

水驱油田含水率预测方法研究及拓展

高文君,徐冰涛,黄瑜,李君芝,欧翠荣

(中国石油吐哈油田分公司 勘探开发研究院,新疆 哈密 839009)

摘要:在新型油相相对渗透率曲线的基础上,结合物质平衡方程和 Welge 方程,导出了一种新型含水率预测模型,并在一定条件下可转化得到 Logistic 模型。新型含水率预测模型中待定系数与开发动态和地质静态参数变化关系明确,使得许多控水措施更具理论支持。同时,针对目前已有油水相渗曲线与 Welge 方程结合还无法得到 Logistic 模型、Goempertz 模型以及 Usher 模型的问题,以及新模型推理过程中要保持开井数不变等条件限制,提出了联解法和直接法建立含水率预测模型。通过两种方法拓展,使得含水率预测模型丰富、多样,能够完全满足描述复杂多样的油田含水率与时间变化过程。后经实例应用,效果较好,值得其他油田借鉴。

关键词:含水率;预测模型;渗流基础;联解法;水驱油田

中图分类号:TE341

文献标识码:A

Research on and development of prediction method of water cut in water flooding oilfield

Gao Wenjun, Xu Bingtao, Huang Yu, Li Junzhi, Ou Cuirong

(Research Institute of Exploration & Development, Tuha Oilfield Company, PetroChina, Hami, Xinjiang 839009, China)

Abstract: On the basis of a new oil phase relative permeability curves, combined with the material balance equation and Welge equation, a new model for predicting water cut is derived. Under certain conditions, it can be converted to the Logistic model. In the new model, the relationship between undetermined coefficients, development dynamic and geological static parameters is clear, so many water control measures have become more theoretically supported. Meanwhile, combined with water-oil relative permeability curves and Welge equation, either the Logistic model, the Goempertz model or Usher model cannot be deduced. Furthermore, some limiting conditions remain in our solution, such the new model requires that the number of wells still not be changed. However, coupling and direct methods have been proposed to build prediction model of water cut. By means of expanding the two methods, with rich, diverse prediction models of water cut, it has been fully possible to describe the complex and diverse water content and process of time change. After field applications of the model, positive results are acquired, and thus may be applied to other oil fields.

Key words: water cut, prediction model, permeable flow theory, coupling method, water-flooding field

产量变化规律、含水上升规律以及油水运动分布规律通称注水油田3大开发规律,这些规律的理论、模型、机理研究随着时间的推移和油田开发实践的丰富,逐步得到了完善和发展,尤其在产量递减方程和全过程预测方法、含水上升规律(或水驱特征曲线)等方面形成了非常丰富的方法(或模型)^[1-3]。然而,在油田开发调整和规划方案编制中,常需要利用含水率与开发时间变化规律进行指标的预测,但目前国内含水率

预测模型相对较少,主要有 Logistic 模型、Goempertz 模型以及 Usher 模型等^[4-7]。这些模型是将经济、信息数学模型直接移植到油藏工程中进行含水率预测(通称直接法),模型中的参数物理内涵不清,渗流理论基础缺乏。为此,文中以新型油相相对渗透率曲线为基础,利用物质平衡方程和 Welge 方程^[8],给出了一种新型含水率预测模型及其渗流理论推导,其待定系数与开发动态和地质静态等参数变化关系明确,使得许多控

收稿日期:2016-08-10;修订日期:2017-07-09。

第一作者简介:高文君(1971—),男,高级工程师,油藏工程。E-mail:gaowj7132@petrochina.com.cn。

基金项目:中石油科技重大专项(2017E-04-07)。

水措施更具理论支持。同时,针对新模型推理过程中的设定限制条件和对直接法中含水率增长率的特征分析,给出了两种建立含水率预测模型的简便方法,即利用含水率增长率与含水率变化关系定积分建立含水率与时间的变化规律的直接法和利用产量变化规律与含水变化规律联立消元确定含水率与时间的变化规律的联解法,使得含水率预测模型更加丰富,有利于适应复杂多变的油田含水率与时间变化规律的精确描述。

