

袁珍,孙楠,陈立军,等. 志丹地区西部长8段致密砂岩孔喉结构分形特征[J]. 西安科技大学学报, 2026, 46(2): 420-430.
YUAN Zhen, SUN Nan, CHEN Lijun, et al. Fractal characteristics of tight sandstone pore throat structure of Chang 8 Member in the western Zhidan area[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2026, 46(2): 420-430.

志丹地区西部长8段致密砂岩孔喉 结构分形特征

袁珍^{1,2}, 孙楠^{1,2}, 陈立军³, 孙明⁴, 姜鹏飞⁴

1. 西安石油大学 地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065;
2. 西安石油大学 陕西省油气成藏地质学重点实验室, 陕西 西安 710065;
3. 延长油田股份有限公司 勘探开发技术研究中心, 陕西 延安 716000;
4. 延长油田股份有限公司 志丹采油厂, 陕西 延安 716000)

摘要:为精细表征志丹地区西部长8段致密砂岩微观孔隙结构特征,明确非均质性,探讨所蕴含的地质意义,根据铸体薄片、扫描电镜、X-射线衍射、高压压汞、油水相渗等试验,明确孔喉结构对储层物性的影响。结果表明:志丹地区西部长8段致密砂岩储集空间以次生溶蚀孔隙和残余粒间孔隙为主,喉道体系类型多样,含紧缩式、板片状、弯曲片层状及微管束集合状喉道;依据压汞试验曲线形态,储层可分为I类和II类,排驱压力与物性参数呈降低趋势,孔隙结构非均质性逐渐增大;储层分形曲线呈三段式且有明显拐点,分形维数 $D_1(2.5981 \sim 2.8283)$, 平均 2.7285) $> D_2(2.5706 \sim 2.7801)$, 平均 2.7129) $> D_3(2.2361 \sim 2.8515)$, 平均 2.5916),大孔喉非均质性更强;在致密砂岩储层中,矿物组分含量的差异是导致储层非均质性的重要因素,而储层非均质性的强弱直接决定了储层物性的优劣及孔隙结构的复杂程度。

关键词:致密砂岩;孔隙结构;分形特征;长8储层;志丹地区西部

中图分类号:TE 122.3

文献标志码:A

文章编号:1672-9315(2026)02-0420-11

DOI:10.13800/j.cnki.xakjdxxb.2026.0217

Fractal characteristics of tight sandstone pore throat structure of Chang 8 Member in the western Zhidan area

YUAN Zhen^{1,2}, SUN Nan^{1,2}, CHEN Lijun³, SUN Ming⁴, JIANG Pengfei⁴

(1. School of Earth Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

3. Exploration and Development Technology Research Center, Yanchang Oilfield Co., Ltd., Yan'an 716000, China;

4. Zhidan Oil Production Plant, Yanchang Oilfield, Co., Ltd., Yan'an 716000, China)

Abstract: In order to precisely characterize the microporosity features of the tight sandstones of Chang 8 Member in the western Zhidan area, clarify heterogeneity, and discuss the associated geological implications. Using cathodoluminescence thin sections, scanning electron microscopy, X-ray diffraction, high-pressure mercury injection, oil-water relative permeability tests, we determined the influence of pore-throat architecture on reservoir properties. The results indicate that: The storage space of Chang 8

收稿日期:2025-10-18

基金项目:陕西省重点研发计划项目(2023-YBGY-079)

通信作者:袁珍,女,陕西西安人,博士,副教授, E-mail:cloud_yz@163.com

Member tight sandstones in the western Zhidan area is dominated by secondary dissolution pores and residual intergranular pores. Throat systems are diverse, including constricted, platy, curved-lamina, and micro-tube-bundle assemblage types. Based on the shapes of mercury-injection curves, reservoirs can be classified into Type I and Type II; displacement pressure and petrophysical parameters show a decreasing trend while pore-throat structural heterogeneity progressively increases. Reservoir fractal curves are three-segmented with distinct inflection points; fractal dimensions follow the order: D_1 (2.598 1 ~ 2.828 3, mean 2.728 5) > D_2 (2.570 6 ~ 2.780 1, mean 2.712 9) > D_3 (2.236 1 ~ 2.851 5, mean 2.591 6), indicating stronger heterogeneity in large pore-throat domains. In tight sandstone reservoirs, differences in mineral assemblage contents are an important cause of reservoir heterogeneity, and the degree of heterogeneity directly determines reservoir quality and the complexity of pore structure.

Key words: tight sandstone; porestructure; fractal characteristics; Chang 8 reservoir; the western of Zhidan area

0 引言

随着全球能源消耗持续上升及传统油气资源可开采储量日益减少,致密砂岩油气等非常规资源已成为油气领域关注的热点^[1-4]。这类储层的渗透特性及微观孔隙结构表征一直是业界研究的核心问题^[5-8]。相较于常规储层,致密砂岩储层的微观孔隙系统表现出结构复杂、空间异质性强、组合形式多样等特征,这些因素直接影响储集性能与流体运移效率,为实现对致密砂岩储层的精细评价与高效开发,须对微观孔隙体系进行精确、系统的定量表征。近几年来,国内学者从不同角度对致密砂岩孔隙结构进行了研究和分析。王斌等通过结合低温氮气吸附与核磁共振试验方法,揭示了川东南石牛栏组页岩孔隙系统的分形特征具有明显的尺度依赖性^[9];张全培等以分形理论为基础,综合运用高压压汞法、扫描电镜显微分析及铸体薄片鉴定技术,系统研究了石英和黏土矿物等组分对不同孔径孔隙发育的差异性影响^[10];高洁等创新性地整合了高压压汞测试、恒速压汞分析和核磁共振技术,系统揭示了各类孔隙结构组合中流体可动性的分布特征^[11]。

分形理论旨在描述自然界中不规则、非稳定且高度复杂的几何形态,是分析具有相似性复杂体系的重要工具,在石油勘探与储层孔隙结构研究领域已得到广泛应用^[12-14],不仅能够有效量化低渗储层孔隙结构的复杂程度,亦可作为连接储层微观孔隙特征与宏观物性行为的关键纽带^[15]。

鄂尔多斯盆地志丹地区延长组长8段储层孔喉结构研究还相对薄弱且缺少分形特征研究,受

多种因素影响,储层孔喉结构具有明显非均质性,亟需探讨分形特征对储层物性与孔喉结构的影响。通过X射线衍射技术测定岩石矿物组成,结合扫描电镜观察微观孔隙形态,并运用高压压汞和油水相对渗透率测试定量评估储层物性特征。分析获取的试验数据,明确储集空间构型特征,建立分形几何模型,实现储层参数的精确量化表征。

