

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2021.04.10

引用格式: 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 C L,Hao W J,Hu L S,et al. Environmental impact monitoring technology for carbon storage projects under leakage scenarios[J]. Geological Survey of China,2021,8(4): 92 – 100.)

泄漏情景下碳封存项目的环境影响监测技术方法

张成龙, 郝文杰, 胡丽莎, 刘 廷, 张 徽, 刁玉杰

(中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051)

摘要: CO₂环境影响监测技术作为碳捕集、利用与封存(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)体系的重要组成部分,贯穿整个储存过程,决定着 CCUS 工程的成败,对 CCUS 工程的有效性、持续性、安全性及碳减排效果的评估发挥着举足轻重的作用。为确保碳封存项目安全可靠运行,需要对环境影响、地层响应和 CO₂地下运移等多个监测指标开展全流程测量和监控。不同监测阶段、不同监测指标下 CO₂环境影响监测的重点会有所不同,相应的监测技术组合也略有差别。围绕地质封存中 CO₂泄漏监测及泄漏源监测识别问题,系统剖析了 CO₂环境影响监测技术的特点和应用场景,阐述了不同监测阶段、不同监测指标下 CO₂环境影响监测技术方法的研究进展,总结了不同泄漏情景下 CO₂环境影响监测技术方法的选择及其在实际应用中面临的问题,认为实时连续的监测设备研发、“大气-地表-地下”立体化快速监测技术体系以及长期有效的 CO₂监测管理系统构建将是 CO₂环境影响监测技术的发展方向。可为未来开展百万吨级碳封存工程的环境影响监测提供参考和借鉴。

关键词: CCUS; CO₂地质封存; CO₂泄漏; 环境影响; 监测技术

中图分类号: P642; X14; X83

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2021)04-0092-09

0 引言

我国于 2020 年提出在 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和的战略目标。碳捕集、利用和封存(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)技术作为可以实现 CO₂大规模减排和化石能源净零排放的重要技术途径成为当下研究的热点^[1-2]。CO₂环境影响监测技术作为 CCUS 体系的重要组成部分,贯穿整个封存过程,决定着 CCUS 工程的成败,对 CCUS 工程的有效性、持续性、安全性及碳减排效果的评估发挥着举足轻重的作用。

受自然或人为的地质活动的影响,CO₂不可避免地存在着渗漏和逃逸的风险^[3-4]。一旦 CO₂从地层泄漏,便可能会产生一系列的安全与环境问题^[5]。为了确保 CO₂地质储存工程具备可靠性和

安全性,需要做好相应的监控、测量工作^[6]。CO₂地质储存工程的有效性、持续性、安全性、对周围环境的影响程度,及其全球尺度温室气体减排效果的评估均需要一系列监测数据来论证^[3,7-9]。国内外学者和机构通过对挪威北海 Sleipner 项目、阿尔及利亚 In Salah 项目、加拿大 Weyburn 油田 CO₂强化石油开采(CO₂-Enhanced Oil Recovery, CO₂-EOR)项目、澳大利亚 Otway 示范项目以及中国神华集团鄂尔多斯碳捕集与封存(Carbon Capture and Storage, CCS)示范工程、中国石油新疆彩南油田 CO₂驱水与地质封存先导性试验工程和中国石油吉林油田 CO₂-EOR 试点项目等国内外 CO₂地质封存项目的研究,已基本架构出较为完整的监测技术方法^[10-12]。

CO₂环境影响监测技术复杂多样,常见的有常规监测井、示踪监测、井间地震、微震监测、3D 时移

收稿日期: 2021-07-14; 修订日期: 2021-07-28。

基金项目: 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心“多井组 CO₂-EOR 与储层系统动态监测技术研究(编号: 2019YFE0100100)”项目资助。

第一作者简介: 张成龙(1988—),男,工程师,主要从事深部地下空间碳封存与储气储能及国土空间规划研究。Email: zhangchenglong@mail.cgs.gov.cn。

地震、地面形变监测、大气监测、井网监测、土壤气监测、大面积 CO₂ 泄漏监测(红外、UMA、卫星)等技术,但从技术发展及经济角度而言,这些监测体系仍需不断优化和完善^[13-15]。不同监测阶段、不同监测指标下环境影响监测的重点会有所不同,相应的监测技术组合也略有差别。本文围绕地质封存中 CO₂ 泄漏监测及泄漏源监测识别问题,通过文献的查阅和综合分析,并结合前期项目研究基础,系统剖析了 CO₂ 环境影响监测技术的特点和应用场景,以期通过泄漏情景下碳封存项目的环境影响监测技术研究,为未来开展百万吨级碳封存工程的环境影响监测提供参考和借鉴。

1 泄漏情景下 CO₂ 环境影响监测概述

1.1 泄漏风险与监测的目的和意义

在 CCUS 工程 CO₂ 注入过程中,随着 CO₂ 的注入,储盖层压力会同步增大^[16]。如果持续注入

CO₂, 储盖层压力异常增高,可能会超过盖层的突破压力,进而破坏原有的力学平衡,使得盖层发生剪切破坏和拉伸破坏,生成盖层裂缝或小断层,导致原有未被发现的先存断层复活,诱发地震,尤其是在注入点附近的垂向剖面上,可能出现地层、地面隆起等变形现象。同时,由于地质体的不连续性和非均质性,因断层、导水通道、开采井等的存在,受到压力影响,地层中 CO₂ 可能突破水力圈闭,泄漏到浅层含水层中,导致含水层水质受到极大影响,甚至影响整个生态环境。

