



· 地球科学 ·

铁边城地区延安组储层孔喉结构复杂程度 及其对含油性的控制作用

武景岳¹, 屈怡倩¹, 程鑫¹, 左学谦², 程钰婷¹, 吴汉宁¹, 孙卫¹

1. 西北大学 地质学系, 陕西 西安 710069; 2. 湖北工业大学 机械工程学院, 湖北 武汉 430068

摘要 通过高压压汞、扫描电镜、铸体薄片、荧光观察、含油饱和度测试等实验方法,并结合分形理论,对延8~延10层位典型样品的孔喉结构及其复杂特征开展定量分析,探讨孔喉结构对含油性的控制作用。研究表明,铁边城地区延8~延10储层主要由岩屑砂岩构成,孔隙类型以粒间孔和长石溶孔为主,广泛发育微纳米级孔隙,平均孔隙度为14.54%,平均渗透率为 $0.24 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于中孔-超低渗储层。低渗储层孔喉结构复杂,多为大孔-细喉的组合,样品储集空间越大,孔喉结构复杂程度越高。孔喉结构具有三段式分形特征,依次对应大、中、小孔喉段,各段平均分形维数分别为2.853 5、2.435 8、2.449 1。大孔喉段虽储集能力高,但不能决定低渗储层整体的含油饱和度,而中孔喉段对含油饱和度起主导作用。大孔-粗喉组合越发育,中孔喉段分布越均质,越有利于石油在低渗储层中的富集。最有利于油气富集的孔喉半径范围为 $0.02 \sim 1 \mu\text{m}$ 。该研究成果为进一步优化铁边城地区的油气开发策略提供了关键的科学依据。

关键词 分形维数;孔喉结构;储层含油性;鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE357 **DOI:** 10.16152/j.cnki.xdxbzr.2026-01-017

Pore-throat structure complexity of Yan'an Formation reservoir in Tiebiancheng area and its controlling effect on oil saturation

WU Jingyue¹, QU Yiqian¹, CHENG Xin¹, ZUO Xueqian²,
CHENG Yuting¹, WU Hanning¹, SUN Wei¹

1. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China;

2. School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China

Abstract In order to further guide the exploration and development of oil reservoirs in Tiebiancheng area, the pore throat structure and its complex characteristics of typical samples in Yan 8-Yan 10 layers were quantitatively analyzed by using experimental methods such as high-pressure mercury injection, scanning electron microscopy, cast thin section, fluorescence observation, oil saturation test and fractal theory, and the control effect of pore throat structure on oil content was discussed. The results show that the Yan 8-yan 10 reservoirs in Tiebiancheng area is mainly composed of lithic sandstone, and the pore types are mainly intergranular pores and feldspar dissolved pores, with micron sized pores widely developed. The average porosity is 14.54% and the average permeability is $0.24 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, belonging to medium porosity ultra-low permeability reservoir.

收稿日期:2025-01-15 修回日期:2025-02-07

基金项目:国家自然科学基金青年基金(42202143)

第一作者:武景岳,男,从事石油勘探研究,13277988076@163.com。

通信作者:屈怡倩,女,副教授,从事非常规储层地质学研究,quyq@nwu.edu.cn。

The pore throat structure of low permeability reservoir is complex. The larger the sample storage space in this area, the higher the complexity of pore throat structure, which is mostly a combination of large pore and fine throat. The pore throat structure has three fractal segments, which corresponds to the large, medium and small pore throat segments in turn. The average fractal dimensions of each segment are 2.853 5, 2.435 8 and 2.449 1, respectively. Although the reservoir capacity of the large pore throat section is high, it does not determine the overall oil saturation of the low-permeability reservoir. The more developed the macropore coarse throat combination, the more homogeneous the distribution of the mesopore throat, which is more conducive to the enrichment of oil in low-permeability reservoirs. The radius range of pore throat which is most conducive to oil and gas enrichment is $0.02 \sim 1 \mu\text{m}$. The research results provide a key scientific basis for further optimizing the oil and gas development strategy in the Tiebiancheng area.

Keywords fractal dimension; pore throat structure; reservoir oil saturation; Ordos Basin

姬源油田铁边城区块延安组储层具有良好的油气潜力^[1],但储层孔喉结构复杂,非均质性强,含油程度分布不均,勘探开发进展相对缓慢^[2-3]。因此,明确铁边城地区储层的孔喉结构及其非均质性对含油性的影响至关重要。

目前,国内外学者对鄂尔多斯盆地侏罗系储层的孔隙结构及其复杂性进行了深入研究。有学者通过高压压汞分选系数、孔喉半径分布区间,并引入分形维数等表征孔喉结构的复杂性,进一步探讨了储层分形维数与物性之间的相关性,指出孔喉的分形维数主要受储层矿物成分及含量控制^[4-5],与储层孔隙度、渗透率等也存在相关性^[6-7];也有学者针对储层物性与含油性的关系进行了研究,指出储层含油饱和度受储层物性的影响显著,与孔隙度、渗透率等存在明显正相关^[8-9]。尽管前人对研究区储层的孔喉结构及分形特征进行了大量研究,但鄂尔多斯盆地储层的孔喉结构复杂,含油性与孔喉结构密切相关,关于孔喉复杂程度对含油性的影响研究较少。近年来,分形理论在储层孔喉结构的表征中展现出独特优势^[10]。研究表明,分形维数能够有效量化孔喉系统的几何非均质性,其数值直接反映孔隙空间的表面粗糙度、形态不规则性和拓扑结构的复杂程度。特别是在低渗储层中,分形维数与孔喉配位数、迂曲度等关键参数存在显著相关性^[11],这为解析孔喉结构对流体赋存状态的制约机制提供了新视角。

本研究在扫描电镜和铸体薄片观察的基础上,结合高压压汞及分形理论,对鄂尔多斯盆地铁边城区块延 8、延 9、延 10 三个层位的储层微观孔喉结构特征进行研究;基于分形维数,定量表征储层的非均质性,进一步依据含油饱和度实验,计算出不同孔隙结构储层的含油饱和度,探讨孔喉复

杂程度与含油饱和度的关系,厘清铁边城地区延 8、延 9、延 10 段储层孔隙结构及非均质性对含油性的控制作用。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地是一个典型的多旋回克拉通盆地^[12],其基底为太古代和元古代的结晶岩和变质岩系,上覆古生代、中生代和新生代的沉积岩层,呈明显的二元结构^[13]。盆地边缘有发育的断裂褶皱,盆地内部地形较为简单平缓,以鼻状构造为主,缺乏二级和三级构造,地层倾角一般不超过 1° ^[14]。总体来看,鄂尔多斯盆地的构造特点是长期稳定,具有整体抬升、持续沉降、坡度宽缓、低隆起和接触整齐的特征^[15-16]。按其现今的构造形态特征,该盆地可划分为伊盟隆起、渭北隆起、晋西挠褶带、伊陕斜坡、天环向斜及西缘逆冲断裂构造带等 6 个一级构造单元^[17-18]。侏罗系延安组是在持续拗陷和沉降过程中形成的一套陆源碎屑岩沉积体系,自上而下划分为 10 个层段,记录了湖盆形成至消亡的全过程^[19]。

铁边城地区位于鄂尔多斯盆地中西部的姬源油田东南缘(见图 1),目前主力开发层位为侏罗系延安组及三叠系延长组。研究层位延安组整体连续性较好,局部发育若干条近东西向的低幅度鼻隆构造。延 10 为河流相沉积环境,中下段发育辫状河沉积体系,顶部发育曲流河沉积体系,以砂岩、含砾砂岩为主,整体粒度较粗^[20];延 9—延 8 段为三角洲平原沉积,发育分流河道沉积微相^[21],是研究区良好的储层。

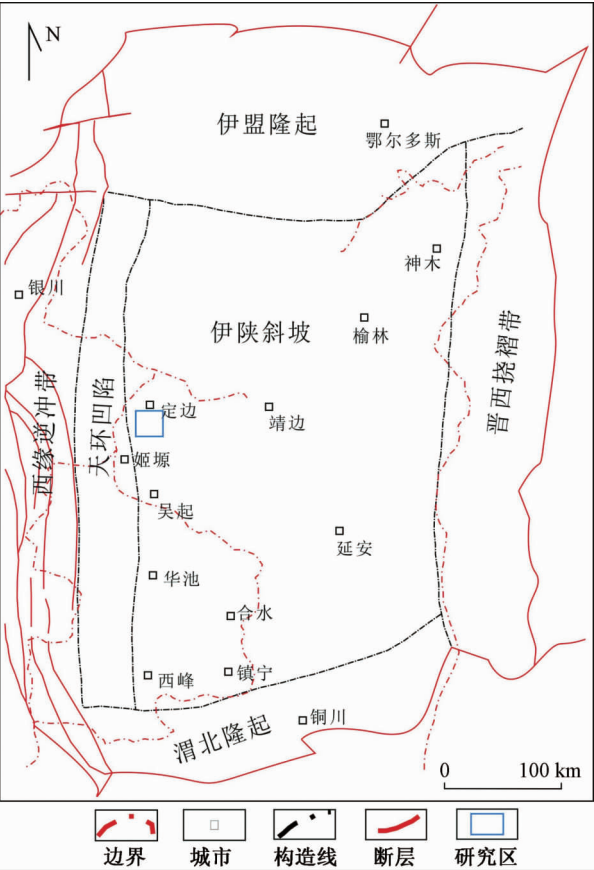


图 1 鄂尔多斯盆地构造单元(据文献[22]修改)
Fig. 1 Tectonic unit of Ordos Basin

2 样品及分析方法

针对鄂尔多斯盆地铁边城地区侏罗系延安组,开展了 8 口典型井的岩心观测和描述。采集 8 口不同井的岩心样品,在每口井的试油段,沿平行地层方向钻入直径为 2.5 cm、长度为 5 cm 的柱塞,将柱塞样放入酒精和苯的混合溶液中去除残余烃(持续 20 天以上)。试样干燥后,进行岩石物性、铸体薄片、扫描电镜、高压压汞等实验。以三氯甲烷为溶剂,使用抽提法测定不同试样中油样的质量,并结合岩样孔隙体积,计算出岩样的含油饱和度。

