

Doi:10.3969/j.issn.1671-4172.2022.02.007

基于三元混合模型的滨海金矿矿井涌水水源分析

刘震^{1,2}, 张少鹏^{3,4}, 侯奎奎^{1,2}, 王玺^{1,2}, 尹延天^{1,2}

(1. 山东黄金集团有限公司 深井开采实验室, 山东 莱州 261400;

2. 山东省深海深地金属矿智能开采重点实验室, 济南 250000;

3. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083;

4. 山东黄金集团有限公司 三山岛金矿, 山东 莱州 261400)

摘要:为查明三山岛深竖井建设区域矿井涌水源, 选用三元混合模型分析法对三山岛矿井涌水水样进行化验分析, 利用矿化度(M)和 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 浓度的线性相关性, 建立地下矿山涌水源三元混合模型并计算。结果表明: 模型方法简单便于操作, 能够很好地判断矿井涌水水源构成; 矿井涌水在浅部主要来源于海水, 其次是基岩卤水, 少量第四系水, 随深度增加, 基岩卤水比例增加, 海水和第四系水占比显著下降。

关键词:滨海金矿; 矿井涌水; 水化学分析; 涌水来源; 三元混合模型; 三山岛金矿

中图分类号:TD865

文献标志码:A

文章编号:1671-4172(2022)02-0034-05

Analysis of mine water gushing source in seaside gold mine based on ternary mixed model

LIU Zhen^{1,2}, ZHANG Shaopeng^{3,4}, HOU Kuikui^{1,2}, WANG Xi^{1,2}, YIN Yantian^{1,2}

(1. Deep Mining Laboratory of Shandong Gold Group Co., Ltd., Laizhou Shandong 261400, China;

2. Shandong Key Laboratory of Deep-sea and Deep-earth Metallic Mineral Intelligent Mining, Jinan 250000, China;

3. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

4. Sanshandao Gold Mine of Shandong Gold Group Co., Ltd., Laizhou Shandong 261400, China)

Abstract: In order to find out the source of mine water inflow in the construction area of deep shaft in Sanshandao, the ternary mixed model analysis method was used to analyze the mine water inflow samples in Sanshandao. The ternary mixed model of underground mine water inflow was established and calculated by using the linear correlation between salinity(M) and the concentrations of SO_4^{2-} and Mg^{2+} . The calculation results show that the model method is simple and easy to operate, and can well judge the composition of mine water inflow source; In the shallow part of Sanshandao gold mine, the mine water mainly comes from sea water, followed by bedrock brine and a small amount of quaternary water; With the increase of depth, the proportion of bedrock brine increases, and the proportion of seawater and quaternary water decreases significantly.

Key words: coastal gold mine; mine water gushing; hydrochemical analysis; source of gushing water; ternary mixed model; Sanshandao gold mine

通过对矿井坑道涌水取样进行化学分析, 得到各个涌水点的化学常量元素含量, 进一步分析得到矿井涌水源, 针对不同来源选取合理的治理方法^[1-3]。近些年的矿山涌水水化学分析方法应用

的实例有很多, 比如灰色关联分析法^[4-6]、模糊综合评判法及其改进法^[7-10]、聚类分析法^[11-12]、神经网络法^[13-15]和三元混合模型分析法^[16-17]等。不同的分析方法都有其各自特点及优势, 同时也有一定的局限性, 实际应用过程中需根据具体情况选用最合适的方法。

三山岛金矿是国内最大的滨海金矿^[18], 前人已经对矿井涌水风险和水量预测等内容做了比较多的

收稿日期: 2021-08-04

基金项目: 山东黄金集团科研项目(19A2010)

作者简介: 刘震(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事矿山地质和岩石力学研究工作。

研究^[18-19],但对于涌水源的探讨较少。目前拟在矿区内建设一深竖井,井位距离海边仅 200 m。建井过程中以及深竖井投入使用后,矿井地下水会对机械设备产生一定的腐蚀作用。本文选取三山岛西山矿区井下部分涌水水样和深竖井工勘孔抽水试验水样,通过三元混合模型分析法对水样化学元素含量进行分析,并计算得到矿井涌水源混合比例,指导后期施工中机械设备选择合适的防腐措施。

