

碳中和目标下的能源经济 转型路径与政策研究*

张希良 黄晓丹 张 达 耿 涌 田立新 范 英 陈文颖

摘要:“2030年前碳达峰”和“2060年前碳中和”目标要求我国能源经济系统进行深刻的转型。本文利用中国—全球能源模型(C-GEM)等模型工具,研究了碳中和愿景下我国能源经济转型的路径,定量评价了主要减排措施在不同时期的减排贡献度和所需的政策干预力度,对能源经济转型路径的关键特征指标进行了不确定性分析。研究表明,要实现“2060年前碳中和”目标,我国应进一步提高能源利用效率,2060年单位GDP能源消费相比当前下降75%以上;持续推进以新能源为主体的能源结构优化,2060年非化石能源在一次能源消费中的比重提高到80%以上;大力推进电气化和电力系统深度脱碳,2060年电力在终端能源消费中的比重提高至70%以上,非化石电力在电力供应中比重提升至90%以上,电力系统在2045~2050年间实现净零碳排放;碳定价机制将在碳中和转型中发挥关键作用,为低碳、零碳和负碳技术创新和产业转型升级提供有效的激励。研究还表明,碳中和将有助于我国经济高质量发展,2030年和2050年我国人均GDP将超过2万美元和3万美元。

关键词:碳中和 转型路径 碳定价 CGE模型

DOI:10.19744/j.cnki.11-1235/f.2022.0005

一、引言

《巴黎协定》确定了控制全球温度上升的目标:将温升控制在 2°C 之内,并争取控制在 1.5°C 之内。为实现这一长期目标,各国温室气体排放应尽快达到峰值,并促使全球在21世纪中叶实现碳中和。中国作为世界上最大的碳排放国家与工业门类最为齐全的国家,正处在城镇化快速发展阶段,面临着经济转型、环境保护、应对气候变化等多重挑战。

长期以来,中国高度重视气候变化问题,把积极应对气候变化作为国家经济社会发展的重大战略,采取了一系列行动,为应对全球气候变化做出了重要贡献。自“十二五”以来,中国积极实施了各项政策措施,产业结构和能源结构调整加快推进,能源利用效率大幅提高,单位国内生产总值(GDP)碳排放实现年均下降超5%。2015年,中国发布国家自主贡献,承诺二氧化碳排放2030年左右达到峰值并争取尽早达峰,到2030年单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降60%~65%,非化石能源占一次能源消费比重达到20%左右。2020年9月22日,习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话,宣布“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,争取在2060年前实现碳中和。”

为了实现“2030年前达峰”和“2060年前碳中和”目标,当前迫切需要识别能源经济系统的转型路径、评估转型所需政策干预力度。为此,本研究综合国家自然科学基金重大项目“绿色低碳发展转型中的关键管理科学问题与政策研究”成果,采用中国—全球能源经济模型(China-in-Global Energy Model, C-GEM),同时结合电力、交通和建筑三大部门能源技术模型,综合考虑国内外社会经济技术等因素,重点围绕以下5个方面展开研究:(1)合理的碳中和碳排放轨迹;(2)碳中和对经济转型的要求;(3)碳中和对能源系统转型的要求;(4)实现碳中和所需的政策干预力度;(5)主要减排技术方案的减排贡献。

*本项研究得到国家自然科学基金重大项目“绿色低碳发展转型中的关键管理科学问题与政策研究”(基金号:71690240)的资助。张希良为本文通讯作者。

二、文献综述

(一) 温升控制与碳排放轨迹

《巴黎协定》确定了将全球温升控制在 2°C 并争取控制在 1.5°C 之内的目标,而《IPCC 全球升温 1.5°C 特别报告》指出,将全球变暖限制在 1.5°C 而不是 2°C 或更高的温度,可以避免一系列气候变化影响。例如,到2100年,将全球变暖限制在 1.5°C 而非 2°C ,全球海平面上升将减少10厘米(IPCC, 2018)。因此,应识别全球实现 2°C 和 1.5°C 温升控制的碳排放轨迹,以 2°C 温控为底线、以 1.5°C 温控为目标确定我国合理的碳中和排放轨迹。

《IPCC 全球升温 1.5°C 特别报告》(Rogelj et al., 2018)研究显示,要以大于66%的概率实现 2°C 和 1.5°C 温升控制目标,必须将2011~2100年间的全球累计排放分别控制在1万亿吨和4000亿吨 CO_2 。为实现 1.5°C 温升控制目标,全球需要在土地、能源、工业、建筑、交通和城市方面进行“快速而深远的”转型。到2030年,全球 CO_2 排放量需要比2010年的水平下降大约45%,到2050年左右达到“净零”排放(Rogelj et al., 2018)。Luderer等(2018)联合5个重要能源模型组,基于减排发生在具有最佳成本效益的时间和地点的原则,研究得出全球需要在2020年左右实现碳达峰,而后加快减排,在2045~2060年间实现碳中和,而后实现负排放,方能以大于66%的概率实现 1.5°C 温控目标。由此可见,中国于2060年前实现碳中和的承诺与努力实现 1.5°C 温升控制目标是一致的。

对于中国的转型路径,清华大学联合我国十多家研究机构开展“中国长期低碳发展战略与转型路径研究”项目,研究了面向2050年的中国 2°C 情景和 1.5°C 情景,估算出2050年化石能源燃烧碳排放应分别为29亿和15亿吨 CO_2 (解振华等, 2020)。姜克隽等(2012)利用IPAC-AIM模型研究,估计出要实现 2°C 温控目标需要在2050年将碳排放控制在30亿吨 CO_2 以内,要实现 1.5°C 温控目标则应在2050年实现负排放5.9亿吨(Jiang et al., 2018)。段宏波和汪寿阳(2019)基于中国能源—经济—环境系统集成模型(CE3METL),从排放路径、能源重构和经济影响3个维度对比分析了全球温控目标从 2°C 到 1.5°C 的战略调整对中国的长期影响。该研究认为,中等可能性的 2°C 目标下,中国的二氧化碳排放量将于2030年前达到峰值,2050年碳排放为70亿吨左右,而后快速减排至2060年的20亿吨;而 1.5°C 目标则要求碳排放从当下开始急剧下降至2025年20亿~40亿吨,且最早到2060年前后实现近零排放。在此基础上,Duan等(2021)进一步评估中国实现 1.5°C 目标所需的行动力度,综合AIM、GCAM、IMAGE、POLES等团队的研究结果,认为中国要实现 1.5°C 目标,需在2020年达峰,而后加快减排至2030年的30亿~80亿吨,于2050年降至-10亿~20亿吨。此外,能源基金会(2020)发布的《中国碳中和综合报告2020》对中国实现碳中和目标的关键年份(2035和2050年)进行分析,识别并建议电力、建筑、工业、交通、农业、林业和土地利用等关键部门的减排行动。虽然目前已有上述部分研究提出了中国的碳排放路径及对应的温升控制目标,但大多数为面向2050年的论证分析,缺乏对2060年前碳中和目标下的能源经济协同转型路径的系统研究。目前国际上针对 1.5°C 温控目标的大多数研究,几乎都假设我国碳排放于2020年达峰后急剧下降,不符合我国国情。

(二) 碳定价在能源经济转型中的作用

目前国际通行的碳减排政策主要包括能效与排放标准、公共技术研发和碳定价工具(包括碳税和碳排放交易体系)。政策分析人士普遍认为,要以经济有效的方式实现深度碳减排,覆盖全经济系统的碳定价工具将是政策的必要组成部分(Metcalf, 2009; Kaplow, 2010; Borenstein et al., 2019)。鉴于碳排放来源的多样性,传统的能效和排放标准设计挑战很大,且会造成不必要的高成本(Newell and Stavins, 2003)。碳定价工具的关键优势在于它的灵活性以及可以带来经济总体成本效益最优的有效激励(Knittel, 2019)。另外,碳定价还可以通过诱导气候友好型技术变革降低长期减排成本(Newell et al., 1999)。

国际社会广泛认可碳定价在能源经济转型中的核心作用并将其落诸实践。当前,全球已有61项碳定价机制正在实施或计划实施中,其中31项属于碳排放交易体系,30项属于碳税,共覆盖约120亿吨 CO_2 ,占全球温室气体排放量的约22%(世界银行, 2020)。《巴黎协定》的189个缔约方提交的减排承诺中,有一半以上表示将使用

碳定价工具。经过近十年的地方试点和建设准备,2021年7月我国全国碳排放权交易市场实现了电力行业的交易运行。这种基于市场的碳定价机制通过限制多个碳密集型行业的碳排放,也推动高碳排放产业的转型升级。

在模型研究中,碳定价可以用来定量显示减排所需的政策行动的整体力度。根据《IPCC全球升温1.5℃特别报告》,要实现2℃温控,2030年全球碳价水平需达到15~220美元/吨CO₂,2050年则需达到45~1050美元/吨CO₂,2070年将达到120~1100美元/吨CO₂;相对的,要实现1.5℃温控,2030年全球碳价水平需进一步提升至135~6050美元/吨CO₂,2050年则需达到245~14300美元/吨CO₂,2070年将达到420~19300美元/吨CO₂(Rogelj et al., 2018)。反映政策力度的碳价水平由于模型框架、减排目标和技术可用性预测等的不同而有所差别(Clarke et al., 2014; Kriegler et al., 2015; Rogelj et al., 2015a; Riahi et al., 2017; Stiglitz et al., 2017)。

目前已有部分模型研究对不同国家实现碳中和所需政策力度开展了评估。European Union(2018)基于价格导向的市场均衡模型PRIMES研究显示,欧盟要于2050年实现碳中和,碳价需达到350欧元/吨CO₂(约为430美元/吨)。Oshiro等(2018)利用自下而上能源系统模型AIM/Enduse(Japan)分析日本于2050年实现碳中和所需的能源系统转型,计算得到碳减排成本在2050年高达2200美元/吨CO₂。Climate Works Australia(2020)利用技术优化模型Aus-TIMES模型研究澳大利亚2050年实现碳中和所需的碳价:在强调技术创新的发展路径下,碳价水平约为200美元/吨CO₂;在强调政策干预的发展路径下,碳价水平将达到233美元/吨CO₂。总体而言,不同地区实现碳中和时所面临的碳价水平不同,与国家的发展水平、技术路径和资源禀赋密切相关。因此,在利用模型评估中国碳中和目标下的能源经济转型所需碳价水平时,需要充分考虑我国的经济系统和能源系统的特点。

三、模型介绍

为模拟我国绿色低碳转型的路径与政策,本研究采用自上而下的可计算一般均衡能源经济模型——中国—全球能源模型(China-in-Global Energy Model, C-GEM)进行情景模拟分析,并利用3个自下而上的技术模型REPO(China Renewable Electricity Planning and Operation Model)、CPREG(China Provincial Road Transport Energy Demand and GHG Emissions Analysis Model)和CBEM(China Building Energy Model)分别对电力、交通和建筑三大重点排放部门的能源消费、成本和技术选择情况进行校核验证,确保研究结果在经济和技术上都具有可解释性。详细的模型介绍参见《管理世界》网络发行版附录。

经过7年多的开发和应用实践,C-GEM的低碳技术表达和政策模拟功能日趋成熟,比较适合能源经济系统转型路径及所需政策力度的评估工作。一方面,C-GEM模型细致刻画了多种低碳、零碳和负碳技术。Qi等(2014a)细致刻画了风、光、生物质发电等11种先进能源技术,并评估可再生能源发展对中国能源和碳排放的影响。与此同时,Zhang等(2015)进一步改进了模型中煤电碳捕集及封存(CCS)技术和气电CCS等CCS技术的刻画,并研究得出当碳价高于35美元/吨CO₂时,电力系统将开始部署CCS技术。为了进一步研究中国的深度脱碳路径,Huang等(2020)在模型中刻画了负排放技术——生物质碳捕集及封存(BECCS)技术,并评估可利用生物质资源量,研究显示,若2050年中国的碳排放空间为23亿吨CO₂,BECCS需负排放6亿吨CO₂;当排放空间为10亿吨,则BECCS需负排放近10亿吨CO₂。另一方面,C-GEM模型细致刻画了碳市场交易模块,并已经支撑了一系列评估转型所需政策力度的研究。Qi等(2016)评估中国延续《哥本哈根协议》减排承诺力度(即年均碳强度下降率为3%)所需的碳定价政策力度,研究显示,2050年要将碳排放控制在120亿吨,碳价需达到58美元/吨CO₂。Weng等(2018)研究了中国实现《巴黎协定》气候承诺(即2030年碳排放强度相比2005年下降60%~65%)所需的碳价水平,研究显示,中国2021~2025年碳价达到8美元/吨CO₂,2026~2030年达到12美元/吨CO₂,则可以大于90%的概率实现气候承诺。

本节将对C-GEM、REPO、CPREG和CBEM这4个模型进行简要介绍。

(一)中国—全球能源模型(C-GEM)

中国—全球能源模型(C-GEM)是全球多区域递归动态可计算一般均衡(CGE)模型。该模型由清华大学

能源环境经济研究所与美国麻省理工学院全球变化科学与政策联合项目开发,主要用于评估中国与全球低碳政策对经济、贸易、能源消费与温室气体排放的影响。图1展示了C-GEM经济能源系统中产品、服务与要素的流动关系(Qi et al., 2014b; 翁玉艳, 2018)。模型以2014年为基年,并根据世界银行、国际能源署与中国统计局发布的相关数据将模型主要国家及地区的能源经济数据校核至2018年,随后从2020年起以5年为一个周期运行到2100年。

C-GEM模型涵盖全球17个区域与19个经济部门,在开发过程中注重对中国及其他发展中国家的经济特征表述,尤其对发展中国家能耗较高的工业部门细节与对能源系统低碳化转型十分重要的多种能源技术做出详细刻画。为了模拟研究碳中和路径,模型重点刻画了可再生能源技术和BECCS、空气直接碳捕集(DAC)、钢铁CCS、煤电CCS等多种CCS技术(Huang et al., 2020; Zhang et al., 2015; Qi et al., 2014a)。此外,模型参考发达国家的电气化程度和经验,通过动态调整主要部门电力与化石能源间的替代弹性来有效刻画我国未来电气化进程。

考虑到中国经济发展进入“新常态”,需求管理与供给侧改革不断深入,研究团队在C-GEM模型中特别考虑了中国未来经济转型的特点。C-GEM模型借鉴欧盟、日本、美国等国的经济增长和结构变化情况,结合中国供给侧结构性改革进程和扩大内需消费等政策措施,对模型动态过程中的消费和投资等结构进行外生动态演变,以模拟中国经济快速转型的特点,具体过程详见Zhang等(2016)和翁玉艳(2018)。

(二)自下而上的分部门技术模型

本研究采用由清华大学能源经济研究所开发的中国可再生能源电力规划及运行模型(REPO)对电力部门转型进行技术验证。该模型是反映中国电力系统运行特征和省际差异的分省电力系统规划模型,以最小化电力系统贴现成本为优化目标,能够得出满足约束条件下各类发电技术各模型模拟年份在各省的装机和发电量、省间传输线容量和碳排放等结果(熊威明, 2016; Yang et al., 2018)。不同情景下,C-GEM模型将所模拟的全国电力需求和碳价反馈给REPO模型,REPO模型以上述指标为输入模拟得到电力结构并反馈给C-GEM,后者以此更新模型电力结构并得到新的电力需求和碳价,重新反馈至REPO模型,通过多次迭代校验,最终保证两模型电力结构、电力需求和碳价基本一致。

对于交通部门的转型路径,本研究应用自下而上的中国分省道路交通能耗和温室气体排放模型(CPREG)进行验证。该模型细致刻画了多种交通技术,通过外生的宏观经济、社会发展指标以及广义交通成本,采用弹性的方法预测中国未来客货运服务需求,运用离散选择的方法计算未来各种交通技术所承担的交通服务份额,并测算能耗及温室气体排放情况(Peng et al., 2018)。验证过程中,C-GEM模型将根据不同碳排放约束下CPREG模型的研究结果校核电动车发展规模,保证两个模型交通部门电气化水平和用能需求量可比。

对于建筑部门的转型路径,本研究则采用自下而上的中国建筑用能模型(CBEM)进行验证。该模型以大量统计、调研与实测数据为基础,构建了中国的典型建筑库;基于建筑全性能仿真平台,得到不同气象条件、建筑本体、设备性能及行为模式下的建筑全性能情况(能耗、碳排放、污染物、室内环境);同时基于多源数据分析得到不同典型建筑在我国的整体分布情况,从而获得我国建筑用能现状与历史;同时通过文献分析与趋势判断,研究不同驱动因素在不同假设下如何变化,从而得到不同情景下的建筑部门发展情况(Guo et al., 2021)。验证过程中,C-GEM模型将根据不同碳排放约束下CBEM模型的研究结果校核建筑用能规模,保证最终建筑部门用能结构和规模与技术模型协调一致。

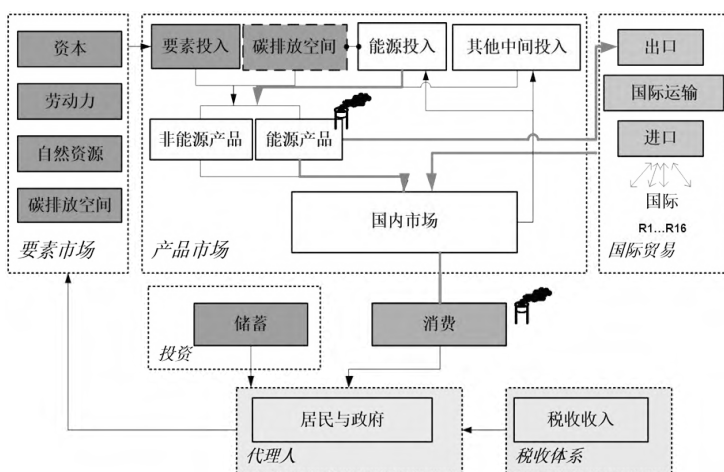


图1 C-GEM模型经济系统生产与消费关系表述

四、主要假设与情景设计

(一) 社会经济发展假定

未来人口增长的假定采用联合国经济和社会事务部(UNDESA, 2019)发布的《2019世界人口展望》中等人口情景的预测结果:中国人口预计将于2030年达峰,为14.6亿,而后逐渐下降到2060年的13.3亿。该预测也与《国家人口发展规划(2016—2030年)》中的人口发展预期目标基本一致。

通过对国家信息中心(祝宝良, 2019)、国际货币基金组织(IMF, 2020)、世界银行(WB, 2020)、牛津经济(Oxford Economics, 2020)、经济合作与发展组织(OECD, 2020, 2021)、美国能源信息署(EIA, 2019)和国际能源署(IEA, 2019)等国际机构对中国未来经济增速的预测调研,本研究参考情景下的中国未来经济增速如表1所示。中国经济总量在2035年达到205万亿元(2020年人民币不变价),2060年达到420万亿元;人均GDP在2035年达到14万元(约2.0万美元),在2060年达到约31万元(约4.6万美元)。

(二) 情景描述

本研究开发了面向2060年的参考情景及2060碳中和情景,来比较研究实现碳中和目标的能源经济转型及政策干预力度。两个情景的能源技术成本和自动能效进步率假设相同,技术应用规模由市场价格驱动。两个情景采用碳定价机制作为所有气候政策的代表,碳价显示全经济尺度的边际减排成本,反映实现碳中和目标所需的政策力度。由于我国过去和近期的碳减排目标以碳强度形式提出,为了保证政策在一段时间内的可比性,本研究以年均碳强度下降率作为碳排放约束。

1. 参考情景

该情景在2030年以前的碳减排力度以我国2015年在巴黎气候变化大会上承诺的碳减排力度为依据,即碳排放于2030年左右达峰、单位GDP碳排放与2005年相比下降60%~65%、非化石能源比重2030年达20%以上;2030年以后假设延续2020~2030年的碳减排力度,单位GDP碳排放年均下降率持续保持在大约4%的水平。

2. 2060碳中和情景

该情景的碳减排力度以习近平总书记提出的“2030年前碳排放实现达峰,2060年前实现碳中和”目标为依据,碳排放趋势尽可能靠近全球1.5℃温升控制目标下要求的中国碳排放轨迹。何建坤等(2020)研究显示,要争取2030年之前实现二氧化碳排放的达峰,中国单位GDP碳排放强度的年下降率需达到4.5%~5%的水平,才能用GDP碳强度下降抵消能源消费增长带来的碳排放增量。2060碳中和情景假设“十四五”年均碳排放强度下降率为4.5%，“十五五”年均碳强度下降率为5%。

对于2030年后的排放轨迹设定,尽量对标1.5℃温升控制目标。Luderer等(2018)研究显示,

若要以大于66%的概率实现1.5℃温升控制,在没有任何减排分担机制、减排发生在最具成本效益的地点和时间的情况下,全球应在2045~2060年间实现碳中和(如图2所示)。若将Luderer等(2018)的减排轨迹用碳强度下降率的方式表示(见图3),则全球2030~2040年应以至少7.8%的年均碳强度下降率进行减排,2041~2045年年均碳强度下降率应达到至少9.2%,2046~2050年应达到至少11.7%,2051~

