

鄂尔多斯盆地致密砂岩储层可动流体 赋存特征及其影响因素

闫健^{1,2},秦大鹏³,王平平³,王海华³

(1.西安石油大学石油工程学院,陕西西安710065; 2.陕西省油气田特种增产技术重点实验室,
陕西西安710065; 3.中国石油长庆油田分公司第六采油厂,陕西西安718600)

摘要:致密砂岩储层流体分布特征复杂,可动流体参数是评价流体分布和渗流特征的关键指标。基于低场核磁共振原理,辅以高压压汞、X-射线衍射和扫描电镜实验,以鄂尔多斯盆地吴起油田长7储层为研究对象,对30块岩心开展可动流体测试分析,将储层划分为I、II和III共3种类型,并建立了分类标准,定量评价了3类储层中不同孔隙半径孔隙内可动流体赋存量,并对可动流体赋存特征的影响因素进行了分析。研究表明:3类储层对应的大孔隙发育程度、孔喉连通性和可动流体赋存量依次降低,可动流体赋存特征存在较大差异,I、II和III类储层可动流体饱和度平均值分别为50.35%、42.00%和21.40%;其中I和II类储层可动流体参数相近,且可动流体赋存量较大,是未来勘探开发的主要方向。可动流体主要赋存于孔隙半径为0.053~0.527 μm的I和II类储层中。渗透率和中值半径是影响储层可动流体特征的主要因素,但I和II类储层可动流体主要还受孔隙度、大孔隙孔隙度、分选系数、有效孔隙度和黏土矿物的影响;而III类储层影响因素多且杂,并未发现明显的主要影响因素。

关键词:致密砂岩;核磁共振;可动流体参数;微观孔隙结构;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE343

文献标识码:A

Occurrence characteristics and main controlling factors of movable fluid in tight sandstone reservoirs in Ordos Basin

YAN Jian^{1,2}, QIN Dapeng³, WANG Pingping³, WANG Haihua³

(1. College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an City, Shaanxi Province, 710065, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Advanced Stimulation Technology for Oil & Gas Reservoirs, Xi'an City, Shaanxi Province, 710065, China; 3. No.6 Oil Production Plant, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an City, Shaanxi Province, 718600, China)

Abstract: The fluid distribution characteristics of tight sandstone reservoir are complicated, and the movable fluid parameters are important to evaluate the fluid distribution and percolation characteristics. Based on the low-field nuclear magnetic resonance (NMR), high pressure mercury injection capillary pressure (MICP), X-ray diffraction, and scanning electron microscope (SEM) experiments, the movable fluid in 30 core samples collected from Chang7 Member of Wuqi Oilfield in Ordos Basin are analyzed. The reservoirs can be divided into three types: I, II and III, and the division standard is established. The amount of movable fluid in the pores with different pore radius of three types of reservoirs is quantitatively evaluated and the influencing factors of the movable fluid are analyzed. The results show that the macropore, pore throat connectivity and the amount of movable fluid decrease in sequence. There are large differences in the occurrence characteristics of movable fluid. The average values of movable fluid saturation in type I, type II and type III reservoirs are 50.35%, 42.00% and 21.40%, respectively. The main direction of exploration and development in the future is type I and II reservoirs, which have a large amount of similar movable fluid. The movable fluid of the target reservoir mainly distribute in the pores with the radius of 0.053~0.527 μm in type I and II reservoirs. Permeability and median radius are the main factors that affect the characteristics of the movable fluid, in type I and II reservoirs, the movable fluid is also affected by porosity, macropore

收稿日期:2020-06-28。

作者简介:闫健(1981—),男,江苏如皋人,副教授,博士,从事油田开发方面的研究工作。E-mail:yanjiangxasy@163.com。

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目“致密气藏开发中气水相渗影响机制及曲线校正”(51404197)。

porosity, sorting coefficient, effective porosity and clay minerals. However, there are many and complex influencing factors in type III reservoir, and no obvious influencing factors have been found.

Key words: tight sandstone; nuclear magnetic resonance (NMR); movable fluid parameters; micropore structure; Ordos Basin

为满足石油战略储备需求,中国能源公司纷纷加大了对致密油气的勘探开发力度。鄂尔多斯盆地是中国第二大致密油气盆地,地跨陕甘宁蒙晋五省区,总面积达 $37 \times 10^4 \text{ km}^2$,具有丰富的致密油气资源,开发潜力巨大^[1-3]。但由于其具有储层物性差、非均质性严重、孔隙结构复杂、微纳孔喉发育等特点,导致自然衰竭开发采收率低下,即使是在水平井和体积压裂技术的帮助下,原油采收率仍然很难超过10%^[4-5]。近些年,中外学者研究发现,致密油储层中部分流体在渗流过程中会被毛管压力和黏滞力等作用力束缚,无法参与流动,只有能够摆脱束缚力参与流动的流体才是真正具有开采价值的资源^[6-8]。而致密砂岩储层复杂的孔隙结构特征又进一步加剧了流体赋存状态的复杂性,导致开发效果很不理想。随着低场核磁共振技术在石油工业中的不断发展和应用,核磁共振具有测试时间短、精度高、无损样品等诸多优点,不但能够直接反映密闭岩心中流体的分布状态,还能定量表征岩心内的微观孔隙结构特征^[9-13]。郭睿良等采用核磁共振技术研究了鄂尔多斯盆地长7储层可动流体分布特征,但是由于研究的岩心样品数很少(仅6块),得出的结论具有很大的局限性,也并未明确可动流体的主要影响因素,不具有现场指导价值^[14]。为此,笔者基于核磁共振可动流体测试原理,以鄂尔多斯盆地吴起油田长7储层为研究对象,选取30块岩心分别开展了可动流体测试和高压压汞实验,在分类归纳的基础上建立了储层分类标准,定量评价了不同孔隙半径孔隙内可动流体赋存量,从储层物性、孔隙半径分布、微观孔隙结构和黏土矿物对可动流体影响因素进行了分析,取得的成果和认识为致密砂岩油藏勘探开发提供了指导和借鉴。

1 实验器材与方法

1.1 实验器材

实验岩心取自吴起油田长7储层21口取心井,岩心主要为细-中粒岩屑质长石砂岩,其次为长石质岩屑砂岩,碎屑组分主要由石英(含量为17.8%~44.6%)、长石(含量为20.2%~46.8%)和岩屑(含量为5.4%~55.2%)构成。孔隙度主要为3.7%~12.01%,平均为7.78%;渗透率主要为0.003~0.223 mD,平均

为0.071 mD。实验用水为根据储层地层水复配的等矿化度盐水,水型为 NaHCO_3 型,矿化度为21 400 mg/L。

实验仪器主要有核磁共振仪和离心机。核磁共振仪为北京斯派克制造的SPEC-RC2型,磁场强度为0.28 T,频率精度为0.01 Hz,最大共振频率为5 MHz。离心机为Core Lab公司制造的Optima L-100XP型超速离心机,最高转速为100 000 r/min,最大离心力为802 400 xg 。

