

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第7期

Vol.33 No.7

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

三峡库首秭归地区大气降水硫同位素组成及示踪研究	吴起鑫, 韩贵琳 (2145)
成都春季生物质燃烧和沙尘期间气溶胶散射特征及其重建	岳建华, 陶俊, 林泽健, 朱李华, 曹军骥, 罗磊 (2151)
太湖上空大气气溶胶光学厚度及其特征分析	饶加旺, 马荣华, 段洪涛, 姜广甲, 尚琳琳, 周琳 (2158)
环上海地区干霾气溶胶垂直分布的季节变化特征	徐婷婷, 秦艳, 耿福海, 陈勇航, 张华, 刘琼, 马晓骏 (2165)
南京冬季市区和郊区气溶胶中 PAHs 浓度的昼夜特征及粒径分布	张红亮, 樊曙先, 顾凯华, 朱彬, 范洋, 祖繁, 李红双, 孟庆紫, 何佳宝 (2172)
青岛大气气溶胶水溶性无机离子研究: 季节分布特征	刘臻, 祁建华, 王琳, 陈晓静, 石金辉, 高会旺 (2180)
城市污水处理厂生成的微生物气溶胶的污染特性	邱雄辉, 李彦鹏, 牛铁军, 李美玲, 马智慧, 苗莹, 王湘君 (2191)
基于 WEPS 模型的天津郊区土壤风蚀起尘及对中心城区迁移量估算	陈莉, 韩婷婷, 李涛, 姬亚芹, 白志鹏, 王斌 (2197)
浒苔绿潮与苏北近岸海域营养盐浓度的关系研究	高嵩, 石晓勇, 王婷 (2204)
福建沿海近 10 a 赤潮基本特征分析	李雪丁 (2210)
HSPF 水文水质模型应用研究综述	李兆富, 刘红玉, 李燕 (2217)
城市降雨径流模拟的参数不确定性分析	黄金良, 林杰, 杜鹏飞 (2224)
利用 CDOM 吸收系数估算太湖水体表层 DOC 浓度	姜广甲, 马荣华, 段洪涛 (2235)
嘉善地区水环境敏感点水质影响权重分析及风险等级判定	谢蓉蓉, 逢勇, 张倩, 陈可, 孙明园 (2244)
重庆市盘溪河水质不同季节日变化规律及水质评价	张千千, 王效科, 郝丽岭, 逯非, 欧阳志云, 侯培强, 张烨 (2251)
南京市湿地水质对城市化影响强度的响应研究	郝敬锋, 刘红玉, 胡和兵, 安静, 张小红 (2259)
宁夏沙湖浮游植物与水环境因子关系的研究	邱小琮, 赵红雪, 孙晓雪 (2265)
影响太子河流域鱼类空间分布的不同尺度环境因子分析	丁森, 张远, 渠晓东, 孔维静, 刘思思, 孟伟 (2272)
大型底栖动物生物评价指数比较与应用	耿世伟, 渠晓东, 张远, 林坤德 (2281)
青藏高原纳木错流域水体总汞的时空分布特征	王康, 康世昌, 郭军明, 张强弓, 黄杰, 郑伟 (2288)
青藏高原纳木错湖水主要化学离子的时空变化特征	郭军明, 康世昌, 张强弓, 黄杰, 王康 (2295)
用物理-生态集成技术局部控制富营养化	李秋华, 夏品华, 吴红, 林陶, 张友春, 李存雄, 陈丽丽, 杨帆 (2303)
太湖氮素出入湖通量与自净能力研究	陈小锋, 揣小明, 曾巾, 刘涛, 杨柳燕 (2309)
富营养湖泊沉积物中磷组分对硫酸盐的响应	袁探, 华玉妹, 朱端卫, 赵建伟, 蔡建波 (2315)
巢湖表层沉积物磷的空间分布差异性研究	温胜芳, 单保庆, 张洪 (2322)
南京地区典型有机污染物长距离输送潜力研究	方利江, 吴有方, 丁中原, 马子龙, 柳敏, 高宏 (2330)
东海内陆架沉积物中黑碳分布及其与持久性有机污染物的相关性研究	林田, 方引, 陈颖军, 胡利民, 郭志刚, 张干 (2335)
嘉陵江重庆段表层水体多环芳烃的污染特征	蔡文良, 罗固源, 许晓毅, 杜炯 (2341)
电子废物拆解区河流沉积物中多氯联苯的污染水平、分布及来源	王学彤, 李元成, 缪绎, 张媛, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟 (2347)
基于梯形模糊数的沉积物重金属污染风险评价模型与实例研究	李飞, 黄瑾辉, 曾光明, 唐晓娇, 白兵, 蔡青, 祝慧娜, 梁婕 (2352)
渤海湾海岸带开发对近岸沉积物重金属的影响	秦延文, 郑丙辉, 李小宝, 张雷, 时瑶, 曹伟 (2359)
崇明东滩表层沉积物重金属空间分布特征及其污染评价	李雅娟, 杨世伦, 侯立军, 周菊珍, 刘英文 (2368)
白洋淀底泥重金属形态及竖向分布	李必才, 何连生, 杨敏, 孟睿, 袁冬海, 席北斗, 舒俭民 (2376)
西南涌酸挥发硫化物浓度水平及影响因素研究	刘晓冰, 温琰茂, 利锋, 吴昌华, 段志鹏 (2384)
氨氮在饮用水生物滤池内的去除机制	刘冰, 范辉, 余国忠, 于鑫, 赵承美, 李清飞, 张舒婷, 魏博 (2394)
Cu(II) 印迹壳聚糖交联膜的表征及其吸附热力学特性	张玉红, 张爱丽, 周集体, 孙筱雨 (2403)
声电氧化处理扑热息痛的研究	戴启洲, 马文姣, 沈宏, 陈浚, 陈建孟 (2410)
粉煤灰吸附-Fenton 及热再生处理亚甲基蓝废水的特性研究	白玉洁, 张爱丽, 周集体 (2419)
利用双室微生物燃料电池处理模拟废水的产电特性研究	张永娟, 李永峰, 刘春研, 王艺璇, 李龙, 王籽人, 董义兴 (2427)
Zn/Cr 型阴离子黏土的制备、表征及其对活性艳橙 X-GN 的去除性能研究	王小蓉, 吴平霄 (2432)
核电站低放射性废水在封闭水体中的输移规律研究	武国正, 徐宗学 (2438)
A + OSA 污泥减量工艺碳元素平衡与减量机制研究	翟小敏, 高旭, 张曼曼, 贾丽, 郭劲松 (2444)
系列混合碳源在 EBPR 系统颗粒化进程中的影响研究	蒋涛, 孙培德, 徐少娟 (2451)
氧化还原介体催化强化 <i>Paracoccus versutus</i> 菌株 GW1 反硝化特性研究	李海波, 廉静, 郭延凯, 赵丽君, 杜海峰, 杨景亮, 郭建博 (2458)
1 株转座子插入突变菌株 TB34 的筛选及产氢分析	刘洪艳, 王广策, 侍浏洋, 朱大玲 (2464)
蜜环菌漆酶对氯酚类污染物催化降解条件优化	秦仁炳, 朱显峰, 吴珂, 张晶晶, 赵海康 (2470)
双季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放特征及品种筛选研究	傅志强, 朱华武, 陈灿, 黄瑛 (2475)
闽江河口短叶茳芰湿地 CH ₄ 和 N ₂ O 排放对氮输入的短期响应	牟晓杰, 刘兴土, 仝川, 孙志高 (2482)
青海三江源地区退化草地土壤全氮的时空分异特征	彭景涛, 李国胜, 傅瓦利, 易湘生, 蓝家程, 袁波 (2490)
不同降雨条件下侵蚀泥沙黏粒含量的变化规律	吴凤至, 史志华, 方怒放, 岳本江 (2497)
土壤性质对单一及复合污染下外源镉稳定化过程的影响	吴曼, 徐明岗, 张文菊, 武海雯 (2503)
多氯联苯污染农田土壤的原位生态调控修复效应	潘澄, 滕应, 骆永明, 涂晨, 李秀芬, 马婷婷, 张满云, 李振高, 宋静 (2510)
不同作物根系多环芳烃吸收特征差异的比较研究	梁宵, 占新华, 周立祥 (2516)
废气和废渣协同作用脱钠反应特性及机制研究	伊元荣, 韩敏芳 (2522)
中国第三产业能源碳排放影响要素指数分解及实证分析	卢愿清, 史军 (2528)
《环境科学》征稿简则 (2431) 《环境科学》征订启事 (2532) 信息 (2157, 2271, 2367, 2418)	

