基于组合赋权与三维建模的页岩地层 CO_2 封存密封性评价方法

于兴川[1]，石祥超[1]，刘建锋[2]，高雷雨[1,3]，范存辉[1]，周小力[1]

（1. 西南石油大学 油气藏地质及开发工程全国重点实验室，四川 成都 610500；2. 四川大学 水利水电学院，四川 成都 610065；
3. 大庆油田有限责任公司 采油工艺研究院，黑龙江 大庆 163000）

摘要：现有静态密封性评价方法对非均质页岩地层的适用性较差。为提高 CO_2 地质封存储层静态密封性评价结果的表征能力和客观性，提出并应用了创新方法：在传统评价框架中引入三维非均质模型；结合层次分析法（AHP）与熵权法（EWM）建立综合加权策略，以降低主观偏差的影响。研究结果表明：（1）基于非均质模型的评估结果（5.84～9.95 分）显示，储层大部分区域的密封性满足封存要求，但局部存在泄漏风险，有效克服了均质模型表征不足及结果过于乐观的问题；（2）AHP 与 EWM 计算的主要影响因素权重系数平均一致性达 83.3%，验证了综合加权策略在消除主观干扰方面的有效性。该方法显著提升静态密封性评估的可信度，为 CO_2 地质封存项目提供高效且理论支撑充分的评估框架。

关键词：岩石力学；CO_2 地质封存；密封性评价；三维非均质模型；层次分析法；熵权法

中图分类号：TU 45 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－6915(2025)11－3011－13

Evaluation method for CO_2 sealing integrity in shale formations based on combined weighting and 3D modeling

YU Xingchuan[1], SHI Xiangchao[1], LIU Jianfeng[2], GAO Leiyu[1,3], FAN Cunhui[1], ZHOU Xiaoli[1]

(1. *State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation*, *Southwest Petroleum University*, *Chengdu*, *Sichuan* 610500, *China*; 2. *College of Water Resources and Hydropower*, *Sichuan University*, *Chengdu*, *Sichuan* 610065, *China*;
3. *Production Technology Institute*, *Daqing Oil Field Company Limited*, *Daqing*, *Heilongjiang* 163000, *China*)

Abstract: Existing static sealing evaluation methods exhibit limited applicability to heterogeneous shale formations. To enhance the representativeness and objectivity of evaluation results for the static sealing of CO_2 geological storage reservoirs, this study proposes and implements innovative approaches: introducing a three-dimensional heterogeneous model into the traditional evaluation framework; and combining the analytic hierarchy process (AHP) with the entropy weight method (EWM) to establish a comprehensive weighting strategy that minimizes the impact of subjective bias. The research findings indicate that: (1) the evaluation results based on the heterogeneous model (5.84－9.95 points) demonstrate that the sealing performance in most areas of the reservoir meets storage requirements, although there exists a localized leakage risk, effectively addressing the

收稿日期：2025－06－12；**修回日期：**2025－08－06

基金项目：国家自然科学基金重点项目（企业联合基金）（U24B2038）；国家自然科学基金重点项目（地区联合基金）（U20A20266）

Supported by the Key Program of Enterprise Joint Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U24B2038) and Key Program of Regional Joint Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U20A20266)

作者简介：于兴川（1996－），男，2019 年于西南石油大学石油与天然气工程专业获硕士学位，现为博士研究生，主要从事 CO_2 封存盖层完整性方面的研究工作。E-mail：202211000063@stu.swpu.edu.cn。通讯作者：石祥超(1981－)，男，博士，现任教授、博士生导师。E-mail：sxcdream@163.com

DOI：10.3724/1000-6915.jrme.2025.0412

issues of inadequate characterization and overly optimistic outcomes associated with homogeneous models; and (2) the average consistency of the weight coefficients for the primary influencing factors, calculated using AHP and EWM, reaches 83.3%, confirming the effectiveness of the comprehensive weighting strategy in mitigating subjective interference. This method significantly enhances the credibility of static sealing evaluations, providing an efficient and theoretically robust evaluation framework for CO_2 geological storage projects.

Key words: rock mechanics; CO_2 geological storage; sealability evaluation; 3D heterogeneous model; analytic hierarchy process(AHP); entropy weight method(EWM)

1 引 言

面对当前全球性气候危机，急需探索快速有效的地质封存技术以实现碳减排目标[1-2]。得益于页岩岩性致密的特征，广泛分布的页岩为 CO_2 封存提供了巨大的理论封存空间[3-4]。更有研究表明，页岩中干酪根等组分可对 CO_2 产生吸附作用有效促进固碳作用[5-6]。而构建适用于页岩储层的静态密封性综合评价体系，成为保障封存工程长期安全性与稳定性的关键问题[7-8]。

静态密封性评价的关键问题之一是明确主要影响因素。当前静态密封性评价方法流程可以总结为：首先确定影响因素并进行分级评分，其次确定影响因素的权重系数，最后采用加权求和的方法得出最终评价结果[9-11]。其中，影响密封性的因素主要可以分为泄漏通道、岩石属性及地层几何尺寸三大类。泄漏通道评价方面，当前研究中主要考虑了盖层中的断层与裂缝，通过主观评级与量化分析，得出其对密封性影响程度的结论[12-15]。岩石属性评价方面，主要根据盖层岩性及其对应的属性如孔隙度、渗透率、排替压力进行量化评价[16-17]。几何尺寸方面主要通过对封存盖层的厚度判断泄漏难易程度，通过盖层连续性及面积判断封存容量[18-20]。在当前研究中，影响因素的权重系数主要基于层次分析法确定，通过 Saaty 数字标度法[21]对影响因素进行主观重要性排序，以此结果构建判断矩阵并计算得到影响因素权重系数。不同研究对密封性评价参数的选择呈现明显差异：一类聚焦盖层静态封闭能力，强调岩性、厚度、连续性、突破压力及矿物组成等传统指标，并针对氢储引入地层水酸碱性与矿物反应性等特殊因素；另一类关注动态密封性，引入断层滑移、盖层疲劳损伤、应力敏感性及多周期注采影响；盐穴类储库则突出盐层厚度、不溶物含量、夹层性质及顶底板力学稳定性。总体来看，评价因素的选取通常依据研究区块的地质特征及运行工况等差异而灵活调整。

目前大多数静态密封性评价方法主要针对储气库，关于 CO_2 封存尤其是页岩地层 CO_2 封存相关方法甚少。且当前评价方法存在以下局限性：首先，当前评价中影响因素多采用均质属性进行评价，缺乏对地层非均质性的考虑，导致评价结果缺乏代表性，无法真实反映地层密封性状态。其次，层次分析法中影响因素排序环节存在专家经验依赖性，受主观认知偏差影响，可能导致评价结果无法公正客观。

针对现有静态密封性评价方法的不足，本研究通过构建影响因素三维模型，在静态密封性评价体系中加入地层非均质性的考虑。创新性地引入熵权法进行权重优化，最终构建出基于层次分析法－熵权法的三维非均质地层静态密封性评价方法。该方法在现有静态密封性方法基础上，进一步提高了评价结果的科学性与可用性。

2 区块背景

目标区块选取四川南部某区块，构造位置位于四川盆地川南褶皱带与滇黔北凹陷的娄山断褶带的交界部位，且娄山断褶带在此由北东向转为近东西延伸，因此形成了具有多种构造形貌的杂糅组合。

区块内发育震旦系至侏罗系地层，缺失泥盆系和石炭系。背斜核部出露寒武系筇竹寺组、奥陶系五峰组及志留系龙马溪组，两翼主要为二叠系—三叠系[22-23]。页岩层系集中于筇竹寺组、五峰组—龙马溪组及龙潭组，其中五峰组—龙马溪组为页岩气主力产层，整合接触且富有机质[24-25]。受喜马拉雅期挤压影响，区块发育多级逆冲断层体系，构造样式以厚皮构造为主，受基底滑脱层(中寒武统膏岩)和次级滑脱层(筇竹寺组泥页岩)控制，形成逆冲断层、叠瓦构造及背冲断层[26]。五峰组—龙马溪组以硅质页岩为主，脆性矿物含量一般＞55%。岩相纵

向上呈钙质硅质混合页岩→硅质页岩→黏土质硅质混合页岩过渡，横向上由南向北硅质含量增高。微孔隙与裂缝(穿层剪切缝、层内扩张缝)发育，孔隙度平均 5%左右[25]。燕山期以来经历四期挤压变形，形成 NW 向主体构造及 NE 向叠加构造，导致背斜核部抬升剥蚀强烈，向斜区保存条件较好，是页岩气富集有利区[26]。

页岩气生产后期枯竭地层为 CO_2 封存理想场所，生产井可作为 CO_2 注入通道，在实现 CO_2 封存的同时可一定程度提高页岩气开采后期的产量[27]。为了保障 CO_2 有效封存，对页岩地层的静态密封性评价就显得尤为重要。图 1 为研究区块高程图，图中虚线框位置为本次研究区域。

