

# 碳中和实践进展、实现路径与展望

周健, 李晓源, 邓一荣\*

(广东省环境科学研究院, 广东省污染场地环境管理与修复重点实验室,  
粤港澳环境质量协同创新联合实验室, 广东 广州 510045)

**摘要:** 概述了国内外在碳中和实践与实现路径方面的研究进展, 包括能源路径、技术路径、社会路径和政策经济路径。在此基础上, 提出了应用实证数据和模型模拟开展碳中和定量评估、通过不同国家碳中和目标的比较和分析来评估全球碳中和能力和成本、加强不同碳中和路径与产业之间的相关性及多路径共同效应研究等建议。

**关键词:** 碳中和; 碳达峰; 气候变化; 实践进展; 实现路径

中图分类号: X22 文献标志码: A 文章编号: 1006-2009(2023)02-0008-04

## Practical Progress, Realization Path and Prospect of Carbon Neutrality

ZHOU Jian, LI Xiao-yuan, DENG Yi-rong\*

(Guangdong Provincial Research Academy of Environmental Sciences, Guangdong Provincial Key Laboratory of Environmental Management and Remediation of Contaminated Sites, Guangdong-Hong Kong-Macao Joint Laboratory of Collaborative Innovation of Environmental Quality, Guangzhou, Guangdong 510045, China)

**Abstract:** This paper summarized the research progress and realization path of carbon neutrality at home and abroad, including energy path, technological path, social path and policy economic path. On this basis, it suggested to quantitatively assess carbon neutrality using empirical data and model simulation, assess global carbon neutrality capacity and costs by comparing and analyzing carbon neutrality targets in different countries, strengthen the correlation between different carbon neutral paths and industries and research on the common effects of multiple paths.

**Key words:** Carbon neutrality; Peak carbon dioxide emissions; Climate change; Practical progress; Realization path

碳中和指在一定时期内, 通过碳捕获、碳封存、碳转化等方式抵消产生的 CO<sub>2</sub> 或温室气体, 从而实现 CO<sub>2</sub> 或温室气体的“零排放”。《巴黎协定》旨在努力将全球变暖限制在比工业化前水平高 1.5 °C 的范围内, 为了实现该目标, 必须于 21 世纪中叶在全球范围内实现碳中和。然而, 联合国环境规划署发布的 2019 年《排放差距报告》显示, 各国碳减排目标与 1.5 °C 目标之间仍存在很大差距<sup>[1]</sup>。为了缩小差距, 越来越多的国家制定了碳中和目标, 以减轻气候变化的影响。尽管目前有很多关于低碳发展与碳中和方面的研究, 但多局限于其中某一方面, 缺乏对相关实践进展的总结。今针对碳中和的实践部分进行系统、全面的总结, 主要

包括碳中和的实践进展、实现路径与相关的展望建议, 以期开展后续研究提供参考。

### 1 碳中和实践进展

碳中和的目标需要世界各国共同努力。当前,

收稿日期: 2022-05-23; 修订日期: 2022-12-26

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (2019YFC1804302); 国家自然科学基金-广东联合基金重点资助项目 (U1911202); 广东省科技创新战略专项资金资助项目 (2019B121205004); 广东省基础与应用基础研究重大专项基金资助项目 (2019B030302013)

作者简介: 周健 (1984—), 男, 河北唐山人, 高级工程师, 硕士, 研究方向为环境管理政策、生态文明建设与气候变化。

\* 通信作者: 邓一荣 E-mail: ecoyrdeng@163.com

碳中和已经成为全球共识,120 多个国家提出了碳中和目标,以及为实现碳中和而实施的具体政策和措施<sup>[2]</sup>。

### 1.1 中国

作为世界上最大的碳排放国,2020 年中国贡献了全球碳排放的 30.7%,导致碳中和目标难以实现<sup>[3]</sup>。2020 年 9 月 22 日,习近平主席提出中国 CO<sub>2</sub> 排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和,这对全球共同应对气候变化具有积极意义。2021 年 3 月 15 日,中央财经委员会第九次会议明确把碳达峰、碳中和纳入生态文明建设总体布局,表明中国已经将碳中和放在国家发展战略的重要位置。“十四五”时期是中国高质量发展的又一个关键阶段,为了实现碳达峰和碳中和双重目标,各省市和部委相继提出了碳达峰和碳中和行动计划或方案。

