

引用格式: 刘莉娜, 曲建升, 曾静静, 等. 全球碳中和形势分析及对我国的启示建议. 中国科学院院刊, 2026, 41(8): 1731-1744, doi: 10.3724/j.issn.1000-3045.20250312003.

Liu L N, Qu J S, Zeng J J, et al. Analysis of global carbon neutrality situation and policy insights for China. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2026, 41(8): 1731-1744, doi: 10.3724/j.issn.1000-3045.20250312003. (in Chinese)

全球碳中和形势分析及 对我国的启示建议

刘莉娜^{1,2} 曲建升^{2,3*} 曾静静^{1,2} 宋晓谕^{1,2} 廖琴^{1,2} 牛艺博^{1,2} 刘燕飞^{1,2} 秦冰雪^{1,2}

1 中国科学院西北生态环境资源研究院

干旱区生态安全与可持续发展全国重点实验室 兰州 730000

2 甘肃省知识计算与决策智能重点实验室 兰州 730000

3 中国科学院文献情报中心 北京 100190

摘要 实现“双碳”目标, 将给我国经济社会带来全面且深刻的系统性变革。通过剖析全球碳中和趋势可知, 当前碳中和议题主要围绕减排类别、关键领域、科技创新以及碳市场建设这4个维度展开。我国正稳步构建多层级(国家、地区、企业)的碳中和政策框架体系。在能源、工业、交通、建筑、农林等重点领域, 我国不仅积极采取切实有效的行动, 还大力展开科技布局。同时, 碳市场建设也初显成效, 为我国实现“双碳”目标筑牢了战略保障。然而, 在碳中和新形势下, 我国仍面临着一系列严峻挑战。在能源领域, 能源转型与安全保障亟待解决, 既要加快清洁能源发展, 又要确保能源供应稳定性; 在工业领域, 产业升级与技术创新刻不容缓, 传统工业面临绿色转型压力, 新兴产业的技术创新有待进一步提升; 在交通领域, 需要加大投入以完善基础设施, 并积极推动绿色出行; 在建筑领域, 探索低碳建筑与净零路径面临技术与成本难题; 在生态碳汇领域, 如何科学有效地提升生态系统碳汇能力是关键; 在碳市场未来建设方面, 市场机制、监督体系等仍需进一步完善。

关键词 碳达峰, 碳中和, 能源转型, 可持续发展

DOI 10.3724/j.issn.1000-3045.20250312003

CSTR 32128.14.CASbulletin.20250312003

*通信作者

资助项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(42401388), 国家自然科学基金战略研究项目(42542001), 甘肃省基础研究计划软科学专项(24JRZA057), 兰州市青年科技人才创新项目(2023-QN-25)

修改稿收到日期: 2026年7月29日

随着全球变暖,多个气候临界点将面临被触发的风险。《2024年全球风险报告》(The Global Risks Report 2024)指出,极端天气将是未来人类面临的重大风险。碳中和是国际社会应对气候风险与减缓生态危机的重要举措^[1]。政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布的《全球升温1.5℃特别报告》(Global Warming of 1.5℃)提出,大幅、快速、持续地降低碳排放,在21世纪中叶实现碳中和,才可能将全球升温控制在1.5℃以内。截至2025年10月,有145个国家已经宣布或正在考虑实现净零目标,这些国家覆盖了全球近77%的碳排放量^[2]。其中,中国、欧盟和印度的碳排放总量约占全球的43%^[2]。

温室气体减排是应对和减缓气候变化的国际共识,也是气候谈判中各国博弈的焦点^[3]。1992年,联合国环境与发展大会上,154个国家签署了《联合国气候变化框架公约》(United Nations Framework Convention on Climate Change,以下简称《公约》),为应对气候变化国际合作打下良好基础^[4,5]。此后,历经30年漫长而曲折的国际气候谈判,全球气候治理进程得以持续推进。1995年,第一届缔约方会议(COP1)在德国柏林召开,拉开了国际气候谈判的帷幕。1997年,COP3在日本东京召开,提出《京都议定书》(Kyoto Protocol),直到2005年《京都议定书》才正式生效。2009年,COP15在丹麦哥本哈根召开,通过了《哥本哈根协议》(Copenhagen Agreement)。2015年,COP21在法国巴黎召开,联合国195个成员国在大会上签署了《巴黎协定》(Paris Agreement),各国以“国家自主贡献”(NDC)的方式应对全球气候变化。2024年11月,COP29在阿塞拜疆巴库召开,达成《巴库气候团结契约》(Baku Climate Unity Pact),再次强调气候合作的重要性,但在资金支持、技术转让等关键问题上仍存在诸多难题。

深入剖析这一系列国际气候谈判历程,具有重要的研究意义。在理论上,有助于丰富和完善全球气候

治理理论体系;在现实上,为各国开展碳中和行动提供统一框架与方向。对此,本文总结全球碳中和最新形势,并分析我国“双碳”目标进展及面临挑战,以期为我国高质量发展提出针对性的启示建议。

1 全球碳中和最新形势分析

当前,全球碳中和总体形势呈现出积极进展与复杂挑战并存的态势。各国围绕NDC与减排类别、关键领域碳中和、科技创新及进展、全球碳市场共识等方面积极推进,但同时也面临着诸多现实难题。

1.1 国家自主贡献与温室气体减排现状

(1) 多国承诺强化NDC目标。NDC是各国为实现《巴黎协定》制定的气候行动计划,当前国家气候行动力度尚不足以实现1.5℃以内温控目标^[6]。COP29期间,多国提出加强NDC雄心的重要性,巴西、英国、阿联酋等提出了具体减排目标,德国、美国等也表示将提交更具雄心的NDC。截至2024年12月31日,联合国195个成员国中有69个提交了常见表格格式(CTF)NDC表,89个提交了2年期透明度报告(BTR)^[7]。

(2) 全球持续推进温室气体减排。COP29期间,各国除关注二氧化碳减排,还重视非二氧化碳(如甲烷、氧化亚氮)减排,减排类别得到拓展。《2024年全球碳预算》(Global Carbon Budget 2024)报告指出,2024年全球人为碳排放创下历史新高,而碳预算有限。《全球氧化亚氮评估报告》(Global Nitrous Oxide Assessment)指出,到2050年全球氧化亚氮排放量将增加约30%,其上升速度超出预期,对气候和臭氧层均构成威胁。同时,多项报告显示,亟须提升甲烷治理行动能力,加速政府和私营部门在能源、废弃物和农业等领域采取新举措,实现甲烷减排^[8,9]。

1.2 关键领域碳中和行动进展

COP29上,各国围绕碳中和目标,在能源、工业、交通、建筑和农林等关键领域开展了深入讨论与

交流（图1）。

（1）**加速能源低碳化转型进程。**能源领域碳中和是COP29焦点，强调全球能源转型紧迫性，需构建清洁高效能源体系，提升能效并保障能源安全。国际能源署《2025年可再生能源》（Renewables 2025）报告预计，到2030年全球可再生能源装机将增加一倍，其中80%来自太阳能^[10]；《COP29氢能宣言》（COP29 Hydrogen Declaration）提出加快氢能生产与部署，以促进能源转型。

