

江苏省西部湖泊表层沉积物中重金属分布特征及其潜在生态风险评价

陈乾坤¹, 刘涛¹, 胡志新¹, 时飞¹, 胡忻², 杨柳燕^{1*}

(1. 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京大学环境学院, 南京 210046; 2. 南京大学现代分析中心, 南京 210093)

摘要: 为了掌握江苏省西部湖泊表层沉积物中重金属的污染情况, 利用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)分析江苏省西部湖泊表层沉积物中 As、Cd、Co、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 含量, 并采用地积累指数法、富集因子法和 Hakanson 潜在生态风险指数法对各重金属的污染水平以及潜在生态风险进行评价。结果表明, 湖泊表层沉积物中 As、Cd、Co、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 含量分别为 11.6~54.9、0.12~0.91、10.06~20.12、44.01~85.91、22.74~54.17、20.31~40.48、21.40~45.23、68.86~254.09 mg·kg⁻¹。地积累指数法和富集因子法的评价结果均表明, Cd 和 As 是主要的污染物, Cu、Zn 和 Pb 在少数位点为轻度污染, Co、Cr 和 Ni 处于无污染水平。Hakanson 潜在生态风险指数法评价结果显示, 综合风险程度顺序为固城湖(284.43)>石臼湖(280.93)>白马湖(212.80)>玄武湖(200.99)>高邮湖(136.15)>洪泽湖(133.42)>骆马湖(79.28), 单因素方差分析结果表明, 这 7 个湖泊综合潜在生态风险指数存在极显著差异($P=0.001$)。因此, 固城湖、石臼湖、白马湖和玄武湖表层沉积物重金属潜在生态风险为中等, 主要风险污染物为 Cd 和 As, 而高邮湖、洪泽湖和骆马湖重金属潜在生态风险较低。

关键词: 重金属; 湖泊; 沉积物; 地积累指数; 潜在生态风险指数; 江苏省

中图分类号: X820.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2013)05-1044-07 doi:10.11654/jaes.2013.05.024

Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments from the Lakes of West Jiangsu Province

CHEN Qian-kun¹, LIU Tao¹, HU Zhi-xin¹, SHI Fei¹, HU Xin², YANG Liu-yan^{1*}

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210046, China; 2. Center of Materials Analysis, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: The contents of heavy metals or metalloid (i.e. As, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn) were investigated in surface sediments from the lakes in the Western part of Jiangsu Province through inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry (ICP-AES). The contamination level and potential ecological risks of heavy metals were assessed with geo-accumulation index, enrichment factor and potential ecological risk index methods, respectively. It was found that the contents of the heavy metals in the sediments were in the range of 11.6~54.9, 0.12~0.91, 10.06~20.12, 44.01~85.91, 22.74~54.17, 20.31~40.48, 21.40~45.23 and 68.86~254.09 mg·kg⁻¹ for As, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn, respectively. Analysis with geo-accumulation index and enrichment factor methods both indicated that Cd and As were the main pollutants, Cu, Zn and Pb caused light pollution in same sampling sites and Co, Cr and Ni were in clean level. For the different lakes examined in the present study, the general indices of potential ecological risk followed the order of Lake Gucheng (284.43) > Lake Shijiu (280.93) > Lake Baima (224.97) > Lake Xuanwu (200.19) > Lake Gaoyou (136.15) > Lake Hongze (133.42) > Lake Luoma (76.26). One-way ANOVA analysis indicated that very significant difference ($P=0.001$) existed in the general indices of the different lakes. Therefore, Lake Gucheng, Lake Shijiu, Lake Baima and Lake Xuanwu had moderate ecological risks with Cd and As as the main contributors, while Lake Gaoyou, Lake Hongze and Lake Luoma imposed low ecological risks.

Keywords: heavy metal; lake; sediment; geo-accumulation index; potential ecological risk index; Jiangsu Province

收稿日期: 2012-09-04

基金项目: 国家“水体污染控制与治理”重大专项(2012ZX07101006)

作者简介: 陈乾坤(1988—), 男, 安徽池州人, 硕士研究生, 主要从事污染水体的生态治理。E-mail: chen881120@hotmail.com

* 通信作者: 杨柳燕 E-mail: yangly@nju.edu.cn

重金属污染物进入水体后,绝大部分能够迅速被水中悬浮颗粒物和底部沉积物所吸附,并在其中富集^[1-2]。在一定条件下,吸附在沉积物中的重金属又可以释放到上覆水体,造成二次污染^[2-5]。对于湖泊这类较为封闭的水体来说,重金属污染物一旦进入,就较难通过水流冲刷等作用被排出,会对湖泊生态系统造成长期的影响^[6]。目前,沉积物中重金属污染的评价方法有多种,包括地累积指数法(Geo-accumulation Index)、富集因子法(Enrichment factor method, EFs)、沉积物质量基准法、潜在生态风险指数法(Potential ecological risk index)、污染负荷指数法、脸谱图法等。其中,地累积指数法和富集因子法能够反映沉积物中重金属富集的程度^[7],潜在生态风险指数法是瑞典科学家 Hakanson^[8]提出,具有简洁、实用、可比性以及综合性强的特点而被广泛应用^[9]。

