

# 基于特高含水期相渗规律的含水率预测新模型

曲 江, 夏连晶

大庆油田有限责任公司第四采油厂, 黑龙江 大庆  
Email: dqqujiang@petrochina.com.cn, xialianjing@petrochina.com.cn

收稿日期: 2021年6月22日; 录用日期: 2021年8月9日; 发布日期: 2021年8月20日

---

## 摘 要

目前常用的含水率预测方法主要包括Gompertz模型、Logistic模型和Usher模型, 这三种方法缺乏理论依据, 只反映了含水率与时间的统计规律, 而常用的水驱规律曲线虽能反映渗流理论, 但进入特高含水期后油水相对渗透率比值与含水饱和度在半对数曲线上偏离直线关系, 不能用于特高含水期含水率预测。因此, 本文深入研究特高含水期相渗曲线变化规律, 建立了反映含水率与采出程度关系的含水率预测新模型, 能够真实体现特高含水期油水地下渗流特征, 预测更为准确。研究表明, 与其他三种方法相比, 含水率预测新模型预测精度提高至少3个百分点以上, 为特高含水期水驱油藏开发规划制定提供了理论依据。

## 关键词

特高含水期, 相渗曲线, 含水率预测, 模型建立, 水驱规律曲线

---

# A New Model of Water Cut Prediction Based on Relative Permeability Law in Extra-High Water Cut Stage

Jiang Qu, Lianjing Xia

No.4 Oil Production Plant of Daqing Oilfield Co. Ltd., Daqing Heilongjiang  
Email: dqqujiang@petrochina.com.cn, xialianjing@petrochina.com.cn

Received: Jun. 22<sup>nd</sup>, 2021; accepted: Aug. 9<sup>th</sup>, 2021; published: Aug. 20<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

At present, the commonly used water cut prediction methods mainly include Gompertz model, Logistic model and Usher model. These three methods lack theoretical basis and only reflect the statistical law of water cut and time. Although the commonly used water drive law curve can reflect the seepage theory, the oil-water relative permeability ratio and water saturation deviate from the linear relationship on the semi logarithmic curve after entering the extra-high water cut stage, so it cannot be used for the water cut prediction in the extra-high water cut stage. Therefore, this paper deeply studies the change law of relative permeability curve in extra-high water cut stage, and establishes a new water cut prediction model reflecting the relationship between water cut and recovery degree, which can truly reflect the characteristics of oil-water underground seepage in extra-high water cut stage, and the prediction is more accurate. The results show that compared with the other three methods, the prediction accuracy of new water cut prediction model is improved by more than 3 percent, which provides a theoretical basis for the development planning of water drive reservoir in extra-high water cut period.

## Keywords

Extra-High Water Cut Stage, Relative Permeability Curve, Water Cut Prediction, Model Establishment, Water Drive Law Curve

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

对于水驱开发油田,含水率是反映油田含水上升规律的重要指标,是评价水驱油田开发效果、分析油田生产动态的重要指标。历年来国内外学者对含水上升规律进行深入研究,目前常用的含水率预测方法[1] [2] [3] [4] [5]主要包括 Gompertz 模型、Logistic 模型和 Usher 模型,这三种方法通常反映了含水率与时间的统计规律,缺乏理论依据,当含水率出现剧烈波动时,该方法适用性差;而常用的水驱规律曲线[6] [7] [8] [9]虽能反映油水渗流理论,但进入特高含水期后油水相对渗透率比值与含水饱和度在半对数

曲线上偏离直线关系, 不能用于特高含水期含水率预测。因此, 本文基于特高含水期相渗规律, 建立了一种反映含水率与采出程度关系的含水率预测新方法, 既能反映特高含水期油水渗流规律, 又能提高特高含水期含水率预测精度, 为特高含水期水驱油藏开发规划制定提供了理论依据。

