

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第9期

Vol.34 No.9

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

利用PUF被动采样技术研究长三角城市群大气中多环芳烃的时空分布及来源 张利飞,杨文龙,董亮,史双昕,周丽,张秀蓝,李玲玲,钮珊,黄业茹 (3339)

FTIR对大气颗粒物PM_{2.5}中硝酸盐的定量分析 刘娜,魏秀丽,高闽光,徐亮,焦洋,李胜,童晶晶,程巴阳 (3347)

福建茫荡山地区春季大气O₃、HONO、HCHO、H₂O₂对·OH的贡献率研究 刘昊,王会祥 (3352)

水体类固醇雌激素污染现状研究进展 都韶婷,金崇伟,刘越 (3358)

嘉兴市地表水中兽用抗生素的污染现状调查 闫幸,余卫娟,兰亚琼,李立,吕升,叶朝霞,张永明,刘锐,陈吕军 (3368)

上海食用鱼中短链氯化石蜡的污染特征 姜国,陈来国,何秋生,孟祥周,封永斌,黄玉妹,唐才明 (3374)

水体环境内毒素活性的鲎法定量检测及影响因素研究 张灿,刘文君,张明露,田芳,孙雯,钱令嘉,战锐 (3381)

四环素类抗生素对淡水绿藻的毒性作用 徐冬梅,王艳花,饶桂维 (3386)

光照对东海典型赤潮藻生长及硝酸还原酶活性的影响 李鸿妹,石晓勇,丁雁雁,唐洪杰 (3391)

围隔实验中浒苔在不同营养盐条件下的生长比较 庞秋婷,李凤,刘湘庆,王江涛 (3398)

长江口及邻近海域浮游植物色素分布与群落结构特征 赖俊翔,俞志明,宋秀贤,韩笑天,曹西华,袁涌铨 (3405)

长江中下游湖泊超微型真核藻类遗传多样性研究 李胜男,史小丽,谢薇薇,龚伊,孔繁翔 (3416)

峡谷型水源水库的氮、磷季节变化及其来源分析 黄廷林,秦昌海,李璇 (3423)

九龙江河流-库区系统沉积物磷特征及其生态学意义 鲁婷,陈能汪,陈朱虹,王龙剑,吴杰忠 (3430)

氮在高含沙水向人工浅水湖泊补水期间的变化规律 陈友媛,申宇,杨世迎 (3437)

石灰石和黄铁矿-石灰石人工湿地净化河水的研究 张菁,李睿华,李杰,胡俊松,孙茜茜 (3445)

杭州湾潮滩湿地3种优势植物碳氮磷储量特征研究 邵学新,李文华,吴明,杨文英,蒋科毅,叶小齐 (3451)

滇池优势挺水植物茭草和芦苇降解过程中DOM释放特征研究 谢理,杨浩,渠晓霞,朱元荣,鄢元波,张明礼,吴丰昌 (3458)

自来水处理工艺对溶解相中全氟化合物残留的影响 张鸿,陈清武,王鑫璇,柴之芳,沈金灿,杨波,刘国卿 (3467)

J市饮用水氯消毒副产物分析及其健康风险评价 李晓玲,刘锐,兰亚琼,余素林,文晓刚,陈吕军,张永明 (3474)

水中硫酸根及溶解氧质量浓度变化对管垢金属元素释放的影响 吴永丽,石宝友,孙慧芳,张枝焕,顾军农,王东升 (3480)

重金属捕集剂对水中微量Hg(II)的处理研究 胡运俊,盛田田,薛晓芹,谭丽莎,徐新华 (3486)

聚合氯化铁-聚(环氧氯丙烷-二甲胺)复合絮凝剂在模拟水处理中的混凝特性研究 刘新新,杨忠莲,高宝玉,王燕,岳钦艳,李倩 (3493)

镁铝复合脱色絮凝剂的微观结构形态及絮凝机制 桑义敏,常雪红,车越,谷庆宝 (3502)

钴掺杂铁酸铋活化过硫酸盐降解水中四溴双酚A的研究 欧阳磊,丁耀彬,朱丽华,唐和清,廖海星 (3507)

以海泡石为载体的双金属多相类芬顿催化剂的制备及表征 宿程远,李伟光,刘兴哲,王恺尧,王勇 (3513)

氧化还原介体调控亚硝酸盐反硝化特性研究 赵丽君,马志远,郭延凯,席振华,杜海峰,刘晓宇,郭建博 (3520)

缓释碳源滤池用于二级出水的深度脱氮 唐蕾,李彭,左剑恶,袁琳,李再兴 (3526)

微膨胀对好氧颗粒污泥脱氮过程中N₂O产生量的研究 陈丽丽,高大文 (3532)

Fenton试剂与CPAM联合调理对污泥脱水效果的影响研究 马俊伟,刘杰伟,曹芮,岳东北,王洪涛 (3538)

高效厌氧氨氧化颗粒污泥的动力学特性 唐崇俭,熊蕾,王云燕,郑平 (3544)

内蒙古温带草原氮沉降的观测研究 张菊,康荣华,赵斌,黄永梅,叶芝祥,段雷 (3552)

湘中矿区不同用地类型面源Cd输出负荷的原位实验研究 刘孝利,曾昭霞,陈喆,铁柏清,陈永稳,叶长城 (3557)

蠡湖沉积物重金属形态及稳定性研究 王书航,王雯雯,姜霞,宋倩文 (3562)

密云县境内潮河流域土壤重金属分析评价 于洋,高宏超,马俊花,李迎霞,莫雁,孔彦鸿 (3572)

西北干旱区黄河沿岸典型工业带表土磁性特征及其环境意义 许淑婧,张英,余晔,王博,夏敦胜 (3578)

复合稳定剂对砷污染土壤的稳定研究 王浩,潘利祥,张翔宇,李萌,宋宝华 (3587)

湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征 何东,邱波,彭尽晖,彭亮,胡凌霄,胡瑶 (3595)

安太堡露天矿复垦地不同人工植被恢复下的土壤酶活性和肥力比较 王翔,李晋川,岳建英,周小梅,郭春燕,卢宁,王宇宏,杨生权 (3601)

三苯基锡的微生物降解及其对降解菌的影响 叶锦韶,田云,尹华,彭辉,黄捷,麻榆佳 (3607)

二氯甲烷降解菌 *Methylobacterium rhodesianum* H13 的分离鉴定及降解特性研究 刘洪霞,朱润晔,欧阳杜娟,庄庆丰,陈东之,陈建孟 (3613)

引物选择对污泥微生物多样性分析的影响 徐爱玲,吴等等,宋志文,任杰,夏岩,董珊珊,刘梦 (3620)

钙铝类水滑石衍生复合氧化物的SO₂储存性能研究 曹琳,王海滨,解强 (3627)

基于转运站满负荷的北京市新东西城区生活垃圾物流优化方案研究 袁京,李国学,张红玉,罗一鸣 (3633)

重金属污染土壤治理与生态修复论坛会议论文

多证据分析技术在场地重金属污染评价中的应用研究 姜林,钟茂生,朱笑盈,姚珏君,夏天翔,刘辉 (3641)

我国城市不同功能区地表灰尘重金属分布及来源 李晓燕,刘艳青 (3648)

黄河下游滩区开封段土壤重金属分布特征及其潜在风险评价 张鹏岩,秦明周,闫江虹,胡长慧,赵亚平 (3654)

青岛北站规划区原场地表层土壤重金属污染研究 朱磊,贾永刚,潘玉英 (3663)

某铅蓄电池厂土壤中铅的含量分布特征及生态风险 郑立保,陈卫平,焦文涛,黄锦楼,魏福祥 (3669)

某铅冶炼厂对周边土壤质量和人体健康的影响 周小勇,雷梅,杨军,周广东,郭广慧,陈同斌,万小铭,梁琪,乔鹏伟 (3675)

某铅蓄电池厂表土不同粒径中铅分布规律研究 岳希,孙体昌,黄锦楼 (3679)

原位生物稳定固化技术在铬污染场地治理中的应用研究 张建荣,李娟,许伟 (3684)

淋洗剂对多金属污染尾矿土壤的修复效应及技术研究 朱光旭,郭庆军,杨俊兴,张晗芝,魏荣菲,王春雨, Marc Peters (3690)

铅蓄电池厂污染土壤中重金属铅的清洗及形态变化分析 任贝,黄锦楼,苗明升 (3697)

超声波辅助化学萃取对某工业场地铅污染土壤修复效果研究 王鑫杰,黄锦楼,刘志强,岳希 (3704)

摩擦清洗修复铅污染土壤的参数优化及清洗效率评价 杨雯,黄锦楼,彭会清,李思拓 (3709)

土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉的吸附特性研究 郭文娟,梁学峰,林大松,徐应明,王林,孙约兵,秦旭 (3716)

无机稳定剂对重金属污染土壤的化学稳定修复研究 曹梦华,祝玺,刘黄诚,王琳玲,陈静 (3722)

《环境科学》征稿简则(3404) 《环境科学》征订启事(3444) 信息(3492, 3551, 3696, 3715)

蠡湖沉积物重金属形态及稳定性研究

王书航¹, 王雯雯¹, 姜霞^{1*}, 宋倩文^{1,2}

(1. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 东北林业大学林学院, 黑龙江 150040)