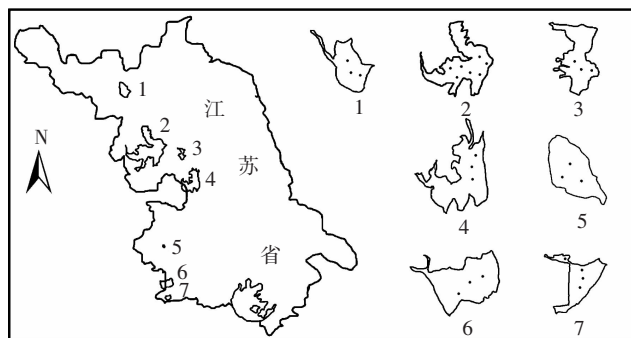
江苏省是我国淡水湖泊分布最集中的省区之一,境内有大小湖荡 200 余个,湖泊率达 6%,居全国首位^[10]。但是近 30 年来,随着工业化和城市化的发展,江苏省湖泊接纳大量的地表径流、工业废水和生活污水而受到不同程度的污染^[11]。然而,这些湖泊也是江苏省重要的水产养殖水域,其沉积物中重金属污染程度直接关系到水产品质量安全。已有的研究主要集中于对太湖、洪泽湖和玄武湖沉积物中重金属污染水平的调查^[11-16],而对其他江苏省西部湖泊,如骆马湖、白马湖、高邮湖等湖泊沉积物中重金属含量和污染情况的研究相对较少。因此,本研究对江苏省西部 7 个湖泊表层沉积物采样,利用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)分析表层沉积物中重金属的含量,探讨不同湖泊沉积物中重金属的分布特征,并采用地累积指数法、富集因子法和 Hakanson 潜在生态风险指数法对重金属的富集程度和潜在生态危害进行评价,以为江苏省西部湖泊重金属污染的风险管理和污染防治提供依据。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

调查的江苏省西部湖泊共有 7 个,分别为骆马湖、洪泽湖、白马湖、高邮湖、玄武湖、石臼湖和固城湖(图 1)。其中,骆马湖是江苏省四大湖泊之一,属于大型平原水库型湖泊,地跨徐州、宿迁两市,水面面积 375 km²。洪泽湖是中国第四大淡水湖泊,面积为 2069 km²,跨洪泽、淮阴、泗阳、泗洪和盱眙五县市。白马湖地处宝应、楚州、金湖、洪泽四市县交界处,位于

洪泽湖之南,高邮湖之北,水面面积 108 km²。高邮湖分属两省四县,跨安徽省天长市和江苏省高邮市、宝应县、金湖县,主湖区属江苏省,是江苏省第三大淡水湖,总面积约 775 km²。玄武湖属于天然小型浅水湖泊,位于南京老城区东北部,是典型城市湖泊,水面面积 3.72 km²。石臼湖是南京市溧水县、高淳县和安徽省当涂县三县间的界湖,水面面积 196 km²。固城湖位于高淳县,现面积约 30 km²。在调查中,洪泽湖设置 7 个采样点,固城湖设置 4 个采样点,其他湖泊各设置 3 个采样点。



1.骆马湖 2.洪泽湖 3.白马湖 4.高邮湖
5.玄武湖 6.石臼湖 7.固城湖
1.Lake Luoma 2.Lake Hongze 3.Lake Baima 4.Lake Gaoyou
5.Lake Xuanwu 6.Lake Shiji 7.Lake Gucheng

图 1 江苏省西部湖泊采样位点

Figure 1 Location of sample lakes

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集

分别于 2011 年 2 月和 2012 年 2 月,对江苏省西部 7 个湖泊进行了调查。使用彼得森采样器采集沉积物,将采集的表层沉积物样品混合均匀后装入聚乙烯自封袋中密封,低温保存送回实验室进行预处理及分析。

1.2.2 分析测定

将沉积物样品置于 Advantage Freeze Dryer 型冻干机(美国)中冻干,去杂物及石块,经玛瑙研钵研磨处理后过 100 目尼龙筛,装入聚乙烯自封袋中。称取冻干样品 0.100 g,置于 30 mL 聚四氟乙烯(PTFE)烧杯中,加少量水润湿,加入 5 mL 盐酸,盖上 PTFE 盖,中温加热 30 min 左右,加入 25 mL 硝酸,继续微沸加热至硝酸分解完毕,加入 7 mL 氢氟酸,0.5 mL 高氯酸,盖好并加热,待溶液基本澄清后,140 °C 高温使高氯酸完全挥发。冷却后加入约 1.7 mL 盐酸和少量水,再加热至全溶后,定容至 25 mL,以待后续分析使用。

用 Optima-5300DV 型电感耦合等离子体发射光

谱仪(美国 Perkin-Elmer 公司)进行重金属元素测定,以混合标准溶液建立标准曲线,逐个分析各样品中砷(As)、镉(Cd)、钴(Co)、铬(Cr)、铜(Cu)、镍(Ni)、铅(Pb)和锌(Zn)元素含量,每个样品测定3次。分析过程中加入国家标准土壤参比物质(GSS 1)以检测分析方法的精准性,结果表明所有元素的分析误差皆在5%以内,符合质控要求。

