

# 基于近似理论水驱曲线的油藏水驱 体积波及系数动态计算方法

刘晨<sup>1,2,3</sup>,张金庆<sup>2,3</sup>,李文忠<sup>4</sup>,周文胜<sup>2,3</sup>,冯其红<sup>1</sup>

(1.中国石油大学(华东)石油工程学院,山东青岛266580; 2.海洋石油高效开发国家重点实验室,北京100028;  
3.中海油研究总院有限责任公司,北京100028; 4.中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津300459)

**摘要:**水驱体积波及系数是油藏开发过程中的重要参数,目前其计算方法需拟合油、水相相对渗透率曲线,难以满足油水渗流规律多样的复杂油藏应用的需求。为此,基于近似理论水驱曲线和 Welge 方程线性表达式,通过理论推导建立了一种新型的水驱体积波及系数和驱油效率动态计算方法,可根据实际生产动态数据计算不同开发阶段的水驱体积波及系数和驱油效率,克服了现有方法对油、水相相对渗透率曲线的依赖。研究表明,新方法计算结果可靠,且能准确得到复杂类型油藏不同含水率阶段体积波及系数和驱油效率的变化规律。新方法所需数据基础简单、计算简便快捷,适应各种类型油藏,可实现水驱前缘突破后各含水率阶段的准确计算,在油田动态分析和开发效果评价等方面具有广泛的应用前景。

**关键词:**水驱;动态分析;水驱特征曲线;体积波及系数;动态计算方法

中图分类号:TE32<sup>·7</sup>

文献标识码:A

## A new dynamic calculation method of volume sweep coefficient of water drive reservoir based on approximate theoretical water drive curve

LIU Chen<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Jinqing<sup>2,3</sup>, LI Wenzhong<sup>4</sup>, ZHOU Wensheng<sup>2,3</sup>, FENG Qihong<sup>1</sup>

(1.School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(East China), Qingdao City, Shandong Province, 266580, China; 2.State Key Laboratory of Offshore Oil Exploitation, Beijing City, 100028, China; 3.CNOOC Research Institute Ltd., Beijing City, 100028, China; 4.CNOOC(China) Tianjin Branch, Tianjin City, 300459, China)

**Abstract:** The water drive volume sweep coefficient is an important parameter in oilfield development. At present, its calculation method needs to fit the relative permeability curves of oil and water phases, and it is difficult to meet the application requirements of complex reservoirs with diverse oil-water percolation laws. To solve this problem, based on the approximate theoretical water drive curve and the Welge linear equation, a new dynamic calculation method of displacement efficiency and volume sweep coefficient of water drive reservoir is established through theoretical derivation. The volume sweep coefficient and displacement efficiency in different development stages can be calculated based on actual production data, which overcomes the dependence of existing methods on the relative permeability curves of oil and water phases. The results show that the new method is reliable, and can accurately obtain the variation rules of displacement efficiency and volume sweep coefficient in different water cut stages in complex reservoirs. The proposed method is featured with accessible data, convenient calculation, and wide adaptability to various types of reservoirs, and it can realize the accurate calculation from low water cut stage to ultra-high water cut stage, showing a broad application prospect in dynamic analysis and development effect evaluation in oilfield.

收稿日期:2020-05-21。

作者简介:刘晨(1985—),男,山东日照人,在读博士研究生,从事油田开发方面的工作。E-mail:liu099339@163.com。

通信作者:冯其红(1969—),男,四川西充人,教授,博导。E-mail:fengqihong.upc@gmail.com。

基金项目:国家科技重大专项“海上稠油油田开发模式研究”(2016ZX05025-001)。

**Key words:** water drive; dynamic analysis; water drive characteristic curve; volume sweep coefficient; dynamic calculation method

水驱体积波及系数是油藏开发过程中的重要参数,准确把握水驱体积波及系数的变化规律有助于油田开发技术政策的合理制定<sup>[1-2]</sup>。目前水驱体积波及系数的研究主要包括室内实验、油藏数值模拟以及水驱特征曲线等方法<sup>[3-8]</sup>。室内实验法和油藏数值模拟法均以岩心实验数据为基础,难以准确反映整个油藏真实情况。水驱特征曲线法基于油藏实际的生产数据,可较客观全面地评价油藏的整体水驱体积波及规律,受到了诸多学者的关注。目前水驱特征曲线法计算水驱体积波及系数可分为3种方法:①假设水驱油过程中驱油效率始终为恒定值<sup>[9-12]</sup>,忽略波及区内驱替程度的变化,由此将导致不同含水率阶段计算的水驱体积波及系数小于实际值。②胡罡提出的方法,考虑了水驱过程中驱油效率的变化,但在推导过程中驱油效率采用出口端含水饱和度计算,不符合常规认识,且方法未能得到有效验证<sup>[13-14]</sup>。③有学者提出将岩心相对渗透率曲线与水驱曲线相结合的计算方法<sup>[15-17]</sup>,该方法克服了上述2种方法存在的问题,可较客观地计算中高含水率及特高含水率阶段的水驱体积波及系数,但计算精度受控于岩心相对渗透率资料的可靠性和代表性,仅适用于储层均质性较好、油水渗流规律较统一、相对渗透率具有代表性的油藏,难以满足沉积类型多样、非均质性强等储层内部油水渗流规律多样的复杂油藏。