表1 参考情景下的GDP增速

	2021~ 2025年	2026~ 2030年	2031~ 2035年	2036~ 2040年	2041~ 2045年	2046~ 2050年	2051~ 2055年	2056~ 2060年
GDP年均增速	5.8%	4.8%	3.8%	3.3%	3.0%	2.9%	2.9%	2.8%

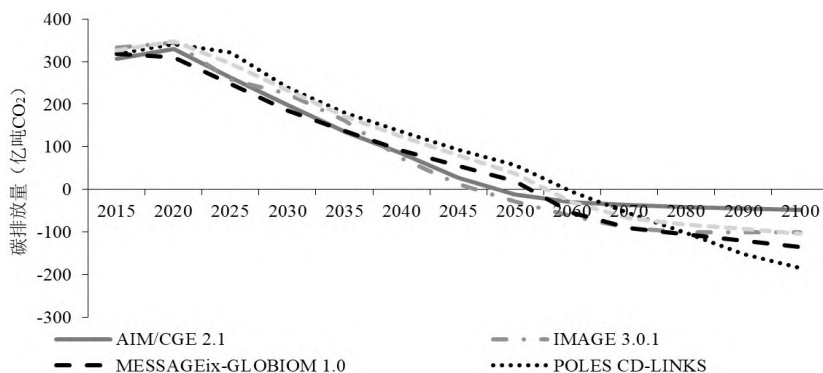


图2 全球以大于66%概率实现1.5℃温控的CO₂排放轨迹

注:Luderer等(2018)。其中,AIM/CGE模型由日本社会环境系统研究中心开发,MESSAGE-GLOBIOM模型由国际应用系统分析研究所(IASA)开发,IMAGE模型由爱尔兰环境评估署开发,POLES模型由欧盟联合研究中心开发,REMIND模型由德国波茨坦气候影响研究所开发。

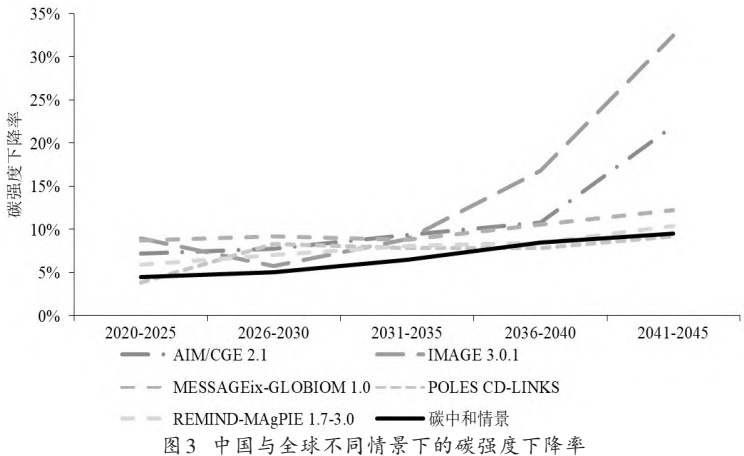
2055 年应达到至少 15%。因此,本研究设置阶梯式碳强度下降率(详见表 2),使得我国 2030 年后碳强度下降率基本达到 1.5℃温升控制目标所要求的最低碳强度下降率(见图 3 黑色实线)。

五、结果与讨论

(一)能源相关碳排放应在“十五五”中期达峰,2050 年相比峰值下降约 75%

如图 4 所示,在参考情景下,若延续我国 2015 年在巴黎气候变化大会上承诺的碳减排力度,我国化石能源燃烧碳排放将于 2030 年达峰,峰值为 108 亿吨 CO₂,而后碳排放量逐渐下降,但到 2060 年仍有 79 亿吨,不能实现“两度温升控制”目标和“2060 年前碳中和”目标。在 2060 碳中和情景下,我国“十四五”年均碳排放强度下降率为 4.5%，“十五五”年均碳强度下降率为 5%，化石能源燃烧碳排放将于 2027~2028 年左右达峰,峰值在 105 亿吨以内,而后稳中有降,2030 年碳排放缓慢降为 100 亿吨。2030~2035 年碳排放有明显下降,2035 年碳排放将相比峰值下降约 15%,约 87 亿吨;此后进一步加速减排,2050 年将减排至 26 亿吨,即相比峰值下降约 75%;2060 年,能源相关碳排放将实现净零排放。与此同时,工业过程碳排放和非二氧化碳温室气体排放有望与农林业增汇相抵消,最终实现全社会的碳中和。

为了比对 2060 碳中和情景与全球 1.5℃温控目标的排放趋势,本研究对 2060 碳中和情景和 Luderer 等(2018)所研究的全球 1.5℃温控排放轨迹进行指数化表示(即将 2020 年中国和全球的碳排放指数皆设为 100,其他年份的碳排放指数为该年份碳排放量除以 2020 年碳排放量而后乘以 100),详见图 5。Luderer 等人研究要求全球 2020 年碳达峰进而快速减排,而我国作为一个发展中国家,仍需要 10 年左右的准备期才能进入快速减排阶段。从碳达峰到碳中和,中国预计需要 30 年的时间,相比欧盟 1980 年达峰、2050 年前碳中和,美国的碳中和目标已经非常积极、挑战巨大。考虑到参考情景无法满足“2030 年前碳达峰”目标和“2060 年前碳中和”目标,下文将重点围绕 2060 碳中和情景进行讨论。



(二)碳中和目标要求经济进行持续结构性调整,高碳产业贡献不断降低

“十二五”以来,中国的经济结构出现了较为明显的变化,工业部门对中国经济的贡献不断下降,服务业的贡献不断上升。未来,随着人们生活水平和收入水平的提高,内需将进一步扩大,人们的消费选择向以服务、休闲为主的消费转变,服务业投资占比加快增大;同时,高耗能部门将进一步“去产能”,制造业从资源依赖走向技

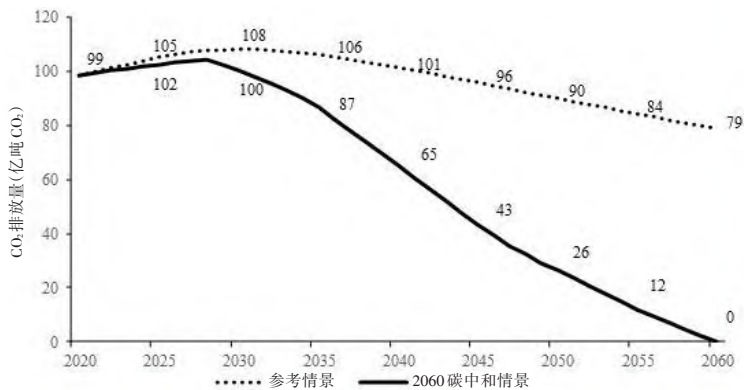


图 4 2020~2060 年不同情景下中国化石能源燃烧二氧化碳排放路径

表 2 两情景下年均碳强度下降率

	2020~2025 年	2026~2030 年	2031~2035 年	2036~2040 年	2041~2045 年	2046~2050 年	2051~2055 年	2056~2060 年
参考情景	4%							
2060 碳中和情景	4.5%	5%	6.5%	8.5%	9.5%	12%	16.7%	100%

注:2060 碳中和情景在 2060 年碳排放和碳强度均为 0,碳强度下降率为 100%。

术依赖。因此,我国产业结构加快向服务业主导结构转型。如图6所示,2050年随着我国现代化强国目标的实现,第三产业增加值占GDP比重预计将达到71%,而后保持相对稳定。

与此同时,2060年我国总产值将扩大为2020年的3.5倍,其中17个行业在2060年的产值指数如图7所示。本研究假设2020年各行业的产值指数为100,2060年的产值指数为2060年该行业产值除以2020年产值并乘以100;若产值指数超过100,则该行业相比2020年生产规模扩大,低于100则表示该行业生产规模缩小。

可以看出,实现碳中和时,2060年产值相比2020年增速最快的6个行业分别为服务业、运营交通运输业、交通设备制造业、化工制品制造业、电力与热力生产与供应业及电气设备制造业。其中服务业产值约为2020年的6倍,运营交通运输业和交通设备制造业的产值约为2020年的4倍。在全社会再电气化和新能源技术的带动下,2060年电力与热力生产与供应业、电气设备制造业的产值约为2020年的3倍,而黑色金属冶炼及压延业、炼油业、煤炭开采与生产业、石油开采与生产业、天然气开采与生产业等的产值将相比2020年有所下降。其他部门2060年的产值约为2020年的2~3倍。

图8展示了我国未来主要行业的国际贸易变化。2060年,我国未来纺织业、电气设备制造业、黑色金属冶炼及压延加工业的净出口将进一步扩大,非金属矿物制品业与其他工业净出口有所减少,化工制品制造业和有色金属冶炼及压延加工业的净进口将进一步扩大。

2060碳中和情景下2020~2060年GDP增速如图9所示。可以看出,通过技术进步和经济转型升级,中国在实现碳中和的同时,也可实现现代化强国的经济目标,2035年GDP总

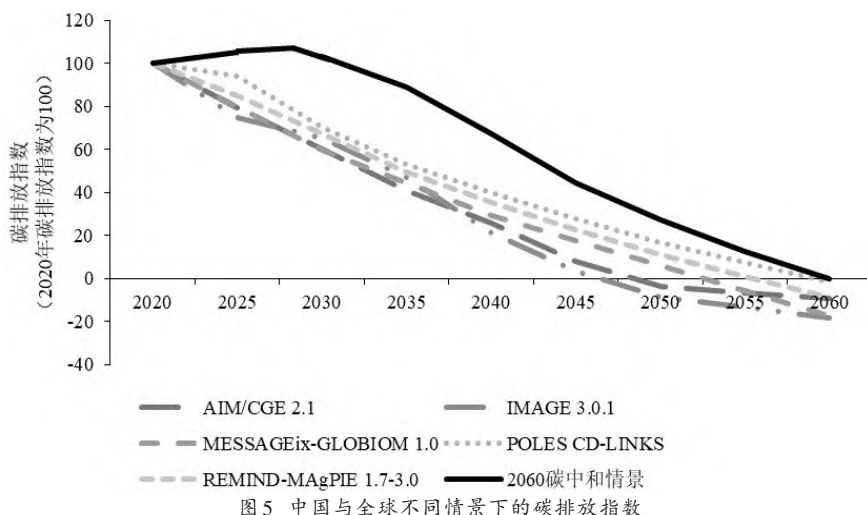


图5 中国与全球不同情景下的碳排放指数

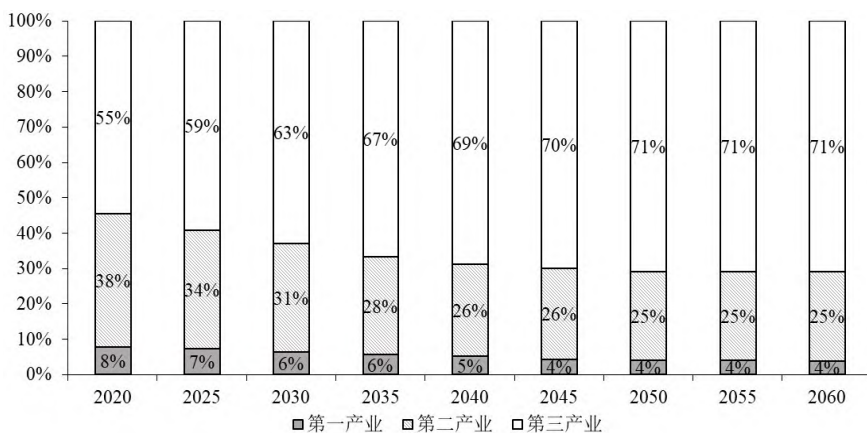


图6 2020~2060年中国未来经济结构变化趋势

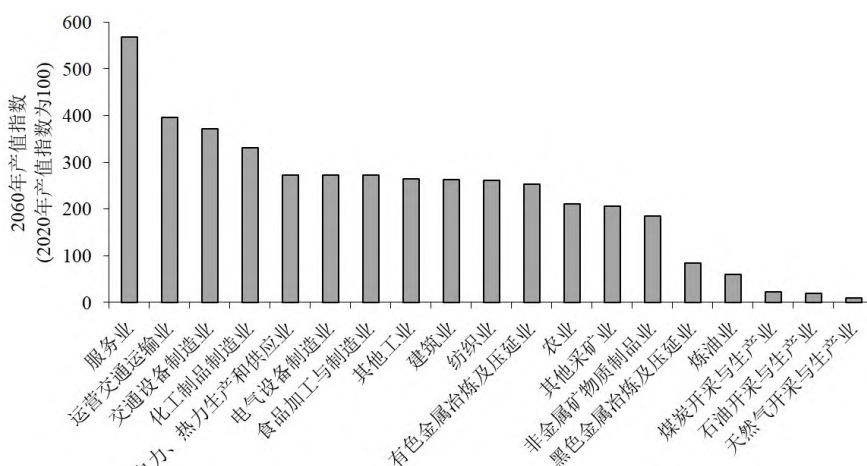


图7 2060碳中和情景下2060年产值指数(2020年产值指数为100)

量将相比2020年翻一番,2060年将比2020年翻两番,2060年仍可保持2.6%的GDP增速。与此同时,人均国内生产总值2035年将相比2020年翻一番至14万元(2020年人民币不变价),约2万美元;2050年将进一步提升至约23万元,接近3.5万美元;2060年将相比2020年翻两倍以上,达到31万元,约4.5万美元。

(三)碳中和目标的实现需要引入足够强的碳价信号

因为存在市场失灵,能源经济的深刻转型不能自动实现,需要政策的推动。碳价代表着全经济尺度的边际碳减排成本,碳定价是成本最低的公共政策工具的代表。

图10展示了2060碳中和情景下2020~2060年的碳价水平。要实现碳达峰和碳中和,2025年我国的碳价水平将达到近70元/吨(2020年人民币不变价),约为10美元/吨;2030年将超过100元/吨,即近15美元/吨;2035年将达到近180元/吨,约为25美元/吨;2060年将超过2700元/吨,约为400美元/吨。2060年碳价超过了空气直接碳捕集技术成本,空气直接碳捕集技术是目前成本最高的负排放技术,在碳价高于300美元/吨时,空气直接碳捕集技术将逐渐变得成本有效并开始大规模捕集CO₂(Realmon et al., 2019)。与European Union (2018)实现碳中和时的碳价350欧元/吨(约为430美元/吨)相比,我国实现碳中和时的边际减排成本略低一些;相比于全球实现碳中和时的碳价水平,即100~1000美元/吨(Rogelj et al., 2015b),我国边际减排成本处于中等水平。

(四)能源消费总量应于2030年进入平台期,煤油气消费应依次达峰

2060碳中和情景下,随着碳约束的加强、能效和电气化水平的提升,中国一次能源消费总量将于2030年起进入约10年的平台期(消费量约为60亿吨标煤)。2040年后,经济发展与能源消费基本脱钩,一次能源消费总量以年均1%的下降率逐渐下降,2060年降低至50亿吨标煤,与2020年基本相当。与2020年水平相比,我国单位GDP能源消费量2025年下降15%左右、2030年下降28%左右、2060年下降75%左右;2020~2060年单位GDP能源消费量年均下降率约为3.5%。

如图11和表3所示,在碳中和情景下,我国能源结构将加快向可再生能源主导型结构转变。煤炭消费在2025年左右达峰后,大幅下降至2060年的5亿吨标煤左右,其中3/4为近零碳排放煤炭(采用CCS)。随着交通部门电气化与交通服务结构和模式的改变,石油消费于2030年左右达峰,峰值约为10.6亿吨标煤,而后

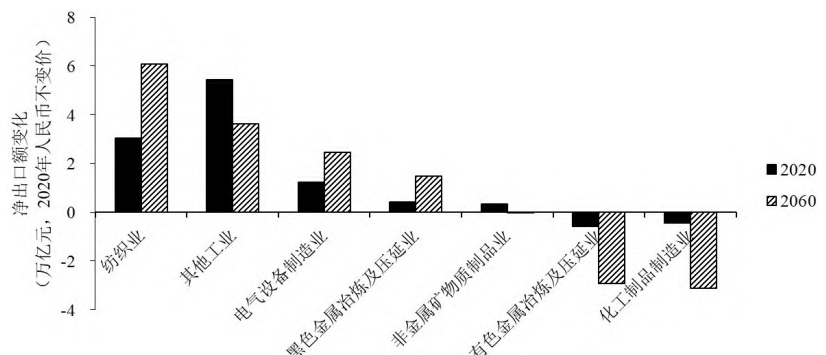


图8 2060碳中和情景下贸易净出口额变化的行业分布

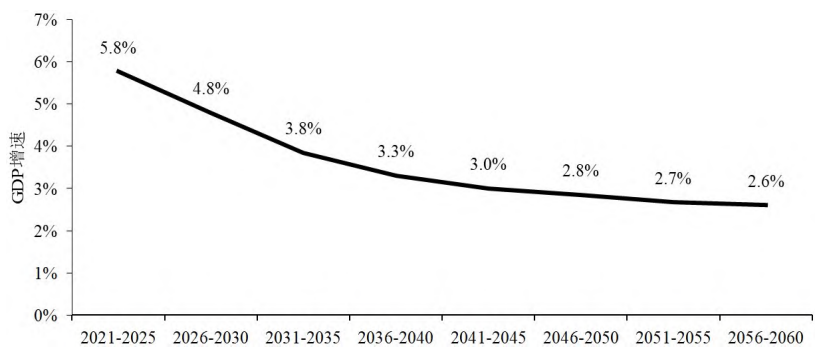


图9 2060碳中和情景下2021~2060年GDP增速

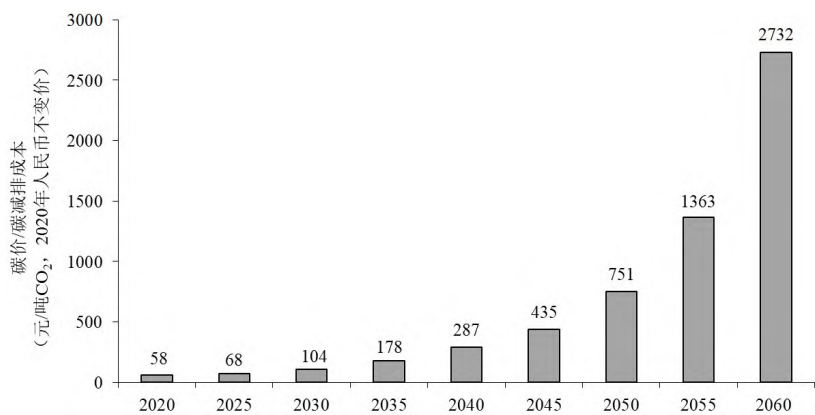


图10 2020~2060年中国二氧化碳价格/碳减排成本

不断下降至2060年的3亿吨标煤。天然气消费在2035年左右达峰,峰值约为8.3亿吨标煤,其后逐步降低到2060年2亿吨标煤左右,其中一半以上为近零碳排放天然气(采用CCS)。非化石能源发展速度大幅加快,其占比从2030年的26%,增长至2060年的80%以上。其中,核电在一次能源消费中的占比从2030年的4%,逐渐增长至2060年的15%。2060年BECCS将利用2.4亿吨标煤的生物质,常规生物质发电及生物质燃油规模将达到0.6亿吨标煤。

(五)加快电气化和电力系统深度脱碳

未来用电需求随着人民生活质量的提升和经济的不断增长而不断提高(见图12)。由于经济增长仍需要能源的支撑,在碳排放约束趋严的情况下,能源系统需要加快非化石能源替代,而电力作为非化石能源的主要利用形式,需要在全社会各部门更加广泛的应用。预计到2025年电力需求将达8.9万亿千瓦时左右,到2030年电力需求将达10.4万亿千瓦时左右;而后用电量不断增长至2060年的15.1万亿千瓦时。达到碳中和时,电力占终端用能的比重达到70%以上。对于电力在终端用能中的作用,欧盟在1.5℃温控研究中也进行了分析(European Union, 2018):欧盟在2050年实现碳中和,电力直接使用在终端用能比重为50%,电制气、电制液体燃料约占10%,氢气约占终端用能的10%,其他燃料占30%。

对于分品种电力(如图13所示),未来煤电与气电需进行CCS技术改造,非化石电力尤其是风光电力需大规模发展。对于常规煤电,其发电量将于2025年左右达峰,约为4.8万亿千瓦时,而后不断减少至2050年完全退出市场。为了降低常规煤电机组搁浅所带来的成本,自2035年起,常规煤电机组将进行CCS改造,部分机组与生物质进行掺混燃烧并实现净零乃至负排放。煤电CCS发电量将从2035年的0.1万亿千瓦时不断增长至2050年的0.9万亿千瓦时,而后保持相对稳定(2060年占总发电量的6%)。常规天然气发电量从2020年0.3万亿千瓦时增长至2035年的0.4万

