035-2050 年，我国则主要依赖能源结构的转变实现碳排放的降低，由于化石能源使用的降低，碳排放强度的下降趋势不再明显。而我国 2050 年非化石能源的使用量增长至 2035 年的两倍，与此同时，煤炭的使用量却下降为 2035 年的二分之一。

从整体上看，能源强度的下降和能源结构的转型是中国未来实现碳中和的主要驱动力。

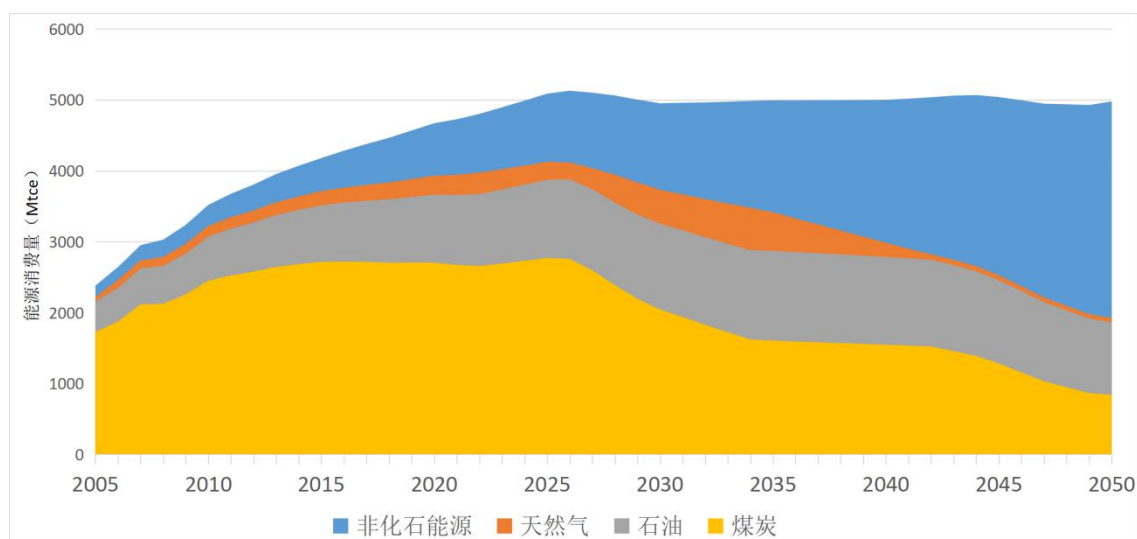


图 10 2005-2050 年中国一次能源结构变化

图 10 中展现了中国在 2℃ 情境下能源结构的变化趋势，我们可以看到，非化石能源的量以一种较为平滑的趋势上升，在 2050 年已经可以达到 6 成，而三种主要化石能源占比却产生了各不相同的变化，煤炭的使用下降最为显著，而在过渡阶段，为治理空气污染，天然气在特定时期用量有所增加，总的来看，化石燃料的使用呈现先升后降的趋势，并需要在 2050-2060 年下降至一个较低的水平。长期以煤炭作为主要能源的中国，必须在几十年的时间内完成能源结构翻天覆地的改变。

