

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第2期

Vol.33 No.2

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

基于人体健康风险的水污染事件污染物安全阈值研究	郑丙辉, 罗锦洪, 付青, 秦延文, 胡林林 (337)
基于人体健康风险的水污染事件遗传性致癌物安全浓度研究	罗锦洪, 郑丙辉, 付青, 黄民生 (342)
湿地水环境健康评价方法及案例分析	李玉凤, 刘红玉, 郝敬峰, 郑因, 曹晓 (346)
北运河下游典型河网区水体中氮磷分布与富营养化评价	单保庆, 菅宇翔, 唐文忠, 张洪 (352)
漳卫南运河流域水质时空变化特征及其污染源识别	徐华山, 徐宗学, 唐芳芳, 于伟东, 程燕平 (359)
黄河三角洲浅层地下水化学特征及形成作用	安乐生, 赵全升, 叶思源, 刘贯群, 丁喜桂 (370)
沉积物扰动持续时间对悬浮物中磷形态数量分布的影响	李大鹏, 黄勇, 李勇, 潘杨 (379)
沉水植物生长期对沉积物和上覆水之间磷迁移的影响	王立志, 王国祥, 俞振飞, 周贝贝, 陈秋敏, 李振国 (385)
长寿湖表层沉积物氮磷和有机质污染特征及评价	卢少勇, 许梦爽, 金相灿, 黄国忠, 胡文 (393)
洪泽湖沉积物中营养盐和重金属的垂向分布特征研究	张文斌, 余辉 (399)
降雨对农家堆肥氮磷流失的影响及其面源污染风险分析	彭莉, 王莉玮, 杨志敏, 陈玉成, 乔俊婧, 赵中金 (407)
浅水湖泊水动力过程对藻型湖区水体生物光学特性的影响	刘笑菡, 冯龙庆, 张运林, 赵林林, 朱梦圆, 时志强, 殷燕, 丁艳青 (412)
基于半分析模型的太湖春季水体漫衰减系数 K_d (490) 估算及其遥感反演	刘忠华, 李云梅, 李瑞云, 吕恒, 檀静, 郭宇龙 (421)
基于 QAA 算法的巢湖悬浮物浓度反演研究	张红, 黄家柱, 李云梅, 徐伟凡, 刘忠华, 徐昕 (429)
好氧/厌氧潜流湿地结构工艺优化	李锋民, 单时, 李媛媛, 李扬, 王震宇 (436)
邻苯二甲酸二丁酯对短裸甲藻活性氧自由基的影响	别聪聪, 李锋民, 李媛媛, 王震宇 (442)
Rac-及 S-异丙甲草胺对 2 种微藻毒性特征影响研究	蔡卫丹, 刘惠君, 方治国 (448)
羟基自由基致死船舶压载水海洋有害生物研究	白敏冬, 张拿慧, 张芝涛, 陈操, 孟祥盈 (454)
天然菱铁矿改性及强化除砷研究	赵凯, 郭华明, 李媛, 任燕 (459)
零价铁降解 4-氯硝基苯动力学研究	廖娣劫, 杨琦, 李俊鎔 (469)
水体中氧氟沙星的光化学降解研究	邵萌, 杨桂朋, 张洪海 (476)
阿替洛尔在硝酸根溶液中的光降解研究	季跃飞, 曾超, 孟翠, 杨曦, 高士祥 (481)
吡啶在紫外光辐射下的生物降解	方苗苗, 阎宁, 张永明 (488)
蜜环菌漆酶对蒽醌类染料的脱色条件优化	朱显峰, 秦仁炳, 余晨晨, 范书军 (495)
ϵ -聚赖氨酸生产废菌体对六价铬吸附影响的研究	曹玉娟, 张杨, 夏军, 徐虹, 冯小海 (499)
丝状菌污泥致密过程的强化条件研究	李志华, 孙玮, 姬晓琴, 王晓昌 (505)
亚硝化颗粒污泥对温度变化的响应特性研究	罗远玲, 杨朝晖, 徐峥勇, 周玲君, 黄兢, 肖勇, 曾光明, 汪理科 (511)
我国典型工程机械燃油消耗量及排放清单研究	李东玲, 吴烨, 周昱, 杜让, 傅立新 (518)
北京市 PM_{10} 自动监测网络优化研究	齐玲, 赵越, 谢绍东 (525)
道路绿化带对街道峡谷内污染物扩散的影响研究	徐伟嘉, 幸鸿, 余志 (532)
Fe^{II} (EDTA) 络合协同 RDB 去除 NO 废气效能及过程分析	陈浚, 杨宣, 於建明, 蒋轶锋, 陈建孟 (539)
UV-B 辐射对亚热带森林凋落叶氮、磷元素释放的影响	宋新章, 张慧玲, 江洪, 余树全 (545)
干热河谷林地燥红土固碳特征及“新固定”碳表观稳定性	唐国勇, 李昆, 孙永玉, 张春华 (551)
九龙江河口表层水体及沉积物中甲烷的分布和环境控制因素研究	郭莹莹, 陈坚, 尹希杰, 孙治雷, 邵长伟 (558)
秋季黄河口滨岸潮滩湿地系统 CH_4 通量特征及影响因素研究	姜欢欢, 孙志高, 王玲玲, 牟晓杰, 孙万龙, 宋红丽, 孙文广 (565)
我国典型非木浆造纸二噁英排放研究	王志芳, 丁琼, 王开祥, 吴昌敏, 曲云欢, 赵晓冬 (574)
典型电器工业区河涌沉积物中的多溴联苯醚空间和垂直分布	邱孟德, 邓代永, 余乐洹, 孙国萍, 麦碧娴, 许玫英 (580)
电子废物拆解区农业土壤中多氯联苯的污染特征	王学彤, 李元成, 张媛, 缪绎, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟 (587)
北京科教园区绿地土壤中多环芳烃的残留特征与潜在风险	彭驰, 王美娥, 欧阳志云, 焦文涛, 陈卫平 (592)
上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价	柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 庄腾飞, 施振香, 卢小遮 (599)
海河流域北部地区河流沉积物重金属的生态风险评价	尚林源, 孙然好, 王赵明, 汲玉河, 陈利顶 (606)
三峡库区消落带不同水位高程土壤重金属含量及污染评价	王业春, 雷波, 杨三明, 张晟 (612)
超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中细菌群落结构分析	叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝健, 蔡明山, 许燕滨, 占星星 (618)
大庆聚驱后油藏内源微生物群落结构解析与分布特征研究	赵玲侠, 高配科, 曹美娜, 高梦黎, 李国强, 朱旭东, 马挺 (625)
不同碳源刺激对老化污染土壤中 PAHs 降解研究	尹春芹, 蒋新, 王芳, 王聪颖 (633)
应用电致化学发光分子探针技术对微小原甲藻的检测	朱霞, 甄毓, 米铁柱, 于志刚, 池振明, 路兴岚 (640)
软骨藻酸直接竞争 ELISA 方法的建立及优化	王茜, 程金平, 高利利, 董宇, 席磊 (647)
固相萃取-高效液相色谱法同时测定水体中的 10 种磺胺类抗生素	洪蕾洁, 石璐, 张亚雷, 周雪飞, 朱洪光, 林双双 (652)
五氯酚对 HeLa 细胞毒性及 DNA 损伤的研究	金帮明, 王辅明, 熊力, 张晓峰, 刘堰 (658)
建筑陶瓷碳计量与优化模型研究	彭军霞, 赵宇波, 焦丽华, 曾路, 郑为民 (665)
《环境科学》征订启事 (447) 《环境科学》征稿简则 (475) 信息 (524, 586, 605, 624)	

