

煤矿矿井突水水源的多元矩阵模型分析

刘剑民¹, 王继仁¹, 何治良²

1. 辽宁工程技术大学安全科学与工程学院, 阜新 123000

2. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 武汉 430000

摘要 针对煤矿矿井突水对煤矿安全生产的不利影响, 基于水化学分析结果, 建立多元混合模型模型, 分析计算矿井突水水样, 并与传统的BP神经网络原理和模糊综合评判法相对比, 分析结果与矿山实际情况相符合。结果表明: 多元混合模型不仅能准确分析出矿井突水水样主要来源, 而且计算简单准确, 受水化学分析样本量和离子种类数量限制较小, 可以作为一种矿井突水水源判别工具在工程实践中应用。

关键词 多元混合模型; 传统方法; 水化学分析; 矿井突水; 突水水源

中图分类号 TD745

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.09.012

Multivariate Mixed Models Based Source Determination of Coal Mine Water Burst

LIU Jianmin¹, WANG Jiren¹, HE Zhiliang²

1. Collage of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China

2. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430000, China

Abstract In order to figure out the source of bursting water in an accurate manner, the multivariate mixed models theory and hydro-chemical analysis were used to build the multivariate mixed models for aquifer and bursting water source. By combining the built equations, numerical analysis was taken for the bursting water source. The gained result was compared with those gained by the BP neural network method and the fuzzy comprehensive evaluation method. The comparison shows that these results are basically consistent with each other, proving that the multivariate mixed models can well be counted upon as a reliable tool. The tool is able to accurately figure out the source of coal mine water invasion and the calculation process is simple and accurate; it is less restricted by water chemical analysis of sample size and ionic species number, thus making a great contribution to the improvement of the safety production of coal mine.

Keywords multivariate mixed models; conventional method; hydro-chemical analysis; mine water invasion; bursting water source

矿井突水是煤矿生产过程中最具威胁的自然灾害之一。一旦发生矿井突水, 往往会在短时间内淹没坑道, 给矿山生产带来严重危害, 甚至造成人员伤亡。因此, 对矿井突水水源进行合理评价, 对指导矿山企业安全生产具有重要的意义, 如何及时准确地判断突水成因, 查找突水水源, 是解决和进一步预防突水灾害的关键。水化学数据反映了地下水的本质特征, 用水化学成分判别水源的方法具有准确、快速、经济的特点^[1-3]。鉴于此, 人们对水化学分析结果展开了大量计算研究。魏永强等^[4]阐述了BP神经网络法在实践工程应

用中的可行性, 吴岩等^[5]对该方法做出了进一步改进。杨永国等^[6]初步在鹤壁矿区运用模糊综合评判法计算分析出突水水源, 余克林等^[7]在一级模糊综合评判的基础上运用二级模糊综合评判使计算结果更加合理。但这些方法都有自己的适用性和局限性, 而现场突水状况是千变万化的, 导致水化学分析情况也在不断变化, 在这种情况下, 就迫切需要一种能适应各种水化学分析的计算方法。鉴于此, 本研究将借助多元混合模型^[8-10]对矿井突水化学元素含量进行分析, 计算得到矿井突水受各个含水层的影响程度, 从而准确地判别矿井

收稿日期: 2013-11-12; 修回日期: 2013-12-25

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50834002)

作者简介: 刘剑民, 博士研究生, 研究方向为煤矿开采与安全管理, 电子信箱: 896944398@qq.com

引用格式: 刘剑民, 王继仁, 何治良. 煤矿矿井突水水源的多元混合模型分析[J]. 科技导报, 2014, 32(9): 79-83.

