

玄武岩CO₂矿化封存监测方法和技术体系研究

廖松林, 马诗佳, 夏菖佑, 高志豪, 刘牧心, 梁希, 戴青, 黄新我, 蒋泽原, 于冰清

Research on monitoring methods and technical systems of CO₂ mineralization in basalt formation

LIAO Songlin, MA Shijia, XIA Changyou, GAO Zhihao, LIU Muxin, LIANG Xi, DAI Qing, HUANG Xinwo, JIANG Zeyuan, and YU Bingqing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202308038>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

玄武岩封存CO₂技术方法及其进展

Research progress on key technologies of CO₂ storage in basalts

李万伦, 徐佳佳, 贾凌霄, 马冰, 陈晶 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 164–173

新疆准东地区场地尺度二氧化碳地质封存联合深部咸水开采潜力评估

A study of the potential of field-scale of CO₂ geological storage and enhanced water recovery in the eastern Junggar area of Xinjiang

马鑫, 李旭峰, 文冬光, 罗兴旺, 刁玉杰, 杨国栋, 尹书郭, 曹伟 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 196–205

基于弱光栅技术的地面沉降自动化监测系统

Automatic land subsidence monitoring system based on weak-reflection fiber gratings

何健辉, 张进才, 陈勇, 闫星光, 施斌, 魏广庆, 贾立翔, 刘苏平 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 146–153

集束式监测井成井工艺研究

A study of the well-forming technology of a cluster monitoring well

张建良, 李文鹏, 孙梓航, 李长青, 王进卫 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 44–48

非饱和带二氧化碳入侵对表生植物及土壤的影响

Influence of carbon dioxide invasion in the unsaturated zone on vegetation and soil

潘颖, 赵晓红, 王文科, 邓红章, 韩枫, 罗平平, 杨雨萌, 张徽 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 180–189

玄武岩纤维加筋黄土承载比试验研究

An experimental study of the California bearing ratio of basalt fiber reinforced loess

李沛达, 骆亚生, 陈箐芮, 汪国刚 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 131–137



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202308038

廖松林, 马诗佳, 夏菡佑, 等. 玄武岩 CO₂ 矿化封存监测方法和技术体系研究 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(4): 41-52.
LIAO Songlin, MA Shijia, XIA Changyou, et al. Research on monitoring methods and technical systems of CO₂ mineralization in basalt formation[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(4): 41-52.

玄武岩 CO₂ 矿化封存监测方法和技术体系研究

廖松林¹, 马诗佳¹, 夏菡佑¹, 高志豪¹, 刘牧心¹, 梁希^{1,2}, 戴青³, 黄新我³, 蒋泽原³, 于冰清³
(1. 广东南方碳捕集与封存产业中心, 广东 广州 510440; 2. 伦敦大学学院, 伦敦 WC1E 6BT; 3. 腾讯公司, 广东 深圳 518057)

摘要: 玄武岩 CO₂ 矿化封存是近年来逐渐受到关注的新一类 CO₂ 地质封存方式, 已在冰岛和美国成功开展技术示范。玄武岩 CO₂ 矿化封存主要将 CO₂ 转化为固体矿物, 在 CO₂ 注入方式、埋存深度、储盖层物理性质要求等方面与砂岩储层碳封存差异较大, 两者监测方案也存在显著差异。文章基于美国 Wallula 项目和冰岛 Carbfix 项目的监测经验, 结合玄武岩 CO₂ 矿化封存特点, 梳理不同 CO₂ 注入相态(超临界态和溶解态)的玄武岩 CO₂ 矿化封存监测方案, 横向比较玄武岩 CO₂ 矿化封存、咸水层封存和油气藏封存的监测体系。砂岩储层的封存监测体系侧重观测 CO₂ 储层的地质构造完整性, 以及评价潜在泄漏路径上 CO₂ 浓度的变化, 监测周期通常要求在 50 a 以上。相较而言, 玄武岩 CO₂ 矿化封存监测体系侧重于观测“水-CO₂-玄武岩”的矿化反应效果, 反映井下流体物质性质的变化, 包括各化学组分浓度、示踪剂浓度、pH 值等参数, 定性定量评价矿化反应程度及碳封存效果。最后, 基于咸水层封存和油气藏封存的监测技术经验, 结合玄武岩 CO₂ 矿化封存监测的技术需求, 总结提出由监测范围、监测目的、监测方案和预警体系 4 大部分组成的玄武岩 CO₂ 矿化封存通用性监测体系, 形成了“地下-井筒-地表-地上”的三维空间监测体系。文章提出的玄武岩 CO₂ 矿化封存监测方法和技术体系具有通用性, 可为未来开展玄武岩 CO₂ 矿化封存示范项目提供借鉴。

关键词: 玄武岩; 二氧化碳; 矿化封存; 监测技术; 监测体系

中图分类号: X701; X141

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)04-0041-12

Research on monitoring methods and technical systems of CO₂ mineralization in basalt formation

LIAO Songlin¹, MA Shijia¹, XIA Changyou¹, GAO Zhihao¹, LIU Muxin¹, LIANG Xi^{1,2}, DAI Qing³, HUANG Xinwo³, JIANG Zeyuan³, YU Bingqing³
(1. UK-China (Guangdong) CCUS Centre, Guangzhou, Guangdong 510440, China; 2. University College London, London WC1E 6BT, UK; 3. Tencent, Shenzhen, Guangdong 518057, China)

Abstract: CO₂ storage in basalt formation has received much attention as one of the new CO₂ geological storage methods worldwide. It has been successfully implemented in Iceland and the United States. During the process of carbon storage in basalt, CO₂ is transformed into solid minerals, which differs significantly from carbon storage in sandstone reservoirs in terms of CO₂ injection method, burial depth, and physical property requirements of reservoir cap. Significant differences are also found in both monitoring schemes. By studying the Wallula basalt

收稿日期: 2023-08-17; 修订日期: 2023-10-13

投稿网址: www.swdgcgz.com

第一作者: 廖松林(1994—), 男, 硕士, 主要从事二氧化碳捕集、利用与封存技术, 二氧化碳驱油与封存、数值模拟等方面研究工作。

E-mail: 3203861816@qq.com

通讯作者: 马诗佳(1989—), 女, 博士, 主要从事二氧化碳驱油与封存等方面研究工作。E-mail: shijia.ma@gdcccus.org

storage project in the United States and the Carbfix mineralization storage project in Iceland, this study compared and summarized the monitoring schemes of basalt storage for different CO₂ injection phases (supercritical and gas dissolved state). The monitoring systems of basalt storage, saline aquifer storage, oil and gas reservoir storage were further compared. The storage monitoring system for sandstone reservoir focuses on the structural integrity of the CO₂ reservoir and evaluating the change of CO₂ concentration along the potential leakage path. The monitoring period is usually more than 50 years. In contrast, basalt mineralization and storage technology focus on the mineralization reaction of “water-CO₂-basalt”. Its monitoring system is mainly to describe the property changing pattern of each substance from downhole fluid (chemical compositions, tracer concentrations, pH, etc.) during the storage cycle. Moreover, it evaluates the degree of mineralization reaction and the storage efficiency of basalt qualitatively and quantitatively. Finally, based on the systematic and comprehensive monitoring scheme of saline aquifer and oil and gas reservoir storage, the basalt-CO₂ mineralization storage monitoring technology is analyzed systematically and a complete set of basalt-CO₂ mineralization storage monitoring scheme and process is summarized. By comparing different CO₂ storage monitoring systems, this study proposes a universal “subsurface-wellbore-surface-ground” monitoring scheme for basalt-CO₂ mineralization: monitoring scope, purpose, program, and alert system. This provides basic information for the future basalt-CO₂ mineralization storage demonstration project.

