

引用格式:李国艳,常琳,陈猛,等.考虑注水体积倍数及离子交换的水淹层剩余油评价方法[J].油气藏评价与开发,2023,13(6):801-808.  
LI Guoyan, CHANG Lin, CHEN Meng, et al. Evaluation method of remaining oil in water-flooded formation considering injected-water volumes and ion exchange [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(6): 801-808.  
DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2023.06.011

## 考虑注水体积倍数及离子交换的水淹层剩余油评价方法

李国艳<sup>1</sup>,常琳<sup>1</sup>,陈猛<sup>2</sup>,钟萍<sup>1</sup>,陈杰<sup>1</sup>,王琳<sup>1</sup>,李玉萍<sup>1</sup>,张煜<sup>3</sup>

(1. 中国石油青海油田分公司勘探开发研究院,甘肃 敦煌 736202; 2. 西南石油大学地球科学与技术学院,四川 成都 610500; 3. 中国石油青海油田分公司钻采工艺研究院,甘肃 敦煌 736202)

**摘要:**准确求取注水开发过程中水淹层混合溶液矿化度和电阻率是评价油藏开发中后期储层水淹状况及剩余油饱和度的关键基础。通过了解岩心尺度不同矿化度水驱油岩电实验模拟矿场注水开发过程,理论分析建立考虑不同矿化度模拟地层水驱替过程注入水体积倍数及离子交换作用效率影响的混合地层水矿化度表征模型,准确表征了注水开发过程中储层混合流体性质变化,有效提升不同矿化度水驱过程中水淹层地层水电阻率计算精度。利用建立的方法在青海油田H区块实例井进行应用,计算水淹层含油饱和度与密闭取心分析含油饱和度符合率达到92.33%,解释水淹层与实际生产动态匹配性较好,证实建立模型的有效性,为水淹层高精度评价定量提供支撑。

**关键词:**水淹层;离子交换;注水体积倍数;混合液电阻率;剩余油饱和度

中图分类号:TE311

文献标识码:A

### Evaluation method of remaining oil in water-flooded formation considering injected-water volumes and ion exchange

LI Guoyan<sup>1</sup>, CHANG Lin<sup>1</sup>, CHEN Meng<sup>2</sup>, ZHONG Ping<sup>1</sup>, CHEN Jie<sup>1</sup>, WANG Lin<sup>1</sup>, LI Yuping<sup>1</sup>, ZHANG Yu<sup>3</sup>

(1. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Qinghai Oilfield Company, Dunhuang, Gansu 736202, China; 2. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 3. Drilling and Production Technology Research Institute, PetroChina Qinghai Oilfield Company, Dunhuang, Gansu 736202, China)

**Abstract:** Accurately calculating the salinity and resistivity of mixed solution in water-flooded layers is the key basis for evaluating the water-flooded condition and remaining oil saturation in middle-late development stage. This paper focuses on simulating water-flooding processes with varying salinities and measuring resistivity at the rock core scale. A novel model for calculating the resistivity of mixed solutions was developed, taking into account the efficiency of injected-water sweep and ion exchange. This model was formulated based on theoretical analysis and provides an accurate representation of the properties of reservoir mixed solutions during water-flooding. It significantly enhances the accuracy of mixed-water resistivity calculations. The established model was successfully used in H Block of Qinghai Oilfield and the calculated water saturation was consistent well with the core analysis result with the total coincidence rate reached 92.33%. The interpreted water-flooded layers were matched well with the actual production performance, the effectiveness of the established model was validated and lays a foundation for quantitative evaluation in the water-flooded layers.

**Keywords:** water-flooded layers; ion exchange; injected-water volumes; mixed solution resistivity; remaining oil saturation

收稿日期:2022-08-17。

第一作者简介:李国艳(1982—),女,硕士,高级工程师,主要从事开发地质相关研究。地址:甘肃省酒泉市敦煌七里镇青海油田勘探开发研究院,邮政编码:736202。E-mail:55837178@qq.com

通信作者简介:陈猛(1986—),男,博士,副教授,主要从事油气田开发过程测井方法原理、资料处理解释及综合评价应用研究。地址:四川省成都市新都区新都大道8号,邮政编码:610500。E-mail:chenmengyuz@163.com

基金项目:国家自然科学基金“致密油储层孔隙尺度注水吞吐油水两相渗流机理研究”(41804141);油气藏地质及开发工程国家重点实验室开放基金“致密气藏孔隙尺度多因素耦合作用渗吸机理研究”(PLN201933)。

随着油田开发的逐步深入,原始油藏边底水的推进和注水开发使得越来越多的油田出现不同级别的水淹,侵入水作用使得储层油水分布发生系列变化,储层含水饱和度普遍上升明显<sup>[1]</sup>。同时,受外来水侵入程度和不同作用阶段的影响,储层含油饱和度降低的同时原始地层水性质亦会发生相应的变化,致使储层电性响应特征复杂。针对水淹后储层评价,关键是准确求取储层的剩余油饱和度,而其中水淹后地层水混合液电阻率的准确求取是评价地层剩余油饱和度的关键基础。

