

基于熵权的改进可拓评价方法 在地下水水质评价中的应用

于丹¹,张搏¹,许春东²

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 辽宁有色勘察研究院, 辽宁 沈阳 110000)

摘要 目的 构建应用于地下水水质评价的熵权改进可拓评价模型,并验证模型的可行性. 方法 将熵权理论和非对称贴进度原则引入到传统可拓评价方法当中,建立基于熵权的改进可拓评价模型. 同时,将模型应用到矿区地下水水质评价实例当中,并且与采用 TOPSIS 法运用相同数据所得评价结果进行对比,以验证评价结果的准确性和模型的可行性. 结果 基于熵权的改进可拓方法所得的评价结果显示;区域内各个采样点地下水水质均处于 II 类与 III 类水之间,倾向于 III 类水,与绝对隶属原则判定结果完全一致,同时,评价结果与 TOPSIS 方法所得结果基本一致. 结论 研究区地下水水质为 III 类水,评价结果对比一致也印证了将基于熵权的改进可拓评价方法运用到地下水水质评价中完全可行,是较为理想的地下水水质评价模型.

关键词 水质;可拓评价;熵权;贴进度

中图分类号 X-523

文献标志码 A

Application of the Improved Extension Evaluation Method Based on Entropy Weight in Groundwater Quality Evaluation

YU Dan¹, ZHANG Bo¹, XU Chundong²

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Non-ferrous Exploration Institute in Liaoning Province, Shenyang, China, 110000)

Abstract: Construct an improved extension evaluation model of entropy weight to evaluation of groundwater quality, and verify the feasibility of the model. Entropy weight theory and asymmetric progress principle were applied to the extension evaluation method to establish a improved evaluation model of objective element extension based on entropy weight. The model is applied to the evaluation instance of groundwater quality and evaluation result acquired by adapting osculating value method that using the same data is compared and analyzed. The evaluation results of the improved extension method based on the entropy weight are presented; The groundwater quality of each sampling point in the mining area is between Class II and III, tend to class III water, And ab-

收稿日期:2015-11-20

基金项目:国家自然科学基金项目(50479024);陕西省教育厅专项科研计划项目(04JK233)

作者简介:于丹(1963—),女,教授,主要从事地下水在岩土工程中作用分析方面研究.

solute determination of the principle of subordination completely consistent, at the same time, the results are in accordance with the TOPSIS method. Groundwater quality in the study area is Grade III, the consistency of the comparison results also confirms that it is feasible to apply the improved extension evaluation method based on entropy weight to the groundwater quality evaluation, which is a ideal evaluation mode of groundwater quality.

Key words: water quality; extension evaluation; entropy weight; close degree

地下水水质评价,通常是指对区域水环境进行环境要素分析,根据近期的地下水水质监测资料,对水质的优劣进行定量的评价过程.评价方法的选择对于评价结果的准确性尤为重要.目前比较常用的方法主要包括综合指数法^[1-3]、人工神经网络模型^[4-7]、模糊数学法^[8-11]、灰色聚类法^[12-13]等.尽管方法(模型)多达几十种可供选择,但是,至今仍然没有理想的模型能够得到广泛应用.众多方法普遍存在对地下水水质分界线的模糊性考虑不足、对于样本的有限性和地下水系统的复杂性的问题考虑不足、构建合理的隶属函数和权重矩阵较为复杂、容易导致信息丢失而使评价结果偏差等问题.可拓评价方法考虑了水质的不确定性,同时也注意到了水质界限的模糊性,既可以反应评价等级,又能够体现评价结果对于评价等级的贴进程度.兰双双^[14]等人以梨树县平原区浅层地下水作为研究对象,采用可拓评价方法对研究区的水质进行评价,并以综合指数法作为对比方法验证了模型的可行性.但是传统的可拓评价方法中的最大隶属度原则存在容易丢失信息而导致判别结果偏差的缺陷.在评价指标的权重确定方面,传统的头脑风暴法存在较大的人为主观因素诱导,也容易造成评价结果偏差.因此,笔者采用熵权法确定评价指标的权重,可有效地避免人为因素对权重的影响.同时对传统可拓评价方法进行改进,采用非对称贴进度原则取代原有的最大隶属度原则进行结果判定,克服了传统方法的不足.

