

# 水驱油田高含水期产量运行预警的模糊综合评判模型

肖武<sup>1</sup>, 姜汉桥<sup>2</sup>, 方文超<sup>2</sup>, 李俊健<sup>2</sup>

1. 中国石化胜利油田分公司地质科学研究院, 东营 257015
2. 中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室, 北京 102249

**摘要** 水驱油田高含水期稳产难度大, 容易发生产量的异常波动, 给油田生产带来损失。为提高油田的抗风险能力, 建立了产量运行预警的两级模糊综合评判模型, 设计的模型具有开发综合预警及产量构成预警的双重功能。从产量构成、能量补充及管理因素3个方面筛选了10种影响产量的显著性指标并分析了各自的影响特征, 利用矿场数据计算得到指标集的权重向量, 指标隶属度矩阵的计算采用“(0,1)隶属度方法”。以胜利油田A、B采油厂的历史生产情况对预警模型进行了验证, 结果表明, 模型能对产量的大幅异常下降提前准确预警, 并从概率角度提供风险参考; 基于产量构成的预警结果可分析造成产量异常下降的原因, 从而进一步为决策调整指明方向。

**关键词** 水驱油田; 模糊综合评判; 高含水期

**中图分类号** TE328

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.02.008

## Fuzzy comprehensive evaluation model for early warning of production running in water flooding oilfield during high water-cut period

XIAO Wu<sup>1</sup>, JIANG Hanqiao<sup>2</sup>, FANG Wenchao<sup>2</sup>, LI Junjian<sup>2</sup>

1. Institute of Geosciences, Shengli Oilfield Company, Sinopec, Dongying 257015, China
2. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

**Abstract** Maintaining stable production is difficult for a water flooding oilfield during the high water-cut period, which usually brings about losses to the oilfield company due to the abnormal fluctuation of production. In order to provide a basis for the adjustment strategy, making oilfields more risk-resistant, a 2-level fuzzy comprehensive evaluation model for early warning of production running is established. The model includes dual functions: The early warnings in production composition and production integration. Ten significant indexes influencing the production are chosen related with the production composition, the reservoir energy complement and the management; Meanwhile the influences of these indexes are analyzed. Index weight vector is calculated by using the production data, and the membership matrix is maintained by using the (0,1) membership degree method. The established model is validated through historical production data of A and B oil extraction factories in Shengli Oilfield. It is shown that the early warning for situations of production's abnormal decrease is accurate. The model also provides a risk reference from probabilistic prospective. Besides, the early warning in production composition can help analyze the production's abnormal decrease to determine the direction of the production adjustment.

**Keywords** water flooding oilfield; fuzzy comprehensive evaluation; high water-cut period

收稿日期: 2014-07-08; 修回日期: 2014-10-16

基金项目: 中国石化胜利油田分公司重点科技攻关项目(YKY1305); 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2013CB228000)

作者简介: 肖武, 高级工程师, 研究方向为油田开发战略及开发规划, 电子邮箱: xwxiaowu@sohu.com

引用格式: 肖武, 姜汉桥, 方文超, 等. 水驱油田高含水期产量运行预警的模糊综合评判模型[J]. 科技导报, 2015, 33(2): 59-63.

胜利油区目前整体处于高含水采油阶段,胜坨、东辛、临盘等主力老油田含水均突破90%,进入特高含水期,油田稳产难度大。胜坨、东辛等油田历史上还曾出现过产量大幅度下降的恶劣情况,部分油田降幅达到20万t以上,给油田产量合理运行带来了巨大挑战。

针对高含水油田的预警机制已成为指导开发的主要依据,现有的开发预警一般基于对目前生产形势的分析,存在分析滞后问题,不能从根本上化解开发过程中出现的主要矛盾<sup>[1-3]</sup>;或者预警模型所选取的指标简单,不能从实质上揭示高含水后期产量异常变化的规律<sup>[4,5]</sup>。此外,一些开发预警仅对表征开发形势的指标进行简单的预测分析<sup>[6,7]</sup>,而高含水后期产量受技术及多种复杂情况的影响,随机性较大,确定性预测方法往往不能对指标变化的异常点做出准确预测,因而预警效果差。为了缩短发现生产状况异常的时滞性,变“问题之后分析”为“分析避免问题”,实现超前预警,便于提前部署下一步的稳产调整措施,需要在全面综合各方面因素的前提下,建立一套能及时报警的开发综合预警模型,保障油田生产平稳运行,实现经济效益的最大化。