1.3 评价方法

1.3.1 地累积指数法

计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{k B_n} \right) \quad (1)$$

式中: I_{geo} 为地累积指数; C_n 为小于 $2\mu\text{m}$ 沉积物中元素 n 的含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; B_n 为粘质沉积岩(即普通岩)中该元素的地球化学背景值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,采用江苏省土壤环境背景值^[17]; k 为考虑到成岩作用可能会引起的背景值的变动而设定的常数,一般 $k=1.5$ 。

地累积指数计算中通常选用工业化前全球沉积物重金属的平均背景值为参比值 B_n ,由于不同地球化学背景可能造成各地所获得的重金属污染信息的差异,采用江苏省土壤重金属背景值作为计算标准(表3)。

根据 I_{geo} 数值的大小,将沉积物中重金属的污染程度分为7个等级,即0~6级,如表1所示。

表1 重金属污染程度与 I_{geo} 的关系

Table 1 I_{geo} and contamination grades of heavy metals

I_{geo}	≤ 0	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	>5
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	重度	严重

1.3.2 富集因子法

本研究依据参考元素的选择标准,选取Fe元素作为参考元素^[18],所用的背景值与地累积指数法所选背景值相同。

计算公式如下:

$$EF = \frac{[\text{金属}/\text{Fe}]_{\text{样品}}}{[\text{金属}/\text{Fe}]_{\text{背景}}} \quad (2)$$

式中: EF 是重金属的富集因子, $[\text{金属}/\text{Fe}]_{\text{样品}}$ 是样品中重金属与Fe元素的浓度比; $[\text{金属}/\text{Fe}]_{\text{背景}}$ 是背景值中重金属与Fe元素的浓度比。

1.3.3 重金属潜在生态风险指数法

计算公式如下:

(1)单项重金属的潜在生态风险指数为

$$E_i = T_i \cdot \frac{C_i}{C_o} \quad (3)$$

式中: C_i 、 C_o 和 T_i 分别为单项重金属 i 的测定值、参比值和毒性响应系数。 C_o 采用江苏省土壤重金属背景值(表3); T_i 分别为: $\text{Cd}=30$, $\text{As}=10$, $\text{Co}=\text{Cu}=\text{Ni}=\text{Pb}=5$, $\text{Cr}=2$, $\text{Zn}=1$ 。

(2)多种重金属的综合潜在生态风险指数为

$$RI = \sum E_i \quad (4)$$

重金属单项潜在生态风险指数 E_i 和综合生态风险指数 RI 的分级标准如表2所示。

表2 单项及综合潜在生态风险评价指数与分级标准

Table 2 Individual and general indices and grades of potential

ecological risk assessment

E_i	单项污染物生态风险等级	RI	综合潜在生态风险等级
<40	低	<150	低
40~80	中等	150~300	中等
80~160	较重	300~600	重
160~320	重	≥ 600	严重
≥ 320	严重		

2 结果与讨论

2.1 沉积物中重金属含量

江苏省西部湖泊表层沉积物中重金属含量的变化范围及平均值如表3所示。总体上看,苏北的骆马湖和洪泽湖表层沉积物中重金属含量相对较低,而苏南的固城湖和石臼湖表层沉积物中重金属含量相对较高,尤其是这两个湖泊中Cd、Pb和Zn的含量相对其他湖泊明显偏高。同江苏省土壤中重金属背景值比较后发现,江苏省西部湖泊表层沉积物中污染最严重的重金属是Cd和As,分别超出土壤背景值1.41~10.71倍和1.23~5.84倍;其次为Zn、Cu和Pb,分别超出土壤背景值1.06~3.92、0.97~2.31、0.97~2.06倍;而Co、Cr和Ni在表层沉积物中的含量与土壤背景值相当,基本无污染。

2.2 沉积物重金属污染评价

2.2.1 地累积指数法评价

江苏省西部湖泊表层沉积物各重金属地累积指数评价结果见表4。可以看出,9种重金属中,Cd是最主要的污染物,7个湖泊中只有骆马湖为0级,无污染;洪泽湖、白马湖、高邮湖和玄武湖均达到2级,偏中度污染;石臼湖和固城湖达到3级,中度污染。As次之,7个湖泊中玄武湖、骆马湖为0级,无污染;洪泽湖、高邮湖、石臼湖和固城湖均达到1级,轻度污染;白马湖达到2级,偏中度污染。此外,玄武湖、石臼湖、固城湖沉积物中Zn,玄武湖、固城湖中Cu和玄武

表 3 江苏省西部湖泊表层沉积物中重金属含量的变化范围及平均值(mg·kg⁻¹)

Table 3 The averages and ranges of heavy metal contents in surface sediments from the lakes of West Jiangsu Province(mg·kg⁻¹)