Keywords: basalt; CO₂; mineralization storage technology; monitoring technology; monitoring system

随着工业化进程的深入和能源需求的增长,全球温室气体排放量急剧上升,导致大气中 CO₂ 浓度不断攀升。据研究,截至 2020 年,全球大气中 CO₂ 质量浓度已经达到 412 mg/L^[1]。迅速上升的 CO₂ 浓度不仅加剧了地球气候变暖的速度和程度,还对全球生态系统、社会经济稳定性和人类福祉产生了广泛而深远的影响。2022 年举办的《联合国气候变化框架公约》第二十七次缔约方大会通过了“沙姆沙伊赫实施计划”,重申了《巴黎协定》“将全球平均气温较前工业化时期上升幅度控制在 2℃ 以内”的长期目标,并且再次敦促各国逐步减少未采用捕集与封存措施的煤电^[2]。为解决温室气体排放问题,国际能源署(IEA)根据其预测研究指出,到 2050 年,全球将需要依靠 CO₂ 捕集、利用与封存(carbon capture, utilization and storage, CCUS)等绿色技术实现大规模减排,预计碳减排量将达到 760×10⁸ t^[3-4]。

CCUS 技术的核心在于捕集 CO₂ 并将其加以利用或封存至地下,以实现 CO₂ 永久减排,是化石能源清洁利用及实现大规模减排的最有效方法^[5]。在 CCUS 技术体系中,CO₂ 地质封存是实现减排的关键环节。然而,向地层注入 CO₂ 实现封存的过程中,地质构造的不完整可能导致 CO₂ 泄漏,对周边区域环境造成影响^[6-9]。因此,在实施 CO₂ 封存的同时,为确保封存地点的安全性并明确 CO₂ 的封存状态,需要进行实时全方位的 CO₂ 封存监测。

常规的地下咸水层和油气藏的 CO₂ 封存主要依赖于构造封存、残余气体封存和溶解封存原理^[8,10-11],即注入的 CO₂ 主要以游离态存在于地质储层中,对地质构造的密封性要求较高,封存监测周期较长,相关监测方案主要关注构造圈闭的封闭性和 CO₂ 沿井筒的泄漏途径^[12-15]。目前,针对咸水层封存和油气藏砂岩储层封存的监测已逐步形成一系列完整体系和风险评价方法^[1,6-8,16-20]。与常规封存方式相比,玄武岩 CO₂ 矿化封存技术在 CO₂ 注入方式、埋存深度以及盖层要求等方面存在较大差异^[11-12],因此其监测方案也与常规地质封存监测方案有显著差异。然而,目前对于玄武岩 CO₂ 矿化封存监测方法的研究相对较少,国内尚未出现相关的封存案例,也尚未形成相应的监测体系。

本文在综合美国 Wallula 和冰岛 Carbfix 玄武岩 CO₂ 矿化封存项目的监测方案基础上,通过对比玄武岩 CO₂ 矿化封存与常规咸水层封存、油气藏封存监测方法的特点,提出了针对玄武岩 CO₂ 矿化封存监测体系的建议,可为玄武岩 CO₂ 矿化封存技术的发展提供技术支持和借鉴。

1 玄武岩 CO₂ 矿化封存机理

CO₂ 封存机理主要包括构造封存、残余气体封存、溶解封存和矿物封存等 4 类(图 1)。其中,矿物封存被广泛认为是最长久、最安全的 CO₂ 地质封存机

理。在图 1(a)中, 随着时间的推移, 沉积盆地 CO₂ 封存机理逐渐由构造封存转变为残余气体封存和溶解封存, 最终实现矿物封存, 封存安全性逐步提升。作为近 10 a 来被广泛关注的玄武岩 CO₂ 矿化封存, 其封存机理主要依赖于溶解封存和矿物封存, 将 CO₂ 转化为固相碳酸盐矿物, 进而封存于地下^[1,16], 封存安全性相对较高, 如图 1(b)所示。CO₂ 与玄武岩发生化学反应生成碳酸盐矿物的过程可描述为: (1)CO₂ 溶于水溶液生成碳酸根离子; (2)玄武岩溶于水, 进而分离出二价金属阳离子(Ca²⁺、Mg²⁺、Fe²⁺等); (3)二价金属阳离子与碳酸根离子反应生成碳酸盐矿物。上述反应流程可由以下化学反应式表示^[7]:

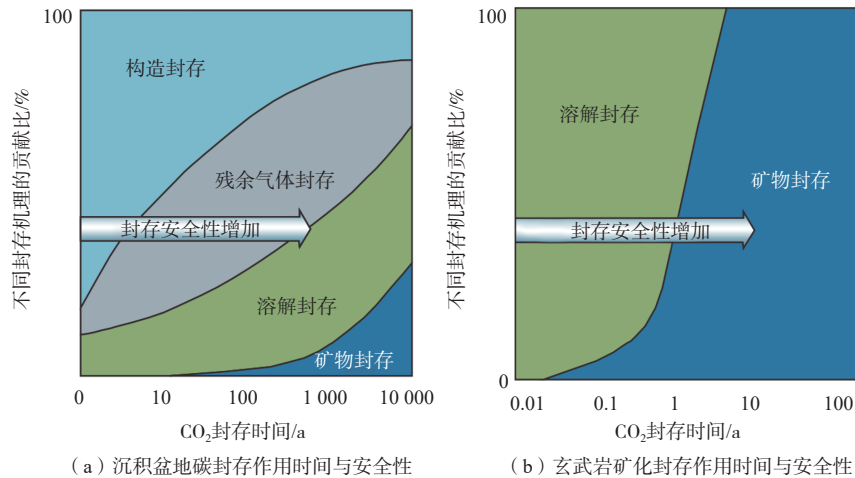
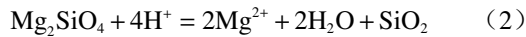
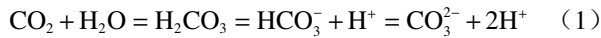


图 1 碳封存机理作用时间与封存安全性之间的关系 (据文献 [10, 26] 修改)

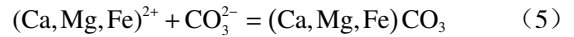
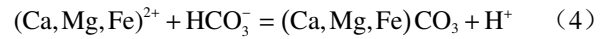
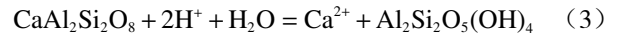
Fig. 1 The relationship between CO₂ storage trapping mechanism with time and storage safety (modified after Ref. [10, 26])

2 玄武岩 CO₂ 矿化封存项目实例分析

目前, 全球已经有 2 个玄武岩 CO₂ 矿化封存示范工程成功案例。其中, 美国的 Wallula 项目采用了超临界 CO₂ 注入技术, 而冰岛的 Carbfix 项目则采用了注入饱和 CO₂ 水溶液的方法。这 2 个项目均成功实现了 CO₂ 的矿化封存, 验证了玄武岩封存 CO₂ 的技术可行性。同时, 这 2 个项目还建立了各自独特的 CO₂ 矿化封存监测技术体系, 为制定通用的玄武岩 CO₂ 矿化封存的监测方案提供了有价值的实例依据。

2.1 美国 Wallula 项目监测方案

美国 Wallula 项目是全球首个在玄武岩地层中注入超临界 CO₂ 的试验项目。该项目位于美国西北部



玄武岩 CO₂ 矿化封存技术的效率取决于“水-CO₂-玄武岩”矿化反应速率。试验研究表明, 玄武岩、橄榄岩等基性-超基性岩的碳酸盐化反应速率与温度、压力、pH 值、流体流动速率以及与矿物的接触表面积等因素密切相关^[8,21-23]。例如, 在一定温度范围内, 玄武岩的溶解速率随温度的升高而增加; 而橄榄石和辉石的溶解速率随 pH 值升高而降低^[8,24-25]。因此, 定期监测和分析影响碳酸盐化学反应速率的因素对评估玄武岩 CO₂ 矿化反应效率非常重要, 并有助于制定全面的监测方案。通过分析玄武岩 CO₂ 矿化封存的实例, 可以了解不同项目的特点和监测方法。

的华盛顿州, 目标封存层为埋深 800~900 m 的大陆溢流玄武岩—哥伦比亚河玄武岩地层 (Columbia River Basalt Group)^[9]。项目注入的气源是从附近炼油厂购买的食物级液态 CO₂。在 2013 年 6—7 月期间, 项目以 40 t/d 的速率向目标玄武岩地层注入了超临界态 CO₂, 总注入量为 977 t。2015 年 7 月完成了封存效果的监测评价, 标志着项目的正式结束。

Wallula 项目的监测方案在时间维度上分为 4 个不同阶段: 注气前、注气中、注气后和闭场环境评估 (表 1)。监测方式主要包括抽水试验、地层流体温度和压力测量、井下流体样品的化学分析、同位素示踪分析、潜在泄漏途径上的 CO₂ 浓度监测以及地球物理测井分析等技术手段。通过这些监测手段, 能够对

