

文章编号:1009-9603(2023)02-0144-09

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.202211026

# CO<sub>2</sub>驱油与封存安全监测体系的构建及实践

——以黄土塬地区特低渗透油藏为例

刘 瑛<sup>1,2</sup>, 王香增<sup>1,3</sup>, 杨 红<sup>1,2</sup>, 梁全胜<sup>1,2</sup>, 沈振振<sup>1,2</sup>, 王 伟<sup>1,2</sup>, 王维波<sup>1,2</sup>, 郑 晶<sup>4</sup>, 康元勇<sup>5</sup>

(1.陕西省CO<sub>2</sub>封存与提高采收率重点实验室,陕西西安710065; 2.陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院,陕西西安710065; 3.陕西延长石油(集团)有限责任公司,陕西西安710065; 4.中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京100083; 5.中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院,山东东营257015)

**摘要:**黄土塬地区地表条件复杂,特低渗透油藏CO<sub>2</sub>驱井网密度大、注入压力高、易气窜以及为减缓气窜以水气交替开发为主的特点造成CO<sub>2</sub>泄漏点源多、强度高,以致该区域CO<sub>2</sub>监测点位布局和监测精度要求高,现有安全监测体系难以适应。通过对黄土塬地区特低渗透油藏CO<sub>2</sub>泄漏风险进行识别,分析CO<sub>2</sub>在地质体的空间运移特征,构建了涵盖盖层、井筒、深层和浅层地下水、地表土壤、地表水和大气体的立体化多指标CO<sub>2</sub>安全监测体系,并在此基础上,开展了矿场CO<sub>2</sub>安全监测实践,进一步建立了CO<sub>2</sub>封存安全评价体系。安全监测和评价结果表明,CO<sub>2</sub>注入后各指标未出现异常,试验区未发生CO<sub>2</sub>地质泄漏,CO<sub>2</sub>封存安全等级为I级。

**关键词:**监测体系;CO<sub>2</sub>封存;特低渗透油藏;安全评价体系;黄土塬地区

中图分类号:TE348

文献标识码:A

## Establishment and practice of safety monitoring system during CO<sub>2</sub> flooding and storage: A case study of ultra-low permeability reservoirs in loess tableland

LIU Ying<sup>1,2</sup>, WANG Xiangzeng<sup>1,3</sup>, YANG Hong<sup>1,2</sup>, LIANG Quansheng<sup>1,2</sup>, SHEN Zhenzhen<sup>1,2</sup>,

WANG Wei<sup>1,2</sup>, WANG Weibo<sup>1,2</sup>, ZHENG Jing<sup>4</sup>, KANG Yuanyong<sup>5</sup>

(1. Shaanxi Key Laboratory of CO<sub>2</sub> Sequestration and Enhanced Oil Recovery, Xi'an City, Shaanxi Province, 710065, China; 2. Research Institute of Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., Xi'an City, Shaanxi Province, 710065, China; 3. Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., Xi'an City, Shaanxi Province, 710065, China; 4. School of Geosciences & Surveying Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing City, 100083, China; 5. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China)

**Abstract:** The loess tableland has complex surface conditions, and CO<sub>2</sub> flooding in ultra-low permeability reservoirs faces the high density of well patterns, the high injection pressure, and the easy gas channeling. Moreover, the development is characterized by water-alternating-gas injection to mitigate gas-channeling. As a result, there are multiple CO<sub>2</sub> leakage points and high intensity in this area, so the layout and monitoring accuracy of CO<sub>2</sub> monitoring points are demanding, and the existing safety monitoring systems are hardly applicable. In view of these problems, according to the identification of CO<sub>2</sub> leakage risks in ultra-low permeability reservoirs in the loess tableland and the analysis of CO<sub>2</sub> spatial migration in geological bodies, a three-dimensional multi-index CO<sub>2</sub> safety monitoring system was established, covering cap rock, well-

收稿日期:2022-11-25。

作者简介:刘瑛(1976—),女,浙江临海人,高级工程师,从事油气田开发方面的研究与管理工。E-mail:liuy\_2012@163.com。

通信作者:杨红(1986—),男,湖北仙桃人,高级工程师,硕士。E-mail:yh\_cup2011@sina.com。

基金项目:国家重点研发计划项目“二氧化碳提高油藏采收率与地质封存一体化关键技术及应用示范”(2022YFE0206700)和“CO<sub>2</sub>驱油技术及地质封存安全监测”(2018YFB0605500),陕西省青年科技新星项目“促进CO<sub>2</sub>与原油混相的伴生气体体系构筑及其改善CO<sub>2</sub>驱油效果评价”(2021KJXX-86)。

bores, deep and shallow groundwater, soil, surface water, and atmosphere. Besides, CO<sub>2</sub> safety monitoring was practically carried out to further build a safety evaluation system of CO<sub>2</sub> storage. From the results of safety monitoring and evaluation, there was no abnormality for all indexes after CO<sub>2</sub> injection and no CO<sub>2</sub> geological leakage occurred in the test area. The safety of CO<sub>2</sub> storage was at the level I.

**Key words:** monitoring system; CO<sub>2</sub> storage; ultra-low permeability reservoir; safety evaluation system; loess tableland

碳捕集、利用与封存(CCUS)作为一项为应对温室气体减排而发展起来的新兴技术,能够在实现CO<sub>2</sub>大规模减排中发挥重要作用。2020年国际能源署(IEA)研究表明,在可持续发展情景下,CCUS技术对CO<sub>2</sub>累积减排量的贡献可达15%<sup>[1]</sup>。CO<sub>2</sub>驱油与封存作为CCUS技术的重要组成和发展方向,具有经济和环保双重效益,被认为是当前经济和技术条件下CO<sub>2</sub>减排的理想选择<sup>[2-3]</sup>。在CO<sub>2</sub>驱油提高采收率的同时,由于地质构造、黏滞力和毛细管力作用、CO<sub>2</sub>在地层流体中的溶解及其与地层岩石矿物和流体相互作用,绝大部分CO<sub>2</sub>会封存在油藏中<sup>[4-6]</sup>,但由于地质条件本身的不确定性和油藏开发过程中的人为因素,注入的CO<sub>2</sub>依然具有一定的泄漏风险<sup>[7-10]</sup>。一旦CO<sub>2</sub>发生泄漏,会对生态环境和社会安全产生重大影响,建立系统全面的CO<sub>2</sub>安全监测体系并进行有效监测是目前降低CO<sub>2</sub>泄漏风险和保障CO<sub>2</sub>封存安全的主要方法。

