

文章编号: 1001-4810(2014)01-0022-09

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

李录娟, 邹胜章

(中国地质科学院岩溶地质研究所/国土资源部、广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘 要:综合指数法和模糊综合评价法在地下水质量评价中被广泛应用。岩溶地区地下水环境脆弱, 潜在污染源复杂。为了更好地了解综合指数法和模糊综合法在岩溶地下水评价中的应用效果, 本文以贵州省遵义市为例, 利用这两种方法分别对该市具有代表性的 9 个地下水点水质进行评价和对比分析。结果显示: 遵义市浅层地下水水质总体较好, III 类及 III 类以上水占 33%, 但个别区域地下水水质很差, 主要为 NO_2^- 、 NH_4^+ 、 Mn 、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、溶解性总固体、总硬度 (CaCO_3) 和 Se 等超标; 两种方法评价结果一致的共有 6 个水点, 均属 II 类水质, 结果不一致的 3 个水点, 在综合指数法中全为 IV 类水, 而在模糊综合评价中则是 III 类水 1 个, V 类水两个。出现差异的主要原因是综合指数法在综合分值计算中过于强调单项指标最大值的作用和未考虑参评指标的权重, 而模糊综合法则很好地克服了这些不足, 精细地刻画出指标值对水质分级界限的接近程度并量化了所有指标对地下水水质的影响权重。可见, 地下水水质评价中, 模糊综合法要明显优于综合指数法。

关键词:岩溶地下水; 水质评价; 综合指数法; 模糊综合法; 对比分析; 贵州遵义市

中图分类号:X824 **文献标识码:**A

0 引 言

水质评价是研究人类水环境质量变化规律, 评价人类水环境质量水平, 并对水环境要素或区域水环境性质的优劣进行定量描述的科学^[1]。水质评价方法很多, 有二三十种水质评价方法在国内外被广泛采用^[2], 其中应用较多的包括: 单因子评价法、综合指数法、灰色评价法、模糊评价法、物元分析法、神经网络评价法等。这些方法各有优缺点, 单因子评价法是现行国家水质标准中确定的悲观评价原则^[3]; 可拓评价法适应于一些特定场合, 应用受到一定限制^[4]; 灰色评价法过程复杂, 区域综合评价结果欠合理, 评价精度一般较低^[5]。综合指数法是对整体水体质量的定量描述, 只要项目、标准、监测结果可靠, 评价结果可

以基本反映污染的性质和程度。综合指数法的优点是数学过程简捷, 运算方便, 物理概念清晰。GB/T14848-1993《地下水质量标准》^[6]中应用了此方法, 中国环境监测总站在进行水质评价时采取的也是这种方法^[2]。模糊综合法在建立单因素隶属函数时, 需要同时对每一级别逐一建立隶属函数, 过程较繁, 但是该方法能够较好的解决水质评价中水质分级界限和等级概念的模糊性与不确定性问题^[7], 而且综合考虑了地下水评价因子超标值、水质分级标准、评价因子在总体污染中的贡献等, 弥补了综合指数法未考虑权重的缺点。因此, 该方法近年来被广泛应用于水环境质量评价中^[8]。王橛橛等^[9]采用模糊综合法对德阳市地下水质量进行了评价, 结果显示德阳地区地下水 III 级及以上水占 85%, “5.12”汶川地震后德阳

市浅层地下水水质变化不大;杨小芳^[10]等引入了模糊数学的基本原理,构建了岩溶水质模糊综合评判模型,并以徐州市裂隙岩溶水为例进行了计算;李春萍等^[11]对北京市 6 座垃圾填埋场的渗滤液性质以及地下水水质进行监测分析和模糊评价,认为 6 座垃圾填埋场枯水期、丰水期和平水期的地下水水质均不合格,且综合评价结果为很差的占 95 % 以上。

岩溶含水层抗污染能力弱,水环境脆弱,地下水水潜在污染源复杂。近年来,岩溶地下水的污染问题越来越受到人们的关注。为了更好的了解综合指数法和模糊综合法在岩溶地下水水质评价中的应用情况,本文以典型的岩溶地区——遵义市为例,分别用综合指数法和模糊综合评价法对该市具有代表性的地下水点水质进行评价,比较两种方法在岩溶地下水评价中的优缺点和适用性,并了解研究区地下水的环境质量状况,以期为岩溶地区地下水评价和遵义市的地下水开发利用和污染治理等提供参考。