（2）**推进难减排行业深度脱碳。**工业领域是碳排放的主要来源，COP29聚焦难减排行业低碳技术与深度脱碳，推动循环经济。《2024年工业净零排放追踪报告》（Net-Zero Industry Tracker 2024）提出，航空、航运、公路运输、钢铁、水泥、铝、化工和石油天然气八大难减排行业产生的碳排放量，约占全球当年碳排放总量的40%^[11]。难减排行业仍面临技术成熟度不足、市场竞争与价格机制不完善、监管机制不健全等多重挑战。建议增加低碳技术研发资金，支持关键技术突破和创新；建立创新平台，促进产学研用合作；

加大充电站，加氢站，碳捕集、利用与封存（CCUS）等低碳能源基础设施建设力度^[12]。

（3）**提升交通设施智能化水平。**全球电动汽车销量持续增长，为交通脱碳提供了有力支撑。根据《2026年全球电动汽车展望》（Global EV Outlook 2026）报告，2025年全球电动汽车市场再创新高，较2024年增长20%，销量超过2 000万辆，预计到2035年，全球电动汽车保有量将较2025年增长六倍以上^[12]。推广电动汽车、氢能汽车等低碳交通方式，构建智能交通网络和物流系统，完善充电基础设施建设，有助于推动交通领域减排效应与智能系统协同发展。

（4）**提高绿色建筑电气化水平。**建筑行业是全球第三大碳排放源，实现净零排放目标亟须大力推进减排。建筑建造与运营过程中产生的二氧化碳排放量约为120亿吨/年，约占全球总量的1/3^[13]。对此，建筑运营中可通过推广电气化、提升建筑能效、改变消费者行为来降低能源需求；在建造过程中可通过推广低碳建筑材料技术、提高建造效率、延长建筑寿命及采用低碳翻新技术实现减排。

（5）**推动农林领域可持续发展。**降低农牧领域温室气体排放、增加林业碳汇是实现农林碳中和的重要路径。农牧业是甲烷和氧化亚氮排放的主要来源，农牧系统低碳转型与土地利用优化管理，有助于减排增汇^[8]。《2024年排放差距报告》（Emissions Gap Report 2024）显示，技术创新推广可显著提升农林生产效率和减排；《全球氧化亚氮排放报告》（Global Nitrous Oxide Assessment）指出，改进畜牧业管理模式和技术手段可以显著降低其生产过程中的温室气体排放量。

1.3 科技创新引领碳中和进程

（1）**化石燃料清洁高效利用与能源替代。**一方面，化石燃料清洁高效利用技术取得显著进展，为实现碳中和目标提供了重要支撑。另一方面，核能、风能、氢能等清洁能源大规模部署及其替代品开发是实现碳中和的重要途径。低碳或零碳氢化合物成为传统

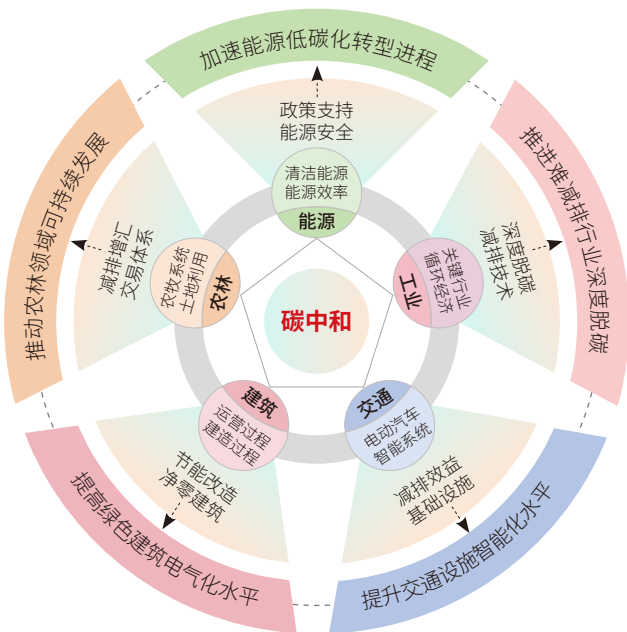


图1 全球碳中和关键议题梳理
Figure 1 Review of key global themes for carbon neutrality

化石燃料领域（长途运输和航空）及高耗能行业（水泥制造和炼钢）的关键脱碳选择^[14]。例如，法国作为核能大国，其核能发电有效降低了对化石能源的依赖；德国、日本、韩国推动氢燃料电池汽车技术发展，探索交通领域氢能脱碳路径。

(2) 新型电力系统与人工智能广泛应用。① **构建新型电力系统，提升清洁能源接入与消纳能力。**欧盟、英国、荷兰等地积极发展分布式能源、微电网、虚拟电厂和海上风电，构建安全、低碳的电力供应体系，确保电力系统安全高效运行^[15,16]。锂离子电池、液流电池和抽水蓄能等储能技术正在快速发展，有助于解决可再生能源间歇性问题。② **数字化与人工智能(AI)技术广泛应用。**数字化技术提高了能源管理效率和精准度。智能电网通过应用物联网、大数据和云计算技术，实现了对电力供需的实时监测和优化调度。AI在可再生能源发电预测、智能电网管理、能源存储优化等方面潜力巨大，既有助于加速能源转型并降低排放，还可实现跨领域（建筑、交通、工业）示范，助力各行业绿色转型。

(3) 基于自然的解决方案与负排放技术。森林是重要碳汇，保护和恢复森林对于减少大气中二氧化碳浓度具有重要意义。巴西、中国、埃塞俄比亚、印度尼西亚、英国和美国等多国实施基于自然的解决方案(NbS)，有效降低森林砍伐和退化，实现碳储存和生态修复^[17]。美国通过改进农业管理措施并采用可持续农业技术，增加土壤固碳能力，有效促进可持续农业实践；中国正在积极推动农业废弃物资源化利用和土壤改良项目。负排放技术(NET)是从大气中移除并长期安全存储二氧化碳的关键技术，包括CCUS、直接空气捕集(DAC)、生物质热解多联产(BIPP)和生物质能碳捕集与封存(BECCS)等技术。CCUS和DAC在降低化石能源碳排放方面潜力显著，欧洲、北美等地积极推进CCUS项目。

1.4 碳市场及气候投融资情况

COP29上全球碳市场取得重大进展，特别是针对《巴黎协定》第6条下的2个关键市场机制，即第6.2条（双边合作机制）和第6.4条（全球统一机制）进行了深入探讨^[18]。各国就建立可靠和透明的碳市场达成一致，这是允许各国通过碳交易和碳核销实现气候目标的关键一步。

