

DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2025.115

吕晋宁, 张枢, 陈文颖. 碳中和目标下中国 CCUS 发展进程与国际经验启示 [J]. 气候变化研究进展, 2026, 22 (1): 70-83

Lyu J N, Zhang S, Chen W Y. The development process of CCUS in China towards carbon neutrality: insights from international experience [J]. Climate Change Research, 2026, 22 (1): 70-83



碳中和目标下中国 CCUS 发展进程 与国际经验启示

吕晋宁, 张枢, 陈文颖

清华大学能源环境经济研究所, 北京 100084

摘要: 碳捕集、利用与封存 (CCUS) 是实现碳中和目标的“兜底技术”。文中分析了中国 CCUS 发展现状, 指出虽在政策支持、示范项目数量与规模方面取得进展, 但仍面临技术成本高、商业模式不成熟、产业链布局不完善、政策配套与市场机制不健全等挑战。国际分析显示, 全球及各国/地区 CCUS 部署规模与气候目标所需规模存在巨大鸿沟。发达国家凭借顶层战略、法规标准、财税激励和市场机制等模式, 项目商业化发展更为成熟。国际典型项目经验凸显政策驱动、市场创新、产业链管理、技术集成与国际合作的重要性。鉴于此, 为推动中国 CCUS 规模化发展, 提出以下建议: 推进技术研发, 实现降本增效, 整合产业链条, 健全政策法规, 完善市场机制, 同时深化国际合作, 构建人才队伍。

关键词: 碳捕集、利用与封存 (CCUS); 碳中和; 国际经验; 政策评估

引言

碳捕集、利用与封存 (CCUS) 是通过工程技术手段将排放源或大气中的 CO₂ 进行高效捕集, 经压缩、净化处理后, 通过管道、船舶或车辆运输至特定场所加以规模化利用或长期封存, 从而减少人为 CO₂ 净排放的综合性技术体系。在全球气候变化治理加速深化的背景下, CCUS 作为支撑深度脱碳的关键技术路径, 其战略价值逐步凸显。根据预测, 中国 CCUS 的减排需求到 2050 年可能达到 20 亿 t/a 左右, 而 2024 年底已投运的

CCUS 示范项目捕集能力约为 440 万 t/a, 当前发展与碳中和目标需求之间仍存在显著差距。与国际先进水平相比, 部分前沿捕集技术和海底管道运输、强化天然气/页岩气开采等技术仍存在代际落差^[1]。此外, 全产业链成本控制、跨行业协同能力、政策支持体系等关键要素均尚未形成有效支撑^[2]。亟需进一步评估发展现状, 对比国内外差距, 构建符合国情的政策体系。

本文聚焦中国 CCUS 发展核心议题, 围绕 3 个方面开展系统研究: 1) 从政策支持、技术发展、示范项目维度分析中国 CCUS 发展现状, 梳理面

收稿日期: 2025-05-29; 修回日期: 2025-07-03

资助项目: 国家科技重大专项: CO₂ 驱大幅度提高采收率与长期封存技术 (2024ZD1406600); CO₂ 驱油与封存发展战略规划研究 (2024ZD1406606)

作者简介: 吕晋宁, 女, 博士研究生, lvjn24@mails.tsinghua.edu.cn; 陈文颖 (通信作者), 女, 教授, chenwy@tsinghua.edu.cn

临的主要问题; 2) 分析全球和典型国家/地区 CCUS 发展规模及未来减排贡献, 分析各国/地区政策框架、商业模式与产业集群, 总结可借鉴的制度创新与合作经验; 3) 结合碳中和目标下的能源与工业体系转型需求, 提出技术研发、产业协同、政策机制与国际合作方面的建议, 旨在为中国 CCUS 规模化发展提供战略参考, 助力构建“技术-政策-国际合作”协同驱动的低碳转型方案。

1 中国 CCUS 发展现状

1.1 政策体系

近年来, 中国政府高度重视并积极应对全球气候变化, 出台多项政策引导支持 CCUS 相关技术的研发工作。在“十四五”期间, CCUS 被明确为碳中和“兜底技术”, 国家顶层设计与地方规划政策呈现显著转变, 具体体现在几个方面。1) 目标具体化, 由“十二五”“十三五”时期的纲领性要求, 转向分阶段技术攻关与规模化示范项目, 强调全流程产业化应用^[1]。2) 应用场景多元化, 《工业领域碳达峰实施方案》明确钢铁、建材、石化化工等行业 CCUS 技术突破与示范要求。同时, CO₂ 封存也在从驱油利用向深部盐水层封存、海洋封存等多元化路径拓展, 同步发展陆地和海洋封存^[3]。3) 技术路线图更新, 2024 年发布的《中国 CCUS 技术发展路线图》提出 2030 年前突破低能耗捕集、海底封存等关键技术, 力争将第二代技术^①成本降低 30% 以上^[4]。4) 地方根据自身优势差异化部署 CCUS 政策, 如内蒙古聚焦煤化工与绿氢耦合, 提出探索现代煤化工与绿氢、CCUS 耦合发展模式; 山东侧重前沿技术攻关和产业示范, 强调加快碳中和前沿技术突破, 在油田、天然气田等优势区域研发低成本碳封存技术; 上海作为沿海区域, 着力强化基础研究和前沿技术布局, 将 CCUS 与深远海风电、新型电力系统等前

瞻科技融合, 积极探索深远海 CO₂ 地质封存。5) 地方政府推动跨区域协同机制, 如大亚湾区 CCUS 集群项目谅解备忘录的签署, 旨在构建海上规模化碳捕集与封存产业集群, 为沿海高排放企业提供新的减排思路。6) 国际合作持续深化, 中国已与美国、亚太、荷兰、挪威等国家开展 CCUS 联合示范。2023 年 11 月, 中美签署《关于加强合作应对气候危机的阳光之乡声明》, 约定至 2030 年各自推动 5 个大型 CCUS 项目。

1.2 技术水平

CCUS 成本主要包括碳捕集、运输、储存或利用三部分, 其中捕集成本占比最高。中国 CCUS 技术整体与国际先进水平相当, 但部分关键技术与商业化集成仍有差距。燃烧前物理吸收技术工艺相对成熟, 能较好地适应煤化工、天然气处理等行业中中等浓度 CO₂ 的捕集需求, 已达到商业应用阶段。燃烧后化学吸收技术虽然仍处于工业示范阶段, 但其技术路线明确、设备和工艺较为成熟, 适合燃煤电厂等大规模排放源, 成为当前推广的重点^[5]。第二代和第三代技术尚处于研发或实验室阶段, 尚未达到大规模示范或商业应用条件。运输方面, 罐车与船舶运输已商业化, 技术水平与国际相当, 但具备规模化潜力的管道运输仍处于基础研究与中试阶段。部分工程已取得突破, 如中石化齐鲁石化-胜利油田百万吨级 CCUS 项目建成 109 km 的 CO₂ 输送管道、2025 年宝世顺中标国内首条超临界 CO₂ 管道项目等, 标志着中国 CO₂ 输送领域实现关键技术进展。在利用与封存方面, CO₂ 化学与生物利用技术发展与国际基本同步, 处于工业示范阶段。

中国 CCUS 单位减排成本整体较高。在碳捕集环节, 目前 CCUS 捕集成本为 100 ~ 730 元/t CO₂, 煤化工与石化行业的一体化驱油项目碳捕集成本相对较低, 电力 (200 ~ 600 元/t) 与水泥 (30 ~ 730 元/t) 领域波动较大, 但低于国际电

①第一代技术, 如胺基吸收剂和常压富氧燃烧, 已具备大规模示范应用能力; 第二代技术, 如新型膜分离、新型吸附、增压富氧燃烧、化学链燃烧等, 主要聚焦于降本增效, 正逐步向多行业推广应用; 第三代技术, 如固体吸附剂、生物法与直接空气捕集, 受限于成本较高, 目前仍处于实验室研发或小规模试点阶段。

力 (350 ~ 977 元 / t) 与水泥 (686 ~ 1280 元 / t) 水平^[1]。图 1 为中国分行业 CCUS 减排成本 (绿色柱子)、其他技术路径的减排成本 (彩色圆点) 和全球主要碳市场 2024 年的碳价^[6-9]。从 CCUS 成本与现行碳价的差距来看, 中国全国碳市场碳价远低于各行业 CCUS 净减排成本。与其他减排技术相比, CCUS 成本仍偏高。例如, 中国火电厂通过提升能效或燃料转换的减排成本约 317 元 / t^[10]、水泥行业通过提高热 / 电效率或替代燃料的减排成本约 288 元 / t CO₂, 均低于相应行业的 CCUS 减排成本^[11-12]。提高石油采收率 (EOR) 可依靠石油获利, 煤化工和石化行业中使用 CCUS 具有一定的成本优势。综上, 尽管部分中国 CCUS 项目在特定领域已具备一定国际竞争力, 其净减排成本仍普遍高于国内碳价, 且 CCUS 尚未纳入国家核证自愿减排量 (CCER) 市场, 难以依赖现有碳市场实现商业化部署。同时, 相较其他减排技术, CCUS 经济性尚显不足。未来随着技术进步、规模扩大及政策支持加强, CCUS 减排成本有望进

