

东洞庭湖沉积物重金属污染及生态-健康风险

蔡长卿, 金昌盛, 陈佳, 文佳骏, 聂小东, 王磊, 李忠武

引用本文:

蔡长卿, 金昌盛, 陈佳, 文佳骏, 聂小东, 王磊, 李忠武. 东洞庭湖沉积物重金属污染及生态-健康风险[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(6): 1337-1347.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1488>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

汉江上游水体表层沉积物重金属污染特征评价

宋凤敏, 岳晓丽, 刘智峰, 葛红光, 李琛, 赵佐平

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1576-1584 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0143>

夜郎湖表层沉积物重金属分布特征及生态风险评估

徐梦, 刘鸿雁, 罗凯, 崔俊丽, 刘艳萍, 李家飞

农业环境科学学报. 2017, 36(6): 1202-1209 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1179>

广西某采选废矿区重金属生态风险与源汇关系

毛志强, 田康, 刘本乐, 张晓辉, 卞子金, 黄标, 袁旭音, 吴龙华, 罗栋源

农业环境科学学报. 2021, 40(5): 987-998 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1338>

安庆沿江湖泊及长江安庆段沉积物重金属污染特征及生态风险评价

李法松, 韩铖, 林大松, 周葆华, 徐志兵, 余光明, 钮志远, 赵亿, 王淑媛

农业环境科学学报. 2017, 36(3): 574-582 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1325>

安徽迪沟采煤沉陷区土壤和沉积物重金属特征及潜在生态风险评价

陈城, 鲁潇, 于坤, 张明珠, 孙庆业

农业环境科学学报. 2021, 40(3): 570-579 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1076>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

蔡长卿, 金昌盛, 陈佳, 等. 东洞庭湖沉积物重金属污染及生态-健康风险[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(6): 1337–1347.

CAI C Q, JIN C S, CHEN J, et al. Sediment heavy metal pollution and its ecological and health risk assessment in the East Dongting Lake, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(6): 1337–1347.



开放科学 OSID

东洞庭湖沉积物重金属污染及生态-健康风险

蔡长卿¹, 金昌盛¹, 陈佳¹, 文佳骏¹, 聂小东², 王磊², 李忠武^{1,2*}

(1. 湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082; 2. 湖南师范大学地理科学学院, 长沙 410081)

摘要: 沉积物是水体中重金属污染的源和汇, 为探究东洞庭湖最新的沉积物重金属污染状况、生态风险及健康风险, 采集东洞庭湖湿地保护核心区、城陵矶港口区、航道区、城镇居民区、旅游区、农场和芦苇场7个功能区63个表层沉积物样品, 测定As等10种重金属的含量, 并采用地累积指数法、富集因子法和Hakanson潜在生态风险指数法以及美国EPA健康风险评估法对其污染程度和人体暴露风险进行评估。结果表明, As、Cd、Cr、Co、Cu、Mn、Ni、Pb、Sr和Zn的平均含量分别为14.53、6.49、70.39、19.66、27.91、933.26、42.36、41.48、93.83 mg·kg⁻¹和164.91 mg·kg⁻¹。地累积指数评价结果显示, Cd处于偏重度污染程度等级($I_{geo}=3.39$), 其余均为轻度污染($0 < I_{geo} < 1$); 富集因子法评价结果表明, Cd为中度富集($EF=2.78$), 其余重金属均为轻度富集($EF < 1$); 潜在生态风险指数法评价结果显示, Cd的风险程度为极高风险($E_i=662.13$), 其余重金属均为低风险($E_i < 10$); 从不同功能区来看, 重金属潜在生态风险由高到低排序为: 湿地保护核心区>芦苇场>航道区>旅游区>农场>城镇居民区>城陵矶港口区, 表明重金属更易于在植物根际土壤中沉积与滞留。健康风险评估结果表明, 表层沉积物对成人的非致癌指数均在可接受范围内($HI < 1$), 而As、Cd、Pb对儿童造成的非致癌风险在沿东洞庭湖东岸的航道区超过了可接受水平。综合来看, 与已报道的国内其他浅水湖泊相比, 东洞庭湖表层沉积物的重金属污染处于较高污染水平。

关键词: 东洞庭湖; 沉积物; 重金属污染; 生态风险; 健康风险

中图分类号: X825 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2022)06-1337-11 doi:10.11654/jaes.2021-1488

Sediment heavy metal pollution and its ecological and health risk assessment in the East Dongting Lake, China

CAI Changqing¹, JIN Changsheng¹, CHEN Jia¹, WEN Jiajun¹, NIE Xiaodong², WANG Lei², LI Zhongwu^{1,2*}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. College of Geography Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

Abstract: The concentrations of 10 heavy metals were determined in 65 surface sediment samples collected at East Dongting Lake, including seven functional wetland protection areas, Chenglingji port, a waterway area, urban residential area, tourist area, farmland, and a reed field. The pollution status and human exposure risk of heavy metals in different functional areas were evaluated using the geo-accumulation index, enrichment factor, potential ecological risk index, and health risk assessment method in accordance with the characteristics of human exposure parameters. The results showed that the average concentrations of As, Cd, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, Pb, Sr, and Zn were 14.53, 6.49, 70.39, 19.66, 27.91, 933.26, 42.36, 41.48, 93.83 mg·kg⁻¹, and 164.91 mg·kg⁻¹, respectively. The overall pollution status of heavy metals was relatively severe compared to that in other shallow lakes in China. The evaluation results of the geo-accumulation index showed that the pollution level of Cd was severe ($I_{geo}=3.39$); however, all other metal levels were relatively mild. The evaluation of the enrichment factor index demonstrated that, except for the remarkable enrichment of Cd ($EF=2.78$), the other nine metals

收稿日期: 2021-12-26 录用日期: 2022-03-18

作者简介: 蔡长卿(1997—), 女, 湖南岳阳人, 硕士研究生, 主要从事重金属污染控制与评价研究。E-mail: caichangqing@hnu.edu.cn

*通信作者: 李忠武 E-mail: lizw@hnu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(U19A2047, 51879103)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(U19A2047, 51879103)

were all at mild enrichment levels ($EF < 1$). The potential ecological risk index assessment suggested that the potential ecological risk of Cd was extremely high ($E^i_r = 662.13$), whereas the other nine metals were at a mild level ($E^i_r < 10$). Ecological risk assessment results from different functional areas ranked in the descending order were as follows: wetland protection area > reed field > waterway area > tourist area > farmland > urban residential area > Chenglingji port area. Human health risk assessment results showed that the non-carcinogenic indices for adults were all within the acceptable range ($HI < 1$). However, the non-carcinogenic risks of As, Cd, and Pb to children exceeded the acceptable level in the waterway area along East Dongting Lake. In summary, the heavy metal pollution in the surface sediments of East Dongting Lake is severe.

