科技评论

# 碳中和的托底技术
## ——新一代低能耗低成本碳捕集利用与封存技术

郜时旺[1,2], 王焕君[1,2*], 袁浩伟[1,2], 刘昶[1,2]

**摘要** 碳捕集、利用与封存(carbon capture, utilization and storage, CCUS)技术作为实现碳中和的关键路径之一,正逐步成为保障碳中和目标实现的“托底技术”。近年来,全球 CCUS 项目数量与规模显著增长,2025 年全球处于各阶段的 CCUS 项目达 1017 个,运行中项目捕集封存能力约 7048.2 万 t/a。中国在该领域的示范项目推进迅速,目前我国各阶段 CCUS 示范项目约 126 个,具备 $CO_2$ 捕集能力约 940 万 t/a,集群化布局初见雏形。然而,CCUS 仍面临高能耗、高成本、封存安全性与规模化不足等多重挑战,其系统能效与规模化潜力亦引发广泛讨论。在梳理发展现状的基础上,聚焦于 CCUS 技术推广中的关键瓶颈,探讨其在技术成熟度、经济可行性及系统协同性等方面现状及潜力。分析表明,CCUS 既非“万能解方”,也非“延缓转型的借口”,而是实现碳中和不可或缺的战略支撑。在当前发展阶段,必须大力推进该领域的技术创新与体系构建,推动其从“示范探索”迈向“托底保障”。未来,CCUS 的发展应超越单纯技术迭代,实现政策机制、商业模式、产业协同与国际合作的系统融合,才能真正承担起应对气候变化、保障能源安全的时代使命。

**关键词** 碳捕集、利用与封存(CCUS);气候变化;碳中和;能源转型;新型能源系统

当全球每年因化石燃料燃烧向大气中排放超过 400 亿 $tCO_2$[1],远超森林、海洋等自然碳汇的吸收能力,人类文明与碳排放的这场“世纪博弈”已进入读秒阶段。政府间气候变化专门委员会的历次评估报告不断警示:要将全球温升控制在 1.5℃ 或 2℃ 以内[2],仅靠能源结构转型与能效提升已远远不够,必须诉诸大规模、工程化的“负排放”技术,以主动移除大气中的存量 $CO_2$[3]。在此背景下,碳捕集利用与封存(carbon capture, utilization and storage, CCUS)技术被推至聚光灯下,它被比作“碳捕手”——能从钢铁、水泥、化工等“难减排”行业的烟囱中,乃至直接从空气中捕获 $CO_2$,或加以利用转化为产品,或封存于地下深处,从而实现化石能源的“清洁化”利用与大气碳循环的人工干预。更重要的是,作为实现“负排放”的关键技术路径,生物质能耦合碳捕集与封存(bioenergy with carbon capture and storage, BECCS)和直接空气捕集(direct air capture, DAC)等技术,能够抵消那些无法完全消除的剩余排放,为最终实现净零目标提供决定性的技术支撑。CCUS 是国际公认的大规模快速减排温

1. 高效灵活煤电及碳捕集利用封存全国重点实验室,中国华能集团有限公司,雄安 070001
2. 中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司,北京 102209

收稿日期:2025-12-05;修回日期:2026-05-12
基金项目:华能集团科技项目(HNKJ24-H85);北京市高层次创新创业人才支持计划科技新星计划(20250484773)
作者简介:郜时旺,正高级工程师,研究方向为碳捕集、利用与封存技术及电力环保,电子信箱:sw_gao@qny.chng.com.cn;王焕君(通信作者),高级工程师,研究方向为碳捕集技术及非均相催化,电子信箱:hj_wang2@qny.chng.com.cn
引用格式:郜时旺, 王焕君, 袁浩伟, 等. 碳中和的托底技术——新一代低能耗低成本碳捕集利用与封存技术[J]. 科技导报, 2026, 44(18): 24-31;
doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2025.12.00039

室气体的关键技术路径之一，全球范围内 CCUS 已经从技术试验走向商业化应用加速阶段。

## 1 CCUS 技术发展现状

近年来，国内外 CCUS 发展态势整体向好，设施数量显著增长。根据全球碳捕集与封存研究院的数据库[4−5]分析，全球处于各阶段的 CCUS 项目达 1017 个，其中，运行中项目为 62 个，捕集封存能力约 7048.2 万 t/a(图 1[5])，规模化项目(>100 万 t/a)数量占比达到 42.7%，预计到 2035 年各阶段项目能力将增加至 4.5 亿 t/a。全球项目涵盖行业更加广泛，共有 222 个 $CO_2$ 运输/封存项目(不包括捕集)正处于开发的不同阶段，$CO_2$ 运输和封存设施已成为新的行业增长点。

