

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第12期

Vol.33 No.12

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

特别策划:再生水灌溉利用生态风险研究专题

序	陈卫平 (4069)
再生水灌溉利用的生态风险研究进展	陈卫平, 张炜铃, 潘能, 焦文涛 (4070)
绿地再生水灌溉土壤微生物量碳及酶活性效应研究	潘能, 侯振安, 陈卫平, 焦文涛, 彭驰, 刘文 (4081)
绿地再生水灌溉土壤盐度累积及风险分析	潘能, 陈卫平, 焦文涛, 赵忠明, 侯振安 (4088)
再生水灌溉对土壤性质及重金属垂直分布的影响	赵忠明, 陈卫平, 焦文涛, 王美娥 (4094)
模型模拟再生水灌溉对土壤水盐运动的影响	吕斯丹, 陈卫平, 王美娥 (4100)
模型模拟土壤性质和植被种类对再生水灌溉水盐运移的影响	吕斯丹, 陈卫平, 王美娥 (4108)
再生水灌溉农田土壤镉累积规律模拟研究	赵忠明, 陈卫平, 焦文涛, 王美娥 (4115)
再生水灌溉土壤人工合成麝香累积模型模拟	王美娥, 陈卫平, 焦文涛 (4121)
城市绿化草坪再生水灌溉对地下水水质影响研究	王巧环, 陈卫平, 王效科, 任玉芬, 张烨 (4127)
北京市再生水的公众认知度评估	张炜铃, 陈卫平, 焦文涛 (4133)

研究报告

北京地区臭氧时空分布特征的飞机探测研究	陈鹏飞, 张蕾, 权建农, 高扬, 黄梦宇 (4141)
世博会期间上海市大气挥发性有机物排放强度及污染源研究	王红丽, 陈长虹, 黄海英, 王倩, 陈宜然, 黄成, 李莉, 张钢锋, 陈明华, 楼晟荣, 乔利平 (4151)
贡嘎山本底站大气中 VOCs 的研究	张军科, 王跃思, 吴方堃, 孙杰 (4159)
区域大气环境风险源识别与危险性评估	张晓春, 陈卫平, 马春, 詹水芬, 焦文涛 (4167)
稻草烟中正构烷烃和正构脂肪酸的碳同位素	刘刚, 孙丽娜, 李久海, 徐慧 (4173)
汽油轿车 NEDC 循环超细颗粒物排放特性	胡志远, 李金, 谭丕强, 楼狄明 (4181)
城市道路绿化带不同植物叶片附尘对大气污染的磁学响应	隆茜, 周菊珍, 孟颖, 达良俊 (4188)
闽江口养殖塘水-大气界面温室气体通量日进程特征	杨平, 仝川, 何清华, 黄佳芳 (4194)
模拟增温对冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸的影响	刘艳, 陈书涛, 胡正华, 任景全, 沈小帅 (4205)
广西大石围天坑中多环芳烃的大气传输与分异	孔祥胜, 祁士华, 孙莺, 黄保健 (4212)
松花江流域冰封期水体中多环芳烃的污染特征研究	马万里, 刘丽艳, 齐虹, 白杨, 沈吉敏, 陈忠林, 李一凡 (4220)
温州城市河流中多环芳烃的污染特征及其来源	周婕成, 陈振楼, 毕春娟, 吕金刚, 许世远, 潘琪 (4226)
温州城市河流河岸带土壤中 PAHs 的污染特征与来源	周婕成, 毕春娟, 陈振楼, 王璐, 许世远, 潘琪 (4237)
辽河水系沉积物中 PAHs 的分布特征及风险评估	武江越, 刘征涛, 周俊丽, 高富 (4244)
某炼油厂退役场地土壤与浅层地下水酚类污染特征研究	裴芳, 罗泽娇, 彭进进, 祁士华 (4251)
某大型焦化企业污染场地中多环芳烃空间分布的分异性特征	刘庚, 郭观林, 南锋, 魏文侠, 李发生, 毕如田 (4256)
太原市污灌区有机氯农药垂直分布特征及源解析	廖小平, 张彩香, 赵旭, 向青清, 李佳乐 (4263)
上海市崇明岛农田土壤中多环芳烃分布和生态风险评价	吕金刚, 毕春娟, 陈振楼, 周婕成, 韩景超 (4270)
近 50 年来深圳湾红树林湿地 Hg、Cu 累积及其生态危害评价	李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 贺蓓 (4276)
北运河源头区沙河水库沉积物重金属污染特征研究	张伟, 张洪, 单保庆 (4284)
太湖表层沉积物重金属赋存形态分析及污染特征	秦延文, 张雷, 郑丙辉, 曹伟 (4291)
典型季风型温冰川消融期融水化学日变化特征	朱国锋, 蒲焘, 何元庆, 王培震, 张建龙, 张宁宁, 辛惠娟 (4300)
螺-草水质净化系统氮素环境归趋的实验研究	周露洪, 谷孝鸿, 曾庆飞, 毛志刚, 高华梅, 孙明波 (4307)
固定化果胶酶抑制铜绿微囊藻生长研究	沈清清, 彭谦, 赖泳红, 纪开燕, 韩秀林 (4316)
采用膜污染指数评估天然有机物在低压超滤膜中的污染行为	肖萍, 肖峰, 赵锦辉, 秦潼, 王东升, 冯金荣, 许光 (4322)
水体中甲基汞光化学降解特征研究	孙荣国, 毛雯, 马明, 张成, 王定勇 (4329)
土霉素在乙酸水溶液中的臭氧氧化降解研究	李时银, 李小荣, 朱怡苹, 朱江鹏, 王国祥 (4335)
酰胺咪唑光降解效能与机制及其影响因素研究	陈超, 赵倩, 封莉, 张立秋 (4340)
利用 FeS 去除水中硝基苯的试验研究	王夏琳, 李睿华 (4346)
地下污水管线泄漏原位自动监测模拟实验研究	郭磊, 贾永刚, 付腾飞, 刘晓磊, 赵战坤 (4352)
表面活性剂改性沸石对水中酚类化合物吸附性能研究	谢杰, 王哲, 吴德意, 李春杰 (4361)
抗生素类制药废水厌氧消化产物急性毒性的检测	季军远, 邢雅娟, 郑平 (4367)
废砖块作为人工湿地填料的除磷能力研究	王振, 刘超翔, 李鹏宇, 董健, 刘琳, 朱葛夫 (4373)
基于生物沸石复合滤料的间歇式脱氮水处理	庆承松, 鲍韬, 陈天虎, 陈冬, 谢晶晶 (4380)
硝酸盐对厌氧生物膜和颗粒污泥的同时产甲烷反硝化性能影响研究	钟晨宇, 叶杰旭, 李若愚, 陈胜, 孙德智 (4387)
水平电场作用下活性污泥的脱水研究	季雪元, 王毅力, 冯晶 (4393)
多重环境因子对氟胺磺隆在土壤中降解的影响	宋宁慧, 单正军, 石利利, 郭敏, 许静, 孔德洋 (4400)
碱后处理对互花米草沼渣理化特性的影响研究	陈广银, 郑正, 常志州, 王海芹, 叶小梅 (4406)
含砷废渣高温烧结过程砷的矿物相结构变化与环境释放行为	王兴润, 农泽喜, 王琪 (4412)
国家大气污染物排放标准体系研究	江梅, 张国宁, 张明慧, 邹兰, 魏玉霞, 任春 (4417)
环境基准向环境标准转化的机制探讨	毕岑岑, 王铁宇, 吕永龙 (4422)
对“有毒重金属”实施 2 种总量控制监管方式的利害分析	傅国伟 (4428)
《环境科学》第 33 卷(2012 年)总目录	(4434)
《环境科学》征订启事(4099)	《环境科学》征稿简则(4166)
信息(4180, 4219, 4225, 4275)	编辑征稿通知(4172)

