

# Study of Water Flooding Curve Applied in Complicated Multi-Layers Reservoir

Han Chen

CNOOC Research Institute, Beijing  
Email: chenhan@cnooc.com

Received: Jul. 9<sup>th</sup>, 2018; accepted: Jul. 24<sup>th</sup>, 2018; published: Jul. 31<sup>st</sup>, 2018

---

## Abstract

Water flooding curve is one of the most commonly used reservoir engineering method. Many researchers devote themselves to study theoretical basis, application conditions and methods to improve accuracy of water flooding curve. At present, different kinds of water flooding curves were proposed by many scholars, but few studies focused on adaptation of water flooding curve on complicated multi-layers reservoir. In the paper, theoretical basis of water flooding curve was discussed, then adaptation of water flooding curve on complicated multi-layers reservoir was analyzed in view of mathematics. On the basis of that, existing problems and solutions were given when water flooding curve was used in complicated multi-layer reservoir. Validity of the method proposed was verified by sensitivity analysis of numerical simulation and actual production data of some typical complicated multi-layer carbonate reservoir in the Middle East. The proposed method has reference significance for index forecast and dynamic analysis of complicated multi-layer reservoir.

## Keywords

Water Flooding, Water Flooding Curve, Multi-Layer Reservoir

---

# 水驱曲线在复杂多层油藏中的适应性分析

陈 翰

中海油研究总院, 北京  
Email: chenhan@cnooc.com

收稿日期: 2018年7月9日; 录用日期: 2018年7月24日; 发布日期: 2018年7月31日

---

## 摘 要

水驱曲线是目前最常用的油藏工程方法之一, 很多学者致力于研究水驱曲线的理论基础、适用条件以及

提高其精度的方法。目前,很多学者已经提出了各种各样的水驱曲线,但其在复杂多层油藏中的适应性研究却很少。本文首先探讨了水驱曲线的理论基础,并从数学角度分析了水驱曲线在复杂多层油藏中的适应性,进一步指出水驱曲线在复杂多层油藏中应用存在的问题,并给出了解决方法。通过数值模拟敏感性分析及中东某典型复杂多层碳酸盐岩油藏实际生产数据,验证了本文提出方法的可靠性,对复杂多层油藏指标预测及动态跟踪分析具有一定的借鉴意义。

## 关键词

水驱, 水驱曲线, 多层油藏

Copyright © 2018 by author and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

水驱特征曲线是注水开发预测油藏动态的一个主要的方法。自1959年水驱特征曲线提出以来,很多学者对其进行了深入的研究,也取得了很多成果,目前主要集中在水驱曲线的理论基础、适用条件以及提高其精度的方法研究上[1]-[8]。在适用性以及应用方面,水驱曲线应用范围较广,比较常见的是用于预测可采储量及采收率,预测含水率、含水上升率、累产水量等开发指标以及计算动态地质储量[9];此外,水驱曲线还可用于计算动态相渗,分析递减规律,分析剩余油等诸多方面[10][11][12],但需要注意的时水驱曲线是有一定的适用性的,尤其是在低含水和特高含水阶段适应性差,同时不同的水驱曲线适用于不同的含水阶段、不同的原油粘度[13]。一般,水驱曲线适用于相对均质的油藏,但目前投入开发的很多油藏是非均质油藏,尤其是纵向极差较大的油藏,动态上表现出了明显的多层特征,对于复杂多层油藏而言,水驱曲线的适应性有待进一步考证。但目前很少有学者探讨水驱曲线在复杂多层油藏中的适应性;本文旨在解决水驱曲线在复杂多层油藏的适用方法,以进一步提高水驱曲线的应用范围及广度,同时为提高水驱曲线在复杂多层油藏预测精度提供一种思路和方法。

