

DOI: 10.3724/EE.1672-9250.2025.53.009

CSTR: 32253.14.EE.1672-9250.2025.53.009

武汉城市湖泊表层沉积物重金属分布、 风险评估及源解析

庞婷婷¹, 金紫依¹, 占 宁¹, 王翌昕¹, 陈路锋^{1,2,*}, 阴永光^{1,2}, 梁 勇¹

(1. 江汉大学 持久性有毒污染物环境与健康危害湖北省重点实验室, 环境与健康学院, 武汉 430056;

2. 中国科学院生态环境研究中心 环境化学与环境毒理全国重点实验室, 北京 100085)

摘 要: 沉积物作为湖泊系统重金属重要的“汇”和二次“源”, 通过影响重金属的形态转化、迁移与释放等, 对重金属的生物地球化学循环起着重要作用。本文选取15个典型的武汉城市湖泊作为研究对象, 分析了表层沉积物中9种重金属的分布特征, 并评估了其污染现状和生态风险, 识别了沉积物中重金属的主要来源及贡献。结果表明样品中的Cd、Zn、Cu和Pb浓度分别有80%、73%、60%和47%约为背景值的2倍, 地累积指数法和潜在生态风险指数法结果也显示武汉城市湖泊沉积物受Cd污染严重并具有较高的生态风险。相关性分析、主成分分析和绝对因子分析-多元线性回归受体模型结果表明武汉城市湖泊沉积物中的Pb、Zn、Cu、Cr和Cd主要来源于交通、工业等人为污染源, 而Co、Mn、Ni和As浓度主要受地质背景影响。研究结果有望为湖泊污染的精准治理和生态修复提供科学依据, 为湖泊污染源控制措施的制定提供数据支撑。

关键词: 重金属; 风险评估; 源解析; 湖泊沉积物

中图分类号: X52; X820.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9250(2025)06-0822-10

重金属因其难降解、生物累积性和高毒性等特点对生态系统具有严重的危害, 并威胁人类健康^[1]。随着经济社会的快速发展, 水环境中重金属含量的逐渐增加越来越受到关注^[2]。2000—2017年全球河流和湖泊水体中有8种重金属平均含量超过了世界卫生组织和美国环境保护局的标准阈值^[3]。中国36.4%的湖泊存在重金属污染问题^[4], 湖泊水产品中Cd、Pb、As和Cr的浓度存在不同程度的超标现象^[4-5]。沉积物作为湖泊系统重金属重要的“汇”和二次“源”, 对重金属的生物地球化学循环具有显著影响。一方面水体中的重金属可通过吸附、凝结或絮凝等过程沉降到沉积物中^[6], 使得沉积物能够反映湖泊重金属污染情况; 另一方面重金属又会通过扩散和再悬浮等过程释放到水体, 从而对湖泊系统重金属的分布及生物富集产生长期影响^[7-8]。

湖北省武汉市位于长江经济带的核心位置, 水量充沛, 素有“百湖之市”之称。近年来随着经济社会的快速发展和城市化进程的加快, 武汉城市湖泊包括重金属

在内的污染问题日益严重^[9-10], 直接影响了城市的可持续发展和居民的生活质量^[11]。已有研究表明武汉工业区湖泊水体受到了重金属污染, 但尚未构成污染危害^[12], 而沉积物中的Cr、Cu、Ni、Pb和Zn富集系数较高^[13]; 武汉城市湖泊中的重金属主要富集于底泥中, 并向水生生物、水体等介质中迁移^[14], 且含量明显呈现的城区 > 近郊 > 远郊的趋势^[15-16]; 通过分析武汉城市湖泊底泥Hg含量的控制因素发现, 人为活动对武汉城市湖泊Hg分布影响明显^[17]。然而, 武汉城市湖泊沉积物中的重金属研究大多集中在10~20年前的少量湖泊和重金属类型, 尚缺乏系统的调查及全面的风险评估, 限制了对湖泊重金属污染现状的深入了解。另外, 有关武汉城市湖泊重金属的影响因素及来源解析研究也鲜有报道, 难以为湖泊污染的科学治理提供基础数据。

本文选取15个附近城市建设集中、人口密集的武汉城市湖泊作为研究对象, 分析了表层沉积物中9种重金属的浓度水平及其空间分布特征, 通过地累积指数法

收稿日期: 2024-11-06; 改回日期: 2025-01-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(42307332)。

第一作者简介: 庞婷婷(1996—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为镉等重金属的环境行为。email: ttpang@stu.jhun.edu.cn。

*通信作者: 陈路锋(1989—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为湿地、滨海等典型水环境汞、镉等重金属的关键迁移转化过程及机制。email: chenlufeng@jhun.edu.cn。

© Editorial office of Earth and Environment. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

和潜在生态风险指数法评估了沉积物中重金属的污染现状和生态风险,为湖泊精准治理和生态修复提供科学依据;同时,结合相关性分析、主成分分析和绝对因子分析-多元线性回归受体模型,识别了沉积物中重金属的主要来源及贡献,为湖泊污染源的控制措施制定提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域和样品采集

武汉市位于长江流域中段,水量充沛,城市湖泊水域面积达787.32 km²,约占全市总面积的30%。2020年8月选取武汉市15个城市湖泊作为采样点(图1),湖泊面积0.02~47.6 km²[17],水质状况为IV-劣V类,轻度-中度富营养化[18]。根据湖泊的水域面积,在湖泊无明显污染源的岸边和湖心采集2~3个样品,共采集33个表层沉积物样品。使用抓斗式沉积物采样器采集湖心沉积物样品,用塑料铲刮取0~5 cm沉积物于自封袋内密封保存;使用柱状沉积物采样器采集岸边沉积物样品,用塑料铲将0~5 cm沉积物分割至密封袋,在3 m范围内均匀采样3次混匀成1份样品。采集的样品装于自封袋中,低温保存,转移至实验室。样品经冷冻干燥、研磨、过100目尼龙筛后用于重金属浓度测定。

1.2 重金属及相关参数的测定

选择Pb、Cd、Zn、Cr、Cu、As、Ni、Mn和Co共9种重金属/类金属作为目标元素,参照《土壤和沉积物12种金属元素的测定王水提取-电感耦合等离子体质谱法》

