第 33 卷第 5 期	地 质 与 资 源		Vol. 33 No. 5
2024 年 10 月	GEOLOGY AND RESOURCES		Oct. 2024
文章编号:1671-1947(2024)05-0662-09 DOI:10.13686/j.enki.dzyzy.2024.05.006	中图分类号 : P618.13 文献标志码 : A	开放科学标志码(OSID):	

前25%和。

致密砂岩储层微观孔隙结构表征研究

——以鄂尔多斯盆地东南部地区延长组为例

龚建涛,白艳军

延长油田股份有限公司,陕西 延安 716000

摘 要:微观孔喉结构是控制致密砂岩储层储集能力和流体流动的重要因素之一.选取鄂尔多斯盆地东南部地区晚三叠世延长组 致密砂岩储层代表性样品 20 个,展开了铸体薄片、扫描电镜、高压压汞及储层岩石物理特征等一系列实验,运用分形理论研究孔 喉结构特征,并分析了分形维数与物性、孔喉结构参数和矿物含量之间的关系.研究结果表明:根据分形曲线可将样品的孔喉结构 分为介孔和微孔,计算出对应的分形维数,推测介孔贡献了主要的孔隙度和渗透率;介孔的分形维数与储层物性及孔隙结构各类 参数相关性好,其分形维数越大,孔隙分布越不均匀,连通性越差,非均质性越强;石英和绿泥石对微孔和介孔虽有支撑作用,但绿 泥石对介孔的堵塞也较为严重;长石的溶蚀虽然增加了微孔的数量,但也在一定程度上增加了储层的非均质性. 关键词: 孔喉结构;致密砂岩;非均质性;分形理论;延长组;鄂尔多斯盆地

CHARACTERIZATION OF MICROSCOPIC PORE STRUCTURE IN THGHT SANDSTONE RESERVOIR:

A Case Study of Yanchang Formation in Southeastern Ordos Basin

GONG Jian-tao, BAI Yan-jun

Yanchang Oil Field Co., Ltd., Yan'an 716000, Shaanxi Province, China

Abstract: Micro-pore throat structure is one of the important factors controlling the storage capacity and fluid flow of tight sandstone reservoir. Selecting 20 representative samples from tight sandstone reservoir of the Late Triassic Yanchang Formation in southeastern Ordos Basin, the study carries out a series of experiments, including cast thin section, scanning electron microscope, high pressure mercury injection and reservoir petrophysical test, applying fractal theory to realize the characteristics of pore throat structure, and analyzes the relationship between fractal dimensions and physical properties, pore throat structure parameters and mineral content. The results show that the pore throat structure of the samples can be divided into mesopore and micropore according to fractal curves. Based on the calculated corresponding fractal dimension, it is inferred that the mesopore contributes to most of the porosity and permeability. The fractal dimension of mesopore has good correlation with the parameters of reservoir physical properties and pore structure. The larger the fractal dimension is, the more uneven the pore distribution is, with worse connectivity and more heterogeneity. Despite the support of quartz and chlorite to micropore and mesopore, chlorite could anyway cause severe mesopore blockage. The dissolution of feldspar increases the number of micropores, meanwhile increases the heterogeneity of reservoir to a certain extent.

Key words: pore throat structure; tight sandstone; heterogeneity; fractal theory; Yanchang Formation; Ordos Basin

基金项目:中国博士后基金面上项目"延长油区东南部低渗透油藏微裂缝发育与分布"(2017M623221).

作者简介:龚建涛(1985一),男,硕士,高级工程师,从事石油勘探研究,通信地址 陕西省延安市宝塔区枣园路延长石油,E-mail//306767863@qq.com

0 引言

致密油等非常规资源目前是全球能源勘探开发领域的热点,现今非常规油气资源已成为全球能源结构中的重要角色^[1-2].储层的孔隙结构制约着油气储存和运移.受沉积作用和成岩作用的影响,致密砂岩储层物性差,非均质性强,孔喉空间狭小,因此研究这一类储层的微孔喉结构表征具有挑战性^[3-5].

