

乔俊,岳芳宁,罗水明,等.应用层次分析法综合评价河流沉积物污染状况[J].环境科学研究,2012,25(7):840-844.

QIAO Jun, YUE Fangning, LUO Shuiming, et al. Application of analytic hierarchy process on comprehensive assessment of sediment pollution in a river[J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(7): 840-844.

应用层次分析法综合评价河流沉积物污染状况

乔俊^{1,2}, 岳芳宁^{1,3}, 罗水明^{1,3}, 张承东^{1,3*}

1. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300071

2. 山西省生态环境研究中心, 山西 太原 030002

3. 天津市城市生态环境修复与污染防治重点实验室, 天津 300071

摘要:应用层次分析法,以天津滨海新区新河干渠沉积物为例,以各类污染物在沉积物中的生态效应区间值为标准确定各指标的权重,并结合污染物的实际含量对沉积物的污染状况进行定性、定量评价。计算结果表明,权重最大的3个指标分别为DDD(权重为0.359)、DDE(权重为0.168)和金属汞(权重为0.105);得分最高的3个指标为总氮(0.034)、镍(0.030)和DDD(0.012);三大类指标得分依次为营养元素(0.040)、重金属(0.043)和持久性有机物(0.012);新河干渠沉积物污染综合评价得分为0.095。评价结果表明,新河干渠沉积物总体上产生不利生态效应的可能性较低,产生不利效应的主要污染物为总氮、镍和DDD。与单项指标评价相比,层次分析法综合评价体系突出了营养元素类污染物在沉积物环境风险中的贡献。

关键词:层次分析法;沉积物;综合评价

中图分类号: X522

文献标志码: A

文章编号: 1001-6929(2012)07-0840-05

Application of Analytic Hierarchy Process on Comprehensive Assessment of Sediment Pollution in a River

QIAO Jun^{1,2}, YUE Fang-ning^{1,3}, LUO Shui-ming^{1,3}, ZHANG Cheng-dong^{1,3}

1. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China

2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Shanxi Province, Taiyuan 030002, China

3. Tianjin Key Laboratory of Environmental Remediation and Pollution Control, Tianjin 300071, China

Abstract: Analytic Hierarchy Process (AHP) was used in this study to assess the sediment pollution in Xinheganqu River of Binhai New Development Area, Tianjin, China. The weights of indicators were determined by using effect range levels as the standard. Sediment quality could be assessed qualitatively and quantitatively using the weights according to concentrations of various contaminants in the sediment. The calculation results showed that the indicators with the top three weight values were Dichlorodiphenyldichloroethane (DDD, weight value 0.359), Dichlorodiphenyldichloroethylene (DDE, 0.168) and mercury (0.105). The indicators with the top three highest scores were total nitrogen (0.034), nickel (0.030) and DDD (0.012). The scores for the three categories of contaminants were 0.040 for nutrition elements, 0.043 for heavy metals and 0.012 for persistent organic pollutants. The comprehensive assessment score of sediment pollution in Xinheganqu River was 0.095. The results showed that the ecological risk posed by sediments of Xinheganqu River was relatively low, and the primary pollutants were total nitrogen, nickel and DDD. In comparison with a single index assessment, the contribution of nutrient pollutants to the overall environmental risk of sediment was more pronounced when using AHP method.

Key words: analytic hierarchy process; sediment; comprehensive assessment

收稿日期: 2011-09-07

修订日期: 2012-02-02

基金项目: 天津市应用基础及前沿技术研究计划(09JCYBJC26900);

教育部博士点基金(20090031120032)

作者简介: 乔俊(1983-),男,山西大同人,工程师,博士,主要从事土壤及水环境的修复技术研究, qj_nk@yahoo.com.cn.

* 责任作者,张承东(1976-),女,江苏扬州人,副教授,博士,主要从事环境污染物的生物降解和生物修复、污染物与生物大分子的相互作用机制研究, zhangchengdong@nankai.edu.cn

我国尚无河流、湖泊等淡水沉积物环境质量标准。目前关于河流沉积物污染评价的研究大都只关注其中某一类污染物(如重金属、多环芳烃、有机氯农药等),借助国外的沉积物环境质量标准来进行评价^[1-5]。事实上,沉积物中经常共存多种污染物,对沉

沉积物的污染评价应建立在对各种污染物的综合考虑之上。此外,由于沉积物中各类污染物的含量和性质不同,带来的环境风险也不尽相同。比较各类污染物的环境风险,明确其中的优先控制污染物对后续的修复工作意义重大。

