DOI:10.19431/j. cnki. 1673-0062.20190607.003

# 湘江中游衡阳-株洲段沉积物几种典型重金属的 污染特征及其生态风险评价

彭翠英<sup>1,2,3</sup>,李志良<sup>1,2</sup>,黄 微<sup>1,2,3</sup>,左 慧<sup>1</sup>,谌 苏<sup>1</sup>, 朱允华<sup>1,2,3</sup>,胡劲松<sup>1,2,3</sup>,谢红艳<sup>1,2,3</sup>,刘 俊<sup>1,2,3</sup>\*

(1. 南华大学 衡阳医学院,湖南 衡阳 421001;2. 生物毒理与生态修复衡阳市重点实验室,湖南 衡阳 421001;3. 有色金属矿区耕地重金属污染生态阻抗技术研究衡阳市重点实验室,湖南 衡阳 421001)

摘 要:为研究湘江中游衡阳-株洲段沉积物中重金属的污染特征及其生态风险,对 24 个沉积物样品进行重金属检测分析,使用多种方法评价污染程度及等级。研究表 明,湘江中游衡阳-株洲段沉积物中重金属存在很强的积累现象,尤其是 Cd 污染特 别严重。且 Cd 主要以可交换态和碳酸盐结合态存在于沉积物,Pb 主要以铁锰氧化 物态存在于沉积物中,容易被外界利用或者受外界因素变化而使其被动植物吸收增 加。与《国家土壤环境质量标准》二级标准比较,各采样点 Cu、Pb、Zn 尚未超标,但 Cd 超标4.98~22.08 倍。单因子指数和地积累指数均表明,Cd 达到了严重污染,各 采样点底泥的 Cd 的 Igeo 值均为6级,已达到了极强的污染程度;虽然各采样点 Fe 的 Igeo 也均为6级,但主要以残渣态为主,对生态环境影响较低;Mn 只产生了轻度的污 染,Mg 对环境无污染。各采样点分析发现,松柏镇和霞湾可能是此江段主要污染源。 在后续治理中,应该加大对于 Cd 污染的治理,减少对于周边生命健康的危害。 关键词:湘江;衡阳-株洲段;重金属污染;生态风险 中图分类号:X53;X826 文献标志码:A 文章编号:1673-0062(2019)04-0089-08

# Heavy Metal Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk Assessment of Sediments in Hengyang-Zhuzhou Section of Xiangjiang River

PENG Cuiying<sup>1,2,3</sup>, LI Zhiliang<sup>1,2</sup>, HUANG Wei<sup>1,2,3</sup>, ZUO Hui<sup>1</sup>, CHEN Su<sup>1</sup>, ZHU Yunhua<sup>1,2,3</sup>, HU Jingsong<sup>1,2,3</sup>, XIE Hongyan<sup>1,2,3</sup>, LIU Jun<sup>1,2,3</sup>\*

(1. Hengyang Medical College, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;

收稿日期:2019-03-05

- 基金项目:湖南省自然科学基金项目(2018JJ2325);湖南省教育厅重点项目(15A168); 衡阳市科技局项目 (2018KJ111;2016KF14)
- 作者简介:彭翠英(1971-),女,教授,博士,主要从事环境医学方面的研究。E-mail:2517618772@qq.com。\*通信作者:刘 俊(1976-),男,副教授,博士,主要从事环境生态学、环境生物学等方面的研究。E-mail: nhuliujun@126.com