(HJ 803—2016)测定其含量。称取约0.1 g(精确至0.000 1 g)沉积物于聚四氟乙烯消解管中,加入6 mL HCl(电子级,国药公司,中国)和3 mL HNO₃(痕量金属级,Fisher公司,美国)后按如下程序进行微波消解:120 ℃保持10 min,150 ℃保持20 min,190 ℃保持30 min。消解完成后,将消解液在140 ℃下赶酸至剩余0.5 mL,用超纯水(18.2 MΩ·cm)定容到25 mL后利用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS,iCAP TQ,Thermo Scientific公司,美国)测定Pb、Cd、Zn、Cr、Cu、As、Ni、Mn和Co浓度。通过测定沉积物样品在550 ℃下灼烧6 h后的质量损失百分比来计算烧失量(loss on ignition, LOI),用以代表沉积物的有机质含量[19],数据引自前期研究[17]。

1.3 质量控制

重金属测定过程中以水系沉积物标准参考物质GSD-11(GBW07311)和GSD-12(GBW07312)为参照,同时测定方法空白、平行样品进行准确度和精密度控制。标准物质中Pb、Cd、Zn、Cr、Cu、As、Ni、Mn和Co的回收率平均值分别为100%、101%、104%、88%、103%、103%、110%、110%和94%,平行样品间的标准偏差平均值分别为0.3%、4%、4%、4%、4%、6%、3%、0.3%和2%,在标准方法的可接受范围内。测定过程中Pb、Cd、Zn、Cr、Cu、As、Ni、Mn和Co的方法空白分别为0.04、0.000 7、2.50、0.14、0.14、0.02、0.07、0.01和0.01 mg/kg。另外,在使用ICP-MS测定以上重金属浓度时,采用20 μg/L Rh作为内标对分析条件进行校正。

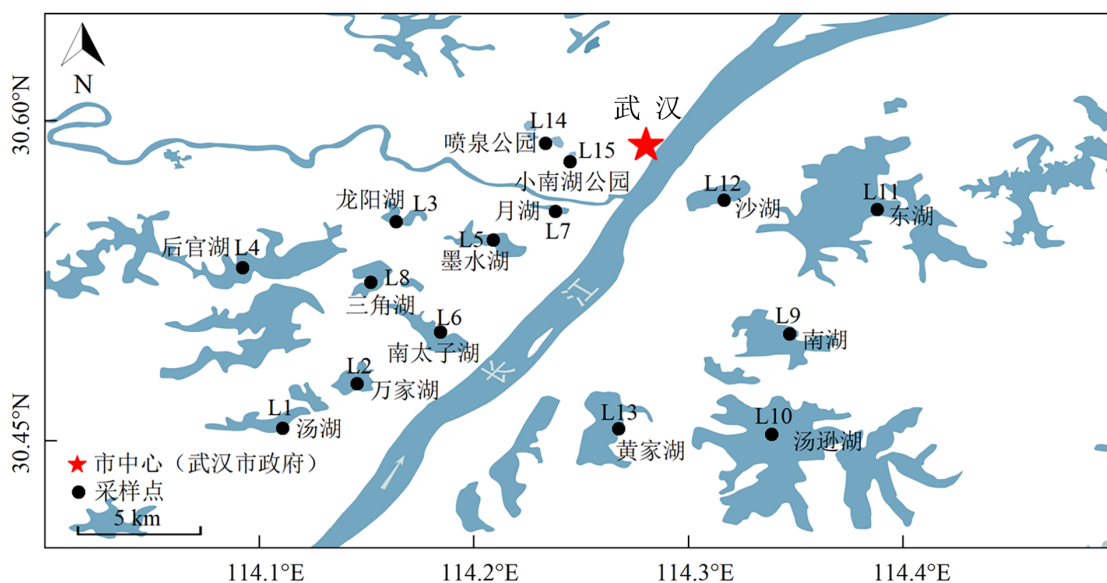


图1 武汉城市湖泊表层沉积物采样点(据文献[17]修改)

Fig. 1 Sampling sites of surface sediment of urban lakes in Wuhan City (Modified after ref. [17])

1.4 数据分析

本研究中运用地累积指数法(I_{geo})和潜在生态风险指数法(PERI)评估武汉城市湖泊沉积物中重金属的污染现状和生态风险。其中,地累积指数计算公式如下:

$$I_{\text{geo}}=\log_2(\frac{C_i}{1.5\times B_i})$$
 (1)

式中, C_i 为沉积物中重金属*i*的浓度(mg/kg); B_i 为沉积物中重金属*i*的环境背景值(mg/kg),本研究选取湖北省地质调查研究院对武汉郊区受污染影响较小的15个湖泊190个表层沉积物Pb、Cd、Zn、Cr、Cu、As和Ni含量的平均值34.50、0.20、79.00、88.00、32.20、14.30和35.00 mg/kg作为背景值^[13],选取湖北省土壤Co和Mn背景值15.40和712.00 mg/kg作为Co和Mn背景值^[20]。1.5为考虑各地岩石背景值变动影响的修正系数。 I_{geo} 一般分为7个等级: $I_{\text{geo}}<0$,0级; $0\leq I_{\text{geo}}<1$,1级; $1\leq I_{\text{geo}}<2$,2级; $2\leq I_{\text{geo}}<3$,3级; $3\leq I_{\text{geo}}<4$,4级; $4\leq I_{\text{geo}}<5$,5级; $I_{\text{geo}}\geq 5$,6级。

单个重金属的潜在生态风险系数 E_r^i 由公式(2)计算,潜在生态风险指数PERI为多种重金属潜在生态风险系数之和,由公式(3)计算。

$$E_r^i=T_r^i\times\frac{C_i}{B_i}$$
 (2)

$$\text{PERI}=\sum E_r^i$$
 (3)

式中, C_i 为沉积物中重金属*i*的浓度(mg/kg); B_i 为沉积物中重金属*i*的环境背景值(mg/kg), T_r^i 为重金属的毒性响应因子(Pb=5、Cd=30、Zn=1、Cr=2、Cu=5、As=10、Ni=5、Mn=1、Co=5)^[21]。 E_r^i 可分为5个等级: $E_r^i\leq 40$,轻微风险; $40<E_r^i\leq 80$,中等风险; $80<E_r^i\leq 160$,强风险; $160<E_r^i\leq 320$,很强风险; $E_r^i>320$,极强风险。PERI同样可分为5个等

级:PERI<150,轻微风险;150≤PERI<300,中等风险;300≤PERI<600,强风险;600≤PERI<1 200,很强风险;PERI≥1 200,极强风险。

