

“双碳”背景下我国中长期能源需求预测与转型路径研究

黄震*, 谢晓敏, 张庭婷

(上海交通大学碳中和发展研究院, 上海 200240)

摘要: 我国是世界上最大的能源消费和碳排放国家, 能源结构“偏煤”、产业结构“偏重”的特点给碳达峰、碳中和(“双碳”)目标实现及能源领域高质量发展构成挑战, 因而面向未来的能源转型路径研究较为迫切。本文在梳理我国能源发展现状的基础上, 对我国中长期能源需求和转型趋势进行了预测及分析。研究结果表明, 2035年我国一次能源需求总量为 $5.56 \times 10^9 \sim 5.96 \times 10^9$ tce, 单位国内生产总值CO₂排放强度较2005年将下降77.6%~81.5%; 能源相关CO₂排放将在“十五五”时期达峰; 能效提高, 可再生能源发展, 碳捕获、利用与封存技术应用, 氢能及可再生燃料替代是降低能源CO₂排放的主要技术措施, 技术创新是推动重点领域绿色低碳转型的核心驱动力。进一步从推进节能战略, 发展可再生能源, 加强技术创新, 统筹法制、技术和市场等方面提出了发展建议, 以期能为能源领域高质量发展提供参考。

关键词: 碳达峰; 碳中和; 能源需求; 能源转型

中图分类号: TK01 **文献标识码:** A

Medium- and Long-Term Energy Demand of China and Energy Transition Pathway Toward Carbon Neutrality

Huang Zhen*, Xie Xiaomin, Zhang Tingting

(Research Institute of Carbon Neutrality, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: China is the world's largest energy consumer and carbon emitter. Its coal-dominated energy structure and heavy industries bring considerable challenges for achieving the carbon peaking and carbon neutrality goals and for realizing high-quality energy development; this necessitates research on energy transition pathways. Herein, the study reviews the current status of China's energy development and predicts the medium- and long-term energy demand and energy transition trends in the country. Our results indicate that the total primary energy demand of China will reach 5.56×10^9 to 5.96×10^9 tons of standard coal in 2035. The CO₂ emission intensity per unit of GDP in 2035 will decrease by 77.6%–81.5% compared with that in 2005. Energy-related CO₂ emissions will peak during the 15th Five-Year Plan period. Improving energy efficiency, expanding renewable energy application, promoting the carbon capture, storage and utilization technology, and developing hydrogen energy and renewable synthetic fuels are the major technical measures for reducing energy-related CO₂ emissions. Moreover, technological innovation is the core driving force for promoting the green and low-carbon transformation of key areas in China. Furthermore, suggestions are proposed from the aspects of energy conservation,

收稿日期: 2022-09-28; **修回日期:** 2022-11-11

通讯作者: *黄震, 上海交通大学碳中和发展研究院教授, 中国工程院院士, 研究方向为新能源动力、燃烧和大气污染防治、能源政策与能源战略; E-mail: z-huang@sjtu.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“能源战略(2035)”(2019-ZD-20)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

renewable energy development, technological innovation, and coordination of the legal system, technologies, and the market.

Keywords: carbon peaking; carbon neutrality; energy demand; energy transition

一、前言

推进碳达峰、碳中和（“双碳”）成为国家重大战略，既是对国际社会的庄严承诺，也是推动高质量发展的内在要求 [1]。《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》（2021年）提出，要推进经济社会发展全面绿色转型，加快构建清洁低碳安全高效能源体系 [2]。能源贯穿于经济社会发展的全过程、各环节，能源领域是实现“双碳”战略目标的关键领域。开展能源变革，推进能源供给侧的电力脱碳与零碳化、燃料零碳化，能源需求侧的能源利用高效化、再电气化、智慧化，从而构建以新能源为主体、“化石能源+碳捕获、利用与封存（CCUS）”和核能为保障的现代能源体系 [3]，显现“清洁、低碳、安全、高效”特征，支撑“双碳”战略目标实现。

已有研究针对我国能源需求预测 [4]、能源转型路径 [5,6]、不同领域能源发展趋势 [7~11]等方面展开，从国家、地区、行业、技术等不同视角对能源需求与能源转型路径进行了探讨 [12~14]，为能源领域低碳发展、“双碳”目标实现提供了理论基础。然而，我国长期以高碳基为主的能源体系，对能源转型构成了重大挑战 [15]。碳中和的能源系统转型时间紧、任务重、过程复杂，是兼顾发展与减排的系统工程；需平衡发展与减碳关系，尽快开发绿色低碳的替代能源，以此实现经济发展与碳排放的脱钩。

开展“双碳”目标约束下我国能源需求分析，是能源转型路径设计的前提和依据，相应研究极为必要。本文立足我国经济发展进入新阶段的宏观背景，建立基于行业层面的终端能源-过程转换-一次能源供应的能源供需模型 [16]；引入碳排放等关键因素约束，分析2035年能源需求，据此提出我国能源转型发展建议。

二、我国能源发展的现状与挑战

（一）我国能源发展现状

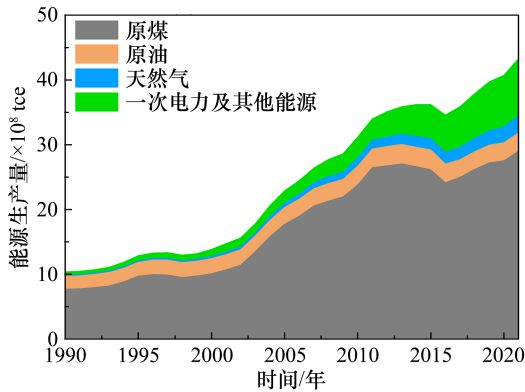
在能源供给侧，我国能源工业迅速发展，能

源结构加快向清洁低碳方向转变。自改革开放以来，我国一次能源生产总量不断增长，从1990年的 1.0392×10^9 tce提高至2021年的 4.33×10^9 tce（见图1（a）），平均每年以4.7%的增速增长 [17,18]。其中，煤炭生产量年均增长4.4%，原油生产量年均增长1.2%，天然气年均增长8.5%，一次电力及其他能源生产年均增速达9.7%。电力发展迅速，供应能力持续增强，2021年累计发电装机容量达到 2.377×10^9 kW，发电量 8.377×10^{12} kW·h，较2000年分别增长了6.44倍和5.12倍 [19]。可再生能源利用规模快速扩大，水电、风电、光伏发电累计装机容量均居世界首位 [20]。截至2022年3月31日，我国运行核电机组共54台，装机容量55 805.74 MWe，居世界第二 [21]。此外，能源输送能力显著提高，能源储备体系也不断健全。不断提升的能源供给能力为我国国民经济的持续快速发展提供了坚实的保障与支撑。

