

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.01.003

调水过程中望虞河的水质风险分析

麻林,刘凌,宋兰兰,王流通

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏南京 210098)

摘要:为探究调水过程中望虞河水体水质风险状况,对 2008 年引江济太期间望虞河水质风险进行了识别,并采用三角模糊数的 α -截集技术对望虞河各监测断面风险因子进行风险率计算,以分析望虞河各断面水体水质风险率及其风险等级。结果表明,造成望虞河水体水质恶化的风险因素主要为望虞河西岸支流污水汇入及污染物二次迁移;江边闸内断面各风险因子风险率较大,风险等级也较高;虞义大桥断面水体具有较低风险和较高风险两个等级;张桥断面各风险因子的风险率较小,风险等级也较低;大桥角新桥断面水体中除高锰酸盐指数外,其余风险因子风险率都较大,风险等级为较高风险;望亭闸下断面各风险因子风险率为 0,无水质恶化风险。

关键词:调水;水质风险;风险分析;三角模糊数;望虞河

中图分类号:TV68;X824 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2014)01-0013-06

Risk analysis of water quality of Wangyu River during water diversion

MA Lin, LIU Ling, SONG Lanlan, WANG Liutong

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to investigate the risk conditions of the water quality of the Wangyu River in the process of water diversion from the Yangtze River to Taihu Lake in 2008, the water quality risk factors were identified, and triangular fuzzy number α -cut set technology was used to calculate the risk probabilities of the risk factors of several monitoring sections of the Wangyu River. Then, the water quality risk probability and risk level of each section of the Wangyu River were obtained. The results show that the main factors causing water quality deterioration were the sewage inflow from the tributaries of the west bank of the Wangyu River and secondary pollutant migration; the risk probabilities of the risk factors of the Jiangbianzhane section were relatively large, and the risk level was relatively high; the risk levels of the risk factors of the Yuyi Bridge section were classified into relatively low risk and relatively high risk; the risk probabilities of the risk factors of the Zhangqiao Bridge section were relatively small, and the risk level was relatively low; the risk probabilities of the risk factors, except the permanganate index, of the Daqiaojiuoxinqiao section were relatively large, and the risk level was relatively high; and the risk probabilities of the risk factors of the Wangtingzhaxia section were zero, indicating that there was no water quality deterioration risk.

Key words: water diversion; water quality risk; risk analysis; triangular fuzzy number; Wangyu River

近年来,随着人们对水环境污染问题的日益关注,水质风险评价逐渐受到人们的重视。目前,应用于水质风险评价中的方法主要有 3 类^[1]:概率论方法^[2-4]、模糊论方法^[5-8]与风险指数法^[9]。概率论方法对数据信息的丰富程度和准确度要求较高,但由于实际中统计资料不足,有时计算会变得很复杂甚至难以进行,同时也降低了风险的可信度。风险指数法不采用概率来描述风险,而采用其他指标间接描述风险,具有直观简

洁的优点,但该法缺乏系统理论的指导,不便于推广。模糊论方法能较好地弥补以上2种方法的不足,但还需进一步发展和完善。另外,关于水质恶化风险等级的划分目前还没有统一的标准,因此对风险等级划分进行探讨是非常有意义的。

为改善太湖水环境,实施了引江济太工程,即通过望虞河从长江引水入太湖。望虞河连接长江与太湖,是引江济太调水工程中主要的引水通道。望虞河与其周边众多河流连通,彼此之间有着频繁的水体交换,入太湖水体的水质不仅受长江水体水质的影响,更直接受望虞河水体水质的影响。因此,展开调水对望虞河水质风险的研究很有必要。

本研究以2008年引江济太调水试验过程中的望虞河为研究对象,采用三角模糊数原理,计算望虞河水体中不同水质指标的风险率,并进行风险等级划分,进而分析调水期间望虞河与长江、太湖及周边水系连通条件下的水质恶化风险状况。

