

中高含水期新型水驱特征曲线关系式

秦鹏¹, 刘世界², 朱建英¹, 李建荣¹

- 1. 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司 天津 300452
- 2. 中海油能源发展股份有限公司采油服务分公司 天津 300452

通讯作者: Email: qinpeng2@cnooc.com.cn

引用: 秦鹏, 刘世界, 朱建英, 等. 中高含水期新型水驱特征曲线关系式[J]. 油气井测试, 2022, 31(1): 69-73.

Cite: QIN Peng, LIU Shijie, ZHU Jianying, et al. A new relational expression of water drive characteristic curve at medium and high water cut stages [J]. Well Testing, 2022, 31(1): 69-73.

摘要 在油田开发的见水初期和特高含水阶段, 油水相对渗透率比值与含水饱和度在半对数坐标中不再呈线性关系。根据油水相对渗透率比值与含水饱和度的关系曲线特征, 提出新的函数模型, 利用该模型的非线性性质, 采用牛顿算法优化求解, 得出适合中、高含水阶段油水相对渗透率比值与含水饱和度与含水饱和度关系表达式, 并在此基础上拟合出适合中、高含水期油田的新型水驱特征曲线。以贝尔油田某区块、榆树林油田东某区块、西峰油田庄某区块、和 PL19-3 油田某区块的油藏生产数据为例进行实例验证, 该方法预测的极限可采地质储量与其他方法基本一致, 具有较强的适用性, 有助于指导油田开发实践。

关键词 相对渗透率比值; 含水饱和度; 水驱特征曲线; 牛顿算法; 生产动态; 可采储量; 含水率 实例验证

中图分类号: TE122 **文献标识码**: B **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2022.01.012

A new relational expression of water drive characteristic curve at medium and high water cut stages

QIN Peng¹, LIU Shijie², ZHU Jianying¹, LI Jianrong¹

- 1. CNOOC EnerTech-Drilling&Production Co., Tianjin 300452, China
- 2. CNOOC Energy Technology&Services-Oil Production Services Co., Tianjin 300452, China

Abstract: At the initial stage of water breakthrough and ultra-high water cut stage of oilfield development, the relation between oil-water relative permeability ratio and water saturation is no longer linear in semi-logarithmic coordinate. According to the characteristics of the relation curves between oil-water relative permeability ratio and water saturation, a new function model is proposed in this paper. This model with nonlinear behavior is solved using the Newton algorithm to derive the relational expression between oil-water relative permeability ratio and water saturation at medium and high water cut stages. On this basis, a new water drive characteristic curve suitable for oilfields at medium and high water cut stages is obtained. Taking the reservoir production data of Beier, Yushulin, Xifeng and PL19-3 oilfields as examples, it is verified that the ultimate recoverable reserves predicted by this method are basically consistent with that by other methods. Thus, the proposed method is very applicable and helpful to guide the practical oilfield development.

Keywords: relative permeability ratio; water saturation; water drive characteristic curve; Newton algorithm; production performance; recoverable reserves; water cut; application

注水开发可以维持地层能量, 提高驱油效率, 大多砂岩油藏均采用了水驱开发技术^[1-2]。但是, 当油藏见水后, 含水率不断上升, 产量也随之递减, 即使采取调剖、堵水及井网调整等措施减缓含水率上升速度^[3-6], 但总体含水上升趋势没有发生根本性变化, 使得油藏开发过程变得复杂且难以管理, 因此, 水驱特征曲线在水驱油藏开动态和可采储量的预测中起了至关重要的作用。传统水驱特征曲线主要有甲型、乙型、丙型和丁型等^[7], 其推导的理论基础是含水阶段油水相对渗透率比 K_{ro}/K_{rw} 与

