



引文格式: 王波, 郭强, 王春伟, 等. 基于低场核磁共振的致密储层孔隙结构特征及流体可动性研究: 以敦煌盆地五墩凹陷侏罗系为例[J]. 西北地质, 2024, 57(5): 156–165. DOI: 10.12401/j.nwg.2024041

Citation: WANG Bo, GUO Qiang, WANG Chunwei, et al. Pore Structure Characteristics and Fluid Mobility of Tight Reservoir Based on Nuclear Magnetic Resonance: A Case Study of Jurassic in Wudun Sag, Dunhuang Basin[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(5): 156–165. DOI: 10.12401/j.nwg.2024041

基于低场核磁共振的致密储层孔隙结构特征及流体可动性研究: 以敦煌盆地五墩凹陷侏罗系为例

王波¹, 郭强², 王春伟^{3,*}, 侯瑞卿⁴, 孙鑫³, 郭涛⁴, 陈伟⁴

(1. 中石油吐哈油田分公司开发事业部, 新疆 哈密 839000; 2. 中国石油玉门油田分公司勘探开发研究院, 甘肃 酒泉 735019; 3. 中石化经纬有限公司地质测控技术研究院, 山东 青岛 266000; 4. 中石化经纬有限公司胜利地质录井公司, 山东 东营 257000)

摘要: 致密储层孔喉细小, 流体可动性评价难度大, 影响着致密油藏储层物性表征及开发潜力分析。本研究针对敦煌盆地五墩凹陷侏罗系致密储层岩心, 采用低场核磁共振技术, 结合 XRD 全岩矿物分析、铸体薄片与扫描电镜照片, 系统梳理了核磁共振 T2 谱与孔喉半径的对应关系, 实现了致密储层孔径定量表征, 阐明了储层孔喉分布特征, 并明确了不同孔隙结构的流体可动性。结果表明: 五墩凹陷核磁共振 T2 谱多为双峰型, 左峰优势型占 65%, 双峰均势型占 35%, 粒间孔半径为 $6 \times 10^{-3} \sim 600 \times 10^{-3} \mu\text{m}$, 溶蚀孔半径为 $0.6 \sim 4 \mu\text{m}$, 微裂缝半径大于 $4 \mu\text{m}$; 各井孔喉半径分布差异大: XC1 井以粒间孔优势型为主, 溶蚀孔比例变化大, D1 井均为粒间孔优势型, 孔喉半径分布曲线形态变化较小, D2 井发育粒间孔优势型及双孔均势型, 粒间孔、溶蚀孔比例变化大, DX3 井为双孔均势型, 整体信号强度小; 通过对饱和水、束缚水及残余油状态的岩心进行核磁测试, 反映出溶蚀孔对流体可动性的贡献大。五墩凹陷后期的勘探方向为寻求孔隙结构发育程度及溶蚀孔比例“双高”的井区。研究成果对于该区致密油藏的勘探与开发具有重要的指导意义。

关键词: 致密油藏; 五墩凹陷; 核磁共振; 孔隙结构; 流体可动性

中图分类号: P618.12

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)05-0156-10

Pore Structure Characteristics and Fluid Mobility of Tight Reservoir Based on Nuclear Magnetic Resonance: A Case Study of Jurassic in Wudun Sag, Dunhuang Basin

WANG Bo¹, GUO Qiang², WANG Chunwei^{3,*}, HOU Ruiqing⁴, SUN Xin³, GUO Tao⁴, CHEN Wei⁴

(1. Development Department, Tuha Oilfield Company, petrochina, Hami 839000, Xinjiang, China; 2. Research Institute of Exploration and Development, Yumen Oilfield Company, petrochina, Jiuquan 735019, Gansu, China; 3. Research Institute of Geological Measurement and Control Technology, Sinopec Jingwei Co., LTD., Qingdao 266000, Shandong, China; 4. Shengli Geological Logging Company, Sinopec Jingwei Co., LTD., Dongying 257000, Shandong, China)

收稿日期: 2023-03-17; 修回日期: 2023-07-26; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 国家重点研发计划项目“油/水/固界面浸润调控智能流体提高采收率关键材料与机理研究”(2019YFA0708700)。

作者简介: 王波(1991-), 男, 工程师, 主要从事油田开发工作。E-mail: taylor_88888@163.com。

* 通讯作者: 王春伟(1988-), 男, 工程师, 主要从事非常规油气研究与评价工作。E-mail: 584019559@qq.com。

Abstract: The pore throat of tight reservoir is small, and the fluid mobility evaluation is difficult, which affects the characterization of tight reservoir physical properties and development potential analysis. In this study, low-field nuclear magnetic resonance technology was applied to the Jurassic tight reservoir core in the Wudun Sag of Dunhuang Basin, combining with XRD whole-rock mineral analysis, cast thin section and scanning electron microscope photos to systematically clarify the corresponding relationship between NMR T_2 spectrum and pore throat radius, thus realizing the quantitative characterization of tight reservoir pore diameter and illustrating the distribution characteristics of pore throat. The fluid mobility of different pore structures is also defined. The results show that the NMR T_2 spectra of Wudun sag are mainly bimodal, with the left peak dominant type accounting for 65% and the bimodal equilibrium type accounting for 35%. The radius of intergranular pore is $6 \times 10^{-3} \sim 600 \times 10^{-3} \mu\text{m}$, the radius of dissolution pore is $0.6 \sim 4 \mu\text{m}$, and the radius of microfracture is greater than $4 \mu\text{m}$. The distribution of pore throat radius varies greatly among all Wells: XC1 is dominated by intergranular pore dominance with large change in the proportion of dissolved pore; D1 is dominated by intergranular pore dominance with small change in the distribution curve of pore throat radius; D2 is characterized by intergranular pore dominance and double pore equilibrium with large change in the proportion of intergranular pore and dissolution pore; DX3 is characterized by double pore equilibrium with small overall signal intensity; Through the nuclear magnetic test of saturated water, bound water and residual oil state of the core, it shows that the contribution of the dissolution hole to the fluid mobility is great. The exploration direction of the late Wudun sag is to seek for the well area with the development degree of pore structure and the proportion of dissolution holes "double high". The above results and understanding have important guiding significance for the exploration and development of tight oil reservoirs in this area.