Keywords: East Dongting Lake; sediment; heavy metal pollution; ecological risk; health risk

重金属具有显著毒性、持久性和不可降解性,其在食物链中会产生生物富集效应,因此严重威胁着水生生态环境^[1]。沉积物含有大量的各种各样的无机、有机及无机-有机胶体,如天然有机质、微生物、铁锰氧化物以及矿物质等,可通过吸附、络合、沉淀等作用结合重金属,是湖泊水体中重金属的蓄积地^[2-4]。但随着环境条件(水体pH值、有机质含量、水体扰动等)的改变,重金属极易释放、扩散进入湖泊水体中,引起二次污染^[5-6]。因此,沉积物重金属含量常被用作判断湖泊环境质量的重要指标,一直以来都是科学研究的重点^[7-11]。

洞庭湖是我国第二大淡水湖,水域面积2 579.2 km²^[9],以其独特优越的自然条件维系和支撑着自身及其流域内的生态平衡,其生态功能受损将影响洞庭湖流域可持续发展。从1980年开始,随着矿产资源的大量开发和流域社会经济的迅速发展,工业污染、农业面源污染和城市生活污染加剧,洞庭湖沉积物重金属含量呈递增趋势^[12]。经过多年治理,洞庭湖流域生态环境有所好转,但沉积物中重金属污染仍然是威胁洞庭湖生态环境的主要问题之一。部分研究主要关注湘、资、沅、澧“四水”入湖口^[9,13-14]、大通湖^[15-16]、东洞庭湖^[17-18]、西洞庭湖^[19-20]、南洞庭湖^[21]等局部湖区,但是一方面普遍存在采样点稀疏的情况,可能会影响结果准确性;另一方面重金属的分布特点具有空间异质性,鲜有通过生态功能区划分进行深入探讨的研究。综合诸多研究发现,东洞庭湖、湘江入湖口、鹿角至洞庭湖出口段等湖区重金属污染较为严重^[9,13-15,22],且As、Cd、Cr、Co、Cu、Mn、Ni、Pb、Zn是洞庭湖沉积物中最受关注的重金属元素,其中Cd是潜在生态风险的主要贡献者。东洞庭湖作为洞庭湖最大的湖区,重金属在沉积物中的积累受沉积物理化性质、沉积物组分、地质背景和作物种类等多种因素影响,其在不同生态功能区的分布、富集程度等具有显著的异质性,但有关东洞庭湖不同生态功能区沉积物重金属空间

分异特征不明确,造成该污染难评测、控制与治理等问题。与此同时,当前部分针对湖泊沉积物重金属的污染评价常采用单一方法,而多种方法结合分析能够更加全面地揭示重金属污染对生态环境和人体健康等的影响,使研究结果更具科学性。对于重金属生态效应方面,地累积指数评价法、潜在生态风险指数法和富集因子法这3种评价方法运用较为广泛^[23]。地累积指数法^[9-10,22,24]能够较好地考虑地质背景所带来的影响;富集因子法^[25-27]可以有效校正沉积物粒度和矿物组成变化对重金属含量的影响;而潜在生态风险指数法^[10,16,28-29]可以综合评价多种重金属元素对生态环境的潜在影响并得到每种重金属的贡献率。由于每一种评价指数都存在一定的局限性^[18],至今鲜有研究联合这三类评价方法进行东洞庭湖沉积物重金属污染程度及生态风险的评估。对于重金属健康风险的评估,目前主要采用美国环保署(USEPA)环境健康风险评估模型^[30-31]。

为掌握东洞庭湖最新的沉积物重金属污染状况、生态风险及健康风险,本研究以东洞庭湖沉积物为研究对象,基于不同生态功能区表层沉积物重金属(As、Cd、Cr、Co、Cu、Mn、Ni、Pb、Sr、Zn)含量,分析重金属含量分布特征,运用地累积指数法和富集因子法评价重金属污染程度,运用潜在风险指数法评价东洞庭湖沉积物中重金属的生态风险,运用USEPA环境健康风险评估模型评估人体健康风险,以期为洞庭湖沉积物重金属污染防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样点分布及样品采集

沉积物样品采集的时间是2020年12月,此时研究区水域处于枯水期,降水量小,水环境稳定。利用GPS定位采样点位置,依据研究区周边湖泊地势和污染源分布特征布设63个采样点(图1),其中,航道区采样点水深均在2 m以上,使用彼得逊重力采泥器采

集表层(0~20 cm)沉积物样品,其余采样点为沿岸出露洲滩沉积物,利用铁铲采集表层(0~10 cm)沉积物样品。每个采样点在5 m×5 m范围内采集3个样品混合后作为一个样品。根据生态功能,将采样点分为湿地保护核心区、城陵矶港口区、航道区、城镇居民区、旅游区、农场、芦苇场。采集的沉积物分别装入聚乙烯袋中,标注编号、密封避光保存。运送至实验室后,将取回后的样品放在阴凉通风口处自然风干,剔除石砾、植物根系等明显异物。用玛瑙磨碎,过100目(孔径0.149 mm)尼龙筛,混匀后保存备用。

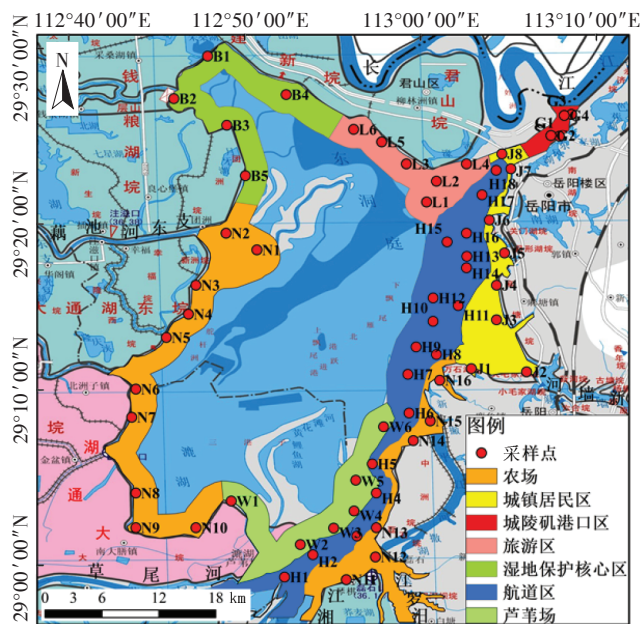


图1 东洞庭湖沉积物采样点分布示意图

Figure 1 Distribution of sediment sampling points in East Dongting Lake

1.2 样品处理与分析

沉积物样品经HF-HNO₃-HClO₄-HCl酸溶解法消解:称取0.2 g过100目筛的沉积物样品放入50 mL的聚四氟乙烯消解管中,将装有样品的消解管置于石墨消解仪,在30℃条件下,每个消解管依次加入硝酸5 mL、盐酸3 mL、氢氟酸4 mL、高氯酸2 mL,振荡摇匀1 min,然后加热消煮至内容物呈白色黏稠状。降至室温后将消解物定容到50 mL容量瓶中,并摇匀静置,过滤后转移至离心管中待测。使用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, iCAP 7000 Series)测定沉积物中As、Cd、Cr、Co、Cu、Mn、Ni、Pb、Sr、Zn共10种重金属含量^[2]。为保证分析的准确性,每个沉积物样品设置2个平行样,样品分析相对误差小于5%,取平行

样品分析的均值为结果。实验数据利用Excel 2010和SPSS Statistics 23软件进行分析处理。使用Arc-GIS 10.4软件绘制东洞庭湖沉积物采样点分布图,采用反距离加权法对重金属含量数据进行空间插值,未检出重金属样点的插值结果在图中以零值显示。

1.3 污染程度与生态风险评价方法

1.3.1 地累积指数法

地累积指数法(I_{geo})不仅考虑了自然地质过程造成的背景值影响,也充分关注了人为活动对重金属污染的影响,是区分人为活动影响的重要参数^[22,24],因此已成为广泛用于研究水环境沉积物中重金属污染程度的定量方法。其计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{1.5BE_n} \quad (1)$$

式中: C_n 为样品中重金属 n 的实测含量,mg·kg⁻¹; BE_n 为重金属 n 的地球化学背景值,mg·kg⁻¹。为更真实地反映东洞庭湖表层沉积物中重金属的污染现状,采用洞庭湖水系沉积物元素背景值作为参考值^[32]。根据 I_{geo} 值确定重金属污染等级: $I_{geo} \leq 0$ (清洁)、 $0 < I_{geo} \leq 1$ (轻度污染)、 $1 < I_{geo} \leq 2$ (偏中度污染)、 $2 < I_{geo} \leq 3$ (中度污染)、 $3 < I_{geo} \leq 4$ (偏重污染)、 $4 < I_{geo} \leq 5$ (重污染)。