### 1.2 欧盟

2019 年 12 月 11 日,欧盟在布鲁塞尔宣布了一项名为《欧洲绿色协议》的气候变化新政策,旨在 2050 年实现欧洲 CO<sub>2</sub>“净零排放”,以及经济增长与资源消耗脱钩,该目标也被写入《欧洲气候法》草案。根据其提出的 2050 年实现有竞争力的低碳经济路线图,欧盟承诺到 2030 年将国内碳排放总量减少 40%,到 2040 年减少 60%,到 2050 年减少 80%,目的是将欧洲推向更清洁和气候友好的道路<sup>[4]</sup>。欧盟 78%的城市有碳减排目标,25%的城市有实现碳中和的雄心目标<sup>[5]</sup>。然而,欧盟仍然面临着大量的资金投入、难以技术突破,以及实现碳中和的社会公平等问题。

### 1.3 美国

2021 年 1 月 20 日,拜登总统上任后宣布美国重返《巴黎协定》,积极应对气候变化和全球变暖。拜登提出的清洁能源革命和环境正义计划呼吁通过向可再生能源过渡,到 2035 年建立一个“无碳电力社会”,到 2050 年实现 100%清洁能源经济与碳中和<sup>[6]</sup>。然而,关于气候变化问题的意见分歧使美国实现碳中和目标变得更加困难。

### 1.4 英国

2015 年,英国签署了《巴黎协定》。2019 年 6 月,英国在新修订的《气候变化法案》中明确提出,将在 2050 年前实现碳中和。英国是第一个将碳中和目标明确写入法律的发达国家,也是第一个开始碳中和实践的国家。2020 年 11 月,英国宣布了

“绿色工业革命十点计划”。此外,世界上第一个碳中和承诺规范(PAS 2060)也是由英国标准协会发布<sup>[7]</sup>。

## 2 碳中和实现路径

加快实现碳中和将减缓气候变化,探索碳中和的实现路径意义重大。实现碳中和的路径包括 4 个方面:能源路径、技术路径、社会路径和政策经济路径<sup>[8]</sup>。

### 2.1 能源路径

目前,煤炭消费仍然是一些国家能源结构的主流。改变能源结构,将煤炭消费转化为清洁能源,是迈向碳中和社会的第一步<sup>[9]</sup>。新能源将成为未来实现碳中和的主导因素,能源结构的调整具有重要意义<sup>[9-10]</sup>。然而,面向碳中和的能源系统过渡仍面临重大挑战,需要区域、国家甚至全球的积极行动与协调,并加强政府在其中的作用<sup>[11-12]</sup>。

可再生能源的电力系统是实现碳中和目标的主要措施之一。碳中和目标的提出加速了电力部门的零碳化进程,对电力领域的减排提出了更高的要求。电力与氢能相结合、生物质耦合发电、电力系统与碳封存技术相融合等都有助于实现电力部门的碳中和<sup>[13-14]</sup>。

总体而言,实现碳中和的能源途径方面的研究主要集中在清洁能源上。由于技术限制,仍有很多可再生清洁能源有待开发,相应清洁能源的潜力、成本和发展前景还有待核算。此外,还需要开发更科学、更复杂的模型,以丰富碳中和能源路径研究。

