



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2404036

引用格式:王涛,蒋裕强,杨长城,等.四川盆地天府气区须四段致密砂岩储层孔隙结构及流体可动性[J].科学技术与工程,2025,25(12):4900-4912.

Wang Tao, Jiang Yuqiang, Yang Changcheng, et al. Pore structure and fluid movability of the tight sandstone reservoir in the Tianfu Gas Area of the Sichuan Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(12): 4900-4912.

四川盆地天府气区须四段致密砂岩储层 孔隙结构及流体可动性

王涛^{1,2}, 蒋裕强^{1,2*}, 杨长城³, 王占磊^{1,2}, 朱讯⁴, 潘辉^{1,2}, 周亚东^{1,2}, 袁永亮^{1,2}, 贺英⁵

(1. 西南石油大学地球科学与技术学院, 成都 610500; 2. 中国石油非常规重点实验室储层评价实验室, 成都 610500;

3. 中国石油西南油气田公司开发管理部, 成都 610056; 4. 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院, 成都 610000;

5. 四川省能投油气勘探开发有限公司, 成都 610094)

摘要 孔隙结构是决定致密砂岩储层物性和油气产量的关键因素,明确孔隙结构特征对油气的勘探开发具有重大意义。以天府气区须家河组须四段致密砂岩储层为例,通过薄片鉴定、扫描电镜观察、核磁共振测试、高压压汞测试以及X衍射等实验,结合分形理论,系统分析了研究区须四段砂岩的孔隙结构特征、分形特征及流体可动性。结果表明:研究区须四段砂岩主要为长石岩屑砂岩,储层类型为特低孔-特低渗孔隙型储层,孔隙类型主要为长石溶孔,喉道类型以片状喉道为主。根据高压压汞曲线形态和核磁共振结果,可将须四段砂岩孔隙结构分为三类,其中I类样品储层物性最好,孔喉半径较大,孔喉连通性和分选性好,流体可动性强,储层质量最优。须四段致密砂岩孔隙结构和流体可动性受沉积结构和矿物含量影响较为明显,粒度较粗、分选性较好的储层孔隙结构和流体可动性较好。同时,石英作为砂岩中主要的刚性矿物,具有抗压实的能力,对储层孔隙起到了一定的保护作用,而方解石和黏土矿物会占据孔隙空间,导致储层的孔隙结构和流体可动性变差。

关键词 分形维数; 流体可动性; 孔隙结构; 须四段; 四川盆地

中图法分类号 P624;

文献标志码 A

Pore Structure and Fluid Movability of the Tight Sandstone Reservoir in the Tianfu Gas Area of the Sichuan Basin

WANG Tao^{1,2}, JIANG Yu-qiang^{1,2*}, YANG Chang-cheng³, WANG Zhan-lei^{1,2}, ZHU Xun⁴,

PAN Hui^{1,2}, ZHOU Ya-dong^{1,2}, YUAN Yong-liang^{1,2}, HE Ying⁵

(1. School of Geosciences and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. Reservoir Evaluation Laboratory, CNPC Key Laboratory of Unconventional Oil and Gas, Chengdu 610500, China;

3. Management Department of Gas Field Development, Southwest Oil & Gas Field Company, PetroChina, Chengdu 610056, China;

4. Exploration and Development Research Institute, Southwest Oil & Gas Field Company, PetroChina, Chengdu 610000, China;

5. Sichuan Nengtou Oil and Gas Exploration and Development Co., Ltd., Chengdu 610094, China)

[Abstract] The pore structure is a pivotal determinant of the physical properties of tight sandstone reservoirs, and elucidating its characteristics holds great significance for oil and gas exploration and development. Taking the 4th member of the Xujiahe Formation tight sandstone reservoirs in Tianfu Gas Area as an example, the pore structure characteristics, fractal features, and fluid mobility of the Xu-4 sandstone in the study area were systematically analyzed through thin section identification, scanning electron microscopy observation, nuclear magnetic resonance testing, high-pressure mercury intrusion testing, and X-ray diffraction experiments, combined with fractal theory. The results indicate that the sandstones of the 4th member of the Xujiahe Formation in the study area are predominantly composed of feldspar lithic sandstone, belonging to an ultra-low pore-ultra-low permeability pore type reservoir. The pore type is primarily feldspar-dissolved pores, and the throat type is predominantly sheet throats. According to the morphology of the high-pressure mercury injection curves and nuclear magnetic resonance outcomes, the pore structure of the 4th member of the Xujiahe tight sandstone reservoir is categorized into three distinct types. Among them, the material properties of the I-type samples are the best, with larger pore-throat radii, good connectivity and sorting of pore-throat, strong fluid mobility, and the best reservoir quality. The pore

收稿日期: 2024-05-30; 修订日期: 2025-02-07

基金项目: 中石油西南油气田分公司重大专项(2022ZD01)

第一作者: 王涛(1998—),男,汉族,四川德阳人,硕士研究生。研究方向:非常规油气地质。E-mail:1429290673@qq.com。

*通信作者: 蒋裕强(1963—),男,汉族,四川成都人,硕士,教授。研究方向:非常规油气地质及复杂碳酸盐岩储层地质。E-mail:1014533645@qq.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

structure and fluid mobility of the fourth member of the Xujiahe tight sandstone reservoir are affected by sedimentary structures and mineral content. Specifically, reservoirs with coarser grain sizes and better sorting demonstrate superior pore structure and fluid mobility. Furthermore, quartz, the primary rigid mineral in sandstones, exhibits resistance to compaction, thereby safeguarding the reservoir pores to a certain extent. However, calcite and clay minerals will occupy pore space, resulting in deterioration of the pore structure and fluid mobility of the reservoir.

[**Keywords**] fractal dimension; fluid mobility; pore structure; the 4th member of Xujiahe Formation; Sichuan Basin

中国致密砂岩气资源储量丰富,总资源量约为 $2.185 \times 10^{13} \text{ m}^3$ ^[1],作为常规油气的主要接替力量,为中国能源事业注入了新动力。致密砂岩储层孔隙结构具有孔隙非均质性强、孔隙结构复杂、孔喉半径小以及流体可动性差等特征^[2-4],严重影响了储层的储集能力与渗流能力,为气藏的高效开发带来了巨大的困难和挑战。只有准确评价致密砂岩储层孔隙结构,才能更好了解储层发育模式,明确优质储层的分布规律。因此,对致密砂岩孔隙结构进行更加精细的研究,对天然气增储上产具有重要意义^[5-7]。

近年来,致密砂岩孔隙结构的研究方法分为直接观察法和间接表征法,通过薄片鉴定、扫描电镜、计算机断层扫描(computed tomography, CT)扫描等方法可直接观察致密砂岩的孔隙形态与孔隙的连通特征,同时可以通过高压压汞、恒速压汞、核磁共振、氮气吸附等间接的方法对储层的孔隙大小、连通性、以及非均质性进行定量表征^[8-12]。然而,以上各类实验办法都具有其局限性,任何单一的方法都无法对储层孔隙结构进行全孔径表征^[13-14],为此,学者们提出了联合表征的分析办法,如将扫描电镜、铸体薄片、高压压汞、恒速压汞等方法联合起来对致密砂岩孔隙结构进行分析^[15],实验方法彼此之间互作弥补,对致密砂岩孔隙结构更加全面化和精细化的全孔径表征。对于孔隙结构的非均质性,越来越多的学者利用分形维数来进行表征,通过高压压汞和核磁共振实验结合分形理论建立相应的分形模型,计算其分形维数,来反映孔隙结构的非均质性^[16-19]。流体可动性作为反映储层的渗流能力的重要参数,对储层改造和开发方案的制定具有重要意义。目前对于流体可动性的研究常通过高速离心之后的核磁共振 T_2 谱与饱和水状态下的核磁共振 T_2 谱相结合的方法来进行表征, T_2 截止值作为可动流体的下限值可以有效地区分束缚流体与可动流体,从而计算得出储层的可动流体饱和度^[20]。

致密砂岩储层的孔隙结构和可动流体饱和度受储层物性、沉积环境、矿物组分以及成岩作用等多种因素的影响,导致储层的孔隙结构和可动流体饱和度非均质性强^[21-22]。鉴于此,以四川盆地天府气区须家河组须四段致密砂岩为研究对象,通过铸

体薄片、扫描电镜、X 衍射、核磁共振以及高压压汞等分析化验实验,对储层的孔隙结构、分形特征及流体可动性进行综合分析,明确研究区须四段致密砂岩储层孔隙结构和流体可动性的影响因素,以期对四川盆地天府气区须四段致密砂岩气的勘探开发提供理论依据。

1 区域地质背景

四川盆地位于中国西南部扬子克拉通之上,是经历了长期多次构造演化的叠合盆地。盆地内部被划分成了川北低缓构造带、川西低陡拗陷带、川中低缓褶皱带、川西南低陡褶皱带、川南低陡褶皱带和川东高陡构造带等构造单元(图 1)。盆地内发育多套含油气层系,其中陆相层系由老至新为上三叠统须家河组,下侏罗统自流井组东岳庙段、大安寨段、凉高山组以及沙溪庙组,其中须家河组同时具备生烃与储集能力^[23-24]。研究区构造位置位于川中低缓褶皱带西部,西邻龙泉山断裂带,研究区须家河组前后经历晚印支、燕山、喜山构造运动,受构造运动的影响,形成大低缓斜坡带的构造特征^[25-26]。