洪泽湖沉积物中营养盐和重金属的垂向分布特征研究

张文斌^{1,2}, 余辉^{1*}

(1. 中国环境科学研究院湖泊生态环境创新基地, 北京 100012; 2. 长春市市政建设(集团)有限公司, 长春 130033)

摘要: 为了揭示洪泽湖沉积物中营养盐和重金属的垂向分布特征, 2008年6月采集了洪泽湖淮河口湖口附近、湖西和湖心3个柱状沉积物样品。通过测定分析其总氮、总磷、有机质和重金属Cu、Zn、Pb、Cd、Fe、Al、Cr、Hg、Mn、As的垂向分布特征, 揭示了营养盐演化规律及重金属污染历史。结果表明, 淮河口附近沉积环境受淮河流域影响较大, 营养盐中TN、TP、OM的含量分别为390.8~643.7、428.6~538.6、5194.3~9164.9 mg·kg⁻¹, Zn、Cd、Al、Fe和Mn受人为影响较小, 其余重金属人为影响较大。湖西区沉积环境受淮河及湖西周边城市影响, TN、TP、OM的含量为633.4~2677.3、480.0~1115.9、7140.8~47849.7 mg·kg⁻¹, TN、OM和重金属污染程度从20世纪70年代末加剧, 90年代以来有所改善, As和Cr受流域人类活动影响较大, 其余重金属受人为影响较小。湖心来源主要为流域碎屑物质, TN、TP、OM的含量为904.7~1585.4、526.3~750.1、10635.6~19020.6 mg·kg⁻¹, 营养盐和重金属相关性显著, 垂向分布均相似, 含量从底层至表层呈上升趋势。沉积柱中营养盐、重金属元素具有比较一致的污染特征, 与洪泽湖流域发展阶段相吻合, 洪泽湖沉积环境属于洪水冲刷型堆积模式(Turbidity Flood Model方式)。

关键词: 洪泽湖; 沉积物; 营养盐; 重金属; 垂向分布

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)02-0399-08

Vertical Distribution Characteristics of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of Lake Hongze

ZHANG Wen-bin^{1,2}, YU Hui¹

(1. Research Center of Lake Environment, Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China; 2. Changchun Municipal Group, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to understand the vertical distribution characteristics of nutrients and heavy metals in sediments of Lake Hongze, three core sediment samples at 3 sites (one near the Huaihe River inlet of Lake Hongze, one at the western part of the lake and one at the lake center) were collected in June of 2008. By measurement of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and heavy metals (Cu, Zn, Pb, Cd, Fe, Al, Cr, Hg, Mn, As) and by analyzing of their vertical characteristics, investigation revealed the nutrient evolution processes and pollution history. Sediment near Huaihe river mouth was more polluted by the Huaihe River watershed. The nutrients TN, TP and organic matter (OM) concentrations in this core sample were 390.8-643.7, 428.6-538.6, 5194.3-9164.9 mg·kg⁻¹ respectively. Zn, Cd, Al, Fe and Mn in the sediment in this area were affected by human activities less than other heavy metals. Western Lake sediment was affected by the Huaihe River, inlet river and human activities in cities along western lake shoreline. TN, TP and OM concentrations in this core sample were 633.4-2677.3, 480.0-1115.9, 7140.8-47849.7 mg·kg⁻¹ respectively. The pollution extents of TN, OM and heavy metals in sediment were exacerbated since the late of 1970s, but the situation was improved since the 1990s. As and Cr in the sediments were influenced by human activities more than other heavy metals. Main pollution source in sediment at the lake center were detritus from the lake watershed. TN, TP and OM concentrations in this core sample were 904.7-1585.4, 526.3-750.1, 10635.6-19020.6 mg·kg⁻¹ respectively. The correlations among nutrients and heavy metals in sediment are significant, and their vertical distribution patterns were similar. The concentrations of nutrients and heavy metals increased from bottom to surface. Nutrients and heavy metal pollution in sediment had the same vertical distribution characteristics which coincided with the lake watershed economic development stage. The sediment in Lake Hongze can be described by the Turbidity Flood Model.

Key words: Lake Hongze; sediments; nutrients; heavy metals; vertical distribution

洪泽湖(33°06′~33°40′N, 118°10′~118°52′E)是中国第四大淡水湖, 湖盆形成于公元12世纪, 距今约有800年的历史。湖面水域面积1597 km², 最大水深4.37 m, 平均水深1.77 m, 蓄水量27.9×10⁸ m³。洪泽湖具有蓄洪、灌溉、航运、水产养殖、饮用、生态保护等多种功能^[1~3]。

湖泊沉积物蓄积了大量的营养盐和重金属等物

质, 成为记录流域人类活动对环境影响和湖泊环境响应的自然档案^[4~8], 通过对沉积物多环境指标的分析可重建湖泊及流域环境演变过程以及人类活动

收稿日期: 2011-03-18; 修订日期: 2011-08-10

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07101-001)

作者简介: 张文斌(1983~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污水处理技术, E-mail: zhangwenbin114@163.com

* 通讯联系人, E-mail: yuhui@craes.org.cn

对环境的影响,从而揭示湖泊富营养状态的演化规律^[9~14].

湖泊沉积物中 C/N 在某种程度上可反映有机质来源,因为生物种类不同,C/N 不同. 高等植物的 C/N 为 14~23,水生生物为 2.8~3.4,浮游动物与浮游植物为 6~13,藻类为 5~14^[15].

湖泊水体沉积物的堆积方式与其湖盆地形、水流等特性相关. 日本学者 Inouchi^[16] 认为湖体沉积物的堆积有 4 种模式: Cloud Model, 该模式主要适用于深水湖,堆积速率与水深成正比; Blanket Model, 该模式主要适用于水流缓慢的湖泊,堆积速率与水深无关,呈均匀分布; Wave Redistributed Model, 该模式中,堆积速率与入出湖河流无关,由波浪作用决定; Turbidity Flood Model, 该模式主要适用于浅水湖泊,堆积速率与入出湖河流河口及湖湾位置有关. 余辉等^[17] 用以上堆积模式对洪泽湖进行了分析,根据洪泽湖底质营养盐的形态分布特征,证明洪泽湖的沉积物堆积是属于 Turbidity Flood Model 方式.

洪泽湖作为通江湖泊,近年来越来越受到关注. 但有关洪泽湖的研究资料与基础数据相对较少,尤其是对沉积物污染特征的研究更为少见. 本研究为了揭示洪泽湖沉积物中营养盐和重金属的垂向分布特征,选取洪泽湖典型区域的柱状沉积物进行研究,分析比较沉积柱中营养盐和重金属的垂向分布,通过对柱状沉积物多环境指标的分析,可重建洪泽湖及流域环境演变过程以及人类活动对环境的影响,从而揭示洪泽湖富营养状态的演化规律和堆积模式,以为洪泽湖的治理与保护提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 采样点布设与样品采集

洪泽湖入湖河流集中在西部,其中淮河为其最大入湖河流,入湖水量占总入湖径流量的 70% 以上. 3 条主要出湖河流分布在东部,其中入江水道的出水量占总出湖水量的 60%~70%^[3]. 洪泽湖流域水系和采样点见图 1.