Keywords: tight oil reservoir; Wudun depression; nuclear magnetic resonance; pore structure; fluid mobility

随着致密油藏研究评价技术的日益丰富(程秀花等, 2022), 国内主要油田已经逐步开展致密油藏勘探开发并逐渐成为后期增储上产的主要阵地之一(周能武等, 2021; 姜亭等, 2022)。但致密油藏储层物性差, 孔喉半径小, 流体可动性差等客观条件不利于后期油气开采(罗群等, 2022)。近年来, 核磁共振技术已被前人引用至地质研究领域, 它能清晰展示储层的储集空间特征, 实现微观孔隙的高分辨率测量与分析, 展示了其在致密储层孔隙结构与流体可动性研究方面具有良好的应用前景(付瑜等, 2020; 刘成等, 2022)。国内学者采用低场核磁共振技术结合离心实验确定了有效渗流喉道半径下限(任颖惠等, 2017), 阐明了致密砂岩油藏的微观孔隙结构与可动流体之间的关系(吴松涛等, 2019), 研究了致密储层不同储集空间类型半径边界与开发潜力(张庆辉等, 2021)。

自2014年以来, 在敦煌盆地五墩凹陷侏罗系地层发现了致密油藏, 并相继部署了XC1、D1、D2及DX3等4口预探井, 均见到了油斑、荧光等不同程度的油气显示, 除D2井油气显示级别低且油层薄未进

行测试, XC1、D1及DX3井压裂后在侏罗系地层分别获 12.1 m^3 、 7.4 m^3 、 1.4 m^3 的低产油流。前人对五墩凹陷侏罗系致密油层展开了相关研究, 梳理了五墩凹陷侏罗系的有利的致密油成藏地质条件, 并对该区储层致密化过程进行了研究分析, 明确了储层致密是制约该区油气勘探与开发的重要因素(张学才等, 2017; 蔡利飘等, 2022)。但目前对五墩凹陷储层孔隙结构特征及流体可动性认识不清, 制约着该区产能潜力分析及下一步的勘探开发。因此, 笔者以五墩凹陷侏罗系为研究对象, 以区内预探井岩心资料为基础, 通过应用核磁共振技术, 结合扫描电镜、岩心驱替等分析化验资料, 系统剖析致密储层的微观孔隙结构特征, 并对其内部流体的赋存状态进行分析, 从而确定流体可动用的喉道半径下限, 为研究区后续的勘探开发提供地质依据。

1 地质背景

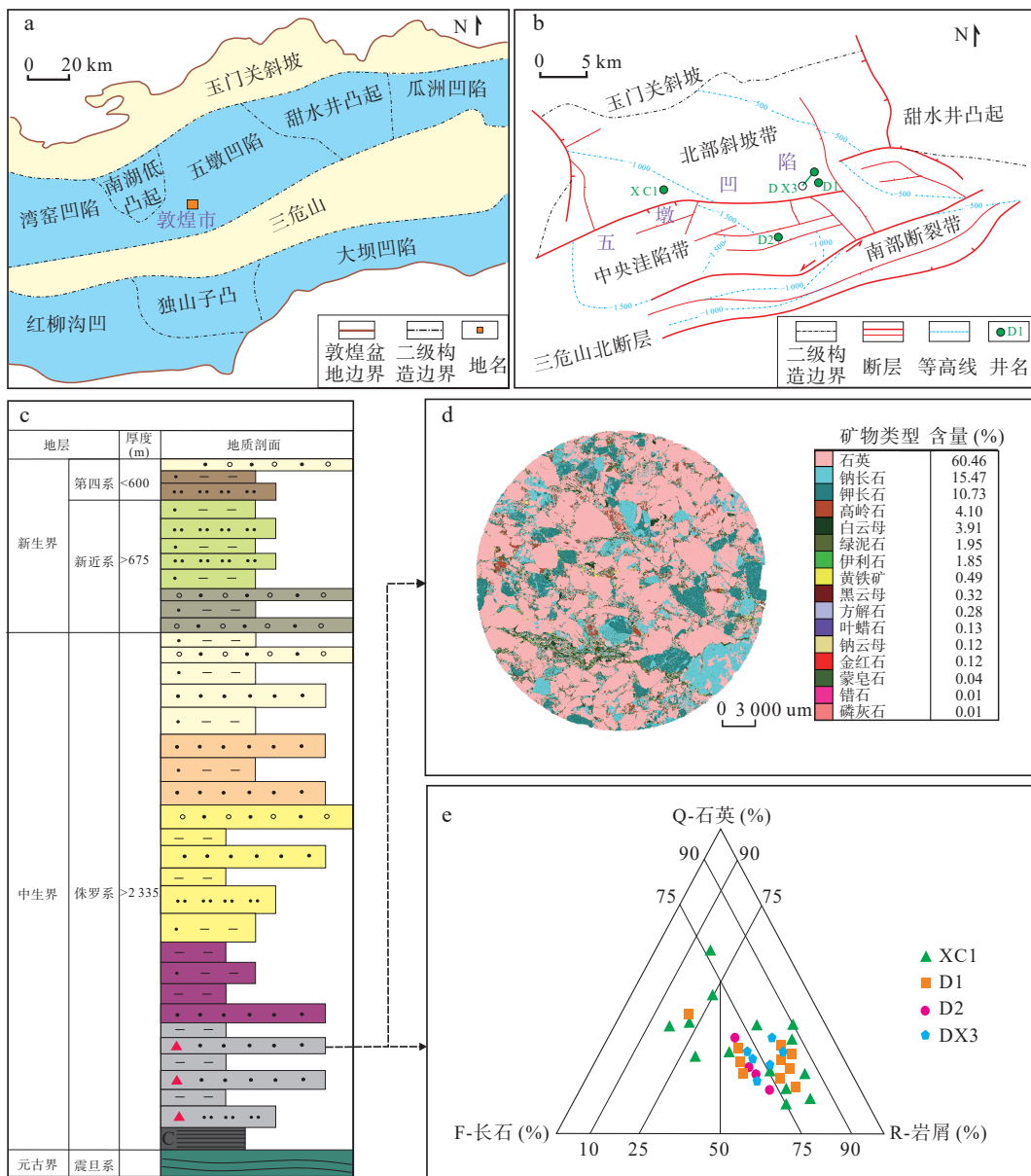
敦煌盆地构造位置位于祁连山造山带、东天山造

山带之间,是中新世改造的残留盆地。五墩凹陷位于敦煌盆地中东部,西边紧靠南湖低凸起,北部为玉门关斜坡,东边临近甜水井凸起,南部为三危山(图 1a)。五墩凹陷为陆相断陷湖盆沉积,内部划分为中央洼陷带、北部斜坡带及南部断裂带(图 1b),地层以第四系、新近系和侏罗系沉积为主,基底为元古界(图 1c)。辫状河三角洲及扇三角洲沉积砂体为侏罗系主要发育的储层成因类型,岩石类型为岩屑砂岩、砂砾岩,岩石成分主要为石英、长石,变质岩岩屑、泥质杂基、砾石成分含量高,胶结物以泥质为主,成分及