突水水源,并与传统的分析方法对比,突出多元混合模型分析法在矿井突水水源分析应用中的优越性,为下一步矿山突水治理提供理论依据。

1 矿区水化学多元混合模型分析方法的构建

水化学研究是借助水化学测试技术,监测不同水文地质条件下各种类型水中离子组分、含量、丰度、分布、演变特征等方面数据^[1],并利用各种离子在各类水中的含量,从而分析矿井突水来源,进而研究解决水文地质的有关问题。

3M模型即 multivariate mixed models,其原理是针对多个未知数先建立矩阵方程,再利用实测数据,求出未知数,是矩阵方程在实际工程中的一种特殊应用。根据矿井突水的一般规律,突水水源一般由地下岩层水构成,多元混合模型在矿井突水计算中以各个含水层对矿井突水的影响程度为未知研究对象。对矿井突水水样而言,多元混合模型在矿井突水水源分析中的数学表达式为

$$AX=B, A=\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n-1,1} & A_{n-1,2} & \cdots & A_{n-1,n} \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}, B=\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_{n-1} \\ 1 \end{bmatrix}, X=\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_{n-1} \\ P_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,矩阵A为岩层水,矩阵B为突水水样,矩阵X为各含水层对矿井突水的影响程度。矩阵A同行不同列的元素代表同

种化学元素在不同含水层中的不同表达形式,矩阵A同列不同行的各个元素(去除最后一行的元素)代表含水层水样中的不同化学元素,计算所需化学元素种类数目为n-1,矩阵B中的各个元素(去除最后一行的元素)代表突水水样中的不同化学元素,并与矩阵A中的元素相对应,矩阵X中P₁、P₂、…、P_{n-1}、P_n代表n个含水层分别对矿井突水的影响程度,其中对矿井突水影响程度最高的P_i值代表最大的含水层,其可能为此次矿井突水的主要来源。为保证最终计算的结果更接近实际,在此基础上,用同样的方法,选择多组数据进行综合判断,确定各组计算结果平均值所代表的含水层为此次矿井突水主要来源。

2 实例分析

2.1 含水层水样采集及待判别样本

为了确定计算结果的非偶然性,选取多个矿山^[12-14]突水案例进行分析计算。在矿井突水中,各含水层岩层水中含有化学成分众多,综合考虑离子的重要性及数据的有效性^[15],选用HCO₃⁻、Cl⁻、SO₄²⁻、Mg²⁺、K⁺+Na⁺、Ca²⁺ 6种离子的质量浓度ρ作为评价因子对突水水源进行判别^[16]。

通过对不同含水层水样和同一含水层多个水样及突水水样进行分析,得出适用于各含水层和突水水样离子质量浓度的标准值见表1。

表1 含水层离子质量浓度(单位:mg·L⁻¹)
Table 1 Standard of aquifers (unit: mg·L⁻¹)

矿山	水样	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	Ca ²⁺
M ₁	灰岩含水层	362	1060	479	32	2412	88
	下部含水层	332	1013	280	24	2223	45
	砂岩含水层	1428	684	26	3	2883	7
	突水水样	332	984	269	24	2206	43
M ₂	奥灰含水层	116	580	647	123	229	241
	顶砂含水层	198	358	300	52	248	48
	野灰含水层	88	640	666	164	274	232
	突水水样	103	618	658	158	255	223
M ₃	奥灰含水层	279	90	1944	112	80	714
	十 _下 灰含水层	308	82	1160	57	314	279
	十三灰含水层	231	76	1646	97	130	598
	突水水样	250	82	1352	95	94	449

2.2 多元混合模型分析矿井突水水源

在矿山M₁中,矿井突水最可能来自灰岩含水层、下部含水层和砂岩含水层3个含水层,即n=3,多元混合模型可表达为

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

每组计算需2种离子,水化学测试共测得6种常用离子

数据,可以组成15组计算数据。以HCO₃⁻和SO₄²⁻的质量浓度作为一组计算数据进行示例计算,则有

$$\begin{bmatrix} \rho_1(\text{HCO}_3^-) & \rho_2(\text{HCO}_3^-) & \rho_3(\text{HCO}_3^-) \\ \rho_1(\text{SO}_4^{2-}) & \rho_2(\text{SO}_4^{2-}) & \rho_3(\text{SO}_4^{2-}) \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_r(\text{HCO}_3^-) \\ \rho_r(\text{SO}_4^{2-}) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,P₁、P₂、P₃分别表示灰岩含水层、下部含水层和砂岩含水层对矿井突水影响程度;ρ₁(HCO₃⁻)、ρ₂(HCO₃⁻)、ρ₃(HCO₃⁻)、ρ_r(HCO₃⁻)分别表示HCO₃⁻在灰岩含水层、下部含水层、砂岩含