为构建CO<sub>2</sub>驱油与封存安全监测体系,中外众多学者开展了广泛研究。WHITTAKER等基于Weyburn和Pembina油田地质特征,建立了涵盖储层、盖层、地下流体和近地表环境的CO<sub>2</sub>安全监测体系<sup>[11-12]</sup>。MA等通过评估乔家洼油区储盖层条件,设计了覆盖储层和近地表环境的CO<sub>2</sub>安全监测体系<sup>[13]</sup>。李琦等利用MST软件提出了针对胜利油田的CO<sub>2</sub>安全监测体系框架<sup>[14]</sup>。ZHANG等在吉林油田构建了包括井筒完整性、储层和环境的CO<sub>2</sub>安全监测体系<sup>[15]</sup>。中国环保部发布的《二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南(试行)》,对CCUS项目环境风险识别和评估做了进一步规范<sup>[16]</sup>。综合分析,中外学者针对特定油藏已建立了完整性不同的CO<sub>2</sub>安全监测体系并开展了相应监测,但在黄土塬地区特低渗透油藏CO<sub>2</sub>安全监测体系方面还缺少系统研究。由于特低渗透油藏储层物性差、非均质性强、天然和人工裂缝交错,油藏开发具有井网密度大、注入压力高、易气窜以及为减缓气窜以水气交替开发为主的特点,造成油藏CO<sub>2</sub>泄漏呈现点源多、强度高的风险特征<sup>[17-18]</sup>;另外,黄土塬地区地表沟壑纵横,且覆盖有较厚的疏松黄土层,近地表CO<sub>2</sub>监测受监测点位和气象条件影响较

大,对该区域CO<sub>2</sub>监测点位布局和监测精度要求更高<sup>[19-20]</sup>。上述特点造成现有的安全监测体系难以适用于黄土塬地区特低渗透油藏CO<sub>2</sub>驱油与封存。

为此,笔者在分析黄土塬地区特低渗透油藏CO<sub>2</sub>泄漏途径和风险识别的基础上,通过明确CO<sub>2</sub>在地质体的空间运移特征,提出了CO<sub>2</sub>泄漏安全监测指标,构建了立体化多指标CO<sub>2</sub>安全监测体系,并针对性开展了矿场CO<sub>2</sub>泄漏监测,保障了CO<sub>2</sub>驱油与封存示范工程的安全性。同时,结合安全监测体系和矿场安全监测实践进一步建立了适合黄土塬地区特低渗透油藏的CO<sub>2</sub>封存安全评价体系,为高效开展CO<sub>2</sub>驱油与封存项目的安全监测和评价提供依据。

## 1 CO<sub>2</sub>泄漏风险识别

CO<sub>2</sub>泄漏风险识别是指判别能引起CO<sub>2</sub>泄漏的各种事件,分析风险发生的潜在原因<sup>[21]</sup>。一般来说,CO<sub>2</sub>驱油与封存泄漏风险主要来自注入井、生产井、废弃井等工程设施和地层裂缝、断层等地质构造,由于鄂尔多斯盆地地质构造较为稳定,断层基本不发育,本文主要分析由井筒和地层裂缝可能引发的CO<sub>2</sub>泄漏。

CO<sub>2</sub>注入会引发井筒内温度和压力的交替变化,导致井筒组合体(套管、水泥、地层岩石)发生非均匀热膨胀和收缩,井筒出现动态拉伸和收缩破坏,造成在套管/水泥环和水泥环/地层的界面产生裂纹<sup>[22-24]</sup>。同时,由于CO<sub>2</sub>对套管和水泥环的化学腐蚀作用,CO<sub>2</sub>长期注入后,存在套管穿孔及水泥环产生空隙、裂缝和径向裂纹的风险<sup>[25-26]</sup>,这些都是CO<sub>2</sub>在注入井井筒发生泄漏的通道。需要注意的是,特低渗透油藏开发井网密度大、注入压力高和水气交替开发的特点,造成交变应力和腐蚀作用对井筒的破坏性增强,井筒CO<sub>2</sub>泄漏点源增多,致使CO<sub>2</sub>泄漏风险大幅增加。因此,为保障特低渗透油藏CO<sub>2</sub>注入与封存安全,必须扩大井筒监测范围,提高监测频率。

特低渗透油藏天然裂缝发育,受压裂改造形成的人工裂缝也普遍存在,在较高的注入压力下,裂缝开启和生成会造成CO<sub>2</sub>泄漏风险进一步增大,需

对储盖层裂缝进行动态监测<sup>[27]</sup>。通过监测储层CO<sub>2</sub>运移情况,明确其运移方向和范围以判断CO<sub>2</sub>潜在泄漏方位,并指导开展其他监测。同时,盖层既是阻碍CO<sub>2</sub>向上迁移的有效屏障,也是泄漏通道。由于特低渗透储层上覆盖层多为泥岩,其突破压力高、厚度大且分布连续性好,CO<sub>2</sub>一般难以通过渗透和扩散方式突破盖层发生泄漏<sup>[28]</sup>。为降低盖层裂缝开启和生成的风险,防止CO<sub>2</sub>泄漏,可通过长期监测盖层中的微地震事件以确保盖层良好的封盖效果。

## 2 CO<sub>2</sub>安全监测体系构建

### 2.1 CO<sub>2</sub>泄漏空间运移特征

由于储层及其上部地层条件复杂,CO<sub>2</sub>在地层的迁移转化方式多样。受浮力作用影响,注入储层的CO<sub>2</sub>纵向迁移速度高于横向,注入初期以纵向运移为主,在CO<sub>2</sub>羽流到达盖层底部后,受盖层阻隔作用控制,开始在储层大规模横向运移。随着注入量增大和储层压力不断升高,CO<sub>2</sub>通过渗透和扩散作用缓慢进入盖层,由于盖层泥质含量高、厚度大、突破压力高,CO<sub>2</sub>通过上述2种机制一般难以有效突破盖层,但特低渗透油藏注入压力高,盖层存在裂缝开启和生成的风险,这些裂缝可为CO<sub>2</sub>突破盖层提供泄漏通道。

突破盖层或沿井筒泄漏的CO<sub>2</sub>会进入深层地下水,并从泄漏点向上快速扩散。由于深层地下水受次级盖层的阻隔作用,上覆地层流体对其扰动较小,水体流动缓慢,当CO<sub>2</sub>为点状泄漏且速率较低时,CO<sub>2</sub>羽流在纵向上呈窄带状垂向分布,随着CO<sub>2</sub>泄漏速率增大,羽流幅围逐渐变宽并向上泄漏至浅层地下水<sup>[20]</sup>。与深层地下水层相比,浅层地下水层渗透率高,CO<sub>2</sub>在其中扩散更快。同时,由于浅层地下水与地表水连通性好,黄土塬地区地表土壤良好的透水性会促使地表降水入渗作用增强,由此造成浅层地下水流动速度相对较快,CO<sub>2</sub>泄漏一般具有显著的随水流向下游运移的方向性特征,因此,为确保CO<sub>2</sub>封存安全,应对下游位置进行重点监测。此外,由于浅层地下水还是重要工农业生产和居民生活水源,因此,其是开展CO<sub>2</sub>泄漏监测的重点区域。

CO<sub>2</sub>突破浅层地下水体后会向上泄漏至土壤、大气等地表环境。由于黄土塬地区地表土质疏松、孔隙度大,CO<sub>2</sub>在土壤中运移阻力小且扩散速度快,使得CO<sub>2</sub>泄漏具有横向多向性和纵向泄漏面积大的特点<sup>[19]</sup>,考虑区域覆盖黄土层较厚,应对不同深度的土壤进行监测。CO<sub>2</sub>泄漏至大气后,受地势和气

