

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第7期

Vol.33 No.7

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

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

崇明东滩表层沉积物重金属空间分布特征及其污染评价

李雅娟, 杨世伦*, 侯立军, 周菊珍, 刘英文

(华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

摘要: 以崇明东滩潮间带表层沉积物为研究对象, 在粒度分析、重金属以及有机碳含量测定的基础上, 采用 ArcGIS 中的地统计分析模块研究了重金属 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd 的空间分布格局, 应用克里金法进行空间插值作图, 估算了沉降通量, 并运用地质累积指数法和潜在生态危害指数法对重金属污染现状进行了评价。结果表明: ① 目前崇明东滩重金属 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd 含量平均值分别为 42、27、69、71、0.23 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 均超过上海滩背景值, 且受沉积物粒径分布和有机碳的影响, 重金属含量呈现自岸向海和自北向南下降的趋势; ② 崇明东滩重金属 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd 的年沉降量分别为 187、121、395、312、1.04 t, 总沉积通量为 11 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$, 反映崇明东滩仍具有较强的重金属污染物“过滤器”功能; ③ 重金属污染状况总体为清洁, 但 Cd、Pb 和 Cu 的污染程度相对较高。

关键词: 崇明东滩; 沉积物; 重金属元素; 空间分布; 沉积通量; 污染评价

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)07-2368-08

Spatial Distribution and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Intertidal Surface Sediments of Eastern Chongming

LI Ya-juan, YANG Shi-lun, HOU Li-jun, ZHOU Ju-zhen, LIU Ying-wen

(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: Using the ArcGIS geostatistical analysis module, this work investigated the spatial distribution pattern of heavy metals (Cu, Pb, Zn, Cr, Cd) and their deposition fluxes in the intertidal surface sediments of Eastern Chongming based on the analysis of grain size, heavy metal concentrations and organic carbon content. The spatial interpolation (Kriging) was performed to estimate the deposition fluxes, and the contamination status of heavy metals was evaluated using geoaccumulation index and potential ecological risk index. The results showed that the average contents of Cu, Pb, Zn, Cr and Cd were 42, 27, 69, 71 and 0.23 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, respectively, all of which exceeded the background value in the Shanghai tidal flat. The contents of heavy metals showed a landward as well as northward increasing trend due to the influences of sediment grain size and organic carbon content. The annual deposition of Cu, Pb, Zn, Cr and Cd in Eastern Chongming were 187, 121, 395, 312 and 1.04 t, respectively; the total deposition flux of these heavy metals was 11 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$. Although the overall contamination level of heavy metals in Eastern Chongming was relatively low, Cd, Pb and Cu had a potential pollution threat to the sediment environment.

Key words: Eastern Chongming tidal flat; sediments; heavy metal; spatial distribution; deposition flux; pollution assessment

河口潮间带湿地是来自流域的污染物质的重要汇库^[1]。目前, 由于工业废水和生活污水的大量排放, 潮间带湿地作为污染物储存和净化场而面临巨大的压力^[2]。与很多污染物不同, 重金属威胁在于其不能被微生物分解, 可在生物体内富集, 并通过食物链逐级传递富集转化成毒性更大的金属-有机化合物, 当环境改变时, 聚集在沉积物中的重金属有可能释放出来, 导致滩涂环境质量恶化^[3]。崇明东滩作为长江口最重要的潮间带湿地之一, 目前是国家级鸟类保护区, 也是世界重要湿地名录之一, 研究崇明东滩重金属的研究对于保护湿地及鸟类等生物有重要作用。前人对于崇明东滩重金属污染已有相关研究, 但对于崇明东滩的重金属沉积通量研究尚不多^[1]。鉴于此, 本研究通过系统采样和分析, 结合 ArcGIS 中的地统计分析模块, 揭示崇明东滩沉积物

重金属 (Cu、Pb、Zn、Cr、Cd) 的分布特征和影响因素, 估算重金属的沉积通量, 并评估其污染水平, 以期为该潮间带湿地的保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与分析

崇明东滩位于长江口崇明岛向海一侧, 是目前长江口地区最大的潮间带湿地, 面积约 92.4 km^2 [图 1(a)]。崇明东滩南、北较窄 (1~2 km), 东部较宽 (最宽达 8 km)。潮间带上部被盐沼植物覆盖 (盐沼最宽约 2.5 km), 盐沼外是无植被

收稿日期: 2011-09-23; 修订日期: 2011-11-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41021064); 科技部中荷合作项目 (2008DFB90240); 上海市委项目 (10dz1210505)

作者简介: 李雅娟 (1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为重金属污染与评价, E-mail: liyajuanmiya@hotmail.com

* 通讯联系人, E-mail: slyang@sklec.ecnu.edu.cn

覆盖的光滩[图 1(b)]. 海三棱藨草为先锋植物, 一般高度为 40 ~ 50 cm, 盖度为 60% ~ 70%; 芦苇生长在海三棱藨草的向陆一侧, 一般高 2 ~ 2.5 m, 盖度 80% ~ 90%. 2001 年, 美国互花米草被引种到崇明东滩北部, 一般高 1.5 ~ 2.0 m, 盖度 90% ~ 95%^[4]. 20 世纪 80 年代, 崇明东滩的向海淤涨速率达到约 $350 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[5]. 近期, 由于建坝等因素导致长江入海泥沙锐减, 崇明东滩的淤涨明显减慢, 甚至局部出现蚀退^[6]. 崇明东滩沉积物组成以粉砂为主, 总体上具有自海向陆变细和自南向北变细的趋势^[7].

在崇明东滩布设北、中、南 3 个采样断面[图 1(b)], 每个断面间距约 200 m 设置采样点, 北、中、南断面各 9、25、11 个采样点, 于 2009 年 9 月采集

表层(<5 cm)沉积物样品, 共 45 个样. 在实验室对沉积物样品做粒度、重金属、有机碳分析.

粒径的测定: 取 1 g 左右混合均匀的沉积物样品放入烧杯中, 加蒸馏水静置 24 h 后, 用吸管轻轻地把水吸出, 洗出潮滩样品中的盐分; 然后加入 10% 的双氧水, 待反应完全后加满蒸馏水, 静置 24 h 后用吸管轻轻地把水吸出, 以除去样品中的有机质; 再加入 10% 的盐酸, 待反应完全后加满蒸馏水去除无机碳, 静置 24 h 后用吸管轻轻地把水吸出, 加入 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的六偏磷酸钠溶液($[\text{NaPO}_3]_6$), 静置 24 h, 并使用玻璃棒搅拌使颗粒得以充分分散, 经超声波分散后用 Coulter LS100 Q 激光粒度仪(美国生产, 测量范围 0.4 ~ 1 000 μm)进行粒度测量, 得到沉积物粒级全谱分布.

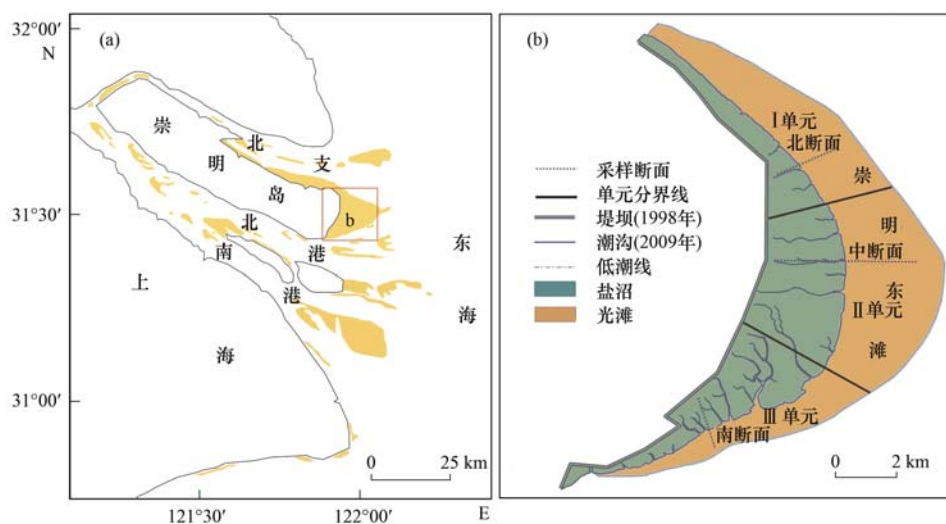


图1 研究区示意

Fig. 1 Sketch map of the studied area

重金属元素的测定: 样品经自然风干后, 用石英研钵研磨均匀, 采取酸溶法($\text{HF}-\text{HClO}_4-\text{HNO}_3$)消解, 用 AAnalyst 800 原子吸收光谱仪(美国 PE 公司生产)火焰法测定 Cu、Zn 和 Cr 的含量, 石墨炉法测定 Pb、Cd 的含量. 所有样品的处理、分析质量监控以国家标准沉积物样品(GSD-9)为质控样品, 其中 Cu、Pb、Zn、Cr 和 Cd 的回收率分别为: 101.60%、95.20%、102.08%、91.50% 和 88.00%.

有机碳的测定: 采用重铬酸钾氧化-硫酸亚铁滴定法. 称取 0.4000 g 样品于 50 mL 玻璃试管中, 加 10.00 mL $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7-\text{H}_2\text{SO}_4$ 标准溶液, 将一批试管置于铁丝笼中(每个笼中内有 3 个空白样品和 3 个 GSD-9 监控样), 然后放入 180℃ 油浴锅中加热, 待试管内容物沸腾 5 min 后, 取出擦净试管外壁的油,

将试管中的溶液及残渣倒入 250 mL 锥形瓶中, 加入 2 ~ 3 滴邻菲罗啉指示剂, 用 FeSO_4 标准溶液滴定至溶液由浅绿色突变到亮绿色再到砖红色即为终点.

1.2 插值方法

沉积物中元素空间分布的研究常利用空间插值方法, 将离散的点数据转化为连续的面数据, 以达到研究区域内元素的空间分布趋势的目的^[8]. 常用的插值方法有反距离加权插值法、克里金插值法、最小曲率法、多元回归法等, 其中克里格插值法是一种最优内插法, 广泛应用于地下水模拟、土壤制图等领域, 是一种对区域变量进行无偏最佳估值的一种可靠方法^[9]. 根据各插值方法的特点、采样点的分布和前人对插值方法的比较^[10], 本研究选用克里金插值法, GIS 平台为 ESRI 公司的 ArcInfo 9.3.

1.3 沉积速率测量及重金属沉积通量计算

于 2005 年 9 月 ~ 2010 年 9 月利用 RTK-GPS (美国 Ashtech 公司生产) 对沉积物取样所在的 3 个断面的高程进行 4 ~ 5 a 的重复测量, 计算各断面的平均沉积速率. 由于崇明东滩北中南断面各自所在的区域水动力、植被、人为干扰等情况均有差异, 故将崇明东滩划分为 I、II、III 这 3 个面积单元[图 1(b)], 分别以北、中、南断面的沉积速率和重金属含量代表 I、II、III 单元的沉积速率和重金属含量. 重金属沉积通量的计算公式如下(据文献[1]修改):

$$F = r_{Me} / \sum A_i = \sum (A_i \times D_i \times S_i \times c_{Me}) / \sum A_i \quad (1)$$

式中, F 为沉积通量 [$\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$]; r_{Me} 为崇明东滩重金属的总年沉降量 ($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$); A_i 为各单元面积 (km^2); D_i 为各单元沉积物干容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); S_i 为各单元平均沉降速率 ($\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$); c_{Me} 为沉积物中重金属元素含量 ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$).

1.4 沉积物重金属污染水平评价

采用地质累积指数法^[11]和潜在生态危害指数法^[12]对崇明东滩沉积物重金属元素进行污染水平评价.

1.4.1 地质累积指数法

地质累积指数法 (geo-accumulation index) 最早是由德国海德堡大学沉积物研究所的 Müller 提出^[11], 是一种研究水体沉积物中重金属污染的定量指标, 被广泛用于研究现代沉积物中重金属污染的评价, 其计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2(c_n/kB_n) \quad (2)$$

式中, I_{geo} 为地质累积指数; c_n 为重金属在沉积物中的实测含量; B_n 为沉积岩 (即普通页岩) 中所测元素的地球化学背景值, 考虑到以中国陆壳中地球化学背景值比普通页岩中地球化学背景值更接近实际情况, 本研究采用中国陆壳地球化学背景值评价崇明东滩沉积物污染情况, Cu、Pb、Zn、Cr、Cd 地球化学背景值分别为 38、15、86、63、0.06 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[13]; k 为考虑到成岩作用可能会引起的背景值的变动而设定的常数, 一般 $k = 1.5$. 根据 I_{geo} 数值的大小, 可以将沉积物中重金属的污染程度分为 7 个等级: 未污染 ($I_{geo} \leq 0$)、轻度污染 ($0 < I_{geo} < 1$)、偏中度污染 ($1 < I_{geo} < 2$)、中度污染 ($2 < I_{geo} < 3$)、偏重度污染 ($3 < I_{geo} < 4$)、重度污染 ($4 < I_{geo} < 5$)、严重污染 ($5 < I_{geo} < 6$)^[14].

1.4.2 潜在生态危害指数法

潜在生态危害指数法 (ecological risk index) 是

瑞典学者 Hakanson 于 1980 年建立的一套应用沉积学原理评价重金属污染及生态危害的方法^[12], 计算公式如下:

$$E_{RI} = \sum_i E_r^i = \sum_i T_r^i \cdot c_f^i = \sum_i T_r^i \cdot \frac{c_i}{c_n} \quad (3)$$

式中, E_{RI} 为多种重金属的潜在生态危害指数; E_r^i 为金属 i 的潜在生态危害系数; T_r^i 为重金属毒性系数 (toxic response coefficient), 反映重金属的毒性水平及生物对重金属污染的敏感程度, Cu、Pb、Zn、Cr、Cd 毒性系数分别为 5、5、1、2、30^[12]; c_f^i 为重金属 i 的污染系数; c_i 为重金属 i 的实测浓度; c_n 为重金属 i 的评价参比值, 一般采用工业化以前的沉积物中重金属最高背景值, 由于沉积物背景值的地区性强, 采用不同的背景值对潜在生态危害指数的计算有较大影响, 本研究采用的底质评价标准, Cu、Pb、Zn、Cr、Cd 背景值分别为 30、20、80、80、0.5 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[15]. 重金属污染评价指标与生态危害程度和潜在生态风险程度的关系如表 1 所示.

表 1 重金属潜在生态危害指数和污染程度的关系^[16]

Table 1 Relationship between the contamination level of heavy metals and the potential ecological risk

E_r^i	单因子污染物 生态危害程度	E_{RI}	总的潜在生 态风险程度
< 40	轻微	< 150	轻微
40 ~ 80	中等	150 ~ 300	中等
80 ~ 160	强	300 ~ 600	强
160 ~ 320	很强	600 ~ 1 200	很强
≥ 320	极强	$\geq 1 200$	极强

2 结果与分析

2.1 沉积物特性

45 个沉积物样品中粒径 $< 63 \mu\text{m}$ 的粉砂和黏土组分的体积分数为 94%, 占绝对优势. 样品中值粒径的平均值为 33.0 μm , 其中北、中、南 3 个断面中值粒径的平均值分别为 16.3、37.0 和 37.3 μm ; 为方便研究, 将断面分为高潮滩 (高程 $> 3.5 \text{ m}$)、中潮滩 (高程 1.8 ~ 3.5 m)、低潮滩 (高程 $< 1.8 \text{ m}$), 3 个断面高、中、低潮滩的中值粒径平均值分别为 13.2、32.7 和 57.2 μm . 总体上, 沉积物有自海向陆变细和自南向北变细的趋势. 以上特征与前人的研究结果^[7]相似.

沉积物样品中有机碳含量范围为 0.11% ~ 6.91%, 平均值为 0.76%. 北、中、南 3 个断面有机碳平均值分别为 0.65%、0.91%、0.50%; 3 个断面高、中、低潮滩有机碳平均值分别为 1.01%、1.03%、0.24%. 总体而言, 有机碳含量顺序为中

断面 > 北断面 > 南断面, 中潮滩 > 高潮滩 > 低潮滩.

2.2 重金属含量及分布特征

沉积物样品中 Cu、Pd、Zn、Cr、Cd 含量范围分别为

为 8~106、14~48、42~172、37~98、0.06~0.46 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值分别为 42、27、79、71、0.23 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (表 2). 重金属含量平均值排序与上海潮滩背景值基本一致, 其中 Cu 和 Pb 含量顺序不同, 反

表 2 崇明东滩与其它滨岸地区重金属元素含量的对比/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

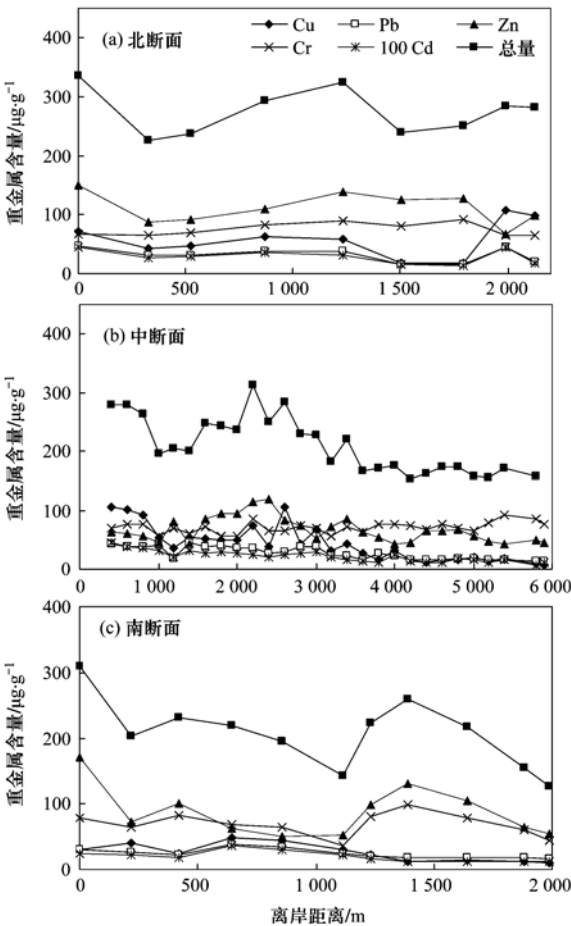
Table 2 Comparisons of the heavy metal contents in Eastern Chongming and in other coastal wetlands in the world/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$		Cu	Pb	Zn	Cr	Cd
崇明东滩(本研究)	地区					
	最小值($n=45$)	8	14	42	37	0.06
	最大值($n=45$)	106	48	172	98	0.46
	平均值($n=45$)	38	27	81	71	0.22
	标准偏差($n=45$)	25	10	32	12	0.09
	平均值倍数(相对于上海潮滩背景值)	2.2	1.3	1.7	2.5	2.4
崇 明 东 滩 平 均 值 (1998 年) ^[17] 上 海 潮 滩 背 景 值 ^[18] 横 沙 岛 (平 均 值) ^[19] 九 段 沙 (平 均 值) ^[20] 长 江 口 南 岸 (平 均 值) ^[20] 杭 州 湾 北 岸 (平 均 值) ^[20] 中 国 渤 海 西 南 部 潮 滩 (平 均 值) ^[21] 加 拿 大 James 湾 (平 均 值) ^[22] 英 国 Thames 河 口 (平 均 值) ^[23] 美 国 Narragansett 湾 (平 均 值) ^[24] 德 国 Rhine 河 口 (平 均 值) ^[25] 荷 兰 Western Scheldt 盐 沼 (平 均 值) ^[26]	最大值倍数(相对于上海潮滩背景值)	6.3	2.4	3.5	3.5	5.1
		77	40	146	70	0.03
		17	20	49	28	0.09
		29	21	99	39	—
		46	39	104	55	—
		123	64	291	101	—
		74	33	104	64	—
		15	22	74	32	0.45
		13	23	36	16	1.40
		61	179	219	59	1.30
		190	140	250	155	0.80
		600	800	2 900	1 240	45.00
		155	210	715	268	1.50

映了 Cu 和 Pb 富集情况不同. 自岸向海, 高、中、低潮滩重金属的重金属 (Cu、Pd、Zn、Cr、Cd) 总含量平均值分别为 243、232 和 176 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 呈下降趋势; 自北向南, 3 个断面重金属总含量平均值分别为 275、208 和 207 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 其中 3 个断面高潮滩含量分别是 274、246 和 217 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 中潮滩分别是 272、217、233 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 低潮滩分别是 283、162 和 140 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. 部分元素的变化趋势有些例外, 例如, 北、中、南断面中潮滩 Cr 含量分别为 87、68 和 86 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. 从重金属沿岸分布图 (图 2) 和空间数据插值图 (图 3) 可以看出, 在总体变化趋势下, 各重金属元素垂直于岸线的变化呈复杂波动.

2.3 重金属的沉降通量

重金属的沉降通量是潮间带湿地对污染物“过滤”效应研究的重要内容之一. 潮间带湿地重金属的沉降通量与沉积速率密切相关. 因此, 沉积速率测量是计算重金属沉降通量的前提. 近 5 年崇明东滩 3 个断面的大部分测量点处于淤积状态, 只有中断面和南断面的向海一端出现侵蚀 (图 4). 北、中、南断面的平均沉积速率分别为 4.6、2.6 和 3.7 $\text{cm}\cdot\text{a}^{-1}$, 它们分别代表北、中、南 3 个分区 I、II、III 单元的沉积速率 [图 1(b)]. I、II、III 单元的面积分别是 28、34 和 30 km^2 , 故全区平均沉积速率为 3.6 $\text{cm}\cdot\text{a}^{-1}$, 与 20 世纪 80 年代相比, 近几年沉积速率下降了约 70%^[5].

根据上述实测的 3 个分区潮滩沉积速率和重金



100 Cd 表示 Cd 含量的 100 倍
图 2 各横断面重金属元素含量变化

Fig. 2 Variations of the heavy metal contents at different cross sections

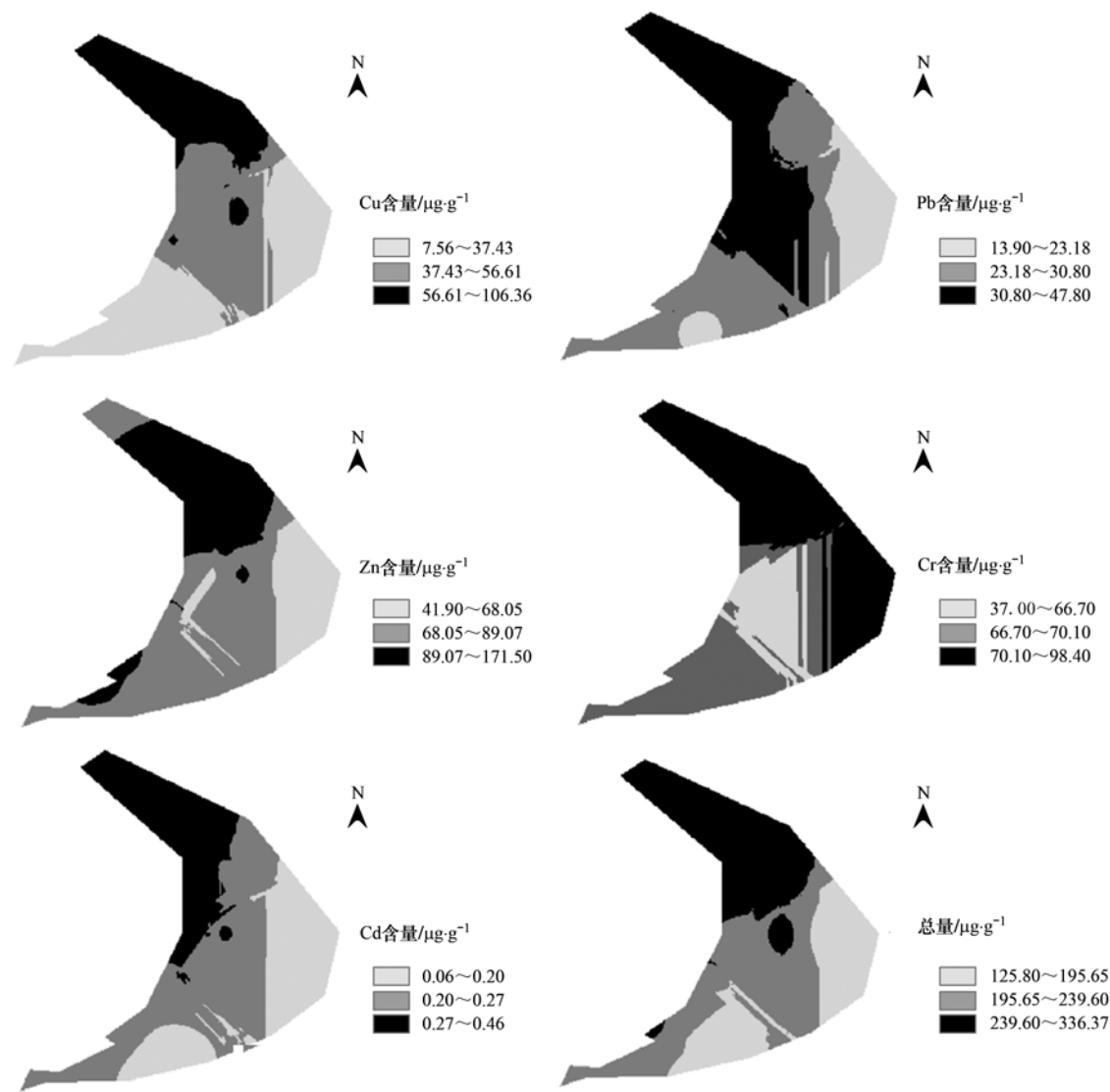


图3 各横断面重金属元素含量空间数据插值图

Fig. 3 Spatial data interpolation of the heavy metal contents at different cross sections

属含量,并引用前人^[28]测定的潮滩沉积物干容重,计算结果见表3.结果表明,近几年崇明东滩淤积泥沙约435万t·a⁻¹(约占同期长江入海泥沙通量的3%)^[6],Cu、Pb、Zn、Cr、Cd等5种重金属年沉降量分别为187、121、395、312、1.04 t,总年沉降量约为1 016 t,总沉积通量为11 g·(m²·a)⁻¹.

表3 重金属年沉降量计算参数值及结果¹⁾

单元	A /km ²	D /g·cm ⁻³	S /m·a ⁻¹	c _{Me} /μg·g ⁻¹					r _{Me} /t·a ⁻¹					总年沉降量 /t·a ⁻¹	F /g·(m ² ·a) ⁻¹
				Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd		
I	28.0	1.32	0.046	58	31	111	75	0.29	98	53	188	127	0.50	1 016	11
II	34.4	1.32	0.026	43	27	67	71	0.22	50	32	79	84	0.26		
III	30.0	1.32	0.037	26	24	88	69	0.20	39	36	128	101	0.29		
Σ									187	121	395	312	1.04		

1)各参数的含义见公式(1)

3 讨论

3.1 重金属的累积与影响因素分析

河口湿地重金属的累积受到流域母岩物质成分、人类活动以及河口湿地本身沉积动力作用和生化过程等的影响^[27].崇明东滩重金属总含量与沉积

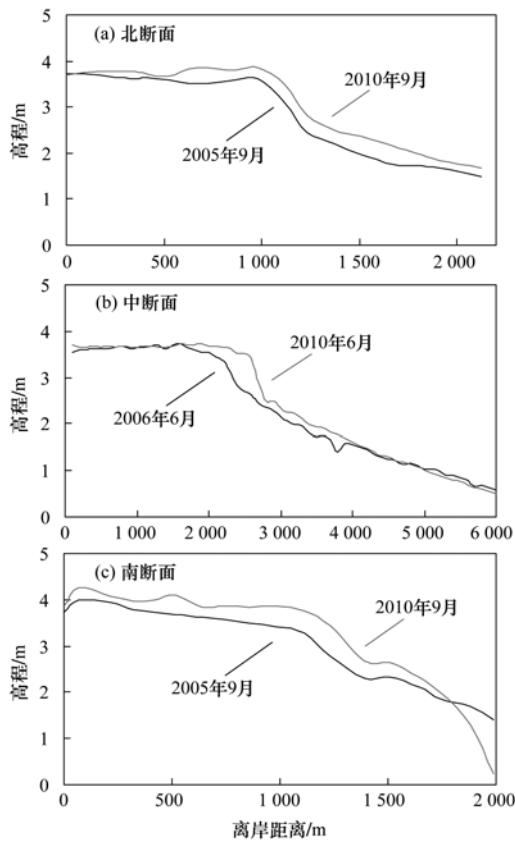


图4 各横断面高程变化

Fig. 4 Cross-shore changes in elevation of sediment surface

物平均粒径(D_{50} 值)之间存在显著的负相关关系($R = -0.65$),表明颗粒越细,重金属含量越高.这种关系既与样品的颗粒越细、总表面积越大、空隙率越高、吸附能力越大^[28]有关外,还与不同粒径颗粒的化学成分差异有关.相关实验观察表明,砂粒主要由石英和长石组成,随着颗粒变细,黏土矿物和云母类矿物增多^[29].上述重金属含量自海向陆和自南向北增大的趋势与沉积物的变细趋势一致,说明崇明东滩重金属含量的空间变化受到沉积动力过程制约.此外,还发现有机碳与重金属总含量呈正相关关系(相关系数 $R = 0.49$),与前人研究结果一致^[30],这说明有重金属与有机碳(主要为腐殖质)通过表面吸附、阳离子交换及螯合反应,形成金属-有机络合物并吸附于颗粒沉积物中^[31,32],表明有机碳也是影响沉积物中重金属含量水平与空间分布的重要因素之一.

本次研究中重金属含量平均值与10年前的研究结果^[17]相比,总含量和Cu、Pb、Zn、Cr含量均有减少,只有Cd含量变大(表2),说明近10年来,崇明东滩重金属污染状况总体减轻.如果近10年流域来沙增多导致研究区沉积速率增大,则重金属含量的

下降可能与沉积速率的增大有关(重金属质量一定的情况下).然而,如前所述,实际情况正好相反:即流域来沙减少导致研究区沉积速率下降.因此,近10年崇明东滩重金属含量下降的原因可能有:一是国家对排污总量的控制政策效应显现;二是目前长江口外水下三角洲受侵蚀^[6],将未受污染的历史上早期沉积物冲刷上来堆积到滩面上,与受污染的沉积物混合,降低了重金属含量浓度.此外,与长江口南岸相比,崇明东滩、横沙和九段沙的重金属含量较低(表2),这与长江口南岸有黄浦江(携带来自上海市区的污染物)汇入以及多个排污口的直接排放有关,而处于江心的崇明东滩、横沙和九段沙的重金属堆积主要反映流域来源物质(重金属含量相对较低)^[20,33,34].崇明东滩与中国其他河口如渤海西部潮滩等相比,部分元素如Cu、Pb、Cr和Zn污染较重,而Cd较轻,这可能与不同河口地区产业结构不同及工业化进程有关.在全球滨岸湿地中,崇明东滩与英国、美国、德国和荷兰等工业化时间早、程度高的国家相比,污染较轻,但与加拿大等一些河口湿地相比,污染较为重.总体而言,崇明东滩污染程度在长江口滩涂、中国河口湿地和全球滨岸地区范畴内均处于居中地位,且呈减轻趋势.

3.2 重金属污染水平评价

根据地质累积指数法的计算结果,崇明东滩沉积物重金属污染程度在空间上北断面>中断面>南断面.不同重金属元素的污染程度为Cd(1.46)>Pb(0.28)>Cr(-0.42)>Cu(-0.43)>Zn(-0.70),Cd属于偏中度污染,Pb属于轻度污染,Cr、Cu和Zn污染级别属于无污染,即清洁(表4);而根据潜在生态危害指数法的计算结果,多种重金属潜在生态危害指数低于150,表明整体生态危害性轻微.空间上,重金属潜在生态危害程度北断面>中断面>南断面,各重金属潜在生态危害程度顺序为Cd(13.61)>Cu(7.07)>Pb(6.81)>Cr(1.76)>Zn(0.99),各重金属的潜在风险程度均轻微(表5).2种方法的结果从区域分布看,污染程度顺序均为:北断面>中断面>南断面;从不同重金属污染结果看,尽管评价方法不同使得重金属元素的排序不同,但Cd、Pb和Cu污染程度始终在前列,应作为污染控制对象.两种方法结果不同原因是侧重点不同,地质累积指数法是对沉积物中重金属污染做总体上的评价,综合考虑了人为活动对环境的影响和自然成岩作用可能会引起背景值变动的因素,但未考虑不同金属的毒性差异;而潜在生态危害指数

表 4 重金属地质累积指数及其级别

Table 4 Geoaccumulation index of heavy metals and the corresponding grade

站组	Cu		Pb		Zn		Cr		Cr	
	I_{geo}	级别	I_{geo}	级别	I_{geo}	级别	I_{geo}	级别	I_{geo}	级别
北断面	0.02	轻度	0.48	轻度	-0.22	无	-0.34	无	1.82	偏中度
中断面	-0.41	无	0.27	轻度	-0.96	无	-0.42	无	1.4	偏中度
南断面	-1.11	无	0.12	轻度	-0.56	无	-0.46	无	1.26	偏中度
平均	-0.43	无	0.28	轻度	-0.7	无	-0.42	无	1.46	偏中度

表 5 重金属潜在生态危害系数和危害指数及二者级别

Table 5 Potential ecological risk factors, risk indices of heavy metals and the corresponding grade

站组	E_r^i										E_{RI}	级别
	Cu	级别	Pb	级别	Zn	级别	Cr	级别	Cd	级别		
北断面	9.63	轻微	7.86	轻微	1.38	轻微	1.87	轻微	17.53	轻微	38.29	轻微
中断面	7.13	轻微	6.8	轻微	0.83	轻微	1.77	轻微	13.09	轻微	29.61	轻微
南断面	4.40	轻微	6.11	轻微	1.10	轻微	1.72	轻微	11.85	轻微	25.18	轻微
平均	7.07	轻微	6.81	轻微	0.99	轻微	1.76	轻微	13.61	轻微	30.25	轻微

法考虑了生态系统中重金属对环境的毒性因素^[35],可综合反映沉积物中多种重金属对生态环境的影响潜力,更具实际性.

4 结论

(1) 目前崇明东滩沉积物重金属 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd 含量平均值分别为 38、27、81、71、0.22 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,均超过上海潮滩背景值(平均值为 1.3 ~ 2.5 倍,最大值为 2.4 ~ 6.3 倍). 重金属总含量有从低潮滩向高潮滩、从南向北增大的趋势,与沉积物粒径变细的趋势和有机碳含量变大的趋势一致,反映沉积动力过程对潮滩沉积物中重金属分布的空间差异有一定的制约作用. 总体而言,崇明东滩沉积物重金属污染程度在长江口滩涂、中国河口湿地和全球滨岸地区范畴内均处于居中地位,且与约十年前相比,污染程度有所减轻.

(2) 崇明东滩重金属 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd 年沉降量分别为 187、121、395、312、1.04 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$,总年沉降量约为 1016 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$,总沉降通量为 11 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$,反映崇明东滩仍具有较强的重金属污染物“过滤器”功能.

(3) 根据地质累积指数法的计算结果,在空间上,崇明东滩沉积物重金属污染程度北断面 > 中断面 > 南断面,不同元素中,Cd 属于偏中度污染,Pb 属于轻度污染,Cr、Zn 和 Cu 污染级别属于零级,即清洁;根据潜在生态危害指数法的计算结果,空间上,重金属潜在生态危害程度北断面 > 中断面 > 南断面;各元素污染程度顺序为 Cd > Pb > Cu > Cr > Zn,均属于轻微生态危害范围. 两种结果中 Cd、Pb

和 Cu 污染程度均居于前列,为重金属污染因子.

致谢:本研究在野外观测中得到崇明东滩国家鸟类自然保护区的大力支持,在此表示衷心的感谢.

参考文献:

[1] 毕春娟,陈振楼,许世远,等. 长江口滨岸潮滩重金属源汇通量估算[J]. 地球化学, 2006, **35**(2): 187-193.

[2] 张丽洁,王贵,姚德,等. 近海沉积物重金属研究及环境意义[J]. 海洋地质动态, 2003, **19**(3): 6-9.

[3] 黄家祥,殷勇,徐军,等. 苏北灌河口潮间带表层沉积物重金属空间分布特征及其环境效应[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, **27**(5): 23-32.

[4] 李华,杨世伦,Ysebaert T,等. 长江口潮间带淤泥质沉积物粒径空间分异机制[J]. 中国环境科学, 2008, **28**(2): 178-182.

[5] Yang S L, Ding P X, Chen S L. Changes in progradation rate of the tidal flats at the mouth of the Changjiang (Yangtze) River, China[J]. Geomorphology, 2001, **38**(1-2): 167-180.

[6] Yang S L, Milliman J D, Li P, et al. 50,000 dams later: erosion of the Yangtze River and its delta[J]. Global and Planetary Change, 2011, **75**(1-2): 14-20.

[7] Yang S L, Li H, Ysebaert T, et al. Spatial and temporal variations in sediment grain size in tidal wetlands, Yangtze delta: on the role of physical and biotic controls[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2008, **77**(4): 657-671.

[8] 郭旭东,傅伯杰,马克明,等. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异特征研究——以河北省遵化市为例[J]. 应用生态学报, 2000, **11**(4): 557-563.

[9] 谢正苗,李静,王碧玲,等. 基于地统计学和 GIS 的土壤和蔬菜重金属的环境质量评价[J]. 环境科学, 2006, **27**(10): 2110-2116.

[10] 袁峰,白晓宇,周涛发,等. 元素空间分布插值方法的对比研究:以铜陵地区土壤中的重金属元素为例[J]. 地学前缘, 2008, **15**(5): 103-109.

[11] 施祺, Peter R, Thomas L, 等. 珠江河口沉积物 Hg 的分布与

- 污染评价[J]. 海洋环境科学, 2007, **26**(6): 553-556.
- [12] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [13] 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.
- [14] 彭景, 李泽琴, 侯家渝. 地积累指数法及生态危害指数评价法在土壤重金属污染中的应用及探讨[J]. 广东微量元素科学, 2007, **14**(8): 13-17.
- [15] 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.
- [16] 王丽萍, 周晓蔚, 郑丙辉, 等. 长江口及毗邻海域沉积物生态环境质量评价[J]. 生态学报, 2008, **28**(5): 2191-2198.
- [17] 柳林, 许世远, 陈振楼, 等. 上海滨岸带潮滩表层沉积物中重金属的空间分布与环境质量评价[J]. 上海地质, 2000, (1): 1-5.
- [18] 许世远, 陶静, 陈振楼, 等. 上海潮滩沉积物重金属的动力学累积特征[J]. 海洋与湖沼, 1997, **28**(5): 509-515.
- [19] 沈军, 刘尚灵, 陈振楼, 等. 横沙岛潮滩沉积物中重金属的空间分布与累积[J]. 长江流域资源与环境, 2006, **15**(4): 485-489.
- [20] 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.
- [21] 张雷, 秦延文, 郑丙辉, 等. 环渤海典型海域潮间带沉积物中重金属分布特征及污染评价[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(8): 1676-1684.
- [22] Glooschenko W A, Capocianco J, Coburn J, *et al.* Geochemical distribution of trace metals and organochlorine contaminants of a Lake Ontario shoreline marsh[J]. Water, Air and Soil Pollution, 1981, **15**(2): 197-213.
- [23] Attrill M J, Thomes R M. Heavy metal concentrations in sediment from the Thames estuary, UK [J]. Marine Pollution Bulletin, 1995, **30**(11): 742-744.
- [24] Goldberg E D, Gamble E, Griffin J J, *et al.* Pollution history of Narragansett Bay as recorded in its sediments[J]. Estuarine and Coastal Marine Science, 1977, **5**(4): 549-561.
- [25] Förstner U, Müller G. Schwermetalle in flüssen und seen [M]. Berlin: Springer, 1974.
- [26] Netherlands Department of Soil Protection. Soil protection act [A]. In: The ministry of housing, spatial planning and the environment [M]. The Hague, The Netherlands, 1994.
- [27] 黄家祥, 殷勇, 徐军, 等. 苏北灌河口潮间带表层沉积物重金属空间分布特征及其环境效应[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, **27**(5): 23-32.
- [28] Yang S L. Tidal wetland sedimentation in the Yangtze Delta [J]. Journal of Coastal Research, 1999, **15**(4): 1091-1099.
- [29] 王中波, 杨守业, 李萍, 等. 长江水系沉积物碎屑矿物组成及其示踪意义[J]. 沉积学报, 2006, **24**(4): 570-578.
- [30] 章明奎, 方利平, 周翠. 污染土壤中有机质结合态重金属的研究[J]. 生态环境, 2005, **14**(5): 650-653.
- [31] Soares H M V M, Boaventura R A R, Machado A A S C, *et al.* Sediments as monitors of heavy metal contamination in the Ave river basin (Portugal): multivariate analysis of data [J]. Environmental Pollution, 1999, **105**(3): 311-323.
- [32] Borg H, Jonsson P. Large-scale metal distribution in Baltic Sea sediments [J]. Marine Pollution Bulletin, 1996, **32**(1): 8-21.
- [33] 常晋娜. 长江口潮滩重金属污染现状研究及其污染源的识别 [D]. 上海: 华东师范大学, 2005. 16.
- [34] 方杰. 浙江沿海沉积物和海洋生物中持久性有机污染物及重金属的分析与研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2007. 2.
- [35] 丁喜桂, 叶思源, 高宗军. 近海沉积物重金属污染评价方法 [J]. 海洋地质动态, 2005, **21**(8): 31-36.

CONTENTS

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

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年7月15日 33卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 7 Jul. 15, 2012

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人