

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第8期

Vol.33 No.8

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

南海北部大气气相多溴联苯醚的含量及来源	李琦路, 李军, 刘向, 徐维海, 张干 (2533)
河北张家口市大气污染观测研究	邵平, 王莉莉, 安俊琳, 周彦丽, 王跃思 (2538)
大气中丙烷光氧化臭氧生成活性的烟雾箱模拟	黄丽华, 莫创荣, 徐永福, 贾龙 (2551)
膜生物反应器处理甲苯性能及机制	叶杞宏, 魏在山, 肖盼, 李华琴, 张再利, 樊青娟 (2558)
厨余垃圾堆肥过程中恶臭物质分析	张红玉, 邹克华, 杨金兵, 李国学, 杨青原, 张锋 (2563)
北京城市生态系统地表水硝酸盐污染空间变化及其来源研究	徐志伟, 张心昱, 任玉芬, 孙晓敏, 王效科, 王升忠 (2569)
枯、平、丰水期长江3条支流表层水中多氯联苯的分布特征及风险评价	李昆, 赵高峰, 周怀东, 曾敏, 廖柏寒, 吴正勇, 张盼伟, 柳敏 (2574)
三峡库区丰水期表层水中酚类的分布特征及潜在风险	吴正勇, 赵高峰, 周怀东, 李科林, 李昆, 张盼伟 (2580)
东湖表层水体中全氟辛酸和全氟辛磺酸空间分布特征	陈静, 王琳玲, 朱湖地, 王贝贝, 刘黄诚, 曹梦华, 苗竹, 胡丽, 陆晓华, 刘光虹 (2586)
三峡库区大宁河与磨刀溪重金属污染特征	安立会, 张艳强, 郑丙辉, 刘玥, 宋双双, 李子成, 陈浩, 赵兴茹, 林进 (2592)
长江水系表层沉积物重金属污染特征及生态风险性评价	王岚, 王亚平, 许春雪, 安子怡 (2599)
江苏如东滩涂贝类养殖区表层沉积物中重金属来源分析及其潜在生物毒性	李磊, 王云龙, 蒋玫, 袁璐, 沈新强 (2607)
扰动强度对太湖沉积物中磷释放及其形态转化的影响	李大鹏, 黄勇 (2614)
干流倒灌异重流对香溪河库湾营养盐的补给作用	张宇, 刘德富, 纪道斌, 杨正健, 陈媛媛 (2621)
常年淹水和干旱对三峡库区消落带菖蒲生长恢复的影响	李强, 高祥, 丁武泉, 朱启红, 欧媛, 刘瑜 (2628)
温州城市降雨径流磷的负荷及其初始冲刷效应	周栋, 陈振楼, 毕春娟 (2634)
沂蒙山区典型小流域降雨径流的磷素输出特征	于兴修, 李振炜, 刘前进, 井光花 (2644)
城郊农业区小流域土地利用结构对氮素输出的影响	杨峰, 王鹏举, 杨珊珊, 吴金水, 胡荣桂 (2652)
基于 AnnAGNPS 模型四岭水库小流域氮磷流失特征的模拟研究	边金云, 王飞儿, 杨佳, 俞洁, 楼莉萍, 俞丹萍 (2659)
基于 GIS 和 L-THIA 模型的深圳市观澜河流域非点源污染负荷变化分析	白凤姣, 李天宏 (2667)
黄土丘陵区坡面水蚀对降雨和下垫面微观格局的响应	卫伟, 贾福岩, 陈利顶, 吴东平, 陈瑾 (2674)
强化混凝对腐殖酸和富里酸去除对比研究	周玲玲, 张永吉, 叶河秀, 张一清 (2680)
九龙江下游水源水中新发病原微生物和抗生素抗性基因的定量 PCR 检测	王青, 林惠荣, 张舒婷, 于鑫 (2685)
布吉河丰水期总细菌和氨氧化细菌的定性和定量研究	孙海美, 白姣姣, 孙卫玲, 邵军 (2691)
曝气生物滤池工艺脱氮性能及反硝化细菌群落结构特征研究	彭晓兰, 刘聪, 陈吕军 (2701)
城市污水处理厂氧化沟工艺微生物种群分析	郭云, 杨殿海, 卢文健 (2709)
IC 反应器处理啤酒废水的效能及其微生物群落动态分析	朱文秀, 黄振兴, 任洪艳, 阮文权 (2715)
原子力显微镜液池成像技术应用于微絮凝过滤工艺过程中的实验条件优化	郑蓓, 葛小鹏, 于志勇, 原盛广, 张文婧, 孙景芳 (2723)
UV/H ₂ O ₂ 法对印染废水生化出水中不同种类有机物的去除效果	李新, 刘勇弟, 孙贤波, 徐宏勇, 钱飞跃, 李欣珏, 李暮 (2728)
蛋白核小球藻 <i>Chlorella pyrenoidosa</i> -15 的异养培养条件优化及污水养殖	王秀锦, 李兆胜, 邢冠岚, 李卓凝, 袁红莉, 杨金水 (2735)
“Fe ⁰ /优势脱氯菌”体系降解 2,4,6-TCP 特性及机制研究	戴友芝, 郭丽丽, 史雷, 刘智勇, 高宝钗 (2741)
树脂 D201 上粗漆酶的固定化及对孔雀石绿的脱色	戚绪亮, 刘翔, 刘波, 王林, 王小春, 方超 (2747)
TiO ₂ /PS/Fe ₃ O ₄ 光催化剂的低温制备及其光催化和磁回收性能	王雪姣, 任学昌, 念娟妮, 肖举强, 王刚, 常青 (2752)
微波加热下苯的催化氧化性能研究	张钰彩, 卜龙利, 王晓晖, 刘海楠, 张浩 (2759)
纳米磁粉协同解偶联剂作用下活性污泥性能的研究	高丽英, 汤兵, 梁玲燕, 黄绍松, 付丰连, 罗建中 (2766)
好氧颗粒污泥沉降选择实验研究与定量描述	苏德足, 邓绣坤, 郑丽, 王畅, 金旺江, 沈俊 (2773)
超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中水解酶活性变化研究	叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝建, 许燕滨, 占星星, 刘敬勇 (2780)
微生物营养剂浓度对生物沥浸法促进城市污泥脱水性能的影响	宋永伟, 刘奋武, 周立祥 (2786)
实验室条件下蓝藻结皮对低温光照胁迫的响应与微结构变化	饶本强, 李华, 熊瑛, 兰书斌, 李敦海, 刘永定 (2793)
西南地区紫色水稻土活性碳库的季节动态	吴艳, 江长胜, 郝庆菊 (2804)
典型设施菜地土壤抗生素污染特征与积累规律研究	尹春艳, 骆永明, 滕应, 章海波, 陈永山, 赵永刚 (2810)
土壤铜硒复合污染中金属形态转化及其对生物有效性的影响	胡斌, 梁东丽, 赵文龙, 缪树寅 (2817)
土壤微生物群落对多环芳烃污染土壤生物修复过程的响应	张晶, 林先贵, 刘魏魏, 尹睿 (2825)
可可毛色二孢菌对焦化厂土壤多环芳烃污染修复	张志远, 王翠苹, 刘海滨, 孙红文 (2832)
广西茶山梯矿尾砂中微量元素的淋滤实验研究	蔡永兵, 李玲, 魏晓飞, 张国平, 李海霞, 付志平 (2840)
北京市近郊区土壤砷累积特征	戚洁, 王美娥, 汪自强, 欧阳志云 (2849)
抗氧化酶基因作为多环麝香污染分子标志物研究	陈春, 周启星, 刘潇威 (2855)
臭气污染对不同品种小麦干物质与生物量碳积累与分配的影响	寇太记, 于伟伟, 朱建国, 朱新开 (2862)
尿素分解共沉淀法中反应时间对 ZnAl 类水滑石结构和磷吸附性能的影响	陆英, 程翔, 邢波, 孙中恩, 孙德智 (2868)
铅和铜离子在纳米羟基磷灰石上的竞争吸附动力学研究	胡田田, 仓龙, 王玉军, 司友斌, 周东美 (2875)
pH 和 Ni ²⁺ 对人工纳米氧化硅吸附菲的影响	罗沛, 孙红文, 张鹏 (2882)
铀在凹凸棒石上的吸附特性与机制研究	刘娟, 陈迪云, 张静, 宋刚, 罗定贵 (2889)
环丙沙星在潮土中的吸附特性	崔皓, 王淑平 (2895)
中高温区水合肼 SNCR 脱硝反应机制和特性研究	洪彦, 陈德珍, 王渡, 黄慷 (2901)
H ₂ S 选择性催化氧化工艺及催化剂研究现状	郝郑平, 冀广玉, 张鑫, 曲思秋 (2909)
《环境科学》征稿简则 (2550) 《环境科学》征订启事 (2568) 信息 (2684, 2714, 2848, 2916)	