研究区须家河组以湖泊-三角洲相沉积为主,岩性主要发育灰黑色泥岩、粉砂质泥岩、长石岩屑砂岩、粉砂岩、夹砾岩、碳质泥岩及煤线,含丰富植物碎屑,地层厚度可达 600 ~ 1 300 m。须家河组自下而上可划分为六段,其中须一、须三、须五段主要为沼泽-湖泊相沉积,岩性以黑色泥岩夹粉砂岩、煤线为主,为须家河组主要的烃源岩,须二、须四、须六发育滨浅湖-三角洲相沉积,岩性以中-细粒砂岩夹薄层泥岩为主,是须家河组主要的储集层^[27-28]。研究区须四段主要为三角洲相沉积,自东南向西北逐渐由三角洲平原过渡为三角洲前缘相沉积,岩性以灰白色、浅灰色厚层砂岩为主,须四段与下伏须三上亚段地层的接触关系多表现为岩性突变或冲刷接触,地层厚度介于 70 ~ 190 m,平均厚度约为 104.6 m。

2 实验与方法

2.1 实验样品

以四川盆地中部天府气区须家河组须四段为

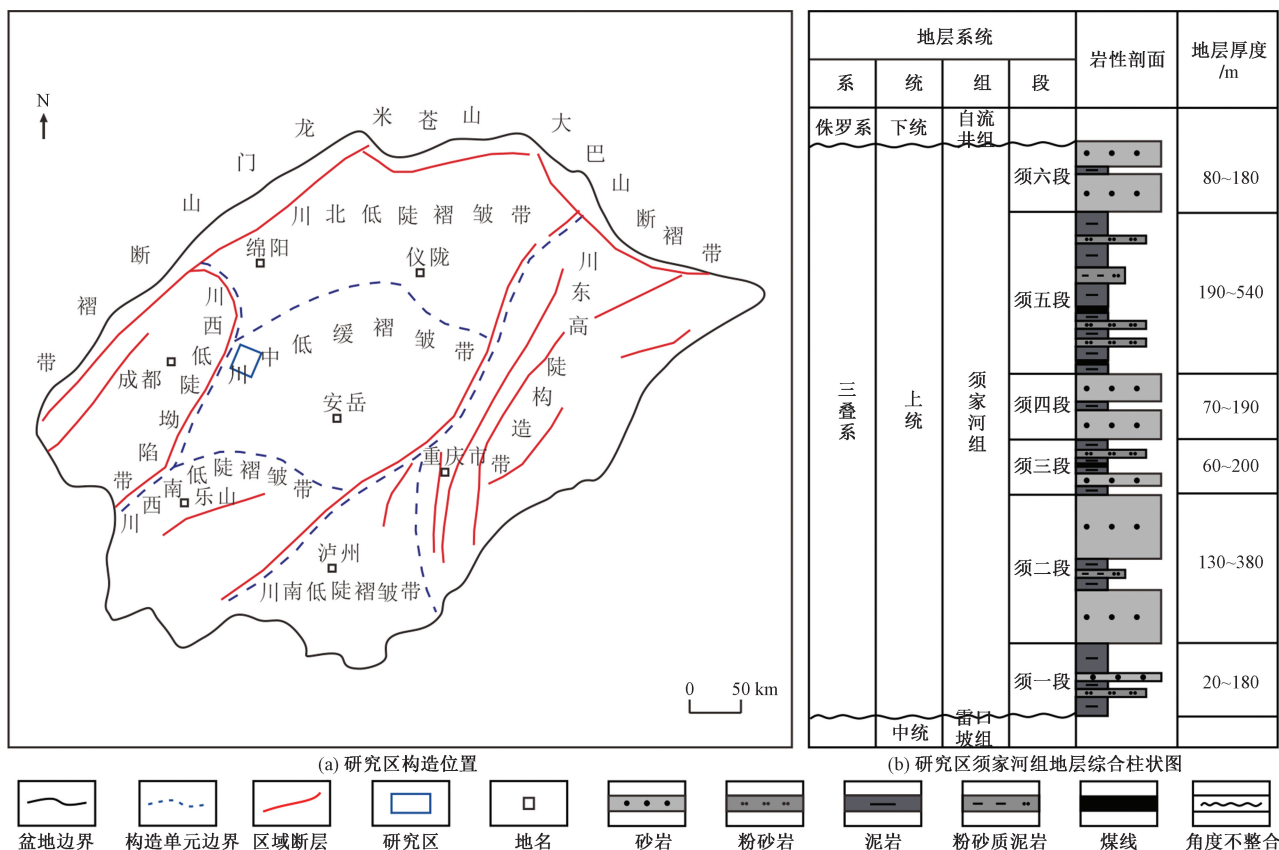


图1 研究区构造位置及须家河组地层综合柱状图

Fig. 1 The structural location of the study area and the comprehensive histogram of the Xujiahe Formation stratum

研究对象,选取 21 个柱塞样品、28 个碎样,样品主要为灰色细-中砂岩,取样方式为常规钻井取心。所有的柱塞样品均制成直径 2.5 cm、长度约为 3 cm 的圆柱形柱塞样,碎样根据实验需求制成相应的规格,对样品进行干燥等处理后,依次进行各项试验,所有实验均在中石油非常规重点实验室进行,实验条件及方法均按照行业标准执行。

2.2 实验方法

2.2.1 核磁共振实验

核磁共振采用 MacroMR12-150H-I 仪器进行测试,测量每个样品饱和水状态与离心状态的 T_2 谱,核磁共振分析参数设置共振频率为 12 MHz,等待时间为 6 000 ms,回波间隔 0.08 ms。通过对比离心前后核磁共振 T_2 谱,可计算出样品可动水饱和度。

2.2.2 高压压汞实验

高压压汞采用 Poremaster 型全自动压汞仪器,孔径测试范围 10 nm ~ 600 μm ,本次实验中最大进汞压力设置为 200 MPa,实验过程中采用阶段式增压,待压力稳定后测量样品的最大进汞饱和度。不同进汞压力下孔喉半径的计算公式为

$$r = \frac{-2\delta\cos\theta}{P_c} \quad (1)$$

式(1)中: r 为孔喉半径; P_c 为进汞压力; δ 为汞的表面张力,取 480 N/m; θ 为润湿角。

2.2.3 薄片鉴定、扫描电镜、X 衍射实验

铸体薄片鉴定采用偏光显微镜进行观察,最高放大倍数为 600 倍,实验中采用蓝色铸体充注,扫描电镜利用扫描电子显微镜(型号:FEI Quanta 450 FEG)进行分析,放大倍数在 7 ~ 100 000 倍,图像分辨率小于或等于 3.5 nm,X 衍射实验采用理学 D/MAX-3CX-射线衍射仪,对样品中的矿物成分进行定性、半定量分析。

2.3 分形维数计算方法

由核磁共振的原理可知,不同的 T_2 弛豫时间对应不同大小的孔隙中流体的弛豫特征,较大的孔隙对应较大的 T_2 时间,较小的孔隙则对应较小的弛豫时间。由核磁共振理论, T_2 弛豫时间可简化表示为^[29]

$$\frac{1}{T_2} = F_s \frac{\rho}{r'} \quad (2)$$

式(2)中: F_s 为孔隙的几何形状因子,对于圆形孔, $F_s = 2$;对于球形孔, $F_s = 3$; r' 为孔隙半径, μm ; ρ 为岩石表面弛豫率, $\mu\text{m}/\text{ms}$ 。

根据分形几何理论,当最小孔喉半径远小于最

大孔喉半径时有^[30]

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

式(3)中: S_v 为累积孔隙体积分数; D 为分形维数; r 为孔喉半径; r_{max} 为最大孔喉半径。

将式(2)代入式(3)得

$$S_v = \left(\frac{T_2}{T_{2max}}\right)^{3-D} \quad (4)$$

式(4)中: T_{2max} 为最大弛豫时间。

对式(4)两边同时取对数可得

$$\lg S_v = (3 - D)\lg T_2 - (3 - D)\lg T_{2max} \quad (5)$$

$\lg T_2$ 与 $\lg S_v$ 为线性关系,可在双对数坐标中通过拟合得到的直线斜率 K 计算 T_2 谱的分形维数。

$$D = 3 - K \quad (6)$$

3 储层基本特征

3.1 岩石学特征

通过岩心观察和薄片鉴定得出,须四段砂岩主要为灰色、灰白色细-中砂岩,砂岩类型为长石岩屑砂岩(图2)。石英作为砂岩中最主要的造岩矿物,其含量介于45%~62%,平均值为55%;其次为岩屑,其含量为22%~32%,平均值为26%,以变质岩岩屑为主,沉积岩岩屑和岩浆岩岩屑较少;长石含量介于9%~16%,平均值为12%,以钾长石为主。填隙物以泥质杂基和胶结物为主,整体含量主要分布于1%~10%,部分样品中胶结物含量较高,以方解石为主,含少量的白云石。须四段砂岩粒径主要分布于0.15~0.5 mm,平均值为0.35 mm,分选性较好,磨圆度主要为次圆-次棱角状,结构成熟度中等。

