基于技术成熟度的中美碳捕集、利用与封存技术对比研究

李丹妮[1]，林 俊[2]，程 凯[2]，庄 珺[1]
（1. 上海市科学学研究所，上海 200031；
2. 上海电气集团股份有限公司中央研究院，上海 200070）

摘 要：为系统评估中美碳捕集、利用与封存（Carbon Capture, Utilization and Storage，CCUS）技术进展与竞争态势，基于技术成熟度（Technology Readiness Level，TRL）框架，对中美 CCUS 技术的成熟度及应用现状进行了对比分析。结果表明，美国在燃烧后捕集、CO_2 强化油气回收（CO2 Enhanced Oil Recovery，CO_2-EOR）及地质封存技术上处于全球领先地位（TRL 7 ~ 9）；中国在海洋封存和部分矿化利用技术上具有一定优势（TRL 6 ~ 9），但整体项目规模较小，技术成熟度多集中于试验至工业示范阶段（TRL 3 ～ 7）。建议短期阶段优先推广燃烧后捕集、CO_2-EOR 等高成熟度技术；中期阶段加速富氧燃烧捕集、BECCS 及地质 / 海洋封存等技术的规模化应用；长期阶段培育 DAC、化学利用及矿物封存等前沿技术的突破。同时通过政策创新、基础设施建设及产业生态构建，推动 CCUS 技术规模化应用，为中国 2060 年碳中和目标提供支撑。

关键词：碳捕集、利用与封存；技术成熟度；碳中和；梯度培育策略
中图分类号：F260 **文献标识码**：A DOI：10.3772/j.issn.1009-8623.2025.07.006

党的二十大报告对积极稳妥推进碳达峰碳中和作出明确部署。根据统计数据，中国碳排放峰值预计达 10.8 亿 t，与欧盟和美国相比，分别高出 1.4 倍和 0.8 倍，且碳中和转型期仅为 30 年，显著低于发达国家的 50 ～ 70 年[1]。国际能源署分析表明，要实现 2070 年全球净零排放目标，单纯依赖能源转型，难以消除工业及交通部门的 CO_2 排放，碳捕集、利用与封存（Carbon Capture，Utilization and Storage，CCUS）技术需承担约 15% 的减排任务，其重要性日益凸显[1]。中国作为全球最大的碳排放国，明确提出“双碳”（“碳达峰”与“碳中和”）目标[2]。经估算，到 2050 年，中国 CO_2 年度减排量需达 14 亿 t，累计减排量约为 190 亿 t，CCUS 技术的规模化应用成为实现这一目标的重要技术保障[3]。CCUS 技术作为支撑实现碳中和目标的“兜底”技术之一，也是中国发展未来产业的重点关注技术[4]，亟须系统评估 CCUS 各环节子技术的技术成熟度，以提出针对性的梯度发展政策建议，培育 CCUS 产业长效发展机制。

当前，CCUS 技术在全球范围内呈现快速发展的趋势，中国也在积极推进 CCUS 技术的研发和应用，已发布了 70 余项 CCUS 技术相关的政策文件，并开始建设百万吨级的 CCUS 技术示范工程[5]。据估算到 2050 年，中国 CCUS 产业产值将达到 3 300 亿元[6]。

截至 2022 年末，中国已建成和规划中的 CCUS 示范项目总数达 99 个，但与中国约占全球 1/3 的碳排放量相比，捕集能力也仅占全球 1/10 左右，利用与封存能力的占比更小[3]。同时，核心技术国产化率不足 60%[5]。在中国，CCUS 技术的产业化进程受到技术成熟度、成本和基础设施等多重

第一作者简介：李丹妮（1995—），女，博士，助理研究员，主要研究方向为能源技术、科技政策。
项目来源：上海市软科学项目“上海科技创新关键技术前瞻与多路径技术发展路线图研究”（24692122900）；上海市软科学项目“脑机接口多路径技术发展路线图研究”（24704）。
收稿日期：2025-03-20

因素的制约，不同技术路径（如捕集、利用、封存）在技术成熟度上的差异显著，直接影响了其商业化前景[6-7]。在中美博弈的新形势下，为避免CCUS技术成为制约中国发展的关键技术[8-9]，需要在明晰技术成熟度的基础上提出针对性的梯度培育策略，响应超前布局未来产业的战略号召[10]。

本研究旨在基于技术成熟度视角，系统评估中国CCUS技术的发展水平，分析其演进阶段、驱动因素和未来发展方向，综合对比中美研究应用进展与政策体系的差异，为中国CCUS技术的产业化提供理论和实践指导。

1 中美CCUS技术应用进展的对比

技术成熟度等级（Technology Readiness Level，TRL）由美国国家航空航天局提出，是衡量技术成熟度的标准化评估工具，广泛应用于工程管理领域[11]。本研究基于未来产业的性质[12]和TRL评估方法，构建CCUS各子技术演进阶段的分析框架，从CO_2捕集、CO_2利用和CO_2封存3个技术环节展开中美CCUS技术成熟度对比分析。

1.1 CO_2捕集技术

CO_2捕集技术是CCUS技术的关键环节，也是成本、能耗最高的技术环节[13]。主流的CO_2捕集方法包括燃烧前捕集、燃烧后捕集和富氧燃烧等技术，而直接空气捕集（Direct Air Capture，DAC）技术和生物质能与碳捕集封存（Bio-Energy with Carbon Capture and Storage，BECCS）技术是目前各国关注并重点发展的新兴技术[13]。

