

低渗透砂岩油藏改进水驱曲线含水率预测方法

侯爽¹, 王威²

(1. 中国石油大庆油田第四采油厂 黑龙江 大庆 163511; 2. 中国石油大庆油田勘探开发研究院, 黑龙江 大庆 163712)

摘要:针对大庆外围低渗透油田中高含水期水驱曲线不出现明显直线段问题,统计343条相渗曲线,基于油水两相渗流规律,建立了改进的水驱曲线含水率预测方法。研究表明:对油水相对渗透率比值与含水饱和度在半对数坐标下进行二次式关系拟合,拟合精度可大幅提升。应用矿场实际资料对改进的水驱曲线的拟合精度进行检验,结果表明,其拟合精度高于其他四种水驱曲线,含水相对误差在2%以内。因此,可应用新建立的改进水驱曲线对外围低渗透油田含水进行预测,该方法对同类油田的指标预测具有重要指导意义。

关键词:改进水驱曲线;含水预测;低渗透;二次式

中图分类号:TE341 **文献标志码:**A

Water-cut prediction method of improved waterflooding characteristic curve in low-permeability sandstone reservoirs

HOU Shuang¹, WANG Wei²

(1.No.4 Oil Production Plants of Daqing Oilfield Company, Daqing 163511, China;

2.Exploration and Development Research Institute of Daqing Oilfield Company Ltd., Daqing 163712, China)

Abstract: Aiming at the problem that there is no obvious straight-line segment in the waterflooding characteristic curve of low-permeability oilfields in the periphery of Daqing in the middle and high water-cut period, 343 oil-water phase permeability curves were counted. Based on oil-water two phase seepage laws, an improved water-cut prediction method of water drive curve was established. The research results show that the fitting accuracy of the quadratic relationship between oil-water relative permeability ratio and water saturation in semi-logarithmic coordinates can be greatly improved. The actual data of oilfields was used to test the fitting accuracy of the improved water drive curve. The results showed that the accuracy of the improved water drive curve was higher than the other four waterflooding characteristic curves, and the relative error of water cut was less than 2%. Therefore, the newly established improved water drive curve can be used to predict water-cut in peripheral low-permeability oilfields of Daqing. This method has important guiding significance for the index prediction of similar oilfields.

Key words: improved waterflooding characteristic curve; water-cut forecast; low-permeability; quadratic form

含水率是反映注水开发油田含水上升规律的综合指标,它既反映油层及原油物性对油层中油水运动规律的制约,也反映开采过程中多种技术措施的效果。因此,对于进入中高含水期开发的低渗透油田,认识油田含水上升规律,研究影响含水上升地质因素,制定控制含水上升的措施,是油田开发所面临的一项非常重要的工作。利用矿场实际开发数据预测低渗透油田的含水率,是对水驱油田开发效果评价、动态调整,以及油田开发方案编制的重要依据。

从调研的文献看,含水率预测方法主要有水驱

特征曲线法^[1-3]、数学模型法^[4-5]和联解模型法^[6-7]。通常用水驱特征曲线法研究油田含水变化规律,但水驱特征曲线不能进行水驱开发的全过程预测,只有当油藏含水率达50%以上,且出现明显的直线段后,才可有效应用;常用的数学模型法有 Logistic 模

收稿日期:2020-07-31;改回日期:2020-08-24。

第一作者简介:侯爽(1989—),女,助理工程师,现从事于油藏工程方面的现场工作。E-mail:wangwei_cup@163.com。

基金项目:国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(编号:2011ZX05014)资助。

型^[8-10]、Gompertz模型^[11-12]和Usher模型^[13-14],联解模型法是水驱特征曲线和产量预测模型联解求含水率的方法,而联解模型法和数学模型法公式过于复杂且求解困难。为建立适应低渗透油田开发中后期的水驱特征曲线,本文在传统水驱特征曲线基础上,建立了一种随开发时间变化的新型含水率预测模型。

