

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第1期

Vol.35 No.1

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

雾霾重污染期间北京居民对高浓度 PM_{2.5} 持续暴露的健康风险及其损害价值评估 谢元博, 陈娟, 李巍 (1)

长白山 PM_{2.5} 中水溶性离子季节变化特征研究 赵亚南, 王跃思, 温天雪, 戴冠华 (9)

青岛大气颗粒物数浓度变化及对能见度的影响 柯馨姝, 盛立芳, 孔君, 郝泽彤, 屈文军 (15)

重庆市大气二噁英污染水平及季节变化 张晓岭, 卢益, 朱明吉, 蹇川, 郭志顺, 邓力, 孙静, 张芹, 罗财红 (22)

西南地区再生铝冶炼行业二噁英大气排放 卢益, 张晓岭, 郭志顺, 蹇川, 朱明吉, 邓力, 孙静, 张芹 (30)

西南地区新型干法水泥生产中的二噁英大气排放 张晓岭, 卢益, 蹇川, 郭志顺, 朱明吉, 邓力, 孙静, 张芹 (35)

杭州市办公场所室内空气中 PBDEs 的污染现状与特征 蒋欣慰, 孙鑫, 裴小强, 金漫彤, 李云龙, 沈学优 (41)

模拟不同排放源排放颗粒及多环芳烃的粒径分布研究 符海欢, 田娜, 商惠斌, 张彬, 叶素芬, 陈晓秋, 吴水平 (46)

川东北地区元素大气沉降通量及其季节变化 童晓宁, 周厚云, 游镇烽, 汤静, 刘厚均, 黄颖, 贺海波 (53)

重庆市铁山坪 2001 ~ 2010 年酸沉降变化 余德祥, 马萧萧, 谭炳全, 赵大为, 张冬保, 段雷 (60)

汉江上游金水河流域氮湿沉降 王金杰, 张克荣, 吴川, 张全发 (66)

麦秸及其烟尘中正构脂肪酸的组成 刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (73)

兰州市室内大气降尘环境磁学特征及其随高度变化研究 吴铎, 魏海涛, 赵瑞瑞, 张蕊, 刘建宝 (79)

中亚热带针阔混交林土壤-大气界面释汞通量研究 马明, 王定勇, 申源源, 孙荣国, 黄礼昕 (85)

水稻秸秆生物炭对耕地土壤有机碳及其 CO₂ 释放的影响 柯跃进, 胡学玉, 易卿, 余忠 (93)

黄海和东海海域溶解铋地球化学分布特征 吴晓丹, 宋金明, 吴斌, 李学刚 (100)

浑河上游(清原段)水环境中重金属时空分布及污染评价 马迎群, 时瑶, 秦延文, 郑丙辉, 赵艳民, 张雷 (108)

POCIS 采样技术应用于九龙江流域水环境中雌激素的检测 张利鹏, 王新红, 李永玉, 吴玉玲, 张祖麟 (117)

降雨条件下岩溶地下水微量元素变化特征及其环境意义 陈雪彬, 杨平恒, 蓝家程, 莫雪, 师阳 (123)

锡林河流域地表水水化学主离子特征及控制因素 唐玺雯, 吴锦奎, 薛丽洋, 张明泉, Frauke Barthold, Lutz Breuer, Hans-Georg Frede (131)

子牙河水系河流氮素组成及空间分布特征 赵钰, 单保庆, 张文强, 王超 (143)

水稻种植对中亚热带红壤丘陵区小流域氮磷养分输出的影响 宋立芳, 王毅, 吴金水, 李勇, 李裕元, 孟岑, 李航, 张满意 (150)

黄东海表层沉积物中磷的分布特征 宋国栋, 刘素美, 张国玲 (157)

河流沉积物中有机磷提取剂 (NaOH-EDTA) 提取比例与机制研究 张文强, 单保庆, 张洪, 唐文忠 (163)

沉积物短期扰动下 BAPP 再生和转化机制 武晓飞, 李大鹏, 汪明 (171)

三峡库区典型农村型消落带沉积物风险评价与重金属来源解析 敖亮, 雷波, 王业春, 周谐, 张晟 (179)

太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价 毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明, 曾庆飞, 谷先坤, 李旭光 (186)

滇池沉积物中主要污染物含量时间分异特征研究 王心宇, 周丰, 伊旋, 郭怀成 (194)

浓度层析荧光光谱局部匹配溢油鉴别技术 王春艳, 史晓凤, 李文东, 张金亮 (202)

光电 Fenton 技术处理污泥深度脱水液研究 王现丽, 王世峰, 吴俊峰, 濮文虹, 杨昌柱, 张敬东, 杨家宽 (208)

同步脱氮除磷颗粒污泥硝化反硝化特性试验研究 刘小英, 林慧, 马兆瑞, 王磊, 刘静伟, 郭超, 姜应和 (214)

垃圾填埋场渗滤液短程生物脱氮的长期稳定性实验研究 孙洪伟, 郭英, 彭永臻 (221)

油田区土壤石油烃组分残留特性研究 胡迪, 李川, 董倩倩, 李立明, 李广贺 (227)

水稻光合同化碳在土壤中的矿化和转化动态 谭立敏, 彭佩钦, 李科林, 李宝珍, 聂三安, 葛体达, 童成立, 吴金水 (233)

土地利用及退耕对喀斯特山区土壤活性有机碳的影响 廖洪凯, 李娟, 龙健, 张文娟, 刘云飞 (240)

水稻土团聚体 Cu²⁺ 吸附过程中铝的溶出及土壤溶液 pH 变化 许海波, 赵道远, 秦超, 李玉姣, 董长勋 (248)

Cr(VI) 对两种黏土矿物在单一及复合溶液中 Cu(II) 吸附的影响 刘娟娟, 梁东丽, 吴小龙, 屈广周, 钱勋 (254)

淹水时长对 3 种丛枝菌根 (AM) 真菌侵染 2 种湿地植物的影响 马雷猛, 王鹏腾, 王曙光 (263)

太湖水质与水生生物健康的关联性初探 周笑白, 张宁红, 张咏, 牛志春, 刘雷, 于红霞 (271)

3 种典型污染物对水生生物的急性毒性效应及其水质基准比较 姜东生, 石小荣, 崔益斌, 李梅 (279)

某制药废水对发光细菌急性毒性的评价研究 杜丽娜, 杨帆, 穆玉峰, 余若祯, 左剑恶, 高俊发, 余忻, 滕丽君, 汤薪瑶 (286)

异丙甲草胺与锌共存对斜生栅藻毒性手性差异影响 胡晓娜, 张淑娟, 陈彩东, 刘惠君 (292)

Biotic Ligand Model 的简化模型及预测性能评价 王万宾, 陈莎, 吴敏, 苏德丽, 赵婧 (299)

基于 USEtox 的焦化行业优先污染物筛选排序研究 郝天, 杜鹏飞, 杜斌, 曾思育 (304)

微囊藻毒素降解菌 *Paucibacter* sp. CH 菌的分离鉴定及其降解特性 游狄杰, 陈晓国, 向荟圯, 欧阳溱, 杨冰 (313)

硝酸盐抑制油田采出水中硫酸盐还原菌活性研究 杨德玉, 张颖, 史荣久, 韩斯琴, 李光哲, 李国桥, 赵劲毅 (319)

降解纤维素产甲烷的四菌复合系 吴俊妹, 马安周, 崔萌萌, 于清, 齐鸿雁, 庄绪亮, 庄国强 (327)

中国陆地生态系统土壤异养呼吸变异的影响因素 谢薇, 陈书涛, 胡正华 (334)