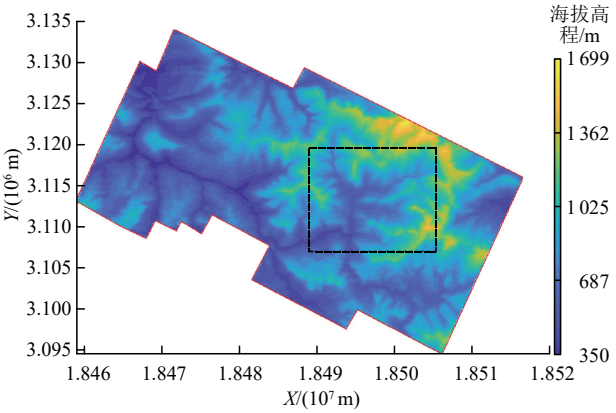


图 1　川南某区块研究区位置及高程示意图

Fig.1　Schematic diagram of the location and elevation of a certain block in south Sichuan

本研究选取脆性指数、岩性、地层厚度、地层渗透率、裂缝发育强度和毛细管压力 6 个影响因素研究地层静态密封性。综合层次分析法与熵权法的优点，计算了影响因素的权重，并对影响因素的三维模型进行了分级评分，最终对地层静态密封性进行了综合评价。

3　静态密封性评价方法的建立

3.1　影响因素权重系数的计算

(1) 层次分析法(AHP)

层次分析法是多因素影响下制定决策的有效工具。该方法以基于影响因素构建的主观重要性判断矩阵为基础[21, 28]，计算得到每种影响因素的权重系数，在此基础上结合影响因素的分级评分结果得出最终密封性评价得分。层次分析法层级结构如图 2 所示。

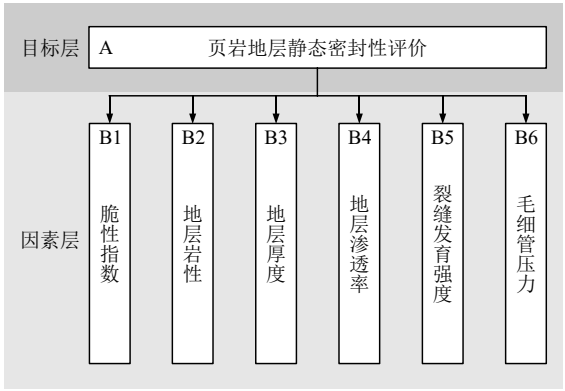


图 2　层次分析法的层级结构

Fig.2　AHP hierarchical structure

采用 Saaty 数字标度法[29-30]对影响因素对密封性影响的重要程度进行排序，影响因素重要性即判断矩阵如表 1 所示。

表 1　层次分析法判断矩阵

Table 1　AHP judgment matrix

影响因素名称	脆性参数	地层岩性	地层厚度	渗透率	裂缝发育强度	毛细管压力
脆性指数	1	1/3	1/5	1/7	1/7	1/9
地层岩性	3	1	1/3	1/5	1/7	1/7
地层厚度	5	3	1	1/3	1/5	1/7
渗透率	7	5	3	1	1/3	1/5
裂缝发育强度	7	7	5	3	1	1/3
毛细管压力	9	7	7	5	3	1

基于表 1 构建判断矩阵进行层次分析法分析，下面给出层次分析法具体计算公式。该方法首先要根据因素重要性构建判断矩阵：

$$\boldsymbol{P}=(p_{ij})_{n\times n}=\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{11} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix} \tag{1}$$

根据判断矩阵，计算其特征向量：

$$\overline{\omega}_i=\left(\prod_{j=1}^{n} p_{ij}\right)^{1/n} \quad (i,\ j=1,\ \cdots,\ n) \tag{2}$$

根据矩阵的特征向量计算向量归一化值，该值即为各影响因素的加权系数：

$$\omega_i=\omega_i\Big/\left(\sum_{j=1}^{n}\overline{\omega}_j\right) \quad (i=1,\ \cdots,\ n) \tag{3}$$

为了验证结果的合理性，需要对计算结果进行一致性检验：

$$\lambda_{\max}=\left\{\sum_{i=1}^{n}[(P\omega)_i/\omega_i]\right\}\Big/n \tag{4}$$

$$CR=[(\lambda_{\max}-n)/(n-1)]/RI \tag{5}$$

式中：$\lambda_{\max}$ 为最大特征根，RI 为随机一致性指标，CR 为一致性比率。通过一致性检验表明，计算结果逻辑合理。

(2) 熵权法(EWM)

熵权法(EWM)是以客观数据为驱动的多因素决策方法，该方法以数据分布的集中程度判断数据的重要性高低[31-32]。将原始数据矩阵进行标准化，消除量纲差异，设共有 m 个样本，n 个指标，则原始数据矩阵为

$$\boldsymbol{X}=(x_{ij})_{m\times n} \tag{6}$$

正向指标为

$$x'_{ij}=\frac{x_{ij}-\min(x_j)}{\max(x_j)-\min(x_j)} \tag{7}$$

负向指标为

$$x'_{ij}=\frac{\max(x_j)-x_{ij}}{\max(x_j)-\min(x_j)} \tag{8}$$

对标准化后的矩阵 $\boldsymbol{X}'$ 计算每个样本在指标 j 下的比重 p_{ij}：

$$p_{ij}=\frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}x'_{ij}} \tag{9}$$

计算每个指标的信息熵 e_j：

$$e_j=-\frac{1}{\ln m}\sum_{1}^{m}p_{ij}\ln(p_{ij}) \tag{10}$$

计算反应指标信息量的差异系数 d_j：

$$d_j=1-e_j \tag{11}$$

确定最终权重 v_j (为差异系数归一化结果)：

$$v_j=\frac{d_j}{\sum_{j=1}^{n}d_j} \tag{12}$$

3.2 静态密封性三维属性建模与分级评分

影响因素三维模型根据单井测井数据插值或计算得到，裂缝发育强度则根据勘探地震数据体以及成像测井数据得到。下面将对每种影响因素建模方法进行介绍。

地层是阻止封存 CO_2 垂直迁移的直接对象，而地层厚度又是影响密封性最直接的参数。地层厚度模型为地层的顶、底面的差值。图 3，4 分别为该地层的顶面和底面数据，2 个面都呈现一种向斜构造形态，中间低四周高。

不同岩性存在不同的孔渗特征，从岩性基本可以对地层的密封能力进行初步判断，这一结论已经在吕延防等[33-34]研究中给出。本文通过测井数据中的自然伽马数据(见图 5(a))判断对应的岩性，图中