象条件的影响,易在下风向和黄土塬地区河谷等地势低洼区聚集,进而形成高浓度CO<sub>2</sub>聚集区。因此,在进行大气CO<sub>2</sub>监测时,应重点监测井场下风向和河谷区。

### 2.2 CO<sub>2</sub>安全监测指标

CO<sub>2</sub>泄漏至储层上部地层空间后会引发地层及其赋存流体性质的变化,为快速高效监测CO<sub>2</sub>泄漏情况,需根据不同监测层位的CO<sub>2</sub>泄漏空间运移特征,建立技术上可操作性强且经济可行的CO<sub>2</sub>安全监测指标。

#### 2.2.1 微地震事件

CO<sub>2</sub>注入储层后,在地层压力梯度和浮力的共同作用下,CO<sub>2</sub>羽流发生横向和纵向迁移并产生压力扰动,甚至在地层局部出现压力聚集,诱发储层和上覆盖层裂缝开启或生成,甚至会活化断层,产生不同级别的微地震事件<sup>[29-30]</sup>。利用微地震技术监测地层发生的微地震事件,可以评估CO<sub>2</sub>封存的安全性。Weyburn油田微地震监测发现,在储层的上覆和下伏地层出现多个震级为1~3级的微地震事件<sup>[29]</sup>。Illinois盆地咸水层CO<sub>2</sub>封存项目,在22个月的注入时间内,在储层下部地层监测到10 123次震级为1~2级的微地震事件,分析认为注入的CO<sub>2</sub>活化了该区域的多个小断层<sup>[31]</sup>。

特低渗透油藏由于CO<sub>2</sub>注入压力高,运移过程中产生的压力扰动大,进而诱发裂缝的风险也增大,利用微地震技术对储层和盖层进行重点监测,分析产生的原因,并着重评估CO<sub>2</sub>注入后的盖层完整性。

#### 2.2.2 腐蚀监测

CO<sub>2</sub>溶于水后形成的酸性流体会对油管 and 套管造成不同程度的腐蚀,随着腐蚀损伤累积,管柱的物理化学特性发生改变,导致其结构稳定性和耐久性降低,进而破坏井筒的完整性,严重影响CO<sub>2</sub>的安全注入与封存。大庆长垣外围油田CO<sub>2</sub>驱油试验区井筒点滴式加注缓蚀剂后,进行腐蚀速率监测显示,不同深度油井井筒平均腐蚀速率为0.025 6 mm/a<sup>[32]</sup>。长岭气田气井管柱腐蚀速率监测发现,加注缓蚀剂后,生产管柱的腐蚀速率控制在行业标准范围内<sup>[33]</sup>。相关研究结果均表明,向油套环空加注缓蚀剂并对注采管柱进行腐蚀监测,是保持井筒完整性,确保CO<sub>2</sub>注入与封存安全的有效手段<sup>[34-38]</sup>。

与富CO<sub>2</sub>相环境相比,富H<sub>2</sub>O相中溶有更多杂质,碳钢管材在富H<sub>2</sub>O相中比在富CO<sub>2</sub>相中面临更严重的腐蚀<sup>[39]</sup>。特低渗透油藏CO<sub>2</sub>和水交替注入的开发方式进一步加剧了流体对管柱的腐蚀,在制定

严格的腐蚀防护措施的基础上,需对注采管柱进行高频率的腐蚀速率、采出水铁离子质量浓度等指标监测,及时分析注采管柱腐蚀情况,最大限度地降低CO<sub>2</sub>沿管柱泄漏的风险。

### 2.2.3 pH值

黄土塬地区地下水和地表水均呈中性-偏弱碱性,CO<sub>2</sub>泄漏至地下水体后,溶于地层水并生成碳酸,从而引起水体酸化,pH值降低。杜尚海等以美国某试验场地为例,模拟了CO<sub>2</sub>泄漏对浅层地下水的影响,结果表明,CO<sub>2</sub>泄漏进入浅层地下水后,水体pH值从初始的7.96降低至4.98<sup>[40]</sup>。姜玲模拟研究得出,当泄漏速率为0.000 5 kg/s时,地下水pH值迅速降低至饮用水标准范围以下<sup>[41]</sup>。LITTLE等对美国17个地区的含水层进行CO<sub>2</sub>注入实验发现,所有样品中的H<sup>+</sup>质量浓度均升高了1~2个数量级<sup>[42]</sup>。张丙华等通过实验发现,不同泄漏速率条件下,CO<sub>2</sub>发生泄漏48 h后,地表水pH值均以不同速度由7.7下降至约5.3<sup>[43]</sup>。因此,pH值可作为一项水体监测指标以判断CO<sub>2</sub>是否泄漏。

### 2.2.4 Ca<sup>2+</sup>和Mg<sup>2+</sup>质量浓度

CO<sub>2</sub>泄漏造成水体酸化会改变原始地层中的水岩平衡环境,诱发方解石、伊利石、斜长石、绿泥石等矿物溶解和蒙脱石等矿物沉淀,从而引发水体中离子质量浓度发生变化。LI等以延长油田浅层地下水为例,研究了CO<sub>2</sub>泄漏对地下水化学组成的影响<sup>[44]</sup>。研究表明:在CO<sub>2</sub>泄漏速率为0.000 1 kg/s的条件下,在泄漏初始阶段,由于泄漏点附近水体中方解石、伊利石、斜长石和绿泥石等矿物溶解,Ca<sup>2+</sup>和Mg<sup>2+</sup>质量浓度急剧升高;CO<sub>2</sub>泄漏10 a后,受上述矿物溶解和钠蒙脱石、钙蒙脱石沉淀作用的影响,Ca<sup>2+</sup>质量浓度开始缓慢升高,Mg<sup>2+</sup>质量浓度快速下降;但CO<sub>2</sub>泄漏100 a后,Mg<sup>2+</sup>质量浓度依然远高于其初始值。因此,基于CO<sub>2</sub>泄漏至地下水体后,水体中Ca<sup>2+</sup>和Mg<sup>2+</sup>质量浓度显著升高的变化规律,可将其作为一项监测水体CO<sub>2</sub>泄漏的重要指标。

### 2.2.5 CO<sub>2</sub>浓度

CO<sub>2</sub>突破浅层地下水体后,受环境温度和压力降低的影响,开始以气态的形式扩散运移。CO<sub>2</sub>泄漏至土壤层后,快速置换土壤中的原生气体,造成CO<sub>2</sub>浓度升高。由于黄土塬地区地表土壤以支架大孔隙结构为主<sup>[45]</sup>,具有无层理、极松散、多孔隙的特点,CO<sub>2</sub>在该地区土壤层中的迁移速度高且强度大<sup>[46-47]</sup>。CO<sub>2</sub>泄漏至大气后,由于CO<sub>2</sub>较空气重,一定时间内泄漏点附近和地表低洼地带大气中CO<sub>2</sub>浓度会显著升高。因此,可将CO<sub>2</sub>浓度作为一项监测指