结构成熟度低(图 1d、图 1e)(董艳蕾等, 2021)。主力油层段孔隙度为 $1.07\% \sim 11.30\%$, 渗透率为 $0.01 \times 10^{-3} \sim 5.95 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 属于致密储层。五墩凹陷侏罗系广泛发育优质生油岩,致密砂岩夹与生油岩之间,源储一体,圈闭类型多、规模大,构造、地层及潜山圈闭总面积为 205 km^2 , 成藏条件有利(曹力伟等, 2018)。

2 样品与实验

(1) 实验样品: 来自五墩凹陷 4 口重点探井侏罗



a.构造位置图; b.内部构造划分图; c.地质剖面图; d.岩石矿物扫描图; e.岩石类型三角图

图1 五墩凹陷基本地质情况

Fig. 1 Basic geological condition of Wudun depression

系地层主力油层岩心, 每口井选取 4~5 块具有代表性的岩心, 共计 17 块样品(表 1)。岩心切割采用 DK7732B 型岩心切割仪, 能够满足标准岩心柱切割。

测试样品均为砂岩、砂砾岩, 储层特征相近, 统一规格为直径 2.5 cm、长 5 cm 的标准岩心柱体, 以便实验对比。

表 1 五墩凹陷核磁共振测试样品
Tab. 1 NMR test samples of Wudun depression

井号	样品编号	深度 (m)	岩性	孔隙度 (%)	渗透率 ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)
XC1	XC1-1	2 293.2	灰色油斑砾状砂岩	4.90	0.24
	XC1-2	2 293.5	灰色油斑砂砾岩	5.06	0.05
	XC1-3	2 294.7	灰色油斑砂砾岩	3.83	0.25
	XC1-4	2 349.3	灰色荧光中砾岩	7.08	0.11
	XC1-5	2 356.4	灰色荧光细砾岩	11.30	3.89
D1	D1-1	1 923.6	灰色油斑含砾细砂岩	6.99	0.36
	D1-2	1 926.6	灰色油斑含砾细砂岩	3.07	0.06
	D1-3	1 928.8	灰色油斑含砾细砂岩	7.39	2.73
	D1-4	1 930.3	灰色油斑含砾细砂岩	6.66	0.17
D2	D2-1	2 270.0	灰色荧光含砾中砂岩	8.19	0.06
	D2-2	2 272.5	灰色油斑含砾细砂岩	10.15	0.18
	D2-3	2 363.0	灰色砂砾岩	2.71	0.01
	D2-4	2 397.0	灰色砂砾岩	4.67	0.01
DX3	DX3-1	2 015.8	灰色荧光含砾细砂岩	4.47	0.03
	DX3-2	2 140.0	灰色油斑砂砾岩	8.28	5.95
	DX3-3	2 147.0	灰褐色油浸含砾细砂岩	7.78	1.34
	DX3-4	2 251.0	灰色荧光含砾细砂岩	5.60	0.15

(2)实验设备: 核磁共振测试仪器为苏州纽迈分析仪器股份有限公司生产的型号为 MacroMR12-150H-I。实验还需要借助岩心驱替装置进行饱和水、油驱水及水驱油过程, 岩心驱替装置型号 SY-DQT-2, 实验压力可达 40 MPa, 流量为 0.1~20 ml/min, 温度可达 120 ℃。

(3)实验原理: 低场核磁共振技术为通过测定岩石孔隙流体中氢核(^1H)的核磁共振信号强度与岩石孔隙固体表面之间的相互作用过程(表面弛豫), 来分析储层孔隙结构、孔隙度及油水饱和度等参数(于春勇等, 2021; 孙中良等, 2022)。它可以提高样品孔隙测量范围, T_2 谱的反演从 0.01 ms 开始, 相当于 7.35 nm 的微孔隙, 这样就将孔隙尺度分辨率提高到 8 nm, 满足了纳米级页岩储层评价的需要(张磊等, 2018)。

(4)实验方法: 整个实验过程共分为两个阶段。第一阶段为将岩心进行洗油、洗盐、烘干、抽真空加压饱和水等过程, 再直接对所有样品进行核磁共振测

试, 聚类分析, 总结孔隙结构分布规律。通过整理分析核磁共振实验数据, 结合铸体薄片、扫描电镜分析对孔隙结构的定性判断, 对不同构造区域位置及不同孔隙结构特征进行系统归类及差异分析, 对比确定孔隙结构的分布特征。

第二阶段为选定不同孔隙结构的样品, 先用岩心驱替装置将样品饱和地层水, 进行核磁共振测试, 得到反映整体储集空间的核磁共振谱图; 然后利用岩心驱替装置进行模拟油(采用的模拟油不含氢核, 核磁共振测试时不产生信号)驱替饱和地层水样品, 至产出液不含水时对样品进行核磁共振测试, 得到束缚水状态下的核磁共振图谱; 最后利用岩心驱替装置进行地层水驱替油驱后的样品, 至产出液不含油时对样品进行核磁共振测试, 测得残余油状态下的核磁共振谱图(肖文联等, 2021; 付兰清等, 2023)。通过对饱和和地层水状态、束缚水状态及残余油状态的核磁共振图谱对比分析, 确定孔隙结构与流体可动性的关系。