研究区储层的孔隙度分布在 3.04% ~ 14.08%,平均为 8.76%;渗透率分布在 $(0.03 \sim 236.5) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,其中样品 J71 测试后破裂,渗透率高达 $236.46 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,其余 4 块样品平均渗透率为 $0.38 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (见表 1)。由表 1 可以看出,样品的物性较差,且渗透率分布不均,储层非均质性较强。

表 1 铁边城区延安组样品基本信息及物性特征

Tab. 1 Basic information and physical properties of samples from the Yan'an Formation in Tiebiancheng Area

样品 编号	层位	深度/m	孔隙度 /%	渗透率 / $10^{-3} \mu\text{m}^2$
J64	延 9	1 543 ~ 1 548.3	11.17	0.24
J71	延 10	1 636.5 ~ 1 647.1	14.08	236.46
J114	延 9	1 578.9 ~ 1 585	6.83	0.03
J175	延 8	1 540 ~ 1 549.6	14.00	1.21
W550	延 8	1 567 ~ 1 579.3	3.04	0.05

2.1 高压压汞

高压压汞实验采用美国 Corelab CMS300 和美国 AutoPore IV 9505 压汞仪,根据 SY/T 5346 — 2005 岩石毛管压力曲线的测定^[23]标准进行实验。样品测试前在 105 ℃ 下烘干至恒重,压汞实验包括加压进汞、减压退汞过程,最高实验压力 200 MPa。

实验中,毛细管力会阻止非湿润相汞侵入孔喉,因而需要施加相应的注入压力克服毛细阻力。其中,注入压力下的进汞量可以表示相应压力下的连通孔喉体积^[24]。因此,样品在每一个压力点达到平衡时,测得随注入压力变化的进汞量,绘制成相应的毛管压力曲线^[25],并通过毛管压力与孔喉半径关系^[26][公式(1)]得到孔喉半径曲线。高压压汞可以测量 0.001 ~ 96 μm 孔喉结构。

$$p_c = \frac{2\sigma\cos\theta}{r} \tag{1}$$

式中: p_c 为毛管压力,MPa; σ 为表面张力,mN/m; θ 为湿润角,(°); r 为孔喉半径, μm 。

2.2 分形理论

分形理论于 1975 年由法国数学家 Mandelbrot 首次提出^[27],用于研究结构复杂、具有自相似性的不规则体^[28-29],定量分析几何体内部的关系性^[30-31],是表征孔隙结构特征的有效方法^[32]。目前,该方法广泛应用于储层裂缝预测、孔隙结构、非均质性研究等领域^[33]。多孔岩石的分形维数通常为 2 ~ 3,越接近 2 表示该岩石内部的孔喉均质性越强,越接近 3 表示该岩石内部的孔喉非均质性越强^[34]。因此,分形维数越大,孔喉结构越复杂,储层非均质性越强^[35]。

在高压压汞实验中,采用毛管近似法求取分形维数。根据分形几何原理,储层中孔喉半径大于

r 的孔隙数目 $N(r)$ 与孔隙半径 r 的幂函数关系为^[36]

$$N(r) = \int_r^{\infty} p(r) dr = ar^{-D} \tag{2}$$

式中: $N(r)$ 为孔隙半径大于 r 的孔隙数量; r 为孔隙半径, μm ; r_{max} 为最大孔隙半径, μm ; $p(r)$ 为孔隙半径的密度分布函数; a 为常数 ($a = 1$ 代表管状孔隙, $a = 4\pi/3$ 为球状孔隙); D 为分形维数。

根据 Brooks-Corey 模型, 假设岩石孔隙是管状孔隙, 则孔隙半径小于 r 的累积体积分数可表示为^[37-38]

$$V(c) = \left(\frac{r}{r_{\text{max}}}\right)^{3-D} \tag{3}$$

两边取对数, 可得

$$\log V(c) = \log(1 - S_{\text{Hg}}) = (3 - D)\log r - (3 - D)\log r_{\text{max}} \tag{4}$$

显然, 如果储层的孔隙大小及其分布满足分形理论, 则 $\log(1 - S_{\text{Hg}})$ 与 $\log r$ 之间满足线性相关, 通过拟合毛管压力曲线的斜率 H , 用 $D = 3 - H$ 近似求取岩石孔隙的分形维数 (分形维数 $D > 2.6$ 表明孔喉表面高度不规则, 结构复杂, $D < 2.4$ 则指示相对均质的孔喉系统^[39])。

若样品 $\log(1 - S_{\text{Hg}})$ 与 $\log r$ 之间存在多段分形, 则分别统计每段的分形维数 D , 计算每个孔喉段所占孔隙度 ϕ , 根据各孔隙度 ϕ 加权平均计算整体的总分形维数^[40]:

$$D_p = \frac{D_1\phi_1 + D_2\phi_2 + D_3\phi_3}{\phi_1 + \phi_2 + \phi_3} \tag{5}$$

3 结果

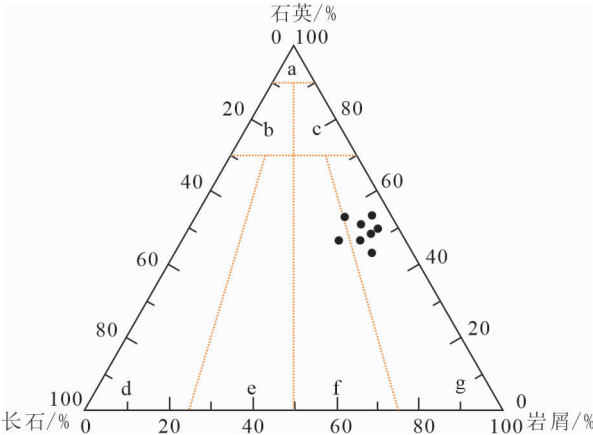
3.1 岩石学特征

通过岩心观察、铸体薄片、扫描电镜等对 8 个样品进行岩石学特征分析。根据砂岩的三角图解分类法将岩石进行分类可知 (见图 2), 研究区的岩石类型主要为石英砂岩、岩屑砂岩两种类型, 其次是长石岩屑砂岩。对铸体薄片的观察结果进行统计发现 (见表 2), 碎屑颗粒中石英含量最高, 平均质量分数为 50.59%, 岩屑含量次之, 平均质量分数为 33.19%, 长石最少, 平均质量分数为 16.22%。

研究区储层不同层位的粒度、分选、磨圆不同 (见图 3)。延 8 石英/(长石 + 岩屑) 的值为 1.04, 成熟度为中等低, 磨圆度以次棱 - 次圆为

主, 分选中等; 延 9 石英/(长石 + 岩屑) 的值为 1.26, 成熟度为中等, 磨圆度以次棱 - 次圆为主, 分选中等; 延 10 石英/(长石 + 岩屑) 的值为 0.69, 成熟度低, 磨圆度以次棱 - 次圆为主, 分选中等。储层整体岩石成分成熟度与结构成熟度表现为中等偏低的特征。

研究区储层的填隙物质量分数约为 9.86%, 主要填隙物为黏土矿物、硅质、白云石及方解石。延 8 储层的填隙物质量分数为 10.83%, 主要填隙物为硅质、方解石及黏土矿物; 延 9 储层的填隙物质量分数为 9.25%, 主要填隙物为硅质、白云石及黏土矿物; 延 10 储层的填隙物质量分数为 9.5%, 主要填隙物为黏土矿物。



(a) 石英砂岩; (b) 长石石英砂岩; (c) 岩屑石英砂岩; (d) 长石砂岩; (e) 岩屑长石砂岩; (f) 长石岩屑砂岩; (g) 岩屑砂岩

图 2 铁边城地区延安组储层砂岩岩石碎屑含量三角图

Fig. 2 Triangular diagram of clastic content in Yan'an Formation reservoir sandstone rocks in Tiebiancheng Area