1 地质背景

志丹地区西部位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡中部(图1)^[16],地质构造条件简单,西倾单斜背景上发育小型低幅鼻状隆起^[17],上三叠统延长组的长8段沉积期,志丹地区西部处于三角洲前缘沉积环境,这一时期的沉积物主要受来自东北方向的物源供给控制^[18-19],沉积微相类型以水下分流河道和分流间湾为主^[20],岩性主要为灰色、灰黑色砂岩和黑色泥岩,类型以灰色细粒长石岩屑砂岩为主,碎屑颗粒之间主要以点-线接触和线接触为主,仅有极少量颗粒呈现点接触的结构特征,具备中等成分成熟度和中等-较高结构成熟度的双重特征^[21-22],为判断储层结构提供了关键岩石学特征。

2 试验方法及理论基础

前人借助恒速压汞测试对致密砂岩孔喉形态及其分形特性开展了分析,指出其孔喉结构具备分形性质,并可通过分形维数定量描述储层的非均质程度^[23-24]。然而,恒速压汞试验的进汞压力相对较低,难以准确揭示微纳米级孔喉的分形规律。高压压汞技术能够实现更高的进汞压力(最高可达200 MPa),且可探测的孔喉半径范围更

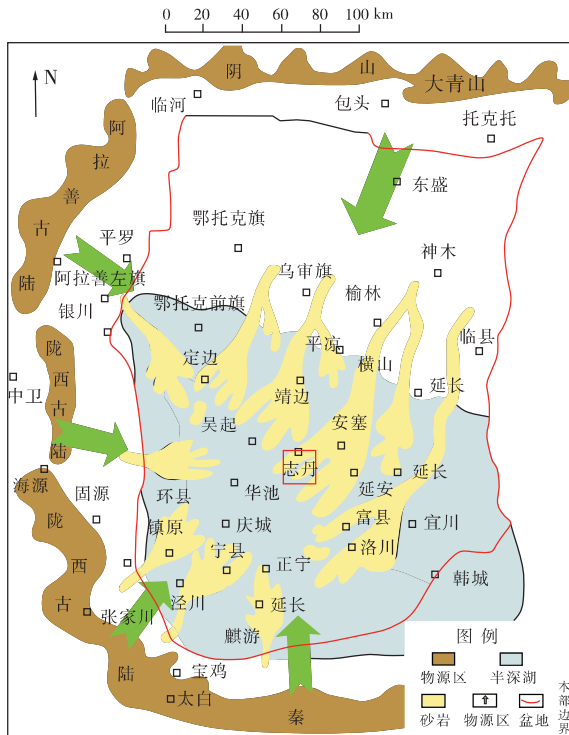


图1 志丹地区西部长8段构造单元位置
(据文献[16]修改)

Fig.1 Location of the structural units of Chang 8 Member in the western Zhidan area (Modified according to Ref. [16])

宽^[25],因此,采用高压压汞方法能够更有效地刻画研究区致密砂岩储层的孔喉结构及其分形特征,从而为该类储层的微观表征提供更为可靠的依据。

3 试验结果

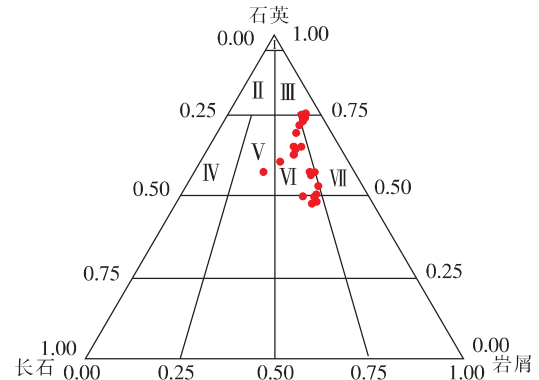
3.1 岩石学特征

志丹地区西部延长组长8段岩石学特征结果如图2所示,以长石岩屑砂岩为主,少量岩屑砂岩。沉积粒度细,总体以细砂为主,分选中等-好,磨圆主要为次棱角状-次圆状。

3.2 物性和孔隙类型

储层孔隙类型集中表现为粒间孔隙与粒内溶

蚀孔隙(图3(a)),且孔隙非均质性显著,多数孔隙为压实作用或胶结作用形成的残余孔隙(图3(b)),形态以三角形或多边形为主,孔隙边缘呈平直状,内部无杂质残留且洁净度良好。



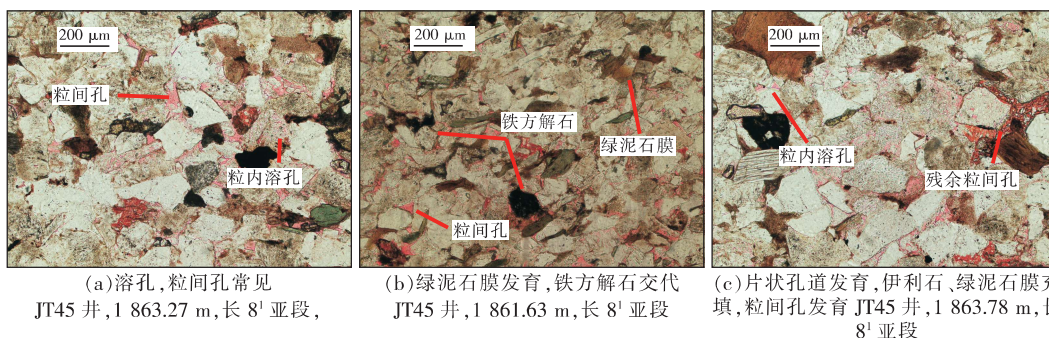
I-石英砂岩; II-长石石英砂岩; III-岩屑石英砂岩 IV-长石砂岩; V-岩屑长石砂岩; VI-长石岩屑砂岩; VII-岩屑砂岩

图2 志丹地区西部长8段砂岩分类三角图

Fig.2 Triangular diagram of sandstone classification of Chang 8 Member in the western Zhidan area

在孔隙填充特征方面,填充物质以铁方解石为主(图3(c)),同时发育绿泥石薄膜式胶结(图3(d))、方解石胶结物及丝状伊利石胶结物(图3(e));此外,孔隙内部可见块状黄铁矿集合体(图3(f))与石英次生加大现象(图3(g)),晶间孔与微裂缝仅在局部区域偶见(图3(h),(i))。多数孔隙直径小于0.1 μm;剩余粒间孔隙与溶蚀孔隙常被杂基和胶结物充填,进而形成大量晶间孔隙,整体孔隙连通性处于较低水平,对储层储集性能具有直接影响。

