

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

不同国家农用地土壤环境标准比较与启示
李勖之, 姜璐, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年2月

第43卷 第2期
Vol.43 No.2

目次

综述

- 不同国家农用地土壤环境标准比较与启示 李勤之, 姜蓉, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁 (577)
- 再生水水质稳定性评价指标与体系 张馨怡, 魏东斌, 杜宇国 (586)

研究报告

- 兰州市采暖期和非采暖期大气降尘重金属的分布特征及来源 黄文, 王胜利 (597)
- 基于多种新型受体模型的 PM_{2.5} 来源解析对比 王振宇, 李永斌, 郭凌, 宋志强, 许艳玲, 王丰, 梁维青, 史国良, 冯银厂 (608)
- 华中地区夏季 PM_{2.5} 中水溶性离子污染特征及来源分析 苏业旺, 刘威杰, 毛瑶, 程铨, 石明明, 许安, 李星谕, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (619)
- 淄博 2021 年元宵节 PM_{2.5} 水溶性离子污染特征 陈巧, 吴丽萍, 徐勃, 张向炎, 李梦辉, 赵雪艳, 杨文 (629)
- 浙江省大气颗粒物 PM_{2.5} 中全氟化合物污染特征分析及健康风险评估 李冰洁, 陈金媛, 刘铮铮, 王静, 何士冲 (639)
- 2001~2019 年气象条件对江苏省 PM_{2.5} 分布的影响 潘晨, 康志明 (649)
- 基于神经网络和数值模型的重点区域 PM_{2.5} 预报比较分析 高愈霄, 汪巍, 黄永海, 王晓彦, 朱媛媛, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (663)
- 2015~2020 年海南省臭氧时空变化及其成因分析 符传博, 徐文帅, 丹利, 佟金鹤 (675)
- 济南市城区夏季臭氧污染过程及来源分析 孙晓艳, 赵敏, 申恒青, 刘杨, 杜明月, 张文娟, 许宏宇, 范国兰, 公华林, 李青松, 李大秋, 高晓梅, 张丽娜 (686)
- 山东临沂大气夏季典型时段臭氧污染特征及其控制因素分析 杨雪, 安馨悦, 刘玉启, 江春美, 张鹏程, 李灵婕, 赵世阳, 张书源 (696)
- 基于气团老化程度对挥发性有机物分类改善 PMF 源解析效果 朱玉凡, 陈强, 刘晓, 张瑞欣, 郭文凯 (707)
- 日照市夏季 VOCs 物种空间分布特征及其对臭氧生成的影响 姚维杰, 王大玮, 谢付堂, 朱宏伟, 孟祥宇, 田雨, 刘航, 刘晓咏, 张宇婷, 雷山东, 孙业乐, 吴林, 潘小乐, 王自发 (714)
- 泰山大气卤代烃的长期变化趋势与来源 赵峰, 陈天舒, 董灿, 李洪勇, 刘子璐, 毕于健, 国兆新, 王新锋, 杨凌霄, 王韬, 王文兴, 薛丽坤 (723)
- 典型内燃叉车尾气挥发性有机物与正构烷烃的排放特征 周文钦, 李成, 刘俊文, 朱曼妮, 桂小亮, 余飞, 廖松地, 姜帆, 李光辉, 蒋斌, 郑君瑜 (735)
- 2000~2020 年黄河流域植被时空演化驱动机制 田智慧, 任祖光, 魏海涛 (743)
- 西南喀斯特流域土地利用对河流溶解无机碳及其同位素的影响 徐森, 李思亮, 钟君 (752)
- 生物炭添加对太湖滨岸带土壤氮矿化和淋失特征的影响 熊钰婷, 袁旭音, 周慧华, 高一丹, 汪宜敏 (762)
- 不同降雨条件下北运河河岸带类型对径流污染削减效果的影响 朱利英, 赵凯, 张俊亚, 王春荣, 魏源送 (770)
- 雨源型城市河流污染特征及水质联合评价: 以深圳龙岗河为例 毕业亮, 王华彩, 夏兵, 姜参参, 吴伟业, 李志林, 李诗敏, 宿辉, 白志辉, 徐圣君, 庄绪亮 (782)
- 廊坊市区径流污染时空分布特征及来源解析 潘欣荣, 左剑恶, 张宇, 门聪, 张丽萍, 黄守斌 (795)
- 北运河京津冀段河道浮游微生物群落多样性变化分析 郭芝芝, 苏振华, 邱琰茗, 郭道宇 (803)
- 河北省典型景观水体反硝化菌群落时空分布特征及驱动因素: 以石家庄为例 陈召莹, 张紫薇, 张甜娜, 周石磊, 张艺冉, 董宛佳, 于明会, 张一凡, 张家丰 (813)
- 青海湖流域有色可溶性有机物来源与特征分析 俞晓琴, 孟先强, 吴华武, 陈慧敏, 李宇阳, 朱俊羽, 郭燕妮, 姚磊 (826)
- 鄱阳湖丰枯情景对有色可溶性有机物生物可利用性及收支平衡的影响 郭燕妮, 姚晓龙, 陈慧敏, 俞晓琴, 李宇阳, 朱俊羽, 韩龙飞, 周蕾, 周永强 (837)
- 鄱阳湖沉积物溶解性有机质光谱特征 罗燕清, 万智巍, 晏彩霞, 聂明华, 丁明军, 鞠民, 刘赞 (847)
- 汤逊湖表层沉积物重金属污染与潜在生态风险评价 李星谕, 李朋, 苏业旺, 石明明, 胡天鹏, 毛瑶, 刘力, 张雅, 邢新丽, 祁士华 (859)
- 基于核密度估计的城市基础要素与街尘营养元素含量特征关联 王子娇, 李叙勇 (867)
- 新冠疫情下武汉典型饮用水水源中 DBPs 污染特征与风险评估 张坤峰, 昌盛, 涂响, 付青, 杨光, 樊月婷, 孙兴滨 (878)
- 铁改性石英砂过滤协同控制饮用水含氮消毒副产物和条件致病菌 齐鹏, 胡春, 邢学群, 毕志浩, 李泽松 (887)
- 氮掺杂生物炭催化臭氧对于布洛芬的降解特性与机制 柴铨, 许路, 金鑫, 石炬, 吴晨曦, 金鹏康 (896)
- 环糊精多孔聚合物对水中染料分子的吸附性能及主客效应 赵传靓, 王子婕, 闫仪, 徐慧, 周俊垣, 杨利伟, 王东升 (907)
- 冷冻 PN/A 颗粒污泥快速活化过程中的污泥形态与菌群演化特征分析 黄子恒, 张立, 崔舒惠, 张琦英, 文言, 钱飞跃 (920)
- 不同阳离子聚丙烯酰胺有机脱水剂对污泥脱水性能的影响 冯齐云, 高宝玉, 岳钦艳, 石伟杰, 冯春晖, 周继柱, 王国瑞 (928)
- 云南某矿区小流域土壤重金属健康风险评价 刘洋, 何朝辉, 牛学奎, 张迪, 潘波 (936)
- 山地平原过渡带耕地土壤重金属空间特征及潜在生态风险因素探析 张丁, 黄容, 高雪松 (946)
- 地累积指数法评价多金属环境质量的方法优化探索: 以农业发达地区为例 鞠铁男, 雷梅 (957)
- 西南地质高背景区蔬菜 Pb 的安全生产阈值与土地质量类别划分 穆德苗, 孙约兵 (965)
- 典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价 黄钟霆, 易盛炜, 陈贝贝, 彭锐, 石雪芳, 李峰 (975)
- 矿业废弃地不同生态修复模式下植物多样性及重金属富集迁移特征 周鹏飞, 张世文, 罗明, 魏洪斌, 宋强, 方兵, 庄红娟, 陈弘扬 (985)
- 不同种植年限蔬菜大棚土壤特性、重金属累积和生态风险 任强, 孙瑞玲, 郑凯旋, 刘伟丹, 阮心玲, 王洋洋 (995)
- 温室与大田种植方式对胡萝卜生长过程中重金属吸收的影响 曹春, 任丹, 吕贞英, 张鹏, 李锦超, 陈勋文, 王俊坚 (1004)
- 两种淹水模式下施用钝化材料对镉污染农田水稻安全的影响 王港, 余海英, 李廷轩, 唐婵 (1015)
- 复合淋洗条件下农用地耕作层土壤去镉效率及其功能调节 曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (1023)
- 产多胺细菌调控根际细菌群落阻控小麦 Cd 吸收效应 李晓哲, 覃善梅, 陈兆进, 张君, 姚伦广, 李娜, 虎发虎, 韩辉 (1031)
- 土壤 *phoC* 和 *phoD* 微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应 杨文娜, 余冻, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 王子芳, 高明 (1040)
- 刺槐林恢复过程中土壤微生物碳降解酶的变化及与碳库组分的关系 李文杰, 张颖皎, 赵雅萍, 许森平, 任成杰, 杨改河, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娟, 韩新辉 (1050)
- 中亚热带不同林龄马尾松林土壤酶学计量特征 焦鹏宇, 郭文, 陈泽龙, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (1059)
- 稻田与旱地土壤中真菌和细菌对秸秆碳的利用特征 邓少虹, 郑小东, 毛婉琼, 陈香碧, 胡亚军, 程爱武, 何寻阳, 苏以荣 (1069)
- 模拟及实际根系分泌物对苤蓝土壤微生物群落的影响 韩博远, 张闻, 胡芳雨, 赵庆庆, 卢媛, 孔学, 吕俊岗 (1077)
- 德兴铜矿区抗生素抗性基因污染特征及其驱动因子 韩柳, 楼倩, 乔敏, 刘梦婷, 钟家有, 丁惠君 (1089)
- 陕西渭北旱塬区农田土壤有机质空间预测方法 尉芳, 刘京, 夏利恒, 徐仲伟, 龙小翠 (1097)
- 长三角农田轮作系统氨排放特征、转化机制和减排潜力 徐昶, 苗文亮, 倪远之, 沈根祥, 钱晓雍, 付侃, 高宗源, 王振旗 (1108)
- 《环境科学》征订启事(618) 信息(685, 935, 956)