3.2 微观孔喉结构特征

3.2.1 储集空间类型及特征

研究区延 8 ~ 延 10 段储层发育的孔隙类型主要有粒间孔、长石溶孔及晶间孔等 (见图 3)。残余粒间孔是原生粒间孔经过成岩过程中压实作用和胶结物填充后形成的剩余孔隙^[41-42]。它们的形态相对规则, 通常呈三角形或多边形, 边缘整齐平直。这种孔隙周边常发育绿泥石衬边充填, 呈薄膜状^[43], 直径通常为 10 ~ 100 μm , 且具有良好的连通性。溶蚀孔主要是易溶矿物在成岩过程中被酸性流体溶解形成的孔隙。其中, 粒间溶孔是碎屑和填隙物在成岩过程中溶解改造而成的孔

隙,主要发生在长石和部分岩屑颗粒上^[44]。这些孔隙的边缘不规则,常呈港湾状,直径通常在 10 ~ 50 μm ,部分可达 100 ~ 200 μm 。粒内溶孔主要是长石沿解理方向的溶蚀以及少量云母和岩屑的溶蚀。

有些长石完全溶解后形成仅保留其外形和骨架的铸模孔,其孔隙直径一般较小,大多在 50 μm

以下,连通性较差。晶间孔主要是自生矿物晶体的生长和沉淀^[45],孔径多小于 1 μm ,且常表现出与溶蚀孔明显共存的关系。不同孔隙之间通常具有关联性,如粒间孔发育的样品中通常会发育溶蚀孔,晶间孔发育的样品中少见粒间孔发育的情况,而随着样品物性变差,残余粒间孔的比例会逐渐降低,而溶蚀孔和晶间孔的比例会不断升高。

表 2 铁边城地区延 8 ~ 延 10 层样品微观孔喉结构特征参数表

Tab. 2 Characteristic parameters of micro pore throat structure of samples from layer 8 to 10 in Tiebiancheng Area

样号	层位	平均孔喉半径/ μm	最大汞饱和度/%	退汞效率/%	排驱压力/ MPa	中值压力/ MPa	分选系数
J64	延 9	0. 22	96. 85	41. 76	0. 68	3. 96	2. 10
J71	延 10	14. 77	98. 61	13. 35	0. 02	0. 04	2. 31
J114	延 9	0. 29	96. 17	44. 71	0. 68	3. 89	2. 32
J175	延 10	0. 89	97. 55	51. 53	0. 27	1. 02	1. 82
W550	延 8	7. 20	97. 28	19. 67	0. 03	0. 13	3. 03

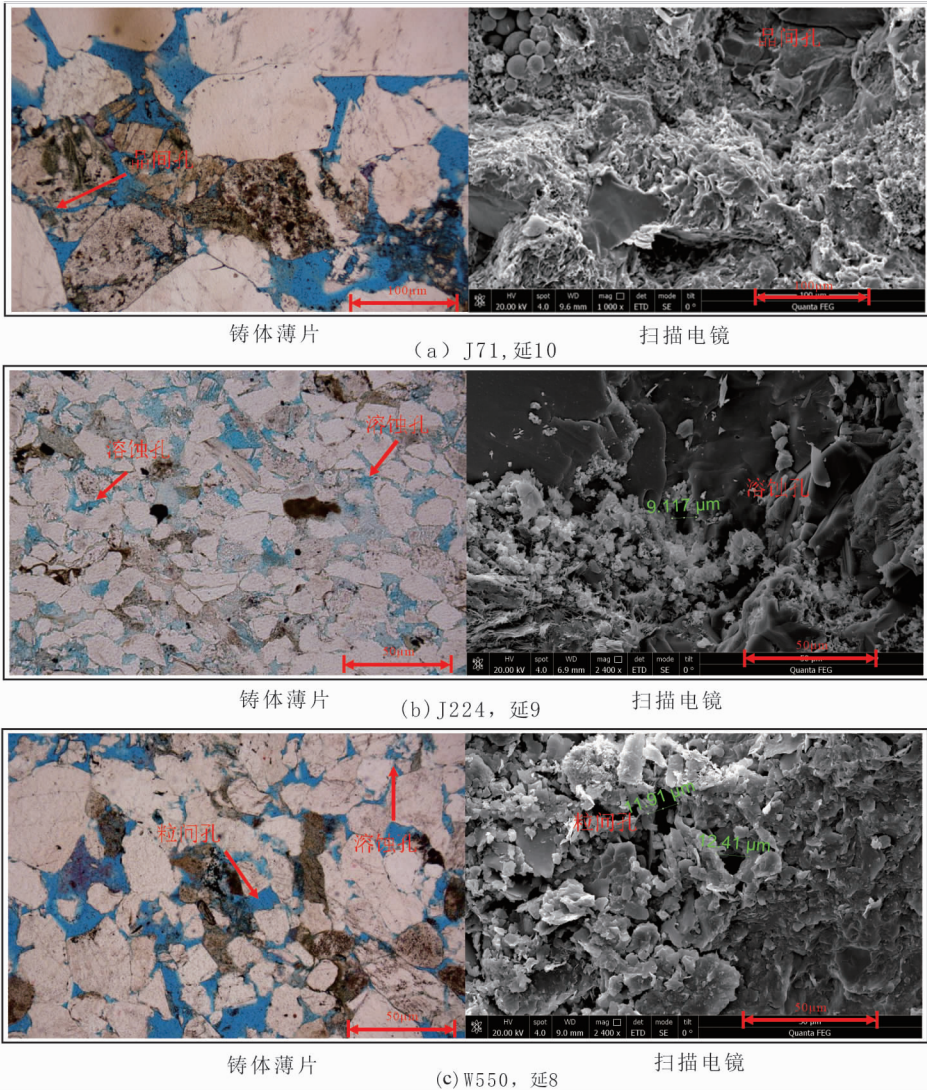


图 3 铁边城区块铸体薄片和扫描电镜照片

Fig. 3 Cast thin sections and scanning electron microscopy photographs of Tiebiancheng Area

3.2.2 孔喉大小及分布特征

图 4 及表 2 所示为本研究高压压汞实验的结果。由图 4 和表 2 可以看出,研究区样品的排驱压力及中值压力较小,孔喉半径较大;排驱压力主要分布在 0.02 ~ 0.3 MPa,中值压力主要分布在 0.1 ~ 1.5 MPa,中值孔喉半径主要分布在 20 ~ 40 μm。因此,整体上讲,研究区主要发育微米级孔

喉。研究区延 8 层 W550 样品孔喉半径较大,但退汞效率差,代表孔喉结构不均质,分选系数高达 3.03;延 9 层 2 个样品虽然平均孔喉半径小,但孔喉结构均质,连通性好,退汞效率高;延 10 层 2 个样品展现出较明显的差异,J71 孔喉半径大,但非均质性强,不利于流体的渗流;J175 孔喉结构均质,退汞效率在所有样品中最高。

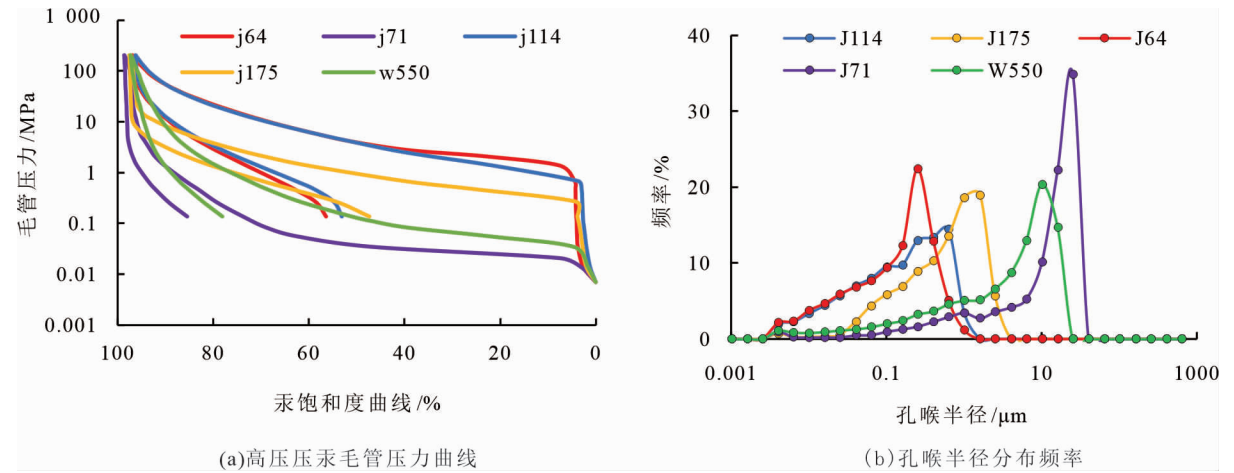


图 4 铁边城地区延 8 ~ 延 10 层样品孔喉分布
Fig. 4 Pore throat distribution of Yan 8 ~ Yan 10 samples in Tiebiancheng Area