CCUS 工程中 CO₂ 泄漏情况包括: ①通过废弃井或因为井破裂等原因而引发的瞬时性泄漏,这种泄漏扩散速度快、浓度大且易被发现; ②因为断层、泄漏的(油、气)井等原因而引发的连续性泄漏^[17-18](图 1)。

碳封存项目环境影响监测的目的和意义在于在 CCUS 工程标准和程序规范的控制下,为风险发生提供尽早、有效的泄漏监测^[19],使其处于可控与可容忍的范围内。①通过制定行之有效的监测方

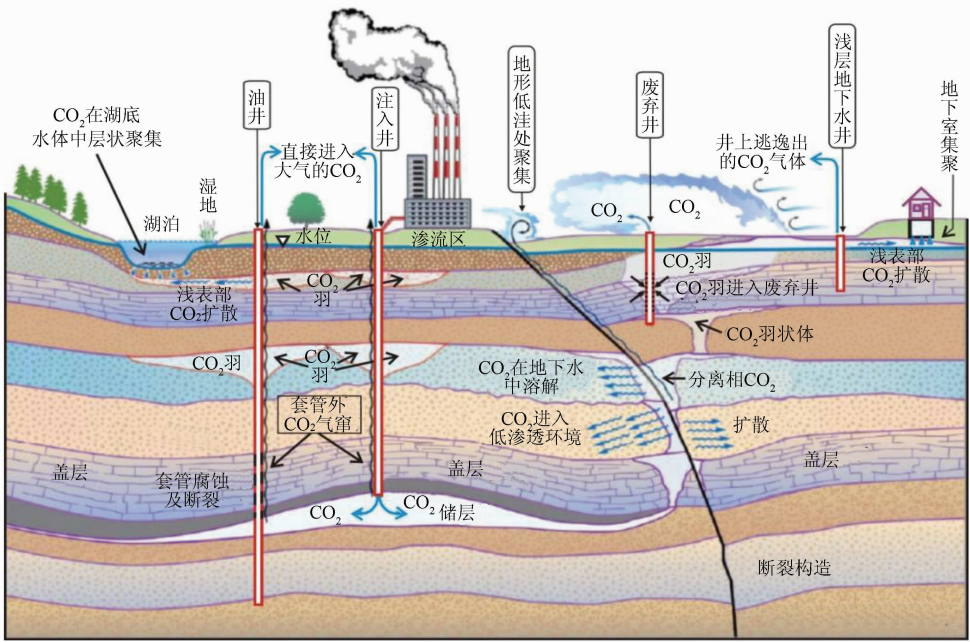


图 1 CO₂地质储存工程潜在的泄漏风险

Fig. 1 Potential leakage risk of CO₂ geological storage project

案和监测技术,监测 CO₂ 的运移和分布状态,评估 CCUS 工程对环境、安全和人类健康产生的影响,最大限度降低危害和风险的发生,确保工程的安全性、有效性和持久性; ②全面掌握拟建 CO₂ 封存场

地的环境状况并确定各环境要素背景值,不仅可用于 CO₂ 注入阶段的对比分析,也可成为今后法律纠纷重要的依托数据; ③及时向决策者、监管者、公众反馈环境影响信息,坚定信心、消除质疑; ④对

CO₂进行监测核准,为碳封存工程进入碳交易市场提供有效信息。

1.2 监测阶段和监测指标的划分

CO₂地质封存环境监测的核心是地下(地下水)、近地表(土壤和植被)和地上(大气),其完整监测周期涉及4个阶段^[20-21](图2)。监测指标主要为环境影响、地层响应和CO₂地下运移3部分。其中,环境影响监测包括大气环境监测、土壤环境

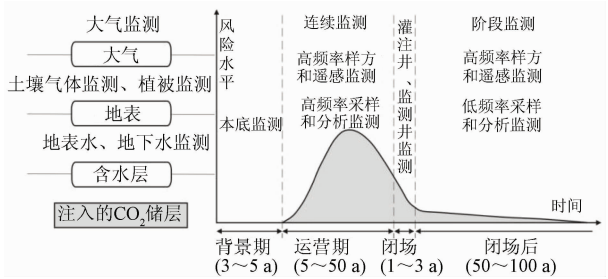


图2 CO₂地质储存工程各阶段环境监测特征
Fig.2 Environmental monitoring characteristics of various stages for CO₂ geological storage project

监测和地下水环境监测。地层响应监测即地质环境扰动监测,包括断层活化(蠕变)监测和地面变形(隆起或沉陷)监测。

总之,不同监测阶段、不同监测指标关注的问题不同,其监测的重点有所不同,相应的监测技术组合也各有不同^[22]。

2 泄漏情景下 CO₂ 环境影响监测技术方法和研究进展

当前 CCUS 技术还在不断发展之中,各类监测技术手段层出不穷。本文围绕地质封存中 CO₂ 泄漏监测以及泄漏源监测识别问题,剖析了 CO₂ 环境影响监测的技术特点和应用场景,系统阐述了不同监测阶段、监测指标下监测技术方法的选择,总结及预测了 CO₂ 环境影响监测技术的研究现状和发展趋势(图3)。