# 2. The Key Laboratory of Hengyang City on Biological Toxicology and Ecological Restoration, Hengyang, Hunan 421001, China; 3. The Key Laboratory of Hengyang City on Ecological Impedance Technology of Heavy Metal Pollution in Cultivated Soil of Nonferrous Metal Mining Area, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: In order to study the pollution characteristics and ecological risk of heavy metals in the sediments in the Hengyang-Zhuzhou section of the Xiangjiang River, 24 sediment samples were analyzed for heavy metals, and various methods were used to evaluate pollution levels and grades. Studies have shown that there is a strong accumulation of heavy metals in the sediments of the Hengyang-Zhuzhou section of the Xiangjiang River, especially Cd. And Cd is mainly present in the deposits in the exchangeable state and the carbonate-bound state. Pb is mainly present in the deposit in the form of iron-manganese oxide, and is easily utilized by the outside or by external factors to increase the absorption of passive plants. Compared with the second-level standard of National Soil Environmental Quality Standard, Cu, Pb and Zn have not exceeded the standard, but Cd exceeded the standard by 4.98-22.08 times. Both the single factor index and the ground accumulation index indicate that Cd has reached serious pollution. The  $I_{reo}$  value of Cd at each sampling point is 6 and has reached a very strong pollution level; although the  $I_{\text{geo}}$  of Fe at each sampling point is also Level 6, but mainly based on the residual state, has a low impact on the ecological environment, Mn only produces mild pollution, and Mg has no pollution to the environment. Analysis of each sampling point found that Songbai Town and Xiawan may be the main sources of pollution in this section. In the follow-up governance, the treatment of Cd pollution should be increased to reduce the harm to the surrounding life and health. key words: Xiangjiang River; Hengyang-Zhuzhou section; heavy metal pollution; ecological risk

### 0 引 言

湘江中游衡阳市和株洲市拥有丰富有色金属 矿产资源,矿藏冶炼开发是该地区的主要产业,矿 区存在一些处理能力不达标的企业排放含有重金 属的废水进入湘江。随着城市化、工业化的加速 推进和养殖业集约化发展,工业污染、生活污染、 养殖业污染和历史遗留污染叠加,湘江流域环境 污染问题日益复杂[1]。通过各种途径排入水体 的重金属污染物,由于不易降解,逐步转移沉积至 底泥中,因此底泥中的重金属含量比水相中高很 多,具有极强的累积作用。随着上覆水体环境的 变化,吸附在底泥沉积物中的重金属可能被释放 再次进入水体<sup>[2]</sup>。因此,沉积物重金属的污染状 况是全面衡量水环境质量状况的重要因素。为了 解湘江衡阳-株洲段沉积物的多种重金属污染情 况,为湘江的水污染防治提供基础环境数据,本研 究于通过以湘江中游衡阳-株洲段沉积物为研究 对象,对沉积物中铅(Pb)、镉(Cd)、铜(Cu)、铁(Fe)、镁(Mg)、锰(Mn)、锌(Zn)的总量和形态进行测定分析,使用地积累指数法、单因子指数法和风险评价代码(risk assessment code, RAC)法对所调查沉积物中重金属污染特征及其潜在生态风险进行定量评价。

### 1 材料和方法

#### 1.1 样品采集与制备

取样在 2017 年 10~11 月湘江枯水期进行, 选择各县市具有代表性的江段确定取样点,从上 游到下游选择常宁市的松柏镇 S1,衡南县的云集 镇 S2,衡南县的车江镇 S3,衡阳市的东洲岛 S4, 衡东县的霞流镇 S5,株洲县的淦田镇 S6、渌口镇 S7,株洲市的霞湾 S8,共8 个取样点(图1)。底泥 样品的采集通过无扰动重力底泥采样器采集表层 0~20 cm 沉积物,共 24 个底泥样品,用聚乙烯封 口袋封装标记后带回实验室。采集到的底泥样品 被转移到洁净的搪瓷盘中自然风干,剔除硕石、木 屑、动植物残体等异物后,混匀研磨处理,样品全 部过孔径为 150 μm 的尼龙筛后,用广口瓶保存 备用<sup>[3]</sup>。



 S1-S8采样点分别位于松柏镇,云集镇,车江镇,东洲岛, 霞流镇,淦田镇,渌口镇,霞湾
 图1 湘江衡阳株洲段采样点

Fig. 1 Sampling point of Hengyang-Zhuzhou section of Xiangjiang River

#### 1.2 样品中重金属的总量与形态分析

底泥样品采用王水-HClO<sub>4</sub> 法进行消解<sup>[4-5]</sup>, 使用电感耦合等离子光谱仪(ICP-AES)和石墨炉 原子吸收分光光度计测定重金属含量。使用改进 的 BCR 连续提取法<sup>[6]</sup>,将沉积物样品中重金属分 成可交换态与碳酸盐结合态(B1),铁锰氧化物结 合态(B2),有机物和硫化物结合态(B3),残渣态 (B4)。