## 2. 水驱曲线理论基础分析

目前水驱曲线表达式较多,前期水驱曲线的提出基于统计学理论,但根据后期很多学者的研究结论表明[1][2][4],大部分水驱曲线具有一定的理论基础,基于物质守恒方程以及相对渗透率模型。张金庆、陈元千、俞启泰等学者[1][4][5]在其著作中进行了总结。其基本推导过程如下:

基于不同的相渗曲线表达函数形式[14]

$$\frac{K_{ro}}{K_{rw}} = a \left( \frac{1 - S_{wi}}{1 - S_{wi} - S_{or}} - \bar{S}_{wd} \right)^b \quad (b > 0) \quad (1)$$

$$\frac{K_{ro}}{K_{rw}} = \bar{S}_{wd}^{-b} \quad (b > 0) \quad (2)$$

$$\frac{K_{ro}}{K_{rw}} = a \left( \bar{S}_{wd} - b \right)^{\frac{1+n}{n}} \quad (b > 0, n > 0) \quad (3)$$

$$\frac{K_{ro}}{K_{rw}} = \frac{a}{\bar{S}_{wd}} \exp(-b\bar{S}_{wd})^n \quad (b > 0, n > 0) \quad (4)$$

$$\frac{K_{ro}}{K_{rw}} = \frac{a}{1 + b\bar{S}_{wd}} \exp(-b\bar{S}_{wd}) \quad (b > 0) \quad (5)$$

基于物质平衡方程

$$\bar{S}_w = \frac{N_p}{N} (1 - S_{wi}) + S_{wi} \quad (6)$$

通过数学推导可以得出不同类型的水驱曲线。目前标准中常用的水驱曲线公式有如下几种[5] [15]:

a) 水驱特征曲线公式 1——纳札洛夫水驱曲线, 推荐用于低粘(小于 3 mPa·s)层状油藏和碳酸盐岩底水驱油藏。其表达式为

$$\frac{L_p}{N_p} = a + bW_p \quad (7)$$

b) 水驱特征曲线公式 2——马克西莫夫 - 童宪章水驱曲线, 推荐用于中粘(3~30 mPa·s)层状油藏。其表达式为

$$\lg W_p = a + bN_p \quad (8)$$

c) 水驱特征曲线公式 3——西帕切夫水驱曲线, 推荐用于中粘(3~30 mPa·s)层状油藏。其表达式为

$$\frac{L_p}{N_p} = a + bL_p \quad (9)$$

d) 水驱特征曲线公式 4——沙卓诺夫水驱曲线, 推荐用于高粘(大于 30 mPa·s)层状油藏。其表达式为

$$\lg L_p = a + bN_p \quad (10)$$

e) 水驱特征曲线公式 5——张金庆水驱曲线, 适用于任何原油粘度和类型的水驱油藏。其表达式为

$$\frac{W_p}{N_p} = -a + b \frac{W_p}{N_p^2} \quad (11)$$

f) 水驱特征曲线公式 6——俞启泰水驱曲线, 适用于任何原油粘度和类型的水驱油藏。其表达式为

$$\lg N_p = a - b \lg \left( \frac{L_p}{W_p} \right) \quad (12)$$

通过上述理论推导过程探讨及常用水驱曲线表达式分析, 得出如下认识:

- 1) 水驱曲线寻求的是动态指标的直线关系, 以在应用时更加方便快捷;
- 2) 水驱曲线的理论基础是物质平衡方程和相渗曲线表达式;
- 3) 水驱曲线一般有一定的适用条件如油水粘度比等, 同时需出现直线段, 一般需到中高含水期。

### 3. 复杂多层油藏水驱曲线适应性分析

通过水驱曲线理论推导可以看出, 水驱曲线的表达式系数隐含了物性参数、相渗曲线参数、地质储量以及流体参数, 那么对于强非均质多层油藏, 不同层地质储量不同, 且其物性参数及相渗曲线参数不同, 可不可以直接拟合预测呢?

