

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

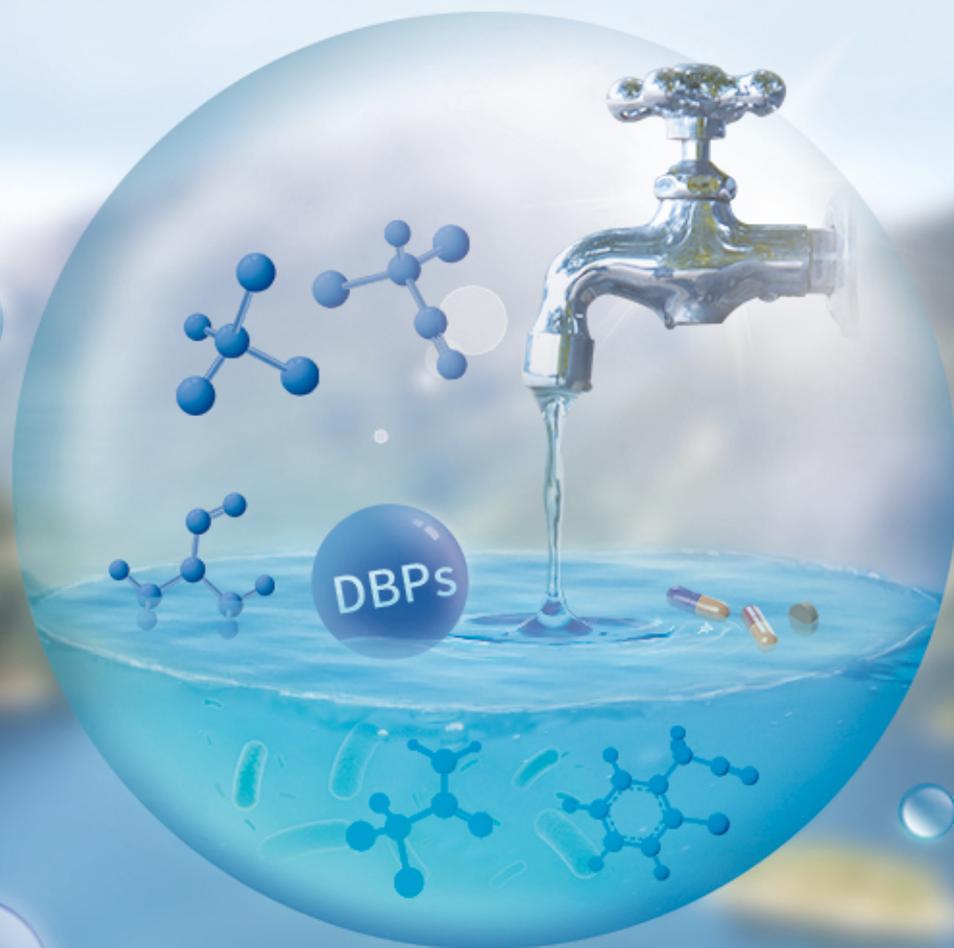
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

饮用水中的消毒副产物及其控制策略

楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年11月

第42卷 第11期
Vol.42 No.11

目次

综述与专论

饮用水中的消毒副产物及其控制策略 楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华(5059)
生物炭吸附硫化氢机制与影响因素研究进展 徐期勇, 梁铭坤, 许文君, 黄丹丹(5086)

研究报告

1998~2016 中国八大经济区植被覆盖对 PM_{2.5} 浓度时空分布的影响 杨玉莲, 杨昆, 罗毅, 喻臻钰, 孟超, 李岑(5100)
COVID-19 疫情期间北京市两次重霾污染过程大气污染物演变特征及潜在源区分析 赵德龙, 田平, 周崑, 肖伟, 盛久江, 王飞, 杜远谋, 黄梦宇, 何晖, 丁德平(5109)

汾渭平原临汾市 2019 年春节期间大气污染特征与来源解析 刘威杰, 胡天鹏, 毛瑶, 许安, 苏业旺, 李星谕, 程铖, 石明明, 梁莉莉, 邢新丽, 张家泉, 祁士华(5122)

石家庄市大气污染物的季节性时空特征及潜在源区 聂赛赛, 王帅, 崔建升, 刘大喜, 陈静, 田亮, 贺博文, 沈梦宇(5131)

天津市冬季空气湿度对 PM_{2.5} 和能见度的影响 丁净, 唐颖潇, 郝天依, 姚青, 蔡子颖, 张裕芬, 韩素芹(5143)

承德市 PM_{2.5} 中碳质组分的季节分布特征及来源解析 贺博文, 聂赛赛, 王帅, 冯亚平, 姚波, 崔建升(5152)

中国生活源挥发性有机物排放清单 梁小明, 陈来国, 沈国锋, 卢清, 刘明, 陆海涛, 任璐, 孙西勃, 林奎, 梁明易, 叶代启, 陶澍(5162)

2011~2019 年中国工业源挥发性有机物排放特征 刘锐源, 钟美芳, 赵晓雅, 卢诗文, 田俊泰, 李银松, 侯墨, 梁小明, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启(5169)

基于 LHS-MC 青岛市工业源 VOCs 排放清单及不确定性 徐琬莹, 付飞, 吕建华, 李瑞凡, 邵蕊, 和慧, 李淑芬, 左华(5180)

典型橡胶制品业 VOCs 排放特征及对周边环境的影响 王海林, 辛国兴, 朱立敏, 薛松, 聂磊, 郝润(5193)

沈阳市不同功能区挥发性有机物分布特征及臭氧生成潜势 库盈盈, 任万辉, 苏枫棋, 于兴娜(5201)

天津城区夏冬季典型污染过程中 BTEX 变化特征及其健康风险评估 韩婷婷, 李颖若, 蒲维维, 姚青, 刘敬乐, 吴进, 张楠楠, 李梓铭, 马志强(5210)

郑州市大气氨排放清单及驱动力分析 计尧, 王琛, 卢轩, 张欢, 尹沙沙(5220)

基于 GAMs 模型分析成都市气象因子交互作用对 O₃ 浓度变化的影响 张莹, 倪长健, 冯鑫媛, 王式功, 张小玲, 张家熙, 李运超(5228)

长江干流表层水体悬浮物的空间变化特征及遥感反演 李建鸿, 黄昌春, 查勇, 王川, 尚娜娜, 郝维月(5239)

河北省夏季降雨溶解性有机物光谱特征的空间分布、来源解析及氮素响应 张紫薇, 周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 董宛佳, 甄瑞晗, 张馨童, 姚波, 崔建升(5250)

城镇与城郊污染河道中 DOM 成分分布与影响因素 朱奔, 陈浩, 丁国平, 孙晓楠, 刘辉, 叶建锋(5264)

北京城市河流水和沉积物中微塑料的组成与分布 胡嘉敏, 左剑恶, 李頔, 谢珍雯, 陈磊(5275)

太湖西岸地表水中中性有机污染物非靶向筛查与生态风险评估 卢昕妍, 王菲, 张丽敏, 任晓鸣, 于南洋, 韦斯(5284)

河水-地下水交互带沉积物中抗生素和代谢产物提取方法优化及其分布特征 李玉琼, 童蕾, 严涵, 尤悦, 卢钰茜, 刘慧(5294)

白洋淀清淤示范区沉积物中抗生素和多环芳烃的分布特征与风险评估 王同飞, 张伟军, 李立青, 张美一, 廖桂英, 王东升(5303)

雄安新区唐河污水库残留污染物对地下水水化学动态的作用机制 张志雄, 王仕琴, 张依章, 冯文钊(5312)

基于时间序列模型的饮用水源地重金属健康风险分析与预测 姬超, 侯大伟, 谢丽, 孙华, 李发志, 周宇, 邓爱萍, 沈红军, 包广静, 王逸南(5322)

千河下游水体-沉积物重金属空间分布、风险及影响因素 高煜, 王国兰, 金梓函, 张军, 耿雅妮(5333)

巢湖流域丰水期可溶态重金属空间分布及污染评价 何苗, 刘桂建, 吴蕾, 齐翠翠(5346)

洪泽湖围栏养殖对表层沉积物重金属含量影响与生态风险评估 瞿鑫源, 张鸣, 谷孝鸿, 阚可聪, 毛志刚, 陈辉辉, 曾庆飞(5355)

成都市地表水天然水化学变化特征及影响因素 许秋瑾, 赖承钺, 丁瑶, 王照丽, 程中华, 于涛(5364)

雷州半岛地下水化学特征及控制因素分析 彭红霞, 侯清芹, 曾敏, 黄长生, 师环环, 皮鹏程, 潘羽杰(5375)

粤港澳大湾区陆源氮污染源结构与空间分布 董斯齐, 黄翀(5384)

红壤丘陵区小流域典型土地利用的面源氮磷输出特征 房志达, 苏静君, 赵洪涛, 胡炼, 李叙勇(5394)

