

CCUS 中 CO₂ 捕集技术谱系与 场景适配性研究

游 贇¹, 李 琳^{2*}, 刘 宁¹, 王鑫鑫¹

(1. 重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆 401331;
2. 重庆市能源利用监测中心(重庆市节能技术服务中心), 重庆 400020)

摘要:CCUS 技术是实现碳中和的关键路径,而 CO₂ 捕集环节的高能耗与高成本是制约其规模化应用的主要瓶颈。通过分析各类主流技术路径,表明了燃烧后化学吸收法技术成熟但再生能耗高;富氧燃烧与化学链燃烧潜力显著,尚处于示范阶段;直接空气捕集可实现负排放,但成本高昂;在分离工艺上,吸收法面临能耗与腐蚀问题;吸附与膜分离法能耗较低但受限于材料性能;低温分离能获得高纯 CO₂,但能效偏低。CO₂ 捕集技术发展需并行推进现有技术的迭代优化与前沿变革性技术的探索,通过材料创新与系统集成,推动其向高效、经济、环保方向演进,为实现碳中和提供关键技术支撑。

关键词:CCUS; CO₂ 捕集; 技术路径; 分离工艺; 应用场景

中图分类号:TQ028

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)S1-0001-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S1.001

Analysis of CO₂ capture technology spectrum and scenario applicability in CCUS

YOU Yun¹, LI Lin^{2*}, LIU Ning¹, WANG Xin-xin¹

(1. School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China;

2. Chongqing Energy Utilization Monitoring Center (Chongqing Energy Saving Technology Service Center),
Chongqing 400020, China)

Abstract: Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) is a critical technology for achieving carbon neutrality, yet the high energy consumption and cost of CO₂ capture remain major bottlenecks to its large-scale deployment. This study systematically assesses mainstream capture pathways. Findings reveal that post-combustion chemical absorption is mature but energy-intensive; oxy-fuel and chemical looping show promise but remain at demonstration phase; direct air capture enables negative emissions at high cost. Among separation techniques, absorption faces energy and corrosion challenges; adsorption and membrane separation offer better efficiency but are limited by material properties; cryogenic separation delivers high-purity CO₂ with low energy efficiency. The development of CO₂ capture technology requires the parallel advancement of iterative optimization of existing technologies and the exploration of cutting-edge transformative technologies. Through material innovation and system integration, it is essential to drive its evolution toward high efficiency, economic feasibility, and environmental friendliness, thereby providing critical technological support for achieving carbon neutrality.

Key words: CCUS; CO₂ capture; technological pathways; separation processes; application scenarios

全球气候变化成为新世纪人类社会面临的重大挑战之一,主要驱动因素为 CO₂ 等温室气体的大量排放。根据《巴黎协定》缔约方大会(CMA)达成的共识,本世纪中叶致力将全球温升控制在工业化前水平 2°C 以内^[1]。然而,全球碳排放形势依然严峻。国际能源署(IEA)数据显示,2024 年全球 CO₂ 排放量 378 亿 t,同比增长 0.8%;其中,中国 CO₂ 排放量 126.4 亿 t,占全球总量 33.8%,而煤电行业仍是主要的排放源^[2]。在此背景下,中国于 2020 年 9 月在第 75 届联合国大会上正式承诺,将

力争使 CO₂ 排放于 2030 年前达到峰值,并努力在 2060 年前实现碳中和^[3]。为实现这一“双碳”目标,CO₂ 捕集、利用与封存(CCUS)技术被广泛认为是实现深度减排乃至净零排放的关键路径之一。然而,当前 CCUS 技术的全球部署规模与减排需求之间存在巨大差距。根据 CCUS 发展报告,截至 2024 年底,全球已投入运行的商业化 CCUS 设施仅 51 个,CO₂ 捕集与封存能力约为 5 100 万 t/a,仅占全球年度 CO₂ 排放总量的 0.13%,远低于 IPCC 设定的预期目标^[4]。

收稿日期:2025-12-31;修回日期:2026-03-11

基金项目:重庆市科学技术局基础研究与前沿探索项目(CSTB2023NSCQ-MSX1059)

作者简介:游贇(1980-),男,硕士,副教授,6173936@qq.com;李琳(1987-),女,硕士,高级工程师,研究方向为能源节能诊断评估和项目设计,通讯联系人,highsky123@163.com。

