

· 调查与评价 ·

改进的模糊综合评价法在某煤矿区水质评价中的应用

张彪¹, 姜春露^{1*}, 郑刘根¹, 赵琦¹, 苏玮¹, 陈园平²

(1. 安徽大学资源与环境工程学院, 安徽省矿山生态修复工程实验室, 安徽 合肥 230601;

2. 安徽科垦工程科技有限公司, 安徽 合肥 230601)

摘要: 基于熵权法和相对标准偏差法组合评价因子权重, 综合最大隶属度原则与加权平均原则, 建立改进的模糊综合评价法, 应用该方法评价某煤矿区浅层地下水水质, 并与其他评价方法作比较。结果表明: 在研究区 33 个浅层地下水监测点中, 属于 I 类、II 类、III 类水的监测点分别有 4 个、16 个、13 个, II 类水最多, 占比 48.5%, 无 IV 类、V 类水, 水质状况总体较好; 对比发现, 工业园水质相对较差, 煤矿区及工业广场次之, 农田和居民区水质相对较好; 改进后的模糊综合评价法综合考虑了评价因子间的内在联系, 既减小了主观因素对评价过程的影响, 也规避了单一评判原则对水质等级判定带来的局限性, 评价结果更符合实际情况。

关键词: 地下水水质; 模糊综合评价法; 方法改进; 综合判别原则; 煤矿区

中图分类号: X523; X824

文献标志码: B

文章编号: 1006-2009(2022)05-0027-06

Application of Improved Fuzzy Comprehensive Evaluation Method in Water Quality Assessment in A Coal Mine Area

ZHANG Biao¹, JIANG Chun-lu^{1*}, ZHENG Liu-gen¹, ZHAO Qi¹, SU Wei¹, CHEN Yuan-ping²

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Anhui Province

Engineering Laboratory for Mine Ecological Remediation, Hefei, Anhui 230601, China;

2. Anhui Keken Engineering Technology Co., Ltd., Hefei, Anhui 230601, China)

Abstract: Based on the combined evaluation factor weights of entropy weight method and relative standard deviation method, an improved fuzzy comprehensive evaluation method was established by integrating the principles of maximum membership and weighted average. This method was applied to evaluate the quality of shallow groundwater in a coal mine area, and compared with other evaluation methods. The results showed that among 33 shallow groundwater monitoring sites in the study area, there were 4, 16 and 13 sites belonging to Class I, Class II and Class III water respectively. The most belonged to Class II water, accounting for 48.5%. There was no Class IV or V water. The water quality was generally good. Through comparison, the water quality was relatively poor in industrial parks, followed by coal mine areas and industrial squares, and was relatively good in farmland and residential area. The improved fuzzy comprehensive evaluation method comprehensively considered the internal relationship between evaluation factors, which not only reduced the influence of subjective factors on the evaluation process, but also avoided the limitations of single evaluation principle on the determination of water quality grade, and the evaluation results were more in line with the actual situation.

Key words: Groundwater quality; Fuzzy comprehensive evaluation method; Method improvement; Comprehensive discrimination principle; Coal mine area

近年来,煤炭开采、运输、洗选等矿业活动对地下水的影响已被人们所关注^[1],开展地下水水质评价对煤矿区地下水合理开发利用具有重要的意

收稿日期: 2021-10-08; 修订日期: 2022-07-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41602310, 42072201); 中国博士后科学基金资助项目(2017M611044)

作者简介: 张彪(1994—),男,安徽合肥人,硕士,研究方向为矿山环境地质。

* 通信作者: 姜春露 E-mail: ahuclj@ahu.edu.cn

义。模糊综合评价法因能将模糊性的环境问题进行定量描述而被广泛应用于地下水水质评价^[2]。

权重的确定是模糊综合评价中的一个关键步骤。杨浩等^[3]采用超标倍数法、Zhang等^[4]使用熵权法确定权重,分别对洮河和咸阳地下水水质进行了综合评价;赵微等^[5]使用变异系数法确定因子权重,评价了人类活动对地下水环境的影响。以往研究均从主观或客观角度片面确定权重,权重系数受到主观因素或单一系数的限制影响,使得评价结果不够精确。隶属度确定是模糊综合评价中的另一关键步骤。过去学者多用最大隶属度原则判断水质等级,鲜有人关注最大隶属度原则的有效性问题^[6]。今基于熵权法和相对标准偏差(RSD)重新确定因子权重,并根据有效度值来检验最大隶属度原则的有效性,同时结合加权平均原则^[7]对水质等级进行综合判定。将改进的模糊综合评价法应用于某煤矿区浅层地下水水质评价,探讨该方法的适用性和实用性,以期丰富地下水水质评价方法和水环境治理工作提供一定的参考^[8]。

