

宁夏地区咸水层CO₂封存选区及潜力预测

杨川枫, 刘廷, 程国强, 刁玉杰, 马鑫, 王楠, 李凤洋, 杨凌雪, 马晶, 虎亭, 孙建, 任建国

Potential prediction and storage area selection of CO₂ geological storage in deep saline aquifers in Ningxia region

YANG Chuanfeng, LIU Ting, CHENG Guoqiang, DIAO Yujie, MA Xin, WANG Nan, LI Fengyang, YANG Lingxue, MA Jing, HU Ting, SUN Jian, and REN Jianguo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202403013>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

黑龙江林甸地区深部咸水层CO₂地质储存条件与潜力评估

Geological storage conditions and potential assessment of CO₂ in deep saline aquifers in Lindian of Heilongjiang Province

马永法, 周学军, 董俊领, 詹涛, 王旭, 刘玲, 刘玉, 刘艳, 何兰, 李昌, 史珍珍 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 179–189

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

A study of the potential of field-scale of CO₂ geological storage and enhanced water recovery in the eastern Junggar area of Xinjiang

马鑫, 李旭峰, 文冬光, 罗兴旺, 刁玉杰, 杨国栋, 尹书郭, 曹伟 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 196–205

玄武岩封存CO₂技术方法及其进展

Research progress on key technologies of CO₂ storage in basalts

李万伦, 徐佳佳, 贾凌霄, 马冰, 陈晶 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 164–173

鸿图璋隧道突涌水预测及防治措施

Prediction and prevention of sudden water gushing in the Hongtuzhang tunnel

罗依珍, 成国文, 尹利君, 邓皇适, 谭宁, 刘真真 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 64–72

高放废物深地质处置地下水数值模拟应用综述

Review of groundwater numerical simulation for deep geological disposal of high-level radioactive waste

李露露, 张秋兰, 李星宇, 张璜, 崔亚莉, 邵景力 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 43–53

第二松花江干流傍河开采潜力评价

Potential evaluation of river bank infiltration along the Second Songhuajiang River

崔瑞娟, 冶雪艳, 杜新强, 王丽雪, 陆向勤 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 35–35



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202403013

杨川枫, 刘廷, 程国强, 等. 宁夏地区咸水层 CO₂ 封存选区及潜力预测 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(4): 21-32.
YANG Chuanfeng, LIU Ting, CHENG Guoqiang, et al. Potential prediction and storage area selection of CO₂ geological storage in deep saline aquifers in Ningxia region [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(4): 21-32.

宁夏地区咸水层 CO₂ 封存选区及潜力预测

杨川枫¹, 刘廷², 程国强¹, 刁玉杰², 马鑫², 王楠¹, 李凤洋¹, 杨凌雪¹, 马晶¹,
虎亭¹, 孙建¹, 任建国¹

(1. 宁夏回族自治区水文环境地质调查院, 宁夏银川 750021; 2. 中国地质调查局
水文地质环境地质调查中心, 天津 300304)

摘要: 宁夏局部地区高碳排放源集中且碳排量巨大, 亟需开展碳封存潜力评价等工作, 以支撑未来碳捕集、利用与封存规划与重大示范。文章在宁夏地区碳封存基本地质条件的基础上, 采用美国能源部(US-DOE)体积法, 评估宁夏地区深部咸水层 CO₂ 封存预测地质潜力约 867.421×10⁸ t, 预测技术容量约 423.34×10⁸ t, 主力储层主要集中分布在宁夏东部盐池地区和六盘山盆地。综合封存潜力、盖层封闭性、地质体稳定性、社会环境风险等因素, 开展了宁夏地区咸水层封存适宜性初步评价, 结果表明: 宁夏东部盐池地区储盖层条件良好、构造较稳定、人口密度低, 是宁夏地区开展咸水层 CO₂ 封存的有利远景区。
关键词: 宁夏; 深部咸水层; CO₂ 地质封存; 预测潜力; 远景区

中图分类号: X701; X141

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)04-0021-12

Potential prediction and storage area selection of CO₂ geological storage in deep saline aquifers in Ningxia region

YANG Chuanfeng¹, LIU Ting², CHENG Guoqiang¹, DIAO Yujie², MA Xin², WANG Nan¹,
LI Fengyang¹, YANG Lingxue¹, MA Jing¹, HU Ting¹, SUN Jian¹, REN Jianguo¹

(1. *Institute of Hydrogeology and Environmental Geology of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan, Ningxia 750021, China*; 2. *Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, CGS, Tianjin 300304, China*)

Abstract: Due to the concentrated carbon emission sources and the enormous carbon emissions in the Ningxia Hui Autonomous, it is necessary to evaluate carbon sequestration potential to support future CCUS planning and major demonstrations. Based on the basic geological conditions for carbon sequestration in Ningxia, this study used the volumetric method of the US Department of Energy (US-DOE) to assess the geological potential for deep saline aquifer sequestration in Ningxia. The results show that the predicted geological potential of carbon sequestration in the deep saline aquifers in Ningxia is approximately 86.742 billion tons, with the predicted technical capacity of about 42.334 billion tons. The main reservoirs are concentrated in the Yanchi area in eastern Ningxia and the Liupan Mountain Basin. A preliminary evaluation of the suitability of saline aquifer sequestration in Ningxia was conducted by considering many factors such as the overall sequestration potential, cap rock integrity, geological

收稿日期: 2024-03-06; 修订日期: 2024-05-10

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 宁夏回族自治区财政项目(NXCZ20220202); 中国地质调查局地质调查项目(DD20221818)

第一作者: 杨川枫(1988—), 男, 本科, 工程师, 主要从事水文地质、地质碳储探究。E-mail: 13804829831@163.com

通讯作者: 刘廷(1990—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事深部地下空间储气储能、碳封存研究。E-mail: liuting@mail.cgs.gov.cn

stability, and socio-environmental risks. The results indicate that the Yanchi area in eastern Ningxia has favorable reservoir and cap rock conditions, stable structures, and low population density, making it a potential region for CO₂ sequestration in Ningxia.

Keywords: Ningxia; deep saline aquifers; CO₂ geological storage; predictive potential; promising region

区域碳封存潜力评估是回答能否利用碳封存技术实现碳减排的首要任务。我国碳封存技术发展相对滞后,但在封存潜力评价方面,已有大量学者相继开展了不同地区不同尺度的封存潜力评价工作。早在 2014 年,郭建强等就牵头组织完成了中国主要沉积盆地的 CO₂ 地质封存潜力初步评估^[1];任相坤等^[2]、张冰等^[3]、杨红等^[4]、赵习森等^[5]相继围绕鄂尔多斯盆地针对咸水层封存和油气藏封存等不同技术类型,开展了不同尺度的碳封存潜力评估;肖贝等^[6]、何佳林等^[7]、马鑫等^[8]分别从准噶尔盆地、准东油田区块、准东场地三个尺度进行了不同类型的碳封存潜力评估;刁玉杰等^[9]对四川盆地枯竭油气田、不可采煤层、咸水层等不同封存技术方法分别进行了碳封存潜力评价;王齐鑫等^[10]、罗伟等^[11]、马永法等^[12]分别对安徽省各沉积盆地、松辽盆地中央拗陷区北部地区和黑龙江林甸地区的咸水层碳封存潜力进行了评估计算。上述研究从不同技术类型、不同盆地、不同尺度开展了碳封存潜力评价工作,填补了我国局部地区碳封存潜力数据空白,同时也促进了国内碳封存潜力评价方法学的发展。但以上潜力评估主要针对盆地、构造单元或特定区块等具有相对统一地质背景的区域进行,省域的碳封存潜力评估少有报道,但省域的碳封存潜力评估数据对省级碳减排发展规划有重要参考意义。

