

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.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(1):96-107. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220166.

Liu Shuo, Wang Fei, Yu Rui, et al. Micro Pore Throat Structure and Fractal Characteristics of Tight Sandstone Reservoir. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(1): 96 - 107. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220166.

致密砂岩储层微观孔喉结构及其分形特征

刘硕¹,王飞²,于瑞²,高建星²,师昊²,朱玉双¹

1.西北大学大陆动力学国家重点实验室/地质学系,西安 710069

2.延长股份有限公司子长采油厂,陕西 延安 717399

摘要:孔喉微观结构定量评价一直是致密砂岩储层研究的热点和难点。以分形维数为突破口,在鄂尔多斯盆地子长地区不同井中采集了上三叠统延长组长6段12个岩心样品,通过扫描电镜、铸体薄片、高压压汞等实验方法以及分形理论对致密砂岩样品的孔喉结构及其分形特征进行了研究。结果表明,研究区致密砂岩储层的孔隙类型主要由剩余粒间孔、溶孔和晶间孔组成。总分形维数与孔隙度和渗透率存在良好的负相关性,表明研究区致密砂岩储层孔喉结构的复杂程度和非均质性对物性具有一定的影响。中孔的分形维数与孔喉结构参数的相关性更好,表明中孔的非均质性和表面粗糙度主要影响储集空间和渗流性质。致密砂岩储层的品质与分形维数呈明显的负相关关系,越有利于油气富集的储层,其分形维数越小。

关键词:鄂尔多斯盆地;致密砂岩;高压压汞;孔喉结构;分形特征;分形维数

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220166

中图分类号:TE122

文献标志码:A

Micro Pore Throat Structure and Fractal Characteristics of Tight Sandstone Reservoir

Liu Shuo¹, Wang Fei², Yu Rui², Gao Jianxing², Shi Hao², Zhu Yushuang¹

1. State Key Laboratory of Continental Dynamics/Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

2. Zichang Oil Product Factory, Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., Yan'an 717399, Shaanxi, China

Abstract: The quantitative evaluation of pore throat microstructure has always been a hot and difficult point in the study of tight sandstone reservoirs. Taking fractal dimension as a breakthrough point, 12 core samples of Chang 6 Member of Yanchang Formation of Upper Triassic were collected

收稿日期:2022-06-01

作者简介:刘硕(1998-),男,硕士研究生,主要从事油气田地质与开发方面的研究,E-mail:1260561583@qq.com

通信作者:朱玉双(1968-),女,教授,博士,主要从事油层物理和油气田开发地质学方面的研究,E-mail:yshzhu@nwu.edu.cn

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05008-004-004-001);国家自然科学基金项目(41972129)

Supported by the National Science and Technology Major Project (2017ZX05008-004-004-001) and the National Natural Science Foundation of China(41972129)

from different wells in Zichang area of Ordos basin. The pore throat structure and fractal characteristics of tight sandstone samples were studied by means of scanning electron microscope, casting thin section, high pressure mercury injection and other experimental methods and fractal theory. The results show that the pore types of tight sandstone reservoirs in the study area are mainly composed of residual intergranular pores, dissolution pores and intercrystal pores. There is a obvious negative correlation between total fractal dimension and porosity and permeability, which indicates that the complexity and heterogeneity of pore throat structure of tight sandstone reservoirs in the study area have a certain impact on the physical properties. The correlation between the fractal dimension of mesopores and pore throat structure parameters is better, which indicates that the heterogeneity and surface roughness of mesopores mainly affect the reservoir space and seepage properties. There is a positive correlation between the quality of tight sandstone reservoir and the fractal dimension. The more favorable the reservoir is for oil and gas enrichment, the smaller the corresponding fractal dimension is.

Key words: Ordos basin; tight sandstone; high pressure mercury injection; pore throat structure; fractal characteristics; fractal dimension

0 引言

随着世界能源需求的不断增加和常规油气藏可采资源的快速减少,致密砂岩油气等非常规能源越来越受到油气行业的重视^[1-4]。致密砂岩储层的渗透率和微观孔喉结构一直是油气行业研究的重点^[5-8]。与常规油气藏不同,致密砂岩储层微观孔喉具有结构复杂、非均质性强、组合复杂等特点,对储层储集能力和流体渗流能力有着重要的影响。因此,为了更好地对致密砂岩储层进行评价和开发,有必要准确、定量地评价微观孔喉结构。

分形理论的提出是为了解释不规则性、不稳定性和高度复杂的结构特征,是研究具有自相似特征复杂系统的重要方法,被广泛应用于石油勘探开发及储层微观孔喉结构研究^[9-11]。分形理论不仅是定量描述低渗透储层孔喉结构复杂程度的有效方法,也是连接储层微观孔喉结构和宏观表现的重要桥梁^[12]。分形维数(D)是表征孔喉结构非均质性的重要参数,在以往的研究中已被用来研究孔喉结构^[13]。孔喉表面和结构会随着矿物的填充和溶蚀而变得更加粗糙和复杂,分形维数能有效评价储层孔喉结构的这种特性。砂岩储层孔喉的分形维数变化在 2.0 ~ 3.0 之间,可反映砂岩孔喉结构的复杂性和表面粗糙程度; D 值越接近 2.0,表明孔喉形状分布越规律且孔喉表面越光滑;而越接近 3.0,表明孔喉结构越复杂,表面越粗糙。研究区长 6 段致密