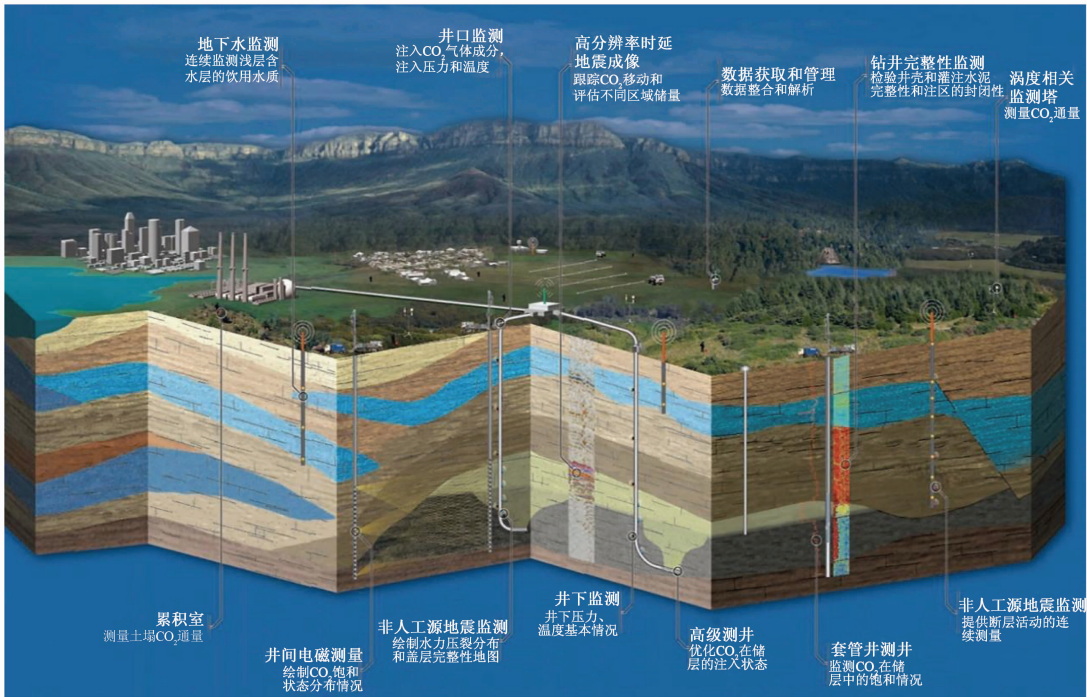


图3 立体化环境影响与地质安全监测保障技术体系示意图^[23]
Fig.3 Schematic diagram of the three – dimensional environmental impact and geological safety monitoring and guarantee technical system^[23]

2.1 环境影响监测

环境影响监测包括大气环境监测、土壤环境监测和地下水环境监测3个部分。

2.1.1 大气环境监测

大气环境 CO₂ 浓度监测最常用的技术有红外线气体监测技术、大气 CO₂ 示踪监测技术和大气

CO₂通量监测技术3种。

大部分CO₂浓度(红外线气体)监测技术都是根据二氧化碳近红外吸收光谱的相关特点开展的^[24-25]。目前,已被使用的是红外气体分析仪检测技术,属于便携式现场直接点式监测,精度高、响应速度快,缺点是区域面积测量不便且成本高^[26]。长程开放路径红外探测和调制激光检测技术,可由激光发射器发射脉冲到反射器上,将信号反馈到前端探测器测得路径中CO₂的累积浓度,优点是覆盖面积广,缺点是性能不稳定、不成熟^[27]。

大气CO₂示踪监测技术即通过利用大气中的天然示踪剂监测CO₂地质储存工程是否出现CO₂泄漏的技术方法。该方法是在封存气体内添加一些示踪物质,如六氟化硫(SF₆)、全氟化碳同位素示踪剂(PFT)等,在封存二氧化碳以后,就可以对大气中一些示踪剂比如SF₆等的具体浓度进行监测,若监测发现其变化显著,就说明有二氧化碳泄漏且能计算出具体的泄漏量^[28-29]。当然,此类手段也存在一些不足,比如其气相色谱仪等监测装置价格昂贵,无法适应野外环境下的长期监测,且有些示踪剂也属于温室气体,存在潜在的环境风险。因此,便携、快速且具备在线功能的监测装置研发需求十分迫切。

大气CO₂通量监测技术则多采用涡度相关法(Eddy Covariance, EC)来达到目的。在微气象监测中,EC方法较为完善,已然成为CO₂地质储存重要的监测手段之一,并被广泛采用^[30],其优势在于监测范围广、可自动监测、不干扰周围环境等,不足之处在于研究地点过分依赖于气象和地形条件,不但需要对诸多复杂的数据信息进行处理,而且很难快速对其泄漏量进行判断,只有综合分析长期监测的数据信息,才能够明确其泄漏量^[31]。

2.1.2 土壤环境监测

通过监测土壤中某些参数,来判断二氧化碳泄漏情况^[32-33]。以CO₂-EOR示范工程为例,CO₂一旦泄漏到地表,其他轻的烃类气体也会到达浅层土壤。通过监测 $\delta^{13}\text{C}$ 含量、轻的烃类气体如甲烷浓度,以及土壤二氧化碳浓度随注气时间的变化情况,不仅可以判断二氧化碳是否泄漏,还能计算其泄漏量^[34]。氦、钍等惰性气体性质稳定,不会干扰CO₂源解析,是良好的监测指示指标,不过与CO₂、CH₄等相比,其价格更为昂贵且方法更为复杂^[17]。

土壤环境监测方法通常有封闭式动态累积室测量法、开放式动态累积室测量法和封闭式静态累积室测量法3种。其中,开放式动态累积室测量法是测量土壤CO₂通量的方法中最为可靠的一种。

此外,还可以通过基于热导性能的监测方法进行监测,即通过基于分布式热式传感器对水平测井温度分布进行监测,从而判断是否出现二氧化碳泄漏现象^[35]。学者Hurter对比了光纤DTS系统和温度记录仪监测效果的优劣,通过收集和分析其热异常信号,可在井间(注入井与监测井)距离大于50 m的监测井中监测到二氧化碳的泄漏情况^[36]。