CO₂ 注入过程中的地层响应、CO₂ 的封存状态以及对周边环境的影响进行全面评估和监测。这些技术的

应用为玄武岩 CO₂ 矿化封存提供了重要的实践经验和技

表 1 美国 Wallula 项目监测方案梳理^[9, 27-29]
Table 1 US Wallula project monitoring scheme^[9, 27-29]

监测阶段	监测方式	监测目的	备注
注气前	①抽水试验	评估注入层位的渗透性	在钻井过程中,进行抽水试验
	②岩屑取样分析	分析储层岩性	在钻井过程中,提取目的层附近岩屑
	③地球物理测井分析	明确储层物理性质(孔隙度、渗透率等)	分析测井资料(包括脉冲中子测井、密度测井、电测井、中子测井、成像测井等)
	④地下流体取样分析	确定样品中组分浓度(溶解性总固体(TDS)、碱度、Ca ²⁺ 和Mg ²⁺ 等)参数的基准值	使用特定的井下流体采样器定期提取井下流体
	⑤土壤环境CO ₂ 浓度监测	确定浅层土壤中CO ₂ 浓度基准值	采集注入井周围的浅层土壤气体样本
注气中	①储层温度及压力测试	确定井下CO ₂ 流体的分布情况	监测储层温压条件变化,发现注入区顶部的温度升高约8℃,表明CO ₂ 发生了流动
	②地下流体取样分析及同位素监测	确定样品中相关组分浓度及同位素浓度试验值的变化情况	在注入样品中添加同位素 ¹⁸ O和 ¹³ C
	③示踪剂监测	监测CO ₂ 羽流扩展情况	在开始注入CO ₂ 流体的48 h内,注入全氟化碳示踪剂(PFT)
	④土壤环境CO ₂ 浓度监测	确定注入过程浅层土壤CO ₂ 浓度的变化情况	采集注入井周围的浅层土壤气体样本 ^[9]
注气后	①流体温度及压力测试和残余饱和度测试(RST)	监测CO ₂ 注入后地层变化,以及是否存在CO ₂ 泄漏	注入层的大部分CO ₂ 都分布于2个玄武岩互流带的最上层,同时也证实注入层上方的开放层没有明显的CO ₂ 存在
	②地下流体取样分析及同位素监测	监测CO ₂ 与玄武岩的反应和地下水中相关组分浓度变化	注入CO ₂ 后,地下水中相关组分浓度比注入前提高了1.5~3个数量级; ¹⁸ O和 ¹³ C同位素浓度显著低于原位地层水,表明注入的CO ₂ 与周围的玄武岩已发生活跃的地球化学反应
	③土壤环境CO ₂ 浓度监测	判断是否存在CO ₂ 浅层泄漏	确定注入后浅层土壤中CO ₂ 浓度的变化情况
闭场环境评估	①电缆地球物理测井分析	评估周围储层和上覆岩层中CO ₂ 的存在,以及评估注入井周围地层岩性特征变化的可能性	由于浮力,游离态CO ₂ 存在于上部两层玄武岩(注入区)
	②抽水测试	评估潜在的小到中尺度渗透性变化	CO ₂ 注入后与注入前地层结构没有明显的变化
	③侧壁岩心取样分析	评估CO ₂ 与玄武岩反应生成的矿化物的情况	采集注入层约50块井壁岩心,通过X射线显微断层扫描(XMT)成像技术和纳米二次离子质谱(NanoSIMS)同位素分析法进行对比检查,发现有较多的碳酸盐矿化分布,并有新生成的结核,其成分主要为铁白云石 ^[28]

注:在注入977 t 超临界CO₂到玄武岩地层2 a后,项目于2015年6月进行了1次全面的封存监测环境评估,确定玄武岩CO₂矿化封存情况,评估结束后关井,封存项目结束。

美国 Wallula 项目的监测方案和结果表明,每类监测技术有不同的应用阶段。地下流体取样分析和土壤环境 CO₂ 浓度监测持续了整个周期;而地质构造完整性监测分析(包括地质测试、地球物理测井分析和岩心分析等)主要在注气前和最后的环境评估阶段进行。流体取样分析的监测结果显示,在注入 CO₂ 后的 2 a 内,流体中的组分浓度(TDS、碱度、Ca²⁺和 Mg²⁺等)比注入前提高了 1.5~3 个数量级;在项目闭场开展环境评估时,侧壁岩心分析结果显示,碳酸盐矿物主要为铁白云石沉淀^[28]。综合推断得出:注入的超临界 CO₂ 与玄武岩发生了化学反应,并转化为稳定的碳酸盐矿物。同时,地球物理测井分析和土壤环境 CO₂ 浓度监测结果表明,CO₂ 未发生泄漏,储层的封闭性完好。由于 Wallula 项目没有监测井,无法准确估算已碳酸盐化的 CO₂ 比例^[29]。通过数值模拟的估算,注入 CO₂ 1 a 后,超过 18% 的 CO₂ 已经溶解到地层水中^[9]。

2.2 冰岛 Carbfix 项目监测方案

冰岛 Carbfix 项目是世界上规模最大的玄武岩 CO₂ 矿化封存项目。项目气源为冰岛西南部 Hellisheiði 地热发电厂尾气,经过处理后,以 CO₂ 完全溶解于水中的方式注入到附近的玄武岩地层,实现玄武岩 CO₂ 矿化封存。

项目自 2012 年开始运行后,经历了 2 个阶段:第 1 阶段,先后 2 次注入 175 t CO₂ 和 73 t CO₂-H₂S 混合气体(75% CO₂-25% H₂S)到埋深 400~800 m 的玄武质熔岩和玻璃质玄武岩地层。监测结果显示,2 a 后超过 95% 的 CO₂ 被矿化^[30-31];第 2 阶段,使用发电厂处理后的 CO₂ 和 H₂S 混合气体作为气源,并改进了注入工艺,注入层位选为埋深 1 900~2 200 m、地层温度高达 260 ℃ 的橄榄拉斑玄武岩地层,自 2014 年 6 月至 2023 年 5 月,累计注入 91 294 t CO₂,监测结果表明,大部分注入的 CO₂ 在几个月内即开始转化为碳酸盐矿物^[20, 32]。

Carbfix 项目的监测方案在时间维度上分为 3 个不同阶段: 注气前、项目运行时和项目关闭后(计划)(表 2)。由于 Carbfix 项目采用了被称为“Carbfix 方法”的特殊 CO₂ 注入方式, 即将 CO₂ 溶于水后再注入

玄武岩地层, 这种方式在一定程度上降低了 CO₂ 逃逸泄漏的风险。常规的地球物理监测方式(如地震监测、垂直地震剖面(VSP)监测)无法监测到溶解或矿化的 CO₂ 量^[33], 因此在该项目中未被采用。

表 2 冰岛 Carbfix 项目监测方案^[34-39]
Table 2 The Iceland Carbfix project monitoring scheme^[34-39]

监测阶段	监测方式	监测目的	备注
注气前	①抽水试验	评估注入层位的渗透性	在钻井过程中, 进行抽水试验
	②岩石样品分析	分析封存地点的岩石矿物成分及化学成分	钻井过程中, 对岩石进行取样
	③土壤 CO ₂ 通量测定分析	确定浅层土壤中 CO ₂ 浓度基准值	采集注入井周围的浅层土壤气体样本
	④流体取样分析	确定流体相关参数及示踪剂的基准值	研究地下水补给径流条件及各含水层水力联系情况 ^[19]
	⑤地层温度及压力测量	确定本底值	对初始地层温度及压力进行多次测量
项目运行时	①示踪剂监测(非反应型示踪剂、反应型示踪剂、同位素示踪剂等)	确定样品中相关离子浓度及同位素浓度试验值的变化情况; 监测 CO ₂ 羽流扩展情况	在注入井中注入非反应型示踪剂, 对选定的监测井进行流体取样分析, 其中非反应型示踪剂是通过注气管道注入, 反应型示踪剂是通过注水管道注入
	②流体取样分析	监测 CO ₂ 与玄武岩的反应和地下水中各组分浓度变化	分析温度、pH、溶解无机碳(DIC)、主要元素(Si、Ca、Mg、Fe等)浓度。注气时, 从2012年1月至2012年9月, 关键监测井采样频率为每周采样2次, 之后再回到2013年7月(停止注入后1a), 期间指定监测井1周取样1次 ^[30]
	③反应运移模型预测分析	预测 CO ₂ 羽的运移情况、矿化程度以及 CO ₂ 的注入对储层岩石物理性质及地下水水质的影响	流动运移模型、反应模型及其耦合模型分析。根据前期的物探数据、岩样、水样的分析结果以及不断更新的监测数据对模型的参数进行调整, 通常包括地层的渗透率、孔隙度等物理性质参数, 矿物的反应动力学参数及反应比表面积等。在此基础上增加模型的模拟时间
	④土壤 CO ₂ 通量测定分析	判断是否存在 CO ₂ 浅层泄漏	注入井及监测井周围以 25 m×25 m 网格设置 CO ₂ 气体探测器, 注入井地下水下游设置 4 组监测线
项目关闭后(计划)	①流体取样分析	持续监测地下水相关离子浓度变化	每隔 1 a 对选定的监测井进行取样分析
	②反应运移模型预测分析	持续更新、完善模型	每隔 1 a 更新 1 次模型
	③大气 CO ₂ 监测	持续监测场地周围 CO ₂ 浓度变化	每隔 1 a 对场地周围选定地点的大气中的 CO ₂ 进行测量