减氮条件下不同施肥模式对稻田氮素淋溶流失的影响 姜海斌, 张克强, 邹洪涛, 马璞骏, 渠清博, 谷艳茹, 沈仕洲(5405)

互花米草入侵对胶州湾湿地土壤磷赋存形态的影响 沙梦乔, 柴娜, 赵洪涛, 刘春井, 丁文超, 谢文霞(5414)

基于 16S rRNA 高通量测序的北运河水体及沉积物微生物群落组成对比分析 彭柯, 董志, 邸琰蓉, 郭道宇(5424)

硅改性花生壳生物炭对水中磷的吸附特性 赵敏, 张小平, 王梁嵘(5433)

高锰酸钾改性桉木生物炭对 Pb(II) 的吸附特性 莫贞林, 曾鸿鹤, 林华, Asfandiyar Shahab, 石清亮, 张华(5440)

混合金属氧化物/碳复合材料的制备及其对 Pb(II) 的吸附性能 卢予沈, 宗莉, 于惠, 牟斌, 王爱勤(5450)

负载型钛凝胶的制备及其吸附去除三价砷的性能 孙晔洋, 周畅, 甘永海, 吴兵党, 张淑娟(5460)

一体式短程硝化-厌氧氨氧化工艺启动过程的亚硝酸盐调控 左富民, 郑蕊, 隋倩雯, 钟慧, 陈彦霖, 魏源送(5472)

生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响 邓华, 高明, 龙翼, 赖佳鑫, 王莹燕, 王子芳(5481)

紫色土旱坡地不同坡位土壤有机碳组分含量对施肥管理的响应 徐曼, 余添, 王富华, 王丹, 王莹燕, 杨文娜, 高明, 王子芳(5491)

南阳盆地东部山区土壤重金属分布特征及生态风险评估 赖书雅, 董秋瑶, 宋超, 杨振京(5500)

城郊农田土壤多环芳烃污染特征及风险评估 张秀秀, 卢晓丽, 魏宇宸, 朱昌达, 潘剑君(5510)

我国东部沿海地区蔬菜中重金属累积分布特征及居民膳食暴露评估 孙帅, 耿柠波, 郭崔崔, 张保琴, 卢宪波, 张海军, 陈吉平(5519)

典型矿区周边农业用地农产品安全风险及影响因素 霍彦慧, 王美娥, 谢天, 姜蓉, 陈卫平(5526)

稻田土壤 Cd 污染与安全种植分区, 以重庆市某区为例 曹淑珍, 母悦, 崔敬鑫, 刘安迪, 程先, 符远航, 魏世强, 张进忠(5535)

镉污染大田条件下不同品种水稻镉积累的特征及影响因素 王宇豪, 杨力, 康愉晨, 陈小红, 耿杰, 李佳欣, 陈文清(5545)

纳米膜覆盖对畜禽粪便好氧堆肥进程及恶臭气体排放的影响 李永双, 孙波, 陈菊红, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮(5554)

《环境科学》征订启事(5108) 《环境科学》征稿简则(5151) 信息(5249, 5263, 5283)

洪泽湖围栏养殖对表层沉积物重金属含量影响与生态风险评价

訾鑫源^{1,2}, 张鸣³, 谷孝鸿², 阚可聪^{1,2}, 毛志刚², 陈辉辉², 曾庆飞^{2*}

(1. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 101408; 2. 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; 3. 南京市高淳区水务局, 南京 211300)

摘要: 为探讨洪泽湖全湖沉积物重金属分布特征及围栏养殖对其影响, 于2018年洪泽湖部分围栏拆除后, 对洪泽湖不同区域(河口、湖心、围栏区、拆除区和外围区)表层沉积物中重金属含量、来源和空间分布特征进行分析, 评估其生态风险. 结果表明, 洪泽湖表层沉积物中 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 含量均值分别为 66.78、33.89、25.35、74.77、16.55、0.23 和 27.20 mg·kg⁻¹. 采用地累积指数和 Hakanson 潜在生态风险指数对沉积物重金属污染现状和潜在生态风险程度的评价表明, 除了 As 和 Cd 元素处于较轻污染程度, 其余元素 Cr、Ni、Cu、Zn 和 Pb 均处于无污染; 除 Cd 存在严重的潜在生态风险, 其余元素均只有低水平潜在生态风险. 结果表明围栏区、拆除区和外围区之间的重金属含量呈现递增趋势, 并向湖心蓄积, 拆除围栏并未在短时间内明显降低重金属含量. 洪泽湖整体呈现低生态风险的状态, 今后治理重点应是北部及东北部的表层沉积物堆积区和养殖区.

关键词: 围栏养殖; 沉积物; 重金属; 洪泽湖; 生态风险评价

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)11-5355-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202012131

Impact of Enclosure Culture on Heavy Metal Content in Surface Sediments of Hongze Lake and Ecological Risk Assessment

ZI Xin-yuan^{1,2}, ZHANG Ming³, GU Xiao-hong², KAN Ke-cong^{1,2}, MAO Zhi-gang², CHEN Hui-hui², ZENG Qing-fei^{2*}

(1. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China; 2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Gaochun District Water Authority Bureau, Nanjing 211300, China)

Abstract: In order to explore the concentrations of heavy metals and the influence of fencing on Hongze lake, the content, source, and spatial distribution characteristics of heavy metals in surface sediments and ecological risks were analyzed in 2018 after part of the fence around Hongze Lake was removed. The results showed that the average contents of Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, and Pb in the surface sediments in Hongze Lake were 66.78, 33.89, 25.35, 74.77, 16.55, 0.23, and 27.20 mg·kg⁻¹, respectively. Cr, Ni, Cu, Zn, and Pb contents were at non-polluting levels, with As and Cd at the lowest level, based on the accumulation index evaluation. Except for Cd, all the elements showed low potential ecological risk. The results showed that the heavy metal content in the fenced, dismantled, and peripheral areas increased and accumulated towards the center of the lake. The removal of the fence did not significantly reduce the heavy metal content in the short-term. Overall, Hongze Lake presented a state of low ecological risk. In the future, environmental policies should include surface sediment accumulation areas and fencing culture in the north and northeast of Hongze Lake.

Key words: fence culture; sediment; heavy metals; Hongze Lake; ecological risk assessment

洪泽湖作为中国第四大淡水湖泊, 具有灌溉、航运、水产养殖、饮用和生态保护等多种功能^[1], 由于资源丰富, 素有“日出斗金”美称. 近年来, 集约化围栏养殖, 以及淮河上、中游工业废水和生活污水排放^[2], 使得湖泊富营养程度不断加剧, 生态系统功能逐年退化.

围栏养殖, 特别是投饵集约化养殖^[3]过程中的残饵、鱼类粪便和药物残留是造成水体富营养化和重金属富集的主要方式^[4]. 集约化养殖过程中所添加的水产饲料含有锌、铁、铜、钴、碘和硒等微量矿物质添加剂^[5], 未经摄食的残饵和动物排泄物沉积在围栏内, 经微生物作用分解成小分子释放到水环境中, 增加沉积物和水体的污染风险^[6~8]. 刘金金等^[9]在对上海市 17 个鱼虾养殖池塘沉积物重金属

含量的分析中发现, 池塘沉积物中 Cd、Hg 和 Cr 含量超过无公害食品淡水养殖产地环境沉积物质量要求的标准. 朱陈名等^[10]对洪泽湖重金属污染现状进行分析得出洪泽湖重金属污染是多因素共同造成的, 其中围栏养殖可能有着重大影响. 最新研究发现, 湖泊围栏拆除后水生植被种类组成及分布发生较大变化, 水体透明度明显下降, 但是对于围栏拆除后沉积物中重金属的变化还鲜见报道^[11]. 因此, 系统研究洪泽湖围栏养殖对表层沉积物中重金属含量

收稿日期: 2020-12-15; 修订日期: 2021-03-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(31972813); 江苏省治太科研课题项目(TH2018303); 江苏省农业科技自主创新项目(CX(20)2026)

作者简介: 訾鑫源(1998~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为淡水养殖生态, E-mail: zixiaoerme@163.com

