

DOI: 10.15918/j.jbitss1009-3370.2021.7380

碳中和目标下中国碳排放路径研究

余碧莹, 赵光普, 安润颖, 陈景明, 谭锦潇, 李晓易

(北京理工大学 管理与经济学院 能源与环境政策研究中心, 北京 100081)

摘要: 气候变化是当今人类面临的重大全球性挑战。中国是第一大碳排放国, 在全球气候治理中起着关键作用。继 2015 年气候变化巴黎大会之后, 中国在 2020 年联合国大会一般性辩论和气候雄心峰会等重要会议上, 首次提出了争取 2030 年前碳达峰, 2060 年前碳中和, 2030 年碳强度下降 65%、非化石能源比重达到 25% 等中长期战略目标。这一系列里程碑意义的新目标, 彰显了中国负责任的大国担当, 也是实现中国高质量发展的客观要求。为支撑国家应对气候变化战略实施, 围绕碳达峰与碳中和目标, 利用自主研发的国家能源技术经济模型 (CIAM/NET), 从自下而上的行业视角, 研究了中国中长期 CO₂ 排放的总体目标和实现路径; 分析了不同经济增速和减排力度情景下, 能源系统、碳捕集与封存技术以及碳汇的贡献程度。研究发现: 全国 CO₂ 排放量有望于 2025 年实现达峰, 峰值约 108 亿吨, 最晚于 2030 年达峰。通过能源系统实施不同减排努力, 并结合碳捕集与封存技术部署, 到 2060 年, 与能源相关的 CO₂ 排放量仍将存在 3 亿~31 亿吨, 主要来自电力、钢铁、化工、交通等行业, 需要森林、海洋碳汇来吸收。并针对电力、工业、交通、建筑等重点领域和行业提出了建议。

关键词: 气候变化; 碳中和; 碳达峰; 能源系统; 碳捕集与封存技术; 减排路径; 行业责任; 技术布局

中图分类号: F426

文献标志码: A

文章编号: 1009-3370(2021)02-0017-08

气候变化是当今人类面临的重大挑战, 应对气候变化已经成为全球共识。2015 年 12 月, 缔约方通过《巴黎协定》, 并明确了 21 世纪末将全球温升控制在不超过工业化前 2 °C 的目标, 并将 1.5 °C 温控目标确立为应对气候变化的长期努力方向。《巴黎协定》要求各缔约方每五年提交一次“国家自主减排贡献”(NDC), 由各国自主制定减排目标。多项研究表明, 即使各国均兑现《巴黎协定》中各缔约方提交的国家自主减排贡献方案, 全球平均温升水平有可能达到 3 °C 以上, 无法满足 2 °C 和 1.5 °C 温控目标的要求^[1-3]。因此, 全球各国和地区均需要大幅提升自主贡献目标, 加大减排力度, 以避免长期不可逆的巨大风险。

长期以来, 中国积极参与全球治理, 将温室气体减排任务纳入国家五年规划和 2035 远景目标。在落实政策方面, 通过产业结构调整、能源结构优化、能源效率提高、碳市场建设、生态碳汇增加等一系列措施, 使得中国节能减排行动取得了显著成效。2019 年, 中国单位国内生产总值 CO₂ 排放(碳强度)较 2005 年降低 48.1%, 非化石能源占比为 15.3%, 已经提前和超额完成 2020 年气候行动目标^[4]。

为进一步强化应对气候危机, 在全球碳减排进程中做出更大贡献, 中国在第七十五届联大会议及气候雄心峰会上宣布了新的国家自主贡献目标和长期愿景。相比于 2015 年提交的国家自主减排贡献(NDC)方案, 碳强度由“2030 年左右达峰”提升到“2030 年前碳达峰、2060 年前碳中和”, 非化石能源比重由 20% 提高到 25%, 森林蓄积量由 45 亿立方米增加到 60 亿立方米。这些新的目标具有多重意义, 展现了中国积极应对全球气候变化的责任担当, 有利于推动全面绿色转型, 加快形成清洁、高效、绿色、安全的现代治理体系。

实现中国碳中和, 要求全国在一定时间内(一般指一年)由人为活动直接和间接排放的 CO₂, 通过碳捕集与封存或植树造林等固碳技术吸收后, 达到 CO₂ 的“零排放”。相比于欧洲、美国等发达国家的历史进程, 中国实现碳中和目标, 面临时间紧、任务重的严峻挑战, 需要用比发达国家更短的时间去实施

收稿日期: 2021-01-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFA0602603); 国家自然科学基金项目(71822401, 71603020, 71521002); 北京市自然科学基金项目(JQ19035)

