

天津北大港水库渔业生态环境调查与评价

缴建华, 于洁, 白明, 王娟娟, 李彤

(农业部渔业环境及水产品质量监督检验测试中心(天津), 天津 300221)

摘要: 运用熵权模糊综合评价法和浮游生物多样性指数及优势种等方法, 分析评价了天津北大港水库 2013 年 5 月、7 月和 9 月的检测数据。结果表明: 北大港水库 2013 年 5、7 和 9 月的水质都属于 IV 类水, 浮游生物多样性指数较高, 但是优势种中已出现耐污种类。北大港水库的水质评价结果和浮游生物分析结果都表明其已处于富营养化状态。最后针对这一结果提出了改善建议。

关键词: 水环境; 模糊综合评价法; 浮游生物; 多样性指数; 优势种; 北大港水库

中图分类号: TV697.25

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)03-0090-06

Investigation and evaluation of fishery ecological environment in north Dagang reservoir of Tianjin

JIAO Jianhua, YU Jie, BAI Ming, WANG Juanjuan, LI Tong

(Quality of Fishery Environment and Aquatic Products Supervision and Testing Center (Tianjin),
Ministry of Agriculture, Tianjin 300221, China)

Abstract: The paper analyzed the monitored data of north Dagang reservoir in May, July and September of 2013 by use of fuzzy comprehensive evaluation method of entropy weight, diversity index and dominant specie of plankton. The result showed that the water quality of North Dagang reservoir in May, July and September of 2013 belonged to IV degree water, and which of diversity index of plankton was high, but there were some pollution tolerant species in dominant specie of plankton. Both the result of water quality assessment and plankton showed that the water is in the state of eutrophication. At last it proposed some improvement suggestions based on the research result.

Key words: water environment; fuzzy comprehensive evaluation method; plankton; diversity index; dominant species; north Dagang reservoir

北大港水库位于天津市滨海新区, 地处独流减河下游, 东临渤海, 距入海口 6 km。北大港水库是天津市最大的平原型水库, 是大港湿地保护核心区(北大港湿地于 2004 年列入国家重点保护湿地名录), 是引黄济津工程唯一的调蓄水库和天津市重要备用水源地。水库始建于 1974 年, 1978 年初步建成, 占地面积 163.5 km², 水域面积 150 km²。水库核定设计库容 4.04 亿 m³, 相应蓄水位 5.5 m; 兴利库容 3.42 亿 m³, 设计死库容 0.62 亿 m³, 相应蓄水位 3.02 m。北大港水库现有水量 0.62 亿 m³, 目前已经到死库容, 水域面积 53.33 km², 苇地 66.67 km²^[1]。北大港水库自建库以来, 其功能是以蓄水

为主, 鱼、苇、藕、林全面发展, 蓄泄兼顾, 综合利用的大型平原水库。为了解和掌握北大港水库水域生态环境现状, 科学、合理地开发利用水库水资源, 2013 年对北大港水库渔业生态环境进行了调查, 并根据渔业水域生态环境的检测结果, 对该水域进行评价, 了解该水域的水质污染状况, 以期为实现湿地保护和水库渔业可持续发展提供技术支撑。

水质评价是环境科学的重要组成部分, 自 20 世纪 60 年代以来, 国内外研究应用于评价水质的方法多达几十种, 其中应用较多的包括: 单因子评价法、综合指数法、灰色评价法、神经网络评价法、模糊评价法等。这些方法各有优缺点, 单因子评价法是

收稿日期: 2014-10-22; 修回日期: 2014-11-24

基金项目: 天津市财政专项“天津市渔业生态环境监测”

作者简介: 缴建华(1965-), 男, 天津市人, 研究员, 主要从事水产养殖、渔业环境的研究。

现行国家水质标准中确定的悲观评价原则,原理简单,易于操作,但是评价结果往往过于单一,无法解释水环境中复杂的内在关系^[2-3];综合指数法是基于单因子评分法而产生的,数学过程简捷,运算方便,应用广泛,但是过于强调最大污染因素的作用并且指标分级具有非连续性,不能客观地反映出位于水质等级界限附近指标值对水质评价定级的影响作用^[4-5]。灰色评价法引入了灰色系统理论,综合考虑了各因子间的关系,但是区域综合评价结果欠合理,评价精度一般较低^[6]。人工神经网络需要多样本,网络结构因不同人使用而不同,造成评价模型不能通用^[7]。模糊评价法能够较好的解决水质评价中水质分级界限和等级概念的模糊性与不确定性问题^[8],而且综合考虑了地下水评价因子超标值、水质分级标准、评价因子在总体污染中的贡献等,弥补了综合指数法未考虑权重的缺点。因此,该方法近年来被广泛应用于水环境质量评价中^[9-12]。