1 方法的改进

模糊数学综合评价法^[9]在水质评价中已有广泛应用,一般计算步骤在此不再赘述,下面将对该方法两个重要环节进行优化改进。

1.1 权重的改进

1.1.1 熵权法

在典型的模糊综合评价中,因子权重通常由实测值与相应的环境质量标准限值之比来确定^[10-12]。熵权赋值步骤如下。

(1)对由 n 个评价因子、 s 个评价对象组成的初始浓度矩阵标准化处理后,可得到标准化矩阵:

$$\mathbf{R} = (r_{ip})_{n \times s} \quad (1)$$

式中: r_{ip} 为第 p 个评价对象第 i 个评价因子的标准化值。

对于数值小而优型参数,计算公式如下:

$$r_{ip} = \frac{\max_p \{x_{ip}\} - x_{ip}}{\max_p \{x_{ip}\} - \min_p \{x_{ip}\}} \quad (2)$$

对于数值大而优型参数,计算公式如下:

$$r_{ip} = \frac{x_{ip} - \min_p \{x_{ip}\}}{\max_p \{x_{ip}\} - \min_p \{x_{ip}\}} \quad (3)$$

式中: $r_{ip} \in [0, 1]$; x_{ip} 为第 p 个评价对象第 i 个评价因子的实测值; $\max_p \{x_{ip}\}$ 和 $\min_p \{x_{ip}\}$ 分别为 x_{ip} 在所有评价对象中的最大值和最小值。

(2)第 i 个评价因子的熵 H_i 计算公式如下:

$$H_i = -k \sum_{p=1}^s f_{ip} \ln f_{ip} \quad (i = 1, 2, \dots, n; p = 1, 2, \dots, s) \quad (4)$$

$$\text{其中, } f_{ip} = \frac{r_{ip}}{\sum_{p=1}^s r_{ip}}, k = \frac{1}{\ln s} \quad (5)$$

当 $f_{ip} = 0$ 时,令 $f_{ip} \ln f_{ip} = 0$ 。

(3)第 i 个评价因子的熵权 w_i 计算公式如下:

$$w_i = \frac{1 - H_i}{n - \sum_{i=1}^n H_i} \quad (6)$$

式中: $w_i \in [0, 1]$, $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ 。

1.1.2 RSD法

根据RSD可确定各评价指标的权重,计算公式如下:

$$A_i = \frac{\delta_i}{\sum_{i=1}^n \delta_i} \quad (7)$$

式中: δ_i 为第 i 项指标的RSD。

1.1.3 组合权重

根据简单平均原则的数学方法确定两种客观权重的组合权重值,计算公式如下:

$$w = \eta \times w_i + (1 - \eta) \times A_i \quad (8)$$

式中: η 为偏好系数,文中取 $\eta = 0.5$ ^[13]。

1.2 评价原则的改进

1.2.1 最大隶属判别原则

模糊矩阵为 $\mathbf{R} = (a_{ij})_{n \times m}$,权重矩阵为 $\mathbf{W} = (w_i)_{1 \times n}$,模糊算子采用相乘相加法,模糊矩阵结果 $\mathbf{B}$ 可表示为:

$$\mathbf{B} = \mathbf{W} \times \mathbf{R} = (b_1, b_2, \dots, b_m) \quad (9)$$

式中: $b_j = \sum_{i=1}^n w_i \times a_{ij}$, $j = 1, 2, \dots, m$,其中 b_j 的最大值所对应的水质等级为该评价对象的水质类别。

1.2.2 加权平均原则

加权平均原则通常根据 G 值大小判定水质级别^[14],计算公式如下:

$$G = \frac{\sum_{j=1}^m j \times b_j^k}{\sum_{j=1}^m b_j^k} \quad (10)$$

式中: G 为综合评价数值; b_j^k 为监测点对于第 j 等级的隶属度; m 为水质等级; k 为待定系数(文中取

$k=2)^{[15]}$ 。 G 值与地下水水质类别的对应关系为： $G<1.5$ ，Ⅰ类； $1.5\leq G<2.5$ ，Ⅱ类； $2.5\leq G<3.5$ ，Ⅲ类； $3.5\leq G<4.5$ ，Ⅳ类； $G\geq 4.5$ ，Ⅴ类。