3 结果与讨论

3.1 核磁共振 T₂ 谱形态分析

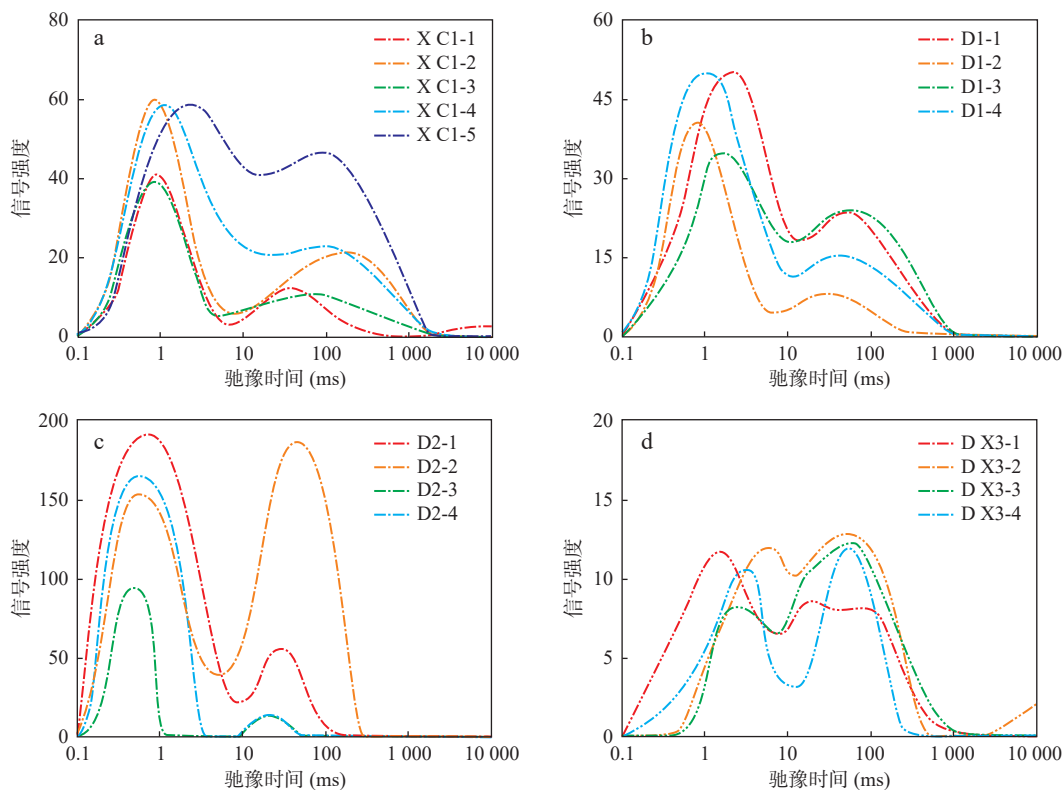
由第一阶段核磁共振测试结果,经过不同样品的形态对比统计(图 2),五墩凹陷岩心样品核磁共振 T₂ 谱均不发育单峰型,主要为双峰型,其中左峰展布范围为 0.1~10 ms,右峰展布范围为 10~1 000 ms。除了 DX3-1 样品右峰范围较宽,大体呈平台状以外,其他均为明显的尖峰状。根据双峰的形态可进一步分为左峰优势型及双峰均势型:

(1)左峰优势型。左峰峰值明显高于右峰,对应 D1 井的全部样品、XC1 及 D2 井大部分样品、DX3-1 样品,比例高达 65%。同一口井内样品左峰峰值的信

号强度相近,不同井的左峰峰值的信号强度不同:XC1 井及 D1 井最大信号强度介于 32~60;D2 井峰值信号强度明显较大,达 95~192;DX3-1 样品峰值信号强度明显较小,只有 12。

(2)双峰均势型占 35%。左峰与右峰峰值相差不大,有的右峰较左峰稍大一点,对应 DX3 井大部分样品、XC1-5 样品、D2-2 样品,比例为 35%。D2-2 样品峰值信号强度为 190;XC1-5 样品峰值信号强度为 59;DX3 井样品峰值信号强度明显较小,介于 11~12.5。

此外,双峰型曲线的 XC1-1 及 DX3-2 样品最高弛豫时间达 10 000 ms 以上仍未出现峰值,大于该值的信号响度未能在实验中完整呈现,超出量程。核磁共振测试结果反映五墩凹陷侏罗系致密储层非均质性强,储集空间复杂多变(高强勇等, 2021; 宁凡等, 2022)。



a.XC1 井样品; b.D1 井样品; c.D2 井样品; d.DX3 井样品

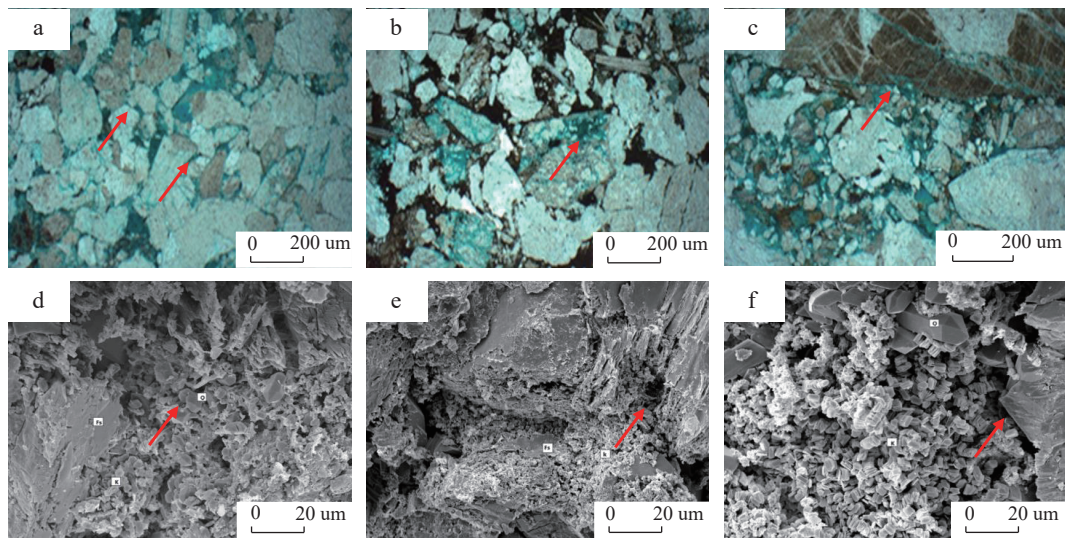
图2 五墩凹陷样品核磁共振测试结果

Fig. 2 NMR test results of Wudun sag samples

3.2 核磁共振 T₂ 谱的向孔喉半径谱转换

要明确五墩凹陷致密储层的孔喉分布特征,首先要对五墩凹陷致密储层的主要储集空间大小进行定性判定,初步确定不同储集空间发育的相对规模。从五墩凹陷致密砂岩铸体薄片及扫描电镜照片中可以