砂岩储层横向差异大,微观孔喉结构非均质性强,制约了油气勘探开发,研究分形结果对于研究区致密砂岩孔喉结构和非均质性的定量表征以及勘探开发具有重要意义。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地是中国第二大沉积盆地,位于华北克拉通西部,属于克拉通边缘拗陷盆地,在中国致密油气勘探开发中发挥着主导作用^[14-17]。盆地基底为太古宙和元古宙变质结晶岩系,被古生代、中生代和新生代盖层覆盖。鄂尔多斯盆地发育早古生代、晚古生代和中生代多套油气组合,是一个具有丰富油气勘探前景的大型沉积盆地^[18]。研究区位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡中东部(图 1),其上三叠统延长组长 6 段沉积期为湖泊河流三角洲平原亚相沉积,受东北物源控制,主要发育分流河道和分流河道间微相^[20]。储层岩性以灰色、灰绿色砂岩和黑色泥岩为主,岩石类型以灰色细粒长石砂岩为主,岩石颗粒之间主要为点-线接触和线接触,少量呈点接触,具有成分成熟度中等、结构成熟度中等一较高的特点^[21]。

2 实验方法及理论基础

前人利用恒速压汞实验对致密砂岩孔喉结构和分形特征进行了研究,认为致密砂岩孔喉具有分形特征,可以利用分形维数来表征致密砂岩非均质

式中: r_{\max} 为孔喉半径最大值, μm ; $F(r)$ 为孔喉半径分布密度函数; a 为比例常数。由于孔喉半径最小值 r_{\min} 远小于 r_{\max} ,故可得

$$S = \left(\frac{r}{r_{\min}} \right)^{3-D} \quad (3)$$

式中, S 为毛管压力 P_c 对应的润湿相饱和度, %。

假设 θ 不受孔喉大小的影响,可得到孔喉半径分布的分形公式:

$$S = \left(\frac{P_c}{P_{\min}} \right)^{D-3} \quad (4)$$

式中, P_{\min} 为 r_{\max} 对应的毛管压力, MPa。对式(4)两边取对数,得到

$$\lg(S) = (D-3)\lg(P_c) - (D-3)\lg(P_{\min}) \quad (5)$$

首先,根据毛细管压力实验数据,可以确定 $\lg(S)$ 与 $\lg(P_c)$ 的相关关系。其次,在高压压汞实验中,润湿相是空气,非润湿相是汞,故 $\lg(S)$ 可以表示为 $\lg(1-S_{\text{Hg}})$,其中 S_{Hg} 为汞饱和度。然后,通过该实验得到 $\lg(1-S_{\text{Hg}})-\lg(P_c)$ 相关性趋势线的斜率,即为 Hurst 指数(H)。最后计算得到分形维数:

$$D = 3 + H \quad (6)$$

根据分形理论,孔隙喉道结构分形可分为整体分形和分段分形^[29]。当 $\lg(1-S_{\text{Hg}})-\lg(P_c)$ 图分形曲线是一条直线时,说明大孔喉和小孔喉结构相似,分形维数相近。当 $\lg(1-S_{\text{Hg}})-\lg(P_c)$ 图曲线的分段分形曲线不是一条直线,而有明显的拐点时,则该曲线可分割成若干段,需计算不同大小孔喉的分形维数。通过对不同大小孔喉孔隙度的加权平均计算,可以得到整个孔喉的总分形维数,以此确定孔隙大小分布和孔喉结构的分形特征。

3 实验结果

3.1 物性和孔隙类型

通过常规岩石物性测量,获得了研究区长 6 段 12 个代表性致密砂岩样品的孔隙度和渗透率结果(表 1),其孔隙度分布范围为 8.71% ~ 10.54%,平均值为 9.43%;渗透率分布范围为 $(0.127 \sim 0.839) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值为 $0.281 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于典型的致密砂岩。

通过对铸体薄片和扫描电镜的观察,研究区长 6 段储集层主要孔隙类型为剩余粒间孔、溶孔和晶

表 1 研究区长 6 段代表性致密砂岩长 6 段样品常规物性实测数据

Table 1 Measured data of conventional physical properties of representative tight sandstone samples of Chang 6 Member reservoir in the study area

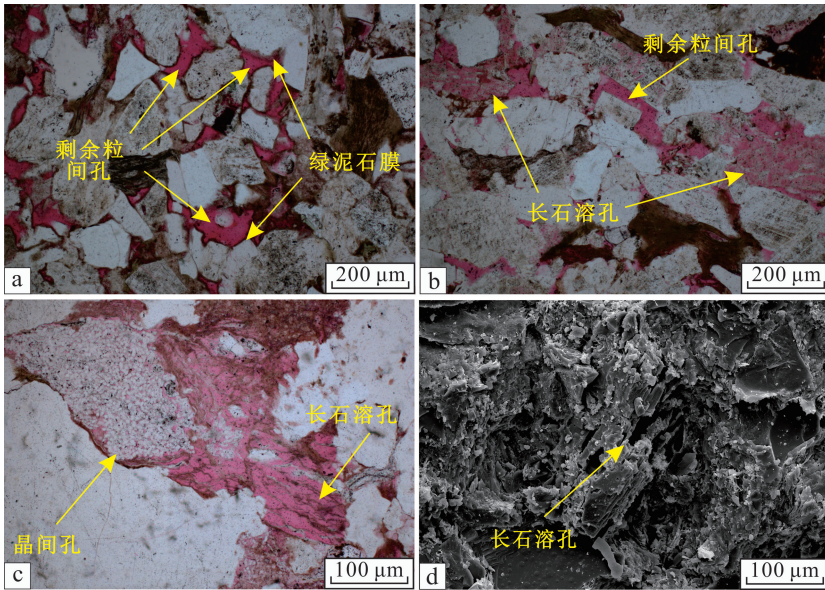
样品编号	深度/m	孔隙度/%	渗透率/ $(10^{-3} \mu\text{m}^2)$
1	869	9.24	0.152
2	887	8.92	0.181
3	886	9.02	0.321
4	894	10.54	0.839
5	912	9.32	0.186
6	929	8.71	0.127
7	863	9.63	0.202
8	879	9.91	0.208
9	873	8.92	0.243
10	891	9.87	0.356
11	871	10.04	0.351
12	867	9.01	0.192