1 采样与分析方法

1.1 调查范围与时间

调查时间为2013年5、7和9月,调查区域为北大港水库现有水域,调查站位9个,站位位置见表1。

表1 北大港水库检测站位经纬度

站位	经度	纬度
东卡口	117°28'36.4"	38°44'54.2"
8000亩养殖场	117°27'32.2"	38°44'48.2"
刘水军养殖基地	117°24'09.5"	38°45'44.6"
出水口	117°23'39.3"	38°45'57.6"
北港专业合作社	117°23'16.7"	38°45'55.9"
进水口	117°18'32.0"	38°48'13.3"
引黄进水口	117°15'33.3"	38°45'12.5"
刘承森养殖场	117°19'36.7"	38°41'22.3"
窦西通养殖场	117°23'0.32"	38°41'0.40"

1.2 调查项目与检测方法

调查项目包括:高锰酸盐指数、总磷、总氮、氨氮、石油类、浮游植物、浮游动物等环境和生物因子。检测方法依据《渔业生态环境监测规范》(SC/T9102.3-2007)第3部分淡水进行^[13]。

1.3 评价方法

水质理化因子状况采用熵权模糊综合评价法^[14]进行分析评价,浮游生物状况采用多样性指数等进行分析评价。

1.3.1 熵权模糊综合评价法具体分析步骤如下

(1)建立评价因素集和评价集。建立评价因素

集,即参与评价的 m 个水质因子的实际测定浓度组成的模糊子集,设为 $X = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m)$,其中 x_i 为评价参数 i 的实测值。而评价集是 m 个水质因子相应的 n 个水质标准等级的集合,设为 $C = (c_1, c_2, \dots, c_j, \dots, c_n)$,其中 c_j 为评价参数 x_i 的 n 个标准等级。GB 3838-2002《地表水环境质量标准》^[15]中根据地表水水域功能和保护目标,将地表水水质分成了五类,故确定评价集 C 为: $C = \{I, II, III, IV, V\}$ 。各指标分级标准见表2。

表2 水质评价指标及分级标准

分级	NH ₃ -N	高锰酸盐指数	TP	TN	石油类
I	0.15	2	0.01	0.2	0.05
II	0.5	4	0.025	0.5	0.05
III	1	6	0.05	1	0.05
IV	1.5	10	0.1	1.5	0.5
V	2	15	0.2	2	1

(2)建立模糊关系矩阵 R 。由于水质污染程度和水质分级标准都是模糊的,故用隶属度来刻画分级界限比较合理。设 r_{ij} 表示第 i 个评价因子对第 j 评价等级的隶属度,它们的关系即为隶属函数,这样就构成了水质评价因子与水质类别的模糊关系矩阵 R 。

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: m 为评价因子数, $i = 1, 2, \dots, m$; n 为水体级别, $j = 1, 2, \dots, n$ 。

若水环境质量指标以数值小为优,隶属函数采用偏小型分布^[16]。各水质类别的隶属度 r_{ij} 解析式^[17]如下:

第 i 项指标对I级水的隶属度函数为:

$$r_{i1} = \begin{cases} 1 & x_{ik} \leq c_{i1} \\ \frac{c_{i2} - x_{ik}}{c_{i2} - c_{i1}} & c_{i1} < x_{ik} \leq c_{i2} \\ 0 & x_{ik} > c_{i2} \end{cases} \quad (2)$$

第 i 项指标对 j 级水的隶属度函数为:

$$R_{ij} = \begin{cases} 0 & x_{ik} \leq c_{ij-1}, x_{ik} \geq c_{ij+1} \\ \frac{x_{ik} - c_{ij-1}}{c_{ij} - c_{ij-1}} & c_{ij-1} < x_{ik} \leq c_{ij} \\ \frac{c_{ij+1} - x_{ik}}{c_{ij+1} - c_{ij}} & c_{ij} < x_{ik} < c_{ij+1} \end{cases} \quad (3)$$

