

巨野煤田深部煤层 CO₂ 地质封存潜力 评价及有利区优选

苗禾垚¹, 张军建¹, 杨 斌², 唐璐璐², 沈晓丽¹, 王 猛³, 吕大炜¹, 常象春¹, 王东东¹

(1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 山东省地质科学研究所, 山东 济南 250013;

3. 中国矿业大学 碳中和研究院, 江苏 徐州 221008)

摘要:本研究以鲁西南巨野煤田深部 3[#] 煤层为研究对象, 研究了该煤层 CO₂ 地质封存潜力, 并进行有利区优选。依据 CO₂ 超临界相态机理确定煤层封存临界深度, 并对煤层封存可行性进行评价。按照构造和埋深两项指标划分封存区块与单元, 并利用校正后的吸附曲线计算各单元 CO₂ 吸附和游离封存量。在此基础上, 综合利用数值模拟敏感性和主成分分析法, 明确 CO₂ 封存主控因素, 并厘定了封存有利区。结果表明, 3[#] 煤层温度 42.4~72.5 °C, 临界深度 700~910 m, 孔隙度 3.51%~5.27%, 渗透率 0.12~0.62 mD, CO₂ 单位吸附量 0.91~1.01 mmol/g。研究区可划分为 5 个封存单元, 理论单位封存量 1.01~1.09 mmol/g, 且该值随埋深线性增加, 理论封存总量 529.2×10⁷ t。CO₂ 封存主控因素为渗透率、孔隙度和含气量。封存有利区主要分布在目标区北部和中部, 面积为 355.08 km²。

关键词: 巨野煤田; 深部煤层; 二氧化碳; 地质封存; 潜力评价

中图分类号: P618.11

文献标志码: A

CO₂ geological storage potential evaluation and optimization of favorable areas in deep coal seams of Juye Coalfield

MIAO Heyao¹, ZHANG Junjian¹, YANG Bin², TANG Lulu², SHEN Xiaoli¹,

WANG Meng³, LÜ Dawei¹, CHANG Xiangchun¹, WANG Dongdong

(1. Collge of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Shandong Institute of Geological Sciences, Jinan 250013, China;

3. Carbon Nertrality Institute, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: This study evaluates the CO₂ geological storage potential and optimizes the favorable zones in the deep No. 3 coal seam of Juye Coalfield in southwestern Shandong. Based on the supercritical phase mechanism of CO₂, the critical storage depth was determined to assess the feasibility of coal seam storage. The study area was divided into storage blocks and units according to geological structure and burial depth, and the corrected adsorption curves were used to calculate CO₂ adsorption capacity and free gas content in each unit. Numerical simulation and principal component analysis were employed to identify key controlling factors and quantitatively determine favorable CO₂ storage zones. Results show that the No. 3 coal seam exhibits a temperature range of 42.4~72.5 °C, critical depth of 700~910 m, porosity of 3.51%~5.27%, permeability of 0.12~0.62 mD, and CO₂ adsorption capacity of 0.91~1.01 mmol/g. The study area could be divided into five CO₂ geological units, with unit storage capacity

收稿日期: 2025-02-21

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(42202205); 山东省自然科学基金青年科学基金项目(ZR2021QD072)

作者简介: 苗禾垚(2002—), 男, 山东青岛人, 硕士研究生, 主要从事非常规油气评价与开发研究。

张军建(1991—), 男, 山东潍坊人, 副教授, 博士, 主要从事非常规油气评价与开发研究, 本文通信作者。

E-mail: skd996457@sdust.edu.cn

ranging from 1.01 to 1.09 mmol/g. The value increases linearly with depth and the theoretical total storage capacity amounts to 529.2×10^7 tons. Permeability, porosity, and gas content are the primary controlling factors and the favorable zones are mainly located in the northern and central regions, covering an area of 355.08 km².

Key words: Juye Coalfield; deep coal seams; carbon dioxide; geological storage; potential evaluation

以 CO₂ 地质封存为代表的碳负排技术已成为能源领域实现双碳目标的重要途径。随着深地科学和相关技术的发展,深部非常规储层已成为 CO₂ 地质封存的重点目标。相关文献表明,深部煤储层具有高温高压高游离气含量的特点,该条件下 CO₂ 达到超临界状态,可实现更好的 CO₂ 封存效果。同时,受煤矿现有生产条件的限制,大埋深煤层开采受限,煤层资源难以被充分利用^[1]。因此,深部煤层 CO₂ 地质封存技术已成为扩展煤层赋存区资源潜力和实现地区碳中和目标的重点手段。

美国、加拿大、波兰等国家自 20 世纪 90 年代起先后开展了煤层注入 CO₂ 先导试验^[2]。以此为基础,相关学者普遍认为影响深部煤层 CO₂ 注入的因素主要为煤储层物性特征(煤级、渗透率、物理力学性质、含水性等)以及工作制度(CO₂ 的注入速率、注入压力及注入时间等)^[4-6]。值得注意的是,这些研究多利用主观或半定量方法确定 CO₂ 地质封存的影响因素,定量化研究较少。叶建平等^[7]以沁水盆地南部 3 号煤层为例,采用数值模拟技术分析了 CO₂ 注入后引起的煤储层物性变化。刘静等^[8]通过 Eclipse 数值模拟对沁县区块煤层气增产及 CO₂ 封存潜力进行评价,并优选出先导性试验区。然而,以上研究多关注于 CO₂ 驱替量,对 CO₂ 的封存量关注不够,针对深部煤层 CO₂ 地质封存潜力的研究也较弱。

综上所述,前人针对深部煤层 CO₂ 地质封存方法进行了相关研究,但仍存在部分不足:首先,CO₂ 地质封存影响因素的定量化研究不够,尚未构建一套完整的煤层 CO₂ 地质封存潜力的评价体系;其次,特定煤层赋存区深部煤层 CO₂ 地质封存单元的划分及其计算方法研究有待细化;最后,CO₂ 地质封存潜力评估和封存量计算方法与研究区实际结合度较弱。

因此,本研究以鲁西南地区巨野煤田为例,以深部 3[#] 煤层为研究目标,进行巨野煤田深部煤层 CO₂ 地质封存潜力评价。首先,依据 CO₂ 超临界相态机理,确定目标煤层 CO₂ 封存临界深度,分析研究区 CO₂ 地质封存可行性;其次,按照构造、埋深逐级细分,划分 CO₂ 地质封存区块和单元;在此基础上,利用校正后的 CO₂ 吸附曲线,以封存单元为单位进行 CO₂ 吸附量和游离气含量的计算;最后,综合利用数值模拟和灰色关联法定量化研究 CO₂ 地质封存主控因素,并进行有利区优选。