一步下降。

1.3 示范项目

中国 CCUS 示范项目建设与投运持续推进, 捕集能力和注入能力都在快速提升。自 2004 年中国第一个 CCUS 示范项目在山西投运以来, 截至 2024 年底, 中国已投运和规划建设中的 CCUS 示范项目超过 100 个, 投运和规划建设项目总 CO₂ 捕集能力超过 850 万 t/a。在所有投运和规划建设的项目中, 已投运项目 54 个, 具备 CO₂ 捕集能力约 440 万 t/a, 利用 / 注入能力约 400 万 t/a, 利用 / 注入能力较 2023 年提高约 90%^[1]。

从捕集端看, 主要以电力、化工行业排放的 CO₂ 为碳源, 逐步扩展至钢铁、水泥建材及油气等行业, 与政策推动 CCUS 从单一领域向多行业扩展的趋势相呼应; 从利用 / 封存端看, EOR 是当前 CCUS 项目利用 / 封存最主要的模式, 2023 年有 26 个投运项目的利用方式为 EOR, 矿化利用和化学利用分别有 13 个项目, 生物利用、驱替

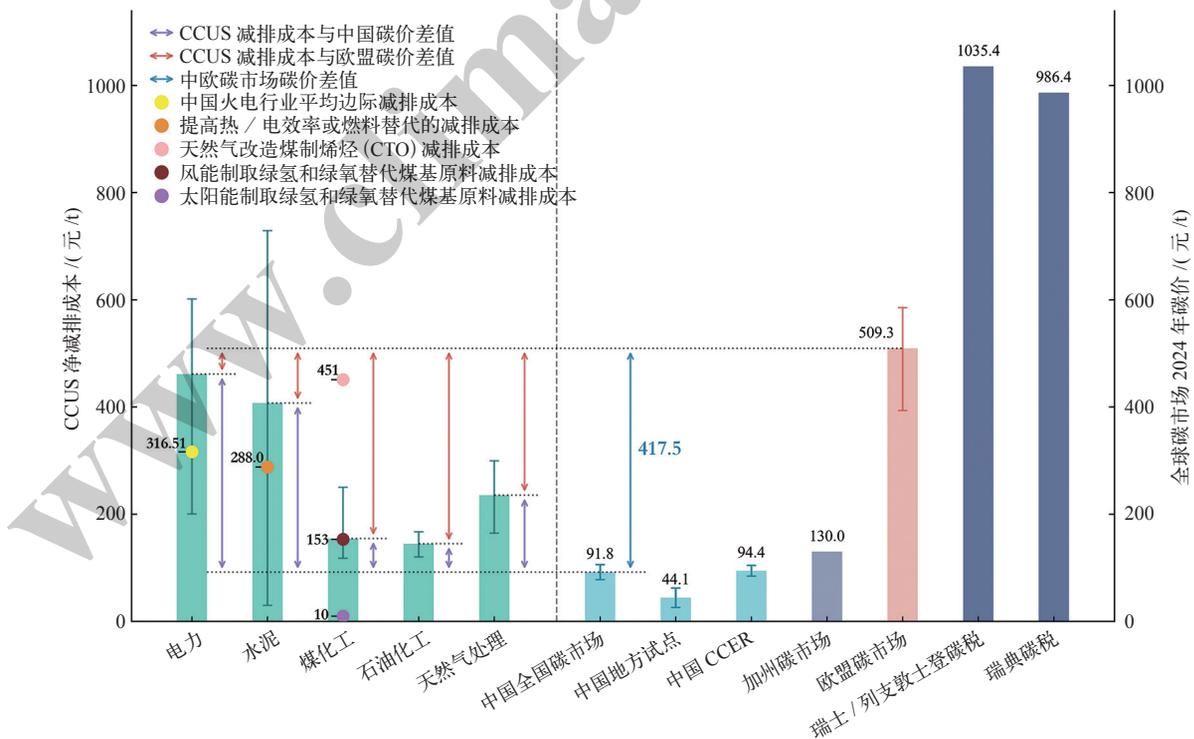


图 1 2024 年中国分行业碳捕集、利用与封存 (CCUS) 减排成本与其他路径减排成本和国内外碳价比较
 Fig. 1 Comparison of sectoral Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) abatement costs and other emission reduction pathway costs in China with domestic and international carbon prices in 2024

煤层气及地质封存等前沿技术已开展试点应用; 从产业规模维度分析, 自 2022 年起, CCUS 项目进入规模化突破阶段, 10 万 t 及以上项目超过 40 个。齐鲁石化-胜利油田项目是中国首个商业化的百万吨级 CCUS 项目, 该项目由山东省专项资金、环境保护税减免、中石化主导投资、产业链降本增效、胜利油田投入经费共同驱动, 已在 20 个区块累计注入 64 万 t CO₂, 封存 50 多万 t CO₂, 增油 10 多万 t。2025 年 5 月, 我国首个海上 CCUS 项目恩平 15-1 平台投用, 该项目由广东省专项补贴、中海油经费投入等共同驱动, 捕集油田伴生 CO₂ 进行驱油和封存, 计划累计封存超 100 万 t CO₂, 标志着我国在海洋碳封存领域取得关键进展^[13-14]。行业规模化进程在已投运的大型项目中逐步得到验证, 大部分 CCUS 项目由大型国有能源企业主导开发, 并整合到现有石油石化或煤炭产业链中 (表 1)^[15]。

综上, 中国 CCUS 发展面临以下问题。1) 政策机制层面, 国家顶层设计虽逐步完善, 但配套实施细则和行业标准滞后。财税激励覆盖范围有限, 强制碳市场与 CCUS 的关联度较低, CCUS 项目尚未通过 CCER 市场等自愿减排交易机制获得有效经济补偿。2) 技术水平层面, 二代和三代捕集技术等仍与国际水平存在差距, 大规模 CO₂ 运输和利用/封存技术仍在发展。目前中国各行业捕集成本异质性强, CCUS 全产业链净减排成

本远高于中国全国碳市场碳价, 也高于其他脱碳技术的减排成本。3) 项目运营层面, 顶层规划与发展路径联系不够紧密, 产业链整合路线不够清晰, 产业化水平较低, 商业化项目仍以中小规模为主, 尚未从源头解决 CCUS 项目难以实现盈利的问题。钢铁、水泥等高排放行业规模化应用不足, 财税、市场等多元化激励途径尚未打通。

2 国际 CCUS 发展路径

2.1 全球 CCUS 减排贡献与部署现状

应对气候变化, CCUS 已成为实现净零排放的重要技术路径。根据多家国际机构测算, 全球 CCUS 年减排需求将在 2050 年达到 46.6 亿 t, 2070 年扩大至 97.7 亿 t^[16-18]。截至 2024 年 7 月, 全球 CCUS 项目数量增至 628 个, 较 2023 年增长 60.2%, 所有运营、在建和规划项目的总 CO₂ 捕集能力达 4.16 亿 t。50 个在运营项目年捕集量达 5100 万 t, 较上年增加 200 万 t; 在建项目 44 个, 捕集能力同比增长 57%; 处于后期开发阶段的项目由 2022 年的 121 个增至 247 个, 增长势头强劲。

图 2 为 2017—2030 年间全球碳捕集与封存 (CCS) 发展的实际轨迹与近期气候目标间的差距。全球在运营项目的年捕集能力自 2017 年的 3200 万 t 增长至 2024 年的 5100 万 t。若所有当前的项目计划都得以实现, 在最乐观的可行部署情境下

表 1 中国已投运大型碳捕集、利用与封存 (CCUS) 项目典型示例

Table 1 Typical example of large-scale Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) projects in operation in China