摘要: 以蠡湖及其入湖河口为研究对象, 采用连续分级提取法研究了表层沉积物中 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg 和 Pb 形态的空间赋存特征, 同时结合各金属在间隙水体中的空间分布, 探讨了各形态金属的稳定度及其生物有效性。结果表明, 间隙水体及表层沉积物可提取态金属分布都具有明显的空间异质性, Cr、Cu、Zn、Pb 的高值区沿宝界桥和蠡湖大桥呈“带状”分布, Ni、As、Cd、Hg 的高值区沿河口向湖区扩展, 呈“扇形”分布, 并且含量都在退渔还湖区较低。沉积物中 Cd、Cu、Ni 的可提取态占总量的质量分数较高, 分别达到 71.02%、54.79% 和 50.62%, 其余金属则主要以残渣态为主。8 种金属稳定性顺序为 Cr > Pb > Hg > As > Cu > Ni > Zn > Cd, Cd 和 Zn 在大部分点位处于不稳定状态, 快速解解释放的风险较大。间隙水体毒性评估表明, 各金属不会对水生生态系统产生急性毒性, 但部分区域尤其是入湖河口的 Hg 和 Pb 可能会对底栖生物产生慢性毒性。

关键词: 蠡湖; 沉积物; 间隙水; 重金属; 形态; 连续提取

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)09-3562-10

Heavy Metal Speciation and Stability in the Sediment of Lihu Lake

WANG Shu-hang¹, WANG Wen-wen¹, JIANG Xia¹, SONG Qian-wen^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: The spatial occurrence characteristics of the speciation of Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Hg and Pb in sediments of the lake body and river mouths of Lihu Lake were studied. Meanwhile, combined with the spatial distribution of metals in interstitial water, the stability and bio-availability of various forms of studied metals were discussed. The results showed that metals in interstitial water and extractable metals in surface sediments both had obvious spatial heterogeneity, and the metal contents in retreated fishery district were lower. High value areas of Cr, Cu and Zn distributed in belt along Baojie Bridge and Lihu Lake Bridge, and the high value areas of Ni, As, Cd, Hg distributed in sector extending from river mouths to the lake body. Most metals mainly existed in residue state except for Cd, Cu and Ni, the extractable content of which respectively accounted for 71.02%, 54.79% and 50.62% of the total content. The stability of eight studied metals was in the order of Cr > Pb > Hg > As > Cu > Ni > Zn > Cd. Cd and Zn were unstable in most studied sites, so there was higher risk of quick desorption and release. Toxicity assessment of interstitial water showed that the tested metals would not pose acute toxicity for aquatic ecosystem, but Hg and Pb in some districts, especially in the river mouths, might pose chronic toxicity for the benthonic organisms.

Key words: Lihu Lake; sediment; interstitial water; heavy metal; speciation; sequential extraction

重金属是对生态环境造成极大危害的污染物, 其进入环境后很难被微生物降解, 往往会随食物链循环最终在生物体内累积, 破坏生物体正常生理代谢活动^[1~3]。沉积物是重金属重要的蓄积场所, 但在条件适宜的情况下重金属还会再次释放进入间隙水以及上覆水体, 造成“二次污染”^[4~8]。然而并不是所有形态的重金属都能被生物吸收或对生物产生毒性效应, 同一重金属因其存在形态不同, 其生物化学、环境化学行为及其在环境中的迁移转化规律也不同^[9,10]。研究表明^[11,12], 在受人为污染的沉积物中, 重金属有效态的含量及释放风险明显增加。因此, 对沉积物中重金属形态组成的分析, 不仅能有效识别重金属的人为污染情况, 而且能在一定程度上评估重金属的潜在生态风险。

蠡湖又称五里湖, 作为城市湖泊, 长期以来接纳

了工业化、城市化进程所带来的各种点、面源污染物。但目前对蠡湖沉积物重金属污染的详细研究较少, 并且对于重金属形态的研究还鲜见报道^[13,14]。本文以蠡湖及其入湖河口为研究对象, 采用基于 BCR^[15]连续提取法分析了 64 个蠡湖表层沉积物中金属(Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg、Pb)不同形态含量的空间分布特征, 同时结合各金属在间隙水体中的空间分布, 探讨了各形态金属的稳定度及其生物有效性, 以期能为城市湖泊的环境管理提供依据和建议。

收稿日期: 2012-12-14; 修订日期: 2013-02-18

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101-013-01)

作者简介: 王书航(1985~), 男, 硕士, 主要研究方向为湖泊水环境, E-mail: shuhang125126@163.com

* 通讯联系人, E-mail: jiangxia@craes.org.cn

1 材料与方法

1.1 研究区域

蠡湖位于太湖北部(120.22°E ~ 120.29°E, 31.48°N ~ 31.55°N), 东西长约6 km, 南北宽0.3 ~ 1.8 km, 面积约8.6 km². 经梁溪河闸、五里湖闸与梅梁湖相通, 通过曹王泾、长广溪等分别与京杭大运河、贡湖相连接, 湖周围还有一些小河及断头浜, 是一个既相对独立又与太湖相通的水体, 换水周期约400 d.

为方便讨论, 以蠡堤、宝界桥和蠡湖大桥为边界将蠡湖划分为4个区域(图1), 分别为A区, 即退渔还湖区, 原有大量鱼塘, 污染严重, 采用干湖清淤的方式去除底泥; B区为综合整治前的“西蠡湖”, 在B区的西北部开展了环保疏浚, 在两边沿岸开展了水生植被重建工程; C区以宝界桥和蠡湖大桥为界, 实施了沿岸整治工程, 并建有长广溪湿地; D区为蠡湖“东出口区”, 沿岸居民区较多.

1.2 样品采集及处理

于2012年6月, 在蠡湖及其出/入湖河口共布置64个采样点, 其中40个位于蠡湖内, 其余24个点布设在入湖河流或者断头浜的河口处. 用柱状采样器(04.23 BEEKER, Eijkelkamp, NL)采集表层2 cm的沉积物样品, 每个采样点采集4个平行样现场混匀, 装入自封袋, 并用GPS进行定位导航, 采样点位置见图1. 取约250 g混合均匀的新鲜沉积物样品分装于几个100 mL离心管中, 于10 000 r·min⁻¹离心10 min, 滤液混合后过0.45 μm混纤膜, 获得的间隙水冷藏保存, 待测; 离心后的沉积物

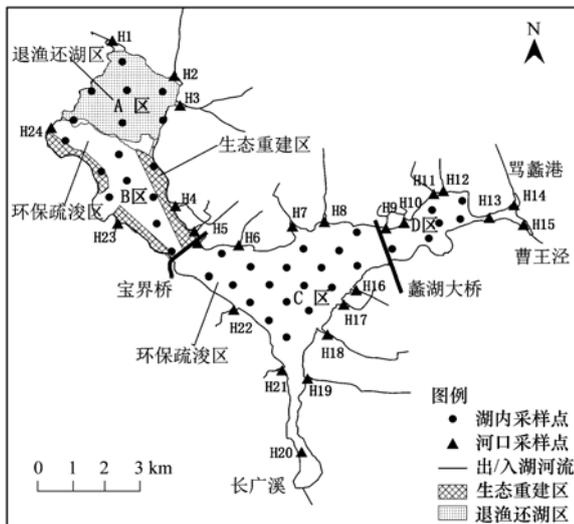


图1 蠡湖采样点分布示意

Fig. 1 Sampling sites and location of Lihu Lake

经-40℃冷冻干燥、研磨、过100目筛后保存于封口袋中备用.

1.3 样品分析

根据沉积物表面各形态金属结合程度的强弱, 金属形态分为: 可交换态及碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机物及硫化物结合态和残渣态, 沉积物中金属总量为以上4种形态重金属含量之和, BCR形态分级提取步骤参见文献[15]. 沉积物和间隙水各形态金属含量利用ICP-MS(Agilent 7500a)进行测定; 有机质和pH测定方法详见文献[16].

1.4 数据处理

As为类金属, 本研究为了便于叙述, 将As归类为重金属一并讨论. 所有样品分析均做3次平行, 试验结果均以3次样品分析的平均值表示(3次分析结果的误差范围<5%). 采用水系底泥标准参考样品(GBW-07307 GSD7)作为质量控制样品, 对沉积物样品前处理过程和形态测定过程进行质量控制. 结果显示, Cu、Zn、Pb、Ni、Cr、Cd、Hg和As这8种重金属的回收率均处在85%~110%, 见表1. 试验数据采用Excel 2007、Origine 8、ArcGIS 9.3、Surfer 8以及SPSS 17软件进行统计检验、绘图和分析.

表1 沉积物标准样品(GSD7)回收率试验结果

Table 1 Results of the recovery test of standard samples (GSD7)

元素	测定值 /mg·kg ⁻¹	标准值 /mg·kg ⁻¹	回收率/%
Cr	110.75	122 ± 7	90.78
Ni	48.79	53 ± 4	92.06
Cu	33.62	38 ± 2	88.47
Zn	258.51	238 ± 12	108.62
As	83.21	84 ± 6	99.06
Cd	1.00	1.05 ± 0.06	95.24
Hg	0.049	0.053 ± 0.013	92.45
Pb	345.48	350 ± 17	98.71

2 结果与分析

2.1 沉积物间隙水体中重金属空间分布

沉积物-上覆水界面间的物质交换主要是通过间隙水来实现的, 并且底栖生物的生长环境及其生物毒性效应都与间隙水体息息相关, 因此, 沉积物间隙水在湖泊体系中金属的地球化学循环过程中起重要作用^[17,18]. 本研究对蠡湖湖体及入湖河口表层沉积物间隙水中Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg、Pb的质量浓度进行了调查分析, 其水平空间分布特征如图2、图3所示.