1 地质背景和计算方法

1.1 地质概况

巨野煤田位于山东省西南部的鲁西南含煤区,主要分布在巨野和郓城两县境内(图 1)。研究区基底为奥陶系,主要含煤地层为石炭系本溪组和太原组,均为海陆交互相沉积,其中山西组为过渡相沉积(三角洲沉积),下石盒子组和上石盒子组为陆相沉积。巨野煤田北起汶泗断层,南到单县断层,西到聊考断裂,东至峰山断层,属鲁西南块陷构造区。目标煤层为山西组 3[#] 煤层,全区较稳定、结构简单,赋存区全部可采,厚度为 0~10.43 m,平均厚度 5.81 m,夹石 0~3 层^[9]。

1.2 断层分维值计算方法

相关研究^[10]表明,断层的分布及其几何形态具有明显的分形特征,因此可利用线性分形手段进行断层构造复杂性的定量化表征。常用的断层分维值包括容量维 D_k 、信息维 D_1 和相似维 D_s 。本次研究采用相似维 D_s 计算断层分形维数。

相似维 D_s 定义为:对于某一具有自相似性的研究对象,将其划分为 N 个单元,且每一单元按相似比进行划分,即

$$D_s = -\lg N(r) / \lg r. \quad (1)$$

式中: $N(r)$ 为对断层痕迹进行覆盖的正方形网格数,即划分的正方形单元个数; r 为划分的正方形单元的边长。

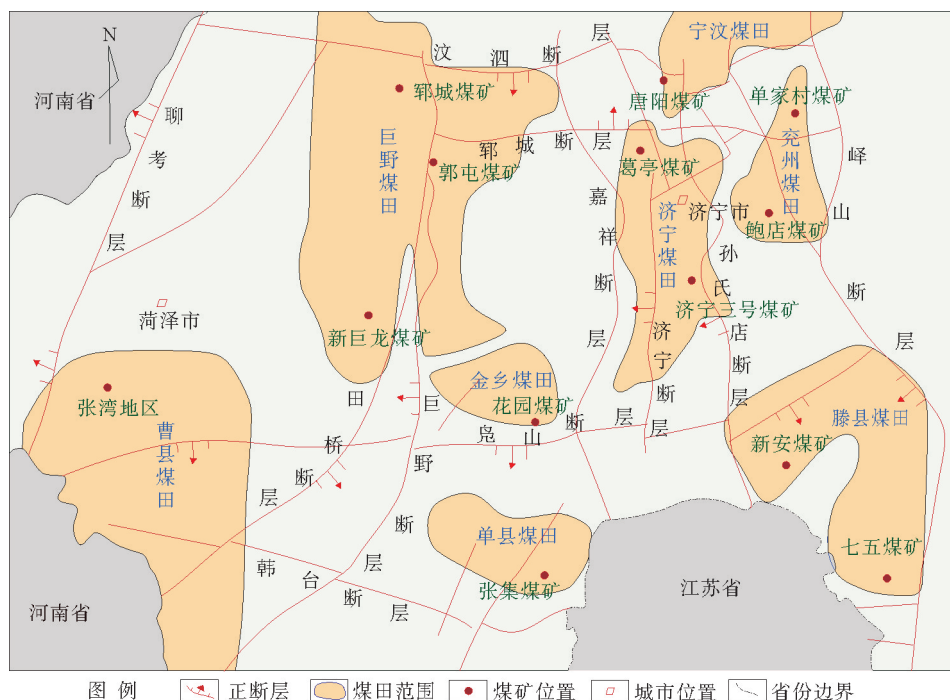


图1 巨野煤田分布及构造示意图

Fig. 1 Distribution and structural schematic diagram of Juye Coalfield

根据研究区断层展布图,采用网格覆盖法统计和计算断层分形维数中的相似维 D_s ,以定量描述断层分形结构的不规则性。该值可作为反映断层网络复杂程度的综合性指标,分形维数越大,表示该区断裂越发育,构造越复杂,裂隙越发育。

具体计算步骤:①将网格边长设为 r_0 ,对断层痕迹进行覆盖,统计其中包含断层痕迹的网格数 $N(r)$;②逐渐缩小网格尺寸,使得 $r_i = r_0/2^i$,得出相应的 $N(r_i)$ (图2)。基于散点图拟合直线 $\lg N(r) = a + b \times \lg r$,所求的分维数 D_s 等于直线斜率的绝对值^[10]。求出各点断层分维值后,利用 surfer 软件,对研究区断层分维值进行插值计算,绘制等值线图。

1.3 吸附和游离量计算方法

CO_2 单位封存量包括不同封存类型的单位封存量,即吸附封存量、溶解封存量、游离封存量和矿化封存量。受制于封存机理的不同,各部分 CO_2 单位封存量的比例也不同^[11]。

深部煤层由于矿化作用时间过长,固碳矿物供应不足,煤岩 CO_2 矿化封存量一般不作为重点因素考虑; CO_2 游离封存量通过真实气体状态方程获得^[12]:

$$m_{v0} = \frac{\varphi(1 - S_w)p}{ZRT\rho_{\text{coal}}} \quad (2)$$

式中: m_{v0} 为单位质量煤岩 CO_2 静态封存量(游离相),mmol/g; φ 为压汞法或测井法得到的孔隙度,%; S_w 为含水饱和度,%; p 为压力,MPa; Z 为某温度压力下 CO_2 压缩因子; ρ_{coal} 为煤岩视密度,g/cm³; R 为摩尔

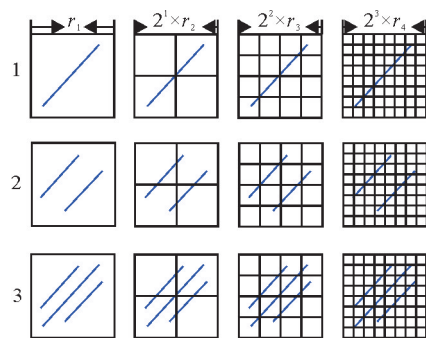
图2 基于断层分维值的构造复杂程度评价图^[10]

Fig. 2 Construction complexity evaluation map by using fault fractal dimension

气体常数,取 $8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; T 为开氏温度, K。

煤岩 CO₂ 吸附量可通过校正过的煤样等温吸附实验获得。在等温吸附实验中,若吸附饱和,吸附相密度 ρ_a 和体积 v 不再随着吸附压力的增加而改变,而游离相密度 $\rho(P, T)$ 会随着吸附压力的增加而增加,导致煤样的 CO₂ 吸附等温线出现下拐现象^[13],因此需要通过等温吸附实验获得 Gibbs 吸附量和实际吸附量的关系,对吸附等温线进行修正^[14]。

Gibbs 吸附量和实际吸附量的关系如下:

$$m_e = m_a - \rho(P, T) v_a = \rho_a v_a - \rho(P, T) v_a = m_a \left[1 - \frac{\rho(P, T)}{\rho_a} \right], \quad (3)$$

可转换为:

$$m_a = m_e \frac{\rho_a}{\rho_a - \rho(P, T)}。 \quad (4)$$

式中: m_e 为 Gibbs 吸附量, mmol/g; m_a 为实际吸附量, mmol/g; ρ_a 为吸附相密度, kg/m³; $\rho(P, T)$ 为温度 T 和压力 P 时的游离相密度, kg/m³; v_a 为吸附相体积, cm³/g。