目前水淹层测井技术主要包括常规勘探测井、套后剩余油饱和度测井等技术<sup>[2-6]</sup>,受套后剩余油饱和度测井监测成本和监测覆盖率限制,目前水淹层评价依旧以常规勘探测井技术为主,同时辅助以一定量套后剩余油饱和度测井。针对勘探测井资料的水淹层评价,国内外学者围绕水淹后混合地层水电阻率定量评价开展了大量的物理实验、数值模拟和理论推导研究<sup>[7-13]</sup>,在水淹层剩余油饱和度定量评价方面以国内研究居多<sup>[14-15]</sup>。对应建立的混合液地层水电阻率计算方法主要包含混合液取样直接测试法<sup>[16]</sup>、交汇图版法<sup>[17-18]</sup>、测井曲线(如自然电位、电阻率曲线)反演法<sup>[19-20]</sup>等,上述各类方法在计算混合溶液电阻率中被一定范围采用,但受不同地区矿场施工和井眼、地层及围岩等因素影响,几类方法存在成本较高且精度有限的局限,并未广泛应用<sup>[12]</sup>。其后,基于并联导电模型<sup>[21-23]</sup>、一阶偏导阿尔奇模型、动静态资料综合法<sup>[24]</sup>、物质平衡法模型<sup>[20,24-26]</sup>、离子交换模型<sup>[9,27-28]</sup>、多参数拟合模型<sup>[29]</sup>等被提出并被学者进行改进以提升水淹层地层水电阻率计算精度。朱学娟等<sup>[30]</sup>通过考虑注水开发阶段的推进,研究建立了基于不同注水开发阶段水淹层混合地层水电阻率计算方法;张恒荣等<sup>[12]</sup>研究引入动态的未被注入水混合的毛管束缚水变量,提出了一种动态混合导电模型;赵军等<sup>[31]</sup>研究将混合地层水分为无离子交换、离子交换完全以及离子交换未充分完成3个阶段,利用物质平衡方程和并联电阻关系式推导出混合地层水电阻率;秦敏等<sup>[32]</sup>提出一种基于水驱油过程微元法和离子有效交换比计算地层混合液电阻率的微元动态物质平衡法,大大提升混合溶液电阻率计算精度。张建升等<sup>[26]</sup>基于实验结果分析建立了胶结指数 $m$ 和饱和度指数 $n$ 与混合地层水矿化度关系式,并通过迭代反演得到水淹层含油饱和度,实

现了渤海S油田水淹层定量评价。上述方法模型一定程度上反映水淹过程不同阶段、不同水淹级别条件注入水与原始地层水的相互作用,但水淹过程中,储层微观孔隙结构及原生地层水分布方式,会对注水开发过程混合流体作用产生直接影响,进而影响混合流体矿化度及电阻率表征。

通过岩心尺度不同矿化度水驱油模拟实验,综合理论分析研究建立对应的储层地层水混合液电阻率计算模型和储层电阻率表征模型,较好地实现了水淹过程不同阶段储层电阻率变化表征。并以青海油田H区块为例进行实测资料处理,验证建立模型的有效性。

## 1 实验研究

为明确不同矿化度地层水水淹过程储层电阻率变化特征,结合目标区储层岩心开展不同模拟地层水驱油实验。实验选用青海油田H区块J1井目标层岩心样品,样品洗盐洗油烘干后基于国家标准《岩心分析方法:GB/T 29172—2012》测得对应的氦气孔隙度和氮气渗透率,其中样品S1孔隙度为21.8%,渗透率为 $72.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,样品S2孔隙度为14.36%,渗透率为 $11.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。基于高压压汞毛管压力数据分析,获取样品对应的孔喉分布见图1,孔喉半径主要分布于0.1~10.0  $\mu\text{m}$ 。

实验在实验室内标准状况下完成,具体实验流程:

### 1) 样品准备

将钻取的岩心样品制备为标准柱塞样,洗盐洗油烘干,并测试获取基础物性数据,然后采用循环加压的方法将样品老化处理。

### 2) 饱和水状态制备及电阻率测量

将所选实验样品采用抽真空加压的方法饱和矿化度170 000 mg/L模拟地层水(NaCl溶液),采用数字电桥测量得到对应的饱和水状态岩石电阻率。

### 3) 模拟饱和油状态制备及电阻率测量

采用模拟原油低速(0.01、0.05、0.10 mL/min)驱替饱和水岩心样品,每一次驱替至样品中无模拟地层水产出时调整驱替速度,直至样品最终无模拟地层水产出时止,此时认为样品为模拟地层饱和油状态,计量出水量,并测量得到样品对应电阻率。

### 4) 水淹过程模拟及电阻率测量

分别采用配置的模拟注入水(3 000、40 000、

70 000、100 000 mg/L)以矿化度从低到高的方式低速驱替岩心样品模拟注水开发过程,监测水驱油不同阶段出水量和稳定时电阻率,得到实验过程不同含水饱和度条件岩心样品电阻率。完成一种矿化度地层水模拟水淹实验后,将样品洗盐洗油烘干再次饱和和矿化水,重复上述步骤,直至完成所有不同矿化度模拟地层水条件水淹模拟实验。实验得到2块岩心样品电阻率变化见图2。

实验表明:

1) 采用100 000 mg/L高矿化度模拟水驱替岩心样品电阻率持续下降,含水饱和度小于70%时岩心整体电阻率在驱替过程中下降较为明显,后电阻率下降逐渐趋缓。以S1样品为例,饱和油时(束缚水饱和度为24.0%)岩心电阻率为 $9.799 \Omega \cdot m$ ,当采用

100 000 mg/L氯化钠溶液驱替至含水饱和度下降至66.6%时,电阻率下降至 $2.159 \Omega \cdot m$ ,至最终残余油状态(含水饱和度72.8%)时电阻率下降至 $2.046 \Omega \cdot m$ 。

2) 采用矿化度70 000 mg/L及以下模拟溶液驱替过程中,电阻率开始下降明显而后变化平缓,当达到某一临界值时,岩心电阻率整体升高,且驱替溶液矿化度越低,岩心电阻率升高越明显。以S1号样品为例,饱和油岩石含水饱和度为28.8%,电阻率为 $8.333 \Omega \cdot m$ ,用3 000 mg/L压水驱替至含水饱和度到67.1%附近,电阻率下降至 $4.921 \Omega \cdot m$ ,随着含水饱和度的升高,岩心电阻率呈现非对称U型形态变化,至残余油状态样品电阻率升高至 $42.707 \Omega \cdot m$ ,对应40 000 mg/L和70 000 mg/L残余油状态岩心电阻率分别为 $7.087 \Omega \cdot m$ 和 $2.609 \Omega \cdot m$ 。