3.2 储层物性特征

常压下孔隙度和渗透率测试结果表明,研究区

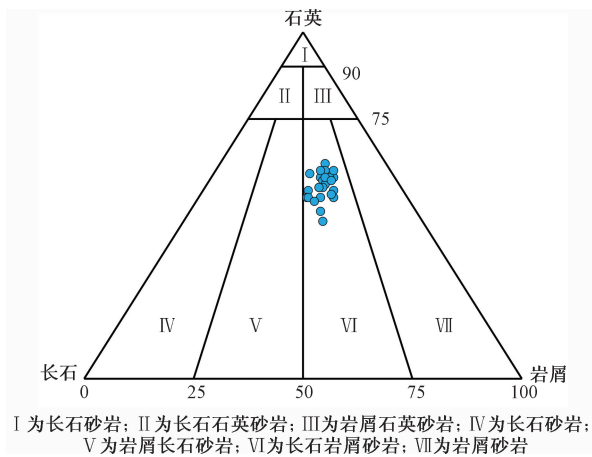


图2 研究区须四段砂岩类型三角图

Fig. 2 Triangular map of sandstone types of the 4th member of Xujiahe Formation in the study area

须四段砂岩样品孔隙度主要分布在6%~8%,占样品总数的50.15%,其次为4%~6%,占比为42.52%,如图3(a)所示,平均孔隙度为5.88%。渗透率普遍小于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,主要分布与 $0.1 \times 10^{-3} \sim 0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值约为 $0.23 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,占样品总数52.49%,其次为 $0.05 \times 10^{-3} \sim 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,占比42.52%,如图3(b)所示,仅有3.82%的样品物性较好,渗透率大于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。根据《油气储层评价方法》(SY/T 6285—2011)提出的碎屑岩储层评价标准,须四段储层为特低孔-超低渗型致密储层^[31]。孔隙度和渗透率交会图显示,二者之间呈现良好的正相关性,表明须四段储层类型以孔隙型储层为主,如图3(c)所示。

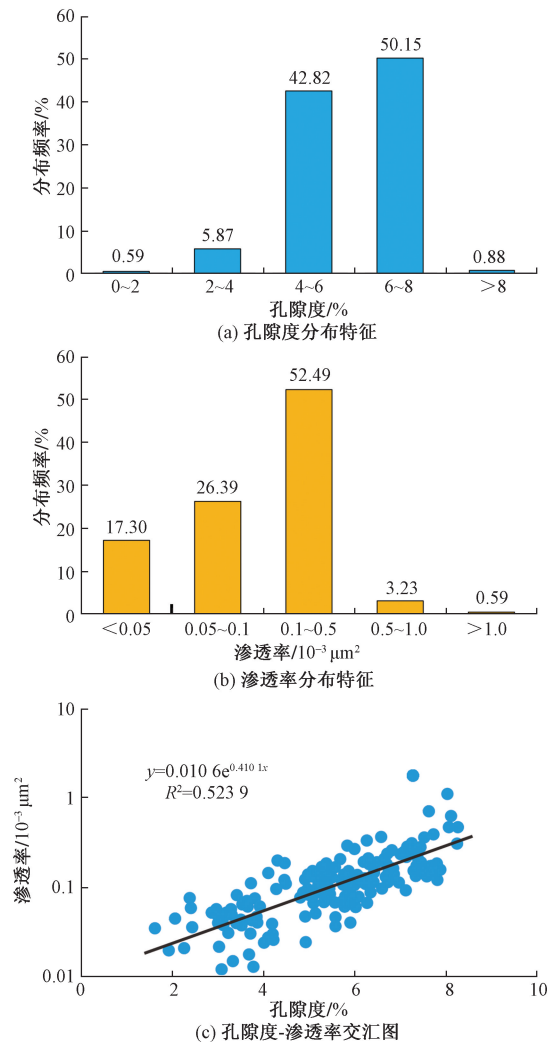


图3 研究区储层物性分布特征

Fig. 3 Physical property distribution characteristics of tight sandstone reservoirs in the study area

3.3 储层孔喉类型

须四段砂岩孔隙类型以溶蚀孔隙为主,含少量

黏土矿物晶间孔、残余粒间孔,其中溶蚀孔隙类型主要为长石溶孔和少量粒间溶孔。粒间溶孔,如图4(b)所示,一般从矿物边缘向矿物中心溶蚀,溶蚀颗粒边缘呈现不规则状,孔隙空间连通性较好,而粒内溶孔,如图4(a)所示,保留了矿物整体形态,常在矿物内部形成独立的溶蚀空间且与外界不连通,孔隙连通性差。残余粒间孔孔径较小,多为长条形和似三角状如图4(c)所示,平均面孔率0.7%。通过扫描电镜下观察发现,钾长石表面被大量溶蚀,呈现出不规则锯齿状如图4(e)所示,同时可见少量石英内部遭受溶蚀,发育相互孤立的微小溶孔,如图4(f)所示。

晶间孔主要发育于黏土矿物中丝缕状伊利石或蜂窝状伊蒙混层集合体,如图4(d)所示,其孔径较小,含量也相对较少。喉道类型以片状喉道为主,如图4(b)所示,这类喉道普遍较细且狭长,喉道宽度约为10 μm,易受到黏土矿物吸水膨胀的影响造成喉道堵塞,导致储层渗透率较差,含少量缩颈型喉道,仅在物性较好的样品中出现,如图4(c)所示。

3.4 孔隙结构特征

3.4.1 高压压汞结果

高压压汞可以很好地反映储层的孔喉大小及连通性,不同孔隙结构的样品毛管压力曲线和孔喉结构参数存在明显差异。通过高压压汞实验,得到14个样品的毛管压力曲线及孔径分布曲线(图5),

其中毛管压力曲线整体呈现两段式,即上升段和上翘段,不同段反映了不同大小孔隙的结构特征。上升段为大孔隙段,进汞压力小,连通性较好,上翘段为微小孔喉,孔径小,进汞压力大,孔喉连通性差。孔径分布曲线整体呈现单峰型,孔喉半径主要分布在0.1~1 μm,中值半径介于0.003~0.17 μm,如表1所示,样品总体呈现出孔径较小、分选性和连通性较差的特点。

根据高压压汞毛细管压力曲线特征将研究区实验样品分为三类,其中I类样品门槛压力低,平均为0.26 MPa,毛管压力曲线具有明显的平台段,且平台段较低,退汞效率高,平均为46.36%,孔径主要分布在0.1~3 μm,表明其孔喉半径较大且分选性和连通性好的特征;II类样品毛管压力曲线平台段较高且斜率增加,门槛压力平均为0.43 MPa,退汞效率平均为43.11%,孔径主要分布在0.1~0.8 μm,相较之I类样品,II类样品孔喉半径减小,孔喉连通性和分选性略差;III类样品门槛压力最大,平均为1.02 MPa,退汞效率差,平均为45.56%,整体的进汞饱和度较小且毛管压力曲线无明显的平缓段,孔喉半径主要在0.01~0.6 μm,表明其整体孔喉发育较差,孔喉半径较小、孔隙结构复杂、连通性和分选性最差。

3.4.2 核磁共振结果

核磁共振(nuclear magnetic resonance, NMR)实验是通过测量样品中氢原子的自旋信号来间接表

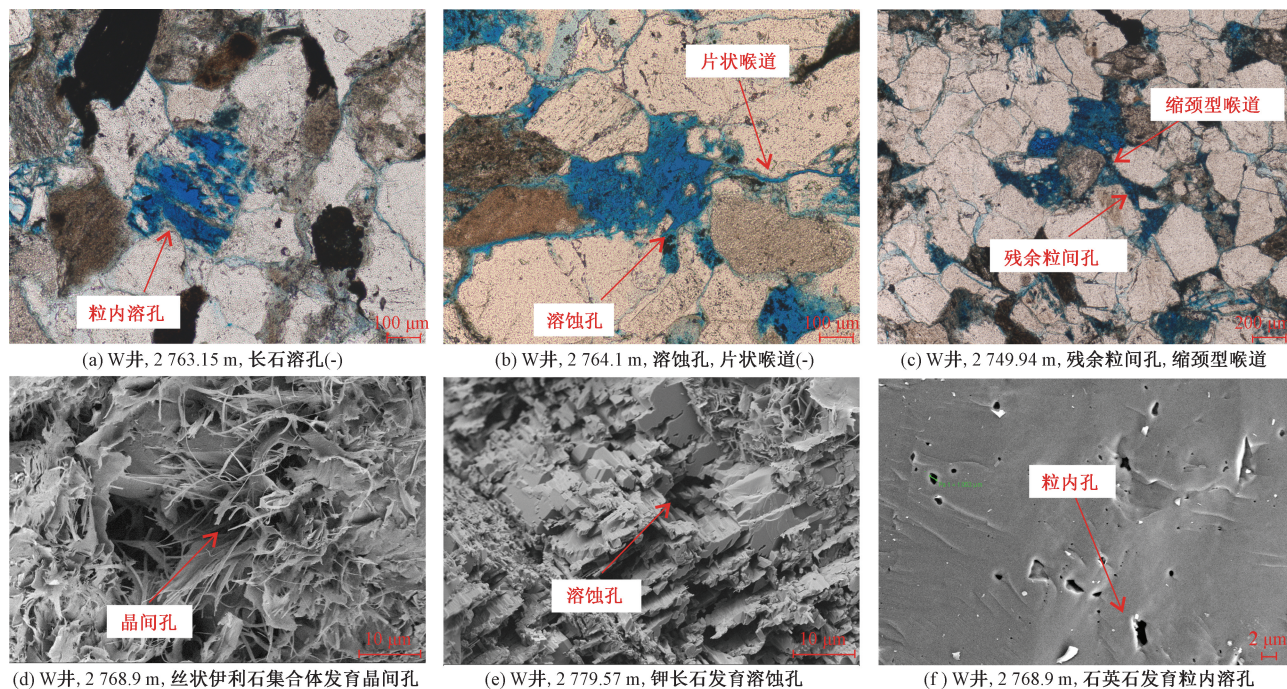


图4 研究区致密砂岩储层微观孔隙特征

Fig. 4 Microscopic pore characteristics of the tight sandstone reservoir in the study area

