

二氧化碳地质储存动态监测研究

赵学亮, 郭建强, 史云, 张森琦, 郭颖平, 袁爱军

(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: 将化石燃料燃烧产生的 CO_2 进行储存, 是当前减缓温室效应的有效途径之一。为了保证储存的有效性、安全性和持久性, 必须开展科学、严格的监测, 从而为整个储存工程的成功提供重要技术支撑。详细阐述了当前 CO_2 地质储存采用的各项动态监测技术与方法。

关键词: CO_2 地质储存; 分布运移; 动态监测; 监测系统

中图分类号: P546, X701

文献标识码: A

文章编号: 1674-6732(2011)-06-0004-04

Research on Carbon Dioxide Geological Storage Dynamic Monitoring

ZHAO Xue-liang, GUO Jian-qiang, SHI Yun, ZHANG Sen-qi, GUO Ying-ping, YUAN Ai-jun

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

ABSTRACT: Carbon dioxide geological storage (CGS) is an enormous potential method to solve global greenhouse effects which are caused by anthropogenic greenhouse gases emissions. In order to guarantee the effectiveness, safety and durability, the scientific and rigorous monitoring must be implemented, so that the important technical support was provided to guarantee the success of global storage engineering. Various monitoring technologies and methods were introduced in detail.

KEY WORDS: carbon dioxide geological storage; distribution migration; dynamic monitoring; monitoring system

0 引言

有研究表明, 向空气中大量排放 CO_2 所导致的温室效应等问题, 已经威胁到人、动物乃至整个自然界的生态安全。因此, CO_2 减排已成为人类必须共同面对并急需解决的问题。

将 CO_2 注入石油和天然气储层、深层咸水层和枯竭的煤层等地质储层中, 是减少温室气体排放的可行方法。然而, 在长期的地质储存过程中, CO_2 既有可能从井筒、断层、裂缝泄露, 也有可能通过分子扩散作用从储层溢出^[1]。因此需要综合运用地球物理、地球化学、遥感等多种技术手段, 对注入 CO_2 储盖层的完整性、深部 CO_2 运移与分布状况、因渗漏所造成的环境影响等进行监测, 以便对整个储存工程的安全性、持久性和有效性作出评估, 及时发现各种潜在的危险。笔者将对 CO_2 地质储存动态监测方案与技术进行重点阐述。

涉及钻探、水文地质、工程地质、地质力学、地球物理、地球化学、遥感和自动控制等, 空间上需要贯穿空中、地面和地下。因此笔者提出了多学科、多手段的三维立体监测网络。监测对象包括: 空气、植被、土壤空气、地层压力、地球化学流体、稳定同位素、微地震和地面升降等; 技术方法涉及地球物理、地球化学、遥感和自动控制等领域, 技术方法主要包括: 时移地震、微地震、水质、土壤空气、空气、稳定同位素和红外探测等监测技术(表1)^[2,3]。

根据监测目的和对象, 将整个监测分为: 钻井监测、地下分布运移动态监测、安全 and 环境影响监测。实际监测工作中, 应根据监测目的, 综合运用表1中涉及的技术, 有针对性地布置监测网络。