湖泊名称	取值	As	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
骆马湖	范围	13.10~13.60	0.12~0.13	17.84~18.92	64.21~65.20	27.97~28.63	27.39~32.90	21.40~26.43	68.86~71.11
	平均值	13.40	0.13	18.40	64.78	28.19	29.77	24.29	69.64
洪泽湖	范围	12.00~19.30	0.25~0.30	16.77~20.12	60.72~73.12	25.19~30.67	31.75~40.48	21.56~32.02	77.41~96.40
	平均值	14.69	0.27	18.56	66.42	27.45	35.17	27.03	84.16
白马湖	范围	30.60~35.10	0.38~0.49	10.06~12.57	44.01~54.47	22.74~29.23	20.31~30.04	22.02~38.06	68.91~90.69
	平均值	34.90	0.45	11.29	48.67	25.62	25.10	29.60	77.30
高邮湖	范围	18.90~22.10	0.24~0.29	16.25~16.58	59.62~63.31	25.70~28.31	28.69~32.81	22.06~29.53	76.50~89.25
	平均值	20.50	0.27	16.40	61.64	26.94	30.65	24.87	84.40
玄武湖	范围	12.80~15.00	0.40~0.52	14.35~17.70	57.42~85.91	35.08~54.17	27.59~39.56	27.88~45.23	124.49~186.44
	平均值	13.10	0.46	15.59	68.85	41.51	31.85	35.52	145.29
石臼湖	范围	11.60~25.00	0.42~0.84	14.42~16.02	46.97~58.35	23.96~43.93	26.16~35.19	25.85~39.06	88.71~254.09
	平均值	19.17	0.68	15.36	52.59	35.16	31.26	33.26	154.42
固城湖	范围	17.30~30.10	0.53~0.91	15.04~18.78	53.91~63.63	31.02~44.45	26.25~32.78	28.23~33.99	98.91~166.66
	平均值	22.65	0.67	17.24	60.22	37.93	29.15	31.93	130.97
江苏土壤背景值		9.4	0.085	14.6	75.6	23.4	32.8	22	64.8
倍数		1.23~5.84	1.41~10.71	0.68~1.38	0.58~1.14	0.97~2.31	0.62~1.23	0.97~2.06	1.06~3.92

表 4 江苏省西部湖泊表层沉积物重金属地累积指数及污染程度评价

Table 4 I_{geo} and contamination grades of heavy metals in surface sediments from the lakes of West Jiangsu Province

湖泊		Co		Cr		Cu		Ni		Pb		Zn		Cd		As	
		<i>I_{geo}</i>	分级	<i>I_{geo}</i>	分级	<i>I_{geo}</i>	分级	<i>I_{geo}</i>	分级	<i>I_{geo}</i>	分级	<i>I_{geo}</i>	分级	<i>I_{geo}</i>	分级	<i>I_{geo}</i>	分级
洪泽湖	范围	-0.39~ -0.12	0	-0.90~ -0.63	0	-0.48~ -0.19	0	-0.63~ -0.28	0	-0.61~ -0.04	0	-0.33~ -0.01	0	0.98~ 1.25	1~2	-0.23~ 0.45	0~1
	均值	-0.24	0	-0.78	0	-0.36	0	-0.49	0	-0.30	0	-0.21	0	1.09	2	0.04	1
玄武湖	范围	-0.61~ -0.31	0	-0.98~ -0.40	0	0~0.63	0~1	-0.83~ -0.31	0	-0.24~ 0.45	0~1	0.36~ 0.94	1	1.65~ 2.03	2~3	-0.14~ 0.09	0~1
	均值	-0.50	0	-0.74	0	0.21	1	-0.65	0	0.08	1	0.55	1	1.84	2	-0.05	0
石臼湖	范围	-0.60~ -0.45	0	-1.27~ -0.96	0	-0.55~ 0.32	0~1	-0.91~ -0.48	0	-0.35~ 0.24	0~1	-0.13~ 1.39	0~2	1.72~ 2.71	2~3	-0.28~ 0.83	0~1
	均值	-0.51	0	-1.11	0	-0.04	0	-0.67	0	-0.01	0	0.52	1	2.34	3	0.37	1
白马湖	范围	-1.12~ -0.80		-1.37~ -1.06		-0.63~ -0.26	0	-1.28~ -0.71	0	-0.58~ 0.21	0~1	-0.50~ -0.1	0	1.58~ 1.95	2	1.12~ 1.32	2
	均值	-0.96	0	-1.23	0	-0.46	0	-0.99	0	-0.19	0	-0.34	0	1.82	2	1.25	2
骆马湖	范围	-0.30~ -0.21	0	-0.80~ -0.82	0	-0.33~ -0.29	0	-0.85~ -0.58	0	-0.62~ -0.32	0	-0.50~ -0.45	0	-0.12~ 0.03	0~1	-0.11~ -0.05	0
	均值	-0.25	0	-0.81	0	-0.32	0	-0.73	0	-0.45	0	-0.48	0	-0.02	0	-0.08	0
高邮湖	范围	-0.43~ -0.40	0	-0.93~ -0.84	0	-0.45~ -0.31	0	-0.78~ -0.58	0	-0.58~ -0.16	0	-0.35~ -0.12	0	0.93~ 1.20	1~2	0.42~ 0.65	1
	均值	-0.42	0	-0.88	0	-0.38	0	-0.68	0	-0.42	0	-0.21	0	1.06	2	0.54	1
固城湖	范围	-0.54~ -0.22	0	-1.07~ -0.83		-0.18~ 0.34	0~1	-0.91~ -0.59	0	-0.23~ 0.04	0~1	0.03~ 0.78	1	2.04~ 2.83	3	0.30~ 1.09	1~2
	均值	-0.35	0	-0.92	0	0.09	1	-0.76	0	-0.05	0	0.39	1	2.37	3	0.65	1