太湖表层沉积物重金属赋存形态分析及污染特征

秦延文, 张雷, 郑丙辉, 曹伟

(中国环境科学研究院国家环境保护河口与海岸带环境重点实验室, 北京 100012)

摘要: 为了解太湖表层沉积物中重金属的污染状况, 对太湖表层沉积物中 4 种重金属 (Cd、Pb、Cu、Zn) 的含量及空间分布分别进行了对比研究, 并采用 BCR 三步分级提取法分析了太湖表层沉积物中 4 种重金属 (Cd、Pb、Cu、Zn) 不同赋存形态的含量, 评估了这 4 种重金属的生物有效性, 最后采用潜在生态危害指数法对重金属污染程度及潜在生态危害进行了评价。结果表明, 太湖表层沉积物中 4 种重金属元素均有一定程度的富集, 其中 Cd 的富集程度最为严重; 赋存形态分析表明 4 种金属均主要以可提取态形式存在, 各元素生物有效性即可提取态含量排序为: Cd > Pb > Zn > Cu; 潜在生态危害指数法评价结果表明, 元素 Cd 为太湖表层沉积物中最主要的污染元素, 且具有较强的生态危害。其次是 Pb, Cu 和 Zn 则较为轻微。4 种重金属潜在生态危害由大到小排序为: Cd > Pb > Cu > Zn。

关键词: 太湖; 表层沉积物; 重金属; 形态; 污染评价

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)12-4291-09

Speciation and Pollution Characteristics of Heavy Metals in the Sediment of Taihu Lake

QIN Yan-wen, ZHANG Lei, ZHENG Bing-hui, CAO Wei

(State Environmental Protection Key Laboratory of Estuary and Coastal Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: To explore the condition of heavy metal pollution of Taihu Lake, the contents and spatial distribution of Cd, Pb, Cu and Zn in surface sediments of Taihu Lake were studied respectively. BCR three stages sequential extraction procedure was applied to investigate the speciation and contents of four heavy metals (Cd, Pb, Cu, Zn) in the surface sediments of Taihu Lake. And the bioavailability of these four heavy metals was also determined preliminarily. At last the contamination and potential ecological risk of these elements were evaluated by potential ecological risk index. The results indicated that all 4 elements in surface sediments of Taihu Lake were enriched to some extent, especially Cd. All of these four metals existed mainly in extractable fractions which included weak soluble fraction, reducible fraction and oxidisable fraction, and the bioavailability of four metals varied with a descending order of Cd > Pb > Zn > Cu. The comprehensive assessment results showed that Cd was the primary element with high ecological risk while Pb, Cu, Zn were slight, and the order of ecological risk was Cd > Pb > Cu > Zn.

Key words: Taihu Lake; surface sediment; heavy metal; speciation; pollution evaluation

水系沉积物作为污染物的储备库,既可以接纳污染物,也可以再次向水体释放,形成二次污染。因此,水体沉积物是潜在的主要重金属污染源之一,是进行重金属污染评价的重要依据^[1]。与水体相比,沉积物中重金属具有丰度高、易于准确检测等特点,重金属相对于其环境本底值的变化直接反映了一个地区的环境质量,因而水体沉积物重金属变化具有重要的环境指示意义,是环境评价中的一个重要指标。沉积物中重金属的环境行为和生物有效性及毒性不仅与重金属的总量有关,而且与重金属的地球化学形态也密切相关。重金属赋存形态是判断沉积物中重金属的毒性响应以及生态风险的重要指标^[2,3],形态不同,重金属活性、生物毒性与迁移特征也不同^[4],且沉积环境的变化也会使重金属在颗粒态和溶解态之间发生转化^[5~9],因此,相对于总

量,重金属赋存形态的研究对于了解重金属的来源、迁移转化规律和生物有效性等具有更为重要的意义。目前,关于沉积物重金属形态分析,应用较广的形态分级方法有 Tessier 等^[10]提出的 5 步提取法和 1993 年欧共体标准局提出的相对简化的“3 步形态分类法”,即 BCR 形态分析法^[11],BCR 法被证明是可以在不同地区获得可比数据的成熟方法^[12,13]。

太湖位于我国东部长江三角洲平原上,是一个大型的浅水湖泊。70 年代末期以来,太湖流域经济快速发展,煤、石油等燃料的消耗量增加,皮革、电镀、造纸、印染、黑色金属冶炼、化工等工业废水

收稿日期: 2012-02-03; 修订日期: 2012-04-11

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2009ZX07528-002, 2012ZX07503-002)

作者简介: 秦延文 (1973 ~), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为河口污染物生物地球化学循环方面, E-mail: qinyw@ craes. org. cn

及生活污水通过河道进入太湖^[14],湖泊富营养化及重金属污染日益加重,污染元素在底泥中不断积累.关于太湖沉积物重金属污染情况已有一些报道,如刘恩峰等^[15,16]、袁和忠等^[17]等研究了太湖沉积物中重金属的变化特征及污染历史,认为其污染历史与该区经济发展阶段相吻合,太湖重金属含量高于地壳中的背景值,存在一定的潜在生物毒性.但以往科研人员主要集中于太湖沉积物重金属总量及年代测定的研究,对重金属形态的研究较少,并且未对重金属总量、赋存形态及生态危害进行综合研究.

本研究选取太湖表层沉积物为对象,选择 BCR 形态分析法,结合潜在生态危害指数法^[18],对太湖表层沉积物中不同重金属含量、赋存形态及其生态危害进行了分析,以期对太湖水系沉积物中重金属污染状况和环境质量的改进提供基础数据.

1 材料与方法

1.1 调查区域与站位设置

本次现场调查区域选取受人类活动影响大、水体质量较差,底泥分布集中和污染严重的沿岸带、入湖河口、湖湾区等代表区域,共 30 个采样点,采样时间为 2011-08-28 ~ 2011-09-02,采样点分布情况见图 1.

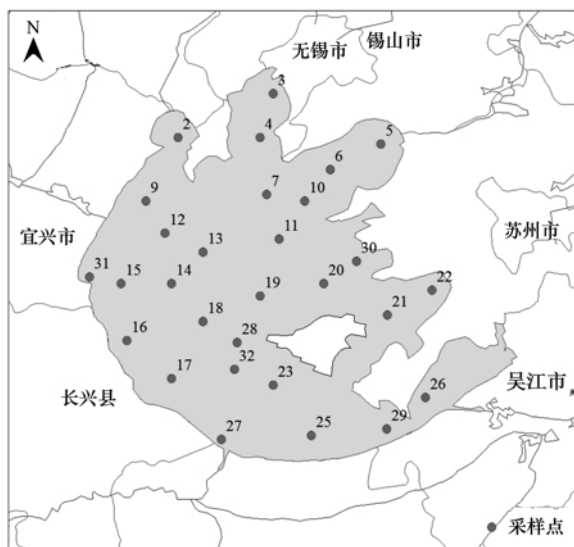


图 1 太湖采样断面示意

Fig. 1 Location of sampling sites of Taihu Lake

1.2 样品采集与处理

用抓斗式重力采泥器采集表层沉积物样品,用木勺取顶部 0 ~ 5 cm 表层沉积物,将样品装入聚乙烯袋中密封,在实验室中于 -20℃ 条件下冷冻保存,经 FD-1A-50 型冷冻干燥机(西安德派生物仪器有

限公司)冷冻干燥处理,用重物捣碎研磨,过 100 目 (0.149 nm) 筛,然后保存于封口袋中,置于干燥器中备用.

