

# 淡水湖泊沉积物污染评价方法比较

——以北大港水库为例

祁艳丽<sup>1</sup>, 唐永杰<sup>2</sup>, 蔡树伯<sup>2</sup>, 孙红文<sup>1</sup>, 刘春光<sup>1</sup>

(1. 南开大学 环境污染过程与基准教育部重点实验室, 天津市城市生态环境修复与污染防治重点实验室, 天津 300350; 2. 天津市北大港水库管理处, 天津 300270)

**摘要:** 为了比较沉积物污染的3种典型评价方法,对北大港水库内的11个采样点进行表层沉积物采样,并测定了样品的全盐量、有机质、全磷和全氮指标。根据测定得出的数据分别利用单因子指数法、内梅罗综合指数法和模糊数学综合评价法对沉积物污染状况进行评价,结果表明:水库中心的S1、S2和S3点为中度或重度污染,其余位于库周的采样点为未污染或轻度污染,总体上库心的沉积物污染比库周严重。结合北大港水库实例,比较3种评价方法的评价结果,得出结论:单因子指数法计算简便,但评价结果偏高;内梅罗综合指数法考虑了沉积物污染评价的综合性,但忽略了评价指标的权重影响;模糊数学综合评价法利用熵值赋权的方法确定指标权重,客观性与综合性较强,评价结果更接近实际情况。

**关键词:** 淡水湖泊; 沉积物; 污染评价; 单因子指数法; 内梅罗综合指数法; 模糊数学综合评价法  
中图分类号: X825 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2016)06-0026-05

## Comparison of evaluation methods of the freshwater lake sediment pollution:

A case study of Beidagang reservoir

QI Yanli<sup>1</sup>, TANG Yongjie<sup>2</sup>, CAI Shubo<sup>2</sup>, SUN Hongwen<sup>1</sup>, LIU Chunguang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria (Ministry of Education), Tianjin Key Laboratory of Environmental Remediation and Pollution Control, Nankai University, Tianjin 300350, China; 2. Administration of Beidagang Reservoir of Tianjin, Tianjin 300270, China)

**Abstract:** In order to compare the three typical methods of evaluating the sediment pollution, samples of top sediment were collected from eleven sites of Beidagang Reservoir, and indicators of total salt content, organic matter content and the concentrations of total phosphorus and total nitrogen were monitored. Three typical methods including single factor index evaluation method, Nemerow comprehensive index evaluation method and fuzzy mathematic comprehensive evaluation method were used to evaluate the status of pollution respectively. The results indicated that the S1, S2 and S3 sites located in the center of the reservoir were moderate or severe polluted and the rest of the sites on the edge of the reservoir were non-polluted or lightly polluted. The pollution of sediment in the center was more serious than that on the edge of the reservoir. Taking the Beidagang reservoir as an example, the comparison of the three methods indicates that the single factor index evaluation method was convenient to evaluate but the results are relatively high; the Nemerow comprehensive index evaluation method was a comprehensive method, but it ignored the impacts of the weight of the evaluation indices; the fuzzy mathematic comprehensive evaluation method was an objective and comprehensive method, it calculated the weighting of the index based on the entropy weighting method, and the result was closer to the actual status.

**Key words:** freshwater lake; sediment; pollution evaluation; single factor index evaluation; Nemerow comprehensive index evaluation; fuzzy mathematic comprehensive evaluation

收稿日期:2016-07-12; 修回日期:2016-09-02

基金项目:天津市水务局科技项目(KY2014-08); 国家科技支撑项目(2012BAC07B02)