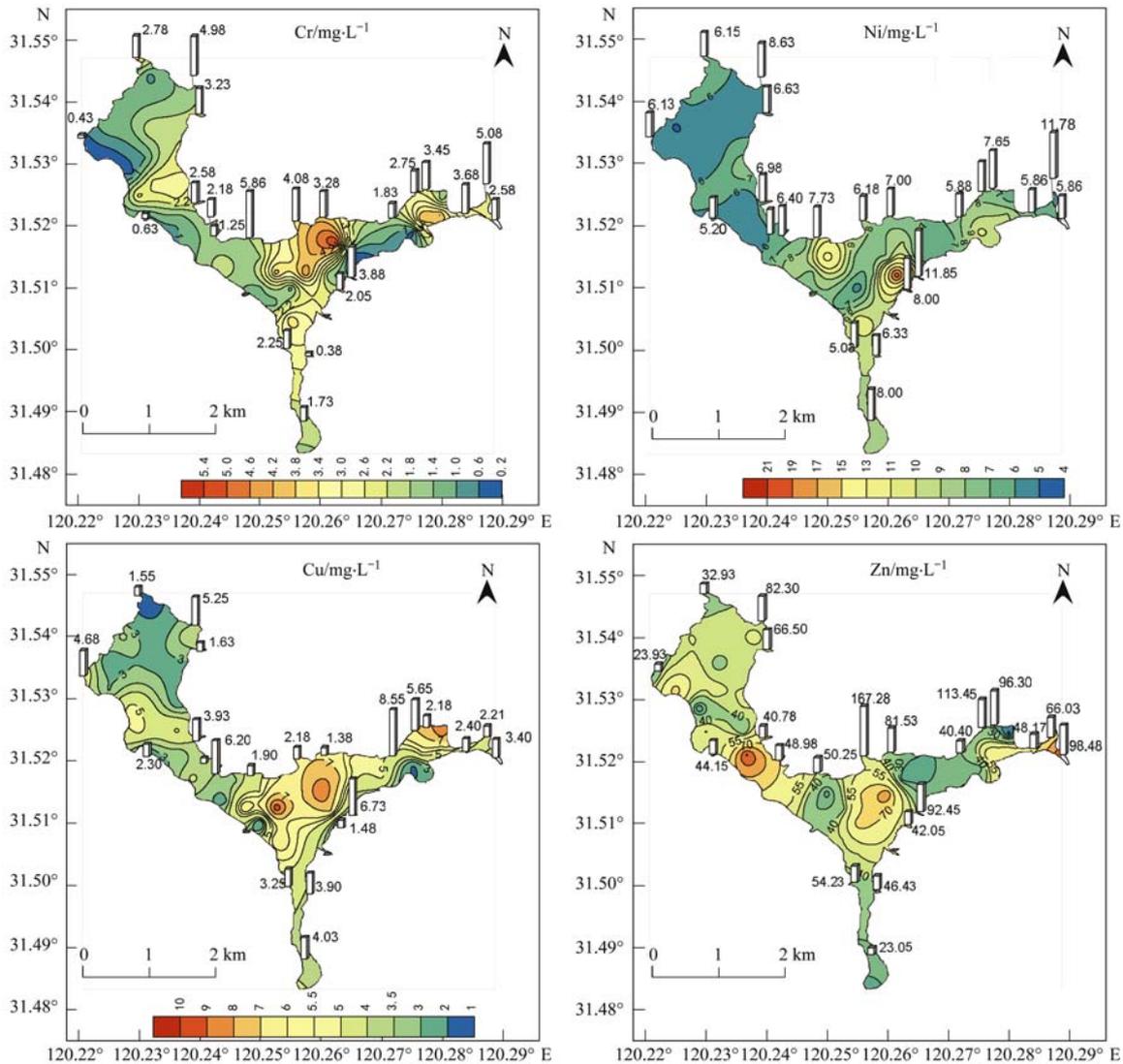


图2 湖区和河口表层沉积物间隙水中 Cr、Ni、Cu 和 Zn 的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of Cr, Ni, Cu, and Zn in interstitial water of surface sediments from the lake body and river mouths

由图2和图3可知,蠡湖表层沉积物间隙水体中各金属空间分布差异较大,重金属质量浓度在C区和D区普遍高于A区和B区,入湖河口普遍高于湖区,并且8种重金属高值区分布趋势可大致归纳为两种类型:第一种为高值区沿宝界桥和蠡湖大桥呈“带状”分布,此类型重金属包括Cr、Cu、Zn和Pb;第二种为高值区沿河口向湖区扩展,呈“扇形”分布,包括Ni、As、Cd和Hg。

由于国内暂时没有水体重金属对水生生态系统的毒性标准,本研究参照美国EPA公布的“国家推荐水质标准(National Recommended Water Quality Criteria)”^[19]对蠡湖表层沉积物间隙水中重金属可能对水生生态系统带来的毒性水平进行评估。该标准包括一个标准连续浓度(criterion continuous concentration, CCC)和一个标准最大浓度(criterion

maximum concentration, CMC),如果水体中某金属的浓度超过其相应的CCC值,则可能会对水生生态系统产生慢性毒性;如果超过其相应的CMC值,则会对水生生态系统产生急性毒性。蠡湖表层沉积物间隙水中重金属浓度与EPA水质标准如表2所示。

将全部点位间隙水中的金属浓度与标准对比,结果发现,仅在极少数河口采样点Zn和Hg含量超过其CMC值,表明蠡湖表层沉积物间隙水中重金属不会对水生生态系统产生急性毒性。Cr、Ni、Cu和As的浓度几乎均小于相应的CCC值,即不会对水生生态系统产生毒性;河口和湖区采样点的Zn和Cd平均浓度也都小于相应的CCC值,仅在部分入湖河口处的少数点位超过其CCC值,但总体看来也不会对水生生态系统产生毒性;Hg浓度在湖区的值均小于CCC-Hg值,但在入湖河口处的平均浓度大于

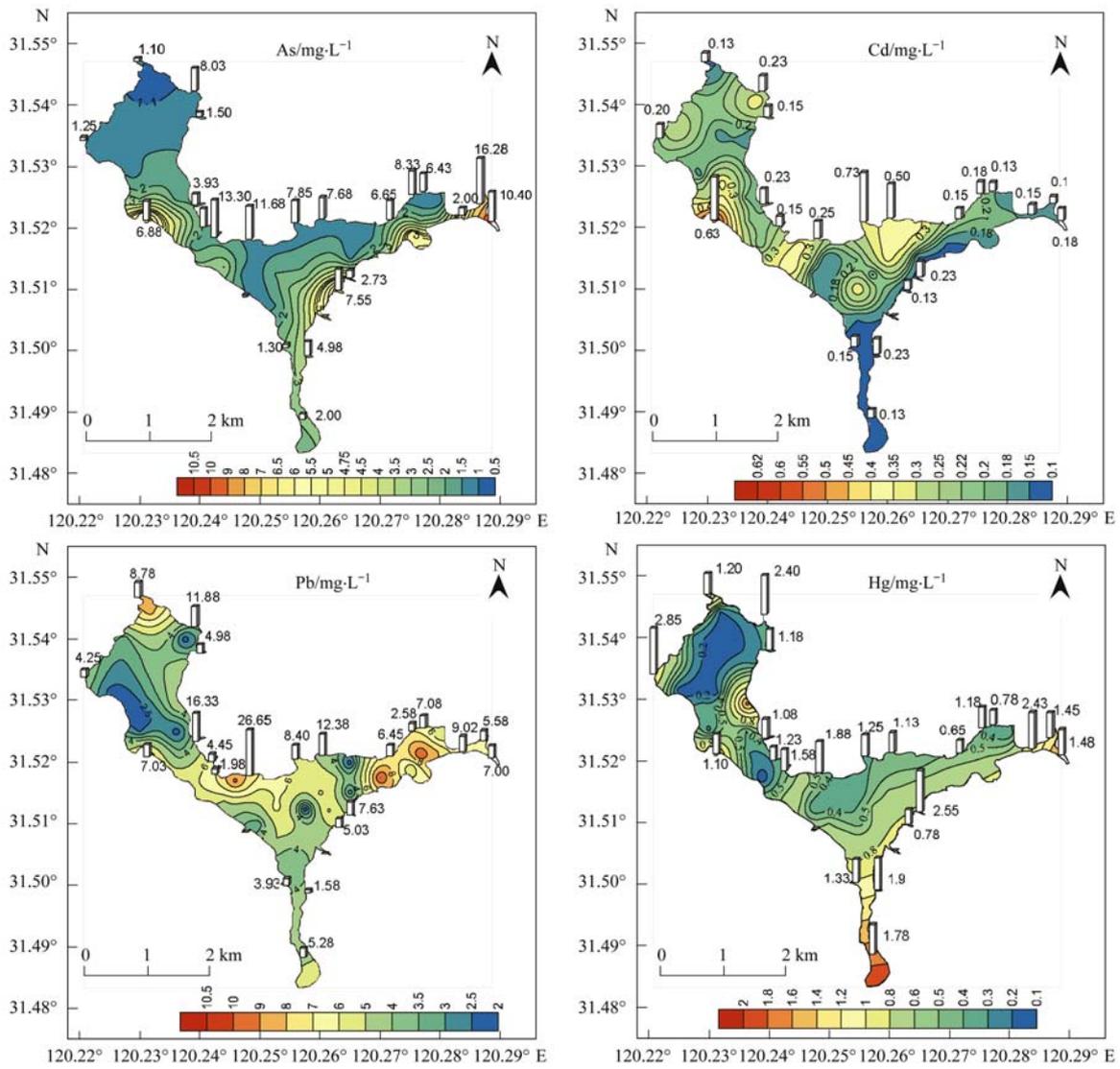


图 3 湖区和河口表层沉积物间隙水中 As、Cd、Hg 和 Pb 的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of As, Cd, Hg, and Pb in interstitial water of surface sediments from the lake body and river mouths