3.3 分形特征

根据研究所得高压压汞毛细管压力曲线,绘制各样品 $\log(1 - S_{Hg})$ 和 $\log r$ 的散点图(见图 5)。由图 5 可以看出,研究区 4 个样品表现出三段式分形特征,按孔喉从大到小分为 3 个区间段,对应的分形维数记为 D_1 、 D_2 、 D_3 ;大孔喉段孔喉半径以

$>1 \mu\text{m}$ 的孔喉为主,中段孔喉半径位于 $0.02 \sim 1 \mu\text{m}$,小孔喉段半径以 $<0.02 \mu\text{m}$ 的孔喉为主。W550 样品[见图 5(e)]孔喉分布均匀,呈一段式分形,说明大、中和小孔喉形态及表面发育程度展现出一致性。

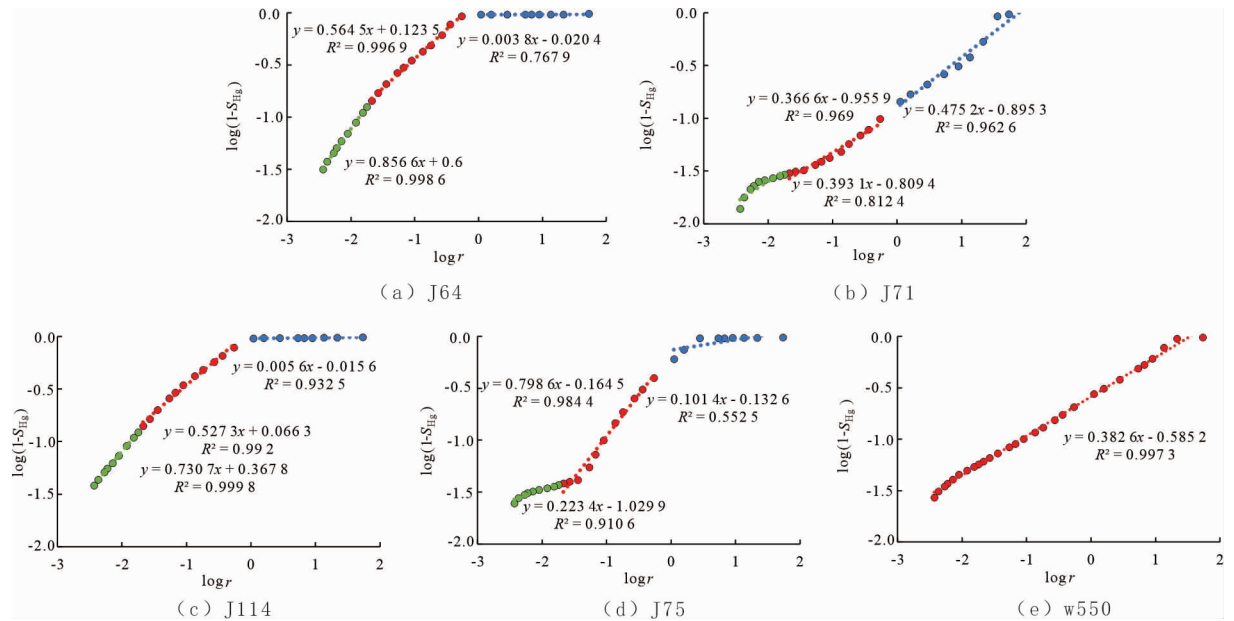


图 5 铁边城地区延 8 ~ 延 10 层样品分形特征曲线
Fig. 5 Fractal characteristics curve of samples from Yan 8 ~ Yan 10 layers in Tiebiancheng Area

表 3 所示为样品分段分形维数和渗透率贡献大小。总体而言,大孔的分段分形维数最高,平均 2.853 5;中孔的分形维数较低,平均 2.435 8,其中 J71 的分形维数最大,为 2.633 4。小孔的平均分形维数为 2.449 1,其中 J175 的分形维数最大,

表 3 铁边城地区延 8~延 10 层样品分段分形维数、累计孔喉及渗透率贡献

Tab.3 Segmented fractal dimensions, cumulative throat sizes, and permeability contributions of samples from Yan 8 ~ Yan 10 layers in Tiebiancheng Area

样号	平均分形维数	D_1	R^2	渗透率贡献/%	D_2	R^2	渗透率贡献/%	D_3	R^2	渗透率贡献/%
J64	2.283 5	2.996 2	0.767 9	4.56	2.435 5	0.996 9	83.89	2.143 4	0.998 6	11.55
J71	2.523 0	2.524 8	0.962 6	86.88	2.633 4	0.969 0	11.48	2.606 9	0.812 4	1.64
J114	2.327 8	2.994 4	0.932 5	3.85	2.472 7	0.992 0	85.47	2.269 3	0.999 8	10.68
J175	2.172 1	2.898 6	0.552 5	40.74	2.201 4	0.984 4	57.84	2.776 6	0.910 6	1.42
W550	2.617 4	2.617 4	0.997 3	/	2.617 4	0.997 3	/	2.617 4	0.997 3	/

3.4 含油特征

表 4 所示为铁边城地区延 8~延 10 层样品含油饱和度统计数据。由表 4 可知,样品孔隙度在 3.04%~14.08%,平均孔隙度为 8.98%,含油饱和度在 38.56%~77.44%,平均为 68.16%。其中延 8 层位 3 块样品的含油饱和度在 59.86%~78.56%,平均含油饱和度为 69.85%,孔隙度在 3.04%~14.00%,平均孔隙度为 9.91%;延 9

为 2.776 6。大孔的分段分形维数在 3 种孔隙中最大,表明孔隙越大,非均质性越强,且孔隙大小更偏向离散部分,而小孔及中孔具有相对均匀及规则的孔隙分布规律。

层位 4 块样品的含油饱和度在 65.79%~71.79%,平均含油饱和度为 68.69%,孔隙度在 5.12%~11.17%,平均孔隙度为 7.34%;延 10 层位 3 块样品的含油饱和度在 53.73%~77.44%,平均含油饱和度为 65.75%,孔隙度在 8.21%~14.08%,平均孔隙度为 10.23%。3 个层位的含油饱和度水平相近,且与孔隙度之间无明显相关性。

表 4 铁边城地区延 8~延 10 层样品含油饱和度统计表

Tab.4 Statistical table of oil saturation of samples from Yan 8 ~ Yan 10 layers in Tiebiancheng Area

样品编号	层位	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	含油饱和度/%
J175	延 8	14.00	1.21	78.56
J175-1	延 10	8.21	0.08	66.09
J175-2	延 10	8.42	0.14	53.73
J116	延 9	5.12	0.13	69.85
J224	延 9	6.24	0.04	71.79
J64	延 9	11.17	0.24	67.34
J71	延 10	14.08	236.46	77.44
J114	延 9	6.83	0.03	65.79
Y267	延 8	12.70	73.15	71.14
W550	延 8	3.04	0.05	59.86

4 讨论

4.1 分形维数与孔喉结构的关系

分形维数可以定量表征储层孔隙结构的复杂

程度^[46],其数值与孔喉结构的大小、分布、连通性等息息相关,通过绘制分形维数与孔喉结构参数的关系图(见图 6),可清晰获得孔喉结构参数对孔喉整体复杂程度的影响。

样品分选系数与分形维数之间呈现微弱正相

关性[见图 6(a)], 相关系数为 0.432 2, 表明储层孔隙结构越复杂, 分选程度越差, 分选系数越大。但这种正相关性并不明显, 可能与研究区样品的分段分形特征有关。过高的分选系数表明喉道非均质性强, 例如样品 W550, 孔喉结构差, 分选系数 3.03, 在所有样品中最高, 总分形维数 2.617 4, 在所有样品中最高, 镜下显示发育大孔和细喉组合, 代表孔喉结构差。同时研究发现, 分选系数小, 喉道均匀, 孔喉结构较为均质, 但渗流能力并不强, 如样品 J175(见图 7), 分形维数 2.172 1, 较小, 分选系数 1.82, 在所有样品中最小, 喉道均质分布, 孔喉结构较为均质, 但孔喉整体以小孔为主, 发育大量黏土矿物晶间孔, 对渗流影响极小甚至不产生作用的细微喉道占大多数, 整体渗透性差。因此, 过高或过低的分选系数都不利于储层渗流。孔喉相对分选系数为孔喉分选系数与孔喉半径均

值的比值, 反映孔喉大小分布的均匀程度。研究区相对分选系数与分形维数之间存在负相关性, 相关系数为 0.375 8, 进一步验证了分形维数表征孔喉结构与非均质性的有效性。

