

# 鄂尔多斯盆地马岭油田长 $8_1$ 储层

## 不同流动单元可动流体赋存特征及其影响因素

黎盼<sup>1</sup>, 孙卫<sup>1</sup>, 闫健<sup>2</sup>, 高永利<sup>2</sup>, 折文旭<sup>1</sup>, 杜堃<sup>1</sup>

(1. 西北大学地质学系/大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069;

2. 西安石油大学石油工程学院, 西安 710065)

**摘要:**鄂尔多斯盆地马岭油田长 $8_1$ 储层是典型的低孔—低渗透油藏, 渗透率的强非均质性制约了油气储层品质的提高。通过开展核磁共振实验, 结合恒速压汞和高压压汞、图像粒度、铸体薄片等微观实验研究储层的微观孔隙结构特征, 同时选取砂厚、孔隙度、渗透率、含油饱和度、流动带指数5个参数, 借助SPSS数据分析软件, 将马岭油田长 $8_1$ 段储层的流动单元划分为E、G、M、P等4类, 进而分析不同类型流动单元微观孔隙结构特征及其对可动流体饱和度的影响, 结合生产动态数据分析不同类型的流动单元产能的差异。结果表明: 不同流动单元的微观孔隙结构有着明显的差异, 是造成可动流体饱和度差异的主要因素。其中, 喉道半径分布形态及主流喉道半径大小起了决定性作用。生产动态数据表明, 在油气田勘探开发阶段E类和G类流动单元的产能最高, 应根据不同流动单元的微观孔隙结构差异性特征, 实施合理有效的开发方案。

**关键词:** 流动单元; 微观孔隙结构; 可动流体; 长 $8_1$ 储层; 马岭油田; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE311

文献标识码: A

## Characteristics of movable fluids and controlling factors in different flow units of Chang $8_1$ reservoir in Maling oil field, Ordos Basin

LI Pan<sup>1</sup>, SUN Wei<sup>1</sup>, YAN Jian<sup>2</sup>, GAO Yongli<sup>2</sup>, ZHE Wenxu<sup>1</sup>, DU Kun<sup>1</sup>

(1. Department of Geology / State Key Laboratory for Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China;

2. College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

**Abstract:** The Chang  $8_1$  reservoir of the Maling oil field in the Ordos Basin has low porosity and low permeability. The quality of oil and gas reservoirs is constrained by the strong heterogeneity of its permeability. We analyzed the characteristics of its microscopic pore structure by conducting an NMR experiment and microcosm experiments including constant speed mercury injection, high pressure mercury injection, image granularity, and casting lamella. We then divided the flow units into 4 classes E, G, M and P, using SPSS data analysis software on the basis of 5 chosen parameters, including sand thickness, porosity, permeability, oil saturation and flown zone exponent. We analyzed the microscopic pore structure characteristics in different types of flow unit and the impacts on movable fluid saturation. The results showed that there are obvious differences in the microscopic pore structure characteristics in different flow units, which are the main factors that caused different movable fluid saturation. The distribution and size of pore throat radius played a crucial role. Production performance data demonstrated that classes E and G acquired the highest capacity in the oil and gas field development. Reasonable and effective development programs should be implemented according to the microscopic pore structure characteristics of different flow units.

**Key words:** flow units; microscopic pore structure; movable fluids; Chang  $8_1$  reservoir; Maling oil field; Ordos Basin

流动单元是含油的砂体受到流体流动的影响, 使得流体的岩相特征和物理性质相似、渗流特征相同、水淹特征一致连续储集单元。其研究为剩余

油分布提供了一个更接近于实际渗流过程的地质模型, 从而能准确精细评价和挖潜剩余油<sup>[1-3]</sup>。可动流体饱和度参数能更为直观、快速地评价孔隙结

收稿日期: 2017-09-03; 修订日期: 2018-03-05。

作者简介: 黎盼(1990—), 女, 博士研究生, 从事油气田地质与开发研究。E-mail: 122078558@qq.com。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51404197)、国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2011ZX05044)和陕西省青年人才基金(2016JQ4022)联合资助。

构的优劣特征及油气的可采程度,是有利区目标筛选、油气储量估算、低渗透储层高效开发的关键<sup>[4]</sup>。前人着重于流动单元有效划分以及不同流动单元的剩余油分布规律等方面的研究,对不同类型流动单元可动流体赋存特征及其影响因素等方面分析相对欠缺。笔者从4种不同类型的流动单元出发,通过开展核磁共振实验,结合恒速压汞和高压压汞、图像粒度、铸体薄片等微观实验,分析鄂尔多斯盆地马岭油田长<sub>8</sub><sub>1</sub>段储层不同类型流动单元的微观孔隙结构特征;同时基于核磁共振技术测定不同流动单元 $T_2$ 弛豫时间,表征不同流动单元储层的孔隙结构响应参数与可动流体在孔隙中的赋存特征,为后期油气勘探效益的提高提供科学依据。

## 1 区域地质概况

### 1.1 沉积构造背景

鄂尔多斯盆地马岭油田位于我国甘肃省陇东地区,构造位置位于鄂尔多斯盆地陕北斜坡构造带,其石油资源丰富,且面积较大,是中国石油长庆油田的主力油气勘探开发区域<sup>[5-7]</sup>,三叠系延长组长<sub>8</sub>段储层为本次研究目的层。通过开展研究区50多口井157块岩心样品的常规物性、图像粒度、核磁共振实验以及恒速压汞、高压压汞、铸体薄片和扫描电镜等微观实验,结合前人研究成果认为,马岭油田长<sub>8</sub><sub>1</sub>沉积时期受东北、西南、西部3个方向物源和西南沉积体系控制,发育三角洲前缘沉积<sup>[8]</sup>。

### 1.2 岩石学特征

铸体薄片实验研究和统计样品的碎屑组分表明,马岭油田长<sub>8</sub><sub>1</sub>储层岩性成分主要以岩屑长石质砂岩为主,其体积含量为64.23%;其次为长石质岩屑砂岩,平均体积含量为30.33%;同时还包括长石岩屑石英砂岩(体积含量3.18%)、岩屑砂岩(体积含量1.46%)和长石砂岩(体积含量0.8%)。长<sub>8</sub><sub>1</sub>段砂岩碎屑组分主要以石英类为主,其体积含量为8.5%~72.5%,平均为31.97%;其次为长石类,体积含量为1.5%~47.0%,平均为26.83%;岩屑类体积含量最低,平均为20.96%。岩屑成分以

变质岩岩屑为主,其含量最高(体积含量12.5%),火成岩岩屑含量次之(体积含量7.3%),沉积岩岩屑含量较低(体积含量1.4%)。

## 2 不同流动单元特征

### 2.1 流动单元划分

储层流动单元是反映储层非均质性的一个方面,其储层内部砂体在横向上和垂向上是连通的,并且具有相似的岩石物理特征<sup>[9]</sup>。本次研究借助SPSS数据分析软件,采用Q型聚类分析法,选取砂厚、孔隙度、渗透率、含油饱和度和流动带指数等5个流动单元分类参数,对马岭油田长<sub>8</sub><sub>1</sub>储层的157块样品的物性数据进行Q型聚类分析,将储层划为E(很好)、G(好的)、M(一般)、P(较差)等4类流动单元(表1)。

