

doi:10.19920/j.cnki.jmsc.2024.02.001

# 中国的碳中和：技术经济路径与政策选择<sup>①</sup>

段宏波<sup>1</sup>, 汪寿阳<sup>2,3</sup>

(1. 中国科学院大学经济与管理学院, 北京 100190; 2. 中国科学院数学与系统科学研究院, 北京 100190; 3. 上海科技大学创业与管理学院, 上海 201210)

**摘要:** 2020 年中国政府向国际社会承诺了 2060 年实现碳中和的战略目标, 这将对我国中长期经济增长模式、能源转型和碳排放路径产生深远的影响. 在此背景下, 本文构建了技术扩展的能源-经济-环境系统集成模型, 综合评估了我国实现 2060 年碳中和目标的能源技术路径和经济可行性, 并给出了相应的政策选择. 研究发现了 2030 年的非化石能源发展目标与碳中和目标的高度一致性, 且碳中和要求高排放的“平台期”大幅缩短. 单纯的碳价或非化石能源补贴政策均不足以支持碳中和目标的如期达成, 而退煤脱油机制下碳价干预与负排放技术的发展激励为这一目标的实现提供了可行的政策选项. 碳中和下, 太阳能和风能成为能源系统的主力, 其合计供能比重需达到 53%, 其次是水电和装配 CCS 技术的生物质能, 分别占比 13.7% 和 12.5%. 研究进一步指出, 经济代价不应该成为我国推进碳中和目标达成的主要顾虑, 在“对勾”型政策成本轨迹下, 预估的累积经济成本不超过相应 GDP 的 1.9%, 且在政策目标达成之前即可享受到碳中和带来的经济发展红利.

**关键词:** 碳中和; 综合评估建模; 能源技术路径; 经济可行性; 政策选择; 中国

**中图分类号:** F205 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2024)02-0001-17

## 0 引言

气候变化是当前全球面临的主要挑战, 它同时也孕育着能源系统变革和经济新增长的巨大推力. 在此背景下, 在 2020 年 9 月 22 日召开的第 75 届联合国大会一般性辩论上, 中国向国际社会承诺将提高国家自主减排贡献的力度, 力争于 2030 年之前实现碳排放达峰, 并努力争取在 2060 年实现碳中和; 在随后的 12 月 12 日气候雄心峰会上, 国家主席习近平进一步重申了中国达成这一目标的决心. 中国是全球四大排放国中首个承诺碳中和的国家, 这一目标的提出, 引起了世界各国和国内社会各界的广泛关注, 它势必对未来我国的中长期能源转型、技术投资、碳减排规划

和经济发展产生深远的影响<sup>[1]</sup>.

UNFCCC 的统计数据显示, 当前全球已有 100 多个国家或地区在相关文件中提及了碳中和, 其中通过正式渠道给出官方承诺的有 29 个 (包括 27 个欧盟国家), 覆盖了全球 50% 以上的碳排放<sup>[2]</sup>. 尽管各国对碳中和的内涵、目标细则和推动碳中和的进度有所差异, 但无不体现了全球共同应对气候变化挑战的决心<sup>[3]</sup>. 根据 IPCC 《全球 1.5 °C 温升特别报告》, “碳中和”可定义为一种二氧化碳 (CO<sub>2</sub>) 净零排放的状态, 它通过自然或人为碳移除 (CDR) 在全球范围内抵消人为 CO<sub>2</sub> 排放来实现<sup>[4]</sup>. 本文将基于这一定义和内涵来推进研究.

已有研究和事实表明, 我国的碳中和与全球

① 收稿日期: 2021-09-26; 修订日期: 2022-12-30.

基金项目: 国家电网公司总部科技项目 (SGTYHT/21-JS-223).

作者简介: 段宏波 (1985—), 男, 湖南益阳人, 博士, 教授, 博士生导师. Email: hbduan@ucas.ac.cn

1.5℃温控目标对中国的减排要求具有较高的一致性. 全球层面,1.5℃目标要求各国共同开展实质性减排活动,将2030年的全球人为净排放降至2010年55%的水平,并在2050年前后实现净零排放. 国家层面,在差异化的排放预算分配情景下,1.5℃温控要求中国在2060年左右实现近零排放<sup>[5]</sup>. 由此可见,尽管当前尚缺少文献对我国碳中和的实现路径进行系统综合的评估,但围绕1.5℃温控目标的研究较多,可以为碳中和的评估工作提供有益借鉴. 考虑到当前全球平均温升已经达到1.1℃,而目前的温室气体(GHGs)总排放依然在稳定增加,即使在新冠疫情的影响下. 因此,不少研究认为1.5℃目标的实现难度很大<sup>[6,7]</sup>,即使通过大规模侵入性的政策干预来强力推进,也将付出较大的社会经济代价<sup>[8,9]</sup>. 整体上,这一目标的实现需要立即的、大规模的、全部门参与的减排行动;另外,还有赖于碳基能源向低碳能源的迅速切换和碳移除技术的快速发展,尤其是碳捕获与封存技术(CCS)、负排放技术(BECCS)和直接的空气碳捕获(DAC)技术等<sup>[10,11]</sup>. 当然,也有些观点对该目标的达成持乐观态度. 特别地,若加大短期(2030年前)的减排力度,且在有效的气候政策设计下后期的低碳化进程得以延续且不断加速,则1.5℃温控目标依然可期<sup>[12,13]</sup>;当然,这过程中非碳排放的额外减排、低碳行为的形成以及能源需求的快速电气化、清洁化转变也十分重要<sup>[14]</sup>.

既然碳中和目标与1.5℃温控目标在国家层面的要求近似,那么,我国碳中和目标的实现难度如何,是否如全球层面1.5℃温控目标的实现一般充满挑战,通过何种政策选择可以实现? 目标达成的能源技术演变场景如何,各种能源技术在该目标达成中扮演着怎样的角色? 从长期来看,碳中和目标的实现是否具有经济可行性,气候挑战的应对战略是否与稳定的经济增长目标一致? 本文将通过发展技术驱动型的能源-经济-环境系统集成模型来综合评估我国实现碳中和目标的政策选择及技术经济可行路径.

## 1 技术扩展的综合评估模型

2060年碳中和目标的评估是一个长时间尺

度,涉及经济、能源和环境等多个系统维度的复杂问题,综合评估模型(integrated assessment model, IAM)是开展这一研究的强有力工具,它可以提供政策干预下经济、能源和排放关系的动态闭环反馈<sup>[15]</sup>. 基于此,本文将采用自主构建的CE3METL模型来综合评估我国的碳中和目标. CE3METL是一个基于内生经济增长理论的中国单区域动态跨期优化模型,该模型由宏观经济、能源技术和气候三大主模块构成;基于政策驱动的Logistic多重技术扩散机制的引入是该模型最大的特点,这也使得其具备了自顶向下模型进行技术经济路径评估的能力<sup>[16]</sup>. 目前该模型体系已被广泛应用于能源和气候政策的模拟与评估工作中,包括排放空间约束下中国的最优排放和碳税路径问题,能源技术替代的综合协同效益评价,减排与适应困境问题,以及巴黎协定目标的政策综合评估等诸多方面<sup>[17,18]</sup>. 模型的框架如图1所示.

CE3METL假设系统中存在完美预期的中央计划人,其以给定偏好的社会福利最大化为目标,而福利的累积来源于代际人均消费的增加,因此,福利目标的最大化与动态消费流和排放控制力度紧密相关. 不同代际间的效用分配依赖于纯时间偏好和边际消费效用(或消费弹性)两个因素,而这又决定了跨期效用累积的贴现因子选择. 具体地,模型的目标函数可表示如下

$$\max_U \sum_{t \in T} L(t) \ln \left( \frac{C(t)}{L(t)} \right) \prod_{\tau=0}^t (1 + \nu(\tau))^{-\Delta} \quad (1)$$

其中  $\nu(t) = \nu_0 \times e^{-\delta t}$  为贴现因子. CE3METL中的生产基于资本  $K$ 、劳动  $L$  和能源  $E$  等投入要素,以柯布-道格拉斯(Cobb-Douglas)与能源的常弹性复合函数形式进行,生产过程如下

$$Y(t) = (\alpha(t) (K(t)^\gamma L(t)^{1-\gamma})^\rho + \beta(t) E(t)^\rho)^{\frac{1}{\rho}} \quad (2)$$

其中  $Y$  为产出,  $\alpha$  和  $\beta$  分别衡量了要素生产率和自发性能源效率改进水平(AEEI). 人口增长轨迹外生给定,资本存量通过投资和消费流的优化来决定. 与DICE等其他综合评估模型一样,假设经济产出是单一的复合商品,产出的流向包括投资、消费(政府消费和居民消费)、支付能源成本和碳排放成本以及进出口等,即

$$C(t) = Y(t) - I(t) - EC(t) - IM(t) +$$

$EX(t)$  (3) 优化路径的变化而变化,这主要通过设定进口的上界和出口的下界来实现。  
CE3METL 假设进口  $IM$  和出口  $EX$  跟从 GDP