第 i 项指标对第 n 级水的隶属度函数为:

$$r_{im} = \begin{cases} 0 & x_{ik} \leq c_{in-1} \\ \frac{x_{ik} - c_{in-1}}{c_{in} - c_{in-1}} & c_{in-1} < x_{ik} \leq c_{in} \\ 1 & x_{ik} > c_{in} \end{cases} \quad (4)$$

式中： c_{ij} 为评价因子 x_{ik} 的第 j 类水质标准值； x_{ik} 为评价的因子的实际检测值。

(3) 权重的确定。在综合评价中，各单项指标高低差别很大，对总体污染的作用的大小也是不同的，因此要进行权重计算。权重是衡量评价因子集中某一因子对水质污染程度影响相对大小的量。本文采用熵值赋权分析法，来确定评判过程中的权重分配。熵权的计算方法^[18]如下所示。

设有 m 个评价指标， n 个评价对象，则形成原始数据矩阵 $R' = (r'_{ij})_{m \times n}$ 。

$$R' = \begin{pmatrix} r'_{11} & r'_{21} & \cdots & r'_{1n} \\ r'_{21} & r'_{22} & \cdots & r'_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r'_{m1} & r'_{m2} & \cdots & r'_{mn} \end{pmatrix} \quad (5)$$

(1) 对原始数据矩阵进行标准化得到： $R = (r_{ij})_{m \times n}$

式中： r_{ij} 为第 j 个评价对象在评价指标上的标准值， $r_{ij} \in [0, 1]$ 。其中对小者为优的指标而言，有：

$$r_{ij} = \frac{\max(r'_{ij}) - r'_{ij}}{\max(r'_{ij}) - \min(r'_{ij})} \quad (6)$$

(2) 信息熵。在有 m 个指标， n 个被评价对象的评价问题中，第 i 个指标的熵定义为：

$$H_i = -k \sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

式中： $f_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^n r_{ij}}$ ， $k = \frac{1}{\ln n}$ ，并假定，当 $f_{ij} = 0$ ， $f_{ij} \ln n = 0$ 。

(3) 熵权。定义了第 i 个指标的熵之后，可得到第 i 个指标的熵权定义，即：

$$w_i = \frac{1 - H_i}{m - \sum_{i=1}^m H_i} \quad (8)$$

$$0 \leq w_i \leq 1, \quad \sum_{i=1}^m w_i = 1$$

1.3.2 浮游生物状况分析方法和标准

(1) Shannon - Wiener 指数

$$H' = - \sum_{i=1}^S \left(\frac{n_i}{N} \right) \log_2 \left(\frac{n_i}{N} \right) \quad (9)$$

式中： S 为样品中总的种类数； n_i 为样品中第 i 种生

物的个体数； N 为样品中生物总个体数。

(2) 种类均匀度

$$J' = H / \ln N$$

$$J' = H / \ln N \quad (\text{Pielou}, 1969) \quad (10)$$

式中： H 为多样性指数； N 为所有种类的总个体数。

(3) 种类分布丰富度

$$D = (S - 1) / \ln N \quad (\text{Margalef}, 1958) \quad (11)$$

(4) 优势度

$$Y = (n_i / N) f_i \quad (12)$$

式中： n_i 为样品中第 i 种生物的个体数； N 为样品中生物总个体数； f_i 为样品中第 i 种生物的出现频率。

取优势度大于0.02的种类为优势种^[19]。

2 结果与分析

2.1 水质理化因子检测与评价结果

2.1.1 水质理化因子检测结果 北大港水库5、7、9月的水质检测数据如表3所示。

表3 北大港水库的检测数据

月份	NH ₃ -N	高锰酸盐指数	TP	TN	石油类
5	0.67 ± 0.25	16.38 ± 4.94	0.11 ± 0.18	1.84 ± 0.99	0.05 ± 0.02
7	0.87 ± 0.31	18.88 ± 6.05	0.05 ± 0.02	2.72 ± 1.36	0.03 ± 0.01
9	0.68 ± 0.17	16.36 ± 5.20	0.08 ± 0.02	2.25 ± 1.13	0.03 ± 0.01