样品分形维数与孔隙度无明显相关性, 与渗透率之间呈负相关性[见图 6(b)], 说明表征孔喉结构复杂程度的分形维数并不受控于样品的储集空间大小, 而与样品的渗流能力有关, 储层渗透率越小, 说明孔喉结构越复杂, 非均质性越强, 因此分形维数越大。这也印证了低渗透储层的孔隙度与渗透率的相关性一般。最大进汞饱和度与分形维数之间无明显相关性, 而退汞效率与分形维数呈显著负相关性[见图 6(c)]; 最大进汞饱和度代表样品的储集能力, 与孔喉结构复杂程度的相关性较差, 而退汞效率越高, 代表孔喉结构越均质, 连通性越好, 相应的分形维数越小。

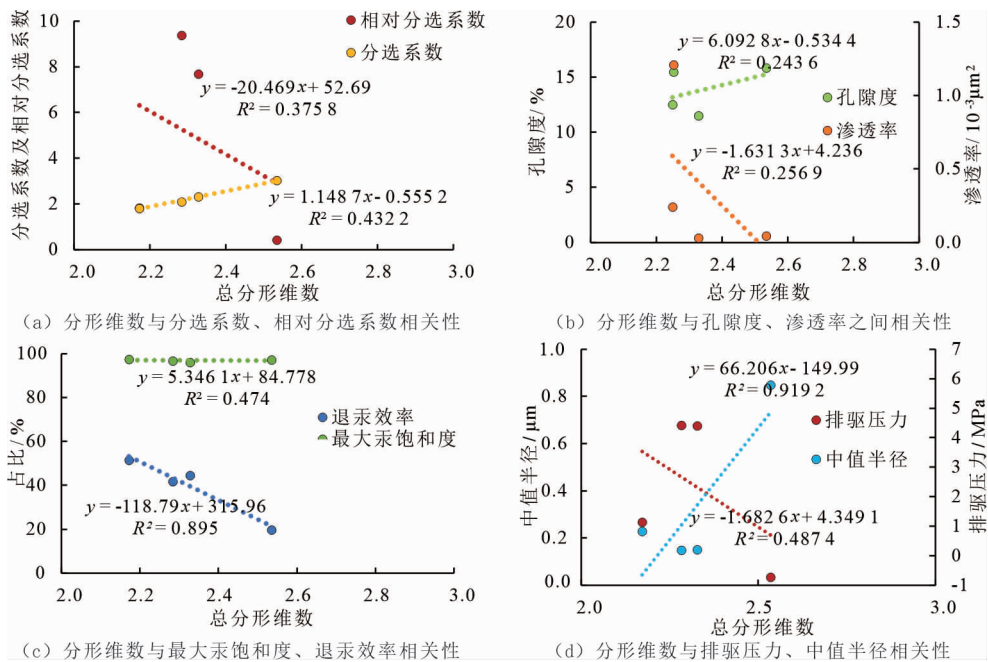


图 6 分形维数与孔喉结构参数相关性

Fig. 6 Correlation between fractal dimension and pore-throat structural parameters

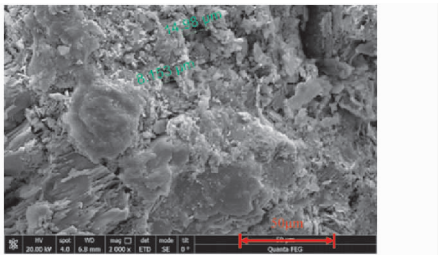


图 7 J175 样品扫描电镜

Fig. 7 Sample J175 scanning electron microscopy

样品分形维数与排驱压力呈负相关性[见图

6(d)], 排驱压力越小, 最大孔喉半径越大, 代表样品大孔喉段半径较大; 但大孔与细喉或细微喉组合, 形态差异大, 造成储层非均质性强, 结构复杂, 孔喉分形维数大。样品分形维数与中值半径之间呈显著正相关性, 表明中值孔喉半径越小, 分形维数越小。如样品 J114(见图 8), 主要发育中小孔, 孔喉形态相似度高, 分布集中, 结构均质, 因此分形维数小。这主要原因是, 储层孔喉分布越集中, 孔隙表面越规则, 对孔隙结构非均质性的影响越小。

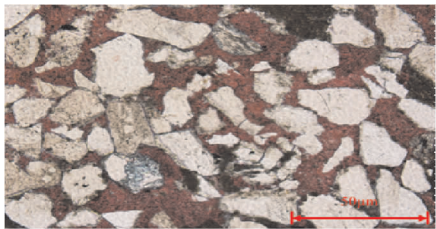
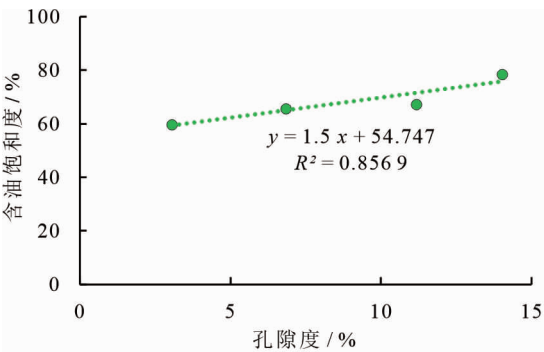


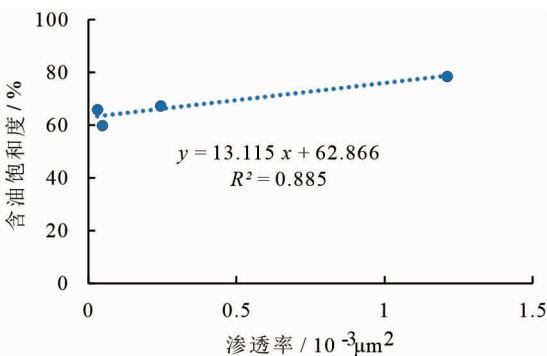
图 8 J114 样品铸体薄片

Fig. 8 Sample J114 casting thin section

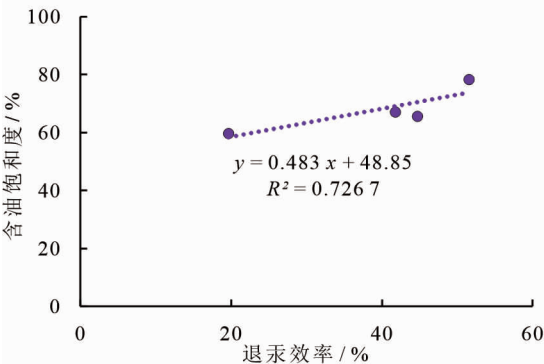
由此可见,低渗储层孔喉结构越复杂,样品储集空间越大,孔喉结构复杂程度越高,则多为大孔细喉的组合,渗流能力相较于中小孔喉发育的样品越差。



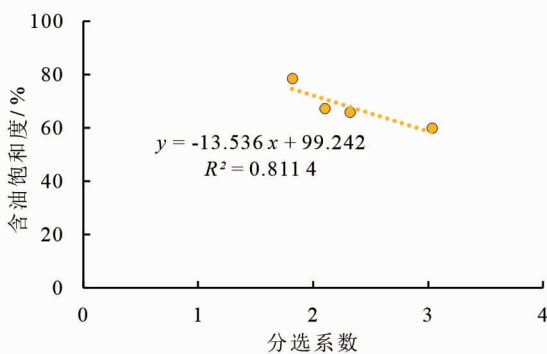
(a) 孔隙度与含油饱和度相关性



(b) 渗透率与含油饱和度相关性



(c) 退汞效率与含油饱和度相关性



(d) 分选系数与含油饱和度相关性

图 9 孔喉复杂程度与含油饱和度相关性

Fig. 9 Correlation between pore-throat complexity and oil saturation

高分形维数 ($D > 2.8$) 表征的迷宫式孔喉网络显著增加了流体运移路径的迂曲度,导致毛细管阻力增大。据 Washburn 方程估算,当喉道半径从 $1 \mu\text{m}$ 降至 $0.1 \mu\text{m}$ 时,驱替压力将升高一个数量级,这使得原油在非均质孔喉系统中难以有效驱替束缚水。另一方面,复杂孔喉界面产生的表面力会增强原油组分的吸附滞留效应,这种界面效应对轻质组分的选择性滞留,进一步降低了可

4.2 孔喉复杂程度对储层含油性的控制

孔喉复杂程度通过影响流体的通过能力进而影响储层的含油饱和度。图 9 所示为储层孔喉结构参数与含油饱和度的相关性,其中,孔隙度[见图 9(a)]、渗透率[见图 9(b)]、退汞效率[见图 9(c)]与含油饱和度均呈明显正相关,相关系数分别为 0.856 9、0.885 和 0.826 7;分选系数[见图 9(d)]与含油饱和度呈明显负相关,相关系数为 0.811 4。由此可见,储集空间大,含油饱和度高,储集空间为油气的聚集提供良好的场所;渗透率、退汞效率及分选系数等均可反映储层孔喉结构的非均质性,孔喉均质程度越高,流体在其中的渗流能力越好,含油饱和度越高。

动油饱和度。

样品分形维数与储层含油饱和度具有良好的负相关关系,相关系数为 0.995 9,当分形维数从 2.95 降至 2.45 时,含油饱和度增幅达 35%。这说明孔喉系统的自相似性越强(分形维数趋近于 2),孔喉结构越均质,含油饱和度越高,越有利于形成连续渗流通道,促使石油在储集空间中达到更高的赋存效率。由此可知,低渗储层的孔喉结