1 新型含水率预测模型理论

在注水保持地层压力条件下,油藏物质平衡微分方程为^[9]:

$$Q_o = \frac{N}{1 - S_{wi}} \cdot \frac{d\bar{S}_w}{dt} \quad (1)$$

由 Darcy 定律知,油藏总产油量为^[10]:

$$Q_o = \frac{0.1728\pi n K K_{ro} h \rho_o \Delta p}{B_{oi} \mu_o [\ln(R_e/r_w) + S]} = \alpha K_{ro} \quad (2)$$

联立公式(1)和(2)式,得

$$\frac{1}{K_{ro}} d\bar{S}_w = \frac{\alpha(1 - S_{wi})}{N} dt \quad (3)$$

油井见水后,由 Welge 方程得到平均含水饱和度为:

$$\bar{S}_w = S_{we} + (1 - f_w) / \frac{df_w}{dS_{we}} \quad (4)$$

因此,只要确定出平均含水饱和度与出口端含水饱和度的关系式,再结合公式(3)和公式(4),即可推导出含水率与时间的关系式。

依据 Эфрос (艾富罗斯) 实验结果,平均含水饱和度与出口端含水饱和度一般符合线性关系^[11]:

$$\bar{S}_w = m S_{we} + (1 - m)(1 - S_{or}), (m < 1) \quad (5)$$

上式代入公式(4),并取初始条件 $S_{we} = S_{wi}$ 时, $f_w = 0$, 定积分,得

$$f_w = 1 - \left(\frac{1 - S_{we} - S_{or}}{1 - S_{wi} - S_{or}} \right)^{1/(1-m)}, (m < 1) \quad (6)$$

文献[12]曾给出 Willhite 提出的油相相对渗透率曲线为 $K_{ro} = K_{o(S_{wi})} (1 - S_{wd})^m$, 在此基础上,结合 Wyllie 对于水湿岩石的油水两相相对渗透率公式,改进油相相对渗透率为如下精度较高的关系式:

$$K_{ro} = \frac{K_{o(S_{wi})}}{1 - p} (1 - S_{wd}) [1 - p (1 - S_{wd})^{\frac{1}{1-m}}], \quad (0 < p < 1) \quad (7)$$

式中, $S_{wd} = (S_{we} - S_{wi}) / (1 - S_{wi} - S_{or})$ 。

那么,将公式(7)上式代入公式(3),并取初始条件 $t = t_{w0}$ 时, $S_{we} = S_{wi}$, 定积分,求得 S_{we} 后再代入公式(6),整理得到一种新型含水率预测模型:

$$f_w = 1 - \frac{1}{p + \exp(bt)/a} \quad (8)$$

式中, $a = \exp(bt_{w0}) / (1 - p)$,

$$b = \frac{\alpha(1 - S_{wi}) K_{o(S_{wi})}}{(1 - p) N m (1 - m) (1 - S_{wi} - S_{or})}$$

2 新模型与 Logistic 模型对比

很明显,当 $p = 1$ 时,公式(8)即转化为 Logistic 含水率预测模型^[4]:

$$f_w = \frac{1}{1 + a \exp(-bt)} \quad (9)$$

对公式(8)微分,得到含水率变化率与时间的关系式:

$$\frac{df_w}{dt} = \frac{b/a \exp(bt)}{[p + \exp(bt)/a]^2} \quad (10)$$

取 $a = 45, b = 0.2, p$ 分别取 $0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$, 做含水率变化率与时间变化曲线(图1)。结果显示,当 $p = 0$ 时,含水率变化率与时间呈指数递减曲线;当 $p = 1$ 时,即为 Logistic 含水率预测模型对应的含水率变化率与时间关系式,此时含水率变化率与时间曲线为钟形,曲线左右近乎对称,表明 Logistic 模型只是一种特殊的含水率预测模型,即在开发初期含水率随时间上升逐渐加快,而在开发末期含水率随时间上升

