

强底水砂岩水驱曲线评价新方法



于季灏*, 封奔, 潘悦, 谢鑫, 杨丕辉

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆 401331

摘要: 强底水砂岩油藏是具有丰富天然能量的一类油藏, 在油藏的开发过程中, 水驱能量是能量的主要来源。与此同时, 水驱的过程中也有许多问题出现, 尤其是见水早和底水水窜的问题。通过文献调研以及该油藏的地质特征, 结合对前人对该地区的研究, 发现对该类油藏进行水驱分析十分有必要。本文主要分析了四种经典水驱曲线以及 f_w-N_p 型、 $WOR-N_p$ 型水驱曲线, 对单井进行拟合, 利用相关系数以及计算值和实际值拟合效果综合评价, 通过计算, 在水驱特征曲线中, 对直线段进行拟合, R^2 的差别并不是很大, 仅凭相关系数 R^2 并不能较好的判断出水驱曲线的适应性, 因此, 将实际与计算数据进行拟合, 综合来判断适合生产井的水驱曲线。大多数井符合甲型水驱曲线, 部分井对丙型、丁型以及 $WOR-N_p$ 型水驱曲线有较好的适应性。在油藏开发过程中, 利用适用性较好的水驱曲线, 对开发制度进行调整, 对油藏的含水率和累产水量进行预测, 利于油藏的开发。

关键词: 水驱曲线; 强底水油藏; 夹层; 开发效果

DOI: [10.57237/j.res.2024.01.002](https://doi.org/10.57237/j.res.2024.01.002)

A New Method for Evaluating the Water Drive Curve of Sandstone with Strong Bottom Water

Yu Jihao*, Feng Ben, Pan Yue, Xie Xin, Yang Pihui

School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China

Abstract: Strong bottom water sandstone reservoirs are a type of reservoir with abundant natural energy. During the development process of reservoirs, water drive energy is the main source of energy. At the same time, there are also many problems that arise during water flooding, especially the problems of early water breakthrough and bottom water breakthrough. Through literature research and geological characteristics of the reservoir, combined with previous research on the region, it was found that water drive analysis of this type of reservoir is very necessary. This article mainly analyzes four classic water drive curves, as well as FW-Np and WOR-Np water drive curves, and fits single wells. The fitting effect is comprehensively evaluated using correlation coefficients, calculated values, and actual values. Through calculation, in the water drive characteristic curve, the difference in R^2 is not significant when fitting the straight line segment. Relying solely on the correlation coefficient R^2 cannot determine the adaptability of the water drive curve well. Therefore, the actual and calculated data are fitted, To comprehensively determine the suitable water drive curve for production wells. Most wells conform to Type A water drive curves, while some wells have good adaptability to Type C, Type D, and WOR-Np water drive curves. In the process of reservoir development, using water drive curves with good applicability, adjusting the development system, predicting the water content and cumulative water production of the reservoir, is beneficial for the development of the reservoir.

基金项目: 哈法亚油田 Sadi 碳酸岩油藏压裂前置微乳液渗吸增油规律研究 (基金号: YKJCX2320126).

*通信作者: 于季灏, 2022201054@cqu.edu.cn

收稿日期: 2023-12-13; 接受日期: 2024-02-01; 在线出版日期: 2024-02-04

<http://www.energyscitech.org>

Keywords: Water Drive Curve; Strong Bottom Water Reservoir; Interlayer; Development Effect

1 引言

作为强底水砂岩油藏，具有较强天然能量，在开采过程中底水作为能量来源不断驱替油相从储层进入井底[1]。底水不仅是该类油藏的能量来源，而且也是开发过程中重要的影响因素，影响着开发过程中含水率、水相饱和度的变化，进而影响着油田的产量和开发效果，因此，在强底水砂岩油藏的开发中，水相是不可忽视的重要因素。通过数据与理论的结合，来探究强底水砂岩油藏的含水率变化和水相饱和度变化规律，将有利于油田开发，提高油藏的开发效果。本文选择水驱曲线中不只选择了四种经典的水驱曲线，而且还选择了水油比和含水率与累计产油量的水驱曲线，其更能体现水相和油相间的关系，符合强底水砂岩油藏的特征[2, 3]。

2 水驱曲线理论基础

水驱特征曲线的研究主要是理论研究与实际数据相结合，在前人的研究过程中研究方法主要有三种，首先是前苏联和美国的学者通过实际资料进行整理，研究指出累产油量和累产水量的变化有一定的数学关系[4, 5]；其次，随着注水开发的普遍由众多油藏动态的研究人员发现，在半对数坐标上累计产水量和和累计产油量有着近似的直线关系，之后，陈元千对这些公式进行了详细的理论推导，并与中国的实际油藏数据进行了结合引入中国。至此，水驱曲线广泛地应用到了各个油田中，用于指导开发、预测可采储量。