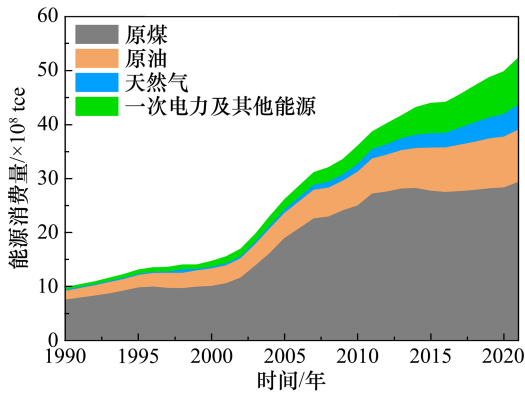
在能源消费侧，能源消费总量持续增长，能源利用水平显著提高。我国能源消费总量从1990年的 9.87×10^8 tce增加至2021年的 5.24×10^9 tce（见图1（b）），年均增速为5.5% [17,18]。能源利用水平显著提升，万元国内生产总值（GDP）能源消费量不断下降，1990年至2021年，年均5.5%的能源消费增长支撑了国民经济年均9.2%的增长 [18]。能源消费结构进一步优化。2021年煤炭消费占能源消费总量比重为56.0%，比1990年低20.2个百分点；天然气、水电、核电、风电等清洁能源占能源消费总量的比重为25.5%，比1990年提高了18.3个百分点；非化石能源占消费总量比重约为16.8%，比1990年提高了9.6个百分点。

（二）“双碳”目标下我国能源发展面临的挑战

能源活动引起的CO₂排放被认为是导致全球气候变暖的主要原因。据统计，2021年全球共排放CO₂约 3.898×10^{10} t，其中能源相关的CO₂排放约 3.388×10^{10} t，占排放总量的86.9% [20]。我国2021年CO₂排放总量约为 1.204×10^{10} t，其中能源活动引起的CO₂排放为 1.052×10^{10} t [20]。电力和工业部门是我国CO₂排放的主体，合计占据能源相关CO₂排放的77% [17]。



(a) 一次能源生产总量及构成



(b) 能源消费总量及构成

图1 我国一次能源生产和能源消费总量及构成 (1990—2020年)

1. 碳减排目标极具挑战

我国已成为碳排放第一大国，2021年我国能源相关CO₂排放占全球能源相关CO₂排放总量的31.1%，CO₂排放还处于持续上升阶段（见图2）。美国、加拿大、日本、英国、德国、法国和澳大利亚等发达国家的CO₂排放量大多早已达峰，目前都进入了下降阶段（见图2）[20]，从实现碳达峰到碳中和有充足的时间。我国提出力争在2030年前实现碳排放达峰、2060年前实现碳中和。与发达国家相比，碳排放总量大、碳达峰与碳中和时间间隔短等特点决定了我国碳减排目标极具挑战性。

2. 能源需求总量持续增长

从发达国家的人均用能与人均GDP发展历程来看（见图3）[20,22]，绝大部分发达国家人均用能都已进入了峰值，并维持平稳增长或开始下降。美国、加拿大、澳大利亚、英国、德国、法国、日本等国家的人均用能大约都是在人均GDP 20 000~30 000美元（现价）的时候进入了峰值，随后保持平稳或缓慢下降。我国人均用能和人均GDP均处于

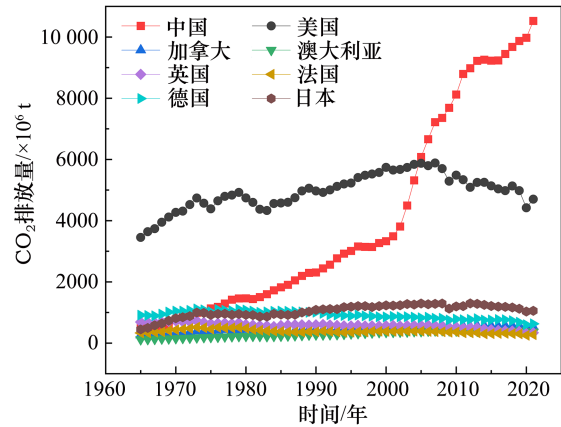


图2 主要国家历年CO₂排放 (1960—2020年)

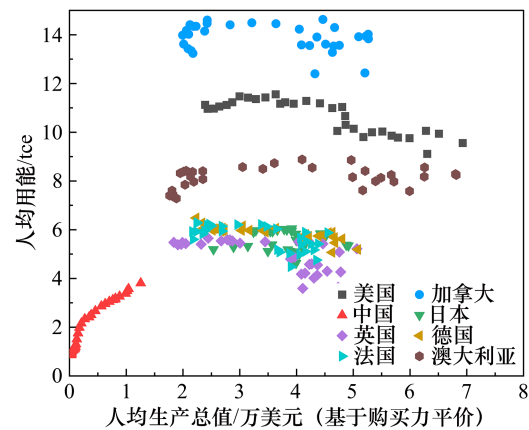


图3 世界主要国家人均用能与人均GDP关系图

快速增长阶段，人均GDP从1990年的318美元（现价）增加到2021年的12 556美元（现价）[22]，人均用能相应地从0.86 tce增加至3.7 tce [18]，尚未达到峰值。预计到2035年，我国的人均GDP将达到中等发达国家的水平。这期间，依然需要不断增加的能源消费总量来支撑我国的经济发展。

3. 能源结构低碳化转型紧迫而艰巨

“富煤”的资源特征决定了过去和现在我国“以煤为主”的能源消费格局。1990年我国能源消费的结构是：煤炭占比76.2%、石油占比16.6%、天然气占比2.1%、一次电力及其他能源占比5.1% [17]。在绿色低碳发展等政策的引领下，我国能源转型取得了显著的成效。2021年能源消费结构中煤炭下降到56.0%，石油消费占比维持在18.5%，天然气消费占比提高至8.9%，水电、核电、风电、太阳能发电等一次电力及其他能源消费占比增加至16.6% [17,18]。