中国 CCUS 示范工程建设发展迅速，数量和规模均显著增加，在更多行业和领域开展 CCUS 技术应用，推动能耗成本持续下降。根据《碳捕集与封存产业发展报告(2025)》[5]，中国各阶段 CCUS 示范项目约 126 个，具备 $CO_2$ 捕集能力约 940 万 t/a，注入能力约 590 万 t/a，覆盖行业更加多元，涵盖电力、油气、化工、水泥、钢铁等领域。$CO_2$ 化工利用项目规划产能超过 200 万 t/a，增速逐年增加。2024 年，国家发展改革委员会印发的《绿色低碳先进技术示范项目清单(第一批)》首批 47 个选定项目中，有 6 个与 CCUS 相关。在示范工程规模方面，中国已投运和规划建设中的 CCUS 示范项目规模明显扩大。10 万吨级及以上项目超过 40 个，其中 50 万吨级及以上项目超过 10 个，多个百万吨级以上项目正在规划中。2024 年 9 月，宁夏 300 万 t/a CCUS 示范项目一期工程顺利中交验收，以一期煤化工企业排放的高纯 $CO_2$ 为主要碳源，建设 50 万 t/a 碳捕集液化工程。2025 年 9 月，华能集团建成的全球单体规模最大的燃煤电厂 150 万 t/a CCUS 全流程示范工程正式投运。

中国高度重视 CCUS 产业、技术研发及推广应用，CCUS 各环节技术发展水平日益提升，部署的系列示范项目落地运行，新理念和新技术方向不断涌现，技术应用效率持续提高，BECCS、DAC 等负排放技术正在完成从 0 到 1 的研发部署。广东粤电湛江生物质电厂是国内首个生物质电厂原始烟气微藻固碳示范工程项目，由中国石化、黑鲸能源、上海交通大学、华东理工大学联合申报的万吨级 DAC 项目正式获批。CCUS 技术耦合集成也逐渐形成新模式，华东、大亚湾等千万吨级的 CCUS 集群正在规划中。随着技术进步和项目规模的扩大，捕集成本已降至每吨 300 元以下，未来技术迭代有望进一步推动 CCUS 各环节技术成本下降。通过共建共享 $CO_2$ 输送管网、封存枢纽等基础设施，发挥规模效应，有效降低运输、封存等环节的单位成本，形成产业竞争优势。《中国 CCUS 技术发展路线图》[6]进一步提出未来中国 CCUS 技术发展愿景及各环节规模成本展望(图 2[6])，如果延续当前发展态势，有望到 2030 年实现现有技术产业化，到 2035 年新型技术形成产业化能力，到 2050 年负排放技术广泛商业化应用，到 2060 年形成 CCUS 产业集群新业态，支撑碳中和目标实现。

然而，在 CCUS 技术加速推进的同时，不应回避其潜在的挑战。尽管 CCUS 技术展现出强大的碳减排潜力，但其大规模部署所带来的经济成本、能源消耗、技术成熟度、长期封存的安全性以及潜在的“技术锁定”效应等问题，仍然是学术界和产业界广泛关注的焦点[7−8]。例如，为实现大规模碳捕集，往往需要消耗大量的能源，这本身可能会带来额外的温室气体排放，形成“伪减排”的风险[9]。尽管中国在 $CO_2$ 捕集环节的示范项目数量和规模增长迅速，但与之