根据油水两相稳态渗流的达西定律，地层保持恒温，刚性水驱，在不考虑重力和毛细管压力的情况下，油水比的公式为[6]：

$$R = \frac{\mu_o}{\mu_w} \cdot \frac{K_{rw}}{K_{ro}} \quad (1)$$

根据实验资料得出的公式 $\frac{K_{ro}}{K_{rw}} = ce^{-dS_w}$ 带入式(1)中可得：

$$S_w = \frac{1}{d} \ln \left(c \frac{\mu_w}{\mu_o} \right) + \frac{1}{d} \ln R \quad (2)$$

其中， K_{wr} 、 K_{or} 为水和油的相对渗透率，单位 mD； μ_w 、 μ_o 为水和油的粘度，单位 mPa s； S_w 为地层水饱和度； c 、 d 为与储藏有关的常数。

根据油水两相稳态渗流的达西定律原油采出程度和含水饱和度成正比关系，其关系公式为：

$$\eta = 1 - \frac{B_{oi}(1-S_w)}{B_o(1-S_{wi})} \quad (3)$$

$$\text{或 } S_w = 1 - \frac{B_o(1-S_{wi})}{B_{oi}} + \frac{B_o(1-S_{wi})}{B_{oi}} \eta \quad (4)$$

其中， η 为原油的采出程度； S_{wi} 为原始地层水饱和度； B_{oi} 为原始地层压力下的原油体积系数， m^3/m^3 ； B_o 为地层压力下的原油体积系数， m^3/m^3 。

将式(4)带入式(2)中，可得采出程度与油水比的关系式：

$$1 - \frac{B_o(1-S_{wi})}{B_{oi}} + \frac{B_o}{B_{oi}}(1-S_{wi})\eta = \frac{1}{d} \ln \left(c \frac{\mu_w}{\mu_o} \right) + \frac{1}{d} \ln R \quad (5)$$

通过对式(5)简化，可得：

$$\eta = B + A \ln R \quad (6)$$

即：

$$\frac{N_p}{N} = B + A \ln \frac{dW_p}{dN_p} \quad (7)$$

简化得：

$$dW_p = e^{\left(\frac{N_p}{N}-B\right)/A} dN_p \quad (8)$$

等式两边积分得：

$$W_p + A Ne^{-\frac{B}{A}} = A Ne^{\left(\frac{N_p}{N}-B\right)/A} \quad (9)$$

对式(9)两边取对数，可得：

$$\lg \left(W_p + A Ne^{-\frac{B}{A}} \right) = \lg A + \lg N + \left(\frac{N_p}{N} - B \right) \quad (10)$$

式(10)即甲型水驱曲线, 通过对一些常数项的整理即可得到通常看到的甲型水驱曲线公式[7, 8], 其他公式由类似的方法也可以推出。由上面的推导过程, 不难发现水驱曲线, 不仅是由经验以及大量的实际数据得出的, 而且具有一定的理论基础, 因此, 水驱曲线拟合特征也和水驱特征有直接的关系。

2.1 M 油藏水驱曲线特征分析

M油藏四种水驱曲线拟合见图1至4。结合水驱曲线和含水率变化, 可以看出, 从前期不稳定水驱进入稳定水驱阶段, 水驱曲线出现了明显的直线段, 在区

块工作制度发生变化后, 水驱曲线变化较明显, 因此进行了分段拟合[9]。拟合效果较好, 观察甲型水驱曲线直线段最早出现在含水率20%左右处, 乙型曲线也有同样的现象。根据前人研究表明, 水平井的开发渗流特征较直井开发有区别, 直井底水的稳定水驱更为明显突出, 而水平井底水水驱则介于稳定水驱和不稳定水驱之间。在累产油达到 $26 \times 10^4 t$ 以及 $112 \times 10^4 t$ 时, 含水量有较大的变化甲乙水驱曲线有明显的变化, 丙丁型这在变化后, 一段时间出现明显的直线段。对两个直线段的拟合值做储量预测。