汤逊湖表层沉积物重金属污染与潜在生态风险评价

李星谕¹, 李朋^{1,2}, 苏业旺¹, 石明明¹, 胡天鹏¹, 毛瑶¹, 刘力², 张雅², 邢新丽^{1*}, 祁士华¹

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074; 2. 古生物与地质环境演化湖北省重点实验室, 武汉 430205)

摘要: 为了解汤逊湖沉积物重金属的污染特征、空间分布、潜在来源和生态风险, 对汤逊湖表层沉积物重金属(As、Hg、Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 和 Ni)含量进行分析, 采用地累积指数法和潜在生态风险指数法对沉积物重金属污染现状和潜在生态风险程度进行评价, 并利用相关性和主成分分析法解析重金属主要污染物的潜在来源。结果表明, 除 Cr 外, 其余重金属含量均高于其背景值。重金属含量存在显著性地域差异, 湖泊西南角、东北角 Hg、Cd、Zn 和 Cu 元素含量较高, 可能来自排污口废水排放、渔业和周围工农业活动等复合污染。地累积指数和潜在生态风险表明 Hg 和 Cd 处于偏中度污染, Cu、Pb 和 Zn 处于无-轻度污染, As、Cr 和 Ni 处于无污染状态; 除 Hg 和 Cd 分别存在较重和重度的潜在生态风险外, 其余元素均处于低风险水平。汤逊湖表层沉积物重金属整体表现为较重生态风险水平。

关键词: 汤逊湖; 表层沉积物; 重金属; 污染; 生态风险

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)02-0859-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202105129

Pollution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Tangxun Lake

LI Xing-yu¹, LI Peng^{1,2}, SU Ye-wang¹, SHI Ming-ming¹, HU Tian-peng¹, MAO Yao¹, LIU Li², ZHANG Ya², XING Xin-li^{1*}, QI Shi-hua¹

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Hubei Key Laboratory of Paleontology and Geological Environment Evolution, Wuhan 430205, China)

Abstract: In order to understand the pollution characteristics, spatial distribution, potential sources, and ecological risk of heavy metals in the sediments of Tangxun Lake, the contents of heavy metals (As, Hg, Cd, Cr, Cu, Pb, Zn, and Ni) in the surface sediments of Tangxun Lake were analyzed, and the pollution status and potential ecological risk degree of heavy metals in the sediments were evaluated using the geo-accumulation index and potential ecological risk index. The potential sources of heavy metal pollutants were analyzed by correlation and principal component analysis. The results showed that except for Cr, the contents of other heavy metals were higher than their background values. The contents of Hg, Cd, Zn, and Cu were higher in the southwest and northeast corners of the lake, which may come from the combined pollution of sewage discharge, fisheries, and surrounding industrial and agricultural activities. The geo-accumulation index and potential ecological risk showed that Hg and Cd were in moderate pollution; Cu, Pb, and Zn were in non-light pollution; and As, Cr, and Ni were in non-pollution. Except for Hg and Cd, there were serious and serious potential ecological risks, and the other elements were at a low risk level. The heavy metals in the surface sediments of Tangxun Lake showed a high ecological risk level.

Key words: Tangxun Lake; surface sediments; heavy metals; pollution; ecological risk

湖泊在涵养水源、为人类提供饮用水、为多种生态系统提供和管理水资源方面发挥着重要作用^[1]。随着工业化和城市化进程的加快, 电镀、金属冶炼、化石燃料燃烧和化学工业废水排放等工业活动会释放 As、Cu 和 Pb 等重金属^[2,3], 大量重金属和污染物通过降雨、径流和其他渠道进入河流, 最终进入湖泊^[4,5], 这些污染物通过物理和化学作用可以降解水质和重构生物群落, 降低水生生态系统中无脊椎动物和鱼类的多样性和生产力^[6]。重金属作为一类不易降解的污染物, 进入湖泊后通过絮凝或沉淀作用, 多数将富集在沉积物中, 当环境条件发生变化时, 重金属会再次从沉积物中释放到水中, 对水生生物和人类健康构成潜在威胁^[7]。Waaen 等^[8]的研究认为湖泊水体富营养化与湖泊沉积物存在显著的相关关系, 沉积物中污染物的释放是城市湖泊水质恶化的根本原因。有研究表明, 城市湖泊沉积物中重金属富集显著^[9]。沉积物中重金属由于其毒性、在环境中的持久性和进入食物链后的生物积累

性从而引起了世界范围内的关注。其中 Cd、Cr、As、Hg、Pb、Cu、Zn 和 Ni 等重金属已被美国环保署列为优先控制污染物^[10]。因此, 对城市湖泊沉积物重金属进行调查分析, 评价其污染程度和潜在的生态风险, 对改善城市水环境具有重要意义。

汤逊湖 (N30° 22' ~ 30° 30', E114° 15' ~ 114° 27') 位于武汉市东南部, 横跨江夏区、洪山区和东湖新技术开发区, 水域面积为 47.62 km²。文献 [11] 显示, 汤逊湖已经成为中国乃至亚洲最大的城中湖。近年来, 大量未经处理的生活污水和工业废水直接排入湖中, 导致湖中重金属含量不断升高^[12]。Zhao 等^[13]采集汤逊湖 4 个采样点的沉积柱并对其营养盐和重金属 (Cd、As、Zn、Cu、Cr 和 Pb) 含量

收稿日期: 2021-05-13; 修订日期: 2021-07-23

基金项目: 武汉市多要素城市地质调查示范项目 (WHDYS-2020-010); 古生物与地质环境演化湖北省重点实验室开放基金项目 (PEL-202105)

作者简介: 李星谕 (1997 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为重金属的环境行为和效应, E-mail: 1720675970@qq.com

* 通信作者, E-mail: xlxing@cug.edu.cn

进行了研究,发现汤逊湖存在较重的 Cd 污染. Zhou 等^[14]的研究表明东北角排污口工业废水的排放是汤逊湖全氟烃基酸(PFAAs)污染水平高的主要原因,在整个湖泊中呈现由东北向西南方向逐渐递减的趋势. 目前尚未见到有关汤逊湖表层沉积物中重金属的相关报道. 本研究通过采集汤逊湖全水域表层沉积物样品,对其重金属的含量和空间分布特征进行分析,采用地累积指数法(I_{geo})和 Hakanson 潜在生态风险指数法(RI)评价其污染和生态风险水平,以期为今后湖泊的污染治理提供参考.

