

对《一种预测水驱油田体积波及系数的新方法》 一文公式的修正与应用

孙玉瑾¹, 彭彩珍^{1*}, 郭丰¹, 崔文富², 张淼³

(1. 西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川成都 610500; 2. 中国石化胜利油田分公司胜利采油厂, 山东东营 257051; 3. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249)

摘要: 在水驱油田的动态分析和预测中, 水驱曲线可用于预测油田的含水率、可采储量以及评价油田的开发动态等。结合油田实例和相关文献调研发现, 俞启泰型水驱曲线在预测油田含水率变化时更为方便准确。《一种预测水驱油田体积波及系数的新方法》一文在该曲线的基础上推导出预测体积波及系数的新公式, 但在推导过程中存在不合理性, 因此对其进行了修正。利用胜坨油田 T21 断块开发数据, 将新公式和修正后的公式分别与陈元千基于甲、乙、丙型水驱曲线推导出的体积波及系数与含水率公式进行对比发现, 修正后的公式与陈元千的甲、乙、丙型体积波及系数与含水率关系曲线具有很好的一致性, 而新公式与甲、乙、丙型体积波及系数与含水率关系曲线差异较大, 表明新公式有其不合理性。修正后的公式不仅具有适用油田类型更为广泛的优点, 而且计算结果更加合理准确, 应予以推广。

关键词: 水驱油田 水驱曲线 体积波及系数 含水率 预测

中图分类号: TE313.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2016)01-0096-05

Modification and application of a formula from *A new method for prediction of volumetric sweep efficiency in water-drive oilfield*

Sun Yujin¹, Peng Caizhen¹, Guo Feng¹, Cui Wenfu², Zhang Miao³

(1. College of Petroleum and Natural Gas Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu City, Sichuan Province, 610500, China; 2. Shengli Oil Production Plant, Shengli Oilfield Company, Dongying City, Shandong Province, 257051, China; 3. Faculty of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing City, 102249, China)

Abstract: In the dynamic analysis and prediction of water drive oilfield, water drive curve can be used to predict water cut and recoverable reserves and evaluate dynamic development of oilfields. Through literature research and case study of oilfield, the survey found that Yu Qitai water drive curve was more convenient and accurate on predicting oilfield water cut. In the paper of *A new method for prediction of volumetric sweep efficiency in water-drive oilfield*, the authors deduced a new formula of predicting the volumetric sweep efficiency based on Yu Qitai water drive curve. However, irrationality existed in the process of its derivation, it was modified in this study and a revised one was proposed. Using the development data from T21 fault block in Shengtuo oilfield, the results of the two formulas, curves showing correlation between volumetric sweep efficiency and water cut, were respectively compared with that of Chen Yuanqian's formula derived from Type-A, Type-B and Type-C water drive curves. The result of the revised formula has very good consistency with that of Chen Yuanqian's formula; but the result of the original formula is different from that of Chen Yuanqian's formula, which shows its irrationality. The revised formula is not only more widely applicable for different field types, but has more reasonable and accurate

收稿日期: 2015-11-06。

作者简介: 孙玉瑾(1991—), 女, 山东东营人, 在读硕士研究生, 从事油气田开发方面的研究。联系电话: 15008292837, E-mail: 1029836997@qq.com。

*通讯作者: 彭彩珍(1963—), 女, 湖南邵阳人, 副教授。联系电话: 13458599529, E-mail: pengcz918@163.com。

calculation result, and should be popularized.

Key words: water drive oilfield; water drive cure; volumetric sweep efficiency; water cut; forecast

驱油效率和体积波及系数^[1-3]是直接影响水驱油田采收率的2个重要指标,其中体积波及系数是判别油田开发效果、制定调整对策的重要依据。根据文献[4]和文献[5]中预测体积波及系数新公式的相关研究,发现文献[4]中基于俞启泰型水驱曲线推导出的体积波及系数(E_v)与含水率(f_w)关系的新公式^[4]存在问题。笔者结合油田实例,通过与陈元千基于甲、乙、丙型水驱曲线推导出的 E_v-f_w 公式进行对比,证明了该公式的不合理性,以及公式修正后的正确性,并认为修正后的公式能够较为准确地预测水驱油田的体积波及系数,应用的油田类型更为广泛。

