

# Reviews on Evaluating Waterflooding Efficiency on Developed Field and Calculation of Sweep Efficiency

Fang Zhao<sup>1</sup>, Wei Xiong<sup>1,2</sup>, Shusheng Gao<sup>1,2</sup>, Rui Shen<sup>1,2</sup>, Baojiang Duan<sup>1</sup>, Xiyan Lan<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Science, Langfang

<sup>2</sup>Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Langfang

<sup>3</sup>Research Institute of North China Oilfield Exploration and Development, Renqiu

Email: still1900a@hotmail.com

Received: Apr. 5th, 2012; revised: Apr. 21st, 2012; accepted: May 4th, 2012

**Abstract:** In recent years, low permeability reservoir has played an important role in oil field development and water injection is the most important method for reservoir development. How to improve the water drive efficiency and waterflooding effect is the main problem and water flooding assessment has played an important role in judging the level of oil field development. In this paper, we mainly discussed the method of waterflooding evaluation and calculation and application of sweep efficiency. Research found that some of the existing methods could not fully take into account the effect of the heterogeneity of the reservoir, making the coincidence rate of waterflooding evaluation and sweep efficiency low.

**Keywords:** Low Permeability Reservoirs; Waterflood Evaluation; Sweep Efficiency; Recovery Ratio

## 已开发油田水驱评价体系及波及系数计算方法综述

赵芳<sup>1</sup>, 熊伟<sup>1,2</sup>, 高树生<sup>1,2</sup>, 沈瑞<sup>1,2</sup>, 段宝江<sup>1</sup>, 兰喜艳<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院渗流流体力学研究所, 廊坊

<sup>2</sup>中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 廊坊

<sup>3</sup>华北油田勘探开发研究院, 任丘

Email: still1900a@hotmail.com

收稿日期: 2012年4月5日; 修回日期: 2012年4月21日; 录用日期: 2012年5月4日

**摘要:** 近年来低渗透油藏在我国油田开发中所占的比重越来越大。而注水是低渗透油藏有效开发的最重要手段, 如何改善水驱效果, 提高水驱效率是低渗透油藏注水开发过程中的关键问题, 而水驱评价方法是评判低渗透油田注水开发效果的重要手段。本文主要针对低渗透油田水驱评价体系相关文献展开调研分析, 主要内容包括以下两个方面: 低渗透油藏水驱评价方法; 水驱波及系数影响因素及相关计算方法和应用。文献调研分析结果表明, 现有的一些水驱评价体系和水驱波及系数计算方法都不能全面考虑油层的非均质性产生的影响, 从而导致非均质低渗透油藏的水驱评价结果和水驱波及系数的符合率不高。

**关键词:** 低渗透油藏; 水驱评价方法; 波及系数; 采收率

### 1. 水驱评价体系

#### 1.1. 研究现状

自 20 世纪二三十年代注水开采油田在美国获得

工业化应用以来, 水驱评价方法目前已在世界范围内获得了广泛应用, 注水已成为油田主要的开采方式, 它承担了当前强化采油和提高原油产量的重任。20 世纪六十年代以来, 中国陆上开发的大油田都已进入高

含水开发阶段。高含水油田开发效果评价涉及包括井网密度、注采井数比等在内的 40 余个指标，每个指标侧重不一样，如何通过这些指标综合评价油田处于什么级别的开发水平，是进行开发效果评价的主要内容，对于指导后续开发工作意义重大。我国从二十世纪 50 年代以来，也开始进行水驱开发效果研究，经过多年的发展，已经形成了多种评价方法。

