

物元可拓法在地下水环境质量评价中的应用

叶 勇,迟宝明,施枫芝,戴长雷
(吉林大学环境与资源学院,长春 130026)

摘 要:介绍了物元可拓法的基本原理及计算步骤。在此基础上,利用物元可拓法对长春市伊通河附近地下水水样进行水质等级评价。从评价结果中看出,运用物元可拓法对地下水水质进行综合评价,排除了人为的干预,并利用关联度函数及权重系数等手段,使最终评价结果更加接近于实际情况,比较客观的反映了地下水水质总体状况。物元可拓方法由于其评价客观,计算简便,结果比较理想等优点,已经在诸多领域中得到了广泛应用。

关键词:地下水;环境质量评价;物元分析

中图分类号:X523 文献标识码:A 文章编号:1005-3409(2007)02-0052-03

Application of Matter-element Extension for
Groundwater Environment Quality Evaluation

YE Yong ,CHI Bao-ming ,SHI Feng-zhi ,DAI Chang-lei
(College of Environment & Resources , Jilin University , Changchun 130026 , China)

Abstract :The basic theory and calculating process of Matter-Element Analysis was discussed , ground water samples , which are near the Yitong River in Changchun city , were evaluated. From the result of evaluation , the evaluation result gained from this method are more close to the real world by eliminating the human intervening , using correlated function and weight coefficient , and represent an impersonal remark of the main characteristic in groundwater quality. Matter-Element analysis had been introduced in a great deal of field because of its impersonality , easy to calculate , well result etc.

Key words :groundwater ; environment quality evaluation ; matter-element extension

物元分析法于上世纪 80 年代,由我国蔡文教授创立,是主要研究和处理不相容问题的理论和方法,是贯穿于自然科学与社会科学的横断学科。目前已广泛应用于新产品构思与设计、优化决策、控制、识别与评价等各个领域^[1]。应用物元分析法对地下水环境质量评价是在近些年才开始兴起的。随着物元分析理论的进一步成熟以及与可拓法的结合,使得物元分析法的使用范围越来越广泛^[2,3]。

由于水环境系统及其评价中存在的模糊性,采用建立在模糊集合论基础上的综合评价方法来进行水环境质量评价受到了上世纪 80 年代后的水文地质工作者及环境科学工作者的青睐^[4]。虽然模糊集合论方法综合评价水环境质量能较客观地反映水环境系统污染的真实情况,但也存在一些不足。如,隶属度用最高和最低的两级状态,没有考虑中间值的影响,在某些情况下就与实际有较大的偏差。虽然可以采用权重来弥补这一不足,但权重值如何给定又具有很大的人为干预性。物元分析方法把模糊集合从[0,1]区间扩展到了(-,+)的实数轴上,丰富了事物的内涵,因此能更加客观的反映真实世界的情况^[5-9]。

1 物元可拓法简介

1.1 物元

将所研究的事物记作 M , M 的特征记作 C , M 关于 C 的

量值记作 V ,则称有序三元组 $R = (M, C, V)$ 为物元。若事物 M 有多个特征,并以 n 个特征 c_1, c_2, \dots, c_n 和相应的量值 v_1, v_2, \dots, v_n 来描述,则可以表示为:

$$R(x) = \begin{bmatrix} M & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M(x) & c_1(x) & \langle a_1(x), b_1(x) \rangle \\ & c_2(x) & \langle a_2(x), b_2(x) \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n(x) & \langle a_n(x), b_n(x) \rangle \end{bmatrix}$$

将 R 称为 n 维物元。

1.2 经典域与节域

由事物的特征及其标准量值范围组成的物元矩阵称为经典域,记为 R_0 。由经典物元加上可以转化为经典物元的事物及其特征和此特征相应推广了的量值范围组成的物元矩阵称为节域,记为 R_c 。

$$R_0 = \begin{bmatrix} M & c_1 & [a_{01}, b_{01}] \\ & c_2 & [a_{02}, b_{02}] \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & [a_{0n}, b_{0n}] \end{bmatrix} \quad R_c = \begin{bmatrix} Mc & c_1 & [a_{c1}, b_{c1}] \\ & c_2 & [a_{c2}, b_{c2}] \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & [a_{cn}, b_{cn}] \end{bmatrix}$$

