

# 基于博弈论的磷石膏充填水质物元评价

李夕兵, 范昀, 兰明, 尚雪义

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

**摘要** 为研究磷石膏充填对地下水环境的影响,选取水中总汞、总砷、六价铬、铁、锰、铜、锌、总磷、氯化物的含量共9个影响因子作评价指标,采用物元分析理论进行评价;针对传统物元评价中单一赋权方法确定评价指标权重的不足,引入博弈论思想,对评价指标组合赋权,建立基于博弈论的磷石膏充填水质组合赋权-物元评价模型,以《地下水质量标准》为依据对不同采样点涌水水质综合评价。结果表明:1) 基于博弈论的物元分析法体现了不同评价因子对水质的影响,结果更加全面、系统、真实;2) 未充填区域水质可达到Ⅰ级水质标准,充填区域较差,循环用水最差,为Ⅴ类水质标准;3) 评价结果为磷石膏充填水环境保护方案的提出及矿山安全、绿色开采的实现提供了科学依据。

**关键词** 磷石膏充填;地下水;组合赋权;物元分析法

**中图分类号** X824

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.15.002

## Evaluation of phosphogypsum filling water quality using game theory and matter-element analysis theory

LI Xibing, FAN Yun, LAN Ming, SHANG Xueyi

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

**Abstract** To study the influence of phosphogypsum filling on the ground water environment, a phosphogypsum filling water quality combination weighting-matter-element evaluation model is established based on game theory and matter-element analysis theory. 9 influence factors are chosen as evaluation indexes which include mercury, total arsenic, hexivalent chromium, iron, manganese, copper, zinc, total phosphorous and fluoride. Game theory is included in the model where combination weighting is adopted to avoid the defect of traditional matter-element evaluation methods that use a single weight. A comprehensive evaluation on the seeping water quality from different sampling points is conducted based on "Quality Standard for Ground Water". The results are as follows. Firstly, the matter-element analysis method based on the game theory includes combined influences from different evaluation factors on the water quality, the evaluation result being more comprehensive, systematic and factual. Secondly, water quality in the unfilled region reaches water quality level 1, a lower water quality is found in the filled region, and the circulating water has the lowest water quality in this study, i.e., water quality level 5. Finally, a phosphogypsum filling water environment protection scheme is proposed and scientific evidence is provided for the safety in mines and environmentally friendly mining.

**Keywords** phosphogypsum filling; ground water; component bestowal weights; matter-element analysis

磷石膏作为中国累计堆存和年排放最大的工业固体废物之一,其每年伴随产生的磷石膏渣高达5000万t,累计起来近亿吨<sup>[1]</sup>。然而这些磷石膏大多处于自然堆放的状态,不仅侵占耕地,并且由于风化、浸泡、淋滤等作用,导致部分重金属元素进入水或者土壤中,对周围环境造成很难消除的污染<sup>[2]</sup>。贵州开磷矿业生产优质矿石,但其地表堆积的磷石膏

侵占耕地,污染环境,制约着集团的发展。2004年开磷集团在大量实验基础上成功开发出磷石膏+水泥+粉煤灰的充填采矿技术,近两年又找到磷化工的另一副产品——黄磷渣代替水泥。这些措施不仅提高了矿石回收率,还减少了磷石膏等废物的堆存和充填成本,建成了全磷废料自胶结充填的无废开采矿山。但磷石膏中含有大量有害元素,会对地下水造

收稿日期:2015-03-11;修回日期:2015-05-06

基金项目:国家自然科学基金项目(41272304)

作者简介:李夕兵,教授,研究方向为岩石破裂与岩石动力学,电子信箱:fanyun@csu.edu.cn

引用格式:李夕兵,范昀,兰明,等.基于博弈论的磷石膏充填水质物元评价[J].科技导报,2015,33(15):22-26.