作者简介: 余碧莹(1986—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: yubiyong_bj@bit.edu.cn

更大体量的碳中和。那么，中国应该如何走出自己的碳中和道路？此外，由于碳达峰的时间点和峰值直接决定从碳达峰到碳中和转变的可用时间和需要完成的减排体量，因此碳达峰的行动方案必须在碳中和目标的牵引和约束下统筹规划。但是，目前关于中国实现碳达峰、碳中和目标路径的研究极为缺乏，特别是在当前百年未有之大变局形势下，后疫情时代社会经济发展存在较大的不确定性，数字化、智能化、网络化等新技术对人们生活形态和工作业态带来了极大的改变。因此，如何在综合考虑社会经济技术不确定性的前提下，提出适用于中国新发展格局的碳中和行动方案，是当前必须要回答的问题。

为了探索实现中国碳达峰、碳中和目标的可行性路径，本文自主构建了一个自下而上的中国气候变化综合评估模型/国家能源技术模型 (China's Climate Change Integrated Assessment Model/National Energy Technology Model, C³IAM/NET)，模拟能源供给—加工转化—运输配送—终端使用—末端治理的全过程。在统筹考虑后疫情时代的经济发展水平、能源系统的低碳转型力度、碳捕集与封存技术 (CCS) 的部署规模以及森林碳汇可用量等多方面不确定性基础上，进一步回答：后新冠疫情时代不同经济复苏情况下，能源系统的低碳转型能否实现碳中和目标？各行业应该如何分担减排责任？应该如何部署 CCS 技术？实现碳中和目标需要多少碳汇？最终为国家制定低碳发展战略，引领全球气候治理提供科学支撑。

一、研究方法:C³IAM/NET 模型

(一)模型介绍

国家能源技术模型 (National Energy Technology Model, NET) 是中国气候变化综合评估模型 (C³IAM) 的子模型，由北京理工大学能源与环境政策研究中心自主研发^[5]。C³IAM/NET 模型是以自下而上的角度，从工艺流程出发，模拟了从一次能源供应、到加工转换、再到终端行业生产运行全过程中产生的能源消费及排放。目前已应用于多个部门，涵盖一次能源供应、电力、热力、钢铁、水泥、化工、有色、造纸、居民、商业、客运、货运、其他工业等二十多个细分行业，共涉及六百余类具体技术^[6-14]。模型不仅可以评估技术创新和能源经济政策的节能减排潜力和减排成本，而且可以寻找实现能源消费或排放控制等环境目标的最佳技术路径。C³IAM/NET 模型框架如图 1 所示。