1.2.3 综合判别原则

先计算某一评价对象分别隶属于各级别水质的程度，根据最大隶属原则判定该评价对象的水质等级，再检验最大隶属原则的有效性 a 。当有效度值 $a\geq 0.5$ 时，水质级别判定适合采用最大隶属原则；反之，采用加权平均原则判定水质类别。

最大隶属原则的有效性检验及计算公式如下：

$$a = \frac{q \times \beta - 1}{2 \times \gamma \times (q - 1)} \quad (11)$$

式中： q 为模糊矩阵 B 中的元素个数； β 为最大隶属度； γ 为第二大隶属度。

有效度 a 的使用原则：当 $a\geq 1$ 时，可认定施行最大隶属原则非常有效；当 $0.5\leq a<1$ 时，最大隶属原则比较有效；当 $0<a<0.5$ 时，最大隶属度原则低效；当 $a=0$ 时，最大隶属度原则完全失效^[16]。

1.2.4 先进性分析

从权重确定和评价原则两方面对改进的模糊综合评价法的创新性和先进性进行分析。

(1)权重确定。熵权法虽然考虑多个评价因子间的相互联系，可削弱异常值的作用，但熵权法存在指标权重分配均衡化的缺陷。利用RSD和熵权法组合赋权来调整权重系数，可有效避免单一赋权法计算时可能带来的偏差。同时，熵权法与RSD法均是客观赋权法，也可减小传统主客观组合赋权时专家赋权主观偏好性带来的误差。

(2)综合评价原则。隶属度虽然可直接反映某一评价对象对不同级别水质的隶属程度，其中最大隶属度值所对应的水质类别即为该评价对象的水质判别结果，但是最大隶属度原则存在有效性的问题，有时候可能得出不合理的评价结果。在最大隶属度原则低效甚至失效时，采用加权平均原则可对隶属度数据进行量化处理，得到被评价对象的相对位置，即评价结果。综合判别原则可充分利用两种方法的优点，互补不足，得出的评价结果更符合客观实际。

2 改进的模糊综合评价法在某煤矿区水质评价中的应用

2.1 某煤矿区浅层地下水水质评价

2.1.1 评价指标选取原则

研究区位于中国中部平原，监测时间为2020年12月，布点原则主要为：①考虑煤矿及工业园位置，在煤矿工业广场及固废堆放区、工业园内均布设监测点；②考虑研究区浅层地下水水流场分布，区内地下水流向总体自西南向东北，故在工业园西南至东北向沿线布设监测点；③作为对比，在农田和居民区也布设若干监测点。共布设33个地下水监测点(G1—G33)。原始水质数据共有30多项指标，众多指标反映的水体信息存在一定的重叠，故选取部分有代表性的评价因子即可。为最大程度减小指标选取主观性对评价的不利影响，评价因子选取主要根据以下两个原则^[6]：①排除《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)中未给出标准限值的因子，如总氮、总磷、钾、钙、镁、乙苯、邻二甲苯、苯乙烯等；②排除水质指标已经达到Ⅰ类标准的因子^[17]，如pH值、苯、甲苯、汞、铜、锌、钠、氯化物、间二甲苯、对二甲苯等。最终筛选出氟化物(F^-)、硫酸盐(SO_4^{2-})、氨氮(NH_3-N)、硝酸盐氮($NO_3^- - N$)、铁(Fe)、锰(Mn)、砷(As)、镉(Cd)、六价铬(Cr^{6+})、铅(Pb)共10项指标作为研究区地下水水质模糊综合评价模型的评价因子，其监测值统计见表1。

表1 10项地下水水质指标的监测值统计

Table 1 Statistics of monitoring values of 10 groundwater quality indicators

水化学 指标	最小值 $\rho/$ ($mg \cdot L^{-1}$)	最大值 $\rho/$ ($mg \cdot L^{-1}$)	平均值 $\rho/$ ($mg \cdot L^{-1}$)	标准差 $\rho/$ ($mg \cdot L^{-1}$)	RSD/ %
F^-	0.570	2.88	1.72	0.576	33.5
SO_4^{2-}	9.01	122	51.8	32.8	63.3
NH_3-N	0.052	0.567	0.255	0.120	47.1
$NO_3^- - N$	—	20.4	1.31	4.02	307
Fe	0.093	1.05	0.454	0.247	54.4
Mn	0.023	0.524	0.118	0.103	87.3
As	0.004	0.164	0.046	0.039	84.8
Cd	0.001	0.058	0.005	0.010	200
Cr^{6+}	0.040	0.983	0.134	0.175	131
Pb	—	0.073	0.009	0.013	144