### 2.2 不同流动单元的微观特征

#### 2.2.1 E类流动单元

E类流动单元孔隙度和渗透率最高,储层性能和渗透性最好,位于研究区物性最好的区域<sup>[10]</sup>。岩性为中砂岩,以中粒、细—中粒岩屑长石砂岩为主,泥质含量低;孔喉半径大,大孔喉数量多,孔喉连通性好,储层非均质性强,在平面图上呈豆状零星的不连续的片状(图1a)。该类流动单元排驱压力低,平均为0.098 MPa,中值压力0.780 5 MPa,分选系数为2.47,歪度系数为1.76,最大孔喉半径为9.94  $\mu\text{m}$ ,最大进汞饱和度平均值为80.45%(表2),孔喉半径集中在1.0~9.9  $\mu\text{m}$ 之间。E类流动单元排驱压力小,最大进汞饱和度较高,孔喉半径最大,毛管压力曲线特征表现为偏向图左下方的宽平台。由此可见,该类流动单元储层孔喉半径大,孔隙和喉道粗,孔喉分布集中,储集能力与渗流能力强,多发育于河道中心厚层砂体内(图2a)。

#### 2.2.2 G类流动单元

G类流动单元孔隙度和渗透率高,储层性能和渗透性好,位于研究区物性好的区域。岩石颗粒大小以细—中粒和中粒为主,岩性为岩屑长石砂岩,含有一定的泥质(图1b)。填隙物含量偏高,孔隙度、

表1 鄂尔多斯盆地马岭油田长<sub>8</sub><sub>1</sub>储层流动单元分类参数统计

Table 1 Statistics of classified parameters for flow units of Chang<sub>8</sub><sub>1</sub> reservoir in Maling oil field, Ordos Basin

流动单元类型	统计油井数/口	所占比例/%	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	含油饱和度/%	砂厚/m	流动带指数
E	20	18	10.85	1.45	58.79	7.58	0.79
G	58	52	10.37	0.82	54.50	17.67	0.73
M	22	20	10.15	0.54	42.94	7.90	0.71
P	10	9	9.76	0.17	35.06	20.63	0.64

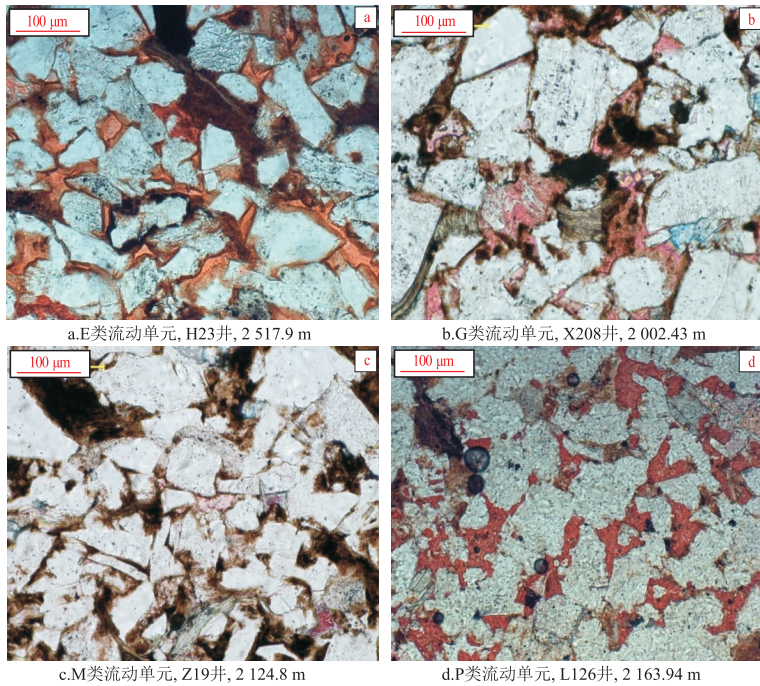


图 1 鄂尔多斯盆地马岭油田不同流动单元铸体薄片镜下特征

Fig.1 Casting lamella characteristics in different flow units of the Maling oil field, Ordos Basin

表 2 鄂尔多斯盆地马岭油田长 8<sub>1</sub>段储层不同流动单元储层样品微观孔隙结构参数统计Table 2 Microscopic pore structure parameters for different flow units of Chang 8<sub>1</sub> reservoir in Maling oil field, Ordos Basin

流动单元 类型	孔隙度/ %	渗透率/ 10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup>	排驱压力/ MPa	中值压力/ MPa	分选 系数	歪度 系数	最大孔喉 半径/μm	中值半径/ μm	最大进贡 饱和度/%
E	10.85	1.45	0.098	0.780 5	2.47	1.76	9.94	0.780 5	80.45
G	10.37	0.82	0.365	0.171 3	2.35	1.58	1.23	0.171 3	87.32
M	10.15	0.54	1.075	0.113 9	2.15	1.06	0.75	0.113 9	84.22
P	9.76	0.17	4.036	0.011 5	1.36	0.87	0.10	0.011 5	72.66

渗透率以及含油饱和度相对于 E 类减小,储层物性较 E 类变差,因此该类储层的储层非均质性、储集能力和渗流能力也相对于 E 类降低。平面上 G 类储层连片性较 E 类分布面积大,连片程度较好,多呈片状分布,由中心向边缘砂体逐渐变薄,物性逐渐变差<sup>[11-13]</sup>。该类流动单元排驱压力中等,平均为 0.365 MPa,较 E 类排驱压力高,但相对 M、P 类低,中值压力为 0.171 3 MPa,分选系数为 2.35,歪度系数为 1.58,最大进汞饱和度平均值为 87.32%(表 2),对进汞贡献大的孔喉半径主要集中在 0.1~1.2 μm,毛管压力曲线与 E 类曲线形态相似且整体排驱压力高于 E 类,偏向图左下方较宽的平台,说明 G 类流动单元储集性能和渗流能力较好,多发育于水下分流河道或与河道中心相连的厚砂体中(图 2b)。

### 2.2.3 M 类流动单元

M 类流动单元孔隙度和渗透率一般,储层性能和渗透性相对 E 类和 G 类差,在储层中呈连片

的带状分布。M 类流动单元的面积较大,连续性好。岩性以泥质砂岩为主,其中可见中细粒岩屑长石砂岩;孔喉形态为中孔喉及少量粗孔喉;主要成岩类型为伊利石溶蚀相和高岭石胶结相(图 1c)。该类流动单元储层排驱压力较前两类高,平均为 1.075 MPa,中值压力为 0.113 9 MPa,分选系数为 2.15,歪度系数为 1.06,最大孔喉半径为 0.75 μm,最大进汞饱和度平均值为 84.22%(表 2),进汞所对应的孔喉半径主要分布在 0.08~0.70 μm,毛管压力曲线段表现为略偏向图右上方,在该段毛管曲线较 G 类明显上倾,排驱压力变低,说明 M 类流动单元孔隙和喉道半径小、孔喉连通性差、有效孔隙和喉道数量少,储层非均质性突出,储集性能与渗流能力相对于 E 类和 G 类变差(图 2c)。