图 1 展示了模型总体框架，包括三个模块 (数据模块、绿色政策模块和输出模块) 和两个子模型

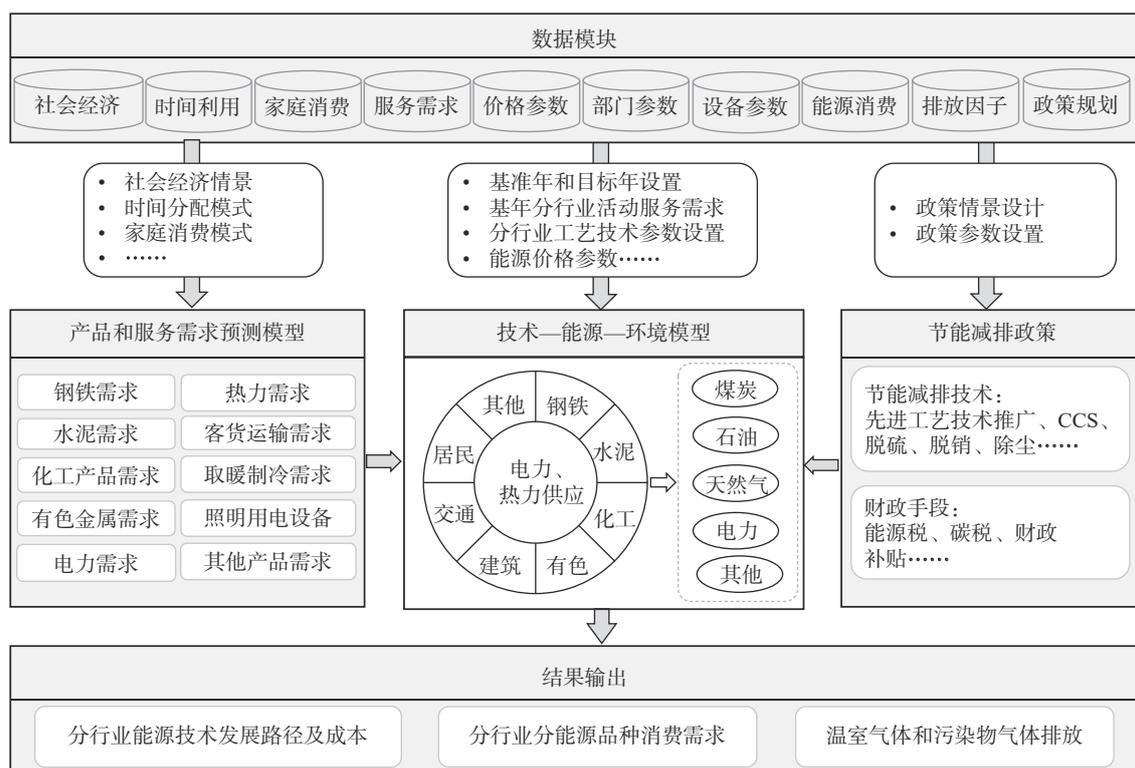


图 1 C³IAM/NET 模型框架

(服务需求预测模型、技术—能源—环境模型)。具体原理为:在综合考虑经济发展、产业升级、城镇化加快、智能化普及等社会经济形态变化的基础上,利用服务需求预测模型对各个终端用能行业的产品和服务需求进行预测;进一步基于技术—能源—环境模型模拟各终端行业生产工艺过程或消费过程中各类技术的能源流和物质流,引入技术升级、燃料替代、成本下降等变化趋势和政策要求,提出各行业以经济最优方式,实现其产品或服务供给目标的技术发展路径,最终得到温室气体排放、能源供应和能源效率等约束下全社会所需投入的能源以及产生的排放。

C³IAM/NET模型包括供给和需求两个层次。对各终端行业(如钢铁、水泥、化工、造纸、有色、其他工业、建筑、交通等)分别构建反映该行业工艺过程和决策机理的NET子模型,并汇总各终端行业的用电和用热总需求,进而对电力和热力行业进行技术优化布局,最终获得满足终端行业用电和用热需求的电力、热力行业能源消耗。在此基础上,集成供给和需求侧的能源投入和排放产出,得到全社会的能源和排放总量。

(二)模型数学表达

C³IAM/NET模型是一个线性优化模型,在相关条件(例如技术渗透速度、能源服务需求、碳预算、能源和材料供应的可用性等)约束下,选择实现系统总成本最小的最优技术组合方案。数学描述如下:

1. 目标函数

C³IAM/NET模型的目标函数是规划期内能源系统年化总成本最小。包含三个部分:设备或技术的年度化初始投资成本、设备或技术的年度化运行和维护成本,以及燃料成本。总成本表达式为

$$\min TC_t = IC_t + OM_t + EC_t \quad (1)$$

其中, t 为年份; TC_t 表示折算到第 t 年的总成本; IC_t 为折算到第 t 年的年度化初始投资成本; OM_t 为设备的运行和维护成本; EC_t 为燃料成本。

年度化初始投资成本计算时需考虑政府可实施的补贴率、内部收益率、设备寿命因素,表达式为

$$IC_t = \sum_i^m \sum_d^n ic_{i,d,t} \times (1 - SR_{i,d,t}) \times \frac{IR_{i,d,t} \times (1 + IR_{i,d,t})^{T_{i,d}}}{(1 + IR_{i,d,t})^{T_{i,d}} - 1} \quad (2)$$

其中, i 为行业; m 为所有行业总量; d 为设备; n 为所有设备总量; $ic_{i,d,t}$ 为第 t 年行业 i 的设备 d 的初始投资成本; $SR_{i,d,t}$ 为补贴率; $IR_{i,d,t}$ 为内部收益率; $T_{i,d}$ 为生命周期。

运行和维护成本:是指设备的维修成本、管理成本、人力成本和政府补贴等,表达式为

$$OM_t = \sum_i^m \sum_d^n om_{i,d,t} \times OQ_{i,d,t} \times (1 - SR_{i,d,t}) \quad (3)$$

其中, $om_{i,d,t}$ 为第 t 年行业 i 的设备 d 的单位运行和维护成本; $OQ_{i,d,t}$ 为设备 d 的运行数量。

能源成本:是指所有设备能源消费乘以能源价格的总和。计算时需考虑不同能源品种价格随时间的变化、设备能源效率的提高和政府可实施的补贴,表达式为

$$EC_t = \sum_i^m \sum_d^n \sum_k^z P_{i,d,k,t} \times E_{i,d,k,t} \times OQ_{i,d,t} \times (1 - EFF_{i,d,t}) \times (1 - SR_{i,d,t}) \quad (4)$$

