

改进的灰关联分析法在上海市闵行区 北横泾水质评价中的应用

王琢文¹, 汪松青² (1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 上海市闵行区水务局, 上海 201100)

摘要: 传统的灰关联分析法在水质评价应用中易出现关联序乱序、逆序的现象,故对传统方法进行改进,采用受极值影响较小的标准化方法对原始数据进行无量纲处理,将绝对差计算式改写为点到区间的形式以增加计算精度,选择基于线性运算的关联系数计算式,以避免采用传统方法运算导致的序数效应,并根据上海市闵行区北横泾氨氮、总氮污染严重的水质特点,调整指标权重,得到的评价结果与传统灰关联分析法以及其他常用方法相比更符合实际。

关键词: 灰关联分析法; 灰色关联序; 水质评价; 北横泾

中图分类号: X824 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2014)01-0096-05

Application of Improved Grey Correlation Analysis Method to Water Quality Assessment of Beihengjing River in Shanghai. WANG Zhuo-wen¹, WANG Song-qing² (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Water Authority of Minhang District, Shanghai 201100, China)

Abstract: The application of the traditional grey correlation analysis method to water quality assessment is prone to cause appearance of "disorder" and "reverse order" in grey correlation analysis. To overcome these problems, the traditional method was modified by nondimensionalizing the original data with the standardization method that was less affected by polar value and rewriting the formula of absolute difference into a new one based on the distance from point to area to improve accuracy of the calculation. Meanwhile, in light of the properties of the water of the Beihengjing River which was seriously polluted by NH₃-N and TN, weights of the indices were adjusted. The application of the modified grey relational analysis method to evaluation of the water quality of the Beihengjing River in Shanghai shows that its results match the reality better than the traditional one and any other conventional methods.

Key words: grey relational analysis; grey correlation order; water quality assessment; Beihengjing River

随着灰色系统理论的发展,灰关联分析法已广泛应用于水质评价。灰关联分析法能计算待评价水体的各指标值与不同水质标准的关联度,将关联度排序所得的序列即能反映待评价水体与各级水质标准之间的相似程度,并最终得到待评价水体的水质级别。但采用传统的灰关联分析法进行水质评价时易出现关联序乱序、逆序的现象,针对传统方法的不足,许多学者对其进行了改进。朱利霞等^[1]、蒋慧云等^[2]和于福荣等^[3]从数据处理入手,采用最大值法、均值法和归一法进行无量纲化处理,但这几种方法易受极值的影响,不适用于水质较差的地区;杨文慧等^[4]研究发现传统灰关联系数计算过程中的非线性运算会产生序数效应,使关联序发生变化,但其提出的新的灰关联系数计算式中的绝对差计算仍采用点到点的距离公式,没有考虑将水质评价标准作为区间值;于洪涛等^[5]基于灰区间理论,重新定义了点到区间的距离公式,但在水

质评价应用中会产生与实际不符的评价结果,其理论基础尚待完善;赵天燕等^[6]按照污染物类型将水质指标分层,通过低层次子集的关联度计算高层次的关联度,但这种方法仅适用于指标较多的断面,对于指标数量较少或指标污染类型相同的断面评价效果一般,且计算较为复杂。

基于上述问题,笔者从几个方面对传统方法进行改进,针对常用无量纲法易受极值影响的缺点,利用标准化方法进行数据处理;为消除因使用点到点的计算而带来的关联序乱序现象,将绝对差计算式改进为点到区间的形式;由于传统方法存在非线性运算会造成关联序乱序,采用改进的基于线性运

收稿日期: 2013-04-03

基金项目: 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究基金(IWHR-SKL-201210); 国家博士后基金(2012M520988)

算的关联系数计算式;同时按照污染物浓度的超标程度合理分配权重。最后将改进的方法应用于上海市北横泾的水质评价,并将评价结果与其他方法进行比较,检验方法的可行性。

1 传统的灰关联分析法

灰关联分析实际上是一种曲线间几何形状的分析比较^[7],几何形状越接近,则关联程度越大。传统灰关联分析法的水质评价步骤如下:

(1)确定参考数列和比较数列。以水质监测断面的监测数据为参考数列 $[X_0(t)]$,以水质评价标准的各级数据为比较数列 $[X_i(t)]$ 。

(2)计算数列间的绝对差。由于数列间的比较实际上是几何曲线间的比较,曲线间的差异程度表征了数列间的相似程度。因此,把这种差异性定义为参考数列与比较数列的绝对差,当时刻 $t=k$ 时绝对差 $\Delta_{0i}(k)$ 为

$$\Delta_{0i}(k) = |X_0(k) - X_i(k)|, k = 1, 2, \dots, n。$$

显然当 $\Delta_{0i}(k) = 0$ 时,曲线间差异最小,参考数列与比较数列最接近。

(3)求关联系数 $\xi_{0i}(k)$,其计算公式为

$$\xi_{0i}(k) = \frac{\min_i \min_k \Delta_{0i}(k) + \rho \max_i \max_k \Delta_{0i}(k)}{\Delta_{0i}(k) + \rho \max_i \max_k \Delta_{0i}(k)}。 \quad (1)$$

式(1)中, $\min_i \min_k \Delta_{0i}(k)$ 和 $\max_i \max_k \Delta_{0i}(k)$ 分别为各时刻参考数列与比较数列绝对差的最小值与最大值; ρ 为分辨系数, $\rho \in [0, 1]$,通常取0.5。

(4)求关联度 r_{0i} 。传统灰关联分析法一般不考虑不同指标权重对关联度的影响,即按照平均值法计算参考数列与比较数列的关联度,其计算公式为

$$r_{0i} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_{0i}(k)。$$

由此可计算出不同水质标准等级下的关联度,将关联度排序得到灰关联序,据此可说明水质监测数据与水质标准间的关联大小。

2 改进的灰关联分析法

2.1 数据的无量纲化处理

在对原始数据进行无量纲化处理时,常采用以下几种不同的处理方法:中心化、极差化、极大化、极小化、均值化和初值化等。但实际上水质标准区间是不均匀的,不同的无量纲化处理会改变数据序列的离散度,从而导致关联序的逆序;同时,由于极值化方法仅与极端值有关,与其他取值无关,这使

得该方法在改变各变量权重时过分依赖2个极端取值,导致无量纲化数据普遍低于不存在极端取值的变量,从而造成各变量分析权重存在差异^[8]。因此不能简单地进行无量纲化处理。

采用标准化方法对参考数列和比较数列进行无量纲化处理,以期将分析对象间的差异体现得最明显,其计算公式为

$$Y_i = \frac{X_i(k) - \bar{X}_i}{\sigma_i}, i = 1, 2, \dots, n。 \quad (2)$$

式(2)中, Y_i 为标准化后的数列; \bar{X}_i 与 σ_i 分别为原始数列 $X_i(k)$ 的样本均值和样本均方差。

2.2 绝对差的计算

由于水质评价标准并非一个数值,而是一个区间,在传统灰关联分析法中采用点到点的计算方法忽略了区间值对结果的影响,会影响评价结果的精度。同时,水质评价标准是一个不均匀区间^[9],采用点到点的方法计算 $\Delta_{0i}(k)$ 值时,很可能会与实际情况不符。例如 $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ (单位为 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)的水质评价标准区间为 $\{(0, 2], (2, 4], (4, 6], (6, 8], (8, 15], (15, +\infty)\}$,假设水体 $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 的监测值为 $6.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,若采用点到点的计算方法,则 $\Delta_{0i}(1) = 4.2, \Delta_{0i}(2) = 2.2, \Delta_{0i}(3) = 0.2, \Delta_{0i}(4) = 1.8, \Delta_{0i}(5) = 8.8, \Delta_{0i}(3)$ 的值最小,表示该水体监测值最接近Ⅲ类水标准,但实际上该监测值应为Ⅳ类水标准。由此可见,采用点到点的计算方法有一定缺陷,容易造成最终关联度的乱序,因此有必要对 $\Delta_{0i}(k)$ 的计算方法进行改进。

首先定义 $X_i(k) = (X_{i,\min}(k), X_{i,\max}(k))$, $X_{i,\min}(k)$ 与 $X_{i,\max}(k)$ 分别为指标 k 在第 i 个级别的下限值与上限值,则区间形式的绝对差为

$$\Delta_{0i}(k) = \begin{cases} X_{i,\min}(k) - X_0(k), & X_0(k) \leq X_{i,\min}(k) \\ 0, & X_{i,\min}(k) < X_0(k) < X_{i,\max}(k) \\ X_0(k) - X_{i,\max}(k), & X_0(k) \geq X_{i,\max}(k) \end{cases}。$$