作者简介:祁艳丽(1991-),女,山西临汾人,硕士研究生,主要从事生态风险评价方面研究。

通讯作者:刘春光(1974-),男,天津蓟县人,博士,副教授,主要从事水污染防治和生态修复方面的研究。

沉积物是水环境的重要组成部分,既是水中污染物的“汇”,又是水体二次污染的“源”<sup>[1]</sup>。沉积物中污染物的释放对水质有较大影响,因此,评价沉积物的污染状况对水质保护具有重要的意义<sup>[2]</sup>。根据评价需要以及所能获取的数据,选择适当的评价方法,对于科学开展沉积物的污染评价工作至关重要。目前,常用的沉积物污染评价方法主要有单因子指数法<sup>[3]</sup>、内梅罗综合指数法<sup>[4]</sup>和模糊数学综合评价法<sup>[5]</sup>。这3种方法具有不同的特点和适用条件,然而在实际应用中如何选择,目前还缺乏科学依据。因此有必要结合实际案例,对这3种方法进行比较,从而为淡水沉积物的污染评价提供指导。

天津北大港水库作为天津市重要水源地,是华北地区最大的人工平原水库,同时还是“引黄济津”及“南水北调”的调节水库<sup>[6]</sup>。该水库位于天津东南部滨海地区,地貌上属于土壤盐渍化严重的海积冲击平原,由于沉积物含盐量高,导致水体咸化严重。此外,由于外源氮、磷输入和沉积物中营养盐的释放,该水库已经呈中度富营养化状态<sup>[7]</sup>。针对北大港水库的水质特点,在该水库选取11个采样点,以全盐量、有机质、全氮、全磷为评价指标,利用单因子指数法、综合指数法和模糊数学综合评价法对沉积物进行污染评价,并对3种方法的优缺点及适用情况进行比较分析。希望通过归纳总结3种评价方法的特点,为沉积物污染评价方法的选择提供依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区域概况

北大港水库位于天津市滨海新区南部大港境内,地处海河流域的大清河、南运河、子牙河水系的独流减河下游左岸(117°15′-117°30′E,38°40′-38°50′N)。水库占地面积164 km<sup>2</sup>,设计库容5.00×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,围堤总长54.51 km。北大港水库是天津市北大港湿地的核心区,不仅关系到滨海新区乃至整个天津市区的供水安全,而且还发挥着不可替代的生态功能。

### 1.2 样品采集及测定

根据水文特征,在北大港水库设置11个沉积物采样点。其中,库周设置6个采样点:排咸闸、沙井

子闸、刘岗庄闸、马圈闸、姚塘子、十号口门闸,依次记为B1-B6。库中设置5个采样点,依次记为S1-S5,各点的分布见图1。每个采样点取表层(0~20 cm)沉积物,现场剔除杂质后,装入塑料密实袋,运回实验室备测。沉积物的测定指标分别为全盐量、有机质、全磷和全氮。测定方法如下<sup>[8]</sup>:全盐量采用溶液浸提-残渣烘干法;有机质采用重铬酸钾氧化-外加加热法;全磷采用硫酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法;全氮采用硫酸-高氯酸消煮-半微量开氏蒸馏法。

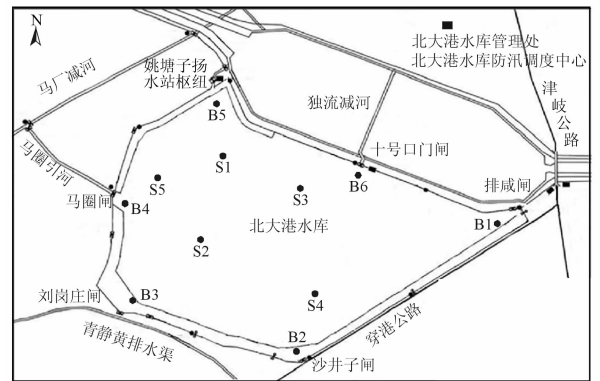


图1 北大港水库沉积物采样点分布图

### 1.3 评价方法

1.3.1 单因子指数法 单因子指数法是将评价指标的实测值与其对应的标准值进行比较<sup>[9]</sup>,计算公式如下:

$$P_i = \frac{C_i}{k_i} \quad (1)$$

式中: $P_i$ 为指标*i*的单因子指数; $C_i$ 为指标*i*的实测值; $k_i$ 为指标*i*的标准值。

本研究所使用的4个指标中,全盐量的标准值参考祝寿泉等<sup>[10]</sup>的研究,有机质、全磷、全氮的标准值参考加拿大安大略省环境和能源部发布的沉积物评价指南<sup>[11]</sup>,各沉积物评价指标的标准值见表1。

