

文章编号: 1000-0747(2017)06-0955-06 DOI: 10.11698/PED.2017.06.13

特高含水期新型水驱特征曲线

王继强¹, 石成方¹, 纪淑红¹, 李冠林², 陈映桥²(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油大学(北京)
石油工程教育部重点实验室, 北京 102249)基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05010-003); 中国石油天然气股份有限公司
“高/特高含水油田改善水驱效果关键技术”项目(2016B-1202)

摘要: 基于油田实测相对渗透率数据的统计分析, 提出了高含水饱和度下水相相对渗透率比值与归一化含水饱和度间的新型函数表达式, 实现了对常规相对渗透率比值关系曲线后段较为精确的拟合。利用新型油水相对渗透率比值表征关系式, 结合油藏工程方法推导出两种适用于油田开发特高含水阶段(含水率大于90%)的新型水驱特征曲线。分别采用五点井网数值模拟结果和羊二庄油田、柳赞油田某区块实际生产数据, 对新型水驱特征曲线的实用性进行了验证, 结果表明, 在甲型或乙型水驱特征曲线发生上翘以后, 新型水驱特征曲线较常规水驱特征曲线的预测误差小, 可用于预测特高含水阶段的油田生产动态、确定最终采收率以及可采储量。图7表4参18

关键词: 水驱开发; 特高含水期; 水驱特征曲线; 可采储量

中图分类号: TE341 文献标识码: A

New water drive characteristic curves at ultra-high water cut stage

WANG Jiqiang¹, SHI Chengfang¹, JI Shuhong¹, LI Guanlin², CHEN Yingqiao²

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory for Petroleum Engineering of the Ministry of Education, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: A function expression of the oil-water relative permeability ratio with normalized water saturation at high water saturation was proposed based on statistics of measured oil-water relative permeability data in oilfields. This expression fits the later section of conventional relative permeability ratio curve more accurately. Two new water drive characteristic curves at the ultra-high water cut stage ($f_w > 90\%$) were derived by combining the new oil-water relative permeability ratio expression and reservoir engineering method. Then, the numerical simulation results of five point well pattern and production data of Yangerzhuang Oilfield and Liuzan Oilfield were used to verify the adaptability of the new water drive characteristic curves. The results showed that the new water drive characteristic curves are more accurate than conventional water drive characteristic curves after A type and B type water drive curves rise, and can be used to predict production performance at ultra-high water cut stage, ultimate recovery efficiency and recoverable reserves.

Key words: water flooding development; ultra-high water cut stage; water drive characteristic curve; recoverable reserves

引用: 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.

0 引言

甲型、乙型水驱特征曲线在国内外注水开发油田具有普遍的适用性, 可以用来预测油田生产动态, 确定最终采收率以及可采储量^[1-3]。然而, 在实际油田生产以及室内实验过程中发现, 甲型和乙型水驱特征曲线在特高含水阶段不再适用, 若仍然采用直线段外推的方法来确定最终采收率以及可采储量, 其值较实际值会明显偏大。

从理论上讲, 水驱特征曲线出现上翘现象的主要原因在于推导甲型和乙型水驱特征曲线过程中, 所用到的相对渗透率比值与含水饱和度间的半对数关系在后段不再满足直线关系^[4]。因此, 特高含水期水驱特征曲线的理论推导需要以恰当的相对渗透率比值表征关系式为基础。前人在这方面已经做了许多研究^[5-11], 所建立的新型水驱特征曲线在不同程度上都可以对特高含水期的实际生产数据进行拟合, 但所得水驱特征曲线多为非线性关系式, 不便于应用且外推预测的误差

较大。因此,本文在 Willhite 油水相对渗透率数学模型以及范海军等提出的表征方法^[12]基础上,以油田实测相对渗透率数据为依据,提出了新型相对渗透率比值表征关系式,并推导出特高含水阶段的新型水驱特征曲线。

1 油水相对渗透率比值新型表征关系

为便于应用和研究,常将相对渗透率的比值 K_{rw}/K_{ro} 表示为含水饱和度 S_{we} 的函数,最常使用的是 Craft 等^[13]提出的函数关系式:

$$\frac{K_{rw}}{K_{ro}} = \alpha e^{\beta S_{we}} \quad (1)$$

实测结果表明,大多数岩石的油水相对渗透率比值曲线在单对数坐标上都具有中间段为直线而后段弯曲的特征。由于(1)式不能描述曲线后段弯曲特征,与之相应的甲型、乙型水驱特征曲线在特高含水期会表现出上翘现象。