表 2 蠡湖表层沉积物间隙水中重金属浓度与 EPA 水质标准/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Heavy metal concentrations of the interstitial water in surface sediments of Lihu Lake and EPA water quality criteria/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

项目	指标	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb
湖区	最小值	0.23	4.88	1.48	13.3	0.75	0.15	0.13	2.05
	最大值	5.48	20.60	9.8	101.48	59.73	0.40	0.68	10.08
	平均值	2.09	7.64	4.93	53.68	3.52	0.23	0.46	4.72
	标准方差	1.32	2.95	2.07	21.69	9.68	0.08	0.28	2.25
河口	最小值	0.37	5.03	1	23.05	1.1	0.1	0.65	1.58
	最大值	5.85	11.85	8.55	167.28	16.28	0.73	2.85	26.55
	平均值	2.75	7.28	3.44	63.4	6.17	0.23	1.34	7.56
	标准方差	1.44	1.81	1.98	33.22	4.12	0.16	0.61	5.35
评估标准	CMC	13	470	13	120	340	2	1.4	65
	CCC	9	52	9	120	150	0.25	0.77	2.5

CCC-Hg 值,可能对底栖生物产生慢性毒性;湖区和河口处 Pb 平均浓度均大于 CCC-Pb 值,表明间隙水中的 Pb 可能会对底栖生物产生慢性毒性,应引起重

视,尤其是沿宝界桥、蠡湖大桥两边水域以及蠡溪河、威尼斯花园河和蠡湖大桥公园河等入湖河口处。

2.2 蠡湖表层沉积物中金属形态分布特征

水体沉积物中的重金属以不同结合态存在,主要包括可交换态及碳酸盐结合态(弱酸溶解态)、Fe/Mn 氧化物结合态(可还原态)、有机物及硫化

物结合态(可氧化态)以及存在于矿物晶格中的残渣态^[20],其中前3种形态统称为可提取态^[15,21]. 蠡湖表层沉积物中可提取态重金属含量的空间分布如图4、图5所示.

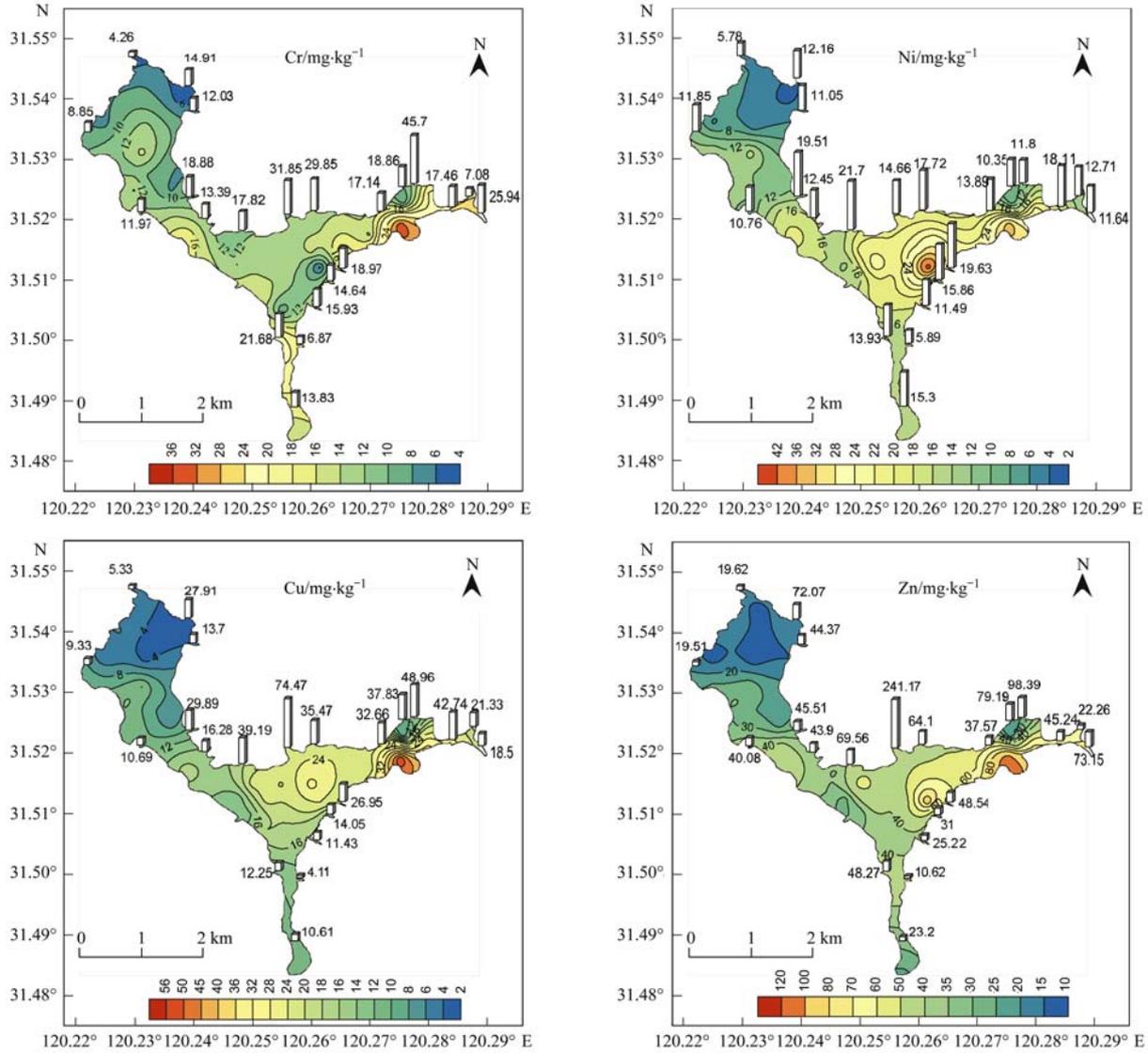


图4 湖区和河口表层沉积物中可提取态 Cr、Ni、Cu 和 Zn 的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of extractable Cr, Ni, Cu and Zn in surface sediments of the lake body and river mouths

湖体及入湖河口表层沉积物中可提取态 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg 和 Pb 的平均含量分别为 (14.77 ± 7.40)、(15.47 ± 7.16)、(19.34 ± 13.57)、(45.09 ± 34.02)、(1.88 ± 1.22)、(0.24 ± 0.13)、(0.040 ± 0.029)、(25.12 ± 27.86) mg·kg⁻¹,整体分布趋势与间隙水相似,且具有明显的空间差异性. 可提取态金属含量在 A 区和 B 区较其它区域含量小,且在入湖河口处平均含量普遍高于湖区,说明入湖河口是城市湖泊外源输入生物可利用性重金属最严重的区域.

可交换态及碳酸盐结合态(F1)金属在中性和弱酸条件下即可释放出来,容易被生物吸收利用,毒性也最强^[22]. 蠡湖表层沉积物中可交换态及碳酸盐结合态重金属占总量的质量分数以 Cd、Zn 和 Ni 为较高,分别为 44.03%、25.03%和 21.29%,而 Cr 最小,仅为 1.65%,这与卢少勇等^[23]对太湖沉积物中重金属形态分析结果相一致. 本次调查中,蠡湖沉积物的 pH 在 6.21 ~ 8.24 之间,平均为 7.65,呈中性至弱碱性,在正常环境条件下并不利于碳酸盐结合态金属的释放,但在酸雨、水生植物腐烂等环