1 望虞河概况及其水质风险识别

1.1 望虞河概况

2008年引江济太期间,望虞河与周边河流自然连通,长江引水主要进入望虞河东岸支流,部分水体进入望虞河西岸支流,整个调水期间的水量入湖率不足35%。同时,望虞河西岸支流也有部分水体进入望虞河,如张家港、锡北运河、九里河及伯渎港等,这些支流水质都较差,极易引起望虞河水体水质恶化。

调水试验期间,望虞河共设5个监测断面,即江边闸内、虞义大桥、张桥、大桥角新桥、望亭闸下5个断面,主要监测指标为COD_{Mn}、NH₃-N、TP、TN。调水时间为2008年1月10日至6月9日,在此期间监测各断面水质指标,并于1月5日对调水试验前各断面水质指标进行监测。引水前与引水期间望虞河各监测断面水质情况见表1,望虞河周边水系及水质监测断面见图1。调水过程中,望虞河水体流动方向为由江边闸内断面流向望亭闸下断面。

表1 望虞河各监测断面水质因子监测值与极限值

Table 1 Monitoring data and limit values of water quality factors of monitoring sections of Wangyu River mg/L

监测断面	水质因子监测值				水质因子极限值			
	$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$	$\rho(\text{TP})$	$\rho(\text{TN})$	$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$	$\rho(\text{TP})$	$\rho(\text{TN})$
江边闸内	1.900	0.400	0.090	2.700	[1.900,4.000]	[0.030,0.950]	[0.055,0.170]	[2.000,4.000]
虞义大桥	2.700	0.800	0.140	3.000	[2.100,5.000]	[0.050,1.300]	[0.070,0.200]	[2.100,5.200]
张 桥	4.000	2.600	0.150	9.000	[2.000,5.700]	[0.150,3.400]	[0.100,0.195]	[2.150,5.700]
大桥角新桥	5.600	1.450	0.145	1.400	[2.000,5.800]	[0.100,3.400]	[0.075,0.280]	[0.100,3.800]
望亭闸下	4.600	0.500	0.075	0.480	[2.150,4.600]	[0.150,2.800]	[0.055,0.210]	[0.150,2.800]

1.2 水质风险识别

为改善流域生态环境,太湖流域调水工程中所引水体水质一般优于受水区河段水质。在调水过程中,随着新鲜水体的引入,由于稀释冲刷等作用,大部分河段水体水质都得到改善,但在此过程中也有部分河段由于污染物二次迁移、外部污水汇入等原因,造成水质恶化,产生水质风险。

调水过程中,水体中污染物在沉积物和间隙水之间进行着不间断的平衡交换,当上覆水体中氮磷含量较低时,沉积物中的营养物质又会通过吸附/解吸作用重新释放到水相中,成为引起水体水质恶化的内源^[10-14]。Hou等^[15]的研究表明,沉积物对氨氮的吸附-解吸行为受外部水体环境变化影响很大,随着调水的进行,氨氮从底泥向水体中迁移,引起氨氮质量浓度上升,水质恶化。彭素芬等^[16]的研究表明,有机物从沉积物中释放存在着明显的滞后效应,因此可能造成调水过程中水体

