

一种新的水驱特征曲线的研究与应用

魏 俊, 张志军, 王宏申, 王锦林, 徐 浩, 尹 鹏

(中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司, 天津 300452)

摘要: 常规水驱特征曲线多以累产量作为参量进行开发效果评价, 累产量因其对瞬时产量变化的敏感程度低问题, 不能及时有效地反映调整措施初期油田产量变化。针对这一问题, 将导函数引入水驱特征曲线, 推导出一种瞬时产量与累产量关系式, 即一种新的水驱特征曲线。实例表明, 新型水驱特征曲线不仅对中高含水期油藏应用效果显著, 而且对中、低含水期油藏, 尤其是措施初期开发效果的评价适用性高, 因其对产量变化的敏感性强, 能及时、有效地反映措施效果, 从而更加合理地指导油藏措施调整。

关键词: 新型水驱特征曲线; 瞬时产量; 敏感性; 低含水期; 中含水期

中图分类号: TE341 **文献标志码:** A

Research and application of a new waterflooding characteristic curve

WEI Jun, ZHANG Zhijun, WANG Hongshen, WANG Jinlin, XU Hao, YIN Peng

(CNOOC Energy Tech-Drilling & Production Co., Tianjin 300452, China)

Abstract: The conventional waterflooding characteristic curves mostly use cumulative production as a parameter for the evaluation of development effects. Due to its low sensitivity to instantaneous production changes, the cumulative production can not effectively reflect the changes in oilfield production at the initial state of adjustment measures. To solve this problem, the derivative functions were introduced into the waterflooding characteristic curve, and a relationship between instantaneous producing rate and cumulative production was derived, namely a new waterflooding characteristic curve. The example shows that the new water drive characteristic curve is not only effective in the application of medium and high water-cut reservoirs, but also has high applicability for the development effect evaluation of medium and low water-cut reservoirs, especially in the initial stage of the measures, because of its strong sensitivity to production changes, which can reflect the effect of measures in a timely and effective manner, thereby guiding the adjustment of reservoir measures more reasonably.

Key words: waterflooding characteristic curve; instantaneous producing rate; sensibility; medium and low water-cut stage

在油藏工程研究中, 通常需要用到一些累产量随时间变化的特征曲线来分析油藏开发效果, 这些累积性指标称为特征函数^[1-2]。水驱特征曲线作为一种简单而又快捷的特征函数, 在油田开发动态分析中得到了广泛的应用^[3-4]。水驱特征曲线可以预测油田地质储量、可采储量和采收率, 还可以预测油田开发的未来动态^[5]。自前苏联学者马克西莫夫1959年绘制了第一条水驱特征曲线, 到目前为止, 已提出50多种水驱特征曲线。在中国油田的实际应用结果表明, 只有少数几种效果较好^[6-10]。大量的应用实例表明, 水驱特征曲线仅在油田开发至高含水期时才能呈现直线段, 预测精度相对较高。而无法对中、低含水期开发效果进行预测与评价。近年来多数学

者对水驱特征曲线进一步进行了研究, 将水驱特征曲线由单一曲线向“曲线簇”^[11-16]发展, 但水驱特征曲线簇仍难对中、低含水期开发效果进行评价, 曲线适用范围有限。

众所周知, 压力导函数已广泛应用于现代试井解释领域, 并取得准确的解释结果。针对常规水驱

收稿日期: 2019-12-10; 改回日期: 2020-04-08。

第一作者简介: 魏俊(1986—), 硕士, 工程师, 现主要从事提高采收率技术研究。E-mail: weijun2@cnooc.com.cn。

基金项目: 中国海洋石油总公司项目“海上聚合物驱增效工艺技术研究”(CNOOC-KJ 135 KJXM NFGJ 2016-04); “十三五”国家科技重大专项示范工程 58 “渤海油田高效开发示范工程”(编号 2016ZX05058)经费资助。

特征曲线适用范围窄的问题,本文将导函数引入水驱特征曲线,建立一种新型水驱特征曲线,不仅可以预测中高含水期油藏开发效果,而且适用于中低含水期开发效果的评价,同时能够很好地评价化学驱的驱替效果。新型水驱特征曲线扩大了常规水驱特征曲线只能预测中高含水期水驱开发效果的范围,且预测敏感度更高,可以用来预测各类油藏含水上升规律。

