

黑龙江林甸地区深部咸水层CO₂地质储存条件与潜力评估

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

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

MA Yongfa, ZHOU Xuejun, DONG Junling, ZHAN Tao, WANG Xu, LIU Ling, LIU Yu, LIU Yan, HE Lan, LI Chang, and SHI Zhenzhen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202111065>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

长江干流水化学成因与风化过程CO₂消耗通量解析

Hydrochemical origins and weathering-controlled CO₂ consumption rates in the mainstream of the Yangtze River

张鸿, 周权平, 姜月华, 金阳, 杨国强, 顾轩, 梅世嘉, 王晓龙 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 30-40

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

一种可增加海岛地下淡水资源储量的方法研究

A method for improving the fresh groundwater storage of oceanic islands

马婧, 鲁春辉, 吴吉春, 罗剑 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 1-7

地质灾害隐患和水文地质环境地质调查计划进展

Achievements of the program of geological investigation on geo-hazards and hydrogeology and environmental geology

李文鹏 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 1-1



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202111065

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.

黑龙江林甸地区深部咸水层 CO₂ 地质储存 条件与潜力评估

马永法^{1,2}, 周学军¹, 董俊领¹, 詹涛¹, 王旭¹, 刘玲¹, 刘玉¹, 刘艳¹, 何兰¹, 李昌¹, 史珍珍¹

(1. 黑龙江省生态地质调查研究院, 黑龙江哈尔滨 150030;

2. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北武汉 430074)

摘要: CO₂ 地质储存是减少碳排放、缓解温室效应的有效措施。经地热勘探与综合研究, 黑龙江林甸地区埋藏深度 940~2 062 m 的中生代白垩系泉头组三四段、青山口组和姚家组砂岩层状地层中蕴含丰富的咸水, 溶解性总固体可达 2 000~9 000 mg/L, 孔隙发育较好, 水流速缓慢, 其上盖层以白垩系嫩江组、四方台组、明水组的层状泥质岩为主, 厚度为 800~1 300 m, 未被主要断裂带穿透, 封闭良好, 决定了其可以作为储存 CO₂ 的良好地质储体。同时, 大庆市紧邻林甸地区, 化工企业众多, 碳源集中且充足, 规模大, 距离短, 为研究区的 CO₂ 地质储存提供了有利条件。因林甸地区油气资源匮乏, 缺少石油井, 本次工作首次利用地热勘探井, 根据 CO₂ 地质储存技术机理, 采用国际权威潜力评估公式, 开展了深部咸水层 CO₂ 地质储存的潜力评估。结果表明, 其深部咸水层 CO₂ 理论储量为 478.91×10⁸ t, 有效储量为 11.49×10⁸ t, 储存潜力较大, 未来可作为大庆、齐齐哈尔等邻近城市减碳的地质储存场所。此项工作的开展, 为林甸地区下一步实施 CO₂ 地质储存适宜性评价、目标靶区筛选和场地选址及示范工程建设提供了技术支撑。

关键词: 咸水层; CO₂ 地质储存; 地质条件; 潜力评估

中图分类号: X701

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)06-0179-11

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

MA Yongfa^{1,2}, ZHOU Xuejun¹, DONG Junling¹, ZHAN Tao¹, WANG Xu¹, LIU Ling¹, LIU Yu¹,

LIU Yan¹, HE Lan¹, LI Chang¹, SHI Zhenzhen¹

(1. Institute of Ecological Geology Survey and Research of Heilongjiang Province, Harbin, Heilongjiang

150030, China; 2. School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan),

Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: Geological storage of CO₂ is an effective measure to reduce carbon emission and mitigate greenhouse effect. Through geothermal exploration and comprehensive research, it is found that the sandstone stratified strata of the Third and Fourth Member of the Quantou Formation, the Qingshankou Formation and the Yaojia Formation

收稿日期: 2021-11-24; 修订日期: 2022-01-09

投稿网址: www.swdvgcdz.com

基金项目: 黑龙江省矿产资源补偿费项目(黑国土资函[2015]684号); 黑龙江省财政基金项目(SRKC-2019002); 黑龙江省生态地质调查研究院科研基金项目(CXJJ-001)

第一作者: 马永法(1980-), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事 CO₂ 地质储存和地热地质研究工作。E-mail: 80902601@qq.com

通讯作者: 周学军(1984-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地热地质研究工作。E-mail: 13766893593@163.com

of the Cretaceous age in the Lindian area of Heilongjiang Province, with the burial depth of about 940–2 062 m, contain rich saline water with TDS of 2 000–9 000 mg/L, and are of well-developed pores and slow groundwater flow. The caprock is dominated by pelite stratified strata of the Nenjiang Formation, Sifangtai Formation and Mingshui Formation of the Cretaceous age, with a thickness of about 800–1 300 m. It has not been penetrated by major fault zones and is well closed, which determines that it can be used as a good geological reservoir for CO₂ storage. At the same time, Lindian is close to the city of Daqing, with numerous chemical enterprises, concentrated and sufficient carbon sources, and large scale and short distance, providing favorable conditions for CO₂ geological storage in the study area. Due to the lack of oil and gas resources and oil wells in the Lindian area, this work uses geothermal exploration wells for the first time. According to the mechanism of CO₂ geological storage technology and the international authoritative potential assessment formula, the potential assessment of CO₂ geological storage of deep saline aquifers in this area is carried out. The results show that the theoretical CO₂ storage in the deep salt aquifers is 478.91×10^8 t, the effective CO₂ storage is 11.49×10^8 t, which is of large storage potential. In the future, it can provide geological storage sites for carbon reduction in Daqing, Qiqihar and other neighboring cities. The implementation of this work provides technical support for the next implementation of CO₂ geological storage suitability evaluation, objective target area and site selection and demonstration projects in the Lindian area.

Keywords: saline aquifer; CO₂ geological storage; geological condition; potential assessment

由温室气体(CO₂、CH₄、N₂O、HFCs、PFCs、SF₆等)浓度升高引起的全球气候变化问题已经引起了全球的广泛关注。其中,CO₂是引发温室效应的主要因素,其作用占全部温室气体的60%以上^[1]。CO₂减排是缓解温室效应的必要措施。欧美国家及日本的经验表明,地质储存是处置CO₂的有效途径之一^[2-4]。可用于CO₂地质储存的场地主要有沉积盆地内的咸水层、枯竭油气田和无商业开采价值的深部煤层等^[5-9]。其中,咸水层储量较大,经预测在我国可占到全部地质储存量的98.64%^[10]。目前,国内外对沉积盆地内的深部咸水层、油气田和深部煤层CO₂地质储存的研究,尤其是储存潜力的评估已经取得了一些成果^[11-26]。其中,国外比较典型的深部咸水层CO₂地质储存量的评估方法与深部煤层的计算方法相近,分别是碳封存领导人论坛(CSLF)计算方法^[10,23]、美国能源部(USDOE)计算方法^[14]、欧盟计算方法^[17]、ECOFYS和TNO-NING计算方法^[26],并应用到了实际评估中。从国内典型案例来看,有研究者利用溶解度法计算了我国24个主要沉积盆地的深部咸水层理论CO₂储量^[14]。通过开展我国CO₂地质储存适宜性评价与示范工程,前人采用CSLF计算方法对我国主要沉积盆地深部咸水层的CO₂区域级与盆地级的储存量进行了计算^[10]。有学者考虑了我国沉积盆地含水系统的差异,将25个主要沉积盆地划分为三种类型含水系统,分别建立模型后利用溶解度法计算得到CO₂储量^[19]。针对鄂