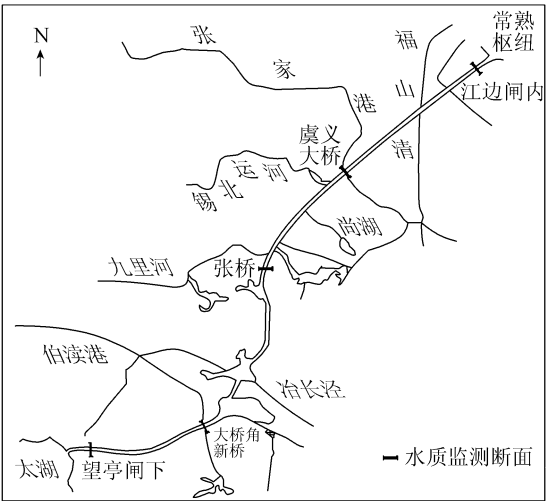


图1 望虞河周边水系及水质监测断面

Fig. 1 Surrounding rivers and water quality monitoring sections of Wangyu River

中的有机物含量增加。望虞河西岸支流水质较差,调水期间汇入望虞河干流会引起望虞河水质恶化。

从以上分析可知,引水过程中造成水体水质恶化的风险因素主要有污染物二次迁移和外来污水的汇入。根据监测资料及以上分析,本研究选用 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 TP 、 TN 作为水质风险分析因子。

2 水质风险评价方法

2.1 三角模糊数风险分析法基本原理

设 a 、 b 、 c 分别为某一模糊变量的下限、最可能值和上限,则 3 个一组数 (a, b, c) 构成一个三角模糊数。这里 a 、 b 、 c 为实数,且相应的隶属函数定义^[17]为

$$u_{\tilde{A}}(x)=\begin{cases}0 & x < a, x > c \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leqslant x \leqslant b \\ \frac{c-x}{c-b} & b < x \leqslant c\end{cases}$$

(1)

设三角模糊数 $\tilde{A}=(a, b, c)$,其隶属函数表达式同式(1),则 $\tilde{A}$ 的 α -截集可以定义^[17-18]为

$$\tilde{A}^{\alpha}=\{x \mid u_{\tilde{A}}(x) \geqslant \alpha, x \in X\}$$

(2)

式中: X ——广域区间; α ——可信度水平, $\alpha \in [0, 1]$ 。

$\tilde{A}^{\alpha}$ 是一个无空的闭区间,通常表示为

$$\tilde{A}^{\alpha}=\left[a_L^{\alpha}, a_R^{\alpha}\right]=\left[(b-a) \alpha+a,(b-c) \alpha+c\right]$$

(3)

式中: a_L^{α} 、 a_R^{α} ——三角模糊数转换为可信度水平不低于 α 的数据区间的左、右极限值。

显然, $\tilde{A}^{\alpha}$ 是三角模糊数,且对所有 $\alpha(\alpha \in [0, 1])$ 也是如此。由式(2)和式(3)可以看出,对于给定的可信度水平 α ,三角模糊数实际上已经转化为区间数。

2.2 风险率计算

假设 $\tilde{X}((d, d, d))$ 表示引水前水环境污染负荷水平的三角模糊数,采用相同的可信度水平,利用三角模糊数的 α -截集技术将三角模糊数 $\tilde{X}$ 表示为区间数,得 $\tilde{X}^{\alpha}=[(b-a) \alpha+a,(b-c) \alpha+c]$ 。可知, $\tilde{X}$ 区间值随着可信度 α 取值的变化而改变,即 $\tilde{X}$ 是可信度水平 α 的函数, α 取遍整个可信度区间 $[0, 1]$,则可得到三角模糊数形式的污染物质量浓度分布,见图 2。

假设 $\tilde{Y}((a, b, c))$ 为引水期间水环境污染负荷水平的三角模糊数,令 $\tilde{Z}=\tilde{X}-\tilde{Y}$ 。若 $\tilde{Z}>0$,即 $\tilde{Z}$ 为正的三角模糊数,则表示引水前水环境污染负荷水平大于引水期间污染负荷水平,此时水环境水质是安全的;若 $\tilde{Z}<0$,即 $\tilde{Z}$ 为负的三角模糊数,则表示将发生失效模糊概率事件,出现水质超标现象。显然, $\tilde{Z}=0$ 为临界状态。因此,可以用式(4)表征污染风险发生的可能性^[19]:

$$R(\tilde{Z}<0)=\frac{\int_{\tilde{Z}<0} u_{\tilde{Z}}(\tilde{Z}) \mathrm{d} \tilde{Z}}{\int_{\tilde{Z}} u_{\tilde{Z}}(\tilde{Z}) \mathrm{d} \tilde{Z}}$$