表3 2060碳中和情景下一次能源消费结构

	2020年	2025年	2030年	2035年	2040年	2050年	2060年
核电	2%	3%	4%	6%	7%	10%	15%
可再生	14%	17%	22%	29%	39%	53%	65%
煤	57%	51%	44%	34%	26%	17%	10%
油	19%	18%	18%	17%	17%	13%	6%
天然气	8%	11%	13%	14%	11%	7%	4%

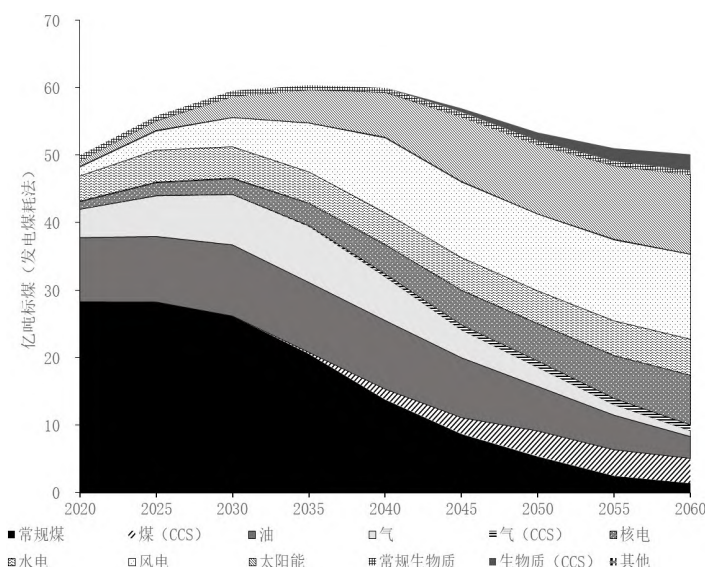


图11 2060碳中和情景下中国分品种能源消费量

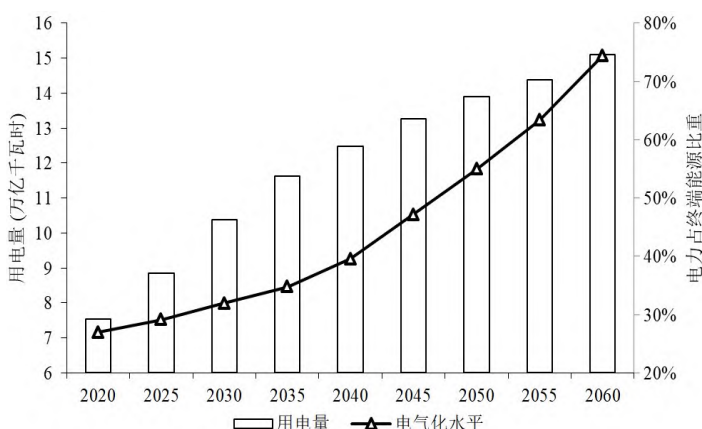


图12 2060碳中和情景下的用电需求与电力占终端用能比重图

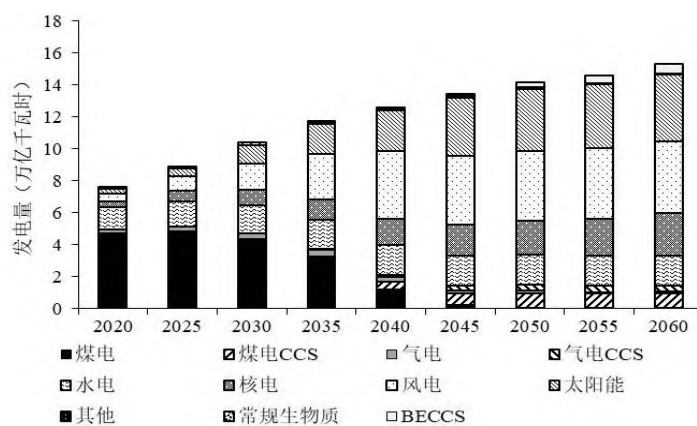


图13 2060碳中和情景下电力部门发电量

亿千瓦时,之后随着机组退役与机组的CCS技术改造,2060年常规天然气发电量将减少至0.1万亿千瓦时,主要用于提供调峰辅助服务。与此同时,气电CCS将于2035年起开始规模化应用,至2060年发电量将达到0.4万亿千瓦时,占总发电量的2%。核电发电量由2020年的0.4万亿千瓦时不断增长至2060年的2.6万亿千瓦时。常规水电发电量由2020年的1.3万亿千瓦时增长至2060年的1.9万亿千瓦时。风光发电增长显著:风电发电量由2020年的0.5万亿千瓦时,翻近两番至2030年的1.7万亿千瓦时,而后再增长至2060年的4.5万亿千瓦时;光伏和光热发电由2020年的0.3万亿千瓦时,翻两番至2030年的1.2万亿千瓦时,而后再较快增长至2060年的4.2万亿千瓦时;风光发电量到2060年将占总发电量的近60%。随着碳价的提高,BECCS技术将于2045年起开始规模应用,发电量由2045年的0.1万亿千瓦时增长至2060年的0.6万亿千瓦时。

对于电力装机,将由2020年的22亿千瓦增加至2030年的近35亿千瓦,而后持续增长至2060年的60亿千瓦以上(其中风光装机占约75%)。在地区分布方面,煤电向新疆、内蒙、宁夏、山西等煤价较低的煤产地集中,煤电CCS也主要集中在新疆和内蒙两地。水电发展受资源限制明显,新增装机主要集中在华中地区和西藏。风电新增装机主要分布在风力资源较好的地区,如新疆、内蒙、河北、云南以及福建等。太阳能发电装机则兼顾地域和资源,在光照条件良好和负荷中心地区均有较快发展。BECCS机组主要分布在生物质与碳封存资源较好的地区,如四川、山东、广东、吉林等(Wei et al., 2021; 科学技术部, 2019)。

随着未来非化石能源电力占总发电量的比例提升和CCS技术的推广,电力部门将于2045~2050年间率先实现碳中和。其中,非化石电力占比从2020年的34%逐渐提高至2025年的43%,2030年提高至55%,2050年较快增长至90%后保持相对稳定(其中可再生电力占总发电量的约75%)。Rogelj等(2015b)研究显示,1.5℃情景下全球需于2050年左右实现碳中和,该年份下低碳电力(非化石电力与煤/气CCS电力)占比的中值为97%,与本研究结果(99%)基本可比。值得注意的是,随着电力系统中可再生能源发电占比的提高,2035年起电力系统需要大规模的配备电化学储能、压缩空气储能等储能装置,以保障电力系统的安全与稳定。通过大力发展可再生能源和CCS技术,在经济最优的情况下,电力部门将于2050年前实现碳中和,而后进入负排放阶段,为其他难减排部门提供一定的排放空间。

(六)CCUS技术和碳移除技术对全经济尺度碳中和具有重要意义

如图14所示,2060年,我国将通过人工CCUS和碳移除技术分别捕集约14亿和9亿吨CO₂。对于电力部门,煤电CCS、BECCS和气电CCS机组将分别在2060年捕集约7亿、7亿和1.5亿吨CO₂。钢铁CCS在2035~2045年有一定规模的工业示范(2040年捕集约0.3亿吨),2050年起开始规模化应用,将捕集2.1亿吨CO₂,2060年捕集量约为2.9亿吨CO₂。化工CCS将从2035年捕集0.1亿吨CO₂不断增加至2060年捕集近2亿吨CO₂。水泥CCS将从2035年捕集0.6亿吨CO₂不断增加至2060年捕集近1亿吨CO₂。碳捕集成本高达300美元/吨的DAC技术将在2060年开始规模化应用,捕集达到实现碳中和需要的剩余1.7亿吨CO₂排放。

实现碳中和需要识别主要部门的减排难度及相应碳排放情况。在2050~2060年(见表4),工业部门是减排难度较大的部门,2060年仍将排放近4亿吨CO₂;电力部门将率先实现负排放,2060年将为其他部门提供5.6亿吨的排放空间;2060年交通部门、建筑部门(只考虑直接排放)和其

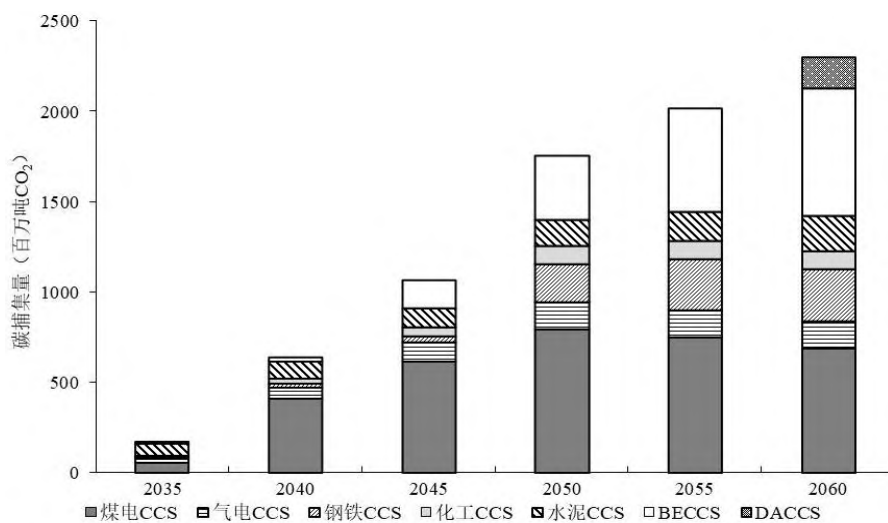


图14 2060碳中和情景下人工CCUS和碳移除量

他部门的碳排放量基本相当,分别为1.5、0.9和1亿吨;2060年DAC技术的捕集量将能基本抵消建筑部门和其他部门的排放量。

(七)达峰前减排由能效提升主导,达峰后能源替代与碳捕集减排贡献显著

要实现碳达峰、碳中和目标,不仅要通过能效提升(包括技术进步、结构调整、管理等)、能源结构优化(包括非化石能源替代与煤改气等化石能源内部结构优化)、发展人工CCUS和碳移除技术等手段减少经济体的碳排放存量,也要通过上述方式抵消由经济增长所带来的碳排放增量。为了识别上述因素在不同时期的碳减排贡献,本研究应用对数平均迪氏指数法(Logarithmic Mean Divisia Index, LMDI)(Ang, 2005; Ang and Liu, 2007)进行了因素分解研究。

由图15可知,经济增长在相当长一段时期内仍是碳排放增加的主要驱动因素,而随着我国经济发展与碳排放的逐渐脱钩,由经济增长所带来的碳排放增量将由“十四五”期间的28亿吨CO₂逐渐下降至“十六五”的17亿吨,2046~2050年进一步下降至约5亿吨,2055~2060年基本实现碳排放与经济增长的完全脱钩。

由图16可知,能效提升(包括技术进步、结构调整、管理等)在达峰前的减排贡献显著,而后随着能源结构优化的深入及人工CCUS和碳移除技术的发展,能

表4 能源碳排放部门
2060碳中和方案

单位:亿吨CO ₂	2050年	2055年	2060年
净排放	26.3	12.1	0
工业	17.9	10.2	4.1
电力	-1.1	-4.2	-5.6
交通	4.7	2.9	1.5
建筑	3.4	2.2	0.9
DAC	—	—	-1.7
其他	1.4	1.0	0.8

源碳强度不断下降,能效提升减排贡献不断下降。未来10年能效提升在所有减排因素中的减排比重达67%,2031~2035年减排贡献度下降至50%,2036~2050年进一步下降至36%,2051~2060年仅为11%。

能源结构优化中,非化石能源替代与化石能源内部结构优化的减排贡献皆先增后降。对于非化石能源替代,其减排贡献度由未来10年的24%提升至2031~2035年的37%,2036~2050年减排贡献度进一步提升至38%,而后随着人工CCUS和碳移除技术的规模化应用,2051~2060年下降至19%;相应的,减排量由“十四五”期间的6亿吨增长至2036~2040年的近15亿吨,而后开始下降,2046~2050年降至6亿吨左右,2051~2060年减排贡献约为5亿吨。对于化石能源内部结构优化,煤炭、石油、天然气的单位能源碳排放量依次下降,当化石能

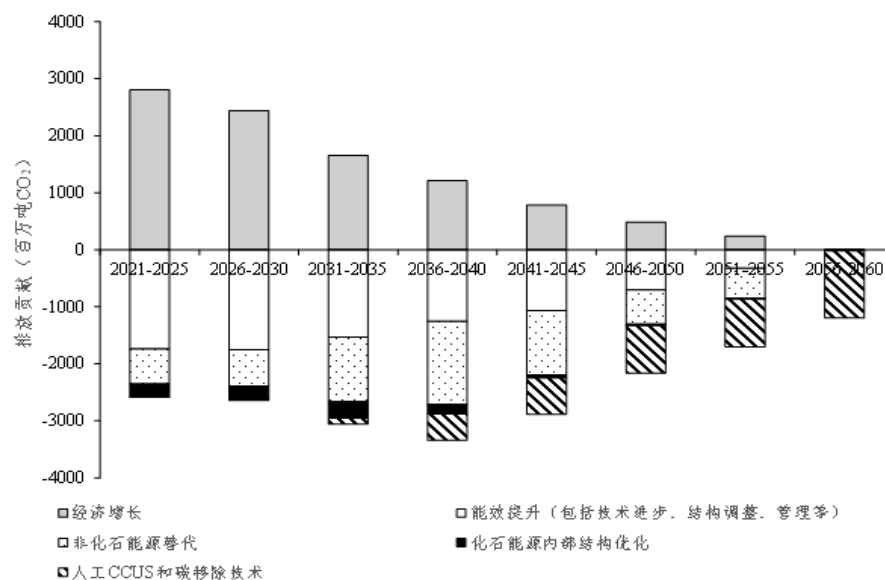


图15 2060碳中和情景下主要因素的排放影响

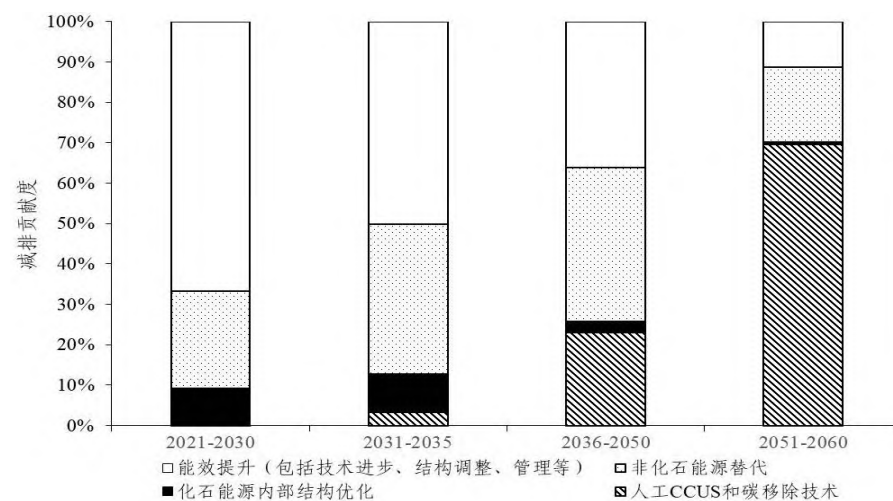


图16 2060碳中和情景下主要减排因素的减排贡献度

源结构中煤炭比重下降、石油和天然气比重提高,单位化石能源的碳排放量将逐渐下降,从而实现碳减排。随着煤炭、石油、天然气分别在“十四五”、“十五五”、“十六五”时期达峰,2035年前化石能源内部结构优化的减排贡献不断提高,由“十四五”期间的约2亿吨提升至“十六五”期间的近3亿吨,而后随着化石能源消费总量的下降和人工CCUS和碳移除技术的推广,减排贡献逐渐下降。化石能源内部结构优化的减排贡献度将从未来10年的9%提升至“十六五”的10%,2036~2050年下降至3%,2041~2060年仅为1%。

人工CCUS和碳移除技术在碳达峰后的减排贡献将大幅提升,从“十六五”期间的不到1亿吨快速提升至2046~2050年的8亿吨,2056~2060年进一步提升至12亿吨。减排贡献比例将由“十六五”期间的3%左右提升至2036~2050年的23%,2051~2060年进一步提升至69%。

六、不确定性讨论

基于模型模拟结果,本研究参考国务院发展研究中心资环所、国家发展改革委能源研究所可再生能源中心、国家气候战略中心等团队的研究成果(以上团队研究成果均未正式发表,大多以内部座谈会等形式交流获得),重点围绕2个经济指标(GDP增速与碳价),7个能源指标(一次能源消费量、化石能源消费量、非化石能源在一次能源消费中比重、非化石电力在总发电量中比重、电力占终端消费比重、总用电量、分品种电力发电量),3个碳指标(能源相关碳排放量、人工CCUS和碳移除量、分部门碳排放)进行了不确定性讨论,对综合判断较大可能出现的情况以“大概率分布区间”形式通过下列各图中阴影部分表示,并与本研究2060碳中和情景结果进行对比。

未来我国经济增长速(如图17a所示)将随着我国经济增长所处阶段的不同,由“十四五”期间的5.5%~6%逐

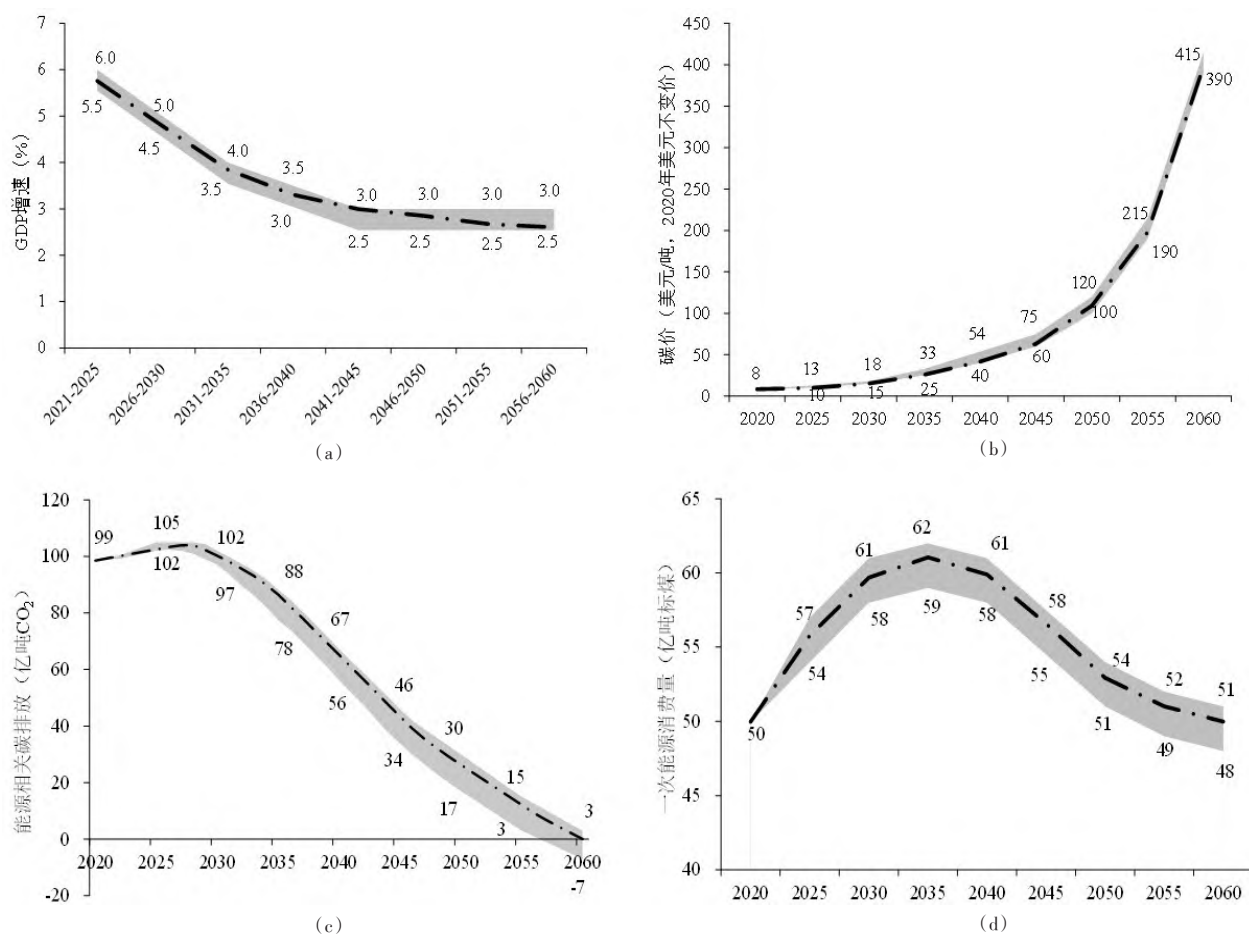
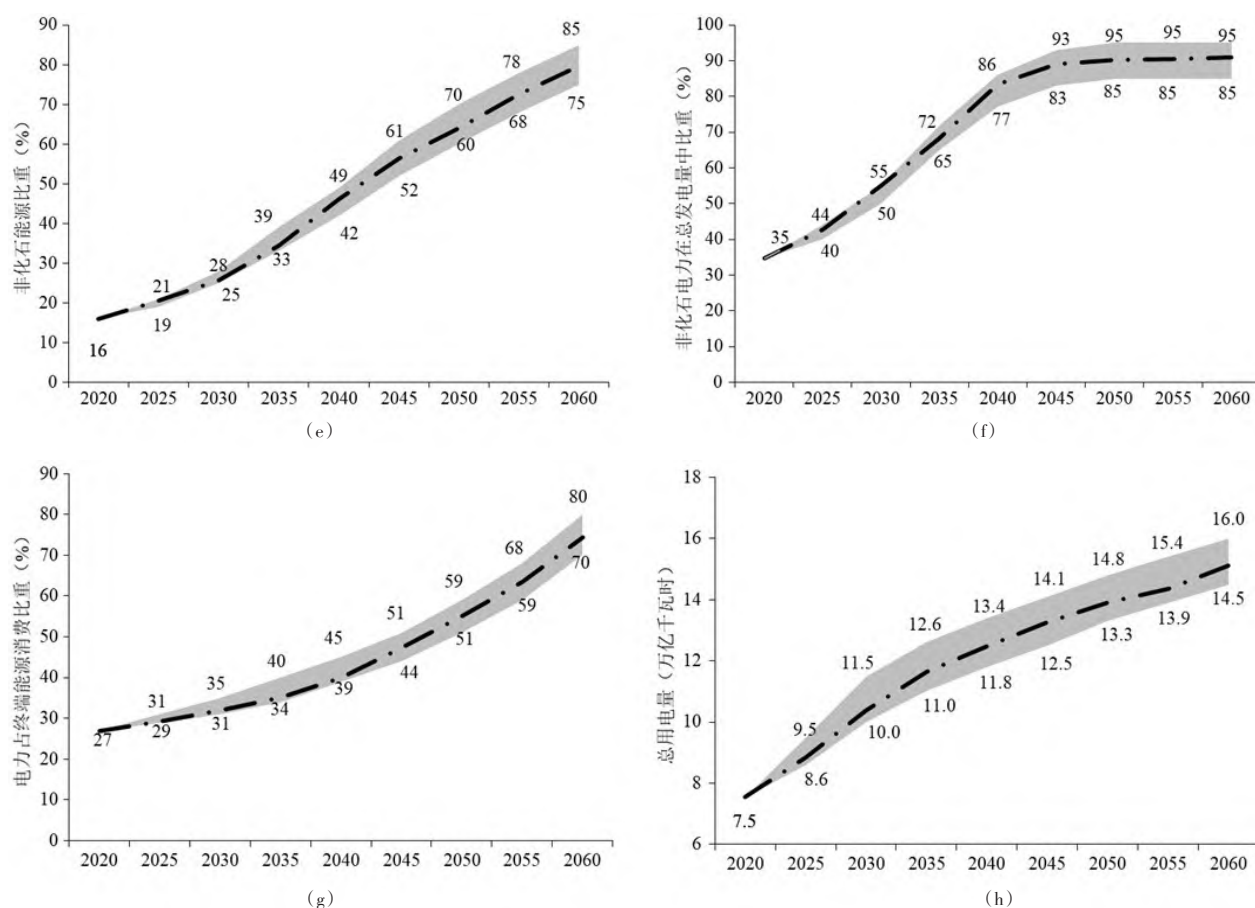