相比其他发达国家,我国煤炭在能源消费结构中的比重过高。如图4所示[20],美国的煤炭消费占比仅为11%,英国、法国、加拿大等国的煤炭占比则在5%以下,澳大利亚因其煤炭资源丰富,其煤炭消费占比为29%。这些国家目前已进入了油气消费为主体、核能和可再生能源并举的能源消费阶段。对我国而言,需要在不到40年的时间里将56%的煤、近85%的化石能源结构逐步转换为以可再生能源为主体,煤炭、油气为保障的能源消费结构。中国能源结构低碳化调整的任务是紧迫而艰巨的。

三、我国中长期能源需求分析

在能源需求总量高、碳排放基数大的发展现状下,预测“双碳”目标下我国不同行业的中长期能源需求,对实现碳达峰、碳中和意义重大。本文通过结合我国经济社会发展、碳减排承诺以及能源安全新战略,综合考虑不同阶段各类能源技术发展水平,设置基准情景和强化低碳情景(见表1)预测我国中长期能源需求,进而推演我国实现碳达峰、碳中和目标的中长期能源低碳发展路径。

(一) 能源需求

能源供应、转换与消费受能源技术、经济社会、政策因素等多方面的综合影响。图5为2035年强化低碳情景下我国的能源供应、转换与消费情况。从能源供应能力看,2035年前煤炭在我国能源供应中依旧发挥重要的保障作用。煤炭将提供34%左右的一次能源供应,相较2020年降低约22.8%(见图6中强化低碳情景)。天然气的供应能力将达到 9.5×10^8 tce,约占能源供应总量的17%,较2020年的天然气消费量翻一倍。非化石能源供应将提高至 1.794×10^9 tce,约占一次能源供应总量的32%。可见,煤炭依然将发挥重要的能源安全保障兜底作用,天然气将起到重要的过渡支撑作用。随着能源结构不断向绿色低碳化转变,风光等可再生能源在能源结构中的占比显著上升。相比2020年,包括风光在内的非化石能源占比将提高12.1~16.1个百分点。预计到2035年,风电、光伏、水电等一次电力供应能力合计将达到 7.76×10^8 tce,占一次电力供应总量的比例达到83.7%(见图5)。届时,我国将基本形成煤炭、油气和新能源“三足鼎立”的能源供应格局[23]。

从未来能源消费格局看,能源消费的主要部

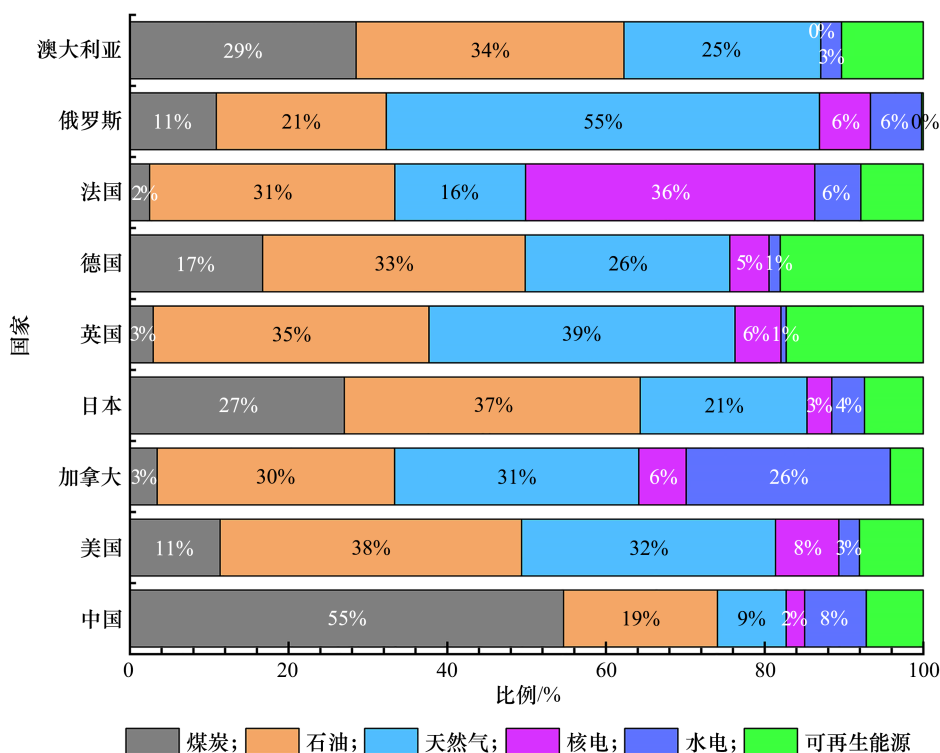


图4 世界主要国家能源消费结构 (2021年)

表1 情景说明

情景名称	基准情景	强化低碳情景
经济社会	2021年新冠疫情得到有效控制，经济增速恢复至8%，2022—2025年经济增速保持在6%，“十四五”“十五”“十六五”期间经济年增速分别为5.5%、5% [24,25]。人口总量保持缓慢增长，“十四五”“十五”“十六五”期间人口年均增长率分别为0.4%、0.3%、0.1% [26,27] 城镇化率分别为65%、67%、68% [26,28]	
能源技术	煤炭清洁转换技术在“十四五”期间进一步发展；风、低成本光伏和深远海风电关键技术将在2025年后取得突破并加以应用；可再生能源与储能相融合的技术在2025年取得关键进展；分布式供能和智能微网技术在2025年后具备应用竞争性；电动汽车按照现阶段规划持续推进，氢燃料电池技术稳步发展；CCUS技术示范应用 [29,30]	可再生能源与储能相融合的技术在2030年前后取得突破；先进核能技术在“十五五”期间取得突破；可再生生成燃料技术、可再生能源大规模制氢等关键技术将在2030年前后取得突破；CCUS技术在2030年后规模化商业应用 [29,30]
碳排放约束	2030年前碳达峰	碳达峰时间进一步提前

