

doi: 10.12029/gc20221030001

刁玉杰, 刘廷, 魏宁, 马鑫, 金晓琳, 付雷. 2023. 咸水层二氧化碳地质封存潜力分级及评价思路[J]. 中国地质, 50(3): 943–951.

Diao Yujie, Liu Ting, Wei Ning, Ma Xin, Jin Xiaolin, FU Lei. 2023. Classification and assessment methodology of carbon dioxide geological storage in deep saline aquifers[J]. Geology in China, 50(3): 943–951(in Chinese with English abstract).

咸水层二氧化碳地质封存潜力分级及评价思路

刁玉杰¹, 刘廷¹, 魏宁², 马鑫¹, 金晓琳¹, 付雷¹

(1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 天津 300309; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要:【研究目的】碳达峰碳中和目标背景下, 咸水层 CO₂ 地质封存技术被认为是中国化石能源领域实现碳中和目标的兜底技术。随着不同地质尺度的封存潜力评价研究日趋广泛和深入, 迫切需要建立统一的封存潜力分级体系和科学的评价方法。【研究方法】本文参考固体矿产、油气矿产等地质勘查等经验, 以及国内外咸水层封存潜力级别及评价方法, 划分了中国咸水层封存工作阶段及封存潜力级别, 并提出了潜力评价思路、计算公式及重要系数取值参考。【研究结果】一是咸水层 CO₂ 地质封存可设定为普查、详查、勘探和注入四个工作阶段, 封存潜力可划分为地质潜力、技术容量、技术经济容量和工程封存量四大类, 其中普查阶段对应预测级别(D级), 详查阶段对应控制级别(C级), 勘探阶段对应探明级别(B级), 注入阶段对应工程级别(A级)。二是咸水层封存潜力评价可总体按照储层筛选、潜力定级、潜力计算三个步骤依次开展, 有效储层应综合储集条件、盖层封闭性、封存体稳定性条件及深部资源开发影响等因素予以筛选圈定。三是不同级别的封存潜力计算根据应用场景合理选择容积法或机理法公式, 以及地质系数、驱替系数、成本系数等关键参数取值, 探明阶段需要结合不同的注入方案开展封存潜力数值模拟预测评价。【研究结论】中国咸水层 CO₂ 地质封存潜力评价应形成精度由低到高的多尺度多级别动态机制, 本文提出的潜力评价级别及方法建议, 能够科学地对比不同区域、不同阶段的潜力评价数据, 也能够为咸水层封存工程审批和深部地下空间管理提供参考, 但未来更符合工程实际的潜力计算公式及关键参数赋值, 仍需要通过大量的室内实验、数值模拟和工程实践不断创新。

关键词: 咸水层; CO₂ 地质封存; 潜力评价; 计算公式; 系数取值; 碳达峰碳中和综合地质调查工程

创 新 点: (1) 系统提出咸水层 CO₂ 地质封存工作阶段建议及地质认识程度要求; (2) 融合地质、技术、经济和工程实施条件及地质工作规律, 建立了多尺度多级别咸水层 CO₂ 封存潜力分类分级体系; (3) 提出咸水层 CO₂ 地质封存潜力评价流程, 以及容积法或机理法计算公式的应用条件和关键参数取值参考。

中图分类号: X701 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2023)03–0943–09

Classification and assessment methodology of carbon dioxide geological storage in deep saline aquifers

DIAO Yujie¹, LIU Ting¹, WEI Ning², MA Xin¹, JIN Xiaolin¹, FU Lei¹

收稿日期: 2022–10–30; 改回日期: 2022–11–25

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20221818)、国家重点研发计划项目(2019YFE0100100)、河北省重点研发计划项目(22374004D)联合资助。

作者简介: 刁玉杰, 男, 1983年生, 博士, 正高级工程师, 主要从事深部地下空间碳封存及地质利用等研究; E-mail: diaoyujie@mail.cgs.gov.cn。

通讯作者: 刘廷, 男, 1990年生, 硕士, 工程师, 主要从事深部地下空间碳封存研究; E-mail: liuting@mail.cgs.gov.cn。

(1. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geological Survey, Tianjin 300309, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, Hubei, China)

Abstract: This paper is the result of comprehensive geological survey engineering of carbon peak and carbon neutrality.

[Objective] To achieve the carbon neutrality, the carbon dioxide geological storage in saline aquifers is considered as the bottom technology in the field of fossil energy in China. With the increasingly extensive and in-depth research on the evaluation of storage potential at different geological scales, it is urgent to establish a unified classification system and scientific evaluation methods for storage potential. **[Methods]** This paper refers to the geological exploration experience of solid minerals, oil and gas minerals, as well as the potential levels and evaluation methods of saline aquifer carbon dioxide storage at home and abroad. It divides the stages and potential levels of saline aquifer carbon dioxide storage in China, and proposes potential evaluation ideas, calculation formulas, and important coefficient values for reference. **[Results]** Firstly, by setting four stages of the requirements for exploration and geological understanding of the storage sites, i.e. general exploration, detailed exploration, advanced exploration and injection, the carbon dioxide storage potential is divided into four levels: geological potential, technically capacity, technically-commercial capacity and engineering reserves. The general exploration stage corresponds to the possible level (Level D), the detailed exploration stage corresponds to the probable level (Level C), the advanced exploration stage corresponds to the proved level (Level B), and the injection stage corresponds to the engineering level (Level A). Secondly, the assessment on carbon dioxide storage potential can be carried out in process of reservoir selection, potential grading and calculation, and the effective reservoirs should be selected considering storage conditions, sealing ability, stability of storage complex, and development of deep resources. At last, for different levels of carbon dioxide storage potential calculation, formulas of volume method or mechanism method, as well as geological coefficient, displacement coefficient, cost coefficient and other key parameters should be reasonably selected according to the application scenarios. The carbon dioxide storage potential should be assessed using numerical simulation with different injection schemes in the detailed exploration stage. **[Conclusions]** The potential assessment on carbon dioxide storage in saline aquifers should include a multi-scale and multi-level dynamic evaluation mechanism with a precision from low to high. The classification and assessment methodology of carbon dioxide geological storage in saline aquifers proposed could provide support (references) for potential of different regions and assessment stages, and also the management of deep underground space for saline aquifer carbon dioxide storage. However, the potential calculation formulas and key coefficient values are still need to be innovated through a large number of lab experiments, numerical simulation and project practices, as that are more consistent with the actual storage sites.