1 新型水驱特征曲线的建立

1981 年苏联学者提出一种水驱特征曲线^[17],其表达式为:

$$\lg \frac{W_p}{N_p} = a + b \lg(N_p) \tag{1}$$

式中, W_p 为累产水, 10^4 m^3 , N_p 为累产油, 10^4 m^3 , a 、 b 为方程系数。

将式(1)两边对 N_p 进行微分,并对时间 t 求导数可得:

$$\frac{d}{dt} \lg \left(\frac{W_p}{N_p} \right) = b + \frac{d}{dt} \lg(N_p) \tag{2}$$

化简可得:

$$\frac{N_p}{W_p} \cdot \frac{Q_w N_p - Q_o W_p}{N_p^2} = b \frac{Q_o}{N_p} \tag{3}$$

进一步化简可得:

$$\frac{W_p}{N_p} = b_1 \frac{Q_w}{Q_o} \tag{4}$$

式中, Q_w 、 Q_o 表示单位时间产水量和产油量, 10^4 m^3 , $b_1 = 1 + b$ 。

由式(4)可知:累计水油比与瞬时水油比呈过原点的线性关系。但在中低含水期及特高含水期由于相渗曲线的突变^[18],油藏措施调整导致曲线偏移^[19]等原因,极易造成该线性关系不能过原点,因此这里引入系数,从而保证该公式满足所有油田。其表达式为:

$$\frac{W_p}{N_p} = a_1 + b_1 \frac{Q_w}{Q_o} \tag{5}$$

式(5)即为一种新型的水驱特征曲线,该曲线以累产量和瞬时产量为参数,既考虑了累产量对油藏开发的影响,也考虑了瞬时产量对开发的影响,可以对油藏生产动态更加敏感。尤其是对油藏措施调整初期,能够更及时、有效地评价油藏措施调整效果。对于大多数油田,无水采收期阶段无法满足 $a_1=0$,因此该新型水驱特征曲线不适用于无水采收期油藏。

当然常规的甲乙丙丁水驱特征曲线也可通过上述方法进行求解变形,但各自的变形结果在计算时较为复杂,不利于油藏工作者使用,因此不建议利用常规水驱特征曲线进行变形。

2 含水率与累产油量推导

根据含水率与瞬时产量的关系:

$$\frac{Q_w}{Q_o} = \frac{f_w}{1-f_w} \tag{6}$$

将式(5)带入式(4)可以得到含水率与累产量关系曲线表达式:

$$f_w = \frac{W_p/N_p - a_1}{W_p/N_p - a_1 + b_1} \tag{7}$$

$$N_p = \frac{W_p(1-f_w)}{a_1(1-f_w) + b_1 f_w} \tag{8}$$

式中, f_w 为含水率。

3 新公式验证

选渤海两个聚驱油田,其油藏物性存在较大差异,继而验证新型水驱特征曲线的适用性。其中渤海 S 油田原油属重质稠油油藏,地层原油黏度平均 $95.5 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,平均孔隙度 31%,平均渗透率 $2\,000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,储层具有高孔、高渗的储集物性特征。J 油田原油属稀油油藏,地层原油黏度平均 $17.1 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,孔隙度 22%~36%,渗透率 $(10 \sim 5\,000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于高孔中高渗储层。以下将开展新型水驱特征曲线的高敏感性验证。