国内外已有碳封存潜力评价方法的大量研究和实践,碳封存领导人论坛(CSLF)^[13]、美国能源部(US-DOE)^[14]、Bachu 等^[15]、沈平等^[16]和 Ma 等^[17]国内外机构、学者分别提出并丰富了相关的潜力评价技术方法。刁玉杰等^[18]考虑我国碳封存潜力勘查评价实际情况,将碳封存勘查工作划分为普查、详查、勘探和注入四个工作阶段,将碳封存潜力分别对应划分为预测、控制、探明、工程四个级别,并提出了各级别潜力评价计算方法建议。

宁夏地处华北陆块、阿拉善微陆块、祁连早古生代造山带 3 个二级构造单元交汇地带,是我国南北构造体系与东西构造体系的交汇部位,地质构造演化过程复杂,虽然全区沉积地层较为发育,但沉积地层空间差异巨大,且全区各地地壳稳定性和断裂发育不尽相同^[19]。宁夏也是我国西部碳排放集中区,碳减排压力

巨大。“双碳”目标提出以来,宁夏正在通过产业结构转型和大力发展清洁能源来减少碳排放,但以煤为主的能源产业格局短期内难以改变,2021 年宁夏直接碳排放量为 2.35×10^8 t^[20](未扣除电力调查蕴含的碳排放量),预计 2030 年以后年碳排放量仍能够达到 4×10^8 t 以上^[21]。工业碳排放源主要分布在宁夏东部和北部地区,包括宁东能源化工基地、银川—吴忠、石嘴山、中卫等地,且排放源类型主要为火电和化工企业等难减排行业^[22]。碳封存技术作为实现大规模化石能源零排放利用的重要技术选择,是火电厂、化工、钢铁、水泥等难减排行业深度脱碳的可行技术方案,随着碳减排压力的增加,对碳封存技术的重视程度日渐提高。复杂的地质背景给宁夏碳封存地质研究工作带来了较大的挑战,至今尚未形成专门针对宁夏地区的碳封存潜力评价成果。因此,开展宁夏地区的咸水层 CO₂ 封存选区和潜力评价工作,不仅可以为此类复杂地质背景下的 CO₂ 地质封存研究工作提供技术方法参考,更有利于促进宁夏地区碳封存工作的规划和发展。

本文综合宁夏地区已有地质基础,基于刁玉杰等给出的潜力评价划分方案^[18],采用体积法计算了宁夏地区咸水层 CO₂ 封存预测级别潜力,初步圈定远景区,以期为宁夏地区规模化碳封存规划选址与重大示范提供参考。

1 区域地质概况

宁夏位于柴达木—华北板块中南部,东侧为稳定的华北陆块,西北侧为阿拉善微陆块,西南侧为祁连早古生代造山带,可细分为 3 个三级构造单元,即鄂尔多斯地块、腾格里早古生代增生楔和北祁连中元古代—早古生代海沟系。该区是连接我国北方西部和东部不同大地构造单元的枢纽地区,也是我国地层、构造、地貌以及各种地球物理场的重要分界区域,地质构造演化过程复杂。本文不详细展开讨论,仅简述适宜开展咸水层封存的沉积盆地的基本地质概况,主要包括鄂尔多斯盆地、银川盆地、六盘山盆地(图 1)。

鄂尔多斯盆地是华北板块西部典型的克拉通边缘叠合盆地,盆地发育了中新元古界—下古生界海相碳酸盐台地相沉积、上古生界海陆交互相含煤碎屑岩

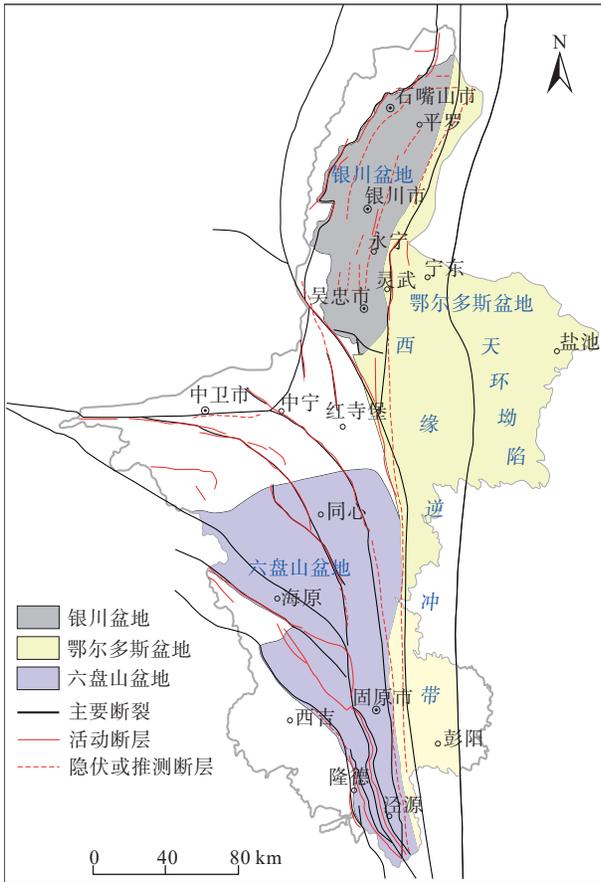


图 1 宁夏地区主要盆地及断裂分布图 (据文献 [19] 略改)

Fig. 1 Distribution of major basins and faults in the Ningxia region (modified after Ref. [19])

沉积、中生界内陆河流-三角洲-湖盆相沉积、新生代风成黄土及河流相沉积。盆地基底为前寒武纪结晶变质岩系, 后续地层发育较全, 总厚度为 5 000 ~ 6 000 m, 主要缺失志留系至下石炭统地层^[23]。盆地整体分为伊盟隆起、伊陕斜坡、天环拗陷、西缘逆冲带、晋西挠褶带、渭北隆起六大构造单元, 而宁夏地区东部的盐池、灵武、彭阳等地区位于盆地西缘的天环拗陷和西缘逆冲带 2 个二级构造单元(图 1)。天环拗陷内沉积地层埋藏较深, 沉积厚度大, 断裂发育较少, 而西缘逆冲带地层埋藏相对浅, 并且逆冲带内发育大量不同规模的高角度逆冲断层^[24]。

六盘山盆地主体大部分处于宁夏地区境内, 北界为天景山, 西界为西华山-南华山, 东界为鄂尔多斯盆地西缘(图 1)^[25]。六盘山盆地位于青藏高原东北缘, 大地构造位置处于河西走廊北西向构造带和鄂尔多斯盆地近南北构造带的交接部位, 构造位置特殊, 成盆动力学背景复杂, 构造变形强烈, 是一个受多期次改造的叠合盆地。盆地发育在太古宇与古元古界结晶基底和下古生界褶皱基底双重基地之上, 海西期

以来开始发育沉积盖层, 进入盆地雏形期, 受构造运动控制, 盆地经历多个原型盆地的复合叠加, 主要经历了石炭~二叠纪类克拉通盆地、三叠~白垩纪伸展断陷盆地 2 个不同的发育期。侏罗纪以后受西南向北东方向的挤压作用, 形成了六盘山中新生代的挤压性盆地^[26-27]。

