

洪湖沉积柱中重金属的历史分布特征及来源

郑煌¹, 杨丹^{2*}, 邢新丽^{1,3}, 张泽洲³, 舒全来¹ (1.中国地质大学(武汉)环境学院,湖北 武汉 430074; 2.中国地质大学(武汉)工程学院,湖北 武汉 430074; 3.中国地质大学(武汉),生物地质与环境地质国家重点实验室,湖北 武汉 430074)

摘要: 为了解历史上洪湖重金属的含量水平及来源,于2014年12月在洪湖中心位置采集了沉积柱,分析了沉积柱中4种重金属(Cu、Cd、Zn、Pb)的含量,并结合¹³⁷Cs和²¹⁰Pb定年技术得到沉积物中重金属高分辨率年代沉积序列。结果表明:洪湖沉积柱中4种重金属总量介于67.86~189.57mg/kg之间,4种重金属含量的高低为Pb>Zn>Cu>Cd。地累计指数表明Cu和Zn未达到污染级别,而Pb为无污染到中度污染级别,Cd为中度污染到强污染级别。沉积物中重金属含量受洪水和围湖造田的共同影响,新滩水闸建成前,洪水会导致沉积物中重金属含量先降低,随后升高。水闸建成后,洪水会导致洪湖出现内涝致使沉积物中重金属含量升高;围湖造田导致沉积物中重金属含量升高。源解析研究表明,沉积物重金属来源于非点源农业污染、交通活动以及工业废水和生活废水排放。

关键词: 洪湖; 沉积柱; 重金属; 定年; 污染历史; 源解析

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2016)07-2139-07

Historical records, distribution characteristics and sources of heavy metals from sediment core in Honghu Lake, China. ZHENG Huang¹, YANG Dan^{2*}, XING Xin-li^{1,3}, ZHANG Ze-zhou³, SHU Quan-lai¹ (1.School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2.Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3.State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology China University of Geosciences, Wuhan 430074, China). *China Environmental Science*, 2016,36(7): 2139~2145

Abstract: In order to understand the historical level of heavy metals concentrations of Honghu Lake, a sediment core was collected in December 2014. The concentrations of 4 heavy metals (Cu, Cd, Zn, Pb) were determined and the chronology was dated by ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb. The total concentrations of 4 heavy metals ranged from 67.86mg/kg to 189.57mg/kg and the concentrations of individual heavy metals ranked as Pb>Zn>Cu>Cd. The geoaccumulation index indicated that the concentrations of Cu and Zn were uncontaminated, while level of Pb was uncontaminated to moderately contaminated and Cd was moderately contaminated to strongly contaminated. The concentrations of heavy metals in sediments were affected by the flood events and reclamations. Before the construction of Xintan sluice, the tendency of heavy metal concentrations caused by floods decreased at first, then increased. However, the concentrations increased due to the waterlogging caused by floods after the sluice's built. Reclamations contributed to increasing of heavy metals concentrations in sediments. Source diagnosis results suggested that heavy metals in sediment were from non-point agriculture source, transportation activities and industrial and domestic wastewater.

Key words: Honghu Lake; sediments core; heavy metal; chorology; pollution history; source analysis

重金属毒性大、难降解,对生态系统的潜在危害极大^[1-2],因而受到广泛关注。湖泊沉积物作为重金属的汇,记录了重金属的环境行为以及污染历史等信息^[3]。沉积物中重金属来源于人类活动以及自然风化、侵蚀等作用,沉积物中重金属含量的高低受粒径、盐度、氧化还原电位等因素的影响。此外,湖泊水文条件的变化也会影响重金

属的运移及沉降过程^[4],进而影响沉积柱中重金属的垂直分布。

洪湖位于湖北省中南部,形成于长江与东荆

收稿日期: 2015-12-02

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41503103);湖北省自然科学基金面上项目(2014CFB895)

* 责任作者, 讲师, yangdan322@139.com

河之间的长条形洼地带上,为典型的河间洼地湖.历史上洪湖是与长江连通的,后因3次大规模的围垦造田使得洪湖面积迅速缩小,同时入湖泥沙量也减少了,特别是1955年在新滩口建闸以后,洪湖由一个吞吐湖变成了半封闭型湖^[5],洪湖与长江的水体交换仅发生在洪水年份.大规模围垦和频发的洪水事件使得洪湖的水文条件、生态环境发生改变,从而影响到洪湖沉积物的性质.