通过式(4)对煤样的 CO₂ 吸附等温曲线进行校准,获取准确的 CO₂ 吸附量。

1.4 CO₂ 地质封存量计算方法

利用煤层气地质资源量计算方法,可计算深部煤层 CO₂ 地质封存量,得到单位质量煤岩 CO₂ 地质封存量后,结合盆地的煤炭资源量,计算 CO₂ 理论地质封存量^[15],具体计算方式为:

$$M_t = A \times H \times \rho_{\text{coal}} \times m \times M。 \quad (5)$$

式中: M_t 为理论地质封存容量, t; A 为 CO₂ 地质封存区域面积, m²; H 为煤层厚度, m; ρ_{coal} 为煤岩视密度, g/cm³; m 为每克煤中 CO₂ 理论封存量, mmol/g; M 为 CO₂ 摩尔质量, 44 g/mol。 m 主要由吸附封存量、静态封存量和溶解封存量组成^[16],

$$m = m_{\text{ad}} + m_{\text{v0}} + m_{\text{s}}。 \quad (6)$$

式中: m_{ad} 为单位质量煤岩 CO₂ 吸附封存量, mmol/g; m_{v0} 为单位质量煤岩 CO₂ 静态封存量(游离相), mmol/g; m_{s} 为单位质量煤岩 CO₂ 溶解封存量, mmol/g。

结合 1.3 节,吸附封存量通过校正过的煤样等温吸附实验实际吸附量获得,静态封存量通过真实气体状态方程获得,溶解封存量利用溶解度计算方程获得,式(6)可转换为:

$$m = n_{\text{ab}}(T, p) + \frac{\varphi(1 - S_w)p}{ZRT\rho_{\text{coal}}} + \frac{\varphi S_w S_{\text{CO}_2}}{\rho_{\text{coal}}} \quad (7)$$

式中: $n_{\text{ab}}(T, p)$ 为给定温度压力下的 CO₂ 绝对吸附封存量, mmol/g; S_{CO_2} 为某温度压力下 CO₂ 在纯水中的溶解度, mmol/cm³。

2 典型煤田 CO₂ 地质封存条件

当温压条件均达到 CO₂ 临界点(31.1 °C、7.38 MPa)时,气态 CO₂ 转变为超临界态(图 3),该状态下的 CO₂ 密度接近液体,黏度却接近气体,扩散系数介于气体和液体之间,具有密度大、流动性好和溶解能力强等特点,这些特征均有利于 CO₂ 在地下迅速运移扩散和大量储存^[16-18]。

探讨煤层封存 CO₂ 技术的可行性,核心前提在于煤层需具备良好的圈闭条件。然而,并非所有煤层都适宜作为 CO₂ 的封存场所。理想的封存煤层通常需具备埋藏深、厚度大、CH₄ 含气量高、煤层孔隙率和渗透率高,且地质构造稳定,无显著褶皱和断层等特征^[19]。本研究结合煤矿地质资料和研究成果分析认为,目标煤层 3[#] 煤层形成于三角洲沉积体系,水平连续,顶板条件较复杂,正断层贯穿研究区全区^[9]。本研究以封存量为主要指标,探讨巨野煤田深部煤层 CO₂ 地质封存潜力,并进行有利区优选。

2.1 温度和压力条件

研究区 3[#] 煤层温度在 42.4~72.5 °C;临界深度为 700~910 m,除大李集煤田外,煤层埋深在 500~

1 500 m,均满足临界深度的要求(表 1)。与常规认识的深部煤层 CO₂ 封存有利区埋深多位于 800 m 以下一致。

表 1 煤矿 3[#] 煤层基础地质数据表

Table 1 Basic information of coal seam 3

煤矿	地温梯度/(℃/100 m)	临界深度/m	煤层温度/℃	埋深/m	煤厚/m
郭屯煤矿	2.78	719.42	44.43~57.83	663~1 145	0.38~8.30
李楼煤业	3.01	664.45	42.40~72.50	545~1 545	0.44~10.05
大李集煤田	2.45	816.33	43.88~44.13	275~560	1.23~6.03
新巨龙煤矿	2.82	709.22	46.45~59.14	725~1 175	0.30~10.48
郛城煤矿	3.01	664.45	43.27~58.26	574~1 072	3.96~7.88
赵楼煤矿	2.20	909.09	41.40~49.76	700~1 080	0~10.33
梁宝寺煤矿	1.20	1 666.67	29.60~37.64	300~970	0~9.23

2.2 构造条件分析

本研究利用断层分维值法^[10],对研究区构造条件进行定量评价,分维值越大表明断层构造条件越复杂。分别选取位于研究区的郛城煤矿、郭屯煤矿和新巨龙煤矿进行断层分维值的计算:

1) 郛城煤矿位于巨野煤田北部,呈走向近南北、倾向东的单斜构造,发育次一级宽缓褶曲并伴有一定数量的断层。断层多近南北向分布,北部发育少量北东向、近东西向断层,煤矿北部被近南北向、北东向和近东西向断层切割。由图 3(a))可以看出,郛城煤矿断层分维值大部分都在 1 以下,说明其构造较简单。

2) 郭屯煤矿位于巨野煤田中部,为东倾的单斜构造,受区域构造影响,煤矿发育宽缓褶曲,并伴生一定数量的断层。断层主要集中在煤矿中东部,按照断层走向,大致可分为近南北向、北东向和北西向三组。郭屯煤矿断层分维值大部分都在 1 以上,说明其构造较复杂(图 3(b))。