其中, k 为能源品种; z 为能源品种数量; $P_{i,d,k,t}$ 为第 t 年行业 i 的设备 d 所耗能源品种 k 的价格; $E_{i,d,k,t}$ 为设备 d 所耗能源品种 k 的消费量; $EFF_{i,d,t}$ 为设备 d 的能源效率提升率。

2. 约束条件

产品和服务需求约束:是指对于给定的某种服务,对应的所有设备运行量乘以单位设备能源服务量的总和,必须大于该能源服务的需求量(不含进口),从而满足市场需求。表达式为

$$\sum_d^n OT_{i,d,j,t} \times OQ_{i,d,t} \times (1 + EFF_{i,d,t}) \geq DS_{i,j,t} \quad (5)$$

其中, $DS_{i,j,t}$ 为第 t 年行业 i 的产品或能源服务需求类型 j 的总需求量实际值; $OT_{i,d,j,t}$ 为 j 的产出量。

能源消费约束:是指所有设备运行量乘以单位设备能源消费量的总和,不得超过或低于某个限制值,从而满足国家或行业能源总量控制的政策约束。表达式为

$$ENE_{i,k,t}^{\min} \leq ENE_{i,k,t} \leq ENE_{i,k,t}^{\max} \tag{6}$$

其中, $ENE_{i,k,t}$ 为第 t 年行业 i 所有设备所耗能源品种 k 的总消费量; $ENE_{i,k,t}^{\min}$ 为能源消费下限约束; $ENE_{i,k,t}^{\max}$ 为能源消费上限约束。

排放约束: 是指所有设备运行量乘以单位设备排放量的总和, 不得超过某个限制值, 从而满足国家和行业低碳发展目标的约束。表达式为

$$EMS_{i,g,t} \leq EMS_{i,g,t}^{\max} \tag{7}$$

其中, $EMS_{i,g,t}$ 为第 t 年行业 i 所产生的气体 g 的排放量; $EMS_{i,g,t}^{\max}$ 为最大排放量约束。

运行设备数量约束: 是指设备运行量不得大于开机的设备库存量, 表达式为

$$OQ_{i,d,t} \leq SQ_{i,d,t} \times RATE_{i,d,t} \tag{8}$$

$$SQ_{i,d,t} = SQ_{i,d,t-1} + NQ_{i,d,t} + RQ_{i,d,t} \tag{9}$$

其中, $SQ_{i,d,t}$ 为第 t 年行业 i 设备 d 的库存量; $SQ_{i,d,t-1}$ 为第 $t-1$ 年设备 d 的存量; $NQ_{i,d,t}$ 为第 t 年设备 d 的新增数量; $RQ_{i,d,t}$ 为第 t 年设备 d 的退役数量; $OQ_{i,d,t}$ 为第 t 年设备 d 的运行数量; $RATE_{i,d,t}$ 为设备 d 的开机率, 不大于 1。

技术渗透率约束: 是指对于给定的某种服务, 由某种设备供给的比例, 不得超过或低于某个约束值, 从而满足淘汰落后产能, 或鼓励先进技术发展的政策需求。表达式为

$$Share^{\min} \leq Share \leq Share^{\max} \tag{10}$$

其中, $Share$ 为第 t 年行业 i 的设备 d 在服务 j 总产出量中的最小比例; $Share^{\min}$ 为渗透率下限约束; $Share^{\max}$ 为渗透率上限约束。上限和下限约束视具体情况而定。

供给需求约束: 电力和热力行业生产的电力、热力产品需满足终端行业或部门产生的电力和热力需求。

二、情景设置与参数假设

实现碳中和的路径存在极大的不确定性, 取决于后新冠疫情时代的社会经济发展态势、能源系统低碳转型速度、碳捕集与封存技术 (CCS) 部署规模、森林碳汇可用量等多个方面。本研究以能源系统转型为主, CCS 和森林碳汇等技术为辅的思路, 探讨未来中国实现碳中和目标的可能路径。在此简要介绍模型的相关参数设置, 包括情景设置、技术参数特征、能源服务需求预测等。

(一) 社会经济参数假设

2020 年中国取得新冠疫情防控的重大战略成果, 成为全球唯一实现正增长的大型经济体, 全年国内生产总值超过百万亿元, 比上一年增长 2.3%。同时由于受到全球政治经济格局深度影响, 中国未来经济在乐观的走势中带有不确定性。由此设置了未来 GDP 低速、中速、高速发展三种情景, 如表 1 所示^[14]。

