

集对分析法在洞庭湖区浅层水质评价中的应用

肖丹^{1,2}, 肖江¹, 王士党¹

(1. 湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南省地质研究所, 长沙 410007)

摘要:利用集对分析法对洞庭湖区水质质量进行评价,了解洞庭湖区浅层地下水环境质量的现状,横向对比区域水质综合状况,以及为今后开展浅层地下水污染机理研究、防治提供科学的依据。集对分析法分析研究的浅水水质是科学有效地,对促进社会经济发展有着重要的现实意义和深远的历史意义。

关键词:集对分析法;权重分析;水质评价;洞庭湖区

中图分类号:X824

文献标志码:A

随着经济的快速发展,对于水资源的开发利用存在一定程度上的不合理,导致可直接饮用的水质比重越来越低。我国淡水资源十分缺乏,人均水平不到世界平均水平的22%。洞庭湖地区地下水资源丰富,用水方式也大多为就地取水,由于近年来大量化肥、农药及生活、工业废水的不合理排放,导致浅层水资源质量变化较大。因此,为了更好地利用浅层地下水资源,开展水质质量评价也就显得尤为重要。

目前常见水质质量评价方法主要是综合指数法、模糊评价法、灰色系统法和BP神经网络法等。水资源评价是水文学中的重要组成部分,集对分析法在水资源评价中获得了大量的应用,取得了较大的进展。2000年刘慧等^[1]、2003年王玉梅^[2]、2003年门宝辉等^[3]、2012年郭晓静等^[4]利用集对分析法通过对不同地区的区域水资源进行评价,2004年王栋等^[5]、2011年吕明捷等^[6]利用集对分析法论证了在水质富营养化评价中的应用。重点突出集对分析法在水资源开发利用程度评价中的准确性。本文主要利用集对分析法对洞庭湖地区地下水水质资料进行水质综合评价,研究该地区水质特征,分析水质综合状况,为下一步的开发利用及水资源保护提供科学依据。

1 基本原理及方法

集对分析法(Set Pair Analysis,简称SPA)最早是由我国学者赵克勤^[7]于1989年在全国系统理论上提出,是一种处理不确定性的系统分析方法。集对分析法用同、异、反三个方面反应采集水样与水质标准两个集合之间的隶属关系,主要体现在确定性及非确定性两个方面。在集中分析中,“同一”与“对立”是确定性的,“差异”是不确定的,从三个方面研究分析事物,认为三者是互相联系、互相影响、互相制约的,又在一定的条件下相互转化。

在用集对分析法对一个地区的地下水水质进行评价时,对于逆向(正向)指标,在只有I、II、III类标准的前提下,假定总体共有N个评价指标,其中S个评价指标优于I类(III类)标准,有P个评价指标差于III类(I类)标准,有F个评价指标属于II类标准。水样的联系度表达式可以表示为:

$$\mu = \frac{S}{N} + \frac{F}{N}i + \frac{P}{N}j = a + bi + cj \quad (1)$$

其中, i 表示差异度系数, j 表示对立度系数。 $a + b + c = 1$ 。

根据集对分析法的理论,(1)式中,同一度 a 值越

大,表明水样样本与标准水样的相似度越高,水质质量越好;而对立度 c 值越大,表明水质质量越差,污染程度越高;差异度 b 值是不确定的,由式 $a + b + c = 1$ 就可以综合评价该区的浅层水质质量^[4,5,8,9]。

假定有 N 个评价指标和 M 级评价等级,则联系度表达式为:

$$\mu = \frac{S}{N} + \frac{F_1}{N}i_1 + \frac{F_2}{N}i_2 + \dots + \frac{F_{M-2}}{N}i_{M-2} + \frac{P}{N}j = a + b_1i_1 + b_2i_2 + \dots + b_{M-2}i_{M-2} + cj \quad (2)$$

式中, $b_1, b_2, b_3, \dots, b_{M-2}$, 为差异度系数。对于某一逆向指标(或正向指标) k 的联系度 μ_k ($k = 1, 2, \dots, N$) 可写成式(3)或式(4)^[6,10]。