1 评价方法

1.1 综合指数法

首先进行各单项组分评价,划分组分所属质量类别^[6]。然后按表 1 分别确定各单项组分的评价分值 F_i 。

表 1 单项组分评价取值表

Table 1 The evaluation value of the single component

类别	I	II	III	IV	V
F_i	0	1	3	6	10

然后按公式(1)和(2)计算综合评价分值 F 。

$$\bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i \quad (1)$$

$$F = \sqrt{\frac{\bar{F}^2 + F \max^2}{2}} \quad (2)$$

式中: \bar{F} 为各单项组分评价分值 F_i 的平均值; F_{\max} 为单项组分评价分值 F_i 中的最大值; n 为项数。

最后根据 F 值,参照表 2 划分地下水质量级别。

表 2 地下水质量级别表

Table 2 The groundwater quality grade

级别	优良	良好	较好	较差	极差
F	<0.80	0.80~<2.50	2.50~<4.25	4.25~<7.20	>7.20

1.2 模糊综合法

模糊综合评价又称模糊综合评判,是以模糊数学为基础,应用模糊关系合成的原理,对具有多种属性的事物,或者说其总体优劣受多种因素影响的事物,作出一个能合理地综合这些属性或因素的总体评判。利用模糊数学进行地下水质量评价的基本思路是:由水质监测数据建立各因子指标对各级水的隶属度集,形成隶属度矩阵,再把各因子的权重集和隶属度矩阵相乘,得到模糊积,获得一个综合评判集,表明水体水质对各级标准水质的隶属程度,反映了综合水质级别的模糊性。

1.2.1 建立隶属函数

本文采用半梯形分布法来计算隶属函数。设:评价中有 n 项水质影响因子,取第 k 个水样中某一个因子 i 的实测值为 x_{ki} ,其 j 级标准值为 c_{ij} ($i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m$),则该因子对各级水的隶属函数可用下式表示:

对 1 级水的隶属函数,即 $j=1$

$$y_{i1} = \begin{cases} 1 & x_{ki} \leq c_{i1} \\ \frac{c_{i2} - x_{ki}}{c_{i2} - c_{i1}} & c_{i1} < x_{ki} \leq c_{i2} \\ 0 & x_{ki} > c_{i2} \end{cases} \quad (3)$$

对 j 级至 $m-1$ 级水的隶属函数,即 $j=2,3,\dots,m-1$

$$y_{ij} = \begin{cases} 1 - \frac{c_{ij} - x_{ki}}{c_{ij} - c_{ij-1}} & c_{ij-1} \leq x_{ki} \leq c_{ij} \\ \frac{c_{ij+1} - x_{ki}}{c_{ij+1} - c_{ij}} & c_{ij} < x_{ki} \leq c_{ij+1} \\ 0 & x_{ki} < c_{ij-1}, x_{ki} > c_{ij+1} \end{cases} \quad (4)$$

对 m 级水的隶属函数,即 $j=m$

$$y_{im} = \begin{cases} 0 & x_{ki} < c_{im-1} \\ 1 - \frac{c_{im} - x_{ki}}{c_{im} - c_{im-1}} & c_{im-1} \leq x_{ki} \leq c_{im} \\ 1 & x_{ki} > c_{im} \end{cases} \quad (5)$$

当 x_{ki} 给定,就可用上述隶属函数求 k 水样中第 i 个污染因子分别对各 j 级水的隶属度,由此确定一个 $i \times j$ 阶的模糊关系矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1j} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{i1} & y_{i2} & \cdots & y_{ij} \end{bmatrix} \quad (6)$$

1.2.2 确定权重因子

在评价中要考虑到各单项指标在总体污染中作用大小不同。它不仅与实测数据大小有关,而且与某种用途水中各指标的允许浓度有关,实测数据相同而

允许浓度高标准却低的指标对污染程度影响较小。因此在综合评价过程中要进行权重计算,一般采用污染物浓度超标加权法计算^[12]。

$$\omega_{ki} = \frac{x_{ki}}{s_i} \quad (7)$$

式中: $s_i = \frac{1}{m}(c_{i1} + c_{i2} \cdots + c_{ij} \cdots + c_{im})$

对 ω_{ki} 作归一化处理:

$$a_{ki} = \frac{\omega_{ki}}{\sum_{i=1}^n \omega_{ki}} \quad (8)$$

式中: ω_{ki} 为权重因子; x_{ki} 为第 k 个水样第 i 个因子的实测浓度; c_{im} 为评价标准中各级浓度标准值; s_i 为第 i 个因子各级水标准值均值; a_{ki} 为第 k 个水样第 i 个因子的权重值。

将 n 个单因子的实测值和评价标准值分别代入上式,便可求得各单因子的权重值,并由其组成模糊矩阵 A , 即因子权重集:

$$A = \{a_{k1}, a_{k2}, \cdots, a_{kn}\} \quad (9)$$

1.2.3 综合评价原则

综合评价结果是通过 A 与 R 复合运算完成的,即对每个评价因子进行加权计算 $B = A \cdot R$ 。理论上,广义的模糊合成运算有无穷多种,但在实际应用中,经常采用的具体模型有 $M(\wedge, \vee)$ 、 $M(\cdot, \vee)$ 、 $M(\wedge, \oplus)$ 和 $M(\cdot, \oplus)$ 4种^[13-14]。在此次模糊矩阵复合运算过程中采用第一个模型(取小取大原则),即:

$$B = A \cdot R = \max \min(a_{ij}, y_{ij}) \quad (10)$$

结果按最大隶属度原则确定,即对哪级水的隶属度最大,水质定位为哪级。如果在评价结果中出现两个级别的隶属度都是最大值,则采取考虑次大值的原则,即:哪个最大值所属水质级别更接近次大值的水质级别,就将评价结果定为该最大值的水质级别。