1 整体方案设计

1.1 总体监测框架

CO_2 地质储存是一个高度复杂的工程, 学科上

收稿日期: 2011-03-28; 修订日期: 2011-04-19

基金项目: 中国地质调查局项目(水[2010]矿评03-08-01, 水[2010]矿评03-08-02, 水[2010]矿评03-08-04)。

作者简介: 赵学亮(1982—), 男, 工程师, 硕士, 从事环境自动监测仪器、环境监测研究工作。

表 1 CO₂监测技术一览

空间位置	监测技术	评价参数	评价能力
空中	非分散红外线大气分析技术	大气 CO ₂ 浓度、CO ₂ 同位素分析	监测 CO ₂ 浓度; 识别 CO ₂ 来源
	涡度协方差技术	CO ₂ 通量	与风速和风向结合, 定位和量化 CO ₂ 泄漏量
	机载红外激光气体分析技术	大气 CO ₂ 浓度	监测 CO ₂ 浓度
	遥感红外线成像技术	地表超谱成像	监测 CO ₂ 对植物健康状况的影响; 监测微小和隐藏的裂缝
	合成孔径雷达差分干涉测量 (D-InSAR) 技术	复雷达图像相位差信息	监测 CO ₂ 灌注引起的地面升降
地面	土壤空气累积室技术	土壤呼吸速率、CO ₂ 同位素分析	监测、定位和量化 CO ₂ 泄漏量; 识别泄漏源
	地表水 (如泉) 分析技术	矿化度、电导率、pH 值、CO ₃ ²⁻ 、HCO ₃ ⁻ 、重金属元素	检测 CO ₂ 向地表的泄漏情况; 了解 CO ₂ 溶解和矿化捕捉机理
	超声波检测技术	声波	检测灌注井和监测井密封情况
	井口压力	压力	核实 CO ₂ 状态信息; 核实 CO ₂ 注入量
	非人工源微地震监测技术	地震位置、等级和震源特点	识别 CO ₂ 潜在运移通道; 掌握 CO ₂ 深部运移和分布状况
	水准测量技术	地面升降	监测 CO ₂ 储存诱发的地面升降; 掌握 CO ₂ 深部运移和分布状况
	电法、电磁和重磁技术	地层导电率、电磁感应、流体密度	监测 CO ₂ 在储盖层分布运移状况; 了解储盖层地层状况; 监测咸水层向浅水层的运移状况
地下	地下地层压力	地层压力、地下含水层压力	控制注入压力和速率; 确定从储集层渗漏情况
	测井或者录井技术	井筒环空压力、咸度、声波、CO ₂ 饱和度	确定井的完整性; 监测 CO ₂ 进入浅水含水层情况; 校正三维地震速度参数
	时移偏移三维地震成像或垂直地震剖面井震标定技术	P 波和 S 波传播速度、反射层和地震振幅衰减	了解地层特征; 监测 CO ₂ 深部运移状况; 发现微裂缝等潜在逃逸通道

1.2 工作流程

- (1) 根据监测目的进行调查研究, 收集必要的基础资料, 然后经过综合分析, 确定监测项目, 设计布点网络, 选定采样频率、采样方法和监测技术, 建立质量保证程序和措施, 提出监测结果报告要求及进度计划。
- (2) 在 CO₂ 地质储存工程灌注前期开展场地背景值监测, 为灌注中后期监测获得的数据提供参考依据。
- (3) 在 CO₂ 地质储存工程灌注期和闭合前, 开展 CO₂ 深部运移监测、CO₂ 逃逸监测和安全与环境监测。
- (4) 在 CO₂ 地质储存工程闭场后, 开展 CO₂ 逃逸监测和安全与环境监测。
- (5) 整理和分析监测结果, 编写监测成果报告。

2 钻井监测

2.1 注入井监测

注入井是将捕捉、压缩后的超临界 CO₂ 注入储集层的通道, 对注入井的监测主要包括: 地层压力、注入压力、井口压力、温度、注入速率和气体泄漏等。对地层压力和注入压力进行监测, 主要目的是保证注入压力大于储层流体的压力而小于地层最大安全压力, 以便 CO₂ 有效注入到储集层的同时, 不会诱发地层中潜在的微裂缝或者缝隙产生^[3]; 对井口压力、温度和注入速率进行监测, 主要目的是防止可能发生的井喷和核实 CO₂ 状态信息, 保证现场工作人员的人身安全和核实注入量; 使用超声波气体泄漏检测仪定期对井口进行监测, 目的是验证井口装置的密封性, 以便及时发现可能通过注入井的泄漏。因此, 在向储集层注入 CO₂ 时, 一定要在先了解盖层的厚度、韧性、突破压力和井口装置最大突破压力之后, 再采取合适的注入速度和注入

压力^[4]。

在做好上述监测工作的同时,由于注入工程的特殊性,需要对注入井的选材、施工和管理做特殊化处理。比如,阀门和其他密封可受到超临界 CO₂ 的影响,因此需要选择适当的材料;油井与岩石结构之间的密封以及在废弃后封井所使用的水泥,必须能长期抗 CO₂ 和盐水;此外,为保持 CO₂ 注入井的完整,需要合适的建造材料和管理规则;等等。

2.2 监测井监测

监测井监测是 CO₂ 灌注工程的重要监测手段,监测的项目主要包括:地层压力、温度、地球化学流体和示踪剂等。地层压力和温度通过压力传感器监测,通过储层中压力传感器监测的压力变化,可使人了解 CO₂ 地下运移速度和运移方向;通过盖层中压力传感器监测的压力变化,可使人了解 CO₂ 对储盖层的突破情况。对地球化学流体和示踪剂的检测,首先需要通过分层定深取样器进行取样,然后对地球化学流体和示踪剂进行检测。地球化学流体和示踪剂的变化反映了 CO₂ 地下运移速度、运移方向和 CO₂ 储存机理。