项目	捕集源/CO ₂ 源	捕集技术	捕集规模/ (万 t/a)	处置技术	年利用或注 入量/万 t
齐鲁石化-胜利油田 CO ₂ 捕集利用与封存全流程项目	化工厂 (化肥厂尾气)	燃烧前	100	驱油封存	100
中海油恩平 15-1 油田群 CO ₂ 封存项目	石油开采 (油田伴生气)	燃烧前	30	咸水层封存	30
国家能源集团泰州电厂 CCUS 项目	燃煤电厂 (泰州电厂超临界燃煤发电机组)	燃烧后	50	焊接制造、食品级干冰、高新机械清洗、EOR	/
中石化中原油田濮阳 CO ₂ -EOR 示范工程	/	/	/	驱油封存	50
中石油吉林大情字井油田 CCUS 项目	天然气处理 (吉林油田长岭天然气处理厂)	燃烧前	60	EOR	40
中石油华北油田沧州 CCUS 项目	/	/	/	EOR	40

注: “/” 表示该项目未涉及或未公开该项信息。

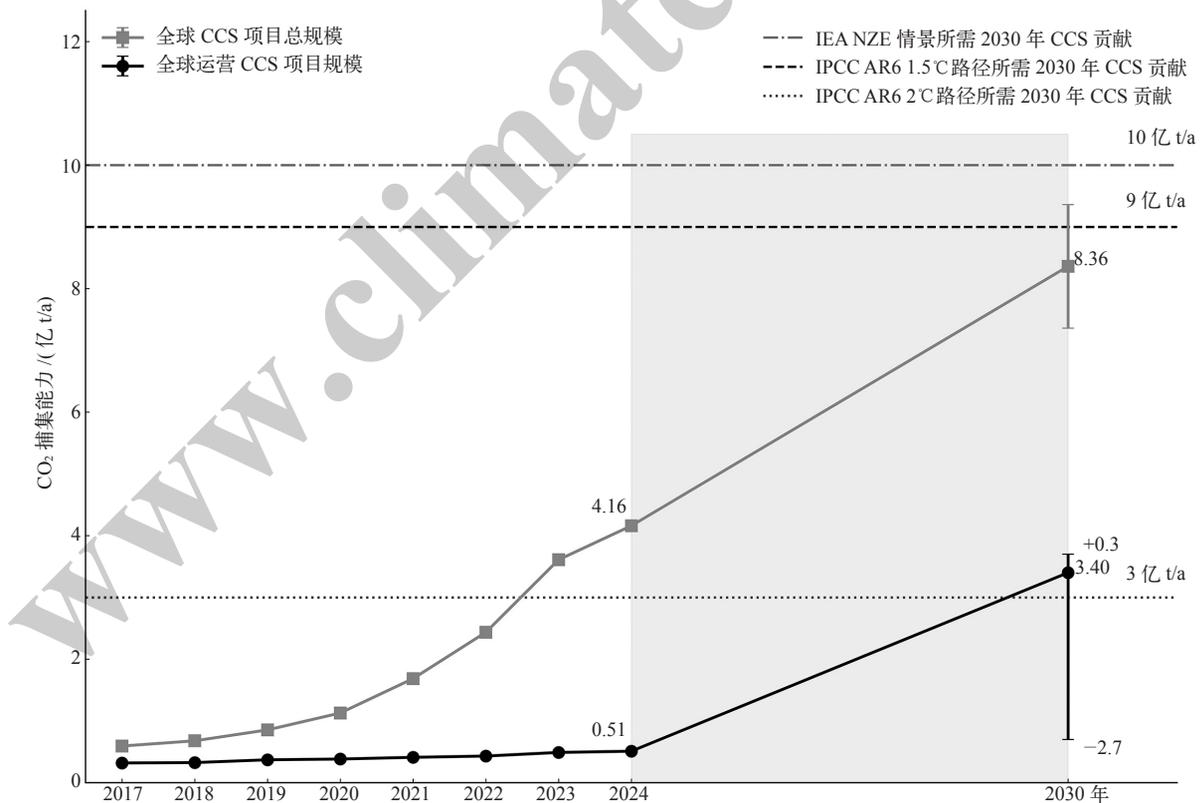
捕集规模达到 3.7 亿 t，与 1.5℃ 路径需求仍相距较远^[19]。各阶段 CCS 项目的总捕集能力从 2017 年的 5900 万 t 提升至 2024 年的 4.16 亿 t，依据现有项目的成熟、新增项目容量等推算，2030 年有望达 8.36 亿 t^[2,20-22]。即便所有在建与规划项目如期实现，至 2050 年全球累计封存量仅约 120 亿 t，而实现净零排放所需封存量预计将超过 1000 亿 t，差距接近 10 倍^[20]。

2.2 全球 CCS 部署受限的关键障碍

全球 CCS 商业化进程中存在 4 类关键障碍，造成当前部署规模与未来减排需求之间的显著差距。1) 经济成本高与商业模式不成熟。CCUS 项目通常伴随高额前期投入、长期能效损失和运维成本激增，回报周期长。在缺乏足够市场机制、财政激励或政策保障的情况下，项目经济性较差。目前除采用 EOR 或依赖补贴外，较难形成可独立盈

利的商业模式并吸引私人资本投资。此外，部分 CCUS 核心技术尚未实现规模化或商业化应用，项目开发不确定性限制 CCUS 规模化发展。2) 产业链整合不完善，源汇匹配路径有待明晰。CCUS 上下游产业链长且空间错配，目前许多地区的源汇匹配路径规划尚未达到精细量化程度，缺乏面向资源、产业与基础设施统筹优化的 CCUS 空间布局与成本效益评估框架。3) 政策与市场机制的支持力度不足。CCUS 项目周期较长，依赖长期、稳定的政策或市场激励。目前较多地区针对 CCUS 的财政补贴不足、市场机制不够成熟。4) 法规审批复杂与公众接受度不足。封存资源的勘探、评估及许可流程繁琐，是制约项目落地的关键瓶颈。跨境项目和陆上管道建设也通常面临繁复的监管要求与冗长的审批流程。同时，公众对 CO₂ 运输与封存的安全性存在认知疑虑，接受度不高。

综上所述，实现 CCUS 大规模部署，必须同



注：2017—2024 年为历史数据。气候目标所需 2030 年 CCS 贡献是指为完成不同气候目标，每年需要通过 CCS 技术实现的 CO₂ 捕集并封存速率^[19,20]。IEA NZE 是国际能源署 (IEA) 净零排放情景。

图 2 全球 CCS 发展轨迹 (2017—2024 年)、预期规模与实现气候目标所需贡献

Fig. 2 Global CCS development trajectory, expected scale, and required contribution to achieve climate targets

步技术进步、产业链完善、政策支持与社会接受度提升, 系统破解当前商业化进程中的关键障碍。

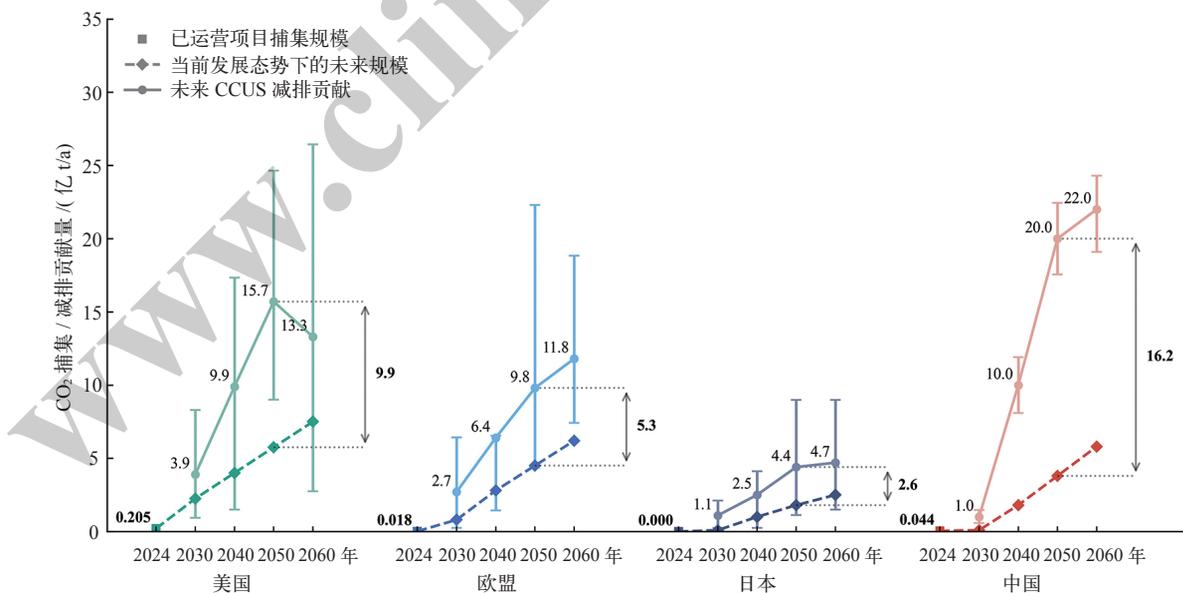
2.3 各国 / 地区 CCUS 减排贡献与发展路径

基于 CCUS 减排需求显著、区域发展模式具有代表性及数据可得性, 选取 4 个典型国家展示其当前 CCUS 规模、未来发展趋势及减排贡献 (图 3)。为实现 1.5°C 气候目标和各自的碳中和承诺, 到 2050 年, 各国通过 CCUS 实现的年度减排需求预计分别为: 美国 9 亿~24.6 亿 t、欧盟 4.4 亿~22.3 亿 t、日本 1.1 亿~8.9 亿 t, 中国 18.7 亿~22.5 亿 t^[16]。全球 CCUS 项目数量与规模不断提升, 北美与欧洲在政策驱动下快速扩张, 中国、中东与亚太地区亦展现强劲增长势头, 但整体部署规模与未来需求仍存在巨大缺口。近年来, 不同国家和地区正根据自身资源禀赋、产业结构与政策环境, 探索多样化的发展路径。