1.2 实验方法

实验前将岩心等体积纵向切割为两半(切割后每块直径不变,长度约为4 cm),清洗烘干后,将其中一块岩心用于核磁共振可动流体测试实验,另一块岩心用于高压压汞测试实验。核磁共振可动流体测试实验的具体步骤为:将岩心放置于高压密闭容器中抽真空72 h,然后向高压容器中注入模拟地层水,并加压至50 MPa饱和岩心7 d。降压取出岩心后,对饱和地层水状态下的岩心进行 T_2 谱采样,然后分别在0.2、0.4、2.0和4.0 MPa离心力下对岩心进行离心实验,并对每个压力下离心后的岩心状态进行 T_2 谱采样。高压压汞测试实验的具体步骤为:将岩心放置于高压压汞仪的岩心室中,逐渐提高注入压力,并记录压力稳定后的压力值和汞注入量。当注入压力能够克服毛管压力时,汞开始进入孔隙,进入孔隙中的汞体积即为该孔喉对应的孔隙体积。

2 实验结果与分析

2.1 储层类型划分

根据研究区长7储层30块岩心饱和地层水后的核磁共振 T_2 谱分布形态和 T_2 表达式^[17-18],可将储层孔隙类型划分为小孔隙(对应 T_2 谱分布左峰)和大孔隙(对应 T_2 谱分布右峰)。同时,还可以进一步划分为I、II和III类储层。其中,I类储层的 T_2 谱分布为典型的右峰高于左峰连续型双峰形态(图1),反映该类储层具有大孔隙较为发育,大孔隙体积占比高,储层物性好,且孔喉之间连通性好的特点。II类储层的 T_2 谱分布为典型的左右两峰峰值相当的连续型双峰形态,且两峰对应弛豫时间所包络的面积基本相等(图2),反映该类储层具有大孔隙和

小孔隙发育程度相当,大、小孔隙体积占比相近,储层物性相对较好,且孔喉之间连通性较好的特点。而Ⅲ类储层的 T_2 谱分布为左峰高于右峰,右峰发育较弱的双峰形态(图3),反映出小孔隙发育程度高、体积占比高,以及孔喉之间连通性差的特点。

通过对3类储层共计30块代表岩心(图1—图3)进行离心后发现,在0.4 MPa离心力作用下, T_2 谱分布均变化较小,且小孔隙对应的振幅变化幅度更

小,说明在此离心力作用下小孔隙和大孔隙中的可动流体含量相对较少。当离心力增加至4.0 MPa后,Ⅰ类和Ⅱ类储层的 T_2 谱形态发生明显变化,即大孔隙对应的右峰下降明显,而小孔隙对应左峰下降幅度较小, T_2 谱形态由右峰高于左峰或两峰相当转变为左峰高于右峰,说明大、小孔隙中均赋存有可动流体,但大孔隙中可动流体赋存量大于小孔隙。而Ⅲ类储层的 T_2 谱分布整体变化较小,说明相

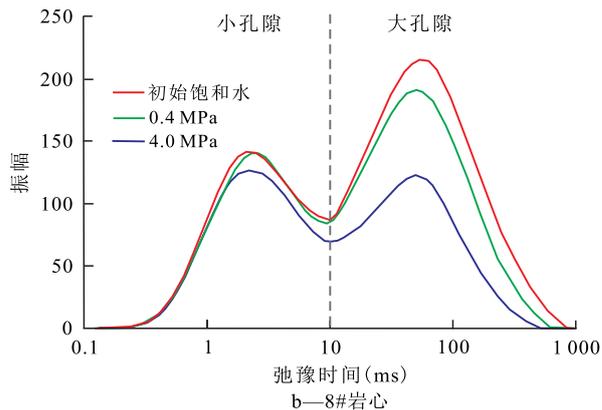
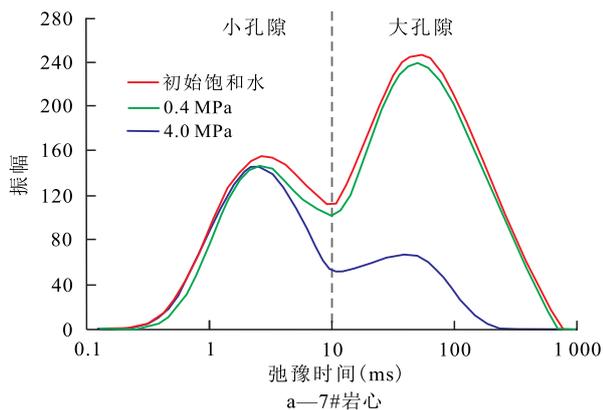


图1 Ⅰ类储层典型岩心离心前后 T_2 谱分布

Fig.1 T_2 spectrum distribution of typical cores of type I reservoir before and after centrifugation

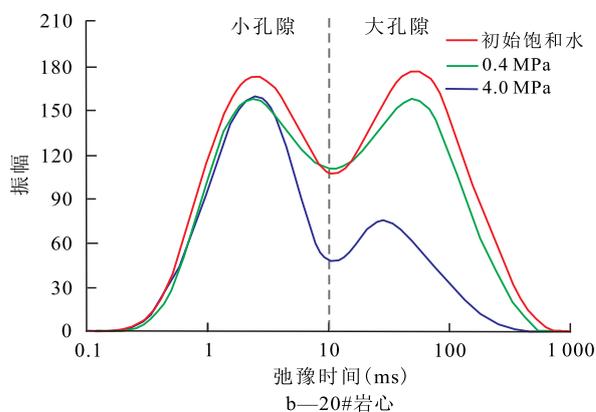
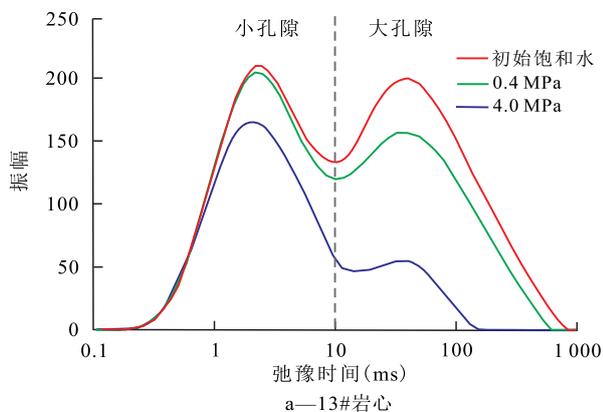


图2 Ⅱ类储层典型岩心离心前后 T_2 谱分布

Fig.2 T_2 spectrum distribution of typical cores of type II reservoir before and after centrifugation

