

doi:10.19920/j.cnki.jmsc.2024.04.001

面向碳中和目标的中国工业部门减排路径与战略选择^①

陈诗一^{1,2}, 王畅¹, 郭越^{3,4}

(1. 复旦大学经济学院, 上海 200433; 2. 复旦大学国际金融学院, 上海 200433; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101; 4. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 工业部门(包含电力工业)是中国碳排放量最多的国民经济部门。探寻工业部门合理有效的碳减排路径是中国碳达峰、碳中和目标顺利实现的关键。本文分解了中国2000年—2019年工业碳排放历史演变路径的驱动因素,预测了三种情景下2019年—2060年工业碳排放的潜在演变路径,估计了工业部门碳中和进程中所需的投资额,讨论了不同减排时点选择下投资需求的异质性。研究发现:1)规模效应和效率效应是历史演变路径中最关键的驱动因素,而化石能源清洁转化效应、化石能源内部结构效应和清洁能源替代效应的影响较小;2)非电力工业未来核心的碳减排技术路径为能源效率提升和清洁能源消费替代,电力工业未来核心的碳减排技术路径则为清洁能源发电替代;3)在当前的技术水平下,工业部门碳中和的进程中需要超过300万亿元的巨额投资,所需投资主要集中于高排放的非电力工业。本文最后提出了“以技术为核心,以市场为机制,以政策为引导”的中国工业部门实现碳中和的战略选择。

关键词: 工业碳排放; 碳中和路径; 指数分解; 情景分析; 边际减排成本

中图分类号: F205 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2024)04-0001-20

0 引言

工业是中国国民经济的支柱产业,也是高能耗和高排放的重点领域。在工业化进程中,工业部门(包含电力工业)不仅是中国当前碳排放量最多的部门,而且其占国内碳排放总量的比例也远高于世界其他主要国家^②。自2006年以来,中国一直是世界上最大的二氧化碳排放国,碳核算数据库(Carbon Emission Accounts & Datasets, CEADs)的数据显示,2019年,工业碳排放占中国碳排放总量的85%左右,其中,电力工业占中国

工业碳排放的56%;在非电力工业中,石油化工、化学原料、钢铁、有色金属、非金属制品是前五大高碳排放行业,占中国工业碳排放的41%,而其他一般工业行业仅占剩余的4%^③。2020年中国对国际社会作出减排承诺,“中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,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,中共中央、国务院正式公布《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意见》,对碳达峰、碳中和工作作出了系统谋划;2022年,党的二十大报

① 收稿日期:2022-07-04;修订日期:2023-03-09。

基金项目:国家自然科学基金创新研究群体项目(72121002);教育部人文社会科学重点研究基地重大项目(22JJD790058);耶鲁大学福克斯国际学者项目。

作者简介:陈诗一(1970—),男,江苏海安人,博士,教授,博士生导师。Email: shiyichen@fudan.edu.cn

② 中国工业碳排放占碳排放总量的比重远高于同期的其他主要国家:根据IEA的数据,2020年美国、OECD中的欧洲国家、澳大利亚、加拿大、印度、俄罗斯的工业部门碳排放分别约占碳排放总量的52%、50%、70%、51%、78%和70%。

③ 数据请参见<https://www.ceads.net/>。

告提出,“推进新型工业化”,并强调“积极稳妥推进碳达峰碳中和”,“实现碳达峰碳中和是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革”。国务院和工业和信息化部、国家发展改革委和生态环境部等部委在 2021 年和 2022 年先后印发了《2030 年前碳达峰行动方案》、《“十四五”工业绿色发展规划》、《工业领域碳达峰实施方案》等一系列政策文件,明确指出“工业是产生碳排放的主要领域之一,对全国整体实现碳达峰具有重要影响.工业领域要加快绿色低碳转型和高质量发展,力争率先实现碳达峰。”电力、钢铁、有色金属、建材、石化化工等行业被列入节能降碳重点行业.因此,推动中国工业部门绿色转型和深度脱碳对于全国顺利实现“双碳”目标至关重要.

如何基于科学的量化研究方法,准确识别工业碳排放历史演变路径的驱动因素并预测其潜在演变路径,进而分析碳减排时点选择与减排成本之间的权衡关系,是“双碳”目标下中国工业部门绿色低碳转型和高质量发展所需要考虑的关键科学问题.在相关研究中,中国碳排放历史演变的驱动因素分解、碳减排目标的实现路径分析和碳减排成本估算等方面的学术论文和研究报告与本文直接相关.

学者们已开展了大量关于中国碳排放历史演变路径驱动因素的研究,其中,以对数平均迪氏指数法(Logarithmic Mean Divisia Index, LMDI)为代表的指数分解方法由于其理论基础完善、适用性强的特点,被大量文献所采用^[1].这些文献大多从化石能源内部结构、能源效率、产出等角度考察中国碳排放历史演变路径的驱动因素,较少将清洁能源替代、生产过程碳排放效率提升等新兴的驱动因素纳入碳排放历史演变路径驱动因素的分析框架^[2-5].而事实上,新兴低碳技术的发展是实现深度脱碳目标的关键^④.此外,现有文献较少考察电力需求侧和电力供给侧碳排放历史演变路径驱动因素的差异及联动性,而设定电力需求侧和电力供给侧碳排放变化的驱动因素相同.实际上,电力需求侧和电力供给侧实现碳中和所需的关键技术不尽相同,电力需求侧和电力供给侧还会通过供需互动的机制对碳中和目标的实现产生影

响.基于以上分析,本文通过对 LMDI 做出适当扩展,将化石能源清洁转化(化石燃料加氢裂化等)、清洁能源替代(电气化、清洁能源发电等)、生产过程碳排放效率提升等新兴低碳技术纳入碳排放历史和潜在演变路径驱动因素的分析框架中.

在碳排放趋势建模预测方面,存在较多研究对中国至 2030 年、2050 年或 2060 年的碳排放演变路径进行了分析^[6-9].清华大学气候变化与可持续发展研究院^[8]预测了不同升温情景下中国 2050 年各部门的一次能源消费量和碳排放量;Duan 等^[9]采用多模型对比的方法,评估了中国碳减排政策对于实现全球升温 1.5 °C 目标发挥的作用;张希良等^[7]对中国碳中和目标下的能源经济协同转型路径展开研究.上述研究主要采用自上而下的宏观模型,利用加总生产函数进行参数校准和政策模拟.现有的文献多数以 2030 年或 2050 年为目标年,仅有少部分文献对中国至 2060 年实现碳中和的路径进行了分析;这些文献也大多将工业部门作为整体分析,较少讨论工业细分行业的碳减排路径.本文将分析的时间段扩展至 2060 年,采用自下而上的能源规划模型和动态情景分析方法,评估低碳技术发展、经济增长、能源结构调整等因素对中国工业部门和工业细分行业碳中和目标实现的影响.

在估算碳减排成本和减排所需投资方面,现有文献主要使用专家法(expert-based method)、模型法(model-derived method)对低碳技术或碳减排的成本进行测度,并根据减排成本,估计实现特定减排目标所需的投资额^[10].其中,专家法是自下而上的工程学方法,主要依据科学家和工程师的建议,评估每个技术方案的减排潜力和相应成本.最知名的采用专家法测度边际减排成本的研究是麦肯锡公司(McKinsey & Company)于 2009 年测度的边际减排成本曲线^[11].在中国背景下,刘俊伶等^[12]测度了中国各行业至 2050 年减排所需技术的边际减排成本.高盛公司、中国国际金融股份有限公司(简称中金公司)、红杉资本、渣打银行等中外投资咨询机构先后对中国实现碳中和所

④ 请参见 http://www.xinhuanet.com/politics/2021-03/16/c_1127216053.htm.

需的投资额进行了估计,但是,专家法测度的投资机会并未考虑技术转换所需要的系统性投资,可能会导致投资需求的低估^[13],且业内专家可能更关注低碳技术当前的使用情况,而非长期发展趋势^[10].模型法则主要通过已知数据中的变量来估计碳减排的投资需求,其中,估计边际减排成本的模型通常可分为基于经济—能源模型和基于微观供给侧的二氧化碳影子价格估计模型.基于微观供给侧的二氧化碳影子价格估计模型具有理论假设少、符合现实生产过程等优势,已被较多的文献采用^[14-18].其中,陈诗一^[14]估计了中国各工业行业的边际减排成本,发现碳减排成本随时间推移递增.蒋伟杰和张少华^[16]进一步根据边际减排成本的估计结果,为不同行业制定不同的减排策略.然而,现有对2060年实现碳中和的投资需求的测算大多采用专家法,使用模型法进行测度的较少;其性质多为研究报告或新闻报道,学术文献鲜有涉及;且较少在中国背景下,结合国家具体的碳达峰、碳中和政策,考虑不同的达峰和峰后减排时点选择对所需投资的影响.

本文首先采用LMDI对中国工业碳排放的历史演变路径的驱动因素进行分解,然后基于能源规划模型讨论了不同情景设定下,中国工业碳排放潜在演变路径及其驱动因素.随后,使用微观供给侧的二氧化碳影子价格估计模型,估计了在当前技术水平下,工业部门碳中和进程中的所需投资额,并进一步提出了“以技术为核心,以市场为机制,以政策为引导”的中国工业部门实现碳中和的战略选择.本文相较于现有的其他研究,有以下几点潜在的贡献:第一,将新兴的碳减排技术(清洁能源替代、化石能源清洁利用、生产过程碳排放效率提升)纳入LMDI和能源规划模型的分析框架中,从电力需求侧和电力供给侧两端,分别考察低碳技术创新对中国工业碳排放历史和潜在演变路径的影响,而现有文献较少系统地考察新兴的碳减排技术,也较少从电力需求侧和电力供给侧两端分别展开研究;第二,面向2060年碳中和目标,预测不同情景下碳排放的潜在演变路径,进而通过分解分析,就主要驱动因素对碳中和的贡献差异进行比较,突破了现有大多数文献主要分析至2030年或2050年的设定;第三,采用微观供给侧的二氧化碳影子价格模型,估计了中国工

业行业的边际减排成本和碳中和进程所需投资额,并进一步考察碳减排时间节点的选择对于所需投资的影响,对主流投资咨询机构通过专家法的估计结果做出有益补充.

1 工业部门碳排放历史演变路径的驱动因素分解

1.1 驱动因素影响机理

现有运用LMDI方法,对碳排放演变路径的驱动因素进行分解的研究通常以Kaya恒等式为基础,普遍聚焦于化石能源排放系数、化石能源结构、化石能源强度和产出规模等传统的驱动因素^[2-6].其中,化石能源排放系数测度了单位化石能源消费产生的碳排放量.传统意义下,化石能源排放系数表示各种化石能源的燃料质量和燃烧效率,在短时间范围内不会发生明显变化^[19].化石能源内部结构测度了各种化石能源消费占全部化石能源消费之比,由于石油和天然气相对于煤炭的排放系数更低,化石能源消费结构从煤炭向油气为主的转型通常会降低二氧化碳排放量^[1].化石能源强度测度了单位产出的化石能源消费量,可以理解为化石能源效率的倒数.在总产出一定的情况下,化石能源强度下降意味着化石能源消费总量下降,有利于碳减排.产出规模通常以经济活动水平(即产出或增加值)表示.在经济增长与化石能源消费尚未脱钩的现实下,产出规模的扩张不可避免地导致碳排放的增加.

