一种基于液油比的含水率预测方法研究与应用

叶　锋

中国石油辽河油田分公司勘探开发研究院，辽宁　盘锦　124010

摘　要：注水开发油藏特高含水期产液量上升快，传统方法预测的含水率与实际偏差较大。对油藏不同含水期采油、采液指数变化规律的研究表明：液油比是影响含水率变化的敏感因素，随着累积产液量增长，含水上升速度减缓。从丙型水驱特征曲线基本原理出发，得出液油比与产液量的二项式关系；结合含水率的定义与产液量之间的关系，推导出基于液油比的含水率预测模型。通过油田实际生产动态数据验证，新建立的含水率预测模型预测精度较高，具有推广应用价值。

关键词：液油比；含水率；水驱曲线；特高含水期

DOI：10.3969/j.issn.1006-5539.2014.04.013

0　前言

目前，国内已开发水驱油藏中除低渗透油藏外，大多已进入“双高”阶段，以喇萨杏为代表的中高渗透砂岩油藏综合含水已超过 90%，以任丘为代表的裂缝性碳酸盐岩油藏综合含水、可采储量采出程度都达 90% 左右，主力油藏均已进入开发后期[1-2]。随着越来越多的油藏进入特高含水期，准确预测含水率变化对制定油藏调整政策、改善开发效果、提升整体经济效益显得越来越重要[3]。

含水率预测方法目前主要分为数值模拟法、水驱特征曲线法、模型预测法等[4-9]。但对特高含水期油藏，许多含水率预测方法适应性差，例如甲型和乙型水驱特征曲线在含水率超过 90% 后开始上翘，使预测精度大大降低[10]。本文从油藏渗流规律出发，分析了无因次采油、采液指数变化规律，并且利用丙型水驱特征曲线，建立了基于液油比的含水率预测理论公式。

1　采液/采油指数变化规律分析

采液/采油指数是衡量油井生产能力的重要指标，也是油田进行产能预测和抽油机选型的重要依据之一。某一含水率下的无因次采液指数是实际采液指数与含水为零时的采液指数之比，是评价不同含水条件下油井采液能力的指标，它只与储层类型和油藏流体性质有关。无因次采液指数与相对渗透率的关系为[11]：

$$f_w=\frac{1}{1+\frac{\mu_w k_{ro}(S_w)}{\mu_o k_{rw}(S_w)}} \tag{1}$$

$$J_{OD}=\frac{k_{ro}(S_w)}{k_{ro}(S_{wi})} \tag{2}$$

$$J_{OL}=\frac{J_{OD}}{1-f_w}=\frac{k_{ro}(S_w)}{k_{ro}(S_{wi})}+\frac{k_{rw}(S_w)\mu_o}{k_{rw}(S_{wi})\mu_w} \tag{3}$$

式中：f_w 为综合含水率，%；μ_o，μ_w 分别为地层原油黏度和地层水黏度，mPa·s；J_{OD} 为无因次采油指数；J_{OL} 为无因次采液指数；$k_{ro}(S_w)$为油相渗透率；$k_{ro}(S_{wi})$为初始含水饱和度的油相渗透率；$k_{rw}(S_w)$为水相渗透率；$k_{rw}(S_{wi})$为初始含水饱和度的水相渗透率。

实验及矿场分析表明，油藏进入特高含水阶段后储层的孔隙度、渗透率、润湿性等均发生了显著变化，而这些也是影响相对渗透率的主要因素[12-14]。

以辽河油区欢喜岭油田锦 16 块中高渗透油藏为例，利用计算公式以及相对渗透率曲线的实验数据，求出无因次采液/采油指数，并绘制曲线（见图 1）。

由图 1 可知，锦 16 块随着含水率的上升，无因次采

收稿日期：2014-04-09

基金项目：中国石油天然气股份有限公司重大科技项目“辽河油田原油千万吨持续稳产关键技术研究”（2012 E-3004）

作者简介：叶　锋(1982-)，男，湖北黄冈人，工程师，学士，主要从事油田开发研究工作。

液指数逐渐升高，无因次采油指数逐渐降低，呈现 3 个变化阶段：在中含水期（含水率 20%~60%）以前，采液/采油指数变化幅度不大；高含水期（含水率 60%~90%），采油指数大幅度下降，采液指数开始快速上升；特高含水期（含水率大于 90%），无因次采液指数出现上升拐点后急剧上升，无因次采油指数下降幅度进一步变大。

