



含水层地下储氢圈闭盖层密封性评价 ——以 Y 含水圈闭为例

贾善坡¹, 张 玥², 温曹轩¹, 李 健³, 张宗峰⁴

(1. 东北石油大学 环渤海能源研究院, 河北 秦皇岛 066004;

2. 吉林大学 建设工程学院, 吉林 长春 130026; 3. 中国石化胜利油田有限公司勘探开发研究院, 山东 东营 257000;

4. 中国石化上海海洋油气分公司, 上海 200120)

摘要 结合国内外含水层储气库建设中影响盖层密封性的关键指标, 构建含水层地下储氢圈闭盖层密封性评价体系, 分析得出适合中国含水层盖层密封性评价方法——层次分析法, 并运用层次分析法和多因子综合评价法相结合的方法定性分析了华东某油气区内的 Y 含水圈闭盖层静态密封能力。结果表明: ① 盖层静态密封性评价体系中直接盖层厚度、岩石脆性等传统评价因素占比较高, 其次为地层水的酸碱性、矿物类型等特殊因素。② 基于层次分析法和多因子综合评价法分析可知, Y 含水圈闭的盖层在静态条件下具备一定的封气能力, 能够在一定程度上封隔储集层中的氢气, 避免氢气逸散。研究表明, 该评价体系可为初步评价含水层地下储氢盖层密封性提供一定的指导与理论依据。

关键词 含水层; 氢气储存; 盖层密封性; 层次分析法; 评价体系

中图分类号: TE822 **DOI**: 10.16152/j.cnki.xdxzbzr.2024-04-014

The sealing evaluation of underground hydrogen storage cap rock in aquifer: Taking Y water-bearing trap as an example

JIA Shanpo¹, ZHANG Yue², WEN Caoxuan¹, LI Jian³, ZHANG Zongfeng⁴

(1. Bohai Rim Energy Research Institute, Northeast Petroleum University, Qinhuangdao 066004, China;

2. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China;

3. Exploration and Development Research Institute of Shengli Oilfield Company Limited,

SINOPEC, Dongying 257000, China; 4. SINOPEC Shanghai Offshore Oil and Gas Branch, Shanghai 200120, China)

Abstract Based on the key indicators affecting the seal performance of aquifer gas storage at home and abroad, the seal evaluation system of aquifer underground hydrogen storage trap is constructed, and the evaluation method suitable for the seal performance of aquifer cover in China-analytic hierarchy process is analyzed. The static sealing capacity of Y water-bearing trap cap in an oil and gas area in East China is qualitatively analyzed by combining analytic hierarchy process (AHP) and multi-factor comprehensive evaluation method. The results show that: ① Traditional factors such as direct cap thickness and rock brittleness account for a relatively high proportion in the static seal evaluation system, followed by special factors such as formation water acidity and mineral type. ② Based on the analysis of analytic hierarchy process (AHP) and multi-factor comprehensive evaluation method, the Y water-bearing trap cap in the static condition has a certain gas sealing capacity, which can effectively isolate the hydrogen gas in the reservoir from the surrounding environment to a certain extent, avoiding hydrogen gas leakage. It is shown that this evaluation system can provide certain guidance and theoretical basis for the preliminary evaluation of the seal performance of the aquifer underground hydrogen storage cap rock.

收稿日期: 2024-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(42072166); 黑龙江省重点研发项目(JD2023SJ26)。

第一作者: 贾善坡, 男, 教授, 博士生导师, 从事油气地下储库工程研究, jiashanporsm@163.com。

hensive evaluation, it can be seen that the cap layer of Y water-bearing trap has a certain gas sealing ability under static conditions, which can seal off the hydrogen in the reservoir to a certain extent and avoid the escape of hydrogen. The research shows that the evaluation system can provide some guidance and theoretical basis for the preliminary evaluation of the sealing property of the underground hydrogen storage cover of aquifers.

Keywords aquifer; hydrogen storage; cap rock sealing; analytic hierarchy process; evaluation system

氢能作为高热值、零污染的二次清洁能源,对于实现中国“十四五”规划下的“双碳”目标显得尤为重要^[1],如何促进氢能源跨越式发展及实现大范围利用成为当前面临的严峻问题,而大规模储氢技术成为研究热点。地下储氢与传统储氢相比在时间尺度及空间尺度上具有较大的优势,能够满足氢能中长期存储的要求。地下储气库作为能源的“地下粮仓”,具有地下空间大、安全性高等特点^[2]。目前,利用地下储气库储能已由传统的储油/天然气延伸到压缩空气储能、储氢、储氦等方面^[3]。含水层储气库作为广泛分布在工业城市附近的大型地下储能空间^[4-5],具备地下储氢的先天优势,但含水层地下储气库存在选址理论与密封性评价等多项技术不完善的问题,尤其是盖层密封性评价,是推广氢能源首要的“卡脖子”的技术问题。盖层是封隔储集层气体、保护圈闭密封性的第一道屏障,一旦盖层的密封先天条件无法满足地下储氢,那么地下储氢也将无从谈起。因此,盖层密封性一直是地下储氢的先决条件,开展含水层地下储库的盖层密封性评价体系研究可为地下储氢库的建设提供重要依据。同时对于中国尚处于起步阶段的含水层地下储氢库建设而言,合理的评价指标、体系和方法显得尤为重要。

目前,学者针对盖层密封性的研究集中于微观与宏观两方面。垢艳侠等从岩性和厚度条件对盖层进行了宏观评价,又从孔渗特征、突破压力与扩散特征 3 方面对盖层进行了微观评价^[6]。庞晶等对区域盖层和直接盖层的岩性和厚度进行了宏观评价,从孔渗特征、突破压力、吸附特征与压汞试验对盖层进行了微观评价^[7]。舒萍等从盖层的岩性、厚度、物性和微观孔喉结构 4 个方面进行评价^[8]。贾善坡等从盖层的岩性、厚度、物性特征、排替压力等因素对盖层密封性进行了综合评价^[9-11]。氢气与天然气不同,氢气具有质量小、密度轻等特点,此时,评价盖层密封性的指标则会发生变化。Lindblom 等研究表明,氢在地下储层中以气态存在,在储层顶部的圈闭构造内, H_2 气体