2.1.2 水质理化因子评价结果

(1) 建立评价因素集和评价集。根据北大港水库水质调查检测数据和地表水环境质量标准，选取评价水质状况的5个指标，分别是：NH₃-N、高锰酸盐指数、TP、TN、石油类，作为评价因子，组成评价因子集 C ：

$$X = \{ \text{NH}_3\text{-N、高锰酸盐指数、TP、TN、石油类} \}。$$

上述5项检测指标在北大港水库3个月份的检测数据见表3。

(2) 模糊关系矩阵 R 。由各指标的隶属度函数计算得5、7、9月北大港检测数据的隶属矩阵依次为：

$$R_5 = \begin{bmatrix} 0 & 0.66 & 0.34 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.90 & 0.10 \\ 0 & 0 & 0 & 0.32 & 0.68 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_7 = \begin{bmatrix} 0 & 0.26 & 0.74 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0.64 & 0.36 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0.40 & 0.60 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(3)权重分析。根据熵权法公式计算出各评价指标的熵权,结果见表 4。

表 4 各评价指标的熵权

水质指标	NH ₃ -N	高锰酸盐指数	TP	TN	石油类
熵权	0.18	0.18	0.24	0.21	0.19

(4)水质评价类别结果。根据综合隶属度矩阵 $B = W \cdot R$, 进行矩阵复合运算,得到各评价对象的综合隶属度矩阵。按最大隶属度原则,对各评价对象评价,评价结果见表 5。由表 5 可知,北大港水库的 5、7 和 9 月 3 个月份的水质都属于 IV 类水。

表 5 北大港水库的模糊综合评价结果

月份	对各级别的隶属度					所属级别
	I	II	III	IV	V	
5	0.12	0.06	0.28	0.35	0	IV
7	0.05	0.37	0.00	0.39	0	IV
9	0.12	0.16	0.14	0.39	0	IV

2.2 浮游生物检测与评价结果

北大港水库浮游动、植物组成情况如表 6、7 所示。由表 6 和表 7 可知,北大港水库浮游植物密度在 216.11 万 ~ 2884.18 万个/L 之间,生物量在 4.33 ~ 49.95 mg/L 之间。浮游动物密度在 56.41 ~ 174.49 个/L 之间。

5 月共检测到浮游植物 6 门 46 种,其中硅藻门 16 种,甲藻门 1 种,蓝藻门 7 种,绿藻门 17 种,裸藻门 3 种,隐藻门 2 种;共检测到浮游动物 4 类 11 种,其中枝角类 2 种,桡足类 3 种,轮虫 5 种,幼虫类 1 种。浮游植物优势种为颤藻 (*Oscillatoria* sp.)、蓝纤维藻 (*Dactylococcopsis* sp.)、四尾栅藻 (*Scenedesmus quadricanda*) 和小环藻 (*Cyclotella* sp.)。浮游动物优势种为白色大剑水蚤 (*Macrocyclus albidus* (Jurine))、长额象鼻蚤 (*Bosmina longirostris*)、壶状臂尾轮虫 (*Brachionus urceus*)、近邻剑水蚤 (*Thermocyclops vicinus*)、矩形龟甲轮虫 (*Keratella quadrata*) 和无节幼虫。

7 月共检测到浮游植物 7 门 55 种,其中硅藻门 9 种,黄藻门 1 种,甲藻门 1 种,蓝藻门 9 种,绿藻门

22 种,裸藻门 11 种,隐藻门 2 种;共检测到浮游动物 4 类 9 种,其中枝角类 2 种,桡足类 2 种,轮虫 4 种,幼虫类 1 种。浮游植物优势种为颤藻、尖头藻 (*Raphidiopsis* sp.)、蓝纤维藻、平裂藻 (*Merismopedia* sp.) 和色球藻 (*Chroococcus* sp.)。浮游动物优势种为长额象鼻蚤、短尾秀体蚤 (*Diaphanosoma brachyurum* Liévin)、萼花臂尾轮虫 (*Brachionus calyciflorus*)、壶状臂尾轮虫、近邻剑水蚤、晶囊轮虫 (*Asplanchna* sp.) 和无节幼虫。