作为 CCUS 技术体系的核心环节,CO₂ 捕集技术通过物理或化学方法实现排放源中 CO₂ 的分离与富集,其技术经济性直接决定了 CCUS 系统的整体可行性^[5]。在典型 CCUS 项目中,捕集环节的能耗与成本占比分别高达 60%~80% 和 70% 以上。因此,有效降低捕集过程的能耗与成本,是实现该技术规模化应用的首要前提。本文基于 CCUS 领域近年来的研究进展与工程实践,旨在系统梳理主流 CO₂ 捕集的技术路径与分离工艺特性,并深入探讨其在不同应用场景下的适用性与未来发展前景。

1 CO₂ 捕集方式与实施路径

CO₂ 捕集指通过物理或化学方法,将 CO₂ 从工业过程、能源转换系统或大气中分离并富集的过程。根据 CO₂ 的来源,捕集技术可分为两大类:其一是针对集中排放源的工业源 CO₂ 捕集;其二是直接从环境空气中捕集 CO₂ 的直接空气捕集。其中,工业源 CO₂ 捕集依据其技术原理与实施环节的不同,可进一步划分为燃烧前捕集、燃烧后捕集、富氧燃烧以及化学链燃烧等技术路径。

1.1 燃烧前碳捕集

燃烧前碳捕集(Pre-combustion Carbon Capture, Pre-CC)是一种在含碳燃料(如煤、天然气)燃烧前,通过物理或化学方法将其中的碳元素分离并捕集的技术。该技术通常包括气化或重整过程,将燃料转化为以 H₂ 为主的合成气,对于煤基燃料,主要通过气化工艺生成合成气;对于天然气,则采用重整($\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO} + 3\text{H}_2$)或部分氧化($\text{CH}_4 + 1/2\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + 2\text{H}_2$)等途径制备合成气。随后经水气变换反应将 CO 转化为 CO₂,最终通过吸收工艺实现 CO₂ 与 H₂ 的分离。

燃烧前碳捕集的主要技术优势,一是合成气中不含氮气,气体流量小、CO₂ 分压高,有利于提高吸收效率,并降低溶剂循环量与设备尺寸;二是较高的系统总压与 CO₂ 分压可有效提升分离过程的能效。华能天津 IGCC 电站配套的 6~10 万 t/a CO₂ 捕集装置,其单位能耗约为 2.34 GJ/t,单位捕集成本为 180 元/t。该案例表明,燃烧前碳捕集技术在实现高效 CO₂ 捕集的同时,亦有助于降低系统整体能耗与运行成本。

1.2 富氧燃烧碳捕集

富氧燃烧碳捕集(Oxy-fuel Combustion Carbon Capture, OFCCC)是一种采用高纯度氧气替代空气作为氧化剂的燃烧技术,其通过避免氮气的引入,使

燃烧产生的烟气主要成分为 CO₂ 和水蒸气,从而将烟气中的 CO₂ 浓度提升至 80% 以上。这种高浓度 CO₂ 烟气经脱水、压缩和纯化后,即可直接进行封存或资源化利用。该技术面临的主要挑战在于能耗大部分源自高纯度氧气的制备过程,其主流的低温空分法制氧能耗较高,且能耗随所需氧气纯度的提升而进一步增加。尽管如此,富氧燃烧技术在碳捕集效率与协同污染物减排方面展现出显著优势,被视为一项具有重要发展前景的碳减排技术。

目前,该技术在全球范围内仍处于工业示范阶段。我国推动实施了“0.3 MW-3 MW-35 MW-200 MWe”的研发示范路线,并实现了 CO₂ 富集浓度达 82.7% 的国际领先水平。2024 年 1 月,青州中联水泥 20 万 t/a CO₂ 全氧燃烧富集提纯项目进入试生产阶段。该项目集成“全氧燃烧+变压吸附浓缩+变温变压吸附净化+低温精馏提纯”工艺,其单位能耗可控制在 1.6 GJ/t CO₂ 以下,是全球水泥行业规模最大的全氧燃烧耦合碳捕集示范工程。未来,富氧燃烧碳捕集技术的发展将聚焦于开发低能耗、低成本的制氧技术,并进一步优化全系统的集成设计^[6]。