长江水系表层沉积物重金属污染特征及生态风险性评价

王岚^{1,2,3}, 王亚平^{3*}, 许春雪³, 安子怡³

(1. 中国人民武装警察部队黄金地质研究所, 廊坊 065000; 2. 中国地质大学(北京)科学研究院, 北京 100083; 3. 国家地质实验测试中心, 北京 100037)

摘要: 对2007年采集的长江水系表层沉积物中的9种重金属(Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Pb、Cd、As和Hg)含量进行了分析。结果表明, 沉积物中除了重金属Cr、Co、Ni外, Cu、Zn、Pb、Cd、As和Hg的含量都明显高于20世纪90年代调查结果。主成分分析(PCA)结果表明, 前3个主成分的累积贡献率达到86.75%, 表明了重金属的3种主要来源, 分别为采矿与工业排污、岩石的自然风化与侵蚀和城市电镀工业废水与自然源。地累积指数和富集因子评估结果同时显示, 长江水系表层沉积物中未受Cr、Co和Ni的污染, Cu、Zn、As和Hg受轻度污染, 而Cd和Pb的污染最大。Hakanson生态风险指数法对沉积物中重金属的生态风险评价表明, 各重金属单因子生态危害程度为Cd > Hg > As > Zn > Pb > Cu > Co > Ni > Cr。综合潜在生态指数表明, 在61个位点中, 中等生态危害的样点占36%, 有3个位点属于强生态危害范畴, 即长江干流重庆段、支流资水洞庭湖入口和信江位点; 而支流湘江衡阳段、湘江株洲段、湘江洞庭湖入口、洞庭湖和安徽顺安河位点为极强生态危害范畴。

关键词: 长江; 主成分分析(PCA); 沉积物; 重金属; 污染评价; 生态风险

中图分类号: X522; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)08-2599-08

Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of the Yangtze River

WANG Lan^{1,2,3}, WANG Ya-ping³, XU Chun-xue³, AN Zi-yi³

(1. Gold Geological Institute of China Armed Police Force, Langfang 065000, China; 2. Institute of Earth Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037, China)

Abstract: The concentrations of Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, As and Hg in surface sediment samples of Yangtze River collected in 2007 were analyzed and evaluated. The results indicated that the concentrations of Cu, Zn, Pb, Cd, As and Hg were significantly higher than those measured in 1990s. Principal Component Analysis showed that the cumulative proportion of the first three components accounted for 86.75% of the total variable, indicating the three major sources of heavy metals were industrial and mining wastewater, weathering and erosion of rocks, and urban electroplating industry wastewater and natural sources. Geoaccumulation index (I_{geo}) and enrichment factors (EF) also showed that the surface sediments of the Yangtze River were not contaminated with Cr, Co and Ni, lightly contaminated with Cu, Zn, As and Hg, and majorly contaminated with Pb and Cd. The ecological hazards for the heavy metals in the sediments were evaluated with the Hakanson ecological risk index. It was concluded the ecological hazards for each metal in a descending order were Cd > Hg > As > Zn > Pb > Cu > Co > Ni > Cr. The comprehensive index of potential ecological risks for metals indicated that 36% of the 61 sites had moderate potential ecological risks. Three sites had a high potential ecological risk, namely, Chongqing site of the main Yangtze River, Zishui Dongting Lake and Xinjiang site, whereas Xiangjiang Hengyang section, Xiangjiang Zhuzhou section, Xiangjiang Dongting Lake entrance, Dongting Lake and Shunan River belonged to the areas with extremely high potential ecological risk.

Key words: Yangtze River; principal component analysis; sediment; heavy metal; pollution estimation; ecological risk

水生环境中沉积物是重金属的最大储存库, 同时又是污染物的源和汇, 所以沉积物质量已被认为是一重要的水质污染指标。研究沉积物质量可以揭示污染物的变化、降解、循环和它们对水污染的影响^[1]。另外, 重金属作为典型的累积性污染物, 其显著的生物毒性和持久性, 对生态系统构成潜在威胁^[2]。重金属的污染威胁在于它不能被微生物分解; 相反, 生物体可以富集, 并且把某些重金属转化为毒性更大的金属-有机化合物。在一系列的环境变化下, 沉积物中的重金属会释放到水体中, 造成水体的二次污染^[3,4]。

长江是中国第一大河, 世界第三大河, 流域辽阔、水系庞大。但由于长江流域内人口过多、水土流失严重和过度的森林砍伐, 严重地降低了河水的水质; 尤其是长江中下游沿江城市经济的快速发展, 大量来自工业、农业和城市的各种污染物排入到河水中, 导致了河水水质的恶化; 在这些污染

收稿日期: 2011-10-20; 修订日期: 2012-01-10

基金项目: 中国地质调查局专项(GZTR20050201, GZTR20060201, GZTR20070201); 中国人民武装警察部队黄金指挥部博士后科研基金项目

作者简介: 王岚(1977~), 女, 博士, 主要研究方向为地球化学, E-mail: wanglan437@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wangyaping@cags.net.cn

物中,重金属是主要的污染物,而且这些重金属最终大部分转移到颗粒态沉降并累积在沉积物中^[5~7]. 近年来,国内外学者主要致力于长江中下游及河口处沉积物环境质量的研究^[8~12],力图查清长江中下游各城市段及河口受人类活动强烈影响的重金属污染现状,而对长江整个水系重金属污染程度的研究报道较少. 诸如,Chetelat 等^[13]研究表明,长江下游段水质受人为因素的影响占 15%~20%. 同时,三峡大坝的修建导致了长江下游更严重的环境问题^[14]. Song 等^[15]结合地球化学指标(Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、TOC 和 BC)研究了长江南京至上海段沉积物中重金属元素 As、Cd、Co、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的来源并评价了其污染情况,表明南京段长江沉积物中 As、Cd 和 Pb 有强污染,并指出电厂是长江南京至上海段重金属的主要污染源. 刘文国等^[16]研究表明,由于广泛分布的工业和高密度人口,导致长江中下游干流 60% 的江水受到污染.