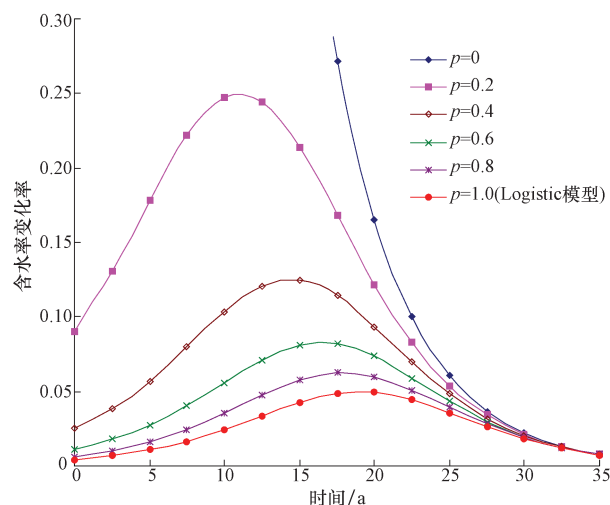


图1 含水率变化率与时间关系 ($a = 45, b = 0.2$)

Fig. 1 Relationship between the water cut and time

逐渐减慢;在开发中期含水率上升最快;当 $0 < p < 1$ 时,含水率变化率与含水率曲线介于指数递减和钟形之间的多种“歪钟形”曲线,能够适应复杂多样的水驱油田含水率随时间变化规律预测。

取 $p = 1$, 并利用 Taylor 级数展开式 $\exp[-a/b \exp(-bt)] \approx 1 + a \exp(-bt)$, 则公式(8)式转化为 Goempertz 含水预测模型^[5]:

$$f_w = \exp[k \exp(-bt)] \quad (11)$$

式中, $k = -a/b$ 。

在公式(11)基础上,取 $k = cr/b$,将等式右边先改写为等式 $\left\{ \exp\left[-\frac{r}{b} \exp(-bt)\right] \right\}^{-c}$, 然后将 $\exp\left[-\frac{r}{b} \exp(-bt)\right]$ 按 Taylor 级数展开,取前两项,则(11)式转化 Usher 含水率预测模型^[6-7]:

$$f_w = \frac{1}{[1 + r \exp(-bt)]^c} \quad (12)$$

以上研究表明,在新型含水率预测模型的基础上,当待定参数 $p = 1$,直接得到 Logistic 模型;若利用 Taylor 级数展开式对新建模型进行变形等效处理,可以得到常用的 Goempertz 和 Usher 模型,因此公式(8)具备了一定的广义性。进一步分析公式(8)中待定系数 a , b 与渗透率、生产动用厚度、压差、表皮系数、粘度(比)、单井控制储量等静态或动态参数的关系,明显地为控水措施提供了理论依据,具体影响因素结果见表1。

3 含水率预测模型建立方法拓展

目前,国内含水率预测方法相对较少,主要直接法有 Logistic, Goempertz 和 Usher 等模型,为了进一步丰富含水率预测方法,提出了对直接法预测模型的拓展和利用联解法建立更为多样的含水率预测模型。

3.1 直接法预测模型的拓展

新型含水率预测模型的推理过程表明,要建立直接法中各模型的渗流基础,必须满足两个条件:首先,确定出油、水相对渗透率分别与含水饱和度的关系;其次,经过 Welge 方程可以得到平均含水饱和度与出口端含水饱和度的关系式,代入到 Darcy 式中进行定积分,否则无法建立目前直接法中各模型的渗流基础。目前,理论界给出的油、水相相对渗透率计算公式^[12],还无法直接导出 Logistic, Goempertz 和 Usher 模型,这也是长期以来直接法含水率预测模型缺乏渗流理论基础的主要原因。若以含水率增长率定义式 $\left(D_{f_w} = \frac{df_w}{f_w dt}\right)$ 对直接法含水率预测模型的特征进行研究,发现 Logistic 预测模型 $D_{f_w} = b(1 - f_w)$, Goempertz 预测模型 $D_{f_w} = -b \ln f_w$, Usher 预测模型 $D_{f_w} = cb(1 - f_w^c)$, 均为以含水率为自变量的递减函数,表明直接法中含水率增长率随含水率的增大而变小^[13]。再借鉴 Arps 递减方程初期建模理论,构想 $D_{f_w} = F(f_w)$, 其中 $F(f_w)$ 即可为以含水率为自变量的递减函数,取初始下限 f_{w0} 和 t_{w0} , 定积分后会得到许多含水率预测方法。如 $F(f_w) = B(k - f_w)$, 令 $c = 1/k$, $b = B/k$, $a = (1/f_{w0} - 1/k) \exp(bt_{w0})$, 那么对应含水率预测模型为:

$$f_w = \frac{1}{c + a \exp(-bt)} \quad (13)$$

3.2 联解法预测模型的建立

在新型含水率预测模型的推理设定限制条件中,地层压力和油井开井数是保持不变的,但实际生产情况难以满足这些条件。对于资源有限体系或非再生资源,国内外学者提出了较多的生命旋回模型,来描述油田开发全过程,如 Weng 旋回模型、Weibull 旋回模型和 Rayleigh 旋回模型等,利用这些模型很方便建立累计