2.1.2 因子权重的确定

根据公式(1)—公式(8)分别计算基于熵权法和RSD法，以及二者组合得出的模糊综合评价的评价因子权重值，结果见表2。

2.1.3 不同方法水质评价结果

运用不同方法对研究区地下水水质进行评价。在33个监测点中，基于熵权法计算评价因子权重

表2 不同方法的权重值

Table 2 Weight values of different methods

评价因子	熵权法权重	RSD法权重	组合权重
F^-	0.077 2	0.028 9	0.053 1
SO_4^{2-}	0.069 2	0.054 9	0.062 1
NH_3-N	0.057 1	0.040 8	0.049 0
$NO_3^- - N$	0.019 7	0.265 6	0.142 7
Fe	0.055 6	0.047 1	0.051 4
Mn	0.056 9	0.075 5	0.066 2
As	0.182 0	0.072 8	0.127 4
Cd	0.237 5	0.176 3	0.206 9
Cr^{6+}	0.018 7	0.113 0	0.065 9
Pb	0.226 1	0.125 1	0.175 6

的模糊综合评价法(简称熵权法)评价结果显示,属于Ⅰ类、Ⅱ类、Ⅲ类、Ⅳ类水的监测点分别有2个、14个、16个、1个,其中属于Ⅲ类水监测点最多,占总数的48.5%,无Ⅴ类水监测点;基于RSD法计算评价因子权重的模糊综合评价法(简称RSD法)评价结果显示,属于Ⅰ类、Ⅱ类、Ⅲ类水的监测点分别有13个、15个、5个,属于Ⅱ类水监测点最多,占比为45.5%,无Ⅳ类、Ⅴ类水监测点;基于组合权重的改进模糊综合评价法(简称改进法)评价结果显示,属于Ⅰ类、Ⅱ类、Ⅲ类水的监测点分别有4个、16个、13个,其中属于Ⅱ类水监测点最多,占比48.5%,无Ⅳ类、Ⅴ类水监测点。为考察改进模糊综合评价法的科学与合理性,结合修正内梅罗指数法^[18](以下简称内梅罗法)进一步进行对比。内梅罗法评价结果显示,属于Ⅲ类、Ⅳ类、Ⅴ类水的监测点分别有1个、31个、1个,其中属于Ⅳ类水监测点最多,占比93.9%,无Ⅰ类、Ⅱ类水监测点。

图1(a)(b)(c)分别为不同水质评价方法评价结果空间分布对比。由图1(a)可见,根据改进模糊综合评价法,研究区浅层地下水主要为Ⅱ类、Ⅲ类水,综合评价为良好。工业园区主要是Ⅲ类水,导致该处水质相对较差的原因主要为镉、铬等重金属超标,这与园区内分布有焦化厂、电厂、选煤矿等有关。煤矿工业广场区域零星分布着大小不一的粉煤灰、煤矸石堆,这可能是导致该区域内Ⅰ类、Ⅱ类、Ⅲ类水均有所分布的原因。煤矿1区东北侧附近的G9、煤矿2区邻近的G3监测点均为Ⅲ类水,水质相对较差,这是由于煤矿开采活动会导致矿区所在位置浅层地下水环境受到干扰。另外,煤矿中微量元素等经过雨水淋滤作用下渗入地

