

## 基于不确定性研究的油田开发后期指标预测方法

方文超<sup>1</sup>,姜汉桥<sup>1</sup>,李俊键<sup>1</sup>,郇绍献<sup>2</sup>,肖武<sup>2</sup>,张超<sup>2</sup>

(1.中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室,北京 102249;

2.中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院,山东 东营 257015)

**摘要:**针对油田开发后期开发指标不确定性、波动程度大导致常规预测方法适应性差,且无法提供预测结果概率分布特征的问题,建立了基于不确定性研究的开发后期指标预测方法。该方法通过历史生产数据确定指标影响因素的概率分布,并采用随机算法生成服从概率分布的大量样本,最后通过所建立的指标与影响因素之间的定量关系预测指标的概率分布特征。用该方法对H采油厂注采比进行预测,其2013年前6个月注采比的预测误差平均为0.53%,而多项式回归模型及支持向量机模型的误差分别为3.33%和1.46%;2013年1月的注采比概率分布范围为0.77~0.93,最大概率的注采比为0.834 3。不确定性开发指标预测方法精确度较高,能为开发决策提供可靠依据,并大大降低决策风险。

**关键词:**开发后期 指标预测 不确定性研究 概率分布 开发决策 支持向量机

中图分类号:TE319

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2015)05-0094-05

## A prediction method for oilfield development indices during later period based on uncertainty research

Fang Wenchao<sup>1</sup>, Jiang Hanqiao<sup>1</sup>, Li Junjian<sup>1</sup>, Bing Shaoxian<sup>2</sup>, Xiao Wu<sup>2</sup>, Zhang Chao<sup>2</sup>

(1.MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(Beijing),

Beijing City, 102249, China; 2.Research Institute of Exploration and Development, Shengli Oilfield Company,

SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China)

**Abstract:** Conventional methods have poor prediction accuracy and can not provide probability distribution characteristics of predicted results for great fluctuation and uncertainty of development indices in later period of oilfield development. A novel prediction method for development indices based on uncertainty research is put forward. This method firstly determines the probability distributions of the influencing factors of index through analyzing the historical production data. Then, a large number of samples for each factor can be produced by random algorithm based on the obtained probability distribution. Finally, the probability distribution of target index is predicted through establishing the quantitative relation between the index and its influencing factors. The injection-production ratio was predicted for H oil production plant by using this novel method. The prediction result for the first six months in 2013 shows that this method has higher prediction precision (the average error is 0.53%) compared to polynomial regression method (the average error is 3.33%) and support vector machine model (the average error is 1.46%). The range of possible injection-production ratio in January 2013 is from 0.77 to 0.93, and the value of 0.834 3 is the most likely to occur. The novel method for development indices prediction based on uncertainty research provides more reliable basis for oil development decision-making, thus greatly lowers decision-making risk.

**Key words:** later period of development; index prediction; uncertainty research; probability distribution; development decision-making; support vector machine

收稿日期:2015-07-25。

作者简介:方文超(1989—),男,湖北黄冈人,在读博士研究生,从事油气藏开发方面的研究。联系电话:18810459454, E-mail: wenchao daxue2007@163.com。

基金项目:国家“973”计划“中国南海相页岩气高效开发的基础研究”(2013CB228000)。

油田开发指标预测在油田开发过程中有着极重要的地位,油田的开发方案设计、开发状况评价及预警、开发措施调整等项目均以开发指标变化特征为依据<sup>[1-4]</sup>。油田开发指标预测研究从最开始缺乏理论依据的少数几种经验统计方法发展到如今借鉴渗流力学、计算数学、控制理论、功能模拟及计算机手段等的科学预测方法<sup>[5-10]</sup>,虽然预测精度得以提高,但随着油田开发的不断深入,受地下油、气、水及注入工作液等多种流体的复杂流动关系、储层物性差异化加剧以及开发调整措施等影响,很多开发指标的变化并不像油田开发早、中期那样具有较为明显的规律,而是随机性较强,确定性预测方法的预测精度已经无法满足要求,而且不能为决策者提供概率性的决策依据。因此,需要建立一种基于不确定性研究的油田开发后期指标预测方法,其不仅能准确地预测油田开发指标,还能提供随机变化的概率特征,为决策者提出科学合理的决策方案提供可靠依据。