从以上分析中可以看出,现有研究对碳排放演变路径的驱动因素的诠释不尽完善,因素选取较为局限.首先,现有研究大多将化石能源排放系数解释为燃料质量和燃烧效率,并未考虑在碳中和的背景下,化石能源清洁转化技术将得到发展,产品生产可能由化石能源氧化、产生碳排放的传统生产方式,转化为化石能源加氢裂化、不产生碳排放的新型生产方式,进而降低单位化石能源消费的碳排放量,即降低化石能源排放系数.其次,现有研究大多仅考虑化石能源消费对碳排放的影响,但未将清洁能源消费占比纳入其中,实际上,以低碳电力、氢能、生物质能为代表的清洁能源会在工业生产中替代化石能源,电气化、清洁能源发

电等新兴技术将对实现碳中和发挥愈加重要的作用^[20-21]。因此,本文在文献普遍考察的碳排放驱动因素的基础上,补充考虑了清洁能源替代对于工业碳排放的影响。此外,现有研究通常只考虑化石能源燃烧产生的碳排放,工业生产过程中的碳排放则很少引起关注。实际上,工业生产过程中的碳排放占中国碳排放总量的12%,而非金属制品行业的水泥生产过程的碳排放占其中的70%^[22],本文在分析非金属制品行业的碳排放演变的驱动因素时,纳入了工业生产过程的碳排放强度这一因素。最后,现有文献多假设非电力工业和电力工业的碳排放演变路径具有相同的驱动因素,而本文基于电力需求侧和电力供给侧减排驱动因素的异质性与生产的联动性,分别考虑电力需求侧(非电力工业)和电力供给侧(电力工业)的驱动因素。

因此,为了全面反映工业碳排放历史演变路径的驱动因素,本文对常用的驱动因素分解模型进行了扩展。具体地,将工业部门分成非电力工业和电力工业两个部分,分别考察非电力工业和电力工业的碳排放历史演变路径的驱动因素,并纳入化石能源清洁转化、清洁能源替代、生产过程碳排放效率等新的驱动因素。非电力工业碳排放变化的驱动因素可以被表示为

$$\begin{aligned} C_i &= \left(\sum_{j=coal, oil, gas} \frac{C_{ij}}{FE_{ij}} \times \frac{FE_{ij}}{FE_i} \times \frac{FE_i}{E_i} \times \frac{E_i}{Y_i} + \frac{C_{i,process}}{Y_i} \right) \times Y_i \\ &= \left(\sum_{j=coal, oil, gas} ef_{ij} \times fs_{ij} \times es_i \times ei_i + ci_i \right) \times y_i \\ &= [(ef_{i, coal} \times fs_{i, coal} + ef_{i, oil} \times fs_{i, oil} + ef_{i, gas} \times fs_{i, gas}) \times es_i \times ei_i + ci_i] \times y_i \quad (1) \end{aligned}$$

中国非电力工业中的高排放行业包括石油化工、化学原料、非金属制品、钢铁、有色金属等五个

行业,因此,本文讨论的行业*i*主要为上述五个行业,并将其他非电力工业行业的数据加和,归为一般工业行业进行综合考虑。*C*、*FE*、*E*、*Y*分别代表碳排放量、终端化石能源消费量、终端能源消费量和总产出, *coal*, *oil*, *gas*, *process*分别表示煤炭、石油、天然气及生产过程。*ef*、*fs*、*es*、*ei*、*ci*和*y*分别表示煤炭或油气排放系数、化石能源内部结构、化石能源消费占比、能源强度、生产过程碳排放强度、总产出;由于生产过程中的碳排放主要来源于非金属制品行业,*ci*仅用于非金属制品行业碳排放驱动因素的分析,其他行业的*ci*取值为0。

与非电力工业不同,电力工业的化石能源消费结构比较单一,煤炭占终端化石能源消费的比例在95%以上,电力工业主要的减排驱动因素为火力发电效率提升和清洁能源发电对火力发电的替代。在火力发电尚未完全退出时,非电力工业电气化进程的加速不一定促进碳减排,反而可能会刺激电力需求,加大电力工业减排的难度。电力工业碳排放变化的驱动因素的表达式为

$$\begin{aligned} C &= \frac{C}{FE} \times \frac{FE}{FEL} \times \frac{FEL}{EL} \times EL \\ &= ef \times te \times ts \times el \quad (2) \end{aligned}$$

其中*C*、*FE*、*FEL*、*EL*分别代表碳排放量、化石能源消费量、火力发电量和总发电量,*ef*、*te*、*ts*和*el*分别表示化石能源排放系数、火力发电能源强度(单位火力发电量的化石能源消费量)、火力发电占比、总发电量。

LMDI比较了基准年和最终年之间碳排放量的变化,并探讨这一变化的驱动因素。以非电力工业为例,基准年和最终年之间碳排放量的变化可以表示为

$$\begin{aligned} \Delta C_i &= \sum_{j=coal, oil, gas} L(w_{ij}^t, w_{ij}^{t-1}) \ln \left(\frac{ef_{ij}^{t+1}}{ef_{ij}^t} \right) + \sum_{j=coal, oil, gas} L(w_{ij}^t, w_{ij}^{t-1}) \ln \left(\frac{fs_{ij}^{t+1}}{fs_{ij}^t} \right) + \sum_{j=coal, oil, gas} L(w_{ij}^t, w_{ij}^{t-1}) \ln \left(\frac{es_i^{t+1}}{es_i^t} \right) + \\ &\quad \sum_{j=coal, oil, gas} L(w_{ij}^t, w_{ij}^{t-1}) \ln \left(\frac{ei_i^{t+1}}{ei_i^t} \right) + L(w_{i,process}^t, w_{i,process}^{t-1}) \ln \left(\frac{ci_i^{t+1}}{ci_i^t} \right) + \sum_{j=coal, oil, gas, process} L(w_{ij}^t, w_{ij}^{t-1}) \ln \left(\frac{y_i^{t+1}}{y_i^t} \right) \\ &= \sum_{j=coal, oil, gas} ef_{ij}^{effect} + \sum_{j=coal, oil, gas} fs_{ij}^{effect} + es_i^{effect} + ei_i^{effect} + ci_i^{effect} + y_i^{effect} \quad (3) \end{aligned}$$

其中 $L(w_{ij}^t, w_{ij}^{t-1}) = \frac{C_{ij}^t - C_{ij}^{t-1}}{\ln(C_{ij}^t) - \ln(C_{ij}^{t-1})}$, 因此,不同时期行业*i*碳排放量的变化可以被分解成化石能源*j*的清洁转化效应 ef_{ij}^{effect} 、化石能源*j*的内部

结构效应 fs_{ij}^{effect} 、清洁能源消费替代效应 es_i^{effect} 、能源效率效应 ei_i^{effect} 、生产过程碳排放效率效应 ci_i^{effect} 、产出效应 y_i^{effect} 。

本文在对工业碳排放历史演变路径进行经验

分解时,选择2000年—2019年中国工业分行业数据作为研究样本,包括6个非电力工业行业(高排放非电力工业行业5个、一般工业行业1个)和电力工业,其中,一般工业行业的数据由所有非高排放非电力工业行业加总得到.相关数据主要来源于《中国工业统计年鉴》和碳核算数据库.工业的增加值参考陈诗一^[23]的方法进行构造.为保证数据的可比性,增加值平减为2000年不变价格.

1.2 分解结果与讨论

基于中国每5年制定实施一个社会经济发展规划,且在不同规划期内的主要目标不同的事实,本文将考察时间段2000年—2019年划分为3个子阶段:

2000年—2005年(“十五”时期)、2005年—2010年(“十一五”时期)、2010年—2019年(“十二五”和“十三五”时期),计算得到非电力工业和电力工业碳排放历史演变路径的驱动因素分解结果,如图1所示.非电力工业和电力工业碳排放的主要促增因素分别是总产出和总发电量,而主要促降因素是能源效率和火力发电效率、清洁能源发电替代.此外,非电力工业的煤炭消费占比、清洁能源消费替代和工业生产过程的碳排放效率同样发挥促降作用,但作用相对较小;煤炭、油气清洁转化的促增效应和促降效应均有出现.

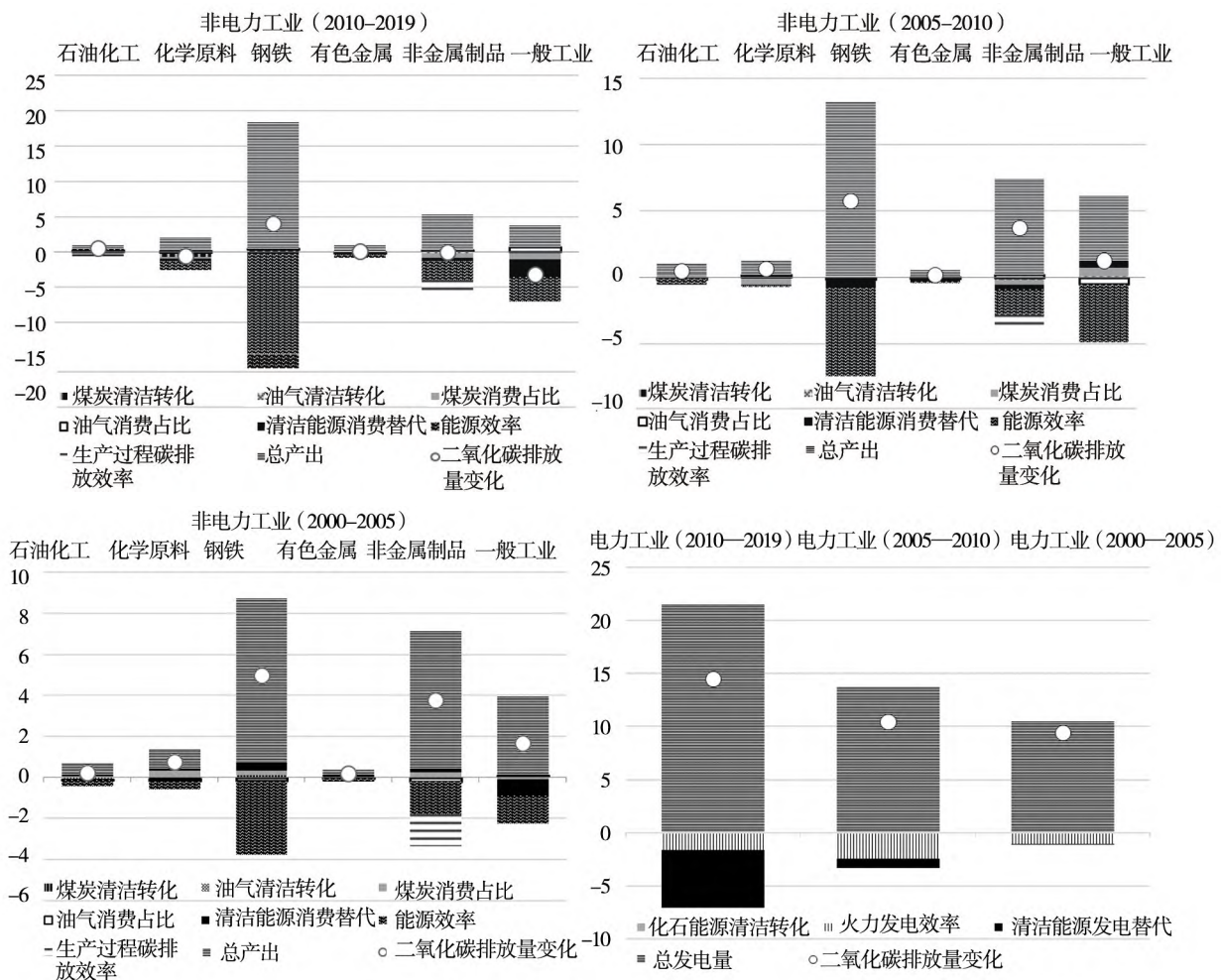


图1 工业碳排放历史演变路径驱动因素的分阶段分解结果(单位:亿t)