基于梯形模糊数的沉积物重金属污染风险评价模型与实例研究

李飞^{1,2}, 黄瑾辉^{1,2*}, 曾光明^{1,2*}, 唐晓娇^{1,2}, 白兵^{1,2}, 蔡青^{1,2}, 祝慧娜^{1,2}, 梁婕^{1,2}

(1. 湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082; 2. 环境生物与控制教育部重点实验室(湖南大学), 长沙 410082)

摘要: 综合考虑经典确定性污染评价模型的现实缺陷, 将梯形模糊数理论引入环境评价领域, 通过将研究区域重金属背景值及重金属实测含量的梯形模糊数化, 结合聚类分析、 α -截集技术和区间数隶属度计算, 最后基于定义的重金属生物毒性评价权重系数建立了沉积物重金属污染风险模糊评价模型. 采用该评价模型评价了洞庭湖表层沉积物重金属污染的风险状况, 结果表明, 洞庭湖水系表层沉积物中 7 种重金属污染风险程度排序为: $\text{Hg} > \text{Cd} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Zn} > \text{As}$, Hg , Cd 和 Pb 应成为洞庭湖水环境污染治理的优先控制因子. 与确定性模型评价结果的对比分析表明, 模糊评价模型得出了各重金属地累积指数的可能值区间, 并进而得出与之对应的隶属可信度水平, 从而较好地弥补了确定性评价的不足, 更客观地、全面地表征了评价区域沉积物中重金属的真实污染状态与空间分布差异.

关键词: 洞庭湖; 沉积物; 重金属; 梯形模糊数; 污染风险评价

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)07-2352-07

Assessment Model for Heavy Metal Pollution in Sediment Based on Trapezoidal Fuzzy Numbers and Case Study

LI Fei^{1,2}, HUANG Jin-hui^{1,2}, ZENG Guang-ming^{1,2}, TANG Xiao-jiao^{1,2}, BAI Bing^{1,2}, CAI Qing^{1,2}, ZHU Hui-na^{1,2}, LIANG Jie^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Key Laboratory of Environmental Biology and Pollution Control (Hunan University), Ministry of Education, Changsha 410082, China)

Abstract: Due to the practical shortcomings of the classical deterministic pollution assessment model, the theory of trapezoidal fuzzy numbers was introduced to the environmental assessment system. A fuzzy risk assessment model was built based on the geoaccumulation index and biotoxicity coefficients of heavy metals. Using the fuzzy pollution risk assessment model, the risk of heavy metal pollution was evaluated for the surface sediment of Dongting Lake. The results showed that the pollution risk in a descending order was $\text{Hg} > \text{Cd} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Zn} > \text{As}$, with Hg , Cd and Pb being the priority pollutants in Dongting Lake. Both the intervals of possible values for the geoaccumulation indexes of heavy metals and their credible levels were calculated using this model. Compared with the results of the deterministic assessment model, the fuzzy pollution risk assessment model gave a better characterization of the actual pollution status and spatial distribution difference of the heavy metals in the sediment of the studied region which is more objective and comprehensive.

Key words: Dongting Lake; sediment; heavy metal; trapezoidal fuzzy numbers; pollution risk assessment

重金属是被广泛关注的持久有毒污染物,其可通过水体、沉积物、大气及土壤等迁移转化途径对生态系统的稳定或人体的健康直接地或间接地造成突发性或积累性的危害或风险. 水环境系统中自然或人为来源的重金属通过各种迁移过程中进入水体后,仅极少量以溶解态停留在水体中,绝大部分则是被底部沉积物所吸附和聚集^[1~3]. 底栖生物搅动、水流量变化等外在环境因素,工矿业、农业及城市生活污水排放等人为因素都影响着沉积物中重金属的含量及分布,并可使沉积物中被稳定的重金属再次通过一系列物理、化学和生物过程而被释放,从而可能引发水环境的“二次污染”^[4,5]. 作为持久性污染物的主要蓄积库,对于某水系沉积物重金属的污染评

价作为确定研究区域污染程度和制定污染控制策略的重要参考而被广泛关注. 目前,国内外对于沉积物重金属污染的评价方法已有很多,其中主要方法^[6~10]有:单因子指数评价法、内梅罗综合污染指数法、地累积指数评价模型法、脸谱图法、潜在生态危害指数法和叠加污染综合指数法等. 地累积指数模型^[10]是于 20 世纪 60 年代晚期由德国科学家 Müller 所提出的一种可较好地表征土壤或沉积物中

收稿日期: 2011-09-18; 修订日期: 2011-11-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51039001, 51178172); 教育部新世纪优秀人才计划项目(NCET-08-180)

作者简介: 李飞(1986~),男,硕士研究生,主要研究方向为环境风险评价, E-mail: fei371@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: huangjinhui_59@163.com, zgming@hnu.edu.cn

重金属富集程度的定量指标,现广泛应用于研究土壤或沉积物中重金属的污染富集程度.但其评价过程中仍存在一些不足,需进一步完善,主要表现在:①沉积物中重金属含量空间分布的差异性和污染程度分级标准的单一确定性,造成了评价区域重金属含量数据、评价结果及其对应评价标准之间均存在较大模糊性,导致确定性评价结果不能真实地反映沉积物中重金属的实际污染程度;②仅考虑到沉积物中重金属的超标及富集状况,未考虑各重金属自身的生物毒性差异,这可能掩盖有些浓度低但毒性大的重金属污染作用;③不同学者或决策者采用的地球化学背景值等参数的差异造成评价结果缺乏可比性.