### 1 开发指标不确定性预测方法

储量规模大且油水井数多的油田,其开发后期的开发指标随机性强,但这些开发指标分布一般具有统计学概率特征,且很多开发指标之间相关性较强<sup>[11-13]</sup>。为此建立了基于统计概率特征分析及随机变量抽样的开发指标不确定性预测方法,其流程如图1所示。

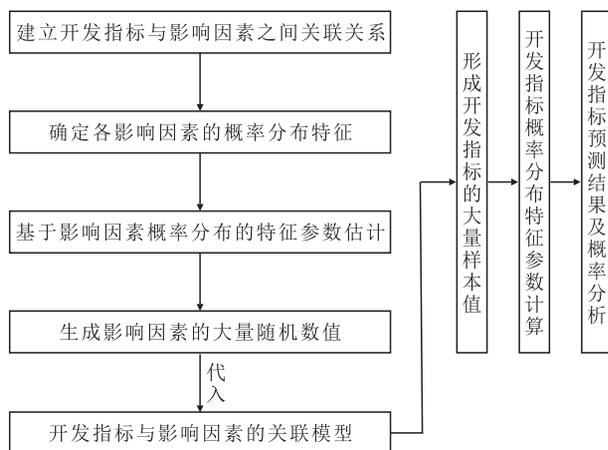


图1 油田开发指标不确定性预测方法的流程

Fig.1 Flowchart of prediction method based on uncertainty research for oilfield development index

#### 1.1 建立开发指标与影响因素之间的定量关联关系

建立开发指标与影响因素之间定量关联关系的方法有多元线性回归、神经网络和灰色关联方法

等<sup>[14-16]</sup>。H采油厂注采比预测所采用的方法为多元线性回归,其中影响注采比的主要因素有产液量、累积产液量、含水率、压力水平和累积注采比<sup>[17]</sup>,注采比的多元线性回归函数表达式为

$$I = a_1 Q_L + a_2 f_w + a_3 Q_p + a_4 L_p + a_5 R_1 + a_6 (Q_p R_1) + a_7 \quad (1)$$

式中:  $I$  为注采比;  $a_1, a_2, \dots, a_7$  为回归系数;  $Q_L$  为产液量,  $10^8$  t/月;  $f_w$  为含水率;  $Q_p$  为自喷单井日产水平(表征地层的压力水平), t/d;  $L_p$  为累积产液量,  $10^8$  t/月;  $R_1$  为累积注采比。

选取H采油厂2009年1月至2012年12月的实际矿场数据进行多元线性回归函数拟合,其中影响因素数据需进行归一化预处理。拟合得到的多元线性回归模型表达式为

$$I = -0.044 1 Q_L + 0.035 4 f_w + 0.012 2 Q_p + 1.058 2 L_p - 0.666 8 R_1 - 0.186 7 Q_p R_1 + 0.502 7 \quad (2)$$

拟合效果(图2)表明,所建立的多元线性回归模型计算得到的注采比与实际生产注采比符合率达到97.5%,一方面验证了所筛选的指标影响因素的合理性,另一方面也验证了回归模型的准确性。

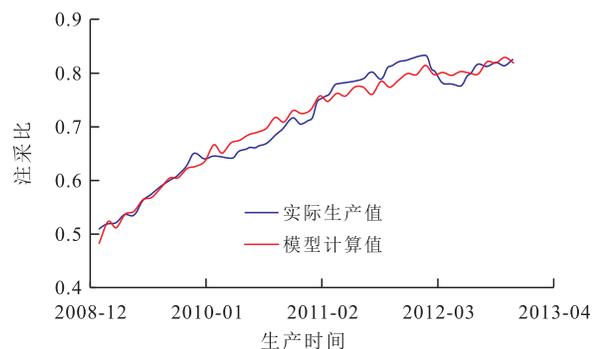


图2 多元线性回归模型计算注采比与实际注采比之间的拟合效果

Fig.2 Matching degree between injection-production ratios calculated by multiple linear regression model and the production values