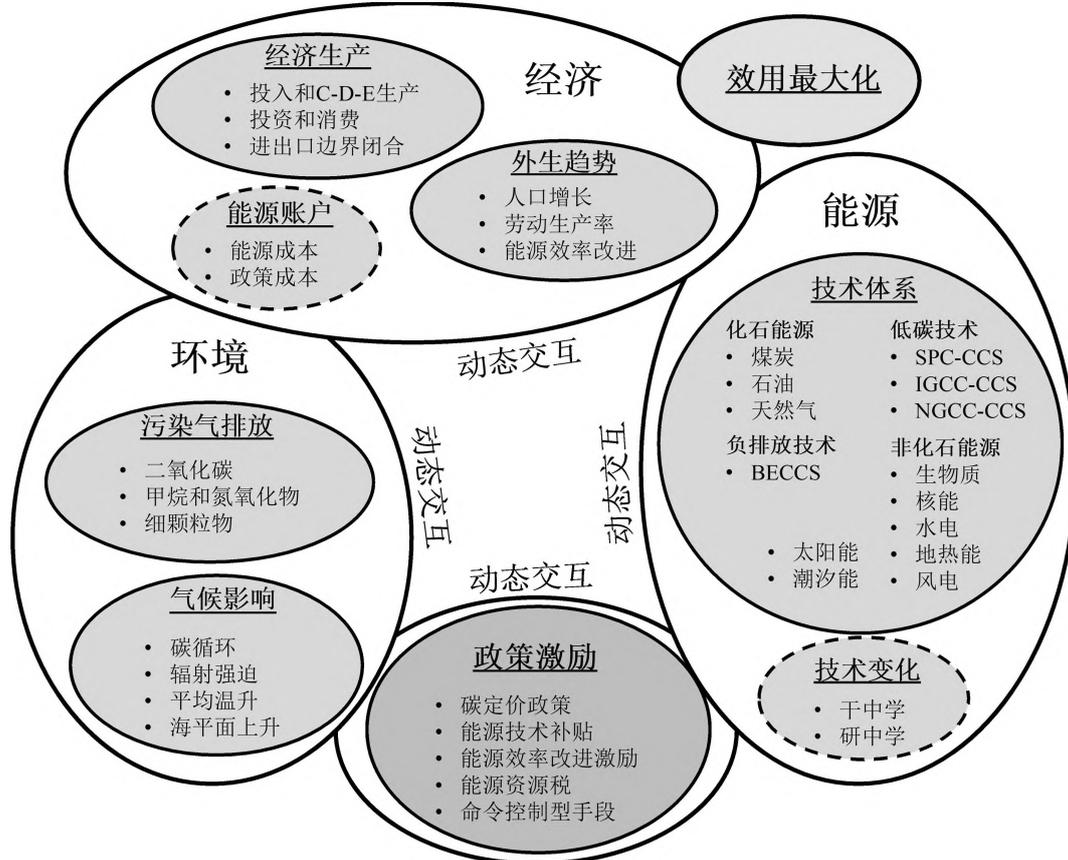


图 1 CE3METL 模型架构及运行示意图

Fig. 1 Model structure of the CE3METL

能源成本  $EC$  一方面包含了能源使用成本 (为化石能源成本  $EC_F$ , 低碳技术成本  $EC_{LC}$  和非化石能源技术成本  $EC_{NF}$  之和), 另一方面还作为一个单独的账户来调和系统中碳税  $Ftax_i$  和补贴  $Sub_j$  等政策成本, 即

$$EC(t) = EC_F(t) + EC_{LC}(t) + EC_{NF}(t) \quad (4)$$

且

$$EC_K(t) =$$

$$\begin{cases} \sum_{i \in F} S_i(t) C_i(t) (1 + Ftax_i(t)), & K = F \\ \sum_{i \in F} S_i(t) \zeta_i C_i(t) (1 + Ftax_i(t)) + \sum_{j \in LC} S_j(t) \times \\ \quad OC_j(t) (1 - Sub_j(t)), & K = LC \\ \sum_{k \in NF} S_k(t) C_k(t) (1 - Sub_k(t)), & K = NF \end{cases} \quad (5)$$

此处  $S_i(t)$  为能源技术的份额,  $F$ 、 $LC$  和  $NF$  分别代表化石能源集、低碳技术集和非化石能源技术集 (具体技术清单如图 1)。  $C_i$  是技术  $i$  的使用成

本,  $\zeta_i$  为低碳技术中燃料成本占比,  $OC_j$  为除燃料成本以外的其他发电成本。

已有研究表明: 严格气候目标的达成离不开低碳及负碳技术的贡献<sup>[5, 6]</sup>。考虑 CCS 可将 2℃ 温控目标下本世纪内的化石能源的排放预算和现有化石能源储量可开发程度翻倍<sup>[20]</sup>。到 2050 年, 负排放技术每年可以提供 28 EJ (1018 焦耳) 的电力, 封存 25 亿 t  $CO_2$ , 到 2100 年, 这一数值将分别增至 220 EJ 和 400 亿 t  $CO_2$ <sup>[21]</sup>。因此, 为科学评估碳中和目标的实现路径, 亟需进一步丰富 CE3METL 模型能源技术细节, 即将代表性的低碳和负排放技术纳入已有的能源技术体系中。基于此, 本文改进了模型现有的能源技术体系, 引进了三种低碳技术, 即超临界煤电与 CCS 组合技术 (SPC-CCS)、整体煤炭气化联合循环与 CCS 组合技术 (IGCC-CCS)、天然气联合循环与 CCS 组合技术 (NGCC-CCS), 和一种负排放技术, 即生物质

与 CCS 组合技术(BECCS). 详细技术清单如图 1. 技术间的替代主要通过修改的 Logistic 多重能源技术替代演变机制来刻画, 即

$$\frac{d S_i(t)}{d P_i(t)} = a_i(t) S_i(t) \left( \bar{S}_i(t) \left( 1 - \sum_{j \neq i} S_j(t) \right) - S_i(t) \right) \quad (6)$$

且

$$P_i(t) = \begin{cases} \frac{C_{mark}(t)(1+Ctax(t))}{C_i(t)(1+Ftax_i(t))}, & i \in F \\ \frac{C_{mark}(t)(1+Ctax(t))}{\xi_i C_i(t)(1+Ftax_i(t)) + OC_i(t)(1-Sub_i(t))}, & i \in LC \\ \frac{C_{mark}(t)(1+Ctax(t))}{C_i(t)(1-Sub_i(t))}, & i \in NF \end{cases} \quad (7)$$

给定煤炭为标杆技术, 则任意两种技术间的替代均可转化为标杆技术与目标技术  $i$  间的替代关系, 替代难易程度由参数  $a_i$  决定.  $\bar{S}_i$  是技术市场潜力, 有  $0 \leq \bar{S}_i < 1$ .  $C_{mark}$  为标杆能源技术成本, 这里选定煤炭为标杆技术. 该机制以 Logistic 技术扩散模型为基础, 将技术份额关于时间的变化调整为市场份额关于相对价格的变化(即标杆技术价格与替代技术价格的比值), 并巧妙地将碳税和补贴等政策干预效果考虑其中. 此时, 技术的替代演变路径取决于政策的实施力度和技术的相对成本的变化. 从相对成本  $P_i$  的表达式可以看出, 对不同技术的政策干预方式不同, 比如化石能源技术按总成本从价征收碳税, 低碳技术则分为两部分: 化石燃料部分征收碳税, 其他成本部分则从价补贴, 而对非化石能源技术可以统一进行补贴激励. 给定  $Ctax$  和  $C_{coal}$  分别为煤炭的税率和综合使用成本, 则其他技术的碳税从价税率可以如下式得到

$$Ftax_i(t) = \frac{Ctax(t) \xi_i C_{coal}(t)}{\xi_{coal} C_i(t)}, i \in F \cup LC \quad (8)$$

其中  $\xi$  表示相应技术的碳排放因子, 根据对应技术的使用成本, 可以计算出具体碳税水平

$$Ltax(t) = \frac{Ctax(t) C_{coal}(t)}{\xi_{coal}} \quad (9)$$

技术内生是纠正单纯的外生技术进步带来

结果偏差的主要手段<sup>[5]</sup>. 本文采取基于“干中学”效应的技术学习曲线方法来内生技术进步. 这种方法的本质是随着生产规模的扩大, 生产经验或知识会逐渐累积, 而知识存量的累积反过来会促进技术改进, 继而降低生产或技术使用成本. 因此, 内生技术进步过程可以描述为

$$C_i(t) = C_i(0) \left( \frac{KD_i(t)}{KD_i(0)} \right)^{-b_i} \quad (10)$$

这里  $KD$  为知识资本存量,  $b_i$  是技术  $i$  的学习指数, 由学习率  $lr_i$  的指数关系确定, 即  $lr_i = 1 - 2^{-b_i}$ . 值得注意的是, 知识资本与传统资本一样在跨期累积过程中需要考虑折旧效应, 因此, 当期的知识资本应当是上一期的知识存量扣减过时部分之后的净值与新增知识流之和, 即

$$KD_i(t+1) = (1 - \delta_i) KD_i(t) + S_i(t+1) E(t+1) \quad (11)$$

在全球尺度上, 刻画气候系统与经济、能源系统之间的闭环反馈关系是综合评估建模的主体工作之一, 这种关系包括碳循环、辐射强迫流的形成、温升响应关系以及气候反馈损害等. 对于区域模型而言, 本文对气候系统模块进行了简化, 仅仅考虑外生的自然碳排放和内生的人为活动碳排放, 它可以通过加总各种含碳能源的碳含量与对应消费量的乘积得到. 假定非化石能源是完全零排放的, 那么人为碳排放  $Emis_{anth}$  可以通过下式计算

$$Emis_{anth}(t) = \left( \sum_{i \in F} \xi_i S_i(t) + \sum_{k \in LC} \xi_k S_k(t) - \xi_{be} S_{be}(t) \right) E(t) \quad (12)$$

其中  $\xi_i$ 、 $\xi_k$  和  $\xi_{be}$  分别表示化石能源技术、低碳能源技术和负排放技术的碳排放因子.