表1 沉积物评价指标的标准值

全盐量/ %	有机质/ %	全磷/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )
0.30	1.72	0.60	0.55

将单因子指数 $P_i$ 值分成5个等级,具体的分级标准见表2。

表2 单因子指数的分级标准

单因子指数 $P_i$	$P_i \leq 0.70$	$0.70 < P_i \leq 1.00$	$1.00 < P_i \leq 1.50$	$1.50 < P_i \leq 2.00$	$P_i > 2.00$
污染等级	I (良好)	II (未污染)	III (轻污染)	IV (中污染)	V (重污染)

1.3.2 内梅罗综合指数法 内梅罗综合指数表示的是沉积物的综合污染程度<sup>[12]</sup>。计算公式如下:

$$P = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i\right)^2 + (\max(P_i))^2}{2}} \quad (2)$$

式中:  $P_i$  为指标  $i$  的单因子指数;  $P$  为内梅罗综合指数;  $n$  为指标  $i$  的个数。

1.3.3 模糊数学综合评价法 模糊数学综合评价法是利用数学方法对一些具有模糊性、不确定性的对象进行综合评价的方法<sup>[13]</sup>, 具体的分析步骤如下:

(1) 建立评价的因素集和评价集。评价因素集  $U$  包含参与沉积物污染评价的所有指标, 本研究中  $U = (\text{全盐量}, \text{有机质}, \text{全磷}, \text{全氮})$ 。评价集  $V$  为各个评价指标的等级类别, 本研究中评价集  $V = (\text{I}, \text{II}, \text{III}, \text{IV}, \text{V})$ , 各沉积物评价指标的分级标准见表3。

表3 沉积物评价指标的分级标准

指标	评价等级				
	I (良好)	II (未污染)	III (轻污染)	IV (中污染)	V (重污染)
全盐量/%	0.05	0.10	0.20	0.40	0.60
有机质/%	0.50	1.00	1.75	2.75	3.75
全磷/(g · kg <sup>-1</sup> )	0.40	0.55	0.60	0.70	0.80
全氮/(g · kg <sup>-1</sup> )	0.10	0.25	0.55	0.75	1.00

(2) 建立模糊关系矩阵。设  $r_{ij}$  表示第  $i$  评价指标对第  $j$  评价等级的隶属度, 由此构成评价指标与沉积物污染等级类别的模糊关系矩阵  $R$ , 即:

$$R(r_{ij}) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $n$  为评价指标数,  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $m$  为评价等级数,  $j = 1, 2, \dots, m$ 。

求解  $r_{ij}$  采用三角形隶属度函数, 具体的函数计算公式参考 Yang 等<sup>[14]</sup> 的研究。限于篇幅, 仅列本文实例中采样点 B1 的模糊关系矩阵  $R_{B1}$ :

$$R_{B1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.68 & 0.32 \\ 0 & 1.00 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.90 & 0.10 & 0 & 0 \\ 0 & 0.13 & 0.87 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(3) 权重确定。本文采用熵值赋权分析法来确定评价过程中指标的权重分配。熵权的计算方法参考邹志红等<sup>[15]</sup> 的研究, 通过计算得到全盐量, 有机质, 全磷, 全氮的权重并组成权重集:  $W = (0.260,$