#### 1.3 污染生态评价及生物有效性分析

单因子指数法和德国学者 Muler 在 1979 年 提出的地积累指数法(index of geoaccumulation, *I*geo) 是众多水体沉积物中重金属污染评价应用 最广泛的方法<sup>[3,7-8]</sup>。本研究中土壤污染评价采 用单因子指数法和地积累指数法进行综合评价。 地积累指数法(*I*geo) 可以直观反映外源重金属在 沉积物中的富集程度,数据具有较高的可比性。 其计算公式如下:

 $I_{\text{geo}} = \log 2 \left[ C_{\text{i}} / (1.5 \times B_{\text{i}}) \right]$ 

式中,*C*<sub>i</sub>为沉积物中第*i*种重金属的实测含量,*B*<sub>i</sub>为参比值,即当地母质母岩中该元素的地球化学

背景值,常数1.5为考虑到造岩运动可能引起的 背景值变动而取的系数。根据 *I*geo 值,重金属的 污染程度共分7级(0~6级),*I*geo 值与污染程度 的对应关系见表1。

表 1 地积累指数与污染程度分级 Table 1 Geological accumulation index and pollution degree classification

$I_{ m geo}$	≤0	0 ~ 1	$1 \sim 2$	2~3	3~4	4~5	>5
级数	0	1	2	3	4	5	6
污染 程度	无	无-中	中	中-强	强	强- 极强	极强

生物有效性采用风险评价代码法(Risk assessment code, RAC)对7种重金属风险进行评价<sup>[9-10]</sup>。重金属的生态风险分级标准为<sup>[10]</sup>:重金 属可交换态与碳酸盐结合态(B1)在总量中所占 比例小于1时,无风险;B1所占比例在1~10时, 低风险;B1所占比例在11~30时,中度风险;B1 所占比例在31~50时,高风险;B1所占比例大于 50时,极高风险。

#### 1.4 数据分析

结果用"平均数±标准差"表示,采用 Excel 2016 和 SPSS 23.0 软件进行统计分析。

### 2 结果与分析

### 2.1 研究段沉积物重金属总含量分析

湘江中游衡阳-株洲段沉积物 7 种重金属含 量分布如图 2。从图 2 各重金属含量分布图可 知,从整体上看,霞湾、松柏镇和霞流镇这三个采 样点的各重金属含量要高于其它采样点。总体来 看,从松柏镇到霞湾的沉积物中重金属浓度分布 大致呈现高-低-高的情况,主要是由于中上游金 属冶炼开发企业较多,排入湘江的重金属较多,衡 阳市区段污染源主要为生活垃圾,进入湘江的重 金属量减少,湘江在霞流镇附近有大渡源水利枢 纽,水流经过时易于携带的重金属污染物沉积,因 此在霞流镇重金属含量出现增高,下游株洲冶炼 化工企业众多,近年来经济建设发展迅速,多种因 素导致此区域重金属含量较高。

对 8 个取样点检测的 7 种金属元素进行相关 性分析后发现, Mn 与其他 6 种元素之间均没有 显著的相关性( $\rho$ >0.05);Cd、Cu、Fe、Mg、Pb、Zn 这 6 种元素之间存在着显著的关联性( $\rho$ <0.05)。 说明,Mn 元素与其他六种元素来源不同,Cd、Cu、

### Pb、Zn、Mg 五种元素来源可能相同。



采样点:S1-松柏镇;S2-云集镇;S3-车江镇;S4-东洲岛;S5-震流镇;S6-淦田镇;S7-渌口镇;S8-震湾
 图 2 8 个取样点 7 种典型重金属含量分布图
 Fig. 2 Distribution of 7 typical heavy metals in 8 sampling points