### 1 模糊综合评判预警理论及模型构建

设针对某一具体目标的影响因素集合为  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ , 评判集  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ , 则从  $U$  到  $V$  的一个模糊映射向量  $R(u_i) = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im})$  称为一个单因素评判向量,为集合  $V$  上的模糊子集,其中  $r_{ij} (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$  表示因素  $r_i$  被评判为  $v_j$  的隶属程度。将所有因素的评判向量组合起来得到模糊综合评判的影响因素隶属度矩阵  $R$ 。设表征影响因素对研究目标影响程度的权重向量为  $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ , 将  $A$  与  $R$  进行耦合(式(1))可得到一个单级模糊综合评判的隶属度向量  $B = (b_1, b_2, \dots, b_m)$ , 基于最大隶属度原则即可对研究目标进行评判。

$$B = AR \quad (1)$$

油田产量运行的模糊综合评判由于考虑的因素较多,且因素间还有不同的类别和层次,因此预警模型采用两级评判。多级模糊综合评判模型是在单级评判的基础上构建的<sup>[8-10]</sup>,如式(2)所示,其实质是利用单层的隶属度向量  $B_i = A_i R_i$ , 建立第二层次的隶属度矩阵  $R$ , 然后与该层次的权重向量耦合后得到最终综合评判的隶属度向量  $B_U$ 。

$$B_U = AR = A \begin{bmatrix} A_1 R_1 \\ A_2 R_2 \\ \dots \\ A_n R_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

#### 1.1 预警指标选取及评判集的确定

油田产量运行预警的研究对象为年产油量,因此指标的选取主要针对影响产量的显著性因素。高含水期油田的产量构成包括老井产量、新井产量以及措施井产量3部分,产量构成是影响产量的主要因素之一。此外,地层能量补充对老井递减影响大,也是考虑的主要因素(能量型因素)。产量构成因素及能量型因素构成了高含水油田产量递减的2个决定

性因素。通过矿场数据统计及相关性分析等手段,确立了10项指标作为综合评判的影响因素集。设第  $n$  年为预警的目标年,则10项指标及其对第  $n$  年产量的影响规律如下。

1) 第  $n-2$  年新井产量比例  $u_1$ 。由于时率的影响,新井在投产当年产量较低,第2年达到高峰,第3年开始快速递减,图1为胜利油田某采油厂的不同年份投产新井的产量跟踪数据,新井在第3年的递减率平均达到25.2%,而当年老井的递减率为18.1%,从而可以认定第  $n-2$  年投产的新井必然会加大第  $n$  年油田产量的总递减。

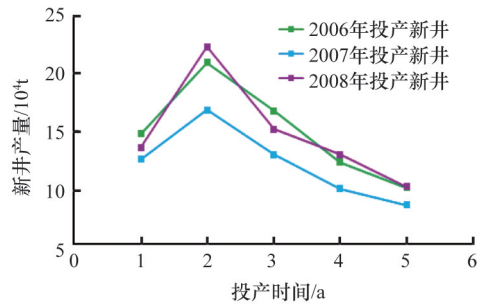


图1 胜利油田某采油厂新井产量变化规律

Fig. 1 New wells' oil production in an oil factory in Shengli Oilfield

2) 第  $n-1$  年新井产量比例  $u_2$ 。从新井产量的变化规律可以看出,第  $n-1$  年投产的新井在第  $n$  年的递减率为负值,必然会减缓第  $n$  年的油田总递减。

3) 第  $n-1$  年的措施增油量比例  $u_3$ , 第  $n-1$  年强化性措施增油量比例  $u_4$ 。与新井的产量变化规律不同,措施井在措施后的第2年即开始大幅度递减。特别是强化性措施(下电泵、大泵等),其在第2年的递减幅度更大。如胜利油田某采油厂2009年投产的普通措施井在2010年的递减率为26.8%,2009年投产的强化性措施井在2010年的递减率达到35.9%,而2010年的老井递减率仅为21.7%。

4) 第  $n-1$  年措施有效率  $u_5$ 。对胜利油田典型采油厂历史上出现产量大幅度下降的前两年的措施有效率分析发现,异常下降的前1年往往伴随着措施有效率的显著降低,因此将其作为产量预警的指标。胜利油田规定,措施有效率是指年增油量大于1万t的措施井数占总措施井数的比例。