## 2 数据及处理

本文的模型演算以 2010 年为初始年份, 2010 年—2020 年为校准期, 政策从 2020 年开始实施, 模型考察期为 2020 年—2060 年, 以报告整个碳中和目标期的优化结果. 产出、消费、投资、进出口等宏观经济数据主要来自中国统计年鉴, 各品种的能源消费数据来自中国能源统计年鉴, 碳排放因子来自 IPCC 碳排放清单修正版<sup>[22]</sup>, 外生

的人口增长路径则根据世界银行的最新预期设定。更多的模型数据介绍和参数设定可参考 Duan 等最新发表的文章<sup>[5, 19]</sup>。

由于与之前的模型版本相比,本文模型的主要差异是重构了 CE3METL 的能源技术体系,新引入了对于碳中和目标达成可能发挥关键性作用的低排放和负排放技术,因此,这里主要介绍下这些技术的成本数据和技术参数。对于三种低碳技术,其成本由燃料成本和其他成本构成,前者随燃料(煤炭和天然气)价格的增长而增长,本文假定

燃料成本(包括 CCS 耗能)平均占总供能成本的 60%,后者则包括运营成本、输配成本和 CCS 运行成本(碳捕获、运输、封存及碳泄漏检测和管理成本等)。对于负排放技术 BECCS,其成本包含生物质供能和 CCS 运行成本两部分。由于化石能源和生物质等非化石能源的供能成本在 CE3METL 模型中已有较完善的设定,这里新增的成本不确定性主要来自 CCS 技术。已有不少研究报告了代表性示范电厂的 CCS 成本信息<sup>[23, 24]</sup>,本文对将相关的数据进行了整理,如表 1。

表 1 CCS 技术成本

Table 1 Details on the costs of CCS technologies

	SPC-CCS	IGCC-CCS	NGCC-CCS	BECCS
发电成本	59 ~ 167	111 ~ 278	61 ~ 102	
全链发电成本 <sup>1</sup>	229 ~ 703	281 ~ 814	231 ~ 638	
运营成本	9 ~ 11	9 ~ 11	11 ~ 16	
总成本	1 854.8 ~ 4 855.1	3 273.1 ~ 7 882.7	1 963.9 ~ 3 218.6	2 673.7 ~ 6 507.7
碳捕获成本	41 ~ 62	41 ~ 62	75 ~ 95	
运输成本 <sup>2</sup>	4.4 ~ 7.6 陆上 7.0 ~ 9.8 离岸	4.4 ~ 7.6 陆上 7.0 ~ 9.8 离岸	4.4 ~ 7.6 陆上 7.0 ~ 9.8 离岸	
碳规避成本 <sup>3</sup>	24 ~ 110	3 ~ 140	10 ~ 146	25 ~ 60
总成本	154.2 ~ 261.1	154.2 ~ 261.1	268.2 ~ 371.8	
碳捕获成本	28 ~ 111	28 ~ 111	28 ~ 111	49 ~ 128
运输成本	1.3 ~ 14.8	1.3 ~ 14.8	1.3 ~ 14.8	0 ~ 25
存储监测成本 <sup>4</sup>	0.6 ~ 8.3	0.6 ~ 8.3	0.6 ~ 8.3	
总成本	99.4 ~ 445.6	99.4 ~ 445.6	99.4 ~ 445.6	164.8 ~ 536.0

注: 1. 这里的成本包含了 CCS 富氧燃烧和碳存储成本,单位统一为美元/MWh(2015 年价),总成本为发电与 CCS 的平准化(LCOE)成本,单位换算为元/t 标煤(2010 年价),数据信息主要来自 Budinis 等<sup>[19]</sup>的研究。

2. 本文假设碳捕获与封存点的距离平均小于 500 km,管道运输的容量为每年 1 千万 t CO<sub>2</sub>。

3. 碳规避成本是 CCS 运行的全链成本,包括捕获、运输和存储,单位是美元/t CO<sub>2</sub>(2015 年价),数据主要来自 Budinis 等<sup>[19]</sup>和 Kang 等<sup>[22]</sup>的研究。

4. 假定容量因子为 0.65 - 0.85,此时的固定资本成本比容量因子为 0.85 时高出约 24%,数据主要参考 Woolf 等<sup>[23]</sup>的研究,这里的单位是美元/t CO<sub>2</sub>(2014 年价),这里的总成本主要指 CCS 运营成本,不包含供能成本,计算中单位统一换算为元/t CO<sub>2</sub>(2010 年价,2010 元/t CO<sub>2</sub>)。

CE3METL 中的技术成本为包含供能和碳处理的平准化总成本,化石能源成本变动趋势根据资源稀缺性和历史价格波动信息外生线性设定,而碳处理成本主要通过表 1 中的成本信息平均化得来。其他重要的参数包括 CCS 捕获效率和技术学习率。对于前者,根据示范电厂数据设定为 85%<sup>[25]</sup>,据此可以得到三种低碳能源技术的碳排放因子,而 BECCS 技术的燃烧和锻炉配置都假定为 100%的生物质原料,尽管过程效率可能只有

24.6%,但负碳因子高达 1 545 g CO<sub>2</sub>/kWh<sup>[10]</sup>。对于后者,传统上通常利用烟气脱硫装置(Flue-gas desulfurization)的技术学习效果来设定 CCS 技术的双因素学习率,“干中学”和“研中学”过程的学习率分别估计为 7.1%和 6.6%<sup>[26]</sup>。Kang 等<sup>[22]</sup>针对具体的示范电厂数据对估值进行了更新,指出 SPC-CCS、IGCC-CCS 和 NGCC-CCS 的平准化成本学习率分别为 0.024 ~ 0.084, 0.088 ~ 0.182 和 0.045 ~ 0.100。本文取其中值,分别为 0.054、0.135 和 0.073。

### 3 结果和分析

本文设计的政策选项主要包括化石能源碳税、低碳、无碳和负碳能源技术补贴,以及碳税与补贴政策的组合选择.相应地,设置了几类情景,首先是参考情景,即仅考虑当前的减排政策(通过能源消费、碳排放等路径等校准来蕴含其中),而不考虑新的碳定价或补贴政策,该情景作为政策情景提供对比参考.其次是碳税政策情景,政策力度参考《巴黎协定》目标实现的政策要求.最后是补贴政策及其与碳税的组合政策情景,模型假定补贴资金来源于碳税收入,具体的情景设置细节参加各子节的讨论.

#### 3.1 参考情景结果

为保证模型政策优化结果的可信性,一方面需要依据历史数据对经济增长、能源消费等关键指标进行校准,另一方面通过广泛参考已有研究和专家观点设定未来的指标预期.就宏观经济而言,根据统计年鉴的数据可估计得到2010年—

2015年和2015年—2019年的年均增速分别为8.38%和6.74%,考虑到2020年疫情对经济的冲击,预计2015年—2020年的年均增速将低于6.74%.据此,CE3METL模型校准得到了两个时间段的年均GDP增速分别为8.32%和6.71%,充分反映了我国历史的经济增长状况.基于此,本文进一步对未来的经济增长路径进行了预期.考虑到疫情后经济可能出现的报复式增长,本文预计2020年—2030年的平均经济增速可达5.68%,此后将逐步回落到2040年—2050年的3.25%以及2050年—2060年的2.72%.当前,已有不少国内外文献给出了中国未来经济增长态势的预期,包括联合国发展规划署(UNDP)、国际能源署(IEA)、清华大学等,但其研究均未考虑到疫情对宏观经济的短中期影响,而从2030年以后的经济增长预期看,本研究的结果与这些研究趋于收敛<sup>[27, 28]</sup>.此外,中国工程院发布的“推动能源生产和消费革命战略研究”第一期报告表明,到本世纪中叶,中国的人均GDP将较当前增长5倍至6倍<sup>[29]</sup>,这也与本文模型结果得到的6.5倍的预期相当.

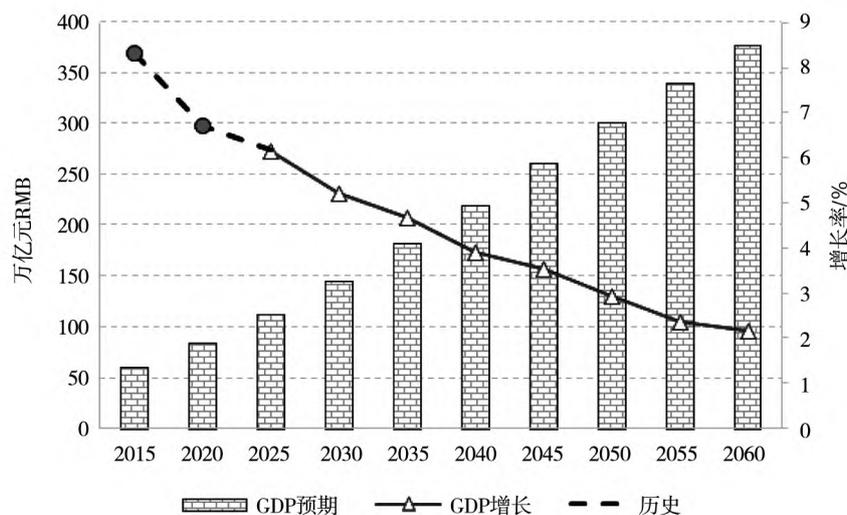


图2 参考情景(Baseline)下中国的经济增长预期

Fig. 2 Projections on China's economic growth under the baseline case

对能源部门而言,已有多数报告的研究结果表明,中国的一次能源消费将在2035年—2045年间达峰.具体地,中国石油经济技术研究院(ETRI)发布的《2050年世界和中国能源展望》报告指出,我国的一次能源消费将于2035年达峰,其中化石能源达峰时间为2030年<sup>[30]</sup>.中国工程院能源生产

与消费革命研究组的结果认为中国一次能源消费达峰时间在2040年前后,这与国家电网能源研究院最新发布的报告结果一致,后者预期达峰峰值为57亿t标准煤,而对应的化石能源达峰峰值约为43亿t<sup>[31]</sup>.相比较而言,清华大学中国的碳发展战略与转型路径研究给出的一次能源达峰时间

相对较晚,为 2050 年,达峰峰值水平也偏高,即 62 亿 t 标准煤<sup>[32]</sup>. 本文给出的能源消费预期及结构如图 3 所示,一次能源消费将于 2045 年左右达峰,峰值水平约为 57.5 亿 t 标煤,而化石能源将在 2035 前后达峰,峰值为 46 亿 t,这一结果显然在各机构的预期之中.