微观结构显示,储层中同时发育片状、弯片状微细喉道以及由孔隙边缘溶蚀扩展或中央胶结物溶解形成的缩颈型喉道(图4)。这种复合型喉道组合显著增强了孔隙结构的复杂性。低孔隙度储层的孔隙类型较为单一,孔径分布范围窄且空间展布相对均质,喉道类型以紧缩型喉道为主。



(a)溶孔,粒间孔常见
JT45井,1 863.27 m,长8'亚段,

(b)绿泥石膜发育,铁方解石交代
JT45井,1 861.63 m,长8'亚段

(c)片状孔道发育,伊利石、绿泥石膜充填,粒间孔发育
JT45井,1 863.78 m,长8'亚段

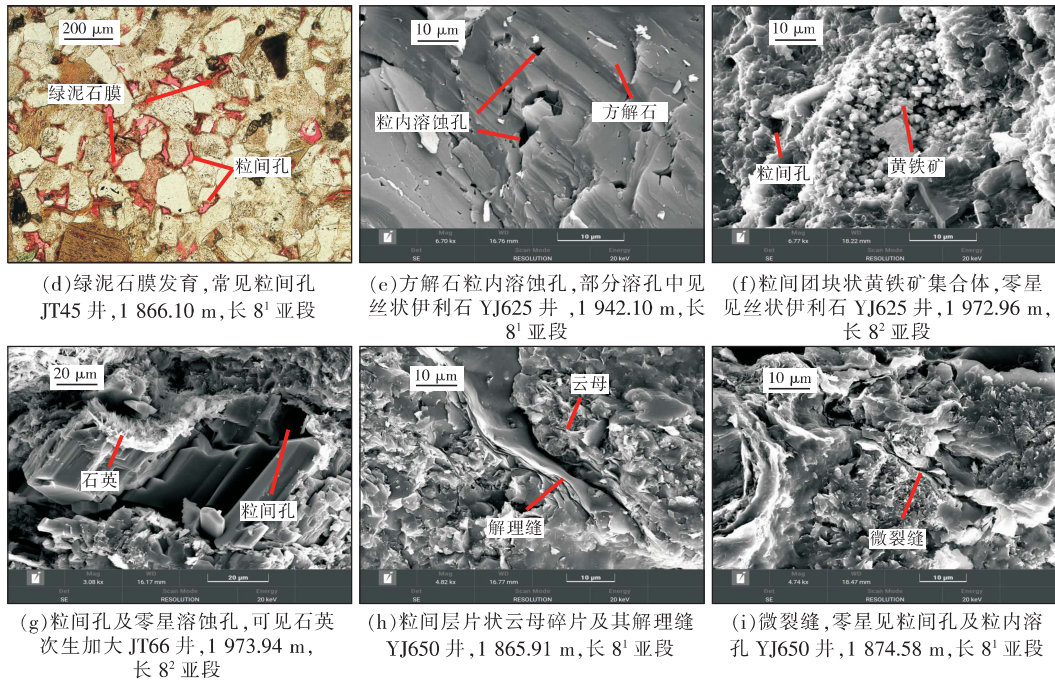


图 3 志丹地区西部长 8 段储层孔隙类型及矿物组分

Fig. 3 Reservoir porosity types and mineral composition of Chang 8 Member in the western Zhidan area

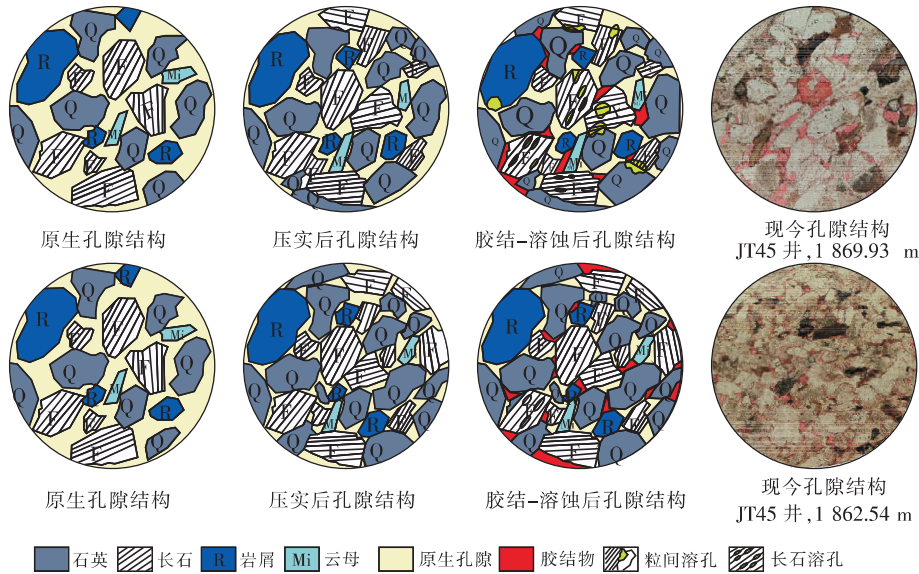


图 4 储层多尺度孔隙发育模式图(据文献[24]修改)

Fig. 4 Reservoir multi-scale pore development pattern diagram(Modified according to Ref. [24])

3.3 孔喉结构特征

根据毛管压力曲线形态特征和排驱压力可将长 8 储层孔隙结构分为 I、II 这 2 类。

I 类储层汞注入曲线显示, 随注入压力的逐步升高, 进汞量呈现出较为平缓的上升趋势。储层的排驱压力较低, 平均值为 0.18 MPa, 指示储层具有良好的物性条件。储层的分选系数平均值为 2.49, 表明孔喉系统的分选性较差。从孔喉半径分

布特征来看, I 类储层峰值主要位于 0.7 μm 与 5 μm (图 5(a)(b)), 其呈现出典型的“双峰”, 整体呈现出低均值高分选表明储层均一的微小孔喉为主, 高变异系数暗示存在高变异系数暗示存在少量大孔喉或微裂缝。

II 类储层峰值主要位于 0.7 μm (图 5(c)(d)), 排驱压力较 I 类储层略高为 0.72 MPa, 孔喉半径分布呈现“单峰”(图 5(d)), 主要峰值介于