银川盆地是喜马拉雅期盆地东、西两侧北北东向断裂右行走滑拉分形成的断陷盆地, 其范围北起白石咀山, 南至牛首山, 西邻贺兰山, 东接鄂尔多斯高原(图 1)。盆地萌生于始新世, 在中新世末断陷沉降活动加剧, 形成巨厚的古近~新近系沉积, 第四纪仍有活动。盆地内新生界地层厚度变化受基底构造的控制, 中部凹陷区是沉降最深的部位, 自渐新世以来, 沉积了厚达 9 000 m 的新生代沉积物^[28]。

2 研究方法

2.1 潜力计算方法

潜力计算与远景区优选是当前阶段碳封存工作的基础性先导工作之一, 不同地质尺度的封存潜力计算研究日趋广泛和深入。国内外学者根据不同的封存机理认识, 提出不同的封存潜力计算方法, 包括物质平衡法、有效容积法、溶解法以及考虑多种封存机理的综合算法^[29]。本次评价考虑宁夏地区当前 CO₂ 封存勘查阶段及已有地质资料情况, 选择美国能源部 (US-DOE) 体积法^[14]开展宁夏地区咸水层 CO₂ 封存潜力计算, 其结果为预测级别潜力, 评价流程包括储层筛选、潜力计算两个步骤。潜力计算公式如下:

$$G = A \cdot h \cdot \phi \cdot \rho_{\text{CO}_2} \cdot E \quad (1)$$

$$E = E_{A_n/A_t} \cdot E_{h_n/h_g} \cdot E_{\phi_c/\phi_t} \cdot E_V \cdot E_d \quad (2)$$

式中: G ——预测封存潜力/kg;

A ——咸水层储层面积/m²;

h ——咸水层储层厚度/m;

ϕ ——咸水层储层孔隙度/%;

E ——储集效率因子, 即有效封存量与理论封存量之间的比值;

ρ_{CO_2} ——咸水层储层中 CO₂ 的超临界密度/(kg·m⁻³);

E_{A_n/A_t} ——储层面积有效系数, 即能够有效适宜 CO₂ 封存的储层面积占总储层面积的比值;

E_{h_n/h_g} ——储层厚度有效系数, 即能够有效适宜 CO₂ 封存的储层厚度占总储层厚度的比值;

E_{ϕ_c/ϕ_t} ——储层孔隙度有效系数, 即能够有效适宜 CO₂ 封存、相互连通的孔隙度占总孔隙

度的比值;

E_v ——波及效率,即由于 CO_2 和地层水之间的密度差异,有效厚度范围内分布有 CO_2 的储层体积占储层总体积的比例;

E_d ——驱替效率,即由于原位流体不流动导致的储层中不可封存 CO_2 的孔隙空间占比。

潜力评价首先进行储层筛选,要求储层埋深大于 800 m,以满足 CO_2 达到超临界状态,储层单层厚度大于 1 m,有效孔隙度宜大于 5%,渗透率高于 $1 \times 10^{-3} \mu m^2$ ^[18]。本次评价所采取的储层厚度直接采用储层有效厚度,有效厚度的取值依据过往石油、天然气、煤炭、地热勘查等深部钻孔资料所揭示的地层埋深、岩性等数据,统计厚度、孔渗等条件适宜的砂层,进而确定有效储层厚度。面积根据储层的平面分布,直接圈定有效面积,由于本次评价的储层均在盆地内广泛连续分布,储层岩型特征较稳定,因此储层的有效面积等于盆地面积。孔隙度采用部分钻孔揭露的储层有效孔隙度,在一些没有孔隙度数值的区域,通过插值或结合沉积环境、沉积相等进行类比赋值,有效孔隙度需进行合理的预测。通过直接确定有效厚度、有效面积和有效孔隙度,获取了 $A \cdot E_{A_n/A_i}$ 、 $h \cdot E_{h_n/h_g}$ 、 $\phi \cdot E_{\phi_n/\phi_i}$ 的取值,而 E_v 和 E_d 的乘积采用 DOE 建议的取值 0.14^[14]。 ρ_{CO_2} 是一个受温度和压力影响的参数,可查询获取,本次评价通过盆地温度场和压力场确定了不同评价层位的 ρ_{CO_2} 。

2.2 远景区优选方法

普查阶段的远景区优选工作是建立在潜力计算的基础上,考虑盖层封闭性、地质体稳定性、社会环境风险等问题,规避活动断裂及深大断裂,避开人口集中的城镇区,圈定具有一定封存潜力规模的连片区

域。远景区优选可以为进一步开展 CO_2 封存详查工作提供参考。

优选的技术流程包括适宜性评价、远景区区划两个步骤,其中的关键在于 CO_2 封存适宜性评价。 CO_2 封存适宜性评价方法有很多,包括经验的、数学的(如层次分析法、概率分析、特征—事件—过程算法等),以及计算机技术(如 GIS 环境下的多因子逐层叠加法)等,这些评价方法较为成熟,应用广泛。本次评价采用基于 GIS 的多源信息叠加评价方法,在系统分析 CO_2 封存影响因素基础上,对各影响因素进行权重赋值和定性定量数值转化,制作形成各因素评价信息数据层,对信息数据进行归一化处理,利用 GIS 空间分析功能完成适宜性评价。适宜性评价计算公式如下:

$$P = \sum_{i=1}^n P_i A_i (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

式中: P ——评价单元 CO_2 封存适宜性综合评分值;

n ——评价因子的总数;

P_i ——第 i 个评价指标的适宜性评价得分;

A_i ——第 i 个评价指标的权重。

单个指标因素适宜性评价得分,采用由“好”—“差”赋值“10”—“1”,根据 GIS 综合评价结果,确定适宜性评价等级,本次评价所选取的指标及其权重取值见表 1。

3 封存条件评价

按照咸水层 CO_2 封存基本要求,重点分析宁夏地区不同沉积盆地地质体稳定性、储集条件、盖层封闭性三个主要地质条件。

3.1 地质体稳定性

区域地壳稳定性直接影响 CO_2 封存的地质安全

表 1 CO_2 地质封存适宜性评价指标及权重

Table 1 Weight of evaluation index of suitability for CO_2 geological storage

一级		二级		三级		关键因素否决条件
指标	权重	指标	权重	指标	权重	
地质适宜性评价	0.7	储集条件与封存潜力	0.5	主力(最大)储层潜力占比	0.6	
				单位面积封存潜力	0.4	
		盖层封闭性	0.3	岩性	0.4	
				断裂发育情况	0.3	
				厚度	0.2	
埋藏深度	0.1					
地质体稳定性	0.2	地震动峰值加速度	1.0	地震动峰值加速度大于等于 0.40 g 区域和 活动断裂两侧 5 km 范围内为不适宜区		
社会环境风险	0.3	国土空间安全及环境风险	1	地质灾害易发性	0.1	
				人口密度	0.6	
				地形复杂程度	0.3	

性,是引起封存区域性风险的最主要潜在因素。区域地壳越稳定,越适宜 CO₂ 封存。地震动峰值加速度作为一项重要的评价区域地壳稳定性的指标被广为接纳。

宁夏地区地震动峰值加速度小于等于 0.15 g 的区域主要集中在东部地区(图 2),属于鄂尔多斯盆地。从地壳稳定性角度来看,六盘山盆地受到宁南弧形构造带强烈活动的影响,银川盆地受到贺兰山东麓断裂、黄河断裂等全新世活动断裂影响,地震动峰值加速度也处于较高水平,不宜开展 CO₂ 封存。如有强烈碳封存需求,需要开展相关的专项地震安全性评价工作。