1 基于熵权的改进可拓评价方法

可拓评价方法是建立包括多个指标参数

的评价模型,通过构建可拓相关矩阵,进行聚类分析,进而反应事物的综合水平的评价方法.熵权法是把评价中各个待评单元的信息进行量化与综合分析,并赋予权重的客观赋权法.鉴于熵权法和物元可拓评价方法自身特点.建立基于熵权的改进可拓评价模型.并且应用到地下水水质评价当中.使得评价结果既解决了人为因素对赋权的影响,又具有可拓评价的优点,结果更加真实可信^[15].

1.1 同征物元体和待评物同征物元矩阵

为了正确反应事物的质与量的关系,从而更加贴切地描述客观事物的变化过程,解决矛盾.为此,物元概念被蔡文^[16]教授写入了可拓学.事物 N 、事物特征 C 和特征量值 V 三者所组成的三元组称为物元,记作 $R = (N, C, V)$. 不同的事物可以兼有一个或多个相同的特征,用同征物元表示. 设 $R_1 = (N_1, C_1, V_1)$ 、 $R_2 = (N_2, C_2, V_2)$ 、 \cdots 、 $R_m = (N_m, C_m, V_m)$ 为 m 个同征物元,则由 R_1, R_2, \cdots, R_m 组成的 R 称为同征物元体.

笔者将地下水水样设定为事物 N ,将选取的水质评价指标作为事物的相同特征,构建待评物同征物元矩阵 R_N 为

$$R_N = \begin{bmatrix} N & N_1 & N_2 & \cdots & N_m \\ C & V_1 & V_2 & \cdots & V_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & N_1 & N_2 & \cdots & N_m \\ C_1 & v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1m} \\ C_2 & v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_n & v_{n1} & v_{n2} & \cdots & v_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: N_1, N_2, \cdots, N_m 表示 m 个事物(地下水水样); C_1, C_2, \cdots, C_n 表示同征物元的 n 个相

同特征(评价指标); v_{ij} 表示第 j 个地下水水样 N_j 的第 i 个评价指标 C_i 的数量值,即待评水样的水质实际检测数据, $(v_{ij})_{n \times m}$ 称为待评物同征物元矩阵^[17].

1.2 确定经典域与节域物元矩阵

根据地下水环境质量和评价指标,构造经典域和节域.

$$R_0 = \begin{bmatrix} G & G_1 & G_2 & \cdots & G_m \\ C & V_1 & V_2 & \cdots & V_m \end{bmatrix} =$$
$$\begin{bmatrix} G & G_1 & G_2 & \cdots & G_s \\ C_1 & (a_{11}, b_{11}) & (a_{12}, b_{12}) & \cdots & (a_{1s}, b_{1s}) \\ C_2 & (a_{21}, b_{21}) & (a_{22}, b_{22}) & \cdots & (a_{2s}, b_{2s}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_n & (a_{n1}, b_{n1}) & (a_{n2}, b_{n2}) & \cdots & (a_{ns}, b_{ns}) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

式中: R_0 为经典域同征物元体; G_1, G_2, \cdots, G_s 为地下水水质评价的 S 个等级; (a_{ij}, b_{ij}) 为 S 个等级的 n 个相同特征的经典域,表示第 j 个等级关于第 i 个相同特征的规定数量值的范围.

$$R_p = \begin{bmatrix} P, C_1, v_{1p} \\ C_2, v_{2p} \\ \vdots \\ C_n, v_{np} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P, C_1, \langle a_{1p}, b_{1p} \rangle \\ C_2, \langle a_{2p}, b_{2p} \rangle \\ \vdots \\ C_n, \langle a_{np}, b_{np} \rangle \end{bmatrix}. \quad (3)$$

式中: R_p 为节域物元阵; $V_{ij} \subset V_{ip} (i = 1, 2, \cdots, n)$; P 为评价等级; $\langle a_{ip}, b_{ip} \rangle$ 为节域,表示第 i 个评价指标的全体评价等级规定数量值范围.

1.3 确定权重系数

笔者采用熵权法对各个评价指标的权重进行计算.作为一种客观赋权方法,熵权法有效地克服了人为因素的影响,权重仅仅依赖于所选定的待评水样和评价指标,从而使结果更加符合实际.