## 1.2. 研究方法

水驱评价方法概括起来有如下几种：可采储量评价法、系统动态分析法、状态对比法、模糊综合评判法、灰色系统理论法、数值模拟评价法等<sup>[1]</sup>。

### 1) 可采储量评价法

可采储量是评价水驱开发效果的重要指标。可采储量可分为静态可采储量和动态可采储量。对于静态可采储量和动态可采储量，已经形成了许多经验预测公式。1955 年 Gutuhie 和 Greenberger 对 73 个完全水驱或部分水驱砂岩油田的基础数据，利用多元回归分析得到预测注水油田的水驱可采储量的经验公式<sup>[2]</sup>。1958 年 Wright 根据油田的实际开发数据，首先建立了水油比与累积产油量半对数统计直线关系<sup>[3]</sup>。1959 年 Matthews 又建立了水油比与累积产油量半对数统计直线关系<sup>[4]</sup>。我国在二十世纪 70 年代中期~80 年代初又提出利用多种驱替特征曲线来预测注水油田的水驱可采储量，其中应用最广泛的是甲型曲线。从 80 年代中期开始，人们发现利用驱替特征曲线来预测注水油田的水驱可采储量，仅考虑了采出量(油、水)之间的关系，这样评价油田水驱开发效果就将受到一定限制。同时，油田进入中、高含水期以后，随着注水量的不断增加，注水成本也将不断提高，注水指标作为衡量开发效果的一个方面，其重要性愈来愈被人们所认识。

### 2) 系统动态分析法

系统动态分析方法是王凤琴、薛中天等提出一种新效果评价方法<sup>[5]</sup>。该方法以大系统理论方法为依据，把油田看作一个复杂的系统，研究各生产井中产油量与产液量、产水量与产液量、含水率与产液量之间的相关关系；研究各生产井之间产油量之间、产水量之间的相关关系；研究注采井之间注入量与产水量、产油量的相关关系。从而得到油藏中油水运动关系、储

层中能量消耗与储层非均质性关系、储层能量补充和能量消耗的关系，对油田的开发决策提供有力的科学依据。通过计算分析，采取适当的措施，如加密、堵水调剖等，使整个开发系统的总产油量得到提高，延长稳产时间，进而提高整个开发系统的最终采收率。系统动态分析法着眼于提高整个油田大系统的产量及最终采收率，由于其考虑因素较多更能合理地模拟油田开发实际，但由于数学模型建立较难等一些原因短时间内不会取得实质性的进展，因而在现场应用较少。

### 3) 状态对比法

所谓状态对比法是指把理论曲线与实际的生产曲线对比，在相同情况下根据两者之间偏离情况进行评价<sup>[6]</sup>。卢俊提出的注入倍数增长率，即每采出单位数值的地质储量时相应的注入孔隙体积倍数增长的速度，从注水角度来评价和预测油田调整挖潜的效果，弥补了以往评价和预测油田开发效果单纯考虑采出量变化的不足，使评价和预测油田开发效果的工作更趋全面<sup>[7]</sup>。

张锐推导出不同类型油田、不同开发阶段计算存水率的经验公式，提出了应用采出程度与存水率标准曲线评价油田注水效果、预测水驱采收率的方法<sup>[8]</sup>。周琦、朱学谦以中渗高含水油藏为例，对层系组合、井网密度的合理性进行了综合评价，并通过含水上规律拟合和预测、水驱采收率的计算与对比，对油藏目前所处的开发阶段进行了判断<sup>[9]</sup>。闵田才应用油田矿场实际资料统计规律与理论计算曲线比较，评价 L 油藏注水开发效果<sup>[10]</sup>。邵长新利用永 3 断块实际与理论水驱指数与采出程度关系曲线、实际与理论存水率与采出程度关系曲线对比分析油田开发效果<sup>[11]</sup>。状态对比法简单、实用，能够充分利用丰富的动态资料，且结果简洁、明了，在较长一段时间内将会继续在现场上广为使用。

### 4) 模糊综合评判法

模糊综合评判法就是应用模糊变换原理和最大隶属度原则，考虑与评价事物相关较大的各个因素，对其所作的综合评价。该方法是建立在模糊数学基础上的一种模糊线性变换，它的优点是将评判中有关的模糊概念用模糊集合表示，以模糊概念的形成直接进入评判的运算过程，通过模糊变换得出一个对模糊集合的评价结果。肖淳芳介绍了常用于实际工程技术问