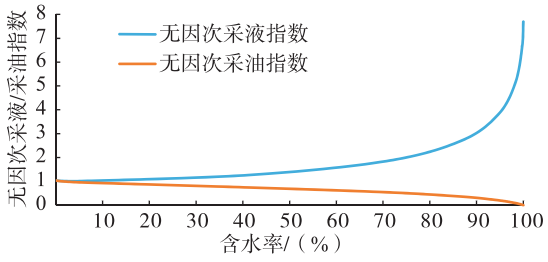

图 1　含水率和无因次采液/采油指数的关系曲线

对比各含水阶段采液/采油指数与含水率的关系曲线，随着油田所处含水阶段不同，无因次采液/采油指数变化幅度均呈上升趋势，尤其是进入特高含水阶段以后，无因次采液指数变化幅度明显高于无因次采油指数，即油田进入特高含水期后，对含水率变化敏感的液油比这项指标更能反映这一时期的指标变化趋势。因次，建立液油比与产液量关系模型预测含水率变化具有重要意义。

2　液油比预测模型的理论推导

基于油田常用的西帕切夫水驱特征曲线，通过累积产油量和累积产液量等指标对时间求导数，得到年产油量、年产液量等指标，再根据液油比的定义推导出相关数学模型。

西帕切夫水驱特征曲线形式为：

$$\frac{L_p}{N_p}=a+bL_p \tag{4}$$

式中：L_p 为累积产液量，10^4 t；N_p 为累积产油量，10^4 t；a，b 分别为丙型水驱特征曲线的截距与斜率。

将式(4)变形得：

$$N_p=\frac{L_p}{a+bL_p} \tag{5}$$

将式(5)等号两边对时间 t 求导数得：

$$Q_O=\frac{aQ_L}{(a+bL_p)^2} \tag{6}$$

式中：Q_O 为年产油量，10^4 t；Q_L 为年产液量，10^4 t。

由式(6)可知：

$$LOR=\frac{Q_L}{Q_O}=\frac{(a+bL_p)^2}{a}=\frac{b^2}{a}L_p^2+2aL_p+a \tag{7}$$

令 $A=\frac{b^2}{a}$，$B=2a$，$C=a$ 则有：

$$LOR=AL_p^2+BL_p+C \tag{8}$$

由式(8)可知，液油比与累积产液量呈二项式关系。根据含水率与液油比关系可知：

$$f_w=\frac{Q_L-Q_O}{Q_L}=1-\frac{1}{LOR} \tag{9}$$

将式(8)代入式(9)得含水率与累积产液量的关系式：

$$f_w=1-\frac{1}{AL_p^2+BL_p+C} \tag{10}$$

式(10)即为本次建立的基于液油比的含水率预测模型，是一个单调递减的函数，随着累积产液量的增加，含水上升速度逐渐减缓，符合进入稳定水驱油藏中后期含水率变化规律。

3　实例应用

锦 16 块构造上位于辽河盆地西部凹陷西斜坡欢喜岭油田中部，开发目的层为沙河街组兴隆台油层，是一个层状砂岩边底水稀油油藏。断块于 1979 年 4 月开始注水开发，1992 年含水率达到 83%，1999 年进入特高含水开发阶段。

利用丙型水驱曲线含水率预测方法[15] 及本文提出的含水率预测方法对比，选取 1992~2004 年稳定水驱阶段数据点进行拟合，再用 2005~2010 年数据进行验证。