表1 油井控水主要方法及措施

Table 1 Main methods and measures of water control in production well

序号	控水方法	控水措施
1	减小生产压差	提高油井流动压力或降低注水井注水压力(或注水量)
2	增加可采储量	提高单井动用储量(水驱控制储量)或利用注入表面活性剂降低残余油饱和度
3	降粘	增大注入水粘度(如注入水中加凝胶)或降低原油粘度(如热采、蒸汽吞吐)
4	降低表皮系数	储层改造(压裂、酸化、深穿孔补层)
5	提高动用程度	油井补层、分层系开发或注水井分层注水
6	减少开井数	关停高含水井或封堵高含水井层

产油量与时间的变化关系式^[1]。另一方面,在含水率上升规律中^[2],利用 $R = N_p/N$,可以确定出累计产油量与含水率的变化关系(当然也可以从水驱特征曲线反演得到),并将旋回模型代入消元(消去累计产油量),会得到诸多含水率预测模型。如利用 Rayleigh 分布得到累计产油量与开发时间的变化规律为:

$$N_p = N_R [1 - \exp(-bt^2)] \quad (14)$$

结合甲型含水上升规律曲线 $R = A + B \ln[f_w/(1 - f_w)]$,得到一种含水率预测模型:

$$f_w = \frac{1}{1 + \exp[c + a \exp(-bt^2)]} \quad (15)$$

式中, $a = N_R/(BN)$, $c = (A - N_R/N)/B$ 。

当然,若产量递减规律研究明确,油井开井数保持相对稳定,也可以利用产量递减规律得到累计产油量与时间的变化关系,再与含水上升规律相结合,得到含水率预测模型。如产量递减方程为指数递减 $Q = Q_i \exp[-D_i(t - t_0)]$,其累计产油量与时间的关系式为:

$$N_p = N_{p0} + \frac{Q_i}{D_i} - \frac{Q_i}{D_i} \exp[-D_i(t - t_0)] \quad (16)$$

再结合甲型含水上升规律曲线,也能得到一种含水率预测模型:

$$f_w = \frac{1}{1 + \exp[c + a \exp(-bt)]} \quad (17)$$

式中, $a = Q_i \exp(D_i t_0)/(D_i BN)$, $b = D_i$, $c = [A - N_{p0}/N - Q_i/(D_i N)]/B$ 。

在产量变化规律(包括产量全过程和产量递减)和含水上升规律(或水驱特征曲线)研究中,国内外已建立了众多方法或模型。这两类模型经联解法的拓展,能够形成许多的含水率预测模型。例如,将常用的甲型含水上升规律(或称“S”型含水率曲线)与 Arsp 递减方程结合,可形成3种含水率预测方法;若将甲型

含水上升规律分别与 Weng 旋回模型、Weibull 旋回模型、Rayleigh 旋回、t 模型、HCZ 模型等产量全过程预测方法结合,也可得到另外5种含水率预测方法,这样一种含水上升规律与产量变化规律相结合,能形成至少8种以上的含水率预测模型。同样,若将万吉业提出的5类含水率上升规律(凸型,凸-S型,S型,S-凹型,凹型)与上述列举的产量变化规律一一相结合,就能得到含水率预测模型不少于40种;诸如类推,通过联解法可以形成各式各样的含水率预测模型供现场工作人员的选择、应用。

4 实例应用

4.1 新含水率预测模型的应用效果

应用公式(8)及直接法等4种关系式对已公开的大庆油田南二、三区葡I组1968—1984年含水率生产数据进行拟合。其中,拟合程度最好的为公式(8),其次为公式(12),而1985—1987年预测误差较小的为公式(11)(图2a)。产生这种情况的主要原因是:1985—1987年葡I组进行了层系细分,提高了油层的动用储量,有利于含水率的控制^[14]。因此,在进行含水率预测时,不仅要选择精度较好的模型,而且更应考虑油田的调整措施对控水的影响,否则,预测结果只是前期开发趋势的一种外推延续。若从考虑未来调控措施影响角度出发,公式(8)更好,因为模型中待定系数与控水因素有明确的关系式,易于修正模型的待定参数。