1 材料与方法

1.1 样点设置与采集

2020 年 8 月,根据汤逊湖排污口分布、距离污染源位置 and 实际采样的难易程度,在汤逊湖全水域布设采集 23 个表层沉积物样品,其中外湖布设 13 个点,内湖布设 10 个点,具体采样点分布如图 1 所示. 使用重力抓斗式采泥器采集表层(0~10 cm)的

沉积物样品(剔除沉积物中植物和贝类等残体),装入干净的聚乙烯自封袋,所有样品采集完后,立即运回实验室,低温保存.

汤逊湖主要功能为饮用水源地、农田灌溉、渔业养殖和景观等,流域内排口点源污染主要以生活污水为主,东北角汤逊湖污水处理厂和西南角纸坊污水处理厂尾水是汤逊湖入湖污染来源之一. 汤逊湖流域内主要排口和污水处理厂信息如表 1 所示.

1.2 样品处理与分析

沉积物样品自然风干,研磨、过 200 目筛,保存于阴凉干燥处备用. 采用 HCl-HNO₃-HF-HClO₄ 法进行完全消解. 采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, Agilent 5110)测定 Cr、Cu、Pb、Zn 和 Ni,电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Agilent 8900)测定 Cd、Hg 和 As 采用王水沸水浴消解,采用原子荧光仪测定. 利用 SPSS 22.0 软件进行主成分分析和 Pearson 相关性分析; ArcGIS 10.2 绘制重金属含量的空间分布图; Origin、Excel 绘制统计图表.

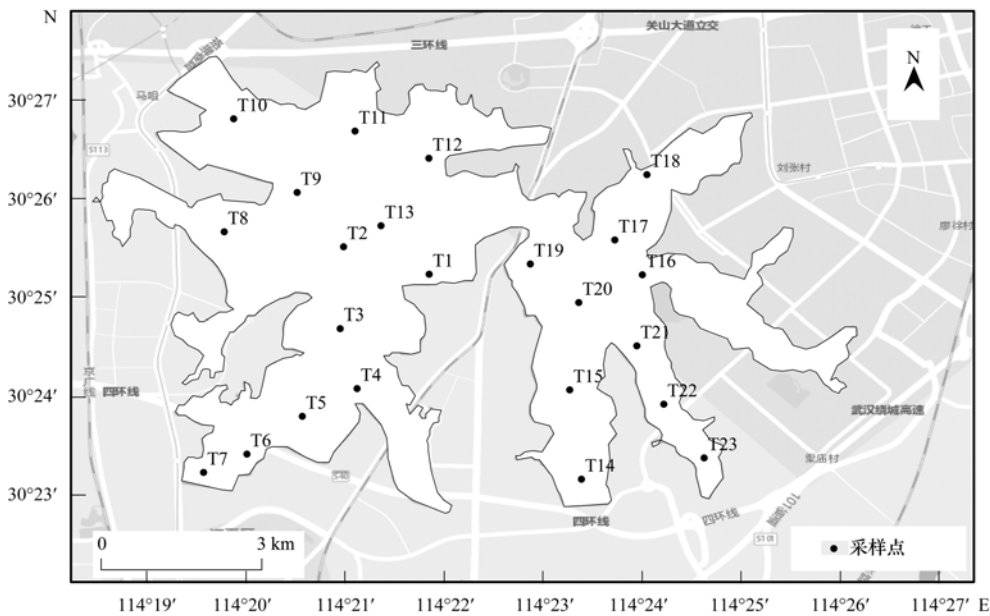


图1 汤逊湖表层沉积物采样点位示意

Fig. 1 Sampling sites of surface sediments in Tangxun Lake

表 1 汤逊湖流域内主要排口和污水处理厂概况

Table 1 Overview of sewage treatment plants and main outlets in Tangxun Lake

污水厂名称	位置	尾水排放去向(服务区域)	排口名称	位置
纸坊污水处理厂	西南角	汤逊湖(纸坊城区污水、庙山小区和江夏区汤逊湖经济发展园)	纸坊污水厂尾水入湖排口	T6 和 T7 附近
			汤逊湖污水厂尾水入湖排口	T18 附近
汤逊湖污水处理厂	东北角	汤逊湖(东湖高新区域的三环线以西,南环铁路以南的庙山、藏龙岛、流芳地区)	梅南山居排口	T1 附近
			汤逊湖村-窑咀排口	T11 附近

1.3 质量保证与控制

本实验中所用试剂均为优级纯,试剂溶液均用二次去离子水配制. 实验前后将消解罐于硝酸中浸泡 24 h. 整个实验操作过程中,避免接触金属物品.

采用国家标准土壤样品(GSS-1、GSS-2、GSS-5 和 GSS-7)进行实验过程质量控制,各元素回收率在 92%~106% 之间;同时每 10 个样品做 1 个样品平行和 1 个分析空白,平行样重复率在 90%~110% 之

间,空白样中目标重金属均远低于样品浓度.

1.4 沉积物中重金属评价方法

1.4.1 地累积指数法

地累积指数(index of geo-accumulation, I_{geo})法^[15]是对土壤和沉积物重金属污染程度进行定量评价常用方法之一. 计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 [C_n / (k \times B_n)] \quad (1)$$

表2 地累积指数分级

Table 2 Geo-accumulation index grading

I_{geo}	≤ 0	(0, 1]	(1, 2]	(2, 3]	(3, 4]	(4, 5]	> 5
分级数	0	1	2	3	4	5	6
污染程度	清洁	轻度	偏中度	中度	偏重度	严重	极重

1.4.2 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法用以评价重金属对生态环境的潜在危害. 该方法从重金属的生物毒性角度出发,定量划分出潜在生态风险等级. 该方法由瑞典学者 Hakanson^[18]提出,计算公式为:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_{i,r} = \sum_{i=1}^n T_{i,r} \times \frac{C_{i,f}}{C_{i,n}} \quad (2)$$

式中,RI 为多种重金属的综合潜在生态风险指数,无量纲; $E_{i,r}$ 为重金属元素 i 的潜在生态风险指数,无量纲; $T_{i,r}$ 是重金属元素 i 的毒性系数,无量纲; $C_{i,f}$ 为重金属元素 i 的实测含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; $C_{i,n}$ 为重金属元素 i 的土壤背景值,选取武汉市土壤背景值^[14]. 根据 RI 和 $E_{i,r}$ 值的大小,潜在生态风险指数划分标准见表 3^[19].

表3 潜在生态风险指数划分标准

Table 3 Classification standards of potential ecological risk assessment

单金属潜在生态风险指数($E_{i,r}$)	综合潜在生态风险指数(RI)	潜在生态风险等级
< 40	< 150	低
$40 \leq E_{i,r} < 80$	$150 \leq RI < 300$	中
$80 \leq E_{i,r} < 160$	$300 \leq RI < 600$	较重
$160 \leq E_{i,r} < 320$	≥ 600	重
≥ 320		严重

表4 各金属含量描述性统计

Table 4 Descriptive statistics of each metal content

元素	平均值 $/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	最大值 $/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	最小值 $/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	标准差	变异系数	武汉市土壤背景值 ^[16] $/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	中国湖泊沉积物平均值 ^[21] $/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	中国南方水系沉积物平均值 ^[22] $/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
Hg	0.17	0.55	0.07	0.12	0.72	0.044	0.053	0.075
Cd	0.66	1.08	0.30	0.17	0.26	0.12	0.194	0.23
As	12.88	20.29	7.17	3.72	0.29	12	12.1	13.1
Ni	40.49	56.17	27.53	7.30	0.18	40	36.8	29
Pb	41.60	55.85	23.61	8.46	0.20	25	31	32.3
Cu	51.28	94.97	32.24	12.61	0.25	32	31.7	25
Cr	85.28	110.13	63.59	10.60	0.12	90	85	67
Zn	145.01	310.94	90.09	47.01	0.32	79	88	81

式中, C_n 为沉积物中重金属含量实测值, B_n 为沉积物中重金属的背景值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 元素背景值来自于武汉市土壤背景值^[16]. k 值是考虑到各地岩石差异可能会引起背景值的变动而设定的系数(一般设定为 1.5)^[17]. 在地累积指数的研究与应用中,一般采用的是 Muller 的分级标准,将污染程度从无污染到极强污染分为 7 个污染等级^[15],分级标准见表 2.