北美地区的 CCUS 发展处于全球领先地位。美国已布局 276 个 CCS 项目, 19 个已实现商业化, 年捕集能力超过 2050 万 t, 约占全球在运营项目的 45%。项目覆盖水泥、燃煤、燃气、垃圾发电

与化工等高排放行业, 展现广泛的产业适应性。美国联邦政府通过《基础设施投资与就业法案》(IIJA) 提供资金, 通过《通胀削减法案》(IRA) 提供税收抵免, 大幅提升了 CCUS 项目的经济性。美国持续加大碳管理技术研发与集群示范投入力度, 形成了政府稳定投入、私营资本活跃的多元激励体系, 促使美国 50% 的项目不再依赖 EOR 的收入, 并积极布局直接空气捕集 (DAC) 等前沿技术^[28]。预计 2030 年捕集能力将达 2 亿~2.5 亿 t/a, 虽具快速扩张潜力, 但距减排需求仍有显著差距^[16]。加拿大有 58 个项目处于不同开发阶段, 运输与封存能力接近 700 万 t/a。加拿大政府提供了联邦投资税收抵免和碳市场机制, 并建立了碳差价合约 (CCfD) 机制来支持项目起步。加拿大计划到 2030 年封存能力达 1500 万 t/a, 未来 6 年需实现逾 1 倍增长^[20]。

欧洲侧重于通过政策支持与市场机制应对上述挑战。截至 2024 年, 共有 191 个商业项目处于不同开发阶段, 较 2023 年增长 62%。北海区域凭借成熟的地质条件, 长期被视为封存的优选区域, 带动了该区域产业集群的形成。欧盟通过《净零



注: 已运营捕集规模, 美国、欧盟、日本统计 CCS 项目^[21], 中国统计 CCUS 项目^[4]; 当前发展态势下的未来规模, 美国、欧盟、日本根据政策目标确定未来规模, 缺少数据的年份使用线性插值补充; 中国 2030 年规模为假设现有开发、在建和投运项目均按计划运营时的年捕集量, 由于缺少明确政策目标数据, 2040—2060 年规模参考欧美未来规模平均增长率计算^[23-26]; 未来 CCUS 减排贡献: 实现相应的气候目标所需的 CCUS 减排量, 误差线表示预测范围^[1, 27]。

图 3 主要国家 / 地区当前 CCUS 规模、未来规模及减排贡献

Fig. 3 Current scale and projected future scale of CCUS and potential future contributions to emission reductions

工业法案》强制油气生产商贡献封存库容，破除了基础设施建设困境。欧盟碳排放权交易体系（EU ETS）的修订通过扩大覆盖范围、设定更严格的排放上限、将更大比例配额用于拍卖等措施，持续推高碳价，提升了CCUS项目的经济竞争力。同时，创新基金将ETS收益用于支持CCUS等低碳技术示范。其《工业碳管理战略》将CCUS和碳移除（CDR）明确纳入欧盟2040年气候目标的关键组成部分，并提出了到2050年从工业源和大气中捕集约4.5亿t CO₂的目标^[2]。然而，从2024年捕集能力175万t/a的基点出发，仍面临巨大差距。

中东与非洲地区CCUS的发展主要依托国家政策主导。现有项目占全球运营能力8%。当前3个运营项目总捕集能力为380万t/a，另有6个在建项目与36个开发中项目。沙特阿拉伯和阿联酋依靠国家石油公司主导项目投资，战略重点在于将CCUS与EOR等产业紧密耦合，巩固并提升其在全球能源市场中的领导地位。至2035年，区域捕集能力需增至6500万t/a，其中沙特目标为4400万t/a，阿联酋2030年目标为1000万t/a，2050年达4350万t/a^[2]。该地区核心挑战在于如何将国家意志转化为匹配目标的项目投资与建设能力。

亚太地区（中国除外）的发展路径聚焦于政策支持与跨境合作。现有1个CCS项目运营，4个在建，包括澳大利亚Moomba（170万t/a）项目、马来西亚Kasawari（330万t/a）项目等。由于地质封存资源分布不均，本土封存潜力不足或成本较高的国家正寻求与封存资源丰富的国家开展跨境合作。日本《CCS长期路线图》提出2030年封存能力达600万~1200万t/a、2050年达1.2亿~2.4亿t/a的目标，但与未来需求仍有显著差距^[25]。亚太地区项目数量与规划目标之间存在较大落差，技术示范与商业化仍处于起步阶段，需进一步加强政策协同、资源整合与区域合作。

2.4 各国/地区CCUS驱动模式

CCUS发展依靠国家战略、法规标准、财税

激励、市场机制、国际合作协同发力。各国根据资源禀赋与产业结构，探索差异化发展路径。各国/地区CCUS驱动模式如表2所示。CCUS正由早期立法逐步向财税优惠、法规标准与市场机制相结合的多元化体系转变。例如，美国有关CCUS的碳管理政策体系于1970年左右开始建设，2007年左右开展有关CCUS早期立法与技术定位，2008年推出45Q税收抵免政策^②，初期补贴力度较低。2018年修订45Q条款，补贴额度阶梯式上涨。2021年颁布IIJA为CCUS投入约120亿美元。2022年推出IRA，进一步上调税收抵免额度。据美国荣鼎咨询（Rhodium Group）测算，IRA对CCUS的补贴将导致美国CO₂排放量由现行的较2005年平均减少30%进一步下降至减少40%^[49]。美国自愿碳市场对CCUS的专项规则于2024年正式发布，为CCUS项目参与碳交易提供了明确路径。欧盟2009年出台《欧盟CCS指令》，为CCS项目的环境安全提供法律框架，但经济激励不足^[50]。2020—2024年通过《欧洲绿色协议》《欧盟碳管理战略》等，逐步提升CCUS在欧盟气候工具中的地位^[51-52]。

3 国际项目CCUS全产业链集成发展经验

当前国际CCUS项目呈现向全产业链集成推进的显著趋势，即不再局限于单一环节的技术验证或示范，而是更加注重覆盖捕集、运输、利用/封存全链条的系统性布局与商业化落地。从技术成熟度、产业链完整性与机制创新性3个维度，选取全球9个具有代表性的CCUS项目，系统梳理其全产业链集成路径（表3）与资金来源（表4），为中国CCUS产业化路径优化提供案例借鉴。选取项目涵盖电力、油气、化工、钢铁等高碳排行业，运输方式以管道为主、船运为辅，利用或封存技术包括EOR、工业利用与咸水层封存，展现出差异化的政策支持与融资模式。美国Petra Nova项目作为燃煤电厂CCUS商业化示范，验证传统能

