

关键碳中和技术的 2030 年目标与全球进展差距评估

关钰生¹, 张诗卉^{2*}, 王灿¹

(1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 2. 中国人民大学生态环境学院, 北京 100872)

【摘要】 碳中和目标的实现依托于关键低碳技术的快速部署与规模化应用。然而, 全球范围内各类技术的既定目标与实际进展之间仍存在显著差距。本文构建了一个涵盖七类关键碳中和技术[可再生能源电力、电动车、节能、生物燃料、碳捕集利用与封存 (CCUS)、清洁氢和森林碳汇]的系统评估框架, 综合国际数据库与政策情景数据, 对各技术的 2030 年目标与当前部署进展之间的差距进行了定量评估。结果显示, 全球层面七类关键技术的目标完成度仅为 1% 至 42%, 其中节能、生物燃料和 CCUS 的进展最为滞后, 而可再生能源和电动车虽已实现规模化增长, 但增速尚未达到如期完成目标的要求; 清洁氢和 CCUS 技术面临高成本与基础设施不足的双重约束, 而森林碳汇的治理与监测体系仍需进一步强化。总体来看, 全球碳中和技术体系面临增速不足、结构失衡和投资缺口并存的局面。针对这些挑战, 本文提出应通过加快重点领域技术创新、实施差异化支持政策、优化投融资结构、强化国际协同治理等措施, 形成系统性的技术发展框架, 助力全球碳中和目标的实现。

【关键词】 碳中和技术; 目标差距评估; 可再生能源; CCUS; 清洁氢; 技术政策

【中图分类号】 X321; G307; F113.3

【文章编号】 1674-6252 (2025) 06-0095-11

【文献标识码】 A

【DOI】 10.16868/j.cnki.1674-6252.2025.06.095

引言

全球碳中和进程正从“承诺宣示”向“执行落实”过渡^[1]。自《巴黎协定》通过以来, 各国陆续提出了到 2050 年前后实现净零排放的长期目标, 并在能源、工业、交通、建筑及生态系统等领域制定了中期技术部署规划^[2]。然而, 从全球范围看, 实际进展与目标路径之间仍存在显著差距。根据联合国环境规划署 (UNEP) 和国际能源署 (IEA) 最新评估, 在“当前政策情景”下, 关键低碳技术的部署强度与投资规模普遍滞后于既定目标, 全球

减排速度几乎不可能将全球升温幅度限制在 1.5℃ 以内^[3]。当前碳中和技术发展面临挑战, 一方面, 部分成熟技术已快速扩散, 但部分新兴技术仍未进入规模化发展阶段; 另一方面, 由于政策缺位、资金匮乏或基础设施限制, 关键技术在部分地区的渗透率大大落后于全球部署进展。系统、定量识别这些关键技术的“目标—进展差距”, 不仅有助于科学判断全球碳中和进程现状, 也能为政策支持、投融资决策与国际合作提供参考, 加速碳中和承诺的落实。

资助项目: 国家自然科学基金青年基金项目“考虑健康协同效益的区域差异化碳定价机制研究”(72204137); 国家自然科学基金碳中和专项“中国碳中和实现路径的预测研究”(72348001); “全球碳中和年度进展评估”项目。

作者简介: 关钰生 (2002—), 男, 博士研究生, 研究方向为能源经济系统建模与分析、城市系统低碳转型与可持续发展, E-mail: guanys23@mails.tsinghua.edu.cn。

*** 责任作者:** 张诗卉 (1994—), 女, 博士, 助理教授, 硕士生导师, 研究方向为气候变化经济学、气候变化与低碳政策的经济—健康影响评估、气候—环境—经济—健康跨系统建模, E-mail: shihuizhang9414@ruc.edu.cn。

近年来,多个国际机构与研究组织开展了对碳中和及技术进展的追踪与监测,为全球低碳转型进程的量化评估提供了基础数据与分析视角。IEA通过《追踪清洁能源进展》系列报告(TCEP)定期评估全球能源系统中50多种关键技术与基础设施的发展状况^[4],国际可再生能源署(IRENA)每年更新全球及主要地区可再生能源电力技术装机容量和成本指标^[5],全球能源监测(GEM)则对全球化石燃料、电力基础设施的新建容量和退役状况进行持续追踪^[6]。然而,这些机构对全球碳中和及技术进展开展的综合评估仍存在一些盲区。一方面,它们多数专注于能源或电力系统,对碳捕集利用与封存(CCUS)、森林碳汇等碳中和关键负碳技术关注不足;另一方面,它们的分析往往基于到本世纪中叶实现净零排放的假设,较少以明确的短期全球目标为基准,衡量全球技术的部署进展。因此,亟须构建以2030年目标为核心的短期目标—进展评估框架,在全球范围内识别各项技术的进展与目标之间的差距,从而识别关键差距,为优化支持政策和加速技术部署提供参考。

本研究旨在构建一个关键碳中和及技术进展差距评估框架,通过系统量化不同技术的目标设定与部署进展,识别碳中和进程中的关键短板与结构性差距。研究以可再生能源电力、电动车、节能、生物燃料、CCUS、清洁氢和森林碳汇七类技术为分析对象,综合运用国际数据库与模型估算结果,对各技术的2030年目标完成度进行比较评估。通过目标与进展的对比分析,本文力求为国际社会理解全球碳中和及技术转型的真实进度提供科学依据,也为各国制定技术战略与政策布局提供一定参考。

1 评估方法

1.1 评估框架

本研究选取可再生能源电力、电动车、节能、生物燃料、CCUS、清洁氢和森林碳汇等七类关键技术作为全球碳中和及技术进展评估的核心对象^[7]。这一选择基于两个方面的考虑:一方面,这七类技术覆盖了《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)温室气体排放清单的主要部门^[8],包括能源、工业过程和产品使用、农业、林业和其他土地利用、废

弃物等,是全球减排的关键技术支撑;另一方面,它们共同构成了实现深度脱碳与长期净零目标的系统性技术路径,既包括以能源供应为中心的“供给侧替代”,也涵盖终端部门的“需求侧转型”和以碳汇为代表的“负排放补偿”^[9]。能源生产与转化部门脱碳关键在于可再生能源电力与CCUS技术:前者通过替代化石能源实现源头减排,后者避免化石能源的剩余排放。交通运输部门的低碳转型主要依靠电动车与生物燃料技术,二者均为交通燃料替代的技术选择。工业与建筑部门的减排难度较大,而节能技术在提升能效的同时可优化工艺流程。对于钢铁、水泥、化工生产中难以通过电气化实现降碳减排的环节,清洁氢与CCUS技术分别提供了源头和末端减排方案。土地利用、土地利用变化及林业部门(LULUCF)兼具排放源和汇的角色,而森林碳汇是加强生态系统的碳储存与抵消的选择之一。因此,以这七类技术作为全球碳中和进展评估的核心对象,既涵盖了重要排放部门,又基本覆盖了主要的降碳减排技术。