为此,笔者基于近似理论水驱曲线和 Welge 方程线性表达式建立了新型的水驱体积波及系数和驱油效率动态计算方法。新方法仅需要累积产油量和累积产水量等实际生产动态数据,不需要拟合岩心相对渗透率曲线,可满足复杂油藏的计算需求。同时,由于近似理论水驱曲线可实现不同类型油藏在各含水率阶段的动态精细刻画<sup>[18-22]</sup>,因此,新方法不仅能适用各种类型油藏,同时还可实现水驱前缘突破后各开发阶段的准确计算,在油田动态分析和开发效果评价等方面具有广泛的应用前景。

## 1 新方法的建立

### 1.1 含水饱和度与含水率定量表征关系

油、水相相对渗透率曲线通常采用幂函数表示<sup>[23-24]</sup>,其表达式为:

$$K_{rw} = K_{ro}(S_{or})S_{wd}^{n_w} \quad (1)$$

$$K_{ro} = K_{ro}(S_{wi})(1 - S_{wd})^{n_o} \quad (2)$$

其中:

$$S_{wd} = \frac{S_{we} - S_{wi}}{1 - S_{wi} - S_{or}} \quad (3)$$

忽略毛细管力和重力作用,分流量方程表示为:

$$f_w = \frac{1}{1 + \frac{K_{ro}\mu_w B_w}{K_{rw}\mu_o B_o}} \quad (4)$$

将(1)式和(2)式代入(4)式可得:

$$f_w = \frac{MS_{wd}^{n_w}}{(1 - S_{wd})^{n_o} + MS_{wd}^{n_w}} \quad (5)$$

其中:

$$M = \frac{K_{rw}(S_{or})\mu_o B_o}{K_{ro}(S_{wi})\mu_w B_w} \quad (6)$$

(5)式为 $f_w$ 与 $S_{wd}$ 的函数关系式,其反函数可近似表示为<sup>[25]</sup>:

$$S_{wd} = 1 - \frac{1}{b} \quad (7)$$

其中:

$$b = \left[ 1 + 0.006738 \exp\left(\frac{3.5n_w + 6.5n_o}{n_w + n_o}\right) \left(\frac{1}{M} \times \frac{f_w}{1 - f_w}\right)^{\frac{1.3n_w + 0.7n_o}{n_w(n_w + n_o)}} \right]^{\frac{n_w}{n_o}} \quad (8)$$

可通过(7)式计算不同含水率对应的含水饱和度和。

### 1.2 驱油效率与含水率定量表征关系

油、水两相区含水饱和度与出口端含水饱和度的关系可由 Welge 方程表示<sup>[26]</sup>:

$$\bar{S}_w = S_{we} + \frac{1 - f_w}{\frac{df_w}{dS_{we}}} \quad (9)$$

对(5)式求导,并代入(9)式可得:

$$\bar{S}_w = S_{we} + \frac{(1 - S_{we} - S_{or})(S_{we} - S_{wi})}{n_o(S_{we} - S_{wi}) + n_w(1 - S_{we} - S_{or})} \times \left[ 1 + \frac{(1 - S_{wi} - S_{or})^{(n_w - n_o)}}{M} \times \frac{(1 - S_{we} - S_{or})^{n_o}}{(S_{we} - S_{wi})^{n_w}} \right] \quad (10)$$

文献[27]提出了 Welge 系数的概念,并将(10)式简化为线性表达式:

$$\bar{S}_w = wS_{we} + (1-w)(1-S_{or}) \quad (11)$$

水驱油藏驱油效率计算公式为:

$$E_d = \frac{\bar{S}_w - S_{wi}}{1 - S_{wi}} \quad (12)$$

采用(11)式 Welge 方程的线性表达式,并结合(7)式和(12)式可得水驱驱油效率与含水率变化关系为:

$$E_d = \frac{1 - S_{wi} - S_{or}}{1 - S_{wi}} \left(1 - \frac{w}{b}\right) \quad (13)$$