绝对因子分析-多元线性回归受体模型(Absolute Principal Component Scores-Multiple Line Regression, APCS-MLR)常用于大气^[22]、水体^[23-24]、土壤^[25]和沉积物^[26]等环境介质中污染物的源解析。本研究首先运用SPSS 26.0软件对武汉城市湖泊表层沉积物重金属含量与相关参数进行皮尔逊相关性分析(Pearson)和主成分分析(Principal Components Analysis, PCA),识别数据中的主要变异因素作为潜在的污染源用以定性分析重金属的主要来源;进一步使用绝对因子分析-多元线性回归受体模型定量不同来源的贡献率^[27]。

2 结果与讨论

2.1 武汉城市湖泊表层沉积物重金属分布

武汉城市湖泊表层沉积物中Pb、Cd、Zn、Cr、Cu、As、Ni、Mn和Co的平均浓度分别为40.87 mg/kg(22.55~128.49 mg/kg)、0.46 mg/kg(ND~1.60 mg/kg)、146.49 mg/kg(43.61~420.47 mg/kg)、73.71 mg/kg(41.14~269.48 mg/kg)、74.85 mg/kg(16.67~508.07 mg/kg)、13.35 mg/kg(7.82~18.69 mg/kg)、32.14 mg/kg(18.92~38.95 mg/kg)、703.34 mg/kg(272.14~1 051.79 mg/kg)和13.98 mg/kg(8.88~22.59 mg/kg)。武汉城市湖泊分别有80%、73%、60%和47%的表层沉积物样品中的Cd、Zn、Cu和Pb浓度约为背景值的2倍,且明显高于中国湖泊表层沉积物中重金属浓度均值^[28],说明武汉城市湖泊表层沉积物中这几种金属的污染情况较严重。与国内其他湖泊系统相比(表1),武汉城市湖泊

表1 武汉城市湖泊表层沉积物重金属浓度与其他湖泊系统的比较

Table 1 Concentrations of heavy metals in surface sediments of urban lakes in Wuhan City and other Chinese and international regions

研究区	Pb	Cd	Zn	Cr	Cu	As	Ni	Mn	Co
湖北武汉市湖泊	40.87	0.46	146.49	73.71	74.85	13.35	32.14	703.34	13.98
中国湖泊 ^[28]	31.00	0.19	88.00	85.00	31.70	12.10	36.80	—	—
西藏湖泊 ^[29]	25.43	0.26	70.14	74.12	24.61	77.69	33.85	—	7.93
广东广州市湖泊 ^[30]	90.48	2.54	447.88	92.27	165.20	—	70.20	—	—
湖南洞庭湖 ^[31]	41.33	2.96	154.12	—	34.09	26.07	—	—	—
江西南昌市湖泊 ^[32]	41.74	11.69	94.13	73.81	27.16	11.69	27.47	—	—
印度水体沉积物 ^[33]	79.28	11.46	145.99	265.59	134.13	26.83	74.65	1 668.97	56.67
美国城市公园湖泊 ^[34]	229.00	2.50	278.00	30.00	40.00	7.10	24.00	605.00	—

注:“—”表示未检测,浓度单位为mg/kg。

表层沉积物重金属浓度普遍高于人类活动干扰较少的西藏湖泊(除As外)^[29],整体低于广州市湖泊沉积物的重金属浓度^[30]。武汉城市湖泊表层沉积物Cd浓度明显低于同为长江流域的洞庭湖和南昌市湖泊沉积物^[31-32],而Cu浓度较高。与国外湖泊系统相比,武汉城市湖泊沉积物重金属浓度低于印度水体沉积物^[33];Pb、Cd和

Zn浓度明显低于美国城市公园湖,而Cr、Cu、As、Ni和Mn浓度较高^[34]。

空间分布特征上,Pb、Cd、Zn、Cr和Cu的分布情况相似,整体上呈现随着距市中心(武汉市政府所在地)距离的增加而浓度降低的趋势(图2)。其中,Cd、Zn、Cr和Cu浓度的最大值和最低值均分布在距市中心最近的小