题的模糊数学在模糊综合评判的基本原理,其中模糊向量是各个单因素权重系数构成的权重集,模糊矩阵是由对应的各个单因素评价矩阵迭加而成<sup>[12]</sup>。

黄炳光、唐海等在分析评价经验公式法、水驱特征曲线法和递减曲线法确定油藏水驱开发潜力优缺点的基础上,把影响油藏水驱开发潜力的7类地质因素(岩石颗粒结构、岩石孔隙结构、储集层渗流物性、储集层敏感性、含油气砂体分布、储集层能量及原油物性)中选取矿场易获取的能够反映油藏地质特征的24个地质参数,构成油藏水驱开发潜力评价指标体系,提出了用“模糊综合评判法”确定油藏水驱开发潜力的方法<sup>[13]</sup>。模糊综合评判方法实际是把模糊数学理论应用到油藏工程中来,用以评价油藏水驱开发潜力,在实际应用中具有一定的参考价值。

### 5) 灰色系统理论法

灰色系统理论是指既含已知又含未知的分析方法或系统,用灰色系统来分析注水开发油田开发地质潜力评价,就是把影响注水开发地质潜力的因素、评价结果看作一个包含已知因素和未知因素的灰色过程,通过分析研究和提取参数,统计确定灰色信息系统中每个参数的评价标准和指标。然后用这些参数、指标及特征值去白化灰色系统,来实现综合评价和分析注水开发油田开发地质潜力。

宋子齐等通过对注水开发油藏的地质特征、开发特点和评价指标分析,采用灰色系统理论综合评价分析方法,建立了油藏水驱开发效果评价及水驱开发潜力综合地质因素的评价参数、标准、权系数和自动处理方法<sup>[14]</sup>。李治平、赵必荣提出用灰色关联分析法着重从微观上(或区块上)来分析油田的注水开发效果<sup>[15]</sup>。灰色系统理论方法实际是把灰色系统理论应用到油藏工程中来,用以评价油藏水驱开发效果及潜力,在实际应用中具有一定的参考价值。

### 6) 数值模拟评价法

数值模拟既可以模拟不同地质状态去评价开发效果,也可以根据油田开发实际中的问题设计模拟状态,然后进行评价。ADW Jones等人模拟评价了北科威特油田的不同井网和井距的开发效果<sup>[16]</sup>。P. M. Lemouzy和R. Eschard选择了井距、井网、裂缝类型等几个参数,并让其在给定范围变化的油藏进行了模拟评价<sup>[17]</sup>。应用数值模拟评价开发效果方面的研究学者还有M. D. Dunn<sup>[18]</sup>。陈月明、姜汉桥总结了利用数

值模拟方法研究剩余油饱和度分布;用井间示踪剂方法研究油藏非均质;用最优化方法设计注水井谓割方案;用水驱曲线等方法评价开发效果。结果表明,改善高含水期注水开发效果应以油藏描述为基础,井间示踪剂测试法是研究油藏平面和纵向非均质性的较好方法<sup>[19]</sup>。数值模拟评价水驱开发效果是最方便,最节约运行成本的一种方法,随着数值模拟技术在各个油田的普及将来开发效果评价也会成为数值模拟应用的一个主要方向。

### 7) 其他方法的应用

闫凤萍、陈林媛完成了开发指标预测系统软件,便于使用者在油田开发指标预测中进行选择。系统较完整的考虑了不同开发时期油藏开发指标预测问题,包括目前国内外常用的r模型、Weibull模型、Hubbert模型、递减模型、灰色系统五种数学模型<sup>[20]</sup>。李洪海、许卫华提出定量评价注水开发效果的一种新方法。根据油藏各种单因素指标对注水开发效果的影响程度,在单指标定性评价的基础上,通过研究多个国内外注水开发油田的开发效果及指标影响因素,建立了注水开发油田综合定量指标评价体系。对辽河油区不同类型油田进行分析评价,直观说明了注水开发效果<sup>[21]</sup>。普鲁德霍湾油田采取加密井网、注水、分期安装气举采油系统、开展大规模混相驱及非常规井如高角度井、水平井、反向高角度井、排液井等措施来改善开发效果<sup>[22]</sup>。