因此,本研究尝试将梯形模糊数引入水环境沉积物污染评价中,结合地累积指数模型,并通过对沉积物重金属含量和地球化学背景值的梯形模糊化,结合聚类分析、 α -截集技术和区间数隶属度计算,最后基于本研究定义的重金属生物毒性评价权重系数建立了沉积物重金属污染风险模糊评价模型.采用

该模糊评价模型评价了洞庭湖表层沉积物的污染风险现状,取得了较为满意的结果,为水环境沉积物重金属的污染评价、优先污染物的控制及区域污染防控决策的制定提供新思路、新方法.同时模型预留了如关心受体耐受级等可选参数,以期模型的后续研究和拓展使用提供了思路.

1 基于梯形模糊数的沉积物污染评价模型

1.1 地累积指数评价模型

地累积指数法是德国科学家 Muller^[10] 于 1969 年提出的一种用于研究沉积物中重金属污染程度的定量指标,其计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 [c_i / (k B_i)] \tag{1}$$

式中, c_i 为污染物 i 在沉积物中的实测含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), B_i 为污染物 i 的地球化学背景值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), k 为修正成岩作用引起的背景值波动而设定的系数(一般取值为 1.5).在等级划分时,应用 Förstner^[11] 提出了经典的 7 级划分法,分级情况和污染程度如表 1 所示.

表 1 地累积指数与重金属污染程度分级

Table 1 Geoaccumulation indexes and pollution levels of heavy metals							
I_{geo}	≤ 0	0 ~ 1	1 ~ 2	2 ~ 3	3 ~ 4	4 ~ 5	> 5
级数	0	1	2	3	4	5	6
污染程度	清洁	轻度污染	偏中污染	中度污染	偏重污染	重度污染	严重污染

1.2 梯形模糊数

近年来,模糊数学方法被广泛用于降低系统不确定性的研究与实践中,其通过隶属度函数描述污染状况的渐变性和模糊性,使评价结果更加准确可靠^[12,13].三角模糊数处理技术对于数据资料不足或数据精度不高具有较好的适用性,已有学者将其成功地应用于地表水环境风险评价^[14]和河流沉积物重金属污染评价^[15]中.但由于三角模糊数本身隶属度函数的限制,其最该概然值仅为一个点,对于在实践中广泛存在的一系列整体分布较为扁平、无明显峰值的参数集来说,三角模糊数将带来较大的模拟误差,甚至干扰最终的决策.梯形模糊数在继承三角模糊数的优点的基础上,对上述问题给予了很好解决^[16].

梯形模糊数的定义^[17]为:设在实数域 R 上的一个模糊数 $\tilde{A}$,定义一个隶属函数: $\mu_{\tilde{A}}(x): \rightarrow [0,1]$, $x \in R$,若隶属函数 $\mu_{\tilde{A}}(x)$ 表示为:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ (x - a) / (b - a), & a \leq x < b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ (d - x) / (d - c), & c < x \leq d \\ 0, & x > d \end{cases} \tag{2}$$

则称 $\tilde{A}$ 为梯形模糊数,记作 $\tilde{A} = (a, b, c, d)$.其中, $a \leq b \leq c \leq d$, $b \leq x \leq c$ 为相对最概然区间;当 $b = c$ 时, $\tilde{A}$ 退化成三角模糊数;当 $a = b = c = d$ 时, $\tilde{A}$ 为一个精确实数.

实际计算中,通常利用 α -截集技术来简化计算. α -截集定义^[18]为:设 $\tilde{A}$ 是论域 U 上的模糊集,对 $\alpha \in [0,1]$,称普通集合 $\tilde{A}_{\alpha} = \{x | \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha\}$ 为模糊集 $\tilde{A}$ 的 α -截集;当 $\tilde{A}_{\alpha} = \{x | \mu_{\tilde{A}}(x) > \alpha\}$ 时,称为 $\tilde{A}$ 的 α 强截集, α 称为置信水平. $\alpha = 0.9$ 是易被人们接受的可信度水平^[19],故本研究所有 α -截集处理过程中均取 $\alpha = 0.9$.

如有梯形模糊数 $\tilde{A} = (a, b, c, d)$,取置信水平 $\alpha \in [0,1]$,可以得置信水平区间:

$$\tilde{A}_{\alpha} = [A_{\alpha}^L, A_{\alpha}^R] = [(b - a)\alpha + a, (d - c)\alpha + d] \tag{3}$$

对于实数域 R 上的模糊集 $\tilde{A}$, α -截集 $\tilde{A}_{\alpha}$ 即为实数区间数 $[A_{\alpha}^L, A_{\alpha}^R]$ 满足如下运算法则^[20].

$$\tilde{A}_{\alpha 1} + \tilde{A}_{\alpha 2} = [A_{\alpha 1}^L + A_{\alpha 2}^L, A_{\alpha 1}^R + A_{\alpha 2}^R] \tag{4}$$

$$\tilde{A}_{\alpha 1} \times \tilde{A}_{\alpha 2} = [A_{\alpha 1}^L \times A_{\alpha 2}^L, A_{\alpha 1}^R \times A_{\alpha 2}^R] \quad (5)$$

$$\tilde{A}_{\alpha 1} \div \tilde{A}_{\alpha 2} = [A_{\alpha 1}^L \times 1/A_{\alpha 2}^L, A_{\alpha 1}^R \times 1/A_{\alpha 2}^R] \quad (6)$$

$$k \cdot \tilde{A}_{\alpha} = [k \cdot A_{\alpha}^L, k \cdot A_{\alpha}^R] \quad (7)$$

1.3 重金属生物毒性评价权重系数

地累积指数模型是一种可较好地表征沉积物中重金属富集程度的定量指标,但它仅考虑到沉积物中重金属总量的超标富集情况,未考虑各重金属自身的生物毒性差异,这极可能掩盖有些浓度低但毒性大的重金属污染作用.故本研究选取 Hakanson^[5]制定的标准化重金属毒性系数为重金属生物毒性评价权重系数值(H),其可以很好地表征不同重金属自身的生物毒性差异,并已广泛用于实际污染风险评价中^[21,22].根据文献[23,24]的研究结论,分别定义各重金属自身的生物毒性权重系数为: $H_{\text{Hg}} = 40$, $H_{\text{Cd}} = 30$, $H_{\text{Ni}} = H_{\text{Cu}} = 5$, $H_{\text{Cr}} = 2$, $H_{\text{Zn}} = 1$.