* 通信作者, E-mail: qizeng@niglas.ac.cn

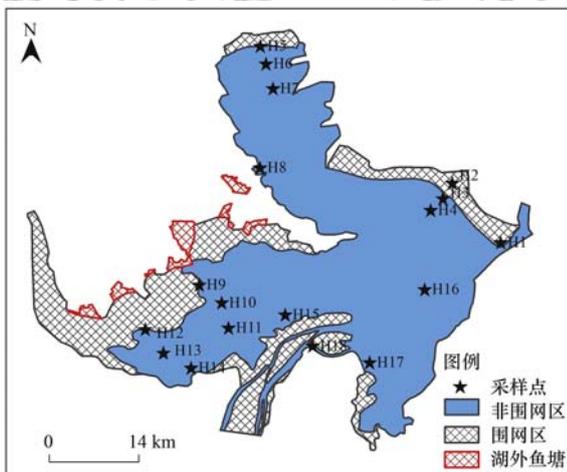
的影响,可为湖泊围栏养殖决策提供理论依据和数据支撑。

重金属作为典型的积累性污染物,具有显著的生物毒性和持久性^[12],是潜在生态风险的重要污染物. 重金属污染一方面表现在进入环境后易积蓄、难降解,会通过食物链进入人体对人类健康产生危害^[13],另一方面,重金属进入到水体后吸附在悬浮颗粒物表面,并与后者共同沉降至水底,最终蓄积于沉积物中,造成环境污染^[14,15]. 张杰等^[16]通过对太湖沉积物中重金属的调查发现,太湖流域总体污染负荷较重; 张家泉等^[17]通过对大冶湖表层沉积物重金属分析发现,大冶湖具有极强的生态风险. 因此研究洪泽湖表层沉积物中重金属含量可以准确判断围栏养殖对于湖泊生态系统所造成的影响. 本文通过对洪泽湖底泥 7 种重金属元素 (Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb) 污染现状、分布特征进行研究,对其生态风险进行评价,旨在系统全面地研究洪泽湖底泥重金属污染状况,并解释围栏养殖对表层沉积物中重金属富集的影响。

1 材料与方法

1.1 采样点布设与采集

2018 年 7 月,根据洪泽湖水域特点、围栏养殖和拆除区的位置设置了 18 个采样点,采集河口、湖心区、围栏区、拆除区和外围区域表层沉积物,点位设置见图 1。



河口: H1、H8、H17 和 H18; 湖心: H15 和 H16; 围栏区: H2、H5、H9 和 H12; 拆除区: H3、H6、H10 和 H13; 外围区: H4、H7、H11 和 H14

图 1 洪泽湖采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Hongze Lake

1.1.1 样品采集

沉积物样品采用彼得森采泥器采集 0 ~ 10 cm 沉积物表层(去除垃圾杂物),置于聚乙烯袋中现场

混匀. 所有样品采集完后装入聚乙烯自封袋中,密封并记录编号、取样位置,低温保存,立即回实验室进行预处理及分析。

1.1.2 样品的处理及分析

沉积物样品使用冷冻干燥机进行干燥,样品至恒质量去除杂物及石块,经翻动、压碎和研磨后过 100 目(0.165 mm)尼龙筛,储存于牛皮纸袋中。

通过电感耦合等离子体质谱仪(美国安捷伦 ICP-MS 7900)测定重金属含量; 目标元素为 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb. 同时质量保证采用三平行样和加标回收法,其中样品分析数据的相对标准偏差(RSD)小于 3%。

本研究采用 SPSS 22.0 和 Excel 2019 统计分析软件对洪泽湖表层沉积物中 7 种重金属元素 (Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb) 进行 Pearson 相关系数分析和 Bray-Curtis 聚类分析. 分析各元素之间是否存在同源关系,通过 Bray-Curtis 聚类分析,分析何种元素可能具有相同来源。

1.2 评价分析方法

1.2.1 富集因子法

富集因子法(EF)和地累积指数法(I_{geo})是评价环境污染的有效工具. 富集因子法是评价土壤和沉积物中重金属富集程度的参数,根据其大小可以分自然和人为的环境影响,其计算公式如下:

$$EF = \frac{(\omega_n / \omega_{ref})_{\text{实测}}}{(B_n / B_{ref})_{\text{背景}}}$$

式中, ω_n 为土壤和沉积物中的重金属含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); ω_{ref} 为参比元素的测试含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); B_n 为待测元素的背景含量; B_{ref} 为参比元素的背景含量. 根据 EF 的大小,将污染程度划分为 6 个等级(表 1)。

需要说明的是 EF 值在 0.5 ~ 1.5 之间,说明微量金属元素可能全部来自地壳物质或者自然风化过程. 若 EF 值大于 1.5,指示很大一部分微量金属元素来自于非地壳物质或者非自然风化过程,说明这部分微量金属元素由其它物质来源提供,譬如点源污染、非点源污染以及生物区系^[18,19]。

表 1 富集因子(EF)的污染分级

Table 1 Contamination classification of enrichment factor(EF)					
EF	≤2	2~5	5~20	20~40	≥40
污染分级	无~轻	中	较强	强	极强

1.2.2 地累积指数法

地累积指数是 Muller 引入的地球化学标准,可用于通过比较当前和工业化前浓度来评估土壤污染,对重金属的污染进行分级. 与其他评估方法不同,地累积指数法将自然的成岩过程考虑在内,评估

结果更加准确^[20]. 其计算公式如下:

$$I_{geo} = \log_2 [\omega_i / (1.5 \times B_n)]$$

式中, B_n 为相应重金属的地球化学背景值, 1.5 为系数, 表示基准数据的潜在变化, 重金属地累积指数分级见表 2.

表 2 地累积指数 I_{geo} 的污染分级

Table 2 Pollution classification of geoaccumulation index

I_{geo}	≤ 0	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	≥ 5
污染程度	无	无-轻	中	中-重	重	重-极重	极重
等级	0	1	2	3	4	5	6

1.2.3 生态风险评价

由 Hakanson 潜在生态风险评价方法, 定量计算土壤和沉积物中重金属的潜在生态风险指数^[21], 该方法在 1980 年提出, 是利用沉积学原理评价重金属污染状况及对生物的影响, 同时将重金属毒性及其在沉积物中迁移转化以及生态系统对重金属污染的敏感性都量化并校正. 得到所需的计算参数综合考虑了多种元素毒性的加和作用, 消除了区域差异影响, 可以相对全面地评价洪泽湖中重金属污染情况^[22].

单项重金属潜在的生态风险指数 (E_r^i) 计算公式如下:

$$E_r^i = T_i \times \omega_i / \omega_B$$

式中, T_i 为第 i 种重金属的毒性相应因子, ω_i 为第 i 种重金属的实测值; ω_B 为参比值, 采用江苏省土壤重金属背景作为参比值^[23]; 其中 $T_{Cd} = 30$, $T_{As} = 10$, $T_{Pb} = T_{Cu} = T_{Ni} = 5$, $T_{Cr} = 2$, $T_{Zn} = 1$.

多项重金属综合潜在生态风险指数 (RI) 为单项重金属潜在的生态风险指数之和 ($RI = \sum_{i=1}^n E_r^i$), Hakanson^[21] 从“元素丰度原则”和“元素释放度”的角度来考虑, 将沉积物污染强度划分为 5 类. 潜在生态危害系数 (E_r^i) 是描述某一污染物从低到高 5 个变化等级的值; 而潜在生态危害指数 (RI) 是描述多个污染物的危害系数的综合值, 分为 4 个等级. 首先用 (E_r^i) 等级反映指出哪些物质应该引起关注, 这对于污染的控制尤为重要, 其次再根据某一地区的 RI 所处等级, 判断其综合潜在生态风险. 故本文从这两点进行研究, 试图揭示洪泽湖重金属污染的控制因子, 为湖泊的研究治理提供参考.

单项重金属潜在的生态风险指数, 与多项重金属综合潜在生态风险指数评价指标与具体风险等级如表 3.

表 3 重金属生态风险分级

Table 3 Ecological risk classification of heavy metals

E_r^i	< 40	$40 \leq E_r^i < 80$	$80 \leq E_r^i < 160$	$160 \leq E_r^i < 320$	≥ 320
RI	< 150	$150 \leq RI < 300$	$300 \leq RI < 600$	≥ 600	
生态风险分级	低	中度	较重	重	严重

2 结果与分析

2.1 洪泽湖表层沉积物重金属的空间分布

洪泽湖沉积物中重金属按其含量由大到小排序为: $Zn > Cr > Ni > Pb > Cu > As > Cd$, 其中 Cr 平均值为 $(66.78 \pm 12.33) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; Ni 平均值为 $(33.89 \pm 7.59) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; Cu 平均值为 $(25.35 \pm 6.23) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; Zn 平均值为 $(74.77 \pm 18.19) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; As 平均值为 $(16.55 \pm 4.07) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; Cd 平均值为 $(0.23 \pm 0.07) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; Pb 平均值为 $(27.28 \pm 6.31) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 2). 由表 4 可见, 除了 Cr, 沉积物重金属 Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 平均含量均高于江苏省土壤背景值. 整体来说, 围栏区各重金属含量较低, 呈现围栏区、拆除区和外围区重金属含量逐渐增加的趋势.

2.2 重金属污染程度与生态风险

洪泽湖表层沉积物中 $EF(Cr)$ 平均值为 0.88 ± 0.16 ; $EF(Ni)$ 平均值为 1.03 ± 0.23 ; $EF(Zn)$ 平均

值为 1.15 ± 0.28 ; $EF(Cu)$ 平均值为 1.08 ± 0.27 ; $EF(Pb)$ 平均值为 1.24 ± 0.29 ; $EF(As)$ 平均值为 1.76 ± 0.43 ; $EF(Cd)$ 平均值为 2.69 ± 0.89 . 富集因子排序 $EF(Cd) > EF(As) > EF(Pb) > EF(Zn) > EF(Cu) > EF(Ni) > EF(Cr)$.