0.3 ~ 0.8 μm , II类曲线退汞效率明显高于 I 类曲线,退汞效率平均为 28.82%,分选系数为 1.93,表

明孔喉分选性较好。

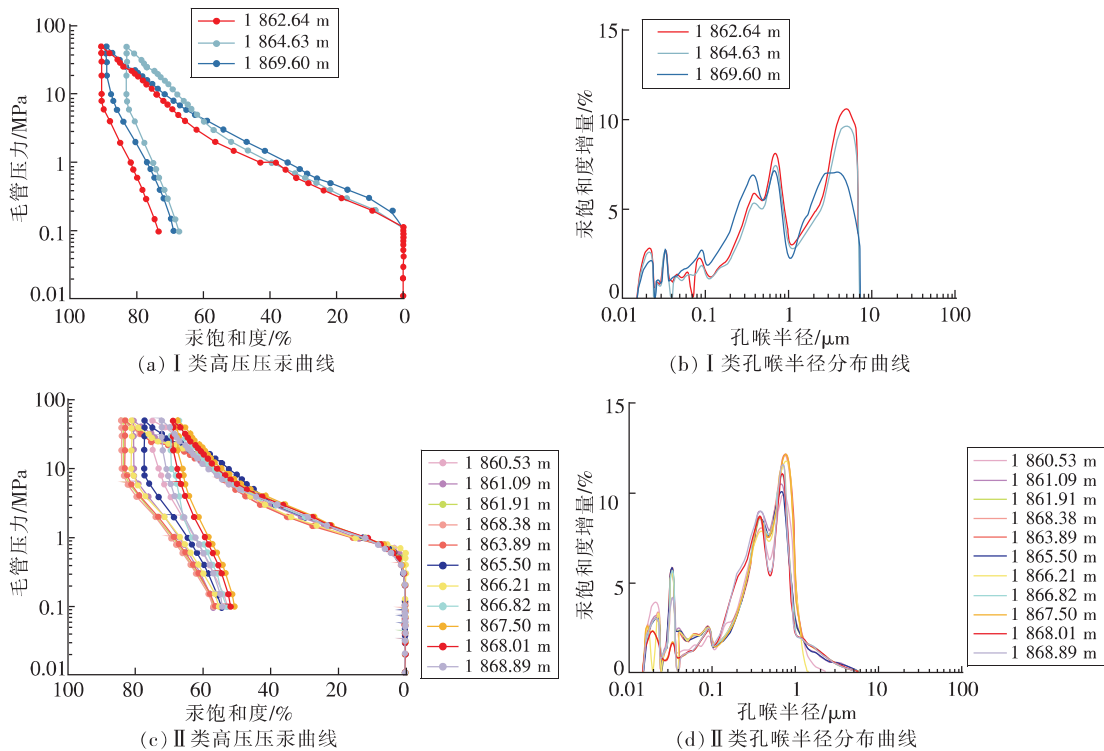


图5 不同类型储层典型样品高压压汞曲线及孔喉半径分布曲线

Fig. 5 High pressure mercury injection curves and pore throat radius distribution curve of typical samples of different types of reservoirs

根据孔隙分类标准^[26],有效孔隙空间类型分为4类:大孔(孔径 $\geq 1\ 000\ \text{nm}$)、中孔(孔径 $100 \sim 1\ 000\ \text{nm}$)、过渡孔(孔径 $10 \sim 100\ \text{nm}$)和微孔(孔径 $\leq 10\ \text{nm}$)。志丹西部地区长8段致密砂岩样品主要发育中孔、过渡孔和微孔,大孔几乎不发育。

3.4 分形特征

3.4.1 分形理论

致密砂岩储层表现出显著的非均质特性,在研究中常运用分形维数这一参数对其进行定量刻画。分形维数的数值大小与孔隙表面的粗糙状况密切相关^[27-29]。当孔喉具备分形特征时,其分形维数的取值范围处于 $2.0 \sim 3.0$ 。分形维数越趋近于 3.0 ,意味着孔隙结构愈发复杂,储层的非均质程度也就越高。贺承祖等^[30]基于高压压汞试验结果推导出分形维数的计算表达式为

$$S = \left(\frac{P_c}{P_{\min}} \right) D - 3 \quad (1)$$

式中 P_{\min} 为 r_{\max} 对应的毛管压力,MPa。

对式(1)两边取对数,得

$$\lg S = (D - 3) \lg P_c - (D - 3) \lg P_{\min} \quad (2)$$

由式(2)可知,具有分形特征的储层 $\lg S$ 与 $\lg P_c$ 呈线性关系,分形维数通过该直线的斜率 H 求得

$$D = 3 + H \quad (3)$$

式中 H 为 $\lg S$ 与 $\lg P_c$ 直线的斜率。

3.4.2 分形结果

通过构建双对数坐标系下 $\lg(1 - S_{\text{Hg}})$ 与 $\lg P_c$ 的线性关系模型,验证了样品孔隙系统的分形特性。各样品相关系数(R^2)均高于 0.9 ,表明分形模型可有效表征该类岩石的孔隙非均质性。压汞曲线呈现典型的三段式分布特征,各段斜率差异显著。经分段线性回归处理,获得3个独立的分形维数: D_1 反映微米级孔隙的几何复杂程度, D_2 表征过渡孔隙的形态学特征, D_3 则描述介孔尺度结构的非均质性。这种多尺度分形行为揭示了岩石内部孔隙系统的分层结构特征(图6),且不同孔径区间的分形曲线均表现出强线性相关性。

储层孔隙系统的分形特征呈现显著的多尺度分异性,微孔(D_1)、过渡孔(D_2)及中孔(D_3)的分

形维数均分布于 2~3 的合理区间,且各维数间表现出较强的关联性(相关系数 > 0.9)。D₁ 显著高于 D₂,D₂ 又明显大于 D₃,表明微孔和过渡孔的结构非均质性更强,孔隙空间分布更为离散。

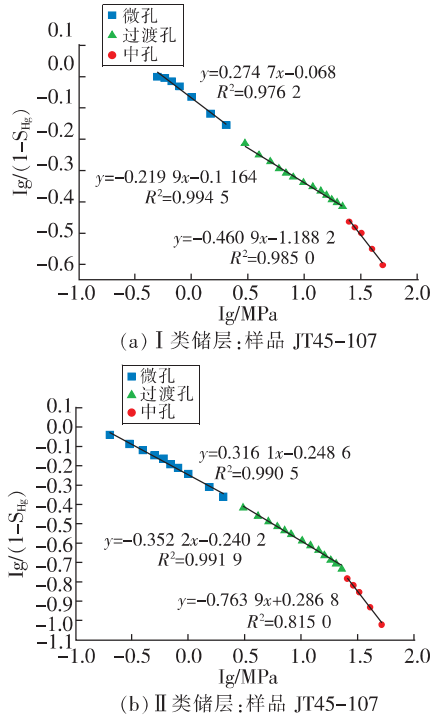


图 6 不同类型储层典型样品分形特征

Fig. 6 Fractal characteristics of typical samples of different types of reservoirs