常见的孔喉结构研究主要采用铸体薄片、扫描电 镜、核磁共振、CT扫描、N2气体吸附测量、高压压汞、 恒速压汞等实验方法评价孔喉结构[6-11]. 郭轩豪等[6] 应用压汞实验、孔渗分析、X射线衍射等测试方法,探 讨了鄂尔多斯盆地姬塬和镇北地区成岩作用对致密砂 岩储层微观孔喉结构的影响差异. 王俊杰等[10]通过铸 体薄片、扫描电镜、压汞试验对储层的微观孔隙结构进 行研究,通过高压压汞和恒速压汞相结合的手段表征 浊积砂岩储层的孔喉尺寸分布特征. 冯动军等[11]通过 联合恒速压汞法和核磁共振实验,再结合岩心实验结 果,分析川西新场地区上三叠统须家河组四段储集空 间类型、孔隙结构类型、孔喉特征、孔喉比特征及其与 孔、渗相关关系,研究孔隙和喉道对毛细管曲线的影 响,探讨孔喉特征对可动流体参数的影响.但致密砂 岩储层孔喉特征复杂,非均质性强,传统的实验方法难 以精准表征其微观孔喉结构.铸体薄片和扫描电镜观 察视野太小,具有局限性.核磁共振可定量表征孔喉 分布,但是存在 T2能谱如何有效转化为孔喉半径的问 题. N₂气体吸附主要适用于纳米级孔喉,不适用于微 米级孔喉. 高压压汞实验存在孔隙屏蔽效应, 部分大 孔的数据会有误差. 恒速压汞方法假设了孔隙空间为 球形,与真实孔隙空间不同.

因此笔者通过常规实验方法,并结合分形理论,对 鄂尔多斯盆地延长组致密砂岩微观孔喉结构进行定性 定量的表征,在此基础上计算分形维数 D₁、D₂,并探讨 致密砂岩储层的复杂性和非均质性.研究结果可为致 密砂岩储层的开发提供借鉴.

1 区域地质背景

鄂尔多斯盆地三叠系延长组致密油气资源丰富, 具有十分广阔的勘探开发前景.研究区位于鄂尔多斯 盆地中部(图1),大地构造位于陕北斜坡,东接晋西挠 折带,南邻渭北隆起,地层西倾单斜并且倾角小于1°,



图 1 研究区区域构造位置图



局部地区发育低幅度构造.延长组自上而下划分为10 个油层组(图2),其中长6和长8油层组是典型的致 密砂岩储层.受控于沉积环境和成岩作用,致密砂岩 发育大量的纳米级孔喉,并且孔喉结构复杂,流体在孔 喉中可动程度不高,直接限制了油田的勘探开发.三 角洲前缘亚相在研究区广泛发育,岩性表现为砂泥岩 互层,构造以平行层理和水平层理为主,常见植物根茎 化石,水下分流河道砂岩为研究区主要的油气储集体.

2 实验方法和原理

2.1 样品与实验

实验所用的样品来自鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东南 部地区延长组晚三叠世长6致密砂岩储层.该储层主 要由陆相碎屑岩组成,包括泥岩和灰色及浅灰色中细 粒砂岩^[3,12].整体孔隙度范围为2%~12%,渗透率范围 为0.01~0.15 mD,属于典型的致密储层.

统	组.	油层组	厚度/m	岩性柱	测井曲线
下侏罗统	延安组	延1-延10	250-300		12 自然电位 5: 67 自然伽玛 23
		长1	0-245		6
		₩2	120~150		M
		长3	100~170	1	Se la
Ŀ		₩4+5	90-130		and an
Ц	X	₩6			MANA
ň	ĸ	¥7	180-200		MUMAN
统	紕	长8	100~190		MAAAAA
		长9			S
		₩10	200~320		Marin

图 2 研究区地层综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive stratigraphic column of the study area
1—砾岩 (conglomerate); 2—砂岩 (sandstone); 3—粉砂岩(siltstone);
4—砂质泥岩(sandy mudstone); 5—泥岩(mudstone); 6—油页岩(oil shale)

将所有样品钻取成直径约 2.5 cm、长度约 3.0 cm 的圆柱体后洗油洗盐,之后将样品切成长度为 2.5 cm 和 0.5 cm 的圆柱体.前者用于物性测试,并进行高压 压汞测试;后者用于铸体薄片和扫描电镜实验.