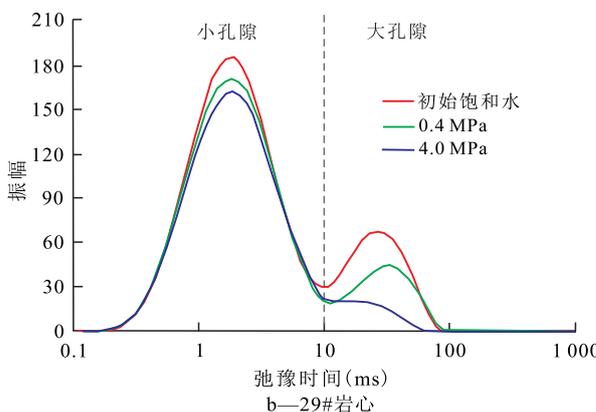
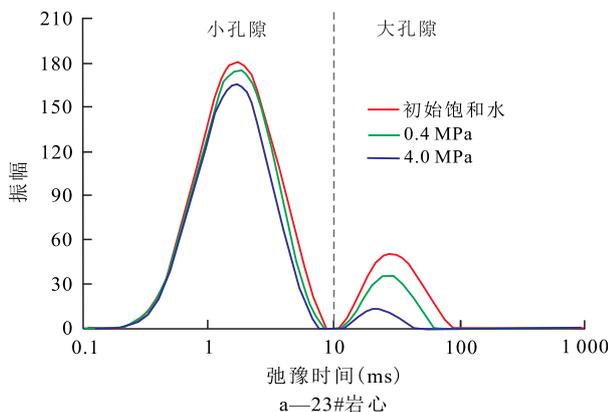


图3 Ⅲ类储层典型岩心离心前后 T_2 谱分布

Fig.3 T_2 spectrum distribution of typical cores in type III reservoir before and after centrifugation

比于前两类储层,Ⅲ类储层中可动流体赋存量小,且大部分孔隙中的流体以束缚态存在于小孔隙中。此外,由图1还发现,代表Ⅰ类储层的7#岩心在4.0 MPa离心力作用后大孔隙对应右峰的下陷幅度明显大于8#岩心中大孔隙对应右峰的下陷幅度,说明8#岩心中部分大孔隙存在死孔隙或孔喉堵塞的现象,导致岩心中某部位的孔喉连通性较差,可动流体无法流动,成为了束缚流体。类似现象还有代表Ⅱ类储层的13#岩心在4.0 MPa离心力作用后小孔隙对应左峰的下陷幅度大于20#岩心中小孔隙对应左峰的下陷幅度,说明13#岩心中部分小孔喉之间连通性较好,其赋存流体在附加离心力作用下能够克服毛管压力顺利流出。因此3种类型储层中的可动流体赋存特征明显不同,而同一类型储层的不同岩心,其可动流体赋存特征也存在较大差异。

2.2 储层可动流体赋存特征

计算和统计3类储层代表岩心离心后可动流体参数(表1)可知,不同类型储层的可动流体参数存在较大差异,Ⅰ类储层可动流体饱和度为31.11%~65.09%,平均值为50.35%;可动流体孔隙度为1.71%~6.02%,平均值为3.98%。Ⅱ类储层可动流体饱和度为26.64%~60.71%,平均值为42.00%;可动流体孔隙度为1.80%~6.74%,平均值为3.66%。Ⅲ类储层可动流体饱和度为11.54%~27.17%,平均值为21.40%;可动流体孔隙度为0.44%~3.11%,平均值为1.62%。综上可知,Ⅰ类和Ⅱ类储层可动流体参数较为接近,可动流体赋存量较大,是未来勘探开发的主要方向。而Ⅲ类储层可动流体参数较差,可动流体赋存量小,不具备开发经济价值。

计算4个离心力对应的动用孔隙半径,结合离

表1 3类储层孔隙结构参数及可动流体参数
Table1 Pore structure parameters and movable fluid parameters of three type reservoirs

储层类型	可动流体参数		孔隙结构参数					不同孔隙半径孔隙内可动流体饱和度(%)			
	可动流体饱和度(%)	可动流体孔隙度(%)	中值压力(MPa)	最大孔喉半径(μm)	中值半径(μm)	平均孔喉半径(μm)	分选系数	0.053~0.105(μm)	0.105~0.527(μm)	0.527~1.055(μm)	>1.055(μm)
Ⅰ类	31.11~65.09 50.35	1.71~6.02 3.98	2.71~12.31 6.86	0.315~1.192 0.62	0.066~0.299 0.17	0.113~0.495 0.295	1.45~3.57 2.55	7.54~18.66 12.42	9.09~37.08 24.47	1.6~15.53 7.13	1.27~15.75 6.31
Ⅱ类	26.64~60.71 42	1.8~6.74 3.66	2.71~18.38 7.99	0.677~1.874 0.981	0.044~0.299 0.154	0.059~0.487 0.278	1.59~3.62 2.71	6.184~14.98 10.23	8.88~21.81 19.49	2.47~15.88 7.92	0.68~7.09 4.36
Ⅲ类	11.54~27.17 21.4	0.44~3.11 1.62	18.66~137.76 43.71	0.037~0.485 0.232	0.006~0.043 0.027	0.043~0.207 0.122	2.42~4.61 3.62	0.3~11.16 5.11	2.27~11.7 7.18	0.72~11.42 4.2	0.42~12.32 4.9

心后 T_2 谱分布可以获得不同孔隙半径孔隙中可动流体饱和度分布特征(表1)。由表1和图4可知,Ⅰ类储层中可动流体主要赋存于孔隙半径为0.105~0.527 μm的孔隙中,其可动流体饱和度平均值达24.47%,其次为孔隙半径为0.053~0.105 μm的孔隙中,其可动流体饱和度平均值为12.42%,即在孔隙

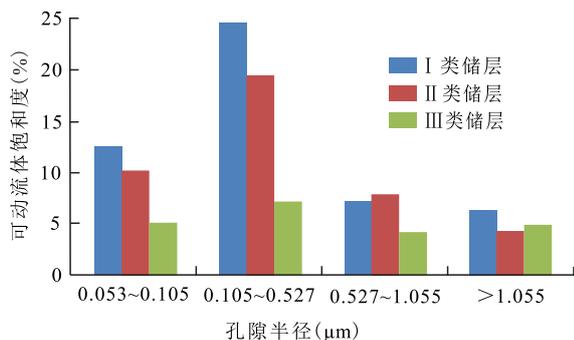


图4 3类储层中不同孔隙半径孔隙内可动流体饱和度分布
Fig.4 Distribution of movable fluid saturation in pores with different sizes in three types of reservoirs