图17 2060碳中和目标下主要能源经济数据大概率分布区间



续图 17

注：灰色区域代表该指标在2060碳中和目标下大概率分布区间，黑色点划线为本研究2060碳中和情景下的研究结果。

渐向2060年的2.5%~3%转变。整体而言，2035年GDP将相比2020年翻一番，2050年GDP约为2020年的3倍，2060年将相比2020年翻两番。相对于大概率分布区间，在碳中和情景下，本研究对2050年前的经济增长预测乐观，2050年后随着社会主义现代化经济目标的实现，GDP增速将放缓，逐渐接近区间下限。对于碳中和目标下的碳价水平（碳边际减排成本，见图17b），预计2030年将在15~18美元/吨CO₂左右，2050年将超过100美元/吨CO₂，2060年将达到390~415美元/吨CO₂，即2650~2820元/吨CO₂。由于本研究2060碳中和情景的碳排放轨迹处于大概率分布区间中间偏上的位置（见图17c），所以碳价处于区间中间偏下位置。

一次能源消费量（见图17d）于“十三五”期间达峰，峰值约为59亿~62亿吨标煤，而后将进入平台期，2040年后随着能效提升，逐渐下降至2060年的48亿~51亿吨标煤。本研究2060碳中和情景下的一次能源消费量处于大概率分布区间中间位置。对于化石能源消费量，如表5所示，本研究2060碳中和情景对近零碳排放煤炭与近零碳排放天然气应用规模的判断较为慎重，消费量处于大概率分布区间中间偏下的位置；若未来CCUS技术成本进一步下降且经济有效的碳利用途径增加，近零碳排放煤炭与天然气应用规模有望进一步增加。如表6所示，2060年实现碳中和时，人工碳捕集、

表5 2060碳中和目标下化石能源消费量

单位：亿吨标煤		2025年	2030年	2035年	2050年	2060年
煤炭	常规利用煤炭	26.0~29.0	23.0~27.0	18.0~22.0	3.0~6.0	1.0~2.0
	近零碳排放煤炭(采用CCUS)	0~0.01	0.01~0.5	0.2~1.0	2.5~6.0	2.5~6.0
石油		9.6~10.3	9.6~11.0	8.8~10.8	4.5~7.0	2.0~4.0
天然气	常规利用天然气	5.0~7.0	6.0~9.0	6.5~9.6	2.4~5.3	0.5~3.0
	近零碳排放天然气(采用CCUS)	0	0~0.1	0~0.5	0.3~2.5	0.3~2.5

表6 2060碳中和目标下人工CCUS和碳移除量

单位：亿吨CO ₂		2030年	2035年	2050年	2060年
人工碳捕集、利用与封存 (CCUS)	煤电	0.1~0.5	0.5~2	5~10	5~10
	气电	0~0.2	0~0.6	0.4~3.5	0.4~3.5
	钢铁	0.02~0.1	0.1~0.2	0.5~2.1	0.9~2.9
	化工	0.05~0.35	0.1~0.5	1~2	1~2
	水泥	0.05~0.1	0.1~0.8	1~1.5	1.5~2
人工碳移除	BECCS	0~0.001	0.001~0.2	1~5	3~7
	DAC	0	0	0.01~1	0.3~3

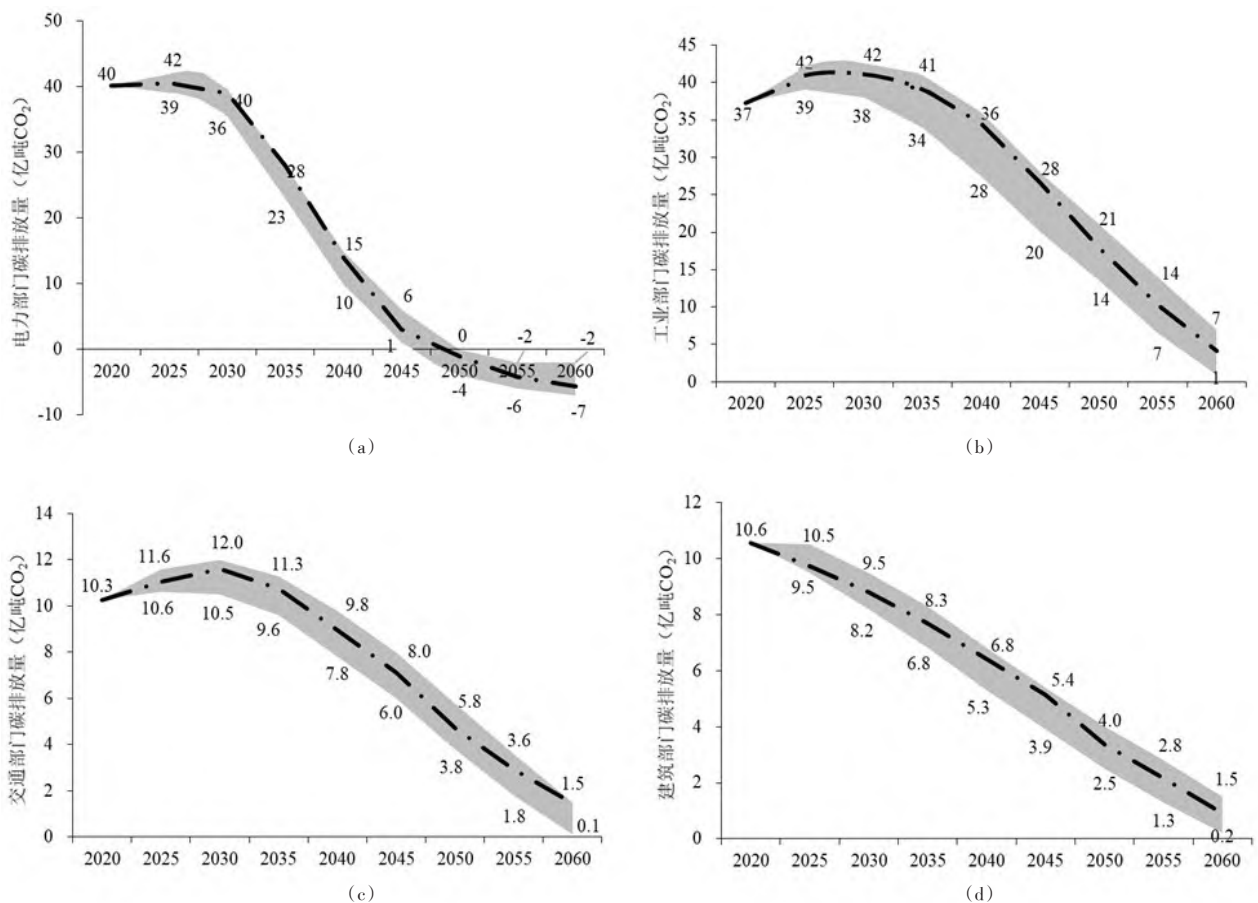


图 18 2060 碳中和目标下分部门碳排放
注：灰色区域代表该指标在 2060 碳中和目标下大概率分布区间，黑色点划线为本研究 2060 碳中和情景下的研究结果。

利用与封存量将达到 9 亿~15 亿吨 CO₂，人工碳移除量将达到 6 亿~9 亿吨；本研究 2060 碳中和情景结果位于区间中值。

非化石能源的发展可以分为 3 个时期：准备期、加速期与稳定期，分别为 2020~2030 年、2030~2050 年和 2050~2060 年。对应的，非化石能源在一次能源中的比重将由 2020 年的 16% 逐渐增长至 2030 年的 25%~28%；而后随着新能源和储能等技术的成熟，非化石能源应用规模快速扩大，其比重快速增长至 2050 年的 60%~70%；随着易开发资源被基本开发、易电气化领域已基本实现电气化、以及 CCUS 技术基本成熟，非化石能源在一次能源中的比重增长变缓，到 2060 年该比重为 75%~85%（如图 17e 所示）。本研究 2060 碳中和情景的研究结果在 2030 年前与国家政策目标基本一致，位于区间中等偏下位置；2030~2060 年情景预测结果处于区间中值。关于非化石电力在总发电量中的比重（如图 17f 所示）趋势，2040 年前情景研究结果相对乐观，处于区间上限；2050 年后，随着非化石电力占比达到 90%，综合考虑电网稳定性与安全性问题，非化石电力占比将维持在该水平，处于区间中值。

终端电气化率（如图 17g 所示）将由当前的 27% 逐步增长至 2060 年的 70%~80%，呈不断加快趋势。本研究 2060 碳中和情景的研究结果在 2040 年前接近区间下限，2040 年后居于区间中值；本研究电力需求处于区间中等偏下位置（如图 17h 所示）。分品种电力发电量与分部门碳排放的大概率分布区间分别详见表 7 与图 18。

表 7 2060 碳中和目标下分品种电力发电量					
单位：TWh	2025 年	2030 年	2035 年	2050 年	2060 年
常规煤电	4500~5000	4200~4700	2800~3200	0~50	0
煤电 CCS	0	0~20	65~150	650~1200	650~1200
常规水电	250~350	300~400	400~500	0~200	0~100
水电 CCS	0	0~20	0~130	100~900	100~900
核电	550~610	860~960	1200~1350	2100~2350	2350~2650
水电	1450~1600	1600~1850	1700~2000	1850~2200	1850~2200
风电	800~900	1400~1560	2500~3100	4050~4500	4100~4600
太阳能发电	450~500	1050~1200	1500~1850	3600~4000	3800~4200
常规生物质发电	150~165	150~165	150~165	0~150	0~150
BECCS	0	0~10	0~20	120~440	250~600
其他能源	2~5	2~5	2~5	2~5	2~5

七、结论与政策建议

中国—全球能源模型与电力、交通和建筑技术模型的情景模拟分析显示,我国要实现2060年碳中和目标,能源与经济系统就必须进行深刻的转型。实现转型的主要技术路径和政策措施包括以下几个方面。

1. 明确碳排放总量控制路径

能源相关碳排放放在“十五五”中期达到峰值,峰值水平在105亿吨以内,2035年在峰值水平基础上下降15%左右,2050年下降75%以上,2060年前实现全经济尺度碳中和。进行分部门碳排放总量管理,推动建筑(仅考虑直接排放)、电力、工业与交通部门依次达峰,达峰年分别为2025年前、2025年左右、2025年左右与2030年左右。

2. 进一步提高能源利用效率

通过产业升级和结构调整、技术节能和管理节能等措施,与2020年水平相比,我国单位GDP能源消费量2025年下降15%左右、2030年下降28%左右,2050年下降65%左右,2060年下降75%以上。能源消费总量于“十六五”期间进入平台期,2040年以后开始下降,2060年用能水平与2020年基本相当。碳达峰前,减排量由能效提升所主导实现,该措施将贡献超过60%的减排量。

3. 持续推进以新能源为主体的能源结构优化

要实现2030年前碳达峰目标和2060年前碳中和目标,需要持续推进以新能源为主体的能源结构优化,促使非化石能源在一次能源消费中的比重2030年上升到25%以上,2050年进一步增长至65%左右,2060年达到80%以上。碳达峰后,到本世纪中叶,能源替代将比能效提高发挥更大的作用,贡献40%左右的减排量。

4. 大力推进电气化和电力系统深度脱碳

电气化对于能源经济深度脱碳至关重要。终端能源中的电力占比2030年提高到32%左右,2050年提高到55%以上,2060年提高到70%以上。到2030年,电力系统风电、光伏装机分别将达到6.5亿千瓦和9.5亿千瓦,风光发电量占比超过25%,非化石能源发电占比超过55%。到2050年以后,非化石电力占比达到90%以上,电力系统应率先于2045~2050年实现净零排放,而后进入负排放阶段。常规煤电在“十四五”期间装机达到峰值,2030年后进入快速退出轨道,将在2050年前后基本完全退出。

5. 积极推动CCUS和碳移除技术的研发、示范和推广

实现工业、交通、建筑部门零排放代价很大,需考虑通过发展BECCS、煤电CCS和气电CCS等技术,率先实现电力部门的负排放(2060年负排放近6亿吨),并通过发展钢铁等部门的CCUS技术促进工业部门的深度减排;同时发展空气直接碳捕集技术,使其在2060年形成近2亿吨的负排放能力,从而以更低成本实现全经济尺度的能源相关CO₂排放的碳中和,并为在2060年后进一步实现负排放奠定基础。在实现碳中和的最后一段时期,人工CCUS和碳移除技术将发挥关键作用。

6. 充分发挥碳定价机制在能源经济转型中的经济激励

碳定价机制将是实现碳中和目标的重要手段。未来我国在积极发挥碳排放权交易体系的作用基础上,对碳市场覆盖以外的行业,如交通和建筑领域,可以考虑引入碳价。实现碳达峰与碳中和目标我国的碳价水平2025年不应低于近70元/吨(约为10美元/吨),2030年不应低于100元/吨(约为15美元/吨),2035年不应低于180元/吨(约为25美元/吨),2050年不应低于700元/吨(约为100美元/吨)。

(作者单位:张希良、黄晓丹、张达、陈文颖,清华大学现代管理研究中心、清华大学能源环境经济研究所;耿涌,上海交通大学国际与公共事务学院;田立新,南京师范大学数学科学学院;范英,北京航空航天大学经济与管理学院)

参考文献

- (1)段宏波、汪寿阳:《中国的挑战:全球温控目标从2℃到1.5℃的战略调整》,《管理世界》,2019年第10期。
- (2)何建坤:《强化实现碳达峰目标的雄心和举措》,《中国财经报》,2020年11月17日。

- (3)姜克隽、庄幸、贺晨旻:《全球升温控制在2℃以内目标下中国能源与排放情景研究》,《中国能源》,2012年第2期。
- (4)科学技术部(社会发展科技司,中国21世纪议程管理中心):《中国碳捕集利用与封存技术发展路线图(2019版)》,科学出版社,2019年。
- (5)能源基金会:《中国现代化的新征程:“十四五”到碳中和的新增长故事》,《中国碳中和综合报告2020》,2020年。
- (6)世界银行:《2020年碳定价机制现状和趋势》,2020年,<https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/33809>。
- (7)翁玉艳:《碳市场在全球碳减排中的作用研究》,清华大学博士学位论文,2018年。
- (8)熊威明:《中国可再生能源电力规划及运行模型的开发与应用》,清华大学博士学位论文,2016年。
- (9)解振华、何建坤、李政、张希良等:《中国长期低碳发展战略与转型路径研究综合报告》,《中国人口·资源与环境》,2020年第11期。
- (10)祝宝良:《“十四五”我国经济增长潜力预计为5.5%左右》,2019年,中国发展网,<http://thinktank.chinadevelopment.com.cn/Home/Article/detail/id/10325.html>。
- (11)Ang, B. W., 2005, “The LMDI Approach to Decomposition Analysis: A Practical Guide”, *Energy Policy*, vol.33, pp.867~871.
- (12)Ang, B. W. and Liu, N., 2007, “Handling Zero Values in the Logarithmic Mean Divisia Index Decomposition Approach”, *Energy Policy*, vol.35(1), pp.238~246.
- (13)Borenstein, S., Bushnell, J., Wolak, F. A. and Zaragoza-Watkins, M., 2019, “Expecting the Unexpected: Emissions Uncertainty and Environmental Market Design”, *American Economic Review*, vol.109(11), pp.3953~3977.
- (14)Clarke, L., Jiang, K., Akimoto, K., Babiker, M., Blanford, G. and Karen, F. V., et al., 2014, *Assessing Transformation Pathways. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp.413~510.
- (15)ClimateWorks Australia, 2020, “Decarbonisation Futures: Solutions, Actions and Benchmarks for a Net Zero Emissions Australia”, Available at: <https://www.climateworksaustralia.org/resource/decarbonisation-futures-solutions-actions-and-benchmarks-for-a-net-zero-emissions-australia/>.
- (16)Duan, H. B., Zhou, S. and Jiang, K., et al., 2021, “Assessing China’s Efforts to Pursue the 1.5°C Warming Limit”, *Science*, vol.372, pp.378~385.
- (17)EIA, 2019, “Annual Energy Outlook 2019”, Available at: www.eia.gov/aeo19.
- (18)European Commission, 2018, “A Clean Planet for All: A European Long-term Strategic Vision for a Prosperous, Modern, Competitive and Climate Neutral Economy”, Brussels.
- (19)Guo, S. Y., Yan, D., Hu, S. and Zhang, Y., 2021, “Modelling Building Energy Consumption in China under Different Future Scenarios”, *Energy*, vol.214, 119063.
- (20)Huang, X. D., Chang, S. Y., Zheng, D. Q. and Zhang X. L., 2020, “The Role of BECCS in Deep Decarbonization of China’s Economy: A Computable General Equilibrium Analysis”, *Energy Economics*, vol.92, 104968.
- (21)International Energy Agency (IEA), 2019, “World Energy Outlook 2019”, IEA, Paris, Available at: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>.
- (22)International Monetary Fund (IMF), 2020, *World Economic Outlook: The Great Lockdown*, Washington, DC, April.
- (23)IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2018, “IPCC’s Special Report on Global Warming of 1.5°C: Assessment and Recommendation”, Centre for Science and Environment’s (CSE), Available at: <https://www.cseindia.org/ipcc-s-special-report-on-global-warming-of-1-5-c-9056>.
- (24)Jiang, K. J., He, C. M., Dai, H. C., Liu, J. and Xu, X. Y., 2018, “Emission Scenario Analysis for China under the Global 1.5°C Target”, *Carbon Management*, vol.9, pp.481~491.
- (25)Kaplow, L., 2010, “Taxes, Permits, and Climate Change”, National Bureau of Economic Research Working Paper, No.16268, Available at: <https://www.nber.org/papers/w16268>.
- (26)Oshiro, K., Masui, T. and Kainuma, M., 2018, “Transformation of Japan’s Energy System to Attain Net-zero Emission By 2050”, *Carbon Management*, vol.9(5), pp.493~501.
- (27)Knittel, C. R., 2019, “Diary of a Wimpy Carbon Tax: Carbon Taxes as Federal Climate Policy”, Working Paper 2019-013, MIT Center for Energy and Environmental Policy Research, August, Available at: <https://ceep.mit.edu/workingpaper/diary-of-a-wimpy-carbon-tax-carbon-taxes-as-federal-climate-policy/>.
- (28)Kriegler, E., Riahi, K., Bauer, N., Schwanitz, V. J., Nils, P. and Bosetti, V., et al., 2015, “Making or Breaking Climate Targets: The AMPERE Study on Staged Accession Scenarios for Climate Policy”, *Technological Forecasting and Social Change*, vol.90 (Part A), pp.24~44, doi: 10.1016/j.techfore.2013.09.021.
- (29)Luderer, G., Vrontisi, Z., Bertram, C., Edelenbosch, O. Y., Pietzcker, C. R., Rogelj, J., et al., 2018, “Residual fossil CO₂ Emissions in 1.5~2°C Pathways”, *Nature Climate Change*, vol.8, pp.626~633.
- (30)Lu, X., Liang, C., Wang, H., Peng, W., Xing, J. and Wang, S., et al., 2019, “Gasification of Coal and Biomass as a Net Carbon-negative Power Source for Environment-friendly Electricity Generation in China”, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol.116, pp.8206~8213.
- (31)Metcalf, G. E., 2009, “Market-Based Policy Options to Control U.S. Greenhouse Gas Emissions”, *Journal of Economic Perspectives*, vol.23(2), pp.5~27.