2.3 灰关联系数的计算

式(1)中, $\xi_{0i}(k)$ 与 $\Delta_{0i}(k)$ 之间建立的其实是一种非线性关系,不同 $\Delta_{0i}(k)$ 值转换到 $\xi_{0i}(k)$ 时增加的倍数不同,可能会产生序数效应,改变不同样本同一指标的绝对差之间的比值关系,进而导致关联序变化,影响结果精度。针对传统方法的不足,采用杨文慧等^[4]提出的新的灰关联系数表达式:

$$\xi_{0i}(k) = \frac{\alpha[1 - \Delta_{0i}(k)]}{\max_i \max_k \Delta_{0i}(k)}。 \quad (3)$$

式(3)中, α 为分辨系数, $\alpha \in (0, 1]$, α 越大,则 $\xi_{0i}(k)$ 的取值范围越大,笔者对 α 取值1。

2.4 权重的确定

传统灰关联评价法中,由于水质评价指标数较少,数据信息不足,一般采用等均权重,将权重系数均设置为1。为体现主要污染物对水质的影响,应在水质评价过程中考虑权重。由上海市闵行区历年水质公报可知,北横泾主要污染物为氨氮和总氮。因此,以监测值超出各级别水质标准浓度平均值的倍数作为该参数的总体权重^[10-11],以反映主要污染物对水质评价的影响。

设待评价水体第 k 项指标的监测值为 $c(k)$,该指标对应的各级别水质标准的浓度平均值为 $s(k)$,则该指标的权重 $\omega(k)$ 为

$$\omega(k) = \frac{c(k)}{s(k)} / \sum_{k=1}^n \frac{c(k)}{s(k)}。$$

表1 2011年5月北横泾水质监测数据

Table 1 Water quality monitoring data of the Beihengjing River in May 2011

监测断面	DO	COD _{Mn}	COD _{Cr}	BOD ₅	NH ₃ -N	TP	TN	挥发酚	石油类
陈思桥	2.9	10.7	25.2	3.8	6.61	0.430	11.70	0.001 0	0.060
建虹路桥	3.7	5.7	15.6	2.9	5.69	0.385	9.88	0.002 2	0.090
沪青平公路桥	3.4	8.7	27.0	5.5	7.25	0.803	11.20	0.001 8	0.140
漕宝路八号桥	1.1	9.1	25.1	6.1	6.33	0.679	10.40	0.000 7	0.025
顾戴路	2.4	8.9	22.9	2.8	6.47	0.245	10.30	0.002 3	0.070
庙泾路桥	4.2	8.1	17.0	2.8	1.85	0.325	5.50	0.000 3	0.090
沪闵路六号桥	1.9	8.8	24.4	3.9	4.28	0.260	6.45	0.001 1	0.070
老沪闵路桥	3.3	8.0	18.3	2.9	2.61	0.228	5.88	0.000 9	0.025
北桥	4.1	6.0	15.3	4.5	1.94	0.206	5.96	0.001 2	0.060
江川路桥	3.2	5.5	15.8	2.9	0.52	0.114	3.63	0.001 6	0.025

表2 地表水环境质量分级标准

Table 2 Criteria for grading of surface water environment quality

指标	I类	II类	III类	IV类	V类	劣V类
DO	[7.5, +∞)	[6, 7.5)	[5, 6)	[3, 5)	[2, 3)	[0, 2)
COD _{Mn}	(0, 2]	(2, 4]	(4, 6]	(6, 8]	(8, 15]	(15, +∞)
COD _{Cr}	(0, 15]	(0, 15]	(15, 20]	(20, 30]	(30, 40]	(40, +∞)
BOD ₅	(0, 3]	(0, 3]	(3, 4]	(4, 6]	(6, 10]	(10, +∞)
NH ₃ -N	(0, 0.15]	(0.15, 0.5]	(0.5, 1]	(1, 1.5]	(1.5, 2]	(2, +∞)
TP	(0, 0.02]	(0.02, 0.1]	(0.1, 0.2]	(0.2, 0.3]	(0.3, 0.4]	(0.4, +∞)
TN	(0, 0.2]	(0.2, 0.5]	(0.5, 1.0]	(1.0, 1.5]	(1.5, 2.0]	(2.0, +∞)
挥发酚	(0, 0.002]	(0, 0.002]	(0.002, 0.005]	(0.005, 0.01]	(0.01, 0.1]	(0.1, +∞)
石油类	(0, 0.05]	(0, 0.05]	(0, 0.05]	(0.05, 0.5]	(0.5, 1]	(1, +∞)