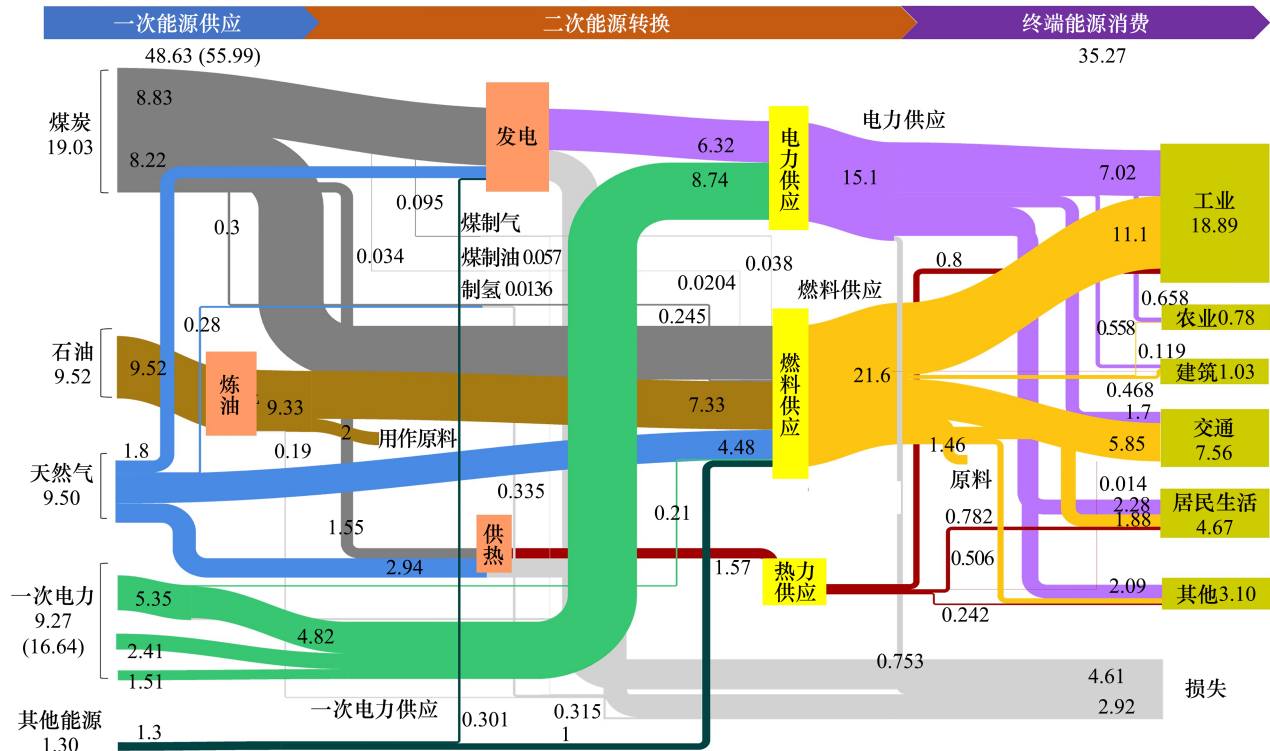


图5 强化低碳情景下2035年我国的能源流向 (单位: ×10⁸ tce)

注：一次电力按照电热当量折算标准煤，括号里的值为按当年发电煤耗折算后的值；终端能源消费数量未包括用于原料、材料的能源消费。

门依然是以工业为主。2020年，我国终端能源消费总量约为3.234×10⁹ tce（扣除用作原料、材料的能源，按电热当量计算），其中，工业用能占比约为62.5% [31]。2035年，终端能源消费总量将进一步提升至3.527×10⁹ tce（扣除用作原料、材料的终端能源消费），其中工业用能占能源消费总量的比例约为53.5%（见图5）。终端用能结构也将发生显著变化，电气化的比例将进一步提高。例如，2035年工

业部门的电气化比例可达到37%以上，交通运输的电气化比例可增加到22%以上，建筑部门电气化水平可达到54%。在碳中和目标的推动下，终端电气化进程还将不断推进。2035年前，我国能源需求总量仍将持续增长（见图7）。2020年至2025年，一次能源需求总量的年均增长速度为2.1%~2.3%。基准情景下，我国一次能源需求总量在2025年将达到5.57×10⁹ tce，2035年达到5.96×10⁹ tce。强化低碳情

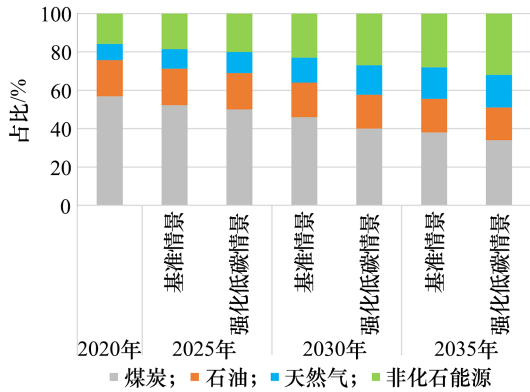


图6 不同情景下的一次能源需求结构

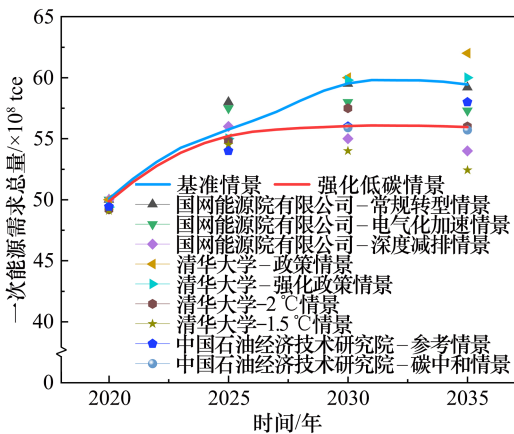


图7 不同情景一次能源需求

景下，2025年我国一次能源需求总量为 5.52×10^9 tce，2035年约为 5.56×10^9 tce（见图7）。基准情景下能源需求总量大约在2030年达峰。在强有力的政策支持和技术促进下，我国能源需求总量有望在2030年前达到峰值然后开始下降，从而为碳中和的实现留出

空间。由于方法设计、情景设置、政策环境、技术发展等方面的不同研判，已有研究对未来能源需求总量判断呈现差异，但这些研究证实了同样的趋势，即能源需求总量增速将放缓 [5,12,13,32]。