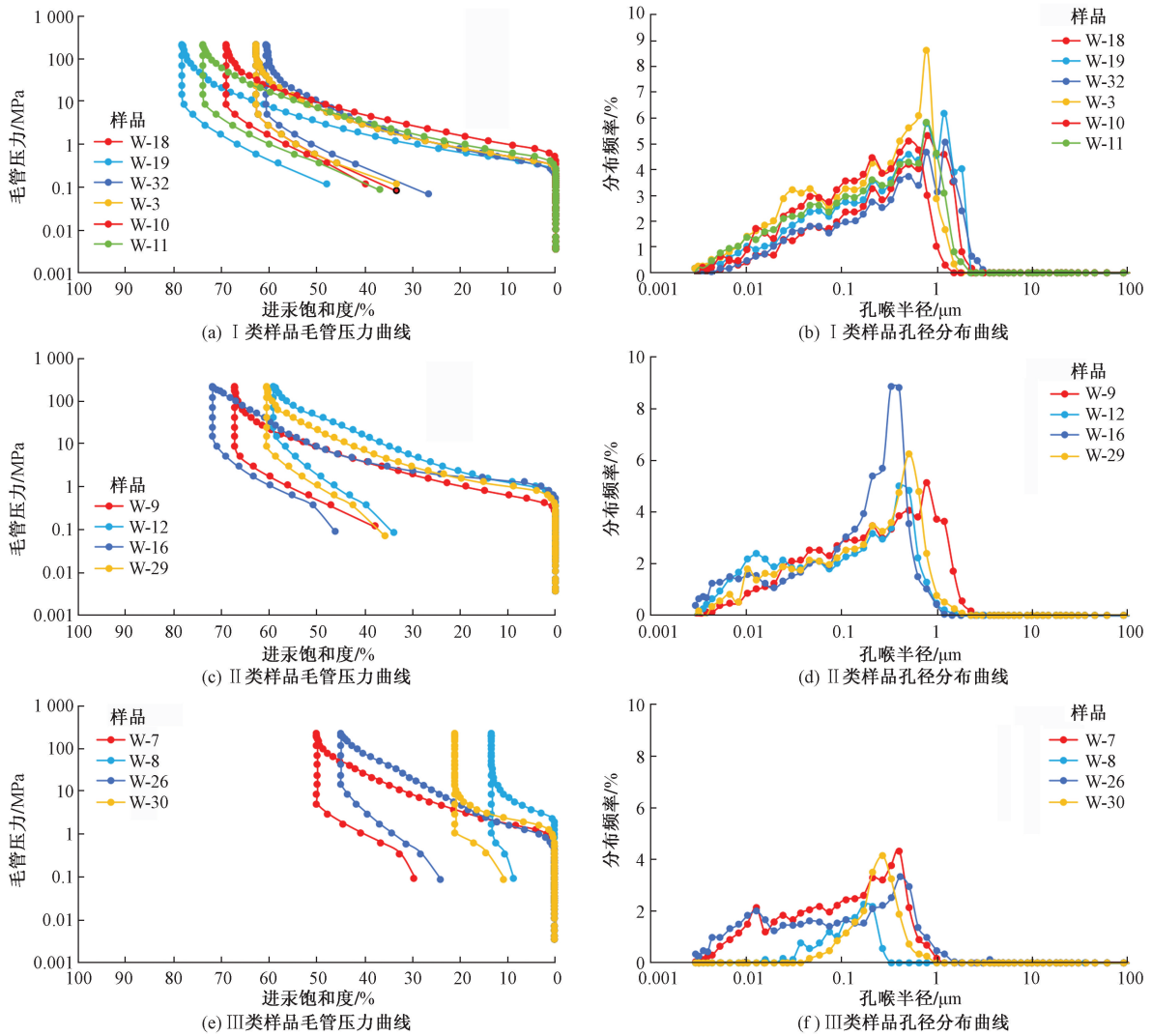


图5 研究区储层毛管压力曲线及孔喉半径分布曲线

Fig. 5 Capillary pressure curve and pore throat radius distribution curve of reservoir in the study area

征其孔隙空间,在100%饱和水的情况下可以反映样品的全孔径分布情况,同时在经过高速离心之后,样品中可动空间的流体会排出孔隙空间,仅保留束缚流体,因此可以通过饱和水状态下和离心后测量的核磁 T_2 谱的积分面积之差来表征样品的流体可动性。核磁共振结果表明,所有样品的 T_2 谱峰分布在0.1~1 000 ms,主要呈双峰形态(图6)。其中,I类样品曲线形态呈明显的双峰型,谱峰面积较大且右峰高于左峰,大孔隙占比较高,主要介于35.62%~61.77%,平均值约为48.74%, T_2 截止值分布为0.52~2.77 ms(表1),平均为1.45 ms,可动流体饱和度在70.25%~93.27%,平均为79.37%,表明I类样品中以大孔隙为主,孔隙连通性好,流体可动性强;II类样品核磁 T_2 曲线峰面积较I类样品略小,且左峰高于右峰,大孔占比分布为30.75%~52.13%,平均为38.73%, T_2 截止值分布

为0.79~3.65 ms,平均为2.06 ms,可动流体饱和度在61.46%~89.85%,平均为70.1%,与I类样品相比,II类样品中大孔隙相对较少,孔隙连通性和流体可动性相对较差;III类核磁 T_2 样品曲线整体峰面积较小且右峰明显低于左峰,大孔占比分布为4.68%~34.36%,平均值仅为16.6%, T_2 截止值分布为0.6~1.96 ms,平均为1.1 ms,可动流体饱和度在59.09%~79.89%,平均为68.69%,表明III类样品中主要为小孔隙,孔隙连通性最差,可流动流体饱和度最小,储层的储集能力和渗流能力最差。

3.4.3 孔隙结构分形特征

根据12个核磁共振样品资料绘制 $\lg S_v$ 与 $\lg T_2$ 的交会曲线图,通过 T_2 截止值将曲线分为两部分(图7)。根据分形理论,多孔介质的分形维数介于2~3,且分形维数越接近2孔隙结构越简单,孔隙非均质性越弱。结果显示,小于 T_2 截止值的孔隙分形

表1 储层核磁共振参数及高压压汞参数

Table 1 NMR parameters and high pressure mercury injection parameters of tight sandstone reservoir

样品编号	样品类型	深度/m	高压压汞参数			核磁共振参数						
			门槛压力/MPa	退汞效率/%	中值半径/ μm	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	T_2 截止值/ms	可动流体饱和度/%	D_{n1}	D_{n2}	大孔占比/%
W-3	I	2 749.70	0.41	43.77	0.14	6.36	0.27	1.70	70.36	0.87	2.89	40.68
W-10	I	2 756.10	0.51	42.44	0.06	5.94	0.51	1.48	82.56	-0.91	2.88	35.62
W-11	I	2 756.90	0.27	50.25	0.09	5.38	2.10	0.64	70.25	0.31	2.83	43.53
W-18	I	2 763.95	0.24	46.84	0.09	7.15	8.84	2.77	79.95	0.73	2.82	61.77
W-19	I	2 763.69	0.34	38.63	0.17	6.76	4.02	0.52	93.27	-2.18	2.85	55.70
W-32	I	2 779.47	0.20	56.26	0.06	6.53	2.58	1.59	79.86	0.24	2.83	55.14
平均值			0.33	46.36	0.10	6.35	3.05	1.45	79.37	-0.16	2.85	48.74
W-9	II	2 755.70	0.27	43.73	0.08	5.88	3.31	0.79	89.85	0.14	2.80	52.13
W-12	II	2 757.85	0.41	42.52	0.01	5.06	0.26	1.38	61.81	0.62	2.91	32.99
W-16	II	2 764.05	0.51	35.99	0.08	6.11	0.64	3.65	61.46	1.18	2.85	30.75
W-29	II	2 776.11	0.33	41.12	0.03	5.26	0.51	2.41	67.29	1.16	2.90	39.06
平均值			0.38	40.84	0.05	5.58	1.18	2.06	70.10	0.78	2.87	38.73
W-7	III	2 752.87	0.62	40.93	0.003	2.42	0.19	1.96	59.09	1.03	2.94	15.56
W-8	III	2 752.89	2.27	33.74	—	1.77	0.02	0.60	60.12	0.21	2.94	11.81
W-26	III	2 773.50	0.41	46.58	—	3.34	0.52	0.85	75.65	0.60	2.91	4.68
W-30	III	2 777.46	0.79	49.00	—	1.24	0.16	0.98	79.89	0.59	2.86	34.36
平均值			1.02	42.56	0.003	2.19	0.22	1.10	68.69	0.61	2.91	16.60