1.4 基于梯形模糊数的沉积物污染评价模型

将实测重金属含量和地球化学背景值分别表示为: $\tilde{c}_i = (c_{1i}, c_{2i}, c_{3i}, c_{4i})$ 、 $\tilde{B}_i = (B_{1i}, B_{2i}, B_{3i}, B_{4i})$.把梯形模糊数参数嵌入式(1)中,得到梯形模糊化的地累积指数评价模型:

$$\tilde{I}_{\text{geo}i} = \log_2 [\tilde{c}_i / (k \tilde{B}_i)] \quad (8)$$

通过 α -截集技术处理得到的沉积物重金属地累积指数是一个区间数,经隶属度函数计算确定沉积物中各重金属污染程度等级.如有一个地累积指数区间为 $[I_{\text{geo}1}, I_{\text{geo}2}]$,则 $[I_{\text{geo}1}, I_{\text{geo}2}]$ 于 $[I_{\text{geo}1}^*, I_{\text{geo}2}^*]$ 的隶属度可以定量表示为:

$$A(l) = \frac{|[I_{\text{geo}1}, I_{\text{geo}2}] \cap [I_{\text{geo}1}^*, I_{\text{geo}2}^*]|}{|[I_{\text{geo}1}, I_{\text{geo}2}]|} \quad (9)$$

式中, $A(l)$ 表示 $[I_{\text{geo}1}, I_{\text{geo}2}]$ 对 $[I_{\text{geo}1}^*, I_{\text{geo}2}^*]$ 的隶属度; $|$ 表示区间的几何长度; $\cap$ 表示取二个区间的交集; $[I_{\text{geo}1}^*, I_{\text{geo}2}^*]$ 表示评价等级的第 l 等级, $l = 1, 2, \dots, n$.

由式(9)得到 $[I_{\text{geo}1}, I_{\text{geo}2}]$ 对各个等级的隶属度,然后基于地累积指数污染等级的划分得出 $[I_{\text{geo}1}, I_{\text{geo}2}]$ 的重金属污染程度,见式(10).

$$I'_{\text{geo}i} = \sum_{l=1}^n A(l) \times V(l) \quad (10)$$

式中, $I'_{\text{geo}i}$ 是沉积物中重金属 i 的模糊地累积指数值; $V(l)$ 为各个污染程度的赋值.

基于 $I'_{\text{geo}i}$ 值,结合重金属生物毒性评价权重(H),最终建立沉积物重金属污染风险模糊评价模型,其算式如下:

$$\tilde{R}_i = (I'_{\text{geo}i} \times H_i) / P \quad (11)$$

式中, $\tilde{R}_i$ 是沉积物中重金属的模糊风险值; P 是预留可选参数,如关心受体耐受级(表征不同人群对某重金属的耐受程度,可划分为成年人、青少年和幼儿,级别值依次降低,本研究中暂设 $P = 1$).

2 实例研究

2.1 研究区域采样点的布设及样品的采集

洞庭湖(112°18' ~ 113°15' E, 28°30' ~ 29°38' N)位于长江南岸,跨湖南、湖北二省,西面和南面接纳湘、资、沅、澧四水,东面有汨罗江河、新墙河入湖,北面有松滋、太平、藕池三口分泄长江水流,并经岳阳城陵矶再次汇入长江,是目前与长江出三峡进入中下游平原后,唯一与长江干流直接连通的吞吐型河流^[25].洞庭湖水系的生态环境质量直接影响到周边城市的饮水安全、湿地生态系统的稳定及生物的多样性.将本研究建立的模型应用于洞庭湖水系表层沉积物重金属污染风险评价中,采样点的布设根据湖(库)底质采样点一般设在主要河流及污染源水进入后与湖(库)水混合均匀处,另外,采样点应遵照避开底质沉积不稳定、易受搅动和水表层水草茂盛之处的布设原则,并重点参考了国家监测站在洞庭湖的监测断面布设现状和相关经典文献采样点位的布设情况^[26,27],要求基本覆盖洞庭湖的整个水域,并考虑到了沉积物重金属分布的空间不均匀性,设置13个具有代表性的监测点,这些监测点分别为:南嘴(S1)、目平湖(S2)、小河嘴(S3)、万子湖(S4)、樟树港(S5)、虞公庙(S6)、横岭湖(S7)、鹿角(S8)、东洞庭湖(S9)、岳阳楼(S10)、荆江口(S11)、城陵矶(S12)和陆城(S13),采样点区位分布见图1.在上述采样点进行采样,沉积物采样采用DDC-2型箱式采泥器,取0~5 cm的沉积物作为样品,每个采样点设5~10个平行样,并放入可密

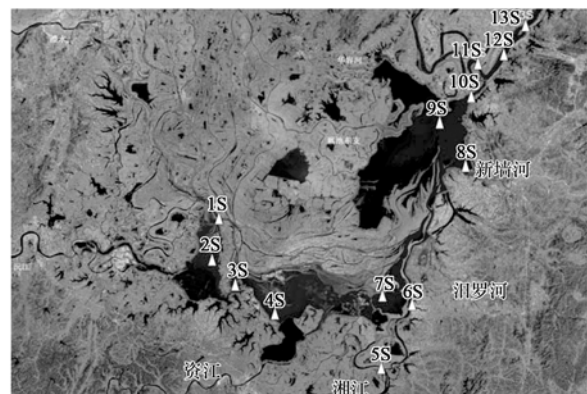


图1 研究区域及采样点位置示意

Fig. 1 Location of the studied area and sampling sites

封的洁净 PVC 袋中冷藏保存备测。

2.2 样品的分析测定

采集的沉积物样品在冷冻干燥机中烘干至恒重,经翻动、压碎、研磨并过 100 目尼龙筛,除杂后,再过 200 目尼龙筛,并编号待测. 利用电子天平准确称取 0.100 0 g 经预处理的样品于在聚四氟乙烯密闭溶样罐中,并加 HNO₃ 和 HClO₄ 进行消解并制成样品溶液,利用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)上进行了 Cr、Cu、Zn、Pb、Cd 和 As 这 6 种元素总量分析(样品预

处理、分析方法详见 DZ/T 0223-2001 电感耦合等离子质谱分析方法通则). 另利用电子天平准确称取 0.300 0 g 经预处理的样品,通过混合酸体系消解后,加入氯化亚锡溶液,采用冷原子荧光法对沉积物中 Hg 元素总量进行了测定. 考虑到采样样品测定的准确度和精度,分别对样品进行了重复分析和标样分析(重复率为 10%),重复样品分析误差 <5% 时,认为分析结果可靠,最终每个采样点的沉积物重金属元素含量取该采样点的统计均值,结果见表 2.