#### 1.2 确定各影响因素的概率分布特征及概率特征参数估计

假设注采比的影响因素均为随机变量,且服从均值为 $\mu$ ,方差为 $\sigma^2$ 的正态分布。对于同一种影响因素,其在不同时刻为不同的随机变量。H采油厂注采比的预测时间为2013年1月至6月共6个月,采用样本值代替均值。以产液量为例,将2011年1月至2012年12月共24个月的产液量作为历史数据预测2013年1月至6月的产液量,以此作为6个月均值的估算值,预测方法采用基于支持向量机的时间序列预测。

采用样本方差代替方差 $\sigma^2$ 的估算值,2012年第

$t$ 月的方差估算值基于2002年第 $t$ 月至2011年第 $t$ 月的10个样本值,其计算公式为

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\mu_i - \bar{\mu})^2 \quad (3)$$

式中: $\sigma^2$ 为方差; $n$ 为样本量; $i$ 为样本编号; $\mu_i$ 为第 $i$ 个样本值; $\bar{\mu}$ 为样本均值。

采用该方法计算H采油厂2012年1月至2012年12月产液量的方差估算值,其计算结果依次为

0.029 4, 0.015 9, 0.040 1, 0.046 8, 0.030 6, 0.025 8, 0.020 2, 0.020 2, 0.022 5, 0.028 8, 0.026 8, 0.022 2。

利用支持向量机的时间序列预测方法,可以根据2012年某影响因素在各月的方差及平均值作为支持向量机训练样本建立该影响因素的支持向量机预测模型,从而预测得到2013年1月至2013年6月该影响因素在各月的方差估算值及均值(表1)。以2013年1月为例,预测得到的产液量在该月份的

表1 2013年1月至6月开发指标的均值和方差估算值

Table1 Estimated average values and variances of development indices from January to June in 2013

| 月份 | 产液量     |            | 含水率     |            | 单井日产液量  |            | 累积产液量   |            | 累积注采比   |            |
|----|---------|------------|---------|------------|---------|------------|---------|------------|---------|------------|
|    | $\mu$   | $\sigma^2$ |
| 1  | 0.907 2 | 0.023 0    | 0.802 5 | 0.026 3    | 0.095 7 | 0.053 0    | 0.902 1 | 0.085 1    | 0.879 1 | 0.085 5    |
| 2  | 0.972 0 | 0.023 3    | 0.749 0 | 0.024 1    | 0.105 2 | 0.060 5    | 0.922 9 | 0.085 3    | 0.903 4 | 0.086 8    |
| 3  | 0.9479  | 0.023 4    | 0.798 6 | 0.022 1    | 0.164 4 | 0.064 7    | 0.943 9 | 0.085 3    | 0.928 5 | 0.088 1    |
| 4  | 0.956 3 | 0.023 5    | 0.784 7 | 0.020 4    | 0.120 1 | 0.067 0    | 0.965 2 | 0.085 3    | 0.954 6 | 0.089 3    |
| 5  | 0.978 5 | 0.023 5    | 0.806 4 | 0.018 8    | 0.133 0 | 0.068 3    | 0.986 9 | 0.085 4    | 0.981 8 | 0.090 4    |
| 6  | 0.986 9 | 0.023 5    | 0.805 1 | 0.017 3    | 0.181 0 | 0.060 0    | 0.990 1 | 0.085 4    | 0.986 2 | 0.091 5    |

概率分布服从均值为0.907 2,方差为0.023 0的正态分布,而含水率服从均值为0.802 5,方差为0.026 3的正态分布。

### 1.3 开发指标预测

对于某一时刻开发指标的预测,根据已获得的该时刻影响因素概率分布特征,采用蒙特卡罗随机变量抽样方法进行多次抽样<sup>[18-19]</sup>,每一次获得影响因素样本均可利用式(2)计算得到其开发指标样本。 $n$ 次抽样后可获得开发指标的多个样本,进而可分析得到开发指标的概率分布特征及特征参数,利用特征参数可对开发指标进行概率预测。

由于采用样本值代替均值的方法进行正态分布的均值估算,因此开发指标的预测值即可认为是获得的多个开发指标样本的均值。

## 2 开发指标预测结果及分析

基于不确定性预测方法对H采油厂2013年前6个月的注采比进行了预测,并与矿场实际生产注采比对比,以评价该方法的预测精度。同时,基于矿场注采比的2005年至2012年的历史数据对这6个月分别采用多项式回归和支持向量机2种方法进行注采比预测,比较其预测精度的差异性。通过图3和图4可以看出,支持向量机模型的拟合效果好于多项式回归模型的拟合效果,表明支持向量机能较好地概括复杂非线性情况。