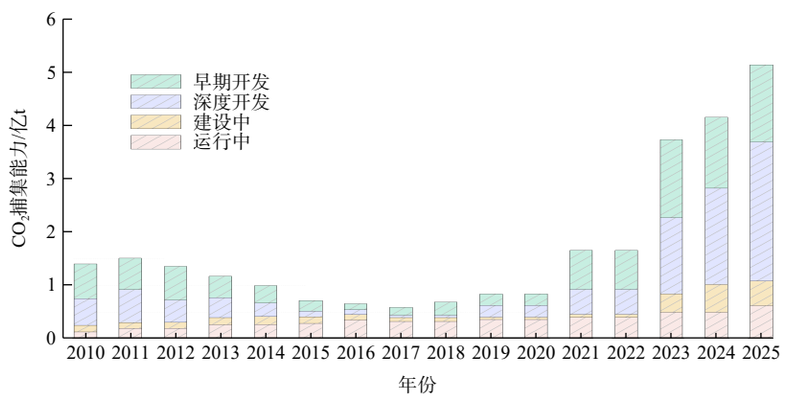



图 1 处于各商业阶段的 CCUS 项目 $CO_2$ 捕集能力变化

| 发展路径 | | | 2030年 掌握现有技术产业化能力，加快部署负排放技术 | 2035年 掌握新型技术产业化能力 | 2050年 负排放技术实现商业运行，广泛部署CCUS集群 | 2060年 全面形成CCUS集群新业态 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 发展目标 | | $CO_2$减排需求（万t/a） | 6500~14000 | 40000~80000 | 180000~240000 | 230000~300000 |
| | | 产业GDP（亿元/a） | 810~2050 | 6350~10200 | 20100~23950 | 21800~26200 |
| 捕集 | 高浓度捕集 | 捕集量（万t/a） | 5000~10000 | 14000~29000 | 15000~25000 | 15000~30000 |
| | | 成本（元/$tCO_2$） | ≤135 | ≤135 | ≤124 | ≤100 |
| | 低浓度捕集 | 捕集量（万t/a） | 5000~14000 | 19000~40000 | 80000~95000 | 60000~100000 |
| | | 成本（元/$tCO_2$） | ≤270 | ≤225 | ≤170 | ≤150 |
| | 新型燃烧捕集 | 捕集量（万t/a） | 100~500 | 6000~10000 | 55000~70000 | 30000~70000 |
| | | 成本（元/$tCO_2$） | ≤220 | ≤190 | ≤140 | ≤120 |
| 运输 | | 单管输送能力（万t/a） | 50~200 | 50~500 | 1000~2000 | >2000 |
| | | 成本 [元/(t·km)] | 0.70 | 0.60 | 0.45 | 0.30 |
| 利用 | 化工利用 | $CO_2$直接利用量（万t/a） | 700~1000 | 1850~2800 | 8900~12600 | 16500~25500 |
| | | 产业GDP（亿元/a） | 300~700 | 2000~4000 | 6000~8000 | 7000~9000 |
| | 生物利用 | $CO_2$直接利用量（万t/a） | 20~30 | 50~100 | 300~400 | 300~500 |
| | | 产业GDP（亿元/a） | 90~200 | 250~400 | 650~900 | 1000~1500 |
| | 矿化利用 | $CO_2$直接利用量（万t/a） | 1480~2170 | 3600~5400 | 4800~7000 | 7200~11000 |
| | | 产业GDP（亿元/a） | 400~800 | 3000~6000 | 9000~12000 | 10000~15000 |
| | 地质利用 | $CO_2$直接利用量（万t/a） | 1500~2000 | 2500~3500 | 6000~12000 | 10000~15000 |
| | | 产业GDP（亿元/a） | 210~280 | 350~490 | 850~1400 | 1400~2100 |
| 封存 | | $CO_2$封存量（万t/a） | 2000~6500 | 20000~40000 | 120000~150000 | 150000~190000 |
| | | 陆上封存成本（元/$tCO_2$） | 50~90 | 40~60 | 30~50 | 20~40 |
| | | 海上封存成本（元/$tCO_2$） | 200~400 | 150~300 | 100~200 | 40~150 |
| 负排放技术 | BECCS | 捕集规模（万$tCO_2$） | 320~480 | 780~1560 | 22000~36000 | 35000~55000 |
| | | 成本（元/$tCO_2$） | 300~1500 | 250~1200 | 200~800 | 150~600 |
| | DAC | 捕集规模（万$tCO_2$） | 80~120 | 220~440 | 8000~14000 | 15000~25000 |
| | | 成本（元/$tCO_2$） | 700~3000 | 600~2500 | 350~1500 | ≤300 |

图 2 CCUS 技术各环节规模成本展望

配套的运输基础设施发展明显滞后，这种结构性不匹配，导致大量捕集的 $CO_2$ 难以有效输送至封存场地或利用场景。$CO_2$ 的长期安全封存方面，地质稳定性、泄漏风险及对地下生态环境的影响，还需要更深入的研究和严谨的验证。此外，过度依赖 CCUS 技术，是否会延缓甚至削弱我们向真正零碳、负碳能源体系转型的紧迫感和决心，进而延缓更根本性的能源结构变革，也是一个值得警醒的哲学与战略层面的思考。