半径为0.053~0.527 μm的孔隙中可动流体赋存量占岩心总可动流体赋存量的73.28%。Ⅱ类储层可动流体分布特征与Ⅰ类储层相似,孔隙半径为0.053~0.527 μm的孔隙中赋存的可动流体赋存量占岩心中总可动流体赋存量的70.77%。而Ⅲ类储层中4类孔隙半径孔隙的可动流体饱和度偏低,且相差较小,孔隙半径为0.053~0.527 μm的孔隙中赋存的可动流体赋存量仅占岩心中总可动流体赋存量的57.43%。由此可进一步得知,可动流体主要赋存于Ⅰ类和Ⅱ类储层中孔隙半径为0.053~0.527 μm的孔隙中,而孔隙半径大于1.055 μm的孔隙中可动流体饱和度较低,这主要是因为岩心样品中孔隙半径大于1.055 μm的孔隙非常少,使得此类孔隙中可动流体赋存量很少,进而导致可动流体饱和度较低。

2.3 储层物性及微观孔隙结构特征

2.3.1 储层物性特征

通过统计3类储层30块代表岩心孔隙度与渗

透率的关系(图5a和表1)可知, I类储层孔隙度主要为5.5%~10%,平均值为7.62%;渗透率主要为0.016~0.17 mD,平均值为0.079 mD。II类储层孔隙度主要分布在6.65%~11.1%,平均值为8.31%;渗透率主要分布在0.020~0.223 mD,平均值为0.107 mD。III类储层孔隙度主要为3.7%~12.01%,平均值为7.4%;渗透率主要为0.003~0.065 mD,平均值为0.026 mD。3类储层的渗透率与孔隙度之间呈一定线性关系,相关系数为0.56~0.65。此外,根据岩心饱和和地层水状态下 T_2 谱分布中大、小孔隙对应弛豫时间所包络的面积之比,可以分别计算出小孔隙和大孔隙的平均孔隙度。由图5b可知,3类储层的平均孔隙度相差较小,但3类储层对应的小孔隙平均孔隙度依次增大,大孔隙平均孔隙度依次降低,说明I类储层中大孔隙较为发育,II类储层中大、小孔隙发育程度相当,而III类储层中小孔隙较为发育。综上可以看出,虽然I类和II类储层物性整体高于III类储层,但储层物性还与微观孔隙结构具有直接关系。

2.3.2 微观孔隙结构特征

通过统计3类储层共计30块代表岩心的高压汞测试结果(图6)可知,III类储层平均阈压为6.01 MPa,远高于I和II类储层的平均阈压(1.68和1.75 MPa),说明汞在较小压力下更容易进入I和II类储层中。与此对应的I和II类储层的最大孔隙半径分别为0.620和0.981 μm ,远大于III类储层的最大孔隙半径0.232 μm 。中值压力代表了非润湿相饱和度在50%时对应的毛管压力,其值越小表明岩石渗滤性越好。由图6a可知,I和II类储层的中值压力相差较小,分别为6.86和7.99 MPa,远小于III类储层的中值压力(43.71 MPa);与此对应的I类和II类储层中值半径为0.17和0.154 μm ,远大于III类储层的中值半径(0.027 μm)。而I和II类储层的平均孔隙半径分别为0.295和0.278 μm ,与III类储层的平均孔隙半径(0.122 μm)却相差较小(图6),说明III类储层的孔隙结构非常复杂,非均质性异常严重。通过对比3类储层的分选系数可知,I和II类储层的平均分选系数分别为2.55和2.71,而III类储

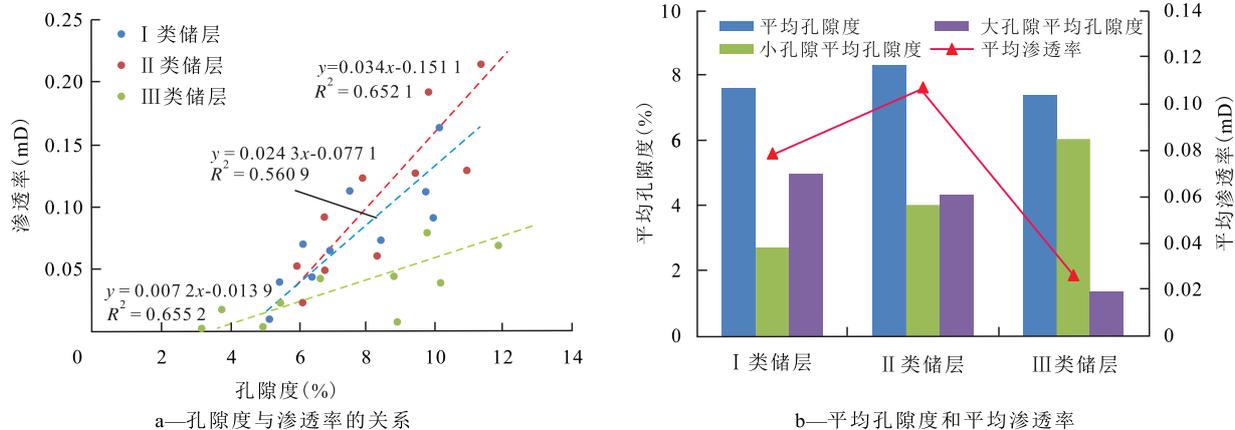


图5 3类储层孔隙度与渗透率特征

Fig.5 Porosity and permeability characteristics in three types of reservoirs

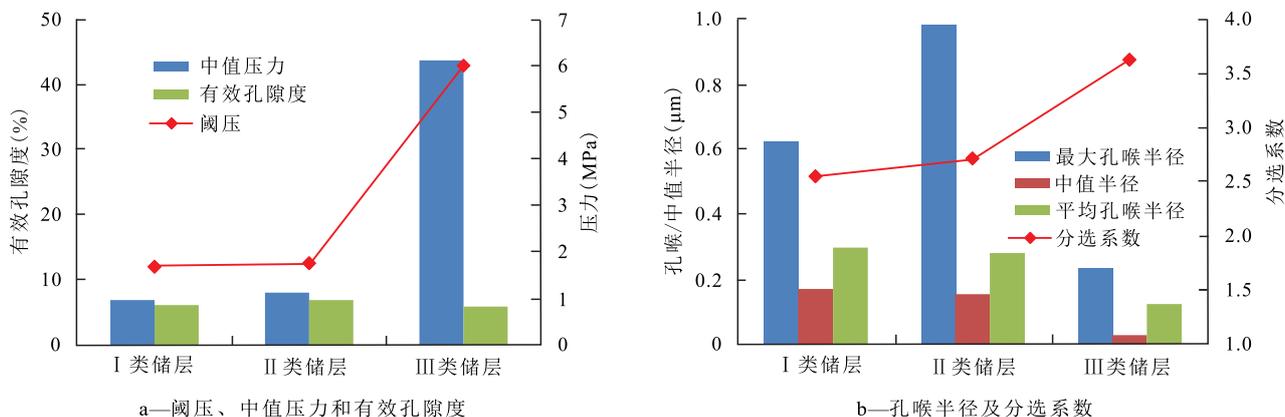


图6 3类储层孔隙结构参数对比

Fig.6 Comparison of pore structure parameters in three types of reservoirs

层的平均分选系数达到3.62,说明Ⅲ类储层孔隙分选程度较差,不同孔隙半径的孔隙和喉道分布分散,也进一步验证了Ⅲ类储层非均质性严重的特点。此外,3类储层有效孔隙度相差较小,这主要是因为岩心样品致密,孔隙体积小,进入孔隙内的汞体积变化量与岩心外观体积相比非常小,导致3类储层之间的差异较小。

