

◀测井录井▶

doi:10.11911/syztjs.2019100

# 油基钻井液条件下西湖凹陷低孔低渗储层流体性质随钻快速识别方法

张国栋<sup>1</sup>, 鲁法伟<sup>1</sup>, 陈 波<sup>2</sup>, 罗 健<sup>1</sup>, 胡文亮<sup>1</sup>, 何玉春<sup>1</sup>

(1. 中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200335; 2. 中海油田服务股份有限公司, 河北三河 065201)

**摘要:** 为了解决西湖凹陷低孔低渗储层流体性质快速识别困难的问题, 提出了基于油基钻井液条件的时移电阻率测井对比识别法。首先进行了油基钻井液滤失性试验, 研究了其在低孔低渗储层的滤失特征; 然后分析了油基钻井液条件下随钻电阻率测井时、钻井液滤液侵入不同深度和侵入不同类型地层后的地层电阻率变化特征。研究表明, 油基钻井液存在一定的滤失, 其滤失量和岩石物性、压差和时间都有一定关系; 油基钻井液滤液不导电, 其侵入储层后, 如果驱替的是油气, 随钻和复测电阻率基本一致; 如果驱替的是地层水, 则复测电阻率会大于随钻电阻率。因此, 利用油基钻井液的高侵特性, 基于时移测井理念, 提出通过对比浅层实时电阻率与复测电阻率的差异快速识别流体性质的方法。该方法进行了现场应用, 流体性质快速识别结果与后续电缆地层测试泵抽取样结果一致, 验证了其可行性, 具有推广应用价值。

**关键词:** 油基钻井液; 低渗储层; 流体性质; 随钻电阻率; 时移测井; 西湖凹陷

中图分类号: P631.8<sup>+11</sup> 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2019)05-0116-05

## A Fluid Properties while Drilling Rapid Identification Method under Oil-Based Drilling Fluid Conditions for Low Porosity and Low Permeability Reservoirs in the Xihu Sag

ZHANG Guodong<sup>1</sup>, LU Fawei<sup>1</sup>, CHEN Bo<sup>2</sup>, LUO Jian<sup>1</sup>, HU Wenliang<sup>1</sup>, HE Yuchun<sup>1</sup>

(1. Shanghai Branch, CNOOC (China) Co., Ltd., Shanghai, 200335, China; 2. China Oilfield Services Limited, Sanhe, Hebei, 065201, China)

**Abstract:** In order to achieve rapid identification while drilling of fluid properties for low porosity and low permeability reservoirs in the Xihu Sag under oil-based drilling fluid conditions, a delay-resistivity logging comparison identification method was proposed. The fluid loss test of oil-based drilling fluid was carried out, and its fluid loss characteristics in the low porosity and low permeability reservoirs were studied. The characteristics of resistivity change after the drilling fluid filtrate intruded into the different depths and types of formations during the resistivity LWD under oil-based drilling fluid conditions were analyzed. The study found that there was a certain fluid loss in the oil-based drilling fluid, and the amount of fluid loss showed a certain relationship with in-situ physical properties, along with pressure difference and time. The oil-based drilling fluid filtrate was not conductive, and if it invaded the reservoir, and the oil and gas were displaced, the resistivity of LWD and re-tested one were basically the same. If the formation water was displaced, the re-tested resistivity increased, and it could be greater than the resistivity of LWD. Therefore, based on the high intrusion characteristics of oil-based drilling fluids, according to the time-lapse logging concept, a method was proposed to that could quickly identify the fluid properties by comparing the difference between the shallow real-time resistivity and the re-tested resistivity. This method was successfully applied in the field, and the obtained fluid properties rapid identification results were consistent with the results of subsequent cable formation test pumping, indicating that this new technique was feasible and in addition, could potentially have widespread applications.