目前针对海洋、湖泊表层沉积物中重金属的含量、形态、分布、生态风险评价的研究很多^[6-7],针对湖泊沉积柱中重金属的垂直分布特征的研究也有报道,但对于水文条件发生重大变化的湖泊沉积柱中重金属研究的报道却不多.除湖泊水文条件发生变化外,洪湖地区作为重要的工农业和水产养殖基地,近年来,强烈的农业活动和工业活动所排放的重金属也会对洪湖湖泊环境产生重要影响.因此,本研究采用¹³⁷Cs和²¹⁰Pb定年法分析了洪湖沉积柱中重金属的污染历史,讨论了洪水和围湖造田对沉积物中重金属含量的影响,同时采用多元统计的方法对洪湖沉积物中重金属进行源解析,以期对洪湖环境污染综合治理提供基础资料.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

洪湖呈多边几何形,湖岸平直,湖底平坦,东西长23.4km,南北宽20.8km,面积355km²,平均水深1.35m,最大水深2.3m,最低水深0.4m,为湖北省最大的淡水湖泊.洪湖地区属于亚热带湿润季风气候,年均降水量为1061~1331mm,年均气温为19℃.

1.2 样品采集与处理

2014年12月在洪湖较为稳定的中部区域(N29°51'10.7",E113°18'52.7"),用重力采样器(直径10cm)采集无扰动的柱状沉积物样品,取样深度为37cm,采样点水深2.2m.沉积柱采集后每隔1cm切片分样,装入洁净的聚乙烯密实袋内,尽快运回实验室低温(4℃)保存.样品冷冻干燥后,用玻璃棒剔除动植物残体等杂质,经玛瑙研钵研磨

后过100目尼龙筛,储于聚乙烯密实袋内备用.

1.3 样品测试

重金属含量测定:取0.5g(精确到0.001g)经均一化的沉积物样品,采用HNO₃-HF-HClO₄(体积比为5:2:2)高温密闭消解体系,在180℃下消解5h,冷却后赶酸,后用5%稀HNO₃定容到50mL.检测仪器为原子吸收光谱(AA400,PerkinElmer).实验中采取平行样和空白样品进行质量控制与保证,每10个样品重复一个平行样,共计4个平行样(测量误差小于5%).沉积物pH值,有机质(OM)和总磷(TP)的测定参照文献^[8].

¹³⁷Cs和²¹⁰Pb活度测定:采用EG&G Ortec公司生产高纯锗低本底γ谱分析系统,标准源及活度标定由中国原子能研究院提供.样品密封于样品瓶3周,使其达到放射性平衡,然后分别用46.5keV和661.6keV的γ能谱测量²¹⁰Pb和¹³⁷Cs的比活度,测量误差小于5%.年代测定由中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊沉积与环境重点实验室完成.

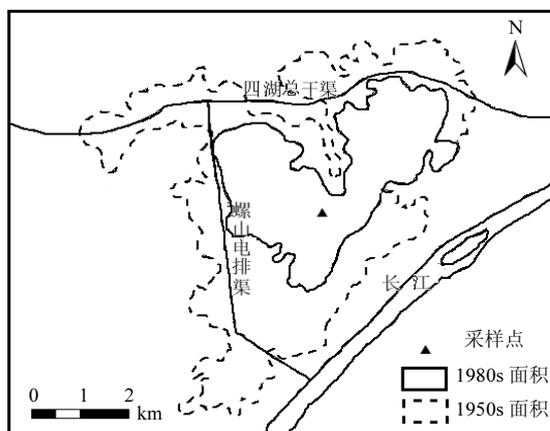


图1 洪湖沉积柱采样点示意

Fig.1 Sampling site of sediment core in Honghu Lake

1.4 数据处理

测试结果,重金属的垂直分布,¹³⁷Cs及²¹⁰Pb的定年采用Excel2013进行分析并绘图;重金属之间的Person相关系数检验(双尾检验)、因子分析采用SPSS19.0;采样点示意图采用ARC GIS10.2绘制.