采用 4 个油田区块的油水相对渗透率数据样本,包括水驱开发油田常见的油水相对渗透率曲线类型^[14],即水相上凹型、水相直线型以及水相下凹型。通过对油水相对渗透率比值曲线上翘段的拟合分析,得到了能够很好地描述油水相对渗透率比值曲线后期特点的新型表征关系式:

$$\frac{K_{rw}}{K_{ro}} = \frac{m}{(1-S_{wd})^n} \quad (2)$$

即:

$$\lg \frac{K_{rw}}{K_{ro}} = \lg m - n \lg(1-S_{wd}) \quad (3)$$

归一化的含水饱和度 S_{wd} 可表示为:

$$S_{wd} = \frac{S_{we} - S_{wi}}{1 - S_{or} - S_{wi}} \quad (4)$$

这样,常用的 $\lg(K_{rw}/K_{ro}) - S_w$ 曲线后期上翘段就可以转化为(3)式的线性关系式。用榆树林油田、喇嘛甸油田、葡南油田、丘陵油田各区块实测相对渗透率曲线后段数据作 $\lg(K_{rw}/K_{ro}) - \lg(1-S_{wd})$ 关系曲线(见图 1),同时回归得出了新型相对渗透率比值表征关系式,相关性很好(见表 1)。

2 新型水驱特征曲线的理论推导

基于甲型和乙型水驱特征曲线的推导方法^[4,15],从前面得到的油水相对渗透率比值新型表征关系式出发,推导适用于特高含水期的水驱特征曲线。

根据油藏工程中容积法计算公式,可得在注水保

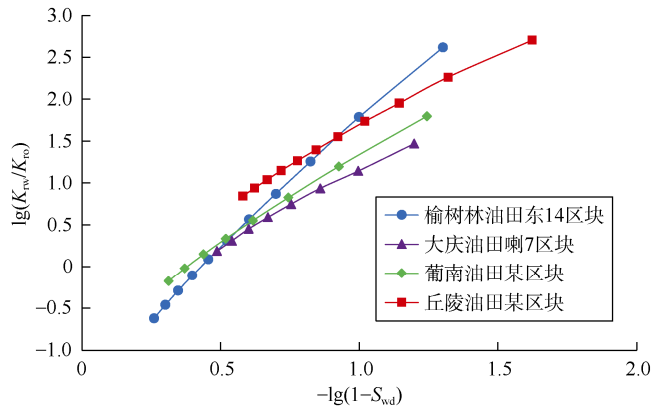


图 1 新型相对渗透率比值-含水饱和度关系曲线

表 1 新型相对渗透率比值-含水饱和度关系式拟合结果

油田区块	拟合关系式	相关系数
榆树林油田东 14 区	$\lg(K_{ro}/K_{rw}) = -3.12\lg(1-S_{wd}) - 1.36$	0.997 7
大庆油田喇 7 区块	$\lg(K_{ro}/K_{rw}) = -1.79\lg(1-S_{wd}) - 0.64$	0.994 3
葡南油田某区块	$\lg(K_{ro}/K_{rw}) = -2.12\lg(1-S_{wd}) - 0.79$	0.997 1
丘陵油田某区块	$\lg(K_{ro}/K_{rw}) = -1.8\lg(1-S_{wd}) - 0.15$	0.995 3

持地层压力的条件下,采出程度与地层平均含水饱和度和有如下关系:

$$R = \frac{N_p}{N} = \frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_{wi}} \quad (5)$$

考虑到特高含水期的地层平均含水饱和度可用出口端含水饱和度代替,(5)式可写作:

$$R = \frac{S_{we} - S_{wi}}{1 - S_{wi}} \quad (6)$$

极限驱油效率 E_D 为:

$$E_D = \frac{1 - S_{or} - S_{wi}}{1 - S_{wi}} \quad (7)$$

(4) 式可改写为:

$$S_{wd} = \left(\frac{S_{we} - S_{wi}}{1 - S_{wi}} \right) / \left(\frac{1 - S_{or} - S_{wi}}{1 - S_{wi}} \right) \quad (8)$$