Fig.1 Decomposition results of drivers of the historical evolution path of industrial carbon emissions in different phases (Unit: 100 million tons)

图1中工业碳排放历史演变的驱动因素可以分为规模效应、效率效应、化石能源清洁转化效应、化石能源内部结构效应和清洁能源替代效应.在经济系统尚未完全脱离化石能源时,生产规模

(包括总产出、总发电量)的扩大将导致碳排放量增加,而中国的经济一直处于中高速增长时期,因此,规模效应对工业碳排放的促增效应非常明显.而效率效应(包括能源效率、生产过程碳排放

效率、火力发电效率)的分解结果则意味着生产流程的持续优化及能效提升型技术的研发和利用,是过去碳减排的主要原因,但随着能效提升型技术的成熟,持续的能效提升型技术创新可能面临瓶颈.化石能源清洁转化效应(煤炭清洁转化、油气清洁转化和化石能源清洁转化)对碳减排的作用尚不明显,但化石能源清洁转化制取化学品是实现中国化石能源清洁高效利用的重要途径,将来可能对碳减排发挥更加重要的作用.化石能源内部结构效应(煤炭消费占比、油气消费占比)的出现是由于石油和天然气的碳排放系数低于煤炭,化石能源消费结构由煤炭为主向油气为主的转变会降低碳排放量,但是,油气燃烧同样会产生碳排放,仅仅依靠化石能源内部结构的优化不足以实现碳中和的目标,反而可能导致次优减排技术的锁定效应^[11].清洁能源替代效应(清洁能源消费替代和清洁能源发电替代)通过清洁能源替代化石能源的使用,主要于近期(2010年—2019年)在一般工业和电力工业发挥了一定的促降作用,但对其他行业碳减排的影响仍不明显,这是由于一般工业和电力工业的电气化与清洁能源发电技术已经发展得较为成熟,但其他非电力工业行业的清洁能源消费替代技术大多仍处在示范和研究阶段,尚未得到充分的发展.

2 工业部门碳排放潜在演变路径的动态情景分析

2.1 模拟思路 and 情景设定

由因素分解结果可知,工业碳排放历史演变路径的最主要促增效应规模效应,最主要促降

效应是效率效应,化石能源清洁转化效应和清洁能源替代效应则在未来具有较大的驱动减排空间.此外,非电力工业和电力工业碳排放演变路径的驱动因素存在差异.因此,本文构建包括电力需求侧、电力供给侧两个部分的能源规划模型,用于非电力工业和电力工业碳排放潜在演变路径的动态情景分析.具体地,如果化石能源排放系数(ef_{ij})、化石能源内部结构(fs_{ij})、化石能源消费占比(es_i)、能源强度(ei_i)、生产过程碳排放强度(ci_i)和总产出(y_i)的年度变化率分别为 α_{ij} 、 β_{ij} 、 δ_i 、 ϕ_i 、 χ_i 和 γ_i ,则非电力工业两年间的碳排放演变路径的驱动因素存在如下关系: $ef_{ij}^{t+1} = ef_{ij}^t \times (1 + \alpha_{ij}^t)$, $fs_{ij}^{t+1} = fs_{ij}^t \times (1 + \beta_{ij}^t)$, $es_i^{t+1} = es_i^t \times (1 + \delta_i^t)$, $ei_i^{t+1} = ei_i^t \times (1 + \phi_i^t)$, $ci_i^{t+1} = ci_i^t \times (1 + \chi_i^t)$, $y_i^{t+1} = y_i^t \times (1 + \gamma_i^t)$.因此,两年间的碳排放的关系的表达式如下

$$C_i^{t+1} = \left(\sum_j ef_{ij}^t \times (1 + \alpha_{ij}^t) \times fs_{ij}^t \times (1 + \beta_{ij}^t) \times es_i^t \times (1 + \delta_i^t) \times ei_i^t \times (1 + \phi_i^t) + ci_i^t \times (1 + \chi_i^t) \right) \times y_i^t \times (1 + \gamma_i^t) \quad (4)$$

类似地,如果电力工业的化石能源排放系数(ef)、火力发电能源强度(te)、火力发电占比(ts)和总发电量(el)的变化率分别为 α 、 φ 、 δ 、 γ .两年之间电力工业的碳排放的关系的表达式为

$$C^{t+1} = ef^t \times (1 + \alpha^t) \times te^t \times (1 + \varphi^t) \times ts^t \times (1 + \delta^t) \times el^t \times (1 + \gamma^t) \quad (5)$$

为预判非电力工业和电力工业碳排放可能的潜在演变路径以识别合理的减排路径,本文基于各因素过去的演化趋势、现有的政策目标以及潜在的减排空间构建了三种情景:碳中和情景、基准情景、强化碳中和情景,三种情景的设定如表1所示.本文将对三种情景下参数的取值进行详细的讨论说明.

表1 工业部门中长期碳减排路径的情景设定

Table 1 Scenario settings for medium- and long-term industrial emission reduction pathways

情景名称	情景目标	情景描述
碳中和情景	2060年实现碳中和	在实现长期经济增长目标的同时,能效持续提升,化石能源清洁转化、清洁能源消费替代和清洁能源发电替代等新兴低碳技术得到充分发展
基准情景	2030年之前实现碳达峰	2030年前,主要依靠能源效率提升、化石能源内部结构调整及其他成熟技术的推广应用来实现减排,2030年后的减排潜力不足
强化碳中和情景	提前实现碳中和	新兴技术取得突破,碳减排进程进一步加速

2.1.1 碳中和情景参数设定

碳中和情景应符合中国2060年实现碳中和的政策目标。根据现有的碳排放潜在演变路径的分析结果,实现碳中和时,中国的碳排放量应大幅度下降,但仅通过减排,仍不可能完全实现零排放,还需要辅以碳捕集、利用与封存技术(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)等负碳技术和碳汇,实现碳排放与碳吸收的平衡^[7]。本文接下来从化石能源排放系数下降、化石能源内部结构转型、清洁能源替代、能源和生产过程碳排放强度下降、工业产出和发电量增长的角度,对中国非电力工业和电力工业的碳排放的潜在演变路径分别进行分析。

化石能源排放系数指单位终端化石能源消费产生的二氧化碳排放量,可进一步细分为煤炭排放系数和油气排放系数。在利用煤化工技术生产烯烃、甲醇等化工产品的过程中,需要对煤炭的H/C原子比进行调整,煤炭的H/C原子比为0.2~1.0,而化工产品的H/C原子比更高,因此,目前在煤气化制甲醇和烯烃、煤液化以及煤间接液化过程中都会注入氧气,并有大量的碳以二氧化碳的形式产生。而随着技术的发展和相应催化剂的出现,煤化工过程可能通过煤加氢直接裂化合成产品来实现,相比于传统的煤化工需要在煤炭中加入氧气实现裂化,可以减少单位终端煤炭消费的二氧化碳的排放。因此,化学原料行业具有更大的煤炭清洁转化潜力,其他行业的煤炭清洁转化潜力则较小,在碳中和情景下,设定2060年化学原料行业的煤炭排放系数为2019年的70%,而其他非电力工业行业的煤炭排放系数为2019年的90%。在过去,油气的排放系数主要呈小幅度下降趋势,因此设定未来的油气排放系数下降,但幅度不会太大:所有行业2060年的石油和天然气排放系数均为2019年的95%。

化石能源内部结构转型是长期的渐进过程,从历史经验来看,生产力进步和产业结构调整会推动化石能源内部结构的渐进转型^[24, 25]。近年来,非电力工业的煤炭占终端化石能源消费量之比呈下降趋势,但在2019年,这一比重仍高达

80.48%,而美国、日本和欧盟的工业部门煤炭占化石能源消费比重均已较为稳定。这说明中国的化石能源转型仍然需要付出较多的努力。在以上国家中,日本由于油气资源稀缺,与中国的化石能源内部结构较为相似,参照国际能源署(International Energy Agency, IEA)发布的上述国家各行业的终端化石能源消费结构^[26],预测至2060年,中国各工业行业的终端化石能源消费结构达到日本当前的水平。

清洁能源替代主要指电力及其他清洁能源对化石能源的替代,在非电力工业(即电力需求侧)表现为化石能源消费占比的下降。电力需求侧化石能源消费占比下降与电力供给侧的清洁能源发电业务相结合,将为实现能源系统零碳化提供重要支撑。非电力工业清洁能源消费替代的程度主要根据各行业相关技术的发展潜力进行测算,中、低温度要求的工业行业(如一般工业)通过生产流程和设备改造,采用现有的电加热技术(例如微波加热、射频加热、红外辐射等)可以较快地通过电气化,实现清洁能源消费替代。清洁能源消费替代的难点主要在于要求更高温度的工业领域^[27],可能需要辅助以间接电气化(电力制氢作为燃料)和生物质能的发展。参照落基山研究所和能源转型委员会对中国2050年各行业终端能源消费结构的预测,认为至2050年,一般工业行业对加热温度的要求较小,化石能源消费占比将接近0,并参考其对其他非电力工业行业的化石能源消费占比的设定^⑤,各年份化石能源消费占比的下降速度则参考Madeddu等^[28]的研究结论。

自2009年以来,中国政府开始制定能源强度目标,而随着能源效率的提升,高能效技术的瓶颈可能出现。例如,中国的“十二五”、“十三五”和“十四五”规划分别要求能源强度下降16%、15%和13.5%,反映了能源强度持续高速下降可能面临一定的技术瓶颈,现有研究同样指出能源强度下降在实现碳中和的初期阶段将发挥更大的作用,后续则可能更需要依赖其他技术^[6]。目前,中国的钢铁、有色金属、非金属制品行业的主要产品能耗已接近国际先进水平,而石化、化工行业的单