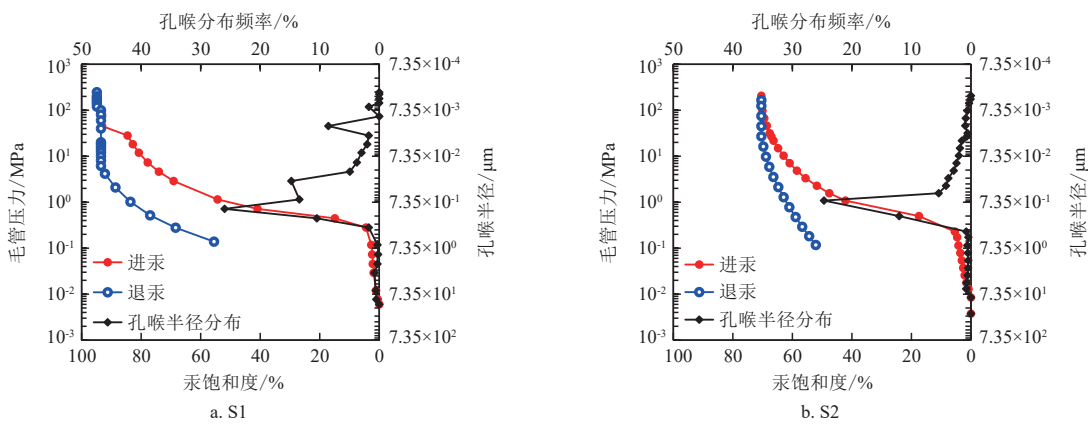


图1 样品S1和S2高压汞毛管压力曲线及孔喉半径分布

Fig. 1 Mercury injection curves and pore-throat distributions for sample S1 and sample S2

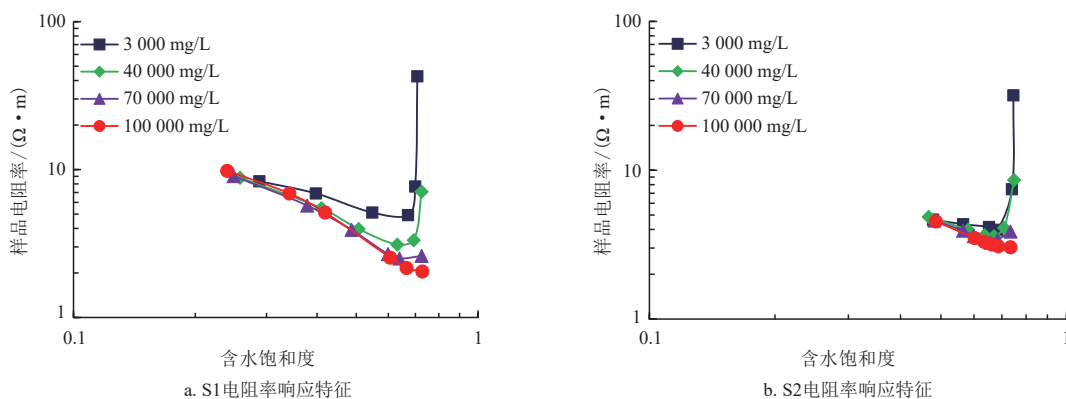


图2 水驱油过程岩石样品电阻率响应特征

Fig. 2 Resistivity change feature of rock samples during water flooding

综合分析表明,原始地层水矿化度与注入水矿化度比值 $N$ 小于某一临界值(一般为3)时,注入水与原始地层水矿化度较为接近。随着水淹程度增加,储层中油相被驱出,电阻率下降,当水淹程度很高时,电阻率趋于平缓或略有抬升;当 $N$ 增大至某一范围(3~5)时,此时注入水矿化度小于原始地层水,随着水淹程度的增加,电阻率呈现先降低后升高的U型特征,U型的左端即为初始阶段孔喉中原油被水驱出导致整体电阻率降低,U型的右端为水淹后期注入水如原始水相互作用,水淹层电阻率趋于油层电阻率值;当 $N$ 值更大时,此时注入水矿化度远小于原始地层水,U型的右端较高,注入水与初始束缚水充分作用致使储层电阻率高于原始饱和油状态。电阻率的U型变化,表明注入水与地层水之间存在离子交换以达到离子平衡,且随水淹程度的增加,该作用越不可忽略。

## 2 表征模型

水驱油过程中,受孔喉微观结构及储层非均质性影响,注入水在地层中多呈现指进式驱替。由于注入水与孔喉束缚水间离子质量分数的差异,注入水与孔喉束缚水间存在离子交换作用,且该作用是一个动态过程,即在水淹初期离子交换作用较弱,而至最终残余油状态,孔喉内流体矿化度逐渐趋近于注入水矿化度<sup>[28,31-32]</sup>。在地层逐步水淹加剧过程中,随着注入水体积倍数增加,储层内含油饱和度降低,注入水与孔喉原生水离子交换作用逐步增强。由于水驱油过程中,注入水流体速度极低,因此忽略流体与骨架部分作用导致孔喉物性变化,同时,不考虑流体和岩石骨架的弹性变化影响。注水过程中基于物质平衡方程,注入流体含盐量与孔喉内原始含盐量之和应等于产出流体含盐量与当前孔喉流体含盐量之和。

整体关系可表示为:

$$Q_i C_i + V_p S_{wi} C_{wi} = Q_{wp} C_{wp} + V_p S_w C_{wa} \quad (1)$$

式中: $Q_i$ 为注入水量,单位 $m^3$ ;  $C_i$ 为注入水矿化度,单位 $mg/L$ ;  $V_p$ 为储层孔喉体积,单位 $m^3$ ;  $S_{wi}$ 为储层束缚水饱和度;  $C_{wi}$ 为初始束缚水矿化度,单位 $mg/L$ ;  $Q_{wp}$ 为产出水量,单位 $m^3$ ;  $C_{wp}$ 为含水饱和度为 $S_w$ 时产出水矿化度,单位 $mg/L$ ;  $S_w$ 为水淹后当前含水饱和度;  $C_{wa}$

为含水饱和度为 $S_w$ 时孔喉内全部水平均矿化度,单位 $mg/L$ 。

而注入过程含水饱和度的增加是一个渐进式过程,因此,水驱过程中对应任一含水饱和度 $S_w$ 条件下孔喉流体发生离子交换的束缚水体积仅占总束缚水体积的一部分。假定某一稳定状态总注入水体积为水驱后产出油气体积 $V_p(S_w - S_{wi})$ 的 $k$ 倍,孔喉内原始束缚水中发生离子交换体积占总束缚水体积的比例为 $\alpha$ ,发生离子交换部分溶液矿化度整体均衡,则有:

$$kV_p(S_w - S_{wi})C_i + V_p S_{wi} C_{wi} = [(k-1)V_p(S_w - S_{wi})]C_{wp} + V_p S_w C_{wa} \quad (2)$$