即便如此，CCUS 技术作为一种重要的碳减排手段，其价值不容忽视。在当前全球应对气候变化的大背景下，CCUS 技术在短期和中期内，可以视为我们碳减排战略中的一个关键的“兜底”技术。对于钢铁、水泥、化工等“难减排”行业，以及部分难以快速实现电气化或使用氢能的领域，CCUS 提供了一条最直接的低碳化路径。它为保障中国能源安全，构建新型能源系统，特别是在确保化石燃料低碳化能源转型过程中扮演着至关重要的角色。因此，在审慎评估其局限性的同时，更需要深入研究如何优化其技术路径，降低其成本，并有效管理其风险，使其真正成为应对气候变化的有力工具。

## 2 CCUS 推广的技术瓶颈与未来发展方向

CCUS 技术的大规模推广主要面临高成本、技术成熟度不足等瓶颈。未来，其发展将依赖于技术创新以降本增效、政策激励以创造市场空间，以及走向集群化、产业化的发展模式。通过 $CO_2$ 驱油等利用方式获得收益，以及探索与新能源耦合的负排放技术，是推动 CCUS 商业化应用的关键方向[10]。

### 2.1 CCUS 推广的技术瓶颈

1）高能耗与高成本制约规模化应用。当前主流的化学吸收法碳捕集技术成本较高，高昂的成本导致项目收益率低，企业投资意愿不强。多数技术仍处于工业示范阶段，存在高能耗、系统运行稳定性不足等问题。碳捕集成本占 CCUS 全链成本的 70%~75%，高能耗主要源于吸收剂再生过程中所

需的热能,包括 $CO_2$ 从吸收剂释放的解离反应热(约占解吸能耗的 50%~60%)、溶液升温显热(约占解吸能耗的 10%)和水的蒸发潜热(约占解吸能耗的 30%~40%)3 部分,三者占比受吸收剂种类、再生温度和溶液浓度等因素影响,其中反应热的占比最大,而显热和潜热则主要受工艺条件调控,为低能耗捕集技术的研发提供了多个突破口。新型碳捕集材料、高效碳捕集设备、工艺与系统的集成控制策略等关键技术难题亟须突破,以实现碳捕集能耗和成本的进一步降低。

2) $CO_2$ 利用技术成熟度不高,经济性不足。化工利用技术与可再生能源制氢技术的匹配度不足,导致高效的化学转化依赖高性能催化剂,但现有催化剂在活性、成本与寿命上难以兼顾。同时,生物利用技术存在光合效率低、占地面积大等问题,而矿化技术则面临自然过程缓慢或加速能耗高的挑战,均制约了工业化放大。捕集与转化过程能耗较高,尤其是化学转化需打破 $CO_2$ 稳定的 C═O 化学键(约 800 kJ/mol),需要输入大量能量才能将其活化为高附加值产物。但是,若该转化过程所使用的能量并非来自零碳电力(如风电、光伏),而是来自化石能源发电,则其间接碳排放可能超过所固定的 $CO_2$ 量,导致碳排放“倒挂”,产生“伪减排”风险——表面上消耗了 $CO_2$,实则因高能耗驱动而增加了净排放。因此,只有在低碳能源的深度耦合下,化学转化才能实现真正的净减排效益。此外,除 $CO_2$ 驱油利用外,多数碳利用产品(如绿色燃料、材料等)市场价值有限,在未获得绿色补贴情况下其售价难以覆盖全过程成本。当前碳利用产品缺乏稳定、规模化的市场需求,且国际公认的碳足迹认证标准缺失,使得产品的“低碳”属性无法转化为实际的经济价值。此外,诸多技术路径依赖低碳电力以实现减排效益,其与波动的可再生能源系统的耦合也对工艺和电网提出了新挑战。

3) 源汇匹配与基础设施不足,封存安全性与长期监管面临挑战。$CO_2$ 排放源与适宜封存地之间往往距离较远,管道运输网络建设滞后,中国已建 $CO_2$ 输送管道仅数百公里,而美国超 7500 km。跨区域协调机制缺失,导致运输成本高、项目集成难度大,制约 CCUS 集群化发展。尽管地质封存技术已在一定规模上验证其可行性,但长期封存的安全性仍存隐忧。注入压力管理、盖层完整性、潜在泄漏风险等问题需通过全生命周期监测与预警体系予以控制。