湖中 Pb 的地累积指数均达到 1，轻度污染水平；而 Co、Cr、Ni 在 7 个湖泊中的地累积指数均为 0，为清洁无污染。

根据沉积物中重金属整体污染状况，可以将江苏省西部 7 个湖泊大致分为 3 类：①污染程度最轻的是

骆马湖，8 种重金属均为清洁状态。②污染程度相对较重的是洪泽湖、白马湖和高邮湖 3 个湖泊，Cd、As 两种重金属存在污染，其他重金属均为清洁状态，洪泽湖表层沉积物中重金属全湖平均值依其地累积指数 I_{geo} 大小排列次序为 Cd>As>Zn>Co>Pb>Cu>Ni>Cr，

与已有的研究结果一致^[19]。③污染程度相对严重的是固城湖、石臼湖和玄武湖 3 个湖泊,均有 3 种以上重金属存在污染。固城湖全湖 Cd 均达到中度污染水平,As、Zn、Cu 全湖平均为轻度污染,局部 Pb 存在轻度污染;石臼湖的 3 个采样点中,2 个点位 Cd 达到中度污染,1 个点位 Cd 为偏中度污染,Zn、As 全湖平均为轻度污染,有 2 个点位的 Cu、Pb 存在轻度污染;玄武湖沉积物中 Cd 全湖平均为偏中度污染,Zn、Cu、Pb 全湖平均为轻度污染,与已有的研究结果基本一致^[20]。

整体上看,江苏省西部湖泊表层沉积物重金属分布具有明显的区域差异。污染最严重的固城湖、石臼湖和玄武湖均位于苏南,而苏北湖泊表层沉积物重金属污染相对较轻。这种区域差异与江苏省社会经济发展状况的空间格局相符,体现了湖泊表层沉积物重金属污染程度与流域内人类活动的方式以及强度之间的密切关系。

玄武湖、石臼湖和固城湖均有 2 个点位存在轻度 Pb 污染,一般认为 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^[21]。玄武湖表层沉积物中 Pb 含量较高与玄武湖处于交通要道有密切联系,虽然南京市自 1998 年开始推广使用无铅汽油,但是沉积物中的铅污染具有累积效应,铅在路域土壤中的累积仍在继续^[22],汽油中的 Pb 随尾气、车胎中的 Pb 随磨损进入街道扬尘,进而随干湿沉降进入湖泊,最终汇入沉积物中^[23];自 20 世纪 70 年代以来,固城湖沉积物中 Pb 呈现不断增加的趋势^[24],固城湖沉积物中 Pb 不仅仅来源于自然作用,更多的是人类活动导致了 Pb 在沉积物中的累积。玄武湖、石臼湖和固城湖的 Cu、Zn 污染与该流域电镀、制革和有色金属冶炼业有关,且 Cu、Zn 具有生物累积效应以及与有机物较强的结合能力,这可能是造成沉积物 Cu、Zn 污染的主要原因。此外,该区湖泊沉积物中 Cu、Zn、Pb 的轻度污染还可能与水产养殖过程中大量投放微量

元素有关^[25-26]。

与苏南湖泊相比,洪泽湖等苏北湖泊处于经济欠发达地区,流域内人口相对较少,城市化进程远低于苏南地区。农业、渔业是苏北地区的支柱产业,尤其是骆马湖流域除化肥、农药等农业排放源及大气沉降之外,很少有其他重金属来源,人类活动方式的单一以及活动强度较低使得骆马湖表层沉积物重金属含量为 7 个湖泊中最低,基本无污染。而洪泽湖、高邮湖和白马湖的 Cd 和 As 的污染与近些年来湖泊周边乡镇工业迅速发展带来的大量工业废水的排放有关^[13]。

2.2.2 富集因子法评价

图 2 为各重金属在江苏西部湖泊表层沉积物中的富集因子平均值。根据 Sutherland^[27]提出的判断标准($EF \leq 2$,为无污染到弱污染; $2 < EF \leq 5$,为中度污染; $5 < EF \leq 20$,为显著污染),Cd 在玄武湖、白马湖、石臼湖和固城湖达到显著污染程度,在洪泽湖和高邮湖为中度污染,在骆马湖无污染;As 在白马湖达到显著污染程度,在高邮湖、固城湖和石臼湖为中度污染,在骆马湖、洪泽湖和玄武湖无污染;Zn 在玄武湖和石臼湖为中度污染,在白马湖和固城湖为弱污染;Pb 在白马湖、玄武湖和石臼湖,Cu 在玄武湖、石臼湖和固城湖,为弱污染;Co、Cr 和 Ni 在各湖泊均无污染。以上结果表明,江苏省西部湖泊表层沉积物没有受到重金属 Co、Cr 和 Ni 的污染,但 Cd 和 As 对沉积物有明显的污染,而 Cu、Zn 和 Pb 对苏南的玄武湖、石臼湖和固城湖以及苏北的白马湖有弱污染。富集因子法与地累积指数法所得的结果相似。