看出,五墩凹陷主要发育粒间孔、溶蚀孔及微裂缝 3 种主要的储集空间(图 3)。粒间孔呈多边形产出,整体半径较小,在矿物颗粒周围均匀展布;微裂缝为条带状形态展布,整体半径较大,虽然规模较大但发育程度不高,偶尔可见;溶蚀孔主要受溶蚀作用控制,形



a.XC1井铸体薄片, 2249 m, 粒间孔; b.XC1井铸体薄片, 2293 m, 溶蚀孔; c.XC1井铸体薄片, 2356 m, 微裂缝;
d.D1井扫描电镜, 1924 m, 粒间孔; e.D1井扫描电镜, 1924 m, 溶蚀孔; f.D1井扫描电镜, 1924 m, 微裂缝

图3 五墩凹陷致密砂岩铸体薄片及扫描电镜照片

Fig. 3 Thin section and SEM of tight sandstone cast in Wudun depression

状不规则, 整体半径居中, 主要为微米级, 不同深度范围溶蚀孔发育程度相差较大。通过定性对比分析, 粒间孔、溶蚀孔及微裂缝的孔喉半径由小变大。

前人对应用高压压汞等资料对核磁共振 T_2 谱定量表征孔隙结构的分布做了大量研究, 并依据核磁共振的基本原理, 总结出了核磁共振 T_2 谱的向孔喉半径谱转换的经验公式:

$$r = \rho F_s T_2 \quad (1)$$

式中: r 为孔隙半径, 单位为 nm ; ρ 为表面弛豫率, 单位为 nm/ms , 研究区样品平均表面弛豫率 2 nm/ms ; F_s 为形状因子, 对于粒间孔取 $F_s=3$, 对于溶蚀孔和微裂缝取 $F_s=2$; T_2 为弛豫时间, 单位为 ms 。

利用公式(1)得到孔喉半径谱图(图4), 考虑到粒间孔、溶蚀孔和微裂缝相互之间的半径差异及核磁共振谱图中曲线的连续性, 在核磁共振 T_2 谱的向孔喉半径谱转换后, 能划分五墩凹陷致密储层的粒间孔、溶蚀孔和微裂缝(井康康等, 2021)。

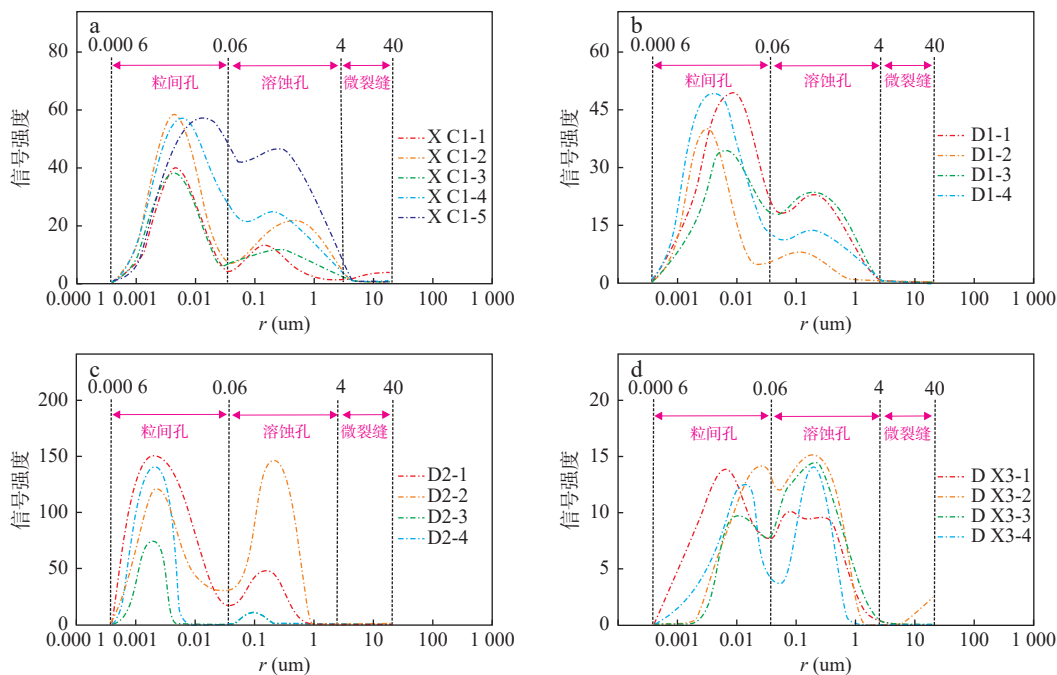
3.3 孔喉半径分布特征

(1)整体特征。从五墩凹陷样品储层孔喉半径分布(图4)中可以看出, 粒间孔、溶蚀孔、微裂缝从曲线上三峰边界区分明显, 粒间孔半径主要分布于 $6 \times 10^{-3} \sim 600 \times 10^{-3} \mu\text{m}$, 溶蚀孔半径主要分布区间为 $0.6 \sim 4 \mu\text{m}$, 微裂缝半径则大于 $4 \mu\text{m}$ 。各岩心样品中粒间孔、溶蚀孔普遍发育, 但只有 XC1-1 及 DX3-2 岩心样品发育少量微裂缝, 其余岩心样品未见。整体来看, 五墩凹