## 2. 目前含水率预测模型

目前常用的含水率预测方法主要包括 Gompertz 模型、Logistic 模型和 Usher 模型, 这三种方法均反映了含水率与时间的统计规律。

### 2.1. Gompertz 模型

英国统计学家和数学家冈珀茨 Gompertz 于 1825 年提出了一种预测动物种群生长模型, 使用该模型能够描述种群的消亡规律和比较植物病害进展曲线。后来将这种广泛用于经济增长和油气资源增长预测的 Gompertz 模型[10]应用于水驱开发含水率预测中, 其一般形式为

$$f_w = e^{k \cdot e^{-bt}} \quad (1)$$

式中:  $f_w$  为油田含水率, %;  $t$  为油田开发时间, a;  $k$ 、 $b$  为拟合系数。

将公式(1)变形, 得到  $\ln f_w$  与  $t$  之间的关系, 见公式(2), 通过公式拟合即可得到拟合系数  $k$  和  $b$  的数值。

$$\ln f_w = k \cdot e^{-bt} \quad (2)$$

### 2.2. Logistic 模型

Logistic 模型[11]又称 Logistic 回归分析, 该模型在流行病学中应用较多, 能够根据危险因素预测某疾病发生的概率。美国地质学家哈伯特 King Hubbert 于 1962 年提出将 Logistic 模型应用于油田开发指标预测中, 其一般形式为

$$f_w = \frac{1}{1 + k \cdot e^{-bt}} \quad (3)$$

将公式(3)变形, 得到  $1/f_w - 1$  与  $t$  之间的关系, 见公式(4), 通过公式拟合即可得到拟合系数  $k$  和  $b$  的数值。

$$\frac{1}{f_w} - 1 = k \cdot e^{-bt} \quad (4)$$

### 2.3. Usher 模型

美国学者 Usher 于 1980 年提出了一种增长数据随时间变化数学模型。将该模型应用于水驱开发油田, 发现当  $t \rightarrow \infty$  时,  $f_w \rightarrow 1$ , 即预测含水率 Usher 模型[12] [13]的一般形式为

$$f_w = \frac{1}{(1 + k \cdot e^{-bt})^{1/c}} \quad (5)$$

式中:  $c$  为拟合系数。

将公式(5)变形, 得到  $f_w$  与  $t$  之间的关系, 见公式(6), 应用试凑法, 通过改变拟合系数  $c$  获得最大的相关系数, 即可得到拟合系数  $k$  和  $b$  的数值。

$$f_w^{-c} - 1 = k \cdot e^{-bt} \quad (6)$$

从以上表达式可以看出, 用于含水率预测的 Gompertz 模型和 Logistic 模型是 Usher 的两种简化形

式, 当  $c = 0$  时, 对公式(5)求导可得到 Gompertz 模型, 当  $c = 1$  时, 直接得到 Logistic 模型。Gompertz 模型和 Logistic 模型曲线呈“S”形状, 曲线中存在一个最大增长速度——拐点, Gompertz 模型拐点发生在  $N_R/e$  处, Logistic 模型拐点发生在  $N_R/2$  处, 这说明上述两个模型的拐点位置只与可采储量有关, 不适用于含水率拐点位置不符合相关规律的油藏。而 Usher 模型为三参数( $k$ 、 $b$  和  $c$ )模型, 引入了参数  $b$ , 拐点的位置与参数  $b$  和可采储量有关, 提高了 Usher 模型的适用范围, 与 Gompertz 模型和 Logistic 模型相比具有同等或更高的预测精度。

这三种模型均反映了含水率与时间的统计规律, 用于油田含水率预测时缺乏理论依据、各参数无实际物理意义。当油田进入稳定递减阶段后, 含水率变化随开发时间呈稳定变化趋势; 当油田进行大规模井网加密或重大措施调整时, 产油量曲线剧烈波动, 含水率出现明显的降低或太高趋势, 上述方法适用性变差。

### 3. 特高含水期相渗规律

油水相对渗透率曲线是研究油水两相渗流的基础, 是油田开发指标计算、动态分析等方面不可缺少的重要资料, 能够反映水驱油藏油水渗流规律。图 1(a)为任一复合相渗曲线, 当进入油水渗流阶段后, 水相相对渗透率与油相相对渗透率比值  $k_{rw}/k_{ro}$  与含水饱和度之间半对数直线关系; 当含水率超过 90%后, 进入特高含水阶段, 此时两者偏离直线关系出现明显上翘, 如图 1(b)所示, 因此需要建立新的特高含水阶段油水渗流理论。