将(6)式、(7)式代入(8)式中得:

$$S_{wd} = \frac{R}{E_D} = \frac{N_p}{NE_D} \quad (9)$$

可动油储量 N_{om} 可表示为:

$$N_{om} = NE_D \quad (10)$$

则(9)式可改写为:

$$S_{wd} = \frac{N_p}{N_{om}} \quad (11)$$

在稳定渗流条件下,水油比 WOR 定义为:

$$WOR = \frac{Q_w}{Q_o} = \frac{\mu_o B_o \gamma_w K_{rw}}{\mu_w B_w \gamma_o K_{ro}} \quad (12)$$

将(2)式和(11)式代入(12)式中可得：

$$WOR = \frac{\mu_o B_o \gamma_w}{\mu_w B_w \gamma_o} \frac{m}{\left(1 - \frac{N_p}{N_{om}}\right)^n} \quad (13)$$

将(13)式两端取对数可得：

$$\lg WOR = a - n \lg \left(1 - \frac{N_p}{N_{om}}\right) \quad (14)$$

其中：

$$a = \lg \frac{m \mu_o B_o \gamma_w}{\mu_w B_w \gamma_o} \quad (15)$$

(13)式还可写作：

$$\frac{dW_p}{dN_p} = \frac{\mu_o B_o \gamma_w}{\mu_w B_w \gamma_o} \frac{m}{\left(1 - \frac{N_p}{N_{om}}\right)^{n+1}} \quad (16)$$

对(16)式积分后取常用对数得：

$$\lg(W_p + C) = b + (1-n) \lg \left(1 - \frac{N_p}{N_{om}}\right) \quad (17)$$

其中：

$$b = \lg \frac{m \mu_o B_o \gamma_w N_{om}}{\mu_w B_w \gamma_o (n-1)} \quad (18)$$

随着油田生产的进行，累计产水量会不断增加，(17)式中常数C的影响可以忽略不计，令 $d=n-1$ ，则(17)式可以写作：

$$\lg W_p = b - d \lg \left(1 - \frac{N_p}{N_{om}}\right) \quad (19)$$

(14)式和(19)式即为适用于特高含水阶段的水驱特征曲线关系式，其反映的是水驱开发后期水油比或累计产水量与可动储量采出程度间的关系^[16]。

3 实例验证

为验证新型水驱特征曲线在特高含水阶段的适用性，分别从数值模型计算结果和实际油田生产数据两方面进行应用计算，并与常规水驱特征曲线进行对比。

3.1 数值模型计算结果验证

根据实际注水开发油藏特点，建立一个五点井网模型^[17-18]，模型网格数为 $31 \times 31 \times 3$ ，平面上网格步长为10 m，纵向网格步长为5 m，孔隙度为29.6%，保持注采平衡，原油黏度为5 mPa·s，油水黏度比为10，油水相对渗透率数据见表2。

利用乙型水驱特征曲线关系式对 N_p 、 $\lg WOR$ 计算结果进行拟合(见图2)可见，在中高含水阶段， $\lg WOR-N_p$ 曲线具有较好的直线关系，而进入特高含水

表2 油水相对渗透率数据

含水饱和度/%	水相相对渗透率/f	油相相对渗透率/f
29.2	0	1.000 0
29.5	0.000 4	0.986 8
32.0	0.005 9	0.880 0
34.5	0.011 1	0.778 9
37.0	0.017 2	0.683 8
39.5	0.024 6	0.594 5
42.0	0.032 2	0.511 1
44.5	0.039 5	0.433 8
47.0	0.047 8	0.362 5
49.5	0.057 7	0.297 3
52.0	0.069 1	0.238 2
54.5	0.082 8	0.185 4
57.0	0.102 1	0.138 8
59.5	0.126 3	0.098 7
62.0	0.154 1	0.065 1
64.5	0.190 2	0.038 2
67.0	0.230 4	0.018 2
69.5	0.284 7	0.006 3
72.0	0.369 4	0.000 9
72.6	0.408 9	0