**Key words:** oil-based drilling fluid; low permeability reservoirs; fluid property; resistivity logging while drilling; time-lapse logging; Xihu Sag

西湖凹陷位于东海陆架盆地浙东坳陷东部, 面积约  $5.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 新生代地层最大沉积厚度超过  $1.0 \times 10^4 \text{ m}$ , 主要目的层为古近系平湖组和花港组地层。储层岩性以长石砂岩和岩屑砂岩为主, 埋深一般大于 3 500.00 m, 受压实成岩作用影响, 储层物性

收稿日期: 2019-01-07; 改回日期: 2019-08-15。

作者简介: 张国栋 (1984—), 男, 山东成武人, 2006 年毕业于中国石油大学 (华东) 资源勘查专业, 高级工程师, 主要从事石油测井技术研究及相关管理工作。E-mail: zhanggd4@cnooc.com.cn。

基金项目: 国家科技重大专项“东海深层低渗-致密天然气勘探开发技术”(编号: 2016ZX05027) 资助。

一般偏低, 孔隙度多在 15% 以下, 渗透率一般小于 10 mD。低孔低渗储层的流体性质识别一直是西湖凹陷油气勘探开发中的难题之一<sup>[1-3]</sup>, 原因是储层束缚水含量高、电阻率对比度低, 同时受储层孔隙结构影响, 水层的电阻率往往也较高, 通过电性判别难度较大<sup>[4-6]</sup>; 另外, 低孔低渗储层毛细管水含量高, 当生产压差增大到一定数值后, 一部分束缚水往往会转化为可动水, 导致生产出水, 影响油气产量, 特别是气层一旦出水将严重影响最终的采收率, 降低油气田开发的经济性<sup>[7-10]</sup>。针对上述问题, 笔者利用油基钻井液的高侵特性, 基于时移测井理念<sup>[11-12]</sup>, 提出时移电阻率测井对比识别法, 即通过对随钻实时电阻率与复测电阻率的差异快速识别流体性质, 并在西湖凹陷低孔低渗储层进行了现场应用, 验证了其可行性和有效性。

## 1 油基钻井液滤失性试验

西湖凹陷低孔低渗储层钻井使用的油基钻井液主要成分为白油, 根据实际需要, 其含量约占钻井液总体积的 70%~85%, 其余成分为水和各种添加剂, 主要起乳化、降滤失和封堵作用。虽然油基钻井液比水基钻井液具有更好的井壁稳定和储层保护作用, 但仍具有一定的侵入特性。为了分析油基钻井液的滤失特征, 利用具有低孔低渗特征的人造岩心进行了滤失性试验, 岩心参数见表 1。

表 1 油基钻井液滤失性试验所用岩心的主要参数

Table 1 Core parameters of oil-based drilling fluid filtration test

编号	长度/cm	直径/cm	渗透率/mD	钻井液密度/(kg·L <sup>-1</sup> )
1	7.39	2.49	199	1.18
2	7.34	2.53	198	1.32

将岩心放入夹持器内, 逐渐加压至 13 MPa, 并持续 24 h, 测量滤失量、滤饼厚度和滤液侵入深度。试验结果为: 1 号岩心滤饼厚 4.0 mm, 滤液侵入深度为 3.5 cm; 2 号岩心滤饼厚 5.0 mm; 滤液侵入深度为 6.5 cm; 滤失量与侵入时间的关系如图 1 所示。

从图 1 可以看出, 油基钻井液存在一定的滤失性, 滤液能够侵入岩心, 滤失量与岩心物性、压差和时间都有一定的关系。这是因为, 油基钻井液滤液侵入地层后, 会对储层中原有流体产生一定的驱替作用, 导致储层电性特征变化, 所以可通过对比储层电性特征变化情况分析判断储层流体的性质。

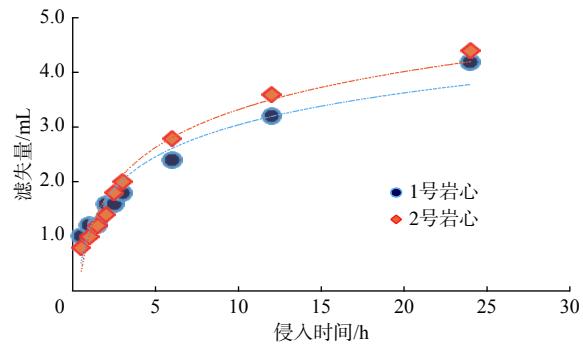


图 1 油基钻井液滤失量与侵入时间的关系

Fig. 1 Relationship between fluid loss and intrusion time of oil-based drilling fluid