(4)

由图 2 可以看出,污染物质量浓度三角模糊数的隶属函数可以近似看作是线性的。由图 2 及式(4),风险率 R 可用式(5)计算。

$$R(\tilde{Z}<0)=\frac{\int_{\tilde{Z}<0} u_{\tilde{Z}}(\tilde{Z}) \mathrm{d} \tilde{Z}}{\int_{\tilde{Z}} u_{\tilde{Z}}(\tilde{Z}) \mathrm{d} \tilde{Z}}=\frac{S_1}{S_{\text{总}}}$$

(5)

式中: $S_{\text{总}}$ ——图 2 中最大三角形总面积; S_1 ——调水期间污染物质量浓度超过引水前污染物质量浓度部分的面积,即图 2 中阴影部分的面积。

污染风险的分布一般都符合正态分布,其中,最低风险与最高风险在整个风险率区间 $[0, 1]$ 中所占比例要小于中间风险等级。本研究将风险分为低风险、较低风险、较高风险、高风险 4 个等级,其中低风险与高风险取值区间占整个风险率区间的 20%,较低风险与较高风险取值区间占整个风险率区间的 30%,具体风险

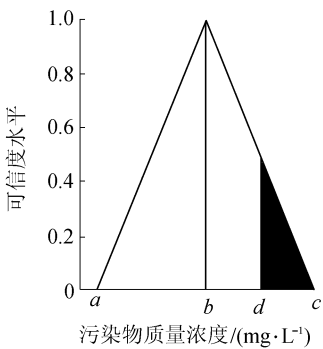


图 2 三角模糊数形式的污染物质量浓度分布
Fig. 2 Distribution of pollutant concentration in form of triangular fuzzy number

等级划分情况见表2。

3 实例计算

以张桥断面为例,对其 COD_{Mn} 风险率进行计算。

3.1 三角模糊数及其 α-截集构建

以调水期间张桥断面所监测的 COD_{Mn} 质量浓度最大值作为三角模糊数上限值,最小值作为下限值,两者平均值作为最可能值,构建引水期间 COD_{Mn} 三角模糊数 $\tilde{C}_1 = (2, 3.85, 5.7)$, 则 $\tilde{C}_1$ 相应的隶属函数为

$$u_{C_1}(x) = \begin{cases} 0 & x < 2, x > 5.7 \\ \frac{x - 2}{3.85 - 2} & 2 \leq x \leq 3.85 \\ \frac{5.7 - x}{5.7 - 3.85} & 3.85 < x \leq 5.7 \end{cases} \quad (6)$$

假设采用相同的可信度水平,利用三角模糊数的 α-截集技术将三角模糊数 $\tilde{C}_1$ 表示为区间数,得 $C_1^\alpha = [1.85\alpha + 2, -1.85\alpha + 5.7]$ 。若 α 取整个可信度区间[0,1],则得到三角模糊数形式的 COD_{Mn} 质量浓度分布图,见图3。

3.2 COD_{Mn} 风险率计算

以张桥断面 1 月 5 日监测的 COD_{Mn} 质量浓度作为水质控制目标,构建引水前 COD_{Mn} 三角模糊数 $\tilde{C}_0 = (4, 4, 4)$, 则 $\tilde{Z} = \tilde{C}_0 - \tilde{C}_1 < 0$, 意味着张桥断面调水期间 COD_{Mn} 质量浓度超过引水前,水质恶化,将发生水质风险。

由式(5)及图3可得望虞河张桥断面 COD_{Mn} 风险率为

$$R(\tilde{Z} < 0) = \frac{\int_{\tilde{Z} < 0} u_{\tilde{Z}}(\tilde{Z}) d\tilde{Z}}{\int_{\tilde{Z}} u_{\tilde{Z}}(\tilde{Z}) d\tilde{Z}} = \frac{S_{\Delta EDC}}{S_{\Delta ABC}} = \frac{0.78}{1.85} = 0.422$$