2008 年 6 月,在位于洪泽湖南部的淮河口附近 S1 (33°19'61.02"N, 118°51'50.26"E)、湖西区成河乡西 S2 (33°30'83.33"N, 118°50'88.33"E) 和湖心 S3 (33°28'83.13"N, 118°73'38.82"E) 3 个点位采集柱状沉积物. 沉积柱样品用奥地利产 Uwtee 柱状重力采样器采取, S1 点位采集深度为 20 cm, S2 和 S3 点位采集深度为 30 cm, 现场将样品分层, 每 1 cm 分一层. 将采集沉积物样品均匀混合后装入聚乙烯自

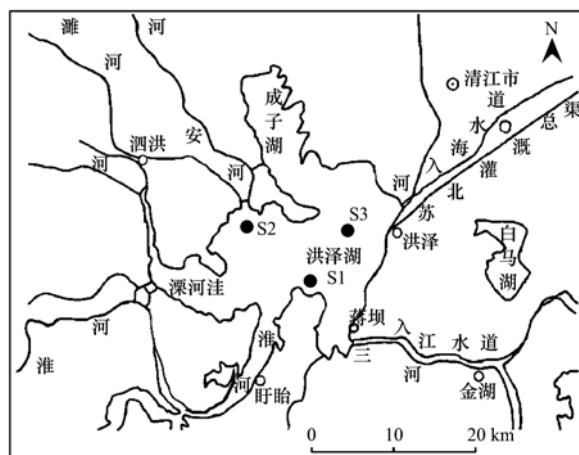


图 1 洪泽湖出入湖河流水系和采样点位示意

Fig. 1 Watershed and sediment sampling locations in Lake Hongze

封袋中密封,低温保存送回实验室冷冻.

1.2 样品处理及分析.

沉积物样品使用冷冻干燥机干燥,待干燥后去掉杂物及石块,经玛瑙研钵研磨处理后过 100 目尼龙塞,贮存与塑料自封袋后密封待用.

营养盐分析项目有:总氮(TN)、总磷(TP)和有机质(OM),营养盐成分分析根据文献^[18]进行. 重金属分析项目有: Cu、Zn、Pb、Cd、Fe、Al、Cr、Hg、Mn 和 As, 其中 Cu、Zn、Pb、Fe、Al、Cd、Mn 和 Cr 用等离子发射光谱 ICP-OES (VARIAN VISTA-MPX) 测定, Hg 和 As 用 AFS-230a 型双道原子荧光光度计进行测定. 沉积物重金属分析根据文献^[19]进行.

2 结果与讨论

2.1 沉积柱中营养盐的分布特征和来源分析

2.1.1 营养盐的垂直分布特征

从图 2 可看出,洪泽湖 S1 点位沉积柱中有机质(OM)和总磷(TP)含量随深度无明显变化规律,有机质变化范围为 5 194.3~9 164.9 mg·kg⁻¹,含量基本保持在均值 7 324.2 mg·kg⁻¹附近,总磷基本保持稳定,均值为 493.8 mg·kg⁻¹,变化范围为 428.6~538.6 mg·kg⁻¹. S1 点位位于淮河口附近,受淮河流域影响较大,由于水流的冲刷作用,OM 和 TP 的含量变化不稳定. 总氮(TN)在沉积柱 6 cm 处有一个累积小峰值,达到 643.7 mg·kg⁻¹,在 8~6 cm 这一阶段含量有明显的升高趋势,这与 1989 年 3 月淮河突发水污染事故,上游蚌埠、淮南等地排放工业废水导致洪泽湖水体氨氮等严重超标有关^[20],在湖泊的自净能力作用下,6~3 cm 剖面有很快的下降趋势,除

此之外含量变化比较平稳,为 390.8 ~ 502.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,总体变化不大.

TN 与 OM、TP 均有显著相关性(见表 1),其中 TN 与 OM 呈极显著相关,说明三者来源相近. N/P 值比较平稳,保持在 0.8 ~ 1.1 之间. C/N 值为 6.5 ~ 11.0,表明 S2 沉积柱有机物主要来源于浮游动物和浮游植物^[15]. C/N 计算方法为:有机碳/总氮;有机碳 = 有机质/1.724.

从图 3 可看出,洪泽湖 S2 沉积柱中 OM 的含量变化可分为 4 个阶段:30 ~ 11 cm 为第 1 阶段,期间有机质含量基本不变,均值为 9 660.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,标

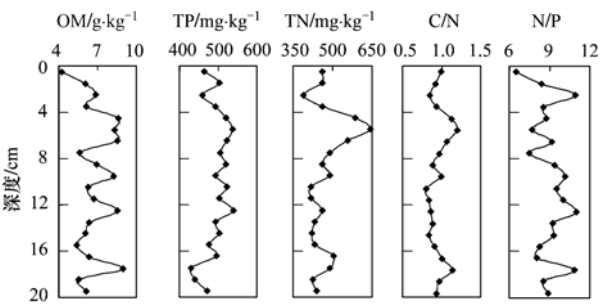


图 2 洪泽湖 S1 沉积柱中营养盐的垂直变化

Fig. 2 Vertical profiles of nutrients in the lake sediment at S1 in Lake Hongze

表 1 洪泽湖 S1 沉积柱营养盐与重金属间的相关系数¹⁾

Table 1 Correlation coefficient between heavy metals and nutrients in lake sediments at S1 in Lake Hongze													
	OM	TP	TN	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Hg	As	Al	Fe	Mn
OM	1.000	0.313	0.567**	0.024	0.470*	0.079	0.320	0.491*	0.194	0.177	0.241	0.349	0.393
TP		1.000	0.438*	0.567**	0.161	0.141	0.063	0.273	0.478*	0.097	0.049	0.124	0.074
TN			1.000	0.053	0.567**	0.139	0.570**	0.416	0.071	0.132	0.453*	0.593**	0.712**
Cu				1.000	0.107	0.567**	0.334	0.234	0.234	0.050	0.204	0.146	0.218
Zn					1.000	0.243	0.567**	0.430	0.109	0.318	0.718**	0.713**	0.796**
Pb						1.000	0.331	0.567**	0.122	0.036	0.105	0.160	0.268
Cd							1.000	0.290	0.567**	0.144	0.898**	0.907**	0.905**
Cr								1.000	0.169	0.567**	0.258	0.366	0.419
Hg									1.000	0.208	0.567**	0.063	0.010
As										1.000	0.203	0.567**	0.354
Al											1.000	0.933**	0.567**
Fe												1.000	0.921**
Mn													1.000

1) *表示显著性水平为 0.05(显著); **表示显著性水平为 0.01(极显著),下同

准差是 993.4; 11 ~ 6 cm 为第 2 阶段,此阶段有机质含量急剧升高,在 6 cm 处出现一个高峰值,达到 47 849.7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,由于在 20 世纪 70 年代末以来,淮河流域、徐州及泗洪等地工农业经济及养殖业快速发展,皮革、造纸、印染、和化工等工业迅速发展,使得西部湖区污染不断严重^[21,22]; 6 ~ 4 cm 为第 3 阶段,在 20 世纪 90 年代以来,政府部门加大对洪泽湖的治理,提高了工业废水的处理能力,农药使用量减少,致使在这阶段含量呈下降趋势^[23]; 4 ~ 0 cm 为第 4 阶段,在此阶段趋含量向于平稳,均值为 19 040 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,标准差为 1 560.7,约为第一阶段的 2 倍. TP 的变化趋势与 OM 不同,在 2 cm 处有 1 个小峰值,为 1 115.9 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,约为其它剖面的 2 倍,其它剖面的含量变化不大,值均在 600.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 附近. TN 与 OM 的变化趋势一致,第 1 阶段均值为 779.7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,标准差为 66.3; 第 2 阶段的峰值达到 2 677.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,标准差为 340.2; 第 4 阶段均值为 1 551.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,标准差为 115.2,约为第 1 阶段的 2 倍.