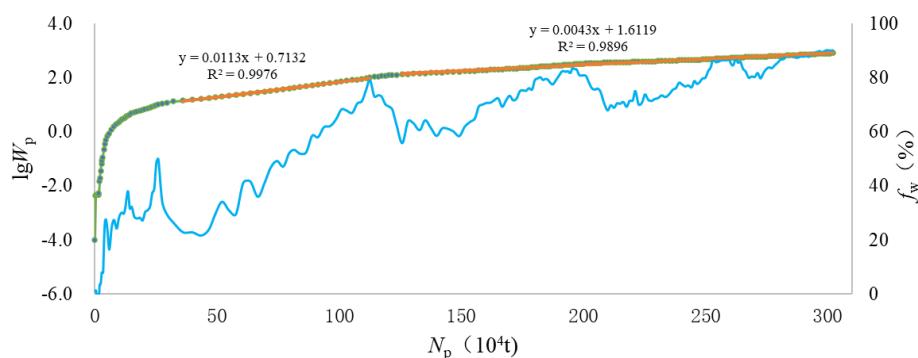


图1 M油藏甲型水驱曲线

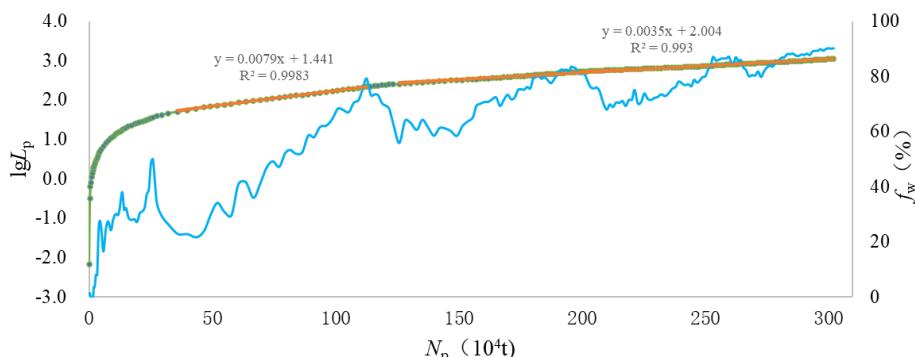


图2 M油藏乙型水驱曲线

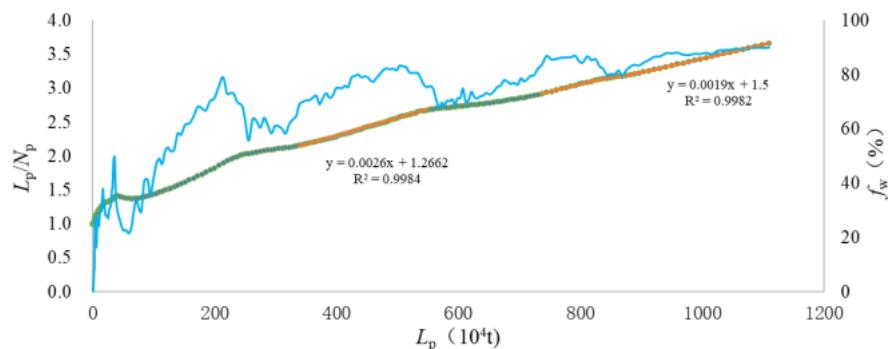


图3 M油藏丙型水驱曲线

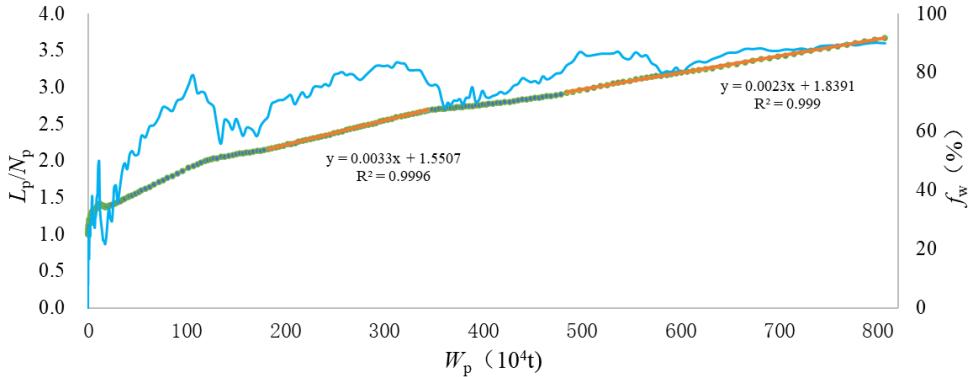


图 4 M 油藏丁型水驱曲线

2.2 水驱曲线拟合评价

2.2.1 评价方法及其原理

分析水驱曲线是水驱特征分析的一个重要方法，水驱曲线是通过公式推导，得出由不同的几个生产数据具有一定关系，且在稳定生产时具有一定的直线关系。下面本文将利用整理好的实际生产数据，进行水驱曲线拟合，分析找出所适合的水驱曲线类型。主要分析的马克西莫夫—童宪章型水驱曲线（甲型水驱曲线）、沙卓诺夫型水驱曲线（乙型水驱曲线）西帕切夫水驱曲线（丙型水驱曲线）、纳扎洛夫水驱曲线（丁型水驱曲线），以及 f_w - N_p 型、WOR- N_p 型水驱曲线。其中 f_w - N_p 型、WOR- N_p 型水驱曲线更能体现水相和油相间的关系，符合强底水砂岩油藏的生产特征[10]。

在本文中主要的评价方法是，直线拟合的相关系数 R^2 评价以及实际数据与计算数据拟合评价[11]。引用实际与计算数据拟合的方法，来对水驱曲线进项进一步的选择。实际与计算数据拟合的方法相较于 R^2 可以更直观的发现拟合直线中所蕴含的数据之间的关系。

方法是通过已知的水驱曲线关系进行数学变换，得出某两个数据之间的关系，分别对甲型水驱曲线和 WOR- N_p 型水驱曲线进行举例推导。

甲型水驱曲线的公式为[12]:

$$\lg W_p = A_1 + B_1 N_p \quad (11)$$

式中 W_p 为累产水量，单位 $10^4 t$; N_p 为累产油量，单位 $10^4 t$; A_1 、 B_1 为甲型水驱特征曲线的截距和斜率。对式(11)进行简单的数学计算可以得到:

$$W_p = 10^{A_1 + B_1 N_p} \quad (12)$$

这样便得到了 W_p 与 N_p 之间的关系。下面对式(12)等式两边对时间 t 求导得:

$$W_p = WOR / (2.303B_1) \quad (13)$$

$$WOR = Q_w / Q_o \quad (14)$$

Q_w 为年产水量，单位 $10^4 t/a$; Q_o 为年产油量，单位 $10^4 t/a$; WOR 为水油比。将式(13)代入式(11)，并进行整理，可得:

$$N_p = \frac{\lg WOR - [A_1 + \lg(2.303B_1)]}{B_1} \quad (15)$$

根据 $WOR = \frac{f_w}{1 - f_w}$ ，并对式(15)求反函数函数，可得:

$$f_w = \frac{10^{A_1 + B_1 N_p} + 2.303B_1}{10^{A_1 + B_1 N_p} + 2.303B_1 + 1} \quad (16)$$

这样便得到了 f_w 与 N_p 之间的关系。

下面对 WOR- N_p 型水驱曲线进行推导，WOR- N_p 型水驱曲线的公式为:

$$\lg WOR = A_2 + B_2 N_p \quad (17)$$

根据 $f_w = \frac{WOR}{1 + WOR}$ ，可得 f_w 与 N_p 之间的关系:

$$f_w = \frac{10^{A_2 + B_2 N_p}}{10^{A_2 + B_2 N_p} + 1} \quad (18)$$

根据 $WOR = Q_w / Q_o$ ，式(17)可以整理为:

$$Q_w = 10^{A_2 + B_2 N_p} \cdot Q_o \quad (19)$$

对式(17)等式两边对时间 t 积分, 可得:

$$W_p = \frac{10^{A_2 + B_2 N_p}}{B_2 \cdot 2.303} \quad (20)$$

这样便得到了 W_p 与 N_p 之间的关系。通过上述方法即可获得各水驱曲线关于 f_w 与 N_p 的关系方程以及 W_p 与 N_p 的关系方程, 本文所选各水驱曲线由上述方法的推导结果, 如表 1 所示。

表 1 各水驱曲线的推导结果

水驱曲线类型	f_w 与 N_p 关系	W_p 与 N_p 关系
f_w-N_p	$f_w = 10^{A_1 + B_1 N_p}$	$W_p = -\ln(1 - \frac{N_p}{100}) \frac{1}{2.303 \cdot B_1}$
$WOR-N_p$	$f_w = \frac{10^{A_2 + B_2 N_p}}{10^{A_2 + B_2 N_p} + 1}$	$W_p = \frac{10^{A_2 + B_2 N_p}}{B_2 \cdot 2.303}$
甲型水驱曲线	$f_w = \frac{10^{A_3 + B_3 N_p} \cdot 2.303 B_3}{10^{A_3 + B_3 N_p} \cdot 2.303 B_3 + 1}$	$W_p = 10^{A_3 + B_3 N_p}$
乙型水驱曲线	$f_w = \frac{10^{A_4 + B_4 N_p} \cdot 2.303 B_4 - 1}{10^{A_4 + B_4 N_p} \cdot 2.303 B_4}$	$W_p = 10^{A_4 + B_4 N_p} - N_p$
丙型水驱曲线	$f_w = 1 - \frac{(1 - B_5 N_p)^2}{A_5}$	$W_p = \frac{N_p - A_5 N_p - B_5 N_p^2}{B_5 N_p - 1}$
丁型水驱曲线	$f_w = \frac{ 1 - A_6 }{(1 - B_6 N_p)^2 - 1 - A_6 }$	$W_p = \frac{N_p - A_6 N_p}{B_6 N_p - 1}$