(1) COP29促进全球碳市场达成共识。① 第6.2条允许单边、双边及多边协议下的碳信用交易，鼓励国家间通过碳汇项目、清洁能源项目等合作形式，开展减排量和清除量交易，以实现成本效益优化与资源共享。例如，日本和印度尼西亚根据第6.2条碳交易体系，启动首个双边互认协议，为推动全球碳市场迈出关键一步。② 第6.4条旨在建立一个由联合国监督的碳信用机制。COP29就《巴黎协定》第6.4条下“碳信用额”的创建标准达成共识，为启动全球碳市场提供了多项关键基本规则。例如，第6条将确立全球标准与质量、增强市场信誉、激发企业需求，促进企业调整战略选择融入第6条或者继续参与自愿碳市场^[19]。如果整个第6条全面实施，这种跨国合作模式预计将使各国实施NDC的成本每年降低高达2 500亿美元^[18]，并可能对自愿碳市场产生影响。

(2) 全球碳市场亟须关注五大主题。随着全球气候变化问题不断提升，碳管理已成为各国政府和企业实现低碳转型的关键环节。2026年1月，伍德麦肯兹提出2026年全球碳市场需关注的五大趋势，主要包括：① 项目规模扩大，但“超级项目”(mega-project)面临延迟；② CO₂捕集运营规模扩大且行业多样化；③ CO₂航运加快发展，推动跨境封存合作；④ 亚洲政策重心转向资金支持，欧美面临政策阻力；⑤ CCUS在合规碳市场中的地位正逐渐确立^[19]。

(3) 气候投融资规模扩大且流向多样化。随着全球对碳中和重视程度不断提升，气候投融资规模呈现快速增长态势。国际金融机构、政府、企业等各方主

体纷纷加大气候项目的投融资力度。气候基金、碳基金等新型金融工具也不断涌现，为气候项目提供了更多资金来源。此外，气候投融资不仅流向了传统能源、工业等领域，还逐渐向新兴领域拓展^[18]。例如，在新能源汽车研发与生产、智能交通系统、超低能耗建筑、气候智慧型农业等领域。

2 我国碳中和已取得显著成效

我国在积极推进“双碳”目标进程中，通过多维举措构建起全面且深入的行动体系。从政策框架体系逐步完善，到关键领域有力开展减排行动及低碳技术创新，再到碳市场建设持续推进，各个环节紧密相连、协同发力，为实现碳中和愿景奠定了坚实基础。

2.1 逐步完善政策框架体系

我国在国家、地区及企业层面的碳中和政策框架体系逐步完善（图2），为实现碳中和目标提供了坚实的战略保障。

（1）国家层面。2021年9月以来，我国陆续印发“双碳”相关的政策文件，基本建成碳达峰碳中和“1+N”政策体系^[20]。《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》和《2030年前碳

达峰行动方案》这两份文件贯穿碳达峰碳中和“1+N”政策体系的顶层设计。国家层面围绕“1+N”政策体系，明确了能源、工业、交通、建筑、农林、生活等不同领域的“碳达峰十大行动”。

（2）地区层面。截至2024年底，我国31个省（自治区、直辖市）陆续发布了“双碳”相关的实施方案，就各地如何实现“双碳”目标制定了行动计划。从碳达峰时间来看，北京、上海、江苏、天津等地在其碳达峰实施方案中明确提出争取率先或提前实现碳达峰目标。从减排领域来看，主要聚焦能源、工业、城乡建设、交通运输、农业农村、循环经济和科技创新。同时，各地根据经济模式、排放结构、行动进展等差异，其碳达峰策略与实施路径各有侧重。例如，北京、上海、广东、浙江等经济发达地区，注重绿色金融和科技创新，通过金融手段和技术创新推动绿色发展；河北、江苏、四川等工业基础较强地区，持续淘汰落后产能，加快工业领域绿色转型；内蒙古自治区、青海、甘肃等西部欠发达地区依托资源优势，大力发展新能源和清洁电力；吉林和海南分别侧重增加黑土和蓝海碳汇，旨在提升农业和生态系统碳汇能力。

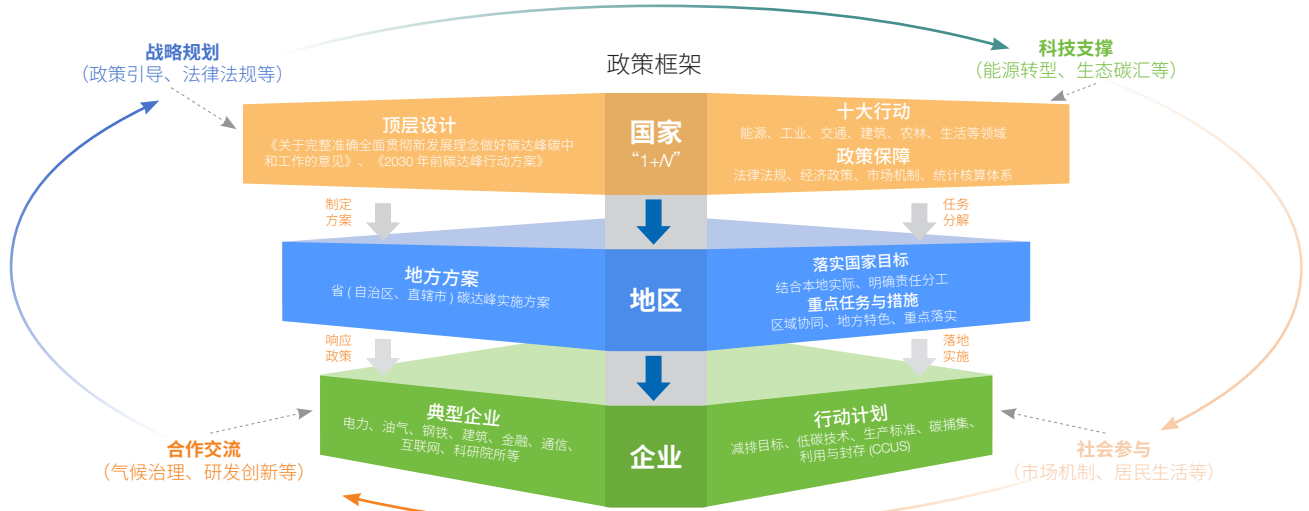


图2 我国“双碳”政策行动框架图
Figure 2 China’s “dual carbon” policy action framework

(3) 企业层面。实现“双碳”目标需推动经济社会全面转型，各行业积极响应并采取行动。① 能源行业引领清洁转型。例如，国家电网有限公司、中国南方电网有限责任公司等电力行业企业聚焦清洁能源替代和能源结构优化，设定2030年非化石能源占比目标；中国海洋石油集团有限公司等相关油气行业启动碳中和规划，落实能源安全新战略，推动炼油行业绿色创新发展；中国核工业集团有限公司等核能企业，致力于安全有序发展核能，巩固清洁能源主力地位。② 制造与建筑业推进绿色升级。例如，中国宝武钢铁集团有限公司、河钢集团有限公司、鞍钢集团有限公司等钢铁行业巨头发布“双碳”目标，明确创新和技术路径；中国建筑第八工程局有限公司等建筑行业企业出台低碳政策和发展规划，通过低能耗建筑、绿地碳汇等措施推动绿色转型。③ 金融行业助力绿色融资。例如，中国人民银行联合6部门发布《关于进一步强化金融支持绿色低碳发展的指导意见》，旨在提升金融机构碳核算能力，加大绿色信贷支持；江苏银行、上海证券交易所等机构通过气候融资支持清洁能源，扩大绿色债券和投资。④ 通信互联网发挥AI驱动作用。例如，中国移动、中国电信等企业提出节能、清洁、赋能行动计划，推动AI算法优化基站能耗管理，旨在实现低碳运营和绿色发展。