2.1.3 地下水环境监测

如果CO₂从深部地下储层发生泄漏,向上运移进入浅层地下水含水层,就会导致含水层化学成分、离子含量、pH、温度、压力、导电性、热传导性能等发生变化^[37]。基于此,可以通过开展地下水环境监测,来鉴别和评价CO₂泄漏情况。地下水环境监测有现场测定和实验室测试2种。对于pH、水温、电导率及游离CO₂、亚硝酸根、氧化还原电位(Eh)等极易发生变化的监测指标可通过传感器实时或现场测定;其他监测指标可通过实验室ICP-MS开展水质全分析、水质简分析来测定^[38]。

目前地下水环境监测技术方法已较为成熟,美国Lawrence Berkeley实验室和Los Alamos实验室、澳大利亚CO₂-CRC中心^[19]以及中国地质调查局水文地质环境地质调查中心等国内外研究团队在这方面已经做了大量的工作,针对不同的泄漏方式和泄漏地点,提出了很多CO₂泄漏监测方法。

比较常见的有基于压力变化的监测方法、热导性能监测方法、pH测量传感器监测方法和地球化学效应监测方法等。基于压力变化的监测方法几乎已应用到目前所有的CCS/CCUS项目中,即对封存蓄积层或含水层压力进行监测来保证CO₂封存的安全性^[39],比如油气田用井下PDG系统连续监测井底的压力和温度等。pH测量传感器监测方法即通过测量对CO₂在储层中扩散运移行踪具有明显指示作用的指标的pH值变化来监测其泄漏情况,但传统深层地下水pH值监测技术方法会有电路整机超低功耗、高精度补偿算法电极漂移等一系列问题^[40]。中国地质调查局水文地质环境地质调查中心研制出了pH值深层原位自动监测系统,解决了类似问题,可在1 500 m深度实现实时监测,并

在鄂尔多斯神华 CCS 示范工程中得到了实例验证。地球化学效应监测方法主要监测由 CO_2 的加入引起的矿物质溶解、迁移和沉降变化,常用氧化-还原电位计、离子选择性电极等进行监测^[41]。

其他还有基于电阻率的监测方法、航空电磁测量技术、电动力势能监测方法以及 CO_2 -EOR 烃类和有机物监测方法等^[32,42]。

2.2 地层响应(地质环境扰动)监测

CCUS 工程对地质环境的扰动包括地面变形、断层活化(蠕变)、诱发地震等。其中,所诱发的地震的监测可以纳入国家地震台网监测。

2.2.1 断层活化(蠕变)监测

利用光纤实时监测技术实时监测断层蠕变。分布式光纤传感技术具有传输距离远、抗电磁干扰等技术特点,在周围断层蠕变及背景扰动作用下,传感光缆中的敏感光纤在长度、直径、折射率等参数上会发生相应的变化。通过检测光纤的相位变化,可以获取光纤周围环境的震动信息(图4)。

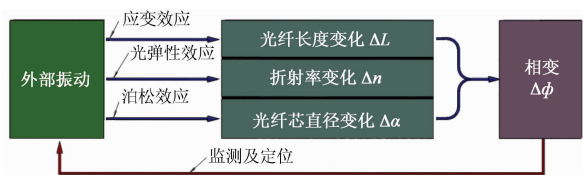


图4 外界振动引起的光纤传感参数变化与相位解调

Fig.4 Optical fiber sensing parameter change and phase demodulation caused by external vibration

通过光缆埋深测试和长周期的实时监测,获取场地背景噪声频率的高频分量,通过低通滤波算法分离断层蠕变的低频分量,结合光纤空间部署形态,通过多点定位,确定震源的空间和频率信息,由此判断断层的蠕变特点及位置分布情况。

2.2.2 InSAR 地面形变监测

InSAR 技术是根据重复雷达图像的相位数据来提取地面目标三维空间信息的技术^[43]。以 Sentinel-1 和 ALOS-2/PALSAR 为数据源,采用 D-InSAR、SBAS-InSAR 和 PS-InSAR 技术开展 CO_2 注入后地表形变幅度的遥感监测。

还可以通过高精度 GPS 测量技术和倾斜仪测量技术,来监测 CO_2 注入和运移引起的地面形变。

2.3 CO_2 地下运移监测

CO_2 地下运移监测会跟踪注入目标储层 CO_2 羽

状体的运移过程,定义羽流的横向范围和运移边界,从而确保 CO_2 羽状体长期稳定性和安全性^[44]。

目前已有诸多 CO_2 地下运移监测技术,包括地球物理监测技术、地球化学监测技术等。其中,地球物理监测技术分为地震监测技术、电磁监测技术、测井监测技术、重力监测技术等,地球化学监测技术又称化学示踪剂监测技术。单就监测手段而言,三维地震、垂直地震剖面(Vertical Seismic Profiling, VSP)、井间地震、测井分析及化学示踪剂是对 CO_2 运移进行有效监测的 4 类方法^[45]。而综合各类监测方法来看,地震监测方法是最有效的 CO_2 封存监测工具^[46],其中四维地震和时移 VSP 技术被广泛用于监测 CO_2 地质封存^[47-48],在一些规模化商业封存项目中已有成功应用,四维地震被认为是实施长时期监测封存 CO_2 运移的最好方法^[49],已然成为动态监测流体变化的有力工具^[46]。下面简要介绍四维地震监测和时移 VSP 监测技术。