成严重的二次污染,而这种污染往往具有隐蔽性、难以逆转性、迁移性、长期性和污染因子的多样性<sup>[3]</sup>,威胁矿山的安全生产。因此,如何对磷石膏充填水质进行科学合理的评价显得尤为重要。目前水环境质量评价的方法主要有单项污染指数法、模糊评判法、算术平均、多目标决策-理想点法、模糊聚类分析法、灰色关联分析法、物元分析法等数十种方法<sup>[4-5]</sup>,但是由于影响水质的因素太多,各个评价因子之间的关系灰色、模糊而且复杂<sup>[6]</sup>,各种模型的评价效果亦不尽相同。

物元分析法<sup>[7]</sup>是研究物元及其变化并用以解决矛盾问题的规律和方法。利用物元分析方法,可以建立事物多指标性能参数的质量评定模型,并能以定量的数值表示评定结果,从而能够较完整地反映事物质量的综合水平。由于它可解决多因子分析中不相容的问题,体现不同评价因子对评价对象的综合影响,因此本文采用物元分析方法对磷石膏充填水质进行综合评价。考虑到传统物元评价确定指标权重的方法比较单一,评价结果的准确性易受到影响,为了使得磷石膏充填水质的综合评价结果更加准确可靠,引入博弈论的思想,通过对评价指标的主观及客观的组合赋权,建立基于博弈论的组合赋权-物元评价模型,并将其应用于磷石膏充填水质的综合评价中,以期能够得到磷石膏充填体对地下水水质影响的结果,对不同的水质情况进行科学合理的分析及处理,保证矿山的安全生产。

## 1 基于博弈论的组合赋权-物元法计算理论

### 1.1 确定经典域和节域

根据物元分析理论,地下水环境质量的经典域物元矩阵可表示为

$$R_{oj} = \{M_{oj}, c_i, v_o\} = \begin{bmatrix} M_{oj} & c_1 & (a_{oj1}, b_{oj1}) \\ & c_2 & (a_{oj2}, b_{oj2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & (a_{ojn}, b_{ojn}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $R_{oj}$  为地下水水质的经典域物元,  $M_{oj}$  为地下水环境质量标准中的  $j$  个评价等级 ( $j=1, 2, \dots, m$ );  $c_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 为第  $i$  个评价的指标,  $(a_{oji}, b_{oji})$  为对应评价等级  $j$  的量值范围,即经典域。

地下水环境质量的节域物元矩阵可表示为

$$R_p = \{M_p, c_i, v_p\} = \begin{bmatrix} M_p & c_1 & (a_{p1}, b_{p1}) \\ & c_2 & (a_{p2}, b_{p2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & (a_{pn}, b_{pn}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,  $R_p$  为节域物元;  $M_p$  为地下水环境质量标准中的全体等级;  $(a_{pi}, b_{pi})$  为节域物元关于特征量  $c_i$  的值域,即地下水评价标准中所有等级的取值范围。

### 1.2 确定待评物元

将待评价对象  $M_x$  ( $x$  为评价样本编号) 的物元表示为

$$R_x = \begin{bmatrix} M_x & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,  $v_i$  为待评对象  $M_x$  关于指标  $c_i$  的量值。

### 1.3 关联函数及关联度确定

关联函数  $K(x)$  表示被评价单元与某标准的隶属程度的函数,关联函数的数值为关联度。关联函数的定义为

$$K_j(v_i) = \begin{cases} -\frac{\rho(v_i, X_{oji})}{|X_{oji}|}, & v_i \in X_{oji} \\ \frac{\rho(v_i, X_{oji})}{\rho(v_i, X_{pi}) - \rho(v_i, X_{oji})}, & v_i \notin X_{oji} \end{cases} \quad i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m \quad (4)$$

式中,  $|X_{oji}| = |a_{oji} - b_{oji}|$ ,  $\rho(v_i, X_{oji})$  为  $v_i$  与区间  $X_{oji} = (a_{oji}, b_{oji})$  的距离,  $\rho(v_i, X_{pi})$  为  $v_i$  与节域区间  $X_{pi} = (a_{pi}, b_{pi})$  之间的矩。计算式<sup>[8]</sup>为

$$\begin{cases} \rho(v_i, X_{oji}) = \left| v_i - \frac{1}{2}(a_{oji} + b_{oji}) \right| - \frac{1}{2}(b_{oji} - a_{oji}) \\ \rho(v_i, X_{pi}) = \left| v_i - \frac{1}{2}(a_{pi} + b_{pi}) \right| - \frac{1}{2}(b_{pi} - a_{pi}) \end{cases} \quad (5)$$

### 1.4 基于博弈论的组合赋权

为了提高评价指标赋权的可靠性,在赋权方法上引入博弈论的思想,进行多种赋权方法的权重组合,从而寻求出最优的权重向量。基于博弈论进行组合赋权的具体思路<sup>[9]</sup>为:

假设采用  $L$  种赋权方法对评价指标进行赋权处理,那么可以得到  $L$  个评价指标权重向量,即  $w(k) = [w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{kn}]$ ,  $k = 1, 2, \dots, L$ 。对这  $L$  个权重向量进行任意的线性组合:

$$w = \sum_{k=1}^L \alpha_k w_k^T \quad (6)$$

式中,  $\alpha_k$  为线性权重组合系数,  $w$  为可能出现的综合权重向量。根据博弈集结的思想,寻求最优权重向量可以归结为线性权重组合系数  $\alpha_k$  的优化问题,使得  $w$  与各  $w_k$  的离差极小化。因此,其数学决策模型可以表示为

$$\min \sum_{k=1}^L \alpha_k w_k^T - w_j^T \quad (j=1, 2, \dots, L) \quad (7)$$

利用矩阵的微分性质,得到式(7)的最优化一阶导数条件为

$$\sum_{k=1}^L \alpha_k w_k w_k^T = w_j w_j^T \quad (j=1, 2, \dots, L) \quad (8)$$

通过式(8)可以求出系数  $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_L)$ , 将经过归一化处理得到的  $\alpha_k^*$  代入式(6),可得到综合权重为

$$w^* = \sum_{k=1}^L \alpha_k^* w_k^T \quad (9)$$

### 1.5 综合关联度 $K_j(M_x)$ 及评定等级的确定

综合关联度是关联度与权系数的乘积,待评价对象  $M_x$  关于等级  $j$  ( $j=1, 2, \dots, m$ ) 的综合关联度  $K_j(M_x)$  为

$$K_j(M_x) = \sum_{i=1}^n w_i^* K_j(v_i) \quad (10)$$

式中,  $K_j(v_i)$  为评价指标  $i$  关于第  $j$  等级的关联度;  $w_i^*$  为评价指标  $c_i$  的权重系数,由组合赋权得到。若  $K_j = \max\{K_j(M_x)\}$  ( $j=1, 2, \dots, m$ ), 则地下水  $M_x$  的水质等级为  $j$ 。令

$$K_j(M_x) = \frac{K_j(M_x) - \min_j(K_j(M_x))}{\max_j(K_j(M_x)) - \min_j(K_j(M_x))} \quad (11)$$

$$j^* = \frac{\sum_{j=1}^m j \cdot K_j(M_x)}{\sum_{j=1}^m K_j(M_x)} \quad (12)$$

式中,  $j^*$  为等级  $j$  的变量特征值。

## 2 磷石膏充填地下水物元评价模型及应用

贵州开磷(集团)有限责任公司长期采用房柱空场法开采,浪费了宝贵的磷矿资源<sup>[10]</sup>,地表的磷石膏侵占耕地,破坏生态与地表水系。为此,2004年开磷集团与中南大学合作,对磷石膏作充填材料进行研发,成功开发出磷石膏+粉煤灰+水泥的磷石膏充填采矿技术,后又于2012年改进该技术,采

用成本更小的磷石膏+磷渣粉的充填采矿技术,建成了世界上第一座全磷废料自胶结充填的无废开采矿山<sup>[11]</sup>。但磷石膏、磷渣粉等废料输送到井下制成充填体,是否会污染水资源带来环境污染成为不容忽视和亟待解决的问题。

### 2.1 评价指标的选取

对2007—2011年充填区域地下水涌水、循环用水和未充填区域地下水涌水的13个水质影响因子进行监测,参考《GB/T 14848—93地下水质量标准》,从中挑出对环境影响比较明显的9项检测因子作为具体评价指标,分别为总汞、总砷、六价铬、铁、锰、铜、锌、总磷、氟化物。其余项含量远小于国家地下水标准值,影响甚微,故本研究不将其参与计算。参考《GB/T 14848—93地下水质量标准》,按单因素法将地下水环境水质分为5个等级(表1),9个评价指标各自实测值见表2。