Key words: saline aquifer; carbon dioxide geological storage; potential assessment; calculation formula; coefficient value; comprehensive geological survey engineering of carbon peak and carbon neutrality

Highlights: (1) The suggestions for the stage of saline aquifers carbon dioxide geological storage and the requirements for geological understanding has been systematically proposed; (2) Considering conditions of geology, technology, economy, engineering implementation, and rules of geological survey, a multi-scale and multi-level classification of saline aquifer carbon dioxide storage potential is formed; (3) Process, calculation formulas of volume method or mechanism method, as well as the values of key coefficients for potential assessment are recommended.

About the first author: DIAO Yujie, male, born in 1983, Ph.D., professor of engineering, engaged in CO₂ geological utilization and storage in deep underground space; E-mail: diaoyujie@mail.cgs.gov.cn.

About the corresponding author: LIU Ting, male, born in 1990, master, engineer, engaged in CO₂ geological storage in deep underground space; E-mail: liuting@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20221818), National Key Research and Development Program (No.2019YFE0100100), Key Research and Development Program of Hebei Province (No.22374004D).

1 引 言

CO₂地质封存是碳捕集利用与封存(CCUS)的末端技术环节,是指通过工程技术手段将主要来自

于工业领域大型排放源捕集的CO₂注入至深部咸水层、枯竭油气藏等适宜地质体中,以实现其与大气长期隔绝的过程(Metz et al., 2005; 黄晶, 2021)。预计到2060年,CCUS技术对中国碳中和目标的贡献

量可达5亿t以上(丁仲礼,2021)。深部咸水层CO₂地质封存作为支撑碳达峰碳中和目标必不可少的地质方案之一(Wang et al., 2021; 马冰等, 2021),被认为是化石能源领域实现碳中和目标的“压舱石”和“兜底”技术,科学、接近工程实际的封存潜力数据备受关注。

国内外开展咸水层CO₂地质封存潜力级别及评价方法研究较广泛(USDOE, 2006; CSLF, 2007; 王欢等, 2022),针对中国咸水层封存潜力评价的相关研究也较多(张洪涛等, 2005; 李小春等, 2006; Wei et al., 2013; 郭建强等, 2014; Wei et al., 2021, 2022; Dai et al., 2022),但大多以宏观尺度或盆地尺度区域评估为主(刁玉杰等, 2017; 张冰等, 2019; 杨红等, 2019)。碳封存领导人论坛(CSLF, 2007)利用金字塔形式将CO₂地质封存潜力分为四种层次类型,即理论埋存量、有效埋存量、实际埋存量和匹配埋存量,并提出了机理法理论的潜力计算公式;美国能源部(USDOE, 2006)将CO₂地质封存潜力分为远景封存量、推定封存量和实际封存量三类,提出了容积法理论的潜力计算公式。郭建强等(2014)在充分考虑到中国沉积盆地复杂的地质背景、CO₂地质封存研究现状等因素的基础上,将中国CO₂地质封存潜力分为预测潜力(E级)、推定潜力(D级)、控制潜力(C级)、基础封存量(B级)和工程封存量(A级),并组织完成了预测潜力级别全国主要沉积盆地咸水层封存潜力评价。

在碳中和目标背景下,随着能源化工企业碳捕

集与咸水层封存规划选址及示范试验的不断涌现,不同地质尺度的封存潜力评价研究日趋广泛和深入,因此需要迫切建立统一的潜力级别或标准,优选较为科学的潜力评价方法,服务规模化封存场地选址。本文通过合理设定咸水层CO₂地质封存工作阶段,划分了封存潜力级别,并分析提出了容积法、机理法计算公式及数值模拟方法应用场景等建议,以期支撑中国未来规模化的咸水层CO₂地质封存规划选址与重大示范。

2 封存潜力分类分级

2.1 勘查注入阶段

咸水层CO₂地质封存勘查注入工作可依据地质认识程度划分为普查、详查、勘探和注入四个阶段,其中勘查阶段地质认识程度要求见表1。

2.1.1 普查阶段

针对某一沉积盆地或其地质构造单元,选择性地完成地震普查,以及区域探井钻探,基本了解深部区域性咸水层及盖层空间展布特征、地质安全条件,以及地下煤炭、石油、天然气等能源矿产资源勘查开发情况,并能够圈定有利封存远景区,评价相应级别的封存潜力。

2.1.2 详查阶段

在有利封存远景区内,进一步开展地震等地球物理详查,查明有利CO₂地质封存的圈闭构造与地质条件,通过预探井钻探,基本查明区域性储盖层分布、地质安全条件,并能够圈定有利封存靶区,评

表1 咸水层封存各勘查阶段地质认识程度要求

Table 1 Requirements for geological understanding of exploration stages of saline aquifer CO₂ storage