在浮力作用下向上运移,因为氢分子的扩散速度比甲烷分子高 4.4 倍,氢气的泄露速度比甲烷气更快^[12]。由于地下环境中存在着大量微生物菌群,致使地下环境变得更为复杂。Simbeck 等研究了氢的扩散性,其高扩散率导致氢气通过含水层的盖层岩石渗漏,但是氢在水中的溶解度很低,因此,氢气地下储存(UHS)并未受到扩散损失的影响^[13]。Truche 等在特定温度和压力环境下研究了氢在富黏土岩石中的地球化学反应,在黄铁矿不稳定的作用下,导致硫化物的产生,与氢气发生还原反应产生 H_2S ^[14]。Zivar 等指出,当矿物发生沉淀或溶解时,储盖层中有可能发生矿物沉淀或溶解,当沉淀速率大于溶解速率时,盖层的完整性可能保持不变,若小于则盖层完整性就会遭到破坏^[15]。

盖层密封性评价研究存在两个关键问题,一是氢气地下储存影响盖层密封性因素的选取,另一个是评价方法的选取。贾善坡等通过建立层次分析法-可拓学评价模型评价了华北油田大 5 目标区改建地下储气库的适宜性程度,其结果与专家论证意见一致,验证了评价标准和评价方法的可靠性和合理性^[16]。金凤鸣等运用层次分析法对京津冀地区断陷盆地 11 个初选圈闭目标进行了优选,并成功优选出了大 5 石盒子组等 3 个适宜改建地下储气库的含水层构造^[17]。林建品等利用层次分析法建立了储气库盖层质量评价体系,并用该方法对兴 9 枯竭气藏的盖层质量进行了评价^[18]。刘林等利用层次分析法对川西北中坝气田须二气藏盖层进行了封闭能力综合评价,为该区改建储气库的可行性评价提供了科学依据^[19]。岳刚等利用了层次分析法和模糊数学评价法对松辽盆地梨树断陷下白垩统泥岩盖层的封闭能力进行了定量评价,其评价结果与勘探实践结果基本一致,证实了该评价方法具有较高的可行性^[20]。Lewandowska 等运用层次分析法,对波兰境内的含水层构造和油气藏等多处潜在地下储氢场地进行评价、对比和排序^[21]。综上所述,无

论是含水层储气库的选址评价还是盖层密封性评价,其共性都是通过建立层次分析法评价模型,对评价体系中的各要素进行权重分析并得出评价结论。因此,在地下储气领域,层次分析法具有一定的普适性与准确性。

本研究通过调研全球内关于非常规地下储气库及氢气地下储存的盖层密封性的研究成果,从盖层岩性、空间展布等方面,提出了含水层地下储存盖层的密封性评价指标与标准,采用层次分析法对含水层地下储氢圈闭盖层的密封性进行综合评价,并将该方法应用于中国某含水圈闭,为中国含水层地下储氢库盖层的密封性研究提供技术与理论支持,对于推动中国氢能源跨区域大规模应用,实现“双碳”目标具有重要意义。

1 盖层密封性评价体系指标选取

含水层地下储氢圈闭的盖层密封性受到多种因素影响,根据中国地下储气库盖层密封性的评价因素,综合国外氢气地下储存实践工程的经验研究可知,利用含水层地下储氢,不仅受到盖层沉积环境、岩石岩性等影响,还受到氢气等地下水环境的特殊因素的干扰^[22]。含水层地下储氢圈闭盖层密封性主要影响因素分析如下。

1.1 盖层岩性

1) 沉积环境(C1)。盖层是由不同性质的岩石组成,沉积环境决定盖层的岩石组成,从而间接决定了盖层的密封能力^[23],是盖层宏观发育上的关键性因素。对于含水层地下储氢圈闭而言,沉积能量稳定、分布面积较大的半深—深湖相、盆地相等沉积环境是形成泥质含量高、厚度大且横向分布广泛、连续稳定的区域性盖层的必要条件。类似于水动力条件较为活跃的河流相、冲积扇相,可能会造成非均质盖层,形成的盖层质量较差,在选择含水层地下储氢圈闭时,并不是优质盖层的首选项。

2) 岩石岩性(C2)。盖层岩性分为很多种,但主要为泥岩、页岩、盐岩3种类型,盖层岩性的不同决定着盖层封闭能力的强弱。常规储气库盖层的封闭能力从强到弱依次为膏岩盖层、煤系盖层、泥岩盖层、砂质岩盖层^[24];而地下圈闭中抑制氢气主要依赖于盖层岩石中的黏土矿物成分^[25],氢气在含水构造中,在压力与温度的作用下,发生氢气—水—岩石的相互作用。有关研究表明,在地

层温度333 K和5~20 MPa内,盖层岩石的润湿角并未发生较大变化,并表现出水湿特性,有效抑制了氢气的扩散^[26]。因此,黏土矿物的存在不会对盖层岩石产生较大影响,相反的,氢气通过吸附在黏土矿物上缓解了其本身的扩散运动。当岩石岩性由泥岩逐渐转变为砂岩时,由于孔渗结构的变化易导致氢气沿着孔渗结构较大的通道进行逃逸或集聚。但是,砂岩孔渗特征能够满足储存要求,也可以将其用于含水层地下储氢圈闭^[27]。

3) 矿物类型(C3)。对含水层地下储氢库而言,矿物类型显的尤为重要。原因是地下空间中易存在微生物菌群,含量丰富,微生物反应条件充足,迫使氢气与含水层中的微生物发生反应,打破了地下水岩石气体之间的平衡,进而发生矿物溶解,破坏盖层的密封能力。在此过程中主要发生矿物溶解的是绿泥石族碳酸盐矿物、硫酸盐矿物、碳酸盐矿物和黏土矿物,溶解后形成伊利石、硫化铁、磁黄铁矿、硬石膏的溶解与沉淀^[28-29],矿物的溶解会增加储层乃至盖层的孔隙率,影响盖层的完整性,导致泄露通道的产生。其中,以黄铁矿的还原反应与方解石的溶解为代表,黄铁矿发生还原反应产生磁黄铁矿^[30],而方解石在氢气和水的双重作用下,胶结物溶解,发生显著膨胀,导致盖层处的岩石孔渗结构发生变化,盖层密封能力随之改变^[31]。