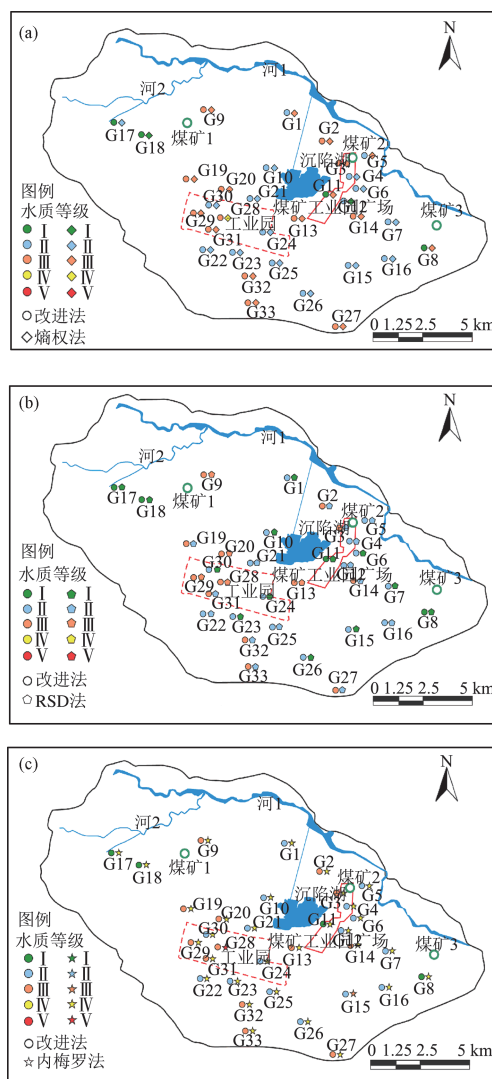


图1 不同水质评价方法评价结果空间分布对比

Fig. 1 Comparison of spatial distribution of evaluation results by different water quality evaluation methods

下水也会导致该处地下水中元素超标,水质受到影响变得相对较差。农田和居民混合区主要为Ⅱ类水,局部为Ⅰ类和Ⅲ类水。

2.2 不同方法评价结果分析

由图1(a)可见,与熵权法相比,改进法的评价结果略有不同。其中,监测点G1、G5、G17、G28水质比前者优一个等级,G8和G11优两个等级,G12差一个等级,其他监测点评价结果相同。熵权法评价结果最差的为G28,属于Ⅳ类水,位于工业园区内,工业园区内其他监测点水质两种方法的评价结果相同。煤矿工业广场西南侧G11和煤矿3区西南方向G8监测点熵权法的评价结果均为Ⅲ类水,而改进法的评价结果比前者优两个等级。煤矿1

区和煤矿2区的浅层地下水水质两种方法的评价结果相同。农田和居民混合区除G1处水质两种方法的评价结果略有不同外,其他监测点水质评价结果均一致。

由图1(b)可见,与RSD法相比,改进法的评价结果中有17个监测点水质比前者差一个等级,其他监测点两种方法评价结果相同。RSD法评价结果中有5个监测点水质相对较差,为Ⅲ类水,分别是煤矿1区东北方向的G9、工业园区内的G28和G29,以及邻近园区东北方向的G20和G13。距离煤矿1区和煤矿3区西南方向较远的G18和G8监测点水质均相对较好,为Ⅰ类水,这与改进法水质评价结果相同。煤矿工业广场除了靠近煤矿2区附近的G3,RSD法评价为Ⅱ类,而改进法评价为Ⅲ类水外,其余监测点水质两种方法的评价结果一致。工业园区两种方法的评价结果有3处不同,分别为G30和G24处RSD法评价结果为Ⅰ类水,G31处为Ⅱ类水,而改进法评价结果均比前者差一个等级。农田和居民混合区各监测点的水质类别改进法的评价结果均比RSD法差一个等级。

由图1(c)可见,与内梅罗法相比,改进法评价得出的水质评价类别总体要优一两个等级。由于内梅罗法总是兼顾最大值及权重最大因子评分值对水质的影响,导致该方法水质评价结果总体表现较差,而改进法会综合考虑各评价因子对水质的影响。

基于熵和RSD两种客观权重组合后的改进模

糊综合评价法与其他3种方法评价结果空间分布规律表现相似,不会低估或者高估研究区浅层地下水的水质。对比分析发现,改进后的模糊综合评价法水质判定类别更加贴近实际情况。

2.3 综合判别原则可靠性分析

图2(a)(b)分别为各监测点水质级别隶属度及其有效性检验。由图2(a)可见,G2、G3等监测点有效度 $a > 0.5$,水质类别判定适合采用最大隶属度原则,此时可在图2(b)中直接读取以上监测点的水质判别结果:其中G2、G3、G13、G19、G31、G32监测点为Ⅲ类水,G8、G11、G17、G18监测点为Ⅰ类水。图2(a)中其余监测点的有效度 $a < 0.5$,此时最大隶属原则不再适用,改用加权平均原则进行水质判别。由公式(10)计算得出各监测点的G值,见图3。由图3可见,G1、G4等监测点判定为Ⅱ类水,G9、G14等监测点判定为Ⅲ类水。综合判别原则的应用以G1为例,图2(b)显示其有效度 a 值为0.409, < 0.5 ,最大隶属度原则低效不适用,改用加权平均原则,得到G值为2.114(见图3),判定结果为Ⅱ类水。