2.2 积极推动关键领域减排

通过对我国及各省份“双碳”目标相关政策文本的深度梳理与分析，归纳近年来各领域减排举措可以发现，我国在能源、工业、交通、建筑、农林和全民行动等重点领域积极采取行动，推动各领域减排（图3）^[21]。

(1) 能源领域。通过优化顶层设计、调整能源结构、发展清洁能源等措施，多措并举控制能耗。例如，多省份碳达峰方案提出推进智能电网建设，加快配电网智能化升级改造；广东、黑龙江等工业大省推动发电转型，扩大可再生能源占比；青海、甘肃、西藏等高原省份建设清洁能源基地，推动能源清洁低碳安全高效利用。国家能源局发布的2025年可再生能源并网运行情况显示，截至2025年底，我国可再生能源装机总量达到23.4亿千瓦，约占全国的60%；新增装机容量为4.52亿千瓦，同比增长21%。

(2) 工业领域。通过调整产业结构、重点行业碳管理、发展低碳产业等措施，推动工业绿色化发展，2024年重点行业大宗货物清洁运输比例约70%^[21]。例如，完善能耗双控方案，建立健全监管体系，确保政策有效执行；对钢铁、铁合金、焦化等13个行业严格执行准入条件，加强建材、化工、有色等重点行业能耗与碳管理，提升整体能效水平；加快发展新能源、

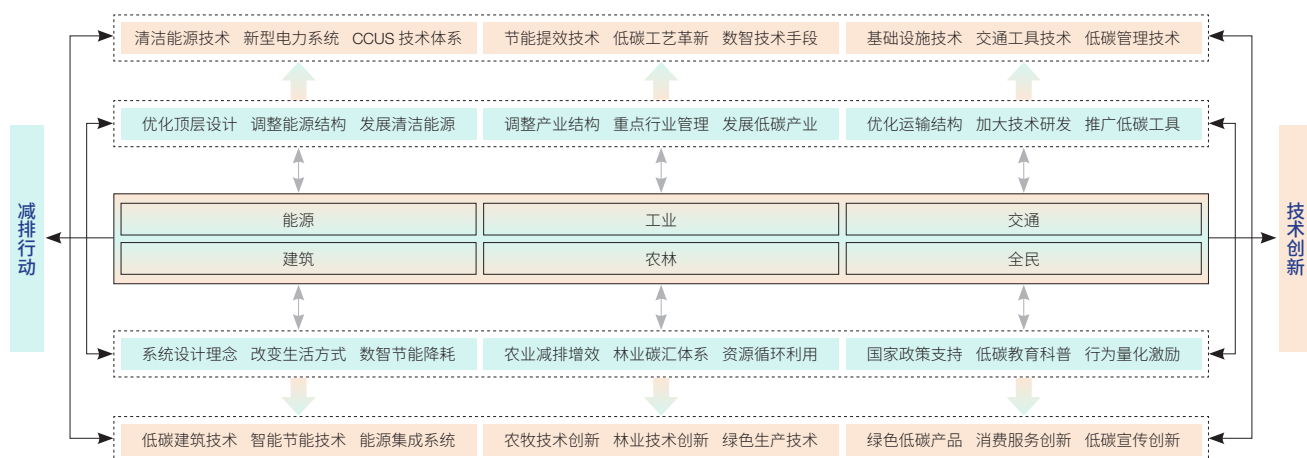


图3 关键领域减排行动与技术创新总结

Figure 3 Summary of emission reduction actions and technological innovation in key areas

新材料等战略性新兴产业，加快淘汰落后产能，促进经济结构优化升级。

(3) **交通领域**。通过优化交通运输结构、加大低碳技术研发、推广低碳交通工具等措施，降低运输能耗和排放强度。例如，调整运输方式比例，鼓励采取更低碳、更高效的运输方式，推广步行、骑行、公共交通等绿色出行方式；加大运输领域低碳新技术研发，推动技术创新和升级；大力推广新能源汽车，完善充电基础设施网络。根据《2026年全球电动汽车展望》(Global EV Outlook 2026) 报告，2025年全球电动汽车销售量超过2 000万辆，中国约占全球的一半以上。

(4) **建筑领域**。通过系统设计新理念、改变生产生活方式、智能化节能降耗等措施，推动建筑领域净零碳排放转型。例如，树立低碳环境价值观，提升新建建筑节能标准至75%，并稳步推进既有建筑节能改造；在北方供暖地区，调整供暖用能结构，提高清洁能源供暖比例；利用数字孪生、AI等技术，实现实体与虚拟空间环境能耗的统筹优化。2024年我国城镇新建绿色建筑面积16.9亿平方米，占当年城镇新建建筑面积的97.9%^[21]。

(5) **农林领域**。通过农业减排增效、林业碳汇体系建设、资源循环利用等措施，加强非二氧化碳温室气体管控，推动农林业可持续发展。例如，实施化肥农药减量增效行动，推广有机肥和生物防治技术，加强农业生物质能源与废弃物资源化利用；多地继续加强林业碳汇建设，实施造林、再造林、森林管理等基于自然的解决方案，有力推动生态产品价值实现和提升生态恢复效果。

(6) **全民行动**。通过国家政策支持、低碳教育科普、行为量化激励等措施，推动绿色低碳生活方式和全民参与减排。例如，政策支持方面，《促进绿色消费实施方案》《公民绿色低碳行为温室气体减排量化导则》等明确提出全面促进重点领域消费绿色转型。

教育普及方面，《加强碳达峰碳中和高等教育人才培养体系建设工作方案》不仅强调增强社会公众意识，还要建设专业人才培养队伍。

2.3 持续加强低碳技术创新

结合我国2023年“双碳”十大科技创新成果，对我国在能源、工业等重点领域持续加强低碳技术创新的情况进行总结(图3)。

(1) **能源领域**。持续加强太阳能、风电技术等清洁能源技术研发，如省域燃煤发电清洁低碳智慧管控关键技术助力火电企业低碳发展。新型电力系统技术取得突破，煤炭清洁高效利用、污染物高效治理协同降碳、安全灵活运行等技术不断进步，促进新能源可靠接入与消纳。CCUS技术体系逐步完善，形成涵盖碳捕集、运输、封存和利用等环节的完整技术链条，攻克CO₂高效低能耗捕集技术，开展绿色甲醇燃料多元化利用示范^[1,20]。