2.3 废弃井监测

随着油田勘探的深入开发,废弃井的数量越发庞大,多数情况下没有对其进行防渗漏或封闭处理,使得废弃井成为 CO₂ 的主要潜在泄漏途径。对废弃井的处理,最常用的方法是灌注水泥或直接进行机械性封堵。对于无套管废弃井,可直接灌注大量水泥;对于有套管废弃井,虽然套管可以在一定程度上起到防渗漏的作用,但时间长了套管本身也极易遭受腐蚀,水泥墙、水泥塞以及套管本身都可能存在潜在的渗漏通道,因此需要移出套管后,直接灌注水泥,通过水泥封堵 CO₂ 的潜在渗漏通道。封堵后的废弃井要定期使用被动声波等手段进行 CO₂ 逃逸监测。

3 地下分布运移动态监测

当 CO₂ 注入储层后,将通过溶解、弥散、扩散、对流等各种物理或地球化学捕获机制,广泛分布于储集层、盖层和地层水中。当前有许多直接或间接检测技术被应用于地下 CO₂ 监测。

3.1 直接检测技术

3.1.1 天然或人工示踪剂

通过在注入井、监测井、地表水出露等地点对天然或者人工示踪剂进行检测,可精确实现对 CO₂

垂向迁移的直接测量。通过绘制示踪剂响应曲线,分析 CO₂ 运移方向和速率,研究多相流的渗透力学属性(饱和度、渗透率等)及其变化。一般而言,对示踪剂的选择有如下要求:①无毒、无味;②检出限低;③稳定性强,不与基质反应,不被含水层中的有机质吸附,没有明显生物降解。

当前推荐和国内外工程中使用的示踪剂主要有:①天然示踪剂:稳定碳同位素、稳定氧同位素、化学流体、稀有气体等;②人工示踪剂:SF₆(六氟化硫)、全氟化碳。

3.1.2 地球化学流体监测

目前通过研究发现,CO₂ 在深层含水层中的储存机理主要为以下两种:水力学隔离和地球化学矿物隔离。而在地球化学矿物隔离中,岩石矿物-水-CO₂ 的化学应对地下储存具有长期的、决定性的影响^[5]。通过地球化学流体可以实现对地下 CO₂ 运移的直接监测和认识,并可了解 CO₂ 与储层流体和矿物间的反应机理。对流体样品监测的参数主要包括:pH 值、电导率、总矿化度、Na⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、CO₃²⁻、HCO₃⁻、Pb、As 等。当前,地球化学流体检测技术比较成熟,可实现现场快速检测,应用的技术方法包括:离子选择性电极法、分光光度计法和电化学法等。

3.2 间接检测技术

3.2.1 地震监测

地震监测的本质是通过岩石检测由人工和自然产生的波的速度和吸收的能量。不同性质的岩石以及岩石所含的流体会改变波的属性。当储层注入 CO₂ 后,储层流体的密度、饱和度、孔隙压力、流体运移方向都将发生变化,因此,可利用这种属性的差异来反演地层参数的变化,实现对 CO₂ 在储层分布运移状况的监测。在加拿大 Weyburn 油田中,研究人员运用了时间偏移三维地震监测技术、垂直地震剖面法(VSP)和十字井层析成像技术,较准确地量化了 CO₂ 在地下岩石孔隙中的存储量以及分布状况^[6]。

此外,微震技术也有一定的应用价值,它通过监测地层压力的变化或者地层裂缝引起的微小震动事件,反映压力的变化规律以及气体在储存区和含水层的运移。

通常,地震监测方法比较直观、准确和形象,与储层建模技术、地层断裂和水动力系统研究相结合,可有效地预测 CO₂ 在地下储层的分布规律,这

也是目前应用最广泛、最成熟和最有效的技术。

3.2.2 非地震监测

非地震的地球物理监测方法包括:电法、电磁法、重磁法和自然电位法。电法和电磁法通过监测地层电导率实现。当高密度的盐溶液被低密度的 CO_2 取代时,电导率会发生变化,这种变化能够通过电法和电磁法检测到。重磁法主要依据密度的变化,在地下,一种流体被另一种流体代替时(比如 CO_2 流体代替水),密度将会发生变化。重磁技术应用数学模型,通过观察到的数据能够发现密度的变化。应用自电位技术,通过测量地球电位,也能够检测到 CO_2 的运移。