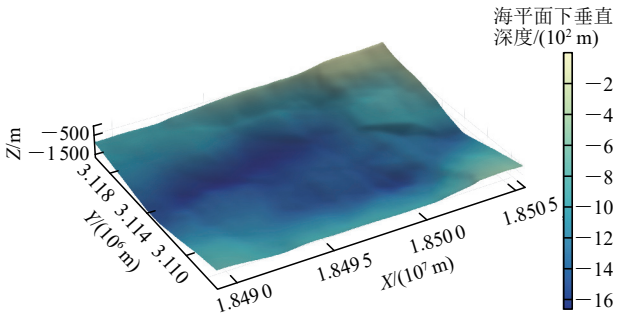


图 3　研究区域地层顶面三维模型

Fig.3　3D model of the top surface of the stratum in the study area

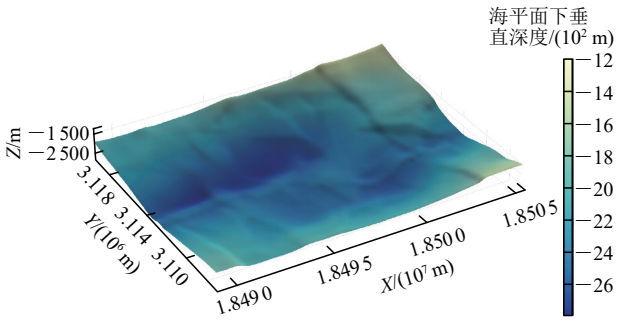
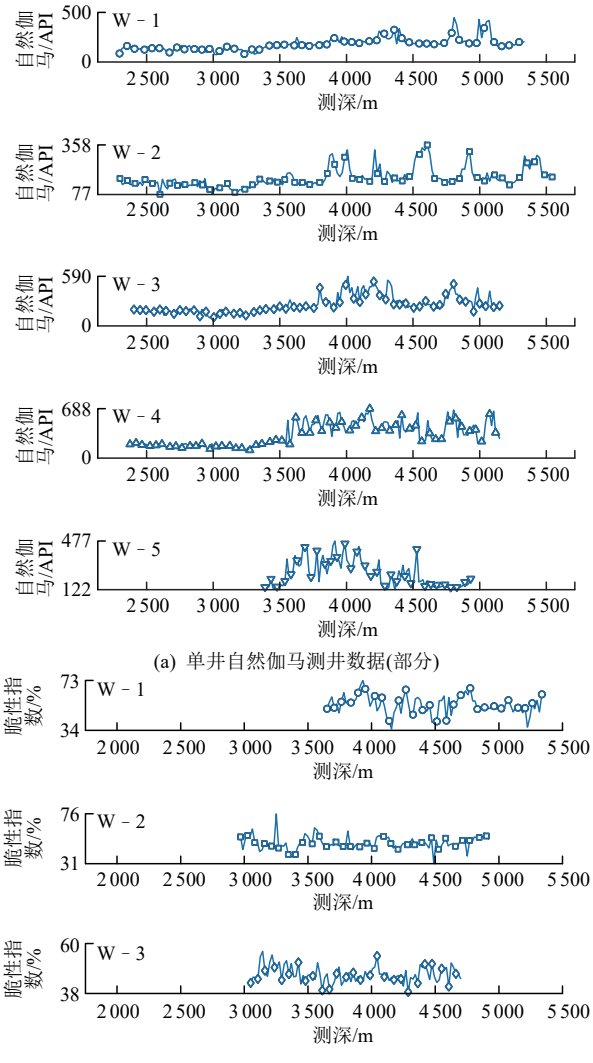
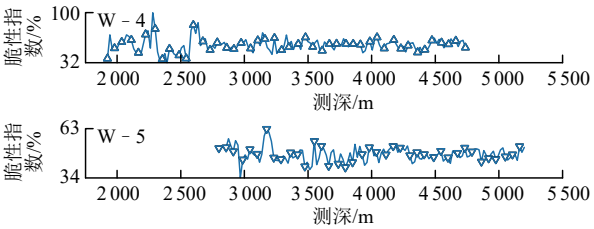


图 4　研究区域地层底面三维模型

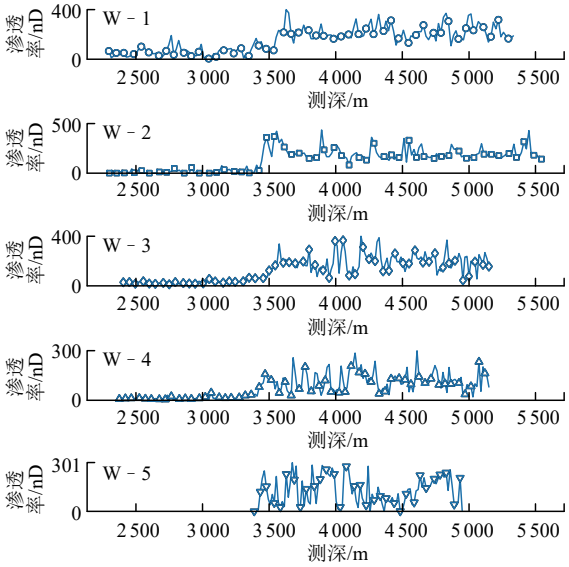
Fig.4　3D model of the bottom surface of the stratum in the study area



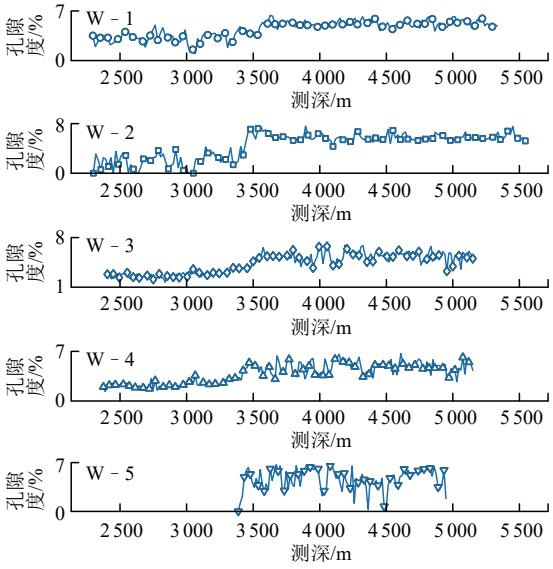
(a) 单井自然伽马测井数据(部分)



(b) 单井脆性指数测井数据(部分)



(c) 单井渗透率测井数据(部分)



(d) 单井孔隙度测井数据(部分)

图 5　研究区域部分单井测井曲线数据

Fig.5　Log data of some single wells in the study area

5 口井的数据是本研究使用的部分数据，纵坐标上、下 2 个数字分别为每口井对应的最大值和最小值。将自然伽马数据＞100 定义为页岩，将数值＜100 定义为砂岩。大部分数据都在 100 以上，为页岩，岩性符合区块特征。将通过井间数据插值的方法建立研究区域岩相模型，后续也会将该数据作为相控数据，建立孔渗参数三维模型。

脆性指数是页岩地层水力压裂有利区评价的重要参数，较大的脆性指数意味着更容易压裂成缝，同时也意味着更容易产生泄漏通道。从图 5(b)可以看出，研究区域脆性普遍偏高。脆性指数三维模型同样以测井数据为基础，通过克里金井间插值方法得到[35]。

渗透率是反映地层渗流能力的重要参数之一，较大的渗透率将导致封存 CO_2 更容易泄漏。从图 5(c)可以看出，研究区域渗透率极低，最高仅 500 nD 左右。渗透率三维模型的建模方法是在测井数据的基础上进行井间插值，在建模过程中利用岩相模型控制每种岩相的渗透率分布。

毛细管压力是判断封存是否发生毛细管封存失效的重要判据，其数值与孔隙度密切相关[36]。从图 5(d)中可看出，研究区域孔隙度较小，最大孔隙度仅为 8%。本文通过两者关系模型将毛细管压力三维模型与孔隙度模型结合，其计算公式[37]如下：

$$P_c = 24.799\phi^{-0.818\,9} \tag{13}$$

式中：P_c 为毛细管压力，ϕ 为孔隙度。

而三维孔隙度模型则根据测井数据，采用岩相模型控制下的井间插值方法得到，其方法与渗透率三维模型建模方法一致。需要额外说明的是，在地层基质渗透率的基础上增加了大裂缝的考虑。通过裂缝与网格体积的关系计算得到大尺度裂缝的孔隙度模型(见图 6)，与基质孔隙度模型相加得到最终的孔隙度三维模型(见图 7)。

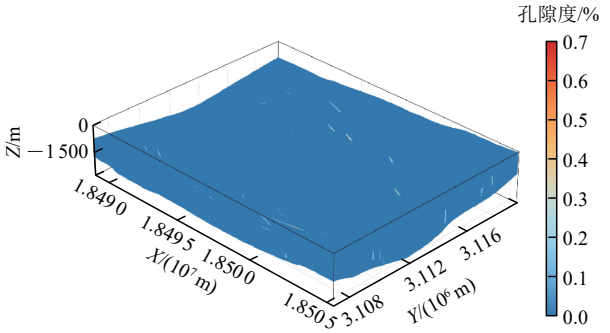


图 6　大尺度裂缝的孔隙度模型

Fig.6　Large-scale fracture porosity model

地层裂缝是 CO_2 泄漏的主要通道，也是静态密封性研究中的重点。本文中的裂缝发育强度模型通过综合单井成像测井与地震属性数据获得。单井裂缝密度数据如下，从图 8 中可以看出，在测深 2 850 和 3 150 m 附近裂缝密度较大。

通过对单井裂缝与地震属性相关性的排序，优选出 4 个与单井裂缝密度数据相关性较高的地震属性(见图 9～12)，再通过神经网络融合的方法，将 4

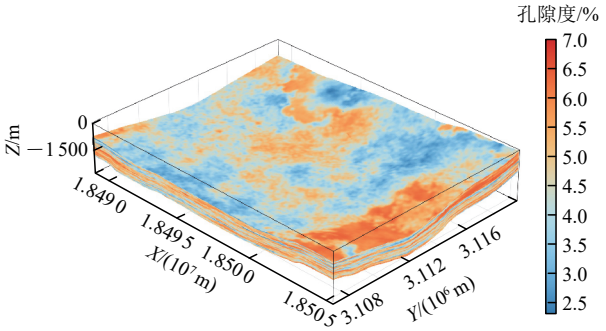


图 7　总孔隙度三维模型

Fig.7　Total porosity 3D model

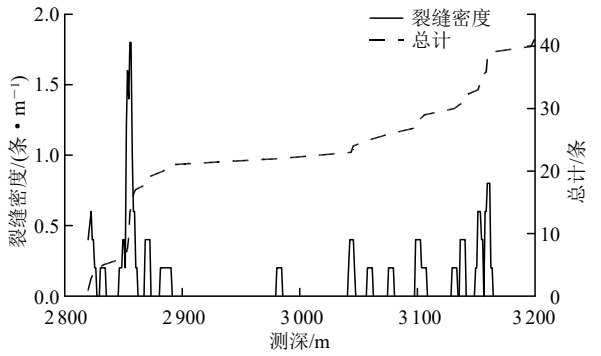


图 8　基于成像测井的裂缝密度曲线

Fig.8　Fracture density curve based on imaging logs

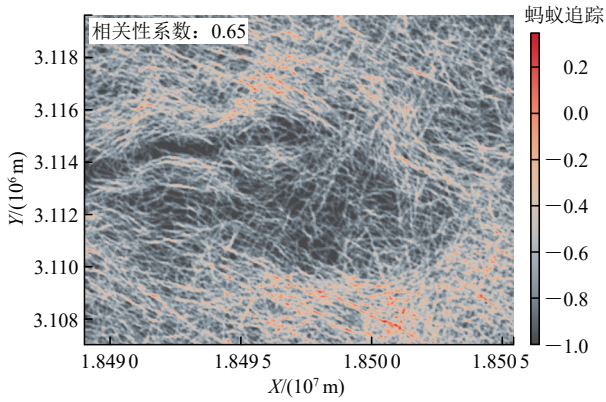


图 9　蚂蚁追踪地震属性平面图及其单井数据相关性

Fig.9　Ant tracking seismic attribute map and its correlation with single well data

