

杨振华,苏维词,吴克华,等. 基于级别特征值的岩溶含水层水质模糊综合评价修正[J]. 中国岩溶,2015,34(6):551-559.
DOI:10.11932/karst20150603

基于级别特征值的岩溶含水层水质模糊综合评价修正

杨振华¹,苏维词²,吴克华²,张凤太³,王 伟⁴

(1. 贵州师范大学中国南方喀斯特研究院,贵州 贵阳 550001; 2. 贵州科学院山地资源研究所,贵州 贵阳 550001;
3. 贵州师范学院资源环境与灾害研究所,贵州 贵阳 550018; 4. 贵州省地质工程勘察设计院,贵州 贵阳 550008)

摘 要:为改进传统水质模糊综合评价中存在评价指标不能全面反映水质状况、评价结果不清晰,评价等级区分度不明显等缺陷,文章以位于六枝特区威宁—郎岱褶皱群的第一层岩溶含水层水质为例,根据岩溶区水质评价特点和研究区含水层超标因子特征,建立涵盖物理、化学和微生物等因子的评价指标体系,利用级别特征值对传统模糊综合评价结果进行了适当修正,并与综合污染指数法、传统模糊评价综合法的评价精度进行定量化比较。研究表明:六枝特区的研究区探采点水质综合评价等级都达到Ⅲ类生活饮用水卫生标准,但仍有 71% 的探采点存在氨氮(NH₄⁺)、氟化物(F⁻)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、溶解性总固体(TDS)和大肠杆菌等指标超标,且超标因子浓度呈点状扩散分布于三叠系中下统地层;另外,传统模糊综合评价中有 57.1% 的水质达到Ⅰ类标准,与多个探采点存在因子超标的情况不符,而通过级别特征值修正的模糊综合评价结果中分别有 57.1% 和 28.6% 的探采点水质为Ⅱ类或Ⅲ类标准,与着重突出最大超标因子权重的综合指数法类别标准差低 0.011。因此,基于级别特征值的模糊综合评价能有效的反映水质整体水平,探采点水样超标因子浓度和同类水质的区分度,评价结果合理、可信。

关键词:级别特征值;模糊综合评价;岩溶;水质

中图分类号:X824 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-4810(2015)06-0551-09

0 引 言

地下水作为我国重要的供水水源之一,却面临着水位下降、污染加剧等危机。据《2014 中国环境状况公报》统计,全国 202 城市的 4 896 个地下水监测点监测结果显示:水质为优良级的监测点比例为 10.8%,良好级的监测点比例为 25.9%,较好级的监测点比例为 1.8%,较差级的监测点比例为 45.4%,极差级的监测点比例为 16.1%^[1]。近年来,水质评价一直是人们探讨的热点问题^[2],国内外学者对水质评价模型与方法进行了许多相关的研究,相继提出了 t-SNE 算法、密切值法、贝叶斯模型、主成分分析、神经网络、灰色关联等多种评价方法,有力地促进了水

质综合评价的研究进展。如 Van der Maaten 等^[3]提出的通过降维揭示数据内在的分类特点,实现了直观地表达数据间的相似性程度与高维变量之间的非线性关系;Li 等^[4]研究证明基于熵权的密切值法是众多密切值法中相对合理的评价方法;李连香等^[5]利用分层构权分析法对子系统的重要性采用因子得分权重赋权,避免了主观赋权带来的弊端;余勋等^[6]构建的三角模糊数的贝叶斯水质评价模型全面、实际地表达出水环境系统不确定性。

水环境系统是一个多维、非线性复合系统,其污染程度与各因子评价等级间存在一定的模糊性,这种模糊性表现为水环境污染程度的差异在类别确定时存在“亦此亦彼”性^[7]。虽然,基于模糊矩阵和隶属

资助项目:国家科技支撑计划课题:喀斯特山区水资源演变规律及监测技术研究(2014BAB03B001)
第一作者简介:杨振华(1991-),男,硕士研究生,研究方向为水资源开发与评价。E-mail:yangzh750@sina.com。
通讯作者:苏维词(1965-),男,研究员,主要从事岩溶生态环境与水资源研究。E-mail:suweici@sina.com。
收稿日期:2015-09-08

度的模糊综合评价法能使一些边界不清、不易量化的因素定量化,直观反映评价水体与各类水质标准相对应的隶属程度,并以最大隶属度所对应的水质级别作为评价水体所属类别,从而客观、准确地反映水体状况与水质标准间的关系,弥补了综合指数法不考虑权重的缺点^[8-10]。但以往水质模糊综合评价对象集中于地表水(河流、湖泊、海洋),非岩溶地下水,而对岩溶区域地下水水质评价研究较少,且评价指标选取、因子赋权、评价结果的可比性等方面存在以下缺点:(1)评价指标的筛选多依靠个人想法和经验,缺乏充分的现实依据和科学证明,使得评价指标反映的水质信息存在一定程度的重叠或缺失,易掩盖水环境本身的某些特征,造成评价结果失真;(2)常规的综合指数法、模糊综合评价法等评价方法在评价过程中的效用函数、权重需人为设计,存在极大的不确定性和随机性;(3)传统模糊评价在对水质评价结果等级划分过程中,划分为同一等级内的水质,不能体现其同类水质内部因子的差异及超标因子的超标程度,易出现以偏概全的现象。