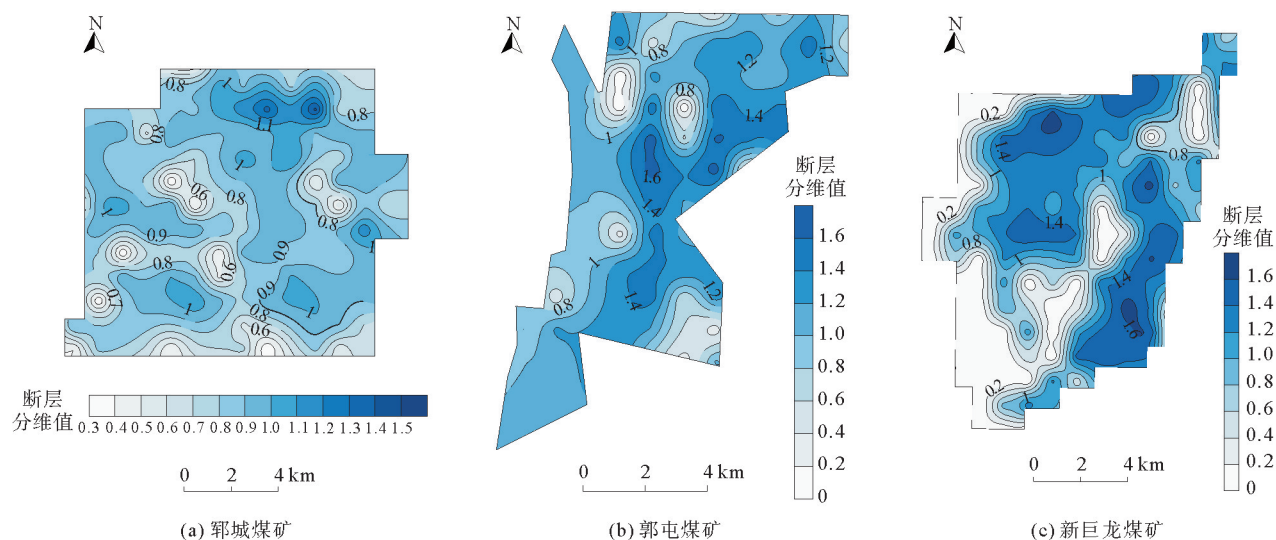


图 3 巨野煤田煤矿构造和断层分维值分布图

Fig. 3 Distribution of structural and fault dimensions of Juye Coalfield

3) 新巨龙煤矿位于巨野煤田南部,为东倾的单斜构造,发育断层和次一级宽缓褶曲。断层走向近南北向,东南部发育西南—东北向断层。由图 3(c)可以看出,新巨龙煤矿断层分维值分布跨度大,不同区域构造差异较大,其中煤矿西南部构造较简单,中北部和东南部的构造较复杂,但研究区大部分区域断层分维值均小于 0.5,说明煤矿整体构造较简单。

2.3 煤层物性和吸附特征

煤层渗透率是影响 CO₂ 运移速率及封存效率的关键因素。随着埋深的增加,地应力增大,煤层中的孔隙受挤压程度加大。浅部煤层的主应力差较大,沿水平方向发育的裂隙处于拉张状态;深部煤层由于应力发生转换,主应力差减小,储层在三轴方向均受压,裂缝逐渐闭合,导致渗透率变差。由图 4 可以看出,巨野煤田典型煤样孔隙度为 3.52%~5.27%,渗透率为 0.12~0.62 mD,渗透率低于 1 mD,说明样品渗透率较低,物性较差。由所选样品在 40 °C 的 CO₂ 等温吸附实验可知,巨野李楼煤矿的 CO₂ 单位吸附量较大,最高为 1.01 mmol/g,说明 CO₂ 吸附能力较强、封存潜力较大。

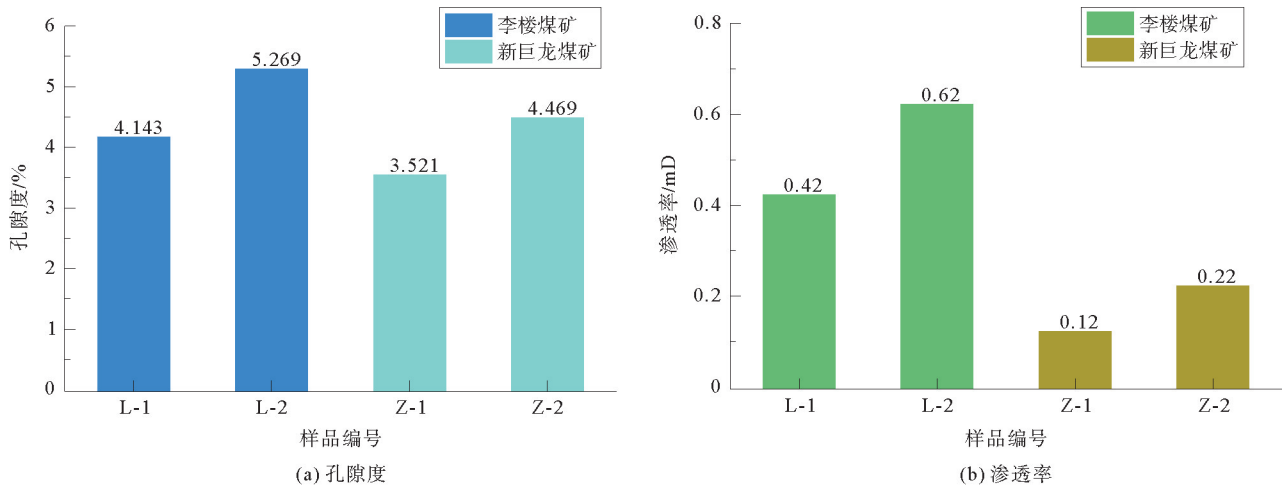


图 4 巨野煤田典型煤矿的煤样参数对比

Fig. 4 Comparative analysis of coal specimen parameters from representative mines of Juye Coalfield

3 主力煤层 CO₂ 地质封存潜力计算

3.1 巨野煤田封存区块及封存单元划分

研究区断层主要分为两组,分别为近东西向和近南北向正断层,均具有规模大、延展长、断距大的特点。按照断层、构造和煤层展布特征的差异性,将研究区划分为 5 个 CO₂ 封存区块(图 5(a))。以区块①为例,根据次级断层和煤层埋深将区块①划分为 15 个 CO₂ 封存单元,并以封存单元为基本单位进行封存量计算(图 5(b))。

3.2 巨野煤田 CO₂ 理论/有效地质封存量

基于 1.4 节的式(6)、式(7),充分考虑不同埋深条件下的 CO₂ 吸附量、游离量和溶解量,得到区块①的理论单位封存量(表 2)。由表 2 结果表明,随着埋深增大,CO₂ 单位封存量呈线性变化(1.08~1.10 mmol/g)。

