李法松, 韩 钺, 林大松,等. 安庆沿江湖泊及长江安庆段沉积物重金属污染特征及生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(3): 574-582. LI Fa-shong, HAN Cheng, LIN Da-song, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the sediments from lakes of Anqing City and Anqing section of Yangtze River[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(3): 574-582.

安庆沿江湖泊及长江安庆段沉积物重金属 污染特征及生态风险评价

李法松^{1,2},韩 铖¹,林大松³,周葆华^{1*},徐志兵¹,余光明¹,钮志远¹,赵 亿¹, 王淑媛¹

(1.安庆师范大学资源环境学院,安徽 安庆 246011;2.中国科学院生态环境研究中心,环境化学与生态毒理学国家重点实验室,北 京 100085;3.农业部环境保护科研监测所,产地环境监测与预警创新团队,天津 300191)

摘 要:为研究安庆沿江湖泊及长江安庆段重金属污染特征及潜在的生态风险,采集了安庆沿江湖泊及长江安庆段沉积物样品共 58个,分析了Cu、Zn、Pb和Cd共4种重金属分布特征,并采用地累积指数法和Hakanson生态危害指数法进行生态风险评价,结果 表明:不同水体沉积物重金属含量差异较大,市区湖泊群内各重金属含量普遍高于周边生态湖泊和长江安庆段;与区域对应的沉积 物重金属背景值比较,市区湖泊群中各类重金属普遍高于背景值,而其他水体沉积物中的重金属则与背景值相近,表明市区工业生 产及生活等人类活动对湖泊沉积物重金属含量有较大影响。地累积指数污染评价表明安庆市区湖泊群受到一定程度的重金属污 染,尤其是Cd污染达到了中度污染程度。总的看来,所有安庆沿江湖泊及长江安庆段沉积物中各重金属污染的程度依次为Cd>Pb> Zn>Cu。生态风险评价表明市区湖泊群和菜子湖处于中等生态危害状态,其他水体均处于低生态风险状态,各水体潜在生态危害顺 序依次为市区湖泊群、菜子湖、长江安庆段、嬉子湖、石门湖、白荡湖;研究区域沉积物中的重金属生态风险以Cd为主。 关键词:重金属;生态风险评价;沉积物;长江;湖泊;安庆

中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)03-0574-09 doi:10.11654/jaes.2016-1325

Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the sediments from lakes of Anqing City and Anqing section of Yangtze River

LI Fa-shong^{1,2}, HAN Cheng¹, LIN Da-song³, ZHOU Bao-hua^{1*}, XU Zhi-bing¹, YU Guang-ming¹, NIU Zhi-yuan¹, ZHAO Yi¹, WANG Shu-yuan¹

(1.College of Environmental Resources, Anqing Normal University, Anqing 246011, China; 2.State Key Laboratory of Environmental Chemistry and Ecotoxicology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3.Innovative team of monitoring and precaution for cropland environment, Institute of Agro-Environmental Protection, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China)

Abstract: To investigate pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the sediments from lakes of Anqing City and Anqing section of Yangtze River, the pollution characteristics of 4 heavy metals including Cu, Zn, Pb and Cd were analyzed in 58 surface sediment samples from lakes of Anqing City and Anqing section of Yangtze River, and the ecological risk assessment was evaluated using geo-accumulation index(I_{gv}) and potential ecological risk index(RI). Results showed that: The concentrations of heavy metals varied

收稿日期:2016-10-17

作者简介:李法松(1978—),男,副教授,博士,研究方向为环境化学。E-mail:lifs628@163.com

^{*}通信作者:周葆华 E-mail:zhoubh@aqnu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(21577157);安徽省自然科学基金项目(1608085QD76,1708085MB40)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(21577157); The Natural Science Foundation of Anhui Province, China(1608085QD76, 1708085MB40)

2017 年 3 月 李法松,等:安庆沿江湖泊及长江安庆段沉积物重金属污染特征及生态风险评价

greatly in different lakes. The heavy metals in the urban lakes were generally higher than other detected lakes and river. Comparing with the soil background value of Yangtze River basin, the concentration of all 4 heavy metals in sediment samples from urban lakes were higher generally, while heavy metals in other sediment samples were close to the value of soil background, which means human activities such as industrial production and resident's life in urban areas influencing on the content of heavy metals in lake sediments. I and also indicated that urban lakes were contaminated by heavy metals among all detected lakes and river, especially Cd, which coming up to moderate pollution. Generally, the order of heavy metal pollution in the sediments of the lakes and river in this study was Cd, Pb, Zn and Cu. The results of ecological risk assessment indicated that the ecological risk in urban lakes and Caizi Lake were in middling level, while other lakes and river were slight. The order of ecological risk in these study areas was urban lakes, Caizi Lake, Anging section of Yangtze River, Xizi Lake, Shi-

men Lake and Baidang Lake. The ecological risk was dominated by Cd in all sediments in these study areas.