⑤ 请参见 <https://www.beipa.org.cn/productinfo/499726.html?templateId=602287>。

位产品能耗仍与国际先进水平有较大的差距^[12],因此,本文设定在“十四五”期间(2020年—2025年),石油化工、化学原料行业的能源强度下降18%^⑥,钢铁、有色金属、非金属制品和一般工业行业下降16%。在2025年之后,由于技术瓶颈的存在,能源强度下降的空间进一步减小。参照Zhang等^[3]和Song等^[29]对各五年计划内能源强度下降幅度的设定,本文设定石油化工、化学原料行业的能源强度在2025年—2030年、2030年—2040年、2040年—2050年和2050年—2060年期间,分别下降18%、31%、29%和28%;钢铁、有色金属、非金属制品和一般工业行业则在这些区间分别下降16%、28%、26%和24%。

非金属制品行业的生产过程碳排放主要来源于水泥生产时,以碳酸钙为主的生料煅烧分解,生成熟料(氧化钙)并产生二氧化碳。在这一生产过程中,可替代生料的水泥生产原料有限,生产过程碳排放强度的下降主要来源于在熟料中加入其他成分,例如粉煤灰和高炉矿渣,以降低单位水泥产量的碳排放强度^[30]。IEA的研究结论表明,在可持续发展情景下,2019年—2040年全球的熟料—水泥比较为稳定,这与中国的实际情况相似,因为中国目前降低熟料—水泥比的技术同样并不成熟^[31];而在2040年—2060年,全球熟料—水泥比基本呈匀速下降^⑦^[32]。曹植等^[31]的研究进一步表明,至2050年,中国熟料—水泥比的极限值为0.5,而中国当前的数值是0.66。因此,本文设定当前至2040年生产过程碳排放强度保持不变,而在2040年—2050年,生产过程碳排放强度以每年-2.73%的速度下降,至2050年下降至0.5,并在2050年—2060年保持相同的速度下降。

自2011年左右,中国的经济增长模式经历了高速增长到高质量增长的转变。依照发达国家经济增速放缓和经济结构转型的规律,本文设定中国各行业产出的增长率将在未来逐渐放缓,在2035年以后,各行业年度产出增长率稳定在2%左右,而且呈现出非高排放的一般工业行业增长更快的特征。具体地,主要采用国际应用系统分析

研究所的温室气体—空气污染相互作用和协同(Greenhouse gas-Air pollution Interactions and Synergies, GAINS)模型中对中国各行业未来产出增长趋势的设定,该设定与联合国、国际货币基金组织、经济合作与发展组织对中国未来产出增长的预测相吻合^[33]。

电力工业是能源系统中,零排放技术最为成熟、经济竞争力最强的行业。清洁能源发电将成为中国电力工业至2060年碳排放下降的主要驱动因素。目前,中国的水电、核电等技术的度电成本已经低于火力发电,而随着中国太阳能和风能发电技术的不断发展,其度电成本下降速度较快,也将进一步助推清洁能源发电。已有的研究表明,中国应在2050年左右基本退出火电项目^[8]。具体到各年份的变化,《能源生产和消费革命战略(2016—2030)》指出,至2030年,非化石能源发电量占全部发电量的比重力争达到50%。此外,中国提出到“十四五”末,可再生能源将成为能源电力消费增量的主体,且预计可再生能源在全社会用电量增量中的比重将达到三分之二左右^[34]。基于以上模型证据和政府规划,对各年份清洁能源发电占比的参数进行设定。在本文的参数设定下,至2050年,清洁能源发电量占中国总发电量之比达到90%以上,至2060年占比将达到95%以上。

电力行业的动态情景分析参数还包括化石能源排放系数、火力发电能源强度和总发电量。其中,化石能源排放系数的参数设定主要参照非电力工业的对应参数进行设置,本文设定至2060年,化石能源排放系数为2019年的90%。火力发电能源强度则在过去数据的基础上进行推算,在2020年—2025年、2025年—2030年、2030年—2040年、2040年—2050年和2050年—2060年期间,分别下降8%、7%、14%、12%和10%。总发电量的参数设定则根据非电力工业未来能源强度、化石能源消费占比和总产出的变化,得到电力需求的变化,进行推算。

⑥ “十三五”期间,高排放非电力工业行业的能源强度下降约18%,本文设定“十四五”期间,石油化工和化学原料行业将延续“十三五”能源强度下降的趋势。

⑦ 2019年—2030年,2030年—2040年,2040年—2050年和2050年—2060年间,全球熟料水泥比分别下降1.4%,-1.4%,5.6%和5.9%。

2.1.2 基准情景参数设定

基准情景是以中国工业过去发展特征和颁布的碳排放政策为基础,根据工业发展走向和低碳技术进步外推而得到的可能情景。在基准情景的模拟中,中国只需实现2030年前碳达峰的目标,仍主要依靠能源效率提升、终端化石能源消费内部结构调整及其他成熟技术的推广应用来实现减排。而由于化石能源清洁转化、清洁能源替代等新兴技术研发投入不足,在2030年后,持续碳减排的动力不足。具体而言,本文设定在基准情景下,化石能源内部结构转型和经济增长仍将持续,非电力工业在2019年至2060年化石能源内部结构变化和产出增长与碳中和情景相同。由于能源强度下降是中国实现2030年碳达峰目标的关键措施,本文设定基准情景下,能源强度的下降幅度在2030年前仍与碳中和情景一致,随后下降放缓至碳中和情景对应年份的40%。化石能源排放系数、化石能源消费占比、过程碳排放强度的下降主要依赖于新兴的技术,其在2019年—2030年的下降幅度缩小至碳中和情景对应年份的80%,之后则缩小至碳中和情景的40%。

对于电力工业,火力发电能源强度仅在2030年前与碳中和情景一致,随后降幅放缓至碳中和情景对应年份的40%,化石能源排放系数和火力发电占比的变化在2019年—2030年的变化缩小至碳中和情景的80%,之后则缩小至碳中和情景的40%,总发电量的参数设定根据碳中和情景所用的方法进行推算。

2.1.3 强化碳中和情景参数设定

政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)的研究表明,为了使全球平均温度保持在比工业化前水平升高不超过 1.5°C ,全球必须于2050年左右实现碳中和^[35];段宏波和汪寿阳^[36]的研究同样表明,相较于 2°C 目标,实现中等概率的 1.5°C 温控目标要求提前至少10年实现碳中和。因此,本文设置了

强化碳中和情景,探究何种路径下中国可以早于2060年实现碳中和。强化碳中和情景设定了更高的低碳技术减排潜力,具体而言,对于非电力工业,化石能源排放系数、化石能源消费占比、能源强度、生产过程碳排放强度的下降更加迅速,而化石能源内部结构和总产出的变化与基准情景、碳中和情景保持一致。对于电力工业,化石能源排放系数、火力发电能源强度、火力发电占比的下降同样更加迅速,发电量增长率则根据非电力工业电力需求量的变化进行推算。具体而言,林伯强和刘希颖^[37]的研究表明,以上因素可能会在碳中和情景的基础上上下浮动20%左右。因此,本文设定在强化碳中和情景下,上述需要进一步下降的因素的下降幅度相比于碳中和情景增加20%。

2.2 潜在演变路径分析

基于三种情景下的参数取值,本文绘制了工业部门碳排放潜在演变路径的轨迹图,如图2所示。在碳中和情景下,中国工业部门的碳排放量在2020年—2025年仍以较快速度上升,在2025年—2030年上升速度放缓,并在2030年达到最高值。2030年之后,随着新技术的产生和发展,中国工业部门碳排放下降,工业部门至2060年的碳排放总量约为21亿t,产生的碳排放将主要通过CCUS吸收,实现工业部门二氧化碳产生量与吸收量的平衡^⑧。

在基准情景下,中国的工业部门碳排放量在2020年—2030年与碳中和情景的变化轨迹较为一致,工业碳排放可于2030年达峰,但由于低碳技术的发展瓶颈存在,2030年后碳排放的下降速度较慢,至2060年的碳排放总量仍为70亿t以上。这与欧美等发达国家的经验相吻合,即在没有低碳政策干预的情况下,美国、欧盟的碳排放量在达峰后下降速度较慢^[26]。

在强化碳中和情景下,中国工业部门的二氧化碳排放量在2025年提前达峰,在达峰之后开始下降,并在2030年后加速下降。二氧化碳排放量

⑧ 对于中国至2060年的CCUS潜力,不同研究的估计不尽相同,但整体集中在10亿t~30亿t左右。具体地,张贤等^[38]依照现有技术发展预测,2060年通过CCUS技术实现的减排量可达到16亿t二氧化碳。张希良等^[7]发现2060年的人工CCUS、碳移除量潜力分别达到14亿t、9亿t二氧化碳。除CCUS技术之外,中国的碳汇同样具有较大的减排潜力,如Wang等^[39]估算了中国陆地系统碳汇的平均值为 $-1.11 \pm 0.38\text{PgC/年}$ (约等于40亿t二氧化碳)。因此,CCUS辅以碳汇有望吸收工业活动产生的碳排放,实现中国工业部门碳中和的目标。

于2051年降低至21亿t,2060年降低至15亿t,相比于碳中和情景,可以提前约10年达到相同的碳排放水平。

碳中和情景下,非电力工业和电力工业碳排放的潜在演变路径存在差异.非电力工业的碳排放量在2025年达峰后开始下降,但随着时间的推移,下降速度有所放缓;而电力工业的碳排放量在2020年—2030年仍以较快速度上升,而在2030年后开始出现大幅度下降.这是由于非电力工业和电

力工业技术发展和产出需求处在不同阶段所导致的,在当前阶段,中国经济仍在中高速增长,而由于经济系统的电气化程度提升,电力需求量快速增长,加之火力发电仍在电力系统中占据较大的比重,造成电力工业的碳排放的增长潜力更大.而随着非电力工业的碳减排技术瓶颈的出现和清洁能源发电占比的持续上升,非电力工业的减排作用减弱,电力系统低碳化对中国工业减排发挥了更加重要的作用。

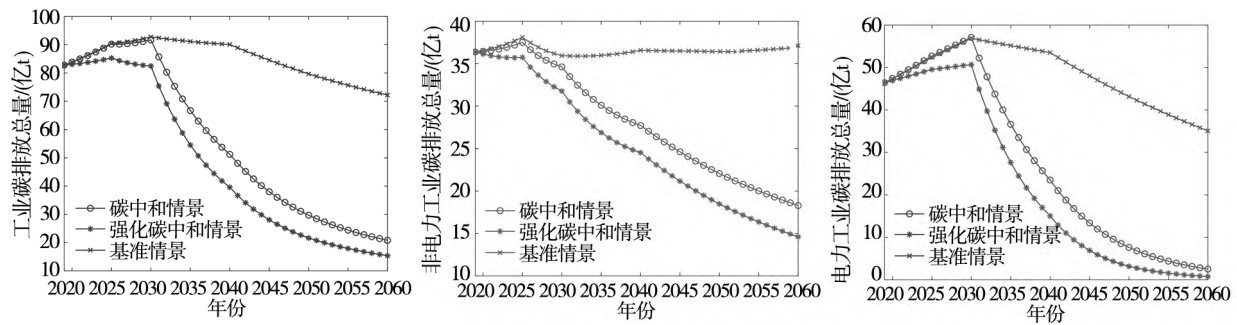


图2 工业部门碳排放至2060年的变化趋势预测(单位:亿t)