## 2 时移电阻率测井对比识别法原理

地层刚钻开时, 油基钻井液滤液侵入量小, 滤饼薄, 冲洗带和过渡带较窄; 钻开一段时间后, 滤饼增厚, 冲洗带和过渡带宽度增大<sup>[13]</sup>, 如图 2 所示。所以, 刚钻开地层进行随钻电阻率测井时, 该电阻率一般可以代表地层真电阻率, 即原状地层电阻率  $R_t$ ; 地层钻开一段时间后复测电阻率时, 电阻率特别是探测深度较浅的电阻率( $R_s$ )会包含冲洗带和过渡带的流体性质变化信息。对于水基钻井液,  $R_s$  相对于  $R_t$  增大或减小, 取决于钻井液滤液矿化度和地层水矿化度的相对大小关系; 但对于油基钻井液, 由于钻井液滤液不导电, 当地层水被驱替后, 复测时电阻率  $R_s$  会变大, 即复测  $R_s$  大于随钻测量  $R_s$ 。时移电阻率测井对比识别法就是利用含有不同性质流体的储层被油基钻井液滤液驱替后、表现出不同的电性变化特征进行流体识别。

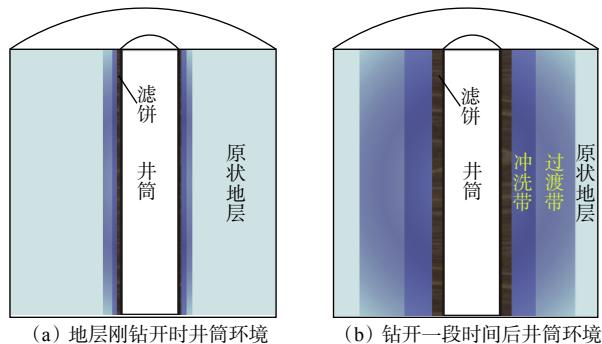


图 2 地层刚钻开和钻开一段时间后的井筒环境

Fig. 2 Wellbore environments after penetrating the formation soon and drilling for a while

为了进一步说明时移电阻率测井对比识别法的技术原理, 分别分析了探测深度与被探测地层电阻

率的关系,以及油基钻井液滤液侵入不同地层后的电阻率变化特征。

首先用 Schlumberger 公司的 ARC 随钻电阻率测井仪(以下简称 ARC 测井仪)分析探测深度与被探测地层电阻率的关系。该仪器有 5 个源距(406.4, 558.8, 711.2, 863.6 和 1 016.0 mm)的发射器,采用 2 种发射频率(400 kHz 和 2 MHz),所以可以获得 20 条电阻率曲线(10 条相位电阻率和 10 条衰减电阻率)。其中,发射频率为 2 MHz 时,ARC 测井仪探测深度与地层相位电阻率的关系曲线如图 3 所示。

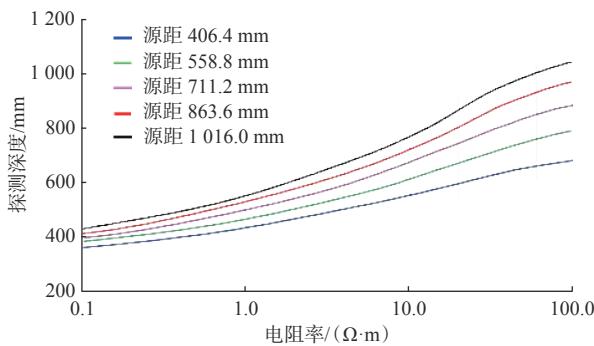


图 3 P16H 探测深度与被探测地层电阻率的关系曲线  
Fig. 3 Relationship curve between P16H detection depth and the resistivity of measured formation