1.2 目标—进展差距的指标定义与计算方法

为保证不同技术间结果的可比性与方法的透明性,本文对“目标—进展差距”的核心指标体系和计算方法进行了统一界定。本文所称“2030年目标完成度”指按基准年至现状年(2024年)年均复合增长率外推后,某一技术在2030年可能实现的部署水平与其既定目标水平之间的比值,用以量化技术目标与进展之间的差距。“2030年目标完成度”的计算公式如式(1)和式(2)所示。其中, C_{2030} 是2030年目标完成度, I_{2024} 是指标在现状年的取值, I_b 是指标在基准年的取值, r 为指标在基准年至现状年期间的年均复合增长率, T_{2030} 是指标在2030年的目标取值。此外,“2024年完成度”则是指指标在2024年的取值与2030年目标值之比,如式(3)所示。

$$C_{2030} = I_{2024} \times (1+r)^{2030-2024} / T_{2030} \quad (1)$$

$$r = (I_{2024} / I_b)^{1/(2024-b)} - 1 \quad (2)$$

$$C_{2024} = I_{2024} / T_{2030} \quad (3)$$

在评估指标的选取上，本文充分考虑七类技术在性质和单位上的差异，根据其全球目标和数据可得性选取了最能反映技术进展的核心指标。可再生能源电力技术以装机容量（单位：吉瓦，GW）衡量；电动车技术以年度销量（单位：万辆/年）衡量；节能技术以全球能效提升率（单位：% / 年）衡量；生物燃料技术以产能（单位：亿升/年）衡量；清洁氢技术以产能（单位：万吨/年）衡量；CCUS技术以捕集能力（单位：亿吨CO₂/年）衡量；森林碳汇技术以净固碳量（单位：亿吨CO₂/年）衡量。值得注意的是，森林碳汇技术2030年目标为“零毁林”，本文将其简化为净固碳量为0，并在计算完成度时，选择基准年净固碳量的绝对值（即待削减的排放量）作为目标值。尽管全球能效提升率和净固碳量存在波动性，采用平均增速可以反映全球进展在该指标下的宏观体现，且可以确保全文对七类技术分析具有一致性。此外，在对单个技术开展目标—进展差距评估时，本文还辅以特定技术的市场规模、渗透率、项目数量等指标，增强差距评估的系统性和完整性。

本文选取2015年和2023年作为两组对比情景的基准年，具有明确的科学与政策依据。2015年是《巴黎协定》达成之年，以2015年为基准，可系统评估《巴黎协定》实施十年来全球碳中和关键技术整体进展趋势，反映各国中长期承诺的落实程度。以2023年为基准则能反映过去一年全球低碳技术部署的最新进展态势。通过以2015年和2023年为双基准年进行对比外推，本文既可揭示过去十年技术发展的长期趋势，又能反映近期年度进展的动态变化，为判断2030年前的目标实现路径提供多时间尺度的参考依据。

需要指出的是，本文对2030年完成度的预测基于“未来趋势可由近年平均增速代表”的假设，这一方法虽能较好揭示技术发展的方向性差距，但也存在一定局限。首先，部分技术（如电动车、清洁氢和CCUS）可能面临饱和效应与边际成本递减的约束，未来增速可能低于历史平均水平。其次，政策环境与经济周期的变化（包括补贴退出、市场波动、融资条件收紧等）均可能导致增长趋势的转折。此外，技术突变或制度创新亦可能打破线性假设，使实际结果偏离预测轨迹。因此，本文的外推结果应被理解为基于历史趋势的情景估计，而非确定性预测，相关结论宜作趋势性参考。

1.3 数据来源

本研究的数据来源主要是国际权威数据库和各国官方文件，力求在数据覆盖度、时效性与可比性方面保持科学一致。如表1所示，技术部署目标数据主要来自各国官方文件及国际权威机构，如IEA设定的净零排放情景^[10]等；技术部署进展数据主要来自IRENA^[11]、IEA^[12-16]、全球碳捕集与封存研究院（GCCSI）^[17]、世界银行（WB）^[18]等组织公布的数据库，其中包括全球及各国可再生能源装机容量、电动车销量、氢能产能、CCUS项目部署量等关键指标。通过整合上述多源数据，本研究建立了七类技术的目标和部署进展的综合数据库。

2 全球技术总体进展差距

全球关键碳中和技术的实际部署进度与既定目标之间仍存在明显差距。截至2024年，七类关键碳中和技术的实际部署水平仅达到其2030年目标所需规模的1%至42%不等，整体进展明显滞后。若要弥合这一差距，几乎所有技术在未来五至六年

表1 关键碳中和技术进展—目标对比

| | 可再生能源电力 | 电动车 | 节能 | 清洁氢 | 生物燃料 | CCUS | 森林碳汇 |
|---------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| 2030年目标 | 11 000 GW | 7 040 万辆 / 年 | 4.20% | 4 900 万 t / 年 | 4 154 亿 L / 年 | 10 亿 t / 年 | 零毁林 |
| 目标来源 | COP28 ^[19] | IEA NZ ^[20] | COP28 ^[19] | IEA NZ ^[14] | IEA NZ ^[16] | IEA NZ ^[21] | COP26 ^[22] |
| 2024年进展 | 4 448 GW | 1 710 万辆 / 年 | 0.9% | 64.7 万 t / 年 | 1 756 亿 L / 年 | 0.51 亿 t / 年 | -3.8 亿 t / 年 |
| 2023年基准 | 3 870 GW | 1 420 万辆 / 年 | 1.4% | 53.4 万 t / 年 | 164.4 亿 L / 年 | 0.49 亿 t / 年 | -5.2 亿 t / 年 |
| 2015年基准 | 1 985 GW | 68 万辆 / 年 | 1.9% | 1 万 t / 年 | 131.6 亿 L / 年 | 0.3 亿 t / 年 | -3.4 亿 t / 年 |
| 数据来源 | IRENA ^[11] | IEA ^[12] | IEA ^[13] | IEA ^[15] | IEA ^[16] | GCCSI ^[17] | WB ^[18] |