勘查阶段	地质认识程度
普查	圈定了封存远景区,储盖层研究精度达到1:100000~1:250000
	初步查明了区域构造形态、咸水层及盖层空间展布、区域封存体稳定性条件情况
	基本明确潜在地质封存层位及岩性 基本了解重要能源矿产资源勘查开发情况,能够合理配置CO ₂ 地质封存与资源开发
详查	圈定了封存靶区,储盖层研究精度达到1:25000~1:50000
	基本查明储集类型、储层物性、储层厚度、非均质程度;对裂缝-孔洞型储层,已基本查明裂缝系统,明确注入层位
	基本查明地层流体性质、温度及压力系统 基本查明盖层物性、厚度及封盖能力及溶蚀风险 了解重要能源矿产资源勘查开发情况,能够合理配置封存与资源开发
勘探	圈定了封存场地,构造形态及主要断层分布落实清楚,储盖层研究精度达到1:5000~1:10000
	已查明储集类型、储层物性、储层厚度、非均质程度;对裂缝-孔洞型储层,已基本查明裂缝系统,明确注入层位
	已查明地层流体性质、温度及压力系统 已查明盖层物性、厚度及封盖能力及溶蚀风险 掌握重要能源矿产资源勘查开发情况,能够合理配置CO ₂ 地质封存与资源开发

价相应级别的封存潜力。

2.1.3 勘探阶段

在有利封存靶区内,开展二维地震精查或三维地震勘探,在满足井筒防腐、泄漏等条件下补充评价井钻探,查明构造形态、断层分布、地层物性及深部咸水化学性质等,并能够圈定有利封存场地及注入层,评价相应级别的封存潜力,完成注入方案设计。

2.1.4 注入阶段

在确定的封存场地内,基于已有场地评价及注入方案设计,进一步制定监测及风险应急方案,补充监测井钻探,实施CO₂注入,评价相应级别的封存潜力。

2.2 潜力分类分级

依据咸水层CO₂地质封存的地质、技术、经济和工程实施条件,分别划分为地质潜力、技术容量、技术经济容量和工程封存量四大类。对应咸水层CO₂地质封存勘查及注入的各个阶段,潜力/容量级别划分详见表2。普查阶段对应预测级别(D级),详查阶段对应控制级别(C级),勘探阶段对应探明级别(B级),注入阶段对应工程级别(A级)。

(1)地质潜力是不考虑技术、经济等因素影响的储层静态理论封存能力,包括预测地质潜力、控制地质潜力、探明地质潜力三个级别。

(2)技术容量是考虑注入方案、技术水平等因素控制的有效封存能力,包括预测技术容量、控制技术容量、探明技术容量三个级别。

(3)技术经济容量是源汇匹配情形下,考虑CO₂输送和封存成本及政策驱动条件等因素,企业可以接受的成本范围内的封存能力,包括控制技术经济容量、探明技术经济容量两个级别。

(4)工程封存量是指具体封存工程的设计阶段和实际实施阶段的封存量,即设计封存量 and 实际封存量。

3 封存潜力评价思路

3.1 总体思路

潜力评价流程总体按照储层筛选、潜力定级、潜力计算的3个步骤依次开展。

储层筛选需要考虑储集条件、盖层封闭性、封存体稳定性条件,以及煤炭、石油和天然气等深部资源开发影响等因素,圈定有效储层。

潜力定级和计算首先根据表1确定咸水层研究能够满足的工作阶段,再结合地质、技术、经济、工程设计等不同服务领域或研究目的,确定需要评价的潜力级别,并采用科学合理的公式和参数开展潜力计算。

不同级别潜力评价,需要满足相应的勘查或注入阶段地质认识程度或工作要求。低精度级别的地质潜力区内可以包含高精度级别的地质潜力区,反之亦然,但已有高精度级别潜力数据后不再重复计算低精度级别潜力数据。

3.2 储层筛选一般标准

3.2.1 储集条件

(1)考虑CO₂需要达到超临界状态,储层深度一般大于800 m(Metz et al., 2005),或通过钻探测量实际地层压力和温度能够满足CO₂注入后达到超临界态;(2)储层类型可考虑碎屑岩、碳酸盐岩,以及岩浆岩等特殊岩层;(3)以组、段或砂岩层等为研究对象统计有效储层数据时,储层单层厚度一般不小于1 m,累计厚度一般不小于5 m,平均孔隙度一般不小于5%,平均渗透率一般不小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;(4)参照《水文地质术语》(GB/T 14157-1993)关于地下咸水和地下盐水总矿化度的有关规定,进一步从保护地下水资源的角度考虑,咸水层储层的地下水总矿化度应大于8 g/L;(5)储层应为半封闭、封闭型水文地质结构,地下水交替缓慢或十分缓慢(刁玉杰等, 2019)。

表2 勘查注入阶段与潜力级别对应关系

Table 2 Corresponding relationships between exploration & injection stages and potential levels

勘查注入阶段	地质目标	潜力级别	地质潜力	技术容量	技术经济容量	工程封存量
普查	远景区	预测级别(D级)	预测地质潜力	预测技术容量	/	/
详查	靶区	控制级别(C级)	控制地质潜力	控制技术容量	控制技术经济容量	/
勘探	场地	探明级别(B级)	探明地质潜力	探明技术容量	探明技术经济容量	/
注入	注入	工程级别(A级)	/	/	/	设计封存量 实际封存量