2 地下水质量评价对比分析

遵义市岩溶地貌类型以溶蚀和溶蚀构造地貌分布最广,约占全市土地面积的 60%^[15],岩溶多为裸露型,这使得地下水与地表水、降水转换频繁,地下水比较脆弱,很容易受到直接污染。近年来,遵义市城市化和工业化进程加快,国民经济快速发展,对局部地区地下水造成了污染^[16]。为此,本文选取遵义市受人类活动影响强烈地区的地下水为评价对象,对比分析综合指数法和模糊综合法在岩溶地区地下水水质评价中的效果,同时了解这些地区岩溶地下水水质

现状。

2.1 研究区概况

遵义市区地处大娄山南麓,西部为溶蚀山地,中部为溶蚀谷地,东南部为溶蚀垄谷地,地势西北高东南低,构成由西北往东南倾斜的斜地^[17]。研究区为遵义市主城区及周边近郊区和经济开发区的一部分,面积约 134 km²(图 1)。

区内主干河流为湘江河,属长江流域乌江水系,自北西经遵义市区往南东流出。湘江在研究区内的主要支流有 3 条,分别为高坪河、喇叭河和洛江。此外,有呈叶脉状分布的泥桥河、虾子河、舟水河等小支流。

研究区地层以浅海相碎屑岩及碳酸盐岩沉积为特征,出露最老地层为奥陶系下统湄潭组,在地层沉积序列中,缺失志留系、泥盆系、石炭系、侏罗系上统、白垩系和第三系,二叠系和三叠系各层均有出露,且为研究区主要地层。研究区在大地构造上属扬子准地台黔北台隆遵义断拱毕节北东向构造变形区,现今之构造面貌皆为燕山期地壳运动的产物。未见岩浆活动。NE、NNE 向褶皱为区内构造主体;NNE 向主要形成较狭窄紧密的褶皱,相邻褶皱间距较小,包括核桃窝背斜、南白向斜、马石岩背斜、舟水桥向斜、铜锣井背斜;NE 向褶皱有遵义向斜。断裂一般发育在褶皱构造的轴部及两翼,与相应的褶皱轴线近平行排列,以北东向高角度压扭性逆断层为主。

研究区的地下水有岩溶水及碎屑岩孔隙裂隙水。区内碳酸盐岩分布面积大,是遵义市唯一具有供水意义的含水岩组,包括: P_2q 、 P_2m 、 T_1y^{1+2} 、 T_1m 、 T_2sh 、 T_2s 等。碎屑岩以泥、页岩为主,除 T_3e 及 $J_{1-2}Z$ 外,其余组段含水极弱,无供水意义,可视为相对隔水层。区内岩溶发育,地下暗河较多,比较大的有沙坝龙洞湾、白杨洞、龙井沟、响水洞等地下河及新店子至舟水桥一带的多条暗河。

研究区地下水主要接受大气降水补给,在碳酸盐岩分布地带降水常通过山间洼地、落水洞、漏斗、天窗、溶潭、垂向溶蚀裂隙等垂直入渗进入地下。降水沿向斜构造层间及构造裂隙向核部汇流,断裂带附近张性断裂也是地下水运动的良好途径。因此,区内地下河及其出口的位置分布多与上述条件相关。研究区的地质构造、岩性、地貌对地下水的补给、径流、排泄起控制作用。湘江是地下水排泄的重要处所。除此之外,人类活动产生的部分生活污水、工业废水、农田污水等沿各种途径渗入补给地下水,成为地下水的污染源。