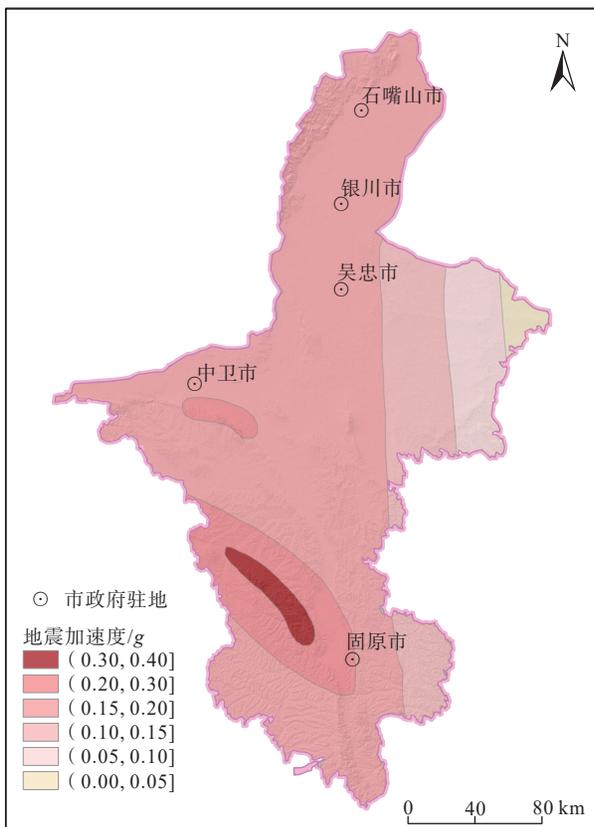


图 2 宁夏地区地震动峰值加速度区划图^[30]

Fig. 2 Plots of peak acceleration of ground motion in the Ningxia region^[30]

3.2 储集条件

储集条件是 CO₂ 咸水层封存的首要先决性条件,深部地质体是否具备储集能力,是评价咸水层封存潜力的基本要求,鄂尔多斯盆地等 3 个主要沉积盆地的构造演化和沉积埋藏过程差异较大,致使各盆地储集条件迥异。

根据侯光才等^[29]对鄂尔多斯盆地地下水的研究成果,鄂尔多斯盆地白垩系地层水一般为淡水或微咸水,而在埋深 800 m 以下的侏罗~石炭系地层中存在

明显的地下水滞流带,滞流带地下水为古封存水,溶解性总固体可达 10~50 g/L 或更高^[31];特别是在鄂尔多斯盆地西部,侏罗系以下地层埋深较大,深部地下水处于封闭、半封闭状态,大部分为咸水层,从地下水保护角度来看,适宜作为 CO₂ 储层。本次评价为预测性评价,受限于地质勘查资料精度,不过多探讨具体地层的咸淡水界面、分布范围等问题,将 800 m 以下侏罗系及下伏地层均视作咸水层。依据岩性特征,规避侏罗系煤层开采的影响,初步将鄂尔多斯盆地宁夏地区深部地层划分为 4 套储盖组合(图 3)。天环坳陷地区砂岩储层物性条件较好,其中主要咸水层地层刘家沟组砂层平均孔隙度为 4.5%~7.0%,和尚沟组砂层平均孔隙度为 5%~8%^[32]。主要含油层系延长组地层储层孔渗良好,长 6 段砂层孔隙度在 5%~13%,平均孔隙度 8% 左右,渗透率一般在 0.1~3.0 mD^[33],因此在非含油区,延长组也可以作为良好的 CO₂ 封存储层。主要含气层系石盒子组和山西组局部地区砂岩储层平均孔隙度为 5%~11%,平均渗透率为 0.3~2.0 mD^[24],因此在非气藏区,石盒子组和山西组也可以作为良好的 CO₂ 封存储层。

六盘山盆地主要发育期是白垩纪,白垩系、古近系地层是本区主要潜在 CO₂ 封存地层。六盘山盆地整体水质较差,表层第四系松散岩类孔隙水多为微咸水、咸水,盆地内部 800 m 以下的白垩系、古近系等地层,由于埋深较大,与地表水力联系较差,水循环微弱,溶解性总固体一般为 3~10 g/L,深度越深,溶解性总固体越高。因此,本次评价将白垩系、古近系地层作为咸水层储层。依据地层岩性特征,大致可将六盘山盆地深部地层划分出 3 套 CO₂ 咸水层地质封存储盖组合(图 4)。六盘山群马东山组、李洼峡组、和尚铺组、三桥组均发育有细砂、砂岩、细砾岩,可以作为储层。其中李洼峡组、和尚铺组为条件较好的白垩系储集层,在盘参 4 井发现下白垩统含油斑砂岩,显示本区下白垩统砂岩储层物性条件良好。据前人资料显示,和尚铺组主要为含砾砂岩、中-细砂,孔隙度为 8%~15%,最大可达约 30%;盘参 1 井中,李洼峡组主要为厚层砂岩,储集物性好,孔隙度为 11%~14%,渗透率为 96~115 mD。根据相关钻孔统计数据以及石油勘查统计数据,李洼峡组砂地比为 0.05~0.60,和尚铺组砂地比为 0.05~0.45^[34]。此外,早白垩世三桥期盆地内地形起伏、沉降幅度及沉积厚度差异较大,岩性单一,主要为紫红色砾岩、角砾岩夹少量透镜状砂岩,厚 90~155 m。砾石分选性差,磨圆一般,大小混

地层				厚度/m	柱状剖面	储盖层	岩性描述	
界	系	统	组					
新生界	第四系			50 ~ 400			风成、冲积、坡残积次生黄土为主黏土层	
	新近系						黏土岩、砂质黏土岩，含钙质结核	
	古近系						砾岩、厚层砂岩夹薄层泥岩	
中生界	白垩系	下统	志丹群	320 ~ 530			砂岩	
		上统	芬芳河组	20 ~ 50			泥岩、页岩与粉砂岩互层	
	侏罗系	中统	安定组	80 ~ 150	200 ~ 600			砂岩、泥岩、泥质粉砂岩
			直罗组	200 ~ 600				中、上部为泥岩、砂岩互层，局部夹煤层，底部为巨厚含砾砂岩
			延安组	300 ~ 350				
		下统	富县组	0 ~ 120		盖层	泥岩为主，下部有厚层一块状砂岩或砾岩	
	三叠系	上统	延长组	1150 ~ 1200				盖层
								储层
		中统	纸坊组	200 ~ 500		盖层	砂泥岩互层	
		下统	和尚沟组	50 ~ 250	200 ~ 400			
刘家沟组			200 ~ 400	砂质泥岩与砂岩，砂岩下粗上细 细-粗砂岩夹泥岩，底部含细砾岩				
古生界	二叠系	上统	石千峰组	190 ~ 345				盖层
			上石盒子	160 ~ 340				上部以泥岩为主，夹中厚层砂岩，下部为砂岩夹泥岩
		中统	下石盒子	80 ~ 200				储层
			山西组	95 ~ 115				砂质泥岩与砂岩互层，砂岩较致密 砂岩与砂质泥岩互层，底部含砾石
	石炭系	上统	太原组	70 ~ 90				砂岩夹泥岩夹煤层，底部为石英砂岩
			本溪组	0 ~ 60				泥岩夹砂岩，上部夹煤层及泥灰岩
	奥陶系	下统	马家沟组	205 ~ 535				页岩夹灰岩及煤线
								灰岩、白云岩、泥灰岩

图 3 鄂尔多斯盆地宁夏地区深部咸水层 CO₂ 封存储盖层划分

Fig. 3 Division of CO₂ seal and storage cap in the deep saline aquifers of the Ordos Basin in Ningxia region