1 文献[4]新公式推导中存在的问题

1998年,俞启泰^[6]在已有的2种水驱曲线^[7-10]的基础上,提出了一种不同于常规甲、乙、丙型水驱曲线的新型曲线,其表达式为

$$\lg N_p = a - b \lg \frac{L_p}{W_p} \quad (1)$$

俞启泰分析认为可采储量采出程度(R^*)与含水率的关系曲线不是单一曲线,而是一组曲线簇,可用于描述不同类型水驱油田的含水率上升规律,易于现场实际应用。经现场应用证实,该公式正确合理,适用油田类型广泛。

其中,累积产油量和含水率的公式为

$$N_p = 10^a \times \left\{ \frac{2bf_w}{1-f_w + b(1+f_w) + \sqrt{[1-f_w + b(1+f_w)]^2 - 4b^2f_w}} \right\}^b \quad (2)$$

经调研发现,文献[4]的作者基于俞启泰型水驱曲线推导出了预测水驱油田体积波及系数的新公式(E_v-f_w 新公式),但该公式在推导过程中存在一定的问题,从而影响了该公式的正确性。

1.1 引用错误的公式

文献[4]中引用的累积产油量与含水率的公式为

$$N_p = 10^a \times \frac{2bf_w}{1-f_w + b(1+f_w) + \sqrt{[1-f_w + b(1+f_w)]^2 - 4b^2f_w}} \quad (3)$$

对比式(2)与式(3)发现,两者之间存在明显的

差异,说明式(3)是错误的,由此推导的 E_v-f_w 新公式也是不正确的。

1.2 可动油储量与最大可采储量概念的混淆

可动油储量应该介于石油地质储量与可采储量之间^[11-12],只有在理想的现代工艺技术和经济条件下才有可能出现可动油储量与最大可采储量相等,但对于目前大多数的水驱油田而言,很难达到这种水平,文献[4]中却直接将可动油储量等同于最大可采储量,影响了预测水驱油田 E_v-f_w 新公式的精确性。

2 文献[4]新公式的修正

针对文献[4]新公式推导中存在的问题,在俞启泰型水驱曲线的基础上运用不同于文献[4]的方法对 E_v-f_w 公式进行重新推导,推导过程如下。

将式(2)两端同时除以石油地质储量得

$$R = \frac{10^a}{N} \times \left\{ \frac{2bf_w}{1-f_w + b(1+f_w) + \sqrt{[1-f_w + b(1+f_w)]^2 - 4b^2f_w}} \right\}^b \quad (4)$$

针对注水保持地层压力的油田,石油地质储量采出程度^[5,13]可表示为

$$R = E_v E_D \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)得

$$E_v = \frac{10^a}{NE_D} \times \left\{ \frac{2bf_w}{1-f_w + b(1+f_w) + \sqrt{[1-f_w + b(1+f_w)]^2 - 4b^2f_w}} \right\}^b \quad (6)$$

水驱油田的驱油效率^[14]可以表示为

$$E_D = \frac{1}{b_3 N} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)得到俞启泰型水驱曲线预测体积波及系数与含水率的公式为

$$E_v = 10^a b_3 \times \left\{ \frac{2bf_w}{1-f_w + b(1+f_w) + \sqrt{[1-f_w + b(1+f_w)]^2 - 4b^2f_w}} \right\}^b \quad (8)$$

由式(8)可以看出,当含水率为经济极限含水率时,得到预测最终体积波及系数的公式、可采储量与含水率的公式分别为

$$E_{va} = 10^a b_3 \times \left\{ \frac{2bf_{wl}}{1-f_{wl}+b(1+f_{wl})+\sqrt{[1-f_{wl}+b(1+f_{wl})]^2-4b^2f_{wl}}} \right\}^b \quad (9)$$

$$N_R = 10^a \times \left\{ \frac{2bf_{wl}}{1-f_{wl}+b(1+f_{wl})+\sqrt{[1-f_{wl}+b(1+f_{wl})]^2-4b^2f_{wl}}} \right\}^b \quad (10)$$

$$A = \frac{2 \times 0.98b}{1-0.98+b(1+0.98)+\sqrt{[1-0.98+b(1+0.98)]^2-4 \times 0.98b^2}} \quad (13)$$