1 传统的水驱曲线局限性

根据国内外油田水驱曲线的适用条件,水驱特征曲线预测方法适用于中高含水期之后,在半对数坐标系下油水相对渗透率比值与含水饱和度出现

明显的直线关系的情况。但是根据对大庆长垣外围低渗透油田343条相渗曲线的统计分析(见表1),SP油层和FY油层分别有66.67%和53.16%的岩样油水相对渗透率比值与含水饱和度的直线关系并不明显。

通过对长垣外围低渗透油藏相渗曲线的研究发现,对油水相对渗透率的比值与含水饱和度进行二次式关系拟合后,拟合精度大幅度提升(见图1、图2和表1),整个长垣外围相关系数大于0.99的由直线关系的36.44%提高到二次式关系的60.93%,提高了24.49%,且相关系数小于0.99的经二次式关系拟合后,拟合精度均有了一定程度的提高。

表1 长垣外围油田不同油层油水相对渗透率比值与含水饱和度关系统计

油层	相渗曲线条数	相关系数>0.99的相渗曲线			相关系数<0.99的相渗曲线		
		条数	直线拟合比例/%	二项式拟合比例/%	条数	直线拟合比例/%	二项式拟合比例/%
SP	264	158	33.33	59.85	106	66.67	40.15
FY	79	51	46.84	64.56	28	53.16	35.44
合计	343	209	36.44	60.93	134	63.56	39.07

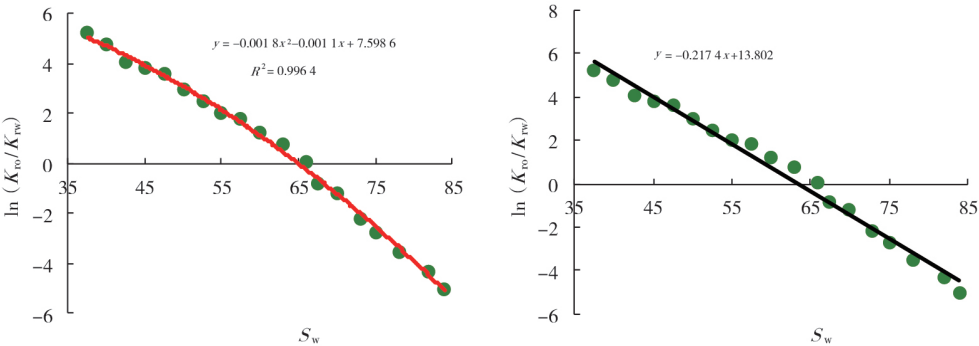


图1 SFT油田F145-2井3号岩样油水相对渗透率与含水饱和度关系

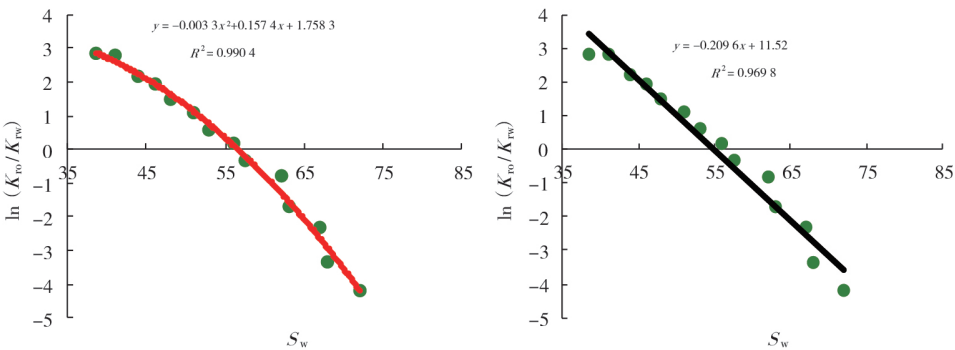


图2 CYG油田C49-2井10号岩样油水相对渗透率与含水饱和度关系

2 改进的水驱曲线

对于油水相对渗透率曲线,在中高含水阶段 $\ln(\frac{K_{ro}}{K_{rw}})$ 与 S_w 呈直线关系,其表达式为:

$$\ln(\frac{K_{ro}}{K_{rw}}) = a + bS_w \tag{1}$$

即
$$\ln(\frac{K_{ro}}{K_{rw}}) = e^{a+bS_w} \tag{2}$$

式中, K_{ro} 和 K_{rw} 分别为油和水相对渗透率; a 、 b

分别为拟合系数; S_w 为含水饱和度。

通过上述低渗透油田岩样相对渗透率数据统计,油水相对渗透率与含水饱和度呈二次式关系:

$$\frac{K_{ro}}{K_{rw}}=ae^{-(bS_w^2+cS_w)}$$

(3)