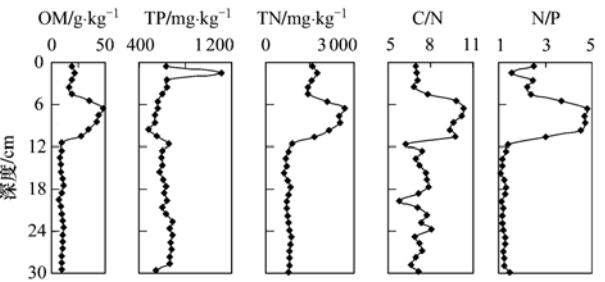


图 3 洪泽湖 S2 沉积柱中营养盐的垂直变化

Fig. 3 Vertical profiles of nutrients in the lake sediment at S2 in Lake Hongze

TN 与 OM 呈极显著相关性(见表 2),说明两者来源相近. C/N 值变化范围为 5.8 ~ 10.4,5 ~ 11 cm 比值最大,说明有机物来源大部分来源于浮游动物和浮游植物,19 ~ 20 cm 来源于藻类^[15]. N/P 值变化趋势与 OM 和 TN 相似,变化范围在 0.5 ~ 1.0 之间.

洪泽湖 S3 沉积柱营养盐含量见图 4,沉积柱中 OM 含量从 30 cm 往上总体有逐渐上升的趋势,其中在 13 cm 处出现峰值,为 19.0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,在 8 cm 处

表 2 洪泽湖 S2 沉积柱营养盐与重金属间的相关系数

Table 2 Correlation coefficient between heavy metals and nutrients in lake sediments at S2 in Lake Hongze

	OM	TP	TN	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Hg	As	Al	Fe	Mn
OM	1.000	0.272	0.567 **	0.665 **	0.095	0.263	0.125	0.083	0.520 **	0.174	0.392	0.048	0.424 *
TP		1.000	0.164	0.567 **	0.502 **	0.432 *	0.412 *	0.126	0.189	0.204	0.283	0.443 *	0.494 **
TN			1.000	0.671 **	0.567 **	0.356 *	0.171	0.075	0.553 **	0.100	0.443	0.014	0.340
Cu				1.000	0.573 **	0.567 **	0.541 **	0.123	0.241	0.078	0.672 **	0.462 **	0.024
Zn					1.000	0.734 **	0.567 **	0.353	0.150	0.629 **	0.820 **	0.909 **	0.586 **
Pb						1.000	0.694 **	0.567 **	0.048	0.400 *	0.610 **	0.587 **	0.406 *
Cd							1.000	0.490 **	0.567 **	0.615 **	0.830 **	0.925 **	0.640 **
Cr								1.000	0.158	0.567 **	0.358 *	0.457 **	0.262
Hg									1.000	0.273	0.567 **	0.257	0.028
As										1.000	0.484 **	0.567 **	0.540 **
Al											1.000	0.788 **	0.567 **
Fe												1.000	0.686 **
Mn													1.000

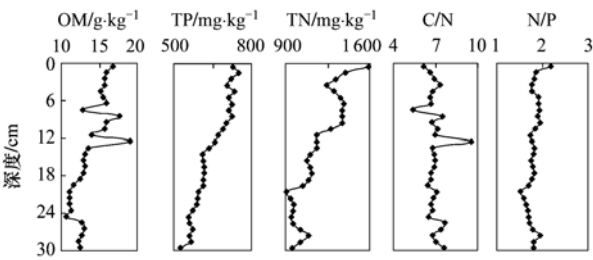


图 4 洪泽湖 S3 沉积柱中营养盐的垂直变化
Fig. 4 Vertical profiles of nutrients in the lake sediment at S3 in Lake Hongze

表 3 洪泽湖 S3 沉积柱营养盐与重金属间的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between heavy metals and nutrients in lake sediments at S3 in Lake Hongze

	OM	TP	TN	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Hg	As	Al	Fe	Mn
OM	1.000	0.773 **	0.567 **	0.098	0.498 **	0.684 **	0.312	0.062	0.646 **	0.450 *	0.119	0.289	0.643 **
TP		1.000	0.920 **	0.567 **	0.670 **	0.887 **	0.454 *	0.133	0.620 **	0.698 **	0.183	0.509 **	0.909 **
TN			1.000	0.291	0.567 **	0.885 **	0.589 **	0.169	0.611 **	0.628 **	0.256	0.615 **	0.878 **
Cu				1.000	0.473 **	0.567 **	0.458 **	0.471 **	0.227	0.182	0.444 *	0.687 **	0.435 *
Zn					1.000	0.705 **	0.567 **	0.447 *	0.458 **	0.509 **	0.312	0.729 **	0.759 **
Pb						1.000	0.487 **	0.567 **	0.608 **	0.727 **	0.253	0.589 **	0.858 **
Cd							1.000	0.498 **	0.567 **	0.200	0.641 **	0.829 **	0.498 **
Cr								1.000	0.344	0.567 **	0.522 **	0.592 **	0.311
Hg									1.000	0.328	0.567 **	0.254	0.569 **
As										1.000	0.190	0.567 **	0.705 **
Al											1.000	0.737 **	0.567 **
Fe												1.000	0.699 **
Mn													1.000

C/N 值变化范围为 5.4~9.5,其中 12~13 cm 处比值最高,7~8 cm 剖面最低,此剖面有机物来源于藻类,其余剖面有机物均来源于浮游动物和浮游植物。N/P 值变化不大,从下到上基本保持稳定。

2.1.2 营养盐来源及影响因素

S1、S2 和 S3 沉积柱中 OM 与 TN 均具有极显著相关性,说明沉积物中氮、碳有同源性,在生物体内

含量突然下降,7 cm 处含量有所回升。TP 含量从沉积柱底部到顶端呈缓慢上升趋势,变化范围 526.3~750.1 mg·kg⁻¹,均值为 641.5 mg·kg⁻¹,标准差为 65.7。TN 含量变化呈阶梯状,自底部向上含量逐渐增加,变化范围 904.7~1 585.4 mg·kg⁻¹,上升幅度比 TP 较快。由于 S3 位于湖心,受入湖河流影响较小,沉积物对营养盐通过吸附和累积作用,使含量不断增加。

OM、TP、TN 两两之间均有极显著相关性(见表 3),表明来源相同,TP 和 TN 的相关系数达到 0.9。

氮、碳含量较恒定,且都是生物体有机组成元素,而磷在生物体内含量变化较大,说明磷主要以无机形态存在^[24],有机物大部分来源于浮游动物和浮游植物,只有极少部分来自藻类。

S1、S2 和 S3 沉积柱营养盐含量总体分布为 S1<S2<S3,与表层沉积物相似,S1 受淮河冲刷作用,营养盐不易沉淀,敞水区 S3 处由于湖水滞留

时间较长,由于沉积物对营养盐吸附和营养盐沉淀致富营养化程度高,这一分布是典型的洪水冲刷型堆积模式(Turbidity Flood Model 方式)^[16]. 沉积柱 11 cm 以上 S2 中 OM 和 TN 的含量大于 S3 处,2003 年何华春等^[25]对洪泽湖中心柱样进行分析,用²¹⁰Pb 和¹³⁷Cs 计年,计算出洪泽湖沉积物平均沉积速率约 $0.4 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$,据此推算,在 20 世纪 90 年代初,S2 沉积柱 OM 和 TN 含量急剧增加. 20 世纪 90 年代以来,安徽、河南地区工农业发展迅速,污染物随入湖河流进入洪泽湖,本地入湖污染源中又以湖西的泗洪、盱眙、泗阳县为主,废水的排放对洪泽湖富营养化影响很大,致使西部湖区污染严重,这与这一时期洪泽湖北部和西部湖区水质急剧恶化及洪泽湖水质的不断恶化的趋势相一致^[21,22].

2.2 沉积柱中重金属的分布特征和来源分析

2.2.1 重金属的垂直分布特征

研究湖泊沉积物柱状样中重金属不同层位的含量分布,可了解研究区域重金属的累积叠加历史,反映不同历史阶段人类活动对所研究区域重金属的影响情况^[26-28].

