

罗明科, 田学达, 余 辉, 等. 长江中游湖泊柱状沉积物的垂直污染特征[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(5): 955–962.

LUO Ming-ke, TIAN Xue-da, YU Hui, et al. Vertical pollution characteristics of sediments from lakes in middle reaches of Yangtze River[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(5): 955–962.

长江中游湖泊柱状沉积物的垂直污染特征

罗明科^{1,2}, 田学达¹, 余 辉^{2*}, 杨 超³, 牛 远², 刘 鹏^{1,2}, 牛 勇²

(1.湘潭大学化工学院, 湖南 湘潭 411105; 2.中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 3.环境保护部环境与经济政策研究中心, 北京 100029)

摘 要:为研究长江中游湖泊沉积物污染的变化规律和主要来源,采集了武汉东湖、黄石海口湖、钟祥南湖3个不同类型湖泊的柱状沉积物,研究总有机碳(TOC)、总氮(TN)和重金属(Zn、Cu、Ni、Cr、Pb)的垂直分布特征。结果表明:3个湖泊沉积物TOC、TN含量从底层到表层总体呈增加趋势,30~10 cm增加速度较大,与各湖泊环境演变时间一致,其中TOC含量最大的是黄石海口湖,TN含量最大的是武汉东湖。研究区Zn、Cu、Pb受人为影响较大,Cr主要来自土壤环境,5种金属污染程度为武汉东湖>黄石海口湖>钟祥南湖。主成分分析和相关性分析表明,三个湖泊污染人为贡献率大于自然贡献率,营养盐和重金属Pb是共有的污染问题,重金属的污染来源受多种因素控制。

关键词:柱状沉积物; TOC; TN; 重金属; 相关分析; 主成分分析

中图分类号: X820.3 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2016)05-0955-08 doi:10.11654/jaes.2016.05.020

Vertical pollution characteristics of sediments from lakes in middle reaches of Yangtze River

LUO Ming-ke^{1,2}, TIAN Xue-da¹, YU Hui^{2*}, YANG Chao³, NIU Yuan², LIU Peng^{1,2}, NIU Yong²

(1.College of Chemical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China; 2.State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3.Policy Research Center for Environment and Economy, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100029, China)

Abstract: Sediment vertical pollution characteristics are important for understanding the history of lake pollution. Here sediments from Lake Donghu in Wuhan, Lake Haikou in Huangshi, and Lake Nanhu in Zhongxiang in the middle reaches of the Yangtze River were collected to reveal the variation patterns and the main pollution sources of pollutants. The vertical distributions of total organic carbon(TOC), total nitrogen(TN), and heavy metals(Zn, Cu, Ni, Cr, Pb) were examined. Results showed that: concentrations of TOC and TN increased rapidly from 10 to 30 cm depth of sediment, which was consistent with the environmental changes around the lakes. The maximum value of TOC concentrations appeared in Lake Haikou, while that of TN concentrations occurred in Lake Donghu. Zn, Cu and Pb were mainly influenced by human activities, while Cr was primarily derived from natural sources. The pollution of heavy metals decreased in order of Lake Donghu> Lake Haikou> Lake Nanhu. Correlation analysis and principal component analysis showed that pollution contributed by human activities was greater than that by natural sources in these three lakes. Nutrients and Pb were the common pollutants. Heavy metal pollution in the sediments of these three lakes was affected by multiple factors. These results would provide useful information for controlling lake pollution in this area.

Keywords: core sediment; TOC; TN; heavy metal; correlation analysis; principal component analysis

收稿日期: 2015-10-22

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大项目(2012ZX07101-001)

作者简介: 罗明科(1989—),男,湖南邵阳人,硕士研究生。E-mail: luoke1125@126.com

* 通信作者: 余 辉 E-mail: yuhui@craes.org.cn

长江中下游是我国浅水型湖泊分布最密集的地区,水域面积大于 1 km^2 的湖泊总数超过 650 个,其中大约有 1/3 的湖泊位于中游湖北,此类湖泊多属浅平宽广型,湖底泥沙淤积较厚,平均水深 $1\sim 2 \text{ m}$,是整个长江中下游湖泊群中一个重要组成部分,研究该地区的湖泊对整个长江游流域有重要意义^[1]。

近年来我国水体污染与富营养化问题日益突出,尤其是河流、湖泊等地表水。城市湖泊水环境质量不断下降,部分区域已出现水体黑臭、沉积物大量堆积等现象,导致水体功能严重丧失,给人类的健康、社会的发展带来了长久的危害^[2]。沉积物是湖泊一系列复杂物理、化学、生物过程的产物,能直接反映出湖泊污染的现状及湖泊环境演变的过程^[3-5]。目前,长江流域湖泊的沉积物研究不少,如王玲玲等^[6]通过研究梁子湖沉积物确定了该区域重金属污染种类,王毛兰等^[7]分析了鄱阳湖三江口柱状沉积物的主要污染来源,李辉等^[8]根据滇池柱状沉积物的总氮变化特征得出其历史变化规律。但目前的研究大部分针对单个湖泊,城市湖泊与郊区湖泊环境变化有何关联,湖泊开发种植对湖泊环境具体有何影响,尚待深入研究。有学者研究了长江中游部分湖泊沉积物的营养盐形态特征^[9]和重金属的变化规律^[10],但针对的仅仅是表层沉积物,这对恢复长江流域湖泊古环境研究显然不够,因为除了要掌握近几年环境污染状况外,还必须了解历史演变进程、历史含量丰度等。本文基于这一角度,选取长江中游三个典型的湖泊——武汉市东湖(城市内湖)、黄石市海口湖(种植型湖泊)、钟祥市南湖(郊区型湖泊),通过分析其柱状沉积物的重金属和营养盐垂直变化特征,揭示其环境演变规律和污染来源,以期对长江流域环境保护和时代变化特征提供一定参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2014 年 10 月对武汉东湖、黄石海口湖、钟祥南湖进行了调查,三个湖泊均为浅水型湖泊,淤泥较厚,湖盆平坦,故采样点设在人为影响较少,且能最大程度反映整个湖泊汇水情况的湖中心。武汉东湖是我国第二大城市内湖,由五大湖区构成,周边主要为风景区和居住区,人员流量大,水域面积 32 km^2 ,平均水深约 2 m ,位于长江南岸,由长江淤塞而形成,采样点布在郭郑湖区;黄石海口湖,水域面积为 12.9 km^2 ,平均水深 1.3 m ,位于长江右岸,属沉溺谷经积水而成的滞积湖,周边以农田为主,湖区内被围格开发种植莲藕,采