燃烧前CO_2捕集技术主要应用于整体煤气化联合循环（Integrated Gasification Combined Cycle，IGCC）发电系统，通过气化工艺生成含CO和H_2的合成气，并采用物理或化学吸收法分离CO_2[14]。目前，中国技术已达到TRL6～7，并且处于技术验证阶段，代表性项目如华能天津绿色煤电项目（CO_2捕集能力为10万t/a）和连云港清洁能源研究设施（CO_2捕集能力达3万t/a）[3]。高投资成本和系统集成难度限制了燃烧前捕集技术的商业化，预计2030—2040年技术可达到TRL8～9[15]。美国在燃烧前捕集技术上领先，已达到TRL7的水平，部分项目接近商业化，代表性项目如Kemper County整体煤气化联合循环（Intergrated Gasification Combined Cycle，IGCC）项目（CO_2捕集能力为300万t/a）[14]。

燃烧后捕集技术以胺基化学吸收法为主，适用于燃煤、天然气电厂及工业尾气（CO_2浓度为5%～15%），中国燃烧后捕集技术达到TRL6～9水平，已在电力、石化和水泥行业实现示范项目建设[16]，预期2030年后可将捕集成本降至150～200元/t CO_2[15]。美国燃烧后CO_2捕集技术达到TRL9的水平，已广泛应用于燃煤电厂、天然气处理及化工行业，如美国的天然气处理厂Century Plant，其CO_2捕集能力为840万t/a，具备商业运营能力[17]。

富氧燃烧技术采用纯氧作为燃烧介质，生成高CO_2浓度（浓度为80%～90%）烟气。中国部分富氧燃烧技术已达到TRL6～7水平，全系统富氧燃烧技术达到TRL7～8水平，均表现出较高的捕集效率（90%～95%）和较低的处理成本（200～250元/t CO_2）[18]。截至2024年，国内外水泥行业共部署富氧燃烧技术项目12个[18-19]。该技术的主要制约因素包括制氧系统的高能耗和设备改造成本，预计2030—2040年技术可达到TRL9[20]。美国富氧燃烧技术为TRL4～7水平，略低于中国，部分项目处于试验到示范的阶段。例如，NET Power的Allam循环项目结合富氧燃烧和超临界CO_2循环，捕集效率接近100%[21]。

直接空气捕集（Direct Air Capture，DAC）技术通过直接从大气环境中回收CO_2实现碳移除目标[1]。中国DAC技术尚处于基础研究阶段（TRL4），4个DAC示范项目正在规划建设中，其中，最大CO_2捕集规模为百吨级[22]。高能耗和高成本（500～1 000美元/t CO_2）构成了DAC技术面临的核心挑战[14]，需在高效吸附材料和低能耗再生工艺等方面进行突破，预计2045年后达到TRL6-8水平[22]。美国DAC技术接近TRL7，如2025年4月，美国环境保护署（EPA）批准了大型DAC设施Stratos的Class VI①许可，这是美国首次为DAC项目颁发的CO_2封存许可，但DAC高能耗与高成本等问题仍待优化解决[21]。

① Class VI许可是美国环境保护署（EnvironmentalProtection Agency，EPA）地下注入控制程序下的专用许可类型，专用于CO_2地质封存井。该许可要求项目方提交详细的站点适宜性评估、监测计划和财务保障措施，以确保CO_2注入深层地质构造时不会泄漏并污染地下饮用水源。

生物质能结合碳捕集与封存（Bio-Energy with Carbon Capture and Storage，BECCS）技术通过生物质燃烧或气化捕集 CO_2，实现负排放，中国技术达到 TRL4 ～ 7 水平 [23]，已在生物质电厂和热电联产项目中得到广泛应用 [3]。目前，BECCS 技术面临的主要制约因素是全链条成本偏高，总成本约为 100 ～ 200 美元 /t CO_2[14, 24]，因此需要开发新型低能耗吸收剂 [14]，未来可优先在中国华北、东北等生物质资源丰富的地区部署示范项目。美国 BECCS 的技术为 TRL6 ～ 8 水平，应用规模较大。例如，ADM 公司 Illinois 项目年捕集 100 万 t CO_2，捕集后的 CO_2 用于生产乙醇，实现经济效益。

1.2　CO_2 利用技术

CO_2 利用技术体系包含物理利用、生物利用、化学利用及矿化利用等。物理利用技术以 CO_2 强化油气回收（CO_2 Enhanced Oil Recovery，CO_2-EOR）为主，并且已达到 TRL6 ～ 7 水平。CO_2-EOR 在国际市场已实现商业化应用（TRL9）超过 50 年，而在中国仍处于工业示范发展阶段（TRL6 ～ 7），代表性项目如中国石油吉林油田 CCUS 项目，CO_2 捕集规模约为 10 万～ 50 万 t/a。此外，上海电力长兴岛电厂 10 万吨级项目已安全运行 1.4 万 h，累计实现 CO_2 减排量 10 万 t，是国内最大的 CO_2 用于电焊保护气体的 CCUS 全流程项目 [25]。CO_2-EOR 技术的发展主要得益于利用油气增产的经济回报机制和稳定的市场需求，但该技术的应用范围受到油气田储量和地理分布的约束 [26]。美国 CO_2-EOR 技术达到 TRL9 的水平，通过 CO_2-EOR 技术年产油 1 500 万 t，如 Weyburn-Midale 项目的 CO_2 捕集规模达到数百万吨 / 年 [14]。