间孔(图 2)。剩余粒间孔形状不规则,常与绿泥石薄膜或石英自生加大胶结共存,孔径多大于 $50 \mu\text{m}$ (图 2a);本区溶孔的形成是由于长 7 段烃源岩生烃时产生的酸性流体侵入到上覆长 6 段致密砂岩中,导致易溶矿物在酸性环境下发生溶蚀而形成次生孔隙,常被黏土矿物充填^[16],孔径多小于 $0.1 \mu\text{m}$ (图 2b、d);剩余粒间孔和溶孔常被杂基和胶结物充填,形成众多晶间孔,孔径多小于 $0.1 \mu\text{m}$,连通性较差(图 2c)。

3.2 微观孔喉结构特征

通过高压压汞实验可以获得样品的孔喉结构和孔径分布特征。根据本次测试 12 块代表性样品的高压压汞数据(表 2),可见研究区长 6 段致密砂岩储层孔喉分布较为均匀。从进汞曲线可以看出(图 3a),绝大部分样品的进汞曲线趋于一致,进汞曲线前段较平缓,后段逐渐抬升,表明较大孔喉的分选性优于较小孔喉。

利用高压压汞进汞曲线可以得到研究区孔喉分布曲线。其孔喉主要分布范围为 $0.03 \sim 1.00 \mu\text{m}$ (图 3b),曲线呈多峰型分布。较小孔喉主要集中在 $0.03 \mu\text{m}$ 左右,较大孔主要集中在 $0.18 \mu\text{m}$ 左右,虽



a. 绿泥石膜胶结后形成的剩余粒间孔, 2号样品, 铸体薄片, 单偏光, 红色铸体; b. 长石溶孔和剩余粒间孔, 6号样品, 铸体薄片, 单偏光, 红色铸体; c. 长石溶孔和晶间孔, 7号样品, 铸体薄片, 单偏光, 红色铸体; d. 长石溶孔, 6号样品, 扫描电镜照片。

图 2 研究区长 6 段储集层孔隙类型

Fig.2 Pore type of Chang 6 Member reservoir in the study area

表 2 研究区长 6 段储集层孔喉结构参数

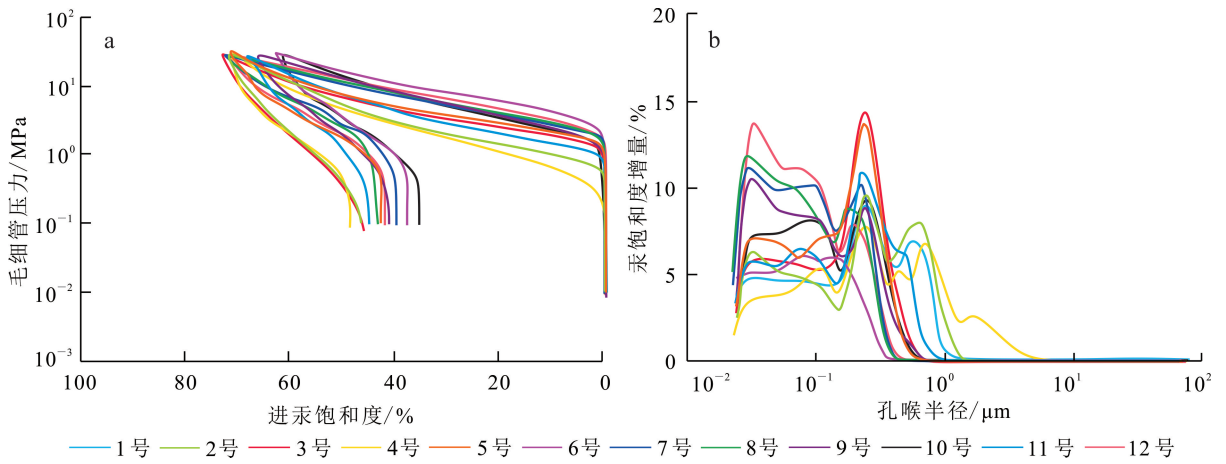
Table 2 Pore throat structure parameters of Chang 6 Member reservoir in the study area

样号 编号	排驱压力/ MPa	中值压力/ MPa	最大孔喉 半径/ μm	中值孔喉 半径/ μm	平均孔喉 半径/ μm	分选系数	歪度	最大进汞 饱和度/%	退汞效率/ %
1	0.85	6.71	0.877	0.112	0.213	0.163	0.62	73.46	48.12
2	1.73	14.81	0.434	0.051	0.093	0.253	-0.23	68.72	47.30
3	1.52	7.28	0.492	0.103	0.139	0.088	0.35	73.43	47.06
4	0.52	4.32	1.451	0.174	0.264	0.237	0.65	71.47	46.83
5	2.58	13.17	0.291	0.057	0.147	0.290	-0.29	69.78	42.03
6	3.41	16.55	0.221	0.045	0.025	0.379	0.12	63.71	40.31
7	2.25	10.98	0.334	0.068	0.062	0.119	-0.18	69.14	42.73
8	2.27	12.08	0.331	0.062	0.217	0.197	0.52	70.80	40.88
9	1.90	13.35	0.394	0.056	0.068	0.155	0.22	67.12	36.34
10	0.78	5.66	0.965	0.133	0.254	0.179	0.76	71.48	45.34
11	1.15	7.51	0.654	0.102	0.126	0.128	0.54	69.76	44.96
12	1.66	7.82	0.452	0.096	0.129	0.079	0.77	71.88	47.53
最大值	3.41	16.55	1.451	0.174	0.264	0.379	0.77	73.46	48.12
最小值	0.52	4.32	0.221	0.045	0.025	0.079	-0.29	63.71	36.34
平均值	1.72	10.02	0.574	0.088	0.145	0.189	0.32	70.06	44.12

