

灰色加权关联度法用于水环境功能评价

孟宪林¹, 邵雪¹, 齐志宁², 李佳琪¹

(1. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院 城市水资源与水环境国家重点实验室, 150090 哈尔滨;
2. 黑龙江省垦区环境监测站, 150036 哈尔滨)

摘要: 地表水水质的好坏可以影响到水环境功能是否能够发挥其应有的作用. 因此, 对地表水水质评价问题一直是环境科学研究的热点问题. 本文在调研分析常用水质评价方法的基础上, 提出了水环境功能区灰色加权关联度综合评价法. 以松花江哈尔滨段为研究对象, 对典型监测断面 2009 年的水质监测数据进行评价分析, 结果表明: 相比传统的等权灰色关联度法, 灰色加权关联度法依据不同断面的功能区类别确定出评价指标的权重值, 能够强化浓度过高指标的影响, 同时兼顾到每一个指标对水环境质量产生影响的综合效应, 从而提高了评价结果的准确性.

关键词: 水质评价; 功能评价; 灰色关联度

中图分类号: TH133; TP183 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2012)04-0067-04

Research on gray-weighted correlation method for evaluation of water environment functional

MENG Xian-lin¹, SHAO Xue¹, QI Zhi-ning², LI Jia-qi¹

(1. State Key Laboratory of Urban Water Resource & Environment, School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China; 2 Environmental Monitoring Station of Reclamation Area in Heilongjiang Province, 150036 Harbin, China)

Abstract: Based on analysis of commonly used water quality evaluation methods, the weighted gray correlation method was proposed in this paper. A case study of Songhua river in Harbin section was carried out by the water monitoring data in 2009, and it showed that, contrasted to the traditional equal weight gray correlation method, the grey weighted correlation method, according to different functional of every section, could determine the evaluation indicator's weights, strengthen the impact of concentrations of indicators, and consider every indicator's impact, so that the accuracy of water evaluation results could be improved.

Key words: water quality assessment; function evaluation; gray correlation

水质综合评价就是根据各水质指标值, 对某水体的水质等级进行综合评判, 为水体的科学管理和污染防治提供决策依据^[1]. 目前, 国内外常用的方法有综合指数法^[2-3]、概率统计法^[4-6]、模糊数学法^[7-8]、灰色关联分析法^[9-10]、聚类分析法^[11-12]和神经网络法^[13-14]等, 每种方法各有其优点和缺陷^[15-19]. 灰色关联分析法是基于水质评

价中的灰色及不确定性, 等权灰关联法的计算结果有时会在误判现象, 本文就是在对灰色关联分析法中改进权重确定方法的基础上进行的.

1 灰色功能区加权关联度法

1.1 灰色关联度模型

设有参考数列 $\{X_{i(k)}\}$, 比较数列 $\{X_{j(k)}\}$:

$$\{X_{i(k)}\} = \{X_{i(1)}, X_{i(2)} \cdots X_{i(n)}\},$$

$$\{X_{j(k)}\} = \{X_{j(1)}, X_{j(2)} \cdots X_{j(n)}\}, k = 1, 2, \dots, n.$$

则 $\{X_{i(k)}\}$ 对 $\{X_{j(k)}\}$ 在第 k 点的关联系数 (反映比较数列与参考数列在某个点上的关联程度) 定义为

收稿日期: 2011-04-22.

基金项目: 城市水资源与水环境国家重点实验室 (哈尔滨工业大学) 自主课题 (2011DX01).

作者简介: 孟宪林 (1961—), 男, 博士, 副研究员.

通讯作者: 孟宪林, mengxll@sina.com.

$$\varepsilon_{ij(k)} = \frac{\min_j \min_k \Delta_{ij(k)} + \rho \cdot \max_j \max_k \Delta_{ij(k)}}{\Delta_{ij(k)} + \rho \cdot \max_j \max_k \Delta_{ij(k)}} \quad (1)$$

式中: $\Delta_{ij(k)} = |X_{i(k)} - X_{j(k)}|$ 为 $\{X_{i(k)}\}$ 与 $\{X_{j(k)}\}$ 在第 k 点的绝对差; $\min_j \min_k \Delta_{ij(k)}$ 为两级最小差; $\max_j \max_k \Delta_{ij(k)}$ 为两级最大差; ρ 为分辨系数, 其在 $0 \sim 1$ 之间取值, 本文取 $\rho = 0.5$.