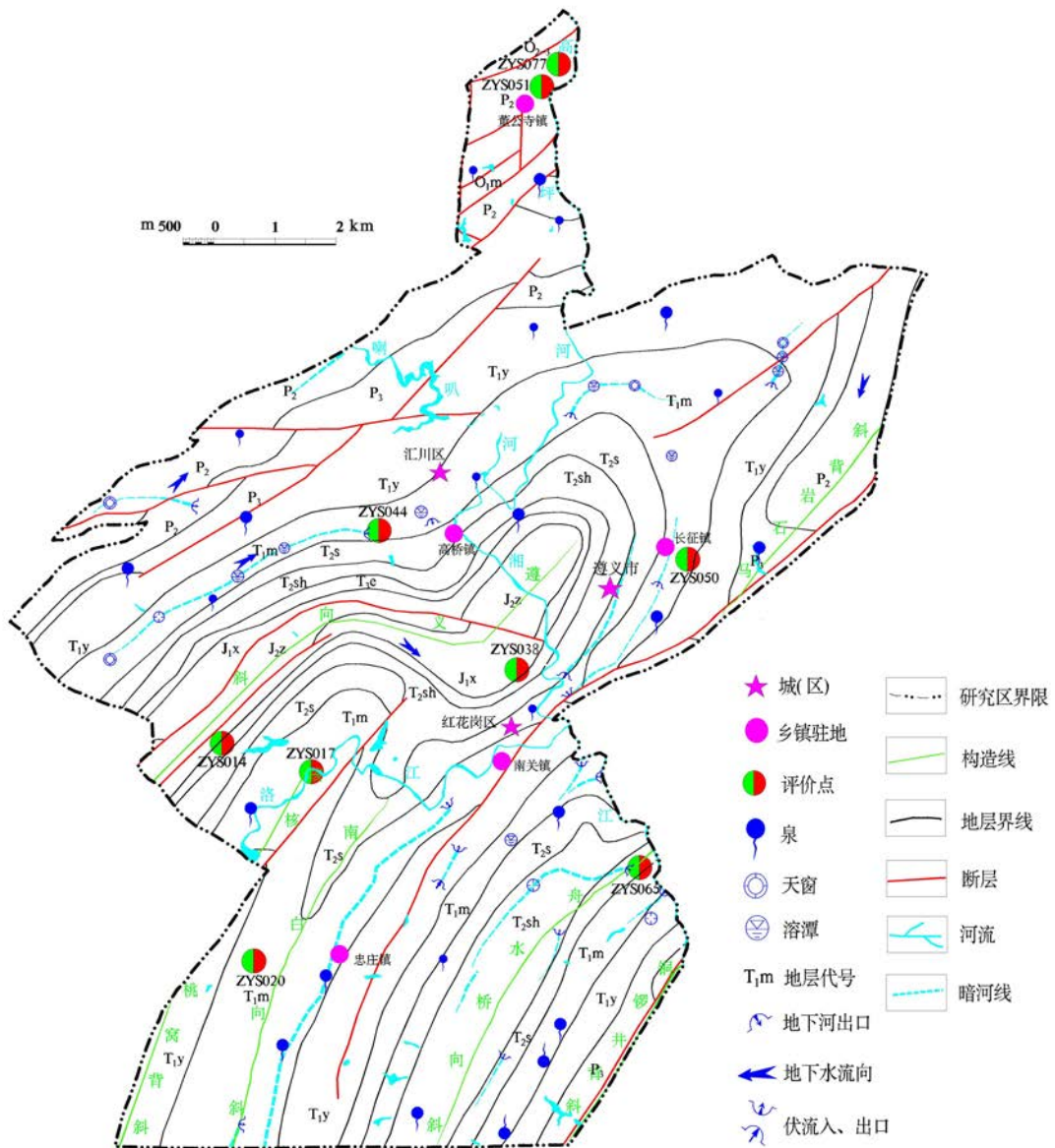


图 1 研究区水文地质及采样点布置图

Fig.1 The hydrogeology and sampling sites

1. J_{1-2} 为侏罗系中下统自流井群; 2. T_{3e} 为三叠系上统二桥组; 3. T_{2sh} 为三叠系中统狮子山组; 4. T_{2s} 为三叠系中统松子坎组; 5. T_{1m} 为三叠系下统茅草铺组; 6. T_{1y} 为三叠系下统夜郎组; 7. P_{3l} 为二叠系上统龙潭组; 8. P_{2q+m} 为二叠系中统栖霞组及茅口组; 9. O_{2+3} 为奥陶系中上统; 10. O_{1m} 为奥陶系下统潭潭组

2.2 地下水取样点的选择

本文利用 2012 年丰水期采样点中的 9 个采样点进行地下水质量评价(图 1、表 3)。根据地下水污染地质调查评价规范(DD2008-01)^[19], 采样点选择的依据是: 在区域控制的基础上, 重点考虑污染源、含水层分布、地下水流向、污染物的扩散形式等因素。岩溶水是研究区内的主要地下水类型, 因此 78 % 的采样点为岩溶水。碎屑岩孔隙裂隙水集中分布在遵义向斜构造内, 为了查明其水质, 设置了 ZYS014 号、ZYS038 号两个采样点。

根据遵义市城市规划, 董公寺镇、南关镇一带是工矿企业集中地, 有钛厂、铁合金厂、碱厂、酒厂、油库等企业; 高桥镇、忠庄镇西侧属于农业耕作区, 厂矿企业很少, 东侧与长征镇一带分布于遵义中心城区至南白镇一带的垄岗谷地中, 人口密度较大, 工矿企业零星分布其中, 人类工程活动强烈。因此, 我们的取样涵盖了这几个区域, 并且选取了各区域内有代表性的水点作为采样点。如: ZYS044 号点为地下河出口, 其所在地下河是巷口镇、高桥镇两个镇的主要供水水源, 人们通过溶井、溶潭等取水直接利用; ZYS050 号

点位于人口密度很大,人类工程活动强烈的市区一火车站附近,城市建设将之前出露的地下河伏流出口、泉等都掩埋了,ZYS050号点由于其特有的历史纪念意义保存至今,目前依旧是附近居民的一处水源地;ZYS065号点为地下河出口,地下河所在一带有铁合金厂、碱厂、钛厂等工矿企业,造成市区南东及南部一带大气污染严重,空气质量较差。