2.3 沉积物重金属潜在生态风险评价

江苏省西部湖泊表层沉积物的重金属单项及综合潜在生态风险指数和分级结果如表 5 所示。可以看出,除 Cd 外,重金属单项潜在生态风险程度均为低风险(<40)。Cd 在骆马湖(44.35)为中等生态风险,在高邮湖(94.41)和洪泽湖(96.05)为较重生态风险,在

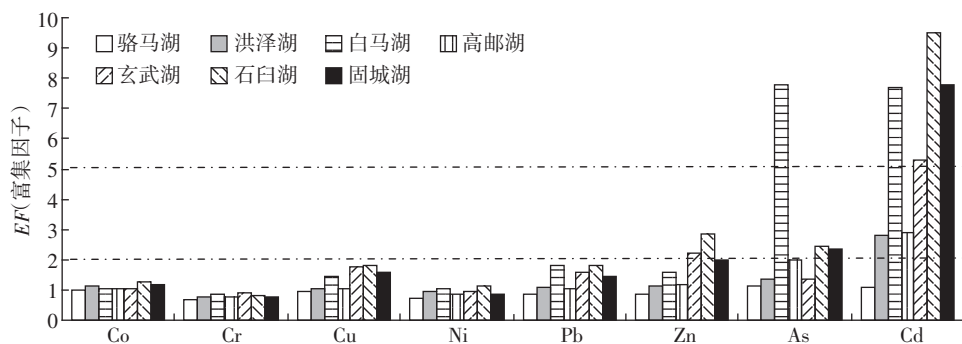


图 2 江苏省西部湖泊表层沉积物重金属富集因子

Figure 2 Enrichment factor of heavy metals in the surface sediments from the lakes of West Jiangsu Province

表 5 江苏省西部湖泊表层沉积物重金属潜在生态风险评价

Table 5 The potential ecological risk of heavy metals in lake surface sediments from West Jiangsu Province

湖泊		Ei								RI	风险等级
		Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Cd	As		
洪泽湖	变化范围	5.74~6.89	1.61~1.93	5.38~6.55	4.84~6.17	1.54~2.29	0.44~0.55	88.59~107.29	12.77~20.53	124.12~150.40	低
	均值	6.36	1.76	5.87	5.36	1.93	0.48	96.05	15.62	133.42	
玄武湖	变化范围	4.91~6.06	1.52~2.27	7.5~11.57	4.21~6.03	1.99~3.23	0.71~1.07	141.18~183.53	13.62~15.96	176.04~229.72	中等
	均值	5.34	1.82	8.87	4.85	2.54	0.83	162.24	14.50	200.99	
石臼湖	变化范围	4.94~5.49	1.24~1.54	5.12~9.39	3.99~5.36	1.85~2.79	0.51~1.45	147.88~295.06	12.34~26.60	185.64~339.44	中等
	均值	5.26	1.29	7.51	4.76	2.38	0.88	238.35	20.39	280.93	
白马湖	变化范围	3.45~4.3	1.16~1.44	4.86~6.25	3.10~4.58	1.57~2.72	0.39~0.52	134.12~173.29	32.55~37.34	183.35~230.09	中等
	均值	3.87	1.29	5.48	3.83	2.11	0.44	160.12	35.67	212.80	
骆马湖	变化范围	6.11~6.48	1.70~1.72	5.98~6.12	4.18~5.02	1.53~1.89	0.39~0.41	41.29~45.88	13.94~14.47	76.67~81.22	低
	均值	6.30	1.71	6.02	4.54	1.73	0.40	44.35	14.22	79.28	
高邮湖	变化范围	5.57~5.68	1.58~1.67	5.49~6.05	4.37~5.00	1.58~2.11	0.44~0.51	85.76~103.06	20.11~23.51	128.36~144.11	低
	均值	5.62	1.63	5.76	4.67	1.78	0.48	94.41	21.81	136.15	
固城湖	变化范围	5.15~6.43	1.43~1.68	6.63~9.50	4.00~4.56	2.02~2.43	0.57~0.95	185.65~320.82	18.40~32.02	243.53~365.48	中等
	均值	5.90	1.59	8.11	4.44	2.28	0.75	237.26	24.10	284.43	

白马湖(160.12)、玄武湖(162.24)、固城湖(237.26)和石臼湖(238.35)达到重度生态风险,其中固城湖的GC1点(320.82)Cd达到严重风险程度,为所有点位中最大值。比较各重金属平均值大小可知,除骆马湖Co略大于Cu外,江苏省西部湖泊表层沉积物中各重金属单项潜在生态风险程度的大小顺序一致,均为: Cd>As>Co>Cu>Ni>Pb>Cr>Zn。Cd是最主要的生态风险贡献因子,其次是As。