根据式(4)和丙型水驱曲线（见图 2），得到锦 16 块丙型水驱曲线特征公式为：

$$\frac{L_p}{N_p}=1.399\,518+0.000\,405\,L_p \tag{11}$$

由陈元千等人[15]得到含水率预测公式为：

$$f_w=1-\frac{(1-0.000\,405\,N_p)}{1.399\,518} \tag{12}$$

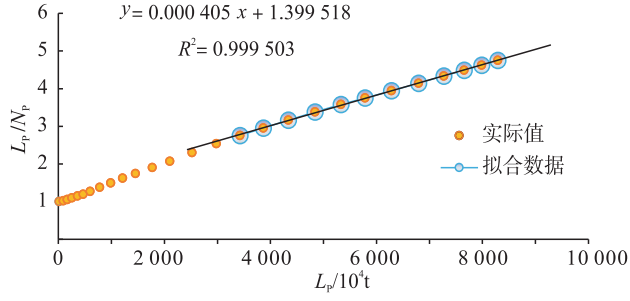

图 2　锦 16 块丙型水驱特征曲线图

根据式(8)绘制液油比与累积产液量关系曲线（见图 3），得到锦 16 块液油比与累积产液量二项关系式为：

$$LOR=0.000\,000\,44\,L_p^2+0.003\,248\,64\,L_p+13.023\,671\,07 \tag{13}$$

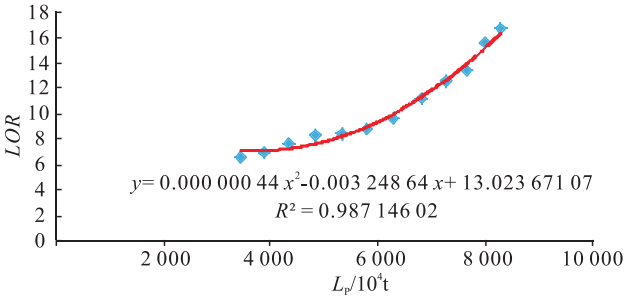

图 3 锦 16 块液油比与累积产液量关系曲线图

则由式(10)得到含水率预测公式为：

$$f_w=1-\frac{1}{0.000\,000\,44\,L_p^2+0.003\,248\,64\,L_p+13.023\,671\,07} \quad (14)$$

根据锦 16 块 2005~2010 年实际累积产油和累积产液量，利用式(12)、(14)两种模型，分别预测含水率变化情况(见表 1)。

表 1 两种方法预测结果与实际值对比

年度	实际值			液油比预测模型		丙型水驱特征曲线	
	累积产油 /10^{4}t	累积产液 /10^{4}t	含水率 /(%)	预测含水率 /(%)	相对误差 /(%)	预测含水率 /(%)	相对误差 /(%)
2005	1 761	8 597	94.8	94.3	0.5	91.2	3.9
2006	1 776	8 893	94.7	94.7	0.0	91.6	3.3
2007	1 793	9 216	94.9	95.1	0.2	92.0	3.1
2008	1 813	9 570	95.2	95.5	0.3	92.4	3.0
2009	1 830	9 955	95.6	95.9	0.3	92.8	2.9
2010	1 847	10 326	95.5	96.2	0.8	93.2	2.4

由表 1 可见，本文建立的基于液油比的含水率预测方法得到的预测结果相对误差在 0.8%以内，而基于丙型水驱特征曲线的传统含水率预测模型预测结果相对误差在 2.4%~3.9%，与实际值偏差较大，说明本文建立的新模型在特高含水期含水率预测上具有更强适应性。

4 结论

a) 高/特高含水期油藏，由于累积产油/产液量等参数已经很大，含水率对累积量的细微变化不敏感，传统预测公式预测的含水率与实际偏差较大。

b) 新建立的基于液油比含水率预测模型更加符合油藏生产实际，具有较大的推广意义。

参考文献：

[1] 王凤兰，石成方，田晓东，等. 大庆油田“十一五”期间油田开发主要技术对策研究 [J]. 大庆石油地质与开发，2007，26 (2)：62-65.
Wang Fenglan, Shi Chengfang, Tian Xiaodong,et al. Study on Main Technical Strategy of Oilfield Development During the Eleventh Five-Year Plan in Daqing Oilfield[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2007, 26 (2):62-65.

[2] 王秋语. 国外高含水砂岩油田提高水驱采收率技术进展[J]. 岩性油气藏，2012，24(3)：123-128.
Wang Qiuyu. Technical Progress for Improving Waterflood Recovery Efficiency of Foreign High Water Cut Sandstone Oilfield[J]. Lithologic Reservoirs, 2012,24 (3) :123-128.

[3] 周光敏. 应用含水率与累积产油量关系评价油田可采储量 [J]. 价值工程，2012，(9)：39.
Zhou Guangmin. To Evaluate Oilfield Recoverable Reserves by the Relationships between Water Ratio and Cumulative Oil Production [J]. Value Engineering, 2012, (9): 39.

[4] 王作乾，黄淑女. 累积存水率和累积水驱指数与含水率的理论关系[J]. 新疆石油地质，2011，32(1)：57-59.
Wang Zuoqian, Huang Shunv. Theoretical Relationship between Cumulative Water Storage Rate,Cumulative Water Drive Index and Water Cut [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2011, 32(1): 57-59.

[5] 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.
Tian Hongzhao,Peng Caizhen,Wang Xueli. A New Model of Predicting Water Cut of the Water Flooding Oilfield [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2011, 25(1): 71-72.

[6] 计秉玉. 油田开发指标预测方法综述 [J]. 大庆石油地质与开发，1999，18(2)：19-22.
Ji Bingyu. Forecasting Methods of Oil Field Development Indexes [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1999,18 (2) :19-22.

[7] 张诗笛，杨 宇，吕新东，等. 含水率上升规律预测新方法 [J]. 石油地质与工程，2009，23(4)：54-55.
Zhang Shidi,Yang Yu,Lv Xindong, et al. A New Method to Predict Water Cut Ascension [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2009,23 (4): 54-55.

[8] 郭粉转，唐 海，吕栋梁，等. 油藏合理地层压力保持水平与

含水率关系[J]. 石油钻采工艺,2010,32(2): 51-53.
Guo Fenzhuan, Tang Hai, Lv Dongliang, et al. Correlation between Rational Formation Pressure and Water Cut [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2010, 32(2): 51-53.