S1 沉积柱垂向分布总体可分为 3 个阶段(见图 5):20~10 cm 为第 1 阶段,此阶段 Cu、Cr、Zn、Al、

Fe、Mn 含量呈波浪状,波动比较大,Pb 和 Hg 含量随深度变浅而减少,As 和 Cd 含量基变化较小. 1953 年对洪泽湖进行了湖道疏浚工作^[25],沉积物中重金属含量波动可能与航道疏浚过程中,由于湖泊环境条件的改变使部分重金属重新释放和吸附^[29],另一方面 S1 点离淮河入口较近,受淮河流域的影响以及入湖水流流量和冲刷作用致使重金属含量不稳定. 第 2 阶段为 10~6 cm, Cu、Hg、Pb、Cr 和 Zn 随深度变浅含量逐渐升高,其余各元素含量基本稳定. 说明该阶段洪泽湖南部污染现象日益严重,与沉积柱中 TN 的变化趋势相似. 第 3 阶段为 6~0 cm, Hg 和 As 含量随深度变浅而升高, Zn、Cd、Al、Fe 和 Mn 元素随深度变浅而含量降低, Cu、Pb 和 Cr 含量波动较大. 90 年代后,国家和当地政府部门加大对淮河和洪泽湖的治理^[30],使得大部分重金属含量降低. 由于 90 年代后洪泽湖发生多起水污染事故,导致有些重金属元素含量产生波动^[23]. Hg 元素含量上升除了与工业污染有关外,还与物累积效应有关, Hg 在生物作用下富集,可能是造成沉积柱 Hg 污染历史较长^[31], Hg 污染日益严重的原因. As 主要来源于人为活动,金属冶炼和煤炭燃烧,同时农业生产使用污水灌溉及含 As 肥料、农药等,也能引起砷元素含量的增加^[32].

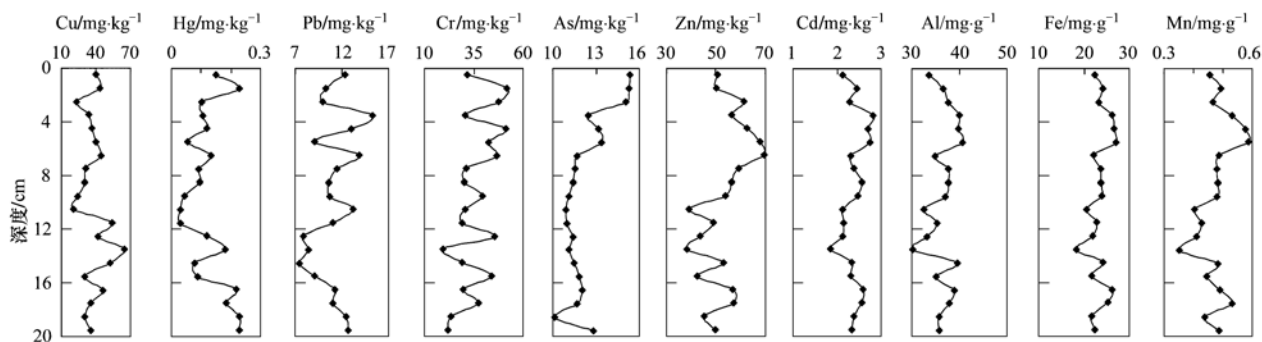


图 5 洪泽湖 S1 沉积柱中重金属的垂向分布

Fig. 5 Vertical of heavy metals in the lake sediment at S1 in Lake Hongze

S2 沉积柱可分为 4 个阶段(见图 6):30~17 cm 为第一阶段,在这一阶段 Pb、Cr、Al 和 Mn 变化曲线呈波浪状,但含量变化范围均不大,其余各重金属元素含量变化较小. 这说明 20 世纪 70 年代以前,人类活动对洪泽湖西部的影响较小. 17~12 cm 为第 2 阶段,此阶段除 Hg 外其它重金属元素含量均有自下而上减小的趋势, Hg 含量为先增后减. 根据已有洪泽湖地区粒度变化规律资料的研究^[33],湖西区该阶段变化趋势可能是由于该时段入湖河流挟带大量泥沙入湖,粒径较大颗粒先行沉积,致使沉积了大

量粗颗粒矿物,黏土矿物比例相对较少,粗颗粒矿物吸附能力小,使得该时段总体重金属元素的含量偏低^[34]. 12~7 cm 为第 3 阶段,此阶段重金属的含量有所回升, Mn 含量在该阶段最低,该阶段与沉积柱中营养盐的分布的第 2 阶段相似. 7~0 cm 为第 4 阶段,该阶段 Cu 含量曲线呈减小的趋势,其它元素在最表层含量较高,这与从 2000 年以来洪泽湖发生多起污染事故有关,2000~2004 每年都发生较大污染事故,其中还有几起特大污染事故,污染物浓度高,范围大,对洪泽湖的生态环境造成严重破坏^[23].

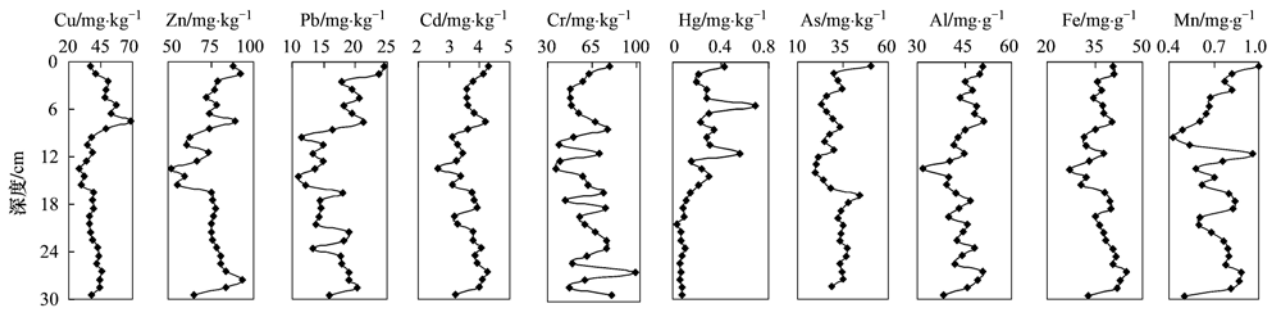


图 6 洪泽湖 S2 沉积柱中重金属的垂向分布

Fig. 6 Vertical of heavy metals in the lake sediment at S2 in Lake Hongze

S3 沉积柱中各重金属的含量 12 cm 处可看作分界线(见图 7), 12 cm 以上的含量大于 12 cm 以下. S3 在敞水区, 沉积物重金属的沉降和吸附较稳

定, 洪泽湖从 80 年代污染逐渐严重, 90 年代初期至中期污染情况急剧恶化, 90 年代后期有所改善, 但波动很大^[21].