4.2 拓展模型的应用效果

为了对比拓展模型的应用效果,同样对大庆油田南二、三区葡I组1968—1984年的数据进行了拟合

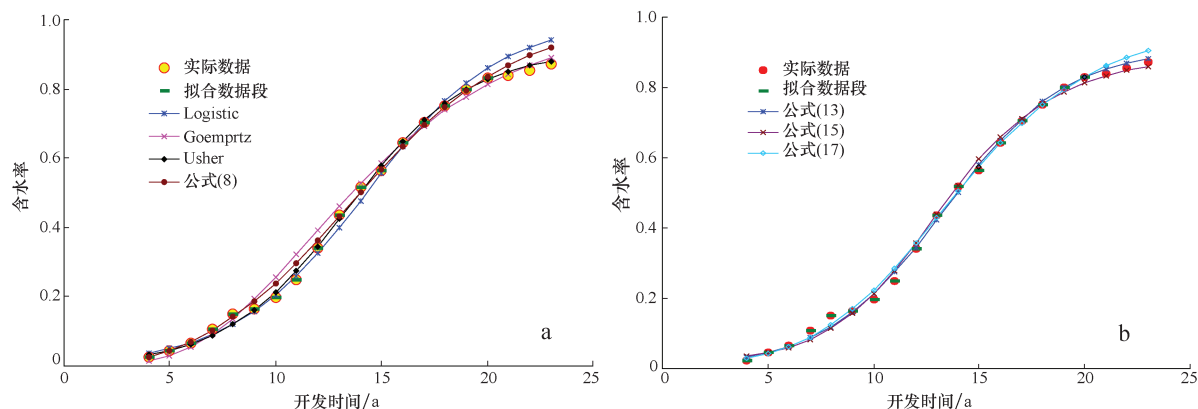


图2 大庆油田南二、三区经典模型(a)和拓展模型(b)含水率预测曲线

Fig. 2 Classical model(a) and extended model(b) of water cut prediction curve in the southern 2 & 3 areas of Daqing oilfield

(图 2b),结果显示,各方法拟合程度基本上都能满足工程上需要,尤其是公式(13)和公式(17),拟合相关系数达到 0.997 以上(表 2),表明利用联解法和直接法拓展建立的含水率预测模型,与渗流理论上建立的模型或通过增长信息移植的模型相比,可以达到相同的效果。因此,在油田生产数据较为丰富的情况下,利用确定的产量变化规律与含水上 升规律相结合,可以快速建立油田的含水率预测模型。这样处理,不仅减少了含水率预测模型优选与适应性论证,而且也能很好的继承油田其他开发规律的研究成果。

4.3 实际应用中含水率预测模型的优选

当然在实际应用时,并不是所有油田都像大庆油田南二、三区葡 I 组一样,对上述 7 种模型都能取得很好的拟合效果,因此,在充分利用生产数据,通过各模型的拟合,选择相关系数高、拟合程度好的模型来进行含水率预测,是矿场常采用的优选办法。如雁木西油田和双河油田,通过拟合优选,其确定的最佳预测模型

相差很大。其中,雁木西油田位于台北凹陷西部胜南-雁木西构造带西端,主要生产层位为新近系鄯善群,其平均孔隙度为 20.4%,平均渗透率为 $228.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,为中孔中渗储层;油藏地层原油密度为 0.8093 g/cm^3 ,地层原油粘度为 $3.66 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,原始溶解气油比为 $8.64 \text{ m}^3/\text{t}$,体积系数为 1.045,地饱压差为 14.11 MPa,属低饱和油藏。利用上述 7 种模型分别对雁木西油 1999—2015 年的生产数据进行拟合(表 3),结果表明,公式(8)、Usher 模型拟合结果要好于其他模型,两者后期预测值也非常接近(图 3a)。同样,利用文献[15]中双河油田的含水率数据进行拟合,发现拓展模型中公式(15)拟合效果最优,相关系数达到 0.999 5,而其它模型预测效果较差(图 3b;表 4)。这些应用效果充分表明,不同的油田,其含水率与时间变化规律存在较大的差异。另一方面,从新模型公式(8)对应的油相相渗特征分析,雁木西油田油相相渗更符合公式(7),而双河油田比较符合 Willhite 提出的油相相渗关系式(图 4)。因此,从渗流角度讲,渗流特征决定着含水率预测模型。

