

灰关联分析在南湖水库水质评价中的应用研究^{*}

廖亮¹, 罗亭^{2*}

(1. 江西省政府投资项目评审中心 南昌 330046; 2. 珠海市规划设计研究院 广东 珠海 519000)

摘要:应用灰关联分析方法,根据南湖水库水质功能,选取高锰酸盐指数、COD、TN、TP、DO、BOD₅、NH₃-N、石油类和粪大肠菌群9个指标,进行南湖水库水质综合评价。引入劣V类标准限值,按6类分级进行评价,以关联度最大者所对应的分级数为水质的最终等级。比较分析了幂函数法、极差法和线性法建立的关联离散函数对水质的评价结果,表明线性法更能反映水体水质实际情况,极差法常因存在个别较好或较差的指标而导致对水质的误判。灰关联分析表明:南湖水库春季和冬季水质较好,达到或高于III类水质标准,4-8月水质较差,以IV类为主;南湖水库主要污染物为TN、TP和粪大肠菌群,污染源为农田面源和库区周边居民点源。

关键词:南湖水库;灰关联分析;关联离散函数;水质评价

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2015)02-0229-06

Study on Application of Gray Relational Analysis in Nanhu Reservoir Water Quality Assessment

Liao Liang¹, Luo Ting^{2*}

(1. Jiangxi Government Project Approval Centre, Nanchang 330046, China; 2. Zhuhai Institute of Urban Planning & Design, Zhuhai Guangdong 519000, China)

Abstract: Based on gray relational analysis, nine evaluation indicators including COD, total nitrogen, total phosphorus, dissolved oxygen, BOD₅, ammonia nitrogen, petroleum and fecal coliform were selected to assess the water quality of Nanhu Reservoir according to its water function. With the introduction of six levels (inferior to class V) of water quality standard, the evaluation was carried out under six classes, the corresponding class of the maximum correlation degree was the evaluating result. Three evaluating results of the water quality were obtained by different correlation discrete function established by power function method, range method and linear method respectively, the comparative analysis results of which indicated that linear method could preferably reflect the actual water quality of the reservoir, the range method was not reasonable for the existence of individually preferable or poorer indicator. According to the gray relational analysis, the water quality appeared to be better in spring and winter, which achieved or even preceded class III, while the water quality was worse and mainly belonged to IV class from April to August. The main pollutants of Nanhu Reservoir were total nitrogen, total phosphorus and fecal coliform, and the main pollution sources were the agricultural non-point source pollution and the point source pollution from domestic sewage.

Keywords: Nanhu Reservoir; gray relational analysis; correlation discrete function; water quality assessment

* 收稿日期:2014-08-02(修改稿)

作者简介:廖亮(1972-)男,江西南康人,学士,高级工程师,主要从事给排水规划与咨询研究工作。

E-mail: aliaol@163.com

通讯作者:罗亭(1988-)女,硕士,助理工程师,主要从事给排水工程规划设计研究工作。

E-mail: 812029694@qq.com

1 引言

水质评价方法有很多,其中灰关联评价方法是国内外应用较多的研究水环境状况的方法。它具备综合指数法和模糊数学评价法的诸多特点,不仅可以反映监测序列和水质标准各级数列间的关联性关系,提供较为丰富的水环境质量分类级别信息,而且可了解不同断面或不同时期水环境质量变化,计算过程与定量评价较为简单,容易在实际中推广应用^[1-5]。灰关联分析水质评价是通过建立各因子实测浓度与各级水质标准的关联离散函数,再考虑权重计算关联度,从而判断水质类型^[5-7]。由于现有建立的关联离散函数与关联水质类别成正比,即函数值越大,与水质的关联性越大,而用于计算关联度的权重通常采用超标倍数法,即超标越严重的指标赋给的权重越大,以体现其对水环境质量的影响,因此当构造关联离散函数对离散变量进行不同程度的缩放时,可能导致水质的误判,降低评价方法的分辨率^[8]。本文作者以重庆南湖水库水质为例,应用灰关联分析方法,研究不同关联离散函数的构造对水质综合评价的影响,一方面为灰关联分析法在水环境质量评价中的应用提供新思路,另一方面为合理评价南湖水库水质、分析水库水质现状,从而为水库水环境的综合整治、保护以及水资源的合理开发、利用提供参考。

2 灰关联分析评价方法

水环境质量评价的灰色关联分析方法步骤如下:

2.1 确定样本矩阵与标准浓度矩阵

设某水域有 m 个待分级评价的断面或序列监测数据,每个断面或每组数据又有 n 项被评价的单项水质指标,它们可以排列为 1 个样本矩阵:

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \cdots & X_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: X_{ij} ($i=1, 2, \cdots, m; j=1, 2, \cdots, n$) 为第 i 断面第 j 项指标水质监测值。

根据各个断面的实测水质指标,按现行国家《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 确定评价水质污染程度的分级数,记为 p ,可以得到水质标准浓度矩阵:

$$S_{kj} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ S_{p1} & S_{p2} & \cdots & S_{pn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: S_{kj} ($k=1, 2, \cdots, p; j=1, 2, \cdots, n$) 为第 j 项污染物第 k 分级水环境质量标准值。

2.2 归一化处理

考虑到各种水质指标的单位、数量级可能不完全相同,在采用灰关联分析与评价之前,需要将样本矩阵和标准矩阵的元素归一化,转化为 $[0, 1]$ 内取值。归一化方法可采用分段线性变换^[9]。

对于指标值愈大,污染愈重的指标,其标准矩阵和样本矩阵的归一化采用下列变换方法:

$$b_{kj} = \frac{S_{pj} - S_{kj}}{S_{pj} - S_{1j}} \quad (k=1, 2, \cdots, p; j=1, 2, \cdots, n) \quad (3)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & X_{ij} \leq S_{1j} \\ \frac{S_{pj} - X_{ij}}{S_{pj} - S_{1j}} & S_{1j} < X_{ij} < S_{pj} \\ 0 & X_{ij} \geq S_{pj} \end{cases} \quad (i=1, 2, \cdots, m; j=1, 2, \cdots, n) \quad (4)$$

对于指标值愈大,污染愈轻的可采用下列变换方法:

$$b_{kj} = \frac{S_{kj} - S_{pj}}{S_{1j} - S_{pj}} \quad (k=1, 2, \cdots, p; j=1, 2, \cdots, n) \quad (5)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & X_{ij} \geq S_{1j} \\ \frac{X_{ij} - S_{pj}}{S_{1j} - S_{pj}} & S_{1j} > X_{ij} > S_{pj} \\ 0 & X_{ij} \leq S_{pj} \end{cases} \quad (i=1, 2, \cdots, m; j=1, 2, \cdots, n) \quad (6)$$

归一化处理之后的水质标准矩阵为:

$$b_{kj} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ b_{p1} & b_{p2} & \cdots & b_{pn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

归一化后的水质样本矩阵为:

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

2.3 求解关联离散函数与关联度

对于任意一监测断面或序列监测数据 i ($i=1,$

2, …, m), 计算关联离散函数 ξ_{kj} 和关联度 Γ_k 。目前计算关联离散函数 ξ_{kj} 有幂函数法和极差法^[9]。

$$\text{幂函数法: } \xi_{kj} = \frac{1 - \Delta_{kj}^c}{1 + \Delta_{kj}^c} \tag{9}$$
$$\text{极差法: } \xi_{kj} = \frac{\min_k \min_j \Delta_{kj} + \rho \max_k \max_j \Delta_{kj}}{\Delta_{kj} + \rho \max_k \max_j \Delta_{kj}} \tag{10}$$

式中: $\Delta_{kj} = |b_{kj} - a_{(i)j}|$; $\min_k \min_j \Delta_{kj}$ 、 $\max_k \max_j \Delta_{kj}$ 分别是 Δ_{kj} 最小差和最大差; ρ 为分辨系数, 在 0 ~ 1 之间变化, 一般可取 0.5; c 为大于或等于 1 的整数, 一般取 1 ~ 4。

关联度 Γ_k 通过下式计算:

$$\Gamma_k = \sum_{j=1}^n w_{(i)j} \cdot \xi_{kj} \tag{11}$$

式中: $w_{(i)j}$ 为断面或序列监测数据 i 第 j 项指标的权重, 一般采用浓度超标加权算法, 即:

$$w_{(i)j} = \frac{X_{(i)j}/S_j}{\sum X_{(i)j}/S_j} \tag{12}$$

式中: $X_{(i)j}$ 为断面 i 第 j 项指标实测值; S_j 为第 j 项指标各类标准值的平均值, 即:

$$S_j = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p S_{kj} \tag{13}$$

2.4 灰关联评判方法

按照灰关联分析原理, 第 i ($i = 1, 2, \dots, m$) 个断面或序列监测数据的质量评价, 应取关联度 Γ_k 中最大者所对应的分级数为该断面的水质级别。

