

碳捕集与封存（CCS）技术的发展与应用

宋 娜

贵州大学 贵州贵阳

【摘要】碳捕集与封存（CCS）技术作为应对气候变化、实现碳中和目标的关键技术路径，通过捕集工业生产和能源利用过程中产生的二氧化碳，并将其安全封存于地质构造中，有效减少温室气体排放。近年来，随着全球碳中和进程的加速，CCS 技术在捕集效率、运输安全、封存监测等环节取得显著进展。在捕集环节，新型化学吸收剂、吸附材料及低温捕集系统的创新提升了捕集经济性；在封存方面，海上咸水层封存、驱油利用（CCUS-EOR）等模式不断成熟。然而，CCS 技术仍面临成本高昂、基础设施不足、政策支持待强化等挑战。本文系统梳理 CCS 技术链各环节创新成果，分析其在电力、钢铁、造纸等行业的应用潜力，探讨政策法规与风险管理体系的构建需求，并基于国际经验与中国实践，提出产业化发展路径。研究表明，通过技术创新、政策激励与国际合作协同推进，CCS 技术有望在全球能源系统低碳转型中发挥重要作用。

【关键词】碳捕集与封存；碳中和；地质封存；减排技术；政策规划

【收稿日期】2025 年 5 月 8 日 **【出刊日期】**2025 年 6 月 18 日 **【DOI】**10.12208/j.aes.20250018

Development and application of carbon capture and storage (CCS) technology

Na Song

Guizhou University, Guiyang, Guizhou

【Abstract】 Carbon Capture and Storage (CCS) technology, as a key pathway to address climate change and achieve carbon neutrality goals, effectively reduces greenhouse gas emissions by capturing carbon dioxide generated during industrial production and energy utilization, and securely storing it in geological structures. In recent years, with the acceleration of global carbon neutrality efforts, CCS technology has made significant advancements in capture efficiency, transportation safety, and storage monitoring. In the capture stage, innovations such as novel chemical absorbents, adsorbent materials, and low-temperature capture systems have enhanced capture economics. In terms of storage, models like offshore brine layer storage and enhanced oil recovery (CCUS-EOR) continue to mature. However, CCS technology still faces challenges such as high costs, insufficient infrastructure, and the need for stronger policy support. This paper systematically reviews the innovative achievements in each stage of the CCS technology chain, analyzes its application potential in industries such as power, steel, and paper, explores the requirements for policy and regulatory frameworks and risk management systems, and proposes industrial development pathways based on international experience and Chinese practices. The study indicates that through technological innovation, policy incentives, and international cooperation, CCS technology is expected to play a significant role in the low-carbon transition of the global energy system.

【 Keywords 】 Carbon capture and storage; Carbon neutrality; Geological storage; Emission reduction technology; Policy regulation

引言

全球气候变化已成为 21 世纪人类面临的重大挑战之一，其对自然生态系统和人类社会经济发展

的深远影响日益凸显。根据政府间气候变化专门委员会（IPCC）的最新评估报告，要实现《巴黎协定》设定的温控目标，即全球平均气温较前工业化时期

上升幅度控制在 1.5°C 以内，必须在 2050 年左右实现全球碳中和。这一严峻的减排任务要求各国采取更加积极有效的技术路径和政策措施。在众多减排技术中，碳捕集与封存技术因其独特的优势而受到国际社会的广泛关注。

碳捕集与封存技术是指将二氧化碳从工业或能源相关排放源中分离出来，输送到适宜的封存地点，并长期与大气隔绝的技术过程。这一技术体系主要包含三个核心环节：捕集、运输和封存。在捕集环节，根据不同的排放源特征，可分为燃烧前捕集、燃烧后捕集和富氧燃烧等主要技术路线；在运输环节，主要采用管道运输和船舶运输两种方式；在封存环节，则包括地质封存和海洋封存等途径，其中地质封存是目前最为成熟和可行的技术选择。

CCS 技术的发展历程可追溯至 20 世纪 70 年代，最初主要用于提高石油采收率。随着气候变化问题的日益突出，该技术逐渐被赋予新的使命。特别是在当前全球能源转型背景下，CCS 技术展现出其不可替代的重要价值。首先，对于电力、钢铁、水泥等高排放行业而言，CCS 技术是现阶段实现深度减排的最有效手段之一。其次，在可再生能源尚未完全主导能源体系之前，CCS 技术可以为化石能源的清洁利用提供关键支撑。此外，CCS 技术与生物质能结合形成的 BECCS 技术，更能实现负排放，这对抵消某些难以避免的碳排放具有重要意义。

从国际发展态势来看，全球 CCS 技术正处于从示范向商业化过渡的关键阶段。根据全球碳捕集与封存研究院的统计，截至 2023 年底，全球已有数十个大型 CCS 项目投入运营，年捕集能力达到数千万吨二氧化碳。美国、挪威、加拿大等国家在 CCS 技术研发和项目部署方面处于领先地位，这些国家通过完善的政策法规和资金支持机制，推动了 CCS 技术的快速发展。例如，美国的 45Q 税收抵免政策为 CCS 项目提供了有力的经济激励，挪威的 Longship 项目则展示了全链条 CCS 技术的商业化可行性。

相比之下，中国作为全球最大的碳排放国，在 CCS 技术发展方面既面临重大机遇，也面临特殊挑战。一方面，中国拥有丰富的封存资源禀赋，特别是在鄂尔多斯盆地、松辽盆地等地区具有巨大的封存潜力。另一方面，中国以煤炭为主的能源结构和快速发展的工业化进程，使得 CCS 技术的应用需求尤