生物利用技术通过微藻培养和富碳农业利用 CO_2，中国温室大棚技术达到 TRL9 的水平，微藻培养受限于效率和成本，仅达到 TRL3 ～ 5 水平 [7]，代表性项目包括 20 t/a 微藻固定煤化工烟气项目 [3]。CO_2 微藻利用技术主要受制于光生物反应器性能和微藻培养工艺的优化与规模化扩容问题，未来商业化应用需要在光照条件、营养供给体系和反应器设计等方面进一步优化 [22]。美国生物利用技术达到 TRL6 ～ 9 水平，气肥利用技术达到 TRL9 水平，两者广泛应用于温室大棚。微藻固定项目获美国能源部支持（2021 年投资达 800 万美元），技术达到 TRL6 的水平。

化学利用技术将 CO_2 转化为甲醇、尿素、聚合物等高附加值化学产品。中国 CO_2 化学利用技术水平与国际先进水平基本持平，均处于工业示范发展阶段（TRL4 ～ 6）[13]。然而，高能耗和催化剂效率不足限制了该技术的商业化，预计 2030 年后该技术可以达到 TRL6 ～ 8 水平 [27-28]。美国 CO_2 制甲醇技术达到 TRL7 水平，如费尔韦甲醇公司（Fairway Methanol LLC）于 2024 年 1 月在美国启动运营，每年捕集 CO_2 量为 18 万 t，同时生产 13 万 t 低碳甲醇 [29]。

CO_2 矿化利用技术通过与钢渣、矿渣等碱性废料反应形成稳定碳酸盐化合物，实现碳永久固定，美国矿化技术达到 TRL9 的水平，中国达到 TRL4 ～ 9 水平，其中钢渣及磷石膏矿化应用已趋近商业化阶段 [6]，硅酸盐水泥固化已达到 TRL9 的水平，如 2021 年中国建成全球首条 CO_2 制备混凝土制品的生产线 [7]。该技术优势为就地处理，能够缓解 CO_2 供需失衡，但受制于专用设备开发（如特殊反应器等），需持续优化工艺参数和规模化应用技术 [3]。

1.3　CO_2 封存技术

CO_2 封存主要涵盖地质封存、海洋封存和矿物封存 3 类技术路线，其中地质封存为核心技术方向，涉及废弃油气藏、咸水层及深部煤层等储层类型 [30]。地质封存将 CO_2 注入深层构造，以实现永久储存，中国已达示范水平（TRL6 ～ 7），代表性项目包括中石油渤海湾咸水层项目（CO_2 封存能力为 50 万 t/a）、鄂尔多斯咸水层封存项目（CO_2 封存能力为 10 万 t/a）[25] 和松辽盆地林甸深部咸水层 CO_2 地质封存项目（研究区有效 CO_2 封存量达 11.5 亿 t）[6]。基础设施不足和安全性验证滞后是制约地质封存技术发展的系统性问题 [25]。因此，需建立完善的环境管理体系 [31]。美国地质封存技术可以达到 TRL9 的水平，如 Carbon Terravault 项目计划 2025 年前年封存量达到 100 万 t CO_2[32]。

海洋碳封存通过深海注入等方式将 CO_2 长期固定于海洋系统中，中国整体处于工业示范阶段（TRL6 ～ 7）[33]。2023 年，中国首个百万吨级海上碳封存示范工程——恩平 15-1 油田碳封存项目在珠江口海域正式投运，作为国内首个海上 CO_2 封存示范工程，可以实现超过 1.5×10^6 t CO_2 的海底地层封存 [13]。美国海洋封存技术成熟度为 TRL6，尚未大规模部署，但正在规划墨西哥湾等区域项目。

矿物封存通过 CO_2 与橄榄石等反应形成碳酸盐，技术的 TRL 达 3 ～ 5 水平，已纳入国家未来产业发展重点。2024 年 2 月发布的《广东省培育发展未来绿色低碳产业集群行动计划》明确提出，重点发展海上封存、玄武岩矿化封存及相关监测评估技术。然而该技术面临反应动力学缓慢、CO_2 储层筛选和埋藏潜力评价方法待完善等问题 [34–35]。美国矿物封存技术的 TRL 为 7，作为美国能源部“碳封存保障设施计划”（CarbonSAFE）的一部分，HERO 项目评估将天然气发电厂排放的 CO_2 注入玄武岩的可行性。

1.4 中美 CCUS 技术成熟度对比

全球规划及运营中的 CCUS 产业集群共计 24 个，主要集中于欧美地区 [20]。美国在 CCUS 技术领域居全球领先地位，已经建立了多个百万吨级的 CCUS 集群项目，以及超过 8 000 km 的 CO_2 运输管网，并有多个捕集、运输和注入全流程的大型工业集群处于规划中 [21]。例如，Summit 公司在美国中西部地区规划建设大型 CCUS 网络项目，拟通过管道网络连接中西部多个州的超过 30 个生物质乙醇工厂，将工业源捕集的 CO_2 集中运输至北达科他州的封存点并进行长期地质封存 [21]。相比之下，中国仅有总长约为 200 km 的 CO_2 运输管网，CCUS 项目仍以“点对点”单一发展模式为主，项目建设规模较小。