3.3 2℃情景下中国六部门二氧化碳排放因素分解

2℃ 情境下，中国能够在 2025 年前后实现碳达峰，峰值可达百亿吨二氧化碳，而各产业呈现出各不相同的变化趋势。

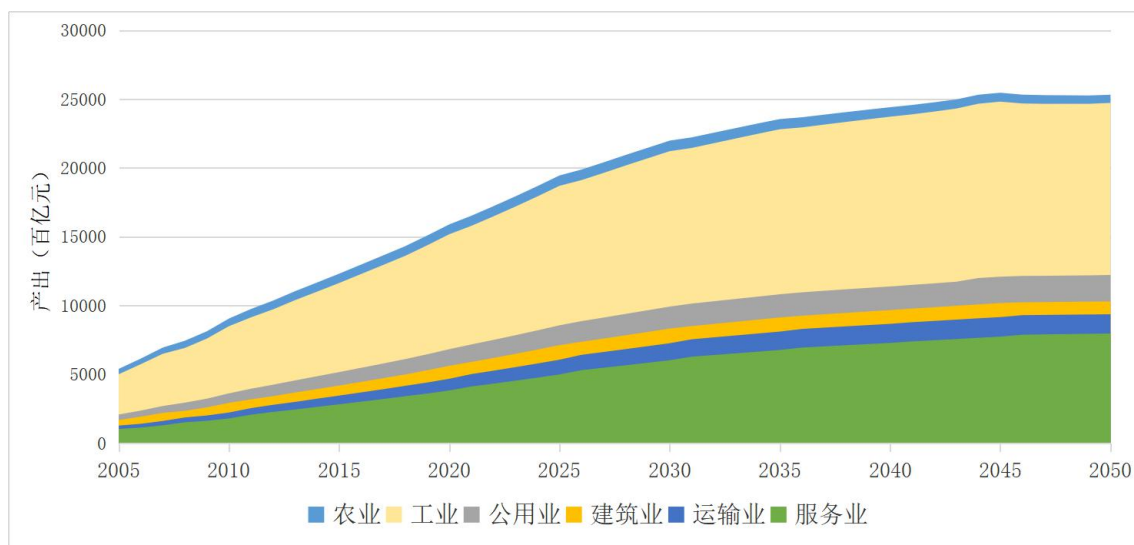


图 11 2005-2050 年中国 6 部门产出变化

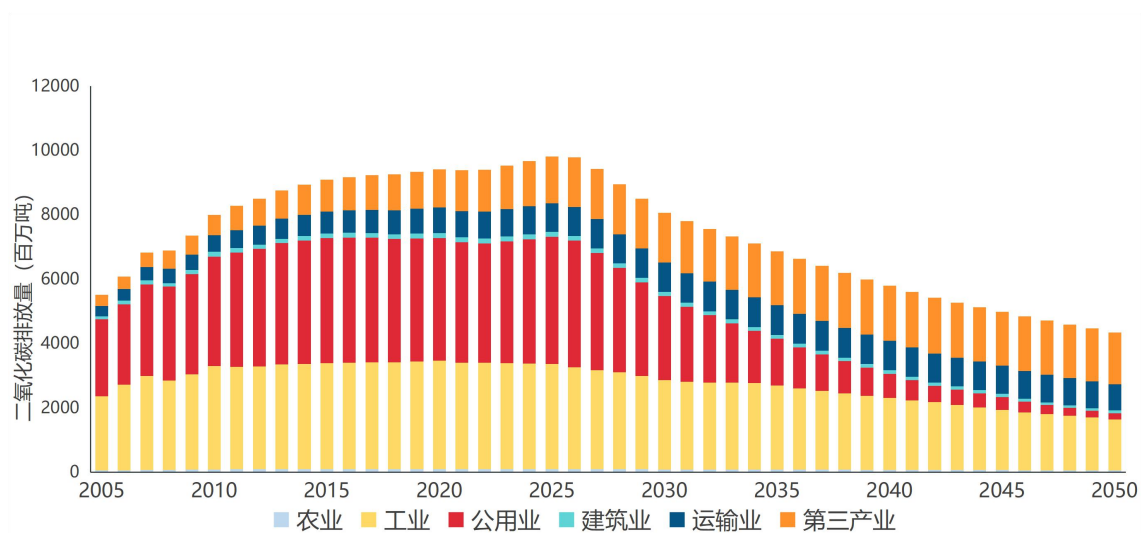


图 12 2005-2050 年中国六部门二氧化碳排放变化

目前对于我国碳排放贡献较为明显的是能源行业和工业，而到 2050 年，由于第三产业的总产出持续上升，二氧化碳排放长时间缓慢上升，第三产业将会在碳排放总量中占据重要的地位，到 2050 年第三产业大约可贡献全国 37% 的碳排放，与工业大致相当。另外，值得注意的是，沿 2℃ 情景，中国的发电行业能够在 2050 年之前实现零碳发电，这对于碳中和目标的实现是极为有利的。

