

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2021.04.09

引用格式: 刁玉杰, 马鑫, 李旭峰, 等. 咸水层 CO<sub>2</sub> 地质封存地下利用空间评估方法研究[J]. 中国地质调查, 2021, 8(4): 87-91. (Diao Y J, Ma X, Li X F, et al. Evaluation methods of underground space utilization for CO<sub>2</sub> geological storage in deep saline aquifers[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(4): 87-91.)

# 咸水层 CO<sub>2</sub> 地质封存地下利用空间评估方法研究

刁玉杰, 马鑫, 李旭峰, 张成龙, 刘廷

(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:** 咸水层 CO<sub>2</sub> 地质封存技术是我国实现碳中和目标的重要支撑技术, 也是一项深部地下空间开发利用技术。咸水层 CO<sub>2</sub> 地质封存工程利用的深部地下空间, 需要在确定 CO<sub>2</sub> 羽流、扰动边界和经济因素“三级边界”的基础上进行综合评估。以我国唯一的深部咸水层 CO<sub>2</sub> 地质封存项目——国家能源集团鄂尔多斯碳捕集与封存 (Carbon Capture and Storage, CCS) 示范工程为实例, 基于封存场地储层 CO<sub>2</sub> 羽流监测以及扰动边界的推断预测结果综合评估, 认为示范工程平面上 4 个 1' × 1' 经纬度范围可作为地下利用空间平面边界, 垂向上以纸坊组顶界 (深度约 958 m) 为地下封存体顶部边界, 以深度 2 800 m 为底板封隔层底界。提出的咸水层 CO<sub>2</sub> 地质封存地下利用空间评估方法, 能够为未来封存工程地下利用空间审批与监管提供一定参考, 但也需要进一步结合已有法律法规及规模化封存工程实践完善提升。

**关键词:** 咸水层; CO<sub>2</sub> 地质封存; CO<sub>2</sub> 羽流; 扰动边界; 地下利用空间

**中图分类号:** P642; X141; P534

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-8706(2021)04-0087-05

## 0 引言

CO<sub>2</sub> 地质封存技术是我国实现 2060 年碳中和目标的重要支撑技术, 也是开发利用深部地下空间的新兴技术之一。沉积盆地深部咸水层分布广泛、封存潜力巨大, 被认为是实施碳封存的主力储集场所<sup>[1-2]</sup>。咸水层 CO<sub>2</sub> 地质封存本质上相当于寻找或营造一个地下“人工气藏”, 无论是 CO<sub>2</sub> 的直接占用, 还是从封存工程安全性考虑, 都需要占用深部地下空间。澳大利亚《CO<sub>2</sub> 地质封存的环境指南》、欧盟《碳捕获与封存指令》、美国《CO<sub>2</sub> 封存许可法案》和《CO<sub>2</sub> 地质封存井的地下灌注控制联邦法案》, 以及加拿大阿尔伯达省《碳捕集与封存法律修正案》等法律法规, 均将地下空间所有权、使用权的审批和监管作为一项重要内容, 其目的也是科学利用深部地下空间以实施 CO<sub>2</sub> 地质封存, 同时避免其

他石油、煤炭等矿权开发冲突, 保障地下封存库的安全性。

国际上针对 CO<sub>2</sub> 地质封存深部地下利用空间的评估主要集中在地下 CO<sub>2</sub> 羽流分布方面, 几乎所有的工业或示范工程都将 CO<sub>2</sub> 羽流分布作为监测重点, 包括挪威北海 Sleipner 项目<sup>[3-5]</sup> 和以监测研究为目的的澳大利亚 CO<sub>2</sub> CRC Otway 示范项目<sup>[6-7]</sup> 等。

本文以国内第一个深部咸水层 CO<sub>2</sub> 地质封存工程——国家能源集团鄂尔多斯碳捕集与封存 (Carbon Capture and Storage, CCS) 示范项目 (又称神华 CCS 示范项目) 为实例, 结合已经提出的 CO<sub>2</sub> 地质封存地下利用空间评估概念模型<sup>[8]</sup>, 以及鄂尔多斯 CCS 示范项目场地表征及 CO<sub>2</sub> 地下运移监测预测最新认识<sup>[9]</sup>, 开展深部咸水层 CO<sub>2</sub> 地质封存地下利用空间评估方法研究, 以为碳封存项目地下利用空间核准与管理政策制定提供参考。