然储层孔喉半径变化范围基本相似,但不同大小孔喉的分布频率仍有较大差异,表明研究区长 6 段致密砂岩储层的孔喉分布比较复杂,非均质性较强。

根据孔隙分类标准^[30],有效孔隙空间类型分为大孔($\geq 1\ 000\ \text{nm}$)、中孔($100\sim 1\ 000\ \text{nm}$)、过渡孔($10\sim 100\ \text{nm}$)和微孔($\leq 10\ \text{nm}$)。研究区长 6 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。中孔、过渡孔和微孔所占的体积分数分别为 28.71%、37.95% 和 33.34%。通过统计分析不同孔径孔喉的孔隙度(表 3),明确中孔、过渡孔和微孔的平均孔隙度分别为 2.70%、3.58% 和 3.14%。



a. 毛管压力与进汞饱和度曲线; b. 孔径分布曲线。

图 3 研究区实验样品的高压压汞孔喉分布特征曲线

Fig.3 Distribution characteristic curve of high pressure mercury injection pore throat of experimental samples in the study area

3.3 分形特征

根据毛管压力曲线,构建全部样品的 $\lg(1 - S_{Hg}) - \lg(P_c)$ 的关系散点图。图 4 为 5 号典型样品的 $\lg(1 - S_{Hg}) - \lg(P_c)$ 关系曲线,对比不同尺度的孔喉的分形特征,各段曲线拟合良好,判定系数 (R^2) 均大于 0.9,其他样品也具有相似的特征,表明该致密砂岩样品总体具有多重分形特征,可以通过

分形几何理论进行表征。

分别统计实验样品中孔、过渡孔和微孔对应的分形维数 D_1 、 D_2 和 D_3 (表 3)可以看出,各段的分形维数变化范围均在 2~3 之间,且具有较高的相关性,判定系数均大于 0.7。 D_1 明显大于 D_2 , D_2 明显大于 D_3 (图 5),说明较大孔隙空间具有较强的非均质性且孔隙分布较为离散。对中孔、过渡孔和微孔

表 3 研究区实验样品不同孔隙类型分形维数统计表

Table 3 Statistical table of fractal dimensions of different pore types of experimental samples in the study area

样品 编号	中孔			过渡孔			微孔			D
	D_1	R^2	$\Phi_1/\%$	D_2	R^2	$\Phi_2/\%$	D_3	R^2	$\Phi_3/\%$	
1	2.668 7	0.996 2	2.65	2.582 9	0.997 5	3.51	2.447 6	0.972 4	3.07	2.562 4
2	2.783 6	0.907 5	2.56	2.655 2	0.963 3	3.39	2.513 2	0.869 5	2.97	2.644 7
3	2.660 9	0.931 8	2.59	2.586 4	0.954 6	3.42	2.550 3	0.910 2	2.99	2.595 7
4	2.665 8	0.996 8	3.02	2.763 8	0.935 7	4.01	2.796 4	0.876 9	3.51	2.746 6
5	2.830 8	0.811 4	2.67	2.350 5	0.996 4	3.54	2.134 1	0.943 5	3.11	2.416 2
6	2.884 9	0.719 4	2.50	2.524 1	0.975 6	3.31	2.307 6	0.965 5	2.91	2.555 4
7	2.779 7	0.842 7	2.76	2.425 2	0.967 3	3.66	2.230 2	0.858 8	3.21	2.461 9
8	2.800 8	0.944 2	2.84	2.400 2	0.941 1	3.76	2.153 2	0.928 8	3.30	2.432 8
9	2.790 8	0.909 2	2.56	2.535 6	0.985 0	3.39	2.310 6	0.952 2	2.97	2.533 8
10	2.657 3	0.995 2	2.83	2.656 2	0.928 4	3.75	2.436 4	0.869 9	3.29	2.583 2
11	2.663 7	0.982 5	2.88	2.670 3	0.997 2	3.81	2.694 2	0.944 8	3.35	2.676 4
12	2.680 9	0.903 2	2.59	2.596 5	0.942 3	3.42	2.430 9	0.963 3	3.02	2.565 5
平均值	2.739 0	0.902 1	2.70	2.562 1	0.965 4	3.58	2.417 1	0.911 6	3.14	2.564 5

注: D_1 、 D_2 和 D_3 分别为中孔、过渡孔和微孔对应的分形维数; R^2 为判定系数; Φ_1 、 Φ_2 、 Φ_3 分别为中孔、过渡孔、微孔对应的孔隙度, %。