Fig. 2 Prediction of the trend of industrial carbon emissions towards 2060 (Unit: 100 million tons)

2.3 工业部门碳中和进程的驱动因素分解

基于以上分析,在碳中和情景下,中国可以将2060年产生的碳排放控制在20亿t左右,并通过CCUS和碳汇吸收产生的碳排放.相比之下,基准情景下中国工业部门至2060年的碳排放量仍处于较高水平,通过CCUS吸收的经济性不足;而强化碳中和情景对技术进步的要求相较于现有文献的预测结果更加严格,并不一定符合中国经济转型和低碳技术创新的规律.因此,本文接下来的分析主要围绕碳中和情景进行,并对碳中和情景下中国非电力工业和电力工业碳排放潜在演变路径的驱动因素进行分解,以说明过去和未来中国工业部门碳排放演变路径的驱动因素的差异.图3报告了碳中和情景下,碳排放潜在演变路径的因素分解结果.非电力工业碳排放潜在演变的主要促增因素是产出增长,而主要的促降因素是清洁能源消费替代和能源效率提升.清洁能源消费替代指运用电力、氢能、生物质能等能源替代化石能源消费,进行工业生产.近年来,清洁能源消费替代的技术发展迅速.例如,在化学原料行业,氨的规模化生产主要依赖需消耗大量化石燃料的哈伯-博施(Haber-Bosch)工艺,而在近年来,电化学法

合成氨气的技术趋于成熟;在钢铁行业,电炉取代高炉的技术已经较为成熟,可将生产每t钢铁释放的二氧化碳下降77%.上述电气化技术的应用推广,及新的电气化技术研发将进一步促成清洁能源消费替代.能源效率提升指单位产出的能源消费量下降,能源效率在过去20年里的提升速度较快,例如,在“十三五”期间,大部分省份的能源效率提升了18%以上.随着低碳节能技术的发展,本文预期能源效率的提升仍将持续。

中国电力工业至2060年碳排放下降的主要驱动因素是清洁能源发电替代,主要促增因素是发电总量增长.清洁能源发电替代是指用水电、风电、光伏、核电等非化石能源替代火力发电.至2060年,电力工业的碳排放量仅为2019年的5%.由于可再生能源发电具有规模报酬递增的特点,随着可再生能源的应用和普及,其发电成本将持续下降,将进一步助推清洁能源发电替代.火力发电效率的提升同样对电力工业的碳排放下降具有一定的作用,但由于至2060年,火力发电在发电总量中占比很低,火力发电效率提升的碳减排作用相对并不大.电力工业发电总量的增长则是由于中国经济增长和电力需求侧清洁能源消费替

代致使用电需求上升,是电力工业碳排放的主要

促增因素.

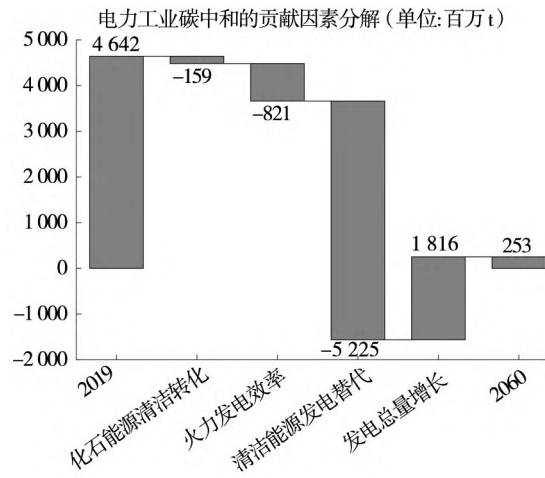
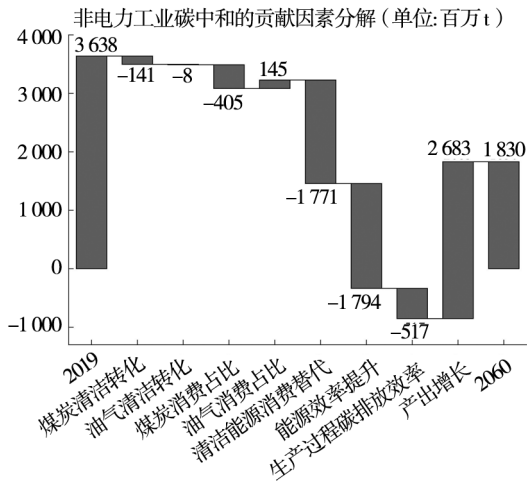


图3 碳中和情景下工业碳排放潜在演变路径的驱动因素分解

Fig. 3 Decomposition of driving factors for the potential evolution path of industrial carbon emissions under the carbon neutrality scenario

附图1进一步报告了非电力工业各细分行业碳排放潜在演变路径的驱动因素分解结果. 具体来看,化学原料行业在煤炭清洁转化方面具有更大的减排潜力,在化学原料行业,煤炭清洁转化技术指煤加氢直接裂化合成产品,进而减少注入氧气导致的二氧化碳排放,目前相关技术仍处在实验室研究的阶段. 非金属制品行业的碳排放主要来自于水泥生产的生产过程碳排放和化石能源燃烧碳排放^[31]. 生产过程碳排放和化石能源燃烧碳排放均主要发生在熟料煅烧阶段,生产过程碳排放的下降主要依赖熟料-水泥比的降低,缺少其他减排技术,而由于中国非金属制品行业产出的潜在增长趋势,至2060年,生产过程碳排放从2019年的6.81亿t上升至12.41亿t. 相比之下,化石能源燃烧碳排放可以依靠能源效率提升、清洁能源消费替代等技术路径减排,化石能源燃烧碳排放将从2019年的4.31亿t下降至2060年的0.75亿t. 因此,进一步实现中国非电力工业减排可能需要非金属制品行业自身,及其下游的建筑业的系统性变革,例如,延长建筑的使用寿命,及开发可替代水泥的多种生产材料等. 有色金属和一般工业行业至2060年的碳排放量则均接近0,这是由于有色金属和一般工业行业的清洁能源消费替代的潜力较大,到2060年终端化石能源消费基本可以全部由电力、氢能、生物质能等清洁能源替代.

3 工业部门碳中和进程所需投资额的估计

3.1 碳中和情景下所需投资额的估计

从上文的分析中可知,实现中国碳中和的目标需要依赖低碳技术创新和能源结构转型,需要付出大量的经济与社会成本. 因此,本文接下来对实现碳中和所需的投资额进行估计,主要按照以下三个步骤进行:首先,基于微观供给侧的二氧化碳影子价格估计模型,使用径向距离函数对中国工业行业-省份-年份层面的二氧化碳影子价格进行估计,估计出的影子价格为边际减排成本;随后,利用边际减排成本的估计结果,运用非参数的局部线性加权平滑法和参数估计的方法,估计各工业行业边际减排成本方程;最后,根据碳中和情景下各年份各行业的碳减排量,对边际减排成本方程进行积分,即可求出在当前技术水平下,实现碳中和所需的全部成本. 在估计边际减排成本方程的过程中,所使用的数据为中国1998年—2013年分行业分省份的数据,包括6个非电力工业行业(高排放非电力工业行业5个、一般工业行业1个)和电力工业. 资本、劳动、产出的数据来源于中国工业企业数据库,并按照陈诗一和陈登科^[40]的做法,加总到行业-省份-年份层面. 能源消费量和

碳排放量的数据来自碳核算数据库,产出和资本调整至2019年不变价格.

3.1.1 边际减排成本的估计

与Du等[18]类似,采用基于微观供给侧的二氧化碳影子价格估计模型估计边际减排成本.具体地,本文构造确定性、参数化的径向产出距离函数,该函数的形式为二次型,刻画经济个体追求利润最大化的行为,并在最优解处采用包络定理求解得到二氧化碳影子价格.该函数描述了在给定生产技术可行集的情况下,如何在最大程度上实现期望产出的扩张和非期望产出的收缩.相比于非参数方法,参数化的径向产出距离函数具有求解唯一性、可开展统计检验等优点[16].通常,径向产出距离函数可以定义为

D_o(x, y, b; g_y, -g_b) = max{beta: (y + beta g_y, b - beta g_b) in P(x)}

其中x = (x_1, x_2, ..., x_N) in R_+^N为投入向量, y = (y_1, ..., y_M) in R_+^M为期望产出向量, b = (b_1, ..., b_J) in R_+^J为非期望产出向量, P(x)为生产可能性集合, g = (g_y, g_b) in R_+^M x R_+^J为方向向量,衡量了期望产出增加和非期望产出减少的方向.

与现有文献的假设相一致,本文认为技术边界的外推是通过同时增加经济产出、减少碳排放实现的,故g = (1, 1) [16-18].

本文将第m个期望产出y_m的市场价格设为p_m,则根据包络定理,第j个非期望产出b_j的影子价格如下

b_j = carbonprice_j = -p_m [partial D_o(x, y, b; g_y, -g_b) / partial b_j] / [partial D_o(x, y, b; g_y, -g_b) / partial y_m], j = 1, ..., J

3.1.2 边际减排成本方程的估计

本文首先采用非参数的局部线性加权平滑法,绘制了各工业行业边际减排成本与碳排放量的关系,如图4所示.图4表明,中国各工业行业的边际减排成本曲线均向下倾斜,这说明在当前的技术下,随着中国二氧化碳排放量的下降和减排力度的提升,行业的减排成本加大.分行业来看,排放水平较小的行业(例如化学原料、有色金属)具有较高的边际减排成本,而排放水平高的行业(例如电力工业)的边际减排成本低.