AHP(analytical hierarchy process,层次分析)法用于对非定量事件与因素做定量分析,适用于复杂的模糊综合评价系统^[6-8]。目前,AHP 法在环境科学领域被应用于水质评价、区域生态安全评估、土壤及沉积物环境质量评价等方面^[9-16],但在沉积物污染评价的应用仍仅考虑某一类污染物(如重金属),将各类污染物综合考虑的研究还较少^[17-18]。在应用 AHP 法对沉积物的污染进行综合评价时的难点是如何客观、合理地评判各评价指标(污染物)的相对重要性,尤其是比较不同性质的污染物(如重金属与有机化合物)的相对重要性,并在此基础上确定各类污染物的权重。该研究以污染物在沉积物中的生态效应区间值为依据,定量确定各类污染物的权重,并以天津滨海新区辖内新河干渠为例,应用 AHP 法对沉积物的污染状况进行综合评价。

1 材料和方法

1.1 沉积物样品的采集

2010 年 8 月采集新河干渠表层沉积物样品 8 个,采样点分布见图 1。表层沉积物用抓斗式采样器采集,深度为 0~20 cm,样品装入密封袋后,低温冷藏运回实验室,于 -20℃ 下保存至分析。

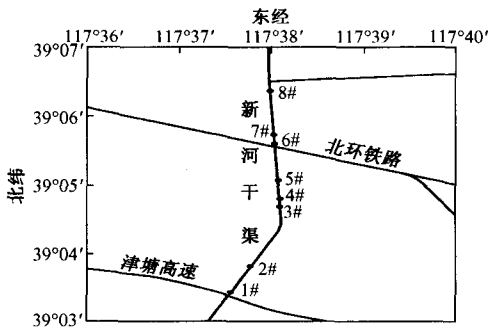


图 1 新河干渠沉积物采样点分布
Fig. 1 Sediment sampling sites of
Xinheganqu River

1.2 沉积物污染评价指标体系的建立

选取一系列广受关注的污染物作为评价指标,各污染物在沉积物样品中的含量按相应标准方法^[19-24]进行测定。污染物可概括为三大类:重金属、持久性有机污染物和营养元素,建立如表 1 所示的沉积物污染评价指标体系。因总氮、总磷均属于营养元素,如同时选取会导致营养元素类污染物权重过大,掩盖其他污染物的在整体评价中的贡献;同时相对于总氮而言,总磷是一种较易被去除的外源性营养元素^[25]。因而该研究中以总氮作为二者的代表。

表 1 沉积物污染评价指标体系

Table 1 Evaluating indicator system of sediment pollution

| 目标层 A | 要素层 B | 指标层 C |
|-------------|------------|---------------|
| 沉积物 污染评价 | 营养元素(B1) | 有机碳(C1) |
| | | 总氮(C2) |
| | 重金属(B2) | 砷(C3) |
| | | 镉(C4) |
| | | 铬(C5) |
| | | 铜(C6) |
| | | 镍(C7) |
| | | 铅(C8) |
| | | 锌(C9) |
| | | 汞(C10) |
| | | 16 种多环芳烃(C11) |
| | 持久性有机物(B3) | DDD(C12) |
| | | DDE(C13) |
| | | DDT(C14) |
| | | |

1.3 沉积物污染评价方法

各指标的权重采用三标度 AHP 法进行计算^[26-28]。每个层次各指标相对重要性的三标度比较矩阵 $S = (S_{ij})_{n \times n}$ 按下式构建:

$$S_{ij} = \begin{cases} 2, & \text{污染物 } i \text{ 限量值小于污染物 } j \text{ 限量值} \\ 1, & \text{污染物 } i \text{ 限量值等于污染物 } j \text{ 限量值} \\ 0, & \text{污染物 } i \text{ 限量值大于污染物 } j \text{ 限量值} \end{cases} \quad (1)$$

其中,各指标相对重要性的评判参考了国际上最为通用的用于评价沉积物中污染物生态风险的 ERL (effects range low,生态效应区间低值,生物有害效应几率 < 10%) 和 ERM (effects range median,生态效应区间中值,生物有害效应几率 > 50%)^[29],以各污染物 ERL 和 ERM 的平均值作为污染物在沉积物中的限量值,结果见表 2。