### 2.2 CCUS 技术未来发展方向

1) 通过技术迭代和规模效应降低碳捕集成本。强化材料创新与人工智能、高通量实验平台的协同,加速研发变革性技术路径。研发新型化学吸收剂,如相变吸收剂、非水吸收剂、离子液体和深共晶溶剂等。其中,相变吸收剂在吸收 $CO_2$ 后自发分为两相,仅需对富相进行再生,可减少 30%~50% 的再生能耗;非水吸收剂以有机溶剂替代水,避免水的高热容与蒸发潜热损失,可大幅降低显热能耗;离子液体具有极低挥发性、高热稳定性和可设计性,通过调控阴阳离子结构可实现对 $CO_2$ 的高选择性吸收,再生能耗显著低于传统醇胺溶液;深共晶溶剂作为离子液体的低成本替代品,合成简便、环境友好,同样展现出优异的 $CO_2$ 捕集性能。研发高性能固体吸附剂,如金属有机框架材料,其凭借超高比表面积、可调的孔道结构和开放的金属位点,可在常温常压下高效吸附 $CO_2$,并通过低压蒸汽或变温变压实现低能耗再生。开发高渗透性、高选择性的混合基质膜及促进传递膜,推动膜法捕集的工业应用;电化学捕集利用可逆的氧化还原反应或 pH 摆动效应,在常温下实现 $CO_2$ 的低能耗富集与释放,是极具潜力的颠覆性技术。在应用场景上,推动 $CO_2$ 捕集从当前的火电领域向钢铁、水泥、化工等难以减排的工业领域延伸。通过产业集群,集约化建设基础设施,通过规模化效应来显著降低全链条成本。同时,积极探索 CCUS 与可再生能源(如风电、光伏)的耦合模式,利用“弃风弃光”的电力来降低捕集过程的能耗和碳排放量,实现协同减排。然而,可再生能源的波动性与间歇性对 CCUS 工艺的灵活性提出了严峻挑战。传统化学吸收法碳捕集过程通常依赖稳定的热源和连续运行,直接接入波动性电源可能导致运行不稳定或效率下降。为此,可进一步探索“储能+CCUS”模式,通过储电、储热等方式平滑能源供给,或发展“柔性捕集”技术(如可快速启停的吸附/解吸工艺),使捕集系统能够主动适配电源波动,从而保障耦合系统的稳定高效运行。此外,积极探索将 CCUS 减排量纳

入碳市场交易,为其创造经济价值。

2)发展多元化、高值化、系统化的 $CO_2$ 利用技术。推动 $CO_2$ 利用技术与可再生能源、氢能、工业固废处理等技术深度耦合,构建闭环循环经济产业链,助力 $CO_2$ 利用从“减排辅助手段”向“创造新价值的核心产业”转型。聚焦高效、灵活且长寿命的催化剂研发,重点突破单原子/单团簇催化(实现近100% 原子利用率与精准反应路径调控)、电催化(如铜基材料催化C—C 偶联制多碳产物、酸性体系高效制甲酸)、光催化(利用金属有机框架/共价有机框架等材料实现太阳能驱动还原)等前沿催化路径,通过多位点协同、活性位点空间解耦等创新策略,打破传统催化剂在活性、选择性与寿命之间难以兼顾的瓶颈,将 $CO_2$ 转化为高附加值化工原料(如聚碳酸酯、聚氨酯等聚合物单体)、新型碳材料(如碳纳米管、石墨烯)、绿色燃料(如甲醇、可持续航空燃料)等,实现 $CO_2$ 的资源化消纳。依托钢渣、磷石膏等工业固废中丰富的钙、镁组分,与 $CO_2$ 反应生成碳酸盐,制备高性能建材(如碳酸化砖、轻骨料),实现 $CO_2$ 永久封存与固废资源化利用的双重目标。但是,固废预处理成本较高,矿化反应速度慢,且固废与 $CO_2$ 源可能存在空间错位导致运输成本高,建材产品的市场消纳量也有限;因此,推广矿化技术时应综合评估预处理成本、运输半径与消纳潜力。通过基因工程等手段培育高固碳效率、高环境耐受性的微藻或工程菌株,将 $CO_2$ 转化为生物燃料(如生物柴油、生物乙醇)或高价值蛋白质(如单细胞蛋白),进一步拓宽 $CO_2$ 资源化利用路径。

3) $CO_2$ 封存技术实现系统化、精准化和制度化的突破。为解决源汇匹配与基础设施不足的瓶颈,未来发展的核心是从“单点项目”走向“集群化与区域协同”。通过国家或区域层面的系统性规划,精准评估排放源(如钢铁、水泥集群)与封存地(如枯竭油气田、咸水层)的“源汇匹配”关系,优先在匹配度高的区域(如沿海工业带)布局。推动 $CO_2$ 运输管网网络的共建共享,显著降低单个项目的运输成本,并通过规模化效应吸引更多排放源接入,形成产业集群。为确保持久的安全封存并应对长期监管挑战,技术将向更高精度和实时响应化演进。构建封存地的“数字孪生”模型,并融合卫星遥感、分布式光纤传感和微地震监测等多种技术,实现对封存体状态与 $CO_2$ 羽流迁移的米级、实时化、四维立体监测。利用人工智能与大数据分析,对监测数据进行实时解读,实现泄漏风险的早期预警和预测。长期监管挑战的解决,最终依赖于健全的制度设计。建立清晰的法律框架,明确封存场所在项目关闭后的长期监护主体与资金来源。制定与国际标准接轨的场地筛选、监测、风险评估和关闭技术规范,并建立全国统一的 $CO_2$ 封存许可证管理与数据报告制度,为技术的安全规模化推广提供制度保障。