### 2.2 研究段沉积物重金属形态分布特征及风险 评估

湘江中游衡阳-株洲段沉积物典型重金属形态分布如表2所示,8个采样点的沉积物中,7种金属元素的形态比例各不相同。各采样点中Cd

主要是以可交换态与碳酸盐结合态为主存在于沉积物(51.28%~66.37%);Cu各形态比例在各江段有所差异,但是整体是以残渣态为主(31.8%~47.68%),其次为铁锰氧化物结合态(15.63%~31.47%)、有机物和硫化物结合态

(13.00%~30.21%);Fe 主要为残渣态存在于沉积物(75.46%~87.06%),其它形态所占比例较低;Mg 以残渣态为主(43.08%~73.49%);Mn 主要以可可交换态与碳酸盐结合态和铁锰氧化结合物态存在于沉积物中(72.39%~78.91%);Pb 主要以铁锰氧化物结合态存在于沉积物中(56.23%~79.80%);Zn 除有机物和硫化物结合态外,可交换态与碳酸盐结合态(23.70%~37.64%)、铁锰氧化物态(21.82%~29.01%)和 残渣态(24.32%~37.62%)三种形态的占比接近。8个采样点中,Cd 在霞流镇和霞湾的可交换态和碳酸盐结合态含量最高,Mn 在松柏镇、霞流

镇和淦田镇的可交换态与碳酸盐结合态含量较高,Zn在霞流镇和霞湾的可交换态和碳酸盐结合态含量较高。通常认为,可交换态与碳酸盐结合态容易被动植物吸收利用,对于环境的直接危害较大;铁锰氧化物结合态、有机物和硫化物结合态在pH、氧化还原电位、有机质含量等发生变化时可能被释放,具有潜在危害;残渣态一般较稳定,不容易被利用。综上可得,Cd、Mn和Zn三种重金属进入湘江水体后对环境的直接危害较大,其中Cd是一个极大的生态风险因素;整体上,霞流镇和霞湾区域的沉积物的污染程度明显高于其它采样点。

93

0%

表 2 8 个取样点 7 种典型重金属形态百分比表 Table 2 Distribution of 7 typical heavy metal morphological contents at 8 sampling points

	14010 2	2.501.1540	on or , cypre	ai neu (j me	un morphore	great conten	is at a samp	B Points	,0	
元素	采样点	松柏镇	云集镇	车江镇	东洲岛	霞流镇	淦田镇	渌口镇	霞湾	
	B1	55.22	66.37	55.45	60.54	66.25	54.97	52.96	51.28	-
B2	21.76	15.19	15.48	18.29	20.52	19.46	24.53	22.34		
Ca	B3	8.29	8.36	19.50	13.89	5.72	9.94	12.11	10.03	
	B4	14.73	10.09	9.57	7.29	7.51	15.64	10.41	16.35	
·	B1	12.89	23.46	14.40	15.01	11.44	14.11	14.42	9.95	-
C	B2	30.09	21.71	15.63	22.80	27.19	27.36	24.32	31.47	
Cu	B3	21.16	13.00	22.29	30.21	25.93	21.26	17.98	19.19	
	B4	35.86	41.83	47.68	31.98	35.44	37.26	43.28	39.39	
	B1	0.01	0.05	0.02	0.02	0.04	0.03	0.01	0.01	
Fe B2 B3 B4	B2	15.96	13.05	11.21	14.61	21.70	15.99	18.94	15.13	
	В3	2.07	1.00	1.71	1.92	2.80	2.07	2.51	2.22	
	B4	81.96	85.90	87.06	83.45	75.46	81.92	78.53	82.64	
B1 B2	24.77	10.25	36.71	40.40	14.97	23.24	18.67	27.84		
	B2	9.61	8.39	8.77	9.89	8.47	9.22	9.71	11.35	
wig	B3	10.17	7.87	7.17	6.63	11.21	9.64	9.83	8.45	
	B4	55.45	73.49	47.35	43.08	65.35	57.90	61.79	52.36	
	B1	31.00	47.34	37.61	35.97	51.40	48.42	26.55	36.90	
Ma	B2	43.02	31.57	37.22	39.94	24.24	28.93	50.90	35.49	
14111	B3	2.51	2.87	3.03	2.74	3.53	3.33	2.52	3.54	
	B4	23.47	18.22	22.14	21.35	20.82	19.31	20.03	24.07	
	B1	2.99	9.83	5.09	2.50	4.27	4.18	1.66	2.85	
DL	B2	63.97	56.23	53.29	56.68	79.80	58.62	66.95	67.92	
гb	B3	5.67	4.19	6.44	4.54	6.29	6.33	6.63	7.30	
	B4	27.37	29.76	35.18	36.28	9.64	30.87	24.76	21.93	
	B1	26.52	28.87	23.70	23.94	37.62	28.09	29.93	30.83	
7.	B2	26.24	24.45	21.82	25.38	28.00	28.10	27.40	29.01	
LII	В3	11.29	9.05	12.78	14.64	10.06	12.11	11.26	15.17	
	B4	35,96	37.62	41.70	36.05	24.32	31.70	31,41	24, 98	