Keywords: heavy metal; ecological risk assessment; sediment; Yangtze River; lakes; Anqing

重金属作为典型累积性污染物,具有不可降解、 易累积性、毒性大,能通过食物链富集放大等特点受 到广泛关注^[1]。沉积物是水域生态环境的重要组成部 分,是重金属等污染物的主要蓄积场所,进入水体后, 重金属被水体颗粒物吸附、络合、絮凝、沉降,以沉积 物形式存在。一方面沉积物中的重金属能够通过再悬 浮作用重新释放到环境中,造成二次污染[2-3]。另一方 面底栖生物能通过摄食、细胞转化等方式生物富集沉 积物中的重金属,从而对水生生物产生毒害作用,破 坏水生生态系统,进一步影响陆生生物和人类健康^[4]。 另外,沉积物中重金属污染特征等信息能反映水体重 金属污染状况和污染来源及生态风险等信息¹⁵。因此, 研究水体沉积物中重金属的分布特征、污染状况,进 一步评价生态风险,对有效控制区域重金属污染、降 低生态风险具有非常重要的意义。

对沉积物中重金属质量评价国内还没有统一标 准,近年来,具有代表性的评价方法主要有地累积指数 法、生态风险评价指数法、富集因子(EFs)、沉积物质 量基准法、污染负荷指数法、脸谱图法、尼梅罗综合指 数法和次生相与原生相分布比值法等16-7。这些方法有 不同的特点和适用范围,并存在各自的应用局限性。其 中地累积指数法和潜在生态风险指数法是目前应用 最广泛的两种评价方法。地累积指数法既反映重金属 分布的自然变化特征,还可以判别人为活动对环境的 影响,是区分人为活动影响的重要参数,但该方法未 考虑不同重金属毒性效应的差别。潜在生态风险指数 法综合考虑重金属的生态效应、环境效应以及毒理效 应,是一种可比的、等价属性指数分级的评价重金属 的方法[8-9]。因此综合运用这两种评价方法能够有效地 评价重金属污染的程度,全面地分析和了解重金属的 毒性和潜在危害,增加重金属污染评价的可靠性。

目前关于湖泊河流沉积物重金属的报道非常广

泛,长江流域及周边湖泊内重金属的分布特征也被广 泛报道,例如长江中下游流域、太湖、巢湖、鄱阳湖、龙 感湖等湖泊^[6-14]。安徽省安庆沿江湖泊湿地由菜子湖、 嬉子湖、石门湖、白荡湖、破罡湖等众多湖泊组成[15-17]。 是长江中下游淡水湿地的重要组成部分,湿地资源十 分丰富[18]。另一方面安徽省安庆市是长江中下游重要 的石油化工城市,有400多家石油化工企业,周边有 安庆铜矿、月山铜矿、月山煤矿等矿产企业,矿产资源 丰富¹⁹。近年来随着经济的发展和城市的扩张,环境 污染问题日益突出。最近的研究表明,安庆沿江湖泊 中某些水体存在富营养化趋势,且某些持久性污染物 如多环芳烃等存在潜在的生态风险[15,17,20]。但该地区 湖泊沉积物中重金属污染状况未见系统报道,亟需进 一步调查该区域湖泊沉积物中重金属类污染物的分 布特征并评价其生态风险。

本研究采集了安庆地区湖泊(包括市区湖泊群、 菜子湖、嬉子湖、白荡湖、石门湖等)、长江安庆段及支 流表层底泥共58个沉积物样品,分析了四种重金属 (Cu、Zn、Pb、Cd)的分布特征,利用地累积指数法和生 态风险评价指数法对沉积物中的重金属进行生态风 险评价,旨在为改善地区环境质量和污染治理提供科 学依据和基础数据支撑。

材料与方法 1

1.1 样品采集

选取安庆市区湖泊群(22个点,U1~U22),包括 东大湖、西小湖、菱湖、莲湖、水上公园、神灵潭等,石 门湖(6个点,S1~S6),嬉子湖(10个点,X1~X10),菜 子湖(9个点,C1~C9),白荡湖(4个点,B1~B4)和沿江 监测断面(Y1~Y4),皖河口入江断面(W),破罡湖入 江闸前、闸后断面(A、K)布置采样点,具体采样点如 图1所示,其中长江监测断面与安庆环境监测中心站



图 1 安庆沿江湖泊及长江安庆段采样点位 Figure 1 Sampling sites from Lakes of Anging City and Anging section of Yangtze River

的监测断面保持一致^[13,16]。采样时间为 2014 年 4—5 月,采样深度为 0~5 cm,样品用彼得逊采泥器采集, 每个采样点采集 500~1000 g 样品装入聚乙烯样品袋 内,贴好标签。样品采集后,立即送回实验室,将所采 集的沉积物冷冻干燥 48 h,剔除杂质,然后用石英研 钵研磨,过 100 目网筛后,低温保存备用。