- (1)将待评物同征物元矩阵设定为初始评价矩阵.
- (2)初始数据标准化,消除数量级和量纲的影响.

$$y_{ij} = \frac{(v_{ij})_{\max}^i - v_{ij}}{(v_{ij})_{\max}^i - (v_{ij})_{\min}^i}. \quad (4)$$

式中: y_{ij} 为标准化后的特征值; $(v_{ij})_{\max}^i$ 为第 i 个评价指标的各个地下水水样水质检测数据最大值; $(v_{ij})_{\min}^i$ 为第 i 个评价指标的各个地下水水样水质检测数据最小值.

标准评价矩阵为

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{m1} & y_{m2} & \cdots & y_{mn} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

(3)计算信息熵.

$$P_{ij} = (y_{ij} + 10^{-4}) / \sum_{i=1}^m (y_{ij} + 10^{-4}). \quad (6)$$

式中: P_{ij} 为特征值修正值; 10^{-4} 为修正系数.

$$e_i = - \frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij}. \quad (7)$$

式中: e_i 为第 i 评价指标信息熵.

(4)计算熵权.

$$w_i = \frac{1 - e_i}{\sum_{i=1}^n (1 - e_i)}. \quad (8)$$

式中: w_i 为指标 i 的权重.

1.4 关联度的计算及等级评定

在众多的分析方法中,判别原则的有效性至关重要.传统的可拓评价方法运用最大隶属原则进行关联度计算和等级评价.但是,最大隶属度原则也存在着容易导致信息丢失而使判别结果偏差或出错的缺陷.为了弥补最大隶属原则失效的问题,相关学者通过大量的分析研究^[18-19],最终提出,非对称贴近度原则可以很好地解决最大隶属原则信息丢失的问题.因此本文中在关联度计算和等级评定过程中采用张洪波^[20]提出的非对称贴近度公式(9)($P = 1$ 时)进行计算和评价.

$$T = 1 - \frac{1}{n(n+1)} \sum_{i=1}^n D \times w_i. \quad (9)$$

式中: T 为非对称贴近度; D 为待评物同征物元矩阵关于经典域数量值范围的距离.

具体的计算和评价步骤如下:

(1)对经典域通征物元矩阵 R_0 中的数量值进行规格化处理,得:

$$R'_0 = \begin{bmatrix} G & G_1 & G_2 & \cdots & G_s \\ C_1 & v'_{11} & v'_{12} & \cdots & v'_{1s} \\ C_2 & v'_{21} & v'_{22} & \cdots & v'_{2s} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_n & v'_{n1} & v'_{n2} & \cdots & v'_{ns} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: $v'_{ij} = \frac{v_{ij}}{b_{ip}}$ ($i = 1, 2, \cdots, n; j = 1, 2, \cdots, m$) 为规格化后的经典域; b_{ip} 为节域的上边界值.

同理,对待评物同征物元矩阵进行规格化,得:

$$R'_N = \begin{bmatrix} N & N_1 & N_2 & \cdots & N_m \\ C_1 & v''_{11} & v''_{12} & \cdots & v''_{1m} \\ C_2 & v''_{21} & v''_{22} & \cdots & v''_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_n & v''_{n1} & v''_{n2} & \cdots & v''_{nm} \end{bmatrix} \quad (11)$$

(2)计算规格化后的待评物同征物元矩阵关于新的经典域数量值范围的距离 $D_j(v_i)$.

$$\text{令: } D_j(v_i) = \rho(v_i, V_j) = \left| v_i'' - \frac{a'_{ij} + b'_{ij}}{2} \right| - \frac{1}{2}(b'_{ij} - a'_{ij}).$$

(3)采用熵权法计算各评价指标的权重 w_i ($i = 1, 2, \cdots, n$) 定义贴近度.

按照式(9)进行贴近度计算

$$T_j(G) = 1 - \frac{1}{n(n+1)} \sum_{i=1}^n w_i \times D_j(v_i'),$$
$$j = 1, 2, \cdots, m. \quad (12)$$

式中: $T_j(G)$ 为第 i 个地下水水样关于第 j 个等级的贴近度.

(4)等级评定.