陷储集空间中发育程度最高的为粒间孔, 微裂缝最低, 溶蚀孔介于两者之间, 主要发育粒间孔优势型及双孔均势型模式。

(2)单井特征。根据不同井的样品对比可知, 四口井受平面位置及主力油层埋深差异, 导致岩心孔喉半径分布特征各不相同。XC1井样品以粒间孔优势型为主, 粒间孔比例相对稳定, 溶蚀孔比例变化大, 信号强度居中, 孔隙度整体不高且受溶蚀孔变化影响较大; D1井样品均为粒间孔优势型, 粒间孔、溶蚀孔比例相对稳定, 孔喉半径分布曲线形态、峰值及孔喉半径大变化较小, 因信号强度居中且溶蚀孔比例小, 孔隙度整体较低; D2井样品有粒间孔优势型及双孔均势型, 粒间孔、溶蚀孔比例变化大, 部分样品溶蚀孔较粒间孔发育多, 信号强度大, 少数样品溶蚀孔比例高的样品孔隙度高, 大部分样品溶蚀孔比例低的样品孔隙度不高; DX3井为以双孔均势型为主, 样品粒间孔、溶蚀孔比例变化不大, 溶蚀孔比例较其他井高, 但其因为信号强度小, 整体孔隙度也不高。孔隙度主要受到溶蚀孔比例及信号强度的影响, 溶蚀孔比例高及信号强度大的样品孔隙度高。

(3)差异分析。分别选取粒间孔优势型、双孔均势型代表样品 D1-4、DX3-4, 利用 XRD 全岩矿物分析、铸体薄片及扫描电镜分别对矿物组分及储集空间进行对比, 探讨引起孔喉半径特征不同的原因。五墩凹陷侏罗系溶蚀作用主要表现为长石的溶蚀, 长石由于



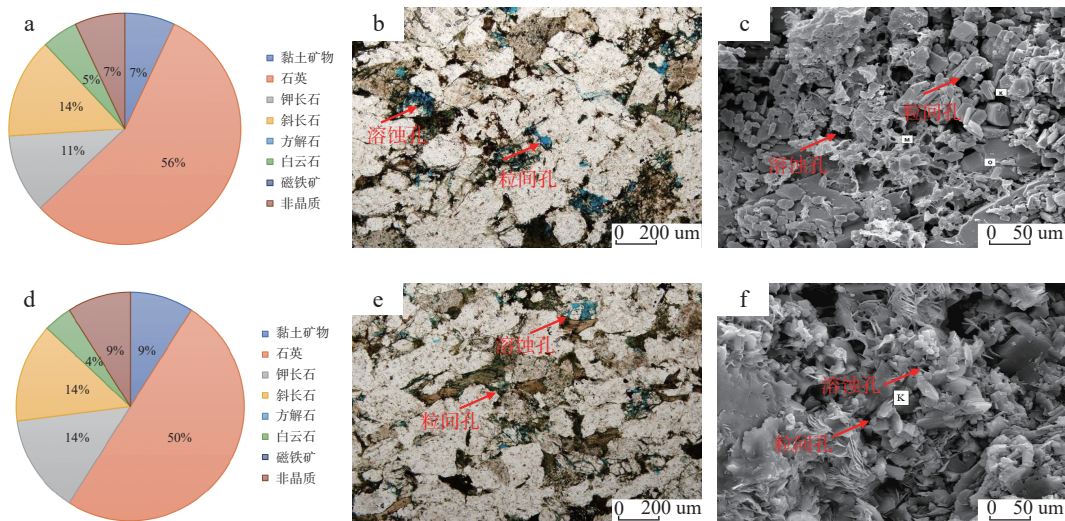
a.XC1 井; b.D1 井; c.D2 井; d.DX3 井

图4 五墩凹陷样品储层孔喉半径分布

Fig. 4 Distribution of pore throat radius of sample reservoir in Wudun Sag

解理发育, 容易形成较多的溶蚀孔(王俊等, 2021)。与粒间孔优势型相比, 双孔均势型钾长石含量高, 整

体储集空间小, 溶蚀孔比例高(图5), 由于不同样品矿物组分及孔隙类型不同, 造成孔喉半径特征差异化。



a.D1-4 全岩矿物占比; b.D1-4 铸体薄片; c.D1-4 扫描电镜; d.DX3-4 全岩矿物占比; e.DX3-4 铸体薄片; f.DX3-4 扫描电镜

图5 D1-4 与 DX-3 样品岩矿组分及储集空间对比

Fig. 5 Distribution of pore throat radius of sample reservoir in Wudun Sag

3.4 流体可动性研究

选取 D1-4、DX3-4 样品进行第二阶段核磁共振测试以确定流体可动性, 将 3 种状态的岩心进行核磁测试, 并转换为孔喉半径谱图(图6)。用饱和水状态的孔喉半径曲线减去束缚水状态的孔喉半径曲线可以

得到可动流体饱和度, 残余油状态的孔喉半径曲线减去束缚水状态的孔喉半径曲线可以得到可动油饱和度。

从不同样品 3 种状态下核磁测试转换结果图中可以看出, 孔喉半径越大, 残余油状态的包络线与饱

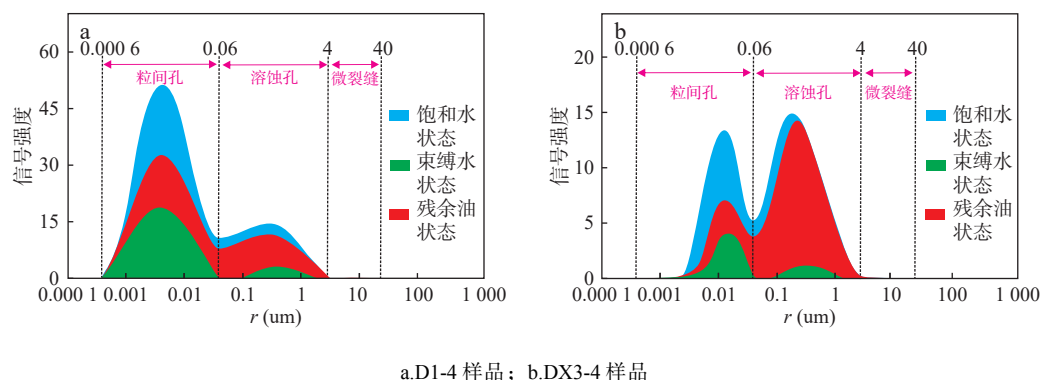


图6 不同样品3种状态下核磁测试转换结果

Fig. 6 Conversion results of NMR test under three states of different samples

和水状态的包络线越相近,当孔喉半径 $>0.6\text{ }\mu\text{m}$ 时已接近于重合状态;粒间孔优势型束缚水状态包络面积较双孔均势型更大,反映出粒间孔优势型束缚水更多,流体可动性相对较差。在孔隙度相近的情况下,双孔均势型较粒间孔优势型可动流体饱和度及可动油饱和度更大,反映出相比于半径小的粒间孔,半径较大的溶蚀孔对流体可动性的贡献大。