3 可动流体赋存特征影响因素

研究区长7储层可动流体参数分布范围广泛,即使是同一取心井同一层位或邻近取心井同一层位的岩心,其可动流体参数都存在明显差异,说明可动流体影响因素极其复杂。为探究储层可动流体赋存特征影响因素,分别选取储层物性、孔隙半径、微观孔隙结构和黏土矿物等参数进行详细分析。

3.1 储层物性

由图7可知,研究区长7储层可动流体饱和度与孔隙度的相关性较差(图7a,黑色虚线),但与渗透率的相关性较高(图7b,黑色虚线),相关系数达

到0.6048,即储层渗透率增大,可动流体饱和度也相应增加。这是因为孔隙度主要表征储层储集空间,而渗透率主要表征孔喉之间的连通程度,也就是说储集空间大的储层不一定可动流体饱和度就高,而可动流体饱和度受孔喉之间连通程度的影响更大。此外,由图7还可以看出不同类型储层的孔隙度和渗透率与可动流体饱和度的相关性也存在差异。Ⅰ和Ⅱ类储层中孔隙度和渗透率与可动流体饱和度均呈现出较高的正相关性,其中渗透率与可动流体饱和度的相关系数达到0.7以上。而Ⅲ类储层的孔隙度和渗透率与可动流体饱和度的相关性较差,甚至低于长7储层整体孔隙度和渗透率与可动流体饱和度的相关性。这说明当储层物性好时,可动流体饱和度的高低同时受到孔隙度和渗透率的影响,但受渗透率的影响程度更大;而当储层物性差时,可动流体饱和度受孔隙度和渗透率的影响较小。

3.2 孔隙半径

图8展示了小孔隙和大孔隙孔隙度对可动流体饱和度的影响。3类储层中可动流体饱和度与大孔

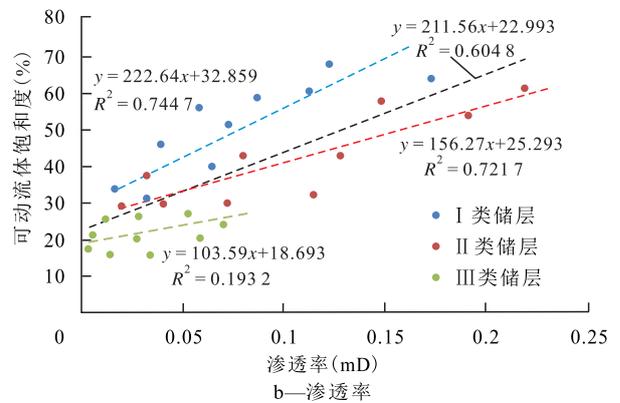
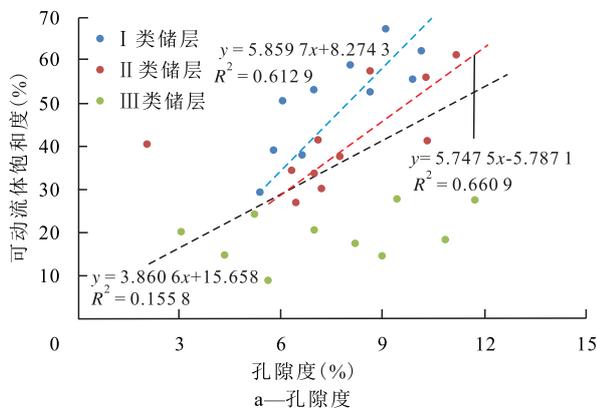


图7 3类储层孔隙度和渗透率与可动流体饱和度的关系

Fig.7 Relationships among movable fluid saturation and porosity/permeability in three types of reservoirs

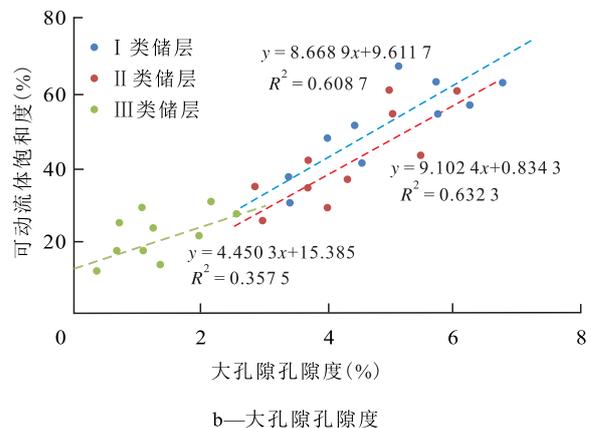
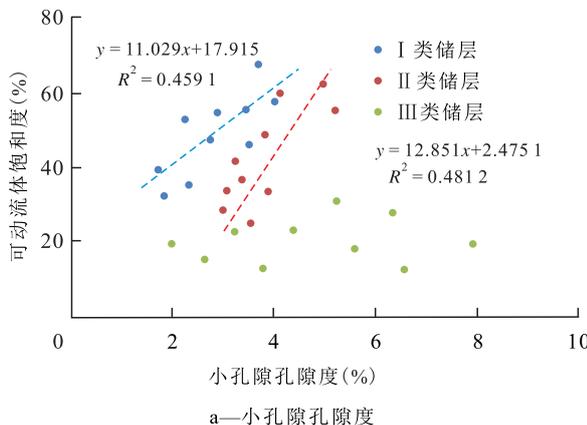


图8 3类储层中小、大孔隙孔隙度与可动流体饱和度的关系

Fig.8 Relationships among porosity of small/large pores and movable fluid saturation in three types of reservoirs

隙孔隙度的相关程度均高于小孔隙孔隙度,而 I 和 II 类储层中可动流体饱和度与大孔隙孔隙度的相关程度高于 III 类储层,说明可动流体饱和度受大孔隙发育程度的影响较大,大孔隙发育程度越高,可动流体饱和度越大;而 III 类储层中由于微小孔隙较为发育,纳米级孔隙占比高,小孔隙孔隙度较大,导致可动流体饱和度较低。

3.3 微观孔隙结构

孔隙是岩石内的储集空间,而喉道是连通不同孔隙半径孔隙之间的桥梁。喉道的形状和大小会直接影响孔隙之间的连通性,进而对可动流体参数产生影响^[19-20]。为评价孔喉大小对可动流体的影响程度,分别选取最大孔喉半径、中值半径、平均孔喉半径、分选系数、最大进汞饱和度和有效孔隙度进行分析。由图 9a 可知,3 类储层中可动流体饱和度与最大孔喉半径的相关程度均较差,说明最大孔喉半径对可动流体饱和度影响较小,也就是说在某些非均质性严重的储层中,孔喉半径分布较广,分选性较差,导致储层虽然具有较大的最大孔喉半径,但可动流体饱和度却较低。

