

文章编号:0559-9350(2009)10-1204-06

基于改进 SPA 法的地下水环境模糊综合评判

魏明华^{1,2}, 郑志宏^{1,2}, 黄强¹, 邱林²

(1. 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 华北水利水电学院, 河南 郑州 450011)

摘要:利用集对分析的原创联系度可展性,对其进行改进,将其推广到五级评判,进而建立了地下水环境评价模型。结合模糊综合评判方法,针对地下水环境的7项主要影响因子进行评价,可得到各地下水测点的评价结果,以及处于各评价等级的趋同程度。应用该方法进行实例计算,并与综合指数法、灰色关联法计算结果进行比较,结果表明:本方法评判效果较好,能够真实反映研究对象的状况,具有很好的工程应用价值。

关键词:改进集对分析;联系度;评价模型;地下水环境;模糊综合评判

中图分类号:X824

文献标识码:A

1 研究背景

地下水是水循环系统的重要环节,自古以来就是人类生活、生产用水的重要水源,特别是现在缺水的山西省,其已成为主要的供水水源。随着经济社会的发展,人类对地下水的污染和过度开采日趋严重,地下水环境状况在逐渐发生改变。回顾20世纪我国地下水开发历程,大致可划分为初期、扩大、大力发展和超采4个时期。长期的污染和过量无序地开采地下水,不仅大量消耗了地下水天然储量,改变了补给排泄条件,引起水位下降、平原地区降落漏斗逐年扩大、地面沉降、海水倒灌等一系列环境地质问题;并且,水量减少使得水体自净能力减弱、水环境变差。近年来,I、II类优质地下水呈明显下降趋势^[1]。因此,全面认识地下水,合理开发地下水,积极进行地下水环境评价研究,有效解决在地下水开发、利用、保护等方面存在的问题,已成为水资源可持续利用,人口、资源、环境和经济社会协调发展的迫切要求^[2]。综合评判是对系统的全面判断,包含技术、经济和社会等各方面内容,在实际工程中,模糊不确定性因素在各方面均客观存在着,常规的确定性评价方法难以准确反映区域水环境健康风险真实状态^[3]。目前应用比较广泛的专家打分法、灰色关联法等都是对存在不确定性因素影响的系统进行综合评判,这些方法对系统不确定性评价一般为“很差、差、较差、较好、好、很好”等等^[4],在隶属度和隶属函数的确定方面,都有一定难度,并且存在定性分析与定量分析平衡矛盾的问题。因此本文提出基于改进集对分析法的模糊综合评判,以更好地解决这些问题。

2 改进集对分析法评价原理及模型

集对分析(Set Pair Analysis, SPA)是赵克勤在1989年提出的一种新的系统分析理论方法^[5-6],但是该评价方法中有一点不足,是**b**、**c**的细化问题,即同异反评语细化问题^[7]。如地表水水质评价中存在5

收稿日期:2009-08-04

基金项目:水利部公益性行业专项经费项目(200801015);国家自然科学基金项目(50709027);华北水利水电学院青年科研基金项目(HSQJ2008013)

作者简介:魏明华(1976—),女,辽宁新民人,博士生,主要从事水资源系统工程。E-mail:wmmh@ncwu.edu.cn

类水质标准；一个方案指标的评价语有“好、一般和差”，在好中也有“稍好、好、很好、极好”等好的细化差别；同样差也有“稍差、差、很差、极差”等差的细化差别。虽然也有学者对这类问题用贴近度来处理^[8-9]，但结果仍然不理想，本文对其进行如下改进：