1 三元混合模型的选择与构建

1.1 水化学分析法选择

在比较常用的矿山涌水水化学分析方法中,灰色关联分析法和聚类分析法都能胜任水样来源判别分析工作,但是两种模型本身比较繁琐,需要大量的水样检测数据进行分析,应用于多种来源的水源判别分析,计算过于复杂。本文使用的基础数据有限,无法提供大量的数据参与上述两种分析法的计算,所以上述两种方法不适用。研究三山岛地区的水文地质条件及主要含水层补给方式可知,矿区井下涌水主要来源有基岩卤水、海水和第四系水。地下水水质几乎全为 Cl-Na 型,其中基岩卤水多是高矿化度的古海水,而第四系水孔隙水主要是 Cl-Na-Ca、Cl-HCO₃-Na-Ca 和 Cl-HCO₃-Na-Mg 型,矿化度较低,地下水在与海水混合过程中不会产生任何化学沉淀反应。在这一前提下,本文适合采用三元混合模型分析法对井下不同位置涌水点中所含海水、基岩卤水和第四系水的比例进行分析计算。

1.2 三元混合模型构建

三元混合模型是针对三个变量建立三元一次方程组,再将检验数据的值,代入方程求出未知数,方法简单易行且精度较高。根据三山岛矿区地下涌水的规律,三元混合模型在本计算应用中以海水、基岩卤水和第四系水混合的比例为未知研究对象。矿坑涌水在不同位置的水样离子种类和离子数量是不一样的,因此要选取适合的离子作为参与三元混合模型分析的变量进行计算,这是一项关键性工作。矿区内地下水的矿化度仅在降雨较多的时候会略微下降,总体上矿化度变化很小比较稳定。因此,矿化度 M 可以作为一个变量参与计算。另外两个参数跟矿化度 M 具有线性相关性,应该选择某种离子的浓度参与计算。根据矿山水文地质报告和工勘孔抽水试验水样分析结果可知,矿区地下水质的矿化度与 Cl⁻、SO₄²⁻、Na⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺ 等浓度之间存在显著的线性正相关,而与 pH 值、HCO₃⁻ 浓度呈现

线性负相关。为了保证最终计算的结果更接近实际,本文中选取 SO₄²⁻、Mg²⁺ 两组参数同时进行计算^[16],并对两组参数计算结果进行对比,以验证此方法的准确性。

完成变量的选取后,列出三元混合模型应用到矿坑涌水点水源分析中的数学表达式:

$$\begin{cases} M_S P_S + M_B P_B + M_Q P_Q = M_i \\ K_S P_S + K_B P_B + K_Q P_Q = K_i \\ P_S + P_B + P_Q = 1 \times 100\% \end{cases}$$

式中, M_S 、 M_B 、 M_Q 分别为矿区所取的海水、基岩卤水和第四系水的矿化度(g/L); K_S 、 K_B 、 K_Q 分别为这三种水源中某种离子的浓度(mg/L),与矿化度 M 线性相关; M_i 和 K_i 分别为矿坑涌水采样点水样的矿化度和上述离子的质量体积浓度; P_S 、 P_B 和 P_Q 分别为所求的涌水采样点的海水、基岩卤水和第四系水的混合体积比。

将此三元一次方程组求解,得出 P_S 、 P_B 和 P_Q 的值即为所取涌水水样来源中海水、基岩卤水和第四系水所占的比例。

2 三元混合模型应用

2.1 矿区水样采集与测试

从矿床勘探至整个矿山开拓施工采矿期间,对矿区西侧渤海的水质分析结果进行记录,其矿化度为 26.14~32.60 g/L,pH 值为 7.84~8.30;基岩卤水包括赋存在含水带中的地下水和含水岩体(带),含水带在天然状态下赋存着高盐度卤水,矿化度为 56.32~61.06 g/L,pH 值为 6.5~7.2,最高矿化度能达 92.75 g/L;第四系水由于可以接受降水补给,故比海水淡,矿化度低,同时水质变化范围大,矿化度为 0.21~25.95 g/L,pH 值为 7.32~9.40^[20]。取矿山水文地质报告里的水源水质检验结果作为已知量进行计算,如表 1 所示。