表1 评价指标分类标准

Table 1 Standard classification of evaluation indexes

mg/L

等级	总汞	总砷	六价铬	铁	锰	铜	锌	总磷	氟化物
I	≤0.00005	≤0.005	≤0.005	≤0.1	≤0.05	≤0.01	≤0.05	≤0.02	≤1.0
II	≤0.0005	≤0.01	≤0.01	≤0.2	≤0.05	≤0.05	≤0.5	≤0.1	≤1.0
III	≤0.001	≤0.05	≤0.05	≤0.3	≤0.1	≤0.1	≤1.0	≤0.2	≤1.0
IV	≤0.001	≤0.05	≤0.1	≤1.5	≤1.0	≤1.0	≤5.0	≤0.3	≤2.0
V	>0.001	>0.05	>0.1	>1.5	>1.0	>1.0	>5.0	>0.4	>2.0

表2 磷石膏充填区域地下水水质指标实测值

Table 2 Measured values of groundwater quality index in phosphorus gypsum filling area

mg/L

采样地点	总汞	总砷	六价铬	铁	锰	铜	锌	总磷	氟化物
1 <sup>#</sup>	0.0008	0.0075	0.004	0.32	0.01	0.06	0.25	0.126	0.25
2 <sup>#</sup>	0.0001	0.0079	0.004	0.28	0.01	0.06	0.17	0.053	0.19
3 <sup>#</sup>	0.0027	0.0047	0.004	0.75	0.01	0.06	0.13	0.976	0.80
4 <sup>#</sup>	0.0021	0.0044	0.004	0.22	0.01	0.06	0.09	0.041	0.15
5 <sup>#</sup>	0.0038	0.0087	0.004	0.67	0.01	0.06	0.11	6.026	1.36
6 <sup>#</sup>	0.0023	0.0183	0.027	0.85	0.07	0.06	0.14	339.45	0.47
7 <sup>#</sup>	ND	0.0072	0.004	0.26	0.01	0.01	0.01	0.03	0.07

注:1<sup>#</sup>~7<sup>#</sup>采样地点分别为1120中段北1号、1120中段北2号、1135分层10号矿房、1145分层13号矿房、1080分层北1号矿房、循环用水及没有经过充填区的地下水涌水。ND表示未检测出。

### 2.2 确定充填水质的相关物元参数

参考评价指标分类标准,并对数据进行归一化处理,得

到经典域  $M_o$ 、节域  $M_p$ 、待评物元  $M_x$ 。

经典域  $M_o$  :

$$M_o = \begin{bmatrix} M & M_{o1} & M_{o2} & M_{o3} & M_{o4} & M_{o5} \\ c_1 & (0,0.01) & (0.01,0.1) & (0.1,0.2) & (0.2,0.2) & (0.2,1) \\ c_2 & (0,0.05) & (0.05,0.1) & (0.1,0.5) & (0.5,0.5) & (0.5,1) \\ c_3 & (0,0.033) & (0.033,0.067) & (0.067,0.33) & (0.33,0.67) & (0.67,1) \\ c_4 & (0,0.05) & (0.05,0.1) & (0.1,0.15) & (0.15,0.75) & (0.75,1) \\ c_5 & (0,0.033) & (0.033,0.033) & (0.033,0.067) & (0.067,0.67) & (0.67,1) \\ c_6 & (0,0.005) & (0.005,0.025) & (0.025,0.5) & (0.5,0.75) & (0.75,1) \\ c_7 & (0,0.006) & (0.006,0.062) & (0.062,0.125) & (0.125,0.625) & (0.625,1) \\ c_8 & (0,5e^{-5}) & (5.9e^{-5},2.9e^{-4}) & (2.9e^{-4},5.9e^{-4}) & (5.9e^{-4},8.8e^{-4}) & (8.8e^{-4},1) \\ c_9 & (0,0.33) & (0.33,0.33) & (0.33,0.33) & (0.33,0.67) & (0.67,1) \end{bmatrix}$$

节域  $M_p$  :

$$M_p = \begin{bmatrix} p & c_1 & (0.00, 1.00) \\ & c_2 & (0.00, 1.00) \\ & c_3 & (0.00, 1.00) \\ & c_4 & (0.00, 1.00) \\ & c_5 & (0.00, 1.00) \\ & c_6 & (0.00, 1.00) \\ & c_7 & (0.00, 1.00) \\ & c_8 & (0.00, 1.00) \\ & c_9 & (0.00, 1.00) \end{bmatrix}$$

待评物元  $M_s$  :