参考情景下我国的碳排放路径如图 4 所示,结果表明:中国的 CO<sub>2</sub> 排放将于 2035 年左右达峰,峰值水平约为 119 亿 t. 这里的碳排放主要是

由能源消费引起的,同时也包括了外生的由土地利用变化所产生的碳排放. 图 3 也给出了参考情景下全球代表性综合评估模型对中国碳排放路径的优化结果,数据主要来自 ADVANCE 数据库<sup>[33]</sup>. 显然,除了 WITCH 和 POLES 模型偏高的估计之外,CE3METL 给出的碳排放路径与其他绝大多数模型预期具有较高的一致性,且达峰时间也介于其他模型评估的 2030 年—2045 年之间,这亦很大程度上增强了 CE3METL 参考情景结果的可信度.

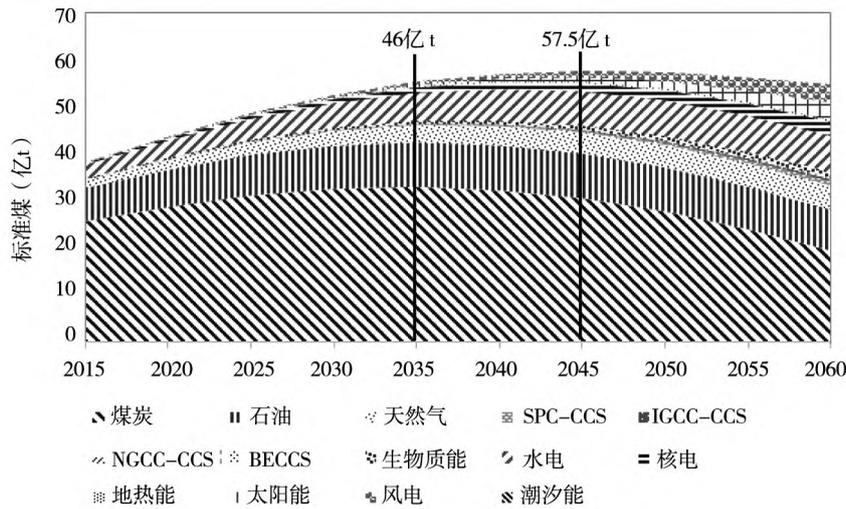


图 3 参考情景下的一次能源消费结构

Fig. 3 Primary energy structure under the baseline case

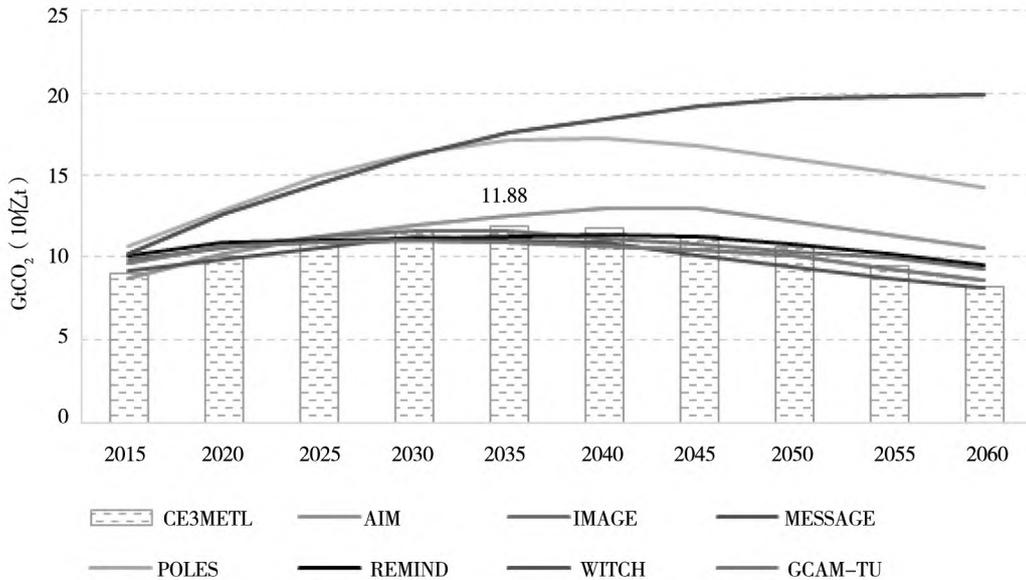


图 4 参考情景下我国的碳排放量及跨模型比较

Fig. 4 Cross-model comparisons on China’s baseline carbon emissions

### 3.2 碳定价政策能否保证碳中和目标的实现？ 排污收费政策是纠正环境外部性的有效市场

手段之一,基于此,碳定价政策被广为采用于控制温室气体排放<sup>[13, 17, 19]</sup>. 那么,碳定价政策能够帮

助我国实现 2060 年的碳中和目标吗? 为回答这一问题,首先需要设计差异化的碳税政策情景. 根据碳价格高级别委员会报告,要实现《巴黎协定》升温控制目标,2020 年的碳价水平要达到 40 美元/t ~ 80 美元/t CO<sub>2</sub>,这一数值将进一步增至 50 美元/t ~ 100 美元/t<sup>[34]</sup>,这些结果实际上依然远低于 2 °C 或 1.5 °C 温控目标下的最优碳价水平<sup>[19]</sup>. 基于此,本文设定了三种政策情景 T25、T40 和 T55,对应 25%、40% 和 55% 的从价碳税

率,计算可得三种情景下的碳价路径,如图 5. 不难看出,这里的初始碳价水平依然偏于保守.

政策激励下的碳排放路径反映到图 6 中. 显然,碳定价政策可带来显著到碳减排效果,且减排幅度随着碳税政策力度的加大和时间的推移而不断增加,但三种政策作用均不足以实现中国 2060 年碳中和的目标,在最严格的碳价情景下,到 2060 年,碳排放水平可以较参考情景下降 5.6%,但依然距碳中和目标存在 36 亿 t CO<sub>2</sub> 的减排缺口.

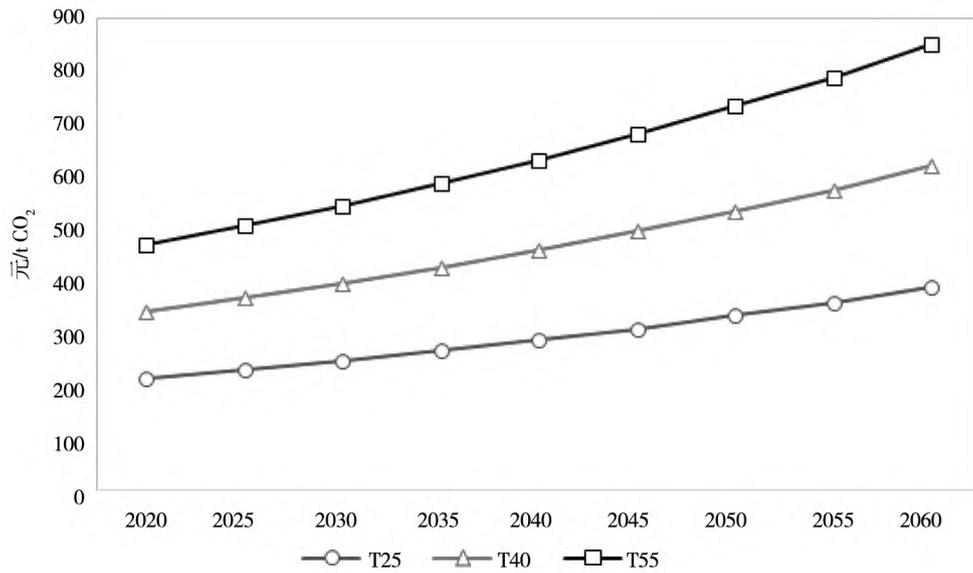


图 5 碳价政策情景设计  
Fig. 5 Design of carbon pricing policy

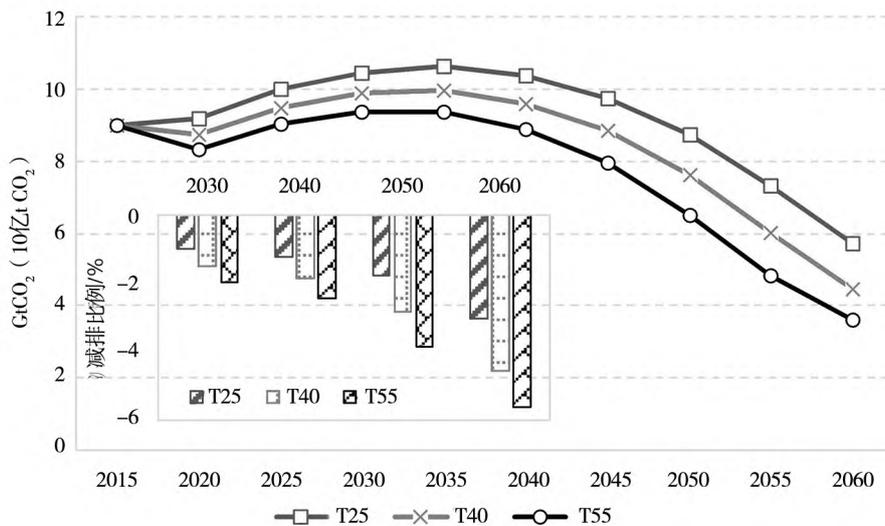


图 6 碳价政策下的减排路径优化  
Fig. 6 Emission reduction pathways under the carbon pricing policy

那么,究竟是什么原因导致这一缺口的存在呢,是经济系统脱煤力度不足还是非化石能源发

展水平不够? 因此,进一步的分析需围绕不同政策情景下的能源结构演变情势展开. 具体的结果

展现在图 7 中。不难看出,碳价政策的实施显著加速了能源系统的脱煤进程,具体表现为从 2020 年政策实施年份开始,碳排放开始显著下降。参考情景下,2060 年的煤炭需求为 19.2 亿 t,碳税情景 T25% 下,这一需求被压缩到 10.8 亿 t,下降幅度达到 43.8%;而在更严格的 T55% 情景下,煤炭需求进一步降至 3.3 亿 t,仅占一次能源消费总量的 6.2%,经济系统接近完全脱煤。由此可见,碳价激励下,实质性的能源系统脱煤贡献了显著的