## 2. 水驱波及系数基础理论

### 2.1. 波及系数

油田开发的根本目的是从地下采出尽可能多的原油,使地层原油的采收率达到最大,而波及系数是衡量采收率的重要指标。

#### 1) 面积波及系数

面积波及系数(平面波及系数)是指驱油剂在平面上波及的面积 $A_s$ 和整个含油面积 $A$ 的比值,以 $E_A$ 表示。

$$E_A = \frac{A_s}{A}$$

实际布井方式下,油水前缘运动的不均匀性给解决水驱油问题带来了很大困难,影响波及系数的主要因素是油水的流度比,而不同井网的波及系数与流度比的关系也不一样。

#### 2) 体积波及系数

体积波及系数(体积扫油系数)是指驱油剂驱过部分的体积  $V_s$  与油藏的含油体积  $V$  的比值,以  $E_V$  表示。等于面积波及系数和厚度波及系数之乘积。

$$E_V = \frac{V_s}{V} Z$$

3) 地层原油的采收率为油藏波及系数和驱油效率的乘积。

$$E_R = E_V E_D$$

并且油藏的体积波及系数为油藏面积波及系数  $E_A$  和垂向波及系数  $E_z$  的乘积, 又上式可以写为

$$E_R = E_A E_z E_D$$

4) 影响波及系数的主要因素

a) 油层非均质性及对波及系数的影响

反映油层非均质程度的渗透率变异系数对体积波及系数有明显影响, 变异系数升高, 体积波及系数急剧降低。

b) 重力对波及系数的影响

因为水游比重的差异, 所以水倾向于沿底层底部向井突进。油层越厚, 重力影响就越大。特别是对于中高渗油田作用明显, 但是对于低渗油田影响不大。

c) 毛细管力对体积波及系数的影响

水驱油动态计算的数学模型多假定在渗透率不同的邻层之间互不渗透, 这是与事实不相符的。实验和数值分析均证明, 邻层之间渗透率的差异程度和流度比对层间互渗影响最大。层间渗透率相差约悬殊, 互渗的影响越严重。当流度比小于 1 时, 层间互渗会提高见水时的体积波及系数; 而当流度比大于 1 时, 会降低见水时的体积波及系数。

d) 注水速度对体积波及系数的影响

注水速度低, 在油层亲水条件下, 有利于充分发挥油水前缘后的水由高渗层向低渗层的吸渗作用, 从而提高了体积波及系数。

## 2.2. 水驱波及系数计算方法

油层波及系数是定量评价地下石油采出程度的重要指标。关于波及系数的研究国内外提出的方法有很多。

1) 纵向波及系数

a) 前苏联西帕奇夫和纳扎洛夫, 分别于 1981 年

和 1982 年以经验公式的形式提出了在我国定名为丙型水驱曲线的关系式计算水驱波及系数, 1995 年陈元千完成了它的理论推导并给出计算方法<sup>[23]</sup>:

$$E_V = 1 - \sqrt{a(1-f_w)} \quad (1)$$

其中  $a$  是丙型曲线回归系数。

b) 牛彦良、李莉分析了影响井网系数、驱油效率和波及系数的因素, 结合非达西渗流理论, 对低渗透油藏水驱采收率计算方法进行了研究。给出了经验公式<sup>[24]</sup>:

$$Y = a_1 E_z^{a_2} (1 - E_z)^{a_3} \quad (2)$$

式中  $a_1 = 3.334088568$ ,  $a_2 = 0.7737348199$ ,  $a_3 = -1.225859406$ ,  $E_z$  为厚度波及系数;  $Y$  计算参数, 并且由下式确定:

$$Y = \frac{(F_{WO} + 0.4)(18.948 - 2.499V_K)}{(M + 1.137 - 0.8094V_K)10^{f(V_K)}} \quad (3)$$