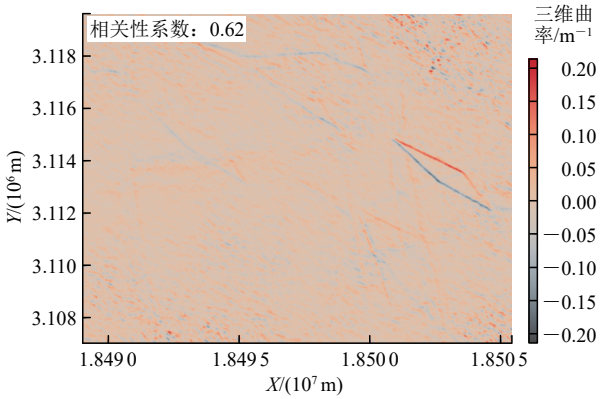


图 10　三维曲率地震属性平面图及其单井数据相关性

Fig.10　3D curvature seismic attribute map and its correlation with single well data

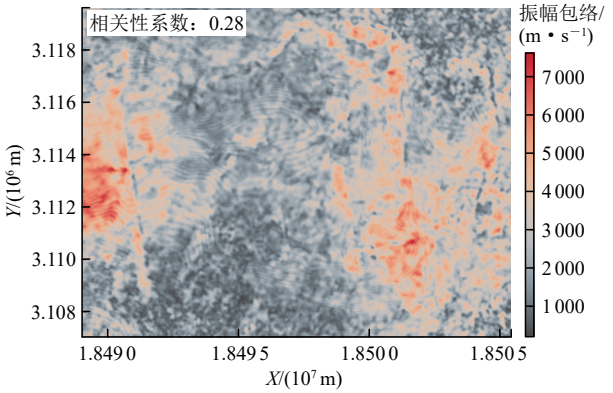


图 11　振幅包络地震属性平面图及其单井数据相关性

Fig.11　Envelope seismic attribute map and its correlation with single well data

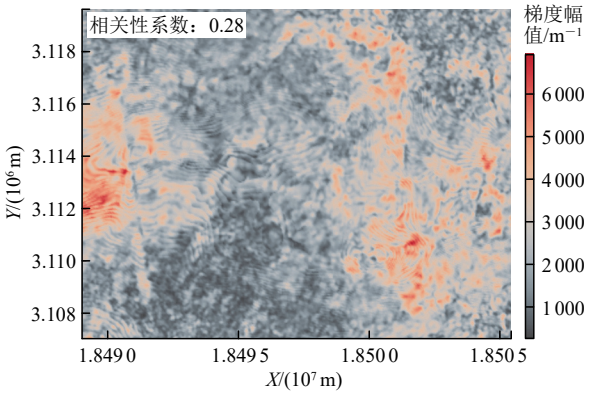


图 12　梯度幅值地震属性平面图及其单井数据相关性

Fig.12　Gradient Magnitude seismic attribute map and its correlation with single well data

种相关性高的属性体进行融合，进一步提高其与裂缝密度的相关性，融合后属性与裂缝密度的相关性提高至 0.66(见图 13)。

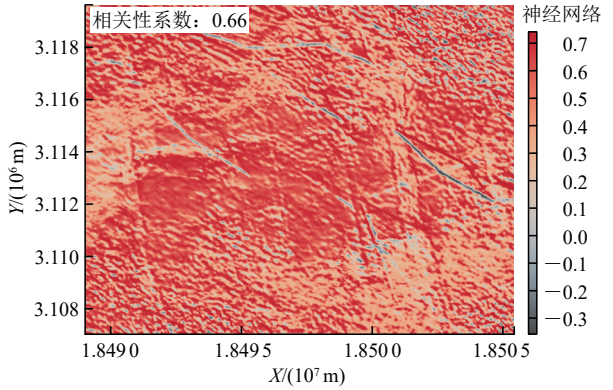


图 13　神经网络融合属性平面图及其单井数据相关性

Fig.13　Neural network fusion attribute map and its correlation with single well data

基于神经网络融合的地震属性体和单井裂缝密度数据，采用井间插值方法获得裂缝发育强度三维数据体(见图 14)，用于后续的密封性评价研究。

依据区块影响因素客观情况及相关密封性评价标准，建立了研究区域的密封性影响因素的单项

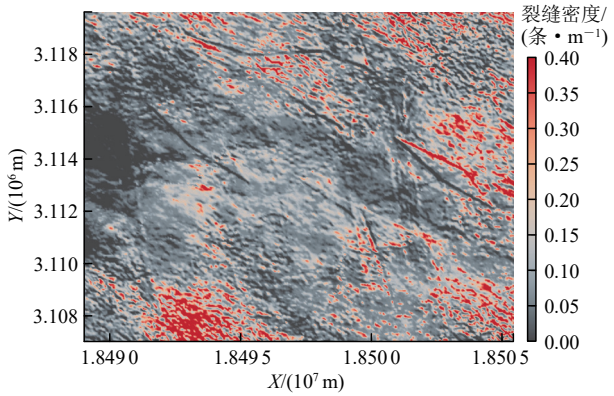


图 14　基于单井与神经网络数据的裂缝发育强度模型

Fig.14　Fracture development intensity model based on single well and neural network data

评价标准以及对应的分数(见表 2)。通过对建立的三维属性体进行分级评分，得到每种影响因素的得分三维模型。

表 2　静态密封性影响因素评价分级

Table 2　Static sealing influence factor evaluation classification

类型	评价参数						
	脆性指数/%	地层岩性	地层厚度/m	地层渗透率/mD	裂缝发育强度/(条 • m⁻¹)	毛细管压力/MPa	评价得分
I	＜40	盐岩、膏岩	＞300	＜0.001	0.1	＞10	10
II	40～50	泥岩为主	150～300	0.001～0.01	0.1～0.2	5～10	8
III	50～60	粉砂质泥岩为主	50～150	0.01～0.1	0.2～0.3	1～5	6
IV	＞60	砂泥岩互层	＜50	＞0.1	＞0.3	＜1	4

3.3　权重系数组合赋权与加权求和

在依据层次分析法与熵权法分别计算得到影响因素权重系数的基础上，利用下式进行权重系数的协同优化处理：

$$\alpha_i = \frac{\omega_i v_j}{\sum \omega_i v_j} \tag{14}$$

在协同优化后的权重系数基础上，结合影响因素分级评分三维模型，采用下式计算最终静态密封性得分：

$$M = \sum_{i=1}^{6} \alpha_i m_i \tag{15}$$

式中：M 为静态密封性评价得分，m_i 为影响因素分析评分结果。

由此可以得到静态密封性评价得分三维模型。概括来说，本研究针对静态密封性评价，首先优选了 6 种显著影响因素并进行了三维建模；随后，建立了这些因素的分级评分标准并完成评分。在此基础上，分别运用 AHP 依据专家判断对因素重要性排序并计算其主观权重系数，以及采用 EWM 基于因素数据分布的离散程度计算其客观权重系数。通过对比 2 种方法所得的权重系数，验证了 AHP 中因素排序的合理性，并采用组合赋权法将主客观权重进行融合，得到综合权重系数。最终，基于该综合权重系数和各影响因素的评分结果，通过加权求和计算得出静态密封性的综合评价结果。

4　静态密封性评价结果

4.1　静态密封性影响因素属性模型

图 15 为脆性指数三维模型。研究区域的脆性指数分布在 35%～65%范围内，数据分布范围较广且无明显规律。脆性指数越大，岩石越容易被压裂，因此较高的脆性指数不利于地层的密封性。图 16 为岩性分布模型，其中数字“1”和“0”分别代表泥岩和砂岩，研究区域以页岩居多，砂岩占小部分。