1.2 空间展布

1) 盖层连续性(C4)。盖层的连续性通常是指盖层岩石的稳定性和均匀性是否能形成区域性盖层。氢气保存主要受控于盖层的连续性,当地下应力场发生变化引起断层活化时,对盖层的破坏实质上是减小了盖层的连续性和厚度^[32]。换言之,若盖层连续性较好,分布稳定,则盖层密封能力强^[33],当氢气注入地下空间时,也易形成规模性的气藏。

2) 直接盖层厚度(C5)。直接盖层厚度较大时,岩石所需的突破压力也越高,盖层中的裂隙不易贯通^[34],能够有效延缓或阻止氢气通过盖层泄漏。盖层的厚度和连续性之间存在正相关关系,当盖层的厚度足够大时,因构造活动所产生的断裂破坏作用,对盖层的封闭性影响会比较小,有利于保持盖层分布的连续性^[35]。

1.3 封闭能力

1) 突破压力(C6)。突破压力是评判盖层密封能力的主要参数之一,实质是岩石最大连通孔

道的毛细管压力。无论是二氧化碳地质封存还是氢气地下储存,都会采用室内试验的方法测试岩石的突破压力^[36-37]。一般而言,盖层岩石突破压力越高,盖层密封性能越好。

2)地层水酸碱性(C7)。当氢气注入地下储库时,岩石中的孔隙度变化主要源于孔隙水的 pH 值。以泥岩为代表的盖层岩石类型,pH 值是间接决定孔隙度变化大小的关键因素,是控制地下圈闭中化学反应程度的直接因素。氢气地下储存时,为有效防止黄铁矿还原,要尽量排除强酸性或强碱性环境。研究表明,当地下环境中的 pH 值由 7 增加到 9 时,泥岩在氢气作用下孔隙度增大,其孔隙度变化量仅为 0.001 3,其主要原因是岩石比表面积大、石英含量少导致的。因此,氢气地下储存的环境最好为弱酸性及偏中性储氢环境^[38]。

1.4 岩石力学性质

1)构造应力(C8)。地下圈闭中构造应力场的变化容易引起盖层发生明显的偏向应力,当盖层中的水平应力与垂向应力相差较大时,会对盖层的密封性造成不利影响。当地下圈闭处于注采

气阶段时,会引起盖层的向上或向下弯曲变形^[39],其中,侧向应力的大小取决于构造环境,因此,在地下储氢过程中,要避免构造应力场的变动。

2)岩石脆性(C9)。岩石脆性是盖层力学评价与封闭能力评价的重要参数之一,是岩石在外力作用下没有明显变形时发生破裂的性质。一旦盖层遭受构造应力发生破坏时,若盖层岩石是塑性的,则不易产生裂缝或者破坏。

2 盖层密封性评价体系构建

本研究从盖层岩性、空间展布、封闭能力与岩石力学性质 4 个方面,沉积环境、地层水酸碱性等 9 项基本因素构建了含水层地下储氢圈闭盖层密封性评价体系(见图 1)。根据国内外含水层储气库及氢气地下储存等工程选址的相关研究成果与工程经验,将含水层地下储氢圈闭盖层分为好、较好、中等、差 4 级(见表 1),以便对具体含水层构造盖层密封性的评价指标进行定量化分析。

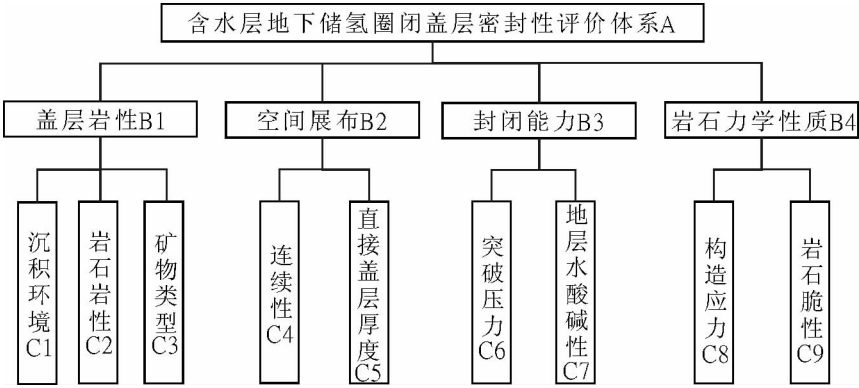


图 1 含水层地下储氢圈闭盖层密封性评价体系

Fig. 1 Evaluation system of seal property of aquifer underground hydrogen storage trap cap

3 评价模型

3.1 盖层密封性评价体系目标层计算方法

多属性决策评价方法较多,主要有主成分分析法、灰色关联度法、熵权法、层次分析法等,目前,在石油天然气勘探开发领域,常见的方法为层次分析法(AHP)^[40-44]。AHP 是将多目标的决策问题通过层次划分进行两两因素比较后构造判断矩阵,是定性与定量相结合的综合分析方法。在氢气地下储存领域,层次分析法首次在波兰境内

进行运用并成功选址^[21]。综上所述,层次分析法在氢气地下储存领域具有一定的适用性,因此,针对含水层地下储氢圈闭中盖层密封性的评价,采用层次分析法对影响盖层密封性的因素进行全面评估[公式(1)、(2)],再通过多因子综合评价法,构建含水层地下储氢圈闭盖层密封性综合评价模型[公式(3)],即

$$P = (b_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \cdots & \cdots & \ddots & \cdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{cases} C_{CR} = \frac{C_{C.L.}}{C_{C.R.}} \\ C_{C.L.} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \\ \lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(Bw)_i}{w_i} \end{cases} \quad (2)$$
$$M = \sum_{i=1}^9 \omega_i \cdot m_i \quad (3)$$

一致性指标; $C_{C.L.}$ 为相容性指标; $C_{C.R.}$ 为随机性指标; n 为判断矩阵的阶数; $\lambda_{\max}$ 为最大特征值; m_i 为各评价指标的量化值; ω_i 为各评价指标的权重值; $i = 1,2,\cdots,9$ 。