2 结果与讨论

2.1 沉积物的定年及沉积速率

^{137}Cs 和 ^{210}Pb 法常用于沉积物的定年,前者基于不同时间段内核试验或者核泄漏向大气中抛射 ^{137}Cs 会在沉积柱芯中形成蓄积峰,适用于 1954 年之后的年代推断^[9].而后者定年基于 U 系元素的衰变以及各种模型,且只适用于百年之内^[10].本研究中,2011 年日本福岛核电站泄露事件对于海洋沉积物中 ^{137}Cs 的蓄积影响更大,而对于本研究的影响较小^[11],因此忽略该时标年.图 2 为洪湖沉积柱中 ^{137}Cs 和 ^{210}Pb 定年结果及平均沉积速率.由图 2 可知, ^{137}Cs 时标中,1954 年、1963 年以及 1975 年与 ^{210}Pb 恒定初始浓度模式(CIC)定年结果一致,但 1986 年时标偏差较大.因此本文中 1954 年之后采用 ^{137}Cs 确定年份,1954 年之前采用 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (CIC)定年,本研究中将最上层(1cm)定为 2012 年,最深处(37cm)定为 1935 年.

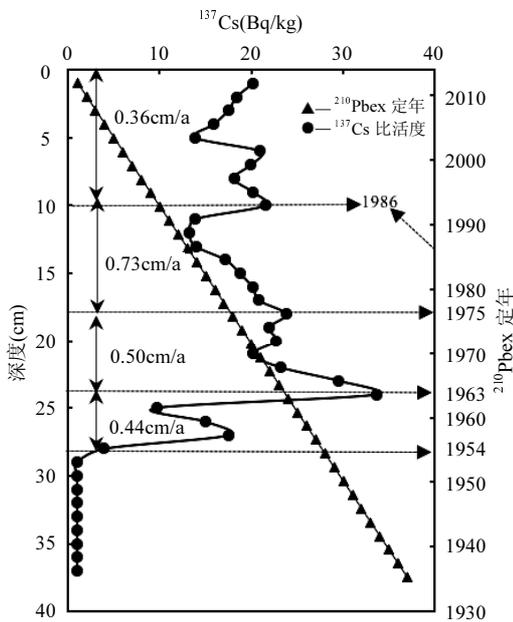


图 2 洪湖沉积柱芯中 ^{210}Pb 与 ^{137}Cs 定年结果及沉降速率
Fig.2 Dating results of ^{210}Pb , ^{137}Cs and sedimentation rate in sediments core of Honghu Lake

从图 2 可以看出, ^{137}Cs 蓄积最先出现在 28cm 处,后于 24cm 出现最大蓄积峰,之后呈现递减趋势,但在 18cm 和 10cm 处分别又出现两

个小的蓄积峰.依据核试验的强度可以判断出沉积柱芯中 ^{137}Cs 蓄积峰所对应的年代^[12].依据 ^{137}Cs 各时标所在层位深度可推算出一段时间内的平均沉积速率,如图 2 所示.过去近 60 年中,洪湖沉积速率经历了一个由慢到快再到慢的过程.可能的原因是 20 世纪 50 年代之前,洪湖水文条件较为稳定,沉积速率较低.50 年代到 80 年代间的 3 次大规模的围垦活动,致使洪湖面积大面积萎缩^[13],围湖造田导致湖区周围水土流失,大量的侵蚀物质被带入湖中,从而导致沉积速率上升;当物质转移趋于稳定时,进入湖中的侵蚀物质数量趋于稳定,沉积速率逐渐降低并趋于稳定^[14].

2.2 重金属垂直分布特征

2.2.1 含量分布 沉积柱中重金属的含量如表 1 所示.沉积柱中重金属的总量介于 67.86~189.57mg/kg 之间,4 种重金属的平均含量大小依次为: $\text{Pb} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Cd}$,变异系数大小依次为: $\text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cd} > \text{Cu}$.对比湖北省土壤背景值^[15],沉积物中 Cu 和 Zn 除极少数层位超过背景值外,其余层位均低于背景值;Pb 的含量在大多数层位中高于背景值,而 Cd 在所有层位中均超过背景值,由此判读出洪湖地区历史上存重金属污染.为进一步判断洪湖沉积柱中重金属的污染程度,采用地累积指数(I_{geo})进行判断^[16].