收稿日期: 2021-06-30; 修订日期: 2021-07-17。

基金项目: 国家重点研发计划重点专项“碳捕集利用封存产业技术能力的提升与创新 (编号: 2019YFE0100100)”项目资助。

第一作者简介: 刁玉杰 (1983—), 男, 博士, 高级工程师, 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工作。Email: diaoyujie@mail.cgs.gov.cn。

## 1 咸水层 CO<sub>2</sub>地质封存机理

CO<sub>2</sub>地质封存的科学原理是利用 CO<sub>2</sub>具有的超临界特点,即当温度高于 31.1 °C、压力高于 7.38 MPa 时,CO<sub>2</sub>进入超临界状态,能够在相同的空间内封存更多的 CO<sub>2</sub>。碳封存领导人论坛认为,咸水层 CO<sub>2</sub>地质封存机理主要包括物理捕获和化学捕获两类。物理捕获包括构造地层静态捕获、束缚气捕获和水动力捕获,化学捕获包括溶解捕获和矿化捕获<sup>[1]</sup>。需要认识到的是,物理捕获机理占主要作用,控制着溶解捕获和矿化捕获的作用范围。

## 2 评估模型与方法学

### 2.1 概念模型

咸水层 CO<sub>2</sub>地质封存深部地下利用空间范围评估涉及 3 个重要边界,即综合考虑 CO<sub>2</sub>羽流、扰动边界和经济因素确定的“三级边界”<sup>[8]</sup>(图 1)。为规范 CO<sub>2</sub>地质封存项目地下利用空间审核及登记备案,建议在扰动边界确定的基础上,将其投影到平面上,以经纬度 1' × 1'划分的区块为基本单位确定地下空间;垂向深度上建议精确到米。

表 1 EPA 确定 CO<sub>2</sub>羽流和相关压力波前缘位置要求和建议

Tab. 1 Requirements and recommendations for determining the CO<sub>2</sub> plume and pressure wave by EPA

技术	说明	EPA - Class VI 规定
压力直接监测	可以利用放置在注入区监测井内套管压力计后方的传感器,或者通过直接测量通过射孔的流体深度,实现现场流体压力测量	要求监测注入区内是否有压力升高
间接地球物理监测	地震、重力或电磁方法	要求监测注入区内是否有压力升高以及 CO <sub>2</sub> 羽流的范围,条件不允许或不适宜情况除外
直接 CO <sub>2</sub> 羽流监测	借助地球化学方法,利用注入区内的监测井证实是否有 CO <sub>2</sub> 或显著的化学变化	要求监测 CO <sub>2</sub> 羽流的范围,条件不允许或不适宜情况除外
数值模拟方法	支撑现场监测策略的制定,并将测量数据并入现场综合数据模型	计算机模拟方法应作为影响区划定和重新评估的一部分

### 2.3 扰动边界

扰动边界是指 CO<sub>2</sub>封存活动可能引起地层流体压力扰动的空间范围,一般认为是现状技术水平下可探测的压力波前缘。美国环保署(EPA)建议,CO<sub>2</sub>羽流和压力波前跟踪可以直接监测的最高精度为 0.7 psi(约为 0.005 MPa),考虑到我国目前井下压力传感器的平均精度,建议为 3 psi(约为 0.02 MPa)。刁玉杰等<sup>[8]</sup>建议借助直接或间接地球物理技术监测储层中 CO<sub>2</sub>羽流运移范围,利用数值模拟技术尽可能分析压力变化特征,预测停止注入某个时刻、某个模拟监测点增加的压力