表 1 中国未来 GDP 增速预测

单位: %

增速	2021—2025年	2026—2030年	2031—2035年	2036—2040年	2041—2050年	2051—2060年
低速	5.0	4.5	4.5	3.5	2.5	1.5
中速	5.6	5.5	4.5	4.5	3.4	2.4
高速	6.0	5.5	5.0	5.0	4.5	4.0

(二) 产品或能源服务需求

能源服务需求是指各类耗能技术或设备所能提供给最终能源消费者的产品和服务。在三种 GDP 增速下, 并进一步考虑未来智能化、电气化、产业升级、城镇化加快、智能化普及等变化趋势的基础上, 预测三种不同的终端行业产品或能源服务需求 (此处不列出详细过程, 参见文献 [6-14])。具体来说, 在进行预测时, 工业各行业考虑到产业结构调整、贸易政策变化、下游产业变动等因素; 交通行业考虑新能源车推广、运输结构优化、电子商务发展等; 建筑行业考虑收入水平提高、数字化加深、老龄化加剧等因素影响。以 GDP 中速增长情景为例, 各个行业能源服务需求的种类及未来预测值如表 2 所示。

表2 中国终端用能行业产品和服务需求预测

行业	产品或能源服务需求种类	单位	2030年	2060年
钢铁	钢产量	亿吨	8.3	10.0
铝	铝产量	百万吨	32.6	7.1
水泥	水泥产量	亿吨	19.6	10.6
乙烯	乙烯产量	百万吨	33.6	69.7
其他工业	产业增加值	亿元	71.0	137.0
城市客运	城市客运周转量	万亿人公里	5.4	8.6
城际客运	城际客运周转量	万亿人公里	5.3	7.3
货运	货运周转量	万亿吨公里	29.2	41.6
居民	供暖、制冷、热水、照明、电器运行、烹饪等活动需求	亿吨标准煤	9.8	12.9
商业	供暖、制冷、热水、照明、电器运行等活动需求	亿吨标准煤	8.5	15.7

模型中消费侧与供给侧通过硬连接的方式来实现供需平衡。由于行业自身特性不同,钢铁和铝产品属于存量型用能产品,其他行业的服务需求均属于流量型用能产品和服务。存量型用能产品涵盖每年新生产量、下游行业的在用量、回收量。流量型用能产品和服务只能一次性使用,无法回收再加工。

(三)碳中和情景设置

模型以2015为基准年,以2060年为目标年,并对2015—2019年的历史数据进行了校准^[15-16]。综合气候目标种类、GDP增速、能源系统减排力度、CCS部署力度,共设置了24种情景,如表3所示。气候目标分为三种情景:BAU(政策趋势照常)、原NDC目标、2060年碳中和目标。在考虑经济性和可行性的基础上,设置了三种CCS部署力度情景:不加装CCS、小规模部署(2040年开始商业化推广)、大规模部署(2030年开始商业化推广)。三种GDP增速分别对应三种产品和能源服务需求情景。为进一步刻画能源系统可能出现的低碳转型到位、转型不足的情况,进一步将能源系统减排力度划分为三种情景:中度、大力、强力,即在原NDC情景的基础上,加快推进先进技术和低碳技术的渗透,大幅提高可再生能源和电力消费比重,以达到能源系统各行业的最佳可行性路径。

表3 情景设置及代码

气候目标	CCS部署力度	低速GDP	中速GDP	高速GDP
BAU	无CCS	BAU-L	BAU-M	BAU-H
原NDC	无CCS	BAU-L	BAU-M	BAU-H
碳中和	2040年开始部署	CM1-L-2040	CM1-M-2040	CM1-H-2040
		CM2-L-2040	CM2-M-2040	CM2-H-2040
		CM3-L-2040	CM3-M-2040	CM3-H-2040
	2030年开始部署	CM1-L-2030	CM1-M-2030	CM1-H-2030
		CM2-L-2030	CM2-M-2030	CM2-H-2030
		CM3-L-2030	CM3-M-2030	CM3-H-2030

注:CM1、CM2、CM3分别代表中度、大力、强力减排;L、M、H分别代表低、中、高三种GDP增速;2030、2040分别代表2030年开始部署CCS、2040年开始部署CCS。

