

应用可变模糊集理论评价达拉特旗地表水水质

冯 峰^{1,2}, 许士国¹, 周志琦²

(1. 大连理工大学土木水利学院, 辽宁 大连 116024; 2. 黄河水利职业技术学院, 河南 开封 475004)

摘要 应用基于相对差异函数的可变模糊集理论, 对黄河达拉特旗八大孔兑地表水水质进行评价, 在计算相对综合隶属度时采用不同的参数组合, 并与物元可拓法和综合水质标识指数法评价结果进行对比分析。结果表明, 模糊可变评价方法克服了其他评价方法的片面性, 提高了结果的可靠性和合理性。对于评价指标以区间值表示标准值的水质综合评价, 能够有效解决区间值对评价结果的影响, 获得更为合理准确的结果。

关键词 模糊可变评价 相对差异函数 物元可拓法 综合水质标识指数法 水质评价

中图分类号 X0159 **文献标识码** A **文章编号** 1004-6933(2009)01-0044-04

Evaluation of surface water quality in Dalate Banner with fuzzy variable assessment method

FENG Feng^{1, 2}, XU Shi-guo¹, ZHOU Zhi-qi²

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024 China; 2. Yellow River Conservancy Technical Institute, Kaifeng 475004, China)

Abstract The fuzzy invariable assessment theory based on the relative difference function was used to evaluate the surface water quality of eight rivers in Dalate Banner. The comprehensive membership degree was calculated with different combinations of parameters. Compared with the matter-element extension and comprehensive water quality identification index method, this new method is more reasonable and reliable because it uses interval values instead of single values and it can prevent the interval value from impacting the evaluation results.

Key words fuzzy variable assessment; relative difference function; matter-element extension method; comprehensive water quality identification index method; water quality evaluation

黄河一级支流内蒙古达拉特旗十大孔兑(蒙语音译, 即季节性河流)的发源地大部分位于达拉特旗, 十大孔兑上游为黄土丘陵沟壑区, 中游为库布齐沙漠, 下游为冲积平原区, 最后汇入黄河。达拉特旗境内主要有卜尔色太沟、黑赖沟、西柳沟、罕台川、壕庆河、哈什拉川、母花沟、东柳沟八大孔兑^[1]。河流综合水质评价是水环境治理的重要基础性工作。通过对水质监测数据的合理评价, 制定科学的整治规划, 采取有效的措施。目前常用的河流水质评价方法有^[2-3] ①单因子极值评价法; ②模糊可变法; ③物元分析与可拓集合法; ④水质标识指数法; ⑤灰色系统理论法; ⑥数理统计法; ⑦人工神经网络法; ⑧投影寻踪模型法等。

水质评价问题是涉及多个级别、以区间数表示标准值的评价方法, 采用模糊可变集合综合评价能有效地解决评价标准区间值对评价结果的影响。应用基于可变模糊集基本原理^[4]的可变模糊集模型进行水质综合评判, 可以实现对地表水环境质量等级进行科学合理的评价。

1 可变模糊集基本原理

1.1 对立模糊集定义^[5]

定义 1 设论域 U 上的对立模糊概念, 以 A 与 A^c 表示吸引与排斥性质, 对 U 中的任意元素 $u, u \in U$, 在参考连续统区间 $[1, 0]$ (对 A) 与 $[0, 1]$ (对 A^c) 的任一点, 吸引与排斥的相对隶属度分别为 $\mu_A(u)$ 、

$$\mu_{\tilde{A}}^c(u), \text{ 且 } \mu_{\tilde{A}}(u) + \mu_{\tilde{A}}^c(u) = 1, \text{ 令}$$

$$A \approx \{u, \mu_{\tilde{A}}(u), \mu_{\tilde{A}}^c(u) \mid u \in U\} \quad (1)$$

$$\text{满足 } \mu_{\tilde{A}}(u) + \mu_{\tilde{A}}^c(u) =$$

$$1, 0 \leq \mu_{\tilde{A}}(u) \leq 1, 0 \leq \mu_{\tilde{A}}^c(u) \leq 1 \quad (2)$$

$\tilde{A}$ 称为 U 的对立模糊集。

1.2 相对差异度定义

$$\text{定义 2 设 } D_{\tilde{A}}(u) = \mu_{\tilde{A}}(u) - \mu_{\tilde{A}}^c(u) \quad (3)$$

$$D_{\tilde{A}}(u) \text{ 称 } u \text{ 对 } \tilde{A} \text{ 的相对差异度。}$$

$$\text{映射 } D_{\tilde{A}}: D \rightarrow [-1, 1] \quad (4)$$

$$u \mapsto D_{\tilde{A}}(u) \in [-1, 1], \text{ 称为 } u \text{ 对 } \tilde{A} \text{ 的相对差异函数。}$$