减排潜力。图 7 也显示,碳价政策下,可再生能源技术得到了大力发展,尤其对风电和太阳能而言。低碳价情景下,2060 年核电、风电和太阳能占一次能源消费的比重达到 7.9%、15.2% 和 19.8%,非化石能源消费总份额超过 64%,而在最严格的碳价政策下,三者的比重将分别增至 8.3%、24% 和 17.5%,对应 71% 的非化石能源消费总份额,这一数值比参考情景高出了 30% 以上。因此,碳价激励下,非化石能源发展对碳减排的贡献也是显而易见的。

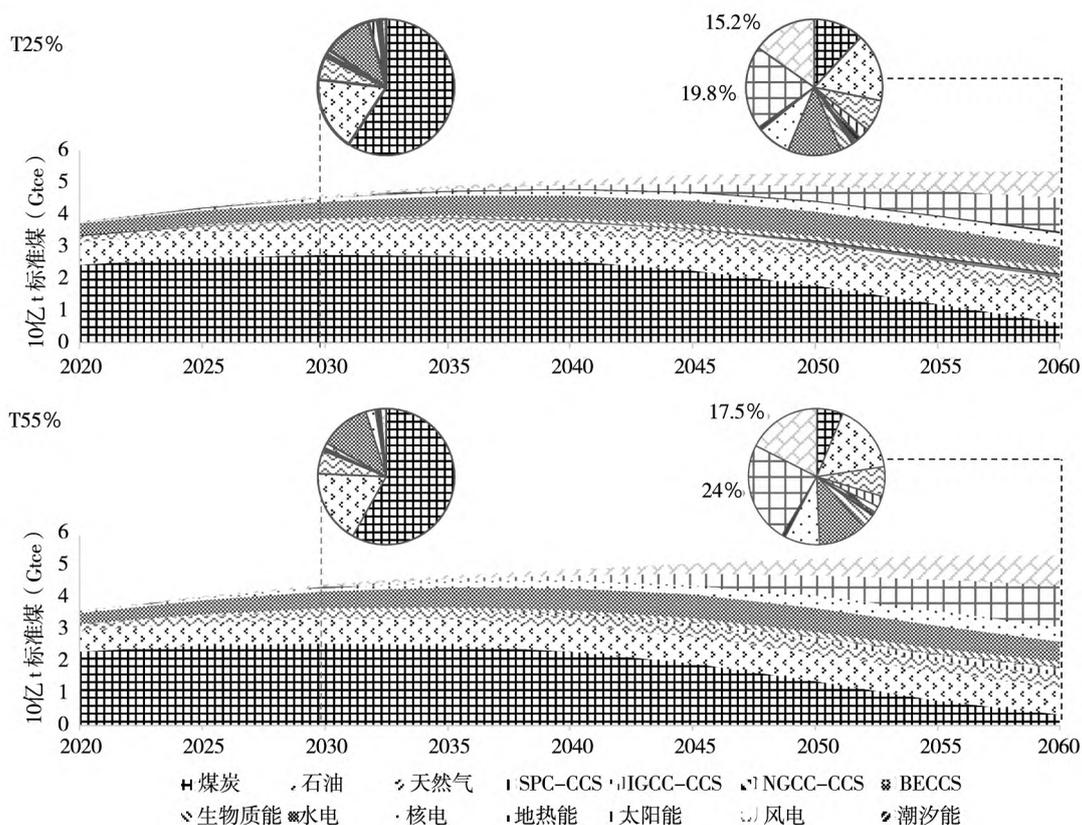


图 7 碳价政策下的能源结构演变

Fig. 7 Evolution of energy structure in the presence of carbon pricing

进一步观察图 7 可以发现,不同的碳价情景下,石油和天然气的消费量均保持稳定,而天然气低碳化程度较高且消费占比不大,显示不是残余排放的主要贡献者,那么,石油消费造成的碳排放应该是碳中和目标的减排缺口主因。这意味着根据单位含碳量统一征税的政策模式并不能实现能源系统的脱油,如果未来的油价不出现显著高于煤炭的增长态势,长期稳定的石油消费将成为我国实现 2060 年碳中和目标的主要挑战。当然,这一结果并非仅得到本文模型的支持,也在 Duan

等<sup>[34]</sup>的研究中获得充分的依据。具体地,在其研究中引进了国内外 8 个代表性综合评估模型的相应结果进行了分析,相关数据来自 IIASA 公布的 ADVANCE 数据库和中国的模型比较项目数据库<sup>[33]</sup>。结果显示:只有 AIM 和 IMAGE 模型给出了逐步下降的石油消费量,绝大多数模型下中国未来的石油消费结构趋于稳定,REMIND、GCAM-TU 和 IPAC 模型评估的石油消费份额还呈现了显著的增长。这些跨模型的结果很大程度上增强了本文的研究发现。

### 3.3 非化石能源补贴能否保证碳中和目标的实现?

国网能源研究院的报告认为:到2060年,中国的非化石能源占比可达到81%,其中风电和太阳能的贡献超过50%。这是否意味着继续强化非化石能源发展可以帮助实现碳中和呢?为此,本节将在上述碳价政策情景上引入非化石能源的补贴激励,这里的非化石能源包括可再生能源、低碳和负碳能源技术,补贴的资金主要来自碳税收入。从价补贴率分别为10%、20%和30%,设定依据参考莫建雷等的研究,对应S10、S20和S30三种情景。由于中等碳价情景与补贴的组合情景下,我国2060年的非化石能源消费份额可达到80%,因此这里主要选取该组合情景下的结果进行讨论,即T40S10、T40S20和T40S30。

从图8不难看出,补贴政策的引入可以带来一定的减排效果(减排13.5亿t CO<sub>2</sub>),但碳价与补贴的组合情景下,2060年的碳排放依然没有达到近零或中和,缺口为31亿t CO<sub>2</sub>,这一结果也印证了已有研究结论,即即使充分利用了替代能源,我国实现碳中和的负排放需求仍将高达25亿t/年<sup>[36]</sup>。这一缺口的存在可以从三个方面来解释。

首先,针对性补贴对非化石能源技术的发展激励效果是显著的,但随着时间的推移,这种效果在边际递减;其次,均等补贴下,低碳和负碳技术并没有得到跨越式发展,在补贴实施的后期,低碳技术市场份额甚至被其他技术不同程度的挤出;再次,石油的消费的刚性并未因为非化石能源补贴的激励而下降,与单纯的碳价政策下的结果类似,稳定的石油消费依然是造成碳中和目标难以达成的主要原因(图9)。一方面,我国的石油消费集中在交通部门,难以应用CCS技术,另一方面,均等的补贴机制也无法现在激励负碳技术的发展。

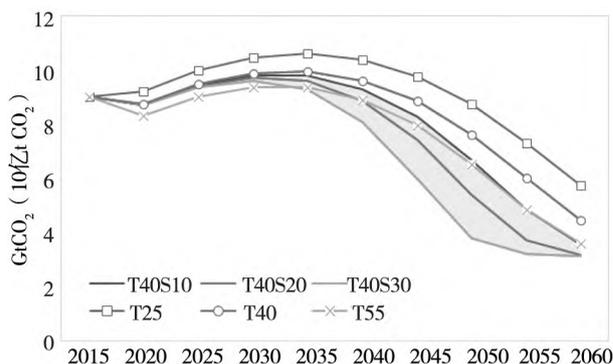


图8 组合情景下的碳排放优化路径

Fig. 8 Optimal carbon pathways under the mix policy case

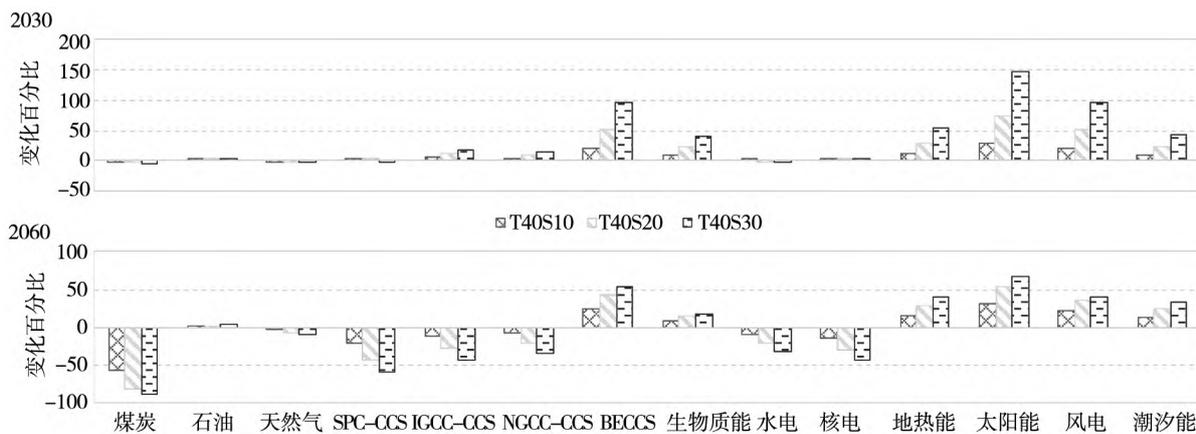


图9 组合政策对能源结构演变的影响

Fig. 9 Impact of mix policy on energy structure

### 3.4 实现碳中和的政策选择和技术路径

从以上分析可知,要实现碳中和目标主要需要从两方面进行政策发力:其一,促进技术替代,打破石油的消费刚性;其二,为生物质能等低碳/负碳技术提供有力的政策激励。事实上,在储能技术的发展瓶颈下,风电、光伏等可再生能源在相当长时间内也难以作为稳定的基荷能源使用,此时,