三、碳中和约束下全国碳排放路径

本文将主要介绍基于C'IAM/NET模型优化得到的碳达峰,碳中和目标下中国总体碳排放路径和行业责任分配等结果。

(一)碳中和总体路径

24种情景下2020—2060年中国CO₂排放路径如图2所示。可以发现,无论在何种GDP增速、能源系统转型力度、CCS部署规模程度下,2060年中国能源相关的CO₂排放都高于0。换言之,仅靠能源系

统低碳转型和 CCS 技术捕集 CO₂ 是无法实现中国 2060 年碳中和的目标, 仍然需要森林、海洋碳汇等方式来吸收。具体来说, 在可行技术路径下实现能源系统不同程度低碳转型, 结合 CCS 技术部署, 到 2060 年, 与能源相关的 CO₂ 排放量仍有 3~31 亿吨 CO₂, 这一部分余量需要森林、海洋碳汇来吸收, 具体结果如图 3 所示。

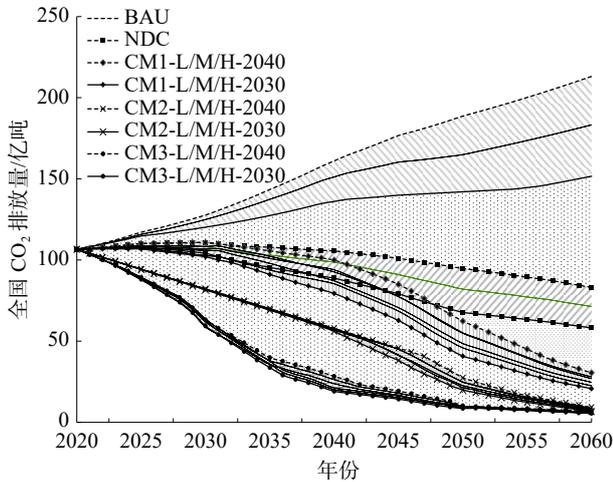


图 2 不同情景下的中国 CO₂ 排放路径

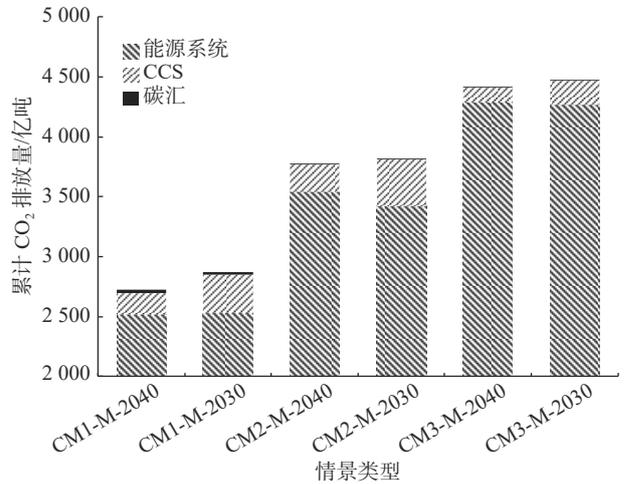


图 3 碳中和约束下不同减排方式的累计贡献量 (以 GDP 中速增长为例)

碳达峰的行动方案必须在碳中和目标的牵引和约束下统筹规划。按照更新的国家自主减排贡献目标, 在 GDP 低速增长、能源系统中度减排情景下 (即 CM1-L-2030、CM1-L-2040 情景), 全国能源相关 CO₂ 排放量有望于 2025 年实现全国碳达峰, 峰值约 108 亿吨。在 GDP 高速增长、能源系统中度减排力度下 (即 CM1-H-2030、CM1-H-2040 情景), 碳达峰时间最晚不超过 2030 年。为了实现碳达峰目标, 2020—2030 年, CO₂ 排放年均增长率不高于 0.4%, 年均新增 CO₂ 排放量应控制在 0.5 亿吨以内。

(二) 行业 CO₂ 排放和减排责任

本研究模拟得到 24 种情景下各个行业的 CO₂ 排放和减排责任, 本文以能源系统大力减排、结合 CCS 大规模部署情景为例来进行说明。图 4 显示出该情景下 GDP 中速发展时能源系统各行业的 CO₂ 排放路径。总体来说, CO₂ 排放主要来自电力、钢铁、水泥、交通等行业。在碳达峰目标约束下, 不同经济增速下, 2020—2030 年能源系统累计排放空间总量为 1 160 亿~1 200 亿吨 CO₂, 各行业直接 CO₂ 排放比例为: 电力热力 42%、工业 37%、交通 13%、建筑 8%。相比于 BAU 政策照常发展的情景, 该情景下能源系统需累计减排 234 亿吨 CO₂, 各行业直接 CO₂ 减排责任为: 电力热力 71%、工业 11%、交通 7%、建筑 11%。具体如图 5 所示。