由式(8)可以看出水驱油田体积波及系数与俞启泰型水驱曲线直线段截距(a)和斜率(b)及含水率相关,其中含水率可由油田现场资料获取, a 和 b 可由现场资料根据式(1)线性拟合得到。由式(12)可知,根据不同的 b 值能得到多条 R^*-f_w 关系曲线,同理可知,体积波及系数与含水率的关系是一组曲线簇。当 b 分别取值为0.1,0.3,0.5,0.9,1.5,3,5,10时,代入式(8)得到 E_v-f_w 关系曲线(图1)。由图1可知:①随着 b 值由0.1变化到10, E_v-f_w 关系曲线由S型变为凹型;②当含水率大于80%后, E_v-f_w 关系曲线出现上翘,即随着含水率的增加水驱体积波及系数迅速增加,油田水淹速度加快趋于停产,这说明若通过提高体积波及系数来增加水驱采收率,则必须在油田含水率达到80%之前进行相关的措施调整^[15]。该结论纠正了文献[4]中“当 b 由0.1到10变化时, E_v-f_w 关系曲线由凹型逐渐变为直线型”的错误说法。

由文献[6]可知,俞启泰型水驱曲线的通式为

$$N_p = a' \left(\frac{L_p}{W_p} \right)^{b'} \quad (14)$$

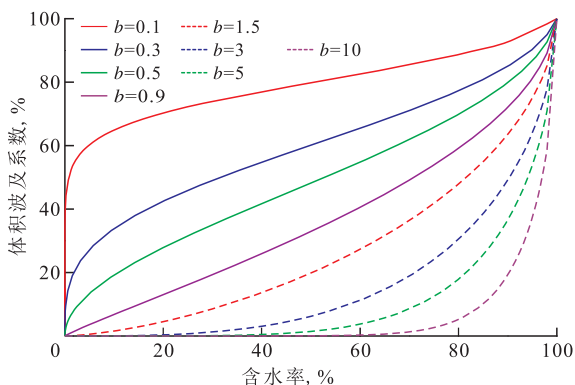


图1 不同 b 值下的 E_v-f_w 关系曲线

Fig.1 Diagram of E_v-f_w curves under different b values

当含水率为1时,最大可采储量的公式为

$$N_{Rmax} = 10^a \quad (11)$$

3 修正后的公式曲线形态分析

俞启泰型可采储量采出程度与含水率公式为

$$f_w = \frac{(1+b)AR^{*\frac{1}{b}} - b\left(AR^{*\frac{1}{b}}\right)^2}{b+(1-b)AR^{*\frac{1}{b}}} \quad (12)$$

其中

$$A = \frac{2 \times 0.98b}{1-0.98+b(1+0.98)+\sqrt{[1-0.98+b(1+0.98)]^2-4 \times 0.98b^2}} \quad (13)$$

对式(14)两边取对数,整理后得到俞启泰型水驱曲线,即式(1),则有

$$a = \lg a' \quad (15)$$

$$b = -b' \quad (16)$$

由于累积产液量恒大于等于累积产水量,即二者之比大于等于1,因此由式(14)可以看出,俞启泰型水驱曲线通式系数(b')越大,累积产油量越大。针对同一个水驱油田,在没有实施任何增产措施的前提下,随着开采时间的延长,累积产油量越大,含水率越高,即俞启泰型水驱曲线通式系数 b' 越大含水率越高,再结合式(14)和式(16)可得到 b 越大 b' 越小,进而含水率越低的结论。综合图1发现,该结论可以得到验证,同时也纠正了文献[4]中由 E_v-f_w 关系曲线得到的“在相同的体积波及系数下, b 值越大含水率越大”的错误观点。