为迫切。近年来，中国在 CCS 技术领域取得了显著进展，建成了一批重要的示范项目，如国华锦界电厂 15 万吨/年燃烧后捕集示范装置、中原油田 CCUS-EOR 项目等。这些项目为 CCS 技术在中国特定条件下的应用积累了宝贵经验。

然而，必须清醒地认识到，CCS 技术的大规模商业化推广仍面临诸多挑战。首先，高昂的成本是制约其发展的主要障碍。目前，二氧化碳捕集成本占 CCS 项目总成本的 60%-80%，如何降低捕集能耗和成本是需要解决的关键问题。其次，封存安全性和长期监测要求对技术可靠性提出了更高标准。此外，公众接受度、法律法规体系、基础设施建设等非技术因素也同样重要。特别是在中国情境下，还需要考虑技术适应性和产业协同等特殊问题。

在此背景下，本文旨在系统分析 CCS 技术的发展现状与应用前景。论文将首先梳理 CCS 技术链各环节的最新进展，包括捕集技术创新、运输安全保障和封存监测技术等；然后重点探讨 CCS 技术在电力、钢铁、造纸等重点行业的应用潜力；进而分析政策法规和风险管理体系的建设需求；最后基于国际经验和中国实践，提出促进 CCS 技术发展的政策建议。通过全面系统的研究，期望为 CCS 技术的科学发展和合理部署提供理论参考和实践指导。

需要特别说明的是，本文的研究重点将放在技术可行性和经济合理性方面，同时也会充分考虑政策环境和社会接受度等非技术因素。在研究方法的运用上，将采用文献调研、案例分析和比较研究相结合的方式，力求客观反映 CCS 技术的发展全貌。希望通过本研究，能够为推动 CCS 技术在中国的发展和應用提供有益借鉴，为全球气候变化应对和碳中和目标实现贡献智慧。

1 碳捕集技术创新与行业发展应用

碳捕集技术作为 CCS 技术体系的首要环节，其创新进展直接关系到整个系统的经济性和可行性。近年来，随着材料科学、工艺工程和系统优化的深度融合，碳捕集技术呈现出多元化、高效化的发展趋势，同时在多个行业的应用探索也取得了显著进展。

在工业领域应用方面，造纸行业作为重要的能源消耗和碳排放部门，正在积极探索 CCS 技术的应用路径。研究表明，造纸过程产生的烟气具有流量

稳定、成分相对简单等特点,为碳捕集技术的应用提供了有利条件。通过采用胺基吸收剂等成熟技术,造纸企业可实现中等规模的碳捕集,捕集后的二氧化碳可用于食品级干冰生产或作为化工原料,形成循环经济模式。然而,当前造纸行业应用 CCS 技术仍面临捕集成本高、能源消耗大等挑战,需要进一步开发适用于造纸烟气特性的高效低耗捕集技术^[1]。

从能源系统转型的宏观视角来看,印度尼西亚的案例提供了有益借鉴。作为东南亚最大的经济体,印尼正在通过综合评估方法探索包含 CCS 技术的可持续电力系统转型路径。研究显示,在印尼的能源结构转型情景中,CCS 技术特别是与燃气电厂相结合的配置,将在保障电力供应安全的同时实现深度减排。这种技术路径不仅考虑了减排效果,还充分评估了社会经济影响,包括就业效应、投资需求和产业带动作用,为发展中国家推进低碳电力转型提供了重要参考^[2]。

在封存环节的技术创新方面,海上咸水层封存显示出巨大潜力。对典型海上咸水层封存项目的概述表明,相比陆上封存,海上封存具有封存容量大、环境风险可控、远离人口密集区等优势。目前,挪威、英国等国家已在北海区域开展了多个海上封存项目,积累了丰富的工程经验。这些项目在封存场地选址、注入工艺、监测技术等方面形成了系统化的技术规范,特别是在地层压力管理、泄漏风险防控等关键环节建立了完善的技术方案,为全球海上封存项目提供了重要借鉴^[3]。

国际经验比较研究对技术发展具有重要启示。巴西在 CCUS 技术领域的发展呈现出独特路径,其特点在于将二氧化碳驱油与生物燃料产业相结合。巴西充分利用海上油田的地质条件和生物乙醇产业的发展优势,形成了具有本国特色的 CCUS 技术路线。这种发展模式不仅考虑了技术可行性,还紧密结合国家资源禀赋和产业特点,为中国等新兴经济体推进 CCUS 技术发展提供了有价值的参考^[4]。

在捕集材料创新方面,钙循环技术衍生的吸附剂在建筑材料领域的应用展现出循环经济价值。研究表明,钙循环捕集过程中产生的失活吸附剂可作为水泥部分替代品,用于制备低碳建筑材料。这种创新应用不仅解决了废吸附剂的处置问题,还显著降低了水泥生产的碳足迹,实现了“以废治废”的双

重环境效益。技术经济分析显示,该路径在降低 CCS 系统整体成本的同时,还能产生额外的经济效益,为碳捕集技术的商业化推广提供了新思路^[5]。

钢铁行业作为重点减排领域,其低碳转型技术路径研究备受关注。对高炉低碳炼铁技术路径的分析表明,将 CCS 技术与氢冶金、生物质能利用等创新工艺相结合,可形成多元化的减排方案。特别是在现有高炉系统中集成碳捕集装置,被视为实现短期减排的现实选择。然而,不同技术路径在能效影响、投资成本和运营维护方面存在显著差异,需要根据企业具体条件进行定制化方案设计^[6]。