内均需实现倍速增长。如果延续 2015—2024 年的增速，到 2030 年，电动车和清洁氢技术可能实现目标；而如果延续过去一年的增速，到 2030 年，仅有森林碳汇可能实现目标。值得注意的是，2015 年的电动车和清洁氢技术基准值较低，导致对目标实现的可能性过分高估。相较之下，如果延续过去一年的增速，除森林碳汇外的关键技术的部署均有不同程度的落后：可再生能源电力、生物燃料、节能与 CCUS 技术到 2030 年的部署进展预计将分别达到各自目标的 88%、53%、21% 和 8%。

部分国家和地区在特定技术上已率先实现阶段性突破，呈现出“成熟技术加速突破、新兴技术显著滞后”的结构性分化格局。如图 1 所示，可再生能源电力和电动车技术进展较快，而节能、生物燃料和 CCUS 等领域明显滞后，这种结构性差距表明全球碳中和进程仍依赖少数领先技术驱动，整体体系尚不均衡。2024 年，尽管全球可再生能源电力装机容量增长再创新高，但 2030 年目标仍难以实现。电动车技术目标实现可能性较为模糊：部分发达国家因政策调整或市场饱和导致电动车销量增长速度放缓，但全球总体增长势头依旧强劲，主要得益于“全球南方”国家的加速部署。在新兴技术方面，清洁氢和 CCUS 的部署进展仍显滞后。2024 年全球绿氢产能增幅与 2023 年基本持平，若要实

现 2030 年既定目标，未来五年需实现指数级增长。全球 CCUS 捕集能力增长缓慢，难以实现 2030 年目标。虽在项目数量上呈现快速增长，但新增项目主要集中于规划和早期建设阶段，实际捕集能力提升有限，反映出 CCUS 技术商业化进程仍处于瓶颈期。与此同时，森林碳汇的全球治理亦进展不及预期，尽管近年来造林与生态恢复在部分地区有所增长，但《格拉斯哥领导人宣言》提出的 2030 年前森林砍伐零增长目标尚未取得实质性进展，现有恢复速率远不足以抵消土地利用变化带来的碳损失^[23]。

3 关键技术的目标—进展差距评估

3.1 可再生能源电力技术

可再生能源电力是全球碳中和技术体系中的关键支柱，其发展直接决定电力部门能否率先实现碳中和，并为交通、工业、建筑等终端部门的电气化提供清洁电力支撑，但其难以实现 2030 年目标。根据 COP28 通过的“可再生能源 3 倍”目标^[24]，全球需在 2030 年前将风能、太阳能等可再生能源装机总量从 2022 年的约 3400 吉瓦提升至至少 1.1 太瓦，实现“三倍增长”^[25]。然而，若维持 2015—2024 年平均增长率，到 2030 年全球装机容量预计仅能达到 2022 年水平的约 2.63 倍，较目标

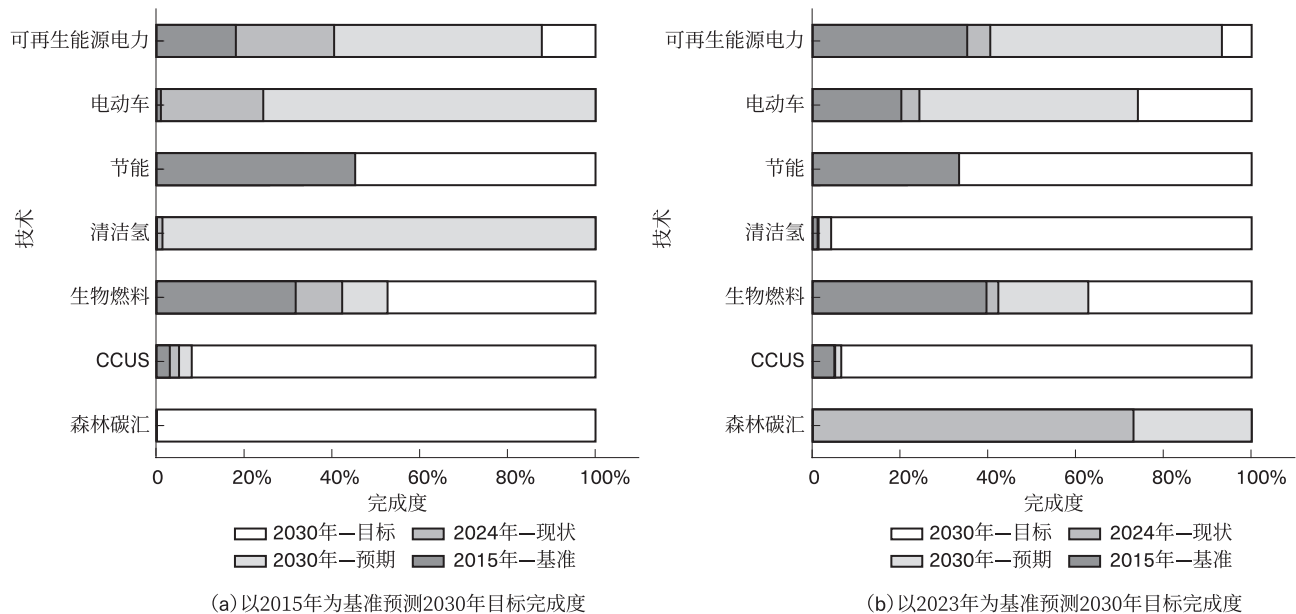


图 1 关键碳中和技术进展—目标对比

注：节能技术和以 2015 年为基准的森林碳汇技术的年均复合增长率为负，因此图中未体现 2024 年的现状水平和 2030 年目标完成度。

仍存在约 12% 的缺口。值得注意的是，创纪录的年度增长使缺口逐渐缩小，如果只采用截至 2023 年的数据，预计 2030 年仅能实现 2.19 倍目标，表明装机容量的快速增长将持续推高全球对未来转型的乐观预期^[26,27]。尽管如此，当前该技术仍面临多重制约：一是电网调峰与储能能力不足，限制了高比例可再生能源并网；二是长距离输电通道受限，使区域间资源优势难以充分发挥；三是土地利用冲突与许可审批流程冗长，延缓了项目落地；四是部分发展中国家融资环境脆弱，导致清洁能源投资成本居高不下。总体而言，可再生能源虽保持强劲增长势头，但其持续扩张正逐渐受到系统性约束，如何在“成本下降—电网承载—投资安全”之间实现平衡，成为后续部署的核心难题。