由图2(b)可见,G2、G3等监测点(图中红色箭头指示的监测点)第一大隶属度数值远大于第二大隶属度,说明采用最大隶属原则判别水质等级是可靠的。而蓝色箭头指示的监测点不具备此特征,甚至其中部分监测点第一和第二大隶属度数值十分接近,此时根据最大隶属原则判别水质很可能

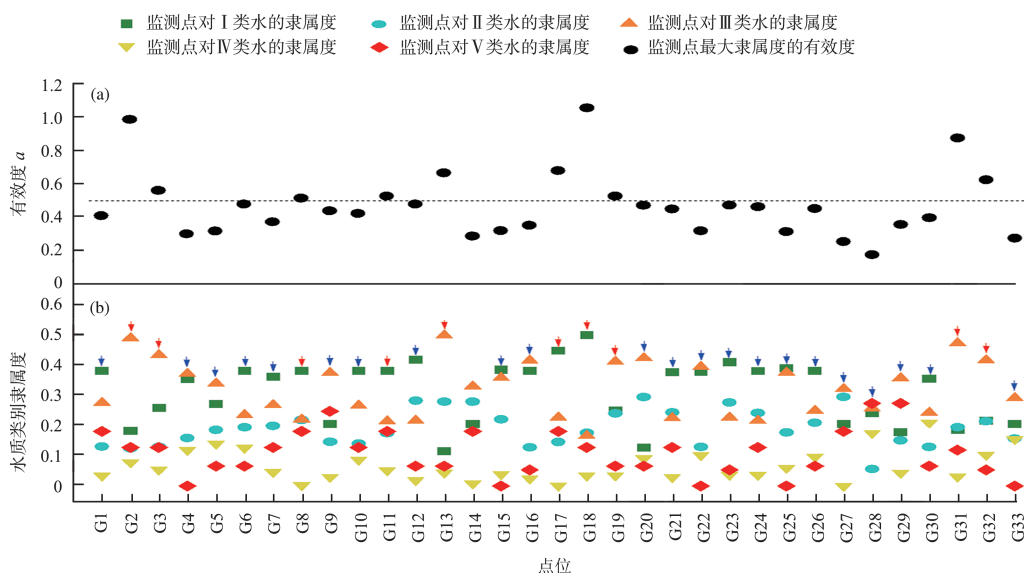


图2 各监测点水质级别隶属度及其有效性检验

Fig. 2 Water quality grade evaluation and validity test of each monitoring site

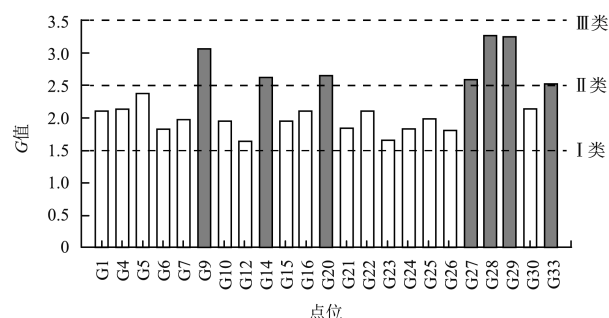


图3 各监测点的 G 值及其与地下水水质类别的对应关系

Fig.3 G values of each monitoring site and its corresponding relationship with groundwater quality category

会得到不合理的评价结果。以监测点 G28 为例,其对于 V 类、III 类和 I 类水的隶属度数值十分接近,直接根据最大隶属原则判定为 V 类水显然不合适。进行有效性检验,发现其有效度 α 值为 0.177,远低于临界值 0.5,说明最大隶属原则是低效的。改用加权平均原则计算后,其 G 值为 3.264 (见图 3),判定为 III 类水,评价结果显然更合理。以监测点 G17 为例,直接采用加权平均计算将被判定为 III 类水,而采用综合判别原则,该处水质等级判定明显适用最大隶属度原则,判定为 I 类水。G17 位于煤矿区及工业园区的上游,周边为大片农田区,综合分析,判定为 I 类水的可信度更高。经过上述实例分析后,采用综合判别原则进行水质等级判别比单一地使用最大隶属度原则或加权平均原则要更加科学与合理。