生物质能与CCS的组合技术对同时实现能源稳定供给和减排的双重目标提供了现实可依赖的技术选择<sup>[37]</sup>。为此,本节引入削减石油消费的约束条件,强化非化石能源对油气的替代性。同时,调整补贴策略,一方面根据当前新能源补贴退坡的政策环境取消对所有可再生能源的补贴,另一方面将所有补贴预算投入到BECCS等负排放技术,

并设置了 40%、45% 和 50% 的从价补贴情景 (BE40、BE45 和 BE50)。数值试验结果显示,在此补贴力度下,只需要引进较低的碳价政策(15%、25%和 35%,对应 T15、T25 和 T35 情景)即可填补净零排放的缺口,此时的初始碳价水平低至

128 元/t CO<sub>2</sub> ~ 298 元/t CO<sub>2</sub>,到 2060 年每 t CO<sub>2</sub> 的价格也仅为 231 元 ~ 540 元。通过对 9 种组合政策情景的比较分析,得到了成本最小框架下的三种政策选择,即: T15BE50、T25BE45 和 T35BE40。

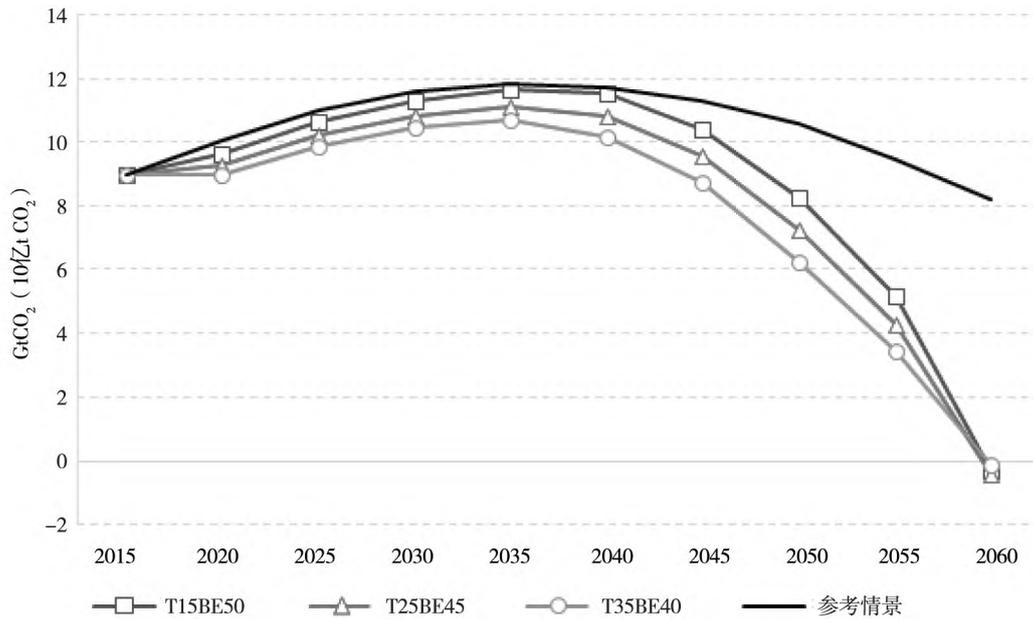


图 10 碳中和的实现路径

Fig. 10 Emission pathways toward carbon neutrality

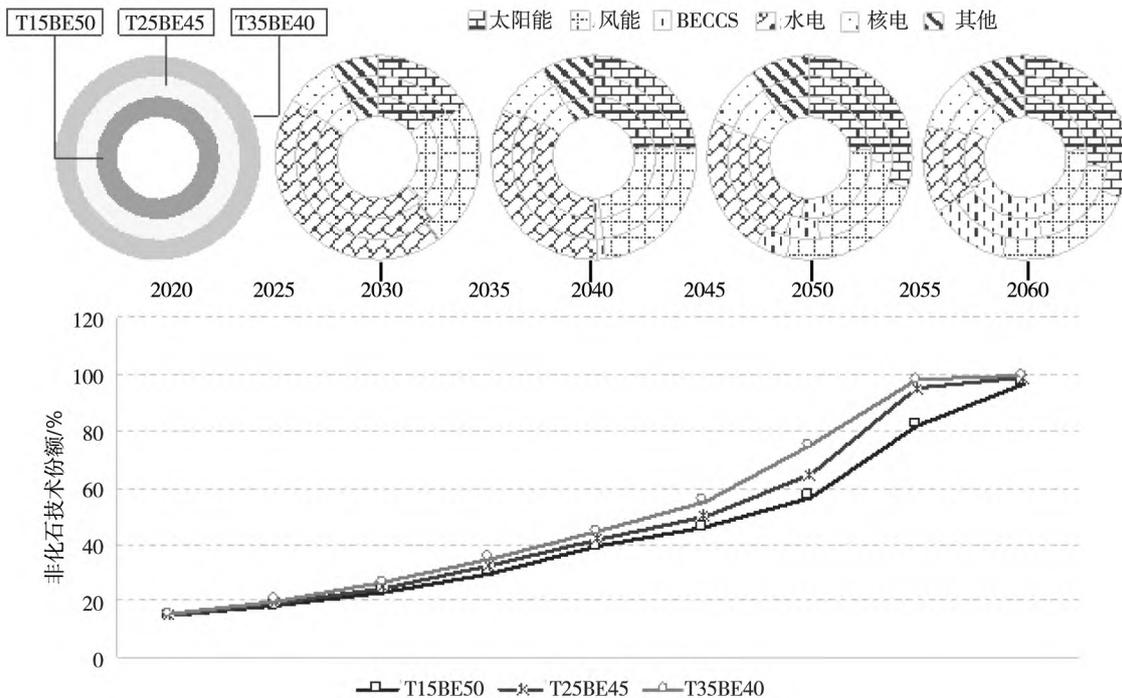


图 11 实现碳中和的能源技术路径

Fig. 11 Tech-economic pathways toward carbon neutrality

注: a. 下主图是不同情景下非化石能源占一次能源消费的份额变化;b. 四个辅图(圆环图)分别给出三种政策情景下 2030 年、2040 年、2050 年和 2060 年各种非化石能源技术的具体占比。其他能源技术主要包含三种化石能源与 CCS 的组合技术和地热、潮汐等可再生能源技术。

由图 10 可以看出,尽管不同政策下的排放轨迹有所差异,但都可以在 2060 年之前达成碳中和愿景,并在目标年份实现 1 亿 t ~ 4 亿 t 的负排放;CO<sub>2</sub> 排放的达峰时间在 2030 年—2035 年,排放峰值介于 107 亿 t ~ 117 亿 t 之间.由此可见,2030 年碳排放达峰目标的实现与碳中和目标的达成之间或许并没有绝对的相关关系,负排放技术的实质性发展可以显著降低中短期的碳减排压力,同时也可以很大程度上缓解对大规模发展不确定的可再生能源技术的依赖,这一结论也与全球尺度上的研究基本一致<sup>[5, 38]</sup>.

碳中和目标达成下的能源技术路径,如图 11. 首先,碳中和要求化石能源从 2040 年开始实现与经济实质性脱钩,2045 年开始非化石能源逐步主导能源市场. 其次,碳中和目标与 2030 年非化石能源发展目标基本一致,届时非化石能源占一次能源总消费的比重达到 24.7% ~ 26.3%;到 2050 年非化石能源份额最高可达 75%,而到 2060 年,这一数值接近 100%,全面实现经济增长与含碳能源消费脱钩. 再次,在不同的时间点,非化石能源的消费结构有所不同. 2030 年,水电充当非化石能源的主力,其占比超过 11.5%,其次是风电和太阳能,其份额分别为 6.1% 和 4.4%,且这一结构基本延续到 2040 年,届时三者的比重分别为 14.8%、10.9% 和 10.5% (对应 T35BE40 情景);到 2050 年,太阳能消费比重开始超过水电和风电,三者的总份额超过 55%,同时 BECCS 逐步发展起来,其供能比重最高可达 4.9%;2060 年,太阳能和风电依然是能源供给的主力,其合计

份额达到 53%,其次是水电和 BECCS,对应的消费占比分别为 13.7% 和 12.5%<sup>[33, 39]</sup>. 事实上,已有研究评估结果显示,全球 BECCS 的碳移除潜力达到 7 300 亿 t CO<sub>2</sub> (2016 年—2100 年的累计值),而早在 2013 年,生物质在中国一次能源消费的占比潜力就可达 40%.

### 3.5 达成碳中和目标的经济性分析

综合评估模型研究气候政策的最大优势是可以建立起从政策干预到排放控制目标评估,再到技术路径演变和政策成本分析的闭环反馈,特别地,政策成本是影响政策可行性的关键环节,因此也是决策者关心的重点. 图 12 的结果显示,碳中和目标达成的即使政策成本(以 GDP 损失占比计)随时间呈现出“对勾”型,即政策实施初期的负影响较大,最高可占到 GDP 的 4%;但随着时间的推移,新能源技术获得发展空间,其成本和竞争优势将增强其对传统能源技术对替代,继而表现为经济系统对政策冲击的适应和消化程度增加和政策成本的逐步下降. 结果显示,到 2050 年前后可实现零政策成本,此后碳中和政策的影响体现为对经济发展的正向激励,且当前的政策力度越大,正向激励效果越强,到 2060 年最大的正影响可达到 GDP 的 2.4%. 从总政策成本角度看,到 2060 年,碳中和政策所引起的累计经济成本占累计 GDP 的 0.3% ~ 1.9% (以 5% 的贴现率计). 这一结果略低于清华大学评估的中国实现 1.5℃ 温控目标的投资成本,后者认为 1.5℃ 温控目标将要求中国每年的新增投资占 GDP 的比重达到 2.5%<sup>[32]</sup>.