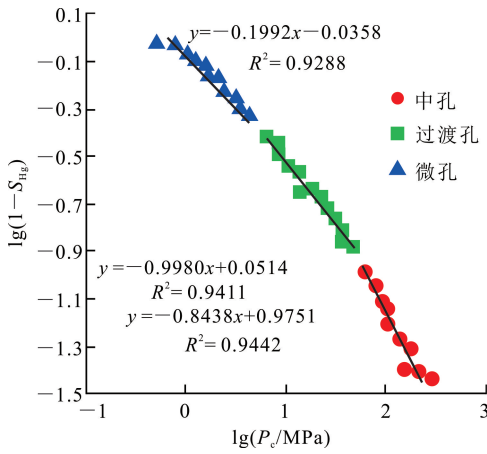


图 4 5 号样品分形特征曲线

Fig. 4 Fractal characteristic curve of Sample No.5

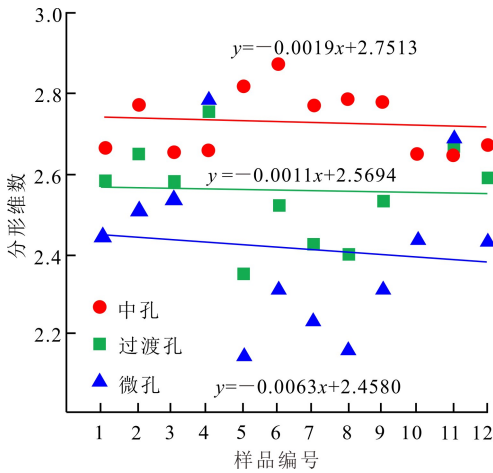
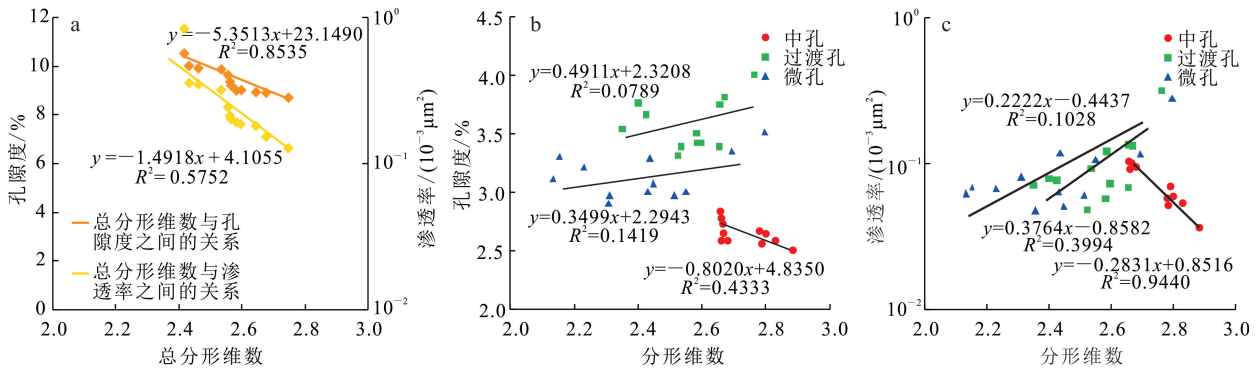


图 5 研究区样品中孔、过渡孔和微孔的分形维数分布

Fig.5 Fractal dimension distribution of pores, transition pores and micropores in the samples in the study area



a. 总分形维数与物性的关系; b. 分形维数与孔隙度的关系; c. 分形维数与渗透率的关系。

图 6 研究区孔喉分形维数与储集层物性的关系

Fig.6 Relationship between pore throat fractal dimension and reservoir physical property in the study area

孔隙度加权平均,得到整个孔喉的总分形维数:

$$D = \frac{D_1\Phi_1 + D_2\Phi_2 + D_3\Phi_3}{\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3} \quad (7)$$

通过式(7)计算, D 值介于 2.416 2~2.746 6 之间,平均值为 2.564 5,分布较为分散。 D 值分析结果表明,研究区致密储层孔喉结构复杂,非均质性强。

4 讨论

4.1 分形维数与储层物性

为了在微观尺度上定量表征致密砂岩储集层性质,建立了分形维数与储层孔隙度和渗透率之间的关系。结果表明,总分形维数与储层物性呈较好的负相关关系(图 6a),以此可得到分形维数的地质意义为分形维数越小,孔隙的连通性和均质性越好,孔喉表面越光滑并且储集能力越强,该类储集层发育的层位是油气勘探的甜点区;相反,分形维数大、孔喉表面粗糙、非均质性强的储集层,孔喉连通性差,其对油气的渗流和储集能力弱,不利于油气的富集。

D_1 、 D_2 、 D_3 与孔隙度、渗透率也具有明显的分异特征(图 6b、c)。其中: D_1 与孔隙度、渗透率的负相关性显著较好,说明较大孔喉的复杂程度对储层物性影响较大,中孔的分形维数越高,其复杂程度越强,对应的物性贡献越低; D_2 和 D_3 与孔隙度和渗透率之间的相关性不高,说明较小孔喉对储层物性影响不显著,影响其分布非均质性的因素更加复杂。当流体在岩石中流动时,会经过一系列复杂多变的孔喉组合,孔隙和喉道都会影响其流动。束缚水倾

向于在小孔喉中积聚,限制了小孔喉对渗透率的贡献。

4.2 分形维数与孔喉结构特征

通过绘制分形维数与孔喉结构参数关系的散点图,分析二者之间的关系,确定分形维数的变化规律以及分形特征对孔喉结构特征的影响。图 7a 显示孔喉半径中值仅与 D_1 存在明显的负相关关系,表明中孔的分形维数越小,其结构分布越规则,孔喉半径越大。 D_1 与分选系数呈正相关关系, D_2 、 D_3 与分选系数相关性并不显著(图 7b),说明孔喉大小的分选性对中孔的非均质性有影响,对过渡孔和微孔的非均质性无明显影响。歪度与 D_1 呈负相关关系,与 D_2 、 D_3 无明显相关关系,说明孔喉分布的对称性对中孔分形特征具有影响,对过渡孔和微孔的分形特征的影响较为微弱,且歪度越大,其非均质性越强(图 7c)。最大进汞饱和度只与 D_1 具有较好的负相关性,说明中孔虽然在数量上占比小于过渡孔和微孔的和,但在孔隙空间中对储层储集空间的影响较大(图 7d)。平均孔喉半径与 D_2 、 D_3 均无明显相关性,与储集空间主要贡献者中孔的分形维数 D_1 的相关性也较为微弱,说明该孔喉结构参数的分形特征并不明显(图 7e)。退汞效率可以反应储层的孔喉连通性,仅与 D_1 存在较好的负相关性,表明随着分