由图 3 可知,P16H(源距为 406.4 mm, 频率为 2 MHz 的相位电阻率)探测深度最小,但其探测深度与地层电阻率相关,电阻率越高,探测深度越大。由于油基钻井液滤液侵入深度小,所以可以利用 P16H 电阻率的变化率分析侵入深度。

然后分析油基钻井液滤液分别侵入油气层、水层、含油气水层和干层后,冲洗带电阻率的变化情况。对于油气层,油气和油基钻井液滤液都是不导电的流体介质,油基滤液侵入地层后,地层电阻率基本不变;对于水层、含油气水层或同层,油基钻井液滤液侵入后会减小导电流体(水)的体积,导致储层的电阻率升高。实际复测时,同时测量砂岩储层及上下泥质围岩的电阻率,由于泥岩为非渗透性层,所以随钻实时电阻率和复测电阻率保持一致,通过使围岩电阻率重合,就可以确定砂岩储层电阻率的变化。钻井液滤液的侵入深度与储层物性、井筒过平衡压差、侵入时间及钻井液特性都有关系。例如,西湖凹陷某区域的典型低孔低渗储层,孔隙度为 9%~18%,渗透率为 1~50 mD,在较大正压差和较长完钻时间下的侵入深度一般较大。而致密层由于储层物性太差,滤液基本无侵入,所以地层电阻率基本不变。不同地层的具体变化特征见表 2(其中,P16H 实时,指 P16H 随钻实时电阻率;P16H 复测,指 P16H 复测电阻率)。

表 2 油基钻井液滤液侵入不同地层后的电阻率变化特征

Table 2 Characteristics of resistivity change after oil-based drilling fluid filtrate invaded different formations

地层类型	钻井液滤液侵入情况	电阻率变化情况	ARC 测井仪测量结果
油气层	一定压差下侵入	不变	P16H 实时≈P16H 复测
水层	一定压差下侵入	升高	P16H 实时<P16H 复测
含油气水层或同层	一定压差下侵入	升高	P16H 实时<P16H 复测
致密层	基本无侵入	不变	P16H 实时≈P16H 复测

### 3 现场应用

时移电阻率测井对比识别法在西湖凹陷 X1 井和 X2 井进行了应用,均取得了成功,证明该方法可行且有效。

X1 井 4 450.00~4 475.00 m 井段钻遇油气显示层,电阻率最高 50  $\Omega\cdot\text{m}$ ,气测全量  $T_g$  最高 12.0%,岩性为长石细砂岩,孔隙度为 9%~11%,渗透率为 1~5 mD,参照邻井信息,初步判断该层为气层。对该层进行了随钻电阻率复测,结果如图 4 所示。图 4 中,第五道“电阻率对比”指 P16H 随钻实时电阻

率(P16H 实时)与 P16H 复测电阻率(P16H 复测)的对比;P16H 复测值大于 P16H 实时值(对应部分进行了蓝色充填),表明该层为非纯气层,存在一定量的可动水,或者说在该井钻井液过平衡压差约 6.9 MPa 的条件下,储层孔隙中的部分水可以流动。

X1 井完钻后,在井深 4 471.50 m 处进行了电缆地层测试泵抽取样(MDT 仪器),泵抽至 45 min 时,通过井下流体识别仪 IFA 开始观察到地层天然气流体,流线中的成分主要为天然气和油基钻井液;泵抽至 160 min 时,泵抽压差增大至 4.13 MPa,流线出现了明显的地层水信号,说明在该压差下一部分毛细管水开始流动,转变为可动水。泵抽结束时,流

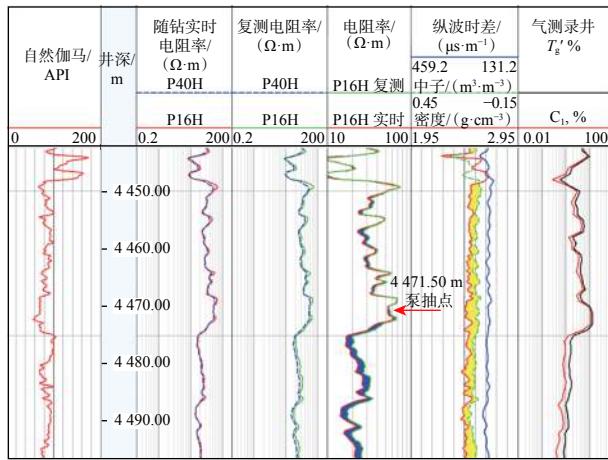


图 4 X1 井随钻电阻率实时值与复测值的对比

Fig. 4 Comparison on the resistivity while drilling real-time measurement and the re-tested value in Well X1