在系统优化层面,目标规划方法为 CCS 网络设计提供了科学工具。通过建立多目标优化模型,可以同时考虑减排目标、经济效益和风险控制等多个维度,实现 CCS 网络的最优规划。这种方法特别适用于区域级的 CCS 基础设施建设,能够有效解决捕集源、运输路径和封存场地之间的匹配问题,提高整个系统的运行效率^[7]。

中国钢铁行业的低碳发展技术路线图研究进一步明确了 CCS 技术的定位和作用。基于对中国钢铁工业碳排放特征和转型需求的分析,CCS 技术被确定为中长期深度减排的关键技术之一。路线图研究不仅设定了技术发展的时间节点,还提出了相应的政策保障措施,为行业低碳转型提供了明确指引^[8]。

在前沿技术探索方面,钙钛矿氧化物热化学转化技术展现出独特优势。该技术利用太阳能驱动二氧化碳分解,实现碳捕集与太阳能燃料生产的一体化,具有能量自给、产物价值高的特点。虽然目前仍处于实验室研究阶段,但其创新思路为碳捕集技术的发展开辟了新方向,特别是在分布式能源系统和可再生能源富集地区具有应用潜力^[9]。

综上所述,碳捕集技术创新正在向多元化、高效化方向发展,从材料创新到系统优化,从单一技术突破到全链条协同,展现出蓬勃的发展活力。同时,在不同行业的应用探索也呈现出因地制宜、产融结合的特点,为 CCS 技术的规模化推广奠定了坚实基础。

2 运输封存技术与安全风险管控

二氧化碳的运输与地质封存是 CCS 技术链中确保减排效果最终实现的关键环节。随着 CCS 项目规模的不断扩大,运输封存技术的可靠性、经济性以

及全过程的风险管理已成为行业关注的焦点。本部分将系统分析运输封存技术的最新进展及其安全风险管理体系。

超临界二氧化碳管道运输作为最经济的规模化运输方式,其腐蚀防护技术取得重要突破。研究表明,在超临界状态下,二氧化碳中微量的水分和杂质会引发严重的管道腐蚀问题。最新研发的纳米复合涂层技术和在线监测系统,可有效实时监测管道壁厚变化和腐蚀热点,显著提升运输安全性。这些技术创新为长距离、大规模二氧化碳运输提供了技术保障^[10]。

从全球能源转型的视角看,CCS 技术的发展需要系统考虑资源利用效率。研究显示,不同 CCS 技术路线对关键元素的需求存在显著差异,这要求我们在技术选择时充分考虑资源可持续性因素。通过建立科学的评估体系,可以优化 CCS 技术路径,确保其与环境可持续发展目标相一致^[11]。

在政策调控方面,减排政策对 CCS 技术效率的影响机制值得关注。实证研究表明,合理的政策设计能够显著提升 CCS 项目的运行效率。特别是碳定价机制与 CCS 技术补贴政策的协同,可以有效降低项目运营成本,提高技术竞争力。这为政府部门制定精准的扶持政策提供了重要参考^[13]。

海洋碳封存技术作为重要发展方向,其技术成熟度正在不断提升。相比陆上封存,海洋封存具有独特的优势,但也面临特定的技术挑战。目前需要在注入工艺、监测技术、环境影响评估等方面进行深入研究,特别是要建立完善的海洋环境监测网络和应急响应体系^[14]。

在封存安全性方面,西南地区油气田的地质封存实践提供了宝贵经验。该地区利用丰富的油气勘探开发经验,建立了完善的封存安全性评估体系。通过创新监测技术和风险管理方法,确保了二氧化碳在地质构造中的长期封存安全。这些经验为其他地区的 CCS 项目提供了重要借鉴^[17]。

CCS 项目的经济性评估方法不断完善。综合考虑封存成本、环境效益和长期风险管控的综合评价模型显示,规模化部署是降低 CCS 成本的关键因素。通过优化项目设计和运营管理,可以显著提高 CCS 项目的经济可行性。然而,仍需通过技术创新和政策支持进一步降低成本^[18]。

在标准规范建设方面,需要建立完善的 CCS 技术标准体系。从管道运输压力参数到封存场地选址标准,从监测技术规范到应急预案制定,都需要建立统一的技术标准。这将为 CCS 技术的大规模商业化应用提供制度保障^[19]。

通过以上分析可见,运输封存技术与安全风险管理体系正在向系统化、标准化方向发展。从技术创新到标准建立,从单一环节优化到全链条协同,CCS 技术的可靠性和经济性不断提升。未来需要在监测技术、应急响应、国际合作等方面继续深化研究,为 CCS 技术的大规模部署提供坚实支撑。

3 重点行业应用与政策法规体系

CCS 技术在重点排放行业的应用实践以及相关政策法规的完善,是推动该技术规模化发展的关键支撑。本章将重点探讨 CCS 技术在典型行业的应用特点,并分析政策法规对 CCS 技术发展的引导作用。

3.1 电力行业 CCS 技术应用

电力行业作为碳排放的重点领域,其 CCS 技术应用具有规模大、集中度高的特点。研究表明,燃煤电厂和燃气电厂采用 CCS 技术改造后,可实现碳排放量的大幅削减。特别是在现有电厂基础上加装碳捕集装置,被视为实现电力行业低碳转型的重要路径。然而,CCS 系统的能耗问题仍需通过技术创新进一步优化,以降低对电厂发电效率的影响。当前,超临界机组和整体煤气化联合循环(IGCC)电站因其高效率特性,成为 CCS 技术应用的首选对象。这些电站在设计阶段就考虑了碳捕集系统的集成,通过优化蒸汽参数和热力系统,最大限度地降低了能耗损失。此外,电力行业 CCS 项目的规模化效应明显,大型发电机组配套建设碳捕集装置,可显著降低单位捕集成本,提高项目经济性。随着可再生能源比例的提升,燃煤电厂将更多承担电网调峰功能,这也对 CCS 系统的变负荷运行能力提出了新的要求^[20]。