注:B1:可交换态与碳酸盐结合态;B2:铁锰氧化物结合态;B3:有机物结合态和硫化物结合态;B4:残渣态。

#### 2.3 研究段沉积物重金属生物有效性分析

表 2 知, Cd 在 8 个采样点的 RAC (51.28 ~ 66.37) 均大于 50, 为极高风险; Cu 的 RAC 为

9.95~23.46,属于低风险到中风险;Fe 在各取样 点的 RAC(0.01~0.05)均小于1,可认为无风险; Mg 在各采样点 RAC 范围为 10.25~40.40,属于 低风险到中风险; Mn 在禄口镇为中风险(RAC=26.55), 在霞流镇属于极高风险(RAC=51.40), 在其它 6 个采样点为高风险(RAC=51.40), 在其它 6 个采样点为高风险(31.00 < RAC < 48.42); Pb 在各采样点的 RAC 为1.66~9.83, 属 于低风险; Zn 在霞流镇(RAC=37.62)和霞湾 (RAC=30.83)属于高风险,在其它 6 个采样点属 于中风险(23.70 < RAC < 29.93)。综上可得, 8 个 采样点的 Cd 均达到了高风险,已经成为一个极 其严重的生态风险因子; Mn、Zn 在各采样点也具 有一定的风险性,应进行治理,防止其成为新的生 态风险因子。

### 2.4 研究段沉积物重金属污染程度评价

本研究采用全国土壤环境背景值调查成果中 湖南省土壤背景值的几何均值<sup>[11]</sup>作为地积累指 数法的参比值和单因子指数法的评价标准,计算 得到表 3 和表 4。从表 4 可知,湘江中游衡阳-株 洲段各采样点中 Mg 的单因子指数 *P*<sub>i</sub><1,Cu、Mn、 Pb、Zn 的单因子指数除个别点外,大部分都 *P*<sub>i</sub><5, Cd 和 Fe 的单因子指数 *P*<sub>i</sub>>>5。表明,在湘江中 游衡阳-株洲段的沉积物在整体上 Cd、Fe 污染极

其严重,且 Cd 超出国家二级标准(GB15618 -1995)<sup>[12]</sup>(维护人体健康的土壤限制值)4.98~ 22.08 倍。综上,湘江中游衡阳-株洲段沉积物中 Cd 已经成为严重威胁沿岸居民生命健康的生态 因子。从表3可知,各采样点的 Cd 的 I am 指数除 车江镇为5级外,其余7个采样点的 I and 指数均 为6级,达到了极强的污染程度;从数据中可以看 出 Pb 和 Zn 的污染程度比 Cu 的污染程度高;各 采样点的 Fe 的 I eeo 值均达到 6 级,为极强污染程 度; Mn 的 I eeo 值在 1~2级,属于无-中度污染程 度。虽然 Fe、Mn 未在国家标准中规定标准值,但 从医学文献中可知,Fe、Mn 为人体必需的微量元 素,但是在大量摄入时在体内积累,引起疾病,如 Fe 过量摄入会引起血色病,也会提高糖尿病的发 病率, Mn 在人体过量蓄积会引起严重的神经毒 性<sup>[13-14]</sup>。因此,也需监测 Fe、Mn 的含量和形态变 化。综上可得,湘江中游衡阳-株洲段沉积物中 Cd、Fe 的污染程度要远远高于 Cu、Pb、Zn、Mn、Mg 四种元素。