(2) **工业领域**。节能提效技术研发，针对钢铁、水泥等高耗能高排放行业，研发应用高效燃烧、余热回收等技术。在低碳工艺与数字化转型方面，一方面在难减排领域研发三氟甲烷绿色资源化转化利用技术，另一方面利用大数据、云计算、AI等提升工业生产智能化与数字化水平。

(3) **交通领域**。在基础设施上，推广高性能改性沥青技术、路面再生成套等公路道路重点技术。在低碳交通工具上，推进碳电极水解离制氢技术研发攻关，拓展电动汽车和氢能汽车布局。在低碳交通管理上，如“云表桩车”居住区电动汽车有序充电方案推动智能化管理，利用大数据建设交通碳排放统计体系。

(4) **建筑领域**。加快低碳建筑创新，采用高性能保温材料、地源热泵、光伏建筑一体化(BIPV)等超低能耗建筑技术，以及新型监测与装配式技术提升节能水平。智能化节能，利用建筑信息模型等数字监管技术实现建筑智能化、自动化和高效化。支持建筑领

域能源集成系统,如自然工质CO₂循环理论与技术,提高能源利用效率。

(5) **农林领域**。农牧技术创新上,研发化肥农药减量增效、有机废物厌氧发酵沼液催化重整等技术。林业技术创新上,推动森林碳汇监测评估技术,通过遥感监测、地面观测、模型模拟等多手段准确评估碳汇能力。在绿色生产应用上,强化农田碳汇提升、生态系统保护、精准农业等技术,推动农业现代化。

(6) **全民行动**。绿色产品推广,研发推广智能家居、智能出行、绿色包装等技术产品。消费服务创新,建立碳普惠机制,利用碳积分、碳标签等市场化手段激励公众低碳行为。通过媒体、学校、社区等多种宣传方式,提高公众对绿色低碳发展的认知和接受度。

2.4 碳市场建设已初显成效

(1) **市场体系与制度建设成效显著**。根据生态环境部介绍,我国建立了较为完善的碳交易制度体系,已成为全球覆盖排放量最大的碳市场。2024年5月,国务院发布了《碳排放权交易管理暂行条例》,为全国碳市场运行管理提供了法律支撑。此外,全国碳市场行业覆盖范围正在逐步扩大,纳入钢铁、水泥、铝冶炼等行业,覆盖全国碳排放量的占比超过60%^[21]。

(2) **市场功能与经济效应逐步显现**。碳市场促使

企业更加重视碳排放管理,通过节能减排、技术改造等措施降低碳排放强度。通过市场机制作用,碳市场引导企业降低碳排放的同时提高能效,从而促进了我国经济绿色低碳转型^[23]。根据生态环境部介绍,我国碳排放权交易市场碳排放配额已累计成交量6.7亿吨,成交额459.3亿元^[21]。

(3) **国际合作与全球影响逐步提升**。我国积极参与国际碳市场建设与合作,借鉴国际先进经验,推动国内碳市场高质量发展。通过签署合作协议、开展联合研究等方式,加强与国际碳市场建设的合作与协调。我国碳市场持续完善,全球影响力正逐步提升^[22]。

3 实现碳中和仍面临诸多挑战

根据全球碳中和形势,以及我国在碳中和相关政策行动、重点领域、技术创新、碳市场建设等方面取得成效,归纳总结我国未来可能面临的挑战(图4)。

3.1 能源转型与安全保障双重压力

能源转型是实现“双碳”目标的关键环节,但仍面临能源结构调整、成本控制及安全保障等多重挑战^[24]。① **能源结构调整难度较大**。尽管我国清洁能源占比近年来有所提升,根据国家统计局数据,2025年煤炭占能源消费总量的比例达51.4%,仍占主导地位。这意味着在未来几十年要完全实现能源脱碳,必须妥

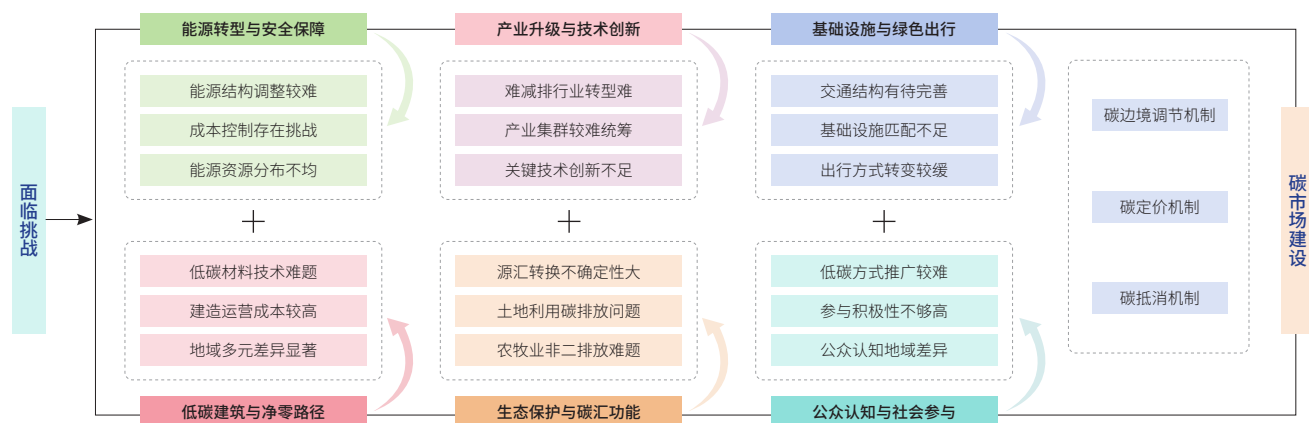


图4 我国实现“双碳”目标面临挑战总结

Figure 4 Summary of challenges faced by China in achieving “dual carbon” goal

善解决经济发展与能源安全之间的平衡问题，这是一项艰巨任务。② **成本控制方面存在挑战**。在扩大清洁能源规模和提高经济效益过程中，其面临着调峰能力不足、远距离输送成本高以及储能配置不足等问题。③ **能源资源分布不均衡**。例如，太阳能、风能等资源主要集中在我国西部和北部，而用电负荷中心则位于东部和南部，这使得能源集成系统的稳定性、安全性和消纳能力面临较大挑战。此外，我国在氢能、核电等可再生能源的安全性技术与管理方面存在不足，从而影响国家能源安全保障^[20,25]。