### 2.2.4 P 类流动单元

P 类流动单元孔隙度和渗透率小,储层的渗流能力和物性差,主要分布在砂体的边部,岩性以泥



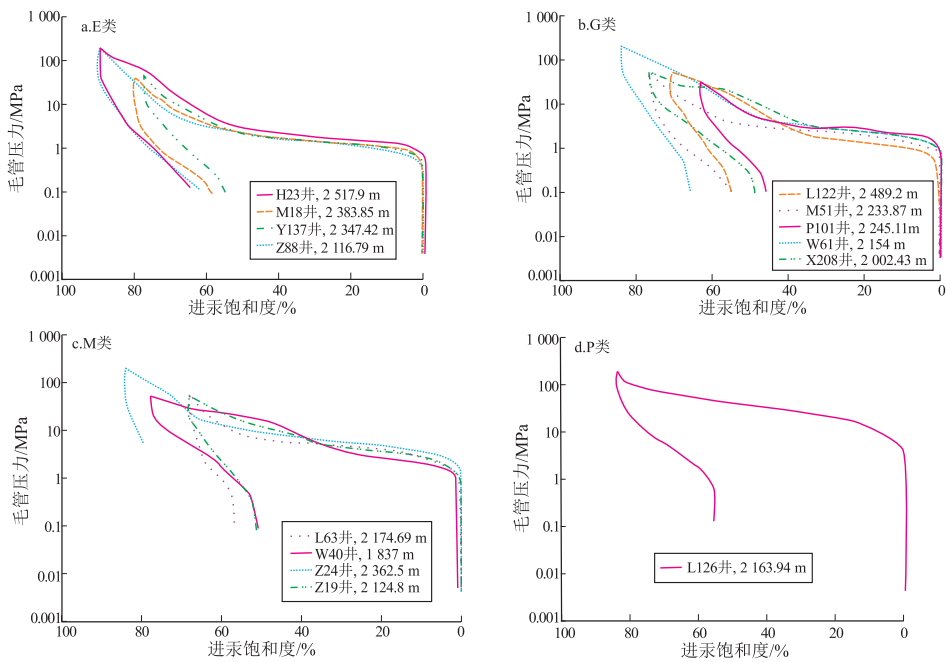


图2 鄂尔多斯盆地马岭油田长<sub>8</sub>储层不同流动单元储层毛管压力曲线

Fig.2 Capillary pressure curves of different flow units of Chang 8<sub>1</sub> reservoir in Maling oil field, Ordos Basin

质为主,储层粒度小,孔隙和喉道小,孔喉连通性差,孔隙类型主要为微孔型(图1d)。P类流动单元物性好的储层少,含油量低,剩余油分布多,不利于油田的高效开采,开发效益低<sup>[14-15]</sup>。该类流动单元储层排驱压力最高,平均为4.036 MPa,中值压力为0.011 5 MPa,分选系数为1.36,歪度系数为0.87,最大孔喉半径为0.1 μm,最大进汞饱和度平均值为72.66%(表2),毛管压力曲线形态显示为偏向图右上方,在该段几乎没有平缓段,说明P类流动单元属于孔隙喉道数量最少、孔喉连通性以及物性最差的类型,主要发育在与分流间湾和砂泥互层等处(图2d)。

不同流动单元的储层微观孔隙结构特征参数及不同类型的毛管压力曲线特征表明,不同类型流动单元储层的微观孔隙结构特征具有明显差异<sup>[16-18]</sup>。E类流动单元储层大孔喉数量多,连通性好,排驱压力低,开采程度高,微观孔隙结构最好;G、M类流动单元储层孔喉半径较小,开采程度相对较高,有剩余油分布,微观孔隙结构次之,是油田进一步开发和挖潜的流动单元类型;P类流动单元孔喉半径小,开采程度低,剩余油分布多,微观孔隙结构差,该类储层分布在砂体的边部,对油田开采的贡献少,甚至无法开采。

### 3 可动流体赋存研究

#### 3.1 核磁共振实验

核磁共振技术是观察可动流体赋存特征的有

效手段,其中 $T_2$ 弛豫时间能更客观地表征微观孔隙结构与流体在孔隙中的赋存特征,弛豫时间受岩石物性及流体特征的影响<sup>[19-20]</sup>。不同类型流动单元的 $T_2$ 谱弛豫时间和谱峰特征不同,核磁共振实验可通过不同弛豫时间表现出的 $T_2$ 谱峰特征来定量分析可动流体赋存特征。当岩石孔隙半径较小且孔喉连通性较差时,一部分流体由于毛细管力和比表面束缚效应而无法流动,称为束缚流体;另一部分可流动的为可动流体。当孔隙半径减小到一定程度导致流体无法流动时对应的弛豫时间为临界值,大于此临界值为可动流体,小于此临界值为束缚流体<sup>[21]</sup>。

选取马岭油田长<sub>8</sub>储层E、G、M、P等4类流动单元储层的岩心样品进行核磁共振实验,得到可动流体饱和度相关参数(表3)。根据 $T_2$ 谱形态特征以及岩心离心压力实验总结发现,束缚流体与可动流体之间的临界弛豫时间值 $T_2$ 为13.895 ms。由14块岩心样品不同流动单元的核磁共振 $T_2$ 谱频率分布图(图3)可看出, $T_2$ 谱峰不仅存在单峰现象,还存在双峰现象。M类和P类流动单元为单峰,E类和G类流动单元为双峰。单峰峰值位于临界值左侧,说明M类和P类流动单元储层孔喉连通性差,孔隙半径小且分布不均匀,非均质性强,物性较差。双峰表现为E类左低右高形峰和G类左高右低形峰,说明E类和G类流动单元储层孔隙和喉道的连通性好,孔喉半径较大。

由表3可知,E类流动单元储层可动流体饱和

表3 鄂尔多斯盆地马岭油田长8<sub>1</sub>段储层不同流动单元核磁共振可动流体饱和度相关参数统计

Table 3 Movable fluid saturation parameters of different flow units of Chang 8<sub>1</sub> reservoir in Maling oil field, Ordos Basin

流动单元类型	井号	水测孔隙度/%	气测渗透率/ 10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup>	可动流体饱和度/%	可动流体孔隙度/%	束缚水饱和度/%	高压压汞累积进汞饱和度/%	
							≥0.1 μm	≥0.2 μm
E	H23	7.09	0.288	70.55	5.01	29.45	55.07	32.85
G	X208	8.64	0.168	45.97	3.97	54.03	46.19	19.54
M	Z19	8.98	0.135	38.29	3.43	61.71	42.51	29.74
P	L126	12.51	0.101	32.58	3.09	67.42	61.03	42.63