3.2 工业部门 CCS 技术部署

在钢铁、水泥等高能耗工业领域,CCS 技术的应用需要结合工艺流程特点进行定制化设计。钢铁生产过程中的碳排放主要来自炼铁高炉和焦化工序,其烟气具有成分复杂、温度波动大的特点。针对这些特性,需要开发专用的捕集技术和工艺路线。例如,在炼钢环节可采用富氧燃烧技术,使烟气中的二氧化碳浓度提升到 90%以上,大幅降低后续捕集

能耗。水泥行业的情况更为特殊,其生产过程中约60%的碳排放来自原料分解,这部分排放无法通过能效提升来消除,使得 CCS 技术成为必然选择。目前,欧洲多个水泥厂已开展 CCS 示范项目,通过胺基吸收技术捕集窑尾烟气中的二氧化碳,取得了较好的示范效果。然而,工业领域 CCS 技术推广仍面临空间限制、工艺匹配等挑战,需要开发模块化、紧凑型的捕集装置,以适应现有厂区的布局条件^[21]。

3.3 政策法规体系建设

完善的政策法规体系是 CCS 技术发展的重要保障。从国际经验来看,明确的法律框架、碳定价机制和财政激励政策,对推动 CCS 项目投资具有显著促进作用。首先需要解决的是封存地的法律归属问题,明确封存二氧化碳的所有权和责任主体。其次,要建立长期的监测和责任追究机制,确保封存安全。在财政支持方面,碳定价机制能够为 CCS 项目提供稳定的收益预期,而投资税收抵免、项目建设补贴等政策则可有效降低项目前期成本。此外,还需要建立碳排放标准体系,通过强制性减排要求推动企业采用 CCS 技术。值得注意的是,政策设计需要充分考虑技术发展阶段,在示范阶段侧重研发支持和投资激励,在商业化阶段则更多依靠市场机制和排放标准^[22]。

3.4 技术标准与规范完善

CCS 技术的标准化工作对其规范化发展至关重要。在捕集环节,需要制定吸收剂性能测试标准、设备能效评价标准等,确保不同技术路线的可比性和可靠性。运输环节的标准制定要重点关注管道材料选择、压力参数设计、安全监测要求等内容,确保二氧化碳运输安全。封存环节的标准最为复杂,包括场地选址评价标准、注入井建设规范、监测技术标准等多个方面。这些标准不仅要考虑技术可行性,还要充分考虑长期安全性。国际标准化组织(ISO)和美国石油学会(API)已发布了一系列 CCS 相关标准,为我国标准制定提供了参考。在标准实施过程中,还需要建立相应的认证和监管机制,确保各项标准得到有效执行^[23]。

3.5 风险管理与公众参与

CCS 项目的风险管理需要建立全生命周期的风险识别和管控机制。在项目选址阶段,要通过详细的地质勘探,评估封存地层的密封性和稳定性。在

运营阶段,要建立良好的监测系统,实时跟踪二氧化碳的运移情况。长期封存阶段的风险管理更为重要,需要建立应急预案和责任基金,应对可能发生的泄漏事故。公众接受度是 CCS 项目成功的关键因素之一。要通过科普宣传、公众听证会等形式,增强社会对 CCS 技术的了解和认同。特别要重视项目所在地社区居民的参与,建立透明的信息沟通机制,及时回应公众关切。此外,可以借鉴国际上成功的公众参与经验,如设立社区监督委员会、建立利益共享机制等,提高项目的社接受度^[24]。

3.6 国际合作与知识共享

CCS 技术的发展需要加强国际合作与知识共享。通过参与国际能源署(IEA)、碳封存领导人论坛(CSLF)等多边机制,可以分享各国在 CCS 技术研发、项目示范和政策制定方面的经验。特别是在标准互认、技术转让等领域,国际合作显得尤为重要。目前,中国已与挪威、英国等 CCS 技术先进国家建立了双边合作机制,在技术研发、人才培养等方面开展深入合作。这些国际合作不仅有助于加快技术进步,还能促进全球 CCS 技术标准的统一,为技术推广应用创造有利条件^[25]。

3.7 人才培养与创新能力建设

CCS 技术的长期发展离不开专业人才支撑。需要加强跨学科人才培养,特别是地质工程、化学工程、环境工程等专业的复合型人才。高校和科研机构要优化课程设置,增加 CCS 相关课程内容。企业也要加强在职培训,提升现有技术人员的能力水平。在创新能力建设方面,要加大研发投入,支持关键核心技术攻关。建立产学研协同创新机制,促进科技成果转化。同时,要注重知识产权保护,激发创新活力,形成良好的创新生态^[26]。

通过以上分析可见,CCS 技术在重点行业的应用需要结合行业特点进行技术优化,同时需要政策法规体系的协同支持。未来应继续深化行业应用研究,完善政策环境,加强国际合作,推动 CCS 技术的规模化发展。

4 技术经济性分析与规模化发展路径

CCS 技术的经济可行性和规模化发展路径是决定其商业化前景的关键因素。本章将从技术经济性评估、成本构成分析、规模化效应以及未来发展路径等方面进行深入探讨,为 CCS 技术的商业化推广