含水饱和度 S_w 成半对数直线关系。而在高含水阶段 K_{ro}/K_{rw} 与 S_w 在半对数坐标中明显偏离直线关系, 针对高含水期 K_{ro}/K_{rw} 与 S_w 关系曲线特征, 许多学者做了大量研究; 高丽、李丽丽等^[8-10] 指出使用二段直线法对中期含水阶段和高含水期进行分别拟合; 宋兆杰、邴绍献等^[11-13] 对后期特高含水期建立了 K_{ro}/K_{rw} 与 S_w 关系式; 任玉林^[14] 通过对油、水相对渗透率比与含水饱和度关系式的修正, 建立了能够用一个公式描述各种不同形态水驱曲线的广义水驱特征曲线法。二段直线法和末端曲线法虽对中期

含水阶段和高含水期进行分别拟合,提高了预测精度,但未能给出统一的函数关系,而油田实际生产中,相当长时期内都处于高含水的状况,使用起来较为不便。目前仅有任玉林广义水驱特征曲线法能够对中、高产水期进行预测,但是其修正指数较难确定。

为建立同时适用水驱油藏中、高含水期的水驱特征曲线,本文针对中、高含水期油水相对渗透率比与含水饱和度的曲线特征,提出了可以同时满足中、高含水期油水相对渗透率比与含水饱和度的同一新型关系式,并在此基础上推导出同时适应中、高含水期的同一新型水驱特征曲线。通过验证可知,该新型水驱特征曲线使用方便、预测精度较高,且在中含水期便能预测油藏可采储量,对油藏开发生态预测及管理具有重要意义。

1 中、高含水阶段 $K_{ro}/K_{rw} \sim S_w$ 关系式
新型关系式

油藏中、高含水周期 $\ln(K_{ro}/K_{rw}) \sim S_w$ 曲线呈

现两端弯曲、中间直线的特征,基于该曲线特征,本文构造三次函数模型(1)式对 $\ln(K_{ro}/K_{rw}) \sim S_w$ 关系进行拟合。

$$\ln\left(\frac{K_{ro}}{K_{rw}}\right) = aS_w^3 + bS_w^2 + cS_w + d \tag{1}$$

式中: K_{ro}, K_{rw} 为油、水的相对渗透率, f; S_w 为含水饱和度, f; a, b, c, d 为系数。

为了验证(1)式的合理性,本文借鉴文献[11]中的大庆贝尔油田某区块、榆树林油田东某区块、长庆西峰油田庄某区块和渤海 PL19-3 油田某区块岩心相对渗透率数据资料(见表 1),分别对其拟合求解。(1)式具有较强的非线性特征,为求解其参数 a, b, c, d ,构造函数 $F(X)$,即

$$F(X) = \sum_{j=1}^n \left[\ln\left(\frac{K_{roj}}{K_{rwi}}\right) - (aS_{wj}^3 + bS_{wj}^2 + cS_{wj} + d) \right]^2 \tag{2}$$