注: 关闭后的监测应不少于 10 a, 若监测数据表明 95% 以上 CO₂ 已矿化, 可提前终止监测。

在完善选址和布井方案的基础上, Carbfix 项目采用了地球化学和同位素示踪剂作为主要的监测方法来追踪 CO₂ 的运移轨迹(表 2)。在同一注入层位的不同位置设计了多口监测井, 在整个注入周期中, 定期进行示踪剂和井下流体取样, 并对监测井取样进行化学分析。采用物质质量平衡计算方式^[20](式 6), 对流体样品中各组分物质浓度的变化规律进行定性和定量分析。通过对比测量值与质量平衡计算值之间非反应性混合 DIC 浓度的差异, 评估玄武岩 CO₂ 矿化封存的效果。

$$F_{\text{mineralized}} = \frac{C_{i,\text{predicted}} - C_i}{C_{i,\text{predicted}} - C_{i,\text{background}}} \quad (6)$$

式中: $F_{\text{mineralized}}$ ——矿化分数/%;

$C_{i,\text{predicted}}$ —— i 组分计算预测浓度/(mmol·L⁻¹);

C_i —— i 组分实际测量浓度/(mmol·L⁻¹);

$C_{i,\text{background}}$ —— i 组分基准浓度/(mmol·L⁻¹)。

Carbfix 项目的第 1 阶段向注入流体中添加了示踪剂¹⁴C、六氟化硫(SF₆)和五氟化三氟甲基硫(SF₅CF₃), 采用质量平衡计算方式以定量分析注入 CO₂ 的去向,

计算结果显示, DIC 和¹⁴C 的浓度远高于流体样品中的浓度, 表明 DIC 和¹⁴C 沿着监测方向的地下水流向产生了损失, 推断造成这种差异的原因是碳酸盐矿物沉淀的形成。示踪剂监测结果显示, 注入的 CO₂ 在 2 a 内的矿化率约为(95±3)%。此外, 采用 X 射线衍射和扫描电镜分析监测井井下潜油电泵上的沉淀物, 结果证实沉淀矿物为方解石^[30-31], 结果进一步证明了注入的 CO₂ 已矿化。

Carbfix 项目的第 2 阶段向注入流体中添加热惰性示踪剂 1-萘磺酸盐(1-ns), 并定期在监测井进行流体取样分析。分析包括测定流体中的 DIC、硫化氢(H₂S)、硫酸盐(SO₄)、1-ns 示踪剂浓度、pH 值、金属离子浓度和气相组分中 CO₂、CH₄、H₂S 浓度。通过监测水样中的 DIC 和 TDS, 研究人员认为在地层运移过程中, 碳和硫发生了较强烈的矿物沉淀。测定结果进一步证实了 Carbfix 二期项目注入的 CO₂ 和 H₂S 在项目运行的 2 a 内发生了矿化反应^[20, 36]。通过对热惰性示踪剂和其他多项指标的分析, 研究人员能够深入了解地下水体系中的化学变化。

2.3 监测方案对比分析

综合分析对比美国 Wallula 项目和冰岛 Carbfix 项目的监测方案发现:美国 Wallula 项目采用注入超临界态 CO_2 , 并选择密封性完好的盖层作为注入层位的上部层, 在矿化封存的同时实现了构造封存, CO_2 封存的安全性增大, 但对封存地质构造特征有一定的要求。该项目的监测方案主要依赖地下流体取样分析, 以评估矿化反应程度。与之不同的是, 冰岛 Carbfix 项目将 CO_2 完全溶解于水中, 并将其注入玄武岩地层, 通过化学反应形成稳定的矿物, 提高封存安全性, 然而, 这种方法需要大量的水资源, 通过监测井示踪剂和取样分析可以对矿化反应程度进行定量分析。

Wallula 和 Carbfix 项目均采用井下流体取样分析作为主要监测手段, 该方法着重分析井下流体各组分浓度、示踪剂浓度、pH 值等参数的变化规律, 基于物质平衡法, 可以定量评价“水- CO_2 -玄武岩”矿化反应程度及玄武岩封存效率, 同时结合其他监测技术, 全方位论证矿化封存的安全性。

3 矿化封存与构造封存监测方案对比与建议

在 CO_2 构造封存(咸水层封存、油气藏封存)的实例中, 目标封存储层通常为砂岩^[43-44], 监测方案较为成熟^[3, 40-42], 监测的主要目的是分析泄漏风险, 确保封存的安全性。例如, 在中国神华煤制油深部咸水层 CO_2 地质封存示范工程(神华 CCS 示范工程)中, 采用了“大气-地表-地下” CO_2 地质封存立体监测技术方法(图 2), 并建立了完善的环境监测体系^[45-46], 在注入完成后连续监测 2 a, 并且开展了全面的环境风险评估。在 2016 年, 赵兴雷等^[47-48]基于神华 CCS 示范工

程项目的监测数据, 建立了地下水、 CO_2 浓度与通量等多指标安全等级评价体系, 以此来判断和评估咸水层封存项目的安全性。在油气藏封存监测方面, 林千果等^[4, 18, 49]于 2019 年针对低-特低渗透油藏 CO_2 驱油封存项目进行了研究, 基于时间和空间维度分析油藏地质特征、 CO_2 的运移及分布、泄漏风险等封存因素影响, 建立起一套低-特低渗透油藏 CO_2 驱油封存监测体系(图 3), 该监测体系主要监测目的在于保障 CO_2 驱油和封存的安全性, 监测 CO_2 是否泄漏。

综合对比不同类型的 CO_2 地质封存技术及其监测方案(表 3), 可以得出以下结论:咸水层和油气藏封存的监测体系主要关注目标储层的地质构造完整性, 并评估可能泄漏路径上 CO_2 浓度的变化, 这是一个长期的过程。咸水层封存侧重于监测 CO_2 运移、泄漏情况及目标储层的安全性; 油气藏封存则需要覆盖驱油前、驱油过程中和驱油完成后的场地封闭、闭场监测, 其监测时间维度的划分对玄武岩 CO_2 矿化封存具有借鉴性。相较于咸水层和油气藏封存的长时间维度监测, 玄武岩 CO_2 矿化封存技术主要依赖于“水- CO_2 -玄武岩”的矿化反应, 其监测体系着重于描述封存周期内井下流体的各物质性质变化规律, 定量评价矿化反应程度, 一旦矿化过程完成, 监测即可结束。与此同时, 在咸水层和油气藏封存监测中被广泛应用的地震勘测和 VSP 监测技术, 均无法有效监控 CO_2 水溶液在注入玄武岩后的运移和矿化程度, 因此 Wallula 和 Carbfix 项目均以地球化学监测为主^[34]。