由综合潜在生态风险指数RI可以看出,骆马湖(79.28)、洪泽湖(133.42)和高邮湖(136.15)全湖平均为低生态风险水平,玄武湖(200.99)、白马湖(212.80)、石臼湖(280.93)和固城湖(284.43)全湖平均为中等生态风险水平,其中石臼湖的SJ1点(339.44)、SJ2点(317.71)和固城湖的GC1点(365.48)达到重生态风险水平,这主要是由于这三个点位的Cd含量很高。总体上看,综合潜在生态风险程度的大小顺序为: 固城湖>石臼湖>白马湖>玄武湖>高邮湖>洪泽湖>骆马湖。单因素方差分析结果表明,这7个湖泊综合潜在生态风险指数存在极显著差异($F=15.564, P=0.001$)。因此,苏南的3个湖泊和苏北的白马湖应为今后重金属污染防治的重点区域。

3 结论

(1)江苏省西部湖泊表层沉积物中污染最严重的重金属是Cd、As,其次为Zn、Cu和Pb,而Co、Cr和Ni在表层沉积物中的含量与土壤背景值相当,基本无污染。苏北的骆马湖和洪泽湖表层沉积物中重金属含量

相对较低,而苏南的固城湖和石臼湖表层沉积物中重金属含量相对较高。

(2)根据地累积指数法评价结果,可以将江苏省西部7个湖泊大致分为3类:污染程度最轻的是骆马湖,为清洁状态;污染程度相对较重的是洪泽湖、白马湖和高邮湖3个湖泊,都只有Cd、As两种重金属存在污染;污染程度相对严重的是固城湖、石臼湖和玄武湖3个湖泊,均有3种以上重金属存在污染。

(3)潜在生态风险指数法评价结果显示,除骆马湖Co略大于Cu外,江苏省西部湖泊表层沉积物中各重金属单项潜在生态风险程度的大小顺序一致,均为: Cd>As>Co>Cu>Ni>Pb>Cr>Zn。Cd是最主要的生态风险因子,其次是As。表层沉积物中重金属综合潜在生态风险的大小顺序为: 固城湖>石臼湖>白马湖>玄武湖>高邮湖>洪泽湖>骆马湖。苏南的3个湖泊和苏北的白马湖达到中等潜在生态风险,应为今后重金属污染防治的重点区域。

参考文献:

[1] 黄延林. 水体沉积物中重金属释放动力学及试验研究 [J]. 环境科学学报, 1995, 15(4):440-446.
HUANG Ting-lin. Kinetics of heavy metal release from aquatic sediments[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1995, 15(4):440-446.

[2] 余海燕. 河湖沉积物对重金属吸附-解吸的研究概况[J]. 化学工程师, 2005(7):30-33.
SHE Hai-yan. Introduction of the absorption-desorption of heavy metals in the sediment of rivers and lakes[J]. *Chemical Engineer*, 2005(7):30-33.