杂，呈角砾-次角砾状的杂乱堆积，不显层理，孔隙度为 5% ~ 10%，渗透率为 9.58 ~ 115 mD。根据相关统计数据分析，三桥组砂地比一般为 0.05 ~ 0.35，局部地区砂体储层最大到 0.7，从储层孔渗以及砂层厚度来看，适宜作为 CO₂ 封存层位^[25]。

银川盆地形成于新生代，主要沉积了较厚的古近 ~ 新近系、第四系地层，在盆地周缘也有下白垩统地层分布，是盆地形成演化之前鄂尔多斯盆地沉积残留地层。银川盆地的第四系地层内淡水资源丰富，而古近系、新近系地层埋深较深，过往鲜有深部水文地质勘查工作，但从地质背景来看，古近系、新近系为湖盆相沉积，岩层中普遍富含石膏和易溶盐类，与地表水力

联系较差，水循环微弱，推测深部的古近系和新近系地层大部分为咸水层。依据地层岩性特征，可初步将银川盆地深部地层划分出 2 套 CO₂ 咸水层地质封存储盖组合(图 5)。宁夏地区地热资源评价过程中获取的相关数据揭示，银川盆地清水营组储层以砾岩、细砾岩储层为主，孔隙度一般在 11% ~ 15%，整个地层砂地比最大 0.14，一般取 0.1，渗透率一般小于等于 20 mD，地温梯度 1.92 ~ 2.71 °C/hm。寺口子组储层岩性以砾岩为主，孔隙度一般在 10% ~ 12%，砂地比最大 0.28，一般在 0.10 ~ 0.15，渗透率一般小于等于 20 mD^[28]。

3.3 盖层封闭性

鄂尔多斯盆地盖层主要为泥岩，其中主要盖层包

地层				厚度/m	柱状剖面	储盖层	岩性描述
界	系	统	组				
新生代	第四系			300 ~ 740	[柱状剖面符号]		细砂、砂质黏土
	新近系	上新统					
	古近系	渐新统	清水营组	615 ~ 1 520	[柱状剖面符号]	盖层	上部泥岩、膏盐, 下部石膏砂岩与细砾岩
			始新统	寺口子组		70 ~ 152	储层
中生界	白垩系	下统	乃家河组	317 ~ 620	[柱状剖面符号]	盖层	泥岩夹泥灰岩及少量薄层细砂岩, 局部夹石膏层
			马东山组	752 ~ 1 246		储层	泥岩、泥灰岩局部夹油页岩, 粉细砂岩夹泥岩
			李洼峡组	400 ~ 930	盖层	砂岩、粉砂岩、泥岩和灰岩	
			和尚铺组	260 ~ 728	[柱状剖面符号]	储层	砂质泥岩、粉砂岩、砂岩、砾岩
			三桥组	90 ~ 155		储层	粉砂岩夹细砾岩

图 4 六盘山盆地深部咸水层 CO₂ 封存储盖层划分

Fig. 4 Division of CO₂ seal and storage cap in the deep saline aquifers of the Liupanshan Basin

地层				厚度/m	柱状剖面	储盖层	岩性描述	
界	系	统	组					
新生代	第四系			450 ~ 1 600	[柱状剖面符号]		细砂、粗砂、砂质黏土	
	新近系	上新统	干河沟组	200 ~ 1 400				砂、砾岩与泥岩、砂质泥岩互层
		中新统	红柳沟组	840 ~ 1 800				砂岩与泥岩、砂质泥岩互层
	古近系	渐新统	清水营组	300 ~ 2 150	[柱状剖面符号]	盖层	上部泥岩夹砂岩, 中部石膏砂岩夹泥岩, 下部为泥岩, 底部为石膏砂岩及细砾岩	
						储层		
						盖层		
	始新统	寺口子组	1 500 ~ 2 500	[柱状剖面符号]	储层	砂岩、含砾砂岩、砾岩		

图 5 银川盆地深部咸水层 CO₂ 封存储盖层划分

Fig. 5 Division of CO₂ seal and storage cap in the deep saline aquifers of the Yinchuan Basin

括侏罗系安定组上部泥岩盖层、延安组上部的泥岩及煤层盖层、富县组上部泥岩盖层、延长组上部和中部的泥岩盖层、石千峰组上部的泥岩盖层。除这些区域性盖层外, 三叠系以来地层普遍发育河流二元结构, 构成下部砂层、上部泥岩层的下储上盖的多套储盖层。此外, 盆地西缘天环坳陷断裂发育较少, 盖层完整性较好, 西缘逆冲带发育大量的高角度逆冲断层(图 2), 有一定的泄漏风险。从盖层封闭性角度看, 天环坳陷的封存条件以及勘探成本优于西缘逆冲带。

六盘山盆地白垩系马东山组—乃家河组砂岩较少, 为一套红色碎屑、黏土岩, 常含砾石, 二者不易分开, 其中砂质岩占 35% ~ 65%, 泥质岩占 40% ~ 60%^[34]。

下白垩统马东山组—乃家河组由盆地中心向外砂岩增多, 粒度逐渐变粗。如盘参 4 井至盘中 1 井砂岩单层最厚 4.0 ~ 7.5 m, 累计厚 40 m 左右。盘探 2 井岩性变为砂砾岩, 厚达 700 多米。泥岩孔隙度小于 5%, 渗透率小于 5 mD, 砂岩孔隙度 5% ~ 9%, 渗透率 130 ~ 250 mD^[34]。乃家河组砂地比为 0.05 ~ 0.15, 马东山组砂地比为 0.05 ~ 0.34^[34]。乃家河组主要以泥岩、石膏层为主, 可以作为层间盖层, 起到良好的封闭作用。但六盘山盆地受喜山期运动构造影响显著, 发育大量高角度逆冲断层, 盖层封闭性有待详细勘查评价。

银川盆地古近—新近系主要为一套湖泊相沉积, 岩性为红色砂岩、泥岩夹石膏层, 总厚 3 000 m 左右。

盆地新近系地层成岩作用差,不宜作为封存 CO₂ 的储层。古近系的清水营组中下部砂岩占比较大,为主要储层,而清水营组上部发育褐、棕红色泥岩夹灰白色砾状砂岩,可以作为区域盖层。银川盆地的盖层与六盘山盆地相似,被众多断裂贯穿,不同的是银川盆地内的断裂多为隐伏断裂,且为拉张走滑型的正断层,断裂附近不宜开展 CO₂ 封存,这给 CO₂ 盖层封闭性评价工作带来较大的挑战和不确定性。

从储集条件分析,3个盆地均具有良好的储层物性条件,鄂尔多斯盆地天环坳陷地层分布连续平缓,岩性较稳定,发育多套储层,构造简单,断裂发育较少,储集条件最优。从盖层封闭性角度来看,3个盆地均有一定厚度的泥岩盖层,但六盘山盆地发育大量高角度逆冲断层,而银川盆地发育大量隐伏拉张走滑型正断层,鄂尔多斯盆地西缘逆冲带发育大量高角度逆冲断层,这些断裂的发育导致盖层完整性受到破坏,存在泄漏风险;而鄂尔多斯盆地天环坳陷断裂发育较少,盖层封闭性最优。从地质体稳定性角度分析,亦是鄂尔多斯盆地天环坳陷地区最适宜。