② 45Q 税收抵免政策是美国联邦政府为激励 CCUS 技术部署而设立的政策。

表 2 各国 / 地区 CCUS 驱动模式
Table 2 CCUS driving models across countries/regions

驱动模式	核心政策工具及内容	模式特征
国家战略	<p>欧洲: 欧盟发布《欧洲绿色协议》《欧盟 2040 气候目标》草案和《欧盟工业碳管理战略》, 确立 2030 年封存 5000 万 t CO₂ 目标^[29]; 德国发布《二氧化碳封存法》, 开放陆上封存^[30]; 法国发布《国家 CCUS 战略》强化本土 CO₂ 封存能力^[31]; 奥地利发布《国家碳管理战略》^[2]。</p> <p>其他: 沙特阿拉伯《国家自主贡献》将碳捕集目标提升至 2030 年封存 100 万 t CO₂; 马来西亚发布《国家能源转型路线图》, CCUS 被列为 6 个能源转型杠杆之一</p>	<p>顶层目标直接约束法规与资金配置, 战略目标驱动 CCUS 发展; 发展中国家借助国家战略弥补市场机制不足, 依赖财政主导</p>
法规标准	<p>北美: 美国环保署 (EPA) 新规要求煤电和燃气电厂 2032 年前捕集 90% 排放, 并将碳捕集列为最佳减排系统^[32]; 加拿大发布 C-59 号法案扩大投资税收抵免 (CCUS ITC) 范围^[33]。</p> <p>欧盟: 2009 年出台《欧盟 CCS 指令》提供法律框架; 2023 年出台《净零工业法案》草案, 对标美国《通胀削减法案》, 简化 CCUS 项目审批, 匹配封存目标; 法国发布《矿山法典》^[34]; 意大利发布《能源法令》《基础设施法令》^[35]。</p> <p>澳大利亚及日本: 澳大利亚发布《环境保护 (海洋倾倒) 修正案》《石油法修正案》, 建立详细的监管框架^[36]; 日本发布《CO₂ 储存业务法》, 明确封存权责^[37]。</p> <p>其他: 巴西发布《未来燃料法》, 设立国家石油管理局为 CCS 监管机构^[38]; 印度尼西亚发布《总统令 14/2024》, 正式将 CCUS 纳入商业化框架^[39]</p>	<p>法规为战略目标提供法律约束力, 将战略转化为可操作的法规; 标准制定降低项目风险, 鼓励私营资本; 法规与财税激励捆绑</p>
财税激励	<p>北美: 美国通过 IJIA 为 CCUS 技术提供约 120 亿美元资金, 发布 IRA 上调税收抵免力度 (封存获 85 美元 /t 税收碳信用, 碳利用为 60 美元 /t, DAC+ 封存为 180 美元 /t, DAC+ 碳利用为 130 美元 /t)。加拿大设立 CCfD, 为 CCUS 项目提供上限 10 亿加元的资金保障^[40-41]。</p> <p>欧洲: 欧盟设立创新基金, 拨款 40 亿欧元资助 CCS/CDR 等脱碳技术商业化^[42]; 英国通过《CCUS 愿景》设定明确目标, 2028 年起, 在 25 年内投资高达 217 亿英镑开发用于和能源、工业以及氢能相关的 CCUS 项目^[43], 并设立《CCUS 专项基金》, 投资 9.6 亿英镑支持工业集群项目^[44]。</p> <p>澳大利亚及日本: 澳大利亚联邦政府拨款 5.56 亿澳元开展地质封存资源评估^[45]; 日本发行 1300 亿美元气候转型债券, 为 CCUS 定向配置 20% 资金^[2]</p>	<p>财政补贴有利缓解项目高成本问题; 税收工具降低融资风险, 与法规强制力形成组合推动项目发展; 发展中国家的补贴相对不足</p>
市场机制	<p>北美: 美国自愿碳市场 (VCMs) 的扩展为 CCUS 项目创造额外收益渠道; 加拿大《温室气体污染定价法案》(GGPPA) 建立碳价体系, 碳价 80 加元 /t (2024), 2030 年递增至 170 加元 /t^[46]。</p> <p>欧洲: EU ETS 为 CCUS 项目提供碳信用获益途径且欧洲多国正逐步试点碳税制度, 为 CCUS 项目创造更强碳价信号</p>	<p>碳价为项目提供长期收益支点; 碳市场与财税激励互补; 除北美和欧洲外, 其他地区市场机制尚未成熟, 依赖政策托底</p>
国际合作	<p>多边合作平台: 碳管理挑战 (CMC) 汇集了包括美国、加拿大、印度尼西亚在内的 20 多个国家, 共同致力于到 2030 年推动全球碳管理项目达到十亿吨级规模。</p> <p>双边合作协议: 全球已签署了超过 50 项包含 CCUS 内容的双边协议或谅解备忘录。</p> <p>《巴黎协定》第六条提出通过国际转让减排成果、可持续发展机制促进全球碳市场协作^[47]。如根据此条内容, 瑞士与秘鲁、加纳共和国、格鲁吉亚等多国建立双边合作机制^[48]</p>	<p>通过双边 / 多边合作推动项目共建与资源共享; 有助于跨境封存、碳信用转移等复杂项目落地; 以《巴黎协定》第六条为核心, 市场机制与减排责任逐步接轨</p>

源低碳转型路径; Heirloom 公司 DAC 项目突破空气直接捕集技术瓶颈; 加拿大 Quest 项目以 10 年稳定运营成为工业 CCUS 基准案例, Polaris 项目开创油砂行业集群化封存新模式; 挪威 Northern Lights 项目作为全球首个跨国全产业链碳封存平

台, 验证基础设施共享机制; 意大利 Ravenna 项目通过低成本改造天然气基础设施, 探索传统能源资产低碳化路径; 阿联酋 Habshan 项目首创中东跨行业碳循环系统, 推动制氢与地质封存一体化创新; 马来西亚 Kasawari CCS 项目是全球最大

表3 典型项目全产业链基本情况
Table 3 Basic information on the full industry chain of typical projects

项目名称	地点	现状 / 捕集量	捕集源 / CO ₂ 源	运输方式	利用 / 封存方式
Petra Nova	美国德克萨斯州	2023年9月重新投运, 年捕集140万~160万t	W.A.Parish 燃煤电厂8号机组	管道运输 (80 km)	EOR
Heirloom DAC	美国路易斯安那州	2023年示范项目年捕集1000 t, 2024年启动商业化扩建, 最大年捕集能力达32万t	大气中的CO ₂	管道 / 罐车运输	地质封存 (墨西哥湾近海盐穴地层)、工业利用 (注入混凝土搅拌过程) ^[52]
Quest	加拿大阿尔伯塔省	运行中, 截至2024年累计封存超900万t	斯科特福德油砂升级装置	管道运输 (65 km)	地质封存 (深砂岩构造)
Polaris	加拿大阿尔伯塔省	2024年6月启动建设, 规划年捕集65万t	Shell 炼油厂和化工综合体	管道运输 (与 Quest 项目共用运输系统)	地质封存 (寒武系底部砂岩地层)
Northern Lights	挪威	第一阶段2024年9月完成, 年存储150万t; 2025年3月宣布扩建至500万t	挪威本土工业排放、荷兰氨生产厂排放	特制船只跨境运输 +100 km 海底管道运输	地质封存 (北海深处2600 m 以下) ^[53]
Ravenna	意大利	运行中, 捕获效率达90%~96%, 每年预计封存1600万t	卡萨尔博尔塞蒂天然气处理厂	船运 + 管道运输	地质封存 (亚得里亚海枯竭气田) ^[54]
Habshan	阿联酋	计划2026年投运, 设计年捕集150万t	天然气处理厂是核心碳源, 联动周边钢铁、化工等产业的排放	管道运输	EOR、地质封存、制氢
Kasawari CCS	马来西亚	2024年平台主体建造, 年捕集量330万t	天然气田开发过程中分离CO ₂	海底管道运输 (138 km)、船运 (跨境)	枯竭油田地址封存 ^[55]
FS BECCS	巴西	2024年7月启动建设, FS工厂年捕集目标超180万t	玉米乙醇发酵过程排放的高浓度CO ₂	管道运输	地质封存、负碳乙醇 ^[56]

规模海上封存工程之一, 为碳管理枢纽提供跨境合作范式; 巴西 FS BECCS 项目开创发展中国家农业废弃物生物能耦合碳移除的负碳燃料新模式。

通过对国际典型 CCUS 项目的案例解析, 可提炼出以下关键性经验启示。其一, 政策工具显著降低项目资金门槛。美国通过 IJIA 为 Petra Nova 项目提供 1.9 亿美元 (占总投资 18.3%) 直接资助; 加拿大阿尔伯塔省实施“双倍碳信用”机制, Quest 项目每封存 1 t CO₂ 可获得 2 t 碳信用; 欧盟《净零工业法案》设定封存硬性目标, 为 Northern Lights 项目扩建提供政策支撑; FS BECCS 项目依托《未来燃料计划》专项立法与巴西科学研究与发展项目资助署 (FINEP) 财政补贴, 推进生物能源耦合封存技术商业化。其二, 市场机制破解项目经济性难题。Northern Lights 项目向欧洲客户收取与碳价挂钩的封存服务费; Quest 项目通过碳抵消机制获得额外信用; 美国