$$\mu_k = \begin{cases} 1 + 0j \frac{x_{k2} - x_{kt}}{x_{k2} - x_{k1}} + \frac{x_{kt} - x_{k1}}{x_{k2} - x_{k1}}i_1 + 0i_2 + \dots + 0i_{M-2} + 0j & 0 \leq x_{kt} \leq x_{k1} \\ \dots & x_{k1} < x_{kt} \leq x_{k2} \\ \dots & \dots \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + \dots + \frac{x_{kM} - x_{kt}}{x_{kM} - x_{kM-1}}i_{M-2} + \frac{x_{kt} - x_{kM-1}}{x_{kM} - x_{kM-1}}j & x_{kM-1} < x_{kt} < x_{kM} \\ 0 + 1j & x_{kt} \geq x_{kM} \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu_k = \begin{cases} 1 + 0j & x_{k1} \leq x_{kt} \\ \frac{x_{k2} - x_{kt}}{x_{k2} - x_{k1}} + \frac{x_{kt} - x_{k1}}{x_{k2} - x_{k1}}i_1 + 0i_2 + \dots + 0i_{M-2} + 0j & x_{k1} < x_{kt} < x_{k2} \\ \dots & \dots \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + \dots + \frac{x_{kM} - x_{kt}}{x_{kM} - x_{kM-1}}i_{M-2} + \frac{x_{kt} - x_{kM-1}}{x_{kM} - x_{kM-1}}j & x_{kM-1} < x_{kt} \leq x_{kM-1} \\ 0 + 1j & 0 \leq x_{kt} < x_{kM} \end{cases} \quad (4)$$

在水质评价中,由于各指标标准是不同的,绝对值差别很大,因此需要衡量单因子权重,要对数据进行无量纲化处理,其公式为:

表 1 地下水质量标准 (mg/L)

等级	SO_4^{2-}	Cl^-	NO_3^-	NO_2^-	NH_4^+	F^-	Fe	Mn
I	≤50	≤50	≤2	≤0.001	≤0.02	≤1	≤0.1	≤0.05
II	≤150	≤150	≤5	≤0.01	≤0.02	≤1	≤0.2	≤0.05
III	≤250	≤250	≤20	≤0.2	≤0.2	≤1	≤0.3	≤0.1
IV	≤350	≤350	≤30	≤0.5	≤0.5	≤2	≤1.5	≤1
V	450	450	50	1	1	5	2	1.5

I 级和 II 级地下水基本未遭受污染,可以直接饮用,III 级地下水局部可能遭受少量元素的污染,但可以稍加处理即可饮用,IV 级和 V 级地下水普遍遭受污染,

$$\omega'_k = \begin{cases} \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M x_{kj} & x_{kj} > x_{k(j+1)} \\ \frac{x_{ki}}{x_{ki}} & x_{kj} < x_{k(j+1)} \\ \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M x_{kj} & \end{cases} \quad (5)$$

归一化得:

$$\omega_k = \frac{\omega'_k}{\sum_{k=1}^N \omega'_k} \quad (6)$$

求单指标的 μ 和 ω 的乘积和^[11-13]:

$$\mu_i = \sum_{k=1}^N \mu_k \omega_k \quad (7)$$

式中: μ_i 一第 i 个样本的联系度。

根据最大隶属度原则, μ_{ij} 最大值所对应的污染指数

$$\delta = \max_{1 \leq j \leq m} (\mu_{ij}) \quad (8)$$

式(8)判别样本水质属于哪一级别水质,评价水质质量。

2 洞庭湖区水质综合评价

本文选用国家 1993 年颁发的《地下水环境质量标准》(GB/T14848 - 1993)^[14] 为评价标准(表 1),将地下水分为 I、II、III、IV、V 五类。将 IV 类水的上限设置成 V 类水的下限。在地下水环境质量标准中,水质标准是一个区间, I 类水是指小于等于 I 级标准的水,也就是本文所要研究的“同一”, V 类水是指大于 IV 级标准的水,是所要研究的“对立” II、III、IV 类就是所要研究“差异”。

而且污染元素数量较多,能饮用或要经过深度处理才能饮用。

表 2 洞庭湖区实测水样数据结果 (mg/L)

断面	SO_4^{2-}	Cl^-	NO_3^-	NO_2^-	NH_4^+	F^-	Fe	Mn
橘子洲组	12.08	10.74	9.5	0.68	0.07	0.1	1.74	0.3
雷神庙组	0.2	2.07	1	0	0.14	0.05	0.37	0.2
白沙井组	5	2.2	3	0	0	0.21	0.08	0.006
白水江组	120	65.77	3.6	0	1.9	0.25	0.38	0.792
新开铺组	16	8.05	1.4	0.036	0.16	0.08	0.36	0.049

2.1 各水样模糊联系度表达式

洞庭湖区实测水样数据结果见表2,以橘子洲组为例,由实测数据与质量标准可知,SO₄²⁻、Cl⁻、F⁻属于I类, N = 8, S = 3;