2 结果与讨论

2.1 表层沉积物重金属含量及空间分布特征

汤逊湖表层沉积物中重金属含量特征见表 4. 各元素含量平均值由大到小排序为: $\text{Zn} > \text{Cr} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Hg}$, 其含量平均值(范围)分别为 145.01 (90.09 ~ 310.94)、85.28 (63.59 ~ 110.13)、51.28 (32.24 ~ 94.97)、41.60 (23.61 ~ 55.85)、40.49 (27.53 ~ 56.17)、12.88 (7.17 ~ 20.29)、0.66 (0.30 ~ 1.08) 和 0.17 (0.07 ~ 0.55) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 各重金属的含量范围变化较大,其中 Hg 的变异系数为 72%,表明人类活动对沉积物中重金属的含量有直接影响^[20]. 与武汉市土壤背景值相比^[16],除 Cr 外,其余重金属平均含量均超过其背景值, Hg 和 Cd 分别是背景值的 6.85 和 5.65 倍,与 Zhao 等^[13]于 2016 年对汤逊湖的研究结果相一致,但 Cd 的含量是 2016 年的 2.35 倍,表明近年来汤逊湖 Cd 含量呈现逐渐增加的趋势. 与中国湖泊沉积物^[21]平均值相比, Hg、Cd、Ni、Pb、Cu 和 Zn 含量偏高, As 和 Cr 含量相近; 与中国南方水系沉积物平均值相比^[22], Hg、Cd、Ni、Pb、Cu、Cr 和 Zn 含量偏高, As 含量相近. 如表 5 所示,将汤逊湖与典型受污染城市湖泊^[23~27]

表 5 典型污染城市湖泊表层沉积物重金属平均含量¹⁾

Table 5 Average content of heavy metals in surface sediments of typical polluted urban lakes

项目	采样点数量	$\omega/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$							
		As	Hg	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	Ni
汤逊湖(本研究)	23	11.22	0.3	0.68	85.28	51.28	41.6	145.01	40.49
东湖 ^[23]	20	—	—	0.3	85.7	35.9	51.8	166.8	40.7
洪泽湖 ^[24]	18	16.55	—	0.23	66.78	25.35	27.2	74.77	33.89
鄱阳湖 ^[25]	20	—	—	0.7	132.49	44.89	49.39	142.79	—
阳澄湖 ^[26]	15	15.85	0.09	0.45	101.28	66.54	34.02	187.33	68.72
太湖 ^[27]	94	13.34	0.109	0.479	102.46	44.71	37	163.62	45.5

1) “—”表示没有相关数据

沉积物中重金属平均含量进行对比,分析得 Hg 和 Cd 的含量均高于其他湖泊; Cu 的含量高于东湖、洪泽湖、鄱阳湖和太湖,低于阳澄湖; Pb 的含量高于洪泽湖、阳澄湖和太湖; Ni、Cr、Zn 和 As 含量相对较低.

综上所述,汤逊湖表层沉积物中重金属含量相对较高,特别是 Hg 和 Cd 含量显著高于其他城市湖泊. 研究表明湖泊重金属污染情况随当地经济发展、污染排放源和地理条件以及元素之间理化性质和含量的不同而存在差异,除此之外还可能受到湖泊的背景值和周围人类活动的影响^[28]. 汤逊湖作为国内最大城中湖,长期接纳沿湖污水的直接排放,再加上渔业养殖对汤逊湖水质产生的影响,导致汤逊湖重金属处在一个高值水平.

汤逊湖表层沉积物中 As、Hg、Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 和 Ni 含量空间分布差异明显(图 2). Cr、Pb 和 Ni 在空间分布上具有一致性,含量高值区主要集中在湖心位置,且分布相对均匀; Hg 和 Cd 含量高值区位于湖泊的西南角(T6 和 T7)和东北角(T17 和 T18). Zn 和 Cu 含量高值区主要位于湖泊东北角 T18 位置. As 的含量空间分布表现出独特性,含量高值区主要集中在内湖湖心和东南角湖汊位置.

2.2 重金属污染评价与生态风险评估

汤逊湖表层沉积物中重金属地累积指数(I_{geo})评价结果见图 3. 根据 I_{geo} 分级标准,Cr 和 Ni 整体处于清洁状态,几乎无污染; As 处于无-轻度污染状态; Cu、Pb 和 Zn 整体污染程度较低,为轻度污染,分别有 52%、39% 和 30% 的采样点处于清洁状态,但在东北角 T18 采样点处,Zn 处于偏中度污染. Hg 和 Cd 整体处于偏中度污染. 就 Hg 而言,轻度污染的采样点占 57%,偏中度污染的采样点占 30%,西南角 T7 采样点处于中度污染,西南角 T6 和东北角 T18 采样点处于偏重度污染; 就 Cd 而言,偏中度污染的采样点占 57%,中度污染的占 35%. 综上所述,汤逊湖表层沉积物存在重金属污染,Hg 和 Cd 是主要污染物,且受 Hg 和 Cd 污染的采样区域在空间上

存在显著差异,污染主要集中在湖泊西南角和东北角.

汤逊湖表层沉积物中 As、Hg、Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 和 Ni 的潜在生态风险指数($E_{i,r}$)平均值(范围)分别为: 10.73 (5.98 ~ 16.91)、153.48 (62.53 ~ 495.54)、165.83 (75.08 ~ 269.37)、1.90 (1.41 ~ 2.45)、8.01 (5.04 ~ 14.84)、8.32 (4.72 ~ 11.17)、1.84 (1.14 ~ 3.94) 和 5.06 (3.44 ~ 7.02) (图 4). Hg 有 78% 以上的采样点具有较重的潜在生态风险; Cd 分别有 61% 和 35% 的采样点具有重度和较重的潜在生态风险; 其余元素在全部采样点都处于低潜在生态风险水平,表明 Hg 和 Cd 是造成汤逊湖表层沉积物生态危害的主要因素,与地累积指数分析结论一致. Hg 和 Cd 的潜在生态风险在空间分布上存在差异(图 5),西南角(T6、T7)和东北角(T17、T18) Hg 的潜在生态风险高于其余各点. 综合潜在生态风险指数(RI)显示(图 6),所有采样点的 RI 值介于 175.58 ~ 760.71 之间,平均值为 365.05,表现为较重风险水平,西南角 T6 和东北角 T18 采样点综合生态风险等级最高,表现为重度风险水平.

有研究证实,人类活动的方式和强度与湖泊重金属生态风险密切相关,工业化程度与发展水平高的城市湖泊重金属污染程度高于城市工业化程度与发展水平较低的城市湖泊^[28]. 武汉市作为长江经济带的核心城市,是全国重要的工业基地和交通枢纽^[29]. 汤逊湖沿湖建有商品楼盘、大学城和科技园等,长期以来的高强度人类活动导致汤逊湖存在严重的重金属污染和生态风险.