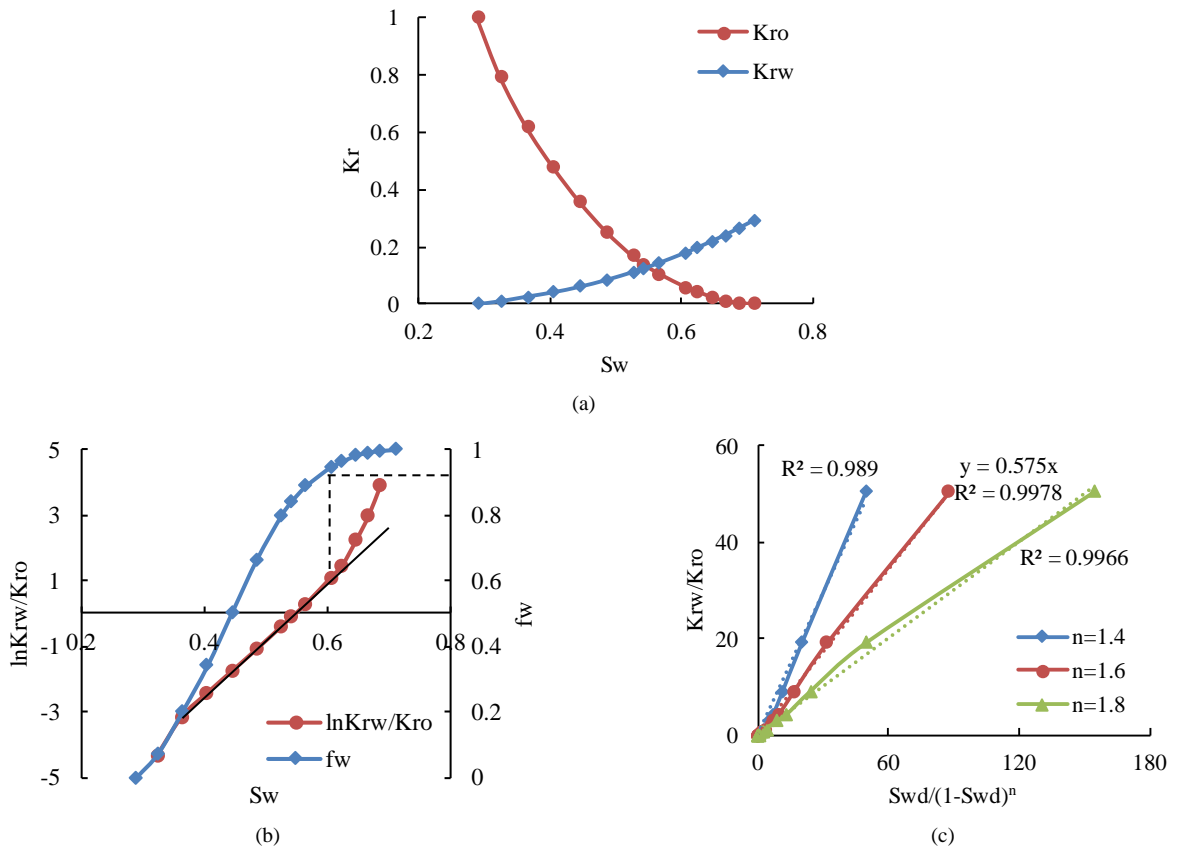


Figure 1. Law of oil-water relative permeability curve. (a) Relative permeability curve; (b) Relative permeability curve law in steady seepage stage; (c) Relative permeability curve law in extra-high water cut stage

图 1. 油水相对渗透率曲线规律。(a) 相对渗透率曲线; (b) 稳定渗流阶段相渗规律; (c) 特高含水期相渗规律

通过深入研究特高含水期相渗曲线变化规律, 发现油水相对渗透率比值  $k_{rw}/k_{ro}$  与归一化含水饱和度  $S_{wd}$  存在以下关系:

$$\frac{k_{rw}}{k_{ro}} = \frac{bS_{wd}}{(1-S_{wd})^n} \quad (7)$$

其中

$$S_{wd} = \frac{S_w - S_{wc}}{1 - S_{wc} - S_{or}} \quad (8)$$

式中:  $k_{rw}$ 、 $k_{ro}$  为水相相对渗透率、油相相对渗透率;  $S_w$ 、 $S_{wd}$  为含水饱和度、归一化含水饱和度;  $S_{wc}$ 、 $S_{or}$  为束缚水饱和度、残余油饱和度;  $b$ 、 $n$  为拟合系数。