$0.252, 0.194, 0.294)$ 。

(4) 根据  $B = W \cdot R$  求得评价对象的隶属度  $B$ , 由隶属度的值判定最终的污染评价结果。

## 2 结果与讨论

### 2.1 沉积物的污染评价结果

2.1.1 单因子指数法评价结果 单因子指数法的评价等级取各个指标中的最高等级作为该点的最终评价等级, 其结果列于表4。由表4可知各采样点沉积物的污染等级为: B5 和 S5 为II级, B2、B4、B6 和 S4 为III级, B1 和 B3 为IV级, S1、S2 和 S3 为V级。其中, 全盐量达到污染程度的点有: S1 和 S3 为轻度污染, S2 为中度污染, B1 为重度污染, 其余点均为未污染或良好状态。有机质污染中 S1、S2 和 S3 达到中度和重度污染, 其余点除 B3、B4 和 S4 为轻度污染外均为未污染或良好水平。全磷整体为轻度和中度污染。而全氮污染严重的有 S1、S2 和 S3, 次之是 B2、B3 和 B4, 其余点均为未污染或良好水平。

表4 单因子指数法评价结果

采样点	单因子指数值 及其等级	评价指标				评价等级
		全盐量	有机质	全磷	全氮	
B1	指数值	1.55	0.58	0.93	0.93	IV
	等级	IV	I	II	II	
B2	指数值	0.51	0.85	1.10	1.05	III
	等级	I	II	III	III	
B3	指数值	0.64	1.28	1.08	1.69	IV
	等级	I	III	III	IV	
B4	指数值	0.82	1.06	0.92	1.31	III
	等级	II	III	II	III	
B5	指数值	0.66	0.96	0.90	1.00	II
	等级	I	II	II	II	
B6	指数值	0.59	0.74	1.12	0.89	III
	等级	I	II	III	II	
S1	指数值	1.02	2.17	1.15	1.75	V
	等级	III	V	III	IV	
S2	指数值	2.73	2.51	0.95	2.27	V
	等级	V	V	II	V	
S3	指数值	1.36	1.78	1.23	2.04	V
	等级	III	IV	III	V	
S4	指数值	0.84	1.06	1.03	1.25	III
	等级	II	III	III	III	
S5	指数值	0.79	0.55	1.00	0.93	II
	等级	II	I	II	II	

2.1.2 内梅罗综合指数法评价结果 内梅罗综合

指数法的评价等级按照单因子指数法的分级标准(见表 2)划分,并将评价结果列于表 5。由表 5 可知:B2、B5、B6 和 S5 为 II 级,B1、B3、B4 和 S4 为 III 级,S1 和 S3 为 IV 级,S2 为 V 级。可见,北大港水库

的 11 个沉积物采样点中的 8 个点的盐分、营养盐综合污染程度为 II 级或 III 级,属于未污染和轻度污染,且这些点均位于库周或靠近库周,其余 3 个位于库心的采样点为 IV 级或 V 级,为中度污染和重度污染。

表 5 内梅罗综合指数法评价结果

采样点	B1	B2	B3	B4	B5	B6	S1	S2	S3	S4	S5
内梅罗综合指数 $P$	1.30	1.00	1.46	1.18	0.94	0.99	1.87	2.32	1.72	1.16	0.91
评价等级	III	II	III	III	II	II	IV	V	IV	III	II

2.1.3 模糊数学综合评价法结果 运用模糊数学综合评价法求出各采样点在 5 个评价等级下的隶属度,选择隶属度最大的等级作为该点的评价等级,将结果列于表 6。可以看出,B1 点为 II 级,库周及靠近库周的 B2、B3、B4、B5、B6、S4 和 S5 为 III 级,库心 S1、S2 和 S3 为 V 级。由此得知,北大港水库的沉积物除了 B1 未污染,其他的采样点均已经被污染,多数属于轻度污染,只有库心 S1、S2、S3 点达到了重度污染。

表 6 模糊数学综合评价法结果

采样点	对各级别的隶属度					所属级别
	I	II	III	IV	V	
B1	0.00	0.46	0.28	0.18	0.08	II
B2	0.00	0.22	0.73	0.05	0.00	III
B3	0.00	0.02	0.57	0.22	0.19	III
B4	0.00	0.19	0.53	0.28	0.00	III
B5	0.01	0.22	0.77	0.00	0.00	III
B6	0.00	0.28	0.68	0.04	0.00	III
S1	0.00	0.00	0.24	0.28	0.48	V
S2	0.00	0.16	0.04	0.00	0.80	V
S3	0.23	0.03	0.02	0.35	0.37	V
S4	0.00	0.06	0.69	0.25	0.00	III
S5	0.02	0.36	0.57	0.05	0.00	III