4 潜力预测与封存选区

4.1 预测级别潜力计算

利用 ArcGIS 栅格计算模块,基于储层有效厚度、储层有效面积、有效孔隙度、封存效率系数等储层参数,开展深部咸水层 CO₂ 封存潜力评估,数据空白区的相关参数进行了插值和人工赋值,其中储层有效厚度采用空间插值,孔隙度数据根据钻孔揭示和区域沉积相特征进行人工赋值处理。潜力评估结果分为预测地质潜力与预测技术容量两类,其中预测地质潜力是基于普查阶段获取的资料,针对全区沉积盆地估算得到的理论封存量;预测技术容量是在预测地质潜力的基础上,考虑地质安全条件(边界断裂、深大断裂、活动断裂等)对 CO₂ 封存的影响,估算得到的封存容量^[18]。本次评价中预测技术容量是在预测地质潜力的基础上,立足安全封存的技术可行性,考虑断裂对储盖层的影响以及 CO₂ 注入后的扩散运移半径,剔除边界断裂、深大断裂、活动断裂两侧 5 km 范围的潜力数据。结果表明,宁夏地区深部咸水层封存预测地质潜力约 867.42×10⁸t,分布面积 35 388 km²(图 6a);预测技

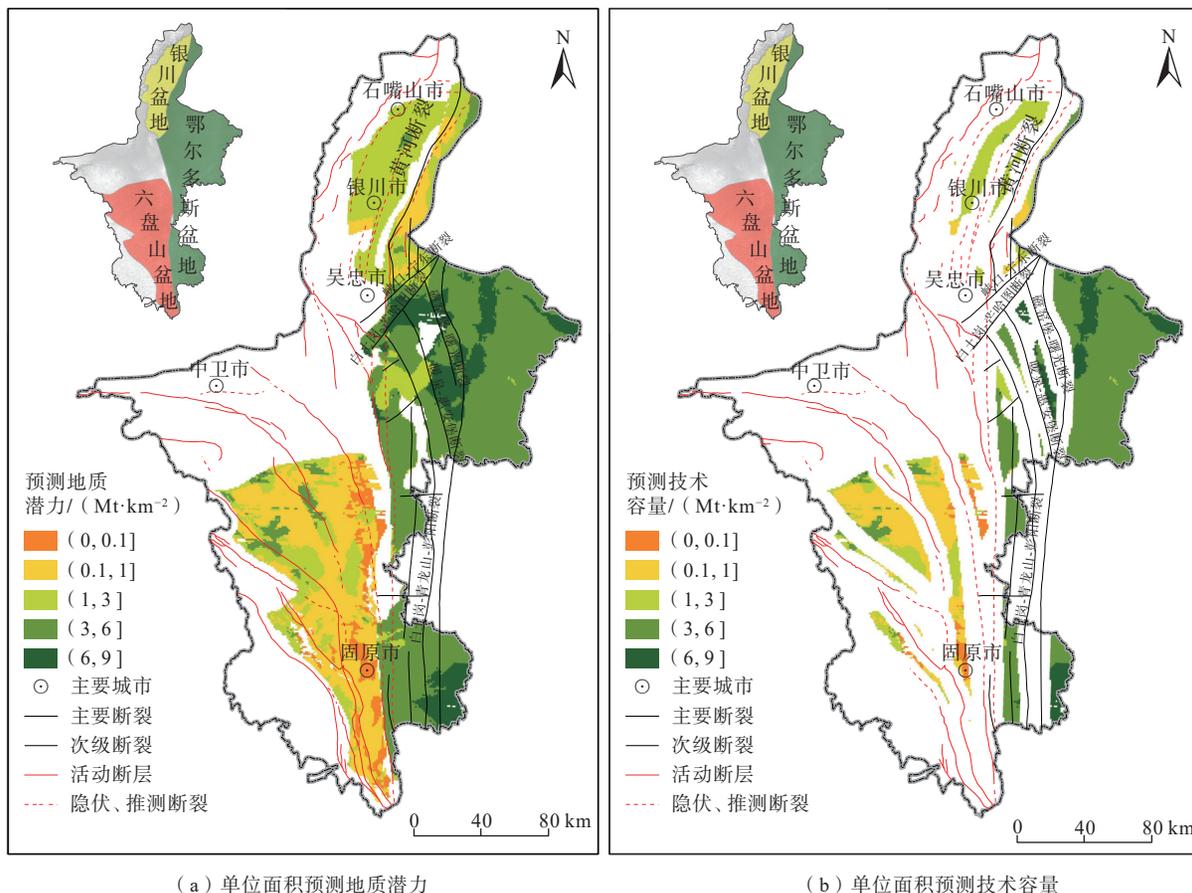


图 6 宁夏地区咸水层 CO₂ 封存潜力预测评价图

Fig. 6 Prediction of CO₂ geological storage in the deep saline aquifers of the Ningxia region

术潜力约 423.34×10^8 t, 分布面积 $12\,144\text{ km}^2$, 封存潜力较大区主要分布在宁夏东部鄂尔多斯盆地(宁夏部分)(图 6b)。

4.2 远景区优选

CO₂ 封存适宜性评价结果显示, 受控于沉积地层分布、地壳稳定性、深大断裂等影响, 宁夏地区大部分区域为 CO₂ 封存不适宜区, 占全区总面积的 84.02% (图 7)。适宜和较适宜区面积为 $8\,903\text{ km}^2$, 占全区总面积的 13.41%, 主要分布在鄂尔多斯盆地盐池地区、六盘山盆地西北部地区以及银川盆地中部地区, 其中盐池地区适宜—较适宜区面积 $4\,950\text{ km}^2$, 占全区适宜—较适宜区总面积的 55.60%, 且适宜区主要集中分布在该地区。CO₂ 封存一般适宜区和较不适宜区面积为 $1\,706\text{ km}^2$, 占全区总面积的 2.57%, 分布较为分散, 主要影响因素为人口密度、断裂等。

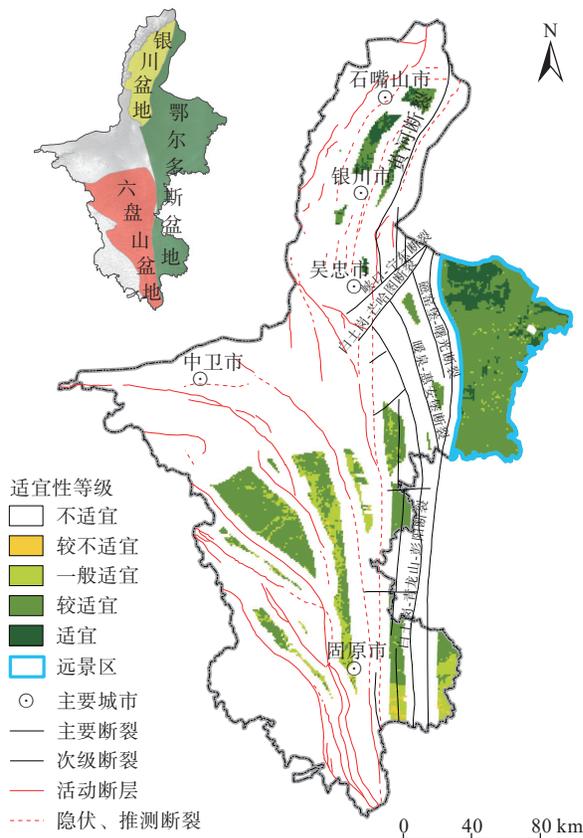


图 7 宁夏地区适宜性评价及远景区分布图

Fig. 7 Distribution of suitability evaluation and favorable area optimization in the Ningxia region

盐池地区存在多套潜在储层, 盖层连续完整, 无活动断裂和贯穿性深大断裂, 地震动峰值加速度小, 人口密度低, 适宜开展 CO₂ 封存, 且封存潜力较大, 该区预测技术潜力达 239.69×10^8 t, 占宁夏总预测技术潜