孔喉内当前水相含盐量可表示为:

$$V_p S_w C_{wa} = V_p(S_w - S_{wi})C_{wp} + V_p \alpha S_{wi} C_{wp} + V_p(1-\alpha)S_{wi}C_{wi} \quad (3)$$

其中,注入水体积倍数 $k$ 表示为<sup>[12]</sup>:

$$k = \frac{1}{1 - F_w} \quad (4)$$

式(2)一式(4)中: $k$ 为注入水体积倍数; $F_w$ 为含水饱和度为 $S_w$ 时的产水率; $\alpha$ 为含水饱和度为 $S_w$ 时原始束缚水中发生离子交换的比例。

随着注水体积倍数增加,储层水淹程度加剧,持续水洗使得注入水波及面积增大,储层含水饱和度不断增加,注入水与原始地层水进一步充分接触完成离子动态交换。在刚开始注入水瞬间,无注入水进入地层储层离子交换率为0,当油层含水饱和度达到 $(1-S_{or})$ 时,此时,孔喉空间内油相被完全驱出,注入水与原生束缚水离子充分交换,储层离子交换率无限接近为1。因此,地层驱油效率越高,离子交换率越大,通过储层含水饱和度的相对变化,可一定程度上表征离子交换率, $\alpha$ 等效表示为:

$$\alpha = \frac{S_w - S_{w0}}{1 - S_{or} - S_{wi}} \quad (5)$$

式中: $S_{or}$ 为残余油饱和度; $S_{w0}$ 为储层初始含水饱和度(对于纯油层则等于束缚水饱和度)。

则将式(2)和式(3)联合,可得当地层含水饱和度为 $S_w$ 时发生离子交换部分混合液矿化度与产出水矿化度相等,表示为:

$$C_{wz} = C_{wp} = \frac{k(S_w - S_{wi})C_i + \alpha S_{wi}C_{wi}}{k(S_w - S_{wi}) + \alpha S_{wi}} \quad (6)$$

根据混合液电阻率 $R_{wz}$ 与矿化度 $C_{wz}$ 的关系<sup>[25,32]</sup>,

则有:

$$R_{wz} = \frac{0.55965 + 165963.07/C_{wz}^{0.995}}{T + 21.5} \quad (7)$$

式(6)一式(7)中: $C_{wz}$ 为含水饱和度为 $S_w$ 时发生离子交换混合液矿化度,单位mg/L; $R_{wz}$ 为含水饱和度为 $S_w$ 时孔喉内流体离子交换部分流体的电阻率,单位 $\Omega \cdot m$ ;  $T$ 为当前储层温度,单位 $^{\circ}C$ 。

基于并联导电机理(图3),水淹层地层含水饱和度为 $S_w$ 时,孔喉内混合液总电阻率 $R_{wa}$ 与各部分流体电阻率间关系可表示为:

$$\frac{S_w}{R_{wa}} = \frac{(1 - \alpha)S_{wi}}{R_{wi}} + \frac{\alpha S_{wi}}{R_{wz}} + \frac{S_w - S_{wi}}{R_i} \quad (8)$$

对应储层电阻率 $R_i$ 计算依据 Archie 公式:

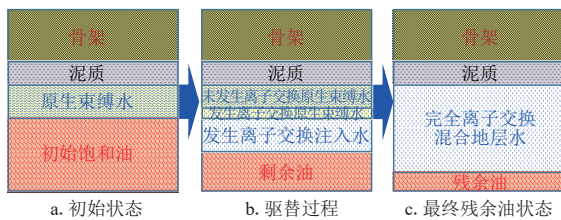


图3 水淹过程离子交换等效示意图

Fig. 3 Equivalent sketch of ion exchange during water flooding

$$R_i = \frac{abR_{wa}}{\varphi^m S_w^n} \quad (9)$$

式(8)一式(9)中: $R_{wa}$ 为含水饱和度为 $S_w$ 时孔喉内流体的总电阻率,单位 $\Omega \cdot m$ ;  $R_i$ 为储层电阻率,单位 $\Omega \cdot m$ ;  $\varphi$ 为储层孔隙度;  $R_{wi}$ 为初始束缚水电阻率,单位 $\Omega \cdot m$ ;  $R_i$ 为注入水电阻率,单位 $\Omega \cdot m$ ;  $a, b, m, n$ 为岩电参数,基于岩电实验获取。

研究表明,水淹过程中岩电参数 $m$ 和 $n$ 会随着地层水性质和流体饱和度变化而发生改变<sup>[26,33-34]</sup>,表现为混合液矿化度和储层含水饱和度的函数,基于实验结果拟合分析可得:

$$m = 0.2756C_{wz}^{0.1788} (R^2 = 0.948) \quad (10)$$

$$n = 0.5159S_w^{0.0981} (R^2 = 0.967) \quad (11)$$

基于公式(8)和式(9)建立的水淹过程地层混合液平均电阻率和储层电阻率关系,结合目标储层岩心S1样品不同矿化度水驱油实验监测样品电阻率变化,同时选择100 000 mg/L条件驱替束缚水和残余油饱和度作为参考基准,初始束缚水饱和度为24.0%,残余油饱和度为27.2%,则模拟计算得到水驱油过程样品电阻率变化见图4,结果表明采用模型可以较好地表征水淹过程储层电阻率整体变化特征。