水层和矿井突水中的质量浓度; $\rho_1(\text{SO}_4^{2-}), \rho_2(\text{SO}_4^{2-}), \rho_3(\text{SO}_4^{2-}), \rho_R(\text{SO}_4^{2-})$ 分别表示 SO_4^{2-} 在灰岩含水层、下部含水层、砂岩含水层和矿井突水中的质量浓度。将矿井 M_1 的3个含水层水样和突水水样中的 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 的质量浓度值代入式(3),即可得出各含水层对矿井突水的影响程度

$$P = \begin{bmatrix} -0.0534 \\ 1.0519 \\ 0.0015 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中取值最大的一个元素所代表的含水层对矿井突水影响概率最高,该组计算得到的矿井突水来源为下部含水层的水。计算结果中出现负值,原因是各个含水层中所含有的化

学离子彼此间是可以相互反应的,如 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 会形成微溶于水的 CaSO_4 ,从而使水中离子实际含量与所测结果产生误差,导致最终计算结果产生负数。突水水源最终判定是基于多元混合模型计算结果,选取 P_i 值最大的一个所代表的含水层,负数对该含水层选取过程中无影响,即对该突水水样的突水水源判断仍准确。

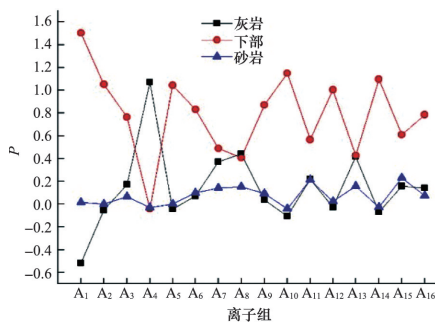
同理,可以利用其余14组的数据代入式(2)计算出各含水层对本次矿井突水的影响程度(表2)。

图1为矿山 M_1, M_2, M_3 中15组离子计算结果及其平均值所代表各个含水层对突水水样的影响程度。

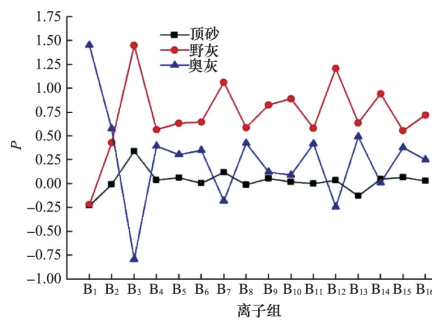
表2 矿山 M_1 各含水层对突水水样的影响程度

Table 2 Major source of bursting water in sample M_1 mine

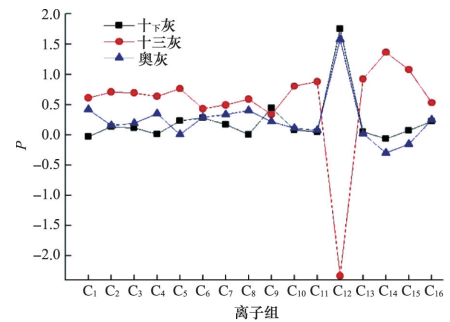
离子组	选用离子组数	P_1	P_2	P_3	判别结果
A ₁	HCO_3^- 和 Cl^-	-0.5178	1.5036	0.0142	下部
A ₂	HCO_3^- 和 SO_4^{2-}	-0.0534	1.0519	0.0015	下部
A ₃	HCO_3^- 和 Mg^{2+}	0.1708	0.7642	0.0651	下部
A ₄	HCO_3^- 和 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$	1.0706	-0.0413	-0.0293	灰岩
A ₅	HCO_3^- 和 Ca^{2+}	-0.0454	1.0442	0.0012	下部
A ₆	Cl^- 和 SO_4^{2-}	0.0700	0.8319	0.0981	下部
A ₇	Cl^- 和 Mg^{2+}	0.3702	0.4888	0.1410	下部
A ₈	Cl^- 和 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$	0.4406	0.4083	0.1511	灰岩
A ₉	Cl^- 和 Ca^{2+}	0.0359	0.8708	0.0933	下部
A ₁₀	SO_4^{2-} 和 Mg^{2+}	-0.1076	1.1486	-0.041	下部
A ₁₁	SO_4^{2-} 和 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$	0.2187	0.5667	0.2146	下部
A ₁₂	SO_4^{2-} 和 Ca^{2+}	-0.0268	1.0045	0.0223	下部
A ₁₃	Mg^{2+} 和 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$	0.4155	0.4262	0.1583	下部
A ₁₄	Mg^{2+} 和 Ca^{2+}	-0.0701	1.0968	-0.0267	下部
A ₁₅	$\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 和 Ca^{2+}	0.1584	0.6097	0.2319	下部
A ₁₆	A ₁ 到A ₁₅ 组的平均值	0.14197	0.78499	0.07304	下部