### 1.3 体积波及系数与含水率定量表征关系

将(5)式积分可得新型的近似理论水驱曲线<sup>[28-29]</sup>的方程式为:

$$N_p = N_R - a \frac{(N_p - N_{po})^p}{W_p^q} \quad (14)$$

将(14)式对时间求导,可得含水率与累积产油量关系式为:

$$f_w = \frac{\frac{1}{q} \left( \frac{N_p - N_{po}}{N_R - N_p} + p \right) \frac{(N_p - N_{po})^{\frac{p-1}{q}}}{(N_R - N_p)^{\frac{1}{q}}}}{1 + \frac{1}{q} \left( \frac{N_p - N_{po}}{N_R - N_p} + p \right) \frac{(N_p - N_{po})^{\frac{p-1}{q}}}{(N_R - N_p)^{\frac{1}{q}}}} \quad (15)$$

由(15)式通过迭代计算可以得到不同含水率对应的累积产油量。在此基础上即可求得不同含水率时的水驱采出程度表达式为:

$$R = \frac{N_p}{N} \quad (16)$$

同时,水驱采出程度还可表示为:

$$R = E_d \cdot E_v \quad (17)$$

将(13)式代入(17)式,可得到水驱体积波及系数计算公式为:

$$E_v = \frac{R(1 - S_{wi})}{(1 - S_{wi} - S_{or}) \left(1 - \frac{w}{b}\right)} \quad (18)$$

### 1.4 关键参数计算

(18)式中的  $w, n_w, n_o$  和  $M$  等4个参数,其中  $n_w, n_o$  和  $M$  与近似理论水驱曲线特征参数的关系<sup>[28-29]</sup>为:

$$n_w = \frac{p}{q} - 1 \quad (19)$$

$$n_o = \frac{1}{q} + 1 \quad (20)$$

$$M = \frac{p}{q} \times a^{\frac{1}{q}} \times N_R^{\left(\frac{p}{q} - \frac{1}{q} - 1\right)} \quad (21)$$

Welge 方程中的系数  $w$  可由下式迭代求解<sup>[29]</sup>:

$$M = \frac{[1 - n_o(1-w)]^{(n_w-1)} [1 + (1-w)(n_w - n_o - 1)]^{(n_w - n_o)}}{(1-w)^{n_w} (n_w - 1)^{(n_w-1)}} \quad (22)$$

新方法计算步骤主要包括:①根据累积产油量和累积产水量等实际生产动态数据进行近似理论水驱曲线拟合,求取特征参数  $p, q, a$  和可动油储量  $N_R$ 。②根据(19)式—(21)式可计算油、水相指数和水油流度比。③根据(22)式计算 Welge 方程中的系数  $w$ 。④根据(13)式和(18)式计算不同含水率时的水驱体积波及系数和驱油效率。

## 2 新方法验证

为了验证新方法的可靠性,选取文献[15-16]中的2个开发实例进行对比分析,这2个油藏均通过拟合典型的岩心相对渗透率曲线得到较为可靠的开发中后期的水驱体积波及系数变化规律。其中,渤海南部 BZ 油田 A 井区 S1 砂体为常规中、高渗透率稀油储层,平均渗透率为 700 mD,储层均质性较好、油水渗流规律简单,地层原油黏度为 4.5 mPa·s,地层水黏度为 0.5 mPa·s,实验岩心分析束缚水饱和度为 0.289,残余油饱和度为 0.214,经过 10 a 开发,综合含水率为 96.1%,采出程度为 28.8%<sup>[15]</sup>;鄯善油田三间房组油藏为低渗透率、低黏度砂岩储层,平均渗透率为 6.2 mD,地层原油黏度为 0.388 mPa·s,地层水黏度为 0.343 mPa·s,实验岩心分析束缚水饱和度为 0.375,残余油饱和度为 0.321,经过 28 a 开发,综合含水率为 94.6%,采出程度为 23.8%<sup>[16]</sup>。根据 BZ 油田 S1 砂体历年生产数据进行近似理论水驱曲线拟合,得到 S1 砂体的近似理论水驱曲线特征参数:  $p=2.1, q=0.8, a=0.3844, N_R=114.4121$ ,根据(19)式—(22)式计算得到  $n_w=1.625, n_o=2.25, M=4.6993, w=0.7242$ 。同理可得鄯善油田三间房组油藏的相关参数:  $p=2.3, q=1.1, a=0.0478, N_R=886.8568, n_w=1.0909, n_o=1.9091, M=0.4527, w=0.4823$ 。根据(18)式还可得到2个开发实例油藏不同含水率时的水驱体积波及系数。