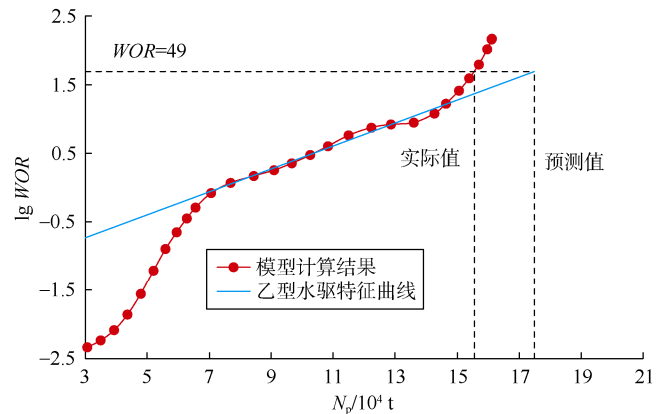


图2 乙型水驱特征曲线

阶段以后，曲线发生了上翘。应用乙型水驱特征曲线直线段外推到极限水油比(WOR为49)预测的可采储量为 17.4898×10^4 t，而实际可采储量为 15.5580×10^4 t，预测误差较大。

该模型的 $\lg WOR-N_p$ 曲线上翘时的含水率约为92.2%，采用(14)式的新水驱特征曲线关系式对含水率在92.2%~99.2%的数据进行拟合(见图3)。结果说明新型水驱特征曲线具有较好的直线关系，可用于特高含水阶段的生产动态预测。

为了同乙型水驱特征曲线的预测结果进行对比，利用(14)式拟合上翘区间附近的生产数据(含水率为92.2%~95.4%)，得到拟合关系式(20)式(相关系数为0.9995)：

$$\lg WOR = -1.1954 - 3.5594 \lg \left(1 - \frac{N_p}{18.5181}\right) \quad (20)$$

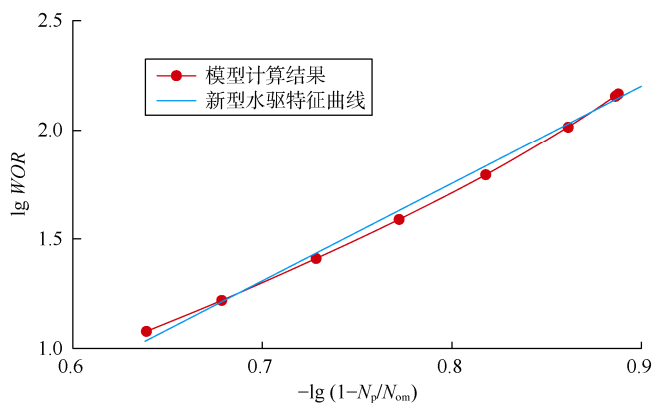


图3 新型水驱特征曲线

式中可动油储量由油水相对渗透率曲线和地质储量计算得出。由新型水驱特征曲线计算可采储量为 15.6546×10^4 t, 表明在特高含水阶段, 新型水驱特征曲线的预测结果更为准确。

3.2 羊二庄油田某区块生产资料验证

根据羊二庄油田某区块的实际生产数据(见表3)作 $\lg WOR-N_p$ 曲线。该区块在1996年采取一系列措施, 使油井产水得到控制, 随着油田的继续生产, 在2005

表3 羊二庄油田某区块的实际开发数据

年份	累计产油量/ 10^4 t	累计产水量/ 10^4 t	综合含水率/%
1983	257.052 3	361.549 1	69.8
1984	289.944 2	441.232 2	70.8
1985	327.088 7	536.311 7	71.9
1986	357.237 2	654.028 1	79.6
1987	385.278 6	779.412 3	81.7
1988	413.996 6	921.919 3	83.2
1989	440.368 8	1 114.073 0	87.9
1990	462.434 5	1 298.419 0	89.3
1991	482.092 7	1 473.739 0	89.9
1992	501.655 8	1 665.922 0	90.8
1993	518.888 9	1 854.277 0	91.6
1994	531.148 4	2 021.637 0	93.2
1995	542.874 5	2 185.401 0	93.3
1996	553.405 3	2 339.208 0	93.6
1997	563.507 1	2 454.611 0	92.0
1998	573.449 9	2 560.166 0	91.4
1999	582.612 9	2 653.619 0	91.1
2000	592.719 5	2 764.027 0	91.6
2001	603.593 9	2 894.027 0	92.3
2002	613.308 9	3 031.479 0	93.4
2003	621.342 2	3 153.260 0	93.8
2004	628.441 4	3 274.040 0	94.4
2005	635.630 7	3 397.059 0	94.5
2006	641.158 3	3 502.842 0	95.0
2007	647.417 2	3 634.382 0	95.5
2008	652.893 1	3 768.552 0	96.1
2009	657.371 0	3 897.203 0	96.6
2010	661.069 1	4 015.882 0	97.0