1.3 测试项目与方法

本研究中沉积物重金属形态分析采用 BCR 形态分析法,BCR 法将沉积物重金属赋存形态分为 4 类,分别是弱酸溶解态(简称 B1 态)、可还原态(简称 B2 态)、可氧化态(简称 B3 态)和残渣态(简称 B4 态)^[19].重金属赋存提取方法如下.

准确称取 1.00 g 表层沉积物样品置于聚丙烯塑料具塞离心试管中,按以下步骤平行(3 次)分级提取.

B1 态:加入 0.1 mol·L⁻¹ HAc 溶液 40.0 mL,在 22℃ ± 5℃ 下振荡提取 16 h,以 3 000 r·min⁻¹ 离心分离 30 min,取其上清液,残渣分别用 8 mL 0.1 mol·L⁻¹ HAc 溶液清洗,离心分离,取其上清液合并于提取液中,0.45 μm 滤膜过滤,0.1 mol·L⁻¹ HAc 溶液定容至 100 mL 比色管待测,残渣留作下一步分级提取物.

B2 态:在 B1 态残渣中,加入 0.5 mol·L⁻¹ NH₂OH·HCl 40 mL(用 HNO₃ 调 pH 值 = 2.0),22℃ ± 5℃ 下振荡 16 h,以 3 000 r·min⁻¹ 离心分离 30 min,取其上清液,不溶物洗涤步骤同上,残渣留作下一分级提取物.

B3 态:在 B2 态残渣中,滴加 10 mL(用 HNO₃ 调 pH 值 2 ~ 3)30% H₂O₂ 溶液,缓慢地以小体积加入到上步残渣离心管中,室温消解 1 h.加热至 85℃ ± 2℃ 水浴下消解 1 h,去掉盖子水浴加热至小体积,再加入 10 mL H₂O₂ 溶液,加热至 85℃ ± 2℃ 消解 1 h,冷却后,加入 50 mL 1.0 mol·L⁻¹ 溶液 NH₄OAc(用硝酸将 pH 调节为 2.0 ± 0.1),22℃ ± 5℃ 下振荡提取 16 h,以 3 000 r·min⁻¹ 离心分离 30 min,不溶物洗涤步骤同上,残渣留作下一分级提取物.

B4 态:将 B3 态提取后的残渣冷冻干燥后进行分析.

各形态提取液中重金属元素含量利用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS, Agilent 7500cx 型)测定,仪器的检出限为 10⁻¹² 级,精密度短期为 1% ~ 3% RSD,长期(几个小时)为 ≤ 5% RSD^[20~24].重金属元素的总量取各形态重金属元素含量之和.

沉积物有机质含量(TOC)采用重铬酸钾容量法测定;沉积物粒度使用英国 Malvern 公司的 Mastersizer 2000 型激光粒度分析仪进行测定.

2 结果与讨论

2.1 沉积物地球化学特性

太湖表层沉积物的粒度组成较细,组成类型主要为粉砂,其粉砂含量平均值高达 72.25%;其次是黏土,平均含量占 16.99% (如图 2 所示)。

沉积物有机质含量(质量分数)在 0.64% ~ 2.66% 范围内,平均含量为 1.38%。竺山湾、梅梁湾和贡湖区域污染较为严重,其余沿岸湖区次之,胥湖和东太湖污染情况较轻(如图 2)。

Fe、Al、Mn 是含量丰富重要地球化学元素。Fe、Al、Mn 的水合(氢)氧化物是沉积物中重要的无机胶体,其主要代表为针铁矿(α -FeOOH)、水铝矿、水锰矿(γ -MnOOH)等,它们的巨大比表面积

及其表面的化学活性使其具有对众多的重金属、金属及含氧阴离子的吸附能力,可以通过吸附、共沉淀等作用而影响沉积物中重金属的含量。它们的这些能力和作用具有十分重要的环境学意义。太湖表层沉积物中 Fe 的含量在 21 149.66 ~ 37 174.17 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围内,平均含量为 28 283.90 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Al 的含量在 60 841.91 ~ 85 857.64 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,平均含量为 75 145.72 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Mn 含量在 383.14 ~ 1 075.37 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围内,平均含量为 680.43 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。由图 2 可知,Fe、Al、Mn 这 3 种金属的分布特征很相似,竺山湾、梅梁湾及沿岸湖区的三者含量均较高;贡湖的 Fe 含量较高,Al 和 Mn 的含量较低;东太湖和胥湖三者的含量均较低。

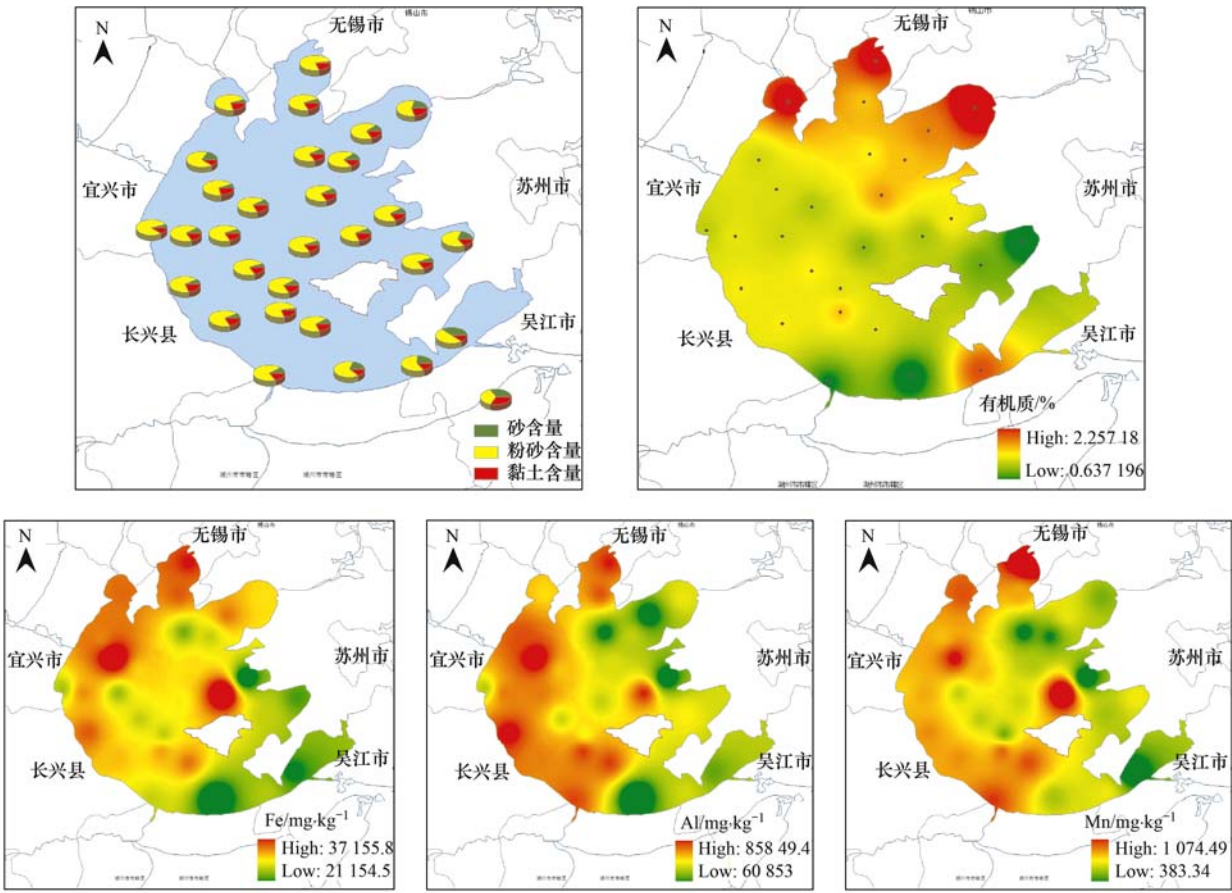


图 2 太湖表层沉积物粒度、有机质、Fe、Al、Mn 含量分布

Fig. 2 Spatial distribution of grain-size, content of organic matter and Fe, Al, Mn in Taihu Lake