表 2 洞庭湖表层沉积物中重金属总量分析结果

采样点 编号	重金属含量/mg·kg ⁻¹						
	Cr	Cu	Zn	Pb	Cd	Hg	As
S1	82.700	63.800	114.000	25.698	0.329	0.065	15.400
S2	83.000	37.800	143.000	12.780	4.050	0.433	12.902
S3	98.000	35.702	124.000	9.890	2.909	0.150	16.230
S4	89.600	35.798	132.000	13.900	2.490	0.140	19.100
S5	87.110	63.400	329.000	180.000	12.500	0.144	104.900
S6	87.400	41.200	282.000	66.099	4.360	0.461	28.700
S7	110.000	45.500	219.000	41.600	7.800	0.178	28.600
S8	67.130	29.000	110.000	70.800	1.630	0.046	21.600
S9	69.600	42.099	180.000	65.900	6.410	0.072	32.800
S10	98.900	63.300	292.000	125.000	12.100	0.136	60.799
S11	104.000	79.000	194.000	85.000	0.889	0.048	8.100
S12	82.000	33.200	104.000	35.200	0.389	0.016	7.440
S13	65.500	21.380	133.000	18.400	0.586	0.120	6.670
最大值	110.000	79.000	329.000	180.000	12.500	0.460	104.900
最小值	65.500	21.380	104.000	9.890	0.330	0.020	6.670
平均值	86.534	45.475	181.230	57.713	4.342	0.155	27.942
标准差	13.857	16.781	76.864	50.081	27.942	0.139	27.283

2.3 模型参数的准备和处理

2.3.1 实测重金属含量参数的梯形模糊数化

对于实测的重金属含量参数而言,存在最小值、最概然区间和最大值,可以构造参数的梯形模糊数 $\tilde{A}(a,b,c,d)$,这里 a,b,c,d 是实数,且 $a \leq b \leq c \leq d$. 研究利用 SPSS 16vers 软件对表 2 中的含量监测数据进行了 Q 型聚类分析,将其划分为若干区段,以各区段内数据占总数据的百分比作为相应区段的可信度,将可信度最高的区间作为最概然区间,例如将 As 的各采样点含量数据进行聚类后,可分为 6 类,结果表示为: $f_{As}(c)$ (可信度) = 0.231, $c = [6.67, 8.1]$; 0.385, $c = [12.9, 21.6]$; 0.231, $c = [28.6, 32.8]$; 0.077, $c = [60.799]$; 0.077, $c = [104.9]$; 0, $c = [其他]$,其中选取 $f_{As}(c) = 0.385, c = [12.9,$

21.6] 中的参数区间作为“最概然区间”;如聚类后出现几个区间的可信度一致的情况,这时根据统计学理论^[28],选取靠近中位数的最高可信度区间值 ± 0.5 倍的标准差来作为最概然区间,最后以重金属含量的最小值和最大值分别作为下限和上限,构建了重金属含量的梯形模糊数,分别为:

$$\tilde{c}_{Cr} = (65.500, 79.606, 93.462, 110.000) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$$
$$\tilde{c}_{Cu} = (21.380, 37.085, 53.866, 79.000) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$$
$$\tilde{c}_{Pb} = (9.890, 65.900, 85.000, 180.000) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$$
$$\tilde{c}_{Cd} = (0.329, 0.586, 4.360, 12.500) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$$
$$\tilde{c}_{Hg} = (0.016, 0.120, 0.178, 0.461) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$$
$$\tilde{c}_{As} = (6.670, 12.900, 21.600, 104.900) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$$

经 α -截集处理后的洞庭湖表层沉积物重金属的含量区间见表 3.

表 3 经 α -截集处理的洞庭湖表层沉积物重金属的含量数据/mg·kg⁻¹

重金属	Cr	Cu	Zn	Pb	Cd	Hg	As
数值	[78.20, 95.12]	[35.51, 56.38]	[122.00, 161.60]	[60.30, 94.50]	[0.56, 5.17]	[0.04, 0.05]	[12.28, 29.93]

2.3.2 模糊背景值含量的构造

B_i 为地球化学背景值,参考洞庭湖水系地球化学背景值的研究现状^[29,30],取李健等^[30]关于洞庭湖

沉积物的研究成果中对应区域值,并尝试将案例区域地球化学背景值以文献值的 $\pm 10\%$ 变动范围来构建模糊数,并通过 α -截集技术转化为区间数见表 4.

表 4 洞庭湖沉积物中重金属的地球化学背景值区间值

Table 4 Interval of geochemical background values of heavy metals in the sediment of Dongting Lake							
重金属元素	Cr	Cu	Zn	Pb	Cd	Hg	As
$B_i/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	[39.60,48.40]	[18.18,22.22]	[74.97,91.63]	[20.97,25.63]	[0.297,0.363]	[0.042,0.052]	[11.61,14.19]

2.4 案例沉积物中重金属污染的综合评价

根据式(8)、表 3 和表 4 计算得洞庭湖表层沉

积物中各重金属的模糊地累积指数区间值,具体结果见表 5.

表 5 洞庭湖沉积物中重金属的地累积指数区间值

Table 5 Interval of geo-accumulation indexes of heavy metals in the surface sediment from Dongting Lake							
重金属	Cr	Cu	Zn	Pb	Cd	Hg	As
数值	[0.11,0.68]	[0.09,1.05]	[-0.17,0.52]	[0.65,1.59]	[0.04,3.54]	[0.50,1.70]	[-0.79,0.78]

结合表 1,从表 5 可以得出,部分待评沉积物重金属地累积指数的部分可能值区间处于 2~3 个污染级别之间,说明重金属污染等级的确定性评价确

实存在较大的不确定性.根据表 5、式(9)和式(10)进行隶属度运算得到各重金属隶属于各污染等级的可信度,结果见表 6.

表 6 各重金属污染水平隶属于各污染等级的可信度

Table 6 Credibility of the pollution level classification of each heavy metal							
重金属	清洁	轻度污染	偏中污染	中度污染	偏重污染	重度污染	严重污染
	0	1	2	3	4	5	6
Cr	0	1	0	0	0	0	0
Cu	0	0.950	0.050	0	0	0	0
Zn	0.247	0.753	0	0	0	0	0
Pb	0	0.374	0.626	0	0	0	0
Cd	0	0.274	0.286	0.286	0.154	0	0
Hg	0	0.417	0.583	0	0	0	0
As	0.504	0.496	0	0	0	0	0

表 5 不仅列出了各重金属隶属的污染等级,同时也提供了相应的隶属可信度.从表 5 中各重金属污染等级的跨度及其可信度可以看出;评价区域重金属 Cr 仅隶属于轻度污染等级,这说明 Cr 的空间分布很均匀;Cd 则跨越了 4 个污染等级,是所有评价重金属中跨度最大的,这说明评价区域 Cd 的空间分布差异性较大;Cu、Zn、Pb、Hg 和 As 也都跨越了 2 个不同的污染等级,其空

间分布差异性相对较小.鉴于某些重金属空间分布的不均匀性,可以将相关区域作为重点监控治理区域,更有针对性地治理洞庭湖的重金属污染.

结合表 6 结果,根据式(11),计算得出洞庭湖表层沉积物重金属的 $\bar{R}_i$ 值,而后利用 SPSS 软件对评价结果进行了 Q 型聚类分析将结果分为了 4 类,其结果见表 7.

表 7 洞庭湖表层沉积物中重金属的污染程度评价结果及经聚类后评价等级

Table 7 Evaluation conclusions and rankings of the pollution levels of heay metals in the surface sediment of Dongting Lake							
重金属	Cr	Cu	Zn	Pb	Cd	Hg	As
等级	2/1 级 (轻度污染)	5/1 级 (轻度污染)	1/1 级 (轻度污染)	10/2 级 (中度污染)	60/3 级 (重度污染)	80/4 级 (严重污染)	0/1 级 (轻度污染)

为验证所建模型的可适性,将结果与确定性评价模型评价结果共同列出,结果值依次为基于沉积物重金属污染风险模糊评价模型($\bar{R}_i$)的评价结果、

确定性统计平均地累积指数分级结果、单因子评价污染指数结果($I_i = c_i/s_i, s_i$ 取相应的国家土壤环境质量标准(GB 15618-1995)的二级标准值),见表 8.

表 8 不同评价方法下洞庭湖表层沉积物中重金属的污染程度评价结果

Table 8 Evaluation results of the pollution levels of heavy metals in the surface sediment of Dongting Lake by different assessment methods							
重金属	Cr	Cu	Zn	Pb	Cd	Hg	As
结果	1/1/0.29	1/1/0.45	1/1/0.72	2/1/0.19	3/4/14.47	4/2/0.31	1/1/1.11

1) 表中数值表示 $\tilde{R}_i/I_{\text{geo}_i}/I_i$

结合表 6~8,洞庭湖表层沉积物参评重金属的污染等级在 3 种模型下的高低排序依次为: $\text{Hg} > \text{Cd} > \text{Pb} > \text{Cr} = \text{Cu} = \text{Zn} = \text{As}$, $\text{Cd} > \text{Hg} > \text{Cr} = \text{Cu} = \text{Zn} = \text{As} = \text{Pb}$, $\text{Cd} > \text{As} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Hg} > \text{Cr} > \text{Pb}$. 3 种评价模型的评价结果相似,这表明该方法用于沉积物重金属污染评价是可行的,但也存在着一些差异,主要表现在:①Hg 的污染级别是 3 种评价模型结果差异最大的,在模糊评价下为 4 级,而在确定性评价下为 2 级,而其单因素指数仅为 0.31. 造成 Hg 在模糊评价级别上远比确定性模型结果高的原因为相对于另二个模型,模糊模型加入了对于各重金属自身的生物毒性差异的考量. 由表 6 可知,Hg 的确对于偏重污染的隶属可信度最高(0.583),但是由于 Hg 自身的生物毒性是参评重金属中最高的($H_{\text{Hg}} = 40$),故模糊模型评价结果相比另两模型高;②Cd 的污染级别,在模糊评价下为 3 级,而在确定性评价下为 4 级,造成前者在评价级别上比确定性模型结果略低的原因为模糊评价中污染物浓度和地球化学背景值的选取范围更大,比采用统计平均浓度和单一的地球化学背景值包含了更多的信息,在一定程度上反映了输入参数的时空不确定性. 表 6 中 Cd 对偏重污染(4 级)的隶属可信度仅为 0.154,远小于对于偏中污染和重度污染的隶属可信度,这也充分证明了模糊评价具有更高分辨力,它减小了局部对整体的影响,在一定程度上避免了小区域污染影响整体评价结果这种情况的发生,使决策者可以更有针对性地治理污染;③单因素指数(I_i)虽然能在一定程度上反映污染程度,但其对污染程度判断有极大的不确定性,对于案例中 Hg 和 As 污染来说,单因素指数模型显然缺乏对重金属的空间浓度分布差异及 Hg 自身高生物毒性的考量而导致结果过低,从而可能误导决策;④As 的污染级别在在模糊评价和确定性评价均为轻度污染(1 级),而其对应 I_{As} 却大于 1,其原因是单因素指数法的对比参照为国家土壤环境质量二级标准(GB 15618-1995),忽略了每个特征地区及不同土壤类型在重金属背景值上的差异性,结果造成评价结果过高,从而可能误导决策者关于当地土地开发利用相关规划的制定.

综上,洞庭湖表层沉积物已受到了部分重金属的明显污染,根据文献资料,其原因很可能就是工矿企业的采冶排污,工业废水、生活污水排放和农业生产非点源污染,鉴于该地区的区位特征及其极为重要的生态价值,故建议有关部门把 Hg、Cd 和 Pb 作为优先的污染控制对象,并且积极关注沉积物与水环境中其浓度及重金属赋存形态的变化,主动地采取一些生物、化学修复技术进行治理.

所建立的沉积物重金属污染风险模糊评价模型考虑到了重金属实际含量的空间分布的差异性,并同时考虑了个别区域重金属严重污染这一情况的存在,又避免了因个别值影响整体评价结果这一情况的发生,最后又纳入了对于不同重金属自身生物毒性差异的考量,这是常规的确定性评价模型难以实现的,但模型中也仍存在问题,主要有①重金属生物毒性评价权重系数仅仅是以污染物-植物毒性而类比得出的,暂不能完全真实的表达污染物-人类的毒性效应;②沉积物中重金属的赋存形态在区域空间上可能有较大差异,结合存在区域环境要素差异,很可能在迁移转化能力上有着较大差异等,这也为模型的进一步拓展研究与改进指明了方向.

3 结论

(1) 基于重金属生物毒性评价权重系数的沉积物重金属污染风险模糊评价模型通过计算各重金属地累积指数的可能值区间,进而得出与之对应的隶属可信度水平,提高了评价结果的可分辨性,更全面、真实地综合表征了评价区域沉积物中重金属富集污染状况及其可能潜在生物毒性风险的水平,并预留了关心受体耐受级别(P)类可选择添加的参数,为沉积物重金属的污染评价提供了新的思路.

(2) 采用沉积物重金属污染风险模糊评价模型评价了洞庭湖表层沉积物的重金属污染现状,各重金属的综合评价价值由高到低依次为: Hg 、 Cd 、 Pb 、 Cu 、 Cr 、 Zn 和 As ,主要原因可能是工矿企业的采冶排污,工业废水、生活污水排放和农业生产非点源污染,因此,Hg、Cd 和 Pb 应成为今后洞庭湖水系沉积物及水环境污染治理的优先控制因子.