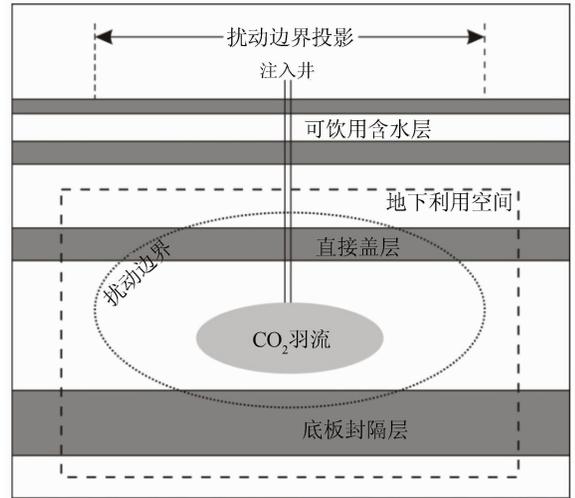


图 1 封存工程地下利用空间评估概念模型垂向示意<sup>[8]</sup>

Fig. 1 Conceptual model of underground space for CO<sub>2</sub> geological storage project<sup>[8]</sup>

### 2.2 CO<sub>2</sub>羽流的探测与预测

美国环保署 (Environmental Protection Agency, EPA)《Underground Injection Control (UIC)-Class VI》要求使用“直接”方法监测注入区是否有压力升高(例如压力波前缘监测),以及间接地球物理方法监测 CO<sub>2</sub>羽流的范围(表 1)。这些方法与国际上已有的咸水层 CO<sub>2</sub>地质封存工业或示范工程的技术方法基本一致。

差,进而提出这个时刻 3 psi 的扰动边界近似最优的扰动边界。

### 2.4 综合评估方法

CO<sub>2</sub>地质封存工程地下利用空间评估,即在 CO<sub>2</sub>羽流确定基础上,从安全性和经济性角度出发,进一步确定扰动边界和地下利用空间边界,以供政府管理部门审核及登记备案。评估主要包括以下几项:

(1) CO<sub>2</sub>羽流。通过综合直接监测、间接地球物理监测及数值模拟等方法获得。

(2) 扰动边界。通过综合直接监测、间接地球物理监测及数值模拟等方法获得。

(3)盖层安全性。通过盖层力学稳定性等综合评估获得。

(4)底板封隔层安全性。尽管 CO<sub>2</sub>与流体的密度差异会驱动 CO<sub>2</sub>向上运移,但从安全性考虑,也应参考盖层安全性开展底板封隔层安全性评估。

(5)断裂封闭性。通过断裂结构探测及封闭性评估等方法获得。

经济性主要影响因素包括以下几项:

(1)储层体积。基于 CO<sub>2</sub>羽流与扰动边界确定的最小储层体积,CCS 运营商可以根据经济情况和 CO<sub>2</sub>羽流与压力波前预测扩大储层体积。

(2)盖层体积。综合盖层力学稳定性、经济因素,确定能够保证安全封盖储层且有效利用地下空间的盖层体积;平面上盖层面积不小于储层面积,垂向上登记利用盖层厚度不小于直接有效盖层厚度。