[3] Almeida C M, Mucha A P, Vasconcelos M T. Influence of the sea rush

- Juncus maritimus* on metal concentration and speciation in estuarine sediment colonized by the plant[J]. *Environ Sci Technol*, 2004, 38(11): 3112–3118.
- [4] 郑志侠, 潘成荣, 丁凡. 巢湖表层沉积物中重金属的分布及污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(1): 161–165.
- ZHENG Zhi-xia, PAN Cheng-rong, DING Fan. Distribution and environmental pollution assessment of heavy metals in surface sediments of Chaohu Lake, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(1): 161–165.
- [5] Feng H, Kirk Cochran J, Lwiza H, et al. Distribution of heavy metal and PCB contaminants in the sediments of an urban estuary: The Hudson River[J]. *Marine Environmental Research*, 1998, 45(1): 69–88.
- [6] 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.
- [7] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geojournal*, 1969, 2: 108–118.
- [8] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975–1001.
- [9] 金艳, 何德文. 重金属污染评价研究进展[J]. 有色金属, 2007, 59(2): 101.
- JIN Yan, HE De-wen. Review on pollution assessment of heavy metals[J]. *Nonferrous Metals*, 2007, 59(2): 101.
- [10] 中国科学院南京地理研究所湖泊室. 江苏湖泊志[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1982.
- [11] 战玉柱, 姜霞, 陈春霄, 等. 太湖西南部沉积物重金属的空间分布特征和污染评价[J]. 环境科学研究, 2011, 24(4): 363–370.
- ZHAN Yu-zhu, JIANG Xia, CHEN Chun-xiao, et al. Spatial distribution characteristics and pollution assessment of heavy metals in sediments from the southwestern part of Taihu Lake[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, 24(4): 363–370.
- [12] Yin Hongbin, Gao Yongnian, Fan Chengxin. Distribution, sources and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments from Lake Taihu, China[J]. *Environ Res Lett*, 2011(6): doi:10.1088/1748-9326/6/4/044012.
- [13] 何华春, 许叶华, 杨兢红, 等. 洪泽湖流域沉积物重金属元素的环境记录分析[J]. 第四纪研究, 2007, 27(5): 766–774.
- HE Hua-chun, XU Ye-hua, YANG Jing-hong, et al. Environmental implications of heavy metals from surface sediments in the Lake Hongze basin[J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(5): 766–774.
- [14] 张文斌, 余辉. 洪泽湖沉积物中营养盐和重金属的垂向分布特征研究[J]. 环境科学, 2012, 33(2): 399–406.
- ZHANG Wen-bin, YU Hui. Vertical distribution characteristics of nutrients and heavy metals in sediments of Lake Hongze[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(2): 399–406.
- [15] 张立, 袁旭音, 邓旭. 南京玄武湖底泥重金属形态与环境意义[J]. 湖泊科学, 2007, 19(1): 63–69.
- ZHANG Li, YUAN Xu-yin, DENG Xu. Speciation of heavy metals in sediments from Lake Xuanwu and their environmental significance[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2007, 19(1): 63–69.
- [16] 邹丽敏, 王超, 冯士龙. 玄武湖沉积物中重金属污染的潜在生物毒性风险评价[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(2): 280–284.
- ZOU Li-min, WANG Chao, FENG Shi-long. Potential biological toxicity assessment on heavy metal pollution in surface sediments of Xuanwu Lake[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, 17(2): 280–284.
- [17] 廖启林, 刘聪, 许艳, 等. 江苏省土壤元素地球化学基准值[J]. 中国地质, 2011, 38(5): 1363–1378.
- LIAO Qi-lin, LIU Cong, XU Yan, et al. Geochemical baseline values of elements in soil of Jiangsu Province[J]. *Geology in China*, 2011, 38(5): 1363–1378.
- [18] 张秀芝, 鲍征宇, 唐俊红. 富集因子在环境地球化学重金属污染评价中的应用[J]. 地质科技情报, 2006, 25(1): 65–72.
- ZHANG Xiu-zhi, BAO Zheng-yu, TANG Jun-hong. Application of the enrichment factor in evaluating of heavy metals contamination in the environmental geochemistry[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2006, 25(1): 65–72.
- [19] 刘振坤, 张书海. 洪泽湖底质重金属污染变化趋势分析[J]. 江苏环境科技, 2005, 18(4): 41–43.
- LIU Zhen-kun, ZHANG Shu-hai. The analysis of pollution changing trend of heavy metals in Hongze Lake's bottom material[J]. *Jiangsu Environmental Science and Technology*, 2005, 18(4): 41–43.
- [20] 马婷, 赵大勇, 曾巾, 等. 南京主要湖泊表层沉积物中重金属污染潜在生态风险评价[J]. 生态与农村环境学报, 2011, 27(6): 37–42.
- MA Ting, ZHAO Da-yong, ZENG Jin. Potential ecological risk assessment of heavy metal pollutants in surface sediments of the lakes in Nanjing[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2011, 27(6): 37–42.
- [21] Duzgoren-Aydin N S. Sources and characteristics of lead pollution in the urban environment of Guangzhou[J]. *Sci Total Environ*, 2007, 385(1–3): 182–195.
- [22] 张茂林, 傅大放. 江苏省高速公路路域土壤铅污染现状与评价[J]. 现代交通技术, 2007, 4(6): 79–91.
- ZHANG Mao-lin, FU Da-fang. Actuality and assessment of lead pollution of soil along expressways in Jiangsu[J]. *Modern Transportation Technology*, 2007, 4(6): 79–91.
- [23] 王沛芳, 邹丽敏, 王超, 等. 玄武湖沉积物中重金属的垂直分布[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(5): 547–552.
- WANG Pei-fang, ZOU Li-min, WANG Chao, et al. Vertical distribution of fractions of Pb, Cd, Ni, Zn, Cr and Mo in sediments of an urban lake[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, 19(5): 547–552.
- [24] 姚书春, 薛滨, 朱育新, 等. 长江中下游湖泊沉积物铅污染记录: 以洪湖、固城湖和太湖为例[J]. 第四纪研究, 2008, 28(4): 659–666.
- YAO Shu-chun, XUE Bin, ZHU Yu-xin, et al. Sediment lead pollution records from lakes at the middle and lower reaches of Changjiang River basin: Case study in Honghu, Guchenghu, and Taihu Lakes[J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(4): 659–666.
- [25] Sutherland T F, Petersen S A, Levings C D, et al. Distinguishing between natural and aquaculture-derived sediment concentrations of heavy metals in the Broughton Archipelago, British Columbia[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2007, 54: 1451–1460.
- [26] Mendiguchía C, Moreno C, Manuel-Vez M P, et al. Preliminary investigation on the enrichment of heavy metals in marine sediments originated from intensive aquaculture effluents[J]. *Aquaculture*, 2006, 254: 317–325.
- [27] Sutherland R A. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii[J]. *Environmental Geology*, 2000, 39: 611–637.