若 $T_j(G) = \max_j T_j(G)$, 则 j 为待评物所属级别.

$$\text{令 } \overline{T}_j(G) = \frac{T_j(G) - \min_j T_j(G)}{\max_j T_j(G) - \min_j T_j(G)},$$

$$j^* = \frac{\sum_{j=1}^m j \cdot \overline{T}_j(G)}{\sum_{j=1}^m \overline{T}_j(G)}.$$

(13)

式中: j^* 为待评物元等级变量特征值,用以判断待测物元偏向相邻等级的程度^[21].

2 改进可拓法在地下水水质评价中的应用

2.1 研究区地下水环境概况

研究区位于辽宁省本溪市东北部山区,地貌单元为构造剥蚀高丘,地貌类型单一,地势较为平缓,坡度较小.地层自上而下由角砾和不同风化程度的页岩构成.地下水类型主要为区域基岩裂隙水,赋存于页岩的裂隙当中,水源丰富.

2.2 监测水样采集与监测项目分析方法

根据国家环境《采样方案设计技术规范》(HJ495—2009)要求,采样设计四个地下水采样点,采样网络扩展到整个研究区,采样频次为一次,监测项目见表1.

表1 地下水水质监测项目

水样名称	监测项目
餐馆水 董家水 大井水 旅店水	水温、色度、臭和味、浊度、pH 值、DO、TDS、电导率、碳酸根/重碳酸根、总磷、亚硝酸盐氮、氨氮、氯化物、钾、钠、钙、六价铬、苯系物、金属元素全扫、铜、锌、铁、银、锰、镉、砷、汞、铈等的定量测试以及有机物质多环芳烃的定量测试

本次检测实验室水质监测项目的分析方法优先选用国家或行业标准分析方法,尚无国家或者行业标准分析方法的检测项目,选用行业统一分析方法或行业规范.采用经过验证的 ISO、美国 EPA 和日本 JIS 方法体系等其他等效分析方法,其检出限、精确度和精密度达到质控要求.

现场测试使用的仪器为哈希多功能水质参数仪,其检测的项目有水温、pH 值、电导率、浑浊度、色、臭和味等.

2.3 评价指标的确定

鉴于文中研究区位于矿区附近,矿山开

采和尾矿堆存势必会产生大量重金属污染物. 因此,在对研究区进行现场调查后,结合实际情况,综合考虑影响作用,选择对人体有

害并且会对地下水利用功能造成严重影响的锰、镉、汞、铅和砷 5 种重金属元素作为本次的评价指标. 实际检测数据见表 2.

表 2 地下水水质评价因素指标

Table 2 Evaluation indexes values of groundwater quality

水样名称	$\rho(\text{锰})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{镉})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{汞})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{铅})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{砷})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
餐馆水	0.001	0.002 0	0.000 40	0.006	0.046 0
董家水	0.001	0.000 6	0.001 13	0.007	0.005 1
大井水	0.001	0.000 3	0.001 03	0.010	0.004 6
旅店水	0.175	0.000 2	0.000 40	0.006	0.007 9

评价标准选用地下水环境质量标准 (GB/T14848—93). 由于标准在等级划分过程中采用限制评价指标的浓度上限原则,这样就存在第 V 类水只存在指标下限而无指

标上限的现象. 鉴于所选择水样不存在严重超标的现象,笔者采用地下水环境质量标准的前四个等级构建评价指标的等级评价范围. 划分标准见表 3.

表 3 地下水水质标准

Table 3 Groundwater quality defined rules

评价等级	$\rho(\text{锰})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{镉})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{汞})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{铅})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{砷})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
I 类	≤ 0.05	$\leq 0.000\ 1$	$\leq 0.000\ 05$	≤ 0.005	≤ 0.005
II 类	≤ 0.05	≤ 0.001	≤ 0.0005	≤ 0.01	≤ 0.01
III 类	≤ 0.1	≤ 0.01	≤ 0.001	≤ 0.05	≤ 0.05
IV 类	≤ 1	≤ 0.01	≤ 0.001	≤ 0.1	≤ 0.05

2.4 计算权重系数

采用熵权法对各个评价指标的权重值进行计算,则评价指标的权值计算结果见表 4.

表 4 权重计算表

Table 4 Calculate of factor weight

评价因子	熵权值
锰	0.173
镉	0.176
汞	0.300
铅	0.178
砷	0.173

2.5 关联度计算

将实际检测数据及熵权法所得权重代入式(10)~式(13)中进行计算,得到评价结果(见表 5). 同时,为了验证模型的可行性,选择 TOPSIS 法对研究区水质进行综合评价,将评价结果进行对照.