4 玄武岩 CO_2 矿化封存监测方案及建议

对比分析不同 CO_2 地质封存案例后, 建议玄武岩 CO_2 矿化封存应兼顾空间与时间因素, 选择恰当的监测技术, 侧重井下流体数据分析, 以构建覆盖地下、地表、地上的全周期监测方案。在 CO_2 注入前, 应筛选合适储层, 评估技术经济可行性, 并识别潜在泄漏风险以优化监测。注入中要适时分析、调整频率, 注入后定期评估封存效果。若矿化率超 95%, 井筒良好且无泄漏, 持续监测 2 a 后可结束项目。玄武岩 CO_2 矿化封存监测方案的制定主要依据目标储层的地质特征, 其监测技术的选择和监测频率的优化则以项目需求和风险要求而定。通过明确项目地址及地质情况, 确定监测范围; 根据项目需求确定监测目的, 优化监测方案; 以保障项目的安全性为基础, 确定预警体系, 从而形成一套完整的 CO_2 封存监测体系。综合砂岩储层封存监测技术经验^[50-53], 结合玄武岩 CO_2 矿化封

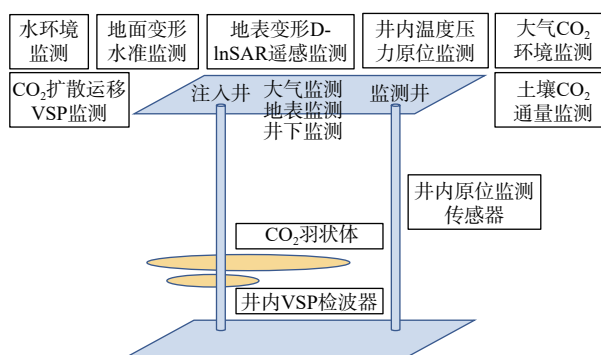


图 2 神华 CCS 示范工程立体监测技术体系
(据文献 [16] 修改)

Fig. 2 China Shenhua CCS project monitoring system
(modified after Ref. [16])

注: 图中 D-InSAR 为合成孔径雷达差分干涉测量。

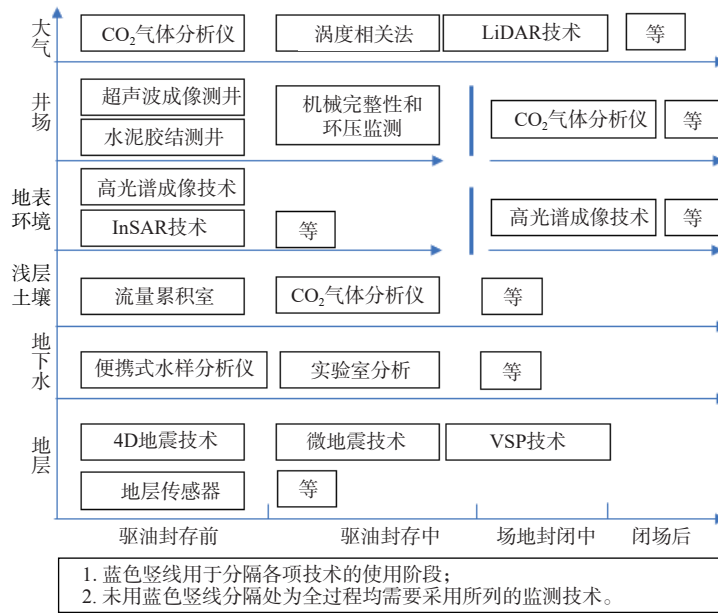


图3 低-特低渗透油藏 CO₂ 驱油封存监测体系 (据文献 [18] 修改)

Fig. 3 Monitoring system for low permeability and extremely low permeability reservoirs for CO₂-EOR (modified after Ref. [18])

注: 图中 LiDAR 为激光雷达; InSAR 为合成孔径雷达干涉测量。

表3 不同类型地质封存案例监测方案对比

Table 3 Comparison of different monitoring schemes

封存类型	咸水层封存	油气藏封存	玄武岩CO ₂ 矿化封存
应用案例	神华CCS示范工程	低-特低渗透油藏CO ₂ 驱油封存项目	美国Wallula项目和冰岛Carbfix项目
监测体系	“大气-地表-地下”CO ₂ 地质封存立体监测技术	低-特低渗透油藏CO ₂ 驱油封存监测体系	无
监测方案	从空间位置上进行了地下、地表、地上3个层次的全方位监测,从监测内容上主要着重监测CO ₂ 运移、泄漏情况及目标储层的安全性	空间维度上,分为地层监测、地下水监测、浅层土壤监测、地表环境监测、井场监测和大气监测;从时间维度上分为驱油封存前监测、驱油封存过程中监测、场地封闭过程监测和闭场监测	美国Wallula项目的监测方案分为4个阶段:注入前、注入时、注入后和闭场的环境评估;冰岛Carbfix项目监测方案分为注入前、项目运行时、项目关闭后
监测技术	①地下监测技术:VSP监测、地下温度及压力监测和地质构造监测技术;②地表监测技术:浅层地下水取样分析和土壤环境监测评价技术;③大气监测技术:近地表大气CO ₂ 浓度监测和涡度相关系统监测技术	①地质监测:4D地震技术和时移VSP技术等;②井场监测:超声波成像测井、井筒完整性监测技术;③CO ₂ 的运移及泄漏监测:CO ₂ 气体分析仪、便携式水样分析仪等	美国Wallula项目主要有流体取样分析、同位素监测以及岩心取样分析等;冰岛Carbfix项目主要包括地球化学监测和同位素示踪剂监测等
监测目的	对CO ₂ 在地下空间的扩散运移状态及其环境影响进行监测与评价	保障CO ₂ 驱油和封存的安全性,监测CO ₂ 是否泄漏	定量分析矿化反应程度,评价玄武岩CO ₂ 矿化封存效果

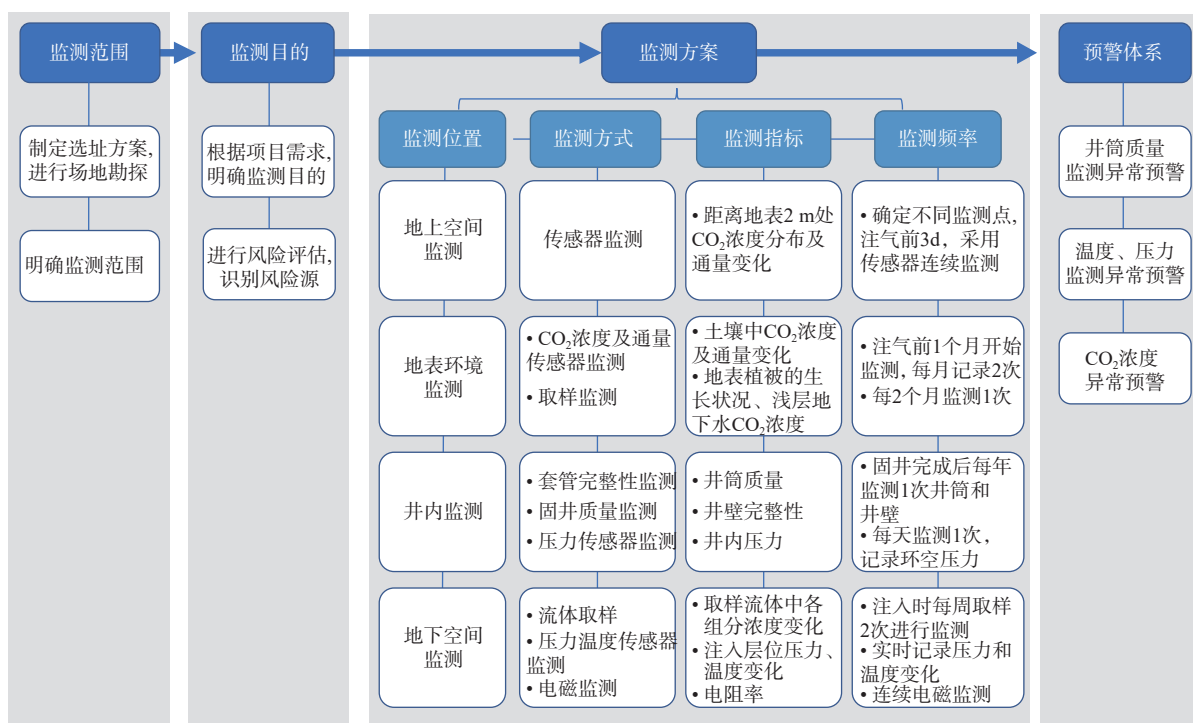
存实例监测技术要点,对玄武岩 CO₂ 矿化封存监测技术进行系统性分析,总结提出玄武岩 CO₂ 矿化封存通用性监测体系的 4 大部分:监测范围、监测目的、监测方案和预警体系(图 4)。文章所提出的监测体系为玄武岩 CO₂ 矿化封存通用体系,因此监测指标设置较为全面,同时考虑到我国目前尚无 CO₂ 玄武岩矿化封存项目,在一开始采用更为严格的监测指标将有利于项目的成功实施。随着日后我国此类项目成功经验的增加,可因地制宜地对监测方案进行更新,制定更加有效的监测方案和指标。