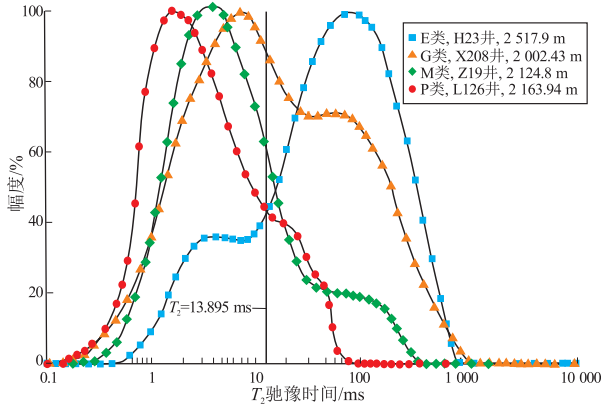


图3 鄂尔多斯盆地马岭油田长8<sub>1</sub>储层不同流动单元核磁共振T<sub>2</sub>谱频率分布

Fig.3 Frequency distribution of NMR T<sub>2</sub> spectra of different flow units of Chang 8<sub>1</sub> reservoir in Maling oil field, Ordos Basin

度最高(70.55%),束缚水饱和度最低(29.45%);G类流动单元储层可动流体饱和度较E类低(45.97%),束缚水饱和度较E类高(54.03%);M类流动单元储层可动流体饱和度较低(38.29%),束缚水饱和度较E类较高(61.71%);P类流动单元储层可动流体饱和度最低(32.58%),束缚水饱和度最高(67.42%);表明流动单元类型越好,孔隙半径和喉道半径越大,孔喉连通性越好,可动流体饱和度越高,束缚水饱和度越低。因此,不同类型的流动单元孔喉特征具有明显差异,决定了可动流体赋存

于孔隙和喉道中含量的相对多少(表3、图3)。

### 3.2 可动流体赋存影响因素

不同类型流动单元储层的微观孔隙结构不同,导致其可动流体饱和度赋存特征不同。影响可动流体赋存特征差异的因素较多,如沉积相特征、构造位置以及岩石类型、储层物性、孔喉特征和黏土矿物成分、孔喉配置关系等微观方面的差异都会造成可动流体赋存特征的不同<sup>[22]</sup>。本次研究主要从储层物性、微观孔喉结构特征和黏土矿物含量入手,对影响不同流动单元储层可动流体赋存特征差异的因素进行深入分析。

#### 3.2.1 储层物性

对马岭油田长8<sub>1</sub>储层14块测试样品的可动流体饱和度参数与物性的相关性进行比较,同时对实验结果进行分析,找出孔隙度、渗透率与可动流体之间的变化规律。由图4可知,可动流体饱和度与孔隙度的相关性较差,其相关系数R<sup>2</sup>为0.3519(图4a);与渗透率的相关性比与孔隙度的相关性好,其相关系数R<sup>2</sup>为0.6749(图4b)。其中14块样品的可动流体饱和度分布范围较宽,随着孔隙度和渗透率的增加,其可动流体饱和度不一定增加,有些样品渗透率越高,其可动流体饱和度越小,但大部分样品的可动流体饱和度随着渗透率的增大而增大<sup>[23-25]</sup>。由此可见,可动流体饱和度参数受

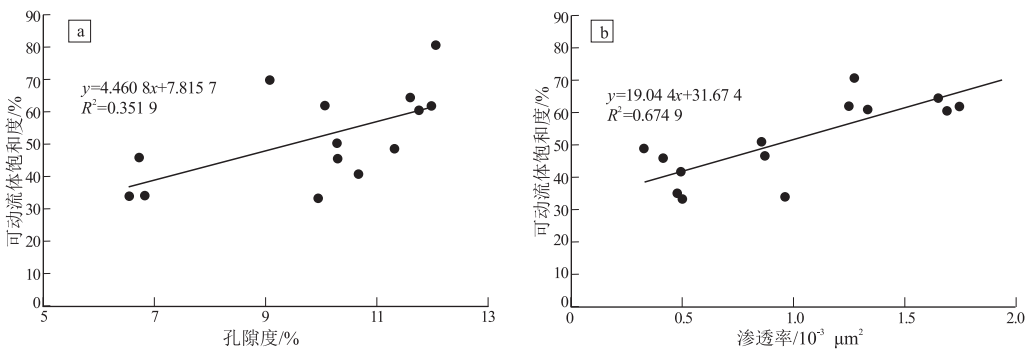


图4 鄂尔多斯盆地马岭油田长8<sub>1</sub>储层可动流体饱和度与物性的相关性

Fig.4 Relationship between movable fluid saturation and the physical properties of Chang 8<sub>1</sub> reservoir in Maling oil field, Ordos Basin

物性的影响较小,储层物性并不能完全真实地反映可动流体的赋存特征,可动流体赋存特征的影响并不受单一储层参数的控制。

### 3.2.2 微观孔喉特征

(1)孔喉半径大小。对岩心样品进行化验分析得出孔隙半径和喉道半径加权平均值与可动流体饱和度的相关性(图5a,b)。可以看出,孔隙半径、喉道半径与可动流体饱和度呈正相关关系,喉道半径加权平均值与可动流体饱和度的相关系数为0.808 2,正相关性较好;而孔隙半径加权平均值与可动流体饱和度的相关系数为0.641 7,相关性比喉道半径差。表明不同流动单元储层其喉道半径对可动流体饱和度的影响大于孔隙半径对可动流体饱和度的影响。喉道半径越大,大喉道数量越多,小喉道数量越少,喉道的连通性越好,流体越容

易流动,其可动流体饱和度就越高;反之,可动流体饱和度越低。

由4种不同流动单元的微观孔隙结构参数(表4)可以看出,E类、G类、M类和P类流动单元储层的主流喉道半径加权平均值分别为1.28,0.60,0.57,0.20 μm。对比发现,E类主流喉道半径最大,明显大于G、M、P类流动单元储层,且E类储层物性好,连通性好,流体容易流动,可动流体饱和度高,因此可进一步说明喉道半径大小是影响不同流动单元可动流体饱和度赋存的主导因素。

(2)主流喉道分布。不同流动单元储层可动流体饱和度不仅受孔隙半径和喉道半径的影响,还受到主流喉道分布的影响。由喉道半径分布频率(图5c)可知,E类流动单元储层喉道半径分布面积大,主流喉道半径最大(1.45 μm),喉道连通性好,可