2.6 地下水水质等级评定

由评价结果表 5 中的评价等级 j_0 可以看出,研究区的 4 个不同采样点的水质等

表 5 地下水水质评价结果

Table 5 Evaluation results of groundwater quality

水样名称	评价指标贴进度					j_0	j^*	TOPSIS 法
	I 类	II 类	III 类	IV 类	最大值			
餐馆水	0.991	0.994	1.003	0.989	1.003	III 类	2.677	III 类
董家水	0.987	0.991	0.997	0.988	0.997	III 类	2.792	III 类
大井水	0.990	0.993	0.999	0.990	0.999	III 类	2.753	III 类
旅店水	0.995	0.997	1.002	0.997	1.002	III 类	2.916	II 类

级均为Ⅲ类。由等级变量特征值可以看出,区域地下水水质均处于Ⅱ类与Ⅲ类水之间,倾向于Ⅲ类水,与绝对隶属原则判定结果一致。评价结果与采用相同检测数据的TOPSIS法所得评价结果基本一致。从而说明了评价结果的准确性,同时也印证了将基于熵权的改进可拓评价方法应用到地下水水质评价当中完全可行。

3 结 论

(1)采用基于熵权的改进可拓评价方法对辽宁东北部某矿区地下水水质进行评价,区域内的四个不同采样点水质等级均为Ⅲ类,变量特征值表明,水质均处于Ⅱ类与Ⅲ类水之间,并倾向于Ⅲ类水。评价结果与采用TOPSIS经典方法所得评价结果基本一致。

(2)基于熵权的改进可拓评价方法,在权重赋值方面,克服了人为因素的影响。在判定原则方面,引入非对称贴近度原则,很好地弥补了传统可拓评价方法最大隶属度原则容易丢失信息的问题。同时,改进可拓评价方法所得结果既能反应相对级别,有能体现绝对隶属程度,是较为理想的地下水水质评价模型。

参考文献

- [1] KARTAR S, PAVAN K, KUMAR S B. An associative relational impact of water quality on crop yield: a comprehensive index analysis using LISS-III Sensor[J]. IEEE sensors journal, 2013, 13(12): 4912–4917.
- [2] MENG Xianlin, FAN Guangliang, CAO Xiaohui, et al. Research on a multi-Index comprehensive evaluation method for surface water quality assessment[J]. Advanced materials research, 2014, 1010(1012): 321–324.
- [3] HONG Cui, Water quality assessment for Kaikong River(Xinjiang, China) based on multivariate statistical analysis and comprehensive water quality identification index[J]. International journal of earth sciences and engineering, 2015, 8(2): 590–596.
- [4] DING Jinting, HE Jie. Water quality forecast based on BP-artificial neural network model in Qiantang River[J]. Applied mechanics and materials, 2014(668/669): 994–998.
- [5] SAEAD E, NILOUFAR L. Modeling nitrate pollution of groundwater using artificial neural network and genetic algorithm in an arid zone[J]. International journal of water, 2009, 5(2): 194–203.
- [6] KYUNG H C, SUTHIPONG S, YAKOV A P, et al. Prediction of contamination potential of groundwater arsenic in Cambodia, Laos, and Thailand using artificial neural network[J]. Water research, 2011, 45(17): 5535–5544.
- [7] 苏彩红, 向娜, 陈广义, 等. 基于人工蜂群算法与BP神经网络的水质评价模型[J]. 环境工程学报, 2012, 6(2): 699–704.
(SU Caihong, XIANG Na, CHEN Guangyi, et al. Water quality assessment model based on artificial colony algorithm and the BP neural network[J]. Chinese journal of environmental engineering, 2012, 6(2): 699–704.)
- [8] 房春生, 孟赫, 单玉书, 等. 基于GIS的吉林省地下水水质模糊评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(增刊): 293–297.
(FANG Chunsheng, MENG He, SHAN Yushu, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of groundwater quality based on GIS of Jilin province[J]. Journal of Jilin university(earth science edition), 2011, 41(S): 293–297.)
- [9] JIANG Xue, XIAO Changlai, LIANG Xiujuan, et al. Application of fuzzy comprehensive evaluation method in groundwater quality assessment in Handan city[J]. Advanced materials research, 2010, 113(116): 1275–1279.
- [10] GONG Peibin, SUN Baojiang, LIU Gang, et al. Fuzzy comprehensive evaluation in well control risk assessment based on AHP: a case study[J]. Advances in petroleum exploration and development, 2012, 4(1): 13–18.
- [11] 乔宇, 梁秀娟. 改进的模糊数学法在地下水水质评价中的应用[J]. 水电能源科学, 2015, 33(6): 27–30.
(QIAO Yu, LIANG Xiujuan. The application in the evaluation of groundwater quality based on the improved fuzzy mathematics method[J]. Water resources and power, 2015, 33(6): 27–30.)
- [12] 赵焱, 王婷, 徐曦. 改进灰色聚类关联在地下水水质评价中的应用[J]. 人民黄河, 2012, 34(7): 56–58.
(ZHAO Yan, WANG Ting, XU Xi. The appli-