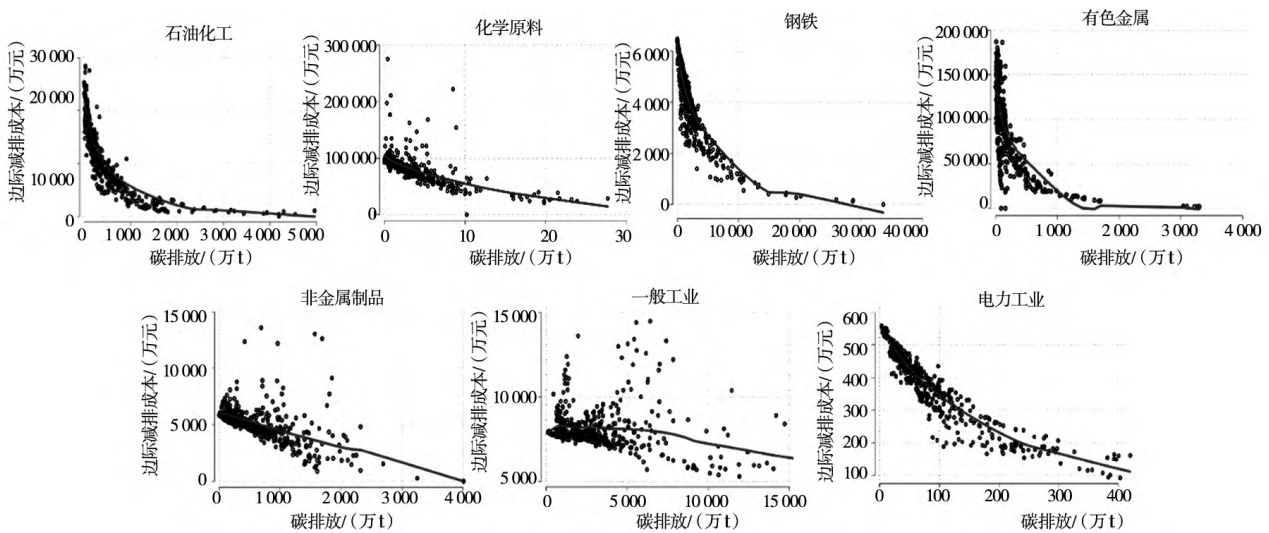


图4 中国工业行业的边际减排成本曲线

Fig. 4 Marginal industrial emission abatement cost curve

Meng等[10]的研究结论表明,将年份纳入减排成本的估计中能较好地预测未来的减排成本.因此,为了参数化定量估计二氧化碳排放量对边际减排成本的影响,本文将碳排放量、年份纳入到边

际减排成本的估计方程中,具体的方程设定如下

carbonprice_it = alpha + beta_1 carbon_it^2 + beta_2 carbon_it + gamma_1 year_it^2 + gamma_2 year_it + epsilon_it

其中carbonprice_it代表第t年省份i的边际减排成

本, $carbon_{it}$ 为第 t 年省份 i 的碳排放量, $year_t$ 为对应的年份, 用于衡量除了碳排放外, 其他影响边际减排成本的宏观经济因素。各行业二氧化碳边际

减排成本方程的回归结果如表 2 所示, 拐点年份表示二氧化碳边际减排成本随着年份增加由下降转变至增加的年份。

表 2 二氧化碳边际减排成本方程的估计结果

Table 2 Estimates of marginal CO₂ emission reduction cost equation

变量	石油化工	化学原料	钢铁	有色金属	非金属制品	一般工业	电力工业
$carbon^2$	29.89*** (21.35)	142.83*** (6.17)	0.17*** (20.90)	318.44*** (2.96)	-3.49* (1.68)	-0.39* (1.84)	0.004*** (24.63)
$carbon$	-1 597.48*** (30.73)	-6 949.64*** (15.40)	-65.22*** (32.86)	-14 740.16*** (5.10)	-108.46** (2.21)	67.94*** (2.63)	-2.50*** (46.37)
$year^2$	27.33*** (3.51)	309.404*** (7.74)	3.79** (2.28)	1013.60*** (3.90)	37.12*** (5.99)	45.37*** (3.42)	0.006 (0.08)
$year$	-109 604.17*** (3.51)	-1 239 292.72*** (7.73)	-15 203.88** (2.28)	-4 070 127.29*** (3.91)	-148 731.98*** (5.99)	-181 816.10*** (3.42)	-22.21 (0.07)
观测值	471	477	477	417	477	477	477
拟合优度	0.749	0.588	0.798	0.185	0.177	0.075	0.924
拐点年份	2005	2003	2006	2008	2003	2004	NA

注: 1. ***, **, * 分别表示在 1%, 5% 和 10% 水平上显著; 括号中为 t 值; 2. NA 表示无对应数据。

表 2 的回归结果显示, 对于大部分行业而言, $carbon^2$ 的回归系数显著为正, $carbon$ 的回归系数显著为负, 说明当碳排放量已经位于较低水平时, 随着碳排放量的进一步减小, 边际减排成本逐渐上升, 且上升速度逐渐加快。这是因为在碳规制的早期, 采取成本较低的措施就可以取得一定的减排成果, 但随着低成本的减排机会逐渐被利用, 进一步减排必然要付出更大代价^[14]。 $year^2$ 和 $year$ 的回归系数同样对于大部分行业分别显著为正和显著为负, 这说明在控制住碳排放之后, 其他宏观经济因素在样本早期降低了边际减排成本, 但自 2005 年左右开始出现拐点, 宏观经济因素同样导致了边际减排成本提升。这是因为随着经济社会的发展, 固有的工业生产模式已经形成, 进行节能减排改造意味着对现有模式的改造和重塑, 可能需要付出更大的沉没成本和系统响应成本。例如, 中国长期以来建设了大量的煤电机组, 煤电退出

需要付出额外的拆迁费用、职工安置再就业、灵活性改造等成本^[41, 42]。

接下来对边际减排成本方程进行积分, 估计在当前技术水平下, 工业部门碳中和进程所需的投资额, 结果如表 3 所示。表 3 的结果显示, 中国工业部门碳中和进程所需的投资额约为 307.16 万亿元。其中, 非金属制品行业和化学原料行业所需的投资额最多。为了考察结果的稳健性, 表 3 的第三列列出了各行业的绿色溢价比例。绿色溢价比例是指某项经济活动的零碳排放成本与现有成本之差与现有成本的比值, 由中金公司根据技术转换所需的成本, 结合政府相关部门、国内外相关学者和业界龙头企业的建议进行估计^⑨[43]。结果显示, 本文测算的各行业碳中和进程的所需投资额与中金公司绿色溢价比例大小的排序相似, 说明测算结果可以较为准确地反映各行业碳中和进程中所需投资

⑨ 值得说明的是, 绿色溢价的计算是根据技术转换所需的成本, 而本文计算的实现碳中和所需投资不仅涉及技术转换, 还涉及系统调整成本。由于人们的生活习惯、风俗和经济系统发展的路径依赖等因素, 绿色溢价和碳中和所需投资的关系不一定呈线性。根据边际减排成本估计的投资需求与绿色溢价的相对大小具有一致性, 可用于说明本文计算的碳中和所需投资与各行业低碳技术的发展程度相符, 具有一定的可信性。同时, 相比于绿色溢价, 本文计算的投资需求不仅考虑了对新技术的投资, 还考虑高碳发展路径依赖所带来的系统调整成本。

额的相对大小. 值得一提的是, 本文估计的碳中和所需投资额大于目前主流投资咨询机构给出的估计值, 例如, 中金公司对碳中和所需投资额的估计为 139 万亿元, 渣打银行的估计则为 127 万亿元 ~ 192 万亿元. 这是由于投资咨询机

构主要根据微观项目的汇总计算所需投资, 而本文采用的影子价格法根据碳减排的隐性价格, 即不仅考虑了开设新的低碳项目所需的投资, 还包括了退出旧项目、完善新项目的配套措施所带来的系统转型成本.

表 3 碳中和情景下工业部门碳中和所需的投资估计

Table 3 Estimated investment required for industrial carbon neutrality under the carbon neutrality scenario

	碳中和所需投资/(万亿元)	绿色溢价比例/%
石油化工	7.66	8%
化学原料	86.52	61%
钢铁	18.73	21%
有色金属	16.82	4%
非金属制品	165.91	151%
一般工业	8.64	NA
电力工业	2.88	17%
合计	307.16	NA

注: 1. 碳中和所需投资为作者根据二氧化碳边际减排成本曲线积分求得, 绿色溢价比例来自中金公司^[43]; 2. NA 表示无对应数据.

3.2 碳减排时点选择对所需投资额的影响

当前, 中国已经承诺实现碳中和, 但是, 实现碳中和具体的碳排放变化轨迹和减排时点选择还在讨论过程中. 现有的部分研究表明, 碳减排的时点选择会影响累积碳排放总量, 尽早实现减排目标将对全球温控产生重要影响^[44, 45]. 但是, 现有文献较少从碳减排经济成本的角度, 讨论碳减排时点选择对中国实现碳中和所需投资额的影响. 而根据本文边际减排成本方程的估计结果, 延后减排可能会导致经济增长模式和能源供应系统的锁定效应, 在碳排放目标一定的条件下, 需要付出更大的沉没成本和系统响应成本. 因此, 本文以碳中和情景为基准, 设定相对于碳中和情景而言, 三种不同的碳减排时点选择: 1) 达峰时间不变, 但峰值提高; 2) 延后达峰, 峰值与碳中和情景一致; 3) 达峰时间和峰值均与碳中和情景一致, 但达峰后维持二氧化碳排放峰值水平, 于一段时间过后开始减排.

本文对三种减排时点选择下的具体减排路径做出如下设定, 以分别测算在当前技术水平下, 三种碳减排时点选择对所需投资的影响. 时点选择 1) 下, 设定达峰时间与碳中和情景一致 (于 2030 年达峰), 但峰值提升 20%, 达峰后按照碳中和情景

各时间段的减排占比开始减排, 至 2060 年减排至碳中和情景下 2060 年的碳排放量, 所需的总投资为 343.63 万亿元. 时点选择 2) 下, 设定工业碳排放至 2035 年达峰, 峰值与碳中和情景下 2030 年的峰值相同, 达峰后即刻开始减排, 至 2060 年减排至碳中和情景下 2060 年的碳排放量, 所需的总投资为 328.13 万亿元. 时点选择 3) 下, 工业碳排放于 2030 年达峰, 但达峰后, 2030 年—2035 年的碳排放水平保持稳定, 自 2035 年起减排, 并减排至碳中和情景下 2060 年的碳排放量, 则所需投资为 324.94 万亿元.

由此可见, 延后减排将带来大量的额外投资. 造成上述结果差异的原因是减排政策实行的越晚, 碳排放的峰值越高, 则更容易将中国的经济和能源系统锁定在高碳路径下, 实现相同的减排目标需要付出更多的系统调整成本, 所需的投资总额越大. 因此, 中国实现碳中和的最优时点选择是尽早达峰, 尽可能降低峰值, 达峰后尽快减排.