线中水的体积比约为 17%，该结果与电阻率复测分析结果完全一致（如图 5 所示）。这说明该层有一部分毛细管水在压差大于 4.13 MPa 时是可以流动的，可以称这部分水为弱束缚水；后续进行地层测试或开发时，生产压差应小于 4.13 MPa，否则会导致地层出水，影响天然气产能。

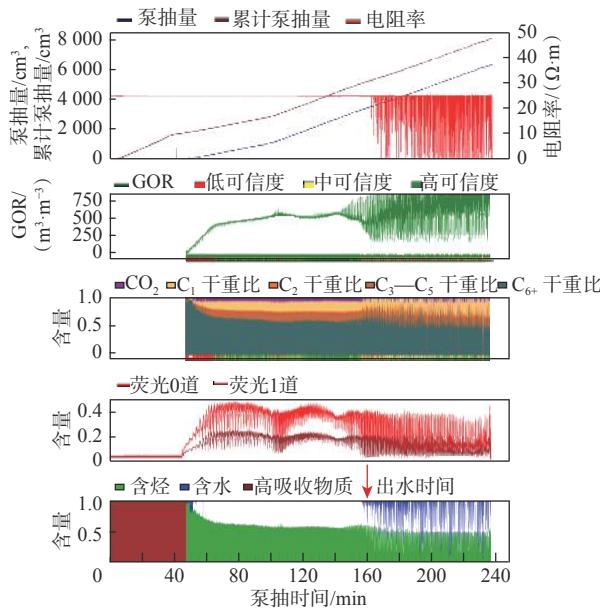


图 5 X1 井井深 4 471.50 m MDT 泵抽流体性质综合识别

Fig. 5 Comprehensive identification of 4 471.50 m MDT pumping fluids properties in Well X1

X2 井与 X1 井处于同一构造带，应用油基钻井液钻进。该井 4 317.00~4 336.00 m 井段钻遇油气显示层，岩性为长石细砂岩，孔隙度为 10%~15%，渗透率为 1~10 mD。储层上部电阻率约 24 Ω·m，气测全量  $T_g$  最高约 6.0%；储层下部电阻率为 13 Ω·m，

气测全量  $T_g$  约为 2.8%。与邻区同层位油气层相比，该层整体电阻率较低，认为该层未达到纯油气层的标准，为此进行了电阻率随钻与复测对比，结果如图 6 所示。该井钻井液过平衡压差为 7.13 MPa。图 6 中，第五道为 P16H 实时值和复测值的对比结果，可以看出井深 4 330.00 m 以浅的 P16H 实时值与 P16H 复测值一致，说明该层不含可动水，为纯油气层；井深 4 330.00 m 以深的 P16H 复测值明显大于 P16H 实时值，说明该层含可动水，推测为气水同层。

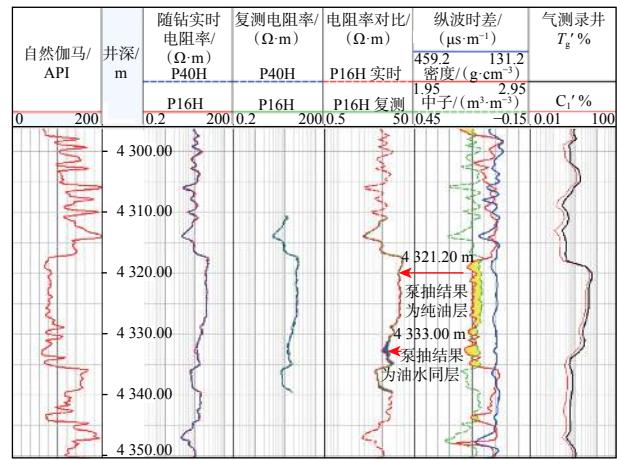


图 6 X2 井随钻电阻率实时值与复测值的对比

Fig. 6 Comparison on the resistivity while drilling real-time measurement and the re-tested value in Well X2

