

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第11期

Vol.35 No.11

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊夏季近地层臭氧及其前体物体积分数变化特征 邵平, 安俊琳, 杨辉, 林旭, 吉东生 (4031)

亚青会期间南京污染气体与气溶胶中水溶性离子的分布特征 邹嘉南, 安俊琳, 王红磊, 邵平, 段卿, 薛国强, 庞博 (4044)

亚青会期间南京地区气溶胶浓度变化及其与能见度的关系 袁亮, 银燕, 李琦, 肖辉, 李力 (4052)

2013年10月长株潭城市群一次持续性空气污染过程特征分析 廖志恒, 范绍佳, 黄娟, 孙家仁 (4061)

在线单颗粒气溶胶质谱 SPAMS 对细颗粒物中主要组分提取方法的研究 付怀于, 闫才青, 郑玫, 蔡靖, 李小滢, 张延君, 周振, 傅忠, 李梅, 李磊, 张远航 (4070)

PM₁₀可替代源成分谱的建立方法及其应用 陈强, 景毅, 吴焕波, 王芳 (4078)

夏季东海和南黄海一氧化碳的浓度分布、海-气通量和微生物消耗研究 王敬, 陆小兰, 杨桂朋, 徐冠球 (4085)

三峡库区典型农田小流域水体汞的时空分布特征 王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇 (4095)

浑太水水体中不同粒径有机胶体荧光光谱特性 刘娜娜, 李斌, 刘瑞霞, 宋永会, 吴畏 (4103)

深圳湾流域 TN 和 TP 入海年通量变化规律研究 赵晨辰, 张世彦, 毛献忠 (4111)

滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性 熊强, 焦立新, 王圣瑞, 彭希琰 (4118)

金山湖闸坝型水体表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价 周晓红, 刘龙梅, 陈曦, 陈志刚, 张金萍, 李义敏, 刘彪 (4127)

西藏普莫雍错湖芯沉积物中重金属的垂向分布特征及生态风险评估 谢婷, 罗东霞, 杨瑞强 (4135)

西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析 袁宏林, 李星宇, 王晓昌 (4143)

城市不同下垫面降雨径流多环芳烃(PAHs)分布及源解析 武子澜, 杨毅, 刘敏, 陆敏, 于英鹏, 汪青, 郑鑫 (4148)

粗放型绿色屋面填料的介质组成对出水水质的影响 陈昱霖, 李田, 顾俊青 (4157)

饮用水处理中不同来源生物活性炭微生物群落多样性和结构研究 杜尔登, 郑璐, 冯欣欣, 高乃云 (4163)

压力强化混凝除藻工艺中藻毒素安全性研究 蒋新跃, 栾清, 丛海兵, 徐思涛, 刘玉娇, 朱学源 (4171)

基于膜特征参数变化的蛋白质超滤过程膜污染研究 王旭东, 张银辉, 王磊, 张慧慧, 夏四清 (4176)

臭氧氧化水溶液中对乙酰氨基酚的机制研究 曹飞, 袁守军, 张梦涛, 王伟, 胡真虎 (4185)

电辅助微生物反应器降解苯并噻唑效能的研究 刘春苗, 丁杰, 刘先树, 程旺斌 (4192)

铁镧复合氧化物纳米吸附剂的制备、表征及 As(III)吸附性能研究 张伟, 陈静, 张高生 (4198)

重金属铬胁迫下水蚯蚓的生理响应研究 楼菊青, 杨东叶, 曹永青, 孙培德, 郑平 (4205)

光质对蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)生长特征及生化组成的影响研究 唐青青, 方治国, 嵇雯雯, 夏会龙 (4212)

常温低基质下碱度和溶解氧对厌氧氨氧化的影响 任玉辉, 王科, 李相昆, 马凯丽, 张杰 (4218)

Fe²⁺和 Fe³⁺对厌氧氨氧化污泥活性的影响 李祥, 黄勇, 巫川, 王孟可, 袁怡 (4224)

CSTR 中亚硝化颗粒污泥的变化过程研究 阴方芳, 刘文如, 王建芳, 吴鹏, 沈耀良 (4230)

盐度对好氧颗粒污泥硝化过程中 N₂O 产生量的影响 王珊珊, 梁红, 高大文 (4237)

硫酸盐还原反应器污泥驯化过程中微生物群落变化分析 曾国驱, 贾晓珊, 郑小红, 杨丽平, 孙国萍 (4244)

利用铅同位素方法量化不同端元源对南京土壤和长江下游悬浮物铅富集的影响 王成, 夏学齐, 张义, 廖启林, 杨忠芳, 季峻峰 (4251)

北京东南郊土壤剖面氟喹诺酮类抗生素分布特征 苏思慧, 何江涛, 杨蕾, 乔肖翠, 崔亚丰 (4257)

环境因素对土壤中几种典型四环素抗性基因形成的影响 张俊, 罗方园, 熊浩徽, 焦少俊, 叶波平 (4267)

稻田土壤不同水分条件下硝化/反硝化作用及其功能微生物的变化特征 刘若萱, 贺纪正, 张丽梅 (4275)

典型岩溶土壤微生物丰度与多样性及其对碳循环的指示意义 靳振江, 汤华峰, 李敏, 黄炳富, 李强, 张家喻, 黎桂文 (4284)

变温环境对典型石灰土有机碳矿化的影响 王莲阁, 高若红, 丁长欢, 慈恩, 谢德体 (4291)

铁氧化物与电子供体基质交互作用对红壤性水稻土中 DDT 还原脱氯影响 刘翠英, 徐向华, 王壮, 姚童言 (4298)

植物套种及化学强化对重金属污染土壤的持续修复效果研究 卫泽斌, 郭晓方, 吴启堂, 龙新宪 (4305)

不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征 李洪建, 高玉凤, 严俊霞, 李君剑 (4313)

不同开垦年限黑土温室气体排放规律研究 李平, 郎漫, 徐向华, 李煜姗, 朱淑娟 (4321)

转 Cry1Ac 基因抗虫棉与其亲本棉花根际真菌多样性的比较 潘建刚, 焦海华, 白志辉, 齐鸿雁, 马安周, 庄国强, 张洪勋 (4329)

天津污灌区内气态汞的污染特征及在叶菜类蔬菜中的富集 郑顺安, 韩允垒, 郑向群 (4338)

1-硝基萘和 1,2-萘醌的联合细胞毒性和致 DNA 损伤 尚羽, 蒋玉婷, 张玲, 李怡 (4345)

鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究 卜贵军, 于静, 邱慧慧, 罗世家, 周大寨, 肖强 (4352)

污泥预植重金属 Cu 炭化及炭中重金属的稳定性研究 窦晓敏, 陈德珍, 戴晓虎 (4359)

上层曝气式生物反应器填埋工艺特性的研究 田颖, 王坤, 徐期勇 (4365)

硝酸盐连续回灌对生物反应器填埋场 N₂O 产生的影响 卞荣星, 孙英杰, 李晶晶, 张欢欢 (4371)

中国碳强度下降和碳排放增长的行业贡献分解研究 蒋晶晶, 叶斌, 计军平, 马晓明 (4378)

泛长三角地区工业污染重心演变路径及其驱动机制研究 赵海霞, 蒋晓威, 崔建鑫 (4387)

基于污染防治技术模拟的造纸行业环境管理方法研究 张雪莹, 温宗国 (4395)

大气棕色碳的研究进展与方向 闫才青, 郑玫, 张远航 (4404)

《环境科学》征稿简则(4094) 《环境科学》征订启事(4126) 信息(4243, 4266, 4274, 4328)

金山湖闸坝型水体表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价

周晓红, 刘龙梅, 陈曦, 陈志刚, 张金萍, 李义敏, 刘彪

(江苏大学环境与安全工程学院, 镇江 212013)

摘要: 采集金山湖闸坝型水体表层沉积物, 经 HNO_3 - HF - HClO_4 消解后, 通过电感耦合等离子体光谱法 (ICP) 测定沉积物 As、Cu、Pb、Cd、Zn、Cr 等 6 种重金属含量, 通过富集系数、地累积指数法、潜在生态风险评价以及溯源分析等对沉积物重金属的分布特征进行综合评价. 结果表明: ①金山湖表层沉积物 As、Pb、Cu、Zn、Cr、Cd 的平均值分别为 23.22、26.20、24.42、143.12、245.30 和 0.67 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中, Pb、Cu 含量低于土壤环境质量标准一、二级标准, Zn、Cr 含量介于土壤环境质量标准一级标准与二级标准之间, As、Cd 含量均超过土壤环境质量标准一、二级标准; 从空间分布来看, Pb 和 Zn 在北固山广场的 1 号样点形成最高值, As、Cu、Cr、Cd 的含量分别在镇润洲码头附近的 12 号样点、运粮河河口区域的 3 号样点、湖中靠近征润州岛的 14 号样点、春江潮与解放路泵站之间往湖中心处的 7 号样点处出现最高值. ②富集系数表现为 $\text{As} > \text{Cr} > \text{Cd} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Cu}$, 表明金山湖表层沉积物中 As 的富集量最大, Cu 最小. ③根据地累积指数判断, 金山湖未受 Cu 的污染, Pb、Zn、Cd 则为轻度污染, As、Cr 表现为偏中度污染; ④6 种重金属的单项潜在生态危害系数表现顺序为 $\text{Cd} > \text{As} > \text{Cr} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Zn}$, 其中, Cr、Pb、Cu、Zn 均为轻微生态危害程度, As 和 Cd 处于中等生态危害程度; 从全湖分布看, 北固湾广场附近 (1 号样点)、春江潮与解放路泵站之间靠近岸边区域 (6 号样)、春江潮与解放路泵站之间往湖中心处 (7 号样点) 以及镇润洲码头附近 (12 号样点) 样点的潜在生态危害为中等, 其余采样点均为轻微潜在生态危害; ⑤主成分分析结果表明, 金山湖沉积物重金属的差异除了受到各样点沉积物环境背景值的影响外, 还与各采样点周围人为活动、外源污水排放等有密切关系. ⑥本次研究中发现闸坝对金山湖沉积物重金属分布的影响不明确, 该部分内容尚需进行长时间尺度的研究.

关键词: 沉积物; 重金属; 地累积指数; 生态风险; 金山湖; 闸坝

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)11-4127-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.11.012

Heavy Metals Distribution Characteristics and Ecological Risk Evaluation in Surface Sediments of Dammed Jinshan Lake

ZHOU Xiao-hong, LIU Long-mei, CHEN Xi, CHEN Zhi-gang, ZHANG Jin-ping, LI Yi-min, LIU Biao

(School of the Environment and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to reveal the pollution loading of heavy metals in Dammed Jinshan lake, six heavy metals (As, Cu, Pb, Cd, Zn, Cr) from 18 sediment samples were analyzed using ICP, and the distribution characteristics of heavy metals in the sediment were comprehensively evaluated through concentration coefficient, geo-accumulation indexes, potential ecological risk evaluation and traceability analysis. The results showed that ① the average contents of As, Pb, Cu, Zn, Cr, Cd were 23.22, 26.20, 24.42, 143.12, 245.30 and 0.67 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively, in the surface sediments of dammed Jinshan Lake. The average contents of Pb and Cu were lower than the primary standard and secondary standards of soil environmental quality standards. The average contents of Zn and Cr were lower than the primary standard and higher than the secondary standards of soil environmental quality standards. The average contents of As and Cd were higher than the primary and secondary standards of soil environmental quality standards. From the spatial distribution, the contents of Pb and Zn were the highest at sampling site No. 1, which was located at the Beigushan Square. The contents of As, Cu, Cr, Cd were the highest at sampling sites Nos. 12, 3, 14, and 7, respectively; ② The order of concentration coefficient was $\text{As} > \text{Cr} > \text{Cd} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Cu}$, which indicated that the enrichment amount of As was the highest and that of Cu was the lowest; ③ Based on the geo-accumulation indexes, the Cu is clean and Pb, Zn, Cd is the light pollution and As, Cr moderate pollution; ④ The order of Potential ecological risk coefficient was $\text{Cd} > \text{As} > \text{Cr} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Zn}$, Cr, Pb, Cu, Zn were of light ecological risk and As, Cd were of medium ecological risk. From the spatial distribution, the sampling sites Nos. 1, 6, 7 and 12 had medium potential ecological risk, and the rest sample points had slight potential ecological risk; ⑤ The principal component analysis (PCA) revealed that the main reason for the differences of heavy metals in surface sediments of Jinshan lake was the different sediment environmental background value at the 18 samples sites. Besides, the pollution sources in each sampling sites also contributed to the differences in heavy metals; ⑥ the influence of the dam on the heavy metals distribution was not clear, and requires long-term study.

收稿日期: 2014-04-01; 修订日期: 2014-07-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51109097); 江苏省基础 Research 计划 (自然科学基金) 项目 (BK2011520); 中国博士后科学基金第五批特别资助项目 (2012T50464)

作者简介: 周晓红 (1981 ~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为水环境生态修复, E-mail: xzhzhou0214@163.com

Key words: sediments; heavy metals; geo-accumulation index; ecological risk; Jiashan Lake; dam

沉积物作为湖泊重金属污染的“源”和“汇”,在湖泊生态系统污染物的生物地球化学循环中起到至关重要的作用^[1~3]. 由于重金属污染不易被微生物降解,且可随食物链累积而呈现生物放大效应^[4],对生态系统构成多种威胁^[5~10],因此成为湖泊沉积物中的主要污染物之一.

近年来,包括太湖^[11,12]、洪泽湖^[13]、巢湖^[14]、昆承湖^[15]、乌梁素湖^[16]、玄武湖^[17]等在内的多个湖泊沉积物重金属污染物时空分布、生物有效性、潜在生态风险评价等已有大量成果发表,综合现有研究成果后发现,由于湖泊自身形态、水文、污染源等差异,导致各个湖泊重金属污染种类、累积过程以及生态风险等差异较大. 可见,针对特定湖泊沉积物重金属污染分布特征的调查与评价研究,将为湖泊污染的综合治理提供关键的基础数据.

然而,到目前为止尚未查到有关闸坝型水体沉积物中重金属方面的研究报道. 由于闸坝型水体水文等往往受闸坝控制,使得水流、污染物、沉积物等均与自然水体有所差异. 表现为①闸坝型水体流向多变,关闭闸坝时水流主要靠风力驱动;当打开闸坝时,水体流向受闸坝前后水位高低决定,闸坝不同的开启模式可能导致水流呈现相反的流向. ②闸坝型水体在关闸蓄水阶段,水体处于相对静止状态,污染物迁移扩散作用较小,且随蓄水时间的延长,水质恶化现象明显. ③特殊的水力条件使得闸坝型水体泥沙淤积现象更为严重,且淤积主要发生在闸下河道^[18]. 基于此,本文选择典型的闸坝型水体——镇江市金山湖为研究对象,对表层沉积物中 As、Cu、Pb、Cd、Zn、Cr 等 6 种重金属含量、富集系数、地累积指数法、潜在生态风险评以及溯源分析等进行综合分析,通过获得湖泊沉积物重金属的分布特征等基础数据,以期对闸坝型水体的综合整治提供依据.

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区域位于江苏省镇江市金山湖,介于北纬 $32^{\circ}13'4.652'' \sim 32^{\circ}14'35.79''$,东经 $119^{\circ}25'5.711'' \sim 119^{\circ}29'48.049''$ 之间,位于镇江城市市区北部,是镇江市金山、焦山、北固山“三山”名胜景区的核心所在,该地区属亚热带湿润气候,年平均气温 15.6°C ,年均降水量约 1088.2 mm . 金山湖是典型

的闸坝型水体,东西方向长约 4 km ,南北宽约 2 km ,丰水期面积约 8.8 km^2 ,占镇江城市地表水面积的 80% 以上. 金山湖原名为内江,是旧镇江港的所在地,自 1987 年来开通了连接内江与长江的引航道,使得长江水可通过引航道进入内江,通过下游东侧出口回流长江. 但是,由于长江水位一年四季变化幅度较大,枯水期内江水质有恶化的趋势,因此自 2009 年,分别在湖泊东西两侧的焦山南和引航道建设了水利调度枢纽工程,通过闸坝来实现内江水位的调控,自此,内江成为半封闭式闸坝型水体,并更名为金山湖.

根据金山湖东西两侧闸门的启闭状态,分为 3 种水力阶段:①蓄水阶段:同时关闭两侧闸门,金山湖与长江之间没有水体交换;②注水阶段:打开引航道闸门,关闭焦南大坝闸门,长江水体由引航道注入金山湖,增加湖泊水量;③换水阶段:同时打开引航道闸门与焦南大坝闸门,长江水体由引航道进入金山湖,由焦南大坝置换出湖泊水体^[18].

1.2 采样点设置、样品采集与预处理

综合考虑金山湖的水域面积、湖岸线形态,溢流污染排污口、闸坝控制的水动力条件等特征,在整个湖区共设 18 个采样点(图 1). 2013 年 10 月 13 日,采用彼得逊抓斗采泥器采集各样点表层沉积物,每个样点采集 3 次,充分混合后迅速保存于聚乙烯自封袋里(排出空气),运回实验室后,低温 4°C 保存,并通过冷冻干燥仪器于 -45°C 冷冻干燥(LGJ-12 压差型,北京松源华兴科技发展有限公司),用玛瑙研钵研磨,过 100 目筛,自封袋封装后保存备用.

1.3 样品测定方法

沉积物重金属元素测定采用全消解方法进行预处理^[19]. 称取 0.1000 g 预处理好的样品置于 30 mL 聚四氟乙烯坩埚中,加入 7 mL HF 溶液和 1 mL 浓 HNO_3 溶液,经 $\text{HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$ 消解后转移到容量瓶中,定容摇匀,离心后取上清液,通过用电感耦合

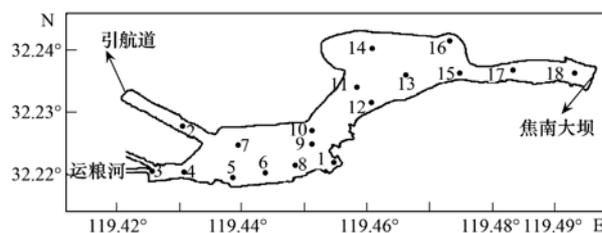


图 1 采样点示意

Fig. 1 Location of sampling sites

等离子体发射光谱仪 (ICP spectrometer, VISTA-MPX, 澳大利亚瓦里安有限公司) 测定 Cu、As、Cr、Pb、Cd、Zn 等重金属元素含量。

1.4 沉积物重金属的地累积指数评价

地累积指数法 (I_{geo}) 是目前使用最广泛的评价沉积物重金属污染程度的方法之一^[20-22], 由 Muller^[23] 提出, 该评价方法不仅考虑地质过程可能引起背景值变动的因素, 也考虑到人为因素对重金

属污染的影响, 计算方法见公式 (1) 所示:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left[\frac{C_n}{1.5B_n} \right] \quad (1)$$

式中, C_n 为样品中元素 n 在沉积物中的含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); B_n 为沉积物岩中的地球化学背景值, 或者为当地沉积物背景值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。根据 I_{geo} 计算结果, 将沉积物重金属污染状况分为 7 个等级, 见表 1 所示。

表 1 地累积指数 I_{geo} 及对应污染程度分级^[23]

I_{geo}	$I_{\text{geo}} < 0$	$0 < I_{\text{geo}} \leq 1$	$1 < I_{\text{geo}} \leq 2$	$2 < I_{\text{geo}} \leq 3$	$3 < I_{\text{geo}} \leq 4$	$4 < I_{\text{geo}} \leq 5$	$I_{\text{geo}} \geq 5$
级数	0	1	2	3	4	5	6
污染程度	清洁	轻度污染	偏中度污染	中度污染	偏重污染	重污染	严重污染

1.5 沉积物重金属的潜在危害生态评价

采用较为常用的重金属的潜在危害生态评价^[24, 25], 通过公式 (2)、公式 (3) 对金山湖沉积物重金属单项潜在生态危害指数以及综合潜在生态危害指数进行评价, 评价标准如表 2 所示。

单个重金属的潜在生态危害指数值, 符号为 E_r^i :

$$E_r^i = T_r^i C_s^i / C_n^i \quad (2)$$

多种重金属综合潜在生态危害指数, 符号为 RI:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i C_s^i = \sum_{i=1}^n T_r^i C_s^i / C_n^i \quad (3)$$

式中, C_r^i 为第 i 种重金属的富集系数 ($C_r^i = C_s^i / C_n^i$), C_s^i 为沉积物中第 i 种金属的实测含量; C_n^i 为重金属的背景值; 本研究采用镇江市金山湖流域重金属的背景值为参考值^[26] 进行计算。 T_r^i 为单个污染物的毒性系数, As、Cr、Pb、Cd、Cu、Zn 对应的毒性系数分别为 10、2、5、30、5、1。 单项潜在生态危害指数与相对应的潜在生态危害划分标准见表 2。

表 2 重金属污染程度及潜在生态危害等级划分标准

E_r	单个污染物生态危害程度	RI	总潜在生态危害程度
$E_r < 40$	轻微	$RI < 150$	轻微
$40 \leq E_r < 80$	中等	$150 \leq RI < 300$	中等
$80 \leq E_r < 160$	强	$300 \leq RI < 600$	强
$160 \leq E_r < 320$	很强	$RI \geq 600$	很强
$E_r \geq 320$	极强		

2 结果与讨论

2.1 金山湖表层沉积物重金属含量统计结果

金山湖表层沉积物重金属统计结果如表 3 所示, 从中可知, As、Pb、Cu、Zn、Cr、Cd 平均值分别为 23.22、26.20、24.42、143.12、245.30、0.67 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 从变异系数值可看出, Zn 的变异系数最大, 达到 188.52%, 其次为 Pb, 变异系数为 113.93%, Cr 的变异系数也达到 87.63%, 反映出这 3 种重金属元素的离散程度较高, 表明 Pb、Zn、Cr 含量在不同点位处差异较大。 通过与国家土壤环境质量标准 (GB 15618-95) 对比分析可知, Pb、Cu 含量低于土壤环境质量标准一、二级标准, 其中 Zn、Cr 介于土壤环境质量标准一级标准与二级标准, As、Cd 含量均超过土壤环境质量标准一、二级标

准; 此外, As、Pb、Cr、Cd 这 4 种重金属含量均超过当地土壤背景值。 与闸坝建设前相比^[26], 沉积物中 Zn、Cr、Pb、As 平均含量有所增加, 而 Cu、Cd 平均含量降低, 但以上重金属平均值的增加或降解可能受某些采样点峰值的影响较大, 并不能真正反映出整个金山湖沉积物重金属含量随时间的变化过程。

此外, 与江苏省其它湖泊相比 (表 4), 金山湖表层沉积物 Pb 元素平均含量高于高邮湖, 但低于其他湖泊, Cu 元素平均含量均低于江苏省其他 5 个湖泊, Zn 元素平均含量超过高邮湖、洪泽湖、固城湖, 而小于太湖以及玄武湖, As、Cr 平均含量均高于太湖、高邮湖、阳澄湖、玄武湖、洪泽湖以及固城湖, Cd 含量除了与固城湖相当外, 均高于其他湖泊, 以上结果表明金山湖沉积物中 As、Cr、Cd 含量在江苏省湖泊污染中处于较高水平。

表 3 沉积物重金属含量统计结果

Table 3 Statistical results of heavy metals in the surface sediments of Jinshan Lake

项目	As	Pb	Cu	Zn	Cr	Cd
平均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	23.22	26.20	24.42	143.12	245.30	0.67
最小值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	10.21	9.14	11.70	45.14	34.20	0.32
最大值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	30.49	141.70	42.71	1220.04	627.24	1.64
标准差	5.15	29.85	7.57	269.81	214.95	0.32
变异系数/%	22.19	113.93	31.00	188.52	87.63	46.90

表 4 江苏省其它湖泊沉积物重金属含量、土壤环境质量及其当地土壤背景值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Table 4 Concentration of heavy metals in surface sediments of others lakes of Jiangsu and soil environmental quality standards/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

标准	As	Pb	Cu	Zn	Cr	Cd	数据来源	
江苏省其它湖泊	太湖	21.44	72.50	97.50	223.10	96.20	0.49	[4, 27]
	高邮湖	20.50	24.87	26.94	84.40	61.64	0.27	[28]
	玄武湖	13.10	35.52	41.51	145.29	68.85	0.46	[28]
	洪泽湖	14.69	27.03	27.45	84.16	66.42	0.27	[28]
	固城湖	22.65	31.03	37.93	130.97	60.22	0.67	[28]
土壤环境质量标准	一级	15	35	35	100	90	0.2	[29]
	二级	20	350	100	300	350	0.6	[29]
当地土壤背景值	3.94	26.03	54.08	252	83.17	0.31	[26]	
江苏土壤背景值	9.4	22	23.4	64.8	75.6	0.085	[28]	

2.2 金山湖表层沉积物中重金属富集系数的变化

沉积物重金属含量可表征水体污染现状,而富集系数可反映沉积物对上覆水污染物的汇入情况.重金属的富集系数通常以沉积物中重金属含量与背景值的比值加以计算,背景值往往选择当地土壤背景值^[15],这种方法通过对污染物进行无量纲化处理,可有效避免污染物浓度数量级之间的差异,以便进行不同重金属间的横向对比.

图2为金山湖表层沉积物重金属的富集系数变化,由中可知,6种重金属的富集系数差异显著,Pb和Zn变幅最大,富集系数介于0.35~5.44、0.18~4.84之间,变异系数达113.93%、188.52%,其次为Cr,Cd,富集系数分别在0.41~7.54、1.04~5.28之间波动变化,变异系数为87.63%和46.90%;As和Cu的富集系数变幅最

小,变异系数分别为22.19%和31.00%.6种重金属的平均富集系数表现为:As>Cr>Cd>Pb>Zn>Cu,表明金山湖表层沉积物中As的富集量最大,Cu最小,与闸坝建设前相比^[26],As的富集系数略微增加,而Cd富集系数则下降了54.69%.

从全湖的空间分布来看,Pb和Zn的富集系数在北固湾广场区域的1号点最大,As、Cu、Cr、Cd的富集系数分别在镇润洲码头附近的12号点、运粮河河口附近的3号点、湖中靠近征润州岛的14号点、春江潮与解放路泵站之间往湖中心处的7号点区域出现最高值.对各采样点的6种重金属富集系数求和后发现,综合富集系数最高值出现在1号采样点附近,其次为6号样点,而6种重金属富集系数的最高值均未出现在引航道的2号样点,表明长江来水并不是重金属的主要来源,反映出金山湖沉积物中重金属含量可能与各采样点的污染源、所处地形、水动力特征、流场、水流速等均有密切关系.其中,1号点靠近北固湾广场,受人为活动影响较大,采样点附近的水岸边有诸多人为投弃的垃圾等漂浮物,另一原因是该采样点位于北固湾码头,快艇以及其他游船均停靠于此,以上船只在运行过程中排放的污染也可能导致该区域沉积物重金属含量的增高,加之该区域处于湖湾位置,水体流动较慢使得进入水体中的重金属元素被悬浮物或沉积物吸附从而呈现富集状态.而春江潮广场与解放路泵站之间

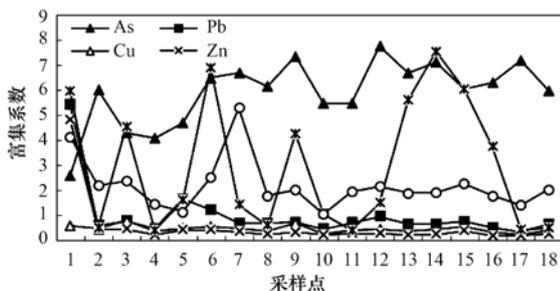


图 2 金山湖表层沉积物重金属的富集系数变化

Fig. 2 Heavy metals concentration coefficient in the surface sediments from Jinshan Lake

靠近岸边的 6 号采样点的综合富集系数也较高,其主要原因可能是受春江潮广场附近水域餐饮等商业游船污水排放及解放路泵站的溢流污染等的双重影响;此外,3 号样点位于运粮河河口位置,由于运粮河沿岸排污管道众多,流域内有部分生活污水直接入河,导致该河水质污染,且河口沉积物淤积严重^[18],河流上游污染物在河口累积是导致这一采样重金属的富集量大的原因之一,而 14 号样点受水生滩地形的影响,该区域水流不畅,污染物沉积累积较大^[26,30]。

2.3 金山湖表层沉积物重金属的地累积指数评价

本研究中,采用金山湖沉积物背景值计算 6 种重金属的地累积指数 I_{geo} ,其统计结果见表 5 所示。从中可知,金山湖表层沉积物重金属污染程度表现为: $Zn < Cu < Pb < Cr < Cd < As$,其中 Cu 元素的 R 值在各采样点均为 0,表现为清洁状况,Zn 元素在 1 号点 R 值为 2,其余点均为 0,表明 Zn 元素在大部分湖区表现为清洁状态,Pb、Cd 元素的 I_{geo} 平均值介于 0~1 之间,表现为轻度污染状态,As、Cr 元素的

I_{geo} 平均值大于 1,污染级别为 2,表现为偏中度污染。

6 种重金属地累积指数在全湖的分布范围有所不同。其中,污染范围最广泛的元素为 Cd,除了 1、4、5、10、17 号样点外,其余各点 R 值均为 1,占全部采样点的 72.22%,污染程度总体表现为轻度污染;As 元素则在 11 个采样点呈现出中度污染,占全部采样点的 61.11% 左右,表明金山湖 As 污染范围较广且污染程度严重;Cr 元素在 1、3、5、6、9、13、14、15、16 号采样点均呈表现为轻度污染至中度污染,占采样点的 50%;Cu 元素在所有采样点 R 值均为 0,表现为全湖范围的清洁状态;Zn 和 Pb 元素仅在北固湾广场的 1 号样点处表现为为偏中度污染,仅占采样点的 5.56%。

此外,对同一样点 6 种重金属的 I_{geo} 指数取平均值后发现,北固湾广场附近的 1 号样点 I_{geo} 指数最高,表明该区域重金属的污染程度最为严重,其次为春江潮广场与解放路泵站之间靠近岸边的 6 号采样点,这一结果与前面研究一致。

表 5 金山湖表层沉积物中重金属地累积指数(I_{geo})及累积等级(R)

Table 5 Geo-accumulation indexes and accumulation levels(R) of heavy metals in surface sediments of Jinshan Lake

采样点	As		Pb		Cu		Zn		Cr		Cd	
	I_{geo}	R	I_{geo}	R	I_{geo}	R	I_{geo}	R	I_{geo}	R	I_{geo}	R
平均值	1.93	2.56	-0.94	0.17	-1.80	0	-2.09	0.11	0.25	1.11	0.42	0.89
最小值	0.79	1	-2.09	0	-2.79	0	-3.07	0	-1.87	0	-0.53	0
最大值	2.37	3	1.86	2	-0.93	0	1.69	2	2.33	3	1.81	2
标准差	0.38	—	0.86	—	0.45	—	1.04	—	1.61	—	0.56	—
变异系数	19.90	—	-91.83	—	-25.01	—	-49.72	—	646.03	—	133.91	—

2.4 金山湖表层沉积物重金属的潜在危害生态评价

金山湖表层沉积物中重金属的潜在生态危害指数的统计结果见表 6 所示,从中可知,6 种重金属单项潜在危害指数由强到弱的顺序为 $Cd > As > Cr > Pb > Cu > Zn$ 。从 E_r^i 平均值来判断,Cr、Pb、Cu、Zn 均为轻微生态危害程度,As 和 Cd 处于中等生态危害程度,表明金山湖的 As 和 Cd 存在一定程度的生态风险。从 RI 平均值来判断,整个金山湖 RI 均值为 137.94,低于 150,总体处于轻微生态危害。

从空间分布上看,北固湾广场附近(1 号样点)、春江潮与解放路泵站之间靠近岸边区域(6 号样)、春江潮与解放路泵站之间往湖中心处(7 号样点)以及镇润洲码头附近(12 号样点)样点的潜在生态危害为中等,其余采样点均为轻微潜在生态危害,表明除了受到人为活动影响较频繁的 1、6、7、12 号采样点外,金山湖沉积物重金属的生态危害程度普遍

较低。入水口的引航道区域(2 号样点)RI 值处于清洁状态,表明金山湖来水重金属含量低,入水口生态危害指数低,水质较为清洁。

目前,关于闸坝建设后对水循环过程、水动力条件、水环境的影响等方面研究较多^[31~33],现有研究表明,对于重污染河流等水体而言,闸坝的建设会导致上游蓄积大量的工业废水及生活污水,当闸坝突然开闸后会导致污水团的下泄,并因此诱发水污染事件的发生,这是闸坝建设对水环境的不利影响,而目前关于闸坝建设前后水体沉积物中污染物的生态效应研究不多。对于金山湖而言,闸坝建设前由于长江水位一年四季变化幅度较大,枯水期水资源短缺形势严峻,水流较慢,泥沙与污染物淤积严重,水质恶化明显,因此生态危害较大。闸坝建设过程中,对金山湖沉积物进行了一定程度的清淤,闸坝建设后,金山湖水体通过一定程度的生态调度,使得水体交换频繁,水流加速,沉积物的沉积速率减

表 6 金山湖沉积物中重金属的潜在生态危害指数 (E_r^i) 和总潜在生态危害指数 (RI)

Table 6 Potential ecological risk of heavy metals in surface sediments of Jinshan Lake

采样点	E_r^i						RI
	As	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	
平均值	58.94	5.03	2.26	0.57	5.90	65.24	137.94
最小值	25.90	1.76	1.08	0.18	0.82	31.06	88.89
最大值	77.38	27.22	3.95	4.84	15.08	158.27	234.01
标准差	13.08	5.73	0.70	1.07	5.17	30.60	35.63
变异系数	22.19	113.93	31.00	188.52	87.63	46.90	25.83

缓,以上因素可能在一定程度上降低了重金属等污染物对湖泊水体的生态危害。

2.5 金山湖表层沉积物重金属相关性溯源分析

近年来,主成分分析(principal components analysis, PCA)以及相关性分析已经成为湖泊沉积物重金属溯源分析的主要手段之一^[34~37]。一方面,由于沉积物中各含量及其比率具有相对的稳定型,当沉积物来源相同或相似时,元素之间存在一定的相关性,因此,通过沉积物重金属之间的相关分析往往可判断重金属的来源^[38];另一方面,主成分分析可通过降维技术把多个变量化为少数几个主成分,

从而将多种原始变量因子进行提取和简化,并判断出主要因子及其次要因子,这种方法能够极大地保留原始数据信息,且客观地确定各影响因子的权重,成为推测湖泊沉积物重金属溯源的另一种可行的办法^[26~34,39,40]。

本研究首先对6种重金属元素进行 Pearson 相关分析,随后参照刘峰等^[37]方法对数据进行标准化转换($\log_{10} C_i + 1$),以便去除各变量之间因数量级不同带来的影响。其中, C_i 为实测的重金属含量,最后通过 SPSS 软件进行主成分分析,结果见表7~9。

表 7 金山湖表层沉积物重金属间的相关系数矩阵¹⁾

Table 7 Correlation coefficients among the concentrations of the heavy metals in surface sediments of Jinshan Lake

	As	Pb	Cu	Zn	Cr	Cd
As	1.00					
Pb	-0.64 **	1.00				
Cu	-0.25	0.34	1.00			
Zn	-0.65 **	0.98 **	0.31	1.00		
Cr	0.00	0.33	0.51 **	0.31	1.00	
Cd	-0.13	0.46 **	0.39 *	0.50 **	0.22	1.00

1) * 为在 $P < 0.05$ 水平上相关性显著, ** 为在 $P < 0.01$ 水平上相关性显著

由 Pearson 相关分析可知,As 与 Pb、Zn, Pb 与 Zn、Cd, Cu 与 Cr、Cd 以及 Zn 与 Cd 之间存在显著相关关系,反映出以上重金属在来源、迁移、富集、沉积环境等方面可能具有相似的地球化学过程^[41,42]。

由主成分分析结果可知, F_1 和 F_2 累计方差贡献率达到了 78.237%,且特征值均大于 1,意味着前 2 个主成分能够反映金山湖沉积物中 6 种重金属的分布情况的 78.237%。其中第一主成分贡献率为 57.911%,高于其它因子,该因子对沉积物重金属的组成和分布具有决定性的意义。此外,6 种重金属在第一组成分上均有较高的荷载,表明第一主成分反映了 6 种重金属的含量特征,因此第一主成分的实际意义可以理解为金山湖沉积物中重金属含量主要来自各采样点的成土母质环境的不同,反映出各采样点沉积物地球化学背景值的差异。第二主成分的

贡献率为 20.325%,该因子变量在 As 和 Cr 成分的载荷分别为 0.682 和 0.611,但 As 和 Cr 之间无显著相关关系,表明这两种重金属并未来自同一污染源。由此可知,金山湖沉积物重金属的差异,除了受到沉积物环境背景值的影响外,还与各采样点所处水域沉积物的沉积环境、外界环境因子、人为扰动等均有一定的关系。

此外,闸坝对金山湖沉积物重金属分布的影响

表 8 特征值和主成分分析贡献率

Table 8 Eigenvalues and contribution rates of heavy metals

成份	特征值	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%
F_1	3.475	57.911	57.911
F_2	1.220	20.325	78.237
F_3	0.667	11.113	89.350
F_4	0.358	5.962	95.311
F_5	0.230	3.838	99.150
F_6	0.051	0.850	100.000

过程尚不明确,可能原因是本研究仅采集一次样品,在未来研究中,尚需从时间尺度上持续研究来探明闸坝控制过程对沉积物污染物累积中的潜在影响。

表 9 主成分载荷量

Table 9 Loading values of the principal components

重金属	主成分载荷值	
	第一主成分 F_1	第二主成分 F_2
As	-0.645	0.682
Pb	0.908	-0.193
Cu	0.768	0.401
Zn	0.935	-0.277
Cr	0.569	0.611
Cd	0.668	0.326

3 结论

(1)金山湖表层沉积物重金属 As、Pb、Cu、Zn、Cr、Cd 平均含量分别为 23.22、26.20、24.42、143.12、245.30、0.67 mg·kg⁻¹。其中 Pb、Cu 含量低于土壤环境质量标准一、二级标准,Zn、Cr 介于土壤环境质量标准一级标准与二级标准,As、Cd 含量均超过土壤环境质量标准一级标准与二级标准;As、Pb、Cr、Cd 这 4 种重金属含量均超过当地土壤背景值,且在空间上呈现不均匀的分布特征。

(2)6 种重金属的平均富集系数表现为:As > Cr > Cd > Pb > Zn > Cu,表明金山湖表层沉积物中 As 的富集量最大,Cu 最小。

(3)根据地累积指数判断,Cu 元素为清洁状况,Zn 元素在一号样点 R 值为 2,其余样点均为 0,表明 Zn 元素在大部分湖区表现为清洁状态,Pb、Cd 元素为轻度污染状态,As、Cr 元素为偏中度污染。

(4)6 种重金属单项潜在危害指数平均值由强到弱的顺序为 Cd > As > Cr > Pb > Cu > Zn,其中 Cr、Pb、Cu、Zn 均为轻微生态危害程度,As 和 Cd 处于中等生态危害程度。总潜在生态危害指数平均值为 137.94,表现为轻微生态危害。

(5)主成分分析结果表明,金山湖沉积物重金属的分布的差异除了受到各样点沉积物环境背景值的影响外,还与外源污染有一定的关系,但各个样点的污染源有所差异。

(6)闸坝对金山湖湖沉积物重金属分布的影响过程不明确,因此尚需进行长时间尺度的研究。

(7)总体而言,金山湖沉积物重金属大部分处于轻微生态危害程度,但受人为扰动强烈的 1 号、6 号、7 号以及 12 号样点则处于中等生态危害程度,对以上区域应严格控制金山湖沿岸溢流污水的排入,加强游船及游人的管理。此外,应进一步加强

金山湖上覆水及沉积物重金属的监测工作,尤其是对受闸坝控制的人湖引航道及焦南大坝。

参考文献:

- [1] Zoumis T, Schmidt A, Grigorva L, et al. Contaminants in sediments: remobilization and demobilization[J]. Science Total Environment, 2001, **266**: 195-202.
- [2] 钟继承, 范成新. 底泥疏浚效果及环境效应研究进展[J]. 湖泊科学, 2007, **19**(1): 1-10.
- [3] 田林峰, 胡继伟, 罗桂林, 等. 贵州百花湖沉积物重金属稳定性及潜在生态风险性研究[J]. 环境科学学报, 2011, **32**(4): 885-894.
- [4] 陈奎, 周勇华, 张怀静. 东昌湖水体和表层沉积物重金属元素污染评价[J]. 中国海洋大学学报, 2012, **42**(10): 97-105.
- [5] 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]. Environmental Management, 1995, **19**(1): 81-97.
- [6] Gao X L, Arthur Chen C T. Heavy metal pollution status in surface sediments of the coastal Bohai Bay[J]. Water Research, 2012, **46**(6): 1901-1911.
- [7] Tang W Z, Shan B Q, Zhang H, et al. Heavy metal sources and associated risk in response to agricultural intensification in the estuarine sediments of Chaohu Lake Valley, East China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **176**(1-3): 945-951.
- [8] Covelo E F, Vega F A, Andrade M L. Simultaneous sorption and desorption of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn in acid soils II. Soil ranking and influence of soil characteristics [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, **147**(3): 862-870.
- [9] Zhang J, Liu C L. Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in China-weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2002, **54**(6): 1051-1070.
- [10] 杨卓, 李贵宝, 王殿武, 等. 白洋淀底泥重金属的污染及其潜在生态危害评价[J]. 农业环境科学学报, 2005, **24**(5): 945-951.
- [11] 张明礼, 杨浩, 林振山, 等. 太湖竺山湾底泥中有害物质含量与环境污染评价[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(5): 852-857.
- [12] 陈雷, 远野, 卢少勇, 等. 环太湖主要河流入湖出口表层沉积物污染特征研究[J]. 中国农学通报, 2011, **27**(1): 294-299.
- [13] 张文斌, 余辉. 洪泽湖沉积物中营养盐和重金属的垂向分布特征研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(2): 399-406.
- [14] 刘飞, 邓道贵, 杨威, 等. 巢湖表层沉积物重金属的分布特征及生物有效性[J]. 水土保持学报, 2012, **26**(5): 149-153.
- [15] 王天阳, 王国祥. 昆承湖沉积物重金属的环境地球化学特征[J]. 水土保持学报, 2008, **22**(1): 109-113.
- [16] 赵胜男, 李畅游, 史小红, 等. 乌梁素海沉积物重金属生物活性及环境污染评估[J]. 生态环境学报, 2013, **22**(3): 481-489.

- [17] 王沛芳, 邹丽敏, 王超, 等. 玄武湖沉积物中重金属的垂直分布[J]. 长江流域资源与环境, 2012, **19**(5): 547-553.
- [18] 何锋. 闸坝型水体水质变化趋势研究——以镇江金山湖为例[D]. 镇江: 江苏大学, 2012.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [20] Chakravarty M, Patgiri A D. Metal pollution assessment in sediments of the Dikrong River, N. E. India [J]. *Journal of Human Ecology*, 2009, **27**(1): 63-67.
- [21] Praveena S M, Ahmed A, Radojevic M, *et al.* Heavy metals in mangrove surface sediment of Mengkabong lagoon, Sabah; Multivariate and geo-accumulation index approaches [J]. *International Journal of Environmental Research*, 2008, **2**(2): 139-148.
- [22] Sekabira K, Oryem Origa H, Basamba T A, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in the urban stream sediments and its tributaries [J]. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 2010, **7**(3): 435-446.
- [23] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of Rhine River [J]. *Geo Journal*, 1969, **2**(3): 108-118.
- [24] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [25] 刘勇, 岳玲玲, 李晋. 太原市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(6): 1285-1293.
- [26] 吴春笃, 瞿俊, 李明俊, 等. 镇江内江底泥重金属分布特征及潜在生态危害评价[J]. 中国环境监测, 2009, **25**(5): 90-94.
- [27] 滑丽萍, 华璐, 高娟, 等. 中国湖泊底泥的重金属污染评价研究[J]. 土壤, 2006, **38**(4): 366-373.
- [28] 陈乾坤, 刘涛, 胡志新, 等. 江苏省西部湖泊表层沉积物中重金属分布特征及其潜在生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(5): 1044-1050.
- [29] GB 15618-95. 土壤环境质量标准[S]. 1995.
- [30] 刘明源, 逢勇. 镇江内江不同湿地布局对滨江水体水质影响[J]. 人民长江, 2008, **39**(3): 48-50.
- [31] 左其亭, 李冬锋. 重污染河流闸坝防污限制水位研究[J]. 水利水电技术, 2013, **44**(1): 22-26.
- [32] 于洋, 王晓燕, 张鹏飞. 北运河水体浮游细菌群落的空间分布特征及其与水质的关系[J]. 生态毒理学报, 2012, **7**(3): 337-344.
- [33] 窦飞. 闸坝前后底泥沉淀与再悬浮影响机制及分析方法研究[J]. 中国农村水力水电, 2013(5): 126-128.
- [34] 刘总堂, 李春海, 章钢娅. 运用主成分分析法研究云南湖水体中重金属分布[J]. 环境科学研究, 2010, **23**(4): 459-4666.
- [35] 张鸿岭, 孙丽娜, 赵国苹. 运用主成分分析法评价浑河水体中重金属污染来源[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2010, **24**(5): 5-9.
- [36] 盛周君, 孙世群, 王京城, 等. 基于主成分分析的河流水环境质量评价研究[J]. 环境科学与管理, 2007, **32**(12): 172-175.
- [37] 刘峰, 胡继伟, 秦樊鑫, 等. 红枫湖沉积物中重金属元素溯源分析的初步探讨[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(9): 1871-1879.
- [38] 田林峰, 胡继伟, 秦樊鑫, 等. 重金属元素在贵州红枫湖水体中的分布特征[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(3): 481-489.
- [39] Loska K, Wiechuła D. Application of principal component analysis for the estimation of source of heavy metal contamination in surface sediments from the Rybnik Reservoir [J]. *Chemosphere*, 2003, **51**(8): 723-733.
- [40] 李玉, 俞志明, 宋秀贤. 运用主成分分析(PCA)评价海洋沉积物中重金属污染来源[J]. 环境科学, 2006, **27**(1): 137-141.
- [41] 吴攀碧, 解启来, 卜艳蕊, 等. 扎龙湿地湖泊表层沉积物重金属污染评价[J]. 华南农业大学学报, 2010, **31**(3): 24-27.
- [42] 牛勇, 余辉, 张敏, 等. 太湖流域典型河流沉积物重金属污染特征及生态风险评价[J]. 环境工程, 2013, **31**(5): 151-155.

CONTENTS

Variation Characteristics of Surface Ozone and Its Precursors During Summertime in Nanjing Northern Suburb	SHAO Ping, AN Jun-lin, YANG Hui, <i>et al.</i> (4031)
Distribution Characteristics of Pollution Gases and Water Soluble Ion in Aerosol During the Asian Youth Games of Nanjing, China	ZOU Jia-nan, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4044)
Aerosol Concentration Variation in Nanjing During Asian Youth Games and the Relationship Between Aerosol Concentration and Visibility	YUAN Liang, YIN Yan, LI Qi, <i>et al.</i> (4052)
Characteristic Analysis of a Multi-day Pollution Event in Chang-Zhu-Tan Metropolitan Area During October 2013	LIAO Zhi-heng, FAN Shao-jia, HUANG Juan, <i>et al.</i> (4061)
Application of On-line Single Particle Aerosol Mass Spectrometry (SPAMS) for Studying Major Components in Fine Particulate Matter	FU Huai-yu, YAN Cai-qing, ZHENG Mei, <i>et al.</i> (4070)
Establishment and Application of Replaceable Source Profiles of PM ₁₀	CHEN Qiang, JING Yi, WU Huan-bo, <i>et al.</i> (4078)
Distribution, Flux and Biological Consumption of Carbon Monoxide in the East China Sea and the South Yellow Sea in Summer	WANG Jing, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4085)
Spatial and Temporal Distribution of Mercury in Water of a Small Typical Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (4095)
Fluorescence Characteristics of Fractionated Colloidal Organic Matter in Freshwater from Hunhe and Taizihe Watersheds	LIU Na-na, LI Bin, LIU Rui-xia, <i>et al.</i> (4103)
Variations of Annual Load of TN and TP in the Deep Bay Watershed, Shenzhen	ZHAO Chen-chen, ZHANG Shi-yan, MAO Xian-zhong (4111)
Characteristics and Bioavailability of Organic Phosphorus from Different Sources of Sediments in Dianchi Lake	XIONG Qiang, JIAO Li-xing, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (4118)
Heavy Metals Distribution Characteristics and Ecological Risk Evaluation in Surface Sediments of Dammed Jinshan Lake	ZHOU Xiao-hong, LIU Long-mei, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4127)
Vertical Distribution Pattern and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Sediment Core from Pumoyum Co, Tibet	XIE Ting, LUO Dong-xia, YANG Rui-qiang (4135)
Heavy Metals Pollution and Analysis of Seasonal Variation Runoff in Xi'an	YUAN Hong-lin, LI Xing-yu, WANG Xiao-chang (4143)
Distribution and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Urban Rainfall Runoff	WU Zi-lan, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4148)
Influence of the Substrate Composition in Extensive Green Roof on the Effluent Quality	CHEN Yu-lin, LI Tian, GU Jun-qing (4157)
Investigation of the Microbial Diversity and Structure of Biological Activated Carbon from Different Sources in Drinking Water Treatment Process	DU Er-deng, ZHENG Lu, FENG Xin-xin, <i>et al.</i> (4163)
Microcystin Safety Study During <i>Cyanobacteria</i> Removal by Pressure Enhanced Coagulation Process	JIANG Xin-yue, LUAN Qing, CONG Hai-bing, <i>et al.</i> (4171)
Membrane Fouling Based on Change of Membrane Characteristic Parameters During Ultrafiltration of Protein	WANG Xu-dong, ZHANG Yin-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (4176)
Impact Factors and Degradation Mechanism for the Ozonation of Acetaminophen in Aqueous Solution	CAO Fei, YUAN Shou-jun, ZHANG Meng-tao, <i>et al.</i> (4185)
Degradation of Benzothiazole in Electro-Assisted Microbial Reactor	LIU Chun-miao, DING Jie, LIU Xian-shu, <i>et al.</i> (4192)
Preparation and Evaluation of Fe-La Composite Oxide Nanoadsorbent for As(III) Removal from Aqueous Solutions	ZHANG Wei, CHEN Jing, ZHANG Gao-sheng (4198)
Physiological Responses of Tubificidae to Heavy Metal Chromium Stress	LOU Ju-qing, YANG Dong-ye, CAO Yong-qing, <i>et al.</i> (4205)
Effects of Light Quality on the Growth Characteristics and Biochemical Component of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	TANG Qing-qing, FANG Zhi-guo, JI Wen-wen, <i>et al.</i> (4212)
Influence of Alkalinity and DO on ANAMMOX Bioreactor at Normal Temperature and Low Substrate Concentration	REN Yu-hui, WANG Ke, LI Xiang-kun, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Fe ²⁺ and Fe ³⁺ on the Activity of ANAMMOX	LI Xiang, HUANG Yong, WU Chuan, <i>et al.</i> (4224)
Research on Change Process of Nitrosation Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	YIN Fang-fang, LIU Wen-ru, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (4230)
Effects of Salinity on N ₂ O Production During Nitrification Using Aerobic Granular Sludge	WANG Shan-shan, LIANG Hong, GAO Da-wen (4237)
Analysis of Microbial Community Variation in the Domestication Process of Sludge in a Sulfate-reducing Reactor	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan, ZHENG Xiao-hong, <i>et al.</i> (4244)
Quantifying the Influence of Different Matrices on Pb Accumulation in the Soil from Nanjing and Suspended Matter from the Lower of the Yangtze River with Pb Isotopic Technique	WANG Cheng, XIA Xue-qi, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4251)
Contamination Characteristics of Fluoroquinolones in Different Kinds of Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	SU Si-hui, HE Jiang-tao, YANG Lei, <i>et al.</i> (4257)
Effect of Environmental Factors on the Formation of Several Typical Tetracycline Resistance Genes in Soil	ZHANG Jun, LUO Fang-yuan, XIONG Hao-hui, <i>et al.</i> (4267)
Response of Nitrification/Denitrification and Their Associated Microbes to Soil Moisture Change in Paddy Soil	LIU Ruo-xuan, HE Ji-zheng, ZHANG Li-mei (4275)
Microbial Community Abundance and Diversity in Typical Karst Ecosystem to Indicate Soil Carbon Cycle	JIN Zhen-jiang, TANG Hua-feng, LI Min, <i>et al.</i> (4284)
Effects of Variable Temperature on Organic Carbon Mineralization in Typical Limestone Soils	WANG Lian-ge, GAO Yan-hong, DING Chang-huan, <i>et al.</i> (4291)
Influence of the Interaction Between Iron Oxide and Electron Donor Substances on 1,1,1-Trichloro-2,2-bis(<i>p</i> -chlorophenyl)ethane (DDT) Reductive Dechlorination in Hydragic Acrisols	LIU Cui-ying, XU Xiang-hua, WANG Zhuang, <i>et al.</i> (4298)
Continuous Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil by Co-Cropping System Enhanced with Chelator	WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (4305)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow at Different Sampling Scales	LI Hong-jian, GAO Yu-feng, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4313)
Study on Regularity of Greenhouse Gas Emissions from Black Soil with Different Reclamation Years	LI Ping, LANG Man, XU Xiang-hua, <i>et al.</i> (4321)
Comparison Between Transgenic Insect-Resistant Cotton Expressing CryI _{Ac} Protein and Its Parental Variety in Rhizospheric Fungal Diversity	PAN Jian-gang, JIAO Hai-hua, BAI Zhi-hui, <i>et al.</i> (4329)
Concentrations of Mercury in Ambient Air in Wastewater Irrigated Area of Tianjin City and Its Accumulation in Leafy Vegetables	ZHENG Shun-an, HAN Yun-lei, ZHENG Xiang-qun (4338)
Combined Effects of 1-Nitropyrene and 1,2-Naphthoquinone on Cytotoxicity and DNA Damage in A549 Cells	SHANG Yu, JIANG Yu-ting, ZHANG Ling, <i>et al.</i> (4345)
Influence of Organic Matter Evolution During Composting on the Bioavailability of Heavy Metals	BU Gui-jun, YU Jing, DI Hui-hui, <i>et al.</i> (4352)
Carbonization of Heavy Metal Cu Implanted Sewage Sludge and Stability of Heavy Metal in the Resulting Char	DOU Xiao-min, CHEN De-zhen, DAI Xiao-hu (4359)
Technological Characteristics of Bioreactor Landfill with Aeration in the Upper Layer	TIAN Ying, WANG Shen, XU Qi-yong (4365)
Impact of Nitrate Continuous Injection on N ₂ O Releases from Bioreactor Landfill	BIAN Rong-xing, SUN Ying-jie, LI Jing-jing, <i>et al.</i> (4371)
Research on Contribution Decomposition by Industry to China's Carbon Intensity Reduction and Carbon Emission Growth	JIANG Jing-jing, YE Bin, JI Jun-ping, <i>et al.</i> (4378)
Shifting Path of Industrial Pollution Gravity Centers and Its Driving Mechanism in Pan-Yangtze River Delta	ZHAO Hai-xia, JIANG Xiao-wei, CUI Jian-xin (4387)
Method for Environmental Management in Paper Industry Based on Pollution Control Technology Simulation	ZHANG Xue-ying, WEN Zong-guo (4395)
Research Progress and Direction of Atmospheric Brown Carbon	YAN Cai-qing, ZHENG Mei, ZHANG Yuan-hang (4404)

《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)

2014年11月15日 第35卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 11 Nov. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行