### 2.2 技术路径

技术路径与碳封存、碳汇等负排放技术密切相关。碳封存技术主要包括 3 种,分别为碳捕获与封存(CCS),碳捕获、利用与封存(CCUS),以及生物质能的碳捕获与封存(BECCS)。CCS 是将 CO<sub>2</sub> 从相关排放源中分离出来,运输到封存地点,并与大气长期隔离的过程。CCS 可以显著降低碳排放总量和强度,从长远来看具有巨大的经济和环境价值,而由于成本和技术方面的限制,其在短期内无法大规模推广实现<sup>[15]</sup>。CCUS 不仅封存 CO<sub>2</sub>,还将其投入新的生产流程进行回收利用。CCUS 兼顾了经济和环境效益,是实现碳中和的可行途径之一。BECCS 将碳捕获和存储与生物质能源相结合,从大气中去除 CO<sub>2</sub>,在减缓气候变化和碳中和中发挥了重要作用<sup>[16-17]</sup>。碳汇是指通过植树造

林、植被恢复等措施吸收大气中的CO<sub>2</sub>,从而降低大气中温室气体浓度的过程,一般包括陆地碳汇和海洋碳汇。

就技术路径而言,目前的研究主要集中在CCS、CCUS、BECCS和碳汇技术领域,其他负排放技术还有待探索。关于上述技术可行性和发展潜力的定量分析,以及推广和使用成本方面的研究仍较少,还需要开展后续调查。

### 2.3 社会路径

社会路径指居民、家庭和企业促进碳中和目标实现的低碳行动,主要分为两个部分,即社会宣传活动和消费者为碳中和的付费意愿。

在中国,很多省市开展了一系列活动来普及碳中和的概念。2020年5月20日,上海市面向数百万青少年启动了E60碳中和先锋计划。2021年8月25日,广东省发起了“步行获碳币”活动。在国外,诸如加州大学戴维斯分校、代顿大学等一些学校通过能源改革加入碳中和运动,评估自身低碳发展能力,减少温室气体排放<sup>[18-19]</sup>。

在实现碳中和的过程中,不能忽视消费者行为。首先,碳中和的支付意愿可能会受到消费者的国家(地区)、性别、学历、社会地位、收入等因素的影响<sup>[20-21]</sup>;其次,支付意愿会受到碳中和项目本身的影响<sup>[22]</sup>;最后,为碳中和付费的倾向还会受到消费者接收的客观信息和知识的影响<sup>[23-24]</sup>。

### 2.4 政策经济路径

政策经济路径指通过低碳政策和经济手段减少碳排放,助力实现碳中和。

低碳政策包括碳配额、低碳城市试点和其他相关政策。碳配额意味着必须按照规定完成温室气体减排目标,众多研究表明,该政策是行业企业实现低碳发展的有效途径<sup>[25-26]</sup>。2010年,中国发改委启动了低碳城市试点建设,此项建设虽然耗时较长,但是能提高城市碳排放效率。

低碳经济包括碳税机制和碳排放交易制度。碳税指对CO<sub>2</sub>排放征税,该机制对碳减排具有积极作用,有助于实现经济增长和降低能源消耗。2020年,中国生态环境部发布了《碳排放权交易管理办法(试行)》。碳排放交易可以显著促进碳减排,降低碳排放强度<sup>[27-28]</sup>。

## 3 展望与建议

当前,碳中和实践已经取得了一些进展。在中

国,碳中和目标被放在国家发展的重要位置。世界上有120多个国家提出了碳中和目标,碳中和已经成为不可阻挡的全球趋势。在总结和分析现有实践进展和实现路径的基础上,提出以下研究建议。

(1)国内的现有研究大多是对碳中和的概括和描述,未来有必要通过分析碳中和目标的可行性、接受程度、实现成本及相关技术,用实证数据和模型模拟来验证研究结论。此外,还需要建立综合评价指标体系,动态评估碳中和发展水平。在国际碳中和研究方面,缺少关于全球尺度碳中和趋势的研究,未来应对不同国家的碳中和目标进行比较和分析,充分评估全球碳中和能力和成本。

(2)在碳中和实现路径方面,未来应开展路径相关成本的研究,包括清洁能源使用成本、技术开发成本、实施成本和其他成本。此外,还应开发更复杂、更精准的模型,以更好地评估碳中和目标的实现路径、直接与间接影响、优化协同方案等。