## 2.2 三种污染评价方法的比较

综合 3 种方法的评价结果发现,部分沉积物采样点的评价结果存在一定差异。由表 7 可以看出:总体上,对于同一采样点,单因子指数法的评价等级均高于或等于其余两种方法。内梅罗综合指数法和模糊数学综合评价法的评价结果中 B3、B4、S2 和 S4 评价等级一致,除 B1 外其余几点均为模糊数学综合评价法较内梅罗综合指数法高一个等级。造成以上现象的原因是单因子指数法以指标的最高等级决定评价对象的等级,而内梅罗综合指数法兼顾了单因子指数

的平均值和最高值,平均值削弱了最高指标在评价过程中的决定性作用,但最高值仍在一定程度上突出了最高等级指标的作用。然而,模糊数学综合评价法通过客观的熵值赋权对各个指标进行权重分配<sup>[16]</sup>,综合考虑了各个评价指标在污染评价中的贡献。以 B6 为例,单因子指数法以全磷的等级来决定其结果为 III 级,高于内梅罗综合指数法的 II 级,等于模糊数学综合评价法的 III 级。但内梅罗综合指数法的结果为  $P = 0.99$ ,该数值在 0.70 到 1.00 之间更靠近 1.00,表明 B6 点属于 III 级( $1.00 < P \leq 1.50$ )的可能性更大<sup>[17]</sup>,所以模糊数学综合评价法的结果更合理。

通过比较上述 3 种方法在北大港水库沉积物污染评价中的应用,并结合其他文献[18-22],归纳总结出 3 种污染评价方法的比较结果,并将结果列于表 8。由表可知,3 种方法均具有各自的特点,单因子指数法计算简单,可显示不同指标下评价对象的污染程度,确定被污染的对象,并能够找出评价对象的主要污染物。例如,从单因子指数法评价结果(表 4)中的全盐量来看,各个评价对象的盐分污染等级排序为  $S2 > B1 > S1 = S3 > B4 = S4 = S5 > B2 = B3 = B5 = B6$ ,可见在控制盐分污染时应将 S2 和 B1 作为重点对象,同时还可得到 B1 主要污染物为盐分,B3 主要污染物为全氮等信息,然而其不足之处在于评价结果的等级偏高,不够全面。内梅罗综合指数法与模糊数学综合评价法均可对评价对象做出综合评价,但前者更简单快速。从实例研究可看出,两种方法均显示 S1、S2 和 S3 综合污染最严重,因此对水库进行污染治理时,库心应作为重点区域。从模糊数学综合评价法的客观赋权中能够得到评价指标的权重,从而可以判断指标在评价过程中的重要性,实例中为:全氮 > 全盐量 > 有机质 > 全磷。表明整个水库氮污染对沉积物质量评价的影响最大。该方法在考虑指标权重的基础上,以隶属度函数为依据,从概率分布的角度判定出最终的评价结果,客观性强。

表7 三种评价方法的结果对比

采样点	B1	B2	B3	B4	B5	B6	S1	S2	S3	S4	S5
单因子指数法	Ⅳ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅲ	Ⅱ
内梅罗综合指数法	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ
模糊数学综合评价法	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅲ	Ⅲ

表8 三种沉积物污染评价方法的比较

方法名称	所需数据	优点	缺点	适用条件
单因子指数法	实测值、标准值	可找出评价对象的主要污染物,可对比某一污染指标下评价对象的污染程度,计算简便	突出了单因子在评价中的决定性作用	寻求评价对象的重要污染物,评价对象较少、评价指标少
内梅罗综合指数法	实测值、标准值,单因子指数平均值和最大值	一定程度上对评价对象做出综合评价	忽略了评价指标的权重影响	评价对象和评价指标较多,评价指标对综合评价的贡献一致,权重一样
模糊数学综合评价法	实测值、标准值、隶属度函数	通过客观赋权的方法,综合考虑了评价指标的权重	计算过程复杂	评价对象和评价指标较多,评价指标对综合评价的贡献有差异,权重分大小

