

周 峰,李 朋,翁茂芝,等.武汉龙阳湖、墨水湖沉积物重金属生态风险评价 [J]. 中国环境科学, 2023,43(10):5433-5443.

Zhou F, Li P, Weng M Z, et al. Ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Longyang Lake and Moshui Lake in Wuhan [J]. China Environmental Science, 2023,43(10):5433-5443.

武汉龙阳湖、墨水湖沉积物重金属生态风险评价

周 峰^{1,2*},李 朋^{1,3},翁茂芝^{1,2},邢新丽³,刘 力^{1,2},张 雅^{1,2},朱睨亭^{1,2},罗 红^{1,2} (1.湖北省地质调查院,湖北 武汉 430034; 2.资源与生态环境地质湖北省重点实验室,湖北 武汉 430034; 3.中国地质大学(武汉)环境学院,湖北 武汉 430074)

摘要: 为探明城市湖泊湿地的生态环境现状,采用数理统计、地累积指数和潜在生态风险指数等方法,对武汉市龙阳湖、墨水湖表层沉积物中的氮、磷和重金属的富集程度、空间分布及生态风险进行了评价.结果显示,来自龙阳湖的表层沉积物中 TN 浓度为 265.03~729.68mg/kg、TP 浓度为 888.64~1694.86mg/kg;来自墨水湖的表层沉积物 TN 浓度为 306.14~857.27mg/kg、TP 浓度为 671.48~2674.39mg/kg.总的来说,墨水湖沉积物受污染程度比龙阳湖较高.与国内典型城市湖泊相比,本研究两个湖泊中 TN 含量较低,TP 含量较高.重金属元素 As、Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 在龙阳湖中分别为 14.27,0.58,59.20,55.61,33.20,176.94mg/kg,在墨水湖中分别为 19.26,0.62,85.53,53.67,41.69,266.64mg/kg.除 Cr 外,沉积物中其它重金属平均含量均高于武汉市土壤背景值,且龙阳湖、墨水湖 Cd 含量分别是背景值的 4.83 和 5.17 倍.与 20 年前相比,除 Cd 以外,墨水湖沉积物重金属含量均有减少,表明淤泥清理对改善湖泊沉积物环境有一定效果,但未从根本上消除污染问题.重金属地累积指数显示,两湖泊中 Cd 含量均处于偏中度至中度污染状态;Cu、Pb、Zn、As 总体上处于轻度污染状态;Cr 处于清洁状态.潜在生态风险指数显示,两湖泊 Cd 含量均处于中度至重度潜在生态风险水平,综合潜在生态风险为低风险至中风险.研究区湖泊中的重金属污染物来源可能为早期工业排放、渔业养殖、动物粪便及人类生活污水的排放等综合因素所致.

关键词: 湖泊沉积物; 重金属元素; 生态风险评价; 龙阳湖; 墨水湖

中图分类号: X524 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2023)10-5433-11

Ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Longyang Lake and Moshui Lake in Wuhan. ZHOU Feng^{1,2*}, LI Peng^{1,3}, WENG Mao-zhi^{1,2}, XING Xin-li³, LIU Li^{1,2}, ZHANG Ya^{1,2}, ZHU Xian-ting^{1,2}, LUO Hong^{1,2} (1.Hubei Geological Survey, Wuhan 430034, China; 2.Hubei Key Laboratory of Resources and Eco-environment Geology (Hubei Geological Bureau) Wuhan, Hubei 430074; 3.School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China). *China Environmental Science*, 2023,43(10): 5433~5443

Abstract: In order to assess the current status of the ecological environment of urban lake wetlands, the present study employs various methods, including mathematical statistics, ground accumulation index, and potential ecological risk index. These methods are used to evaluate the enrichment levels, spatial distributions, and ecological risks of nitrogen, phosphorus, and heavy metal elements in the surface sediments of Longyang Lake and Moshui Lake, located in Wuhan, China. The results indicate that the surface sediment samples from Longyang Lake have total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) contents ranging from 265.03 to 729.68mg/kg and 888.64 to 1694.86mg/kg, respectively. On the other hand, Moshui Lake samples have TN and TP contents ranging from 306.14 to 857.27mg/kg and 671.48 to 2674.39mg/kg, respectively. Thus, Moshui Lake exhibits higher pollution levels compared to Longyang Lake. Moreover, when compared to typical lakes in other domestic cities, both Longyang Lake and Moshui Lake exhibit low TN and high TP contents in their sediments. The concentrations of As, Cd, Cr, Cu, Pb, and Zn in Longyang Lake are 14.27mg/kg, 0.58mg/kg, 59.20mg/kg, 55.61mg/kg, 33.20mg/kg, and 176.94mg/kg, respectively. In Moshui Lake, the concentrations of these elements are 19.26mg/kg, 0.62mg/kg, 85.53mg/kg, 53.67mg/kg, 41.69mg/kg, and 266.64mg/kg, respectively. Additionally, the average concentration of heavy metal elements in the surface sediments, except for Cr, exceeds the background levels of soil in Wuhan. Moreover, the Cd content in Longyang Lake and Moshui Lake are significantly higher than the background values, being 4.83 and 5.17 times greater, respectively. Comparing the current conditions with those from 20 years ago, it is evident that the content of heavy metal elements (except Cd) in Moshui Lake's sediments has decreased. This suggests that efforts to clean the lake's mud have improved the sediment conditions, although pollution has not been completely eliminated. The accumulated index indicates that the Cd level in both lakes is in a roughly moderate polluted state, while Cu, Pb, Zn, and As are generally in a

收稿日期: 2023-02-27

基金项目: 武汉市多要素城市地质调查示范项目 (WHDYS-2021-007)

* 责任作者, 工程师, 864784261@qq.com

mildly polluted state, and Cr is in a clean state. The potential ecological risk index suggests that the overall potential ecological risk is at a low to medium level, but the Cd content in both lakes poses a moderate to severe risk. The study area's heavy metal elemental pollutants may be sourced from a combination of fluxes, including early industrial discharge, fishery farming, animal feces, and emissions from human domestic sewage.

Key words: lake sediment; heavy metal elements; ecological risk assessment; Longyang Lake; Moshui Lake

城市湖泊作为城市重要的地表水资源,在涵养水源、维持生态系统平衡、为人类提供休闲游憩场所等方面起着重要作用^[1-2].武汉市被称为“百湖之市”,也是全球唯一人口超千万的“国际湿地城市”.近年来,随着城市化进程的加快,城市湖泊作为地表径流的受纳水体,受到人为活动的影响较大,污染问题也随之累积.大量研究表明,城市湖泊的重金属污染与其周边人为活动密切相关^[3-6].重金属是一种生物毒性强、易累积、难降解的持久性污染物^[7],研究发现,进入湖泊的重金属通过絮凝作用或沉淀作用,多数进入沉积物中,是重金属的“汇”,同时一定条件下重金属从沉积物中会重新释放进入水体而成为潜在污染源^[8-9].有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^[10],沉积物中污染物的释放是城市湖泊水质恶化的根本原因.因此,沉积物重金属是湖泊水环境的重要“指示剂”,能够客观反映湖泊的污染状况和生态风险,目前绝大多数国家环保部门已将 Cu、Pb、Zn、As、Cd 等重金属列为优先控制污染物^[11-13].因此,查清湖泊沉积物的

重金属污染特征对于城市湖泊的保护修复具有重要意义.