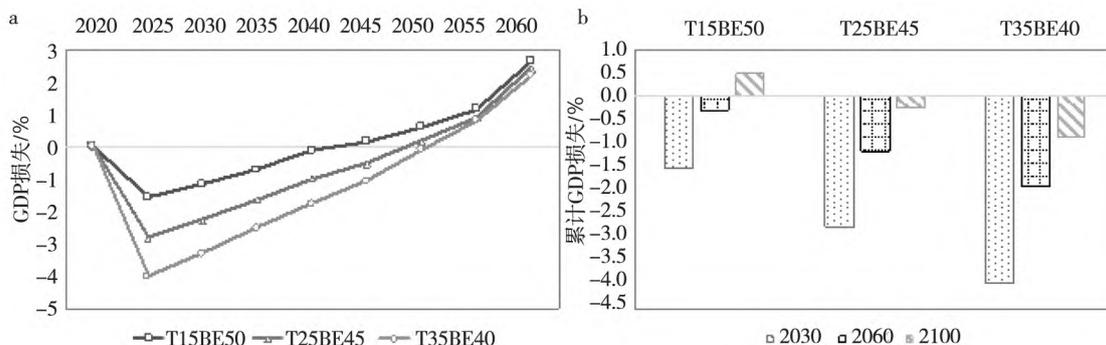


图 12 实现碳中和目标的政策成本

Fig. 12 Policy costs to achieve carbon neutrality

注: a. 即时 GDP 损失(占当年 GDP 的百分比,相较于参考情景), b. 累计 GDP 损失(占累计 GDP 的百分比,取 5% 的贴现率,相较于参考情景).

## 4 结束语

中国承诺的2060年实现碳中和的宏伟目标,将应对气候挑战提到了中长期的国家战略高度,这势必对未来我国的经济、能源转型和减排政策的制定产生深远的影响。在此背景下,对这一目标进行系统综合的评估将具有重要的现实意义。基于此,本文通过考虑对实现严格碳减排目标产生关键影响的低碳和负碳技术,改进了综合评估模型CE3METL的能源技术体系,并借此综合评估了实现我国2060年碳中和目标可能的政策选择、能源技术优化路径和政策成本,给出了有助于达成这一战略目标的政策建议。

研究首先根据历史经济增长和能源消费情势,同时考虑疫情对经济的短期影响校准并预期了我国未来的经济增长状况,指出2020年—2030年我国年均GDP增速可稳定在5.6%以上,这一数值将逐步降至2040年—2050年的3.25%和2050年—2060年的2.72%;到本世纪中叶,中国的人均GDP将较2010年增长约6.5倍。同时,碳排放将于2035年前后达峰,对应的峰值水平为119亿t,这与国内外诸多代表性IAM的模型结果基本一致。

本文模拟了多种政策选择对碳中和目标的影响。研究发现,首先,单纯的碳价政策不足以帮助中国实现2060年的碳中和目标,即使碳价水平达到全球层面实现《巴黎协定》承诺的水平。其次,碳价与非化石能源的普惠式补贴政策组合可以一定程度上激励了能源的低碳化转型,并有效拉低碳排放轨迹,但依然不足以实现我国的碳中和目标,到2060年,碳中和缺口仍将达到31亿t CO<sub>2</sub>。再次,研究发现了石油消费的相对刚性,其很可能成为了我国实现碳中和目标的主要挑战之一。最后,碳价政策和对负排放技术的针对性补贴激励的组合可以帮助我国顺利实现2060年的碳中和,中和路径对碳排放达峰并没有严格的要求,但需要缩短高排放的“平台期”,平台期的峰值水平在107亿t~117亿t之间。

评估结果给出了碳中和目标达成情景下的能源技术路径。化石能源于2055年前后实现净零(为大多数火电厂在生命周期内逐步退役提供了

时间)。研究发现了达成2030年非化石能源发展目标与碳中和目标的一致性,25%的非化石能源占比要求可以作为碳中和的阶段性目标。从2045年开始,非化石能源主导能源市场,其消费份额最高可达75%,而到2060年可基本实现100%的清洁能源转型,届时太阳能和风电成为能源系统的主力,可合计贡献53%的比重,水电的消费占比依然达到13.7%,而负排放技术BECCS也将占比12.5%。从政策成本角度看,实现碳中和目标的经济代价整体上低于实现《巴黎协定》温控目标的成本,最高即时经济损失占到GDP的4%,到2060年的累计GDP损失不超过1.9%;政策成本随时间推移而显著下降,本世纪中叶后,我国逐步开始享受碳中和政策带来的发展红利,并进入后中和时代的经济快速增长期。

基于此,本文提出了应对中长期碳中和挑战的政策建议。首先,应该肯定中短期阶段性目标的设计和落实对实现长期气候战略目标的重要性,比如2030年25%的非化石能源发展目标与2060年的碳中和目标具有较高的一致性,但排放达峰目标与碳中和目标并不是强因果的关系,这实际上要求相关部门充分理解相对目标与绝对目标,短中期目标与长期目标的关系,而这一关系又很大程度上依赖于未来的技术发展状况和达成目标的政策选择。本文研究显示,未来我国的碳排放路径不一定呈现出“驼峰”型(此时早达峰意味着实现碳中和的可能性越大);而有可能是“平抛物线”型(此时排放达峰时间的早晚并不能决定碳中和实现的难易程度)。这意味着政府在做短中期目标实现决策时要充分依托能源技术的发展现实,以尽可能将过渡目标与长期目标的不一致程度降到最低。此外,过早的碳达峰势必会推高峰值水平,这可能会带来新的碳锁定效应,继而不利于实现长期的碳中和。

其次,研究结果并未发现非化石能源与石油消费间的自然高替代性,石油消费引起的碳排放很可能成为实现我国中长期气候政策目标的阻碍。这可以提供两点启示:其一,考虑到煤炭的高含碳量及其在能源结构中的绝对占比,当前普遍将脱碳对等到脱煤的观点并无弊病,但从长期看本文建议要将一部分注意力转移到易于被忽视的

石油消费控制上.其二,需要在政策层面强力推动石油与非化石能源的替代,引入削减机制实现脱油;这又对应到一系列与石油消费相关的具体的行业发展政策、产业结构调整和技术变革上,比如交通体系的脱油规划和氢燃料电池技术发展的政策激励等<sup>[40]</sup>.此外,配置 CCS 技术的生物质能对石油消费削减也具有重要意义,此时政策又需更多地关注到生物质管理和 CCS 技术发展等方面(比如补贴激励方向的倾向性转移等).

再次,政策成本不必定成为碳中和目标能否达成的主要顾虑,一方面,政策选择和组合策略对于降低政策成本十分关键<sup>[13, 41]</sup>,高的经济负影响主要来自于强碳价冲击,而针对性能源补贴的引入可以在保证同等目标实现的同时降低对高碳价的依赖,继而降低政策成本.另一方面,碳中和政策对经济的负影响主要体现在短中期(也即转型的阵痛期),长期来看,经济系统最终将收获技术变革和结构调整带来的红利,实现后中和时代的绿色高质量增长.

尽管本文较早基于系统集成模型对我国碳中和目标进行了闭环式综合评估,得到了有意义的新发现和政策启示,但依然存在一定的局限.首

先,改进的 CE3METL 模型基于可耗竭资源的稀缺性和历史价格波动趋势以线性增长的形式设定了三种主要化石能源技术的成本演化路径,未考虑能源市场波动引起的成本不确定性,这也很大程度上影响了政策干预下非化石能源对传统能源的竞争替代.其次,考虑到石油消费主要集中在交通领域,移动排放源管理存在较大的难度,因此模型中未考虑石油燃烧相关的碳捕获技术,也未引入氢储能、燃料电池等可能对交通石油消费产生关键性替代的技术选项,这使得石油削减在机制层面难以与具体技术对应.再次,本研究探讨了负排放技术在碳中和目标实现中的重要角色,但生物质能的大规模发展需要权衡生物质开发潜力、土地利用、粮食和水安全等一系列相关问题,这些都有待后续研究来加强和完善.最后,文中给出的碳中和能源转型路径中,风能和光伏太阳能技术占了较大比重,但这并未考虑矿产资源的约束,而事实上,可再生能源对关键矿产资源的依赖程度远高于传统化石能源<sup>[42]</sup>.因此,矿产资源约束的引入很可能引起风光为主体的清洁能源贡献比重的下降,这也有赖于资源约束机制下综合评估模型的发展和政策优化相关的研究.

## 参 考 文 献:

- [1] 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, (8): 95 - 105.  
Fan Ying, Yi Bowen. Evolution, driving mechanism, and pathway of China's energy transition[J]. Journal of Management World, 2021, (8): 95 - 105. (in Chinese)
- [2] 邓 旭, 谢 俊, 腾 飞. 何谓“碳中和”[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(1): 107 - 113.  
Deng Xu, Xie Jun, Teng Fei. What is carbon neutrality[J]. Climate Change Research, 2021, 17(1): 107 - 113. (in Chinese)
- [3] 王 灿, 张雅欣. 碳中和愿景的实现路径与政策体系[J]. 中国环境管理, 2020, (6): 58 - 64.  
Wang Can, Zhang Yaxin. Implementation pathway and policy system of carbon neutrality vision[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2020, (6): 58 - 64. (in Chinese)
- [4] IPCC. Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5 °C Above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty[R]. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Working Paper, 2018.
- [5] 段宏波, 汪寿阳. 中国的挑战: 从 2 °C 到 1.5 °C 温控目标的战略调整[J]. 管理世界, 2019, (10): 50 - 63.  
Duan Hongbo, Wang Shouyang. China's challenges: Strategy adjustments for warming control from 2°C to 1.5°C[J]. Journal of Management World, 2019, (10): 50 - 63. (in Chinese)
- [6] Rogelj J, Popp A, Calvin K V, et al. Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5°C[J]. Nature

