

DOI: 10.19666/j.rlfed.202503059

CO₂地质封存与利用技术发展态势与展望

方杰^{1,2}, 雷宏武³, 时俊杰^{1,2}, 白冰³, 李娜娜⁴, 赵晏强⁴

(1.北京低碳清洁能源研究院, 北京 102211;

2.煤炭开采水资源保护与利用全国重点实验室, 北京 102211;

3.中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程安全全国重点实验室, 湖北 武汉 430071;

4.中国科学院武汉文献情报中心科技大数据湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430071)

[摘要] 碳捕集、利用与封存 (carbon capture, utilization and storage, CCUS) 技术是缓解 CO₂ 排放对环境影响的关键技术, CO₂ 地质封存与利用是 CCUS 技术的重要组成部分。分析了 CO₂ 地质封存与利用技术领域的全球发展态势, 从政策体系建设、项目实施、研究成果等方面梳理了我国的发展现状, 通过文本分析解读了该领域的研究热点, 最后对 CO₂ 地质封存与利用技术的发展进行了展望。研究指出: 当前 CO₂ 地质封存与利用领域研究热点主要集中在枯竭油气藏封存、诱发地震机理与监测、泄漏监测与环境评价、CO₂ 封存与能源资源协同开发利用、快速矿化封存等方面; 未来应重视 CO₂ 封存与利用中复杂多场多相的耦合研究, 致力于构建全流程智能化的 CO₂ 地质封存与利用系统, 并积极探索多元化的 CCUS 产业发展模式。

[关键词] CO₂ 地质封存与利用; 发展态势; 研究热点; 展望

[引用本文格式] 方杰, 雷宏武, 时俊杰, 等. CO₂ 地质封存与利用技术发展态势与展望[J]. 热力发电, 2025, 54(6): 157-167.
FANG Jie, LEI Hongwu, SHI Junjie, et al. Research on carbon dioxide geological storage and utilization: progress and prospects[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(6): 157-167.

Research on carbon dioxide geological storage and utilization: progress and prospects

FANG Jie^{1,2}, LEI Hongwu³, SHI Junjie^{1,2}, BAI Bing³, LI Nana⁴, ZHAO Yanqiang⁴

(1.National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy, Beijing 102211, China;

2.State Key Laboratory of Water Resource Protection and Utilization in Coal Mining, Beijing 102211, China;

3.State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering Safety, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

4.Wuhan Library, Chinese Academy of Sciences/Hubei Key Laboratory of Big Data in Science and Technology, Wuhan 430071, China)

Abstract: Carbon capture, utilization and storage (CCUS) is a key technology to mitigate the impact of CO₂ emissions on the environment, and CO₂ geological storage and utilization is an important part of CCUS. This paper analyzes the global development trend of CO₂ geological storage and utilization technology, reviews the current development situation in China from the aspects of policy system construction, project implementation and research results, interprets the research frontiers in this field through literature analysis, and prospects the development of CO₂ geological storage and utilization. Current research focuses on the CO₂ geological storage and utilization in depleted oil and gas reservoirs, induced seismic mechanism and monitoring, leakage monitoring and environmental assessment, CO₂ geological storage and energy resources cooperative development and utilization, and rapid mineralization storage. In the future, research in this field should focus on the complex multi-field and multi-phase study in CO₂ geological storage and utilization, building a whole-process intelligent CO₂ geological storage and utilization system, and exploring diversified CCUS industry development models.

收稿日期: 2025-03-04 网络首发日期: 2025-05-28

基金项目: 国家能源集团科技项目 (GJNY-23-96); 国家自然科学基金联合重点基金项目 (U2344226); 国家能源集团科技项目 (GJNY-23-92); 国家自然科学基金联合基金项目 (U24B2032); 中国科学院武汉文献情报中心青年领军 2021 项目人才计划专项 (E2KZ091002)

Supported by: Science and Technology Project of China Energy Investment Corporation Co., Ltd. (GJNY-23-96); Key Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (U2344226); Science and Technology Project of China Energy Investment Corporation Co., Ltd. (GJNY-23-92); Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (U24B2032); 2021 Young Leading Talents Program of Wuhan Library, Chinese Academy of Sciences (E2KZ091002)

第一作者简介: 方杰 (1984), 男, 博士, 教授级高工, 主要研究方向为矿井水保护与生态利用、CO₂ 地质封存等, 10038939@chnenergy.com.cn.

通信作者简介: 李娜娜 (1988), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为 CCUS、地热能开发利用、深地储能等技术, linn@mail.whlib.ac.cn.

Key words: CO₂ geological storage and utilization; development trend; research hotspots; prospect

CO₂ 等温室气体的排放导致气候变暖是全球面临的共同问题,减少其排放已经成为国际社会共同关注的重大议题。《巴黎协定》明确提出,将全球平均温升控制在相对工业化前水平 2 °C 以内^[1]。

“欧盟 2030 年气候与能源政策框架”(EU 2030 Climate and Energy Policy Framework)提出,到 2030 年,温室气体排放要比 1990 年减少 40%。为避免气候变化造成的严重后果,有效解决碳排放问题成为全球关注的焦点,各国积极承诺实现碳中和目标。2020 年 9 月 22 日,习近平主席在第 75 届联合国大会上承诺,中国“CO₂ 排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和”。

碳捕集、利用与封存(carbon capture, utilization and storage, CCUS)是减少温室气体排放和应对气候变化的重要技术措施,对促进化石能源低碳化利用具有重要意义,得到了国际社会的广泛认可,美国、欧盟、英国、日本等相继出台相关战略推动其发展^[2]。在 2023 年 4 月 20 日召开的主要经济体能源与气候论坛(Major Economies Forum on Energy and Climate, MEF)上,澳大利亚、加拿大、欧盟、美国等共同发起了“碳管理挑战”,提出需要广泛部署 CCUS 和碳去除技术^[3]。国际能源署发布《通往 1.5 °C 的可靠途径:2020 年代行动的四大支柱》^[4]报告,指出 CCUS 是四大行动支柱之一。

CO₂ 地质封存与利用通过工程技术手段将捕集的 CO₂ 储存于深部咸水层、枯竭油气藏,并用于生产和强化能源、资源开采的过程^[5],是 CCUS 的重要组成部分。我国 CO₂ 地质封存与利用潜力巨大,近年来该领域的研究取得重要进展。为进一步有效推进我国 CO₂ 地质封存与利用技术的发展,本文对该领域的全球发展态势与研究进展进行了梳理,分析了当前研究热点并对该领域的发展进行展望,以期助力我国“双碳”战略目标的实现。

1 全球发展态势分析

在碳中和目标与能源转型双重驱动下,全球主要国家/地区密集出台国家战略并强化资金支持,加速布局 CCUS 技术,推动 CO₂ 地质封存与利用技术产业的规模化发展,在项目实施方面取得重要进展,领域研究成果不断增长。

1.1 主要国家/地区相关战略陆续出台

世界主要经济体将 CCUS 视为实现碳中和目标必不可少的创新技术,加速制定 CCUS 战略,明确 CCUS 技术定位和目标,推动 CCUS 快速部署。《美国能源转型的净零路径》^[6]探讨了美国能源净零转型的关键领域,提出开发和部署 CCUS 等技术。美国能源部发布《工业脱碳路线图》^[7],确定 CCUS 为美国实现工业脱碳的 4 个关键路径之一,并通过情景分析预测了其减排潜力。欧盟委员会通过《工业碳管理战略》^[8],以 2030 年、2040 年为时间节点,将 CCUS 的发展分为 3 大发展阶段,旨在扩大 CCUS 项目的部署规模,并实现商业化。法国发布《CCUS 战略》^[9]草案征集意见,指出 CCUS 是法国在 10 年内实现工业碳排放量减半目标必不可少的技术之一。英国发布《净零战略》^[10],计划到 2030 年投资 10 亿英镑与工业界合作建设 4 个 CCUS 产业集群。加拿大环境与气候变化部发布的《2030 年减排计划:加拿大清洁空气与强劲经济的下一步行动》^[11]提出了一项 91 亿加元的新投资,其中,制定《碳捕集、利用与封存战略》被列为重要行动之一。