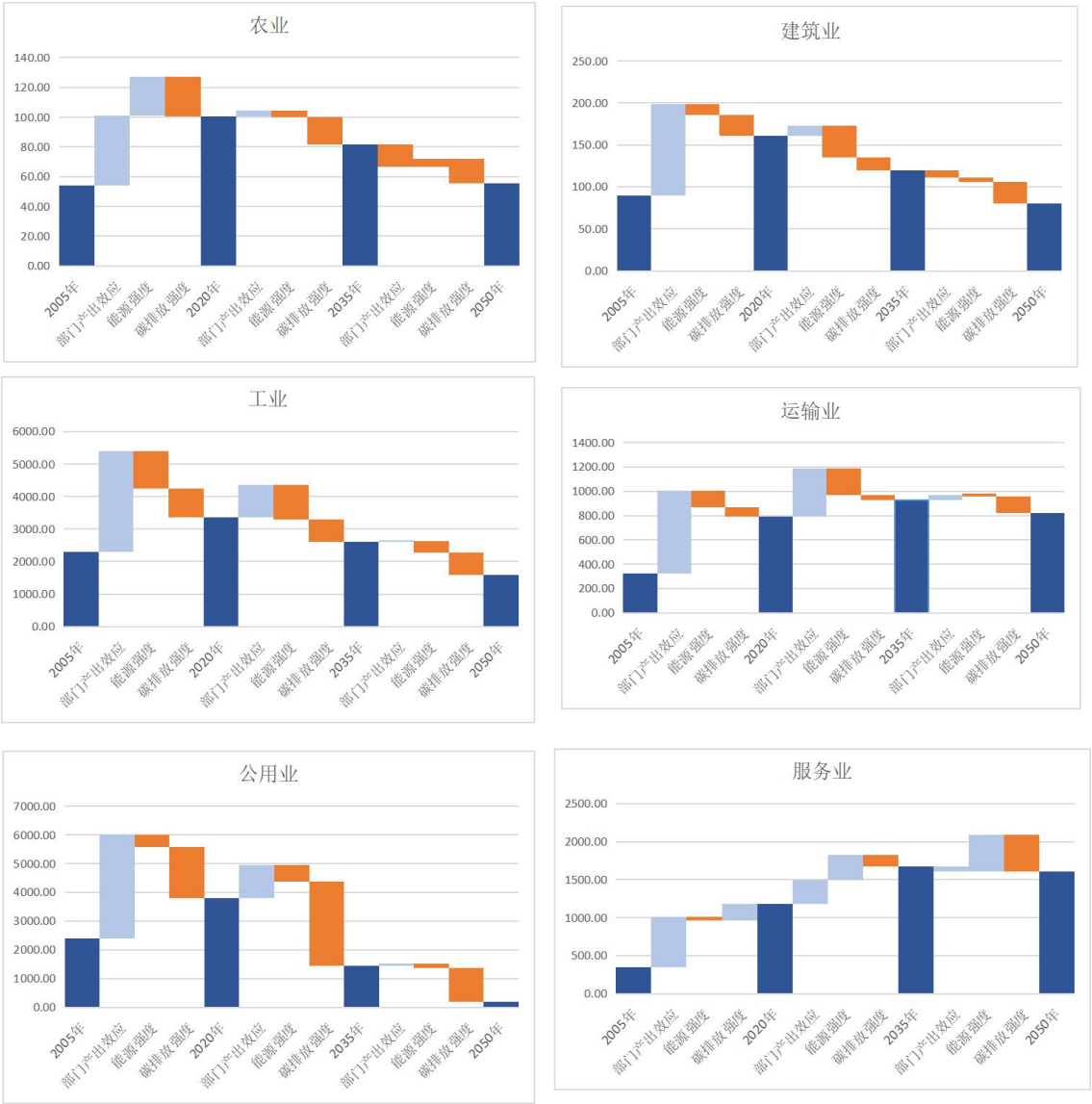


图 13 2005-2050 年中国 6 部门二氧化碳排放因素分解

从因素分解结果中可以看到，中国各部门产出几乎都呈现上升趋势，对于碳排放带来正的贡献。而碳排放强度主要反映了能源结构等信息，可再生能源的使用增加能够使得碳排放强度有效降低，所以碳排放强度的降低带来的碳减排也是各部门的共同特点。

分别来看，农业碳排放量总体较低，未来的农业碳减排主要依赖碳排放强度的降低；建筑业在过去的十几年中，能源强度有较为明显的上升，但在 2℃ 情景下，需要在未来较为迅速地降低能源的使用量，同时转变能源结构；工业是实现碳中和的重点部门，碳排放量一直占有较大的比重，未来产出的增加会逐渐缓慢，并主要依赖能源强度和能源结构的转变实现碳排放的下降；而由于产出的增加，再