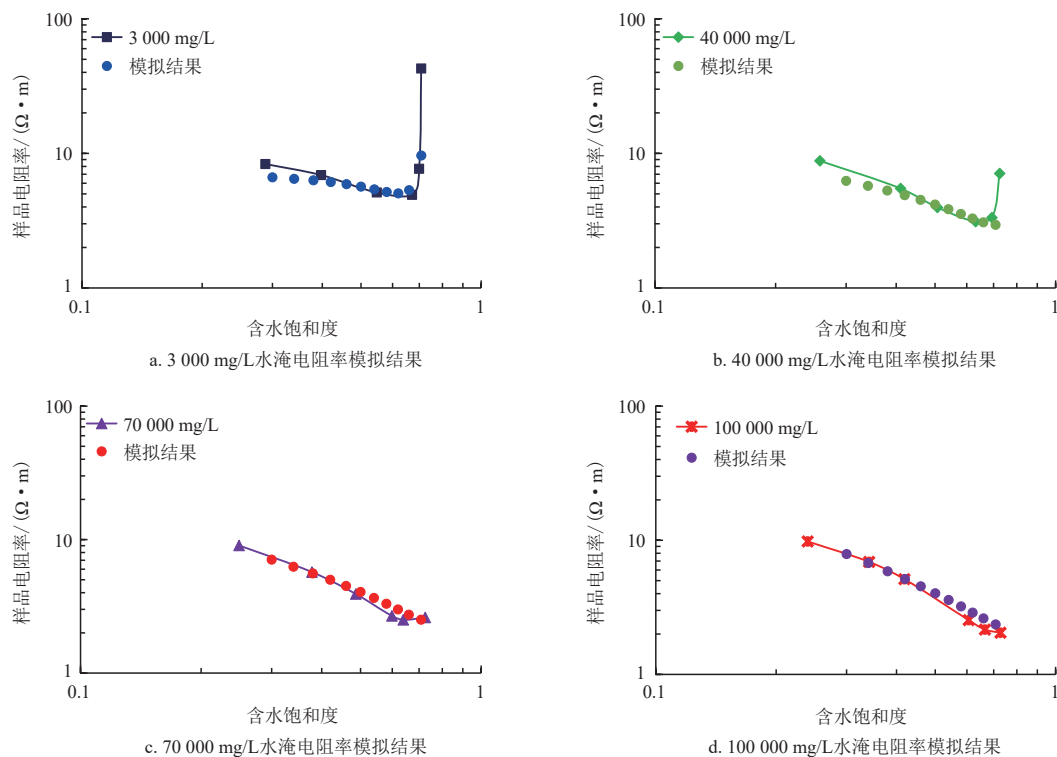


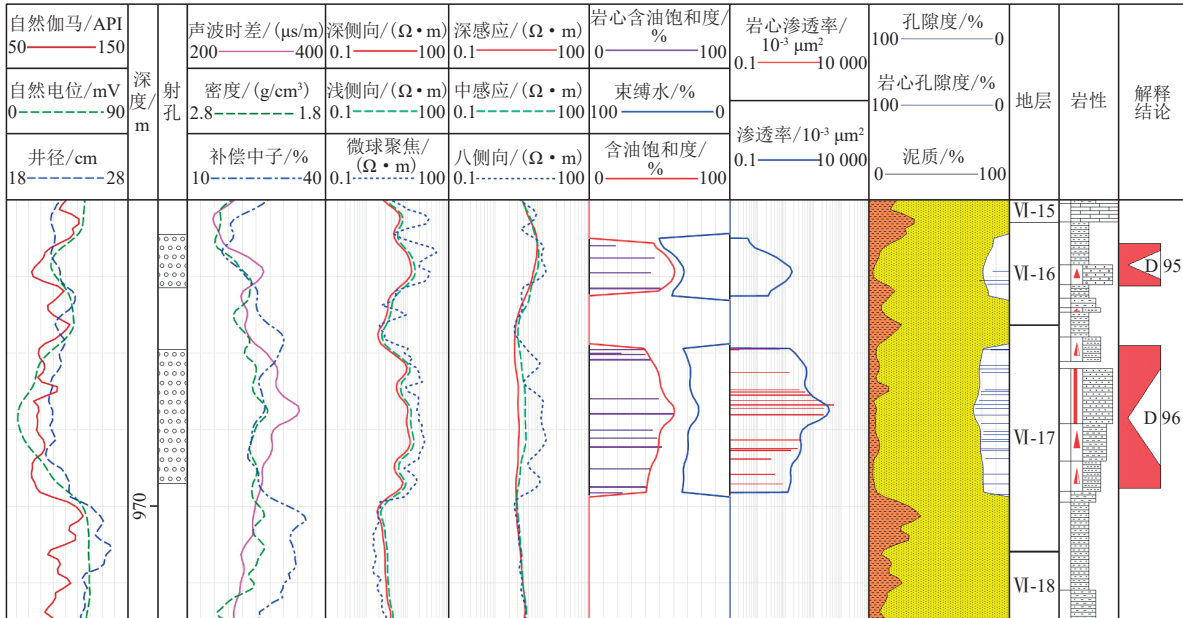
图4 模拟计算岩心电阻率变化与实验数据对比

Fig. 4 Comparison between simulated and experimental results for core sample

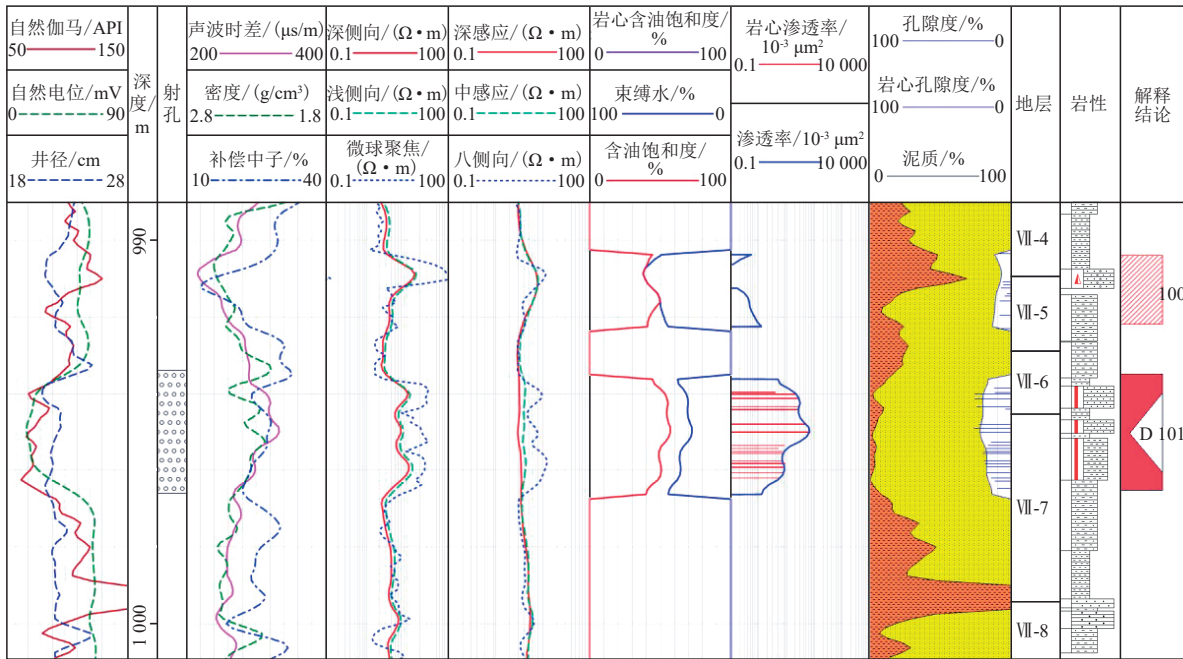
### 3 实例应用

根据建立的混合液电阻率模型及含油饱和度模

型,结合目标区域储层特征参数计算模型对青海油田H区块有密闭取心资料的X1井进行处理解释,该井2016年8月完井投产,投产初期取样分析产出水为CaCl<sub>2</sub>型,氯离子质量分数为68 893.53 mg/L。图5



a. 962-973 m段解释成果



b. 989-1001 m段解释成果



图5 青海油田H区块X1井测井处理解释成果

Fig. 5 Well logging interpretation results for Well-X1 in H block of Qinghai Oilfield

中,从左至右第1道为岩性曲线道,第2道为深度道、第3道为射孔层位道,第4道为孔隙度曲线道,第5和第6道为电阻率曲线道,第7至9道为处理成果曲线和岩心分析结果道。将计算得到的储层含油饱和度与密闭取心饱和度进行对比(第7道),结果表明采用建立的水淹层饱和度定量计算模型计算的含油饱和度与岩心分析含油饱和度符合率为92.33%,证明所建立模型能够较为准确评价目标区储层水淹层含油饱和度。综合该井投产后井口生产数据(图6),该井投产初期射孔层为962.9~964.3 m、965.9~969.4 m和993.4~996.6 m进行分析,3个射孔层解释含油饱和度分别为53.465%、51.729%、50.829%,计算得束缚水饱和度分别为33.692%、29.059%、31.352%,参照区域水淹层评价标准解释该井3个射孔层均为低水淹层,结合该井井口生产动态进行分析,该井投产初期产液2.77 m<sup>3</sup>/d,产油1.92 m<sup>3</sup>/d,含水率为30.69%,与解释结论一致。

## 4 结论与认识

1) 不同矿化度注入过程中储层电阻率变化存在不同特征,水淹后储层电阻率变化规律与原始地层水矿化度与注入水矿化度比值密切相关。

2) 水淹层含油饱和度定量评价过程中需考虑注入水与原生地层水离子交换以提升混合地层水电阻率计算精度,结合建立的考虑不同矿化度模拟地层水驱替过程注入水体积倍数及离子交换作用效率影响的混合地层水矿化度表征模型,准确表征了注水开发过程储层流体动态变化。

3) 以青海油田H区块为例进行水淹储层测井评价,计算水淹储层剩余油饱和度与取心分析含油

饱和度符合率为92.33%,解释水淹级别与实际生产动态一致,为油田水淹储层剩余油饱和度评价提供了有效技术支持。

### 参考文献

- [1] 张世明,杨勇.特高含水水驱油藏流场边界动态追踪模型研究[J].油气地质与采收率,2021,28(2):91-99.  
ZHANG Shiming, YANG Yong. Study on the dynamic tracking model of flow field boundaries in water drive reservoirs at ultra-high water cut stage[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(2): 91-99.
- [2] 徐锦绣,赵书铮,陈红兵,等.SZ油田基于常规测井资料的水淹层定量评价[J].测井技术,2018,42(4):401-406.  
XU Jinxiu, ZHAO Shuzheng, CHEN Hongbing, et al. Quantitative evaluation of water flooded zone based on conventional logging data in SZ oilfield[J]. Well Logging Technology, 2018, 42(4): 401-406.