龙阳湖、墨水湖位于武汉汉阳区南郊,属汉阳东湖水系,均为武汉城区内中小型浅水湖泊.早期的汉阳城区是中国近现代工业的摇篮,在快速工业化和城市化进程中,墨水湖等湖泊遭受了明显的污染^[15-17],这在我国城市湖泊中具有代表性.“十一五”期间国家科技部实施了“武汉水专项”,诸多学者对汉阳湖泊水质和沉积物污染进行评估并提出防治措施^[18-22],武汉市政府实施汉阳“六湖连通”工程,通过截污控排、清淤及水系连通等措施改善湖泊水环境,但目前修复情况尚不清楚.因此,本文时隔近 20a 对龙阳湖、墨水湖开展详细调查研究,全面摸清沉积物氮磷、有机质及重金属等关键环境指标特征,科学评价其环境演变情况、生态风险水平及与人类活动的关系,为湖泊保护与流域综合治理提供依据.

1 材料与方法

1.1 采样点设置与采集

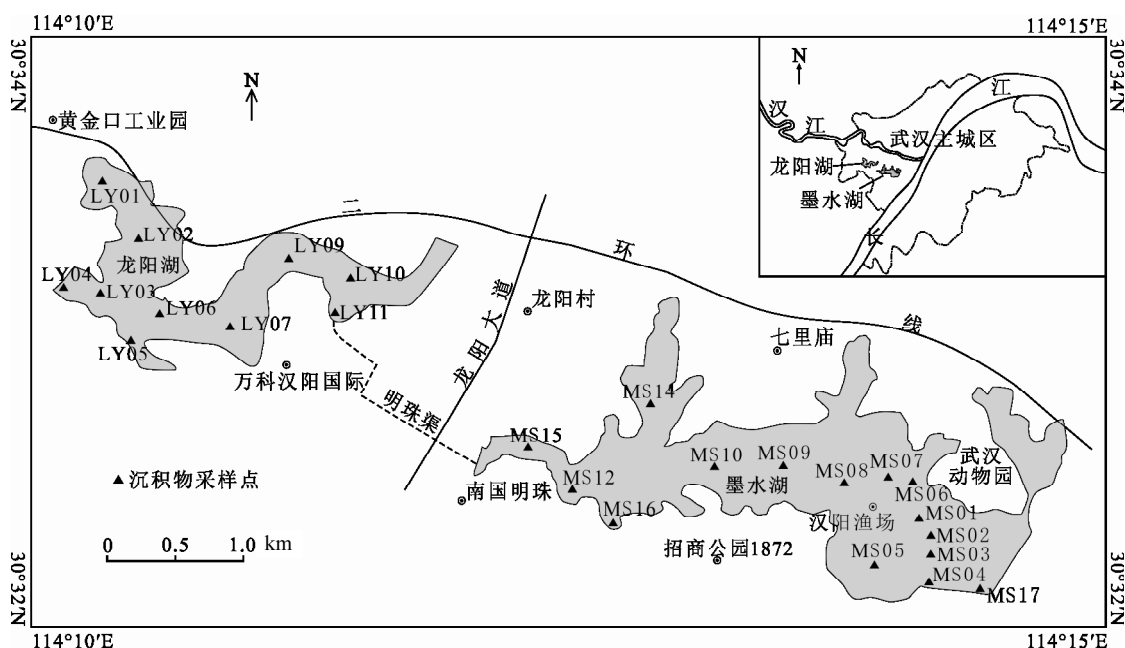


图1 龙阳湖、墨水湖表层沉积物采样点位

Fig.1 Sampling point map of surface sediments in Longyang Lake and Moshui Lake

使用抓斗式采样器于 2021 年 11 月对龙阳湖、墨水湖表层(0~10cm 深度)的沉积物进行采集,根据总体均匀式、局部人类活动密集区(武汉动物园周边)加密的原则,在两个湖泊中共采集表层沉积物 25 件(图 1),将沉积物样品(去除垃圾杂物)装入聚乙烯自封袋密封,低温保存至实验室分析。

1.2 样品处理及分析

湖泊沉积物样品经过冷冻干燥,研磨、过 200 目筛,保存于阴凉干燥处备用.采用混合酸(HCl、HNO₃、HF 和 HClO₄)消解后,使用电感耦合等离子体发射质谱仪(ICP-OES,Agilent 5110)测定 Cr、Cu、Pb 和 Zn;电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS,Agilent 8900)测定 Cd;As 采用王水沸水浴消解,采用原子荧光仪测定.总磷、总氮和有机质采用容量法测定,样品经无二氧化碳蒸馏水浸溶后用离子选择电极测定 pH 值.利用 SPSS22.0 软件进行主成分分析和 Pearson 相关性分析,ArcGIS 10.8 绘制重金属含量的空间分布图,Origin、Excel 绘制统计图表。

1.3 评价分析方法

1.3.1 地积累指数法 地积累指数由德国科学家 Muller 提出^[22],能够充分反映自然条件和人类活动对沉积物及土壤的影响,可以直观反映重金属的累积程度.计算公式如下:

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

式中: I_{geo} 为地累积指数; C_n 为沉积物重金属 n 含量的实际测量值; B_n 为重金属的地球化学背景值; k 为由于各地区差异可能引起背景值波动引入的常数,通常 $k=1.5$.重金属地积累指数分级见表 1.

表 1 地积累指数 I_{geo} 的污染分级

Table 1 Pollution classification of geoaccumulation index

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

1.3.2 潜在生态风险指数法 用潜在生态风险指数法来评价重金属生态危害状况.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危害等级.该方法由瑞典学者 Hakanson 提出^[23],计算公式如下:

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

式中:RI 为多种重金属的综合潜在生态风险指数; $E_{i,r}$ 为重金属元素 i 的单项潜在生态危害指数; $T_{i,r}$ 为重金属元素 i 的毒性系数; $C_{i,f}$ 为重金属元素 i 的实测含量; $C_{i,n}$ 为重金属元素 i 的土壤背景值,参考武汉市土壤背景值^[24].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 2.