尔多斯盆地咸水层CO₂储存潜力,研究者采用CSLF计算方法估算了其CO₂有效地质储存量^[23]。基于源-汇匹配方法,前人对苏北—南黄海盆地CO₂地质储存量进行了评估^[24]。但以上研究,多数限于区域级和盆地级的储存潜力评估,对于次盆地级的研究较少,尤其是利用地热勘探井对属于CO₂地质储存较适宜区、适宜性评价重点调查评价区的松辽盆地^[10],尚未开展其次盆地级且缺少石油勘探资料的林甸地区储存地质条件分析与潜力评估研究。

经过地质部门数十年的地热勘探、研究^[27-29],现已探明林甸地区埋藏深度在940~2 062 m的中生代白垩系泉头组三四段、青山口组和姚家组砂岩层状地层中蕴含有丰富的咸水,溶解性总固体可达2 000~9 000 mg/L,且在白垩系上统姚家组地层之上沉积了嫩江组、四方台组、明水组,岩性以层状泥质岩为主,厚度在800~1 300 m,可以较好封闭CO₂,是良好盖层。同时,林甸地区紧邻大庆市,作为中国最大的石油工业基地,大庆市石化工业发达,化工企业众多,碳源集中且充足,规模大,距离短,为研究区的CO₂地质储存提供了有利条件。本次工作以林甸地区深部咸水层为研究对象,通过野外调查与搜集整理相关地质资料,进行综合研究,根据CO₂地质储存条件,深入分析该地区的储盖层、断层、地下水动力特征,在判断其具备储存条件的基础上,利用国际权威潜力评估公式,计算基于林甸地区的主要4个二级构造单元CO₂

地质储存量, 并对该地区深部咸水层 CO₂ 地质储存潜力进行评价, 为下一步开展适宜性评价、目标靶区筛选及场地选址与示范工程建设提供技术支撑, 对我国实现低碳减排与碳中和目标具有重要的探索意义。

1 研究区概况

林甸地区处于松花江—辽河平原北部, 地貌类型为低平原, 地势平坦, 东北略高, 西南偏低, 海拔 143 ~ 160 m。春季干旱多风, 夏季高温多雨, 秋季降温急剧, 冬季寒冷干燥, 四季分明, 年平均气温 3.3 °C, 属温带大陆性季风气候。

按照大地构造分级, 研究区呈中部隆起、两侧凹陷, 主要分属 4 个二级构造单元, 北部为北部倾没区的乌裕尔凹陷、克山依龙背斜带, 南部为中央凹陷区的齐家古龙凹陷、黑鱼泡凹陷(图 1)。根据以往地热及石油钻孔资料^[27], 研究区的地层层序自上而下分别为: 第四系, 岩性以松散黏土、砂为主; 古近系, 岩性以泥岩、砂砾岩为主; 白垩系, 岩性以泥岩、砂岩为主; 侏罗系, 岩性以砂砾岩为主; 石炭~二叠系为基底, 被印支期和燕山期花岗岩侵入, 岩性以浅变质岩为主(图 2)。

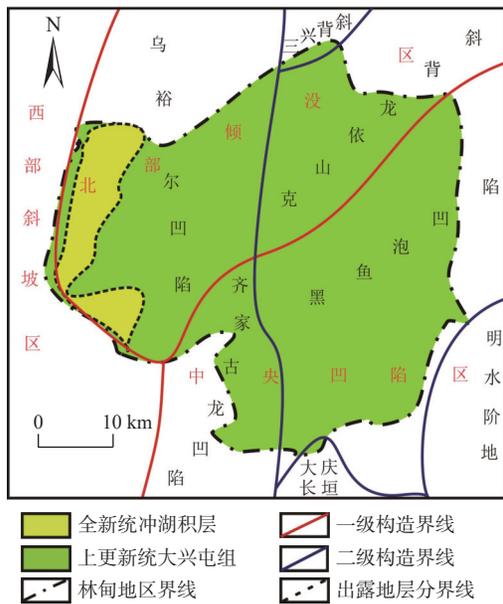


图 1 林甸地区区域地质图
Fig. 1 Regional geological map of the Lindian area

2 储存原理与机制

2.1 储存原理

当 CO₂ 处于压力高于 7.38 MPa、温度高于 31.1 °C 条件下时, 即进入超临界状态。超临界 CO₂ 是一种高

地层				岩性描述	储层	盖层
系	统	组	段			
第四系	上更新统	大兴屯组		以粉质黏土和黄土状粉质黏土为主		
		林甸组		主要为粉质黏土、粉细砂、砂砾石等		
		泰康组		浅灰色粉质黏土、中细砂、粉砂、砂砾石、含植物化石		
古近系		依安组		灰、深灰、紫褐色泥岩与杂色砂砾岩不等厚互层		
白垩系	上统	明水组	二段	灰绿色泥岩与灰绿色粉砂岩、泥质粉砂岩互层		
			一段	深灰泥岩与灰色砂岩、砂砾岩		
		四方台组		紫红色泥岩与灰绿色粉砂岩、砂砾岩		
		嫩江组	五段	紫红色泥岩及粉细砂岩		
			四段	紫红、灰绿色泥质粉砂岩、粉砂岩互层		
			三段	紫红、灰绿色泥质粉砂岩、粉砂岩互层		
	二段		主要为黑色泥岩, 底部为油页岩, 顶部为浅灰色粉砂质泥岩及泥质粉砂岩			
	一段	底部黑色泥岩, 中下部为灰色粉砂岩, 泥质粉砂岩夹泥岩, 上部黑色泥岩, 夹劣质油页岩				
	姚家组	二、三段	以砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩为主			
		一段	灰砂岩、红色泥岩与粉砂岩互层			
	青山口组	二、三段	以深灰、灰黑色泥岩、厚层泥岩, 灰色粉砂岩和泥质粉砂岩互层为主			
		一段	灰黑色泥岩与灰色粉砂岩互层			
下统	泉头组	四段	紫红色泥岩与灰白色粉砂岩互层			
		三段	灰绿、紫红色砂泥碎屑岩沉积			
		一、二段	以紫红、暗紫色泥岩为主, 夹薄层粉砂岩			

图 2 林甸地区 CO₂ 地质储存垂直储盖组合

图 2 Vertical combination of reservoir and caprock of CO₂ geological storage in the Lindian area