由图 3 可以看出, 洪泽湖中 $EF(Zn)$ 、 $EF(Ni)$ 、 $EF(Cu)$ 和 $EF(Pb)$ 均 ≤ 2 , 说明这 4 种重金属元素的累积主要原因并非是人类因素, 而是表层沉积物的缓慢释放和物质循环. $EF(Cd)$ 和 $EF(As)$ 的富集因子平均值在 2~5 之间, 说明洪泽湖中 Cd 和 As 元素主要来源于人类活动, 农业生产活动中含 As 肥料和农药污染等^[24].

地累积指数 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 的平均数值为 -0.79 、 -0.57 、 -0.52 、 -0.42 、 0.19 、 0.77 和 -0.31 . 除 As 和 Cd 元素处于无-较轻污染程度, 其余元素 Cr、Ni、Cu、Zn 和 Pb 均处于无污染程度 (图 4).

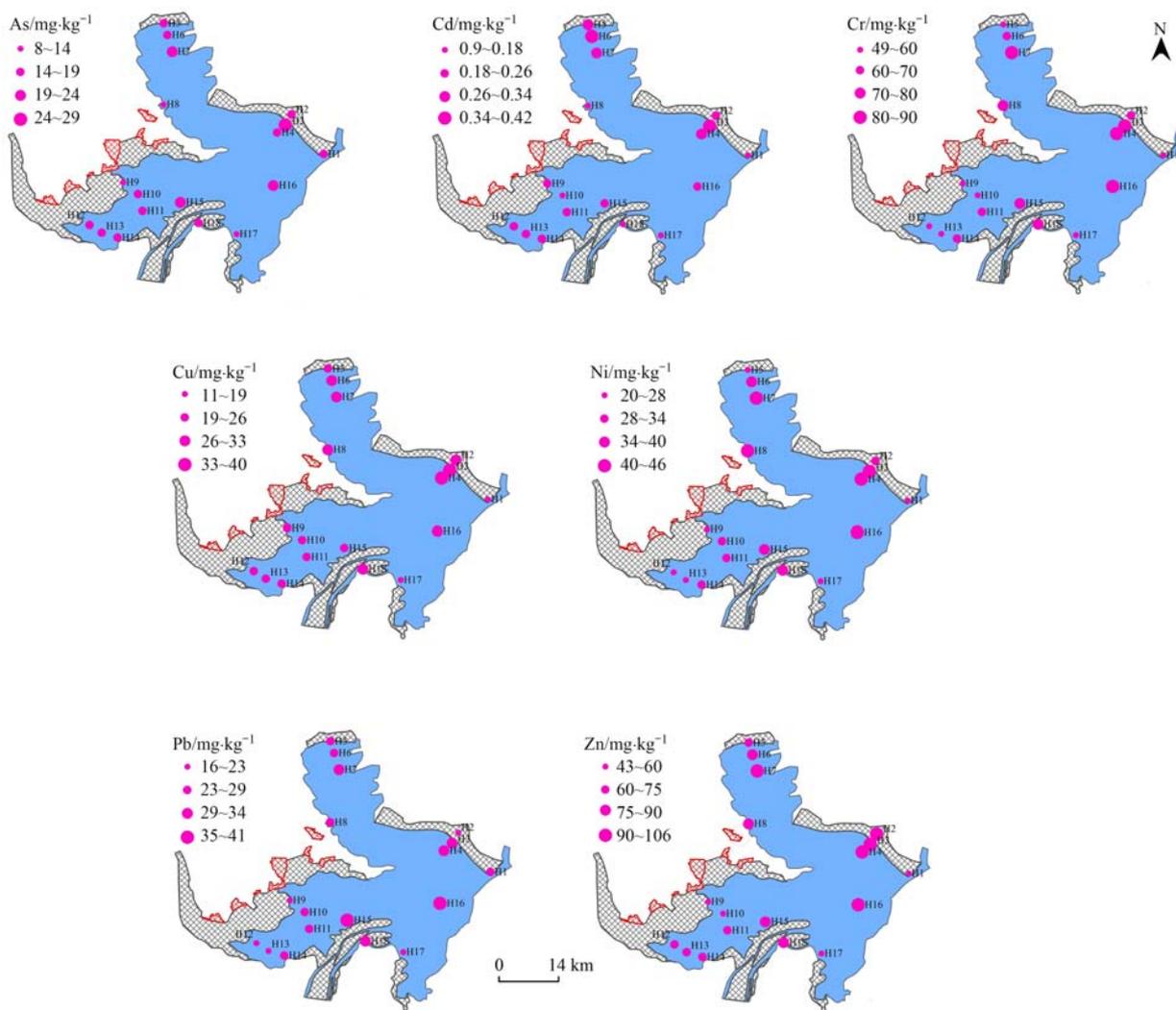


图2 洪泽湖表层沉积物各重金属空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of heavy metals in the surface sediments of Hongze Lake

表4 洪泽湖表层沉积物中重金属含量特征

Table 4 Heavy metal content characteristics in surface sediments of Hongze Lake

项目	重金属元素(ω)/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$						
	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
河口	63.66 ± 13.53	32.68 ± 10.37	20.82 ± 7.21	64.05 ± 19.59	13.74 ± 3.89	0.14 ± 0.03	24.95 ± 7.13
湖心	78.43 ± 10.94	40.85 ± 5.40	28.94 ± 5.20	90.66 ± 12.82	19.47 ± 0.49	0.23 ± 0.04	38.51 ± 2.72
围栏区	58.18 ± 5.58	28.58 ± 3.23	22.97 ± 2.44	69.40 ± 15.82	14.30 ± 1.50	0.24 ± 0.03	23.11 ± 2.21
拆除区	66.40 ± 14.84	34.09 ± 8.13	27.55 ± 8.01	76.49 ± 23.69	19.13 ± 5.86	0.29 ± 0.11	27.08 ± 5.89
外围区	73.05 ± 11.47	36.75 ± 7.11	28.27 ± 5.24	81.29 ± 14.65	17.55 ± 2.90	0.26 ± 0.05	28.38 ± 4.09
最小值	50.00	20.90	11.60	43.2	8.40	0.10	16.40
最大值	88.40	45.10	38.50	105.00	27.80	0.41	40.40
平均值	66.78	33.89	25.35	74.77	16.55	0.23	27.28
标准误	2.91	1.79	1.47	4.29	0.96	0.02	1.49
变异系数/%	18.46	22.39	24.58	24.33	24.57	33.28	23.11
江苏土壤背景值	75.60	32.83	23.40	64.80	9.40	0.085	22.00
土壤环境质量标准(二级)	300	50	100	250	25	0.30	300

2.3 沉积物中重金属的相关性及来源分析

由表5可以得出元素之间除了Cd与Cr、Ni和Pb之间并没有显著相关性,其它重金属元素之间显著相关,说明其余元素在洪泽湖水系沉积物中的地球化学

性质相似,具有相同的来源或者产生了复合污染。

聚类分析显示,7种元素共分为4类,其中Cd、As各单独聚为一类;Zn和Cr聚为一类;Cu、Pb和Ni聚为一类(图5)。

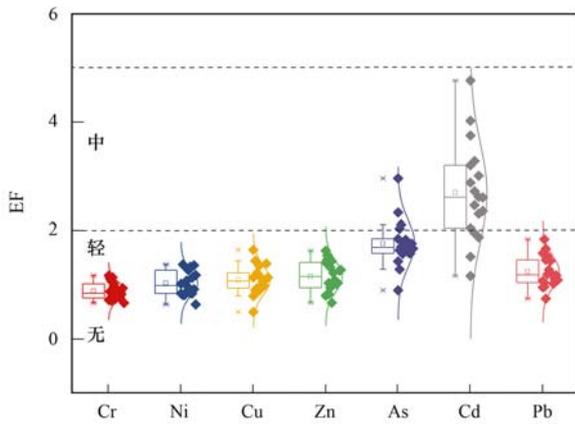


图3 洪泽湖表层沉积物重金属富集因子

Fig. 3 Heavy metal enrichment factors(EF) in the surface sediments of Hongze Lake

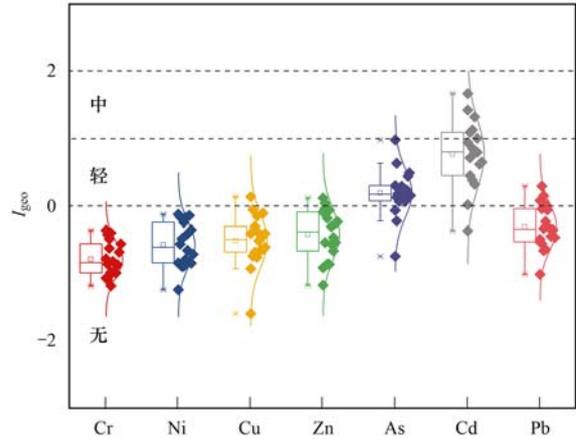


图4 洪泽湖表层沉积物重金属地累积指数

Fig. 4 Accumulation index of heavy metals in the surface sediments of Hongze Lake