5) 第  $n-1$  年注采比  $u_6$ , 第  $n-1$  年水井开井数  $u_7$ , 第  $n-1$  年动液面  $u_8$ 。这3个指标为表征地层能量的指标。通过相关性分析发现,产量异常下降前1年,注采比、水井开井数会降低,从而造成第  $n$  年的地层能量亏空,产量下降。最直接的体现就是前一年的动液面(井口到井筒液面间的距离)上升,地层能量下降。

6) 含水上升率  $u_9$ 。产量异常下降前期往往伴随采油厂综合含水的快速上升,因此将含水上升率作为预警指标。

7) 输差  $u_{10}$ 。输差是一个管理性指标,表征的是实际生产产量与采油厂计划产量之间的差距,一般在年底检查计划

完成情况时会上升,其值越大表示采油厂欠产越严重,产量大幅度递减可能性也越大。在实际预警时,将第 $n-1$ 年11月和12月的输差作为预警指标。

预警系统的评判集一般由颜色表征,油田开发预警模型的评判集 $V=\{\text{红色,黄色,绿色}\}$ ,其中,红色表示产量发生异常下降的可能性很大,黄色表示产量发生异常下降的可能性一般,绿色表示产量不会发生异常下降。

### 1.2 预警指标权重计算

预警指标的权重表征了产量变化随指标变化敏感程度的差异。基于矿场生产数据采用公式(3)对预警指标的权重进行计算

$$K_n = \frac{|D_n - D_{n-1}|}{D_{n-1}} \bigg/ \frac{|I_{n-1} - I_{n-2}|}{I_{n-1}} \quad (3)$$

式中, $D_n$ 表示第 $n$ 年的产量自然递减率, $I_n$ 表示第 $n$ 年的指标值。若求第 $n-2$ 年指标的 $K$ 值,则式中 $I$ 的下标均减1。

在实际计算中,共有12个采油单元的生产数据,因此某一指标的 $K$ 值由所有采油单元的该指标 $K$ 取平均得到,对10个指标的最终 $K$ 值进行归一化即可得到影响因素的权重向量 $A=(0.1147,0.1294,0.1040,0.1052,0.1034,0.0839,0.0685,0.0907,0.1050,0.0952)$ 。图2给出了产量对指标变化敏感程度的直观表示,斜率的绝对值越大则越敏感,斜率为正表示指标值的增大会加剧产量的递减。

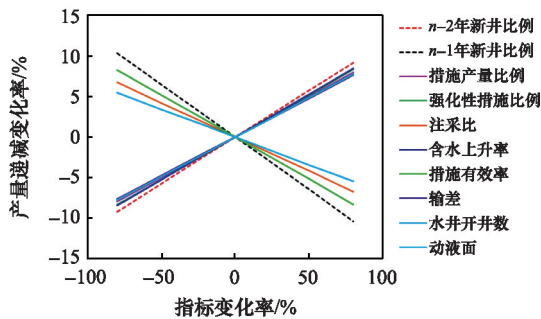


图2 指标权重相对大小示意

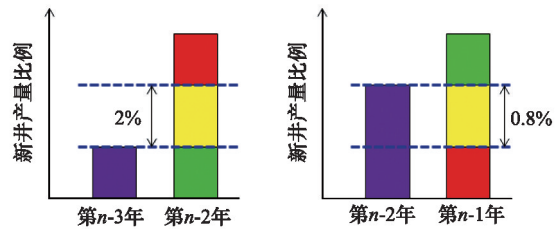
Fig. 2 Schematic diagram of relative sizes of index weights

### 1.3 预警指标标准及隶属度矩阵的求取

基于数理统计方法及递减分析方法等手段,胜利油田给出了预警指标的标准: $u_1=2.0\%$ , $u_2=0.8\%$ , $u_3=2.3\%$ , $u_4=3.0\%$ , $u_5=1.5\%$ , $u_6=0.02$ , $u_7=10$ 口, $u_8=25$  m, $u_9$ 第 $n$ 年前连续上升3个节点, $u_{10}$ 第 $n-1$ 年11、12月输差均比1~10月均值大0.01<sup>[11]</sup>。指标标准值均是指标变化的幅度值,如对于第 $n-2$ 年新井产量比例而言,标准显示第 $n-2$ 年新井产量比例上升(相对于第 $n-1$ 年)2.0%,则会使第 $n$ 年产量发生大幅度下降(下降幅度为1万t);对于第 $n-1$ 年新井产量比例,标准则认为第 $n-1$ 年比例下降0.8%会造成第 $n$ 年产量大幅度下降。