选取 S 油田、J 油田聚驱初期生产数据,对比新型与原水驱特征曲线,拟合结果如图 1、2 所示。

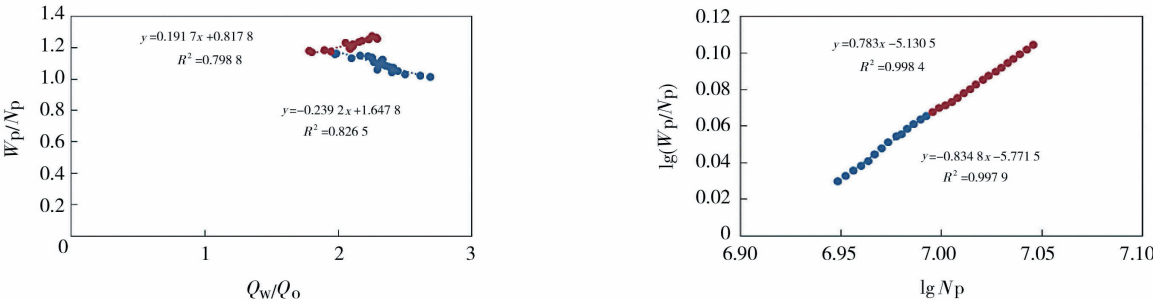


图1 S油田新型/原水驱特征曲线低含水期拟合曲线

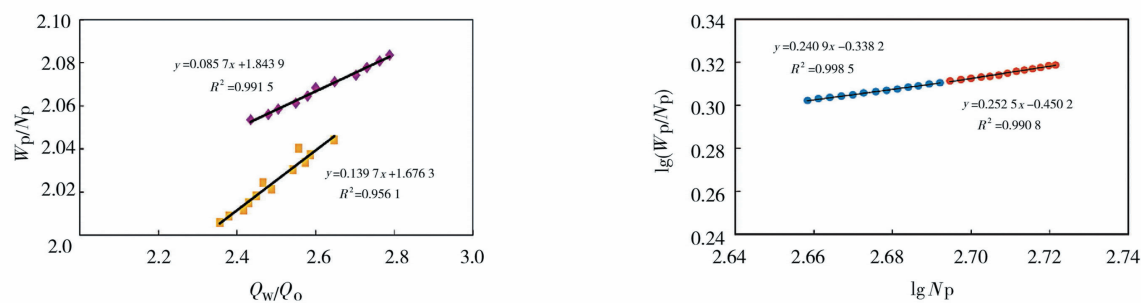


图2 J油田新型/原水驱特征曲线聚驱初期拟合曲线

分析发现：原曲线以累产量作为动态参数,对聚驱初期产量变化的敏感程度低,曲线整体拟合效果虽好,但在聚驱初期不能及时有效地反映聚驱效果。新型水驱特征曲线以其对产量变化的高敏感性,措施前后直线段明显分开,能够更清晰地反映出措施效果,说明新型水驱特征曲线不仅适用于水驱阶段油藏,同时对油藏措施的敏感性更高,能够及时、有效地对措施效果进行评价。

4 实例应用

4.1 渤海 J 油田

选取渤海 J 聚驱油田, 将针对该油田不同生产阶段论证新型水驱特征曲线的高敏感性。

4.1.1 低含水期

选取油田投产初期低含水期 (含水低于 20%) 的动态数据,对比原曲线与改进曲线的拟合效果,拟合结果如图 3 所示。

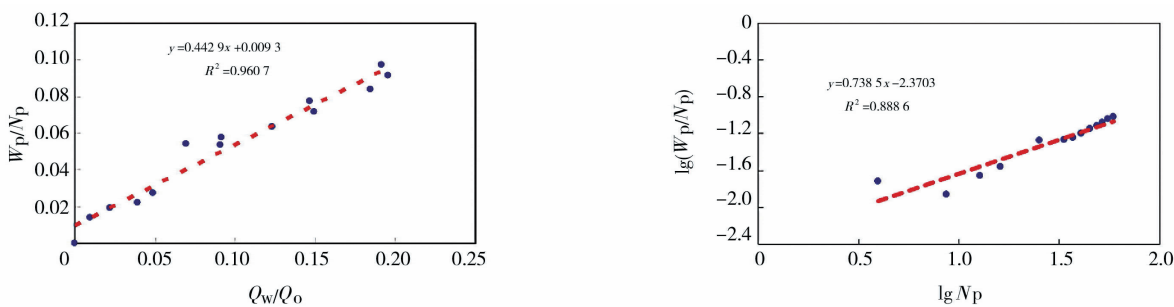


图3 新型/原水驱特征曲线低含水期拟合曲线

由图 3 可知, 新型水驱特征曲线拟合程度高,且上升规律基本一致。而原水驱特征曲线拟合精度低,无法对低含水期水驱效果进行评价。可见新型水驱特征曲线适用于低含水期油藏开发效果评价。

