

CO₂封存方法研究进展及展望

张世豪，邓欣颖，段浩然，朱鸿亚，刘佳奕

江西理工大学 矿业工程学院，江西 赣州 341000

DOI: 10.61369/RTED.2025210035

摘要：CO₂封存技术是应对全球气候变化、实现碳中和的关键手段，目前已形成地质封存、生物封存、水合物封存、溶解封存及矿物碳化等多种技术路径。地质封存（含咸水层、枯竭油气藏、难以开采煤层）成熟度高，适用于大规模应用：枯竭油气藏封存可结合驱油技术增收益，煤层封存能同步回收甲烷，但二者均存泄露与成本难题。生物封存依托微生物固碳，兼具环保与资源价值，却受培养条件和能耗限制。水合物封存稳定性强，仍处实验室或中试阶段；溶解封存容量大，环境影响尚不明确。当前各类技术普遍面临成本、风险及工程化瓶颈，部分依赖资源或政策。未来需聚焦技术融合、低成本一体化、全生命周期风险与生态管控，推动规模化应用，支撑全球碳中和。

关键词：CO₂封存；研究阶段；地质封存；碳中和

Research Progress and Prospects of CO₂ Sequestration Methods

Zhang Shihao, Deng Xinying, Duan Haoran, Zhu Hongya, Liu Jiayi

Jiangxi University of Science and Technology School of Mining Engineering Ganzhou, Jiangxi, 341000

Abstract : Carbon dioxide sequestration is a key to addressing global climate change and achieving carbon neutrality, with technical pathways including geological (saline aquifers, depleted oil/gas reservoirs, uneconomical coal seams), biological, hydrate, dissolution and mineral carbonation sequestration. Geological sequestration is mature for large-scale use but faces leakage and cost issues; others are constrained by conditions, in early stages or have unclear environmental impacts. Current technologies suffer from cost, risk and engineering bottlenecks, so future efforts should focus on technology integration, low-cost solutions and full-lifecycle management to drive large-scale application.

Keywords : CO₂ storage; research stage; geological storage; carbon neutrality

引言

CO₂封存技术是应对全球气候变化、实现碳中和目标的关键手段之一，通过将工业排放或大气中的CO₂捕获并稳定储存在特定载体中，可有效降低大气CO₂浓度^[1]。目前已发展出多种封存技术路径，包括地质封存（咸水层、枯竭油气藏、难以开采煤层）、生物封存、水合物封存及溶解封存等^[2]。本文系统综述各类技术的研究进展、核心特征、现存瓶颈及未来方向，为技术优化与工程应用提供参考。

一、咸水层封存

将CO₂封存到深层咸水层是地质封存的重要方式，凭借高渗透性和大孔隙体积的储层构造，能容纳大量CO₂，减少注入井数量并缓解压力消散。超临界CO₂注入后会置换孔隙咸水，与岩石、地下水发生反应，引发矿物生成或溶解，进而改变储层特性。长期稳定封存需依赖具备高密封性盖层的大型含水层存储盆地，低渗透性盖层是防止CO₂溢出的关键^[3]。

CO₂在咸水层中的地下圈闭系统主要有四种^[4]：构造 / 地层圈闭、岩石孔隙圈闭、溶解圈闭、矿物圈闭。目前研究存在如下局限：多数潜在咸水层缺乏专用CO₂输送管网与注入井网，地质潜力难以转化为工程应用；CO₂—盐水—岩石体系的长期化学作用对盖层密封性的演化规律尚未厘清，无法构建有效的长期安全评估模型；成本评估未纳入全流程支出，难以客观对比经济可行。

未来需结合区域地质特征规划基础设施协同布局，构建低成本工程化体系，通过室内模拟与现场监测耦合厘清盖层演化机制，建立全流程成本核算框架。

二、枯竭油气藏封存

将CO₂封存到枯竭油气藏是目前最成熟有效的碳封存技术之一^[5]。全球常规油田平均采收率约40%，大量滞留原油为 EOR 技术提供了应用动力。在提升采收率技术中，CO₂因能降低原油粘度且成本低于液化天然气，成为最优气体注入选择，美国通过该技术已实现日均增产约26万桶原油。加拿大 Weyburn-Midale 项目证实^[6]，CO₂收集既能实现驱油增产，又能完成碳封存，可开采常规手段无法获取的原油，并延长油田开采时间20至25年。

该技术存在潜在风险，储层封堵不充分时油井可能成为CO₂

排泄通道；注入过度加压可能破坏盖层；埋深小于800m的浅层油气田不适宜封存。现有研究瓶颈包括杂质协同效应及阈值浓度未确定、废弃井密封性检测与修复技术不成熟。未来需建立杂质控制标准体系，完善监管法规，研发废弃井完整性检测与修复技术，构建全生命周期风险管控体系。

三、难以开采的煤层封存

利用难以开采的煤层封存CO₂，核心依据是煤对气相CO₂的吸附能力高于甲烷（CH₄）。煤层的割理系统提供渗透性，基质微孔结构可大量吸附气体，该技术能在永久封存CO₂的同时提升甲烷产量，实现碳封存与非常规页岩气开采的双重收益^[7]。

已有研究^[8]证实CO₂在煤基质中的扩散能力优于CH₄和N₂。三维地质模型模拟显示^[9]，注入的过程里煤基质的膨胀可能会致使渗透率的损失，但CO₂的注入是可行的，同时高挥发分烟煤在20年内可实现大规模CO₂封存与甲烷回收，但煤基质膨胀会导致渗透率下降。