3.2 电动车技术

电动车是陆路交通实现深度脱碳的核心技术路径，也是连接能源终端消费部门脱碳的重要载体，其 2030 年目标实现的可能性仍较模糊。在以 2015

年为基准的长期趋势情景下，预测结果显示该技术可在 2030 年前基本实现目标；相反，以 2023 年为基准预测，2030 年电动车销量仅可达目标的 75% 左右。以电动小客车销量占比进行辅助判断，尽管部分国家和地区的电动车目标与部署速度倒退，但“全球南方”国家强力支撑全球部署速度。如图 2 所示，亚洲市场增速最快，欧洲市场增速放缓，部分发达国家甚至出现回落，显示出南北方市场在技术扩散阶段的显著差异。例如，2024 年中国的电动小客车销量占比达到了 48%，超前实现目标；相反，冰岛的电动小客车销量占比从 2023 年的 71% 倒退到 2024 年的 42%，这种退步为全球目标的实现带来更多不确定性^[12]。当前，全球范围内电动车进一步普及主要受充电基础设施建设滞后、关键矿产供应链波动、电池回收体系尚不完善等因素的制约。随着市场逐渐从政策驱动向成本竞争过渡，如何保持消费者信心、强化电力系统支撑能力并完善电池全生命周期管理，将成为决定该技术能否持续引领交通脱碳的关键。

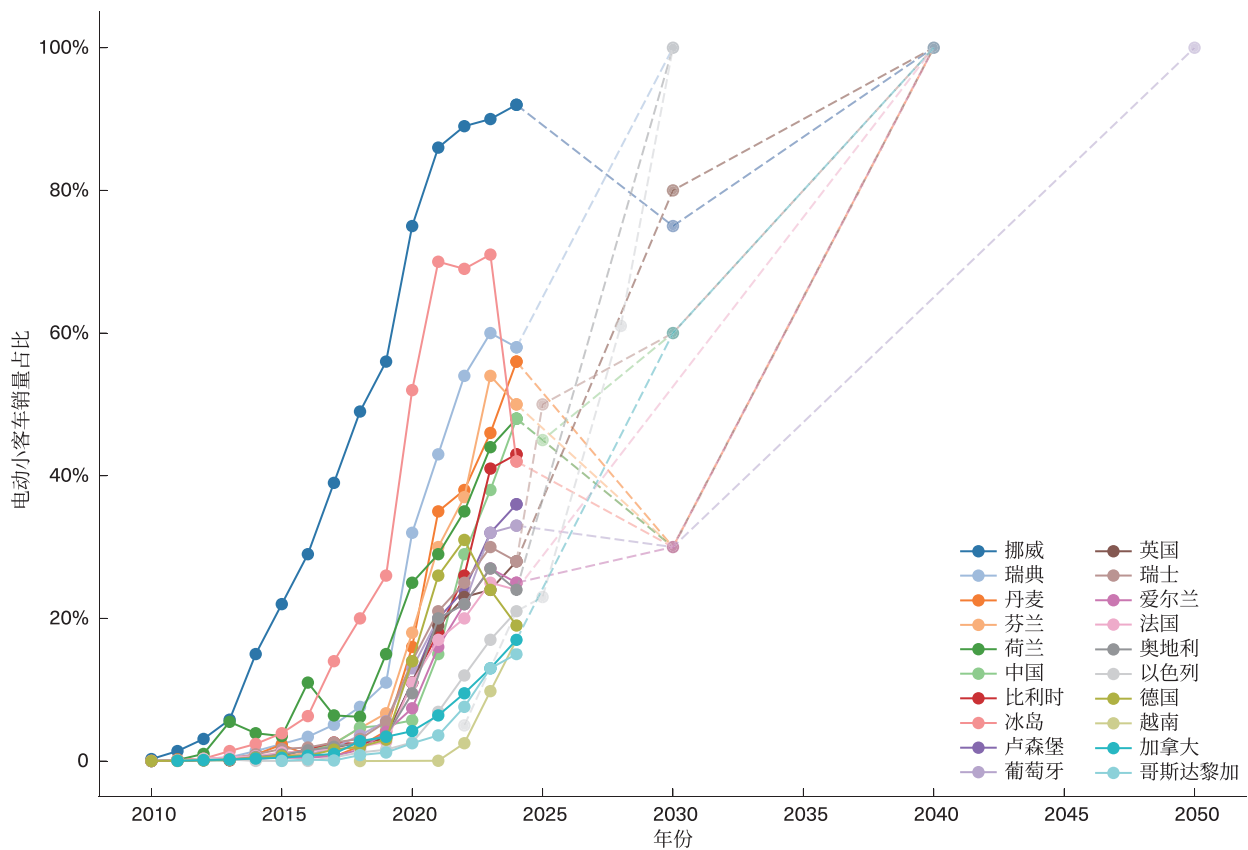


图 2 2010—2024 年电动小客车销量占比进展及各国目标达成情况

3.3 节能技术

节能技术贯穿能源利用全过程，是成本最低、普遍适用的减碳途径之一，无论在电力、工业、建筑还是交通领域，能效提升均是实现碳达峰、碳中和的基础性手段，然而全球能效提升目标较难实现。据 IEA 估算，为实现 1.5℃ 控温目标，全球能源强度需以年均 4% 以上的速度降低，但 2024 年能效提升仅为 0.9%，低于 2015 年和 2023 年两个基准值，表明全球能效提升的速度正在放缓，这提高了全球目标实现的难度^[28]。以建筑部门中的热泵技术为例，全球主要热力市场中的热泵份额呈波动的趋势，从 2020 年的 84 GW 增长至 2022 年的 111 GW，又在 2023 年微弱下降至 109 GW^[29]。其中，欧洲地区的热泵市场以北欧及中东欧国家为核心增长区，而南欧国家增速相对缓慢，表明节能技术推广受区域经济结构与政策激励差异的显著影响，如图 3 所示；而发展中国家受限于资本成本高、监测体系弱和激励不足，能效提升行动推进缓慢。当前节能技术的主要难点在于：传统行业改造投资回报周期长、能效标准执行不严、节能监测体系不完善，以及能源价格信号不足以形成有效激励。节能虽潜力巨大，但其推广需突破“技术分散、资金分散、责任分散”的治理困境。