45Q 税收抵免直接促进 Heirloom DAC 项目获得 1.2 亿美元联邦资助; Kasawari CCS 项目探索跨境封存服务定价机制, 计划通过日本工业排放源付费合作对冲高成本基建投入。其三, 产业链管理与协同提升系统效率。Heirloom 与微软签订 10 年 31.5 万 t 碳去除协议, 采用“政府资助 + 企业预购”模式加速 DAC 商业化; Ravenna 项目整合埃尼集团 (Eni) 与 Snam 企业技术, 仅改造 10% 天然气设施实现 96% 捕集效率; Habshan 项目引入壳牌 (Shell) Cansolv 技术, 构建多源碳捕集系统, 验证跨领域集成可行性; FS BECCS 项目通过农业废弃物资源化处理和乙醇生产装置协同布局, 实现发酵高浓度低成本捕集。其四, 国际合作突破地域资源约束。Northern Lights 建立跨国封存网络, 实现荷兰至北海的 CO₂ 运输。以上典型项目的发展路径在政策设计、市场机制、技术集成与国际合作等方面为中国 CCUS 产业化

表 4 典型项目资金来源
Table 4 Funding source analysis of typical projects

项目名称	政策支持	企业投资 / 外部融资	市场机制	合作 / EOR / 其他
Petra Nova	美国能源部资助 1.9 亿美元; 45Q 税收优惠	NRG Energy 与 JX Nippon 分别出资 3 亿美元; 日本国际合作银行和瑞穗银行贷款 2.5 亿美元	无	油价高于 50 美元 / 桶时获得采油收益 ^[57]
Heirloom DAC	美国能源部 DAC 中心计划资助	累计融资超 5.43 亿美元, 2024 年完成 1.5 亿美元融资	无	与微软签订 10 年 31.5 万 t CO ₂ 去除合同 ^[58]
Quest	加拿大政府和阿尔伯塔省政府共 8.65 亿加元支持; 50% 资本支出税收优惠	Shell 代表 AOSP ¹⁾ 运营	每封存 1 t CO ₂ 可获得 2 t 碳减排额	实际成本比预计低了 35% ^[59]
Polaris	阿尔伯塔省碳抵消机制	Shell 专项配置 100 亿 ~ 150 亿美元低碳能源战略投资	阿尔伯塔省碳抵消机制	与 Quest 项目共用封存设施形成协同系统 ^[60]
Northern Lights	挪威政府“长船计划”提供 20 亿欧元; 欧盟 CEF Energy 提供资金支持	Equinor、Shell 和 TotalEnergies 合资, 各出 33.3% 资金	从捕集端按欧洲碳交易价格向工厂收取服务费	与斯德哥尔摩能源公司签订 90 万 t CO ₂ 封存协议 ^[61]
Ravenna	欧盟净零工业法案框架提供政策支持	Eni 和 Snam 等企业投资	无	利用现有基础设施改造, 通过低碳产品服务生态吸引投资 ^[54]
Habshan	阿联酋 2030 年减排 40% 政策目标	ADNOC 计划 2030 年前投入 150 亿美元 (单项目合同超 6 亿美元)	无	Shell 提供技术合作; 耦合 EOR、地质封存与低碳制氢技术 ^[62]
Kasawari CCS	国家能源转型战略将 CCUS 列为马来西亚 2050 净零路径六大杠杆	Petronas 自主投资, 天然气田开发 +CCS 项目总成本 20 亿美元	对接日本工业排放源	与日本合作; 通过东南亚封存网络实现商业收益 ^[55]
FS BECCS	巴西创新研究署提供财政补贴; 政府推动《未来燃料计划》立法框架	FS 自投 3.5 亿雷亚尔用于设备建设 (约 6500 万美元)	预计出售碳信用获得收益	预计出售负碳乙醇溢价获得收益 ^[56]

注: 1) AOSP 为阿萨巴斯卡油砂项目。

提供了多维度参考, 具备重要借鉴意义。

4 碳中和目标下中国未来 CCUS 发展政策建议

在“双碳”战略框架下, CCUS 技术已从补充性手段跃升为关键技术^[18], 但其发展仍面临多重问题。因此, 基于对中国 CCUS 发展现状和国际 CCUS 项目经验, 立足“技术-政策-国际合作”框架, 提出以下针对性建议, 旨在构建具有中国特色的 CCUS 全产业链协同创新范式。

4.1 加强技术研发, 突破关键工程瓶颈

目前 CCUS 技术发展面临高成本、高能耗问

题, 应推进低能耗碳捕集技术的创新研发与产业化布局, 攻克大规模全流程工程相关技术瓶颈, 打造全产业链技术体系, 为 CCUS 未来的规模化、商业化应用夯实技术储备。在捕集环节, 推进燃烧后捕集技术的示范和应用, 同时积极推动低成本、低能耗的第二代技术的研发和商业化突破, 并积极探索新型膜分离、化学链燃烧等变革性技术的潜力; 通过发电集团与科技企业合作及规模化应用降低 DAC 成本。在运输封存环节, 发展适合大规模、连续稳定的管道运输, 降低单位运输成本, 推动建设区域性或跨区域的 CO₂ 运输管网; 开发多样化封存场地, 评估封存点潜力与适配性, 加快地质封存监测技术创新。通过产业链整合、系统协同优化释放成本潜力。绘制全国碳源分布

图, 加快封存汇数据库建设; 依托地区进行试点, 如依托山西钢焦化联产等项目, 构建“钢铁—焦化—煤化工—封存”技术集成验证平台, 推进技术路线多样化发展; 促进跨行业、跨区域资源整合与协作, 推动多点多源碳流合理布局, 构建系统化、集约化的产业链运作模式, 增强全链条竞争力和可持续发展能力。

4.2 健全制度保障, 支撑技术研发与应用

需构建目标导向的政策框架, 明确 CCUS 的战略定位并强化制度保障。将 CCUS 各环节纳入相关规划与政策体系, 推动技术发展路线图与分行业减排指引的完善, 引导研发投资和新技术试点; 整合大型国央企在碳排放源和运输网络等领域现有资源, 匹配电力和工业 CO₂ 供应与油气、采油 CO₂ 需求, 促进企业合作建立全产业链试点和产业集群。有序推动强制碳市场扩容与配额拍卖进程; 将 CCUS 纳入 CCER 体系, 激发企业内生需求, 激励低成本的 CCUS 早期应用; 拓展 CO₂ 资源化利用场景, 重点培育化工、农业等领域的创新应用模式, 提升 CO₂ 资源化经济价值。将“源汇匹配”纳入国家或区域 CCUS 发展的核心规划, 制定具备引导性的产业布局路线图。通过上述举措, 为 CCUS 关键技术的规模化验证与成本突破提供必要的制度保障、市场牵引和系统支撑。

4.3 深化国际合作, 强化人才队伍建设

在全球气候治理框架下, 依托《巴黎协定》第六条提出的国际减排合作机制, 探索与“一带一路”等重点合作国家开展 CCUS 项目级合作, 试点碳信用跨境转移与交易, 为我国 CCUS 项目引入国际资金与技术, 并为未来碳市场国际接轨积累经验。应将 CCUS 纳入多边合作优先领域, 推动规则协同、技术互鉴, 促进标准互认与国际认可。通过双边或多边平台, 推动修订跨境封存主权条款, 争取发展中国家对专属经济区碳封存资源的管辖权; 积极参与 CCUS 相关国际交流, 学习国际先进发展经验, 寻求技术协同发展; 构建东北亚碳封存联盟, 推动中日韩共建地质封存

库; 主导制定东南亚 CO₂ 驱油技术标准, 输出中国低渗透率油藏封存监测技术范式。在人才培养方面, 依托重大示范项目建立产学研协同创新育人平台, 鼓励十万吨级以上项目开放工程经验、参与培训交流, 助力行业人才队伍建设; 实施跨国工程师交流计划, 重点培养具备复杂地质建模能力的复合型人才, 针对性培养其在复杂地质建模、长输管道安全、全流程系统集成等关键领域的核心能力。■