表 3 湘江中游衡阳-株洲段沉积物 7 种重金属地积累指数

 Table 3 Geological accumulation index of seven heavy metals in sediments from Hengyang-Zhuzhou section of the middle reaches of Xiangjiang River

采样点	Cd		Cu		Pb		7	Zn		Fe		Mn		Mg *	
	$I_{ m geo}$	级数	$I_{\rm geo}$	级数	$I_{ m geo}$	级数									
松柏镇	6.10	6	0.36	1	0.74	1	0.60	1	12.82	6	1.98	2	-1.69	0	
云集镇	5.64	6	-0.76	0	0.31	1	0.02	1	12.05	6	0.25	1	-2.36	0	
车江镇	4.58	5	-0.61	0	-0.48	0	-0.40	0	11.68	6	0.04	1	-2.24	0	
东洲岛	5.26	6	-0.24	0	-0.10	0	0.10	1	11.92	6	0.51	1	-1.88	0	
霞流镇	6.73	6	0.20	1	1.03	2	1.33	2	12.74	6	0.86	1	-1.72	0	
淦田镇	5.70	6	-0.17	0	0.52	1	0.49	1	12.68	6	0.87	1	1.77	0	
渌口镇	5.46	6	-0.72	0	0.30	1	0.43	1	12.32	6	0.89	1	-2.02	0	
霞湾	6.62	6	0.54	1	1.23	2	1.92	2	12.83	6	0.93	1	-1.41	0	

注:\* Mg 背景值采用南方地区全镁浓度平均值 5 000 mg/kg

#### 表4 湘江中游衡阳-株洲段沉积物7种重金属单因子指数

Table 4 Single factor index of seven heavy metals in the sediments of Hengyang-Zhuzhou section

of the middle reaches of Xiangjiang River										
地点编号	Cd	Cu	Fe	Mg	Mn	Pb	Zn			
松柏镇	102.86	1.92	10 872.39	0.46	5.92	2.50	2.21			
云集镇	74.97	0.89	6 367.25	0.29	1.79	1.85	1.48			
车江镇	35.99	0.98	4 935.63	0.32	1.54	1.08	1.10			
东洲岛	57.50	1.27	5 801.07	0.41	2.14	1.40	1.56			
霞流镇	159.58	1.73	10 285.63	0.46	2.72	3.06	3.66			

95

续表							
地点编号	Cd	Cu	Fe	Mg	Mn	Pb	Zn
淦田镇	78.19	1.33	9 841.51	0.44	2.75	2.14	2.05
渌口镇	65.96	0.91	7 671.66	0.37	2.78	1.85	1.95
霞湾	147.77	2.19	10 892.98	0.57	2.85	3.51	5.50

## 3 讨 论

湘江中游衡阳-株洲段沉积物中重金属的含 量与形态分布表现出明显不均一性,说明衡阳-株洲段的人类活动对于沉积物的形成具有明显的 影响作用。水口山地区有大量的铅、锌、铜等有色 金属,当地众多的冶炼企业,在采选和冶炼过程中 排放的废气、废渣、废水,已成为湘江水系及其周 边土壤污染主要来源。各采样点的重金属含量及 形态分布的差异与距离水口山矿区的远近没有直 接关系,这种差异主要与当地的工农业生产布局, 尤其是矿业、化工等产业布局关系密切。松柏镇 虽然紧邻水口山地区,但是在松柏镇采样点的沉 积物中重金属含量没有异常偏高,可能是频繁泥 沙开采的活动,致使河床上大量的重金属被搅动, 随着河流漂流到下游地区。霞流镇地处衡东县干 支流的交汇处,交通便利,来往船只密切,同时,湖 南省重点建设项目大源渡水利枢纽工程也在此 地,湘江在此处时受水利枢纽的影响流速缓慢,利 于水中携带重金属的泥沙悬浮物等沉降,可能是 导致霞流镇沉积物中重金属含量偏高的主要原 因。下游的霞湾一直以来就是株洲市的采选冶污 染中心区,拥有为数众多、规模不等的开采冶炼公 司。因此在霞湾的沉积物中一直存在大量的重金 属蓄积,对当地的生产生活产生了很大的影响。