由图 9b 可知, I 类储层中可动流体饱和度与中值半径成正相关,相关系数达 0.767, II 类储层次之,

III 类储层中并未发现存在相关性。但从长 7 储层整体来看(黑色虚线),研究区长 7 储层可动流体饱和度与中值半径的相关程度较高,相关系数达 0.754 3,说明中值半径对可动流体饱和度影响较大。然而,图 9c 却显示 3 类储层中可动流体饱和度与平均孔喉半径的相关性较差,与最大孔喉半径中出现的规律类似,III 类储层中可动流体饱和度与最大孔喉半径呈一定的负相关性,这进一步说明研究区长 7 储层的非均质性较为严重,导致可动流体饱和度与中值半径相关程度较高,但却与平均孔喉半径相关性较差,即研究区长 7 储层平均孔喉半径对可动流体饱和度的影响较小。

由图 9d 可知,储层的分选系数主要为 1.5~5,说明储层分选性属于中等偏差。3 类储层的可动流体饱和度与分选系数的相关性较高,其中 I 类和 II 类储层中可动流体饱和度与分选系数呈负相关关系,且相关性较高;而 III 类储层中可动流体饱和度与分选系数呈一定正相关关系,相关性相对较差。这说明在物性和孔隙结构参数较好的 I 类和 II 类储层中,分选性越好、分选系数越接近 1,可动流体饱和度越大。而在物性和孔隙半径都较差的 III 类储层中,分选性越差、分选系数越大,可动流体饱和度相

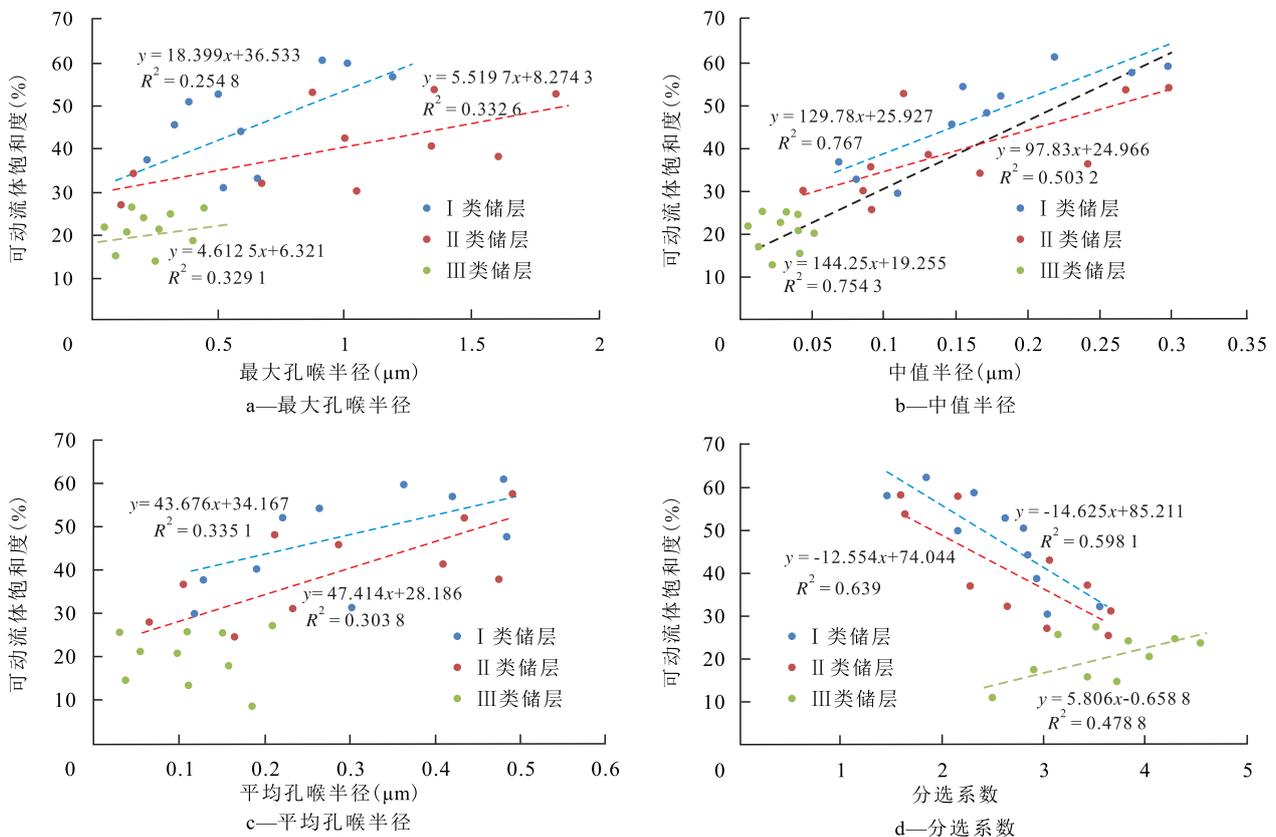
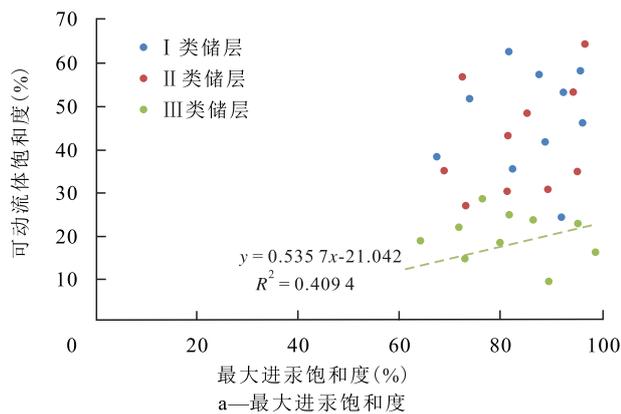


图 9 3 类储层孔隙结构参数与可动流体饱和度的关系

Fig.9 Relationships among pore structure parameters and movable fluid saturation in three types of reservoirs

对越大,这主要是因为Ⅲ类储层孔喉细小,而分选性变差会在一定程度上增加大孔喉的比例,增大可动流体饱和度。

由图10a可知,Ⅲ类储层中可动流体饱和度与最大进汞饱和度呈负相关关系,而在Ⅰ和Ⅱ类储层中并未发现存在相关性。相反,在Ⅰ和Ⅱ类储层中可动流体饱和度与有效孔隙度具有较高的正相关



性(图10b),相关系数分别为0.6624和0.5329;但在Ⅲ类储层中并未发现存在相关性。这说明有效孔隙度对可动流体饱和度的影响较大,而最大进汞饱和度对可动流体饱和度的影响较小。这主要是因为有效孔隙度是表征有效孔隙之间连通性的主要参数,而孔喉连通程度直接影响可动流体饱和度的高低。