其中,含水层地下储氢圈闭盖层密封性能力等级评价划分见表 2,通过公式(3)计算出盖层密封性综合得分,与表 2 中进行对比,即可得出该盖层密封性能力。

式 中: b_{ij} 为两两要素重要性比价的标度值; C_{CR} 为

表 1 含水层地下储氢圈闭泥岩盖层密封性评价标准

评价参数	等级划分			
	好	较好	中等	差
沉积环境	半深深湖相、盆地相、广海陆盆相	台地相、滨浅湖相、三角洲前缘相	台地边缘、滨岸相、三角洲分流平原相	河流相、冲积扇相
岩性	泥岩	含砂泥岩、含粉砂泥岩	粉砂质泥岩、砂质泥岩	泥质粉砂岩、泥质砂岩
矿物类型	含有微量方解石与黄铁矿	含有少量方解石与黄铁矿	含有一定量方解石与黄铁矿	含有大量方解石与黄铁矿
连续性	连续、稳定	较连续、较稳定	有一定的连续性、较稳定	连续性差、不稳定
直接盖层厚度/m	>100	50~100	25~50	<25
突破压力/MPa	>15	15~10	10~5	<5
地层水酸碱性	弱酸性	中性	弱碱性	强碱性
构造应力	无构造应力	较弱	一般	强
盖层脆性	塑性	脆塑性	脆性	脆性较强

表 2 含水层盖层密封性能力等级评价表

Tab. 2 Aquifer cover sealing capacity grade evaluation form

盖层密封性	综合指数	应对措施建议
最佳	$9 < M \leq 10$	盖层密封能力好、安全性高,很适宜建库
良好	$7 < M \leq 9$	比较适宜建库,但须在运营期加强圈闭密封性投资和监测
中等	$6 < M \leq 7$	基本适宜建库,但建设期需持续评价储库的密封性
较差	$M \leq 6$	不宜建库,放弃该项目

3.2 盖层密封性评价指标权重的确定

针对评价体系中不同层次的评价指标构建判断矩阵,计算评价指标权重并进行一致性检验,其结果如下。

A-B 层级判断矩阵为

$$P_{A-B} = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/2 & 1 \\ 3 & 1 & 1/2 & 2 \\ 2 & 2 & 1 & 2 \\ 1 & 1/2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

盖层岩性因素 B_1 判断矩阵为

$$P_{B_1-C} = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/2 \\ 2 & 1 & 1/2 \\ 2 & 2 & 1 \end{bmatrix} \tag{5}$$

空间展布因素 B_2 判断矩阵为

$$P_{B_2-C} = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 \\ 2 & 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

封闭能力因素 B_3 判断矩阵为

$$P_{B_3-C} = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 1/2 & 1 \end{bmatrix} \tag{7}$$

岩石力学性质因素 B_4 判断矩阵为

$$P_{B_4-C} = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 \\ 3 & 1 \end{bmatrix} \tag{8}$$

根据以上判断矩阵分析可得,权向量 $\omega_{A-B} = [0.149\ 1, 0.305\ 7, 0.385\ 2, 0.159\ 9]$, 权向量 $\omega_{B_1-C} = [0.197\ 6, 0.311\ 9, 0.490\ 5]$, 权向量 $\omega_{B_2-C} = [0.333\ 3, 0.666\ 7]$, 权向量 $\omega_{B_3-C} = [0.666\ 7, 0.333\ 3]$, 权向量 $\omega_{B_4-C} = [0.250\ 0, 0.750\ 0]$, 随机一致性指标均小于 0.1。

不同评价指标对于含水层储氢库盖层密封性体系中所占的权重分配见图 2。由图 2 可知,盖层中岩石矿物类型、直接盖层厚度、突破压力、岩石脆性等因素占比较高,其次为地层水酸碱性、盖层连续性等因素,说明在含水层地下储氢圈闭盖层密封性评价中,应当重视岩石矿物类型等因素的影响,其对盖层密封能力有着较大的影响。

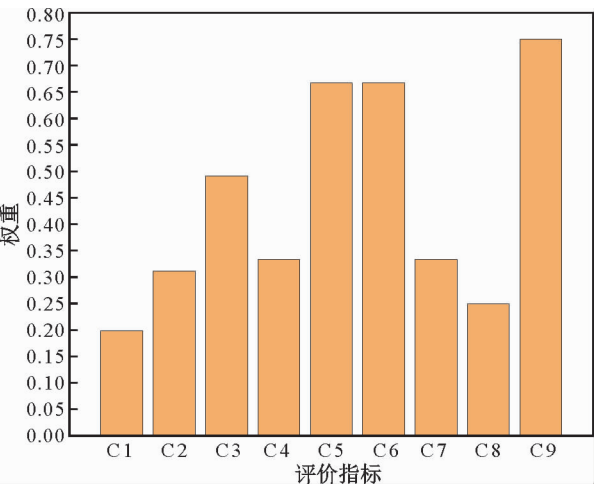


图 2 含水层地下储氢圈闭盖层密封性评价指标所占权重柱状图

Fig. 2 Column chart of weight of sealing evaluation index of aquifer underground hydrogen storage trap cap

4 工程实例应用

华东某油气区共有 3 个含水层构造,分别是 S 含水圈闭、Y 含水圈闭、X 含水圈,目前,地质勘探资料丰富且已投产使用的仅有 Y 含水圈闭一处。因此,以 Y 含水圈闭为例,应用本研究所提出的盖层密封性评价体系进行研究。

4.1 盖层岩性因素分析

Y 含水圈闭上覆稳定且厚度极大的泥岩盖层,且上覆盖层的下段含有致密性的砾砂岩^[45],具有良好的封闭性。盖层沉积环境大面积发育三角洲前缘状砂沉积和前三角洲亚相沉积,其他地区发育深湖一半深湖亚相的泥质沉积,周围岩层的沉积环境为三角洲前缘河口坝和水下分流河道沉积,主要为河口坝微相(见图 3),沉积环境和岩石岩性总体等级为较好^[46]。矿物类型的确定是参考了国家能源局颁布的石油和天然气行业标准中的矿物 X 射线衍射分析方法^[47],针对岩石中的矿物含量进行了初步测定,矿物含量测试结果如表 3 所示。由表 3 可知,盖层中含有部分方解石与微量黄铁矿,这可能会导致盖层密封性降低。