1.3 燃烧后碳捕集

燃烧后碳捕集(Post-Combustion Carbon Capture, Post-CC)是从工业锅炉、发电厂等固定排放源燃烧化石燃料、生物质或废物后所产生的烟气中分离和捕集 CO₂ 的技术。由于该技术可直接耦合于现有燃烧设施末端,无需改变核心工艺流程,因此被视为对现有电厂和工厂进行低碳改造最具可行性的技术路径之一。然而,在常规空气燃烧方式下,电厂烟气表现出大流量、低 CO₂ 分压的特点,这造成 CO₂ 分离的驱动力不足,从而导致捕集过程的能耗以及设备的投资与运行成本较高。此外,烟气中夹带的氮氧化物、硫氧化物、粉尘等活性杂质,不仅会引发生物降解与设备腐蚀,更对捕集单元的稳定运行构成威胁。因此,必须配置高效的预处理系统提供深度净化,这进一步增加了系统的复杂性与总体成本^[6-7]。

尽管存在上述挑战,燃烧后碳捕集的工程实践仍取得了显著进展。国家能源集团泰州电厂于 2023 年 6 月投运的 50 万 t/a CCUS 项目,是亚洲目前规模最大的燃煤电厂燃烧后碳捕集工程。该装置可产出纯度高达 99.94% 的 CO₂,其捕集单位能耗约为 2.35 GJ/t。未来,燃烧后碳捕集技术的发展应侧重于开发高性能、低能耗的新型吸收剂(如相变溶剂、位阻胺等),并系统优化集成工艺,以期在规模

化应用中实现能耗与成本的突破性降低。

1.4 化学链燃烧碳捕集

化学链燃烧碳捕集(Cheical Looping Combustion, CLC)利用载氧体在空气反应器与燃料反应器之间的循环,将空气中的氧传递至燃料,从而在非接触燃烧过程中完成CO₂的内分离。该技术从根本上避免了氮气的混入,使燃料反应器出口气体为高浓度的CO₂和H₂O,经冷凝脱水后获得高纯度CO₂,实现CO₂的内分离与主动富集。CLC技术的工艺流程包括两个主要反应器:在燃料反应器中,燃料与金属氧化物(载氧体)发生还原反应;被还原的金属氧化物输送至空气反应器,与空气中的氧发生氧化反应,并完成循环。这一设计使得CLC技术无需传统的空分装置,即可直接产生高浓度CO₂流,其捕集效率可超过95%,有效降低了系统投资与运行成本。此外,由于避免了烟气中氮气带走大量热量,该技术本身也具有较高的能量利用效率,为化石能源的清洁转化与工业深度脱碳提供了一条颇具潜力的技术路径。

近年来,化学链燃烧技术的工程化取得了重要进展。2023年4月,东方电气集团东方锅炉股份有限公司在其德阳基地建成了热功率达4兆瓦的化学链燃烧示范装置,此为目前全球规模最大的CLC示范工程。该项目的成功投运,标志着化学链燃烧技术实现了从实验室原理验证到工程化示范的里程碑式突破^[8]。

1.5 直接空气碳捕集

直接空气碳捕集(Direct Air Capture, DAC)是一种直接从环境大气中捕集CO₂的技术,其能够主动

降低全球大气中的温室气体浓度,且因其不依赖于固定排放源,在部署选址上具有高度的灵活性。然而,由于大气中CO₂的浓度极低(约0.04%),这使得DAC技术的捕集难度、能耗及成本方面均显著高于针对集中排放源的捕集技术。因此,该技术目前总体上仍处于早期示范和商业化探索阶段。2024年10月,原初科技(北京)有限公司在中山火炬开发区启动了全球首套“空气源碳捕集矿化一体化”示范项目。该项目设计碳移除能力为每年1000t,标志着DAC技术与矿物封存相结合的创新路径进入了工程验证阶段。