岩溶含水层水体在“二元三维”^[11]空间结构影响下,抗污染能力弱,污染修复难度大,污染物运移速度快,地下水污染物来源复杂,整体水环境脆弱。为明确含水层水质类别与污染程度,获取水质模糊综合评价优化方法,本文建立一种基于级别特征值的模糊综合评价模型,利用粗糙集理论筛选因子,结合熵权法和 AHP 法进行组合赋权,并以级别特征值作为同级别水体水质优劣比较和水质等级判定的依据,最后,验证模型的实际应用效果,以期丰富水质评价模型种类,为水文地质勘查部门提供决策参考。

1 模糊综合评价模型

1.1 建立隶属度矩阵

隶属度矩阵由各项评价指标对水质评价集的隶属度构成,可以通过对该因子浓度的分级标准值 s_{ij} 建立隶属函数的表达,如公式(1)、(2)和(3)所示^[12-13]。

I 类水体隶属函数($j=1$):

$$R_{ij} = \begin{cases} 1 & \varphi_i < s_{i1} \\ \frac{\varphi_i - s_{i1}}{s_{i2} - s_{i1}} & s_{i1} < \varphi_i < s_{i2} \\ 0 & \varphi_i > s_{i2} \end{cases} \quad (1)$$

II、III、IV 类水体隶属函数($j=2,3,4$):

$$R_{ij} = \begin{cases} 0 & \varphi_i \leq s_{ij-1}, \varphi_i \geq s_{ij+1} \\ 1 - \frac{\varphi_i - s_{ij-1}}{s_{ij} - s_{ij-1}} & s_{ij-1} < \varphi_i < s_{ij+1} \\ \frac{\varphi_i - s_{ij}}{s_{ij+1} - s_{ij}} & s_{ij} < \varphi_i < s_{ij+1} \end{cases} \quad (2)$$

V 类水体隶属函数($j=5$):

$$R_{ij} = \begin{cases} 1 & \varphi_i > s_{i5} \\ \frac{\varphi_i - s_{i4}}{s_{i5} - s_{i4}} & s_{i4} < \varphi_i < s_{i5} \\ 0 & \varphi_i < s_{i4} \end{cases} \quad (3)$$

式中, R_{ij} 为评价指标 i 对于 j 类水质标准的隶属度; φ_i 为第 i 个评级因子经过内梅罗法处理后的浓度值; s_{ij} 为评价指标 i 对应 j 类水质的分级标准值,其值确定的参考依据为《地下水质量标准》(GB/T14848—2007)和《生活饮用水卫生标准》(GB5749—2006)。将各项评价指标对水质评价集的隶属度排列成 $i \times j$ 阶矩阵,可以得到相应的隶属度矩阵 R 。

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{i1} & \cdots & r_{ij} \end{bmatrix} \quad (4)$$

1.2 评价指标组合赋权

基于超标加权法确定权重方法的模糊综合评判模型应用甚广,但该方法也往往会出现分析结果与实际不一致的情况^[14],其因为单纯用超标因子赋权,不能反映岩溶含水层水质异质性和水质区域差异,使评价结果与实际不符。故本文采用主观 AHP 法和客观熵权法进行组合定权。公式如下:

设 w_{si} , w_{oi} 分别表示 AHP 法权重和熵值法权重,则称:

$$w_i = \frac{\sqrt{w_{si} \cdot w_{oi}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{w_{si} \cdot w_{oi}}} \quad (5)$$

是具有同时体现两种赋权法信息组合特征的权重值。按公式(5)得到组合权重 w_i , 其中, w_{si} 根据公式(6)计算得到:

$$(w_{s1}, w_{s2}, \cdots, w_{si}) = (\frac{\varphi_1}{\theta_1} / \sum_{i=1}^n \frac{\varphi_i}{\theta_i}, \frac{\varphi_2}{\theta_2} / \sum_{i=1}^n \frac{\varphi_i}{\theta_i}, \cdots, \frac{\varphi_i}{\theta_i} / \sum_{i=1}^n \frac{\varphi_i}{\theta_i}) \quad (6)$$

式中, w_i 为第 i 个评价指标的权重。根据《饮用水源卫生标准》和此次地下水探采目的, θ_i 确定为水质第 III 类别的标准限值《地下水质量标准》(GB/T14848—2007),以判别水质是否达到饮用条件。