1.3.2 富集因子法

富集因子法可以有效校正沉积物粒度和矿物组成变化对重金属含量的影响,从而更好地定量描述重金属的富集程度^[25]。同时,归一化的富集因子(EF)可用于量化人为干扰对重金属污染程度的影响。Al常被作为一种可接受的标准化元素,用于计算富集因子^[26]。沉积物中Al元素以流域自然来源为主,变异系数低,受人为来源影响相对较小^[25-26]。其计算公式为:

$$EF = \frac{(C_i/C_r)_{\text{样品}}}{(C_i/C_r)_{\text{背景}}} \quad (2)$$

式中: $(C_i/C_r)_{\text{样品}}$ 为目标元素与参考元素(Al)的实测浓度比值; $(C_i/C_r)_{\text{背景}}$ 为目标元素与参考元素(Al)的背景值之比。研究认为,自然衍生元素的 EF 值在0.5~1.5之间,当 $EF > 1.5$,指示很大一部分微量元素来自非地壳物质或者非自然风化过程,例如点源污染、非点源污染以及生物区系等^[25]。根据 EF 值确定重金属富集程度^[33]: $EF < 2$ (轻度富集)、 $2 < EF < 5$ (中等富集)、 $5 < EF < 20$ (较强富集)、 $20 < EF < 40$ (高度富集)、 $EF > 40$ (极高度富集)。

1.3.3 潜在生态风险指数法

HAKANSON潜在生态风险指数法综合考虑了重金属的生态效应、环境效益和毒理效应^[34]。其计算流

程及生态风险等级划分参照文献[6,34-35]。

1.4 重金属元素健康风险评估

人类暴露于重金属的主要途径有3种:摄入、吸入和皮肤接触富含重金属的颗粒^[36]。根据USEPA推荐的健康风险评估模型^[37],基于沉积物中重金属(As、Cd、Cr、Cu、Pb、Zn)的3种暴露途径对儿童和成人进行非致癌风险评估。其计算公式为:

$$HQ_{\text{ing}} = \frac{C \times \text{IngR} \times EF \times ED}{BW \times AT \times RfD_{\text{ing}}} \times CF \quad (3)$$

$$HQ_{\text{der}} = \frac{C \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT \times RfD_{\text{der}}} \times CF \times GIABS \quad (4)$$

$$HQ_{\text{inh}} = \frac{C \times \text{InhR} \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT \times RfD_{\text{inh}}} \quad (5)$$

$$HI = \sum HQ = HQ_{\text{ing}} + HQ_{\text{der}} + HQ_{\text{inh}} \quad (6)$$

式中: HQ_{ing} 、 HQ_{der} 和 HQ_{inh} 分别是摄入、皮肤接触和吸入的非致癌风险商数; HI 为非致癌性风险系数; C 为沉积物的潜在有毒元素的含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; IngR 为土壤摄入频率, $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$; EF 为土壤暴露频率, $\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$; ED 为暴露年限, a ; BW 为体质量, kg ; AT 为重金属平均暴露时间, d ; RfD 为基于USEPA(2013)的非致癌风险计算参考剂量^[38]; CF 为转换系数; ABS 为皮肤吸收系数; SA 为皮肤暴露表面积, cm^2 ; AF 为皮肤黏着度, $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$; InhR 为呼吸频率, $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$; PEF 为灰尘排放因子, $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$; $GIABS$ 是指污染物在胃肠道中被吸收的比例(根据美国环保署2016年数据,设定为1)^[39]。各重金属健康风险评估参数取值参照文献[37-40]。

2 结果与讨论

2.1 东洞庭湖沉积物重金属空间分布特征

东洞庭湖表层沉积物重金属As、Cd、Cr、Co、Cu、Mn、Ni、Pb、Sr、Zn的平均含量分别为2.77、6.45、70.94、

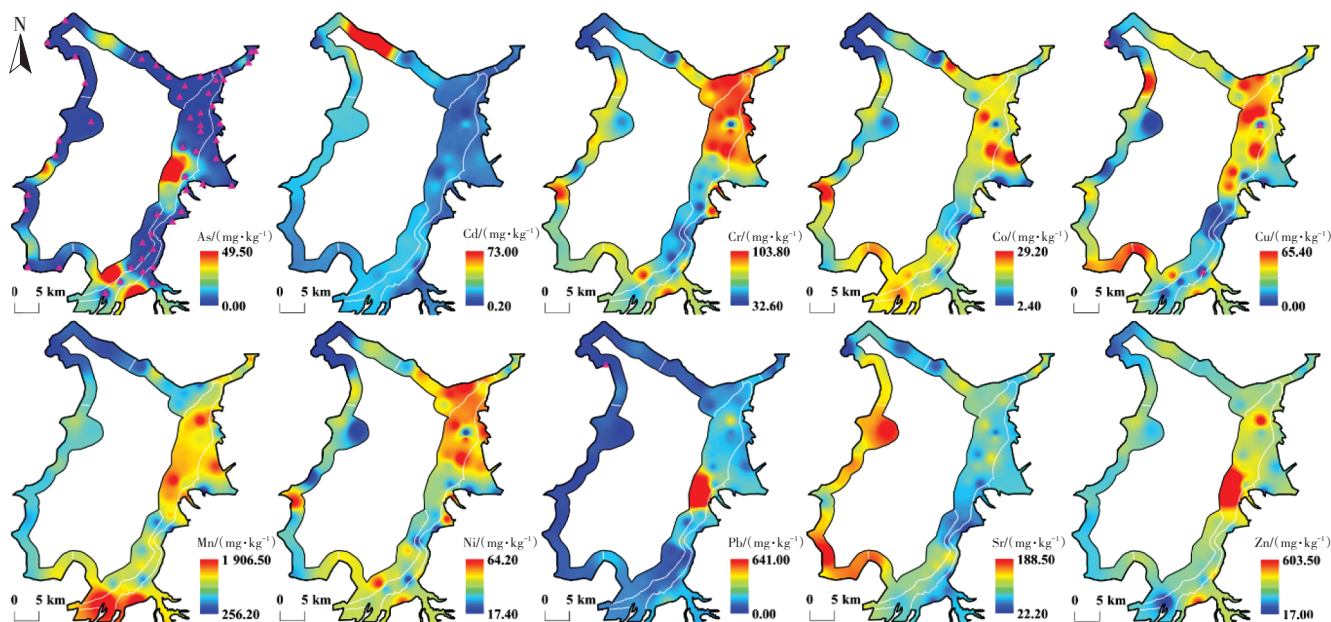
19.78、28.48、938.80、42.73、42.69、91.36、166.09 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表1),除As以外,其他重金属的平均含量分别超出洞庭湖沉积物背景值19.55、1.61、1.92、1.40、2.09、2.02、1.83、1.14、1.99倍。其中Cd、Cr、Co、Mn、Ni、Zn分别有98%、97%、97%、94%、98%、94%的样点超出背景值,说明东洞庭湖沉积物中重金属Cd、Cr、Co、Mn、Ni、Zn普遍存在污染问题。其中Cd的超出倍数与超出样点数最高,这与孟婉等^[41]的研究相印证。

从东洞庭湖区域空间分布看(图2),Mn、Pb和Zn具有相似的分布特征,最高值出现在航道区,最低值在湿地保护核心区。自然条件下Pb和Zn多为伴生关系,说明二者可能具有相同的来源^[7]。其入湖河流湘江的上游是铅锌矿的主要产地,加上航道流速的减缓^[42],沉积物在航道中段大量淤积,累积更多Pb、Zn。而航道区的沉积物处于淹水环境,微生物会优先利用 MnO_2 进行无氧呼吸,将 MnO_2 还原为 Mn^{2+} 而溶解在间隙水或者吸附于颗粒物上,因此Mn元素从航道入口扩散并沉积在航道的中段^[27]。As元素在城镇居民区和旅游区无检出,样点H9、W2、N5、N11超出背景值,这可能与湘江输入有关^[21]。Cr在不同区域的平均含量表现为城镇居民区>旅游区>城陵矶港口区>农场>航道区>芦苇场>湿地保护核心区,这可能与东洞庭湖在人类活动频繁区域为消灭血吸虫的寄主钉螺而投放大量铬渣等化学试剂相关^[43]。Cu和Ni的含量在旅游区最高,航道北段也较高,湿地保护核心区最低,Sr含量在东洞庭湖西部的农场区域显著更高,表明在人类活动频繁的区域要注意Cu、Ni、Sr等元素的潜在污染。Cd的含量在不同区域上表现为湿地保护核心区>芦苇场>航道区>旅游区>农场>城陵矶港口区>城镇居民区。这反映出湿地保护虽然减少了多数重金属的输入,但是沉积物人为上翻的残留与固定作用使