1.3 相对差异函数模型

设 $X_0 = [a, b]$ 为实轴上的模糊可变集合 $\tilde{Y}$ 的吸引域, 即 $0 < D_{\tilde{A}}(u) \leq 1$ 区间, $X = [c, d]$ 为包含 $X_0 (X_0 \subset X)$ 的某一上、下界范围域区间, 如图 1 所示。

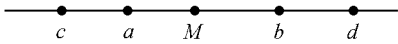


图 1 区间 X_0 、 X 的关系

根据模糊可变集合 $\tilde{Y}$ 的定义可知 $[c, a]$ 与 $[b, d]$ 均为 $\tilde{Y}$ 的排斥域, 即 $-1 \leq D_{\tilde{A}}(u) < 0$ 区间。设 M 为吸引域区间 $[a, b]$ 中 $D_{\tilde{A}}(u) = 1$ 的点值。 x 为 X 区间内的任意点的量值, 则 x 落入 M 点右侧时, 其相对差异度函数模型为

$$\begin{cases} D_{\tilde{A}}(u) = \left(\frac{x-b}{M-b}\right)^\beta, & x \in [M, b] \\ D_{\tilde{A}}(u) = -\left(\frac{x-b}{d-b}\right)^\beta, & x \in [b, d] \end{cases} \quad (5)$$

当 x 落入 M 点左侧时, 其相对差异度函数模型为

$$\begin{cases} D_{\tilde{A}}(u) = \left(\frac{x-a}{M-a}\right)^\beta, & x \in [a, M] \\ D_{\tilde{A}}(u) = -\left(\frac{x-a}{c-a}\right)^\beta, & x \in [c, a] \end{cases} \quad (6)$$

确定 $D_{\tilde{A}}(u)$ 后, 根据式(7)可求解相对隶属度:

$$\mu_{\tilde{A}}(u) = [1 + D_{\tilde{A}}(u)]/2 \quad (7)$$

2 模糊可变评价计算过程

基于相对差异函数模型的模糊可变集合的水环境质量评价方法计算过程^[6]:

$$I_{ab} = \begin{bmatrix} [0,2] & [2,4] & [4,6] & [6,10] & [10,15] \\ [0,0.2] & [0.2,0.5] & [0.5,1.0] & [1.0,1.5] & [1.5,2.0] \\ [0,15] & [15,15] & [15,20] & [20,30] & [30,40] \\ [20,7.5] & [7.5,6] & [6,5] & [5,3] & [3,2] \\ [0,0.05] & [0.05,0.1] & [0.1,0.2] & [0.2,0.5] & [0.5,1.0] \\ [0,3] & [3,3] & [3,4] & [4,6] & [6,10] \end{bmatrix} = ([a, b]_{ih})$$

a. 根据 c 个级别的标准值构建区间矩阵 $I_{ab} = ([a, b]_{ih}), i = 1, 2, \dots, m; h = 1, 2, \dots, c$ (m 为指标数, c 为级别数)。

b. 根据 I_{ab} 构造变动区间的范围值矩阵 $I_{cd} = ([c, d]_{ih}), i = 1, 2, \dots, m; h = 1, 2, \dots, c$ 。

c. 确定指标 i 级别 h 的 M 矩阵。

d. 应用式(5)、(6)以及矩阵 I_{ab} 、 I_{cd} 、 M 中的对应数据, 计算指标 i 级别 h 的相对隶属度矩阵 $\mu_{\tilde{A}}(u) = (\mu_{\tilde{A}}(u)_{ih})$ 。

e. 利用二元比较模糊决策分析法^[6]确定目标权重 w , 利用模糊可变识别模型计算样本对各级别的综合相对隶属度:

$$u'_h = 1 / \left[1 + \left(\frac{d_{gh}}{d_{bh}} \right)^a \right] \quad (8)$$

$$\text{其中 } d_{gh} = \left\{ \sum_{i=1}^m [w_i (1 - \mu_{\tilde{A}}(u)_{ih})]^p \right\}^{\frac{1}{p}}$$