力的 56.62%。此外, 盐池地区距离宁夏碳源集中的宁东能源化工基地、银川—吴忠、石嘴山、中卫等地区距离较近, 适宜开展近源输送的碳捕集、利用和存储(carbon capture, utilization and storage, CCUS)集群部署。近源输送可大幅降低 CO₂ 大规模封存成本, 是碳封存的首选发展方向^[35], 因此, 从地质和经济两个方面考虑, 盐池地区均为咸水层封存最优远景区(图 7)。

盐池远景区古生界—中生界埋藏了由海相向陆相转变的巨厚沉积盖层, 其中发育多套封存潜力可观的砂岩储层, 根据钻孔揭示的地层岩性, 以及鄂尔多斯盆地神华二氧化碳地质封存示范工程取得的实践经验^[36], 远景区优势储层主要集中在二叠系和三叠系下部地层, 包括上下石盒子组、石千峰组、刘家沟组、和尚沟组等地层(图 3), 在后续勘探开发过程中, 应重点关注上述地层。

5 结论与展望

(1) 宁夏地区目前处于 CO₂ 封存勘查评价的早期普查阶段, 初步评估深部咸水层封存预测地质潜力约 867.42×10^8 t; 考虑封存安全性, 规避边界断裂、深大断裂、活动断裂等对 CO₂ 地质封存的影响, 估算预测技术潜力约 423.34×10^8 t, 主要集中分布在宁夏东部盐池地区。CO₂ 封存适宜性评价结果显示, 全区大部分地区为不适宜区, 适宜和较适宜区仅占全区总面积的 13.41%, 面积为 $8\,903\text{ km}^2$, 主要分布在鄂尔多斯盆地盐池地区、六盘山盆地西北部地区以及银川盆地中部等地区, 其中盐池地区适宜—较适宜区面积 $4\,950\text{ km}^2$, 占全区适宜—较适宜区总面积的 55.60%。

(2) 盐池地区存在多套潜在储层, 盖层完整性较好, 无活动断裂和贯穿性深大断裂, 地震动峰值加速度小, 人口密度低, CO₂ 封存地质适宜性良好, 且距离宁夏主要碳源集中区较近, 适宜开展近源输送的 CCUS 集群部署, 是宁夏开展 CO₂ 咸水层封存首选地区。盐池远景区的预测技术潜力达 239.69×10^8 t, 占宁夏总预测技术潜力的 56.62%。

(3) 盐池远景区作为宁夏地区咸水层 CO₂ 地质封存首选远景区, 结论可引导宏观规划和 CO₂ 地质封存勘探方向, 但评价精度尚不足以支撑碳封存工程部署。在实施封存工程之前, 还应进一步开展高精度专项勘查评价, 查明深部地层岩性、地质构造、断裂发育、储盖层物性参数、深部水文地质特征等主要地质条件, 开展靶区和场地级别的精细勘查评价, 探明该

地区咸水层碳封存潜力, 为大规模 CO₂ 地质封存工程提供切实地质技术支撑。

参考文献 (References):

- [1] 郭建强, 文冬光, 张森琦, 等. 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, 2014. [GUO Jianqiang, WEN Dongguang, ZHANG Senqi, et al. The atlas of carbon dioxide geological storage potential and suitability assessments of China major sedimentary basins[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014. (in Chinese)]
- [2] 任相坤, 崔永君, 步学朋, 等. 鄂尔多斯盆地 CO₂ 地质封存潜力分析 [J]. 中国能源, 2010, 32(1): 29 - 32. [REN Xiangkun, CUI Yongjun, BU Xuepeng, et al. Analysis on CO₂ storage potentiality in Ordos Basin[J]. Energy of China, 2010, 32(1): 29 - 32. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 张冰, 梁凯强, 王维波, 等. 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, 2019, 6(3): 15 - 20. [ZHANG Bing, LIANG Kaiqiang, WANG Weibo, et al. Evaluation of effective CO₂ geological sequestration potential of deep saline aquifer in Ordos Basin[J]. Unconventional Oil & Gas, 2019, 6(3): 15 - 20. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 杨红, 赵习森, 康宇龙, 等. 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, 2019, 15(1): 95 - 102. [YANG Hong, ZHAO Xisen, KANG Yulong, et al. Evaluation on geological sequestration suitability and potential of CO₂ in Ordos Basin[J]. Climate Change Research, 2019, 15(1): 95 - 102. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 赵习森, 杨红, 陈龙龙, 等. 延长油田化子坪油区长 6 油层 CO₂ 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 CO₂ flooding and storage potential of Chang 6 reservoir in Huaziping area of Yanchang oilfield[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 2019, 34(1): 62 - 68. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 肖贝, 陈磊, 杨旻, 等. 准噶尔盆地深部咸水层 CO₂ 地质封存适宜性及潜力评价 [J/OL]. 大庆石油地质与开发, (2023-12-08)[2024-05-27]. [XIAO Bei, CHEN Lei, YANG Huang, et al. Suitability and potential evaluation of CO₂ geological storage in deep saline aquifers of Junggar Basin[J/OL]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, (2023-12-08)[2024-05-27]. <https://link.cnki.net/urlid/23.1286.TE.20231206.1630.005>. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 何佳林, 师庆三, 董海海, 等. 新疆准东油田各区块 CO₂ 地质封存潜力评估 [J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2018, 35(4): 528 - 531. [HE Jialin, SHI Qingsan, DONG Haihai, et al. Evaluation of CO₂ geological sequestration potential in each block of Xinjiang Jundong oilfield[J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition), 2018, 35(4): 528 - 531. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 马鑫, 李旭峰, 文冬光, 等. 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, 2021, 48(6): 196 - 205. [MA Xin, LI Xufeng, WEN Dongguang, et al. 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, 2021, 48(6): 196 - 205. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 刁玉杰, 朱国维, 金晓琳, 等. 四川盆地理论 CO₂ 地质利用与封存潜力评估 [J]. 地质通报, 2017, 36(6): 1088 - 1095. [DIAO Yujie, ZHU Guowei, JIN Xiaolin, et al. Theoretical potential assessment of CO₂ geological utilization and storage in the Sichuan Basin[J]. Geological Bulletin of China, 2017, 36(6): 1088 - 1095. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 王齐鑫, 马传明, 花勳健, 等. 安徽省沉积盆地 CO₂ 地质储存适宜性评价 [J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(5): 121 - 121. [WANG Qixin, MA Chuanming, HUA Mengjian, et al. Suitability evaluation of geological storage of CO₂ in sedimentary basin of Anhui Province[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(5): 121 - 121. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 罗伟, 张洋, 刘宁, 等. 松辽盆地中央坳陷区北部咸水层 CO₂ 储存场地适宜性评价与储量计算 [J]. 安全与环境工程, 2015, 22(5): 52 - 58. [LUO Wei, ZHANG Yang, LIU Ning, et al. Assessment of site suitability and the capacity of CO₂ storage in deep aquifer in the northern central depression of Songliao Basin[J]. Safety and Environmental Engineering, 2015, 22(5): 52 - 58. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 马永法, 周学军, 董俊领, 等. 黑龙江林甸地区深部咸水层 CO₂ 地质储存条件与潜力评估 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(6): 179 - 189. [MA Yongfa, ZHOU Xuejun, DONG Junling, et al. Geological storage conditions and potential assessment of CO₂ in deep saline