1.2 各国/地区政府加大对 CCUS 的资助

各国/地区政府加大对 CCUS 的支持力度,为项目发展提供资金支持。其中,美国自 2008 年起出台 45Q 法案为 CO₂ 地质封存提供税收抵免,2022 年颁布的《通胀削减法案》强化了对 45Q 法案的税收抵免,提高了对驱油及地质封存的补贴力度,为直接空气捕集用于 CO₂ 地质封存与利用的项目提供高额补贴,有效推动了 CCUS 项目的部署^[12]。此外,美国联邦政府根据《清洁能源融资计划》为 CCS 项目在内的清洁能源部署和基础设施项目提供 3 000 多亿美元资金支持。欧盟宣布在创新基金的呼吁下,为 CCS 项目在内的气候技术提供 30 亿欧元资金。英国政府承诺在 20 年内投资 200 亿英镑用于扩大 CCS 项目。挪威承诺对北极光 CCUS 项目进行长期财政支持。荷兰政府计划拨款 67 亿欧元支持 CCS 项目的发展,特别是为 8 个在北海枯竭天然气藏进行的 CO₂ 封存项目提供资金支撑^[13]。

1.3 全球 CCUS 项目部署速度加快

2020 年以来,全球 CCUS 项目爆发式增长。截至 2024 年 7 月,正在开发和筹备中的商业化 CCUS

项目共 628 个, 同比增长 60%。正在运行的项目 CO₂ 捕集和封存能力可达 5 100 万 t/a, 若正在建设的设施开始运营, 全球 CO₂ 捕集和封存能力将有望翻番, 达到每年 1 亿吨以上^[14]。目前, CCUS 项目的累计 CO₂ 捕集能力为 4.16 亿吨/年, CO₂ 捕集能力自 2017 年之后以每年 35% 的速度增长, 与 2022 年相比, 2023 年捕集能力增长了 56% (图 1)。

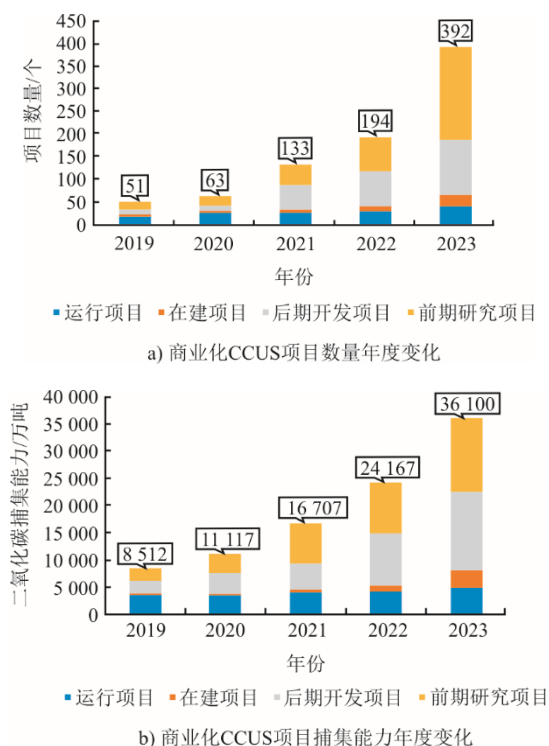


图 1 全球 CCUS 项目部署情况 (数据来源: Global CCS Institute (GCCSI))

Fig.1 Deployment trend of global CCUS projects (Data source: Global CCS Institute (GCCSI))

1.4 领域研究成果数量不断增长

基于 Web of Science 核心集数据库, 以 CO₂ 地质封存、CO₂ 驱油、CO₂ 驱气等关键词构建检索式, 文献类型限定为论文 (Article) 和综述 (Review), 检索时间段为 2010—2024 年, 检索时间为 2025 年 5 月, 共检索到相关论文 10 148 篇, 具体如图 2a) 所示。由图 2a) 可以看出, 该领域 SCI 论文由 2010 年的 173 篇增长到 2024 年的 1 418 篇, 增长了近 8 倍。2009—2024 年, 该领域共申请发明专利 1 821 件 (图 2b))。其中, 中国以 1 018 件发明专利排名全球第一。发明专利呈稳步发展态势 (一般发明专利的审批、授权时间为 3~5 年, 因此, 近 5 年的专利数据仅供参考^[15])。在全球碳中和及能源转型背景下, 预计未来该领域的研究成果仍会不断增长。

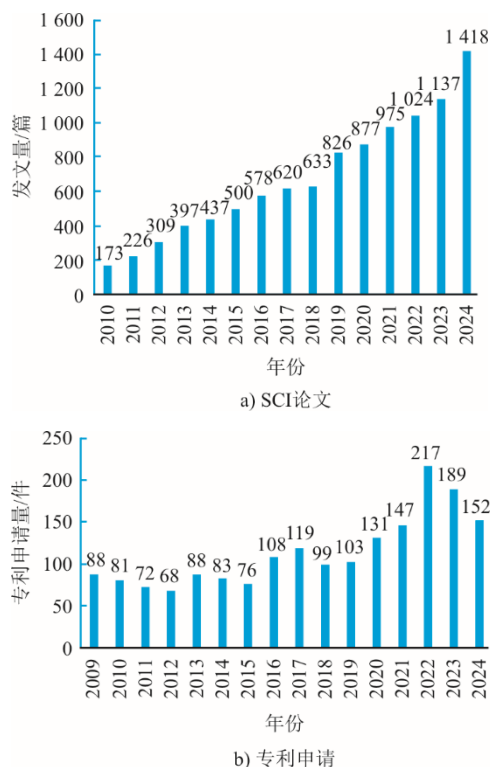


图 2 CCUS 领域科技成果产出趋势

Fig.2 Trends of publications and patents in CCUS field

2 我国发展现状分析

2.1 政策保障体系不断完善

我国高度重视 CCUS 技术的发展, 2021 年 CCUS 技术被写入《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》。为保障 CCUS 的有效实施, 我国发布多份政策文件。《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》《2030 年前碳达峰行动方案》《中共中央 国务院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》等提出强化 CO₂ 捕集利用与封存领域的基础研究、推进技术研发与项目示范, 为 CCUS 技术的发展提供了良好的政策环境。《关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见》提出加强 CCUS 技术推广示范, 扩大 CO₂ 驱油技术应用, 探索利用油气开采形成的地下空间封存 CO₂。此外, 《能源碳达峰碳中和标准化提升行动计划》《关于“十四五”推动石化化工行业高质量发展的指导意见》《“十四五”生态环境领域科技创新专项规划》《工业领域碳达峰实施方案》《工业领域碳达峰碳中和标准体系建设指南》等聚焦技术研发、标准体系建设、相关行业发展、项目应用与示范等方面, 为 CO₂ 地质封存与利用的发展提出实施规划和行动方案。在政策体系的