年含水率达到94.5%附近时曲线发生上翘。

分别应用乙型和新型水驱特征曲线对生产数据进行了拟合(见图4、图5)。其中乙型水驱特征曲线关系式预测含水率97%时的累计产油量 727.5736×10^4 t, 预测相对误差为10.06%。该区块地质储量 $1 319.98 \times 10^4$ t, 对室内实验得到的多条油水相对渗透率曲线进行归一化, 得到束缚水饱和度为27.7%, 残余油饱和度为22.7%, 由此计算区块可动油储量为 905.5464×10^4 t。利用(14)式拟合含水率为94.5%~95.5%的生产数据, 得拟合关系式(21)(相关系数为0.9913):

$$\lg WOR = -1.1749 - 4.5859 \lg \left(1 - \frac{N_p}{905.5464} \right) \quad (21)$$

由(21)式预测的可采储量为 670.3025×10^4 t, 预测相对误差为1.40%。

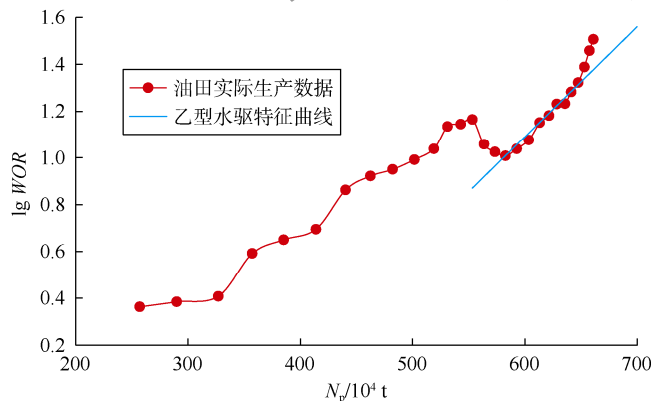


图4 羊二庄油田某区块乙型水驱特征曲线

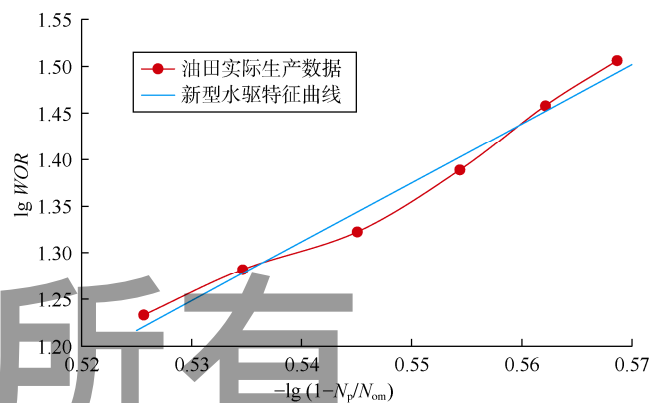


图5 羊二庄油田某区块新型水驱特征曲线

3.3 冀东柳赞油田某区块生产资料验证

柳赞油田某区块的实际开发数据见表4。该区块地质储量为 901.08×10^4 t, 由其归一化油水相对渗透率曲线得到束缚水饱和度为26.5%, 残余油饱和度为31.5%, 计算可动油储量为 514.9×10^4 t。由表4数据绘制甲型水驱特征曲线(见图6), 曲线在累计产油量为

表4 冀东柳赞油田某区块的实际开发数据

累计产油量/10 ⁴ t	累计产水量/10 ⁴ t	含水率/%
36.130	38.770	54.51
45.021	52.912	63.99
55.974	77.770	75.19
66.874	119.046	80.89
78.487	168.082	81.42
91.075	224.639	79.23
112.748	323.435	86.70
132.585	487.499	92.32
145.495	629.021	90.18
156.473	696.680	86.27
167.028	785.458	91.78
175.297	862.522	90.77
178.489	904.996	92.05
182.054	961.163	95.12
185.704	1 030.860	94.77
189.535	1 100.029	94.42
193.759	1 171.939	94.69
196.686	1 230.038	95.29
202.072	1 358.356	96.33
205.934	1 480.184	96.96
208.895	1 606.369	97.71
211.897	1 711.787	96.99
216.829	1 930.118	98.17
218.969	2 045.629	98.25