限于篇幅,仅给出 1# 采样点的待评物元  $M_1$ 。

$$M_1 = \begin{bmatrix} 1^\# & c_1 & 0.160 \\ & c_2 & 0.075 \\ & c_3 & 0.027 \\ & c_4 & 0.160 \\ & c_5 & 0.007 \\ & c_6 & 0.030 \\ & c_7 & 0.031 \\ & c_8 & 3.7e^{-4} \\ & c_9 & 0.083 \end{bmatrix}$$

### 2.3 计算评价指标关于水质等级的关联度

以 1# 采样地点为例,按照式(4)、式(5),对评价指标  $c_i$  关于各水质等级的关联度进行计算,其计算结果见表 3。

表 3 1# 采样地点各评价指标关于水质等级的关联度

Table 3 Correlation of each evaluation index with water quality grade at 1# sampling location

水质等级	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	$c_7$	$c_8$	$c_9$
I	-0.48	-0.25	-0.20	-0.41	-0.20	-0.45	-0.44	-0.46	-0.25
II	-0.27	-0.50	-0.20	-0.27	-0.80	-0.14	-0.44	-0.17	-0.75
III	-0.40	-0.25	-0.60	-0.06	-0.80	-0.01	-0.50	-0.26	-0.75
IV	-0.20	-0.85	-0.92	-0.02	-0.90	-0.94	-0.75	-0.37	-0.75
V	-0.20	-0.85	-0.96	-0.77	-0.99	-0.96	-0.95	-0.58	-0.88

### 2.4 基于博弈论确定的组合权重

根据博弈论的最优组合赋权法,采用层次分析法及熵权法进行组合赋权,主观权重采用层次分析法<sup>[12]</sup>计算得到,根据 9 个评价指标及各评价指标之间的重要程度,建立判断矩阵  $A$  为

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 & 6 & 5 & 4 & 5 & 4 & 8 \\ 1/2 & 1 & 1 & 5 & 4 & 3 & 2 & 3 & 7 \\ 1/2 & 1 & 1 & 5 & 4 & 3 & 2 & 3 & 7 \\ 1/6 & 1/5 & 1/5 & 1 & 1/2 & 1/4 & 1/3 & 1/4 & 5 \\ 1/5 & 1/4 & 1/4 & 2 & 1 & 1/2 & 1/4 & 1 & 4 \\ 1/4 & 1/3 & 1/3 & 4 & 2 & 1 & 2 & 1/2 & 3 \\ 1/5 & 1/2 & 1/2 & 3 & 4 & 1/2 & 1 & 1/2 & 3 \\ 1/4 & 1/3 & 1/3 & 4 & 1 & 2 & 2 & 1 & 2 \\ 1/8 & 1/7 & 1/7 & 1/5 & 1/4 & 1/3 & 1/3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

求出判断矩阵  $A$  的最大特征值  $\lambda_{\max} = 9.7598$ ,并根据方根法求得主观权重为

$$w_1 = (0.2894, 0.1833, 0.1833, 0.0342, 0.0510, 0.0791, 0.0759, 0.0817, 0.0221)$$

通过一致性检验,得到  $CR = 0.095 < 0.1$ ,因此认为判断矩阵满足一致性,主观权重的计算结果是有效的。

客观权重选择熵权法<sup>[13]</sup>进行确定,根据表 2 中各评价指标实测值,构建评价矩阵  $B$  为

$$B = \begin{bmatrix} 0.0008 & 0.0075 & 0.004 & 0.32 & 0.01 & 0.06 & 0.25 & 0.126 & 0.25 \\ 0.0001 & 0.0079 & 0.004 & 0.28 & 0.01 & 0.06 & 0.17 & 0.053 & 0.19 \\ 0.0027 & 0.0047 & 0.004 & 0.75 & 0.01 & 0.06 & 0.13 & 0.976 & 0.8 \\ 0.0021 & 0.0044 & 0.004 & 0.22 & 0.01 & 0.06 & 0.09 & 0.041 & 0.15 \\ 0.0038 & 0.0087 & 0.004 & 0.67 & 0.01 & 0.06 & 0.11 & 6.026 & 1.36 \\ 0.0023 & 0.0183 & 0.027 & 0.85 & 0.07 & 0.06 & 0.14 & 339.45 & 0.47 \\ 0 & 0.0072 & 0.004 & 0.26 & 0.01 & 0.01 & 0.01 & 0.03 & 0.07 \end{bmatrix}$$