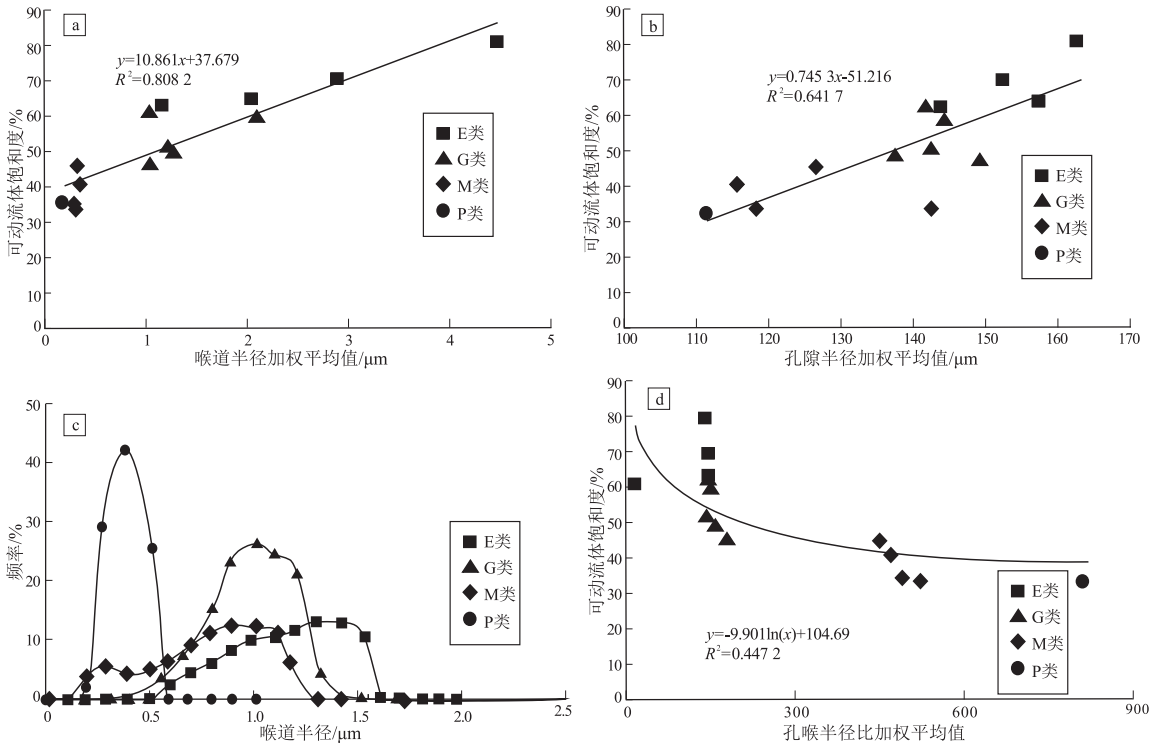


图5 鄂尔多斯盆地马岭油田长<sub>8</sub>储层微观孔喉结构与可动流体饱和度相关关系

Fig.5 Relationship between microscopic pore throat structure and movable fluid saturation of Chang 8<sub>1</sub> reservoir in Maling oil field, Ordos Basin

表4 鄂尔多斯马岭油田长<sub>8</sub>储层不同流动单元恒速压汞微观孔隙结构参数特征统计

Table 4 Micro-pore structure characteristics of different flow units of Chang 8<sub>1</sub> reservoir in Maling oil field, Ordos Basin

流动单元类型	主流喉道半径/μm	孔喉半径比	有效孔隙体积/(mL·cm <sup>-3</sup> )	有效喉道体积/(mL·cm <sup>-3</sup> )	孔隙半径/μm	喉道半径/μm	总孔隙进汞饱和度/%	总喉道进汞饱和度/%
E	1.45	140.71	0.041	0.043	120.12	1.28	17.27	18.34
G	0.99	144.45	0.004	0.012	120.41	0.60	16.35	17.86
M	0.50	452.88	0.005	0.024	100.22	0.57	16.21	17.77
P	0.15	817.10	0.009	0.015	110.66	0.20	15.57	17.07



动流体的饱和度高;G类流动单元储层喉道半径分布范围比E类窄,主要介于 $0.1\sim 1.2\ \mu\text{m}$ ,峰值为 $1.01\ \mu\text{m}$ ,主流喉道半径平均值为 $0.99\ \mu\text{m}$ (表4),对渗透率作用大,喉道半径较E类小,可动流体饱和度较低。M类流动单元储层喉道半径分布范围较窄,集中分布在 $0.08\sim 0.70\ \mu\text{m}$ ,峰值为 $0.83\ \mu\text{m}$ ,主流喉道半径平均值为 $0.5\ \mu\text{m}$ (表4),主流喉道半径小,孔喉连通性差,可动流体饱和度低,富集在微孔和小孔中的流体难以流动。P类流动单元储层喉道半径分布范围最窄,主要集中在 $0.01\sim 0.10\ \mu\text{m}$ ,峰值为 $0.38\ \mu\text{m}$ ,主流喉道平均值为 $0.15\ \mu\text{m}$ (表4),渗透率起的作用最小。通过对比研究发现,不同流动单元储层的主流喉道半径大小与可动流体饱和度成正相关关系,主流喉道半径越大,分布范围越广,喉道的连通性越好,可动流体饱和度越高。

(3)孔隙、喉道进汞饱和度。4类不同流动单元储层的有效孔隙体积和有效喉道体积不同(表4)。储层中的有效孔隙半径、喉道半径与单位体积的孔隙体积、喉道体积呈现正相关关系,孔隙半径和喉道半径越大,大孔隙和大喉道数量越多,孔隙体积和喉道体积就越大,孔喉的连通性就越好,可动流体饱和度越高。孔隙体积和喉道体积可通过孔隙和喉道的进汞饱和度来反映其变化特征。喉道进汞饱和度越大,其可动流体饱和度越大,孔隙进汞饱和度越大,可动流体饱和度就越高。M类和P类流动单元储层的有效喉道数量少、体积小、半径小,孔喉连通性较差,物性较差,使得绝大部分油、气富集在微孔和小喉道中,使得采收率低,可动流体含量低。而E类和G类流动单元储层喉道半径大、有效喉道数量多,孔喉连通性好,可动流体含量高。因此,有效孔隙体积比有效喉道体积对不同流动单元储层的可动流体饱和度的影响程度更大。

(4)孔喉半径比。孔喉半径比的大小可以反映不同流动单元储层的孔隙和喉道相对体积的差异性,同时可以反映出储层的渗透性能。由图5d可以看出,研究区不同类型流动单元的可动流体饱和度随着孔喉半径比的逐渐增大而依次减少,其相关系数 $R^2$ 为 $0.447\ 2$ 。4类不同流动单元的储层孔喉半径比随着流动单元类型的特征而变化,E类和G类流动单元储层孔喉半径比小,单个孔隙由多个大喉道连通,渗透性能较好,流体容易流动,孔隙内的油、气容易通过喉道被开采出,可动流体饱和度较高;而M类和P类流动单元储层孔喉半径比大,