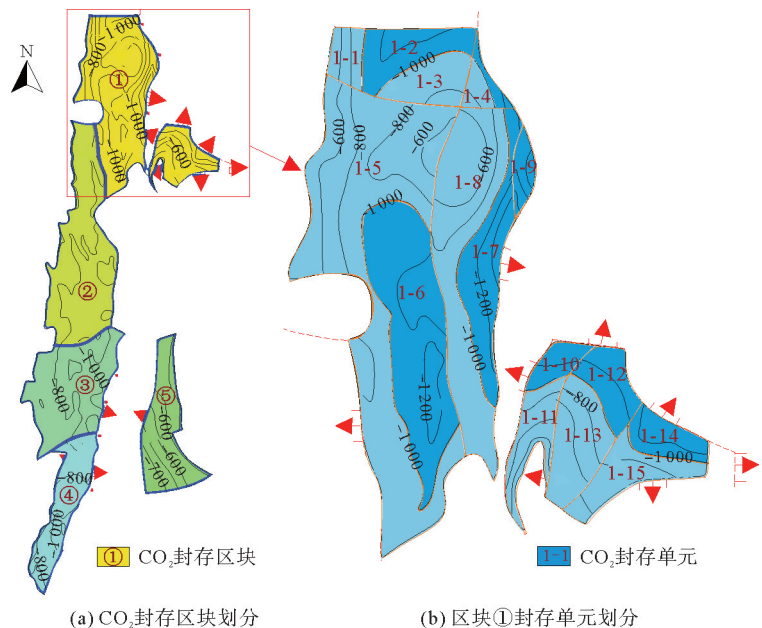


图 5 巨野煤田深部煤层 CO₂ 封存区块及单元划分示意图

Fig. 5 CO₂ storage blocks and unit division in deep coal seams of Juye Coalfield

表 2 巨野煤田区块①单位封存量
Table 2 Unit ① storage calculation of Juye coalfield

煤层埋深/m	温度/℃	压力/MPa	孔隙度/%	视密度/(g/cm ³)	CO ₂ 绝对吸附封存量/(mmol/g)	CO ₂ 压缩因子	CO ₂ 在纯水中的溶解度/(mmol/cm ³)	摩尔气体常数/R	理论单位封存量/(mmol/g)
800	50	8	5.55	1.61	1.00	0.69	0.019	8.31	1.08
900	53	9	5.41	1.52	1.00	0.66	0.017	8.31	1.08
1 000	56	10	5.51	1.59	1.00	0.64	0.018	8.31	1.09
1 100	59	11	5.22	1.57	1.00	0.61	0.019	8.31	1.10
1 200	62	12	4.89	1.44	1.00	0.59	0.020	8.31	1.10

根据 1.4 节中理论地质封存量计算方法(式 5),计算得到区块①中 15 个地质单元的理论地质封存量,如表 3 所示。由表 3 可知,各单元理论地质封存量为 $1.99 \times 10^7 \sim 60.71 \times 10^7$ t,其中单元 1-5 封存面积最大,因此其 CO₂ 单位封存量也最大(1.09 mmol/g)。

表 3 巨野煤田区块①各单元理论地质封存量计算表
Table 3 Calculation for storage of units in Block 1 of Juye coalfield

单元	理论地质封存量/(10 ⁷ t)	封存面积/(10 ⁶ m ²)	煤层厚度/m	视密度/(g/cm ³)	CO ₂ 单位封存量/(mmol/g)
1-1	3.89	3.74	6.09	1.57	1.09
1-2	10.14	9.94	5.87	1.63	1.07
1-3	7.50	7.22	6.04	1.58	1.09
1-4	1.99	1.92	5.89	1.62	1.09
1-5	60.71	58.44	6.36	1.50	1.09
1-6	31.95	31.33	6.04	1.58	1.07
1-7	13.76	13.48	5.87	1.63	1.07
1-8	29.44	28.33	6.28	1.52	1.09
1-9	2.93	2.87	6.37	1.50	1.07
1-10	3.42	3.35	6.02	1.58	1.07
1-11	7.32	7.04	6.33	1.51	1.09
1-12	6.69	6.55	5.98	1.60	1.07
1-13	11.97	11.51	6.07	1.57	1.09
1-14	5.77	5.66	5.86	1.63	1.07
1-15	9.04	8.69	6.38	1.50	1.09

基于上述方法,分别对区块②~⑤进行封存地质单元划分。相对区块①,区块②~⑤构造不发育,按照埋深可将其划分为 14 个封存地质单元进行计算。结果表明,区块②~⑤各封存单元的 CO₂ 单位封存量为 1.01~1.06 mmol/g,理论地质封存量为 $0.22 \times 10^7 \sim 114.44 \times 10^7$ t,巨野煤田 CO₂ 理论地质封存总量为 529.2×10^7 t。其中,区块②中的单元 2-1 封存量最大。对比可知,计算得到的 CO₂ 理论地质封存总量与前人对深部煤层 CO₂ 地质封存量^[13]评估的量级一致,均为百万吨级,具有可靠性。

4 深部煤层 CO₂ 地质封存有利区优选

4.1 基于数值模拟的 CO₂ 地质封存主控因素分析

影响 CO₂ 驱煤层气和 CO₂ 捕获与封存技术效果的因素众多,如破裂压力、吸附参数、含气量、煤层厚度、煤层埋深、储层压力、孔隙度、渗透率以及地层温度等参数,在相关文献的基础上^[20],设置模拟参数(表 4),通过 comsol 软件对孔隙度、渗透率,含气量进行数值模拟,探讨其对 CO₂ 地质封存的影响。其中,渗透率分别设置为 0.1、1.0、2.0 mD,孔隙度分别设置为 2%、5%、7%,含气量通过计算转换为储层瓦斯压力,分别设置为 1.3、1.5、1.7 MPa(表 4)。

表 4 模拟参数取值

Table 4 Simulation parameter values

储层参数	数值	储层参数	数值
单位含气量/(cm ³ /g)	0.5、0.8、1.1	CH ₄ Langmuir 体积/(cm ³ /g)	17.96
煤厚/m	6.70	CH ₄ Langmuir 压力/MPa	0.82
埋深/m	1 000.00	储层压力/MPa	10.00
孔隙度/%	2、5、7	渗透率/mD	0.1、1.0、2.0

1) 渗透率的影响。由图 6、表 5 表明,随着渗透率的增加,CO₂ 气体压力运移范围增大。当初始渗透率为 0.1 mD 时,CO₂ 难以注入和驱替煤层气,煤层的累计产气量和累计注入量均非常低;渗透率为 1 mD 时,封存和驱替效果有所改善,CO₂ 驱替情况下,累计产气量达 0.823×10^6 m³,CO₂ 的累计注入量为 0.299×10^6 m³;当渗透率为 2 mD 时,驱替效果较为理想,累计产气量为 1.134×10^6 m³,CO₂ 的累计注入量提高到 0.389×10^6 m³。模拟结果表明,渗透率对 CO₂ 的封存效率具有显著影响,其增加能同时改善 CO₂ 注入能力和煤层气采收率。

表 5 排采 300 天不同地质条件下累计产气量

Table 5 Cumulative gas production under different geological conditions after 300 days of drainage time

渗透率/ mD	注入量/ (10 ⁶ m ³)	产气量/ (10 ⁶ m ³)	孔隙度/%	注入量/ (10 ⁶ m ³)	产气量/ (10 ⁶ m ³)	瓦斯压力/ MPa	注入量/ (10 ⁶ m ³)	产气量/ (10 ⁶ m ³)
0.1	0.622	0.224	2	1.837	0.575	1.3	1.654	0.471
1.0	0.823	0.299	5	2.013	0.615	1.5	1.775	0.630
2.0	1.134	0.389	7	2.079	0.633	1.7	1.835	0.706