形维数的增大,储层孔隙结构越复杂,孔喉连通性越差(图 7f)。 D_1 与孔喉结构参数相关性较好,特别是与最大进汞饱和度和孔喉半径中值相关性较为显著,但 D_2 和 D_3 与各孔喉结构参数几乎无相关性。可见中孔的非均质性和表面粗糙度主要影响着储层的渗流能力和储集空间大小,是储层孔隙度最主要的贡献者。而过渡孔和微孔对储层的储集性质影响较小,并且其孔喉结构较为复杂。

4.3 分形维数与储层分类

基于致密储层孔喉结构的复杂性,若建立分类评价标准需充分考虑各种因素,将各类评价参数进行综合分析。本次根据徐永强等^[31]研究中所采用的多元分类系数计算方法,选定 8 项定量评价参数(表 4),包括孔隙度、渗透率、平均孔喉半径、最大孔喉半径、最大进汞饱和度、退汞效率、分选系数、排驱压力,构建致密储层多元分类系数(F_{eci}):

$$F_{eci} = \ln \frac{\frac{\Phi_i}{\Phi_{max}} \cdot \frac{K_i}{K_{max}} \cdot \frac{R_i}{R_{max}} \cdot \frac{R_{a_i}}{R_{a_{max}}} \cdot \frac{S_i}{S_{max}} \cdot \frac{R_{o_i}}{R_{o_{max}}}}{\frac{X_{pi}}{X_{pmax}} \cdot \frac{P_{cdi}}{P_{cdmax}}} \quad (8)$$

式中: Φ_i 、 Φ_{max} 为孔隙度及其最大值; K_i 、 K_{max} 为渗

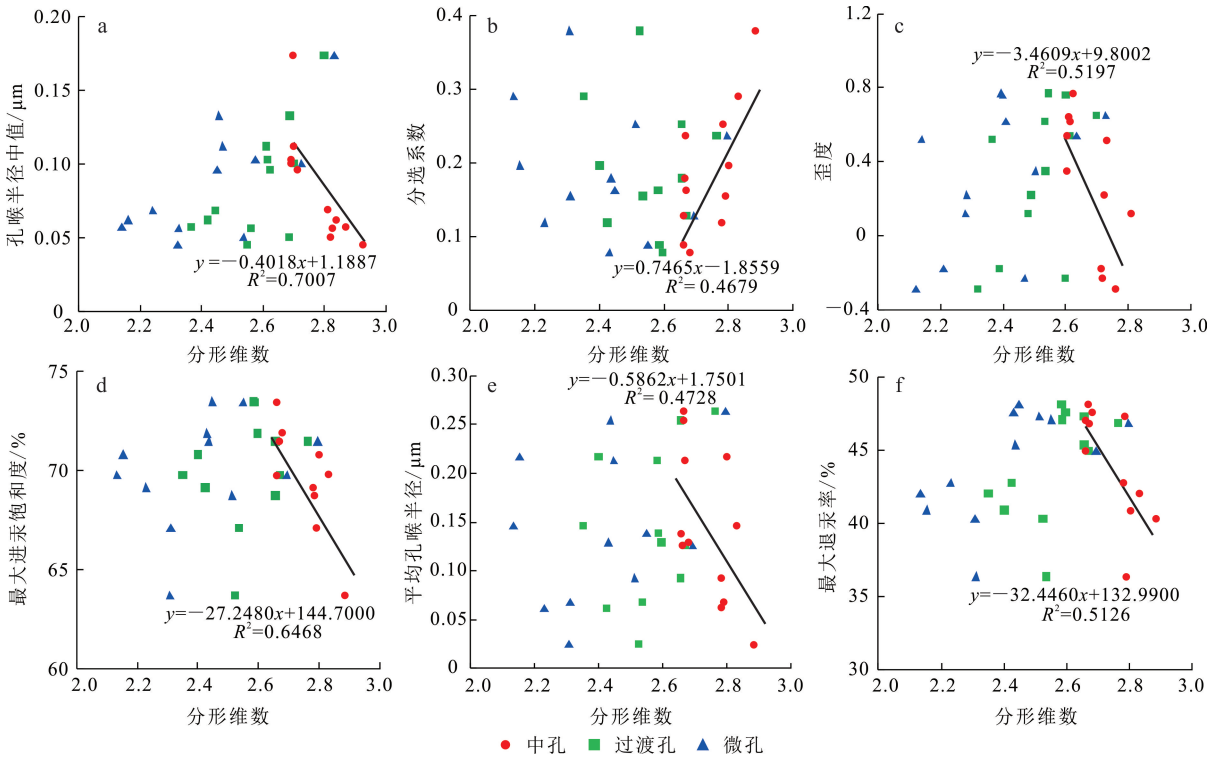


图 7 研究区分形维数与孔喉结构参数的关系

Fig.7 Relationship between fractal dimension and pore throat structure parameters in the study area

表 4 研究区长 6 段储层分类标准

Table 4 Reservoir classification standard of Chang 6 Member in the study area

评价参数	孔隙度/ %	渗透率/ ($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	平均孔喉 半径/ μm	最大孔喉 半径/ μm	最大进 汞饱和 度/%	退汞效 率/%	分选 系数	排驱压 力/MPa	样品 编号	多元分类 系数	储层有效 空间孔隙 类型	储层 品质	
储层 类别	I 类	9.24~ 10.54	0.152~ 0.839	0.126~ 0.264	0.654~ 1.451	69.76~ 73.46	44.96~ 48.12	0.128~ 0.237	0.52~ 1.15	4、8、 10、11	>-0.33	中孔、 过渡孔	好
	II 类	8.92~ 9.63	0.181~ 0.321	0.062~ 0.139	0.334~ 0.492	67.12~ 73.43	36.34~ 47.53	0.079~ 0.253	1.52~ 2.25	1、5、 7、12	$-3.41\sim$ -0.33	过渡孔、 微孔	中
	III 类	8.71~ 9.01	0.127~ 0.208	0.025~ 0.217	0.221~ 0.331	63.71~ 70.80	40.31~ 42.03	0.197~ 0.379	2.27~ 3.41	2、3、 6、9	<-3.41	微孔、 过渡孔	差