内蒙古羊草草原根呼吸和土壤微生物呼吸区分的研究 史晶晶, 耿元波 (341)

南京河流夏季水-气界面 N₂O 排放通量 韩洋, 郑有飞, 吴荣军, 尹继福, 孙霞 (348)

杀菌剂对湖泊水体温室气体浓度分析的影响 肖启涛, 胡正华, James Deng, 肖薇, 刘寿东, 李旭辉 (356)

生物表面活性剂强化剩余污泥微生物燃料电池产电特性研究 彭海利, 张植平, 李小明, 杨麒, 罗琨, 易欣 (365)

不同硅铝比 Fe-ZSM-5 催化剂对氧化亚氮催化分解性能的研究 卢仁杰, 张新艳, 郝郑平 (371)

硫酸铵和尿素对废物焚烧过程中多种途径生成氯苯类的抑制作用 严密, 祁志福, 李晓东, 胡艳军, 陈彤 (380)

县域尺度的京津冀都市圈 CO₂ 排放时空演变特征 汪浩, 陈操操, 潘涛, 刘春兰, 陈龙, 孙莉 (385)

保水剂性能及其农用安全性评价研究进展 李希, 刘玉荣, 郑袁明, 贺纪正 (394)

《环境科学》征订启事 (65) 《环境科学》征稿简则 (220) 信息 (226, 270, 298, 364)

太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价

毛志刚¹, 谷孝鸿^{1*}, 陆小明², 曾庆飞¹, 谷先坤^{1,3}, 李旭光^{1,3}

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 2. 江苏省水利学会, 南京 210029; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为揭示太湖东部疏浚湖区沉积物中重金属分布特征及其潜在生态风险, 于 2012 年在东太湖与胥口湾共设置 5 个点采集沉积物样品, 测试了底泥部分理化性质及重金属元素含量 (As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn), 并运用潜在生态风险指数法综合评价了疏浚湖区沉积物的重金属污染现状和潜在风险程度。结果表明, 太湖东部不同类型湖区间沉积物的营养盐及重金属含量分布存在差异, 总体上胥口湾草型湖区的重金属含量相对东太湖养殖湖区较高, 营养盐含量则相对较低; 在垂直剖面上, 沉积物营养盐和重金属均表现出表层富集的特征。太湖东部湖区各疏浚点位的营养盐和重金属含量均低于未疏浚点位, 表明底泥生态疏浚能有效去除沉积物中的营养物质和重金属污染物, 但疏浚效果随时间逐渐减弱。各重金属元素及营养盐之间均呈显著正相关关系, 表明这些污染物具有较好的同源性。潜在生态风险指数 RI 的评价结果表明, 各点位沉积物的重金属潜在危害程度依次为 $X_1 > D_1 > D_3 > X_2 > D_2$, 其中未疏浚点位胥口湾 X_1 的潜在生态风险高于东太湖 D_1 , 且 X_1 、 D_1 均属于中等生态风险, 而疏浚点位 D_2 、 D_3 、 X_2 属于轻微生态风险, 底泥疏浚有效降低了沉积物中的重金属潜在生态风险。

关键词: 底泥疏浚; 营养盐; 重金属; 潜在生态风险评价; 太湖

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)01-0186-08

Pollution Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Different Eastern Dredging Regions of Lake Taihu

MAO Zhi-gang¹, GU Xiao-hong¹, LU Xiao-ming², ZENG Qing-fei¹, GU Xian-kun^{1,3}, LI Xu-guang^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Jiangsu Provincial Hydraulic Engineering Society, Nanjing 210029, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to investigate the distribution characteristics of nutrients and heavy metals in sediments from different eastern dredging regions of Lake Taihu, the surface and core sediment samples at 5 sites (in East Taihu Lake and Xukou Bay) were collected in 2012. Contents of nutrients (TOC, TN and TP) and heavy metals (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn) in the sediments were measured and the pollution degrees of heavy metals were evaluated with the potential ecological risk method. The results showed that the heavy metal contents in Xukou Bay were generally higher than those in East Taihu Lake, whereas the nutrients contents showed the reverse trend. There were significant differences between the phytoplankton-dominated and culture lake regions. The concentrations of both nutrients and heavy metals decreased with increasing profile depth. Moreover, the contents of nutrients and heavy metals in the sediments of all dredged areas were lower than those in the un-dredged areas, suggesting that dredging may be a useful approach for decreasing nutrients and heavy metals loading in sediments, but its effectiveness decreased with time. Significant positive correlations were found among different heavy metals and nutrients, indicating that they were from the same pollution source. The Hakanson potential ecological risk index was applied for assessing the status of sediment heavy metal enrichment and the result indicated that sediment dredging could reduce the extent of potential ecological risk. The risk index in different sites followed the order: $X_1 > D_1 > D_3 > X_2 > D_2$, while the risk index in site X_1 of Xukou Bay was higher than that in site D_1 of East Taihu Lake. And the comprehensive ecological risk grades in sites X_1 and D_1 were in the moderate range, while the sites D_2 , D_3 and X_2 were low.

Key words: sediment dredging; nutrients; heavy metals; potential ecological risk assessment; Lake Taihu

太湖作为我国第三大淡水湖泊, 在整个流域的洪涝控制、水资源供应、渔业及旅游等方面都发挥着重要作用^[1]。但自 1980 年代以来, 太湖流域经济快速发展, 未经处理的工农业及城市生活污水排入湖体, 大量营养物质及有毒重金属污染物在底泥中不断积累^[2]。其中太湖东部湖区是周边城市最重要

的饮用水源地, 包含贡湖、胥口湾、东太湖等湖湾, 共 9 个取水口, 太湖整体水质的迅速恶化及底泥中

收稿日期: 2013-04-09; 修订日期: 2013-06-14

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2012BAD25B06/07); 江苏省水利科技项目 (2011071)

作者简介: 毛志刚 (1984 ~), 男, 博士, 主要研究方向为湖泊生态学, E-mail: zgmao@niglas.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: xhgu@niglas.ac.cn

重金属污染程度的加重对东部湖区的水质安全构成威胁^[3].

重金属作为典型的累积性污染物,其显著的生物毒性和持久性,对生态环境构成潜在威胁^[4,5]. 对湖泊环境而言,底泥不但是重金属迁移转化的主要归宿,同时在外界条件适宜时,底泥中的重金属会重新释放进入水体,并造成二次污染^[6,7]. 因此,如果能有效控制或去除沉积物中潜在的重金属内源污染,将对湖泊整体环境治理与水体质量改善具有重大意义^[8]. 目前,底泥疏浚作为一种去除重金属污染物的湖泊治理方法已经被广泛运用于世界各地的水环境治理工程中^[9,10]. 通过生态疏浚可以将污染物移出湖体,减轻底泥中重金属对水生生物的毒性威胁,并达到改善水环境质量的目的. 因此,太湖东部湖区也开展了一系列的底泥疏浚工程,包括胥口湾水源地生态清淤和东太湖航道疏浚工程等. 但是,由于湖泊底泥疏浚可能会引起营养盐和重金属等有毒物质的释放,一些研究者也对疏浚的治理效果和环境效应提出了置疑^[11]. 关于太湖底泥疏浚对营养盐和重金属释放的影响已有一些报道,王栋等^[12]研究表明疏浚导致的底泥重金属释放在短期内可能会对水体环境造成一定程度的生态压力,而钟继承等^[13]则发现底泥疏浚是消减沉积物内源磷负荷的有效手段. 这些研究主要关注于底泥疏浚的短期效应分析,对于疏浚后的长期生态效应关注较小,且研究区域集中在太湖污染较为严重的北部湖区^[14]. 因此,本研究将结合太湖东部湖区的生态疏浚工程,在分析不同类型湖湾疏浚后底泥营养盐与重金属空间分布规律的基础上,评价沉积物中重金属的污染现状和潜在生态风险程度,旨在为太湖重金属的污染防治及水源地的水质安全提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