加上能源强度和碳排放强度下降并不明显，运输业并不能实现有效的碳排放的下降；未来公用业碳排放下降最为明显，这主要得益于碳排放强度效应，非化石能源的使用推动电力部门实现零排放，使得电力部门走在碳中和的前列；服务业在未来会成为碳排放的主要贡献部门，这主要是由于产出的大量增加以及能源使用的增加。

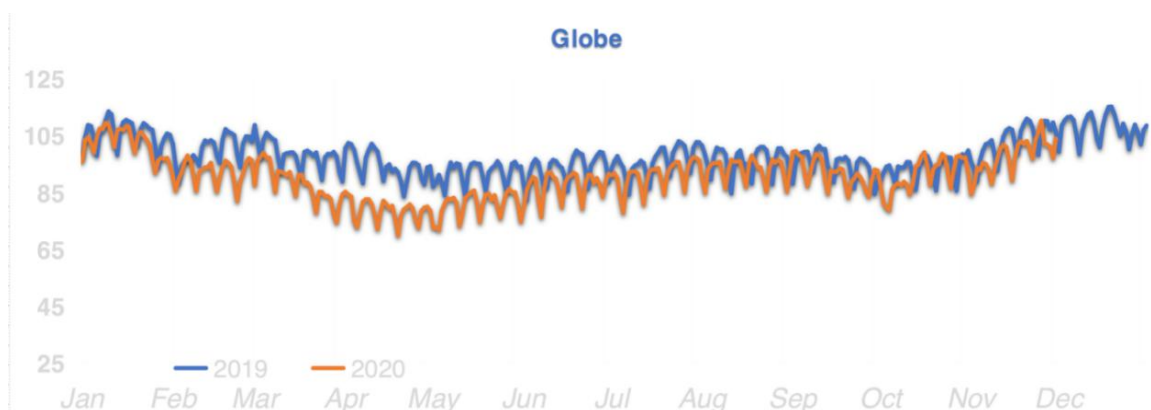
4. 讨论与总结

4.1 挑战与展望

4.1.1 疫情冲击下的碳减排

根据全球碳项目的最新数据，在新冠疫情席卷全球的大背景下，2020 年全球碳排放下降了 7% 左右，约 24 亿吨，约相当于印度正常的年度二氧化碳排放量，是有史以来的最大绝对排放下降。我们可以从不同角度来解读这一变化：第一，疫情在全球已经造成了生产活动的停滞或减缓，重点部门的排放因此下降。虽然这不是我们所期待的，但可能会持续很长时间的新冠疫情确实为降低碳排放做出了贡献。第二，新冠疫情给世界的公共卫生安全和社会经济发展都带来了沉重打击，与此对应的 7% 的减排量与此相比并不对等，这说明这样的牺牲与我们阻止气候变化需要做的努力相比，显得微不足道，更说明不能以牺牲发展作为减排的代价，我们无法承担这样的后果，而应该通过政策调整、能源结构优化、生产方式转型升级的方式合理推进碳减排进程。

同时，从下图可以看出，在疫情比较严重的春季，全球和中国、印度、美国的时段碳排放量都有明显下降，其后都有回升的走势，这说明疫情带来的碳减排中包含太多意外因素。1918 年，在西班牙流感的高峰时期，二氧化碳排放量下降了近 14%，第二年反弹了 15%；2009 年的经济危机使得数亿人失业，碳排放降低了 4.8 吨，在 2010 年却反弹至 16.5 亿吨。这说明 2021 及以后的碳排放形式并不乐观，全球碳治理依旧面临重重挑战。



数据来源: carbon monitor

图 14 2019-2020 同时段 CO₂ 排放对比图

2020-2021 年全球经济在疫情冲击下增速放缓, 导致了碳排放的短暂下降, 但是其他驱动因素没有发生本质变化, 因此这种碳排放的下降是以巨大经济为代价、且不可持续的。未来疫情得到控制后, 预期全球经济回暖, 在各大驱动因素的作用下, 全球碳排放还会反弹, 因此需要更严格的碳减排措施。

4.1.2 国际合作形势

4 月 10 日, 拜登总统邀请 40 位世界领袖参与他即将于 4 月 22 日和 23 日召开的领导人气候峰会^[1], 会议的最重要主题也是实现 1.5℃ 温升目标。美国在气候变化问题上的回归对于中国乃至全世界的碳减排都有着较大的促进作用, 我们的研究只着眼于中国自身, 而国际合作也是中国在碳中和道路上必须重视的一点, 同样需要进一步的研究分析。