3 南湖水库水质评价

3.1 南湖水库基本情况

南湖水库地处重庆市巴南区南彭街道, 距南彭街道办事处 5 km, 位于长江一级支流花溪河的上游, 是一座以灌溉、防洪为主, 兼有场镇供水、旅游和改善生态环境等综合效益的中型水库。南湖水库水域面积 1.319 km², 涉水长度 11 km, 水库集雨面积 39.5 km², 设计总库容 1 374.7 万 m³。根据《重庆市饮用水源保护区划分规定》, 南湖水库系重庆主城重要的饮用水源。

3.2 评价样本

评价样本采用南湖 2011 年水库出口监测数据。选取指标考虑评判的目的是为了衡量水域是否具备作为饮用水水质的功能, 主要选用高锰酸盐指数、总氮、总磷、COD、DO、BOD₅、氨氮、石油类、粪大肠菌群等指标, 对一些浓度较低的如重金属等指标未列入评判指标。评价样本数据见表 1。

3.3 水质评价标准

对地表水环境质量进行评价, 评价标准常采用《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)。该标准设有 5 级标准限值, 分别对应 I、II、III、IV、V 类水质, 超出 V 类标准限值为劣 V 类。在灰关联分析评价过程中, 按 5 级标准限值进行评价, 无论污染指标的浓度多高, 污染等级最高为 V 类, 忽略了劣 V 类的评价等级, 而实际地表水质可能出现劣 V 类水质。为了反映这一实际情况, 评价过程中引入劣 V 类(记为 VI 类)标准限值, 根据现有的 5 级指标限值变化规律, 对劣 V 类水质标准限值进行赋值, 得到改进的水质评价标准, 见表 2。

表 1 水质监测数据
Table 1 The water quality monitoring data

水质指标	月份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
高锰酸盐指数/(mg/L)	3.6	2.02	2.3	1.27	1.58	1.54	3.6	2.5	4.4	4.9	4.3	4.1
总氮/(mg/L)	1.61	1.81	2.03	2.13	2.69	1.23	2.5	2.5	2.43	1.04	1.43	1.27
总磷/(mg/L)	0.09	0.05	0.06	0.09	0.06	0.07	0.07	0.08	0.08	0.07	0.06	0.07
COD/(mg/L)	8	15.8	14.8	14.2	5	13	11.5	11.7	17	15.6	11.7	13.9
DO/(mg/L)	6.6	7.7	8.8	7.8	6.9	7.7	8	6.8	5.9	7	5.9	6.8
BOD ₅ /(mg/L)	1.7	2.6	2.4	3.7	2.8	2.7	2	2.9	2.1	2.2	2.1	3.1
氨氮/(mg/L)	0.45	0.543	0.362	0.627	0.372	0.342	0.737	0.666	0.621	0.274	0.662	0.878
石油类/(mg/L)	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
粪大肠菌群/(个/L)	2 300	2 300	24 000	24 000	24 000	240 000	24 000	24 000	2 300	2 300	24 000	24 000

表 2 水质评价分级标准

Table 2 The grade standards of water quality

项目	I 类	II 类	III 类	IV 类	V 类	劣 V 类
COD _{Mn} /(mg/L) ≤	2	4	6	10	15	20
总氮 /(mg/L) ≤	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
总磷 /(mg/L) ≤	0.01	0.025	0.05	0.1	0.2	0.4
COD _{Cr} /(mg/L) ≤	15	15	20	30	40	50
DO /(mg/L) ≥	7.5	6	5	3	2	1
BOD ₅ /(mg/L) ≤	3	3	4	6	10	18
氨氮 /(mg/L) ≤	0.15	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
石油类 /(mg/L) ≤	0.05	0.05	0.05	0.5	1.0	2.0
粪大肠菌群 /(个/L) ≤	200	2 000	10 000	20 000	40 000	80 000

3.4 水质评价结果

采用幂函数法计算关联度,结果如表 3 所示。从表 3 可以看出:常数 C 取 2、3 时,除 9 月外,各月水质评价结果相同;常数取 1 与取 2、3、4 时的水质评价结果相差较大;常数取 3、4 时,除 6 月外,各月水质评价结果相同。