注： D_{n1} 为小于 T_2 截止时间部分孔隙空间的分形维数，以束缚流体为主； D_{n2} 为大于 T_2 截止时间的孔隙空间分形维数，以可动流体为主。

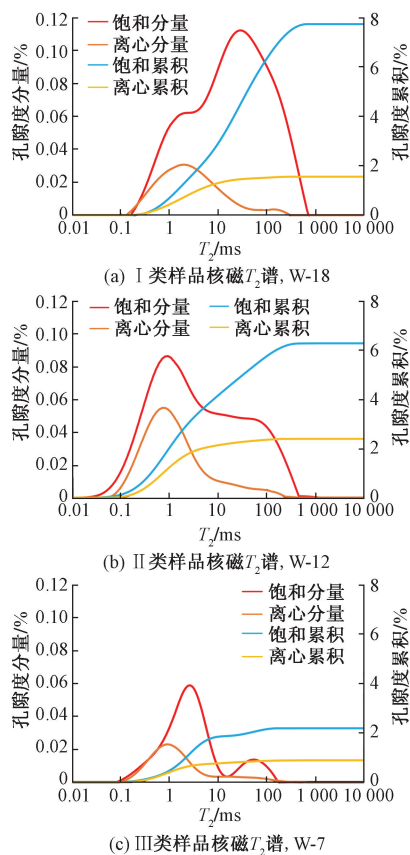


图6 不同类型样品核磁共振 T_2 谱孔隙度分量和累积分布曲线

Fig. 6 The porosity components and cumulative distribution curves of NMR T_2 spectra of different types of samples

维数均小于2(表1),说明该部分孔隙空间不具有分形特征,其原因可能为该部分孔隙整体较小,孔隙相对孤立,孔隙结构复杂,因此后续研究中仅针对可动空间孔隙的分形维数 D_{n2} 进行分析。

通过对比不同类型样品的分形维数可知,从I类孔隙到III类孔隙,分形维数逐渐增大,孔隙结构逐渐变复杂,孔隙非均质性逐渐增强。I类样品大孔隙的分形维数介于2.82~2.89,平均为2.85,孔隙结构最为简单,非均质性最弱;II类样品大孔隙的分形维数介于2.80~2.91,平均为2.87,较I类来说孔隙结构相对复杂,非均质性相对增强;III类样品大孔隙的分形维数为2.86~2.94,平均值为2.91,孔隙结构最差,非均质性最强。

4 讨论

4.1 储层物性对分形维数和流体可动性的影响

分形维数作为表征多孔介质空间结构特征的重要参数,可以很好地反映储层孔隙结构的复杂程度和储层的非均质性。通过分析分形维数 D_{n2} 和储层孔隙度、渗透率的相关性可以看出,分形维数与孔隙度、渗透率之间呈现明显的负相关关系,如图8(a)、图8(b)所示。可以看出,随着孔隙度和渗透率逐渐增大,分形维数逐渐变小,孔隙结构趋于复杂。其原因在于物性越好的储层孔隙发育较好且大孔隙相对较多,孔隙之间具有更好地分选性和连通性,孔隙结构的较为简单,非均质性越弱,分形

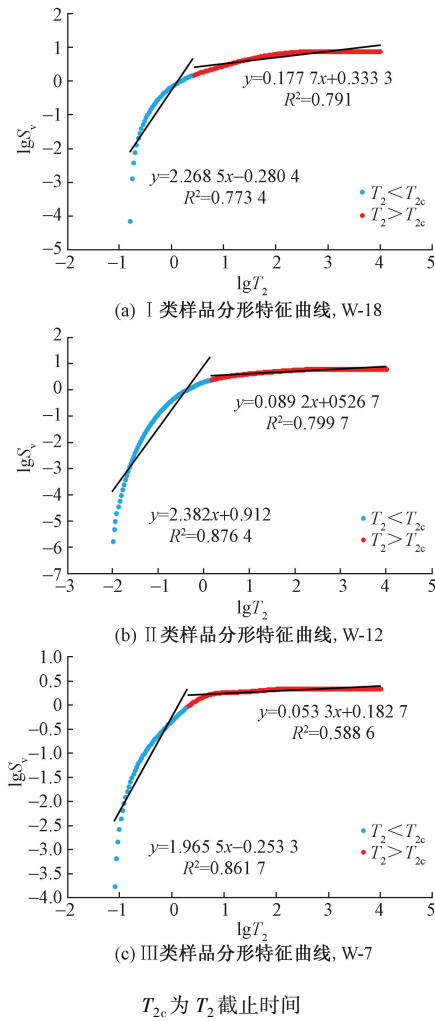


图7 不同类型样品核磁共振分形特征图

Fig.7 NMR fractal characteristics of different types of samples

维数也较低。可动流体孔隙度和可动流体饱和度作为表征储层流体可动性的重要参数,对储层评价具有重要的作用。通过孔隙度、渗透率与可动流体参数相关性图[图8(c)、图8(d)]可知,孔隙度、渗透率与可动流体参数具有明显的正相关性,孔隙度、渗透率越大,可动流体孔隙度和饱和度越高。说明物性越好的储层大孔隙含量越多,且喉道相对较粗,孔隙之间的连通性越好,流体在孔隙中运移时受到的毛细管阻力越小,越有利于油气产出。

4.2 沉积结构对分形维数和流体可动性的影响

沉积作用对砂岩的物性和孔隙结构具有重要的影响,其主要是通过不同砂体形成时所处的沉积环境和水动力条件存在差异,导致原始的碎屑组分、颗粒的大小和分选性以及沉积结构不同,从而影响砂岩的物性和孔隙结构特征。砂岩颗粒的分选性可以通过分选系数进行表征,通过相关性分析得出,须四段砂岩的粒度与分形维数和呈负相关性,与可动流体参数呈正相关性(图9),粒度越大的

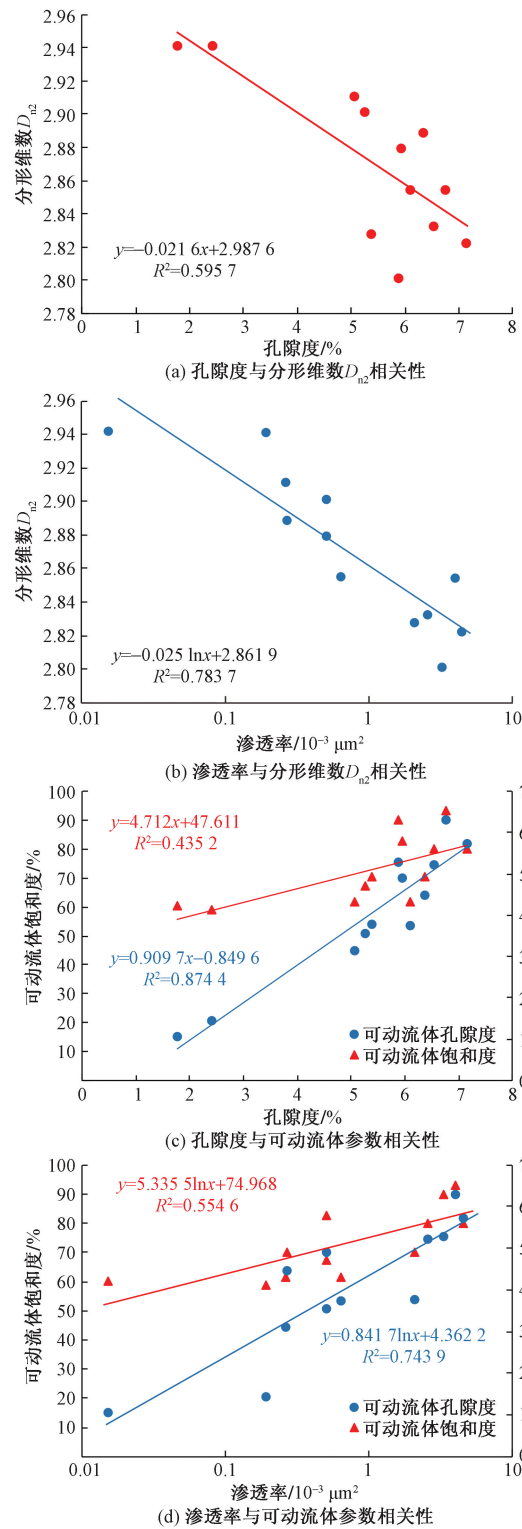


图8 储层物性与分形维数和可动流体参数的相关性图
Fig.8 Correlation diagram between reservoir physical properties and fractal dimension and movable fluid parameters