来源于 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》。

以表1列出的水质监测数据为参考数列,以表2列出的评价标准为比较数列,将各参考数列与比较数列进行灰关联分析。首先计算陈思桥测站的水质级别,对参考数列和比较数列进行无量纲化处理,计算结果见表3。对无量纲化处理后的参考数列和比较数列求绝对差,并求出 $\Delta_{0i}(k)$ 的最大值,计算结果见表4。

加权关联度 R_{0i} 为

$$R_{0i} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \omega_i(k) \xi_{0i}(k)。$$

3 实例应用及与其他方法的比较

3.1 实例应用

用改进的灰关联分析法对上海市闵行区北横泾10个监测断面2011年5月的监测数据(表1)进行评价。评价标准采用 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》,由于北横泾部分监测断面的水质指标浓度高于V类水限值,因此可将超出V类水限值的水质定义为劣V类水,并将评价标准改写为区间形式(表2)。

首先计算参考数列与比较数列的关联系数,再计算各指标权重,结果见表5。根据表5计算得到,陈思桥测站的监测数据与I、II、III、IV、V和劣V类水质标准的关联度分别为-0.023 3、-0.021 0、-0.017 9、-0.015 4、-0.015 8和-0.001 1,可见,其与劣V类水质标准的关联度最大,因此陈思桥测站为劣V类水。按照同样的步骤,可以计算出北横泾

其余测站监测数据与水质标准的关联度,并确定各断面水质所属级别,评价结果见表 6。

表 3 陈思桥测站水质指标的无量纲化处理结果

Table 3 Nondimensionalized data of the water quality indices at the Chensiqiao Station

水质指标	参考数列	比较数列					
		I 类	II 类	III 类	IV 类	V 类	劣 V 类
DO	-1.03	[1.26, +∞)	[0.58, 1.26)	[0.13, 0.58)	[-0.76, 0.13)	[-1.21, -0.76)	(-∞, -1.21)
COD _{Mn}	0.38	(-∞, -1.00]	(-1.00, -0.60]	(-0.60, -0.20]	(-0.20, 0.20]	(0.20, 1.60]	(1.60, +∞)
COD _{Cr}	-0.10	(-∞, -0.83]	(-∞, -0.83]	(-0.83, -0.37]	(-0.37, 0.55]	(0.55, 1.48]	(1.48, +∞)
BOD ₅	-0.81	(-∞, -0.75]	(-∞, -0.75]	(-0.75, -0.41]	(-0.41, 0.27]	(0.27, 1.63]	(1.63, +∞)
NH ₃ -N	7.30	(-∞, -1.18]	(-1.18, -0.71]	(-0.71, -0.04]	(-0.04, 0.63]	(0.63, 1.30]	(1.30, +∞)
总磷	0.27	(-∞, -1.21]	(-1.21, -0.68]	(-0.68, -0.03]	(-0.03, 0.63]	(0.63, 1.29]	(1.29, +∞)
总氮	12.68	(-∞, -1.15]	(-1.15, -0.74]	(-0.74, -0.05]	(-0.05, 0.63]	(0.63, 1.31]	(1.31, +∞)
挥发酚	-0.50	(-∞, -0.51]	(-∞, -0.51]	(-0.51, -0.44]	(-0.44, -0.32]	(-0.32, 1.78]	(1.78, +∞)
石油类	-0.62	(-∞, -0.66]	(-∞, -0.66]	(-∞, -0.66]	(-0.66, 0.40]	(0.40, 1.59]	(1.59, +∞)

表 4 陈思桥测站水质指标的绝对差计算结果

Table 4 Absolute differences of the water quality indice at the Chensiqiao Station