2.2 表层沉积物中重金属含量与空间分布特征

根据太湖重金属的特点,选择太湖沉积物中受人为污染影响较大且对环境影响较大的 4 种重金属 Cu、Pb、Zn、Cd 为研究对象。由于目前国内环境质量标准中尚无河流沉积物的质量标准,因此本研究

以太湖沉积物质量背景值作为评价重金属污染的主要依据,对太湖表层沉积物 4 种重金属含量与太湖沉积物中重金属背景值进行了对比(表 1)。

通过对比可以发现,Pb、Cd 的含量均超过了太湖沉积物的背景值,其中 Cd 的富集情况最为严重,

表 1 太湖表层沉积物重金属元素含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 1 Content of heavy metal in surface sediment of Taihu Lake/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

项目	重金属元素			
	Cu	Pb	Zn	Cd
最小值	14.03	29.20	32.50	0.20
最大值	39.22	74.48	111.06	2.88
平均值	22.24	38.27	57.35	0.45
太湖沉积物背景值	25.00	22.00	62.60	0.13

平均值超过太湖沉积物背景值的 3 倍多. Cu、Zn 的平均含量小于背景值,富集程度相对较轻. Cd 的高含量源于废水的排放,十多年来太湖沿岸乡镇工业发展迅速,产出了大量的工业废水,增加了 Cd 的含量; Pb 高值的原因比较特殊,既有污水排放,又有相当一部分为大气沉降引起. 因为许多燃油可以排放出含铅废气,太湖上航行的船大多使用汽油或柴油,它们排放的含铅废气直接沉降在水面,由于 Pb 比重大,将很快沉降在沉积物上,因此重金属的污染

都是由人类活动引起.

(1) Cu 分布特征 全湖 Cu 的含量在 $14.03 \sim 39.22 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 $22.24 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 竺山湾、梅梁湾和贡湖区域污染最为严重,其余沿岸湖区次之,胥湖和东太湖污染情况最轻.

(2) Zn 分布特征 全湖 Zn 的含量在 $32.50 \sim 111.06 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 $57.35 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 其中最大值出现在梅梁湾. 从全湖平均水平来看,竺山湾、梅梁湾和贡湖区域污染最为严重,湖心区污染较轻,胥湖和东太湖污染情况最轻.

(3) Pb 分布特征 全湖 Pb 的含量在 $29.20 \sim 74.48 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 $38.27 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 从全湖平均水平来看,高值区主要集中于沿岸湖区及梅梁湾和贡湖区,其次是湖心区污染较轻,胥湖和东太湖污染情最轻.

(4) Cd 分布特征 全湖 Cd 的含量在 $0.20 \sim 2.88 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 $0.45 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 从全

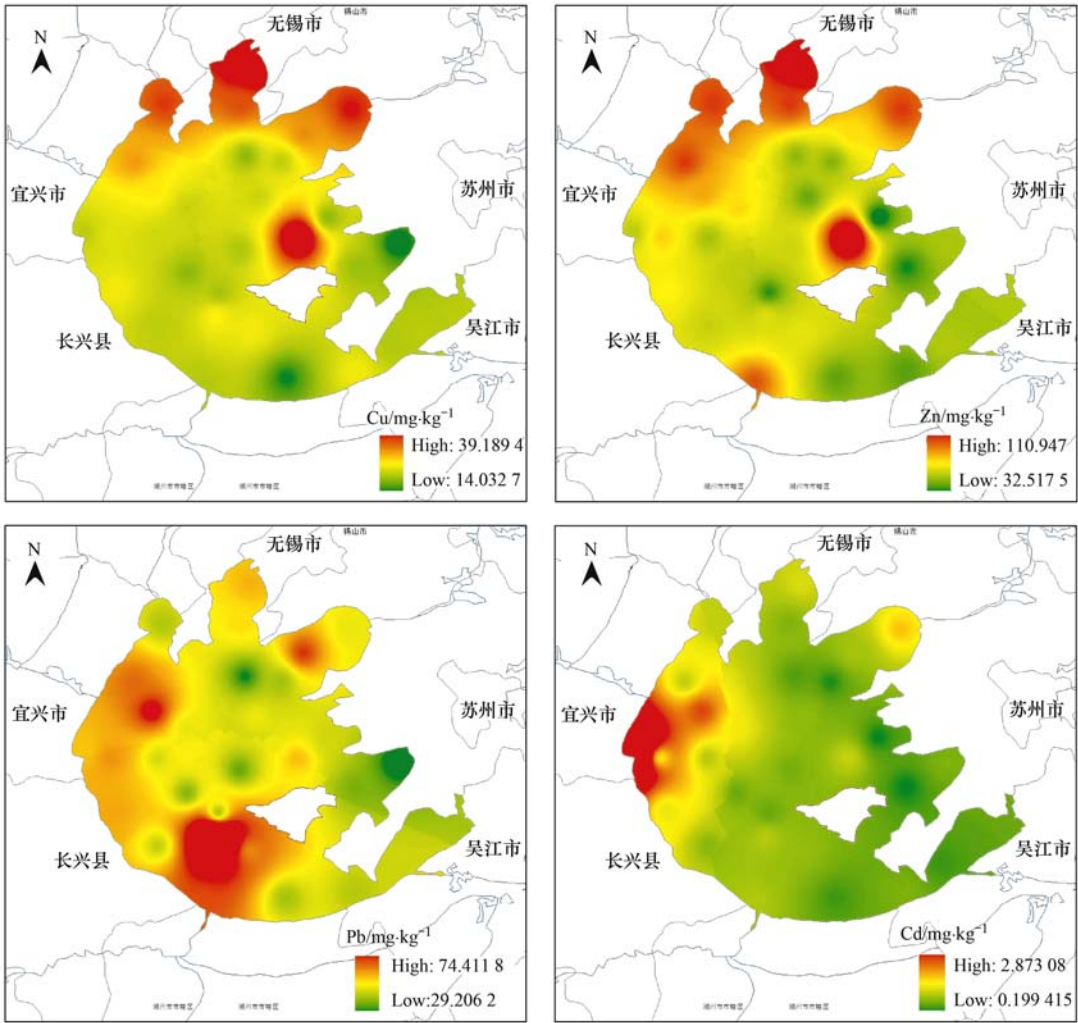


图 3 太湖沉积物 Cu、Pb、Zn、Cd 的含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Fig. 3 Content of Cu, Pb, Zn, Cd in the surface sediments of Taihu Lake/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

湖平均水平来看,高值区主要集中在宜兴市沿岸湖区,其次是竺山湾、梅梁湾和贡湖区,其余水域污染情况较轻.

总体来说,4 种重金属在胥湖、东太湖和湖心区污染较轻,沿湖区、竺山湾、梅梁湾和贡湖区等区域污染严重,这种空间分布特征主要与周边经济发展和人民生活关系密切. 由于湖湾周边经济发展较快,居住人口众多,因而污染状况显得愈加明显.