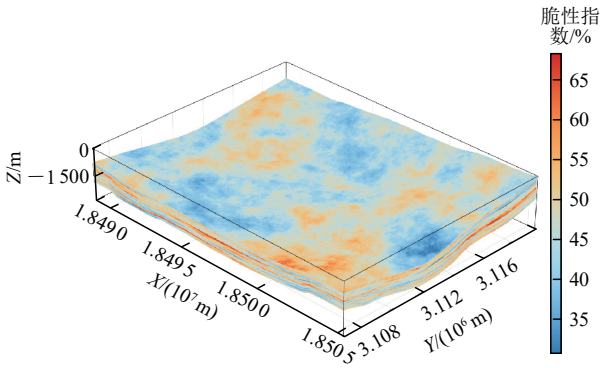


图 15　脆性指数三维非均质模型

Fig.15　3D heterogeneous brittleness index model

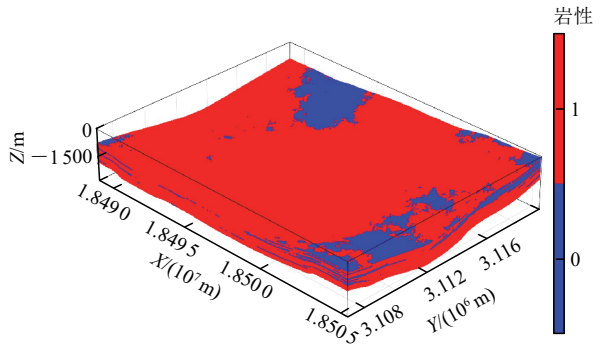


图 16　砂岩和泥岩三维分布非均质模型

Fig.16　3D heterogeneous model of sandstone and mudstone distribution

图 17 为裂缝发育强度三维模型。研究区域裂缝发育强度分布为 0～0.4 条/m。裂缝发育强度较大的位置主要分布于区域边缘的背斜部位。裂缝发

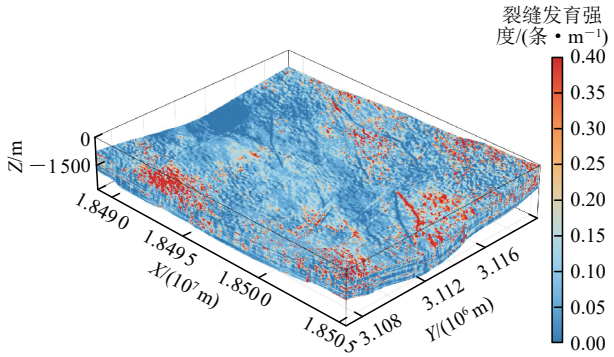


图 17　裂缝发育强度三维非均质模型

Fig.17　3D heterogeneous fracture development intensity model

育强度越大，越可能形成泄漏通道，对地层密封性造成负面影响。图 18 为根据孔隙度数据建立的毛细管压力三维模型的数值范围为 6～12 MPa，数值大多集中于 8 MPa 以下。较高的毛细管压力能有效阻止流体通过地层孔隙通道泄漏，因此毛细管压力与地层密封性呈正相关关系。

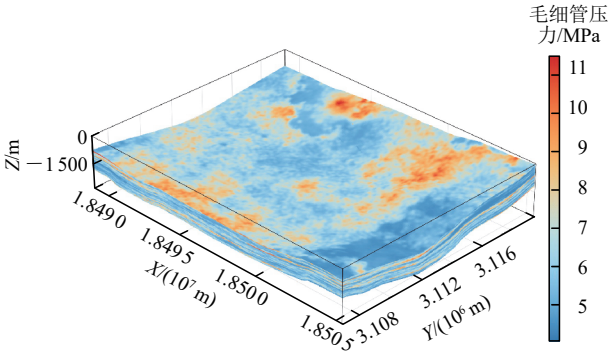


图 18　毛细管压力三维非均质模型

Fig.18　3D heterogeneous capillary pressure model

图 19 为渗透率三维非均质模型。研究区域为页岩地层，渗透率极低，数值范围为 0.000 05～0.000 5 mD。极低的渗透率有利于地层的密封性。图 20 为利用地层厚度数据建模得到的地层厚度三维模型。研究区域地层厚度为 200～500 m，较厚的地层集中于区域东北部，向 WS 方向厚度逐渐降低。

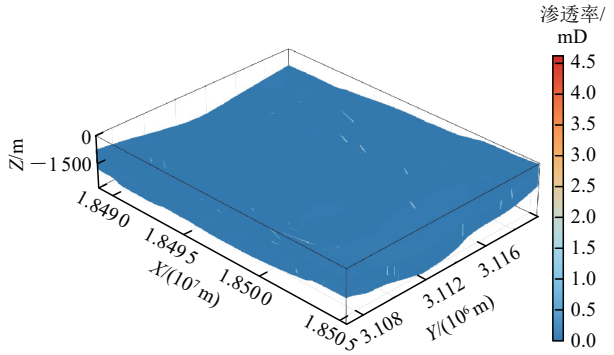


图 19　渗透率三维非均质模型

Fig.19　3D heterogeneous permeability model

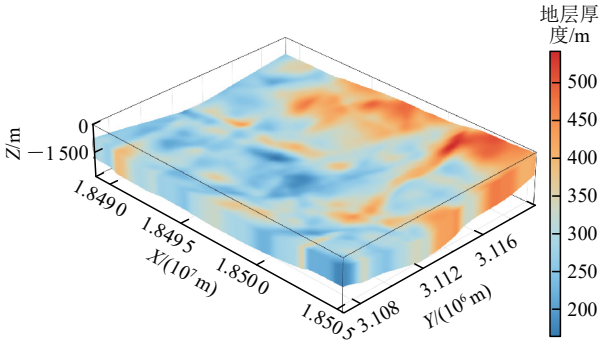


图 20　地层厚度三维非均质模型

Fig.20　3D heterogeneous stratigraphic thickness model

4.2　静态密封性影响因素分级与评价

图 21 为脆性指数的分级评分结果。评价结果在 4 个等级内均有分布。从色标右侧的直方图可以看出，等级 II 和 III 的结果居多，少量位置分布于等级 I 和 IV。图 22 为岩相的分级评分结果。研究区域仅存在 2 种岩性(页岩和砂岩)，因此分级评分结果中仅包含等级 II 和 IV。

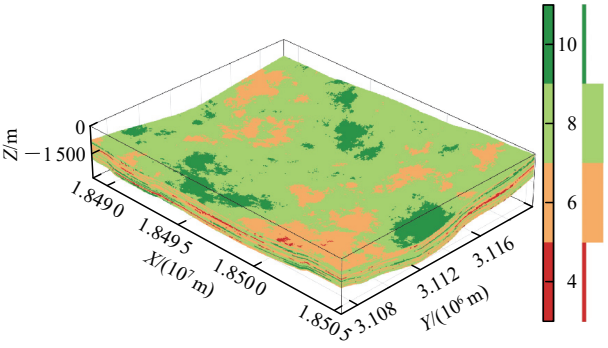


图 21　脆性指数三维非均质模型分级评分结果

Fig.21　Graded evaluation results of 3D heterogeneous brittleness index model

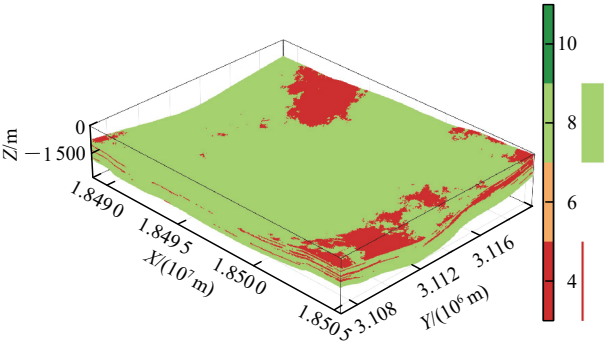


图 22　岩相的三维非均质模型分级评分结果

Fig.22　Graded evaluation results of the 3D heterogeneous lithofacies model

图 23 为裂缝发育强度的分级评分结果。评分结果主要分布于等级 I 中，少量分布在其他等级，其中等级 IV 的分布最少。图 24 为毛细管压力的分级评分结果。从图中可以看出，结果主要分布于等级 II 中，少量分布于等级 III 和 I 中。

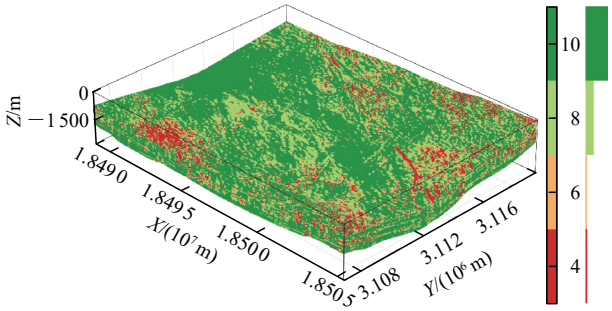


图 23　裂缝发育强度三维非均质模型分级评分结果

Fig.23　Graded evaluation results of the 3D heterogeneous fracture development intensity model