表 3 幂函数法水质关联度结果

Table 3 The water correlation degree by the power function method

时间	C	关联度						评价等级
		I	II	III	IV	V	VI	
1 月	1	0.623	0.708	0.686	0.670	0.436	0.183	II
	2	0.802	0.867	0.920	0.843	0.660	0.320	III
	3	0.876	0.934	0.98	0.919	0.772	0.408	III
	4	0.920	0.967	0.995	0.958	0.841	0.468	III
2 月	1	0.654	0.663	0.644	0.570	0.455	0.206	II
	2	0.760	0.812	0.870	0.802	0.631	0.327	III
	3	0.819	0.887	0.953	0.890	0.728	0.383	III
	4	0.863	0.932	0.983	0.933	0.793	0.412	III

续表

时间	C	关联度						评价等级
		I	II	III	IV	V	VI	
3 月	1	0.590	0.590	0.606	10.606	3 0.563	0.258	IV
	2	0.712	0.761	0.838	0.826	0.713	0.384	III
	3	0.772	0.842	0.930	0.908	0.790	0.443	III
	4	0.811	0.891	0.970	0.946	0.838	0.480	III
4 月	1	0.564	0.581	0.613	0.624	0.546	0.275	IV
	2	0.704	0.756	0.835	0.832	0.732	0.398	III
	3	0.763	0.831	0.92	0.913	0.814	0.461	III
	4	0.796	0.875	0.962	0.950	0.860	0.508	III
5 月	1	0.459	0.487	0.514	0.528	0.493	0.454	IV
	2	0.557	0.617	0.715	0.758	0.734	0.498	IV
	3	0.583	0.669	0.813	0.874	0.832	0.539	IV
	4	0.590	0.702	0.873	0.935	0.882	0.576	IV
6 月	1	0.152	0.158	0.197	0.244	0.374	0.839	VI
	2	0.163	0.199	0.307	0.420	0.629	0.843	VI
	3	0.165	0.223	0.38	0.550	0.780	0.847	VI
	4	0.165	0.242	0.454	0.649	0.867	0.850	V
7 月	1	0.466	0.499	0.533	0.528	0.480	0.441	III
	2	0.569	0.630	0.728	0.762	0.720	0.490	IV
	3	0.599	0.682	0.819	0.876	0.822	0.536	IV
	4	0.607	0.714	0.877	0.933	0.873	0.576	IV
8 月	1	0.412	0.463	0.498	0.521	0.502	0.500	IV
	2	0.510	0.583	0.700	0.759	0.748	0.546	IV
	3	0.537	0.634	0.797	0.881	0.848	0.588	IV
	4	0.544	0.669	0.860	0.942	0.897	0.625	IV
9 月	1	0.484	0.606	0.600	0.510	0.448	0.396	II
	2	0.611	0.691	0.780	0.778	0.690	0.467	III
	3	0.643	0.727	0.856	0.905	0.812	0.515	IV
	4	0.654	0.757	0.904	0.961	0.883	0.559	IV
10 月	1	0.767	0.813	0.810	0.551	0.304	0.084	II
	2	0.931	0.964	0.954	0.793	0.535	0.163	II
	3	0.977	0.993	0.987	0.893	0.684	0.233	II
	4	0.992	0.998	0.996	0.940	0.779	0.294	II
11 月	1	0.619	0.750	0.762	0.692	0.434	0.162	III
	2	0.836	0.907	0.958	0.878	0.683	0.300	III
	3	0.923	0.964	0.993	0.949	0.810	0.409	III
	4	0.961	0.986	0.999	0.978	0.881	0.493	III
12 月	1	0.661	0.738	0.782	0.662	0.409	0.136	III
	2	0.868	0.922	0.960	0.864	0.657	0.258	III
	3	0.946	0.977	0.992	0.935	0.787	0.360	III
	4	0.977	0.993	0.998	0.966	0.859	0.441	III

采用极差法计算关联度,结果如表 4 所示。从表 4 评价结果可以看出,一年内水质波动较大,极差法得出的水质评价结果与幂函数法的结果相差

较大。根据灰关联分析,当计算关联度的指标权重一定时,采用不同的关联离散函数,会由于其对关联度差 Δ 进行不同的代数计算,导致关联离散函数值不同,得出的关联度结果也不一致,从而对同一水质出现不同的判定结果。