表 6 北大港水库浮游植物组成情况

组成情况	5 月	7 月	9 月
密度/ 10 ⁴ (个·L ⁻¹)			
硅藻门	85.27	283.70	361.47
甲藻门	1.6	19.42	73.06
蓝藻门	47.21	1777.98	1592.04
绿藻门	61.34	423.97	257.25
裸藻门	8.07	30.92	78.69
隐藻门	12.62	35.21	22.20
黄藻门		36.99	19.42
总密度/10 ⁴ (个·L ⁻¹)	216.11	2884.18	2404.13
生物量/ (mg·L ⁻¹)			
硅藻门	3.08	10.65	37.38
甲藻门	0.06	0.78	3.97
蓝藻门	0.06	1.47	1.06
绿藻门	0.29	1.71	0.57
裸藻门	0.66	16.17	3.81
隐藻门	0.18	0.7	0.44
黄藻门		5.18	2.72
总生物量/(mg·L ⁻¹)	4.33	36.66	49.95

表 7 北大港水库浮游动物组成情况

月份	浮游动物总量	轮虫类	桡足类	幼虫类	枝角类
5	58.26	22.79	17.25	5.00	13.22
7	174.49	53.44	48.74	9.40	62.91
9	56.41	25.97	19.03	4.37	7.04

9 月共检测到浮游植物 7 门 40 种,其中硅藻门 8 种,黄藻门 1 种,甲藻门 5 种,蓝藻门 8 种,绿藻门 12 种,裸藻门 5 种,隐藻门 1 种;共检测到浮游动物 4 类 12 种,其中枝角类 3 种,桡足类 2 种,轮虫 6 种,幼虫类 1 种。浮游植物优势种为尖头藻、胶鞘藻 (*Phormidium* sp.)、蓝纤维藻、拟鱼腥藻、平裂藻、鞘丝藻 (*Lyngbyopsis* sp.)、小色球藻 (*Chroococcus minor* (Kutz.)) 和针杆藻 (*Synedra* sp.)。浮游动物优势种为长额象鼻蚤、短尾秀体蚤、萼花臂尾轮虫、壶状臂尾轮虫、近邻剑水蚤、晶囊轮虫和裂足轮虫

(*Brachionus diversicornis*)。

北大港水库5、7和9月浮游生物多样性指数如图1~图3。

从图1~图3可以看出,就浮游植物而言,在3个月份中,Shannon - Wiener 指数、种类均匀度和丰

富度的最高值都出现在了5月,而最低值都出现在了9月。就浮游动物而言,Shannon - Wiener 指数最高值在5月,最低值在7月;种类均匀度最高值在5月,最低值在9月;种类丰富度最高值在9月,最低值在7月。

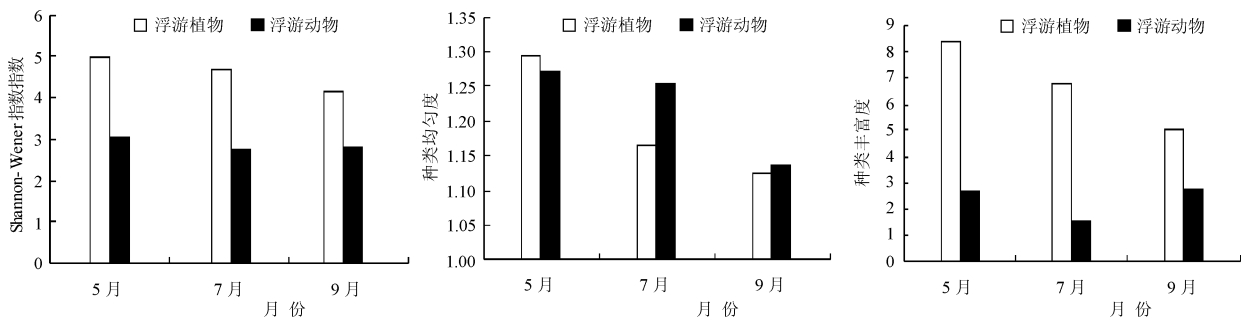


图1 北大港水库浮游生物多样性变化

2.3 北大港水库渔业生态环境评价分析

通过熵权模糊综合评价法判定北大港水库的5、7和9月三个月份的水质都属于IV类水。根据《地表水环境质量标准》(GB3838 - 2002)对地表水的分类的描述,III类水才适宜进行水产养殖,说明北大港水库的水质已经呈现出富营养化状态。