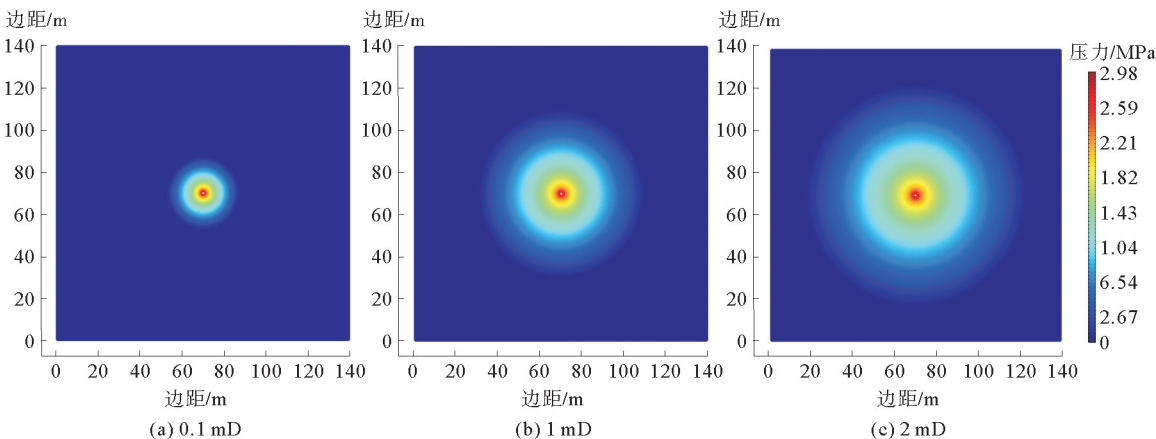


图 6 不同渗透率下 CO₂ 气体压力运移图

Fig. 6 CO₂ gas pressure migration diagram under different permeability

2) 孔隙度的影响。孔隙度是煤储层物性的主要参数,尤其是割理孔隙度对封存效果的影响显著。由图7、表5结果表明,随着孔隙度由2%增至7%, CO_2 累计注入量由 $1.84 \times 10^6 \text{ m}^3$ 显著提升至 $2.08 \times 10^6 \text{ m}^3$,表明高孔隙度煤层的 CO_2 封存能力更强。而对应的产气量仅由 $0.58 \times 10^6 \text{ m}^3$ 小幅增至 $0.63 \times 10^6 \text{ m}^3$,增幅有限。说明煤储层孔隙度是影响 CO_2 封存效率的关键参数,孔隙度越高越有利于实现大规模 CO_2 地质封存。值得注意的是,孔隙度的增大在一定程度上影响了煤层气驱替及封存效果,但对于气体压力传播速度影响不大。

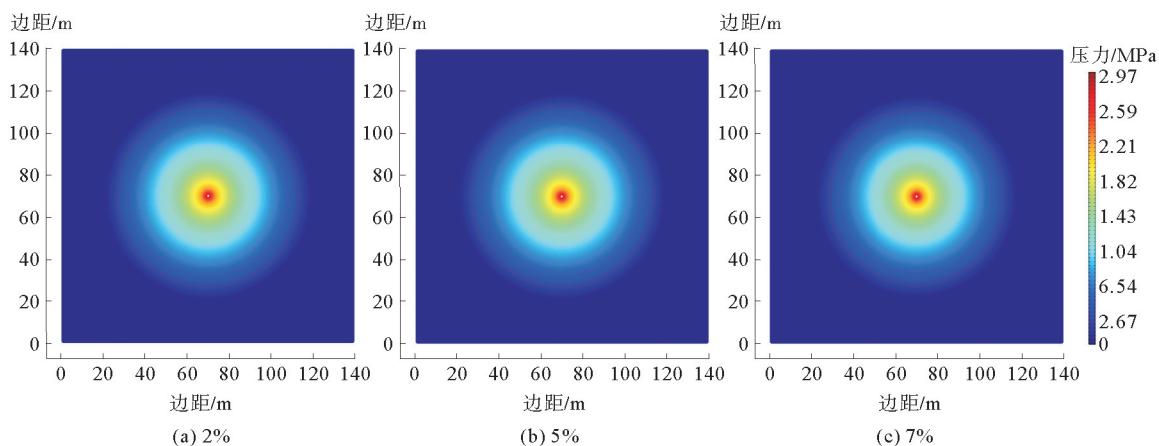


图7 不同孔隙度下 CO_2 气体压力运移图

Fig. 7 CO_2 gas pressure migration diagram under different porosity

3) 含气量的影响。由图8、表5结果表明,当瓦斯压力从1.3 MPa增至1.7 MPa时, CO_2 的累计注入量呈稳定增长趋势,由 $1.654 \times 10^6 \text{ m}^3$ 升至 $1.835 \times 10^6 \text{ m}^3$,增幅约11%,表明较高的储层压力有利于维持 CO_2 注入的稳定性。值得注意的是,煤层气产量变化尤为显著,从 $0.471 \times 10^6 \text{ m}^3$ 大幅提升至 $0.706 \times 10^6 \text{ m}^3$,增幅高达50%,但 CO_2 气体压力运移范围变化不明显,对于气体压力的传播影响不大。

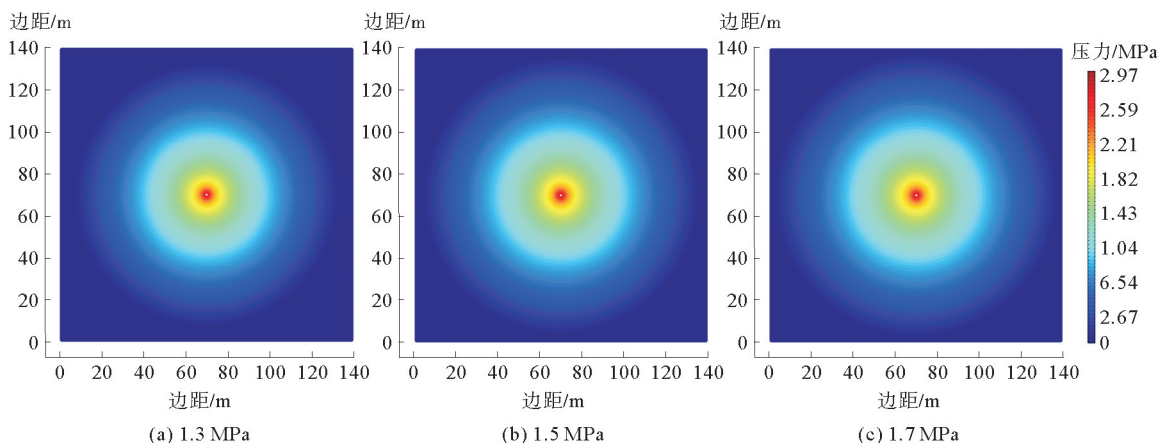


图8 不同含气量下 CO_2 气体压力运移图

Fig. 8 CO_2 gas pressure migration diagram under different gas contents

4.2 基于主成分分析法的 CO_2 地质封存有利区优选

以封存单元为单位,分别统计研究区对应的单位封存量、封存面积、封存总量、渗透率、孔隙度、埋深和煤厚等数据,利用主层次分析-模糊评判法确定单位封存最优区(表6)。主要步骤为:①通过主层次分析法对上述因素进行评分,通过“三标度法”(层次分析法的改进判断尺度方法),利用 SPSS(statistical product and

service solution)软件建立判断矩阵;②对矩阵进行一致性检验,当判断矩阵通过一致性检验后,计算得出各主控因素的权重;③再通过模糊评判法,将 5 个影响因素进行打分评估创建模糊判断矩阵,利用主层次分析法获得的权重矩阵和模糊综合评判矩阵进行相应运算得到模糊评价向量,再换算为权重进行计算(表 6~7)。