为消除各评价指标间单位不同的影响,对  $B$  中数据进行归一化处理,并按照熵权法计算权重的步骤,计算得到客观权重指标为

$$w_2 = (0.0646, 0.0270, 0.1183, 0.0279, 0.1237, 0.0119, 0.0296, 0.5123, 0.0847)$$

由主客观权重计算结果可以看出,用两种方法计算得到的权重有差异。因此,有必要根据博弈论的思想,对主客观权重进行线性组合,按照公式(8)求解得到线性权重组合系数为  $a_1 = 0.5251$ 、 $a_2 = 0.8299$ ,归一化处理后为  $a_1^* = 0.3875$ 、 $a_2^* = 0.6125$ ,将其代入到式(9),得到最优组合权重为

$$w^* = (0.1517, 0.0876, 0.1435, 0.0303, 0.0955, 0.0379, 0.0475, 0.3454, 0.0605)$$

### 2.5 计算综合关联度,确定评价结果

通过各采样地点评价指标关于水质等级的关联度以及评价指标组合权重值,根据式(10)~式(12)计算得到 7 个待评价采样地点的水样等级以及所属等级的特征值,结果见表 4。

表 4 列举了采用改进赋权的可拓方法、单一可拓方法、多目标决策-理想点法的水质评价结果,并对 3 种方法的结果进行对比分析。从表 4 可看出:1) 采用单一可拓方法评价时,1#、3#、4# 采样地点的水质为 II 级;采用多目标决策-理想点法评价时,这 3 个点的水质分别为 I 级, III 级, I 级;而本文所采用的方法为 III 级。观察实际情况发现,这几处采样地点在总汞、总砷、铁、锌、总磷这几项指标上含量均将要达到或已达到 III 级分类标准,这表明采用本文方法进行可拓评价更为贴近水质等级的实际情况,评价结果更为合理;2) 其余采样地点的两种方法的评价结果相一致,均显示出未充填区域水质

表4 各采样地点综合关联度  $K_j(M_i)$  及水质等级评价

Table 4 Results of water quality assessment at every sampling location

采样地点	$K_{m_1}$	$K_{m_2}$	$K_{m_3}$	$K_{m_4}$	$K_{m_5}$	特征值	本文方法	单一可拓评价	多目标理想点
1 <sup>#</sup>	-0.3925	-0.3571	-0.3315	-0.3902	-0.6211	2.607	III	II	I
2 <sup>#</sup>	-0.3146	-0.3750	-0.5514	-0.8082	-0.8886	2.091	I	I	I
3 <sup>#</sup>	-0.4430	-0.4034	-0.3846	-0.4216	-0.5122	2.786	III	II	III
4 <sup>#</sup>	-0.4247	-0.3714	-0.3677	-0.4366	-0.4742	2.737	III	II	I
5 <sup>#</sup>	-0.5631	-0.5362	-0.5114	-0.5795	-0.3921	3.409	V	V	II
6 <sup>#</sup>	-0.7613	-0.7381	-0.6037	-0.7572	-0.2228	4.056	V	V	V
7 <sup>#</sup>	-0.1800	-0.4388	-0.7256	-0.8831	-0.9383	1.847	I	I	I

注:  $K_{m_j}$  为对应采样点相对于  $j$  等级的综合关联度。

最好,为I级;循环用水和5<sup>#</sup>采样点的水质已达到V级,已遭受严重污染,不适合作为生活饮用水,对循环用水需进行处理后使用;其余监测点水质均在以人类健康基准值为依据,主要适用于集中式生活饮用水水源及工、农业用水的III类标准以内。

### 3 结论

1) 用物元分析法对水质进行了评价。物元模型中的综合关联度等指标,既可反映样本评价等级的绝对性,又可反映评价等级的相对性。而基于博弈论的组合赋权方法也使得评价结果全面、系统、真实,计算简便,实用性强,易推广。通过实例分析说明了基于博弈论的水质评价物元可拓模型的有效性和可行性,为水资源保护决策提供了较为可靠的科学依据。

2) 选取了不同年份、循环用水和未充填区域的水质进行评价。评价结果为:未充填区域水质为I级,循环用水水质已达到V级,其他水质均比未充填区域差。这表明,充填还是对水环境造成了一定影响,但大多在可接受范围内。