$$I_{\text{geo}} = \log_2(C_n/k \times B_n)$$

式中: C_n 为在沉积物中的元素 n 的实测浓度; B_n 为土壤中该元素的地球化学背景值; k 为母岩差异所引起背景值的变动而取的系数. B_n 采用湖北省土壤背景值数据,考虑到造岩运动引起的背景值变动, k 取 1.5,计算结果见表 2.该方法将土壤污染污分为 5 类:无/轻微污染($I_{\text{geo}} \leq 0$),中度污染($0 < I_{\text{geo}} < 1$),中度/强污染($1 < I_{\text{geo}} < 3$),强污染($3 < I_{\text{geo}} < 5$),极强污染($5 < I_{\text{geo}}$).依据地累积指数分级标准判断出洪湖沉积柱中,Cu 和 Zn 未达到污染级别,而 Pb 为无污染到中度污染级别,Cd 为中度污染到强污染级别.这一结果与前人报道结果吻合^[17],说明 Cd 是我国淡水湖泊中污染特征最为明显的重金属,而其他重金属污染水平较低.相比于其他地区,洪湖沉积物中 Cd 的含量要高于

巢湖(0.42~1.06mg/kg)^[18],但低于九龙江表层沉积物中的最高值(8.67mg/kg)^[19].

表1 洪湖沉积柱中重金属含量及地累积指数

Table 1 Heavy metal concentrations and index of geoaccumulation in sediment core of Honghu Lake

参数	Cu	Cd	Pb	Zn	总量	
背景值*(mg/kg)	30.7	0.17	26.7	83.6	141.17	
含量	平均值(mg/kg)	19.62	4.01	64.26	50.04	137.93
	变异系数	25.70	27.60	28.93	38.92	18.88
	变化范围(mg/kg)	10.42~30.68	1.09~5.82	20.86~91.24	15.38~96.53	67.86~189.57
I_{geo}	平均值	-1.28	3.89	0.60	-1.45	-0.06
	变化范围	<0	2.09~4.51	<0~1.19	<0	<0~-0.43

注:*为湖北省土壤背景值,摘自《中国土壤元素背景值》。

2.2.2 各重金属含量的垂直分布特征 湖泊湿地沉积物重金属元素含量的垂向分布可看作各元素的沉积记录,就岩芯整体元素含量变化情况而言,在不同阶段具有不同的地球化学行为^[20].沉积柱中各重金属的垂直分布如图3所示,结合¹³⁷Cs和²¹⁰Pb_{ex}的定年结果,可将沉积柱芯中重金属的垂直变化分为4段,大致了解湖泊重金属的污染状况.

第1段:37~28/29cm(1935~1952/1954年)这一阶段中,Zn含量增长趋势显著,由1935年的19.02mg/kg增加到1954年的70.87mg/kg,增加了近4倍;Cu含量也由14.74mg/kg增加到23.31mg/kg;Cd的含量由4.03增加到5.49mg/kg后下降至4.48mg/kg;Pb的含量变化趋与前3种重金属元素相反,由91.24mg/kg逐渐下降到74.60mg/kg.第2段:28~20cm(1954~1971年),4种重金属含量均呈现下降趋势.Cu、Cd、Pb、Zn的含量分别下降了30.50%、21.31%、27.28%、41.43%,其中以Pb含量降低幅度最大.第3段:20~9cm(1971~1995年),这一阶段中4种重金属含量均在1980出现峰值.之后Cu和Cd呈现先下降再上升的趋势,Pb和Zn的含量分别逐渐下降至1992年的40.36,27.86mg/kg后快速上升到1994年的58.76,82.14mg/kg.第4段:9~0cm(1995~2012年),该段中,4种重金属含量均在1998年附近出现迅速降低后升高的现象,其原因可能为1998年长江流域发生的特大洪水,洪水水量和重金属含量均增加,但重金属含量的增加不及水量增加对湖底沉积物的冲刷稀释作用,从而影响了水体和沉积

物间物质含量分配过程,使得表层沉积物中重金属元素从沉积物向水体迁移形成沉积物中含量降低现象^[21].之后Cu与Zn的含量逐渐上升;Cd和Pb的含量上升后又逐步下降.