(3)底板封隔层体积。参考盖层,确定底板封隔层体积。

为规范 CO<sub>2</sub>地质封存项目地下利用空间审核及登记备案,平面上以经纬度 1'×1'划分的区块为基本单位区块。

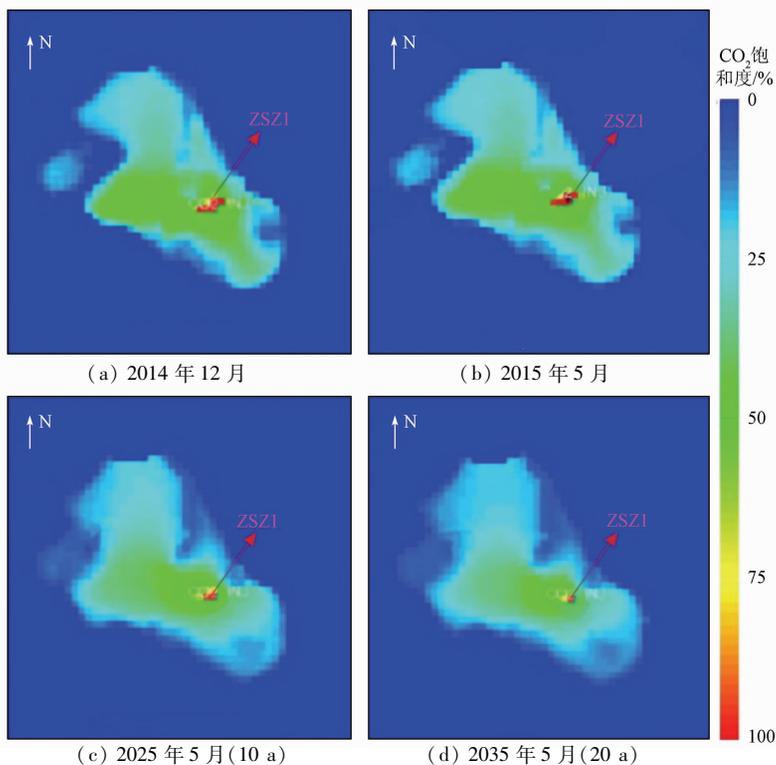
### 3 鄂尔多斯 CCS 示范工程案例研究

#### 3.1 CO<sub>2</sub>羽流监测预测

国家能源集团鄂尔多斯 CCS 示范工程于 2011 年 5 月 9 日开始实施 CO<sub>2</sub>灌注实验,至 2015 年 4 月,成功完成了 CO<sub>2</sub> 30.2×10<sup>4</sup> t 的设计注入目标,持续开展的“地—地—大气”监测结果表明,示范工程未发现 CO<sub>2</sub>突破主力盖层并发生泄漏<sup>[10-11]</sup>。示范工程封存场地部署有 1 口注入井、2 口监测井,其中,中神监 1 井主要针对储层压力、温度及流量等原位监测,中神监 2 井主要针对盖层的安全性以及 CO<sub>2</sub>是否泄漏进行监测。同时,示范场地开展了 3 期时移垂直地震剖面(VSP)监测,以了解 CO<sub>2</sub>羽流特征。

中神监 1 井在示范工程 2011 年开始注入后约 1 个月,监测到 CO<sub>2</sub>羽流;时移 VSP 地震监测结果表明,2011—2014 年期间平面上各储层中 CO<sub>2</sub>羽流最大运移半径约为 600 m。

Diao<sup>[9]</sup>利用示范工程场地时移 VSP 地震监测数据以及数值模拟技术,进一步分析了储层中 CO<sub>2</sub>羽流分布特征,并预测了停止注入 10 a 和 20 a 后的变化特征(图 2),认为 CO<sub>2</sub>羽流自 2014 年 11 月



注: 2014 年 12 月为第二期 VSP 地震监测时间,注入 CO<sub>2</sub>约 13×10<sup>4</sup> t; 2015 年 5 月为第三期 VSP 地震监测时间,注入 CO<sub>2</sub>约 25×10<sup>4</sup> t; ZSZ1 为注入井。

图 2 不同时期鄂尔多斯 CCS 示范场地地下 CO<sub>2</sub>分布饱和度平面投影示意

Fig. 2 Plane projection drawing of underground CO<sub>2</sub> saturation at Ordos CCS demonstration project storage site during different stage

注入  $25 \times 10^4$  t 直至关井 20 a 后(2035 年),平面扩散不大,WN—ES 方向半径最大约 1 000 m,EN—WS 方向半径最大约 750 m,且随着井底压力不断趋向平衡,CO<sub>2</sub>分布饱和度整体降低,并由此推断,至 2035 年 CO<sub>2</sub>羽流范围基本固定。

### 3.2 扰动边界预测

示范工程扰动边界考虑因素包括监测井直接监测结果、时移 VSP 地震间接监测结果以及数值模拟预测结果,但这些方法因数据的不完整或受监测精度限制,尚不能提出较有说服力的 3 psi 扰动边界。考虑到鄂尔多斯 CCS 示范工程深部咸水储层为开放水文地质边界,且场地 2015 年 5 月已经封井,在 CO<sub>2</sub>羽流基本稳定的前提下,假设储层压力近乎恢复到注入前的水平,CO<sub>2</sub>羽流边界可以认为是近似的扰动边界。

### 3.3 地下利用空间评估

如图 3 所示,根据 CO<sub>2</sub>羽流预测以及扰动边界的讨论,本文建议以平面上 4 个 1' × 1' 经纬度范围作为神华 CCS 示范工程地下利用空间的平面边界。