推动下, CCUS 领域标准体系建设不断完善, 2024 年, 我国发布 70 项碳核算、碳足迹、碳减排、能效能耗、碳捕集利用与封存等国家标准, 基本实现重点行业企业碳排放核算标准全覆盖^[16]。

2.2 封存潜力评价积极推进

我国积极推进 CO₂ 封存地质调查及相关技术试验, 持续深化 CO₂ 封存机理、选址、监测等技术研究, 陆地与海域 CO₂ 封存选区评价取得重要进展。由中国地质调查局牵头, 初步建立了深部咸水层、油气藏等不同类型储层地质封存选址的地质适宜性评价方法^[17]。中国地质调查局还创新性地提出了符合我国海域地质条件的 CO₂ 地质封存潜力与适宜性评价方法, 经测算我国海域 CO₂ 地质封存潜力达 2.58 亿吨^[18]。此外, 中国科学院与俄罗斯科学院研究人员聚焦沉积物中 CO₂ 水合物封存潜力, 以琼东南盆地为目标靶区, 结合相平衡机理形成考虑温度、压力和水深等因素的 CO₂ 水合物理论封存量计算方法, 确定了琼东南区域 CO₂ 水合物封存有效厚度及区域范围^[19]。

2.3 示范项目取得显著进步

CCUS 示范项目在数量和规模上均有明显增长, 涵盖电力、油气、化工、水泥、钢铁等多个行业。截至 2024 年 7 月, 处于不同发展阶段的 CCUS 示范项目 120 个, 年捕集能力达到 600 万吨^[20]。我国首个百万吨级 CCUS 项目——齐鲁石化-胜利油田百万吨级 CCUS 项目于 2022 年全面建成投产^[21], 该项目共部署 73 口注入井, 预计 15 年将累计注入 1 000 余万吨 CO₂, 采收率提高 12 个百分点以上^[20]。国内海上首个百万吨级 CO₂ 封存工程——恩平 CO₂ 封存示范项目投入使用^[22], 标志着我国成功掌握海上 CO₂ 捕集、处理、注入、封存和监测的全套技术和装备体系, 实现了海上 CO₂ 封存从无到有的重要突破。目前, 我国已具备大规模 CO₂ 捕集利用与封存的能力。已经实施的 CO₂ 地质封存与利用项目中, CO₂ 驱油项目已初步实现商业化, 深部煤层封存也有工程示范项目实施, 玄武岩体封存仍处于实验室探索阶段^[17]。

2.4 研究成果呈现快速增长

2010 年以来, 我国在 CO₂ 地质封存与利用领域共发表论文 4 149 篇, 发文量在近 15 年出现明显增长, 年度发文量由 2010 年的 21 篇增长到 2024 年的 837 篇, 各年度发文量占领域年度总发文量的比值由 12.14% 增长到 59.03% (图 3a), 中国成为该

领域发文量最多的国家。我国在该领域的研究主要涉及深部煤层、深部咸水层等, 枯竭油气藏和基性超级性火成岩封存技术的研究有待加强^[23]。

我国发明专利的申请量不断增长, 特别是 2020 年以来, 发明专利申请量快速增长, 由 2020 年的 78 件增长至 2024 年的 139 件。2024 年发明专利申请量占全球发明专利申请总量的 90% 以上 (图 3b)。可以看出, 随着知识产权意识的增强和全球化竞争的加剧, 我国开始重视该领域的专利布局与规划, 为产业的快速发展奠定了基础。

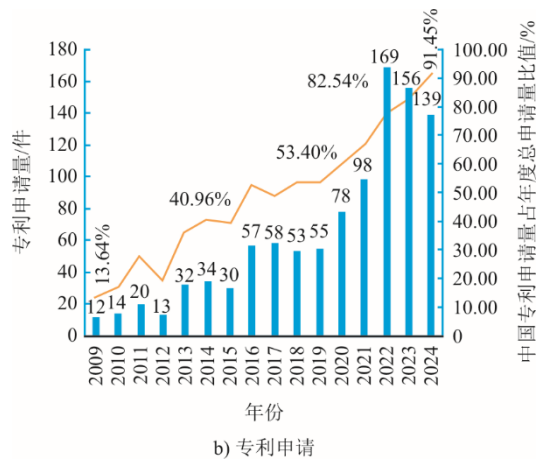
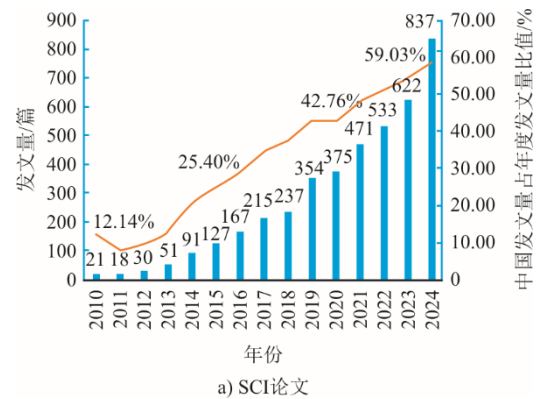


图 3 中国 CCUS 领域科技成果产出趋势
Fig.3 Trends of publications and patents in CCUS field in China

3 CO₂ 地质封存与利用研究热点分析

高被引论文的主题体现该领域的研究热点与学术前沿。基于 CO₂ 地质封存与利用领域高被引论文及 *Nature*、*Science* 和 *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 等期刊相关发文进行分析, 发现当前 CO₂ 地质封存与利用领域的研究热点主要包括枯竭油气藏中 CO₂ 地质封存、CO₂ 注入诱发地震机理、泄漏监测与环境评价等方面。

3.1 枯竭油气藏封存

枯竭油气藏具有良好的封闭性和巨大的储存空间,油气勘探开采过程中积累的丰富地质资料为 CO₂ 注入提供了资料保障,且注入井和管道等原有基础设施可以直接用于 CO₂ 注入,被认为是 CO₂ 封存的重要场地^[24]。例如,已有研究表明,我国枯竭油气藏的 CO₂ 封存潜力为 30.5×10^9 吨^[25],分别为深部不可采煤层封存潜力的 2.5 倍、深部咸水层封存潜力的 1/4 以上^[26],封存潜力巨大。斯坦福大学牵头的研究指出^[27],大幅增加地下 CO₂ 封存最安全和最实际的策略需关注不完全枯竭油气藏分布量较大的地区,此类地区油气藏具备充分的封存能力,其地质学和水动力学环境已充分认识,且与咸水层封存相比诱发地震的风险更小。然而,枯竭油气藏中 CO₂ 的安全封存受盖层稳定性、断层、井筒完整性等的影响^[28],封存前需要开展泄漏评估。

目前,枯竭气藏中 CO₂ 的长期封存定量验证已得到证实。Jenkins 等人^[29]通过对 Otway 项目封存的 CO₂ 对土壤和地下水等影响的研究,证实了枯竭气藏中 CO₂ 封存的安全性和有效性,认为枯竭气藏可以封存大量 CO₂。项目实施方面,2023 年,美国能源部宣布投入 270 万美元支持 5 个 CCUS 项目,其中包括利用先进技术和创新的技术工作流程,制定枯竭气藏 CO₂ 注入计划^[30]。在英国,截至 2023 年 9 月,共有 14 家公司获得了 21 个枯竭油气藏和咸水层的封存许可证,到 2030 年这些地点每年可封存 CO₂ 共 3 000 万吨,占英国 2021 年碳排放的 10%^[31]。丹麦于 2023 年 3 月启动了 Greensand 项目,将比利时捕集的 CO₂ 输送至丹麦北海 Nini West 枯竭油田进行封存,计划于 2025 年底/2026 年初实施 CO₂ 注入,初始阶段目标为每年封存 40 万吨 CO₂^[32]。