参考文献:

- [1] 张忠文, 李光德, 张世远, 等. 泮河底泥中重金属污染及潜在生态危害评价[J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(11): 134-136.
- [2] 张乃星, 曹丛华, 任荣珠, 等. 胶州湾外海洋倾倒区表层沉积物中的重金属及其潜在生态风险[J]. 环境科学, 2011, **32**(5): 1315-1320.
- [3] Mackay D. Multimedia environmental models: the fugacity approach[M]. (2nd ed.). FL, USA: CRC Press, 2001. 39-44.
- [4] Vallee B L, Ulmer D D. Biochemical effects of mercury, cadmium, and lead[J]. Annual Review of Biochemistry, 1972, **41**(10): 92-108.
- [5] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [6] 单丽丽, 袁旭音, 茅昌平, 等. 长江下游不同源沉积物中重金属特征及生态风险[J]. 环境科学, 2008, **29**(9): 2399-2404.
- [7] 戴秀丽, 孙成. 太湖沉积物中重金属污染状况及分布特征探讨[J]. 上海环境科学, 2001, **20**(2): 71-74.
- [8] Hilton J, Davison W, Ochsenein U. A mathematical model for analysis of sediment core data; implications for enrichment factor calculations and trace-metal transport mechanisms[J]. Chemical Geology, 1985, **48**(1-4): 281-291.
- [9] 宁晓波, 项文化, 方晰, 等. 贵阳花溪区石灰土林地土壤重金属含量特征及其污染评价[J]. 生态学报, 2009, **29**(4): 2169-2177.
- [10] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine river[J]. Geojournal, 1969, **2**(3): 108-118.
- [11] Förstner U. Lecture notes in earth sciences (contaminated sediments)[M]. Berlin: Springer Verlag, 1989. 107-109.
- [12] 张超兰, 白厚义. 用模糊综合评判法评价土壤重金属污染程度[J]. 广西农业生物科学, 2003, **22**(1): 54-57.
- [13] 王建国, 杨林章, 单艳红. 模糊数学在土壤质量评价中的应用研究[J]. 土壤学报, 2001, **38**(2): 176-183.
- [14] 樊梦佳, 袁兴中, 祝慧娜, 等. 基于三角模糊数的河流沉积物中重金属污染评价模型[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(8): 1700-1706.
- [15] 祝慧娜, 袁兴中, 曾光明, 等. 基于区间数的河流水环境健康风险模糊综合评价模型[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(7): 1527-1533.
- [16] 李如忠, 董芳, 周爱佳, 等. 基于梯形模糊数的地表灰尘重金属污染健康风险评价模型[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(8): 1790-1798.
- [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] Pan N F. Fuzzy AHP approach for selecting the suitable bridge construction method[J]. Automation in Construction, 2008, **17**(8): 958-965.
- [19] 李如忠. 基于不确定信息的城市水源水环境健康风险评价[J]. 水力学报, 2007, **38**(8): 895-900.
- [20] 曾文艺, 罗承忠, 肉孜阿吉. 区间数的综合决策模型[J]. 系统工程理论与实践, 1997, **11**: 48-50.
- [21] 弓晓峰, 陈春丽, 周文斌, 等. 鄱阳湖底泥中重金属污染现状评价[J]. 环境科学, 2006, **27**(4): 732-736.
- [22] 安立会, 郑丙辉, 张雷, 等. 渤海湾河口沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(5): 666-670.
- [23] 陈静生. 环境地球化学[M]. 北京: 海洋出版社, 1990.
- [24] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(2): 112-115.
- [25] 窦鸿身, 姜加虎. 洞庭湖[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2000.
- [26] 林素梅, 王圣瑞, 金相灿, 等. 湖泊表层沉积物可溶性有机氮含量及分布特性[J]. 湖泊科学, 2009, **21**(5): 623-630.
- [27] 祝云龙, 姜加虎, 孙占东, 等. 洞庭湖沉积物中重金属污染特征与评价[J]. 湖泊科学, 2008, **20**(4): 477-485.
- [28] Han J W, Kamber M, Pei J. Data mining: concepts and techniques[M]. (2nd ed.). California: Morgan Kaufmann, 2006. 14-60.
- [29] 姚志刚, 鲍征宇, 高璞. 洞庭湖沉积物重金属环境地球化学[J]. 地球化学, 2006, **35**(6): 630-638.
- [30] 李健, 曾北危, 姚岳云, 等. 洞庭湖水系水体环境背景值调查研究[J]. 环境科学, 1986, **7**(4): 62-68.

CONTENTS

Isotopic Composition and Isotope Tracing of Sulfur in Atmospheric Precipitation at the Head Area of the Three Gorges Reservoir, China	WU Qi-xin, HAN Gui-lin (2145)
Characterization and Reconstruction of Aerosol Light Scattering Coefficient at Chengdu During Biomass Burning and Dust Storm Period in Spring	YUE Jian-hua, TAO Jun, LIN Ze-jian, <i>et al.</i> (2151)
Aerosol Optical Thickness of the Atmospheric Aerosol over Taihu Lake and Its Features; Results of In-site Measurements	RAO Jia-wang, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao, <i>et al.</i> (2158)
Seasonal Variations in the Vertical Distribution of Aerosols During Dry Haze Periods in Regions Around Shanghai	XU Ting-ting, QING Yan, GENG Fu-hai, <i>et al.</i> (2165)
Size Distributions and Diurnal Variations in the Concentrations of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Winter in Urban and Suburban Nanjing, China	ZHANG Hong-liang, FAN Shu-xian, GU Kai-hua, <i>et al.</i> (2172)
Seasonal Distribution of Water-Soluble Inorganic Ions in the Atmospheric Aerosol in Qingdao	LIU Zhen, QI Jian-hua, WANG Lin, <i>et al.</i> (2180)
Pollution Characteristics of Microbial Aerosols Generated from a Municipal Sewage Treatment Plant	QIU Xiong-hui, LI Yan-peng, NIU Tie-jun, <i>et al.</i> (2191)
Estimation of the Effect Derived from Wind Erosion of Soil and Dust Emission in Tianjin Suburbs on the Central District Based on WEPS Model	CHEN Li, HAN Ting-ting, LI Tao, <i>et al.</i> (2197)
Variation of Nutrient Concentrations at the Inshore Coastal Area of Northern Jiangsu Province and the Occurrence of Green Tide Caused by <i>Enteromorpha prolifera</i>	GAO Song, SHI Xiao-yong, WANG Ting (2204)
Analysis on Characteristics of Red Tide in Fujian Coastal Waters During the Last 10 Years	LI Xue-ding (2210)
Review on HSPF Model for Simulation of Hydrology and Water Quality Processes	LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, LI Yan (2217)
Parameter Uncertainty Analysis for Urban Rainfall Runoff Modelling	HUANG Jin-liang, LIN Jie, DU Peng-fei (2224)
Estimation of DOC Concentrations Using CDOM Absorption Coefficients; A Case Study in Taihu Lake	JIANG Guang-jia, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao (2235)
Weight Parameters of Water Quality Impact and Risk Grade Determination of Water Environmental Sensitive Spots in Jianshan	XIE Rong-rong, PANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (2244)
Diurnal Variation and Evaluation of Water Quality in Different Seasons of Panxi River in Chongqing	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (2251)
Responses of Wetland Water Quality to Influence the Strengthness of Urbanization in Nanjing, China	HAO Jing-feng, LIU Hong-yu, HU He-bing, <i>et al.</i> (2259)
Studies on Relationship of Phytoplankton and Water Environmental Factors in Shahu Lake	QIU Xiao-cong, ZHAO Hong-xue, SUN Xiao-xue (2265)
Influence on the Spatial Distribution of Fish in Taizi River Basin by Environmental Factors at Multiple Scales	DING Sen, ZHANG Yuan, QU Xiao-dong, <i>et al.</i> (2272)
Comparison and Application of Biological Indices of Macroinvertebrates in River Health Assessment	GENG Shi-wei, QU Xiao-dong, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2281)
Spatial and Temporal Distribution of Total Mercury (T-Hg) in Different Water Bodies of Nam Co, Tibetan Plateau	WANG Kang, KANG Shi-chang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> (2288)
Temporal and Spatial Variations of Major Ions in Nam Co Lake Water, Tibetan Plateau	GUO Jun-ming, KANG Shi-chang, ZHANG Qiang-gong, <i>et al.</i> (2295)
Eutrophication Control in Local Area by Physic-ecological Engineering	LI Qiu-hua, XIA Pin-hua, WU Hong, <i>et al.</i> (2303)
Nitrogenous Fluxes and Its Self-Purification Capacity in Lake Taihu	CHEN Xiao-feng, CHUAI Xiao-ming, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2309)
Response of Phosphorus Components in Sediments from Eutrophic Lake to External Sulfate	YUAN Tan, HUA Yu-mei, ZHU Duan-wei, <i>et al.</i> (2315)
Spatial Distribution Character of Phosphorus Fractions in Surface Sediment from Chaohu Lake	WEN Sheng-fang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong (2322)
Long-range Transport Potential of Typical Organic Pollutants in Nanjing	FANG Li-jiang, WU You-fang, DING Zhong-yuan, <i>et al.</i> (2330)
Distribution of Black Carbon in the Surface Sediments of the East China Sea and Their Correlations with Persistent Organic Pollutants	LIN Tian, FANG Yin, CHEN Ying-jun, <i>et al.</i> (2335)
Contamination Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Water from Jialing River in Chongqing	CAI Wen-liang, LUO Gu-yuan, XU Xiao-yi, <i>et al.</i> (2341)
Levels, Distribution and Possible Sources of Polychlorinated Biphenyls in River Sediments from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, MIAO Yi, <i>et al.</i> (2347)
Assessment Model for Heavy Metal Pollution in Sediment Based on Trapezoidal Fuzzy Numbers and Case Study	LI Fei, HUANG Jin-hui, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i> (2352)
Impact of Coastal Exploitation on the Heavy Metal Contents in the Sediment of Bohai Bay	QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (2359)
Spatial Distribution and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Intertidal Surface Sediments of Eastern Chongming	LI Ya-juan, YANG Shi-lun, HOU Li-jun, <i>et al.</i> (2368)
Speciation and Vertical Distribution of Heavy Metals in Sediments of Baiyangdian Lake	LI Bi-cai, HE Lian-sheng, YANG Min, <i>et al.</i> (2376)
AVS Concentrations in Xinan Creek and the Influencing Factors	LIU Xiao-bing, WEN Yan-mao, LI Feng, <i>et al.</i> (2384)
Mechanism of NH_4^+ -N Removal in Drinking Water Biofilter	LIU Bing, FAN Hui, YU Guo-zhong, <i>et al.</i> (2394)
Characterization and Thermodynamic Properties of Cu(II) Imprinted Chitosan Crosslinked Membrane	ZHANG Yu-hong, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti, <i>et al.</i> (2403)
Studies on the Degradation of Paracetamol in Sono-electrochemical Oxidation	DAI Qi-zhou, MA Wen-jiao, SHEN Hong, <i>et al.</i> (2410)
Study on Treatment of Methylene Blue Wastewater by Fly Ash Adsorption-Fenton and Thermal Regeneration	BAI Yu-jie, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti (2419)
Electricity Generation Performance of Two-Chamber Microbial Full Cell in the Treatment of Simulated Wastewater	ZHANG Yong-juan, LI Yong-feng, LIU Chun-yan, <i>et al.</i> (2427)
Preparation and Characterization of Zn/Cr-LDHs and Their Removal Performances of Reactive Brilliant Orange X-GN	WANG Xiao-rong, WU Ping-xiao (2432)
Transport Processes of Low-level Radioactive Liquid Effluent of Nuclear Power Station in Closed Water Body	WU Guo-zheng, XU Zong-xue (2438)
Analysis of Carbon Balance and Study on Mechanism in Anoxic-Oxic-Settling-Anaerobic Sludge Reduction Process	ZHAI Xiao-min, GAO Xu, ZHANG Man-man, <i>et al.</i> (2444)
Effect of Mixed Carbon Sources in the Granulation Process of EBPR System	JIANG Tao, SUN Pei-de, XU Shao-juan (2451)
Biocatalyst of Redox Mediators on the Denitrification by <i>Paracoccus versutus</i> Strain GW1	LI Hai-bo, LIAN Jing, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (2458)
Isolation of a High Hydrogen-producing Mutant TB34 Generated by Transposon Insertion and Analysis of Hydrogen Production	LIU Hong-yan, WANG Guang-ce, SHI Liu-yang, <i>et al.</i> (2464)
Condition Optimization for Degradation of Chlorophenols Using Laccase from <i>Amillariella mellea</i>	QIN Ren-bing, ZHU Xian-feng, WU Ke, <i>et al.</i> (2470)
Characterization of CH_4 , N_2O Emission and Selection of Rice Cultivars in Double Cropping Rice Fields	FU Zhi-qiang, ZHU Hua-wu, CHEN Can, <i>et al.</i> (2475)
Short-term Effects of Exogenous Nitrogen on CH_4 and N_2O Effluxes from <i>Cyperus malaccensis</i> Marsh in the Min River Estuary	MOU Xiao-jie, LIU Xing-tu, TONG Chuan, <i>et al.</i> (2482)
Temporal-spatial Variations of Total Nitrogen in the Degraded Grassland of Three-River Headwaters Region in Qinghai Province	PENG Jing-tao, LI Guo-sheng, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2490)
Temporal Variations of Clay Content in Eroded Sediment Under Different Rainfall Condition	WU Feng-zhi, SHI Zhi-hua, FANG Nu-fang, <i>et al.</i> (2497)
Effects of Soil Properties on the Stabilization Process of Cadmium in Cd Alone and Cd-Pb Contaminated Soils	WU Man, XU Ming-gang, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i> (2503)
<i>In-situ</i> Remediation of Polychlorinated Biphenyls Polluted Soil by Ecological Controlling Measures; A Field Trial	PAN Cheng, TENG Ying, LUO Yong-ming, <i>et al.</i> (2510)
Characterization Comparison of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Uptake by Roots of Different Crops	LIANG Xiao, ZHAN Xin-hua, ZHOU Li-xiang (2516)
Characteristics and Mechanism of Sodium Removal by the Synergistic Action of Flue Gas and Waste Solid	YI Yuan-rong, HAN Min-fang (2522)
Decomposition Model of Energy-Related Carbon Emissions in Tertiary Industry for China	LU Yuan-qing, SHI Jun (2528)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年7月15日 33卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 7 Jul. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人