[9] 李祖友,朱义东,唐　坚,等. 广义 S 增长曲线预测油田含水率[J]. 新疆石油地质,2006,27(1): 62-63.
Li Zuyou, Zhu Yidong, Tang Jian, et al. Application of Generalized S-Shape Growth Curve to Forecast Water-Cut of Oilfield [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 27(1): 62-63.

[10] 陈元千, 陶自强. 高含水期水驱曲线的推导及上翘问题的分析[J].断块油气田,1997,4(3):19-24.
Chen Yuanqian, Tao Ziqiang. Derivation of Water Drive Curve at High Water-Cut Stage and Its Analysis of Upwarding Problem [J]. Block Oil and Gas Fields, 1997,4(3):19-24.

[11] 何更生. 油层物理[M]. 北京:石油工业出版社,1993.159-163.
He Gengsheng. Reservoir Physics [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993.159-163.

[12] 张学文, 尹家宏. 低渗透砂岩油藏油水相对渗透率曲线特征[J]. 特种油气藏,1999,6(2):27-31.
Zhang Xuewen, Yin Jiahong. Features of Oil Water Relative Permeability Curves for Low Permeability Sandstone Reservoir [J].Special Oil and Gas Reservoir, 1999,6(2):27-31.

[13] 王曙光,赵国忠,余碧君. 大庆油田油水相对渗透率统计规律及其应用[J]. 石油学报,2005,26(3):79-85.
Wang Shuguang, Zhao Guozhong, Yu Bijun. Statistical Regularity of Oil-Water Relative Permeability in Daqing Oil Field [J]. Acta Petrolei Sinica, 2005,26(3):79-85.

[14] 林　江,李志芬,张　琪. 不同含水条件下采液指数的预测方法研究[J]. 石油钻探技术,2003,31(4):43-45.
Lin Jiang, Li Zhifen, Zhang Qi. Study on Liquid Production Index Prediction for Different Water Cut [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2003,31 (4):43-45.

[15] 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):33-35.
Chen Yuanqian, Wang Huizhi. An Extended Derivation of Type C Water Drive Curve and Its Application in Chengbei Oilfield [J].China Offshore Oil and Gas, 2004,16 (6):33-35.

第 21 届世界石油大会在莫斯科开幕

2014 年 6 月 15 日第 21 届世界石油大会在莫斯科开幕。中国石油集团公司董事长周吉平率中国石油代表团参加会议。

被誉为全球油气行业“奥林匹克”的世界石油大会（WPC）每 3 年举办一次，汇集全球油气领域的“重量级选手”，共聚一堂讨论油气领域的重大问题。正如 1933 年第 1 届伦敦世界石油大会通过了“检测石油产品的国际化标准”决议，1959 年第 5 届纽约世界石油大会期间产生了欧佩克组织，本届大会围绕“负责任地提供能源、强力支持发展中的世界”主题，设定了丰富的议题，涵盖全球能源领域面临的挑战。

本届大会组委会主席、俄罗斯副总理阿尔卡季·德沃尔科维奇出席开幕式并宣读了俄罗斯总统普京的开幕致辞：“石油工业创造了无数就业机会，创造了科研的需求。我坚信，未来石油工业的发展与资源需求的潜力有关，更与深水开发等大型油气项目的实现有关。这些艰巨的任务需要大家共同努力。这次大会将有益于油气行业发展和经济安全，有益于所有行业参与者建立互利共赢的合作关系，有益于促成油气生产者与消费者之间的建设性对话。”

据大会组委会介绍，超过 30 个国家的能源部长及 400 多名企业的领导者在会上对业内重要问题进行了讨论，包括老油田开发的新契机、未来油气科技发展方向、极地资源开发面临的挑战、常规与非常规油气开发的新边界、“大数据”对石油企业决策的影响等。

世界石油理事会主席雷纳托·贝尔塔尼在开幕式上呼吁：“150 多年来，油气行业为人类社会发展提供了可靠充足的能源，现在油气行业发展面临着新的挑战和机遇，为了实现效益发展，心须大力发展前沿科技，必须大量投入并且合理配置资本，必须坚持绿色发展安全发展。只有在公正、稳定、合理的基础上开展国际合作，我们的行业才能实现可持续发展。”

本届大会还举办了青年论坛，为年轻的工程师和大学生提供交流机会；并举办展览会，为全球油气企业及相关企业提供展示平台。据统计，在来自 80 多个国家的 4780 名注册参会代表中，来自中国的代表人数名列第二位，仅在东道主俄罗斯之后。

（王　路　摘自中国石油网）