表 2 潜在生态风险指数划分标准

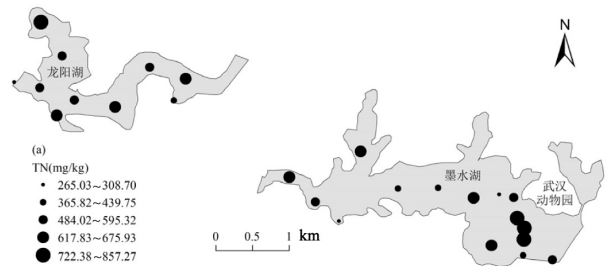
Table 2 Classification criteria for potential ecological risk index

单金属潜在生态危害指数($E_{i,r}$)	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
$80\leq E_{i,r}<160$	$300\leq RI<600$	重
$160\leq E_{i,r}<320$	$600\leq RI<1200$	严重
≥ 320	≥ 1200	极严重

2 结果与讨论

2.1 氮、磷及有机质含量及分布特征

龙阳湖表层沉积物中总氮(TN)浓度范围为 265.03~729.68mg/kg,平均浓度为 553.28mg/kg;总磷(TP)浓度范围为 888.64~1694.86mg/kg,平均浓度为 1275.06mg/kg,有机质(TOC)浓度范围为 1.38%~3.23%,平均浓度为 2.36%;墨水湖表层沉积物中 TN 浓度范围为 306.14~857.27mg/kg,平均浓度为 559.41mg/kg;TP 浓度范围为 671.48~2674.39mg/kg,平均浓度为 1661.51mg/kg,有机质(TOC)浓度范围为 0.94%~3.83%,平均浓度为 2.58%.空间分布显示墨水湖绝大多数点位沉积物 TN、TP、TOC 含量要明显高于龙阳湖(图 2),且含量最高的几个点(MS02~MS06)均位于墨水湖东侧的武汉动物园附近。



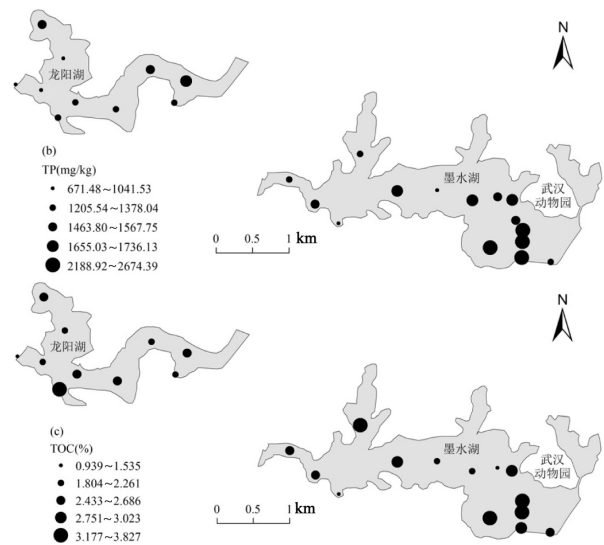


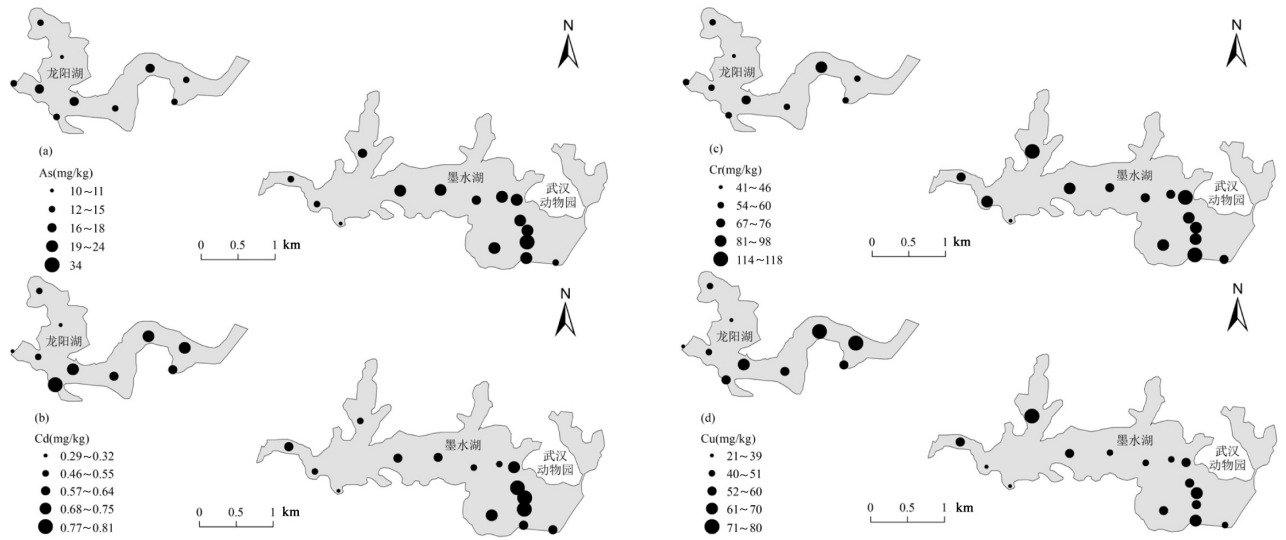
图2 龙阳湖、墨水湖沉积物 TN、TP 和 TOC 空间分布
Fig.2 Spatial distribution of TN、TP and TOC in sediments of Longyang Lake and Moshui Lake

2.2 重金属含量及分布特征

两个湖泊的表层沉积物中各重金属元素含量情况见表 3.其中,As、Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 在龙阳湖中分别为 14.27mg/kg、0.58mg/kg、59.20mg/kg、55.61mg/kg、33.20mg/kg、176.94mg/kg,在墨水湖中分别为 19.26mg/kg、0.62mg/kg、85.53mg/kg、53.67mg/kg、41.69mg/kg 和 266.64mg/kg.各重金属的含量范围变化较大,且变异系数均大于 15%,尤其 Zn 的变异系数异常偏高,表明这些元素存在显著的空间异质性,受人类活动的影响较大.从空间分布特征(图 3)看,龙阳湖和墨水湖沉积物中 Cr、Cu、Pb 的含量在空间分布上呈现一致性,均表现出由西南向东北方向含量增加的现象,其高值主要分布在湖周;墨水湖 Cd、As、Zn 含量高点值均位于湖泊东部靠近武汉动物园一带,尤其在 MS03 点位出现异常高值;而龙阳湖 Cd 高值点主要分布于湖泊周边,As 则是变化不大且整体含量低于墨水湖,Zn 高值点主要集中在湖泊北部.

表 3 龙阳湖、墨水湖表层沉积物中重金属含量特征
Table 3 Characteristics of heavy metal contents in surface sediments of Moshui Lake and Longyang Lake

地区	元素	平均值 (mg/kg)	最大值 (mg/kg)	最小值 (mg/kg)	标准偏差 (mg/kg)	变异系数 (%)	武汉市土壤背景值 [24](mg/kg)	中国湖泊沉积物平均 值[25](mg/kg)	中国南方水系沉积物平 均值[26](mg/kg)
龙阳湖	As	14.27	17.81	10.85	2.21	15.51	12.00	12.10	13.10
	Cd	0.58	0.81	0.32	0.16	27.79	0.12	0.19	0.23
	Cr	59.20	80.85	45.59	10.03	16.95	90.00	85.00	67.00
	Cu	55.61	79.66	35.16	14.79	26.59	32.00	31.70	25.00
	Pb	33.20	42.72	22.40	7.05	21.22	25.00	31.00	32.30
	Zn	176.94	536.44	77.39	130.71	73.87	79.00	88.00	81.00
墨水湖	As	19.26	34.41	9.91	5.67	29.46	12.00	12.10	13.10
	Cd	0.62	0.81	0.29	0.14	23.02	0.12	0.19	0.23
	Cr	85.53	118.36	41.07	20.50	23.96	90.00	85.00	67.00
	Cu	53.67	78.47	20.78	13.48	25.11	32.00	31.70	25.00
	Pb	41.69	59.53	20.33	10.38	24.90	25.00	31.00	32.30
	Zn	266.64	482.77	75.23	110.10	41.29	79.00	88.00	81.00