### 3 结论

(1)利用3种方法对北大港水库沉积物进行污染评价,结果表明:S2和B1点全盐量污染严重,S1、S2和S3点有机质污染程度高,全磷整体上为轻度 and 中度污染,全氮污染严重的有S1、S2和S3点;11个采样点的综合污染状况为库心的S1、S2和S3点为中度或重度污染,库周的B1、B2、B3、B4、B5、B6、S4和S5点为未污染或轻度污染,整体上水库库心的沉积物污染程度大于库周。

(2)对3种沉积物污染评价方法进行比较后发现:单因子指数法计算简便,有利于寻找污染点位并确定主要污染物,该方法强调单因子的决定性评价作用使评价结果偏高,不能全面反映采样点的污染程度;内梅罗综合指数法考虑了沉积物污染评价的综合性,缺陷在于忽视了评价指标的权重影响,评价结果与实际情况有偏差;模糊数学综合评价法利用熵值赋权的方法确定指标权重,客观性与综合性较强,但计算过程较繁琐。总之,3种方法都有各自的优势和不足,并没有最佳的评价方法,只能在特定的研究区域内结合实测数据的特殊性来选择最优的方法。

#### 参考文献:

[1] 吴文星,李开明,汪光,等.沉积物重金属污染评价方法比较:以潭江为例[J].环境科学与技术,2012,35

(9):143-149.

- [2] 邱海源.天然水体沉积物中有机污染物的迁移[J].科学技术与工程,2005,5(4):215-221.
- [3] 齐书蕾,祁士华,傅杨荣,等.小海高位池沉积物中重金属分布与污染评价[J].环境科学与技术,2010,33(8):84-87.
- [4] 王佩,卢少勇,王殿武,等.太湖湖滨带底泥氮,磷,有机质分布与污染评价[J].中国环境科学,2012,32(4):703-709.
- [5] Cui Dongxia,Zhao Qiguo,Xu Wei. Evaluation on ecological risks of soil heavy metals in a certain area of Sichuan by improved fuzzy mathematics method[J]. Journal of Geoscience and Environment Protection,2014,2(2):28-35.
- [6] 胡鹏,刘春光,孙红文,等.北大港水库底泥盐分释放规律研究[J].环境科学与技术,2013,36(6):69-73.
- [7] 常素云,程群,任必穷,等.天津滨海新区水库水质状况分析[J].南水北调与水利科技,2013,11(6):54-57.
- [8] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [9] 罗昭林,朱长波,郭永坚,等.流沙湾表层沉积物中碳,氮,磷的分布特征和污染评价[J].南方水产科学,2014,10(3):1-8.
- [10] 祝寿泉,王遵亲.盐渍土分类原则及其分类系统[J].土壤,1989(2):106-109.
- [11] 李任伟.沉积物污染和环境沉积学[J].地球科学进展,1998,13(4):398-402.

(下转第38页)