3 结论

(1) 根据改进的模糊综合评价法,工业园区水质相对较差,主要为 III 类水,这可能与园内镉、铬等因子超标有关。煤矿工业广场 I 类、II 类、III 类水均有分布,这与区域内粉煤灰、煤矸石堆分布不均有关。煤矿区地下水水质主要为 III 类水,水质相对较差,这可能是由煤矿开采活动导致煤矿中微量元素渗入地下水所致。农田和居民混合区水质评价结果主要为 II 类,局部区域为 I 类和 III 类水。

(2) 改进的模糊综合评价法综合考虑了评价因子间的内在联系,既能减小主观因素对评价过程的影响,也可以避免单一评判原则给水质等级判定带来的局限性。将该方法应用于某煤矿区浅层地下水水质评价,结果表明,其评价结果比其他方法更加符合研究区的实际情况。

参考文献

- [1] 侯恩科,谢晓深,王双明,等. 中深埋厚煤层开采地下水动态变化规律及形成机制[J]. 煤炭学报,2021,46(5):1404-1416.
- [2] 张金婷,孙华. 内梅罗指数法和模糊综合评价法在土壤重金属污染评价应用中的差异分析[J]. 环境监测管理与技术,2016,28(4):27-31.
- [3] 杨浩,张国珍,杨晓妮,等. 基于模糊综合评判法的洮河水环境质量评价[J]. 环境科学与技术,2016,39(S1):380-386.
- [4] ZHANG Q Y, XU P P, QIAN H. Application of fuzzy comprehensive evaluation method using entropy weight in groundwater quality evaluation: A case study on Xianyang, China[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 467(1): 1315-1324.
- [5] 赵微,林健,王树芳,等. 变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响[J]. 环境科学,2013,34(4):1277-1283.
- [6] 徐健,吴玮,黄天寅,等. 改进的模糊综合评价法在同里古镇水质评价中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2014,42(2):143-149.
- [7] 李哲,曾一凡,刘守强,等. 基于有效度的模糊综合评判法在含水层富水性评价中的应用[J]. 矿业安全与环保,2018,45(5):55-59.
- [8] 鲁照,黄河清,徐力刚,等. 基于熵权的 WQI 法在鄱阳湖水质评价中的应用[J]. 环境监测管理与技术,2021,33(4):30-34.
- [9] 田野,李畅游,赵胜男,等. 基于模糊数学的黄河内蒙古段水环境质量评价[J]. 水土保持通报,2016,36(5):162-166.
- [10] 武俐,王祖恒,王亮,等. 基于主成分分析和模糊数学的黄河小浪底水质监测与评价[J]. 水土保持通报,2020,40(5):118-124.
- [11] 符东,吴雪菲,易珍言,等. 沱江水水质模糊综合评价及主要污染物的预测研究[J]. 农业环境科学学报,2020,39(12):2844-2852.
- [12] ZHANG W P, LI B, LIU Z J, et al. Application of improved fuzzy comprehensive evaluation method in karst groundwater quality evaluation: a case study of Cengong county[J]. Earth Science Informatics, 2021, 14(2): 1101-1109.
- [13] 向文英,杨静,张雪. 模糊综合评价法的改进及其在水库水质评价中的应用[J]. 安全与环境学报,2015,15(6):344-348.
- [14] 韩晓刚,黄廷林,陈秀珍. 改进的模糊综合评价法及在给水厂原水水质评价中的应用[J]. 环境科学学报,2013,33(5):1513-1518.
- [15] 梁乃森,钱程,穆文平,等. 大牛地气田地区地下水水质模糊综合评价[J]. 水文地质工程地质,2020,47(3):52-59.
- [16] 尹会永,赵涵,徐琳,等. 岩体质量分级的改进模糊综合评价法[J]. 金属矿山,2020(7):53-58.
- [17] 安堃达,程继雄,嵇晓燕,等. 湖北省地表水水质评价指标及监测方式研究[J]. 中国环境监测,2021,37(2):142-147.
- [18] 时雯雯,周金龙,曾妍妍,等. 新疆乌昌石城市群地下水多重水质评价[J]. 干旱区资源与环境,2021,35(2):109-116.