参考文献

- [1] 张贤, 杨晓亮, 鲁玺, 等. 中国二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2023) [R]. 北京: 中国 21 世纪议程管理中心, 全球碳捕集与封存研究院, 清华大学, 2023. Zhang X, Yang X L, Lu X, et al. China Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) annual report (2023) [R]. Beijing: the Administrative Center for China's Agenda 21, Global CCS Institute, Tsinghua University, 2023 (in Chinese)
- [2] Global CCS Institute. The global status of CCS: 2024 [R/OL]. 2024 [2025-05-14]. <https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/>
- [3] 蔡博峰, 李琦, 张贤, 等. 中国区域二氧化碳地质封存经济可行性研究: 中国二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2024) [R]. 北京: 生态环境部环境规划院, 2024. Cai B F, Li Q, Zhang X, et al. Economic feasibility study on regional CO₂ geological storage in China: annual report on Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) (2024) [R]. Beijing: Chinese Academy of Environmental Planning, 2024 (in Chinese)
- [4] 新浪财经. 新版《中国 CCUS 技术发展路线图》发布 [EB/OL]. 2024 [2025-05-14]. <https://finance.sina.com.cn/jjxw/2024-12-13/doc-inczikpt5796799.shtml>. Sina Finance. New version of China CCUS technology development roadmap released [EB/OL]. 2024 [2025-05-14]. <https://finance.sina.com.cn/jjxw/2024-12-13/doc-inczikpt5796799.shtml> (in Chinese)
- [5] Innovation Center for Energy and Transportation U.S.-China Cleantech Center. China decarbonization market report 2: CCUS market overview and U.S.-China collaboration [R/OL]. 2023 [2025-05-14]. <http://uschinacleantech.org.cn/wp-content/uploads/2023/12/China-CCUS-Market-Report.pdf>
- [6] 张贤, 李阳, 马乔, 等. 我国碳捕集利用与封存技术发展研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23 (6): 70-80. Zhang X, Li Y, Ma Q, et al. Research on the development of Carbon Capture, Utilization and Storage technology in China [J]. Engineering Sciences, 2021, 23 (6): 70-80 (in Chinese)
- [7] 北京理工大学能源与环境政策研究中心. 全球和中国碳市场回顾与展望 (2025) [R]. 北京: 北京理工大学, 2025. Center for Energy and Environmental Policy Research, Beijing Institute of Technology.

- Review and outlook of global and China carbon market (2025) [R]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2025 (in Chinese)
- [8] 北京中创碳投科技有限公司. 案例: 加州碳市场深度解析 [R]. 北京: 中创碳投, 2025. SinoCarbon Innovation & Investment Co., Ltd. Case study: in-depth analysis of California carbon market [R]. Beijing: China Creation Carbon Investment, 2025 (in Chinese)
- [9] 复旦大学可持续发展研究中心. 2024 年 12 月全球碳市场运行分析之欧盟碳市场 [J]. 环境经济研究, 2025 (1): 88-95. Center for Sustainable Development Studies, Fudan University. Analysis of EU carbon market operation in December 2024 [J]. Environmental Economics Research, 2025 (1): 88-95 (in Chinese)
- [10] Peng J, Yu B Y, Liao H, *et al.* Marginal abatement costs of CO₂ emissions in the thermal power sector: a regional empirical analysis from China [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 171: 163-174
- [11] Guo Y, Peng L, Tian J. Deploying green hydrogen to decarbonize China's coal chemical sector [J]. Nature Communications, 2023, 14 (1): 8104
- [12] Shen Q, Song X, Mao F, *et al.* Carbon reduction potential and cost evaluation of different mitigation approaches in China's coal to olefin industry [J]. Journal of Environmental Sciences, 2020, 90: 352-363
- [13] 腾讯网. 我国首个海上二氧化碳捕集、利用、封存项目投用 [EB/OL]. 2025 [2025-05-22]. <https://news.qq.com/rain/a/20250522A01DMH00>. Tencent News. China's first offshore CO₂ Capture, Utilization and Storage project put into operation [EB/OL]. 2025 [2025-05-22]. <https://news.qq.com/rain/a/20250522A01DMH00> (in Chinese)
- [14] 杨正先, 魏树运, 韩建波. 碳中和背景下我国“岸碳入海”发展前景及路径分析 [J]. 中国工程科学, 2025, 27 (2): 137. Yang Z X, Wei S Y, Han J B. “Carbon Capture Ashore and Storage Offshore” in China in the context of carbon neutrality: future prospects and development pathway [J]. Engineering Sciences, 2025, 27 (2): 137 (in Chinese)
- [15] 新华网. 中国首个百万吨级 CCUS 项目全面建成投产 [EB/OL]. 2022 [2025-05-14]. https://www.nea.gov.cn/2022-09/02/c_1310658658.htm. Xinhua Net. China's first million-ton CCUS project completed and commissioned [EB/OL]. 2022 [2025-05-14]. https://www.nea.gov.cn/2022-09/02/c_1310658658.htm (in Chinese)
- [16] 蔡博峰, 李琦, 张贤, 等. 中国二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2021): 中国 CCUS 路径研究 [R]. 北京: 生态环境部环境规划院, 中国科学院武汉岩土力学研究所, 中国 21 世纪议程管理中心, 2021. Cai B F, Li Q, Zhang X, *et al.* China Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) annual report (2021): China's CCUS pathways research [R]. Beijing: Chinese Academy of Environmental Planning; Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Administrative Center for China's Agenda 21, 2021 (in Chinese)
- [17] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021
- [18] 张贤, 李凯, 马乔, 等. 碳中和目标下 CCUS 技术发展定位与展望 [J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31 (9): 29-33. Zhang X, Li K, Ma Q, *et al.* Positioning and prospects of CCUS technology under China's carbon neutrality goal [J]. Population, Resources and Environment of China, 2021, 31 (9): 29-33 (in Chinese)
- [19] Kazlou T, Cherp A, Jewell J. Feasible deployment of Carbon Capture and Storage and the requirements of climate targets [J]. Nature Climate Change, 2024, 14 (10): 1047-1055
- [20] Global CCS Institute, 2023. The global status of CCS: 2023 [R/OL]. 2023 [2025-05-14]. <https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/global-status-of-ccs-2023-executive-summary/>
- [21] Global CCS Institute. The global status of CCS: 2022: ambition to action [R/OL]. 2022 [2025-05-14]. <https://www.globalccsinstitute.com/resources/multimedia-library/global-status-of-ccs-2022-report-launch/>
- [22] Global CCS Institute. Global status of CCS 2021: CCS accelerating to net zero [R/OL]. 2021 [2025-05-16]. <https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/global-status-of-ccs-2021/>
- [23] Clean Air Task Force. A vision for Carbon Capture, Utilization, and Storage in the EU [EB/OL]. 2023 [2025-05-14]. <https://www.catf.us/resource/a-vision-carbon-capture-utilisation-and-storage-eu/>
- [24] Wood Mackenzie. EU will miss 2050 climate targets by a decade without urgent action [EB/OL]. 2024 [2025-05-14]. <https://www.woodmac.com/press-releases/2024-press-releases/eu-will-miss-2050-climate-targets-by-a-decade-without-urgent-action/>
- [25] Reccessary. Japan projects CCS costs to be lower than carbon price by 2040 [EB/OL]. 2023 [2025-05-14]. <https://www.reccessary.com/en/news/world-market/japan-projects-ccs-costs-to-be-lower-than-carbon-price-by-2040>
- [26] European Commission. Commission presents first-ever EU strategy to develop Carbon Capture and Storage [EB/OL]. 2024 [2025-05-14]. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_24_585
- [27] van Vuuren D P, Stehfest E, Gernaat D E H J, *et al.* Alternative pathways to the 1.5°C target reduce the need for negative emission technologies [J]. Nature Climate Change, 2018, 8: 391-397
- [28] 1PointFive. 1PointFive announces agreement to sell 500,000 metric tons of direct air capture carbon removal credits to Microsoft [EB/OL]. 2024 [2025-05-14]. <https://www.1pointfive.com/news/1pointfive-and-microsoft-announce-agreement-for-direct-air-capture-cdrcredits>
- [29] European Commission. Towards an ambitious industrial carbon management for the EU [EB/OL]. 2024 [2025-06-25]. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52024DC0062>
- [30] Global CCS Institute. CCS in Germany's decarbonisation pathway: state of play and way forward [R/OL]. 2024 [2025-05-14]. <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2024/03/CCS-in-Germany.pdf>
- [31] Global CCS Institute. The state of CCUS in France: present & future opportunities [R/OL]. 2024 [2025-05-14]. <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2024/07/The-Status-of-CCUS-in-France-Present-Future-Opportunities.pdf>
- [32] U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 40 CFR 60, federal register [EB/OL]. 2024 [2025-05-14]. <https://www.federalregister.gov/documents/2024/05/09/2024-09233/new-source-performance-standards-for-greenhouse-gas-emissions-from-new-modified-and-reconstructed>