密度流体, 具有较好的流动性, 在物理特性上兼有气体和液体的双重特性, 即密度高, 近于液体; 黏度小, 与气体相似, 流动性远大于液体; 扩散系数大, 近于气体, 为液体的 10~100 倍。CO₂ 地质储存原理是将其封存于深部地层中, 达到超临界状态后, 利用其物性特点, 通过物理与化学过程储存, 在有限的空间内达到最大的储存量, 更有效地储存于地质体中。

2.2 储存机制

林甸地区无油气资源, 因此, 本文研究对象是深部咸水层, 其主要有构造地层储存、残余气体储存、溶解储存与矿物储存 4 种机理。在沉积盆地内, 水力学俘获是咸水层储存 CO₂ 的主要机理, 其不是单纯的物理或化学过程, 而是上述 4 种机理的综合过程。在注入 CO₂ 的过程中, 一部分 CO₂ 因为浮力上升到含水层顶部, 受到顶部隔水层的阻挡, 在压力作用下由顶部向两侧流动。此时, 一部分 CO₂ 因为气液相界面张力的作用被长久地滞留在岩石颗粒的孔隙中。当大量的 CO₂ 通过多孔介质体的时候, 通常是以球滴状被隔离在岩石孔隙中间的, 该方式称为残余气储存, 且孔隙度越大, 孔隙越发育, 通过岩石的 CO₂ 量越多, 束缚在岩石孔隙中的 CO₂ 也就越多。如果含水层中有小的地质圈闭, 则 CO₂ 将在此汇聚, 形成构造地层储存。随着 CO₂ 与地层水接触, 逐渐被其溶解, 相当于溶解储存, 其溶解作用发生的程度主要取决于是否存在具有高渗透性的巨厚储层, 且随储层环境温度、压力和矿化度变化而变化。同时, CO₂ 通过扩散、转变与弥散等过程以溶解相的形式运移, 与周围的矿物发生化学反应, 矿物储存就开始起作用。在以上过程中, 构造地层与残余气体储存属于物理储存机制, 溶解与矿物储存属于化学储存机制。

研究区的储层岩石孔隙度最大可达 31.5%, 孔隙十分发育, 较适于残余气体储存; 储层岩石渗透率最大可达 $1\,440 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 厚度最大可达 209.6 m, 压力最大不超过 23 MPa, 温度平均约 60 °C, 溶解性总固体可达 2 000~9 000 mg/L, 较适于溶解储存。另外, 矿物储存的发生需要较长时间, 矿物反应速率小于 CO₂ 溶解速率, 而且矿物储存是在溶解储存的基础上发生的, 长时间内可认为溶解储存包含了矿物储存^[30]。研究中因小的构造圈闭暂时无法准确确定, 且在实际储存过程中由于水动力作用, 构造地层储存的 CO₂ 在长时间内可认为完全溶解在咸水中, 构造地层储存转化为溶解储存^[30]。因此, 在实际计算时, 咸水层储存潜力可认为只由残余气体储存和溶解储存两部分构成。

3 储存地质条件

深部咸水层在储存 CO₂ 时必须保证其以超临界状态存在, 才能保持稳定性和安全性, 因此其顶部应至少在 800 m 以下; 咸水层的岩石要有一定的孔隙度和渗透率, 将有效的储存空间连通起来, 方便 CO₂ 运移, 达到最大限度的储存; 咸水层必须与饮用水源隔离, 上部盖有隔水层, 防止 CO₂ 逸出, 确保其长期储存^[31]; 储存 CO₂ 的岩层应较稳定, 断裂带不会导致 CO₂ 泄漏^[32]; 咸水层的水循环越慢, 越适宜储存 CO₂。

3.1 储盖层特征

根据勘探资料^[27-29], 研究区内主要咸水层由下至上为中生代白垩系泉头组三四段、青山口组和姚家组地层, 埋藏深度在 940~2 062 m, 砂岩较厚, 孔隙度和渗透率较好(表 1), 其呈层状分布于整个林甸地区。姚家组—青山口组厚度为 395~539 m, 咸水层厚 122~244 m, 由姚家组二三段, 姚家组一段, 青山口组二三段, 青山口组一段组成。其中, 青山口组二三段砂体沉积较厚, 单层厚度较大, 是林甸地区的主力咸水层。泉头组在林甸地区呈层状广泛分布, 顶板埋深 1 200~2 100 m。泉头组三四段地层总厚度 240~310 m, 咸水层厚 16~89 m。林甸地区的嫩江组、四方台组、明水组, 岩性以泥质岩为主(图 2), 夹薄层砂岩, 厚 800~1 300 m, 其在姚家组地层之上, 呈层状分布于整个林甸地区, 对 CO₂ 封闭和蓄积起到了较好的作用, 是良好盖层。

表 1 林甸地区 CO₂ 地质储存主要储层厚度、孔隙度与渗透率

Table 1 Statistical table of thickness, porosity and permeability of main reservoirs of CO₂ geological storage in the Lindian area

储层		厚度/m	孔隙度/%	渗透率/(10 ⁻³ μm ²)
组	段			
姚家组	二、三段	3.4~33.2	7.5~31.5	2.4~1 440.0
	一段	2.2~32.6	12.0~28.0	11.3~544.0
青山口组	二、三段	90.5~209.6	8.2~29.2	11.0~426.0
	一段	1.8~30.5	9.8~27.8	2.1~95.3
泉头组	四段	4.0~57.2	8.8~25.9	0.8~82.0
	三段	5.1~57.3	10.1~21.8	3.1~79.8

3.2 断层特征

研究区断裂比较发育^[27], 主要有 3 条较大的断裂, 分别为黑鱼泡凹陷西部边界断层、林甸断裂、林甸东断裂(图 3)。

3.2.1 黑鱼泡凹陷西部边界断层(H13)

该断裂位于林甸地区东南部黑鱼泡凹陷西部边

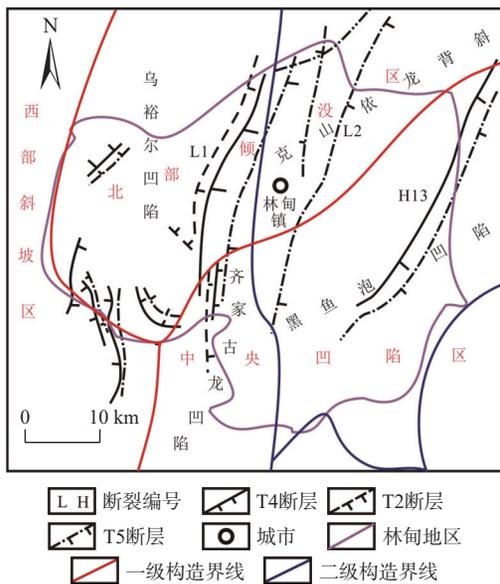


图3 林甸地区断裂分布图(据文献[27]修改)