设有 n 个评价指标，将地下水环境指标的各个等级标准 $A_p = [v_{p1}, \dots, v_{pk}, \dots, v_{pm}]$ 分别组成一个集合， p 表示等级，将每个区域的地下水环境指标数值系列 $B_q = [x_{q1}, \dots, x_{qk}, \dots, x_{qn}]$ 分别组成另一个集合， q 表示区域，这 2 个集合构成一个集对 (A_p, B_q) ^[6]。比较 2 个集合中的对应项 x_{qk} 和 v_{pk} ，若 x_{qk} 处于 v_{pk} 的评价级别中，则认为是相同。若 x_{qk} 处于 v_{pk} 的相邻级别中，且在评价级别优越一边则认为是优异，其值简记 b_1 ；若 x_{qk} 处于 v_{pk} 的相邻级别中，且在评价级别劣差一边则认为是劣异，其值简记 b_2 。若 x_{qk} 处于 v_{pk} 的相隔级别中，且在评价级别优越一边，则认为是优反，其值简记 c_1 ；若 x_{qk} 处于 v_{pk} 的相隔级别中，且在评价级别劣差一边，则认为是劣反，其值简记 c_2 。这样， b, c 得到进一步细化，并且这样处理符合原创联系度可展性^[5,10]。将原来联系度表达式改写成式(1)或式(2)：

$$u = (A_0, B_1) = a + bi + cj = a + (b_1 + b_2)i + (c_1 + c_2)j \quad (1)$$

或

$$u = (A_0, B_1) = a + bi + cj = a + (b_1 i^+ + b_2 i^-) + (c_1 j^+ + c_2 j^-) \quad (2)$$

其中： $a + b_1 + b_2 + c_1 + c_2 = 1$ ， $i^+ \in [0, 1]$ ， $i^- \in [-1, 0]$ ，且 $i^+ + i^- = i \in [-1, 1]$ ， $j^+ = \{0, 1\}$ ， $j^- = -1$ 。

进一步分析地下水环境指标分级标准与评价指标实测值之间的数量关系，可以看出，即使不同地区的地下水环境指标处于同一级别中，但由于指标数值的大小差异，地下水可持续利用性也是有差异的。所以，需要更细致地刻画同、异、反联系度。本文采用距离贴近度的方法来确定联系度系数 a, b_1, b_2, c_1, c_2 的值^[5]。若指标值处于评价级别中，则 $a=1$ ，其它系数为 0。若指标值处于相邻的评价级别中，越靠近本评价标准值， a 越大，反之 b_1, b_2, c_1, c_2 越大；且在评价级别优越一边，则越靠近相邻的评价标准， a 越大， b_1 越小，反之， a 越小， b_1 越大；若指标值处于相邻的评价级别中，且在评价级别劣差一边，越靠近相邻的评价标准， a 越大， b_2 越小，反之， a 越小， b_2 越大。若指标值处于评价的相隔级别中，且在评价级别优越一边，越靠近评价标准，则 a, b_1 越大， c_1 越小；若指标值处于评价的相隔级别中，且在评价级别劣差一边，越靠近评价标准，则 a, b_2 越大， c_2 越小。

建立指标评价模型。相对于一级的联系度：

$$u_1(u_{1k}, x_{qk}) = a + b_1 i^+ + b_2 i^- + c_1 j^+ + c_2 j^- = \begin{cases} 1 & [0, v_{1k}) \\ \frac{v_{1k}}{x_{qk}} + \frac{x_{qk} - v_{1k}}{x_{qk}} i^- & [v_{1k}, v_{2k}) \\ \frac{v_{1k}}{x_{qk}} + \frac{v_{2k} - v_{1k}}{x_{qk}} i^- + \frac{x_{qk} - v_{2k}}{x_{qk}} j^- & [v_{2k}, +\infty) \end{cases}$$

二级的联系度：

$$u_2(v_{2k}, x_{qk}) = \begin{cases} \frac{v_{2k} - v_{1k}}{x_{2k} - x_{qk}} + \frac{v_{1k} - x_{qk}}{v_{2k} - x_{qk}} i^+ & [0, v_{1k}) \\ 1 & [v_{1k}, v_{2k}) \\ \frac{v_{2k} - v_{1k}}{x_{qk} - v_{1k}} + \frac{x_{qk} - v_{2k}}{x_{qk} - v_{1k}} i^- & [v_{2k}, v_{3k}) \\ \frac{v_{2k} - v_{1k}}{x_{qk} - v_{1k}} + \frac{v_{3k} - v_{2k}}{x_{qk} - v_{1k}} i^- + \frac{x_{qk} - v_{3k}}{x_{qk} - v_{1k}} j^- & [v_{3k}, +\infty) \end{cases}$$