3.2.2 盖层封闭性

盖层类型主要包括低渗透性的膏岩、泥岩、粉砂岩等岩层,应为连续、稳定的区域性地层,且无张性贯穿性断裂发育,预测能够全面覆盖CO₂羽流的范围。

3.2.3 封存体稳定性条件

规模化咸水层CO₂地质封存可能存在诱发地震或地震破坏封存圈闭的风险(Metz et al., 2005; 刁玉杰等, 2011; 崔振东等, 2011; 谢和平等, 2012; 李琦等, 2019),应在不同的勘查注入阶段参考《工程场地地震安全性评价》(GB 17741-2005)考虑活动断层对CO₂地质封存的影响。在勘查阶段筛选陆域储层时,参考《中国地震构造环境探查规划》地震构造分级原则,储层在地表的垂直投影分布25 km范围内不存在一级断裂带(I级、II级地块边界活动的断层带),以及二级断裂(II级地块内部活动的断层,一般控制构造单元),5 km范围内不存在三级断裂(I级、II级地块内部规模较小的活动断层和一定规模的第四纪断层);区域地震动峰值加速度应小于等于0.15 g。

3.2.4 深部资源开发影响

宏观尺度评价预测地质潜力和预测技术容量时,储层筛选可以忽略深部矿产资源开发影响因素。但是更高级别的潜力评估时,封存在800 m深度以下的CO₂地下羽流可能会压覆矿产资源,也可能被上覆的矿产资源开发影响,尤其是石油、天然气、页岩气、煤炭、地下水与卤水等资源,需要开展相关的风险分析来筛选适宜储层。

4 封存潜力/容量计算公式

4.1 地质潜力

4.1.1 容积法

美国能源部(USDOE, 2006; Goodman et al., 2011)基于容积法理论提出的咸水层CO₂地质封存计算方法,对咸水层的边界条件进行了界定,假定储层为开放边界系统,在CO₂注入后,会将评价单元中的地下水驱替到周边水文地质单元,并且不会导致边界地层流体压力大幅升高,从而实现CO₂地质封存。该计算公式可同时适用于预测地质潜力(D1)、控制地质潜力(C1)和探明地质潜力(B1)的计算。

$$P_{\text{geol}} = A \cdot h \cdot \phi \cdot \rho_{\text{CO}_2} \cdot E_{\text{geol}} \quad (1)$$

式中: P_{geol} 为地质潜力,kg; A 为储层面积,m²; h

为储层厚度,m; ϕ 为储层孔隙度,%; ρ_{CO_2} 为层中CO₂的密度,kg/m³; E_{geol} 为地质系数,无量纲。

4.1.2 机理法

碳封存领导人论坛(CSLF)将CO₂地质封存机理划分为物理封存和化学封存机理两大类(CSLF, 2007)。其中,物理封存机理主要包括构造地层捕获、束缚捕获和水动力捕获;化学封存机理主要包括溶解捕获和矿化捕获。

碳封存领导人论坛(CSLF)基于机理法提出了相应的潜力计算公式。根据咸水层CO₂地质封存的物理和化学封存机理,提出构造地层封存、束缚封存和溶解封存三种不同机理的潜力计算公式,总地质潜力可认为是三部分不同机理地质潜力之和。

(1)构造地层捕获。咸水层CO₂地质封存的主要作用机制,在构造地层圈闭与水动力圈闭作用下,CO₂被捕获封存在咸水层中,其CO₂封存潜力计算公式如下:

$$P_{\text{geol}_c} = V_{\text{trap}} \cdot \phi \cdot (1 - S_{\text{wirr}}) \cdot \rho_{\text{CO}_2} = A \cdot h \cdot \phi \cdot (1 - S_{\text{wirr}}) \cdot \rho_{\text{CO}_2} \cdot E_{\text{geol}} \quad (2)$$

式中: P_{geol_c} 为深部咸水层中构造地层捕获封存的CO₂潜力,kg; V_{trap} 为构造或地层圈闭的体积,m³; ϕ 为储层孔隙度,%; S_{wirr} 为残余水饱和度,即CO₂排水后岩石孔隙中水的体积与孔隙体积的百分比,%; ρ_{CO_2} 为储层中CO₂的密度,kg/m³; A 为储层面积,m²; h 为储层厚度,m; E_{geol} 为地质系数,无量纲。

(2)束缚捕获。CO₂在咸水层运移的过程中,部分CO₂由于气液两相界面张力的作用被长久地滞留在矿物表面或非连续状态残留于岩石孔隙中,计算公式如下:

$$P_{\text{geol}_b} = \Delta V_{\text{trap}} \cdot \phi \cdot S_{\text{CO}_2} \cdot \rho_{\text{CO}_2} \cdot E_{\text{geol}} \quad (3)$$

式中: P_{geol_b} 为咸水层中束缚捕获封存的地质潜力,kg; ΔV_{trap} 为原先被CO₂饱和然后被水浸入的岩石体积,m³; S_{CO_2} 为液流逆流后残余CO₂的饱和度,%; ϕ 为储层孔隙度,%; ρ_{CO_2} 为储层中CO₂的密度,kg/m³; E_{geol} 为地质系数,无量纲。

(3)溶解捕获。CO₂溶解到深部咸水层中的地层水中的封存量可视为原始地层水达到CO₂饱和时,所能溶解的CO₂量,计算公式如下:

$$P_{\text{geol}_{\text{d}}} = A \cdot h \cdot \phi \cdot (\rho_s X_s^{\text{CO}_2} - \rho_i X_i^{\text{CO}_2}) \approx A \cdot h \cdot \phi \cdot \rho_i \cdot R_{\text{CO}_2} \cdot m_{\text{CO}_2} \cdot E_{\text{geol}} \quad (4)$$