砂岩沉积期水动力能量,具有较高的原始孔隙度,在成岩过程中水体较为开放,胶结物不易沉淀下来,因此其孔隙结构较好,流体可动性较强,分选系数分形维数呈正相关性,与可动流体参数呈负相关

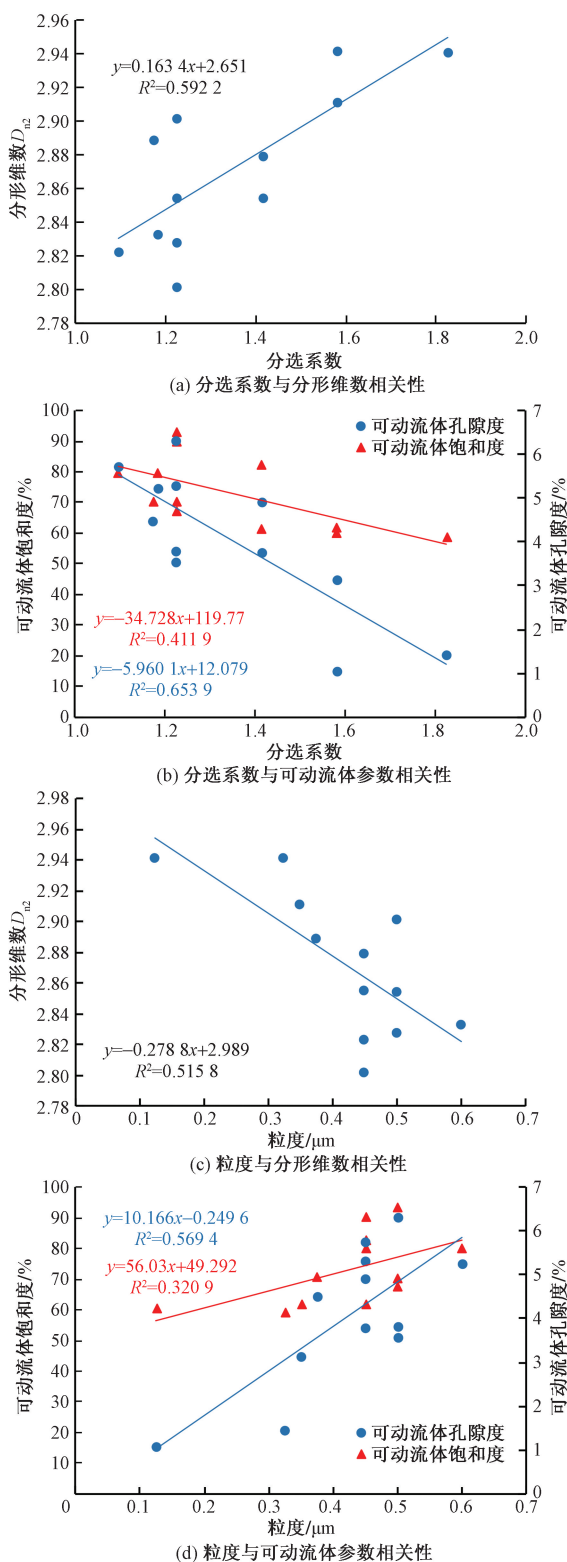


图9 沉积结构参数与分形维数和可动流体参数相关性图
 Fig. 9 Correlation diagram of sedimentary structure parameters, fractal dimension and movable fluid parameters

性,分选系数越小的砂岩颗粒大小较均匀,沉积时颗粒之间堆砌的孔隙空间大,孔隙结构好;反之,颗粒之间堆砌的孔隙空间小且易被更小的颗粒填充,导致孔隙空间小且连通性差。因此,粒度越大、分

选性越好的砂岩具有更好的储层物性,其孔喉非均质性较低,流体可动性较强。

4.3 矿物含量对分形维数和流体可动性的影响

不同的矿物类型会在不同程度上对储层的孔隙空间和孔隙结构进行改造,从而影响储层流体的可动性。

4.3.1 石英含量对分形维数和流体可动性的影响

石英作为致密砂岩中最主要的造岩矿物,对储层的孔隙结构和流体可动性具有重要的影响。通过石英含量与可动流体参数和分形维数相关性分析显示[图10(a)、图10(b)],石英与可动流体参数之间呈明显的正相关性,与分形维数分别呈现负相关性,随着石英含量增高,可动流体饱和度和可动流体孔隙度逐渐变高、分形维数逐渐减小。表明石英储层孔隙结构和储层流体的可动性具有积极作用,其主要原因为石英属于刚性颗粒,在成岩作用过程中,较高的石英会增强储层的抗压性,在一定程度上减少压实作用下对储层孔隙的损害,尽可能的保留原生孔隙,使得储层孔隙结构的非均质性降低,流体可动性增强。

4.3.2 黏土矿物含量对分形维数和流体可动性的影响

黏土矿物含量对作为砂岩储层中最主要的胶结物,对储层质量具有明显的破坏作用。黏土矿物含量与可动流体参数和分形维数相关性图显示[图10(c)、图10(d)],黏土矿物含量与可动流体参数呈明显的负相关性,与分形维数分别呈现正相关性,黏土矿物含量越高,可动流体饱和度和孔隙度越低,分形维数越高。其原因在于须四段砂岩储层中黏土矿物主要为伊利石,通常会充填于原生孔或长石溶孔中,其丝缕状或蜂窝状的结构就会爱那个原本比较大的孔隙分割成多个尺度较小的晶间孔[图11(d)~图11(f)],在孔隙内部形成多个围观渗流屏障,不仅会导致孔隙空间减小,还会严重降低孔隙的连通性减弱,导致储层渗流能力变弱,微观非均质性增强,孔隙结构复杂,流体可动性降低。

4.3.3 碳酸盐矿物含量对分形维数与流体可动性的影响

碳酸盐矿物作为储层中主要的胶结物之一,对储层质量具有严重的破坏作用。碳酸盐矿物含量与可动流体参数和分形维数的相关性图[图10(e)、图10(f)]显示,其与可动流体参数呈明显的负相关性,与分形维数分别呈正相关性,碳酸盐矿物含量越多,分形维数越大,可动流体饱和度和孔隙度越低。这是由于在成岩过程中,孔隙中富含 Ca^{2+} 和

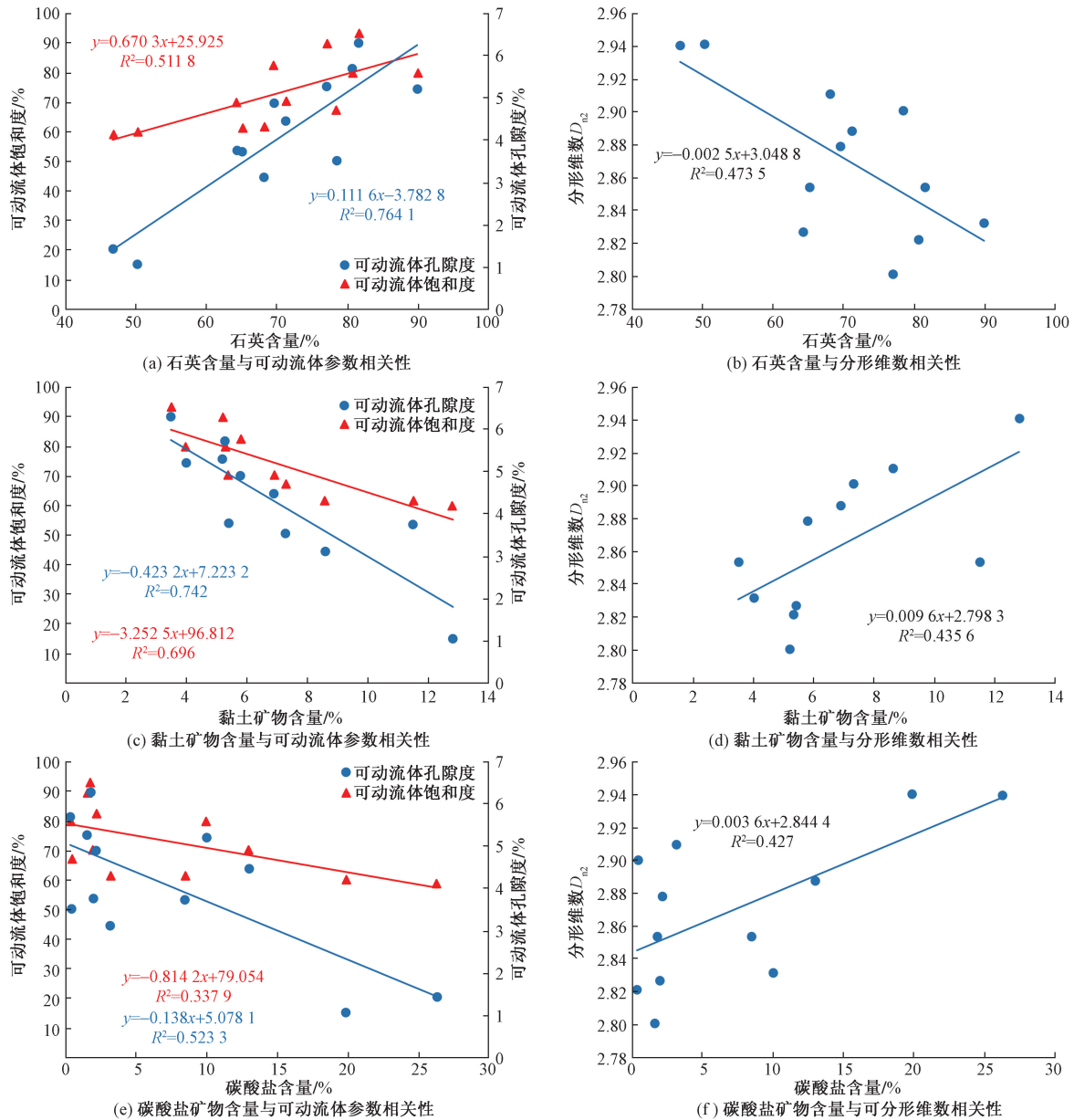


图 10 矿物含量与分形维数和可动流体参数的相关性图

Fig. 10 Correlation diagram of mineral content with fractal dimension and movable fluid parameters