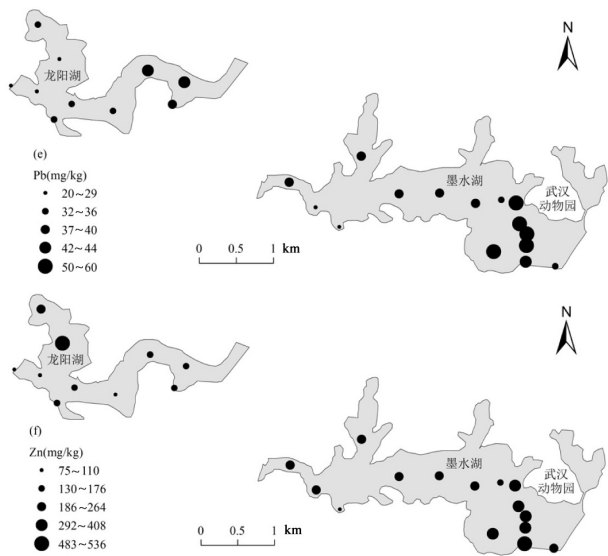


图3 龙阳湖和墨水湖表层沉积物各重金属空间分布
Fig.3 Spatial Distribution of Heavy Metals in Surface Sediments of Moshui Lake and Longyang Lake

2.3 国内典型城市湖泊差异性分析

2.3.1 氮、磷及有机质差异性分析 将龙阳湖、墨水湖与中国东部大多数浅水湖泊以及国内典型城市湖泊的沉积物相关指标^[27-36]进行对比,结果显示(表 4),龙阳湖、墨水湖沉积物中 TN 含量总体处于较低水平,而 TP 含量处于较高水平,除武汉南湖外,明显高于其它城市湖泊,同时显著高于中国东部湖泊平均水平(TP 基准阈值为 454.51~459.03mg/kg)^[27];TOC 含量与其它地区相当,处于中等水平.总体上,TP 污染是本次研究区乃至湖北武汉河湖的典型环境问题,这也与大多学者的研究结果相一致^[37-41].目前生态环境部已将 TP 明确为长江流域首要污染物,湖北省是我国磷化工第一大省,磷化工企业产生的固体废物磷石膏年产生量位居全国首位.“三磷”污染问题较为严峻^[41],在长时间沉积积累作用下,湖北武汉地区的湖泊沉积物 TP 水平则普遍高于长江流域下游地区.

另外在空间分布上,墨水湖 TP 和 TOC 平均含量均大于龙阳湖,说明墨水湖沉积物受污染程度整体上高于龙阳湖,初步判断这可能与武汉动物园及汉阳六湖连通有关.武汉动物园常年经营所产生的动物粪便、生活污水等非点源污染不可避免对墨水湖及其沉积物产生影响,另外六湖连通也可能使富营养化较严重的龙阳湖向下游的墨水湖输送污染物并在沉积物中累积^[42].

表 4 典型湖库沉积物 TN、TP 及 TOC 平均含量
Table 4 Comparison of TN, TP and TOC contents in typical lake sediments

湖泊	TN(mg/kg)	TP(mg/kg)	TOC(%)
龙阳湖	553.28	1275.06	2.36
墨水湖	559.41	1661.51	2.58
重庆长寿湖 ^[28]	2255.89	622.03	2.80
武汉南湖 ^[29]	3972.09	1711.78	6.58
江苏洪泽湖 ^[30]	1020.00	580.00	1.36
太原晋阳湖 ^[31]	2810.00	309.00	14.08
安徽巢湖 ^[32]	1022.00	605.00	2.13
江浙太湖 ^[33]	859.66	560.47	1.28
北京密云水库 ^[34]	1900.00	895.00	2.00
北京官厅水库 ^[35]	1200.00	841.00	2.13
天津于桥水库 ^[36]	1364.60	480.30	3.60

2.3.2 重金属差异性分析 将龙阳湖、墨水湖沉积物重金属与武汉市土壤背景值^[24]相比,两湖中除 Cr 外,其他元素的含量均大于背景值,Cd 超标情况最严重(龙阳湖、墨水湖分别是背景值的 4.83 和 5.17 倍);与中国湖泊沉积物^[25]平均值相比,Cd、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^[26],Cd、Pb、Cu、Cr 和 Zn 含量偏高,As 含量相近.

表 5 典型城市湖泊表层沉积物重金属平均含量(mg/kg)
Table 5 Comparison of average content of heavy metals in surface sediments of typical urban lakes(mg/kg)

元素	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
龙阳湖	14.27	0.58	59.2	55.61	33.2	176.94
墨水湖	19.26	0.62	85.53	53.67	41.69	266.64
墨水湖(2004) ^[18]	30.30	0.61	189.00	76.10	69.50	650.00
东湖 ^[43]	15.53	0.61	78.32	51.48	44.62	112.08
梁子湖 ^[43]	15.86	0.76	88.65	44.37	47.68	120.38
沉湖 ^[43]	14.98	0.61	91.95	52.50	46.56	121.39
汤逊湖 ^[43-44]	10.63	0.69	87.13	52.85	43.89	159.16
洪泽湖 ^[45]	16.55	0.23	66.78	25.35	27.20	74.77
鄱阳湖 ^[46]	—	0.70	132.49	44.89	49.39	142.79
阳澄湖 ^[47]	15.85	0.45	101.28	66.54	34.02	187.33
太湖 ^[48]	13.34	0.48	102.46	44.71	37.00	163.62

注:“—”表示没有相关数据.

将本次研究与国内其他一些典型城市湖泊^[43-48]进行对比,如表 5 所示,这些城市湖泊表层沉积物重金属含量总体相差不大.其中龙阳湖 Cr、Pb 含量均处于较低水平,墨水湖与其它湖泊相近;龙阳湖 As 含量与其他湖泊相当,但墨水湖 As 则高于其他城市湖泊;两湖 Cd 与武汉市其他湖泊^[41]基本一致,但高于其他城市湖泊(除鄱阳湖外),表明武汉市湖泊整体

Cd 水平较高;Cu、Zn 除阳澄湖外均高于其他湖泊,并且墨水湖 Zn 显著高于其他城市湖泊。

另外,与乔胜英、苏春利等 2004 年对墨水湖的取样研究结果^[18-19]相比,除 Cd 外,其他重金属元素含量均有一定程度的减少,其中 Zn 含量减少最明显(2004 年是背景值的 8.23 倍,当前是 3.37 倍),表明墨水湖在清淤后的近 20a 来沉积物重金属污染整体有所好转,但没有完全根治问题,Cd 仍保持较高浓度,这可能与湖底深层重金属在清淤后暴露到表层或近年来新输入污染等因素有关。