表 1 涌水水源参数

Table 1 Parameters of water inflow source

水样类型	矿化度 $M/(g \cdot L^{-1})$	$\rho(\text{SO}_4^{2-})/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{Mg}^{2+})/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
海水	27.39	2 560	1 272
基岩卤水	60	3 421	2 339
第四系水	4	577	282

选取水文地质报告里西山矿区靠近深竖井建设位置不同深度的 3 个采样点和深竖井工勘孔抽水试验 2 个水样的检测数据,以 SO₄²⁻、Mg²⁺ 浓度和矿化度 M 作为参数进行相关计算,如表 2 所示。

表2 水样水质检测结果

Table 2 Water quality test results of water samples

编号	取样地点	$\rho(\text{SO}_4^{2-})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Mg}^{2+})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	pH 值	矿化度 $M/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$
1	-253 m 分段南巷 60 m	2 499	1 293	9	30.27
2	-360 m 中段北巷 130 m	2 742	1 566	9	37.40
3	-400 m 中段北巷 90 m	2 928	1 788	8	43.41
4	工勘孔抽水试验上盘(-580 m)	2 985	1 846	8	45.20
5	工勘孔抽水试验下盘(-980 m)	2 971	1 893	8	46.55

2.2 矿区涌水三元混计算

1) 以矿化度和 SO_4^{2-} 浓度为参数进行计算

设某一涌水点的矿化度为 M_i , SO_4^{2-} 浓度值为 $K_i(\text{mg/L})$, 海水、基岩卤水、第四系水在其中所占的百分比分别为 P_s 、 P_B 、 P_Q , 将表 1 中已知条件代入式(1), 列出方程组式(2)。

$$\begin{cases} 27.39P_s + 60P_B + 4P_Q = M_i \\ 2560P_s + 3421P_B + 577P_Q = K_i \\ P_s + P_B + P_Q = 1 \times 100\% \end{cases} \quad (2)$$

将表 2 中 5 组 M_i 、 SO_4^{2-} 浓度值 $K_i(\text{mg/L})$ 分别代入式(2), 求解三元一次方程组, 结果见表 3。

2) 以矿化度和 Mg^{2+} 浓度为参数进行计算

设某一涌水点的矿化度为 M_i , Mg^{2+} 浓度值为 $Q_i(\text{mg/L})$, 海水、基岩卤水、第四系水在其中所占的百分比分别为 P_s 、 P_B 、 P_Q , 根据表 1 的已知量, 列出方程组式(3)。

$$\begin{cases} 27.39P'_s + 60P'_B + 4P'_Q = M_i \\ 1272P'_s + 2339P'_B + 282P'_Q = Q_i \\ P'_s + P'_B + P'_Q = 1 \times 100\% \end{cases} \quad (3)$$

将表 2 中 5 组 M_i 、 Mg^{2+} 浓度值 $Q_i(\text{mg/L})$ 值分别代入式(3), 求解三元一次方程组, 结果如表 3 所示。

表3 各涌水源混合比计算结果

Table 3 Calculation results of mixing ratio of each inflow source

样号	矿化度 M	$\rho(\text{SO}_4^{2-})$			$\rho(\text{Mg}^{2+})$			平均值			/%
		P_s	P_B	P_Q	P_s	P_B	P_Q	P_s	P_B	P_Q	
1	30.27	74.0	16	10.0	71.0	15.0	14.0	72.5	15.5	12.0	
2	37.40	59.0	35	6.0	57.0	35.0	8.0	58.0	35.0	7.0	
3	43.41	44.0	52	4.0	42.0	53.0	5.0	43.0	52.5	4.5	
4	45.20	39.7	57	3.3	38.7	57.4	3.9	39.2	57.2	3.6	
5	46.55	38.0	58	4.0	37.0	60.0	3.0	37.5	59.0	3.5	

根据分析结果, 使用的矿化度 M 与 $\rho(\text{Mg}^{2+})$ 作为参数的计算结果, 与使用矿化度 M 与 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 为参数计算的结果基本一致。