太湖东部湖区不同湖湾间环境差异明显,其中

胥口湾为草型湖区,水生植被丰富,水质清澈;而东太湖作为上海、苏州等城市的重要水源地的同时,其湖湾内迅速发展的网围养殖也带来一系列水体环境问题^[15]. 东太湖和胥口湾近年均实施了局部湖区底泥生态疏浚工程,据此于2012年2月,在东太湖(D₁、D₂、D₃)和胥口湾(X₁、X₂)共设置5个采样点(图1). 东部湖区各点位疏浚工程的实施时间为2003、2004和2010年,采用环保绞吸式挖泥船进行疏浚,工程疏浚深度为20~30 cm(表1). 在每个采样点随机采集0~5 cm的表层沉积物各3份,将3份样品混合,作为该采样点表层沉积物的代表性样品;同时,使用柱状采泥器(内径8 cm)采集0~20 cm的柱状样,密封后带回实验室以2 cm间距进行分样. 样品自然风干,研磨后过100目筛,待测定.

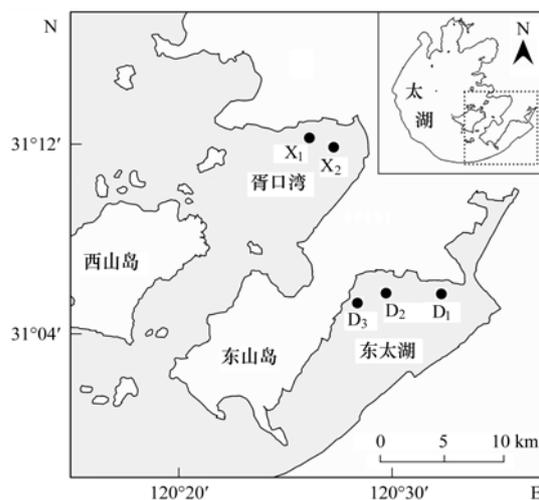


图1 太湖东部疏浚湖区采样点分布示意

Fig. 1 Sampling sites for the sediments in the eastern dredging region of Lake Taihu

1.2 样品分析测定

沉积物待测样品采用HNO₃-HF-HClO₄法进行消解,重金属元素铬(Cr)、铜(Cu)、镍(Ni)、铅(Pb)、锌(Zn)和总磷(TP)采用ICP-AES原子发射光谱仪测定;镉(Cd)采用石墨炉原子吸收分光光度法测定. 汞(Hg)采用H₂SO₄-HNO₃-K₂CrO₇法消解,砷(As)采用H₂SO₄-HNO₃消解,然后均采用HG-

表1 太湖东部疏浚湖区点位描述与底泥理化特性

Table 1 Description of sampling sites and physicochemical properties in sediments of the eastern dredging region of Lake Taihu

点位	湖区	疏浚时间	疏浚深度 /cm	水草生物量 /kg·m ⁻²	ρ_b /g·cm ⁻³	TOC /g·kg ⁻¹	TN /g·kg ⁻¹	TP /g·kg ⁻¹
D ₁	东太湖	未疏浚	/	1.13	0.49	33.38	3.63	0.64
D ₂	东太湖	2010年	20	0.83	1.02	5.48	0.69	0.42
D ₃	东太湖	2004年	30	4.44	0.56	13.80	1.82	0.58
X ₁	胥口湾	未疏浚	/	9.61	0.88	12.17	1.18	0.50
X ₂	胥口湾	2003年	30	2.89	0.82	5.58	0.63	0.49

AFS 原子荧光光谱仪测定. 沉积物总有机碳 (TOC)、总氮 (TN) 采用 CE440 型元素分析仪测定; 干容重 (ρ_b) 采用环刀法测定, 利用环刀取样称重后放入烘箱, 105 ~ 110℃ 烘干 6 ~ 8 h 后再称重计算. 样品测试过程中, 均加入国家标准土壤参比物质 (GBW-07404) 进行质量控制, 样品分析误差均小于 10%, 分析结果符合质控要求. 实验所用试剂均为优级纯, 实验用水为超纯水.

1.3 评价方法

本研究采用瑞典学者 Hakanson^[16] 于 1980 年提出的潜在生态风险指数法 (risk index, RI) 对沉积物重金属进行生态风险评估. 该方法综合考虑了沉积物中重金属的毒性、生态效应与环境效应, 并采用具有可比的、等价属性指数分级法进行评价, 定量地区分出潜在生态危害程度, 已成为目前沉积物重金属污染质量评价中应用广泛的一种方法. 计算公式为:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times C_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times \frac{C_d^i}{C_r^i} \quad (1)$$

式(1)中, RI 为潜在生态风险指数; E_r^i 为重金属 i 的潜在生态风险系数; T_r^i 为重金属 i 的毒性响应系数; C_r^i 为重金属 i 的污染系数; C_d^i 为沉积物中重金属 i 的实测含量; C_r^i 为相应重金属 i 的参比值.

计算潜在生态风险指数 RI 时, 一般选择全球工业化以前的沉积物重金属最高值或当地沉积物的背景值为参考值. 污染物背景值的地区性强, 以当地重金属背景值为参比值可以相对定性地反映出底泥的污染程度^[17]. 本研究采用江苏省土壤重金属背景值^[18] 作为参比 (表 2), 对太湖东部疏浚湖区的底泥重金属潜在生态风险进行评价. 重金属参比值 C_r^i 、毒性响应系数 T_r^i 与潜在生态风险指数等级划分标准如表 2、表 3 所示^[14]. 数据分析采用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS(11.5) 统计软件.

表 2 重金属的参比值 C_r^i 和毒性响应系数 T_r^i

Table 2 References C_r^i and toxic coefficient T_r^i of different heavy metals

项目	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
参比值 $C_r^i/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	10.00	0.13	77.80	22.30	0.29	26.70	26.20	62.60
毒性系数 T_r^i	10	30	2	5	40	5	5	1

表 3 潜在生态风险指数等级划分

Table 3 Classification of potential ecological risk index

单一污染物潜在生态风险系数 E_r^i		潜在生态风险指数 RI	
阈值区间	生态风险程度	阈值区间	生态风险程度
$E_r^i < 40$	轻微	$RI < 150$	轻微
$40 \leq E_r^i < 80$	中等	$150 \leq RI < 300$	中等
$80 \leq E_r^i < 160$	强	$300 \leq RI < 600$	强
$160 \leq E_r^i < 320$	很强	$RI \geq 600$	很强
$E_r^i \geq 320$	极强		

2 结果与讨论

2.1 太湖东部疏浚湖区沉积物理化性质分析

底泥营养盐的释放是影响湖泊富营养状态的重要因素, 分析沉积物中有机质及氮磷含量的变化, 有助于了解营养盐的迁移转化过程以及重金属的来源与分布规律^[19]. 太湖东部疏浚湖区沉积物的理化特征见表 1 和图 2. 研究区表层沉积物中 TOC、TN 和 TP 含量分别介于 5.48 ~ 33.38、0.63 ~ 3.63 和 0.42 ~ 0.64 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 且整体上东太湖养殖湖区的有机碳及氮磷含量高于胥口湾草型湖区. 东太湖是太湖水产养殖发达地区, 该湖区渔网密布, 加上河蟹养殖所需的大量沉水植物衰亡后分解, 水体及沉积物受面源营养盐污染较为严重^[15].