3.2 产业升级与技术创新仍存瓶颈

工业作为实现“双碳”目标的重点领域，需要通过产业结构优化和技术创新，推动高碳向低碳的转变。① **难减排行业绿色转型难题亟须克服**。钢铁、铝、有色金属等传统产业由于耗能高、排放高，在向智能化、高端化、绿色化转型过程中，面临着技术、资金、市场等多重挑战^[26]。② **产业链或产业集群统筹发展面临挑战**。因其涉及多个技术领域，有些产品面临碳关税等贸易壁垒。例如，上游原材料和设备制造相对薄弱，部分关键零部件依赖进口；下游储能成本高、效率低，难以满足清洁能源产业集群和大规模并网的需求，影响整个产业链竞争力。③ **关键设备及技术创新不足**。在CCUS、零碳、负碳等技术方面，存在研发投入和创新不足的问题。同时，我国在高端材料制备、全球供应链风险管理等方面仍存在“卡脖子”难题^[27]。

3.3 基础设施与绿色出行亟须优化

随着我国电动汽车销量持续增长，交通领域的脱碳成为可能，同时也伴随着一系列问题。① **运输结构有待完善**。例如，2025年交通运输行业发展统计公报显示，我国仍以公路运输为主，民航和水路等低碳交通发展仍需进一步优化。② **基础设施匹配不足**。新能源汽车与基础设施之间的协同发展问题凸显。如何找到充电基础设施与投资成本之间的平衡点，确保新能

源汽车便捷使用，并推动关键矿物回收商业化，是交通领域面临的一大挑战^[28]。③ **出行方式转变较缓**。交通出行方式会导致其碳排放量存在显著差异，加之出行需求差异，不利于交通领域整体低碳化发展。

3.4 低碳建筑与净零路径面临挑战

建筑领域是实现“双碳”目标的重点领域之一，面临着建筑能耗高和建筑材料低碳化不足的问题。

① **技术层面**，低碳建筑材料、清洁供暖技术和智能系统等方面仍存在难题。低碳水泥、混凝土等建筑材料虽具环保优势，但其成本较高，且性能有待进一步优化提升；热泵等清洁供暖技术在某些地区的应用受限，普及程度待提高；智能系统的普及率和应用水平也亟待提高，以便充分发挥其降耗方面的潜力。② **经济层面**，低碳建筑建造和运营成本相对较高，导致其市场竞争力不足。当前，缺乏有效的财政补贴、税收优惠等激励政策，使得企业和消费者缺乏足够的积极性。③ **区域差异层面**，我国各地气候条件、经济发展和建筑类型差异显著。因此，在制定和实施减排策略时，必须充分考虑区域差异性，因地制宜地采取针对性的有效措施。

3.5 生态保护与碳汇功能仍待提升

农林领域作为重要的碳汇来源，需要平衡农牧生产与减排增汇的双重目标。源汇转变的不确定性问题日益凸显。青藏高原、黄土高原、西北寒旱区等地虽然草地资源丰富，但草原退化、人为破坏、水质恶化等问题依然严重。随着气候变化对植被、土壤和多年冻土的影响，可能会导致植物向土壤的碳输入减少，多年冻土退化可能会加速土壤碳释放^[29]。土地利用变化导致碳排放问题加剧。随着城市化进程加速和农业用地减少，土地利用方式改变会导致土壤碳储存能力下降，碳汇效应减弱。同时，森林砍伐、火灾、虫害等问题频发，森林资源损失严重，进一步降低碳汇功能^[30]。农牧业非二氧化碳排放问题亟须重视。我国农牧业仍以高投入、高排放的传统方式为主，非二氧化

碳排放在国家温室气体排放总量中比例较大,相关减排技术研发和政策创新仍相对不足。

3.6 公众认知和社会参与相对不足

全民行动是实现“双碳”目标的重要保障之一。当前面临的主要问题是公众认知差异较大、参与积极性不高及低碳方式推广不足等。① **不同地区公众认知存在差异**。青藏高原、西北欠发达地区及云贵高原等区域,其科普资源和专业人才等方面较东中部地区明显稀缺。② **公众参与积极性不够高**。中小企业技术落后、资源有限,实践相对较少;居民生活领域的减污降碳工作常被忽视,缺乏针对性举措激发公众热情。③ **低碳生活方式推广较难**。我国传统生活方式惯性相对较大,短时间内难以完全转变为低碳方式^[10]。

3.7 我国碳市场建设面临多重困境

我国碳市场建设虽取得一定成果,但也面临多方面问题。① **碳边境调节机制扩大带来挑战**。欧盟将钢铁、铝等高耗能行业纳入碳边境调节机制,这将增加我国出口商品碳成本,进而削弱国际竞争力。② **碳定价机制存在不稳定性**。碳定价易受市场和政策等多因素影响,容易导致市场投机、价格波动、参与不足等问题。③ **碳抵消机制仍存弊端**。尽管碳抵消机制在一定程度上会促进我国绿色发展,但也会引发市场供需失衡、项目质量参差不齐及监管难度增加等问题,还可能带来国际对接、技术转移等方面的不确定性。

4 启示建议

随着全球碳中和进程持续推进,新形势不断涌现。我国在碳中和工作中已取得一些显著成效,然而挑战如影随形。立足当下,展望未来,紧密结合全球碳中和最新态势,为我国实现“双碳”目标提出以下4点启示建议。

4.1 完善深化顶层设计,健全法规与制度建设体系

在顶层设计与法规制度建设方面,我国可借鉴英国、欧盟等国际经验,进一步提升战略谋划和部署水

平。针对关键细分领域,可制定5年或10年的中长期、阶段性详细目标,并每年对优先发展方向进行全面评估和更新。同时,加强能源安全、工业脱碳、交通低碳、建筑节能、农林减排、全民行动等方面的法规制度建设,确保各项政策有法可依、有章可循。具体而言,要完善能效监管机制,强化固定资产投资节能审查,推动绿色信贷评估体系建设,为绿色产业提供政策支持和法律保障。

4.2 全面推动绿色转型,优化结构并促进产业升级

(1) **能源领域**。推动前沿技术研发,可设立专项科研基金,加大对太阳能、风能、水能等可再生能源中高效太阳能电池技术、大型海上风电机组关键技术的研发。加强能源安全保障,可加强能源战略储备体系建设,推动能源多元化供应,同时构建能源安全监测预警机制。

(2) **工业领域**。加大循环经济投资与结构升级,重点支持工业废弃物综合利用、可再生资源回收利用等领域的项目建设,加强工业园区循环化改造,构建循环经济产业链,推动工业结构优化升级。制定具体的、量化的工业减排目标,将减排责任分解到各地区、各行业和企业。鼓励企业采用先进的节能减排技术和工艺,推广应用智能制造技术,提高自动化和智能化水平。

(3) **交通领域**。注重低碳技术创新政策引导,制定绿色交通技术创新政策,明确重点领域和方向。加大对电力、氢能、天然气等清洁能源在交通领域应用的支持力度,建设科学合理的充电桩、加氢站等基础设施。注重交通数字化转型,加大5G通信、6G通信、人工智能、物联网等技术在交通领域应用的研发投入,提升车辆行驶安全性和智能化水平^[20,22]。