Fig. 3 Fault occurrence map of the Lindian area (modified from [27])

缘,从上地幔断至 T3 层(泉头组底面),为壳断裂。此断裂由下向上延伸至泉头组的底面,距 CO₂ 储存目的层最底层(泉头组三四段)较远,尤其是距盖层最底层(嫩江组)更远,不会对 CO₂ 储存产生影响。

3.2.2 林甸断裂(L1)

该断裂位于乌裕尔凹陷内,研究区范围内长约 40 km,属于壳断裂,其从上地幔延伸至嫩江组三段底面。该断裂带在 T1 层(嫩江组底面)、T2 层(青山口组底面)与 T3 层最大的断距分别为 115, 90, 110 m。在 T4 层(登娄库组底面)最大的断距为 50 m,影响不到其上的泉头组储层。在 T5 层(侏罗系底面)最大的水平断距为 3 000 m,垂向断距为 2 995 m。在 T6 层(嫩江组三段底面)最大的断距为 80 m。L1 未穿透嫩江组盖层,不存在 CO₂ 泄漏风险。同时,姚家组、青山口组和泉头组咸水层三个 CO₂ 储存目的层连通,方便 CO₂ 运移,利于 CO₂ 储存。

该断裂带在 T2 层伴生有 24 条小断层,断距最大可达 190m,延伸长度最大可达 11 km,连通泉头组三四段和青山口组咸水层两个 CO₂ 储存目的层,方便 CO₂ 运移,有利于 CO₂ 储存。在 T3 层伴生有 8 条小断层,断距最大可达 70 m,其延伸长度在 5~10 km,向上无法错断 CO₂ 储存目的层最底层(泉头组三四段),不会对 CO₂ 储存产生影响。

3.2.3 林甸东断裂(L2)

该断裂位于克山依龙背斜带和黑鱼泡凹陷内,属于壳断裂,垂向断距在 750~2 955 m 之间,水平断距

在 1.7~6.8 km 之间。该断裂错断了侏罗系底面以下地层,但延伸不到 CO₂ 储存目的层最底层(泉头组三四段),距盖层最底层(嫩江组)较远,不会对 CO₂ 储存产生影响。L1 在 T5 层的最大垂向断距可达 2 995 m,为该地区垂向断距之最。据林甸地区干热岩钻探最新成果,该钻孔钻至 4 000 m 终孔,刚刚穿透白垩系,到达侏罗系。因此,林甸地区深大断裂垂向延伸可能的最顶部也在距地面约 1 000 m 以下到达嫩江组,受嫩江组之上巨厚的泥质岩隔水层阻断,不会连通咸水层和上部含水层,也不会导致 CO₂ 逸出。同时, L1 有效连通了姚家组、青山口组和泉头组咸水层三个 CO₂ 储存目的层的储存空间,方便 CO₂ 运移,有利于 CO₂ 储存。

3.3 地下水动力条件

松嫩盆地中央深、四周浅,因泄水区不十分明显,地下水流速缓慢。经研究^[27],因地势相对较高,滨洲铁路线以北的北安至海伦一线为该地区姚家组—青山口组含水层的供水区,地下水动力较强,水的实际流速最大可达 50 cm/a;嫩江流域和通肯河流域为姚家组—青山口组含水层的水排泄区;依安、拜泉、明水等地区为姚家组—青山口组含水层的水交替过渡区,地下水动力相对较弱,水的实际流速最大可达 20 cm/a;林甸地区为姚家组—青山口组深部咸水层的水交替作用停滞区,研究区内的乌裕尔凹陷、克山—依龙背斜、黑鱼泡凹陷、齐家—古龙凹陷 4 个二级构造单元基本在停滞区内,地下水动力很弱,流速十分缓慢(图 4),适合储存 CO₂。

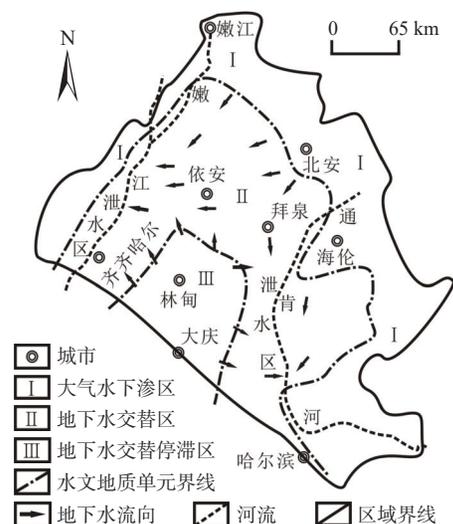


图4 滨北地区姚家组—青山口组水文地质图^[27]

Fig. 4 Hydrogeological map of the Yaojia Formation - Qingshankou Formation in the Binbei area^[27]

4 林甸地区深部咸水层 CO₂ 地质储存潜力

根据深部咸水层 CO₂ 地质储存条件, 深入分析林甸地区的储盖层、断层、地下水动力特征, 结果表明该地区具备 CO₂ 地质储存的条件, 可开展储存潜力评估工作。

4.1 储存量计算方法

基于目前深部咸水层中 CO₂ 地质储存量的 4 种主要计算方法, 研究认为, CSLF 的计算方法根据储存机理的不同将深部咸水层中 CO₂ 储存量主要分为构造地层储存、残余气体储存、溶解储存三类, 评估结果更为准确^[23]。

CSLF 在评价深部咸水层 CO₂ 储存量时, 提出用资源金字塔这一概念来形象地表述, 将 CO₂ 地质储存潜力分为理论储存潜力、有效储存潜力、实际储存潜力、可匹配储存潜力四个层级, 其存在相互关联和逐级递进的关系。

本文在计算时, 咸水层储存潜力可认为只由残余气体储存和溶解储存两部分构成。

(1) 残余气储存的理论储存量

$$M_{CO_2r} = \Delta V_{trap} \times \phi \times S_{CO_2r} \times \rho_{CO_2r} = A \times H \times \phi \times S_{CO_2r} \times \rho_{CO_2r} \quad (1)$$

式中: M_{CO_2r} ——CO₂ 在深部咸水层中残余气体储存的理论储存量/(10⁶ t);

ΔV_{trap} ——原先被 CO₂ 饱和然后被水浸入的岩石体积, 该参数可理解为评价单元内整个深部咸水层的体积/(10⁶ m³);

A ——储层的面积/km²;

H ——储层的有效厚度/m;

ϕ ——储层岩石的孔隙度/%;

S_{CO_2r} ——液流逆流后被圈闭的 CO₂ 的饱和度/%;

ρ_{CO_2r} ——在地层条件下 CO₂ 的密度/(kg·m⁻³)。

(2) 溶解储存的理论储存量

$$M_{CO_2d} = A \times H \times \phi \times (\rho_s X_s^{CO_2} - \rho_i X_i^{CO_2}) \times (1 - S_{CO_2r}) \approx A \times H \times \phi \times \rho_i \times S_{CO_2} \times M_{CO_2} \times (1 - S_{CO_2r}) \quad (2)$$