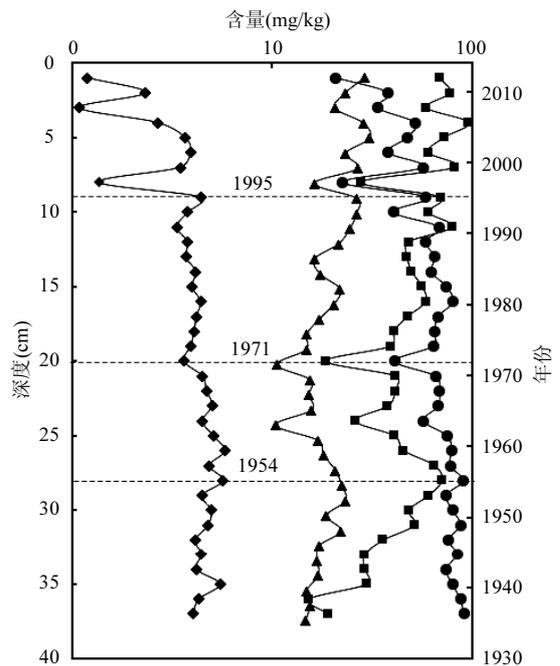


图3 沉积柱中各重金属含量垂直分布

Fig.3 Individual heavy metal concentrations in different depths in sediment core of Honghu Lake
—◆—Cd —●—Pb —■—Zn —▲—Cu

总体来说,洪湖沉积柱中Cu和Zn的含量由底部向上呈升高趋势,Cd和Pb的含量呈下降趋势,而重金属总量呈下降趋势.明显区别于其他地

区沉积柱中重金属含量至底部向上增长的趋势^[22-23],其可能的原因将在下一节进行讨论。

2.2.3 重金属总量与洪水、围垦造田的关系
 洪湖地区历史上多次受长江洪水的影响,20 世纪上半叶,发生大洪水的年份集中在 1935 年、1936 年、1945 年、1949 年。1954 年发生的特大洪水给洪湖地区带来巨大水灾,为了减轻水患,1949 年后大兴水利,修筑了洪湖隔堤,挖通四湖总干渠,建成新滩闸,为治水做出了积极贡献。1959 年洪湖与长江隔开成为阻隔湖后,原来积水的大片洼地裸露,给大规模围湖造田创造了条件。从 1955~1982 年的 28 年中,洪湖历经 3 个围垦高潮(1957~1962 年,1963~1971 年,1971~1976 年),总共被围垦掉 366.5km²^[24]。20 世纪下半叶,受洪水和暴雨的影响,在 1954、1969、1975、1977、1980 和 1983、1998 年又发生涝灾^[25]。洪水与围湖造田的共同作用改变了其水文条件,使洪湖沉积柱中重金属总量的变化区别于其他湖泊,呈现复杂的变化趋势^[26-27]。

如图 4 所示,在 1935~1954 年,洪水发生后,沉积物中重金属总量呈递减趋势,之后呈上升趋势。可能的原因是大量的洪水对沉积物中重金属进行了稀释^[21,28],且洪水带来的粗颗粒物中含有较少的重金属沉积在湖泊底部,导致该层沉积物中重金属含量降低;然而沉积物中重金属含量呈上升趋势可能与洪水发生后含有较多重金属的细颗粒物沉降速度较慢有关^[29]。新滩水闸建成后,洪湖与长江之间的水体交换被隔绝。在发生洪水年份,洪湖易发生内涝,一方面是由于长江水位高于洪湖水位,洪湖水不能向长江排放,另一方面,洪湖上游来水不断的向洪湖汇聚,溶解于上游来水的重金属汇聚在洪湖,被颗粒物、有机物所吸附,最终沉积到湖泊底部。

从图 4 可以看出,在 20 世纪 50 年代初开始的围湖造田致使沉积物中的重金属含量升高直至 1954 年,之后由于 1954 年长江流域的特大洪水作用而导致沉积物中重金属含量降低。1961 年至 1972 年间,共计有 215km² 的湖面被围垦,且 1964 年和 1969 年洪湖地区遭受洪水。研究表明洪湖地区的围湖造田会导致水体中重金属含量

的升高^[24],进入水体的重金属在水流缓慢条件下会富集到沉淀物中,在一定条件下,受到洪水的扰动,重金属会再次进入水体造成沉淀物中含量降低,水体中含量升高的现象^[30]。1972~1978 年,又有 73km² 湖面被围垦,此时间段内沉积物中的重金属含量升高,可能的原因除了与围湖造田重金属输入通量的变化,还可能与农业活动、水产养殖、工业发展所导致的重金属排放有关^[31]。