2.3 表层沉积物重金属含量与其地化指标的关系

通过对重金属元素及沉积物特征参数之间的相

关性分析可以确定沉积物中重金属的来源及其含量变化的控制因素^[25]. 本研究对重金属元素的含量与粒度、有机质的含量进行相关分析,获得相关关系矩阵,如表 2 所示. 4 种主要污染元素中的 Cu 和 Zn 与沉积物中黏土的含量显著相关,说明黏土含量与这 2 种重金属在水环境中的行为存在密切关系. 4 种主要污染元素 (Cu、Pb、Zn、Cd) 与有机质的相关性低,说明有机质含量不是影响该水域重金属污染的主要环境因子. Cu 和 Zn 相互之间的相关性比较明显,说明了它们之间具有一定的同源特性.

表 2 太湖沉积物地化性质与重金属总量间的相关分析¹⁾

Table 2 Correlation matrix of geochemical characters of sediment and heavy metal contents

	粉砂	黏土	有机质	Cu	Pb	Zn	Cd
粉砂	1						
黏土	0.185	1					
有机质	-0.614 **	-0.076	1				
Cu	0.001	0.518 **	0.254	1			
Pb	0.197	0.283	0.005	0.223	1.000		
Zn	0.008	0.440 *	0.088	0.884 **	0.215	1.000	
Cd	0.298	-0.15	-0.075	0.037	0.114	0.073	1.000

1) * 表示显著性相关(显著性水平 $P < 0.05$), ** 表示极显著相关(显著性水平 $P < 0.01$)

2.4 表层沉积物中重金属赋存形态及其空间分布特征

2.4.1 BCR 法重金属各形态的地球化学性质

B1 态包括可交换态及碳酸盐结合态. 可交换态是指重金属元素被吸附在黏土、腐殖质及其他成分上的部分,对环境变化敏感,在中性条件下即可被释放出来,易于迁移转化,具有较强的生物活性. 碳酸盐结合态是指重金属与碳酸盐矿物形成的共沉淀结合形态,对 pH 敏感,在酸性条件下容易释放. 以 B1 态存在的金属对环境变化敏感,在中性或酸性条件下容易释放.

B2 态即铁锰氧化物结合态,指重金属元素被铁锰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,但在水体氧化还原电位降低或水体缺氧时易释放出重金属元素,对水体造成二次污染.

B3 态包括有机物及硫化物结合态,指重金属元素与有机质活性基团或硫离子结合的部分,只有在强氧化条件下才可能释放出来,对水体存在潜在的危害性.

B4 态即残渣态,是指重金属被包含在原生矿物和次生硅酸盐矿物晶格中的部分,性质十分稳定,对沉积物重金属的迁移和生物可利用性贡献不大,因此一般认为对环境是安全的^[26~28].

前 3 种形态统称为可提取态^[29~31],为可被生物

所利用的形态. 大量研究表明,未受人为污染的沉积物中重金属元素具有相对稳定的形态组成;而沉积物受到重金属元素人为污染后,其重金属元素可提取态含量会明显增加,由此可以判断重金属的人为污染情况^[32,33].

2.4.2 重金属的赋存形态及分布特征

太湖重金属形态分布如图 4 所示.

Cu 的赋存形态以可提取态为主,所占质量分数为 59.5%. 可提取态中以 B2 态为主,说明 Cu 具有较强的潜在危害,但迁移性较弱.

Zn 的可提取态所占质量分数为 71.1%,其中 B2 态和 B3 态所占质量分数分别为 28.6% 和 26.5%,为可提取态中主要的存在形式.

Pb 的赋存形态以可提取态为主,所占质量分数为 75.5%. 在 Pb 的可提取态中,B2 态为主要的赋存形态,所占质量分数达到 58.8%,可知 Pb 具有较强的潜在危害,但水溶性及迁移性较弱.

Cd 的赋存形态极为明显,可提取态质量分数占到 90.3%. 在可提取态中,B1 态为主要的赋存形态,所占质量分数为 59.6%,其次是 B2 态,说明 Cd 具有极强的迁移性和生态危害.

总体来看,太湖表层沉积物中 Cd 为最主要的污染元素,其总量高且具有极强的迁移性和生态危害;Pb 元素的 B2 态富集程度较高,潜在环境危害也较强;4 种金属潜在危害程度大小的顺序为 Cd

(90.3%) > Pb (75.5%) > Zn (71.1%) > Cu (59.5%),都具有非常高的二次释放能力. 太湖表

层沉积物中 Cu、Zn、Pb 和 Cd 以极高的比例赋存于沉积物可提取态中,说明 4 种重金属人为污染严重.

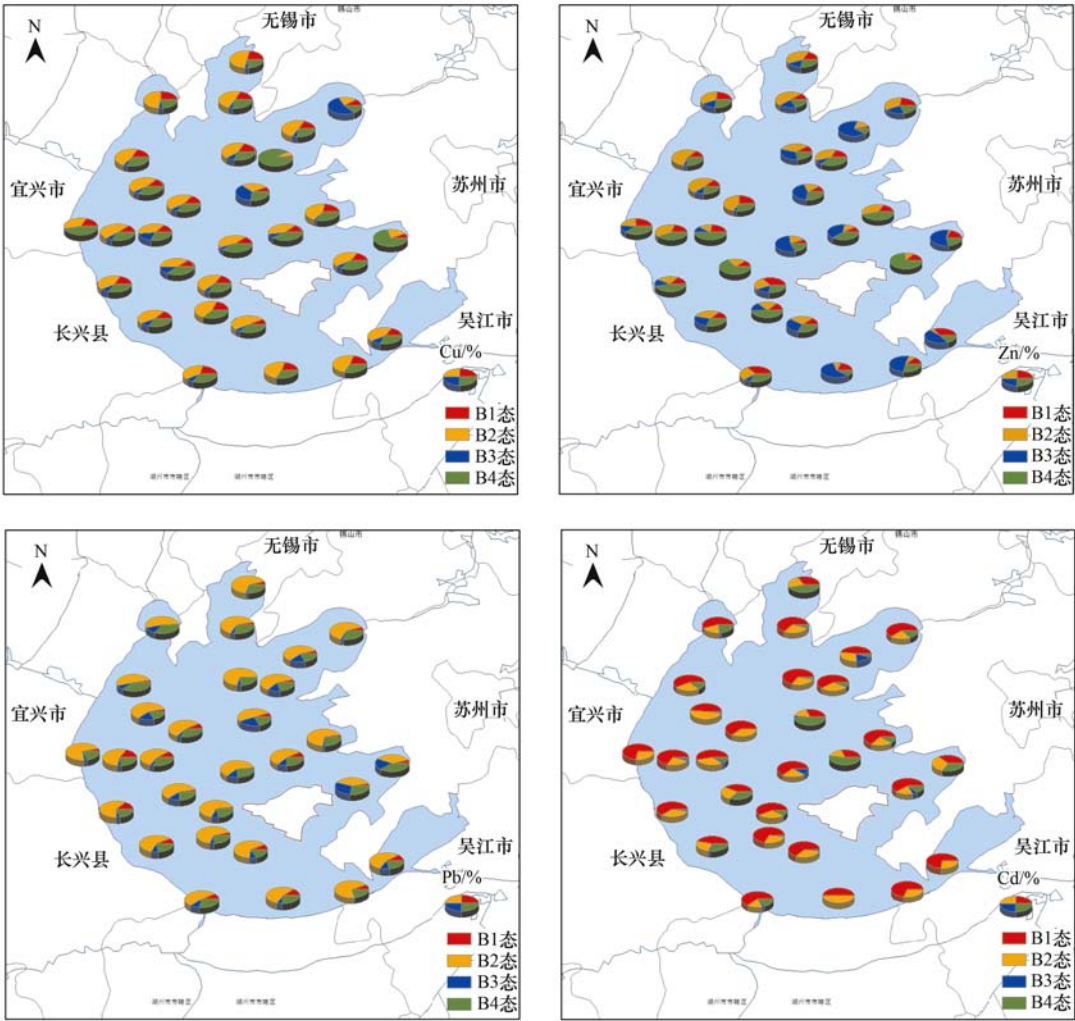


图 4 太湖沉积物形态分布特征
Fig. 4 Speciation of Cd, Pb, Cu and Zn in the surface sediments of Taihu Lake