由此可知,望虞河张桥断面 COD_{Mn} 风险率为 0.422,属于较低风险,调水过程中有时会出现 COD_{Mn} 质量浓度大于引水前的现象。

3.3 望虞河水质风险分析结果

与张桥断面 COD_{Mn} 风险率计算过程一样,望虞河 5 个监测断面(江边闸内、虞义大桥、张桥、大桥角新桥、望亭闸下)的 4 个风险因子(COD_{Mn}, NH₃-N, TP, TN)的风险率计算结果见表3。

由表3可见,调水过程中各风险因子对水质的影响情况如下:

a. 望亭闸下断面水体中 COD_{Mn} 风险率为 0,水质改善,无任何风险;大桥角新桥断面水体中极少出现 COD_{Mn} 质量浓度升高的现象,属于低风险;张桥断面水体中有时出现 COD_{Mn} 质量浓度升高现象,属于较低风险;其余 2 个断面的 COD_{Mn} 风险等级属于高风险,这两个监测断面会经常且反复地出现 COD_{Mn} 质量浓度高于引水前的现象。

b. 望亭闸下断面水体中 NH₃-N 风险率为 0,水质改善,无任何风险;张桥断面极少出现 NH₃-N 质量浓度

表2 风险等级划分情况
Table 2 Risk level classification

风险等级	风险率	风险描述
低风险	[0,0.2]	极少出现水质恶化现象
较低风险	(0.2,0.5]	有时出现水质恶化现象
较高风险	(0.5,0.8]	经常出现水质恶化现象
高风险	(0.8,1]	经常且反复出现水质恶化现象

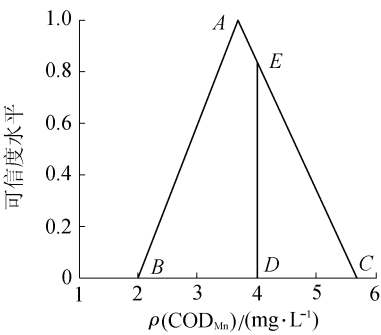


图3 三角模糊数形式的 COD_{Mn} 质量浓度分布
Fig. 3 Distribution of COD_{Mn} concentration in form of triangular fuzzy number

表3 调水过程中望虞河各断面水质风险率
Table 3 Water quality risk probabilities of various sections of Wangyu River during water diversion

监测断面	风险率			
	COD _{Mn}	NH ₃ -N	TP	TN
江边闸内	1	0.677	0.815	0.755
虞义大桥	0.914	0.320	0.426	0.831
张桥	0.422	0.121	0.449	0
大桥角新桥	0.006	0.665	0.767	0.753
望亭闸下	0	0	0	0

升高导致水质恶化的现象,属于低风险;虞义大桥断面在调水过程中有时出现 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度升高的现象,属于较低风险;其余 2 个断面 $\text{NH}_3\text{-N}$ 风险等级较高,这两个监测断面 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度经常高于引水前,导致水质恶化。

c. 望亭闸下断面水体中 TP 风险率为 0,水质改善,无任何风险;虞义大桥与张桥断面在调水过程中有时出现 TP 质量浓度升高现象,属于较低风险;大桥角新桥断面 TP 风险等级属于较高风险,这个监测断面 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度经常高于引水前,导致水质恶化;江边闸内断面 TP 风险等级属于高风险,这个监测断面经常且反复地出现 TP 质量浓度高于引水前的现象。

d. 张桥断面与望亭闸下断面水体中 TN 风险率为 0,水质改善,无任何风险;江边闸内与大桥角新桥断面 TN 风险等级属于较高风险,这两个监测断面 TN 质量浓度经常高于引水前,导致水质恶化;虞义大桥断面 TN 风险等级属于高风险,这个监测断面经常且反复地出现 TN 质量浓度高于引水前的现象。