2.2 分形理论

分形是一种粗糙的或破碎的几何图形,它的组成 部分可以被无限细分,而且它的局部的形状一般与整体 相似.现在一般用英国数学家法尔科内(K.J.Falconer) 对分形集合的描述来判断某一对象是否是分形:1)在 任何尺度下都具有精细的结构和复杂的细节;2)它非 常地不规则,整体和局部都不能用传统的几何语言来 描述;3)通常具有某种自相似性^[13-14]. 具有分形特征的物体可以用分形维数 D 表示. 在储层中,分形维数反映的主要是孔隙大小和非均质性, 通常储层的分形维数在 2~3. 数值越接近 2,储层非均 质性越弱;越接近 3,非均质性越强,储层孔隙结构越 复杂^[15-17]. 如果孔喉具有分形特征,则可以计算出半 径超过 r 的孔喉数量.

$$\mathbf{N} (\mathbf{r}) = \int_{r}^{r_{m}} \mathbf{P}(\mathbf{r}) d\mathbf{r} = \mathbf{a} \mathbf{r}^{-\mathbf{D}}$$
(1)

其中, r 是孔隙半径(μ m); N (>r)是孔隙半径大于 r的孔喉数量; r_m 是最大孔隙半径(μ m); P(r)是孔隙半 径的密度分布函数; a 是常数(a=1用于管状孔隙, $a=4\pi/3$ 用于球形孔隙); D是分形维数.

考虑 Brooks-Corey 模型, 假设岩石孔隙空间是由 一系列毛管束组成^[18].因此,孔隙半径小于 r 的累积 体积百分数可以表示为^[18-19]:

$$V_{(c)} = \left(\frac{r}{r_{max}}\right)^{3-D}$$
(2)

应用杨氏--拉普拉斯方程,可以表征毛细管压力与 孔隙半径之间的数学关系:

$$P_{c}=2\sigma\cos\theta/r$$
(3)

式中: P_e 为毛细管压力 (MPa); σ 为空气和汞之间表 面张力(dyn/cm); θ 为接触角(°).

将r代入(3)式可以转变为:

$$f = \left(\frac{P_c}{P_s}\right)^{D-3}$$
(4)

其中, $f=1-S_{H_{e}}$, $S_{H_{e}}$ 为进汞饱和度, P_{s} 为进汞压力 (MPa).

对(4)式取对数为:

 $logV_{(c)} = log(1-S_{Hg}) = (3-D)logP_{c} - (3-D)logP_{s}$ (5)

通过(5)式可以看出,如果储层的孔隙大小分布满 足分形理论,根据(5)式作 lg f 对 lgP。的双对数图,那 么在双对数坐标系中,二者之间存在线性关系.通过 数据拟合出的直线斜率 H=D-3,截距为(1-D)lgP。。根 据直线的斜率和截距可计算孔隙的分形维数 D 及进 汞压力 P。

3 结果

3.1 岩石学特征及物性特征

根据砂岩分类方案^[20-21],以及铸体薄片和扫描电 镜分析结果,将研究区的砂岩样品分为长石砂岩和岩 屑长石砂岩(图 3). 石英的平均含量为 42.9%;长石为 26.1%,其中斜长石的含量比较高,其次是钾长石.岩 屑的平均含量为12.6%,以变质岩岩屑、沉积岩岩屑为 主,分别占岩屑总含量的41.2%、28.9%;火山岩岩屑含 量低,占总岩屑含量的3.4%.并且在样品的铸体薄片 下均可以发现少量云母.研究区砂岩分选中等,填隙 物以绿泥石(3.6%)和碳酸盐胶结物为主,其次是高岭 石(1.5%)和水云母(1.3%).

研究区物性测试数据显示,样品孔隙度数值范围





I-石英砂岩 (quartz sandstone); II-长石石英砂岩 (feldspar quartz sandstone); III—岩屑石英砂岩(lithic quartz sandstone); IV—长石砂岩 (arkose); V-岩屑长石砂岩(lithic feldspar sandstone); VI-长石岩屑 砂岩(feldspar lithic sandstone); VII-岩屑砂岩(lithic sandstone)

在 2%~12%, 平均数值为 7.24%. 渗透率数值范围在 0.01~0.15 mD,平均数值 0.04 mD. 研究区样品整体物 性差,渗透率和孔隙度相关性图(图4)显示弱正相关 关系,相关性系数 R^2 为 0.4011,表现为相关性较差,符 合致密储层的特征.