## 3 推动 CCUS 技术发展的对策与建议

CCUS 技术作为实现碳中和目标的关键路径之一,其从示范阶段走向规模化、商业化应用,亟须政策、市场、技术与社会多维度协同推进,构建系统化、可持续的推广机制。

### 3.1 强化政策引导与制度保障

政策引导是推动 CCUS 技术规模化发展的首要动力。国家层面应将 CCUS 纳入中长期能源发展战略与气候变化应对规划,明确其在碳减排路径中的定位与发展目标。研究显示,若能在 2030 年前实现 CCUS 成本下降 40%~50%,其在全球碳中和技术组合中的贡献率可提升至 15%~20%[11]。在政策引导下,应集中突破以下关键技术领域:一是加快低能耗吸收剂、高效分离膜材料、低成本转化催化剂等核心材料的研发创新。二是推动模块化、智能化碳捕集装备的自主研制与标准化。三是加强地质封存监测预警技术与大数据平台的深度融合。建议通过国家 CCUS 科技专项,组织产学研联合攻关,构建覆盖“捕集−运输−利用−封存”全链条的技术创新体系。四是加强媒体引导与教育培训,将 CCUS 纳入高校环境、能源类专业课程与职业教育体系,培养专业技术人才、提升公众科学素养,为 CCUS 发展提供源源不断的有生力量。

政策保障方面,需建立健全财税激励与金融支持体系,例如,可参照美国 45Q 税收抵免政策经验,结合中国实际,设立分档递进的 CCUS 税收抵免标准:对捕集量达到 10 万 t/a 以上且封存于深部咸水层的项目,给予 30~50 元/$tCO_2$ 的税收抵免;对驱油或化工

利用的项目,设定差异化补贴比例,引导优先选择永久封存路径。同时,可依托国家绿色发展基金设立 CCUS 专项子基金,对首台(套)装备应用、集群式管网建设提供 10~15 年期的低息贷款及贷款贴息支持、“CCUS 专项绿色债券”或“碳捕集保险”。同时,应加快出台封存场地选址标准、泄漏责任认定、长期监测与风险管理等法规体系,建立跨部门协调机制,明确各方权责,为项目运营提供法律保障。

### 3.2 完善市场机制与基础设施

健全的市场机制是 CCUS 实现商业化运营的关键[12]。当前中国全国碳市场仍处于建设初期,CCUS 项目产生的减排量尚未被充分纳入交易体系,缺乏“基准线认定”和“监测核证方法学”。应加快完善碳市场顶层设计,区分不同行业与技术路径,分别制定基于历史排放强度或基于行业最佳可行技术的基准线,基于现有示范项目明确 CCUS 减排量的监测核证方法学与交易机制,探索将其纳入国家核证自愿减排量体系,并与欧盟等国际碳市场接轨。基础设施方面,应优先在京津冀、长三角、粤港澳等工业集聚区及能源基地布局 $CO_2$ 运输管网与封存枢纽,推动形成“区域协同、管网互联、封存共享”的集群发展模式。研究表明,集群化发展可降低运输成本 30% 以上,并提高封存设施利用率[13]。对于跨区域长距离输送,应统筹管道、船舶、铁路等多式联运体系,推动建设国家级 $CO_2$ 输送骨干网络,推动源汇协同,实现规模效应。

从国际经验看,全球 CCUS 发展已呈现差异化的发展模式:美国依托 45Q 税收抵免等市场激励手段,有效激活了私人资本的投资活力;欧盟则通过《净零工业法案》与碳排放交易体系的深度整合,构建了制度牵引与跨国协同的发展框架;而中东及挪威等地区则凭借政府主导与国有企业的强力投入,推动了全链条示范工程的快速落地。