式中: M_{CO_2d} ——CO₂ 在深部咸水层中溶解储存的理论储存量/(10⁶ t);

ρ_s ——地层水被 CO₂ 饱和时的平均密度/(kg·m⁻³);

ρ_i ——初始地层水的平均密度/(kg·m⁻³);

$X_s^{CO_2}$ ——地层水被 CO₂ 饱和时 CO₂ 占地层水的平均质量分数/%;

$X_i^{CO_2}$ ——原始 CO₂ 占地层水的平均质量分数/%。

S_{CO_2} ——CO₂ 在地层水中的溶解度/(mol·kg⁻¹);

M_{CO_2} ——CO₂ 的摩尔质量, 0.044 kg/mol。

根据加拿大 Alberta 盆地咸水层溶解储量的结果, 不考虑现状地层水含碳量的情况时, 计算值偏大, 但误差仅为 1.3%^[33]。本次研究的咸水层的水化学资料绝大多数仅限于主要离子, 难以确定其含碳量, 此处忽略地层水含碳量, 直接利用溶解度计算。

(3) 深部咸水层中 CO₂ 储存的总潜力

① 理论储存量

$$M_{CO_2ts} = M_{CO_2r} + M_{CO_2d} \quad (3)$$

式中: M_{CO_2ts} ——储存总潜力的理论储存量/(10⁶ t)。

② 有效储存量

$$M_{CO_2es} = E \times M_{CO_2ts} \quad (4)$$

式中: M_{CO_2es} ——储存总潜力的有效储存量/(10⁶ t);

E ——有效封存系数。

CSLF 所提出的深部咸水层构造地层圈闭机理的计算方法与 USDOE 所应用的计算方法相似, 其提出的有效封存系数仅适合于构造地层储存机理计算。USDOE 采用的方法以有效封存系数 E 反映 CO₂ 占据整个孔隙体积的比例, 利用蒙特卡罗模拟可以得到深部咸水层置信区间在 15% ~ 85% 时, E 的取值范围为 4% ~ 15%; 置信区间为 50% 时, E 的平均值为 0.024。在数学模拟过程中所考虑的几个因素, 对于其他封存机理有效封存系数的取值也有借鉴意义^[23]。因此, 本文 E 也取值 0.024。

4.2 CO₂ 储存量

依据地质构造分区情况(图 1), 将研究区划分为乌裕尔凹陷计算区、克山—依龙背斜计算区、黑鱼泡凹陷计算区、齐家—古龙凹陷计算区, 其面积分别为 1 215, 597, 1 404, 345 km²。分别计算四个构造区的姚家组二三段、姚家组一段、青山口组二三段、青山口组一段、泉头组四段、泉头组三段六个咸水层的储存量, 采用地热钻孔数据绘出的各个储层的地层温度、压力等值线(图 5、图 6), 采用地热钻孔的水样数据绘出的各个储层混合水的溶解性总固体等值线图(图 7), 计算参数均为各个储层的平均值(表 2), 其中储层厚度和岩石的孔隙度来自 20 口地热钻孔的测井数据, 初始地层水的密度采用陈瑞军等^[34]的公式经高程校正后计算得出, 液流逆流后被圈闭的 CO₂ 饱和度由 Holtz^[35]的经验公式计算得出, CO₂ 在地层水中的溶解度采用 Duan 等^[36]和于立松等^[37]的溶解度理论预测模型计算得出, 储层中 CO₂ 的密度由张川如等^[38]的 CO₂ 密度数据表进行内插求值得出。经计算, 乌裕尔凹陷

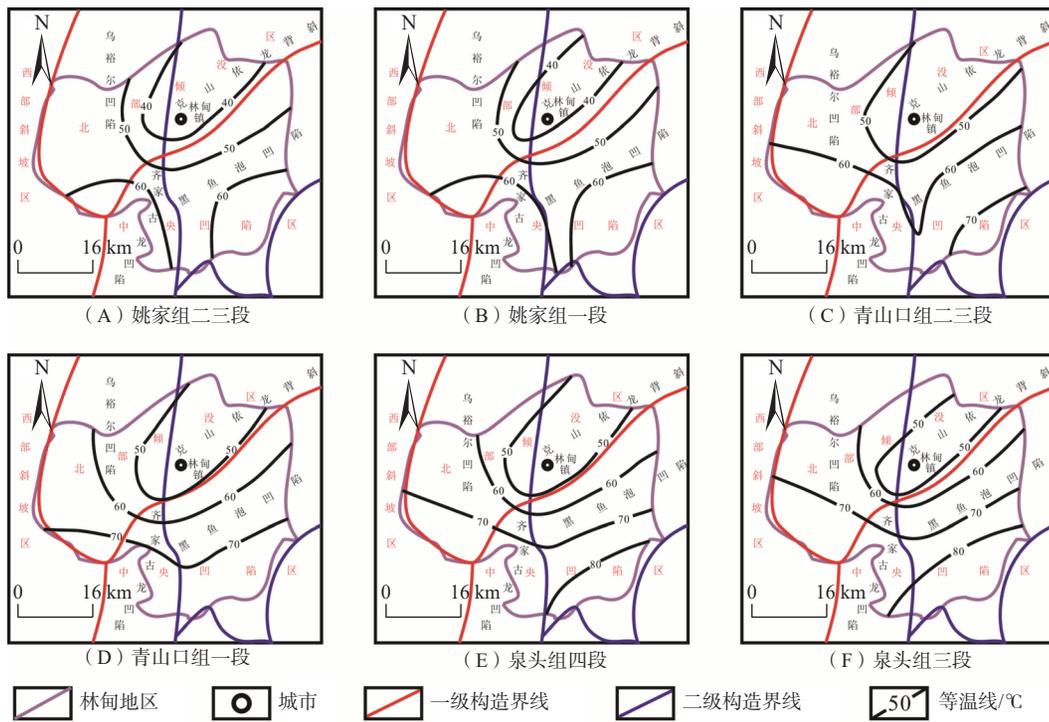


图 5 林甸地区深部咸水层 CO₂ 地质储存各储层地温等值线图

Fig. 5 Maps showing isogeothermal lines of each reservoir for CO₂ geological storage in deep saline aquifers in the Lindian area