3.2 分形特征

根据研究区样品的高压压汞数据,绘制 $\log(1-S_{H})$ 和 $\log P_{e}$ 的散点图. 从分型特征曲线可以看出 $\log(1-S_{He})$ 和 logP。存在一个明显的拐点,将曲线分割成了两个部 分,表明致密储层孔隙结构具有多重分形特征.结合 拐点的压力对应孔喉半径大小,并根据国际理论化学 与应用化学学会孔径大小的标准^[18],即小于 2 nm 的 划分为微孔, 2~50 nm 之间的划分为中孔,大于 50 nm 的划分为大孔,我们把研究区的的样品孔喉分成了微 孔和介孔,对应的分形维数分别为 D_1 和 D_2 .

N1 样品的分形曲线拐点压力对应的半径大小为 24 nm(图 5), 介孔的分形维数 D₁ 为 2.69, 微孔的分形 维数 D₂为 2.47, 说明介孔的非均质性要强于微孔. 分 别计算介孔和微孔的孔隙度占比, φ_1 为 85%, φ_2 为 15%,渗透率贡献值 K1 为 99.99%, K2 为 0.01%,表明 样品的孔隙度和渗透率主要由介孔贡献(表1、2).

N2 和 N3 样品的分形曲线在分别在 24 nm 和 80 nm 处有一明显拐点 (图 6). N2 和 N3 样品介孔和 微孔的分形维数分别为 2.61、2.81、微孔的分形维数 分别为 2.36、2.24, 与 N1 样品的趋势相同, 介孔的分 形维数大于微孔. N3 样品介孔的分形维数最高, 非均 质性最强,孔喉结构复杂,因此与其他样品的划分半径 不同. 经过计算 N2 样品和 N3 样品的孔隙度贡献率和 渗透率贡献率,发现与 N1 样品相比, N2 和 N3 样品介



图 4 研究区孔渗分布相关性图

Fig. 4 Correlation diagrams of porosity and permeability distribution in the study area



Fig. 5 Fractal curves of sample N1

1—大孔(macropore); 2—小孔(micropore)

表1 孔隙度频率分布和渗透率频率分布

Table 1	Distribution	frequency of	f porosity a	nd permeability
---------	--------------	--------------	--------------	-----------------

样品编号 -	孔隙度贡献率/%		渗透率贡献率/%		
	介孔	微孔	介孔	微孔	
N1	85	15	99.99	0.01	
N2	78	22	99.84	0.16	
N3	54	46	99.75	0.25	
N4	64	36	99.75	0.25	
N5	64	35	99.93	0.07	

孔的孔隙度贡献率有所下降,小孔的孔隙度贡献率有 所上升,说明 N2 和 N3 样品中的小孔数量增多,介孔 数量减少,相比于 N1 样品,储层质量有所下降.其中

表 2 分形维数计算结果 Table 2 Calculation results of fractal dimensions

样品 编号	大孔			微孔				
	D_1	R ²	φ_1 /%	K ₁	D_2	R^2	φ₂ /%	K ₂
N1	2.69	0.9977	8.23	0.9999	2.47	0.9829	1.39	0.0001
N2	2.61	0.9747	2.74	0.9984	2.36	0.9938	0.76	0.0016
N3	2.81	0.9697	4.80	0.9975	2.24	0.9901	4.08	0.0025
N4	2.72	0.9885	4.21	0.9975	2.40	0.9909	2.29	0.0025
N5	2.80	0.9330	4.50	0.9993	2.23	0.9820	2.50	0.0007

由于 N3 样品拐点压力对应的半径变大,小孔范围变 大,介孔范围变小,因此储层质量下降较为明显.

N4 和 N5 样品的分形曲线拐点压力对应的半径 为 24 nm(图 7),与大部分样品的分界半径相同,说明 该半径大小为研究区样品微孔和介孔的分界线,同时 该地区的样品具有多重分形特征.N4 和 N5 样品介孔 的分形维数为 2.72、2.80,微孔的分形维数为 2.40、 2.23.除 N3 样品比较特殊,N4 和 N5 样品的介孔分形 维数偏大,孔隙度占比偏小,小孔的分形维数偏小,孔 隙度占比偏大,说明 N4 和 N5 样品的非均质性最强, 孔喉结构最复杂,储层质量最差.