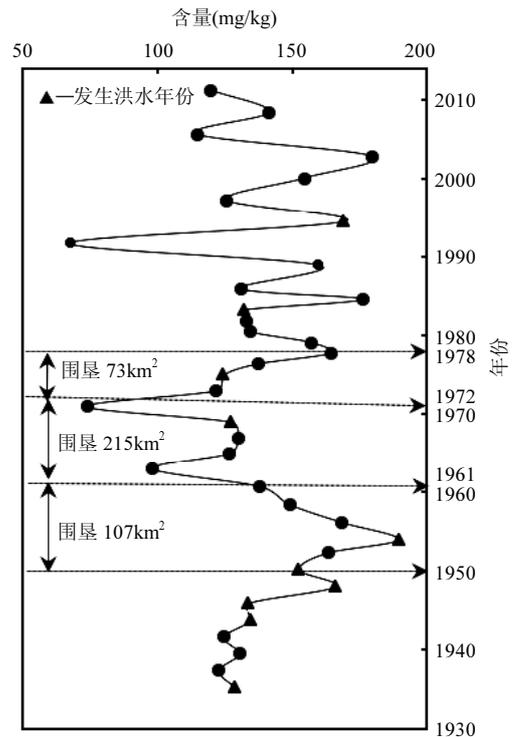


图 4 洪湖沉积柱中重金属含量随时间的变化趋势
 Fig.4 Relation between heavy metal concentrations and time sequence in sediment core of Honghu Lake

2.3 重金属源解析

2.3.1 相关性分析 通过对各元素含量进行相关性分析,可了解各元素之间随深度变化趋势的相似性,能在一定程度上说明元素的来源是否一致,是否受到人为输入的干扰^[22]。由表 2 可见,沉积物中 Cu 与 Zn 之间呈显著性的正相关,说明在洪湖沉积柱中 Cu 与 Zn 的地球化学相似,此外,TP 与 Cu, Zn 呈现显著性正相关,说明三者具有相同的来源。Cd 与 Pb 呈显著性正相关,说明 Cd 与 Pb 具有相同的来源。

2.3.2 因子分析 通过对洪湖沉积柱中重金属含量进行因子分析,可对重金属的来源作进一步分析.采用 SPSS(19.0)做因子分析,KMO 统计量为 0.612,Bartlett 球型检验相伴概率为 0.000,低于显著性水平 0.05,表明各重金属间相关性较强,可以做因子分析.采用主成分提取特征值大于 1 的因子并结合具有 Kaiser 标准化的正交旋转法.旋转后的因子 1 和因子 2 分别占据总方差的 42.50%、36.32%,累计占有率为 78.82%(表 3).Cd 和 Pb 在因子 1 上的载荷较大,分别为 0.895、0.952. Cu 和 Zn、TP 在因子 2 上的载荷较大,分别为 0.937、0.950、0.545.

表 2 重金属元素之间 Person 相关矩阵

Table 2 Matrix of Person correlation among the heavy metals

参数	Cd	Pb	Zn	pH 值	OM	TP
Cu	-0.322	-0.316	0.875**	-0.047	0.214	0.673**
Cd		0.802**	-0.268	0.254	-0.208	-0.710**
Pb			-0.282	0.468**	-0.512**	-0.715**
Zn				-0.273	0.398*	0.584**
pH 值					-0.791**	0.317
OM						0.370*

注:**. 在 0.01 水平(双侧)上显著相关;*. 在 0.05 水平(双侧)上显著相关.

洪湖所处的江汉平原,作为我国粮食生产的重要基地,在农作物的种植过程中大量使用地膜、化肥、农药等农用物质.研究表明,在农用地膜的生产过程中加入了含有 Cd、Pb 的热稳定剂,大面积使用会增加土壤重金属污染.此外,磷肥和有机肥的大量使用也是土壤重金属(Cu、Cr、Cd 等)污染的重要原因.此外,有些农药在组成中含有 Hg、As、Cu 等重金属^[32].洪湖地区在 20 世纪 70 年代前,以有机肥为主,70 年代后期,以化学肥料为主,平均每亩化肥施用量达到 93kg^[25].据计算,土壤所能吸附的化肥只占施用量的 10%~15%,剩余的随地表径流进入水体.洪湖地区上世纪 80 年代开始进行大规模水产围栏养殖,而水产养殖会导致水体中 Cu、Hg、Zn 的变化^[33],进而影响湖泊底部沉积物中重金属含量的变化.除农业来源外,工业废水和生活废水中也含有较高的 Cu、

Zn^[34]. Pb 作为机动车尾气的标识元素,其来源于交通活动^[35].湖泊沉积物中的重金属除了人为来源以外,自然来源也不容忽视.