1.2 样品处理及分析

本研究对安庆地区湖泊及长江安庆段表层沉积 物中几种重金属进行分析。研究表明,水体沉积物重 金属风险评价涉及的重金属有 Hg、Cd、Cr、Pb、Mn、 Cu、Zn、Ni、Co、As等,其中在90%以上的水体沉积物 重金属风险评价中涉及到 Pb、Cu、Zn, 其次是 Cd,说 明这四种重金属污染最广^[6]。因此本研究选取 Pb、Cu、 Zn、Cd 四种重金属为研究对象。四种重金属的标准样 品分别为 Cu 粉(光谱纯,上海沪试)、Zn 粉(光谱纯, 上海沪试)、Cd粉(光谱纯,上海沪试)、Pb粉(光谱 纯,上海沪试)。检测分析依据是 GB/T 17138—1997、 GB/T 17141-1997 等有关国家标准。样品经 HNO3-HClO₄-HF 消化处理后,用原子吸收分光光度计(Pekin Elmer PinAAcle 900T)进行测定,标准曲线法定量,仪 器操作软件非线性拟合,R²≥0.9995。为进一步保证 准确度,利用国家沉积物标准样 GBW07309(GSD-9) 进行3次提取标准样品,计算平均测定值与实际值相

对标准偏差分别为 Cu:3.82%、Zn:4.87%、Pb:2.69%、Cd:5.56%。通过随机抽取平行样对比分析,使得测试误差控制在 10%以内。沉积物样品的有机质总量采用 经典的重铬酸钾容量法-外加热法测定。各湖泊水体 的 pH 和沉积物的有机质含量(OM)范围如下:市区 湖泊群(pH:7.79~8.03;OM:2.31%~8.98%)、石门湖(pH:8.25~8.30;OM:0.59%~2.21%)、白荡湖(pH:7.47~7.85;OM:0.48%~2.80%)、长江安庆段(pH:7.47~7.85;OM:0.30%~0.48%)、菜子湖(pH:7.40~7.58;OM:1.00%~2.40%)、嬉子湖(pH:7.85~7.96;OM:0.25%~2.14%)。

1.3 重金属污染评价方法

为进一步表征本研究区域沉积物中重金属的污染 程度及生态风险,本研究分别运用了地累积指数和潜 在生态风险评价指数值对调查区域沉积物进行评价。 1.3.1 地累积指数法

地累积指数法作为一种评价重金属污染程度的 指标^[21],被广泛用于评价现代沉积物重金属污染,该 方法由德国科学家 Müller¹²¹提出,公式为:

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

式中:*I*geo为地累积指数;*C*n为在沉积物中n元素的实际 含量;*B*n为元素n的地球化学背景值;*k*为成岩作用可能 引起的背景值变动而设定的系数(一般取1.5),根据 Igon值的大小,沉积物的污染程度分为7的等级,见表1。 1.3.2 生态风险评价指数法

Hakanson 潜在生态危害指数法由瑞典学者 Hakanson^[23]提出,利用沉积物中重金属相对于工业化 以前沉积物的最高背景值的比值,及重金属的生物毒 性系数进行加权求和得到生态危害指数。Hakanson 生态危害指数法计算方法如下:

$$C_{f}^{i} = C_{\overline{\mathcal{R}} E}^{i} / C_{n}^{i}$$
$$E_{f}^{i} = T_{f}^{i} \cdot C_{f}^{i}$$

$$RI=\sum_{i=1}^{N}E_{i}$$

其中,C/为某金属的污染指数,C₄₈为沉积物重金 属浓度实测值,C⁴为计算所需的参比值,本文分别针对 长江安庆段和周边湖泊两种不同水体选取长江干流沉 积物的背景值(Cu:57.04 mg·kg⁻¹、Zn:144 mg·kg⁻¹、Pb:26.9 mg·kg⁻¹、Cd:0.45 mg·kg⁻¹)和长江下游水系江河沉积物 中的元素环境背景值(Cu:16.4 mg·kg⁻¹、Zn:77.1 mg·kg⁻¹、 Pb:23.5 mg·kg⁻¹、Cd:0.44 mg·kg⁻¹)为参比值^{D4}。E²为单个 金属的潜在生态危害系数,T²为各金属的毒性响应系 数,反映金属的毒性水平与水体对金属污染的敏感程 度,Cu、Zn、Pb、Cd分别为5、1、5、30。RI 为多种金属潜 在危害系数。

根据 E/值和 RI 值分别确定被考查的元素对水体的潜在生态风险程度,本文研究的污染元素少于 Hakanson^[23]提出的 8 种,需要对 RI 值进行相应的调 整^[25-26],调整后的 RI 值及 E/见表 2。

表 2	湖泊沉积物重金属潜在生态危害程度划分标准

Table 2 Degrees of potential ecological risk corresponding to the

$\text{values } E_{\!\scriptscriptstyle f}^i \text{ and } RI$						
<i>E</i> ⁱ 范围 The range of <i>E</i> ⁱ	<i>RI</i> 范围 The range of <i>RI</i>	生态风险程度 Degree of ecological risk				
$E_f^i < 40$	<i>RI</i> <75	低 Light				
$40 \le E_{f}^{i} < 80$	$75 \leq RI < 150$	中 Medium				
$80 \le E_{f}^{i} < 160$	$150 \leq RI < 300$	高 Strong				
$160 \le E_{f}^{i} < 320$	<i>RI</i> ≥300	很高 Very strong				
$E_t^i \ge 320$		非常高 Extremely strong				