4 讨论

4.1 分形维数与物性参数之间的关系

储层空间的结构会影响流体的储存和运移,孔隙 度和渗透率可以反映这一特点.较大的分形维数可



Fig. 6 Fractal curves of samples N2 and N3 1—大孔(macropore); 2—小孔(micropore) 2024 年



图 8 分形维数与物性之间的关系



以代表更复杂的孔喉结构、较低的储层孔隙度和渗透 率^[8].根据分形维数 *D*₁ 和 *D*₂ 与孔隙度、渗透率之间的 相关性,得到散点图(图 8).图中显示,微孔的孔隙度 随着分形维数的增加而降低,分形维数越大,物性越差. 介孔的孔隙度随着分形维数的增大而增大,这可能是 由于研究区样品的孔隙主要由介孔贡献,尽管样品的 非均质性增强,但是介孔仍然提供了大量的孔隙空间, 介孔和微孔的渗透率相关性较弱,尤其是微孔.因此, 介孔的孔喉结构对储层物性有着至关重要的作用.

4.2 分形维数与孔隙结构参数之间的关系

分形维度可以定量地描述孔喉结构的复杂性和非 均质性^[7,11]. 通过绘制分形维数和孔喉结构参数之间 的散点图来分析孔喉结构(图 9). 其中,中值孔喉半径 反映了孔喉的均匀性,中值孔喉半径越大,中值压力越 小,孔渗特性就好.排驱压力反映非润湿相开始进入 岩样时的最小压力,数值越小,代表样品物性越好.退 汞效率反映了孔喉的连通性,数值越高,连通性越好. 最大进汞饱和度与样品的储集空间成正比,数值越大, 空间越大.变异系数和分选系数可以在一定程度反映 样品的非均质性.

根据散点图可以得到微孔的分形维数(D₂)与变异 系数、中值孔喉半径呈负相关关系,与分选系数、最大 进汞饱和度呈正相关关系,与排驱压力和退汞效率相 关性微弱.研究结果表明,分形维数越大,微孔的中值 孔喉半径越小,最大进汞饱和度越大,则微孔的数量增 多并且孔渗变差.介孔的分形维数与分选系数、变异 系数呈正相关,与排驱压力、最大进汞饱和度、退汞效 率和中值孔喉半径呈负相关.由此可见,随着分形维 数的增大,介孔的孔隙储存体积、连通性、孔渗性质都 在变差.微孔和介孔的孔喉结构参数与分形维数之间 的相关性反映了分形维数越大,储层的孔隙结构越复 杂,连通性越差,非均质性越强,并且介孔的相关性要 好于微孔.

4.3 分形维数与矿物成分之间的关系

储层的沉积成岩过程会影响矿物之间的成分差 异,进一步影响储层孔喉结构的非均质性.石英具有 抗压实作用,在一定程度上可以保护储层的孔喉不被 压实.长石容易发生溶蚀作用,虽然增加储层的储集 空间,但是也容易造成储层孔喉结构复杂,非均质性 强.绿泥石膜可以附着在孔喉表面起到一定支撑作 用,同时也会堵塞细小的孔喉.根据介孔和微孔的分 形维数与矿物含量之间的相关性散点图(图 10)可以 看出,微孔的分形维数与石英、绿泥石含量呈负相关, 与长石含量呈正相关.表明石英和绿泥石的存在在一 定程度上对微孔有支撑作用,长石的存在增加了微孔 的数量,同时也会形成形态各异的溶蚀孔.因此随着 石英和绿泥石含量的降低,长石含量的增多,微孔的孔 喉结构变得复杂,造成了分形维数大.介孔的分形维











Fig. 10 Relationship between fractal dimension and mineral contents

669

数与石英和绿泥石都呈正相关关系,与长石相关性微弱,这表明虽然石英可以对介孔存在一定的支撑作用, 但是大量的绿泥石膜堵塞了介孔的喉道,造成了介孔 结构复杂,进一步影响储层空间和渗流能力.

5 结论

微观孔喉结构是控制致密砂岩储层储集能力和流体流动的重要因素.本研究选取鄂尔多斯盆地东南部地区晚三叠世延长组致密砂岩储层代表性样品,基于最新的储层岩石物理性质实验结果,运用分形理论研究孔喉结构特征,得到以下结论:

1)根据分形特征,可将每个样品的孔喉结构分成 介孔和微孔,每类样品孔喉结构的非均质性都随着分 形维数增大而增强,且介孔贡献了主要的孔隙度和渗 透率.