综合各点 ($k = 1, 2, \dots, n$) 的关联系数, 得整个数列 $\{X_{j(k)}\}$ 与参考数列 $\{X_{i(k)}\}$ 的关联度, 即

$$r = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon_{ij(k)} \quad (2)$$

若 $X_{1(k)}, X_{2(k)} \dots X_{n(k)}$ 为已知的几个比较数列, $\{X_{i(k)}\}$ 为已知的参考数列, 而且有 $r_{is}^* = \max \{r_{ij}\}, 1 \leq j \leq n$, 则称数列 $\{X_{i(k)}\}$ 与比较数列 $\{X_{j(k)}\}$ 关联性最好, 样本点 i 的环境质量评价为 S 级.

1.2 本文提出的灰色加权关联度模型

在水环境质量综合评价中, 对于不同的指标, 标准值不同有时其绝对值相差较大, 不同污染物浓度对水环境质量的影响不同. 权重系数的确定是水环境质量综合评价的核心问题. 目前, 确定权重的方法大致可分为两大类: 研究者根据其主观价值判断对各指标进行比较而赋权的方法, 称主观赋权法; 直接根据各指标的原始信息经过一定数学处理后获得权重的方法, 称客观赋权法^[20].

本文对灰色关联度分析法中等权求取关联度的方法进行权重计算的合理改进, 提出根据污染物超标情况 (污染因子实测浓度与标准限值之比) 对各点 ($k = 1, 2, \dots, n$) 的关联系数进行加权, 依据水质监测断面所属的功能区类别计算得到权重, 然后计算关联度, 根据关联度的大小, 确定出样本的质量级别, 以判断水质是否符合功能区的要求.

某样本 k 污染因子超过 j 级质量标准的情况为

$$r_{ijk}^* = \frac{X_{ijk}}{X_{ojk}} \quad (3)$$

式中: X_{ijk} 为 k 级污染因子的实际监测质量浓度, mg/L ; X_{ojk} 为 k 级污染因子的环境质量标准值, mg/L .

选取《地表水环境质量标准》(GB3838—2002) 中的标准限值, 则各点 ($k = 1, 2, \dots, n$) 关联系数的权重值为

$$\omega_{ijk} = r_{ijk}^* / \sum_{k=1}^n r_{ijk} \quad (4)$$

式中 ω_{ijk} 为样本 i 中污染因子 k 对第 j 级质量标准的权重值.

依据所选取的水质监测断面地表水环境质量功能区划中所对应功能区的水质类别确定权重, 例如: 某断面 i 的功能区水质类别应为 3 类, 则相应的权重值就应为 $\omega_{i3k} (k = 1, 2, \dots, n)$.

最后灰色加权关联度可由下式计算:

$$r_{ijk}^* = \sum_{k=1}^n \varepsilon_{ij(k)} \cdot \omega_{ijk} \quad (5)$$

灰色关联度最大者所对应的 j 则为该样本的质量级别.

2 实例应用

应用上述方法对松花江哈尔滨段的 6 个常规水质监测断面: 朱顺屯、阿什河内、阿什河口下、呼兰河内、呼兰河口下、大顶子山 2009 年水质年平均均值进行水环境功能综合评价. 松花江哈尔滨段沿岸主要是接纳生活污水、工业废水以及农村面源污染, 水体污染呈现有机污染特征. 因此, 本次评价选取的 5 个指标为 5 d 生化需氧量、高锰酸盐指数、总氮、总磷、石油类. 各监测断面的水质年均值见表 1, 《地表水环境质量标准》中的限值见表 2.

表 1 各断面水质实测值 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

监测断面 (i)	指标 (k)				
	BOD ₅	高锰酸盐指数	总氮	总磷	石油类
朱顺屯	2.35	4.82	1.98	0.10	0.02
阿什河内	15.81	11.42	13.75	1.20	0.57
阿什河口下	3.04	4.90	2.44	0.15	0.06
呼兰河内	4.30	6.45	2.68	0.13	0.13
呼兰河口下	2.77	5.58	2.70	0.14	0.04
大顶子山	3.20	5.66	2.34	0.13	0.03

表 2 地表水环境质量标准限值 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

水质类别 (j)	指标 (k)				
	BOD ₅	高锰酸盐指数	总氮	总磷	石油类
I	3	2	0.2	0.02	0.05
II	3	4	0.5	0.10	0.05
III	4	6	1.0	0.20	0.05
IV	6	10	1.5	0.30	0.50
V	10	15	2.0	0.40	1.00

依据哈尔滨市地表水环境功能区划, 这 6 个断面中朱顺屯断面执行 GB3838—2002 中的 III 类标准, 其他 5 个监测断面执行该标准的 IV 类标准.