构复杂,且具有 3 段式分形特征,不同孔喉段对含油饱和度的控制不同。依据样品分段分形维数与含油饱和度的关系可知(见图 10), D_1 为大孔喉段分形维数,即孔喉半径 $>1\text{ }\mu\text{m}$ 的情况下,分形维数介于 $2.6174\sim2.9962$,复杂程度高,且与含油饱和度无相关性。这是因为大孔喉阶段普遍发育溶蚀孔,孔隙形态各异,表面粗糙程度不均,具有较大的储集空间,但其复杂程度与含油饱和度之间无关。 D_3 为小孔喉段分形维数,孔喉半径 $<0.02\text{ }\mu\text{m}$,同样与含油饱和度无明显相关性,该孔喉段主要以晶间孔为主,储层压实作用较强,残留粒间孔发育较少,孔喉半径小,难以驱替,石油难以保存在其中,该段孔喉一般形态为管束状,较为均质,但与储层含油性相关性小。

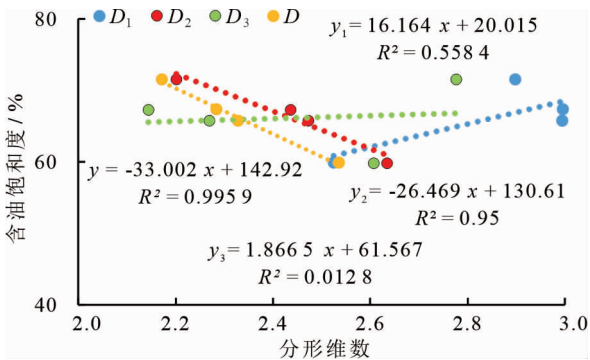


图 10 分段分形维数与含油饱和度关系

Fig. 10 Relationship between segmented fractal dimension and oil saturation

D_2 为中孔喉段分形维数,孔喉半径集中分布在 $0.02\sim1\text{ }\mu\text{m}$,与含油饱和度呈显著负相关关系,相关系数为 0.95 ,可见中孔喉段的均质程度在一定程度上决定了储层的含油性。这是由于在低渗储层中,中孔喉段起到连接大孔以及大孔和小孔的关系,对渗流能力至关重要;中孔喉段的孔喉复杂程度低,更有利于流体的渗流。研究区样品中,中孔喉段以粒间孔和粗喉道为主,沟通大孔喉,利于流体渗流,对储层含油性起控制作用。

4.3 不同孔喉段的渗透率贡献及其对储层含油性的控制

图 11 统计了各样品的渗透率贡献及孔喉分布等,整体上样品表现出 3 类典型特征,包括以 J64 为主的小孔-弱非均质性结构,以 J114、J175 为主的中孔-粗喉-弱非均质性结构和以 W550、J71 为主的大孔-细喉-强非均质性结构。

样品 J64 的主要渗透率贡献区间为 $0.001\sim0.2\text{ }\mu\text{m}$,最大渗透率贡献孔喉为 $0.06\text{ }\mu\text{m}$,位于小孔范围。该样品的平均孔喉半径小,孔喉均质性较强,以微小孔喉为主,图像中可见黏土矿物晶间孔发育(见图 12),孔喉结构虽均质,但整体上物性差,含油性中等。

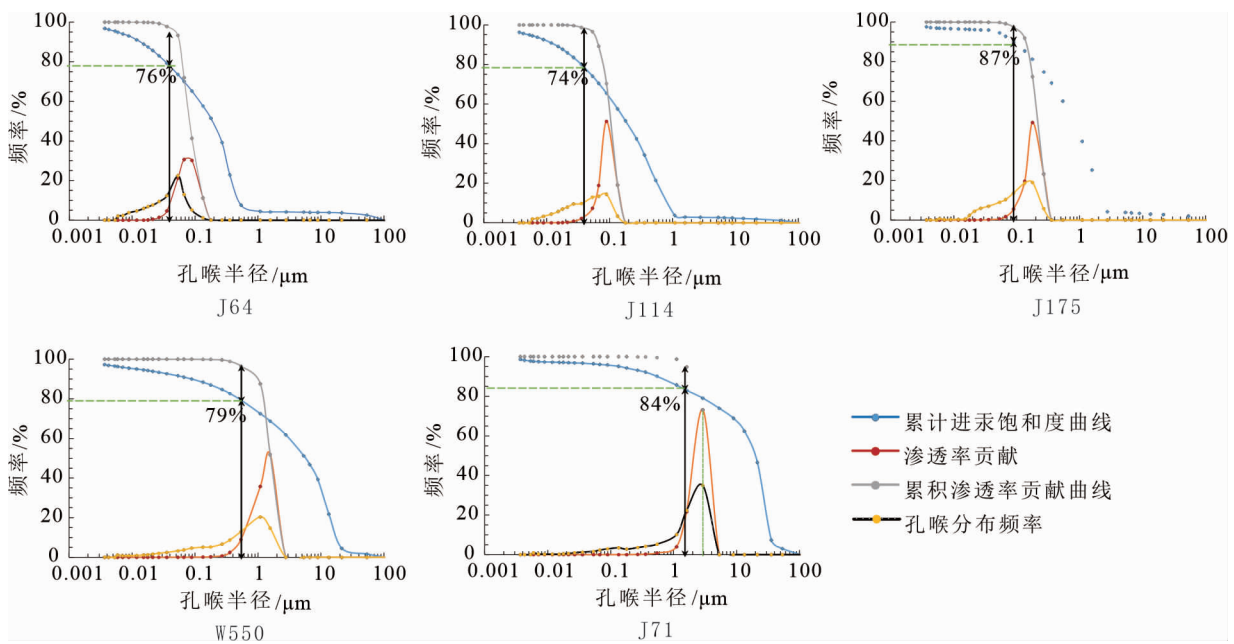


图 11 毛管压力曲线与孔喉分布

Fig. 11 Capillary pressure curve and pore throat distribution

样品 J114 的主要渗透率贡献为 0.02 ~ 0.2 μm ,最大渗透率贡献孔喉为 0.09 μm ;样品 J175 的主要渗透率贡献为 0.05 ~ 0.5 μm ,最大渗透率贡献孔喉为 0.17 μm ,属于中孔范围。该类型样

品的平均孔喉半径较小,孔喉结构以中孔 - 粗喉为主,均质性较强,利于流体在其中渗流,整体含油性较好。

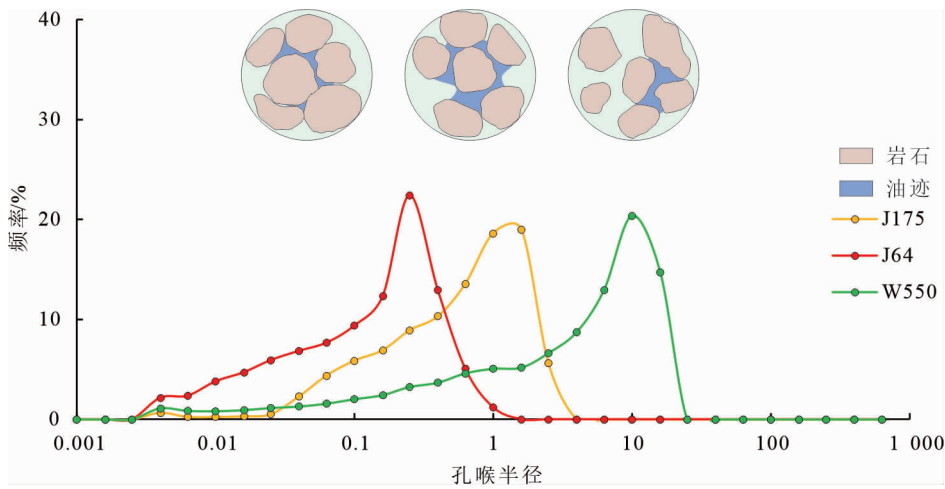


图 12 孔喉半径分布频率

Fig. 12 Distribution frequency of pore throat radius

样品 W550 和样品 J71 虽然储集空间大,主要渗透率贡献区间和最大渗透率贡献孔喉均位于大孔段,但样品孔喉结构非均质性强,导致样品渗透率低,不利于流体流动。这也印证了低渗储层孔喉结构的非均质性制约了储层流体的渗流及含油性。总体而言,由中孔提供主要渗透率贡献的储层含油性较好。