比较矩阵 S 得到后,计算 S 第 i 行各元素的和 (R_i) 值,再利用下式得到判断矩阵 D :

$$D_{ij} = \begin{cases} [(R_i - R_j)/(R_{\max} - R_{\min})] \times (b_m - 1) + 1 & R_i \geq R_j \\ \{[(R_j - R_i)/(R_{\max} - R_{\min})] \times (b_m - 1) + 1\}^{-1} & R_i < R_j \end{cases} \quad (2)$$

表2 各种污染物在沉积物中的 ERL 和 ERM 限定值

Table 2 ERL and ERM criteria of various pollutants in sediment

| 项目 | | ERL | ERM | ERL 与 ERM 的平均值 |
|------------|----------------------------------|-------------------|---------------------|-------------------|
| 营养元素 | w (有机碳) | 10 * | 1.0×10^2 * | 55 |
| | 总氮/(g/kg) | 0.55 * | 4.8 * | 2.7 |
| 重金属 | w (砷)/(mg/kg) | 8.2 | 70 | 39 |
| | w (镉)/(mg/kg) | 1.2 | 9.6 | 5.4 |
| | w (铬)/(mg/kg) | 81 | 3.7×10^2 | 2.3×10^2 |
| | w (铜)/(mg/kg) | 34 | 2.7×10^2 | 1.5×10^2 |
| | w (镍)/(mg/kg) | 21 | 52 | 36 |
| | w (铅)/(mg/kg) | 47 | 2.2×10^2 | 1.3×10^2 |
| | w (锌)/(mg/kg) | 1.5×10^2 | 4.1×10^2 | 2.8×10^2 |
| | w (汞)/(mg/kg) | 0.15 | 0.71 | 0.43 |
| 持久性 有机物 | w (\sum PAHs)/(μ g/kg) | 4.0×10^3 | 4.5×10^4 | 2.4×10^4 |
| | w (\sum DDD)/(μ g/kg) | 8.0 * | 6.0×10^3 * | 3.0×10^3 |
| | w (\sum DDE)/(μ g/kg) | 5.0 * | 1.9×10^4 * | 9.5×10^3 |
| | w (\sum DDT)/(μ g/kg) | 8.0 * | 7.1×10^4 * | 3.5×10^4 |

注: * 为加拿大安大略省淡水沉积物中污染物的 LEL(污染物最低影响阈值浓度, lowest effect level) 和 SEL(能容忍污染物的最高浓度, severe effect level) 标准限定值^[30]。

其中, $R_{\max} = \max(R_i)$, $R_{\min} = \min(R_i)$, $b_m = R_{\max}/R_{\min}$ 。利用判断矩阵进行一致性检验, 检验通过后计算各指标权重。

沉积物污染评价各指标的得分按下式计算:

$$V_i = \begin{cases} 0 & a_i < \text{ERL} \\ a_i/\text{ERM} & a_i \geq \text{ERL} \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{EI} = \sum V_i W_i \quad (4)$$

式中: V_i 为某污染物的污染指数; a_i 为沉积物中某污染物的含量(新河干渠 8 个沉积物样品的平均值); 当污染物的浓度低于 ERL 值时可认为不产生有害效应, 因此污染指数 V_i 记做 0; EI 为沉积物污染综合评价得分; W_i 为某评价指标在层次总排序中的权重。

2 结果和讨论

2.1 沉积物污染评价体系各指标的权重

沉积物污染评价体系各指标权重计算结果见表 3。在对 C 层各项指标权重进行层次总排序后, 权重最大的前 3 项指标分别为 DDD(权重为 0.359), DDE(权重为 0.168) 和金属汞(权重为 0.105)。结合这 3 类污染物的 ERL 限定值可以发现, 这 3 类污染物产生生态不利效应的阈值均较低, 因此采用 AHP 法得到的权重值可凸显这 3 类污染物的危险性, 权重值的可信度较高。