标,用于监测CO<sub>2</sub>在地表土壤和大气中的泄漏情况。

### 2.2.6 碳同位素组成 $\delta^{13}\text{C}$

碳同位素反映了碳源物质的组成及相对含量,可用于追踪CO<sub>2</sub>的来源,近年来被广泛应用于气候与环境变化研究<sup>[48]</sup>。薛璐等利用靖边乔家洼CCUS试验区土壤开展CO<sub>2</sub>泄漏模拟实验,通过研究不同体积分数CO<sub>2</sub>对C<sub>3</sub>和C<sub>4</sub>植物 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响,认为利用C<sub>4</sub>植物 $\delta^{13}\text{C}$ 可有效识别CO<sub>2</sub>泄漏<sup>[49]</sup>。王晓晓通过开展雪玉洞周边地区植被和土壤等的 $\delta^{13}\text{C}$ 监测,明确了洞穴内CO<sub>2</sub>主要来源为地下河<sup>[50]</sup>。CO<sub>2</sub>注入前,黄土塬地区地表土壤气 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-39.3‰~-25.6‰,大气 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-34.3‰~-26.1‰,油藏注入的CO<sub>2</sub>为煤化工尾气,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-17.0‰~-15.0‰,由于注入CO<sub>2</sub>与监测环境中地表土壤气和大气中CO<sub>2</sub>的 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异较大,故可将碳同位素组成 $\delta^{13}\text{C}$ 作为黄土塬地区地表土壤和大气的CO<sub>2</sub>泄漏监测指标。

## 2.3 CO<sub>2</sub>安全监测体系

特低渗透油藏CO<sub>2</sub>注入压力高,随着CO<sub>2</sub>注入量增大,储层压力升高,导致CO<sub>2</sub>沿盖层原生裂缝向上迁移的风险增大。同时,特低渗透油藏注采井网密度大,CO<sub>2</sub>沿井筒泄漏点源多。突破盖层或沿井筒泄漏的CO<sub>2</sub>受地下水浮力作用,在纵向上向深层和浅层地下水迁移,并具有沿地下水流向下游横向迁移的特征。当CO<sub>2</sub>泄漏量增大时,CO<sub>2</sub>会突破深层和浅层地下水进入地表浅层土壤,并在黄土塬地区疏松土壤层中发生多向扩散运移,直至泄漏至近地表和大气中,并在泄漏点附近及地势低洼区聚集。因此,为全面监测CO<sub>2</sub>泄漏情况,需建立黄土塬地区特低渗透油藏立体化CO<sub>2</sub>安全监测体系,该体系需在纵向上覆盖多层位,平面上控制重点区(表1)。

纵向上,CO<sub>2</sub>突破盖层或腐蚀井筒后进入深层和浅层地下水,甚至泄漏至地表土壤、地表水和大气中,形成自下而上的泄漏路径。针对CO<sub>2</sub>纵向泄漏特征,建立了涵盖盖层、井筒、深层和浅层地下水、地表土壤、地表水和大气多层位纵向CO<sub>2</sub>安全监测体系。在地面和监测井中布设检波器,实时监测盖层中微地震事件;在注入井不同深度安装腐蚀挂片,并取样检测生产井采出水中Fe<sup>2+</sup>和Fe<sup>3+</sup>质量浓度;取样检测深层和浅层地下水及地表水的pH值、Ca<sup>2+</sup>和Mg<sup>2+</sup>质量浓度;利用土壤-大气一体化监测设备,原位监测不同深度地表土壤气和大气中CO<sub>2</sub>浓度,同时取样分析地表土壤气和大气中的碳同位素组成 $\delta^{13}\text{C}$ 。

平面上,由于CO<sub>2</sub>泄漏路径受盖层完整性、注采井网、浅层地下水水流方向、黄土塬地区地形和气

表1 黄土塬地区特低渗透油藏CO<sub>2</sub>安全监测体系  
Table1 CO<sub>2</sub> safety monitoring system for ultra-low permeability reservoir in loess tableland

监测对象	监测指标	监测方法	监测要点
盖层	微地震事件	井地联合微地震监测	监测点位布设应基于区域盖层地质特征,并结合储层CO <sub>2</sub> 实际运移情况,及时分析微地震事件产生的原因
井筒	腐蚀速率	腐蚀挂片监测	提高对井筒尤其是注入井的监测频率,避免将井筒设置在平面监测网的边缘位置
	Fe <sup>2+</sup> 和Fe <sup>3+</sup> 质量浓度	取样检测分析	
深层和浅层地下水、地表水	pH值,Ca <sup>2+</sup> 和Mg <sup>2+</sup> 质量浓度	取样检测分析	重点监测水流下游区域,提高深层和浅层地下水监测频率
地表土壤	CO <sub>2</sub> 浓度	CO <sub>2</sub> 浓度在线监测	监测点应覆盖黄土塬地区梁卯和河谷地形,监测地下不同深度地表土壤气,提高夏季监测频率
	δ <sup>13</sup> C	取样检测分析	
大气	CO <sub>2</sub> 浓度	CO <sub>2</sub> 浓度在线监测	监测点位高度设置需考虑地表植被发育情况,加强对下风向和低洼地带的监测
	δ <sup>13</sup> C	取样检测分析	

象条件等因素的影响,CO<sub>2</sub>在不同层位迁移方向多、运移范围大。针对CO<sub>2</sub>平面泄漏特征,黄土塬地区特低渗透油藏CO<sub>2</sub>监测点位应确保覆盖试验区和控制重点区,具体为:尽量将注入井置于所有层位平面监测网的中心位置;盖层监测点位布设需参照储层CO<sub>2</sub>运移范围,并对薄弱区加密监测点;深层和浅层地下水、地表水监测点位应重点布设在下游位置;地表土壤和大气监测点位应集中布设在下游风向和低洼地带。

### 3 CO<sub>2</sub>安全监测实践

基于CO<sub>2</sub>安全监测体系,对黄土塬地区特低渗透油藏开展了盖层、井筒、深层和浅层地下水、地表土壤、地表水及大气的立体化CO<sub>2</sub>安全监测。

通过在地面布设观测台站和井中储盖层段下入检波器,联合监测CO<sub>2</sub>驱油与封存过程中产生的微地震事件来评估盖层的完整性。井地联合微地震监测结果显示,在CO<sub>2</sub>注入过程中,共监测到28个微地震事件,均位于长6段储层中上部注入井附近,说明在CO<sub>2</sub>驱油与封存过程中,盖层完整性未受影响。结合VSP监测发现,CO<sub>2</sub>扩散运移集中在埋深为1380~1500m的储层内,即CO<sub>2</sub>垂直运移深度为1500m。

加注缓蚀剂后的注采管柱腐蚀监测发现,注入井在埋深400,1000和1600m处油管内外壁腐蚀速率为0.008~0.016mm/a,低于行业标准规定的腐蚀速率;生产井采出水中Fe<sup>2+</sup>和Fe<sup>3+</sup>质量浓度分别为6.52~9.25和0.22~0.63mg/L,该值与注气前采出水中Fe<sup>2+</sup>和Fe<sup>3+</sup>质量浓度相比,未出现明显变化。这表明加注缓蚀剂后,CO<sub>2</sub>驱油与封存过程中注采管柱未发生严重腐蚀。