(a) M_1



(b) M_2



(c) M_3

图1 矿山 M_1, M_2, M_3 中突水水样受各个含水层影响程度

Fig. 1 Water inrush of M_1, M_2, M_3 mine influenced by different aquifers

由表2和图1(a)可知,各组别计算结果的平均值表明, M_1 矿山突水水样的突水水源为下部水,其中,分析出 M_1 矿山矿井突水主要来源为下部水的有13组,主要来源为灰岩水的有

2组,主要来源为砂岩水的为0组,综合判断分析可知,矿井 M_1 突水主要来源为下部水。同理可以分析出 M_2, M_3 矿山突水水样的主要来源(表3,图1(b),(c))。

表3 突水分析结果

Table 3 Results of water intrush

矿山	组数	平均值	分析结果
M ₁	灰岩	2	下部
	下部	13	
	砂岩	0	
M ₂	奥灰	2	野灰
	顶砂	0	
	野灰	13	
M ₃	奥灰	0	十三灰
	十 _下 灰	2	
	十三灰	13	

2.3 多元混合模型法与传统方法对比

传统BP神经网络法和模糊综合评判法分析矿山突水水源方法如下。

2.3.1 BP神经网络原理

BP神经网络原理即前馈式误差反传播神经网络,一般包括输入层、输出层、1个或多个隐含层,相邻上、下层之间各神经元实现权连接,而每层各神经元之间无连接,BP网络模型如图2所示。

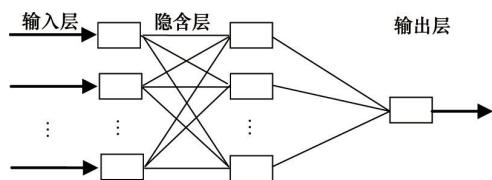


图2 BP神经网络模型

Fig. 2 BP neural network model

矿井突水水源分析过程如下。

1) 首先对BP神经网络进行有效训练,选取输入层的数目为6(水化学分析共有6组离子),输出层个数为1,隐含层节点数采用程序默认的设置值8,对各矿山含水层输出期望进行设置(表4)。

2) 利用训练好的BP神经网络,仿真评判无量纲化后的待评价样本,即可得出突水水样的主要来源,计算结果见表5。

表4 各矿山含水层输出期望

Table 4 Output of each mine aquifer expectations

矿山	输出期望	
M ₁	灰岩	0
	下部	1
	砂岩	0.5
M ₂	奥灰	0
	顶砂	1
	野灰	0.5
M ₃	奥灰	0
	十 _下 灰	1
	十三灰	0.5

表5 传统方法数据分析结果

Table 5 Data analysis results of the conventional method

矿山	模糊综合评判	BP评判
M ₁	灰岩 0.2029	0.6564
	下部 0.5785	
	砂岩 0.2186	
M ₂	奥灰 0.1517	0.5481
	顶砂 0.4358	
	野灰 0.4125	
M ₃	奥灰 0.1566	0.4235
	十 _下 灰 0.2522	
	十三灰 0.5912	