2.3.1 四维地震监测

该技术主要借助地表震源波的反射情况来获取全容积成像,不但能够明确二氧化碳的分布情况,还能明确其运移泄漏情况。四维地震技术具有覆盖面积广、检测通量下限低等优点。在高孔隙度、流体饱和度和属性变化大且埋藏位置不太深的储层,四维地震监测效果更好,能较好地监测到流体前缘和流体动态特征效果。因此,为保证应用四维地震监测流体前缘和流体动态特征的效果,储层应具备孔隙度高、流体饱和度和属性变化大、埋藏位置不要过深等特征^[49],而在 CO_2 饱和度低、储层较薄时效果不太理想^[22]。

该技术在 Sleipner、Weyburn 项目中已得到运用。在 Sleipner 封存项目中,从运行开始就对该构造进行了四维地震监测,1999 年后每两年进行一次地震监测,获得了不同时期该构造的地震剖面图^[50],同时获得了咸水层内超临界 CO_2 层状羽状体的变化情况^[51];而在 Weyburn 封存项目中,由于目的层厚度较薄,地震反射不够明显,四维地震对 CO_2 羽状体成像比在 Sleipner 项目中更困难,最终效果不太好^[33]。

2.3.2 时移 VSP 监测

该技术指的是通过多次进行 VSP 测量来监测时间偏移情况。其具体理论基础为:在储层完成二氧化碳注入操作后,利用水气交代过程来对地层

水分布空间进行占据,如此一来其吸收系数便容易出现波动,即灌注前后储层的地震波速度或吸收系数等参数存在差异。

时移 VSP 监测在 Frio、Otway、神华 CCS 示范工程等项目中得到广泛应用,取得了显著效果:在美国德克萨斯州 Frio 构造中进行的小规模试验性 CO₂封存项目采用了时移 VSP 监测技术,监测 CO₂运移效果比四维地震更加精确,但也更加昂贵^[52];在澳大利亚 Otway 构造中进行的 CO₂封存试验使用了时移 VSP 监测技术,也取得了很好的效果^[53];神华 CCS 示范工程是我国首个全流程煤基 CO₂捕获和低孔低渗深部咸水层多层注入的 CO₂封存项目,目前国内已有很多学者就神华 CCS 示范工程采

用的时移 VSP 监测技术进行了论述^[45,54-55],笔者不再赘述,神华 CCS 示范工程自 2011 年开始,累计注入 CO₂ 超过 30 万 t,期间进行了 3 期时移 VSP 监测,均未发现 CO₂ 泄漏,证明了神华 CCS 示范工程的安全性。

2.4 主要监测技术汇总分析

在国内外,虽然有很多政府、企业、科研院所等对 CCUS/CCS 中涉及的 CO₂ 泄漏问题开展了相关技术研究,但研究主要还是集中于封存的 CO₂ 在蓄积层中泄漏迁移的模型或 CO₂ 泄漏对生态的影响上。综合所述,本文列出了不同泄漏情景下涉及到的各类主要 CO₂ 环境影响监测技术或方法的优缺点、应用场景及已有的工程应用分析(表 1)。

表 1 CO₂地下埋存工程中各种监测应用技术
Fig.1 Various monitoring techniques in CO₂ geological storage projects

监测类别	常用(代表)技术	优点	缺点	应用场景、风险	案例、单位
大气环境 监测	红外线气体监测	点式监测,精度高、响应快	区域测量不便且成本高	扩散	应用广泛而普遍,CCS/CCUS 常用技术手段
	大气 CO ₂ 示踪监测	灵敏度高	价格昂贵、不能连续监测		
	大气 CO ₂ 通量监测(涡度相关法)	监测范围广、自动监测、不干扰周围环境	依赖于气象和地形条件,处理复杂		
土壤环境 监测	开放式动态累积室测量法	可靠、精度高	无法实时、连续监测	地表渗透	In Salah、Gorgon、RECO-POL、Weyburn 等
地下水环境 监测	现场测定	方法众多、技术成熟	具体方法具体分析;快速或在线功能的监测装置研发是其发展方向	羽迁移;盖层完整性;压力发展	In Salah、CO ₂ SINK 等
	实验室测试	技术成熟	无法实时监测	羽迁移;地表渗透	Lawrence Berkeley、CO ₂ -CRC、CHEGS 等
地层响应(地质环境扰动)监测	断层活化(蠕变)监测	分辨率高、长时间实时监测	仪器耐高温、耐压要求高	羽迁移;盖层完整性;压力发展	应用少
	InSAR 地面形变监测	覆盖面积广	对植被和地形有较高要求		In Salah、Weyburn
	倾斜仪/GPS	精度高	区域性监测效果欠佳		In Salah、胜利油田
CO ₂ 地下 运移监测	四维地震监测	覆盖面积广、检测通量下	价格昂贵、对储层和深度有要求	羽迁移;地下特征	Sleipner、Weyburn 等
	时移 VSP 监测	技术成熟、应用广泛	价格昂贵、对地层和注入规模有要求	羽迁移;地下特征	Frio、Otway、In Salah、Gorgon、RECOPOL、Weyburn、神华 CCS 示范工程等

3 结论及展望

(1)CO₂环境影响监测技术是对多个监测指标开展全流程测量和监控。其不同监测阶段(背景期、运营期、闭场及闭场后)、不同监测指标(环境影响、地层响应和 CO₂地下运移等)下 CO₂泄漏环境影响监测重点会有所不同,相应的监测技术组合也