NO₃⁻、NH₄⁺属于III类, F₂ = 2; Mn属于IV类, F₃ = 1; NO₂⁻、Fe属于V类, P = 2。带入(2)式得:

$$\mu_{11} = \frac{3}{8} + 0i_1 + \frac{2}{8}i_2 + \frac{1}{8}i_3 + \frac{2}{8}j = 0.375 + 0i_1 + 0.25i_2 + 0.125i_3 + 0.25j \quad (9)$$

同理推知雷神庙组、白沙井组、白沙江组、金开铺组联系度表达式是:

$$\mu_{21} = 0.625 + 0i_1 + 0.125i_2 + 0.25i_3 + 0j \quad (10)$$

$$\mu_{31} = 0.875 + 0.125i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j \quad (11)$$

$$\mu_{41} = 0.25 + 0.375i_1 + 0i_2 + 0.25i_3 + 0.125j \quad (12)$$

$$\mu_{51} = 0.625 + 0i_1 + 0.25i_2 + 0.125i_3 + 0j \quad (13)$$

比较(9)~(13)式同一度、差异度、对比度大小,白沙井组同一性为0.875,由于所有指标全是逆向指标,水样白沙井组水质最优;白沙江组同一性为0.25,水质较差。

2.2 水样权重计算

求各水样进行评价因子的权重系数,并利用权重系数处理模糊联系度表达式。以水样橘子洲组为例,先求出权重系数,再结合联系度表达式。

$$\mu_{SO_4^{2-}} = \mu_{Cl^-} = \mu_{F^-} = 1 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j \quad (14)$$

$$\mu_{NO_3^-} = 0 + \frac{20 - 9.5}{20 - 5}i_1 + \frac{9.5 - 5}{20 - 5}i_2 + 0i_3 + 0j = 0 + 0.7i_1 + 0.3i_2 + 0i_3 + 0j \quad (15)$$

$$\mu_{Mn} = 0 + 0i_1 + \frac{1 - 0.3}{1 - 0.1}i_2 + \frac{0.3 - 0.1}{1 - 0.1}i_3 + 0j = 0 + 0i_1 + 0.778i_2 + 0.222i_3 + 0j \quad (16)$$

$$\mu_{NH_4^+} = 0 + \frac{0.2 - 0.07}{0.2 - 0.02}i_1 + \frac{0.07 - 0.02}{0.2 - 0.02}i_2 + 0i_3 + 0j = 0 + 0.722i_1 + 0.278i_2 + 0i_3 + 0j \quad (17)$$

$$\mu_{NO_2^-} = 0 + 0i_1 + 0i_2 + \frac{1 - 0.68}{1 - 0.5}i_3 + \frac{0.68 - 0.5}{1 - 0.5}j = 0 + 0i_1 + 0i_2 + 0.64i_3 + 0.36j \quad (18)$$

$$\mu_{Fe} = 0 + 0i_1 + 0i_2 + \frac{2 - 1.74}{2 - 1}i_3 + \frac{1.74 - 1}{2 - 1}j = 0 + 0i_1 + 0i_2 + 0.26i_3 + 0.74j \quad (19)$$

分别求权重:

$$\omega_{SO_4^{2-}} = 0.009 \quad \omega_{Cl^-} = 0.008$$

$$\omega_{F^-} = 0.009 \quad \omega_{NO_3^-} = 0.081$$

$$\omega_{Fe} = 0.389 \quad \omega_{NH_4^+} = 0.037$$

$$\omega_{Mn} = 0.102 \quad \omega_{NO_2^-} = 0.365$$

$$\mu_1 = \mu_{SO_4^{2-}}\omega_{SO_4^{2-}} + \mu_{Cl^-}\omega_{Cl^-} + \mu_{NO_3^-}\omega_{NO_3^-} +$$

$$\mu_{NO_2^-}\omega_{NO_2^-} + \mu_{NH_4^+}\omega_{NH_4^+} + \mu_{Fe}\omega_{Fe} + \mu_{Mn}\omega_{Mn} = 0.026 + 0.084i_1 + 0.114i_2 + 0.357i_3 + 0.419j \quad (20)$$