基于各孔径区间的孔隙度占比进行加权计算,可得到表征全尺度孔喉系统的综合分形维数,从而更全面地反映储层孔隙结构的复杂程度。对微孔、过渡孔和中孔孔隙度加权平均,得到整个孔喉的总分形维数

$$D = \frac{D_1\phi_1 + D_2\phi_2 + D_3\phi_3}{\phi_1 + \phi_2 + \phi_3} \quad (4)$$

式中 ϕ_i 为各孔径区间的孔隙度贡献率,% ; D_i 为对应分形维数。

4 讨论

4.1 分形维数与储层物性

储层质量评价需综合考虑岩石固有特性和孔喉构型特征。通过建立分形参数与物性参数之间的定量关系,中孔分形维数(D₃)与孔隙度、渗透率均呈显著负相关趋势,而微孔(D₁)和过渡孔(D₂)分形维数与物性参数未表现出显著关联(图 7)。长 8 储层的储渗性能主要受控于宏观孔喉结构的

复杂程度。

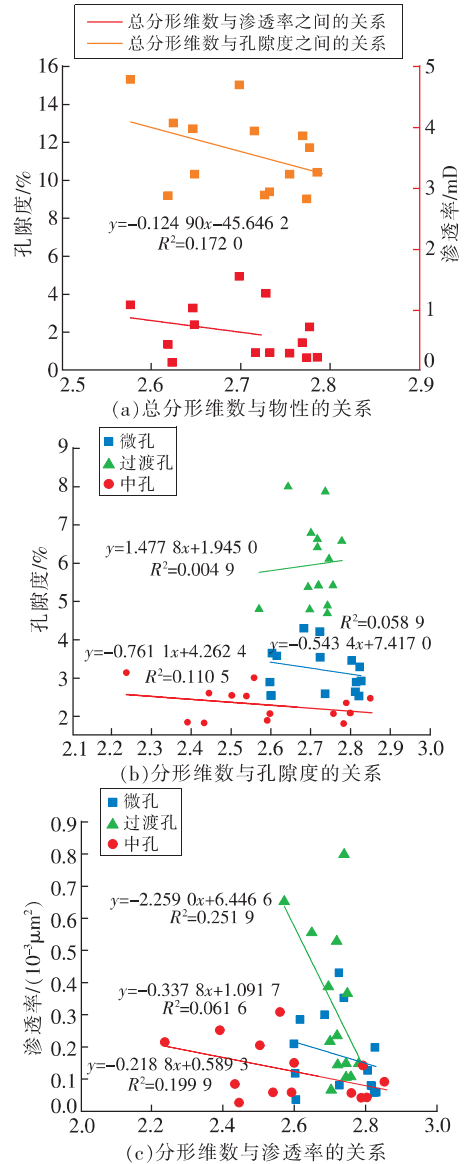


图 7 长 8 段样品孔喉分形维数与储集物性的关系

Fig. 7 Relationship between pore throat fractal dimension and reservoir physical properties of Chang 8 Member samples

随着 D₃ 值的增大,孔喉结构呈现以下变化特征:微观孔隙构型趋于复杂化,细小孔喉在储集空间中的占比提升,孔喉分布呈现细偏态特征,非均质程度增加。值得注意的是,D₃ 与渗透率的相关系数(R² = 0.199 9)显著高于其与孔隙度的相关性(R² = 0.110 5),表明中孔结构的复杂化对储层渗流能力的抑制作用更为突出。

4.2 分形维数与孔喉结构

歪度仅和 D₃ 呈现出显著的负相关性,孔喉分布的对称性会对中孔的分形特征产生作用,而对微孔与过渡孔分形特征的影响程度相对较小,歪

度的数值越大,意味着储层的非均质特性就越强(图8(a))。

D_3 与分选系数之间表现出负向关联性,而 D_1 、 D_2 与分选系数的关联程度则无显著特征,孔喉尺寸的分特性对中孔的非均质性有影响,对微孔和

过渡孔的非均质性无明显影响(图8(b))。

最大进汞饱和度只与 D_3 具有较好的负相关性,尽管中孔的数量少于过渡孔与微孔的数量之和,然而中孔对储层储集空间的贡献却更为突出(图8(c))。

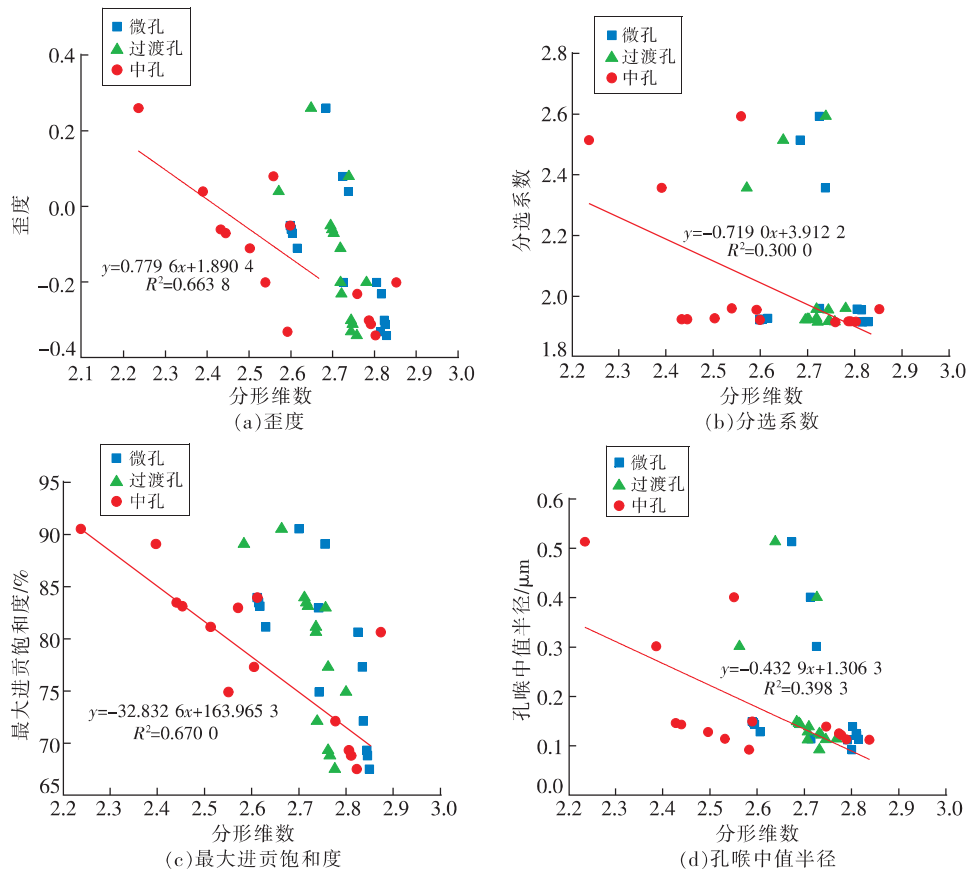


图8 长8段分形维数与孔喉结构参数的关系

Fig. 8 Relationship between fractal dimension and pore throat structure parameters of Chang 8 Member