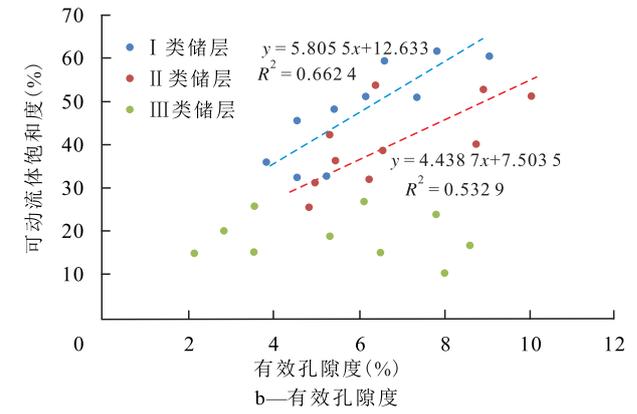


图10 3类储层最大进汞饱和度和有效孔隙度与可动流体饱和度的关系

Fig.10 Relationships among movable fluid saturation and maximum mercury saturation/effective porosity in three types of reservoirs

3.4 黏土矿物

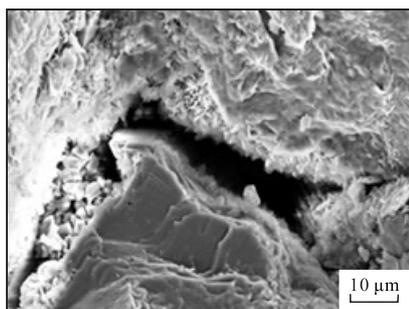
由表2可知,研究区长7储层黏土矿物绝对含量为6.5%,以高岭石为主,占总黏土矿物含量的40.2%,其次为伊利石和绿泥石,分别占26.5%和24.2%。而Ⅰ和Ⅱ类储层中黏土矿物含量与Ⅲ类储层存在较大差异,Ⅲ类储层中伊利石和伊/蒙混层含量增加,高岭石含量降低,且黏土矿物绝对含量也激增至11.3%。通过场发射扫描电镜发现,Ⅰ和Ⅱ类储层代表岩心(10#和14#)中均观测到了分散质点式的高岭石分布于颗粒表面和孔隙衬边式的绿泥石填充在颗粒之间(图11a),虽然高岭石和绿泥石的存在会挤压孔隙体积,使喉道变得狭窄,但其对可动流体整体赋存特征影响较弱。而在Ⅲ类储层代表岩心(26#和27#)中观测到大量蜂窝状的伊

利石(图11b)和弯曲片状的伊/蒙混层集合体填充于孔隙内(图11c),挤压、切割孔隙、堵塞孔喉,导致孔喉连通性变差,而有些大孔隙由于喉道被伊/蒙混层堵塞,变为死孔隙,导致其内可动流体成为束缚流体,大大降低了可动流体饱和度。综上可知,黏土矿物中伊利石和伊/蒙混层含量及赋存方式对可动

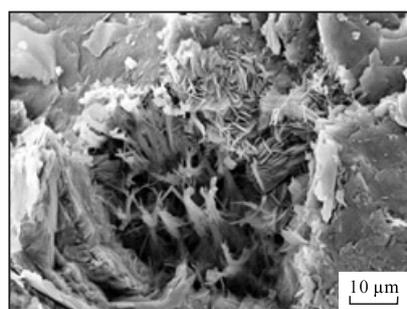
表2 3类储层典型岩心X-射线衍射黏土矿物分析

Table2 X diffraction analysis of typical core samples in three types of reservoirs %

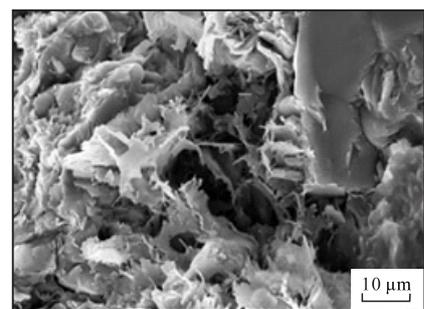
储层类型	相 对 含 量				绝对含量
	伊利石	伊/蒙混层	高岭石	绿泥石	
Ⅰ	24.7	6.8	41.2	27.3	3.8
Ⅱ	23.5	9.2	46.8	20.5	4.5
Ⅲ	31.4	11.3	32.5	24.8	11.3
平均	26.5	9.1	40.2	24.2	6.5



a—分散质点式的高岭石和孔隙衬边式的绿泥石,10#岩心,×969



b—蜂窝状伊利石,26#岩心,×2230



c—弯曲片状伊/蒙混层集合体,27#岩心,×2750

图11 储层典型岩心扫描电镜图像

Fig.11 SEM images of typical core samples in target reservoir

流体赋存特征影响较大。

4 结论

研究区长7储层可划分为Ⅰ,Ⅱ和Ⅲ共3种类型,其对应大孔隙发育程度、孔喉连通性和可动流体赋存量依次降低,Ⅰ和Ⅱ类储层的储集性能、渗流能力和微观孔隙结构特征较为接近,Ⅲ类储层则相对较差。

3类储层中可动流体赋存特征存在较大差异,Ⅰ,Ⅱ和Ⅲ类储层可动流体饱和度平均值分别为50.35%,42.00%和21.40%。Ⅰ和Ⅱ类储层可动流体参数相近,且可动流体赋存量较大,是未来勘探开发的主要方向。

Ⅰ和Ⅱ类储层中孔隙半径为0.053~0.527 μm的孔隙中可动流体赋存量分别占岩心总可动流体量的73.28%和70.77%。而Ⅲ类储层中4类孔隙半径孔隙内可动流体饱和度低,且相差较小。研究区长7储层的可动流体主要赋存于Ⅰ和Ⅱ类储层中孔隙半径为0.053~0.527 μm的孔隙中。

渗透率和中值半径是影响研究区长7储层可动流体赋存特征的主要因素,但Ⅰ和Ⅱ类储层中可动流体主要还受孔隙度、大孔隙孔隙度、分选系数、有效孔隙度和黏土矿物影响;而Ⅲ类储层的影响因素多且杂,未能确定其主要影响因素。