单个孔隙由少数小喉道连通,孔喉大小分布不均,孔、喉连通性较差,非均质性强,流体被束缚在孔喉中难以通过,采收率低,可动流体饱和度低。

### 3.2.3 黏土矿物含量

马岭油田长 $8_1$ 油层组储层黏土矿物充填孔隙主要包括绿泥石、伊利石、高岭石和伊/蒙混层充填;填隙物主要充填在溶蚀孔和残余粒间孔中,部分贴附于孔隙壁表面,对储层起到了严重的破坏作用,进一步影响了可动流体赋存的特征。镜下微观特征显示,伊利石显示出丝状和卷曲状特征,主要依附在颗粒表面和连通孔隙的喉道处,将原生孔隙进行切割和充填,使得孔隙之间的连通性变差;绿泥石呈现细小的针片状,以孔隙衬托式包围在岩石颗粒表面,使得孔隙半径和喉道半径减小,阻碍流体的渗流;高岭石呈书页状,其分布缩小了粒间孔隙,增加了无效孔隙含量,对喉道的影响较小;伊/蒙混层为细丝状,且大量发育,对可动流体的赋存影响较大。由此可见,不同产状的黏土矿物对可动流体的影响程度不同,填隙物的充填程度越高,孔隙连通性越差。

X-衍射实验分析表明,可动流体饱和度与伊利石、伊/蒙混层的负相关性比绿泥石、高岭石稍好,其相关系数 $R^2$ 分别为 $0.200\ 9$ 和 $0.269$ (图6a,d),表明该类黏土矿物的发育使得孔隙之间的连通性变差,孔隙周围存在大量束缚流体,对可动流体的赋存影响较大。可动流体饱和度与绿泥石、高岭石的绝对含量呈较弱的负相关关系,其相关系数 $R^2$ 分别为 $0.097\ 9$ 和 $0.109\ 5$ (图6b,c),表明该类黏土矿物对孔隙和喉道的影响相对较小。由此可见,黏土矿物含量对可动流体赋存有一定影响,但单一的黏土矿物含量对可动流体赋存的影响不大,黏土矿物含量对储层可动流体赋存的影响主要体现在多种黏土矿物的共同影响。

综合上述研究表明,微观孔隙结构是影响可动流体饱和度赋存特征的重要因素,其中孔隙结构是影响可动流体赋存差异的关键;喉道半径、孔喉半径比是影响可动流体赋存的主要因素;主流喉道分布、孔喉汞饱和度对可动流体赋存的影响明显;黏土矿物充填、储层物性对可动流体赋存的影响较小。

## 4 可动流体赋存与油藏产能的响应关系

生产动态特征能更直观地反映井区的产能效益。基于前期4类流动单元的微观孔隙结构特征与可动流体在孔隙中的赋存特征研究,结合研究区长 $8_1$ 段储层50多口井的生产动态资料分析,认为

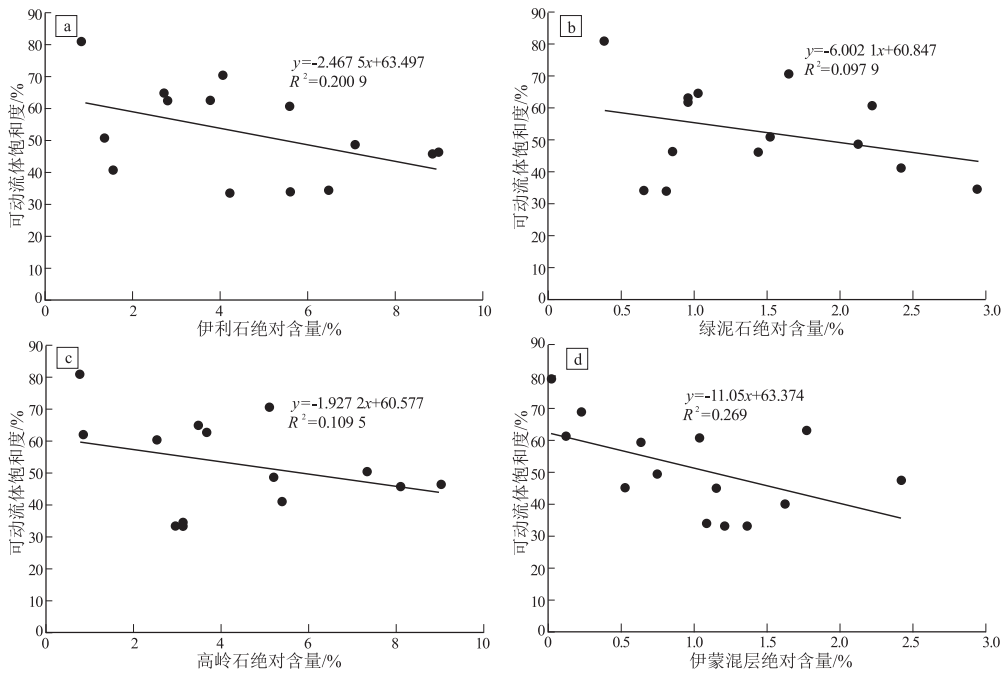


图6 鄂尔多斯盆地马岭油田长8<sub>1</sub>储层黏土矿物含量与可动流体饱和度的关系

Fig.6 Relationship between clay minerals and movable fluid saturation of Chang 8<sub>1</sub> reservoir in Maling oil field, Ordos Basin

流动单元能够客观地反映产能高低,与单井产能呈现较好的正相关关系,越好的流动单元类型对应的产能越高。4种不同流动单元类型表现出不同的微观孔隙结构特征,从而导致其在开发生产过程中的生产动态特征不同,产能差异较为明显。

E类流动单元储层连通性好、渗透能力强,与单井产能有很好的对应关系(图7a)。此类型的流动单元多处于水下分流河道的主体位置,油井初期产能高,采出程度高,平均面孔率为2.67%,平均单井日产油量较高(2.93 t/d),含水率平均为34.4%(图7b)。孔喉半径比最小,孔隙半径和喉道半径最大,稳定周期最长。在注水开发过程中,选取合适的注采比可使得开采相对稳定。该类型的流动单元指导着剩余油的开采,是研究区提高单井产能的主要开发对象。

G类流动单元储层物性较E类流动单元差,平均单井日产油量为3.24 t(图7a),含水率平均为38.6%(图7b),稳定周期较长。该类流动单元油井初期产液量和含水率最高,是油田开发的主力产层。G类流动单元平均面孔率为2.46%,孔隙半径和喉道半径大,有助于大面积的注水开发,开采程度相对较高,有剩余油分布。

M类流动单元物性差,渗流能力和储集能力较差,平均单井日产油量较低(2.1 t/d)(图7a),含水率中等(平均48.04%)(图7b),相对于E类和G类其产液量最低,且含水率很高,采出程度相对较低。该类流动单元平均面孔率为2.38%,孔隙半径和喉道半径小,孔喉半径比较大,孔喉连通性最差,进行开发过后仍然有较多的剩余储量,是油田开发过程中考虑进一步挖潜的对象。