分别采用多项式回归模型、支持向量机模型和

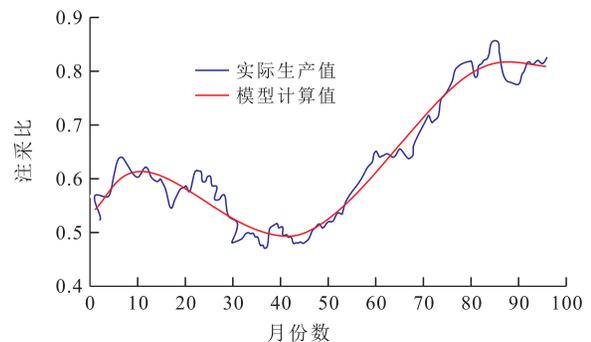


图3 多项式回归模型计算注采比与实际注采比的对比  
Fig.3 Matching degree between injection-production ratios calculated by polynomial regression model and the production values

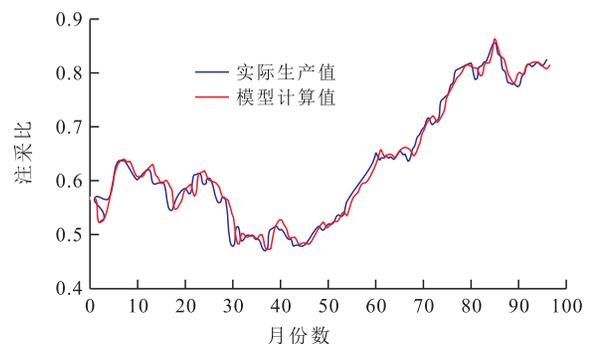


图4 支持向量机模型计算注采比与实际注采比的对比  
Fig.4 Matching degree between injection-production ratios calculated by support vector machine and the production values

概率模型对H采油厂2013年1月至6月的注采比进行预测。结果(表2)表明,支持向量机模型的外推预测能力强于多项式回归模型;从精度上来看,多项式回归模型、支持向量机模型和概率模型的预测

表2 不同模型对注采比进行预测的结果  
Table2 Predicted results of injection-production ratio using different models

| 生产时间    | 实际注采比   | 多项式回归模型 | 支持向量机模型 | 概率模型    |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| 2013-01 | 0.832 0 | 0.808 4 | 0.835 3 | 0.834 3 |
| 2013-02 | 0.831 9 | 0.808 6 | 0.829 7 | 0.842 0 |
| 2013-03 | 0.841 1 | 0.809 2 | 0.833 5 | 0.844 0 |
| 2013-04 | 0.845 5 | 0.810 9 | 0.826 5 | 0.845 3 |
| 2013-05 | 0.850 6 | 0.813 9 | 0.819 5 | 0.839 9 |
| 2013-06 | 0.836 1 | 0.818 3 | 0.825 1 | 0.825 7 |

误差分别为3.33%,1.46%和0.53%,表明支持向量机模型已具备较高的预测精度,概率模型的预测精度更高。支持向量机模型的局限性来源于单一的时间序列预测,对油田开发后期开发指标因受多种因素影响而具有较大不确定性的情况无法进行有效外推;概率模型基于对开发指标的多种影响因素进行综合概率研究,考虑了开发指标的多种不确定性,因而具有更好的预测效果。此外,概率模型还能对预测结果的概率特征进行准确客观地评估。

利用概率模型预测并绘制2013年1月注采比的频率分布及累积概率分布特征(图5)。从图5可以看出,2013年1月的注采比基本符合正态分布特征,概率分布范围为0.77~0.93。最大概率的注采比为0.834 3。从图5中决策者可对预测值的可信程度做出判断,并根据可能出现的情况提前准备相应的开发调整方案,以此降低决策风险。