同理可得到雷神庙组、白沙井组、白水江组、新开铺组联系度表达式:

$$\mu_2 = 0.472 + 0.012i_1 + 0.482i_2 + 0.034i_3 + 0j \quad (21)$$

$$\mu_3 = 0.878 + 0.122i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j \quad (22)$$

$$\mu_4 = 0.241 + 0.056i_1 + 0.052i_2 + 0.004i_3 + 0.647j \quad (23)$$

$$\mu_5 = 0.225 + 0.149i_1 + 0.609i_2 + 0.017i_3 + 0j \quad (24)$$

2.3 水质评价矩阵

$$B = \begin{pmatrix} 0.026 & 0.084 & 0.114 & 0.357 & 0.419 \\ 0.472 & 0.012 & 0.482 & 0.034 & 0 \\ 0.878 & 0.122 & 0 & 0 & 0 \\ 0.241 & 0.056 & 0.052 & 0.004 & 0.647 \\ 0.225 & 0.149 & 0.609 & 0.017 & 0 \end{pmatrix} \quad (25)$$

由此可判断水质质量级别(表3)。

表3 洞庭湖区水质综合评价

分 组	橘子洲组	雷神庙组	白沙井组	白水江组	新开铺组
模糊估计	I	I	I	I	I
集对分析	V	III	I	V	III

由表3可知,白沙井组水质为I级,水质较好,适用于生活饮用水源及工农业用水;雷神庙组、新开铺组水质为III级,水质不可以用于直接用于生活饮用水源,要经过一定的处理才可以饮用,可作为工农业用水;橘子洲组和白水江组水质属于V级,污染比较严重,已经不能饮用只能用于工业用水。对于研究区域的污染区域,应加大治理力度,防止水质进一步恶化,对于未污染地段,加强保护。

3 结束语

本文表明经过权重计算,不同水质级别其污染物的权重是不同的,根据不同水质级别,确定相应级别各污染物的权重,避免了模糊分析法的分级不合理。集对分析法把人们对于事物的辨别系统的分析出来,评价的概念清晰、理论严谨、结果可靠。集对分析法是评价水质的一种比较好的方法,值得在更多的区域水质评价中推广应用。对于集对分析法的发展,更快速的计算及在更多领域的推广使用是今后的重点发展方向。

参考文献:

- [1] 刘慧,龚士良.基于集对分析的上海地面沉降数据处理[J].勘察科学技术,2000(3):23-28.
- [2] 王玉梅,周承德.汉江中下游水质评价方法研究[J].中国农村水利水电,2003(1):73-75.
- [3] 门宝辉,梁川,赵燮京.评价区域水资源开发利用程度的集对分析法[J].南水北调与水利科技,2003,1(6):30-32,41.
- [4] 郭晓静,周金龙,郭林,等.熵权集对分析法在新疆塔里木盆地地下水水质评价中的应用[J].工程勘察,2012(2):56-59.
- [5] 王栋,朱元钰,赵克勤.基于集对分析和模型集合论的水体营养化评价模型的应用研究[J].水文,2004,24(3):9-13.
- [6] 吕明捷,杜云,荣超,等.基于相关系数定权的集对分析法在湖泊富营养化评价中的应用[J].南水北调与水利科技,2011,9(1):96-98,138.
- [7] 赵克勤.集对分析及其初步应用[J].大自然探索,1994,13(1):67-70.
- [8] 童英伟,刘志斌,常欢.集对分析法在河流水质评价中的应用[J].安全与环境学报,2008,8(6):84-86.
- [9] 杨建军,关卫省,徐东,等.基于集对分析法的河流监测断面设置合理性研究[J].上海环境科学,2011,30(2):70-76.
- [10] 李永乐,潘登.熵权集对分析法在沁河水质评价中的应用[J].人民黄河,2012,34(6):56-57,60.
- [11] 聂艳,周勇,雷文华,等.基于集对分析法的农田土壤环境质量评价[J].长江流域资源与环境,2008,17(3):396-400.
- [12] 邱林,唐红强,陈海涛,等.集对分析法在地下水水质评价中的应用[J].节水灌溉,2007(1):13-15.
- [13] 卢敏,张展羽,石月珍.集对分析法在水安全评价中的应用研究[J].河海大学学报:自然科学版,2006,34(5):505-508.
- [14] GB/T14848-1993,地下水质量标准[S].

Application of Set Pair Analysis Method on the Evaluation of Shallow Water Quality in Dongting Lake

XIAO Dan^{1,2}, XIAO Jiang¹, WANG Shi-dang¹

(1. School of Civil Engineering & Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Institute of Geology, Changsha 410007, China)

Abstract: An evaluation on water quality in Dong Ting Lake District is made by using Set Pair Analysis The current situation of the shallow groundwater in the Lake is given and the water quality is compared in a comprehensive way. A good resource for future mechanism research and prevention from shallow underground water pollution are established. Set pair analysis is very scientifically effective for shallow groundwater research. Not only does it play an currently essential role but also will have profound historical impact on social-economic development.

Key words: set pair analysis method; weight analysis; water quality assessment; Dongting Lake