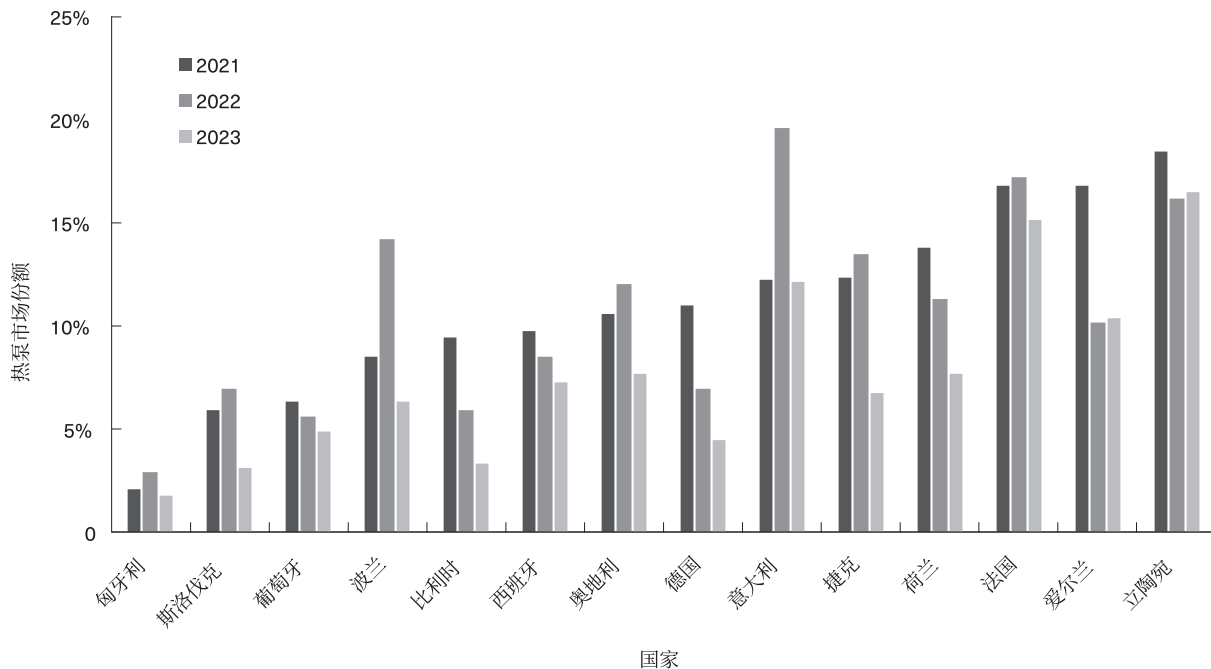


图 3 2021—2023 年欧洲地区热泵市场份额变化

3.4 生物燃料技术

生物燃料（指源自生物质的液体燃料，如生物柴油和生物乙醇等^[30]）是交通和部分工业部门实现低碳替代的重要方案，也是化石燃料减量过程中的关键过渡技术，然而其 2030 年的需求难以满足。在 IEA 净零排放情景下，2030 年的生物燃料产能需求约为 4154 亿 L/年。然而，截至 2024 年，全球生物燃料产能约 1756 亿 L/年，较 2023 年提高 6.8%^[6]。若维持当前增速，到 2030 年产能仅约 2608 亿 L/年，只能达到需求的 63%。关键问题在于，多数国家和地区尚未形成生物燃料生产和利用的完整产业链，原料价格波动、粮燃竞争及土地利用约束均使产业扩张受限。尽管部分国家和地区已启动乙醇汽油与生物柴油掺混计划，但高比例应用仍受政策和技术瓶颈限制。总体来看，生物燃料在能源安全与减排协同中潜力巨大，但其可持续扩张仍依赖于原料体系多元化与国际标准的协调推进。

3.5 碳捕集、利用与封存 (CCUS) 技术

CCUS 是深度脱碳阶段不可替代的关键技术，尤其在难以电气化的重工业和化石能源发电领域具有战略意义，然而按当前增速难以实现 2030 年全球目标。根据 IEA 的净零情景设定，到 2030 年

全球 CCUS 捕集能力需达到每年 10 亿 tCO₂^[11]，而截至 2024 年底，全球在运项目总捕集能力约 5000 万 t，相比 2023 年增长 15.2%，这一速率无法支撑实现 2030 年的净零目标。以项目数进行辅助判断，如图 4 所示，尽管计划中的 CCUS 项目数量由 2023 年的 350 个大幅增长为 2024 年的 652 个，但整体仍处于规划阶段，能否落地还存在较大不确定性^[17]。总体来看，当前 CCUS 发展面临的核心挑战包括捕集与储存成本高、经济激励不足、缺乏统一碳价支撑、管网与储层布局受限、商业模式尚未形成闭环。此外，社会认知与安全监管的不确定性也在一定程度上影响了项目落地进程。因此，CCUS 虽在数量上实现扩张，但质量与商业化水平提升有限，技术—经济双重约束使其成为全球碳中和路径中最具不确定性的环节之一。

3.6 清洁氢技术

清洁氢被视为能源体系中衔接电力、工业与交通部门的关键“枢纽技术”，在实现终端部门深度脱碳中发挥不可替代作用。尽管以 2015 年为基准预测清洁氢可以实现目标，但这可能是因为 2015 年的基准水平过低，导致这一估计过于乐观；以 2023 年为基准预测则难以实现 2030 年目标。IEA 估算，到 2030 年全球可再生氢产能需超过 1 亿 t/年，方能支撑

工业、化工与重型货运交通部门的减排需求。截至 2024 年底，如图 5 所示，全球绿氢产能仅约 15 万 t/年，蓝氢产能接近 50 万 t/年，清洁氢产能仅为 IEA 净零排放情景下 2030 年所需产能的 0.46%^[15]。以电解槽产能进行辅助判断，已投产项目的电解槽产能约为 14 GW，仅达到 2030 年各国已宣称电解槽产能目标的 8.5%，也仅为 IRENA 提出的 2030 年 350 GW 装机目标的 4%。从项目数量上看，虽然宣布的规划项目超过 2400 个、总产能达 2400 万 t，但其中已正式投产的项目不到 15%，处于最终投资