完钻后，X2 井在井深 4 321.20 和 4 333.00 m 处分别进行了 MDT 泵抽取样。井深 4 321.20 m 处泵抽压差约 13.8 MPa，泵抽时间为 115 min，证实为纯轻质油层，不含水；井深 4 333.00 m 处泵抽压差为 18.3 MPa，泵抽时间为 120 min，后期含水率为 60%，证实为油水同层，流体性质识别具体情况如图 7 所示。该井的泵抽结果与电阻率复测对比分析结果完全一致，再次证明了该方法的可行性和有效性。

#### 4 结论与建议

1) 油基钻井液滤液侵入地层后，对储层中原有流体有一定驱替作用，从而引起储层电性特征的变化，通过对比该变化情况，就能够对储层中原有流体性质进行分析判断。

2) 低孔低渗储层岩性和孔隙结构复杂，仅仅依靠对比电阻率的高低或者邻区经验识别流体的性质很难得到准确的结果。油基钻井液条件下利用时移电阻率测井对比识别法，可以快速识别低孔低渗储层的流体性质，现场应用也验证了该方法具有较高

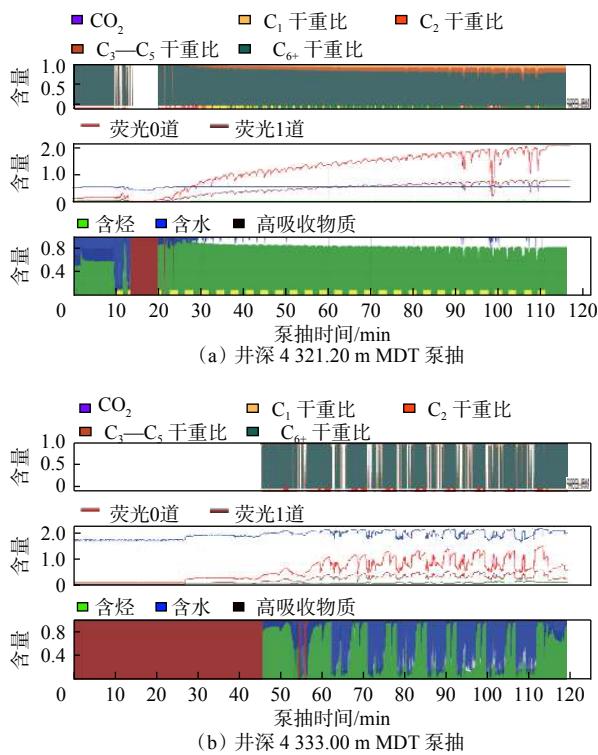


图 7 X2 井井深 4 321.20 和 4 333.00 m MDT 泵抽流体性质综合识别

Fig. 7 Comprehensive identification of MDT pumping fluid properties at 4 321.20 and 4 333.00 m in Well X2