2.3 沉积物中重金属的相关性及污染来源分析

从表 6 可以得出 As 与其他元素之间没有显著相关性,表明其来源的特殊性; Hg 与 Cd、Cu 和 Zn 之间存在极显著的正相关关系($P < 0.01$),Cu 和 Zn 之间存在极显著的正相关性($r = 0.865$, $P < 0.01$); Cr 与 Cu、Pb 和 Ni 之间存在极显著的正相关关系,Pb 和 Ni 之间存在极显著的正相关性($r =$

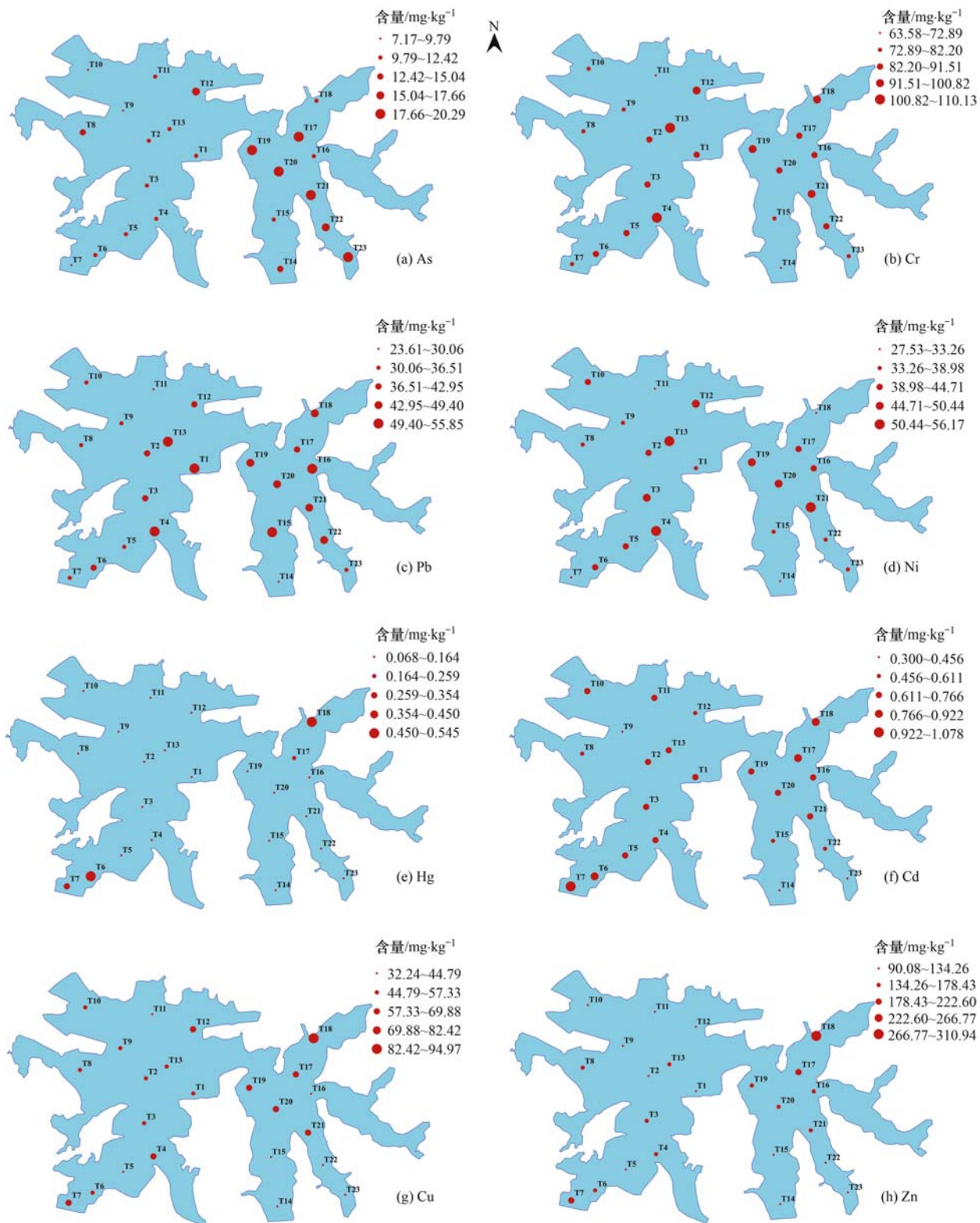


图2 汤逊湖表层沉积物重金属含量空间分布

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

0.621, $P < 0.01$), 表明这些元素在汤逊湖沉积物中的地球化学性质相似, 具有相同来源或者产生了复合污染。

对汤逊湖表层沉积物重金属进行了 Bartlett 球形度检验($0.00 < 0.05$) 与 KMO 度量值检验($0.538 > 0.5$), 结果表明各元素间适合进行主成分分析

(表7). 结果显示, 8 种元素共分为 3 类. 第 1 主成分(F1)方差贡献率为 42.734%, 载荷较高的重金属为 Cu、Zn、Hg 和 Cd; 第 2 主成分(F2)方差贡献率为 28.064%, 载荷较高的重金属为 Cr、Ni 和 Pb; 第 3 主成分(F3)方差贡献率为 12.279%, 载荷较高的重金属为 As.

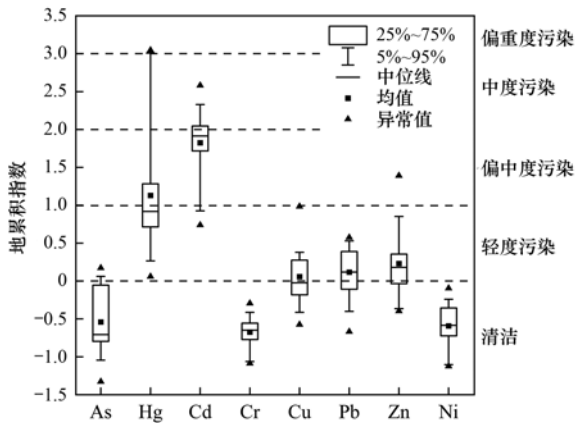


图3 汤逊湖表层沉积物重金属地累积指数

Fig. 3 Geo-accumulation index of heavy metals in surface sediments of Tangxun Lake

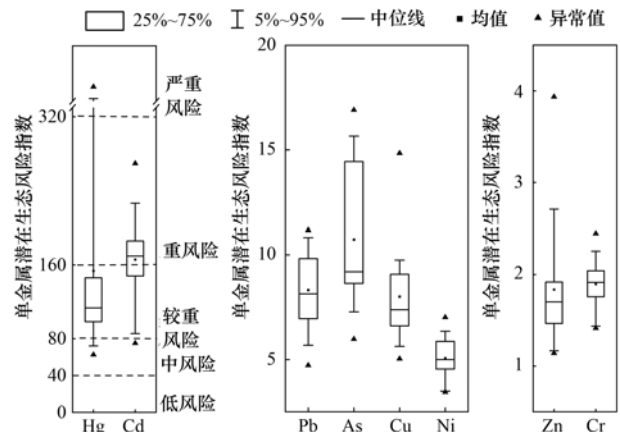


图4 汤逊湖表层沉积物单金属潜在生态危害指数

Fig. 4 Potential ecological hazard index of single metals in surface sediments of Tangxun Lake

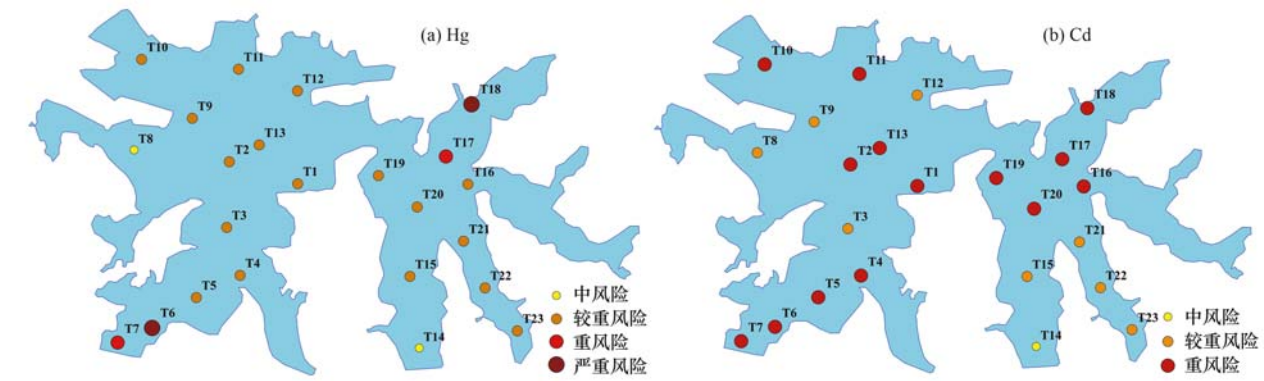
图5 基于 $E_{i,r}$ 的汤逊湖表层沉积物中 Hg 和 Cd 的潜在生态风险分布