2.4 重金属污染程度与生态风险

2.4.1 重金属地累积指数 由图 4 可见,根据 I_{geo} 分级标准,墨水湖和龙阳湖沉积物中 Cr 的 I_{geo} 值均小于 0,为清洁水平,而 Cu、Pb 的 I_{geo} 值均小于 1,属轻度污染。龙阳湖 As 的 I_{geo} 值均小于 0,属清洁水平,但墨水湖 As 的 I_{geo} 值基本介于 0~1,表明受到轻度污染;龙阳湖 Zn 的 I_{geo} 值均小于 1,属轻度污染,但墨水湖 Zn 的 I_{geo} 值在 0~1 和 1~2 均有分布,属轻度~偏中度污染;两湖中的 Cd 大部分点位 I_{geo} 值介于 1~2,甚至部分大于 2,因此属偏中度至中度污染。

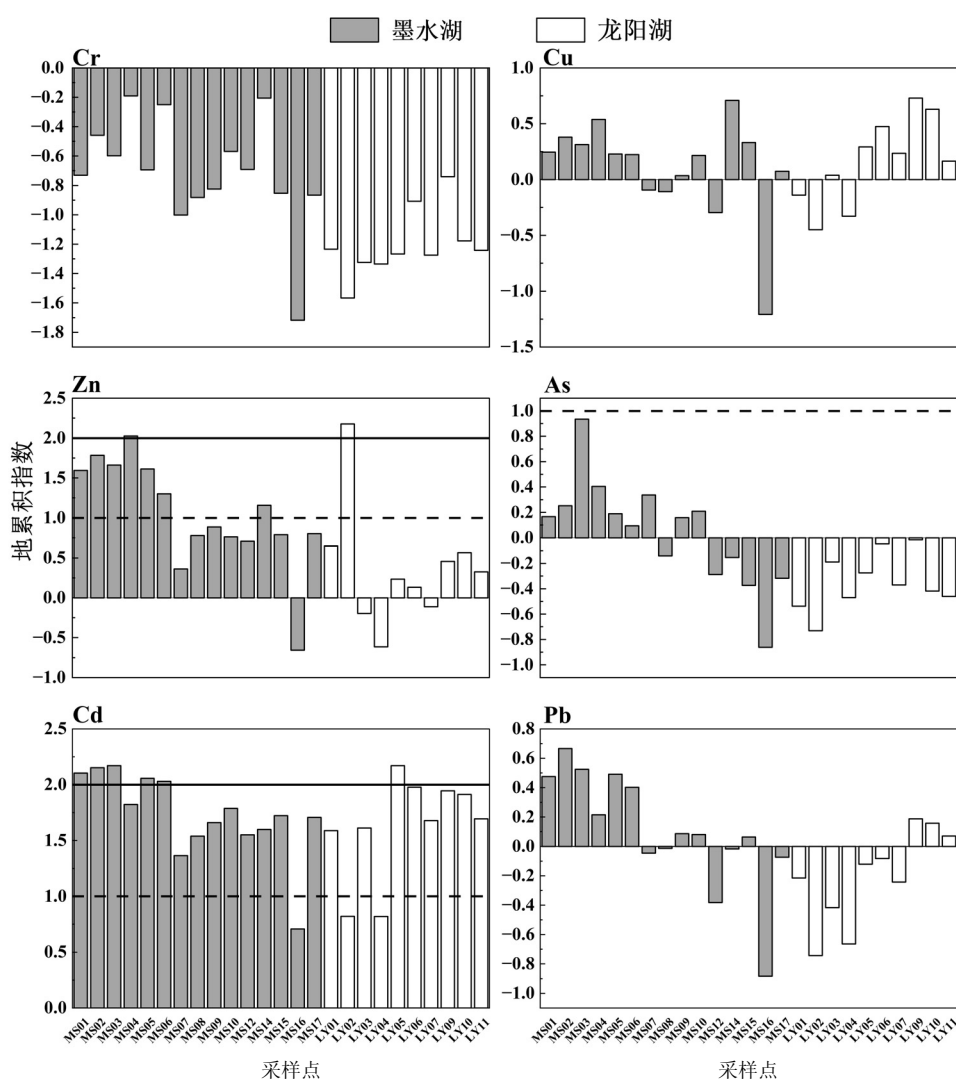


图 4 表层沉积物重金属污染程度

Fig.4 Pollution degree of heavy metals in surface sediments

虚线表示轻度污染阈值,实线表示偏中度污染阈值

2.4.2 重金属潜在生态风险评价 各重金属单项潜在生态风险指数显示,除了 Cd 存在潜在生态风险,其它元素在两湖本次采样范围内均属于低潜在生

态危害范畴($E_{i,r} < 40$)(图 5)。墨水湖沉积物 Cd 的 $E_{i,r}$ 平均值为 153.86,其中 40.00%点位处于严重潜在生态风险水平($160 \leq E_{i,r} < 320$)、53.33%点位处于重潜在

生态风险水平($80 \leq E_{ir} < 160$)、6.67%点位处于中潜在生态风险水平($40 \leq E_{ir} < 80$)。龙阳湖中 Cd 的 E_{ir} 平均值为 144.40, 其中 40.00% 点位处于严重潜在生态风

险水平、40.00% 点位处于重潜在生态风险水平($80 \leq E_{ir} < 160$)、20.00% 点位处于中潜在生态风险水平($40 \leq E_{ir} < 80$)。