①监测范围:目前已发现适合 CO₂ 矿化封存的玄武岩场地主要包括大陆溢流型玄武岩、洋底高原玄武岩和洋中脊玄武岩等 3 种类型^[11,33]。在确定封存场地

时,应充分调查潜在场地的地质构造、玄武岩的储层结构和矿物成分、水文地质特征等封存参数,以评估其是否可作为目标储层。然后根据项目运行方案,优选出封存场地范围,并依据场地实地情况,制定监测范围。

②监测目的:根据项目需求明确监测目的。对选址场地进行风险评估,识别玄武岩注入 CO₂ 封存的风险源,做好综合分析及预测。

③监测方案:整体包括监测位置、监测技术、监测指标以及建议监测频率。当采用不同的 CO₂ 注入方式时,其监测方案的侧重点应相应调整。例如,注入液态或超临界态 CO₂ 时,应重点进行定期流体取样分析、同位素监测以及项目闭场前的综合地质分析;而

图 4 玄武岩 CO₂ 矿化封存监测体系Fig. 4 Monitoring system of CO₂ storage in basalt

当注入流体为饱和 CO₂ 水溶液时, 则应重点进行定期流体取样分析和示踪剂监测等。

④预警体系: 在项目运行前期, 确定环境本底值, 并对注气时和注气结束后各项指标变化波动情况, 设定井筒质量监测异常预警、温度及压力监测异常预警和 CO₂ 浓度异常预警 3 个预警机制, 并制定应急预案, 形成完整的预警体系。根据中国环境科学学会发布的《二氧化碳地质利用与封存项目泄漏风险评价规范》^[54], 可首先开展环境本底值调查, 包括地上空间、地表和地下监测指标(包括地表水、地下水中 pH 值、大气及土壤中 CO₂ 通量、近地表大气 CO₂ 浓度等); 确定环境本底值后, 在项目运行期间持续监测各项指标, 采用打分法判定 CO₂ 泄漏风险。指南中针对每个指标的打分为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1 分, 分别对应高风险、较高风险、中风险、低风险、基本无风险。将每个指标分值相乘, 根据最终相乘结果判断项目总的 CO₂ 泄漏风险, 以及确定预警值。

在玄武岩 CO₂ 矿化封存监测体系中, 根据空间维度提出了具体监测方案(表 4), 形成了“地下-井筒-地表-地上”的三维空间监测体系。地上、地表和井内的监测指标是 CO₂ 矿化封存项目安全性评价的关键; 地下空间监测指标是 CO₂ 与玄武岩反应速率和矿化程度评价的关键。

在地下层面, 主要进行流体取样分析, 不仅对目标储层流体进行取样, 还应对储层上部各含水层水质变化进行监测; 在井筒层面, 主要评估井筒的完整性; 在地表和地上层面, 主要监测 CO₂ 浓度, 判断 CO₂ 是否存在泄漏。监测频率可依据数据采集的难易程度以及监测技术的优化进行调整, 以确保监测体系的准确性与可靠性。

在工业信息化发展的潮流中, 结合传感器监测技术, 根据监测数据的分类, 可进一步研发玄武岩 CO₂ 矿化封存自动预警监测系统。此类监测系统可涵盖样品采集处理单元、分析检测单元、可编程逻辑控制(PLC)单元、数据采集存储单元以及无线传输单元等模块, 实现监测数据的及时记录和封存效果的评价。通过此类系统, 可进一步形成一套数字化 CO₂ 封存监测体系, 为 CO₂ 封存监测技术的发展提供技术支撑。

5 结论

(1)玄武岩 CO₂ 矿化封存技术关键在于“水-CO₂-玄武岩”矿化反应速率。因此, 定期监测和分析影响碳酸盐化反应速率的因素, 评估玄武岩 CO₂ 矿化反应效率, 是制定监测方案的基础。

(2)通过分析美国 Wallula 项目和冰岛 Carbfix 项目的监测方案, 发现玄武岩 CO₂ 矿化封存技术主要依

表 4 玄武岩 CO₂ 矿化封存监测方案及建议Table 4 Monitoring scheme for CO₂ storage in basalt

监测位置	监测方式	监测指标	建议监测频率
地上空间监测	传感器监测	距离地表 2 m 处 CO ₂ 浓度分布及通量变化	确定不同监测点, 注气前 3 d, 采用传感器连续监测
地表环境监测	CO ₂ 浓度及通量传感器监测	不同位置土壤中 CO ₂ 浓度及通量	注气前 1 个月开始监测, 每月记录 2 次
	取样监测	地表植被的生长及健康状况、浅层地下水中 CO ₂ 浓度	每 2 个月监测 1 次
井内监测	生产套管壁缺陷(腐蚀和磨损)监测	套管柱各部件的位置、管柱剖面上管柱内径的变化、管壁缺陷	固井完成后检测, 每 1 a 监测 1 次
	固井质量测井监测(声波测井、磁脉冲探伤等)	声波水泥测井曲线	固井完成后检测, 每 1 a 监测 1 次
	压力传感器监测	注入井环空压力	每天监测环空压力变化 1 次
地下空间监测	监测井流体取样监测	CO ₂ 、示踪剂、Ca ²⁺ 、Mg ²⁺ 、Fe ²⁺ 浓度, 电导率, TDS, DIC, pH 值	①项目开始注入前 1 个月从监测井和注入井取样监测; ② CO ₂ 注入过程中, 每周监测 2 次; ③ 注入结束后, 监测井每周监测 1 次, 直至项目宣布结束
	压力温度传感器监测	注入层位压力、温度	注气开始前 3 d 进行实时监测, 记录井底压力、温度数据, 长期记录更新数据
	电磁方法监测	注入井不同层位电阻率和电荷率	注气前 3 d 开始, 每 30 min 监测 1 次
项目结束评定标准: 取样分析 CO ₂ 矿化率达到 95% 以上、井筒完整无泄漏、地表和地上 CO ₂ 无泄漏, 之后继续监测 2 a			

*注: 项目注入开始前 1 个月进行流体取样监测, 不同于 Carbfix 项目提前 2 a 开始取样检测^[42], 因地层环境的稳定性和项目工程准备的时效性进行优化而给出的建议监测频率。

赖于“水-CO₂-玄武岩”的矿化反应, 其监测体系主要关注封存周期内井下流体中各组分(TDS、碱度、Ca²⁺和Mg²⁺等)的变化规律, 以及定量评价矿化反应程度, 在判定矿化封存完成后即可结束监测。相比之下, 传统砂岩储层的封存监测体系更侧重于描述目标储层的地质构造完整性, 以及评估可能泄漏路径上的 CO₂ 浓度变化, 这是一个长期的过程。

(3) 综合砂岩储层封存的系统性监测方案, 结合玄武岩 CO₂ 矿化封存实例的监测技术要点, 对玄武岩 CO₂ 矿化封存监测技术进行了系统性分析, 总结出一套完整的玄武岩 CO₂ 矿化封存监测体系, 包括监测范围、监测目的、监测方案和预警体系 4 大部分; 并依据空间维度和时间维度, 构建了储层、井筒、土壤和大气全方位监测系统, 形成了一套的玄武岩 CO₂ 矿化封存全周期监测方案。

参考文献 (References) :

- [1] 赵震宇, 姚舜, 杨朔鹏, 等. “双碳”目标下: 中国 CCUS 发展现状、存在问题及建议 [J]. 环境科学, 2023, 44(2): 1128 - 1138. [ZHAO Zhenyu, YAO Shun, YANG Shuopeng, et al. Under goals of carbon peaking and carbon neutrality: Status, problems, and suggestions of CCUS in China [J]. Environmental Science, 2023, 44(2): 1128 - 1138. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 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. [ZHANG Xian, YANG Xiaoliang, LU Xi, et al. China CO₂ capture, utilization and storage (CCUS) annual report (2023) [R]. China Agenda 21 Management Center, Global Institute of Carbon Capture and Storage, Tsinghua University, 2023. (in Chinese)]