(3)大量学者从定性和定量两个角度对实现碳中和的路径进行了分析和研究,其路径类型主要集中在能源和技术方面,后续应加强对个人、企业和政府低碳转型等社会路径及政策经济路径方面的研究。此外,能源路径、技术路径、社会路径、政策经济路径往往相互作用,现有研究多局限于分析单一路径对碳中和的影响,今后应加强多路径共同效应方面的研究。

### [参考文献]

- [1] 张雅欣,罗荟霖,王灿. 碳中和行动的国际趋势分析[J]. 气候变化研究进展,2021,17(1):88-97.
- [2] ZHANG Y, CHAO Q, CHEN Y, et al. China's carbon neutrality: Leading global climate governance and green transformation[J]. Chinese Journal of Urban and Environmental Studies, 2021, 9(3):2150019.
- [3] BP p. l. c. bp 世界能源统计年鉴(2021年版)[R/OL]. [2022-05-23]. [https://www.bp.com/content/dam/bp/country-sites/zh\\_cn/china/home/reports/statistical-review-of-world-energy/2021/BP\\_Stats\\_2021.pdf](https://www.bp.com/content/dam/bp/country-sites/zh_cn/china/home/reports/statistical-review-of-world-energy/2021/BP_Stats_2021.pdf).
- [4] European Commission. Roadmap for moving to a competitive low carbon economy[EB/OL]. [2022-05-23]. [https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/strategies/2050/docs/roadmap\\_fact\\_sheet\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/strategies/2050/docs/roadmap_fact_sheet_en.pdf).
- [5] SALVIA M, RECKIEN D, PIETRAPERTOSA F, et al. Will climate mitigation ambitions lead to carbon neutrality? An analysis of the local-level plans of 327 cities in the EU[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 135(1):110253.
- [6] BIDEN H. The Biden plan for a clean energy revolution and envi-