表1 沉积物样品重金属元素的平均含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 1 Average contents of heavy metal elements in sediment samples($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

功能区 Functional area	样点数/个 Sample quantity	As	Cd	Cr	Co	Cu	Mn	Ni	Pb	Sr	Zn
湿地保护核心区	5	1.80	19.18	55.72	14.08	24.85	495.59	31.13	15.98	84.74	116.03
城陵矶港口区	4	1.56	4.35	74.91	20.26	28.83	1 016.53	42.80	32.99	94.09	148.01
航道区	18	4.11	5.60	67.84	20.82	28.19	1 174.61	42.38	81.63	83.16	211.81
城镇居民区	8	0.00	4.35	79.80	19.35	25.80	977.48	45.48	39.18	73.48	145.75
旅游区	6	0.00	5.37	78.80	20.57	35.13	651.58	49.13	22.11	91.03	139.23
农场	16	3.07	5.15	72.62	19.37	28.82	917.27	41.57	26.35	106.08	158.41
芦苇场	6	6.01	7.18	66.13	21.97	28.21	841.93	46.40	23.41	104.62	157.13
平均值		2.77	6.45	70.94	19.78	28.48	938.80	42.73	42.69	91.36	166.09
背景值		12.90	0.33	44.00	10.30	20.30	450.00	21.20	23.30	80.00	83.30



图中粉色三角形表示此样点该重金属未检出,白色线条为分区线

The pink triangle in the figure indicates that the heavy metal has not been detected at this sample point and the white line is the partition line

图2 东洞庭湖表层沉积物重金属含量的空间分布

Figure 2 Spatial distribution of heavy metal contents in surface sediments of East Dongting Lake

得Cd含量仍然很高^[44];同时湘江输入至航道以及沿岸的芦苇场、旅游区等地的Cd含量与以往的研究相比虽有所下降^[45],但仍显著高于背景值。

2.2 不同区域中沉积物重金属污染程度

2.2.1 地累积指数法评价

东洞庭湖沉积物中重金属As、Cd、Cr、Co、Cu、Mn、Ni、Pb、Sr、Zn的地累积指数平均值分别为-0.92、3.39、0.06、0.19、-0.32、0.37、0.37、-0.41、-0.51、0.25,总体污染程度依次为: Cd>Ni>Mn>Zn>Co>Cr>Cu>Pb>Sr>As(表2)。除As、Sr、Pb、Cu的污染程度为清洁($I_{geo}<0$)外,Cd、Cr、Co、Mn、Ni、Zn的污染程度各不相同,且以Cd污染的程度最为严重($I_{geo}=3.39$),为4级偏重度污染,Cr、Co、Mn、Ni、Zn均为1级轻度污染($0<I_{geo}<1$)。相较于其他湖泊^[46],研究区域沉积物Cu、Pb、Zn、Ni、Cr污染处于中等水平,Cd处于较高水平(表3)。

为分析东洞庭湖区沉积物重金属的复合污染情况,将10种重金属 I_{geo} 值的总和设为综合地累积指数 I_{tot} (表2),东洞庭湖沉积物中整体重金属的 I_{tot} 为2.18,处于3级重度污染。根据 I_{tot} 值,重金属的综合污染状况为:航道区>城镇居民区>旅游区>芦苇场>湿地保护核心区>农场>城陵矶港口区。其中,航道区接近于受污染最严重的支流——湘江入湖后的东洞庭湖沿岸地区,因此其重金属复合污染情况最严重。而对

于偏重度污染的Cd,污染程度最严重的是湿地保护核心区,其次为芦苇场地区,污染程度最轻的为城陵矶港口区。这说明港口区高流动性的水和泥沙有利于沉积物中重金属的迁移和稀释^[47-48]。而湿地保护核心区 and 芦苇场地区具有高密度湿地植物,其根际对外来Cd的固定与滞留作用使得该区域沉积物的Cd地累积指数含量较其他区域更高^[49-50]。

2.2.2 富集因子法评价

东洞庭湖沉积物中各重金属富集程度为: Cd>Mn>Ni>Zn>Co>Cr>Pb>Cu>Sr>As(表4),除重金属Cd富集程度为中等富集($EF=2.78$)外,其余重金属均为轻度富集($EF<1$)。根据不同区域10种重金属的 EF 总和,沉积物中重金属的复合富集程度为:湿地保护核心区($EF=14.75$)>旅游区($EF=4.83$)>芦苇场($EF=4.54$)>农场($EF=3.58$)>城镇居民区($EF=3.46$)>航道区($EF=3.03$)>城陵矶港口区($EF=2.90$)。对于重金属Cd,富集程度最高的是湿地保护核心区($EF=12.65$),其次为芦苇场($EF=2.61$)和旅游区($EF=2.45$),污染程度最轻的为航道区($EF=1.52$)和城陵矶港口区($EF=1.35$)。重金属整体评价结果与地累积指数法有所差异,究其原因因为湿地保护核心区、旅游区和芦苇场地区普遍生长有高密度的湿地植物,对外来Cd具有固定与滞留作用,使得该区域沉积物的Cd富集程度较

表2 东洞庭湖各区域沉积物重金属地累积指数

Table 2 Heavy metal geo-accumulation index in sediments of East Dongting Lake

功能区 Functional area		As	Cd	Cr	Co	Cu	Mn	Ni	Pb	Sr	Zn	I_{tot}
湿地保护核心区	最大值	-1.10	7.20	0.31	0.59	0.90	0.93	0.59	-0.01	0.16	0.58	
	最小值	-1.10	3.41	-0.36	-0.56	-1.28	-0.71	-0.50	-2.13	-1.22	-0.65	
	平均值	-1.10	4.42	-0.11	0.14	-0.10	-0.08	0.08	-0.82	-0.29	0.00	2.14
城陵矶港口区	最大值	-1.63	3.26	0.48	0.52	0.15	0.54	0.69	0.52	0.19	0.59	
	最小值	-1.63	1.50	-1.02	-2.69	-0.86	-1.40	-0.87	-2.69	-2.43	-1.37	
	平均值	-1.63	2.63	-0.10	-0.40	-0.27	-0.01	0.13	-0.71	-1.05	-0.15	-1.56
航道区	最大值	1.36	4.18	0.62	0.92	1.11	1.50	0.96	4.20	0.15	2.27	
	最小值	-1.69	-1.31	-0.70	-0.19	-2.46	-0.28	-0.44	-3.13	-1.28	-2.88	
	平均值	-0.65	3.21	-0.02	0.40	-0.34	0.76	0.36	0.35	-0.59	0.45	3.92
城镇居民区	最大值	0.00	3.65	0.53	0.87	0.30	1.06	0.85	0.64	-0.54	0.55	
	最小值	0.00	2.50	-0.20	-0.44	-2.44	-1.10	-0.18	-0.44	-0.90	-1.18	
	平均值	0.00	3.09	0.25	0.28	-0.42	0.40	0.48	0.12	-0.71	0.13	3.60
旅游区	最大值	0.00	4.10	0.65	0.81	0.82	0.63	1.01	0.07	0.01	0.40	
	最小值	0.00	2.71	-0.48	-0.25	-0.83	-0.54	0.09	-1.67	-1.25	-0.04	
	平均值	0.00	3.37	0.21	0.37	0.11	-0.10	0.60	-0.76	-0.45	0.15	3.51
农场	最大值	0.56	4.10	0.51	0.87	0.59	1.45	0.85	1.08	0.65	1.26	
	最小值	-5.27	0.28	-0.43	-0.95	-4.34	-0.60	-0.32	-4.54	-1.99	-0.43	
	平均值	-1.69	3.15	0.11	0.28	-0.40	0.36	0.34	-1.06	-0.36	0.26	0.99
芦苇场	最大值	0.80	4.10	0.49	0.67	0.80	0.74	0.85	0.42	0.38	0.54	
	最小值	-3.10	3.34	-0.47	0.14	-3.60	-0.34	0.29	-1.60	-1.06	0.15	
	平均值	-1.15	3.83	-0.03	0.50	-0.59	0.28	0.53	-0.77	-0.26	0.33	2.67
全湖平均值		-0.92	3.39	0.06	0.19	-0.32	0.37	0.37	-0.41	-0.51	0.25	2.18