4 应用实例

4.1 R^*-f_w 关系曲线预测含水率对比

截至2014年底,胜坨油田T21断块水驱油田累积产水量为 $3\ 574.18 \times 10^4 \text{ m}^3$,累积产油量为 $339.16 \times 10^4 \text{ m}^3$,综合含水率为91.3%。应用甲、乙、丙型以及俞启泰型水驱曲线进行线性拟合(表1),再利用这4种水驱曲线对该油田的含水率进行预测对比(图2,图3),结果表明,俞启泰型水驱曲线预测效果最好。虽然乙型和俞启泰型水驱曲线均能较好地描述该油田的 R^*-f_w 的关系,但乙型水驱曲线仅为一条单一曲线,不能全面地描述油田开发趋势,俞启泰型水驱曲线为一组曲线簇,且直线段出现的时间较早,回归区间大,因而能更好地反映油田实际情况。

表1 4种水驱曲线的线性拟合结果
Table1 Linear fitting results of four types of water drive curves

水驱曲线类型	回归直线段年份	截距	斜率	相关系数
甲型	2006—2014	2.009	0.004 6	0.998
乙型	1994—2014	2.043	0.004 6	0.998
丙型	1990—2014	2.570	0.002 3	0.998
俞启泰型	1988—2014	2.651	3.249 7	0.997

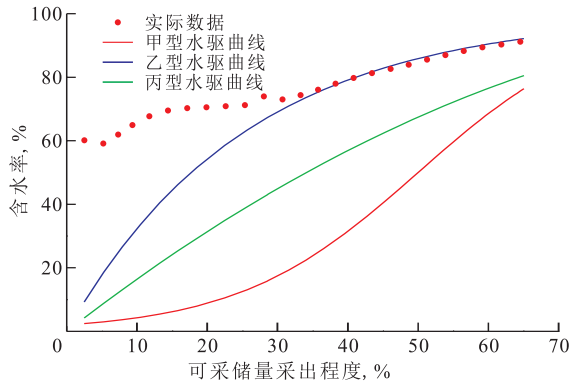


图2 甲、乙、丙型水驱曲线与实际 R^*-f_w 关系对比

Fig.2 Contrast between Type-A, Type-B, Type-C water drive curves and actual R^*-f_w curve

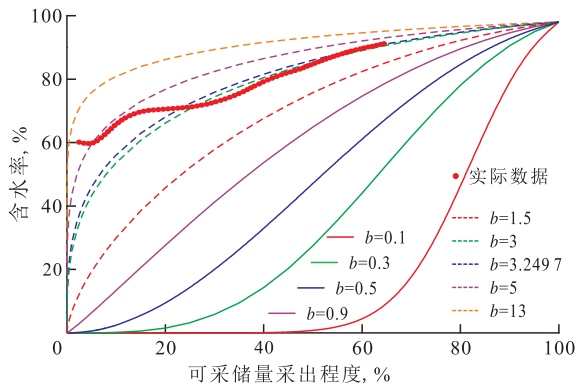


图3 俞启泰型水驱曲线与实际 R^*-f_w 关系对比

Fig.3 Contrast between Yu Qitai water drive curves and actual R^*-f_w curve

4.2 E_v-f_w 公式预测体积波及系数对比

将T21断块的实际含水率以及表1中4种水驱曲线的截距和斜率分别代入陈元千的甲、乙、丙型 E_v-f_w 公式、文献[4]新公式和修正公式进行预测对比(图4)发现^[5,16-17],文献[4]中的 E_v-f_w 关系曲线与陈元千的甲、乙、丙型 E_v-f_w 关系曲线相差较大,而修正后的 E_v-f_w 关系曲线与陈元千的甲、乙、丙型 E_v-f_w 关系曲线基本一致,这说明文献[4]中推导的 E_v-f_w 新公式是不合理的,而修正后的公式能较为准确地预测水驱油田的体积波及系数,并且与陈元千的甲、乙、丙型 E_v-f_w 公式相比,适用的油田类型更为广泛,因此应予以推广。

当经济极限含水率取值为95%^[18]时,利用文献

[4]新公式、修正后的公式以及陈元千的甲、乙、丙型 E_v-f_w 公式求得的最终体积波及系数分别为85.7%,62.5%,63.2%,61.6%,64.2%,由此可见,由陈元千的甲、乙、丙型 E_v-f_w 公式以及修正后的 E_v-f_w 公式预测的最终体积波及系数相差不大,均在63%左右,而文献[4]新公式的预测值与其偏差很大,说明文献[4]新公式不能准确地预测水驱油田的最终体积波及系数。