由近似理论水驱曲线预测的生产动态数据与实际对比(图1)可知,2个开发实例油藏近似理论水

驱曲线预测的含水率和累积产水量,从油藏见水早期即与实际生产动态数据呈良好的吻合关系,表明近似理论水驱曲线具有适用范围广的优点,可准确表征不同含水率阶段的油藏生产动态。

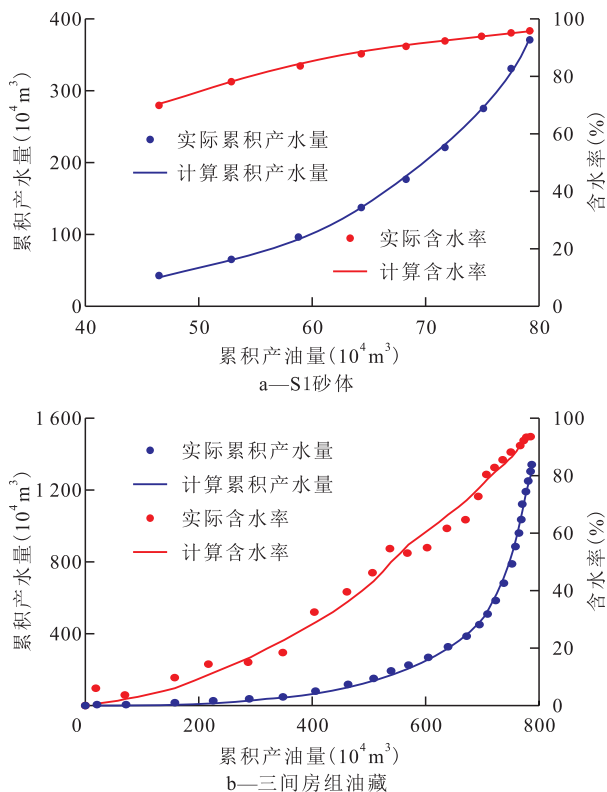


图1 2个开发实例油藏近似理论水驱曲线拟合效果  
Fig.1 Fitting effect of history production data of two case reservoirs based on the approximate theoretical water drive curve

由新方法与文献[15-16]计算的水驱体积波及系数对比(图2)可知,新方法计算结果与文献[15-16]基于岩心相对渗透率曲线的计算结果均呈一致的增长趋势,验证了新方法的可靠性。对于BZ油田S1砂体,文献[15]计算的水驱体积波及系数随含水率变化规律与新方法的计算结果基本重合,在特高含水期稍有差异。新方法预测S1砂体在含水率为96.0%时的水驱体积波及系数为52.3%,文献[15]中的预测值为48.8%,储层实际值为51.5%,新方法预测结果偏差1.6%,预测精度高于文献[15]的方法。对于鄯善油田三间房组油藏,文献[16]计算的水驱体积波及系数随含水率变化规律与新方法计算结果相比,在中高含水率阶段吻合程度较高,在中低含水率阶段存在一定差异,表现在含水率达到45%后吻合程度较好,因此文献[16]预测研究区在中低含水率阶段的水驱体积波及系数不能准确地反映油藏真实情况;而由图1可以看出,采用新方法时该油藏从含水率为18%即开始较好地拟合,故新方法预测的水驱体积波及系数更为可靠。由于新方法

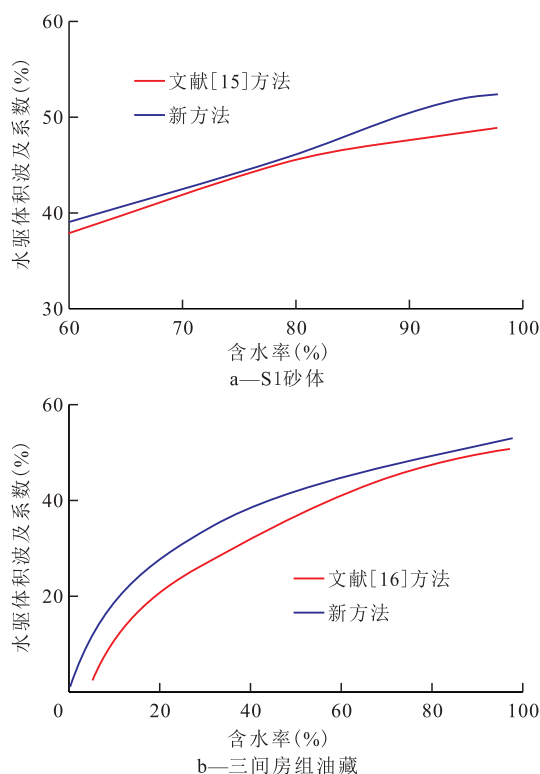


图2 2个开发实例油藏水驱体积波及系数随含水率的变化关系

Fig.2 Relationship between water drive volume sweep coefficient and water cut in two case reservoirs