美国 CCUS 技术成熟度整体处于全球领先地位，与中国相比，美国在燃烧后 CO_2 捕集、CO_2–EOR、地质封存和矿化利用等技术上更成熟，中国在海洋封存和部分利用技术（如混凝土矿化）有一定优势，如表 1 所示。在碳捕集方面，相较于美国已有 33 个在建和投运的碳捕集量超过 50 万 t 的大型 CCUS 项目，中国在建和投运的大型 CCUS 项目为 12 个 [35]，整体规模较小。在碳利用与封存技术方面，除恩平 15–1 油田碳封存示范工程外，中国其他示范项目封存量多为 10 万～ 50 万 t，仍存在一定差距。

表 1　中美 CCUS 技术成熟度对比

技术	中国 TRL	美国 TRL
燃烧前 CO_2 捕集	6 ～ 7	7
燃烧后 CO_2 捕集	6 ～ 9	9
富氧燃烧 CO_2	6 ～ 8	4 ～ 7
DAC	4	7
BECCS	4 ～ 7	6 ～ 8
CO_2–EOR	6 ～ 7	9
化学利用	4 ～ 6	7
生物利用	3 ～ 9	6 ～ 9
矿化利用	4 ～ 9	9
地质封存	6 ～ 7	9
海洋封存	6 ～ 7	6
矿物封存	3 ～ 5	7

2 中美 CCUS政策体系比较研究

本文系统梳理中美两国 CCUS 政策的演进历程和核心内容，相关政策节选如表 2 所示，从政策框架、资金支持、激励机制和监管体系 4 个维度深入分析两国政策体系的差异化特征，为中国进一步优化 CCUS 政策体系、推动技术产业化发展提供政策启示。

2.1 政策演进

美国注重系统性和长期规划，强调技术创新与市场机制的结合。美国早于 2000 年启动相关政策实施，通过《能源政策法案》（2005 年）和后续《基础设施投资与就业法案》（2021 年）奠定基础。美国政府制定了明确的《迎接双重挑战：碳捕集、利用和封存规模化部署路线图》，形成了从研发到商业化的全链条政策支持框架 [36–37]。2025 年 1 月，美国能源部（Department of Energy，DOE）发布的《碳负排放计划》，其中明确提出，到 2050 年以低于 100 美元 /t CO_2 的成本实现十亿吨级 CO_2 移除目标，并设置 2030 年中期目标为 2 500 万 t/a 碳移除需求。该计划通过技术创新与市场驱动相结合的方式，重点推进 DAC、BECCS、海洋碳封存和增强矿化等六大碳移除路径的规模化应用。

中国 CCUS 政策演进从“十三五”规划（2016 年）首次提及，演变为“双碳”目标（2021 年）下的核心支撑。科技部组织编写了《中国碳捕集利用与封存技术发展路线图（2019 版）》，对海上碳封存的技术水平、发展路径和应用区域等进行了分析评估。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》明确提出“开展碳捕集利用与封存重大项目示范”。工业

表 2　2021—2025 中美 CCUS 产业化发展相关政策

政策名称	时间	国家	相关内容
《关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》	2024 年 7 月	中国	推进 CO_2 捕集利用与封存项目建设，加快关键技术研发
《关于加快推动制造业绿色化发展的指导意见》	2024 年 2 月	中国	聚焦 CCUS 技术全生命周期能效提升和成本降低，开展 CCUS 与工业流程耦合、CO_2 生物转化利用等技术研发及示范
《温室气体自愿减排交易管理办法（试行）》	2023 年 9 月	中国	将 CCUS 项目纳入国家温室气体自愿减排交易体系，建立 CCUS 项目方法学和监测标准
《科技支撑碳达峰碳中和实施方案（2022—2030 年）》	2022 年 8 月	中国	将 CCUS 列为重点技术方向，提出突破高效低成本碳捕集、CO_2 高值化转化利用技术等关键技术
《工业领域碳达峰实施方案》	2022 年 7 月	中国	推动钢铁、水泥、化工等重点行业 CCUS 技术产业化应用，建设一批 CCUS 示范项目
《“十四五”现代能源体系规划》	2022 年 1 月	中国	加快 CCUS 技术研发、示范和产业化应用，推进煤电、钢铁、水泥等行业 CCUS 示范工程
《关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见》	2022 年 1 月	中国	加快 CCUS 技术研发和产业化，推进重点行业和区域 CCUS 示范应用
《“十四五”节能减排综合工作方案》	2021 年 12 月	中国	推进 CCUS 技术研发应用，建设全流程、集成化、规模化 CCUS 示范项目
《2030 年前碳达峰行动方案》	2021 年 10 月	中国	明确提出加快 CCUS 技术研发和产业化应用，推进重点行业 CCUS 技术示范
《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》	2021 年 10 月	中国	统筹推进碳捕集利用封存技术研发、示范和产业化应用
《关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》	2021 年 2 月	中国	推进碳捕集利用封存等技术研发和产业化，构建绿色技术创新体系
《美国能源部碳负排放计划》	2025 年 1 月	美国	能源部启动《碳负排放计划》，支持 DAC、BECCS、海洋碳封存等六大 CCUS 技术
《通胀削减法案》（IRA）	2022 年 8 月	美国	增强了 45Q[①]税收抵免，包括将项目开工日期延长至 2033 年 1 月 1 日，并提高抵免额度：工业和发电设施封存 CO_2 每吨 85 美元，利用每吨 60 美元；DAC 封存可达 180 美元 /t，利用 130 美元 /t
《美国确保清洁能源供应链的战略》	2022 年 2 月	美国	制定 CCUS 关键材料供应链安全战略，减少对进口关键材料的依赖
《基础设施投资和就业法案》	2021 年 11 月	美国	投资 120 亿美元用于 CCUS 技术示范项目，包括大规模 CCUS 技术的商业化部署