2.2 新河干渠沉积物污染评价

新河干渠沉积物中各评价指标(污染物)的平均含量及污染评价得分见表 4。比较表 4 中 B 层次各指

表3 沉积物污染评价指标的权重

Table 3 Weight of sediment pollution indicators

| 要素层(B) | | 指标层(C) | | | |
|--------|-----------|--------|-----------|-----------|----|
| 要素 | A-B 单排序权重 | 指标 | B-C 单排序权重 | A-C 总排序权重 | 次序 |
| B1 | 0.105 | C1 | 0.250 | 0.026 | 9 |
| | | C2 | 0.750 | 0.079 | 4 |
| | | C3 | 0.087 | 0.022 | 10 |
| | | C4 | 0.252 | 0.065 | 6 |
| | | C5 | 0.017 | 0.005 | 13 |
| B2 | 0.259 | C6 | 0.029 | 0.007 | 12 |
| | | C7 | 0.149 | 0.039 | 7 |
| | | C8 | 0.050 | 0.013 | 11 |
| | | C9 | 0.011 | 0.003 | 14 |
| | | C10 | 0.405 | 0.105 | 3 |
| B3 | 0.637 | C11 | 0.118 | 0.075 | 5 |
| | | C12 | 0.564 | 0.359 | 1 |
| | | C13 | 0.263 | 0.168 | 2 |
| | | C14 | 0.055 | 0.035 | 8 |

表4 新河干渠沉积物中各种污染物的含量及沉积物污染评价结果

Table 4 Various pollutants content in sediment of Xinheganqu River and the assessment results of sediment quality

| 指标层(C) | | | 要素层(B) | | 目标层(A) | |
|--------|---------------------|-----------------------|--------|----------|--------|-------|
| 指标 | w 平均值/ (mg/kg) | 指标得分 | 要素 | 要素 得分 | 目标 | 评估结果 |
| C1 | 26 360 | 0.007 | B1 | 0.040 | A | 0.095 |
| C2 | 2 010 | 0.034 | | | | |
| C3 | 9.27 | 0.003 | B2 | 0.043 | | |
| C4 | 0.40 | 0 | | | | |
| C5 | 126.60 | 0.001 | | | | |
| C6 | 83.90 | 0.002 | | | | |
| C7 | 43.77 | 0.030 | | | | |
| C8 | 55.57 | 0.003 | | | | |
| C9 | 419.80 | 0.003 | | | | |
| C10 | 0.11 | 0 | | | | |
| C11 | 1.400 6 | 0 | B3 | 0.012 | | |
| C12 | 0.198 0 | 0.012 | | | | |
| C13 | 0.021 8 | 2.00×10^{-4} | | | | |
| C14 | 0.009 6 | 4.75×10^{-6} | | | | |

标的得分发现 $B2 \approx B1 > B3$, 因此整体上, 新河干渠沉积物中对不利生态效应起主要贡献的污染物为重金属和营养元素。比较 C 层各指标得分可知 C2、C7 和 C12 得分较高, 说明新河干渠沉积物中总氮、镍和 DDD 对沉积物不利生态效应的产生起到较大贡献。

新河干渠在历史上是一条农用灌溉渠道, 周边广泛分布着农田, 随着城市建设的发展, 河流周边农田逐渐被居民聚集区代替, 河道的主要功能用于排污。新河干渠的周边没有工业厂矿, 因此河流沉积物中的

总氮主要来源于周边农业生产及居民生活废水,DDD主要来源于历史上农业生产中农药施用的残留,镍主要来源于周边居民生活废弃物(如陶瓷制品,电子线路,金属制品等)。

表4还给出了新河干渠沉积物污染评价的总得

分(0.095),为进一步理解该得分的含义,将表2中各污染物 ERL 和 ERM 限定值分别代入式(3)(4)中,计算得到相应的沉积物污染程度2个等级标准的得分(见表5)。

由表4、5可知,新河干渠沉积物污染评价总得分

表5 基于 ERL 和 ERM 限定值的沉积物污染评价两级标准得分

Table 5 Two level assessment standard score of sediment environment pollution based on ERL and ERM' criteria

| 指标层 (C) | | | 要素层 (B) | | | 目标层 (A) | | |
|---------|-----------------------|----------------|---------|-------|-------|---------|-------|-------|
| 指标 | 基于 ERL 的Ⅰ级标准得分 | 基于 ERM 的Ⅱ级标准得分 | 要素 | Ⅰ级得分 | Ⅱ级得分 | 目标 | Ⅰ级得分 | Ⅱ级得分 |
| C1 | 0.003 | 0.026 | B1 | 0.012 | 0.105 | A | 0.075 | 1.000 |
| C2 | 0.009 | 0.079 | | | | | | |
| C3 | 0.003 | 0.022 | | | | | | |
| C4 | 0.008 | 0.065 | | | | | | |
| C5 | 0.001 | 0.005 | | | | | | |
| C6 | 0.001 | 0.007 | B2 | 0.055 | 0.259 | | | |
| C7 | 0.016 | 0.039 | | | | | | |
| C8 | 0.003 | 0.013 | | | | | | |
| C9 | 0.001 | 0.003 | | | | | | |
| C10 | 0.022 | 0.105 | | | | | | |
| C11 | 0.007 | 0.075 | B3 | 0.008 | 0.637 | | | |
| C12 | 0.001 | 0.359 | | | | | | |
| C13 | 4.41×10^{-5} | 0.168 | | | | | | |
| C14 | 3.95×10^{-6} | 0.035 | | | | | | |