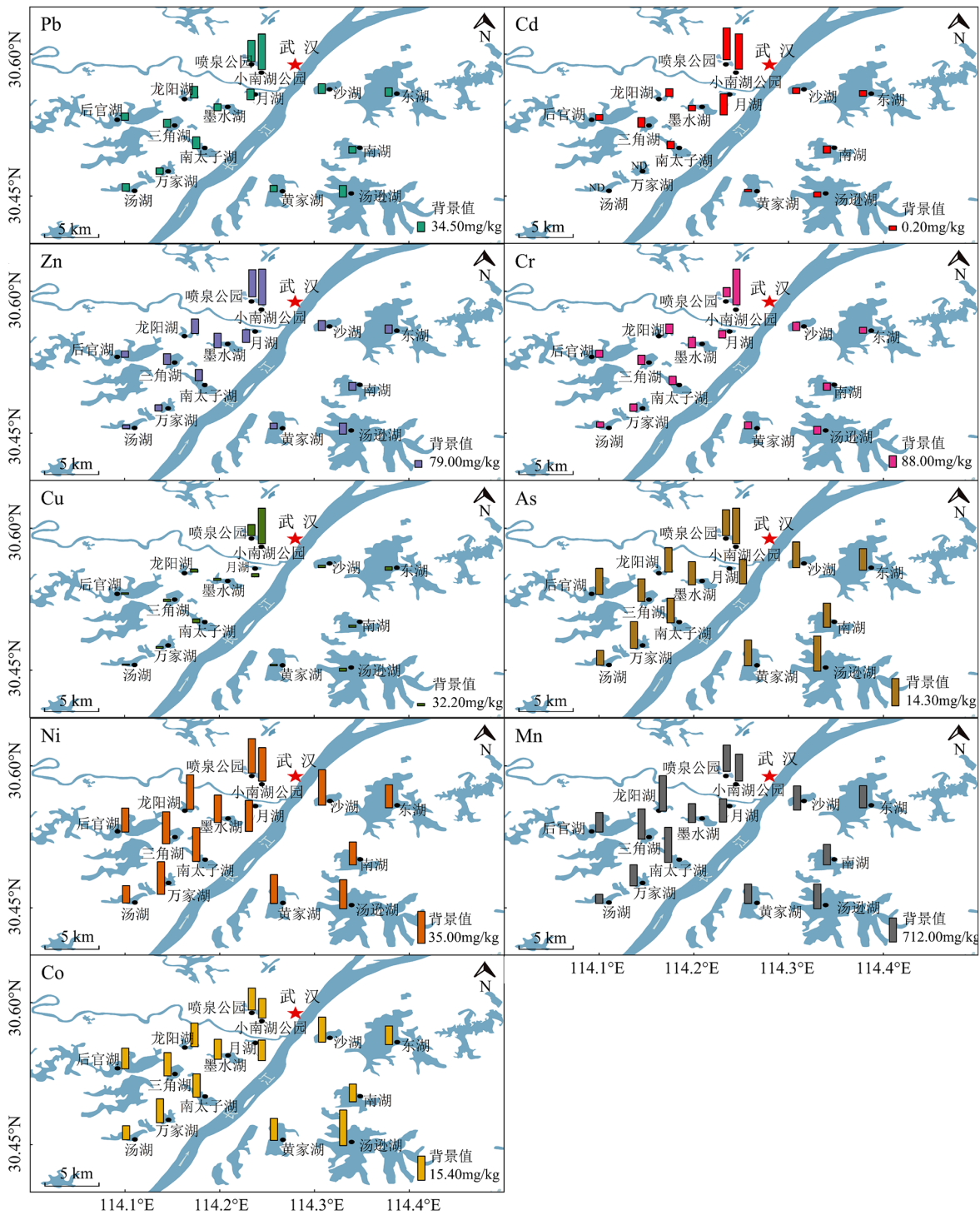


图2 武汉城市湖泊表层沉积物重金属分布

Fig. 2 Distributions of heavy metals in surface sediment from urban lakes of Wuhan City

南湖公园和最远的汤湖;同时,小南湖公园表层沉积物中的Pb浓度最高,而远离市中心的万家湖沉积物中的Pb浓度最低。这些结果表明,人类活动可能显著影响着武汉城市湖泊表层沉积物中重金属的分布。

2.2 武汉城市湖泊表层沉积物重金属风险评估

2.2.1 污染现状

由公式(1)计算的各重金属的地累积指数(I_{geo})的均值基本都小于0,说明武汉城市湖泊表层沉积物受重金属污染较轻(表2),但各湖泊沉积物中重金属污染程度也存在明显差异^[20]。15个武汉城市湖泊表层沉积物中Co、Mn、Ni和As的 I_{geo} 均为负值,而Pb、Cd、Zn、Cr和Cu在不同湖泊呈现不同程度的污染,其中小南湖公园和喷泉公园污染较为严重。如小南湖公园表层沉积物中Pb、Cd、Zn、Cr和Cu的 I_{geo} 污染等级分别达到了2、3、2、2和4级,喷泉公园表层沉积物中Pb、Cd、Zn和Cu的 I_{geo} 污染等级达到了1、3、2和2级。此外龙阳湖、墨水湖、月湖、三角湖、汤逊湖、沙湖和南太子湖表层沉积物中Zn的 I_{geo} 均大于0,龙阳湖、南太子湖、三角湖、月湖和南湖表层沉积物中Cd的 I_{geo} 也大于0。总体来看,武汉城市湖泊表层沉积物中Cd的富集程度较高,存在轻微到中强度的污染。

2.2.2 潜在生态风险

如表3所示,将前期研究的Hg生态风险指数^[17]纳入PERI计算后,武汉城市湖泊表层沉积物中重金属的PERI的平均值为191.03(39.61~698.85),60%湖泊表层沉积物面临的重金属生态风险属于轻微水平。龙阳湖、南太子湖、月湖和汤逊湖表层沉积物处于中等生态风险,距离市中心最近的小南湖公园和喷泉公园属于强生态风险。单项风险系数结果显示,Pb、Cd、Zn、Cr、Cu、As、Ni、Mn、Co的 E_r^i 平均值分别为5.92、69.20、1.85、1.68、11.62、9.33、4.59、0.99和4.54,远低于Hg的 E_r^i 平均值(81.31)^[17],并呈现Cd > Cu > As > Pb > Ni > Co > Zn > Cr > Mn的趋势。其中Hg(占PERI的22%~64%)和Cd(占PERI的18%~53%)的潜在生态风险占比较高,分别处于强风险和中等风险水平,这与其他湖泊体系结果相似^[7,35-36]。

2.3 武汉城市湖泊表层沉积物重金属的影响因素和源解析

沉积物是水环境中营养物质、有机质和各种污染物的天然储存库,其中有机质影响着重金属的固定和转化^[6,37-38]。国内生产总值(Gross Domestic Product, GDP)、人均GDP(Per capita GDP, PGDP)、人口数量和

表2 武汉城市湖泊表层沉积物重金属地累积指数

Table 2 Geoaccumulation index of heavy metals in surface sediments of urban lakes in Wuhan City									
研究区	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Mn
汤湖	-1.68(0)	-1.38(0)	-1.47(0)	-1.53(0)	-1.44(0)	-1.46(0)	-2.59(0)	-0.91(0)	-1.97(0)
万家湖	-1.27(0)	-0.60(0)	-0.56(0)	-0.98(0)	-0.73(0)	-0.62(0)	-2.20(0)	-1.20(0)	-0.77(0)
龙阳湖	-0.85(0)	-0.63(0)	-0.47(0)	-0.20(0)	0.54(1)	-0.73(0)	0.23(1)	-0.28(0)	-0.02(0)
后官湖	-1.27(0)	-0.81(0)	-1.01(0)	-1.07(0)	-0.68(0)	-0.65(0)	-0.22(0)	-0.97(0)	-0.89(0)
墨水湖	-0.74(0)	-0.86(0)	-0.81(0)	-0.70(0)	0.55(1)	-0.82(0)	-0.27(0)	-1.05(0)	-0.94(0)
南太子湖	-1.07(0)	-0.63(0)	-0.50(0)	0.19(1)	0.15(1)	-0.73(0)	0.17(1)	-0.29(0)	-0.04(0)
月湖	-1.25(0)	-0.82(0)	-0.63(0)	-0.05(0)	0.35(1)	-0.74(0)	1.67(2)	-0.45(0)	-0.64(0)
三角湖	-0.90(0)	-0.64(0)	-0.58(0)	-0.50(0)	0.12(1)	-0.85(0)	0.56(1)	-0.83(0)	-0.26(0)
南湖	-1.27(0)	-1.04(0)	-1.07(0)	-0.61(0)	-0.36(0)	-0.75(0)	0.10(1)	-1.10(0)	-0.82(0)
汤逊湖	-1.17(0)	-0.03(0)	-0.73(0)	-0.17(0)	0.14(1)	-0.22(0)	-0.42(0)	-0.31(0)	-0.55(0)
东湖	-1.55(0)	-0.96(0)	-1.06(0)	0.00(0)	-0.30(0)	-0.92(0)	-0.24(0)	-0.79(0)	-0.71(0)
沙湖	-1.06(0)	-0.54(0)	-0.43(0)	-0.39(0)	0.03(1)	-0.66(0)	-0.21(0)	-0.54(0)	-0.58(0)
黄家湖	-1.31(0)	-0.72(0)	-0.73(0)	-1.00(0)	-0.80(0)	-0.66(0)	-1.49(0)	-1.14(0)	-0.89(0)
喷泉公园	-0.93(0)	-0.73(0)	-0.47(0)	1.72(2)	1.44(2)	-0.66(0)	2.26(3)	0.55(1)	-0.46(0)
小南湖公园	1.03(2)	-0.89(0)	-0.51(0)	3.39(4)	1.83(2)	-0.20(0)	2.42(3)	1.31(2)	-0.43(0)
平均值	-1.02(0)	-0.75(0)	-0.73(0)	-0.13(0)	0.06(1)	-0.71(0)	-0.01(0)	-0.53(0)	-0.66(0)