- (13):120-127.
- [2] 李斌斌,李占斌,李鹏. 基于GIS与RS的大理河流域植被格局分形维数时空变化特征[J]. 农业工程学报, 2015,31(12):173-178.
- [3] Bartolo S G D, Veltri M, Primavera L. Estimated generalized dimensions of river networks[J]. Journal of Hydrology, 2006,322(1-4):181-191.
- [4] Schuller D J, Rao A R, Jeong D. Fractal characteristics of dense stream networks[J]. Journal of hydrology, 2001,243(1-2):1-16.
- [5] 马宗伟,许有鹏,李嘉峻. 河流形态的分维及与洪水关系的探讨——以长江中下游为例[J]. 水科学进展, 2005,16(4):530-534.
- [6] Dombrúdi E, Timár G, Bada G, et al. Fractal dimension estimations of drainage network in the Carpathian - Pannonian system[J]. Global and Planetary Change, 2007,58(1-4):197-213.
- [7] 何隆华,赵宏. 水系的分形维数及其含义[J]. 地理科学, 1996,16(2):124-128.
- [8] Pelletier J D, Turcotte D L. Shapes of river networks and leaves: Are they statistically similar[J]. Biological Sciences(Series B), 2000,355(1394):307-311.
- [9] 朱建刚,余新晓,李晶,等. 图像分析计算水系分形维数的改进方法与应用[J]. 地球信息科学学报, 2009,11(5):610-616.
- [10] Jain A K. Data clustering: 50 years beyond K-means[J]. Pattern Recognition Letters, 2008,31(8):651-666.
- [11] Parker J R. Algorithms for image processing and computer vision[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 1996.
- [12] 袁雯,杨凯,吴建平. 城市化进程中平原河网地区河流结构特征及其分类方法探讨[J]. 地理科学, 2007,27(3):401-407.
- [13] Sarkar N, Chaudhuri B B. An efficient differential box-counting approach to compute fractal dimension of image[J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 1994,24(1):115-120.
- [14] 谢先红,崔远来,蔡学良. 灌区塘堰分布分形描述[J]. 水科学进展, 2007,18(6):858-863.
- [15] 汪富泉,曹叔尤,丁晶. 河流网络的分形与自组织及其物理机制[J]. 水科学进展, 2002,13(3):368-376.
- [16] 马宗伟,许有鹏,钟善锦. 水系分形特征对流域径流特性的影响——以赣江中上游流域为例[J]. 长江流域资源与环境, 2009,18(2):163-169.

(上接第30页)

- [12] Kankili G B, Tüzün İ, Kadiogğlu Y K. Assessment of heavy metal levels in sediment samples of Kapulukaya Dam Lake (Kirikkale) and lower catchment area[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013,185(8):6739-6750.
- [13] Yang Y, Zhou Z, Bai Y, et al. Risk assessment of heavy metal pollution in sediments of the Fenghe River by the fuzzy synthetic evaluation model and multivariate statistical methods[J]. Pedosphere, 2016,26(3):326-334.
- [14] Yang L Y, Li A, Bai H. Using fuzzy theory and principal component analysis for water shortage risk assessment in Beijing, China[J]. Energy Procedia, 2010,11:2085-2092.
- [15] 邹志红,孙靖南,任广平. 模糊评价因子的熵权法赋权及其在水质评价中的应用[J]. 环境科学学报, 2005,25(4):552-556.
- [16] 范拴喜,甘卓亭,李美娟,等. 土壤重金属污染评价方法进展[J]. 中国农学通报, 2010,26(17):310-315.
- [17] Li Weixin, Zhang Xuxiang, Wu Bing, et al. A comparative analysis of environmental quality assessment methods for heavy metal-contaminated soils[J]. Pedosphere, 2008,18(3):344-352.
- [18] 褚瑶瑶,张艳,崔正国,等. 威海近海人工鱼礁区沉积环境要素的时空分布与沉积物质量评价[J]. 中国农学通报, 2016,32(2):99-105.
- [19] 唐博,许冬,金路,等. 海南岛近海表层沉积物分散元素的富集特征与污染评价[J]. 海洋学研究, 2013,31(3):89-96.
- [20] 甘华阳,张顺之,梁开,等. 北部湾北部滨海湿地水体和表层沉积物中营养元素分布与污染评价[J]. 湿地科学, 2012,10(3):285-298.
- [21] Shen Guoqing, Lu Yitong, Wang Meinong, et al. Status and fuzzy comprehensive assessment of combined heavy metal and organo-chlorine pesticide pollution in the Taihu Lake region of China[J]. Journal of Environmental Management, 2005,76(4):355-362.
- [22] Adebowale K O, Agunbiade F O, Olu-owolabi B I. Fuzzy comprehensive assessment of metal contamination of water and sediments in Ondo Estuary, Nigeria[J]. Chemistry and Ecology, 2008,24(4):269-283.