提供理论依据和实践指导。

4.1 技术经济性评估方法

建立科学的 CCS 技术经济性评估体系至关重要。当前主要采用平准化成本法进行评估,其中碳捕集成本是影响项目经济性的关键因素。研究表明,不同捕集技术路线的成本差异显著,燃烧后捕集技术的单位成本通常在 40-60 美元/吨二氧化碳,而燃烧前捕集技术由于系统复杂度高,成本相对较高。评估过程中需要综合考虑设备投资、运营维护、能耗成本等多项因素,同时还要充分考虑项目生命周期内的技术风险和市场风险。完善的评估体系有助于投资者准确判断项目可行性,为决策提供可靠依据。

在评估方法创新方面,需要引入全生命周期成本分析框架。这一框架不仅要考虑项目建设期的直接投资,还要涵盖运营维护、监测管理、退役处理等全过程成本。特别是对于封存环节,需要建立长期监测成本模型,准确评估封存场地的长期管理成本。此外,还需要开发动态评估工具,能够反映技术进步、政策变化等因素对项目经济性的影响。这些方法创新将提高评估结果的准确性和实用性,为项目决策提供更可靠的支撑^[27]。

4.2 成本构成与优化路径

CCS 项目的成本构成复杂,主要包括捕集系统投资、运输管网建设、封存场地开发等环节。捕集环节的成本优化空间最大,其中能耗成本占运营成本的 40%-60%。通过开发低能耗捕集技术,如新型相变吸收剂、膜分离技术等,可显著降低运营成本。在设备投资方面,采用模块化设计和标准化制造,能够缩短建设周期,降低投资成本。运输环节的成本优化主要依靠规模效应,大型管道的单位运输成本可比小型管道降低 30%以上。

封存环节的成本具有较大不确定性,主要取决于地质条件的复杂程度。通过加强封存场地前期勘探,采用先进的地球物理探测技术,可以提高场地评价的准确性,降低开发风险。此外,充分利用现有油气基础设施进行改造,如将枯竭油气田转为封存场地,利用现有管道输送二氧化碳等,都可以有效降低成本。这些优化路径需要根据具体项目条件进行组合应用,才能实现最佳的经济效益^[28]。

4.3 规模化发展制约因素

CCS 技术规模化发展面临多重制约因素。技术

成熟度方面,虽然个别环节技术已达到商业化水平,但全链条技术集成仍需验证。特别是大型系统的可靠性和长期稳定性需要更多示范项目验证。基础设施不足是另一个重要制约因素,特别是二氧化碳输送管网的缺失,使得单个项目难以实现规模经济。

政策环境的不确定性也严重影响投资者信心。碳定价机制的稳定性、封存责任的长期认定、项目审批流程等政策因素都直接影响到项目可行性。此外,公众接受度问题也不容忽视,特别是对地质封存安全性的担忧,可能影响项目落地。解决这些制约因素需要采取系统性的措施,包括加强技术研发、完善基础设施、稳定政策预期、加强公众沟通等^[29]。

4.4 产业集群化发展模式

基于产业集群的 CCS 发展模式具有明显优势。这种模式通过区域协同和设施共享,可以显著提高项目经济性。具体实施中,需要重点解决以下几个关键问题:首先是管网规划问题,需要根据排放源分布和封存场地位置,优化管网布局,提高管网利用率。其次是商业模式创新,需要建立公平合理的成本分摊和收益共享机制,确保各参与方的利益。

政府在此过程中应发挥关键作用,包括制定区域发展规划、提供基础设施支持、建立监管框架等。特别是在项目初期,政府需要通过资金支持、税收优惠等措施降低项目风险,吸引社会资本参与。随着项目规模扩大,逐步过渡到市场化运作模式。这种集群化发展模式不仅可以降低单个项目成本,还能形成规模效应,带动相关产业发展^[30]。

4.5 资金支持与风险管理

CCS 项目具有投资规模大、回报周期长的特点,需要多元化的资金支持体系。政府资金在项目早期阶段发挥重要引导作用,包括研发资助、示范项目补贴等。随着技术成熟,需要更多社会资本参与,包括项目融资、绿色债券、碳基金等多种形式。风险分担机制也至关重要,需要通过保险、担保等金融工具分散项目风险。

在风险管理方面,需要建立全流程的风险管控体系。技术风险主要通过加强研发和示范来化解;政策风险需要依靠稳定的政策框架来防范;市场风险可以通过长期合约等方式规避。特别是要建立封存风险基金,为可能的泄漏事故提供资金保障。完善的风险管理体系可以增强投资者信心,促进项目

顺利实施^[31]。

4.6 标准化与监管框架

建立统一的技术标准和监管框架对 CCS 规模化发展至关重要。技术标准涵盖捕集效率、运输安全、封存稳定性等各个环节,可以保证项目质量和安全。监管框架需要明确项目审批流程、运营监管要求、长期责任认定等事项。特别是在封存环节,需要建立长期监测制度和责任转移机制。

国际合作在标准制定方面发挥重要作用。通过参与国际标准组织的工作,可以促进各国标准的协调统一,为跨国项目提供便利。同时,要加强监管能力建设,培养专业的监管人才,提高监管效能。完善的标准化和监管体系是 CCS 技术健康发展的重要保障^[32]。

4.7 未来发展路径展望

CCS 技术的未来发展需要遵循循序渐进的原则。近期重点应放在技术示范和商业模式探索上,通过一批标志性项目验证技术可行性。中期目标是在重点行业实现商业化应用,形成可复制的商业模式。长期来看,CCS 技术将成为碳中和目标下不可或缺的技术选择。