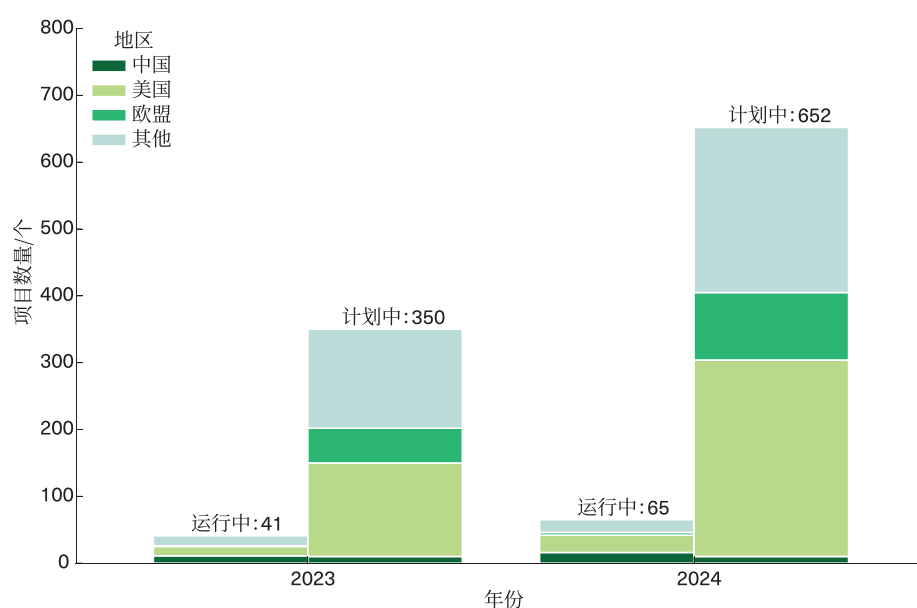


图 4 2023—2024 年全球及主要地区 CCUS 项目数量变化

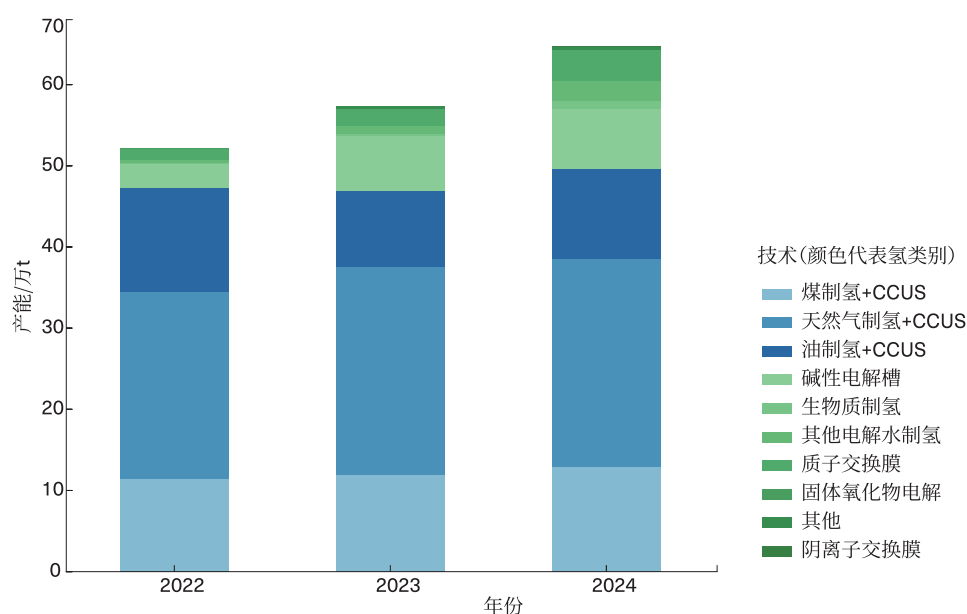


图 5 2022—2024 年全球已投产氢能项目产能技术分布

决定 (Final Investment Decision, FID) 和在建中的项目占 14%，其余项目仍在概念和试验阶段。即使这些项目全部顺利投产，到 2030 年全球清洁氢能预计仅可达目标的 20%。值得注意的是，过去一年超过 200 个项目已宣告失败，高成本 (4~6 美元/kg)、基础设施滞后和跨国认证标准缺乏是核心瓶颈。与此同时，项目融资风险高、政策稳定性不足也导致部分规划项目被搁置。虽然清洁氢技术的战略地位日益凸显，但其商业化路径仍受成本、基础设施和政策不确定性多重制约。

3.7 森林碳汇技术

森林碳汇是实现净零排放的自然解决方案，在抵消残余排放、提升生态系统韧性方面具有独特价值，其 2030 年零毁林目标同样难以实现。根据联合国粮农组织公布的森林覆盖率数据^[18]，2022 年全球森林活动引起碳排放约 3.8 亿 t，尽管如此，相比 2021 年引起的 5.2 亿 t 碳排放，这一情况有所好转。但是，以 2015 年的 3.4 亿 t 碳排放为基准，全球森林正在加速释放二氧化碳，导致 2030 年目标难以实现。尽管按短期增速的预测显示该技术可以实现目标，但考虑到森林固碳量指标的年度波动性，以 2015 年为基准的长期预测更为可靠。目前，造林和森林恢复的区域分布高度不均，从森林面积来看，欧洲、中亚和东亚地区增长显著，而非洲和美洲部分地区因火灾、干旱、病虫害等影响出现森林面积减少。森林碳汇进一步提升的难点主要包括土地资源竞争激烈、碳汇核算标准不统一、资金支持不足、长期监测体系薄弱及项目收益机制缺失。尤其是在发展中国家，生态保护与经济平衡仍是主要挑战。总体来看，全球森林碳汇虽具减排潜力，但其真实贡献仍受限于治理能力、资金投入与监测技术水平。

4 政策启示与展望

从全球减排贡献结构看，七类关键碳中和技术在 2030 年实现净零路径中的相对重要性差异显著。根据 IEA 和 UNEP 的测算^[32-34]，在到 2030 年可能实施的减排技术中，可再生能源电力与节能技术贡献了最大的减排潜力，可再生能源约占 32%，节能技术约占 23%。电动车是交通部门的

主要减排方式，贡献了 4%~7% 的减排潜力。此外，生物燃料技术约占减排潜力的 6%，CCUS 占 2%~6%，清洁氢占不到 2%，主要作用于工业、发电及难减排环节。森林碳汇技术约占 19%，在抵消剩余排放和改善土地利用中发挥作用。这一结构表明，若要实现 2030 年全球减排目标，应优先聚焦可再生能源电力与节能技术的部署加速，发挥电动车技术在交通部门中不可替代的作用，同时兼顾生物燃料、CCUS、清洁氢及森林碳汇的体系性突破。