3.2 CO₂ 注入诱发地震机理及监测

诱发地震活动是 CO₂ 地质封存面临的主要风险之一,强化对注入诱发地震活动机理的认识、开展持续性的实时监测非常重要。美国国家研究理事会(NRC)发布《能源技术诱发地震可能性》^[33]报告,指出由于需要长时间向地下注入大量流体,CO₂ 地质封存具有诱发地震的可能,但由于目前大型项目较少,对其实际风险评估尚难开展,大规模项目诱发地震的可能性将需要持续研究。

理论研究方面,Zoback 等人^[34]认为地震很可能是由大量 CO₂ 注入大陆内部常见的脆性岩石引发。围绕注入气体诱发地震的机理,Wang 等人^[35]将实验室断层流体注入声发射试验和数值模拟相结合,

研究发现,断层的粗糙度减缓了注入诱发的断层滑动,降低了宏观滑动速度,应力差异性和断层粗糙度控制着注入引起的声发射的次中心分布、频率-震级特征和来源机制;而 Vilarrasa 等人^[36]通过分析表明,沉积底层比结晶基底软,很少受到临界应力;且 CO₂ 注入时过压相对较小,从而阻止了注入后诱发地震的发生,CCUS 不太可能引起有感地震。

在现场试验中,加州理工学院研究人员提出基于相对极性和振幅比例的光纤传感方法,能够更精确地确定一组地震的“复合”震源机制,甚至适用于更小震级的地震,为解决 CO₂ 封存过程中断层滑动、诱发地震等风险提供了可行的解决思路^[37]。Gan 等人^[38]以德克萨斯州 Cogdell 油田及其附近地区为研究对象,通过分析 6 个 USArray 台站的地震记录,发现注入气体可能是诱发德克萨斯州 Cogdell 油田及其附近地震的原因。Niyogi 等人^[39]通过在堪萨斯州一压裂现场安装地震仪,监测了超临界 CO₂ 注入之前、期间和之后的地震活动,发现 CO₂ 注入引起了数百次震动,震级从 -1~1 不等,且震颤信号的分布仅限于超临界 CO₂ 注入期间。

3.3 泄漏监测与环境评价

为确保 CO₂ 地质封存的利益最大化和灾害风险最小化,有必要对封存过程中可能出现的 CO₂ 泄漏风险进行灾害监测和环境影响评价。德国联邦内阁通过《CO₂ 封存法》评估报告^[40],提出要制定透明的监测、报告和核查制度,并评估碳封存技术的碳足迹。2023 年,美国能源部的资助计划中包含为海中玄武岩 CO₂ 封存的储层选择、CO₂ 输送、注入和监测提供详细的解决方案,开发一个低成本监测系统,涵盖地球物理监测和自动一致性评估等内容^[30]。在我国,《“十四五”能源领域科技创新规划》^[41]提出,突破 CO₂ 封存监测、泄漏预警等核心技术;《能源碳达峰碳中和标准化提升行动计划》^[42]提出,围绕能源领域 CCUS 有关技术研发和项目建设需求,推进 CO₂ 封存监测、泄漏预警等关键环节标准制修订。

目前,尚未出现已有商业规模 CCUS 项目 CO₂ 泄漏事件发生,研究天然 CO₂ 泄漏的风险可以指导评估 CO₂ 封存泄漏的潜在风险。为此,Roberts 等人^[43]通过意大利 286 次天然 CO₂ 的渗漏数据量化了 CO₂ 泄漏对人类健康的影响。针对 CO₂ 泄漏的环境影响,Blackford 等人^[44]使用声学、化学和生物技术,研究了受控海底 CO₂ 释放泄漏的可检测性和环境影响,发现小于 1 吨/天的小型 CO₂ 泄漏的足迹及对生物的影响范围仅限于几十米内,研究结果增进了对

泄漏环境敏感性的理解, 并提出建议海底碳封存使用配备化学传感器和声学传感器的移动自主水下航行器在靠近海床的位置进行监测, 为海底 CO₂ 封存提供了切实可行的监测策略。大数据、人工智能的发展有效推动了 CO₂ 泄漏与监测技术的进步, 英国提赛德大学宣布与其国际合作伙伴合作实施创新的机器学习和数字孪生技术^[45], 计划通过这些技术更准确地预测小型慢性泄漏和较大泄漏的位置、大小、数量和方向, 并最终通过人工智能采取预防措施。

3.4 CO₂ 封存与能源资源协同开发利用

由于 CO₂ 物化性质优越, 被广泛用于石油、地热、天然气水合物等能源资源的开发利用。CO₂ 封存与能源资源协同开发利用不仅可以提高能源资源的采收率, 而且可以实现 CO₂ 的安全高效封存。

3.4.1 CO₂ 驱油技术 (CO₂-EOR)

CO₂ 驱油 (CO₂ enhanced oil recovery, CO₂-EOR) 技术已经得到广泛应用和研究。CO₂-EOR 的成功应用需要开展岩石的流体数据、储层筛选和润湿性行为研究, Kumar 等人^[46]将已有的实验室研究与现场试验研究结合, 详细研究了石油资源的驱替机制, 以及 CCS 的存储介质描述。混相要求、石油特性及储层非均质性相关的复杂性等可能会影响驱油效率, 此外, 较重的 (黏性) 油也会对驱油效率造成影响。为此, Liu 等人^[47]提出将丙醇作为助溶剂提高 CO₂ 驱替稠油的采收率, 通过研究揭示了丙醇辅助 CO₂ 降低原油黏度的机理。

近年来, 气体泡沫被认为是提高石油采收率的最有效方法之一, CO₂ 泡沫可有效抑制窜流, 提高原油采收率和 CO₂ 封存效率。然而, 传统泡沫材料稳定性较低, 纳米材料作为合适的试剂被用于提高泡沫的稳定性。Chen 等人^[48]提出了一种耐高温泡沫体系, 发现纳米 SiO₂ 的引入对提高其发泡性能影响显著, 且该方法可将采收率提高 13.74%。Ahmadi 等人^[49]将合成的纳米复合材料 (NCs) 用于稳定十二烷基硫酸钠 (SDS) 和十六烷基三甲基溴化铵 (CTAB) 表面活性剂制备的泡沫, 研究发现了 SDS 和 CTAB 表面活性剂的最佳 NCs 浓度, 可使原油采收率提高 20%。Lu 等人^[50]通过填砂实验和分子动力学模拟验证了纳米二氧化硅气凝胶在提高原油采收率和 CO₂ 封存率方面的效果, 与单纯的 CO₂ 驱油相比, 添加纳米颗粒后, 原油的采收率从 49.39% 提高到 73.21%, CO₂ 封存率从 45.35% 显著提高到 83.37%。

3.4.2 CO₂ 驱热技术 (CO₂-EGS)

干热岩地热资源的开发利用是世界各国研究的热点问题, 增强型地热系统 (enhanced geothermal system, EGS) 是开采干热岩资源的主要方法^[51], 传统的 EGS 系统以水为取热介质。Brown^[52]于 2000 年首次提出使用超临界 CO₂ 代替水作为传热介质, 提高 EGS 换热效率的想法。Randolph 等人^[53]于 2011 年首次研究采用超临界 CO₂ 开采深部咸水层地热能, 提出了 CO₂ 羽流地热系统, 研究表明 CO₂-EGS 技术比以水为介质的开采系统效率更高^[54-55], 与传统技术相比优势明显。已有的 CO₂-EGS 研究以室内试验和数值模拟为主, 现场试验未见报道^[56]。