$$d_{bh} = \left\{ \sum_{i=1}^m (w_i \mu_{\tilde{A}}(u)_{ih})^p \right\}^{\frac{1}{p}}$$

f. 应用级别特征值公式计算评价样本的等级:

$$H = \left(u'_h / \sum_{h=1}^c u'_h \right) h \quad (9)$$

3 黄河达拉特旗八大孔兑水质综合评价

根据 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》^[7] 和八大孔兑 16 个监测断面 2004 年 4 月的实测资料^[8], 共设置 6 个评价指标: 高锰酸盐指数(COD_{Mn}) x_1 、总氮(TN) x_2 、化学需氧量(COD) x_3 、溶解氧(DO) x_4 、硫化物 x_5 、五日生化需氧量(BOD_5) x_6 。根据评价标准将地表水质分为 5 个等级, 为Ⅰ类、Ⅱ类、Ⅲ类、Ⅳ类和Ⅴ类, 如表 1 所示。黄河达拉特旗八大孔兑 16 个监测断面实测水质 6 项指标见表 2。

表 1 地表水环境质量分类标准 mg/L

指标	Ⅰ类	Ⅱ类	Ⅲ类	Ⅳ类	Ⅴ类
x_1	0~2	2~4	4~6	6~10	10~15
x_2	0~0.2	0.2~0.5	0.5~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0
x_3	0~15	15	15~20	20~30	30~40
x_4	7.5~20	6~7.5	5~6	3~5	2~3
x_5	0~0.05	0.05~0.1	0.1~0.2	0.2~0.5	0.5~1.0
x_6	0~3	3	3~4	4~6	6~10

a. 根据表 1, 构造模糊可变集合评价的标准值区间矩阵

表 2 黄河达拉特旗地表水 16 个断面监测数据

mg/L

指标	DB1	DB2	DB3	DB4	DB5	DB6	DB7	DB8	DB9	DB10	DB11	DB12	DB13	DB14	DB15	DB16
x_1	2.4	2.1	2.3	2.8	2.1	3.3	2.1	1.9	3.7	2.2	6.8	2.4	2.0	2.2	1.8	2.0
x_2	0.4	0.3	0.1	0.6	0.6	0.4	0.3	0.3	0.3	1.1	5.4	0.2	0.2	0.3	0.1	0.4
x_3	15.5	12.8	31.0	10.0	14.3	10.0	20.1	10.0	15.5	20.4	45.8	17.8	13.4	12.3	13.4	10.0
x_4	6.3	8.7	6.4	8.5	6.6	7.3	6.4	6.1	7.3	8.1	4.0	6.6	8.8	9.1	6.8	8.4
x_5	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0	0.8	1.2	0.4	0.8
x_6	2.9	3.2	2.2	2.7	2.3	2.0	2.6	2.1	2.1	3.0	4.6	2.2	2.9	2.5	2.0	2.8

b. 根据 I_{ab} ,构造变动区间的范围值矩阵

$$I_{cd} = \left[\begin{array}{ccccc} [0,4] & [0,6] & [2,10] & [4,15] & [6,15] \\ [0,0.5] & [0,1] & [0.2,1.5] & [0.5,2] & [1,2] \\ [0,15] & [0,20] & [15,30] & [15,40] & [20,40] \\ [20,6] & [20,5] & [7.5,3] & [6,2] & [5,2] \\ [0,0.1] & [0,0.2] & [0.05,0.5] & [0.1,1.0] & [0.2,1.0] \\ [0,3] & [0,4] & [3,6] & [3,10] & [4,10] \end{array} \right] = ([c,d]_{ih})$$

c. 确定指标 i 级别 h 的 M 矩阵

$$M = \left[\begin{array}{ccccc} 0 & 2 & 5 & 10 & 15 \\ 0 & 0.2 & 0.75 & 1.5 & 2 \\ 0 & 15 & 17.5 & 30 & 40 \\ 20 & 7.5 & 5.5 & 3 & 2 \\ 0 & 0.05 & 0.15 & 0.5 & 1.0 \\ 0 & 3 & 3.5 & 6 & 10 \end{array} \right] = (M_{ih})$$