#### 3.1. 双层油藏中常用的六类水驱曲线

以两层为例, 对于非均质油藏, 不同的层系数  $a$  和  $b$  肯定不同, 而且液量比例和油量比例也不同。基于公式(7), 两层水驱特征曲线记为

$$\frac{L_{p1}}{N_{p1}} = a_1 + b_1 W_{p1}, \quad \frac{L_{p2}}{N_{p2}} = a_2 + b_2 W_{p2} \quad (13)$$

则

$$\frac{L_{p1}}{N_{p1}} + \frac{L_{p2}}{N_{p2}} = a_1 + a_2 + b_1 W_{p1} + b_2 W_{p2} \quad (14)$$

同理，基于公式(8)、(9)、(10)、(11)和(12)，当两层时水驱特征曲线可以写为

$$\lg W_{p1} + \lg W_{p2} = a_1 + a_2 + b_1 N_{p1} + b_2 N_{p2} \quad (15)$$

$$\lg L_{p1} + \lg L_{p2} = a_1 + a_2 + b_1 N_{p1} + b_2 N_{p2} \quad (16)$$

$$\frac{L_{p1}}{N_{p1}} + \frac{L_{p2}}{N_{p2}} = a_1 + a_2 + b_1 L_{p1} + b_2 L_{p2} \quad (17)$$

$$\frac{W_{p1}}{N_{p1}} + \frac{W_{p2}}{N_{p2}} = -(a_1 + a_2) + b_1 \frac{W_{p1}}{N_{p1}^2} + b_2 \frac{W_{p2}}{N_{p2}^2} \quad (18)$$

$$\lg N_{p1} + \lg N_{p2} = a_1 + a_2 - b_1 \lg \left( \frac{L_{p1}}{W_{p1}} \right) - b_2 \lg \left( \frac{L_{p2}}{W_{p2}} \right) \quad (19)$$

上述公式(13)到公式(19)均不能线性叠加，从数学的角度来看，直接用水驱曲线拟合预测不合理，其结果必然误差较大。

### 3.2. 双层油藏水驱曲线可以叠加的特例

如果在一定时期内，两层液量基本不变，且比例已知，则  $L_{p1} = kL_{p2}$ ，当一层见水，另一层未见水时，对于未见水层有  $L_{p1} = N_{p1}$ ， $W_{p1} = 0$ 。

对于上述情况适当简化可进行叠加应用，以适用于任何原油粘度和类型的张金庆水驱曲线为例，双层的水驱特征曲线为

$$\frac{W_{p1}}{N_{p1}} + \frac{W_{p2}}{N_{p2}} = -(a_1 + a_2) + b_1 \frac{W_{p1}}{N_{p1}^2} + b_2 \frac{W_{p2}}{N_{p2}^2} \quad (20)$$

简化后为

$$\frac{W_{p2}}{N_{p2}} = -(a_1 + a_2) + b_2 \frac{W_{p2}}{N_{p2}^2} \quad (21)$$

但是当两层均见水后，则难以进行简化，需对产量进行劈分后预测，再叠加。可对曲线拐点分析，作为劈分依据。

本文通过分析，指出多层复杂油藏不能应用水驱曲线直接拟合预测，为解决复杂多层油藏中水驱曲线适应性，给出如下解决方案：首先基于地质认识(测井、沉积、岩心资料等)分析是否有必要分层；复杂多层油藏需分层、分阶段预测，最后叠加。

## 4. 复杂多层油藏多层动态特征及数模验证

为了证实上述复杂多层油藏水驱特征曲线预测解决方法，建立了数模机理模型。该模型采用1采1注，井距600 m，注采平衡。同时，为了方便研究，选择两层的纵向非均质模型(渗透率极差为2)，其基本参数见表1，从表1可以看出，纵向渗透率不同的两层，其初始含油饱和度和残余油下水相相渗端点也有所不同。