2.1 参考数列与比较数列的确定

将待评价地表水环境质量样本的各个指标实

测值(表1)构成的数列作为参考数列 $\{X_{i(k)}\}$, 此时 $k = 1, 2, \dots, 5, i$ 为监测断面 $i = 1, 2, \dots, 6$.

将地表水环境质量分级标准中某一质量级别的各指标浓度限值构成的数列 $\{X_{j(k)}\}$ 作为比较数列, j 为水质级别, $j = 1, 2, \dots, 5$, 分别表示地表水环境质量标准中对应的 1 ~ 5 级.

2.2 关联系数的计算

以朱顺屯断面为例(即 $i = 1$), 计算 $X_1(k)$ 与比较数列 $\{X_{j(k)}\}$ ($j = 1, 2, \dots, 5$) 的关联系数.

2.2.1 两极差的计算

据 $\Delta_{ij(k)} = |X_{i(k)} - X_{j(k)}|$ 可计算比较数列与参考数列在第 k 点的绝对差, 对于朱顺屯断面即样本 1, 若记

$$\Delta_{ij(k)} = \{\Delta_{ij(1)}, \Delta_{ij(2)}, \dots, \Delta_{ij(5)}\}, \text{ 则有 } \Delta_{11(k)} = \{\Delta_{11(1)}, \Delta_{11(2)}, \dots, \Delta_{11(5)}\} = \{0.03, 0.65, 2.82, 1.78, 0.08\}.$$

$$\text{同理得 } \Delta_{12(k)} = \{0.03, 0.65, 0.82, 1.48, 0\}, \Delta_{13(k)} = \{0.03, 1.65, 1.18, 0.98, 0.1\}, \Delta_{14(k)} = \{0.48, 3.65, 5.18, 0.48, 0.2\}, \Delta_{15(k)} = \{0.98, 7.65, 10.18, 0.02, 0.3\}.$$

则

$$\min_j \min_k \Delta_{ij(k)} = \min_j \{0.03, 0, 0.03, 0.2, 0.02\} = 0, \max_k \Delta_{ij(k)} = 10.18.$$

2.2.2 关联系数的计算

将两极差计算结果带入式(1)有

$$\varepsilon_{ij(k)} = \frac{0.5 \times 10.18}{\Delta_{ij(k)} + 0.5 \times 10.18}$$

则依据上式可得

$$\varepsilon_{1j(k)} = \begin{vmatrix} 0.994 & 14 & 0.886 & 76 & 0.643 & 49 & 0.740 & 90 & 0.984 & 53 \\ 0.994 & 14 & 0.886 & 76 & 0.861 & 25 & 0.774 & 73 & 1.000 & 00 \\ 0.994 & 14 & 0.755 & 19 & 0.811 & 80 & 0.838 & 55 & 0.980 & 73 \\ 0.913 & 82 & 0.582 & 38 & 0.495 & 62 & 0.913 & 82 & 0.962 & 19 \\ 0.838 & 55 & 0.399 & 53 & 0.333 & 33 & 0.996 & 09 & 0.944 & 34 \end{vmatrix}$$

($j = 1, 2, \dots, 5; k = 1, 2, \dots, 5$).

2.2.3 权重值的计算

依据式(3)和(4)得到的 1 ~ 5 类水体的权重值见表 3.

由表 3 可以看出, 朱顺屯断面的总氮占 1 ~ 5 级的权重依次为 0.535 33、0.538 90、0.463 61、0.514 22、0.545 05, 总氮的监测值为 1.98, 可见属于 5 类水体, 但是属于 1、2 类水体的权重要大于 3 和 4 类水体的权重, 这显然不合理. 对于松花江哈尔滨段各个监测断面水质综合评价所得结果必定与实际有一定偏差, 因此, 提出依据功能区划中的类别确定关联系数权重的方法, 即朱顺屯断

面在功能区划是 3 类水体, 对于每一级别的关联系数所取权重值均为 3 类级别水质所对应的权重值, 可以判断出水体是否符合功能区的要求. 这样避免了权重值依属于其他级别值较大时对评价结果的影响, 也符合功能区划的思想. 由此, 其他几个断面均为 4 类水体, 最后得到的权重值见表 4.