3 沉积物重金属潜在生态危害评价

Håkanson 提出的潜在生态危害指数法是目前应用较多的评价沉积物中重金属的生态危害的方法,该方法从沉积学角度对沉积物中重金属污染进行评价,利用沉积物中重金属相对于工业化以前沉积物的最高背景值的比值,并将重金属的生态效应、环境效应和生物毒性系数联系在一起,得到生态危害指数^[18]. 潜在生态危害指数法的计算公式如下:

$$f_i = c_i/B_i \tag{1}$$

$$E_i = T_i \cdot f_i \tag{2}$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n T_i \cdot f_i = \sum_{i=1}^n T_i \cdot c_i/B_i \tag{3}$$

式中, f_i 为第 i 种重金属的污染系数; c_i 为沉积物中第 i 种重金属的实测含量; B_i 为重金属 i 的评价参比值; E_i 为单个重金属的潜在生态危害系数; T_i 为单个污染物的毒性响应参数,反映重金属的毒性水平及生物对重金属污染的敏感程度; RI 为多种重金属潜在生态风险危害指数,等于所有重金属潜在生态危害系数的总和. 重金属污染程度及潜在生态危害分级划分标准见表 3.

将太湖调查水域各重金属元素的实测浓度代入公式(1)~(3), B_i 选用国际上常用的工业化以前沉积物中重金属的全球最高背景值(Cu、Pb、Zn、Cd 分别取值 30、25、80、0.50 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[34,35]; 重金属元素 Cu、Pb、Zn、Cd 的毒性响应参数 T_i 分别为 5、5、1、30^[3], 计算得本次太湖调查水域沉积物中重

金属的污染系数 f_i 和潜在生态危害系数 E_i 及重金属潜在生态危害指数 RI 值,见表 4.

表 3 重金属污染程度及潜在生态危害等级划分标准

Table 3 Dividing standards of heavy metal pollution and ecological risk levels

f_i 范围	单个污染物污染程度	E_i 范围	单个污染物生态危害程度	RI 范围	总潜在生态危害程度
$f_i < 1$	轻微	$E_i < 40$	轻微	$RI < 150$	轻微
$1 \leq f_i < 3$	中等	$40 \leq E_i < 80$	中等	$150 \leq RI < 300$	中等
$3 \leq f_i < 6$	强	$80 \leq E_i < 160$	强	$300 \leq RI < 600$	强
$f_i \geq 6$	很强	$160 \leq E_i < 320$	很强	$RI \geq 600$	很强
		$E_i \geq 320$	极强		

表 4 太湖沉积物中重金属污染系数及潜在生态危害指数

Table 4 The f_i , E_i and RI of heavy metals in surface sediment of Taihu Lake

水域	f_i				E_i				RI
	Cu	Pb	Zn	Cd	Cu	Pb	Zn	Cd	
TH-2	0.98	1.37	0.97	0.82	4.91	6.85	0.97	24.63	37.37
TH-3	1.28	1.59	1.24	0.90	6.40	7.95	1.24	27.00	42.59
TH-4	0.96	1.53	0.98	0.62	4.80	7.65	0.98	18.58	32.01
TH-5	1.01	1.46	0.97	1.20	5.07	7.29	0.97	35.93	49.26
TH-6	0.88	1.77	0.76	0.72	4.38	8.84	0.76	21.71	35.69
TH-7	0.60	1.21	0.56	0.50	2.99	6.06	0.56	15.00	24.61
TH-9	0.86	1.70	0.98	0.82	4.30	8.48	0.98	24.58	38.33
TH-10	0.66	1.35	0.55	0.42	3.29	6.76	0.55	12.60	23.20
TH-11	0.67	1.46	0.52	0.66	3.37	7.31	0.52	19.72	30.92
TH-12	0.77	1.87	0.83	1.63	3.84	9.34	0.83	49.00	63.01
TH-13	0.67	1.45	0.76	1.00	3.34	7.27	0.76	30.06	41.44
TH-14	0.68	1.43	0.59	0.78	3.38	7.13	0.59	23.35	34.45
TH-15	0.70	1.63	0.77	1.10	3.51	8.17	0.77	32.93	45.38
TH-16	0.73	1.61	0.73	0.96	3.66	8.03	0.73	28.77	41.20
TH-17	0.65	1.40	0.64	0.64	3.27	7.00	0.64	19.20	30.10
TH-18	0.60	1.32	0.62	0.56	2.99	6.58	0.62	16.88	27.09
TH-19	0.64	1.28	0.64	0.60	3.18	6.42	0.64	17.98	28.21
TH-20	1.31	1.57	1.39	0.84	6.54	7.85	1.39	25.15	40.92
TH-21	0.61	1.30	0.46	0.40	3.06	6.51	0.46	11.96	21.99
TH-22	0.47	1.17	0.59	0.62	2.34	5.84	0.59	18.51	27.28
TH-23	0.73	1.65	0.68	0.68	3.65	8.26	0.68	20.36	32.95
TH-24	0.64	1.60	0.55	0.62	3.22	7.98	0.55	18.60	30.34
TH-25	0.50	1.36	0.51	0.46	2.48	6.78	0.51	13.81	23.58
TH-26	0.64	1.41	0.60	0.46	3.20	7.04	0.60	13.80	24.64
TH-27	0.64	1.74	0.94	0.76	3.21	8.71	0.94	22.78	35.65
TH-28	0.62	1.37	0.47	0.56	3.12	6.84	0.47	16.73	27.17
TH-29	0.73	1.38	0.50	0.62	3.64	6.89	0.50	18.51	29.54
TH-30	0.60	1.42	0.41	0.40	3.01	7.08	0.41	11.99	22.48
TH-31	0.66	1.56	0.62	5.75	3.29	7.79	0.62	172.54	184.24
TH-32	0.76	2.98	0.67	0.78	3.78	14.90	0.67	23.33	42.67
平均	0.74	1.53	0.72	0.90	3.71	7.65	0.72	26.87	38.94

从单个重金属的污染指数 f_i 来评价,可以看出,太湖表层沉积物中重金属平均污染程度轻微,在所研究的 4 种金属中,Pb 和 Cd 污染相对比较严重.Zn 和 Cu 的污染程度较低. 4 种重金属污染程度由大到小排序为:Pb > Cd > Cu > Zn.

从单个重金属潜在生态危害指数 E_i 来评价,可以看出,太湖表层沉积物中重金属潜在危害状态为

轻微,相对而言,Cd 的平均潜在生态危害程度较强,其次是 Pb、Cu 和 Zn 则较为轻微. 4 种重金属潜在生态危害由大到小排序为:Cd > Pb > Cu > Zn.