三级的联系度：

$$u_3(v_{3k}, x_{qk}) = \begin{cases} \frac{v_{3k} - v_{2k}}{v_{3k} - x_{qk}} + \frac{v_{2k} - v_{1k}}{v_{3k} - x_{qk}} \frac{i^+}{i} + \frac{v_{1k} - x_{qk}}{v_{3k} - x_{qk}} \frac{j^+}{j} & [0, v_{1k}) \\ \frac{v_{3k} - v_{2k}}{v_{3k} - x_{qk}} + \frac{v_{2k} - x_{qk}}{v_{3k} - x_{qk}} \frac{i^+}{i} & [v_{1k}, v_{2k}) \\ 1 & [v_{2k}, v_{3k}) \\ \frac{v_{3k} - v_{2k}}{x_{qk} - v_{2k}} + \frac{x_{qk} - v_{3k}}{x_{qk} - v_{2k}} \frac{i^-}{i} & [v_{3k}, v_{4k}) \\ \frac{v_{3k} - v_{2k}}{x_{qk} - v_{2k}} + \frac{v_{4k} - v_{3k}}{x_{qk} - v_{2k}} \frac{i^-}{i} + \frac{x_{qk} - v_{4k}}{x_{qk} - v_{2k}} \frac{j^-}{j} & [v_{4k}, +\infty) \end{cases}$$

四级的联系度：

$$u_4(v_{4k}, x_{qk}) = \begin{cases} \frac{v_{4k} - v_{3k}}{v_{4k} - x_{qk}} + \frac{v_{3k} - v_{2k}}{v_{4k} - x_{qk}} \frac{i^+}{i} + \frac{v_{2k} - x_{qk}}{v_{4k} - x_{qk}} \frac{j^+}{j} & [0, v_{2k}) \\ \frac{v_{4k} - v_{3k}}{v_{4k} - x_{qk}} + \frac{v_{3k} - x_{qk}}{v_{4k} - x_{qk}} \frac{i^+}{i} & [v_{2k}, v_{3k}) \\ 1 & [v_{3k}, v_{4k}) \\ \frac{v_{4k} - v_{3k}}{x_{qk} - v_{3k}} + \frac{x_{qk} - v_{4k}}{x_{qk} - v_{3k}} \frac{i^-}{i} & [v_{4k}, +\infty) \end{cases}$$

五级的联系度：

$$u_5(v_{5k}, x_{qk}) = \begin{cases} \frac{v_{5k} - v_{4k}}{v_{5k} - x_{qk}} + \frac{v_{4k} - v_{3k}}{v_{5k} - x_{qk}} \frac{i^+}{i} + \frac{v_{3k} - x_{qk}}{v_{5k} - x_{qk}} \frac{j^+}{j} & [0, v_{3k}) \\ \frac{v_{5k} - v_{4k}}{v_{5k} - x_{qk}} + \frac{v_{4k} - x_{qk}}{v_{5k} - x_{qk}} \frac{i^+}{i} & [v_{3k}, v_{4k}) \\ 1 & [v_{4k}, +\infty) \end{cases}$$

模型中 v_{1k} 、 v_{2k} 、 v_{3k} 、 v_{4k} 、 v_{5k} 分别为评价标准的 I 级、II 级、III 级、IV 级、V 级的界限值， x_{qk} 为各评价地区 q 地下水环境的 k 项指标值。根据上述评价模型对每一个地区的各个指标计算联系度系数 a 、 b_1 、 b_2 、 c_1 、 c_2 的值，再结合各指标权重值进行评价。

3 实例计算

以文献[11]的山东某地区浅层地下水数据进行计算。根据研究区域情况选取如下 7 种影响地下水环境的评价因子^[12]：固形物、总硬度、F、As、Pb、 SO_4^{2-} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ ，采用 8 个水样的测试结果进行计算和评价，水质分析结果见表 1。