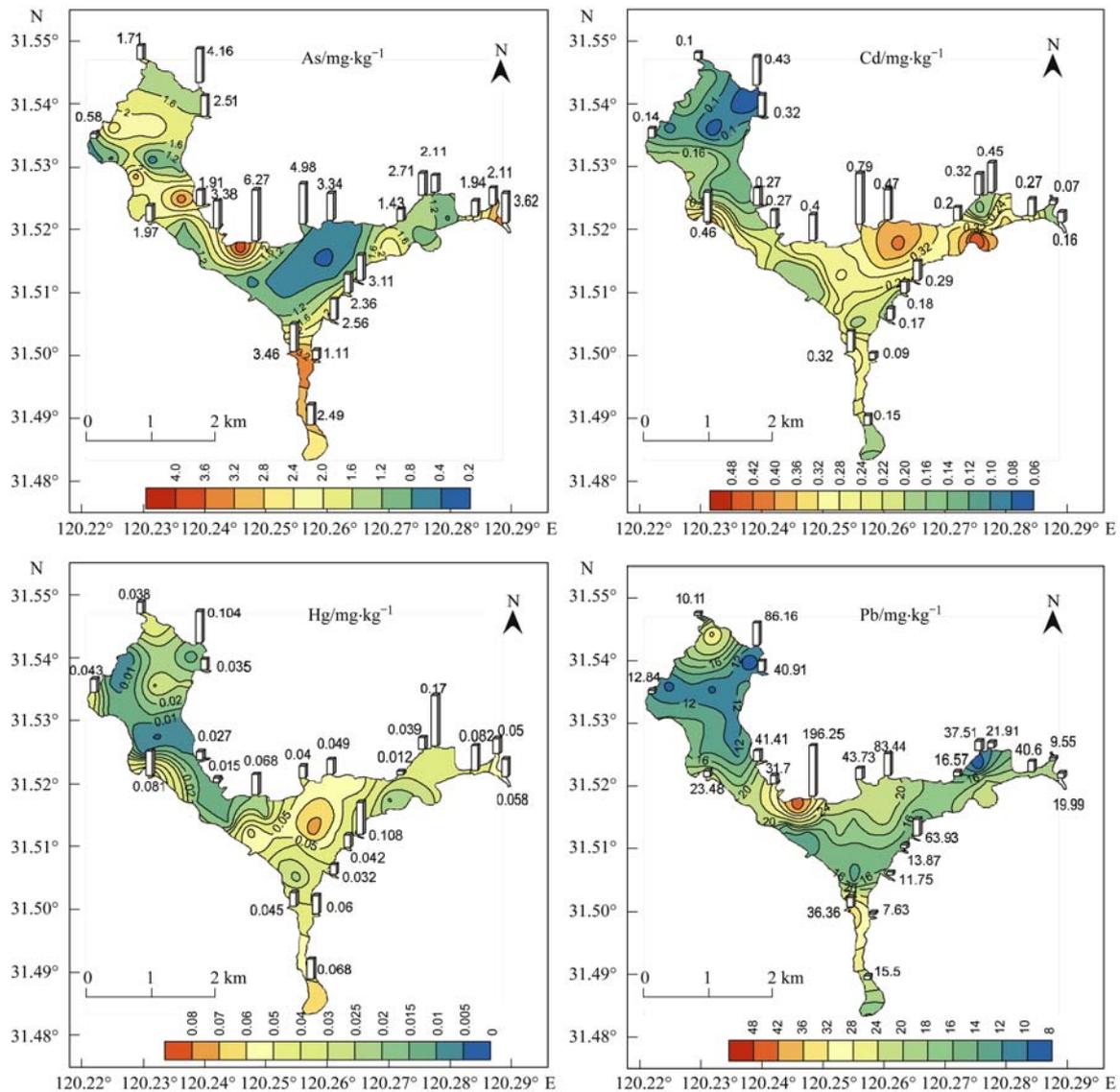


图5 湖区和河口表层沉积物中可提取态As、Cd、Hg和Pb的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of extractable As, Cd, Hg and Pb in surface sediments of the lake body and river mouths

境条件下,沉积物中可交换态及碳酸盐结合态重金属具有二次释放的风险。

Fe/Mn 氧化物结合态(F2)通过吸附作用或共沉淀作用而积累,当水体中氧化还原电位降低或水体缺氧时,Fe/Mn 氧化物会被还原,重金属释放,从而可能造成对水体的污染^[24]。本研究的8种金属中,Pb的F2态占总Pb的质量分数最高,为24.5%;F2态Cr、Cu、Hg占总量的质量分数较小,仅为4.35%、7.03%和7.65%,其余4种金属都在10%~17%之间。入湖河口由于有富含耗氧有机物的污水汇入,导致水体氧化还原电位的降低,因此,蠡湖入湖河口沉积物在还原条件下具有释放Pb的风险。

有机物及硫化物结合态(F3)是以重金属离子

为中心离子,以有机质活性基团为配位体的结合或是硫离子与重金属生成难溶于水的物质。蠡湖沉积物有机质含量在3.21~67.65 g·kg⁻¹之间,平均为16.47 g·kg⁻¹。就F3态占总量的质量分数而言,Zn、As和Pb的比例较低,分别为4.68%、5.64%和5.94%,Cr和Cu较高,达到25.35%和31.03%;其余重金属都在10%~20%之间。由于F3态在强氧化条件下才可以分解,因此这部分重金属在蠡湖沉积物正常的中度还原至弱氧化环境下不易释放。可提取态的Cu和Cr主要以F3态存在,反映这两种元素与有机质以及硫化物具有高度亲合特性,此研究结果与文献[25,26]报道结果相同。

残渣态(F4)指主要赋存于原生矿和次生矿的矿物晶格中的重金属形态,具有极高的稳定性,几乎

不被生物利用^[22]。蠡湖表层沉积物中 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg、Pb 残渣态含量占其总量的质量分数分别为 68.64%、49.38%、45.21%、58.21%、74.32%、29.88%、67.75% 和 65.38%。与残渣态相反,金属可提取态含量占总量的质量分数越高,越易释放出来造成二次污染,其生物有效性就越大。根据重金属总量与形态分布特征,本研究的 8 种重金属的潜在生物有效性顺序为 Cd > Cu > Ni > Zn > Pb > Hg > Cr > As。

3 讨论

3.1 蠡湖沉积物重金属稳定度分析

作为沉积物中对环境条件改变最敏感的重金属形态,可交换态及碳酸盐结合态重金属由于其键合力微弱,在中性和酸性条件下极易释放,因而具有快速解吸释放的能力和生物可利用性^[22]。本研究利用 Singh 等^[27]提出的重金属稳定度风险评估标准 (risk assessment code, RAC) 来评估蠡湖表层沉积物中重金属的二次释放风险。当稳定度 SAC (SAC =

c_e/c_t , 式中 c_e 为可交换态及碳酸盐结合态金属的含量, c_t 为金属总量) $\leq 1\%$ 时,为“极稳定”; $1\% < SAC \leq 10\%$ 时,为“稳定”; $10\% < SAC \leq 30\%$ 时,为“中等稳定”; $30\% < SAC \leq 50\%$ 时,为“不稳定”; $SAC > 50\%$ 时,为“极不稳定”。蠡湖表层沉积物中重金属稳定性的累积概率分布规律见图 6、图 7。

由图 6、图 7 可以看出,本次调查的 8 种重金属稳定性差异较大,且每一种重金属其稳定性的空间差异也较大。总体看来,表层沉积物 8 种重金属的稳定性可分为 4 组:元素 Cr 和 Pb 的稳定性最好, SAC 值均小于 10%,处于极稳定和稳定状态;元素 Hg 和 As 的 SAC 分别在 0.09% ~ 35.66% 和 2.36% ~ 44.23% 之间,平均为 8.01% 和 9.09%,整体处于稳定状态,少数点位处于中等稳定状态;元素 Cu 和 Ni 的 SAC 分别在 1.69% ~ 27.04% 和 6.7% ~ 38.62% 之间,平均为 15.37% 和 19.79%,处于稳定状态和不稳定状态之间;Zn 和 Cd 的 SAC 分别在 9.89% ~ 39.9% 和 9.09% ~ 62.99% 之间,平均为 24.79% 和 44.71%,基本上都处于不稳定状态,尤