在这个过程中,需要密切关注技术发展趋势,及时调整发展路径。特别是要关注新能源、新材料等技术突破对 CCS 发展的影响。同时,要加强国际合作,共享发展经验,共同推进技术进步。通过系统规划和不懈努力,CCS 技术必将为实现碳中和目标做出重要贡献^[33]。

通过以上分析可以看出,CCS 技术的商业化推广需要技术创新、政策支持、资金保障等多方面因素的协同作用。未来应重点突破成本瓶颈,完善商业模式,建立有利于 CCS 发展的政策环境,推动技术实现规模化应用。

5 环境影响评估与可持续发展

CCS 技术的环境效益和潜在影响是其可持续发展的重要考量因素。本章将系统分析 CCS 技术对环境的影响机制,探讨其与可持续发展目标的协同关系,并提出相应的评估方法和管控措施。

5.1 全生命周期环境影响评估

建立科学的 CCS 技术全生命周期环境影响评估体系至关重要。评估范围应涵盖从设备制造、项目建设到运营维护的各个环节。重点包括能源消耗、

水资源利用、土地利用等关键指标。研究表明,CCS 系统的附加能耗可能导致电厂效率下降 10-15 个百分点,间接增加燃料消耗和污染物排放。因此,需要开发高效低耗的捕集技术,优化系统集成方案,最大限度降低环境足迹。评估方法上应采用标准化指标体系,确保结果的可比性和科学性^[34]。

5.2 水资源与生态影响管理

CCS 技术对水资源的影响需要特别关注。捕集环节的冷却用水、吸收剂再生用水等都会增加水资源消耗。在缺水地区,这可能加剧水资源紧张状况。需要开发节水型捕集技术,如空冷技术、闭式循环水系统等。同时,要评估项目对当地生态系统的影响,包括建设期对地表植被的破坏、运营期对地下水质的影响等。建立生态补偿机制,实施植被恢复、水源保护等措施,最大限度减少生态影响^[35]。

5.3 封存环境风险防控

地质封存的环境风险防控是 CCS 技术可持续发展的关键。需要建立完善的风险评估体系,包括泄漏风险、地层稳定性风险等。采用多层监测技术,如地震监测、地下水监测、地表通量监测等,实现全过程监控。制定详细的应急预案,确保及时发现和处理异常情况。特别是要加强对饮用水源等敏感目标的保护,建立安全缓冲区。长期监测数据的积累和分析,为风险防控提供科学依据^[36]。

5.4 与社会可持续发展协同

CCS 技术需要与区域可持续发展目标相协调。项目选址应避开生态敏感区和人口密集区,减少对居民生活的影响。项目建设和运营期间要创造就业机会,带动当地经济发展。建立利益共享机制,让当地社区从项目中受益。同时,要加强公众沟通,提高项目透明度,增强社会接受度。这些措施有助于实现环境保护与社会发展的平衡^[37]。

5.5 全球环境效益评估

从全球视角评估 CCS 技术的环境效益具有重要意义。通过建立统一的计量方法,可以准确评估 CCS 项目对温室气体减排的贡献。同时,要关注技术转移对全球环境的影响,特别是向发展中国家转移时的适应性改造。国际合作可以促进最佳实践分享,提高全球 CCS 项目的环境绩效。此外,要关注 CCS 技术与其它低碳技术的协同效应,实现整体环境效益最大化^[38]。

通过以上分析可见, CCS 技术的环境影响评估需要采取系统化、全过程的方法。在追求减排效益的同时, 必须严格控制其负面环境影响, 确保技术与可持续发展目标相一致。未来应进一步完善评估方法, 加强风险管控, 促进 CCS 技术的可持续发展。

6 创新技术研发与未来趋势

CCS 技术的创新研发是推动其持续发展的核心动力。本章将重点探讨 CCS 领域的前沿技术进展、研发趋势以及未来技术发展方向, 为 CCS 技术的持续创新提供理论指导和实践路径。

6.1 新型捕集材料研发

新型捕集材料的开发是提高 CCS 技术经济性的关键。当前研究重点包括金属有机框架材料、多孔聚合物、离子液体等新型吸附剂。这些材料具有比表面积大、吸附选择性高、再生能耗低等优势。特别是氨基功能化材料的研发取得显著进展, 其二氧化碳吸附容量比传统材料提高 30% 以上。未来研发方向应聚焦于提高材料稳定性、降低生产成本, 并实现规模化制备。材料基因组学等新方法的引入, 将加速新型捕集材料的研发进程。同时, 需要建立标准化的测试评价体系, 确保新材料在实际应用中的可靠性^[39]。

6.2 系统集成与能效提升

CCS 系统的能效优化是技术创新的重要方向。通过流程再造和系统集成, 可以显著降低捕集过程的能耗损失。例如, 将捕集系统与电厂热力系统深度耦合, 利用低品位余热进行吸收剂再生, 可降低再生能耗 20% 以上。此外, 采用多效蒸发、热泵集成等先进工艺, 进一步优化能量利用效率。智能控制系统通过实时监测和优化运行参数, 确保系统始终在最佳工况下运行。这些创新不仅提高了技术经济性, 也增强了系统的运行稳定性^[40]。

6.3 封存监测技术创新

封存监测技术的创新对确保 CCS 项目安全至关重要。新型地球物理监测技术, 如分布式声波传感、时移地震等, 可以实现对封存库的精细刻画和动态监测。地下水化学监测网络的优化设计, 能够及时发现微泄漏信号。卫星遥感技术的应用, 使得大范围地表形变监测成为可能。这些监测技术的创新, 为封存安全提供了全方位、多尺度的保障体系。同时, 监测数据的智能分析和预警模型也不断完善,