因此,中国在完善市场机制的同时,应积极探索多元化的商业模式:一是“一体化模式”,由大型能源央企布局捕集项目,实现全链条内部化运营;二是“联合经营模式”,由区域内多个排放源企业共同出资成立基础设施运营公司,共建共享管网与封存设施,分摊投资与运营风险;三是“第三方运营商模式”,引入专业化的 $CO_2$ 运输与封存服务企业,向周边排放源提供综合服务,降低单个企业参与门槛。通过上述方式可以吸引更多社会资本参与跨国 CCUS 项目,共同分摊大型项目的资金风险和压力。CCUS 产业化推广的核心是建立公平的成本分摊与利益共享机制,确保从碳排放方到封存方的各方都能获得合理回报。超前规划并投资建设 $CO_2$ 输送管网等基础设施。推动形成“区域集群”模式,实现多个排放源共享封存设施,发挥规模效应。

### 3.3 加强国际交流与合作

构建多层次合作网络,未来将形成“政府引导、企业主体、科研机构支撑”的立体合作格局。政府主要负责顶层设计、政策对话和标准协调;企业和金融机构是项目投资和落地的主力;而高校及科研院所则专注于前沿技术的联合攻关和人才的培养。加强国内国外在技术、碳市场机制、标准体系等方面的对接,强化原始创新,加快中国 CCUS 产业化进程。

对 CCUS 国际合作机制进行创新,从松散的论坛交流转向建立实体化、常设性的国际组织,提供稳定、高效的合作平台。强化知识共享与能力建设,聚焦共性技术难题,共建知识平台,避免重复研发,加速技术迭代和成本下降。联合攻关低成本捕集、长效安全封存等关键技术。推动技术标准互认与专利全球布局,促进技术转移。推动跨国“产业集群”合作,共享运输和封存基础设施,通过规模效应显著降低单个项目成本。积极参与国际标准制定,探索跨国碳减排量核算与交易机制,应对碳边境调整机制等政策,推动碳市场联通,为 CCUS 创造公平、可预测的国际市场环境。

### 3.4 增强公众认知与社会接受度

CCUS 技术的推广不仅依赖技术与政策,也离不开社会认同与公众参与。当前,社会对 CCUS 的认知仍较为有限,对封存安全、生态影响等存在疑虑。应通过科普宣传、公众开放日、社区对话等形式,增强对 CCUS 技术原理、安全措施与环境效益等方面的沟通和知识科普,提升公众对 CCUS 安全性与必要性的认知,夯实技术推广的社会基础。

## 4 结论

在应对气候变化的宏大叙事

中,CCUS 技术不是万能灵药,而是实现碳中和目标不可或缺的托底技术。尽管当前面临高能耗、高成本与系统整合等现实挑战,其在难减排工业领域的不可替代性及其对能源平稳转型的保障作用已形成广泛共识。需要积极布局,规避技术锁定,同时也要做好 CCUS 和可再生能源间的协同可持续发展:(1) CCUS不可替代性集中于钢铁、水泥等“难减排”行业;对于电力、交通等可通过可再生能源深度脱碳的领域,CCUS 应作为存量资产低碳改造的过渡手段,而非新建化石能源项目的“绿色通行证”。(2) 规避“技术锁定”风险,需建立动态评估与退出机制。新建化石能源项目不得以“未来配套 CCUS”为由绕过排放标准;存量项目应设定 CCUS 改造后的最长运营年限及退坡机制,确保 CCUS 项目实现设计减排量。(3) CCUS 与可再生能源是互补而非替代关系。可再生能源“做大零碳增量”,CCUS“做净高碳存量”。应确立“可再生能源优先、CCUS 托底”的资源配置原则,避免挤占根本性转型投入。

未来的发展路径必须超越单纯的技术迭代,转向一场深刻的系统性变革:通过政策创新构建稳定的制度环境,借助市场机制激发商业活力,加强技术攻关突破成本瓶颈,并依托国际合作实现知识共享与标准协同。(1) 持续科技创新,聚焦突破捕集能耗、材料性能与封存监测 3 大环节技术瓶颈,不断降低成本,实现商业化开发。(2) CCUS 与可再生能源的动态协同,发展“柔性 CCUS”工艺,实现碳减排与电网调峰双重效益。(3) 积极鼓励集群化发展与市场机制建设,百万千瓦级集群的全链条系统优化,建立源汇匹配与管网规划模型。(4) 长期封存的安全监测与风险预警,结合数字孪生与 AI 实现泄漏风险前瞻预测。(5) 社会科学与治理体系,包括公众接受度、跨区域法律责任、国际碳市场互认规则等。

唯有将 CCUS 置于能源系统整体转型的框架下,使其与可再生能源发展形成互补而非竞争关系,才能有效规避技术锁定风险,真正发挥其作为碳中和“最后一公里”的关键支撑作用。这条路径虽充满挑战,但却是我们面对气候危机时必须跨越的关口,需要全社会共同付出智慧与努力。

## 参考文献(References)


[1] International Energy Agency. Global energy review 2025[R] Paris: International Energy Agency, 2025.