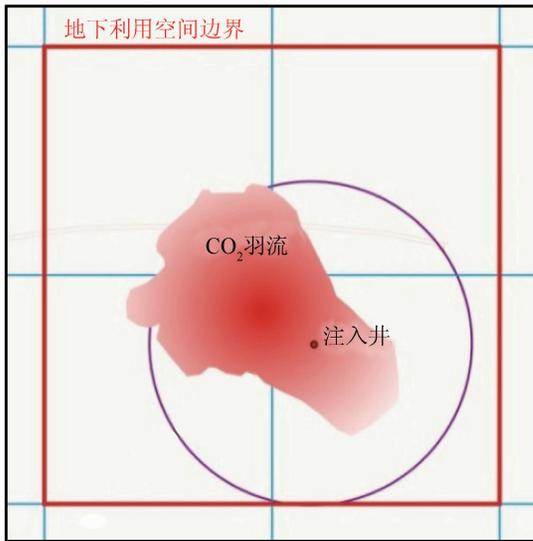


图 3 鄂尔多斯 CCS 示范工程地下利用空间平面范围示意  
Fig.3 Underground space utilization scope of Ordos CCS demonstration project

对于盖层安全性,根据场地钻探及地球物理勘探综合地质分析,以及神华集团已经开展的煤炭开发与 CO<sub>2</sub>地质封存相互影响的数值模拟结果,总体可以认为煤层开采的应力影响主要分布在 700 m 范围之内,500 m 范围内影响明显,建议以纸坊组顶界(深度约 958 m)为地下封存体顶部边界。对于底板封隔层,目前神华 CCS 示范工程钻探尚未钻

穿马家沟组,且已有勘探结果表明,场地内的马家沟组赋存工业级油气流的可能性不大,因此,建议以深度 2 800 m 为底板封隔层底界(表 2)。

表 2 示范工程地下利用空间计算参数

Tab.2 Parameters of evaluation on underground space for CO<sub>2</sub> geological storage at the demonstration project

边界条件	边界	详细参数	判据
平面边界	4 个 1' × 1'	10.74 km <sup>2</sup>	根据 CO <sub>2</sub> 羽流与扰动边界推断
盖层	纸坊组顶界	958 m	根据综合地质分析及文献分析研究结果推断
底板封隔层(垂向)	马家沟组	2 800 m	根据综合地质分析及钻探底界推断
地下利用空间总体积		19.78 km <sup>3</sup>	

## 4 结论与建议

(1)咸水层 CO<sub>2</sub>地质封存过程中,物理捕获机理占主要作用,控制着溶解捕获和矿化捕获的作用范围,是影响封存工程地下利用空间范围的主要因素。因此,咸水层 CO<sub>2</sub>地质封存地下利用空间评估的首要前提是 CO<sub>2</sub>羽流的监测预测。

(2)咸水层 CO<sub>2</sub>地质封存地下利用空间评估需要从安全性考虑确定扰动边界(即地下封存体保护边界),建议将储层压力增加 3 psi 的临界点作为确定依据;在扰动边界确定的基础上,从有效利用地下空间和经济性考虑,将其平面投影以经纬度 1' × 1'划分的区块为基本单位确定地下空间;垂向上建议精确到米。

(3)基于 CO<sub>2</sub>羽流监测预测以及扰动边界分析,建议国家能源集团鄂尔多斯 CCS 示范项目以平面上 4 个 1' × 1'经纬度范围作为地下利用空间平面边界,垂向上,以纸坊组顶界(深度约 958 m)为地下封存体顶部边界,以深度 2 800 m 为底板封隔层底界。

### 参考文献(References):

[1] IPCC. Special report on carbon dioxide capture and storage[R]. 2005.  
[2] 郭建强,文冬光,张森琦,等. 中国二氧化碳地质储存适宜性评价与示范工程[M]. 北京:地质出版社,2014.  
Guo J Q, Wen D G, Zhang S Q, et al. Suitability Evaluation of CO<sub>2</sub> Geological Storage in Sedimentary Basins of China and the