表 3 各断面不同指标 5 级别权重值

监测断面	指标级别	石油类	BOD ₅	高锰酸盐指数	总氮	总磷
朱顺屯	I	0.021 63	0.042 36	0.130 32	0.535 33	0.270 37
	II	0.054 43	0.106 60	0.163 98	0.538 90	0.136 09
	III	0.093 66	0.137 56	0.188 10	0.463 61	0.117 07
	IV	0.015 58	0.152 58	0.187 77	0.514 22	0.129 85
	V	0.011 01	0.129 38	0.176 91	0.545 05	0.137 64
阿什河内	I	0.075 43	0.034 87	0.037 78	0.454 91	0.397 01
	II	0.193 14	0.089 28	0.048 37	0.465 90	0.203 30
	III	0.308 06	0.106 81	0.051 43	0.371 56	0.162 14
	IV	0.063 04	0.145 71	0.063 15	0.506 90	0.221 19
	V	0.044 58	0.123 64	0.059 54	0.537 64	0.234 61
阿什河口下	I	0.049 25	0.041 59	0.100 56	0.500 75	0.307 84
	II	0.122 22	0.103 21	0.124 77	0.497 03	0.152 78
	III	0.201 12	0.127 37	0.136 87	0.408 94	0.125 70
	IV	0.037 00	0.156 22	0.151 08	0.501 54	0.154 16
	V	0.026 25	0.133 00	0.142 92	0.533 76	0.164 07
呼兰河内	I	0.095 73	0.052 78	0.118 75	0.493 40	0.239 34
	II	0.211 28	0.116 48	0.131 04	0.435 57	0.105 64
	III	0.321 78	0.133 04	0.133 04	0.331 68	0.080 45
	IV	0.067 68	0.186 55	0.167 90	0.465 08	0.112 80
	V	0.048 96	0.161 96	0.161 96	0.504 71	0.122 41
呼兰河口下	I	0.031 98	0.036 91	0.111 54	0.539 71	0.279 85
	II	0.080 66	0.093 09	0.140 65	0.544 45	0.141 15
	III	0.137 40	0.118 94	0.159 73	0.463 72	0.120 22
	IV	0.023 76	0.137 14	0.165 76	0.534 71	0.138 63
	V	0.016 74	0.115 95	0.155 71	0.565 09	0.146 50
大顶子山	I	0.026 44	0.047 00	0.124 69	0.515 49	0.286 39
	II	0.066 21	0.117 71	0.156 15	0.516 46	0.143 46
	III	0.112 50	0.150 00	0.176 88	0.43875	0.121 88
	IV	0.019 03	0.169 17	0.179 53	0.494 82	0.137 45
	V	0.013 50	0.143 99	0.169 79	0.526 47	0.146 24

表 4 各个断面的权重值

监测断面	指标级别	石油类	BOD ₅	高锰酸盐指数	总氮	总磷
朱顺屯	III	0.093 66	0.137 56	0.188 10	0.463 61	0.117 07
阿什河内	IV	0.063 04	0.145 71	0.063 15	0.506 90	0.221 19
阿什河口下	IV	0.037 00	0.156 22	0.151 08	0.501 54	0.154 16
呼兰河内	IV	0.067 68	0.186 55	0.167 90	0.465 08	0.112 80
呼兰河口下	IV	0.023 76	0.137 14	0.165 76	0.534 71	0.138 63
大顶子山	IV	0.019 03	0.169 17	0.179 53	0.494 82	0.137 45

2.2.4 灰色功能区加权关联度的计算

将计算得到的关联系数和相应的权重值带入

式(5),有

$$r_{11}^* = \varepsilon_{11(1)} \cdot \omega_{111} + \varepsilon_{11(2)} \cdot \omega_{112} \cdots \varepsilon_{11(4)} \cdot \omega_{115} = 0.093\ 66 \times 0.994\ 14 + 0.137\ 56 \times 0.886\ 76 + 0.188\ 10 \times 0.643\ 49 + 0.463\ 16 \times 0.740\ 90 + 0.117\ 07 \times 0.984\ 53 = 0.794\ 88, r_{12}^* = 0.853\ 34, r_{13}^* = 0.853\ 27, r_{14}^* = 0.795\ 23, r_{15}^* = 0.768\ 55.$$

r_{12}^* 最大,因而,朱顺屯断面的水质类别为二类.其他断面与比较数列的灰色功能区加权关联度同理可求得,结果见表5.