孔喉半径中值和 D_3 呈现出明显的负相关关系,这意味着当中孔的分形维数越小时,其孔喉结构会更加规则,孔径的分布范围则越大(图8(d))。

D_1 与各类孔喉结构参数之间具有较强的关联性,其中与最大进汞饱和度及外部的关联表现尤为显著。中孔的非均质特性以及表面粗糙程度是影响储层渗流能力和储集空间大小的关键要素,在储层孔隙度的形成过程中发挥着最为重要的作用。

4.3 分形维数与矿物组分

岩石矿物组成的差异会显著影响储集空间的微观结构,其影响机制主要表现为孔隙几何形态在空间非均质性变化上,这种微观结构特征可通过多尺度分形维数实现定量表征,其中微孔(D_3)、过渡孔(D_2)及中孔(D_1)分形参数分别对应不同

孔径区间的结构复杂度。为系统解析矿物成分对储层非均质性的控制机理,本研究采用 Pearson 相关性分析方法,定量表征了石英、长石、碳酸盐矿物(以方解石为主)及黏土矿物含量与分形维数间的耦合关系。

长8段储层的孔隙结构复杂度与矿物组分存在显著相关性(图9(a))。分形维数随石英矿物含量的升高而增大,石英是一种化学稳定性好、耐风化的矿物,由于石英晶体的完整性较高,裂缝发育程度较低,因此主要形成残余粒间孔隙,较少形成溶蚀孔隙,普遍存在石英次生加大,进一步填充了原始孔隙空间,导致孔隙结构的复杂程度增加。图9(a)(b)(c)分形维数 D 与长石含量呈现出较为显著的正相关性,揭示了长石在影响储层孔隙结构复杂程度方面扮演着关键角色,长石化学稳

定性欠佳,在成岩作用过程中容易遭受溶蚀,随着储层内长石含量的上升,因长石溶蚀而形成的溶孔数量也随之增多,长石溶孔的发育为黏土矿物的生成营造了有利的环境条件,黏土矿物形成后,

会在孔隙和喉道中发生充填作用,这种充填作用改变了孔隙和喉道的原始形态与连通性,使得孔隙结构愈发复杂^[31],而孔隙结构复杂程度的增加,最终促使分形维数增大。

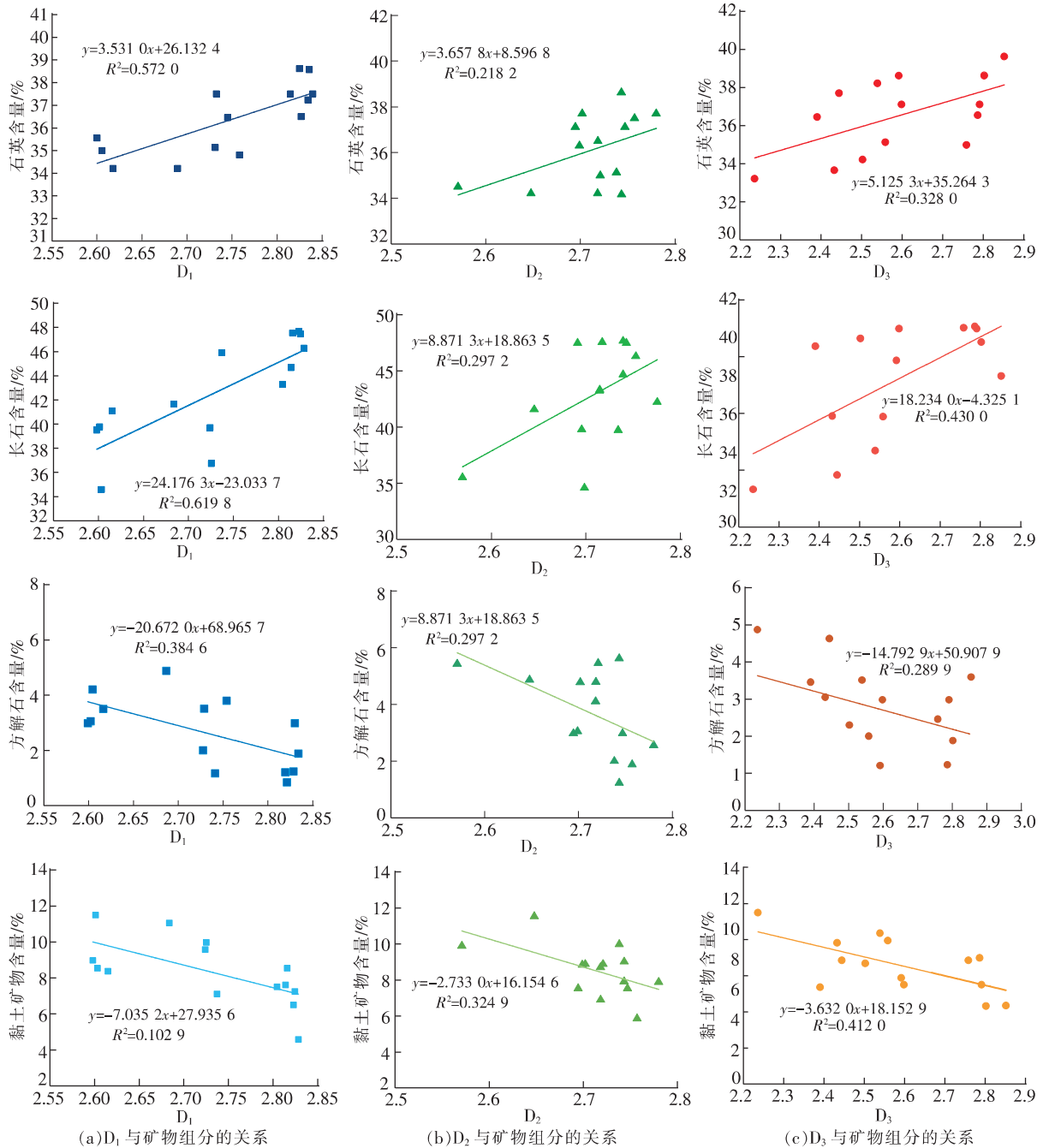


图 9 分形维数与矿物组分的关系

Fig. 9 Relationship between fractal dimension and mineral composition

在碎屑岩储层中,方解石作为典型胶结组分,其含量的增加会导致孔喉堵塞,使孔喉半径减小、孔隙形态改变,还会进一步削弱孔隙间的连通性能,孔隙结构变差,且对应分形维数呈现增大趋