(4) **建筑领域**。健全建筑节能技术标准,明确新建建筑和既有建筑改造的节能要求。被动节能手段灵活应用,如自然通风、遮阳、蓄热等,根据不同地区气候特点和建筑功能,灵活选择和应用被动节能手段。

因地制宜推进老旧小区低碳改造，建立老旧小区低碳改造长效管理机制，确保改造效果持续性和稳定性。

(5) **农林领域**。深化农林业减排作用，加强农田减排技术研发与管理，推广精准农业、节水灌溉、有机肥施用等技术，减少农业面源污染和温室气体排放。发挥林业碳汇功能，加强森林资源保护与管理，提高森林质量及碳汇能力，开发多元化碳汇产品和服务，如森林碳汇、草原碳汇、湿地碳汇等^[29]。持续更新完善农林领域具体部门的远期行动计划和减排战略，根据国内外形势需求，及时调整目标和措施。

4.3 加速科技创新步伐，强化数字和智能技术引领

在科技创新方面，一方面需要完善保障体系，强化低碳前沿技术研发支撑，如设立低碳技术研发专项，加大太阳能、风能、储氢、CCUS等关键领域部署力度。另一方面，深化国际合作，紧跟碳中和新兴技术与产业方向，加强关键低碳技术攻关和标准制定。同时，发挥数字智能技术引领作用，推动交通、建筑、工业等各领域数字化转型，提高能效和减排效果^[22]。

4.4 加强国内碳市场建设，共筑全球气候治理新征程

在全球气候治理深刻变革下，碳市场建设成为关键着力点。我国需积极应对碳边境调节机制挑战，强化国内碳市场建设。一方面，提升碳定价效率与交易活跃度，加强合规碳定价监管，确保市场健康稳定运行。另一方面，完善碳抵消项目认证和审核机制，推动企业碳抵消高质量发展。同时，积极参与碳市场规则制定，加强国际合作，推动《巴黎协定》第6条在全球范围内实施，维护我国在碳市场中的利益和话语权。作为负责任大国，我国在碳市场中积极作为，不仅推动我国碳市场国际化，提高国际竞争力和影响力，更为全球气候治理贡献中国智慧与方案，引领全球迈向绿色低碳未来。

参考文献

1 曲建升, 陈伟, 曾静静, 等. 国际碳中和战略行动与科技布局分析及对我国的启示建议. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 444-458.
Qu J S, Chen W, Zeng J J, et al. Analysis of international carbon neutralization strategic actions and technology layout and enlightenment suggestions to China. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(4): 444-458. (in Chinese)

2 Climate Action Tracker. CAT Net Zero Target Evaluations. (2025-10-27) [2026-07-22]. <https://climateactiontracker.org/global/cat-net-zero-target-evaluations/>.

3 张志强, 曲建升, 曾静静. 温室气体排放评价指标及其定量分析. 地理学报, 2008, 63(7): 693-702.
Zhang Z Q, Qu J S, Zeng J J. A quantitative comparison and analytical study on the assessment indicators of greenhouse gases emissions. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(7): 693-702. (in Chinese)

4 刘莉娜. 中国居民生活碳排放影响因素分析与峰值预测. 兰州: 兰州大学, 2017.
Liu L N. The Determinants and Peak Prediction of Household CO₂ Emissions in China. Lanzhou: Lanzhou University, 2017. (in Chinese)

5 刘莉娜, 曲建升, 曾静静. 中国居民生活碳排放时空格局及影响机制研究. 北京: 气象出版社, 2024.
Liu L N, Qu J S, Zeng J J. Research on the spatio-temporal patterns and the influential mechanism of household CO₂ emissions in China. Beijing: China Meteorological Press, 2024. (in Chinese)

6 United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). 2024 NDC synthesis report. (2024-10-08)[2024-11-30]. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/nationally-determined-contributions-ndcs/2024-ndc-synthesis-report>.

7 United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). First biennial transparency reports. (2024-12-31) [2024-12-31]. <https://unfccc.int/first-biennial-transparency-reports>.

8 United Nations Environment Programme (UNEP). Global nitrous oxide assessment. (2024-11-12)[2024-11-20]. <https://>

- doi.org/10.59117/20.500.11822/46562.
- 9 United Nations Environment Programme (UNEP). An eye on methane 2024: Invisible but not unseen. (2024-11-15)[2024-11-20]. <https://www.unep.org/resources/eye-methane-2024>.
 - 10 IEA. Renewables 2025. (2025-10-17) [2026-07-25]. <https://www.iea.org/reports/renewables-2025>.
 - 11 World Economic Forum. Net-zero industry tracker 2024 edition. (2024-12-12) [2024-12-20]. https://reports.weforum.org/docs/WEF_Net_Zero_Industry_Tracker_2024.pdf.
 - 12 IEA. Global EV Outlook 2026. (2026-05-20) [2026-07-25]. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/e75c9a13-3753-4677-933f-c7f9ae38cfdb/EVBatterySupplyChainSustainability.pdf>.
 - 13 Energy Transitions Commission. Achieving zero-carbon buildings: Electric, efficient and flexible. (2025-02)[2025-2-06]. <https://www.energy-transitions.org/publications/achieving-zero-carbon-buildings/>.
 - 14 Resources for the Future. Global energy outlook 2024: Peaks or plateaus. (2024-04-02) [2024-11-30]. <https://www.rff.org/publications/reports/global-energy-outlook-2024/>.
 - 15 GOV.UK. Clean power 2030 action plan: A new era of clean electricity. (2024-12-13) [2024-12-30]. <https://www.gov.uk/government/publications/clean-power-2030-action-plan>.
 - 16 PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. Exploration of pathways towards climate neutrality 2050: Pathways towards a climate-neutral society for the Netherlands in 2050. (2024-07-17) [2024-10-30]. https://www.pbl.nl/system/files/document/2024-07/pbl-2024-exploration-of-pathways-towards-climate-neutrality-2050_5535.pdf.
 - 17 Umwelt Bundesamt. Nature-based solutions for climate and biodiversity protection in selected national climate contributions. (2025-02)[2025-02-15]. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/05_2025_cc.pdf.
 - 18 COP29 Baku Azerbaijan. COP29 achieves full operationalisation of Article 6 of Paris Agreement—Unlocks international carbon markets. (2024-11-23) [2024-11-30]. <https://cop29.az/en/media-hub/news/cop29-achieves-full-operationalisation-of-article-6-of-paris-agreement-unlocks-international-carbon-markets>.
 - 19 MackenzieWood. Carbon markets: 5 things to look for in 2025. (2024-12-18) [2024-12-30]. <https://www.woodmac.com/news/opinion/carbon-markets-2025-outlook/>.
 - 20 顾佰和, 于东晖, 王琛, 等. 进一步深化碳达峰碳中和战略转型路径的若干思考. 中国科学院院刊, 2024, 39(4): 726-736.
 - Gu B H, Yu D H, Wang C, et al. Insights on further deepening carbon peaking and carbon neutrality strategy and pathways. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(4): 726-736. (in Chinese)
 - 21 中华人民共和国生态环境部. 生态环境部部长黄润秋作《国务院关于应对气候变化和碳达峰碳中和工作情况的报告》. (2025-09-12) [2026-07-25]. https://www.mee.gov.cn/ywdt/hjywnews/202509/t20250912_1127354.shtml.
 - 22 龚剑明, 曲建升, 段晓男, 等. 发挥学部智库咨询作用, 服务国家“双碳”战略需求——中国科学院学部“碳中和”重大咨询项目案例. 中国科学院院刊, 2023, 38(7): 1050-1059.
 - Gong J M, Qu J S, Duan X N, et al. Exerting the think tank role of Academic Divisions and serving the needs of national dual carbon strategy—Major consultancy project of carbon neutrality by CAS Academic Divisions. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(4): 444-458. (in Chinese)
 - 23 王科, 吕晨. 全球和中国碳市场回顾与展望(2025). 北京理工大学学报(社会科学版), 2025, 27(2): 19-36.
 - Wang K, Lv C. Review and outlook of global and China carbon markets. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2025, 27(2): 19-36. (in Chinese)
 - 24 王戎, 陈社叶, 曾嘉伟, 等. “双碳”目标下中国能源转型的战略思考. 科技导报, 2024, 42(19): 10-19.
 - Wang R, Chen Z Y, Zeng J W, et al. Strategic consideration of China's energy transition under the “dual-carbon” goal. Science & Technology Review, 2024, 42(19): 10-19. (in Chinese)
 - 25 顾大钊, 李阳, 李根生, 等. 面向2040年我国碳中和重点领域工程科技发展战略研究. 中国工程科学, 2024, 26(5): 80-90.
 - Gu D Z, Li Y, Li G S, et al. Development strategy of engineering science and technology in key fields of carbon neutrality in China toward 2040. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, 2024, 26(5): 80-90. (in Chinese)