2.3 结果分析

矿区-253 m 分段南巷 60 m 涌水点, 矿化度为 30.27 g/L, 涌水水源中海水组成占 72.5%, 基岩卤水占 15.5%, 第四系水占比 12%。说明浅部涌水受海水影响最大, 海水越流补给较多, 第四系水的补给也相对较多。-360 m 中段北巷 130 m 涌水矿化度为 37.4 g/L 的涌水点, 海水约占 58%, 基岩卤水占 35% 左右, 第四系水 7%。海水和第四系水的占比开始明显下降。-400 m 中段北巷 90 m 涌水点, 矿化度为 43.41 g/L, 涌水水源中基岩卤水组成占 52.5% 以上, 海水组成占 43%, 第四系水 4.5%。基

岩卤水占比开始超过海水, 表明地下水的主要来源变成基岩卤水, 海水越流补给能力下降。-580 m 位置的水样矿化度 45.20 g/L, 涌水水源中基岩卤水组成占 57.2%, 海水组成占 39.2%, 第四系水含量较少。-980 m 位置的水样矿化度 46.55 g/L, 涌水水源中基岩卤水组成占 59%, 海水组成占 37.5%, 少量第四系水。

从图 1 中不难看出, 随着深度的不断增加, 地下水矿化度逐渐增加, 在图 1 中呈明显的正相关性。并且, 随着深度增加, 矿化度的变化速率降低, 越往深部变化越不明显, 变化曲线趋近水平。基岩卤水的占比变化规律和矿化度的变化规律基本一致。但海水和第四系水占比随深度的变化规律和矿化度的变化规律正好相反, 呈逐步降低的趋势。