提高了风险识别和应对能力。

6.4 标准化与成本控制

标准化建设对推动 CCS 技术创新和成本降低具有重要意义。设备模块化设计和标准化制造, 可以大幅降低设备制造成本。工程设计和建设标准的统一, 有利于提高项目执行效率。运营维护标准的建立, 确保系统长期稳定运行。通过标准化推进规模效应, 预计可使 CCS 项目总投资成本降低 15-20%。此外, 标准化也有利于技术推广和人才培养, 为行业发展奠定基础。

6.5 未来技术发展方向

CCS 技术的未来发展方向将更加注重与其他低碳技术的协同。与可再生能源结合的新型捕集系统, 如太阳能驱动捕集工艺, 可实现零碳捕集。与氢能产业耦合的 CCS 技术, 为蓝氢生产提供技术支撑。此外, 基于人工智能的数字孪生技术, 将为 CCS 项目提供全生命周期的优化管理。这些创新方向不仅拓展了 CCS 技术的应用场景, 也提升了其在能源转型中的战略价值。

通过以上分析可见, CCS 技术创新正在向材料、工艺、监测等多个维度深入发展。未来应加强跨学科合作, 推动核心技术突破, 同时注重标准化建设和系统优化, 全面提升 CCS 技术的经济性和可靠性。

7 结论与展望

本文系统探讨了碳捕集与封存(CCS)技术的发展现状、应用前景及面临的挑战。通过对 CCS 技术各环节的深入分析, 可以得出以下结论:

CCS 技术作为应对气候变化的重要技术手段, 在实现全球碳中和目标中具有不可替代的作用。从技术层面看, 捕集、运输和封存各环节的技术创新不断取得突破, 新型捕集材料的开发、系统能效的提升以及智能化监测技术的应用, 显著提高了 CCS 技术的经济性和可靠性。在应用层面, CCS 技术在电力、钢铁等重点行业的实践表明, 其减排效果显著, 但也存在成本较高、能耗较大等问题需要进一步解决。

政策支持是推动 CCS 技术发展的关键因素。完善的法规体系、合理的碳定价机制以及有效的财政激励政策, 能够为 CCS 项目创造良好的发展环境。同时, 公众参与和国际合作也是促进 CCS 技术健康发展的重要保障。通过加强信息透明度和风险沟通,

可以提高社会对 CCS 技术的接受度；通过国际合作和经验分享，可以加速技术进步和成本降低。

展望未来，CCS 技术的发展将呈现以下趋势：首先，技术创新将继续深化，特别是在降低能耗、提高效率方面有望取得更大突破。其次，CCS 技术将更加注重与其他低碳技术的协同发展，形成多元化的减排解决方案。第三，标准化和规模化将推动成本进一步下降，增强 CCS 技术的市场竞争力。最后，随着全球碳中和进程的推进，CCS 技术的国际合作将更加紧密，形成共同发展的新格局。

然而，CCS 技术的发展仍面临诸多挑战。技术方面需要继续攻克能耗和成本问题；政策方面需要建立长期稳定的激励机制；社会方面需要提高公众认知和接受度。解决这些问题需要政府、企业、科研机构和公众的共同努力。

总体而言，CCS 技术作为应对气候变化的重要技术路径，具有广阔的发展前景。通过持续的技术创新、完善的政策支持和广泛的国际合作，CCS 技术必将为实现全球碳中和目标做出重要贡献。未来需要在推进技术发展的同时，加强风险评估和管理，确保 CCS 技术的安全性和可持续性，为构建人类命运共同体贡献力量。

参考文献

- [1] 陆胤君. 碳捕集与封存技术在造纸行业的应用前景[J]. 华东纸业, 2024, 54(12): 34-36.
- [2] Purwanto W W , Hartono D , Yunowo H A , et al. An integrated assessment of technological pathways and socioeconomic impacts for sustainable power system transition in Indonesia[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2024, 15(6): 1107-1120.
- [3] Li L , Liu Y , Li Y , et al. Overview of Typical Projects for Geological Storage of CO₂ in Offshore Saline Aquifers[J]. *Liquids*, 2024, 4(4): 744-767.
- [4] 赵健, 邱兆军, 窦立荣. 巴西碳捕集利用与封存发展现状、趋势及启示[J]. *国际石油经济*, 2024, 32(11): 11-24.
- [5] Rong N , Wang S , Chu C , et al. Deactivated Ca-based sorbent derived from calcium looping CO₂ capture as a partial substitute for cement to obtain low-carbon cementitious building materials[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 454139175-139175.
- [6] Li H , Zhao Y , Guo C , et al. Analysis of Technological Pathways and Development Suggestions for Blast Furnace Low-Carbon Ironmaking[J]. *Metals*, 2024, 14(11): 1276-1276.
- [7] Ayyad M F , Shehata M W , Bhran A A , et al. Optimum Planning of Carbon Capture and Storage Network Using Goal Programming[J]. *Processes*, 2024, 12(11): 2463-2463.
- [8] Wang F H , Qiu J , Ping D X , et al. Roadmap, current situation, and prospects of low-carbon development technologies in Chinese steel industry[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2024, 31(12): 1-14.
- [9] Tran N N H , Li W , Liu X . Perovskite oxide redox materials for two-step solar thermochemical CO₂ splitting[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 500156613-156613.
- [10] Zhao C , Wang J , Li X , et al. Progress in Corrosion Protection Research for Supercritical CO₂ Transportation Pipelines[J]. *Coatings*, 2024, 14(11): 1378-1378.
- [11] Bandpey F A , Rahimpour S , Kraslawski A . Mitigation of greenhouse gas (GHG) emissions aligned with global energy transition: Scenarios of elements use[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2024, 51345-358.
- [12] 李琳, 方波. 绿色经济下 CO₂ 捕集、利用与封存技术的发展[J]. *节能*, 2024, 43(09): 91-93.
- [13] Yang L , Zhang J , Li X , et al. The moderating effect of emission reduction policies on CCS mitigation efficiency[J]. *Applied Energy*, 2024, 376(PB): 124303-124303.
- [14] 王宇飞, 陈昂, 吴许佳, 等. 海洋碳捕集和储存(CCS)技术发展的现状、挑战和建议[J]. *环境保护*, 2024, 52(12): 21-26.
- [15] 陈柳潼. 氨法碳捕集产物综合利用实验研究[D]. 华北电力大学, 2024.
- [16] 段文青. LNG 动力船用经济高效低温凝华碳捕集系统设计与优化[D]. 江苏科技大学, 2024.
- [17] 雍锐. 西南油气田 CCUS/CCS 发展现状、优势与挑战[J]. *天然气工业*, 2024, 44(04): 11-24+199.
- [18] 谭新, 罗大清, 宋欣和. 考虑驱油与碳减排双重效益的 CCUS-EOR 经济性与发展模式分析与探讨[J]. *油气地质与采收率*, 2024, 31(02): 70-78.