式中： $P_{\text{geol}_{\text{d}}}$ 为CO₂在深部咸水层中的溶解捕获封存地质潜力，kg； A 为储层面积，m²； h 为储层厚度，m； ϕ 为储层孔隙度，%； ρ_s 为地层水被CO₂饱和时的平均密度，kg/m³； ρ_i 为初始地层水的密度，kg/m³； $X_s^{\text{CO}_2}$ 为地层水溶解CO₂并达到饱和时，CO₂占地层水中的平均质量分数，%； $X_i^{\text{CO}_2}$ 为原始CO₂在地层水中的平均质量分数，无量纲； R_{CO_2} 为CO₂在地层水中的溶解度，mol/kg； m_{CO_2} 为CO₂的摩尔质量，0.044 kg/mol， E_{geol} 为地质系数，无量纲。

4.2 技术容量

技术容量是地质潜力与技术因素设定系数的乘积，该系数一般被称为有效系数。但需要注意的是，碳封存领导人论坛(CSLF)与美国能源部(USDOE)有效系数 E 综合了地质因素和技术因素，即本文中的地质系数 E_{geol} 和驱替系数 E_{sweep} 。针对有效系数取值，国内外学者开展了大量研究(Bachu, 2015)，到目前为止，还未形成公认的计算方法，推荐参数取值也不尽相同，例如碳封存领导人论坛(CSLF, 2019)提出的 E 取值为1%~4%，美国能源部(USDOE, 2006)提出 E 的取值为0.8%~6%；国际能源机构温室气体研发计划中心(IEA GHG, 2009)提出 E 取值为2.4%~10%。

美国能源部(USDOE)(Goodman et al., 2011)分别提出了碎屑岩、白云岩和石灰岩三大岩类针对 E_{sweep} 取值建议(表3)。驱替系数 E_{sweep} 是体积驱替系数 E_v 和微观驱替系数 E_d 的乘积，储层物性、水化学、压力、温度、相对渗透率等因素均会影响驱替系数 E_{sweep} 的取值。

$$E_{\text{sweep}} = E_v \cdot E_d \quad (5)$$

式中： E_{sweep} 为体积驱替系数； E_v 是由于CO₂和地层水之间的密度差异，有效厚度范围内分布有CO₂的储层体积占储层总体积的比例； E_d 为微观驱替系数，是由于原位流体不流动导致的储层中不可封存CO₂的孔隙空间占比。

驱替系数 E_{sweep} 取值可参照表3，但实际取值范围会随地质条件与注入工艺发生变化，可以补充开展针对性的室内实验、统计方法、数值计算等，进而获

取更可信的技术容量。

中国地质背景复杂，不同沉积盆地、咸水层储层参数差异较大，有必要开展相关室内实验和数值模拟研究，提出中国的评价参数获取方法，以确定相对精准、可靠的封存系数。

4.3 技术经济容量

成本系数 E_{cost} 体现了经济条件对咸水层CO₂地质封存的驱动能力，可以采用经济预算、预/决算等源汇匹配模型结合政策文件计算。

在咸水层CO₂地质封存示范阶段，由于当前缺乏碳税或碳交易政策激励，成本系数 E_{cost} 约为0，在碳中和目标驱动下，预计2060年可接近1；Li et al. (2019)基于碳捕集与封存源汇匹配模型，根据2020年基准值预测提出了高浓度与低浓度工业碳源成本系数 E_{cost} 取值建议，详见表4。

4.4 工程封存量

4.4.1 设计封存量

设计封存量应同时提供封存场地的空间范围、注入执行期、设计CO₂注入量数据，以及详细的注入井和监测井布设方案等信息。设计封存量的评估离不开数值模拟技术，以中国第一个咸水层封存示范工程—神华CCS示范工程场地为例，谢健等(2016)、Li et al. (2016)、Zhang et al. (2016)等应用三维地震、钻探、测井及实验测试数据开展了该示范场地10万t/a、注入期3年的设计封存量评估，以及CO₂在地下空间储层中的运移及分布特征。

4.4.2 实际封存量

在封存工程安全、稳定且未发生CO₂泄漏的前提下，可以认为井口注入量即是实际注入的二氧化碳量。

由于对地质体认识的局限性，有时实际封存量并不能完全达到工程设计封存量，或者根据动态监

表3 E_{sweep} 取值推荐(Goodman et al., 2011)

Table 3 Recommendation value of E_{sweep} (Goodman et al., 2011)

岩性	P ₁₀	P ₅₀	P ₉₀
碎屑岩	7.4%	14%	24%
白云岩	16%	21%	26%
石灰岩	10%	15%	21%

注：P₁₀、P₅₀、P₉₀为置信水平，分别表示有10%的概率小于等于该值，有50%的概率小于等于该值，有90%的概率小于等于该值。

表4 E_{cost} 取值推荐(%;Li et al., 2019)
Table 4 Recommendation value of E_{cost} (%;Li et al., 2019)

碳交易价格/ (元/t)	高浓度碳源 (煤化工)	低浓度碳源(除煤化工 外的工业排放源)
200	70%	1%~5%
350	80%	20%~40%
500	90%	40%~60%

测进一步评价,最终工程实际封存量大于工程初期设计封存量。因此,在已闭场封存工程场地邻区新规划或实施封存工程时,出于保障CO₂地下封存库的安全性和稳定性,工程设计封存量可以参考已闭场封存工程场地的实际封存量进行矫正。