表3 我国主要湖泊沉积物中重金属地累积指数^[46]Table 3 Heavy metal I_{geo} in sediments of major lakes in China^[46]

湖泊 Lake	Cu	Pb	Zn	Cd	Ni	Cr
博斯腾湖	-1.8	-2.8	—	—	1.6	—
青海湖	-0.29	-0.34	-0.13	—	-1.93	-0.39
洪泽湖	-0.2	-0.6	0.3	0.4	—	-0.4
滇池	1.5	1.3	0.9	3.3	—	0.9
巢湖	-0.1	-0.6	-0.3	-0.1	-0.5	-0.1
洞庭湖	0.2	0.4	0.8	3.7	-0.4	-0.3
鄱阳湖	0.9	0.3	1.0	3.0	—	-1.3
太湖	-0.8	-0.8	-0.8	-0.7	-0.9	-0.3
本研究	-0.32	-0.41	0.25	3.39	0.37	0.06

注：“—”表示该湖泊无此数据。

Note: “—” indicates that there is no data in this lake.

其他区域更高。而航道、港口区域高流动的水和泥沙有利于降低沉积物中重金属特别是Cd的富集。湿地保护核心区中, B1、B3, 特别是B4($EF=50.98$)点的Cd的 EF 值特别高, 这可能是由于该位置处于湖泊内湾处, 较少受到水波的冲刷与流动, 更易于Cd在植物根际土壤中沉积与滞留^[43]。

2.3 不同区域中沉积物重金属生态风险

东洞庭湖沉积物中重金属的潜在生态风险指数(E_i^i)和综合潜在生态风险指数(RI)计算结果如表5所示, 各重金属潜在风险程度表现为 $Cd>Pb>Cu>Cr>As>Mn>Zn$, Cd的 E_i^i 值在18.18~6 636.36之间, 平均值为662.13, 属于极高风险, 其余重金属均为轻微风险($E_i^i<10$)。该结果与施宸皓等^[51]和李芬芳等^[52]得出的洞庭湖沉积物重金属生态风险较高, 主要风险污染物为Cd、Pb和Cu的结论一致。Cd为首要污染物, 处于强风险及以上污染水平的样品数占总样品数的95.24%, 其风险贡献率为95.81%。Pb的 E_i^i 值在0~137.55之间, 平均值为9.16, 风险贡献率为1.45%, 其中H7位点为强生态风险, 位于航道区。Cu的 E_i^i 值在0~16.19之间, 平均值为7.05, 风险贡献率为1.18%。

东洞庭湖沉积物中整体重金属的 RI 为688.49(表5), 处于高生态风险。各区域重金属综合生态风险评价结果为: 湿地保护核心区($RI=1\ 832.91$)>芦苇场($RI=676.46$)>航道区($RI=545.01$)>旅游区($RI=508.02$)>农场($RI=490.31$)>城镇居民区($RI=417.82$)>城陵矶港口区($RI=326.74$)。其中, 湿地保护核心区

表4 东洞庭湖各区域沉积物重金属富集因子

Table 4 Heavy metal enrichment factors in sediments of East Dongting Lake

功能区 Functional area		As	Cd	Cr	Co	Cu	Mn	Ni	Pb	Sr	Zn	总和 Total
湿地保护核心区	最大值	0.16	50.98	0.31	0.45	0.41	0.85	0.47	0.31	0.20	0.52	
	最小值	0.00	1.17	0.11	0.15	0.12	0.30	0.13	0.00	0.07	0.11	
	平均值	0.03	12.65	0.22	0.26	0.23	0.60	0.26	0.12	0.12	0.25	14.75
城陵矶港口区	最大值	0.05	1.63	0.27	0.21	0.17	0.47	0.30	0.21	0.12	0.22	
	最小值	0.00	0.94	0.14	0.09	0.00	0.36	0.18	0.08	0.04	0.13	
	平均值	0.01	1.35	0.20	0.17	0.10	0.41	0.24	0.14	0.07	0.20	2.90
航道区	最大值	0.24	4.14	0.21	0.24	0.26	0.68	0.25	2.07	0.10	0.55	
	最小值	0.00	0.04	0.06	0.12	0.00	0.23	0.10	0.02	0.03	0.01	
	平均值	0.02	1.52	0.13	0.17	0.11	0.38	0.17	0.27	0.05	0.21	3.03
城镇居民区	最大值	0.00	3.84	0.41	0.35	0.27	1.40	0.43	0.40	0.19	0.28	
	最小值	0.00	0.77	0.13	0.14	0.06	0.30	0.16	0.07	0.04	0.08	
	平均值	0.00	1.65	0.21	0.21	0.13	0.57	0.24	0.20	0.07	0.19	3.46
旅游区	最大值	0.00	3.88	0.44	0.44	0.46	0.92	0.56	0.25	0.14	0.34	
	最小值	0.00	1.73	0.17	0.24	0.13	0.46	0.22	0.07	0.07	0.17	
	平均值	0.00	2.45	0.28	0.30	0.28	0.66	0.36	0.15	0.10	0.26	4.83
农场	最大值	0.14	3.38	0.27	0.35	0.27	0.77	0.34	0.22	0.18	0.30	
	最小值	0.00	0.19	0.11	0.12	0.01	0.22	0.13	0.01	0.02	0.15	
	平均值	0.14	1.83	0.18	0.21	0.15	0.47	0.21	0.11	0.09	0.20	3.58
芦苇场	最大值	0.34	4.04	0.27	0.30	0.31	0.94	0.35	0.20	0.12	0.35	
	最小值	0.00	1.50	0.09	0.17	0.02	0.38	0.16	0.04	0.07	0.14	
	平均值	0.06	2.61	0.18	0.25	0.16	0.59	0.26	0.12	0.09	0.23	4.54
全湖	平均值	0.05	2.78	0.18	0.21	0.15	0.49	0.23	0.17	0.08	0.21	5.30

和芦苇场为极高风险区域。Cd在湿地保护核心区($E_r^i=1\ 813.64$)、芦苇场($E_r^i=653.03$)和航道区($E_r^i=509.09$)为高风险,而生态风险程度最轻的为城镇居民区和城陵矶港口区。这可能是由于港口区的高流动的水和泥沙有利于沉积物中重金属特别是Cd的稀释和缓冲。而湿地保护核心区和芦苇场地区普遍生长有高密度的湿地植物,对外来Cd具有固定与滞留作用,从而使得该区域沉积物的Cd生态风险程度较其他区域更高。

2.4 沉积物重金属人体健康风险

东洞庭湖沉积物中经3种暴露途径的重金属的成人和儿童非致癌指数见表6和表7。除航道区H7点的Pb($HI=1.07$)以外,所有采样点的成人的HI均在可接受范围内($HI<1$)。而As、Cd、Pb在个别采样点处对于儿童具有非致癌风险。其中,As的非致癌风险点为H9($HI=2.54$)、N11($HI=1.47$)和W2($HI=1.74$);Cd的非致癌风险点为B4($HI=1.19$);Pb的非致癌风险点为H16($HI=1.12$)、H9($HI=1.71$)和H7($HI=6.71$);As的非致癌风险点分布较为分散,主要在湘江入湖口以及航