Fig. 5 Potential ecological risk distribution of Hg and Cd in surface sediments of Tangxun Lake based on $E_{i,r}$

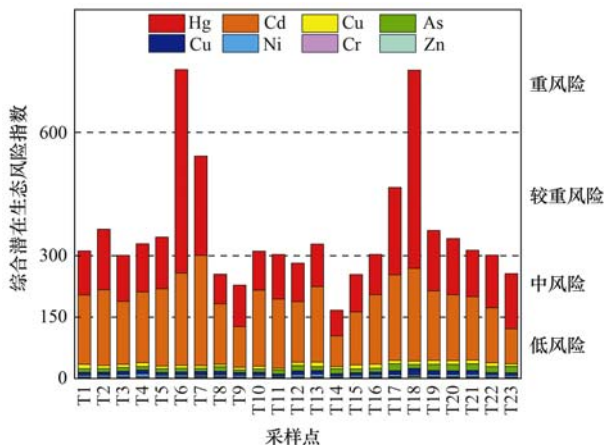


图6 汤逊湖各采样点综合生态风险指数

Fig. 6 Comprehensive ecological risk index of Tangxun Lake

根据重金属污染评价与生态风险评估结果可以得出, Hg 和 Cd 是汤逊湖表层沉积物中主要污染物. 相关性分析和主成分分析结果表明, Hg 和 Cd 可能来自同一污染源.

Hg 的主要来源包括含 Hg 废水的排放、大气中

含 Hg 颗粒物的大气沉降和地表径流, 大部分 Hg 被保留在沉积物中^[30]. 汤逊湖表层沉积物中 Hg 可能来自污水厂的废水排放, 还可能与工业废气排放后远距离输送所造成的大气污染有关; 武汉市全年降雨丰沛, 含 Hg 颗粒物的降雨也是重金属入湖的途径之一. 2017 年汤逊湖暴发了严重的蓝藻水华, 为控制水体富营养化, 对汤逊湖进行围网拆除, 将集约化渔业养殖转化为生态渔业养殖^[31]. 此前大量的外源性饲料和农药添加导致重金属最终沉积到湖底沉积物中. 有研究表明, 水产饲料中的鱼粉含有一定量的 Cd 元素^[24], 农业活动是 Cd、Zn 和 Cr 的潜在来源^[32,33]. 汤逊湖表层沉积物中 Cd 和 Zn 等重金属可能来自水产养殖过程中投加的饵料、鱼类的排泄物、农业化肥流失和农药残留等.

综上所述, 汤逊湖表层沉积物重金属可能来自排污口废水排放、渔业和周围工农业活动等复合污染. 汤逊湖今后关于重金属 Hg 和 Cd 的治理, 应加强流域排污管理, 做好定期清淤等工作.

表 6 各重金属之间的 Pearson 相关系数¹⁾
Table 6 Pearson correlation coefficients among heavy metals

	As	Hg	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	Ni
As	1							
Hg	-0.099	1						
Cd	-0.241	0.612 **	1					
Cr	0.205	0.166	0.255	1				
Cu	0.125	0.530 **	0.468 *	0.605 **	1			
Pb	0.173	-0.031	0.121	0.753 **	0.308	1		
Zn	0.026	0.609 **	0.608 **	0.367	0.865 **	0.192	1	
Ni	0.267	-0.148	0.074	0.859 **	0.267	0.621 **	-0.031	1

1) ** 表示 0.01 水平 (双侧) 上显著相关; * 表示 0.05 水平 (双侧) 上显著相关

表 7 汤逊湖表层沉积物重金属主成分分析矩阵¹⁾
Table 7 Principal component analysis matrix of heavy metals
in surface sediments of Tangxun Lake

重金属元素	F1	F2	F3
Zn	0.926	0.094	0.092
Cu	0.833	0.344	0.197
Hg	0.832	-0.12	-0.114
Cd	0.742	0.127	-0.409
Cr	0.306	0.922	0.099
Ni	-0.076	0.922	0.104
Pb	0.072	0.854	0.032
As	-0.021	0.155	0.941
初始特征值	3.419	2.245	0.982
方差贡献率/%	42.734	28.064	12.279

1) 黑体字表示所占载荷较高的元素,即某成分的主要组成元素

3 结论

(1) 汤逊湖表层沉积物重金属由大到小排序为: Zn > Cr > Cu > Pb > Ni > As > Cd > Hg, 除 Cr 外, 其余重金属平均含量均超过其背景值, 重金属含量处于一个高值水平且存在显著性地域差异, Hg、Cd、Zn 和 Cu 元素在湖泊西南角和东北角呈递增趋势, 湖心处 Cr、Pb 和 Ni 含量较高。

(2) 地累积指数和潜在生态风险指数分析结果表明 Hg 和 Cd 处于偏中度污染, Cu、Pb 和 Zn 处于无-轻度污染, As、Cr 和 Ni 处于无污染状态; Hg 和 Cd 分别存在较重和重度的潜在生态风险, 其余元素均处于低风险水平。整个汤逊湖区的综合潜在生态风险指数在 175.58 ~ 760.71 之间, 平均值为 365.05, 整体为较重风险水平, Hg 和 Cd 的风险指数占综合潜在生态风险指数的 80% 以上, 是汤逊湖重金属污染和生态风险的主要贡献因子。汤逊湖重金属污染治理时需首先关注湖泊沉积物中的 Hg 和 Cd。为减缓汤逊湖沉积物重金属带来的健康和生态危害, 需定期监测重金属特别是 Hg 和 Cd 含量超标情况。

(3) 汤逊湖表层沉积物重金属主要污染物 Hg 和 Cd 可能来自排污口废水排放、渔业和周围工农

业活动等复合污染。

参考文献:

[1] Chen H Y, Jing L J, Yao Z P, *et al.* Prevalence, source and risk of antibiotic resistance genes in the sediments of Lake Tai (China) deciphered by metagenomic assembly: a comparison with other global lakes [J]. *Environment International*, 2019, **127**: 267-275.

[2] Guo C B, Chen Y S, Xia W T, *et al.* Eutrophication and heavy metal pollution patterns in the water supplying lakes of China's south-to-north water diversion project [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **711**, doi: 10.1016/j.scitotenv. 2019.134543.

[3] Noli F, Tsamos P. Concentration of heavy metals and trace elements in soils, waters and vegetables and assessment of health risk in the vicinity of a lignite-fired power plant [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **563-564**: 377-385.

[4] Cheng N, Liu L S, Hou Z L, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of surface sediments in the urban lakes [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**(17): 22022-22037.

[5] Zhang X K, Li B L, Deng J M, *et al.* Regional-scale investigation of dissolved organic matter and lead binding in a large impacted lake with a focus on environmental risk assessment [J]. *Water Research*, 2020, **172**, doi: 10.1016/j.watres. 2020.115478.

[6] Zhu B, Smith D S, Benaquista A P, *et al.* Water quality impacts of small-scale hydromodification in an urban stream in Connecticut, USA [J]. *Ecological Processes*, 2018, **7**(1), doi: 10.1186/s13717-018-0122-z.

[7] 李悦昭, 陈海洋, 孙文超. “河-湖”沉积物重金属环境特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(6): 2646-2652.

Li Y Z, Chen H Y, Sun W C. Environmental characteristics and source apportionment of heavy metals in the sediments of a River-Lake System [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2646-2652.

[8] Waajen G W A M, Faassen E J, Lürling M. Eutrophic urban ponds suffer from cyanobacterial blooms: Dutch examples [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(16): 9983-9994.

[9] Xia P H, Ma L, Sun R G, *et al.* Evaluation of potential ecological risk, possible sources and controlling factors of heavy metals in surface sediment of Caohai Wetland, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **740**, doi: 10.1016/j.scitotenv. 2020.140231.