底泥疏浚能有效去除东部清淤湖区表层沉积物中的营养盐含量, 其中东太湖疏浚点位 D_2 、 D_3 的 TOC、TN 和 TP 含量均低于未疏浚的 D_1 , 胥口湾中疏浚点位 X_2 低于未疏浚的 X_1 . 疏浚时间对表层沉积物碳、氮含量亦有显著影响. 其中疏浚时间较长的 D_3 , 有机质重新积累, 其沉积物中的 TOC 含量达 13.80 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 而 2010 年新疏浚点位 D_2 的 TOC 含量较低, 仅为 D_3 的 39.7%. 从图 2 可看出, 各点位沉积物理化性质在垂直剖面上的分布趋势存在明显差别. 东太湖未疏浚点位 D_1 , 其表层 0 ~ 10 cm 的 TOC、TN 含量为 32.58 ~ 40.49 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而疏浚点位 D_2 、 D_3 在相同深度的 TOC、TN 含量明显低于 D_1 , 分布范围仅为 1.93 ~ 14.50 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 可见底泥疏浚能显著去除湖底的表层浮泥及沉积物中的营养盐含量. 与东太湖

相比,疏浚对胥口湾底泥中碳、氮的整体去除效果并不明显,除表层0~2 cm外, X_1 沉积物中的 TOC、TN

和 TP 含量与 X_2 在垂向分布上接近,这主要与草型湖区底泥的营养盐负荷较低相关^[20].

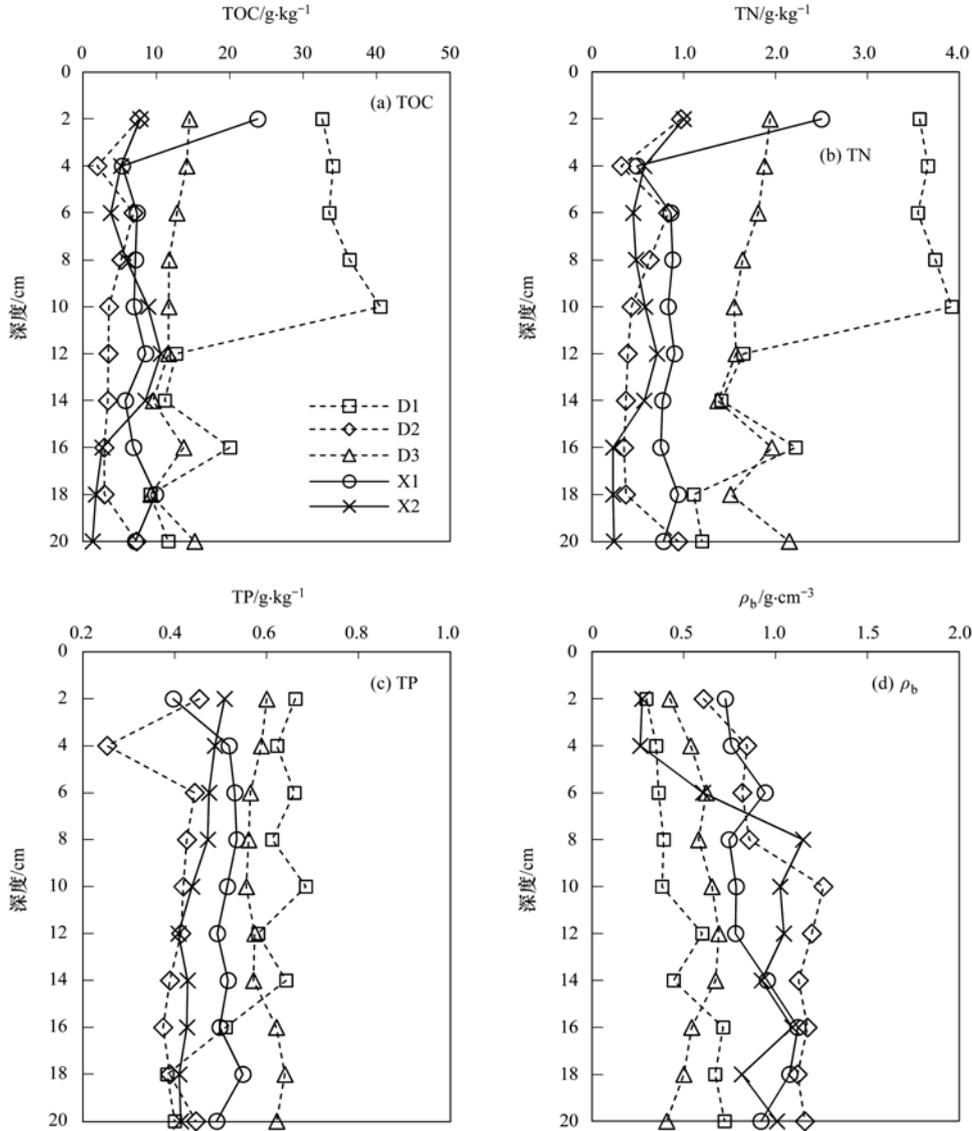


图2 太湖东部疏浚湖区底泥中 TOC、TN、TP 和容重 ρ_b 的垂向分布

Fig. 2 Vertical distributions of TOC, TN, TP and ρ_b in sediments of the eastern dredging region of Lake Taihu

2.2 太湖东部疏浚湖区沉积物重金属分布特征

对太湖东部疏浚湖区沉积物样品中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 这 8 种重金属进行测定,重金属含量及其垂向分布特征如表 4 和图 3 所示.东部湖区未疏浚点位 D_1 和 X_1 表层沉积物中重金属的平均含量由高到低依次为 $Zn > Cr > Pb > Ni > Cu > As > Cd > Hg$,其中 Cr、Hg 平均含量低于太湖沉积物背景值,As 与背景值相近,Cd、Cu、Ni、Pb、Zn 则高于背景值.自 1980 年代以来,太湖流域经济快速发展,一些工农业生产活动包括金属冶炼加工、化石燃料燃烧以及工业废水和城市生活污水排放

等,均可导致 Cu、Ni、Zn 等重金属进入水体环境并在底泥中沉积和富集^[19].东部未疏浚湖区重金属 Cd 的污染最为严重,其含量平均值高出背景值约 3.0 倍,随着太湖周边电镀、塑料稳定剂和电子工业的不断发展,大量含 Cd 废水排入湖泊而造成 Cd 污染^[21].底泥中 Pb 含量较高的原因则可能与太湖航运以及汽车等排放的含 Pb 尾气的大气沉降相关.但东太湖与胥口湾等东部湖区与太湖北部、西部湖区相比,其重金属含量相对较低,表明东部湖区受人类活动的影响较小,重金属污染程度较轻^[14, 19].