和信息化部等七部门发布的《关于加快推动制造业绿色化发展的指导意见》进一步将 CCUS 列为未来产业发展重点。

2.2　研发政策

美国通过联邦政府直接资助推动技术创新和示范应用，注重从基础研发到商业化转化全过程的支持。美国能源部在 2024 年和 2025 年对 CCUS 技术的总投入分别达到 17.6 亿美元和 17.4 亿美元，资金主要来源于清洁能源示范办公室和化石能源与碳管理办公室。

中国研发政策以国家重点研发计划为核心，在政策层面，国家能源局联合科技部印发《“十四五”能源领域科技创新规划》，围绕高效低成本的 CCUS 技术，制定技术创新任务与路线图并实施监

① “45Q”是指美国《国内税收法典》（Internal Revenue Code）中的第 45Q 条款（Section 45Q），全称为“Credit for Carbon Oxide Sequestration”，即碳氧化物封存税收抵免。

测；工业和信息化部印发的《“十四五”原材料工业发展规划》《关于“十四五”推动石化化工行业高质量发展的指导意见》，提出在水泥、煤化工等行业开展 CO_2 捕集、封存技术推广应用试点。在支持研发方向上，科技部部署多项科研项目，如针对低成本规模化碳捕集原理与关键技术，开展增压富氧燃烧、化学链燃烧等新一代碳捕集技术研发，拓展重点工业领域碳捕集关键技术的开发和示范应用，解决碳计量技术瓶颈问题，推动碳排放精准计量技术发展。

2.3 激励机制

美国通过 2022 年 8 月 16 日由时任总统拜登签署的《通胀削减法案》，对 45Q 税收抵免机制进行了全面优化[36]，该法案在原有 45Q 税收抵免的基础上，构建了系统性的经济激励框架，通过为 CO_2 封存或利用提供减免政策，显著降低企业投资成本。此外，相关政策创新性地引入直接支付机制，允许企业在碳捕集设备投入使用后的前 5 年内直接获得税收抵免，这一措施不仅吸引了传统主体（如燃煤电厂和油田等）的参与，还推动了外部投资者进入 CCUS 领域，进而促成相对稳定的收益模式与市场化运作机制。

中国主要依赖政策性金融工具和地方补贴，但碳市场机制尚未成熟，市场化程度较低。中国人民银行推出的碳减排支持工具及《绿色债券支持项目目录》明确将 CCUS 项目纳入支持范围，为其融资提供了政策依据。例如，《关于促进应对气候变化投融资的指导意见》将 CCUS 试点示范纳入气候投融资项目支持范围；《财政支持做好碳达峰碳中和工作的意见》提出鼓励开展相关技术攻关与产业化应用；《环境保护、节能节水项目企业所得税优惠目录（2021 年版）》将 CCUS 项目纳入其中，符合条件的项目可享受企业所得税“三免三减半”优惠政策。地方层面，深圳和北京等地通过赠款或奖励形式对 CCUS 项目投资给予补贴，补贴比例分别达到总投资的 20% 和 25%，最高限额分别为 1 000 万元和 3 000 万元，这些举措充分体现了地方政府在推动技术示范中的积极作用。

2.4 标准体系

在标准制定政策上，美国较早便开始构建 CCUS 标准体系，在 CO_2 地质封存、运输管道安全、项目环境影响评估等多方面制定了详细标准，保障 CCUS 项目从建设到运营全流程的规范化与安全性，为 CCUS 产业发展提供了坚实的标准支撑。例如，美国颁布《国家环境政策法》，要求联邦机构对 CCUS 项目进行环境影响评估（Environmental Impact Statement，EIS），涵盖生态、健康和社会影响分析。

中国也在加快完善相关标准体系，国家能源局将 CCUS 列为能源行业标准年度立项重点支持领域，发布了《二氧化碳驱油田集输管道施工技术规范》等重点行业标准，并推动多项相关行业标准立项。工业和信息化部编制发布《工业领域碳达峰碳中和标准体系建设指南》，推进包括碳捕集利用等在内的重点领域标准研制。尽管《碳捕集利用与封存（CCUS）减排量核算方法学》等全流程标准目前已颁布，但整体标准体系相较于美国，在全面性和成熟度上仍有提升空间。

3 中国CCUS技术发展的关键制约因素

尽管中国在 CCUS 技术领域取得了初步进展，但受限于政策体系不完善、经济激励不足、基础设施滞后及产业生态体系不健全等关键因素，CCUS 技术的规模化应用和产业化发展仍面临诸多挑战。

3.1 梯度培育机制缺失

中国 CCUS 政策体系尚未形成统一的顶层设计和系统性规划。尽管中国已出台多项国家级政策支持 CCUS 技术的研发，但缺乏专门的国家层面的 CCUS 技术发展规划，政策多散布在各类环境保护和节能减排政策中。同时，缺乏依据 CCUS 各技术成熟度进行梯度性培育的针对性政策工具，难以满足处于不同发展阶段技术的差异化需求。