本研究通过测定长江源头通天河至河口崇明岛 61 个长江表层沉积物样点中重金属的总量 (Cr、

Co、Ni、Cu、Zn、Pb、Cd、As 和 Hg),评价了长江水系沉积物中重金属含量及污染程度,并利用主成分分析进行了污染来源的分析,同时对此 9 种不同的重金属进行了生态风险评估.

1 材料与方法

1.1 样品的采集

样品于 2007 年 11 月~2008 年 1 月,采用 GPS 定位采集长江整个水系源头至河口段 61 个点位的表层沉积物,从源头至河口处分别编号为 1~61 (图 1). 采样选点主要考虑了支流对干流的影响和城市对长江的影响,采集了支流汇入点、流经城市入口和出口处等位点. 由于枯水期采集沉积物样品时环境恶劣,有些位点 (尤其是长江上游位点) 地势险要,且有些位点由于自身的原因,无法采集到沉积物样品. 所以,从源头至入海口总共采集了 61 个沉积物样品. 样品使用干净的塑料铲采集表层 0~5 cm 的沉积物为表层沉积物,每个沉积物样品采集大约 200 g,然后用聚乙烯塑料袋密封编号,运回实验室冷冻保存.

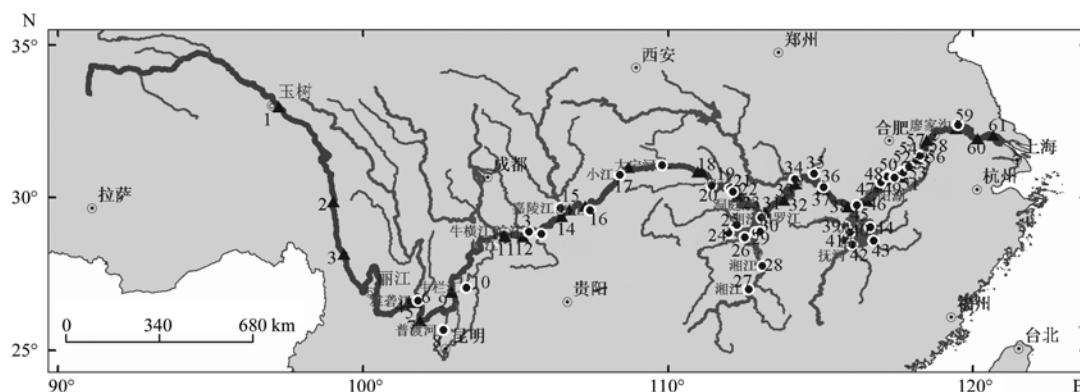


图 1 采样点位示意

Fig. 1 Study area and sampling locations

1.2 样品处理与测试

样品自然风干后,剔除大块残杂物质,用木棍碾碎并用玛瑙研钵研磨,过 100 目筛. 安徽省地质实验研究所承担了沉积物样品的分析测试工作,所有样品经标准方法进行消解处理后, Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Pb、Cd 采用电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS, 美国 ThermoFisher X Series 2 型等离子体质谱) 测定, As、Hg 采用原子荧光光谱 (AFS, 北京科创海光, AFS 230E) 测定; Fe 采用原子吸收光谱测定 (AAS, 德国 Analytik Jena AG 产 AASZEEnit60 型). 为了保证结果的可靠性,同时采用国家标准物质 GBW(E)07309 和采集密码重复样监控分析精密

度和准确度. 所有测试结果都达到地质实验测试技术规范的要求 (DZ/T 0130. 5-2006), 所采集密码重复样的相对误差均小于 10%.

1.3 污染评价

为了表征沉积物重金属的污染程度,本文分别运用地累积指数和富集因子法 2 种在重金属污染评价中广泛使用的方法对长江水系表层沉积物进行评价.

1.3.1 地累积指数法

地累积指数是目前在国内外有着广泛应用的一种研究沉积物中重金属污染程度的定量指标,由德国科学家 Müller 提出,该方法尤其适用

于现代沉积物中重金属污染的评价^[17]. 地累积指数的公式为:

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_n}{1.5B_n} \right]$$

表 1 地累积指数与污染程度

Table 1 I_{geo} and pollution levels							
I_{geo}	<0	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6
级别	0	1	2	3	4	5	6
污染程度	无污染	无污染到中度污染	中度污染	中度污染到强污染	强污染	强污染到极强污染	极强污染

1.3.2 富集因子法

富集因子是用以定量评价污染程度与污染来源的重要指标,它选择满足一定条件的元素作为参考元素(或称标准化元素),样品中污染元素质量分数与参考元素质量分数的比值与背景区中二者质量分数比值的比率即为富集因子(EF).本研究通过选取参考元素的选择标准,选取了 Fe 元素作为参考元素^[17,18],所用的背景值与地累积指数法所选背景值相同;所以富集因子的计算方法可表达为:

$$EF = \frac{[\text{金属}/\text{Fe}]_{\text{沉积物}}}{[\text{金属}/\text{Fe}]_{\text{背景}}}$$

2 结果与讨论

2.1 长江水系表层沉积物重金属含量分布特征

长江水系表层沉积物中重金属含量的分布统计特征见表 2.从中可看出,Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Pb、Cd、As 和 Hg 的平均值分别为 89.54、18.53、37.40、82.00、174、60.00、2.46、25.4 和 0.16 mg·kg⁻¹,沉积物中不同重金属之间的含量差异较大,显示了其不同的来源^[19].Cr 在长江中上游干流重庆段的 15 位点达到最大值,为 127 mg·kg⁻¹;而最低值出现在湖南段支流的汨罗江第 29 位点,为 31.3 mg·kg⁻¹.Co、Ni、Cu、Zn、Pb 和 Hg 的最低值都在长江源头的通天河,即第 1 点位,分别为 4.3、9.8、11.3、34.1、15.9 和 0.008 6 mg·kg⁻¹;Co 和

式中, C_n 是元素 n 在沉积物中的含量, B_n 为沉积物中该元素的地球化学背景值. I_{geo} 值为地累积指数,根据 I_{geo} 值 0~6 将污染分为 7 级,对应污染程度为无污染至极强污染(表 1).

Ni 的最高值都在第 8 位点,即长江支流普渡河位点;而 Cu 和 Zn 的最高值分别为 920 和 1 050 mg·kg⁻¹,都出现在安徽段的支流顺安河,第 54 位点;Pb 和 Hg 的最高值都出现在湖南的湘江,第 26 位点,分别为 535 和 1.29 mg·kg⁻¹.Cd 在 43 位点即抚河最低,为 0.091 mg·kg⁻¹,同时其最高值也出现在湘江的第 28 位点.As 的最高值为 278 mg·kg⁻¹,与 Pb 和 Hg 一样,最高值都出现在第 26 位点.沉积物中重金属含量总体支流水系高于干流水系,而源头含量相对较低;从变异系数看,Cu、Pb、Cd、As 和 Hg 相对其它元素变异系数大,说明这些元素地区分布差别较大.