- (32) Newell, R. G. and Stavins, R. N., 2003, "Cost Heterogeneity and the Potential Savings from Market-Based Policies", *Journal of Regulatory Economics*, vol.23, pp.43~59.
- (33) Newell, R. G., Jaffe, A. B. and Stavins, R. N., 1999, "The Induced Innovation Hypothesis and Energy-Saving Technological Change", *Quarterly Journal of Economics*, vol.114, pp.941~975.
- (34) OECD, 2020, "OECD Economic Outlook, Interim Report March 2020", *OECD Publishing*, Paris, Available at: <https://doi.org/10.1787/7969896b-en>.
- (35) OECD, 2021, "Long-term Baseline Projections, No.103", *OECD Economic Outlook: Statistics and Projections (database)*, Available at: <https://doi.org/10.1787/68465614-en> (accessed on 14 January 2021).
- (36) Oxford Economics, 2020, "World Economy", *Economic Outlook*, vol.44(3), pp.33~35.
- (37) Peng, T. D., Ou, X. M., Yuan, Z. Y., Yan, X. and Zhang, X. L., 2018, "Development and Application of China Provincial Road Transport Energy Demand and Ghg Emissions Analysis Model", *Applied Energy*, vol.222, pp.313~328.
- (38) Qi, T. Y., Zhang, X. L. and Karplus, V., 2014a, "The Energy and CO₂ Emissions Impact of Renewable Energy Development in China", *Energy Policy*, vol.68, pp.60~69.
- (39) Qi, T. Y., Winchester, N., Zhang, D., Zhang, X. L. and Karplus, V. J., 2014b, "The China-in-global Energy Model", *MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change Report*, No.262, Available at: https://globalchange.mit.edu/sites/default/files/MITJPSP-GC_Rpt262.pdf.
- (40) Qi, T. Y., Winchester, N., Karplus, V., Zhang, D. and Zhang, X. L., 2016, "An Analysis of China's Climate Policy Using the China-in-Global Energy Model", *Economic Modelling*, vol.52, pp.650~660.
- (41) Realmonde, G., Drouet, L., Gambhir, A., Glynn, J., Hawkes, A., Köberle, C. A. and Tavoni, M., 2019, "An Inter-model Assessment of the Role of Direct Air Capture in Deep Mitigation Pathways", *Nature Communication*, doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10842-5>.
- (42) Riahi, K., Vuuren, V. D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C. and Fujimori, S., et al., 2017, "The Shared Socioeconomic Pathways and Their Energy, Land Use, and Greenhouse Gas Emissions Implications: An Overview", *Global Environmental Change*, vol.42, pp.153~168, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009.
- (43) Rogelj, J., Shindell, D., Jiang, K., Ffifita, S., Forster, P. and Ginzburg, V., et al., 2018, "Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development. In: 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*, In Press.
- (44) Rogelj, J., Reisinger, A., Mccollum, D. L., Knutti, R. and Meinshausen, M., 2015a, "Mitigation Choices Impact Carbon Budget Size Compatible with Low Temperature Goals", *Environmental Research Letters*, vol.10(7), 075003, doi:10.1088/1748-9326/10/7/075003.
- (45) Rogelj, J., Luderer, G., Pietzcker, R. C., Kriegler, E., Schaeffer, M., Krey, V. and Riahi, K., 2015b, "Energy System Transformations for Limiting End-of-century Warming to Below 1.5°C", *Nature Climate Change*, vol.5(6), pp.519~527.
- (46) Stiglitz, J. E., Nicholas, S., Maosheng, D., Ottmar, E. and Harald, W., 2017, "Report of the High-Level Commission on Carbon Prices", *Carbon Pricing Leadership Coalition (CPLC)*, Available at: <https://apo.org.au/node/91651>.
- (47) UNDESA (United Nations, Department of Economic and Social Affairs), 2019, "World Population Prospects: The 2019 Revision".
- (48) World Bank, 2020, "Global Economic Prospects, January 2020", World Bank Publications, No.33044.
- (49) Weng, Y. Y., Zhang, D., Lu, L. L. and Zhang, X. L., 2018, "A General Equilibrium Analysis of Floor Prices for China's National Carbon Emissions Trading System", *Climate Policy*, vol.18, pp.60~70.
- (50) Wei, Y. M., Kang, J. N., Liu, L. C., Li, Q., Wang, P. T. and Hou, J. J., et al., 2021, "A Proposed Global Layout of Carbon Capture and Storage in Line with a 2°C Climate Target", *Nature Climate Change*, vol.11, pp.112~118.
- (51) Yang, Y. Z., Zhang, H. Y., Xiong, W. M., Zhang, D. and Zhang, X. L., 2018, "Regional Power System Modeling for Evaluating Renewable Energy Development and CO₂ Emissions Reduction in China", *Environmental Impact Assessment Review*, vol.73, pp.142~151.
- (52) Zhang, X. H., Qi, T. Y. and Zhang, X. L., 2015, "The Impact of Climate Policy on Carbon Capture and Storage Deployment in China", *Joint Program Report Series Report 289*, Available at: <https://globalchange.mit.edu/publication/16267>.
- (53) Zhang, X. L., Karplus, V. J., Qi, T. Y., Zhang, D. and He, J. K., 2016, "Carbon Emissions in China: How Far Can New Efforts Bend The Curve", *Energy Economics*, vol.54, pp.388~398.

Research on the Pathway and Policies for China's Energy and Economy Transformation toward Carbon Neutrality

Zhang Xiliang^{a,b}, Huang Xiaodan^{a,b}, Zhang Da^{a,b}, Geng Yong^c,
Tian Lixin^d, Fan Ying^e and Chen Wenyi^{a,b}

(a. Research Center for Contemporary Management, Tsinghua University; b. Institute of Energy, Environment Economy, Tsinghua University; c. School of International and Public Affairs, Shanghai Jiao Tong University; d. School of Mathematical Sciences, Nanjing Normal University; e. School of economics and management, Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

Summary: In 2020, President Xi Jinping announced China's goal of striving to peak carbon dioxide emissions before 2030 and achieve carbon neutrality before 2060. To achieve these goals, China's energy and economy system needs a profound transformation. In this study, we analyze the logic and the pathway of transforming China's energy and economy system, quantify the emissions reduction contribution and required supporting policies of major emissions reduction measures in different periods, and conduct uncertainty analysis on key factors of the energy and economy transformation pathway. We use a top-down global computable general equilibrium energy-economic model, China-in-Global Energy Model (C-GEM), for scenario simulation analysis. We further use three bottom-up technology models to cross-check the energy consumption and technology deployment in the power, transportation, and building sectors, generated by the C-GEM.

To limit global warming well below 2°C and as close to 1.5°C as possible, we show that China's energy-related CO₂ emissions should peak in the middle of the 15th Five-Year Plan (FYP), with the level of around 10.5 billion tons of CO₂; By 2050, China's energy-related CO₂ emissions need to be reduced by about 75%, compared with the peak level; Before 2060, carbon neutrality needs to be achieved. Carbon neutrality can contribute to the high-quality development of China's economy. China's GDP per capita will surpass US\$20,000 and US\$30,000 in 2030 and 2050, respectively.

To achieve this emissions pathway, China should further improve its energy efficiency. Its primary energy consumption needs to be plateaued in 2030; By 2060, its GDP energy intensity needs to be reduced by 75%, compared with the 2020 level. We show that energy efficiency improvement is a major contributor to emissions reduction before China's emissions peak. China should also continue to promote the transformation of the energy system with new energy as the dominant supply and increase the share of non-fossil energy in total primary energy consumption to more than 80% by 2060. In addition, China should further promote electrification and decarbonize the power sector. Promoting carbon capture, utilization, and storage (CCUS) and carbon removal technology is essential to reduce the emissions mitigation cost during the last phase of carbon neutrality. Carbon pricing will play a key role in providing adequate incentives for low-carbon and zero-carbon technological innovation and industrial transformation and upgrading to achieve carbon neutrality.

There is a lack of the knowledge on China's pathways to achieve carbon neutrality. There are also few studies on the transition cost of and policy interventions for achieving the carbon neutrality goal. This study fills the gap by developing a powerful analytical tool of carbon neutrality pathways, which integrates the analysis of energy transition, economic transition and policy interventions, conducting an integrated assessment of the key technological options and the carbon price level for achieving the carbon neutrality goal with the analytical tool developed, and providing theoretical and technical supports for the carbon neutrality technology roadmap formulation and carbon pricing development in China.

Keywords: carbon neutrality; transformation pathway; carbon pricing; computable general equilibrium (CGE) model.

JEL Classification: C68, O13, Q43, Q48

模型介绍

(一)引言

为模拟我国绿色低碳转型的路径与政策,本研究采用自上而下的可计算一般均衡能源经济模型——中国—全球能源模型(China-in-Global Energy Model,C-GEM)进行情景模拟分析,并利用3个自下而上的技术模型REPO(China Renewable Electricity Planning and Operation Model)、CPREG(China Provincial Road Transport Energy Demand and GHG Emissions Analysis Model)和CBEM(China Building Energy Model)分别对电力、交通和建筑三大重点排放部门的能源消费、成本和技术选择情况进行校核验证,确保研究结果经济有效、技术可行。此外,为了识别经济发展水平、能效提升水平、能源结构优化、人工CCUS和碳移除技术等因素对碳排放的影响,本研究应用对数平均迪氏指数法(Logarithmic Mean Divisia Index, LMDI)(Ang,2005;Ang and Liu,2007)对上述因素的排放影响进行分解。下文将分别对如上4个模型和LMDI方法进行介绍。

(二)模型基本框架介绍

本研究所采用的中国—全球能源模型(C-GEM)作为宏观经济模型能够表达经济社会环境约束下的能源发展目标,主要用于模拟实现不同碳减排目标所需的能源经济系统转型路径,评估所需的政策干预力度。

中国可再生能源电力规划及运行模型(REPO)是反映中国电力系统运行特征和省际差异的分省电力系统规划模型,以最小化电力系统贴现成本为优化目标,能够得出满足约束条件下各类发电技术在各省各模拟年份的装机、发电量、省间传输线容量和碳排放等结果(Yang et al.,2018;熊威明,2016)。不同情景下,C-GEM将所模拟的全国电力需求和碳价水平反馈至REPO模型,REPO模型以上述指标为输入模拟得到电力结构并反馈给C-GEM,后者以此校核模型电力结构并得到新的电力需求和碳价,重新反馈至REPO模型;通过多次迭代校验,最终使得两模型电力结构、电力需求和碳价基本一致。

中国分省道路交通能耗和温室气体排放模型(CPREG)细致刻画了多种交通技术,通过外生的宏观经济、社会发展指标以及广义交通成本,采用弹性的方法预测中国未来客货运服务需求,运用离散选择的方法计算未来各种交通技术所承担的交通服务份额,并测算能耗及温室气体排放情况(Peng et al.,2018)。模型校验过程中,C-GEM将根据不同碳排放约束下CPREG模型的研究结果对电动车发展规模进行校核,保证两个模型交通部门的用能规模与结构,尤其是电气化水平基本一致。

中国建筑用能模型(CBEM)以大量统计、调研与实测数据为基础,构建了中国的典型建筑库;基于建筑全性能仿真平台,得到不同气象条件、建筑本体、设备性能及行为模式下的建筑全性能情况(能耗、碳排放、污染物、室内环境);基于多源数据分析得到不同典型建筑在我国的整体分布情况,从而获得我国建筑用能现状与历史。CBEM通过文献分析与趋势判断,研究不同驱动因素在不同假设下如何变化,从而得到不同情景下的建筑部门发展情况(Guo et al.,2021)。模型校验过程中,基于CBEM在不同碳排放与能源需求约束下的模拟结果,校核C-GEM建筑部门的用能规模,确保最终两个模型的排放轨迹、用能规模与结构协调一致。

以下对C-GEM、REPO、CPREG、CBEM的模型原理进行详细介绍。

(三)中国—全球能源模型(C-GEM)

C-GEM是一个全球多区域、多部门、可计算的一般均衡(Computable General Equilibrium,CGE)模型,由清华大学和麻省理工学院基于中国能源与气候项目(China Energy and Climate Project,CECP)合作开发。该模型主要用于模拟能源与气候政策对于经济、产业、贸易、能源以及二氧化碳排放的影响(Qi et al.,2014;翁玉艳,2018)。

C-GEM是一般均衡理论的模型化表达,可以有效地表述经济系统与能源系统之间的关联关系与相互影响。生产者通过要素投入和中间产品投入,在一定的技术条件下生产出国内最终产品,其中一部分作为国内供给进入国内产品市场满足国内需求,另一部分出口到国际市场。国内商品总需求除了来自国内供给,还有一部分来自进口。居民和政府等消费者通过要素出售和税收最终获得可支配收入,在满足自身消费的同时,将一部分收入分配为储蓄,并进而作为投资,最终共同满足国内总需求。能源投入作为中间投入的一部分、碳排放权也作为一种稀缺投入要素进入生产环节,从而将经济系统和能源系统有机联系起来。在完全竞争市场假设下,生产者在生产技术一定的条件下,通过成本最小化追求利润最大化;消费者在收入水平一定的条件下,通过偏好选择实现其效用最大化;国内产品和进出口商品在总产出水平一定的条件下,通过价格机制实现销售收益最大化;要素的供给和需求在生产过程中实现其最优化配置。

C-GEM中,除原油外,不同来源地的商品和服务通过Armington假设(Armington,1969)来区分,国内供给与进口通过CES函数聚合形成国内商品总供给。模型采用新古典主义宏观闭合,内生决定所有产品和要素的价格。模型以通用数学建模系统(General Algebraic Modeling System,GAMS)为开发平台(Rosenthal,2012),使用一般均衡数学规划系统(Mathematical Programming System General Equilibrium,MPSGE)进行编译,并通过PATH求解器求解(Brooke et al.,1992)。

C-GEM涵盖全球17个区域(见附表1)、19个经济部门和2个消费部门(见附表2)。模型采用GTAP 10数据库作为基础数据库,以2014年为基年,并根据世界银行、国际能源署与国家统计局发布的相关数据将我国和主要国家及地区的能源经济数据校核至2018年,随后从2020年起以5年为一个周期运行到2060年。本文将重点说明C-GEM的生产、消费函数及中国经济结构调整刻画。

附表1 C-GEM区域划分

国家/地区	国家/地区
中国	美国
东南亚地区	欧盟
俄罗斯	日本
韩国	加拿大
中东	澳洲
印度	巴西

南非	墨西哥
非洲其他地区	亚洲及欧洲其他地区
拉丁美洲其他地区	

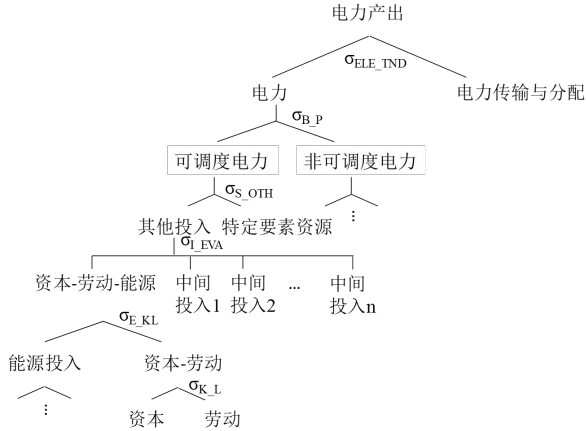
附表 2 C-GEM 区域划分		
种类	部门	描述
农业部门	农业(AGR)	农林牧渔业
能源生产部门	煤炭(COAL)	煤炭开采和洗选业
	原油(OIL)	石油开采业
	天然气(GAS)	天然气开采业
	电力(ELEC)	电力、热力生产与供应业
高耗能部门	成品油(ROIL)	石油加工业
	非金属(NMM)	非金属矿物制品业
	钢铁(I_S)	黑色金属冶炼及压延业
	有色金属(NFM)	有色金属冶炼及压延业
	化工(CRP)	化学原料与制品、化学纤维等制造业
其他工业部门	食品加工业(FOOD)	食品、烟酒、烟草等制造业
	采矿业(MINE)	矿物采选业
	电力装备制造业(EEQ)	电力装备制造业
	交通装备制造业(TEQ)	交通装备制造业
	服装制造业(TWL)	纺织、皮革、毛皮等加工制造业
	其他工业(OTHR)	其他工业
建筑部门	建筑业(CNS)	建筑制造业
服务部门	交通运输业(TRAN)	交通运输业
	公共服务业(SER)	商业和公共服务业等其他服务业
消费部门	政府消费(GOV)	政府消费
	家庭消费(HH)	居民消费

1.生产和消费函数

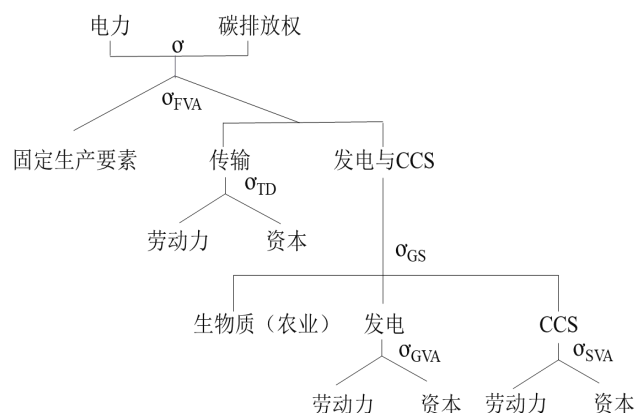
(1)生产函数。

C-GEM采用嵌套的CES生产函数刻画生产部门的生产活动。根据不同部门生产投入结构的差异,可以将生产活动分为六大类:(1)化石能源生产(COAL、OIL、GAS);(2)电力生产(ELEC);(3)成品油生产(ROIL);(4)其他高耗能工业生产(NMM、I_S、NFM、CRP);(5)农业生产(AGR);(6)其他生产活动(FOOD、MINE、EEQ、TEQ、TWL、OTHR、CNS、TRAN、SER)。

目前随着可再生能源电力的发展,全球进入加速电气化时代。电力系统在未来能源生产和消费中将发挥越来越关键的作用,电力系统的内部结构调整和技术进步加快。这不仅包括化石能源电力和非化石能源电力间的替代,也包括不同发电技术之间由于技术进步所带来的竞争。因此,模型对电力生产部门进行了更为细致的刻画。C-GEM将电力部门生产函数中的能源投入根据电源种类进行了区分,将煤电、气电、水电、核电和生物质发电归入可调度电源,风电和太阳能发电归入非可调度电源,电力部门生产函数结构如附图2所示。因此,模型重点刻画了可再生能源技术和生物质发电及碳捕集封存技术(BECCS)、空气直接碳捕集(DAC)、钢铁CCS、煤电CCS等多种CCS技术(Huang et al., 2020; Zhang et al., 2015; Qi et al., 2014)。其中,BECCS技术生产函数结构如附图3所示。此外,模型通过动态调整主要部门电力与化石能源间的替代弹性来刻画我国未来电气化进程。