(二) 碳排放

从能源相关碳排放的流向来看（见图8），2035年煤炭、石油、天然气相关 CO_2 排放分别为 4.95×10^9 t、 1.56×10^9 t和 1.98×10^9 t，分别占 CO_2 直接排放的58.3%、18.4%和23.3%。2035年工业是 CO_2 排放的最主要来源，约占直接排放的37.4%，其次为发电，约占直接排放的30.3%。对于这两大碳排放来源行业，仍需要CCUS减排技术作为兜底。当前，我国现有CCUS利用项目仍以示范为主，主要涉及电力、煤化工、石油化工、水泥、钢铁等领域，其中仍以电力行业应用为主 [14]。预计到2035年，电力行业和化工行业合计可形成 4.3×10^8 t的 CO_2 减排能力，从而使 CO_2 排放总量进一步降低。

图9所示为两种情景下的 CO_2 排放。基准情景下能源相关 CO_2 排在2025年前会继续增加，2029年左右达到峰值（约 1.089×10^{10} t），2035年 CO_2 排放降低至 9.78×10^9 t。强化低碳情景下能源相关 CO_2 排在2025年前能实现达峰，峰值约 1.055×10^{10} t，2035年能源相关 CO_2 排放进一步降低至 8.06×10^9 t。 CO_2 排放强度也将持续降低，2035年单位GDP CO_2 排放将降低至 0.452 t CO_2 /万元到 0.373 t CO_2 /万元。相较2005年，低碳情景下2030年单位GDP CO_2 排放将下降68.7%，2035年下降77.6%，强化低碳情景下2030年单位GDP CO_2 排放强度下降73.5%，2035年

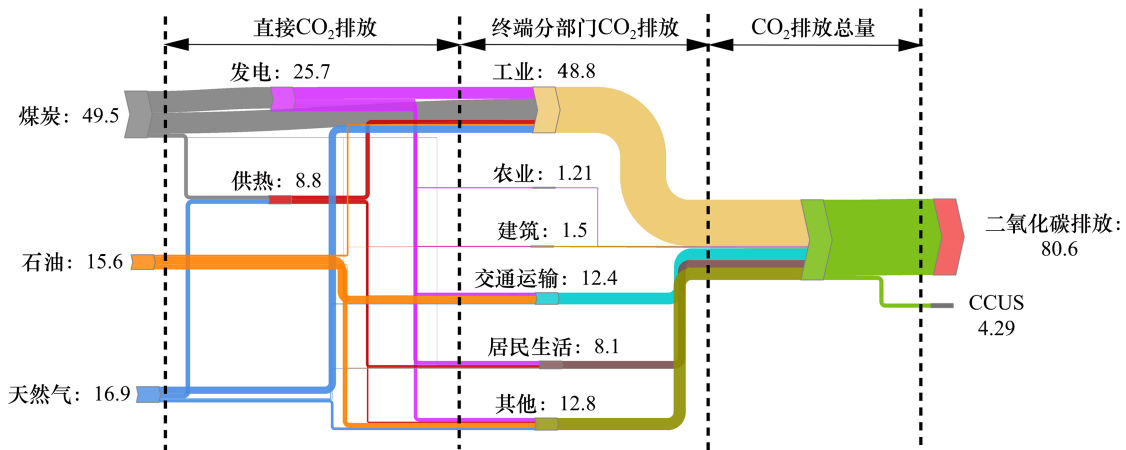


图8 强化低碳情景下2035年能源相关碳排放流向图 (单位: $\times 10^8$ t CO_2)

将下降81.5%。两种情景均可实现2030年单位GDP CO₂排放比2005年下降65%以上的目标。

四、“双碳”目标下的转型路径

能源转型的目标是构建绿色、低碳、安全、高效的能源系统，以促进双碳”目标实现。能源转型需要有政策的引领、技术的推动、市场的促进和体制机制的完善。其中，技术的推动是实现能源转型的核心。

(一) 不同技术措施的减碳贡献

能源技术的进步对CO₂减排起着重要的作用。通过提高能效、扩大可再生能源应用规模、提升终端电气化水平、推广CCUS技术、发展氢能及可再生合成燃料等是降低能源相关CO₂排放的主要方向。图10揭示了各类技术方向未来的减排贡献。提高能源生产、能源转换以及能源利用过程的效率在短期内可显著降低CO₂排放。“十四五”末提高能

源利用效率将贡献60.1%的CO₂减排量，“十五五”末提高能源利用效率将贡献42.8%的CO₂减排量，“十六五”末提高能源效率对CO₂减排量的贡献有所降低(24.6%)。随着终端电气化水平的提升以及风、光等可再生能源应用规模的扩大，我国能源结构得以不断优化，进一步降低了CO₂排放。“十四五”末优化能源结构可贡献32.8%的CO₂减排量，“十五五”末优化能源结构对CO₂减排的贡献提高至39.3%，“十六五”末优化能源结构对减排的贡献收缩至38.1%。实现长期深度脱碳和碳中和目标，特别需要关注常规减排技术或替代技术难以实现深度减排的领域，需要有革命性的技术突破[33]。随着科技进步，未来能源领域有关的先进技术和变革性技术会对能源领域碳减排带来深刻影响。CCUS技术、氢及可再生合成燃料技术等预计将在2030年后逐渐发挥重要的减碳贡献。

(二) 重点领域转型路径

电力、工业、交通等部门是能源相关CO₂排放的重点部门，合计占CO₂排放量的近90%，“双碳”目标下能源转型的主要路径如下。

1. 电力部门的低碳化是各行业脱碳的核心基础
 电力低碳转型对“双碳”目标的实现具有全局性意义。考虑不同外部因素的作用大小，预计2035年全社会用电量将从2021年的 8.31×10^{12} kW·h提高到 9.8×10^{12} kW·h(基准情景)~ 1.22×10^{13} kW·h(强化低碳情景)。这主要归因于电气化的快速发展，包括电力替代煤炭、石油等化石能源直接燃烧和利用，或以可再生电力等制氢，以及终端部门电气化的强化等[33]。电源结构整体呈现清洁化发展的态势，煤电装机量和发电量占比不断下降，非化石能源装机和发电量的占比稳步提升。电源总装机从2020年的 2.2×10^9 kW增加至2035年的 3.6×10^9 kW，增加了64.0%。煤电装机总量下降至 1×10^9 kW以下，相较2020年下降9.6%。气电装机总量超过 2×10^8 kW，相较2020年增加122.5%。可再生电力装机合计超过 2.1×10^9 kW，是2020年的2.4倍。发电总量从2020年的 7.6×10^{12} kW·h提高至 1.27×10^{13} kW·h，增加了66.3%。其中，来自风能、太阳能的可再生电力发电量增加了近5倍，气电发电量增加了1.9倍，核电发电量增加了2.4倍。从碳排放来看，电力系统碳排放预计在2025—2030年达峰，达峰后进入短