表3 采样点概况

Table 3 The general situation of sampling points

采样点编号	采样位置	水点类型	含水岩组
ZYS014	幸福村石坟咀	泉	碎屑岩孔隙裂隙水
ZYS017	桃溪寺三〇二所	机井	岩溶水
ZYS020	马坎村施村	泉	岩溶水
ZYS038	官井路官井	泉	碎屑岩孔隙裂隙水
ZYS044	泥桥村黄泥堡	地下河出口	岩溶水
ZYS050	长征镇沙河路河北井	泉	岩溶水
ZYS051	中石化油库下游下降泉	泉	岩溶水
ZYS065	舟水桥大河坝铁路桥下	地下河出口	岩溶水
ZYS077	小岛渔村内高坪河旁	泉	岩溶水

2.3 评价标准和参评因子

2.3.1 评价标准

评价标准是地下水质量评价的前提和依据,本文参照《地下水质量标准》(报批稿)(GB/T14848—2007)^[18],对遵义市地下水水质状况进行分析评价。

依据我国地下水质量状况和人体健康基准值,参照生活、工业、农业等用水水质要求,将地下水质量划分为五类。Ⅰ类:地下水化学组分含量低,原则上适用于各种用途;Ⅱ类:主要反映地下水化学组分的天然背景含量,适用于各种用途;Ⅲ类:以人体健康基准值为依据,主要适用于集中式生活饮用水水源及工、农业用水;Ⅳ类:以农业和工业用水质量要求以及人体健康风险为依据,适用于农业和部分工业用水,适当处理后可作生活饮用水;Ⅴ类:不宜作生活饮用水,其他用水可根据使用目的选用。

2.3.2 参评因子

在调查采样过程中,进行物理化学指标现场测试,包括:气温、水温、pH值、电导率、氧化还原电位、溶解氧、浊度、 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 等项目。结果表明,遵义市浅层地下水化学类型主要为 $\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 和 HCO_3-Ca 型,地下水pH值介于6.87~7.49之间,电导率为220~2570 $\mu\text{s}/\text{cm}$,浊度值0.7~4.1 NTU。总体而言,遵义市大部分地区浅层地下水水质较好,个别点电导率和总硬度超标,显示局部地下

水受到了污染。对样品进行了室内有机测试和无机测试,测试指标见表4。

表4 水样测试指标一览表

Table 4 The testing indexes of water samples

指标类型	指标名称	指标数目
有机测试指标	卤代烃 三氯甲烷、四氯化碳、1,1,1-三氯乙烷、三氯乙烯、四氯乙烯、二氯甲烷、1,2-二氯乙烷、1,1,2-三氯乙烷、1,2-二氯丙烷、溴二氯甲烷、一氯二溴甲烷、溴仿、氯乙炔、1,1-二氯乙炔、1,2-二氯乙炔	37项
	氯代苯类 氯苯、邻二氯苯、间二氯苯、对二氯苯、1,2,4-三氯苯	
有机氯农药	总六六六、 α -BHC、 β -BHC、 γ -BHC、 δ -BHC、滴滴涕、p,p'-DDE、o,p'-DDD、p,p'-DDT、六氯苯	3项
	多环芳烃 苯并(a)芘	
无机测试指标	溶解性总固体、总硬度、高锰酸盐指数、偏硅酸、硝酸根、亚硝酸根、铵根离子、硫酸根、碳酸根、重碳酸根、氯离子、氟离子、碘离子、钠、钾、钙、镁、铁、锰、铅、锌、镉、六价铬、汞、砷、硒、铝	27项

水受到了污染。对样品进行了室内有机测试和无机测试,测试指标见表4。

评价因子应该选取对环境、生物、人体及社会经济危害性大的参数作为主要评价对象。本文评价因子的选择以《地下水污染调查评价规范》(DD2008—01)及水样测试结果为依据,并考虑了以下因素:(1)遵义市近年来的监测数据显示的污染指标;(2)2007年发布的地下水水质标准中尚无标准值的指标不予以考虑,包括:溴二氯甲烷、二溴氯甲烷、p-二甲苯/m-二甲苯、o-二甲苯、1,3-二氯苯、1,4-二氯苯、1,2,4-三氯苯、 α -六六六、 β -六六六、 δ -六六六、p,p'-DDE、p,p'-DDD、p,p'-DDT、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 I^- 、 H_2SiO_3 。本文最终选取19项挥发性有机物指标:氯乙烯、1,1-二氯乙烯、二氯甲烷、1,2-二氯乙烯、三氯甲烷、1,1,1-三氯乙烷、四氯化碳、1,2-二氯乙烷、苯、三氯乙烯、1,2-二氯丙烷、甲苯、1,1,2-三氯乙烷、四氯乙烯、氯苯、乙苯、苯乙烯、溴仿、1,2-二氯苯,4项有机氯农药指标:总六六六、六氯苯、 γ -六六六、总滴滴涕,1项多环芳烃指标:苯并[a]芘,3项阳离子指标: Na^+ 、 NH_4^+ 、 TFe ,5项阴离子指标: Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 F^- 、 NO_3^- 、 NO_2^- ,3项特殊项目分析指标: H_2SiO_3 、溶解性总固体、总硬度(CaCO_3)和9项微量元素指标:

Al、Pb、Zn、Cr⁶⁺、Cd、Mn、As、Hg、Se,共 44 项评价因子。

2.4 评价结果

表 5 为各单项组分质量类别评价表(空白处类别均为 I 类),从表中可以看出,挥发性有机物水质指标均未超出 III 类水标准,有 3 个点 9 个无机水质指标超出 III 类水标准,分别为: NO₂⁻、NH₄⁺、Mn、Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、溶解性总固体、总硬度(CaCO₃)和 Se,最严重的为 ZYS065 点,有 6 个水质指标超出 III 类水标准。式(11)为模糊综合法最终获得的综合评判集 B 矩阵。

$$B = \begin{bmatrix} 0.1452 & 0.1452 & 0.1916 & 0.1916 & 0 \\ 0.0423 & 0.4795 & 0.1493 & 0 & 0 \\ 0.0013 & 0.3250 & 0.3250 & 0 & 0 \\ 0.2419 & 0.2375 & 0.0619 & 0 & 0 \\ 0.0490 & 0.3646 & 0.3646 & 0 & 0 \\ 0.0253 & 0.0648 & 0.0648 & 0 & 0.5869 \\ 0.0484 & 0.3426 & 0.2631 & 0 & 0 \\ 0.0066 & 0.0354 & 0.2207 & 0.2207 & 0.2712 \\ 0.0012 & 0.3479 & 0.2887 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

表 5 各单项组分质量类别评价表

Table 5 The groundwater quality evaluation grade of the single component (the blanks are all grade I)

分析项目	样品各单项组分质量类别								
	ZYS014	ZYS017	ZYS020	ZYS038	ZYS044	ZYS050	ZYS051	ZYS065	ZYS077
氯乙烯									
1,1-二氯乙烯									
二氯甲烷									
1,2-二氯乙烯								III	
三氯甲烷									
1,1,1-三氯乙烷									
四氯化碳									
1,2-二氯乙烷									
挥发性有机物	苯								
	三氯乙烯					II		III	
	1,2-二氯丙烷								
	甲苯	II	II	II	II	II	II	II	II
	1,1,2-三氯乙烷							III	
	四氯乙烯								
	氯苯						II	II	
	乙苯								
	苯乙烯								
	溴仿								
1,2-二氯苯									
有机氯农药	总六六六							III	
	六氯苯							II	
	γ-六六六							II	
	总滴滴涕								
多环芳烃	苯并[a]芘		III	III					III
	Na ⁺							V	
阳离子	NH ₄ ⁺			III		V			III
	TFe								

续表 5

分析项目	样品各单项组分质量类别								
	ZYS014	ZYS017	ZYS020	ZYS038	ZYS044	ZYS050	ZYS051	ZYS065	ZYS077
阴离子	Cl ⁻							V	
	SO ₄ ²⁻	II	II	II	II	II	II	V	II
	F ⁻		II				II	II	II
	NO ₃ ⁻	II		III	III	III	III	III	
	NO ₂ ⁻	IV					II		
特殊项目分析	耗氧量 COD _{Mn}					II		II	II
	溶解性总固体		II	III		III	II	IV	II
	总硬度(CaCO ₃)	II	III	III	II	III	III	IV	III
微量元素	Al	III							III
	Pb								
	Zn				II				
	Cr ⁶⁺								
	Cd								
	Mn						IV		III
	As								
	Hg						II		
Se								IV	

注:表中空白处类别均为 I 类。

通过对各单项组分质量类别取值并经过(1)式、(2)式的计算,即可得到综合指数法地下水质量评价结果。模糊综合法地下水质量评价结果则按最大隶属度原则由模糊数学综合评判集矩阵(11)式得到。表 6 是两种方法地下水质量评价结果。根据多项指标的地下水质量综合指数 F 值计算结果划分地下水水质级别,有 6 个水点综合评价值 $0.80 \leq F < 2.5$,水质良好,为 II 类水;3 个水点 $4.25 \leq F < 7.2$,水质较差,为 IV 类水;无 I 类、III 类、V 类水。根据模糊综合法确定地下水水质级别,有 6 个水点水质良好,为 II 类水;1 个水点水质较好,为 III 类水;2 个水点水质极差,为 V 类水,无 I 类、IV 类水。