4 结束语

工业部门 (包含电力工业) 是中国产生碳排放最多的国民经济部门, 推动产业结构优化升级,

特别是工业部门的绿色低碳高质量发展是当前的重点任务之一。本文将新兴低碳技术纳入碳排放驱动因素的模型,采用 LMDI 对工业碳排放的历史演变进行了驱动因素分解,进而基于能源规划模型和动态情景分析,对未来碳排放潜在演变路径和关键驱动因素进行分析,并根据边际减排成本方程,测算了实现碳中和的投资需求及不同减排时间节点选择下投资需求的差异。本文发现,总产出增长和总发电量增长分别是非电力工业和电力工业碳排放历史演变的首要促增因素,能源效率和火力发电效率提升效应是过去一直以来导致碳排放减少的关键因素。在一般工业行业和电力工业,清洁能源替代对碳排放的促降作用在 2010 年—2019 年较为明显,但在其他的非电力工业行业的发展较为缓慢。在实现碳中和的进程中,非电力工业则需要在能源效率持续下降的同时,实现清洁能源消费替代,并辅以煤炭清洁转化、化石能源内部结构调整和生产过程碳排放效率提升等技术路径;电力工业碳减排的核心技术路径为清洁能源发电替代,同时还需要依赖化石能源清洁利用和火力发电效率提升等技术路径。在设定新兴低碳技术得到充分发展的碳中和情景下,工业碳排放于 2030 年达峰,并在 2060 年降低至 21 亿 t 左右,且所需的投资额超过 300 万亿元。尽早达峰,尽可能降低峰值和达峰后尽快减排将有效规避高碳经济发展模式的锁定效应,降低碳中和所需的投资额。

基于以上研究结论,本文认为,工业部门碳中和实现的战略重点需要以技术为核心,以市场为机制,以政策为引导,并充分发挥技术、市场与政策之间的协同作用。第一,低碳技术创新是在维持中国工业部门产出增长的同时,使工业部门实现碳中和的重要途径。工业部门碳减排的核心技术路径为在保障能源安全的前提下,推动能源效率提升、清洁能源消费替代和清洁能源发电替代,可发展的重点技术包括新型节能技术、可再生能源与氢能技术、储能与智能电网技术等;由于煤炭在中国一次能源消费中占比较高,煤炭清洁高效转化技术也有望成为中国特色的低碳技术。低碳技

术创新具有双重外部性的特征,一方面,企业研发出的新技术和产品对减缓全球变暖产生积极影响,但不一定提升企业自身的经营绩效,即面临环境外部性;另一方面,企业的创新成果容易被其他竞争者模仿,但研发成本由开发者自行承担,即面临技术外部性。因此,低碳技术的研发需要辅助以市场机制的建立和政府政策的引导。基于市场的碳定价政策可以使企业低碳技术创新的环境外部性内部化,进而实现帕累托最优的资源配置状态;绿色专利制度则通过确立专利的产权,有助于缓解技术外部性的问题。宏观碳减排路径和产业技术政策的制定同样可以引导资金、高技能劳动者等生产要素向绿色低碳创新的领域流动,提升对低碳技术创新的投入。第二,市场机制的建立是促进环境偏向型技术进步的内生动力。工业部门实现碳中和需要巨额投资,难以仅仅依靠政府资金完成,多层次绿色金融产品和市场体系的形成对于中国工业部门实现碳中和具有至关重要的作用。这要求政府在完善绿色财税政策的基础上,加强市场化机制与绿色金融政策的制定,以公共与私人相结合的方式缓解资金缺口,例如依靠贴息和担保等方式,提高社会对低碳技术投资机会实现的预期,鼓励私人资本进入不太成熟和难以融资的技术领域。各行业还可以根据减排成效最大化、减排成本最小化等原则,在碳市场、碳税及碳市场和碳税混合型政策间做出合理的碳定价政策选择。从本文的研究结论来看,钢铁行业和电力工业的排放总量高,而实现碳中和所需投资低,更适合采用控制碳排放总量或强度的碳市场政策。化学原料和非金属制品行业的排放总额则相对较小,实现碳中和的所需投资高、技术难度大,更适合采用固定碳价格的碳税的机制。其他工业行业市场机制的选择,可以根据政策执行的灵活性和难易程度等方面综合考量。第三,政策的制定和颁布在工业部门碳中和进程中发挥关键引导作用。实现工业部门碳中和的政策体系应包括标准计量体系的构建、经济政策的完善、低碳技术的支持和市场机制的优化等多个方面。本文的研究结论特别强调:尽早达峰,降低峰值,达峰后尽快减排将

有利于减少实现工业碳中和目标的所需投资总额。这需要政府部门加强对从当下至碳达峰、碳中和阶段的碳排放路线制定,制定碳达峰详细的时间点、碳达峰的峰值限额及达峰后碳排放的变化轨迹。同时,中国工业部门的主要排放部门会面临从电力工业向非电力工业的转变,政府部门在规划制定的过程中,需要更多考虑自上而下的碳减

排路径设定与自下而上的技术发展和市场运行情况如何协同。此外,政府部门需要紧密结合低碳技术创新发展的阶段性特征,建立健全碳交易市场与碳税等基于市场的减排政策,并辅以绿色投融资的支持政策和绿色财政政策,引导资金流向所需投资更高的行业和技术,为低碳技术创新提供制度条件。

参考文献:

- [1] Shao S, Yang L, Gan C, et al. Using an extended LMDI model to explore techno-economic drivers of energy-related industrial CO₂ emission changes: A case study for Shanghai (China) [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, (55): 516–536.
- [2] 涂正革. 中国的碳减排路径与战略选择——基于八大行业部门碳排放量的指数分解分析[J]. *中国社会科学*, 2012, (3): 78–94, 206–207.
Tu Zhengge. Strategic measures to reduce China's carbon emissions: Based on index decomposition analysis of carbon emissions in eight industries[J]. *Social Sciences in China*, 2012, (3): 78–94, 206–207. (in Chinese)
- [3] Zhang X, Geng Y, Shao S, et al. How to achieve China's CO₂ emission reduction targets by provincial efforts?: An analysis based on generalized Divisia index and dynamic scenario simulation[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, (127): 109892.
- [4] 刘博文, 张 贤, 杨 琳. 基于 LMDI 的区域产业碳排放脱钩努力研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(4): 78–86.
Liu Bowen, Zhang Xian, Yang Lin. Decoupling efforts of regional industrial development on CO₂ emissions in China based on LMDI analysis[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2018, 28(4): 78–86. (in Chinese)
- [5] Guan D, Meng J, Reiner D M, et al. Structural decline in China's CO₂ emissions through transitions in industry and energy systems[J]. *Nature Geoscience*, 2018, (11): 551–555.
- [6] 邵 帅, 张 曦, 赵兴荣. 中国制造业碳排放的经验分解与达峰路径——广义迪氏指数分解和动态情景分析[J]. *中国工业经济*, 2017, (3): 44–63.
Shao Shuai, Zhang Xi, Zhao Xingrong. Empirical decomposition and peaking pathway of carbon dioxide emissions of China's manufacturing sector: Generalized Divisia index method and dynamic scenario analysis[J]. *China Industrial Economics*, 2017, (3): 44–63. (in Chinese)
- [7] 张希良, 黄晓丹, 张 达, 等. 碳中和目标下的能源经济转型路径与政策研究[J]. *管理世界*, 2022, 38(1): 35–66.
Zhang Xiliang, Huang Xiaodan, Zhang Da, et al. Research on the pathway and policies for China's energy and economy transformation toward carbon neutrality[J]. *Journal of Management World*, 2022, 38(1): 35–66. (in Chinese)
- [8] 清华大学气候变化与可持续发展研究院项目综合报告编写组. 《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(11): 1–25.
Report Writing Group of the Institute of Climate Change and Sustainable Development of Tsinghua University. Comprehensive report on “China's long-term low-carbon development strategy and transformation path” [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(11): 1–25. (in Chinese)
- [9] Duan H, Zhou S, Jiang K, et al. Assessing China's efforts to pursue the 1.5 °C warming limit[J]. *Science*, 2021,

- (372): 378 – 385.
- [10] Meng J, Way R, Verdolini E, et al. Comparing expert elicitation and model-based probabilistic technology cost forecasts for the energy transition[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, (118): e1917165118.
- [11] Gillingham K, Stock J H. The cost of reducing greenhouse gas emissions[J]. *Journal of Economic Perspectives*, 2018, (32): 53 – 72.
- [12] 刘俊伶, 夏侯沁蕊, 王克, 等. 中国工业部门中长期低碳发展路径研究[J]. *中国软科学*, 2019, (11): 31 – 41, 54.
Liu Junling, Xiahou Qinrui, Wang Ke, et al. Study on mid- and long-term low carbon development pathway of China's industry sector[J]. *China Soft Science*, 2019, (11): 31 – 41, 54. (in Chinese)
- [13] Ryan S P. The costs of environmental regulation in a concentrated industry[J]. *Econometrica*, 2012, (80): 1019 – 1061.
- [14] 陈诗一. 工业二氧化碳的影子价格: 参数化和非参数化方法[J]. *世界经济*, 2010, 33(8): 93 – 111.
Chen Shiyi. The shadow price of industrial carbon dioxide: Parametric and nonparametric approaches[J]. *The Journal of World Economy*, 2010, 33(8): 93 – 111. (in Chinese)
- [15] 陈诗一. 边际减排成本与中国环境税改革[J]. *中国社会科学*, 2011a, (3): 85 – 100, 222.
Chen Shiyi. Marginal abatement cost and environmental tax reform in China[J]. *Social Sciences in China*, 2011a, (3): 85 – 100, 222. (in Chinese)
- [16] 蒋伟杰, 张少华. 中国工业二氧化碳影子价格的稳健估计与减排政策[J]. *管理世界*, 2018, 34(7): 32 – 49, 183 – 184.
Jiang Weijie, Zhang Shaohua. Robust estimation and application of shadow price of CO₂: Evidence from China[J]. *Journal of Management World*, 2018, 34(7): 32 – 49, 183 – 184. (in Chinese)
- [17] 杨子晖, 陈里璇, 罗彤. 边际减排成本与区域差异性研究[J]. *管理科学学报*, 2019, 22(2): 1 – 21.
Yang Zihui, Chen Lixuan, Luo Tong. Marginal cost of emission reduction and regional differences[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2019, 22(2): 1 – 21. (in Chinese)
- [18] Du L, Hanley A, Wei C. Estimating the marginal abatement cost curve of CO₂ emissions in China: Provincial panel data analysis[J]. *Energy Economics*, 2015, (48): 217 – 229.
- [19] Lin B, Ouyang X. Analysis of energy-related CO₂ (carbon dioxide) emissions and reduction potential in the Chinese non-metallic mineral products industry[J]. *Energy*, 2014, (68): 688 – 697.
- [20] Luderer G, Vrontisi Z, Bertram C, et al. Residual fossil CO₂ emissions in 1.5 – 2 °C pathways[J]. *Nature Climate Change*, 2018, (8): 626 – 633.
- [21] Electric Power Research Institute (EPRI). U. S. National Electrification Assessment[M]. Palo Alto: EPRI, 2018.
- [22] Shan Y, Zhou Y, Meng J, et al. Peak cement-related CO₂ emissions and the changes in drivers in China[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2019, (23): 959 – 971.
- [23] 陈诗一. 中国工业分行业统计数据估算: 1980—2008[J]. *经济学(季刊)*, 2011b, 10(3): 735 – 776.
Chen Shiyi. Reconstruction of sub-industrial statistical data in China: 1980—2008[J]. *China Economic Quarterly*, 2011b, 10(3): 735 – 776. (in Chinese)
- [24] 范英, 衣博文. 能源转型的规律、驱动机制与中国路径[J]. *管理世界*, 2021, 37(8): 95 – 105.
Fan Ying, Yi Bowen. Evolution, driving mechanism, and pathway of China's energy transition[J]. *Journal of Management World*, 2021, 37(8): 95 – 105. (in Chinese)
- [25] 张增凯, 彭彬彬, 解伟, 等. 能源转型与管理领域的科学研究问题[J]. *管理科学学报*, 2021, 24(8): 147 – 153.
Zhang Zengkai, Peng Binbin, Xie Wei, et al. Scientific research issues in the field of energy transition and management [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2021, 24(8): 147 – 153. (in Chinese)