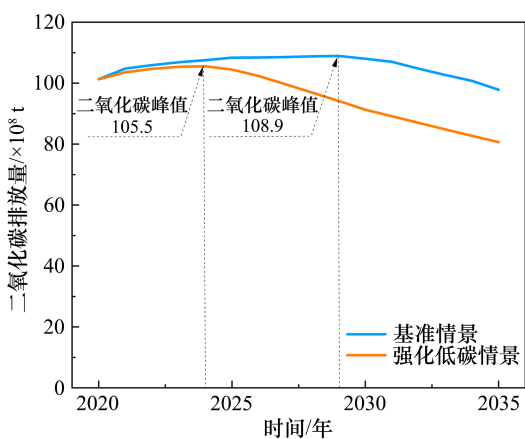


图9 不同情景能源相关CO₂排放量

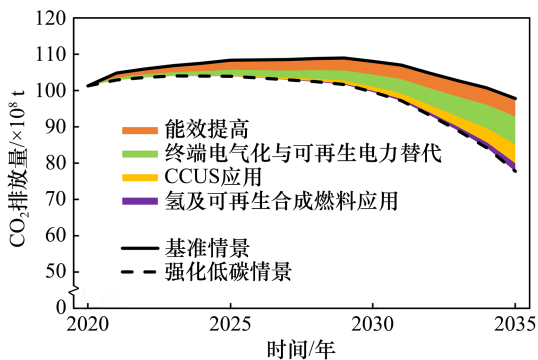


图10 不同技术措施对碳减排的贡献

暂平台期，然后开始下降（见图 11）。电力系统的清洁化和低碳化将对全社会的碳排放下降带来实质性贡献。

2. 工业用能将向高效化、低碳化、电气化方向转变

工业是仅次于能源电力部门的第二大 CO₂ 排放部门。基准情景下工业部门的 CO₂ 排放先缓慢增长再下降，强化低碳情景下工业部门的 CO₂ 排放下降速度加快（见图 12）。工业领域能效的大幅提升、风光清洁能源的应用以及 CCUS 的规模化应用将是工业碳排放降低的关键举措。工业用能大约在 2030 年前后达峰，随后进入峰值平台期。随着工业行业终端电气化水平的不断提升，工业用能中电的比例逐步提高，预计 2035 年工业领域电能占比提高到 37% 以上；有研究指出 2035 年工业部门电气化水平甚至可以达到 40% 以上 [6]。工业用固体燃料在 2030 年左右达峰并趋于稳定，2035 年煤等固体燃料占比约为 43%、天然气占比在 8% 以上。由于钢铁、有色、水泥、建材、化工等行业存在难以避免的碳排放，迫切需要加快 CCUS 技术的研发与部署，从而推动工业领域的碳减排。2030 年后需要逐步开展

CCUS 技术的应用，进一步加快 CCUS 技术的渗透率。

3. 交通运输用能将走向电能替代和可再生燃料替代

交通运输部门是化石能源消耗和 CO₂ 排放增长最快的领域之一。降低交通运输部门碳排放的主要技术措施包括：通过能效提升提高各类交通运输工具的燃油经济性，降低各类运输工具的运行能耗；加大交通运输工具的电气化程度，扩大电动车和混合动力应用规模和范围；发展燃料乙醇、生物柴油、燃料电池、可再生能源制氢及可再生合成燃料等替代技术，加大替代燃料的应用；大力发展公共交通，推广公共出行方式（见图 13）。2025 年前，提高燃油经济性、推广公共交通是交通部门脱碳的主要路径；2030 年左右，提升电气化力度将促进交通部门进一步脱碳；2035 年新能源汽车保有量占乘用车比例将超过 25%，电力占交通能源消费总量比例将超过 22%。随着合成替代燃料技术的成熟以及以新能源为主体的电力系统逐步建成，2035 年后可再生燃料替代将在交通运输领域减碳上发挥关键作用 [34]。此外，交通运输部门还需进一步通过加快大宗货物和中长距离货物运输的“公转铁”“公转水”等方式优化运输结构，加快发展智慧交通，提高运输组织效率 [35]。

五、对策建议

（一）强力推进节能战略，减少能源消耗和碳排放

强力推进节能战略是减少消耗、降低碳排放的重要手段。我国是能源消费大国，能源强度显著高于世界平均水平。能源、工业、交通等终端用能领

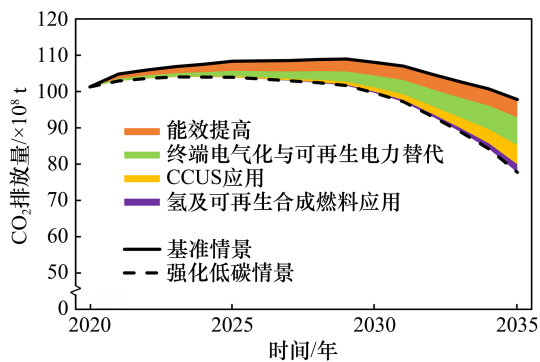


图 11 电力部门碳排放轨迹

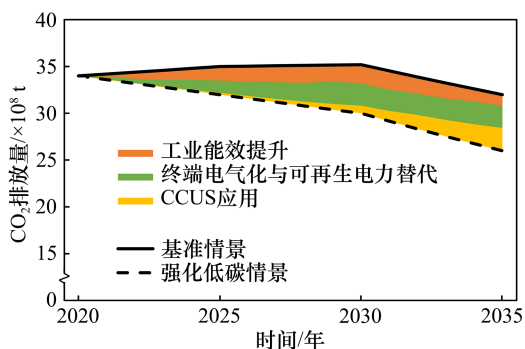


图 12 工业碳排放轨迹

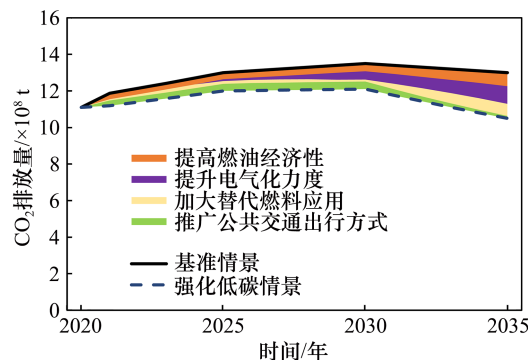


图 13 交通运输部门碳排放轨迹

域节能潜力巨大，在这些领域全面推行节能战略可显著降低全社会能源消费和碳排放。在电力领域，需大力推进发电效率的提高；在工业领域特别是高耗能行业，大力推广节能技术和节能新工艺，提升工业能效；在交通领域着力提升交通运输装备的能效，加强节能技术的研发、应用与推广。