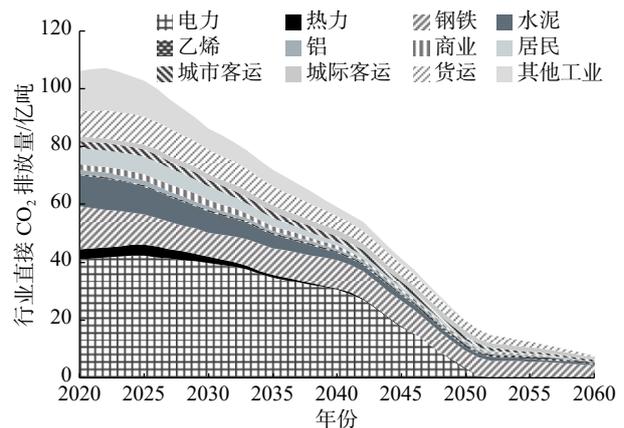


图 4 能源系统各行业的直接 CO₂ 排放路径 (以 CM2-M-2030 情景为例)

在能源系统大力减排、结合 CCS 大规模部署情景下, 2020—2060 年, 能源系统 (含 CCS) 累计排放空间总量约为 3 758 亿吨 CO₂, 各行业直接 CO₂ 排放比例为: 电力热力 42%、工业 35%、交通 17%、建筑 6%。相比于 BAU 政策照常发展情景, 能源系统各行业直接 CO₂ 减排责任为: 电力热力 49%、工业 29%、交通 12%、建筑 10%。具体如图 6 所示。

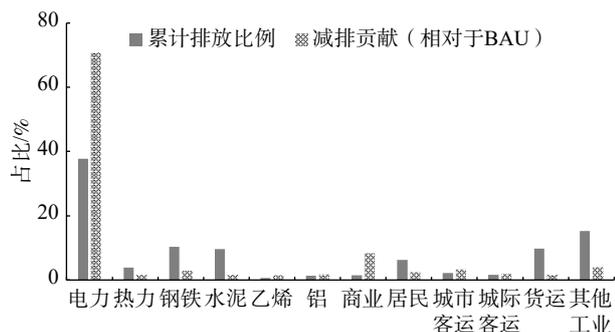


图5 2020—2030年行业累计CO₂排放和减排比例
(以CM2-M-2030情景为例)

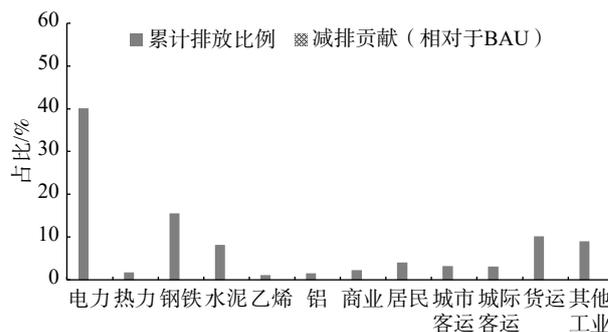


图6 2020—2060年行业累计CO₂排放和减排比例
(以CM2-M-2030情景为例)

四、结论与政策建议

为了实现中国碳达峰、碳中和目标,应认真落实“四个革命、一个合作”能源战略要求,采取更加有力的政策和措施,加快推进新技术普及、新业态创新、低碳技术部署。进一步完善经济激励政策和部门协同管理机制,依靠市场竞争促进可再生能源发展。各方主体合力推进碳达峰和碳中和目标的实现,鼓励企业推广先进适用技术,加快扩大CCS、氢能等突破性技术的商业化应用。加强能源发展政策协同,引导金融资源向绿色发展和应对气候变化领域倾斜,促进绿色产能创新。同时,能源系统各个行业需加快绿色转型步伐。电力行业应重点发展风电、光电、CCS技术。钢铁行业短期应加速小球烧结、低温烧结、干法熄焦、干式高炉炉顶余热发电等节能技术,中长期应加大电弧炉炼钢、氢能炼钢和CCS技术的部署。化工行业应发展轻质化原料、先进煤气化技术、低碳制氢和CO₂利用技术、CCS技术等。建筑部门应继续提高采暖制冷效率,大幅提升电气化水平,因地制宜发展分布式能源。交通部门应优先铁路、水路运输,发展电动客/货车、氢燃料车、生物燃料飞机和船舶等先进技术。通过各个行业协同发力,争取尽早实现行业达峰和碳中和目标,最终落实国家碳中和的战略目标。