地下水持续监测显示,深层地下水pH值为6.87~7.17,Ca<sup>2+</sup>和Mg<sup>2+</sup>的质量浓度分别为3.95~20.84和167.73~360.71mg/L;浅层地下水pH值为7.72~7.95,Ca<sup>2+</sup>和Mg<sup>2+</sup>的质量浓度分别为86.25~138.95和55.07~99.89mg/L,且上下游监测点位获取的监测数据未见明显差异,初步判断CO<sub>2</sub>未泄漏至地下含水层。

大气和地表土壤气CO<sub>2</sub>浓度采用一体化集成设备进行监测,其中,大气CO<sub>2</sub>浓度监测点位的高度距离地面约为50cm,地表土壤气CO<sub>2</sub>浓度监测点位在地表以下1.20m。梁卯区和河谷区监测结果(图1)均显示,注气前后大气CO<sub>2</sub>体积分数均为0.04%~0.041%;受黄土塬地区林草地植物根系呼吸作用和微生物活动影响,地表土壤气CO<sub>2</sub>浓度表现出夏季高、冬季低的变化特征,其中,夏季和冬季地表土壤气CO<sub>2</sub>体积分数分别为0.91%~1.38%和0.40%~0.72%,但注气前后不同地形地表土壤气CO<sub>2</sub>浓度呈现的季节性变化规律均一致。CO<sub>2</sub>注入前后大气和地表土壤气δ<sup>13</sup>C值监测结果一致,且均与注入气δ<sup>13</sup>C值差异明显。上下游地表水长期监测结果显示,pH值为7.68~8.07,Ca<sup>2+</sup>和Mg<sup>2+</sup>的质量浓度分别为55.34~56.99和37.99~41.06mg/L。由此,结合大气和地表土壤气CO<sub>2</sub>浓度、δ<sup>13</sup>C和地表水监测结果可判断CO<sub>2</sub>未泄漏至近地表和大气环境。

综合立体化CO<sub>2</sub>安全监测结果,认为黄土塬地区特低渗透油藏CO<sub>2</sub>驱油与封存过程中未发生CO<sub>2</sub>地质泄漏,除部分CO<sub>2</sub>随生产井产出外,注入的CO<sub>2</sub>均已实现安全有效封存。

### 4 CO<sub>2</sub>封存安全评价体系建立

参考饮用水水源评价体系<sup>[51]</sup>,将CO<sub>2</sub>封存安全

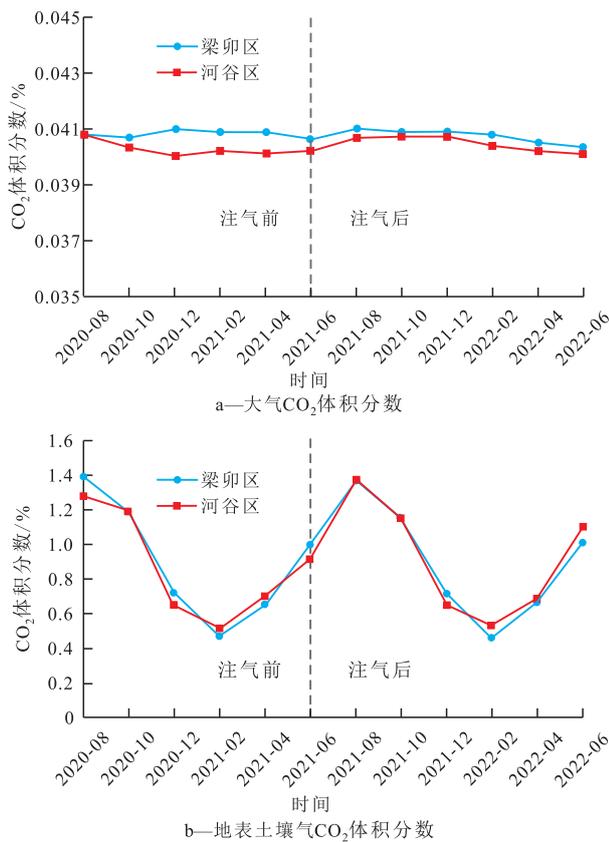


图1 注气前后不同地形大气和地表土壤气CO<sub>2</sub>体积分数  
Fig.1 CO<sub>2</sub> concentration in atmosphere and surface soil gas under different terrains before and after CO<sub>2</sub> injection

评价体系划分为 I (非常安全)、II (安全)、III (基本安全)、IV (不安全)和 V (很不安全)5 个等级(表 2)。其中,CO<sub>2</sub>垂直运移深度安全等级取值范围主要根据 CO<sub>2</sub>驱油与封存项目储层、直接盖层和上覆盖层的厚度进行划分;腐蚀速率的安全等级取值范围基于美国腐蚀工程师协会对平均腐蚀程度的规定和中国碎屑岩油藏注水水质控制指标中对平均腐蚀速率的要求<sup>[52-53]</sup>;参考中国对地下水质量常规指标及限值的规定<sup>[54]</sup>划分 pH 值和 Ca<sup>2+</sup>质量浓度安全等级;根据试验区土壤气和注入气 δ<sup>13</sup>C 值差异,确定 δ<sup>13</sup>C 不同安全等级的取值范围;CO<sub>2</sub>浓度安全等级取值范围参照神华 CO<sub>2</sub>咸水层封存项目安全评价体系<sup>[55]</sup>。

表2 黄土塬地区特低渗透油藏 CO<sub>2</sub>封存安全评价体系

Table2 Safety evaluation system of CO<sub>2</sub> sequestration for ultra-low permeability reservoirs in loess tableland

安全等级	盖层 CO <sub>2</sub> 垂直运移深度/m	井筒 腐蚀速率/(mm·a <sup>-1</sup> )	深层地下水 pH 值	浅层地下水 Ca <sup>2+</sup> 质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	地表土壤气 δ <sup>13</sup> C/‰	大气 CO <sub>2</sub> 体积分数/%	安全指数
I	1 380~1 500	0~0.025	6.5~8.5	0~150	-39.3~-25.6	0.037 5~0.1	0.798 0~1
II	1 280~1 380	0.025~0.076	6.5~8.5	150~300	-39.3~-25.6	0.1~1	0.697 4~0.798 0
III	1 030~1 280	0.076~0.125	6.5~8.5	300~450	-39.3~-25.6	1~4	0.553 6~0.697 4
IV	200~1 030	0.125~0.254	5.5~6.5	450~650	-17.0~-15.0	4~10	0.089 4~0.553 6
V	0~200	> 0.254	≤5.5	> 650	-17.0~-15.0	10~100	0~0.089 4

目标体系的安全等级采用综合指数法来确定。通过对评价体系中各指标数据进行标准化处理,并确定各指标的权重后,即可计算目标体系的安全等级,其表达式为:

$$W_{ij} = \sum A_{ij} X'_{ij} \quad (1)$$

将数值越大对 CO<sub>2</sub>封存安全越有利的指标如评价体系中 CO<sub>2</sub>垂直运移深度和 pH 值等数据进行标准化处理,其表达式为:

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{j,\min}}{X_{j,\max} - X_{j,\min}} \quad (2)$$

将数值越小对 CO<sub>2</sub>封存安全越有利的指标如评价体系中腐蚀速率、Ca<sup>2+</sup>质量浓度、δ<sup>13</sup>C 和 CO<sub>2</sub>浓度等数据进行标准化处理,其表达式为:

$$X'_{ij} = \frac{X_{j,\max} - X_{ij}}{X_{j,\max} - X_{j,\min}} \quad (3)$$

各指标的权重采用层次分析法确定。其中,判断矩阵主要通过具有多年 CCUS 项目经验的专家打分来建立。经计算,CO<sub>2</sub>垂直运移深度、腐蚀速率、pH 值、Ca<sup>2+</sup>质量浓度、δ<sup>13</sup>C 和 CO<sub>2</sub>浓度的权重分别为 0.441 8,0.228 8,0.130 9,0.108 1,0.056 6和 0.033 9。

黄土塬地区特低渗透油藏 CO<sub>2</sub>驱油与封存安全监测实践显示,试验区的 CO<sub>2</sub>垂直运移深度为 1 500 m、腐蚀速率为 0.016 mm/a、深层地下水 pH 值为 6.87、浅层地下水 Ca<sup>2+</sup>质量浓度为 138.95 mg/L、地表土壤气 δ<sup>13</sup>C 值为 -25.6‰、大气 CO<sub>2</sub>体积分数为 0.041%,其安全指数为 0.859 5,CO<sub>2</sub>封存安全等级为 I 级。

## 5 结论

基于 CO<sub>2</sub>泄漏风险识别及其空间运移特征分析,构建了涵盖盖层、井筒、深层和浅层地下水、地表土壤、地表水和大气黄土塬地区特低渗透油藏立体化多指标 CO<sub>2</sub>安全监测体系。矿场安全监测结果表明,CO<sub>2</sub>注入后各监测指标未出现异常,试验区未发生 CO<sub>2</sub>地质泄漏,实现了 CO<sub>2</sub>安全有效封存。结合 CO<sub>2</sub>安全监测体系和矿场安全监测实践,建立

了包含6项指标、5个等级的黄土塬地区特低渗透油藏CO<sub>2</sub>封存安全评价体系,评价结果表明试验区CO<sub>2</sub>封存安全等级为I级。

### 符号解释

- $A_{ij}$ ——第*i*年和第*j*个指标的权重;  
*i*——评价时间, a;  
*j*——评价指标;  
 $W_{ij}$ ——安全指数;  
 $X_{ij}$ ——第*i*年和第*j*个指标的监测数据;  
 $X'_{ij}$ ——第*i*年和第*j*个指标监测数据标准化处理后的数值;  
 $X_{j,max}$ ——第*j*个指标监测数据的最大值;  
 $X_{j,min}$ ——第*j*个指标监测数据的最小值。