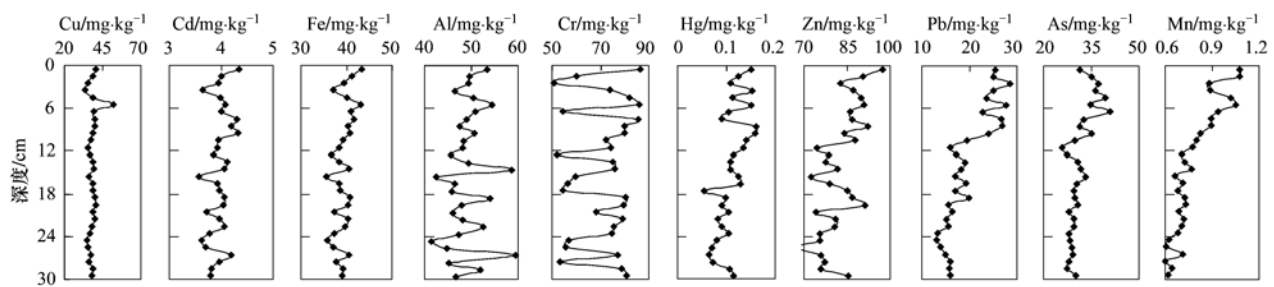


图 7 洪泽湖 S3 沉积柱中重金属的垂向分布

Fig. 7 Vertical of heavy metals in the lake sediment at S3 in Lake Hongze

洪泽湖的 3 个沉积柱中重金属的含量为在淮河口附近 S1 处较低, 这与沉积柱中营养盐分布相似, S2 和 S3 沉积柱中大部分重金属元素含量相近, 变化不显著, 这一分布是典型的洪水冲刷型堆积模式(Turbidity Flood Model 方式)^[16]. S2 沉积柱上部分 Hg 含量大于 S3 沉积柱上部分, 这种的变化与沉积柱中营养盐相似, 影响因素相同.

2.2.2 重金属相关分析及来源分析

S1 沉积柱中重金属元素间相关性见表 1. Zn、Cd、Al、Fe、Mn 两两之间呈极显著相关性, 说明这些重金属元素有很好的同源性, 其中 Fe 和 Cd、Al、Mn, Cd 和 Mn 的相关系数分别为 0.907、0.933、0.921、0.905. Al、Fe 和 Mn 等属于较难迁移的惰性元素^[35], 某种程度上表明了 Zn、Cd、Al、Fe 和 Mn 在沉积物中有相似或相同的存在形式, 属于次生的黏土矿物. 未受人类活动污染的重金属元素与 Al 等黏土矿物元素之间有较好的相关性, 受人类活动污染后, 相关性降低^[36,37]. Pb、Cu、Cr 和 As 受人类活动影响较大. Hg 和 Cd、Al 呈极显著相关性. Hg 元素来源于流域母质和人为活动污染.

S2 沉积柱 Zn、Pb、Cd、Al、Fe、Mn 两两之间相关性显著, 这些重金属元素的来源相似, Fe 和 Zn、Cd 的相关系数为 0.909、0.925. Hg 和 Cd、Al 呈极显著相关性, Cu 与 Al、Fe 等惰性元素呈极显著相关性, 表明 Zn、Pb、Cd、Al、Fe、Mn、Hg 和 Cu 处于自然分布状态, 受人为影响较小, 和大部分重金属元素相关性较差. As 和 Cr 相关性显著, 受流域人类活动影响较大. S3 沉积柱中重金属元素间相关性较好, Cu、Cd、Al、Fe、Mn、Cu、Cd、Al、Fe、Mn、Cu、Zn、Pb、Cd、Fe、Mn 这 3 组元素间两两之间相关性显著, Hg、Cr 与大部分重金属元素相关性较好. S3 位于湖心区, 重金属间有很好的同源性, 说明重金属含量主要受流域碎屑物质来源的影响, 通过共沉淀或吸附沉积在沉积物中.

沉积物重金属元素含量的变化受多种因素的影响, 一般有两来源, 一为自然源(流域母质), 二为人为源^[38]. 这 3 个沉积柱中重金属元素间相关性 S3 最好, S2 次之, S1 受淮河流域人类活动的影响较大, 相关性最差.

Al 和 Fe 等在自然界含量比较稳定, 受人类活

动的影响较小,已有的研究表明,重金属与 Al 和 Fe 元素相关性较好,自然来源可能性大,反之人为来源可能性大.洪泽湖 3 个沉积柱中 Zn、Cd、Al、Fe 和 Mn 均为自然来源,As 和 Cr 受人类活动影响较大,Pb、Cu 和 Hg 既来源于流域母质,又受到人类活动污染.

洪泽湖沉积物中重金属的自然来源相对稳定,大部分重金属元素有很好的同源性,通过共沉淀或吸附积累在沉积物中.人类活动的干扰可能是影响重金属垂向分布呈现波浪状分布特征的主要原因,除此之外还受到沉积环境的变化,如成岩作用、沉积物理化性质、生物作用等的影响.

2.3 营养盐和重金属元素间的相关性

S1 沉积柱 OM 和 Zn、Cr 呈显著相关性,TP 和 Hg 相关性较好,TP 和 Cu 呈极显著相关性,TN 和 Zn、Cd、Al、Fe、Mn 均有显著相关性,表明 TN 为自然循环,以湖泊内源为主.

S2 沉积柱中 OM 和 Cu、Hg、Mn 有显著相关性,TP 和 Cu、Zn、Pb、Cd、Fe、Mn 相关性显著,TN 和 Cu、Zn、Pb、Hg 相关性显著.

S3 沉积柱中 Zn、Pb、Hg、As、Mn 和营养盐均呈显著相关性,Cd、Fe 和 TP、TN 相关性极为显著,Cu 和 TP 呈显著相关性.沉积物对营养盐和重金属的吸附和积累方式相似.

沉积柱营养盐与重金属间相关性强度排序为 $S1 < S2 < S3$,与重金属间的相关性排序一致. S1 中 TN 与重金属的相关性较好,S2 和 S3 的营养盐和大部分重金属的相关性显著,某种程度上反映了大部分重金属和营养盐的污染源相同.

3 结论

(1) 淮河入口附近 S1 沉积环境受淮河流域影响较大,营养盐之间呈显著相关性,营养盐无显著变化趋势,TN 与部分重金属元素的相关性较好.重金属 Zn、Cd、Al、Fe、Mn 间的相关性较好,受人类活动影响较小,其余重金属元素受人类活动影响较大.

(2) 湖西区 S2 沉积环境受入湖河流淮河以及湖西的泗洪、盱眙、泗阳三县的影响较大,沉积柱营养盐中 TN 与 OM 相关性显著.两者变化趋势一致,从 20 世纪 70 年代末至 90 年代,西部湖区污染程度急剧加大,90 年代以来污染程度有所改善,TP 变化较小.重金属变化趋势与 TN、OM 相似,重金属表层含量较高与 2000 年以来洪泽湖发生多起污染事故有关.营养盐和少部分重金属有很好的相关性,重金

属大部分元素之间的相关性较好,As 和 Cr 受流域人类活动影响较大,其余元素人为影响较小.

(3) 湖心 S3 属于敞水区,营养盐之间相关性极为显著,含量从底层至表层呈上升趋势.营养盐与大部分重金属元素相关性显著,表明大部分重金属和营养盐沉积方式相似.重金属的垂向分布与营养盐相似,重金属元素之间的相关性显著,受人类活动影响较小,来源主要为洪泽湖流域碎屑物质.

(4) 3 个沉积柱中营养盐之间相关性较好,有机物大部分来源于浮游动物和浮游植物,只有极少部分来自藻类.重金属的自然来源相对稳定,大部分重金属元素有很好的同源性,通过共沉淀或吸附积累在沉积物中.整体看来,As 和 Cr 的来源与其他元素有些差异,均受人类活动不同程度的影响.

(5) 洪泽湖 3 个沉积柱之间的营养盐和重金属间的垂向含量以及相关强度排序相似: $S1 < S2 < S3$.洪泽湖各沉积柱中营养盐、重金属元素具有比较一致的污染特征,与洪泽湖流域发展阶段相吻合,洪泽湖沉积环境属于洪水冲刷型堆积模式(Turbidity Flood Model 方式).

致谢:本研究在采样和分析过程中,得到了中国科学院水生生物研究所徐军博士和中国环境科学研究院卢少勇博士的帮助,在此表示感谢.