综合上述分析,五墩凹陷3口井压裂试油均为低产油层,从基于核磁共振的致密储层孔隙结构特征及流体可动性评价来看,XC1井、D1井主要为粒间孔优势型,溶蚀孔比例低,可动流体饱和度及可动油饱和度较低,而DX3井虽然为双孔均势型,溶蚀孔比例较高,但其核磁信号强度最小,整体储层孔隙结构发育程度低,试油效果均不理想。后期勘探中应可能寻找储层孔隙结构发育程度及溶蚀孔比例“双高”的井区,依托水平井结合分段压裂技术求产,尽可能增大改造体积,扩大泄油面积,以求获得工业油流(侯娟等, 2021; 马凤春等, 2021),实现五墩凹陷致密油勘探突破。

4 结论

(1)五墩凹陷岩心样品核磁共振 T_2 谱主要为双峰型,其中左峰优势型占65%,双峰均势型占35%。依据核磁共振 T_2 谱的向孔喉半径谱转换的经验公式,结合粒间孔、溶蚀孔和微裂缝相互之间的半径差异及核磁共振谱图中曲线的连续性,在核磁共振 T_2 谱的向孔喉半径谱转换后,划分了五墩凹陷致密储层的粒间孔、溶蚀孔和微裂缝。粒间孔半径主要分布于 $6\times 10^{-3}\sim 600\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}$,溶蚀孔半径主要分布区间为 $0.6\sim 4\text{ }\mu\text{m}$,微裂缝半径则大于 $4\text{ }\mu\text{m}$ 。

(2)研究区4口井岩心孔喉半径分布特征各不相同:XC1井样品以粒间孔优势型为主,溶蚀孔比例变化大,孔喉半径大小不稳定;D1井样品均为粒间孔优势型,孔喉半径分布曲线形态、峰值及孔喉半径大变化较小;D2井样品有粒间孔优势型及双孔均势型,粒间孔、溶蚀孔比例变化大;DX3井为双孔均势型,粒间孔半径大小不稳定,溶蚀孔比例较其他井高。

(3)通过对饱和水、束缚水及残余油3种状态的岩心进行核磁测试,发现粒间孔优势型束缚水更多,流体可动性相对较差。在孔隙度相近的情况下,双孔均势型较粒间孔优势型可动流体饱和度及可动油饱和度更大。后期寻找储层孔隙结构发育程度及溶蚀孔比例“双高”的井区,有助于实现五墩凹陷致密油勘探突破。

参考文献(References):

- 蔡利飘,侯旭波,崔红庄,等.敦煌盆地五墩凹陷中侏罗统中间沟组储层致密化过程分析[J].地质科学,2022,57(2): 478-494.
- CAI Lipiao, HOU Xubo, CUI Hongzhuang, et al. Reservoir densification process of Middle Jurassic Zhonggou Formation in Wudun Sag, Dunhuang Basin[J]. Scientia Geologica Sinica, 2022, 57(2): 478-494.
- 曹力伟.敦煌盆地五墩凹陷周缘侏罗系露头沉积特征及油气勘探意义[J].石油地质与工程,2018,32(6): 6-11.
- CAO Liwei. Sedimentary characteristics of Jurassic outcrop around Wudun Sag in Dunhuang Basin and its significance for oil and gas exploration[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2018, 32(6): 6-11.
- 程秀花,李艳广,叶美芳,等.西北地区地质实验测试技术研究进展及其在地质调查中的应用[J].西北地质,2019,55(3):