d. 计算样本对各级别的综合相对隶属度 u'_h

用二元比较模糊决策分析法^[6]确定 6 个指标相对于 5 个级别的权值,根据语气算子与相对隶属度之间的关系,得出 6 项评价指标的变权重为

$$w' = (1,0.905,0.818,0.739,0.667,0.667) = (w'_i)$$

进行归一化权向量为

$$w = (0.209,0.189,0.171,0.154,0.139,0.139) = (w_i)$$

等权重的归一化权向量为

$$w = (0.167,0.167,0.167,0.167,0.166,0.166) = (w_i)$$

应用式(5)、(6)以及矩阵 I_{ab} 、 I_{cd} 、 M 中的对应数据,计算指标 i 级别 h 的相对隶属度矩阵。利用式(8)计算水质评价各指标综合相对隶属度, α 为模型优化准则参数, $\alpha = 1$ 为加权最小一乘方准则, $\alpha = 2$ 时为最小二乘方准则。 p 为距离参数, $p = 1$ 为取海明距离, $p = 2$ 为取欧氏距离。取 $\alpha = 1, p = 1$ 进行组合计算 u'_h ,计算等权重情况下的相对隶属度并进行归一化处理,结果见表 3。

表 3 $\alpha = 1, p = 1$ 时 16 组样本归一化相对隶属度

组别	权向量归一化后相对隶属度					等权重归一化后相对隶属度				
	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
DB1	0.2972	0.4794	0.2160	0.0074	0.0000	0.3219	0.4585	0.2122	0.0074	0.0000
DB2	0.4061	0.4697	0.1125	0.0117	0.0000	0.4179	0.4410	0.1269	0.0142	0.0000
DB3	0.4306	0.3504	0.0650	0.0693	0.0847	0.4478	0.3319	0.0675	0.0687	0.0841
DB4	0.3053	0.3933	0.1580	0.0424	0.1010	0.3165	0.3762	0.1387	0.0461	0.1226
DB5	0.3801	0.4466	0.1572	0.0162	0.0000	0.4087	0.4273	0.1494	0.0146	0.0000
DB6	0.4231	0.4527	0.1243	0.0000	0.0000	0.4581	0.4372	0.1072	0.0000	0.0000
DB7	0.2208	0.4381	0.1502	0.0963	0.0946	0.2170	0.4142	0.1219	0.1015	0.1154
DB8	0.4875	0.4158	0.0967	0.0000	0.0000	0.5033	0.3970	0.0997	0.0000	0.0000
DB9	0.3321	0.4701	0.2004	0.0073	0.0000	0.3581	0.4531	0.1816	0.0072	0.0000
DB10	0.2188	0.3058	0.1506	0.1802	0.1445	0.2244	0.2932	0.1418	0.1708	0.1698
DB11	0.1286	0.0000	0.1579	0.3063	0.4071	0.1532	0.0000	0.1538	0.3077	0.3853
DB12	0.3662	0.4023	0.1914	0.0402	0.0000	0.3875	0.3820	0.1907	0.0399	0.0000
DB13	0.4500	0.4111	0.0000	0.0278	0.1111	0.4374	0.3966	0.0000	0.0332	0.1328
DB14	0.3677	0.4760	0.0362	0.0000	0.1201	0.3717	0.4495	0.0320	0.0000	0.1468
DB15	0.4457	0.3511	0.0543	0.1064	0.0426	0.4225	0.3409	0.0606	0.1258	0.0503
DB16	0.3939	0.4105	0.0610	0.0270	0.1077	0.3898	0.3945	0.0542	0.0323	0.1292

e. 计算样本级别特征值

用式(9)计算水质样本的级别特征值,结果列入表 4。变权重和等权重计算值略有差异,取其平均值并判断样本的水质级别。为了比较评价结果的合理性及正确性,对样本进行物元可拓法^[9]和综合水质标识指数评价^[10],结果分别列入表 4。

表 4 16 组样本采用模糊可变、水质标识指数方法评价结果

组别	等权重	变权重	平均值	模糊可变法 水质级别	物元可拓 法水质 级别	水质标识 指数法 水质级别
DB1	1.9051	1.9336	1.9194	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
DB2	1.7374	1.7298	1.7336	Ⅰ ~ Ⅱ	Ⅰ	Ⅱ
DB3	2.0092	2.0272	2.0182	Ⅱ	Ⅰ	Ⅱ
DB4	2.2820	2.2404	2.2612	Ⅱ	Ⅰ	Ⅱ
DB5	1.7698	1.8094	1.7896	Ⅰ ~ Ⅱ	Ⅰ	Ⅱ
DB6	1.6491	1.7012	1.6752	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ
DB7	2.4839	2.4057	2.4448	Ⅱ ~ Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ
DB8	1.5964	1.6092	1.6028	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ
DB9	1.8379	1.8930	1.8655	Ⅰ ~ Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
DB10	2.7685	2.7260	2.7473	Ⅱ ~ Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ
DB11	3.7718	3.8635	3.8177	Ⅲ ~ Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ
DB12	1.8829	1.9056	1.8943	Ⅰ ~ Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
DB13	2.0274	1.9389	1.9832	Ⅱ	Ⅰ	Ⅱ
DB14	2.1006	2.0287	2.0647	Ⅱ	Ⅰ	Ⅱ
DB15	2.0404	1.9491	1.9948	Ⅱ	Ⅰ	Ⅱ
DB16	2.1165	2.0441	2.0803	Ⅱ	Ⅰ	Ⅱ