1.3 综合评价

传统的模糊评价是通过模糊矩阵的复合运算实现,其模糊子集通过公式(7)计算得到。

$$Y=W \cdot R=(y_1,y_2,\cdots,y_i) \tag{7}$$

对于模糊矩阵评价结果等级划分的常用识别原则主要有 3 种,即最大隶属度原则、综合指数法原则和级别特征值原则。最大隶属度原则主要强调单一因子对 j 类标准的作用,当多个超标因子对应等级隶属度相近时,容易造成水质信息丢失,常无法获得预期的评价结果,故在使用时必须考虑最大隶属原则的有效度^[15]。综合指数原则对最大隶属度进行了一定的改进,运算更加细化,但评价结果仍主要以各评价指标 F 值的最大值与平均值为依据,评价等级易受最大超标因子对整体水样类别的影响,不适用地下水水质状况综合判定。级别特征值虽然在一定程度上继承了最大隶属度原则的类别划分结果,但可充分利用全部评价指标所提供的水质信息,对最大隶属度评价类别进行合理的修正,在地下水水质评价中的适用性更强。因此,为避免应用最大隶属度原则进行模糊模式识别所可能造成的失真,明确不同等级评判的差异性,本文中引入级别特征值^[16]对模糊评价结果进行修正,得到基于级别特征值的水质总体状况评价类别,并对同一类别水体水质优劣进行比较。设级别变量为 j ,其所对应的隶属度为 R_{ij} ,则级别特征值 H_i 为:

$$H_i=\sum_{j=1}^n R_{ij} \cdot j \tag{8}$$

通过第 i 个样点水体对 j 类标准的级别特征值 H_i 进行水质评价类别修正,实现对级别特征值超过限值的水质等级进行降级处理,得到不同水样点主要超标因子特征。

2 实例验证

2.1 研究区概况和数据来源

本研究区地处云贵高原东斜坡乌蒙山与苗岭山脉的衔接地带的贵州省六枝特区境内,中段五指山将全区分为长江流域(北部)和珠江流域(南部)。区内岩溶裂隙发育,多天坑、深切河谷,地下水资源丰富,其含水层主要分布在三叠系的关岭组、永宁镇组和二叠系的龙潭组、茅口组的灰岩与石英砂岩的夹层地带。为改善岩溶高原区村镇生产、生活用水困难的现

状,根据六枝特区地下岩溶含水层的富水性和地表干旱程度,在村镇居民点附近的洼地或槽谷地带布置 14 个探采点,对地下水进行开采利用(图 1),并于 2012 年 4—8 月陆续完成地下水探采工作。其中,水质检测数据来源于贵州省地质矿产勘查开发局承担的“贵州省 2012 年找水打井工程项目”,水质检测单位为贵州省地矿局第二工程勘察院实验测试中心,且除高锰酸钾指数由公式(9)间接测定之外,其余指标为直接测定值。

$$I_{mn}=\frac{[\frac{10}{V_2}(V_1+10)-10]\times C\times 8\times 1\,000}{100} \tag{9}$$

式中, V_1 为样品测定时消耗的高锰酸钾溶液体积(mL); V_2 为标定时所消耗的高锰酸钾体积(mL); C 为草酸钠标准溶液(0.01 mol/L),测定样品为未稀释样,参照标准为《水质高锰酸盐指数的测定》(GB 11892—1989)。

2.2 构建指标体系

相比于非岩溶区,岩溶区地表负地形地貌发育,地下水与地表水转化速度更快,导致地下水更易受地表水体污染物的影响。同时,地下岩溶地貌发育,岩层间裂隙密布,水力联系复杂,使地下水污染源难以明确,因此,岩溶含水层水质评价应全面涵盖超标指标、并通过 AHP 法适当增加地表污染物权重。根据上述岩溶地下水水文特征和水环境指标的检测结果,参照《地下水质量标准》(GB/T14848—2007),去除所有水样中未检测出或检测值均达到Ⅰ类水质标准的指标,并在通过 KMO 和 Bartlett 球度检验的基础上,采用主成分分析法进行降维处理(累计贡献率 $\geq 85\%$),得到客观反映岩溶区水质综合评价指标体系(表 1)。

2.3 确定指标权重

各评价指标权重的确定在地下水水质评价中至关重要,直接关系评价结果的准确性^[17]。本文采用熵权法和 AHP 法相结合的方式确定各评价指标的权重。在 AHP 法中,为了超标系数的定量化处理,除了大肠杆菌指标执行(GB/T14848—1993)的标准外,其余评价指标一律执行(GB/T14848—2007)的地下水Ⅲ级标准值。为便于权重确定,对于单独某些水样未检出的指标值一律按检测误差 0.000 1 处理,其计算结果如表 1 所示。