水质指标	I 类	II 类	III 类	IV 类	V 类	劣 V 类
DO	2.29	1.62	1.17	0.27	0	0.18
COD _{Mn}	1.38	0.98	0.58	0.18	0	1.22
COD _{Cr}	0.73	0.73	0.27	0	0.65	1.58
BOD ₅	0	0	0.07	0.41	1.08	2.44
NH ₃ -N	8.49	8.02	7.35	6.67	6.00	0
总磷	1.48	0.95	0.30	0	0.36	1.02
总氮	13.83	13.42	12.74	12.05	11.37	0
挥发酚	0.01	0.01	0	0.06	0.18	2.29
石油类	0.05	0.05	0.05	0	1.02	2.20

3.2 与其他方法的比较

运用单指标法、综合指数法以及传统灰关联法

表 5 陈思桥测站关联系数和各指标权重计算结果

Table 5 Grey correlation efficiency and weights of the water quality indice at the Chensiqiao Station

水质指标	关联系数						权重
	I 类	II 类	III 类	IV 类	V 类	劣 V 类	
DO	-0.010 0	-0.004 8	-0.001 3	0.005 7	0.007 7	0.006 4	0.107 2
COD _{Mn}	-0.002 4	0.000 1	0.002 6	0.005 1	0.006 2	-0.001 4	0.086 4
COD _{Cr}	0.002 0	0.002 0	0.005 4	0.007 4	0.002 6	-0.004 3	0.102 3
BOD ₅	0.015 1	0.015 1	0.014 0	0.008 9	-0.001 3	-0.021 7	0.208 4
NH ₃ -N	-0.065 1	-0.061 1	-0.055 2	-0.049 4	-0.043 5	0.008 7	0.120 4
总磷	-0.003 8	0.000 4	0.005 6	0.007 9	0.005 0	-0.000 2	0.109 4
总氮	-0.152 4	-0.147 5	-0.139 4	-0.131 2	-0.123 1	0.011 9	0.164 3
挥发酚	0.005 3	0.005 3	0.005 3	0.005 0	0.004 3	-0.006 8	0.073 4
石油类	0.002 0	0.002 0	0.002 0	0.002 1	0	-0.002 5	0.028 4

(2)与传统灰关联法相比,改进的灰关联法的评价结果更符合实际情况。根据近几年的监测数据可知,北横泾的主要污染物为氨氮和总氮,特别是位于淀北片的 5 个监测断面的氨氮和总氮浓度均超过 V 类水上限。而利用传统灰关联法的评价结

果过于理想化,10 个监测断面中有 8 个为 IV 类水,2 个为 III 类水,明显与实际情况不符,这是因为其所采用的无量纲化方法弱化了极值对结果的影响,等均权重的处理忽视了北横泾氨氮和总氮超标的实际情况。而改进的灰关联法由于采用标准化方法

对北横泾各断面水质进行对比评价(评价步骤略,评价结果见表 6),得到以下结论:
(1)改进的灰关联分析法评价结果表明,闵行区北横泾的水质时空差异明显,位于淀北片的监测断面(陈思桥、建虹路桥、沪青平公路桥、漕宝路八号桥、顾戴路)水质均为劣 V 类水,位于淀南片的监测断面(庙泾路桥、沪闵路六号桥、老沪闵路桥、北桥、江川路桥)水质以 IV 类和劣 V 类为主,其中江川路桥断面水质较好,为 III 类。该评价结果与实际情况较为一致,北横泾被淀浦河分为南北两段,北段河道接纳污染源主要为工业废水和生活污水,污染比较严重,南段河道从黄浦江引水,水体更新较快,因此南段河道水质情况好于北段河道。

处理数据,通过污染物浓度超标倍数确定权重,能更好地体现超标指标对评价结果的影响,更符合实际。

表6 采用各方法得到的北横泾水质评价结果比较

Table 6 Comparison between different methods in water quality evaluation of the Beihengjing River