参考文献

- [1] 杨华,李士祥,刘显阳.鄂尔多斯盆地致密油、页岩油特征及资源潜力[J].石油学报,2013,34(1):1-11.
YANG Hua, LI Shixiang, LIU Xianyang. Characteristics and resource prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 1-11.
- [2] 黄彦杰,耿继坤,白玉彬,等.鄂尔多斯盆地富县地区延长组长6、长7段原油地球化学特征及油源对比[J].石油实验地质,2020,42(2):281-288.
HUANG Yanjie, GENG Jikun, BAI Yubin, et al. Geochemical characteristics and oil-source correlation of crude oils in 6th and 7th members of Yanchang Formation, Fuxian area, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(2): 281-288.
- [3] 张哲豪,魏新善,弓虎军,等.鄂尔多斯盆地定边油田长7致密砂岩储层成岩作用及孔隙演化规律[J].油气地质与采收率,2020,27(2):43-52.
ZHANG Zhehao, WEI Xinshan, GONG Hujun, et al. Diagenesis characteristics and evolution of porosity of Chang7 tight sandstone reservoir in Dingbian Oilfield, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(2): 43-52.
- [4] 白斌,朱如凯,吴松涛,等.非常规油气致密储层微观孔喉结构表征新技术及意义[J].中国石油勘探,2014,19(3):78-86.
BAI Bin, ZHU Rukai, WU Songtao, et al. New micro-throat structural characterization techniques for unconventional tight hydrocarbon reservoir[J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(3): 78-86.
- [5] 惠威,薛宇泽,白晓路,等.致密砂岩储层微观孔隙结构对可动流体赋存特征的影响[J].特种油气藏,2020,27(2):87-92.
HUI Wei, XUE Yuze, BAI Xiaolu, et al. Influence of micro-pore structure on the movable fluid occurrence in tight sandstone reservoir[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(2): 87-92.
- [6] 喻建,杨孝,李斌,等.致密油储层可动流体饱和度计算方法——以合水地区长7致密油储层为例[J].石油实验地质,2014,36(6):767-772,779.
YU Jian, YANG Xiao, LI Bin, et al. A method of determining movable fluid saturation of tight oil reservoirs: A case study of tight oil reservoirs in seventh member of Yanchang Formation in Heshui area[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(6): 767-772, 779.
- [7] 李卫成,张艳梅,王芳,等.应用恒速压汞技术研究致密油储层微观孔喉特征——以鄂尔多斯盆地上三叠统延长组为例[J].岩性油气藏,2012,24(6):60-65.
LI Weicheng, ZHANG Yanmei, WANG Fang, et al. Application of constant-rate mercury penetration technique to study of pore throat characteristics of tight reservoir: A case study from the Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2012, 24(6): 60-65.
- [8] LI P, JIA C Z, JIN Z J, et al. The characteristics of movable fluid in the Triassic lacustrine tight oil reservoir: A case study of the Chang7 member of Xin'anbian Block, Ordos Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 102: 126-137.
- [9] 赵彦超,陈淑慧,郭振华.核磁共振方法在致密砂岩储层孔隙结构中的应用——以鄂尔多斯大牛地气田上古生界石盒子组3段为例[J].地质科技情报,2006,25(1):109-112.
ZHAO Yanchao, CHEN Shuhui, GUO Zhenhua. Application of nuclear magnetic resonance technology to pore structure in tight sandstone: A case from third member of Shihezi formation upper Paleozoic in Daniudi gas field, Ordos Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2006, 25(1): 109-112.
- [10] 时建超,屈雪峰,雷启鸿,等.致密油储层可动流体分布特征及主控因素分析——以鄂尔多斯盆地长7储层为例[J].天然气地球科学,2016,27(5):827-834,850.
SHI Jianchao, QU Xuefeng, LEI Qihong, et al. Distribution characteristics and controlling factors of movable fluid in tight oil reservoir: A case study of Chang7 reservoir in Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(5): 827-834, 850.
- [11] 张春林,李剑,刘锐娥.鄂尔多斯盆地盒8段致密砂岩气储层微观特征及形成机理[J].中国石油勘探,2019,24(4):476-484.
ZHANG Chunlin, LI Jian, LIU Ruie. Microscopic characteristics and forming mechanisms of He 8th member tight sandstone gas reservoirs in the Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(4): 476-484.
- [12] 王为民,郭和坤,叶朝辉.利用核磁共振可动流体评价低渗透油田开发潜力[J].石油学报,2001,22(6):40-44.

- WANG Weimin, GUO Hekun, YE Chaohui. The evaluation of development potential in low permeability oilfield by the aid of NMR movable fluid detecting technology [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2001, 22(6): 40-44.
- [13] 刘秀蝉, 陈西泮. 鄂尔多斯盆地富县地区长8油层组致密油藏主控因素分析 [J]. *油气藏评价与开发*, 2019, 9(1): 1-7.
LIU Xiuchan, CHEN Xipan. Analysis on main controlling factors of tight oil reservoirs in Chang-8 reservoir of Fu County, Ordos Basin [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2019, 9(1): 1-7.
- [14] 郭睿良, 陈小东, 马晓峰, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长7段致密储层水平向可动流体特征及其影响因素分析 [J]. *天然气地球科学*, 2018, 29(5): 665-674.
GUO Ruiliang, CHEN Xiaodong, MA Xiaofeng, et al. Analysis of the characteristics and its influencing factors of horizontal movable fluid in the Chang7 tight reservoir in Longdong area, Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2018, 29(5): 665-674.
- [15] 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 NMR technique to movable fluid of ultra-low permeability and tight reservoir: A case study on the Yanchang formation in Longdong area, Ordos Basin [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2017, 37(1): 103-110.
- [16] 罗燕颖, 吴迪, 杜环虹, 等. 岩样核磁共振参数实验室测量规范: SY/T 6490—2014 [S]. 北京: 石油工业出版社, 2014.
LUO Yanying, WU Di, DU Huanhong, et al. Specification for measurement of rock NMR parameter in laboratory: SY/T 6490—2014 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2014.
- [17] 黄兴, 高辉, 窦亮彬. 致密砂岩油藏微观孔隙结构及水驱油特征 [J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2020, 44(1): 80-88.
HUANG Xing, GAO Hui, DOU Liangbin. Micro pore structure and water-flooding characteristics on tight sandstone reservoir [J]. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science*, 2020, 44(1): 80-88.
- [18] 周宇, 魏国齐, 郭和坤. 核磁共振孔隙度影响因素分析与校准 [J]. *测井技术*, 2011, 35(3): 210-214.
ZHOU Yu, WEI Guoqi, GUO Hekun. Impact factors analysis and decision tree correction of NMR porosity measurements [J]. *Well Logging Technology*, 2011, 35(3): 210-214.
- [19] 崔连训. 恒速压汞及核磁共振在低渗透储层评价中的应用 [J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2012, 39(4): 430-433.
CUI Lianxun. Application of constant-rate intruding mercury and nuclear magnetic resonance method to low permeability reservoir evaluation [J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2012, 39(4): 430-433.
- [20] 刘玲, 汤达祯, 王烽. 鄂尔多斯盆地临兴区块太原组致密砂岩黏土矿物特征及其对储层物性的影响 [J]. *油气地质与采收率*, 2019, 26(6): 28-35.
LIU Ling, TANG Dazhen, WANG Feng. Clay minerals characteristics of tight sandstone and its impact on reservoir physical properties in Taiyuan Formation of Block Linxing in Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2019, 26(6): 28-35.

编辑 单体珍