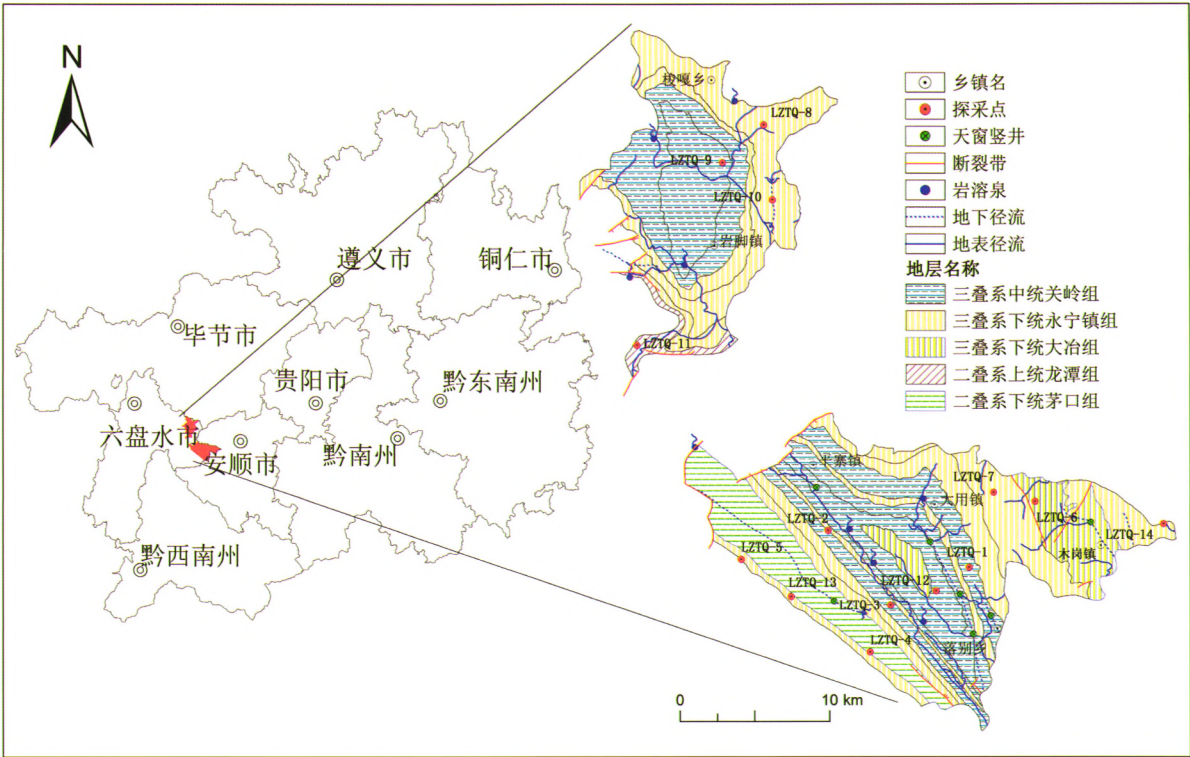


图 1 研究区水文地质简图与探采点分布

Fig. 1 Simplified hydrogeological map of the study area and water sampling/monitoring points

表 1 水质模糊综合评价指标体系及其权重

Table 1 Water quality fuzzy comprehensive evaluation index system and associated weight factors

目标层	准则层	指标层	AHP 法	熵权法	组合权重	单位
水质模糊综合评价	物理性指标	总硬度(以 CaCO_3 计)	0.122	0.101	0.115	mg/L
		溶解性总固体(TDS)	0.100	0.099	0.103	mg/L
	化学性指标	氨氮(NH_4^+)	0.111	0.083	0.099	mg/L
		硫酸盐(SO_4^{2-})	0.022	0.071	0.041	mg/L
		氯化物(Cl^-)	0.033	0.102	0.060	mg/L
		高锰酸盐指数(COD_{Mn})	0.133	0.064	0.096	mg/L
		硝酸盐(以 N 计)	0.056	0.090	0.073	mg/L
		亚硝酸盐(以 N 计)	0.044	0.086	0.064	mg/L
		氟化物(F^-)	0.089	0.087	0.091	mg/L
		铅(Pb)	0.067	0.067	0.069	mg/L
		镉(Cd)	0.078	0.043	0.060	mg/L
	微生物指标	大肠杆菌	0.144	0.108	0.129	MPN/100 mL

2.4 建立隶属度矩阵

以 1 号水样为例,通过隶属度函数公式(2)、(3)、(4)可求得各评价指标实测值对水质等级的隶属度,如表 2 所示。

2.5 评价结果与分析

根据模糊综合评价结果,得出研究区域各探采点的含水层水质整体状况,水质中主要评价指标超标程度及其对评价等级的影响,以利于超标因子空间特征分析。

表 2 评价指标对水质等级的隶属度(以 LZTQ-1 水样点为例)
Table 2 Degree of membership to water quality grade(A case of LZTQ-1)

评价指标	实测值	水质等级隶属度				
		I 级	Ⅱ 级	Ⅲ 级	Ⅳ 级	V 级
氨氮(NH ₄ ⁺)	0.040	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000
硝酸盐(以 N 计)	16.000	0.000	0.267	0.733	0.000	0.000
亚硝酸盐(以 N 计)	0.008	0.222	0.778	0.000	0.000	0.000
总硬度(以 CaCO ₃ 计)	300.400	0.003	0.997	0.000	0.000	0.000
溶解性总固体(TDS)	370.270	0.649	0.351	0.000	0.000	0.000
高锰酸盐指数(COD _{Mn})	0.380	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
硫酸盐(SO ₄ ²⁻)	106.000	0.440	0.560	0.000	0.000	0.000
氯化物(Cl ⁻)	10.380	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
氟化物(F ⁻)	0.400	0.333	0.667	0.000	0.000	0.000
铅(Pb)	0.005	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000
镉(Cd)	0.001	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000
大肠杆菌	3.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000