引入长江水体中的泥沙粒径在望虞河沿程逐渐变小,泥沙主要沉积在张桥断面以上河段,造成江边闸内断面水体水质恶化的风险因素主要为污染物二次迁移,即泥沙及底泥释放的污染物,造成水体中污染物浓度上升。虞义大桥断面受张家港排入望虞河污水及水体中泥沙及底泥释放的污染物影响,造成水体水质恶化^[20]。张桥断面各风险因子的风险率除 TP 外都较前两个监测断面小,主要是因为此断面水体中泥沙粒径较小,且泥沙密度也较小,造成水质恶化风险的风险因素主要是受到锡北运河和九里河排入望虞河污水的影响。大桥角新桥主要受伯渎港排入污水的影响,造成水体中污染物浓度上升。望亭闸下断面作为望虞河排入太湖的最后一个监测断面,其与大桥角新桥之间几乎没有外来污水汇入,水体经过鹅真荡与漕湖的缓冲与净化,水体在此处流速变小,且污染物二次迁移过程中进入水体的污染物微乎其微,因此此处水体没有水质风险,各风险因子风险率为 0。

4 结 论

a. 2008 年引江济太过程中,造成望虞河水体水质恶化的风险因素主要为污染物二次迁移和西岸支流水体的汇入。

b. 采用三角模糊数的 α -截集技术对 2008 年引江济太过程中望虞河的水质风险进行分析,得出了望虞河 5 个监测断面各风险因子的风险率及其所属风险等级,表明运用三角模糊数原理进行水质风险分析是可行的,结果是可信的。

c. 望虞河临近长江的监测断面为江边闸内断面,断面水体中各风险因子风险率较大,风险等级都较高;虞义大桥断面水体中 COD_{Mn} 与 TN 风险率很大,风险等级为高风险,其余风险因子风险率不大,风险等级为较低风险;张桥断面水体中各风险因子风险率较小,风险等级都较低;大桥角新桥断面水体中除 COD_{Mn} 风险率极小外,其余风险因子风险率都较大,风险等级为较高风险;入太湖的监测断面望亭闸下断面的各风险因子风险率为 0,说明调水过程中望虞河进入太湖的水体水质是优于引水前水质的,调水对太湖水质改善有效。

参考文献:

[1] 何理. 水环境突发性与非突发性风险分析的理论和方法初步研究[D]. 长沙:湖南大学,2002.

[2] WARREN T P, LEE A D, JILL A S. Evaluating health risks from groundwater contaminants[J]. Journal of Environmental Science and Technology, 1985, 19(8): 662-667.

[3] SIMONOVIC S P, ORLAB G T. Risk-reliability programming for optimal water quality control[J]. Water Resources Research, 1984, 20(6): 639-646.

[4] MORGAN G M, SAMUEL C M, DEBORAH A L, et al. Uncertainty in risk assessment[J]. Environmental Science and Technology, 1986, 112(1): 105-112.

[5] DAHAB M F, LEE Y W, BOGARDI I. A rule-based fuzzy-set approach to risk analysis of atrate-contaminated around[J]. Water Science and Technology, 1994, 30(7): 45-52.

[6] 李如忠,洪天求. 模糊可靠性理论在河流水质风险评价中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2005(11): 21-23. (LI Ruzhong, HONG Tianqiu. Application of fuzzy reliability theory in risk analysis of river water quality[J]. China Rural Water and Hydropower, 2005(11): 21-23. (in Chinese))