上述两个表达式中 $c_1 - c_n$ 代表物元特征; $a_{0i}、b_{0i}$ 分别表示经典物元特征量值 X_{0i} 的上下限值; $a_{ci}、b_{ci}$ 分别表示节域物元特征量值 X_{ci} 的上下限值,显然有 $X_{0i} \subseteq X_{ci}$ 。

* 收稿日期:2006-03-23
基金项目:吉林省科技厅科技发展项目:长春市东郊水资源人工调蓄系统研究(20010432)
作者简介:叶 勇(1982-),男,四川自贡人,硕士生,主要从事地下水资源评价及信息化方向的研究。

1.3 矩与关联函数

矩,是指实数轴上点 x_j 与区间 $X_{ij} = (a_{ij}, b_{ij})$ 之间的距离。计算公式为:

$$(x_j, x_{ij}) = |x_j - \frac{1}{2}(a_{ij} + b_{ij})| - \frac{1}{2}(b_{ij} - a_{ij})$$

$i=1,2, \dots, m; j=1,2, \dots, n$

(1)

同理,实数点 x_j 与节域区间 $X_{pj} = (a_{pj}, b_{pj})$ 之间的矩用如下公式计算:

$$(x_j, x_{pj}) = |x_j - \frac{1}{2}(a_{pj} + b_{pj})| - \frac{1}{2}(b_{pj} - a_{pj})$$

$j=1,2, \dots, n$

(2)

关联函数 $k(x)$ 表示被评价单元与某标准的隶属程度的函数,关联函数的数值代表关联度。关联函数的选取应当根据被评价事物的特征与可拓集合理论相结合的方法确定。针对不同的评价事物选用合适的关联函数才能更准确的反应隶属关系。本次对地下水水质进行评价选用的关联函数如公式(3)所示。

$$k_i(x_j) = \begin{cases} \frac{(x_j, x_{ij})}{x_{ij}} & x_j \in x_{ij} \\ \frac{(x_j, x_{pj}) - (x_j, x_{ij})}{(x_j, x_{pj}) - (x_j, x_{ij})} & x_j \notin x_{ij} \end{cases}$$

$i=1,2, \dots, m; j=1,2, \dots, n$

(3)

其中: $|x_{ij}| = |a_{ij} - b_{ij}|$ 。关联函数取值的意义见表 1^[10]。

表 1 关联函数 $k(x)$ 的意义

范 围	意 义
$k(x) = 1.0$	表示被评价对象超过标准对象的上限,数值越大,开发潜力越大
$0 < k(x) < 1.0$	表示被评价对象符合标准对象要求的程度,数值越大,越接近标准上限
$-1.0 < k(x) < 0$	表示被评价对象不符合标准对象要求,但具备转化为标准对象的条件,数值越大,越容易转化
$k(x) = -1.0$	表示被评价对象不符合标准对象要求,且不具备转化为标准对象的条件

1.4 权系数 a_i

在综合评价中,考虑到各因素对水质的影响程度不同,应根据其在水质中的作用大小分别赋予不同的权值。权值的计算方法可根据实际情况选取,不同的评价目的及评价因子按不同的公式进行计算。常用的权系数计算方法有指数超标法、自顶向下的系统分析法、专家打分法、层次分析法、因子污染贡献率法、关联函数法等等。

1.5 综合关联度 $K_j(p)$ 及质量评价等级评定

综合关联度是关联度与权系数的乘积。即:

$$K_j(p) = \sum_{i=1}^n a_i \cdot k_j(x_j)$$

(4)

称 $K_j(p)$ 为待评价单元 p 关于 j 质量的综合关联度。综合关联度充分考虑了隶属关系以及某因子对整个水体评价时的影响程度两方面来反应水体的等级,因此对评价单元更客观、准确。若 $k_j = \max[k_j(p)]$,则待评价单元 p 属于等级 j 。即可确定被评价水体的最终等级。