土壤中重金属的总量是判断土壤标准的基本 量。在测定的8种金属元素中,Cd、Cu、Pb、Zn为 国家土壤质量标准中限定的元素,其中,Cu、Pb、 Zn基本处在国家土壤质量二级标准以内,属于轻 度到中度的污染,但是Cd元素却远远超过二级 标准规定的最大值,属于极其严重的污染,对于沿 岸的生态环境仍具有较大威胁。因此,应该继续 加大对Cd污染的治理,同时对其他元素进行监 测,防止污染反复。

土壤中重金属的形态是决定其生物有效性的基础,且各形态在外界条件有一定的变化时会相互转化<sup>[15-16]</sup>。湘江中游衡阳-株洲段各采样点沉积物中 Cd、Mn 和 Zn 主要以可交换态和碳酸盐结合态存在,Pb、Mn、Cu 和 Zn 以铁锰氧化物态和有

机态在各采样点含量均占有一定比例。碳酸盐结 合态很容易受外界影响转换为离子状态,以生物 可直接利用形式存在。铁锰氧化态重金属在较强 酸性和适当环境影响下可以释放出来,成为生物 可利用态,是生物可利用态重金属的提供者<sup>[17]</sup>。 湘江中游衡阳-株洲段采样点沉积物中,Cd、Mn、 Zn、Pb、Cu的可利用态、碳酸盐结合态和铁锰氧化 物态的比例和含量均很高,这是对湘江中游衡阳 -株洲段生态系统和沿岸居民构成严重威胁的重 要的潜在因素。

本研究试验中的形态提取采用了改进的 BCR 三步连续提取法,相对于 Tessier 5 步连续提 取法操作,操作简便,步骤简单,且在以前研究中 发现 Tessier 5 步连续提取法分析结果的精密度明 显低于改进的 BCR 三步连续提取法<sup>[18-19]</sup>,因此, 得到的数据具有更好地精密度。湘江中游衡阳-株洲段沉积物中 Cd、Mn、Zn、Pb、Cu 含量存在很 强的积累现象,尤其是 Cd 污染达到了极强的程 度。与《国家土壤环境质量标准》(GB 15618— 1995)二级标准比较,各采样点Cu、Pb和Zn尚未 超标,但 Cd 超标 4.98~22.08 倍。湘江中游衡阳 -株洲段各采样点底泥中的 Pb、Mn、Cu 和 Zn 生物 可利用性均达到了一定水平,各采样点底泥中 Pb 和Cu的生物可利用性均显著低于Cd、Mn和Zn 的生物可利用性。各采样点底泥中 Cd、Mn 和 Zn 主要以碳酸盐结合态、无定型铁锰氧化物结合态 存在于底泥中,而 Pb 和 Cu 主要以无定型铁锰氧 化物结合态和残渣态存在。

随着上覆水体环境理化性质的变化,吸附在 底泥沉积物中的重金属可被释放再次进入水体, 水体中的 Cd、Mn、Zn、Pb 和 Cu 可能被水生植物 和动物吸收而进入食物链导致危害人体健康。因 此,有必要加强湘江水体中 Cd、Mn、Zn、Pb 和 Cu 在食物链中的迁移、富集及其对人体健康危害方 面的研究。