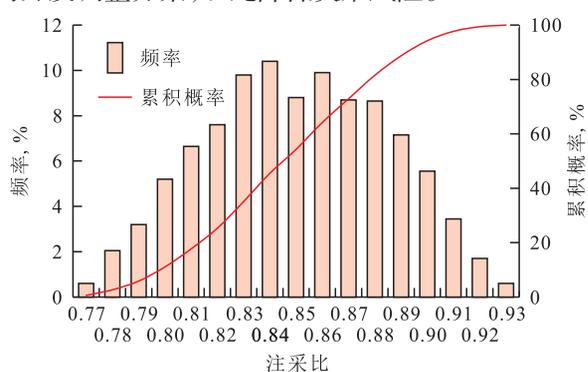


图5 概率模型预测的H采油厂2013年1月注采比频率及累积概率分布特征

Fig.5 Frequency and cumulative probability distribution of injection-production ratio in January 2013 predicted by the probability model for H oil production plant

### 3 结束语

油田开发后期的开发指标波动具有较大不确定性,常规的基于渗流力学理论及时间序列的确定性指标预测方法适应性差。基于开发指标及相关

影响因素的不确定性研究建立了开发指标的概率预测方法,能克服常规预测方法的不足,具有更好的预测效果,对H采油厂注采比的预测误差仅为0.53%。概率预测方法还能提供预测结果的概率分布特征,为开发决策及开发调整方案的合理制定提供可靠依据。需要指出的是,概率模型建立过程中,有时无法用简单的线性模型来准确描述某些开发指标与影响因素间的定量关系,建议采用神经网络、支持向量机回归等方法来模拟开发指标与影响因素间的非线性关系。此外,准确给出开发指标影响因素的概率分布特征对于最终预测结果的准确性具有重要意义,若影响因素不符合正态分布特征,需要对矿场数据进行分布特征拟合确定最佳的分布类型,并给出相应特征参数的估计方法。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 韩兴刚,徐文,刘海锋.“正交试验法”在油气田开发方案优化设计中的应用[J].天然气工业,2005,25(4):1-3.  
Han Xinggang,Xu Wen,Liu Haifeng.Application of “cross experimental method” in optimized design of development program for oil/gas fields[J].Natural Gas Industry,2005,25(4):1-3.
- [3] 曲德斌,武若霞.油田开发规划科学预测的理论和实践[J].石油学报,2002,23(2):38-42.  
Qu Debin,Wu Ruoxia.Optimum study and simulator of oilfield development planning[J].Acta Petrolei Sinica,2002,23(2):38-42.
- [4] 冯其红,王相,王波,等.非均质水驱油藏开发指标预测方法[J].油气地质与采收率,2014,21(1):36-39.  
Feng Qihong,Wang Xiang,Wang Bo,et al.A new method for prediction of heterogeneous reservoir development index by water-flooding[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2014,21(1):36-39.
- [5] 刘义坤,赵静,隋新光.水驱砂岩油藏水平井产能及开发指标预测[J].大庆石油学院学报,2005,29(1):33-36.  
Liu Yikun,Zhao Jing,Sui Xinguang.Production and development index forecast of horizontal wells in water drive sandstones reservoirs[J].Journal of Daqing Petroleum Institute,2005,29(1):33-36.
- [6] Joshi S D.Horizontal well technology [M].Tulsa;Penn Well Publishing Company,1991.
- [7] 徐耀东,丁良成,杜玉山,等.Gompertz模型在油藏溶解气开发指标预测中的应用[J].新疆石油地质,2006,27(5):593-594.  
Xu Yaodong,Ding Liangcheng,Du Yushan,et al.Application of Gompertz model to prediction of solution gas development index in oilfield[J].Xinjiang Petroleum Geology,2006,27(5):593-594.