- [3] 郑利江,孙雅琳,车蓉,等.PNN+饱和度测井复杂水淹层识别[J].测井技术,2019,43(4):434-439.  
ZHENG Lijiang, SUN Yalin, CHE Rong, et al. Identification of complex water-flooded zones with PNN+ saturation logging[J]. Well Logging Technology, 2019, 43(4): 434-439.
- [4] 吴建华,刘行军,张海涛,等.核磁共振谱形因子法识别水淹储层[J].测井技术,2020,44(1):82-86.  
WU Jianhua, LIU Xingjun, ZHANG Haitao, et al. Interpretation of water-flooded reservoirs using the NMR spectral factor method[J]. Well Logging Technology, 2020, 44(1): 82-86.
- [5] JIANG Z H, FU J H, LI G R, et al. Using resistivity data to study the waterflooding process: A case study in tight sandstone reservoirs of Ordos Basin, China[J]. Geophysics, 2020, 86(2): 55-65.
- [6] 陈鑫,陈科贵,王兆峰,等.Aryskum油田水淹层测井响应特征与水淹分析[J].地球物理学进展,2022,37(2):1-9.  
CHEN Xin, CHEN Kegui, WANG Zhaofeng, et al. Logging response characteristics and flooding analysis of water-flooded layers in Aryskum oilfield[J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(2): 1-9.
- [7] 杨景强,卢艳,马宏宇,等.水淹层地层水电阻率变化规律研究[J].测井技术,2006,30(3):195-197.  
YANG Jingqiang, LU Yan, MA Hongyu, et al. Study on resistivity variation of formation water in water-flooded zone[J]. Well Logging Technology, 2006, 30(3): 195-197.
- [8] 谭锋奇,许长福,韦雅,等.基于数值模拟的水淹储层原始电阻率反演方法[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(8):3149-3158.  
TAN Fengqi, XU Changfu, WEI Ya, et al. Original resistivity inversion method of flooded reservoir based on numerical simulation[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(8): 3149-3158.
- [9] YAN W C, SUN J M, ZHANG J Y, et al. A novel method for estimation of remaining oil saturations in water-flooded layers [J]. Interpretation, 2017, 5(1): SB9-SB23.
- [10] 冯程,毛志强,殷文,等.低渗透复杂润湿性储层电阻率实验及导电机理研究[J].地球物理学报,2017,60(3):1211-1220.