在上述基础参数情况下进行模拟得到累产曲线，以甲型水驱特征曲线为例分析模拟结果，见图 1，从图中可以看出，在 B 层见水前后， $\ln(W_p) \sim N_p$  曲线呈现不同的趋势，当采用 B 层见水前曲线的趋势预测含水 98% 可采时，可采储量为  $2.75 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，而当采用 B 层见水后的曲线趋势预测时，可采储量为  $2.33 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，从最终的数模结果上可以明显看出，前者明显被高估，而后者非常接近数模的预测值  $2.32 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。这是因为模型相对均质以及稀油导致水突破后两层的含水均急速上升，水驱特征曲线的拟合段的含水已经很高，所以用 B 层见水后的累产数据预测结果也可接受。但是实际上，模型还是比较理想化的，实际的含水受到多种因素的影响，含水很少出现急速上升的情况，此时若用第二层刚刚见水后的水驱特征曲线去预测最终可采也将存在较大的误差。更好的做法是分层分段进行预测，下面详细介绍。

分层分段预测时，需要根据 PLT、历史拟合或者可靠的地层系数比值对产量进行劈分，将累产数据劈分到层后再进行叠加。为了验证分层分段预测的合理性，继续采用机理模型的模拟结果，对 A 层和 B 层分别应用甲型水驱特征曲线进行预测可采储量，详见图 2 和图 3，预测出含水 98% 时 A 层和 B 层的可采分别为  $0.98 \times 10^4 \text{ m}^3$  和  $1.31 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，与模型预测的结果基本一致，验证了本文提出的方法是可靠的。

### 5. 复杂多层油藏水驱曲线预测实例分析

中东 X 油田是碳酸盐岩油藏，纵向非均质性强，是典型的复杂多层油藏。纵向上储层分为两段 A 段和 B 段，A 段以白云岩为主，B 段以灰岩为主，进一步细分为 7 个油组，分别为 A1、A2、A3、B1、B2、

Table 1. Basic parameters of mechanism simulation model

表 1. 机理模型基础参数表

层位	模拟层 (K <sub>上</sub> -K <sub>底</sub> )	孔隙度	水平渗透率	渗透率水垂比	初始含油饱和度	残余油下 水相相渗端点	净毛比	原油粘度	水粘度
		f	mD	f	f	f	f	cp	cp
A	1-15	0.22	400	0	0.7	0.2	1	4	0.4
B	16-30	0.22	800	0	0.75	0.3	1	4	0.4