当不考虑重力和毛管力的影响,在水驱稳定渗流条件下,油水相对渗透率比值与油、水产量之间存在如下关系式:

$$\frac{K_{ro}}{K_{rw}}=\frac{Q_o\mu_oB_o\gamma_w}{Q_w\mu_wB_w\gamma_o}$$

(4)

式中, Q_o 和 Q_w 分别为地面原油产量和地面水产量,t/d; μ_o 和 μ_w 分别为地层原油和地层水黏度,mPa·s; B_o 和 B_w 分别为地层原油和地层水的体积系数,无因次; γ_o 和 γ_w 分别为地面脱气原油相对密度和地面水相对密度,无因次。

由式(3)和(4)可得出水油比WOR的表达式为:

$$WOR=\frac{Q_w}{Q_o}=\frac{\mu_oB_o\gamma_w}{a\mu_wB_w\gamma_o}e^{(bS_w^2+cS_w)}$$

(5)

根据 Buckley—leverett 线性驱替理论可以给出油井见水之前的驱替方程^[15],Welge 方程^[16]可以得到油井见水之后地层内的平均含水饱和度,以及3ΦPOC(艾富罗斯)的实验理论研究^[17]可以得出关于油水两相流动出口端含水率计算方法,最终求得出口端含水饱和度:

$$S_w=\frac{3}{2}\left(\frac{N_p}{N}S_{oi}+S_{wi}\right)-\frac{1}{2}(1-S_{or})$$

(6)

式中: N 为地质储量, 10^4 t; N_p 为累积产油量, 10^4 t; S_{oi} 、 S_{wi} 和 S_{or} 分别为原始含油饱和度、束缚水饱和度和残余油饱和度。

将式(5)取对数,并把式(4)代入即可得到水油比与累计产油量关系式:

$$\ln WOR=AN_p^2+BN_p+C$$

(7)

通过对式(7)求导并整理即可得到含水变化的微分方程:

$$\frac{df_w}{dt}=Q_o f_w(1-f_w)\left\{B^2-4A\left[C-\lg\left(\frac{f_w}{1-f_w}\right)\right]\right\}^{0.5}$$

(8)

此公式即为建立的适合长垣外围低渗透油藏的含水预测方法。

3 改进的水驱曲线适应性检验

从渗流机理来看,水驱曲线的渗流力学基础是油水相对渗透率比值与含水饱和度在半对数坐标下呈直线关系,但从数学的角度,油水相对渗透率比值与含水饱和度在半对数坐标下的二次式关系要比直线关系的拟合精度高,因此在油水两相渗流规律的基础上建立了改进的水驱曲线。应用矿场实际资料对改进的水驱曲线的拟合精度进行检验,结果(见表2)表明,改进的水驱曲线拟合精度高于其他四种水驱曲线,含水相对误差在2%以内。因此,可应用新建立的改进水驱曲线进行外围低渗透油田含水指标的预测。