实际数据和计算数据的拟合分别使用平均误差值、绝对平均误差值、误差均方根、误差标准差[13]。平均误差值公式为:

$$M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i \quad (21)$$

绝对平均误差值公式为:

$$F = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |E_i| \quad (22)$$

误差均方根公式为:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i^2} \quad (23)$$

误差标准差公式为:

$$\sigma_E = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2} \quad (24)$$

其中各个误差点选为各个实际数据点, 当拟合指标为无量纲时数据的拟合误差为:

$$E_i = X_i(t_i) - A_i(t_i) \quad (25)$$

含水率为无量纲数据, 符合此公式。由式(21)计算值作为拟合误差数据, 在根据式(22)、式(23)、式(24)、式(25)。来计算各个评价指标。

2.2.2 典型井水驱曲线

上文已经对要拟合的水驱曲线类型进行了阐述, 并且对评价的方法也进行了详细推导和阐述,。下面对 #1 水平井作为典型井进行分析, 如图 5 所示。

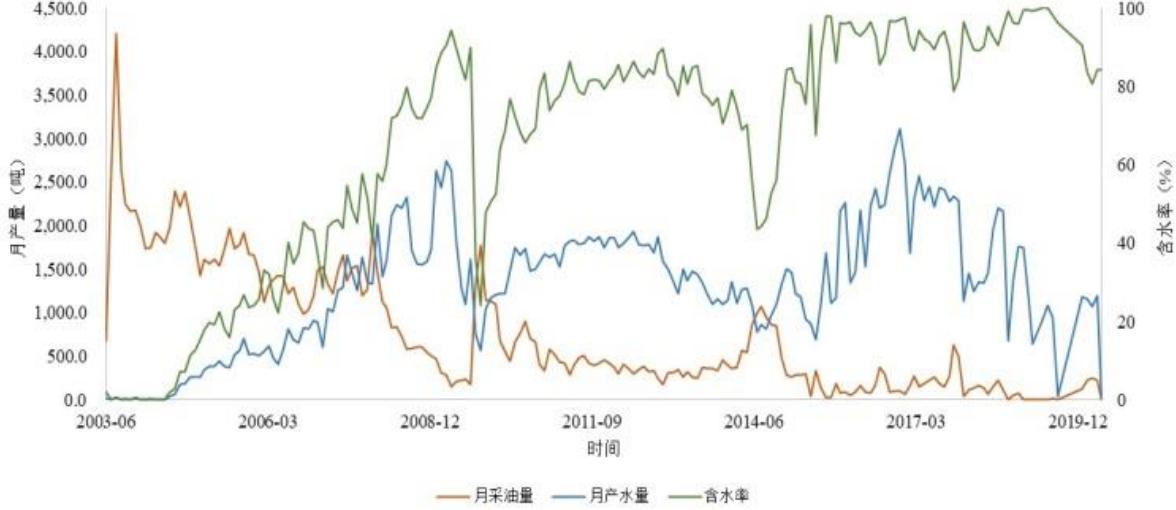


图 5 #1 井采油曲线

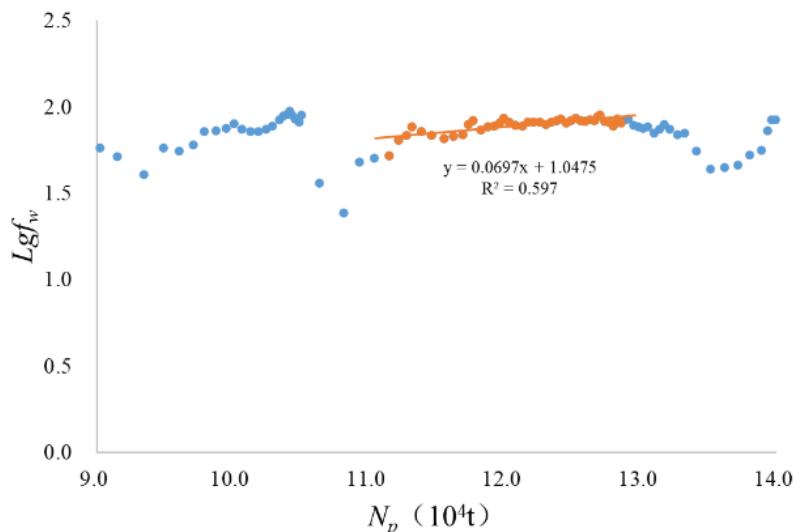
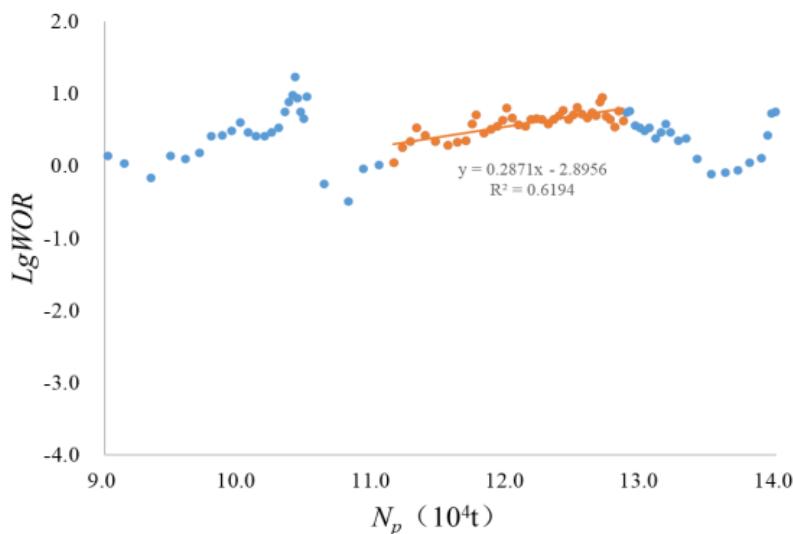
#1 井于 2003 年 6 月 15 日开井, 开井时产油 31.1t/d,

含水率 2.8%，油管自喷生产，后日采油量稳定在 70t/d。由 2003 年 6 月到 2009 年 8 月产量呈递减趋势，天然能量逐渐衰减，2009 年 9 月由自喷井转抽油井，并套

管生产含水率保持稳定，综合分析#1 井生产时期较长，有较稳定的生产时期，受夹层影响。下面通过对#1 井的实际动态数据，进行水驱曲线拟合[14]。

表 2 #1 井水驱曲线拟合评价表

水驱曲线	相关系数 R ²	平均误差值 (%)	绝对平均误差值 (%)	误差均方根 (%)	误差标准差 (%)
f_w-N_p 型	0.597	-0.2193	3.564	30.080	4.756
$WOR-N_p$ 型	0.619	0.2930	3.241	27.885	4.409
甲型	0.994	1.2437	3.871	30.396	4.280
乙型	0.994	16.839	5.294	44.749	7.075
丙型	0.998	1.4306	4.025	34.668	5.481
丁型	0.999	3.2125	3.933	29.506	4.665