### 参考文献

- [1] 张贤,李凯,马乔,等.碳中和目标下CCUS技术发展定位与展望[J].中国人口·资源与环境,2021,31(9):29-33.  
 ZHANG Xian, LI Kai, MA Qiao, et al. Orientation and prospect of CCUS development under carbon neutrality target[J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(9): 29-33.
- [2] 胡永乐,郝明强.CCUS产业发展特点及成本界限研究[J].油气藏评价与开发,2020,10(3):15-22.  
 HU Yongle, HAO Mingqiang. Development characteristics and cost analysis of CCUS in China[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(3): 15-22.
- [3] 秦积舜,李永亮,吴德斌,等.CCUS全球进展与中国对策建议[J].油气地质与采收率,2020,27(1):20-28.  
 QIN Jishun, LI Yongliang, WU Debin, et al. CCUS global progress and China's policy suggestions[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(1): 20-28.
- [4] 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 CO<sub>2</sub> geological storage potential in China[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(11): 10-20.
- [5] 叶航,刘琦,彭勃.基于二氧化碳驱油技术的碳封存潜力评估研究进展[J].洁净煤技术,2021,27(2):107-116.  
 YE Hang, LIU Qi, PENG Bo. Research progress in evaluation of carbon storage potential based on CO<sub>2</sub> flooding technology[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(2): 107-116.
- [6] 杨红,赵习森,康宇龙,等.鄂尔多斯盆地CO<sub>2</sub>地质封存适宜性与潜力评价[J].气候变化研究进展,2019,15(1):95-102.  
 YANG Hong, ZHAO Xisen, KANG Yulong, et al. Evaluation on geological sequestration suitability and potential of CO<sub>2</sub> in Ordos Basin[J]. Climate Change Research, 2019, 15(1): 95-102.
- [7] 李小春,袁维,白冰.CO<sub>2</sub>地质封存力学的数值模拟方法综述[J].岩土力学,2016,37(6):1762-1772.  
 LI Xiaochun, YUAN Wei, BAI Bing. A review of numerical simulation methods for geomechanical problems induced by CO<sub>2</sub> geological storage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(6): 1762-1772.
- [8] 刘苗苗,孟令东,王海学,等.二氧化碳地质封存中盖层力学完整性数值模拟研究综述[J].特种油气藏,2020,27(2):8-15.  
 LIU Miaomiao, MENG Lingdong, WANG Haixue, et al. Review on mechanical integrity simulation of caprock in the geological storage of CO<sub>2</sub>[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(2): 8-15.
- [9] 孔维钟,白冰,李小春.CO<sub>2</sub>咸水层封存中组合盖层密封效果的影响因素[J].交通科学与工程,2015,31(3):53-60.  
 KONG Weizhong, BAI Bing, LI Xiaochun. Factors of sealing efficiency of combined caprocks for CO<sub>2</sub> storage in saline aquifer[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2015, 31(3): 53-60.
- [10] 马鑫,李义连,杨国栋,等.盖层不确定性对CO<sub>2</sub>地质封存安全性的影响[J].安全与环境工程,2013,20(4):45-50.  
 MA Xin, LI Yilian, YANG Guodong, et al. Impact of the uncertainties of caprocks on the security of CO<sub>2</sub> geological storage[J]. Safety and Environmental Engineering, 2013, 20(4): 45-50.
- [11] WHITTAKER S, ROSTRON B, HAWKES C, et al. A decade of CO<sub>2</sub> injection into depleting oil fields: monitoring and research activities of the IEA GHG weyburn-midale CO<sub>2</sub> monitoring and storage project[J]. Energy Procedia, 2011, 4: 6 069-6 076.
- [12] LAKEMAN B, GUNTER W D, BACHU S, et al. Advancing the deployment of CO<sub>2</sub> monitoring technologies through the Pembina Cardium CO<sub>2</sub> monitoring project[J]. Energy Procedia, 2009, 1(1): 2 293-2 300.
- [13] MA Jinfeng, WANG Xiangzeng, GAO Ruimin, et al. Jingbian CCS project, China: second year of injection, measurement, monitoring and verification[J]. Energy Procedia, 2014, 63: 2 921-2 938.
- [14] 李琦,刘桂臻,张建,等.二氧化碳地质封存环境监测现状及建议[J].地球科学进展,2013,28(6):718-727.  
 LI Qi, LIU Guizhen, ZHANG Jian, et al. Status and suggestion of environmental monitoring for CO<sub>2</sub> geological storage[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(6): 718-727.
- [15] ZHANG Liang, REN Bo, HUANG Haidong, et al. CO<sub>2</sub> EOR and storage in Jilin Oilfield China: monitoring program and preliminary results[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2015, 125: 1-12.
- [16] 蔡博峰,庞凌云,曹丽斌,等.《二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南(试行)》实施2年(2016—2018年)评估[J].环境工程,2019,37(2):1-7.  
 CAI Bofeng, PANG Lingyun, CAO Libin, et al. Two-year implementation assessment (2016-2018) of China's technical guideline on environmental risk assessment for carbon dioxide capture, utilization and storage (on trial)[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(2): 1-7.
- [17] 王香增,杨红,王伟,等.延长油田低渗透油藏提高采收率技术进展[J].油气地质与采收率,2022,29(4):69-75.  
 WANG Xiangzeng, YANG Hong, WANG Wei, et al. Technical advancements in enhanced oil recovery in low permeability reservoirs of Yanchang Oilfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(4): 69-75.
- [18] 林千果,张少君,王香增,等.低渗透和特低渗透油藏CO<sub>2</sub>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 CO<sub>2</sub>-EOR and storage in low and extra-low permeability reservoir[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2019, 19(2): 693-703.
- [19] 汤沐成, 林千果, 王昊, 等. 黄土塬地区 CO<sub>2</sub>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, 125.
- TANG Shucheng, LIN Qianguo, WANG Hao, et al. Study on soil monitoring system for CO<sub>2</sub> leakage of CO<sub>2</sub>-EOR and storage in loess tableland region[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2020, 27(6): 112-118, 125.
- [20] 王昊, 林千果, 郭军红, 等. 黄土塬地区 CO<sub>2</sub>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 CO<sub>2</sub> leakage of CO<sub>2</sub>-EOR storage in loess tableland region [J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(8): 217-226.
- [21] 刁玉杰, 张森琦, 郭建强, 等. CO<sub>2</sub>地质储存泄漏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 Yujie, ZHANG Senqi, GUO Jianqiang, et al. Preliminary research on CO<sub>2</sub> leakage safety risk assessment method of geological storage project[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2012, 22(8): 84-89.
- [22] 柏明星, 张志超, 白华明, 等. 二氧化碳地质封存系统泄漏风险研究进展[J]. *特种油气藏*, 2022, 29(4): 1-11.
- BAI Mingxing, ZHANG Zhichao, BAI Huaming, et al. Progress in leakage risk study of CO<sub>2</sub> geosequestration system[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2022, 29(4): 1-11.
- [23] 吴江莉, 马俊杰. 浅议 CO<sub>2</sub>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 CO<sub>2</sub>[J]. *Environmental Science Survey*, 2012, 31(6): 89-93.
- [24] 张绍辉, 张成明, 潘若生, 等. CO<sub>2</sub>驱注入井井筒完整性分析与风险评估[J]. *西安石油大学学报: 自然科学版*, 2018, 33(6): 90-95, 123.
- ZHANG Shaohui, ZHANG Chengming, PAN Ruosheng, et al. Integrity analysis and risk assessment of wellbore in CO<sub>2</sub> flooding [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science*, 2018, 33(6): 90-95, 123.
- [25] 赵凯. 二氧化碳提高采收率井固井水泥环封隔失效因素及预防措施研究[J]. *当代化工*, 2022, 51(6): 1 439-1 442.
- ZHAO Kai. Study on the failure factors and preventive measures of cement sheath in carbon dioxide enhanced oil recovery wells [J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2022, 51(6): 1 439-1 442.
- [26] 高强, 梅开元, 王德坤, 等. CCUS 环境下水泥单矿 C<sub>3</sub>S 的 CO<sub>2</sub> 腐蚀动力学研究[J]. *硅酸盐通报*, 2022, 41(8): 2 644-2 653.
- GAO Qiang, MEI Kaiyuan, WANG Dekun, et al. CO<sub>2</sub> corrosion kinetics of C<sub>3</sub>S in cement single ore under CCUS environment [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 41(8): 2 644-2 653.
- [27] 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): 1 251-1 261.
- ZHANG Senqi, DIAO Yujie, CHENG Xuxue, et al. CO<sub>2</sub> geological storage leakage routes and environment monitoring [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(6): 1 251-1 261.
- [28] 赵习森, 杨红, 陈龙龙, 等. 延长油田化子坪油区长 6 油层 CO<sub>2</sub> 驱油与封存潜力分析[J]. *西安石油大学学报: 自然科学版*, 2019, 34(1): 62-68.
- ZHAO Xisen, YANG Hong, CHEN Longlong, et al. Analysis of CO<sub>2</sub> flooding and storage potential of Chang6 reservoir in Huaziping area of Yanchang Oilfield [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science*, 2019, 34(1): 62-68.
- [29] 刘贺娟, 童荣琛, 侯正猛, 等. 地下流体注采诱发地震综述及对深部高温岩体地热开发的影响[J]. *工程科学与技术*, 2022, 54(1): 83-96.
- LIU Hejuan, TONG Rongchen, HOU Zhengmeng, et al. Review of induced seismicity caused by subsurface fluid injection and production and impacts on the geothermal energy production from deep high temperature rock [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2022, 54(1): 83-96.
- [30] 李军, 张军华, 谭明友, 等. CO<sub>2</sub>驱油及其地震监测技术的国内外研究现状[J]. *岩性油气藏*, 2016, 28(1): 128-134.
- LI Jun, ZHANG Junhua, TAN Mingyou, et al. Research status of CO<sub>2</sub> flooding and its seismic monitoring technologies [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2016, 28(1): 128-134.
- [31] FOLGER P, TIEMANN M. Human-induced earthquakes from deep-well injection; a brief overview [R]. Washington: Congressional Research Service, 2016.
- [32] 刘剑钊. 长垣外围油田 CO<sub>2</sub>驱井筒防腐技术研究[J]. *化学工程与装备*, 2018, 30(5): 161-163.
- LIU Jianzhao. Research on CO<sub>2</sub> flooding wellbore anticorrosion technology in outer Changyuan Oilfield [J]. *Chemical Engineering & Equipment*, 2018, 30(5): 161-163.
- [33] 李君. 腐蚀监测技术在长岭气田高含 CO<sub>2</sub>气井中的应用[J]. *腐蚀与防护*, 2012, 33(8): 731-732, 671.
- LI Jun. Application of gas corrosion monitoring technology in Changling Gas Field with high carbon-dioxide content [J]. *Corrosion & Protection*, 2012, 33(8): 731-732, 671.
- [34] 刘婉颖, 李金宇, 高科超, 等. 温度对 N80 钢在饱和 CO<sub>2</sub> 模拟地层水下腐蚀行为的影响及机理[J]. *表面技术*, 2022, 51(8): 353-362.
- LIU Wanying, LI Jinyu, GAO Kechao, et al. Effect and mechanism of temperature on the corrosion behavior of N80 steel in simulated formation with saturated CO<sub>2</sub> [J]. *Surface Technology*, 2022, 51(8): 353-362.
- [35] 何欢欢, 艾志久, 李韬, 等. CO<sub>2</sub> 腐蚀环境下 P110 套管材料性能的实验研究[J]. *应用力学学报*, 2020, 37(1): 155-160.
- HE Huanhuan, AI Zhijiu, LI Tao, et al. Study on mechanical properties of P110 casing pipe based on corrosion tests [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2020, 37(1): 155-160.
- [36] 刘然克, 王立贤, 刘智勇, 等. 咪唑啉类缓蚀剂对 P110 钢在 CO<sub>2</sub> 注入井环空环境中应力腐蚀行为的影响[J]. *表面技术*, 2015, 44(3): 25-30.
- LIU Ranke, WANG Lixian, LIU Zhiyong, et al. Effect of imidazole corrosion inhibitor on stress corrosion cracking behavior of