为兼顾保障安全稳定性和提高储层地下空间利用效率,基于封存注入过程中获取的数据和实践认识,需要及时动态评价场地的探明技术容量和探明技术经济容量。CO₂在储层中的运移及分布规律研究至关重要,以挪威北海 Sleipner 商业项目,许多学者开展了大量的研究,掌握了场地储层二氧化碳的分布以及后期的可注入性(Chadwick et al., 2010; Ghosh et al., 2015; Raknes et al., 2015; Furre et al., 2017)。Diao et al.(2020)在神华CCS示范项目停注5年后,进一步综合示范场地地质与监测数据,运用数值模拟方法,预测了封存工程注入的30.2万t CO₂在储层中运移及饱和度分布特征,并从地下空间利用管理的角度进一步评估了该示范工程场地的地下利用空间。

5 讨论

本文提出的咸水层CO₂地质封存潜力分类分级与评价思路,设定咸水层CO₂地质封存普查、详查、勘探和注入四个阶段的勘查及地质认识程度要求,一方面融合了地质、技术、经济和工程实施条件,另一方面也契合了不同地质研究程度的工作规律。

将封存潜力划分为地质潜力、技术容量、技术经济容量和工程封存量四大类,不仅凸显深部咸水层静态理论封存潜力数据基础支撑作用,更有利于理解地质因素、技术水平、源汇匹配、经济成本等多种因素对封存潜力或容量的控制,工程封存量数据以实践指导未来深部地下空间实施咸水层封存的科学研究、工程审批和深部地下空间管理。已有研究开展的大多数潜力评价研究,如张洪涛等(2005)、李小春等(2006)、郭建强等(2014)等提出的中国宏观尺度的咸水层CO₂地质封存潜力数据,

以及Wei et al.(2013)、刁玉杰等(2017)等提出的次盆地尺度评价数据,均可归类于本文提出的预测技术容量级别,但对沉积盆地的地质认识和基础数据支撑程度有所差异,筛选出的咸水层储层也不尽相同,无法直接对比潜力成果数据,侧面反映了潜力定级与储层筛选的重要性。对于某一具体封存场地或咸水层储层的潜力评价(Li et al., 2016; 马鑫等, 2021),静态理论封存量可认为是探明技术容量,动态封存量可以认为是假设不同CO₂注入方案的工程设计封存量。

尽管容积法或机理法潜力计算公式已经得到普遍应用,但仍然一定的问题,需要开展深入研究和现场验证。容积法或机理法在计算技术容量和技术经济容量时,驱替系数和成本系数的取值是动态可变化的,随着室内实验、数值模拟、工程示范数据的不断丰富和验证,未来研究会更加深入,参数取值更加科学,工程封存量更是如此,因此地质潜力的科学研究和工程实践经验对封存潜力的精准评价至关重要。此外,机理法计算公式复杂,参数获取难度较大,更适合某个具体场地或某一具体时间段内的封存量评价,建议在计算探明级别的潜力或容量时应用。其次,不同捕获机理在CO₂地质封存过程中具有不同的作用时间尺度,对长期性的封存潜力贡献率也明显不同。一些捕获机理在CO₂注入开始就产生作用,如构造地层捕获、水动力捕获。溶解捕获和矿化捕获产生的作用比较缓慢,需要相当长的时间,特别是矿化捕获,需要几百到上千年才能完全发生作用。CO₂注入过程一般就是几十年,在此期间CO₂的矿化捕获几乎是可以忽略的,这种情况对于束缚捕获机理也是一样。因此,机理法计算的潜力评价数据存在一定时间尺度误差。

6 结论

(1)咸水层CO₂地质封存作为实现中国碳中和目标重要支撑技术,统一潜力评价级别与评价方法至关重要。对应普查、详查、勘探和注入4个工作阶段,综合地质、技术、经济和工程实施条件,可以将封存潜力/容量划分为地质潜力、技术容量、技术经济容量和工程封存量4大类。普查阶段对应预测级别(D级),详查阶段对应控制级别(C级),勘探阶段对应探明级别(B级),注入阶段对应工程级别(A级)。

(2)咸水层 CO₂地质封存潜力评价应形成精度由低到高的多尺度多级别动态机制,评价流程总体按照储层筛选、潜力定级、潜力/容量计算 3 个步骤依次开展潜力评价。储层筛选需要综合考虑储集条件、盖层封闭性、封存体稳定性条件,以及煤炭、石油和天然气等深部资源开发影响等因素,圈定有效储层开展潜力计算。

(3)目前潜力计算公式主要有容积法和机理法两种,但不同级别潜力/容量的方法学应用场景不同,探明阶段封存技术容量评估应结合不同的注入方案开展数值模拟预测评价。当前阶段下,驱替系数、成本系数取值是最大的科研难点,需要结合大量的室内测试与数值模拟以及工程实践数据的支撑予以确定。

