

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)	

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, 袁骐, 沈新强*

(中国水产科学研究院东海水产研究所, 农业部海洋与河口渔业资源及生态重点开放实验室, 上海 200090)

摘要: 通过2010年对江苏如东滩涂贝类养殖区表层沉积物中重金属Cu、Zn、Pb、Cd、Hg、As含量的调查分析, 应用地质累积指数(index of geo-accumulation, I_{geo})对各重金属元素的污染状况进行了评价, 结果表明重金属污染可分为3类: Cu、Cd、Hg为无污染; Pb、As为中~无污染; Zn为中度污染, 重金属污染程度顺序为 $Zn > As > Pb > Cd > Cu > Hg$ 。根据沉积物质量基准(sediment quality guideline, SQG), 表层沉积物中Cd、As的含量在各采样站位分别表现为无潜在生物毒性效应, 偶尔有潜在生物毒性效应, Cu、Pb、Zn、Hg的含量则在部分采样站位偶尔有潜在生物毒性效应, 其中仅有Zn在部分采样站位有频繁发生的潜在生物毒性效应。毒性单位评价(toxic unit, TU)结果表明, 仅有1个采样站位具有明显的急性毒性, 其余站位无急性生物毒性效应。主成分分析(principal component analysis, PCA)的结果表明, 前2个主成分的贡献率分别为37.56%、33.71%, 揭示了重金属污染主要有2个来源: 工业点源排污和交通运输污染源。

关键词: 滩涂贝类养殖区; 重金属; 地质累积指数; 沉积物质量基准; 主成分分析

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)08-2607-07

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, YUAN Qi, SHEN Xin-qiang

(Key and Open Laboratory of Marine and Estuarine Fisheries Resources and Ecology, Ministry of Agriculture, Chinese Academy of Fishery Sciences, East China Sea Fisheries Research Institute, Shanghai 200090, China)

Abstract: Concentrations of six heavy metals were measured in the surface sediments from shellfish culture mudflats of Rudong Country, Jiangsu Province in 2010. The geo-accumulation Index (I_{geo}) was employed to evaluate the pollution level of heavy metals and the results showed that the heavy metal contamination could be divided into three groups: no contamination (I_{geo}), as in the case of Cu, Cd, Hg; light to moderate contamination ($0 < I_{geo} < 1$), as in the case of Pb, As; and moderate contamination ($1 < I_{geo} < 2$), as in the case of Zn. The pollution level of heavy metals followed the order of $Zn > As > Pb > Cd > Cu > Hg$. The potential biological toxicity was analyzed using sediment quality guidelines (SQG), as the guideline values, Cd showed no potential biological toxicity, As showed occasional potential biological toxicity in all sampling stations, Cu, Pb, Zn, Hg showed potential biological toxicity in some sampling stations, whereas Zn was the only one showing frequent potential biological toxicity in some sampling stations. $\sum TU$ s revealed that only one of the sampling stations showed significant acute toxicity, whereas the others showed no acute toxicity. Analysis of heavy metal contamination source through principal component analysis (PCA) revealed that the contribution rates of the top two principal components were 37.56% and 33.71%, respectively, indicating that the two main sources of heavy metals were industrial waste water and pollution from transportation and shipping.

Key words: shellfish culture mudflats; heavy metal; index of geo-accumulation; sediment quality guideline; principal component analysis

滩涂是指大潮高潮位与低潮位之间的海岸带部分^[1], 是海洋与陆地交接并处于不断演变的生态系统, 是人类最早成功开发和利用的海洋地域, 在中国, 滩涂开发已成为海洋开发行业最多, 密集度和活动频率最高的区域, 其中又以养殖业为主^[2]。滩涂是沿海陆源污染物和海上排污的主要受纳场所之一, 近年来, 随着养殖历史的延长及养殖规模的扩大, 滩涂养殖生物频繁发生大规模死亡, 其中重金属

污染是重要原因之一^[3]。重金属是海洋环境中主要的污染物之一, 具有来源广、残留时间长、易于沿食物链转移富集、在某些条件下可以转化为毒性更

收稿日期: 2011-10-18; 修订日期: 2011-12-06

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-48); 国家科技支撑计划项目(2009BADB7B02)

作者简介: 李磊(1985~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋生态, E-mail: zheyilee@126.com

* 通讯联系人, E-mail: xinqiang_shen@hotmail.com

大的金属有机化合物的特点,对水生生物和人体健康构成潜在生态危害^[4]. 水环境中重金属来源于自然和人为两个途径,在转移过程中分散到水体、沉积物和生物体中^[5]. 重金属在海水、沉积物、固体悬浮颗粒和海洋生命物质中循环迁移,但只以很少的溶解态停留在水体中,主要是被作为存贮地的底部沉积物吸附和积聚^[6]. 同时,被水底沉积物吸附的重金属不是固定不变的,它可以通过一系列的物理、化学和生物过程而被释放出来,造成水环境的“二次污染”^[7]. 目前国外关于滩涂沉积物中重金属污染分布的研究已经见诸报道,如 Lee 等^[8]对东英格兰 Humber 入海河口的滩涂沉积物进行了重金属污染评价,Spencer^[9]应用主成分分析方法研究了英国 Medway 河口滩涂沉积物中重金属污染,Mat 等^[10]对马来西亚 Kuala Juru 和 Kuala Muda 两块滩涂中痕量重金属污染水平进行了评估. 国内近些年来针对滩涂沉积物中重金属污染也有相关研究^[11~14],其中张博等^[12]曾利用 GIS 技术评估了江苏如东滩涂重金属污染水平,但对江苏如东滩涂贝类养殖区重金属综合分析仍缺乏研究.

本研究以江苏如东滩涂贝类养殖区作为研究对象,通过 2010 年 5 月对如东滩涂贝类养殖区表层沉积物中 6 种重金属调查分析数据,利用地质累积指数(index of geo-accumulation, I_{geo})、沉积物

重金属质量基准(sediment quality guideline, SQG)分别评价了贝类养殖区表层沉积物中重金属的污染水平、环境风险及潜在生物毒性,同时运用主成分分析(principal component analysis, PCA)分析了重金属的分布情况及其可能的来源,以期为江苏如东滩涂养殖业的健康可持续发展以及环境保护提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

如东滩涂位于江苏省东南部、长江三角洲北翼,海岸线长达 92.42 km,滩涂面积达 6.93×10^4 hm^2 ,滩涂大部分属粉砂性滩涂,向海岸外围延伸形成了大规模辐射状沙洲群,它的规模之大,形态之特殊,水动力及地质地貌之复杂多变,在国内外少见,如东滩涂资源极为丰富,有紫菜以及浅水贝类 50 多种,是江苏省重要的滩涂增养殖区,其中文蛤(*Meretrix meretrix*)的资源量在国内占首位^[15,16].

1.2 站位布设以及样品采集

采样站位如图 1 所示,在江苏如东滩涂贝类养殖区设置 9 个站位,于 2010 年 5 月进行沉积物样品采集. 用塑料勺取其中央未受干扰的表层深度为 0~10 cm 沉积物采样,样品装于聚乙烯袋中,置于盛有冰袋的保温箱中保存.

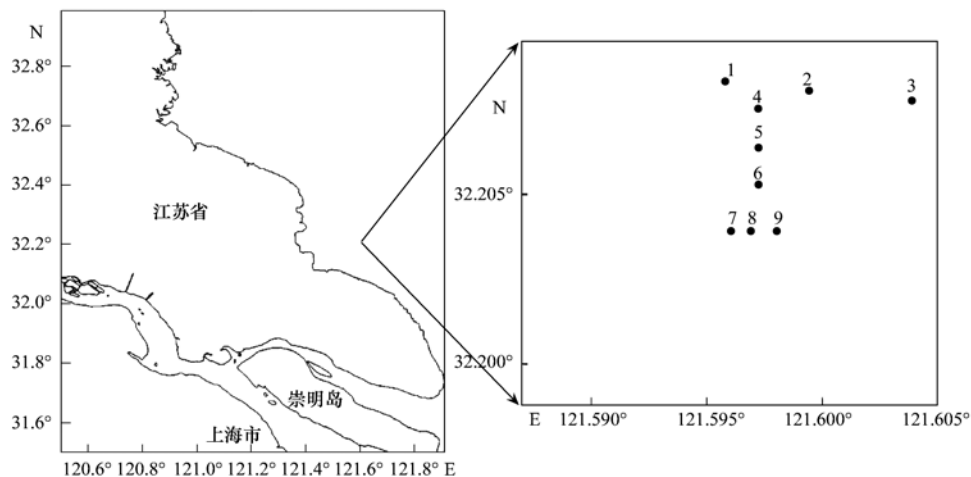


图 1 采样站位设置

Fig. 1 Distribution of sampling stations

1.3 样品分析测定

采集到的沉积物样品带回实验室,置于通风处晾干,去除杂物和粗颗粒后,用玛瑙研钵将其研碎并全部通过 160 目筛,充分混匀后取样以供测定. 样品进行了重金属 Cu、Zn、Pb、Cd、Hg、As 的含量检测

分析, Pb、Cd 用石墨炉原子吸收分光光度仪测定^[17]; Cu、Zn 以火焰原子吸收分光光度法测定、Hg 用冷原子吸收法测定^[18]; As 以原子荧光光谱法测定^[19]. 沉积物消解方法参照文献[20]. 分析过程以国家土壤一级标准物质(GSS1-CSS8)为质控标

样,测试相对误差 <5%.

1.4 数据处理与评价方法

1.4.1 重金属的空间分布

为了定量反映各重金属含量的空间波动程度的大小差异,选用变异系数 (coefficient of variation, CV) 来表示它们变化程度的大小,变异系数计算公式如下^[21]:

$$CV = S^2 / \bar{X} \tag{1}$$

式中,CV 为变异系数; S^2 表示各重金属参数空间序列的标准偏差; $\bar{X}$ 表示各重金属参数空间序列的平均值.

1.4.2 重金属的富集

Müller^[22]提出的地质累积指数 (index of geo-accumulation, I_{geo}) 是一种研究水环境沉积物中重金属污染的定量指标,被广泛应用于研究沉积物中重金属污染程度的评价^[23],计算公式如下:

$$I_{geo} = \log_2 [C_n / (k \times B_n)] \tag{2}$$

式中, C_n 是指元素 n 在沉积物中的含量 (指质量比,实测值); B_n 是粘质沉积岩 (即普通页岩) 中该元素的地球化学背景值; k 为考虑各地岩石差异可能会引起背景值的变动而取的系数 (一般取值为 1.5).

1.4.3 沉积物重金属污染潜在生物毒性

沉积物质量基准 (SQG) 是基于生物效应数据库 (the biological Effects database for sediments, BEDS)^[24, 25] 推导出的,按照评价沉积物中重金属的毒性效应,选用的基准取“有生物效应数据列”中 15% 的浓度作为效应范围低值 (effects range low, ERL), 50% 的浓度作为效应范围的中值 (effects range median, ERM). 并结合“无生物效应数据列” 50% 的浓度值 (no effect range median, NERM) 和 85% 浓度的几何平均值 (no effect range high, NERH) 确定临界效应浓度 (threshold effect level,

TEL) 和必然效应浓度 (probable effect level, PEL). 当污染物中某种重金属的浓度低于 TEL 时,意味着潜在生物毒性效应几乎不会发生; 污染物浓度高于 PEL 时,则潜在生物毒性效应将频繁发生,如介于二者之间,潜在生物毒性效应会偶尔发生.

Pedersen 等^[26]在沉积物质量基准的基础上进一步发展出了毒性单位评价 (toxic unit, TU) 法,毒性单位定义为毒性物质化学浓度与其对应的 PEL 值之比,并用毒性之和 ($\sum TU_s$) 来表征重金属的综合潜在急性毒性,并结合对 *Corophium volutator* 的生物毒性测试结果认为 $\sum TU_s < 4$ 时可以为无毒性, $\sum TU_s > 6$ 时表明具有急性毒性.

1.4.4 主成分分析

主成分分析 (principal component analysis, PCA) 是一种掌握主要矛盾的统计分析方法,优点是能多变量分析,并揭示蕴含的内在信息,通过对原变量进行线性变换后,由产生的少数几个新变量来最大限度地反映原来众多变量的变化关系和相互作用关系^[27]. 已经广泛应用于近岸海洋沉积物重金属污染物的来源确定^[9, 28~33].

1.5 数据分析

数据的统计分析方法采用 SPSS 17.0 软件,使用单因素方差分析法 (ANOVA) 进行组间差异显著性检验, $P < 0.05$ 表示有显著性差异.

2 结果与分析

2.1 表层沉积物中重金属的含量及分布

表 1 为本次调查的滩涂贝类养殖区 9 个采样站位表层沉积物中各金属元素的含量及分布情况,各站位间重金属含量变异较小,分布较均匀. 各重金属的含量范围分别为: Cu 为 12.22 ~ 42.34 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Zn

表 1 表层沉积物中金属的含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 1 Concentrations of heavy metals in surface sediments/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

站位	重金属					
	Cu	Zn	Pb	Cd	Hg	As
1	42.34	1 330.34	59.17	0.52	0.054	19.52
2	28.12	416.17	10.91	0.17	0.016	16.93
3	13.36	658.21	17.53	0.21	0.036	21.41
4	31.11	156.15	58.41	0.44	0.160	19.94
5	27.28	190.35	17.13	0.24	0.217	16.12
6	12.22	195.31	15.36	0.31	0.251	14.11
7	14.19	170.52	56.11	0.51	0.164	16.64
8	14.71	678.46	60.24	0.56	0.064	17.63
9	15.42	179.26	50.82	0.45	0.152	21.24
平均值	22.08	441.64	38.41	0.38	0.124	18.17
标准差	10.55	393.88	22.22	0.15	0.084	2.49
CV	0.48	0.89	0.58	0.39	0.677	0.14

为 156.15 ~ 1 330.34 mg·kg⁻¹、Pb 为 10.91 ~ 60.24 mg·kg⁻¹、Cd 为 0.17 ~ 0.56 mg·kg⁻¹、Hg 为 0.016 ~ 0.251 mg·kg⁻¹、As 为 14.11 ~ 21.41 mg·kg⁻¹；各重金属的含量存在显著差异 (ANOVA, $F = 10.549, P < 0.05$), 含量最高是 Zn, 为 (441.64 ± 393.88) mg·kg⁻¹, 最低是 Hg, 为 (0.124 ± 0.084) mg·kg⁻¹.

2.2 表层沉积物中重金属的污染评价

地质累积指数(I_{geo})法不但考虑了人为活动对环境的影响,而且还考虑到由于自然成岩作用可能会引起背景值变动的因素,是沉积物中重金属污染评价的一个重要而有效的方法^[22].在应用地质累积指数法评价重金属的污染程度的过程中,选取合适的背景值至关重要^[34],部分学者采用全球页岩中金属元素的含量作为背景值^[35],但往往由于区域母质成分的显著差异,导致评价结果产生较大误差,为更好地反映研究区域的实际情况,本研究采用毗邻研究区域的长江口沉积物重金属背景值^[36](表 2)计

算各重金属污染物的 I_{geo} ,同时采用中国陆壳地球化学背景值^[37](表 2)计算各重金属污染物的 I_{geo} 作为参比.

根据 Mülle^[22]对沉积物地积累指数分级标准与污染程度之间的相互关系的定义,地质累积指数分为 7 个等级,即 0 ~ 6 级,表示污染程度由无至极强(表 3).滩涂贝类养殖区表层沉积物中重金属地积累指数和指数分级的计算结果如表 4 所示,以中国陆壳页岩重金属作为背景值的重金属污染程度可分为 4 类:Cu 为无污染;Pb、Hg 为中 ~ 无污染;Zn 为中度污染;Cd、As 为强 ~ 中污染,总的污染程度属于无 ~ 中强度,重金属污染程度顺序为 As > Cd > Zn > Pb > Hg > Cu.以长江口沉积物重金属作为背景值的重金属污染程度可分为 3 类:Cu、Cd、Hg 为无污染;Pb、As 为中 ~ 无污染;Zn 为中度污染,总体上污染程度属于无 ~ 中度,重金属污染程度顺序为 Zn > As > Pb > Cd > Cu > Hg.显然,如前所述,采用不同的重金属背景值对地积累指数存在一定程度的影响.

表 2 地球化学背景值/mg·kg⁻¹

Table 2 Geo-chemistry background values/mg·kg⁻¹

重金属背景值	Cu	Zn	Pb	Cd	Hg	As
中国陆壳页岩	38	86	15	0.055	0.08	1.9
长江口沉积物重金属背景值	30	80	20	0.5	0.2	10

表 3 地质累积指数与污染程度

Table 3 Index of geo-accumulation and pollution level

污染程度	极强	极强 ~ 强	强	强 ~ 中	中	中 ~ 无	无
沉积物 I_{geo}	> 5	5 ~ 4	4 ~ 3	3 ~ 2	2 ~ 1	1 ~ 0	< 0
I_{geo} 分级	6	5	4	3	2	1	0

表 4 表层沉积物中重金属地积累指数和地积累指数分级

Table 4 Index of geo-accumulation (I_{geo}) and I_{geo} classification of heavy metals in surface sediments

重金属背景值	I_{geo}					
	Cu	Zn	Pb	Cd	Hg	As
中国陆壳页岩	-1.37	1.78	0.77	2.20	0.05	2.67
长江口沉积物重金属背景值	-1.03	1.88	0.36	-0.98	-1.27	0.28

2.3 表层沉积物中重金属污染的潜在生物毒性风险

沉积物的化学分析虽然能很好地了解污染状况,但不能判断污染物的生物效应,目前,在缺乏毒性实验数据时,应用基于生物效应数据库的沉积物质量基准可以快速预测污染沉积物的生物毒性,从而鉴别出需要引起关注的水体沉积物区域,为评价沉积物中重金属污染的生态毒性风险和沉积物质量管理提供重要参考^[26,38].

养殖涂贝类养殖区表层沉积物中各站位重金属含量(表 1)与沉积物质量基准中 TEL、PEL(表 5)的

比较结果如表 6 所示,其中 Cd 在各站位的含量均低于 TEL,无潜在生物毒性效应;As 在各站位的含量均介于 TEL ~ PEL 之间,偶尔有潜在生物毒性效应.55.56% 站位的 Cu 含量、44.44% 站位的 Pb 含量、44.44% 站位的 Hg 含量低于 TEL,无潜在生物毒性效应;44.44% 站位的 Cu 含量、55.56% 站位的 Zn 含量、55.56% 站位的 Pb 含量、55.56% 站位的 Hg 含量介于 TEL ~ PEL 之间,偶尔有潜在生物毒性效应;6 种重金属中仅有 Zn 的含量高于 PEL,发生几率为 44.44%,表明 Zn 对生物的潜在毒性效应频繁

发生.

沉积物样品中污染物含量高于 TEL 时,长期暴露会产生毒性效应,含量高于 PEL 时,会产生不利的急性毒性效应.图 2 是养殖区 9 个采样站位表层沉积物中重金属的 TU 和 $\sum TU_s$ 值,由图可知,1 号采样站位具有明显的急性毒性($\sum TU_s > 6$),且 $\sum TU_s$ 值主要由 Zn 贡献,与上述 Zn 对生物毒性效应频繁发生一致,其余站位 $\sum TU_s$ 值则均小于 4,基本不会对水生生物产生急性毒性效应.

结合养殖区表层沉积物中重金属的污染程度(表 4)与其潜在生物毒性风险可以看出,两者的结论吻合较好,表明把重金属在沉积环境中的污染程度与其对水生生物的潜在生物毒性风险相结合,能够较全面反映沉积物中重金属的污染状况.

表 5 TEL、PEL 的重金属基准值^[25]/mg·kg⁻¹

Table 5 TEL, PEL guideline values for heavy metals/mg·kg ⁻¹						
元素	Cu	Zn	Pb	Cd	Hg	As
TEL	18.7	124	30.2	0.68	0.13	7.24
PEL	108.2	271	112.2	4.21	0.70	41.6

表 6 各站位重金属潜在毒性效应在不同采样站位的发生几率¹⁾

Table 6 Potential biological toxicity of heavy metals in different guideline values occurred within the scope of probability in different sampling stations			
重金属	不同站位的发生几率		
	< TEL	TEL ~ PEL	> PEL
Cu	55.56% (5/9)	44.44% (4/9)	0% (0/9)
Zn	0% (0/9)	55.56% (5/9)	44.44% (4/9)
Pb	44.44% (4/9)	55.56% (5/9)	0% (0/9)
Cd	100% (9/9)	0% (0/9)	0% (0/9)
Hg	44.44% (4/9)	55.56% (5/9)	0% (0/9)
As	0% (0/9)	100% (9/9)	0% (0/9)

1) % (m/n), m 代表落在不同生物效应浓度范围的站位数, n 表示站位总数

2.4 表层沉积物中重金属的来源分析

运用 SPSS 软件以表层沉积物中重金属含量为变量进行方差极大正交旋转后得到主成分分析计算结果(表 7),主成分因子的组成及在各变量上的载荷分布如图 3 所示.其中前 2 个主成分特征值均大于 1,累计方差贡献率达到了 71.27%,因此,对前 2 个主成分进行分析已经能够反映全部数据的大部分信息.

PC1 的方差贡献率为 37.56%,对表层沉积物中重金属的组成和分布具有决定性的意义,PC1 在 Zn 上有高的正载荷,在 Hg 上有高的负载荷,Zn 是工业排污的重要成分,结合实地调查,如东沿海工业

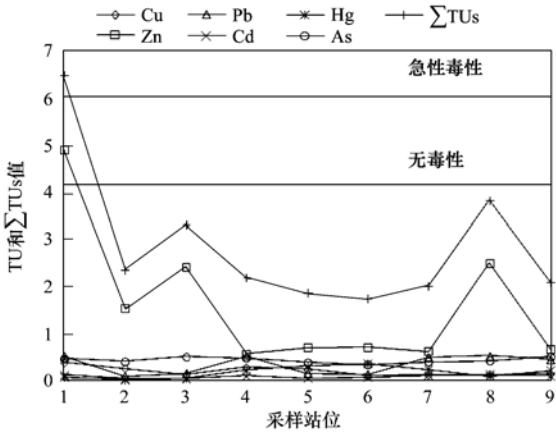


图 2 表层沉积物中重金属潜在生物毒性

Fig. 2 Potential Biological Toxicity of heavy metal in surface sediments

表 7 本研究主成分分析主要计算结果

Table 7 Main calculation results of principal component analysis (PCA) in this study		
项目	PC1	PC2
Cu	0.61	0.71
Zn	0.85	0.16
Pb	0.17	0.98
Cd	0.04	0.98
Hg	-0.87	0.11
As	0.62	0.25
特征值	2.25	2.02
方差贡献率/%	37.56	33.71
累计贡献率/%	37.56	71.27

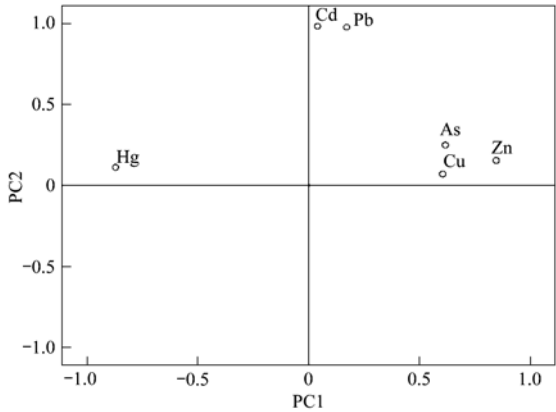


图 3 各金属的二维因子载荷

Fig. 3 Loading plots of heavy metals in the space defined by two components

园区排污是其主要来源,而 Hg 的来源途径区别于上述,作为一种挥发性金属,主要通过大气进入海洋^[39],因此 PC1 代表着工业排污对表层沉积物的重金属污染,同时也支配着 Cu、As 的来源. PC2 在 Pb、Cd 上有高的正载荷,Pb 是燃油中的重要成分,同时也含有微量的 Cd,在燃烧过程中两者一起释放

到大气,最终汇入沉积物^[40],交通、航运是其可能来源,因此 PC2 代表着交通运输对表层沉积物的重金属污染。

3 结论

(1)各采样站位表层沉积物中各金属元素的含量及分布较均匀,变异较小,各重金属的含量存在显著差异。

(2)表层沉积物中重金属污染程度可分为 3 类:Cu、Cd、Hg 为无污染;Pb、As 为中~无污染;Zn 为中度污染,总体上污染程度属于无~中度,重金属污染程度顺序为 $Zn > As > Pb > Cd > Cu > Hg$ 。

(3)Cd 在各站位的含量均低于 TEL,无潜在生物毒性效应;As 在各站位的含量均介于 TEL~PEL 之间,偶尔有潜在生物毒性效应;55.56% 的站位的 Cu 的含量、44.44% 的站位的 Pb 的含量、44.44% 的站位的 Hg 的含量低于 TEL,无潜在生物毒性效应;44.44% 的站位的 Cu 的含量、55.56% 的站位的 Zn 的含量、55.56% 的站位的 Pb 的含量、55.56% 的站位的 Hg 的含量介于 TEL~PEL 之间,偶尔有潜在生物毒性效应;6 种重金属中仅有 Zn 的含量高于 PEL,发生几率为 44.44%,表明 Zn 对生物的潜在毒性效应频繁发生;1 号采样站位具有明显的急性毒性($\sum TU_s > 6$),且 $\sum TU_s$ 值主要由 Zn 贡献,其余站位 $\sum TU_s$ 值则均小于 4,基本不会对水生生物产生急性毒性效应。

(4)主成分分析的结果表明前 2 个主成分特征值均大于 1,方差贡献分别为 37.56%、33.71%,重金属污染主要有 2 个来源:工业点源排污;交通运输污染源。

参考文献:

- [1] 王颖,朱大奎. 海岸地貌学[M]. 北京:高等教育出版社,1994. 30-61.
- [2] 薛超波,王国良,金珊. 海洋滩涂贝类养殖环境的研究现状[J]. 生态环境,2004, 13(1): 116-118.
- [3] 詹文毅,王南平,叶辉,等. 江苏如东文蛤大面积死亡原因探究[J]. 海洋水产研究,2003, 24(4): 62-65.
- [4] Förstner U, Wittman G T W. Metal pollution in the aquatic environment[M]. Berlin: Springer Verlag, 1979. 197-270.
- [5] Moore J W, Ramamoorthy S. Organic chemicals in natural waters: applied monitoring and impact assessment[M]. New York: Springer Verlag, 1984. 168-191.
- [6] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [7] Vallee B L, Ulmer D D. Biochemical effects of mercury, cadmium, and lead[J]. Annual Review of Biochemistry, 1972, 41(10): 91-128.
- [8] Lee S V, Cundy A B. Heavy metal contamination and mixing processes in sediments from the Humber Estuary, Eastern England[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2001, 53(5): 619-632.
- [9] Spencer K L. Spatial variability of metals in the inter-tidal sediments of the Medway Estuary, Kent, UK[J]. Marine Pollution Bulletin, 2002, 44(9): 933-944.
- [10] Mat I, Maah M J. Sediment trace metal concentrations from the mudflats of Kuala Juru and Kuala Muda of Malaysia[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1994, 53(5): 740-746.
- [11] 曹根庭,王国良,薛超波. 宁波市滩涂贝类养殖环境因子相关性分析[J]. 海洋环境科学,2008, 27(4): 355-358.
- [12] 张博,郑青松,赵耕毛,等. 基于 GIS 和地统计学的滩涂增殖区沉积物重金属污染评价[J]. 海洋环境科学,2011, 30(3): 376-379.
- [13] 李取生,楚蓓,石雷,等. 珠江口滩涂湿地土壤重金属分布及其对围垦的影响[J]. 农业环境科学学报,2007, 26(4): 1422-1426.
- [14] 康勤书,周菊珍,吴莹,等. 长江口滩涂湿地重金属的分布格局和研究现状[J]. 海洋环境科学,2003, 22(3): 44-47.
- [15] 陈邦本,方明. 江苏海岸带土壤[M]. 南京:河海大学出版社,1988. 1-58.
- [16] 范可章,孙国铭,陈爱华,等. 江苏南部海域文蛤增殖区底质中硫化物及其与 COD 的关系[J]. 南京师范大学学报(自然科学版),2005, 28(4): 90-94.
- [17] Bay S M, Zeng E Y, Lorenson T D, et al. Temporal and spatial distributions of contaminants in sediments of Santa Monica Bay, California[J]. Marine Environmental Research, 2003, 56(1-2): 255-276.
- [18] 黄华瑞. 渤海湾某些重金属及其它元素的分布与转移[J]. 海洋科学集刊,1988, 29: 191-210.
- [19] 乔永民,黄长江,林潮平,等. 粤东柘林湾表层沉积物的汞和砷研究[J]. 热带海洋学报,2004, 23(3): 28-35.
- [20] GB 17378-2007 海洋监测规范[S].
- [21] 崔党群. 生物统计学[M]. 北京:中国科学技术出版社,1994. 34-35.
- [22] Müller G. Index of geoaccumulation in sediment of the Rhine river[J]. Geological Journal, 1969, 2(3): 108-118.
- [23] Porstner U. Lecture notes in earth sciences (contaminated sediments)[M]. Berlin: Springer Verlag, 1989. 107-109.
- [24] 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.
- [25] Macdonald D D, Carr R S, Calder F D, et al. Development and evaluation of sediment quality guidelines for Florida coastal waters[J]. Ecotoxicology, 1996, 5(4): 253-278.
- [26] Pedersen F, Børnstad E, Andersen H V, et al. Characterization of sediments from Copenhagen Harbour by use of biotests[J].

- Water Science and Technology, 1998, **37**(6-7): 233-240.
- [27] Jolliffe I T. Principal component analysis [M]. New York: Springer, 1986. 487.
- [28] Jackson J E. A user's guide to principal components [M]. New York: Wiley-Interscience, 1991. 592.
- [29] Liu W X, Li X D, Shen Z G, *et al.* Multivariate statistical study of heavy metal enrichment in sediments of the Pearl River Estuary [J]. Environmental Pollution, 2003, **121**(3): 377-388.
- [30] 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.
- [31] Sprovieri M, Feo M L, Prevedello L, *et al.* Heavy metals, polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls in surface sediments of the Naples harbour (southern Italy) [J]. Chemosphere, 2007, **67**(5): 998-1009.
- [32] Carman C M, Li X D, Zhang G, *et al.* Trace metal distribution in sediments of the Pearl River Estuary and the surrounding coastal area, South China [J]. Environmental Pollution, 2007, **147**(2): 311-323.
- [33] Han Y M, Du P X, Cao J J, *et al.* Multivariate analysis of heavy metal contamination in urban dusts of Xi'an, Central China [J]. Science of the Total Environment, 2006, **355**(1-3): 176-186.
- [34] Roussiez V, Ludwig W, Probst J L, *et al.* Background levels of heavy metals in surficial sediments of the Gulf of Lions (NW Mediterranean): an approach based on ^{133}Cs normalization and lead isotope measurements [J]. Environmental Pollution, 2005, **138**(1): 167-177.
- [35] Turekian K K, Welepohl K H. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust [J]. Geological Society of America Bulletin, 1961, **72**(2): 175-192.
- [36] 吴国元. 长江河口南支南岸潮滩底质重金属污染与评价 [J]. 海洋环境科学, 1994, **13**(2): 45-51.
- [37] 黎彤. 中国陆壳及其沉积层和上陆壳的化学元素丰度 [J]. 地球化学, 1994, **23**(2): 140-145.
- [38] Pekey H, Karakas D, Ayberk S, *et al.* Ecological risk assessment using trace elements from surface sediments of Izmit Bay (Northeastern Marmara Sea) Turkey [J]. Marine Pollution Bulletin, 2004, **48**(9-10): 946-953.
- [39] Cheung K C, Poon B H T, Lan C Y, *et al.* Assessment of metal and nutrient concentrations in river water and sediment collected from the cities in the Pearl River Delta, South China [J]. Chemosphere, 2003, **52**(9): 1431-1440.
- [40] 葛敏霞, 袁旭音, 叶宏萌, 等. 长江三角洲农灌区沉积物中重金属的污染特征及生态评价 [J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(12): 2398-2405.

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-lin, 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-qiang, 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

国内外公开发行人