透率及其最大值; R_i 、 R_{\max} 为平均孔喉半径及其最大值; R_{ai} 、 R_{amax} 为最大孔喉半径及其最大值; S_i 、 S_{\max} 为最大进汞饱和度及其最大值; R_{oi} 、 R_{omax} 为退汞效率及其最大值; X_{pi} 、 X_{pmax} 为分选系数及其最大值; P_{cdi} 、 P_{cdmax} 为排驱压力及其最大值。

通过计算, 研究区致密储层多元分类系数介于 $-6.0\sim 3.5$, 结合储层其他特征参数, 依据多元分类系数将研究区致密储层分为 3 类, 根据每一类中各参数值的大小分布建立了适合研究区的致密储层分类评价标准(表 4), 将致密储层品质由好到差依次分为 I、II、III 类。I 类储集层包括 4 号、8 号、10 号和 11 号样品, 该类储集层的储集空间主要由中孔级孔喉组成, 其次为过渡孔级孔喉, 同时发育一定数量的微孔级孔喉, 因此, 该类储集层应具有较高的储集和渗流能力。II 类储集层包括 1 号、5 号、7 号和 12 号样品, 该类储集层的储集空间主要为过渡孔级孔喉和微孔级孔喉, 其储集和渗流能力较 I 类储集层差。III 类储集层包括 2 号、3 号、6 号和 9 号样品, 该类储集层的孔喉主要为微孔级孔喉, 其次为过渡孔级孔喉, 其储集和渗流能力较差。通过绘制分形维数与储层分类级别关系的散点图(图 8), 分析二者之间的关系以确定分形维数与研究区致密储层对油气的渗流和储集能力之间的联系。图 8 显示总分形维数与储层类别存在明显的负相关关系, 判定系数大于 0.8。表明致密砂岩储层品质越好, 其对应的分形维数越小, 孔隙的连通性和均质性越好, 孔喉表面越光滑并且越有利于油气的富集。通过物性参数与孔喉结构参数进行储层类别划分, 分析样品的分类结果与对应分形维数之间的关系, 提供了一种量化的储层品质划分方案, 对于致密砂岩微观孔喉结构非均质性以及储层定量评价具有重要的地质意义。

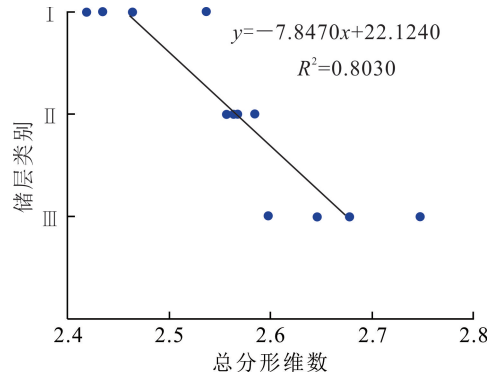


图 8 研究区储层类别与总分形维数的关系

Fig.8 Relationship between reservoir type and total fractal dimension in the study area

5 结论

- 1) 鄂尔多斯盆地子长地区延长组长 6 段致密砂岩储层整体物性较差, 平均孔隙度和渗透率分别为 9.43% 和 $0.281 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 属于典型的特低孔低渗储层。主要孔隙类型包括剩余粒间孔、溶孔和晶间孔。其有效储集空间主要由中孔、过渡孔和微孔组成, 储层孔喉半径变化范围基本相似, 但不同大小孔喉的分布频率有较大差异, 孔喉大小分布曲线主要呈多峰状特征, 孔喉结构特征主要受中孔发育影响。
- 2) 在非均质性和分布离散程度上, 研究区长 6 段致密砂岩储层的中孔大于过渡孔和微孔。总分形维数平均值为 2.564 5, 也反映研究区长 6 段致密砂岩储层孔喉结构较复杂, 储层非均质性强的特点。
- 3) 研究区长 6 段致密砂岩储层孔喉的分形维数与孔隙度和渗透率存在较好的负相关性, 较大的孔喉对储层物性贡献更大。
- 4) 与过渡孔和微孔对应的分形维数相比, 中孔