该技术的优势在于甲烷产量可部分或完全抵消封存成本，但也存在局限性：并非所有煤层都适宜开采，无甲烷储层的项目经济性大幅减弱；甲烷温室效应强于CO₂，需对驱替出的甲烷进行二次处理；全球煤层封存潜力远低于油气藏和深部咸水层。现有研究瓶颈包括煤层非均质性影响定量分析缺乏、煤体膨胀导致渗透率下降。

四、生物封存

生物封存通过细菌、真菌、藻类等生物载体，将CO₂以固态碳酸盐形式或生物质形式封存^[10]，兼具碳减排与资源利用价值。真菌分为腐生真菌和菌根真菌，腐生真菌参与矿化作用和碳循环但分解率较低。藻类是高效光合生物，体型涵盖宏观与微观。大型藻类可用于生物柴油生产；微型藻类通过卡尔文循环固碳，固碳效率惊人，每公斤微藻可固定1.84公斤CO₂，部分品种耐碳能力突出。理想藻类需具备高碳捕获速率、耐受高浓度CO₂等特性，在排放源附近规模化培养可降低局部CO₂浓度，同时生产高价值产品。

生物封存的优势显著：单位面积碳封存能力是森林的10–50倍；可产生生物柴油、饲料蛋白等产品。但是，相关低能耗采收技术尚未成熟，碳减排效益被部分抵消；生物载体抗逆性不足，极端环境下生物量易骤降；产品提取工艺复杂，未形成规模化产业链。未来需研发低能耗采收与脱水技术，通过基因编辑培育抗逆性强的高固碳生物载体，开发藻基多产物联产工艺，构建闭环产业链。

五、水合物封存

CO₂水合物封存是极具潜力的技术，核心优势在于封存稳定性强、容量大且泄露风险极低。该技术利用水分子晶格捕获CO₂分子，在适宜压力和温度条件下快速形成水合物，且水合物顶层结构的裂缝可通过自密封效应修复。应用场景涵盖地下地质封存与海洋封存，尤其适用于寒冷海床下浅层沉积物或大范围冰状水合物区域。

CO₂水合物的封存机制核心是浮力驱动液态CO₂运移，最终被

不可渗透水合物盖层封闭。美国能源部提出的CO₂-EGR技术，通过向甲烷水合物沉积层注入CO₂，置换出CH₄并形成CO₂水合物，实现碳封存与能源回收协同，但该技术的有效性仍需更多研究验证。该技术优势突出，但目前仍处于理论建模和实验室规模实验阶段，大规模商业化应用面临诸多挑战：钻探含水合物沉积层可能引发温压波动，导致地层失稳；CO₂-CH₄置换机制、水合物盖层形成长表征等核心问题尚未解决。未来需在典型场景开展中试试验，研发多参数实时监测系统，深化置换动力学研究，优化工艺参数。

六、总结与展望

CO₂封存技术呈现多元化发展趋势，各有优势与局限。地质封存技术成熟度较高，适合大规模应用，但面临泄露风险与成本挑战；生物封存兼具环保与资源产出价值，但受限于培养条件与能耗；水合物封存稳定性强，但技术仍处于实验室或中试阶段；溶解封存容量大，却存在环境影响不确定性。未来CO₂封存技术的发展需聚焦三大方向：进行技术融合与优化，结合不同技术优势，开发协同封存模式，提升封存效率与安全性；研发低能耗、低成本的捕获—运输—封存一体化技术，完善基础设施布局；建立全生命周期风险监测与评估体系，实现碳减排与生态保护的良性互动。

参考文献

- [1] Zitian Lin, Yangmin Kuang, CA1, Wuqin Li, et al. Research status and prospects of CO₂ geological sequestration technology from onshore to offshore: A review[J]. Earth-Science Reviews, 2024, Vol.258: 104928.
- [2] Na, J (Na, Jin), et al. An integrated study of fluid - rock interaction in a CO₂-based enhanced geothermal system: A case study of Songliao Basin, China[J]. Applied Geochemistry, 2015, Vol.59(1): 166–177.
- [3] Buttinelli, M, Procesi, et al. The geo-database of caprock quality and deep saline aquifers distribution for geological storage of CO₂ in Italy[J]. Energy, 2011, Vol.36(5): 2968–2983.
- [4] Gregory Tarte, Mwenketishi, Hadj Benkreira, Nejat Rahamanian. A Comprehensive Review on Carbon Dioxide Sequestration Methods[J]. Energies, 2023, Vol.16(24): 7971.
- [5] Zangeneh, H (Zangeneh, Hossein), et al. Coupled optimization of enhanced gas recovery and carbon dioxide sequestration in natural gas reservoirs: Case study in a real gas field in the south of Iran[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2013, Vol.17: 515–522.
- [6] White, D.. Monitoring CO₂ storage during EOR at the Weyburn-Midale Field[J]. The Leading Edge, 2009, Vol.28(7): 838.
- [7] Gregory Mwenketishi, Hadj Benkreira, Nejat Rahamanian. Carbon Dioxide Sequestration Methodologies—A Review[J]. American Journal of Climate Change, 2023, (4): 579–627.
- [8] OJ04/02156 Selective transport of CO₂, CH₄, and N₂ in coals: insights from modeling of experimental gas adsorption data: Cui, X. et al. Fuel, 2004, 83, (3), 293 – 303[J]. Fuel and Energy Abstracts, 2004, Vol.45(4): 296.
- [9] Omotilewa, Oluwafemi John, CAA, Panja, et al. Evaluation of enhanced coalbed methane recovery and carbon dioxide sequestration potential in high volatile bituminous coal[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, Vol.91: 103979.
- [10] Parissa Mirjafari, Koorosh Asghari, Nader Mahinpey. Investigating the Application of Enzyme Carbonic Anhydrase for CO₂Sequestration Purposes[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2007, Vol.46(3): 921–926.