不同孔喉段的渗透率贡献差异揭示了储层含油性受控的核心机制。研究表明,大孔段($>1\ \mu\text{m}$)虽孔隙体积占比较高,但受限于细喉道导致的渗流阻力,渗透率贡献普遍较低,且毛细管力阈值高,油相充注效率差;中孔段($0.02\sim1\ \mu\text{m}$)作为渗透率主导贡献段,其孔喉均质性强,喉道粗化的特征显著降低了渗流阻力,为油相连续运移提供优势通道,是含油性优化的关键区间;小孔段($<0.02\ \mu\text{m}$)因孔隙尺度微小且被束缚水占据,渗透率贡献可忽略,对储油能力无实质影响。值得注意的是,中孔段的孔喉均质性(低分形维数)与高连通性(退汞效率 $>50\%$)协同作用,可大幅提升驱替路径的连续性,而大孔段主导的储层尽管孔隙空间发育,却因非均质性过强抑制了油相的富集。这一规律表明,储层含油性并非单纯依赖于孔隙体积,而是由优势孔喉段的渗透率贡献与结构均质性共同决定。

5 结论

1)铁边城地区延 8 ~ 延 10 储层主要由岩屑砂岩构成,孔隙类型以粒间孔和长石溶孔为主,广泛发育微米级孔隙。平均孔隙度为 14.54%,平均渗透率为 $0.24\times10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,属于中孔 - 超低渗储层。该区样品储集空间越大,孔喉结构复杂程度越高,多为大孔 - 细喉的组合。其中,延 8 储层孔隙结构相对较好,含油性也最好,延 9 次之,延 10 相对较差。整体上讲,研究区储层的连通性较好,储层渗流能力较强。

2)孔喉结构具有三段式分形特征,依次对应大、中、小孔喉段,各段平均分形维数分别为 2.853 5、2.435 8、2.449 1。大孔喉段虽储集能力高,但并不决定低渗储层的整体含油饱和度;中孔喉段对含油饱和度起主导作用,大孔 - 粗喉组合越发育,中孔喉段分布越均质,越有利于石油在低渗储层中的富集。

3)含油性受到孔喉复杂程度的影响,与孔隙度、渗透率及退汞效率呈正相关。孔隙度、渗透率及退汞效率越高,孔喉结构越均质,连通性越好,分形维数越小,储层含油性也越好。试验样品进汞孔喉半径主要分布在 $0.02\sim2\ \mu\text{m}$,渗透率峰位主要分布在 $0.04\sim1\ \mu\text{m}$,属于中孔喉范围,说明中孔喉段对含油饱和度起主导作用,最有利于油

气富集的孔喉半径范围为 $0.02 \sim 1 \mu\text{m}$ 。

参考文献

- [1] 王昌勇,郑荣才,王成玉,等.鄂尔多斯盆地姬塬地区延长组中段岩性油藏成藏规律研究[J].岩性油气藏,2010,22(2):84-89.
WANG C Y, ZHENG R C, WANG C Y, et al. Hydrocarbon accumulation law of lithologic reservoirs of middle Yanchang Formation in Jiyuan Area, Ordos Basin [J]. Lithologic Reservoir, 2010, 22 (2) : 84-89.
- [2] 康昱,陈刚,张卫刚,等.鄂尔多斯盆地姬塬油区铁边城区块长8储层成岩致密化及其与油气成藏关系[J].地质科技通报,2021,40(2):64-75.
KANG Y, CHEN G, ZHANG W G, et al. Diagenetic densification of Chang 8 sandstone reservoirs and its relationship with hydrocarbon accumulation in Tiebi-ancheng Area, Jiyuan Oilfield, Ordos Basin [J]. Geological Science and Technology Bulletin, 2021, 40 (2) : 64-75.
- [3] 姚泾利,邓秀芹,赵彦德,等.鄂尔多斯盆地延长组致密油特征[J].石油勘探与开发,2013,40(2):150-158.
YAO J L, DENG X Q, ZHAO Y D, et al. Characteristics of tight oil in Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(2) : 150-158.
- [4] 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 Q P, WU W R, LIU L P, et al. Pore structure and fractal characteristics of ultra-low permeability reservoirs in Yanchang Formation in Zhenbei Area, Ordos Basin [J]. Oil and Gas Geology and Recovery Factor, 2020, 27(3) : 20-31.
- [5] 卢振东,刘成林,臧起彪,等.高压压汞联合分形理论分析致密砂岩孔隙结构:以鄂尔多斯盆地合水地区为例[J].地质科技通报,2023,42(1):264-273.
LU Z D, LIU C L, ZANG Q B, et al. Analysis of the pore structure of tight sandstone by high-pressure mercury injection combined with fractal theory: A case study of the Heshui area in the Ordos Basin [J]. Geological Science and Technology Bulletin, 2023, 42 (1) : 264-273.
- [6] 孔星星,肖佃师,蒋恕,等.联合高压压汞和核磁共振分类评价致密砂岩储层——以鄂尔多斯盆地临兴区块为例[J].天然气工业,2020,40(3):38-47.
KONG X X, XIAO D S, JIANG S, et al. Application of the combination of high-pressure mercury injection and nuclear magnetic resonance to the classification and evaluation of tight sandstone reservoirs: A case study of the Linxing Block in the Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(3) : 38-47.
- [7] 窦文超,刘洛夫,吴康军,等.基于压汞实验研究低渗透层孔隙结构及其对渗透率的影响——以鄂尔多斯盆地西南部三叠系延长组长7储层为例[J].地质论评,2016,62(2):502-512.
DOU W C, LIU L F, WU K J, et al. Pore structure characteristics and its effect on permeability by mercury injection measurement: An example from Triassic Chang-7 reservoir southwest Ordos Basin [J]. Geological Review, 2016, 62(2) : 502-512.
- [8] 胡文婷.孔隙结构对砂岩储层含油性的控制作用[J].科技创新导报,2020,17(17):93,154.
HU W T. Control effect of pore structure on oil bearing property of sandstone reservoir [J]. Science and Technology Innovation Guide, 2020, 17 (17) : 93, 154.
- [9] 唐海评,陈世加,张潇文,等.物性与孔喉结构对致密砂岩储层含油性的影响——以鄂尔多斯盆地华池—合水地区长7段为例[J].断块油气田,2015,22(2):198-201.
TANG H P, CHEN S J, ZHANG X W, et al. Influence of physical property and pore throat structure on oiliness of tight sandstone reservoir: Taking chang 7 oil-bearing formation in Huachi-Heshui Area of Ordos Basin as an example [J]. Fault Block Oil and Gas Field, 2015, 22(2) : 198-201.
- [10] KATZ A J, THOMPSON A H. Fractal sandstone pores: Implications for conductivity and pore formation [J]. Physical Review Letters, 1985, 54(12) : 13-25.
- [11] LI K. Analytical derivation of Brooks-Corey type capillary pressure models using fractal geometry and evaluation of rock heterogeneity [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2010, 73(1/2) : 20-26.
- [12] 刘翰林,邹才能,邱振,等.鄂尔多斯盆地延长组7段3亚段异常高有机质沉积富集因素[J].石油学报,2022,43(11):1520-1541.
LIU H L, ZOU C L, QIU Z, et al. Sedimentary enrichment factors of extraordinarily high organic matter in the sub-member 3 of Member 7 of Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2022, 43 (11) : 1520-1541.
- [13] 郭彦如,刘俊榜,杨华,等.鄂尔多斯盆地延长组低渗透致密岩性油藏成藏机理[J].石油勘探与开发,2012,39(4):417-425.
GUO Y R, LIU J B, YANG H, et al. Hydrocarbon accumulation mechanism of low permeable tight lithologic