根据藻类各种群在群落中所占比例作为污染程度评价的指标,贫营养型水体的浮游植物以金藻为主,中营养型水体的浮游植物以硅藻为主,富营养型水体以绿藻、蓝藻为主^[20]。北大港水库5月浮游植物为硅藻 - 绿藻 - 蓝藻型,7月为蓝藻 - 绿藻 - 硅藻型,9月为蓝藻 - 硅藻 - 绿藻型。说明北大港水库已处于富营养型状态。同时,浮游植物中常见种类和优势种中出现的裸藻属、颤藻属和纤维藻属均为最耐有机污染的类型之一,说明北大港水库水质受到了一定的污染。

从以上分析可以看出生物评价法与熵权模糊综合分析法分析的结果是基本一致的。近年来生物评价已广泛应用于水环境评价^[21-23]。但生物评价法只能定性描述,难以进行定量分析。并且王晓清等^[24]研究认为生物本身具有一定的适应性和忍耐能力,而且这种忍耐力会随其生活在污水中时间的增加而增加,因此会降低生物评价的灵敏度。因此,在水质评价中生物评价应与理化因子评价相结合,才能得出客观公正的结论。

2.4 北大港水库富营养化因子分析

通过对比表2和表3可以发现,造成北大港水库水质较差的主要因素是高锰酸盐指数和TN,北大港水库5、7和9月高锰酸盐指数分别为16.38、

18.88和16.36 mg/L, TN 分别为1.84、2.72和2.25 mg/L,这两个指标的检测值都超过了V类水的水质标准。从5个评价指标的熵权也可以看出,高锰酸盐指数和TN的熵权值在五个指标中都较小,王铁风等^[18]研究认为熵权值越小对评价提供的信息越多,这与本研究结果是一致的。北大港水库高锰酸盐指数和TN超标的原因可能是由于水库内沿岸水产养殖场的生产活动导致鱼类等的残饵粪便的大量积累超过了水库的自净能力所致。

3 结 语

2013年5、7、9月北大港水库水质理化因子和浮游生物的监测与评价结果表明北大港水库水质长期处于富营养化状态。造成这个结果的原因是库区和水库周围高密度水产养殖规模过大形成的污染,并且水库水源补给不足。长此以往北大港水库将失去湿地和渔业生产的功能。因此,应采取水质改善和保护措施。具体包括:严格控制库区内人工池塘养殖面积,严格控制库区周围养殖废水直接排入库区;调整库区及周围渔业养殖结构,优化渔业养殖模式,实行鱼虾混养、鱼蟹混养等生态养殖模式;在库区及周围推广示范循环水养殖技术、水处理技术,降低养殖污染;加强监管,严格控制生活垃圾和工业垃圾等进入库区。

参考文献:

- [1] 王居印,何宗保,李新丽,等. 关于北大港水库生态保护与渔业发展的调研报告[J]. 天津水产,2013(2):1-4.
- [2] 兰文辉,安海燕. 环境水质评价方法的分析与探讨[J]. 干旱环境监测,2002,16(3):167-169.