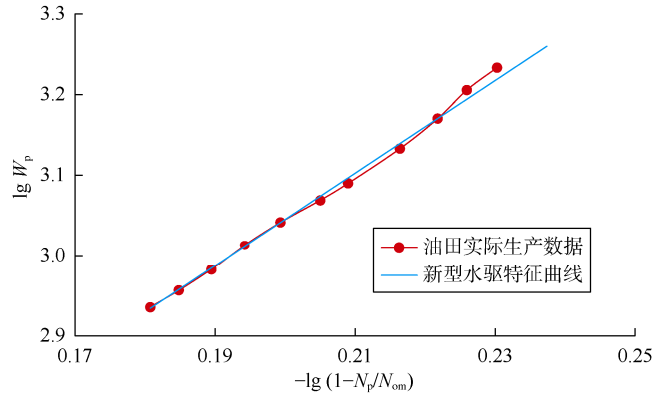


图7 柳赞某区块新型水驱特征曲线

4 结论

新型相对渗透率比值表征关系式能够很好地描述高含水饱和度下的油水相对渗透率比值特征，是推导特高含水期水驱特征曲线的基础。

新型水驱特征曲线为双对数坐标下的线性关系式，与甲型、乙型水驱特征曲线相比，其特高含水阶段的预测结果更接近实际值。常规水驱特征曲线出现上翘后，可以采用新型水驱特征曲线进行直线段外推预测可采储量和最终采收率。

符号注释：

a, b ——系数； B_o, B_w ——地层原油、地层水的体积系数， m^3/m^3 ； C ——积分常数； E_D ——极限驱油效率，%； K_{ro}, K_{rw} ——油、水相对渗透率，无因次； m, n ——系数； N ——地质储量， $10^4 t$ ； N_{om} ——可动油储量， $10^4 t$ ； N_p ——累计产油量， $10^4 t$ ； Q_o ——产油量， t/d ； Q_w ——产水量， t/d ； R ——采出程度，%； S_{or} ——残余油饱和度，%； \bar{S}_w ——地层平均含水饱和度，%； S_{wd} ——归一化含水饱和度，%； S_{we} ——出口端含水饱和度，%； S_{wi} ——束缚水饱和度，%； WOR ——水油比， f ； W_p ——累计产水量， t ； α, β ——与储集层和流体物性有关的常数； μ_o, μ_w ——地层原油、地层水黏度， $mPa \cdot s$ ； ρ_o, ρ_w ——地层原油、地层水的相对密度， f 。

参考文献：

[1] 童宪章. 天然水驱和人工注水油藏的统计规律探讨[J]. 石油勘探与开发, 1978, 5(6): 38-47.
TONG Xianzhang. On exploration of statistical regularity in naturally flooded and artificially water flooded reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 1978, 5(6): 38-47.
[2] 童宪章. 应用童氏水驱曲线分析方法解决国内外一些油田动态分析问题[J]. 新疆石油地质, 1989, 10(3): 41-49.
TONG Xianzhang. Application of Tong's water drive performance curve analysis method to analyzing some reservoir performance problems in the world[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1989, 10(3):

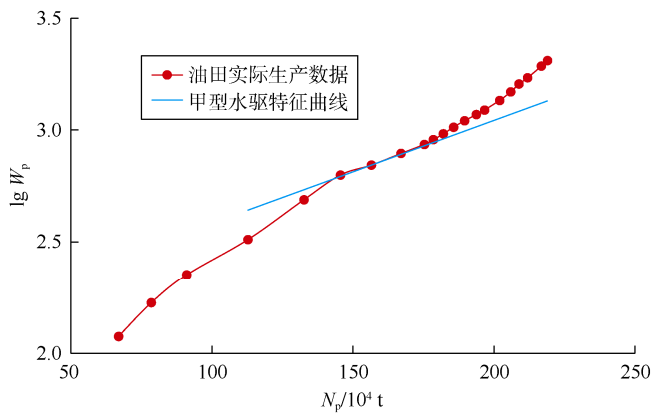


图6 柳赞某区块甲型水驱特征曲线

175.297×10⁴ t左右时发生上翘，甲型水驱特征曲线预测含水率98.25%时累计产油量为258.223×10⁴ t；新型水驱特征曲线（见图7）拟合关系式见（22）式（相关系数为0.9989）：