注:表中数值为重金属的地累积指数,括号内数字为污染指数分级。

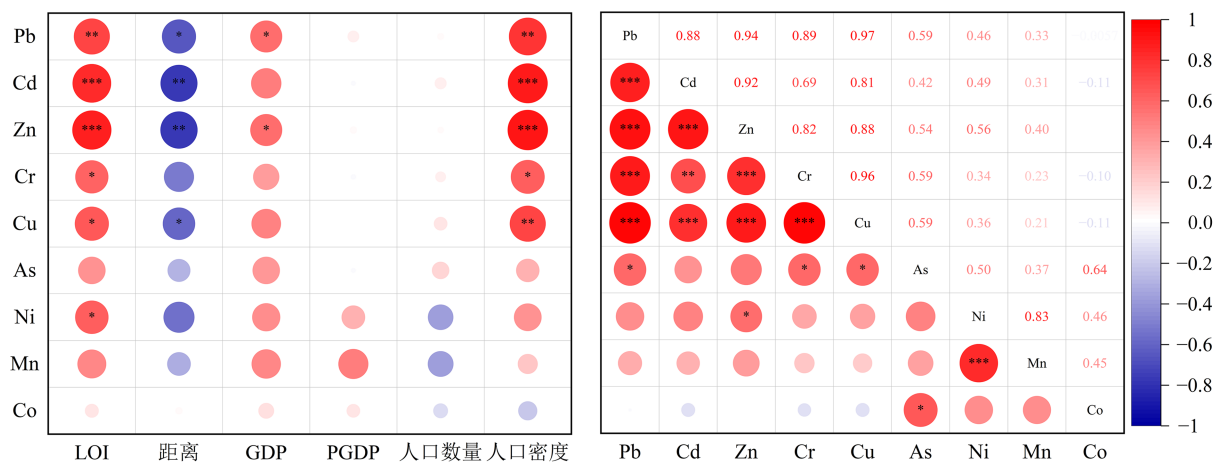
表3 武汉城市湖泊表层沉积物重金属生态风险指数

Table 3 Potential ecological risk index of heavy metals in surface sediments of urban lakes in Wuhan City

湖泊	E_r^i										PERI	风险等级
	Pb	Cd	Zn	Cr	Cu	As	Ni	Mn	Co	Hg ^[17]		
汤湖	3.99	7.48	0.55	0.94	2.59	5.47	2.70	0.38	2.88	12.63	39.61	轻微
万家湖	3.27	9.82	0.90	1.25	3.79	9.79	5.10	0.88	4.93	13.87	53.59	轻微
龙阳湖	6.17	52.84	2.19	1.66	6.51	9.05	5.43	1.48	4.83	66.77	156.94	中等
后官湖	3.83	38.76	0.94	1.24	3.56	9.59	3.74	0.81	4.27	23.61	90.35	轻微
墨水湖	3.63	37.29	2.19	1.80	4.62	8.53	4.29	0.78	4.13	31.02	98.27	轻微
南太子湖	6.15	50.75	1.67	1.43	8.56	9.04	5.29	1.46	4.84	158.60	247.78	中等
月湖	5.51	143.12	1.91	1.26	7.26	8.98	4.86	0.97	4.25	89.63	267.73	中等
三角湖	4.23	66.13	1.63	1.60	5.31	8.33	5.01	1.26	4.80	27.35	125.67	轻微
南湖	3.51	48.23	1.17	1.24	4.91	8.89	3.57	0.85	3.64	32.11	108.13	轻微
汤逊湖	6.07	33.74	1.66	1.33	6.66	12.90	4.54	1.03	7.33	80.91	156.16	中等
东湖	4.34	38.21	1.22	1.03	7.48	7.92	3.60	0.92	3.86	33.83	102.39	轻微
沙湖	5.14	38.90	1.53	1.44	5.72	9.47	5.56	1.00	5.17	71.42	145.36	轻微
黄家湖	3.39	15.97	0.86	1.21	3.74	9.52	4.53	0.81	4.54	20.10	64.68	轻微
喷泉公园	11.00	215.96	4.07	1.57	24.72	9.46	5.40	1.09	4.53	232.16	509.99	强
小南湖公园	18.62	240.75	5.32	6.12	78.89	13.07	5.25	1.12	4.04	325.67	698.85	强
平均值	5.92	69.20	1.85	1.68	11.62	9.33	4.59	0.99	4.54	81.31	191.03	中等

人口密度可以作为反映城市工业化、城市化和人类活动的重要指标。通过分析沉积物中重金属浓度与有机质含量(以烧失量LOI表示)、湖泊与市中心间距离、武汉市各区2019年的GDP、PGDP、人口数量和人口密度(《武汉统计年鉴—2020》)^[39]的相关性可在一定程度上反映人类活动对沉积物中重金属累积特征的影响。

Pearson相关性分析结果显示,武汉城市湖泊表层沉积物中Pb、Cd、Zn、Cr、Cu和Ni的浓度与有机质含量(LOI)存在显著的正相关关系($p<0.05$)(图3)。外源输入的有机质也可能吸附输入到水体中的重金属进而沉降到沉积物中^[40],另一方面沉积物中的有机质可通过吸附和络合等作用富集水环境中的重金属^[41]。此外,Pb、Cd、



*, $p<0.05$; **, $p<0.01$; ***, $p<0.001$ 。

图3 武汉城市湖泊表层沉积物重金属与影响因素的相关性

Fig. 3 Correlations between heavy metals and influencing factors in surface sediment of urban lakes in Wuhan City