应用试凑法, 通过改变系数  $n$  获得最大的相关系数, 即可得到拟合系数  $b$  的数值。当  $n=2$  时, 油水相对渗透率比值  $k_{rw}/k_{ro}$  与归一化含水饱和度项  $S_{wd}/(1-S_{wd})^2$  呈明显的直线关系, 相关系数无限趋近于 1, 如图 1(c) 所示。即公式(7)可以描述油田开发各个阶段油水相对渗透率比值与归一化含水饱和度的关系, 不用再区分低含水阶段、中含水阶段、高含水阶段和特高含水阶段。当公式中含水饱和度趋近于束缚水饱和度时, 即  $S_{wd}=0$  时,  $k_{rw}=0$ ; 当含水饱和度趋近于最大含水饱和度时, 即  $S_{wd} \rightarrow 1$  时,  $k_{rw}/k_{ro} \rightarrow \infty$ , 这与水驱规律相一致。

#### 4. 特高含水期含水率预测新模型

根据特高含水期相渗曲线变化规律, 建立新的特高含水期含水率预测新模型, 直接反映含水率与采出程度之间的关系。与已有模型[14] [15]仅能预测高含水阶段的开发指标相比, 该模型适用于油气田整个开发过程的含水率预测, 含水率预测精度明显提高。

已知采出程度  $R$  和驱油效率  $E_d$  计算公式, 整理公式(8), 当  $R \rightarrow 0$  时,  $S_{wd} \rightarrow 0$ , 当  $R \rightarrow E_d$  时,  $S_{wd} \rightarrow 1$ 。

$$S_{wd} = \frac{1 - S_{wc}}{1 - S_{wc} - S_{or}} \cdot \frac{S_w - S_{wc}}{1 - S_{wc}} = \frac{R}{E_d} \quad (9)$$

根据油水渗流公式可计算含水率:

$$f_w = \frac{Q_w}{Q_w + Q_o} = \frac{1}{1 + \frac{\mu_w}{\mu_o} \cdot \frac{k_{ro}}{k_{rw}}} \quad (10)$$

将公式(7)和公式(9)代入公式(10):

$$f_w = \frac{1}{1 + \frac{\mu_w}{b\mu_o} \cdot \frac{(1-S_{wd})^n}{S_{wd}}} = \frac{1}{1 + \frac{\mu_w}{b\mu_o} \cdot \frac{(1-R/E_d)^n}{R/E_d}} = \frac{1}{1 + \frac{\mu_w}{b\mu_o E_d^{n-1}} \cdot \frac{(E_d - R)^n}{R}} \quad (11)$$

公式(11)整理得:

$$\left( \frac{1}{f_w} - 1 \right) R = m (E_d - R)^n \quad (12)$$

其中

$$m = \frac{\mu_w}{b\mu_o E_d^{n-1}} \quad (13)$$

一般来说, 对于某一研究区驱油效率  $E_d$  可以通过岩心室内驱油实验获得, 根据公式(12), 已知历年

开发数据, 绘制 $(1/f_w - 1)R$  与  $E_d - R$  之间的关系, 确定二者幂函数关系的拟合系数  $m$  和  $n$ 。整理公式(11), 将拟合系数代入公式(14)即可根据采出程度预测未来含水率变化趋势。

$$f_w = \frac{1}{1 + m \cdot (E_d - R)^n / R} \quad (14)$$

### 5. 实例应用

以大庆油田某一已进入特高含水期的区块为研究对象, 1971~2020 年该区块历年开发数据见表 1, 应用上述 4 种方法对 1971~2015 年开发数据进行拟合, 并预测 2016~2020 年含水率, 拟合和预测结果如图 2 所示。通过拟合分别获得 Gompertz 模型、Logistic 模型、Usher 模型和含水率预测新模型的拟合系数  $k$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $m$  和  $n$  的数值, 从拟合相关系数来看, 拟合精度依次提高, 分别为 0.6397、0.8663、0.8941 和 0.9416。