参考文献:

- [1] WEI Y M, HAN R, LIANG Q M, et al. An integrated assessment of INDCs under shared socioeconomic pathways: an implementation of C³IAM[J]. *Natural Hazards*, 2018, 92 (2): 585-618.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Special report on global warming of 1.5 °C[R]. UK: Cambridge University Press, 2018.
- [3] United Nations Environment Programme (UNEP). Emissions gap report 2020[R]. Nairobi: United Nations Environment Programme and UNEP DTU Partnership, 2020.
- [4] 生态环境部. 生态环境部举办积极应对气候变化政策吹风会[EB/OL]. (2020-09-27) [2021-01-20]. http://www.mee.gov.cn/ywdt/hjywnews/202009/t20200927_800752.shtml.
- [5] WEI Y M, HAN R, WANG C, et al. Self-preservation strategy for approaching global warming targets in the post-Paris agreement era[J]. *Nature Communications*, 2020, 11 (1): 1624.
- [6] AN R, YU B, LI R, et al. Potential of energy savings and CO₂ emission reduction in China's iron and steel industry[J]. *Applied Energy*, 2018, 226: 862-880.
- [7] CHEN J M, YU B, WEI Y M. Energy technology roadmap for ethylene industry in China[J]. *Applied Energy*, 2018, 224: 160-174.
- [8] LI X, YU B. Peaking CO₂ emissions for China's urban passenger transport sector[J]. *Energy Policy*, 2019, 133: 110913.
- [9] TANG B, LI R, YU B, et al. How to peak carbon emissions in China's power sector: a regional perspective[J]. *Energy Policy*, 2018, 120: 365-381.
- [10] TANG B, LI R, YU B, et al. Spatial and temporal uncertainty in the technological pathway towards a low-carbon power industry: a case study of China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 230: 720-733.
- [11] TANG B, LI X, YU B, et al. Sustainable development pathway for intercity passenger transport: a case study of China[J]. *Applied Energy*, 2019, 254: 113632.
- [12] TANG B, WU Y, YU B, et al. Co-current analysis among electricity-water-carbon for the power sector in China[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 745: 141005.

- [13] ZHANG C, YU B, CHEN J, et al. Green transition pathways for cement industry in China[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2021, 166: 105355.
- [14] 魏一鸣, 廖华, 余碧莹, 等. 中国能源报告(2018): 能源密集型部门绿色转型研究[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [15] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [16] YU B, ZHAO G, AN R. Framing the picture of energy consumption in China[J]. *Natural Hazards*, 2019, 99: 1469–1490.

Research on China's CO₂ Emission Pathway under Carbon Neutral Target

YU Biying, ZHAO Guangpu, AN Runying, CHEN Jingming, TAN Jinxiao, LI Xiaoyi

(Center for Energy & Environmental Policy Research, School of Management & Economics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Climate change is a major global challenge today. As the largest carbon emitter, China plays a key role in global climate governance. Following the Paris Climate Agreement in 2015, China updated and enhanced its medium- and long-term strategic targets at the 2020 UN General Assembly General Debate and Climate Ambition Summit, et al. These targets include trying to achieve carbon peak before 2030, carbon neutrality by 2060, a 65% reduction in carbon intensity by 2030, and a 25% share of non-fossil energy in total energy consumption. This series of new milestone goals demonstrate China's responsibility as a great economy and are inherent requirements for achieving national high-quality development. In order to support the implementation of the national climate change strategy, this paper focuses on carbon peaking and carbon neutrality targets, and uses C³IAM/NET model to study the CO₂ emission pathway from a bottom-up perspective. Through setting different scenarios composed of different economic growth rates and emission reduction efforts, the responsibilities of energy system, carbon capture and storage and carbon sink are analyzed. We find that national CO₂ emissions are expected to peak at about 10.8 Gt by 2025 at the earliest, or by 2030 at the latest. Through the implementation of different emission reduction efforts by energy system and different scales of carbon capture and storage deployment, the energy-related CO₂ emissions will still exist in the range of 0.3~3.1 Gt by 2060, mainly from the power, steel, chemical, and transportation sectors, and will require forest and ocean carbon sinks to absorb. Finally, some recommendations are put forward for key areas and industries such as power, industry, transportation, and building sectors.

Keywords: climate change; carbon neutrality; carbon peak; energy system; carbon capture and storage; emission reduction pathway; industrial responsibility; technology layout

[责任编辑: 孟青]