从表 4 可以看出,底泥疏浚能够显著降低表层

沉积物中的重金属含量. 对于疏浚过的点位 D_2 、 D_3 和 X_2 , 所测定的各重金属元素含量总体上均低于未疏浚的 D_1 和 X_1 . 以重金属 Cd 为例, D_2 、 D_3 沉积物中的 Cd 含量仅为 D_1 的 21.0% 和 44.3%, X_2 中的 Cd 含量则为 X_1 的 31.7%. 而姜霞等^[22] 在太湖北部梅梁湾底泥疏浚的研究中发现疏浚后沉积物中的重金属含量降低了 32% ~ 51%, 这与本次东部疏浚湖区的调查结果相似. 在水生生态系统中, 由于重金属具有环境持久性且能够在水生生物中富集放大, 是水环境中重要的污染物, 而底泥疏浚能

够有效地削减沉积物中重金属含量, 减少重金属在水土界面的释放通量^[23]. 但在太湖东部湖区, 底泥疏浚对重金属的去除效果随疏浚结束时间的推移逐渐减弱, 2004 年进行过底泥疏浚的 D_3 , 其沉积物中的重金属含量明显高于 2010 年新疏浚的点位 D_2 . 疏浚工程结束后, 水体中的重金属污染物可以随悬浮颗粒物一起沉降到湖泊底部, 或被疏浚后的表层沉积物直接吸附, 因此 D_3 经过较长时间的积累后, 重金属污染物重新在疏浚湖区的表层底泥中富集^[23].

表 4 太湖东部疏浚湖区表层沉积物重金属含量与潜在生态风险指数

Table 4 Heavy metal contents and potential ecological risk index in sediments of the eastern dredging region of Lake Taihu

点位	重金属含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$								潜在生态风险系数 E_r^i								RI
	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	
D_1	12.86	0.50	59.25	25.18	0.11	27.55	30.99	87.75	12.9	120.2	1.5	5.6	15.3	5.2	5.9	1.4	168.0
D_2	9.31	0.11	46.31	12.04	0.06	16.36	17.03	42.75	9.3	25.3	1.2	2.7	8.5	3.1	3.2	0.7	54.0
D_3	10.53	0.22	68.00	21.87	0.08	28.53	24.05	74.81	10.5	53.3	1.7	4.9	11.5	5.3	4.6	1.2	93.1
X_1	12.67	0.51	86.65	30.90	0.10	37.04	36.41	104.26	12.7	120.4	2.2	6.9	14.0	6.9	6.9	1.7	171.8
X_2	10.37	0.16	69.07	20.51	0.07	28.99	17.02	72.10	10.4	38.2	1.8	4.6	10.2	5.4	3.2	1.2	75.0
平均	11.15	0.30	65.86	22.10	0.09	27.69	25.10	76.33	11.1	71.5	1.69	4.96	11.90	5.19	4.79	1.22	112.3

沉积物重金属含量在垂向上的分布趋势如图 3 所示. 未疏浚点位 D_1 、 X_1 的沉积物剖面中, 重金属 As、Cd、Hg 的含量自表向下呈下降趋势, 表明这几种元素在沉积物表层富集较多. 完成底泥疏浚的点位 D_2 、 D_3 和 X_2 , 各金属元素在垂向分布上基本保持稳定; 仅 D_2 在表层 0 ~ 4 cm 间表现出较为明显的重金属积累现象. 与表层沉积物的重金属分布趋势一致, 底泥疏浚亦显著降低了柱状沉积物中的重金属含量. 疏浚点位 D_2 、 D_3 和 X_2 的重金属元素含量在垂向上基本均低于各自的对照组 D_1 和 X_1 . 值得关注的是, 在垂直剖面上草型湖区胥口湾 X_1 的重金属含量最高, 且整体上略高于东太湖的 D_1 , 这与其底泥营养盐含量的分布特征存在明显差别. 胥口湾水生植物丰富, 但附近有太湖重要航道经过, 湖泊沉积物可以通过水生植被的生物化学过程将船舶等排放到水体中的重金属吸附, 并随着水生植物的腐烂分解在底泥中沉积和富集^[24, 25].

2.3 沉积物理化性质与重金属元素的相关性分析

太湖东部疏浚湖区所测柱状沉积物重金属元素之间的相关系数如表 5 所示. 可以看出, 8 种重金属之间均呈极显著正相关关系, 表明各金属元素间关系密切且具有较好的同源性. 有研究认为, 一定区域内的沉积物重金属元素含量及其之间的比率相对稳定, 当沉积物的来源相同或相似时, 其重金属元素之间具有显著的相关性, 且通过对重金属元素及沉

积物理化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^[26]. 从表 5 的分析发现, 沉积物中的重金属元素与底泥营养盐含量具有较为密切的关系, 除元素 Cr、Ni 外, As 等 6 种金属元素均与沉积物 TOC、TN 和 TP 达到显著正相关. 这表明沉积物中有机质与重金属在水环境中的行为存在密切关系, 重金属可以通过表面吸附、阳离子交换及螯合反应等吸附于颗粒沉积物中^[27], 例如沉积物中 Hg 与 TOC、TN 的相关性最高, 显示出 Hg 与沉积物中的有机质具有较强的结合力. 李玉等^[28] 在胶州湾的研究结果也认为, 沉积物中有机质的存在是影响重金属分布与富集的重要因子.

3 沉积物重金属潜在生态风险评价

东部疏浚湖区表层沉积物中各重金属潜在生态风险系数 E_r^i 和生态风险指数 RI 的计算结果如表 4 所示. 可以看出, As、Cr、Cu、Hg 等元素的单个重金属潜在生态风险系数 E_r^i 均低于 40, 属于轻微生态风险; 而 Cd 的 E_r^i 值最高, 其中未疏浚点位 D_1 、 X_1 的 E_r^i 值分别为 120.2 和 120.4, 属于强生态风险元素, D_3 也达到中等生态风险. 从综合指数 RI 值来看, 各样点间底泥重金属潜在生态风险高低顺序为 $X_1 > D_1 > D_3 > X_2 > D_2$, 其中未疏浚点位的潜在生态风险高于疏浚点位, 且未疏浚点位中胥口湾的潜