综合以上分析,因子 1 可能为农业非点源污染及交通活动;因子 2 可能为化肥来源以及工业废水和生活废水.

表 3 因子分析结果

Table 3 Result of factor analysis

元素	因子	
	F1	F2
Cu	-0.203	0.937
Cd	0.895	-0.100
Pb	0.952	-0.117
Zn	-0.174	0.950
OM	-0.484	0.282
TP	-0.734	0.545
方差贡献率(%)	42.50	36.32
累计贡献率(%)	42.50	78.82

3 结论

3.1 洪湖沉积柱中 4 种重金属含量介于 67.86~189.57mg/kg 之间,4 种重金属含量的高低为 Pb>Zn>Cu>Cd.地累计指数表明 Cu 和 Zn 未达到污染级别,而 Pb 为无污染到中度污染级别,Cd 为中度污染到强污染级别.

3.2 沉积柱中,Pb 和 Cd 的含量由沉积物底部向上呈现降低的趋势,Cu 和 Zn 呈现上升趋势.沉积物中重金属含量的变化受洪水和围湖造田的共同影响,表现出复杂的变化趋势.在新滩水闸建成前,洪水导致沉积物中重金属含量降低,随后升高.水闸建成后,洪水导致的内涝致使沉积物中重金属含量升高;围湖造田导致湖底沉积物中重金属含量的升高.

3.3 洪湖沉积柱中重金属来源于非点源农业污染、交通活动以及工业废水和生活废水排放.

参考文献:

- [1] 贾英,方明,吴友军,等.上海河流沉积物重金属的污染特征与潜在生态风险[J]. 中国环境科学, 2013,33(1):147-153.
- [2] Suresh G, Ramasamy V, Sundarajan M, et al. Spatial and vertical distributions of heavy metals and their potential toxicity levels in various beach sediments from high-background-radiation area,