References

- Bachu S. 2015. Review of CO₂ storage efficiency in deep saline aquifers[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 40: 188–202.
- Chadwick A, Williams G, Delepine N, Clochard V, Labat K, Sturton S, Buddensiek M L, Dillen M, Nickel M, Lima A L. 2010. Quantitative analysis of time–lapse seismic monitoring data at the Sleipner CO₂ storage operation[J]. *Leading Edge*, 29: 170–177.
- CSLF. 2007. Estimation of CO₂ Storage Capacity in Geological Media – Phase II Report[R].
- CSLF. 2019. Carbon Capture, Utilisation and Storage (CCUS) and Energy Intensive Industries (EII): From Energy/Emission Intensive Industries to Low Carbon Industries[R].
- Cui Zhendong, Liu Da'an, Zeng Rongshu, Niu Jingrui. 2011. Potential geological and environmental risks and its prevention measures for CO₂ geological storage projects[J]. *Geological Review*, 57(5): 700–706 (in Chinese with English abstract).
- Dai Shixin, Dong Yanjiao, Wang Feng, Xing Zhenhan, Hu Pan, Yang Fu. 2022. A sensitivity analysis of factors affecting in geologic CO₂ storage in the Ordos Basin and its contribution to carbon neutrality[J]. *China Geology*, 5: 359–371.
- Diao Yujie, Zhang Senqi, Guo Jianqiang, Li Xufeng, Zhang Hui. 2011. Geological safety evaluation method for CO₂ geological storage in deep saline aquifer[J]. *Geology in China*, 38(3): 786–792 (in Chinese with English abstract).
- Diao Yujie, Zhu Guowei, Jin Xiaolin, Zhang Chao, Li Xufeng. 2017. Theoretical potential assessment of CO₂ geological utilization and storage in the Sichuan Basin[J]. *Geological Bulletin of China*, 36(6): 1088–1095 (in Chinese with English abstract).
- Diao Yujie, Li Xufeng, Jin Xiaolin, Guo Jianqiang, Zhang Senqi. 2019. Exploration, Evaluation and Engineering Control Technology of Carbon Dioxide Geological Storage in Deep Saltwater[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Diao Y, Zhu G, Li X, Bai B, Zhang B. 2020. Characterizing CO₂ plume migration in multi–layer reservoirs with strong heterogeneity and low permeability using time–lapse 2D VSP technology and numerical simulation[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 92: 102880.
- Ding Zhongli. 2021. Research on China's "Carbon Neutralization Framework Roadmap"[R] (in Chinese).
- Furre A K, Eiken O, Alnes H, Vevatne J N, Kjaer A F. 2017. 20 Years of monitoring CO₂–injection at sleipner[J]. *Energy Procedia*, 114(1): 3916–3926.
- Ghosh R, Sen M K, Vedanti N. 2015. Quantitative interpretation of CO₂ plume from Sleipner (North Sea), using post–stack inversion and rock physics modeling[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 32: 147–158.
- Goodman A, Hakala A, Bromhal G, Deel D, Rodosta T, Frailey S, Small M, Allen D, Romanov V, Fazio J, Huerta N, McIntyre D, Kutchko B, Guthrie G. 2011. U.S.DOE methodology for the development of geologic storage potential for carbon dioxide at the national and regional scale[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 5: 952–965.
- Guo Jianqiang, Wen Dongguang, Zhang Senqi, Jia Xiaofeng, Fan Jijiao. 2014. The Atlas of Carbon Dioxide Geological Storage Potential and Suitability Assessments of China Major Sedimentary Basins[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Huang Jing. 2021. National Assessment Report on Development of Carbon Capture Utilization and Storage Technology in China[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- IEA GHG. 2009. Development of Storage Coefficients for CO₂ Storage in Deep Saline Formations[R]. IEA Green House Gas R & D Programme (IEA GHG).
- Li C, Zhang K N, Wang Y S, Guo C B, Maggi F. 2016. Experimental and numerical analysis of reservoir performance for geological CO₂ storage in the Ordos Basin in China[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 45: 216–232.
- Li Qi, Cai Bofeng, Chen Fan, Liu Guizhen, Liu Lancui. 2019. Review of environmental risk assessment methods for carbon dioxide geological storage[J]. *Environmental Engineering*, 37(2): 13–21 (in Chinese with English abstract).
- Li X C, Wei N, Jiao Z S, Liu S N, Dahowski R. 2019. Cost curve of large–scale deployment of CO₂–enhanced water recovery technology in modern coal chemical industries in China[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 81: 66–82.
- Li Xiaochun, Liu Yanfeng, Bai Bing, Fang Zhiming. 2006. Ranking and screening of CO₂ saline aquifer storage zones in China[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 25(5): 963–968 (in Chinese with English abstract).
- Ma Bing, Jia Lingxiao, Yu Yang, Wang Huan, Chen Jing, Zhong Shuai, Zhu Jichang. 2021. Geoscience and carbon neutralization: Current