2.5.1 评价等级划分

依据公式(8)对研究区水质进行模糊综合评价,并结合综合指数法和传统模糊评价法,对改进型模糊综合评价结果进行验证。从表 3 可以看出,采用最大隶属度原则的传统模糊综合评价法,评级结果不能体现超标因子的影响,如 LZTQ-1 号和 LZTQ-13 号探采点水样都是隶属于 II 类水质,但超标因子特征差异却很大。另外,第 LZTQ-5、LZTQ-6、LZTQ-8、LZTQ-11、LZTQ-13 号水样出现 NH₄⁺、COD_{Mn} 等评价指标超过地下水质量的 III 级标准,但评价结果仍然是 I 级或 II 类水质,与水质状况明显不符,可信度较低(表 3)。综合指数法的评价等级中 50% 的水质为 III 类标准,36% 的为 II 类,其余为 I 级或 IV 类,且评价结果标准差达到 1.624,表明评价结果易受到指标异常值的影响,忽略其它超标值的水质信息,未能真实反映水体真实状况,如 LZTQ-8 号水样仅因溶解性固体值超过 III 类标准,导致 F 值就较大,评价等级也最低。因此,为了克服最大隶属度原则和综合指数原则在评价结果等级划分中不合理的现象,利用级别特征值对评价等级进行数值修正。根据 H_i 判断水质级别,按照 H_i 大于两级中间值归入下一级别,反之,则归入上一级别的原则进行级别修正^[18],将

$H_i \geq 1.5(2.5)$ 作为判定是否需要将水质标准降级的依据,并以 H_i 值大小作为同级别水质优劣排序的依据。通过修正后,模糊综合评价类别中 57.1% 的水质为 II 类标准,28.6% 的为 III 类,92.9% 的水质评价等级在 III 级以上,除 LZTQ-3 号水样外,其余探采点水质均达到居民生活饮用水水质标准;LZTQ-3 号水样由于有氨氮、总硬度和氟化物等因子超过 III 类水质标准,故应当归为 IV 类水质;评价级别特征值的标准差仅为 0.267,不仅评价等级符合正态分布,且有效降低了结果的标准差。

2.5.2 主要超标因子空间特征分析

根据表 4 各探采点监测数据特征统计可以看出,岩溶含水层水质 pH 值以及各元素的峰度和偏度系数与标准正态分布(偏斜系数 0,峰度系数 3)存在较大差异^[19],而克里金空间插值是基于数据正态分布的算法,利用克里金插值法对水质空间特征预测会存在较大的误差,故本次空间插值通过软件 ArcGIS10.1,采用反距离加权法对主要超标因子氨氮(NH₄⁺)、氟化物(F⁻)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、溶解性总固体(TDS)和大肠杆菌等主要超标因子进行空间特征预测(图 2)。即在研究区范围内,以地层地质界线或断裂带为基础,预测岩溶含水层超标因子空间特征。

表 3 不同评价方法的水质评价类别结果比较及主要超标因子

Table 3 The comparison of water quality evaluation results and the major factors which over the standard

探采点编号	所属地层名称	传统模糊综合评价		综合指数法		模糊综合评价修正		超标因子(劣于Ⅲ类)
		最大隶属度	等级	得分	等级	级别特征值	等级	
LZTQ-1	三叠系中统关岭组下段	0.512	Ⅱ	2.176	Ⅱ	1.921	Ⅲ	无
LZTQ-2	三叠系下统永宁镇组第二段	0.448	Ⅱ	4.280	Ⅲ	2.006	Ⅲ	NO ₃ ⁻
LZTQ-3	三叠系中统关岭组下段	0.281	Ⅲ	4.370	Ⅲ	2.272	Ⅳ	NH ₄ ⁺ 、TDS、F ⁻
LZTQ-4	二叠系下统茅口组	0.371	Ⅱ	2.140	Ⅱ	1.627	Ⅲ	无
LZTQ-5	三叠系下统永宁镇组第二段	0.421	I	4.370	Ⅲ	2.139	Ⅱ	NH ₄ ⁺ 、TDS、F ⁻
LZTQ-6	三叠系下统大冶组	0.470	I	4.274	Ⅲ	1.842	Ⅱ	NO ₃ ⁻ 、大肠杆菌
LZTQ-7	三叠系下统永宁镇组第二段	0.343	Ⅱ	2.160	Ⅱ	2.004	Ⅲ	COD _{Mn}
LZTQ-8	三叠系下统永宁镇组第二段	0.329	I	6.190	Ⅳ	2.385	Ⅱ	TDS、F ⁻
LZTQ-9	三叠系中统关岭组第二段	0.499	I	4.275	Ⅲ	2.087	Ⅱ	NO ₃ ⁻
LZTQ-10	三叠系下统永宁镇组第二段	0.524	I	2.154	Ⅱ	1.868	Ⅱ	大肠杆菌
LZTQ-11	二叠系上统龙潭组	0.423	I	4.300	Ⅲ	2.074	Ⅱ	NH ₄ ⁺ 、COD _{Mn}
LZTQ-12	三叠系中统关岭组中段	0.629	I	0.711	I	1.500	I	无
LZTQ-13	三叠系下统永宁镇组第二段	0.386	Ⅱ	4.238	Ⅲ	2.394	Ⅲ	NH ₄ ⁺ 、COD _{Mn}
LZTQ-14	三叠系下统永宁镇组第一段	0.296	I	2.418	Ⅱ	1.720	Ⅱ	无
标准差		0.099	0.650	1.624	0.756	0.267	0.745	