表5 重金属元素间的相关分析¹⁾

Table 5 Correlation analysis among heavy metal elements

	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
Cr	1						
Ni	0.994 **	1					
Cu	0.914 **	0.909 **	1				
Zn	0.904 **	0.903 **	0.940 **	1			
As	0.680 **	0.640 **	0.768 **	0.684 **	1		
Cd	0.426	0.460	0.706 **	0.670 **	0.559 *	1	
Pb	0.803 **	0.801 **	0.737 **	0.760 **	0.687 **	0.397	1

1) **表示 $P < 0.01$, 极显著相关; * 表示两元素来源相关性 $P < 0.05$

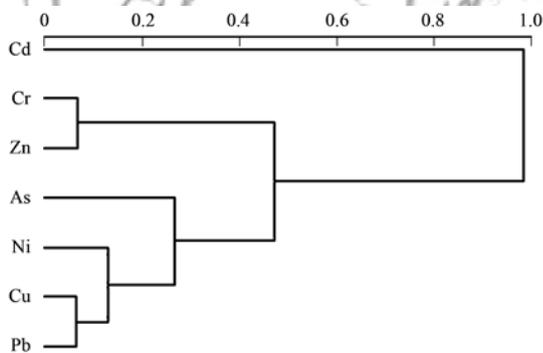


图5 洪泽湖表层沉积物重金属 Bray-Curtis 聚类

Fig. 5 Bray-Curtis clustering of heavy metals in surface sediments of Hongze Lake

2.4 生态风险评价

从图6可以看出,重金属元素除Cd具有中度的潜在生态风险外,As、Cr、Zn、Ni、Cu和Pb元素在全部采样点都处于低生态风险水平,这一结论与地累积指数分析结论一致.洪泽湖表层沉积物中重金属的潜在生态风险程度大小顺序为: $Cd > As > Pb > Cu > Ni > Cr > Zn$. 其中Cd的平均单项重金属潜在生态风险指数为80.82,等级为较重.(Cd)在H2、H3、H4、H5、H6、H7、H11和H16点处(北部及东北部的围栏区、拆除区、外围区和湖心区)潜在生

态风险等级为较重.

由图7得出除H3、H6和H7地区表层沉积物重金属综合生态风险等级为中等外,其余地区RI值均处于低生态风险水平.在洪泽湖入河口H1、H17和H18综合潜在生态风险等级最低,东北部养殖区H3、H6和H7综合生态风险等级最高.

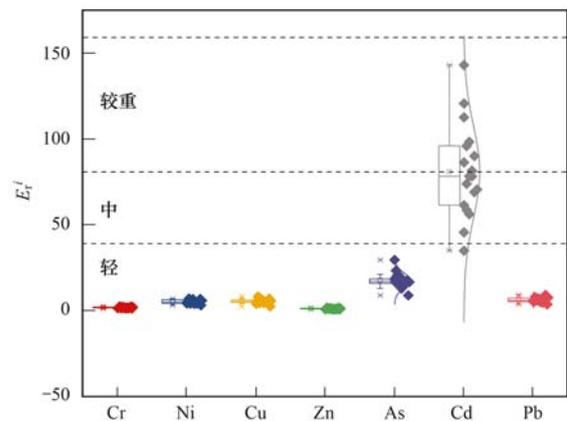


图6 洪泽湖表层沉积物单项重金属的生态风险指数

Fig. 6 Ecological risk index of a single heavy metal in surface sediments of Hongze Lake

由表6可见,洪泽湖的综合潜在生态风险处于较低水平,整体来说拆除区和湖心区较高,河口最

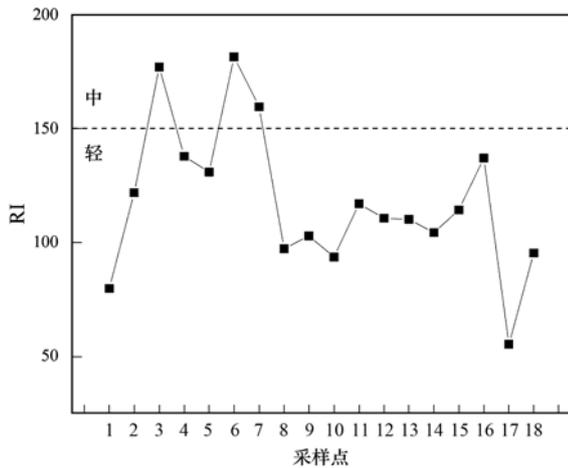


图 7 洪泽湖各样点综合生态风险指数

Fig. 7 Comprehensive ecological risk index of various points in Hongze Lake

表 6 重金属元素潜在生态风险值

Table 6 Potential ecological risk values of heavy metal elements

点位	各地区重金属元素潜在生态风险平均值 E_i^p							综合潜在生态风险值	
	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	RI	等级
河口	1.68 ± 0.36	4.98 ± 1.58	4.44 ± 1.54	0.99 ± 0.30	14.61 ± 4.12	49.51 ± 11.76	5.67 ± 1.62	81.88 ± 19.42	低
湖心	2.08 ± 0.29	6.22 ± 0.82	6.19 ± 1.11	1.40 ± 0.20	20.72 ± 0.53	80.34 ± 13.77	8.76 ± 0.62	125.68 ± 16.11	低
围栏区	1.54 ± 0.15	4.36 ± 0.49	4.91 ± 0.52	1.07 ± 0.24	15.21 ± 1.60	84.21 ± 10.73	5.25 ± 0.50	116.55 ± 12.35	低
拆除区	1.76 ± 0.16	5.19 ± 0.62	5.89 ± 0.86	1.18 ± 0.18	20.35 ± 3.11	100.09 ± 19.29	6.16 ± 0.67	140.61 ± 22.65	低
外围区	1.93 ± 0.31	5.60 ± 1.08	6.04 ± 1.12	1.25 ± 0.22	18.67 ± 3.09	89.76 ± 18.74	6.45 ± 0.93	129.70 ± 24.29	低

最强.因此洪泽湖沉积物中重金属含量受到不同元素迁移能力的影响,迁移能力强的元素会随着河道大量进入湖泊造成富集,迁移能力弱的元素只有少量随入湖泥沙进入湖体,使得重金属分布不均.

从表 4 和表 6 分析得出,河口 H1、H17 和 H18 的各种重金属元素含量和综合潜在生态风险低于其余各点.这是由于洪泽湖是典型过水性湖泊,湖泊内表层重金属沉积受河流冲刷作用影响,使得在西南淮河入湖口处各种重金属元素无法累积,大部分沉积物积累于北部和东北部湖中心. H3、H6 和 H7 号采样点处于地势较低东北部地区,所以此处重金属含量较高,这种重金属堆积模式属典型的洪水冲刷型堆积模式(turbidity flood model)^[25]使得东北部地区具有较高生态风险.

由表 4 分析东北一处、北部一处和西南两处共 4 处养殖区的重金属元素含量发现,东北部 H2、H3、H4、H5、H6 和 H7 样点内的重金属含量显著大于西南部 H9、H10、H11、H12、H13 和 H14 样点.分析结果显示拆除区与围栏区和外围区,这三者表层沉积物中重金属含量之间并没有显著性差异($P > 0.05$),但是呈现出围栏区 < 拆除区 < 外围区的递增趋势,其重金属含量差异形成主要原因还是湖泊沉积物的堆积模式.造成这一现象原因是由于

低,拆除区内 Cd 和 As 的潜在生态风险大于围栏区和外围区.

3 讨论

3.1 洪泽湖重金属空间分布现状和原因

洪泽湖表层沉积物中的重金属含量整体处于较低水平,但是不同地区表层沉积物中重金属含量存在显著性地域差异,重金属元素在围栏区、拆除区和外围区呈递增趋势.

洪泽湖不同地区沉积物中重金属含量差别明显,一方面是由于湖泊沉积物的堆积模式导致,在入湖口处重金属含量较低,在出湖处沉积物堆积,重金属含量较高.另一方面是因为不同重金属元素迁移能力不同,江涛等^[24]的研究发现,元素迁移能力为: $Cd > Pb > Zn > Cu > Ni > Cr$,其中 Cd 和 Pd 的迁移能力

围栏养殖大部分都是靠近岸边,由于湖泊沉积物的冲刷堆积使得养殖区域内的沉积物逐渐向湖心蓄积,使得沉积物中重金属的含量变化呈现出由岸边向湖心递增的趋势.