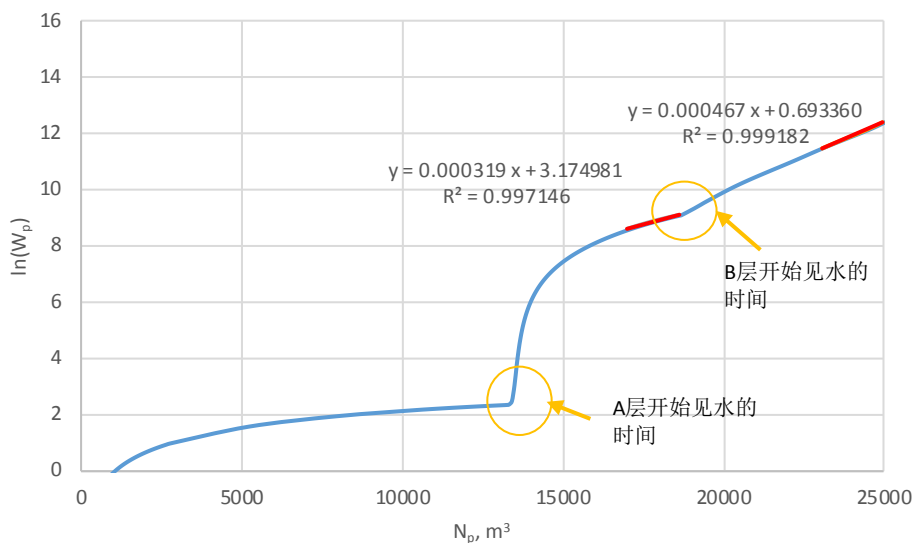
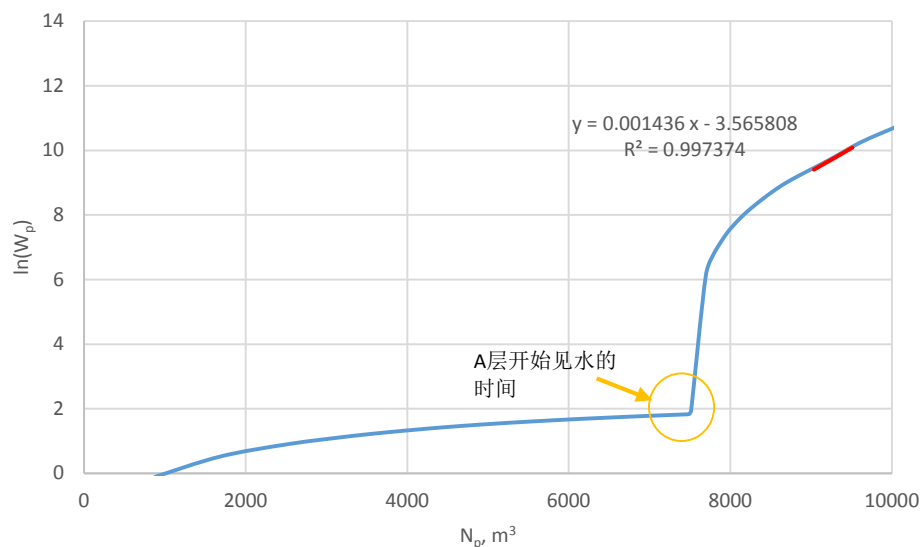
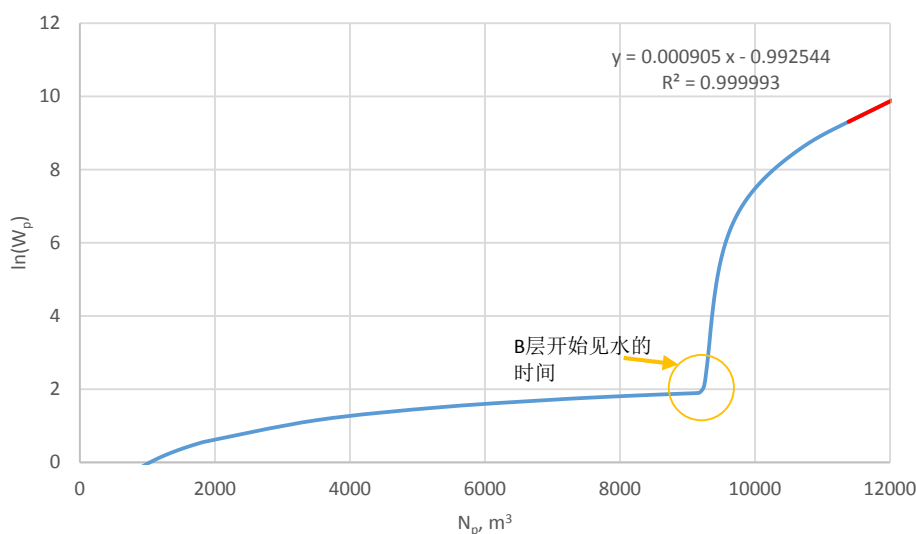


Figure 1. First type water flooding curve analysis of simulation results from mechanism model