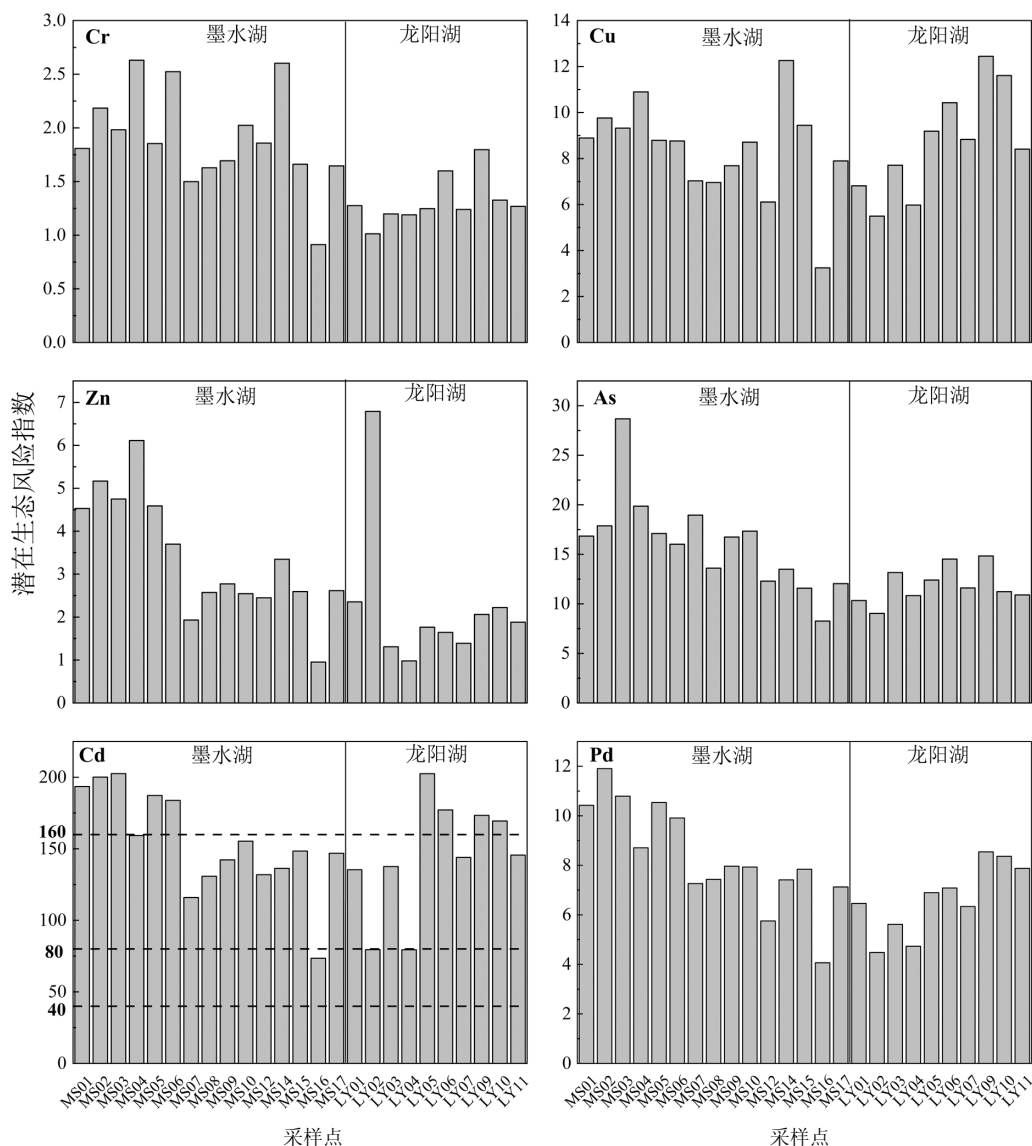


图 5 重金属单项潜在生态风险指数

Fig.5 Single potential ecological risk index of heavy metals

40,80,160 分别是低、中、重潜在生态风险指数阈值

重金属综合潜在生态风险评价结果显示,墨水湖和龙阳湖 RI 平均值分别为 191.91 和 175.17, 除 MS16、LY02、LY04 点处于低潜在生态风险水平(图 6), 其它点位均为中潜在生态风险水平($150 \leq RI < 300$)。

2.5 重金属污染源分析

龙阳湖和墨水湖表层沉积物的主要污染物是 Cd, 其次是 Zn、Cu、Pb 和 As。Cr 平均含量低于背景值且变异系数低, 可能主要为自然来源。相关性分析

(表 6)表明,墨水湖的 Cu、Pb、Zn 和 Cd 可能来自同一污染源,龙阳湖的 Cu、Pb 和 Cd 的来源具有相似性。其中 Pb 主要来源于煤燃烧、含铅矿石的工业利用、原油和含铅汽油的燃烧,As 也被视为燃煤的标志元素^[49]。Cu、Zn 主要来自于垃圾的焚烧和工业排放,部分也来自燃煤的排放^[34]。Cd 主要来源于合金制造、电镀等工业生产,另外煤和原油燃烧也可释放微量的 Cd 到空气中^[50]。这些元素最终通过污水排放和

暴雨径流汇入到湖水及沉积物中.汉阳是武汉最早的工业区,工业对环境的影响历史较长,如近现代的汉阳钢铁厂、汉阳兵工厂、铁路机车厂等,目前龙阳湖北侧仍有包含汽车维修业、木材业及建材业的黄金口工业园.自 1999 年武汉市统计规模以上工业能源消费情况以来,煤炭、原油、电力、焦炭等消费就一直占到武汉能源消费总量的 80%以上,因此化石燃料燃烧、金属冶炼等工业排放应是造成龙阳湖、墨水湖重金污染的主要原因.

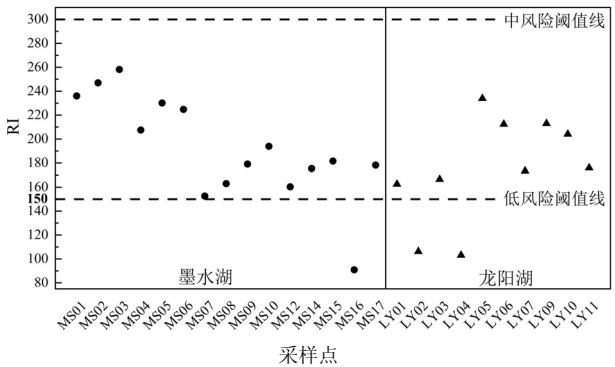


图 6 重金属综合潜在生态风险指数

Fig.6 Comprehensive potential ecological risk index of heavy metals

表 6 表层沉积物重金属含量之间的 Pearson 相关系数

Table 6 Pearson correlation coefficient between heavy metal contents in surface sediments							
地区	元素	Cu	Cr	Pb	Zn	As	Cd
龙阳湖	Cu	1					
	Cr	0.820**	1				
	Pb	0.891**	0.718*	1			
	Zn	-0.361	-0.378	-0.354	1		
	As	0.726*	0.837**	0.504	-0.537	1	
	Cd	0.809**	0.602	0.790**	-0.437	0.665*	1
墨水湖	Cu	1					
	Cr	0.845**	1				
	Pb	0.619*	0.527*	1			
	Zn	0.707**	0.705**	0.822**	1		
	As	0.432	0.393	0.681**	0.634*	1	
	Cd	0.626*	0.574*	0.955**	0.817**	0.653**	1

注:**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.

另外有研究表明,水产饲料中的鱼粉含有一定量的 Cd、Zn 元素^[45],在 2012 年实施退养还湖之前汉阳渔场在两湖中从事着较大规模的水产养殖活动,因此表层沉积物中的 Cd、Zn 等重金属也可能来

自于水产养殖过程中投加的饵料、鱼类的排泄物和农药残留等.并且墨水湖 Zn 的变异系数异常高,其来源之一是畜禽粪便有机肥重金属释放,其与武汉动物园的经营活动有密切关系.

综上所述,龙阳湖、墨水湖表层沉积物重金属可能来自工业排放、渔业养殖、动物粪便及人类生活污水排放等复合污染,因此今后须加强流域综合治理,重点关注重金属 Cd 的污染控制,做好定期清淤等工作.

3 结论

3.1 龙阳湖表层沉积物中 TN 浓度为 265.03~729.68mg/kg、TP 浓度为 888.64~1694.86mg/kg;墨水湖表层沉积物 TN 浓度为 306.14~857.27mg/kg、TP 浓度为 671.48~2674.39mg/kg.与国内典型城市湖泊相比,两湖沉积物 TN 含量较低,TP 含量较高,显著高于中国东部湖泊平均含量.总的来说,墨水湖沉积物受污染程度比龙阳湖较高,TP、TOC 高值区主要位于墨水湖东侧的武汉动物园附近,可能与武汉动物园经营活动及六湖连通有关.