基于适用范围较广的近似理论水驱曲线,同时避免了油藏内部渗流差异带来的干扰,因此,新方法不仅能适用更广泛的油藏类型,同时还可实现水驱前缘突破后各含水率阶段的准确表征,预测精度提升。

### 3 实例应用

曹妃甸油田是受构造控制的潜山—披覆背斜块状油藏,发育古近系孔隙型砂砾岩和太古界裂缝型花岗岩2套储层,储层上、下叠置构成复合储集体,互相连通,具有统一的油水系统,内部油水渗流规律较复杂。砂砾岩储层孔隙度为15.0%~25.0%,渗透率为100~1 000 mD。潜山基岩为双孔双渗储层,有效孔隙度分布不均,裂缝发育,储层特征较复杂。地层原油密度为0.671 g/cm<sup>3</sup>,地层原油黏度为0.6 mPa·s,地层水黏度为0.3 mPa·s,为轻质原油。经室内实验分析,束缚水饱和度为0.225,残余油饱和度为0.130。曹妃甸油田边底水能量充足,天然能量开发10 a(图3),截止2019年综合含水率为96.5%,采出程度仅为9.12%。

根据曹妃甸油田10 a实际生产动态数据构建  $(N_p - N_{p0})^p / W_p^q$  与  $N_p$  的线性关系(图4),拟合近似理论



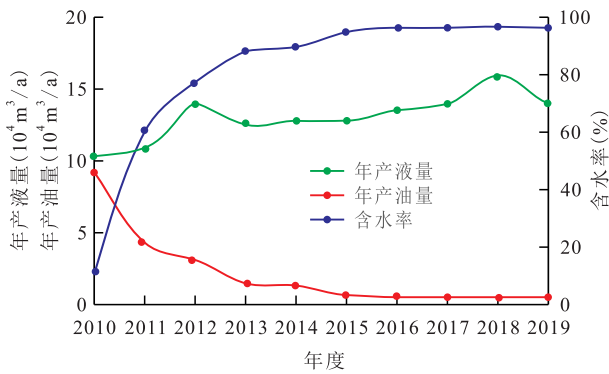
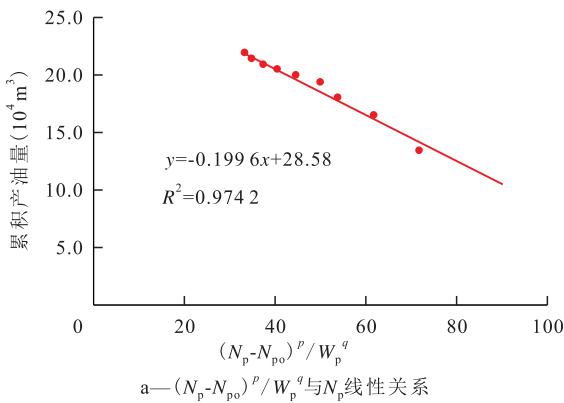
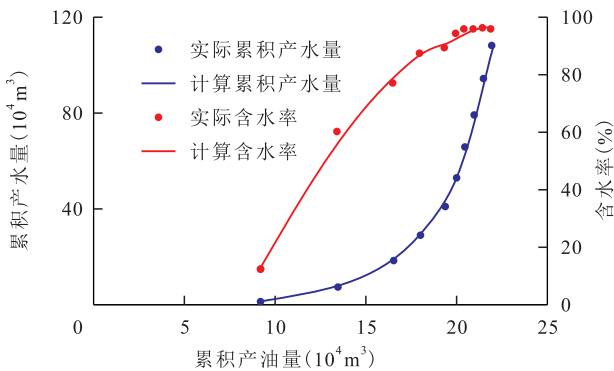


图3 曹妃甸油田实际生产动态数据

Fig.3 Actual production dynamic data of Caofeidian Oilfield



a— $(N_p - N_{p0})^p / W_p^q$ 与 $N_p$ 线性关系



b—近似理论水驱曲线预测指标与实际对比

图4 曹妃甸油田近似理论水驱曲线拟合效果

Fig.4 Fitting effect of approximate theoretical water drive curve in Caofeidian Oilfield

水驱曲线并求得相关参数： $p=2.2, q=0.7, a=0.1996, N_R=28.58, n_w=2.1429, n_o=2.4286, M=3.4482, w=0.7292$ 。由图4可知，曹妃甸油田近似理论水驱曲线拟合关系良好，不同含水率阶段预测的开发指标均与实际相吻合。研究表明，对于曹妃甸油田这种潜山裂缝与砂岩叠置的复合储层，应用近似理论水驱曲线仍然可以较准确地表征油田开发规律。