略有差别。
(2)CO₂环境影响监测技术手段繁多、种类复杂,要针对不同的环境问题和需求,充分考虑 CO₂环境影响监测技术的特点和应用场景,优化不同泄漏情境下 CO₂环境影响监测技术方法的选择,从实际出发,发挥每项技术的特点和多技术协同优势,降低监测成本,提高监测效率。
(3)大部分监测仪器设备昂贵、操作复杂且自

成体系。随着碳封存研究的深入和规模化百万吨级 CO₂ 封存项目的铺开,“物美价廉”的连续实时监测设备的研发、“大气-地表-地下”立体化快速监测技术体系(标准)及监测管理系统的构建将会是 CO₂ 环境影响监测技术的发展方向。

参考文献(References):

- [1] 高慧丽,范基姣.把二氧化碳“埋”在地下:我国二氧化碳地质封存研究及示范成果扫描[N].中国自然资源报,2021-05-07(6).
Gao H L, Fan J J. CO₂ geological storage: Scanning of research and demonstration results of CO₂ geological storage in China[N]. China Natural Resources News, 2021-05-07(006).
- [2] Metz B, Davidson O, de Coninck H C, et al. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [3] 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 S Q, Diao Y J, Cheng X X, et al. CO₂ geological storage leakage routes and environment monitoring[J]. J Glaciol Geocryol, 2010, 32(6): 1251-1261.
- [4] 许志刚,陈代钊,曾荣树,等.CO₂地下地质埋存原理和条件[J].西南石油大学学报(自然科学版),2009,31(1):91-97.
Xu Z G, Chen D Z, Zeng R S, et al. The theory and conditions of geological storage of CO₂[J]. J Southwest Petrol Univ (Sci Technol Ed), 2009, 31(1): 91-97.
- [5] Apps J A, Zheng L, Zhang Y, et al. Evaluation of potential changes in groundwater quality in response to CO₂ leakage from deep geologic storage[J]. Transp Porous Med, 2010, 82(1): 215-246.
- [6] 刁玉杰,张森琦,郭建强,等.CO₂地质储存泄露安全风险评价方法初探[J].中国人口·资源与环境,2012,22(8):84-89.
Diao Y J, Zhang S Q, Guo J Q, et al. Preliminary research on CO₂ leakage safety risk assessment method of geological storage project[J]. China Popul, Resour Environ, 2012, 22(8): 84-89.
- [7] 李小春,小出仁,大隅多加志.二氧化碳地中隔离技术及其岩石力学问题[J].岩石力学与工程学报,2003,22(6):989-994.
Li X C, Hitoshi K, Takashi O. CO₂ aquifer storage and the related rock mechanics issues[J]. Chin J Rock Mech Eng, 2003, 22(6): 989-994.
- [8] 孙枢.CO₂地下封存的地质学问题及其对减缓气候变化的意义[J].中国基础科学,2006,8(3):17-22.
Sun S. Geological problems of CO₂ underground storage and its significance on mitigating climate change[J]. China Basic Sci, 2006, 8(3): 17-22.
- [9] Bachu S. CO₂ storage in geological media: Role, means, status and barriers to deployment[J]. Prog Energy Combust Sci, 2008, 34(2): 254-273.
- [10] White D J, for the Weyburn Geophysical Monitoring Team. Geophysical monitoring of the Weyburn CO₂ flood: Results during 10 years of injection[J]. Energy Procedia, 2011, 4: 3628-3635.
- [11] Wilkin R T, Digiulio D C. Geochemical impacts to groundwater from geologic carbon sequestration: Controls on pH and inorganic carbon concentrations from reaction path and kinetic modeling[J]. Environ Sci Technol, 2010, 44(12): 4821-4827.
- [12] Sun L L, Dou H, Li Z P, et al. Assessment of CO₂ storage potential and carbon capture, utilization and storage prospect in China[J]. J Energy Inst, 2018, 91(6): 970-977.
- [13] 许志刚,陈代钊,曾荣树.CO₂地质埋存渗漏风险及补救对策[J].地质论评,2008,54(3):373-386.
Xu Z G, Chen D Z, Zeng R S. The leakage risk assessment and remediation options of CO₂ geological storage[J]. Geol Rev, 2008, 54(3): 373-386.
- [14] 孙典文.为了经济的可持续发展:神华集团成功封存二氧化碳于千米以下地层纪实[J].中国石油和化工,2011(8):11-15.
Sun D W. For the sustainable development of the economy: Shenhua Group successfully stored carbon dioxide in the stratum below one thousand meters[J]. China Petrol Chem Ind, 2011(8): 11-15.
- [15] 赵学亮,郭建强,史云,等.二氧化碳地质储存动态监测研究[J].环境监控与预警,2011,3(6):4-7.
Zhao X L, Guo J Q, Shi Y, et al. Research on carbon dioxide geological storage dynamic monitoring[J]. Environ Monitor Forewarn, 2011, 3(6): 4-7.
- [16] Stenhouse M, Arthur R, Zhou W. Assessing environmental impacts from geological CO₂ storage[J]. Energy Procedia, 2009, 1(1): 1895-1902.
- [17] 张媛媛,张煜,张建,等.CO₂驱油封存区域土壤气监测技术及应用[J].油气田环境保护,2014,24(4):49-51.
Zhang Y Y, Zhang Y, Zhang J, et al. Soil gas monitoring technology of CO₂ enhanced oil recovery and its application analysis[J]. Environ Prot Oil Gas Fields, 2014, 24(4): 49-51.
- [18] 汪黎东,顿小宝,张天赢,等.CO₂地质封存中单井源泄漏风险的评估方法及模型[J].化工环保,2013,33(1):76-79.
Wang L D, Dun X B, Zhang T Y, et al. Risk assessment and modeling of CO₂ leakage from single well in geological sequestration process[J]. Environ Prot Chem Ind, 2013, 33(1): 76-79.
- [19] 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 X Q, Ma D L, Xia F S, et al. Research progress on leakage monitoring technology for CO₂ storage[J]. Saf Environ Eng, 2020, 27(2): 23-34.
- [20] Gale J. Geological storage of CO₂: What do we know, where are the gaps and what more needs to be done? [J]. Energy, 2004, 29(9/10): 1329-1338.
- [21] Little M G, Jackson R B. Potential impacts of leakage from deep CO₂ geosequestration on overlying freshwater aquifers[J]. Environ Sci Technol, 2010, 44(23): 9225-9232.
- [22] 任韶然,任博,李永钊,等.CO₂地质埋存监测技术及其应用分析[J].中国石油大学学报:自然科学版,2012,36(1):106-