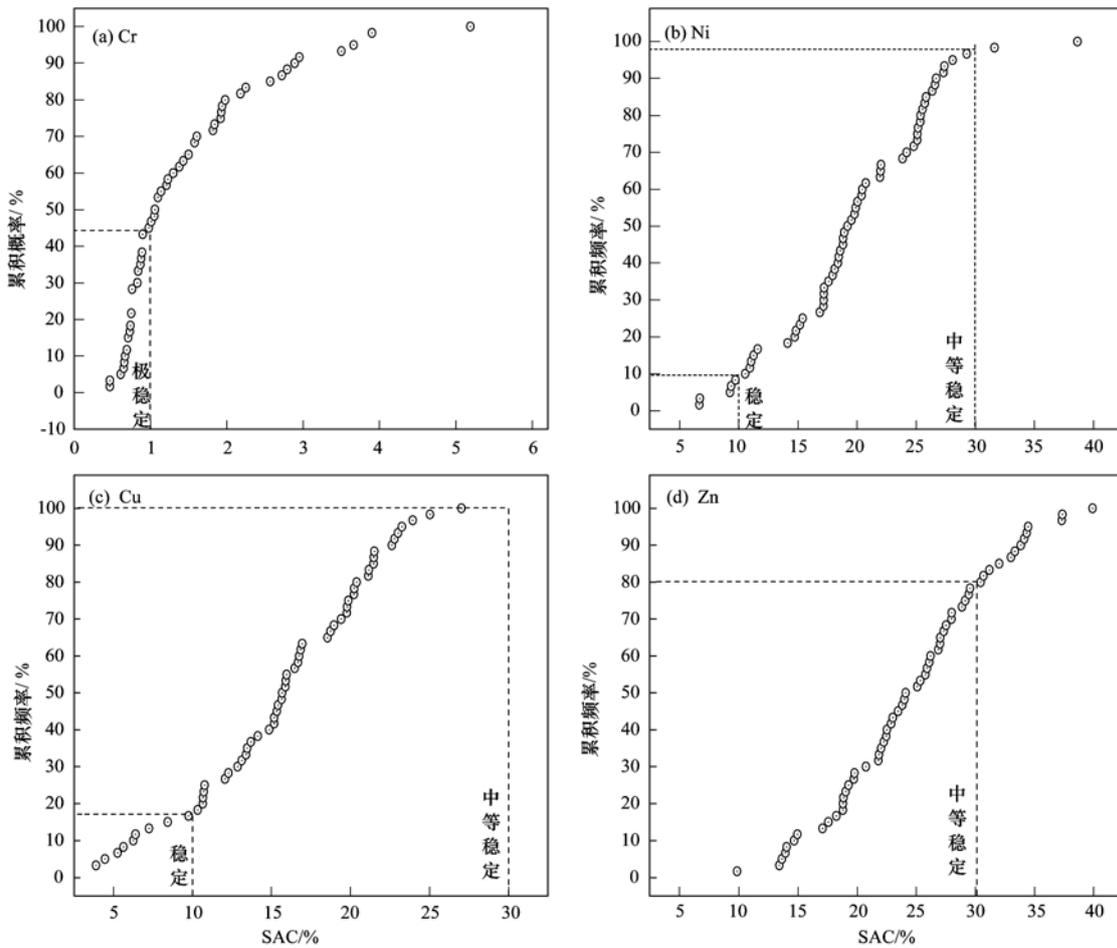


图 6 蠡湖表层沉积物中 Cr、Ni、Cu 和 Zn 稳定性累积频率

Fig. 6 Cumulative frequency of stability of Cr, Ni, Cu, and Zn in surface sediments of Lihu Lake

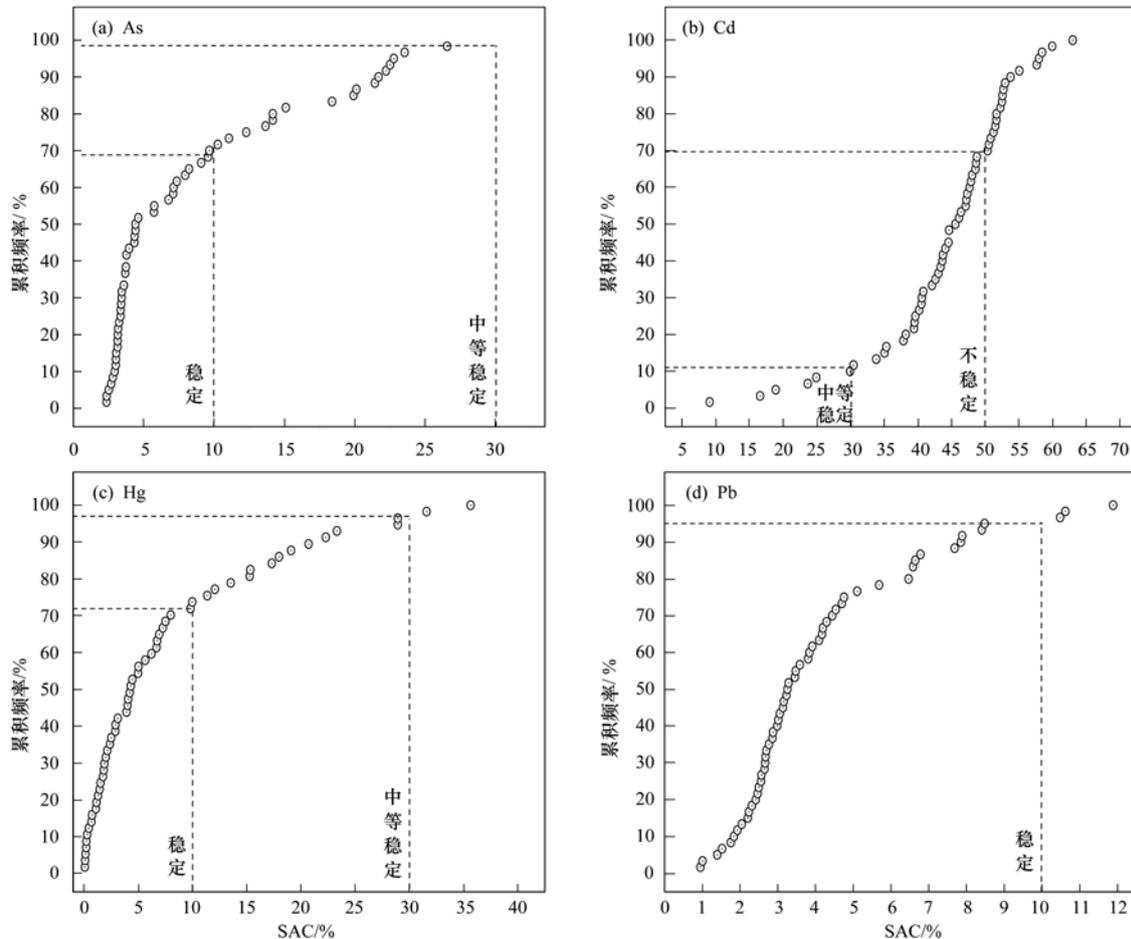


图7 蠡湖表层沉积物中 As、Cd、Hg 和 Pb 稳定性累积频率

Fig. 7 Cumulative frequency of stability of As, Cd, Hg, and Pb in surface sediments of Lihu Lake

其是 Cd, 在约 90% 的点位处于不稳定和极不稳定状态, 表明 Cd 在水体沉积物中有相当高的比例是以活性吸附形态存在的。

3.2 蠡湖表层沉积物重金属生物有效性分析

水体沉积物重金属的生物有效性指重金属能对水生生物产生毒性效应或被生物吸收的性质, 主要涉及两个明显不同的阶段: 一个是物理化学解吸过程, 另一个是生理摄取过程^[28]。由于水环境系统的复杂性和多变性, 重金属生物有效性的影响因素也很复杂, 其主要因素有: 温度、氧化还原电位、溶解氧、pH、有机质和微生物, 除此之外, 重金属的种类、浓度、形态比例等也影响着重金属的生物有效性^[29]。具体的生物有效性和生物可利用的监测方法, 主要包括 3 个方面^[30]: 间隙水体中重金属含量、单独或者连续形态萃取方法和水生生物培养试验, 而本研究主要采取间隙水和沉积物化学形态测定来评估蠡湖表层沉积物重金属的生物有效性。

间隙水化学评估能为沉积物重金属污染物的潜在生态影响, 尤其是对底栖生物的影响提供重要的

信息, 更重要的是沉积物对水生生物的毒性与间隙水体重金属的浓度直接相关, 并且间隙水中的重金属可通过化学分配、扩散、生物扰动、吸附或解吸过程进入上覆水体。为了探讨蠡湖间隙水重金属与可提取态重金属含量之间是否存在联系, 采用多元逐步回归分析法分析了表层沉积物中各形态重金属对间隙水体中重金属的“最优”回归方程, 结果见表 3。

可以看出, 除 Zn 和 Pb 外, 间隙水体中重金属浓度主要由可交换态及碳酸盐结合态 (F1) 含量决定。可交换态及碳酸盐结合态重金属以活性吸附形态存在, 通过吸附、解吸、沉淀、溶解、离子交换等过程与水相重金属进行平衡分配。间隙水中 Pb 的浓度主要由 Fe/Mn 氧化物结合态 (F2) 和有机物及硫化物结合态 (F3) 决定。Pb 的高值主要分布在入湖河口和大桥附近, 入湖河流中生活污水和工业废水带入大量的有机质及含硫污染物, 导致沉积物呈厌氧还原状态。间隙水体 Pb 的最大值 ($26.55 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 的采样点 H6, 其上覆水体溶解氧含量仅为

2.9 mg·L⁻¹. 因此,在还原条件下沉积物释放出较多的 Pb,此结果正好与可提取态 Pb 以 F2 态含量最高相符合. Zn 情况较为复杂,间隙水体 Zn 的浓度与 F3 态最为密切相关,可能是 Zn 更容易与间隙水体中溶解性有机碳(DOC)及硫化物等形成络合物.

相关性分析表明,间隙水体中 Zn 与 F1 态也显著相关($r=0.61$, $P<0.01$, $n=64$),只是 F3 态更能反映间隙水体 Zn 的变化趋势,今后会继续加强溶解性有机碳(DOC)及硫化物与重金属形态及生物有效性的响应关系研究.