与 20 世纪 90 年代长江沉积物中重金属所监测的数据相比^[20],本调查中 Cu、Zn、Pb、Cd、As 和 Hg 的平均含量都大于 20 世纪 90 年代调查结果的最高值含量,说明在过去几十年中,Cu、Zn、Pb、Cd、As 和 Hg 有明显的累积现象.由于缺乏一部分沉积物背景值,所以本研究不同重金属元素分别采用区域背景值即长江流域表层沉积物背景值(Cr、Cu、Zn、Pb、Cd)、工业化前全球沉积物最高背景值(As 和 Hg)和全球页岩平均值(Ni)作为研究的背景值^[2,21,22].Cr、Cu、Zn、Pb、Cd 和 As 的平均值都超过了背景值,而 Co、Ni 和 Hg 的平均值小于背景值,说明在长江水系,Cr、Cu、Zn、Pb、Cd 和 As 不同程度的受到人为活动的影响.

表 2 长江水系表层沉积物中重金属含量的统计特征/mg·kg⁻¹

Table 2 Statistical characteristics of heavy metal content in surface sediments of Yangtze River/mg·kg ⁻¹							
元素	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数/%	20 世纪 90 年代 长江沉积物 ^[20]	背景值 ^[2,21,22]
Cr	31.3	127	89.54	18.68	0.21	47~99	84.71
Co	4.3	42.30	18.53	6.07	0.33	8.7~26.9	19
Ni	9.8	82.30	37.40	11.31	0.30	22.4~44.7	68
Cu	11.3	920	82.00	127	1.54	15.4~67.1	57.04
Zn	34.1	1 050	174	168	0.96	36.75~107	144
Pb	15.9	535	60.00	72.07	1.20	17.1~33.5	26.9
Cd	0.091	29.39	2.46	5.21	2.12	0.13~0.44	0.45
As	4.7	278	25.40	40.18	1.58	5.6~9.6	15
Hg	0.008 6	1.29	0.16	0.19	1.21	0.009 8~0.070 5	0.25

2.2 长江水系表层沉积物重金属来源的分析

首先对长江水系表层沉积物中 9 种重金属和地壳主要组成元素 Fe(以 TFe_2O_3 表示)进行了主成分分析,提取了前 3 个主成分,其解释了总方差的 86.75%,这样这 3 个主成分(特征值: $3.70 + 2.74 + 2.24 = 8.68$ 变量)完全可以代表原始数据的绝大部分的信息.

第一主成分的贡献率为 36.98%,特征表现为因子变量在 Zn、Pb、Cd、As 和 Hg 的浓度上有较高的载荷,同时从相关性分析也可以看出(表 3),这几种元素都有较强的相关性(相关系数 >0.5 ,表中黑体字表示),相关系数从 0.537(Cd-Hg)到 0.893(Hg-Pb),这样可以推测这几种元素的来源相似.在本次采集的沉积物样品中,Pb、Cd、As 和 Hg 含量的最大值都出现在湘江水系.资料表明,在 2000 年之后,湖南的 Hg、Cd、Cr、Pb 排放量位居全国首位,As 居第二位.同时,由于湘江流经南岭多金属成矿带,矿产的勘探和开采导致了周围环境的污染^[23].且湘江流域内长株潭地区为湖南省重工业发展区,这里工矿企业云集.曾敏等^[24]早期就对湘江流域内矿区土壤、植物等研究表明,由于开矿的影响,As 已造成湘江流域土壤的严重污染,同时造成水稻中 As 的超标^[25].所以 Pb、Cd、As 和 Hg 在湘江流域出现的高含量表明流域内采选、冶炼、化工厂等企业的污染为他们的主要污染源^[26].Cu、Zn 含量的最高值都在顺安河位点,该位点位于铜陵多金属矿和长江三角洲工业发达区.白晓宇等^[27]对铜陵矿区重金属污染研究表明,由于矿区污水通过不同支流的流入,造成该地区长江沉积物中重金属的

污染.因此,从 Zn、Hg、Cd、Pb 和 As 对第一主成分的贡献可知其代表的实际意义,即第一主成分主要代表了采矿、工业等排污对沉积物的污染.第二主成分的贡献率为 27.38%,主要表现在重金属 Cu 和 Co 上有较高的载荷,分别为 0.890 和 0.715. Fe 与 Cu 和 Co 都有较强的相关性,Fe 的最高值在顺安河(54 位点),为 $130 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;云南金沙江段和普渡河位点的含量都达到 $105 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,其余河段在 $4 \sim 7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间.由于长江沉积物中的重矿物组合主要由原岩控制,且流域内大多数为 Fe-Ti 氧化物/氢氧化物矿物等重矿物,诸如褐铁矿、钛铁矿、磁铁矿都相对集中在金沙江、湘江、沅江和长江上游干流段^[28].所以,流域内高含量的 Fe 可能主要是由岩石的侵蚀、风化造成,而顺安河相对高含量的 Fe 一部分可能是这一带多金属矿产的开发、侵蚀等造成的影响,这也说明重金属 Cu 和 Co 一部分可能来自自然源^[29],另一部分来自矿产的开采和冶炼.这样,第二主成分主要表示了自然因素即岩石的侵蚀和风化、矿产的开采对沉积物的影响.第三主成分的贡献率为 22.43%,其特征主要是在重金属 Ni 和 Cr 的浓度上有较高的载荷,同时还支配着部分 Co 的浓度.由于 Fe 与 Co 和 Ni 都有较强的相关性,但与 Cr 没有明显的相关性;研究表明,Cr 主要来自以电镀业为主的的城市工业污水^[30],所以第三主成分同时反映了工业和自然源对沉积物的影响.图 2 为前三个主成分载荷的二维图显示,其中各元素之间的离散程度较直观地反映了长江水系表层沉积物中重金属的主要来源,即工业排污和自然地球化学成因.

表 3 各重金属元素间的皮尔逊(Pearson)相关系数¹⁾

Table 3 Pearson correlation coefficients for heavy metals

	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Hg	TFe_2O_3
Cr	1									
Co	0.364 **	1								
Ni	0.606 **	0.805 **	1							
Cu	0.105	0.587 **	0.294 *	1						
Zn	0.136	0.457 **	0.273 *	0.731 **	1					
Pb	0.127	0.123	0.192	0.277 *	0.768 **	1				
Cd	0.083	0.288 *	0.130	0.534 **	0.841 **	0.525 **	1			
As	-0.002	0.139	0.108	0.401 **	0.858 **	0.880 **	0.757 **	1		
Hg	0.169	0.051	0.172	0.095	0.644 **	0.893 **	0.537 **	0.817 **	1	
TFe_2O_3	0.319 *	0.868 **	0.693 **	0.597 **	0.651 **	0.378 **	0.447 **	0.444 **	0.276 *	1

1) ** 表示双尾检验在 0.01 水平下相关性显著,* 表示双尾检验在 0.05 水平下相关性显著

2.3 长江水系表层沉积物重金属污染的分析

2.3.1 地累积指数法

根据地累积指数污染级别标准得到的 Cu、Zn、

Pb、Cd、As 和 Hg 不同取样点污染级别的柱状图见图 3,由于所有位点沉积物中重金属 Cr、Co、Ni 的地累积指数级别都小于 0,表明 Cr、Co 和 Ni 在长江

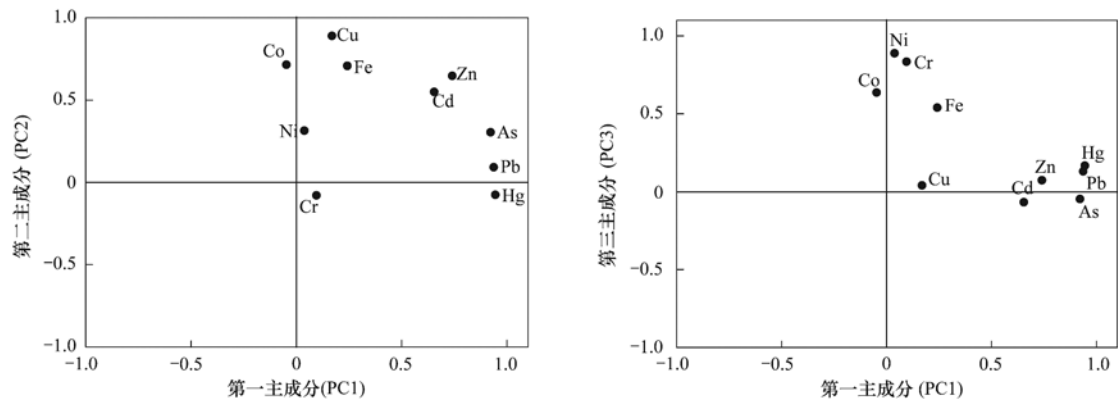


图 2 主成分分析二维载荷图

Fig. 2 Plot of loading of the first two principal

水系沉积物中没有污染,所以这 3 种重金属没有显示. 从图 3 可看出,长江水系表层沉积物重金属 Cd 和 Pb 的污染最大,有 50% 以上的位点都显示了不同程度的污染,尤其是重金属 Cd,除了上游一些位点没受到污染外,其余位点都受到不同程度的污染;在 25~28、30 和 54 位点,即湖南湘江、湘江洞庭湖入口和安徽铜陵顺安河,重金属 Cd 达到了强污染到极强污染;产生这一带如此高的 Cd 污染主要是由于湘江沿江集中的大量有色金属、稀有金属矿藏的开采和冶炼与化工厂等排放的含有大量重金属元素的生产废水和废气等造成;顺安河沉积物中 Cd 显示极强污染,主要由德兴铜矿酸性废水排放造成. 同时,Pb 和 As 也在湘江水系和顺安河沉积物中达

到中度污染到强污染, Zn 和 Hg 在湘江沉积物中也表现出中度污染. Cu 在四川攀枝花至重庆长江段(位点 8~11 和位点 13~15)和顺安河水系沉积物中显示出中度污染到强污染,主要由攀枝花和铜陵矿区酸性废水、沿江城市生活污水和工业废水引起. 总体来看,整个流域沉积物各重金属污染大小为 $Cd > Pb > Cu > As > Zn > Hg$.

2.3.2 富集因子法

图 4 为沉积物中重金属富集因子的 Whisker-box 图,从中可以看出,长江水系大多数表层沉积物位点中重金属 Cd 和 Pb 有明显的富集,一部分位点重金属 As 有富集;但对于重金属 Cd,绝大部分位点的富集因子都超过 2 以上. 而少部分沉积物位点

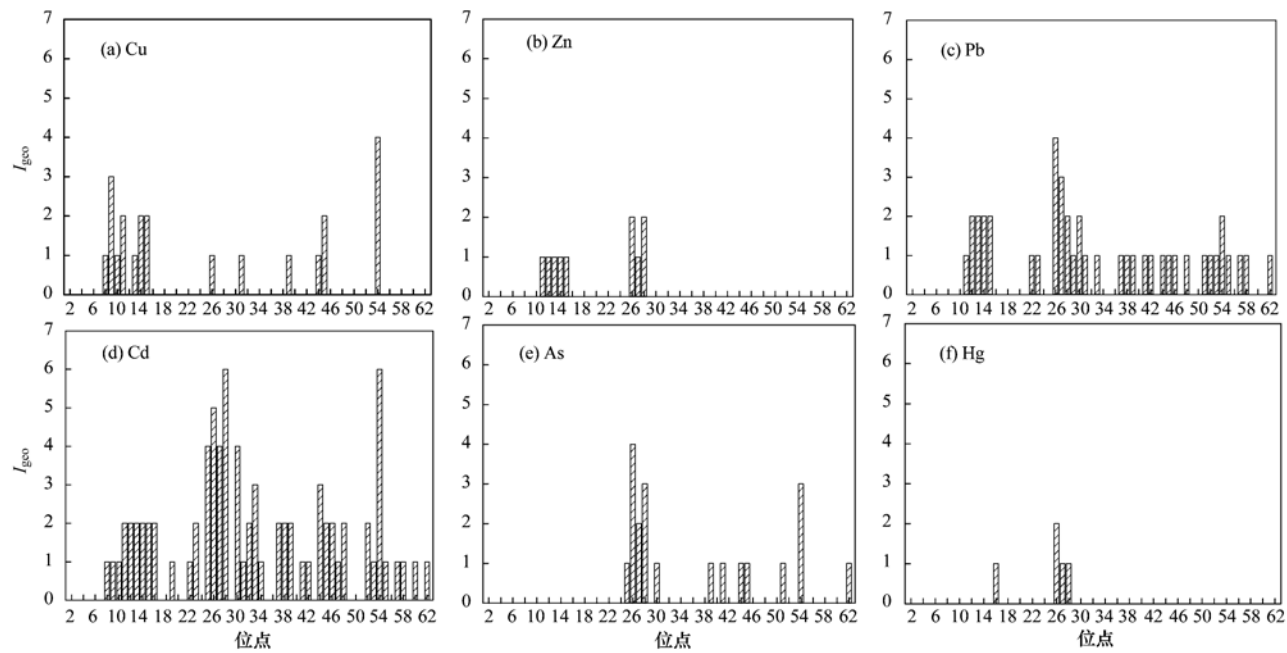


图 3 长江水系表层沉积物重金属元素的 I_{geo} 级别图

Fig. 3 Plots of the I_{geo} levels of heavy metals in the surface sediments of Yangtze River

中重金属 Cu、Zn 和 Hg 有富集,重金属 Cr、Co 和 Ni 的富集因子几乎都小于 1. 以上这些信息表明,长江水系沉积物没有受到重金属 Cr、Co 和 Ni 的污染,但 Cd 和 Pb 对沉积物有明显的污染,而有少部分位点受到 Cu、Zn、As 和 Hg 的污染. 由此可见,长江水系表层沉积物各重金属富集因子显示的信息与地累积指数法所得的结果相似.

2.4 长江水系表层沉积物中重金属的生态风险

潜在生态风险性指数值(RI)综合反映了沉积物中 Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Pb、Cd、As 和 Hg 的污染水平及潜在生态危害性. 本研究基于 Hakanson 的生态风险指数法对各采样点沉积物中的重金属进行生态风险评价^[21],结果见图 5 和表 4.

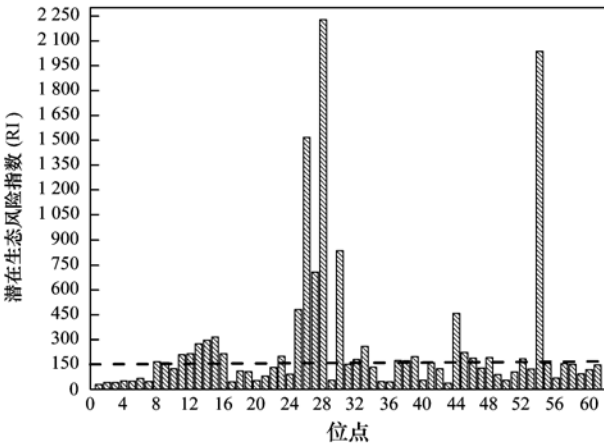


图 5 长江水系表层沉积物中重金属的潜在生态风险指数

Fig. 5 Potential ecological risk factor of heavy metals in the surface sediments of Yangtze River

表 4 长江水系表层沉积物潜在生态风险评价结果

Table 4 Potential ecological risk assessment results in the surface sediments of Yangtze River

项目	潜在生态风险因子 (E_i^r)									潜在生态风险指数 (RI)
	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Hg	
范围	0.74 ~ 3.00	1.13 ~ 11.1	0.72 ~ 6.05	0.99 ~ 80.7	3.56 ~ 109	2.96 ~ 99.4	6.07 ~ 1 959	3.13 ~ 185	1.44 ~ 206	29.9 ~ 2 228
平均值	2.11	4.88	2.75	7.19	18.2	11.2	164	16.93	24.92	252

长江水系重金属污染物中潜在生态风险因子 E_i^r 最高的为 Cd,平均为 164,具有很强的生态危害;最高值达到1 959,生态危害极强. 而 Cu、Zn、Pb、As 和 Hg 潜在的生态危害指数大多属于轻微生态危害,Cu 只有 54 位点,即顺安河位点为强生态危害;Zn 和 As 只在 26 和 54(湘江衡阳段和顺安河)位点为强生态危害,在湘江株洲位点和洞庭湖入口位点为中等生态危害;Pb 只在湘江衡阳位点为强生态危害;Hg 分别在长江干流重庆段、乌江涪陵段、巫山大宁河和湘江株洲段位点显示出中等生态危害,在湘江洞庭湖入口位点显示出强生态危害,湘江衡阳位点显示出很强生

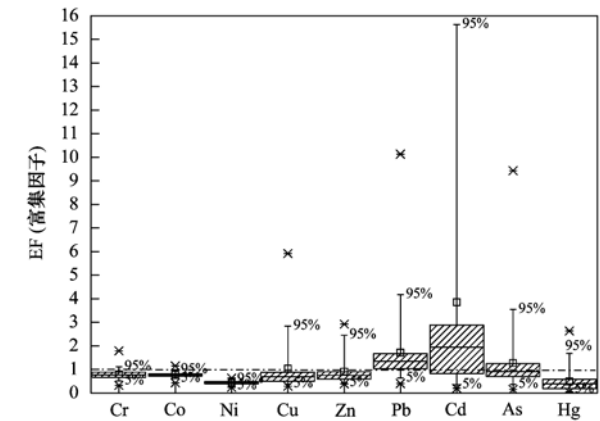
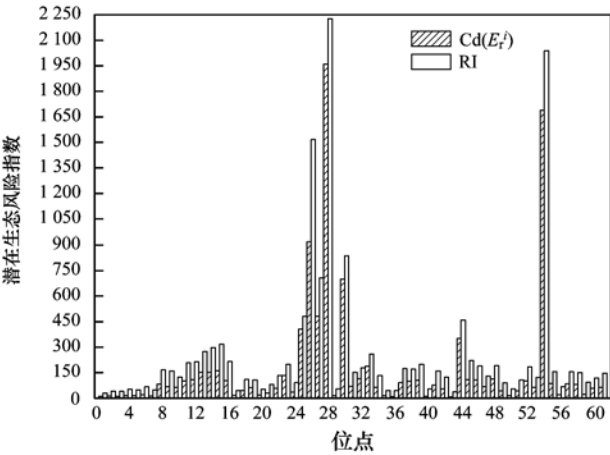


图 4 长江水系表层沉积物中重金属富集因子的 Whisker-box 图

Fig. 4 Box and whisker plots for the EF of heavy metals in the surface sediments of Yangtze River



态危害;而 Cr、Co 和 Ni 潜在的生态危害指数都为轻微生态危害. 各重金属潜在生态风险因子的高低顺序依次为: Cd > Hg > As > Zn > Pb > Cu > Co > Ni > Cr. 综合潜在生态风险指数(RI)表明,在所有的位点中,中等生态危害的样点占 36%,有 3 个位点属于强生态危害范畴,即干流重庆段、资水洞庭湖入口和信江位点;而湘江衡阳段、湘江株洲段、湘江洞庭湖入口、洞庭湖和安徽顺安河位点为极强生态范畴. 从图 5 可看出,Cd 的潜在生态风险因子在潜在生态风险指数中占主导地位,表明 Cd 在长江水系表层沉积物中强的生态风险性.

3 结论

(1) 长江水系表层沉积物中重金属不同程度的受到了人为因素的影响, 除 Co、Ni 和 Hg 外, Cr、Cu、Zn、Pb、Cd 和 As 的平均值都超过了背景值; 且 Cu、Zn、Pb、Cd、As 和 Hg 在过去几十年有明显的累积现象。

(2) 主成分分析和相关分析表明, 沉积物中的 9 种重金属元素所代表的全部信息可由 3 个主成分来反映, 主成分 1 支配着 Zn、Pb、Cd、As 和 Hg 的来源, 代表着采矿和工业排污对沉积物的影响; 主成分 2 支配着 Cu 和 Co 的来源, 代表岩石的侵蚀、风化等自然因素以及矿产开采对沉积物的影响; 而主成分 3 支配着 Ni、Cr 和部分 Co 的来源, 同时代表城市工业污水和自然变化对沉积物的影响。

(3) 地累积指数和富集因子法都表明, 长江水系沉积物不同程度的受到了 Cd 的污染, 尤其是在顺安河和湘江位点分别达到强和极强污染; 同时, Pb 和 As 也在这一带达到中度污染到强污染, Cu、Zn 和 Hg 在不同位点表现出中度到强度污染; 而沉积物没有受到 Cr、Co 和 Ni 的污染。长江整个流域表层沉积物各重金属污染大小为 $Cd > Pb > Cu > As > Zn > Hg$ 。

(4) 重金属的潜在生态危害因子表明, Cd 表现出强或极强的生态危害性, Cu、Zn、Pb、As 和 Hg 潜在的生态危害指数大多属于轻微生态危害, 而 Cr、Co 和 Ni 潜在的生态危害指数都为轻微生态危害。综合重金属的潜在生态风险指数结果表明, 在所有样点中, 中等生态危害的样点占 36%, 而长江干流重庆段、支流资水洞庭湖入口和信江属于强生态风险, 支流湘江和顺安河属于极强生态风险。

致谢: 对中国地质大学(北京)、南京大学和淮海大学在样品采集和中国地质大学(北京)夏学齐老师在绘制点位图时提供的帮助一并致谢。

参考文献:

- [1] Santos Bermejo J C, Beltrán R, Gómez Ariza J L. Spatial variations of heavy metals contamination in sediments from Odiel river (Southwest Spain) [J]. *Environment International*, 2003, **29**(1): 69-77.
- [2] 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.
- [3] Bertin C, Bourg A C M. Trends in the heavy metal content (Cd, Pb, Zn) of river sediments in the drainage basin of smelting activities[J]. *Water Research*, 1995, **29**(7): 1729-1736.
- [4] Lin J G, Chen S Y. The relationship between adsorption of heavy metal and organic matter in river sediments [J]. *Environment International*, 1998, **24**(4): 345-352.
- [5] Feng H, Han X F, Zhang W G, et al. A preliminary study of heavy metal contamination in Yangtze River intertidal zone due to urbanization [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, **49**(11-12): 910-915.
- [6] Yao Q Z, Zhang J, Wu Y, et al. Hydrochemical processes controlling arsenic and selenium in the Changjiang River (Yangtze River) system [J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **377**(1): 93-104.
- [7] Mishra V K, Upadhyaya A R, Pandey S K, et al. Heavy metal pollution induced due to coal mining effluent on surrounding aquatic ecosystem and its management through naturally occurring aquatic macrophytes [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(5): 930-936.
- [8] 沈敏, 于红霞, 邓西海. 长江下游沉积物中重金属污染现状与特征[J]. *环境监测管理*与技术, 2006, **18**(5): 15-18.
- [9] 马德毅, 王菊英. 中国主要河口沉积物污染及潜在生态风险评价[J]. *中国环境科学*, 2003, **23**(5): 521-525.
- [10] 盛菊江, 范德江, 杨东方, 等. 长江口及其邻近海域沉积物重金属分布特征和环境质量评价[J]. *环境科学*, 2008, **29**(9): 2405-2412.
- [11] 张丽旭, 蒋晓山, 赵敏, 等. 长江口海域表层沉积物污染及其潜在生态风险评价[J]. *生态环境*, 2007, **16**(2): 389-393.
- [12] 杨清伟, 肖飞, 刘雪莲, 等. 长江重庆城区段表层沉积物重金属污染特征分析[J]. *水资源保护*, 2009, **25**(1): 28-31.
- [13] Chetelat B, Liu C Q, Zhao Z Q, et al. Geochemistry of the dissolved load of the Changjiang Basin rivers: anthropogenic impacts and chemical weathering [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, **72**(17): 4254-4277.
- [14] Wu J G, Huang J H, Han X G, et al. The Three Gorges Dam: an ecological perspective [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2004, **2**(5): 241-248.
- [15] Song Y X, Ji J F, Yang Z F, et al. Geochemical behavior assessment and apportionment of heavy metal contaminants in the bottom sediments of lower reach of Changjiang River [J]. *Catena*, 2011, **85**(1): 73-81.
- [16] 刘文国, 武勇. 长江已患“早期癌症”, 污染治理需及时 [EB/OL]. 2006, http://www.xinhuanet.com/chinanews/2006-03/01/content_6349953.htm.
- [17] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. *Geo Journal*, 1969, **2**(3): 108-118.
- [18] 张秀芝, 鲍征宇, 唐俊红. 富集因子在环境地球化学重金属污染评价中的应用[J]. *地质科技情报*, 2006, **25**(1): 65-72.
- [19] Lu X Q, Wener I, Young T M. Geochemistry and bioavailability of metals in sediments from northern San Francisco Bay [J]. *Environment International*, 2005, **31**(4): 593-602.
- [20] 臧小平, 郭利平, 陈宏章, 等. 长江干流水底沉积物中十二种金属元素的背景值及污染状况的初步探讨[J]. *中国环境监测*, 1992, **84**(4): 18-20.
- [21] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution

- control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [22] 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.
- [23] Song Y X, Ji J F, Mao C P, *et al.* Heavy metal contamination in suspended solids of Changjiang River — environmental implications[J]. *Geoderma*, 2010, **159**(3-4): 286-295.
- [24] 曾敏, 廖柏寒, 曾清如, 等. 湖南郴州、石门、冷水江 3 个矿区 As 污染状况的初步调查[J]. *农业环境科学学报*, 2006, **25**(2): 418-421.
- [25] 何谈, 廖柏寒, 曾敏, 等. 湘南 4 个矿区稻田 As 污染状况的初步调查[J]. *生态毒理学报*, 2007, **2**(4): 470-475.
- [26] 王秋衡, 王淑云, 刘美英. 湖南湘江流域污染的安全评价[J]. *中国给水排水*, 2004, **20**(8): 104-106.
- [27] 白晓宇, 袁峰, 李湘凌, 等. 铜陵矿区土壤重金属元素的空间变异及污染分析[J]. *地学前缘*, 2008, **15**(5): 256-263.
- [28] Yang S Y, Wang Z B, Guo Y, *et al.* Heavy mineral compositions of the Changjiang (Yangtze River) sediments and their provenance-tracing implication [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, **35**(1): 56-65.
- [29] Landajo A, Arana G, de Diego A, *et al.* Analysis of heavy metal distribution in superficial estuarine sediments (estuary of Bilbao, Basque Country) by open-focused microwave-assisted extraction and ICP-OES[J]. *Chemosphere*, 2004, **56**(11): 1033-1041.
- [30] Tam N F Y, Yao M W Y. Normalisation and heavy metal contamination in mangrove sediments[J]. *Science of the Total Environment*, 1998, **216**(1-2): 33-39.