道中心;Cd的非致癌风险点与Cd污染程度极重的点重合;Pb的非致癌风险点分布较为集中,均在湘江主航道上。As、Pb两种具有非致癌风险重金属主要的风险点均位于沿东洞庭湖东岸的航道区。

3 结论

(1)研究区表层沉积物As、Cd、Cr、Co、Cu、Mn、Ni、Pb、Sr和Zn含量平均值分别为14.53、6.49、70.39、19.66、27.91、933.26、42.36、41.48、93.83 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和164.91 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均超过洞庭湖水系沉积物背景值。在人类活动频繁的航道区、城镇居民区、旅游区和农场,重金属含量总体处于较高污染水平。

(2)东洞庭湖沉积物中的重金属Cd污染严重,其地累积指数、富集因子和潜在生态风险指数分别达到3.39、2.78和662.13,为主要污染因子,具有较强的生态风险。其余重金属均处于轻度污染、轻度富集程度和低生态风险。Cd在湿地核心保护区和芦苇场植物根际土壤中高度富集,该区域是湖区Cd污染防治首要整治对象。

表5 东洞庭湖各区域沉积物重金属潜在生态风险指数

Table 5 Heavy metal potential ecological risk indexes in sediments of East Dongting Lake

功能区 Functional area	项目 Item	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Zn	RI
湿地保护核心区	最大值	6.98	6 636.36	3.73	13.99	2.86	7.46	2.25	6 664.87
	最小值	0.00	477.27	2.34	3.09	0.92	0.00	0.95	497.40
	平均值	1.40	1 813.64	2.83	7.97	1.56	3.94	1.58	1 832.91
城陵矶港口区	最大值	4.84	431.82	4.17	8.32	2.18	10.73	2.26	449.63
	最小值	0.00	127.27	1.48	0.00	0.57	1.16	0.58	131.06
	平均值	1.21	307.95	3.04	4.86	1.69	6.44	1.54	326.74
航道区	最大值	38.37	818.18	4.62	16.19	4.24	137.55	7.24	830.12
	最小值	0.00	18.18	1.84	0.00	1.24	0.86	0.20	67.86
	平均值	3.19	509.09	3.08	6.98	2.61	17.52	2.54	545.01
城镇居民区	最大值	0.00	563.64	4.35	9.26	3.14	11.72	2.20	585.84
	最小值	0.00	254.55	2.61	1.39	0.70	5.54	0.66	281.12
	平均值	0.00	395.45	3.63	6.39	2.17	8.41	1.75	417.80
旅游区	最大值	0.00	772.73	4.72	13.22	2.32	7.90	1.99	785.57
	最小值	0.00	295.45	2.15	4.21	1.03	2.36	1.46	311.05
	平均值	0.00	487.88	3.58	8.69	1.45	4.74	1.67	508.02
农场	最大值	22.17	772.73	4.28	11.26	4.10	15.88	3.60	794.18
	最小值	0.00	54.55	2.23	0.37	0.99	0.32	1.11	82.38
	平均值	2.38	467.90	3.30	7.13	2.04	5.65	1.90	490.31
芦苇场	最大值	26.20	772.73	4.23	13.06	2.50	10.03	2.18	788.51
	最小值	0.00	454.55	2.16	0.62	1.19	2.47	1.66	487.16
	平均值	4.66	653.03	3.01	6.98	1.87	5.02	1.89	676.46
全湖	平均值	2.85	662.13	3.22	7.05	2.09	9.16	1.99	688.49

表6 东洞庭湖各区域沉积物重金属的成人非致癌性风险系数

Table 6 Heavy metal cumulative hazard indexes for non-carcinogenic risk of adults in sediments of East Dongting Lake

功能区 Functional area	项目 Item	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
湿地保护核心区	最大值	0.062 1	0.164 9	0.053 1	0.002 3	0.058 1	0.001 0
	最小值	0.000 0	0.011 9	0.033 3	0.000 5	0.000 0	0.000 4
	平均值	0.012 4	0.045 1	0.040 3	0.001 3	0.030 7	0.000 7
城陵矶港口区	最大值	0.043 1	0.010 7	0.059 4	0.001 4	0.083 6	0.001 0
	最小值	0.000 0	0.003 2	0.021 1	0.000 0	0.009 0	0.000 3
	平均值	0.010 8	0.007 7	0.043 2	0.000 8	0.050 2	0.000 7
航道区	最大值	0.341 5	0.020 3	0.065 8	0.002 6	1.071 3	0.003 3
	最小值	0.000 0	0.000 5	0.026 2	0.000 0	0.006 7	0.000 1
	平均值	0.028 4	0.012 7	0.043 9	0.001 1	0.136 4	0.001 2
城镇居民区	最大值	0.000 0	0.014 0	0.061 9	0.001 5	0.091 3	0.001 0
	最小值	0.000 0	0.006 3	0.037 2	0.000 2	0.043 1	0.000 3
	平均值	0.000 0	0.009 8	0.051 6	0.001 0	0.065 5	0.000 8
旅游区	最大值	0.000 0	0.019 2	0.067 2	0.002 2	0.061 5	0.000 9
	最小值	0.000 0	0.007 3	0.030 6	0.000 7	0.018 4	0.000 7
	平均值	0.000 0	0.012 1	0.051 0	0.001 4	0.036 9	0.000 8
农场	最大值	0.197 3	0.019 2	0.061 0	0.001 8	0.123 7	0.001 6
	最小值	0.000 0	0.001 4	0.031 7	0.000 1	0.002 5	0.000 5
	平均值	0.021 2	0.011 6	0.047 0	0.001 2	0.044 0	0.000 9
芦苇场	最大值	0.233 2	0.019 2	0.060 2	0.002 1	0.078 1	0.001 0
	最小值	0.000 0	0.011 3	0.030 7	0.000 1	0.019 2	0.000 8
	平均值	0.041 4	0.016 2	0.042 8	0.001 1	0.039 1	0.000 9

表7 东洞庭湖各区域沉积物重金属的儿童非致癌性风险系数

Table 7 Heavy metal cumulative hazard indexes for non-carcinogenic risk of children in sediments of East Dongting Lake

功能区 Functional area	项目 Item	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
湿地保护核心区	最大值	0.462 4	1.197 3	0.399 4	0.018 2	0.363 9	0.008 1
	最小值	0.000 0	0.086 1	0.250 9	0.004 0	0.000 0	0.003 4
	平均值	0.092 5	0.327 2	0.303 0	0.010 4	0.192 2	0.005 7
城陵矶港口区	最大值	0.321 1	0.077 9	0.447 2	0.010 8	0.523 6	0.008 1
	最小值	0.000 0	0.023 0	0.158 8	0.000 0	0.056 5	0.002 1
	平均值	0.080 3	0.055 6	0.325 4	0.006 3	0.314 4	0.005 6
航道区	最大值	2.543 0	0.147 6	0.494 9	0.021 1	6.712 5	0.026 1
	最小值	0.000 0	0.003 3	0.197 3	0.000 0	0.041 9	0.000 7
	平均值	0.211 2	0.091 8	0.330 4	0.009 1	0.854 9	0.009 2
城镇居民区	最大值	0.000 0	0.101 7	0.465 7	0.012 1	0.571 8	0.007 9
	最小值	0.000 0	0.045 9	0.279 6	0.001 8	0.270 2	0.002 4
	平均值	0.000 0	0.071 3	0.388 7	0.008 3	0.410 2	0.006 3
旅游区	最大值	0.000 0	0.139 4	0.505 6	0.017 2	0.385 4	0.007 1
	最小值	0.000 0	0.053 3	0.230 2	0.005 5	0.115 2	0.005 3
	平均值	0.000 0	0.088 0	0.383 8	0.011 3	0.231 5	0.006 0
农场	最大值	1.469 3	0.139 4	0.458 8	0.014 7	0.774 9	0.013 0
	最小值	0.000 0	0.009 8	0.238 7	0.000 5	0.015 7	0.004 0
	平均值	0.157 7	0.084 4	0.353 7	0.009 3	0.275 9	0.006 8
芦苇场	最大值	1.736 4	0.139 4	0.453 0	0.017 0	0.489 6	0.007 8
	最小值	0.000 0	0.082 0	0.231 4	0.000 8	0.120 4	0.006 0
	平均值	0.308 7	0.117 8	0.322 1	0.009 1	0.245 1	0.006 8