- Climate Change, 2018, (8): 325–332.
- [7] Deutch J. Is net zero carbon 2050 possible? [J]. Joule, 2020, 4(11): 2237–2240.
- [8] Méjean A, Guibarch C, Lefevre J, et al. The transition in energy demand sectors to limit global warming to 1.5 °C[J]. Energy Efficiency, 2019, (12): 441–462.
- [9] Vitillo J G, Elsaman M D, Aradottir E, et al. The role of carbon capture, utilization and storage for economic pathways that limit global warming to below 1.5°C[J]. IScience, 2022, (25): 104237.
- [10] Fajardy M, Moris J, Gurgel A, et al. The economics of bioenergy with carbon capture and storage (BECCS) deployment in a 1.5°C or 2°C world[J]. Global Environmental Change, 2021, (68): 102262.
- [11] Qiu Y, Lamers P, Daioglou V, et al. Environmental trade-offs of direct air capture technologies in climate change mitigation toward[J]. Nature Communication, 2100, (13): 3635.
- [12] Millar R J, Fuglestbedt J S, Friedlingstein P, et al. Emission budgets and pathways consistent with limiting warming to 1.5°C[J]. Nature Geoscience, 2017, (10): 741–747.
- [13] Fan X, Chen K, Chen Y J. Is price commitment a better solution to control carbon emissions and promote technology investment? [J]. Management Science, 2022, <https://doi.org/10.1287/mnsc.2022.4365>.
- [14] van Vuuren D P, Stehfest E, Gernaat D, et al. Alternative pathways to the 1.5°C target reduce the need for negative emission technologies[J]. Nature Climate Change, 2018, (8): 391–397.
- [15] 段宏波, 张古鹏, 范英, 等. 基于内生能源效率改进的宏观减排结构分析[J]. 管理科学学报, 2016, 19(7): 10–23.
- Duan Hongbo, Zhang Gupeng, Fan Ying, et al. China's carbon reduction structure: An analysis based on endogenous energy efficiency improvement[J]. Journal of Management Sciences in China, 2016, 19(7): 10–23. (in Chinese)
- [16] Duan H B, Zhang G P, Zhu L, et al. How will diffusion of PV solar contribute to China's emissions-peaking and climate responses? [J] Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, (53): 1076–1085.
- [17] 莫建雷, 段宏波, 范英, 等. 〈巴黎协定〉中我国的能源与气候政策目标: 综合评估及政策选择[J]. 经济研究, 2018, (9): 168–181.
- Mo Jianlei, Duan Hongbo, Fan Ying, et al. China's energy and climate targets in the Paris Agreement: Integrated assessment and policy options[J]. Economic Research Journal, 2018, (9): 168–181. (in Chinese)
- [18] Duan H B, Zhang G P, Wang S Y, et al. Integrated benefit-cost analysis of China's optimal adaptation and targeted mitigation[J]. Ecological Economics, 2019, (160): 76–86.
- [19] Budinis S, Krebor S, Mac Dowell N, et al. An assessment of CCS costs, barriers and potential[J]. Energy Strategy Reviews, 2018, (22): 61–81.
- [20] Hanssen S V, Daioglou V, Steinmann Z J N, et al. The climate change mitigation potential of bioenergy with carbon capture and storage[J]. Nature Climate Change, 2020, (10): 1023–1029.
- [21] IPCC. Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[R] The 49th Session of the IPCC, Working Paper, May 2019. <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>.
- [22] Kang J N, Wei Y M, Liu L C, et al. The prospects of carbon capture and storage in China's power sector under the 2 °C target: A component-based learning curve approach[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2020, (101): 103149.
- [23] Woolf D, Lehmann J, Lee D R. Optimal bioenergy power generation for climate change mitigation with or without carbon sequestration[J]. Nature Communications, 2016, (6): 13160.
- [24] Zhu L, Duan H B, Fan Y. CO<sub>2</sub> mitigation potential of CCS in China: An evaluation based on an integrated assessment model[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, (13): 934–947.
- [25] Lohwasser R, Madlener R. Relating R&D and investment policies to CCS market diffusion through two-factor learning[J].

- Energy Policy, 2013, (52): 439–452.
- [26] 清华大学. 中国与气候经济报告[R]. 北京: 全球经济和气候委员会, 2014–11–14.  
Tsinghua University. China and New Climate Change Economics Report[R]. Beijing: Global Economy and Climate Committee, Working Paper, 2014–11–14. (in Chinese)
- [27] IEA. Energy Technology Perspectives[R]. Paris: OECD/IEA, 2020.
- [28] 中国工程院. 推动能源生产和消费革命战略研究(一期)[R]. 北京, 2017–06–09. [http://www.cae.cn/cae/html/main/coll/2017-06/15/20170615112206811404966\\_1.html](http://www.cae.cn/cae/html/main/coll/2017-06/15/20170615112206811404966_1.html).  
The Chinese Academy of Engineering. Strategies for Promoting Energy Production and Consumption in China[R]. Beijing: Working Paper, 2017–06–09. [http://www.cae.cn/cae/html/main/coll/2017-06/15/20170615112206811404966\\_1.html](http://www.cae.cn/cae/html/main/coll/2017-06/15/20170615112206811404966_1.html). (in Chinese)
- [29] 中国石油天然气集团. 2050 年全球和中国能源展望[R]. 北京: 中石油经济技术研究院, 2017–08–16.  
China National Petroleum Corporation. Global and China Energy Outlook 2050[R]. Beijing: Institute of Economic and Technological Research of CNPC, Working Paper, 2017–08–16. (in Chinese)
- [30] 代红才, 张 宁, 薛美美, 等. 中国能源电力发展展望[R]. 北京: 国网能源研究院, 2020–12–25.  
Dai Hongcai, Zhang Ning, Xue Meimei, et al. China Power Development Outlook[R]. Beijing: Energy Institution of the State Grid Corporation of China, 2020–12–25. (in Chinese)
- [31] 清华大学. 中国长期低碳发展战略与转型战略研究[R]. 北京: 清华大学气候变化与可持续发展研究院, 2020 年 10 月 12 日.  
Tsinghua University. China's Long-Run Low-Carbon Development and Transition Strategies[R]. Beijing: Institute of Climate Change and Sustainable Development, Oct. 12, 2020. (in Chinese)
- [32] Luderer G, Vrontisi Z, Bertram C, et al. Residual fossil CO<sub>2</sub> emissions in 1.5–2 °C pathways[J]. Nature Climate Change, 2018, (8): 626–633.
- [33] Stiglitz J E, Stern N. Report of the High-Level Commission on Carbon Prices[R]. World Bank Group: Carbon Pricing Leadership Coalition, Washington D. C, 2017.
- [34] Duan H B, Zhou S, Jiang K J, et al. Assessing China's efforts to pursue the 1.5 °C warming limit[J]. Science, 2021, (372): 376–385.
- [35] 焦念志. 研发海洋“负排放”技术支撑国家“碳中和”需求[J]. 中国科学院院刊, 2021, (2): 179–187.  
Jiao Nianzhi. Developing ocean negative carbon emission technology to support national carbon neutralization[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, (2): 179–187. (in Chinese)
- [36] 潘家华. 压缩碳排放峰值加速迈向净零碳[J]. 环境经济研究, 2020, (4): 1–10.  
Pan Jiahua. Low carbon emission peak with orientation towards net zero carbon[J]. Journal of Environmental Economics, 2020, (4): 1–10. (in Chinese)
- [37] Gasser T, Guivarch C, Tachiiri K, et al. Negative emissions physically needed to keep global warming below 2 °C[J]. Nature Communications, 2015, (6): 7958.
- [38] Zhang A P, Gao J, Quan J L, et al. The implications for energy crops under China's climate change challenges[J]. Energy Economics, 2021, (94): 105103.
- [39] 沈 峰, 马铁驹, 赵兴荣, 等. 激励政策退坡下私家电动汽车扩散分析——以上海市为例[J]. 管理科学学报, 2021, 24(9): 79–107.  
Shen Feng, Ma Tiejun, Zhao Xingrong, et al. Diffusion of private electric vehicle with the fade-out of incentive policies: The case of Shanghai[J]. Journal of Management Sciences in China, 2021, 24(9): 79–107. (in Chinese)
- [40] 朱帮助, 黄丽清, 江民星, 等. 配额分配对跨期碳市场有效性的影响研究[J]. 管理科学学报, 2022, 25(9): 52–65.  
Zhu Bangzhu, Huang Liqing, Jiang Minxing, et al. The impact of permit allocation on intertemporal carbon market efficien-

cy[J]. Journal of Management Sciences in China, 2022, 25(9): 52–65. (in Chinese)

[41] Ali S H, Giurco D, Arndt N, et al. Mineral supply for sustainable development requires resource governance[J]. Nature, 2017, (543): 367–372.

## China's carbon neutrality: Tech-economic pathways and policy options

*DUAN Hong-bo*<sup>1</sup>, *WANG Shou-yang*<sup>2, 3</sup>

1. School of Economics and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Academy of Mathematics and Systems Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. School of Entrepreneurship and Management, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China

**Abstract:** China has committed to neutralize its carbon emissions in 2060, which has profound effects on future economic growth mode, energy transition and emission pathways. On this basis, an integrated energy-economy-environment system model is developed by enriching the energy technology details. It attempts to assess the energy technological pathways of achieving the carbon-neutral goal and its economic feasibility. The study reveals a high degree of consistency between the non-fossil energy development goal in 2030 and the carbon neutrality goal. Additionally, the plateau period with high emissions required for carbon neutrality is greatly shortened. Further, neither carbon pricing alone nor carbon pricing combined with subsidies for non-fossil fuel energies is sufficient to achieve carbon neutrality on time. However, carbon pricing combined with subsidy for negative emission technologies under a mechanism of coal and oil reduction provides a feasible option for achieving this goal. In this circumstance, PV solar and wind power dominate the energy system, jointly contributing 53% of primary energy consumption. Following them are hydro power and biomass with carbon capture and storage, accounting for 13.7% and 12.5%, respectively. This study also emphasizes that economic cost should not be the primary concern in advancing China's carbon-neutral goals. With a hook-shaped path of policy cost, the estimated cumulative economic cost could be less than 1.9%, and China could gain the economic growth dividend associated with carbon neutrality before 2050.

**Key words:** carbon neutrality; integrated assessment model; energy technology pathways; economic feasibility; policy option; China