2 结果与讨论

2.1 安庆沿江湖泊及长江安庆段沉积物重金属污染 特征

采集安庆沿江湖泊群及长江安庆段沉积物 58 个 样品,分析4种重金属含量,分布特征统计如表3所 示,不同水体沉积物重金属含量差异较大,市区湖泊 群内 Cu、Zn、Pb、Cd 的均值含量相对较高,分别为 70.1、239.0、53.9、1.1 mg·kg⁻¹,各重金属在市区湖泊群 内变异系数较高,表明受市区工业生产及人类生活影 响较大,并存在多种不同的来源,另外市区湖泊群由 东大湖、西小湖、菱湖、莲湖、水上公园和神灵潭组成, 水体相对比较封闭,无地表径流补给,主要依靠降雨 和地下水补给,且市区湖泊群内有机质含量差异较 大,这些可能是导致市区湖泊沉积物重金属变异系数 高的原因。石门湖中 Cu、Zn、Pb、Cd 的均值含量分别 为 67.1、110.3、42.1、0.01 mg·kg⁻¹, 嬉子湖内 4 种金属 元素的均值含量分别为 24.1、76.7、35.0、0.1 mg·kg⁻¹, 菜子湖内4种金属元素的均值含量分别为31.4、 73.4、64.9、0.9 mg·kg⁻¹, 白荡湖内 4 种金属元素的均 值含量 40.4、80.0、28.7、0.04 mg·kg⁻¹, 长江安庆段则 为 38.9、140.2、57.6、0.9 mg·kg⁻¹。

各类金属元素在所研究的湖泊及长江断面沉积 物上平均含量排序如下: Cu 含量分布依次为市区湖 泊群、石门湖、白荡湖、长江安庆段、菜子湖、嬉子湖; Zn 含量分布依次为市区湖泊群、长江安庆段、石门 湖、白荡湖、嬉子湖、菜子湖; Pb 含量分布依次为菜子 湖、长江安庆段、市区湖泊群、石门湖、嬉子湖、白荡 湖; Cd 含量分布依次为市区湖泊群、菜子湖、长江安 庆段、嬉子湖、白荡湖、石门湖。长江安庆段各重金属 含量略低于文献报道的长江沉积物的平均值^[9]。与长 江中下游的巢湖、太湖、鄱阳湖、龙感湖等湖泊沉积物 中的重金属相比较^[6-10],本研究中各类湖泊沉积物中 Cd 的含量略高于周边的湖泊报道值。市区湖泊群及 市区附近石门湖沉积物中 Cu、Zn、Pb 略高于周边湖 泊的报道值,其他郊区生态湖泊则与周边湖泊报道值

表 1	地累积指数与污染程度

			Table 1 I_{geo} and	pollution levels			
污染程度 Contamination degree	无污染 No pollution	轻度污染 Light pollution	偏中度污染 Moderate pollution	中度污染 More than moderate pollution	偏重污染 Heavy pollution	重度污染 More than heavy pollution	严重污染 Severe pollution
级别 Degree	0	1	2	3	4	5	6
$I_{ m geo}$	≤0	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6

578

Table 3 Statistical characteristics of heavy metal content in sediments from lakes of Anqing City and Anqing section of Yangtze River								
研究区域	采样数	元素	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数	
Research area	Samples number	Element	Minimum/mg·kg ⁻¹	Maximum/mg•kg ⁻¹	Mean value/mg·kg ⁻¹	Standard deviation	Coefficient of variation/%	
市区湖泊群	22	Cu	30.3	169.0	70.1	36.62	52.21	
Lakes in urban area of Anging		Zn	86.0	426.4	239.0	99.49	41.63	
area or ringing		Pb	19.9	169.3	53.9	32.81	60.85	
		Cd	0.2	6.2	1.1	1.21	112.90	
石门湖	6	Cu	32.8	110.4	67.1	24.98	37.22	
Shimen Lake		Zn	91.0	126.2	110.3	16.03	14.62	
		Pb	36.8	46.2	42.1	3.99	9.49	
		Cd	ND	0.07	0.01	0.028	210.30	
嬉子湖	10	Cu	18.6	28.8	24.1	4.15	17.25	
Xizi Lake		Zn	65.0	89.0	76.7	8.65	11.28	
		Pb	30.4	42.4	35.0	4.09	11.67	
		Cd	0.05	0.1	0.1	0.040	36.29	
菜子湖 Caizi Lake	9	Cu	25.4	46.3	31.4	6.21	19.78	
		Zn	66.0	84.0	73.4	6.04	8.23	
		Pb	39.8	93.3	64.9	17.27	26.61	
		Cd	0.4	1.3	0.9	0.27	29.71	
白荡湖	4	Cu	34.1	45.7	40.4	5.06	12.52	
Baidang Lake		Zn	73.0	85.0	80.0	5.60	7.00	
		Pb	15.3	42.7	28.7	13.15	45.77	
		Cd	ND	0.08	0.04	0.034	75.90	
长江安庆段	7	Cu	17.2	61.4	38.9	17.02	43.74	
Anging section of		Zn	123.2	168.6	140.2	14.04	10.05	
rangize niver		Pb	46.5	69.4	57.6	7.44	12.91	
		Cd	0.7	1.0	0.9	0.078	8.86	

表 3 安庆沿江湖泊及长江安庆段沉积物重金属含量的统计特征

注:ND 表示未检出。

Note: ND mean not detected.