将洪泽湖与长江下游典型湖泊沉积物中重金属含量对比(表 7),分析得洪泽湖沉积物主要污染物 Cd 的含量高于巢湖和太湖,低于鄱阳湖.对比何华春等^[26]在 2007 年对洪泽湖重金属元素的记录,发现 Cd 含量有所下降,但 As 含量有所上升.洪泽湖中 As 含量大于巢湖、太湖和鄱阳湖,主要原因是金属冶炼和煤炭燃烧,其次是农业生产使用污水灌溉及含 As 肥料,过量使用杀虫剂和除草剂等,这都会引起砷元素含量的增加^[29].

3.2 洪泽湖中主要污染物来源分析

洪泽湖中主要污染物是 Cd 和 As.聚类分析显示 Cd 单独聚为一类,与其他重金属元素的来源显著不同,且 $EF(Cd) > 2$ 属于中度污染, $EF(As)$ 为 1.76 属于轻度污染水平.

湖中 Cd 主要是外源性的污染,而洪泽湖位于淮河中下游,是淮河行水河道的组成部分,淮河所携带水沙占入湖总沙量的 90% 以上,淮河对洪泽湖水沙情况起控制作用^[26].我国土壤 Cd 的本底较高,加上近年来由于淮河中上游的工业发展和人类活动使

表 7 长江下游典型湖泊表层沉积物中重金属含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
Table 7 Typical lower Yangtze River heavy metal content in lake surface sediments/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

湖泊	参数	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
洪泽湖	最小值	50.00	20.90	11.60	43.20	8.40	0.10	16.40
	最大值	88.40	45.10	38.50	105.00	27.80	0.41	40.40
	平均值	66.78	33.89	25.35	74.77	16.55	0.23	27.28
	变异系数	0.18	0.22	0.25	0.24	0.25	0.33	0.23
巢湖 ^[27]	最小值	55.94	22.67	14.31	52.83	2.50	0.06	28.51
	最大值	89.83	35.29	78.82	523.37	33.60	0.39	98.79
	平均值	76.22	31.73	34.67	157.81	4.46	0.14	48.58
	变异系数	0.15	0.15	0.68	1.15	0.72	0.40	0.54
太湖 ^[28]	最小值	48.60	9.80	7.84	31.40	2.63	0.02	13.90
	最大值	124.00	64.50	56.70	128.00	39.40	0.40	48.20
	平均值	85.74	38.85	26.03	71.33	10.55	0.09	25.72
	变异系数	0.14	0.28	0.26	0.28	0.37	0.45	0.19
鄱阳湖 ^[29]	最小值	6.31	2.53	9.72	7.70	1.61	0.18	35.48
	最大值	326.00	51.06	19.00	339.80	519.00	0.49	46.81
	平均值	64.98	26.59	14.33	97.06	13.80	0.26	40.46
	变异系数	0.36	0.34	0.81	0.40	1.53	0.85	0.33

土壤中的镉活性增加,进而溶出增加,再加上金属采选冶制,带出了很多的镉使得淮河中 Cd 含量大幅增加,其最大值和平均值分别是我国水系沉积物中 Cd 含量平均值($0.14 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的 6.86 倍和 2.07 倍^[26]。淮河中上游中 Cd 的来源主要是冶金厂、化工厂、焦化厂、电镀厂和皮革厂等排放的含重金属废水,以及固体废物的渗漏,这些工厂中的 Cd 随淮河水系最终可能会富集在洪泽湖中,一定程度上造成洪泽湖 Cd 元素含量的增加。

水产饲料中的鱼粉含有一定量的 Cd 元素,在不同的鱼粉中 Cd 含量不同,但是以鲑鱼内脏所制成的鱼粉中 Cd 含量尤其高,达 $1.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。Jusadi 等^[30]的研究发现,这些 Cd 主要存在方式是金属硫蛋白与 Cd 结合态,并非离子态(饲料镉污染现状)。围栏集约化养殖中外源性饵料的大量投入,也是湖泊中 Cd 元素上升的一个原因。

As 是洪泽湖表层沉积物重金属中的次要污染物,在 H8、H9 和 H17 处属于无污染,As 在 H3、H7、H15 和 H16 处属于中度污染,污染地区范围较大。洪泽湖流域农业比较发达,农田灌溉、施肥和施药等方式粗放,农田污染物质以及陆域分散的污染物质往往随着洪水退水、降雨径流等进入湖中,加重湖泊污染。

洪泽湖今后关于重金属 Cd 和 As 的治理,首先应以加强对淮河中上游位于安徽境内的工厂排污管理,其次应该减少外源性饵料的加入,从而减少 Cd 的流入。对于 As 的管理应培训指导农民科学合理地使用农药和化肥,积极推广生态农业,双管齐下才能降低洪泽湖的重金属污染。

3.3 网栏养殖对重金属的影响

围栏养殖会造成湖泊重金属污染,水产养殖饲料将会释放重金属于水体中,后积累于湖泊沉积物中并随着冲刷堆积逐渐向湖心处蓄集。通过对围栏区($36.13 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、拆除区($41.83 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和外围区($44.26 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)之间重金属含量比较得出,拆除围栏并未在短时间内使得湖泊沉积物重金属含量显著下降。

洪泽湖部分水域围栏养殖集中,摄食性鱼类的高密度养殖,外源性饲料的大量投入是洪泽湖拆除围栏前的状态。水产饲料含有锌、铁、铜、钴、镉和硒等微量矿物质制剂,这些元素将会被释放于水体当中。通常有 30% 以上未被摄食的饵料和鱼体排泄物中的矿物质元素会在养殖区内富集,造成重金属污染。所以拆除围栏不再进行高密度集约化养殖,减少外源性饵料的投入,将会有效减少外源性的 Cu、Zn 和 Cd 等元素进入水体,从而减轻湖泊沉积物中重金属的污染程度。

将 4 个养殖区域内的围栏区、外围区和拆除区之间重金属含量做对比,东北($42.60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和北部($50.10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)两处养殖区内各元素高于西南区两处($34.83 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $35.43 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)养殖区,其主要原因应是河流的流向所导致。通过表 4 发现拆除区重金属元素(Cd 和 As)含量高于围栏区和外围区,可能是由于饲料和水产代谢产物需要一定的时间才能将重金属释放到水中,而且饲料与水产养殖药物中所含重金属元素种类单一,只能增加某种重金属的含量。拆除区在拆除围栏前是主要的集约化养殖场地,有大量的外源性饲料和农药添加,这些物质中的重金属最终沉积在湖底沉积物中,因此拆

除区沉积物中的重金属含量会比围栏区、外围区高。

将养殖区域与湖心和河口沉积物中重金属元素含量做对比,湖心内的重金属元素显著高于养殖区域. 养殖区域内的重金属元素含量由岸边向湖心逐渐呈递增趋势,洪泽湖的湖泊堆积模式会将围栏养殖所产生的重金属往湖心方向蓄积. 商乃萱等^[31]的研究发现,围栏拆除后水体的透明度、浊度和溶解氧浓度均有改善,但是湖体营养盐浓度并未发生明显变化. 因此要对洪泽湖拆除围栏后的生态响应进行长时间的监测,才能为修复湖泊养殖区生态功能提供科学的理论依据. 洪泽湖的重金属污染治理首先要限制集约化养殖,减少外源性饵料、兽药的投入,其次要对于入湖的河流进行管控,降低入湖河流所携带泥沙中的重金属含量;另一方面还要加强对于洪泽湖出湖口处生态恢复工作,使湖体恢复自净功能,这样才能改善洪泽湖高生态风险地区的污染情况.

4 结论

(1)洪泽湖表层沉积物中重金属含量由大到小排序为: $Zn > Cr > Ni > Pb > Cu > As > Cd$,其含量分别为 74.77、66.78、33.89、27.20、25.35、16.55 和 $0.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,洪泽湖沉积物中 Cd 和 As 有明显的富集,其余元素并无富集现象. 地累积指数分析显示 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 的平均数值为 -0.79、-0.57、-0.52、-0.42、0.19、0.77 和 -0.31,仅 As 和 Cd 元素处于较轻污染程度,其余元素均无污染.

(2)洪泽湖表层沉积物中单项重金属除 Cd 处于中度风险以外,其余元素都只有很低的潜在生态风险. 洪泽湖西部和南部的潜在生态风险等级很低,但是北部、东北部地区的 H3、H6 和 H7 处潜在生态风险等级较高. 根据洪泽湖 RI 分析结果显示,洪泽湖整体呈现低潜在生态风险的状态.

(3)洪泽湖沉积物中重金属元素呈现从围栏区向拆除区再向外围区逐渐递增的趋势,湖泊沉积物中重金属的含量呈现由岸边向湖心逐渐增加的趋势.

致谢:感谢马荣华老师对洪泽湖网围养殖分布遥感影像图的解译与绘制指导.

参考文献:

[1] 万杰,袁旭音,叶宏萌,等. 洪泽湖不同入湖河流沉积物磷形态特征及生物有效性[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(10): 4568-4579.
Wan J, Yuan X Y, Ye H M, *et al.* Characteristics and bioavailability of different forms of phosphorus in sediments of

rivers flowing into Hongze Lake [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(10): 4568-4579.