- Demonstration Project in Ordos Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
- [3] Chadwick R A, Noy D, Arts R, et al. Latest time-lapse seismic data from Sleipner yield new insights into CO<sub>2</sub> plume development [J]. *Energy Procedia*, 2009, 1(1): 2103 – 2110.
- [4] Chadwick A, Williams G, Delepine N, et al. Quantitative analysis of time-lapse seismic monitoring data at the Sleipner CO<sub>2</sub> storage operation [J]. *Lead Edge*, 2010, 29(2): 170 – 177.
- [5] Ghosh R, Sen M K, Vedanti N. Quantitative interpretation of CO<sub>2</sub> plume from Sleipner (North Sea), using post-stack inversion and rock physics modeling [J]. *Int J Greenhouse Gas Control*, 2015, 32: 147 – 158.
- [6] Cook P J. Geologically storing carbon: Learning from the Otway Project Experience [M]. Australia: CSIRO Publishing, 2014.
- [7] Pevzner R, Urosevic M, Popik D, et al. 4D surface seismic tracks small supercritical CO<sub>2</sub> injection into the subsurface: CO<sub>2</sub> CRC Otway Project [J]. *Int J Greenhouse Gas Control*, 2017, 63: 150 – 157.
- [8] 刁玉杰, 杨扬, 李旭峰, 等. CO<sub>2</sub>地质封存深部地下空间利用管理法规探讨 [J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(4): 1267 – 1273.
- Diao Y J, Yang Y, Li X F, et al. Management on developing deep underground space for CO<sub>2</sub> geological storage [J]. *Proc CSEE*, 2021, 41(4): 1267 – 1273.
- [9] Diao Y J, Zhu G W, Li X F, et al. Characterizing CO<sub>2</sub> plume migration in multi-layer reservoirs with strong heterogeneity and low permeability using time-lapse 2D VSP technology and numerical simulation [J]. *Int J Greenhouse Gas Control*, 2020, 92: 102880.
- [10] 郭建强, 文冬光, 张森琦, 等. 中国二氧化碳地质储存潜力评价与示范工程 [J]. *中国地质调查*, 2015, 2(4): 36 – 46.
- Guo J Q, Wen D G, Zhang S Q, et al. Potential evaluation and demonstration project of CO<sub>2</sub> geological storage in China [J]. *Geol Surv China*, 2015, 2(4): 36 – 46.
- [11] Zhang K N, Xie J, Li C, et al. A full chain CCS demonstration project in northeast Ordos Basin, China: operational experience and challenges [J]. *Int J Greenhouse Gas Control*, 2016, 50: 218 – 230.

## Evaluation methods of underground space utilization for CO<sub>2</sub> geological storage in deep saline aquifers

DIAO Yujie, MA Xin, LI Xufeng, ZHANG Chenglong, LIU Ting

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

**Abstract:** CO<sub>2</sub> geological storage in deep saline aquifers is an important supporting technology to achieve the goal of carbon neutrality in China, and it is also a technology of deep underground space development and utilization. The deep underground space for CO<sub>2</sub> geological storage in deep saline aquifers should be comprehensively evaluated on the basis of three-level boundaries, including CO<sub>2</sub> plume, perturbation boundary and economic condition. In this paper, the only deep saline aquifers storage project in China—the Ordos CCS demonstration project of National Energy Group have been taken as a case study. Based on the monitoring of CO<sub>2</sub> plume at the storage site and the prediction of perturbation boundary and the prediction of perturbation boundary, the authors have comprehensively affirmed that the 4 basic units of latitude 1' × longitude 1' of the project could be utilized as the boundary of CCS demonstration project. While the top of Zhifang Formation (about 958 m in depth) could be the top boundary, and the seal depth of 2 800 m is the bottom boundary of storage body in vertically. The method of developing deep underground space for CO<sub>2</sub> geological storage, proposed in this paper could provide references for the scientific planning and policy enacting in management. However, this method still needs to be further improved in combination with the existing laws and regulations and the future practice of large-scale storage projects.

**Keywords:** saline aquifers; CO<sub>2</sub> geological storage; CO<sub>2</sub> plume; perturbation boundary; underground space utilization

(责任编辑: 沈效群)