式中,  $F_{WO}$  为水油比;  $V_K$  渗透率变异系数, 小数;  $f(V_K)$  变异系数的函数, 可由下式确定:

$$f(V_K) = -0.6891 + 0.9735V_K + 1.6453V_K^2$$

同时, 文章还给出了平面波及系数的计算方法, 将在下文提到。

2) 平面波及系数

a) 根据文献[24]研究发现水驱油效率是驱替压力梯度的函数, 随井网密度的增大而增大; 平面波及系数是注水方式、裂缝走向夹角及裂缝相对长度的函数给出计算公式如下。

考虑均质、砂体大面积分布的油藏, 平面波及系数与注水方式、储层渗流特征有关系:

$$E = \left[ \frac{1 + \mu_R}{2\mu_R} \right]^{0.5} \mu_R = \frac{[k_w(S_w) + k_o(S_w)]}{\mu_w k_o(S_w)} \mu_o \quad (4)$$

$E$  为平面波及系数;  $k_w$ ,  $k_o$  为含水饱和度为  $S_w$  时油、水相对渗透率。  $\mu_o$ ,  $\mu_w$  为地层条件下油、水粘度。

反九点井网  $E_A = 0.525E$

五点井网  $E_A = 0.718E$

四点井网  $E_A = 0.743E$

考虑裂缝, 根据经验结果数学回归得出经验公式, 当注采方向与裂缝方向平行时为:

$$E_A = -0.1858L_f^2 + 0.3602L_f + 0.701 \quad (5)$$

当注采方向与裂缝方向垂直时为:

$$E_A = 0.1454L_f^2 - 0.94099L_f + 0.73957 \quad (6)$$

b) 水驱油藏的平面波及系数  $E_A$  是指平面上注入水扫过的面积与油层总面积的比值。 $E_A$  是井网形式、

$$\frac{1-E_A}{E_A} = [a_1 \ln(M+a_2) + a_3] f_w + a_4 \ln(M+a_5) + a_6 \quad (7)$$

$a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$ 、 $a_5$ ——与井网形式有关的常数。

c) 2006 年王任一、李正科针对丘陵油田多层辫状河沉积砂岩油藏提出了数字图像处理技术, 直接反映地下真实油层水驱波及状况的图像资料, 较准确地估算出剖面或平面水驱波及系数<sup>[26]</sup>。

3) 体积波及系数

a) 水驱曲线法

$$E_D = 1 - \frac{B_{oi}}{B_o} \frac{1 - \left[ \frac{2}{3} \frac{1}{b} \ln \left( a \frac{\mu_w}{\mu_o} \right) - \frac{1}{b} \ln \left( \frac{1}{f_w} - 1 \right) \right] - \frac{1}{3} (1 - S_{or})}{1 - S_{wi}} \quad (8)$$

式中:  $E_D$ ——驱油效率,  $f$ ;  $B_{oi}$ ——原始原油体积系数,  $m^3/m^3$ ;  $B_o$ ——原油体积系数,  $m^3/m^3$ ;  $\mu_w$ ——地层水粘度, mPa.s;  $\mu_o$ ——原油粘度, mPa.s;  $f_w$ ——含水率,  $f$ ;  $S_{or}$ ——最终残余油饱和度,  $f$ ;  $S_{wi}$ ——束缚水饱和度,  $f$ 。