从多种重金属潜在生态危害指数 RI 来评价,可以看出,太湖表层沉积物的 RI 指数为轻微. 各站点 RI 值中 Cd 的贡献比例最大,这主要是由于太湖调查水域表层沉积物中 Cd 总量高于背景值,且 Cd 毒

性水平较高所致。

4 结论

(1)与太湖沉积物背景值相比,太湖表层沉积物中重金属元素 Cu、Pb、Zn、Cd 均有不同程度的富集,富集程度排序为: Cd > Pb > Cu > Zn。

(2)太湖表层沉积物中重金属元素 Cu、Pb、Zn、Cd 主要以可提取态形式存在,说明 4 中金属元素受人为影响比较大,各元素生物有效性即可提取态含量大小依次为: Cd(90.3%) > Pb(75.5%) > Zn(71.1%) > Cu(59.5%),都具有非常高的二次释放能力,对太湖环境具有潜在的危害。

(3)潜在生态危害法评价结果表明,太湖表层沉积物 4 种重金属潜在生态危害均为轻微,各站点 RI 值中 Cd 的贡献比例最大。4 种金属潜在危害由大到小排序为: Cd > Pb > Cu > Zn。

(4)太湖表层沉积物中 Cu、Pb、Zn 和 Cd 存在较为严重的人为污染影响,应引起湖库管理部门的足够重视。对造成水库污染的主要污染源进行整治,应改进工矿企业生产工艺,减少排出污水中重金属元素含量,或者投建污水处理设备对企业废水进行集中处理后再行排放。

参考文献:

- [1] 李梁,胡小贞,刘娉婷,等. 滇池外海底泥重金属污染分布特征及风险评价[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(S1): 46-51.
- [2] Kwon Y T, Lee C W. Ecological risk assessment of sediment in wastewater discharging area by means of metal speciation[J]. Microchemical Journal, 2001, **70**(3): 255-264.
- [3] 范文宏,张博,张融,等. 锦州湾沉积物中重金属形态特征及其潜在生态风险[J]. 海洋环境科学, 2008, **27**(1): 54-58.
- [4] 弓晓峰,陈瑶,尹丽,等. 鄱阳三江流域沉积物中 Zn、Pb、Cd 的形态分布[J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(11): 48-57.
- [5] 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.
- [6] Chen S Y, Lin J G. Bioleaching of heavy metals from sediment: significance of pH[J]. Chemosphere, 2001, **44**(5): 1093-1102.
- [7] Teasdale P R, Apte S C, Ford P W, et al. Geochemical cycling and speciation of copper in waters and sediments of Macquarie Harbour, Western Tasmania[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2003, **57**(3): 475-487.
- [8] 于瑞莲,胡恭任. 泉州湾沉积物重金属形态特征及生态风险[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2008, **29**(3): 419-423.
- [9] 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.
- [10] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M, et al. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. Analytical Chemistry, 1979, **51**(7): 844-851.
- [11] Ure A M, Quevauviller P, Muntau H, et al. Speciation of heavy metals in soils and sediments. An account of the improvement and harmonization of extraction techniques undertaken under the auspices of the BCR of the commission of the European communities [J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 1993, **51**(1-4): 135-151.
- [12] 周怀东,袁浩,王雨春,等. 长江水系沉积物中重金属的赋存形态[J]. 环境化学, 2008, **27**(4): 516-519.
- [13] Cuong D T, Obbard J P. Metal speciation in coastal marine sediments from Singapore using a modified BCR-sequential extraction procedure[J]. Applied Geochemistry, 2006, **21**(8): 1335-1346.
- [14] 谢红彬,陈雯. 太湖流域制造业结构变化对水环境演变的影响分析——以苏锡常地区为例[J]. 湖泊科学, 2002, **14**(1): 53-59.
- [15] 刘恩峰,沈吉,朱育新,等. 太湖沉积物重金属及营养盐污染研究[J]. 沉积学报, 2004, **22**(3): 507-512.
- [16] 刘恩峰,沈吉,刘兴起,等. 太湖沉积物重金属和营养盐变化特征及污染历史[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, **35**(增刊 II): 73-80.
- [17] 袁和忠,沈吉,刘恩峰. 太湖重金属和营养盐污染特征分析[J]. 环境科学, 2011, **32**(3): 649-657.
- [18] Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control, a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [19] Quevauviller P, Rauret G, López-Sánchez J F, et al. Certification of trace metal extractable contents in a sediment reference material (CRM 601) following a three-step sequential extraction procedure [J]. Science of the Total Environment, 1997, **205**(2-3): 223-234.
- [20] 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.
- [21] 冯素萍,鞠莉,沈永,等. 沉积物中重金属形态分析方法研究进展[J]. 化学分析计量, 2006, **15**(4): 72-74.
- [22] 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.
- [23] 李晶,臧淑英,宋延山,等. 连环湖阿木塔泡沉积物中重金属形态及其对环境影响分析[J]. 环境科学与管理, 2009, **34**(1): 37-41.
- [24] 黄光明,周康民,汤志云,等. 土壤和沉积物中重金属形态分析[J]. 土壤, 2009, **41**(2): 201-205.
- [25] 李军. 湘江长株潭段底泥重金属污染分析与评价[D]. 长沙: 湖南大学, 2008.
- [26] 汪玉娟,吕文英,刘国光,等. 沉积物中重金属的形态及生物有效性研究进展[J]. 安全与环境工程, 2009, **16**(4): 28-29.
- [27] 刘爱菊,王洪海,刘家弟,等. 孝妇河水体沉积物中重金属

- 的污染及形态分布特征[J]. 环境化学, 2010, **29**(5): 875-879.
- [28] 徐圣友, 叶琳琳, 朱燕, 等. 巢湖沉积物中重金属的 BCR 形态分析[J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(9): 20-23.
- [29] 金相灿. 沉积物污染化学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992. 327-356.
- [30] 张凤英, 阎百兴, 朱立禄. 松花江沉积物重金属形态赋存特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(1): 163-167.
- [31] Fan W H, Wang W X, Chen J S, *et al.* Cu, Ni, and Pb speciation in surface sediments from a contaminated bay of northern China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2002, **44**(8): 820-826.
- [32] Abd El-Azim H, El-Moselhy K M. Determination and partitioning of metals in sediments along the Suez Canal by sequential extraction[J]. Journal of Marine Systems, 2005, **56**(3-4): 363-374.
- [33] 霍文毅, 黄风茹, 陈静生, 等. 河流颗粒物重金属污染评价方法比较研究[J]. 地理科学, 1997, **17**(1): 81-86.
- [34] 陈静生, 陶澍, 邓宝山, 等. 水环境化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987. 179-181.
- [35] 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.