综合两种评价结果看,遵义市浅层地下水 III 类及 III 类以上占 33%,水质总体较好。水质较好的水点主要位于中心城区及近郊区,这些地区工矿企业分布较少,仅局部有农田分布,且进行了近 10 年的污水排放治理,因此地下水质量相对较好。个别水点水质很差,如 ZYS050 和 ZYS065 点。河北井(ZYS050)位于火车站附近,处于遵义中心城区至南白镇一带垄岗谷地,人口密度较大,工矿企业零星分布其中,人类工程活动强烈,地下水污染严重。舟水桥(ZYS065)一带为遵义市工矿企业集中分布区,有碱厂、铁合金厂、

钛厂、发电厂等企业,长期大量排放废渣、废水、废气,对附近地下水水质造成严重影响。此外,ZYS050、ZYS065 采样点位于典型岩溶区,地下河、岩溶洼地、落水洞、消水洞、天窗等岩溶形态发育,生活污水和工矿企业废水、废渣经大气降水淋滤很容易通过表层岩溶带进入地下,使得地下水污染来源复杂,检测出的污染指标多且超标严重。模糊综合法确定该两点的的水质类别为 V 类,评价结果符合实际情况。

表 6 两种方法地下水质量评价结果表

Table 6 The groundwater quality evaluation results by the 2 methods

采样点编号	综合指数法		模糊综合法
	F	评价结果	评价结果
ZYS014	4.25	IV 类(较差)	III 类(较好)
ZYS017	2.12	II 类(良好)	II 类(良好)
ZYS020	2.13	II 类(良好)	II 类(良好)
ZYS038	2.13	II 类(良好)	II 类(良好)
ZYS044	2.13	II 类(良好)	II 类(良好)
ZYS050	7.09	IV 类(较差)	V 类(极差)
ZYS051	2.13	II 类(良好)	II 类(良好)
ZYS065	7.16	IV 类(较差)	V 类(极差)
ZYS077	2.14	II 类(良好)	II 类(良好)

两种方法的评价结果整体上比较一致,9 个水点中结果一致的有 6 个,有出入的有 3 个,但也都仅相差 1 个级别。结果差异主要由下面原因引起:

(1)在分值计算中综合指数法过于强调单项指标最大值的作用,使得最终的综合评分值偏高。例如 ZYS014 号点(表 7),指标 NO_2^- 的 F_i 值明显高于其他指标,即使其他指标 F_i 值均较低,但由于受极值(NO_2^- 的高 F_i 值)的影响,得出的综合评分偏高,进而使得最终的评价结果也较模糊综合法的高。

表 7 综合指数法确定的 ZYS014 号点 F_i 值

Table 7 The values of F_i in ZYS014 gotten through comprehensive index method

评价指标	评分值(F_i)	评价指标	评分值(F_i)
甲苯	1	NO_2^-	6
SO_4^{2-}	1	总硬度(CaCO_3)	1
NO_3^-	1	Al	3

注:其余指标 F_i 值为 0。

(2)综合指数法指标分级建立在二值逻辑基础上,具有非连续性,不能客观地反映出位于水质等级界线附近指标值对水质评价定级的影响作用。如 ZYS065 点的 1,2-二氯乙烯、三氯乙烯、1,1,2-三氯乙烯、Mn 的质量类别为Ⅲ类,但其值同时也很接近于Ⅱ类的上限。对此,综合指数法就很难刻画出该指标对水质类别评定的实际贡献作用,而模糊综合法则有效地克服了综合指数法这方面的不足,可精细地反映指标实际浓度对水质分级界限的接近程度。

(3)综合指数法未考虑参评指标的权重,将所有指标对于水质的影响视为同等,而模糊综合法则量化了所有评价指标对地下水水质的影响权重,使评价结果更精确。比如:ZYS050 点 NH_4^+ 浓度为 6.42 mg/L,按地下水水质标准^[18]规定,超过Ⅴ类水标准 1 mg/L 6 倍多,划分为Ⅴ类;溶解性总固体值为 644 mg/L,介于 500~1 000 mg/L,划分为Ⅲ类。综合指数法中,二者对水质的影响权重是一样的,但模糊综合法给出 NH_4^+ 和溶解性总固体的权重分别为 0.586 9、0.026 4,即该点水质评价级别受 NH_4^+ 浓度影响更大,受溶解性总固体影响较小。相比之下,综合指数法弱化了 NH_4^+ 的影响,放大了溶解性总固体影响权重,因此给出了较模糊综合法好的结果。

3 结 论

(1)遵义市较具代表性的地下水评价结果显示,遵义市浅层地下水水质总体较好,Ⅲ类及Ⅲ类以上水占 33%,但是个别区域地下水水质很差,主要受 NO_2^- 、 NH_4^+ 、Mn、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、溶解性总固体、总硬度(CaCO_3)和 Se 等指标超标影响。

(2)对比综合指数法与模糊综合法的评价结果,结果一致的共有 6 个水点,均属Ⅱ类水质,结果不一致的 3 个水点,在综合指数法中全为Ⅳ类水,而在模糊综合评价中则是Ⅲ类水 1 个,Ⅴ类水 2 个。导致评价结果出现差异的原因有 3 点:一是综合指数法过于强调最大污染因素的作用;二是综合指数法指标分级具有非连续性,不能客观地反映出位于水质等级界线附近指标值对水质评价定级的影响作用,而模糊综合法则有效地克服了综合指数法这方面的不足,可精细地反映指标实际浓度对水质分级界限的接近程度;三是综合指数法未考虑参评指标的权重,将所有指标对于水质的影响视为同等,而模糊综合法则量化了所有评价指标对地下水水质的影响权重,使评价结果更精确。