(二) 大力发展可再生能源，建设以新能源为主体的新型电力系统

传统电力系统转向以新能源为主体的新型电力系统是实现碳达峰、碳中和的必然之路。因地制宜大力发展可再生能源，建设基于电网安全运行的高比例风光发电的源-网-储-荷新型电力系统，加快煤电灵活性改造，发展火电CCUS技术，用于灵活性调峰和保障电力供应安全。加强跨省、跨区输电通道建设，发展分布式微电网，提升电网侧的传输能力以及需求侧的消纳能力，突破新型储能关键技术。

(三) 发展可再生燃料替代，推动终端用能低碳化，提高终端电气化水平

以电力的低碳化零碳化为基础，加快突破制氢、合成燃料等新型燃料技术的研发，实现燃料的零碳化。在工业领域加强前沿技术攻关，推动绿色工艺技术应用，实施电能替代、氢能、生物质能等清洁能源替代，推动工业用能尽早达峰。在交通运输领域进一步提升交通运输电气化进程，以绿电为基础推进可再生燃料、氢能等替代燃料的研发以及应用。

(四) 加强技术创新，发挥技术创新在能源转型中的支撑作用

“双碳”目标的实现需要发挥科技创新的支撑引领作用，依靠一系列颠覆性、变革性能源技术突破作为战略支撑。在新能源和智能化等技术进步和成本快速下降的推动下，全球能源沿着低碳和零碳化、数字化的方向加速转型，正在进入一个能源转型发展的时代，颠覆性技术的研发应用将带来能源体系发生结构性的变化。重点聚焦新型电力系统、氢能、储能、可再生合成燃料、可控核聚变、CCUS等关键技术方向，加大“双碳”前沿技术的基础研究和关键技术攻关的支持力度，设定短期、

中期、长期的技术开发目标，给予政策鼓励以及资金支持，实现颠覆性、变革性能源系列技术突破。此外，要建立完善、绿色、低碳的技术评估和交易体系，加快创新成果转化与应用。

(五) 统筹法制、技术和市场，多措并举推进“双碳”工作

加快“双碳”法制体系构建，加强应对气候变化的相关立法，为实现碳中和提供法律保障。统筹推进“双碳”法律法规与配套规章“立改废”，重点加快面向双碳目标的环境保护法体系、能源法体系和相关法律构建。大力推进低碳、零碳、负碳科技创新与革命。加快能源与碳市场体系建设，大力推进全国电力、石油、天然气和二氧化碳排放权交易系统建设。通过碳配额、碳排放权交易和碳税等，推动能源“双控”向碳排放总量和强度“双控”转变，发挥市场机制，形成有效的激励约束机制，让碳排放成本越来越高，减碳收益越来越大，不断降低绿色溢价。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: September 28, 2022; **Revised date:** November 11, 2022
Corresponding author: Huang Zhen is a professor from Shanghai Jiao Tong University and member of the Chinese Academy of Engineering. His major research fields include new energy power, air pollution control, and energy policies and strategies. E-mail: z-huang@sjtu.edu.cn
Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Energy Strategies (2035)” (2019-ZD-20)

参考文献

- [1] 习近平. 正确认识和把握我国发展重大理论和实践问题 [EB/OL]. (2022-05-15) [2022-08-20]. http://www.qstheory.cn/dukan/qs/2022-05/15/c_1128649331.htm.
Xi J P. Correctly understand and grasp the major theoretical and practical issues in China's development [EB/OL]. (2022-05-15) [2022-08-20]. http://www.qstheory.cn/dukan/qs/2022-05/15/c_1128649331.htm.
- [2] 中共中央 国务院. 关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见 [EB/OL]. (2021-10-24) [2022-07-20]. http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm.
The Communist Party of China Central Committee and the State Council. The guiding document on China's work to achieve carbon peaking and carbon neutrality goals under the new development philosophy [EB/OL]. (2021-10-24) [2022-07-20]. http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm.
- [3] 黄震, 谢晓敏. 碳中和愿景下的能源变革 [J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(9): 1010-1018.