样船无法达到主湖中心,采样点设在较靠近湖中心处;钟祥南湖为郊区湖泊,水域面积 13.7 km^2 ,平均水深 1.5 m ,毗邻汉江,属于河湖相沉积的泻湖,周边工业较少,湖泊水质清澈,采样点设在湖中心。各湖泊采样点位^[11]如图 1 所示。



图 1 各湖泊采样点位示意图

Figure 1 Sampling sites in three lakes

以 GPS 定位,柱状重力采泥器采样。沉积物柱长不少于 50 cm ,现场以 2 cm 为一层切割,将样品装入聚乙烯封口袋中低温保存,带回实验室冷冻。

1.2 样品处理与分析

柱状沉积物样品先用冷冻干燥机干燥($-50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下, 5 d 以上),待干燥完全选出石块、动植物残体等杂物,经玛瑙研钵研磨处理后,过 100 目尼龙筛,存放于样品袋中待用。

称取 0.3 g 上述样品,加 $\text{HNO}_3\text{-HCl-HF}$ 混酸使用微波消解仪(CEM Mars6)消解^[12],消解完全后采用等离子发射光谱仪 ICP-OES(Optima 8000DV)检测样品中 Cu 、 Zn 、 Pb 、 Cr 、 Ni 的含量,标准样由国家标准物质中心提供;TOC、TN 采用元素分析仪 Organic Elemental Analyzer(FLASH 2000)测定。所用数据为 3 个平行样品均值,相对标准偏差均保持在 10% 以内,分析结果均以沉积物干重计。数据采用 IBM SPSS Statistics 21 与 Origin 8.0 处理,包括数据统计、相关分析(显著 $P<0.05$,极显著 $P<0.01$)、主成分分析。

1.3 营养盐评价

有机指数和有机氮常用来衡量一个水体沉积物环境污染的指标^[13]。计算方法:有机指数=有机碳($\%$) $\times$ 有机氮($\%$);有机氮($\%$)=总氮($\%$) $\times 0.95$ 。水体沉积物有机指数评价标准见表 1。

1.4 重金属污染评价

地累积指数(I_{geo})法是评价沉积物中重金属污染状况常用的方法之一,以相应天然含量或背景值为参比,得到因人为活动所造成的重金属总富集程度^[14]。

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

式中: C_n 为沉积物中重金属的实测值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; B_n 为

表 1 水体沉积物有机指数评价标准

Table 1 Evaluation criterion of organic indexes in sediments				
等级	I	II	III	IV
有机指数	<0.050	0.050~0.20	0.20~0.50	≥0.50
类型	清洁	较清洁	尚清洁	有机污染
有机氮/%	<0.033	0.033~0.066	0.066~0.13	≥0.13
类型	清洁	较清洁	尚清洁	有机氮污染

沉积岩中重金属的环境背景值 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 本研究采用湖北省土壤背景值进行评价(Zn、Cu、Ni、Cr、Pb 分别为 83.6、30.7、37.3、86.0、26.7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

地累积指数所对应的污染级别和程度见表 2。

表 2 地累积指数(I_{geo})与污染级数

Table 2 Index of geo-accumulation and pollution grades							
I_{geo}	≤0	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	>5
级别	0	1	2	3	4	5	6
污染程度	无	无-中	中	中-强	强	强-极强	极强

沉积物中重金属污染具有伴生性或综合性的特点,单个金属污染因子评价往往难以概括整个湖泊沉积物的重金属污染程度。内梅罗指数是一种兼顾结合最大值的计权型多因子环境质量指数,是应用较多的多因子环境质量指数的综合评价方法^[15]。

$$P_i=C_i/S_i;P_N=\sqrt{\frac{P_{i\text{ave}}^2+P_{i\text{max}}^2}{2}}$$

式中: P_i 为单个元素污染指数; C_i 为单个元素实测值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; S_i 为单个元素在该区域的基线值或评价标准值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; P_N 为内梅罗污染指数; $P_{i\text{ave}}$ 为所有元素污染指数的平均值; $P_{i\text{max}}$ 为所有元素污染指数的最大值。

内梅罗污染指数所对应的污染等级和程度见表 3。

2 结果与讨论

2.1 沉积物环境因子垂直分布特征

2.1.1 营养盐分布特征

从柱状底泥 TOC、TN 垂直变化图(图 2)发现,武汉东湖、黄石海口湖和钟祥南湖柱状沉积物的 TOC 含量范围分别为 9.03~41.7、26.1~55.7、7.14~21.9 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值分别为 26.0、38.5、13.6 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$;TN 含量范围分别为 1.49~5.22、1.85~5.41、0.60~2.81 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值分别为 3.34、3.08、1.64 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