表 4 探采点检测因子数据特征统计

Table 4 Statistic feature of tested factor data

监测因子	最小值	最大值	中值	标准差	变异系数	偏度	峰度
pH	7.100	7.500	7.286	0.129	0.017	0.305	-0.703
氨氮(NH ₄ ⁺)	0.000 *	0.240	0.060	0.068	0.005	1.486	2.723
硝酸盐(以 N 计)	0.000 *	28.000	9.257	9.231	85.202	1.030	0.025
亚硝酸盐(以 N 计)	0.000 *	0.050	0.011	0.014	0.000 * *	2.213	5.035
总硬度(以 CaCO ₃ 计)	231.490	564.160	349.374	96.652	9 341.680	1.057	0.483
溶解性总固体(TDS)	264.810	980.190	417.144	183.904	33 820.824	2.519	7.122
高锰酸盐指数(COD _{Mn})	0.090	5.510	0.654	1.421	2.018	3.544	12.888
硫酸盐(SO ₄ ²⁻)	4.720	232.000	82.694	65.536	4 294.958	1.259	1.203
氯化物(Cl ⁻)	0.460	10.380	5.086	2.874	8.262	0.413	-0.235
氟化物(F ⁻)	0.000 *	1.400	0.524	0.542	0.294	0.753	-1.153
铅(Pb)	0.000 *	0.009	0.002	0.003	0.000 * *	1.233	0.049
镉(Cd)	0.000 *	0.002	0.000 * *	0.001	0.000 * *	2.249	4.783
大肠杆菌	2.000	5.000	3.214	0.699	0.489	1.253	2.876

注:0.000 * 代表该指标值未检出,计算时以 0.000 1 代替;0.000 * * 代表该值小于 0.001。

由图 2a~c,研究区岩脚镇南部的三叠系下统永宁镇组第二段(LZTQ-11)含水层中 NH_4^+ 含量较高,为 0.24 mg/L,达到Ⅱ类水质标准,并由高点向北和东南方向递减,北部和东部地区 NH_4^+ 含量较低,接近为 0;研究区东北部三叠系下统永宁镇组第二段(LZTQ-8)含水层部分区域中 TDS 含量较高,最大值达到了 980.19 mg/L,仅达到Ⅲ类水质标准,中部以及南部等剩下区域含水层水体中 TDS 含量较小,大部分达到Ⅱ类水质以上标准;研究区东南部三叠系下统大冶组(LZTQ-6)含水层部分区域中 COD_{Mn} 含量较高,最大值为 5.51 mg/L,仅达到 VI

类水质标准,其余岩溶含水层中含量较低,最低值为 0.09 mg/L,符合水质Ⅰ类标准。如图 2d~e,研究区二叠系下统茅口组(LZTQ-4)、大冶组(LZTQ-6)、三叠系中统关岭组(LZTQ-9、LZTQ-12)含水层中 F^- 含量较高,其值均达到 1.2 mg/L 以上,仅符合Ⅳ类水质标准,其余含水层中 F^- 含量均达到Ⅲ类水质标准,且最小值为 0,符合水质Ⅰ类标准;各类水质标准中大肠杆菌为“不得检出”的指标,但所有含水层点的大肠杆菌都达到 2~5 个单位,表明含水层水质普遍受到微生物污染。