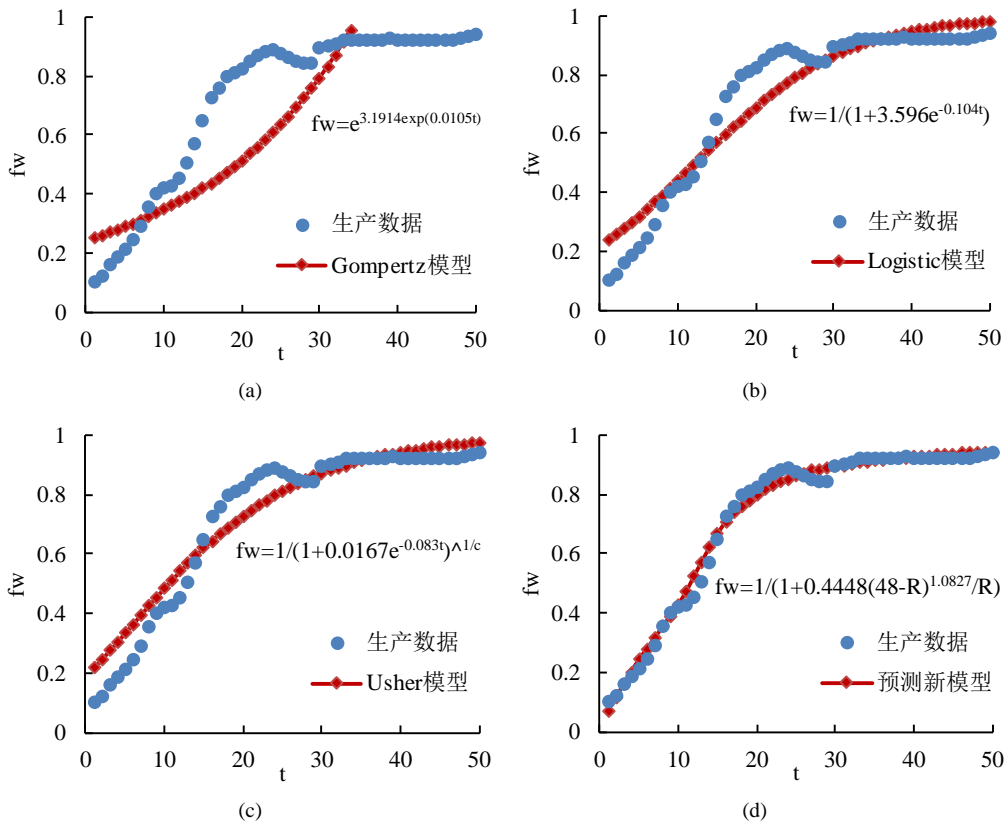


Figure 2. Water cut prediction results of each method. (a) Goempertz model; (b) Logistic model; (c) Usher model; (d) A new prediction model of water cut

图 2. 各方法含水率预测结果。(a) Goempertz 模型; (b) Logistic 模型; (c) Usher 模型; (d) 含水率预测新模型

Table 1. Water cut prediction results of each method

表 1. 各方法含水率预测结果

| 年    | 时间 | 采出程度 (%) | 含水率    | 含水率预测       |             |          |        |
|------|----|----------|--------|-------------|-------------|----------|--------|
|      |    |          |        | Gompertz 模型 | Logistic 模型 | Usher 模型 | 新模型    |
| 1971 | 1  | 2.10     | 0.1022 | 0.2516      | 0.2358      | 0.2176   | 0.0699 |
| 1972 | 2  | 3.49     | 0.1240 | 0.2603      | 0.2551      | 0.2455   | 0.1141 |