相近,说明市区工业生产及生活等人类活动对湖泊沉积物重金属累积有较大影响。

安庆地区沉积物重金属污染来源复杂,市区有众 多的石油化工企业,比如安庆石化厂、曙光化工厂等、 市区附近的工业园区分布很多的机械制造及冶金企 业例如安庆活塞环厂、安庆帝伯粉末冶金有限公司、 辉门环新粉末冶金有限公司、安庆船用柴油机厂等众 多的化工冶金企业,该地区是长江中下游非常重要的 化工重镇,工业结构复杂,市区周边还存在安庆铜矿、 月山铜矿等矿区,这些都是导致市区湖泊沉积物中重 金属含量普遍高于周边地区的原因。

2.2 安庆沿江湖泊及长江安庆段沉积物重金属生态 风险评价

2.2.1 地累积指数评价

地累积指数法被广泛应用于湖泊、河流等沉积物 重金属污染评价^[27-28],本研究采用地累积指数法评价 安庆沿江湖泊群及长江安庆段沉积物的重金属污染

程度,依次得到 Cu、Zn、Pb、Cd 四种元素在不同采样 点污染级别的柱状图,如图2所示。由图2可以看出, Cu 的地累积指数普遍较低, 仅市区湖泊群和邻近市 区的石门湖内少数采样点 I == 值介于 0~1 之间,其余 湖泊 Igeo 值均小于 0,表明 Cu 仅在安庆市区湖泊及紧 邻湖泊内有轻微污染。Zn 的 I 💩 值在市区湖泊群多数 采样点大于 0, 表明市区湖泊普遍受到了 Zn 的轻度 污染,其他湖泊及长江安庆段则未受 Zn 污染。Pb 的 I. 值相对较高, 由图 2 可见, Pb 的 I. 值较大的湖泊 依然是市区湖泊群,多数采样点都显示了不同程度的 污染,其中有个别采样点 Igo 值超过 2,表明市区湖泊 群受到了轻度至偏中度的 Pb 污染,其次是菜子湖和 长江安庆段,多数采样点也显示了不同程度的 Pb 轻 度污染。Cd的 I m 值最大,从图 2 可以看出,市区湖泊 多数采样点 I go 值大于 0, 甚至个别采样点大于 3,表 明市区湖泊受到中度的 Cd 污染,菜子湖和长江安庆 段内多数采样点同样显示了不同程度的 Cd 轻度污





Figure 2 Plot of the Igeo levels of heavy metal in sediments from lakes of Anqing City and Anqing section of Yangtze River

染。总的来看,整个安庆沿江湖泊及长江安庆段沉积 物中各重金属污染的大小为 Cd>Pb>Zn>Cu。 2.2.2 潜在生态风险评价

Hakanson 生态危害指数法评价被广泛应用于现 代沉积物重金属的生态风险评价^[28-30],本文采用 Hakanson 生态危害指数法评价安庆沿江湖泊及长江

农业环境科学学报 第36卷第3期

安庆段沉积物内重金属污染水平及潜在生态危害,结 果见图 3 和表 4。市区湖泊群内重金属污染物中潜在 生态风险因子(E;)最高的是 Cd,平均值为 71.45,范 围为12.00~107.33,对比表2的危害程度划分标准, 整体处于中等的生态风险状态,部分点位达到偏高的 生态危害程度。其他三种重金属均处于相对较低的生 态风险状态。综合潜在生态风险指数(RI)均值为 106.91,范围为 36.57~467.37,表明市区湖泊群潜在生 态风险整体上处于中等的生态风险状态。菜子湖上上 最高的为Cd,均值为62.00,范围为24.67~85.33,达 到中等的生态风险状态,其他三种重金属 E.值均较 低,处于很低的生态风险状态,RI均值为85.76,范围 为 58.91~109.30,整体处于中等的生态风险状态。长 江安庆段及支流上E最高的为Cd,均值为58.38,范 围为 49.33~65.33,达到中度生态危害,其他三种重金 属 E:值均较低,处于很低的生态危害状态, RI 均值为

73.47,范围为 66.37~84.53,整体处于中等生态危害状态。石门湖、嬉子湖和白荡湖各采样点上四种重金属的 E:值和 RI 值均较低,处于低生态风险状态。整体上看,安庆沿江湖泊及长江安庆段沉积物上四种重金属以 Cd 产生的生态危害为主,其他三种重金属产生的生态危害相对较轻,不同湖泊水体重金属生态危害存在差异,潜在生态危害由重到轻依次为市区湖泊群、菜子湖、长江安庆段、嬉子湖、白荡湖、石门湖。

值得关注的是地累积指数评价和生态风险评价 都表明 Cd 是研究区域主要的污染重金属元素,研究 表明 Cd 广泛应用于电镀工业、化工业、电子业和核 工业等领域,来源非常广泛,可能与该地区是长江中 下游重要的化工重镇有关系,这与其他文献报道非常 一致,例如陈书琴等^[31]对安庆沿江的破罡湖沉积物中 重金属的生态风险评价显示 Cd 存在极强的生态风 险,王岚等^[11]对长江水系表层沉积物重金属的生态风



图 3 安庆沿江湖泊及长江安庆段沉积物重金属的潜在生态风险指数

Figure 3 Potential ecological risk factor of heavy metal in sediments from lakes of Anqing City and Anqing section of Yangtze River