2)介孔的分形维数与储层物性及孔隙结构各类参数相关性好,分形维数越小,孔隙分布越连通,非均质性越弱,进而影响储层的储集空间和渗流能力.

3)石英和绿泥石对微孔和介孔有支撑作用,但绿 泥石对介孔的堵塞也较为严重.长石的溶蚀虽然增加 了微孔的数量,但也在一定程度上增加了储层的非均 质性.

参考文献(References):

- [1]何发岐,张宇,王付斌,等.鄂尔多斯盆地中国石化"十三五"油气 勘探进展与新领域[J].中国石油勘探,2022,27(5):1-12.
 He F Q, Zhang Y, Wang F B, et al. Petroleum exploration progress and new field of Sinopec in Ordos Basin during the 13th Five-Year Plan period[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(5): 1-12.
- [2]田景春,梁庆韶,王峰,等.陆相湖盆致密油储集砂体成因及发育 模式——以鄂尔多斯盆地上三叠统长6油层组为例[J].石油与天 然气地质,2022,43(4):877-888.

Tian J C, Liang Q S, Wang F, et al. Genesis and development model of tight oil reservoir sand body in continental lacustrine basin: A case study on the Upper Triassic Chang 6 pay zone, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4): 877–888.

[3]任大忠,刘登科,周兆华,等.致密砂岩油藏水驱油效率及微观影响因素研究——以鄂尔多斯盆地华庆地区三叠系长6储层为例[J]. 电子显微学报,2019,38(4):364-375.

Ren D Z, Liu D K, Zhou Z H, et al. Research on waterflooding efficiency of tight sandstone reservoir and its microscopic influence factors: Taking the Triassic Chang 6 Member in Huaqing area, Ordos Basin, NW China as an example [J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2019, 38(4): 364-375.

[4]黎盼,孙卫,王震,等.鄂尔多斯盆地西峰油田长 81 储层微观孔隙
 结构特征及其对水驱油特征的影响[J].现代地质,2018,32(6):
 1194-1202.

Li P, Sun W, Wang Z, et al. Features of microscopic pore structure and their influence on oil displacement efficiency in Chang 8_1 reservoir of Xifeng Oilfield, Ordos Basin[J]. Geoscience, 2018, 32(6): 1194– 1202.

[5] 赵淑霞,孙爽,周银邦,等.基于精细岩相约束的致密低渗储层参数建模研究——以红河油田 92 井区长 8¹2 致密砂岩储层为例[J].
 地质与资源,2019,28(5):460-469.

Zhao S X, Sun S, Zhou Y B, et al. Parameter modeling of low permeability tight reservoir based on fine lithofacies constraint: A case study of C- 8_1^2 tight sandstone reservoir in No.92 wellblock of Honghe Oilfield[J]. Geology and Resources, 2019, 28(5): 460–469.

[6]郭轩豪,谭成仟,赵军辉,等.成岩作用对致密砂岩储层微观结构 的影响差异——以鄂尔多斯盆地姬塬和镇北地区长7段为例[J]. 天然气地球科学,2021,32(6):826-835.

Guo X H, Tan C Q, Zhao J H, et al. Different influence of diagenesis on micro pore-throat characteristics of tight sandstone reservoirs: Case study of the Triassic Chang 7 Member in Jiyuan and Zhenbei areas, Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(6): 826–835.

- [7]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 Q P, Wang H H, Liu M R, 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.
- [8]郝栋,杨晨,刘晓东,等.鄂尔多斯盆地白豹油田致密砂岩储层孔 喉结构及 NMR 分形特征[J].西安石油大学学报(自然科学版),2021, 36(5):34-45.

Hao D, Yang C, Liu X D, et al. Pore throat structure and NMR fractal characteristics of tight sandstone reservoirs in Baibao Oilfield, Ordos Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2021, 36(5): 34–45.

[9]郭惠,赵红格,陈江萌,等.鄂尔多斯盆地西部古峰庄地区三叠系延 长组裂缝特征及其对低渗透油藏的控制作用[J].中国地质,2024,51 (1):73-88.