表 4 极差法水质关联度结果

Table 4 The water correlation degree by the range method

时间	关联度						评价等级
	I	II	III	IV	V	VI	
1 月	0.706	0.768	0.733	0.739	0.573	0.426	II
2 月	0.744	0.740	0.710	0.658	0.596	0.444	I
3 月	0.698	0.687	0.683	0.685	0.674	0.476	I
4 月	0.676	0.679	0.690	0.700	0.653	0.488	IV
5 月	0.615	0.626	0.629	0.634	0.606	0.626	IV
6 月	0.432	0.429	0.441	0.458	0.528	0.892	VI
7 月	0.619	0.635	0.642	0.633	0.598	0.617	III
8 月	0.583	0.613	0.618	0.628	0.611	0.657	VI
9 月	0.624	0.716	0.689	0.614	0.577	0.580	II
10 月	0.804	0.836	0.836	0.644	0.487	0.373	II
11 月	0.695	0.796	0.790	0.750	0.567	0.412	II
12 月	0.725	0.780	0.807	0.725	0.551	0.398	III

图 1 是不同关联离散函数与关联度差的关系图。“ $C=1$ ”、“ $C=2$ ”、“ $C=3$ ”和“ $C=4$ ”分别为幂函数法常数 C 为 1、2、3 和 4 时所对应的曲线,“min-max”为极差法所对应曲线,“ $1-\Delta$ ”为对关联度差进行 $\xi_{kj} = 1 - \Delta_{kj}$ 线性处理所对应的曲线。

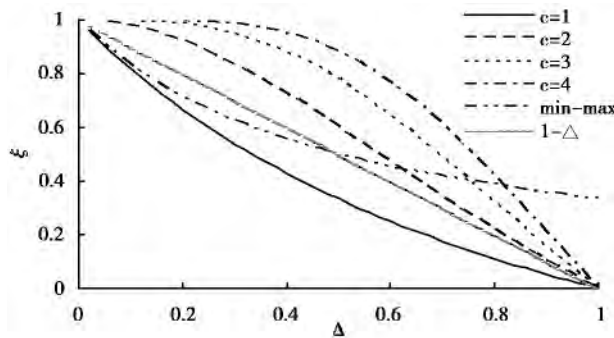


图 1 关联离散函数与关联度差的关系图

Fig. 1 The relation between correlation discrete function and correlation degree difference

从图 1 可以看出,与线性变换曲线相比,幂函

数法常数为 1 的关联离散函数值变小了,常数为 2、3、4 的关联离散函数值扩大了;而极差法的关联离散函数值在关联性较好时变小了,在关联性较差时扩大了。从图 1 可以直观解释上述评价结果为何会出现幂函数常数取 2、3、4 时的评价等级相差不大而与常数取 1 和采用极差法的评价等级相差较大的现象,以及极差法水质评价结果波动较大的问题。为减小关联离散函数对离散变量进行非线性处理带来的影响,采用线性法计算关联度 Γ_k ,结果如表 5 所示。

表 5 线性法水质关联度结果

Table 5 The water correlation degree by the linear method

时间	关联度						评价等级
	I	II	III	IV	V	VI	
1 月	0.727	0.799	0.809	0.769	0.571	0.273	III
2 月	0.722	0.752	0.768	0.700	0.565	0.278	III
3 月	0.665	0.692	0.735	0.729	0.654	0.335	III
4 月	0.647	0.683	0.737	0.740	0.655	0.353	IV
5 月	0.511	0.565	0.634	0.663	0.631	0.489	IV
6 月	0.158	0.187	0.277	0.365	0.530	0.842	VI
7 月	0.520	0.577	0.649	0.664	0.618	0.480	IV
8 月	0.464	0.537	0.620	0.660	0.642	0.536	IV
9 月	0.552	0.660	0.706	0.663	0.592	0.448	III
10 月	0.855	0.891	0.886	0.688	0.451	0.145	II
11 月	0.740	0.836	0.862	0.795	0.582	0.260	III
12 月	0.775	0.836	0.873	0.774	0.557	0.225	III

从表 5 可以看出:10 月水质为 II 类,1—3、9、11—12 月水质为 III 类,4—5、7—8 月水质为 IV 类,6 月水质为劣 V 类;除 4 月外,线性法的水质评价结果与幂函数法常数取 2 的水质评价结果一致。