2.3.2 模糊综合评判法

模糊综合评判法是应用模糊变换原理和最大隶属度原则,综合考虑被评判事物或其属性的相关因素,进而对某事物进行等级或类别评价。矿井突水水源判别过程如下:

1) 利用各个具有突水可能的含水层建立评价集V,选择各含水层和突水的主要离子含量作为因素集U,根据各含水层的水质指标含量计算出各水样中评价因素的权重集A。

2) 通过各种离子的隶属函数,确定隶属度,得出模糊评判矩阵R,从而确定矿井突水对各含水层的隶属程度 $B=A \cdot R$,根据最大隶属度原则即可得出矿井突水来源,结果见表5。

2.3.3 结果分析

根据表3和表5所得的结果,得出待判别样本最终评判结果见表6。

表6 不同方法判别结果与矿山实际突水水源状况对比

Table 6 Different methods for judging the results compared with realities of water intrush in mine

矿山	$\rho/(mg \cdot L^{-1})$						多元混合模型	BP评判结果	模糊综合评判	实际结果
	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	Ca ²⁺				
M ₁	332.0	984.0	269.0	24.0	2206.0	43.0	下部	砂岩	下部	下部
M ₂	103.4	617.6	657.5	58.2	255.2	223.2	野灰	野灰	顶砂	野灰
M ₃	249.7	82.0	1351.9	95.2	93.9	448.8	十三灰	十三灰	十三灰	十三灰

由表6可以看出,虽然多元混合模型、BP神经网络原理和模糊综合评判具有不同的评判原理,但三者均能够结合水化学数据对矿井突水水源(质量浓度 ρ)进行有效判别,同时,也因为各评判方法具有不同的原理和自己的适用性,从而导致运用不同方法对同一矿井突水水样判别时会产生误差,其中多元混合模型分析方法对3处矿山突水的分析均与实际情况相符合,说明该方法在实际应用中是可行的,在不同的水化学分析条件下均具有适用性。

3 结论

1) BP神经网络原理虽然具有较强的自组织、自学习能力和容错性,但它是基于大样本的一种学习算法,在网络结构的确定中往往存在主观性,训练过程中具有收敛速度慢、容易产生局部极值、泛化能力较差等缺点,这也是矿山M₃突水水源分析出现误差的直接原因。

2) 模糊综合评判能用较少的化学离子即可分析出结果,但其需要确定的隶属度函数较多,计算过程比较复杂,而且在突水水样的化学元素权重分析上不够合理,可靠性较差,这也是利用模糊综合评判进行突水水源判别结果与实际情况有出入的最直接原因。

3) 多元混合模型一种新方法,能够准确分析出矿井突水水源。与BP神经网络法相比,多元混合模型分析原理简洁易懂,受矿井突水水样数目限制较小;与模糊综合评判法相比,多元混合模型分析计算过程简单,综合计算多组离子数据求其平均值使最终结果更为精准。因此多元混合模型分析法比传统分析方法更准确合理。

参考文献(References)