表 2 大庆油田南二、三区含水率预测模型拟合结果
Table 2 Results of water cut prediction model in the southern 2 & 3 areas of Daqing oilfield

待定参数及相关系数	预测模型						
	公式(8)	公式(9)	公式(11)	公式(12)	公式(13)	公式(15)	公式(17)
$a(k \text{ 或 } r)$	38.540 10	93.626 81	-8.954 34	11.563 69	119.667 41	5.956 32	13.415 50
b	0.264 43	0.317 54	0.188 19	0.243 11	0.350 04	0.005 37	0.036 20
$c(p)$	0.949 77	—	—	2.118 64	1.097 75	-2.164 28	-8.096 97
相关系数	0.998 84	0.994 56	0.993 70	0.998 02	0.997 18	0.994 44	0.997 50

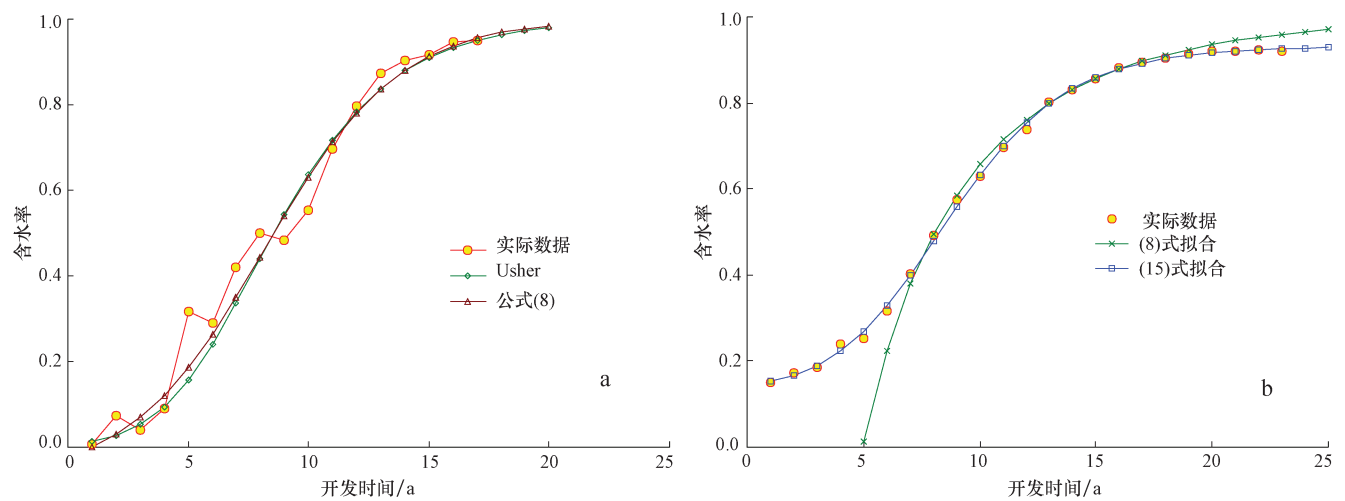


图 3 雁木西油田(a)和双河油田(b)含水率预测曲线
Fig. 3 Water cut prediction model of Yanmuxi oilfield(a) and Shuanghe oilfield(b)

表 3 雁木西油田含水率预测模型拟合结果

Table 3 Results of water cut prediction model of Yanmuxi oilfield

待定参数及相关系数	预测模型						
	公式(8)	公式(9)	公式(11)	公式(12)	公式(13)	公式(15)	公式(17)
$a(k \text{ 或 } r)$	19.88 445	60.30 959	-7.25 501	3.55 747	84.09 653	6.59 090	12.00 934
b	0.35 670	0.43 993	0.28 586	0.32 394	0.50 379	0.01 042	0.06 232
$c(p)$	0.92 829	—	—	3.46 240	1.03 880	-2.99 368	-7.03 754
相关系数	0.99 464	0.97 974	0.99 050	0.99 305	0.98 487	0.97 334	0.98 688