Guo H, Zhao H G, Chen J M, et al. Fracture characteristics of Triassic Yanchang Formation in the Gufengzhuang area, western Ordos Basin and its control on low permeability reservoirs [J]. Geology in China, 2024, 51(1): 73? 88.

[10]王俊杰,吴胜和,肖淑明,等.东营凹陷沙三中亚段浊积砂岩储层 微观孔喉分布特征[J].中国石油大学学报(自然科学版),2021, 45(4):12-21.

Wang J J, Wu S H, Xiao S M, et al. Distribution characteristics of micro pore throat size of turbidite sandstone reservoir in middle sub-

member of 3rd Member, Shahejie Formation in Dongying Depression [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 45(4): 12-21.

[11]冯动军,肖开华. 恒速压汞及核磁共振技术在四川盆地西部致密 砂岩储层评价中的应用[J]. 石油实验地质, 2021, 43(2): 368-376.

Feng D J, Xiao K H. Constant velocity mercury injection and nuclear magnetic resonance in evaluation of tight sandstone reservoirs in western Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(2): 368–376.

 [12]刘玲,张创,孙明.志丹油田纸坊北油区三叠系延长组长 6—长 9
 储层致密史与油藏成藏史研究[J].地质与资源,2023,32(3): 327-334.

Liu L, Zhang C, Sun M. Compacting and accumulation history of Chang 6-Chang 9 reservoirs from the Triassic Yanchang Formation in Zhidan Oilfield[J]. Geology and Resources, 2023, 32(3): 327–334.

[13]李彤. 多重分形原理及其若干应用[D]. 北京:北京交通大学, 2007.

Li T. Multifractal theory and some applications[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007.

- [14]肯尼思·法尔科.分形几何——数学基础及其应用[M].曾文曲,刘 世耀,戴连贵,等,译.沈阳:东北大学出版社,2001:1-303.
 Falconer K J. Fractal geometry: Mathematical foundations and applications [M]. Zeng W Q, Liu S Y, Dai L G, et al, trans. Shenyang: Northeastern University Press, 2001:1-303.
- [15]贺伟,钟孚勋,贺承祖,等.储层岩石孔隙的分形结构研究和应用
 [J]. 天然气工业,2000,20(2):67-70.
 He W, Zhong F X, He C Z, et al. Fractal texture research on the pores in reservoir rocks and its application[J]. Natural Gas Industry, 2000, 20(2):67-70.
- [16]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):1611-1618,1708.

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, 1708.

- [17]陈燕燕,邹才能, Mastalerz M,等.页岩微观孔隙演化及分形特征研究[J]. 天然气地球科学,2015,26(9):1646-1656.
 Chen Y Y, Zou C N, Mastalerz M, et al. Porosity and fractal characteristics of shale across a maturation gradient[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(9): 1646-1656.
- [18]何琰, 吴念胜. 确定孔隙结构分形维数的新方法[J]. 石油实验地质, 1999, 21(4): 372-375, 301.
 He Y, Wu N S. A new method for determining fractal dimension of pore structure[J]. Experimental Petroleum Geology, 1999, 21(4): 372-375, 301.
- [19]冯小哲,祝海华.鄂尔多斯盆地苏里格地区下石盒子组致密砂岩 储层微观孔隙结构及分形特征[J].地质科技情报,2019,38(3): 147-156.

Feng X Z, Zhu H H. Micro-pore structure and fractal characteristics of the Xiashihezi formation tight sandstone reservoirs in Sulige area, Ordos Basin [J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(3): 147–156.

[20]王翀峘,魏钦廉,胡榕,等.不同物源体系致密储层微观结构特征 及成因分析:以陇东地区樊家川和南梁长6段为例[J].地质科技 通报,2023,42(1):286-298.

Wang C H, Wei Q L, Hu R, et al. Microstructure characteristics and genetic analysis of tight reservoirs with different provenance systems: A case study of Fanjiachuan and Nanliang region of Chang 6 reservoir in Longdong area, Ordos Basin [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(1): 286–298.

[21]单云鹏,王红军,张良杰,等.三角图的原理、快速绘制以及在砂岩分类中的应用[J]. 沉积学报,2022,40(4):1095-1108.
Shan Y P, Wang H J, Zhang L J, et al. The principle and fast drawing of ternary plots and their application in sandstone classification[J].
Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(4): 1095-1108.