其中 $X = (a, b, c, d)$

$F(X)$ 具有连续的二阶偏导数,其 Hesse 矩阵正定,为此可借鉴最优化思想,使用牛顿法^[15]进行参数求解。

表 1 岩心相对渗透率数据
Table 1 Core relative permeability data

贝尔油田某区块			榆树林油田东某区块			西峰油田庄某区块			PL19-3 油田某区块		
含水饱和度	相对渗透率		含水饱和度	相对渗透率		含水饱和度	相对渗透率		含水饱和度	相对渗透率	
	油相	水相		油相	水相		油相	水相		油相	水相
0.622 0	1.000 0	0.000 0	0.477 9	1.000 0	0.000 0	0.367 0	1.000 0	0.000 0	0.220 0	1.000 0	0.000 0
0.632 8	0.871 7	0.019 2	0.488 6	0.862 4	0.005 9	0.383 1	0.883 2	0.053 7	0.240 0	0.907 0	0.000 0
0.643 6	0.754 2	0.027 5	0.499 4	0.737 8	0.010 9	0.399 1	0.774 8	0.072 4	0.259 0	0.819 0	0.000 1
0.654 3	0.647 2	0.034 0	0.510 1	0.625 6	0.015 8	0.415 2	0.674 6	0.086 3	0.279 0	0.736 0	0.000 4
0.665 1	0.550 2	0.039 4	0.520 8	0.525 2	0.020 5	0.431 2	0.582 5	0.097 7	0.299 0	0.659 0	0.000 9
0.675 9	0.462 9	0.044 3	0.531 6	0.435 9	0.025 0	0.447 3	0.498 2	0.107 6	0.318 0	0.587 0	0.001 7
0.686 7	0.384 8	0.048 7	0.542 3	0.357 2	0.029 5	0.463 3	0.421 6	0.116 5	0.338 0	0.520 0	0.003 0
0.697 4	0.315 5	0.052 8	0.553 0	0.288 4	0.033 9	0.479 4	0.352 3	0.124 5	0.357 0	0.458 0	0.004 8
0.708 2	0.254 7	0.056 6	0.563 7	0.228 9	0.038 3	0.495 4	0.290 2	0.131 9	0.377 0	0.401 0	0.007 2
0.719 0	0.201 7	0.060 2	0.574 5	0.178 1	0.042 6	0.511 5	0.235 1	0.138 8	0.397 0	0.348 0	0.010 2
0.729 8	0.156 3	0.063 6	0.585 2	0.135 3	0.046 8	0.527 5	0.186 6	0.145 2	0.416 0	0.300 0	0.014 0
0.740 5	0.117 9	0.066 8	0.595 9	0.099 8	0.051 0	0.543 6	0.144 6	0.151 4	0.436 0	0.257 0	0.018 6
0.751 3	0.086 0	0.069 9	0.606 7	0.071 0	0.055 2	0.559 6	0.108 7	0.157 2	0.456 0	0.217 0	0.024 1
0.762 1	0.060 1	0.072 9	0.617 4	0.048 3	0.059 3	0.575 7	0.078 7	0.162 7	0.475 0	0.181 0	0.030 7
0.772 9	0.039 8	0.075 8	0.628 1	0.031 0	0.063 4	0.591 7	0.054 2	0.168 0	0.514 0	0.121 0	0.047 2
0.783 6	0.024 4	0.078 5	0.638 9	0.018 3	0.067 5	0.607 8	0.034 8	0.173 1	0.554 0	0.076 0	0.068 6
0.794 4	0.013 4	0.081 2	0.649 6	0.009 6	0.071 5	0.623 8	0.020 3	0.178 0	0.593 0	0.042 0	0.095 8
0.805 2	0.006 2	0.083 8	0.660 3	0.004 2	0.075 6	0.639 9	0.010 1	0.182 7	0.632 0	0.020 0	0.129 4
0.816 0	0.002 1	0.086 4	0.671 0	0.001 3	0.079 6	0.655 9	0.003 8	0.187 3	0.671 0	0.007 0	0.170 0
0.826 7	0.000 3	0.088 8	0.681 8	0.000 2	0.083 5	0.672 0	0.000 7	0.191 7	0.711 0	0.001 0	0.218 3
0.837 5	0.000 0	0.091 3	0.692 5	0.000 0	0.087 5	0.688 0	0.000 0	0.196 0	0.750 0	0.000 0	0.275 0

求解步骤如下:

- (1) 选定迭代初始点 X_0 , 赋值 $k=0$; 求梯度矩阵 $\nabla F(X_k)$;
- (2) 求其 Hesse 矩阵 $\nabla^2 F(X_k)$ 及其逆矩阵 $[\nabla^2 F(X_k)]^{-1}$;
- (3) 计算 $X_{k+1} = X_k - [\nabla^2 F(X_k)]^{-1} \cdot \nabla F(X_k)$ 和 $\nabla F(X_{k+1})$;
- (4) $\|\nabla F(X_{k+1})\| \leq \varepsilon$ 条件是否满足: 如果满足, X_{k+1} 即为最优解; 若不满足, 置 $k = k + 1$ 并转第 (2) 步继续迭代。