监测断面	单指标法	综合指数法	传统灰关联法	改进的灰关联法
陈思桥	劣V类	V类	IV类	劣V类
建虹路桥	劣V类	V类	III类	劣V类
沪青平公路桥	劣V类	V类	IV类	劣V类
漕宝路八号桥	劣V类	V类	IV类	劣V类
顾戴路	劣V类	V类	IV类	劣V类
庙泾路桥	劣V类	IV类	IV类	IV类
沪闵路六号桥	劣V类	V类	IV类	劣V类
老沪闵路桥	劣V类	IV类	IV类	IV类
北桥	劣V类	IV类	III类	IV类
江川路桥	劣V类	IV类	IV类	III类

(3)建虹路桥断面采用综合指数法的评价结果为V类水,采用单指标和改进的灰关联法的评价结果为劣V类水,而采用传统灰关联法的评价结果却为III类水,存在较大误差,通过检查分析,发现传统方法由于未考虑水质级别为区间形式,导致该断面的部分指标绝对差计算出错,进而影响关联序,以致最终结果偏差较大。

(4)综合指数法中的水质指标赋分规则将参考数列与比较数列间的几何比较简化为数值比较,虽然计算较为简单,但会影响结果精度。采用该方法的评价结果显示,监测断面以V类水和IV类水为主,其中V类水主要分布在淀北片。与综合指数法相比,采用改进的灰关联法对淀南片的评价结果基本一致,但淀北片则以劣V类水为主,其原因是淀北片氨氮和总氮污染较为严重,权重影响较大,因此结果趋于劣V类。

(5)由于北横泾各监测断面均存在水质浓度超过劣V类水上限的指标,因此采用单指标法的评价结果均为劣V类水。然而对于位于淀南片的几个监测断面,例如江川路桥断面,其水质指标中除总氮超出V类上限外,其余指标均为I类和III类,显然其评价结果过于严格,不尽合理。

综上所述,采用改进的灰关联法对闵行区北横

泾水质进行评价,计算简单,结果较为合理,与实际情况相符。

4 结语

针对传统灰关联分析法的不足,从无量纲数据处理、绝对差计算、灰关联系数计算以及权重确定4个方面对其进行改进,有效避免了传统方法易出现关联序乱序、逆序的现象。同时将改进的灰关联分析法应用于上海市闵行区北横泾的水质评价中,得出的评价结果基本合理,与其他方法相比更为符合实际。特别是对于水质监测值超标严重的部分地区,运用改进的灰关联分析法的评价结果更为准确。

参考文献:

- [1] 朱利霞,贺玉晓,宋小红.改进的灰色关联度分析法在引用地下水水质评价中的应用[J].黑龙江水专学报,2009,36(2):79-81.
- [2] 蒋慧云,吕惠进,李佐卿.基于灰色关联的太湖流域水质评价[J].水资源与水工程学报,2012,23(1):161-163.
- [3] 于福荣,刘中培,李俊.灰关联分析法和模糊综合评判法在水库水质评价中的应用[J].水文,2012,32(4):67-70.
- [4] 杨文慧,吴建华.一种新的灰关联系数表达式[J].河海大学学报:自然科学版,2008,36(1):40-43.
- [5] 于洪涛,吴泽宁.灰色关联分析在南水北调中线澧河水水质评价中的应用[J].节水灌溉,2010,7(3):39-45.
- [6] 赵天燕,贺方升,侯祺棕,等.一种改进的灰关联分析法在水质评价中的应用[J].安全与环境学报,2005,5(1):26-29.
- [7] 易德生,郭萍.灰色理论与方法[M].北京:石油工业出版社,1992:25-26.
- [8] 李炳军,朱春阳,周杰.原始数据无量纲化处理对灰色关联序的影响[J].河南农业大学学报,2002,36(2):199-202.
- [9] 蒋桂芹,吴泽宁,尹君.基于点到区间距离的水质灰色关联评价方法改进及其应用[J].灌溉排水学报,2009,28(6):94-96.
- [10] 汪浩,马武生.Fuzzy综合评价模型在京杭大运河扬州段水质评价中的应用[J].淮海工学院学报,2008,17(4):57-60.
- [11] ZHANG J, LIN J G, SUN X L, et al. Grey Correlative Assessment of Marine Environmental Quality in Shenzhen Bay [R]. Guilin, China: International Conference on Energy and Environment Technology, 2009: 601-605.

作者简介:王琢文(1988—),男,湖北宜昌人,硕士生,主要研究方向为城市防洪排涝与水环境。E-mail: wzwhohai@163.com