含水及累产油的预测如图 4 所示。新型水驱特征曲线预测含水值及累产油与实际值接近,且含水上 升规律一致,说明新型水驱特征曲线适用于低含水期油藏效果评价。

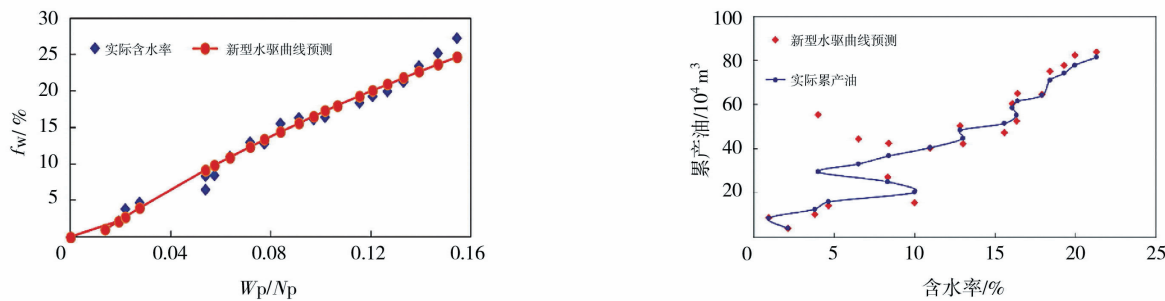


图4 新型水驱特征曲线低含水期含水率及累产油预测值与实际值对比

4.1.2 中含水期

对油田中含水期 (含水 20%~60%) 动态数据进行拟合,拟合结果如图 5 所示。对比可知,对中

含水期阶段,新型水驱特征曲线动态数据的拟合精度高,而原水驱特征曲线拟合误差大,适用性差。

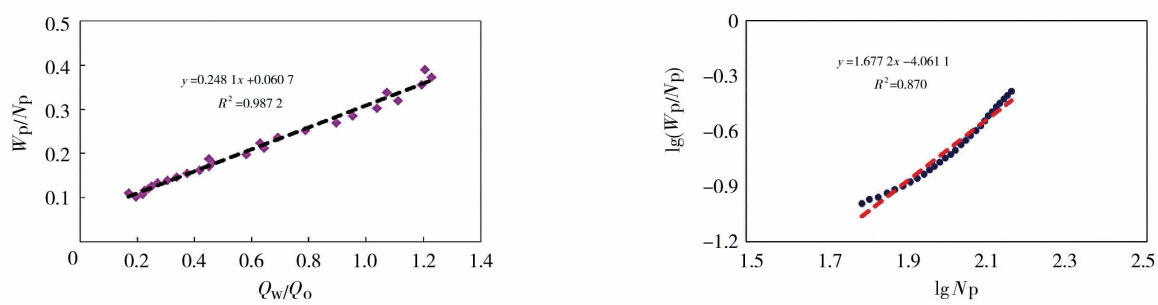


图5 新型/原水驱特征曲线中含水期拟合曲线

含水率及累产油预测值如图 6。新型水驱特征曲线预测值接近,相对误差很小,且预测的含水上

升规律与实际规律一致,说明新型水驱特征曲线对中含水期油藏开发效果的预测和评价同样适用。

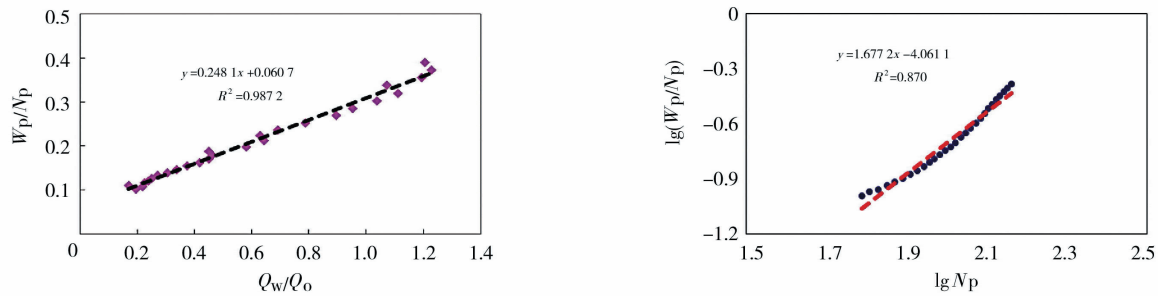


图6 新型水驱特征曲线中含水期含水率、累产油预测值与实际值对比

4.1.3 高含水期

随着聚驱的继续,油田进入高含水期(含水大于 60%)。2014 年 11 月以后,进入井网调整阶段,利用调整后的产量数据进行两种水驱特征曲线比较,拟合结果见图 7。对比拟合结果,对于聚驱中后期油