- ronmental justice[EB/OL]. [2022-05-23]. <https://joebiden.com/climate/>.
- [7] 刘玫,李鹏程. 气候中性与碳中和国际实践及标准化发展对我国的启示[J]. 标准科学,2020(12):121-126.
- [8] WU X H, TIAN Z Q, GUO J. A review of the theoretical research and practical progress of carbon neutrality[J]. Sustainable Operations and Computers, 2022, 3: 54-66.
- [9] JIA Z, LIN B. How to achieve the first step of the carbon-neutrality 2060 target in China: The coal substitution perspective[J]. Energy, 2021, 233(10): 121179.
- [10] 郭春梅,卞晨航,孟冲,等. 天津生态城低碳体验中心碳排放及减碳潜力研究[J]. 环境监测管理与技术, 2022, 34(2): 7-11.
- [11] MILLOT A, MAÏZI N. From open-loop energy revolutions to closed-loop transition: What drives carbon neutrality? [J]. Technological Forecasting and Social Change, 2021, 172(11): 121003.
- [12] WANG Y, GUO C, ZHUANG S, et al. Major contribution to carbon neutrality by China's geosciences and geological technologies [J]. China Geology, 2021, 4(2): 329-352.
- [13] TAN C X, GENG S P, TAN Z F, et al. Integrated energy system—Hydrogen natural gas hybrid energy storage system optimization model based on cooperative game under carbon neutrality [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 38(6): 102539.
- [14] ZENG J M, LIU L D, LIANG X, et al. Evaluating fuel consumption factor for energy conservation and carbon neutral on an industrial thermal power unit [J]. Energy, 2021, 232(10): 120887.
- [15] 周健,邓一荣. 中国碳捕集与封存(CCS):现状、挑战与展望[J]. 环境科学与管理, 2021, 46(8): 5-8.
- [16] EMENIKE O, MICHAÏLOS S, FINNEY K N, et al. Initial techno-economic screening of BECCS technologies in power generation for a range of biomass feedstock[J]. Sustain Energy Technol Assess, 2020, 40(8): 100743.
- [17] 赵敏,胡静,汤庆合. 上海地区土壤碳汇功能评估[J]. 环境监测管理与技术, 2012, 24(5): 17-22.
- [18] WIRYADINATA S, MOREJOHN J, KORNBLOTH K. Pathways to carbon neutral energy systems at the University of California, Davis[J]. Renew Energy, 2019, 130(1): 853-866.
- [19] SHEA P R, WORSHAM O M, CHIASSON D A, et al. A lifecycle cost analysis of transitioning to a fully-electrified, renewably powered, and carbon neutral campus at the University of Dayton[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2020, 37(2): 100576.
- [20] CHOI S A, GÖSSLING S, RITCHIE W B. Flying with climate liability? Economic valuation of voluntary carbon offsets using forced choices[J]. Transp Res Part D: Transp Environ, 2018, 62(6): 225-235.
- [21] 齐绍洲,柳典,李锴,等. 公众愿意为碳排放付费吗? ——基于“碳中和”支付意愿影响因素的研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(10): 124-134.
- [22] ROTARIS L, GIAN SOLDATI M, SCORRANO M. Are air travellers willing to pay for reducing or offsetting carbon emissions? Evidence from Italy [J]. Transp Res Part A: Policy Pract, 2020, 142(12): 71-84.
- [23] LU J L, WANG C Y. Investigating the impacts of air travellers' environmental knowledge on attitudes toward carbon offsetting and willingness to mitigate the environmental impacts of aviation [J]. Transp Res Part D: Transp Environ, 2018, 59(3): 96-107.
- [24] CHI H O, DENTON G, GURSOY D. Interactive effects of message framing and information content on carbon offsetting behaviors [J]. Tourism Management, 2021, 83(4): 104244.
- [25] HUANG Q, XU J. Bi-level multi-objective programming approach for carbon emission quota allocation towards co-combustion of coal and sewage sludge[J]. Energy, 2020, 211(11): 118729.
- [26] CUI X, ZHAO T, WANG J. Allocation of carbon emission quotas in China's provincial power sector based on entropy method and ZSG-DEA [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 284(2): 124683.
- [27] 周健,邓一荣,庄长伟. 中国碳交易市场发展进程、现状与展望研究[J]. 环境科学与管理, 2020, 45(9): 1-4.
- [28] CHEN X, LIN B. Towards carbon neutrality by implementing carbon emissions trading scheme: Policy evaluation in China[J]. Energy Policy, 2021, 157(10): 112510.

本栏目编辑 姚朝英

(上接第7页)

- [56] WATTS A J R, URBINA M A, CORR S, et al. Ingestion of plastic microfibers by the crab *carcinus maenas* and its effect on food consumption and energy balance[J]. Environ Sci Technol, 2015, 49(24): 14597-14604.
- [57] TING W, MENGHONG H, GUANGEN X, et al. Microplastic accumulation via trophic transfer: can a predatory crab counter the adverse effects of microplastics by body defence? [J]. Sci Total Environ, 2021, 754: 142099.
- [58] BATEL A, LINTI F, SCHERER M, et al. Transfer of benzo[a]pyrene from microplastics to *Artemia nauplii* and further to zebrafish via a trophic food web experiment: CYP1A induction and visual tracking of persistent organic pollutants[J]. Environ Toxicol Chem, 2016, 35(7): 1656-1666.
- [59] LISA H, CARMEN S, SVEN H, et al. Microplastic-associated trophic transfer of benzo(k)fluoranthene in a limnic food web: effects in two freshwater invertebrates (*Daphnia magna*, *Chironomus riparius*) and zebrafish (*Danio rerio*) [J]. Comparative Biochemistry and Physiology, 2020, 237: 108849.
- [60] DIEPENS N J, KOELMANS A A. Accumulation of plastic debris and associated contaminants in aquatic food webs [J]. Environ Sci Technol, 2018, 52(15): 8510-8520.