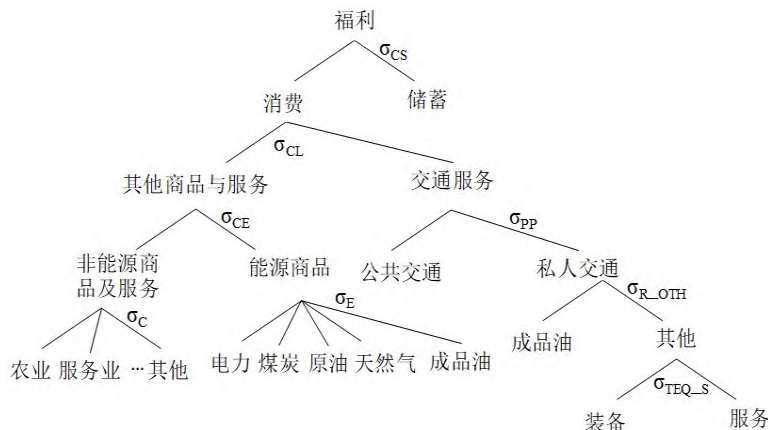
附图 2 C-GEM 中电力部门生产函数的嵌套结构



附图3 C-GEM中BECCS技术生产函数的嵌套结构

(2)消费函数。

消费函数与生产函数类似,均是采用嵌套的常替代弹性(CES)函数进行表达,用以刻画消费者偏好。如附图4所示,假设每一期的储蓄率为外生的固定值(外生假设相关讨论见下一小节),消费和储蓄在嵌套结构中最顶层中的替代弹性取为1。



附图4 C-GEM中消费函数的嵌套结构

2. 中国经济结构调整刻画

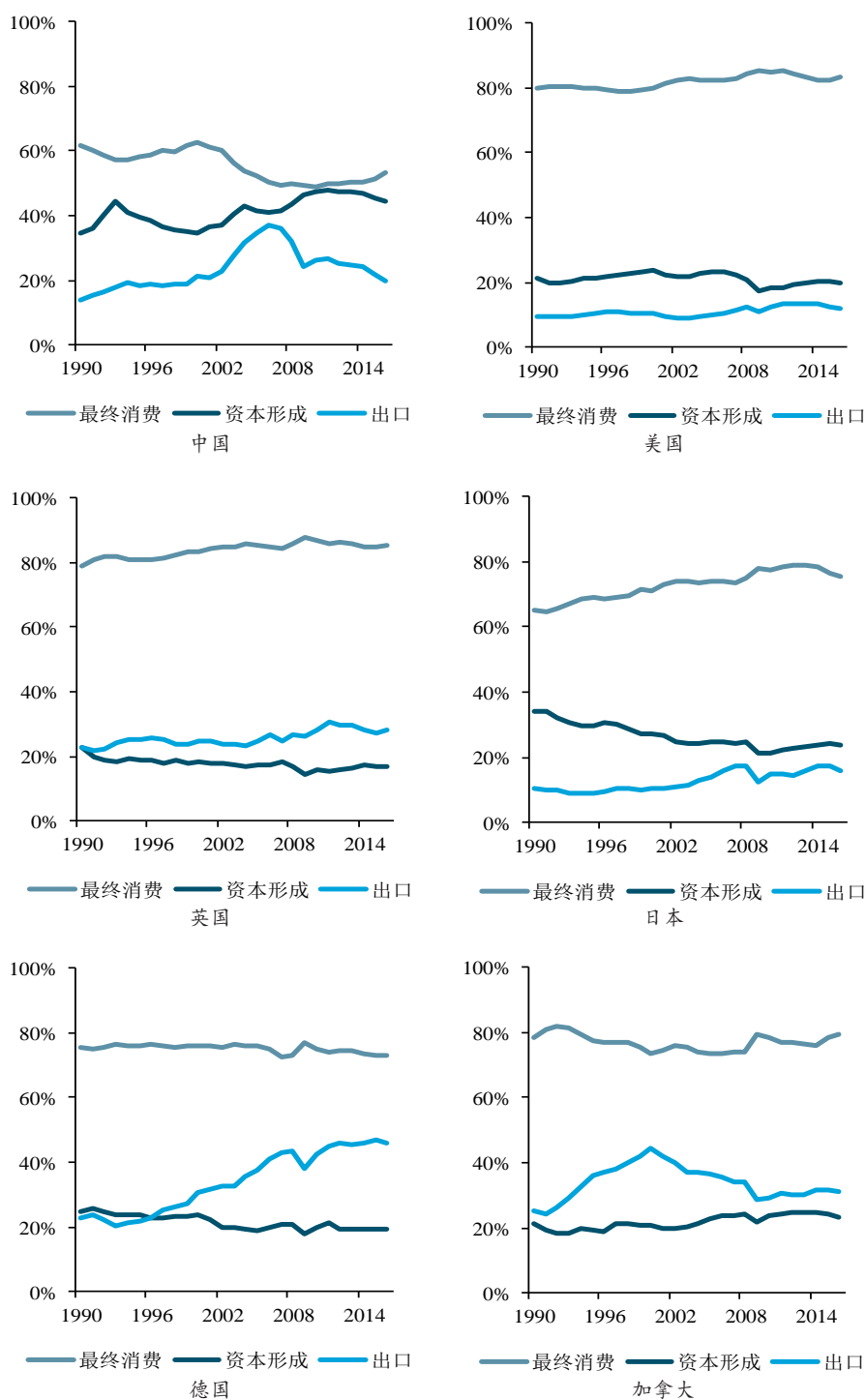
(1)中国经济新常态。

中国正在经历经济增长方式的重大变革。如附图5所示,2000年以来,中国工业化进程逐渐加快,经济高速增长,经济增速逐年上升,最高达到14.2%,之后开始逐渐下降但仍然维持在9%以上。但是,近10年经济增速回落趋势明显,从2010年的10%左右逐步过渡到6%左右,由过去的高速增长转向中高速增长。目前,我国正从过去资源依赖型的增长模式转向价值创造型的可持续发展模式,从“需求侧”和“供给侧”两个方面共同促进中国经济高质量发展。“需求侧”重点是要扩大消费,降低投资,同时调整需求结构和投资结构;“供给侧”重点是优化产业结构,既包括产业间的结构比例,也包括产业内部高低附加值产品的优化。

“需求侧”和“供给侧”带来的经济结构变化是影响未来能源消费和二氧化碳排放的关键因素。理论上,在加入合理的有关消费函数、内生增长等设定之后,CGE模型能够自发地模拟未来经济产业结构随收入增长和技术进步的变化,但要完善的对这些特征进行刻画,需要较强的模型结构假设和较高的数据要求。本文借鉴欧盟、日本、美国等国的发展经验,结合中国供给侧结构性改革进程和扩大内需消费等政策措施,对模型动态过程中的生产与消费等结构进行外生动态演变,模拟中国经济转型的特点。

(2)储蓄率分析。

附图5展示了中国和其他5个发达国家(美国、英国、日本、德国和加拿大)最终消费、资本形成和出口占各国GDP的比重。可以看到,发达国家最终消费的比重均在80%及以上,而中国最终消费占比目前仅为50%左右。随着中国步入工业化后期和后工业化阶段,依照发达国家发展趋势,中国最终消费占比将逐渐上升,并且在“扩大内需”的刺激下,消费比例会以更快的速度上升。



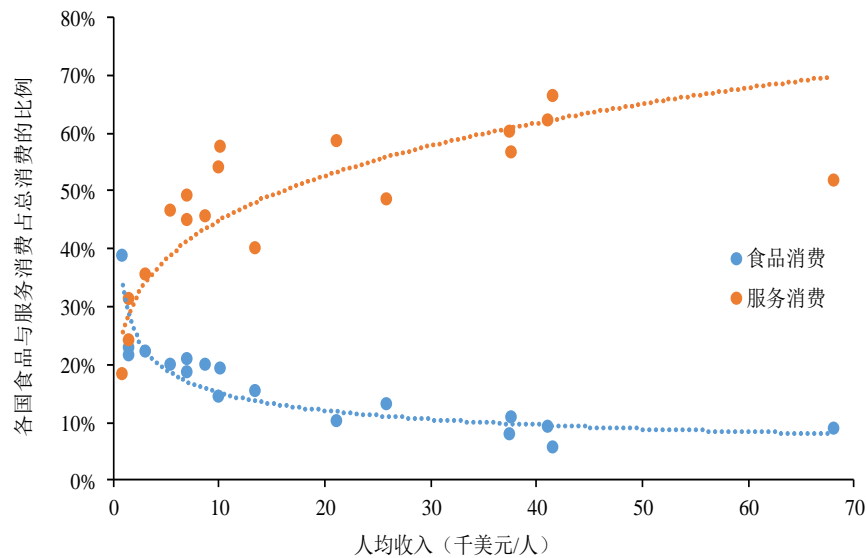
附图5 主要国家最终消费、资本形成和出口比重(世界银行,2017)

模型中储蓄将会被转化为新增投资,因此储蓄率可以决定未来投资与资本供给,进而显著影响一国的经济增长。结合相关研究成果(Zhang et al., 2018; OECD, 2012),借鉴发达国家的储蓄率水平,C-GEM假设中国储蓄率水平将从当前的45%下降到2050年之后的30%左右。

(3)消费与投资结构分析。

伴随着经济的发展和收入的提高,消费结构与投资结构正发生变化。罗斯托和贺力平(1988)将一国的经济发展划分为6个阶段,其中第五到第六阶段的特点是消费结构以耐用品和劳务服务消费为主转向以“提高生活质量”的服务消费为主,例如教育文化、医疗保健和文艺旅游等。附图6展示了现实中美国、欧盟、日本、韩国等国家和地区食品和服务消费与人均收入的关系。从图中可以看出,随着生活和收入水平的提高,人们对于消费的选择将逐渐从以食品、服饰为主的生存型消费向以服务、休闲为主的享受型消费转

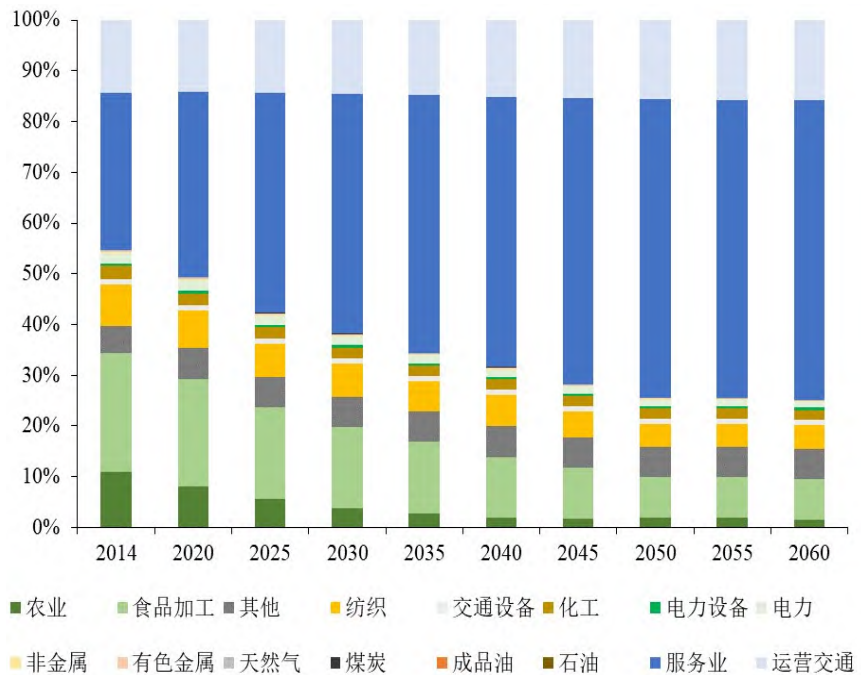
变,消费结构将发生较大的变化。



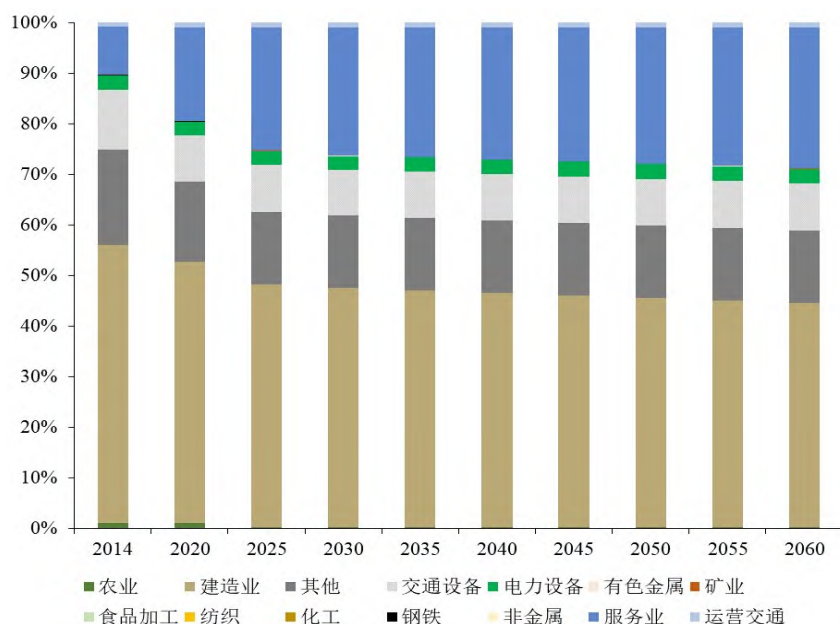
附图6 食品和服务消费与人均收入的关系(Aguiar et al., 2019)

在模型中,借鉴发达国家消费变化趋势,以发达国家当前的平均消费结构作为中国未来消费结构的目标,然后进行趋势外推,从而模拟中国消费结构转变的过程。附图7展示了中国未来消费结构的演变趋势,可以看到,在消费结构中,农产品和食品在消费中的比例大幅降低,而服务品的消费比例大幅增加。

在投资结构演变方面,随着我国工业化基本完成,工业的资本边际效率将随着投资量的增加而递减(Keynes, 1936),服务业对资本的边际报酬相对较高(姚阳, 2013),故而我国未来投资结构将向以现代物流业、软件和信息技术服务业、科学研究和技术服务业、金融业等服务业为主的结构转移。为此,模型参考发达国家的投资结构变化趋势,以其当前的平均投资结构为目标并进行趋势外推,最终模拟中国投资结构转变的过程。如附图8所示,我国未来服务业的投资占比将进一步增大,农业、建筑业、机械装备制造业等部门的投资占比将进一步缩小。



附图7 中国未来消费结构演变趋势



附图8 中国未来投资结构演变趋势

(4)投入产出结构分析。

从“供给侧”角度来看,经济高质量发展重点是要转变生产方式,减少高耗能产品的投入,提高研发投入,扩大服务业等高附加值的投入比重。考虑到我国已实现全面小康社会,大规模基础设施建设基本完成,未来建筑制造业的发展重点将由过去的“大兴大建”转向“建筑改造升级”,即基于已有建筑进行改造以满足需求。如附图9所示,我国目前建筑制造业的高耗能产品投入比美国、欧盟、日本和韩国高17~31个百分点,服务业投入比以上各国低5~28个百分点。参考以上国家的发展趋势,C-GEM假设2060年建筑制造业中的高耗能产品投入占比将下降至24%,服务业投入占比将提升至42%。对于运营交通部门,随着高铁、航空等先进规模化交通技术的发展,该部门所需的工业投入比重将不断下降,包括研发在内的服务产品投入比重将不断提升;由附图9可知,我国当前运营交通部门的投入结构中,服务业占比约为70%,比欧美日韩等国低7~20个百分点,预计在2060年将提升至85%左右。与此同时,随着智能汽车、电动汽车等的发展,未来交通设备制造部门中的技术研发投入将不断提高,服务业的需求将不断扩大,2060年将与欧美水平相当。对于包括机械设备制造在内的其他工业部门,随着产品类型由高耗能产品向高附加值的高科技产品转型,投入结构将不断向欧美等国的结构靠近;2060年,我国服务业投入占比预计将达到33%左右,高耗能产品投入预计将降低至约18%。综上所述,本研究在建模时,基于趋势外推的方法,结合中国高耗能部门“去产能”等政策进程,并参照发达国家在相应阶段的投入产出结构,对中国主要部门的投入产出结构进行动态化调整,外生反映经济快速转型下产业结构的变化。为实现上述目标中间投入结构,模型令各年份主要产业部门的中间投入结构外生等于目标结构。

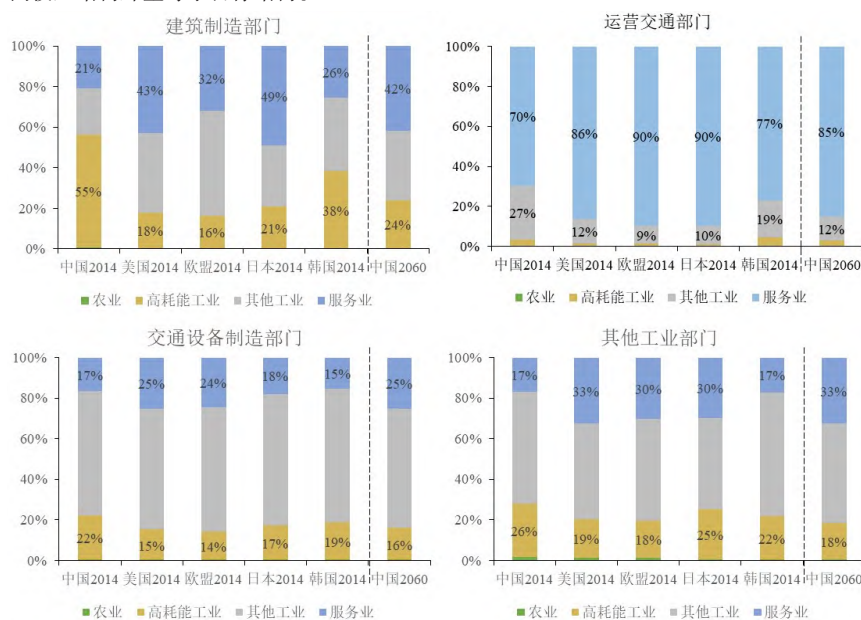
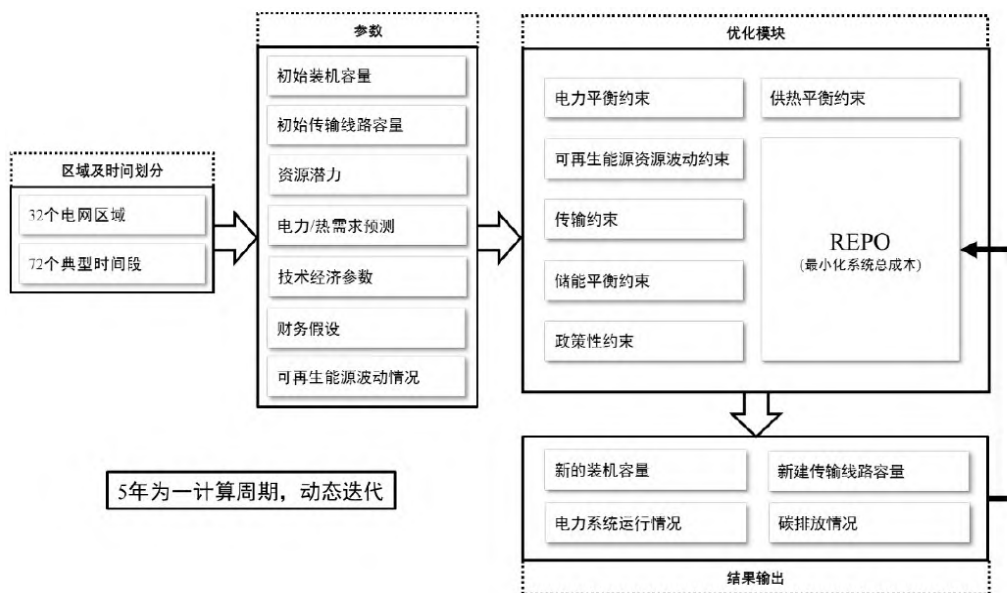


图9 中国、美国、欧盟、日本与韩国的主要部门投入产出结构

(四)中国可再生能源电力规划及运行模型(REPO)

中国可再生能源电力规划及运行模型(REPO)由清华大学能源环境经济研究所基于丹麦科技大学 Balmorel 模型平台(Ravn et al., 2001),结合中国省级电力负荷曲线、电力需求、电力传输网络、现有发电技术装机分布和地理信息系统所评估的可再生能源资源潜力和小时级别发电的波动情况进行了深度二次开发,形成更新的模型框架如附图 10 所示。该模型反映了中国电力系统运行特征和省际差异,可用于模拟中国当前或未来的低碳减排技术、政策措施对电源结构、电量传输、系统运行、可再生电力消纳、碳排放、电力价格等的影响,已被用于研究灵活区域供热、特高压输电技术和电力市场改革对于中国电力系统的影响(Xiong et al., 2016; Yang et al., 2018)。