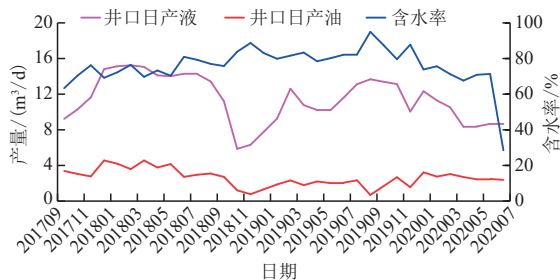


图6 青海油田H区块X1井井口生产动态数据  
Fig. 6 Production performance data for Well-X1 in H block of Qinghai Oilfield

- FENG Cheng, MAO Zhiqiang, YIN Wen, et al. Study on resistivity experiments and conductive mechanism in low-permeability reservoirs with complex wettability[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(3): 1211-1220.
- [11] 冷先刚, 张志国, 陈建文, 等. 水淹层电阻率变化规律研究[J]. 测井技术, 2017, 41(4): 428-432.
- LENG Xiangang, ZHANG Zhiguo, CHEN Jianwen, et al. Study on resistivity variation of water-flooded layer[J]. Well Logging Technology, 2017, 41(4): 428-432.
- [12] 张恒荣, 谭伟, 何胜林, 等. 水驱油实验电阻率分析及混合液电阻率计算新方法[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(2): 880-885.
- ZHANG Hengrong, TAN Wei, HE Shenglin, et al. Resistivity analysis of water drive oil and the new method of calculating the resistivity of mixed liquid[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(2): 880-885.
- [13] 刘欢, 徐锦绣, 高文博, 等. 基于解释单元的水淹层原始电阻率反演及应用. 地球物理学进展, 2019, 34(1): 144-150.
- LIU Huan, XU Jinxiu, GAO Wenbo, et al. Original resistivity inversion of water-flooded zones based on interpretation unit and its application[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(1): 144-150.
- [14] 曹仁义, 马明, 郭西锋, 等. 基于流管模型的低渗透油藏水驱平面波及系数计算方法[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(2): 100-108.
- CAO Renyi, MA Ming, GUO Xifeng, et al. Calculation method of plane sweep coefficient for water flooding in low permeability reservoir based on flow tube model[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(2): 100-108.
- [15] 谭龙, 聂振荣, 熊志国, 等. 砾岩油藏化学驱微观孔隙剩余油分级动用机理——以克拉玛依油田砾岩油藏K7区块为例[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(4): 107-112.
- TAN Long, NIE Zhenrong, XIONG Zhiguo, et al. Study on graded production mechanism of remaining oil in micro-pores of chemical flooding in conglomerate reservoirs: A case of conglomerate reservoir in Block K7, Karamay Oilfield, Xinjiang [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(4): 107-112.
- [16] 白松涛, 王金彬, 杨锐祥, 等. 地层水电阻率评价方法综述[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(2): 566-578.
- BAI Songtao, WAN Jinbin, YANG Ruixiang, et al. Summary on formation water resistivity evaluation methods[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(2): 566-578.
- [17] MABROUK W M, SOLIMAN K S, ANAS S S. New method to calculate the formation water resistivity ( $R_w$ ) [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2013, 104: 49-52.
- [18] 孙永涛. 利用测井资料定性识别水淹层的交会图方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2014, 33(2): 161-164.
- SUN Yongtao. Crossplot method to qualitatively recognize the watered-out reservoir by the well logging data[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2014, 33(2): 161-164.
- [19] SILVA P L, BASSIOUNI Z. A new approach to the determination of formation water resistivity from the SP log[C]// Paper SPWLA-1981-G presented at the SPWLA 22nd Annual Logging Symposium, Mexico City, Mexico, June 1981.
- [20] 谢莹峰, 申辉林, 何胜林, 王利娟, 丁磊, 史安平. 电阻率反演技术在盐水水淹层评价中的应用[J]. 新疆石油地质, 2017, 38(3): 375-378.
- XIE Yingfeng, SHEN Huilin, HE Shenglin, et al. Application of resistivity inversion technique in brine flooded zone evaluation [J]. Petroleum geology of Xinjiang, 2017, 38(3): 375-378.
- [21] 邹长春, 尉中良, 潘令枝. 计算混合液电阻率的一种有效方法[J]. 物探化探计算技术, 1999(3): 216-219.
- ZOU Changchun, WEI Zhongliang. An effective method to calculate resistivity of mixing solution[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 1999(3): 216-219.
- [22] 袁伟, 张占松, 吕洪志, 等. 水淹层混合液地层水电阻率的计算方法[J]. 石油天然气学报, 2014, 36(9): 78-83.
- YUAN Wei, ZHANG Zhansong, LYU Hongzhi, et al. Calculation method of formation water resistivity of water-flooded zone mixture[J]. Journal of Petroleum and Natural Gas, 2014, 36(9): 78-83.
- [23] 王丽, 谭伟, 何胜林, 等. 基于并联导电模型的水淹层剩余油饱和度评价方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2016, 35(2): 134-139.
- WANG Li, TAN Wei, HE Shenglin, et al. Evaluating method of the remained oil saturation for the watered-out reservoir based on parallel conduction model[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2016, 35(2): 134-139.
- [24] 高兴军, 宋新民, 褚人杰, 等. 动静结合方法计算储层水淹后地层混合液电阻率技术及其在剩余油饱和度解释中的应用——以吉林扶余油田泉四段油层为例[J]. 地学前缘, 2008, 15(1): 160-168.
- GAO Xingjun, SONG Xinmin, CHU Renjie, et al. A new technique of the determination of mixed fluid resistivity in water flooded formation by combining dynamic and static information and its application to well logging interpretation of residual oil saturation: An example from Quan4formation of Fuyu oilfield[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(1): 160-168.
- [25] 申辉林, 方鹏. 水驱油地层电阻率变化规律数值模拟及拐点影响因素分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011, 35(3): 58-62.
- SHEN Huilin, FANG Peng. Numerical simulation of formation resistivity variation in water drive process and analysis of influence factors of inflection point[J]. Journal of China University of Petroleum, 2011, 35(3): 58-62.
- [26] 张建平, 杨洪伟, 时新磊, 等. 一种反演水淹层混合水电阻率的新方法[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2021, 43(1): 9.
- ZHANG Jiansheng, YANG Hongwei, SHI Xinlei, et al. A new method for inverting mixed water resistivity in water flooded zone[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2021, 43(1): 133-141.