3.5 结果分析

非线性关联离散函数对离散变量进行非线性运算,在变量取值区域,函数斜率是变化的。不同的非线性关联离散函数的斜率变化趋势不一致,因此最终评价得出的水质类别可能不同。线性关联离散函数在变量区域内反映的是水质与评价标准的实际关联大小,因此评价结果更能反映水质实际

情况。关联离散函数采用幂函数计算,常数取2的水质评价结果与线性法的接近。关联离散函数采用极差法计算,常因存在个别较好或较差的指标而导致对水质的误判,如表4评价结果出现的2—3月份水质为I类以及8月为劣V类的不合理情况。

灰关联分析表明,南湖水库春季和冬季水质较好,达到或高于III类水质标准,满足饮用水水源水质要求,而夏季(4—8月)水质较差,除6月可能因为粪大肠菌群严重超标外,其余月份水质均为IV类,达不到饮用水水源水质要求。超标的污染物主要为总氮、总磷和粪大肠菌群。分析南湖水库水质呈现季节性变化的原因,可能是由于南湖水库受上游农田面源和库区周边居民点源污染的结果,特别是雨季大量的农田面源污染物进入水库,导致水质恶化。为保障饮用水安全,改善南湖水库水质,应加强水库上游农田面源的污染治理。

4 结 论

(1)灰关联分析关联离散函数采用线性函数计算,评价结果更能反映水体水质实际情况。关联离散函数采用极差法计算,常因存在个别较好或较差的指标而导致对水质的误判。

(2)南湖水库春季和冬季水质较好,达到或高于III类水质标准,满足饮用水水源水质要求,而夏季水质较差,主要为IV类。

(3)南湖水库污染源为上游农田面源和库区周边居民点源。为保障饮用水安全,应加强水库上游农田面源的污染治理。

参考文献(References)

- [1] 尹海龙,徐祖信. 河流综合水质评价方法比较研究[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(5): 729-733. (Yin Hailong, Xu Zuxin. Comparative study on typical river comprehensive water quality assessment methods [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17(5): 729-733. (in Chinese))
- [2] Ip W C, Hu B Q, Wong H, et al. Applications of grey relational method to river environment quality evaluation in China [J]. Journal of Hydrology, 2009, 379(3-4): 284-290.
- [3] Zhu C H, Li N P, Re D, et al. Uncertainty in indoor air quality and grey system method [J]. Building and Environment, 2007, 42(4): 711-717.
- [4] Chen G N. Assessment of environmental water with fuzzy cluster analysis and fuzzy recognition [J]. Analytica Chimica Acta, 1993, 271(1): 115-124.
- [5] 罗燕珠, 璩向宁. 不同水质评价方法的适用性研究——以沙湖为例 [J]. 中国农村水利水电, 2010(12): 72-74. (Luo Yanzhu, Qu Xiangning. Availability of different water quality assessment methods: taking Sand Lake for example [J]. China Rural Water and Hydropower, 2010(12): 72-74. (in Chinese))
- [6] 莫崇勋, 黎曦, 樊新艺. 灰关联分析方法在河道水质评价中的应用研究 [J]. 东北水利水电, 2007, 25(1): 47-50. (Mo Chongxun, Li Xi, Fan Xinyi. Study on application of grey relation analysis method in river water quality appraisal [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast, 2007, 25(1): 47-50. (in Chinese))
- [7] 徐晓民, 李畅游, 刘廷玺, 等. 灰色关联分析在湖泊水环境评价中的应用研究 [J]. 内蒙古农业大学报, 2006, 27(4): 118-121. (Xu Xiaomin, Li Changyou, Liu Tingxi, et al. Application of gray correlation analysis method to lake water quality evaluation [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2006, 27(4): 118-121. (in Chinese))
- [8] 吴梅, 钱翌. 灰关联分析法在水磨河水环境质量评价中的应用 [J]. 安全与环境工程, 2006, 13(1): 26-29. (Wu Mei, Qian Yi. The application of grey associative analysis on water evaluation of Shuimo River [J]. Safety and Environmental Engineering, 2006, 13(1): 26-29. (in Chinese))
- [9] 刘思峰. 灰色系统理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2010. (Liu Sifeng. The grey system theory and its application [M]. Beijing: China Science Press, 2010. (in Chinese))