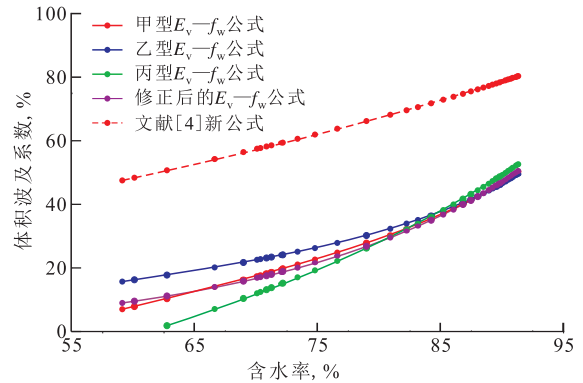


图4 5种不同 E_v-f_w 公式预测的体积波及系数

Fig.4 Volumetric sweep efficiency predicted by five different E_v-f_w formulas

5 结论

经调研发现,文献[4]中水驱油田体积波及系数与含水率新公式存在2方面的问题,即引用错误的累积产油量与含水率公式以及可动油储量与最大可采储量概念混淆。在俞启泰型水驱曲线的基础上对体积波及系数与含水率公式进行重新推导,修正后的公式得到了与文献[4]不同的认识,即当 b 值由0.1变化到10时,体积波及系数与含水率关系曲线应由S型变为凹型,并非由凹型变为直线型。

结合油田实例进一步证明了文献[4]中体积波及系数与含水率新公式的不合理性,并验证了修正后公式的正确性。修正后的公式在保证适用油田类型更为广泛的优点下,计算结果更为准确合理,应予以推广应用。

符号解释:

N_p —— 累积产油量, $10^4 t$; a, b —— 俞启泰型水驱曲线直线段截距和斜率; L_p —— 累积产液量, $10^4 t$; W_p —— 累积产水量, $10^4 t$; f_w —— 含水率, %; R —— 石油地质储量采出程度; N —— 石油地质储量, $10^4 t$; E_v —— 体积波及系数, %; E_D —— 驱油效率, %; b_3 —— 丙型水驱曲线直线段斜率; E_{va} —— 最终体积波及系数, %; f_{wl} —— 经济极限含水率, %; N_R —— 可采储量, $10^4 t$; N_{Rmax} —— 最大可采储量, $10^4 t$;

A ——俞启泰型可采储量采出程度与含水率公式系数,为常数; R^* ——可采储量采出程度; a', b' ——俞启泰型水驱曲线通式系数,均为常数。

参考文献:

- [1] 何聪鸽, 范子菲, 方思冬, 等. 特低渗透各向异性油藏平面波及系数计算方法[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(3): 77-83.
He Congge, Fan Zifei, Fang Sidong, et al. Calculation of areal sweep efficiency for extra-low permeability anisotropy reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(3): 77-83.
- [2] 曹仁义, 周焱斌, 熊琪, 等. 低渗透油藏平面波及系数评价及改善潜力[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(1): 74-77, 83.
Cao Renyi, Zhou Yanbin, Xiong Qi, et al. Evaluation and improvement of areal sweep efficiency for low permeability reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(1): 74-77, 83.
- [3] 喻秋兰, 唐海, 吕栋梁, 等. 复杂断块油藏见水后面积波及系数的修正[J]. 特种油气藏, 2011, 18(4): 70-72.
Yu Qiulan, Tang Hai, Lü Dongliang, et al. Correction of areal sweep efficiency after water breakthrough for complex faulted block reservoirs [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2011, 18(4): 70-72.
- [4] 唐林, 郭肖, 邓钦月, 等. 一种预测水驱油田体积波及系数的新方法[J]. 新疆石油地质, 2013, 34(5): 557-559.
Tang Lin, Guo Xiao, Deng Qinyue, et al. A new method for prediction of volumetric sweep efficiency in water-drive oilfield [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2013, 34(5): 557-559.
- [5] 陈元千, 邹存友, 张枫, 等. 预测水驱体积波及系数方法的推导、对比与应用——兼评胡罡的“新方法”[J]. 新疆石油地质, 2014, 35(3): 293-298.
Chen Yuanqian, Zou Cunyou, Zhang Feng, et al. Derivation, comparison and application of forecasting water drive volume sweep efficiency methods with comments on Hu Gang's "new method" [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35(3): 293-298.
- [6] 俞启泰. 一种广义水驱特征曲线[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(5): 48-50.
Yu Qitai. A new generalized water drive curve [J]. Petroleum Exploration and Development, 1998, 25(5): 48-50.
- [7] 俞启泰. 水驱特征曲线研究(一)[J]. 新疆石油地质, 1996, 17(4): 364-369.
Yu Qitai. Study on the water displacement curves—the 1st in series [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1996, 17(4): 364-369.
- [8] 俞启泰. 水驱特征曲线研究(二)[J]. 新疆石油地质, 1997, 18(1): 62-66.
Yu Qitai. Study on water displacement curve—the 2nd in series [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1997, 18(1): 62-66.
- [9] 梁保红. 特高含水期水驱特征曲线拐点时机判别新方法[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(5): 103-106.
Liang Baohong. A new method for determining the inflection point of water drive characteristic curve in extra high water cut period [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(5): 103-106.
- [10] 刘英宪, 任晓宁, 马奎前, 等. 一种确定水驱曲线直线段合理性的新方法[J]. 特种油气藏, 2013, 20(1): 102-104.
Liu Yingxian, Ren Xiaoning, Ma Kuiqian, et al. A new method to determine the rationality of the straight line of water flooding curve [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2013, 20(1): 102-104.
- [11] 刘国静. 低渗透油田产量变化规律及预测方法研究[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2007.
Liu Guojing. Research on the variation and prediction of oil production rate of low permeability oilfields [D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2007.
- [12] 方文超, 姜汉桥, 李俊键, 等. 基于不确定性研究的油田开发后期指标预测方法[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(5): 94-98.
Fang Wenchao, Jiang Hanqiao, Li Junjian, et al. A prediction method for oilfield development indices during later period based on uncertainty research [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(5): 94-98.
- [13] 黄郑, 张建光, 姚光庆, 等. 一种新型弹性水驱体积波及系数的推导及应用[J]. 断块油气田, 2010, 17(5): 586-588, 592.
Huang Zheng, Zhang Jianguang, Yao Guangqing, et al. Deduction and application of volumetric sweep efficiency for expansion water drive [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2010, 17(5): 586-588, 592.
- [14] 陈元千, 王惠芝. 丙型水驱曲线的扩展推导及其在埕北油田的应用[J]. 中国海上油气, 2004, 16(6): 392-394.
Chen Yuanqian, Wang Huizhi. An extended derivation of Type C water drive and its application in Chengbei oilfield [J]. China Offshore Oil and Gas, 2004, 16(6): 392-394.
- [15] 张利红, 李涛, 蔡蓉, 等. 注水油田驱油效率和波及系数研究[J]. 内蒙古石油化工, 2004, 30(1): 135-137.
Zhang Lihong, Li Tao, Cai Rong, et al. Research on oil displacement efficiency and sweep efficiency in the waterflooding oilfields [J]. Inner Mongolian Petrochemical Industry, 2004, 30(1): 135-137.
- [16] 陈元千, 邹存友, 张枫. 水驱曲线法在油田开发评价中的应用[J]. 断块油气田, 2011, 18(6): 769-771, 779.
Chen Yuanqian, Zou Cunyou, Zhang Feng. Application of water drive curve method in oilfield development evaluation [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(6): 769-771, 779.
- [17] 廖春, 赵英, 许珊珊, 等. 水驱曲线与水驱油试验计算波及体积系数在杂斯库勒油田 E_3^1 油藏的应用[J]. 青海石油, 2011, 29(4): 33-36.
Liao Chun, Zhao Ying, Xu Shanshan, et al. Application of water drive curve and oil displacement experiments on sweep efficiency calculation in E_3^1 reservoir of Gasikule oilfield [J]. Qinghai Oil, 2011, 29(4): 33-36.
- [18] 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 high water-cut stage and its analysis of upwarding problem [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 1997, 4(3): 19-24.