## 4 结 论

1) 湘江衡阳-株洲段的沉积物中重金属 Cd 的含量偏高, Cu、Fe、Mg、Mn、Pb、Zn 的含量相对较

第33卷第4期

低,Cd 污染依然是此地区的主要是污染元素。

2) 形态含量表明, Cd、Mn、Zn 对于环境的有 着直接的危害作用, 应该积极进行治理; Pb 以铁 锰氧化物结合态为主, 有巨大的潜在危害。

3)各采样点的含量分析可知,松柏镇和霞湾 是研究中发现的污染源,云集镇、车江镇、东洲岛、 渌口镇都属于扩散污染。

#### 参考文献:

- [1] 胡杨,许涛. 湖南湘江流域重金属污染现状及建议[J]. 民营科技,2016(8):220.
- [2] 高健磊, 王静. 两种河道底泥重金属污染生态危害评价方法比较研究 [J]. 环境工程, 2013, 31 (2): 119-121.
- [3] 许振成,杨晓云,温勇,等.北江中上游底泥重金属污染及其潜在生态危害评价[J].环境科学,2009,30 (11):3262-3268.
- [4]《环境污染分析方法》组.环境污染分析方法[M].北 京:科学出版社,1980.
- [5] 城乡建设环境保护部环境保护局环境监测分析.环境监测分析方法[M].北京:中国环境科学出版社,1986.
- [6] FÖRSTNER U. Metal speciation-general concepts and applications [J]. International journal of environmental analytical chemistry, 1993, 51(1/2):5-23.
- [7] FU C, GUO J, PAN J, et al. Potential ecological risk assessment of heavy metal pollution in sediments of the Yangtze River within the Wanzhou section, China [J]. Biological trace element research, 2009, 129 (1/2/3): 270-277.
- [8] HUANG X, HU J, LI C, et al. Heavy-metal pollution and potential ecological risk assessment of sediments from Baihua Lake, Guizhou, P. R. China [J]. International journal of environmental health research, 2009, 19(6): 405-419.
- [9] PERIN G, CRABOLEDDA L, LUCCHESE L, et al.

Heavy metal speciation in the sediments of Northern Adriatic Sea. A new approach for environmental toxicity determination [C]//Proceedings of International Conference Heavy Metals in the Environment. Georgia, USA: ICHMET, 1985;45-46.

- [10] GUILLEN M T, DELGADO J, ALBANESE S, et al. Heavy metals fractionation and multivariate statistical techniques to evaluate the environmental risk in soils of Huelva Township (SW Iberian Peninsula) [J]. Journal of geochemical exploration, 2012, 119-120;32-43.
- [11] 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.
- [12] 夏家淇. 土壤环境质量标准详解[M]. 北京:中国环 境科学出版社,1996.
- [13] 徐志芳,杨昱,周亚茹.铁过载与糖尿病[J].中国临床医生杂志,2016,44(6):16-18.
- [14]梁典胤,谢秉言,许放,等.神经炎症在锰中毒中的作 用及对氨基水杨酸钠对其治疗作用研究进展[J]. 中国药理学与毒理学杂志,2018,32(7):579-584.
- [15] PROKOP Z, CUPR P, ZLEVOROVAZLAMALIKOVA V, et al. Mobility, bioavailability, and toxic effects of cadmium in soil samples [J]. Environmental research, 2003,91(2):119-126.
- [16] NURSITA A I, SINGH B, LEES E M, et al. Cadmium bioaccumulation in Proisotoma minuta in relation to bioavailability in soils [J]. Ecotoxicology and environmental safety, 2009, 72(6):1767-1773.
- [17] 韩春梅,王林山,巩宗强,等.土壤中重金属形态分析 及其环境学意义[J].生态学杂志,2005,24(12): 1499-1502.
- [18] 邓晓霞,米艳华,黎其万,等.利用改进的 BCR 法和 Tessier法提取稻田土壤中 Pb、Cd 的对比研究[J]. 江西农业学报,2016,28(9):64-68.
- [19] 黄思宇,彭晓春,吴彦瑜,等.土壤中重金属形态分析 研究进展[J].广东化工,2012,39(2):86-87;97. (责任编辑:周泉)