3.2 政策体系统筹不足

中国 CCUS 监管框架尚处于完善过程中，缺乏专门针对 CCUS 准入、建设、运营、监管和终止等环节的详细法律法规。现有项目多依赖地方性政策支持，缺乏全国统一的审批监管制度和环境监测标准。中国非一体化 CCUS 项目在潜在泄漏责任划分及获取政策激励资格方面的相关政策框架仍需持续完善，火电、钢铁和水泥等重点行业的 CCUS 全流程监管标准体系尚不完善[38]。

3.3 经济激励机制不健全

中国尚未建立专门的 CCUS 税收激励制度，现有税收优惠政策分散在环境保护、节能节水和

资源综合利用等类目中，缺乏系统性和针对性。碳市场机制对 CCUS 项目的支持力度不足，目前碳市场仅覆盖部分发电企业，CCUS 项目的减排量尚未纳入交易体系，相关核查和信用交易规则也尚未完全成熟。

中国碳市场交易价格仅为 40 ～ 60 元 /t CO_2，远低于 CCUS 全流程成本的 300 ～ 400 元 /t CO_2，导致市场驱动力显著不足 [17]。

3.4　基础设施建设滞后

中国处于 CCUS 产业集群化发展初期，CO_2 运输管道网络、共享基础设施网络和封存基础设施的缺乏共同制约了相关技术产业化的推进 [25]。燃烧前 CO_2 捕集技术需与煤气化等上游工艺实现深度耦合，系统集成的技术风险和运营复杂性显著增加。富氧燃烧 CO_2 捕集和 DAC 技术对大规模制氧装置和可再生能源供应体系存在较强的依赖性，跨系统协调和优化面临技术挑战。地质封存技术的长期稳定性受地质条件和监测技术限制，存在潜在的不确定性，且 CO_2 泄漏风险的系统性评估机制尚未健全，缺乏全国统一的法规标准和长期监测数据支持 [31]，监测技术与风险管控措施的健全程度有待进一步提升。

3.5　产业生态体系不完善

在产业生态体系方面，中国 CCUS 技术创新链条尚未形成有效闭环，产学研合作深度不足，关键技术突破与产业化应用之间存在明显断层。目前，CCUS 相关企业多为单一技术环节的参与者，缺乏覆盖碳捕集、运输、利用和封存全产业链的龙头企业和产业联盟。此外，金融服务体系对 CCUS 项目的支持机制尚未成熟，项目融资渠道单一，风险评估和投资回报机制有待完善，这些因素在一定程度上限制了社会资本的广泛参与。

4　中国 CCUS技术发展的政策建议

4.1　CCUS 技术梯度发展策略

对 CCUS 技术成熟度进行系统分析，可以得出中国 CCUS 技术整体处于实验至工业化示范应用阶段（TRL3 ～ 7）的结论。其中，燃烧后捕集、CO_2–EOR 和部分矿化利用等技术接近或已达商业化水平（TRL6 ～ 9），而 DAC、BECCS 和矿物封存等技术仍处于实验验证至示范阶段（TRL3 ～ 7）。为推动中国 CCUS 技术从示范向规模化、商业化应用的跨越，需要基于技术生命周期和 TRL 框架制定梯度发展策略，优先推广高成熟度技术，加速成长技术产业化，并培育萌芽技术潜力。策略分为短期（2025—2030 年）、中期（2025—2035 年）和长期（2025—2040 年）3 个阶段。

短期阶段重点推进 TRL6 ～ 9 的高成熟度技术，如燃烧后 CO_2 捕集、CO_2–EOR 和部分矿化利用等技术。优化胺基吸收剂和工艺参数，降低碳捕集成本，将百万吨级示范项目推广至电力、石化等行业。扩大 CO_2–EOR 应用规模，构建区域性的 CO_2 运输管网，同时推广钢渣和磷石膏矿化技术在建材行业的应用。完善碳市场机制和政策激励，规范技术标准以支持快速部署。

中期阶段加速 TRL6 ～ 8 技术的产业化，包括富氧燃烧 CO_2 捕集、BECCS 和地质 / 海洋封存等技术。优化制氧工艺和生物质烟气捕集效率，在资源禀赋优越区域布局 50 万～ 100 万吨级 CCUS 项目。扩大咸水层和海上封存规模，完善监测与风险管理体系。借鉴国际先进经验，引进封存与监测技术，推进产业集群化发展。

长期阶段培育 TRL3 ～ 6 前沿技术，如 DAC、化学利用和矿物封存等技术。加大高效吸附材料和催化剂研发力度，建设千吨级 DAC 和化学利用示范项目，优化玄武岩矿化封存工艺。推动全链条技术集成，发展长距离 CO_2 运输网络，设立专项基金支持基础研究与人才培养。

4.2　政策体系和激励机制创新与完善

在政策体系方面，建议因地制宜制定区域性 CCUS 发展规划，实现技术路径与资源条件的优化配置。建议制定专门的 CCUS 法律法规，明确 CCUS 项目在立项、建设、运营、监测和终止等环节的监管要求和责任分工，制定涵盖碳捕集、运输、利用和封存全流程的监管标准和技术规范。建立长期的环境监测和风险评估制度，确保 CCUS 项目的环境安全和社会安全。建立项目终止和后续管理的责任机制，明确封存 CO_2 的长期监管责任和潜在风险的责任分担。