预警指标隶属度矩阵的求取需要借助预警标准,求取方法采用“(0,1)隶属度”方法<sup>[12,13]</sup>,以第 $n-2$ 年新井产量比例以

及第 $n-1$ 年新井产量比例2个指标为例,如图3所示。若第 $n-2$ 年新井产量比例增加幅度大于2%,则其隶属于红色的隶属度为1,隶属于黄色、绿色的隶属度均为0;若增加幅度在0~2%,则其隶属于黄色的隶属度为1,隶属于红色、绿色的隶属度为0;若指标值下降,则认为指标处于有益的变化态势,绿色隶属度为1,其余为0。第 $n-1$ 年新井产量比例指标则刚好相反,隶属度求取方法如图3(b)所示。



(a) 第 $n-2$ 年新井产量比例 (b) 第 $n-1$ 年新井产量比例

图3 (0,1)隶属度求取方法示意

Fig. 3 Schematic diagram of calculation method of membership value

对于含水上率及输差2个非纯数量关系的指标,认为含水上率连续上升3个节点为红色,最后一个节点上升为黄色,其余组合形式为绿色;认为11月、12月输差均比1~10月输差平均值大0.01属于红色,11月、12月输差均比1~10月输差平均值低或者其中一个月比平均值低、另一个月比平均值仅高出0~0.01为绿色,其余组合形式为黄色。

## 2 模糊综合评判预警模型的功能设计及建立

图4给出了产量运行预警模糊综合评判模型的两层递阶结构,将10个预警指标分成了产量构成指标、注水及含水状况指标(即能量指标)两类,将输差指标归入后一类。这样的设计一方面突出了指标间的层次构成,另一方面可对油田的产量构成合理性进行预警,因为高含水期油田的产量构成是影响产量的主导因素之一,也是稳产调整的主要着力点,对

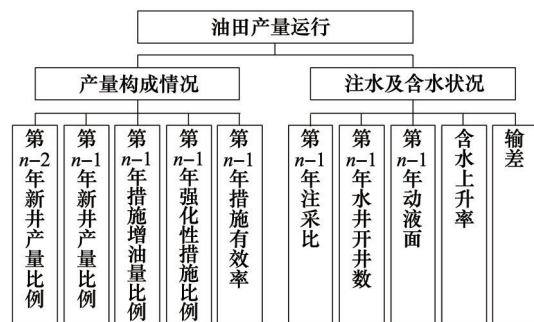


图4 油田产量运行模糊综合评判预警模型的层次结构

Fig. 4 Hierarchical structure of fuzzy comprehensive evaluation early warning model for oilfield output

产量构成合理性进行预警可为下一步的调整提供有力指导。

预警指标被赋予层次结构后,各层指标权重需要根据10个指标权重的相对大小进行归一化计算确定,产量构成情况的5个指标权重向量为  $w_1=(0.2060,0.2324,0.1868,0.1890,0.1857)$ ;注水及含水状况的5个指标权重向量为  $w_2=(0.1893,0.1545,0.2046,0.2369,0.2148)$ ;油田产量运行的2个指标权重向量为  $w=(0.5567,0.4433)$ 。

模糊综合评判理论中,将指标权重与指标隶属度矩阵进行耦合的方式主要有取小取大运算、相乘取大运算、取大有界和运算、相乘相加运算4种<sup>[14]</sup>,其中相乘相加运算对权重和隶属度信息的综合程度最高,开发运行预警模型采用相乘相加运算耦合方式。

耦合得到的向量  $B$  为评判集的隶属度向量,可根据最大隶属度原则<sup>[15]</sup>得到综合评判的结果,即若某一评语  $v_i$  的隶属

度  $b_i$  满足

$$b_i = \max\{b_1, b_2, \dots, b_m\} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

则预警结果为  $v_i$ 。此外,隶属度向量还具有概率特征,隶属度的大小表明了出现各种警级(红、黄、绿)的概率大小,可以为决策层的决策力度调整提供依据。

### 3 模糊综合评判预警模型的功能验证及稳产调整分析

胜利油田A采油厂2004年及B采油厂2010年均出现了产量的大幅度下降,前者下降幅度超过10万t,而后者超过20万t。利用所建立的预警模型对这两年进行预警,预警结果如表1所示。此外,A采油厂2012年在当年调整增油量(新井+措施)不发生大幅度变化的前提下递减率较2011年明显下降,产量比2011年少递减2.96万t,开发形势变好,表1也给出了该年份的预警结果。