- deposits[J]. Society of Petroleum Engineers Reservoir Evaluation And Engineering, 2007, 10(5): 458-481.
- [18] SUN Y H, MA X L, GUO W, et al. Numerical simulation of the short- and long-term production behavior of the first offshore gas hydrate production test in the South China Sea[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 181: 106196.
- [19] 李淑霞, 于笑, 李爽, 等. 神狐水合物藏降压开采产气量预测及增产措施研究[J]. 中国海上油气, 2020, 32(6): 122-127.  
LI Shuxia, YU Xiao, LI Shuang, et al. Prediction of gas production of Shenhu hydrate reservoir by depressurization and its stimulation treatment[J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(6): 122-127.
- [20] 孙嘉鑫, 赵洪宝, 曹鑫鑫, 等. 南海荔湾区域水合物水平井降压开采模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(24): 10246-10256.  
SUN Jiaxin, ZHAO Hongbao, CAO Xinxin, et al. Numerical simulation on depressurization-induced gas production from hydrate reservoirs in the Liwan Area, South China Sea using horizontal well[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(24): 10246-10256.
- [21] 王静丽, 万庭辉, 李占钊, 等. 分支参数对天然气水合物羽状多分支井降压开采产能的影响规律[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(23): 9747-9757.  
WANG Jingli, WAN Tinghui, LI Zhanzhao, et al. Influences of branch parameters on depressurized productivity of nature gas hydrate pinnate multilateral well[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(23): 9747-9757.
- [22] KURIHARA M, SATO A, OUCHI H, et al. Prediction of gas productivity from Eastern Nankai Trough methane-hydrate reservoirs[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2009, 12(3): 477-499.
- [23] SUN Z X, XIN Y, SUN Q, et al. Numerical simulation of the depressurization process of a natural gas hydrate reservoir: An attempt at optimization of field operational factors with multiple wells in a real 3D geological model[J]. Energies, 2016, 9(9): 714.
- [24] MASUDA Y. Numerical calculation of gas production performance from reservoirs containing natural gas hydrates [C]// Annual Technical Conference, Society of Petroleum Engineers, San Antonio, Texas, October, 1997.
- (编辑 顾丽媛)

(上接第 808 页)

- [27] 卢艳, 杨清山, 刘传平. 水驱油岩石物理响应特征实验研究[J]. 测井技术, 2018, 42(4): 371-376.  
LU Yan, YANG Qingshan, LIU Chuanping. Experimental study on petrophysical response characteristics of water flooding[J]. Well Logging Technology, 2018, 42(4): 371-376.
- [28] 屈信忠, 唐文生, 姜明忠, 等. 高盐油藏开发期饱和度计算的矿化度驱替-交换模型[J]. 测井技术, 2018, 42(2): 186-192.  
QU Xinzong, TANG Wensheng, JIANG Mingzhong, et al. Petrophysical model of salinity displacement-ion exchange for saturation calculation during the development of high salinity reservoirs[J]. Well Logging Technology, 2018, 42(2): 186-192.
- [29] LIU Renqiang, DUAN Yonggang, TAN Fengqi, et al. Evaluation on an original resistivity inversion method of water flooding a conglomerate reservoir based on petrophysical analysis[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2015, 5: 780-792.
- [30] 朱学娟, 单沙沙. 不同注水开发阶段水淹层混合地层水电阻率计算方法[J]. 地质与资源, 2017, 26(6): 620-624.  
ZHU Xuejuan, SHAN Shasha. Calculation of mixed formation water resistivity in water flooded layer at different waterflood stages[J]. Geology and Resources, 2017, 26(6): 620-624.
- [31] 赵军, 袁淞珊, 李维, 等. 基于离子交换的水淹层地层水电阻率计算方法[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(2): 676-680.  
ZHAO Jun, YUAN Songshan, LI Wei, et al. Computation method of formation water resistivity for water-out reservoir based on ion-exchange[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(2): 676-680.
- [32] 秦敏, 申辉林, 丁磊, 等. 基于微元动态物质平衡法模型确定水淹层混合液电阻率[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(3): 919-928.  
QIN Min, SHEN Huilin, DING Lei, et al. Determining mixed liquid resistivity of water flooded reservoir based on micro element dynamic material balance model[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(3): 919-928.
- [33] 么忠文, 张剑风, 何凯, 等. 低孔低渗泥质砂岩水淹层岩电参数及定量评价标准的研究[J]. 石油天然气学报, 2010, 32(6): 97-102.  
YAO Zhongwen, ZHANG Jianfeng, HE Kai, et al. Study on electrical parameters and quantitative evaluation standard of low porosity and low permeability argillaceous sandstone[J]. Journal of Petroleum and Natural Gas, 2010, 32(6): 97-102.
- [34] 孙游雪, 高齐明, 魏玉梅, 等. 水淹层评价中  $R_w$ 、 $m$ 、 $n$  值的确定[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2018, 32(3): 57-60.  
SUN Youxue, GAO Qiming, WEI Yumei, et al. Determination of  $R_w$ ,  $m$  and  $n$  values in water-flooded zone evaluation[J]. Journal of Shandong University of Technology (Science & Technology Edition), 2018, 32(3): 57-60.
- (编辑 尹淑容)