3.2 重金属元素 As、Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 在龙阳湖沉积物中分别为 14.27,0.58,59.20,55.61,33.20,176.94mg/kg,在墨水湖沉积物中分别为 19.26,0.62,85.53,53.67,41.69,266.64mg/kg.除 Cr 外,沉积物中其它重金属平均含量均高于武汉市土壤背景值,且龙阳湖、墨水湖 Cd 含量分别是背景值的 4.83 和 5.17 倍.总体上,Cd 是两湖重金属污染和生态风险的主要贡献因子,重金属地累积指数表明两湖 Cd 均处于偏中度至中度污染状态,综合潜在生态风险为低风险至中风险.与 20a 前相比,除 Cd 以外,墨水湖沉积物重金属含量均有减少,表明淤泥清理对改善湖泊沉积物环境有一定效果,但未根本消除污染问题.

3.3 龙阳湖、墨水湖表层沉积物重金属污染受到人类活动的影响非常明显,其高值区主要分布在湖滨以及武汉动物园和汉阳渔场一带.Cu、Pb 和 As 可能主要来源于工业活动的燃烧排放,而 Cd、Zn 污染则是工业排放、渔业养殖、动物粪便及人类生活污水排放等复合污染,须加强综合治理.

参考文献:

[1] 吴佳鹏,刘来胜,王启文,等.城市湖泊生态健康评价指标体系研究

- [J]. 水力发电, 2020,46(3):1-3,112.
- Wu J P, Liu L S, Wang Q W, et al. Study on evaluation index system of ecological health of urban lake [J]. Hydropower, 2020,46(3):1-3,112.
- [2] 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.
- Chen C, Li Y P, Zeng L A. Heavy metal pollution and ecological risk assessment in sediments of major lakes in Nanchang [J]. Journal of Hunan Eco-logical Science, 2023,10(1):15-23.
- [3] 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.
- Ma S X, Qiao Y M, Tang M Y, et al. Heavy metal pollution and potential ecological risk assessment in surface sediments from lakes located in Guangzhou City [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019,35(5):600-607.
- [4] 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.
- [5] 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.
- Guo B X, Liu Y Q, Zhang F, et al. Characteristics and risk assessment of heavy metals in core sediments from Lakes of Tibet [J]. Environmental Science, 2016,37(2):490-498.
- [6] 黄雅婷.新疆典型湖泊沉积物中重金属的形态分布及其环境污染评价 [D]. 石河子大学, 2015.
- Huang Y T. Distribution and speciation of heavy metals and environmental pollution assessment in sediments of typical areas, Xinjiang [D]. Shihezi University, 2015.
- [7] Chen H, Teng Y, Lu S, et al. Contamination features and health risk of soil heavy metals in China [J]. Science of the Total Environment, 2015 (512/513-).
- [8] 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.
- [9] 张 莉,祁士华,瞿程凯,等.福建九龙江流域重金属分布来源及健康风险评价 [J]. 中国环境科学, 2014,34(8):2133-2139.
- Zhang L, Qi S H, Qu C K, et al. Distribution, source and health risk assessment of heavy metals in the water of Jiulong River, Fujian [J]. China Environmental Science, 2014,34(8):2133-2139.
- [10] Waajen G W A M, Faassen E J, Liirling M. Eutrophic urbanponds suffer from cyanobacterial blooms: Dutch examples [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014,21(16):9983-9994.
- [11] 赵振华.美国水中 129 种 “优先污染物” 简介 [J]. 环境与可持续发展, 1981,(8):7-9.
- Zhao Z H. Brief introduction of 129 priority pollutants in American waters [J]. Environment and Sustainable Development, 1981,(8):7-9.
- [12] 王一喆,张亚辉,赵 莹,等.国内外环境优先污染物筛选排序方法比较 [J]. 环境工程技术学报, 2018,8(4):456-464.
- Wang Y Z, Zhang Y H, Zhao Y, et al. Comparison on screening and sorting methods of environmental priority pollutants at home and abroad [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2018, 8(4):456-464.
- [13] 陶艳茹,苏海磊,李会仙,等.《欧盟水框架指令》下的地表水环境管理体系及其对我国的启示 [J]. 环境科学研究, 2021,34(5):1267-1276.
- Tao Y R, Su H L, Li H X, et al. Surface water environment management system in EU water framework directive and its enlightenment to China [J]. Research of Environmental Sciences, 2021,34(5):1267-1276.
- [14] 毛荣生,黄 平.墨水湖 N/P 水质模型研究 [J]. 湖泊科学, 1994, 6(4):348-355.
- Mao R S, Huang P. Study on N/P water quality models in MOSHUI lake [J]. Journal of Lake Sciences, 1994,6(4):348-355.
- [15] 毛荣生,夏 军,王真荣.武汉墨水湖 BOD/DO 数学模型及参数识别 [J]. 环境科学, 1995(4):26-31,92.
- Mao R S, Xia J, Wang Z R. et al. BOD/DO mathematic models for the water quality of lake Moshuihu in Wuhan City and their parameters identification [J]. Environmental Science, 1995(4):26-31,92.
- [16] 梅 涛.浅析武汉动物园对墨水湖水质污染的影响 [J]. 中国环境管理丛书, 2004,(2):40-42.
- Mei T. Analysis Wuhan Zoo for the influence of Moshui Lake water pollution [J]. China Environment Management, 2004,(2):40-42.
- [17] 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,(1):13-16.
- Ni Q, Jiang J Y, Ma Z D. et al. Heavy metal pollution in lakes in the industrial park——A case study of Lake Moshuihu, Wuhan [J]. Safety and Environmental Engineering, 2005,(1):13-16.
- [18] 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,(3):353-357.
- Qiao S Y, Jiang J Y, Xiang W. et al. Distribution of heavy metals in sediments in lakes in Wuhan with assessment on their potential ecological risk [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2005,(3):353-357.
- [19] 苏春利,王焰新.武汉市墨水湖沉积物重金属污染特征与防治对策 [J]. 矿物岩石, 2006,(2):111-116.
- Su C L, Wang Y X. Pollution characteristics and pollution control of heavy metals contaminants in sediments of Moshui Lake, Wuhan, China [J]. Mineralogy and Petrology, 2006,(2):111-116.
- [20] 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,(3):346-351.
- Liu H L, Li L Q, Yin C Q. et al. Metals in sediments of an urban lake in China as archives of anthropogenic activities—A case study of Moshui Lake in Wuhan [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2007, (3):346-351.
- [21] 桑稳蛟,程建军.墨水湖底泥重金属污染现状与评价研究 [J]. 安徽农业大学学报, 2008,(3):469-472.
- Sang W J, Cheng J J. Assessment on pollution status of heavy metal in sediment of Moshui Lake in Wuhan [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2008,(3):469-472.
- [22] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. GeoJournal, 1969,2(3):109-118.
- [23] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control.a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980.