[2] 贲鹏,虞邦义,张辉,等. 洪泽湖水沙变化趋势和冲淤时空分布及驱动因素[J]. 湖泊科学, 2021, **33**(1): 289-298.
Ben P, Yu B Y, Zhang H, *et al.* Spatiotemporal runoff and sediment variation, deposition-erosion characteristics and their driving factors in Lake Hongze [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, **33**(1): 289-298.

[3] Ferreira C I A, Calisto V, Otero M, *et al.* Removal of tricaine methanesulfonate from aquaculture wastewater by adsorption onto pyrolysed paper mill sludge[J]. *Chemosphere*, 2017, **168**: 139-146.

[4] 王玉堂. 饲料营养与鱼类疾病[J]. 当代水产, 2020, **45**(8): 86-91.

[5] Kong W W, Huang S L, Shi F F, *et al.* Study on release kinetics of nitrogen and phosphorus from fish feed [J]. *Aquaculture Research*, 2020, **51**(8): 3216-3229.

[6] Poersch L H, Bauer W, Kersanach M W, *et al.* Assessment of trace metals, total organic carbon and total nitrogen of a shrimp farm system in Southern Brazil [J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2020, **39**, doi: 10.1016/j.rsma.2020.101452.

[7] Harris J M, Vinobaba P, Kularatne R K A, *et al.* An assessment of heavy metal levels in brackish water shrimps: impact on sexes and the relationship between metal pollution index and Fulton's K condition indices [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2019, **25**(8): 1968-1979.

[8] 操建华. 水产养殖业自身污染现状及其治理对策 [J]. 社会科学家, 2018, (2): 46-50.

[9] 刘金金,张玉平,张芬. 上海市养殖池塘沉积物中重金属分布及风险评价[J]. 上海海洋大学学报, 2021, **30**(3): 501-514.
Liu J J, Zhang Y P, Zhang F. Distribution and risk assessment of heavy metals in sediments of aquaculture ponds in Shanghai [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2021, **30**(3): 501-514.

[10] 朱陈名,朱咏莉,韩建刚,等. 洪泽湖重金属污染现状与防控技术[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, **41**(3): 175-181.
Zhu C M, Zhu Y L, Han J G, *et al.* The heavy metal pollution situation and control in Hongze Lake [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2017, **41**(3): 175-181.

[11] 王友文,徐杰,李继影,等. 东太湖围网全面拆除前后水生植被及水质变化[J/OL]. 生态与农村环境学报, 1-13. <https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2020.0986>, 2021-01-15.
Wang Y W, Xu J, Li J Y, *et al.* East lake Taihu Seine comprehensive demolition of aquatic vegetation and water quality change before and after [J/OL]. *Journal of Ecology and the Rural Environment*, 1-13. <https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2020.0986>, 2021-01-15.

[12] 徐晨,王沛芳,陈娟,等. 望虞河西岸河网重金属污染特征及生态风险评价[J]. 环境科学, 2019, **40**(11): 4914-4923.
Xu C, Wang P F, Chen J, *et al.* Contaminant characteristics and ecological risk assessments of heavy metals from river networks in the western area of the Wangyu River [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(11): 4914-4923.

[13] Afonne O J, Ifediba E C. Heavy metals risks in plant foods-need to step up precautionary measures [J]. *Current Opinion in Toxicology*, 2020, **22**: 1-6.

[14] Linnik V G, Minkina T M, Bauer T V, *et al.* Geochemical

- assessment and spatial analysis of heavy metals pollution around coal-fired power station [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2020, **42**(12): 4087-4100.
- [15] 王蒙蒙, 宋刚福, 翟付杰, 等. 陆浑水库沉积物重金属空间分布特征及风险评价[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(4): 1331-1339.
Wang M M, Song G F, Zhai F J, *et al.* Spatial distribution characteristics and risk assessment of heavy metals in sediments of Lulun Reservoir[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(4): 1331-1339.
- [16] 张杰, 郭西亚, 曾野, 等. 太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2202-2210.
Zhang J, Guo X Y, Zeng Y, *et al.* Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in river sediments from lake Taihu Basin[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2202-2210.
- [17] 张家泉, 田倩, 许大毛, 等. 大冶湖表层水和沉积物中重金属污染特征与风险评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2355-2363.
Zhang J Q, Tian Q, Xu D M, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in water and sediment from Daye Lake[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2355-2363.
- [18] Zhang F X, Cui S, Gao S, *et al.* Heavy metals exposure risk to Eurasian Spoonbill (*Platalea leucorodia*) in wetland ecosystem, Northeast China[J]. *Ecological Engineering*, 2020, **157**, doi: 10.1016/j.ecoleng.2020.105993.
- [19] Zhang J, Liu C L. Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in China—weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2002, **54**(6): 1051-1070.
- [20] 杨颖, 孙文, 刘吉宝, 等. 北运河流域沙河水库沉积物重金属分布及生态风险评估[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(1): 217-227.
Yang Y, Sun W, Liu J B, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Shahe Reservoir in Beiyun River Basin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(1): 217-227.
- [21] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [22] 刘晨宇, 田爱民, 孙菲, 等. 生态风险评价方法与应用研究进展[J]. *科技管理研究*, 2020, **40**(2): 79-83.
Liu C Y, Tian A M, Sun F, *et al.* Progress of ecological risk assessment methods and applications [J]. *Science and Technology Management Research*, 2020, **40**(2): 79-83.
- [23] 廖启林, 刘聪, 许艳, 等. 江苏省土壤元素地球化学基准值[J]. *中国地质*, 2011, **38**(5): 1363-1378.
Liao Q L, Liu C, Xu Y, *et al.* Geochemical baseline values of elements in soil of Jiangsu Province [J]. *Geology in China*, 2011, **38**(5): 1363-1378.
- [24] 江涛, 林伟稳, 曹英杰, 等. 梅江流域清凉山水库沉积物重金属污染、生态风险评价及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(12): 5410-5418.
Jiang T, Lin W W, Cao Y J, *et al.* Pollution and ecological risk assessment and source apportionment of heavy metals in sediments of Qingliangshan Reservoir in the Meijiang Basin [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5410-5418.
- [25] 邓恒, 徐国宾, 段宇, 等. 淮河与洪泽湖河湖关系研究进展及展望[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, **29**(5): 142-147.
Deng H, Xu G B, Duan Y, *et al.* Research progress and prospect of the relationship between Huaihe River and Hongze Lake [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, **29**(5): 142-147.
- [26] 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.
He H C, Xu Y H, Yang J H, *et al.* Environmental implications of heavy metals from surface sediments in the lake Hongze Basin [J]. *Quaternary Sciences*, 2007, **27**(5): 766-774.
- [27] 杜臣昌, 刘恩峰, 羊向东, 等. 巢湖沉积物重金属富集特征与人为污染评价[J]. *湖泊科学*, 2012, **24**(1): 59-66.
Du C C, Liu E F, Yang X D, *et al.* Characteristics of enrichment and evaluation of anthropogenic pollution of heavy metals in the sediments of Lake Chaohu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, **24**(1): 59-66.
- [28] 孙恬, 王延华, 叶春, 等. 太湖北部小流域沉积物重金属污染特征与评价[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(5): 2196-2203.
Sun T, Wang Y H, Ye C, *et al.* Characteristics and evaluation of heavy metal pollution in sediments of small watershed in the north of Taihu Lake [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(5): 2196-2203.
- [29] 杨辉, 陈国光, 刘红樱, 等. 长江下游主要湖泊沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *地球与环境*, 2013, **41**(2): 160-165.
Yang H, Chen G G, Liu H Y, *et al.* Pollution of heavy metals in the sediments from the lower reaches of the yangtze river and its potential ecological risk assessment [J]. *Earth and Environment*, 2013, **41**(2): 160-165.
- [30] Jusadi D, Aprilia T, Setiawati M, *et al.* Dietary supplementation of fulvic acid for growth improvement and prevention of heavy metal accumulation in Nile tilapia fed with green mussel [J]. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 2020, **46**(3): 295-301.
- [31] 杨井志成, 罗菊花, 陆莉蓉, 等. 东太湖围网拆除前后水生植被群落遥感监测及变化[J]. *湖泊科学*, 2021, **33**(2): 507-517.
Yang J Z C, Luo J H, Lu L R, *et al.* Changes in aquatic vegetation communities based on satellite images before and after pen aquaculture removal in East Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, **33**(2): 507-517.