(0.095)稍高于沉积物 I 级标准总得分(0.075),远低于 II 级标准总得分(1.000),因而新河干渠沉积物总体上产生不利生态风险的可能性较低。此外,通过计算表4中C层各指标得分与表5中C层基于 ERM II 级标准得分的比值,可从单一污染物水平上筛选超标的污染物。结果显示,比值最大的前3名污染物依次为金属锌(比值为1.00)、镍(0.77)和总氮(0.43)。说明各污染物中锌、镍和总氮在新河干渠沉积物中的污染程度较高。

在应用层 AHP 法对沉积物的综合污染状况进行评价时,有可能会对某单项指标的污染状况估计略显不足,具有一定的局限性,该研究中具体表现在锌的评价结果具有一定差异。单项指标相比时,锌的含量等于 ERM 标准,可产生不良生态风险。但是在表4中锌的综合评价得分较低(仅为0.003),对沉积物整体污染水平的贡献不高。这是因为锌的生态效应阈值较高,在综合评价中的权重值低。这是单项指标风险评价与 AHP 法之间的差异,单项指标评价仅考虑一个指标的超标倍数,而 AHP 法既可综合评价沉积物的整体污染状况又可考虑各污染物在整体风险值中的贡献差异。综合评价体系相比于单项评价突出了毒性效应小、含量高的营养元素在沉积物环境风险

中的贡献。目前很多关于沉积物的研究都侧重于毒性效应显著的重金属、持久性有机污染物(如多环芳烃、多氯联苯类),但事实上随着营养元素的大量排放,它们可能成为沉积物中的主要污染物,导致显著的负生态效应,因而在沉积物的污染评价及河流整治中不容忽视。

3 结论

采用了 AHP 法并结合污染物在沉积物中的生态效应区间限定值,综合评价新河干渠沉积物的污染状况,权重最大的3个指标分别为 DDD(权重为0.359)、DDE(权重为0.168)和金属汞(权重为0.105);得分最高的3个指标为总氮(0.034)、镍(0.030)和 DDD(0.012);三大类指标得分依次为营养元素(0.040)、重金属(0.043)和持久性有机物(0.012);新河干渠沉积物污染综合评价得分为0.095。新河干渠沉积物中产生不利效应的主要污染物为总氮、镍和 DDD,总体上新河干渠沉积物产生不利生态风险的可能性较低。而单项评价中锌的污染较为显著。

参考文献(References):

- [1] ZHANG Zulin, HUANG Jun, YU Gang, et al. Occurrence of PAHs, PCBs and organochlorine pesticides in the Tonghui River of