Zn和Cu与湖泊距市中心(武汉市政府所在地)的距离呈现显著的负相关关系($p<0.05$),并与各区人口密度呈现显著的正相关关系($p<0.01$),且这4种重金属浓度明显高于背景值,说明武汉城市湖泊表层沉积物中的Pb、Cd、Zn和Cu受人类活动影响显著。而沉积物中Co、Mn和As含量与LOI和距市中心距离均未呈现明显的相关性,说明武汉城市湖泊表层沉积物中的As、Mn和Co可能主要受地质背景的影响。如图3显示,GDP、PGDP和人口数量与重金属浓度也未呈现显著的相关性。GDP和人口数量的增加往往会导致环境污染物排放的增加^[42],但技术、政策、产业结构、消费模式等多种因素也会改变经济发展和环境污染之间的关系^[43]。因此,武汉城市湖泊表层沉积物中各重金属的来源呈现多样性,需要进一步解析。

主成分分析(PCA)常用于研究环境介质中重金属的来源^[44-46]。PCA分析结果显示,武汉城市湖泊表层沉积物重金属浓度可分为2个主成分组,累积贡献率为79.8%(图4),可解释所有重金属的大部分信息。第一主成分包括Pb、Zn、Cu、Cr和Cd,这几种重金属也存在明显的正相关关系(图3, $r=0.69\sim0.96$),说明武汉城市湖泊表层沉积物中的Pb、Zn、Cu、Cr和Cd具有类似的来源。Pb主要来源于交通^[47]、印染、纺织^[48]和钢铁冶炼等行业;Zn和Cu也是交通活动标志元素^[49-50],轮胎磨损和镀Zn道路设施的应用都会导致大量的Zn释放到环境,Cu催化剂通常用于发动机燃烧系统,以控制汽车尾气中的CO排放;Cd与印染、纺织和金属冶炼等行业排放有关^[51-52]。研究区的土地利用类型以建设用地为主,且武汉城区的土地逐步被置换为第三产业用地,第二产业向远城区迁移^[53],江岸区仍以印刷包装、机电制造为

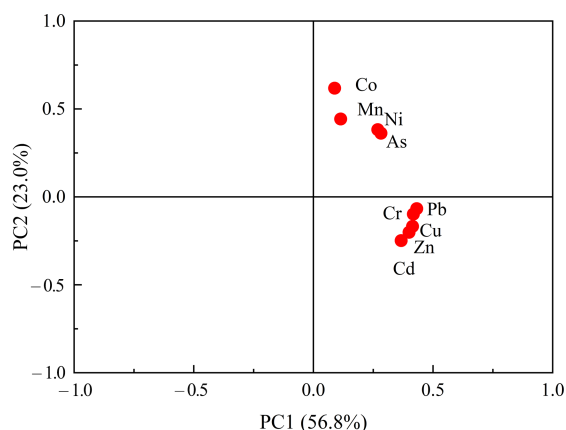


图4 武汉城市湖泊表层沉积物重金属主成分分析

Fig. 4 Principal component analysis of heavy metals in surface sediments of urban lakes in Wuhan City

主,青山区在大力发展钢铁制造及深加工化工、纺织等产业^[54]。以上结果表明,武汉城市湖泊表层沉积物中的Pb、Zn、Cu、Cr和Cd主要来源于交通、工业等人为污染源。第二主成分包括Co、Mn、Ni和As,贡献率为23.0%。第二主成分在Co和Mn上的载荷为0.88和0.63,而这2种重金属浓度接近背景值,且变异系数不高,具有较低的潜在生态风险。这些结果说明,武汉城市湖泊表层沉积物中的Co、Mn、Ni和As浓度主要受地质背景影响,与其他文献报道结果类似^[8]。

在PCA定性识别武汉城市湖泊表层沉积物中重金属来源的基础上,进一步采用绝对因子分析-多元线性回归受体模型(APCS-MLR)估算了各污染源的贡献率。模型拟合结果显示,各重金属的线性回归系数 R^2 依次为Pb(0.96)>Cu(0.93)>Cr(0.91)>Zn(0.90)>Co(0.83)>Cd(0.80)>As(0.66)>Ni(0.65)>Mn(0.44),说明模拟结果可接受。如图5所示,通过APCS-MLR模型计算出了2个确定污染源(交通、工业源和自然来源)和1个未知污染源的贡献率。结果显示,自然来源对Co、Mn、Ni和As的贡献率分别为91%、90%、59%和61%,也说明了武汉城市湖泊表层沉积物中以上几种重金属主要受地质背景的影响。而交通、工业源和未知源(如水产养殖废水^[55]和生活污水排放^[56])对Pb、Zn、Cu、Cr和Cd的贡献率累计达45%、84%、72%、52%和51%,表明武汉城市湖泊表层沉积物中以上几种重金属受人为活动影响明显。以上结果表明了交通、工业等人类活动对水环境重金属累积的重要影响。研究结果为环境污染控制及管理政策的制定提供了数据支撑,如需加强城市人口密集区域交通排放物的监测,城市发展过程应充分考虑环境承载力、优化产业布局等。

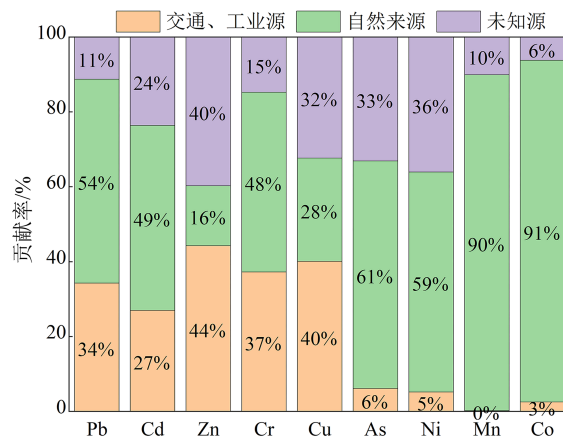


图5 武汉城市湖泊表层沉积物重金属不同污染源的贡献率

Fig. 5 Contributions of different sources to heavy metals in surface sediments of urban lakes in Wuhan City

3 结论

1)武汉城市湖泊表层沉积物中Cd、Zn、Cu和Pb的浓度高于武汉湖泊沉积物背景值,分别有80%、73%、60%和47%样品中的Cd、Zn、Cu和Pb浓度约为背景值的2倍,并整体上呈现随着距市中心距离的增加而降低的趋势。