4.2 盖层空间展布因素分析

Y 含水圈闭盖层的分布比较稳定,厚度 280 ~ 300 m,直接盖层厚度约为 47 m。Y 含水圈闭顶部构造示意图如图 4(a) 所示,在 Y 含水圈闭的溢出点分析其剖面,根据精细地震解释研究发现[见图 4(b)],圈闭溢出点未到南北两条大断层,即未接触到断层 1 与断层 3[见图 4(c)],Y 含水圈闭区域内的盖层受断层 2 影响较大。

4.3 盖层封闭能力因素分析

通过盖层岩石突破压力测试(试样如图 5 所示),发现突破压力值大于 15 MPa,说明盖层具有良好的封闭性。根据该区地层水资料统计显示,该地区地层水 pH 值为 6.2 左右,多呈弱酸性地层环境^[48]。

4.4 盖层岩石力学性质因素分析

Y 含水圈闭的目标盖层的地层压力系数为 1.0,地层压力为常压,等于静水压力,与构造应力没有关系。通过前期测井资料可发现,该盖层岩石试样的单轴抗压强度高达 38.4 MPa,抗张强度为 3.8 MPa。前期由于该区块盖层岩心难以获取,选取了邻区同层位深度的泥岩进行岩石力学性质的试验测试。该邻区为 S971 区块,与 Y 含

水圈闭同属同一油气区,具备一定的相似性^[49],其盖层岩心所测得的三轴抗压强度高达 109.7 MPa,无论是单轴还是三轴试验都表现出了良好的抗压强度。其次,盖层岩心脆性是根据岩心矿

物含量来确定的^[50-51]: $BRIT_2 = \text{石英含量} / (\text{石英含量} + \text{长石含量} + \text{碳酸盐岩含量} + \text{黏土含量} + \text{其他矿物含量})$ 。

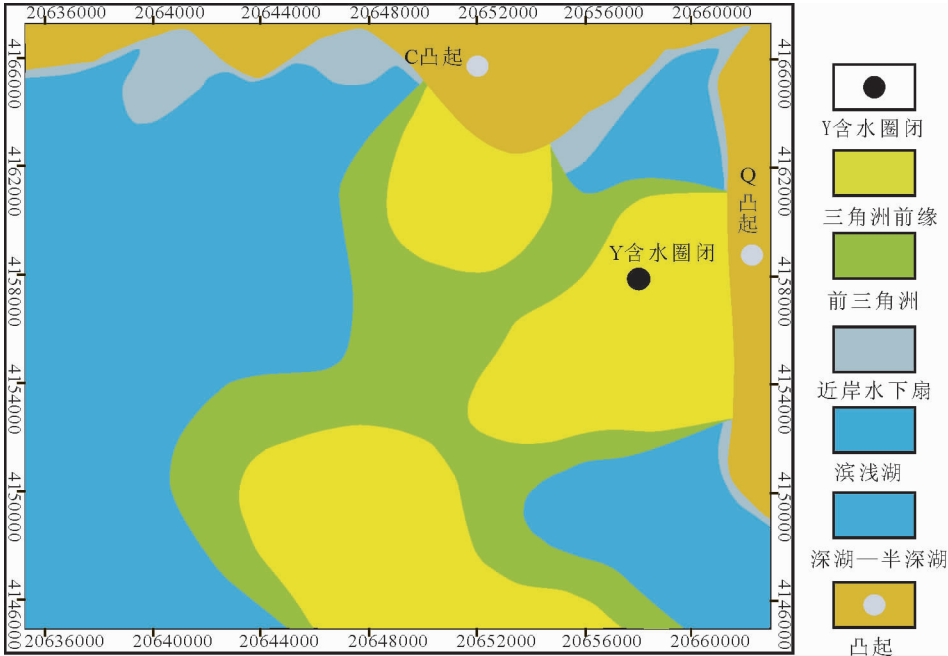


图 3 Y 含水圈闭沉积相分布图(据文献[47]修改)