(3)沉积物中重金属的成人非致癌指数均在可接受范围内,As、Cd、Pb对于儿童的非致癌风险点出现在湘江主航道上和沿东洞庭湖东岸的航道区。因此,该区域内的重金属防控需要引起重视。

参考文献:

- [1] LIU B X, LUO J, JIANG S, et al. Geochemical fractionation, bioavailability, and potential risk of heavy metals in sediments of the largest influent river into Chaohu Lake, China[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 290:118018.
- [2] JIN C S, LI Z W, HUANG M, et al. Laboratory and simulation study on the Cd(II) adsorption by lake sediment: Mechanism and influencing factors[J]. *Environmental Research*, 2021, 197(1):111138.
- [3] HUANG M, LI Z W, HUANG B, et al. Investigating binding characteristics of cadmium and copper to DOM derived from compost and rice straw using EEM-PARAFAC combined with two-dimensional FTIR correlation analyses[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 344: 539-548.
- [4] CHEN M S, DING S M, LI C, et al. High cadmium pollution from sediments in a eutrophic lake caused by dissolved organic matter complexation and reduction of manganese oxide[J]. *Water Research*, 2021, 190: 116711.
- [5] DING X, XU W H, LI Z W, et al. Phosphate hinders the complexation of dissolved organic matter with copper in lake waters[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 276(21):116739.
- [6] LI Z W, HUANG M, LUO N L, et al. Spectroscopic study of the effects of dissolved organic matter compositional changes on availability of cadmium in paddy soil under different water management practices[J]. *Chemosphere*, 2019, 225:414-423.
- [7] 林绍霞, 柳小兰, 张转铃, 等. 贵州草海表层沉积物重金属污染特征与源解析[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(2):390-399. LIN S X, LIU X L, ZHANG Z L, et al. Heavy metal pollution characteristics and source apportionment in overlying deposits of Caohai Lake, Guizhou Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(2):390-399.
- [8] 牛勇, 余辉, 牛远, 等. 太湖流域殷村港沉积物中营养元素及重金属污染特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(8):1557-1562. NIU Y, YU H, NIU Y, et al. Pollution of nutrients and heavy metals in sediments from Yin Cun Gang River of Lake Taihu basin, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(8):1557-1562.
- [9] 欧阳美凤, 谢意南, 李利强, 等. 东洞庭湖及其入湖口水域表层沉积物中重金属的分布特征与生态风险[J]. 生态环境学报, 2016, 25(7):1195-1201. OUYANG M F, XIE Y N, LI L Q, et al. Distribution characteristics and ecological risk of heavy metals in surface sediment of East Dongting Lake and its lake inlet[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(7):1195-1201.
- [10] 徐梦, 刘鸿雁, 罗凯, 等. 夜郎湖表层沉积物重金属分布特征及生

- 态风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(6): 1202-1209. XU M, LIU H Y, LUO K, et al. Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Yelang Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(6): 1202-1209.
- [11] 杨陈, 王沛芳, 刘佳佳, 等. 太湖沉积物中重金属的垂向分布特征及迁移转化[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(3): 548-557. YANG C, WANG P F, LIU J J, et al. Vertical distribution and migration of heavy metals in sediment cores of Taihu Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(3): 548-557.
- [12] 连花, 黄代中, 李芬芳, 等. 江湖关系演变对洞庭湖沉积物重金属污染时空分布的影响[J]. 水生生态学杂志, 2019, 40(3): 8-17. LIAN H, HUANG D Z, LI F F, et al. Influence of river-lake relation evolution on spatio-temporal variation of heavy metal pollution in sediments in Dongting Lake[J]. *Journal of Hydroecology*, 2019, 40(3): 8-17.
- [13] 田琪, 张光贵, 谢意南, 等. 洞庭湖主要入湖口表层沉积物重金属分布特征与生态风险评价[J]. 生态毒理学报, 2017, 12(2): 191-200. TIAN Q, ZHANG G G, XIE Y N, et al. Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments from main tributary entrances of Dongting Lake[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2017, 12(2): 191-200.
- [14] FANG X H, PENG B, WANG X, et al. Distribution, contamination and source identification of heavy metals in bed sediments from the lower reaches of the Xiangjiang River in Hunan Province, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 689: 557-570.
- [15] 祝云龙, 姜加虎, 黄群, 等. 东洞庭湖与大通湖水体沉积物和生物体中Cd Pb Hg As的含量分布及相互关系[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1377-1384. ZHU Y L, JIANG J H, HUANG Q, et al. Contents, distribution and correlation of Cd, Pb, Hg, As in water, sediment and organisms from East Dongting Lake and Datong Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1377-1384.
- [16] 李德亮, 张婷, 余建波, 等. 长江中游典型湖泊重金属分布及其风险评价——以大通湖为例[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(增刊1): 183-189. LI D L, ZHANG T, YU J B, et al. Distribution and risk evaluation of heavy metals in typical lakes in middle reaches of the Yangtze River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, 19(Suppl 1): 183-189.
- [17] LI F, HUANG J H, ZENG G M, et al. Spatial risk assessment and sources identification of heavy metals in surface sediments from the Dongting Lake, middle China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, 132: 75-83.
- [18] LI D B, PAN B Z, CHEN L, et al. Bioaccumulation and human health risk assessment of trace metals in the freshwater mussel *Cristaria plicata* in Dongting Lake, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, 104: 335-350.
- [19] 赵艳民, 秦延文, 曹伟, 等. 洞庭湖表层沉积物重金属赋存形态及生态风险评价[J]. 环境科学研究, 2020, 33(3): 572-580. ZHAO Y M, QIN Y W, CAO W, et al. Speciation and ecological risk of heavy metals in surface sediments of Dongting Lake[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(3): 572-580.
- [20] FENG Y, BAO Q, XIAO X, et al. Geo-accumulation vector model for evaluating the heavy metal pollution in the sediments of Western Dongting Lake[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 573: 40-48.
- [21] LONG X T, LIU F, ZHOU X, et al. Estimation of spatial distribution and health risk by arsenic and heavy metals in shallow groundwater around Dongting Lake plain using GIS mapping[J]. *Chemosphere*, 2021, 269: 128698.
- [22] 杨帆, 袁隆湖, 黎一夫, 等. 湖南省主要水系底泥重金属污染特征及其生态风险评价[J]. 生态学报, 2021(5): 1-13. YANG F, YUAN L H, LI Y F, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of main water systems in Hunan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021(5): 1-13.
- [23] 王玉军, 吴同亮, 周东美, 等. 农田土壤重金属污染评价研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(12): 2365-2378. WANG Y J, WU T L, ZHOU D M, et al. Advances in soil heavy metal pollution evaluation based on bibliometrics analysis[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(12): 2365-2378.
- [24] 宋凤敏, 岳晓丽, 刘智峰, 等. 汉江上游水体表层沉积物重金属污染特征评价[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(7): 1576-1584. SONG F M, YUE X L, LIU Z F, et al. Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in surface sediments of the upper Hanjiang River, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(7): 1576-1584.
- [25] 刘敏, 邓玮, 赵良元, 等. 长江源区主要河流表层沉积物及沿岸土壤重金属分布特征及来源[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(7): 143-149. LIU M, DENG W, ZHAO L Y, et al. Distribution characteristics and sources of heavy metals in surface sediments and bank soils of major rivers in source region of Yangtze River[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, 38(7): 143-149.
- [26] 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 assessment of heavy metals pollution in the sediments from a small catchment in northern Taihu basin[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(5): 2196-2203.
- [27] 盛维康, 侯青叶, 杨忠芳, 等. 湘江水系沉积物重金属元素分布特征及风险评价[J]. 中国环境科学, 2019, 39(5): 2230-2240. SHENG W K, HOU Q Y, YANG Z F, et al. Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in sediments from Xiang River[J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(5): 2230-2240.
- [28] 任杰, 白莉, 李军, 等. 太湖表层沉积物重金属污染评价与来源分析[J]. 地球与环境, 2021, 49(4): 416-427. REN J, BAI L, LI J, et al. Pollution evaluation and source apportionment of heavy metals in surface sediments of the Taihu Lake[J]. *Earth and Environment*, 2021, 49(4): 416-427.
- [29] 陆志华, 蔡梅, 王元元, 等. 太湖沿岸区浅层底泥重金属污染分析及生态风险评价[J]. 湖泊科学, 2021, 34(2): 1-14. LU Z H, CAI M, WANG Y Y, et al. Heavy metal pollution analysis and ecological risk assessment of shallow sediments in the coastal area of Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 34(2): 1-14.
- [30] JIANG F, REN B Z, ANDREW H, et al. Distribution, source identification, and ecological-health risks of potentially toxic elements (PTEs) in soil of thallium mine area (southwestern Guizhou, China)