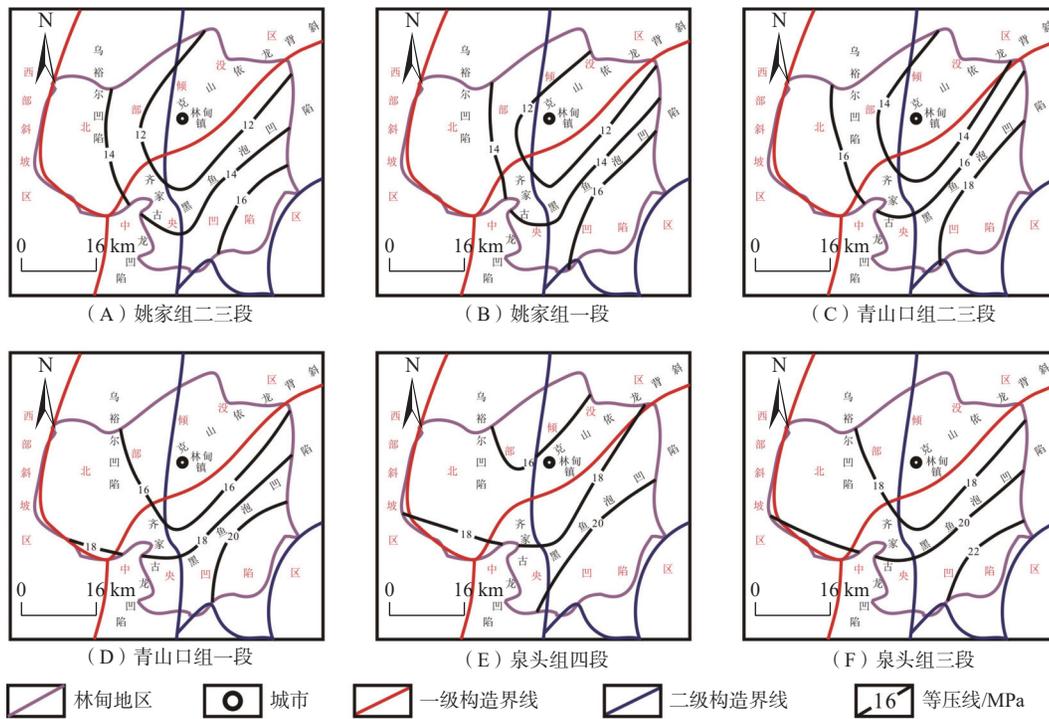


图 6 林甸地区深部咸水层 CO₂ 地质储存各储层压力等值线图

Fig. 6 Pressure contour maps of each reservoir for CO₂ geological storage in deep saline aquifers in the Lindian area

深部咸水层 CO₂ 理论储量为 168.28×10⁸ t, 有效储量为 4.04×10⁸ t; 克山—依龙背斜的理论储量为 100.30×10⁸ t, 有效储量为 2.41×10⁸ t; 黑鱼泡凹陷的理论储

量为 161.09×10⁸ t, 有效储量为 3.86×10⁸ t; 齐家—古龙凹陷的理论储量为 49.24×10⁸ t, 有效储量为 1.18×10⁸ t; 整个林甸地区深部咸水层 CO₂ 理论储量合计

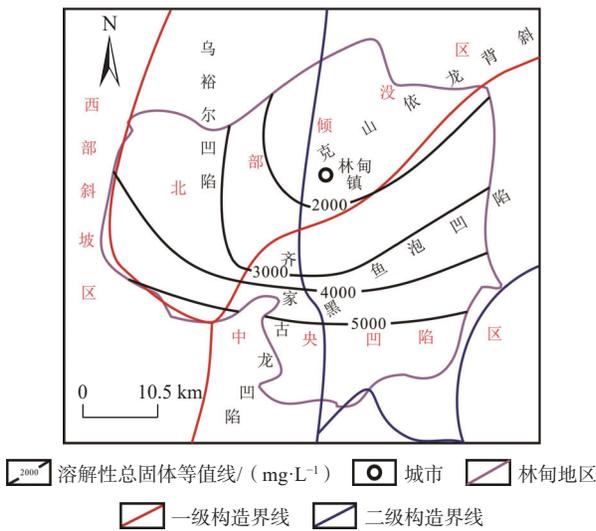


图 7 林甸地区深部咸水层溶解性总固体等值线图

Fig. 7 Isoline map of TDS of the deep saline aquifer in the Lindian area

为 478.91×10^8 t, 有效储量为 11.49×10^8 t, 储存潜力较大(表 3), 较适于 CO_2 地质储存, 与罗伟等^[39]、宋铁军等^[40]得出的关于本次研究的 4 个二级构造单元的结论基本一致, 为后续开展适宜性评价和目标靶区的筛选奠

表 2 乌裕尔凹陷、克山—依龙背斜、黑鱼泡凹陷与齐家—古龙凹陷深部咸水层储量计算参数

Table 2 Storage parameters of deep saline aquifers in the Wuyuer depression, the Keshan-yilong anticline, the Heiyupao depression and the Qijia-gulong depression

储层	储层面积 /km ²	储层平均厚度/m	储层岩石平均孔隙度/%	初始地层水的平均密度/(kg·m ⁻³)	液流逆流后被圈闭的 CO_2 平均饱和度/%	CO_2 在地层水中的平均溶解度/(mol·kg ⁻¹)	储层中 CO_2 的平均密度/(kg·m ⁻³)	
乌裕尔凹陷	1 215	姚家组二三段	9.7	15.88	996.96	47.4	1.247	638.56
		姚家组一段	13.8	18.03	997.05	40.7	1.243	639.09
		青山口组二三段	163.4	15.17	997.43	46.2	1.263	676.21
		青山口组一段	12.3	15.32	999.44	45.5	1.288	712.39
		泉头组四段	28.8	18.00	999.66	40.4	1.295	723.07
		泉头组三段	29.2	17.90	1 000.05	40.7	1.319	747.39
克山—依龙背斜	597	姚家组二三段	14.5	25.76	992.75	30.0	1.222	569.36
		姚家组一段	28.3	21.84	992.89	35.4	1.226	582.26
		青山口组二三段	181.6	20.60	993.47	37.2	1.243	636.97
		青山口组一段	6.9	15.20	994.04	45.8	1.257	671.80
		泉头组四段	30.4	15.96	994.24	46.8	1.268	684.59
		泉头组三段	40.7	17.46	994.55	42.3	1.292	702.04
黑鱼泡凹陷	1 404	姚家组二三段	14.3	14.93	994.46	46.5	1.197	601.50
		姚家组一段	13.2	16.21	994.92	44.6	1.203	609.84
		青山口组二三段	158.1	15.14	994.43	47.3	1.223	628.14
		青山口组一段	9.9	14.94	993.78	47.6	1.247	645.22
		泉头组四段	16.5	13.19	993.55	51.6	1.258	647.34
		泉头组三段	22.4	14.32	993.61	48.3	1.273	652.91
齐家—古龙凹陷	345	姚家组二三段	24.4	18.31	991.98	39.9	1.153	497.1
		姚家组一段	21.2	15.85	991.83	44.4	1.158	509.65
		青山口组二三段	188.6	17.03	991.28	42.2	1.176	539.82
		青山口组一段	6.2	9.98	990.65	58.9	1.196	564.59
		泉头组四段	57.2	15.25	990.32	45.6	1.206	575.33
		泉头组三段	34.8	11.42	989.60	54.7	1.223	587.24