表 1 水质分析结果

单位：mg/L

测点	固形物	总硬度	F	As	Pb	SO_4^{2-}	$\text{NH}_3\text{-N}$
X_1	746	449.82	6.07	0.047	0.020	82.7	0.27
X_2	1 371	695.16	1.79	0	0.063	179.9	0.37
X_3	31.02	1 523.16	1.57	0	0	1065.2	0.24
X_4	1 723	1 144.98	3.13	0.031	0	666.4	0.06
X_5	1 165	807.48	0.50	0.024	0.031	248.1	0.35
X_6	689	429.30	3.56	0	0	170.2	0.05
X_7	1 013	625.52	2.17	0	0	715	0.21
X_8	1 864	1 284.48	3.12	0	0.025	852.3	0.39

根据《地下水环境质量标准》(GB/T14848—93)进行分级，分级标准见表 2。

表2 地下水环境质量标准分级

单位:mg/L

分级	溶解性总固体	总硬度	F	As	Pb	SO ₄ ²⁻	NH ₃ -N
I	300	150	1.0	0.005	0.005	50	0.02
II	500	300	1.0	0.01	0.01	150	0.02
III	1 000	450	1.0	0.05	0.05	250	0.2
IV	2 000	550	2.0	0.05	0.1	350	0.5
V	2 500	650	2.5	0.08	0.15	450	0.75

3.1 权重计算 运用熵值法^[13]确定各指标权重

(1)根据表1实测值建立原始数据矩阵 $X=(x_{ij})_{8 \times 7}$ 。

(2)对 x_{ij} 进行归一化处理。公式 $p_{ij} = x_{ij}^2 / \sum_{i=1}^m x_{ij}$, $i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n$ (有 m 个采样点, n 项指标)^[14]。

(3)计算第 j 项指标的熵值^[15]。 $e_j = - \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}$, $i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n$ 。计算得 $e_1 = 1.903$; $e_2 = 1.987$; $e_3 = 1.915$; $e_4 = 1.059$; $e_5 = 1.281$; $e_6 = 1.819$; $e_7 = 1.923$ 。

(4)计算第 j 项指标的权重。对于给定的 j 令

$$u_j = P e_j \quad (j=1,2,\dots,n) \quad (3)$$

则根据式(3)计算得: $u_1=0.525$; $u_2=0.503$; $u_3=0.522$; $u_4=0.944$; $u_5=0.781$; $u_6=0.550$; $u_7=0.520$ 。

对 u_j 进行归一化处理,使得 $\sum w_j = 1$ 。则第 j 项指标的权重 $w_j = u_j^2 / \sum_{j=1}^n u_j$, 即 $w_1=0.121$; $w_2=0.115$; $w_3=0.120$; $w_4=0.217$; $w_5=0.180$; $w_6=0.127$; $w_7=0.120$ 。可得权重向量为 $W=[w_1 \ w_2 \ w_3 \ w_4 \ w_5 \ w_6 \ w_7]=[0.121 \ 0.115 \ 0.120 \ 0.217 \ 0.180 \ 0.127 \ 0.120]$ 。

3.2 改进 SPA 模糊综合评价计算 将 W 与 R 合成得到 B ,其基本模型为 $B=W \circ R$,“ \circ ”为模糊乘运算算子。设权重向量 $W=[w_1, w_2, \dots, w_n]$,联系度矩阵 $R=(a_{ij} + b_{ij}i + c_{ij}j)_{n \times m}$,则

$$B = W \circ R = \left(\sum_{i=1}^n w_i \cdot a_{im} + \sum_{i=1}^n w_i \cdot b_{im}i + \sum_{i=1}^n w_i \cdot c_{im}j \right)_{1 \times m} \quad (4)$$