$a$ 、 $b$  由下式确定:

$$\frac{K_{rw}}{K_{ro}} = 10^{a-bs_0}$$

式中:  $K_{ro}$ ——原油相对渗透率,  $f$ ;  $K_{rw}$ ——水相对渗

$$E_v = \frac{N_p}{NE_D} = \frac{N_p}{N} \frac{B_o(1-S_{wi})}{B_o(1-S_{wi}) - B_{oi} \left\{ 1 - \left[ \frac{2}{3} \frac{1}{b} \ln \left( a \frac{\mu_w}{\mu_o} \right) - \frac{1}{b} \ln \left( \frac{1}{f_w} - 1 \right) \right] - \frac{1}{3} (1 - S_{or}) \right\}} \quad (9)$$

$N_p$ ——累积产油量,  $10^4$  t;  $N$ ——原油地质储量,  $10^4$  t。

b) 应用相对渗透率曲线计算水驱波及系数

采用描述相对渗透率曲线的公式如下:

$$\frac{K_{rw}}{K_{ro}} = 10^{a-bs_0} \quad (10)$$

式中:  $K_{rw}$ 、 $K_{ro}$  分别为水相和油相的相对渗透率;  $a$ 、 $b$  为拟合系数;  $S_o$  为含油饱和度。

利用上式可以推导出以地下体积表示的水油比:

油水流量比( $M$ )和注水量( $Q_i$ )的函数。

Dyes 等人应用 X 射线图像技术研究了二维非均质模型五点井网、直线排状和交错排状的平面波及系数, 他们应用非线性回归方法拟合了数据点, 得到如下方程<sup>[25]</sup>:

陈元千先生在丙型水驱曲线基础上, 经过推导提出了预测水驱体积波及系数与累积产油量, 以及水驱体积波及系数与含水率的变化关系式<sup>[27]</sup>。

刘德华在计算实际的注入水水驱体积波及系数时, 利用油田开发初期已知的液体高压物性参数、原油 PVT 等静态资料和油田开发过程中的相关动态资料, 给出了开发过程中实际驱油效率的计算公式<sup>[28]</sup>:

透率,  $f$ ;  $S_w$ ——含水饱和度,  $f$ 。

油田实际的驱油效率随着综合含水率的增大而增大, 且前期增加较慢, 后期增加变快。较国际上统一定义的驱油效率而言, 粘度和体积系数的变化体现了压力降, 含水率体现了开采效果和开采程度, 更符合实际的水驱动态。实际的水驱采出程度( $R$ )由实际的水驱油效率( $E_D$ )和实际的水驱体积波及系数( $E_V$ )组成, 即:

可以得到实际水驱波及系数与累积产油量的关系公式:

$$F = 10^{a-bs_0} \frac{\mu_o}{\mu_w}$$

式中:  $F$  为水油比;  $\mu_o$  为原油粘度, mPa.s;  $\mu_w$  为地层水粘度, mPa.s。

油藏开发中, 根据物质平衡公式可知, 累积产油量的变化取决于地下波及体积内饱和度的变化:

$$dN_p = \frac{V_c \phi \rho_o dS_o}{B_{oi}}$$

式中:  $N_p$  为累积产油量, t;  $V_c$  为波及体积,  $m^3$ ;  $\Phi$

为孔隙度； $\rho_o$  为原油密度， $\text{g/cm}^3$ ； $B_{oi}$  为原始地层油体积系数。

不同水油比下的波及体积为：

$$E_v = \frac{R'(F)}{R'_c(F)}$$

式中： $R'(F)$  为油藏生产数据中地下水油比对应的采出程度变化率； $R'_c(F)$  为岩心水驱油实验中水油比对应的采出程度变化率。

c) 2001 年 Vicente 提出了新的理论，文章给出了体波及系数的计算方法<sup>[29]</sup>，首先假设层间没有横流， $S_{oi}$  和  $S_{or}$  的值分别为 0.7 和 0.5，注采阶段没有游离气存在的情况下：

$$E_{vw} = \frac{N_{pw} B_o}{V_p (S_w - S_{wc})} \quad (11)$$

注采阶段游离气饱和度存在时：

$$\begin{aligned} E_{vw} &= A + BN_{pw} \\ A &= \frac{S_g}{(S_w - S_{wc})} \\ B &= \frac{B_o}{V_p (S_w - S_{wc})} \\ \overline{S_w} : a) & 1 - S_{orw} \\ b) & \left[ \overline{S_{bt}} + (1 - S_{orw}) \right] / 2 \end{aligned} \quad (12)$$