表 4	安庆沿江湖泊		п积物潜在生态风险结果

T-11- 4	D	lt. :		. 1.1 . f A	·	A	.f V
Table 4	Potential ecological risk	assessment results 1	n sealments from	i lakes of And	ing City and	i Anding section (DI Tangize nivel
					0	1 0	

项目Item		潜在生态风险因子(E ^r _r)Potential ecological risk factors				潜在生态风险指数(RI)
		Cu	Zn	Pb	Cd	Potential ecological risk index
市区湖泊群 Urban lakes	范围/Range	9.23~51.52	1.12~5.52	4.06~34.49	12.00~107.33	36.57~467.37
	平均值/Mean	21.36	3.10	10.99	71.45	106.91
石门湖 Shimen Lake	范围/Range	10.00~33.47	1.18~1.63	7.51~9.43	0~4.67	20.36~43.59
	平均值/Mean	20.46	1.42	8.60	0.89	31.36
嬉子湖 Xizi Lake	范围/Range	5.70~8.78	0.86~1.15	6.20~8.65	3.33~10.00	16.76~26.59
	平均值/Mean	7.35	1.00	7.14	6.53	22.03
菜子湖 Caizi Lake	范围/Range	7.74~14.12	0.85~1.09	8.12~19.04	24.67~85.33	58.91~109.30
	平均值/Mean	9.57	0.95	13.24	62.00	85.76
白荡湖 Baidang Lake	范围/Range	10.40~13.93	0.95~1.10	3.12~8.71	0~5.33	18.00~25.55
	平均值/Mean	12.32	1.04	6.27	3.50	23.13
长江安庆段 Anqing	范围/Range	1.51~5.38	0.85~1.17	8.64~12.89	49.33~65.33	66.37~84.53
section of Yangtze River	平均值/Mean	3.41	0.97	10.71	58.38	73.47

险评价表明 Cd 的生态风险最高,而刘新等¹⁸对邻近 的巢湖湖区及主要出入湖河流沉积物中重金属进行 生态风险分析表明 Cd 是最主要的重金属污染物。鄱 阳湖¹⁹、湘江¹³¹及东江流域沉积物¹³²¹中的重金属生态风 险也是以 Cd 为主。因此湖泊沉积物中 Cd 的生态风 险值得进一步关注。

3 结论

(1)安庆沿江湖泊及长江安庆段沉积物重金属含量特征表明,不同水体沉积物重金属含量差异较大,市区湖泊群内重金属含量普遍高于周边生态湖泊和长江安庆段水体。与区域对应的沉积物重金属背景值比较,市区湖泊群中各类重金属普遍高于背景值,而其他水体沉积物中的重金属则与背景值相近,表明市区工业生产及生活等人类活动对湖泊沉积物重金属累积有较大影响。

(2)地累积指数法污染评价表明,安庆市区湖泊 群受到一定程度的重金属污染,尤其是 Cd 污染达到 了中度污染的程度。安庆沿江湖泊及长江安庆段沉积 物中各重金属污染程度由大到小为 Cd>Pb>Zn>Cu。

(3)Hakanson 潜在生态危害指数法评价研究区 沉积物内重金属污染水平及潜在生态危害表明,市区 湖泊群和菜子湖处于中等的生态风险状态,仅市区湖 泊群内个别采样点达到偏高的生态风险状态,其他水 体均处于低生态风险状态,潜在生态危害顺序依次为 市区湖泊群、菜子湖、长江安庆段、嬉子湖、白荡湖、石 门湖。研究区域沉积物样品的生态风险以 Cd 为主。

参考文献:

- [1] Nath B, Birch G, Chaudhuri P. Assessment of sediment quality in Avicennia marina-dominated embayments of Sydney Estuary: The potentialuse of pneumatophores (aerial roots) as a bio-indicator of trace metal contamination[J]. Science of the Total Environment, 2014, 472:1010– 1022.
- [2] Bertin C, Bourg A C M. Trends in the heavy metal content(Cd, Pb, Zn) of river sediments in the drainage basin of smelting activities[J]. Water Research, 1995, 29(7): 1729–1736.
- [3] Lin J G, Chen S Y. The relationship between adsorption of heavy metal and organic matter in river sediments[J]. *Environment International*, 1998, 24(4):345–352.
- [4] Habib M R, Mohamed A H, Osman G Y, et al. Biomphalaria alexandrina as a bioindicator of metal toxicity[J]. Chemosphere, 2016, 157:97–106.
- [5] 匡晓亮, 彭 渤, 张 坤, 等. 湘江下游沉积物重金属污染模糊评价[J]. 环境化学, 2016, 35(4):800-809.

KUANG Xiao-liang, PENG Bo, ZHANG Kun, et al. Assessment of heavy metal pollution using the fuzzy function normalization method for sediments of the lowermost Xiangjiang River[J]. *Environmental Chem-istry*, 2016, 35(4):800-809.