(1)建立并计算测点 X_1 的 SPA 联系度矩阵 R_1 。

$R_1 =$

$$\begin{bmatrix} 0.402+0.268\bar{i}+0.330\bar{j} & 0.448+0.552\bar{i}+0\bar{j} & 1 & 0.797+0.203i^+ & 0.285+0.57i^++0.145j^+ \\ 0.333+0.334\bar{i}+0.333\bar{j} & 0.5+0.5\bar{i} & 1 & 0.998+0.002i^+ & 0.499+0.499i^++0.002j^+ \\ 0.165+0\bar{i}+0.835\bar{j} & 0+0\bar{i}+1\bar{j} & 0+0.197\bar{i}+0.803\bar{j} & 0.197+0.803i^- & 1 \\ 0.106+0.106\bar{i}+0.788\bar{j} & 0.119+0.881\bar{i} & 1 & 0+1i^+ & 0.909+0i^++0.091j^+ \\ 0.25+0.25\bar{i}+0.5\bar{j} & 0.333+0.667\bar{i} & 1 & 0.625+0.375i^+ & 0.385+0.385i^++0.23j^+ \\ 0.605+0.395\bar{i} & 1 & 0.598+0.402i^+ & 0.374+0.374i^++0.252j^+ & 0.272+0.272i^++0.456j^+ \\ 0.074+0\bar{i}+0.926\bar{j} & 0+0.72\bar{i}+0.28\bar{j} & 0.72+0.28\bar{i} & 1 & 0.521+0.479i^+ \end{bmatrix}$$

(2)进行合成运算 $B_1 = W \circ R_1$ 。

运用 Matlab 计算软件对测点 X_1 进行合成运算:

$$B_1 = W \circ R_1 = [0.26+0i^++0.189\bar{i}+0j^++0.551\bar{j} \quad 0.324+0i^++0.522\bar{i}+0j^++0.154\bar{j} \\ 0.795+0.051i^++0.057\bar{i}+0j^++0.097\bar{j} \quad 0.515+0.357i^++0.096\bar{i}+0.032j^++0\bar{j} \\ 0.576+0.288i^++0\bar{i}+0.136j^++0\bar{j}]$$

根据集对势的定义: $shi(A) = \bar{a}c$,改进 SPA 法集对势与原集对势具有相同的判别趋势,即 $shi(A)$ 越大表示同一趋势越强,所以有 $shi(u_1)=0.472$; $shi(u_2)=2.104$; $shi(u_3)=8.196$; $shi(u_4)=16.094$; $shi(u_5)=4.235$ 。

对五级集对势进行归一化处理,测点 X_1 在从 I 级到 V 级的趋同程度分别为:1.52%、6.76%、

26.35%、51.75%、13.62%。故测点 X_1 区域的评价结果为 IV 级。同理,可以得到其它各测点的评价结果如表 3。

表 3 各测点评价结果

测点	$shi(u_1)$	$shi(u_2)$	$shi(u_3)$	$shi(u_4)$	$shi(u_5)$
X_1	0.472	2.104	8.196	16.094	4.235
X_2	0.813	0.930	9.567	15.267	3.345
X_3	1.751	0.825	4.631	1.952	2.185
X_4	0.587	0.537	2.396	22.028	4.013
X_5	0.505	1.499	15.205	4.007	3.234
X_6	2.527	3.570	7.733	7.098	1.503
X_7	1.358	1.109	3.771	8.577	3.771
X_8	0.578	0.467	1.880	10.426	4.043

与综合指数法和灰色关联法^[16]进行比较如表 4。

表 4 评价结果及对比

测点	综合指数法评价	灰色关联法评价	改进 SPA 模糊综合评价
X_1	III	III	IV
X_2	IV	IV	IV
X_3	III	III	III
X_4	IV	IV	IV
X_5	III	III	III
X_6	III	I	III
X_7	IV	III	IV
X_8	IV	IV	IV

应用改进 SPA 模糊综合评价所得评价结果测点 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_8 完全一致;对测点 X_1 评价结果为 IV 级,而综合指数法和灰色关联法为 III 级。这是因为测点 X_1 中 7 项评价因子中有 4 项处于 IV 级及以上,所以本方法判为 IV 级较为合理;对测点 X_6 ,7 项评价因子中有 5 项处于 III 级及以上,所以本方法判为 III 级较为合理;对测点 X_7 ,7 项评价因子中有 4 项处于 IV 级及以上,所以本方法判为 IV 级较为合理。