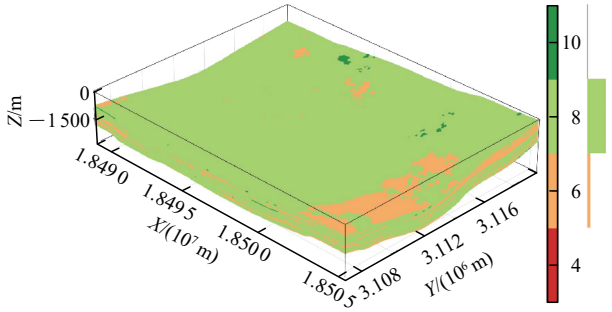


图 24　毛细管压力三维非均质模型分级评分结果

Fig.24　Graded evaluation results of the 3D heterogeneous capillary pressure model

图 25 为渗透率的分级评分结果。从图中可以明显看出，由于整体渗透率极低，仅有小部分区域受大尺度裂缝影响处于等级 II，大部分区域处于等级 I。图 26 为地层厚度的分级评分结果。分级评价结果分布在等级 I 和 II 中，其中等级 I 占比稍高。

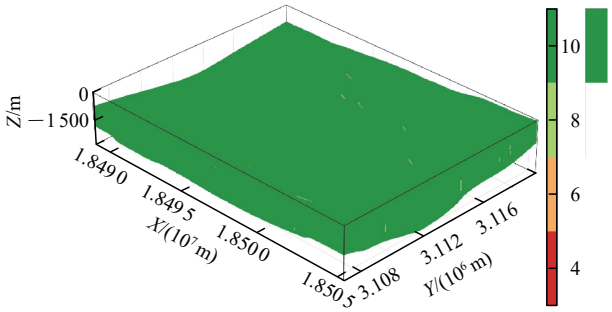


图 25　渗透率三维非均质模型分级评分结果

Fig.25　Graded evaluation results of the 3D heterogeneous permeability model

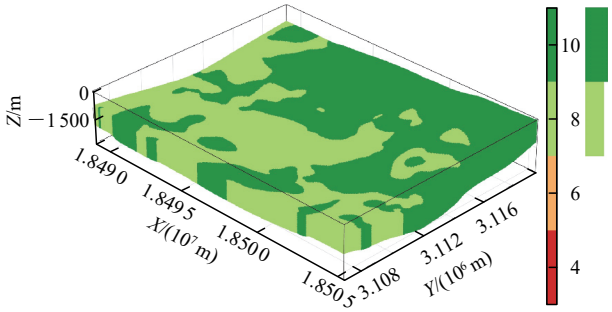


图 26　地层厚度三维非均质模型分级评分结果

Fig.26　Graded evaluation results of the 3D heterogeneous formation thickness model

4.3　静态密封性综合评价结果

通过 2 种方法(AHP 和 EWM)分别计算以及协同优化得到的各影响因素权重系数如表 3 所示。通过对计算结果分析发现，AHP 和 EWM 均认为毛细管压力是对静态密封性影响最大的因素，其权重值大致相同，分别约为 0.45 和 0.411 7。对协同优化后的权重系数分析发现，毛细管压力的权重进一步提高至约 0.79；脆性指数是影响最小的因素，权重系数仅约为 0.01。

表 3　影响因素权重系数计算结果

Table 3　Influence factor weight coefficients calculation results

影响因素	AHP 权重系数	EWM 权重系数	吻合度/%	协同优化权重系数
脆性指数	0.024 1	0.121 6	20	0.012 5
渗透率	0.144 5	0.142 3	98	0.022 8
岩相	0.041 7	0.037 0	89	0.025 3
裂缝发育强度	0.261 4	0.159 1	61	0.106 0
毛细管压力	0.452 7	0.411 7	91	0.792 3
地层厚度	0.075 5	0.128 2	59	0.041 2

静态密封性评分结果如图 27 所示，从图中可以看出研究区域的密封性存在差异：区块四周的密封性相较于区块中央差。图 28 为静态密封性评分

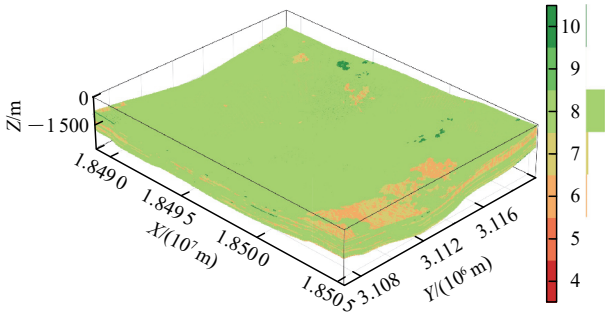


图 27　静态密封性评分结果

Fig.27　Static sealing evaluation results

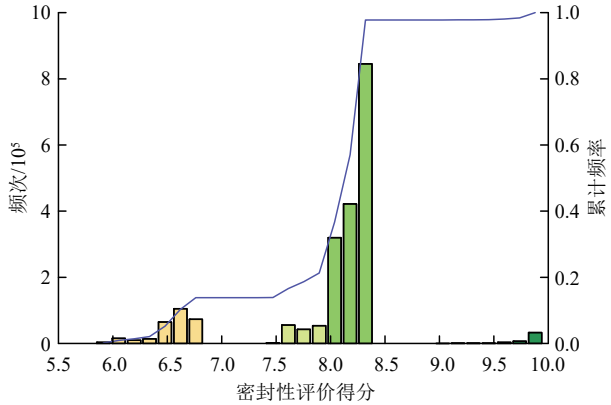


图 28　静态密封性评分的分布直方图

Fig.28　Evaluation results distribution histogram

的分布直方图。从图中可以看出，该区块密封性评分为 5.84～9.95 分，分数主要集中在 8～8.5 分范围。从累计分布曲线可以看出，该区块大部分区域评分较高，评分低的区域仅占小部分。

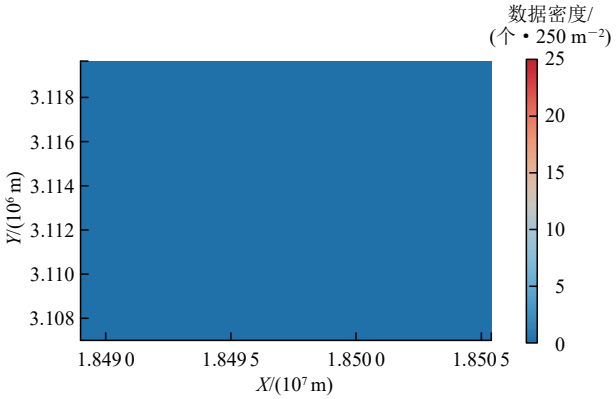
结合表 4 中的标准进行进一步等级评价。初步分析发现，大部分区域处于适宜封存等级，少部分区域处于泄漏可能等级。

表 4　场址静态密封性评价等级

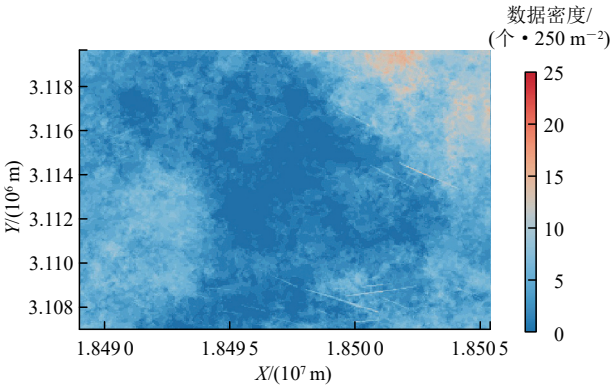
Table 4　Site static sealing evaluation grade