表2 长垣外围油田不同油层典型区块不同方法预测精度对比

油藏分类	区块名称	油层类型	年份	实际含水/小数	改进		甲型		乙型		丙型		丁型	
					预测值/小数	相对误差/%	预测值/小数	相对误差/%	预测值/小数	相对误差/%	预测值/小数	相对误差/%	预测值/小数	相对误差/%
SP油层	QJ	一类	2018	0.84	0.83	1.19	0.82	2.38	0.82	2.38	0.82	2.38	0.82	2.38
			2019	0.88	0.86	2.27	0.83	5.68	0.84	4.55	0.83	5.68	0.83	5.68
			平均			1.73		4.03		3.46		4.03		4.03
	SFT	二类	2018	0.70	0.71	1.43	0.70	7.14	0.74	5.71	0.74	5.71	0.73	4.29
			2019	0.75	0.73	2.67	0.73	2.67	0.72	4.00	0.72	4.00	0.71	5.33
			平均			2.05		4.90		4.86		4.86		4.81
	GL	三类	2018	0.44	0.43	2.27	0.44	6.82	0.42	4.55	0.42	4.55	0.42	4.55
			2019	0.46	0.45	2.17	0.49	6.52	0.44	4.35	0.42	8.70	0.42	8.70
			平均			2.22		6.67		4.45		6.62		6.62
FY油层	CCL	一类	2018	0.47	0.46	2.13	0.47	4.26	0.46	2.13	0.46	2.13	0.46	2.13
			2019	0.46	0.47	2.17	0.48	4.35	0.47	2.17	0.47	2.17	0.47	2.17
			平均			2.15		4.30		2.15		2.15		2.15

续表2 长垣外围油田不同油层典型区块不同方法预测精度对比

油藏 分类	区块 名称	油层 类型	年份	实际含水 /小数	改进		甲型		乙型		丙型		丁型	
					预测值 /小数	相对 误差/%	预测值 /小数	相对 误差/%	预测值 /小数	相对 误差/%	预测值 /小数	相对 误差/%	预测值 /小数	相对 误差/%
FY 油层	CYGYB	二类	2018	0.47	0.46	2.13	0.45	4.26	0.44	6.38	0.45	4.26	0.44	6.38
			2019	0.50	0.49	2.00	0.49	2.00	0.46	8.00	0.46	8.00	0.46	8.00
			平均			2.06		3.13		7.19		6.13		7.19
	QJB	三类	2018	0.46	0.47	2.17	0.45	2.17	0.49	6.52	0.45	2.17	0.44	4.35
			2019	0.48	0.49	1.04	0.49	2.08	0.52	8.33	0.47	2.08	0.45	6.25
			平均			1.61		2.13		7.43		2.13		5.30

4 改进水驱曲线含水预测方法的应用

为了分析改进水驱曲线含水率预测方法的预测效果及适用范围,以大庆长垣外围SFT油田区块的生产开发数据为基础,应用改进含水率预测方法对该区块含水率进行预测,并与传统水驱曲线预测的含水率进行对比。SFT油田2000—2019年的相关开发数据见表3和图3。通过对比实际动态数据和预测数据可知,改进含水率预测方法平均相对误差为1.88%,预测值与实际值拟合较好,预测精度更高,整体预测效果优于传统的水驱曲线方法。

表3 SFT油田实际含水率与预测值对比

年份	实际 含水率/ %	传统水驱曲线		改进水驱曲线	
		预测值/ %	相对误差/ %	预测值/ %	相对误差/ %
2000	51.51	46.62	9.49	50.48	2.00
2001	53.08	49.09	7.52	54.67	3.00
2002	53.86	51.06	5.20	53.40	0.85
2003	56.08	52.99	5.51	53.83	4.01
2004	60.41	56.61	6.29	57.39	5.00
2005	66.30	60.66	8.51	67.13	1.25
2006	68.77	64.58	6.09	67.74	1.50
2007	72.20	66.06	8.50	73.50	1.80
2008	74.74	69.95	6.41	74.03	0.95
2009	79.69	75.55	5.20	79.01	0.85
2010	79.03	71.68	9.30	78.08	1.20
2011	81.85	75.96	7.20	80.74	1.35
2012	82.73	77.85	5.90	84.47	2.10
2013	82.96	79.39	4.30	80.89	2.50

续表3 SFT油田实际含水率与预测值对比

年份	实际 含水率/ %	传统水驱曲线		改进水驱曲线	
		预测值/ %	相对误差/ %	预测值/ %	相对误差/ %
2014	82.97	79.23	4.51	81.60	1.65
2015	82.97	77.58	6.50	81.80	1.41
2016	83.81	78.11	6.81	81.40	2.88
2017	84.03	77.73	7.50	85.29	1.50
2018	84.57	80.26	5.09	83.85	0.85
2019	85.01	80.85	4.91	85.85	0.98