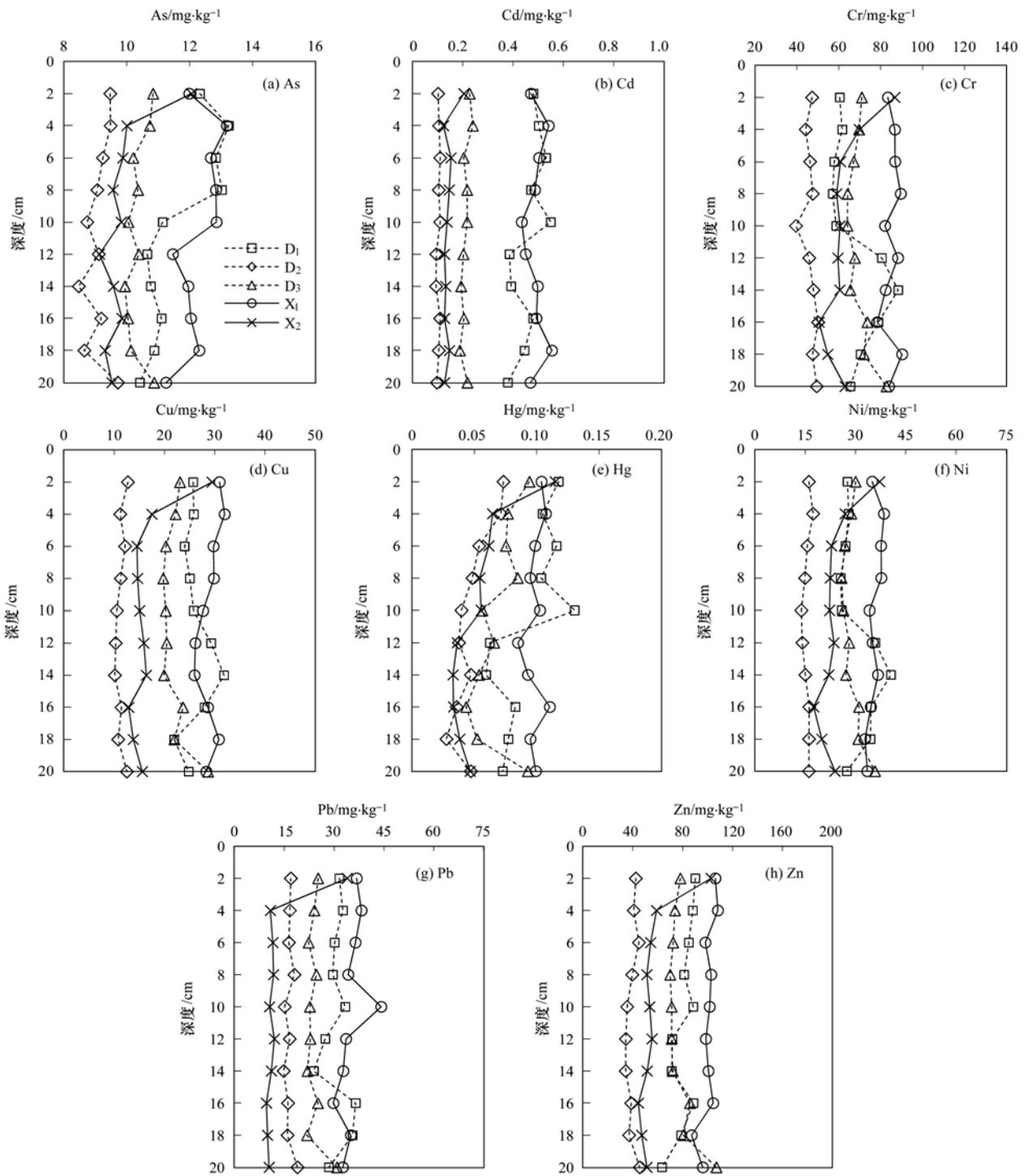


图3 太湖东部疏浚湖区底泥中重金属含量的垂向分布

Fig. 3 Vertical distributions of heavy metal contents in sediments of the eastern dredging region of Lake Taihu

在生态风险高于东太湖,这与重金属总量的分布趋势相一致.各点位 RI 值中 Cd 的贡献比例最高,这主要是由于疏浚湖区表层沉积物中 Cd 含量高于背景值,且 Cd 的毒性系数 T_r^i 相对 Pb、Cr、Zn 等元素较高,进而使得其潜在生态风险系数 E_r^i 和生态风险指数 RI 的计算结果较大.

从图 4 可以看出,东太湖 D_1 的 RI 值随深度的增加呈下降趋势,其中表层 0~10 cm 的 RI 值均高于 150,属于中等生态风险;低于该深度后下降为轻微风险.草型湖区 X_1 总体上则属于中等生态风险,垂直剖面上存在一定程度波动. D_2 、 D_3 和 X_2 的 RI 值在垂向分布上基本保持稳定,且均属于轻微生态

表 5 太湖东部疏浚湖区柱状沉积物理化性质与重金属元素的相关分析¹⁾

Table 5 Correlations of physicochemical properties and heavy metal contents in sediments of the eastern dredging region of Lake Taihu

	ρ_b	TOC	TN	TP	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb
TOC	-0.656 **	1									
TN	-0.693 **	0.977 **	1								
TP	-0.639 **	0.643 **	0.712 **	1							
As	-0.472 **	0.519 **	0.510 **	0.544 **	1						
Cd	-0.416 **	0.474 **	0.435 **	0.485 **	0.886 **	1					
Cr	-0.305 *	0.011	0.044	0.430 **	0.680 **	0.662 **	1				
Cu	-0.534 **	0.354 *	0.373 **	0.609 **	0.852 **	0.856 **	0.899 **	1			
Hg	-0.537 **	0.604 **	0.601 **	0.519 **	0.869 **	0.808 **	0.549 **	0.763 **	1		
Ni	-0.452 **	0.145	0.182	0.522 **	0.751 **	0.743 **	0.961 **	0.945 **	0.635 **	1	
Pb	-0.415 **	0.384 **	0.409 **	0.459 **	0.849 **	0.868 **	0.710 **	0.861 **	0.820 **	0.772 **	1
Zn	-0.489 **	0.408 **	0.443 **	0.590 **	0.872 **	0.815 **	0.857 **	0.934 **	0.817 **	0.906 **	0.877 **

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 $P < 0.01$)

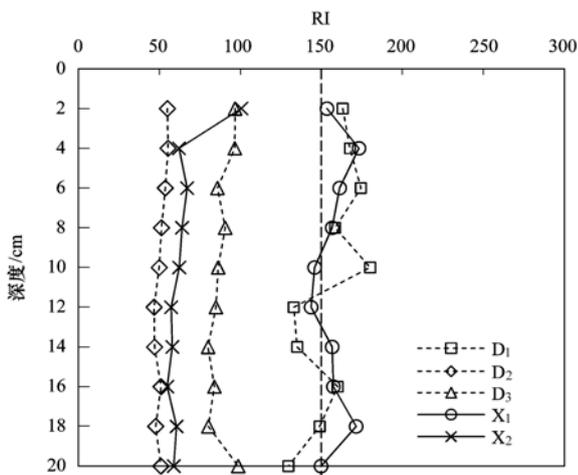


图 4 太湖东部疏浚湖区底泥中重金属潜在生态风险指数 (RI) 的垂向变化

Fig. 4 Vertical distributions of potential ecological risk index (RI) of heavy metals in sediments of the eastern dredging region of Lake Taihu

风险,可见底泥疏浚工程能有效降低柱状沉积物中的重金属潜在生态风险。值得关注的是,疏浚点位 D_3 及 X_2 表层 0~4 cm 沉积物中的重金属生态风险指数 RI 值较高,表明随着疏浚后的时间推移,重金属污染物又重新在沉积物中吸附积累,疏浚工程对重金属去除的长期生态效益逐渐削弱^[29]。

4 结论

(1)太湖东部不同类型湖区的沉积物营养盐及重金属含量存在明显差别,总体上胥口湾草型湖区的重金属含量相对东太湖养殖湖区要高,营养盐含量则相对较低,这主要与不同类型湖区的污染物来源及水生植物的分布相关;在垂直剖面上,沉积物营养盐和重金属均表现出表层富集的特征。

(2)太湖东部湖区各疏浚点位的营养盐和重金属含量均低于未疏浚点位,表明底泥生态疏浚工程能显著去除湖底的表层浮泥及营养物质,并有效削减沉积物中的重金属含量;但底泥疏浚对氮、磷营养物质及重金属的去除效果,随着疏浚后的时间推移逐渐减弱。

(3)东部疏浚湖区所测沉积物中的 8 种重金属之间均呈极显著正相关,表明各金属元素间关系密切且具有较好的同源性;重金属元素亦与底泥营养盐含量呈显著正相关,表明沉积物中有机质和氮磷营养盐的存在是影响重金属分布与富集的重要因子。

(4)潜在生态风险指数 RI 的评价结果显示,各点位表层沉积物的重金属潜在危害程度依次为 $X_1 > D_1 > D_3 > X_2 > D_2$,其中未疏浚点位胥口湾 X_1 的潜在生态风险高于东太湖 D_1 ,且 X_1 、 D_1 均属于中等生态风险,而疏浚点位 D_2 、 D_3 、 X_2 属于轻微生态风险,底泥疏浚有效降低了沉积物中的重金属潜在生态风险。Cd 的单个重金属潜在生态风险系数 E_r^i 值最高,其中未疏浚点位 D_1 、 X_1 的 E_r^i 值达到强生态风险,同时 Cd 也是各点位 RI 值最主要的贡献因子。

致谢:本工作得到江苏省太湖渔业管理委员会办公室支持,在此谨致谢忱!