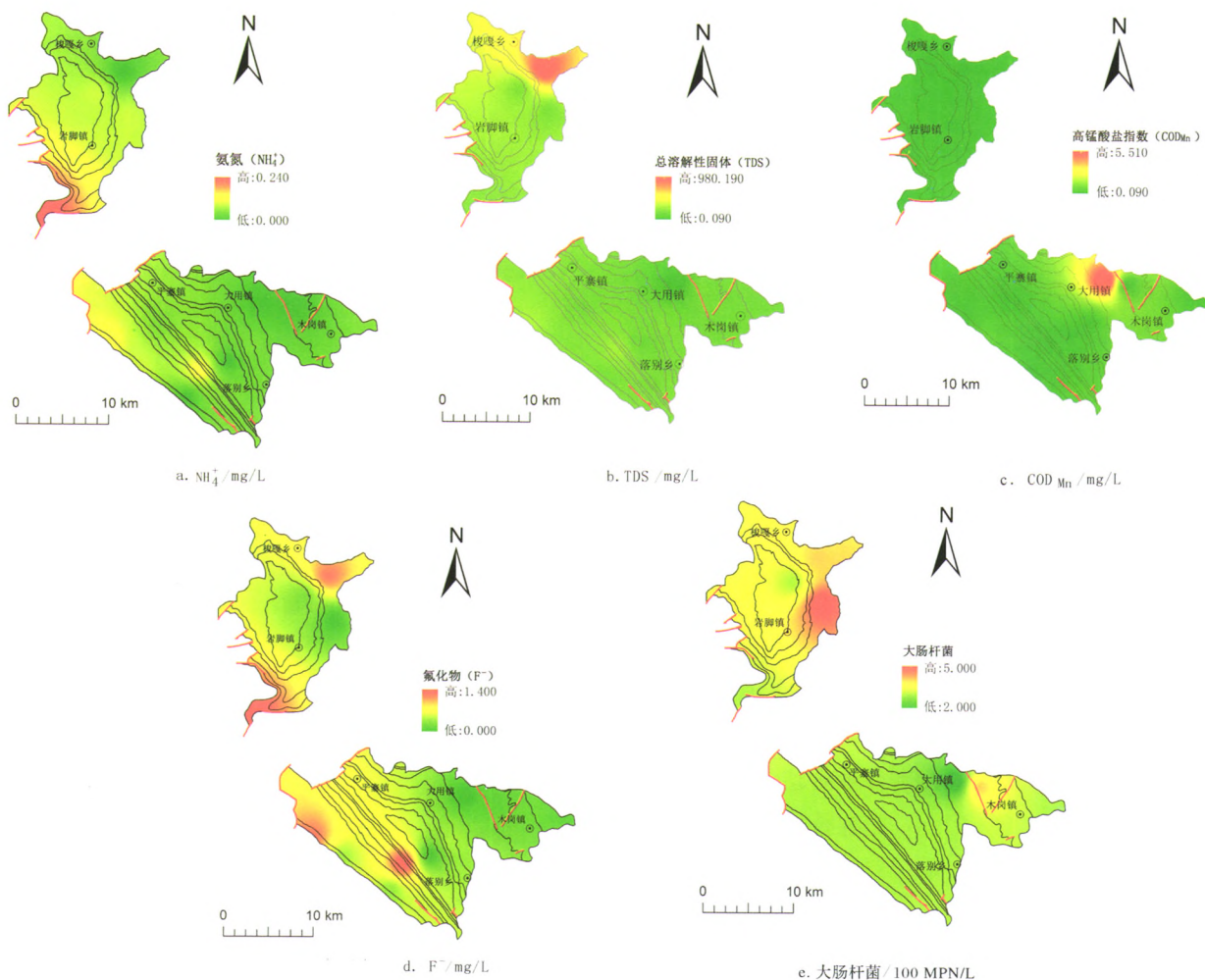


图 2 岩溶含水层水质主要超标因子的空间特征

Fig. 2 Spatial distribution of chemical anomalies of the karst groundwater over the study area

综上所述,研究区岩溶含水层水质评价超标因子呈聚集态势,如三叠系下统永宁镇组含水层中的 NH_4^+ 、TDS、 F^- 和大肠杆菌均达到区域最大值,超标较严重。这与含水层区域农业、生活污水量排放量有

关,表明含水层水体“三水”转化过程中,地表径流将生物碎屑、生活污水等有机污染物通过岩溶裂隙、漏斗等地貌运移至岩溶含水层,使地下水体的某些有机物指标超标,地下水环境恶化。含水层各探采点

TDS 的平均值达到 349.37 mg/L,符合 II 类水质标准,其因为岩溶含水层水体对岩层强烈的溶蚀作用,导致水体中碳酸盐、硫酸盐等盐类物质含量较高,超出西北非岩溶区域的 62.2%。总之,该区域含水层水体整体水平达到饮用水 III 类水质标准。

3 结论与讨论

传统模糊综合评价在水质评价中在评价指标选取、权重确定和评价隶属等级划分不准确等方面的不足,降低了水质评价结果的可信度和适用性。本文在对模糊综合评价法进行改进的同时,以贵州省六枝特区岩溶含水层水质为例,对修正效果进行验证,结果表明:

(1)以主成分分析法对水质评价指标进行简化为基础,考虑评价指标对水体环境的重要性和对水体饮用的影响程度,选取 6 个一般化学因子外,还增加 5 个毒理性因子和 1 个微生物因子,如氟化物,大肠杆菌等。这些因子的浓度为水体利用方式和因子背景值的分析提供了有效依据,揭示导致水质恶化的主要因子为 NH_4^+ 、TDS、 COD_{Mn} 、 F^- 、大肠杆菌等有机污染物,其基本来源为村镇生活污水与农业灌溉的非点源污染的扩散。

(2)级别特征值是融合各超标因子对各个等级的隶属度的综合值,能较好地反映含水层水质整体水平。利用级别特征值对传统模糊综合评价结果修正是针对最大隶属度原则和综合指数法的缺陷而提出的,在划分水质类别中,不同级别特征值直观表现出同类水质的差异性,其值越大代表水质越差,因此,依据超标因子和级别特征值大小,能有效地细化同一水质等级的内部差异,为水体污染物来源提供良好参考。

(3)文章在延展传统水质综合评价方法的基础上,利用主客观赋权和级别特征值尝试弥补传统水质模糊综合评价缺陷,其评价方法原理简单,操作便利,为岩溶含水层水质评价提供了一个更为简便、有效且普遍适应的方法,但岩溶含水层空间结构复杂,与地表径流联系密切,地下水水质状况的空间分布规律及插值分析可行性还需作进一步的探讨。