对应的分形维数与孔喉结构参数的相关性更好,其中与最大进汞饱和度和孔喉半径中值最为显著。

5)研究区致密砂岩储层品质越好,其对应的分形维数越小,孔隙的连通性和均质性越好,孔喉表面越光滑并且越有利于油气的富集。

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 of Differences in the Formation Conditions of Tight Gas in the Upper Paleozoic in the 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 Tigh 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. Microstructural Characteristics and Classification Evaluation of Tight Sandstone Reservoirs: A Case Study of Chang 9 Reservoir in Nanliang Oilfield, 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 Shale Pore Structure in the Chang 7 Oil Layer Formation of the Yanchang Exploration Area in the 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 Phys Properties of the Chang7 Tight Reservoir in the Longdong Area, Ordos Basin [J]. Geology and Exploration,2019,55(3):870-881.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 吕天雪, 张国一, 李忠诚, 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.
Lü Tianxue, Zhang Guoyi, Li Zhongcheng, et al. Pore Structure Characteristics and Fractal Characteristics of Low Permeability Reservoir [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2022, 29(1): 59 - 65.
- [14] Wang R F, Chi Y G, Zhang L, et al. Comparative Studies of Microscopic Pore Throat Characteristics of Unconventional Super-Low Permeability Sandstone Reservoirs: Examples of Chang 6 and Chang 8 Reservoirs of Yanchang Formation in Ordos Basin, China [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, 160: 72 - 90.
- [15] 宋子齐, 白振强, 陈荣环, 等. 陕北斜坡东部低渗透储集层的有利沉积相带[J]. *新疆石油地质*, 2004, 25(6): 588 - 591.
Song Ziqi, Bai Zhenqiang, Chen Ronghuan, et al. Favorable Sedimentary Facies Belt of Low Permeability Reservoir in the East of Northern Shaanxi Slope[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2004, 25(6): 588 - 591.
- [16] 吴浩, 张春林, 纪友亮, 等. 致密砂岩孔喉大小表征及对储层物性的控制: 以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组为例[J]. *石油学报*, 2017, 38(8): 876 - 887.
Wu Hao, Zhang Chunlin, Ji Youliang, et al. Pore-Throat Size Characterization of Tight Sandstone and Its Control on Reservoir Physical Properties: A Case Study of Yanchang Formation, Eastern Gansu, Ordos Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(8): 876 - 887.
- [17] 南凡驰, 林良彪, 余瑜, 等. 向后筛选策略在鄂尔多斯盆地三叠系延长组储层微观非均质性评价中的应用[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(5): 1155 - 1166.
Nan Fanchi, Lin Liangbiao, Yu Yu, et al. Application of Backward Screening Strategy in Micro Heterogeneity Evaluation of Triassic Yanchang Formation Reservoirs in the Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(5): 1155 - 1166.
- [18] 曹尚, 李树同, 党海龙, 等. 鄂尔多斯盆地东南部长 7 段页岩孔隙特征及其控制因素[J]. *新疆石油地质*, 2022, 43(1): 11 - 17.
Cao Shang, Li Shutong, Dang Hailong, et al. Pore Characteristics and Controlling Factors of Chang 7 Shale in Southeastern Ordos Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2022, 43(1): 11 - 17.
- [19] Wang W, Yue D, Eriksson K A, et al. Quantification and Prediction of Pore Structures in Tight Oil Reservoirs Based on Multifractal Dimensions from Integrated Pressure and Rate Controlled Porosimetry for the Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, China [J]. *Energy and Fuels*, 2020, 34(4): 4366 - 4383.
- [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, East Margin of Ordos Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(12): 1513 - 1526.
- [22] 张文凯, 施泽进, 田亚铭, 等. 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. Characterization of Pore Throat Characteristics of Tight Sandstone by Combined High Pressure Mercury Injection and Constant Velocity Mercury Injection Experiments [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2021, 28(1): 14 - 20, 32.
- [23] 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.
- [24] Zang Q B, Liu C L, Awan R S, et al. Occurrence

- Characteristics of the Movable Fluid in Heterogeneous Sandstone Reservoir Based on Fractal Analysis of NMR Data: A Case Study of the Chang 7 Member of Ansai Block, Ordos Basin, China [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 214:416 - 428.
- [25] Wu Y P, Liu C L, Ouyang S Q, et al. Investigation of Pore-Throat Structure and Fractal Characteristics of Tight Sandstones Using HPMT, CRMI, and NMR Methods: A Case Study of the Lower Shihezi Formation in the Sulige Area, Ordos Basin [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 210:335 - 348.
- [26] 薛永超,李惠,余钟,等. 低渗储层微观孔喉半径划分流动单元方法[J]. *特种油气藏*, 2019, 26(6):52 - 57. Xue Yongchao, Li Hui, Yu Zhong, et al. Flow Unit Division with Microscopic Pore-Throat Radius in Low-Permeability Reservoir [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2019, 26(6):52 - 57.
- [27] 张全培,吴文瑞,刘丽萍,等. 鄂尔多斯盆地镇北地区延长组超低渗透储层孔隙结构及其分形特征[J]. *油气地质与采收率*, 2020, 27(3):20 - 31. Zhang Quanpei, Wu Wenrui, Liu Liping, et al. Pore Structure and Fractal Characteristics of Ultra-Low Permeability Reservoirs in Yanchang Formation in Zhenbei Area, Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2020, 27(3):20 - 31.
- [28] 李昊远,庞强,魏克颖,等. 致密砂岩储层孔隙结构分形特征对气水渗流规律的影响:以苏里格气田东南部桃2区块山1段为例[J]. *断块油气田*, 2023, 30(2): 177 - 185. Li Haoyuan, Pang Qiang, Wei Keying, et al. The Fractal Characteristics of Pore Structure in Tight Sandstone Reservoirs and Their Impact on Gas Water Permeability: A Case Study of Shan1 Member in Tao2 Block, Southeastern Sulige Gas Field [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2023, 30 (2): 177 - 185.
- [29] 朱文博,张训华,周道容,等. 下扬子地区二叠系海相页岩孔隙特征新认识及页岩气勘探启示[J]. *天然气工业*, 2021, 41(7):41 - 55. Zhu Wenbo, Zhang Xunhua, Zhou Daorong, et al. New Cognition on Pore Structure Characteristics of Permian Marine Shale the Lower Yangtze Region and Its Implications for Shale Gas Exploration [J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(7):41 - 55.
- [30] 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.
- [31] 徐永强,何永宏,卜广平,等. 基于微观孔喉结构及渗流特征建立致密储层分类评价标准:以鄂尔多斯盆地陇东地区长7储层为例[J]. *石油实验地质*, 2019, 41 (3):451 - 460. Xu Yongqiang, He Yonghong, Bu Guangping, et al. Establishment of Classification and Evaluation Criteria for Tight Reservoirs Based on Characteristics of Microscopic Pore Throat Structure and Percolation: A Case Study of Chang 7 Reservoir in Longdong Area Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(3):451 - 460.