- [3] 徐祖信. 我国河流单因子水质标识指数评价方法研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(3): 321 - 325.
- [4] 李录娟, 邹胜章. 综合指数法和模糊综合法在地下水质量评价中的对比——以遵义市为例[J]. 中国岩溶, 2014, 33(1): 22 - 30.
- [5] 程继雄, 程胜高, 张炜. 地下水质量评价常用方法的对比分析[J]. 安全与环境工程, 2008, 15(2): 23 - 25.
- [6] 齐济, 李岩, 李德峰. 基于改进 AHP 法定权的模糊优选模型在地下水水质评价中的应用[J]. 华北水利水电学院学报, 2002, 23(2): 4 - 7.
- [7] 陈守煜, 徐冬梅, 邱林. 地下水水质评价可变模糊评价法[J]. 中国农村水利水电, 2011(3): 1 - 5.
- [8] 寇文杰. 修正的模糊综合评判法在地下水水质评价中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(2): 71 - 75.
- [9] 安达, 姜永海, 杨昱, 等. 海明距离模糊法在垃圾填埋场地下水质量评价中的应用[J]. 环境工程技术学报, 2013, 3(2): 119 - 123.
- [10] 王橛橛, 吴勇, 古广华. 四川省德阳市地下水水质模糊数学综合评价[J]. 地质灾害与环境, 2011, 22(1): 51 - 55 + 62.
- [11] 杨小芳, 王任超, 张蔚. 基于模糊数学的岩溶水质评价[J]. 科技信息, 2009(20): 83 - 84.
- [12] 李春萍, 李国学, 罗一鸣, 等. 北京市 6 座垃圾填埋场地下水环境质量的模糊评价[J]. 环境科学, 2008, 29(10): 2729 - 2735.
- [13] 中华人民共和国农业部. SC/T9102. 3 - 2007 渔业生态环境监测规范[S]. 中国农业出版社, 2007.
- [14] Wu Huimin, Zhang Wei, Liang Chuanhui, et al. Application of fuzzy comprehensive evaluation method based on entropy weight to evaluate pond water quality[J]. Agricultural Science & Technology, 2012, 13(3): 664 - 668.
- [15] 国家环境保护总局. GB 3838 - 2002 地表水环境质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [16] 潘妍妍, 赵存. 模糊评价法在潞安矿区水质评价中的应用[J]. 煤炭技术, 2010, 29(5): 10 - 12.
- [17] 王金保, 侯得印. 水质模糊综合评价模型的建立与应用[J]. 中国给水排水, 2006, 22(20): 101 - 104.
- [18] 王铁凤, 潘孝辉. 熵权模糊数学方法在水质评价中的应用[J]. 山西建筑, 2010, 36(14): 359 - 360.
- [19] 李晓钰, 于洪贤, 马成学. 松花江哈尔滨段浮游植物群落典范对应分析及多样性分析[J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(10): 103 - 107.
- [20] 张晓举, 王丕波, 冯春辉, 等. 辽河口浮游植物的生态学研究[J]. 海洋环境科学, 2013, 32(5): 679 - 682.
- [21] 孙志强, 施心路, 徐琳琳, 等. 景观湿地夏季原生动植物群落结构与水质关系[J]. 水生生物学报, 2013, 37(2): 290 - 299.
- [22] 魏鹏, 林秋奇, 胡韧, 等. 高州水库水质与浮游生物动态分析[J]. 应用与环境生物学报, 2002, 8(2): 165 - 170.
- [23] 代龚圆, 李杰, 李林, 等. 滇池北部湖区浮游植物时空格局及相关环境因子[J]. 水生生物学报, 2012, 36(5): 946 - 956.
- [24] 王晓清, 曾亚英, 吴含含, 等. 湘江干流浮游生物群落结构及水质状况分析[J]. 水生生物学报, 2013, 37(3): 488 - 494.

(上接第 89 页)

- [2] 姜树海, 范子武, 吴时强. 洪灾风险评估和防洪安全决策[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [3] 解家毕, 孙东亚. 事件树法原理及其在堤坝风险分析中的应用[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2006, 4(2): 133 - 137.
- [4] 张清明, 徐帅, 周杨. 堤防工程安全评价单元堤段划分方法研究[J]. 人民黄河, 2012, 34(1): 16 - 18.
- [5] 夏仲平, 赵坤云, 张文武. 青海玉树震损水利工程查勘与应急处置[J]. 人民长江, 2010, 41(14): 6 - 8 + 19.
- [6] 江越进. 水下模袋混凝土护岸在堤防应急抢险工程中的应用[J]. 甘肃水利水电技术, 2005, 41(3): 269 - 270 + 308.
- [7] 张学志, 田玉华. 土工格栅石笼在洮儿河堤防应急度汛上的应用[J]. 吉林水利, 2006(11): 52 - 53.
- [8] 邢万波, 徐卫亚, 王凯, 等. 外秦淮河堤防水文失事风险分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34(3): 262 - 266.
- [9] 曲红玲. 河道溃堤与溃堤波的一、二维耦合计算数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2007(4): 49 - 54.
- [10] 王腊春, 江南, 周寅康, 等. 太湖流域洪涝灾害评估模型[J]. 测绘科学, 2003, 28(2): 35 - 38.
- [11] 史香阁, 郑文新, 王学武. 堤防漫顶和决口的传统抢险技术[J]. 河北水利水电技术, 1998(4): 26 - 28.