4 安全和环境影响监测

在开展 CO_2 地质埋存项目时,安全性是首要考虑的因素。涉及的安全风险和危害主要有: CO_2 逃逸引起的大气环境影响、陆地生态系统影响、浅层地下水污染、微地震和地面沉降或者抬升等^[7]。 CO_2 泄漏通道见图1。

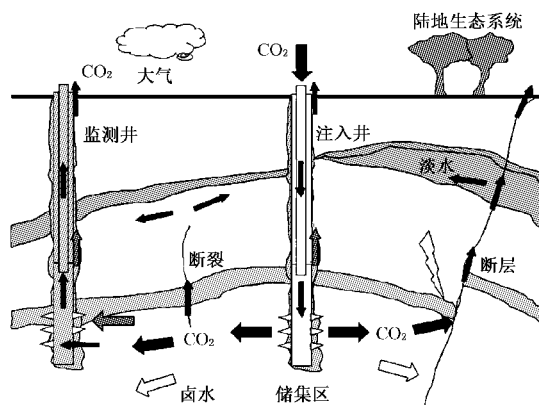


图1 CO_2 泄漏通道

对于泄漏至大气中的 CO_2 ,目前最常采用的监测设备是红外线监测仪,此外,非色散式 CO_2 红外线分析仪和傅立叶转换红外线光谱仪也较常被使用。涡度相关探测方法也可监测大气中的 CO_2 ,该法使用的仪器由红外线气体分析仪和风速仪组成。风速仪测量风速和风向;红外线气体分析仪能够探测来自逆风区域的 CO_2 ,区域大小和形状可通过对风速和风向进行计算得到。结合 CO_2 浓度信息,能够确定单位时间、单位区域内 CO_2 的泄漏量^[8]。

对于浅层地下水中的 CO_2 ,主要通过监测地下水pH值、电导率、总矿化度、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、Pb、As等项目实现,确定 CO_2 是否发生泄露以及对地层水造成的影响。对于陆地生态

系统,主要通过监测土壤呼吸速率,确定 CO_2 是否发生泄露以及对动植物生长造成的影响。对于地面沉降和抬升,主要通过水准仪测量和合成孔径雷达差分干涉测量(D-InSAR)技术,确定地质储存可能诱发的断裂。

5 结语

为了保证 CO_2 埋存的长期稳定性和安全性,贯穿于整个 CO_2 储存工程中的动态监测显得尤为重要。当前,应根据中国国情,加大 CO_2 地下储存的监测技术方法研究和应用力度,制定相应的监测体系和技术规范,以期 CO_2 地质储存工程在中国的实施提供重要技术支撑。

[参考文献]

- [1] KLARA S M, SRIVASTAVA R D, MCLLVRIED H G. Integrated collaborative technology development program for CO_2 sequestration in geologic formations — United States Department of Energy R & D [J]. Energy Conversion and Management, 2003, 44(17): 2699–2712.
- [2] PRESTON C, MONEA M, JAZRAWI W, et al. IEA GHG Weyburn CO_2 monitoring and storage project [J]. Fuel Processing Technology, 2005, 86(14–15): 1547–1568.
- [3] 许志刚, 陈代钊, 曾荣树, 等. CO_2 地下埋存分布状况及环境影响的监测[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(6): 363–368.
- [4] METZ B, DAVIDSON O, CONINCK H, et al. IPCC Special Report on CO_2 Capture and Storage [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005: 195–276.
- [5] 张炜, 李义连. 二氧化碳储存技术的研究现状和展望[J]. 环境污染与防治, 2006, 28(12).
- [6] EMBERLEY S, HUTCHEON I, SHEVALLER M, et al. Geochemical monitoring of fluid-rock interaction and CO_2 storage at the Weyburn CO_2 -injection enhanced oil recovery site, Saskatchewan, Canada [J]. Energy, 2004, 29(9–10): 1393–1401.
- [7] BALDOCCHI D D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating CO_2 exchange rate of ecosystems: past, present and future [J]. Global Change Biology, 2003, 9(4): 479–492.
- [8] PRESTON C, MONEA M, JAZRAWI W, et al. IEA GHG Weyburn CO_2 monitoring and storage project [J]. Fuel Processing Technology, 2005, 86(14–15): 1547–1568.