表 4 双河油田含水率预测模型拟合结果

Table 4 Results of water cut prediction model of Shuanghe oilfield

待定参数及相关系数	预测模型						
	公式(8)	公式(9)	公式(11)	公式(12)	公式(13)	公式(15)	公式(17)
$a(k \text{ 或 } r)$	1.238 57	6.314 97	-2.550 00	0.869 23	11.117 46	4.352 80	7.572 06
b	0.150 00	0.218 19	0.170 34	0.182 23	0.318 34	0.007 45	0.051 93
$c(p)$	-0.697 76	—	—	3.681 42	1.073 68	-2.615 29	-5.080 90
相关系数	0.996 16	0.979 40	0.985 41	0.984 41	0.995 69	0.999 45	0.991 97

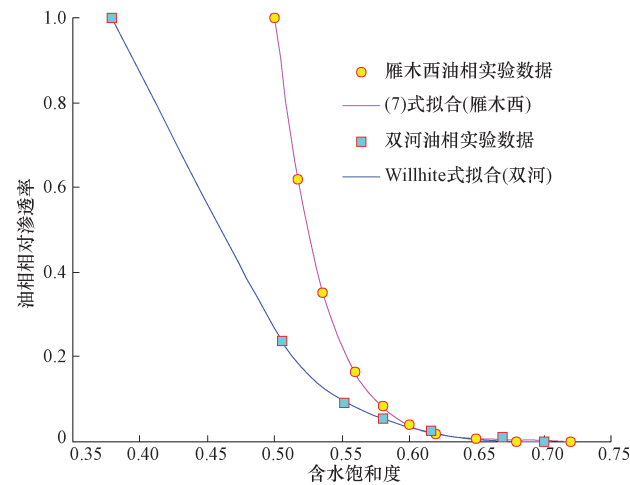


图 4 雁木西油田和双河油田油相相对渗透率曲线

Fig. 4 Oil phase relative permeability curves of Yanmuxi oilfield and Shuanghe oilfield

5 结论

- 1) 利用新型油相相对渗透率模型,导出了一种新的含水率预测模型;新模型中待定参数与动态、静态参数关系明确,为控水提供了理论基础。
- 2) 依据新模型推理过程及其限制条件分析,提出含水率预测模两种拓展方法,使得含水率预测模型丰富、多样,能够满足描述复杂多样的油田含水率与时间变化过程。
- 3) 通过国内不同油田的应用,反映出不同含水率

预测模型的适应性存在较大差异;在确定油田产量变化规律与含水上升规律的基础上,通过联解法可快速建立油田的含水率预测模型,不必再开展含水率预测模型的选择和论证工作。

符号注释

- $a, b, c, m, r, k, p, A, B, C, \alpha$ ——待定系数;
- B_{oi} ——地层原始原油体积系数, m^3/m^3 ;
- D_i ——初始递减率,小数;
- D_{fw} ——含水率增长率,小数;
- f_w ——含水率,小数;
- f_{w0} ——初始含水率,小数;
- h ——生产厚度, m ;
- K ——空气渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$;
- K_{ro} ——油相相对渗透率,无量纲;
- K_{rw} ——水相相对渗透率,无量纲;
- $K_{o(S_{wi})}$ ——束缚水下油相渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$;
- n ——开井数,口;
- N ——地质储量, 10^4 t 。
- N_p ——累计产油量, 10^4 t ;
- N_R ——原油可采储量, 10^4 t ;
- N_{p0} ——无水期累计产油量, 10^4 t ;
- t ——开发时间, a ;
- t_0 ——产量开始递减时间, a ;
- t_{w0} ——初始见水时间, a ;
- Q_o ——产油量, t/d ;