4.1 加快重点领域突破，缩小技术部署差距

本文研究结果显示，节能、生物燃料和 CCUS 等技术在 2030 年目标完成度方面显著滞后，其部署速度需分别提升约 7 倍、4 倍和 8 倍才能满足既定需求。针对这些高缺口领域，应从政策激励、市场机制与技术示范三方面协同发力。首先，建立以公共投资为导向的关键技术加速计划，集中资源支持高成本、低成熟度领域的核心环节突破。节能技术应聚焦工业与建筑领域的系统改造，强化能效标准执行与绩效考核；生物燃料需加快第二代与第三代技术商业化，推进非粮原料开发与可持续认证；CCUS 则应完善基础设施建设，推动捕集、运输与封存一体化布局，并通过设立国家级示范工程验证成本下降潜力^[35]。其次，应构建稳定的政策预期，通过长期购电协议、差价合约等机制降低投资风险，吸引社会资本进入。最后，应推动多国协作与知识共享，提升技术扩散速度与成本可比性，为全球实现碳中和提供共享解决方案^[36]。

4.2 稳固领先技术成果，防止部署增速放缓

可再生能源电力与电动车技术在全球范围内已进入规模化发展阶段，但增长动能出现边际减弱，部分国家和地区甚至出现短期回落。为巩固既有成果并防止增速放缓，应重点从政策延续、系统支撑与市场优化三方面入手。首先，针对可再生能源，应合理设计补贴退出与市场化过渡机制，防止政策真空影响新增投资；同时，优化电网调峰和储能系统，建设高比例可再生能源下的智能电网，提高系统稳定性和消纳能力。其次，在电动车领域，应继

续完善充电基础设施布局，推动充电网络与电力系统协同运行，强化电池回收体系建设以降低资源依赖。各国政府还应通过财政与金融工具维持市场信心，确保中长期目标的平稳过渡。总体而言，应将现有的领先领域从“数量扩张”转向“质量巩固”，通过政策协调与基础设施升级，避免早期成功技术陷入增长瓶颈。

4.3 开展技术分类管理，实施差异化支持策略

七类关键碳中和技术在成熟度、成本与部署速度上差异显著，政策应以分类管理与动态考核为核心，提升政策的针对性与资源配置效率。对于成熟技术（可再生能源电力、电动车、节能），需要以市场化机制为主导，政府重点在于完善电网、交通和能效基础设施，稳定市场预期，降低融资成本；对于过渡技术（生物燃料、CCUS、清洁氢），需要以政策激励与公共投资并行，重点建立技术标准与成本补偿机制，支持示范项目商业化落地；对于生态技术（森林碳汇），以制度创新为核心，建立高完整性碳汇核算体系和生态补偿机制。同时，应构建基于“目标—进展—差距”三维指标的动态考核体系，每两年至少开展一次技术进展评估，及时调整政策优先级和资金投向，使政策体系与技术生命周期相匹配。

4.4 优化投融资结构，引导资金流向高缺口领域

研究表明，清洁氢和CCUS等资本密集型技术是当前全球投融资最薄弱的环节。要实现部署倍增，必须建立有针对性的金融支持体系。建议设立关键低碳技术专项基金，重点支持清洁氢示范项目、CCUS产业链建设及第二代生物燃料商业化。应推广差价合约、长期采购合同和绿色信贷等政策工具，为高风险项目提供稳定的收益预期。同时，应推动绿色债券、转型金融和碳信用抵押融资等市场化手段，将社会资本引入新兴技术领域^[37]。对发展中国家，应通过多边金融机构加大优惠贷款与风险担保比例，确保全球南方在高潜力领域具备技术可及性。通过优化投融资结构和激励机制，可以有效缓解资金瓶颈，使资源配置更加符合全球碳中和技术体系的实际差需求。

4.5 完善长期治理体系，强化创新驱动与国际协同

当前各国在目标设定、政策执行与数据监测方面普遍存在碎片化现象，不同技术和区域间缺乏协调机制^[38]。为了提升整体治理效能，并推动技术创新的有效落地，应构建基于数据共享和动态监测的全球技术协同平台，统一关键技术定义、指标口径与评估方法，推动创新成果的跨国传播与应用。各国应在国家自主贡献（NDC）框架下明确技术路线与量化指标，增强目标的可比性与可核查性，特别是在清洁氢、CCUS、可再生能源等领域的技术创新方面，提供全球范围的政策支持与技术激励。同时，应推动区域层面的南南合作与技术共建，特别是在可再生能源电力、清洁氢与CCUS等领域建立跨境产业协作区和联合研发计划，通过集聚创新资源，发挥规模经济效应。在生态领域，尤其是森林碳汇领域，应通过创新的国际碳市场机制与高完整性信用标准确保自然减排成果的真实性与持久性。科技创新应成为森林管理及生态监测的核心驱动力。通过强化政策协同、技术创新与国际合作，可以在全球范围内形成“目标一致—行动同步—效果可测”的低碳技术治理格局，为2030年前的加速转型提供坚实的制度保障和创新支撑。

参考文献

- [1] ZHANG S H, CAI W J, ZHENG X Z, et al. Global readiness for carbon neutrality: From targets to action[J]. *Environmental science and ecotechnology*, 2025, 25: 100546, doi: 10.1016/j.ese.2025.100546.
- [2] 王灿, 张诗卉, 蔡闰佳. 全球碳中和进展评估 2025——国际视野与中国行动 [M]. 北京: 科学出版社, 2025.
- [3] UN Environment Programme. Emissions Gap Report 2024[R]. Nairobi: UN Environment Programme, 2024.
- [4] IEA. Tracking Clean Energy Progress 2023[R]. Paris: International Energy Agency, 2023.
- [5] IRENA. Renewable Power Generation Costs in 2024[R]. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2025.
- [6] GEM. Global Energy Monitor Annual Report 2024: Empowering a Clean Energy Future[R/OL]. (2025) .[2025-12-04]. <https://globalenergymonitor.org/wp-content/uploads/2025/10/GEM-2024-Annual-Report.pdf>.
- [7] 王灿, 张诗卉, 蔡闰佳. 全球碳中和进展评估——指标、方法与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2024.
- [8] IPCC. 2006年IPCC国家温室气体清单指南 [M]. 神奈川: 日