4 结论

(1)用熵值法确定权重相对比较客观,它避开了专家打分法等主观赋权值方法带来的人为因素干扰。(2)本文的改进 SPA 方法比原来的方法在对事物同、异、反特性上的刻画更为细致,避开了 i^+ 、 i^- 、 j^+ 、 j^- 等系数的取值讨论,利用 SPA 法原创联系度的可展性建立了地下水环境质量五级评价新模型。(3)将改进的 SPA 方法与模糊综合评价相结合,对山东某地区的浅层地下水环境进行评价,并与综合指数法和灰色关联法进行比较,结果表明,本文方法的评价结果更贴近实际情况。另外,本文方法还可以得到处于各评价等级的趋同程度,可为地下水环境评价提供一种更为科学、合理的评价和决策方法,具有较好的应用价值。

参 考 文 献:

- [1] 李少飞,孙书洪,王向余.突变理论在海河流域地下水环境风险评价中的应用[J].水利学报,2007,38(11):1312—1317.
- [2] 康建明.地下水开发利用与生态环境保护[J].科技情报开发与经济,2005(15):294—295.
- [3] 李如忠.基于不确定信息的城市水源水环境健康风险评价[J].2007,38(8):895—900.
- [4] 姜军,宋保维,潘光,等.基于集对分析的模糊综合评判[J].西北工业大学学报,2007,25(3):421—424.
- [5] 赵克勤.集对分析及其初步应用[M].杭州:浙江科学技术出版社,2000:1—3.

- [6] 邓红霞,李存军,朱兵,等.基于集对分析的生态承载能力综合评价方法[J].长江科学院院报,2006,23(6):35—38.
- [7] 赵克勤,宣爱理.集对论——一种新的不确定理论方法与应用[J].系统工程,1996,14(1):18—23,72.
- [8] 李凡修,辛焰,陈武.集对分析用于湖泊富营养化评价研究[J].重庆环境科学,2000,22(6):10—12.
- [9] 周超明,晏路明.港湾水质综合评价的集对分析模型[J].环境科学与管理,2006.31(8):62—66.
- [10] 邱林,冯晓波,冯丽云,等.集对分析法在湖泊水质富营养化评价中的应用[J].人民长江,2008,39(5):52—54.
- [11] 李凡修,陈武,梅平.浅层地下水环境质量评价的综合指数模型[J].地下水,2004(1):36—37.
- [12] 李凡修,陈武.等效数值评价法用于煤矿地下水环境质量评价[J].地下水,2002,24(4):218—219.
- [13] 孟宪萌,胡和平.基于熵权的集对分析模型在水质综合评价中的应用[J].水利学报,2009,40(3):257—262.
- [14] 张先起,梁川.基于熵权的模糊物元模型在水质综合评价中的应用[J].水利学报,2005,36(9):1057—1061.
- [15] 孟宪萌,束龙仓,卢耀如.基于熵权的改进 DRASTIC 模型在地下水脆弱性评价中的应用[J].水利学报,2007,38(1):94—99.
- [16] 吴恩江,李献水.浅层地下水环境质量的灰色关联分析[J].勘察科学技术,2001(6):11—15.

Fuzzy comprehensive evaluation of groundwater environment based on improved set pair analysis

WEI Ming-hua^{1,2}, ZHENG Zhi-hong^{1,2}, HUANG Qiang¹, QIU Lin²

(1. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. North China University of Water Conservancy and Electric Power, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: An improved set pair analysis (SPA) method utilizing the malleability of the original relation degree to extend the evaluation ranking of groundwater environment to 5 levels is suggested. The method can be used to combine with fuzzy method for obtaining the comprehensive evaluation result of groundwater samples as well as their tendency degree to the corresponding ranking based on 7 main factors of groundwater environment. The application result of the proposed method to an example is compare with the results of synthesis index method and gray associate analysis method. It shows that the proposed improved set pair analysis is feasible and reliable.

Key words: improved set pair analysis; contact coefficient; evaluation model; groundwater environment; fuzzy comprehensive evaluation

(责任编辑:韩 昆)