3.4.3 CO₂ 开采天然气水合物 (CO₂-NGH)

Ebinuma^[57]于 1993 年提出 CO₂ 置换开采天然气水合物 (CO₂ enhanced exploitation of natural gas hydrates, CO₂-NGH), 该方法不仅能保持水合物结构的稳定性, 还大幅降低了地质灾害风险。天然气水合物置换后可形成 CO₂ 水合物, 在天然气水合物开采的同时封存了 CO₂, 经济环境效益明显。随着各国实现对天然气水合物的试采, CO₂-NGH 备受关注^[58]。

当前, CO₂-NGH 的现场应用较少, 开发速度慢、置换效率低、海洋施工风险大等制约了其发展速度^[59]。CO₂ 置换法与热刺激结合可以有效提高置换效率, 未来天然气水合物的开发将是一个联合利用太阳能、风能、潮汐能等可再生能源进行 CO₂-NGH 的过程^[60]。

3.4.4 CO₂ 驱煤层气技术 (CO₂-ECBM)

CO₂ 驱替煤层气 (CO₂ enhanced coalbed methane recovery, CO₂-ECBM) 技术作为一种探索性技术, 有望在促进煤炭清洁高效利用、构建新型能源体系、助力实现“碳达峰碳中和”目标方面发挥积极作用。多个国家针对 CO₂-ECBM 技术开展了多年的探索实践, 先导性试验在一定程度上验证了其可行性。目前的研究涵盖了从宏观到微观尺度的多个方面。在宏观尺度, 开展了二元气体竞争吸附和气体置换实验, 研究了 CO₂ 与煤层气在煤层中的相互作用机制。在微观尺度, 利用核磁共振、扫描电子显微镜和计算机断层扫描技术等开展了多孔结构测试。此外, 还开展了关于 CO₂-ECBM 过程中煤渗透率和孔隙度变化的数学模型研究, 以及竞争吸附、扩散等多场多相耦合效应的研究^[61]。

3.4.5 CO₂ 驱气技术 (CO₂-EGR)

1992 年, Burgt 等人最早提出 CSEGR (carbon

sequestration with enhanced gas recovery, CSEGR) 技术^[62], 之后大量学者利用试验与数值模拟方法开展了广泛研究。截至目前, CO₂ 驱气技术 (carbon enhanced gas recovery, CO₂-EGR) 仍是研究热点。Gao 等人^[63]建立了井筒-储层-热-水-力学-扩散 (wellbore-reservoir-thermo-hydro-mechanical- diffusion, WR-THMD) 多物理场全耦合井筒-储层系统模型, 研究了液态 CO₂ 注入过程中井筒和储层中的传质、传热和气体物性变化, 并讨论了不同工程参数对提高 CH₄ 采收率和 CO₂ 封存效率的影响; Hamza 等人^[64]探讨了 CO₂ 在不同气藏 (砂岩、碳酸盐岩和页岩等) 中的吸附和解吸行为, 以及影响 CO₂ 驱替甲烷效率的温度、压力、注入速率等因素, 分析了 CO₂ 长期封存对储层岩石完整性的影响。

3.5 快速矿化封存

CO₂ 矿化封存作为有前景的减排策略, 通过将 CO₂ 注入可反应的岩石中, 使其与岩石中的矿物质发生反应, 形成稳定的碳酸盐矿物, 以达到永久固碳的目的^[65]。地球上广泛分布的基性-超级性岩 (包括大陆溢流玄武岩、洋底玄武岩和地幔橄榄岩等) 为 CO₂ 提供了巨大的封存空间^[66-68], 是实施 CO₂ 封存的重要选择。

利用基性-超级性岩碳酸盐化作用进行 CO₂ 封存的构想由 Seifritz^[69]于 1990 年提出。针对玄武岩矿化封存的研究表明, 将 CO₂ 注入玄武岩中, 可以实现 CO₂ 的安全稳定封存^[70], 与其他手段相比, 该技术具有永久矿化、封存量大、反应迅速、不易泄漏等优点^[71]。已有示范项目证实了玄武岩固碳的广阔发展前景。由美国太平洋西北国家实验室领导的 Wallula 项目于 2009 年启动, 2013 年共将 1 000 吨左右的 CO₂ 注入了深层玄武岩中, 在 CO₂ 注入 2 年后发现约 60% 的 CO₂ 发生了碳酸盐矿化^[72]。位于冰岛西南部 Hellisheiei 地热发电厂的 CarbFix 先导项目于 2012 年 1—3 月、6—8 月先后 2 次分别将 175 吨纯 CO₂ 和 73 吨 CO₂-H₂S 注入玄武岩储层中, Matter 等人通过同位素示踪剂推测研究表明, 95% 以上的 CO₂ 在 2 年内被矿化为碳酸盐矿物^[73], 再次证明了玄武岩 CO₂ 快速矿化封存的可行性。自 2023 年起, 腾讯公司与冰岛公司 CarbFix 合作推进 CO₂ 地下玄武岩快速矿化封存示范项目^[74]。然而, 大规模的 CO₂ 矿化封存项目还不多见^[65], 需要更多的努力来加速其部署。

在橄榄岩矿化封存方面, Kelemen 等人^[75-76]估

算了阿曼 Semail 蛇绿岩地幔橄榄岩中矿物原位碳酸盐化封存 CO₂ 的巨大潜力, 每年通过原位矿化可以消耗 1 万~10 万吨 CO₂, 若将其中所有的 Mg²⁺ 转变为碳酸盐矿物, 可以封存 70 万亿吨 CO₂。橄榄石、辉石、斜长石和火山玻璃的 Ca²⁺ 和溶解实验显示基性-超级性岩矿物溶解速率受流体 pH 值的影响, 橄榄石在酸性条件下的溶解速率最快, 成为非原位矿物矿化封存的最佳选择^[65,77]。

水在调节 CO₂ 矿化效率方面的关键作用已得到广泛认可, 但对其潜在机制的理解仍然不够全面。研究人员通过理论、实验及数值模拟等对水介导的矿化机理开展了相关研究。Qomi 等人^[78]讨论了在纳米吸附水膜中, CO₂ 矿化水介导碳酸盐化的机理反应途径, 发现第一性原理马尔可夫状态模型在阐明水溶液中的复杂反应动力学方面具有巨大的潜力。Gao 等人^[79]采用实验和原子模拟相结合的方法, 阐明了湿度驱动钙质矿物矿化动力学的复杂机制。Li 等人^[80]利用分子动力学模拟, 结合巨正则蒙特卡罗技术研究了不同水膜厚度 (反应相对湿度) 和孔径对碱性固体氢氧化钙中多孔系统中的 CO₂ 吸附情况。Li 等人^[81]将从头分子动力学 (ab initio molecular dynamics, AIMD) 模拟和马尔可夫状态模型 (markov state models, MSM) 结合, 阐明了 CO₂ 在超临界水中的反应机制。

4 结论与展望

4.1 结论

在碳中和目标与能源转型双重驱动下, CCUS 的发展受到前所未有的关注。世界主要国家/地区积极部署相关战略推进 CO₂ 地质封存与利用的实施, 有效推动了项目建设与科学研究的进步。在全球碳中和与能源转型背景下, 预计未来该领域的研究成果仍会不断涌现。当前研究热点主要集中于枯竭油气藏封存、诱发地震机理与监测、泄漏监测与环境评价、CO₂ 封存与能源资源协同开发利用、快速矿化封存等方面。