在激励机制方面，建立专门的 CCUS 税收激励制度，参考美国 45Q 税收抵免法案的成功经验，对 CCUS 项目的碳捕集、运输和封存环节提供差异化的税收减免政策。将现有分散在各类税收优惠政策中的 CCUS 相关条款进行整合，构建统一的 CCUS 税收激励体系。在碳市场机制方面，需要加

快完善全国碳排放权交易市场对 CCUS 项目的支持政策，建立 CCUS 减排量的核查标准和交易规则。

4.3 基础设施建设与产业生态构建

基础设施建设和产业生态构建是 CCUS 技术规模化发展的重要保障。在基础设施建设方面，中国应加快 CO_2 运输和封存基础设施的规划建设，重点推进 CCUS 产业集群和共享基础设施网络的建设。统筹规划建设区域性的 CO_2 运输管网，构建覆盖主要工业集聚区和封存区域的输送网络，实现多个排放源的 CO_2 集中收集和运输，降低运输成本和技术风险。

在产业生态构建方面，建议加强产学研合作，构建 CCUS 技术创新生态系统，推动关键技术突破和产业化应用。鼓励大型国有企业和央企发挥主导作用，通过混合所有制改革吸引社会资本参与基础设施建设。■

参考文献：

[1] 黄晶 . 碳捕集利用与封存 (CCUS) 技术发展的几点研判 [J]. 中国人口·资源与环境 , 2023, 33(1): 100.

[2] 黄鲁成 , 郭鑫 , 苗红 , 等 . 碳中和技术 : 概念维度、功能范畴与结构体系 [J]. 创新科技 , 2025, 25(2): 1-15.

[3] 贾子奕 , 刘卓 , 张力小 , 等 . 中国碳捕集、利用与封存技术发展与展望 [J]. 中国环境管理 , 2022, 14(6): 81-87.

[4] 李丹妮 , 傅翠晓 , 庄珺 . 基于时序性培育的高潜能未来产业遴选方法研究 : 以未来能源领域为例 [J/OL]. 情报杂志 , 1-10[2025-03-02]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1167.g3.20250508.2001.002.html.

[5] 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/OL]. [2025-04-02]. https://www.acca21.org.cn/trs/000100170002/16690.html.

[6] 康佳宁 , 张云龙 , 彭淞 , 等 . 实现碳中和目标的 CCUS 产业发展展望 [J]. 北京理工大学学报 (社会科学版), 2024, 26(2): 68-75.

[7] 刘江枫 , 张奇 , 吕伟峰 , 等 . 碳捕集利用与封存一体化技术研究进展与产业发展策略 [J]. 北京理工大学学报 (社会科学版), 2023, 25(5): 40-53.

[8] 韩秋明 . 美国培育发展未来产业的经验研究 [J]. 全球科技经济瞭望 , 2024, 39(7): 10-18.

[9] 李姣姣 . 全球主要经济体半导体领域面向未来的战略布局及对中国的启示 [J]. 全球科技经济瞭望 , 2024, 39(7): 1-9, 59.

[10] 胡拥军 . 前瞻布局未来产业：优势条件、实践探索与政策取向 [J]. 改革 , 2023(9): 1-10.

[11] 何丽敏 , 刘海波 , 肖冰 . 基于技术成熟度的科技成果转化模式策略研究：以中科院宁波材料所为例 [J]. 科学学研究 , 2021, 39(12): 2170-2178.

[12] 谢芬 , 杜坤伦 . 未来产业高质量发展的生命周期演化与政策体系构建 [J]. 江海学刊 , 2024(4): 96-103.

[13] 吴冲冲 , 张斯然 , 辛靖 , 等 . 石油和石油化工行业二氧化碳捕集、利用与封存技术的研究进展 [J/OL]. 石油学报(石油加工), 2025: 1-19[2025-03-02]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2129.te.20250417.1404.002.html.

[14] 张一楠 , 熊小鹤 , 周寅聪 , 等 . CO_2 捕集、利用及封存技术研究进展 [J/OL]. 煤炭学报 , 2025: 1-21[2025-03-02]. https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.1282.

[15] 贺静 , 林千果 , 郭军红 , 等 . 化学吸收法碳捕集技术研究及应用进展和展望 [J]. 现代化工 , 2025, 45(5): 93-99.

[16] 王振 , 李玥 , 李胜 . 化学吸收法捕集 CO_2 的研究进展、性能对比与展望 [J]. 洁净煤技术 , 2025, 31(4): 120-139.

[17] 姚悦 , 吕昊东 , 彭雪婷 , 等 . 全球碳管理发展态势与技术前沿进展 [J]. 洁净煤技术 , 2024, 30(10): 32-40.

[18] 王俊杰 , 杨华伟 , 朱治平 , 等 . 水泥行业燃烧中碳捕集技术研究及应用进展 [J]. 洁净煤技术 , 2025, 31(4): 37-51.

[19] 刘罗茜 , 雷涯邻 , 支树洁 , 等 . 中国水泥行业点源层面 CCUS 技术减排潜力与优化部署 [J]. 北京理工大学学报 (社会科学版), 2024, 26(4): 56-67.

[20] 周月桂 , 王玉亭 , 黄冠硕 , 等 . 水泥工业氧 - 燃料燃烧碳捕集技术研究进展 [J]. 洁净煤技术 , 2025, 31(4): 163-180.