- oil reservoirs in the Yanchang Formation, Ordos Basin, China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(4): 417-425.
- [14] 邹才能,赵政璋,杨华,等. 陆相湖盆深水砂质碎屑流成因机制与分布特征——以鄂尔多斯盆地为例[J]. *沉积学报*, 2009, 27(6): 1065-1075.
- ZOU C N, ZHAO Z Z, YANG H, et al. Genetic mechanism and distribution of sandy debris flows in Terrestrial Lacustrine Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(6): 1065-1075.
- [15] 杨智,付金华,郭秋麟,等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组陆相致密油发现、特征及潜力[J]. *中国石油勘探*, 2017, 22(6): 9-15.
- YANG Z, FU J H, GUO Q L, et al. Discovery, characteristics and resource potential of continental tight oil in Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2017, 22(6): 9-15.
- [16] 付金华,邓秀芹,楚美娟,等. 鄂尔多斯盆地延长组深水岩相发育特征及其石油地质意义[J]. *沉积学报*, 2013, 31(5): 928-938.
- FU J H, DENG X Q, CHU M J, et al. Features of deepwater lithofacies, Yanchang Formation in Ordos Basin and its petroleum significance [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(5): 928-938.
- [17] 王翔,高吉宏,庞玉东,等. 鄂尔多斯盆地 M34 区块侏罗系延 10 段砂质辫状河储层特征及控制因素[J]. *东北石油大学学报*, 2024, 48(3): 23-39.
- WANG X, GAO J H, PANG Y D, et al. Reservoir characteristics and controlling factors of Jurassic Yan 10 Member sandy braided river of M34 Block, Ordos Basin [J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2024, 48(3): 23-39.
- [18] 屈雪峰,王武荣,谢启超,等. 坳陷湖盆湖底扇储层单砂体构型——以鄂尔多斯盆地合水地区三叠系长 6 油层组为例[J]. *地球科学与环境学报*, 2021, 43(5): 850-867.
- QU X F, WANG W R, XIE Q C, et al. Single sand-body architecture of sublacustrine fan in a depression lacustrine basin—insights from Triassic Chang 6 oil-bearing interval in Heshui Area of Ordos Basin, China [J]. *Journal of Geosciences and Environment*, 2021, 43(5): 850-867.
- [19] 杨华,付金华,喻建. 陕北地区大型三角洲油藏富集规律及勘探技术应用[J]. *石油学报*, 2003, 24(3): 6-10.
- YANG H, FU J H, YU J. Oil reservoir enrichment patterns of large delta systems and application of exploration techniques in Shanbei Area [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 24(3): 6-10.
- [20] 王科,赵俊峰,薛锐,等. 鄂尔多斯盆地延安组河流沉积类型及演变——来自典型露头精细解剖的证据[J]. *沉积学报*, 2022, 40(5): 1367-1377.
- WANG K, ZHAO J F, XUE R, et al. Fluvial sedimentary types and their evolution in the Yan'an Formation in the Ordos Basin: Evidence from the detailed anatomy of typical outcrops [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(5): 1367-1377.
- [21] 唐建云,郭艳琴,宋红霞,等. 定边地区侏罗系延安组延 9 储层成岩作用特征[J]. *西安科技大学学报*, 2017, 37(6): 865-871.
- TANG J Y, GUO Y Q, SONG H X, et al. Diagenesis of Yan 9 reservoir of Yan'an Formation of the Jurassic in Dingbian Area [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2017, 37(6): 865-871.
- [22] 张晓明,吴勤博,邹焰,等. 鄂尔多斯盆地铁边城地区长 2 油层组剩余油模拟[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(5): 1799-1807.
- ZHANG X M, WU Q B, ZOU Y, et al. Simulation of remaining oil in Chang 2 Member in Tiebiancheng Area, Ordos Basin [J]. *Science, Technology and Engineering*, 2024, 24(5): 1799-1807.
- [23] 全国石油天然气标准化技术委员会. GB/T 29171—2023 岩石毛管压力曲线的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [24] 肖佃师,卢双舫,陆正元,等. 联合核磁共振和恒速压汞方法测定致密砂岩孔喉结构[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(6): 961-970.
- XIAO D S, LU S F, LU Z Y, et al. Combining nuclear magnetic resonance and rate-controlled porosimetry to probe the pore-throat structure of tight sandstones [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(6): 961-970.
- [25] PIEROTTI R, ROUQUEROL J. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity [J]. *Pure Appl Chem*, 1985, 57(4): 603-619.
- [26] 金祥纯,杜猛,郝春联,等. 鄂尔多斯盆地长 6 段储层特征及 CO₂ 驱提高采收率实验研究[J]. *油气地质与采收率*, 2025, 32(1): 125-137.
- JIN X C, DU M, HAO C L, et al. Characteristics and CO₂ flooding enhanced oil recovery experiments of Chang 6 in Ordos Basin [J]. *Oil and Gas Geology and Oil Recovery*, 2025, 32(1): 125-137.
- [27] MANDELBRÖT B B. On the geometry of homogeneous turbulence, with stress on the fractal dimension of the isosurfaces of scalars [J]. *Journal of Fluid Mechanics*,

- 1975, 72(3): 401-416.
- [28] ZHANG Z, WELLER A, KRUSCHWITZ S. Pore radius distribution and fractal dimension derived from spectral induced polarization[J]. Near Surface Geophysics, 2017, 15(6): 625-632.
- [29] LAI J, WANG G, WANG S, et al. Review of diagenetic facies in tight sandstones: Diagenesis, diagenetic minerals, and prediction via well logs[J]. Earth Science Reviews, 2018, 185: 234-258.
- [30] LI A, DING W, HE J, et al. Investigation of pore structure and fractal characteristics of organic-rich shale reservoirs: A case study of Lower Cambrian Qiongzhusi formation in Malong block of eastern Yunnan Province, South China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 70: 46-57.
- [31] LIU X, XIONG J, LIANG L. Investigation of pore structure and fractal characteristics of organic-rich Yanchang formation shale in central China by nitrogen adsorption/desorption analysis[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 22: 62-72.
- [32] 程泽虎,李文浩,薛海涛,等. 基于高压压汞技术和分形理论的致密砂岩储层分级评价标准[J]. 东北石油大学学报,2019,43(1):50-59.
- CHENG Z H, LI W H, XUE H T, et al. Grading evaluation criteria of tight sandstone reservoir based on highpressure mercury injection technology and fractal theory[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2019,43(1): 50-59.
- [33] 吴浩,刘锐娥,纪友亮,等. 致密气储层孔喉分形特征及其与渗流的关系——以鄂尔多斯盆地地下盒子组盒8段为例[J]. 沉积学报,2017,35(1):151-162.
- WU H, LI R E, JI Y L, et al. Fractal characteristics of pore-throat of tight gas reservoirs and its relation with percolation: A case from He 8 Member of the permian Xiashihezi Formation in Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017,35(1): 151-162.
- [34] 纪发华,张一伟. 分形几何学在储层非均质性描述中的应用[J]. 石油大学学报(自然科学版),1994,18(5):161-168.
- JI F H, ZHANG Y W. Application of fractal geometry in description of heterogeneity [J]. Journal of University of Petroleum (Natural Science Edition), 1994, 18(5): 161-168.
- [35] SONG Z, LIU G, YANG W, et al. Multifractal distributional analysis for pore structure characterization of tight sands and stone: A case study of the Upper Paleozoic tight formations in the Londong district, Ordos Basin[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 92: 842-854.
- [36] GUO R, XIE Q, QU X, et al. Fractal characteristics of pore-throat structure and permeability estimation of tight sandstone reservoirs: A case study of Chang 7 of the Upper Triassic Yanchang Formation in Longdong Area, Ordos Basin, China [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 184: 106555.
- [37] 马新仿,张士诚,郎兆新. 储层岩石孔隙结构的分形研究[J]. 中国矿业,2003,12(9):47-49.
- MA X F, ZHANG S C, LANG Z X. Fractal research on pore structure in reservoir rock [J]. China mining, 2003, 12(9): 47-49.
- [38] 王伟,宋渊娟,黄静,等. 利用高压压汞实验研究致密砂岩孔喉结构分形特征[J]. 地质科技通报, 2021,40(4):22-30.
- WANG W, SONG Y J, HUANG J, et al. Fractal characteristics of pore-throat structure in tight sandstones using high-pressure mercury intrusion porosimetry [L]. Geological science and Technology Bulletin, 2021,40(4): 22-30.
- [39] AVNIR D, FARIN D, PFEIFER P. Molecular fractal surfaces[J]. Nature, 1984, 308(5956): 261-263.
- [40] LI P, ZHENG M, BI H, 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.
- [41] 杨华,牛小兵,徐黎明,等. 鄂尔多斯盆地三叠系长7段页岩油勘探潜力[J]. 石油勘探与开发,2016,43(4):511-520.
- YANG H, NIU X B, XU L M, et al. Exploration potential of shale oil in Chang 7 Member, Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(4): 511-520.
- [42] 吴育平,孙卫,欧阳思琪. 板桥合水地区长8₁储层不同类型成岩相孔隙结构特征及生产动态分析[J]. 地质科技情报,2018,37(6):122-129.
- WU Y P, SUN W, OUYANG S Q. Diagenetic facies micro-pore structure characteristics and production dynamics of Chang 8₁ reservoir in Bangiao-Heshui Area [J]. Geological Information Science and Technology, 2018, 37(6): 122-129.
- [43] ZHU S F, WANG X Y, YI Q, et al. Occurrence and origin of pore-lining chlorite and its effectiveness on preserving porosity in sandstone of the middle Yanchang Formation in the southwest Ordos Basin [J]. Applied Clay Science, 2017, 148: 25-38.

[44] ROUQUEROL J, AVNIR D, FAIRBRIDGE C W, et al. Recommendations for the characterization of porous solids(technical report)[J]. Pure and Applied Chemistry, 1994, 66(8): 1739-1758.

[45] 肖佃师,卢双舫,姜微微,等. 基于粒间孔贡献量的致密砂岩储层分类——以徐家围子断陷为例[J]. 石油学报,2017,38(10):1123-1134.

XIAO D S, LU S F, JIANG W W, et al. Classification of tight sandstone reservoirs based on the contribution of intergranular pores: A case study of Xujiaweizi fault depression[J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 38(10): 1123-1134.

[46] 黄金亮,董大忠,李建忠,等. 陆相页岩储层孔隙分形特征——以四川盆地三叠系须家河组为例[J]. 天然气地球科学,2016,27(9):1611-1618.

HUANG J L, DONG D Z, LI J Z, et al. Reservoir fractal characteristics of continental shale: An example from Triassic Xujiahe Formation shale, Sichuan Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(9): 1611-1618.

(编辑 雷雁林)