等级	适宜度	指标综合值
I	最佳封存场址	9～10
II	适宜封存场址	7～9
III	存在泄漏可能	5～7
IV	极易发生泄漏	＜5

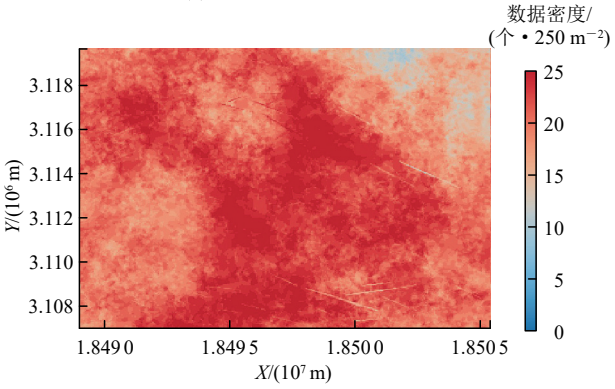
将 4 个密封性等级的数据分别绘制成热度图(见图 29)。图 29(a)为极易泄漏等级的位置分布图。从图中可以看出，研究区域内不存在极易泄漏的位置。图 29(b)为存在泄漏可能等级的位置分布图。从图中可以看出，右上部存在较多可能发生泄漏的数据，整体来看，存在泄漏可能的位置主要分布在区块四周，数据密度为 0～15 个/(250 m^2)，数据量占比 13.85%。图 29(c)为适宜封存等级的位置分布图。该等级数据密度最大，主要集中在中部区域，最大密度可达 25 个/(250 m^2)，数据量占比 83.95%。图 29(d)为最佳封存等级的位置分布图。从图中可以看出，最佳封存位置也主要集中在中部区域，数据密度约为 0～10 个/(250 m^2)，数据量占比 2.2%。适宜封存等级数据量占比最大(83.95%)，表明研究区域大部分区域适合进行 CO_2 封存，但仍需避免在存在泄漏风险(存在泄漏可能)的区域进行封存选址。



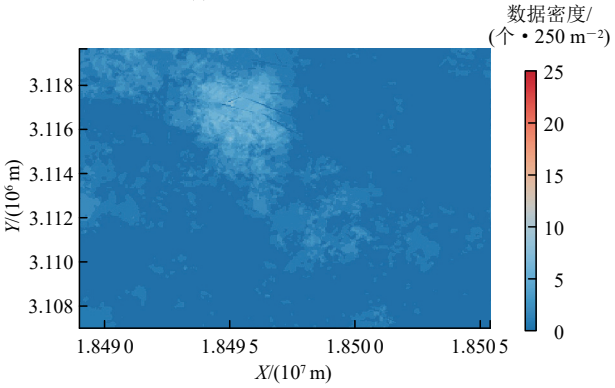
(a) 密封性等级 IV 分布热度



(b) 密封性等级 III 分布热度



(c) 密封性等级 II 分布热度



(d) 密封性等级 I 分布热度

图 29　密封性等级分布热度图

Fig.29　Heat map of sealability grade distribution

5　讨　论

本文的研究结果表明，通过引入影响因素的非均质三维模型，能够有效体现地层的非均质特征。同时，在权重系数计算过程中引入熵权法，改善了单一(AHP)评价体系主观性过强的潜在弊端。

传统密封性评价方法中，AHP 依赖于影响因素的主观排序[9-10]。引入 EWM 不仅优化了权重系数，同时也对 AHP 中影响因素主观排序的合理性进行了验证。AHP 和 EWM 计算得到的权重系数均表明毛细管压力对密封性影响最大，且两者权重值高度吻合(约 91%)。这表明，在影响因素重要性排序上

符合客观实际的前提下，AHP 的计算结果是合理的。值得注意的是，脆性指数因素的权重吻合度仅为 20%，表明两种方法对该因素的计算结果存在差异。造成这种情况的原因可能在于：岩性数据高度集中(页岩为主)，导致岩相因素的权重系数最小。在 AHP 中，人为将脆性指数确定为重要性最低的因素，导致其权重系数计算结果最小。这可能是造成脆性指数权重吻合度低(20%)的主要原因。但考虑到脆性指数的权重系数极小，其对最终评价结果的影响可忽略不计。

常规静态密封性评价方法未考虑地层的非均质性，导致评价结果仅为单一数值[12, 19]。本文方法考虑了非均质性的影响，最终评价结果表现为一个数值区间(5.84～9.95)。若使用本文数据但采用均质属性假设进行评价(即忽略空间变异，取全区平均值)，得到的密封性评价得分将是一个在 5.84～9.95 范围内的单一值，表明传统的均质假设可能会高估地层的整体密封能力，得到过于乐观的静态密封性评价结论。由此可见，考虑地层非均质性将显著提高密封性评价结果的可信度和空间分布差异性。

通过计算发现，毛细管压力是权重最大的关键影响因素，其值基于孔隙度模型计算得出。本文建立的孔隙度模型由基质孔隙度与大尺度裂缝孔隙度相加构成。这表明大尺度裂缝的存在会显著增加局部孔隙度，进而降低毛细管压力，削弱该区域的密封能力。因此，在进行 CO_2 封存选址时，应优先避开大尺度裂缝密集发育的区域。

本文提出的方法创新性地考虑了地层的非均质特征，整合了主客观评价方法(AHP 与 EWM)的优势，可为 CO_2 地质封存选址提供快捷有效的初步评价结论。本文着重考虑了对密封性影响最显著的 6 种因素。纳入更多影响因素可能进一步提升结果精度，但这并不影响本文所提出的非均质性建模和主客观权重协同优化方法在提升评价效果方面的核心贡献的展示。

6 结 论

本文建立了一种页岩地层密封性评价方法，旨在解决现有方法评价结果空间代表性不足和主观偏差显著的问题。主要结论如下：

(1) 综合主客观方法(AHP-EWM)确定毛细管压力为影响静态密封性的最关键因素(协同权重系数为 0.79)。区域密封性评价得分 5.84～9.95，整体适宜 CO_2 封存，局部存在泄漏风险。

(2) 在影响因素主观排序符合客观情况的前提下，两者计算结果相近，主要因素平均吻合度达 83.3%，表明熵权法不仅在协同优化权重方面具有重要作用，也有效验证了主观排序正确性并协同优化了权重系数。

(3) 引入三维非均质模型有效刻画了地层非均质性，并清晰呈现了密封能力的空间分布。结果显示中部区域密封性显著优于四周，该方法有效避免了均质模型可能导致评价结果过于乐观的问题。

参考文献(References)：

[1] CHEN B，LI Q，TAN Y S，et al. Key indicators of caprock sealing assessment with consideration of faults in potential CO_2 geological storage sites in Subei Basin，China[J]. Gas Science and Engineering，2024，129：205414.

[2] YE J，AFIFI A，ROWAIHY F，et al. Evaluation of geological CO_2 storage potential in Saudi Arabian sedimentary basins[J]. Earth-Science Reviews，2023，244：104539.

[3] LIU H，RAO X，XIONG H. Evaluation of CO_2 sequestration capacity in complex-boundary-shape shale gas reservoirs using projection-based embedded discrete fracture model(pEDFM)[J]. Fuel，2020，277：118201.

[4] UMAR B A，GHOLAMI R，NAYAK P，et al. Regional and field assessments of potentials for geological storage of CO_2：A case study of the Niger Delta Basin，Nigeria[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering，2020，77：103195.

[5] TANG C，ZHOU W，CHEN Z X，et al. Numerical simulation of CO_2 sequestration in shale gas reservoirs at reservoir scale coupled with enhanced gas recovery[J]. Energy，2023，277：127657.

[6] SUI H G，ZHANG F Y，ZHANG L，et al. Mechanism of CO_2 enhanced oil recovery in kerogen pores and CO_2 sequestration in shale：A molecular dynamics simulation study[J]. Fuel，2023，349：128692.

[7] RAHMAN M J，FAWAD M，JAHREN J，et al. Top seal assessment of Drake Formation shales for CO_2 storage in the Horda Platform area，offshore Norway[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control，2022，119：103700.

[8] HOU L H，YU Z C，LUO X，et al. Self-sealing of caprocks during CO_2 geological sequestration[J]. Energy，2022，252：124064.

[9] BAN S N，LIU H J，WEI X X，et al. The application of the fuzzy

comprehensive evaluation method in the sealing evaluation of caprocks in underground gas storage[J]. Applied Sciences，2023，13(17)：9753.

[10] ZHAO S，LIU H，ZHU Y F，et al. Quantitative evaluation of Gypsum-Salt caprock sealing capacity based on analytic hierarchy process—A case study from the Cambrian in the Tarim Basin，Western China[J]. Energies，2022，15(19)：7139.

[11] BAI B，HU Q F，LI Z P，et al. Evaluating the sealing effectiveness of a caprock-fault System for CO_2 -EOR storage：A case study of the Shengli Oilfield[J]. Geofluids，2017，2017：8536724.

[12] 井文君，杨春和，李银平，等. 基于层次分析法的盐穴储气库选址评价方法研究[J]. 岩土力学，2012，33(9)：2 683－2 690.(JING Wenjun，YANG Chunhe，LI Yinping，et al. Research on site selection evaluation method of salt cavern gas storage with analytic hierarchy process[J]. Rock and Soil Mechanics，2012，33(9)：2 683－2 690.(in Chinese))

[13] 苏 欣，赵宏涛，袁宗明，等. 基于模糊综合评判法的地下储气库方案优选[J]. 石油学报，2006，27(2)：125－129.(SU Xin，ZHAO Hongtao，YUAN Zongming，et al. Optimum method for underground gas storage projects based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Acta Petrolei Sinica，2006，27(2)：125－129.(in Chinese))

[14] 朱子恒，任众鑫，王照周，等. 苏北盆地刘庄储气库密封性评价研究[J]. 油气藏评价与开发，2024，14(5)：805－813.(ZHU Ziheng，REN Zhongxin，WANG Zhaozhou，et al. Sealing evaluation of Liuzhuang UGS in Subei Basin[J]. Reservoir Evaluation and Development，2024，14(5)：805－813.(in Chinese))

[15] WANG F W，CHEN D X，WANG Q C，et al. Quantitative evaluation of caprock sealing controlled by fault activity and hydrocarbon accumulation response：K gasfield in the Xihu Depression，East China Sea Basin[J]. Marine and Petroleum Geology，2021，134：105352.