CONTENTS

Disinfection By-products in Drinking Water and Their Control Strategies; A Review	CHU Wen-hai, XIAO Rong, DING Shun-ke, <i>et al.</i>	(5059)
Advances in Mechanism and Influencing Factors Affecting Hydrogen Sulfide Adsorption by Biochar	XU Qi-yong, LIANG Ming-shen, XU Wen-jun, <i>et al.</i>	(5086)
Effect of Vegetation Coverage on the Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentration in China's Eight Major Economic Regions from 1998 to 2016	YANG Yu-lian, YANG Kun, LUO Yi, <i>et al.</i>	(5100)
Evolution and Potential Source Apportionment of Atmospheric Pollutants of Two Heavy Haze Episodes During the COVID-19 Lockdown in Beijing, China	ZHAO De-long, TIAN Ping, ZHOU Wei, <i>et al.</i>	(5109)
Characteristics and Origin Analysis of Air Pollution During the Spring Festival in Linfen, Fenwei Plain	LIU Wei-jie, HU Tian-peng, MAO Yao, <i>et al.</i>	(5122)
Spatio-Temporal Characteristics and Potential Source Areas of Seasonal Atmospheric Pollution in Shijiazhuang	NIE Sai-sai, WANG Shuai, CUI Jian-sheng, <i>et al.</i>	(5131)
Impact of Air Humidity on PM _{2.5} Mass Concentration and Visibility During Winter in Tianjin	DING Jing, TANG Ying-xiao, HAO Tian-yi, <i>et al.</i>	(5143)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Chengde	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, WANG Shuai, <i>et al.</i>	(5152)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory from Domestic Sources in China	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SHEN Guo-feng, <i>et al.</i>	(5162)
Characteristics of Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission in China from 2011 to 2019	LIU Rui-yuan, ZHONG Mei-fang, ZHAO Xiao-ya, <i>et al.</i>	(5169)
VOCs Emission Inventory and Uncertainty Analysis of Industry in Qingdao Based on Latin Hypercube Sampling and Monte Carlo Method	XU Wan-ying, FU Fei, LÜ Jian-hua, <i>et al.</i>	(5180)
Emission Characteristics and Environment Impacts of VOCs from Typical Rubber Manufacture	WANG Hai-lin, XIN Guo-xing, ZHU Li-min, <i>et al.</i>	(5193)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Different Functional Zones of Shenyang, China	KU Ying-ying, REN Wan-hui, SU Cong-cong, <i>et al.</i>	(5201)
Characteristics of BTEX and Health Risk Assessment During Typical Pollution Episodes in Summer and Winter in Tianjin Urban Area	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, PU Wei-wei, <i>et al.</i>	(5210)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Analysis of the Driving Force in Zhengzhou City	JI Yao, WANG Chen, LU Xuan, <i>et al.</i>	(5220)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of O ₃ Concentrations Based on GAMs Model in Chengdu	ZHANG Ying, NI Chang-jian, FENG Xin-yuan, <i>et al.</i>	(5228)
Spatial Variation Characteristics and Remote Sensing Retrieval of Total Suspended Matter in Surface Water of the Yangtze River	LI Jian-hong, HUANG Chang-chun, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(5239)
Spatial Distribution Characteristics of the Spectrum, Source Analysis, and Nitrogen Response of Dissolved Organic Matter in Summer Rainfall in the Hebei Province	ZHANG Zi-wei, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i>	(5250)
Distribution and Influencing Factors of DOM Components in Urban and Suburban Polluted Rivers	ZHU Yi, CHEN Hao, DING Guo-ping, <i>et al.</i>	(5264)
Composition and Distribution of Microplastics in the Water and Sediments of Urban Rivers in Beijing	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Di, <i>et al.</i>	(5275)
Nontarget Screening and Ecological Risk Assessment of Polar Organic Pollutants in Surface Water on the West Bank of Taihu Lake	LU Xin-yan, WANG Fei, ZHANG Li-min, <i>et al.</i>	(5284)
Optimization of Extraction Methods and Distribution Characteristics of Antibiotics and Metabolites in Sediments of a River Water-Groundwater Interaction Zone	LI Yu-qiong, TONG Lei, YAN Han, <i>et al.</i>	(5294)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Desilting Demonstration Area in Baiyangdian Lake	WANG Tong-fei, ZHANG Wei-jun, LI Li-qing, <i>et al.</i>	(5303)
Dynamic Mechanisms of Groundwater Quality by Residual Contaminants of the Tanghe Wastewater Reservoir in Xiong'an New Area	ZHANG Zhi-xiong, WANG Shi-qin, ZHANG Yi-zhang, <i>et al.</i>	(5312)
Analysis and Prediction of Health Risk from Heavy Metals in Drinking Water Sources Based on Time Series Model	JI Chao, HOU Da-wei, XIE Li, <i>et al.</i>	(5322)
Spatial Distribution, Risk, and Influencing Factors of River Water-Sediment Heavy Metals in the Lower Reaches of the Qianhe River	GAO Yu, WANG Guo-lan, JIN Zi-han, <i>et al.</i>	(5333)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake Basin During the Wet Season	HE Miao, LIU Gui-jian, WU Lei, <i>et al.</i>	(5346)
Impact of Enclosure Culture on Heavy Metal Content in Surface Sediments of Hongze Lake and Ecological Risk Assessment	ZI Xin-yuan, ZHANG Ming, GU Xiao-hong, <i>et al.</i>	(5355)
Natural Water Chemistry Change in the Surface Water of Chengdu and Impact Factors	XU Qiu-jin, LAI Cheng-yue, DING Yao, <i>et al.</i>	(5364)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Groundwater in the Leizhou Peninsula	PENG Hong-xia, HOU Qing-qin, ZENG Min, <i>et al.</i>	(5375)
Land-based Nitrogen Pollution Source Structure and Spatial Distribution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DONG Si-qi, HUANG Chong, <i>et al.</i>	(5384)
Output Characteristics of Nitrogen and Phosphorus from Non-Point Source Pollution of Typical Land Use in a Micro-Watershed in Hilly Red Soil Region	FANG Zhi-da, SU Jing-jun, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i>	(5394)
Effects of Different Fertilization Patterns on Nitrogen Leaching Loss from Paddy Fields Under Reduced Nitrogen	JIANG Hai-bin, ZHANG Ke-qiang, ZOU Hong-tao, <i>et al.</i>	(5405)
Effects of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil Phosphorus Forms in the Jiaozhou Bay Wetland	SHA Meng-qiao, CHAI Na, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i>	(5414)
Contrasting Analysis of Microbial Community Composition in the Water and Sediments of the North Canal Based on 16S rRNA High-Throughput Sequencing	PENG Ke, DONG Zhi, DI Yan-ming, <i>et al.</i>	(5424)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution by Si-modified Peanut Shell Biochar	ZHAO Min, ZHANG Xiao-ping, WANG Liang-rong, <i>et al.</i>	(5433)
Adsorption Characteristics of Pb(II) on Eucalyptus Biochar Modified by Potassium Permanganate	MO Zhen-lin, ZENG Hong-hu, LIN Hua, <i>et al.</i>	(5440)
Preparation of Mixed Metal Oxide/Carbon Composites and Its Adsorption Performance for Pb(II)	LU Yu-shen, ZONG Li, YU Hui, <i>et al.</i>	(5450)
Fabrication of Supported Titanium Xerogel Adsorbent and Performance Evaluation for Arsenite Removal	SUN Ye-yang, ZHOU Chang, GAN Yong-hai, <i>et al.</i>	(5460)
Nitrite Regulation During Start-up of Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	ZUO Fu-min, ZHENG Rui, SUI Qian-wen, <i>et al.</i>	(5472)
Effects of Biochar and Straw Return on Soil Aggregate and Organic Carbon on Purple Soil Dry Slope Land	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i>	(5481)
Response of Soil Organic Carbon Content in Different Slope Positions to Fertilization Management in Purple Soil Sloping Fields	XU Man, YU Luo, WANG Fu-hua, <i>et al.</i>	(5491)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	LAI Shu-ya, DONG Qiu-yao, SONG Chao, <i>et al.</i>	(5500)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Suburban Farmland Soil	ZHANG Xiu-xiu, LU Xiao-li, WEI Yu-chen, <i>et al.</i>	(5510)
Accumulation Characteristics and Dietary Exposure Estimation of Heavy Metals in Vegetables from the Eastern Coastal Region of China	SUN Shuai, GENG Ning-bo, GUO Cui-cui, <i>et al.</i>	(5519)
Security Risk and Influencing Factors of Agro-Products in Farmland Soil Around a Typical Mining Smelter	HUO Yan-hui, WANG Mei-e, XIE Tian, <i>et al.</i>	(5526)
Cd Pollution and Safe Planting Zoning in Paddy Soils: A Case Study in a District of Chongqing	CAO Shu-zhen, MU Yue, CUI Jing-xin, <i>et al.</i>	(5535)
Characteristics and Influencing Factors of Cadmium Accumulation in Different Rice Varieties Under Cadmium Contaminated Field Conditions	WANG Yu-hao, YANG Li, KANG Yu-chen, <i>et al.</i>	(5545)
Effects of Nano-membrane on Aerobic Composting Process and Odor Emission of Livestock Manure	LI Yong-shuang, SUN Bo, CHEN Ju-hong, <i>et al.</i>	(5554)