$S_{wc}$  为注水开始阶段原始水饱和度  $\overline{S_{bt}}$  为波及部分孔隙中含水饱和度  $\overline{S_w}$  为平均水饱和度。

d) 1998 年，闫宝珍等人就对非均质油藏的流动方式进行了研究，在建立方向渗透率条件下流体流动基本微分方程的基础上，得到了无界地层的解，并推导出流线方程及等势线方程，计算出了油井见到注入流体的时间及体积波及系数<sup>[30]</sup>。在此之后，2000 年，Manoj K. 等人提出了用流线模拟波及系数的计算方法<sup>[31]</sup>。并且 O. Iizgec 等人在 2010 年又给出了改进方法<sup>[32]</sup>。

e) 2008 年王任一又提出了基于最大熵的岩心水驱波及系数求取方法，提出了利用现场水洗检查井密闭岩心劈开面荧光图像资料，直接求取水驱油藏的波及系数的定量方法，此法为直接利用油田大量的检查井的岩心资料，定量求取水驱油藏的波及系数开辟了

一条新的思路<sup>[33]</sup>。

f) 1993 年，范江等人就利用量纲分析等方法针对非均质油层的波及系数进行了详细的建模计算，并给出了具体分析<sup>[34]</sup>。2004 年相天章、李鲁斌从 Buckley-Leverett 一维水驱理论出发，得到了驱油效率与可采储量采出程度的数学关系并建立了实际油藏的驱油效率与可采储量采出程度的数学模型，针对辽河油田进行了验证计算<sup>[35]</sup>。

### 3. 小结

综上所述，在水驱条件下影响水驱体积波及系数的因素很多，如开发层系划分、井网密度、油层连通性、非均质性、注水方式、开发调整等。虽然国内外都提出了一些对应某一含水率下的驱油效率和波及系数的计算方法，但由于无法充分而准确地考虑油层非均质性的影响，因此在该方面的研究还有很大提升空间。

### 参考文献 (References)

- [1] 丁芊芊. 喇萨杏油田典型区块水驱开发效果评价方法研究 [D]. 大庆石油学院, 2009.
- [2] R. K. Guthrie, M. H. Greenberger. The use of multiple correlation analysis for interpreting petroleum engineering data. American Petroleum Institute, 1955: 130-137.
- [3] F. F. Wright. Field results indicate significant advances in water flooding. Journal of Petroleum Technology, 1958: 58.
- [4] M. Parts, C. S. Matthews. Prediction of injection rate and Production history for multifluid five-spot floods. Petroleum Transactions, 1959, 216: 98-105.
- [5] 廖红伟, 王凤琴, 薛中天, 王深. 基于大系统方法的油藏动态分析[J]. 石油学报, 2002, 23(6): 45-49.
- [6] 唐海, 李兴训, 黄炳光等. 综合评价油田水驱开发效果改善程度新方法[J]. 西南石油学院学报, 2001, 23(6): 38-40.
- [7] 卢俊. 评价和预测注水开发油田调整挖潜效果的一项新指标 [J]. 石油勘探与开发, 1993, 20(1): 62-65.
- [8] 张锐. 应用存水率曲线评价油田注水效果[J]. 石油勘探与开发, 1992, 19(2): 63-68.
- [9] 周琦, 朱学谦. 高含水油藏开发效果评价[J]. 新疆石油学院学报, 2002, 14(4): 53-56.
- [10] 阎田才. 老君庙油田 L 油藏注水开发效果评价与分析[J]. 石油学报, 1989, 10(1): 46-53.
- [11] 邵长新, 陆毅. 永 3 断块开发效果评价[J]. 断块油气田, 2005, 12(3): 61-62.
- [12] 肖淳芳. 模糊数学在石油工业中的应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993.
- [13] 黄炳光, 付永强, 唐海等. 模糊综合评判法确定水驱油藏的水驱难易程度[J]. 西南石油学院学报, 1999, 21(4): 1-3.
- [14] 宋子齐, 赵磊, 康立明等. 一种水驱开发地质潜力综合评价方法在辽河油田的应用[J]. 断块油气田, 2004, 11(2): 32-37.
- [15] 李治平, 赵必荣. 油田注水开发效果评价的灰色关联分析法 [J]. 大庆石油地质与开发, 1990, 9(3): 44-51.
- [16] A. D. W. Jones, et al. Rapid assessment of pattern water flooding