CO₃²⁻ 离子流体的结晶会析出大量的碳酸盐矿物, 这些碳酸盐矿物会占据大量的孔隙空间[图 11(a) ~ 图 11(c)], 并且很难发生溶解作用, 使得孔隙空间减小, 孔隙非均质性增强, 孔隙的连通性减弱, 对孔隙结构和流体可动性具有明显的破坏作用。

4.4 分形维数对流体可动性的影响

分形维数可以很好地反映储层孔隙空间的复杂程度。根据储层中可动流体空间的分形维数与可动流体参数的相关性图, 结果显示, 分形维数 D_{n2} 与可动流体孔隙度和饱和度之间呈现明显的负相关性(图 12), 表明分形维数越大, 孔隙结构越复杂, 非均质越强, 孔隙更加孤立、喉道的弯曲的也更好, 孔喉之间的连通性较低, 导致流体在孔隙空间中的

流动时受到的毛细管阻力越大, 流体更难排出孔隙, 从而导致储层的可动流体饱和度与可动流体孔隙度降低。

5 结论

(1) 研究区须四段储层主要为长石岩屑砂岩, 平均孔隙度为 5.88%, 渗透率平均为 $0.23 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 属于典型的特低孔-特低渗孔隙型储层。孔隙类型以溶蚀孔隙为主, 含少量黏土矿物晶间孔、残余粒间孔。溶蚀孔隙类型主要为长石溶孔与岩屑溶孔, 喉道主要为片状喉道, 局部可见缩颈型喉道。

(2) 根据研究区须四段致密砂岩高压压汞曲线

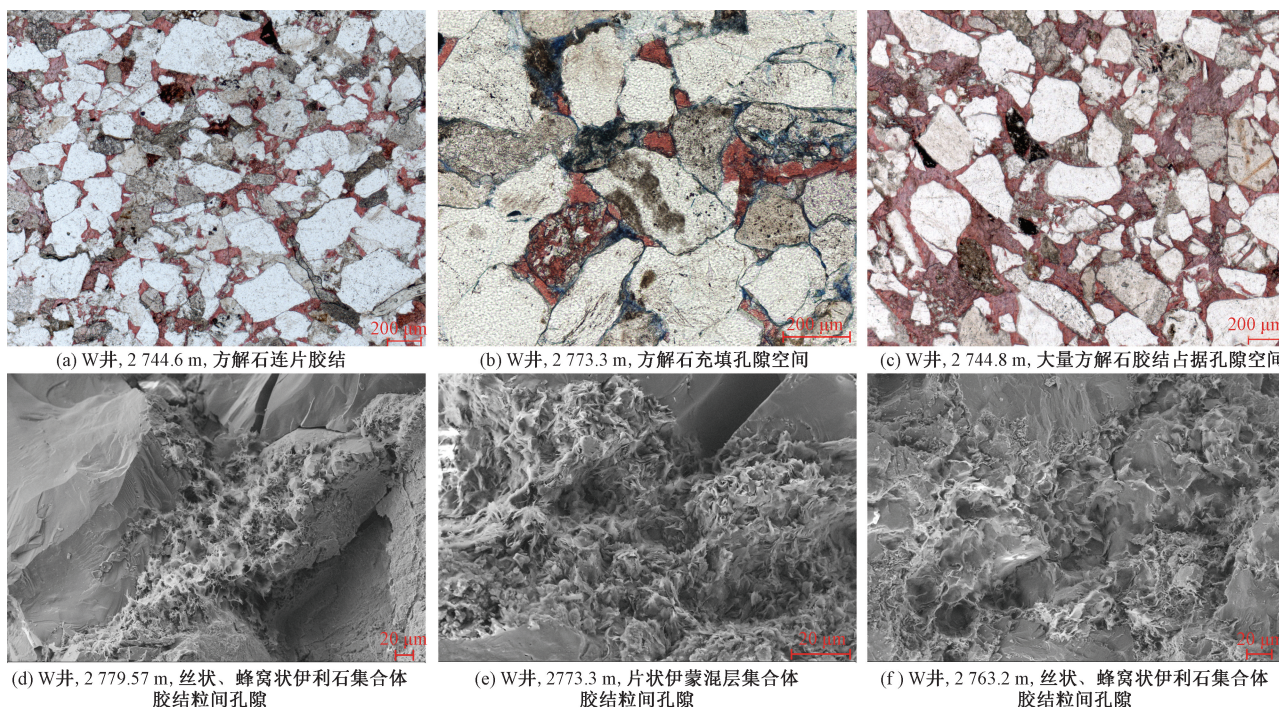


图 11 典型碳酸盐矿物充填孔隙空间及黏土矿物充填孔隙空间

Fig. 11 Typical carbonate mineral filling pore space and clay mineral filling pore space

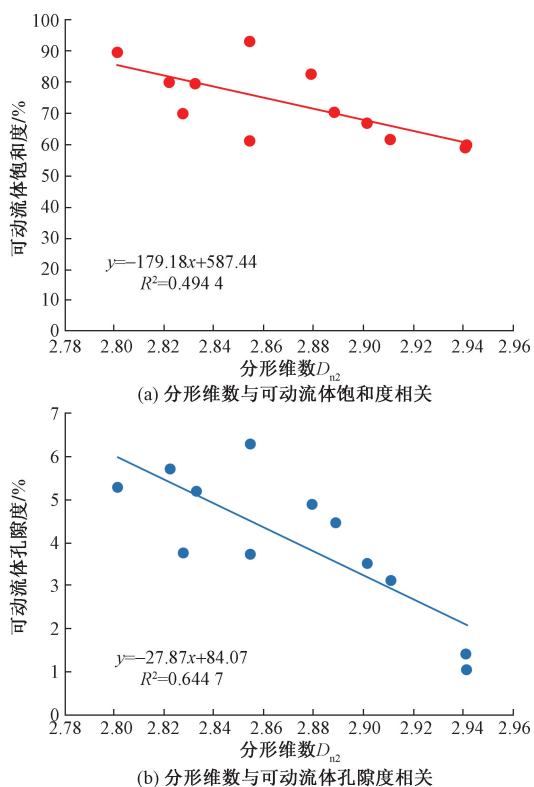


图 12 分形维数与可动流体参数相关性图

Fig. 12 Correlation between fractal dimension and movable fluid parameters

形态特征将样品类型分为三类孔隙,结合核磁共振结果, I 类样品 T_2 谱峰面积较大且右峰高于左峰, 主要以大孔隙为主, 孔隙连通性好、非均质性弱, 分

形维数较小, 流体可动性强; II 类样品较之 I 类样品大孔隙相对较少, 孔隙结构和流体可动性较差; III 类样品普遍以小孔隙为主, 孔隙连通性差, 非均质性最强, 孔隙结构和流体可动性最差。

(3) 分形维数和可动流体饱和度受到储层物性、沉积结构、矿物含量的影响。物性越好、沉积结构越好的储层分形维数越小、流体可动性越强; 矿物组分中石英对孔隙结构起建设性作用, 石英含量越高, 分形维数越小, 流体可动性越强, 黏土矿物与碳酸盐矿物对孔隙结构起破坏性作用, 二者的含量越高, 储层孔隙越复杂, 孔隙结构和流体可动性越差。

参 考 文 献

[1] 贾爱林, 位云生, 郭智, 等. 中国致密砂岩气开发现状与前景展望[J]. 天然气工业, 2022, 42(1): 83-92.
Jia Ailin, Wei Yunsheng, Guo Zhi, et al. Development status and prospect of tight sandstone gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(1): 83-92.

[2] 孟婧, 张莉莹, 李芮, 等. 致密砂岩储层微观孔隙结构特征及其分类评价[J]. 特种油气藏, 2023, 30(4): 71-78.
Meng Jing, Zhang Liying, Li Rui, et al. Microscopic pore structure characteristics of tight sandstone reservoirs and its classification evaluation[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2023, 30(4): 71-78.