4.2 展望

我国在该领域的项目建设与科学研究取得了一定进展, 但仍需突破复杂系统理论与产业化瓶颈。为有效推进我国 CO₂ 地质封存与利用技术的高质量发展, 未来应强化以下方面的发展, 以应对 CO₂ 减排挑战。

1) 开展复杂多场多相 CO₂ 地质封存与利用研究。CO₂ 地质封存是一个复杂的多场多相作用过程,

涉及渗流场、应力场、温度场和化学场的耦合,以及气相、液相和超临界态间的多相流动。研究面临多场耦合机制复杂、多相流动实验难度大等挑战,因此需要深化对复杂多场多相作用下 CO₂地质封存机理的认识,开展多尺度的试验研究,开发精确的多尺度耦合模型,攻关多场耦合数值模拟、多相流动实验等关键技术难题,发展高精度的数值模拟方法,研究多场耦合作用下的 CO₂-水-岩相互作用机制和多相流动、相态转化与流体运移规律。

2) 构建全流程智能化 CO₂ 地质封存与利用系统。将大数据、人工智能和数字孪生等技术与 CCUS 结合,为 CCUS 的发展注入新质生产力,促进 CCUS 产业的高质量发展。可以结合大数据、人工智能与机器学习等构建跨学科的地质、地球物理与工程等数据库;开展基于物联网的实时监测数据传输、结合大数据分析,进行储层表征、潜力评估和运移规律识别;将数字孪生技术用于构建虚拟的 CCUS 系统,利用机器学习预测地层应力变化、优化注入策略、构建智能化泄漏监测与预警控制系统,实现从数据采集、分析到决策支持的全流程智能化。

3) 探索多元化的 CCUS 产业发展模式与路径。随着各国加强对碳排放的管控、碳税和碳价的上涨,采用 CO₂ 进行规模化驱替应用和能源资源的协同化开发利用,会使 CCUS 成本显著降低,并带动相关产业的发展,应用前景广阔。研发大规模低成本 CO₂ 封存技术,开展非纯净 CO₂ 的地质封存与利用;将 CCUS 与天然气水合物等可再生能源开发利用、合成氨及制氢等技术研发、储能等技术进行集成,探索 CCUS 与新能源、新技术、新业态的集成,拓展 CCUS 技术应用领域,形成低碳能源系统解决方案;建设 CCUS 产业集群,发展基于工业废弃物的高效 CO₂ 矿化等技术,推动建材及化工等产业的可持续发展,探索“CCUS+”产业新模式。

[参考文献]

- [1] ROGELJ J, DEN ELZEN M, HÖHNE N, et al. Paris agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C[J]. *Nature*, 2016, 534(7609): 631.
- [2] 秦阿宁, 孙玉玲. 国际碳捕集、利用与封存发展战略与科技态势分析[J]. *中国科学院院刊*, 2024, 39(8): 1486-1496.
QIN Aning, SUN Yuling. International development strategy and analysis of science and technology trends in carbon capture, utilization, and storage (CCUS)[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2024, 39(8): 1486-1496.
- [3] The White House. Chair's summary of the major economies forum on energy and climate held by president Joe Biden[R]. (2023-04-21)[2025-01-01]. <https://bidenwhitehouse.archives.gov/briefing-room/state-ments-releases/2023/04/21/chairs-summary-of-the-major-economies-forum-on-energy-and-climate-held-by-president-joe-biden-2/>.
- [4] IEA. Credible pathways to 1.5°C-Four pillars for action in the 2020s[R]. Paris, 2023: 1.
- [5] 生态环境部环境规划院. 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]. 2024: 1.
Chinese Academy of Environmental Planning. Economic feasibility study on regional carbon dioxide geological storage in China: China carbon dioxide capture, utilization and storage (CCUS) annual report (2024)[R]. 2024: 1.
- [6] EWING J, MARTIN R, AMY P, et al. Pathways to NetZero for the US energy transition[R]. Durham, NC: Nicholas Institute for Energy, Environment & Sustainability, Duke University, 2022: 1.
- [7] DOE. Industrial decarbonization roadmap[R]. (2022-09-01)[2025-01-01]. <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-09/Industrial%20Decarbonization%20Roadmap.pdf>.
- [8] European Commission. Towards an ambitious industrial carbon management for the EU[EB/OL]. (2024-02-06)[2025-01-28]. <https://eurlex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2024%3A62%3AFIN&qid=1707312980822>.
- [9] CCI Business. Lancement d'une consultation sur la stratégie nationale CCUS[EB/OL]. (2021-10-19)[2025-01-28]. <https://hautsdefrance.ccbusiness.fr/sous-traitance-industrielle/consultation-nationale-sur-la-strategie-ccus-capture-stockage-et>.
- [10] GOV.UK. The UK department for energy security and net zero. net zero strategy: build back greener[EB/OL]. (2021-10-19)[2025-01-28]. <https://www.gov.uk/government/publications/net-zero-strategy>.
- [11] Environment and Climate Change Canada. 2030 emissions reduction plan: Canada's next steps for clean air and a strong economy[EB/OL]. (2022-03-29)[2025-01-28]. <https://www.canada.ca/content/dam/eccc/documents/pdf/climate-change/erp/Canada-2030-EmissionsReduction-Plan-eng.pdf>.
- [12] Public Law. Inflation Reduction Act of 2022 (IRA)[EB/OL]. (2022-08-16)[2025-04-20]. <https://www.govinfo.gov/content/pkg/PLAW-117publ169/uslm/PLAW-117publ169.xml>.
- [13] Global CCS Institute. The global status of CCS: 2023[R]. Australia, 2023: 1.
- [14] Global CCS Institute. Global status of CCS 2024[EB/OL]. (2024-10-15)[2025-01-28]. <https://www.globalccsinstitute.com/news-media/press-room/media-rel-eases/installed-ccs-capacity-on-track-to-double-as-governments-and-industry-collaborate-to-advance-projects/>.
- [15] 王一欢, 詹新宇. 政府补贴策略优化对企业自主创新的激励效应——基于科技治理体系现代化视角[J]. *学习与实践*, 2025(2): 76-87.
WANG Yihuan, ZHAN Xinyu. Incentive effect of optimizing government subsidy strategies on independent innovation of enterprises: based on modernization of scientific and technological governance system[J]. *Study*