## Continued

|      |    |       |        |        |        |        |        |
|------|----|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1973 | 3  | 4.88  | 0.1604 | 0.2694 | 0.2753 | 0.2743 | 0.1571 |
| 1974 | 4  | 6.37  | 0.1877 | 0.2789 | 0.2965 | 0.3039 | 0.2019 |
| 1975 | 5  | 7.76  | 0.2125 | 0.2889 | 0.3187 | 0.3340 | 0.2421 |
| 1976 | 6  | 9.08  | 0.2418 | 0.2993 | 0.3417 | 0.3643 | 0.2793 |
| 1977 | 7  | 10.39 | 0.2883 | 0.3103 | 0.3654 | 0.3946 | 0.3150 |
| 1978 | 8  | 11.80 | 0.3549 | 0.3217 | 0.3899 | 0.4248 | 0.3526 |
| 1979 | 9  | 13.27 | 0.4003 | 0.3337 | 0.4149 | 0.4547 | 0.3904 |
| 1980 | 10 | 14.77 | 0.4225 | 0.3463 | 0.4403 | 0.4841 | 0.4279 |
| 1981 | 11 | 16.57 | 0.4245 | 0.3595 | 0.4661 | 0.5128 | 0.4713 |
| 1982 | 12 | 18.79 | 0.4548 | 0.3734 | 0.4920 | 0.5407 | 0.5225 |
| 1983 | 13 | 21.09 | 0.5018 | 0.3879 | 0.5180 | 0.5677 | 0.5730 |
| 1984 | 14 | 23.35 | 0.5667 | 0.4032 | 0.5439 | 0.5939 | 0.6203 |
| 1985 | 15 | 25.62 | 0.6501 | 0.4192 | 0.5696 | 0.6190 | 0.6656 |
| 1986 | 16 | 27.67 | 0.7291 | 0.4361 | 0.5949 | 0.6430 | 0.7045 |
| 1987 | 17 | 29.41 | 0.7565 | 0.4538 | 0.6197 | 0.6660 | 0.7363 |
| 1988 | 18 | 30.79 | 0.7994 | 0.4724 | 0.6439 | 0.6879 | 0.7607 |
| 1989 | 19 | 31.98 | 0.8123 | 0.4921 | 0.6673 | 0.7086 | 0.7811 |
| 1990 | 20 | 33.13 | 0.8238 | 0.5127 | 0.6900 | 0.7283 | 0.8003 |
| 1991 | 21 | 34.15 | 0.8469 | 0.5345 | 0.7118 | 0.7469 | 0.8169 |
| 1992 | 22 | 35.03 | 0.8713 | 0.5574 | 0.7327 | 0.7644 | 0.8309 |
| 1993 | 23 | 35.78 | 0.8839 | 0.5816 | 0.7525 | 0.7810 | 0.8425 |
| 1994 | 24 | 36.45 | 0.8873 | 0.6071 | 0.7714 | 0.7965 | 0.8528 |
| 1995 | 25 | 37.10 | 0.8764 | 0.6339 | 0.7892 | 0.8110 | 0.8626 |
| 1996 | 26 | 37.67 | 0.8645 | 0.6623 | 0.8060 | 0.8247 | 0.8711 |
| 1997 | 27 | 38.21 | 0.8514 | 0.6923 | 0.8217 | 0.8374 | 0.8791 |
| 1998 | 28 | 38.60 | 0.8452 | 0.7240 | 0.8365 | 0.8493 | 0.8846 |
| 1999 | 29 | 38.89 | 0.8444 | 0.7574 | 0.8502 | 0.8604 | 0.8888 |
| 2000 | 30 | 39.23 | 0.8959 | 0.7928 | 0.8630 | 0.8708 | 0.8936 |
| 2001 | 31 | 39.55 | 0.9005 | 0.8303 | 0.8748 | 0.8804 | 0.8981 |
| 2002 | 32 | 39.84 | 0.9104 | 0.8699 | 0.8858 | 0.8894 | 0.9022 |
| 2003 | 33 | 40.11 | 0.9191 | 0.9119 | 0.8959 | 0.8977 | 0.9060 |
| 2004 | 34 | 40.38 | 0.9198 | 0.9564 | 0.9052 | 0.9055 | 0.9096 |
| 2005 | 35 | 40.62 | 0.9232 |        | 0.9137 | 0.9127 | 0.9130 |
| 2006 | 36 | 40.83 | 0.9223 |        | 0.9216 | 0.9193 | 0.9158 |
| 2007 | 37 | 41.03 | 0.9214 |        | 0.9288 | 0.9255 | 0.9186 |
| 2008 | 38 | 41.21 | 0.9245 |        | 0.9354 | 0.9312 | 0.9209 |
| 2009 | 39 | 41.39 | 0.9273 |        | 0.9414 | 0.9365 | 0.9233 |
| 2010 | 40 | 41.57 | 0.9217 |        | 0.9469 | 0.9414 | 0.9257 |
| 2011 | 41 | 41.75 | 0.9234 |        | 0.9519 | 0.9460 | 0.9281 |
| 2012 | 42 | 41.93 | 0.9231 |        | 0.9564 | 0.9502 | 0.9304 |