表5 功能区加权关联度计算结果与评价结果

监测断面	水质级别					评价结果级别
	I	II	III	IV	V	
朱顺屯	0.795	0.853	0.853	0.795	0.769	II
阿什河内	0.524	0.533	0.549	0.587	0.600	V
阿什河口下	0.792	0.842	0.842	0.786	0.761	III
呼兰河口内	0.916	0.932	0.962	0.939	0.899	III
呼兰河口下	0.798	0.838	0.866	0.811	0.780	III
大顶子山	0.805	0.848	0.887	0.816	0.775	III

3 灰色加权关联分析与灰色等权关联分析的比较

一般灰色等权关联分析法的权重计算式为

$$r_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon_{ij(k)}.$$

关联度计算结果见表6.

表6 等权关联度计算结果与评价结果

监测断面	水质级别					评价结果级别
	I	II	III	IV	V	
朱顺屯	0.850	0.903	0.876	0.774	0.702	II
阿什河内	0.615	0.631	0.656	0.744	0.727	IV
阿什河口下	0.865	0.918	0.893	0.779	0.699	II
呼兰河口内	0.935	0.951	0.979	0.944	0.889	III
呼兰河口下	0.871	0.909	0.919	0.815	0.736	III
大顶子山	0.869	0.908	0.932	0.818	0.736	III

由表5、6可以看出:两种评价方法对各个断面的评价结果有些差异,朱顺屯、呼兰河口内、呼兰河口下和大顶子山断面的评价结果相同,因为等权关联度法对各评价指标的影响等权对待,在各个指标超标情况相差不大时,其评价结果可信.但是,当不同指标超标情况差异较大时(如阿什河内断面和阿什河口下断面),往往会由于等权平均掩盖了高浓度指标实际对于整体水质结果的影响,例如,等权关联度法在阿什河口内断面5 d生化需氧量超4类标准1.635倍、总氮超标7.167倍、总磷超标3倍的情况下,仍给出4类水体的评

价结果显然是不对的.像阿什河内断面这样由于沿岸较多工业废水以及生活污水和农业面源污染排入导致污染物浓度相对较高的断面,若仅用等权灰关联的结果作为水环境质量综合评价依据,容易出现与实际水质情况不符的误判,而依据不同断面的功能区类别来确定评价指标的权重,强化了高浓度指标的影响,又考虑到各个指标对水环境质量产生影响的综合效应,从而提高了评价结果的准确性,也可以为环境功能区划提供依据.

由功能评价结果可以看出,6个断面中只有阿什河内的水质不符合功能区4类水体的要求,应加大污染控制力度,其他5个断面2009年的水质情况好于功能区划中的水质类别.

4 结 语

将灰色关联分析法应用于地表水环境功能综合评价的过程中,根据环境评价的特点和监测断面功能区划的实际情况,考虑了不同指标对环境质量影响程度的不同,采用功能区类别的方法对各个指标赋予不同的权重;实例评价结果可以看出,本方法提高了地表水环境功能评价的准确性,与实际情况相符,是一种切实有效的地表水环境功能评价方法.

参考文献:

[1] 金菊良,杨晓华,金保明,等.水环境质量综合评价的新模型[J].中国环境监测,2000,16(4):42-47.

[2] 陈仁杰,钱海雷.水质评价综合指数法的研究进展[J].环境与职业医学,2009,26(6):581-584.

[3] STIGTER T Y, RIBEIRO L, DILL A M M C. Application of a groundwater quality index as an assessment and communication tool in agro-environmental policies; two portuguese case studies [J]. Journal of Hydrology, 2006,327: 578-591.

[4] 方红卫,孙世群.主成分分析法在水质评价中的应用及分析[J].环境科学与管理,2009,34(12):152-154.

[5] PASSY S I, BODE W. Diatom model affinity (DMA), a new index for water quality assessment[J]. Hydrobiologia,2004,524: 241-251.

[6] KOKLU R, SENGORUR B, TOPAL B. Water quality assessment using multivariate statistical methods—a case study: Melen River system (Turkey) [J]. Water Resour Manage,2010 (24):959-978.

[7] 万金保,侯得印,万兴,等.模糊综合评价法在乐安河水水质评价中的应用[J].环境工程,2006,24(6):77-79.