- Kerala, India [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015,91(1):389-400.
- [3] Zhang Y, Huo S, Zan F, et al. Historical records of multiple heavy metals from dated sediment cores in Lake Chenghai, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014,74(5):1-10.
- [4] Lenoble V, Omanović D, Garnier C, et al. Distribution and chemical speciation of arsenic and heavy metals in highly contaminated waters used for health care purposes (Srebrenica, Bosnia and Herzegovina) [J]. *Science of the Total Environment*, 2013,443c(3):420-428.
- [5] 杨汉东,蔡述明.洪湖垦殖剖面的地球化学特征 [J]. *海洋与湖沼*, 1995,26(3):269-274.
- [6] 刘 明,张爱滨,范德江,等.渤海中部底质沉积物重金属环境质量 [J]. *中国环境科学*, 2012,32(2):279-290.
- [7] 孔 明,董增林,晁建颖,等.巢湖表层沉积物重金属生物有效性及生态风险评价 [J]. *中国环境科学*, 2015,35(4):1223-1229.
- [8] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法 [M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000.
- [9] 曾 理,吴丰昌,万国江,等.中国地区湖泊沉积物 ^{137}Cs 分布特征和环境意义 [J]. *湖泊科学*, 2009,21(1):1-9.
- [10] Liu Z, Pan S, Yin Y, et al. Reconstruction of the historical deposition environment from ^{210}Pb and ^{137}Cs records at two tidal flats in China [J]. *Ecological Engineering*, 2013,61(Part A):303-315.
- [11] Liu L B, Shan W U, Cao J J, et al. Monitoring of atmospheric radionuclides from the Fukushima nuclear accident and assessing their impact on Xi'an, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(13):1585-1591.1.
- [12] Seleznev A A, Yarmoshenko I V, Sergeev A P. ^{137}Cs in puddle sediments as timescale tracer in urban environment [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2015,142C:9-13.3.
- [13] 王苏民,窦鸿身.中国湖泊志 [M]. 北京:科学出版社, 1998:191.
- [14] 姚书春,薛 滨,李世杰,等.长江中下游湖泊沉积速率的测定及环境意义——以洪湖、巢湖、太湖为例 [J]. *长江流域资源与环境*, 2006,15(5):569-573.
- [15] 中国环境监测总站.中国土壤元素背景值 [M]. 北京:中国环境科学出版社, 1990.
- [16] Muller, G., Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. *Geojournal*, 1969,2(3):108-118.
- [17] 李玉斌,冯 流,刘征涛,等.中国主要淡水湖泊沉积物中重金属生态风险研究 [J]. *环境科学与技术*, 2012,35(2):200-205.
- [18] 刘 成,邵世光,范成新,等.巢湖重污染汇流湾沉积物重金属污染特征及风险评价 [J]. *中国环境科学*, 2014,34(4):1031-1037.
- [19] 林承奇,胡恭任,于瑞莲,等.九龙江近岸表层沉积物重金属污染评价及来源解析 [J]. *中国环境科学*, 2016,36(4):1218-1225.
- [20] 苏 丹.湖泊湿地沉积物重金属时空变异特征与来源判别研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨师范大学, 2012.
- [21] Martínez-Santos M, Probst A, García-García J, et al. Influence of anthropogenic inputs and a high-magnitude flood event on metal contamination pattern in surface bottom sediments from the Deba River urban catchment [J]. *Science of the Total Environment*, 2015,514:10-25.
- [22] 何海星,于瑞莲,胡恭任,等.厦门西港近岸沉积物重金属污染历史及源解析 [J]. *中国环境科学*, 2014,34(34):1045-1051.
- [23] 于文金,邹欣庆,朱大奎.曹妃甸老龙口现代沉积环境及重金属污染特征研究 [J]. *中国环境科学*, 2011,31(8):1366-1376.
- [24] 谢其明.围湖造田对洪湖的生态影响 [J]. *华中农业大学学报*, 1987,6(1):51-58.
- [25] 洪湖市地方志编纂委员会编.洪湖县志 [M]. 武汉:武汉大学出版社, 1992.
- [26] Guo W, Huo S, Ding W. Historical record of human impact in a lake of northern China: Magnetic susceptibility, nutrients, heavy metals and OCPs [J]. *Ecological Indicators*, 2015,57:74-81.
- [27] 千 娜,金章东,姚 拓.太湖梅梁湾沉积物中重金属的赋存相态及其对污染历史的失踪 [J]. *湖泊科学*, 2007,19(4):397-406.
- [28] Tobin, G.A., R. Brinkmann and B.E. Montz, Flooding and the distribution of selected metals in floodplain sediments in St. Maries, Idaho [J]. *Environmental Geochemistry & Health*, 2000, 22(3):219-232.
- [29] Bábek O, Faměra M, Hilscherová K, et al. Geochemical traces of flood layers in the fluvial sedimentary archive; implications for contamination history analyses [J]. *Catena*, 2011,87(2):281-290.
- [30] Kunwar P S, Dinesh M, Vinod K S, et al. Studies on distribution and fractionation of heavy metals in Gomti River sediments—tributary of the Ganges, India [J]. *Journal of Hydrology*, 2005,312:14-27.
- [31] 李 玲.江汉平原四湖地区河湖环境与人类活动系统研究 [D]. 北京:中国科学院研究生院, 2002.
- [32] 王静雅.成都市湖塘沉积物重金属元素地球化学研究 [D]. 成都:成都理工大学, 2005.
- [33] Silva C A R, Rainbow P S, Smith B D. Biomonitoring of trace metal contamination in mangrove-lined Brazilian coastal systems using the oyster *Crassostrea rhizophorae*: comparative study of regions affected by oil, salt pond and shrimp farming activities [J]. *Hydrobiologia*, 2003,501(1):199-206.
- [34] 李 磊,平仙隐,王云龙,等.长江口及邻近海域沉积物中重金属研究——时空分布及污染分析 [J]. *中国环境科学*, 2012, 32(12):2245-2252.
- [35] 张兆永,吉力力·阿不都外力,等.艾比湖流域大气降尘重金属的污染和健康风险 [J]. *中国环境科学*, 2015,35(6):1645-1653.

致谢: 感谢江晓宇、李水小师兄及孙焰同学在野外采样中提供的助。

作者简介: 郑 煌(1991-),男,湖北武汉人,中国地质大学(武汉)硕士研究生,主要从事环境地球化学方面研究.发表论文 1 篇。