参考文献:

- [1] 孙顺才,黄漪平. 太湖 [M]. 北京:海洋出版社,1993. 1-10.
- [2] Qin B Q, Xu P Z, Wu Q L, et al. Environmental issues of Lake Taihu, China [J]. Hydrobiologia, 2007, 581(1): 3-14.
- [3] 刘聚涛,杨永生,姜加虎,等. 太湖蓝藻水华灾害风险分区评估方法研究 [J]. 中国环境科学, 2011, 31(3): 498-503.
- [4] Chen C Y, Stemberger R S, Klaue B, et al. Accumulation of heavy metals in food web components across a gradient of lakes

- [J]. *Limnology and Oceanography*, 2000, **45**(7): 1525-1536.
- [5] 黄亮, 李伟, 吴莹, 等. 长江中游若干湖泊中水生植物体内重金属分布 [J]. *环境科学研究*, 2001, **15**(6): 1-4.
- [6] Calmano W, Hong J H, Förstner U. Binding and mobilization of heavy metals in contaminated sediments affected by pH and redox potential [J]. *Water Science and Technology*, 1993, **28**(8-9): 223-235.
- [7] 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.
- [8] Akcay H, Oguz A, Karapire C. Study of heavy metal pollution and speciation in Buyak Menderes and Gediz river sediments [J]. *Water Research*, 2003, **37**(4): 813-822.
- [9] Søndergaard M, Jeppesen E, Lauridsen T L, *et al.* Lake restoration: successes, failures and long-term effects [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2007, **44**(6): 1095-1105.
- [10] Annadotter H, Cronberg G, Aagren R, *et al.* Multiple techniques for lake restoration [J]. *Hydrobiologia*, 1999, **136**: 77-85.
- [11] 濮培民, 王国祥, 胡春华, 等. 底泥疏浚能控制湖泊富营养化吗? [J]. *湖泊科学*, 2000, **12**(3): 269-279.
- [12] 王栋, 孔繁翔, 刘爱菊, 等. 生态疏浚对太湖五里湖湖区生态环境的影响 [J]. *湖泊科学*, 2005, **17**(3): 26-268.
- [13] 钟继承, 刘国锋, 范成新, 等. 湖泊底泥疏浚环境效应 1. 内源磷释放控制作用 [J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(1): 84-93.
- [14] 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.
- [15] 谷孝鸿, 王晓蓉, 胡维平. 东太湖渔业发展对水环境的影响及其生态对策 [J]. *上海环境科学*, 2003, **22**(5): 702-704.
- [16] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control—a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [17] Jin Z B, Liang T, Lin J Z, *et al.* Study on heavy metal contamination and potential ecological risk in Hong Kong Rivers [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1997, **33**(4): 485-492.
- [18] 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. 330-381.
- [19] Qu W C, Dickman M, Wang S. Multivariate analysis of heavy metal and nutrient concentrations in sediments of Taihu Lake, China [J]. *Hydrobiologia*, 2001, **450**(1-3): 83-89.
- [20] 雷泽湘, 徐德兰, 顾继光, 等. 太湖大型水生植物分布特征及其对湖泊营养盐的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2008, **27**(2): 698-704.
- [21] 陈璐璐, 周北海, 徐冰冰, 等. 太湖水体典型重金属镉和铬含量及其生态风险 [J]. *生态学杂志*, 2011, **30**(10): 2290-2296.
- [22] 姜霞, 石志芳, 刘锋, 等. 疏浚对梅梁湾表层沉积物重金属赋存形态及其生物毒性的影响 [J]. *环境科学研究*, 2010, **23**(9): 1151-1157.
- [23] 钟继承, 范成新. 底泥疏浚效果及环境效应研究进展 [J]. *湖泊科学*, 2007, **19**(1): 1-10.
- [24] Samecka-Cymermana A, Kempers A J. Concentrations of heavy metals and plant nutrients in water, sediments and aquatic macrophytes of anthropogenic lakes (former open cut brown coal mines) differing in stage of acidification [J]. *Science of the Total Environment*, 2001, **281**(1-3): 87-98.
- [25] 高文华, 杜永芬, 王丹丹, 等. 福建罗源湾潮间带沉积物重金属含量空间分布及其环境质量影响 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(9): 3097-3103.
- [26] 贺志鹏, 宋金明, 张乃星, 等. 南黄海表层海水重金属的变化特征及影响因素 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(5): 1153-1162.
- [27] Borg H, Jonsson P. Large-scale metal distribution in Baltic Sea sediments [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1996, **32**(1): 8-21.
- [28] 李玉, 俞志明, 曹西华, 等. 重金属在胶州湾表层沉积物中的分布与富集 [J]. *海洋与湖沼*, 2005, **36**(6): 580-589.
- [29] 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.