- P110 steel in simulated annulus environment in CO<sub>2</sub> injection wells[J]. *Surface Technology*, 2015, 44(3): 25-30.
- [37] 吴保玉, 宋振云, 陈平. 气井井筒CO<sub>2</sub>腐蚀及结垢监测实验研究[J]. *钻采工艺*, 2021, 44(1): 77-81.  
WU Baoyu, SONG Zhenyun, CHEN Ping. A experimental study on CO<sub>2</sub> corrosion and scaling monitoring in gas wells [J]. *Drilling & Production Technology*, 2021, 44(1): 77-81.
- [38] 孟文波, 张佳旋, 张崇, 等. 井下管柱钢材冲蚀CO<sub>2</sub>腐蚀耦合试验[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2021, 45(3): 104-110.  
MENG Wenbo, ZHANG Jiaxuan, ZHANG Chong, et al. Experimental study on coupled erosion and CO<sub>2</sub> corrosion of steel materials for downhole casing and tubing [J]. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science*, 2021, 45(3): 104-110.
- [39] 孙冲, 刘建新, 孙建波, 等. 含杂质气态CO<sub>2</sub>环境中X65钢腐蚀行为[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2022, 46(3): 129-139.  
SUN Chong, LIU Jianxin, SUN Jianbo, et al. Corrosion behaviors of X65 steel in gaseous CO<sub>2</sub> environment containing impurities [J]. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science*, 2022, 46(3): 129-139.
- [40] 杜尚海, 苏小四, 郑连阁. CO<sub>2</sub>泄漏停止后天然条件下浅层含水层的自我修复能力评价[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2013, 43(6): 1 980-1 986.  
DU Shanghai, SU Xiaosi, ZHENG Liange. Self-repair capacity assessment of shallow aquifer under natural condition after carbon dioxide leakage stopped [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2013, 43(6): 1 980-1 986.
- [41] 姜玲. CO<sub>2</sub>地质储存对地下水的环境影响研究——以江汉盆地为例[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010.  
JIANG Ling. Research on the environmental impact of carbon dioxide geological sequestration on groundwater, a case study of Jianghan Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2010.
- [42] LITTLE M G, JACKSON R B. Potential impacts of leakage from deep CO<sub>2</sub> geosequestration on overlying freshwater aquifers [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(23): 9 225-9 232.
- [43] 张丙华, 景炯炯, 耿春香, 等. 地质封存CO<sub>2</sub>泄露对地表水中非金属类指标的影响[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(2): 161-164, 170.  
ZHANG Binghua, JING Jiongiong, GENG Chunxiang, et al. Influence on non-metallic parameters of surface water for leakage of carbon dioxide during geological storage [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(2): 161-164, 170.
- [44] LI Lian, WU Yahong, CHONG Shan, et al. Influence of CO<sub>2</sub> migration from geological storage on the chemical composition of groundwater and monitoring indicators [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2022, 81(3): 73.
- [45] 田堪良, 张慧莉, 张伯平, 等. 黄土的结构性及其结构强度特性研究[J]. *水力发电学报*, 2005, 24(2): 64-67.  
TIAN Kanliang, ZHANG Huili, ZHANG Boping, et al. Research on structural characteristics and strength of loess [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2005, 24(2): 64-67.
- [46] 李瑜琴, 赵景波. 长安区不同性质土层CO<sub>2</sub>释放规律研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(12): 154-157.  
LI Yuqin, ZHAO Jingbo. Rule of CO<sub>2</sub> release from heterogeneous soils in Chang'an area [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, 22(12): 154-157.
- [47] 白晨赞, 田涵洋, 乔江波, 等. 黄土塬区土地利用方式对土壤主要理化性质的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(4): 223-229.  
BAI Chenyan, TIAN Hanyang, QIAO Jiangbo, et al. Effects of land use patterns on soil physical and chemical properties in the Loess Plateau [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(4): 223-229.
- [48] 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 CO<sub>2</sub> storage [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2020, 27(2): 23-34.
- [49] 薛璐, 马俊杰, 胡芊, 等. C<sub>4</sub>植物稳定碳同位素分析助力地质封存CO<sub>2</sub>泄漏风险识别[J]. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(1): 79-86.  
XUE Lu, MA Junjie, HU Qian, et al. Stable carbon isotope composition of C<sub>4</sub> plants can help the identification of CO<sub>2</sub> leakage risk from geological storage [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, 34(1): 79-86.
- [50] 王晓晓. 雪玉洞洞穴系统碳的变化特征及洞内CO<sub>2</sub>来源研究[D]. 重庆: 西南大学, 2014.  
WANG Xiaoxiao. The character of carbon variation and source of CO<sub>2</sub> in Xueyu Cave [D]. Chongqing: Southwest University, 2014.
- [51] 傅金祥, 王文东, 马兴冠. 饮用水水源安全评价体系研究与应用[J]. *环境工程*, 2014, 32(8): 109-113.  
FU Jinxiang, WANG Wendong, MA Xingguan. The application research on safety assessment system in drinking water resources [J]. *Environmental Engineering*, 2014, 32(8): 109-113.
- [52] NACE International. Standard recommended practice: preparation, installation, analysis, and interpretation of corrosion coupons in oilfield operations: NACE Standard RP0775-2005 [S]. Houston: TX, 2005.
- [53] 林永红, 张继超, 张本艳, 等. 碎屑岩油藏注水水质指标及分析方法: SY/T 5329—2012 [S]. 北京: 石油工业出版社, 2012.  
LIN Yonghong, ZHANG Jichao, ZHANG Benyan, et al. Water quality standard and practice for analysis of oilfield injecting waters in elastic reservoirs: SY/T 5329-2012 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [54] 文冬光, 孙继朝, 何江涛, 等. 地下水质量标准: GB/T 14848—2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.  
WEN Dongguang, SUN Jichao, HE Jiangtao, et al. Quality standard for ground water: GB/T 14848-2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [55] 赵兴雷, 崔倩, 王保登, 等. CO<sub>2</sub>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 on environmental monitoring assessment system for CO<sub>2</sub> storage projects [J]. *Environmental Engineering*, 2018, 36(2): 15-20.