- aquifers in Lindian of Heilongjiang Province[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(6): 179 – 189. (in Chinese with English abstract)]
- [13] BACHU S, BONIJOLY D, BRADSHAW J, et al. Phase II final report from the task force for review and identification of standards for CO₂ storage capacity estimation[R]. Paris: Cslf, 2007.
- [14] GOODMAN A, HAKALA A, BROMHAL G, et al. 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*, 2011, 5(4): 952 – 965.
- [15] BACHU S, SHAW J C, PEARSON R M. Estimation of oil recovery and CO₂ storage capacity in CO₂ eor incorporating the effect of underlying aquifers[C]// Society of Petroleum Engineers(SPE). Proceedings of the SPE/DOE fourteenth symposium on Improved oil recovery. Tulsa, Oklahoma: SPE, 2004.
- [16] 沈平平, 廖新维, 刘庆杰. 二氧化碳在油藏中埋存量计算方法 [J]. *石油勘探与开发*, 2009, 36(2): 216 – 220. [SHEN Pingping, LIAO Xinwei, LIU Qingjie. Methodology for estimation of CO₂ storage capacity in reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2009, 36(2): 216 – 220. (in Chinese with English abstract)]
- [17] MA Xin, WEN Dong-guang, YANG Guang-dong, et al. Potential assessment of CO₂ geological storage based on injection scenario simulation: A case study in eastern Junggar Basin[J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 2021, 9(4): 279 – 291.
- [18] 刁玉杰, 刘廷, 魏宁, 等. 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*, 2023, 50(3): 943 – 951. [DIAO Yujie, LIU Ting, WEI Ning, et al. Classification and assessment methodology of carbon dioxide geological storage in deep saline aquifers[J]. *Geology in China*, 2023, 50(3): 943 – 951. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 宁夏回族自治区地质调查院. 中国区域地质志-宁夏志 [M]. 北京: 地质出版社, 2017. [Ningxia Institute of Geological Survey. Regional geology of China-Annals of Ningxia[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017. (in Chinese)]
- [20] 2021年30个省份排放清单 [DB/OL]. [Emission Inventories for 30 Provinces 2021[DB/OL]. <https://www.ceads.net/data/province/>. (in Chinese)]
- [21] 王雪亭, 郑非凡, 许野, 等. 双碳目标背景下宁夏地区碳达峰预测 [J]. *中国环境科学*, 2023, 43(增刊1): 347 – 356. [WANG Xueting, ZHENG Feifan, XU Ye, et al. Carbon peak prediction in Ningxia under the Dual Carbon Background[J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(Sup1): 347 – 356. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 刘世奇, 莫航, 桑树勋, 等. 宁夏回族自治区碳捕集、利用与封存源汇匹配与集群部署 [J/OL]. *煤炭学报*, (2024-03-21)[2024-05-27]. [LIU Shiqi, MO Hang, SANG Shuxun, et al. Source-sink matching and cluster deployment of carbon capture, utilization, and storage in Ningxia Hui Autonomous Region[J/OL]. *Journal of China Coal Society*, (2024-03-21)[2024-05-27]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.XH23.1378>. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 赵振宇, 郭彦如, 王艳, 等. 鄂尔多斯盆地构造演化及古地理特征研究进展 [J]. *特种油气藏*, 2012, 19(5): 15 – 20. [ZHAO Zhenyu, GUO Yanru, WANG Yan, et al. Study progress in tectonic evolution and paleogeography of Ordos Basin[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2012, 19(5): 15 – 20. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 康玉柱, 王宗秀, 周新桂, 等. 鄂尔多斯盆地构造体系控油作用研究 [M]. 北京: 地质出版社, 2014. [KANG Yuzhu, WANG Zongxiu, ZHOU Xingui, et al. Study on oil control function of tectonic system in Ordos Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014. (in Chinese)]
- [25] 长庆油田石油地质志编写组. 中国石油地质志-卷十二-长庆油田 [M]. 北京: 石油工业出版社出版, 1992. [Changqing Oilfield Petroleum Geology Compilation Group. Petroleum geology of China-Volume 12-Changqing Oilfield[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992. (in Chinese)]
- [26] 潘进礼, 马风华, 李通, 等. 六盘山盆地及邻区构造改造与保存条件研究报告 [R]. 银川: 宁夏回族自治区地质调查院, 2018. [PAN Jinli, MA Fenghua, LI Tong, et al. Research report on structural reconstruction and preservation conditions of Liupanshan Basin and adjacent areas[R]. Yinchuan: Ningxia Institute of Geological Survey, 2018. (in Chinese)]
- [27] 宁夏地质矿产资源勘查开发创新团队. 白垩纪六盘山盆地沉积相研究 [M]. 银川: 宁夏人民出版社, 2013. [Ningxia geological mineral resources exploration and development innovation team. Study on Cretaceous sedimentary facies of Liupanshan Basin[M].

- Yinchuan: Ningxia People's Publishing House, 2013. (in Chinese)]
- [28] 余秋生, 赵志鹏, 汪琪, 等. 宁夏地热资源现状评价与区划成果报告 [R]. 银川: 宁夏回族自治区地质调查院, 2015. [YU Qiusheng, ZHAO Zhipeng, WANG Qi, et al. Report on evaluation and regionalization of geothermal resources in Ningxia[R]. Yinchuan: Ningxia Institute of Geological Survey, 2015. (in Chinese)]
- [29] 刘廷, 马鑫, 刁玉杰, 等. 国内外 CO₂ 地质封存潜力评价方法研究现状 [J]. 中国地质调查, 2021, 8(4): 101 - 108. [LIU Ting, MA Xin, DIAO Yujie, et al. Research status of CO₂ geological storage potential evaluation methods at home and abroad[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(4): 101 - 108. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 中国地震局. 中国地震动参数区划图: GB 18306—2015[S]. [China Earthquake Administration. Seismic ground motion parameters zonation map of China: GB 18306—2015[S]. (in Chinese)]
- [31] 侯光才, 张茂省, 刘方, 等. 鄂尔多斯盆地地下水勘查研究 [M]. 北京: 地质出版社, 2008: 73 - 83. [HOU Guangcai, ZHANG Maosheng, LIU Fang, et al. Study on groundwater exploration in Ordos Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008: 73 - 83. (in Chinese)]
- [32] 杨艳林. CO₂ 地质储存中地质特征实现技术与应用——以鄂尔多斯 CCS 示范工程为例 [D]. 长春: 吉林大学, 2014. [YANG Yanlin. The implementation technology of CO₂ geological storage in complex geological structure and applying it to Ordos Basin[D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 马东升. 鄂尔多斯盆地延长地区延长组储层特征 [D]. 西安: 长安大学, 2018. [MA Dongsheng. Reservoir characteristics of Yanchang Formation in Yanchang Area, Ordos Basin[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [34] 朱国胜. 六盘山盆地中生代构造特征分析及有利油气区预测 [D]. 西安: 长安大学, 2015. [ZHU Guosheng. Analysis of Mesozoic and Cenozoic structural characteristics and prediction of favorable oil and gas zone in Liupanshan Basin[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [35] 桑树勋, 刘世奇, 朱前林, 等. CO₂ 地质封存潜力与能源资源协同的技术基础研究进展 [J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2700 - 2716. [SANG Shuxun, LIU Shiqi, ZHU Qianlin, et al. Research progress on technical basis of synergy between CO₂ geological storage potential and energy resources[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2700 - 2716. (in Chinese with English abstract)]
- [36] 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 Yujie. Study on the Reservoir Characterization and CO₂ Migration Underground in the Shenhua CCS Demonstration Project Site[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2017. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华