- 本全球环境战略研究所, 2006.
- [9] 黄晶, 孙新章, 张贤. 中国碳中和技术体系的构建与展望 [J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(9): 24-28.
- [10] IEA. Net Zero Emissions by 2050 Scenario (NZE)[R]. Paris: International Energy Agency, 2024.
- [11] IRENA. IRENASTAT online data query tool[EB/OL]. (2025).[2024-12-15]. <https://www.irena.org/Data/Downloads/IRENASTAT>.
- [12] IEA. Global EV Outlook 2025: Expanding Sales in Diverse Markets[R]. Paris: International Energy Agency, 2025.
- [13] IEA. Energy efficiency progress tracker[EB/OL]. (2025-11-20)[2025-10-31]. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-efficiency-progress-tracker>.
- [14] IEA. Global Hydrogen Review 2024[R]. Paris: International Energy Agency, 2024.
- [15] IEA. Hydrogen production and infrastructure projects database[EB/OL]. (2025-09)[2025-10-30]. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-production-and-infrastructure-projects-database>.
- [16] IEA. Global biofuel demand, main case, accelerated case and in the Net Zero Scenario, 2010-2030[EB/OL]. (2024-02-06)[2025-10-30]. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-biofuel-demand-main-case-accelerated-case-and-in-the-net-zero-scenario-2010-2030>.
- [17] GLOBAL CCS INSTITUTE. The Global Status of CCS: 2024[R/OL]. Global CCS Institute, (2024) .[2025-10-30]. <https://www.globalccsinstitute.com/previous-reports/>.
- [18] WORLD BANK. Forest area (% of land area)[DS/OL]. (2025) .[2025-10-29]. <https://data.worldbank.org/indicator/AG.LND.FRST.ZS>.
- [19] COP28 UAE. COP28: Global Renewables And Energy Efficiency Pledge[EB/OL]. (2023) .[2025-12-04]. <https://www.cop28.com/en/global-renewables-and-energy-efficiency-pledge>.
- [20] IEA. Global EV outlook 2024[EB/OL]. (2024-04-23).[2025-10-31]. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>.
- [21] IEA. Carbon Capture Utilisation and Storage[EB/OL]. (2024)[2025-10-31]. <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage>.
- [22] World Resources Institute. STATEMENT: Glasgow leaders issue declaration on forests and land use[EB/OL]. (2021-02-11)[2025-10-31]. <https://www.wri.org/news/statement-glasgow-leaders-issue-declaration-forests-and-land-use>.
- [23] NABUURS G J, HARRIS N, SHEIL D, et al. Glasgow forest declaration needs new modes of data ownership[J]. Nature climate change, 2022, 12(5): 415-417.
- [24] 新华网. 国际能源署: 各国需努力实现“可再生能源3倍”目标 [EB/OL]. 新华网, (2024-06-05)[2025-10-31]. <http://www.news.cn/world/20240605/df32c9d1da714575afedf0eb80131b43/c.html>.
- [25] IRENA. Tripling Renewable Power and Doubling Energy Efficiency by 2030: Crucial Steps Towards 1.5 °C[R]. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2023.
- [26] YE W X, AN K X, ZHANG S H, et al. Probabilistic analysis of tripling global renewables based on Bayesian-inferred growth dynamics model[J]. Renewable energy, 2026, 256: 124496, doi: 10.1016/j.renene.2025.124496.
- [27] 清华大学碳中和研究院, 清华大学环境学院. 2025 全球碳中和年度进展报告 [R]. 北京: 清华大学, 2025.
- [28] IEA. Energy Efficiency 2024[R]. Paris: International Energy Agency, 2024.
- [29] IEA. Heat pump sales by country or region, 2019-2023[EB/OL]. (2024-07-29)[2025-10-30]. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/heat-pump-sales-by-country-or-region-2019-2023>.
- [30] IEA BIOENERGY. Definitions[EB/OL]. [2025-10-31]. <https://task39.ieabioenergy.com/about/definitions/>.
- [31] IEA. It is time for CCUS to deliver[EB/OL]. (2024-03-15).[2025-10-29]. <https://www.iea.org/commentaries/it-is-time-for-ccus-to-deliver>.
- [32] IEA. Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector[R]. Paris: International Energy Agency, 2021.
- [33] UNEP. Emissions Gap Report 2024[R]. Nairobi: UN EP, 2024.
- [34] IEA. Cumulative emissions reduction by mitigation measure in the Net Zero Scenario, 2021-2050[EB/OL]. (2021-10-22).[2025-12-02]. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/cumulative-emissions-reduction-by-mitigation-measure-in-the-net-zero-scenario-2021-2050>.
- [35] 王灿. 碳中和愿景下的低碳转型之路 [J]. 中国环境管理, 2021, 13(1): 13-15.
- [36] GUAN Y S, AN K X, ZHENG X Z, et al. Global engagement lowers investment gaps in renewable energy deployment[J]. iScience, 2025, 28(9): 113277.
- [37] 王芬芬, 曹媛, 王灿. 中国气候投融资试点面临的挑战与对策研究 [J]. 中国环境管理, 2024, 16(6): 52-60, doi: 10.16868/j.cnki.1674-6252.2024.06.052.
- [38] 郑军, 刘婷. 主要发达国家碳达峰碳中和的实践经验及对中国的启示 [J]. 中国环境管理, 2023, 15(4): 18-25, 43, doi: 10.16868/j.cnki.1674-6252.2023.04.018.

Assessing the 2030 Targets and Global Progress Gaps of Key Carbon Neutrality Technologies

GUAN Yusheng¹, ZHANG Shihui^{2*}, WANG Can¹

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Ecology & Environment, Renmin University of China, Beijing 100872, China)

Abstract: The achievement of carbon neutrality relies on the rapid deployment and large-scale application of key low-carbon technologies. However, there remains a significant gap globally between the established targets for various technologies and their actual progress. This study develops a systematic evaluation framework covering seven key carbon neutrality technologies—renewable power generation, electric vehicles, energy efficiency, biofuels, Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS), clean hydrogen, and forest carbon sinks. By integrating international databases and policy scenario data, the study quantitatively evaluates the gap between the 2030 targets and the current deployment progress of each technology. The results show that, globally, the target completion rates for these seven key technologies range from 1% to 42%. Among them, energy efficiency, biofuels, and CCUS show the most lagging progress, while renewable energy and electric vehicles have achieved scale-up growth but have not yet reached the required growth rate to meet the targets on schedule. Clean hydrogen and CCUS technologies face dual constraints of high costs and insufficient infrastructure, while the governance and monitoring systems for forest carbon sinks still need further enhancement. Overall, the global carbon neutrality technology system is confronted with insufficient growth rates, structural imbalances, and investment gaps. To address these challenges, this paper suggests accelerating technological innovation in key areas, implementing differentiated support policies, optimizing investment and financing structures, and strengthening international collaborative governance. These efforts aim to form a systematic technological development framework, thereby supporting the realization of global carbon neutrality goals.

Keywords: carbon neutrality technologies; target gap assessment; renewable energy; CCUS; clean hydrogen; technology policy