根据分离介质与作用原理的不同,主流DAC技术主要分为液体吸收法与固体吸附法。液体吸收法通常采用氢氧化钠(NaOH)或氢氧化钾(KOH)等碱性溶液作为吸收剂,通过化学吸收反应捕集空气中的CO₂。富集CO₂的吸收剂需通过高温热解吸进行再生,从而释放出高纯度的CO₂气体,但此再生过程能耗较高。固体吸附法利用具有高比表面积和特定表面化学性质的固体材料(如胺基功能化吸附剂、金属有机框架材料等)对CO₂进行选择性的捕集。再生通常可通过变压或变温等能耗相对较低的方式实现。其中,金属有机框架(MOFs)材料因其极高的比表面积、可调的孔道结构与表面化学性质,成为近年来DAC领域备受关注的研究热点。

2 各项技术的应用边界

为研判主流CO₂捕集技术的适用边界与场景适配性,表1从核心优势、主要局限、分离体系、关键技术及适用场景等维度进行了综合对比分析。

表1 主流碳捕集技术路径综合对比

捕集路径	核心优势	主要局限与挑战	分离体系	关键技术	典型应用场景
燃烧前碳捕集	合成气工作压力与CO ₂ 浓度高,传质驱动力强,吸收/吸附效率显著	系统集成度高,初始投资巨大;工艺流程复杂,操作稳定性面临挑战	CO ₂ /H ₂	燃料气化/重整、水气变换、变压吸附/物理吸收	煤/天然气基化工厂、整体煤气化联合循环发电系统
富氧燃烧	燃烧产物以CO ₂ 和H ₂ O为主,可通过冷凝直接实现CO ₂ 初级富集	依赖高能耗的空分装置制氧,显著增加系统能耗与运营成本	CO ₂ /H ₂ O	低温空分制氧、烟气回收与纯化	燃煤电厂、水泥窑炉、工业锅炉等燃烧系统
燃烧后碳捕集	可直接耦合于现有厂区尾端,工程改造便利性佳,技术成熟度高	烟气中CO ₂ 分压低,捕集过程能耗大,导致运营成本高	CO ₂ /N ₂	化学溶剂吸收、膜分离、固体吸附	传统燃煤/燃气电厂、钢铁烧结、水泥窑尾烟气
化学链碳捕集	通过载氧体循环实现CO ₂ 内分离,理论上规避了空分单元	载氧体材料的反应活性、循环稳定性与制造成本间难以兼顾	CO ₂ /H ₂ O	载氧体设计与合成、双流化床反应器系统	新一代化石/生物质燃料燃烧系统、化工过程
直接空气碳捕集	选址完全灵活,可实现负排放,主动降低大气碳浓度	原料气CO ₂ 浓度极低,捕集能耗与成本远超点源捕集技术	CO ₂ /空气	碱性溶液洗涤与热再生、固体吸附剂变温/变压吸附	碳移除项目、合成低碳燃料、高附加值化学品

3 燃烧后碳捕集中 CO₂ 分离方法

CO₂ 分离是 CO₂ 捕集过程的核心环节,其工艺路线的选择与技术经济性能直接决定了整个碳捕集系统的可行性。在当前主流捕集方式中,燃烧后碳捕集因其与现有能源基础设施兼容性高、改造潜力大而备受关注,其对应的分离技术也最为成熟且具备广阔的应用前景。目前,主流的 CO₂ 分离工艺主要包括吸收法、吸附法、膜分离法及低温分离法。

3.1 吸收分离

吸收分离是燃烧后碳捕集中技术最成熟、应用最广泛的 CO₂ 分离方法。该工艺根据吸收原理的不同,主要分为物理吸收法、化学吸收法和物化复合吸收法。物理吸收法依赖于 CO₂ 在专用物理溶剂(如聚乙二醇二甲醚、*N*-甲基吡咯烷酮等)中的物理溶解。该过程通常在高压下进行,利用高 CO₂ 分压驱动传质,其再生可通过简单的降压闪蒸实现,因此再生能耗相对较低。然而,物理吸收法的 CO₂ 吸收容量有限,故适用于 CO₂ 分压高、处理规模大的场景。化学吸收法则利用化学吸收剂(如醇胺类、氨水等)与 CO₂ 之间发生可逆化学反应,从而选择性捕集 CO₂。该方法对 CO₂ 具有高选择性且吸收容量大,即使在 CO₂ 分压较低的环境中也能保持高脱除效率。但富含 CO₂ 的富液需要高温加热才能实现再生,解吸过程能耗显著偏高。物化复合吸收法融合物理溶剂与化学溶剂的优势,例如典型的砵胺法。该技术体系既能通过物理溶解容纳高 CO₂ 负荷,又能借助化学反应保证在低分压下的捕集效率,因此特别适用于高酸气分压的复杂气体环境。