- cation in the evaluation of groundwater quality based on the improved gray clustering [J]. Yellow river, 2012, 34(7): 56 - 58.)
- [13] 邱贵江. 基于指标规范值的灰色聚类法的地下水水质评价[J]. 水文, 2011, 31(4): 35 - 39.
(QIU Guijiang. Evaluation of groundwater quality based on the standard value of grey clustering method [J]. Hydrology, 2011, 31(4): 35 - 39.)
- [14] 兰双双, 王滨. 基于物元可拓法的地下水水质评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, 39(4): 722 - 727.
(LAN Shuangshuang, WANG Bin. Evaluation of groundwater quality based on matter-element extension method[J]. Journal of Jilin university(earth science edition), 2009, 39(4): 722 - 727.)
- [15] 尹继娟, 梁秀娟, 肖长来, 等. 基于灰色聚类的物元可拓法在地下水水质评价中的应用[J]. 节水灌溉, 2012, 6(4): 52 - 55.
(YIN Jijuan, LIANG Xiujuan, XIAO Changlai, et al. The application in the evaluation of groundwater quality based on grey clustering of matter-element extension method [J]. Water-saving irrigation, 2012, 6(4): 52 - 55.)
- [16] 蔡文. 可拓学[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
(CAI Wen. Extenics [M]. Beijing: Science Press, 2014.)
- [17] 孙秀玲, 褚君达, 马惠群, 等. 物元可拓评价法的改进及其应用[J]. 水文, 2007, 27(1): 4 - 7.
(SUN Xiuling, CHU Junda, MA Huiqun, et al. Improvement and application of evaluation method of matter-element and extension [J]. Hydrology, 2007, 27(1): 4 - 7.)
- [18] 关全成, 赵双喜, 刘江峰, 等. 模糊贴近度法在水质评价中的应用[J]. 节水灌溉, 2012(7): 43 - 46.
(GUAN Quancheng, ZHAO Shuangxi, LIU Jiangfeng, et al. Application of fuzzy close degree method in water quality evaluation [J]. Water-saving irrigation, 2012(7): 43 - 46.)
- [19] 孟珍珠, 唐德善, 魏宇航, 等. 基于海明贴近度的地下水水质熵权模糊物元评价模型[J]. 四川环境, 2015, 34(3): 117 - 121.
(MENG Zhenzhu, TANG Deshan, WEI Yuhang, et al. Fuzzy matter-element evaluation model for entropy weight of groundwater quality based on Hamming proximity degree [J]. Environment of Sichuan province, 2015, 34(3): 117 - 121.)
- [20] 孙廷容, 黄强, 张洪波, 等. 基于粗集权重的改进可拓评价方法在灌区干旱评价中的应用[J]. 农业工程学报, 2006, 22(4): 70 - 74.
(SUN Tingrong, HUANG Qiang, ZHANG Hongbo, et al. The application in the evaluation of irrigation area of drought based on the evaluation methods of coarse centralized heavy improvement extension [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2006, 22(4): 70 - 74.)
- [21] 王洪德, 曹英浩. 基于改进变权物元可拓模型的围岩稳定性评价[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(8): 23 - 29.
(WANG Hongde, CAO Yingjie. Stability evaluation of surrounding rock based on the improved variable weight matter-element extension model [J]. Journal of China safety science, 2013, 23(8): 23 - 29.)