[10] Chen H Y, Teng Y G, Lu S J, *et al.* Contamination features and health risk of soil heavy metals in China [J]. *Science of the Total*

- Environment, 2015, **512-513**: 143-153.
- [11] 武汉市水务局. 武汉湖泊志[M]. 武汉: 湖北美术出版社, 2014.
- [12] 褚俊英, 秦大庸, 王浩, 等. 武汉汤逊湖未来水环境演变趋势的模拟[J]. 中国环境科学, 2009, **29**(9): 955-961.
Chu J Y, Qin D Y, Wang H, *et al.* Simulation of lake water environment trends in Tangxun lake of Wuhan under rainfall uncertainty[J]. China Environmental Science, 2009, **29**(9): 955-961.
- [13] Zhao S L, Li Y, Liu D B, *et al.* Spatial distribution, ecological risk assessment and source identification for nutrients and heavy metals in surface sediments from Tangxun Lake, Wuhan, Central China[J]. Nature Environment and Pollution Technology, 2016, **15**(4): 1417-1425.
- [14] Zhou Z, Liang Y, Shi Y L, *et al.* Occurrence and transport of perfluoroalkyl acids (PFAAs), including short-chain PFAAs in Tangxun Lake, China [J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(16): 9249-9257.
- [15] Muller G. Index of Geoaccumulation in sediments of the Rhine river[J]. Geology Journal, 1969, **2**: 109-118.
- [16] 成杭新, 李括, 李敏, 等. 中国城市土壤化学元素的背景值与基准值[J]. 地学前缘, 2014, **21**(3): 265-306.
Cheng H X, Li K, Li M, *et al.* Geochemical background and baseline value of chemical elements in urban soil in China[J]. Earth Science Frontiers, 2014, **21**(3): 265-306.
- [17] 赵珍丽, 赵委托, 黄庭, 等. 电镀厂周边大气 PM₁₀ 中重金属季节性分布特征及生态风险评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(1): 18-26.
Zhao Z L, Zhao W T, Huang T, *et al.* Seasonal characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in PM₁₀ around electroplating plants[J]. Environmental Science, 2018, **39**(1): 18-26.
- [18] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [19] 姜会敏, 郑显鹏, 李文. 中国主要湖泊重金属来源及生态风险评估[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, **28**(S1): 108-112.
Jiang H M, Zheng X P, Li W. Source and risk assessment of heavy metal in sediment of China [J]. China Population, Resources and Environment, 2018, **28**(S1): 108-112.
- [20] Wang S H, Wang W W, Chen J Y, *et al.* Geochemical baseline establishment and pollution source determination of heavy metals in lake sediments; a case study in Lihu Lake, China [J]. Science of the Total Environment, 2019, **657**: 978-986.
- [21] Cheng H X, Li M, Zhao C D, *et al.* Concentrations of toxic metals and ecological risk assessment for sediments of major freshwater lakes in China [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2015, **157**: 15-26.
- [22] 程志中, 谢学锦, 潘含江, 等. 中国南方地区水系沉积物中元素丰度[J]. 地学前缘, 2011, **18**(5): 289-295.
Cheng Z Z, Xie X J, Pan H J, *et al.* Abundance of elements in stream sediment in South China[J]. Earth Science Frontiers, 2011, **18**(5): 289-295.
- [23] 李晓明, 周密. 武汉东湖沉积物重金属分布特征及其污染评价[J]. 环境科学与技术, 2016, **39**(10): 161-169, 184.
Li X M, Zhou M. Distribution characteristics and contamination assessment of heavy metals in surface sediments of East Lake, Wuhan[J]. Environmental Science & Technology, 2016, **39**(10): 161-169, 184.
- [24] 瞿鑫源, 张鸣, 谷孝鸿, 等. 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[J]. 环境科学, 2021, **42**(11): 5355-5363.
Zi X Y, Zhang M, Gu X H, *et al.* Impact of enclosure culture on heavy metal content in surface sediments of Hongze Lake and ecological risk assessment[J]. Environmental Science, 2021, **42**(11): 5355-5363.
- [25] 王琳杰, 曾贤刚, 段存儒, 等. 鄱阳湖沉积物重金属污染影响因素分析——基于 STIRPAT 模型[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(8): 3683-3692.
Wang L J, Zeng X G, Duan C R, *et al.* Analysis on influencing factors of heavy metal pollution in sediments of Poyang Lake based on STIRPAT Model[J]. China Environmental Science, 2020, **40**(8): 3683-3692.
- [26] 郭西亚, 高敏, 张杰, 等. 阳澄湖沉积物重金属空间分布及生物毒害特征[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(2): 802-811.
Guo X Y, Gao M, Zhang J, *et al.* Characteristics of spatial distribution and biological toxicity for heavy metals in sediments of the Yangcheng Lake [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(2): 802-811.
- [27] 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.
- [28] Obrist D, Kirk J L, Zhang L, *et al.* A review of global environmental mercury processes in response to human and natural perturbations: changes of emissions, climate, and land use[J]. Ambio, 2018, **47**(2): 116-140.
- [29] 杨静, 刘敏, 陈玲, 等. 上海市湖泊沉积物重金属的空间分布[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(10): 3941-3948.
Yang J, Liu M, Chen L, *et al.* Spatial distribution of heavy metals in lake surface sediments in Shanghai [J]. China Environmental Science, 2018, **38**(10): 3941-3948.
- [30] Rydberg J, Gälman V, Renberg I, *et al.* Assessing the stability of mercury and methylmercury in a varved lake sediment deposit [J]. Environmental Science & Technology, 2008, **42**(12): 4391-4396.
- [31] 杜明普, 王红丽, 刘康福, 等. 生态渔业养殖模式下汤逊湖鱼产力估算及对内源污染的影响[J]. 环境工程技术学报, 2021, **11**(2): 278-282.
Du M P, Wang H L, Liu K F, *et al.* Estimation of fish productivity in Tangxun Lake under ecological fishery culture model and its impact on endogenous pollution[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, **11**(2): 278-282.
- [32] Li Y, Zhou S L, Zhu Q, *et al.* One-century sedimentary record of heavy metal pollution in western Taihu Lake, China [J]. Environmental Pollution, 2018, **240**: 709-716.
- [33] Dong B, Zhang R Z, Gan Y D, *et al.* Multiple methods for the identification of heavy metal sources in cropland soils from a resource-based region [J]. Science of the Total Environment, 2019, **651**: 3127-3138.