- status and development direction[J]. *Geology in China*, 48(2): 347–358 (in Chinese with English abstract).
- Ma Xin, Li Xufeng, Wen Dongguang, Luo Xingwang, Diao Yujie, Yang Guodong, Yin Shuguo, Cao Wei. 2021. 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*, 48(6): 196–205 (in Chinese with English abstract).
- Metz Bert, Davidson Ogunlade, De Coninck H C, Loos Manuela, Meyer Leo. 2005. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage[M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- Raknes E B, Arntsen B, Weibull W. 2015. Three-dimensional elastic full waveform inversion using seismic data from the Sleipner area[J]. *Geophysical Journal International*, 202: 1877–1894.
- USDOE. 2006. Carbon Sequestration Atlas of the United States and Canada: Appendix A – Methodology for development of carbon sequestration capacity estimates[R].
- Wang Huan, Zheng Yuzhou, Wang Wei. 2022. The major work and implication of Geoscience Australia on geological carbon sequestration[J]. *Geology in China*, 49(3): 1005–1008 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yao, Guo Chihui, Zhuang Shurong, Chen Xijie, Jia Liqiong, Chen Zeyu, Xia Zilong, Wu Zhen. 2021. Major contribution to carbon neutrality by China's geosciences and geological technologies[J]. *China Geology*, 4: 329–352.
- Wei N, Li X, Wang Y, Dahowski R T, Davidson C L, Bromhal G S. 2013. A preliminary sub-basin scale evaluation framework of site suitability for onshore aquifer-based CO₂ storage in China[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 12: 231–246.
- Wei N, Jiao Z S, Ellett K, Ku A Y, Liu S N, Middleton R, Li X C. 2021. Decarbonizing the coal-fired power sector in China via carbon capture, geological utilization, and storage technology[J]. *Environmental Science & Technology*, 55: 13164–13173.
- Wei N, Li X C, Jiao Z S, Stauffer P H, Liu S N, Ellett K, Middleton R S. 2022. A hierarchical framework for CO₂ storage capacity in deep saline aquifer formations[J]. *Frontiers in Earth Science*, 9: 1–121.
- Xie Heping, Xie Lingzhi, Wang Yufei, Zhu Jiahua, Liang Bin, Ju Yang. 2012. CCU: A more feasible and economic strategy than CCS for reducing CO₂ emissions[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 44(4): 1–5 (in Chinese with English abstract).
- Xie Jian, Zhang Keni, Wang Yongsheng, Tan Liqing, Guo Chaobin. 2016. Performance assessment of CO₂ geological storage in deep saline aquifers in Ordos Basin, China[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 37(1): 166–174 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hong, Zhao Xisen, Kang Yulong, Chen Longlong, Huang Chunxia, Wang Hong. 2019. Evaluation on geological sequestration suitability and potential of CO₂ in Ordos Basin[J]. *Climate Change Research*, 15(1): 95–102 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Bing, Liang Kaiqian, Wang Weibo, Chen Longlong, Wang Hong. 2019. Evaluation of effective CO₂ geological sequestration potential of deep saline aquifer in Ordos Basin[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 6(3): 15–20 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongtao, Wen Dongguang, Li Yilian, Zhang Jiaqiang, Lu Jincui. 2005. Conditions for CO₂ geological sequestration in China and some suggestions[J]. *Geological Bulletin of China*, 24(12): 1107–1110 (in Chinese with English abstract).
- Zhang K N, Xie J, Li C, Hu L T, Wu X Z, Wang Y S. 2016. A full chain CCS demonstration project in northeast Ordos Basin, China: Operational experience and challenges[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 50: 218–230.

附中文参考文献

- 崔振东, 刘大安, 曾荣树, 牛晶蕊. 2011. CO₂地质封存工程的潜在地质环境灾害风险及防范措施[J]. *地质论评*, 57(5): 700–706.
- 刁玉杰, 张森琦, 郭建强, 李旭峰, 张徽. 2011. 深部咸水层 CO₂地质储存地质安全性评价方法研究[J]. *中国地质*, 38(3): 786–792.
- 刁玉杰, 朱国维, 金晓琳, 张超, 李旭峰. 2017. 四川盆地理论 CO₂地质利用与封存潜力评估[J]. *地质通报*, 36(6): 1088–1095.
- 刁玉杰, 李旭峰, 金晓琳, 郭建强, 张森琦. 2019. 深部咸水层二氧化碳地质储存勘查评价与工程控制技术[M]. 北京: 地质出版社.
- 丁仲礼. 2021. 中国“碳中和框架路线图”研究[R].
- 郭建强, 文冬光, 张森琦, 贾小丰, 范基姣. 2014. 中国主要沉积盆地二氧化碳地质储存潜力与适宜性评价图集[M]. 北京: 地质出版社.
- 黄晶. 2021. 中国碳捕集利用与封存技术评估报告[M]. 北京: 科学出版社.
- 李琦, 蔡博峰, 陈帆, 刘桂臻, 刘兰翠. 2019. 二氧化碳地质封存的环境风险评价方法研究综述[J]. *环境工程*, 37(2): 13–21.
- 李小春, 刘延锋, 白冰, 方志明. 2006. 中国深部咸水含水层 CO₂储存优先区域选择[J]. *岩石力学与工程学报*, 25(5): 963–968.
- 马冰, 贾凌霄, 于洋, 王欢, 陈静, 钟帅, 朱吉昌. 2021. 地球科学与碳中和: 现状与发展方向[J]. *中国地质*, 48(2): 347–358.
- 马鑫, 李旭峰, 文冬光, 罗兴旺, 刁玉杰, 杨国栋, 尹书郭, 曹伟. 2021. 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*, 48(6): 196–205.
- 王欢, 郑宇舟, 王为. 2022. 澳大利亚地球科学局在地质碳封存方面开展的主要工作与启示[J]. *中国地质*, 49(3): 1005–1008.
- 谢和平, 谢凌志, 王昱飞, 朱家骅, 梁斌, 鞠杨. 2012. 全球二氧化碳减排不应是 CCS, 应是 CCU[J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 44(4): 1–5.
- 谢健, 张可霓, 王永胜, 覃莉清, 郭朝斌. 2016. 鄂尔多斯深部咸水层 CO₂地质封存效果评价[J]. *岩土力学*, 37(1): 166–174.
- 杨红, 赵习森, 康宇龙, 陈龙龙, 黄春霞, 王宏. 2019. 鄂尔多斯盆地 CO₂地质封存适宜性与潜力评价[J]. *气候变化研究进展*, 15(1): 95–102.
- 张冰, 梁凯强, 王维波, 陈龙龙, 王宏. 2019. 鄂尔多斯盆地深部咸水层 CO₂有效地质封存潜力评价[J]. *非常规油气*, 6(3): 15–20.
- 张洪涛, 文冬光, 李义连, 张家强, 卢进才. 2005. 中国 CO₂地质埋存条件分析及有关建议[J]. *地质通报*, 24(12): 1107–1110.