- 111.
- Ren S R, Ren B, Li Y Z, et al. Monitoring techniques of CO₂ geological storage and its application analysis[J]. J China Univ Petrol; Nat Sci, 2012, 36(1): 106–111.
- [23] 蔡博峰. 二氧化碳地质封存及其环境监测[J]. 环境经济, 2012(8): 44–49.
- Cai B F. CO₂ geological storage and environmental monitoring[J]. Environ Economy, 2012(8): 44–49.
- [24] 江晓军. 光电传感与检测技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- Jiang X J. Photoelectric Detection & Sensing Technology[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2011.
- [25] 肖心通. 基于红外传感器的气体浓度测量系统设计[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- Xiao X T. The Design of Measuring System for Gas Concentration Based on the Infrared Sensor[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
- [26] Oldenburg C M, Lewicki J L, Hepple R P. Near-surface Monitoring Strategies for Geologic Carbon Dioxide Storage Verification[R]. Washington D C; Lawrence Berkeley National Laboratory, 2003.
- [27] Oskarsson N, Pálsson K, Ólafsson H, et al. Experimental monitoring of carbon dioxide by low power IR-sensors; Soil degassing in the Fumas Volcanic Centre, Azores[J]. J Volcanol Geoth Res, 1999, 92(1/2): 181–193.
- [28] Stalker L, Boreham C, Underschultz J, et al. Geochemical monitoring at the CO₂ CRC Otway project; Tracer injection and reservoir fluid acquisition[J]. Energy Procedia, 2009, 1(1): 2119–2125.
- [29] Trumbore S. Age of soil organic matter and soil respiration; Radio-carbon constraints on belowground C dynamics[J]. Ecol Appl, 2000, 10(2): 399–411.
- [30] Song X, Liu Y F, Xu X F. Evaluating the measurement results of eddy covariance system at two heights using two methods[J]. J Grad School Chin Acad Sci, 2005, 22(3): 386–393.
- [31] Lewicki J L, Hilley G E. Eddy covariance mapping and quantification of surface CO₂ leakage fluxes[J]. Geophys Res Lett, 2009, 36(21): L21802.
- [32] Klusman R W. Evaluation of leakage potential from a carbon dioxide EOR/sequestration project[J]. Energ Convers Manage, 2003, 44(12): 1921–1940.
- [33] Wilson M, Monea M. IEA GHG Weyburn CO₂ Monitoring and Storage Project Summary Report 2000–2004[R]. Regina, Canada; Petroleum Technology Research Centre, 2004.
- [34] Mayer B, Shevalier M, Nightingale M, et al. Tracing the movement and the fate of injected CO₂ at the IEA GHG Weyburn–Midale CO₂ monitoring and storage project (Saskatchewan, Canada) using carbon isotope ratios[J]. Int J Greenh Gas Control, 2013, 16(S1): S177–S184.
- [35] Yamamoto H, Zhang K N, Karasaki K, et al. Large-scale numerical simulation of CO₂ geologic storage and its impact on regional groundwater flow: A hypothetical case study at Tokyo Bay, Japan[J]. Energy Procedia, 2009, 1(1): 1871–1878.
- [36] Hunter D. Forward Modelling Surface NMR for Hydrogeological Applications in Australia[M]//Roach I C. Advances in Regolith. Bentley, WA; CRC LEME, 2003: 221–224.
- [37] Little M G, Jackson R B. Potential impacts of leakage from deep CO₂ geosequestration on overlying freshwater aquifers[J]. Environ Sci Technol, 2010, 44(23): 9225–9232.
- [38] 强薇, 李义连, 文冬光, 等. 温室性气体地质处置研究进展及其问题[J]. 地质科技情报, 2006, 25(2): 83–88.
- Qiang W, Li Y L, Wen D G, et al. Advances and problems of geological disposal of greenhouse gases[J]. Geol Sci Technol Inform, 2006, 25(2): 83–88.
- [39] Meckel T A, Hovorka S D, Kalyanaraman N. Continuous Pressure Monitoring for Large Volume CO₂ Injection[C]//Proceedings of the 9th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-9). Washington D C; Gulf Coast Carbon Center, 2008.
- [40] 陈瑶, 薛月菊, 陈联诚, 等. pH 传感器温度补偿模型研究[J]. 传感技术学报, 2012, 25(8): 1034–1038.
- Chen Y, Xue Y J, Chen L C, et al. Research on pH sensor temperature compensation model[J]. Chin J Sensor Actuat, 2012, 25(8): 1034–1038.
- [41] Abbaspour A, Refahi M, Khalafi – Nezhad A, et al. Carbon composite PVC based membrane coated platinum electrode for chromium determination[J]. J Hazard Mater, 2010, 184(1/2/3): 20–25.
- [42] Moore J R, Glaser S D, Morrison H F, et al. The streaming potential of liquid carbon dioxide in Berea sandstone[J]. Geophys Res Lett, 2004, 31(17): L17610.
- [43] Onuma T, Ohkawa S. Detection of surface deformation related with CO₂ injection by D – InSAR at In Salah, Algeria[J]. Energy Procedia, 2009, 1(1): 2177–2184.
- [44] Freifeld B M, Daley T M, Hovorka S D, et al. Recent advances in well – based monitoring of CO₂ sequestration[J]. Energy Procedia, 2009, 1(1): 2277–2284.
- [45] 赵海英, 陈沉忠, 李彦鹏, 等. CO₂ 地质封存时移垂直地震监测技术[J]. 岩土力学, 2018, 39(8): 3095–3102.
- Zhao H Y, Chen Y Z, Li Y P, et al. CO₂ monitoring with time – lapse vertical seismic profile[J]. Rock Soil Mech, 2018, 39(8): 3095–3102.
- [46] 郝艳军, 杨顶辉. 二氧化碳地质封存问题和地震监测研究进展[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(6): 2369–2383.
- Hao Y J, Yang D H. Research progress of carbon dioxide capture and geological sequestration problem and seismic monitoring research[J]. Progr Geophys, 2012, 27(6): 2369–2383.
- [47] 耿建华, 董良国, 马在田. 海底节点长期地震观测: 油气田开发与 CO₂ 地质封存过程监测[J]. 地球科学进展, 2011, 26(6): 669–677.
- Geng J H, Dong L G, Ma Z T. Ocean bottom nodes time – lapse seismic survey for monitoring oil and gas production and CO₂ geological storage[J]. Adv Earth Sci, 2011, 26(6): 669–677.
- [48] Arts R, Eiken O, Chadwick A, et al. Monitoring of CO₂ injected at