武汉东湖、黄石海口湖、钟祥南湖柱状沉积物的 TOC 和 TN,从底层到表层基本呈增加的趋势。一般沉积物表层氧化还原电位较高,所含有机质也较高,表

表 3 内梅罗污染指数

Table 3 Index of Nemerow integrated		
内梅罗污染指数	污染等级	污染程度
$P_N<1.00$	I	无污染
$1.00\leq P_N<2.50$	II	轻污染
$2.50\leq P_N<7.00$	III	中污染
$7.00\leq P_N$	IV	重污染

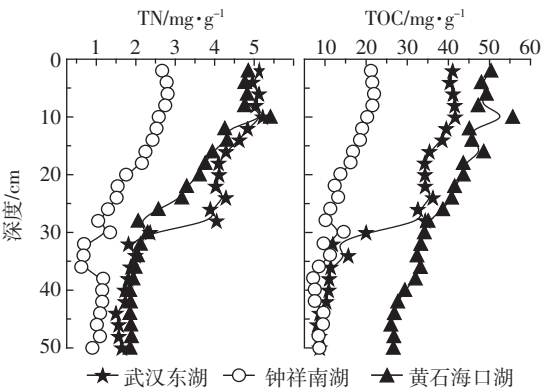


图 2 湖泊柱状沉积物 TOC、TN 含量的垂直变化

Figure 2 Vertical characteristics of TOC and TN in lake sediments

层沉积物中有机质还未完全矿化或还原,被后来的沉积物覆盖并积累,随着深度的增加,氧化还原电位降低,总有机质含量减少;总体上 TOC 和 TN 在 30~10 cm 增加速度较快,50~30、10~0 cm 趋于平缓。由此可得 30 cm 与 10 cm 处各湖泊环境发生较大变化,根据文献[16]提供的武汉东湖在该点位附近的平均沉积速率值 $5.8\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 计算,分别得出变化时间为 1962 年和 1996 年,与武汉东湖周边 20 世纪 60 年代至 90 年代大建钢铁冶炼厂导致环境污染时间点吻合。该结果与刘碧波等^[17]研究结果一致。

2.1.2 重金属分布特征

三个湖泊重金属含量的垂直变化情况如图 3 所示。Zn、Cu 和 Ni 平均含量最大的是武汉东湖,分别为 121、44.7、43.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;Pb 平均含量最大的是黄石海口湖,为 37.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;武汉东湖和钟祥南湖的 Cr 平均含量与背景值基本一致。武汉东湖的 Zn、Cu 和 Pb 从底层到表层总体上呈增加的趋势,三者与深度极显著负相关(表 4, $P<0.01$),其中 Zn 与 Cu 均在 30 cm 附近急剧增加;Ni 总体上为递减,与深度极显著正相关;Cr 变化无明显特征,在背景值附近波动,变异系数为 6.47%,与深度相关性不显著($P>0.05$)。黄石海口湖的 Zn、Cu、Pb 变化趋势及相关性(表 5)与武汉东湖接近,三者均在 30 cm 附近急剧增加;Ni 和 Cr 在均值附近波动,变异系数分别为 4.64%和 7.18%,与深

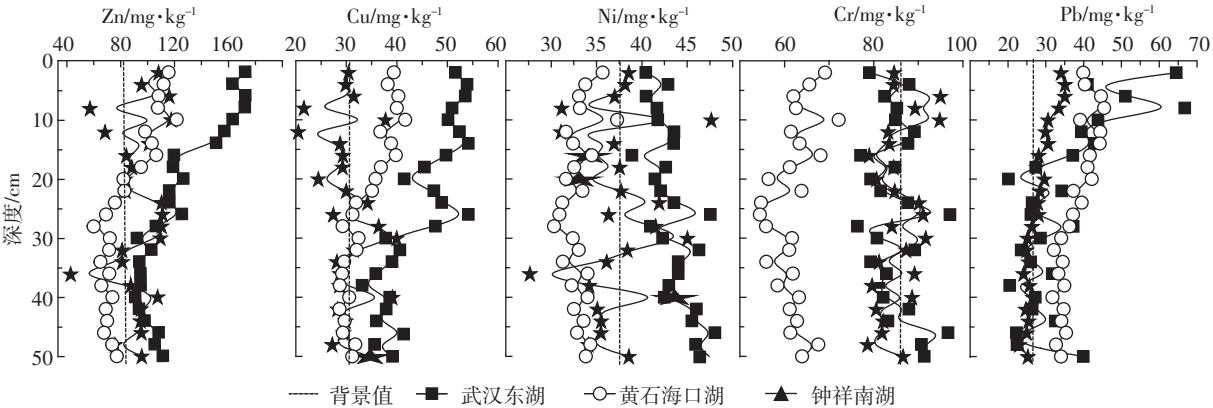


图 3 湖泊重金属含量的垂直变化

Figure 3 Vertical distribution characteristics of heavy metals in lake sediments

表 4 武汉东湖柱状沉积物环境因子相关性矩阵

Table 4 Correlation matrix for pollution factors of WDH sediments

R	TOC	TN	Zn	Cr	Cu	Ni	Pb
深度	-0.941**	-0.949**	-0.870**	0.270	-0.841**	0.691**	-0.671**
TOC		0.995**	0.827**	-0.216	0.900**	-0.654**	0.607**
TN			0.870**	-0.188	0.907**	-0.643**	0.647**
Zn				0.041	0.833**	-0.425*	0.797**
Cr					0.099	0.822**	-0.201
Cu						-0.378	0.612**
Ni							-0.475*