表 6 巨野煤田 CO₂ 封存量相关参数
Table 6 CO₂ storage parameters in Juye Coalfield

单元	封存面积/(10 ⁶ m ²)	理论地质封存量/(10 ⁷ t)	CO ₂ 单位封存量/(mmol/g)	含气量/(m ³ /t)	孔隙度/%	煤层埋深/m
1-1	3.74	3.89	1.09	0.23	5.35	700
1-2	9.95	10.14	1.07	0.45	5.35	700
1-3	7.22	7.50	1.09	1.03	5.35	700
1-4	1.92	1.99	1.09	0.98	5.35	700
1-5	58.44	60.71	1.09	0.03	5.55	800
1-6	31.33	31.95	1.07	1.23	5.35	800
1-7	13.49	13.76	1.07	0.89	2.05	800
1-8	28.34	29.44	1.09	0.89	2.05	800
1-9	2.88	2.93	1.07	0.89	2.05	800
1-10	3.36	3.42	1.07	1.16	3.05	800
1-11	7.05	7.32	1.09	1.07	3.67	900
1-12	6.56	6.69	1.07	1.16	3.67	900
1-13	11.52	11.97	1.09	1.24	3.67	900
1-14	5.66	5.77	1.07	1.15	3.67	900
1-15	8.70	9.04	1.09	1.16	3.67	900
2-1	161.03	114.44	1.01	1.17	2.78	900
2-2	3.28	2.45	1.06	1.15	2.78	900
2-3	1.04	0.78	1.06	1.16	2.78	900
3-1	104.28	74.11	1.01	1.15	2.78	1 200
3-2	0.29	0.22	1.06	1.26	2.78	1 200
3-3	2.80	2.09	1.06	1.36	2.78	1 200
3-4	18.52	13.84	1.06	1.16	2.78	1 200
4-1	2.52	1.79	1.01	0.51	7.14	1 200
4-2	2.65	1.98	1.06	0.56	7.14	1 200
4-3	6.60	4.69	1.01	0.52	7.14	1 200
4-4	53.10	37.73	1.01	0.72	7.14	1 200
4-5	8.63	6.45	1.06	0.43	7.14	1 200
5-1	44.41	31.56	1.01	0.58	7.14	1 200
5-2	42.98	30.55	1.01	0.53	7.14	1 200

表 7 巨野煤田 CO₂ 封存量相关参数权重值
Table 7 The weight value of CO₂ storage parameters in Juye Coalfield

项	CO ₂ 单位封存量	理论地质封存量	封存面积	孔隙度	渗透率
权重值	26.84	24.73	25.77	12.33	10.33

由上述分析可知,巨野煤田总体具有较好的 CO_2 封存地质条件。由图 9 可知,单元 1-5 和 1-6 构造条件稳定,封存面积大,煤层孔渗条件较好,可作为有利区。单元 3-1 和 2-1 的煤层孔渗条件较差,但封存面积大、构造条件稳定,可作为次级有利区(图 9)。有利区主要分布在研究区北部和中部,面积 355.08 km^2 。

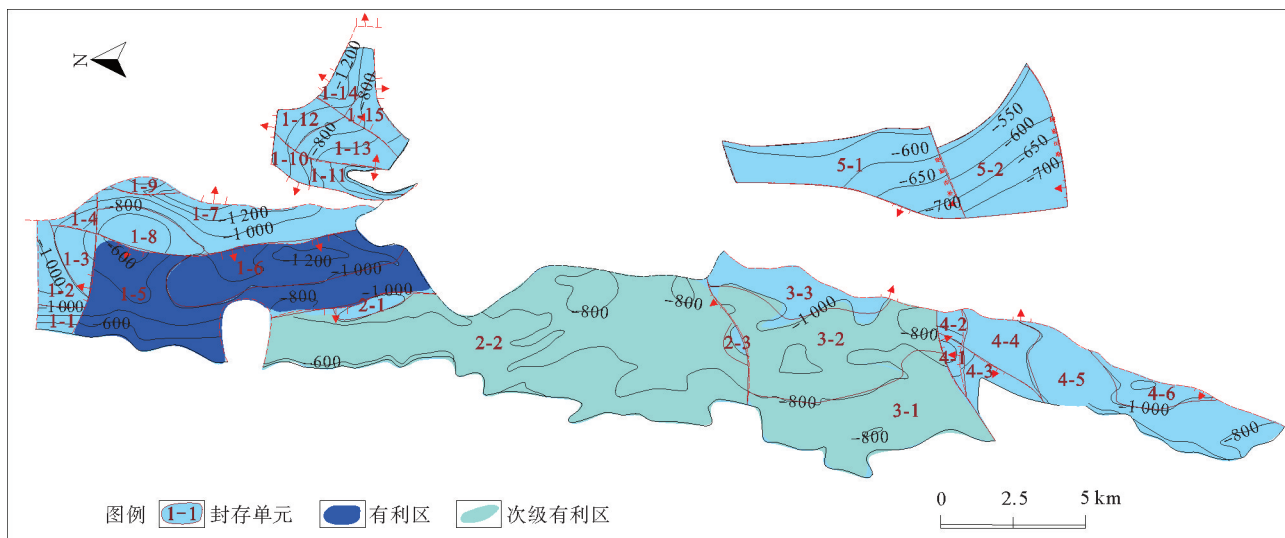


图 9 巨野煤田 CO_2 封存有利区划分图

Fig. 9 Favorable areas for CO_2 storage in Juye Coalfield

5 结论

1) $3^\#$ 煤层温度为 $42.4 \sim 72.5^\circ\text{C}$, 临界深度为 $700 \sim 910 \text{ m}$, 埋深为 $500 \sim 1500 \text{ m}$, 均满足临界深度的要求。目标煤层孔隙度为 $3.51\% \sim 5.27\%$; 渗透率为 $0.12 \sim 0.62 \text{ mD}$, CO_2 吸附量最高为 $0.91 \sim 1.01 \text{ mmol/g}$ 。

2) 研究区构造复杂程度由北至南逐渐降低, 按照断层、构造和煤层展布将研究区划分为 5 个 CO_2 封存区块, 不同埋深条件下的理论单位封存量为 $1.05 \sim 1.10 \text{ mmol/g}$, 随着埋深增大, 单位封存量呈线性变化。5 个区块封存单元的 CO_2 单位封存量为 $1.01 \sim 1.09 \text{ mmol/g}$, 理论封存量为 $0.22 \times 10^7 \sim 114.44 \times 10^7 \text{ t}$, 巨野煤田 CO_2 理论封存总量为 $529.2 \times 10^7 \text{ t}$ 。