- Huang Z, Xie X M. Energy revolution under vision of carbon neutrality [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(9): 1010–1018.
- [4] Zhang S, Chen W Y. Assessing the energy transition in China towards carbon neutrality with a probabilistic framework [J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 1–15.
- [5] 清华大学气候变化与可持续发展研究院. 中国长期低碳发展战略与转型路径研究: 综合报告 [M]. 北京: 中国环境出版集团, 2021.
Institute of Climate Change and Sustainable Development Tsinghua University. Research on the strategy and pathway of low-carbon transition in China: Synthesis report [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2021.
- [6] 魏一鸣, 余碧莹, 唐葆君, 等. 中国碳达峰碳中和时间表与路线图研究 [J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2022, 24(4): 1–10.
Wei Y M, Yu B Y, Tang B J, et al. Research on China's CO₂ emission pathway under carbon neutral target [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology (Social sciences edition)*, 2022, 24(4): 1–10.
- [7] 舒印彪, 张丽英, 张运洲, 等. 我国电力碳达峰、碳中和路径研究 [J]. *中国工程科学*, 2021, 23(6): 1–14.
Shu Y B, Zhang L Y, Zhang Y Z, et al. Carbon peak and carbon neutrality path for China's power industry [J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(6): 1–14.
- [8] 刘合, 梁坤, 张国生, 等. 碳达峰、碳中和约束下我国天然气发展策略研究 [J]. *中国工程科学*, 2021, 23(6): 33–42.
Liu H, Liang K, Zhang G S, et al. China's natural gas development strategy under the constraints of carbon peak and carbon neutrality [J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(6): 33–42.
- [9] 舒印彪, 陈国平, 贺静波, 等. 构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究 [J]. *中国工程科学*, 2021, 23(6): 61–69.
Shu Y B, Chen G P, He J B, et al. Building a new electric power system based on new energy sources [J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(6): 61–69.
- [10] 谢克昌. 因地制宜推进区域能源革命的战略思考和建议 [J]. *中国工程科学*, 2021, 23(1): 1–6.
Xie K C. Strategic thinking and suggestions on promoting regional energy revolution based on local conditions [J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(1): 1–6.
- [11] 李全生, 张凯. 我国能源绿色开发利用路径研究 [J]. *中国工程科学*, 2021, 23(1): 101–111.
Li Q S, Zhang K. The path for green development and utilization of energy in China [J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(1): 101–111.
- [12] 中国石油经济技术研究院. 2050 年世界与中国能源展望(2020 版) [R]. 北京: 中国石油经济技术研究院, 2020.
CNPC Economics & Technology Research Institute. World and China's energy outlook in 2050 (2020 version) [R]. Beijing: CNPC Economics & Technology Research Institute, 2020.
- [13] 国网能源研究院有限公司. 中国能源电力发展展望 2020 [R]. 北京: 国网能源研究院有限公司, 2020.
State Grid Energy Research Institute Co., Ltd. China's energy and power development outlook 2020 [R]. Beijing: State Grid Energy Research Institute Co., Ltd., 2020.
- [14] 张贤, 李阳, 马乔, 等. 我国碳捕集利用与封存技术发展研究 [J]. *中国工程科学*, 2021 (23): 70–80.
Zhang X, Li Y, Ma Q, et al. Development of carbon capture, utilization and storage technology in China [J]. *Strategic Study of CAE*, 2021 (23): 70–80.
- [15] 于贵瑞, 郝天象, 朱剑兴. 中国碳达峰、碳中和行动方略之探讨 [J]. *中国科学院院刊*, 2022, 37(4): 423–434.
Yu G R, Hao T X, Zhu J X. Discussions on action strategies of China's carbon peak and carbon neutrality [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(4): 423–434.
- [16] Wu W, Zhang T, Xie X, et al. Regional low carbon development pathways for the Yangtze River Delta region in China [J]. *Energy Policy*, 2021, 151: 1–12.
- [17] 国家统计局. 中国统计年鉴 2021 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
National Bureau of Statistical of China. 2021 China statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2022.
- [18] 国家统计局. 国家数据—年度数据 [EB/OL]. [2022-07-16]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
National Bureau of Statistical of China. National data-yearly data [EB/OL]. [2022-07-16]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
- [19] 中国电力企业联合会. 中国电力统计年鉴—2021 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
China Electricity Council. 2021 China electricity statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [20] BP. BP statistical review of world energy 2022 [R]. London: BP, 2022.
- [21] 中国核能行业协会. 全国核电运行情况(2022 年 1—3 月) [EB/OL]. (2022-05-06)[2022-06-14]. <http://www.china-nea.cn/site/content/40689.html>.
China Nuclear Energy Association. Operation of nuclear power in China (Jan.-Mar. 2022) [EB/OL]. (2022-05-06)[2022-06-14]. <http://www.china-nea.cn/site/content/40689.html>.
- [22] 世界银行. 世界银行公开数据库 [EB/OL]. [2022-07-16]. <https://data.worldbank.org.cn/indicator/NY.GDP.PCAP.CD>.
The World Bank. World bank open data [EB/OL]. [2022-07-16]. <https://data.worldbank.org.cn/indicator/NY.GDP.PCAP.CD>.
- [23] 邹才能, 赵群, 陈建军, 等. 中国天然气发展态势及战略预判 [J]. *天然气工业*, 2018, 38(4): 1–11.
Zhou C N, Zhao Q, Chen J J, et al. Natural gas in China: development trend and strategic forecast [J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(4): 1–11.
- [24] International Monetary Fund. World economic outlook: A long and difficult ascent [R]. Washington DC: International Monetary Fund, 2020.
- [25] 郝宇, 巴宁, 盖志强, 等. 经济承压背景下中国能源经济发展与展望 [R]. 北京: 北京理工大学能源与环境政策研究中心, 2020.
Hao Y, Ba N, Gai Z Q, et al. Development and prospect of China's energy economy under economic pressure [R]. Beijing: Center for Energy & Environmental Policy Research, BIT, 2020.
- [26] Chen H T, Wang Z H, Xu S, et al. Energy demand, emission reduction and health co-benefits evaluated in transitional China in a 2 °C warming world [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 264: 1–15.

- [27] Zhang X, Guo F, Zhai Z. China's demographic future under the new two-child policy [J]. *Population Research and Policy Review*, 2019, 38(4): 537–563.
- [28] Zhou Y, Hao F, Meng W, et al. Scenario analysis of energy-based low-carbon development in China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, 26(8): 1631–1640.
- [29] IEA. *Energy technology perspectives 2020* [R]. Paris: International Energy Agency, 2020.
- [30] IEA. *An energy sector roadmap to carbon neutrality in China* [R]. Paris: International Energy Agency, 2021.
- [31] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴-2021 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
Department of Energy Statistics, National Bureau of Statistics. *China energy statistical yearbook 2021* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2022.
- [32] 中国煤控研究项目课题组. 建言“十四五”: 继续实施煤炭消费约束性指标 [R]. 北京: 中国煤控研究项目课题组, 2020.
Coal Control Research Project Group. *Advices on the “14th Five-Year Plan”*: Continue to implement obligatory targets for coal consumption [R]. Beijing: Coal Control Research Project Group, 2020.
- [33] 清华大学气候变化与可持续发展研究院. 《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(11): 1–25.
Institute of Climate Change and Sustainable Development Tsinghua University. *Synthesis report on “Research on the strategy and pathway of low-carbon transition in China”* [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(11): 1–25.
- [34] Huang Z, Zhu L, Li A, et al. Renewable synthetic fuel: Turning carbon dioxide back into fuel [J]. *Frontiers in Energy*, 2022, 16(2): 145–149.
- [35] 李晓易, 谭晓雨, 吴睿, 等. 交通运输领域碳达峰、碳中和路径研究 [J]. *中国工程科学*, 2021, 23(6): 15–21.
Li X Y, Tan X Y, Wu R, et al. *Paths for carbon peak and carbon neutrality in transport sector in China* [J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(6): 15–21.