注:* 表示显著性水平为 0.05(显著),** 表示显著性水平为 0.01(极显著),n=25。下同。

表 5 黄石海口湖柱状沉积物环境因子相关性矩阵

Table 5 Correlation matrix for pollution factors of HKH sediments

R	TOC	TN	Zn	Cr	Cu	Ni	Pb
深度	-0.965**	-0.943**	-0.856**	-0.241	-0.878**	-0.159	-0.837**
TOC		0.965**	0.890**	0.329	0.919**	0.277	0.826**
TN			0.957**	0.436	0.959**	0.357	0.858**
Zn				0.642**	0.965**	0.556**	0.760**
Cr					0.552**	0.930**	0.083
Cu						0.447*	0.814**
Ni							-0.055

度相关性不显著。钟祥南湖的 Zn、Cu、Ni 和 Cr 四种金属变化特征不明显, 变异系数分别为 20.4%、15.7%、12.1%和 5.55%;Zn、Cu 和 Ni 均与深度相关性不显著(表6);Cu、Ni 与 Cr 显著正相关;Pb 在 30 cm附近快速增加,6 cm 附近达到最大值,与其他金属相关性均不显著,与深度极显著负相关。

2.2 沉积物污染评价与来源分析

2.2.1 营养盐评价

根据相关性结果(表 4、表 5、表 6),武汉东湖的

表 6 钟祥南湖柱状沉积物环境因子相关性矩阵

Table 6 Correlation matrix for pollution factors of ZNH sediments

R	TOC	TN	Zn	Cr	Cu	Ni	Pb
深度	-0.935**	-0.898**	-0.170	-0.323	0.197	-0.072	-0.908**
TOC		0.946**	0.178	0.341	-0.184	0.087	0.901**
TN			0.205	0.226	-0.232	0.050	0.906**
Zn				0.360	0.647**	0.807**	0.255
Cr					0.453*	0.466*	0.334
Cu						0.864**	-0.197
Ni							0.793

TOC-TN(0.995, $P<0.01$)、黄石海口湖 TOC-TN(0.965, $P<0.01$)和钟祥南湖TOC-TN(0.946, $P<0.01$)均为极显著正相关,说明各湖泊相应的 TOC 与 TN 可能具有同源性。

结合表 1 和图 4 可得,武汉东湖、黄石海口湖柱状沉积物的有机指数范围分别为 0.12~2.07、0.46~2.86,平均值分别为 1.00、1.22。武汉东湖 30 cm 与黄石海口湖 40 cm 以下部分处于等级Ⅲ,尚清洁,30 cm 与 40 cm 以上部分均达到等级Ⅳ,有机污染严重,二者整体上为等级Ⅳ,均属于严重污染范畴。有机氮范围分别为 0.14%~0.50%、0.18%~0.51%,均值分别为 0.32%、0.29%,均超过等级Ⅳ控制线,沉积物氮污染较重,与有机指数结论一致。因武汉东湖为城市内湖,周边生活、娱乐、工业用水的直接排放导致相应污染较重。黄石海口湖在改革开放至 21 世纪初,水草植被覆盖率为 96%^[18],此次现场采样发现,水草植被几乎消失,底泥含有大量植物残体,因沉积物表层新鲜植物残体还没有充分氧化,其所含的营养物质又会被后来的植物所吸收,在这个循环过程中,TOC、TN 含量在各层逐渐累积并快速增加^[19]。

钟祥南湖柱状沉积物的有机指数范围为 0.05~

0.59(图4),均值为0.25。20 cm以下部分处于等级Ⅱ,较清洁,20~10 cm处于等级Ⅲ,尚清洁,总体上处于等级Ⅲ,尚清洁。有机氮范围为0.06%~0.27%,均值0.16%,20 cm以上达到等级Ⅳ,有机氮污染严重,可能是近几十年周边农田过多施氮肥导致。20 cm以下总体处于等级Ⅲ,但32~36 cm出现断层现象,等级为Ⅱ,较清洁,可能原因是20世纪50年代初期钟祥南湖出现超长冰冻期,低温导致底泥中有机污染物被释放^[20]。

2.2.2 重金属评价

地累积指数评价结果见表7。武汉东湖Zn和Cu在0~28 cm与Pb在0~14 cm地累积指数均为1,属于无-中污染水平,Zn、Cu和Pb平均地累积指数均为1,属于无-中污染水平,Ni与Cr地累积指数为0,未

受到污染。黄石海口湖0~20 cm层Pb地累积指数为1,属于无-中污染水平,其他五种金属地累积指数为0,未受到污染。钟祥南湖五种金属地累积指数均为0,污染较少。Ni与Cr在三个湖泊中地累积指数均为0,基本属于无污染状态。在研究区三个湖泊柱状沉积物的Zn、Cu、Ni、Cr和Pb在30~50 cm层地累积指数均为0,表明在该阶段受到各金属污染较少。在研究区内武汉东湖主要污染重金属是Zn、Cu和Pb,黄石海口湖主要污染重金属为Pb,钟祥南湖五种金属污染相对较少。五种重金属污染总程度为武汉东湖>黄石海口湖>钟祥南湖。

由于目前没有制定长江中游湖泊水体沉积物重金属标准,本研究采用湖北省土壤背景值作为评价标准值来计算各湖泊沉积物重金属的内梅罗指数。研究区内武汉东湖、黄石海口湖和钟祥南湖沉积物中重金属内梅罗指数分别为1.37、1.24和1.05,污染等级均达到Ⅱ级,属于轻度污染,重金属污染程度为武汉东湖>黄石海口湖>钟祥南湖,与地累积指数评价结果基本一致。