$$\lg W_p = 1.8949 - 5.7502 \lg \left(1 - \frac{N_p}{514.9} \right) \quad (22)$$

由（22）式预测累计产油量为222.840×10⁴ t，实际累计产油量为218.969×10⁴ t。可以看出新型水驱特征曲线的预测结果更接近实际值。

- 41-49
- [3] 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.
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.
- [4] 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.
- [5] 刘世华, 谷建伟, 杨仁锋. 高含水期新型水驱特征曲线[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2011, 30(S1): 158-163.
LIU Shihua, GU Jianwei, YANG Renfeng. New water-flooding characteristic curve at high water-cut stage[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2011, 30(S1): 158-163.
- [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的理论推导[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(2): 201-208.
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): 201-208.
- [7] 侯健, 王容容, 夏志增, 等. 特高含水期甲型水驱特征曲线的改进[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(6): 72-75.
HOU Jian, WANG Rongrong, XIA Zhizeng, et al. Improvement of water displacement curve for water flooded oil reservoirs at ultra-high water cut stage[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013, 37(6): 72-75.
- [8] XU F, MU L, WU X, et al. New expression of oil/water relative permeability ratio vs. water saturation and its application in water flooding curve[J]. Energy Exploration & Exploitation, 2014, 32(5): 817-830.
- [9] 崔传智, 徐建鹏, 王端平, 等. 特高含水阶段新型水驱特征曲线[J]. 石油学报, 2015, 36(10): 1267-1271.
CUI Chuazhi, XU Jianpeng, WANG Duanping, et al. A new water flooding characteristic curve at ultra-high water cut stage[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(10): 1267-1271.
- [10] LIU Zhibin, LIU Haohan. An effective method to predict oil recovery in high water cut stage[J]. Journal of Hydrodynamics, 2015, 27(6): 988-995.
- [11] ZHOU Z, WANG J. Research and application of a new type of water flooding characteristic curve in oilfield development[J]. Advances in Petroleum Exploration and Development, 2016, 11(2): 1-5.
- [12] 范海军, 朱学谦. 高含水期油田新型水驱特征曲线的推导及应用[J]. 断块油气田, 2016, 23(1): 105-108.
FAN Hanjun, ZHU Xueqian. Derivation and application of new water flooding characteristic curve in high water-cut oilfield[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2016, 23(1): 105-108.
- [13] CRAFT B C, HAWKINS M F. Applied petroleum reservoir engineering [M]. London: Prentice-Hall, 1959: 355-365.
- [14] 王国先, 谢建勇, 李建良, 等. 储集层相对渗透率曲线形态及开采特征[J]. 新疆石油地质, 2004, 25(3): 301-304.
WANG Guoxian, XIE Jianyong, LI Jianliang, et al. On relative permeability curves and production characteristics of reservoirs [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2004, 25(3): 301-304.
- [15] 高文君, 彭长水, 李正科. 推导水驱特征曲线的渗流理论基础和通用方法[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(5): 56-60.
GAO Wenjun, PENG Changshui, LI Zhengke. A derivation method and percolation theory of water drive characteristic curves[J]. Petroleum Exploration & Development, 2000, 27(5): 56-60.
- [16] 纪淑红, 田昌炳, 石成方, 等. 高含水阶段重新认识水驱油效率[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(3): 338-345.
JI Shuhong, TIAN Changbing, SHI Chengfang, et al. New understanding on water-oil displacement efficiency in a high water-cut stage[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 338-345.
- [17] 赵伦, 陈希, 陈礼, 等. 采油速度对不同黏度均质油藏水驱特征的影响[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(3): 352-357.
ZHAO Lun, CHEN Xi, CHEN Li, et al. Effects of oil recovery rate on water-flooding of homogeneous reservoirs of different oil viscosity[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(3): 352-357.
- [18] 赵辉, 康志江, 孙海涛, 等. 水驱开发多层油藏井间连通性反演模型[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(1): 99-106.
ZHAO Hui, KANG Zhijiang, SUN Haitao, et al. An interwell connectivity inversion model for waterflooding multilayer reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(1): 99-106.

第一作者简介: 王继强(1981-), 男, 山东临清人, 博士, 中国石油勘探开发研究院高级工程师, 主要从事高含水油田提高水驱采收率方面的研究。地址: 北京市海淀区学院路20号, 中国石油勘探开发研究院, 邮政编码: 100083。E-mail: wangjiqiang08@petrochina.com.cn

收稿日期: 2017-03-20 修回日期: 2017-09-23

(编辑 唐俊伟)