参考文献:

- [1] 朱松泉,窦鸿身. 洪泽湖 [M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1993.
- [2] 洪国喜,韩国民. 洪泽湖人湖、出湖水流泥沙特性分析 [J]. 水利科技与经济, 2007, 13(4): 240-241.
- [3] 楚恩国. 洪泽湖水文特性初探 [J]. 水文, 2001, 21(5): 56-59.
- [4] Von Gunten H R, Sturm M, Moser R N. 200-year record of metals in lake sediments and natural background concentrations [J]. Environmental Science and Technology, 1997, 31(8): 2193-2197.
- [5] Rognerud S, Fjeld E. Trace element contamination of Norwegian lake sediments [J]. A Journal of the Human Environment, 2001, 30(1): 11-19.
- [6] 吴艳宏,王苏民. 龙感湖沉积物中人类活动导致的营养盐累积通量估算 [J]. 第四纪研究, 2006, 26(5): 843-848.
- [7] 薛滨,姚书春,王苏民,等. 长江中下游不同类型湖泊沉积物营养盐蓄积变化过程及其原因分析 [J]. 第四纪研究, 2007, 27(1): 122-127.
- [8] 杨丽原,沈吉,张祖陆,等. 近四十年来山东南四湖环境演化的元素地球化学记录 [J]. 地球化学, 2003, 32(5): 453-460.
- [9] Cundy A B, Croudace I W, Cearreta A, et al. Reconstructing historical trends in metal input in heavily-disturbed,

- contaminated estuaries; studies from Bilbao, Southampton Water and Sicily [J]. *Applied Geochemistry*, 2003, **18**(2): 311-325.
- [10] Schmidt H, Reimers C E. The recent history of trace metal accumulation in the Santa Barbara Basin, southern California borderland [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1991, **33**(5): 485-500.
- [11] 廖启林, 黄顺生, 范迪富, 等. 微量元素在湖积物、土壤的垂向分布与稻谷中的分配 [J]. *第四纪研究*, 2005, **25**(3): 331-339.
- [12] 王荣, 羊向东, 朱立平. 西藏纳木错过去 200 年来的环境变化 [J]. *第四纪研究*, 2006, **26**(5): 791-798.
- [13] 孙千里, 肖举乐. 岱海沉积记录的季风/干旱过渡区全新世适宜期特征 [J]. *第四纪研究*, 2006, **26**(5): 781-790.
- [14] 姚书春, 王小林, 薛滨. 全新世以来江苏固城湖沉积模式初探 [J]. *第四纪研究*, 2007, **27**(3): 365-370.
- [15] 蔡金榜, 李文奇, 刘娜, 等. 洋河水库底泥污染特性研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(3): 886-893.
- [16] Inouchi Y. Sedimentation mechanism of fine materials in Lake Biwa. Mem [J]. *Geological Society of Japan*, 1990, **36**: 195-208.
- [17] 余辉, 张文斌, 卢少勇, 等. 洪泽湖表层底质营养盐的形态分布特征与评价 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(4): 961-968.
- [18] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范 [M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 211-230.
- [19] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第三版). 北京: 中国环境科学出版社, 1997. 446-457.
- [20] 杨士建. 洪泽湖湿地资源保护与可持续利用研究 [J]. *重庆环境科学*, 2003, **25**(2): 15-17.
- [21] 李波, 濮培民. 淮河流域及洪泽湖水质的演变趋势分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 2003, **12**(1): 67-73.
- [22] 董广霞, 毛剑英. 淮河流域污染“久治不愈”原因浅析及治理措施建议 [J]. *中国环境监测*, 2005, **21**(6): 75-78.
- [23] 尹景伟, 刘春山. 洪泽湖 1991~2005 年发生的水污染情况分析 & 对策探讨 [J]. *江苏水利*, 2009, (8): 30-31.
- [24] 王永华, 钱少猛, 徐南妮, 等. 巢湖东区底泥污染物分布特征及评价 [J]. *环境科学研究*, 2004, **17**(6): 22-26.
- [25] 何华春, 许叶华, 杨競红, 等. 洪泽湖流域沉积物重金属元素的环境记录分析 [J]. *第四纪研究*, 2007, **27**(5): 766-774.
- [26] 朱伯万, 薛怀友. 江苏扬中长江漫滩沉积物重金属垂向分布特征及其背景值确定方法 [J]. *江苏地质*, 2006, **30**(3): 187-190.
- [27] 齐凤霞, 郑丙辉, 万峻, 等. 渤海湾(天津段)柱样沉积物重金属污染研究 [J]. *海洋技术*, 2004, **23**(3): 85-91.
- [28] 康勤书, 吴莹, 张经, 等. 崇明东滩湿地重金属分布特征及其污染状况 [J]. *海洋学报*, 2003, **25**(增刊 2): 1-7.
- [29] 吴建政, 余晓玲, 鲍鹏, 等. 芝罘湾近期沉积物中重金属元素记录 [J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2006, **36**(1): 141-144.
- [30] 吴晓兵. 洪泽湖 60 年的变迁 [J]. *中国水利*, 2009, (14): 21-23.
- [31] 刘恩峰, 沈吉, 朱育新等. 太湖表层沉积物重金属元素的来源分析 [J]. *湖泊科学*, 2004, **16**(2): 113-119.
- [32] 张宪军, 蓝先洪, 赵广涛, 等. 苏北浅滩表层沉积物中重金属元素 Cd、As、Hg、Se 分布及污染评价 [J]. *海洋地质动态*, 2007, **23**(2): 9-13.
- [33] 何华春, 丁海燕, 张振克, 等. 淮河中下游洪泽湖湖泊沉积物粒度特征及其沉积环境意义 [J]. *地理科学*, 2005, **25**(5): 591-596.
- [34] 朱广伟, 秦伯强, 高光, 等. 太湖近代沉积物中重金属元素的累积 [J]. *湖泊科学*, 2005, **17**(2): 143-150.
- [35] 刘恩峰, 沈洁, 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.
- [36] Ekholm P, Krogerus K. Bioavailability of phosphorus in purified municipal wastewaters [J]. *Water Research*, 1998, **32**(2): 343-351.
- [37] Ackermann F. A procedure for correcting the grain size effect in heavy metal analyses of estuarine and coastal sediments [J]. *Environmental Technology Letters*, 1980, **1**(11): 518-527.
- [38] 刘伟, 陈振楼, 许世远, 等. 上海市小城镇河流沉积物重金属污染特征研究 [J]. *环境科学*, 2000, **27**(3): 535-543.