表1 胜利油田A(2004、2012)、B(2010)采油厂的预警结果

Table 1 Early warning results of A (2004, 2012) and B (2010) factories in Shengli Oilfield

预警结果	综合预警结果			产量构成预警结果		
	红色	黄色	绿色	红色	黄色	绿色
A采油厂2004年	0.7296	0.1735	0.0969	0.8671	0.1329	0
B采油厂2010年	0.3445	0.3185	0.3370	0.1329	0.4141	0.4529
A采油厂2012年	0.0951	0.4281	0.4768	0	0.6653	0.3347

由表1可以看出,对产量发生异常下降的年份,预警模型均能给出红色预警,提示下一年需要进行产量调整的必要性程度很大;此外,给出的警级概率提示了调整力度的大小,例如A采油厂2004年红色警级概率很大,说明2004年A采油厂必须部署较大力度的调整措施才能扭转产量大幅递减。而B采油厂2010年则相对较好,尽管也需要加大调整力度来扭转递减,但投入相对较少一些。A采油厂2012年尽管预警绿色,但对产量构成的调整不可忽略,绿色是因为能量补充的态势好,在一定程度上弥补了构成的不理性。

为了分析产量构成对递减的影响,预警模型也给出了产量构成的预警结果,如表1所示。可以看出,A采油厂2004年的红色预警主要是由于产量构成的极不理性造成的,能量型因素影响较少,因而进一步为2004年调整指明了方向,即调整着力点为新井和措施,注水及含水状况可暂不考虑。B采油厂2010年则情况相反,红色预警并不是由产量构成造成的,2010年的稳产调整应关注能量的补充(注水及水井开井数)。图5展示了两种情况下的产量构成情况,即预警年之前2~3年的新井产量比例、措施增油量比例和强化性措施增油

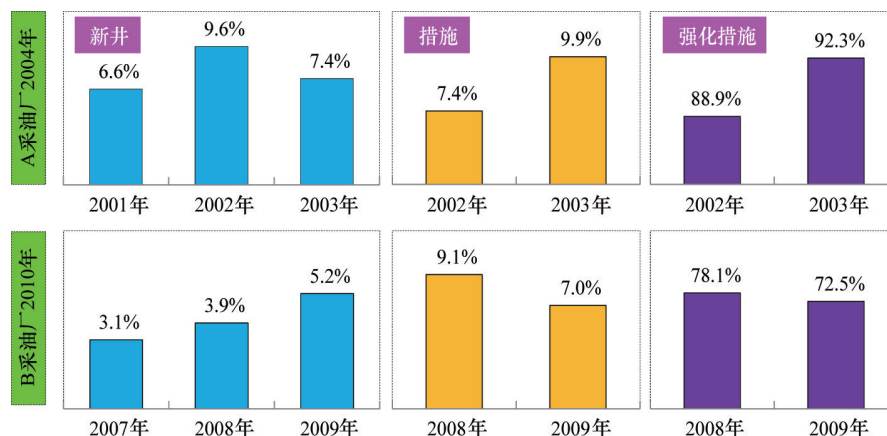


图5 预警年之前的产量构成实际变化情况

Fig. 5 Production composition before target year of early warning

量比例的变化情况。由图5可以看出产量构成预警结果的合理性,如A采油厂2002年(第 $n-2$ 年)新井产量比例大幅上升、2003年(第 $n-1$ 年)比例大幅下降且措施增油量,特别是强化性措施增油量大幅上升,根据第1.1节中的指标分析可知,这都是产量运行恶化的构成态势,对2004年的稳产极为不利。

#### 4 结论

1) 水驱高含水油田产量稳定运行的可控性差,容易发生产量异常下降。影响产量的主要因素分为产量构成及能量补充2个方面,具体包含新井产量比例、措施增油量比例、强化性措施增油量比例、措施有效率、注采比、水井开井数、动液面、含水上升率等指标。

2) 利用所筛选的10项指标建立了两级模糊综合评判预警模型,模型包含开发综合预警及产量构成预警两种功能。利用该模型能提前发现油田产量的异常波动,并指导稳产调整措施的有效部署。

3) 依据胜利油田A、B采油厂的实际生产情况对模型进行验证发现,模型能对产量异常下降进行准确预警,并找出导致异常下降的原因,为问题的发现及确定解决问题的着力点提供了有力参考,从而可以有效避免油田开发风险,提高开发效果。