Fig. 3 Y water trap sedimentary facies distribution map

表 3 矿物 X 射线衍射分析

Tab. 3 Mineral X ray diffraction analysis

编号	矿物种类和质量分数/%					黏土矿物总量/%
	石 英	钾长石	斜长石	方解石	黄铁矿	
1	24.3	2.2	4.4	27.8	3.9	19.7

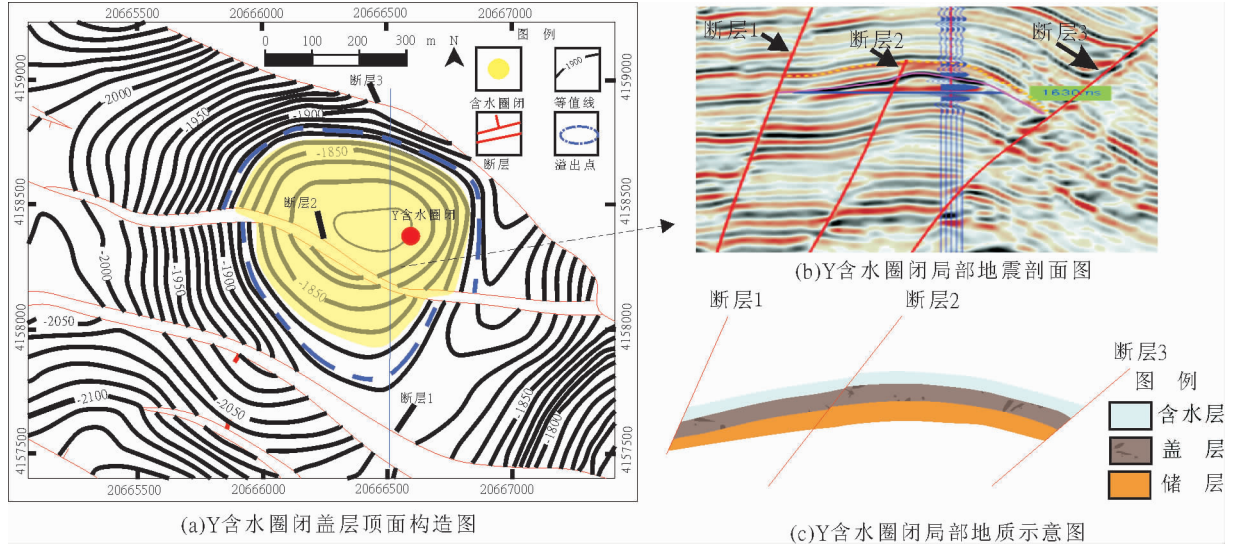


图 4 Y 含水圈闭地质构造示意图

Fig. 4 Y Geological structure diagram of water-bearing trap



图 5 盖层岩心试样示意图

Fig.5 Schematic diagram of cap core sample

根据 4.4 节可知,Y 含水圈闭盖层的脆性指数(BRIT₂)为 24.3%,整体而言,盖层岩石偏脆性,可压性较好,有利于盖层密封性。

井资料,对盖层岩石岩性、盖层脆性等影响因素进行了评分,每项指标得分如表 4 所示。

4.5 目标盖层指标评分结果

整理 Y 含水圈闭盖层的相关地质勘探与测

表 4 Y 含水圈闭盖层各影响因素得分表

Tab.4 Y Score table of influencing factors of water-bearing trap cover

因素	地质概况	得分
沉积环境	储层是滨浅湖相滩坝及湖滩砂体,构造连续性较好	8
岩性	以砂泥岩为主	8
矿物类型	盖层岩石中含有少量方解石与微量黄铁矿	8
连续性	盖层层数>2,圈闭内存在一条断层两侧各有一条断层,连续性一般	8
直接盖层厚度/m	盖层厚度 25 ~47 m	8
地层水酸碱性	地层水酸碱性大小为 62,为偏酸性地层	10
突破压力/MPa	岩石突破压力约为 16.78 MPa	10
构造应力	地层压力系数为 1.0,无构造应力	10
盖层脆性	盖层岩性较好,属于脆塑性	8

Y 含水圈闭盖层静态密封性综合得分为 $M = 8.83$,对照评价等级表 2 可知,盖层在静态条件下封气能力较强,表明 Y 含水圈闭盖层静态密封良好,具有一定的封气能力。

5 结论

1)基于国内外影响含水层储氢库盖层密封性的各项因素,从盖层岩性和空间展布等 4 个方面建立了盖层密封性评价的层次结构体系;基本指标主要有矿物类型、突破压力和地层水酸碱性

等 9 项,将密封性等级优劣划分为 4 级,确定了各评价指标的量化范围。

2)基于层次分析法建立了适用于含水层储氢库的盖层静态密封性评价模型,并对各项指标进行权重量化。研究表明,盖层中岩石脆性指标所占权重最大,而影响氢气地下储存的矿物类型及地层水酸碱性指标所占权重较小。

3)基于含水层地下储氢圈闭盖层密封性评价模型,对华东某油气区 Y 含水圈闭的盖层进行应用评价。研究表明,Y 含水圈闭的盖层静态封气能力较强,具备一定的封气能力,能够在一定程