CONTENTS

Safety Value of Contaminant in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk	ZHENG Bing-hui, LUO Jin-hong, FU Qing, <i>et al.</i> (337)
Safety Concentration of Genotoxic Carcinogens in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk	LUO Jin-hong, ZHENG Bing-hui, FU Qing, <i>et al.</i> (342)
A Quantitative Method and Case Analysis for Assessing Water Health	LI Yu-feng, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, <i>et al.</i> (346)
Temporal and Spatial Variation of Nitrogen and Phosphorus and Eutrophication Assessment in Downstream River Network Areas of North Canal River Watershed ...	SHAN Bao-qing, JIAN Yu-xiang, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (352)
Spatiotemporal Variation Analysis and Identification of Water Pollution Sources in the Zhangweinan River Basin	XU Hua-shan, XU Zong-xue, TANG Fang-fang, <i>et al.</i> (359)
Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Shallow Groundwater in the Yellow River Delta	AN Le-sheng, ZHAO Quan-sheng, YE Si-yuan, <i>et al.</i> (370)
Impacts of Sediment Disturbance Time on the Distribution of Phosphorus Forms in Suspended Solids	LI Da-peng, HUANG Yong, LI Yong, <i>et al.</i> (379)
Influence of Submerged Macrophytes on Phosphorus Transference Between Sediment and Overlying Water in the Growth Period	WANG Li-zhi, WANG Guo-xiang, YU Zhen-fei, <i>et al.</i> (385)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments of Lake Changshouhu in Chongqing, China	LU Shao-yong, XU Meng-shuang, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (393)
Vertical Distribution Characteristics of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of Lake Hongze	ZHANG Wen-bin, YU Hui (399)
Effects of Rainfall on Nitrogen and Phosphorus Loss from Courtyard Compost and Its Risk of Nonpoint Source Pollution	PENG Li, WANG Li-wei, YANG Zhi-min, <i>et al.</i> (407)
Effects of Hydrodynamic Process on Bio-optical Properties in Algal-Dominated Lake Region of Shallow Lake	LIU Xiao-han, FENG Long-qing, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (412)
Estimation and Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient $K_d(490)$ in Lake Taihu in Spring Based on Semi-analytical Model	LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, LI Rui-yun, <i>et al.</i> (421)
Monitoring the Total Suspended Matter of Lake Chaohu Based on Quasi-Analytical Algorithm	ZHANG Hong, HUANG Jia-zhu, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (429)
Optimization of Aerobic/Anaerobic Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Feng-min, SHAN Shi, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (436)
Effects of Allelochemical Dibutyl Phthalate on <i>Gymnodinium breve</i> Reactive Oxygen Species	BIE Cong-cong, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (442)
Toxicity Effects of <i>Rac</i> - and <i>S</i> -Metolachlor on Two Algae	CAI Wei-dan, LIU Hui-jun, FANG Zhi-guo (448)
Studies for Killing the Oceanic Harmful Organisms in Ship's Ballast Water Using Hydroxyl Radicals	BAI Min-dong, ZHANG Na-hui, ZHANG Zhi-tao, <i>et al.</i> (454)
Modification of Natural Siderite and Enhanced Adsorption of Arsenic	ZHAO Kai, GUO Hua-ming, LI Yuan, <i>et al.</i> (459)
Kinetic Study of 4-Chloronitrobenzene Degradation by Zero-Valent Iron	LIAO Di-jie, YANG Qi, LEE Chun-chi (469)
Photochemical Degradation of Ofloxacin in Aqueous Solution	SHAO Meng, YANG Gui-peng, ZHANG Hong-hai (476)
Photodegradation of Atenolol in Aqueous Nitrate Solution	JI Yue-fei, ZENG Chao, MENG Cui, <i>et al.</i> (481)
Biodegradation of Pyridine Under UV Irradiation	FANG Miao-miao, YAN Ning, ZHANG Yong-ming (488)
Optimization on Decoloration Conditions of Anthraquinone Dyes by Laccase from <i>Amillariella mellea</i>	ZHU Xian-feng, QIN Ren-bing, YU Chen-chen, <i>et al.</i> (495)
Biosorption of Chromium(VI) by Waste Biomass of ϵ -Poly-L-lysine Fermentation	CAO Yu-juan, ZHANG Yang, XIA Jun, <i>et al.</i> (499)
Investigation on Enhanced Conditions for the Densification of Filamentous Sludge	LI Zhi-hua, SUN Wei, JI Xiao-qin, <i>et al.</i> (505)
Effect of Temperature on the Response Characteristics of Shortcut Nitrification Granular Sludge	LUO Yuan-ling, YANG Zhao-hui, XU Zheng-yong, <i>et al.</i> (511)
Fuel Consumption and Emission Inventory of Typical Construction Equipments in China	LI Dong-ling, WU Ye, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (518)
Optimization of PM ₁₀ Monitoring Network in Beijing	QI Ling, ZHAO Yue, XIE Shao-dong (525)
Effect of Greenbelt on Pollutant Dispersion in Street Canyon	XU Wei-jia, XING Hong, YU Zhi (532)
Investigation of Effect and Process of Nitric Oxide Removal in Rotating Drum Biofilter Coupled with Absorption by Fe ^{II} (EDTA)	CHEN Jun, YANG Xuan, YU Jian-ming, <i>et al.</i> (539)
Effect of UV-B Radiation on Release of Nitrogen and Phosphorus from Leaf Litter in Subtropical Region in China	SONG Xin-zhang, ZHANG Hui-ling, JIANG Hong, <i>et al.</i> (545)
Characteristics of Carbon Sequestration and Apparent Stability of New Sequestered Carbon in Forested Torrid Red Soil at Dry-Hot Valley	TANG Guo-yong, LI Kun, SUN Yong-yu, <i>et al.</i> (551)
Spatial Distribution of Methane in Surface Water and Sediment of Jiulongjiang Estuary and the Effect Environment factors of It	GUO Ying-ying, CHEN Jian, YIN Xi-jie, <i>et al.</i> (558)
Methane Fluxes and Controlling Factors in the Intertidal Zone of the Yellow River Estuary in Autumn	JIANG Huan-huan, SUN Zhi-gao, WANG Ling-ling, <i>et al.</i> (565)
Study on Dioxin Emission for Typical Non-Wood Pulp Making in China	WANG Zhi-fang, DING Qiong, WANG Kai-xiang, <i>et al.</i> (574)
Horizontal and Vertical Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediment from a Typical Electrical Equipment Industrial Area	QIU Meng-de, DENG Dai-yong, YU Le-huan, <i>et al.</i> (580)
Characteristics of Polychlorinated Biphenyls in Soils from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (587)
Characterization and Potential Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Green Space Soils of Educational Areas in Beijing	PENG Chi, WANG Mei-e, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (592)
Spatial Variability and Evaluation of Soil Heavy Metal Contamination in the Urban-transect of Shanghai	LIU Yun-long, ZHANG Li-jia, HAN Xiao-fei, <i>et al.</i> (599)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments of Rivers in Northern Area of Haihe River Basin, China	SHANG Lin-yuan, SUN Ran-hao, WANG Zhao-ming, <i>et al.</i> (606)
Concentrations and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals at Different Water-level Altitudes in the Draw-down Areas of the Three Gorges Reservoir	WANG Ye-chun, LEI Bo, YANG San-ming, <i>et al.</i> (612)
Analysis of Community Structure on Sludge Aerobic/anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment	YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> (618)
Research on Population Structure and Distribution Characteristic of Indigenous Microorganism in Post-polymer-Flooding Oil Reservoir	ZHAO Ling-xia, GAO Pei-ke, CAO Mei-na, <i>et al.</i> (625)
Study on Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) with Different Additional Carbon Sources in Aged Contaminated Soil	YIN Chun-qin, JIANG Xin, WANG Fang, <i>et al.</i> (633)
Detection of <i>Prorocentrum minimum</i> (Pavillard) Schiller with the Electrochemiluminescence-Molecular Probe	ZHU Xia, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (640)
Development of Direct Competitive Enzyme-Linked Immunosorbent Assay for the Determination of Domoic Acid	WANG Qian, CHENG Jin-ping, GAO Li-li, <i>et al.</i> (647)
Simultaneous Determination of 10 Sulfonamide Antibiotics in Water by Solid-phase Extraction and High Performance Liquid Chromatography	HONG Lei-jie, SHI Lu, ZHANG Ya-lei, <i>et al.</i> (652)
Effects of Pentachlorophenol on DNA Damage and Cytotoxicity of HeLa Cells	JIN Bang-ming, WANG Fu-ming, XIONG Li, <i>et al.</i> (658)
Modeling of Carbon Dioxide Measurement and Optimization on Building Ceramic Industry	PENG Jun-xia, ZHAO Yu-bo, JIAO Li-hua, <i>et al.</i> (665)

《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2月15日 33卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 2 Feb. 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