势。黏土矿物具有较强的亲水性,遇水后易发生膨胀,导致孔隙空间减小、连通性降低。因此,黏土矿物含量越高,孔隙结构越复杂,分形维数越大。

5 结论

1) 志丹地区西部长 8 段致密砂岩储集空间以次生溶蚀孔隙和残余粒间孔隙为主, 喉道体系类型多样, 含紧缩式、板片状、弯曲片层状及微管束集合状喉道, 根据高压压汞曲线的形态和储层物性, 将储层划分为 I 类与 II 类。I 类储层孔喉半径分布呈现“多峰状”, 较大孔隙发育, 但连通性较差, 孔隙结构较为复杂; II 类储层孔隙大小分布呈“单峰状”, 较小孔隙发育孔喉分布较为集中, 且分选性和孔喉连通性较好。

2) 志丹地区西部长 8 段致密砂岩储层的孔喉结构具有三重分形特征。以分形曲线拐点为界划分为中孔 (D_1)、过渡孔 (D_2) 和微孔 (D_3), 统计分析显示, 分形维数呈现 $D_1 > D_2 > D_3$ 的变化趋势, 其中 D_1 平均值为 2.728 5, D_2 平均值为 2.712 9, D_3 平均值为 2.591 6, 表明中孔的溶蚀作用比微孔强烈, 微孔压实作用强烈, 形态规则故而分形维数较小。

3) 不同黏土矿物对孔喉分形维数的影响也不同。矿物组成的变化与大孔喉非均质性呈现明确关联性。随着石英与长石相对含量的增加, 大孔喉体系的非均质程度表现出减弱趋势, 这一规律在多区域储层试验中均得到验证。

参考文献 (References):

- [1] 张抗, 张立勤, 刘冬梅. 近年中国油气勘探开发形势及发展建议[J]. 石油学报, 2022, 43(1): 15-28, 111.
ZHANG Kang, ZHANG Liqin, LIU Dongmei. Situation of China's oil and gas exploration and development in recent years and relevant suggestions[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(1): 15-28, 111.
- [2] 徐延勇, 申建, 张兵, 等. 鄂尔多斯盆地中东部上古生界致密气成藏条件差异性分析[J]. 断块油气田, 2022, 29(5): 577-583.
XU Yanyong, SHEN Jian, ZHANG Bing, et al. Analysis on differences of tight gas accumulation conditions of Upper Paleozoic in central and eastern Ordos Basin[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2022, 29(5): 577-583.
- [3] 钟大康. 致密油储层微观特征及其形成机理: 以鄂尔多斯盆地长 6-长 7 段为例[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(1): 49-61.
ZHONG Dakang. Micro-petrology, pore throat characteristics and genetic mechanism of tight oil reservoirs: A case from the 6th and 7th members of Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(1): 49-61.
- [4] 钟红利, 张凤奇, 赵振宇, 等. 致密砂岩储层微观孔喉分布特征及对可动流体的控制作用[J]. 石油实验地质, 2021, 43(1): 77-85.
ZHONG Hongli, ZHANG Fengqi, ZHAO Zhenyu, et al. Micro-scale pore-throat distributions in tight sandstone reservoirs and its constrain to movable fluid[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(1): 77-85.
- [5] 朱如凯, 吴松涛, 苏玲, 等. 中国致密储层孔隙结构表征需注意的问题及未来发展方向[J]. 石油学报, 2016, 37(11): 1323-1336.
ZHU Rukai, WU Songtao, SU Ling, et al. Problems and future works of porous texture characterization of tight reservoirs in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(11): 1323-1336.
- [6] 吴云飞, 刘成林, 冯小龙, 等. 致密砂岩储层微观结构特征及分类评价——以鄂尔多斯盆地南梁油田长 9 储层为例[J]. 断块油气田, 2023, 30(2): 246-253, 300.
WU Yunfei, LIU Chenglin, FENG Xiaolong, et al. Micro-structural characteristics and classification evaluation of tight sandstone reservoirs: A case study of the Chang 9 reservoir in the Nanliang Oilfield of the Ordos Basin[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2023, 30(2): 246-253, 300.
- [7] 许璟, 葛云锦, 贺永红, 等. 鄂尔多斯盆地延长探区长 7 油层组泥页岩孔隙结构定量表征与动态演化过程[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 292-307.
XU Jing, GE Yunjin, HE Yonghong, et al. Quantitative characterization and dynamic evolution of pore structure in shale reservoirs of Chang 7 oil layer group in Yanchang area, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 292-307.
- [8] 徐永强, 何永宏, 陈小东, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区长 7 致密储层微观孔喉特征及其对物性的影响[J]. 地质与勘探, 2019, 55(3): 870-881.
XU Yongqiang, HE Yonghong, CHEN Xiaodong, et al. Characteristics of microscopic pore throats and their influence on physical properties of the Chang 7 tight reservoir in the Longdong area, Ordos Basin[J]. Geology and Exploration, 2019, 55(3): 870-881.
- [9] 王斌, 过敏, 施泽进, 等. 川东南地区志留系石牛栏组海相页岩储层孔隙结构特征及油气地质意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2025, 52(4): 674-688.
WANG Bin, GUO Min, SHI Zejin, et al. Characteristics of shale pore structure and its geological oil and gas significance in the Shiniulan Formation, southeast Sichuan

- Basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2025, 52(4): 674–688.
- [10] 张全培,王海红,刘美荣,等. 超低渗透储层全孔径分布及其分形特征研究[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(6): 1137–1149.
ZHANG Quanpei, WANG Haihong, LIU Meirong, et al. Study of the full pore size distribution and fractal characteristics of ultra-low permeability reservoir[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(6): 1137–1149.
- [11] 高洁,任大忠,刘登科,等. 致密砂岩储层孔隙结构与可动流体赋存特征:以鄂尔多斯盆地华庆地区长6₃致密砂岩储层为例[J]. 地质科技情报, 2018, 37(4): 184–189.
GAO Jie, REN Dazhong, LIU Dengke, et al. Impact of pore structures on features of movable fluid in tight sandstone reservoir: Taking Chang 6₃ tight sandstone reservoir of Huaqing Area in Ordos Basin as an example [J]. Geological Science and Technology Information, 2018, 37(4): 184–189.
- [12] 杨毅,张恒荣,袁伟,等. 常规砂岩与砂砾岩分形特征对比及成因分析:以乌石凹陷X构造流沙港组为例[J]. 现代地质, 2022, 36(1): 149–158.
YANG Yi, ZHANG Hengrong, YUAN Wei, et al. Fractal characteristics comparison and genesis of conventional sandstone and glutenite [J]. Geoscience, 2022, 36(1): 149–158.
- [13] DOU W C, LIU L F, JIA L B, et al. Pore Structure, fractal characteristics and permeability prediction of tight sandstones: A case study from Yanchang Formation, Ordos Basin, China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 123: 243–257.
- [14] 李文鏢,卢双舫,李俊乾,等. 南方海相页岩物质组成与孔隙微观结构耦合关系[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(1): 27–38.
LI Wenbiao, LU Shuangfang, LI Junqian, et al. The coupling relationship between material composition and pore microstructure of southern China marine shale [J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(1): 27–38.
- [15] 王伟,陈朝兵,许爽,等. 鄂尔多斯盆地延长组致密砂岩不同尺度孔喉分形特征及其控制因素[J]. 石油实验地质, 2022, 44(1): 33–40.
WANG Wei, CHEN Zhaobing, XU Shuang, et al. Fractal characteristics and its controlling factors of pore–throat with different scales in tight sandstones of the Yanchang Formation in the Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(1): 33–40.
- [16] ZHANG R, JIN Z, LIU Q, et al. Astronomical constraints on deposition of the Middle Triassic Chang 7 lacustrine shales in the Ordos Basin, Central China [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2019, 15(528): 87–98.
- [17] 孟子圆,孙卫. 吴起地区长6储层特征及成岩作用研究[J]. 非常规油气, 2019, 6(6): 7–14.
MENG Ziyuan, SUN Wei. Study on reservoir characteristics and diagenesis of Chang 6 in Wuqi area [J]. Unconventional Oil & Gas, 2019, 6(6): 7–14.
- [18] 邓秀芹,庞锦莲,孙勃. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长10–长8段沉积演化特征[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2024, 54(6): 1078–1090.
DENG Xiuqin, Pang Jinlian, Sun Bo. Evolution characteristics of Ordos Basin in sedimentary period of Chang 10–Chang 8 Member of Yanchang Formation [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2024, 54(6): 1078–1090.
- [19] 高胜利,魏雪珂,赵军龙,等. 鄂尔多斯盆地延长期湖盆底面构造定量化演化规律[J]. 西安科技大学学报, 2023, 43(4): 724–732.
GAO Shengli, WEI Xueke, ZHAO Junlong, et al. Quantitative evolution law of lake basin bottom structure in Yanchang Formation of Ordos Basin [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2023, 43(4): 724–732.
- [20] 刘翰林,杨友运,王凤琴,等. 致密砂岩储集层微观结构特征及成因分析——以鄂尔多斯盆地陇东地区长6段和长8段为例[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(2): 223–234.
LIU Hanlin, YANG Youyun, WANG Fengqin, et al. Micro pore and throat characteristics and origin of tight sandstone reservoirs: A case study of the Triassic Chang 6 and Chang 8 members in Longdong area, Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(2): 223–234.
- [21] 赵靖舟,孟选刚,韩载华. 近源成藏——来自鄂尔多斯盆地延长组湖盆东部“边缘”延长组6段原油的地球化学证据[J]. 石油学报, 2020, 41(12): 1513–1526.
ZHAO Jingzhou, MENG Xuangang, HAN Zaihua. Near-source hydrocarbon accumulation: Geochemical evidence of lacustrine crude oil from the Member 6 of Yanchang Formation, eastern margin of Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(12): 1513–1526.
- [22] 刘硕,王飞,于瑞,等. 致密砂岩储层微观孔喉结构及其分形特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(1): 96–107.

- LIU Shuo, WANG Fei, YU Rui, et al. Micro pore throat structure and fractal characteristics of tight sandstone reservoir[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(1): 96-107.
- [23] 张文凯, 施泽进, 田亚铭, 等. 联合高压压汞和恒速压汞实验表征致密砂岩孔喉特征[J]. 断块油气田, 2021, 28(1): 14-20, 32.
- ZHANG Wenkai, SHI Zejin, TIAN Yaming, et al. The combination of high-pressure mercury injection and rate-controlled mercury injection to characterize the pore-throat structure in tight sandstone reservoirs[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2021, 28(1): 14-20, 32.
- [24] 潘辉, 武富礼, 袁珍, 等. 基于压汞实验及密闭取芯的致密油储层分形特征[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(23): 9823-9829.
- PAN Hui, WU Fuli, YUAN Zhen, et al. Fractal characteristics of tight oil reservoirs based on mercury injection experiment and closed coring[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(23): 9823-9829.
- [25] 冯阵东, 周永, 吴伟, 等. 非均质砂岩储层压汞分形特征与储层评价[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 27(6): 25-34.
- FENG Zhendong, ZHOU Yong, WU Wei, et al. Mercury injection fractal characteristics and reservoir evaluation of heterogeneous sandstone reservoirs[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 27(6): 25-34.
- [26] PENG L, MIN Z, HE B, et al. Pore throat structure and fractal characteristics of tight oil sandstone: A case study in the Ordos Basin, China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 149: 665-674.
- [27] PFEIFER P. Fractal dimension as working tool for surface-roughness problems[J]. Applied, Surface and Science, 1984, 18(1-2): 146-164.
- [28] BURGER J, DIETLER G, BINGGELI M, et al. Aspects of the surface roughness of ceramic bonding tools on a nanometer scale investigated with atomic force microscopy[J]. Thin Solid Films, 1994, 253(1-2): 308-310.
- [29] 吕天雪, 张国一, 易立新, 等. 松辽盆地低渗透储层孔隙结构特征及其分形特征[J]. 特种油气藏, 2022, 29(1): 59-65.
- LYU Tianxue, ZHANG Guoyi, YI Lixin, et al. Pore Structure and fractal characteristics of low-permeability reservoirs in Songliao Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(1): 59-65.
- [30] 贺承祖, 华明琪. 储层孔隙结构的分形几何描述[J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(1): 17-25.
- HE Chengzu, HUA Mingqi. Fractal geometry description of reservoir pore structure[J]. Oil & Gas Geology, 1998, 19(1): 17-25.
- [31] 刘阳, 庞雄奇, 丁超, 等. 吴起地区延10段致密砂岩储层孔隙结构及分形特征[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(29): 12474-12483.
- LIU Yang, PANG Xiongqi, DING Chao, et al. Pore structure and fractal characteristics of Yan 10 tight sandstone reservoir in Wuqi area[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(29): 12474-12483.

(责任编辑: 李克永)