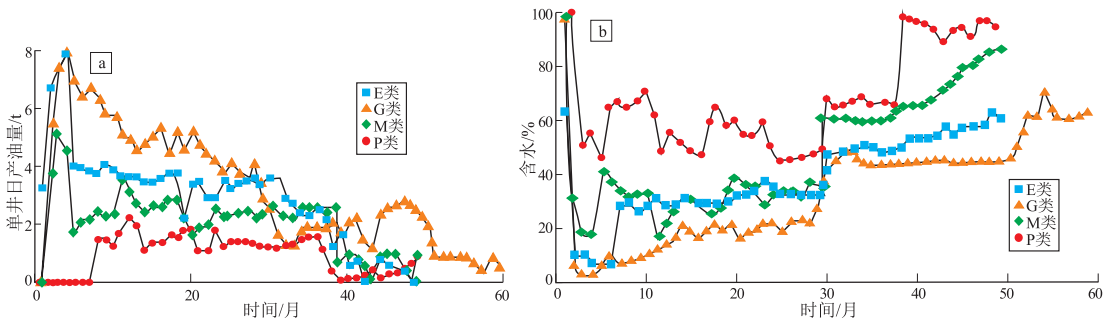


图7 鄂尔多斯盆地马岭油田长8<sub>1</sub>储层不同流动单元单井日产油量开采特征及含水变化特征

Fig.7 Production and water cut change of single wells with different flow units of Chang 8<sub>1</sub> reservoir in Maling oil field, Ordos Basin



P 类流动单元是研究区物性最差的流动单元类型,渗透能力和储存能力最差,此类流动单元处于分流间湾相带,剩余储量多,采出程度低,甚至很难开采。P 类流动单元储层平均面孔率为 2.38%,储层的孔隙空间非常小,平均单井日产油量 2.1 t(图 7a),含水率较高(平均 68%)(图 7b),孔喉半径比最大,稳产周期最短。

由生产动态分析可知,E 类流动单元物性好,初期产油量较高,低含水期稳产周期短,采出程度高,与产能的对应关系好,是研究区的主要开发对象;G 类流动单元物性较差,含油饱和度高,其产油量较高,且含水量较低,低含水期稳产周期长,分布面积最广,是油田开发的主力产层;M 类流动单元产油量低,含水量也低,物性较差,含油饱和度较高,分布面积较广,是油田开采后期进一步开发和挖潜的区块。P 类流动单元储层可动流体饱和度低,物性差,开发难度大。

## 5 结论

(1) 马岭油田长 8<sub>1</sub>段储层可分为 4 种流动单元类型。其中,E 类流动单元储层孔喉半径大,开采程度高,微观孔隙结构最好;G、M 类流动单元储层孔喉半径较小,开采程度相对较高,有剩余油分布,微观孔隙结构次之,是油田进一步开发和挖潜的流动单元类型;P 类流动单元储层孔喉半径小,开采程度低,剩余油分布多,微观孔隙结构差,该类储层分布在砂体的边部,对油田开采的贡献少,甚至无法开采。

(2) 研究区不同流动单元储层微观孔隙结构不同,进而导致赋存的可动流体饱和度特征不同。对孔隙半径、喉道半径、主流喉道分布、孔隙和喉道进汞饱和度、孔喉半径比等影响因素进行研究发现,孔隙半径、喉道半径和可动流体饱和度成正相关关系,但喉道半径比孔隙半径对可动流体饱和度的影响更大,孔喉半径越大,可动流体饱和度就越高;主流喉道半径越大,喉道的连通性越好,可动流体饱和度越高;孔隙进汞饱和度越大,可动流体饱和度就越高;孔喉半径比越大,可动流体饱和度越低。

(3) 微观孔隙结构特征是影响可动流体饱和度赋存特征的重要因素,其中孔喉结构是影响可动流体赋存差异的关键;喉道半径、孔喉半径比是影响可动流体赋存的主要因素;孔喉汞饱和度对可动流体赋存的影响明显;黏土矿物的充填、储层物性对可动流体赋存的影响较小。

(4) 不同流动单元类型表现出不同的微观孔隙结构特征,从而导致在开发生产过程中的开采特征

不同,越好的流动单元类型对应的单井日产量越高。因此,在油田开发过程中应针对不同流动单元的微观孔隙结构差异特征制定合理有效的开发方案。

## 参考文献:

- [1] 张浩,陈刚,朱玉双,等.致密油储层微观孔隙结构定量表征:以鄂尔多斯盆地新安边油田长 7 储层为例[J].石油实验地质,2017,39(1):112-119.  
ZHANG Hao,CHEN Gang,ZHU Yushuang,et al.Quantitative characterization of microscopic pore throat structure in tight sandstone oil reservoirs:A case study of Chang 7 reservoir in Xin'anbian oil field,Ordos Basin[J].Petroleum Geology & Experiment,2017,39(1):112-119.
- [2] 任大忠,孙卫,雷启鸿,等.鄂尔多斯盆地华庆油田长 8<sub>1</sub>段储层物性影响因素[J].地质与勘探,2014,50(3):591-598.  
REN Dazhong,SUN Wei,LEI Qihong,et al.Influential factors in the physical properties of the Chang 8<sub>1</sub> reservoir,Yanchang Formation in the Huaqing Oilfield,Ordos Basin[J].Geology and Exploration,2014,50(3):591-598.
- [3] 庞振宇,李艳,赵习森,等.特低渗储层可动流体饱和度研究:以甘谷驿油田长 6 储层为例[J].地球物理学进展,2017,32(2):702-708.  
PANG Zhenyu,LI Yan,ZHAO Xisen,et al.Study on movable fluid saturation in ultra low permeability reservoir:Taking Chang 6 reservoir in Ganguyi oil field as an example[J].Progress in Geophysics,2017,32(2):702-708.
- [4] 盛军,孙卫,刘艳妮,等.低渗透油藏储层微观孔隙结构差异对可动流体的影响:以鄂尔多斯盆地姬塬与板桥地区长 6 储层为例[J].地质科技情报,2016,35(3):167-172.  
SHENG Jun,SUN Wei,LIU Yanni,et al.Effect of the difference of low permeability reservoir microscopic pore structure on movable fluid:A case for the Chang 6 reservoir of Jiyuan and Banqiao areas in Ordos Basin[J].Geological Science and Technology Information,2016,35(3):167-172.
- [5] 屈雪峰,孙卫,雷启鸿,等.华庆油田低渗透砂岩储层可动流体饱和度及其影响因素[J].西安石油大学学报(自然科学版),2016,31(2):93-98.  
QU Xuefeng,SUN Wei,LEI Qihong,et al.Study on saturation of movable fluid in the low-permeability sandstone reservoirs of Huaqing oilfield and its influencing factors[J].Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition),2016,31(2):93-98.
- [6] 郑庆华,柳益群.特低渗透储层微观孔隙结构和可动流体饱和度特征[J].地质科技情报,2015,34(4):124-131.  
ZHENG Qinghua,LIU Yiqun.Microscopic pore structure and movable fluid saturation of ultra low permeability reservoir[J].Geological Science and Technology Information,2015,34(4):124-131.
- [7] 曹雷,孙卫,盛军,等.低渗透致密油藏可动流体饱和度计算方法:以板桥地区长 6 油层组致密油储层为例[J].长江大学学报(自然版),2016,13(20):1-8.  
CAO Lei,SUN Wei,SHENG Jun,et al.A method to determine movable fluid saturation of low-permeability and tight oil reservoirs:By taking tight oil reservoirs in sixth member of Yanchang Formation in Banqiao area as an example[J].Journal of Yangtze University (Natural Science Edition),2016,13(20):1-8.
- [8] 王伟,牛小兵,梁晓伟,等.鄂尔多斯盆地致密砂岩储层可动