度上封隔储集层中的氢气,避免氢气逸散。

参考文献

- [1] 黄清鲁,赵丽丽. 新能源制氢及氢能应用的发展前景[J]. 中国石油和化工标准与质量,2022,42(17): 98-100.
- HUANG Q L, ZHAO L L. Prospects for hydrogen production from new energy and hydrogen energy applications[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality,2022,42(17):98-100.
- [2] 王皆明,张昱文,丁国生,等. 裂缝性潜山油藏改建储气库机理与评价方法[M]. 北京:石油工业出版社,2013.
- [3] 黄宽,张万益,王丰翔,等. 地下空间储能国内外发展现状及调查建议[J]. 中国地质,2024,51(1): 105-117.
- HUANG K, ZHANG W Y, WANG F X, et al. Development status of underground space energy storage at home and abroad and geological survey suggestions [J]. Geology in China,2024,51(1):105-117.
- [4] 刘炜,陈敏,吕振华,等. 地下储气库的分类及发展趋势[J]. 油气田地面工程,2011,30(12):100-101.
- LIU W, CHEN M, LYV Z H, et al. Classification and development trend of underground gas storage[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2011, 30(12): 100-101.
- [5] 王智,宫敬,尹铁男,等. 天然气凝析液长距离管道稳态水力热力计算[J]. 东北石油大学学报,2013, 37(4):60-66.
- WANG Z, GONG J, YIN T N, et al. Steady-state hydraulic thermodynamic calculation algorithm in long gas-condensate pipeline[J]. Journal of Northeast Petroleum University,2013,37(4):60-66.
- [6] 垢艳侠,武志德,祁红林,等. 安宁盐穴储气库盖层密封性评价[J]. 中国井矿盐,2013,44(4):16-19.
- GOU Y X, WU Z D, QI H L, et al. Assessment on the cap rock tightness of the gas storehouse of Anning salt cavern[J]. China Well and Rock Salt,2013,44(4):16-19.
- [7] 庞晶,钱根宝,王彬,等. 新疆H气田改建地下储气库的密封性评价[J]. 天然气工业,2012,32(2):83-85.
- PANG J, QIAN G B, WANG B, et al. Evaluation of sealing ability of underground gas storage converted from the Xinjiang H gas field[J]. Natural Gas Industry,2012,32(2):83-85.
- [8] 舒萍,高涛,王海燕,等. 大庆油田升平储气库盖层密封性划分标准及评价[J]. 大庆石油地质与开发, 2019,38(5):272-276.
- SHU P, GAO T, WANG H Y, et al. Cap rock sealing-property classifying standard and evaluation of Shengping gas storage in Daqing Oilfield[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing,2019,38(5): 272-276.
- [9] 贾善坡,张辉,林建品,等. 含水层储气库泥质岩盖层封气能力定量评价研究:以里坦凹陷D5区二叠系含水层构造为例[J]. 水文地质工程地质,2016, 43(3):70-86.
- JIA S P, ZHANG H, LIN J P, et al. Quantitative assessment of the gas-sealing capacity of the Permian claystone caprock for the D5 aquifer gas storage in the Litan sag[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016,43(3):70-86.
- [10] 孟祥杰,郭发军,陈洪,等. 含水层构造改建地下储气库盖层封闭能力评价研究:以冀中拗陷大5目标为例[J]. 长江大学学报(自然科学版),2016,13(32):32-39.
- MENG X J, GUO F J, CHEN H, et al. Evaluation of sealing ability of aquifer caprock for reconstructing underground gas storage: By taking Da5 target of Jizhong Depression for example[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition),2016,13(32):32-39.
- [11] 刘团辉,郭发军,张辉,等. 含水层构造改建地下储气库储层评价研究:以冀中拗陷大5井区二叠系砂岩为例[J]. 油气藏评价与开发,2017,7(2):13-22.
- LIU T H, GUO F J, ZHANG H, et al. Evaluation of subsurface gas reservoir reconstruction by aquifer structure: Taking Permian water-cut sandstone in central Hebei depression as an example[J]. Reservoir Evaluation and Development,2017,7(2):13-22.
- [12] LINDBLOM U E. A conceptual design for compressed hydrogen storage in mined cavern[J]. International Journal of Hydrogen Energy,1985,10(10):667-675.
- [13] SIMBECK D R. CO₂ capture and storage:The essential bridge to the hydrogen economy[J]. Energy,2004,29(9/10):1633-1641.
- [14] TRUCHE L, JODIN-CAUMON M, LEROUGE C. Sulphide mineral reactions in clay-rich rock induced by high hydrogen pressure: Application to disturbed or natural settings up to 250 °C and 30 Bar[J]. Chemical Geology, 2013, 351(2):217-228.
- [15] ZIVAR D, KUMAR S, FOROOZESH J. Underground hydrogen storage: A comprehensive review[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2021,46(45): 23436-23462.
- [16] 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): 1628-1640.
- JIA S P, JIN F M, ZHENG D W, et al. Evaluation indices and classification criterion of aquifer site for gas storage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(8): 1628-164.
- [17] 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): 1433-1445.
- JIN F M, JIA S P, ZHANG H, 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): 1433-1445.
- [18] 林建品, 贾善坡, 刘团辉, 等. 枯竭气藏改建储气库盖层封闭能力综合评价研究: 以兴 9 枯竭气藏为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S2): 4099-4107.
- LIN J P, JIA S P, LIU T H, et al. Comprehensive evaluation of sealing ability of mudstone cap rock for Xing 9 depleted gas reservoir in reconstructing underground gas storage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S2): 4099-4107.
- [19] 刘林, 桑琴, 曹建, 等. 枯竭气藏改建储气库盖层封闭能力综合评价: 以川西北中坝气田须二气藏为例[J]. 大庆石油地质与开发, 2022, 41(6): 42-50.
- LIU L, SANG Q, CAO J, et al. Comprehensive evaluation of sealing capacity of depleted gas reservoir reconstructed to gas storage: A case study of Xu 2 gas reservoir in Zhongba Gas Field, northwest Sichuan[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2022, 41(6): 42-50.
- [20] 岳刚, 蒋有录, 苏圣民, 等. 松辽盆地梨树断陷下白垩统泥岩盖层特征及封闭能力定量评价[J]. 大庆石油地质与开发, 2023, 42(5): 18-26.
- YUE G, JIANG Y L, SU S M, et al. Characteristics and quantitative evaluation of sealing capability of lower cretaceous mudstone caprock in Lishu rift of Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2023, 42(5): 18-26.
- [21] LEWANDOWSKA J, TARKOWSKI R, ULIASZ B. Screening and ranking framework for underground hydrogen storage site selection in Poland[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(9): 4401-4414.
- [22] 闫伟, 冷光耀, 李中, 等. 氢能地下储存技术进展和挑战[J]. 石油学报, 2023, 44(3): 556-568.
- YAN W, LENG G Y, LI Z, et al. Progress and challenges in underground hydrogen storage technology[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(3): 556-568.
- [23] 付广, 姜振学. 影响盖层形成和发育的地质因素分析[J]. 天然气地球科学, 1994, 5(5): 6-11.
- FU G, JIANG Z X. Analysis of geological factors affecting the formation and development of cap beds[J]. Natural Gas Geoscience, 1994, 5(5): 6-11.
- [24] 刘方槐. 盖层在气藏保存和破坏中的作用及其评价方法[J]. 天然气地球科学, 1991, 2(5): 220-227.
- LIU F H. The role of cap layer in gas reservoir preservation and destruction and its evaluation method[J]. Natural Gas Geoscience, 1991, 2(5): 220-227.
- [25] DU Z Y, DAI Z X, YANG Z J, et al. Exploring hydrogen geologic storage in China for future energy: Opportunities and challenges[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 196(5): 114366-114384.
- [26] YEKEEN N, AL-YASERI A, NEGASH B M, et al. Clay-hydrogen and clay-cushion gas interfacial tensions: Implications for hydrogen storage[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(44): 19155-19167.
- [27] YEKTA A E, PICHAVANT M, AUDIGANE P. Evaluation of geochemical reactivity of hydrogen in sandstone: Application to geological storage[J]. Applied Geochemistry, 2018, 95(3): 182-194.
- [28] AMID A, MIGNARD D, WILKINSON M. Seasonal storage of hydrogen in a depleted natural gas reservoir[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(12): 5549-5558.
- [29] REITENBACH V, GANZER L, ALBRECHT D, et al. Influence of added hydrogen on underground gas storage: A review of key issues[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(11): 6927-6937.
- [30] TRUCHE L, JODIN-CAUMON M C, LEROUGE C, et al. Sulphide mineral reactions in clay-rich rock induced by high hydrogen pressure: Application to disturbed or natural settings up to 250 °C and 30 Bar[J]. Chemical Geology, 2013, 351(2): 217-228.
- [31] BO Z, ZENG L, CHEN Y, et al. Geochemical reactions-induced hydrogen loss during underground hydrogen storage in sandstone reservoirs[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(38): 19998-20009.
- [32] 吕延防, 万军, 沙子莹, 等. 被断裂破坏的盖层封闭能力评价方法及其应用[J]. 地质科学, 2008, 43(1): 162-174.
- LYV Y F, WAN J, SHA Z X, et al. Evaluation method for seal ability of cap rock destructed by faulting