现阶段,吸收分离工艺已实现大规模工业应用,但仍普遍面临运行能耗高、溶剂损耗与设备腐蚀等问题。未来的研究与发展将聚焦于开发新一代高效吸收剂,其核心目标是实现低再生能耗、高吸收容量、低腐蚀性与优异长期稳定性的统一。

3.2 吸附分离

吸附分离工艺利用具有高比表面积和特定表面化学性质的固体吸附剂,对烟气中的 CO₂ 进行选择性吸附,随后通过改变压力或温度等操作条件实现吸附剂的再生与 CO₂ 的富集。该技术路线兼具高产品纯度与操作灵活性,适用于多种不同规模的排放源。根据吸附质(CO₂)与吸附剂之间作用力的性质,吸附过程可分为物理吸附与化学吸附。物理吸附主要依靠范德华力,作用力较弱,通常具有较快的吸附/脱附动力学;化学吸附则涉及分子间化学键的

形成与断裂,作用力强,选择性高,但再生能耗也相对较大。在工业应用中,再生策略是区分技术路线的关键,由此主要衍生出变压吸附(PSA)、变温吸附(TSA)、真空变压吸附(VSA)以及变温变压耦合吸附(PTSA)等工艺。其中,PSA/VSA 通过压力波动实现快速循环,能耗相对较低,更适用于大规模气量处理;而 TSA 则依靠温度变化进行深度再生,尤其适用于需要高选择性吸附剂的场景,其核心吸附材料包括分子筛、活性炭,以及具有可设计孔道结构的金属有机框架材料等^[9]。

吸附分离工艺面临的核心挑战是如何在保证高吸附容量的同时,有效降低吸附剂再生过程能耗,并维持吸附剂在工况中的机械强度与化学稳定性。因此,未来的技术发展将聚焦于开发兼具高容量、高选择性、快速动力学及优异循环稳定性的新一代高性能吸附剂,并通过优化工艺以协同降低整体能耗。

3.3 膜分离

膜分离工艺是基于气体组分在膜材料中渗透速率差异实现 CO₂ 分离的物理过程,具有无相变、能耗低、设备紧凑、操作简便等特点^[10]。膜材料的选择性与渗透性参数共同决定了膜的分离效率与处理能力。根据材料类型,用于气体分离的膜可分为聚合物膜、无机膜以及综合二者优势的混合基质膜。聚合物膜(如聚酰亚胺)因其成本低廉、成膜性好而得到广泛应用,但其应用受限于较低的耐热性与化学稳定性,在高温或复杂烟气组分环境中易发生塑化或老化。无机膜(如沸石膜、碳分子筛膜)则表现出优异的热稳定性和化学惰性,且通常具有更高的分离选择性,但其制造成本高昂、脆性大,难以制备大面积的分离组件。

目前,膜分离在天然气脱硫、沼气提纯等高压、高浓度 CO₂ 场景中已实现成熟的商业应用。然而,在典型的燃烧后烟气捕集领域,该技术仍面临挑战,尚处于示范与中试阶段。未来的发展将致力于通过材料创新与工艺优化来突破瓶颈:一方面,需开发兼具高选择性、高渗透性、优异稳定性及低成本的新一代膜材料,特别是具有产业化前景的混合基质膜;另一方面,需优化流程设计,如构建多级膜集成系统或其他分离技术耦合,以提升在苛刻条件下的整体技术经济性。

3.4 低温分离

低温分离工艺通过将气体混合物冷却至各组分的冷凝温度以下(对于 CO₂, 约为 -75℃),利用其沸点差异实现气体液化和组分分离的物理过程。低温

分离过程中无需引入化学溶剂,从根本上避免了溶剂降解、补充及后续的二次污染问题,工艺流程相对简洁,可直接产出高纯度的液态CO₂,因此在处理高浓度CO₂气源(如富氧燃烧烟气)时具有显著优势。然而,实现深度制冷所需的巨大能量投入是其最主要的制约因素。整个流程通常包含多级压缩与级间冷却,以及复杂的热集成环节,导致系统能耗与设备投资均维持在较高水平,这极大地限制了其在低浓度或大流量场景下的技术经济性与规模化应用。