藏,新型及原水驱特征曲线均拟合程度高,完全满足拟合精度要求。且由于新型水驱特征曲线以瞬时产量为变量,使得生产过程中的动态变化更加明显,有效避免了原型水驱特征曲线对瞬时产量变化不敏感的难题,提高了水驱特征曲线的敏感度。

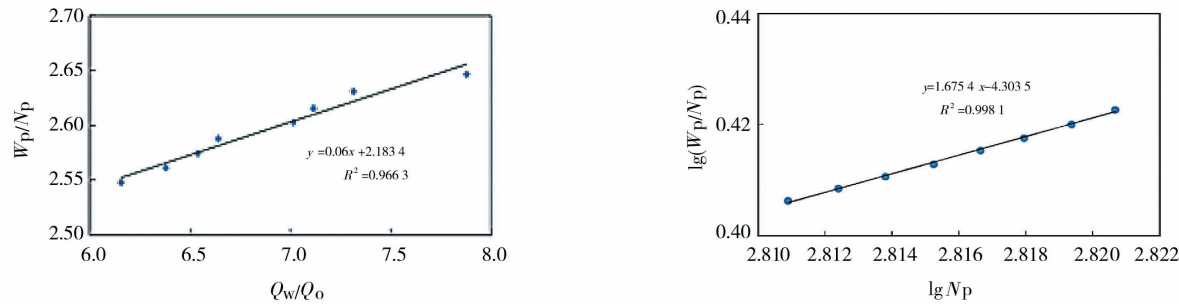


图7 新型/原水驱特征曲线聚驱中后期拟合曲线

4.2 渤海某水驱油田

渤海 B 油田为浅水三角洲沉积。平均孔隙度 31.1%,平均渗透率 $1\ 095\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,属于中、高孔渗油藏,地层原油黏度 8.2~22.8 mPa·s,油藏温度 64 ℃。目标井组 3 注 5 采,综合含水 81.9%,注入突进明显。2018 年 5 月至 11 月进行在线组合调驱,以解决注入突进,减缓井组含水上升速度。

经过在线组合调驱后,井组含水得到明显下降,增油效果明显。井组生产曲线如图 8 所示。

利用原水驱特征曲线评价在线调驱效果时,由于以累产数据进行分析,难以实时地展现出调驱动态变化效果,而采用新型水驱特征曲线进行调驱前后效果分析时,两直线段明显分开且斜率差异大,能够及时地反映调驱效果,因此新型水驱特征曲线的敏感性明显高于原水驱特征曲线。相较于原水驱特征曲线,新型水驱特征曲线更加适合于评价作业周期较短的措施效果(见图 9,10)。