- [3] 宋新民, 王峰, 马德胜, 等. 中国石油二氧化碳捕集、驱油与封存技术进展及展望 [J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(1): 206 - 218. [SONG Xinmin, WANG Feng, MA Desheng, et al. Progress and prospect of carbon dioxide capture, utilization and storage in CNPC oilfields [J]. Petroleum Exploration & Development, 2023, 50(1): 206 - 218. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 王昊, 林千果, 郭军红, 等. 黄土塬地区 CO₂ 驱油封存泄漏地下水监测体系研究 [J]. 环境工程, 2021, 39(8): 217 - 226. [WANG Hao, LIN Qianguo, GUO Junhong, et al. Development of a groundwater monitoring system for CO₂ leakage of CO₂-EOR storage in Loess Tableland Region [J]. Environmental Engineering, 2021, 39(8): 217 - 226. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 李琦, 刘桂臻, 李小春, 等. 多维度视角下 CO₂ 捕集利用与封存技术的代际演变与预设 [J]. 工程科学与技术, 2022, 54(1): 157 - 166. [LI Qi, LIU Guizhen, LI Xiaochun, et al. Intergenerational evolution and presupposition of CCUS technology from a multidimensional perspective [J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(1): 157 - 166. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 张成龙, 郝文杰, 胡丽莎, 等. 泄漏情景下碳封存项目的环境影响监测技术方法 [J]. 中国地质调查, 2021,

- 8(4): 92 – 100. [ZHANG Chenglong, HAO Wenjie, HU Lisha, et al. Environmental impact monitoring technology for carbon storage projects under leakage scenarios[J]. *Geological Survey of China*, 2021, 8(4): 92 – 100. (in Chinese with English abstract)]
- [7] KELEMEN P B, MCQUEEN N, WILCOX J, et al. Engineered carbon mineralization in ultramafic rocks for CO₂ removal from air: Review and new insights[J]. *Chemical Geology*, 2020, 550: 119628.
- [8] 邱添, 曾令森, 申婷婷. 基性-超基性岩碳酸盐固碳效应研究进展 [J]. *中国地质调查*, 2021, 8(4): 20 – 32. [QIU Tian, ZENG Lingsen, SHEN Tingting. Progresses on carbon sequestration through carbonation of mafic-ultramafic rocks[J]. *Geological Survey of China*, 2021, 8(4): 20 – 32. (in Chinese with English abstract)]
- [9] MCGRAIL B P, SPANE F A, AMONETTE J E, et al. Injection and monitoring at the Wallula basalt pilot project[J]. *Energy Procedia*, 2014, 63: 2939 – 2948.
- [10] 高志豪, 夏菖佑, 廖松林, 等. 玄武岩 CO₂ 矿化封存潜力评估方法研究现状及展望 [J]. *高校地质学报*, 2023, 29(1): 66 – 75. [GAO Zhihao, XIA Changyou, LIAO Songlin, et al. Progress of methods for assessing CO₂ mineralization storage potential in basalt[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2023, 29(1): 66 – 75. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 李万伦, 陈晶, 贾凌霄, 等. 玄武岩 CO₂ 地质封存研究进展 [J]. *地质论评*, 2022, 68(2): 648 – 657. [LI Wanlun, CHEN Jing, JIA Lingxiao, et al. Research progress of CO₂ geological sequestration in basalts[J]. *Geological Review*, 2022, 68(2): 648 – 657. (in Chinese with English abstract)]
- [12] VIALLE S, DRUHAN J L, MAHER K. Multi-phase flow simulation of CO₂ leakage through a fractured caprock in response to mitigation strategies[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2016, 44: 11 – 25.
- [13] 张森琦, 刁玉杰, 程旭学, 等. 二氧化碳地质储存逃逸通道及环境监测研究 [J]. *冰川冻土*, 2010, 32(6): 1251 – 1261. [ZHANG Senqi, DIAO Yujie, CHENG Xue, et al. CO₂ geological storage leakage routes and environment monitoring[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(6): 1251 – 1261. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 任韶然, 李德祥, 张亮, 等. 地质封存过程中 CO₂ 泄漏途径及风险分析 [J]. *石油学报*, 2014, 35(3): 591 – 601. [REN Shaoran, LI Dexiang, ZHANG Liang, et al. Leakage pathways and risk analysis of carbon dioxide in geological storage[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(3): 591 – 601. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 吴江莉, 马俊杰. 浅议 CO₂ 地质封存的潜在风险 [J]. *环境科学导刊*, 2012, 31(6): 89 – 93. [WU Jiangli, MA Junjie. A discussion about potential risks of geological storage of CO₂[J]. *Environmental Science Survey*, 2012, 31(6): 89 – 93. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 中国二氧化碳地质封存环境风险研究组. 中国二氧化碳地质封存环境风险评估 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2018. [Environmental risk assessment of geological storage of carbon dioxide in China[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2018. (in Chinese)]
- [17] 王晓桥, 马登龙, 夏锋社, 等. 封储二氧化碳泄漏监测技术的研究进展 [J]. *安全与环境工程*, 2020, 27(2): 23 – 34. [WANG Xiaoqiao, MA Denglong, XIA Fengshe, et al. Research progress on leakage monitoring technology for CO₂ storage[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2020, 27(2): 23 – 34. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 林千果, 张少君, 王香增, 等. 低渗透和特低渗透油藏 CO₂ 驱油封存监测体系的建立 [J]. *安全与环境学报*, 2019, 19(2): 693 – 703. [LIN Qianguo, ZHANG Shaojun, WANG Xiangzeng, et al. Integrated monitoring system for CO₂-EOR and storage in low and extra-low permeability reservoir[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2019, 19(2): 693 – 703. (in Chinese with English abstract)]
- [19] LI Q, LIU G. Risk assessment of the geological storage of CO₂: A review[M]//*Geologic Carbon Sequestration*. Cham: Springer International Publishing, 2016: 249–284.
- [20] GUNNARSSON I, ARADÓTTIR E S, OELKERS E H, et al. The rapid and cost-effective capture and subsurface mineral storage of carbon and sulfur at the CarbFix2 site[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2018, 79: 117 – 126.
- [21] SNÆBJÖRNSDÓTTIR S Ó, SIGFÚSSON B, MARIENI C, et al. Carbon dioxide storage through mineral carbonation[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(2): 90 – 102.
- [22] 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.
- [23] KELEMEN P B, MATTER J. In situ carbonation of peridotite for CO₂ storage[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2008, 105(45): 17295 – 17300.