将曹妃甸油田近似理论水驱曲线特征参数代入(13)式即可得到水驱驱油效率随含水率变化关系(图5)，再由(15)式可得到含水率与采出程度变化关系，从而根据(18)式得到水驱体积波及系数随含水率变化关系(图6)。

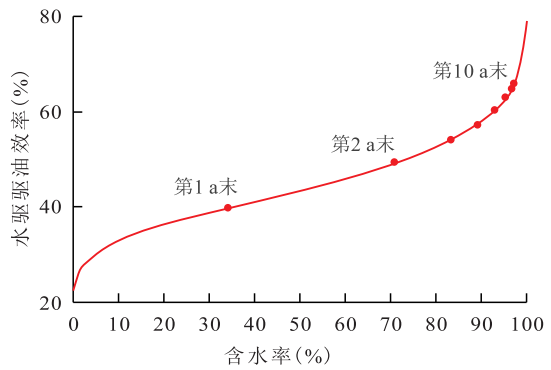


图5 曹妃甸油田水驱驱油效率随含水率变化关系

Fig.5 Relationship between water drive displacement efficiency and water cut in Caofeidian Oilfield

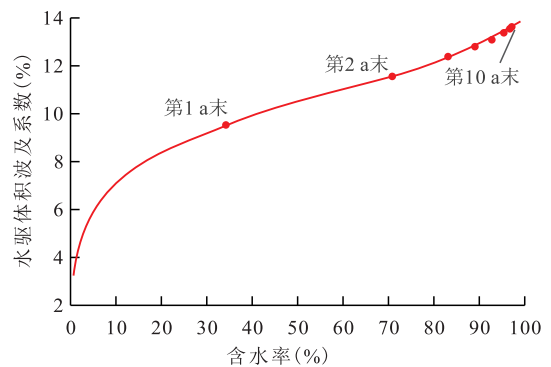


图6 曹妃甸油田水驱体积波及系数随含水率变化关系

Fig.6 Relationship between water drive volume sweep coefficient and water cut in Caofeidian Oilfield

由图5可知，曹妃甸油田水驱驱油效率随含水率变化呈近活塞式的驱替特征。开发初期驱油效率上升较快，投产第2 a末驱油效率即达到49.32%，随后缓慢增长，开发后期受高强度水驱影响，驱油效率进一步提升。利用(13)式预测该油田综合含水率为98%时的水驱驱油效率达到69.79%，与室内实验认识一致。曹妃甸油田目前水驱驱油效率为66.01%，通过提高水驱驱油效率改善油田开发效果的潜力较小。

由图6可知，曹妃甸油田水驱体积波及系数随含水率的增加逐渐增大，初期增速较快，其原因为曹妃甸油田断层、裂缝相对发育，开发初期边底水沿裂缝快速突进，水驱体积波及系数增长速度较快，投产4个月后底水沿着裂缝突进到井筒附近，生产井出现水锥现象，含水率逐渐上升，投产当年年底瞬时含水率即达到34.14%，水驱体积波及系数达到9.54%，而后水驱体积波及系数进入缓慢增长阶段，继续生产9 a后，水驱体积波及系数为13.63%，只增加了4.09%，预测油田综合含水率达到98%时水驱体积波及系数为13.81%，说明约86%的油田区域将无法有效波及。根据储层解释结果，曹妃甸油田裂

缝孔隙度占总孔隙度的比重为12.65%,这表明曹妃甸油田在现有井网下仅有效动用了裂缝中的储量,而砂岩储层和潜山基质中的储量基本未动用。

## 4 结论

水驱体积波及系数目前是基于室内实验得到的油水相对渗透率曲线计算的。油水渗流规律多样的复杂油藏通常有多条油水相对渗透率曲线,目前计算方法难以适用。本文建立的水驱体积波及系数和驱油效率计算新方法从累积产油量和累积产水量等实际生产动态数据入手,通过实际生产动态数据即可准确得到油藏不同含水率阶段水驱体积波及系数和驱油效率的变化规律。由于不需要拟合油、水相相对渗透率曲线,新方法可适用于各种类型油藏,解决了复杂油藏水驱体积波及系数难以计算的难题。新方法计算简便、结果可靠,可广泛应用于油田动态分析、开发效果评价等工作。