- [24] 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.
- [25] Cheng H, Li M, Zhao C, 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.
- [26] 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.
- [27] 王 健,张靖天,咎逢宇,等.中国东部浅水湖泊沉积物总氮总磷基准阈值研究 [J]. 生态环境学报, 2014,23(6):992-999.
Wang J, Zhang J T, Zan F Y, Xi B D, et al. Study on sediment TN and TP criteria in eastern shallow lakes, China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014,23(6):992-999.
- [28] 卢少勇,许梦爽,金相灿,等.长寿湖表层沉积物氮磷和有机质污染特征及评价 [J]. 环境科学, 2012,33(2):393-398.
Lu S Y, Xu M S, Jin X C, et al. Pollution characteristics and evaluation of nitrogen, phosphorus and organic matter in surface sediments of Lake Changshouhu in Chongqing, China [J]. Environmental Science, 2012,33(2):393-398.
- [29] 魏明蓉,姜应和,张 华,等.南湖表层沉积物中有机质·氮和磷的污染现状与评价 [J]. 安徽农业科学, 2010,38(4):2004-2005,2024.
Wei M R, Jiang Y H, Zhang H, et al. Pollution status and evaluation of organic matter, nitrogen and phosphorus in surface sediment of nanhu lake [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010,38(4): 2004-2005,2024.
- [30] 余 辉,张文斌,卢少勇,等.洪泽湖表层底质营养盐的形态分布特征与评价 [J]. 环境科学, 2010,31(4):961-968.
Yu H, Zhang W B, Lu S Y, et al. Spatial distribution characteristics of surface sediments nutrients in Lake Hongze and their pollution status evaluation [J]. Environmental Science, 2010,31(4):961-968.
- [31] 丁建华,王翠红,周新春,等.晋阳湖底泥中氮磷特征的初步研究 [J]. 安全与环境学报, 2008,(3):14-17.
Ding J H, Wang C H, Zhou X C, et al. On the characteristics of nitrogen and phosphorus in the sediments of Jinyang Lake [J]. Journal of Safety and Environment, 2008,(3):14-17.
- [32] 王永华,刘振宇,刘 伟,等.巢湖合肥区底泥污染物分布评价与相关特征研究 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2003,(4):501-506.
Wang Y H, Liu Z Y, Liu W, et al. Distribution and correlation characteristics between pollutants in sediment in Chaohu Lake, China [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2003(4): 501-506.
- [33] 袁和忠,沈 吉,刘恩峰,等.太湖水体及表层沉积物磷空间分布特征及差异性分析 [J]. 环境科学, 2010,31(4):954-960.
Yuan H Z, Shen J, Liu E F, et al. Space distribution characteristics and diversity analysis of phosphorus from overlying water and surface sediments in Taihu Lake. [J]. Environmental Science, 2010, 31(4):954-960.
- [34] 徐 清,刘晓端,王辉锋,等.密云水库沉积物内源磷负荷的研究 [J]. 中国科学(D 辑:地球科学), 2005,(S1):281-287.
Xu Q, Liu X D, Wang H F, et al. Study on endogenous phosphorus load in sediments of Miyun Reservoir [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2005,(S1):281-287.
- [35] 苏德纯,胡育峰,宋崇渭,等.官厅水库坝前疏浚底泥的理化特征和土地利用研究 [J]. 环境科学, 2007,(6):1319-1323.
Su D C, Hu Y F, Song C W, et al. Physicochemical properties of Guanting Reservoir sediment and its land application [J]. Environmental Science, 2007,(6):1319-1323.
- [36] 吴光红,曹珊珊,于雅琴,等.天津典型水环境表层沉积物中营养盐含量及动态特征 [J]. 环境科学, 2009,30(3):726-732.
Wu G H, Cao S S, Yu Y Q, et al. Distribution and enrichment of nutrients in superficial sediment in Tianjin typical waters [J]. Environmental Science, 2009,30(3):726-732.
- [37] 陈 芳,夏卓英,宋春雷,等.湖北省若干浅水湖泊沉积物有机质与富营养化的关系 [J]. 水生生物学报, 2007,(4):467-472.
Chen F, Xia Z Y, Song C L, et al. Relationships between organic matter in sediments and internutrient loadings in shallow lakes in Hubei province of China [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2007,(4): 467-472.
- [38] 高泽晋,孟 鑫,张 洪,等.梁子湖沉积物营养盐的空间分布特征及其污染评价 [J]. 环境科学学报, 2016,36(7):2382-2388.
Gao Z J, Meng X, Zhang H, et al. Spatial distribution and pollution evaluation of nutrients in the sediments of Liangzi Lake [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016,36(7):2382-2388.
- [39] 何 军,李福林,陶 良,等.典型内陆湖泊沉积物氮、磷和重金属分布特征及生态风险评价——以武汉市武湖为例 [J]. 中国地质调查, 2022,9(2):110-118.
He J, Li F L, Tao L, et al. Distribution characteristics and ecological risk assessment of nitrogen, phosphorus and heavy metals in sediments of typical inland lakes:A case study of Wuhu lake in Wuhan [J]. Geological Survey of China, 2022,9(2):110-118.
- [40] 袁赛波,赵彬洁,王红丽,等.汤逊湖沉积物营养盐污染特征评价及治理策略 [J]. 长江流域资源与环境, 2022,31(12):2729-2742.
Yuan S B, Zhao B J, Wang H L, et al. Nutrients pollution characteristic assessment and treatment strategy in sediments of Tangxun Lake [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022,31(12):2729-2742.
- [41] 尹 炜,王 超,张 洪.长江流域总磷问题思考 [J]. 人民长江, 2022,53(4):44-52.
Yin W, Wang C, Zhang H. Consideration on total phosphorus problem in Yangtze River Basin [J]. Yangtze River, 2022,53(4):44-52.
- [42] 王晓凤,葛红波.武汉江湖连通的环境影响浅析——以汉阳六湖连通为例[J].绿色科技, 2014,(2):192-195.
Wang X F, Ge H B. Analysis of the environmental impact of Wuhan river-lake connection-Taking six lakes connection in Hanyang as an example [J]. Journal of Green Science and Technology, 2014(2): 192-195.
- [43] 胡元平,刘 力,李 朋,等.武汉市典型湖泊生态地质环境与演化 [M]. 武汉:中国地质大学出版社, 2022.
Hu Y P, Liu L, Li P, et al. Eco-geological environment and evolution of typical lakes in Wuhan [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2022.

- [44] 李星谕,李 朋,苏业旺,等.汤逊湖表层沉积物重金属污染与潜在生态风险评价 [J]. 环境科学, 2022,43(2):859-866.
- Li X Y, L P, Su Y W, et al. Sediments of Tangxun Lake pollution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface [J]. Environmental Science, 2022,43(2):859-866.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] 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 sediments from Lake Taihu Basin assessment of heavy metals in river. [J]. Environmental Science, 2019,40(5):2202-2210.
- [49] Duzgoren-Aydin N S. Sources and characteristics of lead pollution in the urban environment of Guangzhou [J]. Science of the Total Environment, 2007,385(1-3):182-195.
- [50] 唐阵武.长江水系武汉段典型有毒物污染特征及生态风险 [D]. 北京:北京师范大学, 2007.
- Tang Z W. Pollution characteristics and ecological risk of typical toxicants in Wuhan section of the Yangtze River [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2007.

作者简介: 周 峰(1991-),男,湖北武汉人,工程师,硕士,主要从事生态环境地质调查及研究.发表论文 10 余篇.864784261@qq.com.