定了基础。

因研究区的石油探孔很少, 本次研究主要是利用在地热资源勘探过程中已掌握的 20 口地热钻孔数据开展了林甸地区深部咸水层 CO_2 地质储存潜力的评估工作, 一些参数通过经验公式计算得出, 未充分结合实际进行模拟试验, 评估结果在精度上还需要提高, 但鉴于研究区构造简单, 储盖层均呈层状分布, 变化不十分明显, 基本能达到研究目的。在以后的研究工作中, 应加大资料搜集力度, 并充分利用后续的地热资源勘探数据, 进一步加大钻孔密度, 加强室内试验, 进行数值模拟^[41], 提高研究精度, 更精准地进行储存潜力评估。

5 结论

(1) 林甸地区埋藏深度在 940 ~ 2 062 m 的中生代白垩系泉头组三四段、青山口组和姚家组砂岩层状地层具有较好地孔隙度和渗透率, 蕴含有丰富的咸水, 溶解性总固体可达 2 000 ~ 9 000 mg/L, 且在白垩系上统姚家组地层之上沉积了嫩江组、四方台组、明水

表 3 林甸地区深部咸水层 CO₂ 储存量Table 3 CO₂ storage scale of deep saline aquifers in the Lindian area

计算区	残余气体储存量 /(10 ⁸ t)	溶解储存量 /(10 ⁸ t)	理论储存量 /(10 ⁸ t)	有效储存量 /(10 ⁸ t)
乌裕尔凹陷	152.75	15.53	168.28	4.04
克山—依龙 背斜	88.14	12.16	100.30	2.41
黑鱼泡凹陷	147.19	13.90	161.09	3.86
齐家—古龙 凹陷	43.93	5.31	49.24	1.18
合计	432.01	46.90	478.91	11.49

组,岩性以层状泥质岩为主,厚度在 800 ~ 1 300 m,对 CO₂ 封闭起到了较好的作用,是良好盖层。该地区主要断裂带从上地幔延伸最顶部至嫩江组三段底面,受嫩江组之上巨厚的泥质岩隔水层阻断,不会连通咸水含水层和上部含水层,也不会导致 CO₂ 逸出。该地区深部咸水层处在地下水交替作用停滞区,地下水动力很弱,流速十分缓慢。因此,林甸地区深部的咸水层是 CO₂ 地质储存的良好场所。

(2)利用地热勘探井,并根据 CO₂ 地质储存技术机理,运用国际权威潜力评估公式,计算得到林甸地区深部咸水层 CO₂ 理论储存量为 478.91×10⁸ t,有效储存量为 11.49×10⁸ t,储存潜力较大,为研究区开展适宜性评价、目标靶区筛选和场地选址及示范工程建设提供了地质依据。

参考文献 (References) :

- [1] IPCC. Climate change 2001: The third assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge: Cambridge University, 2001.
- [2] SAM H. An overview of the underground disposal of carbon dioxide[J]. *Energy Conversion and Management*, 1997, 38: S193 – S198.
- [3] GUNTER W D, GENTZIS T, ROTTENFUSSER B A, et al. Deep coalbed methane in Alberta, Canada: A fuel resource with the potential of zero greenhouse gas emissions[J]. *Energy Conversion and Management*, 1997, 38: S217 – S222.
- [4] WINTER E M, BERGMAN P D. Availability of depleted oil and gas reservoirs for disposal of carbon dioxide in the United States[J]. *Energy Conversion and Management*, 1993, 34(9/10/11): 1177 – 1187.
- [5] BACHU S, SHAW J. Evaluation of the CO₂ sequestration capacity in Alberta's oil and gas reservoirs at depletion and the effect of underlying aquifers[J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2003, 42(9): 51 – 61.
- [6] HOLLOWAY S. Underground sequestration of carbon dioxide: A viable greenhouse gas mitigation option[J]. *Energy*, 2005, 30(11/12): 2318 – 2333.
- [7] 江怀友,沈平平,宋新民,等. 世界气候变暖及二氧化碳埋存现状与展望[J]. *古地理学报*, 2008, 10(3): 323 – 328. [JIANG Huaiyou, SHEN Pingping, SONG Xinmin, et al. Global warming and current status and prospect of CO₂ underground storage[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2008, 10(3): 323 – 328. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 许志刚,陈代钊,曾荣树,等. CO₂地下地质埋存原理和条件[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2009, 31(1): 91 – 97. [XU Zhigang, CHEN Daizhao, ZENG Rongshu, et al. The theory and conditions of geological storage of CO₂[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2009, 31(1): 91 – 97. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 文冬光,郭建强,张森琦,等. 中国二氧化碳地质储存研究进展[J]. *中国地质*, 2014, 41(5): 1716 – 1723. [WEN Dongguang, GUO Jianqiang, ZHANG Senqi, et al. The progress in the research on carbon dioxide geological storage in China[J]. *Geology in China*, 2014, 41(5): 1716 – 1723. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 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 Jianqiang, WEN Dongguang, ZHANG Senqi, et al. Carbon dioxide geological storage suitability evaluation and demonstration project in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014. (in Chinese)]
- [11] BACHU S. Sequestration of CO₂ in geological media: Criteria and approach for site selection in response to climate change[J]. *Energy Conversion and Management*, 2000, 41(9): 953 – 970.
- [12] TSANG C F, BENSON S M, KOBELSKI B, et al. Scientific considerations related to regulation development for CO₂ sequestration in brine formations[J]. *Environmental Geology*, 2002, 42(2/3): 275 – 281.
- [13] WHITE C M, SMITH D H, JONES K L, et al. Sequestration of carbon dioxide in coal with enhanced coalbed methane recovery: A review[J]. *Energy & Fuels*, 2005, 19(3): 659 – 724.
- [14] 李小春,刘延锋,白冰,等. 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*, 2006, 25(5): 963 – 968. [LI Xiaochun, LIU Yanfeng, BAI