2)地累积指数和潜在生态风险指数结果显示,武

汉城市湖泊表层沉积物中Cd的富集程度较高,存在轻微到中强度的污染现状;Hg潜在生态风险占比最高,Cd次之,分别处于强风险和中等风险水平。

3)相关性分析、主成分分析和绝对因子分析-多元线性回归受体模型结果表明交通、工业等人为污染源是武汉城市湖泊沉积物中Pb、Zn、Cu、Cr和Cd的主要来源,而Co、Mn、Ni和As浓度主要受地质背景影响。

参 考 文 献

- [1] Paithankar J G, Saini S, Dwivedi S, et al. Heavy metal associated health hazards: an interplay of oxidative stress and signal transduction[J]. *Chemosphere*, 2021, 262: 128350.
- [2] Foster I D L, Charlesworth S M. Heavy metals in the hydrological cycle: trends and explanation[J]. *Hydrological Processes*, 1996, 10(2): 227–261.
- [3] Zhou Q Q, Yang N, Li Y Z, et al. Total concentrations and sources of heavy metal pollution in global river and lake water bodies from 1972 to 2017[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 22: e00925.
- [4] Qin Y H, Tao Y Q. Pollution status of heavy metals and metalloids in Chinese lakes: distribution, bioaccumulation and risk assessment[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 248: 114293.
- [5] Cui L L, Ge J, Zhu Y D, et al. Concentrations, bioaccumulation, and human health risk assessment of organochlorine pesticides and heavy metals in edible fish from Wuhan, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2015, 22(20): 15866–15879.
- [6] Liang E H, Li J R, Li B, et al. Roles of dissolved organic matter (DOM) in shaping the distribution pattern of heavy metal in the Yangtze River[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 460: 132410.
- [7] 卢洪斌, 卢少勇, 李响, 等. 长江中游典型湖泊沉积物重金属分布特征、生态风险评估及溯源[J]. *环境科学*, 2024, 45(3): 1402–1414.
- [8] 杨静, 孟祥周, 刘立早, 等. 上海公园湖泊沉积物重金属的形态分布及潜在生态风险研究[C]//中国环境科学学会. 2013中国环境科学学会学术年会浦华环保优秀论文集. 同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 2013: 7.
- [9] 黄浦江, 刘艳芳, 刘畅, 等. 基于RS与GIS的武汉城市湖泊演化研究[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(9): 1588–1593.
- [10] Xu Y F, Wu Y, Han J G, et al. The current status of heavy metal in lake sediments from China: pollution and ecological risk assessment[J]. *Ecology and Evolution*, 2017, 7(14): 5454–5466.
- [11] 林永钦, 傅春. 湖泊综合承载能力评价探析[C]//南昌大学中国中部经济发展研究中心. 2008年南昌大学中国中部经济发展研究中心学术年会暨中部区域发展与理论创新研讨会论文集. 南昌大学; 南昌大学中国中部经济发展研究中心, 2008: 7.
- [12] 刘红磊, 李立青, 尹澄清. 人为活动对城市湖泊沉积物重金属污染的影响: 以武汉墨水湖为例[J]. *生态毒理学报*, 2007, 2(3): 346–351.
- [13] 倪倩, 蒋敬业, 马振东, 等. 城市工业区湖泊重金属污染状况: 以武汉墨水湖为例[J]. *安全与环境工程*, 2005, 12(1): 13–16.
- [14] 喻劲松, 周国华, 马生明, 等. 武汉主要湖泊重金属污染的特点研究[J]. *物探化探计算技术*, 2007, 29(S1): 243–248, 3.
- [15] 乔胜英, 蒋敬业, 向武, 等. 武汉地区湖泊沉积物重金属的分布及潜在生态效应评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2005, 14(3): 353–357.
- [16] 乔胜英, 蒋敬业, 向武, 等. 武汉市湖泊中重金属污染状况[J]. *水资源保护*, 2007, 23(1): 45–48.
- [17] 陈路锋, 潘钰, 曹梦西, 等. 武汉城市湖泊表层底泥汞分布、风险评价及影响因素[J]. *地球与环境*, 2022, 50(3): 388–396.
- [18] 武汉市水务局. 2020年武汉市水资源公报 [EB/OL]. https://swj.wuhan.gov.cn/szy/202104/t20210413_1666703.html, 2021-04-13/2024-12-26.
- [19] 刘子亭, 余俊清, 张保华, 等. 烧失量分析在湖泊沉积与环境变化研究中的应用[J]. *盐湖研究*, 2006, 14(2): 67–72.
- [20] 唐阵武, 程家丽, 岳勇, 等. 武汉典型湖泊沉积物中重金属累积特征及其环境风险[J]. *湖泊科学*, 2009, 21(1): 61–68.
- [21] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. *环境科学与技术*, 2008, 31(2): 112–115.
- [22] Rahman M S, Bhuiyan S S, Ahmed Z, et al. Characterization and source apportionment of elemental species in PM_{2.5} with especial emphasis on seasonal variation in the capital city “Dhaka”, Bangladesh[J]. *Urban Climate*, 2021, 36: 100804.
- [23] Haji Gholizadeh M, Melesse A M, Reddi L. Water quality assessment and apportionment of pollution sources using APCS–MLR and PMF receptor modeling techniques in three major rivers of South Florida[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 566: 1552–1567.
- [24] Meng L, Zuo R, Wang J S, et al. Apportionment and evolution of pollution sources in a typical riverside groundwater resource area using PCA–APCS–MLR model[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2018, 218: 70–83.
- [25] Jin G Q, Fang W, Shafi M, et al. Source apportionment of heavy metals in farmland soil with application of APCS–MLR model: a pilot study for restoration of farmland in Shaoxing City Zhejiang, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 184: 109495.
- [26] Zhang T, Wang M G, Bai G L, et al. Distribution characteristics, risk assessment, and source analysis of heavy metals in surface sediments and near-lakeshore soils of a plateau lake in China[J]. *Gondwana Research*, 2023, 115: 191–200.
- [27] 冯韶华, 俞一帆, 张旭峰, 等. 中国农田土壤重金属污染源解析研究进展[J]. *环境污染与防治*, 2023, 45(9): 1300–1306.