- Beijing, China[J]. *Environ Pollut*, 2004, 130(2): 249-261.
- [2] 战玉柱, 姜霞, 陈春霄, 等. 太湖西南部沉积物重金属的空间分布特征和污染评价[J]. *环境科学研究*, 2011, 24(4): 363-370.
- [3] 史双昕, 周丽, 邵丁丁, 等. 长江下游表层沉积物中有机氯农药的残留状况及风险评价[J]. *环境科学研究*, 2010, 23(1): 7-13.
- [4] 周俊丽, 刘征涛, 孟伟, 等. 长江河口表层沉积物中 PAHs 的生态风险评价[J]. *环境科学研究*, 2009, 22(7): 778-783.
- [5] SUN Jianhui, WANG Guoliang, CHAI Yan, *et al.* Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Henan Reach of the Yellow River, Middle China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, 72(5): 1614-1624.
- [6] ZHANG Hongxia. The analysis of the reasonable structure of water conservancy investment of capital construction in China by AHP method[J]. *Water Resour Manage*, 2009, 23(1): 1-18.
- [7] 钟振宇, 柴立元, 刘益贵, 等. 基于层次分析法的洞庭湖生态安全评估[J]. *中国环境科学*, 2010, 30(S1): 41-45.
- [8] SRDJEVIC B, MEDEIROS Y D P. Fuzzy AHP assessment of water management plans[J]. *Water Resour Manage*, 2008, 22(7): 877-894.
- [9] CHEN X Y, GAO H W, YAO X H, *et al.* Ecosystem-based assessment indices of restoration for Daya Bay near a nuclear power plant in South China[J]. *Environ Sci Technol*, 2010, 44(19): 7589-7595.
- [10] 戴新, 丁希楼, 陈英杰, 等. 基于 AHP 法的黄河三角洲湿地生态环境质量评价[J]. *资源环境与工程*, 2007, 21(2): 135-139.
- [11] LI Ruzhong. Dynamic assessment on regional eco-environmental quality using AHP-statistics model: a case study of Chaohu Lake basin[J]. *Chinese Geogr Sci*, 2007, 17(4): 341-348.
- [12] 蔡楠, 杨扬, 方建德. 基于层次分析法的城市河流生态修复评估[J]. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(9): 1092-1098.
- [13] 李雪梅, 邓小文, 王祖伟, 等. 污染因子权重及区域环境质量综合评价分级标准的确定: 以土壤重金属污染为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(4): 97-100.
- [14] HUANG P H, TSAI J S, LIN W T. Using multiple-criteria decision-making techniques for eco-environmental vulnerability assessment: a case study on the Chi-Jia-Wan Stream watershed, Taiwan[J]. *Environ Monit Assess*, 2010, 168(1/2/3/4): 141-158.
- [15] DELAVARI-EDALAT F, ABDI M R. Decision support system for monitoring environmental-human interactions[J]. *Environ Monit Assess*, 2009, 153(1/2/3/4): 9-26.
- [16] REZAEI-MOCHADDAM K, KARAMI E. A multiple criteria evaluation of sustainable agricultural development models using AHP[J]. *Environ Dev Sustain*, 2008, 10(4): 407-426.
- [17] ZHANG Yan, GAO Xiang, ZHONG Zhenyu, *et al.* Comprehensive evaluation of heavy metal contamination of sediment in Lake Dianchi by using modified AHP method and ^{137}Cs dating[J]. *Front Environ Sci Engin China*, 2008, 2(3): 370-379.
- [18] ZHANG Yan, ZHANG Hong, GAO Xiang, *et al.* Improved AHP method and its application in lake environmental comprehensive quality evaluation: a case study of Xuanwu Lake, Nanjing, China[J]. *Chin J Oceanol Limnol*, 2007, 25(4): 427-433.
- [19] US EPA. Method 6020A: inductively coupled plasma-mass spectrometry[S]. Washington DC: US EPA, 2007.
- [20] US EPA. Method 7473: mercury in solids and solutions by thermal decomposition, amalgamation, and atomic absorption spectrophotometry[S]. Washington DC: US EPA, 2007.
- [21] US EPA. Method 8310: polynuclear aromatic hydrocarbons[S]. Washington DC: US EPA, 1986.
- [22] US EPA. Method 8081B: organochlorine pesticides by gas chromatography[S]. Washington DC: US EPA, 2000.
- [23] 农业部. 中华人民共和国农业行业标准 NY/T 1121. 6—2006 土壤检测第 6 部分: 土壤有机质的测定[S]. 北京: 农业科学出版社, 2006.
- [24] 国家林业局. 中华人民共和国林业行业标准 LY/T 1228—1999 森林土壤全氮的测定[S]. 北京: 国家林业局, 1999.
- [25] LEWIS W M, WURTSBAUGH W A, PAERL H W. Rationale for control of anthropogenic nitrogen and phosphorus to reduce eutrophication of inland waters[J]. *Environ Sci Technol*, 2011, 45(24): 10300-10305.
- [26] 施丽娜, 华德尊, 李春艳. 运用层次分析法评价虎林市地表水环境质量[J]. *环境科学与管理*, 2005, 30(5): 100-102.
- [27] 邵波, 陈兴鹏. 甘肃省生态环境质量综合评价的 AHP 分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2005, 19(4): 29-32.
- [28] 李学梅, 王祖伟, 汤显强, 等. 重金属污染因子权重的确定及其在土壤环境质量评价中的作用[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(6): 2281-2286.
- [29] LONG E R, MACDONALD D D, SMITH S L, *et al.* Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments[J]. *Environ Manage*, 1995, 19: 81-97.
- [30] PERSAUD D, JAAGUMAGI R, HAYTON A. Guidelines for the protection and management of aquatic sediment quality in Ontario[S]. Ottawa, Ontario: Ontario Ministry of the Environment, 1993.

(责任编辑: 郑朔方)