Q_i ——递减初期产油量, t/d;
 r_w ——井口半径, m;
 R ——采出程度, 小数;
 R_e ——泄油半径, m;
 S ——表皮系数, 小数;
 S_{wd} ——归一化含水饱和度, 小数;
 S_{we} ——出口端含水饱和度, 小数;
 S_{or} ——残余油饱和度, 小数;
 S_{wi} ——束缚水饱和度, 小数;
 $\bar{S}_w$ ——平均含水饱和度, 小数;
 Δp ——生产压差, MPa;
 ρ_o ——地层原油密度, g/cm³;
 μ_o ——地层原油粘度, mPa · s;
 μ_w ——地层水粘度, mPa · s。

参 考 文 献

- [1] 刘瑛, 高文君. 水驱特征曲线方法系统分类研究[J]. 新疆石油地质, 2007, 28(5): 618–621.
Liu Ying, Gao wenjun. A systematic classification of water flood-characteristic-curve methods[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(5): 618–621.
- [2] 高文君, 徐 君, 王作进, 等. 对油气田产量预测广义模型的完善与研究[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(5): 56–59.
Gao Wenjun, Xu Jun, Wang Zuojin, et al. Improving generalized model for forecasting oil/gas field production capacity[J]. Petroleum Exploration and Development, 1985, 12(4): 36–42.
- [3] 王群一, 毕永斌, 张 梅, 等. 南堡陆地油田水平井开发底水油藏油水运动规律[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(6): 91–94.
Wang Qunyi, Bi Yongbin, Zhang Mei, et al. Fluidity rule study on bottom water reservoir horizontal wells in onshore Nanpu oilfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(6): 91–94.
- [4] 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, 2012, 27(6): 713–718.
Yang Renfeng, Yang Li. Study on new forecasting model of water cut in water-flood reservoirs [J]. Chinese Journal of hydrodynamics, 2012, 27(6): 713–718.
- [5] 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, 13(4): 30–32.
Wang Wei, Liu Pengcheng. The predicting model Gompertz of water-cut rate in water-flood oil field[J]. Journal of Xinjiang Petroleum Institute, 2001, 13(4): 30–32.
- [6] 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, 23(3): 50–51.
Yang Xijun. Prediction of the variation of single-well water-cut using Usher model[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2008, 23(3): 50–51.
- [7] 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, 25(2): 191–192.
Zhang Juzeng, Zhang Liehui, Zhang Hongmei, et al. Usher model for water cut prediction in water-flood field[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2004, 25(2): 191–192.
- [8] Buckley S E, Leverett M C. Mechanism of fluid displacements in sands [J]. Transactions of the AIME, 1942, 146(1): 107–116.
- [9] 姜汉桥, 姚 军, 姜瑞忠. 油藏工程原理与方法[M]. 东营, 中国: 中国石油大学出版社, 2006: 200–234.
Jiang Hanqiao, Yao Jun, Jiang Ruizhong. Reservoir engineering theory and method [M]. Dongying, China: China University of Petroleum Press, 2005: 200–234.
- [10] 葛家理. 现代油藏渗流力学原理(上册)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 175–200.
Ge Jiali. The modern mechanics of fluids flow in oil reservoir (I) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 175–200.
- [11] 高文君, 徐 君. 常用水驱特征曲线理论研究[J]. 石油学报, 2007, 28(3): 89–92.
Gao Wenjun, Xu Jun. Theoretical study on common water-drive characteristic curves[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(3): 89–92.
- [12] 黄炳光, 刘蜀知. 实用油藏工程与动态分析方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 22–34.
Huang Bingguang, Liu Shuzhi. Practical petroleum reservoir engineering and dynamic analysis methods [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998: 22–34.
- [13] 蒋明, 宋富霞. Usher 模型的特征分析及应用[J]. 天然气工业, 1998, 18(4): 69–73.
Jiang Ming, Song Fuxia. Characteristic analysis and application of Usher model[J]. Natural Gas Industry, 1998, 18(4): 69–73.
- [14] 刘丁曾, 李伯虎. 大庆萨葡油层多层砂岩油藏[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 80–93.
Liu Dingzeng, Li Bohu. The multilayered sandstone reservoirs in Daqing oilfield [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 80–93.
- [15] 邹存友, 于立君. 中国水驱砂岩油田含水与采出程度的量化关系[J]. 石油学报, 2012, 33(2): 288–292.
Zou Cunyou, Yu Lili. A quantization relationship between water cut and degree of reserve recovery for waterflooding sandstone reservoirs in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 288–292.

(编辑 张玉银)