REPO 模型是高时空分辨率的电力系统优化模型。在时间尺度方面,该模型以 2015 年为基年,随后以 5 年为一个时间周期,并动态迭代优化至 2060 年;同时,在每一个优化年中可模拟电力部门 8760 小时的电源分布、系统运行、电力跨省传输等情况,主要输出包括每个模拟年的新建发电机组容量、输电容量、系统成本、电力价格等相关预测。在空间方面,结合了地理信息系统(Geographic Information System, GIS)对风力资源进行了栅格化的评估,进而获得了省级可再生能源资源开发潜力。模型目前涵盖了 57 种发电技术,2 种储能技术以及 16 种燃料路线。REPO 模型为线性规划问题,在 GAMS 平台进行编译,采用 CPLEX 求解器进行优化求解。



附图 10 REPO 模型框架

1. 区域及时间划分

REPO 模型包含了我国除香港、澳门、台湾外的所有省份。此外,按照电网结构,将内蒙古进一步划分为蒙东电网(国家电网蒙东公司)和蒙西电网。因此,REPO 模型中共包含了 32 个省级区域电网。为了描绘区域级别低碳减排技术、政策约束的影响,REPO 模型将省级区域电网划分为东北电网区域(黑龙江、吉林、辽宁、蒙东),西北电网区域(陕西、甘肃、宁夏、新疆、西藏),华北电网区域(河北、北京、天津、山西、山东、蒙西),华东电网区域(上海、江苏、安徽、福建、浙江),华中电网区域(湖北、湖南、江西、重庆、四川、河南)以及南方电网区域(广东、广西、贵州、海南、云南)。需要说明的是,虽然西藏、海南电网相对独立,但为了进行简化处理,分别将其归入西北电网和南方电网。

由于 REPO 模型为多区域模型,假设电力可在 32 个省市及区域间进行输送,内生变量多且计算维度大,受计算能力条件限制,本模型取 72 个典型时段代表全年电力运行情况,相应时段内的负荷和可再生能源出力情况取该时段的加权平均值。

2. 发电及输电技术

REPO 模型根据实际数据刻画了我国电力部门在役机组的构成情况,并合理模拟了我国发电技术的发展进步趋势。REPO 模型基于 2015 年和 2020 年电力部门统计资料,对分省、分技术的现有装机容量进行校核。依照不同的燃料投入,将发电技术划分为七大类,包括燃煤机组、燃气机组、核机组、水电机组、风电机组、太阳能发电机组以及生物质发电机组。为了尽可能准确地对各个发电机组的技术细节进行刻画表达,模型对用不同燃料的发电技术进行了二次划分,如将燃煤机组进一步划分为循环流化床、高压、亚临界 300MW 级、亚临界 600MW 级、超临界 300MW 级、超临界 600MW 级、超超临界等七类机组。为了能够表达可再生能源的波动性以及不确定性,REPO 模型中对可再生发电技术进行了进一步的区分,如将风电划分为陆上风电和海上风电,将水电划分为径流式水电和水库式水电。除此之外,本研究假设不同的发电技术会随时间有所进步,因此 REPO 模型将根据技术发展阶段动态调整技术经济参数。

在输电线路方面,REPO 模型以电源规划扩张为主要优化对象,对输电线路进行了简化处理,假设不同省份通过输电线路连接,省间电量传输受传输容量上限的约束,传输可双向进行。由于 REPO 模型是省级电力部门优化模型,新建装机只在省级层面进行优化,因此并未考虑省内的传输容量限制,仅描述省内传输的线损。

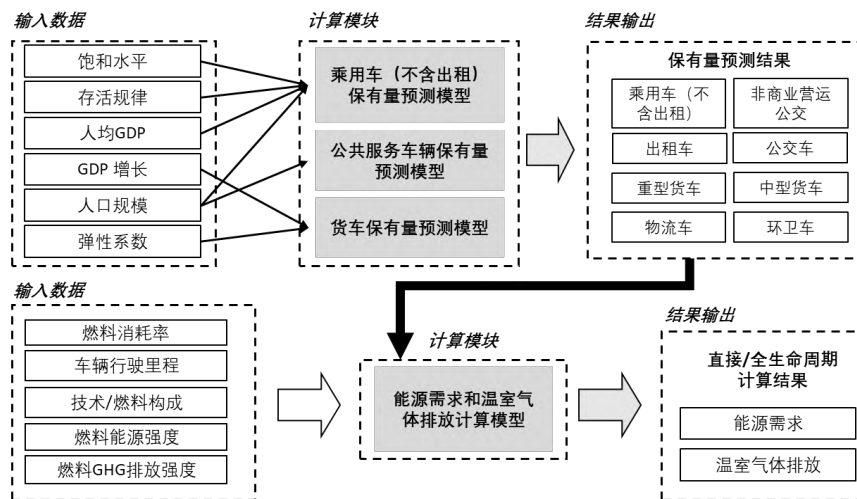
3. 目标与主要约束

REPO 模型以最小化电力系统贴现成本为优化目标,能够得出满足约束条件下各类发电技术在相应模拟年份的各省装机和发电量、省间输电线路容量和碳排放等结果。

模型考虑的约束主要有电力供需平衡约束、机组出力约束、可再生能源出力约束、区域间电力传输约束、机组组合约束等。电力供需平衡约束保证电力供需实时平衡,即每个时刻每个地区的电力生产加上电力净进口加上储能净放电等于该地区电力需求和电力损失。机组出力约束保证机组出力不超过装机限制,即对每个地区每种技术在每时刻的出力均不能超过其装机。对于可再生能源,其出力除了受到装机约束外还受到每时刻可再生能源资源约束,可再生能源出力约束刻画了可再生能源出力受到资源限制,即对某地区每种可再生能源,每时刻出力不超过其该地装机、该种可再生能源在该地年最大利用小时数、该时刻资源在全年资源中占比三者的乘积。区域间电力传输约束给出了两个区域间电力传输的限制,即每时刻两个地区间交换电量不超过两个地区间传输容量。机组组合约束包括运行机组约束、向上调峰约束和向下调峰约束三部分,运行机组约束描述了机组在线数量、关停机组数量和启动机组数量在相邻时间之间的平衡;向上调峰约束描述了机组向上调峰过程中,任一时刻向上调峰的限制小于在线机组减去启动机组的数量与向上调峰出力限制率的乘积加上启动机组的最小出力;向下调峰约束描述了在机组向下调峰的过程中,任一时刻向下调峰的限制小于在线机组容量与向下调峰出力限制率的乘积。

(五)中国分省道路交通能耗和温室气体排放模型(CPREG)

中国分省道路交通能耗和温室气体排放模型(CPREG)根据车辆载重、尺寸和服务属性等对车辆进行细分,研究尺度从全国细化到各省区。基于Gompertz曲线、弹性系数等方法建立起不同车型与相应增长驱动因素之间关系,实现汽车保有量未来规模预测。结合未来汽车技术构成、燃料消耗率和行驶里程等详细刻画,对未来中国分省的车用能源需求和温室气体排放进行了分析,实现对不同发展政策情景下天然气汽车、新能源汽车和替代性液体燃料的车用成品油替代和温室气体减排效果的评估。CPREG模型的分析框架如附图11所示。



附图11 CPREG模型框架

本节将详细介绍乘用车、公共服务车辆和货物运输车辆的未来保有量、汽车存量更新、道路交通能源消费和温室气体(GHG)排放的预测方法。

1. 车辆保有量预测

(1)乘用车保有量预测。

历史经验表明,一个国家和地区的乘用车保有量水平与社会经济发展程度、人口密度和城镇化水平密切相关,大量的研究已经针对不同的保有量驱动因素如收入分配(刘志超,2013;Dargay,1999)和车辆价格变动(Hao et al.,2011)等开展了分析,发展了多种预测汽车保有量的方法,如Logistics模型、神经网络法、计量经济学模型及Gompertz模型等(张茜,2018;Wu et al.,2014;Huo and Wang,2012)。本文利用Gompertz模型对未来乘用车保有量进行预测,该模型将人均汽车保有量(以每千人的车辆拥有数量表示)与人均GDP进行关联,两者关系近似呈“S型”曲线的形状,也称Gompertz曲线。相对于其他方法,该模型原理简单,所需的输入数据较少,数据要求相对较低,可以有效避免中国当前相关统计数据的缺乏所带来的不确定性,并且可以在不同的汽车千人拥有量饱和水平下,灵活地进行情景分析。

Gompertz模型是一种具有饱和值的三参数模型,通过估算中国各省份的人均GDP和千人汽车拥有量饱和水平,可以预测目标年度千人乘用车拥有水平,计算原理如下所示:

$$VS_{x,t} = VS_x e^{\frac{PGDP_{x,t}}{PGDP_{x,t-1}}} \quad (1)$$

上式中 $VS_{x,t}$ 表示第 t 年省份 x 的千人乘用车保有量(辆/千人); VS_x 表示省份 x 的千人乘用车保有量饱和值(辆/千人); α 和 β 分别为Gompertz曲线的两个参数; $PGDP_{x,t}$ 表示第 t 年省份 x 的人均GDP值。 VS_x 、 α 、 β 根据该省区相关指标,参照国际经验进行设定。

将千人乘用车拥有水平 $VS_{x,t}$ 乘以当年人口规模,可获得目标年份乘用车保有量,如下式所示:

$$VS_{x,t} = VS_x \cdot P_{x,t} \quad (2)$$

其中, s 表示汽车类型, $s=1,2,\dots,8$ 分别表示乘用车、出租车、营运公交车、非商业营运客车、重型货车、中型货车、轻型物流货车和环卫车; $VS_{x,t,s}$ 表示第 t 年省份 x 的汽车类型 s 保有量,此处 $s=1$,代表乘用车; $P_{x,t}$ 表示第 t 年省份 x 的人口规模。

利用Gompertz曲线预测乘用车存量的最大挑战是GDP预测和饱和度水平估计的准确性。值得注意的是,中国目前的发展情形正处于Gompertz曲线的初级阶段,这可能会给长期预测带来一定的不确定性。

(2)公共服务车辆保有量预测。

公共服务车辆的未来保有量是通过不同的增长潜力或驱动力的判断进行估计的。出租车、营运公交车、非营运客车和环卫车

主要为满足人们的公共出行和生活提供服务,本研究假设公共服务车辆的千人拥有量随着时间呈线性增长,该线性系数通过对历史数据进行线性回归获得。每类车型的保有量是千人拥有量与人口的乘积。人口规模、城镇化率达到一定程度时,公共服务车辆的千人拥有量将达到饱和。当前,北京公共服务车辆的千人拥有量近些年已经基本接近饱和,个别年份甚至有所下降。因此,我们假设这些车型在其他省份的千人拥有量不会超过北京当前水平。具体计算公式与公式(1)和(2)类似,此处不再详细介绍。

(3)货物运输车辆保有量预测。

一个国家或地区的大型货运汽车的保有量主要和经济发展程度相关。国际经验表明,当一个国家完成工业化和城镇化,大型客运汽车和货运汽车的保有量将达到饱和,因此可在其他研究机构对未来我国GDP的增长情况的预测的基础上,采用弹性系数法(Dargay, 2007; Hao et al., 2011; Dargay, 1999)对大型客车和货车的保有量进行预测,计算方法如公式(3)和(4)所示:

$$VS_{x,t,s} = VS_{x,t-1,s} \cdot (1 + \Delta GR_GDP_{x,t} \cdot E_{x,t,s}) \quad (3)$$

$$E_{x,t,s} = \frac{\Delta GR_VS_{x,t,s}}{\Delta GR_GDP_{x,t}} \quad (4)$$

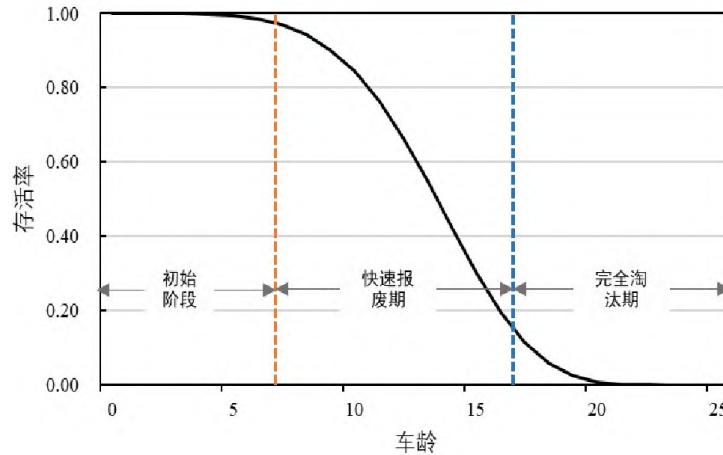
上式中 $VS_{x,t-1,s}$ 表示 x 省在 $t-1$ 年份的车辆类型 s 的保有量; $\Delta GR_GDP_{x,t}$ 表示 x 省在 t 年份的GDP增长率; $E_{x,t,s}$ 表示 x 省在 t 年份的车辆类型 s 保有量对其GDP的弹性; $\Delta GR_VS_{x,t,s}$ 表示 x 省在 t 年份的车辆类型 s 保有量增长率。

2. 汽车存量更新预测

本研究通过引入汽车存活规律曲线对未来汽车存量更新和车龄保有结构进行分析,并建立保有量与销售量之间的关联。汽车在市场上的存量更新用存活率 S_{x,t,s,t_1} 表征,其含义是省份 x 在 t_1 年份销售到市场上的汽车类型 s 到 t 年仍然存活(即仍在使用)比例,该存活规律呈倒“S型”曲线分布,通常采用Weibull函数(清华大学中国车用能源研究中心, 2012; Hao et al., 2011)进行刻画,并根据具体车辆特征对其进行修正,如下公式所示:

$$S_{x,t,s,t_1} = \exp\left[-\left(\frac{t-t_1}{T_s}\right)^{P_s}\right] \quad (5)$$

上式中 T_s 和 P_s 为曲线的特征参数,决定曲线的形状,由车辆技术、市场特点、用户特征等因素综合决定,可以通过大数据分析获得。本研究参考 Han 等(2011)关于中国汽车存活规律的研究成果对不同车辆类型 s 的 T_s 和 P_s 进行设定,该文献基于市场调查以及对官方统计的历史车辆销售、报废和登记数据梳理,在对 Weibull 函数进行修正的基础上,对中国的乘用车、公交车、各类货车的存活规律进行了建模分析,以乘用车为例进行说明,其 T_s 和 P_s 的取值分别为 14.16 和 4.79,其结果如附图 12 所示,其他车辆类型的 T_s 和 P_s 取值见相关文献(清华大学中国车用能源研究中心, 2012)。



附图 12 乘用车存活曲线

在车辆进入市场后的最初几年,车辆存活率保持在接近 1 的水平,然后开始迅速下降,进入快速报废期,在最后完全淘汰阶段,几乎所有的私人乘用车都退出市场,存活率下降到零。由于不同省份的驾驶条件、使用强度和车辆管理的不同,车辆的存活模式也会有所不同。然而,在中国大部分省份并没有关于车辆存活率的详细统计数据,其存活规律省际差异很难区分。因此,本研究假定所有省份汽车存活规律与全国水平相同。需要注意的是,鉴于传统内燃机汽车与电动汽车在动力系统上的差异(例如电池的退化速度快于发动机),两者的存活特征曲线并不相同,但就目前而言,由于电动汽车大规模进入市场应用年限并不长,缺乏相关统计数据,无法对其进行科学细致的刻画,因此本研究假设电动汽车存活规律与传统内燃机汽车相同,对动力电池的预测采用关键资源需求预测模型的研究结果。

t 年份的车辆类型 s 保有量是历年销售到市场上的车辆到 t 年仍然存活的数量的加总,如下式所示:

$$VS_{x,t,s} = \sum_{t_1 \leq t} (Sale_{x,t_1,s} \cdot S_{x,t,s,t_1}) \quad (6)$$

上式中 $Sale_{x,t_1,s}$ 表示 x 省在 t_1 年份的车辆类型 s 的销售量。通过公式(6)的逆运算可以计算 x 省在 t 年份的车辆类型 s 的销售量 $Sale_{x,t,s}$, 公式如下:

$$Sale_{x,t,s} = VS_{x,t,s} - \sum_{t_1 \leq t-1} (Sale_{x,t_1,s} \cdot S_{x,t,s,t_1}) \quad (7)$$

而后,结合不同情景下车辆技术 y ($y=1, 2, 3, 4$ 分别表示传统内燃机汽车,纯电动汽车,插电式混合动力汽车和燃料电池汽车)的市场份额,与总的车辆类型 s 的销量相乘,可以获得车辆类型 s 中车辆技术 y 的年销量,而后参考公式(6)即可获得车辆类型 s 中车辆技术 y 的保有量,计算方法如公式(8)和(9)所示:

$$Sale_{s,t,s,y} = Sale_{s,t,s} \cdot SH_{s,t,s,y} \quad (8)$$

$$VS_{s,t,s,y} = \sum_{t_i \in t} (Sale_{s,t_i,s,y} \cdot S_{s,t_i,s,y}) \quad (9)$$

上式中 $Sale_{s,t,s,y}$ 表示 x 省在 t 年份的车辆类型 s 中车辆技术 y 的销售量; $SH_{s,t,s,y}$ 表示车辆类型 s 中该车辆技术市场份额; $VS_{s,t,s,y}$ 表示 x 省在 t 年份的车辆类型 s 中车辆技术 y 的保有量。整个中国市场中车辆技术 y 的销量和保有量是各车辆类型中该车辆技术数量的加总,如公式(10)和(11)所示:

$$Sale_{t,y} = \sum_s \sum_{s'} Sale_{s,t,s,y} \quad (10)$$

$$VS_{t,y} = \sum_s \sum_{s'} VS_{s,t,s,y} \quad (11)$$

同理,整个中国市场中车辆类型 s 的销量 $Sale_{t,s}$ 和保有量 $VS_{t,s}$,计算原理可参考公式(10)和(11)。

需要指出的是,在实际应用模型时,为便于分析,往往乘用车不同车辆技术的保有量和销售量结构通过车辆生存规律计算,客车和货车等商用车则以政策导向为基础,参考相关研究报告通过时间序列对未来市场结构直接设定(中国汽车技术研究中心,2018)。

3. 能源需求和 GHG 排放预测

基于汽车保有量预测结果,结合不同情景下车辆技术和燃料类型结构,与平均燃料消耗率和平均车辆行驶里程相乘,实现对中国道路交通能源消费总量的测算,如下式所示:

$$EN_{t,w} = \sum_s \sum_{s'} (VS_{s,t,s} \cdot FCR_{s,t,s,w} \cdot L_{s,t,s} \cdot SH_{s,t,s,w}) \quad (12)$$

公式中 $EN_{t,w}$ 为中国道路交通部门燃料 w 需求总量; $FCR_{s,t,s,w}$ 为 t 年份 x 省的车辆类型 s 燃烧使用燃料 w 时的燃料消耗率; $L_{s,t,s}$ 为 t 年份 x 省的车辆类型 s 的平均年行驶距离; $SH_{s,t,s,w}$ 为 t 年份 x 省的车辆类型 s 中燃烧使用燃料 w 的比例。中国道路交通部门直接 GHG 排放指的是汽车燃料周期运行阶段所产生的 GHG 排放,它是不同燃料消耗量与对应 GHG 排放系数乘积之和,如公式(13)所示:

$$GHG_{t,w} = \sum_s \sum_{s'} (VS_{s,t,s} \cdot FCR_{s,t,s,w} \cdot L_{s,t,s} \cdot SH_{s,t,s,w} \cdot EF_w) \quad (13)$$

公式中 $GHG_{t,w}$ 为 t 年份中国道路交通部门燃烧使用燃料 w 带来的直接 GHG 排放; EF_w 为车用燃料 w 的直接排放系数,车辆运行阶段所排尾气中的 GHG 只考虑 CO_2 ,其他 GHG 类型对整体结果影响不大。 EF_w 通过碳平衡公式计算。

中国道路交通部门能源需求总量 EN_t 和直接 GHG 排放总量 GHG_t 为各类燃料结果之和,如公式(14)和(15)所示:

$$EN_t = \sum_w EN_{t,w} \quad (14)$$

$$GHG_t = \sum_w GHG_{t,w} \quad (15)$$

确定能源需求总量和直接 GHG 排放后,包括资源开发和运输、燃料生产和运输以及燃料利用在内的整个汽车燃料周期阶段的化石能源消耗和 GHG 排放可以使用以下公式计算:

$$PE_{LC,t} = \sum_w (EN_{t,w} \cdot PE_{LC,w}) \quad (16)$$

$$GHG_{LC,t} = \sum_w (EN_{t,w} \cdot GHG_{LC,w}) \quad (17)$$

其中, $PE_{LC,t}$ 为 t 年份中国道路交通部门全生命周期化石能源消耗; $GHG_{LC,t}$ 为 t 年份全生命周期 GHG 排放; $EN_{t,w}$ 为 t 年份中国道路交通部门燃料 w 消耗总量; $PE_{LC,w}$ 和 $GHG_{LC,w}$ 分别为车用燃料 w 的全生命周期化石能源消耗和 GHG 排放强度系数。

(六) 中国建筑用能模型(CBEM)