2.2.3 污染来源分析

沉积物来源因素较复杂,主要分为两大类,一类是人为活动过程中产生的污染物质,包括生活废水、工业污水及农业活动产生的污染物;另一类是自然环境来源,如地壳活动,地表岩石水流侵蚀、风化等^[21-22]。通常利用相对稳定、主要来源于环境的重金属作为参考元素,与目标元素的相关性判别来源是自然因素和人为因素^[23-24]。前人研究表明,Cr在研究区主要来源于自然环境^[25-27],Cu和Zn主要来源于生活垃圾焚烧及工业废水,Pb主要来源于矿物(煤、石油)燃烧及农业化肥、药物^[27-29]。为了探讨沉积物中污染物的可能来源,对三个湖泊的重金属Cu、Zn、Ni、Cr、Pb与TOC、TN、深度采用了相关性和主成分分析^[30-31]。

武汉东湖柱状沉积物的营养盐(TOC和TN)与除Cr以外的重金属均达到极显著相关水平(表4),说明沉积物中TOC和TN污染的同时,可能伴随重金属的污染;Zn、Cu、Pb三者之间极显著正相关性,Cr与Ni极显著正相关性,说明重金属来源具有一定的相似性。主成分分析(表8)表明,第一主成分载荷较大的是TOC、TN、Zn、Cu、Ni、Pb。根据重金属垂直分布情况(图3),Zn、Cu、Ni、Pb总体上从底层到表层为增加的趋势,含量均高于背景值,显然受到人为污染。近几十年来,武汉东湖周边人口的急剧增长,一定程度上造成交通堵塞,汽车尾气使得Pb含量增加,大量生活、

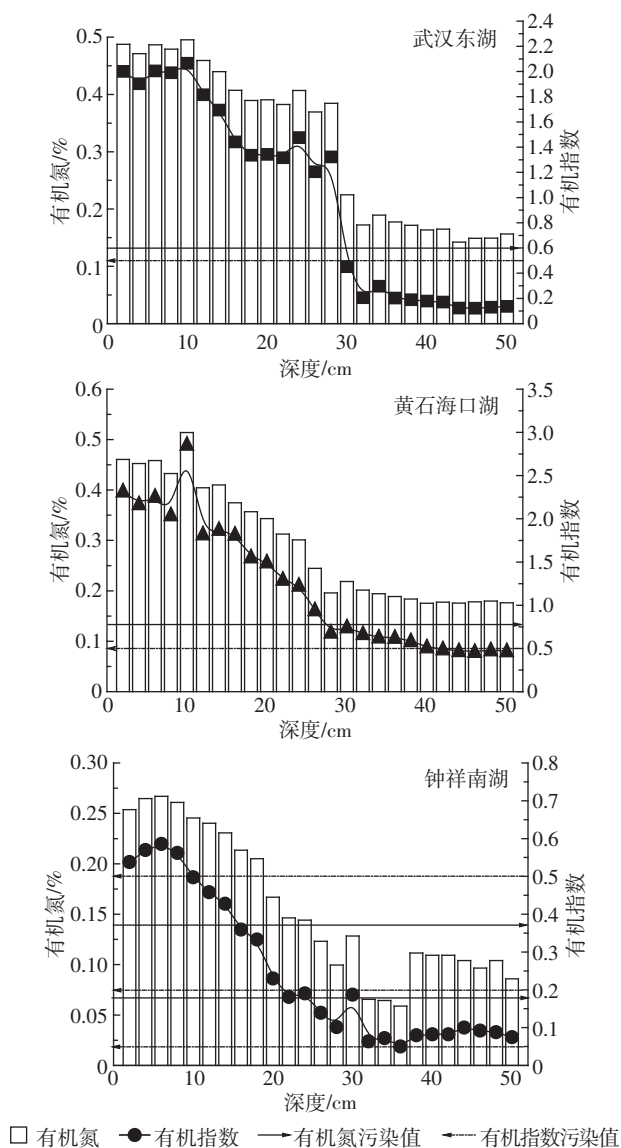


图4 各湖泊沉积物的有机指数和有机氮含量

Figure 4 Organic index and organic nitrogen in lake sediments

表 7 湖泊沉积物重金属地累积污染级数
Table 7 Index of geoaccumulation(I_{geo}) values for metals in lake sediments

深度/ cm	Zn			Cu			Ni			Cr			Pb		
	WDH	HKH	ZNH	WDH	HKH	ZNH	WDH	HKH	ZNH	WDH	HKH	ZNH	WDH	HKH	ZNH
2	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
4	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
6	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
8	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
10	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
12	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
14	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
16	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
18	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
20	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
22	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30~50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

注:WDH 代表武汉东湖, HKH 代表黄石海口湖, ZNH 代表钟祥南湖。

工业废水及垃圾焚烧排放使得 Zn、Cu 增多。第二主成分载荷较大的主要是 Cr 和 Ni。Cr 均值含量与背景值基本一致, 空间上在背景值附近波动, 变异系数 6.47%, 说明其受人为影响较少, 因此 Cr 主要来源于自然环境。Ni 在两主成分中均载荷量较大, 表明其受冶炼^[32]等人为活动影响外, 还受自然环境支配。