参考文献

- [1] 王华东,张义生. 环境质量评价[M]. 天津:天津科学技术出版社,1986:1-2.
- [2] 梁德华,蒋火华. 河流水质综合评价方法的统一和改进[J]. 中国环境监测,2002,18(2):63-66.
- [3] 兰文辉,安海燕. 环境水质评价方法的分析与探讨[J]. 干旱环境监测,2002,16(3):167-169.
- [4] 王锦国,袁永生. 可拓评价方法在环境质量综合评价中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2002,30(1):15-18.
- [5] 齐济,李岩. 基于改进 AHP 法定权的模糊优选模型在地下水水质评价中的应用[J]. 华北水利水电学院学报,2002,23(2):4-7.
- [6] GB/T 14848-1993. 中华人民共和国国家标准地下水质量标准[S].
- [7] 寇文杰. 修正的模糊综合评判法在地下水水质评价中的应用[J]. 南水北调与水利科技,2013,(2):71-75.
- [8] 安达,姜永海,杨显,等. 海明距离模糊法在垃圾填埋场地下水水质评价中的应用[J]. 环境工程技术学报,2013,3(2):120.
- [9] 王橧樞,吴勇,古广华. 四川省德阳市地下水水质模糊数学综合评价[J]. 地质灾害与环境保护,2011,22(1):51-55.
- [10] 杨小芳,王任超,张蔚. 基于模糊数学的岩溶水质评价[J]. 科技信息,2009,(20):83-84.
- [11] 李春萍,李国学,罗一鸣,等. 北京市 6 座垃圾填埋场地下水环境质量的模糊评价[J]. 环境科学,2008,29(10):2729-2735.
- [12] 李亚松. 地下水质量综合评价方法研究——以滤沱河冲洪积扇为例[D]. 北京:中国地质科学院,2009:52.

- [13] 杨纶标,高英仪. 模糊数学原理及应用[M]. 广州:华南理工大学出版社,2006:1-97.
- [14] 谢季坚,刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2006:128-191.
- [15] 毛相义. 遵义市地表水污染及其治理对策[J]. 贵州地质,1991,8(1):77.
- [16] 杨秀忠. 遵义市地下水污染趋势分析及防治对策[J]. 贵州地质,2005,21(4):258.
- [17] 吴远航. 遵义市区环境地质与水资源的关系[J]. 遵义师范学院学报,2006,7(6):88-89.
- [18] GB/T 14848-2007(报批稿),中华人民共和国国家标准地下水质量标准(修订版)[S]. 国家质量监督检验检疫总局,2009.
- [19] DD2008-01. 中国地质调查局地质调查技术标准地下水污染地质调查评价规范[S]. 中国地质调查局,2008.10.

Comparison of comprehensive index method and fuzzy comprehensive method in the evaluation of groundwater quality: A case study in Zunyi City

LI Lu-juan, ZOU Sheng-zhang

(Institute of Karst Geology, CAGS /Key Laboratory of Karst Dynamics, MLR & GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: The comprehensive index method and the fuzzy comprehensive method are widely used in groundwater quality evaluation. The groundwater environment in karst area is vulnerable and the potential pollution sources are complex. In order to better understand the effect of comprehensive index method and fuzzy comprehensive method in assessment of karst groundwater in Zunyi City, Guizhou Province, a typical karst area was selected for study. Applying comprehensive index method and fuzzy comprehensive method to evaluate and contrast analysis groundwater quality of nine representative water points in Zunyi, the results showed: The shallow groundwater quality in Zunyi is generally good, 33 % of the water was grade III or higher; but the individual regional groundwater quality is poor, mainly the NO_2^- , NH_4^+ , Mn, Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , total dissolved solids, total hardness (CaCO_3) and Se exceeded the standard. There were six water points whose evaluation results were the same and all were grade II. The remaining three water points were different; in the comprehensive index method all were grade IV, while in the fuzzy comprehensive 2 water points were grade V and one water point was grade III. The main reasons for these differences are the maximum value of the single index are emphasized when calculate the comprehensive value F and the weight of evaluation indexes are not taken into account in the comprehensive index method; however, these disadvantages of the comprehensive index method are resolved in the fuzzy comprehensive method, the proximity of indexes to water quality classification limitation is carefully depicted, and the impact weight of all indexes to groundwater quality are quantified visible, so in the groundwater quality evaluation, the fuzzy comprehensive method is superior to the comprehensive index method.

Key words: karst groundwater; water quality evaluation; comprehensive index method; fuzzy comprehensive method; contrast analysis; Zunyi City, Guizhou Province

(编辑 吴华英 韦复才)