图 1. 机理模型模拟结果的甲型水驱特征曲线分析



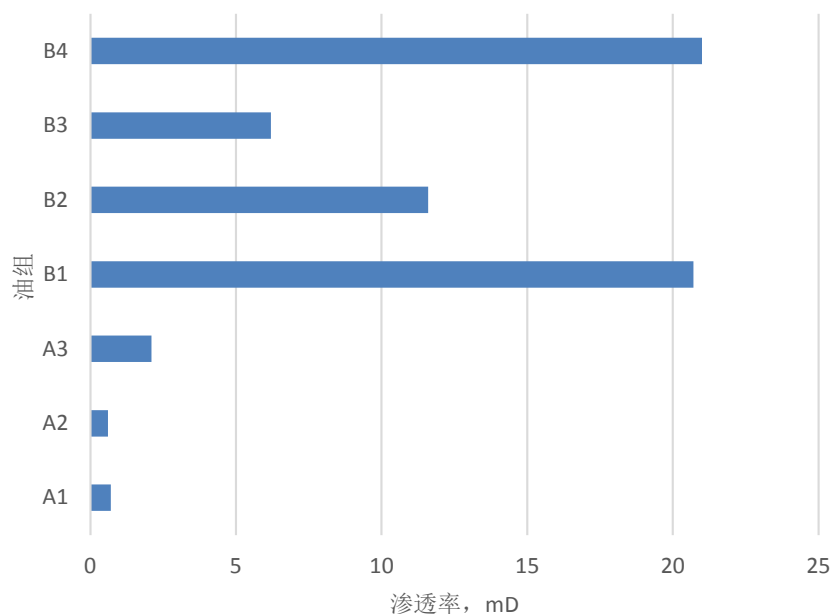
**Figure 2.** First type water flooding curve of layer A after cumulative production split  
**图 2.** 累产量劈分后的 A 层甲型水驱曲线



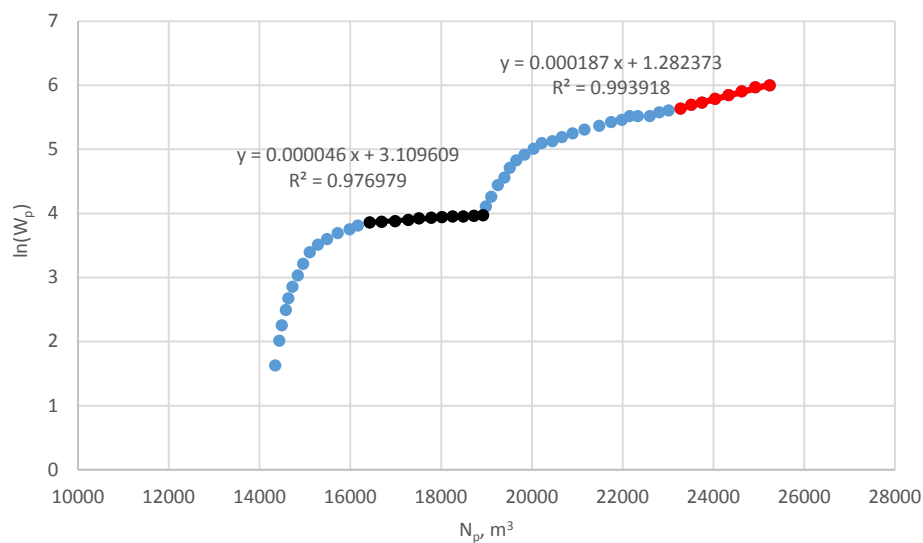
**Figure 3.** First type water flooding curve of layer B after cumulative production split  
**图 3.** 累产量劈分后的 B 层甲型水驱曲线