- [28] 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.
- [29] 郭泌汐, 刘勇勤, 张凡, 等. 西藏湖泊沉积物重金属元素特征及生态风险评估[J]. *环境科学*, 2016, 37(2): 490–498.
- [30] 马舒欣, 乔永民, 唐梦瑶, 等. 广州市主要湖泊沉积物重金属污染与生态风险评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(5): 600–607.
- [31] Yin X Y, Yan G H, Wang X, et al. Trends and risk assessment of heavy metals in the surface sediments of river-connected lakes: a case study of Dongting Lake[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2024, 209: 117181.
- [32] 陈晨, 李逸平, 曾立安. 南昌市主要湖泊沉积物重金属污染及生态风险评价[J]. *湖南生态科学学报*, 2023, 10(1): 15–23.
- [33] Kumar V, Sharma A, Pandita S, et al. A review of ecological risk assessment and associated health risks with heavy metals in sediment from India[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2020, 35(5): 516–526.
- [34] Ye S Y, Laws E A, Gambrell R. Trace element remobilization following the resuspension of sediments under controlled redox conditions: city park lake, Baton Rouge, LA[J]. *Applied Geochemistry*, 2013, 28: 91–99.
- [35] Makokha V A, Qi Y L, Shen Y, et al. Concentrations, distribution, and ecological risk assessment of heavy metals in the east Dongting and Honghu Lake, China[J]. *Exposure and Health*, 2016, 8(1): 31–41.
- [36] 张雅然, 车霏霏, 付正辉, 等. 青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析[J]. *环境科学*, 2022, 43(6): 3037–3047.
- [37] Yi Y B, Xiao M, Mostofa K M G, et al. Spatial variations of trace metals and their complexation behavior with DOM in the water of Dianchi Lake, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(24): 4919.
- [38] Tang G, Zheng X, Li B R, et al. Trace metal complexation with dissolved organic matter stresses microbial metabolisms and triggers community shifts: the intercorrelations[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 314: 120221.
- [39] 武汉市统计局, 国家统计局武汉调查队. 武汉统计年鉴—2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [40] 马闯, 王雨阳, 周通, 等. 污染土壤颗粒态有机质镉锌富集特征及其解吸行为研究[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(9): 1892–1900.
- [41] Dan S F, Udoh E C, Wang Q Q. Contamination and ecological risk assessment of heavy metals, and relationship with organic matter sources in surface sediments of the Cross River Estuary and nearshore areas[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 438: 129531.
- [42] 李镇镇, 武家玉. 中国主要环境污染物与国内生产总值的相关性分析研究[J]. *环境科学与管理*, 2018, 43(4): 35–38.
- [43] 周重阳. 经济增长和环境污染的关系研究[J]. *低碳经济*, 2023, 12(1): 19–26.
- [44] 李玉, 俞志明, 宋秀贤. 运用主成分分析(PCA)评价海洋沉积物中重金属污染来源[J]. *环境科学*, 2006, 27(1): 137–141.
- [45] Chai M W, Li R L, Tam N F Y, et al. Effects of mangrove plant species on accumulation of heavy metals in sediment in a heavily polluted mangrove swamp in Pearl River Estuary, China[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2019, 41(1): 175–189.
- [46] Liu X, Chi H J, Tan Z Q, et al. Heavy metals distribution characteristics, source analysis, and risk evaluation of soils around mines, quarries, and other special areas in a region of northwestern Yunnan, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 458: 132050.
- [47] 方明, 吴友军, 刘红, 等. 长江口沉积物重金属的分布、来源及潜在生态风险评价[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(2): 563–569.
- [48] 史雪勤, 苗苗, 王新起, 等. 含重金属印染废水处理技术的研究与发展[J]. *轻纺工业与技术*, 2023, 52(3): 130–133.
- [49] Desauty A M, Perret S, Maubec N, et al. Tracking anthropogenic sources in a small catchment using Zn–isotope signatures[J]. *Applied Geochemistry*, 2020, 123: 104788.
- [50] Gong C, Xia X, Lan M G, et al. Source identification and driving factor apportionment for soil potentially toxic elements via combining APCS-MLR, UNMIX, PMF and GDM[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 10918.
- [51] 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.
- [52] Bayuo J, Rwiza M J, Choi J W, et al. Recent and sustainable advances in phytoremediation of heavy metals from wastewater using aquatic plant species: green approach[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 370: 122523.
- [53] 王敏, 张军, 周群. 基于空间相关分析的武汉中心城区产业集聚研究[J]. *国土资源科技管理*, 2011, 28(1): 33–39.
- [54] 丁文珺, 黄宇. 碳中和目标下武汉产业结构优化问题探析[J]. *长江论坛*, 2022(2): 34–41.
- [55] Rakib M R J, Miah S, Hossain M B, et al. Delineation of trace metal level in fish feed and farmed fish, Tilapia (*Oreochromis mossambicus*) and their consequences on human health[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2024, 71: 103403.
- [56] Wang F, Dong W Y, Zhao Z L, et al. Heavy metal pollution in urban river sediment of different urban functional areas and its influence on microbial community structure[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 778: 146383.

Distribution, Risk Assessment, and Source Analysis of Heavy Metals in Surface Sediment of Urban Lakes in Wuhan City

PANG Tingting¹, JIN Ziyi¹, ZHAN Ning¹, WANG Yixin¹, CHEN Lufeng^{1,2,*},
YIN Yongguang^{1,2}, LIANG Yong¹

(1. Hubei Key Laboratory of Environmental and Health Effects of Persistent Toxic Substances, School of Environment and Health, Jiangnan University, Wuhan 430056, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Chemistry and Toxicology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: As key "sinks" and secondary "sources" of heavy metals in lake systems, sediments play a critical role in the biogeochemical cycling of heavy metals by influencing their transformation, mobility, and release. This study focused on 15 urban lakes in Wuhan, analyzing the distribution of nine heavy metals in surface sediments, assessing their pollution status and ecological risks, and identifying their primary sources and contributions. The results revealed that Cd, Zn, Cu, and Pb concentrations in 80%, 73%, 60%, and 47% of the samples, respectively, were approximately twice their background levels. Both the geo-accumulation and potential ecological risk index indicated severe Cd pollution and significant ecological risks in the sediments of Wuhan's urban lakes. Correlation analysis, principal component analysis, and the positive matrix factorization–multiple linear regression receptor model identified anthropogenic sources such as traffic and industrial activities as the major contributors to Pb, Zn, Cu, Cr, and Cd, while Co, Mn, Ni, and As concentrations were largely influenced by geological background. These findings provide a scientific basis for targeted lake pollution control and ecological restoration, delivering valuable data to develop pollution source control strategies.

Keywords: heavy metals; risk assessment; source analysis; lake sediment