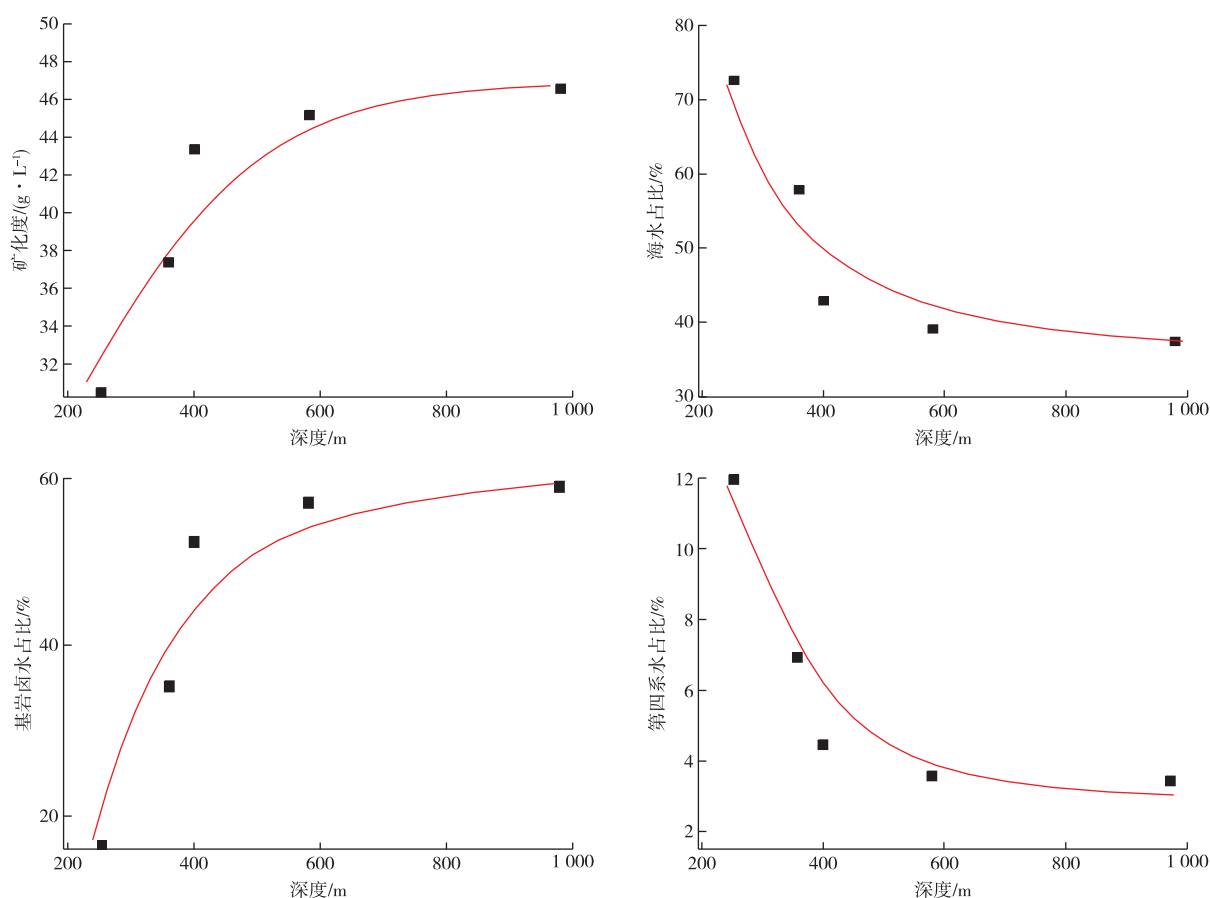


图1 矿化度、各种来源水占比与深度关系图

Fig. 1 Relationship between salinity, proportion of water from various sources and depth

3 结论

1) 三元混合模型分析法能够通过较少的数据, 比较直观地得到矿山涌水主要来源情况, 计算出各类来源的占比。在分析三山岛金矿井下涌水源方面, 相比灰色关联分析法、聚类分析法等方法更加实用。

2) 根据矿山的水文地质采样数据, 基岩卤水的矿化度远大于海水。选取矿化度 M 、 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 浓度作为参数, 通过三元混合模型分析法计算可以得到井下涌中海水、基岩卤水、第四系水含量的占比关系。

3) 三山岛金矿井下涌水的各种来源随深度呈现明显的相关性变化。矿区井下涌水在浅部时主要受海水越流补给, 其次是基岩卤水, 也受第四系水影响。当到达深部时, 涌水主要来自于高矿化度的基岩卤水, 其次才是海水, 第四系水的影响明显变小。

参考文献

[1] 黄君礼. 水分析化学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
HUANG Junli. Water analytical chemistry[M]. Beijing: China

Building Industry Press, 2008.

- [2] 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(5): 16-20.
LI Zaixing, ZHANG Fengming, PANG Liang, et al. Discussion on distinguishing method of mine water inrush source[J]. Ground Water, 2009, 31(5): 16-20.
- [3] 李国庆, 马凤山, 孟召平. 新立矿区海底金属矿坑与上覆海水的连通性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(10): 189-196.
LI Guoqing, MA Fengshan, MENG Zhaoping. Connectivity analysis of seabed metal mines and overlying seawater in Xinli mining area[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(10): 189-196.
- [4] 江晓益, 成春奇. 矿区地下水系统水质分类判别的多元统计分析[J]. 水文地质工程地质, 2009(4): 16-20.
JIANG Xiaoyi, CHENG Chunqi. Multivariate statistical analysis of water quality classification of groundwater system in mining area [J]. Hydrogeological Engineering Geology, 2009(4): 16-20.
- [5] 郝彬彬, 李冲, 王春红. 灰色关联度在矿井突水水源判别中的应用[J]. 中国煤炭, 2010(6): 20-22.
HAO Binbin, LI Chong, WANG Chunhong. The application of grey correlation degree in the identification of mine water