B3 和 B4, 各油组之间物性差异较大, 详见图 4, 从图中可以看出, 该油藏渗透率极差为 35, 纵向非均质性较强。

为了进一步分析复杂多层油藏水驱曲线的特征, 以及在实际应用时存在的问题, 选取一口典型井进行分析, 该井的甲型水驱特征曲线, 见图 5, 从图中可以看出, 该井的动态特征出现了复杂多层特征。而且分析后, 可以得到: 1) 仅第一层见水其他层未见水时, 未见水层累产油在增加, 但产水量不增加, 导致整体拟合预测会偏乐观, 根据图中拐点前的趋势预测可采储量将达到  $23.4 \times 10^4 \text{ m}^3$ ; 2) 第二层见水后, 整体拟合预测时, 不同的层处于不同的含水阶段, 低含水阶段的层的动态特征将会影响整体的判断, 根据图 5 的趋势, 此时预测的可采仅  $6.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 与前述预测值相差非常大; 3) 根据本文提出的分层分阶段的方法进行预测, 可以有效的解决上述的矛盾, 得到的结果也更合理; 4) 在分层分阶段预测可采储量时建议利用曲线的拐点校正劈分数据。



**Figure 4.** Well log permeability in all oil zone of X oilfield in Middle East  
**图 4.** 中东 X 油田各油组测井解释渗透率



**Figure 5.** First type water flooding curve of typical well with multi-layer commingle production of X oilfield in Middle East

**图 5.** 中东 X 油田典型井多层合采甲型水驱特征曲线

## 6. 结论

1) 水驱曲线的理论基础是相渗曲线表达式及物质平衡方程。水驱曲线的系数隐含着不同的物性参数、不同的相渗参数以及不同的流体参数，本文探讨了其在纵向强非均质复杂多层油藏适用性，指出利用水驱曲线直接进行拟合预测误差较大；

2) 本文给出了复杂多层油藏水驱曲线的方法，其核心思想是分层、分阶段预测再叠加，通过数值模拟和敏感性方案分析，本文的提出方法可以一定程度上拓宽水驱曲线的实用性，对于复杂多层油藏指标预测具有一定的参考意义。

## 基金项目

中国海洋石油总公司创新基金[CNOOC-KY-KJCX-CRI-2017-01]。

## 参考文献

- [1] 陈元千. 水驱特征曲线关系式的推导[J]. 石油学报, 1985, 6(2): 69-78.
- [2] 陈元千. 一种新型水驱特征曲线关系式的推导及应用[J]. 石油学报, 1993, 14(2): 65-73.
- [3] 任玉林. 一种新的广义水驱曲线[J]. 新疆石油地质, 2006, 27(2): 188-190.
- [4] 俞启泰. 几种重要水驱特征曲线的油水渗流特征[J]. 石油学报, 1999, 20(1): 56-60.
- [5] 张金庆. 水驱油田产量预测模型[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013: 19-48.
- [6] 张金庆, 安桂荣, 许家峰, 刘晨. 广适水驱曲线适应性分析及推广应用[J]. 中国海上油气, 2013, 25(6): 56-60.
- [7] 张金庆, 许家峰, 安桂荣, 甯波. 高含水油田适时产液结构优化调整计算方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2013, 32(6): 76.
- [8] 刘晨, 张金庆, 王凯, 周文胜. 张型广适与甲型水驱特征曲线关系研究[J]. 特种油气藏, 2017, 24(1): 106-109.
- [9] 姜汉桥, 姚军, 姜瑞忠. 油藏工程原理与方法[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2006: 236-245.
- [10] 赵斌, 王斌, 曾丽, 杨志远, 韩朝阳, 马晓燕. 利用水驱特征曲线确定剩余油分布研究[J]. 石油地质与工程, 2010, 24(3): 59-61.
- [11] 周凤军, 葛丽珍, 王刚, 童凯军. 基于水驱特征曲线计算油水相对渗透率曲线的新方法[J]. 复杂油气藏, 2017, 10(1): 50-54.
- [12] 高文君, 刘瑛. 产量递减规律与水驱特征曲线的关系[J]. 断块油气田, 2002, 9(3): 45-49.
- [13] 李正民, 孙来喜, 邓虎城, 张娟, 李银婷. 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.
- [14] 孙玉凯, 高文军. 著常用油藏工程方法改进与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007: 58-79.
- [15] 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.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-3967, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ag@hanspub.org](mailto:ag@hanspub.org)