CONTENTS

An Assessment of PM _{2.5} Related Health Risks and Impaired Values of Beijing Residents in a Consecutive High-Level Exposure During Heavy Haze Days	XIE Yuan-bo, CHEN Juan, LI Wei (1)
Seasonal Variation of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} at Changbai Mountain	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, et al. (9)
Variation of Atmospheric Particle Number Concentrations in Qingdao and Its Impact on Visibility	KE Xin-shu, SHENG Li-fang, KONG Jun, et al. (15)
Concentrations of PCDD/Fs in the Atmosphere of Chongqing City and Its Seasonal Variation	ZHANG Xiao-ling, LU Yi, ZHU Ming-ji, et al. (22)
Atmospheric Emission of PCDD/Fs from Secondary Aluminum Metallurgy Industry in the Southwest Area, China	LU Yi, ZHANG Xiao-ling, GUO Zhi-shun, et al. (30)
Atmospheric Emission of PCDD/Fs from Modern Dry Processing Cement Kilns with Preheating in the Southwest Area, China	ZHANG Xiao-ling, LU Yi, JIAN Chuan, et al. (35)
Pollution Status and Characteristics of PBDEs in Indoor Air of Hangzhou	JIANG Xin-wei, SUN Xin, PEI Xiao-qiang, et al. (41)
Size Distribution of Particle and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Particle Emissions from Simulated Emission Sources	FU Hai-huan, TIAN Na, SHANG Hui-bin, et al. (46)
Atmospheric Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Elements in Northeast of Sichuan, Central China	TONG Xiao-ning, ZHOU Hou-yun, YOU Chen-feng, et al. (53)
Trend in Acid Deposition at Tieshanping, Chongqing During 2001-2010	YU De-xiang, MA Xiao-xiao, TAN Bing-quan, et al. (60)
Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen of the Jinshui Watershed in the Upper Hanjiang River	WANG Jin-jie, ZHANG Ke-rong, WU Chuan, et al. (66)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Wheat Straw and Its Smoke	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, et al. (73)
Magnetic Properties of Indoor Dustfall at Different Heights in Lanzhou	WU Duo, WEI Hai-tao, ZHAO Rui-rui, et al. (79)
Mercury Fluxes from Conifer-Broadleaf Forested Field in Central Subtropical Forest Zone	MA Ming, WANG Ding-yong, SHEN Yuan-yuan, et al. (85)
Impacts of Rice Straw Biochar on Organic Carbon and CO ₂ Release in Arable Soil	KE Yue-jin, HU Xue-yu, YI Qing, et al. (93)
Geochemical Distribution of Dissolved Bismuth in the Yellow Sea and East China Sea	WU Xiao-dan, SONG Jin-ming, WU Bin, et al. (100)
Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Upper Reaches of Hunhe River (Qingyuan Section), Northeast China	MA Ying-qun, SHI Yao, QIN Yan-wen, et al. (108)
Determination of Estrogenic Compounds in Water of Jiulong River Using Polar Organic Chemical Integrative Sampler	ZHANG Li-peng, WANG Xin-hong, LI Yong-yu, et al. (117)
Variation Characteristics and Environmental Significant of Trace Elements Under Rainfall Condition in Karst Groundwater	CHEN Xue-bin, YANG Ping-heng, LAN Jia-cheng, et al. (123)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Xilin River Basin and the Possible Controls	TANG Xi-wen, WU Jin-kui, XUE Li-yang, et al. (131)
Forms and Spatial Distribution Characteristics of Nitrogen in Ziya River Basin	ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang, et al. (143)
Impact of Rice Agriculture on Nitrogen and Phosphorus Exports in Streams in Hilly Red Soil Earth Region of Central Subtropics	SONG Li-fang, WANG Yi, WU Jun-shui, et al. (150)
Study on Distribution of Phosphorus in Surface Sediments of the Yellow Sea and the East China Sea	SONG Guo-dong, LIU Su-mei, ZHANG Guo-ling (157)
Characterization and Optimization of the NaOH-EDTA Extracts for Solution ³¹ P-NMR Analysis of Organic Phosphorus in River Sediments	ZHANG Wen-qiang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong, et al. (163)
Regeneration and Transformation of BAPP in Suspended Solids Under Short-term Sediment Disturbance	WU Xiao-fei, LI Da-peng, WANG Ming (171)
Sediment Risk Assessment and Heavy Metal Source Analysis in Typical Country Water Level Fluctuated Zone (WLFZ) of the Three Gorges	AO Liang, LEI Bo, WANG Ye-chun, et al. (179)
Pollution Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Different Eastern Dredging Regions of Lake Taihu	MAO Zhi-gang, GU Xiao-hong, LU Xiao-ming, et al. (186)
Study on the Stages of Major Sediments in Dianchi Lake	WANG Xin-yu, ZHOU Feng, YI Xuan, et al. (194)
Oil Spill Identification Using Partial Surface Fitting Method Based on Concentration-Synchronous-Matrix-Fluorescence Spectra	WANG Chun-yan, SHI Xiao-feng, LI Wen-dong, et al. (202)
Treatment of Sludge Liquor Produced in Deep Dehydration by Photoelectro-Fenton Process	WANG Xian-li, WANG Shi-feng, WU Jun-feng, et al. (208)
Characteristics of Nitrification and Denitrification for Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal by Granular Sludge	LIU Xiao-ying, LIN Hui, MA Zhao-rui, et al. (214)
Study on Long-Term Stability of Biological Nitrogen Removal via Nitrite from Real Landfill Leachate	SUN Hong-wei, GUO Ying, PENG Yong-zhen (221)
Compositions and Residual Properties of Petroleum Hydrocarbon in Contaminated Soil of the Oilfields	HU Di, LI Chuan, DONG Qian-qian, et al. (227)
Dynamics of the Mineralization and Transformation of Rice Photosynthesized Carbon in Paddy Soils - a Batch Incubation Experiment	TAN Li-min, PENG Pei-qin, LI Ke-lin, et al. (233)
Effects of Land Use and Abandonment on Soil Labile Organic Carbon in the Karst Region of Southwest China	LIAO Hong-kai, LI Juan, LONG Jian, et al. (240)
Aluminum Dissolution and Changes of pH in Soil Solution During Sorption of Copper by Aggregates of Paddy Soil	XU Hai-bo, ZHAO Dao-yuan, QIN Chao, et al. (248)
Effect of Cr(VI) Anions on the Cu(II) Adsorption Behavior of Two Kinds of Clay Minerals in Single and Binary Solution	LIU Juan-juan, LIANG Dong-li, WU Xiao-long, et al. (254)
Effect of Flooding Time Length on Mycorrhizal Colonization of Three AM Fungi in Two Wetland Plants	MA Lei-meng, WANG Peng-teng, WANG Shu-guang (263)
Preliminary Study on the Relationship Between the Water Quality and the Aquatic Biological Health Status of Taihu Lake	ZHOU Xiao-bai, ZHANG Ning-hong, ZHANG Yong, et al. (271)
Acute Toxicity of Three Typical Pollutants to Aquatic Organisms and Their Water Quality Criteria	JIANG Dong-sheng, SHI Xiao-rong, CUI Yi-bin, et al. (279)
Evaluation of the Acute Toxicity of Pharmaceutical Wastewater to Luminescent Bacteria	DU Li-na, YANG Fan, MU Yu-feng, et al. (286)
Influence of the Coexistence of Zn ²⁺ on the Enantioselective Toxicity of Metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i>	HU Xiao-na, ZHANG Shu-xian, CHEN Cai-dong, et al. (292)
Simplification of Biotic Ligand Model and Evaluation of Predicted Results	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, et al. (299)
Priority Pollutants Ranking and Screening of Coke Industry based on USEtox Model	HAO Tian, DU Peng-fei, DU Bin, et al. (304)
Isolation, Identification and Characterization of a Microcystin-degrading Bacterium <i>Paucibacter</i> sp. Strain CH	YOU Di-jie, CHEN Xiao-guo, XIANG Hui-yi, et al. (313)
Inhibition of the Activity of Sulfate-reducing Bacteria in Produced Water from Oil Reservoir by Nitrate	YANG De-yu, ZHANG Ying, SHI Rong-jiu, et al. (319)
Bioconversion of Cellulose to Methane by a Consortium Consisting of Four Microbial Strains	WU Jun-mei, MA An-zhou, CUI Meng-meng, et al. (327)
Factors Influencing the Variability in Soil Heterotrophic Respiration from Terrestrial Ecosystem in China	XIE Wei, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua (334)
Study on the Distinguishing of Root Respiration from Soil Microbial Respiration in a <i>Leymus chinensis</i> Steppe in Inner Mongolia, China	SHI Jing-jing, GENG Yuan-bo (341)
Nitrous Oxide Flux at the Water-Air Interface of the Rivers in Nanjing During Summer	HAN Yang, ZHENG You-fei, WU Rong-jun, et al. (348)
Effects of Antiseptic on the Analysis of Greenhouse Gases Concentrations in Lake Water	XIAO Qi-tao, HU Zheng-hua, James Deng, et al. (356)
Electricity Generation of Surplus Sludge Microbial Fuel Cell Enhanced by Biosurfactant	PENG Hai-li, ZHANG Zhi-ping, LI Xiao-ming, et al. (365)
Fe-ZSM-5 Catalysts with Different Silica-Alumina Ratios for N ₂ O Catalytic Decomposition	LU Ren-jie, ZHANG Xin-yan, HAO Zheng-ping (371)
Inhibition of Chlorobenzene Formation via Various Routes During Waste Incineration by Ammonium Sulfate and Urea	YAN Mi, QI Zhi-fu, LI Xiao-dong, et al. (380)
County Scale Characteristics of CO ₂ Emission's Spatial-Temporal Evolution in the Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan Region	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, et al. (385)
Characterization and Soil Environmental Safety Assessment of Super Absorbent Polymers in Agricultural Application	LI Xi, LIU Yu-rong, ZHENG Yuan-ming, et al. (394)

《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)

2014年1月15日 35卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 1 Jan. 15, 2014

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