- [7] 王飞,王华东. 环境风险事故概率估计方法探讨[J]. 上海环境科学,1995,4(5):39-42. (WANG Fei, WANG Huadong. Study on estimation method of environmental risk accident probability[J]. Shanghai Environmental Sciences, 1995, 4(5): 39-42. (in Chinese))
- [8] JENNING A A, SURESH P. Risk penalty function hazardous waste management[J]. Journal of Environmental Engineering, 1986, 112(1):105-122.
- [9] 尚林源,孙然好,汲玉河,等. 密云水库入库河流沉积物重金属的风险评价[J]. 环境科学与技术,2011,34(12H):344-348. (SHANG Linyuan, SUN Ranhao, JI Yuhe, et al. Risk assessment on heavy metals in sediments of rivers flowing into Miyun Reservoir[J]. Environmental Science and Technology, 2011, 34(12H): 344-348. (in Chinese))
- [10] 王雨春,万国江,黄荣贵,等. 湖泊现代化沉积物中磷的地球化学作用及环境效应[J]. 重庆环境科学,2000,22(4):39-42. (WANG Yuchun, WAN Guojian, HUANG Ronggui, et al. Geochemistry and environmental effect of modern sediments in Lake Baihua[J]. Chongqing Environmental Science, 2000, 22(4): 39-42. (in Chinese))
- [11] 李宝,丁士明,范成新,等. 滇池福保湾底泥内源氮磷营养盐释放通量估算[J]. 环境科学,2008,29(1):114-120. (LI Bao, DING Shiming, FAN Chengxin, et al. Estimation of releasing fluxes of sediment nitrogen and phosphorus in Fubao bay in Dianchi Lake[J]. Environmental Science, 2008, 29(1):114-120. (in Chinese))
- [12] 黄清辉,王子健,王东红,等. 太湖表层沉积物磷的吸附容量及其释放风险评估[J]. 湖泊科学,2004,16(2):97-103. (HUANG Qinghui, WANG Zijian, WANG Donghong, et al. Phosphorus sorption capacity of the surface sediment in the Lake Taihu and risk assessment of phosphorus release[J]. Journal of Lake Science, 2004, 16(2): 97-103. (in Chinese))
- [13] 李江,金相灿,姜霞,等. 太湖不同营养水平湖区沉积物理化性质和磷的垂向变化[J]. 环境科学研究,2007,20(4):64-69. (LI Jiang, JIN Xiangcan, JIANG Xia, et al. Vertical changes of physiochemical characteristics and phosphorus concentrations of sediments from different trophic regions of Taihu Lake[J]. Research of Environmental Sciences, 2007, 20(4): 64-69. (in Chinese))
- [14] RAAPHORST W V, MALSHAERT J F P. Ammonium absorption in superficial north sea sediments[J]. Continental Shelf Research, 1996, 16(11):1415-1435.
- [15] HOU L J, LIU M, JIANG H Y, et al. Ammonium adsorption by tidal flat surface sediments from the Yangtze Estuary[J]. Environmental Geology, 2003, 45(1): 72-78.
- [16] 彭素芬,张玲,张爱茜,等. 部分有机物在长江底泥上的吸附-解吸行为研究[J]. 污染防治技术,2009,22(2):18-19. (PENG Sufen, ZHANG Ling, ZHANG Aiqian, et al. Sorption-desorption behavior of selected organics on Yangtze River sediments[J]. Pollution Control Technology, 2009, 22(2): 18-19. (in Chinese))
- [17] GIACHETTI R E, YOUNG R E. Analysis of the error in the standard approximation used for multiplication of triangular and trapezoidal fuzzy numbers and the development of a new approximation[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1997, 91(1): 1-13.
- [18] CHEN Chentung. Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 114(1):1-9.
- [19] 杰克·甘诺里斯. 水污染的工程风险分析[M]. 彭静,廖文根,李锦秀,等,译. 北京:清华大学出版社,2005.
- [20] 吴时强,范子武,周杰,等. 引江济太措施对望虞河西部污染物滞留和转移风险分析[J]. 中国工程科学,2011,13(1):102-108. (WU Shiqiang, FAN Ziwu, ZHOU Jie, et al. Risk analysis of water diversion from Yangtze River to Taihu Lake on retention and transfer of pollutions in west area of Wangyu River[J]. Engineering Science, 2011, 13(1): 102-108. (in Chinese))