Continued

|      |    |       |        |        |        |        |
|------|----|-------|--------|--------|--------|--------|
| 2013 | 43 | 42.09 | 0.9220 | 0.9605 | 0.9540 | 0.9325 |
| 2014 | 44 | 42.23 | 0.9201 | 0.9643 | 0.9576 | 0.9344 |
| 2015 | 45 | 42.36 | 0.9191 | 0.9677 | 0.9609 | 0.9361 |
| 2016 | 46 | 42.48 | 0.9231 | 0.9708 | 0.9640 | 0.9376 |
| 2017 | 47 | 42.59 | 0.9235 | 0.9736 | 0.9668 | 0.9390 |
| 2018 | 48 | 42.69 | 0.9281 | 0.9762 | 0.9694 | 0.9402 |
| 2019 | 49 | 42.78 | 0.9314 | 0.9785 | 0.9718 | 0.9414 |
| 2020 | 50 | 42.85 | 0.9411 | 0.9805 | 0.9740 | 0.9423 |

根据拟合系数, 计算 2005 年后 Gompertz 模型预测含水率超过 1; 应用 Logistic 模型、Usher 模型和含水率预测新模型计算 2016~2020 年含水率预测误差分别为 5.00%、4.28% 和 1.15%。通过对于拟合和预测结果可知, 与 Gompertz 模型、Logistic 模型和 Usher 模型相比, 含水率预测新模型拟合误差最小, 预测精度最高, 整体预测效果最好。在整个含水阶段, Gompertz 模型、Logistic 模型和 Usher 模型预测含水率均呈逐年上升的趋势, 但拟合精度并不高, 尤其是进入特高含水期后, 含水率预测值明显高于实际数值, 与实际不符; 而含水率预测新方法在低含水期预测含水率高、特高含水期预测含水率低, 最接近于实际含水率数值, 可靠性高。

## 6. 结论

1) 目前常用的含水率预测方法仅反映了含水率与时间的统计规律, 缺乏油水渗流理论, 而水驱规律曲线虽有理论职称, 但特高含水期后油水相对渗透率比值与含水饱和度在半对数曲线上偏离直线关系, 不能用于特高含水期含水率预测。

2) 基于特高含水期相渗渗流特征, 建立了反映含水率和采出程度变化规律的含水率预测新模型, 模型参数求取简单、可靠性高, 研究表明与 Logistic 模型、Usher 模型相比, 含水率预测精度分别提高了 3.85 个百分点和 3.13 个百分点。

## 基金项目

国家科技重大专项(2017ZX05072-005-005)。

## 参考文献

- [1] 陈元千. 对预测含水率的翁氏模型推导[J]. 新疆石油地质, 1998(5): 3-5.
- [2] 赵艳武, 杜殿发, 王冠群, 等. 水驱油田特高含水期含水率预测模型[J]. 特种油气藏, 2016, 23(5): 110-113, 156.
- [3] 杨仁锋, 杨莉. 水驱油田新型含水率预测模型研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2012, 27(6): 713-719.
- [4] 高文君, 徐冰涛, 黄瑜, 李君芝, 欧翠荣. 水驱油田含水率预测方法研究及拓展[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(5): 993-999.
- [5] 周鹏. 新型水驱油田含水率预测模型的建立及其应用[J]. 新疆石油地质, 2016, 37(4): 452-455.
- [6] 许家峰, 张金庆, 安桂荣, 等. 广适水驱曲线求解新方法及应用[J]. 断块油气田, 2017, 24(1): 43-45, 55.
- [7] 李珂, 杨莉, 张迎春, 皮建. 一种新型水驱特征曲线的推导及应用[J]. 断块油气田, 2016, 23(6): 797-799.
- [8] 高文君, 徐君. 常用水驱特征曲线理论研究[J]. 石油学报, 2007(3): 89-92.
- [9] 窦宏恩, 张虎俊, 沈思博. 对水驱特征曲线的正确理解与使用[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(4): 755-762.
- [10] 王炜, 刘鹏程. 预测水驱油田含水率的 Gompertz 模型[J]. 新疆石油学院学报, 2001(4): 30-32.
- [11] 高文君, 张原平, 阳兴华, 等. Logistic 产量递减方程渗流理论基础[J]. 新疆石油地质, 2001(6): 506-508, 456.



- [12] 张居增, 张烈辉, 张红梅, 等. 预测水驱油田含水率的 Usher 模型[J]. 新疆石油地质, 2004(2): 191-192.
- [13] 杨希军. 应用 Usher 模型预测单井含水率变化[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2008, 110(3): 50-51, 120.
- [14] 邴绍献. 基于特高含水期油水两相渗流的水驱开发特征研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2013.
- [15] 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.