借鉴岩心渗透率数据, 绘制 $\ln(K_{ro}/K_{rw}) \sim S_w$ 曲线(图 1) 并回归得到 $\ln(K_{ro}/K_{rw}) \sim S_w$ 的新型关系式(表 2)。从图 1 和表 2 可知, 应用三次函数拟合中、高含水期 $\ln(K_{ro}/K_{rw}) \sim S_w$ 拟合度较高, 相关系数均超过 0.99, 表明三次函数能够准确的描述中高含水周期的 $\ln(K_{ro}/K_{rw}) \sim S_w$ 曲线关系。

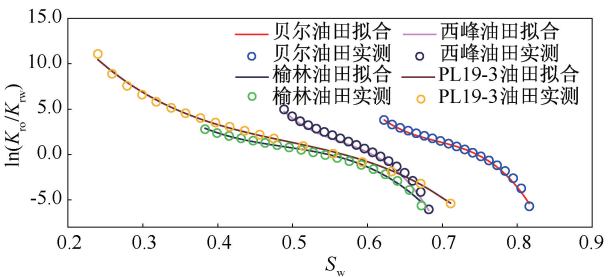


图 1 $\ln(K_{ro}/K_{rw})-S_w$ 曲线拟合
Fig. 1 $\ln(K_{ro}/K_{rw})-S_w$ curve fitting

表 2 $\ln(K_{ro}/K_{rw})-S_w$ 关系曲线拟合结果		
Table 2 $\ln(K_{ro}/K_{rw})-S_w$ curve fitting results		
区块	拟合关系式	相关系数
贝尔油田某区块	$\ln(K_{ro}/K_{rw}) = -2\ 332S_w^3 + 4\ 927S_w^2 - 3\ 491S_w + 830.9$	0.995 2
西峰油田庄 19 井区	$\ln(K_{ro}/K_{rw}) = -2\ 643S_w^3 + 4\ 481S_w^2 - 2\ 561S_w + 494.6$	0.997 5
榆林油田东 14 区块	$\ln(K_{ro}/K_{rw}) = -615.9S_w^3 + 902S_w^2 - 452.7S_w + 78.57$	0.995 6
PL19-3 油田	$\ln(K_{ro}/K_{rw}) = -284.9S_w^3 + 420.9S_w^2 - 224.8S_w + 44.11$	0.997 0

$$\lg WOR = \lg \frac{\mu_o B_o \gamma_o}{C \mu_w B_w \gamma_w} - \frac{a \left(\frac{3}{2} S_{oi} R + E \right)^3 + b \left(\frac{3}{2} S_{oi} R + E \right)^2 + c \left(\frac{3}{2} S_{oi} R + E \right)}{2.303}$$
$$= -\frac{27a S_{oi}^3}{18.424 N^3} N_p^3 - \frac{9(3aE + b) S_{oi}^2}{9.212 N^2} N_p^2 - \frac{3(3aE^2 + 2bE + c) S_{oi}}{9.212 N} N_p + \lg \frac{\mu_o B_o \gamma_o}{C \mu_w B_w \gamma_w} - \frac{E(aE^2 + bE + c)}{2.303} \quad (7)$$

其中

$$E = \frac{1}{2}(3S_{wi} + S_{or} - 1)$$

即可得出中、高含水期油田水驱特征曲线关系式:

2 中、高含水期水驱特征曲线关系式理论推导

根据以上对中、高含水期阶段 $\ln(K_{ro}/K_{rw}) \sim S_w$ 关系曲线拟合关系式, 推导中、高含水期油田水驱特征曲线关系式。

由(1)式可知, 出口端 K_{ro}/K_{rwe} 与出口端 S_{we} 满足以下关系, 即

$$K_{ro}/K_{rwe} = g e^{a S_{we}^3 + b S_{we}^2 + c S_{we}} \quad (3)$$

其中

$$g = e^d$$

式中: K_{ro}, K_{rwe} 为出口端油、水的相对渗透率, f ; S_{we} 为出口端含水饱和度, f 。

若不考虑重力和毛管力的影响, 在水驱稳定渗流条件下, 油水两相流动出口端 $K_{ro}/K_{rwe} \sim S_w$ 与油、水瞬时产量存在如下关系^[16]

$$K_{ro}/K_{rwe} = \frac{Q_o \mu_o B_o \gamma_o}{Q_w \mu_w B_w \gamma_w} \quad (4)$$