2 物元可拓法应用实例

本次采用物元可拓法对长春市伊通河附近地下水水样进行评价。在伊通河下游四化桥处附近农家井中,于埋深约为 5~6 m 处取得砂砾石孔隙水水样。伊通河是长春市惟一过境河流,全长 342.5 km,其中 23 km 河段从长春市区流过。随着社会的发展、人口的快速增加,每年长春市区有近 80% 的工业废水和 90% 的生活污水直接排入河内,并且由于污染物种类繁多、结构复杂等,导致伊通河的河水污染严重。据 2000 年伊通河的地表水质量评价结果,新立城水库大坝监测河段为Ⅲ类水质,水厂小坝监测河段为Ⅲ类水质,东大桥以下监测河段为Ⅳ类水质,伊通河各监测断面Ⅲ类

水质占 33.3%、Ⅳ类水质占 66.7%。

由于河流与地下水之间水力联系的作用,可能使本区地下水水体受到污染河水的污染,为了确定地下水水体的质量等级,在 5 个不同的地点分别取样。选定 (K^+, Na^+) , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , TDS 共 6 项作为评价因子,对地下水进行综合质量评价。实测各评价因子浓度数据见表 2。

表 2 实测浓度数据表

样本	K^+, Na^+	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	TDS
1	16.40	157.39	174.85	236.10	541.29	967.68
2	66.60	142.92	134.17	211.75	477.07	868.70
3	58.20	117.84	126.98	206.10	411.25	782.28
4	23.90	82.65	101.09	191.75	353.84	640.24
5	34.20	63.13	88.35	170.00	280.08	561.81

评价标准采用国家地下水水质标准 GB/ T14848 - 93。国家地下水水质评价标准包含五级,由于国家标准按限制某评价因子浓度的上限来划分等级,对第Ⅴ级标准只有下限要求而没有上限要求,而环境质量标准的划分一般都是指一个浓度区间。考虑到本次评价水样从总体上看没有严重超标的因子,为了符合标准的要求,舍弃第Ⅴ级标准,采用前四级评价标准设定各评价因子等级的范围。本次评价选用的评价因子的相应国家标准如表 3 所示。

根据物元与节域的定义,由表 3 可得出水质分级标准物元矩阵:

$$R_0 = \begin{bmatrix} K^+, Na^+ <0,50> \\ Ca^{2+} <0,50> \\ Cl^- <0,50> \\ SO_4^{2-} <0,50> \\ HCO_3^- <0,150> \\ TDS <0,300> \end{bmatrix}$$

$R_0 = \begin{bmatrix} K^+, Na^+ <50,100> \\ Ca^{2+} <50,100> \\ Cl^- <50,150> \\ SO_4^{2-} <50,150> \\ HCO_3^- <150,300> \\ TDS <300,500> \end{bmatrix}$

$R_0 = \begin{bmatrix} K^+, Na^+ <100,150> \\ Ca^{2+} <100,150> \\ Cl^- <150,250> \\ SO_4^{2-} <150,250> \\ HCO_3^- <30,450> \\ TDS <500,1000> \end{bmatrix}$

$R_0 = \begin{bmatrix} K^+, Na^+ <150,200> \\ Ca^{2+} <150,200> \\ Cl^- <250,350> \\ SO_4^{2-} <250,350> \\ HCO_3^- <450,550> \\ TDS <1000,2000> \end{bmatrix}$

及节域矩阵:

$$R_c = \begin{bmatrix} K^+, Na^+ <0,200> \\ Ca^{2+} <0,200> \\ Cl^- <0,350> \\ SO_4^{2-} <0,350> \\ HCO_3^- <0,350> \\ TDS <0,2000> \end{bmatrix}$$

由表 2 可得被评价样本的物元矩阵:

$$n = \begin{bmatrix} 1 & K^+, Na^+ & 16.40 \\ & Ca^{2+} & 157.39 \\ & Cl^- & 174.85 \\ & SO_4^{2-} & 236.10 \\ & HCO_3^- & 541.29 \\ & TDS & 967.68 \end{bmatrix}$$

$n_2 = \begin{bmatrix} 2 & K^+, Na^+ & 66.60 \\ & Ca^{2+} & 142.92 \\ & Cl^- & 134.17 \\ & SO_4^{2-} & 211.75 \\ & HCO_3^- & 477.07 \\ & TDS & 868.70 \end{bmatrix}$