- uncertainty in a giant oil reservoir. 1997, Article ID SPE38890.
- [17] P. M. Lemouzy, R. Eschard. An integrated approach EOR evaluation of production scenarios in the field delineation phase. 1991, Article ID SPE22906.
- [18] M. D. Dunn. Simulation based dimension less type curves for predicting waterflood recovery. 2001, Article ID SPE68839.
- [19] 陈月明, 姜汉桥. 改善高含水期注水开发效果的油藏工程研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1993, 17: 117-122.
- [20] 闫凤萍, 陈林媛. 开发指标预测系统[J]. 内蒙古石油化工, 2005, 15(1): 80-81.
- [21] 李洪海, 许卫华. 定量评价注水开发效果的一种新方法[J]. 油气井测试, 2003, 12(2): 20-21.
- [22] 朱莉婷, 孙效群. 普鲁德霍湾油田开发方法及效果[J]. 大庆石油地质与开发, 1999, 18(1): 50-51.
- [23] 陈元千. 预测水驱油田开发动态的一种方法[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(2): 43-46.
- [24] 牛彦良, 李莉, 韩德金, 周锡生. 低渗透油藏水驱采收率计算新方法[J]. 石油学报, 2006, 27(2): 77-79.
- [25] M. R. Fassihi, New correlations for calculation of vertical coverage and areal sweep efficiency. SPE Reservoir Engineering, 1986, 1(6): 604-606.
- [26] 王任一, 李正科, 张斌成, 万永红. 利用图像处理技术计算岩心剖面的水驱波及系数[J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(13): 77-78.
- [27] 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.
- [28] 金燕林, 秦飞. 不同水驱曲线水驱体积波及系数和可采储量的预测研究[J]. 内蒙古石油化工, 2010, 20(13): 113-115.
- [29] M. Vicente, D. Crosta, L. Eliseche, J. Scolari and R. Castelo. Determination of volumetric sweep efficiency in barrancas unit, barrancas field. 2001, Article ID SPE68806.
- [30] 闫宝珍, 许卫, 陈莉, 张方舟. 非均质渗透率油藏井网模型选择[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(6): 51-53.
- [31] E. A. Idrobo, M. K. Choudhary and A. Datta-Gupta. Swept volume calculations and ranking of geostatistical reservoir models using streamline simulation. 2000, Article ID SPE62557.
- [32] O. Izgec, M. Sayarpour and G. M. Shook. Optimizing volumetric sweep efficiency in waterfloods by integrating streamlines, design of experiments, and hydrocarbon F- $\Phi$  curves. 2010, Article ID SPE132609.
- [33] 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, 2004, 15(23): 91-93.
- [34] 范江, 张子香, A·B·扎拉杜新. 非均质油层波及系数计算模型[J]. 石油学报, 1993, 14(1): 92-97.
- [35] 相天章, 李鲁斌. 驱油效率和体积波及系数的确定[J]. 新疆石油地质, 2004, 25(2): 202-203.