4 评价结果分析

根据表 4 所示,模糊可变方法与水质标识指数法评价结果基本一致,但与物元可拓法存在差异。通过对比可知,16 个断面中有 6 个评价结果不一致,这 6 个断面都是物元可拓法比模糊可变法的水质偏好。原因主要是物元可拓法在确定物元矩阵、标准物元矩阵及节域矩阵时考虑了水质评价标准的区间,是以综合关联度最大值所对应的级别为评价级别,根据每个参评因子关联度和权系数计算出的最大综合关联度对应的水质等级均为Ⅰ类,文献^[11]已经指出物元可拓法最大综合关联度准则的逻辑错误(即可拓集合的逻辑错误),不能用于实际领域。而模糊可变法是通过计算水质指标对每个等级的相对隶属度,综合求出级别特征值即为水质等级,其结果包含了水质指标的全部信息,利用变动区间更有效处理了水质评价标准为区间值,充分利用每个参评因子信息,权重计算采用二元比较模糊决策分析法^[6],对水质评价等级更加精确,能准确定位水质所处等级。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,可综合运用多种评

价方法对水质进行评价并加以比较,最后得出结论。

根据分析评价结果可知,16 个监测断面中Ⅰ ~ Ⅱ类水占 81.25%,3 个监测断面水质较差,DB7、DB10 为Ⅱ ~ Ⅲ类水,DB11 为Ⅲ ~ Ⅳ类水,占 18.75%。DB7、DB10 主要是硫化物污染较严重,DB11 是 TN、COD 2 项指标严重超标。

5 结 论

基于相对隶属函数的模糊可变评价方法能够较好的处理评价指标信息,对水质做出科学合理的综合评价。根据 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》,Ⅰ ~ Ⅱ类水主要适用于源头水、集中式生活饮用水地表水源地一级保护区等^[12]。目前黄河达拉特旗水质情况良好,但在局部地区水质恶化,污染严重,应采取相应措施查清污染原因,及时处理,避免造成污染延续和扩散,以保证黄河干流的水质不受其影响。

参考文献：

[1] 姬宝霖,吕忠义.内蒙古达拉特旗十大孔兑综合治理方案研究[J].人民黄河,2004,26(1) 31-33.

[2] 郭劲松,龙腾锐,霍国友,等.四种水质综合评价方法的比较[J].重庆建筑大学学报,2000, 22(4) 6-12.

[3] 朱静平.几种水环境质量综合评价方法的探讨[J].西南科技大学学报,2002,17(4) 62-67.

[4] 陈守煜.工程可变模糊集理论与模型——模糊水文水资源学数学基础[J].大连理工大学学报,2005 (2) :308-312.

[5] 陈守煜.水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法[M].大连 :大连理工大学出版社,2005.

[6] 陈守煜.工程模糊集理论与应用[M].北京 :国防工业出版社,1998.

[7] 许士国.环境水利学[M].北京 :中央广播电视大学出版社,2005.

[8] 王海玲,刘廷玺,王敏,等.达拉特旗地表水水质灰色聚类分析评价[J].内蒙古农业大学学报,2006,27(1) 90-93.

[9] 汤洁,李艳梅,卞建民,等.物元可拓法在地下水水质评价中的应用[J].水文地质工程地质,2005(5) 4-5.

[10] 徐祖信,尹海龙.城市河流水质常规评价技术研究[J].环境污染与防治, 2005,27(7) 515-518.

[11] 陈守煜.可变模糊集理论——兼论可拓学的数学与逻辑错误[J].大连理工大学学报,2007,47(4) 618-624.

[12] LI Zuo-yong,DING Jing.Theory and method for environmental quality evaluation [M]. Beijing :Chemical Industry Press, 2004.

(收稿日期 2007-09-22 编辑 傅伟群)