- Bing, et al. Ranking and screening of CO₂ saline aquifer storage zones in China[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(5): 963 – 968. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 巫润建, 李国敏, 黎明, 等. 松辽盆地咸含水层埋存CO₂ 储存容量初步估算[J]. *工程地质学报*, 2009, 17(1): 100 – 104. [WU Runjian, LI Guomin, LI Ming, et al. Estimation of CO₂ storage capacity in deep saline aquifer in Songliao sedimentary basin[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2009, 17(1): 100 – 104. (in Chinese with English abstract)]
- [16] LI D Y, LIU Q F, WENIGER P, et al. High-pressure sorption isotherms and sorption kinetics of CH₄ and CO₂ on coals[J]. *Fuel*, 2010, 89(3): 569 – 580.
- [17] 韩焱, 梁荣柱. 深部盐水层二氧化碳储量的计算新方法[J]. *西部探矿工程*, 2011, 23(6): 112 – 115. [HAN Yi, LIANG Rongzhu. The new means of estimation of CO₂ storage capacity in deep saline aquifer[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2011, 23(6): 112 – 115. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 金超, 曾荣树, 田兴有. 松辽盆地南部保康体系上白垩统CO₂埋存条件与潜力[J]. *地球科学*, 2013, 38(6): 1229 – 1239. [JIN Chao, ZENG Rongshu, TIAN Xingyou. CO₂ storage conditions and capacity of Upper Cretaceous series in Baokang sedimentary system in the southwest of Songliao Basin[J]. *Earth Science*, 2013, 38(6): 1229 – 1239. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 李琦, 魏亚妮, 刘桂臻. 中国沉积盆地深部CO₂地质封存联合咸水开采容量评估[J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(4): 93 – 96. [LI Qi, WEI Yani, LIU Guizhen. Assessment of CO₂ storage capacity and saline water development in sedimentary basins of China[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2013, 11(4): 93 – 96. (in Chinese with English abstract)]
- [20] LI L, ZHAO N, WEI W, et al. A review of research progress on CO₂ capture, storage, and utilization in Chinese Academy of Sciences[J]. *Fuel*, 2013, 108: 112 – 130.
- [21] BACHU S. Review of CO₂ storage efficiency in deep saline aquifers[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 40: 188 – 202.
- [22] 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)]
- [23] 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)]
- [24] ZHU Q L, WANG C, FAN Z H, et al. Optimal matching between CO₂ sources in Jiangsu province and sinks in Subei-Southern South Yellow Sea Basin, China[J]. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 2019, 9(1): 95 – 105.
- [25] 张晓娟. 准噶尔盆地CO₂地质利用与储存潜力研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020. [ZHANG Xiaojuan. Study on CO₂ geological utilization and storage capacity in Junnggar Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 桑树勋, 刘世奇, 王文峰, 等. 深部煤层CO₂地质存储与煤层气强化开发有效性理论及评价[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 403 – 435. [SANG Shuxun, LIU Shiqi, WANG Wenfeng, et al. Coal bed methane in deep coal seam geological storage of CO₂ and theories of strengthening development effectiveness and evaluation [M]. Beijing: Science Press, 2020: 403 – 435. (in Chinese)]
- [27] 大庆市地热研究课题组. 大庆市林甸地区地热资源特征及地热资源评价研究[R]. 大庆: 大庆石油学院, 大庆市地热开发办, 1998. [Daqing geothermal research group. Characteristics and evaluation of geothermal resources in Lindian area of Daqing City[R]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, Daqing Geothermal Development Office, 1998. (in Chinese)]
- [28] 施尚明, 孙小洁, 于清华. 松辽盆地林甸地区地温场特征[J]. *大庆石油学院学报*, 1998, 22(4): 77 – 79. [SHI Shangming, SUN Xiaojie, YU Qinghua. Geotemperature field characteristics in Lindian region of Songliao Basin[J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 1998, 22(4): 77 – 79. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 汪在君. 松辽盆地北部的地热资源及其开发利用方向[J]. *自然资源学报*, 2003, 18(1): 8 – 12. [WANG Zaijun. The geothermal resource of the northern Songliao

- Basin and direction for its development and utilization[J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(1): 8 - 12. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 杨永智,沈平平,宋新民,等. 盐水层温室气体地质埋存机理及潜力计算方法评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, 39(4): 744 - 748. [YANG Yongzhi, SHEN Pingping, SONG Xinmin, et al. Greenhouse gas geo-sequestration mechanism and capacity evaluation in aquifer[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2009, 39(4): 744 - 748. (in Chinese with English abstract)]
- [31] BRUANT R G J, GUSWA A J, CELIA M A, et al. Safe storage of CO₂ in deep saline aquifers[J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36(11): 240A - 245A.
- [32] 张洪涛,文冬光,李义连,等. 中国 CO₂ 地质埋存条件分析及有关建议[J]. *地质通报*, 2005, 24(12): 1107 - 1110. [ZHANG Hongtao, WEN Dongguang, LI Yilian, et al. Conditions for CO₂ geological sequestration in China and some suggestions[J]. *Regional Geology of China*, 2005, 24(12): 1107 - 1110. (in Chinese with English abstract)]
- [33] BACHU S, HAUG K, MICHAEL K, et al. Deep injection of acid gas in western Canada[J]. *Developments in Water Science*, 2005, 52: 623 - 635.
- [34] 陈瑞军,王继革,贾志,等. 深部地热流体温度场中稳态静水压力研究[J]. *水文地质工程地质*, 2013, 40(6): 123 - 128. [CHEN Ruijun, WANG Jige, JIA Zhi, et al. A study of steady-state hydrostatic pressure in deep geothermal fluid temperature field[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2013, 40(6): 123 - 128. (in Chinese with English abstract)]
- [35] HOLTZ, M H. Optimization of CO₂ sequestered as a residual phase in brine-saturated formations[C]//Second Annual Conference on Carbon Sequestration: Developing & validating the technology base to reduce carbon intensity. Alesandria Virginia: GCCC Digital Publication, 2003.
- [36] DUAN Z H, SUN R, ZHU C, et al. An improved model for the calculation of CO₂ solubility in aqueous solutions containing Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, and SO₄²⁻[J]. *Marine Chemistry*, 2006, 98(2/3/4): 131 - 139.
- [37] 于立松,张卫东,吴双亮,等. 二氧化碳在深部盐水层中溶解封存规律的研究进展[J]. *新能源进展*, 2015, 3(1): 75 - 80. [YU Lisong, ZHANG Weidong, WU Shuangliang, et al. Research on dissolved sequestration of CO₂ In deep saline aquifers[J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2015, 3(1): 75 - 80. (in Chinese with English abstract)]
- [38] 张川如,虞绍永. 二氧化碳气井测试与评价方法[M]. 北京:石油工业出版社,1999. [ZHANG Chuanru, YU Shaoyong. Test and evaluation methods for carbon dioxide gas wells[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999. (in Chinese)]
- [39] 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)]
- [40] 宋铁军,万玉玉,张文强,等. 基于灰色关联分析法的松辽盆地 CO₂ 地质储存适宜性评价[J]. *地质通报*, 2017, 36(10): 1874 - 1883. [SONG Tiejun, WAN Yuyu, ZHANG Wenqiang, et al. Suitability assessment of geological sequestration of CO₂ in Songliao Basin based on gray relational analysis method[J]. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(10): 1874 - 1883. (in Chinese with English abstract)]
- [41] 雷宏武,李佳琦,许天福,等. 鄂尔多斯盆地深部咸水层二氧化碳地质储存热-水动力-力学 (THM) 耦合过程数值模拟[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(2): 552 - 563. [LEI Hongwu, LI Jiaqi, XU Tianfu, et al. Numerical simulation of coupled thermal-hydrodynamic-mechanical (THM) processes for CO₂ geological sequestration in deep saline aquifers at Ordos Basin, China[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2015, 45(2): 552 - 563. (in Chinese with English abstract)]

编辑:宗爽