- and its application [J]. Chinese Journal of Geology, 2008, 43(1): 162-174.
- [33] 鲁雪松,柳少波,田华,等. 深层背斜圈闭中泥岩盖层完整性评价方法及其应用:以四川盆地川中地区震旦系气藏为例[J]. 石油学报, 2021, 42(4): 415-427.
- LU X S, LIU S B, TIAN H, et al. An evaluation method for the integrity of mudstone caprock in deep anticlinal traps and its application: A case study of the Sinian gas reservoirs in the central Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(4): 415-427.
- [34] 贾善坡,郑得文,金凤鸣,等. 含水层构造改建地下储气库评价体系[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(3): 857-867.
- JIA S P, ZHENG D W, JIN F M, et al. Evaluation system of selected target sites for aquifer underground gas storage [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(3): 857-867.
- [35] 付广,王浩然,胡欣蕾. 断裂带盖层油气封盖断接厚度下限的预测方法及其应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(3): 30-37.
- FU G, WANG H R, HU X L. Prediction method and application of caprock faulted-contact thickness lower limit for oil-gas sealing in fault zone [J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2015, 39(3): 30-37.
- [36] 崔传智,李惊鸿,吴忠维,等. CO₂ 封存中盖层突破压力计算与分析[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(3): 322-329.
- CUI C Z, LI J H, WU Z X, et al. Calculation and analysis of breakthrough pressure of caprock in CO₂ storage [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(3): 322-329.
- [37] CHABAB S, THÉVENEAU P, CORVISIER J, et al. Thermodynamic study of the CO₂-H₂O-NaCl system: Measurements of CO₂ solubility and modeling of phase equilibria using Soreide and Whitson, electrolyte CPA and SIT models [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2019, 91(7): 102825-102873.
- [38] LABUS K, TARKOWSKI R. Modeling hydrogen-rock-brine interactions for the Jurassic reservoir and cap rocks from Polish Lowlands [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(20): 10947-10962.
- [39] 贾善坡,温曹轩,付晓飞,等. 气藏型储气库盖层应力场演化规律解析[J]. 石油学报, 2023, 44(6): 983-999.
- JIA S P, WEN C X, FU X F, et al. The evolution law of caprock stress field of gas reservoir-type gas storage [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(6): 983-999.
- [40] 李俊飞,王鹏飞,杨建民,等. 渤海湾盆地 D 油田三角洲前缘储层隔夹层研究[J]. 新疆石油天然气, 2018, 14(3): 7-11.
- LI J F, WANG P F, YANG J M, et al. Research on interlayers of delta front reservoir in D oilfield, Bohai bay basin [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2018, 14(3): 7-11.
- [41] 麻慧博. 克拉美丽气田重复压裂选井方法[J]. 新疆石油天然气, 2015, 11(4): 50-54.
- MA H B. The method of well selection for refracturing in Kelameili Gas [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2015, 11(4): 50-54.
- [42] 孙娜. 水驱油田特高含水期油井变化评价指标体系[J]. 新疆石油天然气, 2015, 11(4): 55-59.
- SUN N. Evaluation index system for oil well of water flooding oilfield in ultra - high water cut stage [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2015, 11(4): 55-59.
- [43] 陈晨,王克. 鄂尔多斯盆地东缘煤层气储层物性特征规律研究[J]. 中外能源, 2022, 27(4): 15-21.
- CHEN C, WANG K. Study on physical characteristics of coalbed methane reservoirs in eastern margin of Ordos Basin [J]. Sino-Global Energy, 2022, 27(4): 15-21.
- [44] 张玲,魏绍蕾,黄学斌,等. 基于综合权重法的页岩气储量评价方法探讨[J]. 石油实验地质, 2017, 39(5): 694-699.
- ZHANG L, WEI S L, HUANG X B, et al. Shale gas reserve quality evaluation based on a comprehensive weighting method [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(5): 694-699.
- [45] 李健,廖成锐,杨志伟,等. 含水构造储气库选址与评价初探[J]. 中国石油大学胜利学院学报, 2022, 36(3): 66-70.
- LI J, LIAO C R, YANG Z W, et al. Preliminary study on site selection and evaluation of water-bearing structural gas storage [J]. Journal of Shengli College China University of Petroleum, 2022, 36(3): 66-70.
- [46] 赵伟,邱隆伟,姜在兴,等. 济阳拗陷民丰洼陷古近系沙河街组三段中亚段沉积相展布与演化[J]. 沉积学报, 2011, 29(2): 255-267.
- ZHAO W, QIU L W, JIANG Z X, et al. Distribution and evolution of sedimentary facies of the middle of the third member of shahejie formation, paleogene system in minfeng sub-sag, Jiyang Depression [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(2): 255-267.
- [47] 国家能源局. SY/T 5163—2018 沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物 X 射线衍射分析方法[S]. 北京:石油工业出版社, 2018.

[48] 俞杨烽,康毅力,游利军. 水膜厚度变化:特低渗透砂岩储层盐敏性的新机理[J]. 重庆大学学报, 2011,34(4):67-71.
YU Y F, KANG Y L, YOU L J. Thickness change of water film: New mechanism of salt sensitivity in extra low permeability sandstone reservoirs[J]. Journal of Chongqing University,2011,34(4):67-71.

[49] 赵振允. 流体注入下断层力学稳定性及其动态密封性研究[D]. 武汉:长江大学,2021.

[50] 严印强,李雅,郭晟豪,等. 基于压缩形变特征的岩石脆性评价方法研究及应用[J]. 新疆石油天然气, 2021,17(4):21-27.

YAN Y Q,LI Y, GUO S H, et al. Study and application of rock brittleness evaluation method based on compressive deformation characteristics [J]. Xinjiang Oil & Gas,2021,17(4):21-27.

[51] 刁海燕. 泥页岩储层岩石力学特性及脆性评价[J]. 岩石学报,2013,29(9):3300-3306.
DIAO H Y. Rock mechanical properties and brittleness evaluation of shale reservoir[J]. Acta Petrologica Sinica,2013,29(9):3300-3306.

(编 辑 雷雁林)