表 3 蠡湖表层沉积物中不同形态重金属与间隙水体中重金属的多元逐步回归方程($n=64$)

Table 3 Multiple stepwise regression between different forms of heavy metals in surface sediments and metals in interstitial water of Lihu Lake

元素	逐步回归方程 ¹⁾	决定系数(r)	显著性检验
Cr	$y=0.81 \times F1 + 1.79$	0.47	$P<0.01$
Ni	$y=0.56 \times F1 + 3.85$	0.65	$P<0.01$
Cu	$y=0.59 \times F1 + 1.78$	0.70	$P<0.01$
Zn	$y=4.36 \times F3 + 31.95$	0.67	$P<0.01$
As	$y=2.84 \times F1 + 1.33$	0.66	$P<0.01$
Cd	$y=0.89 \times F1 + 0.1$	0.60	$P<0.01$
Hg	$y=19.86 \times F1 + 13.55 \times F3 + 0.34$	0.47, 0.53	$P<0.01$, $P<0.01$
Pb	$y=0.14 \times F2 + 0.16 \times F3 + 2.8$	0.84, 0.80	$P<0.01$, $P<0.01$

1)y 为间隙水体中各重金属的浓度, $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; F1、F2 和 F3 分别为沉积物中重金属各形态的含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

自 20 世纪 90 年代开始,蠡湖水体中污染物浓度上升加剧,湖体及其周边入湖河流水质迅速恶化至劣 V 类,成为太湖水环境恶化的重灾区. 为防止水体恶化程度进一步加深,2003 年以来对蠡湖实施了“重污染水体底泥环保疏浚与生态重建工程”,包括退渔还湖、环保疏浚、植被重建以及对周边污染河道进行闸控或封堵,使得蠡湖水质有了大幅度的改善^[31]. 本研究结果与沈亦龙等^[14]在 2003 年调查结果相比,Cr、Cu、As、Cd、Hg 和 Pb 的总量分别降低了 44.13%、66.63%、58.54%、34.64%、76.53% 和 24.78%,同时可以看出,在污染治理工程实施较多的区域(A 区和 B 区)沉积物重金属含量较低,稳定度很高,而且各重金属之间没有显著的差别,而污染治理工程实施较少的 C 区和 D 区及其河口,沉积物潜在生物可利用重金属及其间隙水中重金属含量较高,而且重金属的稳定性也较低,值得重视. 因此,今后将深入讨论不同工程治理措施对蠡湖沉积物重金属的含量和分布的影响,尤其加强各治理工程对重金属形态及稳定性影响的研究.

4 结论

(1) 蠡湖表层沉积物间隙水中各重金属分布空间差异较大,以 Cr、Cu、Zn 和 Pb 为代表的重金属的高值区沿宝界桥和蠡湖大桥成“带状”分布,以 Ni、As、Cd 和 Hg 为代表的重金属的高值区沿河口向湖区扩展,呈“扇形”分布. 生态风险评估结果表明,间隙水体中各重金属不会对水生生态系统产生急性毒性,但部分区域尤其是入湖河口的 Hg 和 Pb

可能会对底栖生物产生慢性毒性,应引起重视.

(2) 表层沉积物中 Cd、Cu 和 Ni 的可提取态金属所占质量分数较高,分别达到 71.02%、54.79% 和 50.62%,而稳定性评估表明 Cd 和 Zn 基本上都处于不稳定状态,快速解吸释放的风险较大.

(3) 多元回归统计表明,除 Pb 和 Zn 外,间隙水中各金属浓度与可交换态及碳酸盐结合态(F1)含量最为密切相关.

参考文献:

- [1] Ajmal M, Raziuddin, Khan A U. Heavy metals in water, sediments, fish and plants of river Hindon, U. P., India [J]. *Hydrobiologia*, 1987, **148**(2): 151-157.
- [2] 姜霞, 王雯雯, 王书航, 等. 竺山湾重金属污染底泥环保疏浚深度的推算[J]. *环境科学*, 2012, **33**(4): 1189-1197.
- [3] 邵丽娜, 任宗明, 张高生, 等. 烟台近海海域经济类海洋生物体内 Sn、Hg 的含量分析[J]. *环境科学*, 2011, **32**(6): 1696-1702.
- [4] 李莲芳, 曾希柏, 李国学, 等. 北京市温榆河沉积物的重金属污染风险评价[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(2): 289-297.
- [5] Vallee B L, Ullmer D D. Biochemical effects of mercury, cadmium, and lead [J]. *Annual Review of Biochemistry*, 1972, **41**: 91-128.
- [6] 范文宏, 张博, 陈静生, 等. 锦州湾沉积物中总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.
- [7] 余光伟, 雷恒毅, 刘广立, 等. 重污染感潮河道底泥释放特征及其控制技术研究[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(9): 1476-1484.
- [8] Pempkowiak J, Sikora A, Biemacka E. Speciation of heavy metals in marine sediments vs their bioaccumulation by mussels [J]. *Chemosphere*, 1999, **39**(2): 313-321.

- [9] 陈春霄, 姜霞, 战玉柱, 等. 太湖表层沉积物中重金属形态分布及其潜在生态风险分析[J]. 中国环境科学, 2010, **31**(11): 1842-1848.
- [10] Yang Z, Wang Y, Shen Z, *et al.* Distribution and speciation of heavy metals in sediments from the mainstream, tributaries, and lakes of the Yangtze River catchment of Wuhan, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **166**(2-3): 1186-1194.
- [11] Chapman D. *Water Quantity Assessment-A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring* [M]. London: E & FN Spon, 1992. 121-134.
- [12] 吴瑜端. 台湾海峡西岸主要港湾的重金属及其生态效应[A]. 见: 陈静生, 周家义. 中国水环境重金属研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992. 329-368.
- [13] 尹洪斌, 范成新, 丁世明, 等. 太湖梅梁湾与五里湖沉积物活性硫和重金属分布特征及相关性研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(7): 1791-1796.
- [14] 沈亦龙, 何晶晶, 邵立明. 太湖五里湖底泥污染特性研究[J]. 长江流域资源与环境, 2004, **13**(6): 584-588.
- [15] Davidson C M, Thomas R P, McVey S E, *et al.* Evaluation of a sequential extraction procedure for the speciation of heavy metals in sediments[J]. *Analytica Chimica Acta*, 1994, **291**(3): 277-286.
- [16] 姜霞, 王书航. 沉积物质量调查评估手册[M]. 北京: 科学出版社, 2012. 113-115.
- [17] 马英国, 万国江. 湖泊沉积物-水界面微量重金属扩散作用及其水质影响研究[J]. 环境科学, 1999, **20**(2): 7-11.
- [18] Jiang X, Wang W W, Wang S H, *et al.* Initial identification of heavy metals contamination in Taihu Lake, a eutrophic lake in China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, **24**(9): 1539-1548.
- [19] USEPA. *National Recommended Water Quality Criteria* [EB/OL]. <http://water.epa.gov/scitech/swguidance/standards/criteria/cucurre/index.cfm>, 2009.
- [20] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. *Analytical Chemistry*, 1979, **51**(7): 844-851.
- [21] 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.
- [22] 王亚平, 王岚, 许春雪, 等. pH 对长江下游沉积物中重金属元素 Cd、Pb 释放行为的影响[J]. 地质通报, 2012, **31**(4): 594-600.
- [23] 卢少勇, 焦伟, 金相灿, 等. 环太湖河流沉积物重金属污染及其稳定度分析[J]. 环境科学, 2010, **31**(10): 2311-2314.
- [24] 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): 430-435.
- [25] Ure M, Thomas P, Littlejohn D. Ammonium acetate extracts and their analysis for the speciation of metal ions in soils and sediments [J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1993, **51**(1-4): 65-84.
- [26] Thomas R P, Ure A M, Davidson C M, *et al.* Three stage sequential extraction procedure for the determination of metals in river sediments[J]. *Analytica Chimica Acta*, 1994, **286**(3): 423-429.
- [27] Singh K P, Mohan D, Singh V K, *et al.* Studies on distribution and fractionation of heavy metals in Gomti river sediments—a tributary of the Ganges, India[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, **312**(1-4): 14-27.
- [28] 何孟常. 水体沉积物重金属生物有效性及评价方法[J]. 环境科学进展, 1998, **6**(5): 9-19.
- [29] 钟晓兰, 周生路, 黄明丽, 等. 土壤重金属的形态分布特征及其影响因素[J]. 生态环境学报, 2009, **18**(4): 1266-1273.
- [30] Peijnenburg W J G M, Jager T. Monitoring approaches to assess bioaccessibility and bioavailability of metals: Matrix issues [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2003, **56**(1): 63-77.
- [31] 蔡琳琳, 朱广伟, 王永平, 等. 五里湖综合整治对湖水水质的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, **39**(5): 482-488.