的准确性。

3) 移电阻率测井对比识别法具有较好的通用性, 只要使用随钻电阻率和油基钻井液均可进行借鉴, 特别是对于一些新区探井, 该方法能够快速识别流体性质, 为后续作业选择提供指导, 提高作业效率并节省成本。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 张国华. 西湖凹陷高压形成机制及其对油气成藏的影响 [J]. 中国海上油气, 2013, 25(2): 1–7.  
ZHANG Guohua. Origin mechanism of high formation pressure and its influence on hydrocarbon accumulation in Xihu Sag[J]. China Offshore Oil and Gas, 2013, 25(2): 1–7.
- [2] 张国栋. 气测录井全量正演计算方法判别低孔低渗储层含气性 [J]. 中国海上油气, 2017, 29(1): 46–51.  
ZHANG Guodong. Gas bearing interpretation method for low porosity and low permeability reservoir with total gas forward calculation method of gas logging data[J]. China Offshore Oil and Gas, 2017, 29(1): 46–51.
- [3] 张国栋, 庄春喜, 黑创. 东海西湖凹陷探井储层压后缝高评价新方法 [J]. 石油钻探技术, 2016, 44(5): 122–126.  
ZHANG Guodong, ZHUANG Chunxi, HEI Chuang. New techniques for fracture height determination in exploration wells drilled in the Xihu Sag, East China Sea[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(5): 122–126.
- [4] 郑小敏, 成志刚, 林伟川, 等. 致密砂岩气藏启动压差与可动水变化规律实验研究 [J]. 测井技术, 2014, 38(1): 33–38.  
ZHENG Xiaomin, CHENG Zhigang, LIN Weichuan, et al. Change law experimental study on trigger pressure difference and mobile water in tight sand gas reservoir[J]. Well Logging Technology, 2014, 38(1): 33–38.
- [5] 李霞, 赵文智, 周灿灿, 等. 低孔低渗碎屑岩储集层双孔隙饱和度模型 [J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 82–91.  
LI Xia, ZHAO Wenzhi, ZHOU Canan, et al. Dual-porosity saturation model of low-porosity and low-permeability clastic reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 82–91.
- [6] 王翠平. 致密含气砂岩储层参数及可动流体的定量评价 [D]. 长春: 吉林大学, 2013.  
WANG Cuiping. Quantitative evaluation of reservoir parameters and movable fluid in tight gas sandstone[D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [7] 杨涛涛, 王霞, 何文昌. 低阻油气层成因及测井识别评价方法分析 [J]. 油气地球物理, 2017, 15(4): 1–6.  
YANG Taotao, WANG Xia, HE Wenchang. Analysis of genesis of low resistivity oil gas layer and its logging identification evaluation[J]. Petroleum Geophysics, 2017, 15(4): 1–6.
- [8] 叶礼友, 高树生, 杨洪志, 等. 致密砂岩气藏产水机理与开发对策 [J]. 天然气工业, 2015, 35(2): 41–46.  
YE Liyou, GAO Shusheng, YANG Hongzhi, et al. Water production mechanism and development strategy of tight sandstone gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(2): 41–46.
- [9] 张旭, 姜瑞忠, 崔永正, 等. 考虑束缚水时变的致密气藏数值模拟研究 [J]. 中国海上油气, 2017, 29(5): 82–89.  
ZHANG Xu, JIANG Ruizhong, CUI Yongzheng, et al. Numerical simulation study on tight gas reservoir considering the variation of irreducible water saturation with time[J]. China Offshore Oil and Gas, 2017, 29(5): 82–89.
- [10] 鹿克峰, 徐振中, 冯景林. 一种定量表征油水过渡区饱和度分布的实用方法 [J]. 中国海上油气, 2011, 23(6): 387–390.  
LU Kefeng, XU Zhenzhong, FENG Jinglin. A practical method to quantitatively characterize oil saturation distribution in oil-water transition zones[J]. China Offshore Oil and Gas, 2011, 23(6): 387–390.
- [11] 陈福煊. 电阻率时间推移测井解释方法研究 [J]. 天然气工业, 1996, 16(1): 25–28.  
CHEN Fuxuan. Investigation on the interpretation method of resistivity time-lapse logging[J]. Natural Gas Industry, 1996, 16(1): 25–28.
- [12] 孙建孟, 张海涛, 马建海, 等. 用时间推移测井计算原始含水饱和度新方法研究 [J]. 测井技术, 2003, 27(3): 217–220.  
SUN Jianmeng, ZHANG Haitao, MA Jianhai, et al. On a new method for calculating in-situ water saturation with time-lapse logging[J]. Well Logging Technology, 2003, 27(3): 217–220.
- [13] 吴飞. 低孔渗砂岩储层泥浆侵入模拟及侵入特征研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2015.  
WU Fei. Imitation and characteristic analysis of mud filtrate invasion in low porous and low permeable sandstone reservoir[D]. Qingdao: China University of Petroleum (Huadong), 2015.