式中: Q_o, Q_w 为油、水的产量, m^3/d ; μ_o, μ_w 为原油、地层水的黏度, $mPa \cdot s$; B_o, B_w 为原油、地层水的体积系数, m^3/m^3 ; γ_o, γ_w 为原油、地层水的相对密度, f 。

联立(3)式和(4)式可得出水油比 WOR 的表达式为

$$WOR = \frac{Q_w}{Q_o} = \frac{\mu_o B_o \gamma_o}{g \mu_w B_w \gamma_w} e^{-(a S_{we}^3 + b S_{we}^2 + c S_{we})} \quad (5)$$

由文献[17]可知出口端含水饱和度为

$$S_{we} = \frac{3}{2} \left(\frac{N_p S_{oi}}{N} + S_{wi} \right) - \frac{1}{2} (1 - S_{or})$$
$$= \frac{3}{2} (R S_{oi} + S_{wi}) - \frac{1}{2} (1 - S_{or}) \quad (6)$$

式中: S_{or} 为残余油饱和度, f ; S_{oi} 为原始含油饱和度, f ; S_{wi} 为原始含水饱和度, f ; N_p 为累计产油量, $10^4 m^3$; N 为地质储量, $10^4 m^3$; R 为采出程度, f 。

对(5)式取常用对数, 并将(6)式代入可得

$$\lg WOR = A N_p^3 + B N_p^2 + C N_p + D \quad (8)$$

其中 $A = -\frac{27a S_{oi}^3}{18.424 N^3}$

$$B = -\frac{9(3aE + b) S_{oi}^2}{9.212 N^2}$$

$$C = - \frac{3(3aE^2 + 2bE + c)S_{oi}}{9.212N}$$
$$D = \lg \frac{\mu_o B_o \gamma_o}{C \mu_w B_w \gamma_w} - \frac{E(aE^2 + bE + c)}{2.303}$$

3 实例论证与对比

为验证该水驱特征曲线的适用性,本文采用文献[11]中见水后的油藏生产动态数据进行拟合,为了进一步论证该水驱特征曲线的可靠性,本文分别利用甲型、乙型、丙型、丁型、张金庆型、陈元千两段式、宋兆杰末端法水驱特征曲线对水驱极限可采储量进行预测,然后对预测结果进行对比及曲线拟合(表3、图2),其中以含水率0.98时的累计产油量作为水驱可采储量标准值。

表 3 生产动态数据
Table 3 Production dynamic data

出口端 含水饱 和度/f	水相分 流量/ f	水油比/ f	平均含 水饱和 度/f	采出程 度/f	累计产 油量/ 10 ⁴ m ³	累计产 水量/ 10 ⁴ m ³
0.469	0.798	3.950	0.563	0.514	2.284	0.000
0.495	0.848	5.579	0.582	0.536	2.378	0.523
0.520	0.888	7.928	0.600	0.556	2.467	1.227
0.546	0.920	11.500	0.617	0.574	2.550	2.191
0.572	0.946	17.518	0.636	0.596	2.644	3.833
0.597	0.965	27.571	0.652	0.613	2.723	6.009
0.622	0.980	49.000	0.666	0.629	2.792	9.394
0.649	0.990	99.000	0.681	0.646	2.866	16.719
0.674	0.996	249.000	0.694	0.660	2.930	32.688
0.700	1.000	∞	0.700	0.667	2.960	/