参考文献

- [1] 国家发展和改革委员会,水利部,建设部,等.《全国城市饮用水安全保障规划(2006—2020)》,发改地区(2007) [2798] 号.北京:国家发展和改革委员会,2007.
- [2] 龚艳冰,张继国,梁雪春.基于全排列多边形综合图示法的水质评价[J].中国人口·资源与环境,2011,21(9):26—31.
- [3] Van der Maaten L, Hinton G. Visualizing Data using t-SNE [J]. Journal of Machine Learning Research, 2008, 9(1): 2579—2605.
- [4] Li P, Wu J, Qian H. Groundwater quality assessment based on entropy weighted osculating value method [J]. International Journal of Environmental Sciences, 2010, 1(4): 621—630.
- [5] 李连香,许迪,程先军,等.基于分层构权主成分分析的皖北岩溶水水质评价研究[J].资源科学,2015,37(1):61—67.
- [6] 余勋,梁婕,曾光明,等.基于三角模糊数的贝叶斯水质评价模型[J].环境科学学报,2013,33(3):904—909.
- [7] 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.
- [8] Zou Z H, Yun Y, Sun J N. Entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment [J]. Journal of Environmental Sciences, 2006, 18(5): 1020—1023.
- [9] Dshiya S, Singh B, Gaur S, et al. Analysis of groundwater quality using fuzzy synthetic evaluation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 147(3): 938—946.
- [10] 李录娟,邹胜章.综合指数法和模糊综合法在地下水质量评价中的对比:以遵义市为例[J].中国岩溶,2014,33(1):22—30.
- [11] 杨明德.论喀斯特地貌地域结构及其环境效应:以贵州高原为例[M].贵阳:贵州人民出版社,1988:19—28.
- [12] 马玉杰,郑西来,李永霞,等.岩溶水质量模糊综合评判法的改进与应用[J].中国矿业大学学报,2009,38(5):745—750.
- [13] 吴运敏,陈求稳,李静.模糊综合评价在小流域河道水质时空变化研究中的应用[J].环境科学学报,2011,31(6):1198—1205.
- [14] 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,(3):47—50.
- [15] 孙廷容,黄强,张洪,等.基于粗糙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—73.
- [16] 周振民,穆文彬.组合权重可变模糊模型在地表水水质评价中的应用[J].中国农村水利水电,2011,(10):82—86.
- [17] 刘子剑,崔斌,张楠.改进的模糊综合评价法在长春市岩溶水水质评价中的运用[J].水资源保护,2014,30(6):40—44.
- [18] 周林飞,邹飞,顾晓琳,等.石佛寺人工湿地水质综合评价与分析[J].节水灌溉,2015,(1):60—64.
- [19] 汤国安,杨昕.地理信息系统空间分析实践教程[M].北京:科学出版社,2006.

An improved fuzzy comprehensive evaluation of water quality in karst aquifer based on level characteristic values

YANG Zhen-hua¹, SU Wei-ci², WU Ke-hua², ZHANG Feng-tai³, WANG Wei¹

(1. Institute of South China Karst, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550001, China;

2. Institute of Mountain Resources, Guizhou Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550001, China;

3. Institute of Environment, Resources and Disaster, Guizhou Normal College, Guiyang, Guizhou 550018, China;

4. Guizhou Institute of Geological Engineering Survey and Design, Guiyang, Guizhou 550008, China)

Abstract The aim of this study is to improve traditional fuzzy logic approach to water quality evaluation, due to some drawbacks such as unrepresentative evaluation indexes for water pollution assessment, indeterminate evaluation results and obscure grade boundaries for fuzzy evaluation. The first layer of karst groundwater in Liuzhi special district Weining—Langdai folding area was selected as the modelling object. Based on the karst water quality analysis, factors for the fuzzy logic process were selected from those analysed constituents which were in excess of relevant water quality regulations, from which establishing the evaluation index system which includes physical, chemical, and microbiological factors, and modifying the method of traditional fuzzy comprehensive evaluation. Consequently, results of the new model were assessed and compared with those from the methods of both comprehensive pollution index and traditional fuzzy comprehensive evaluation. Results of the fuzzy comprehensive evaluation show that water quality reaches class III in light of national drinking water standard in Liuzhi special district. However, there are still 71% sampling points where the concentrations of ammonia nitrogen (NH_4^+), fluoride (F^-), permanganate index (COD_{Mn}) and total dissolved solids (TDS) exceed the water class; and these points mostly occur in the strata of the middle and the late Triassic. On the other hand, the groundwater of 57.1% sampling points falls in class I, resulted from previous method of fuzzy comprehensive evaluation, which is not in accord with the reality. In addition, through the fuzzy comprehensive evaluation calibrated with level characteristic values, the water quality of 57.1% and 28.6% points fall within class II and class III, respectively, of which the standard deviation is 0.011 lower than that from the comprehensive index method which stresses much on weight factor for the element with highest concentration. Therefore, current method for comprehensive evaluation of karst water quality can effectively reflect overall water quality level, water chemical anomalies and quantitative quality classification. It is trusted that the evaluation results are reliable.

Key words level characteristic values, fuzzy comprehensive evaluation, karst, water quality

(编辑 黄晨晖)