- [6]陈 明, 蔡青云, 徐 慧, 等. 水体沉积物重金属污染风险评价研究 进展[J]. 生态环境学报, 2015, 24(6):1069-1074. CHEN Ming, CAI Qing-yun, XU Hui, et al. Research progress of risk assessment of heavy metals pollution in water body sediments[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(6):1069-1074.
- [7] 张 鑫,周涛发,杨西飞,等.河流沉积物重金属污染评价方法比较研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2005,28(11):1419-1423.
 ZHANG Xin, ZHOU Tao-fa, YANG Xi-fei, et al. Study on assessment methods of heavy metal pollution in river sediments[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 2005, 28(11):1419-1423.
- [8] 刘 新,蒋 豫,高俊峰,等.巢湖湖区及主要出入湖河流表层沉积物重金属污染特征及风险评价[J].湖泊科学,2016,28(3):502-512.
 LIU Xin, JIANG Yu, GAO Jun-feng, et al. Pollution characteristics of heavy metals and the risk assessment for the surface sediments from Lake Chaohu and its main tributary rivers[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(3):502-512.
- [9] 弓晓峰,陈春丽,周文斌,等.鄱阳湖底泥中重金属污染现状评价[J]. 环境科学,2006,27(4):732-736.
 GONG Xiao-feng, CHEN Chun-lan, ZHOU Wen-bing, et al. Assessment on heavy metal pollution in the sediment of Poyang Lake[J]. Environmental Science, 2006, 27(4):732-736.
- [10] 邴海健, 吴艳宏, 刘恩峰, 等. 长江中下游不同湖泊沉积物中重金属 污染物的累积及其潜在生态风险评价[J]. 湖泊科学, 2010, 22(5): 675-683.

BING Hai-jian, WU Yan-hong, LIU En-feng, et al. The accumulation and potential ecological risk evaluation of heavy metals in the sediment of different lakes within the middle and lower reaches of Yangtze River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(5):675–683.

- [11] 王 岚, 王亚平, 许春雪, 等. 长江水系表层沉积物重金属污染特征 及生态风险性评价[J]. 环境科学, 2012, 33(8):2599-2606.
 WANG Lan, WANG Ya-ping, XU Chun-xue, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the surface sediments of the Yangtze River[J]. *Environmental Science*, 2012, 33 (8):2599-2606.
- [12] 杨 辉,陈国光,刘红樱,等. 长江下游主要湖泊沉积物重金属污染 及潜在生态风险评价[J]. 地球与环境, 2013, 41(2):160-165. YANG Hui, CHEN Guo-guang, LIU Hong-ying, et al. Pollution of heavy metals in the sediments from the lower reaches of the Yangtze River and its potential ecological risk assessment[J]. Earth and Environment, 2013, 41(2):160-165.
- [13] 尹 肃, 冯成洪, 李扬飏, 等. 长江口沉积物重金属赋存形态及风险特征[J]. 环境科学, 2016, 37(3):917-924.
 YIN Su, FENG Cheng-hong, LI Yang-yang, et al. Speciation and risk characteristics of heavy metals in the sediments of the Yangtze estuary [J]. Environmental Science, 2016, 37(3):917-924.
- [14] 徐明露, 方凤满, 林跃胜. 安庆菜子湖退耕湿地土壤中的重金属含量及其污染评价[J]. 湿地科学, 2015, 13(4):437-443. XU Ming-lu, FANG Feng-man, LIN Yu-sheng. Contents and pollution evaluation of heavy metals in soils of wetlands after returning farmland to lake in Caizi Lake in Anqing City [J]. Wetland Science, 2015, 13(4):

437-443.

[15]李法松,路 杨,李长霞,等.安徽省安庆市城区湖泊主要污染分布 来源分析及水质综合评价[J].安庆师范学院学报(自然科学版), 2013,19(4):98-103,112.

LI Fa-song, LU Yang, LI Chang-xia, et al. The distribution, source analysis and comprehensive evaluation in urban lakes of contaminants from Anqing City[J]. *Journal of Anqing Teachers College (Natural Science Edition*), 2013, 19(4):98–103, 112.

- [16] 章宜洁. 安庆市地表水污染特征分析及防治对策[J]. 安庆师范学院 学报(自然科学版), 2012, 18(1):87-90.
 ZHANG Yi-jie. Pollution characteristics analysis and control measures of surface water in Anqing[J]. Journal of Anqing Teachers College(Natural Science Edition), 2012, 18(1):87-90.
- [17] 谷 字, 李法松, 李长霞, 等. 安庆沿江湿地湖泊水体富营养化综合 评价[J]. 安庆师范学院学报(自然科学版), 2014, 20(4):121-124. GU Yu, LI Fa-song, LI Chang-xia, et al. Comprehensive evaluation of Anging Yangtze River wetland eutrophication of lakes[J]. Journal of Anging Teachers College(Natural Science Edition), 2014, 20(4):121-124.
- [18] 周葆华, 操璟璟, 朱超平, 等. 安庆沿江湖泊湿地生态系统服务功能价值评估[J]. 地理研究, 2011, 30(12):2296-2304.
 ZHOU Bao-hua, CAO Jing-jing, ZHU Chao-ping, et al. Valuation of wetland ecosystem services along the Yangtze River in Anqing, Anhui Province[J]. *Geographical Research*, 2011, 30(12):2296-2304.
- [19] 刘一男,范 裕,严四华,等.长江中下游成矿带安庆-贵池矿集区 五横岩体的成岩年代和区域岩浆活动演化研究[J].岩石学报, 2014,30(4):1117-1129.