- Sleipner using time – lapse seismic data[J]. *Energy*,2004,29(9/10):1383 – 1392.
- [49] Lumley D E. Time – lapse seismic reservoir monitoring[J]. *Geophysics*,2001,66(1):50 – 53.
- [50] Arts R,Chadwick A,Eiken O,et al. Ten years’ experience of monitoring CO₂ injection in the Utsira Sand at Sleipner, offshore Norway[J]. *First Break*,2008,26(1):65 – 72.
- [51] Monea M,Knudsen R,Worth K,et al. Considerations for Monitoring, Verification, and Accounting for Geologic Storage of CO₂[M]//Mcpherson B J,Sundquist E T. *Carbon Sequestration and Its Role in the Global Carbon Cycle*. Washington D C: American Geophysical Union,2009,183:303 – 316.
- [52] Daley T M,Myer L R,Peterson J E,et al. Time – lapse crosswell seismic and VSP monitoring of injected CO₂ in a brine aquifer[J]. *Environ Geol*,2008,54(8):1657 – 1665.
- [53] Urosevic M,Campbell A J,Dahlhaus L,et al. Seismic monitoring and verification for the CO₂CRC Otway Basin Project,Part 2: Acquisition and analysis of borehole seismic data[J]. *Energy Procedia*,2009,1(1):3135 – 3140.
- [54] 由荣军,闫照涛. 时移地震技术在 CO₂ 地质储存监测中的适用性[J]. *物探化探计算技术*,2016,38(3):375 – 381.
- You R J,Yan Z T. The applicability of time – lapse seismic monitoring in the geological storage of CO₂[J]. *Comput Tech Geophys Geochem Explor*,2016,38(3):375 – 381.
- [55] 刁玉杰. 神华 CCS 示范工程场地储层表征与 CO₂ 运移规律研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2017.
- Diao Y J. Study on the Reservoir Characterization and CO₂ Migration Underground in the Shenhua CCS Demonstration Project Site[D]. Beijing:China University of Mining & Technology(Beijing),2017.

Environmental impact monitoring technology for carbon storage projects under leakage scenarios

ZHANG Chenglong, HAO Wenjie, HU Lisha, LIU Ting, ZHANG Hui, DIAO Yujie

(Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geological Survey, Hebei Baoding 071051, China)

Abstract: CO₂ environmental impact monitoring technology is an important part of the Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) system, which runs through the entire storage process and determines the success of CCUS. This technology also plays a decisive role for the effectiveness, sustainability, safety of the CCUS project and the assessment of carbon emission reduction effects. It is necessary to carry out the full – process measurement and monitoring of multiple monitoring indicators, such as environmental capacity, stratum response, and CO₂ underground migration, in order to ensure the safe and reliable operation of carbon storage projects. The emphasis of CO₂ environmental impact monitoring will be different under different monitoring stages and different monitoring indicators, and the corresponding monitoring technology combinations will show slight difference. Focusing on the CO₂ leakage monitoring and leakage source monitoring and identifying, the authors have systematically analyzed the features and application scenarios of CO₂ environmental impact monitoring technology, and expounded on the CO₂ environmental impact monitoring technology research progress under different monitoring stages and different monitoring indicators. Besides, the authors have also summarized CO₂ environmental impact monitoring technology selections under different leakage scenarios and the practical problems, and pointed out that the research and development of real – time monitoring equipment, the atmosphere – surface – underground three – dimensional rapid monitoring technology system and the construction of long – term and effective CO₂ monitoring management system would be the future development direction of the CO₂ environmental impact monitoring technology, which could provide some reference for the development of environmental impact monitoring technology for future megaton – level carbon storage projects.

Keywords: CCUS; CO₂ geological storage; CO₂ leakage; environment effects; monitoring technology

(责任编辑: 刘丹)