- [1] 黄君礼. 水分析化学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 15-28.
Huang Junli. Water chemical analysis[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008: 15-28.
- [2] 薛道成. 矿井突水水源快速判别信息辅助决策系统在马兰矿的研发应用[J]. 煤矿安全, 2011, 42(7): 95-101.
Xue Daocheng. Application of information-aided decision system for source of mine water inrush rapid determination to Malan Coal Mine[J]. Safety In Coal Mines, 2011, 42(7): 95-101.
- [3] 李再兴, 张凤鸣, 庞良, 等. 有关矿井突水水源判别方法的探讨[J]. 地下水, 2009, 31(9): 16-20.
Li Zaixing, Zhang Fengming, Pang Liang, et al. Discussion about the methods of distinguishing sources of mine water invasion[J]. Ground Water, 2009, 31(9): 16-20.
- [4] 魏永强, 梁化强, 任印国. 神经网络在判别煤矿突水水源中的应用[J]. 江苏地质, 2004, 28(1): 36-38.
Wei Yongqiang, Liang Huaqiang, Ren Yinguo. Application of neural network in discriminating water bursting source of the coal mine[J]. Jiangsu Geology, 2004, 28(1): 36-38.
- [5] 吴岩, 余智超. 神经网络在矿井突水水源判别中的应用[J]. 工矿自动化, 2011(10): 60-62.
Wu Yan, Yu Zhichao. Application of neural network in water source distinguishing of mine water inrush[J]. Industry and Mine Automation, 2011(10): 60-62.
- [6] 杨永国, 李宾亭, 尚克勤, 等. 鹤壁矿务局矿井突水等级模糊综合评判及预测[J]. 中国矿业大学学报, 1998, 27(4): 204-208.
Yang Yongguo, Li Bingting, Shang Keqin, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of water gush and Its prediction in coal mines of Hebi Mining Bureau[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1998, 27(4): 204-208.
- [7] 余克林, 杨永生, 章臣平. 模糊综合评判法在判别矿井突水水源中的应用[J]. 金属矿山, 2007, 369(3): 47-50.
Yu Kelin, Yang Yongsheng, Zhang Chenpin. Application of fuzzy comprehensive evaluation method in identifying water source of water-rush in underground shaft[J]. Metal Mine, 2007, 369(3): 47-50.
- [8] 唐健军, 白文娟. 多元混合炸药的配方设计及最优化问题[J]. 爆破器材, 1992, 70(5): 1-5.
Tang Jianjun, Bai Wenjuan. Prescription design and optimization of the multi-component mixed explosives[J]. Explosive Materials, 1992, 70(5): 1-5.
- [9] 范进. 基于多元混合准则模糊模型的个性化推荐算法[J]. 华东经济管理, 2007, 21(2): 117-119.
Fan Jin. Individualized recommendation algorithm based on multi-mixture principle[J]. East China Economic Management, 2007, 21(2): 117-119.
- [10] 傅惠民, 岳晓蕊. 多元混合数据回归分析方法[J]. 航空动力学报, 2011, 26(1): 173-177.
Fu Huimin, Yu Xiaorui. Multiple regression analysis method for mixed data[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(1): 173-177.
- [11] Varsanyi I, Kovacs L. Chemical evolution of groundwater in the river danube deposits in the southern part of the pannonian basin [J]. Applied Geochemistry, 1997, 61(12): 625-636.
- [12] 李帅, 王震, 史继彪, 等. 模糊数学在煤矿突水水源判别中的应用[J]. 煤矿安全, 2012, 43(7): 136-139.
Li Shuai, Wang Zhen, Shi Jibiao, et al. Application of fuzzy mathematics in discriminating sources of water inrush in coal mine [J]. Safety in Coal Mines, 2012, 43(7): 136-139.
- [13] 杨永国, 黄福臣. 非线性方法在矿井突水水源判别中的应用研究[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(3): 283-286.
Yang Yongguo, Huang Fuchen. Water source determination of mine inflow based on non-linear method[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 36(3): 283-286.
- [14] 高卫东. 熵权模糊综合评价法在矿井突水水源判别中的应用[J]. 矿业安全与环保, 2012, 39(2): 22-24.
Gao Weidong. Application of entropy weight fuzzy comprehensive evaluation method in mine water bursting source discrimination[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2012, 39(2): 22-24.
- [15] 刘伟韬, 宋传文, 张国玉. 底板突水的专家评分层次分析预测与评价[J]. 工程勘察, 2002, 78(1): 22-24.
Liu Weitao, Song Chuanwen, Zhang Guoyu. Stratification analysis and prediction on floor water invasion by experts[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2002, 78(1): 22-24.
- [16] 周来, 冯启言, 杨建华, 等. 济宁三号井田矿井突水的水化学特征和水源判别[J]. 中国矿业, 2005, 14(8): 68-69.
Zhou Lai, Feng Qiyang, Yang Jianhua, et al. Hydro chemical characteristics and source determination of the inrush water in Jining III Mine Field[J]. China Mining Magazine, 2005, 14(8): 68-69.

(责任编辑 赵业玲)