本研究采用中国建筑用能模型(CBEM)(Guo et al., 2021)对建筑部门的情景分析进行验证。

1. 模型框架与主要输入

CBEM 由清华大学建筑节能研究中心(Building Energy Research Center of Tsinghua University, 下文简称 BERC)自 2006 年开发,主要用于分析与核算我国建筑用能和碳排放(杨秀, 2009)。

考虑到我国南北地区冬季采暖方式、城乡建筑形式和生活方式,以及居住建筑和公共建筑中人员活动及用能设备特征的差别,CBEM 将我国的建筑用能分为北方城镇供暖用能(Northern Urban Heating, 下简称 NUH)、公共建筑用能(不包括北方城镇供暖,下简称“除 NUH”)、城镇住宅用能(除 NUH),以及农村住宅用能 4 类。CBEM 共包含 5 个核心计算模块:建筑规模、北方城镇供暖、公共建筑(除 NUH)、城镇住宅(除 NUH)、农村住宅。各个模块根据自身特征确定更细的分项分别测算,其分类结构如附图 13 所示。该模型中的建筑运行能耗与碳排放由活动因子与用能/碳排放强度相乘得到。活动因子主要由人口结构与建筑规模决定,其中,人口结构参考其他研究成果,建筑规模与 4 个主要用能分项的能耗强度由模型测算得到。基于此,模型的主要框架为:通过输入主要的社会经济发展宏观参数(人口、户数、GDP 等)、建筑能耗影响因素信息以及采集得到的能耗、碳排放与室内环境数据,测算得到建筑规模以及各用能分项的能耗强度,从而获得不同建筑类型、气候分区、用能分项、能源品种等的建筑能耗与碳排放情况,为我国建筑用能特征的具体分析提供数据支撑。



附图 13 CBEM 各计算模块的分类结构

CBEM的输入从内容上主要包括三部分:社会经济发展宏观参数、建筑能耗的影响因素情况(建筑性能、室外气象、设备系统、行为模式)以及采集到的能耗与碳排放数据。从获取方法来看,则可以分为由统计资料与相关文献获取、问卷调查与实际案例测试、大规模数据采集3类。其中,对于统计资料与相关文献,在定义、口径等一致的前提下,如果相关统计资料或质量有所保证的研究成果可以提供相关数据,CBEM优先使用这类数据。对于问卷调查与实际案例测试,BERC自2007年起持续开展了大量问卷调查与案例测试;这些调研与测试积累了大量微观数据,给出了不同影响因素的分布情况以及实际的能耗情况,为确定模型中不同用能模式下的分布与典型能耗强度提供了重要参考(清华大学建筑节能研究中心,2016)。对于大规模数据采集,随着近年来我国数据统计制度的不断完善以及数据获取方式的不断进步,获取大规模能耗或相关信息的数据采集途径增多;CBEM基于上述途径获得的数据分析各种用能方式的现状并对研究结果进行校核。

2. 能耗强度的测算方法

CBEM的重要特点在于其对能耗强度的测算考虑了多种因素的耦合影响。研究表明,建筑能耗强度受到室外气象、建筑性能、设备系统以及用户行为模式的共同相互影响(Yoshino et al., 2017)。然而在大多数已有研究中,以上因素对建筑能耗的影响是相对独立的,使得测算结果与实际情况产生偏差(Hu et al., 2016)。举例来说,由于反弹效应的存在,能效提升往往伴随着能源消费的增长,因此能耗总量的变化与能效提升的比例存在较大差别(Hargreaves, 2011)。因此,为了有效分析不同政策与技术对建筑用能的影响,模型中添加了基于技术和行为分布的模块(Technology, Behavior and Building Performance, TBP)(彭琛, 2014),用以详细刻画上述因素对能耗的耦合影响。

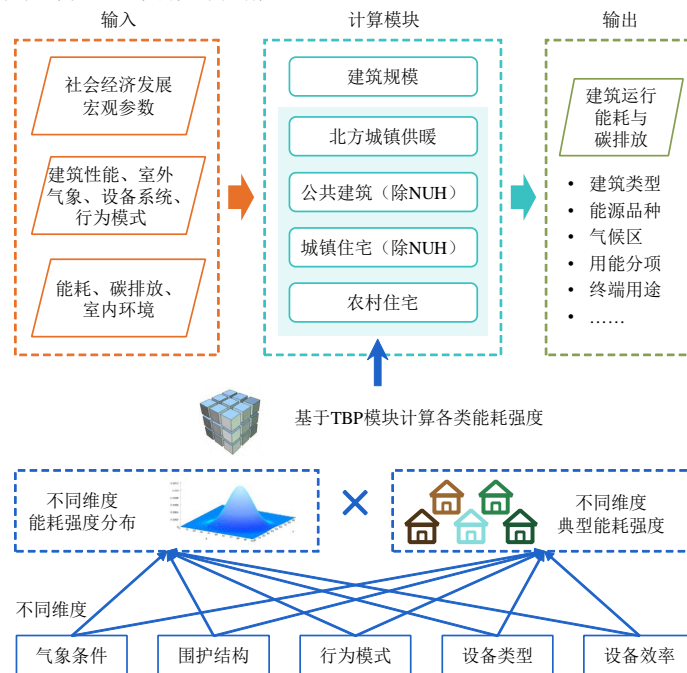
TBP模块可分为两部分:典型强度库与典型强度分布。典型强度库中包含了不同维度下的各种典型类型的能耗强度值。目前,模型中包含的维度有气候分区、围护结构、行为模式、设备类型、设备效率。对于各用能项,各维度的分项各不相同,其典型模式/分类基于大规模调研或文献得到。举例来说,研究我国城镇地区住宅建筑空调的模块进行了如下分类:气候分区考虑五大建筑热工气候区(严寒、寒冷、夏热冬冷、夏热冬暖、温和地区);围护结构考虑不同的住宅形式(高层塔楼、高层办公楼、多层建筑、别墅)与不同的围护结构性能(非节能建筑、50%、65%、75%节能建筑、零能耗建筑);行为模式考虑基于问卷得到的不同空调或风扇使用方式,如从不开启、高温才开启、到家立即开启、夏季一直开启等;设备类型考虑无制冷设备、风扇、分体空调、多联机、集中供冷系统;设备效率参考不同设备类型的能效等级或实测数据进行设定。

对于各种不同维度下的典型项(即最小能耗分析单元),其能耗强度由问卷调查、数据采集、案例测试或采用建筑全性能仿真平台DeST(Designer's Simulation Toolkits)模拟得到,其分布由问卷调查或数据采集得到。对不同用能分项,将多维度下的各典型项所对应的能耗强度及其分布占比之积求和,即为这一分项的平均用能强度,如(18)所示。

$$EUI = \sum I_i \times D_i \quad (18)$$

其中 EUI 为用能分项的平均用能强度, I_i 为该用能分项中第 i 种典型项的能耗强度, D_i 为对应的分布。

综上所述,能耗强度测算模块与模型的结构关系如附图14所示。



附图14 能耗强度测算模块与模型结构

3. 能耗预测的措施设定和主要约束

CBEM对建筑能耗的预测充分考虑了与建筑能耗、碳排放直接相关的各项政策的约束。

与建筑能耗、碳排放直接相关的各项政策可分为两大类:一类针对具体措施,比如提升建筑围护结构性能、引导住户行为模式等;一类针对最终能耗或碳排放量,比如总量与强度控制要求、碳市场等。进行测算时,第一类具体措施体现在所对应的分布或参数中,

第二类措施体现在将各项能耗与碳排放总量或强度校核至预期目标,如果未达到预期目标,则再对各项强度或规模等进行调整。主要包括以下几个方面。

(1)建筑用能与碳排放规划。不同的发展目标对应不同的发展路径。本研究将基于C-GEM计算得到的碳中和情景下建筑总能耗与碳排放要求作为约束输入到CBEM。

(2)建筑规模控制。要实现建筑低碳节能发展,建筑规模需控制在合理范围内。本研究认为,碳中和情景下我国将采取新建建筑规模论证等方式,控制我国民用建筑的总体规模。

(3)建筑围护结构性能提升。包括新建建筑标准提升、既有建筑节能改造、农房改造。在碳中和情景下,模型将对不同气候区、建筑类型、新建/既有建筑的围护结构性能进行相应的设置。

(4)北方采暖热源规划。包括城镇与农村建筑采暖两部分。CBEM根据城镇、农村的不同特征,结合情景要求及前文提到的各类约束,进行热源规划。

(5)生活方式引导。我国要实现建筑节能低碳发展,维持绿色节俭的行为模式不可或缺。模型将根据情景需求设定行为模式的分布以及能耗范围。

(6)设备系统优化。包括效率提升、控制策略优化、可调性提升等。传统的设备系统优化仅考虑效率,由于回弹效应,出现了大量“高能耗、高能效”的案例。设备系统不仅要保证效率,更需要切合所服务的生活方式。模型在未来对设备系统进行引导时,将根据生活方式的情况进行优化匹配,以达到节能减排目标。

(7)农村住宅生物质能利用。未来,高效、清洁的生物质利用方式会成为我国建筑用能的组成部分。CBEM将基于C-GEM计算得到的全国能源结构,测算对应的农村生物质利用情况,并校验C-GEM能源结构的合理性。

(8)能源结构调整。包括提升电气化、减少煤炭使用、推广生物质利用等。要实现相关指标,一方面需要依靠前文涉及的北方采暖、农村用能的结构优化,此外也需要调整如城镇住宅与各类公建夏热冬冷地区采暖、炊事、生活热水、消毒等需求的能源结构,最主要为提升电气化水平。

同时,基于建筑部门的用能特征,测算时需考虑以下4个方面的约束:外界资源环境约束、建设/施工的可行性、建筑与设备系统的锁定效应以及行为模式的渐进性。

(1)外界资源环境约束。考虑我国未来能源结构的整体要求,根据情景整体设置,对建筑部门各能源品种占比进行上限或下限约束。北方城镇供暖中,各类热电联产与工业低品位余热资源需要根据相关电厂运行情况与工业生产情况确定。考虑农村居民用能结构变化时,需同时考虑天然气的普及率变化以及生物质资源量。

(2)建设/施工的可行性。建筑与基础设施的建设与修缮都需要建设周期,不会在某一段时间发生超出正常建设速度的变化。CBEM中的建设速度参照实际案例速度,并对建筑规模、既有建筑改造量、集中系统推广速度进行了相应的约束。

(3)建筑与设备系统的锁定效应。当建筑、基础设施一旦建成、系统设备一旦安装,一般会在超过使用寿命后才进行替换,即形成锁定。因此,CBEM对建筑规模、设备占有进行了锁定约束。

(4)行为模式的渐进性。建筑中的行为模式分为两类,一类来自于真正享受建筑服务或供暖的使用者,另一类来自于建筑的运行管理方。对于真正的使用者,在住宅中的空调采暖、开窗照明等行为往往具有较强的“无意识”习惯性,也存在一定的“锁定效应”(Maréchal, 2010)。因此CBEM对空调、采暖、照明等习惯性的行为模式变化率进行渐进性约束设置,避免分布或均值的“突变”。

(七)对数平均迪氏指数(LMDI)法

根据Kaya恒等式(1990),碳排放量的影响因素可分解为经济发展、能效提升、能源结构优化(可进一步区分为非化石能源替代、化石能源内部结构优化)、人工CCUS和碳移除技术应用等,具体表现形式如下:

$$C = GDP \times \frac{E}{GDP} \times \frac{\sum_i E_i}{E} \times \frac{\sum_i (e_i \times E_i)}{\sum_i E_i} \times \frac{\sum_i (e_i \times E_i) - C_{cc}}{\sum_i (e_i \times E_i)} \quad (19)$$

其中, C 代表能源相关碳排放量, E 为一次能源消费总量, E_i 为能源品种 i 的能源消费量, e_i 为能源品种 i 的碳排放因子(其中 i 为煤炭、石油、天然气), C_{cc} 为人工CCUS和碳移除技术的碳捕集量。相应的, GDP 表征经济发展; E/GDP 是能源强度,表征能效提升,可用 EI 表示; $\frac{\sum_i E_i}{E}$ 是化石能源比重,表征非化石能源替代程度,可用 θ 表示; $\frac{\sum_i (e_i \times E_i)}{\sum_i E_i}$ 代表单位化石能源的碳排放量,表征化石能源内部结构变化,可用 e 表示;

$\frac{\sum_i (e_i \times E_i) - C_{cc}}{\sum_i (e_i \times E_i)}$ 代表碳捕集程度,表征人工CCUS和碳移除技术的减排,可用 r 表示。

故而碳排放公式可表示为:

$$C = GDP \times EI \times \theta \times e \times r \quad (20)$$

根据LMDI分解方法(Ang, 2005; Ang and Liu, 2007),减排效果可以分解为:

$$\Delta C = \Delta GDP + \Delta EI + \Delta \theta + \Delta e + \Delta r \quad (21)$$

各要素 $F(GDP, EI, \theta, e, r)$ 碳排放贡献为:

$$\Delta F = \frac{C_i - C_0}{\ln C_i - \ln C_0} \times \ln \left(\frac{F_i}{F_0} \right) \quad (22)$$

其中, C_i 与 C_0 分别代表期末与期初的能源相关碳排放量。

(八)总结

综上所述,基于中国—全球能源模型在宏观层面的模拟分析,可以有效识别碳中和目标下市场均衡的分部门减排路径和完成减排目标条件下的碳价。通过将上述指标结果反馈至电力、交通和建筑部门的技术模型(分别为REPO、CPREG和CBEM),可以得到分部门自下而上的技术支撑信息:具体而言,可以得到满足电力需求和碳价约束的最小化电力系统贴现成本的发电结构与装机规模,分别满足交通和建筑部门排放和能源需求约束的车辆技术、燃料结构和建筑运行用能结构。基于技术模型自下而上的模拟结果,C-

GEM将通过调整相应能源技术在模型中的供给成本表达来保证其发展规模与技术模型结果基本一致,最终得到自上而下与自下而上相一致的能源经济系统转型路径与转型成本,确保研究结果的合理可靠。最后,利用对数平均迪氏指数(LMDI)法可实现对经济发展水平、能效提升水平、能源结构优化、人工CCUS和碳移除技术等要素排放贡献的识别。

参考文献

- (1)刘志超:《发动机原始制造与再制造全生命周期评价方法》,大连理工大学硕士学位论文,2013年。
- (2)罗斯托、贺力平:《从起飞进入持续增长的经济》,四川人民出版社,1988年。
- (3)彭琛:《基于总量控制的中国建筑节能路径研究》,清华大学博士学位论文,2014年。
- (4)清华大学建筑节能研究中心:《建筑节能支撑技术体系研究总报告》,北京,2016年。
- (5)清华大学中国车用能源研究中心:《中国车用能源展望》,北京科学出版社,2012年。
- (6)翁玉艳:《碳市场在全球碳减排中的作用研究》,清华大学博士学位论文,2018年。
- (7)熊威明:《中国可再生能源电力规划及运行模型的开发与应用》,清华大学博士学位论文,2016年。
- (8)杨秀:《基于能耗数据的中国建筑节能问题研究》,清华大学博士学位论文,2009年。
- (9)姚阳:《发展经济学》,北京大学出版社,2013年。
- (10)中国汽车技术研究中心:《中国传统汽车和新能源汽车发展趋势 2050 研究》,北京,2018年。
- (11)张茜:《中国电动汽车市场渗透与能耗碳排放分析模型开发与应用》,清华大学博士学位论文,2018年。
- (12)Aguiar, A., Chepeliev, M., Corong, E., McDougall, R. & van der Mensbrugghe, D., 2019, "The GTAP Data Base: Version 10", *Journal of Global Economic Analysis*, vol.4(1), pp.1~27.
- (13)Ang, B. W., 2005, "The LMDI Approach to Decomposition Analysis: A Practical Guide", *Energy Policy*, vol.33, pp.867~871.
- (14)Ang, B. W. & Liu, N., 2007, "Handling Zero Values in the Logarithmic Mean Divisia Index Decomposition Approach", *Energy Policy*, vol.35(1), pp.238~246.
- (15)Armington, P. S., 1969, "A Theory of Demand for Products Distinguished by Place of Production", *IMF Staff Papers*, vol.16, pp.159~176.
- (16)Brooke, A., Kendrick, D. A. & Meeraus, A., 1992, *GAMS: a User's Guide*, Release 2.25, The Scientific Press.
- (17)Dargay, J. G. D., 1999, "Income's Effect on Car and Vehicle Ownership, Worldwide: 1960-2015", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol.2, pp.101~138.
- (18)Dargay, J. G. D. S. M., 2007, "Vehicle Ownership and Income Growth, Worldwide: 1960-2030", *The Energy Journal*, vol.4(28), pp.143~170.
- (19)Guo, S. Y., Yan, D., Hu, S. and Zhang, Y., 2021, "Modelling Building Energy Consumption in China under Different Future Scenarios", *Energy*, vol.214, 119063.
- (20)Hao, H., Wang, H. W., Ouyang, M. G. and Cheng, F., 2011, "Vehicle Survival Patterns in China", *Science China Technological Sciences*, vol.54(3), pp.625~629.
- (21)Hargreaves, T., 2011, "Practice-ing Behaviour Change: Applying Social Practice Theory to Pro-environmental Behaviour Change", *Journal of Consumer Culture*, vol.11(1), pp.79~99.
- (22)Hu, S., Yan, D., Cui, Y. and Guo, S., 2016, "Urban Residential Heating in Hot Summer and Cold Winter Zones of China-Status, Modeling, and Scenarios to 2030", *Energy Policy*, vol.92, pp.158~170.
- (23)Huang, X. D., Chang, S. Y., Zheng, D. Q. & Zhang, X. L., 2020, "The Role of BECCS in Deep Decarbonization of China's Economy: A Computable General Equilibrium Analysis", *Energy Economics*, vol.92, 104968.
- (24)Huo, H. & Wang, M., 2012, "Modeling Future Vehicle Sales and Stock in China", *Energy Policy*, vol.43, pp.17~29.
- (25)Kaya, Y., 1990, "Impact of Carbon Dioxide Emission Control on GNP Growth: Interpretation of Proposed Scenarios", Retrieved from https://www.actuaries.org.uk/system/files/field/document/Kaya_identity_JC_Final_050219.pdf.
- (26)Keynes, J. M., 1936/1997, *The General Theory of Employment, Interest, and Money*, New York, Prometheus Books.
- (27)Maréchal, K., 2010, "Not Irrational But Habitual: The Importance of Behavioural Lock-in in Energy Consumption", *Ecological Economics*, vol.69(5), pp.1104~1114.
- (28)OECD (Organization for Economic Co-operation and Development), 2012, "Long-Term Growth Scenarios", Economic Department Working Papers.
- (29)Peng, T. D., Ou, X. M., Yuan, Z. Y., Yan, X. & Zhang, X. L., 2018, "Development and Application of China Provincial Road Transport Energy Demand and GHG Emissions Analysis Model", *Applied Energy*, vol.222, pp.313~28.
- (30)Qi, T., Winchester, N., Zhang, D., Zhang, X. & Karplus, V. J., 2014, "The China-in-Global Energy Model", MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change.
- (31)Ravn, H. F., Hindsberger, M., Petersen, M., Schmidt, R. and Gloukhov, A., 2001, "Balmorel: A Model for Analyses of the Electricity and CHP Markets in the Baltic Sea Region. Appendices", *Review of Religious Research*, vol.39(3), pp.264~272.
- (32)Rosenthal, E. R., 2012, "GAMS-a User's Guide Washington", GAMS Development Corporation, DC, USA.
- (33)Wu, T., Zhang, M. & Ou, X., 2014, "Analysis of Future Vehicle Energy Demand in China Based on a Gompertz Function Method and Computable General Equilibrium Model", *Energies*, vol.7(11), pp.7454~7482.
- (34)Xiong, W. M., Yang, Y. Z., Wang, Y. & Zhang, X. L., 2016, "Marginal Abatement Cost Curve for Wind Power in China: A Provincial-level Analysis", *Energy Science & Engineering*, vol.4(4), pp.245~255.
- (35)Yang, Y. Z., Zhang, H. Y., Xiong, W. M., Zhang, D. & Zhang, X. L., 2018, "Regional Power System Modeling for Evaluating Renew-

able Energy Development and CO₂ Emissions Reduction in China”, *Environmental Impact Assessment Review*, vol.73, pp.142~151.

(36) Yoshino, H., Hong, T. & Nord, N., 2017, “IEA EBC Annex 53: Total Energy Use in Buildings—analysis and Evaluation Methods”, *Energy and Buildings*, vol.152, pp.124~136.

(37) Zhang, L., Brooks, R., Ding, D., Ding, H., He, H., Lu, J. & Mano, R., 2018, “China’s High Savings: Drivers, Prospects, and Policies”, IMF Working Paper WP/18/277, International Monetary Fund, Washington, DC.

(38) Zhang, X. H., Qi, T. Y. and Zhang, X. L., 2015, “The Impact of Climate Policy on Carbon Capture and Storage Deployment in China”, *Joint Prog. , Rep.t Ser. Rep. , 289*, 19.