- [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26: 16556–16567.
- [31] LUO X S, DING J, XU B, et al. Incorporating bioaccessibility into human risk assessments of heavy metals in urban park soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 424: 88–96.
- [32] 李健, 曾北危, 姚岳云, 等. 洞庭湖水系水体环境背景值调查研究[J]. 环境科学, 1986, 7(4): 62–68. LI J, ZENG B W, YAO Y Y, et al. Studies on environmental background levels in waters of Dongting Lake system[J]. *Environmental Science*, 1986, 7(4): 62–68.
- [33] ISLAM M S, AHMED M K, RAKNUZZAMAN M, et al. Heavy metal pollution in surface water and sediment: A preliminary assessment of an urban river in a developing country[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 48: 282–291.
- [34] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975–1001.
- [35] LIU Y X, WANG Q, ZHUANG W, et al. Calculation of Thallium's toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index: A case study[J]. *Chemosphere*, 2018, 194: 562–569.
- [36] JAFARABADI A R, BAKHTIYARI A R, TOOSI A S, et al. Spatial distribution, ecological and health risk assessment of heavy metals in marine surface sediments and coastal seawaters of fringing coral reefs of the Persian Gulf, Iran[J]. *Chemosphere*, 2017, 185: 1090–1111.
- [37] USEPA. Exposure factors handbook[M]. Washington: EPA/600/P-95/002F, 1997.
- [38] USEPA. Region IX, regional screening levels (formerly PRGs)[R/OL]. (2018-10-08) <http://www.epa.gov/region9/superfund/prgl/>.
- [39] USEPA. Regional screening levels (RSLs) – User's guide[R/OL]. (2018-10-08) www.epa.gov/risk/regional-screening-levels-rsls-user-guide-may-2016.
- [40] 赵晓亮, 李响, 卢洪斌, 等. 东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价[J/OL]. 环境科学, 2021, doi: 10.13227/j.hikx.202109123. ZHAO X L, LI X, LU H B, et al. Analysis of heavy metal pollution characteristics and potential ecological risks of surface sediments in Dongjiang Lake[J/OL]. *Environmental Sciences*, 2021, doi: 10.13227/j.hikx.202109123.
- [41] 孟婉, 刘扬, 朱士江, 等. 洞庭湖流域沉积物重金属分布特征及其生态风险[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(4): 739–749. MENG W, LIU Y, ZHU S J, et al. Distribution and ecological risk of heavy metals in sediment across the Dongting Lake basin[J]. *South-to-North Water Transfer and Water Science & Technology*, 2021, 19(4): 739–749.
- [42] 刘虎英. 城陵矶建闸对洞庭湖主要航道影响分析[J]. 交通科学与工程, 2018, 34(1): 50–55. LIU H Y. Analysis of the influence of Chenglingji project on main channel in Dongting Lake[J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2018, 34(1): 50–55.
- [43] 高吉权, 朱姗姗, 刘鹏飞. 洞庭湖底泥沉积物重金属分布与生态风险评价[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2019, 41(4): 851–859. GAO J Q, ZHU S S, LIU P F. Spatial distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Dongting Lake[J]. *Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition*, 2019, 41(4): 851–859.
- [44] ZHANG Y, TIAN Y, SHEN M, et al. Heavy metals in soils and sediments from Dongting Lake in China: Occurrence, sources, and spatial distribution by multivariate statistical analysis[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(14): 13687–13696.
- [45] 尹宇莹, 彭高卓, 谢意南, 等. 洞庭湖表层沉积物中营养元素、重金属的污染特征与评价分析[J]. 环境化学, 2021, 40(8): 2399–2409. YIN Y Y, PENG G Z, XIE Y N, et al. Characteristics and risk assessment of nutrients and heavy metals pollution in sediments of Dongting Lake[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(8): 2399–2409.
- [46] 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(7): 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(7): 108–112.
- [47] 秦建桥, 黄晓萍, 阮文刚. 广东省西伶通道内河航道底泥重金属污染状况与生态风险评估[J]. 水土保持研究, 2019, 26(3): 331–338. QIN J Q, HUANG X P, RUAN W G. Heavy metal pollution and ecological risk assessment in sediments of the Xiling channel of inland waterway of Guangdong Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(3): 331–338.
- [48] 李壮伟, 陈巧弟, 罗荣真, 等. 深圳铜鼓航道表层沉积物中重金属含量及潜在生态危害[J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(9): 32–39. LI Z W, CHEN Q D, LUO R Z, et al. Heavy metal concentration in surface sediments of Shenzhen Tong-gu waterway and assessment of potential ecological risk[J]. *Maine Geology Frontiers*, 2011, 27(9): 32–39.
- [49] 陈银萍, 丁浚刚, 柯昀琪, 等. 不同植物配置人工湿地对废水中镉的去除和富集效应[J]. 水生态学杂志, 2021, 42(3): 114–120. CHEN Y P, DING J G, KE Y Q, et al. Removal and enrichment of cadmium in wastewater by different plant combination in constructed wetlands[J]. *Journal of Hydroecology*, 2021, 42(3): 114–120.
- [50] 葛依立, 陈心胜, 黄道友, 等. 湿地植物水蓼(*Polygonum hydropiper* L.)对镉的富集特征及生理响应[J]. 生态毒理学报, 2020, 15(2): 190–200. GE Y L, CHEN X S, HUANG D Y, et al. Accumulation characteristics and physiological responses of the wetland plant, *Polygonum hydropiper* L. to cadmium[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2020, 15(2): 190–200.
- [51] 施宸皓, 王云燕, 柴立元, 等. 洞庭湖湿地周围表层土壤重金属污染及其人体健康风险评估[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(1): 150–161. SHI C H, WANG Y Y, CHAI L Y, et al. Assessment of heavy metal and human health risk in surface soils around Dongting Lake wetland, China[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2020, 30(1): 150–161.
- [52] 李芬芳, 符哲, 李利强, 等. 洞庭湖表层沉积物重金属污染状况评估[J]. 环境化学, 2017, 36(11): 2462–2471. LI F F, FU Z, LI L Q, et al. Assessment on heavy metal pollution in the surface sediments of Dongting Lake[J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(11): 2462–2471.

(责任编辑:叶飞)