[21] 史明威 , 高仕康 , 吕昊东 , 等 . 中美 CCUS 技术发展与政策体系对比 [J]. 洁净煤技术 , 2024, 30(10): 19-31.

[22] 羊凌玉 , 刘宇 , 张静 , 等 . 基于文献计量的碳捕集、利用与封存技术研究进展 [J]. 生态学报 , 2024, 44(24): 11523-11535.

[23] DENG X, TENG F, ZHANG X, et al. Co-deploying biochar and bioenergy with carbon capture and storage improves cost-effectiveness and sustainability of China's carbon neutrality[J]. One earth, 2025, 8(1): 101172.

[24] 孙裕彤 , 吴晓燕 , 陈方 . 生物质能—碳捕集与封存 (BECCS) 技术发展态势分析 [J]. 科学观察 , 2022, 17(2): 21-32.

[25] 王国锋 , 吕伟峰 , 崔凯 , 等 . 全球二氧化碳捕集、利用

与封存产业集群技术进展及应用展望 [J]. 石油勘探与开发 , 2025, 52(2): 478-487.

[26] 魏宁 , 刘胜男 , 李小春 , 等 . CO_2 地质利用与封存的关键技术清单 [J]. 洁净煤技术 , 2022, 28(6): 14-25

[27] 毛荐其 , 陆高潮 , 刘娜 , 等 . 面向创新全链条的碳捕获、利用与封存领域技术机会预测 [J]. 情报杂志 , 2025, 44(4): 160-172.

[28] 毛荐其 , 陆高潮 , 刘娜 , 等 . 多链路预测指标融合的技术机会预测方法研究 [J/OL]. 情报杂志 , 2025: 1-11[2025-06-02]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1167.G3.20250411.1335.004.html.

[29] ALEX T. Celanese venture is making methanol from CO2[J]. C&en global enterprise, 2024, 102(2): 12-12.

[30] 向国育 , 申长俊 , 陆诗建 , 等 . 二氧化碳捕集、利用与封存示范工程进展 [J]. 低碳化学与化工 , 2025(3): 113-122.

[31] 包琦 , 叶航 , 刘琦 , 等 . 不同地质体中 CO_2 封存研究进展 [J]. 低碳化学与化工 , 2024, 49(3): 87-96.

[32] TARDIN-COELHO R,BHARADWAJ B,ASHWORTH P. Carbon capture utilisation and storage (CCUS) and public perceptions: A systematic literature review[J]. International journal of greenhouse gas control, 2025, 145: 104393.

[33] LIN X，LI X Y，LIU H W，et al. A review on carbon storage via mineral carbonation: Bibliometric analysis, research advances, challenges, and perspectives[J]. Separation and purification technology, 2024, 338: 126558.

[34] 张亮 , 温荣华 , 耿松鹤 , 等 . CO_2 在玄武岩中矿物封存研究进展及关键问题 [J]. 高校化学工程学报 , 2022, 36(4): 473-480.

[35] 陈语 , 姜大霖 , 刘宇 , 等 . 煤电 CCUS 产业化发展路径与综合性政策支撑体系 [J]. 中国人口资源与环境 , 2024, 34(1): 59-70.

[36] 熊书玲 , 郑佳 , 屠鑫煜 , 等 . 美国发展煤炭清洁高效利用技术对中国的启示 [J]. 全球科技经济瞭望 , 2024, 39(5): 57-64.

[37] 金馨 , 程竹静 , 史筱飞 , 等 . 全球氢能技术发展态势研究 [J]. 全球科技经济瞭望 , 2024, 39(10): 29-37.

[38] 宋伟泽 , 李政 , 孙博达 . 中国碳中和目标下 CCUS 发展挑战与政策激励研究 [EB/OL]. [2025-03-02]. https://lce.tsinghua.edu.cn/__local/4/04/9C/71FD581493DEEB7465E70F389AD_F9342134_BDC09.pdf .

Comparative Study on CCUS Technologies in China and the United States Based on TRL

LI Danni[1], LIN Jun[2], CHENG Kai[2], ZHUANG Jun[1]

(1. Shanghai Institute for Science of Science, Shanghai　200031;

2. Shanghai Electric Group Co., Ltd. Central Academe, Shanghai　200070)

Abstract: To systematically assess the progress and competitive landscape of CCUS technologies in China and the United States, a comparative analysis of the maturity and application status of CCUS technologies in the two countries was conducted based on the Technology Readiness Level (Technology Readiness Level, TRL) framework. Findings indicate that the United States leads globally in post-combustion capture, CO_2-enhanced oil recovery (CO2 Enhanced Oil Recovery, CO_2-EOR), and geological storage (TRL 7-9), while China holds certain advantages in ocean storage and specific mineralization technologies (e.g., concrete mineralization) (TRL 6-9), though its project scale remains smaller. China's CCUS technologies are generally at the experimental to industrial demonstration stage (TRL 3-7). The study emphasizes that in the short term, accelerate the industrialization of oxy-fuel combustion capture, BECCS, and geological/oceanic storage in the medium term, and nurture the potential of DAC, chemical utilization, and mineral sequestration in the long term. Meanwhile, policy innovation, infrastructure development, and industrial ecosystem establishment, along with international technological cooperation, are emphasized to drive the large-scale application of CCUS technologies, supporting China's 2060 carbon neutrality goal.

Keywords: Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS); Technology Readiness Level (TRL); carbon neutrality; gradient development strategy