4) 对稳产调整决策的指导不能仅限于发现问题并定性提供调整的方向,提供下一年应具体实施的措施量(新井+措施)大小及合理的新井、措施组成比例是保证油田稳产的更进一步要求。

#### 参考文献(References)

- [1] 赵霞. 高含水单元开发预警机制探讨[J]. 胜利油田职工大学学报, 2008, 22(1): 148-150.  
Zhao Xia. Discussion of early warning system for development of high water cut units[J]. Journal of Shengli Oilfield Staff University, 2008, 22(1): 148-150.
- [2] 常彦荣, 李允, 彭炎, 等. 油田生产产量监控体系及预警系统[J]. 西南石油学院学报, 2006, 28(3): 34-37.  
Chang Yanrong, Li Yun, Peng Yan, et al. The research about applications of production control and early warning system on production of oil fields[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2006, 28(3): 34-37.
- [3] 余一帆. 油田产量监控预测预警及优化配产系统[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.  
Yu Yifan. Early warning and prediction for oil field production and system for production allocation optimization[J]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009.
- [4] 李春生, 魏军, 王博, 等. 油田生产动态预警模型研究[J]. 计算机技术与发展, 2013, 23(4): 245-248.  
Li Chunsheng, Wei Jun, Wang Bo, et al. Research on dynamic early warning model of oilfield production[J]. Computer Technology and Development, 2013, 23(4): 245-248.
- [5] 马立平, 任宝生, 赵明, 等. 油田水驱开发效果评价与预警模型研究[J]. 西南科技大学学报, 2010, 25(2): 51-55.  
Ma Liping, Ren Baosheng, Zhao Ming, et al. Research on oil field water flooding development effect evaluation and its pre-warning model[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2010, 25(2): 51-55.
- [6] 李智超, 刘志斌, 赵正文. 油田产量监控预测预警系统[J]. 石油工业计算机应用, 2009, 16(4): 30-32.  
Li Zhichao, Liu Zhibin, Zhao Zhengwen. The forecast and early warning system for oil field output supervisory[J]. Computer Applications of Petroleum, 2009, 16(4): 30-32.
- [7] 刘庆发, 庄淑兰. 油田开发动态形势分析——趋势分类法研究[J]. 西安石油学院学报: 自然科学版, 2001, 16(4): 13-14.  
Liu Qingfa, Zhuang Shulan. A study on the trend analysis of oil field production behavior[J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute: Natural Science Edition, 2001, 16(4): 13-14.
- [8] Liu M F, Cui J L. The early warning management of logistics service risk based on fuzzy comprehensive evaluation[C]. IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services, 2007, Nanjing, China, November 18-20, 2007.
- [9] Mu C, Huang H, Tian S. Intrusion detection alert verification based on multi-level fuzzy comprehensive evaluation[C]. International Conference, CIS 2005, Xi'an, China, December 15-19, 2005.
- [10] 杨纶标, 高英仪. 模糊数学原理及应用[M]. 3版. 广州: 华南理工大学出版社, 2001: 86-91.  
Yang Lunbiao, Gao Yingyi. Theory and application of fuzzy mathematics[M]. 3rd ed. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2001: 86-91.
- [11] 张孝天. 油田开发预警方法研究及应用[J]. 中国科技信息, 2013(8): 37.  
Zhang Xiaotian. Early warning method research and application for oil field development[J]. China Science and Technology Information, 2013(8): 37.
- [12] Mamdani E H, Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller[J]. International Journal of Man-machine Studies, 1975, 7(1): 1-13.
- [13] Ziarko, Wojciech P. Rough sets, fuzzy sets and knowledge discovery [M]. London: Springer-Verlag, 1994: 132.
- [14] 张晓平. 模糊综合评判理论与应用研究进展[J]. 山东建筑工程学院学报, 2003, 18(4): 90-94.  
Zhao Xiaoping. Advance in fuzzy comprehensive evaluation methods theory and application[J]. Journal of Shandong Institute of Architecture and Engineering, 2003, 18(4): 90-94.
- [15] 涂向阳, 高学平. 模糊数学在海水入侵地下水水质评价中的应用[J]. 水利学报, 2003, 8(8): 64-69.  
Tu Xiangyang, Gao Xueping. Application of fuzzy mathematical method in evaluation of seawater intrusion[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 8(8): 64-69.

(责任编辑 刘志远)