图 6 #1 井 f_w-N_p 型水驱特征曲线拟合图图 7 #1 井 $WOR-N_p$ 型水驱特征曲线拟合图

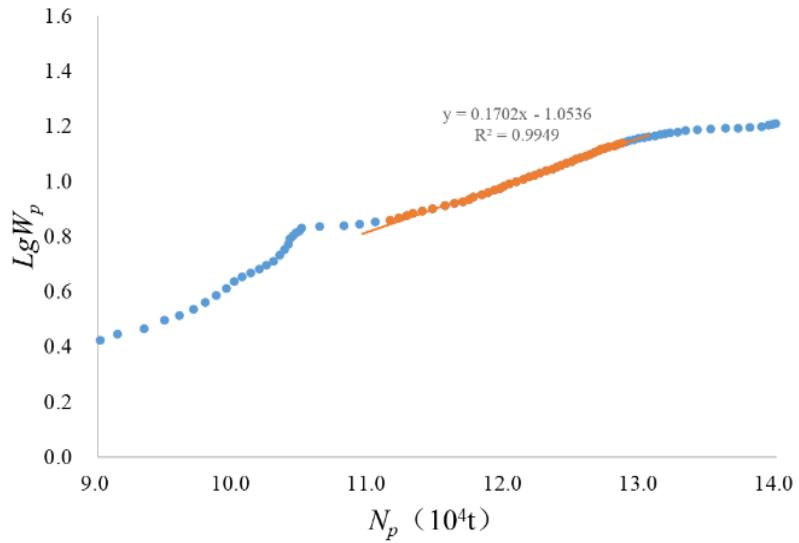


图 8 #1 井甲型水驱特征曲线拟合图

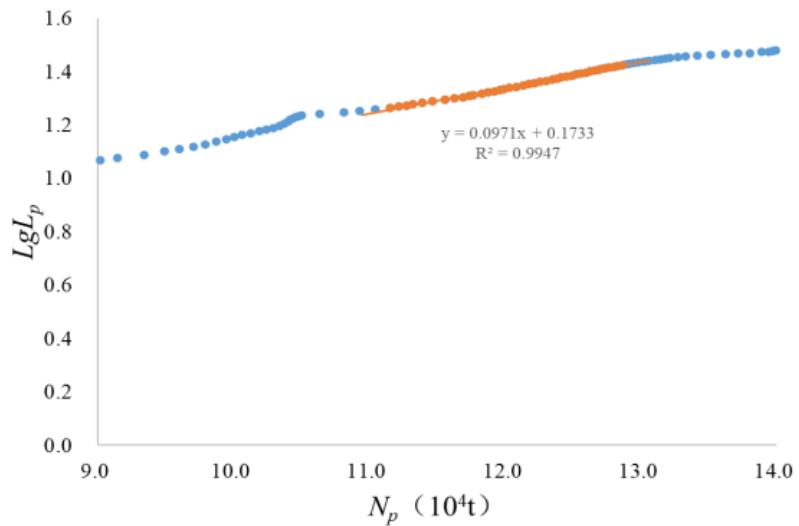


图 9 #1 井乙型水驱特征曲线拟合图

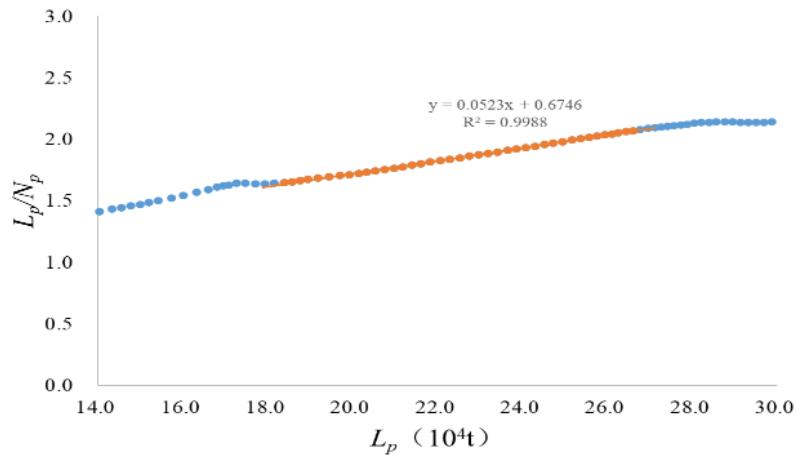


图 10 #1 井丙型水驱特征曲线拟合图

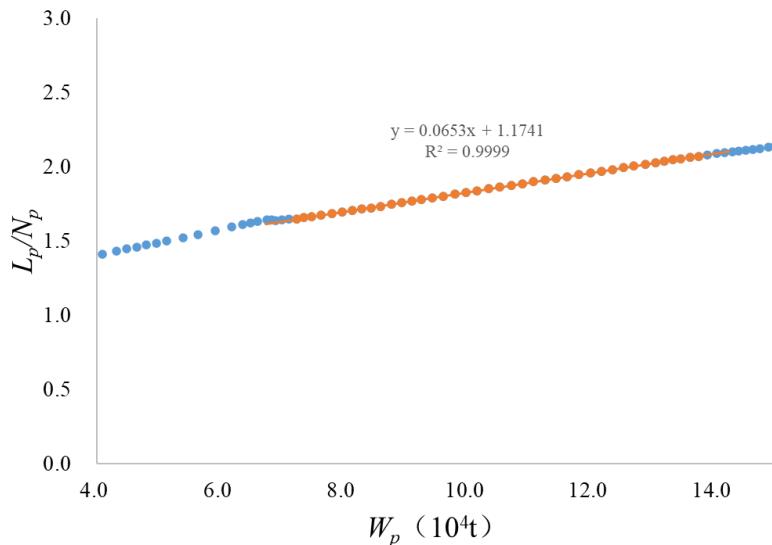


图 11 #1 井丁型水驱特征曲线拟合图

图 6 到图 11 为#1 井的四种经典水驱曲线以及 f_w-N_p 、 $WOR-N_p$ 型水驱曲线和各水驱曲线计算数据与实际的拟合图, 表 2 中各误差值为实际含水率和各计算含水率的误差值计算。通过观察可以发现, f_w-N_p 、 $WOR-N_p$ 型水驱曲线的相关系数 R^2 数值偏小, 但在实际数据与计算数据的拟合上得到了较好的结果, 尤其与乙型水驱曲线来说相关系数 R^2 得到了较高的数值, 但实际数据与计算数据的拟合效果较差相对, 所以要综合判断两种评价方法来选定对象井水驱特征曲线的适应性 [15]。 f_w-N_p 型水驱曲线虽然含水率 f_w 数据拟合较好, 但相关系数 R^2 较小, 拟合直线受数据波动影响较大, 故不做考虑; 丁型曲线拟合较好, 但在累产水在末端出现上翘, 对应用于预测和评价来说, 会使之后的预测值误差偏大, 故不做考虑。

综上的数据可以看出#1 井的水驱曲线可以看出在甲型水驱曲线的拟合上, 无论是拟合段的相关系数值, 还是实际和计算数据的拟合都有较好的精度。这样选择的水驱曲线有利于对该井进行储量和动态预测。

3 结论

- (1) 在水驱特征曲线中, 对直线段进行拟合, R^2 的差别并不是很大, 仅凭相关系数 R^2 并不能较好的判断出水驱曲线的适应性, 因此, 将实际与计算数据进行拟合, 综合来判断适合生产井的水驱曲线。
- (2) 研究井大多数符合甲型水驱曲线, 部分井对丙

型、丁型以及 $WOR-N_p$ 型水驱曲线有较好的适应性。

- (3) 根据上述方法评价得到的水驱曲线, 对研究井进行储量预测, 预测结果比较适合现今的开发状况。

参考文献