- 26 陈诗一, 许璐, 吴海鹏. “双碳”目标下中国产业链绿色低碳转型的理论阐释与实现路径. 广东社会科学, 2024, (5): 63-74.
Chen S Y, Xu L, Wu H P. Theoretical interpretation and realization path of green low-carbon transformation of China's industrial chain under the dual carbon goal. Social Sciences in Guangdong, 2024, (5): 63-74. (in Chinese)
- 27 刘媛, 张华. “卡脖子”技术攻关评价模型构建及应用——以江苏新材料产业为例. 情报杂志, 2025, 44(6): 185-192.
Liu Y, Zhang H. Construction and application of evaluation model of tackling “sticking neck” technology: Taking Jiangsu's new materials industry as an example. Journal of Intelligence, 2025, 44(6): 185-192. (in Chinese)
- 28 应雄, 汪寿阳, 杨宇瑶. 能源转型下的锂、钴、镍资源需求及回收潜力分析——基于电动汽车的视角. 中国科学院院刊, 2024, 39(7): 1226-1234.
Ying X, Wang S Y, Yang Y Y. Analysis of demand and recycling potential of lithium, cobalt, and nickel under energy transition—From perspective of electric vehicles. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(7): 1226-1234. (in Chinese)
- 29 冯起, 白光祖, 李宗省, 等. 加快构建西北地区生态保护新格局. 中国科学院院刊, 2022, 37(10): 1457-1470.
Feng Q, Bai G Z, Li Z X, et al. Accelerate construction of new pattern of ecological protection in northwest China. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(10): 1457-1470. (in Chinese)
- 30 赵荣钦, 黄贤金, 郅文聚, 等. 碳达峰碳中和目标下自然资源管理领域的关键问题. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1123-1136.
Zhao R Q, Huang X J, Yun W J, et al. Key issues in natural resource management under carbon emission peak and carbon neutrality targets. Journal of Natural Resources, 2022, 37(5): 1123-1136. (in Chinese)

Analysis of global carbon neutrality situation and policy insights for China

LIU Lina^{1,2} QU Jiansheng^{2,3*} ZENG Jingjing^{1,2} SONG Xiaoyu^{1,2}

LIAO Qin^{1,2} NIU Yibo^{1,2} LIU Yanfei^{1,2} QIN Bingxue^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2 Gansu Key Laboratory of Knowledge Computing and Intelligent Decision, Lanzhou 730000, China;

3 National Science Library, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract Achieving the goal of “dual carbon” (carbon peaking and carbon neutrality) will bring comprehensive and profound systematic changes in China's social economy. By analyzing the global trend of carbon neutrality, it can be seen that the topics of carbon neutrality mainly focus on four aspects: emission reduction categories, key areas, technological innovation, and carbon market construction. At present, China is steadily building a multi-level (national, regional, and enterprise) carbon-neutral policy framework system. In key areas such as energy, industry, transportation, construction, agriculture, and forestry, China not only actively takes practical and effective actions but also vigorously carries out scientific and technological deployments. Meanwhile, the construction of the carbon market has also shown some initial success, providing a solid strategic guarantee for China to achieve the “dual carbon”

*Corresponding author

goals. Nevertheless, under the new situation of carbon neutrality, China still faces a series of severe challenges. In the energy sector, the issues of energy transformation and security assurance urgently need to be addressed. It is necessary to accelerate the development of clean energy while ensuring the stability of the energy supply. In the industrial sector, industrial upgrading and technological innovation are of great urgency. Traditional industries are under pressure to undergo green transformation, and the technological innovation capabilities of emerging industries need to be further enhanced. In the transportation sector, increased investment is required to improve infrastructure, and green travel should be actively promoted. In the construction sector, technological and cost challenges are faced in exploring low-carbon building and net-zero pathways. In the ecological carbon sink sector, the key lies in how to scientifically and effectively enhance the carbon sequestration capacity of ecosystems. In terms of future construction of the carbon market, market mechanisms and supervision systems still need to be further improved.

Keywords carbon peaking, carbon neutrality, energy transformation, sustainability

刘莉娜 中国科学院西北生态环境资源研究院副研究员。主要研究领域为生态环境与“双碳”战略研究。E-mail: liuln@llas.ac.cn

LIU Lina Associate researcher of Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences (CAS). Her research focuses on the ecological environment and dual carbon strategy. E-mail: liuln@llas.ac.cn

曲建升 中国科学院文献情报中心主任、研究员。主要研究领域为气候变化、生态环境与“双碳”战略研究。
E-mail: qujs@clas.ac.cn

QU Jiansheng Director, researcher of National Science Library, Chinese Academy of Sciences (CAS). His research focuses on climate change, the ecological environment and dual carbon strategy. E-mail: qujs@clas.ac.cn

■ 责任编辑：文彦杰