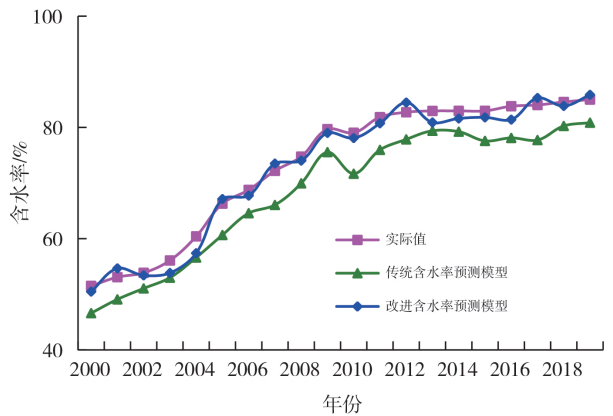


图3 SFT油田实际含水率与不同模型预测含水率对比

5 结论

(1)油水相对渗透率比值与含水饱和度在半对数坐标下的二次式关系比直线关系的拟合精度高,可准确表征长垣外围低渗透油田的渗流规律。

(2)在油水两相渗流规律的基础上建立了改进的水驱曲线含水率预测方法。应用矿场实际资料对改进的含水率预测方法的拟合精度进行了检验,相对误差均在2%以内。

(3)结合矿场实际动态数据,改进的含水率预

测方法的精度高于其他四种水驱曲线,可用改进的水驱曲线对外围低渗透油田的含水指标进行预测。

参考文献:

[1] 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.

[2] 陈元千.水驱曲线关系式的推导[J].石油学报,1985,6(2):69-78.

[3] 俞启泰.使用水驱特征曲线应重视的几个问题[J].新疆石油地质,2000,21(1):58-61.

[4] 田鸿照,彭彩珍,王雪荔.一种预测水驱油田含水率的新模型[J].石油地质与工程,2011,25(1):71-72,75.

[5] 马春生,万宠文,崔秀敏,等.预测水驱油田含水率的一种新方法[J].大庆石油地质与开发,2006,25(3):43-44.

[6] 刘鹏程.预测水驱油田含水率的一种新模型[J].新疆石油学院学报,2000,12(2):29-32.

[7] 赵庆飞,陈元千.一种实用的联解法[J].断块油气田,2000,7(6):27-29.

[8] 刘鹏程,牟珍宝,刘玉涛.逻辑斯蒂旋回模型在预测油田含水率时的修正[J].断块油气田,1999,6(6):40-42.

[9] 刘斌.Logistic 旋回预测含水率[J].石油勘探与开发,

1992,19(1):68-70.

[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,2001,13(4):30-32.

[11] 朱正元,陈伟侯,陈丰.Logistic 曲线与 Gompertz 曲线的比较研究[J].数学的实践与认识,2003,33(10),66-71.

[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,2004,25(2):191-192.

[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.

[14] 翟云芳.渗流力学[M].北京:石油工业出版社,1999:84-85.

[15] 陈元千.油气藏工程实用方法[M].北京:石油工业出版社,1999:132-135.


[16] BUCKLY S E, LEVERERETT M C. Mechanism of fluid displacements in sands[J]. Trans., AIME, 1942, 146(1): 107-116.

[17] WELGE H J. A simplified method for computing oil recovery by gas or water drive[J]. J Pet Technol, 1952, 4(4):91-98.

(编辑 谢 葵)

撤 稿 声 明

原发表于2020年3月第13卷第1期的《数据挖掘技术在录井解释评价中的应用》的文章,由于部分数据来源取自第一作者原工作单位与中海油天津分公司、中法渤海地质服务有限公司的横向合作项目,文中的方法为第一作者在承担合作项目期间的研究工作并在离职后开展深入研究的成果,但原文章发表前未取得原工作单位及项目合作单位的同意,且未将原项目单位署名,本文作者申请将该论文撤销,包括知网等公众平台和数据库内公开发表的其他形式或版本的该文,特此声明。



2021.2.27