CONTENTS

PUF Passive Air Sampling of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere of the Yangtze River Delta, China: Spatio-Temporal Distribution and Potential Sources	ZHANG Li-fei, YANG Wen-long, DONG Liang, <i>et al.</i> (3339)
Quantitative Analysis of Nitrate in Atmospheric Particulates PM _{2.5} with Fourier Transform Infrared Spectroscopy	LIU Na, WEI Xiu-li, GAO Min-guang, <i>et al.</i> (3347)
Study on Contribution Factor to Atmospheric ·OH by O ₃ , HONO, HCHO and H ₂ O ₂ in Spring at Mangdang Mountain, Fujian Province	LIU Hao, WANG Hui-xiang (3352)
A Review on Current Situations of Steroid Estrogen in the Water System	DU Shao-ting, JIN Chong-wei, LIU Yue (3358)
A Study on the Veterinary Antibiotics Contamination in Groundwater of Jiaying	LÜ Xing, YU Wei-juan, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3368)
Contamination Characteristics of Short-Chain Chlorinated Paraffins in Edible Fish of Shanghai	JIANG Guo, CHEN Lai-guo, HE Qiu-sheng, <i>et al.</i> (3374)
Detection of Endotoxin Activity in Water Environment and Analysis of Influence Factors for TAL Assay	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (3381)
Cellular Response of Freshwater Green Algae to the Toxicity of Tetracycline Antibiotics	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, RAO Gui-wei (3386)
Illumination's Effect on the Growth and Nitrate Reductase Activity of Typical Red-Tide Algae in the East China Sea	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, DING Yan-yan, <i>et al.</i> (3391)
Compare the Growth of <i>Enteromorpha prolifera</i> Under Different Nutrient Conditions	PANG Qiu-ting, LI Feng, LIU Xiang-qing, <i>et al.</i> (3398)
Phytoplankton Pigment Patterns and Community Structure in the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	LAI Jun-xiang, YU Zhi-ming, SONG Xiu-xian, <i>et al.</i> (3405)
Genetic Diversity of Picoeukaryotic Phytoplankton in the Lakes Along the Middle-lower Reaches of the Yangtze River	LI Sheng-nan, SHI Xiao-li, XIE Wei-wei, <i>et al.</i> (3416)
Studies on Seasonal Variation and Sources of Nitrogen and Phosphorus in a Canyon Reservoir Used as Water Source	HUANG Ting-lin, QIN Chang-hai, LI Xuan (3423)
Characteristics of Sediment Phosphorus in the Jiulong River-Reservoir System and Its Ecological Significance	LU Ting, CHEN Neng-wang, CHEN Zhu-hong, <i>et al.</i> (3430)
Variation of Nitrogen During the High Suspended Sediments Concentration Water Supply in an Artificial Shallow Lake	CHEN You-yuan, SHEN Yu, YANG Shi-ying (3437)
Limestone and Pyrite-Limestone Constructed Wetlands for Treating River Water	ZHANG Jing, LI Rui-hua, LI Jie, <i>et al.</i> (3445)
Dynamics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus Storage of Three Dominant Marsh Plants in Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LI Wen-hua, WU Ming, <i>et al.</i> (3451)
Dissolved Organic Matter Release of <i>Zizania caduciflora</i> and <i>Phragmites australis</i> from Lake Dianchi	XIE Li, YANG Hao, QU Xiao-xia, <i>et al.</i> (3458)
Influence of Tap Water Treatment on Perfluorinated Compounds Residue in the Dissolved Phase	ZHANG Hong, CHEN Qing-wu, WANG Xin-xuan, <i>et al.</i> (3467)
Study on Chlorinated Disinfection Byproducts and the Relevant Health Risk in Tap Water of J City	LI Xiao-ling, LIU Rui, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3474)
Effect of the Change in Sulphate and Dissolved Oxygen Mass Concentration on Metal Release in Old Cast Iron Distribution Pipes	WU Yong-li, SHI Bao-you, SUN Hui-fang, <i>et al.</i> (3480)
Research on Low-level Hg(II) Removal from Water by the Heavy Metal Capturing Agent	HU Yun-jun, SHENG Tian-tian, XUE Xiao-qin, <i>et al.</i> (3486)
Coagulation Characteristics of Polyferric Chloride-Poly (Epiclorohydrin-Dimethylamine) Composite Flocculant for Simulated Water Treatment	LIU Xin-xin, YANG Zhong-lian, GAO Bao-yu, <i>et al.</i> (3493)
Microstructure Morphology and Flocculation Mechanism of the Decolorizing Flocculant Poly-aluminum(III)-magnesium(II)-sulfate	SANG Yi-min, CHANG Xue-hong, CHE Yue, <i>et al.</i> (3502)
Efficient Degradation of Tetrabromobisphenol A in Water by Co-doped BiFeO ₃	OUYANG Lei, DING Yao-bin, ZHU Li-hua, <i>et al.</i> (3507)
Preparation Bimetallic Heterogeneous Fenton-Like Catalyst as Sepiolite Supported and Its Surface Chemical Characterization	SU Cheng-yuan, LI Wei-guang, LIU Xing-zhe, <i>et al.</i> (3513)
Nitrite Denitrification Characteristics with Redox Mediator	ZHAO Li-jun, MA Zhi-yuan, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (3520)
Advanced Nitrogen Removal Using Innovative Denitrification Biofilter with Sustained-Release Carbon Source Material	TANG Lei, LI Peng, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (3526)
N ₂ O Production in Nitrogen Removal by Micro-expansion of Granular Sludge	CHEN Li-li, GAO Da-wen (3532)
Sludge Dewaterability with Combined Conditioning Using Fenton's Reagent and CPAM	MA Jun-wei, LIU Jie-wei, CAO Rui, <i>et al.</i> (3538)
Kinetic Characteristics of High-rate ANAMMOX Granules	TANG Chong-jian, XIONG Lei, WANG Yun-yan, <i>et al.</i> (3544)
Monitoring Nitrogen Deposition on Temperate Grassland in Inner Mongolia	ZHANG Ju, KANG Rong-hua, ZHANG Bin, <i>et al.</i> (3552)
Non-Point Loads of Soluble Cadmium by <i>in situ</i> Field Experiment with Different Landuses, in Central Hunan Province Mining Area	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, CHEN Zhe, <i>et al.</i> (3557)
Heavy Metal Speciation and Stability in the Sediment of Lihu Lake	WANG Shu-hang, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3562)
Analysis and Evaluation of Heavy Metals Along the Chaohe River in Miyun County	YU Yang, GAO Hong-chao, MA Jun-hua, <i>et al.</i> (3572)
Magnetic Properties of Topsoils in Typical Industrial Belt Along the Yellow River in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Significance	XU Shu-jing, ZHANG Ying, YU Ye, <i>et al.</i> (3578)
Study on Composite Stabilization of Arsenic (As) Contaminated Soil	WANG Hao, PAN Li-xiang, ZHANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (3587)
Heavy Metal Contents and Enrichment Characteristics of Dominant Plants in a Lead-Zinc Tailings in Xiashuiwan of Hunan Province	HE Dong, QIU Bo, PENG Jin-hui, <i>et al.</i> (3595)
Comparison of Soil Fertility Among Open-pit Mine Reclaimed Lands in Antaibao Regenerated with Different Vegetation Types	WANG Xiang, LI Jin-chuan, YUE Jia-wei, <i>et al.</i> (3601)
Biodegradation of Triphenyltin and Its Effect on <i>Klebsiella pneumoniae</i>	YE Jin-shao, TIAN Yun, YIN Hua, <i>et al.</i> (3607)
Isolation and Degradation Characteristics of Dichloromethane-Degradation Bacterial Strain by <i>Methylobacterium rhodesianum</i> H13	LIU Hong-xia, ZHU Run-ye, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3613)
Effect of Different Primers on Microbial Community of Activated Sludge	XU Ai-ling, WU Deng-deng, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3620)
Reaction of SO ₂ over CaAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites Samples	CAO Lin, WANG Hai-lin, XIE Qiang (3627)
Optimization for MSW Logistics of New Xicheng and New Dongcheng Districts in Beijing Based on the Maximum Capacity of Transfer Stations	YUAN Jing, LI Guo-xue, ZHANG Hong-yu, LUO Yi-minget <i>al.</i> (3633)
Application of Multiple Lines of Evidence Analysis Technology in the Assessment of Sites Contaminated by Heavy Metals	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, ZHU Xiao-yong, <i>et al.</i> (3641)
Heavy Metals and Their Sources in Outdoor Settled Dusts in Different Function Areas of Cities	LI Xiao-yan, LIU Yan-qing (3648)
Study on Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Soil Heavy Metals in the Yellow River Beach Region in Kaifeng City	ZHANG Peng-yang, QIN Ming-zhou, YAN Jiang-hong, <i>et al.</i> (3654)
Study on Pollution Evaluation of Heavy Metal in Surface Soil of the Original Site of Qingdao North Station	ZHU Lei, JIA Yong-gang, PAN Yu-ying (3663)
Distribution Characteristics and Ecological Risk of Pb in Soils at a Lead Battery Plant	ZHENG Li-bao, CHEN Wei-ping, JIAO Wei-tao, <i>et al.</i> (3669)
Effect of Lead on Soil Quality and Human Health Around a Lead Smeltery	ZHOU Xiao-yong, LEI Mei, YANG Jun, <i>et al.</i> (3675)
Distribution Characteristics of Lead in Different Particle Size Fractions of Surface Soil of a Lead-acid Battery Factory Contaminated Site	YUE Xi, SUN Ti-chang, HUANG Jin-lou (3679)
Research on the Application of <i>In-situ</i> Biological Stabilization Solidification Technology in Chromium Contaminated Site Management	ZHANG Jian-rong, LI Juan, XU Wei (3684)
Research on the Effect and Technique of Remediation for Multi-Metal Contaminated Tailing Soils	ZHU Guang-xu, GUO Qing-jun, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (3690)
Analysis of Washing Efficiency and Change in Lead Speciation in Lead-contaminated Soil of a Battery Factory	REN Bei, HUANG Jin-lou, MIAO Ming-sheng (3697)
Remediation Efficiency of Lead-Contaminated Soil at an Industrial Site by Ultrasonic-assisted Chemical Extraction	WANG Xin-jie, HUANG Jin-lou, LIU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3704)
Parameters Optimization and Cleaning Efficiency Evaluation of Attrition Scrubbing Remediation of Pb-Contaminated Soil	YANG Wen, HUANG Jin-lou, PENG Hui-qing, <i>et al.</i> (3709)
Adsorption of Cd ²⁺ on Biochar from Aqueous Solution	GUO Wen-juan, LIANG Xue-feng, LIN Da-song, <i>et al.</i> (3716)
Effect of Inorganic Amendments on the Stabilization of Heavy Metals in Contaminated Soils	CAO Meng-hua, ZHU Xi, LIU Huang-cheng, <i>et al.</i> (3722)

《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)

2013年9月15日 34卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 9 Sep. 15, 2013

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行