- and Practice, 2025(2): 76-87.
- [16] 中华人民共和国中央人民政府. 国家发展改革委 市场监管总局 生态环境部关于进一步强化碳达峰碳中和标准计量体系建设行动方案(2024-2025年)的通知: 发改环资〔2024〕1046号[A/OL]. (2024-07-14)[2024-11-18]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202408/content_6967197.htm.
The State Council the People's Republic of China. Notice of the ministry of ecology and environment of the general administration of market supervision of the national development and reform commission on further strengthening the action plan for the construction of the carbon peak carbon neutral standard measurement system(2024-2025): FGHZ〔2024〕No.1046[A/OL]. (2024-07-14)[2024-11-18]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202408/content_6967197.htm.
- [17] 祁生文, 郑博文, 王赞, 等. 二氧化碳地质利用与封存场址的地质评价[J]. 中国科学: 地球科学, 2023, 53(9): 1937-1957.
QI Shengwen, ZHENG Bowen, WANG Zan, et al. Geological evaluation for the carbon dioxide geological utilization and storage (CGUS) site[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2023, 53(9): 1937-1957.
- [18] 中国地质调查局. 工人日报: 我国海域二氧化碳地质封存预测潜力达 2.58 万亿吨[EB/OL]. (2023-01-16)[2025-01-01]. https://www.cgs.gov.cn/xwl/ddyw/202301/t20230116_723106.html.
China Geological Survey. Workers' Daily: The prediction potential of geological storage of carbon dioxide in China's sea area reaches 258 trillion tons[EB/OL] (2023-01-16)[2025-01-01]. https://www.cgs.gov.cn/xwl/ddyw/202301/t20230116_723106.html.
- [19] ZHOU X, WU S, BOSIN A, et al. Evaluation of CO₂ hydrate storage potential in the Qiongdongnan Basin via combining the phase equilibrium mechanism and the volumetric method[J]. *Advances in Geo-Energy Research*, 2024, 11(3): 220-229.
- [20] 齐鲁网. 我国首个百万吨级 CCUS 项目全面建成投产每年可减排二氧化碳 100 万吨 相当于植树近 900 万棵[EB/OL]. (2022-08-29)[2025-02-01]. <https://sdwx.iqilu.com/w/article/YS0yMS0xMzI4NTg4Mw.html>.
Iqilu.com. China's first million-ton CCUS project has been fully completed and put into operation, which can reduce carbon dioxide emissions by 1 million tons annually, equivalent to planting nearly 9 million trees[EB/OL]. (2022-08-29)[2025-02-01]. <https://sdwx.iqilu.com/w/article/YS0yMS0xMzI4NTg4Mw.html>.
- [21] 国家能源局. 我国首个百万吨级 CCUS 项目全面建成投产[EB/OL]. (2022-09-02)[2024-11-18]. http://www.nea.gov.cn/2022-09/02/c_1310658658.htm.
National Energy Administration. China's first million-ton CCUS project was fully completed and put into operation[EB/OL]. (2022-09-02)[2024-11-18]. http://www.nea.gov.cn/2022-09/02/c_1310658658.htm.
- [22] 新华社. 我国海上首个百万吨级二氧化碳封存工程投用[EB/OL]. (2023-06-01)[2024-11-18]. https://www.gov.cn/yaowen/tupian/202306/content_6884126.htm#1.
Xinhua News Agency. China's first offshore carbon dioxide storage project was put into operation[EB/OL]. (2023-06-01)[2024-11-18]. https://www.gov.cn/yaowen/tupian/202306/content_6884126.htm#1.
- [23] 孙腾民, 刘世奇, 汪涛. 中国二氧化碳地质封存潜力评价研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(11): 10-20.
SUN Tengmin, LIU Shiqi, WANG Tao. Research advances on evaluation of CO₂ geological storage potential in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(11): 10-20.
- [24] AMINU M D, NABAVI S A, ROCHELLE C A, et al. A review of developments in carbon dioxide storage[J]. *Applied Energy*, 2017, 208: 1389-1419.
- [25] 刘延锋, 李小春, 方志明, 等. 中国天然气田 CO₂ 储存容量初步评估[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2277-2281.
LIU Yanfeng, LI Xiaochun, FANG Zhiming, et al. Preliminary estimation of CO₂ storage capacity in gas fields in China[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(12): 2277-2281.
- [26] 刘延锋, 李小春, 白冰. 中国 CO₂ 煤层储存容量初步评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2947-2952.
LIU Yanfeng, LI Xiaochun, BAI Bing, et al. Preliminary estimation of CO₂ storage capacity of coalbeds in China[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(16): 2947-2952.
- [27] ZOBACK M, SMIT D. Meeting the challenges of large-scale carbon storage and hydrogen production[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2023, 120(11): e2202397120.
- [28] WEI B, WANG B W, LI X, et al. CO₂ storage in depleted oil and gas reservoirs: a review[J]. *Advances in Geo-Energy Research*, 2023, 9(2): 76-93.
- [29] JENKINS C R, COOK P J, ENNIS-KING J, et al. Safe storage and effective monitoring of CO₂ in depleted gas fields[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, 109(2): 35-41.
- [30] DOE. DOE invests \$2.7 million in carbon capture and storage technologies, working alongside international partners to reduce global greenhouse gas emissions[EB/OL]. (2023-02-21)[2025-01-01]. <https://www.energy.gov/fecm/articles/doe-invests-27-million-carbon-capture-and-storage-technologies-working-alongside>.
- [31] North Sea Transition Authority. Net zero boost as carbon storage licences accepted[EB/OL] (2023-09-15)[2025-01-01]. <https://www.nstauthority.co.uk/news-publications/net-zero-boost-as-carbon-storage-licences-accepted/>.
- [32] GREENSAND. First European built offshore CO₂ carrier to be christened and launched on May 14[EB/OL] (2025-01-05)[2025-04-27]. <https://greensandfuture.com/news/first-european-built-offshore-co2-carrier-to-be-christened-and-launched-on-may-14>.
- [33] National Research Council. Induced seismicity potential in energy technologies[R]. Washington, DC: The National Academies Press, 2013: 1.
- [34] ZOBACK M D, GOREFICK S M. Earthquake triggering and large-scale geologic storage of carbon dioxide[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(26): 10164-10168.
- [35] WANG L, KWIA TEK G, RENARD F, et al. Fault roughness controls injection-induced seismicity[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2024, 121(3): e2310039121.
- [36] VILARRASA V, CARRERA J. Geologic carbon storage is unlikely to trigger large earthquakes and reactivate faults through which CO₂ could leak[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(19): 5938-5943.