- [8] 邴绍献,王华,李建丽,等.改进结构的小波神经网络在油田开发指标预测中的应用[J].油气地质与采收率,2009,16(3):92-94.  
Bing Shaoxian, Wang Hua, Li Jianli, et al. Oilfield development index prediction with structure improved wavelet neural network[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2009, 16(3): 92-94.
- [9] 常军,郎兆新,闫熙照.一种油田开发指标预测的新方法——中心差分建模理论及应用[J].石油学报,1996,17(1):87-94.  
Chang Jun, Lang Zhaoxin, Yan Xizhao. A new method to predict development objects of an oil field—theory and application of establishing central differential model [J]. Acta Petrolei Sinica, 1996, 17(1): 87-94.
- [10] 姚志刚.改进的Logistic模型在原油产量预测中的应用[J].油气地质与采收率,2010,17(3):93-94,98.  
Yao Zhigang. Application of improved logistic model in forecast of oil production [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2010, 17(3): 93-94, 98.
- [11] 关恒.基于液油比的特高含水期水驱开发指标预测方法[J].岩性油气藏,2013,25(5):100-103.  
Guan Heng. Forecasting method of development index based on liquid/oil ratio in extra-high water cut stage [J]. Lithologic Reservoirs, 2013, 25(5): 100-103.
- [12] 王美石,陈祥光.多元线性回归方法在油田产量预测中的应用[J].油气田地面工程,2004,23(11):25-26.  
Wang Meishi, Chen Xiangguang. Application of multiple linear regression method in prediction of oilfield production [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2004, 23(11): 25-26.
- [13] 王滨,赵伟,计小宇,等.基于传递函数模型的油田产油量预测方法[J].油气地质与采收率,2014,21(5):77-80.  
Wang Bin, Zhao Wei, Ji Xiaoyu, et al. Oilfield output prediction method based on transfer function model [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(5): 77-80.
- [14] 李留仁,焦李成.基于人工神经网络的油田产量多因素非线性时变预测[J].西安石油学院学报:自然科学版,2002,17(4):42-44.  
Li Liuren, Jiao Licheng. Prediction of the oilfield output under the effects of nonlinear factors by artificial neural network [J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute: Natural Science Edition, 2002, 17(4): 42-44.
- [15] 张广杰,刘明新,武若霞.神经网络在油田动态预测方面的应用[J].石油学报,1997,18(4):70-75.  
Zhang Guangjie, Liu Mingxin, Wu Ruoxia. The application of an artificial neural networks to predict performance parameters of reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 1997, 18(4): 70-75.
- [16] 谭成仟,宋子齐,吴少波.灰色关联分析在辽河小洼油田储层油气产能评价中的应用[J].测井技术,2001,25(2):119-122.  
Tan Chengqian, Song Ziqi, Wu Shaobo. Application of grey correlation analysis in predicting reservoir production capacity in Liaohe Xiaowa oilfield [J]. Well Logging Technology, 2001, 25(2): 119-122.
- [17] 袁迎中,张烈辉,何磊,等.注采比多元回归分析及合理注采比的确定[J].石油天然气学报,2008,30(1):299-302.  
Yuan Yingzhong, Zhang Liehui, He Lei, et al. Multiple regression analysis and determination of reasonable injection-production ratio [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2008, 30(1): 299-302.
- [18] 徐钟济.蒙特卡罗方法[M].上海:上海科技出版社,1985.  
Xu Zhongji. Monte Carlo method [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1985.
- [19] 罗文生,孙立春,郑洪印,等.蒙特卡罗法在海上某油田储量评价中的应用[J].岩性油气藏,2014,26(1):105-109.  
Luo Wensheng, Sun Lichun, Zheng Hongyin, et al. Application of Monte-Carlo method to OOIP estimation of an offshore oilfield [J]. Lithologic Reservoirs, 2014, 26(1): 105-109.

编辑 王星

(上接第93页)

- [17] 赵人萱,冯星铮.泡沫驱经验模型的发展及应用[J].重庆科技学院学报:自然科学版,2013,15(5):82-85.  
Zhao Renxuan, Feng Xingzheng. Development and application of foam-flooding empirical model [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Sciences Edition, 2013, 15(5): 82-85.
- [18] 李元生,李相方,藤赛男,等.低渗透气藏产水气井两相产能方程研究[J].特种油气藏,2014,21(4):97-100.  
Li Yuansheng, Li Xiangfang, Teng Sainan, et al. Research on two-phase productivity equation for water-producing gas well in low-permeability gas reservoir [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(4): 97-100.
- [19] Sohrabi M, Danesh A, Jamiolahmady M. Visualisation of residual oil recovery by near-miscible gas and SWAG injection using high-pressure micromodels [J]. Transport in Porous Media, 2008, 74(2): 239-257.

编辑 常迎梅