### 符号注释

$a, p, q, N_R$ ——近似理论水驱曲线特征参数;  
 $B_o$ ——地层原油体积系数;  
 $B_w$ ——地层水体积系数;  
 $E_d$ ——水驱驱油效率;  
 $E_V$ ——水驱体积波及系数;  
 $f_w$ ——含水率;  
 $K_{ro}$ ——油相相对渗透率;  
 $K_{ro}(S_{wi})$ ——束缚水饱和度下的油相相对渗透率;  
 $K_{rw}$ ——水相相对渗透率;  
 $K_{rw}(S_{or})$ ——残余油饱和度下的水相相对渗透率;  
 $M$ ——水油流度比;  
 $n_o$ ——油相指数;  
 $n_w$ ——水相指数;  
 $N$ ——地质储量,  $10^4 \text{ m}^3$ ;  
 $N_p$ ——累积产油量,  $10^4 \text{ m}^3$ ;  
 $N_{po}$ ——无水采油量,  $10^4 \text{ m}^3$ ;  
 $R$ ——水驱采出程度;  
 $S_{or}$ ——残余油饱和度;  
 $\bar{S}_w$ ——油、水两相区平均含水饱和度;  
 $S_{wd}$ ——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;  
 $w$ ——Welge系数;  
 $W_p$ ——累积产水量,  $10^4 \text{ m}^3$ ;  
 $\mu_o$ ——地层原油黏度,  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ;  
 $\mu_w$ ——地层水黏度,  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

### 参考文献

- [1] 俞启泰,赵明,林志芳.水驱砂岩油田驱油效率和波及系数研究(一)[J].石油勘探与开发,1989,1(2):48-52.  
YU Qitai, ZHAO Ming, LIN Zhifang. A study of the displacement efficiency and the conformance factor in waterflooded sandstone reservoirs in China(Part I)[J]. Petroleum Exploration and Development, 1989, 1(2): 48-52.
- [2] 俞启泰,赵明,林志芳.水驱砂岩油田驱油效率和波及系数研究(二)[J].石油勘探与开发,1989,1(3):46-53.  
YU Qitai, ZHAO Ming, LIN Zhifang. A study of the displacement efficiency and the conformance factor in waterflooded sandstone reservoirs in China(Part II)[J]. Petroleum Exploration and Development, 1989, 1(3): 46-53.
- [3] 王任一.基于最大熵的岩心水驱波及系数求取方法[J].断块油气田,2008,15(3):91-93.  
WANG Renyi. A calculating method for waterflooding sweep efficiency of core based on maximal entropy[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2008, 15(3): 91-93.
- [4] 朱九成,郎兆新,张丽华.多尺度油藏数值模拟的渗滤方法[J].石油学报,1998,19(2):49-53.  
ZHU Jiucheng, LANG Zhaoxin, ZHANG Lihua. Percolation method in multiscale numerical reservoir simulation[J]. Acta Petrolei Sinica, 1998, 19(2): 49-53.
- [5] 李金宜,戴卫华,罗宪波,等.海上油田波及系数修正新方法[J].中国海上油气,2012,24(增刊1):86-89.  
LI Jinyi, DAI Weihua, LUO Xianbo, et al. A new method to correct the sweep efficiency in offshore oilfields[J]. China Offshore Oil and Gas, 2012, 24(Supplement 1): 86-89.
- [6] 肖武.非均质水驱油藏无因次采液指数曲线的预测及应用[J].油气地质与采收率,2019,26(5):127-131.  
XIAO Wu. Prediction and application of dimensionless fluid production index curve for heterogeneous water flooding reservoirs[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(5): 127-131.
- [7] 宋辉,陈伟,李谋杰,等.基于卷积门控循环单元网络的储层参数预测方法[J].油气地质与采收率,2019,26(5):73-78.  
SONG Hui, CHEN Wei, LI Moujie, et al. A method to predict reservoir parameters based on convolutional neural network-gated recurrent unit (CNN-GRU)[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(5): 73-78.
- [8] 刘巍,刘威,谷建伟,等.利用卡尔曼滤波和人工神经网络相结合的油藏井间连通性研究[J].油气地质与采收率,2020,27(2):118-124.  
LIU Wei, LIU Wei, GU Jianwei, et al. Research on interwell connectivity of oil reservoirs based on Kalman filter and artificial neural network[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(2): 118-124.
- [9] 陈元千,郭二鹏.预测水驱油田体积波及系数和可采储量的方法[J].中国海上油气,2007,19(6):387-389.  
CHEN Yuanqian, GUO Erpeng. A method to predict volumetric sweep efficiency and recoverable reserves of water-drive oilfields[J]. China Offshore Oil and Gas, 2007, 19(6): 387-389.

- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 孙玉瑾,彭彩珍,郭丰,等.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[J].油气地质与采收率,2016,23(1):96-100.  
SUN Yujin, PENG Caizhen, GUO Feng, et al. Modification and application of a formula from A new method for prediction of volumetric sweep efficiency in water-drive oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(1): 96-100.
- [13] 胡罡.计算水驱油藏体积波及系数的新方法[J].石油勘探与开发,2013,40(1):103-106.  
HU Gang. A new method for calculating volumetric sweep efficiency in a water-flooding oilfield [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1): 103-106.
- [14] 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.
- [15] 杨明,陈存良,王雨,等.中轻质油藏高含水期注水体积波及系数研究[J].特种油气藏,2019,26(6):93-97.  
YANG Ming, CHEN Cunliang, WANG Yu, et al. Injected water volume sweep efficiency of high water-cut stage in medium-light oil reservoirs [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(6): 93-97.
- [16] 薛江堂,刘珍,薛龙龙,等.水驱开发油藏高含水期驱替程度和波及系数变化规律[J].新疆石油地质,2018,39(5):573-577.  
XUN Jiangtang, LIU Zhen, XUE Longlong, et al. Study on displacement degree and sweep efficiency variation of water-drive reservoirs at high water-cut stage [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2018, 39(5): 573-577.
- [17] 朱圣举,张文博,朱洁.基于甲型水驱曲线的体积波及系数变化规律[J].特种油气藏,2018,25(4):95-98.  
ZHU Shengju, ZHANG Wenbo, ZHU Jie. Change laws of volumetric sweep efficiency based on type A waterflood curve [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(4): 95-98.
- [18] 张金庆,安桂荣,许家峰,等.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.  
ZHANG Jinqing, AN Guirong, XU Jiafeng, et al. Analyzing the applicability of an eurytopic water-drive curve and its extensible applications [J]. China Offshore Oil and Gas, 2013, 25(6): 56-60.
- [19] 刘晨,张金庆,王凯,等.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.  
LIU Chen, ZHANG Jinqing, WANG Kai, et al. Correlation among characteristic curves of widely applicable type and Type A water-flooding [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2017, 24(1): 106-109.
- [20] 袁庆峰,朱丽莉,陆会民,等.水驱油田晚期开发特征及提高采收率主攻方向[J].大庆石油地质与开发,2019,38(5):34-40.  
YUAN Qingfeng, ZHU Lili, LU Huimin, et al. Development characteristics and main tackled EOR research direction for the water-flooded oilfield at the late stage [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(5): 34-40.
- [21] 刘晨,张金庆,周文胜,等.海上高含水油田群液量优化模型的建立及应用[J].中国海上油气,2016,28(6):46-52.  
LIU Chen, ZHANG Jinqing, ZHOU Wensheng, et al. Modeling of liquid production optimization in high water cut offshore oilfield group and its application [J]. China Offshore Oil and Gas, 2016, 28(6): 46-52.
- [22] 刘晨.考虑储层参数时变的相对渗透率曲线计算方法[J].西南石油大学学报:自然科学版,2019,41(2):137-142.  
LIU Chen. Method for calculating the relative permeability curve of an oil reservoir considering the time-varying effect of relevant reservoir parameters [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2019, 41(2): 137-142.
- [23] 塔雷克·艾哈迈德.油藏工程手册[M].3版.北京:石油工业出版社,2009.  
AHMED T. Reservoir engineering handbook [M]. 3rd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009.
- [24] 秦同洛,李璠,陈元千.实用油藏工程方法[M].北京:石油工业出版社,1989.  
QIN Tongluo, LI Dang, CHEN Yuanqian. Practical reservoir engineering method [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989.
- [25] 张金庆.水驱油田产量预测模型[M].北京:石油工业出版社,2012.  
ZHANG Jinqing. Oilfield production prediction model of water flooding [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [26] WELGE H J. A simplified method for computing oil recovery by gas or water drive [J]. Journal of Petroleum Technology, 1952, 4(4): 91-98.
- [27] ZHANG Jinqing, YANG Renfeng. A further study on Welge equation [J]. Energy Exploration & Exploitation, 2018, 36(5): 1103-1113.
- [28] 张金庆.水驱油理论研究与油藏工程方法改进[M].北京:中国石化出版社,2019.  
ZHANG Jinqing. Research on water drive theory and improvement of reservoir engineering methods [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2019.
- [29] 张金庆.水驱曲线的进一步理论探讨及童氏图版的改进[J].中国海上油气,2019,31(1):86-93.  
ZHANG Jinqing. A further theoretical discussion on water flooding curve and improvement of Tong's chart [J]. China Offshore Oil and Gas, 2019, 31(1): 86-93.