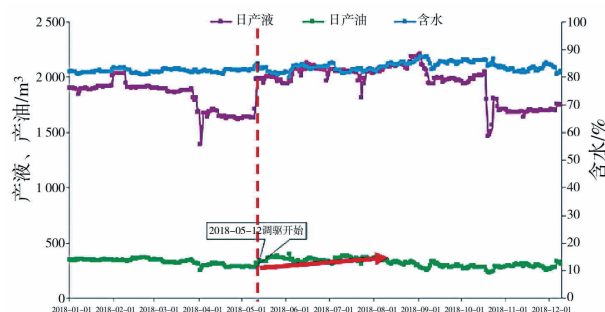


图8 渤海B油田在线组合调驱井组生产曲线

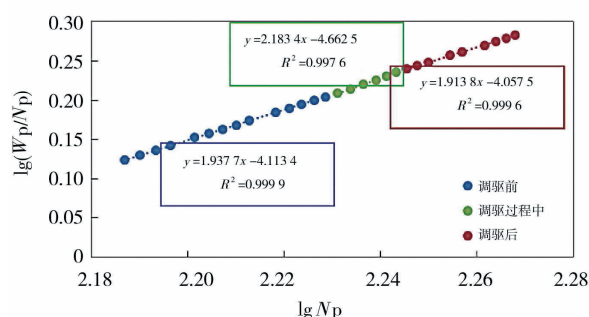


图9 原水驱特征曲线在渤海B油田调驱评价拟合曲线

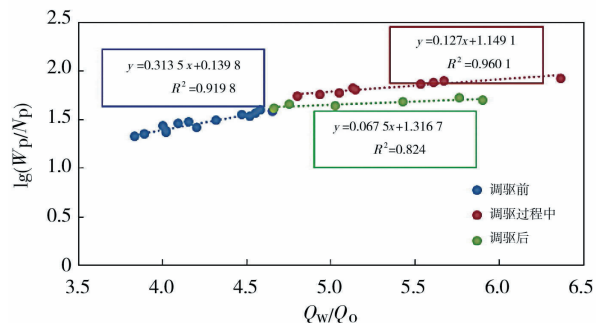


图10 新型水驱特征曲线在渤海B油田调驱评价拟合曲线

4.3 小结

以上实例表明, 新型水驱特征曲线不仅对低、中、高含水期油藏具有很强的适用性, 同时因其对产量变化的高敏感度, 可以及时、准确地反映油藏措施初期效果, 尤其是对作业周期短的措施效果评价, 具有明显优势, 这也是常规水驱特征曲线所不具备的特性之一。

5 结论

(1) 新型水驱特征曲线不仅适用于中高含水油藏, 同时能较好应用于低、中含水阶段出现的非线性上翘的现象, 从而扩大了曲线的适用范围。

(2) 与原水驱特征曲线相比, 新型水驱特征曲线可以及时有效地对措施周期较短的效果进行评价, 这是原水驱特征曲线所难以克服的难题之一。

(3) 新型水驱特征曲线对产量变化的敏感特性能够及时、有效地反映油藏措施效果, 避免传统水驱特征曲线对产量变化不敏感产生的人为误差。

参考文献:

- [1] 杨军, 张烈辉, 刘娅. 水驱导数曲线评价方法研究[J]. 特种油气藏, 2008, 15(6):62-63.
- [2] 康晓东, 冯国智, 张贤松, 等. 一种新的水驱开发效果评价方法[J]. 石油天然气学报, 2010, 32(2):129-130.
- [3] 陈元千, 李璠. 现代油藏工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001:151-153.
- [4] 童宪章. 油井产状和油藏动态分析[M]. 北京: 石油工业出版社, 1981:39-60.
- [5] 姜汉桥. 油藏工程原理与方法[M]. 东营: 石油大学出版社, 2000:235-240.
- [6] 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):201-208.
- [7] 李正民, 孙来喜, 邓虎城, 等. 水驱特征曲线的适用条件研究[J]. 物探化探计算技术, 2012, 34(2):143-146.
- [8] 姜汉桥, 刘睿, 张贤松, 等. 丙型水驱曲线在海上油田早期注聚效果评价中的应用[J]. 中国海上油气, 2009, 21(6):383-387.
- [9] 薛颖, 石立华, 席天德, 等. 童氏水驱特征曲线的改进及应用[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2015, 37(1):141-145.
- [10] 张枫, 曹肖萌, 易继贵, 等. 一种评价水驱特征曲线适用性的方法[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(3):423-428.
- [11] 任玉林. 一种新的广义水驱特征曲线[J]. 新疆石油地质, 2006, 27(2):188-190.
- [12] 吕爱民, 姚军, 郭自强. 塔河油田奥陶系缝洞型底水油藏典型相渗关系及水驱曲线[J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(2):101-104.
- [13] 李伟才, 姚光庆, 张建光. 一种新型广义水驱特征曲线的建立及其应用[J]. 新疆石油地质, 2009, 30(3):381-383.
- [14] 魏洪涛, 王怒涛, 黄炳光. 两种新型水驱特征曲线系列[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2009, 31(6):117-122.
- [15] 郭丰, 唐海, 邱子刚, 等. 新型水驱特征曲线的建立及在新疆油田的应用[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(3):322-325.
- [16] 周鹏, 陈小凡, 乐平, 等. 引入系数的新型水驱特征曲线的建立[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(4):99-102.
- [17] 俞启泰. 水驱特征曲线研究(八)[J]. 新疆石油地质, 2001, 22(3):224-228.
- [18] 王华. 改进型水驱特征曲线计算技术可采储量的公式推导及其应用[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(4):84-86.
- [19] 黄颖辉, 刘东, 李金蔓, 等. 弱凝胶矿场调驱效果评价方法研究[J]. 油气藏评价与开发, 2013, 3(2):62-65.

(编辑 谢 葵)