CONTENTS

Preface	CHEN Wei-ping (4069)
Ecological Risks of Reclaimed Water Irrigation: A Review	CHEN Wei-ping, ZHANG Wei-ling, PAN Neng, <i>et al.</i> (4070)
Study on Soil Enzyme Activities and Microbial Biomass Carbon in Greenland Irrigated with Reclaimed Water	PAN Neng, HOU Zhen-an, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (4081)
Soil Salinity in Greenland Irrigated with Reclaimed Water and Risk Assessment	PAN Neng, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4088)
Effect of Reclaimed Water Irrigation on Soil Properties and Vertical Distribution of Heavy Metal	ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4094)
Simulation of Effect of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Water-Salt Movement by ENVIRO-GRO Model	LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4100)
Simulation of Effects of Soil Properties and Plants on Soil Water-salt Movement with Reclaimed Water Irrigation by ENVIRO-GRO Model	LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4108)
Modeling the Cd Accumulation in Agricultural Soil Irrigated with Reclaimed Water	ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4115)
Model Simulation of the Transportation, Transformation and Accumulation of Synthetic Musk in Soils Input Through Recycle Water Irrigation	WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4121)
Impacts of Reclaimed Water Irrigation of Urban Lawn on Groundwater Quality	WANG Qiao-huan, CHEN Wei-ping, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (4127)
Public Awareness Assessment of Water Reuse in Beijing	ZHANG Wei-ling, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4133)
Temporal and Spatial Distribution of Ozone Concentration by Aircraft Sounding over Beijing	CHEN Peng-fei, ZHANG Qiang, QUAN Jian-nong, <i>et al.</i> (4141)
Emission Strength and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Shanghai During 2010 EXPO	WANG Hong-li, CHEN Chang-hong, HUANG Hai-ying, <i>et al.</i> (4151)
Study on Atmospheric VOCs in Gongga Mountain Base Station	ZHANG Jun-he, WANG Yue-si, WU Fang-kun, <i>et al.</i> (4159)
Regional Atmospheric Environment Risk Source Identification and Assessment	ZHANG Xiao-chun, CHEN Wei-ping, MA Chun, <i>et al.</i> (4167)
Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanes and <i>n</i> -Alkanoic Acids in the Smoke from Combustion of Rice Straw	LIU Gang, SUN Li-na, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (4173)
Research on NEDC Ultrafine Particle Emission Characters of a Port Fuel Injection Gasoline Car	HU Zhi-yuan, LI Jin, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4181)
Magnetic Response of Street Tree Leaves to Particulate Pollution in Shanghai	LONG Qian, ZHOU Ju-zhen, MENG Jie, <i>et al.</i> (4188)
Diurnal Variations of Greenhouse Gas Fluxes at the Water-Air Interface of Aquaculture Ponds in the Min River Estuary	YANG Ping, TONG Chuan, HE Qing-hua, <i>et al.</i> (4194)
Effects of Simulated Warming on Soil Respiration in a Cropland Under Winter Wheat-Soybean Rotation	LIU Yan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (4205)
Transport and Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Air from Dashiwei Karst Sinkholes in Guangxi, China	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, SUN Qian, <i>et al.</i> (4212)
Pollution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water of Songhua River Basin During the Icebound Season	MA Wan-li, LIU Li-yan, QI Hong, <i>et al.</i> (4220)
Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Urban Rivers of Wenzhou City	ZHOU Jie-cheng, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (4226)
Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Riparian Soils Along Urban Rivers of Wenzhou City	ZHOU Jie-cheng, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (4237)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Partial Surface Sediments of Liaohe River	WU Jiang-yue, LIU Zheng-tao, ZHOU Jun-li, <i>et al.</i> (4244)
Phenols Pollutants in Soil and Shallow Groundwater of a Retired Refinery Site	PEI Fang, LUO Ze-jiao, PENG Jin-jin, <i>et al.</i> (4251)
Heterogeneous Characteristic of PAHs' Spatial Distribution in a Large Coking Site of China	LIU Geng, GUO Guan-lin, NAN Feng, <i>et al.</i> (4256)
Vertical Distribution and Source Analysis of Organochlorine Pesticides in Sewage Irrigation Area, Taiyuan City	LIAO Xiao-ping, ZHANG Cai-xiang, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (4263)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soil of the Chongming Island in Shanghai	LÜ Jin-gang, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (4270)
Mercury and Copper Accumulation During Last Fifty Years and Their Potential Ecological Risk Assessment in Sediment of Mangrove Wetland of Shenzhen, China	LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, <i>et al.</i> (4276)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in the Sediments from Shahe Reservoir, the Upper Reach of the North Canal River	ZHANG Wei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing (4284)
Speciation and Pollution Characteristics of Heavy Metals in the Sediment of Taihu Lake	QIN Yan-wen, ZHANG Lei, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (4291)
Chemical Composition and Daily Variation of Melt Water During Ablation Season in Monsoonal Temperate Glacier Region: A Case Study of Baishui Glacier No. 1	ZHU Guo-feng, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (4300)
Experimental Study on the Environmental Fate of Nitrogen in Snail-Macrophyte Ecosystem for Water Purification	ZHOU Lu-hong, GU Xiao-hong, ZENG Qing-fei, <i>et al.</i> (4307)
Growth Inhibition Effect of Immobilized Pectinase on <i>Microcystis aeruginosa</i>	SHEN Qing-qing, PENG Qian, LAI Yong-hong, <i>et al.</i> (4316)
A Novel Approach of Using Fouling Index to Evaluate NOM Fouling Behavior During Low Pressure Ultrafiltration Process	XIAO Ping, XIAO Feng, ZHAO Jing-hui, <i>et al.</i> (4322)
Characteristics of Monomethylmercury Photodegradation in Water Body	SUN Rong-guo, MAO Wen, MA Ming, <i>et al.</i> (4329)
Degradation of Oxytetracycline with Ozonation in Acetic Acid Solvent	LI Shi-yin, LI Xiao-rong, ZHU Yi-ping, <i>et al.</i> (4335)
Photodegradation Performance and Mechanisms of Carbamazepine and Its Impact Factors	CHEN Chao, ZHAO Qian, FENG Li, <i>et al.</i> (4340)
Investigation of Nitrobenzene Removal by Iron Sulfide (FeS)	WANG Xia-lin, LI Rui-hua (4346)
Experimental Research on <i>In-Situ</i> Auto-Monitoring for Underground Sewage Pipeline Leakage	GUO Lei, JIA Yong-gang, FU Teng-fei, <i>et al.</i> (4352)
Adsorption of Phenol Chemicals by Surfactant-Modified Zeolites	XIE Jie, WANG Zhe, WU De-yi, <i>et al.</i> (4361)
Acute Toxicity of Antibiotics and Anaerobic Digestion Intermediates in Pharmaceutical Wastewaters	JI Jun-yuan, XING Ya-juan, ZHENG Ping (4367)
Study on Phosphorus Removal Capability of Constructed Wetlands Filled with Broken Bricks	WANG Zhen, LIU Chao-xiang, LI Peng-yu, <i>et al.</i> (4373)
Denitrification Water Treatment with Zeolite Composite Filter by Intermittent Operation	QING Cheng-song, BAO Tao, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (4380)
Influence of Nitrate on the Simultaneous Methanogenesis and Denitrification Reaction of Anaerobic Biofilm and Granular Sludge	ZHONG Chen-yu, YE Jie-xu, LI Ruoyu, <i>et al.</i> (4387)
Study on Dewatering of Activated Sludge Under Applied Electric Field	JI Xue-yuan, WANG Yi-li, FENG Jing (4393)
Effects of Multiple Environmental Factors on Trifluorsulfuron-methyl Degradation in Soils	SONG Ning-hui, SHAN Zheng-jun, SHI Li-li, <i>et al.</i> (4400)
Effect of Alkaline Post-Treatment on Physicochemical Property of Digested <i>Spartina alterniflora</i>	CHEN Guang-yin, ZHENG Zheng, CHANG Zhi-zhou, <i>et al.</i> (4406)
Structural Changes in Mineral Phases and Environmental Release Behavior of Arsenic During Sintering of Arsenic-containing Waste	WANG Xing-run, NONG Ze-xi, WANG Qi (4412)
Study on Emission Standard System of Air Pollutants	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, ZHANG Ming-hui, <i>et al.</i> (4417)
Mechanism for Transformation of Environmental Criteria into Environmental Standards in China	BI Cen-cen, WANG Tie-yu, LÜ Yong-long (4422)
Effect Analysis on the Two Total Load Control Methods for Poisonous Heavy Metals	FU Guo-wei (4428)

《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12月15日 33卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 12 Dec. 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