[2] Terhaar J, Frlicher T L, Aschwanden M T, et al. Adaptive emission reduction approach to reach any global warming target[J]. Nature Climate Change, 2022, 12(12): 1136−1142.

[3] Duan H B, Zhou S, Jiang K J, et al. Assessing China's efforts to pursue the 1.5℃ warming limit[J]. Science, 2021, 372(6540): 378−385.

[4] Global CCS Institute. Global status of CCS 2024[R]. Melbourne: Global CCS Institute, 2024.

[5] Global CCS Institute. Global Status of CCS 2025[EB/OL]. (2025−10−09)[2025−10−20]. https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report.

[6] 中国21世纪议程管理中心. 中国CCUS技术发展路线图(2025)[R]. 苏州: 2025国际能源变革论坛, 2025.

[7] Zhao Y X. CCUS: A Panacea or a Placebo in the fight against climate change[J]. Green Energy & Environment, 2025, 10(2): 239−243.

[8] Chen W H, Lu X, Lei Y L, et al. A comparison of incentive policies for the optimal layout of CCUS clusters in China's coal-fired power plants toward carbon neutrality[J]. Engineering, 2021, 7(12): 1692−1695.

[9] Rubin E S, Davison J E, Herzog H J. The cost of $CO_2$ capture and storage [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2015, 40: 378−400.

[10] 舒印彪, 张正陵, 汤涌, 等. 新型电力系统构建的若干基本问题[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(21): 8327−8340.

[11] Yan X Z, Tong D, Davis S J, et al. Cost−competitive plant−by−plant strategy for spatially resolved CCUS deployment toward carbon neutrality in global key industries[J]. One Earth, 2025, 8(9): 101378.

[12] 吕昊东, 鲁玺, 张贤. 碳中和目标下CCUS技术部署在公正转型中的协同效益[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(10): 138−146.

[13] Budiarto O, Purwanto W W, Halimatussadiah A, et al. Multi−period superstructure optimization for CCS source−sink matching in South Sumatra industrial clusters[J]. Carbon Neutrality, 2025, 4(1): 20.

# Safety-net technology for carbon neutrality: Next-generation low-energy, low-cost carbon capture, utilization, and storage (CCUS) technology

GAO Shiwang[1,2], WANG Huanjun[1,2*], YUAN Haowei[1,2], LIU Chang[1,2]

1. State Key Laboratory of High-efficiency Flexible Coal Power Generation and Carbon Capture Utilization and Storage, China Huaneng Group, Xiong'an 070001, China
2. Huaneng Clean Energy Research Institute, Beijing 102209, China

**Abstract** Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) technology, as one of the key pathways to achieving carbon neutrality, is gradually emerging as a "safety-net technology" to ensure the attainment of this goal. In recent years, the number and scale of CCUS projects worldwide have grown significantly. By 2025, there were 1,017 CCUS projects at various stages globally, with operational projects capturing and storing approximately 70.482 million tonnes of $CO_2$ per year. In China, demonstration projects in this field have advanced rapidly. Currently, the country has about 126 CCUS demonstration projects at various stages, with a total $CO_2$ capture capacity of approximately 9.4 million tonnes per year, and cluster-based development is beginning to take shape. However, CCUS still faces multiple challenges, including high energy consumption, high costs, storage safety concerns, and insufficient scalability. The system efficiency and scaling potential of CCUS have also sparked extensive discussion. Based on a review of the current development status, this paper focuses on the key bottlenecks hindering the widespread adoption of CCUS technologies, and explores the current state and potential of technical maturity, economic feasibility, and system synergy. CCUS is neither a "universal panacea" nor an "excuse to delay the energy transition", but rather an indispensable strategic support for achieving carbon neutrality. At the current stage of development, it is essential to vigorously promote technological innovation and system building in this field, facilitating the transition of CCUS from "demonstration and exploration" to "safety-net support". In the future, the development of CCUS must go beyond mere technological iteration to achieve the systematic integration of policy mechanisms, business models, industrial synergy, and international cooperation, only then can it truly shoulder the mission of our era to combat climate change and ensure energy security.

**Keywords** CCUS; climate change; carbon neutrality; energy transition; new energy system

（责任编辑　赵庆圆）