LIU Yi-nan, FAN Yu, YAN Si-hua, et al. Petrogensis chronology and evolution of regional magmatic activity study of Anqing–Guichi ore de– posit concentrated area in the Middle–Lower reaches of Yangtze River metallogenic belt[J]. *A cta Petrologica Sinica*, 2014, 30(4):1117–1129.

[20] 李法松,韩 铖,操璟璟,等.长江安庆段及毗邻湖泊沉积物中多环 芳烃分布及风险评价[J]. 环境化学, 2016, 35(4):739-748.
LI Fa-song, HAN Cheng, CAO Jing-jing, et al. Distribution and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from Anqing section of Yangtze River and lakes around Anqing City[J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(4):739-748.

- [21] Hilton J, Davison W, Ochsenbein U. A mathematical model for analysis of sediment core data: Implications for enrichment factor calculations and trace-metal transport mechanisms[J]. *Chemical Geology*, 1985, 48 (1/2/3/4):281-291.
- [22] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Geojourna, 1969, 2(3):108–118.
- [23] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8):975– 1001.
- [24] 张立诚, 佘中盛, 章 申. 长江水系水环境化学元素系列专著(2):
 水环境化学元素研究[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1996:57-59, 67-69.

ZHANG Li-cheng, SHE Zhong-sheng, ZHANG Shen. Series of Monographs on chemical elements of water environment in Yangtze River (2): Study on chemical elements of water environment[M](Beijing: China Environmental Science Press), 1996, 57–59, 67–69.

- [25] 马德毅, 王菊英. 中国主要河口沉积物污染及潜在生态风险评价
 [J]. 中国环境科学, 2003, 23(5):521–525.
 MA De-yi, WANG Ju-ying. Evaluation on potential ecological risk of sediment pollution in main estuaries of China[J]. *China Environmental Science*, 2003, 23(5):521–525.
 [26] 刘 成, 王兆印, 何 耘, 等. 环渤海湾诸河口潜在生态风险评价
- [26] 刘 成, 主兆印, 何 私, 寺. 环渤海湾诸河口潜住生态风险评价 [J]. 环境科学研究, 2002, 15(5): 33-37. LIU Cheng, WANG Zhao-yin, HE Yun, et al. Evaluation on the potential ecological risk for the river mouths around Bohai Bay[J]. *Research* of Environmental Sciences, 2002, 15(5): 33-37.
- [27] 王 丽,陈 凡,马千里,等. 东江淡水河流域地表水和沉积物重金 属污染特征及风险评价[J]. 环境化学, 2015, 34(9):1671-1684.
 WANG Li, CHEN Fan, MA Qian-li, et al. Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in surface water and sediment in Danshui River of Dongjiang[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 34(9): 1671-1684.
- [28] 赵世民,王道玮,李晓铭,等. 滇池及其河口沉积物中重金属污染评价[J]. 环境化学, 2014, 33(2):276-285.
 ZHAO Shi-min, WANG Dao-wei, LI Xiao-ming, et al. Assessment on heavy metals pollution in surface sediments of Dianchi Lake and its estuaries[J]. Environmental Chemistry, 2014, 33(2):276-285.
- [29] 冯精兰, 胡鹏抟, 刘 群, 等. 黄河中下游干流沉积物中重金属的赋 存形态及其生态风险[J]. 环境化学, 2015, 34(1):178-185. FENG Jing-lan, HU Peng-chuan, LIU Qun, et al. Chemical speciation and risk assessment of heavy metals in the sediments from the mainstream of middle and lower reaches of Yellow River[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 34(1):178-185.
- [30] 许友泽, 刘锦军, 成应向, 等. 湘江底泥重金属污染特征与生态风险 评价[J]. 环境化学, 2016, 35(1):189–198.
 XU You-ze, LIU Jin-jun, CHENG Ying-xiang, et al. Characteristics and ecological risk assessment of heavy metals contamination in sediments of the Xiangjiang River[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, 35 (1):189–198.
- [31] 陈书琴, 童 芳, 马德庆, 等. 破罡湖底泥重金属分布特征及潜在生态危害[J]. 湿地科学, 2011, 9(2):151-156.
 CHEN Shu-qin, TONG Fang, MA De-qing, et al. Spatial distribution of heavy metals and their potential ecological risk in sediments of Pogang Lake[J]. Wetland Science, 2011, 9(2):151-156.
- [32] 王鸣宇,秦延文,张 雷,等. 湘江衡阳段表层沉积物重金属污染 评价研究[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(增刊1):271-275, 342.
 WANG Ming-yu, QIN Yan-wen, ZHANG Lei, et al. Analysis and assessment on pollution of heavy metal in the surface sediment of the Xiang River in Hengyang section[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(Suppl1):271-275, 342.
- [33] 王方园,洪华嫦,岑 艳,等.东江流域底泥重金属分析及潜在环境生态风险[J].环境化学,2012,31(9):1328-1334.
 WANG Fang-yuan, HONG Hua-chang, CEN Yan, et al. The analysis and pollution assessment of heavy metals in the sediment of the East River[J]. Environmental Chemistry, 2012, 31(9):1328-1334.