- 流体特征:以姬塬地区延长组长7段油层组为例[J].地质科技情报,2017,36(1):183-187.
- WANG Wei, NIU Xiaobing, LIANG Xiaowei, et al. Characteristic of movable fluid for tight sandstone reservoir in Ordos basin: a case of Chang 7 oil reservoir of Yanchang Formation in Jiyuan area[J]. Geological Science and Technology Information, 2017, 36(1):183-187.
- [9] 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.
- [10] 吴长辉,赵习森.致密砂岩油藏核磁共振 T<sub>2</sub>截止值的确定及可动流体喉道下限:以吴仓堡下组合长9油藏为例[J].非常规油气,2017,4(2):91-94.
- WU Changhui, ZHAO Xisen. Determination of T<sub>2</sub> cut-off value of nuclear magnetic resonance in tight sandstone reservoir and lower limit of movable fluid: A case study of Chang 9 reservoir of Wucangbao oilfield[J]. Unconventional Oil & Gas, 2017, 4(2):91-94.
- [11] 张茜,孙卫,杨晓菁,等.致密砂岩储层差异性成岩演化对孔隙度演化定量表征的影响:以鄂尔多斯盆地华庆地区长<sub>6</sub>储层为例[J].石油实验地质,2017,39(1):126-133.
- ZHANG Xi, SUN Wei, YANG Xiaojing, et al. Quantitative calculation of tight sandstone reservoir porosity evolution based on different diagenesis: A case study of Chang 6<sub>3</sub> reservoir in Huangqing area, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(1):126-133.
- [12] 邹才能,陶士振,侯连华,等.非常规油气地质[M].2版.北京:地质出版社,2011.
- ZOU Caineng, TAO Shizhen, HOU Lianhua, et al. Unconventional petroleum geology [M]. 2nd ed. Beijing: Geological Publishing House, 2011.
- [13] EHRENBERG S N. Assessing the relative importance of compaction processes and cementation to reduction of porosity in sandstones: Discussion; compaction and porosity evolution of Pliocene sandstones, Ventura Basin, California: Discussion[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(10):1274-1276.
- [14] 赵习森,畅斌,张佳琪,等.密井网条件下不同流动单元剩余油分布研究:以延长油田双河区块为例[J].非常规油气,2016,3(6):60-65.
- ZHAO Xisen, CHANG Bin, ZHANG Jiaqi, et al. Distribution of the remaining oil in different flow units for the infill well Networks: Taken Shuanghe Block, Yanchang oilfield as an example [J]. Unconventional Oil & Gas, 2016, 3(6):60-65.
- [15] 李跃林,段迎利,王利娟,等.基于流动单元的原始地层电阻率反演及其应用[J].西安石油大学学报(自然科学版),2016,31(4):32-37.
- LI Yuelin, DUAN Yingli, WANG Lijuan, et al. Inversion of original formation resistivity based on flow unit and its application[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2016, 31(4):32-37.
- [16] GAO H, LI H A. Pore structure characterization, permeability evaluation and enhanced gas recovery techniques of tight gas sandstones [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 28:536-547.
- [17] 任颖,孙卫,张茜,等.低渗透储层不同流动单元可动流体赋存特征及生产动态分析:以鄂尔多斯盆地姬塬地区长6段储层为例[J].地质与勘探,2016,52(5):974-984.
- REN Ying, SUN Wei, ZHANG Xi, et al. Characteristics of movable fluids and study of production performance in different flow units of low-permeability reservoir: An example from the Chang 6 block of the Jiyuan oilfield in Ordos Basin [J]. Geology and Exploration, 2016, 52(5):974-984.
- [18] 陈大友,朱玉双,张皎生,等.鄂尔多斯盆地马岭地区长8储层成岩作用与有利成岩相带[J].石油实验地质,2015,37(6):721-728.
- CHEN Dayou, ZHU Yushuang, ZHANG Jiaosheng, et al. Diagenesis and favorable diagenetic facies of the eighth member of Yanchang Formation in Maling area, the Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(6):721-728.
- [19] 马春林,王瑞杰,罗必林,等.鄂尔多斯盆地马岭油田长8油层组储层特征与油藏分布研究[J].天然气地球科学,2012,23(3):514-519.
- MA Chunlin, WANG Ruijie, LUO Bilin, et al. Characteristics of Chang-8 oil reservoir and distribution of oil reservoirs in Maling oilfield, Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(3):514-519.
- [20] 张茜.马岭油田长<sub>8</sub>储层微观孔隙结构特征和渗流特征研究[D].西安:西北大学,2015.
- ZHANG Xi. Research on micro-pore structure and seepage characteristics in Chang 8<sub>1</sub> sandstone reservoir in Maling Oilfield [D]. Xi'an: Northwest University, 2015.
- [21] 大庆油田有限责任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.
- Daqing Oil Field Co Exploration and Development Research Institute. Evaluating methods of oil and gas reservoirs: SY/T 6285-2011[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [22] MORAD S, AL-RAMADAN K, KETZER J M, et al. The impact of diagenesis on the heterogeneity of sandstone reservoirs: A review of the role of depositional facies and sequence stratigraphy [J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(8):1267-1309.
- [23] 任晓霞,李爱芬,王永政,等.致密砂岩储层孔隙结构及其对渗流的影响:以鄂尔多斯盆地马岭油田长8储层为例[J].石油与天然气地质,2015(5):774-779.
- REN Xiaoxia, LI Aifen, WANG Yongzheng, et al. Pore structure of tight sand reservoir and its influence on percolation: Taking the Chang 8 reservoir in Maling oilfield in Ordos Basin as an example [J]. Oil & Gas Geology, 2015(5):774-779.
- [24] 朱筱敏.沉积岩石学[M].北京:石油工业出版社,2009.
- ZHU Xiaomin. Sedimentary petrology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009.
- [25] 杨华,付金华,何海清,等.鄂尔多斯华庆地区低渗透岩性大油区形成与分布[J].石油勘探与开发,2012,39(6):641-648.
- YANG Hua, FU Jinhua, HE Haiqing, et al. Formation and distribution of large low-permeability lithologic oil regions in Huangqing, Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration & Development, 2012, 39(6):641-648.