CONTENTS

A Comparative Study of Soil Environmental Standards for Agricultural Land Among Different Countries and Its Implication for China	LI Xu-zhi, JIANG Rong, WANG Guo-qing, <i>et al.</i> (577)
Evaluation Parameters and System for Reclaimed Water Quality Stability	ZHANG Xin-yi, WEI Dong-bin, DU Yu-guo (586)
Distribution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Atmospheric Deposition During Heating and Non-heating Period in Lanzhou	HUANG Wen, WANG Sheng-li (597)
PM _{2.5} Source Apportionment Based on a Variety of New Receptor Models	WANG Zhen-yu, LI Yong-bin, GUO Ling, <i>et al.</i> (608)
Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Pollution in PM _{2.5} During Summer in Central China	SU Ye-wang, LIU Wei-jie, MAO Yao, <i>et al.</i> (619)
Pollution Characteristics of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During the Lantern Festival of 2021 in Zibo City	CHEN Qiao, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i> (629)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Perfluorinated Compounds in PM _{2.5} in Zhejiang Province	LI Bing-jie, CHEN Jin-yuan, LIU Zheng-zheng, <i>et al.</i> (639)
Impact of Meteorological Conditions on PM _{2.5} in Jiangsu Province from 2001 to 2019	PAN Chen, KANG Zhi-ming (649)
Comparison and Analysis of PM _{2.5} Forecast in Key Areas Based on the Neural Network Model and Numerical Model	GAO Yu-xiao, WANG Wei, HUANG Yong-hai, <i>et al.</i> (663)
Temporal and Spatial Variations in Ozone and Its Causes over Hainan Province from 2015 to 2020	FU Chuan-bo, XU Wen-shuai, DAN Li, <i>et al.</i> (675)
Ozone Formation and Key VOCs of a Continuous Summertime O ₃ Pollution Event in Ji'nan	SUN Xiao-yan, ZHAO Min, SHEN Heng-qing, <i>et al.</i> (686)
Pollution Characteristic and Control Factor Analysis of Atmospheric Ozone During Summer Typical Periods in Linyi, Shandong	YANG Xue, AN Xin-yue, LIU Yu-qi, <i>et al.</i> (696)
Improved Performance of PMF Source Apportionment for Volatile Organic Compounds Based on Classification of VOCs' Aging Degree in Air Mass	ZHU Yu-fan, CHEN Qiang, LIU Xiao, <i>et al.</i> (707)
Spatial Distribution Characteristics of VOCs and Its Impact on Ozone Formation Potential in Rizhao City in Summer	YAO Wei-jie, WANG Da-wei, XIE Fu-ying, <i>et al.</i> (714)
Long-term Trends and Sources of Atmospheric Halocarbons at Mount Taishan, Northern China	ZHAO Feng, CHEN Tian-shu, DONG Can, <i>et al.</i> (723)
Emission Characteristics of VOCs and <i>n</i> -alkanes from Diesel Forklifts	ZHOU Wen-qin, LI Cheng, LIU Jun-wen, <i>et al.</i> (735)
Driving Mechanism of the Spatiotemporal Evolution of Vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020	TIAN Zhi-hui, REN Zu-guang, WEI Hai-tao (743)
Effects of Land Use on Riverine Dissolved Inorganic Carbon (DIC) and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in a Karst River Basin, Southwestern China	XU Sen, LI Si-liang, ZHONG Jun (752)
Effects of Biochar Addition on Soil Nitrogen Mineralization and Leaching Characteristics in Riparian Zone of Taihu Lake	XIONG Yu-ting, YUAN Xu-yin, ZHOU Hui-hua, <i>et al.</i> (762)
Impacts of Riparian Buffer Zone Type on Reduction in Runoff Pollution in the North Canal River Under Different Rainfall Events	ZHU Li-ying, ZHAO Kai, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> (770)
Pollution Characterization and Comprehensive Water Quality Assessment of Rain-source River: A Case Study of the Longgang River in Shenzhen	BI Ye-liang, WANG Hua-cai, XIA Bing, <i>et al.</i> (782)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Runoff Pollution in Langfang City	PAN Xin-rong, ZUO Jian-e, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (795)
Analysis on Diversity of Plankton Microbial Community in the Beijing-Tianjin-Hebei Section of the North Canal River	GUO Zhi-zhi, SU Zhen-hua, DI Yan-ming, <i>et al.</i> (803)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Bacterial Community Structure from Landscape Water in Hebei Province: Taking Shijiazhuang as Example	CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (813)
Source and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Watershed of Lake Qinghai	YU Xiao-qin, MENG Xian-qiang, WU Hua-wu, <i>et al.</i> (826)
Influences of Hydrological Scenarios on the Bioavailability, Fate, and Balance of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Poyang	GUO Yan-ni, YAO Xiao-long, CHEN Hui-min, <i>et al.</i> (837)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Sediments from Poyang Lake	LUO Yan-qing, WAN Zhi-wei, YAN Cai-xia, <i>et al.</i> (847)
Pollution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Tangxun Lake	LI Xing-yu, LI Peng, SU Ye-wang, SHI Ming-ming, <i>et al.</i> (859)
Identifying Relationship Between Nutrient Contents in Road-Deposited Sediment and Urban Basic Elements Based on Kernel Density Estimation	WANG Zi-qiao, LI Xu-yong (867)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of DBPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan Under the COVID-19 Pandemic	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, TU Xiang, <i>et al.</i> (878)
Synergistic Control of Nitrogenous Disinfection By-products and Opportunistic Pathogens in Drinking Water by Iron-Modified Quartz Sand Filtration	QI Peng, HU Chun, XING Xue-ci, <i>et al.</i> (887)
Degradation Characteristics and Mechanism of Ibuprofen by Ozone Catalyzed by Nitrogen-Doped Biochar	CHAI Cheng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i> (896)
Adsorption Properties and Host-guest Effects of Porous Cyclodextrin Polymers for Dye Molecules in Water	ZHAO Chuan-liang, WANG Zi-jie, YAN Yi, <i>et al.</i> (907)
Characterization of Sludge Morphology and Bacterial Community Evolution in the Rapid Activation of Freeze-stored PV/A Granular Sludge	HUANG Zi-heng, ZHANG Li, CUI Shu-hui, <i>et al.</i> (920)
Effect of Different Cationic Polyacrylamide Organic Dehydrating Agents on Sludge Dewatering Performance	FENG Qi-yun, GAO Bao-yu, YUE Qin-yan, <i>et al.</i> (928)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in a Small Watershed of a Mining Area in Yunnan	LIU Yang, HE Zhao-hui, NIU Xue-kui, <i>et al.</i> (936)
Spatial Characteristics and Potential Ecological Risk Factors of Heavy Metals in Cultivated Land in the Transition Zone of a Mountain Plain	ZHANG Ding, HUANG Rong, GAO Xue-song (946)
Geo-accumulation Index Method to Optimize the Evaluation Method of Polymetallic Environment Quality: Taking Developed Agricultural Areas as an Example	JU Tie-nan, LEI Mei (957)
Safety Production Threshold and Land Quality Classification of Vegetable Pb in High Geological Background Area of Southwest China	MU De-miao, SUN Yue-bing (965)
Pollution Properties and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around a Typical Manganese Mining Area	HUANG Zhong-ting, YI Sheng-wei, CHEN Bei-bei, <i>et al.</i> (975)
Characteristics of Plant Diversity and Heavy Metal Enrichment and Migration Under Different Ecological Restoration Modes in Abandoned Mining Areas	ZHOU Peng-fei, ZHANG Shi-wen, LUO Ming, <i>et al.</i> (985)
Soil Properties, Heavy Metal Accumulation, and Ecological Risk in Vegetable Greenhouses of Different Planting Years	REN Qiang, SUN Rui-ling, ZHENG Kai-xuan, <i>et al.</i> (995)
Effects of Greenhouse and Open-field Cultivation on Heavy Metal Uptake During Carrot Growth	CAO Chun, REN Dan, LÜ Zhen-ying, <i>et al.</i> (1004)
Effects of Different Amendments on Cadmium Accumulation in Rice Safety in Cadmium-Contaminated Farmland Under Two Flooding Treatments	WANG Gang, YU Hai-ying, LI Ting-xuan, <i>et al.</i> (1015)
Effect of Composite Leaching on Cadmium Removal Efficiency in Plow Layer Soil of Agricultural Land and Its Functional Regulation	CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (1023)
Polyamine-producing Bacteria Regulated the Community Structure of Rhizosphere Bacteria and Reduced the Absorption of Cd in Wheat	LI Xiao-zhe, QIN Shan-mei, CHEN Zhao-jin, <i>et al.</i> (1031)
Responses of Soil <i>PhoC</i> and <i>PhoD</i> Gene Microbial Communities to the Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (1040)
Changes in Soil Microbial Carbon-Degrading Enzymes and Their Relationships with Carbon Pool Components During the Restoration Process of <i>Robinia pseudoacacia</i>	LI Wen-jie, ZHANG Zhen-jiao, ZHAO Ya-ping, <i>et al.</i> (1050)
Soil Enzyme Stoichiometric Characteristics of <i>Pinus massoniana</i> Plantations at Different Stand Ages in Mid-subtropical Areas	JIAO Peng-yu, GUO Wen, CHEN Ze-long, <i>et al.</i> (1059)
Characteristics of Microbial Utilization for Crop Residue-Derived C in Paddy and Upland Soils	DENG Shao-hong, ZHENG Xiao-dong, MAO Wan-qiong, <i>et al.</i> (1069)
Influence of Artificial Root Exudates and Actual Root Exudates on the Microbial Community in Pyrene-contaminated Soil	HAN Bo-yuan, ZHANG Wen, HU Fang-yu, <i>et al.</i> (1077)
Pollution Characteristics and Driving Factors of Antibiotic Resistance Genes in Dexing Copper Mine	HAN Liu, LOU Qian, QIAO Min, <i>et al.</i> (1089)
Spatial Prediction Method of Farmland Soil Organic Matter in Weiwei Dryland of Shaanxi Province	WEI Fang, LIU Jing, XIA Li-heng, <i>et al.</i> (1097)
Emission Characteristics, Transformation Mechanism, and Reduction Potential of Ammonia Emissions from a Crop Rotation System in Yangtze River Delta	XU Chang, MIAO Wen-liang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i> (1108)