- [26] IEA. World Energy Outlook 2020[R]. Paris: IEA, 2020a.
- [27] Wei M, McMillan C A, de la Rue du Can S. Electrification of industry: Potential, challenges and outlook[J]. Current Sustainable/Renewable Energy Reports, 2019, (6): 140 – 148.
- [28] Madeddu S, Ueckerdt F, Pehl M, et al. The CO₂ reduction potential for the European industry via direct electrification of heat supply (power-to-heat)[J]. Environmental Research Letters, 2020, (15): 124004.
- [29] Song S, Li T, Liu P, et al. The transition pathway of energy supply systems towards carbon neutrality based on a multi-regional energy infrastructure planning approach: A case study of China[J]. Energy, 2022, (238): 122037.
- [30] Habert G, Billard C, Rossi P, et al. Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives[J]. Cement and Concrete Research, 2010, 40(5): 820 – 826.
- [31] 曹植, 沈镭, 刘立涛, 等. 基于自下而上方法的中国水泥生产碳排放强度演变趋势分析[J]. 资源科学, 2017, 39(12): 2344 – 2357.
Cao Zhi, Shen Lei, Liu litao, et al. A bottom-up analysis of CO₂ emission intensity of Chinese cement industry[J]. Resources Science, 2017, 39(12): 2344 – 2357. (in Chinese)
- [32] IEA. Cement[R]. Paris: IEA, 2020b.
- [33] Greenhouse Gas-Air Pollution Interactions and Synergies (GAINS), IEA WEO 2019 SPS/SDS Scenarios[M]. Vienna: International Institute for Applied Systems Analysis, 2019.
- [34] 新华社, “十四五”末可再生能源将成消费增量主体[EB/OL]. 北京. <https://news.cnstock.com/industry,rdjj-202103-4680397.htm>, 2021a.
Xinhuanet. Renewable energy will become the main body of consumption increment at the end of the “14th Five-Year Plan” [EB/OL]. Beijing: <https://news.cnstock.com/industry,rdjj-202103-4680397.htm>, 2021a. (in Chinese)
- [35] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Special Report: Global Warming of 1.5 °C [EB/OL]. Geneva: IPCC, <https://www.ipcc.ch/sr15/>, 2019.
- [36] 段宏波, 汪寿阳. 中国的挑战: 全球温控目标从 2 °C 到 1.5 °C 的战略调整[J]. 管理世界, 2019, 35(10): 50 – 63.
Duan Hongbo, Wang Shouyang. From 2 °C to 1.5 °C: China’s challenges to attain the global warming-limit targets[J]. Journal of Management World, 2019, 35(10): 50 – 63. (in Chinese)
- [37] 林伯强, 刘希颖. 中国城市化阶段的碳排放: 影响因素和减排策略[J]. 经济研究, 2010, 45(8): 66 – 78.
Lin Boqiang, Liu Xiyi. China’s carbon dioxide emissions under the urbanization process: Influence factors and abatement policies[J]. Economic Research Journal, 2010, 45(8): 66 – 78. (in Chinese)
- [38] 张贤, 李阳, 马乔, 等. 我国碳捕集利用与封存技术发展研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 70 – 80.
Zhang Xian, Li Yang, Ma Qiao, et al. Development of carbon capture, utilization and storage technology in China[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 70 – 80. (in Chinese)
- [39] Wang J, Feng L, Palmer P I, et al. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data[J]. Nature, 2020, 586(7831): 720 – 723.
- [40] 陈诗一, 陈登科. 中国资源配置效率动态演化——纳入能源要素的新视角[J]. 中国社会科学, 2017, (4): 67 – 83, 206 – 207.
Chen Shiyi, Chen Dengke. Dynamic evolution of resource allocation efficiency in China: A new approach incorporating energy factor[J]. Social Sciences in China, 2017, (4): 67 – 83, 206 – 207. (in Chinese)
- [41] Tong D, Zhang Q, Zheng Y, et al. Committed emissions from existing energy infrastructure jeopardize 1.5 °C climate target[J]. Nature, 2019, (572): 373 – 377.
- [42] 林伯强. 碳中和进程中的中国经济高质量增长[J]. 经济研究, 2022, 57(1): 56 – 71.
Lin Boqiang. China’s high quality economic growth in the process of carbon neutrality[J]. Economic Research Journal,

2022, 57(1): 56–71. (in Chinese)

- [43] 中国国际金融股份有限公司:《碳中和经济学:新约束下的宏观与行业分析》[M]. 北京:中信出版集团, 2021.
China International Capital Corporation Limited. Carbon Neutrality Economics: Macro and Sector Analysis Under New Constraints[M]. Beijing: CITIC Press Group, 2021. (in Chinese)
- [44] Millar R, Allen M, Rogelj J, et al. The cumulative carbon budget and its implications[J]. Oxford Review of Economic Policy, 2016, 32(2): 323–342.
- [45] Matthews H D, Zickfeld K, Knutti R, et al. Focus on cumulative emissions, global carbon budgets and the implications for climate mitigation targets[J]. Environmental Research Letters, 2018, 13(1): 010201.

Strategic measures and pathway towards China's industrial carbon neutrality

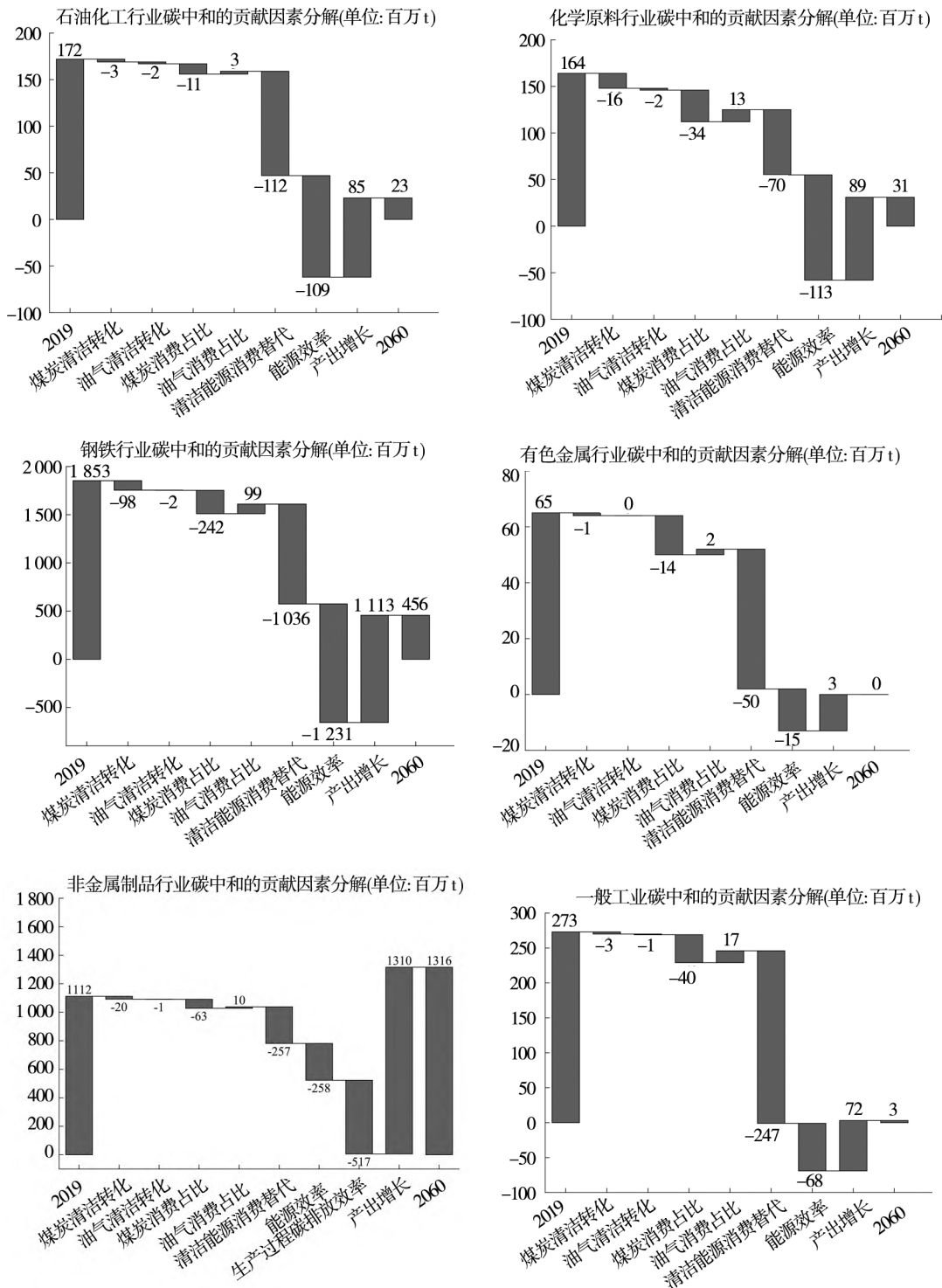
CHEN Shi-yi^{1, 2}, WANG Chang¹, GUO Yue^{3, 4}

1. School of Economics, Fudan University, Shanghai 200433, China;
2. International School of Finance, Fudan University, Shanghai 200433, China;
3. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
4. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The industrial sector (including electric power industry) is China's largest source of carbon emissions. Exploring reasonable and effective pathways of industrial emission reduction for the industrial sector is the key for China's carbon peaking and carbon neutrality goals. This paper decomposes the driving factors of the historical evolution path of China's industrial carbon emissions from 2000 to 2019, predicts the potential evolution path of industrial carbon emissions from 2019 to 2060 under various scenarios, estimates the amount of investment required in the process of carbon neutrality, and discusses the heterogeneity of required investment for different emissions abatement timing options. The research finds that: 1) Scale effect and efficiency effect are the most critical driving factors in the historical evolution path, while the clean conversion of fossil energy, the internal structural change of fossil fuels, and the clean energy substitution have less influence; 2) The core emission reduction technology paths of non-power industry in the future are energy efficiency improvement and clean energy consumption substitution, while the core emission reduction technology path for the electric power industry is clean energy generation substitution; 3) At the current technological level, the process of industrial carbon neutrality requires a huge investment of more than 300 trillion yuan, which is mainly concentrated in the carbon-intensive non-electric industry. At the end of this paper, a strategic choice of realizing China's industrial carbon neutrality is put forward, which is "technology as the core, market as the mechanism, and policy as the guidance".

Key words: industrial carbon emissions; pathways for carbon neutrality; index decomposition; scenario analysis; marginal abatement cost

附录



附图1 碳中和情景下非电力工业细分行业碳排放的潜在演变路径的驱动因素分解

Attached Fig. 1 Decomposition of driving factors for the potential evolution path of carbon emissions in non-power generation industrial sectors under the carbon neutrality scenario