- [37] LI J, ZHU W, BIONDI E, et al. Earthquake focal mechanisms with distributed acoustic sensing[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 4181.
- [38] GAN W, FROHLICH C. Gas injection may have triggered earthquakes in the Cogdell oil field, Texas[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(47): 18786-18791.
- [39] NIYOGI S, GHOSH A, KUMAR A, et al. Tremor signals during fluid injection are generated by fault slip[J]. *Science*. 2023, 381(6657): 553-558.
- [40] Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action. Federal cabinet adopts evaluation report on the carbon dioxide storage act[EB/OL]. (2022-12-21) [2025-01-01]. <https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Pressemitteilungen/2022/12/20221221-federal-cabinet-adopts-evaluation-report-on-the-carbon-dioxide-storage-act.html>.
- [41] 国家能源局、科学技术部. “十四五”能源领域科技创新规划 [EB/OL]. (2021-11-29)[2025-01-01]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-04/03/content_5683361.htm.
National Energy Administration、Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China. 14th Five-Year Plan for scientific and technological innovation in the field of energy[EB/OL]. (2021-11-29)[2025-01-01]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-04/03/content_5683361.htm.
- [42] 国家能源局. 国家能源局关于印发《能源碳达峰碳中和标准化提升行动计划》的通知 [EB/OL] (2022-10-09)[2024-11-27]. http://www.nea.gov.cn/2022-10/09/c_1310668927.htm.
National Energy Administration. Notice of the National Energy Administration on issuing the action plan for peaking energy carbon carbon neutrality standardization[EB/OL]. (2021-11-29)[2025-01-01]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-04/03/content_5683361.htm.
- [43] ROBERTS J J, WOOD R A, HASZELDINE R S. Assessing the health risks of natural CO₂ seeps in Italy[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(40): 16545-16548.
- [44] BLACKFORD J, STAHL H, BULL J M, et al. Detection and impacts of leakage from sub-seafloor deep geological carbon dioxide storage[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(11): 1011-1016.
- [45] Teesside University. Innovative research to detect leaks in underground carbon dioxide storage[EB/OL]. (2022-08-11)[2025-01-01]. https://www.tees.ac.uk/sections/news/pressreleases_story.cfm?story_id=7998.
- [46] KUMAR N, VERMA A, AHMAD T, et al. Carbon capture and sequestration technology for environmental remediation: a CO₂ utilization approach through EOR[J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2024, 234: 212619.
- [47] LIU Y, RUI Z, YANG T, et al. Using propanol as an additive to CO₂ for improving CO₂ utilization and storage in oil reservoirs[J]. *Applied Energy*, 2022, 311: 118640.
- [48] CHEN X, ZHANG Q F, TRIVEDI J, et al. Investigation on enhanced oil recovery and CO₂ storage efficiency of temperature-resistant CO₂ foam flooding[J]. *Fuel*, 2024, 364: 130870.
- [49] AHMADI A, MANSHAD A K, AKBARI M, et al. Nano-stabilized foam for enhanced oil recovery using green nanocomposites and anionic surfactants: an experimental study[J]. *Energy*, 2024, 290: 130201.
- [50] LU T, LI Z, DU L. Enhancing foam stability and addressing asphaltene deposition for improved oil recovery in CCUS applications using aerogel nanoparticles[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 481: 148290.
- [51] GARCIA J, HARTLINE C, WALTERS M, et al. The Northwest Geysers EGS demonstration project, California: Part 1: characterization and reservoir response to injection[J]. *Geothermics*, 2016, 63: 97-119.
- [52] BROWN D W. A hot dry rock geothermal energy concept utilizing supercritical CO₂ instead of water[C]// *Proceedings of the Twenty-fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. California: Stanford University, 2000: 233-238.
- [53] RANDOLPH J B, SAAR M O. Combining geothermal energy capture with geologic carbon dioxide sequestration[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011(10): 10401-1-7.
- [54] NAIR V C, PRASAD S K, KUMAR R, et al. Energy recovery from simulated clayey gas hydrate reservoir using depressurization by constant rate gas release, thermal stimulation and their combinations[J]. *Applied Energy*, 2018, 225: 755-768.
- [55] XU T F, FENG G H, HOU Z Y, et al. Wellbore-reservoir coupled simulation to study thermal and fluid processes in a CO₂-based geothermal system: identifying favorable and unfavorable conditions in comparison with water[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(11): 6797-6813.
- [56] 蒋政, 舒彪, 谭静强. 二氧化碳基增强型地热系统储层换热研究现状及展望[J]. *地学前缘*, 2024, 31(6): 235-251.
JIANG Zheng, SHU Biao, TAN Jingqiang. Heat transfer in geothermal reservoir of CO₂-based enhanced geothermal systems current research status and prospects[J]. *Earth Science Frontiers*, 2024, 31(6): 235-251.
- [57] EBINUMA T. Method for dumping and disposing of carbon dioxide gas and apparatus therefor: US5261490A[P]. (1993-11-16) [2025-03-04].
- [58] HUANG L, NING Z, WANG Q, et al. Effect of organic type and moisture on CO₂/CH₄ competitive adsorption in kerogen with implications for CO₂ sequestration and enhanced CH₄ recovery[J]. *Applied Energy*, 2018, 210: 28-43.
- [59] 陈浩, 颜克凤, 李小森, 等. CO₂置换 CH₄水合物技术中主、客体分子间作用的 DFT 研究[J]. *北京化工大学学报(自然科学版)*, 2021, 48(2): 31-40.
CHEN Hao, YAN Kefeng, LI Xiaosen, et al. A DFT study of the interaction between host and guest molecules in the replacement of CH₄ in natural gas hydrate by CO₂[J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 48(2): 31-40.
- [60] WANG Y, LANG X, FAN S, et al. Review on enhanced technology of natural gas hydrate recovery by carbon dioxide replacement[J]. *Energy & Fuels*, 2021, 35(5): 3659-3674.
- [61] FAN C J, YANG L, SUN H, et al. Recent advances and perspectives of CO₂-enhanced coalbed methane: experimental, modeling, and technological

- develop-ment[J]. *Energy & Fuels*, 2023, 37(5): 3371-3412.
- [62] BOUTKAN V K, VAN DER BURGT M J, CANTLE J. Carbon dioxide disposal from coal-based IGCC's in depleted gas fields[J]. *Energy Conversion and Management*, 1992, 33(5/8): 603-610.
- [63] GAO X, YANG S, TIAN L, et al. System and multi-physics coupling model of liquid-CO₂ injection on CO₂ storage with enhanced gas recovery (CSEGR) framework[J]. *Energy*, 2024, 294: 130951.
- [64] HAMZA A, HUSSEIN I A, AL-MARRI M J, et al. CO₂ enhanced gas recovery and sequestration in depleted gas reservoirs: a review[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 196: 107685.
- [65] SNÆBJÖRNSDÓTTIR S O, SIGFÚSSON B, MARIENI C, et al. Carbon dioxide storage through mineral carbonation[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(2): 90-102.
- [66] MATTER J M, KELEMEN P B. Permanent storage of carbon dioxide in geological reservoirs by mineral carbonation[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(12): 837-841.
- [67] KELEMEN P B, MATTER J M, STREIT E E, et al. Rates and mechanisms of mineral carbonation in peridotite: Natural processes and recipes for enhanced, in situ CO₂ capture and storage[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2011, 39: 545-576.
- [68] WOLFF-BOENISCH D, GISLASON S R, OELKERS E H. The effect of crystallinity on dissolution rates and CO₂ consumption capacity of silicates[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70: 858-8770.
- [69] SEIFRITZ W. CO₂ disposal by means of silicates[J]. *Nature*, 1990, 345: 486.
- [70] GOLDBERG D S, TAKAHASHI T, SLAGLE A L. Carbon dioxide sequestration in deep-sea basalt[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(29): 9920-9925.
- [71] OELKERS E H, GISLASON S R, MATTER J. Mineral carbonation of CO₂[J]. *Elements*, 2008, 4(5): 333-337.
- [72] WHITE S K, SPANE F A, SCHAEF H T, et al. Quantification of CO₂ mineralization at the wallula basalt pilot project[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(22): 14609-14616.
- [73] MATTER JUERG M, MARTIN S, SANDRA Ó, et al. Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions[J]. *Science*, 2016, 352(6291): 1312-1314.
- [74] 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]. 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: 1. ZHANG Xian, YANG Xiaoliang, LU Xi, et al. China's annual report on CCUS(2023)[R]. China 21st Century Agenda Management Center, Global Carbon Capture and Storage Institute, Tsinghua University, 2023: 1.
- [75] KELEMEN P B, MATTER J M. In situ carbonation of peridotite for CO₂ storage[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(45): 17295-17300.
- [76] KELEMEN P B, MANNING C E. Reevaluating carbon fluxes in subduction zones, what goes down, mostly comes up[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(30): E3997-E4006.
- [77] RIMSTIDT J D, BRANTLEY S L, OLSEN A A. Systematic review of forsterite dissolution rate data[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, 99: 159-178.
- [78] QOMI M J A, MILLER Q R S, ZARE S. Molecular-scale mechanisms of CO₂ mineralization in nanoscale interfacial water films[J]. *Nature Reviews Chemistry*, 2022(9): 6.
- [79] GAO Y N, TAO Y, LI G, et al. Moisture-driven carbonation kinetics for ultrafast CO₂ mineralization[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2024, 122(1): e2418239121.
- [80] LI G, TAO Y, ZHU X P, et al. Optimal CO₂ intake in metastable water film in mesoporous materials[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 10790.
- [81] LI C, YAO Y, PAN D. Unveiling hidden reaction kinetics of carbon dioxide in supercritical aqueous solutions[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2025, 122(1): e2406356121.

(责任编辑 李园)