黄石海口湖柱状沉积物的 TOC、TN、Zn、Cu、Pb 两两之间极显著正相关(表 5), 表明 TOC、TN 与 Zn、Cu、Pb 可能具有一定的同源性或受某种因子共同控制; Zn-Cu(0.965, $P<0.01$)、Ni-Cr(0.930, $P<0.01$) 均为极显著正相关, 说明他们可能具有同源性。黄石海口湖第一主成分(表 8)主要载荷因子为 TOC、TN、Zn、Cu、Pb, 其中 Zn、Cu、Pb 均在 30 cm 处急剧增加(图 3), Zn、Cu 在 30 cm 以下低于背景值, 有研究^[33]发现莲藕对底泥重金属具有富集浓缩作用, 导致相应金属含量变低。Zn、Cu 和 Pb 在 30 cm 处含量开始急剧增加, 且 20 cm 以上含量均大于背景值, 说明人为污染增加。由于黄石海口湖属于远郊湖泊, 工业污染源相对较少, 周边农田分布较广, 农业生产大量使用的肥料、农药含有 Zn、Cu、Pb 等重金属, 这些重金属随大气沉降、地表径流进入湖泊, 并逐渐累积。第二主载荷较大的为 Cr 和 Ni, 垂直变异系数分别为 7.18%、4.64%, 说明外界影响不大, 来源可能为自然环境, 但二者均低于背景值, 可能与研究区域土壤母质含量低及历史输入量少有关, 具体原因较复杂。

表 8 湖泊柱状沉积物环境因子主成分矩阵

Table 8 Component matrices for pollution factors of lake sediments

项目	武汉东湖		黄石海口湖		钟祥南湖	
	第一主成分	第二主成分	第一主成分	第二主成分	第一主成分	第二主成分
特征值	5.58	1.61	5.84	1.82	4.00	2.78
贡献率	69.7%	20.1%	72.9%	22.8%	50.0%	34.7%
累积贡献率	69.7%	89.8%	72.9%	95.7%	50.0%	84.7%
深度	-0.970	0.009	-0.919	0.305	-0.945	0.191
TOC	0.964	0.046	0.952	-0.203	0.959	-0.179
TN	0.976	0.079	0.987	-0.114	0.938	-0.220
Zn	0.901	0.307	0.983	0.128	0.369	0.783
Cr	-0.277	0.951	0.544	0.816	0.464	0.514
Cu	0.880	0.367	0.983	0.012	-0.036	0.951
Ni	-0.707	0.683	0.457	0.872	0.244	0.923
Pb	0.768	0.043	0.821	-0.480	0.947	-0.168

钟祥南湖柱状沉积物的 TOC-Pb(0.901, $P<0.01$)、TN-Pb(0.906, $P<0.01$) 极显著正相关(表 6), 表明 TOC、TN 与 Pb 具同源性或 Pb 与 TOC、TN 存在络合关系^[34]。Zn、Cu、Ni 三种金属之间极显著正相关, Cu-Cr、Ni-Cr 显著正相关, 说明重金属来源可能相近。第一主成分载荷较大的是 TOC、TN、Pb, 其中 Pb 在 30 cm 处开始增加, 均值 $28.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 大于背景值, 说明人类活动产生 Pb 污染。第二主成分载荷较大的是 Zn、Cu、Ni, 其中 Cu、Ni 含量均值分别为 30.3 、 $37.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 与背景值基本一致。图 3 中 Cu、Ni 在背景值

附近波动,变异系数分别为15.7%、12.1%,说明人为影响相对较小,因此Cu、Ni主要来源于自然环境。第二主成分中Zn载荷相对较大,均值含量略大于背景值 $83.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,变异系数为20.4%,表明Zn除来源于自然环境外,还受到人为活动影响。钟祥南湖西北角为市区,北面至西南角沿江为高速公路,Zn是改善汽车轮胎硬度的添加剂,轮胎磨损过程会产生含Zn粉尘,Pb的累积与交通密集程度有密切关系,周边的农业有机肥料含有Zn、Pb等元素,也可能随着降雨导致沉积物重金属含量增多^[35]。

3 结论

(1)武汉东湖、黄石海口湖和钟祥南湖研究区的柱状沉积物中营养盐总体变化趋势是增加,地域性差异不太显著;TOC含量最大的是黄石海口湖,TN含量最大的是武汉东湖。

(2)各湖泊重金属污染有增加的风险,Zn、Cu、Pb受到人为影响较大,Cr主要来源于自然因素,Ni受环境与人类活动共同影响,5种重金属污染程度为武汉东湖>黄石海口湖>钟祥南湖。

(3)人为影响较大的营养盐及重金属均与深度显著相关,在30 cm与10 cm附近含量出现较大变化;TOC、TN与Pb是三个湖泊共同污染问题;武汉东湖污染可能主要来自工业及生活废水,黄石海口湖污染来源是人工种植,钟祥南湖污染来源是生活与农业废水。

参考文献:

- [1] 张敏. 长江中下游浅水湖泊富营养化机制与重金属污染研究[D]. 武汉:中国科学院水生生物研究所, 2005.
- [2] ZHANG Min. The mechanisms of eutrophication and heavy metal pollution in shallow lakes along the Yangtze River[D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [3] 郭子军, 田学达, 余辉, 等. 微电解-电极生物膜法在污水深度处理中的应用[J]. 环境科学研究, 2015, 28(6): 1001-1007.
- [4] GUO Zi-jun, TIAN Xue-da, YU Hui, et al. Advanced treatment of polluted water using micro-electrolysis biofilm-electrode process[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(6): 1001-1007.
- [5] 薛滨, 姚书春, 夏威岚. 长江中下游典型湖泊近代环境变化研究[J]. 地质学报, 2008, 82(8): 1135-1141.
- [6] XUE Bin, YAO Shu-chun, XIA Wei-lan. Modern environmental changes of typical lakes along the middle and lower reaches of Yangtze River basin[J]. *Acta Geological Sinica*, 2008, 82(8): 1135-1141.
- [7] Lukawska-Matusaewska K, Kielczewska J, Bolalek J. Factors controlling spatial distributions and relationships of carbon, nitrogen, phosphorus and sulphur in sediments of the stratified and eutrophic Gulf of Gdansk[J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 34: 168-180.
- [8] Dennis T, David P, Hamilton C A P. Evaluating the influence of lake morphology, trophic status and diagenesis on geochemical profiles in lake sediments[J]. *Applied Geochemistry*, 2010, 25(5): 621-632.
- [9] 王玲玲, 吴卫菊, 张斌, 等. 梁子湖沉积物中重金属及营养盐分布特征研究[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(6): 197-203.
- [10] WANG Ling-ling, WU Wei-ju, ZHANG Bin, et al. Distribution characteristic of heavy metals and nutrient in sediments of Liangzi Lake[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 38(6): 197-203.
- [11] 王毛兰, 艾永平, 张丁苓. 鄱阳湖三江口柱状沉积物有机氮同位素特征及其环境指示意义[J]. 中国环境科学, 2015, 35(2): 558-564.
- [12] WANG Mao-lan, AI Yong-ping, ZHANG Ding-ling. Stable organic nitrogen isotope in core sediments of the Three Rivers Estuary, Poyang Lake and its environmental implications[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(2): 558-564.
- [13] 李辉. 滇池柱状沉积物中氮赋存形态及其分布特征研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012.
- [14] LI Hui. Nitrogen forms and distribution in the sediment cores of Dianchi Lake[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2012.
- [15] 王圣瑞, 焦立新, 金相灿, 等. 长江中下游浅水湖泊沉积物总氮、可交换态氮与固定态氮的赋存特征[J]. 环境科学学报, 2008, 28(1): 37-43.
- [16] WANG Shen-rui, JIAO Li-xin, JIN Xiang-can, et al. Distribution of total exchangeable and fixed nitrogen in the sediments from shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(1): 37-43.
- [17] 李德亮, 张婷, 余建波. 长江中游典型湖泊重金属分布及其风险评估: 以大通湖为例[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(Z1): 183-189.
- [18] LI De-liang, ZHANG Ting, YU Jian-bo. Distribution and risk evolution of heavy metals in typical lakes in middle reaches of the Yangtze River: Taking the Datong Lake for example[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, 19(Z1): 183-189.
- [19] 朱志龙, 周梦雷, 柯航. 湖北省城中湖泊调查分析[J]. 人民长江, 2013, 44(1): 155-157.
- [20] ZHU Zhi-long, ZHOU Meng-lei, KE Hang. Investigation of urban lakes in Hubei Province[J]. *Yangtze River*, 2013, 44(1): 155-157.
- [21] 王毛兰, 赖劲虎, 倪妍, 等. 微波消解-CFAAS测定浅水湖泊底泥中重金属元素[J]. 分析实验室, 2012, 31(2): 51-54.
- [22] WANG Mao-lan, LAI Jin-hu, NI Yan, et al. A microwave digestion method for determination of heavy metals in shallow lake sediments by graphite furnace atomic absorption spectrometry[J]. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 2012, 31(2): 51-54.
- [23] 隋桂荣. 太湖表层沉积物中OM、TN、TP的现状与评价[J]. 湖泊科学, 1996, 8(4): 319-324.
- [24] SUI Gui-rong. Statement and evaluation of organic matter, total nitrogen and total phosphate in surface layer sediments in Taihu Lake[J]. *Journal of Lake Science*, 1996, 8(4): 319-324.
- [25] Muller G. Index of geo-accumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geo Journal*, 1969, 2(3): 108-118.
- [26] 李晓燕, 陈同斌, 雷梅, 等. 不同土地利用方式下北京城区土壤的重金属累积特征[J]. 环境科学学报, 2010, 30(11): 2285-2293.
- [27] LI Xiao-yan, CHEN Tong-bing, LEI Mei, et al. Accumulation of heavy metals in urban soils under different land uses in Beijing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(11): 2285-2293.
- [28] 杨洪, 易朝路, 邢阳平, 等. ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 法对比研究武汉东湖现代沉积速率[J]. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2004, 38(1): 109-