- 170–190.
- CHENG Xiuhua, LI Yanguang, YE Meifang, et al. Research progress of geological experimental testing technology and its application in geological survey in Northwest China[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 55(3): 170–190.
- 董艳蕾, 朱筱敏, 韦敏鹏, 等. 敦煌盆地五墩凹陷侏罗系层序地层格架与沉积体系分布[J]. *地学前缘*, 2021, 28(1): 177–189.
- DONG Yanlei, ZHU Xiaomin, WEI Minpeng, et al. Distribution of Jurassic sequence stratigraphic framework and sedimentary system in Wudun Sag, Dunhuang Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(1): 177–189.
- 付兰清. 致密砂岩动态渗吸排驱核磁共振在线实验——以松辽盆地北部扶余油层为例[J]. *大庆石油地质与开发*, 2023, 42(3): 66–74.
- FU Lanqing. NMR Online experiment on dynamic imbibition drainage of tight sandstone: A case study of Fuyu Reservoir in northern Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology and Development in Daqing*, 2023, 42(3): 66–74.
- 付瑜, 柳益群, 蒋宜勤, 等. 准噶尔盆地西北缘玛湖凹陷三叠系百口泉组砂砾岩储层孔隙结构及渗流特征[J]. *西北地质*, 2020, 53(2): 223–234.
- FU Yu, LIU Yiqun, JIANG Yiqin, et al. Pore structure and seepage characteristics of sandstone conglomerate reservoir of Triassic Baikouquan Formation in Mahu Sag, Northwest margin of Junggar Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(2): 223–234.
- 高强勇, 王昕, 高建英, 等. 致密岩心核磁共振孔隙度影响因素分析[J]. *测井技术*, 2021, 45(4): 424–430.
- GAO Qiangyong, WANG Xin, GAO Jianying, et al. Analysis of influencing factors of tight core porosity by NMR[J]. *Well Logging Technology*, 2021, 45(4): 424–430.
- 侯娟, 黄帅博, 柯思, 等. 旬宜地区延长组长 7 致密油特征与富集主控因素[J]. *西北地质*, 2021, 54(4): 171–179.
- HOU Juan, HUANG Shuaibo, KE Si, et al. Characteristics and main controlling factors of tight oil enrichment in Chang 7 of Yanchang Formation in Xianyi area[J]. *Northwestern Geology*, 2021, 54(4): 171–179.
- 姜亭, 周俊林, 牛亚卓, 等. 西北公益性油气地质调查进展和展望[J]. *西北地质*, 2022, 55(3): 64–80.
- JIANG Ting, ZHOU Junlin, NIU Yazhuo, et al. Progress and prospect of public welfare petroleum geological survey in Northwest China[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(3): 64–80.
- 井康康, 董旭, 蔺广泉, 等. 低渗储层孔隙结构的分形特征研究——以鄂尔多斯盆地永宁油田顺宁—洛河北区长 6 储层为例[J]. *非常规油气*, 2021(4): 19–25.
- JING Kangkang, DONG Xu, LIN Guangquan, et al. Study on fractal characteristics of pore structure in low permeability reservoir——A case study of Chang6 reservoir in Shunning—Luohe north area in Yongning Oilfield, Ordos Basin[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2021(4): 19–25.
- 刘成, 王栋, 柳雪青, 等. 基于核磁共振技术的大庆油田 X6 东区剩余油分布特征研究[J]. *非常规油气*, 2022, 9(3): 96–102.
- LIU Cheng, WANG Dong, LIU Xueqing, et al. Study on distribution characteristics of residual oil in eastern X6 block of Daqing Oilfield based on nuclear magnetic resonance[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2022, 9(3): 96–102.
- 罗群, 高阳, 张泽元, 等. 中国与美国致密油形成条件对比研究[J]. *石油实验地质*, 2022, 44(2): 199–209.
- LUO Qun, GAO Yang, ZHANG Zeyuan, et al. Comparative study on formation conditions of tight oil in China and the United States[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2022, 44(2): 199–209.
- 马凤春, 陈晓冬, 王琳, 等. 英东油田长井段薄互层油藏储层产能分类及预测研究[J]. *西北地质*, 2021, 54(2): 179–186.
- MA Fengchun, CHEN Xiaodong, WANG Lin, et al. Study on reservoir productivity classification and prediction of thin interbedded reservoir in long well section of Yingdong Oilfield[J]. *Northwestern Geology*, 2021, 54(2): 179–186.
- 宁凡, 赵欣, 邹姐姐, 等. 柴北缘侏罗系大煤沟组砂岩储层孔喉分布特征[J]. *非常规油气*, 2022, 9(3): 42–51.
- NING Fan, ZHAO Xin, ZOU Niuniu, et al. Distribution characteristics of pore throat of sandstone reservoir of Jurassic Dameigou Formation in northern Qaidam Basin[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2022, 9(3): 42–51.
- 任颖惠, 吴珂, 何康宁, 等. 核磁共振技术在研究超低渗-致密油储层可动流体中的应用——以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组为例[J]. *矿物岩石*, 2017, 37(1): 103–110.
- REN Yinghui, WU Ke, HE Kangning, et al. Application of nuclear magnetic resonance technology in the study of mobile fluid in ultra-low permeability and tight oil reservoirs: A case study of Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2017, 37(1): 103–110.
- 孙中良, 李志明, 申宝剑, 等. 核磁共振技术在页岩油气储层评价中的应用[J]. *石油实验地质*, 2022, 44(5): 930–940.
- SUN Zhongliang, LI Zhiming, SHEN Baojian, et al. Application of nuclear magnetic resonance technology in shale oil and gas reservoir evaluation[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2022, 44(5): 930–940.
- 王俊, 黎明, 安超, 等. 渭北油田长 3 储层孔隙结构特征研究[J]. *非常规油气*, 2021, 8(4): 11–18.
- WANG Jun, LI Ming, AN Chao, et al. Study of pore structure charac-

- teristics of Chang3 reservoir in Weibei Oilfield[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2021, 8(4): 11–18.
- 吴松涛, 林士尧, 晁代君, 等. 基于孔隙结构控制的致密砂岩可动流体评价——以鄂尔多斯盆地华庆地区上三叠统长6致密砂岩为例[J]. *天然气地球科学*, 2019, 30(8): 1222–1232.
- WU Songtao, LIN Shiyao, CHAO Daijun, et al. Dynamic fluid evaluation of tight sandstone based on pore structure control: A case study of Upper Triassic Chang 6 tight sandstone in Huaqing area, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2019, 30(8): 1222–1232.
- 肖文联, 杨玉斌, 李闽, 等. 鄂尔多斯盆地不同类型储集层水驱油特征实验[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(4): 807–816.
- XIAO Wenlian, YANG Yubin, LI Min, et al. Experimental study on water flooding characteristics of different types of reservoirs in Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(4): 807–816.
- 张磊, 石军太, 张庆辉, 等. 鄂尔多斯盆地东南部页岩核磁共振实验研究[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(10): 2876–2885.
- ZHANG Lei, SHI Juntao, ZHANG Qinghui, et al. Experimental study on nuclear magnetic resonance of shale in southeastern Ordos Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(10): 2876–2885.
- 于春勇. 富县地区长8致密砂岩储层孔隙结构特征及形成机理[J]. *非常规油气*, 2021, 8(1): 15–25.
- YU Chunyong. Pore structure characteristics and formation mechanism of Chang 8 member tight sandstone reservoir in Fuxian area[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2021, 8(1): 15–25.
- 张庆辉, 张磊, 吴克柳, 等. 基于核磁共振的湖相致密储层储集空间类型特征及开发潜力评价: 以柴达木盆地英西地区为例[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(2): 498–508.
- ZHANG Qinghui, ZHANG Lei, WU Keliu, et al. Reservoir space type characteristics and development potential evaluation of lacustrine tight reservoir based on nuclear magnetic resonance: A case study of Yingxi area, Qaidam Basin[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2021, 52(2): 498–508.
- 张学才, 李家贵, 刘全稳. 甘肃敦煌盆地五墩凹陷致密油成藏地质条件[J]. *地球科学与环境学报*, 2017, 39(2): 248–254.
- ZHANG Xuecai, LI Jiagui, LIU Quanwen. Geological conditions of tight oil accumulation in Wudun Sag, Dunhuang Basin, Gansu Province[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2017, 39(2): 248–254.
- 周能武, 卢双舫, 王民, 等. 中国典型陆相盆地致密油成储界限与分级评价标准[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(5): 939–949.
- ZHOU Nengwu, LU Shuangfang, WANG Min, et al. Reservoir limits and grading evaluation criteria of tight oil in typical continental basins in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(5): 939–949.