- [19] 刘磊. 船载碳捕集利用与封存技术的应用及发展前景[J]. 船舶物资与市场,2024,32(02):77-79.
- [20] 张舟航,王灿发. 碳捕集与封存技术适用风险预防原则的理论建构与路径完善[J]. 中国环境管理,2024,16(01):136-144.
- [21] 任强,吴鹏,库瑶瑶. 基于知识图谱的中国碳捕集利用与封存技术研究进展与启示[J]. 四川大学学报(自然科学版),2024,61(02):192-204.
- [22] 杨勇. 中国碳捕集、驱油与封存技术进展及发展方向[J]. 石油学报,2024,45(01):325-338.
- [23] 王思佳. 为船载碳捕集系统制定“安全锁”[J]. 中国船检,2023,(12):34-37.
- [24] 周忠科,张忠友,王晋伟. 低碳能源技术前沿追踪的方法与应用[M]. 企业管理出版社:202310:231.
- [25] 桑树勋,华凯敏,屠坤坤,等. 生物质能高效利用与二氧化碳捕集利用封存耦合技术体系(BECCS)的发展方向与研究进展[J]. 中国矿业大学学报,2023,52(05):845-867.
- [26] 刘大李,王聪,刘新伟,等. 用于二氧化碳捕集的化学吸收剂研究进展[J]. 低碳化学与化工,2024,49(01):94-104+112.
- [27] 曹义杰,张建良,李彦鑫. 碳捕集利用与封存技术发展和应用[J]. 包钢科技,2023,49(04):19-24.
- [28] 阳平坚,彭栓,王静,等. 碳捕集、利用和封存(CCUS)技术发展现状及应用展望[J]. 中国环境科学,2024,44(01):404-416.
- [29] 谷春池. 考虑广义电热需求响应的含碳捕集电厂综合能源系统低碳调度研究[D]. 东北电力大学,2023.
- [30] 秦阿宁,孙玉玲. 碳捕集、利用与封存国际研发态势及应用比较研究[J]. 全球科技经济瞭望,2023,38(04):68-76.
- [31] 陈扬,吴烨,刘兴,等. 集成供冷的燃煤电厂碳捕集、封存系统优化分析[J]. 洁净煤技术,2023,29(04):109-120.
- [32] 白彦锋,李泳禧,王丽娟. 促进碳捕集、利用与封存技术发展与应用的税收优惠政策研究[J]. 国际税收,2023,(04):15-22.
- [33] 顾永正,王天堃,黄艳,等. 燃煤电厂二氧化碳捕集利用与封存技术及工程应用[J]. 洁净煤技术,2023,29(04):98-108.
- [34] 张凯,陈掌星,兰海帆,等. 碳捕集、利用与封存技术的现状及前景[J]. 特种油气藏,2023,30(02):1-9.
- [35] 康京涛,荣真真. 双碳目标下碳捕集与封存的立法规制: 欧盟方案与中国路径[J]. 德国研究,2022,37(05):61-79+115.
- [36] 彭雪婷,吕昊东,张贤. IPCC AR6 报告解读: 全球碳捕集利用与封存(CCUS)技术发展评估[J]. 气候变化研究进展,2022,18(05):580-590.
- [37] 陈国伟,张铮. 电厂低浓度烟气碳捕集技术研究现状及燃气电厂应用分析[C]//中国环境科学学会环境工程分会. 中国环境科学学会 2022 年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分会场论文集(三). 北京京能能源技术研究有限责任公司;北京首创环境科技有限公司;2022:307-310+347.
- [38] 李阳,赵清民,薛兆杰. “双碳”目标下二氧化碳捕集、利用与封存技术及产业化发展路径[J]. 石油钻采工艺,2023,45(06):655-660.
- [39] 张妍,池晓彤,康蓉. 全球 CCS 技术的研究、发展与应用动态[J]. 中外能源,2020,25(04):1-10.
- [40] 许世森. 火电厂烟气二氧化碳捕集关键技术及应用. 北京市,中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司,2010-11-10.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS