

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)	

白洋淀底泥重金属形态及竖向分布

李必才^{1,2}, 何连生^{1*}, 杨敏², 孟睿¹, 袁冬海³, 席北斗¹, 舒俭民¹

(1. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 成都 610031; 3. 北京建筑工程学院环境与能源工程学院, 北京 100044)

摘要: 为了解白洋淀底泥沉积物中重金属含量及其潜在生态危害程度, 选取白洋淀淀区具有代表性的 7 个样点, 通过无扰动重力采样器采集 0~14 cm 表层底泥, 用优化的 BCR 连续萃取法对底泥中重金属进行不同形态提取, 对不同形态以及不同深度的重金属含量进行测定, 分析不同形态重金属与底泥中总有机碳(TOC)之间的关系, 并通过地累积指数(I_{geo})法对底泥重金属污染程度进行评价。结果表明, Co、Fe、Mn、Pb、Zn 的形态分别以残渣态、酸可溶态、铁锰氧化态以及有机结合态为主; 有机结合态重金属与底泥 TOC 结合的趋势大于其他形态; Co、Pb、Zn 含量随着深度增加总体呈降低的趋势, 它们在 0~2 cm 底泥的含量最高, Mn 的含量在 6~8 cm 达到最小, 14 cm 时含量达到最大; 白洋淀淀区底泥中 Co、Mn 污染程度主要为无污染或轻度污染, Pb、Zn 除府河入口外主要为轻度污染, 府河入口处的 Pb、Zn 为中度污染。

关键词: 白洋淀; 重金属; 形态分析; 竖向分布; 地累积指数

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)07-2376-08

Speciation and Vertical Distribution of Heavy Metals in Sediments of Baiyangdian Lake

LI Bi-cai^{1,2}, HE Lian-sheng¹, YANG Min², MENG Rui¹, YUAN Dong-hai³, XI Bei-dou¹, SHU Jian-min¹

(1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. College of Earth Science and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: In order to find out the heavy metal concentrations and their potential ecological risks on sediments in Baiyangdian Lake, 0-14 cm surface sediments had been collected by the no-disturbance-gravity sampler at seven representative sampling points of Baiyangdian Lake. Optimized BCR sequential extraction procedure was used to carry out the analysis of heavy metal forms in the surface sediments. The heavy metal contents of different forms and in different depths were determined. The relationship between different forms of heavy metal and total organic carbon (TOC) in the sediments was analyzed. The geo-accumulation index (I_{geo}) was employed to evaluate the extent of heavy metal contamination. The results demonstrated that Co, Fe, Mn, Pb, Zn were mainly in residual form, acid soluble form, Fe-Mn oxide and organic matter bound forms respectively. The tendency of organic bound form of heavy metals and TOC of sediments was greater than the others. The concentration of Co, Pb, Zn decreased with the increase of sediment depth, with the maximal concentration was between 0-2 cm, while the concentration of Mn was the minimal between 6-8 cm and the maximal was at 14 cm. Baiyangdian sediments were not contaminated as a whole by Co, Mn, apart from medium pollution in the entrance of the Fuhe River. The other regions were lightly polluted by Zn and Pb.

Key words: Baiyangdian Lake; heavy metals; speciation analysis; vertical distribution; geo-accumulation index

湖泊水体污染的治理,除了控制外源性污染物的输入外,还要对内源性污染物(底泥)进行治理^[1]。在众多污染物中,重金属由于其毒性和持久性而成为影响底泥质量较严重的一类污染物^[2,3]。水体中的重金属在水环境中是不可降解的,只能被积累和转移,进入水体的重金属通过化学吸附、物理沉淀等作用转移至底泥中^[4-7],一些与底泥结合的重金属不仅可通过多种途径对水生生物产生毒害作用,还可重新释放出来产生潜在的生物毒性风险^[8,9]。

白洋淀位于保定市东 40 km, 北纬 38°43′~39°02′, 东经 115°38′~116°07′之间。地处海河流域

大清河水系的九河下梢,接纳从南、西、北三面流来的潞龙河、唐河、府河等 8 条河流的水汇集而成,是华北地区最大的淡水湖泊^[10]。白洋淀是当地农田灌溉和退水、工业废水和生活污水排放的承泄渠道^[10]。

杨卓等^[11]对白洋淀淀区表层沉积物中重金属污染及其潜在风险评价进行了研究,结果表明白洋

收稿日期: 2011-09-30; 修订日期: 2011-12-15

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07209-008-001, 2009ZX07106-001-002)

作者简介: 李必才(1985~),男,硕士研究生,主要研究方向为水污染控制, E-mail: libicai0327@163.com

* 通讯联系人, E-mail: heliansheng08@126.com

淀底泥重金属元素 Cd、Pb 的污染较普遍且多为 2 种以上的复合污染；而关于白洋淀淀区底泥重金属形态及竖向分布的研究却很少报道. 有研究表明同种金属元素在水环境中的迁移能力往往不取决于其总量^[12], 而与其化学形态和含量有关, 研究底泥中重金属的化学形态, 对于弄清楚它们对水体污染的程度及污染物的迁移转化机制与规律, 寻求防治重金属污染的措施, 有一定的意义. 另外, 通过研究底泥重金属竖向分布规律^[1], 可以为进一步研究污染物在底泥中累积-扩散规律提供重要数据.

本研究以白洋淀底泥为实验对象, 对典型淀区表层底泥的 5 种重金属进行不同形态与不同深度含量的测定, 分析白洋淀不同淀区底泥重金属的形态分布特征以及竖向分布规律. 并通过地累积指数 (I_{geo}) 法对底泥重金属污染程度进行评价, 了解这 5 种重金属在白洋淀淀区的污染情况, 以期为白洋淀淀区生态保护和污染治理提供依据.

1 材料与方法

1.1 样品的采集与制备

于 2010 年 7 月选取白洋淀地区典型淀区具有代表性的 7 个采样点进行采样. 采样布点见图 1, 采样点一般布设在航道附近或淀内人口较密集的村旁沟道. 通过无扰动重力采样器采集采样点表层 0 ~ 14 cm 底泥, 每 2 cm 为一层进行分层切分, 用聚乙烯保鲜袋包装、封口并标记后带回实验室, 将采集的底泥样品放入冷冻干燥机中冷冻干燥, 将干燥后的样品转移至洁净搪瓷盘中, 剔除石块、木屑、动植物残体等异物, 混合均匀后用玛瑙研钵研磨处理, 过 100 目尼龙筛, 用聚乙烯袋保存备用.

1.2 样品测试

本研究采用的底泥重金属形态分析方法是优化的 BCR 连续萃取提取法^[13]. 底泥重金属总量分析

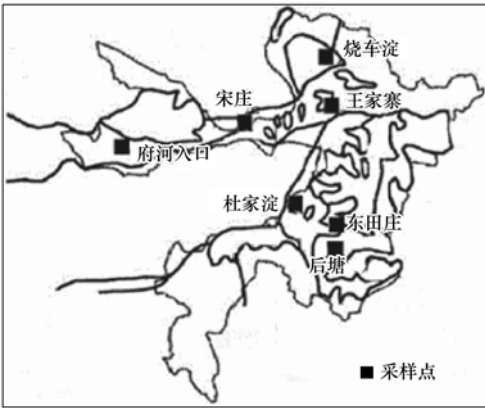


图 1 白洋淀底泥采样点分布示意
Fig. 1 Distribution of sediment sampling points in the Baiyangdian Lake

是在 HCl-HNO₃-HClO₄ 消解后, 进行重金属含量测定. 测定过程中所需的酸均为优级纯, 其他试剂均为分析纯, 实验用水为超纯水. 经过处理后样品的重金属 Co、Fe、Mn、Pb、Zn 的含量由 ICAP6000 SERIES (Thermo 公司) 等离子发射质谱仪测定, RF 功率: 1 150 W, 泵速: 50 r·min⁻¹, 辅助气流量: 0.5 L·min⁻¹, 雾化器压力: 30 psi, 积分时间: UV 20 s, Vis 10 s.

各采样点水质指标见表 1. 其中采样点位置通过 GPS 定位, 深度 (H)、透明度 (SD) 采用赛氏盘法测定; pH、溶解氧 (DO)、电导率均由便携式多参数水质测定仪 (WTW, Multi350i/SET, made in Germany) 测定; 总磷 (TP) 采用过硫酸钾消解, 钼锑抗比色法测定; 磷酸盐 (PO_4^{3-}) 采用钼锑抗比色法测定. 由表 1 可知, 水体中 pH 在 7.80 ~ 8.53 之间, 白洋淀水质偏碱性; 水深位于 0.76 ~ 2.37 m, 属于浅水湖泊; SD 位于 0.21 ~ 1.01 m, 水体透明度较低; 电导率较大位于 1 090 ~ 1 634 $\mu S \cdot cm^{-1}$, 表示水中溶解态的无机化合物浓度较高, TP、 PO_4^{3-} 的含量较高, 总体水质达到了富营养化状态.

表 1 各采样点水质指标
Table 1 Water quality indexes at each sampling site

采样点	经纬度	H/m	SD/m	pH	DO / $mg \cdot L^{-1}$	电导率 / $\mu S \cdot cm^{-1}$	TP / $mg \cdot L^{-1}$	PO_4^{3-} / $mg \cdot L^{-1}$
1 (烧车淀)	38°56.440N, 115°59.968E	1.30	0.41	7.73	1.77	1 323	0.18	0.063
2 (王家寨)	38°55.907N, 116°00.910E	0.76	0.52	7.80	3.71	1 396	0.89	0.834
3 (宋庄)	38°55.133N, 115°57.700E	0.8	0.21	8.53	12.35	1 491	1.39	1.194
4 (府河入口)	38°54.850N, 115°55.808E	2.37	1.01	8.04	3.56	1 634	1.34	1.319
5 (杜家淀)	38°51.440N, 115°58.130E	1.30	0.31	8.09	7.12	1 286	0.12	0.045
6 (后塘)	38°49.639N, 116°00.441E	1.15	0.40	8.14	5.71	1 090	0.09	0.047
7 (东田庄)	38°50.289N, 115°59.232E	0.79	0.45	8.29	8.42	1 092	0.09	0.024

2 结果与讨论

2.1 底泥中的重金属含量

7 个采样点底泥中重金属的含量见表 2. 底泥中重金属含量的范围分别是: Co 6.89 ~ 14.21 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Fe 12 612.26 ~ 21 895.63 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Mn 299.91 ~ 1 227.43 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Pb 9.85 ~ 27.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Zn 36.47 ~ 528.52 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中以 Mn 和 Zn 的变化范围最大, 在 4 倍以上, 尤其是 Zn 达到了 14.5 倍. 从各污染元素平均含量的淀区分布来看, Co、Fe 在采样点 6(后塘)的含量较高, Mn 在采样点 5(杜家淀)含量较高, 这可能是由于杜家淀和后塘

是人口较为集中的 2 个纯水村, 淀区内养鱼者甚多, 大量的生活、生产废弃物堆积在淀边, 部分废弃物常年入淀, 导致这 2 个淀区底泥中 Co、Fe、Mn 的含量较高. Pb、Zn 在采样点 4 的含量较高, 这可能与府河接纳来自保定市生活污水和工业废水有关. 资料显示, 自 20 世纪 60 年代以来, 府河就已成为保定市排污的河流, 排入府河的工业废水中主要包含硫化物、石油类、重金属、氰化物等. 虽然保定市已经建成污水处理厂, 但是污水处理量不及污水排放量, 水体的重金属通过化学吸附、物理沉淀等作用转移至底泥中, 导致府河入口底泥中铅、锌的含量较高.

表 2 各采样点重金属含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
Table 2 Heavy metal content of each sampling site/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

重金属	项目	1(烧车淀)	2(王家寨)	3(宋庄)	4(府河入口)	5(杜家淀)	6(后塘)	7(东田庄)
Co	最大值	11.58	11.22	11.5	9.29	14.21	12.22	8.53
	最小值	8.62	3.36	8.38	7.71	8.42	9.79	6.89
	平均值	10.27	8.42	9.87	8.33	10.62	11.08	7.60
Fe	最大值	19 841.58	18 773.28	19 052.76	20 825.30	21 240.49	21 895.63	15 011.16
	最小值	14 438.23	13 981.08	14 373.06	14 052.30	14 336.86	16 734.98	12 612.26
	平均值	16 744.55	15 650.38	16 556.52	16 746.70	17 362.01	19 887.73	13 964.09
Mn	最大值	803.83	616.26	1039.92	779.40	1277.43	900.94	623.59
	最小值	381.69	333.40	299.91	303.60	395.79	513.90	328.96
	平均值	496.35	481.81	646.87	577.23	688.20	608.60	440.01
Pb	最大值	25.06	21.51	17.84	29.80	22.23	18.03	37.40
	最小值	14.67	10.86	9.85	18.21	15.76	12.78	19.69
	平均值	18.02	15.54	13.50	21.58	19.03	15.63	30.36
Zn	最大值	125.84	88.73	185.25	456.95	528.52	289.95	167.37
	最小值	59.85	36.47	58.06	116.97	87.43	58.30	91.10
	平均值	84.80	55.12	96.85	321.70	202.73	122.13	130.36

2.2 白洋淀表层底泥重金属形态分布

重金属在各采样点的形态分布情况见图 2.

Co 的形态分布详见图 2(a), Co 的形态主要以残渣态和有机结合态为主, 酸可溶态较少, 残渣态最大值占总量的质量分数为 60.55%, 有机物结合态、铁锰氧化态、酸可溶态的质量分数最大值分别为总量的 38.33%、19.35%、12.48%, 各形态含量大小依次为: 残渣态 > 有机结合态 > 铁锰氧化态 > 酸溶态. 这一结果可认为白洋淀底泥中的 Co 主要来源于自然环境.

Fe 的形态分布详见图 2(b), Fe 的形态主要以残渣态为主, 残渣态的质量分数最大值为总量的 75.55%, 铁锰氧化态、有机物结合态、酸可溶态的质量分数最大值分别为总量的 22.23%、19.35%、8.57%, 各形态含量大小依次为: 残渣态 > 铁锰氧化态 > 有机结合态 > 酸溶态. 说明 Fe 在底泥中生物有

效性较低, 生态危害难以在短时间内发生.

Mn 的形态分布详见图 2(c), Mn 的形态以酸可溶态及残渣态为主, 与王海等^[14]对太湖表层底泥研究结果一致. 酸可溶态的质量分数最大值为总量的 62.01%, 残渣态、铁锰氧化态、有机物结合态的质量分数最大值分别为总量的 68.35%、14.65%、10.49%, 虽然残渣态占总量的最大值较酸可溶态稍大, 但总体形态上酸可溶态所占的比例更大, 所以, 各形态含量大小依次为: 酸可溶态 > 残渣态 > 铁锰氧化态 > 有机物结合态. Mn 的酸可溶态含量较高, 这是由于酸可溶提取态的 Mn 有相当一部分以还原态 Mn^{2+} 存在, 在大多数天然水体中, Mn^{2+} 的氧化过程比 Fe^{2+} 慢得多^[14~16], 且 Mn 易于同 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 发生类质同相替代^[17], 由此造成底泥中酸可溶提取态的 Mn 的含量较高.

Pb 的形态分布详见图 2(d), Pb 的形态以铁锰

氧化态为主,铁锰氧化态的质量分数最大值为总量的 87.49%,残渣态、有机物结合态、酸可溶态的质量分数最大值分别为总量的 43.99%、18.47%、8.03%,各形态含量大小依次为:铁锰氧化态>残渣态>有机物结合态>酸可溶态。Pb 的铁锰氧化态含量较高,这是由于以可交换态及碳酸盐结合态存在的 Pb 易随环境条件的变化发生交换^[18~20],而 Pb 易与铁锰氧化物形成稳定的螯(络)合物,在氧化条件下不易释放。白洋淀底泥中 Pb 的铁锰氧化态占很大比例可能与白洋淀为浅水湖泊,底泥中含氧量较好,铁锰氧化物含量较高有关。

Zn 的形态分布详见图 2(e),Zn 的形态以有机物结合态及残渣态为主,有机物结合态的质量分数最大值为总量的 65.06%,残渣态、铁锰氧化态、酸可溶态的质量分数最大值分别为总量的 58.78%、34.40%、32.66%,各形态含量大小依次为有机物结合态>残渣态>铁锰氧化态>酸可溶态。Zn 的有机物结合态含量较高,这是因为有机态 Zn 如果是与腐殖质物质形成的有机化合物就不可溶,若是与单独的生物化学分子结合的络合物则可溶。而白洋淀有机污染较严重,底泥中有机物种类较多,含量较高^[10],因此,底泥中有机物结合态 Zn 的含量较高。

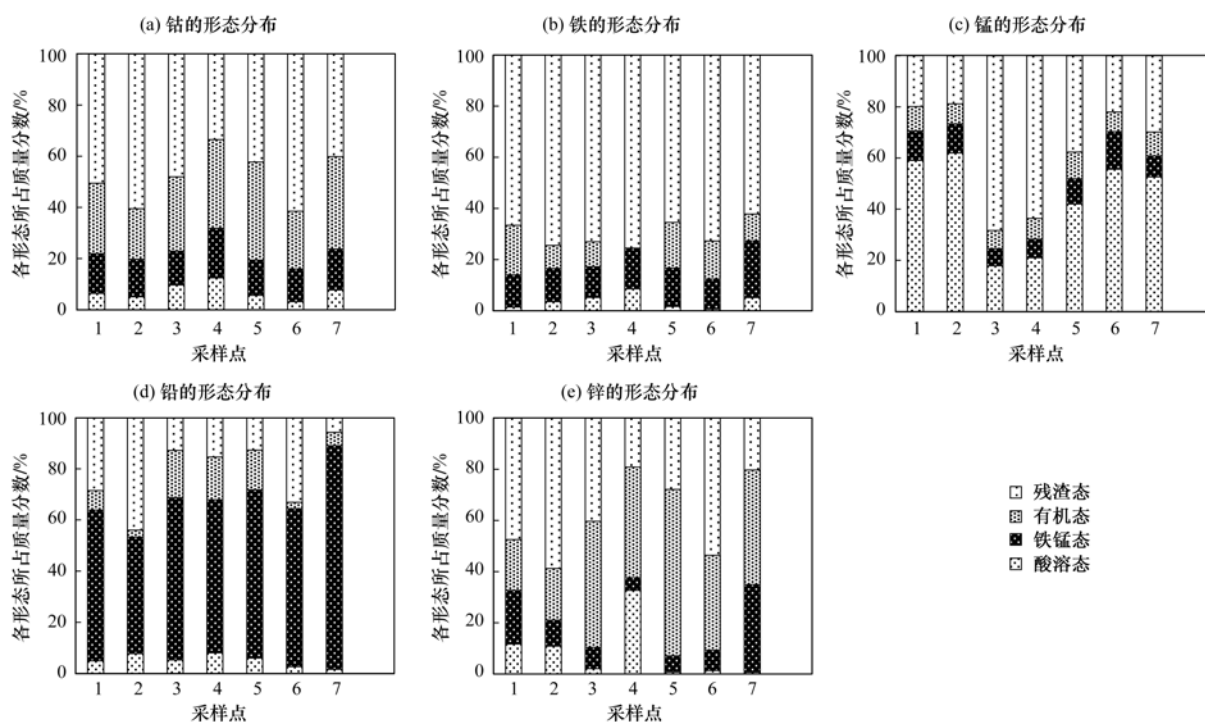


图 2 各采样点重金属形态分布

Fig. 2 Distribution of heavy metal species of each sampling site

2.3 底泥中 TOC 与不同形态重金属含量之间的关系

底泥中总有机碳(TOC)的含量与重金属存在密切的关系^[14,21],Seidemann 等^[22]发现城市河口底泥的重金属污染程度与底泥的 TOC 含量呈显著正相关。而关于底泥的 TOC 含量与底泥中不同形态重金属含量之间的关系却很少报道,将白洋淀底泥中不同形态重金属的含量与 TOC 的含量进行相关性分析(见表 3)。

由表 3 可以看出,底泥中酸可溶态的 Fe、Pb 与 TOC 呈显著负相关,由于酸溶态指重金属元素被吸附在黏土等颗粒表面或被束缚在碳酸盐中的部分,底泥中 TOC 含量的增加,部分原因可能来自碳酸盐

的转化,致使束缚在碳酸盐中的金属含量降低,故而呈现相应的相关性;铁锰氧化态指重金属元素被 Fe-Mn 氧化物包裹或本身就成为氢氧化物沉淀的一部分,属于较强的离子键结合的化学形态,在还原条件下可重新释放进入水体,由相关性分析可知铁锰氧化态的 Co、Mn 与 TOC 呈极显著正相关,Co 与 Mn、Fe 呈极显著正相关与 Zn 呈极显著负相关,Pb 与 Zn 呈极显著正相关与 Fe 呈极显著负相关;有机结合态指重金属元素与有机质活性基团或硫离子结合的部分,在氧化条件下可由有机质或硫离子的氧化而重新释放进入水体^[16],由相关性关系可知,TOC 与有机结合态的 Co、Mn、Fe、Pb、Zn 呈极显著正相关与 Co 呈显著正相关,说明沉积物中有机物及

硫化物结合态重金属元素含量的变化主要受有机质含量的影响. 残渣态是指重金属元素存在于石英、黏土和长石等硅酸盐矿物晶格中的部分,在正常环境条件下十分稳定,难以释放,由相关性关系可知,残渣态的各种重金属与 TOC 均无相关性.

根据上述分析结果:底泥中有机结合态重金属与 TOC 呈极显著相关的有 4 种,呈显著相关的有 1

种,铁锰氧化态重金属与 TOC 呈极显著相关的有 2 种,酸可溶态重金属与 TOC 呈显著相关的有 2 种,残渣态重金属与 TOC 呈显著相关以及极显著相关的都没有. 说明底泥中有机物结合态重金属与总有机碳结合的趋势要大于其它 3 种形态的重金属,这也从一个方面证明了 BCR 提取法中将有机结合态定义为有机物及硫化物结合态的合理性.

表 3 底泥 TOC 与底泥中不同形态重金属之间的相关矩阵¹⁾

Table 3 Correlation between TOC and heavy metal species in sediments

形态	元素	Co	Fe	Mn	Pb	Zn	TOC
酸可溶态	Co	1					
	Fe	0.578 **	1				
	Mn	-0.589 **	-0.318 *	1			
	Pb	0.121	-0.111 **	-0.079	1		
	Zn	0.485 **	0.520 **	-0.353 **	0.541 **	1	
	TOC	0.052	-0.358 *	-0.022	-0.313 *	0.126	1
铁锰氧化态	Co	1					
	Fe	0.534 **	1				
	Mn	0.485 **	0.277	1			
	Pb	0.020	-0.492 **	0.000	1		
	Zn	-0.066 **	0.278	-0.047	0.918 **	1	
	TOC	0.437 **	0.038	0.651 **	0.071	0.106	1
有机结合态	Co	1					
	Fe	0.676 **	1				
	Mn	0.789 **	0.753 **	1			
	Pb	0.700 **	0.338 *	0.521 **	1		
	Zn	0.362 *	0.097	0.198	0.443 **	1	
	TOC	0.320 *	0.750 **	0.631 **	0.592 **	0.540 **	1
残渣态	Co	1					
	Fe	0.816 **	1				
	Mn	0.090	0.240	1			
	Pb	0.500 **	0.377 **	-0.278	1		
	Zn	-0.007	0.252	0.380 **	0.017	1	
	TOC	0.015	-0.081	-0.183	0.037	0.006	1

1) * 表示显著性水平为 0.05,即 $P < 0.05$ 水平, ** 表示极显著性水平为 0.01,即 $P < 0.01$ 水平, $n = 49$

2.4 白洋淀底泥重金属含量竖向分布

通过选取 4 个采样点 0 ~ 14 cm 的底泥,每 2 cm 为一层进行切分,测定各层中重金属含量,通过比较各采样点底泥中不同深度重金属含量之间的关系,从而了解白洋淀淀区底泥重金属含量竖向分布规律. 根据¹³⁷Cs计年标准^[23]测年结果,近 50 年来沉积物平均沉积速率为 1.7 mm·a⁻¹,0 ~ 14 cm 厚度的底泥相当于 20 世纪 30 年代至今沉积物沉积的厚度,其中每 2 cm 的底泥厚度可近似看成底泥每 10 a 的变化情况. 选取的 4 个采样点底泥中 Co、Mn、Pb、Zn 含量随深度的变化见图 3.

从选取的 4 个采样点来看,Pb 和 Zn 在各采样点的含量基本高于白洋淀底泥重金属背景值^[24]($Pb_{背景} = 10.39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $Zn_{背景} = 71.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),

Co 的含量要低于全国土壤背景值^[25]($Co_{背景} = 12.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),Mn 的含量要高于全国土壤背景值($Mn_{背景} = 440 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$).

从深度上看,底泥中重金属含量随深度的增加总体呈下降趋势(Mn 除外),Co 的含量除采样点 5 (杜家淀)0 ~ 2 cm 底泥外均低于土壤背景值,采样点 1(烧车淀)和 3(宋庄)在 8 ~ 10 cm 处 Co 的含量有较大的增长趋势,10 cm 以下逐渐减小并趋于稳定.

Mn 的含量除采样点 1(烧车淀)0 ~ 8 cm,采样点 2(王家寨)8 ~ 12 cm 以及采样点 3(宋庄)0 ~ 4 cm 底泥中重金属含量低于土壤背景值外,其他采样点各层中 Mn 的含量均高于土壤背景值. 各采样点 Mn 的含量在 6 ~ 8 cm 达到最小,> 8 cm 时,Mn 的

含量逐渐增加,至 14 cm 时含量达到最大。

Pb 的含量除采样点 3(宋庄)中 6 cm 和 8 cm 两点低于白洋淀底泥背景值外,其它采样点各深度 Pb 的含量均高于白洋淀底泥背景值。随着深度的增加,各采样点中 Pb 的含量变化较大,总体呈降低的趋势。

Zn 的含量一般在 8 cm 深度附近接近达到白洋淀底泥重金属背景值,其中采样点 2(王家寨)Zn 的含量除 0~2 cm 外均低于白洋淀底泥背景值,采样

点 5(杜家淀)底泥中 Zn 的含量除 12 cm 外均高于白洋淀底泥背景值。

总体来说,白洋淀底泥中重金属 Co、Pb、Zn 含量随深度增加而减小,0~2 cm 含量最高,Mn 的含量在 6~8 cm 达到最小,>8 cm 时,Mn 的含量逐渐增加,至 14 cm 时含量达到最大。部分取样点随深度的增加重金属含量变化较大,这可能是与该处底泥受到船只航行或其他人为扰动的影响有关。

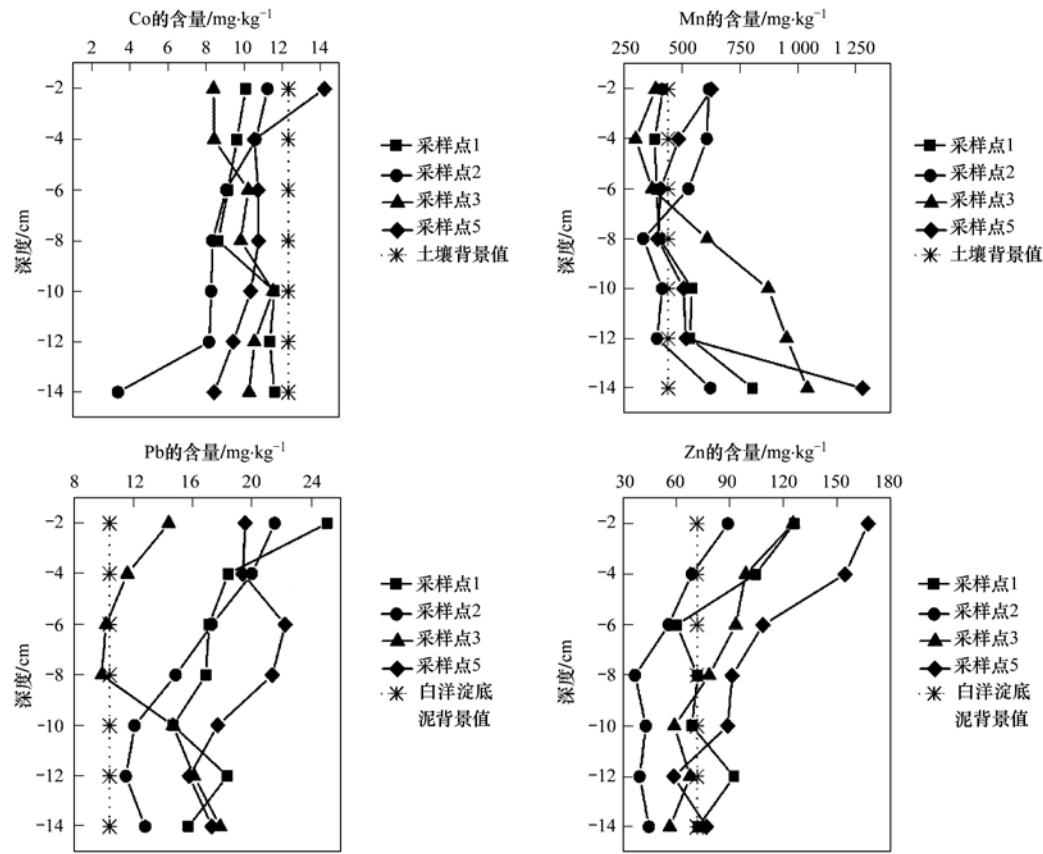


图3 各采样点中重金属含量沿深度分布

Fig. 3 Changes of heavy metal content in sediments with depth

2.5 底泥重金属污染程度评价

20 世纪 70 年代在欧洲发展起来的地累积指数 (I_{geo}) 法被广泛应用于底泥中重金属污染等级的评价^[26~32]。地累积指数公式为:

$$I_{geo} = \log_2 [c_n / (k \cdot B_n)]$$

式中, k 是地质累积指数; B_n 是底泥中重金属元素在研究区的地球化学背景值 ($Pb_{背景} = 10.39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $Zn_{背景} = 71.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $Co_{背景} = 12.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $Mn_{背景} = 440 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); c_n 是重金属元素在底泥中的含量; 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 取 1.5。根据 I_{geo} 的大小,可以将底泥中重金属的污染程度分为 7

个等级(表 4), I_{geo} 法是底泥中重金属污染评价的一个重要而有效的方法。

根据 Mülle^[27] 的定义,各采样点底泥中 4 种重金属元素污染程度分别为:Co 在各个采样点的 $I_{geo} < 0$,属于无污染等级; Mn 仅在采样点 5(烧车淀) I_{geo} 值位于 0~1,为轻-中度污染等级,其余采样点的 $I_{geo} < 0$,为无污染等级; Pb 在采样点 4(府河入口)的 I_{geo} 值位于 1~2,为中度污染等级,在其他采样点 I_{geo} 值位于 0~1,为轻度污染等级; Zn 在采样点 4 的 I_{geo} 值位于 1~2,为中度污染等级,在采样点 3、5、7, I_{geo} 值位于 0~1,为轻度污染等级,其余采样点的 $I_{geo} < 0$,为无污染等级。

总体来看,白洋淀淀区底泥中 Co、Mn 两种重金属元素主要为无污染或轻度污染,Zn、Pb 除府河入口外主要为轻度污染,府河入口处的 Zn、Pb 为中度污染,这与胡国成等^[32]研究的结果相符,主要原因可能是府河是白洋淀地区外源污染物的排污

口的入口,排入府河的水中 Zn、Pb 含量较高,水体中的重金属在水环境中是不可降解的,只能被积累和转移,进入水体的 Zn、Pb 通过化学吸附、物理沉淀等作用转移至底泥中导致底泥中 Zn、Pb 的污染程度较强。

表 4 重金属污染程度与 I_{geo} 的关系

Table 4 Relation between contamination degree of heavy metals and I_{geo}							
污染程度	无	轻-中度	中度	中-强度	强	强-极严重	极严重
污染级别	0	1	2	3	4	5	6
I_{geo}	<0	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	>5

3 结论

(1) 白洋淀底泥中重金属总量的范围分别是: Co 6.89 ~ 14.21 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Fe 12 612.26 ~ 21 895.63 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Mn 299.91 ~ 1 227.43 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Pb 9.85 ~ 27.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Zn 36.47 ~ 528.52 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中以 Mn 和 Zn 的变化范围最大,在 4 倍以上,尤其是 Zn 达到了 14.5 倍。

(2) 白洋淀底泥中 Co 的形态以有机结合态和残渣态为主,Fe 的形态以残渣态为主,Mn 的形态以酸可溶态及残渣态为主,Pb 的形态以铁锰氧化态为主,Zn 的形态以有机物结合态为主,残渣态也占有相当的比例。

(3) 部分淀区底泥中重金属 Co、Pb、Zn 含量随着埋深增加总体呈降低的趋势,这 3 种金属在 0 ~ 2 cm 底泥的含量最高。Mn 的含量在 6 ~ 8 cm 达到最小,>8 cm 时,Mn 的含量逐渐增加,至 14 cm 时含量达到最大。

(4) 地累积指数分析表明白洋淀淀区底泥中 Co、Mn 两种重金属元素主要为无污染或轻度污染,Zn、Pb 除府河入口外主要为轻度污染,府河入口处的 Zn、Pb 为中度污染。

参考文献:

[1] 陈如海,詹良通,陈云敏,等. 西溪湿地底泥重金属竖向分布规律[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2010, **36**(5): 578-584.

[2] 李玉,俞志明,宋秀贤. 运用主成分分析(PCA)评价海洋沉积物中重金属污染来源[J]. 环境科学, 2006, **27**(1): 137-141.

[3] Bibi M H, Ahmed F, Ishiga H. Assessment of metal concentrations in lake sediments of southwest Japan based on sediment quality guidelines[J]. Environmental Geology, 2007, **52**(4): 625-639.

[4] Stead-Dexter K, Ward N I. Mobility of heavy metals within freshwater sediments affected by motorway stormwater [J].

Science of the Total Environment, 2004, **334/335**: 271-277.

[5] Wakida F T, Lara-Ruiz D, Temores-Peña J, *et al.* Heavy metals in sediments of the Tecate River, Mexico [J]. Environmental Geology, 2008, **54**(3): 637-642.

[6] Li X D, Wai O W H, Li Y S, *et al.* Heavy metal distribution in sediment profiles of the Pearl River estuary, South China [J]. Applied Geochemistry, 2000, **15**(5): 567-581.

[7] 李鸣,刘琪璟. 鄱阳湖水体和底泥重金属污染特征与评价 [J]. 南昌大学学报(理科版), 2010, **34**(5): 486-494.

[8] 范文宏,张博,陈静生,等. 锦州湾沉积物中重金属污染的潜在生物毒性风险评价 [J]. 环境科学学报, 2006, **26**(6): 1000-1005.

[9] 宁建凤,邹献中,杨少海,等. 广东大中型水库底泥重金属含量特征及潜在生态风险评价 [J]. 生态学报, 2009, **29**(11): 6059-6067.

[10] 毛美洲,刘子慧,董惠茹. 府河-白洋淀水及沉积物的污染研究 [J]. 环境科学, 1995, **16**(增刊): 1-6.

[11] 杨卓,李贵宝,王殿武,等. 白洋淀底泥重金属的污染及其潜在生态危害评价 [J]. 农业环境科学学报, 2005, **24**(5): 945-951.

[12] 李军,刘云国,许中坚. 湘江长株潭段底泥重金属存在形态及生物有效性 [J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2009, **24**(1): 116-121.

[13] 刘恩峰,沈吉,朱育新. 重金属元素 BCR 提取法及在太湖沉积物研究中的应用 [J]. 环境科学研究, 2005, **18**(2): 57-60.

[14] 王海,王春霞,王子健. 太湖表层沉积物中重金属的形态分析 [J]. 环境化学, 2002, **21**(5): 431-435.

[15] 刘伟,陈振楼,许世远,等. 上海市小城镇河流沉积物重金属污染特征研究 [J]. 环境科学, 2006, **27**(3): 538-543.

[16] 刘恩峰,沈吉,刘兴起,等. 太湖 MS 岩芯重金属元素地球化学形态研究 [J]. 地球化学, 2004, **33**(6): 602-610.

[17] 刘兴起,于昇松,邵明昱. 察尔汗盐湖 91-IV₄ 孔沉积地层元素地球化学的研究 [J]. 湖泊科学, 1995, **7**(4): 321-326.

[18] 罗金发,孟维奇,夏增禄. 土壤重金属(镉、铅、铜)化学形态的地理分异研究 [J]. 地理研究, 1998, **17**(3): 265-272.

[19] Li X D, Shen Z G, Wai O W H, *et al.* Chemical forms of Pb, Zn and Cu in the sediment profiles of the Pearl River Estuary [J]. Marine Pollution Bulletin, 2001, **42**(3): 215-223.

[20] 翁焕新,沈忠悦,陈建裕,等. 沿海表层沉积物中重金属的

- 有效结合态[J]. 地质科学, 2002, **37**(2): 243-252.
- [21] 卢少勇, 焦伟, 金相灿, 等. 滇池内湖滨带沉积物中重金属形态分析[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(4): 487-492.
- [22] Seidemann D E. Metal pollution in sediments of Jamaica Bay, New York, USA-An urban estuary [J]. Environmental Management, 1991, **15**(1): 73-81.
- [23] 白占国, 万国江, 刘东生, 等. 散落核素⁷Be 和¹³⁷Cs 在洱海和红枫湖沉积物中蓄积对比[J]. 地球化学, 2002, **31**(2): 131-138.
- [24] 滑丽萍, 华珞, 王学东, 等. 芦苇对白洋淀底泥重金属污染程度的影响效应研究[J]. 水土保持学报, 2006, **20**(2): 102-105.
- [25] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 87-256.
- [26] 周立旻, 郑祥民, 殷效玲. 苏州河沉积物中重金属的污染特征及其评价[J]. 环境化学, 2008, **27**(2): 269-270.
- [27] Mülle G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Geography Journal, 1969, **2**(3): 108-118.
- [28] 许振成, 杨晓云, 温勇, 等. 北江中上游底泥重金属污染及其潜在生态危害评价[J]. 环境科学, 2009, **30**(11): 3262-3268.
- [29] 刘文新, 栾兆坤, 汤鸿霄. 应用多变量脸谱图进行河流与湖泊表层沉积物重金属污染状况的综合对比研究[J]. 环境化学, 1997, **16**(1): 23-29.
- [30] 汤莉莉, 牛生杰, 徐建强, 等. 外秦淮河疏浚后底泥重金属污染与潜在生态风险评价[J]. 长江流域资源与环境, 2008, **17**(3): 424-430.
- [31] 戴秀丽, 孙成. 太湖沉积物中重金属污染状况及分布特征探讨[J]. 上海环境科学, 2001, **20**(2): 71-74.
- [32] 胡国成, 许木启, 许振成, 等. 府河-白洋淀沉积物中重金属污染特征及潜在风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(1): 146-153.

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