- [1] 刘丽娜, 曹飞, 刘学利等. 塔河油田块状底水砂岩油藏开发特征及挖潜对策 [J]. 新疆石油地质, 2023, 44(04): 450-455.
- [2] 关于甲型、乙型、丙型、丁型水驱特征曲线合理选型的正确认识及应用 [J]. 张宏友; 王月杰; 王美楠. 数学的实践与认识, 2021(20).
- [3] 特高含水期油田新型水驱特征曲线公式推导 [J]. 王英圣; 石成方; 王继强. 石油与天然气地质, 2020(06).
- [4] 一种新的水驱特征曲线的研究与应用 [J]. 魏俊; 张志军; 王宏申; 王锦林; 徐浩; 尹鹏. 复杂油气藏, 2020(03).
- [5] 新型水驱特征曲线的建立及理论基础 [J]. 高文君; 殷瑞; 杨静. 石油学报, 2020(03).
- [6] 一种改进的乙型水驱特征曲线研究及应用 [J]. 谷建伟; 任燕龙; 张以根; 崔文富. 特种油气藏, 2020(01).
- [7] 水驱特征曲线在低渗透油藏开发中的应用 [J]. 王柏力; 冯乔; 江海英; 孙秋分; 戴传瑞. 特种油气藏, 2019(06).
- [8] 两种改进型水驱曲线的建立 [J]. 邓森; 孟妍; 杨金川. 复杂油气藏, 2017(03).

- [9] 基于水驱特征曲线确定油田综合递减规律 [J]. 盖建.石油工业技术监督, 2017(05).
- [10] 高文君, 王少霞, 刘文锐, 等. 水驱驱替特征系列修正及油水渗流特征方程确定 [J]. 断块油气田, 2021, 28(3).
- [11] 王天翔, 刘大鹏, 申太志. 新型水驱特征曲线在低渗透油藏的应用 [J]. 中外能源, 2023, 28(08): 73-76.
- [12] 李良政, 李丛林, 李翀. A 油田水驱特征曲线选型 [J]. 石油化工应用, 2023, 42(07): 79-83+88.
- [13] 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(01): 69-73.
- [14] 朱圣举, 朱洁, 张皎生. 水驱砂岩油藏压力变化率研究 [J]. 重庆科技学院学报 (自然科学版), 2021, 23(05): 34-37.
- [15] 魏俊, 张志军, 王宏申等. 一种新的水驱特征曲线的研究与应用 [J]. 复杂油气藏, 2020, 13(03): 46-50.