113.
YANG Hong, YI Chao-lu, XING Yang-ping, et al. A comparative study on recent sedimentation rates in Lake Donghu, Wuhan with ^{210}Pb and ^{137}Cs dating techniques[J]. *Journal of Central China Normal University(Nat Sci)*, 2004, 38(1):109-113.
- [17] 刘碧波, 丰民义, 刘剑彤. 东湖典型区域沉积物总氮的空间分布和季节变化[C]. 武汉: 环境污染与大众健康学术会议, 2011:1063-1065.
LIU Bi-bo, FENG Min-yi, LIU Jian-tong. Vertical distribution and seasonal variation of nitrogen in sediment pore water of typical area in East Lake[C]. Wuhan: Conference on Environmental Pollution and Public Health, 2011:1063-1065.
- [18] 简永兴, 王建波, 何国庆, 等. 湖北省海口湖、太白湖与武山水生植物多样性的较研究[J]. 生态学报, 2001, 21(11):1815-1824.
JIAN Yong-Xing, WANG Jian-Bo, HE Guo-Qing, et al. A comparative study of aquatic plant diversity of Haikou, Taibai and Wushan Lake in Hubei Province of China[J]. *Acta Ecological Sinica*, 2001, 21(11):1815-1824.
- [19] 秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探[J]. 湖泊科学, 2002, 14(3):193-201.
QIN Bo-qiang. Approaches to mechanisms and control of eutrophication of shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangze River[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2002, 14(3):193-201.
- [20] 李剑超, 朱光灿, 刘伟生, 等. 沉积时间和温度对底泥间隙水有机污染物的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(4):723-726.
LI Jian-chao, ZHU Guang-can, LIU Wei-sheng, et al. Effect of formation time and environmental temperature on organic contaminant in pore water of bottom sediment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(4):723-726.
- [21] 刘伟, 陈振楼, 许世远, 等. 上海市小城镇河流沉积物重金属污染特征研究[J]. 环境科学, 2000, 27(3):535-543.
LIU Wei, CHEN Zhen-lou, XU Shi-yuan, et al. Pollution character of heavy metals in river sediments from small towns, Shanghai[J]. *Environmental Science*, 2000, 27(3):535-543.
- [22] Spencer K J, De Carlo E H, McMurtry G M. Isotopic clues to source natural and anthropogenic lead in sediments and soils from O'ahu Hawai'i[J]. *Pacific Science*, 1995, 49(4):492-510.
- [23] Tkalin A V, Presley B J, Boothe P N. Spatial and temporal variations of trace metals in bottom sediments of Peter the Great Bay, the Sea of Japan[J]. *Environ Pollution*, 1996, 92(1):73-78.
- [24] 李建芬, 王福, 商志文, 等. 天津市潮间带柱状沉积物中重金属的污染历史及来源判别[J]. 地质调查与研究, 2012, 33(1):55-62.
LI Jian-fen, WANG Fu, SHANG Zhi-wen, et al. Pollution history and source discrimination for the heavy metals in core sediments of Tianjin intertidal zone[J]. *Ecological Survey and Research*, 2012, 33(1):55-62.
- [25] 于瑞莲, 张伟芳, 胡恭任, 等. 晋江河口沉积物重金属污染历史与来源[J]. 环境科学研究, 2015, 28(6):907-914.
YU Rui-lian, ZHANG Wei-fang, HU Gong-ren, et al. Pollution history and source analysis of heavy metals in sediments from Jinjiang River estuary[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(6):907-914.
- [26] 魏荣菲, 庄舜尧, 杨浩, 等. 苏州河网区河道沉积物重金属的污染特征[J]. 湖泊科学, 2010, 22(4):527-537.
WEI Rong-fei, ZHUANG Shun-yao, YANG Hao, et al. Pollution characteristics of heavy metals in sediments from the river network of Suzhou City[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(4):527-537.
- [27] 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.
QIAO Sheng-ying, JIANG Jing-ye, XIANG Wu, et al. Distribution of heavy metals in sediments in lakes in Wuhan with assessment on their potential ecological risk[J]. *Resources and Environments in the Yangtze Basin*, 2005, 14(3):353-357.
- [28] 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.
TANG Zhen-wu, CHENG Jia-li, YUE Yong, et al. Accumulations and risks of heavy metals in the sediments from 8 typical lakes in Wuhan, China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, 21(1):61-68.
- [29] 杜臣昌, 刘恩峰, 羊向东, 等. 巢湖沉积物重金属富集特征与人为污染评价[J]. 湖泊科学, 2012, 24(1):59-66.
DU Chen-chang, LIU En-feng, YANG Xiang-dong, et al. Characteristics of enrichment and evaluation of anthropogenic pollution of heavy metals in the sediments of Lake Chaohu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, 24(1):59-66.
- [30] 马立杰, 崔迎春, 王海荣. 运用因子分析评价山东黑泥湾沉积物重金属污染来源[J]. 海洋地质前沿, 2012, 28(4):57-61.
MA Li-jie, CUI Ying-chun, WANG Hai-rong. Source of heavy metal contamination in Heini Bay sediments: A case study using factor analysis[J]. *Marine Geology Frontier*, 2012, 28(4):57-61.
- [31] Elisangela A P, Jefferson C A, Izaia S S, et al. Assessment of trace metals contamination in estuarine sediments using a sequential extraction technique and principal component analysis[J]. *Microchemical Journal*, 2010, 96(1):50-57.
- [32] 王金瑾, 鲍建国, 李立青. 东湖沉积物重金属来源与人类活动相关性分析[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(4):84-90.
WANG Jin-jin, BAO Jian-guo, LI Li-qing. Sources of heavy metal pollution in sediments of Lake Donghu and their relationship with anthropogenic activities[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33(4):84-90.
- [33] 胡文勇, 马陶武, 易浪波, 等. 受污藕塘中莲藕对重金属的生物富集特征[J]. 贵州农业科学, 2010, 38(3):229-231.
HU Wen-yong, MA Tao-wu, YI Lang-bo, et al. Biological enrichment characteristics of heavy metals in lotus root in polluted lotus ponds[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2010, 38(3):229-231.
- [34] 石陶然, 张远, 于涛, 等. 滇池沉积物不同分子量溶解性有机质分布及其与Cu和Pb的相互作用[J]. 环境科学研究, 2013, 26(2):137-144.
SHI Tao-ran, ZHANG Yuan, YU Tao, et al. Distribution of different molecular weight fractions of dissolved organic matters and their complexation with Cu and Pb in the sediment from Dianchi Lake, China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, 26(2):137-144.
- [35] 戴彬, 吕建树, 战金成, 等. 山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2015, 36(2):507-515.
DAI Bin, LÜ Jian-shu, ZHAN Jin-cheng, et al. Assessment of sources, spatial distribution and ecological risk of heavy metals in soils in a typical industry-based city of Shandong Province, Eastern China[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(2):507-515.