CONTENTS

Levels and Sources of Gaseous Polybrominated Diphenyl Ethers in Air over the Northern South China Sea	LI Qi-lu, LI Jun, LIU Xiang, <i>et al.</i> (2533)
Observation and Analysis of Air Pollution in Zhangjiakou, Hebei	SHAO Ping, WANG Li-li, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (2538)
Smog Chamber Simulation of Ozone Formation from Atmospheric Photooxidation of Propane	HUANG Li-hua, MO Chuang-rong, XU Yong-fu, <i>et al.</i> (2551)
Mechanism and Performance of a Membrane Bioreactor for Treatment of Toluene Vapors	YE Qi-hong, WEI Zai-shan, XIAO Pan, <i>et al.</i> (2558)
Analysis of Odor Pollutants in Kitchen Waste Composting	ZHANG Hong-yu, ZOU Ke-hua, YANG Jin-bing, <i>et al.</i> (2563)
Spatial Changes and Sources of Nitrate in Beijing Urban Ecosystem Surface Water	XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2569)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from Three Tributaries of Yangtze River in Different Periods	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2574)
Distribution Characteristics and Potential Risks of Phenols in the Rainy Season Surface Water from Three Gorges Reservoir	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2580)
Spatial Distribution of Perfluorooctanoic Acids and Perfluorinate Sulphonates in Surface Water of East Lake	CHEN Jing, WANG Lin-ling, ZHU Hu-di, <i>et al.</i> (2586)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Daninghe River and Modaoxi River of Three Gorges Reservoir Areas	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2592)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of the Yangtze River	WANG Lan, WANG Ya-ping, XU Chun-xue, <i>et al.</i> (2599)
Analysis of the Source, Potential Biological Toxicity of Heavy Metals in the Surface Sediments from Shellfish Culture Mudflats of Rudong Country, Jiangsu Province	LI Lei, WANG Yun-long, JIANG Mei, <i>et al.</i> (2607)
Effect of Disturbance Intensity on Phosphorus Release and Its Transformation in the Sediment from Taihu Lake	LI Da-peng, HUANG Yong (2614)
Effects of Intrusions from Three Gorges Reservoir on Nutrient Supply to Xiangxi Bay	ZHANG Yu, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2621)
Influence of Perennial Flooding and Drought on Growth Restoration of <i>Acorus calamus</i> in Water-level-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir	LI Qiang, GAO Xiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i> (2628)
Pollution Load and the First Flush Effect of Phosphorus in Urban Runoff of Wenzhou City	ZHOU Dong, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan (2634)
Output Characteristics of Rainfall Runoff Phosphorus Pollution from a Typical Small Watershed in Yimeng Mountainous Area	YU Xing-xiu, LI Zhen-wei, LIU Qian-jin, <i>et al.</i> (2644)
Influence of Land Use Structure on Nitrogen Output in the Watershed of Suburban Agriculture Regions	YANG Feng, WANG Peng-ju, YANG Shan-shan, <i>et al.</i> (2652)
Simulation of Nitrogen and Phosphorus Loss in Siling Reservoir Watershed with AnnAGNPS	BIAN Jin-yun, WANG Fei-er, YANG Jia, <i>et al.</i> (2659)
GIS and L-THIA Based Analysis on Variations of Non-point Pollution in the Guanlan River Watershed, Shenzhen	BAI Feng-jiao, LI Tian-hong (2667)
Response of Sloping Water Erosion to Rainfall and Micro-earth Pattern in the Loess Hilly Area	WEI Wei, JIA Fu-yan, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (2674)
Comparison Study of Enhanced Coagulation on Humic Acid and Fulvic Acid Removal	ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji, YE He-xiu, <i>et al.</i> (2680)
Real-time PCR Detection and Quantification of Emerging Waterborne Pathogens (EWPs) and Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in the Downstream Area of Jiulong River	WANG Qing, LIN Hui-rong, ZHANG Shu-ting, <i>et al.</i> (2685)
Quantitative and Qualitative Analysis of Total Bacteria and Ammonia-oxidizing Bacteria in Buji River in Wet Season	SUN Hai-mei, BAI Jiao-jiao, SUN Wei-ling, <i>et al.</i> (2691)
Study on the Nitrogen Removal Performance and the Characteristics of Denitrification Bacterial Community Structure of Biological Aerated Filter	PENG Xiao-lan, LIU Cong, CHEN Li-jun (2701)
Analysis of Microbial Community Structure at Full-scale Wastewater Treatment Plants by Oxidation Ditch	GUO Yun, YANG Dian-hai, LU Wen-jian (2709)
Performance and Microbial Community Dynamic Characteristics of an Internal Circulation Reactor Treating Brewery Wastewater	ZHU Wen-xiu, HUANG Zhen-xing, REN Hong-yan, <i>et al.</i> (2715)
Coupling AFM Fluid Imaging with Micro-Flocculation Filtration Process for the Technological Optimization	ZHENG Bei, GE Xiao-peng, YU Zhi-yong, <i>et al.</i> (2723)
Study on Removal Effect of Different Organic Fractions from Bio-treated Effluent of Dye Wastewater by UV/H ₂ O ₂ Process	LI Xin, LIU Yong-di, SUN Xian-bo, <i>et al.</i> (2728)
Optimization of <i>Chlorella pyrenoidosa</i> -15 Photoheterotrophic Culture and Its Use in Wastewater Treatment	WANG Xiu-jin, LI Zhao-sheng, XING Guan-lan, <i>et al.</i> (2735)
Characteristics and Mechanism of 2,4,6-TCP Degradation by the "Fe ⁰ /Enriched-Bacteria" System	DAI You-zhi, GUO Li-li, SHI Lei, <i>et al.</i> (2741)
Immobilization of Crude Laccase onto Anion Exchange Resin and Its Application in Decoloration of Malachite Green	QI Xu-liang, LIU Xiang, LIU Bo, <i>et al.</i> (2747)
Low-Temperature Preparation of TiO ₂ /PS/Fe ₃ O ₄ and Its Photocatalytic Activity and Magnetic Recovery	WANG Xue-jiao, REN Xue-chang, NIAN Juan-ni, <i>et al.</i> (2752)
Study on Catalytic Oxidation of Benzene by Microwave Heating	ZHANG Yu-cai, BO Long-li, WANG Xiao-hui, <i>et al.</i> (2759)
Synergistic Effects of Nano-sized Magnetic Particles and Uncoupler to the Characteristics of Activated Sludge	GAO Li-ying, TANG Bing, LIANG Ling-yan, <i>et al.</i> (2766)
Experimental and Modeling Research on the Settlement of Aerobic Granular Sludge	SU Kui-zu, DENG Xiu-kun, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2773)
Analysis of Hydrolytic Enzyme Activities on Sludge Aerobic/Anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment	YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2780)
Effect of Microbial Nutrient Concentration on Improvement of Municipal Sewage Sludge Dewaterability Through Bioleaching	SONG Yong-wei, LIU Fen-wu, ZHOU Li-xiang (2786)
Response of the Artificial Cyanobacterial Crusts to Low Temperature and Light Stress and the Micro-structure Changes Under Laboratory Conditions	RAO Ben-jiang, LI Hua, XIONG Ying, <i>et al.</i> (2793)
Seasonal Dynamics of Soil Active Carbon Pool in a Purple Paddy Soil in Southwest China	WU Yan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2804)
Pollution Characteristics and Accumulation of Antibiotics in Typical Protected Vegetable Soils	YIN Chun-yan, LUO Yong-ming, TENG Ying, <i>et al.</i> (2810)
Transformation and Influences of Copper and Selenium Fractions on Heavy Metals Bioavailability in Co-contaminated Soil	HU Bin, LIANG Dong-li, ZHAO Wen-long, <i>et al.</i> (2817)
Response of Soil Microbial Community to the Bioremediation of Soil Contaminated with PAHs	ZHANG, Jing, LIN Xian-gui, LIU Wei-wei, <i>et al.</i> (2825)
Bioremediation of PAHs Contaminated Soil from Beijing Coking Plant by <i>Lasiodiplodia theobromae</i>	ZHANG Zhi-yuan, WANG Cui-ping, LIU Hai-bin, <i>et al.</i> (2832)
Leaching Experiments on the Release of Trace Elements from Tailings of Chashan Antimony Mine, Guangxi, China	CAI Yong-bing, LI Ling, WEI Xiao-fei, <i>et al.</i> (2840)
Accumulation Characteristics of Arsenic in Suburban Soils of Beijing	QI Jie, WANG Mei-e, WANG Zi-qiang, <i>et al.</i> (2849)
Antioxidant Enzyme Gene Expression as Molecular Biomarkers of Exposure to Polycyclic Musks	CHEN Chun, ZHOU Qi-xing, LIU Xiao-wei (2855)
Effects of Ozone Pollution on the Accumulation and Distribution of Dry Matter and Biomass Carbon of Different Varieties of Wheat	KOU Tai-ji, YU Wei-wei, ZHU Jian-guo, <i>et al.</i> (2862)
Influence of Reaction Time of Urea Hydrolysis-Based Co-precipitation on the Structure of ZnAl Layered Double Hydroxides and the Phosphate Adsorption	LU Ying, CHENG Xiang, XING Bo, <i>et al.</i> (2868)
Competitive Adsorption Kinetics of Aqueous Pb ²⁺ and Cu ²⁺ on Nano-HAP Surfaces	HU Tian-tian, CANG Long, WANG Yu-jun, <i>et al.</i> (2875)
Effects of pH and Ni ²⁺ on Sorption Behavior of Phenanthrene on Engineered Nano-Silica	LUO Pei, SUN Hong-wen, ZHANG Peng (2882)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Uranium on Attapulgite	LIU Juan, CHEN Di-yun, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2889)
Adsorption Characteristics of Ciprofloxacin in Ustic Cambosols	CUI Hao, WANG Shu-ping (2895)
Kinetic Mechanism and Characteristics Researches for Hydrazine-based NO _x Removal at Moderate to High Temperatures	HONG Liu, CHEN De-zhen, WANG Du, <i>et al.</i> (2901)
Current Research Situation of H ₂ S Selective Catalytic Oxidation Technologies and Catalysts	HAO Zheng-ping, DOU Guang-yu, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (2909)

《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8月15日 33卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 8 Aug. 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