- [24] 张亮,温荣华,耿松鹤,等. CO₂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. [ZHANG Liang, WEN Ronghua, GENG Songhe, et al. Mineral trapping of CO₂ in basalt rock: Progress and key issues[J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2022, 36(4): 473 - 480. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 何民宇,刘维燥,刘清才,等. CO₂矿物封存技术研究进展[J]. *化工进展*, 2022, 41(4): 1825 - 1833. [HE Minyu, LIU Weizao, LIU Qingcai, et al. Research progress in CO₂ mineral sequestration technology[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2022, 41(4): 1825 - 1833. (in Chinese with English abstract)]
- [26] RAZA A, GLATZ G, GHOLAMI R, et al. Carbon mineralization and geological storage of CO₂ in basalt: Mechanisms and technical challenges[J]. *Earth-Science Reviews*, 2022, 229: 104036.
- [27] SULLIVAN E C, HARDAGE B A, MCGRIL B P, et al. Breakthroughs in seismic and borehole characterization of basalt sequestration targets[J]. *Energy Procedia*, 2011, 4: 5615 - 5622.
- [28] MCGRIL B P, SCHAEF H T, SPANE F A, et al. Wallula basalt pilot demonstration project: Post-injection results and conclusions[J]. *Energy Procedia*, 2017, 114: 5783 - 5790.
- [29] 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.
- [30] SNÆBJÖRNSDÓTTIR S Ó, OELKERS E H, MESFIN K, et al. The chemistry and saturation states of subsurface fluids during the in situ mineralisation of CO₂ and H₂S at the CarbFix site in SW-Iceland[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2017, 58: 87 - 102.
- [31] MATTER J M, STUTE M, SNÆBJÖRNSDÓTTIR S Ó, et al. Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions[J]. *Science*, 2016, 352(6291): 1312 - 1314.
- [32] SNÆBJÖRNSDÓTTIR S Ó, GISLASON S R, GALECZKA I M, et al. Reaction path modelling of in-situ mineralisation of CO₂ at the CarbFix site at Hellisheidi, SW-Iceland[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2018, 220: 348 - 366.
- [33] 李万伦,徐佳佳,贾凌霄,等. 玄武岩封存 CO₂ 技术方法及其进展[J]. *水文地质工程地质*, 2022, (3): 164-173. [LI Wanlun, XU Jiajia, JIA Lingxiao, et al. Research progress on key technologies of CO₂ storage in basalts[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(3): 164-173. (in Chinese with English abstract)]
- [34] MATTER J M, BROECKER W S, GISLASON S R, et al. The CarbFix Pilot Project—storing carbon dioxide in basalt[J]. *Energy Procedia*, 2011, 4: 5579 - 5585.
- [35] GISLASON S R, SIGURDARDÓTTIR H, ARADÓTTIR E S, et al. A brief history of CarbFix: Challenges and victories of the project's pilot phase[J]. *Energy Procedia*, 2018, 146: 103 - 114.
- [36] CLARK D E, GUNNARSSON I, ARADÓTTIR E S, et al. The chemistry and potential reactivity of the CO₂-H₂S charged injected waters at the basaltic CarbFix2 site, Iceland[J]. *Energy Procedia*, 2018, 146: 121 - 128.
- [37] CLARK D E, OELKERS E H, GUNNARSSON I, et al. CarbFix2: CO₂ and H₂S mineralization during 3.5 years of continuous injection into basaltic rocks at more than 250°C[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, 279: 45 - 66.
- [38] RATOUIS T M P, SNÆBJÖRNSDÓTTIR S Ó, VOIGT M J, et al. Carbfix 2: A transport model of long-term CO₂ and H₂S injection into basaltic rocks at Hellisheidi, SW-Iceland[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2022, 114: 103586.
- [39] MATTER J M, STUTE M, HALL J, et al. Monitoring permanent CO₂ storage by in situ mineral carbonation using a reactive tracer technique[J]. *Energy Procedia*, 2014, 63: 4180 - 4185.
- [40] 魏宁,刘胜男,李小春,等. CO₂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. [WEI Ning, LIU Shengnan, LI Xiaochun, et al. Key technologies inventory of CO₂ geological utilization and storage[J]. *Clean Coal Technology*, 2022, 28(6): 14 - 25. (in Chinese with English abstract)]
- [41] 王容,杨宇尧,段希宇,等. CO₂封存地下监测评价技术[J]. *油气藏评价与开发*, 2011, 1(4): 44 - 46. [WANG Rong, YANG Yuyao, DUAN Xiyu, et al. Subsurface monitoring and evaluation technique for CO₂ storage[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2011, 1(4): 44 - 46. (in Chinese with English abstract)]
- [42] 胥蕊娜,姜培学. CO₂地质封存与利用技术研究进展[J]. *中国基础科学*, 2018, 20(4): 44 - 48. [XU Ruina, JIANG Peixue. Research progress of CO₂ geological storage and utilization technology[J]. *China Basic Science*, 2018, 20(4): 44 - 48. (in Chinese with English abstract)]

- abstract)]
- [43] 马永法, 周学军, 董俊领, 等. 黑龙江林甸地区深部咸水层 CO₂ 地质储存条件与潜力评估 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(6): 179 – 189. [MA Yongfa, ZHOU Xuejun, DONG Junling, et al. Geological storage conditions and potential assessment of CO₂ in deep saline aquifers in Lindian of Heilongjiang Province[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(6): 179 – 189. (in Chinese with English abstract)]
- [44] 马鑫, 李旭峰, 文冬光, 等. 新疆准东地区场地尺度二氧化碳地质封存联合深部咸水开采潜力评估 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(6): 196 – 205. [MA Xin, LI Xufeng, WEN Dongguang, et al. A study of the potential of field-scale of CO₂ geological storage and enhanced water recovery in the eastern Junggar Area of Xinjiang[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(6): 196 – 205. (in Chinese with English abstract)]
- [45] 李琦, 蔡博峰, 陈帆, 等. 二氧化碳地质封存的环境风险评估方法研究综述 [J]. 环境工程, 2019, 37(2): 13 – 21. [LI Qi, CAI Bofeng, CHEN Fan, et al. Review of environmental risk assessment methods for carbon dioxide geological storage[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(2): 13 – 21. (in Chinese with English abstract)]
- [46] 王保登, 赵兴雷, 崔倩, 等. 中国神华煤制油深部咸水层 CO₂ 地质封存示范项目监测技术分析 [J]. 环境工程, 2018, 36(2): 33 – 36. [WANG Baodeng, ZHAO Xinglei, CUI Qian, et al. Environmental monitoring analysis of injected CO₂ in saline layer for Shenhua CO₂ storage project[J]. Environmental Engineering, 2018, 36(2): 33 – 36. (in Chinese with English abstract)]
- [47] 赵兴雷, 崔倩, 王保登, 等. CO₂ 地质封存项目环境监测评估体系初步研究 [J]. 环境工程, 2018, 36(2): 15 – 20. [ZHAO Xinglei, CUI Qian, WANG Baodeng, et al. Preliminary study of environmental monitoring assessment system for CO₂ storage projects[J]. Environmental Engineering, 2018, 36(2): 15 – 20. (in Chinese with English abstract)]
- [48] 赵兴雷, 马瑞, 李国涛, 等. 神华咸水层 CO₂ 封存监测安全评价体系的研究 [J]. 化工进展, 2016, 35(增刊 2): 389 – 395. [ZHAO Xinglei, MA Rui, LI Guotao, et al. Studies on multi-factor safety system in the monitoring process for Shenhua CO₂ saline layers storage project[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(Sup2): 389 – 395. (in Chinese with English abstract)]
- [49] 汤沐成, 林千果, 王昊, 等. 黄土塬地区 CO₂ 驱油封存泄漏土壤监测体系研究 [J]. 安全与环境工程, 2020, 27(6): 112 – 118. [TANG Shucheng, LIN Qianguo, WANG Hao, et al. Study on soil monitoring system for CO₂ leakage of CO₂-EOR and storage in Loess Tableland Region[J]. Safety and Environmental Engineering, 2020, 27(6): 112 – 118. (in Chinese with English abstract)]
- [50] 庞凌云, 蔡博峰, 陈潇君, 等. 《二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南(试行)》环境风险评估流程研究 [J]. 环境工程, 2019, 37(2): 45 – 50. [PANG Lingyun, CAI Bofeng, CHEN Xiaojun, et al. Research on process of technical guideline on environmental risk assessment for carbon dioxide capture, utilization, and storage (on trial)[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(2): 45 – 50. (in Chinese with English abstract)]
- [51] 马劲风, 杨杨, 蔡博峰, 等. 不同类型二氧化碳地质封存项目的环境监测问题与监测范围 [J]. 环境工程, 2018, 36(2): 10 – 14. [MA Jinfeng, YANG Yang, CAI Bofeng, et al. Environmental monitoring range for different types of CO₂ geologic sequestration projects and its related issues[J]. Environmental Engineering, 2018, 36(2): 10 – 14. (in Chinese with English abstract)]
- [52] 朱佩誉. CO₂ 在咸水层的地质封存及应用进展 [J]. 洁净煤技术, 2021, 27(增刊 2): 33 – 38. [ZHU Peiyu. Geological storage and application progress of CO₂ in saline aquifer[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(Sup2): 33 – 38. (in Chinese with English abstract)]
- [53] 李琦, 刘桂臻, 蔡博峰, 等. 二氧化碳地质封存环境风险评估的空间范围确定方法研究 [J]. 环境工程, 2018, 36(2): 27 – 32. [LI Qi, LIU Guizhen, CAI Bofeng, et al. Principle and methodology of determining the spacial range of environmental risk assessment of carbon dioxide geological storage[J]. Environmental Engineering, 2018, 36(2): 27 – 32. (in Chinese with English abstract)]
- [54] 中国环境科学学会. 二氧化碳地质利用与封存项目泄漏风险评估规范: T/CSES 71—2022[S]. [Chinese Society for Environmental Sciences. The specification on risk assessment of the leakage: T/CSES 71—2022[S]. (in Chinese)]

编辑: 宗 爽