- inrush source[J]. China Coal, 2010(6):20-22.
- [6] 王毅, 许光泉, 何吉春, 等. 灰色关联分析方法在突水水源判别中的应用[J]. 地下水, 2013(6):13-16.
WANG Yi, XU Guangquan, HE Jichun, et al. Application of grey correlation analysis method in water inrush source discrimination[J]. Groundwater, 2013(6):13-16.
- [7] 杨永国, 尚克勤. 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(2):204-208.
YANG Yongguo, SHANG Keqin. Hebi mining bureau mine water inrush grade fuzzy comprehensive evaluation and prediction[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1998, 27(2):204-208.
- [8] 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, 36(3):50-53.
YU Kelin, YANG Yongsheng, ZHANG Chenping. Application of fuzzy comprehensive evaluation method in identifying mine water inrush source[J]. Metal Mine, 2007, 36(3):50-53.
- [9] 李凤莲, 冯琳, 张雪英, 等. 模糊综合评判法的改进及在水源判别中的应用[J]. 太原理工大学学报, 2015(4):444-447.
LI Fenglian, FENG Lin, ZHANG Xueying, et al. The improvement of fuzzy comprehensive evaluation method and its application in water source identification [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2015(4):444-447.
- [10] 刘秀娥, 韩科明, 樊振丽. 基于熵权模糊综合评价的矿井突水水源判别方法[J]. 煤矿开采, 2017, 22(6):82-84.
LIU Xiu'e, HAN Keming, FAN Zhenli. Based on entropy weight fuzzy comprehensive evaluation of mine water inrush source discrimination method[J]. Coal Mining, 2017, 22(6):82-84.
- [11] 石磊, 徐楼英. 基于水化学特征的聚类分析对矿井突水源判别[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(3):97-100.
SHI Lei, XU Louying. Cluster analysis based on hydrochemical characteristics for mine water inrush discrimination[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(3):97-100.
- [12] 耿建军. 基于系统聚类分析的煤矿突水水源识别技术:以潞安矿区王庄煤矿为例[J]. 中国煤炭地质, 2019, 31(8):54-59.
GENG Jianjun. Water inrush source identification technology of coal mine based on system cluster analysis: Taking Wangzhuang coal mine in Lu'an mining area as an example[J]. China Coal Geology, 2019, 31(8):54-59.
- [13] 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, 37(10):60-62.
WU Yan, YU Zhichao. Application of neural network in mine water inrush source discrimination[J]. Mining Automation, 2011, 37(10):60-62.
- [14] 徐星, 田坤云, 王公忠, 等. ESN神经网络在矿井突水水源判别中的应用[J]. 安全与环境学报, 2018, 12(4):1257-1261.
XU Xing, TIAN Kunyun, WANG Gongzhong, et al. Application of ESN neural network in the identification of mine water inrush source[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 12(4):1257-1261.
- [15] 李垣志, 牛国庆, 刘慧玲. 改进的 GA-BP 神经网络在矿井突水水源判别中的应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2016(7):77-81.
LI Yuanzhi, NIU Guoqing, LIU Huiling. The application of improved GA-BP neural network in the identification of mine water inrush source[J]. China's Safety Production Science and Technology, 2016(7):77-81.
- [16] 刘爱华, 刘银朋, 程力. 三元混合模型在地下矿山涌水水源计算分析中的应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(8):2768-2773.
LIU Aihua, LIU Yinpeng, CHENG Li. The application of ternary mixed model in the calculation and analysis of water inflow in underground mines [J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2014, 45(8):2768-2773.
- [17] 李小倩, 张彬, 周爱国, 等. 酸性矿山废水对合山地下水污染的硫氧同位素示踪[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(6):103-109.
LI Xiaoqian, ZHANG Bin, ZHOU Aiguo, et al. Sulfur and oxygen isotope tracer of acid mine wastewater pollution to groundwater in Heshan [J]. Hydrogeological Engineering Geology, 2014, 41(6):103-109.
- [18] 孙鹏, 荣帅. 基于改进物元可拓法的滨海金矿涌水风险评估模型研究[J]. 有色金属工程, 2021, 11(6):109-117.
SUN Peng, RONG Shuai. Study on risk assessment model of water inrush in coastal gold mine based on improved matter element extension method[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(6):109-117.
- [19] 冯丽霞, 张德明, 曾叶欣, 等. 滨海金矿涌水危险评价及涌水量混沌预测研究[J]. 有色金属工程, 2019, 9(6):91-96.
FENG Lixia, ZHANG Deming, ZENG Yexin, et al. Study on risk assessment and chaotic prediction of water inflow in coastal gold mine[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2019, 9(6):91-96.
- [20] 邓红卫. 典型矿山地下水防治与资源化调控及工程应用研究[D]. 长沙:中南大学, 2009.
DENG Hongwei. Research on groundwater prevention, resource control and engineering application in typical mines [D]. Changsha: Central South University, 2009.

(编辑:郭文晶)