表2 CO₂分离工艺性能比较

工艺类型	化学吸收法	物理吸附法	膜分离法	低温分离法
适用气源条件	中低CO ₂ 浓度;低CO ₂ 分压湿气源	中高压、低流量、低湿度且杂质少的气源	中高压、高CO ₂ 分压、杂质少且与CO ₂ 渗透速率差异大的气源	中高压、CO ₂ 浓度很高的气源
捕获率/%	85~95	70~85	50~70	90~98
能耗/(GJ·t ⁻¹ CO ₂)	3.2~4.5	2.0~3.0	1.5~2.5	4.0~5.5
设备成本/(USD·t ⁻¹)	50~80	30~50	20~40	80~120
技术成熟度(TRL)	9(商业化)	7(示范)	6(中试)	8(准商用)
适用场景	①燃烧前:低CO ₂ 浓度天然气脱碳 ②燃烧后:燃煤电厂烟气;天然气发电厂烟气;水泥窑烟气;垃圾焚烧厂烟气;钢铁厂烟气	①燃烧前:(1)小规模中等浓度天然气气田开采;(2)IGCC合成气;水煤气变换单元后的合成气 ②燃烧后:干燥后的燃烧后烟气	①燃烧前:(1)中高CO ₂ 浓度和中低气量的天然气脱碳;(2)油田伴生气脱碳 ②燃烧后:经过脱硫脱硝以及干燥的燃烧后烟气	①富氧燃烧后烟气中CO ₂ 分离; ②CO ₂ 含量很大的天然气井开采
商业化案例	Boundary Dam(加拿大)	Petra Nova(美国)	中石化胜利油田	Sleipner(挪威)

5 结论

CO₂捕集作为CCUS技术体系的核心环节,对于实现“碳达峰”与“碳中和”战略目标具有不可替代的关键作用。通过对主流CO₂捕集与分离路径的系统分析,得出以下结论。

(1)燃烧后化学吸收法凭借其技术成熟度高、与现有基础设施兼容性好等优势,已成为当前应用最广泛、部署规模最大的捕集技术,但其面临的核心挑战在于再生能耗过高。因此,开发具有高吸收速率、低解吸能耗及优异稳定性的新型吸收剂,是提升该技术经济性的主要研究方向。

(2)富氧燃烧与化学链燃烧技术通过过程革新,避免了后续烟气中氮气的稀释效应,实现了CO₂的内分离,展现出能耗低、捕集成本可控的显著潜力。尽管目前仍处于工业示范阶段,但它们为火电、水泥等传统高排放行业的深度脱碳提供了富有前景的技术路径。

(3)在分离工艺方面,各类技术呈现出鲜明的

未来的技术发展将致力于通过开发高效的新型制冷循环与工质,优化系统内部的热集成与能量回收网络,以及探索与其他低能耗预浓缩技术的耦合工艺构建新一代高效、低成本的低温分离系统。

4 CO₂分离工艺性能评估

为全面评估各项CO₂分离工艺性能,从适用气源、捕获率、能耗、成本、技术成熟度及商业化应用等方面进行系统性比较,见表2。

场景适用性。其中,物理吸收法在中高压、高CO₂分压条件下表现优异;吸附法虽适用于中低分压条件,但其吸附剂在高湿烟气中的性能衰减问题亟待解决;膜分离技术在高压、高浓度场景下具有低能耗优势,但其分离精度、抗污染能力及长期稳定性仍需通过材料创新与工艺优化来提升;深冷法虽能直接获得高纯液态CO₂,但其高昂的能耗成本制约了应用范围,提高制冷效率是突破瓶颈的关键。

(4)持续降低全过程能耗与总体成本是推动CO₂捕集技术实现规模化商业应用的根本前提。未来的技术发展必将呈现多元化趋势,一方面需对现有成熟技术进行迭代升级,另一方面也需积极探索前沿的变革性技术,共同推动碳捕集技术向着更高效、更经济、更环保的方向演进,为全球碳中和目标的实现提供坚实的科技支撑。

参考文献

- [1] 孙若水,梁媚聪.从巴黎到贝伦——《巴黎协定》十周年进展与展望[J].气候变化研究进展,2025,21(4):574-582.

(下转第12页)