$n_3 = \begin{bmatrix} 3 & K^+, Na^+ & 58.20 \\ & Ca^{2+} & 117.84 \\ & Cl^- & 126.98 \\ & SO_4^{2-} & 206.10 \\ & HCO_3^- & 411.25 \\ & TDS & 785.28 \end{bmatrix}$

$n_4 = \begin{bmatrix} 4 & K^+, Na^+ & 23.90 \\ & Ca^{2+} & 82.65 \\ & Cl^- & 101.09 \\ & SO_4^{2-} & 191.75 \\ & HCO_3^- & 353.84 \\ & TDS & 640.24 \end{bmatrix}$

$$R = \begin{bmatrix} 5 & K^+, Na^+ & 34.20 \\ & Ca^{2+} & 63.13 \\ & Cl^- & 88.35 \\ & SO_4^{2-} & 170.00 \\ & HCO_3^- & 280.08 \\ & TDS & 561.81 \end{bmatrix}$$

由上述样本物元矩阵、标准物元矩阵及节域矩阵,通过(1),(2),(3)式计算样本中各评价因子相对标准水质分级标准的关联度,计算结果如表4所示。

表 4 关联度计算结果表							
样本	等级	K ⁺ ,Na ⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	TDS
1	级	0.6720	-0.7159	-0.4166	-0.6203	-0.9782	-0.4083
	级	-0.6720	-0.5739	-0.1244	-0.4305	-0.9652	-0.3258
	级	-0.8360	-0.1478	0.7515	0.8610	-0.9129	0.9354
	级	-0.8907	0.8522	-0.3006	-0.1088	0.9129	-0.0323
2	级	-0.1995	-0.6195	-0.3855	-0.5392	-0.8177	-0.3956
	级	0.6680	-0.4292	0.8417	-0.3088	-0.7083	-0.2980
	级	-0.3340	0.8584	-0.1055	0.6175	-0.2707	0.7374
	级	-0.5560	-0.1103	-0.4633	-0.2167	0.7293	-0.1313
3	级	-0.1235	-0.4523	-0.3774	-0.5203	-0.6531	-0.3819
	级	0.8360	-0.1784	0.7698	-0.2805	-0.4450	-0.2665
	级	-0.4180	0.6432	-0.1535	0.5610	0.7417	0.5706
	级	-0.6120	-0.2813	-0.4921	-0.2338	-0.2183	-0.2147
4	级	0.5220	-0.2832	-0.3357	-0.4725	-0.5096	-0.3470
	级	-0.5220	0.6530	0.5109	-0.2088	-0.2154	-0.1797
	级	-0.7610	-0.1735	-0.3261	0.5825	0.6411	0.7195
	级	-0.8407	-0.4490	-0.5956	-0.2691	-0.3290	-0.3598
5	级	0.6840	-0.1722	-0.3027	-0.4138	-0.3252	-0.3179
	级	-0.3160	0.7374	0.6165	-0.1053	0.8672	-0.0991
	级	-0.6580	-0.3687	-0.4110	0.8000	-0.0687	0.8764
	级	-0.7720	-0.5791	-0.6466	-0.3200	-0.3863	-0.4382

本次选用评价因子污染贡献率方法来确定权系数^[11],计算公式如下:

$$a_i = \frac{\frac{\bar{x}_i}{s_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{\bar{x}_i}{s_i}} \quad (5)$$

式中: x_i ——第*i*种评价因子的实测值; \bar{x}_i 第*i*种评价因子各级标准的平均值; a_i ——第*i*种评价因子的权重。

根据(5)式计算各样本各评价因子的权值见表5。由(4)式计算综合关联度。根据等级评定方法,按 $k_j = \max[k_j(p)]$ 的原则,评定各水样的最终质量等级(见表6)。

从评定等级结果可以看出,水样所在地的地下水大部分水体质量为级,局部地区水体为级,仅一个水样能达到级水平。从前述伊通河水质情况与此结果对比分析可以

参考文献:

[1] 蔡文.物元分析及其应用[M].北京:科学技术文献出版社,1994.3,8,22.
[2] 刘春莉,李祚泳.生态环境质量物元可拓评价及实例分析[J].城市环境与城市生态,2003,16(4):62-64.
[3] 孙欢,黄川友.大气环境质量物元可拓的权值分析和实例验证[J].东北水利水电,2004,(7):42-45.
[4] 王洪光,王国平.地下水环境质量的物元分析评价法[J].黑龙江环境通报,2002,26(4):114-118.
[5] 黄才安.水体环境质量评价的物元识别模型[J].水电能源科学,1996,14(4):252-257.
[6] 邹同庆.地下水水质的物元评价方法及应用[J].常德师范学报(自然科学版),2001,13(4):31-34.
[7] 王小丹,钟祥浩,范建容.荒漠化评价的物元可拓识别方法[J].山地学报,2002,20(5):636-640.
[8] 薛巧英.水环境质量评价方法的比较分析[J].环境保护科学,2004,30(124):64-67.
[9] 冯玉国,程锡良.地下水环境质量综合评价可拓集合方法及应用[J].工程勘察,2002,(3):23-25.
[10] 门宝辉,梁川.水质评价的物元分析法[J].哈尔滨工业大学学报,2003,35(3):358-361.
[11] 罗定贵,徐卫东.环境质量评价的物元分析模型[J].地下水,1997,19(2):49-55.
[12] 俞峰,杨成梧.物元分析方法在地下水质量综合评判中的应用[J].环境与工程学报,2005,16(2):35-38.

得出:伊通河位于长春市区段已受到非常严重的污染,并且此污染已经影响到地下水。

表 5 各样本各因子权重计算结果表						
样本	K ⁺ ,Na ⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃	TDS
1	0.0220	0.2114	0.1468	0.1982	0.2507	0.1710
2	0.0945	0.2029	0.1190	0.1878	0.2335	0.1622
3	0.0925	0.1872	0.1261	0.2047	0.2253	0.1642
4	0.0482	0.1667	0.1274	0.2417	0.2461	0.1699
5	0.0797	0.1471	0.1286	0.2475	0.2250	0.1722

表 6 综合关联度 $K_j(p)$ 计算结果及评定等级					
样本	级	级	级	级	评定等级
1	-0.6356	-0.5373	0.1624	0.3182	
2	-0.5468	-0.1955	0.3024	-0.0218	
3	-0.4601	-0.0605	0.4380	-0.3036	
4	-0.3634	0.0148	0.3136	-0.3984	
5	-0.2401	0.3145	0.1739	-0.4714	

根据关联函数的意义,样本1中综合关联度最大值为0.3128,与1的差距比较大,说明样本1虽然被评定为IV类水质,但与IV类水质标准下限较为接近,并且综合关联度中仅次于最大值的是第III级,说明样本水体转化为III类水质的可能性较大^[12]。同理,样本2,3,4,5中的综合关联度的最大值都不大,说明水体质量更接近于所评定等级标准的下限值,并且,样本2有向IV类水质转化的可能,样本3与样本4有向II类水质转化的可能,样本1有向III类水质转化的可能。虽然样本2,3,4同被评为III类水质,但从表6中可以看出,各自的最大综合关联度是有差异的。其中,样本3的值大于样本4和样本2,说明样本3的水质相对于样本4和样本2要稍差一些。

3 结 论

从本文所述物元模型及其计算方法可以看出,物元可拓法具有计算简便,评价结果直观等优点^[6]。当评价指标多、分级多、水样多时,可以利用VB,VC,Delphi,Matlab或者直接在Excel里通过VBA,进行简单编程,即可实现对所有的水样进行计算,具有很高的可操作性。

物元可拓法不仅可以对地下水水质进行综合的评价,确定样本所属的水体等级,而且还可以通过比较最大综合关联度,定性区分出同一等级样本水体的水质优劣及可能的转化方向。

采用关联度函数及引入权重系数的方法能够更加客观、真实的反应地下水水质情况。在实际评价时,由于评价方法的不同,所得结果可能稍有出入。因此,可综合运行多种评价方法对地下水水质进行评价并加以比较,最后得出结论,提出改进措施。