4.2 总结

本研究借助不同的经济学模型的计算与分解, 分析了我国实现“碳达峰”与“碳中和”目标的驱动力, 并为之提供了理论上的支撑与数据上的预测。

能源上, 我国需要大力支持非化石能源的普及与应用, 通过政策补贴, 价格调整等方式促进企业技术的转型与调整, 制造更广泛的可再生能源需求, 并借此降低对煤、石油、天然气的消耗。

^[1] 参见美国驻华大使馆和领事馆网站:

<https://china.usembassy-china.org.cn/zh/president-biden-invites-40-world-leaders-to-leaders-summit-on-climate/>

从部门方面分析，工业与能源转换部门在未来具有强劲的减排潜力，需要积极借助能源结构的调整与转型降低劣质能源的使用，提升清洁能源的利用比例以及能源的使用效率，从而实现绿色生产的发展模式。预测结果也显示出工业、建筑业、公用业、运输业等部门的产出在未来仍然处在增长的过程中，但碳排放量会有较大下降，这需要相应行业的不同主体共同发挥减排潜力。

对企业而言，企业本身需要积极主动地进行内部的调整与改革，从投入产出系数变动的角度，提高管理的效率与减排科技的投入，从而降低碳排放。另外也需要积极平衡投资、出口、消费的扩张与进口替代四者之间对碳排放的贡献程度，通过内部调整努力使其被限制在合理的水平内。

另外，2℃情景下，人口数量与人均 GDP 对于碳排放减少的贡献也是不容忽视的，因此仍需要坚持我国人口的科学、平稳增长，促进人口与经济的协调发展。

通过对于我国实现碳中和的驱动力进行分析发现，我国需要付出极大的努力，完成深刻的社会变革，尤其是在能源结构上，同时也需要很好地应对各种挑战，才能完成碳中和的历史使命。

【参 考 文 献】

- [1] Dong, F. , Yu, B. , Hadachin, T. , Dai, Y. , Wang, Y. , & Zhang, S. , et al. (2018). Drivers of carbon emission intensity change in China. *Resources. Conservation and Recycling*, 129, 187-201.
- [2] Fan, J. S. , & Zhou, L. . (2019). Impact of urbanization and real estate investment on carbon emissions: evidence from China's provincial regions. *Journal of Cleaner Production*, 209(FEB.1), 309-323.
- [3] Guan Dabo, Meng Jing, Reiner David M, et al. (2018). Structural decline in China's CO₂ emissions through transitions in industry and energy systems. *Nature Geoscience*.
- [4] Lin, C., Qi, J. , Liang, S. , Feng, C. , & Yang, Z. . (2020). Saving less in china facilitates global CO₂ mitigation. *Nature Communications*, 11(1), 1358.
- [5] Mi, Z. , Jing, M. , Guan, D. , Shan, Y. , & Hubacek, K. . (2017). Chinese CO₂ emission flows have reversed since the global financial crisis. *Nature*

Communications, 8(1), 1712.

- [6] 顾阿伦, & 吕志强. (2016). 经济结构变动对中国碳排放影响——基于 io-sda 方法的分析. *中国人口资源与环境*, 26(003), 37-45.
- [7] 郭朝先. (2010). 中国碳排放因素分解: 基于 LMDI 分解技术. *中国人口·资源与环境*, 020(012), 4-9.
- [8] 郭朝先. (2010). 中国二氧化碳排放增长因素分析——基于 SDA 分解技术. *中国工业经济*, 000(012), 47-56.
- [9] 林伯强. (2009). 中国二氧化碳的环境库兹涅茨曲线预测及影响因素分析. *管理世界*, 187(4), 27-36.
- [10] 廖明球. (2009). *投入产出及其扩展分析*. 北京: 首都经济贸易大学出版社.
- [11] 鲁万波, 仇婷婷, 杜磊. (2013). 中国不同经济增长阶段碳排放影响因素研究. *经济研究*, 048(004), 106-118.
- [12] 袁路, 潘家华. (2013). Kaya 恒等式的碳排放驱动因素分解及其政策含义的局限性. *气候变化研究进展*, 009(003), 210-215.
- [13] 翟建青, 徐新武, 景丞. (2020). 路径下实现全球可持续发展目标的可能性分析. SSPs.