[16] 曾大乾，胡宗全，麋利栋，等. 不同类型地下储气库库址评价标准体系及筛选平台[J]. 天然气工业，2022，42：117－124.(ZENG Daqian，HU Zongquan，MI Lidong，et al. Evaluation standard system and screening platform for different types of underground gas storage sites[J]. Natural Gas Industry，2022，42：117－124.(in Chinese))

[17] 曾大乾，张广权，杨小松，等. 复杂油气藏型地下储气库气藏工程关键参数设计方法[J]. 天然气工业，2023，43(10)：24－33.(ZENG Daqian，ZHANG Guangquan，YANG Xiaosong，et al. Design method of key parameters of gas reservoir engineering for complex reservoir type underground gas storages[J]. Natural Gas Industry，2023，43(10)：24－33.(in Chinese))

[18] 贾善坡，金凤鸣，郑得文，等. 含水层储气库的选址评价指标和分级标准及可拓综合判别方法研究[J]. 岩石力学与工程学报，2015，34(8)：1 628－1 640.(JIA Shanpo，JIN Fengming，ZHENG Dewen，et al. Evaluation indices and classification criterion of aquifer site for gas storage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2015，34(8)：1 628－1 640.(in Chinese))

[19] 贾善坡，张 玥，温曹轩，等. 含水层地下储氢圈闭盖层密封性评价——以Y含水圈闭为例[J]. 西北大学学报：自然科学版，2024，54(4)：729－740.(JIA Shanpo，ZHANG Yue，WEN Caoxuan，et al. The sealing evaluation of underground hydrogen storage cap rock in aquifer：Taking Y water-bearing trap as an example[J]. Journal of Northwest University：Natural Science，2024，54(4)：729－740.(in Chinese))

[20] 金凤鸣，贾善坡，张 辉，等. 京津冀地区断陷盆地含水层储气库评价体系及目标优选[J]. 天然气地球科学，2017，28(9)：1 433－1 445.(JIN Fengming，JIA Shanpo，ZHANG Hui，et al. Evaluation system and optimization of aquifer exploration targets for gas storage in the Beijing，Tianjin and Hebei faulted basins[J]. Natural Gas Geoscience，2017，28(9)：1 433－1 445.(in Chinese))

[21] SAATY R W. The analytic hierarchy process-what and how it is used[J]. Mathematical Modelling，1987，9(3)：161－176.

[22] 王 鹏，谢 丹，罗乃菲. 长宁地区页岩气地质特征与勘探开发前景[J]. 宜宾学院学报，2020，20(12)：10－15.(WANG Peng，XIE Dan，LUO Naifei. Geological characteristics of shale gas and prospects for exploration and development in Changning Area[J]. Journal of Yibin University，2020，20(12)：10－15.(in Chinese))

[23] 韩 倩. 川南长宁背斜构造几何学特征及形成演化[硕士学位论文][D]. 成都：成都理工大学，2020.(HAN Qian. Geometry and evolution of Changning anticline in southern Sichuan[M. S. Thesis][D]. Chengdu：Chengdu University of Technology，2020.(in Chinese))

[24] 张浩淼. 长宁区块上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩气地质特征研究[硕士学位论文][D]. 成都：西南石油大学，2017.(ZHANG Haomiao. Study on shale gas geological characteristics of Upper Ordovician Wufeng Formation—Lower Silurian Longmaxi Formation in Changning block[M. S. Thesis][D]. Chengdu：Southwest Petroleum University，2017.(in Chinese))

[25] 单玄龙，邢 健，苏思远，等. 川南长宁地区下古生界五峰组—龙马溪组一段页岩岩相与含气性特征[J]. 吉林大学学报：地球科学版，2023，53(5)：1 323－1 337.(SHAN Xuanlong，XING Jian，SU Siyuan，et al. Shale lithofacies and gas-bearing characteristics of the Lower Paleozoic Wufeng Formation—Member 1 of Longmaxi Formation in Changning Area，Southern Sichuan[J]. Journal of Jilin University：Earth Science，2023，53(5)：1 323－1 337.(in Chinese))

[26] 公子龙，李智武，李金玺，等. 川南长宁地区构造变形特征及演化过程[J]. 成都理工大学学报：自然科学版，2023，50(3)：257－267.

(GONG Zilong，LI Zhiwu，LI Jinxi，et al. Tectonic deformation characteristics and evolution process in Changning area，Southern Sichuan Province，China[J]. Journal of Chengdu University of Technology：Science and Technology，2023，50(3)：257－267.(in Chinese))

[27] LAI X P，CHEN X Y，WANG Y H，et al. Feasibility analyses and prospects of CO_2 geological storage by using abandoned shale gas wells in the Sichuan Basin，China[J]. Atmosphere，2022，13：1698.

[28] HO W. Integrated analytic hierarchy process and its applications—A literature review[J]. European Journal of Operational Research，2008，186(1)：211－228.

[29] 何 堃. 层次分析法的标度研究[J]. 系统工程理论与实践，1997，(6)：58－62.(HE Kun. A study on the scale of analytic hierarchy process[J]. Systems Engineering—Theory and Practice，1997，(6)：58－62.(in Chinese))

[30] 段怡青，解智强，林美娜，等. 基于指数标度 AHP 的地下空间开发适宜性评价[J]. 地下空间与工程学报，2021，17(增 1)：8－15.(DUAN Yiqing，XIE Zhiqiang，LIN Meina，et al. Suitability evaluation of underground space development based on index scale- AHP[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering，2021，17(Supp.1)：8－15.(in Chinese))

[31] 闫 铁，许 瑞，孙文峰，等. 地层抗钻能力相似性评价及钻头选型新方法[J]. 石油勘探与开发，2021，48(2)：386－393.(YAN Tie，XU Rui，SUN Wenfeng，et al. Similarity evaluation of stratum anti-drilling ability and a new method of drill bit selection[J]. Petroleum Exploration and Development，2021，48(2)：386－393.(in Chinese))

[32] 侯恩科，纪卓辰，车晓阳，等. 基于改进 AHP 和熵权法耦合的风化基岩富水性预测方法[J]. 煤炭学报，2019，44(10)：3 164－3 173.(HOU Enke，JI Zhuochen，CHE Xiaoyang，et al. Water abundance prediction method of weathered bedrock based on improved AHP and the entropy weight method[J]. Journal of China Coal Society，2019，44(10)：3 164－3 173.(in Chinese))

[33] 吕延防，张绍臣，王亚明. 盖层封闭能力与盖层厚度的定量关系[J]. 石油学报，2000，21(2)：27－30.(LV Yanfang，ZHANG Shaochen，WANG Yaming. Research of quantitative relations between sealing ability and thickness of cap rock[J]. Acta Petrolei Sinica，2000，21(2)：27－30.(in Chinese))

[34] 王 欢，王 琪，张功成，等. 琼东南盆地梅山组泥岩盖层封闭性综合评价[J]. 地球科学与环境学报，2011，33(2)：152－158.(WANG Huan，WANG Qi，ZHANG Gongcheng，et al. Comprehensive evaluation on the sealing ability of mudstone caprock in Meishan Formation of Qiongdongnan Basin[J]. Journal of Earch Sciences and Environment，2011，33(2)：152－158.(in Chinese))

[35] 刘 杰. 基于多点地质统计学的储层建模方法研究[硕士学位论文][D]. 北京：中国石油大学(北京)，2020.(LIU Jie. Research on reservoir modeling method based on multi-point geostatistics[M. S. Thesis][D]. Beijing：China University of Petroleum(Beijing)，2020.(in Chinese))

[36] 张 超，姚 杰，李伟娜，等. 塔里木盆地东河储气库盖层密封性定量评价[J]. 大庆石油地质与开发，2025，44(3)：93－102.(ZHANG Chao，YAO Jie，LI Weina，et al. Quantitative evaluation on caprock sealing performance of Donghe gas storage of Tarim Basin[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing，2025，44(3)：93－102.(in Chinese))

[37] JIN Z J，YUAN Y S，SUN D S，et al. Models for dynamic evaluation of mudstone/shale cap rocks and their applications in the Lower Paleozoic sequences，Sichuan Basin，SW China[J]. Marine and Petroleum Geology，2014，49：121－128.