3) 随着孔隙度、渗透率和含气量的增加, 封存量和驱替量逐渐增大, 巨野煤田总体具有较好的 CO_2 封存地质条件。其中, 北部的单元 1-5、1-6 构造条件稳定, 封存面积大, 煤层孔渗条件较好, 可作为有利区; 中部的区域 3-1、2-1 煤层孔渗条件较差, 但封存面积大、构造条件稳定, 可作为次级有利区。

本研究主要是对 CO_2 地质封存的初步评价, 后续将把地质风险评价作为 CO_2 地质封存的重点研究内容。

参考文献:

- [1] 张军建, 常象春, 吕大伟, 等. 双碳目标下煤层发育区 CO_2 地质封存研究与评价[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(增 1): 206-214.
ZHANG Junjian, CHANG Xiangchun, LÜ Dawei, et al. Carbon dioxide geological storage system in coal seam development area under the premise of double carbon target[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S1): 206-214.
- [2] MUKHERJEE M, MISRA S. A review of experimental research on enhanced coal bed methane(ECBM) recovery via CO_2 sequestration[J]. Earth-Science Reviews, 2018, 179: 392-410.
- [3] DUTTA P, ZOBACK M D. CO_2 sequestration into the Wyodak coal seam of Powder River Basin: Preliminary reservoir characterization and simulation[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2012, 9: 103-116.
- [4] TURTA A T, SIM S S K, SINGHAL A K, et al. Basic investigations on enhanced gas recovery by gas-gas displacement [C]//Annual Technical Meeting Canadian International Petroleum Conference, Calgary, Jun. 12-14, 2007. 47(10): 39-44.
- [5] 王壹, 杨伟峰, 张旭光, 等. 深部非采煤层 CO_2 封存稳定性模糊综合评判[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增 1): 2932-2939.

- WANG Yi, YANG Weifeng, ZHANG Xuguang, et al. Fuzzy comprehensive evaluation on stability of CO₂ storage in deep non-mining coal seam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S1): 2932-2939.
- [6] 师素珍, 赵康, 高维旭, 等. 复杂煤层 CO₂-ECBM 的地质主控因素评价及有利区优选[J]. 绿色矿山, 2024, 2(2): 160-168.
- SHI Suzhen, ZHAO Kang, GAO Weixu, et al. Evaluation of geological controlling factors of CO₂-ECBM in complex coal seams and optimization of favorable areas[J]. Journal of Green Mine, 2024, 2(2): 160-168.
- [7] 叶建平, 冯三利, 范志强, 等. 沁水盆地南部注二氧化碳提高煤层气采收率微型先导性试验研究[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 77-80.
- YE Jianping, FENG Sanli, FAN Zhiqiang, et al. Micro-pilot test for enhanced coalbed methane recovery by injecting carbon dioxide in south part of Qinshui Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(4): 77-80.
- [8] 刘静, 吴高峰, 郭强. 利用数值模拟技术评价沁水煤田沁县区深部煤层封存 CO₂ 的潜力[J]. 华北国土资源, 2017, 81(6): 70-72.
- [9] 韩美莲, 魏久传. 巨野煤田含煤地层层序单元划分[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2000, 19(1): 33-37.
- HAN Meilian, WEI Jiuchuang. Division of sequence units in the coal measure from Juye coalfield[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2000, 19(1): 33-37.
- [10] 田正军, 朱国维. 基于 MAPGIS 断裂分维值统计分析与应用[J]. 煤炭与化工, 2021, 44(3): 41-43.
- TIAN Zhengjun, ZHU Guowei. Statistical analysis and application of fracture fractal dimension based on MAPGIS[J]. Coal and Chemical Industry, 2021, 44(3): 41-43.
- [11] BACHU S, BONIJOL D, BRADSHAW J, et al. CO₂ storage capacity estimation: Methodology and gaps[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2007, 1: 430-443.
- [12] DUAN Z H, SUN R. An improved model calculating CO₂ solubility in pure water and aqueous NaCl solutions from 273 to 533 K and from 0 to 2 000 bar[J]. Chemical Geology, 2003, 193(3/4): 257-271.
- [13] 刘操, 赵春辉, 钟福平, 等. 深部煤层 CO₂ 地质封存量化评估及案例研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(增 1): 288-298.
- LIU Cao, ZHAO Chunhui, ZHONG Fuping, et al. Quantitative assessment and case study of CO₂ geological storage in deep coal seams[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(S1): 288-298.
- [14] 韩思杰, 桑树勋, 段飘飘, 等. 改进的深部煤层 CO₂ 地质封存潜力评价方法: 以沁水盆地郑庄区块 3[#] 煤层为例[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(4): 772-788.
- HAN Sijie, SANG Shuxun, DUAN Piaopiao, et al. Modified assessment method of CO₂ geologic storage capacity in deep coal and its application in the Zhengzhuang Block, Qinshui Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(4): 772-788.
- [15] WU M, QIN Y, ZHANG Y Y, et al. Influence factors and feasibility evaluation on geological sequestration of CO₂ in coal seams: A review[J]. ACS Omega, 2023, 8(19): 16561-16569.
- [16] 张小强, 王文伟, 姜玉龙, 等. 超临界 CO₂ 作用下煤岩组合体力学特性损伤及裂隙演化规律[J]. 煤炭学报, 2023, 48(11): 4049-4064.
- ZHANG Xiaoqiang, WANG Wenwei, JIANG Yulong, et al. Mechanical properties and fracture damage law of coal-rock composition under the action of supercritical CO₂[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(11): 4049-4064.
- [17] HAN S J, SANG S X, ZHANG J C, et al. Assessment of CO₂ geological storage capacity based on adsorption isothermal experiments at various temperatures: A case study of No. 3 coal in the Qinshui Basin[J]. Petroleum, 2023, 9(2): 274-284.
- [18] 李采, 郭朝斌, 李霞, 等. 地质调查助力碳达峰碳中和目标实现的路径浅析[J]. 中国地质调查, 2021, 8(4): 1-12.
- LI Cai, GUO Chaobin, LI Xia, et al. Analysis of the role of geological survey on the roadmap design for realizing the goal of carbon emissions peak and carbon neutrality[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(4): 1-12.
- [19] 朱阳升, 宋学行, 郭印同, 等. 四川盆地龙马溪组页岩的 CH₄ 和 CO₂ 气体高压吸附特征及控制因素[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(10): 1942-1952.
- ZHU Yangsheng, SONG Xuexing, GUO Yintong, et al. High-pressure adsorption characteristics and controlling factors of CH₄ and CO₂ on shales from Longmaxi Formation, Chongqing, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(10): 1942-1952.
- [20] 邢丽茹, 张洲, 任峻杉, 等. 准噶尔盆地深部与浅部煤层气储层物性特征对比分析[J]. 中国煤炭, 2024, 50(9): 9-17.
- XING Liru, ZHANG Zhou, REN Junshan, et al. Comparative analysis of physical properties of deep and shallow CBM reservoirs in Junggar Basin[J]. China Coal, 2024, 50(9): 9-17.