3) 根据评价结果可知,须继续监测磷石膏矿井充填对水质的影响。对于刚充填完成的区域和循环用水,则需多加研究处理,以防污染地下水。贵州开磷集团应该严格废水的处理和循环利用,查明地下水水质超标原因,并深入开展后续实验研究。

#### 参考文献 (References)

[1] 李佳宣, 施泽明, 唐瑞玲, 等. 磷石膏堆场对周围农田土壤重金属含量的影响[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2010(5): 52-55.  
Li Jiakuan, Shi Zeming, Tang Ruiling, et al. Influence of phosphogypsum pile on the concentration of heavy metals in farming Soil[J]. China Non-Metallic Minerals Industry, 2010(5): 52-55.

[2] 李光明, 李霞, 贾磊, 等. 国内外磷石膏处理和处置概况[J]. 无机盐工业, 2012, 44(10): 11-13.  
Li Guangming, Li Xia, Jia Lei, et al. General situation of treatment and disposal of phosphogypsum[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2012, 44(10): 11-13.

[3] 何莎莎. 煤矸石井下填充过程中对地下水环境有机污染的影响研究[D]. 河南: 河南理工大学, 2007.  
He Shasha. Investigation of organic pollution impact on groundwater during mine-filling process with gangues[D]. Henan: Henan Polytechnic University, 2007.

[4] 赵晓亮, 齐杰杰, 赵国智, 等. 城市水库水质模糊综合评价模型建立与

应用[J]. 科技导报, 2012, 30(11): 53-56.  
Zhao Xiaoliang, Qi Qingjie, Zhao Guozhi, et al. Establishment and applications of fuzzy comprehensive evaluation model for city drinking water source quality assessment[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(11): 53-56.

[5] 汤爱中. 水源地水质评价及预测方法研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2013.  
Tang Aizhong. Study on water quality assessment and prediction method of water source[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2013.

[6] 齐培培. 基于贝叶斯网络的水质污染评价及预测[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.  
Qi Peipei. Water quality pollution evaluation and prediction based on bayesian networks[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.

[7] 方圆, 刘永强, 戴玮, 等. 基于物元分析法的HSE管理绩效评价[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(6): 222-224.  
Fang Yuan, Liu Yongqiang, Dai Wei, et al. HSE management performance evaluation based on the matter-element analysis[J]. Journal of Safety and Environment, 2013, 13(6): 222-224.

[8] 樊引琴, 刘婷婷, 李娅, 等. 物元分析法在黄河水质评价中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(2): 166-169.  
Fan Yinqin, Liu Tingting, Li Hua, et al. Application of matter element analysis method to water quality evaluation in Yellow River[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2013, 24(2): 166-169.

[9] 路遥, 徐林荣, 陈舒阳, 等. 基于博弈论组合赋权的泥石流危险度评价[J]. 灾害学, 2014, 29(1): 194-200.  
Lu Yao, Xu Linrong, Chen Shuyang, et al. Combined weight method based on game theory for debris flow hazard risk assessment[J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(1): 194-200.

[10] 刘芳. 磷石膏基材料在磷矿充填中的应用[J]. 化工学报, 2009, 60(12): 3171-3177.  
Liu Fang. Application of phosphogypsum-based material to tailings backfill of phosphoritemine[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2009, 60(12): 3171-3177.

[11] 叶学东. 我国磷石膏利用现状、问题及建议[J]. 磷肥与复肥, 2011, 26(1): 5-7.  
Ye Xuedong. Present status, problems and suggestions of phosphogypsum utilization in China[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2011, 26(1): 5-7.

[12] 倪小芬, 孟祥睿, 魏新利, 等. 基于层次分析法的安全评价对经济贡献率的测算研究[J]. 安全与环境学报, 2012(3): 212-215.  
Ni Xiaofen, Meng Xiangrui, Wei Xinli, et al. Study on economic contribution rate of safety evaluation based on AHP[J]. Journal of Safety and Environment, 2012(3): 212-215.

[13] 孙月峰, 张表志, 闫雅飞, 等. 基于熵权的城市水资源安全模糊综合评价研究[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(1): 87-91.  
Sun Yuefeng, Zhang Biaozhi, Yan Yafei, et al. Fuzzy comprehensive assessment model for the urban water resource safety assessment based on the entropy weight[J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 14(1): 87-91.

(责任编辑 王媛媛)