- [33] Parliament of Canada. An act to implement certain provisions of the fall economic statement tabled in parliament on November 21, 2023 and certain provisions of the budget tabled in parliament on March 28, 2023 [EB/OL]. 2023 [2025-05-14]. <https://www.parl.ca/LegisInfo/en/bill/44-1/c-59>
- [34] French Ministry of Economy. Simplification des procédures minières pour accélérer la transition énergétique et renforcer la sécurité d'approvisionnement française [EB/OL]. 2024 [2025-05-14]. <https://presse.economie.gouv.fr/simplification-des-procedures-minières-pour-accelerer-la-transition-energetique-et-renforcer-la-securite-dapprovisionnement-francaise/>
- [35] Istituto Affari Internazionali (IAI). Italy's energy-intensive industries amid competitiveness and decarbonisation [R/OL]. 2025 [2025-05-15]. <https://www.iai.it/sites/default/files/9788893683555.pdf>
- [36] Federal Register of Legislation. Environment protection (sea dumping) amendment (using new technologies to fight climate change) act 2023 [EB/OL]. 2023 [2025-05-15]. <https://www.legislation.gov.au/C2023A00099/asmade/text>
- [37] Ministry of Economy, Trade and Industry, Japan. Japan's CCUS policy [R/OL]. 2023 [2025-05-15]. https://acnf.jp/program/file/presentation/6_Panelist_METI.pdf
- [38] Illuminem. CCUS in Brazil: current policies and potential measures to encourage investment [EB/OL]. 2024 [2025-05-14]. <https://illuminem.com/illuminemvoices/ccus-in-brazil-current-policies-and-potential-measures-to-encourage-investment>
- [39] Lexology. PR 14/2024: a unified and expanded Carbon Capture Storage regulation [EB/OL]. 2024 [2025-06-25]. <https://www.lexology.com/library/detail.aspx?g=87fb12ab-26a8-4590-8cb2-33ed5a9a3700>
- [40] Government of Canada. Deputy prime minister welcomes the Canada growth fund's fourth investment [EB/OL]. 2024 [2025-05-14]. <https://www.canada.ca/en/department-finance/news/2024/06/deputy-prime-minister-welcomes-the-canada-growth-funds-fourth-investment.html>
- [41] Government of Canada. Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) investment tax credit (ITC) [EB/OL]. 2024 [2025-05-14]. <https://www.canada.ca/en/revenue-agency/services/tax/businesses/topics/corporations/business-tax-credits/clean-economy-itc/carbon-capture-itc.html>
- [42] European Commission. Commission opens €4 billion call for proposals for net-zero technologies under the innovation fund [EB/OL]. 2023 [2025-05-14]. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_23_5948
- [43] 第一财经. 重注 CCUS, 英国净零的关键一击 [EB/OL]. 2024 [2025-05-14]. <https://www.yicai.com/news/102076218.html>. China Business Network (Yicai). Focusing on CCUS: the key move for the UK's net-zero strategy [EB/OL]. 2024 [2025-05-14]. <https://www.yicai.com/news/102076218.html> (in Chinese)
- [44] UK Department for Energy Security and Net Zero. Green industries growth accelerator: hydrogen and CCUS supply chains [EB/OL]. 2024 [2025-05-14]. <https://www.gov.uk/government/calls-for-evidence/green-industries-growth-accelerator-hydrogen-and-ccus-supply-chains>
- [45] European Parliamentary Research Service. Austria's climate action strategy [R/OL]. 2024 [2025-05-14]. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2024/767170/EPRS_BRI\(2024\)767170_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2024/767170/EPRS_BRI(2024)767170_EN.pdf)
- [46] Government of Canada. Update to the Pan-Canadian approach to carbon pollution pricing 2023–2030 [EB/OL]. 2025 [2025-05-14]. <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/climate-change/pricing-pollution-how-it-will-work/carbon-pollution-pricing-federal-benchmark-information/federal-benchmark-2023-2030.html>
- [47] IPCC. Climate change 2023: synthesis report [M]. Geneva: IPCC, 2023
- [48] Federal Office for the Environment (FOEN). Bilateral climate agreements [EB/OL]. 2025 [2025-06-30]. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/en/home/topics/climate/info-specialists/climate--international-affairs/staatsvertraege-umsetzung-klimauebereinkommen-von-paris-artikel6.html>
- [49] 张贤, 彭雪婷, 贾子奕. 美国碳管理技术发展态势研究 [J]. 石油石化绿色低碳, 2024, 9 (6): 1-9. Zhang X, Peng X T, Jia Z Y. Study on the development trend of carbon management technologies in the United States [J]. Petroleum & Petrochemical Green and Low Carbon, 2024, 9 (6): 1-9 (in Chinese)
- [50] European Union. Directive 2009/31/EC of the European Parliament and of the council [EB/OL]. 2009 [2025-06-28]. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32009L0031>
- [51] European Commission. The European Green Deal striving to be the first climate-neutral continent [EB/OL]. 2019 [2025-06-28]. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- [52] The New York Times. In a U.S. first, a commercial plant starts pulling carbon from the air [EB/OL]. 2023 [2025-05-15]. <https://www.nytimes.com/2023/11/09/climate/direct-air-capture-carbon.html>
- [53] Northern Lights JV. Northern lights is expanding capacity through commercial agreement [EB/OL]. 2025 [2025-05-15]. <https://norlights.com/news/northern-lights-is-expanding-capacity-through-commercial-agreement/>
- [54] Eni. Eni and Snam launch Ravenna CCS, Italy's first Carbon Capture and Storage project [EB/OL]. 2024 [2025-05-15]. <https://www.eni.com/en-IT/media/press-release/2024/09/eni-snam-launch-ravenna-css-italy-s-first-carbon-capture-storage-project.html>
- [55] NS Energy. Kasawari Carbon Capture and Sequestration (CCS) project [EB/OL]. 2023 [2025-06-24]. <https://www.nsenenergybusiness.com/projects/kasawari-carbon-capture-and-storage-project/>
- [56] Mohamed N M A, Zainalabidin M A, Rahman A S A, *et al.* Kasawari Carbon Capture and Storage (CCS): unfolding the largest offshore CCS project realization available to purchase[C]//Proceedings of the International Petroleum Technology Conference. Bangkok, Thailand: IPTC, 2023
- [57] U.S. Department of Energy. Petra Nova, world's largest post-combustion carbon-capture project, begins commercial operation [EB/OL]. 2017 [2025-05-15]. <https://www.energy.gov/fecm/articles/petra-nova-worlds-largest-post-combustion-carbon-capture-project-begins-commercial>
- [58] Heirloom. Heirloom to build two direct air capture (DAC) facilities

- in northwest Louisiana [EB/OL]. 2024 [2025-05-15]. <https://www.heirloomcarbon.com/news/two-direct-air-capture-facilities-in-northwest-louisiana>
- [59] Government of Alberta. Alberta carbon capture incentive program [EB/OL]. 2023 [2025-05-15]. <https://www.alberta.ca/alberta-carbon-capture-incentive-program>
- [60] Shell. Shell to build Carbon Capture and Storage projects in Canada [EB/OL]. 2024 [2025-05-15]. <https://www.shell.com/news-and-insights/newsroom/news-and-media-releases/2024/shell-to-build-carbon-capture-and-storage-projects-in-canada.html>
- [61] Northern Lights JV. Northern lights delivers plan for development and operation (PDO) for expansion [EB/OL]. 2025 [2025-05-15]. <https://norlights.com/news/northern-lights-delivers-plan-for-development-and-operation-pdo-for-expansion/>
- [62] Upstream. Adnoc awards landmark CO₂ recovery project to European contracting giant [EB/OL]. 2023 [2025-05-15]. <https://www.upstreamonline.com/energy-transition/adnoc-awards-landmark-co2-recovery-project-to-european-contracting-giant/2-1-1528026>

The development process of CCUS in China towards carbon neutrality: insights from international experience

LYU Jin-Ning, ZHANG Shu, CHEN Wen-Ying

Institute of Energy, Environment and Economy, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) represents a critical technological pathway for achieving carbon neutrality targets. It is paramount for the low-carbon transition of the hard-to-abate sectors. Based on the analysis of the current status of CCUS development in China, this paper notes that while progress has been achieved in terms of policy support and the number and scale of demonstration projects, significant challenges persist, including high technological costs, immature business models, incomplete industrial chain planning, and underdeveloped policy and market mechanisms. International analysis indicates a substantial gap between current global and national/regional CCUS deployment scales and the levels required to meet climate objectives. Developed countries have achieved more mature commercial project development through top-level strategies, regulatory standards, fiscal and tax incentives, and market mechanisms. Experiences from leading international projects underscore the importance of policy support, market innovation, industrial chain coordination, technological integration, and international cooperation. Consequently, to promote the scaled-up development of CCUS in China, this paper proposes the following recommendations: advancing R&D for cost reduction and efficiency gains, integrating industrial chains, improving policies, regulations, and market mechanisms, while deepening international cooperation and cultivating a skilled talent pool.

Keywords: Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS); Carbon neutrality; International experience; Policy evaluation