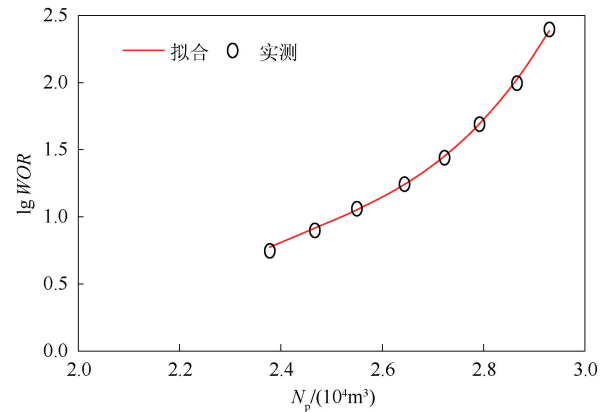


图 2 水驱特征曲线拟合
Fig. 2 Water drive characteristic curve fitting

从图2可以看出,本文水驱特征曲线拟合度较高,从表4可以看出,与其他方法预测结果较一致。因此,该含水期油田水驱特征曲线具有较高的精度和适用性。

表 4 各水驱特征曲线预测可采储量结果
Table 4 Prediction of recoverable reserves by characteristic curve of each water drive

水驱特征 曲线类型	拟合关系式	预测极限 可采储量/ 10 ⁴ m ³
甲型	$\lg W_p = 2.9925N_p - 6.3992$	2.734
乙型	$\lg WOR = 1.891N_p - 3.1535$	2.871
丙型	$L_p/N_p = 0.3856L_p + 0.2576$	2.727
丁型	$L_p/N_p = 0.412W_p + 1.0422$	2.665
张金庆型	$W_p/N_p = 2.4227W_p/N_p^2 + 0.0453$	2.661
陈元千两段直 线式(第2段)	$\lg WOR = 2.1757N_p - 3.8166$	2.841
宋兆杰末端法	$\lg WOR = 3.1125N_p^2 - 12.292N_p + 12.98$	2.806
本文方法	$\lg WOR = 6.822N_p^3 - 50.18N_p^2 + 124.6N_p - 103.5$	2.791

4 结论

(1)水驱油藏含水期油水相对渗透率比值与含水饱和度关系曲线在半对数坐标中呈现中间直线、末端下弯的特征,基于该特征建立了油、水相对渗透率比值与含水饱和度的新型关系式,并运用实际相渗数据进行了验证,拟合结果精度较高。

(2)基于建立的新型油、水相对渗透率比值与含水饱和度的关系表达式推导了一种新型水驱特征曲线,并利用实际生产数据进行验证,预测结果与其他方法一致,该方法精度较高,具有较强的适用性。

致谢:感谢工程技术分公司钻采研究院对本文的撰写给予的支持和帮助。

参考文献

[1] 邹存友,于立君.中国水驱砂岩油田含水与采出程度的量化关系[J].石油学报,2012,33(2):288-292.
ZOU Cunyou, YU Lijun. A quantization relationship between water cut and degree of reservoir recovery for water-flooding sandstone reservoirs in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 288-292.

[2] 康毅力,田键,罗平亚,等.致密油藏提高采收率技术瓶颈与发展策略[J].石油学报,2020,41(4):467-474.
KANG Yili, TIAN Jian, LUO Yaping, et al. Technical bottlenecks and development strategies of enhancing recovery for tight oil reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(4): 467-474.

[3] 王硕亮,姜汉桥,张媛.利用动态数据判断注水开发效果[J].油气井测试,2013,22(2):35-37.
WANG Shuoliang, JIANG Hanchao, ZHANG Yuan. The use of dynamic data to determine the effect of water injection