[3] 祝海华, 张廷山, 钟大康, 等. 致密砂岩储集层的二元孔隙结构特征[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(6): 1220-1228.
Zhu Haihua, Zhang Tingshan, Zhong Dakang, et al. Binary pore

- structure characteristics of tight sandstone reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(6): 1220-1228.
- [4] 李中超, 周勇水, 刘平, 等. 普光地区须家河组致密砂岩储层成岩作用及孔隙演化[J]. *断块油气田*, 2023, 30(3): 353-362.
- Li Zhongchao, Zhou Yongshui, Liu Ping, et al. Diagenesis and pore evolution of tight sandstone reservoirs of Xujiache Formation in Puguang area[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2023, 30(3): 353-362.
- [5] 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.
- [6] 孙灵辉, 萧汉敏, 谭龙, 等. 致密砂岩储层孔隙结构对比及差异机制研究[J]. *地质学报*, 2022, 96(6): 2155-2172.
- Sun Linghui, Xiao Hanmin, Tan Long, et al. 2022. Pore structure comparison and difference mechanism between tight sandstone and tight conglomerate reservoirs[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(6): 2155-2172.
- [7] 郑和荣, 刘忠群, 徐士林, 等. 四川盆地中国石化探区须家河组致密砂岩气勘探开发进展与攻关方向[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(4): 765-783.
- Zheng Herong, Liu Zhongqun, Xu Shilin, et al. Progress and key research directions of tight gas exploration and development in Xujiache Formation, Sinopec exploration areas, Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(4): 765-783.
- [8] Yi X, Wang G W, Liu B C, et al. Pore structure evaluation in ultra-deep tight sandstones using NMR measurements and fractal analysis[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 211: 110180.
- [9] Zhang Q P, Liu Y C, Wang B T, et al. Effects of pore-throat structures on the fluid mobility in Chang 7 tight sandstone reservoirs of Longdong area, Ordos Basin[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 135: 105407.
- [10] Liu X P, Jin Z J, Lai J, et al. Fractal behaviors of NMR saturated and centrifugal T_2 spectra in oil shale reservoirs: the Paleogene Funing Formation in Subei Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 129: 105069.
- [11] 顾雅岷, 喻高明, 李桂珊. 低渗致密砂岩储层孔隙结构特征及自发渗吸实验[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(32): 139-145.
- Gu Yadi, Yu Gaoming, Li Guishan. Experimental of pore structure and spontaneous imbibition of low permeability tight sandstone reservoirs[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(32): 139-145.
- [12] 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.
- [13] 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 Shizezi Formation in the Sulige area, Ordos Basin[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 210: 110053.
- [14] Schmitt M, Fernandes C P, Wolf F G, et al. Characterization of Brazilian tight gas sandstones relating permeability and Angstrom to micron-scale pore structures[J]. *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, 2015, 27(2): 785-807.
- [15] 雒斌, 陶荣德, 崔小丽, 等. 鄂尔多斯盆地吴起-志丹地区长8段致密砂岩储层孔喉结构分形特征[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(8): 1305-1315.
- Luo Bin, Tao Rongde, Cui Xiaoli, et al. Fractal characteristics of pore throat structure of Chang 8 member tight sandstone reservoir in Wuqi-Zhidan area, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(8): 1305-1315.
- [16] 李吴远, 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. Influence of pore structure fractal features of tight sandstone reservoir on gas-water seepage law: a case study of Shan 1 member in Tao 2 block of southeastern Sulige Gas Field[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2023, 30(2): 177-185.
- [17] 李磊, 鲍志东, 李忠诚, 等. 致密砂岩气储层微观孔隙结构与分形特征——以松辽盆地长岭气田登娄库组为例[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(6): 1039-1052.
- Li Lei, Bao Zhidong, Li Zhongcheng, et al. Microscopic pore structure and fractal characteristics of tight sandstone gas reservoir: a case study of Denglouku Formation in Changling Gas Field, Songliao Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(6): 1039-1052.
- [18] 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: 104737.
- [19] 柴兵强, 赵峰, 计玉冰, 等. 川东南盆缘复杂构造区龙马溪组页岩孔隙结构及分形特征[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(12): 4973-4983.
- Chai Bingqiang, Zhao Feng, Ji Yubing, et al. Pore structure and fractal characteristics of Longmaxi Formation shale in complex structural area of southeastern Sichuan Basin[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(12): 4973-4983.
- [20] 刘赛, 吴建邦, 周伟, 等. 玛湖1井区致密砂岩储层物性特征及其对流体可动性的影响[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2023, 38(6): 15-23.
- Liu Sai, Wu Jianbang, Zhou Wei, et al. Physical properties of tight glutenite reservoirs in Mahu 1 wellblock and their effects on fluid mobility[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2023, 38(6): 15-23.
- [21] 朱仰其, 张惠, 姚志刚, 等. 基于高压压汞实验致密砂岩储层分形特征及控制因素[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(20): 8419-8428.
- Zhu Yangqi, Zhang Hui, Yao Zhigang, et al. Fractal characteristics and controlling factors of tight sandstone reservoirs based on high-pressure mercury injection experiments[J]. *Science Techno-*

- logy and Engineering, 2024, 24(20): 8419-8428.
- [22] 唐大海, 王旭丽, 曾琪, 等. 四川盆地西南部沙溪庙组致密砂岩低渗储层特征及形成机理[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(1): 143-154.
Tang Dahai, Wang Xuli, Zeng Qi, et al. Reservoir characteristics and formation mechanism of low permeability tight sandstone of Shaximiao Formation in southwest Sichuan Basin [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(1): 143-154.
- [23] 黄彦庆, 刘忠群, 王爱, 等. 四川盆地元坝地区上三叠统须家河组三段致密砂岩气甜点类型与分布[J]. 岩性油气藏, 2023, 35(2): 21-30.
Huang Yanqing, Liu Zhongqun, Wang Ai, et al. Types and distribution of tight sandstone gas sweet spots of the third member of Upper Triassic Xujiahe Formation in Yuanba area, Sichuan Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2023, 35(2): 21-30.
- [24] 关旭, 金吉能, 杨威, 等. 川中地区须家河组岩性气藏特征与含气有利区预测——以安岳-磨溪地区须家河组二段为例[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(3): 358-368.
Guan Xu, Jin Jineng, Yang Wei, et al. Lithologic gas reservoir characteristics and prediction of gas-bearing favorable zone of the Xujiahe Formation in central Sichuan Basin: case study of the 2nd member of Xujiahe Formation in Anyue-Moxi areas [J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(3): 358-368.
- [25] 杨雨, 谢继容, 曹正林, 等. 四川盆地天府气田沙溪庙组大型致密砂岩气藏形成条件及勘探开发关键技术[J]. 石油学报, 2023, 44(6): 917-932.
Yang Yu, Xie Jirong, Cao Zhenglin, et al. Forming conditions and key technologies for exploration and development of large tight sandstone gas reservoirs in Shaximiao Formation, Tianfu Gas Field of Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(6): 917-932.
- [26] 肖尧, 王锦西, 肖柏夷, 等. 四川盆地天府含气区侏罗系沙溪庙组一段致密砂岩储层特征及主控因素[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(11): 1916-1926.
Xiao Yao, Wang Jinxi, Xiao Baiyi, et al. Characteristics and main controlling factors of tight sandstone reservoir in the first member of Jurassic Shaximiao Formation in Tianfu gas-bearing area, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(11): 1916-1926.
- [27] 孙海涛, 钟大康, 王威, 等. 四川盆地马路背地区上三叠统须家河组致密砂岩储层成因分析[J]. 沉积学报, 2021, 39(5): 1057-1067.
Sun Haitao, Zhong Dakang, Wang Wei, et al. Origin analysis of a tight sandstone reservoir for the Xujiahe Formation of the Upper Triassic at the Malubei area in the Sichuan Basin, China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(5): 1057-1067.
- [28] 李王鹏, 刘忠群, 胡宗全, 等. 四川盆地川西坳陷新场须家河组二段致密砂岩储层裂缝发育特征及主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(4): 884-897, 1010.
Li Wangpeng, Liu Zhongqun, Hu Zongquan, et al. Characteristics of and main factors controlling the tight sand stone reservoir fractures in the 2nd member of Xujiahe Formation in Xinchang area, western Sichuan Depression, Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(4): 884-897, 1010.
- [29] Yan J P, He X, Geng B, et al. Multifractal features of NMR T spectrum and its application in pore structure evaluation [J]. Applied Geophysics, 2017, 14(2): 205-215, 322.
- [30] Zhang Z, Weller A. Fractal dimension of pore-space geometry of an Eocene sandstone formation [J]. Geophysics, 2014, 79(6): 377-387.
- [31] 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院. 油气储层评价方法: SY/T 6285—2011 [S]. 北京: 石油工业出版社, 2011.
Exploration and Development Research Institute of Daqing Oilfield Co., Ltd., Petroleum Exploration and Development Research Institute of China Petroleum & Chemical Corporation, Exploration and Development Research Institute of China National Petroleum Corporation. Evaluating methods of oil and gas reservoirs: SY/T 6285—2011 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.