- development[J]. Well Testing, 2013,22(2):35-37.
- [4] 刘雪涛,赵旭,武滨,等. 高孔高渗油藏深部调驱改善开发效果研究[J]. 油气井测试, 2016,25(5):12-15.
LIU Xuetao, ZHAO Xu, WU Bin, et al. Research on improved development effect for deep water-flooding in high porosity and permeability reservoir [J]. Well Testing, 2016,25(5):12-15.
- [5] 杜庆龙. 长期注水开发砂岩油田储层渗透率变化规律及微观机理[J]. 石油学报, 2016,37(9):1159-1164.
DU Qinglong. Variation law and microscopic mechanism of permeability in sandstone reservoir during long-term water flooding development [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(9):1159-1164.
- [6] 朱丽红,杜庆龙,姜雪岩,等. 陆相多层砂岩油藏特高含水期三大矛盾特征及对策[J]. 石油学报, 2015,36(2):210-216.
ZHU Lihong, DU Qinglong, JIANG Xueyan, et al. Characteristics and strategies of three major contradictions for continental facies multi-layered sandstone reservoir at ultra-high water cut stage [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(2):210-216.
- [7] 陈元千,陶自强. 高含水期水驱曲线的推导及上翘问题的分析[J]. 断块油气田, 1997,4(3):19-24.
CHEN Yuanqian, TAO Ziqiang. Derivation of water drive curve at highwater-cut stage and its analysis of upwarding problem [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 1997,4(3):19-24.
- [8] 高丽,宋考平,马春华,等. 二段直线法预测高含水期油田开发指标[J]. 石油钻探技术, 2008,36(5):72-74.
GAO Li, SONG Kaoping, MA Chunhua, et al. Two Straight Lines to Forecast Development Index of High Water-Cut Oilfield [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008,36(5):72-74.
- [9] 李丽丽,宋考平,高丽. 特高含水期油田水驱规律特征研究[J]. 石油钻探技术, 2009,37(3):91-94.
LI Lili, SONG Kaoping, GAO Li. Water Flooding Behavior of High Water-Cut Oilfield [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009,37(3):91-94.
- [10] 俞启泰. 张金庆水驱特征曲线的应用及其油水渗流特征[J]. 新疆石油地质, 1998,19(6):507-511.
YU Qitai. Application of Zhang's water drive curve and its characteristics of oil-water seepage flow [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1998, 19(6):507-511.
- [11] 宋兆杰,李治平,赖枫鹏,等. 高含水期油田水驱特征曲线关系式的理论推导[J]. 石油勘探与开发, 2013,40(2):201-207.
SONG Zhaojie, LI Zhiping, LAI Fengpeng, et al. Derivation of water flooding characteristic curve for high water-cut oilfields [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013,40(2):201-207.
- [12] 邴绍献. 特高含水期相渗关系表征研究[J]. 石油天然气学报, 2012,34(10):118-120.
BING Shaoxian. Study on relative permeability equation adapted at ultra-high water-cut stage [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012,34(10):118-120.
- [13] 王继强,石成方,纪淑红,等. 特高含水期新型水驱特征曲线[J]. 石油勘探与开发, 2017,44(6):955-960.
WANG Jiqiang, SHI Chengfang, JI Shuhong, et al. New water drive characteristic curves at ultra-high water cut stage [J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(6):955-960.
- [14] 任玉林. 一种新的广义水驱曲线[J]. 新疆石油地质, 2006,27(2):188-190.
REN Yulin. A new generalized water drive curve [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2006,27(2):188-190.
- [15] 郭科,陈聆,魏友华. 最优化方法及其应用[M]. 北京:高等教育出版社, 2007:75-76.
- [16] 姜汉桥,姚军,姜瑞忠. 油藏工程原理与方法[M]. 东营:中国石油大学出版社, 2006:239-241.
- [17] 陈元千. 水驱曲线关系式的推导[J]. 石油学报, 1985,6(2):69-78.
CHEN Yuanqian. Derivation of relationships of water drive curves [J]. Acta Petroleum Sinica, 1985, 6(2):69-78.

编辑 苏璇

第一作者简介:秦鹏,男,1988年9月出生,硕士,工程师,2015年7月毕业于中国石油大学(北京),从事油藏开发方案编制、动态分析等工作。电话:022-66907434,18822190651;Email:qinpeng2@cnooc.com.cn。通信地址:天津市滨海新区滨海新村钻采工程研究院,邮政编码:300452。