

湘江株洲-湘潭-长沙段河床沉积物重金属污染特征及生态风险评价

张 坤^{1,2}, 杨 霞¹, 吴雅霖¹, 吴蓓娟¹, 匡晓亮¹

(1.湖南农业大学资源环境学院, 湖南 长沙 410128; 2.湖南师范大学资源环境科学学院, 湖南 长沙 410006)

摘 要:在湘江株洲-湘潭-长沙(长株潭)河段三地 12 处采集河流沉积柱芯 12 个, 获得沉积物样本 384 个, 采用地累积指数、潜在生态危害指数等评价方法, 系统分析样本中 Mn、Zn、Pb、Cu、Cr、Ni 等 6 种重金属元素含量水平及分布变化特征, 对湘江株洲-湘潭-长沙段重金属污染程度及生态风险进行评价。结果表明:湘江长株潭河流沉积物重金属变动趋势变动较大, Cu、Pb、Zn 分布有明显地域规律, Cr、Ni、Mn 分布无明显地域规律。地累积指数显示, 除 Ni 和 Cr 外, 长株潭三地都存在 Pb、Cu、Zn、Mn 污染, 其中株洲霞湾段(ZX5-10)Pb 和 Zn 达严重污染程度, Mn、Cu 等达到中度或轻度污染程度;湘潭与长沙两地湘江沉积物 Pb、Zn 达到中度污染, 其余重金属为轻度或偏中度污染水平。潜在生态风险指数显示, 株洲段为强生态危害, 湘潭段为中等生态危害, 长沙段为轻微生态危害。株洲霞湾段湘江沉积物的重金属潜在生态危害应引起有关部门重视。

关键词:重金属; 污染评价; 沉积物; 湘江; 长株潭

中图分类号: X820.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2015)01-0060-06

doi: 10.13254/j.jare.2014.0230

Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Reach, Xiang Jiang River, China

ZHANG Kun^{1,2}, YANG Xia¹, WU Ya-jin¹, WU Bei-juan¹, KUANG Xiao-liang¹

(1.College of Resources & Environment of Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2.College of Resources and Environment Science of Hunan Normal University, Changsha 410006, China)

Abstract: The concentration and distribution characteristics of six heavy metals (Mn, Zn, Pb, Cu, Cr, Ni) were analyzed in 384 surface sediments samples from Xiang Jiang River (Zhuzhou-Xiangtan-Changsha Reach, hereinafter referred to as Chang-Zhu-Tan Reach). Heavy metal pollution in the sediments from those areas were analyzed and evaluated by using geo-accumulation index method and potential ecological risk index method. The results indicated that the concentrations of heavy metals in the sediments from Chang-Zhu-Tan Reach which had different variation trends, the distribution of 3 heavy metals (Cu, Pb and Zn) was contacted with regular geographic changes, the distribution of the other 3 heavy metals (Cr, Ni and Mn) was contacted with irregular geographic changes. According to the results by using geo-accumulation index, there were potentially heavy metals pollutions in Chang-Zhu-Tan Reach, and 4 kinds of metals (Pb, Cu, Zn, Mn) were arrived different degree of contaminations. There were serious pollution of Pb and Zn, mild or moderate pollution of Mn and Cu in Xiawan, Zhuzhou Reach (ZX5-10). In Xiangtan and Changsha Reach, there existed moderate pollution of Pb and Zn, mild or moderate pollution of Cu, Mn, Ni and Cr. The potential ecological risk index indicated that the degree of heavy metal pollution in the surface sediments from Zhuzhou Reach represented high ecological hazard, Xiangtan Reach represented moderate ecological hazard, Changsha Reach represented slight ecological hazard. The results suggested that attention should be paid to the potential ecological risk of Xiawan, Zhuzhou Reach (ZX5-10).

Keywords: heavy metals; pollution assessment; sediment; Xiang Jiang River; Chang-Zhu-Tan Reach

河流沉积物作为环境介质, 一方面通过吸附、共沉淀、离子交换等物理化学过程, 使河水中重金属发

生转移, 对水体重金属污染具有缓冲作用, 其自身因积聚重金属而形成环境污染, 成为重金属积聚库; 另一方面, 由于水环境物理化学环境的变化, 积聚重金属的沉积物又可释放其中的重金属, 使其转入水体等环境介质, 对水环境质量产生影响, 而成为可能的重金属污染源。因此, 对河流沉积物重金属污染进行评价和分析, 具有重要的理论意义和实际价值。

收稿日期: 2014-09-16

基金项目: 湖南省研究生创新项目(2014024); 湖南省重点学科建设项目(2012001)

作者简介: 张 坤(1977—), 男, 湖南衡阳人, 博士研究生, 主要从事环境地球化学研究。E-mail: hunnuzk@163.com

湘江作为我国重金属污染最严重的河流之一^[1],其重金属污染问题一直备受关注。对其沉积物重金属污染的分析研究也一直没有间断。已有研究从重金属区域分布^[2-4]、重金属活化迁移^[5]、重金属赋存特征^[6-7]、重金属污染源^[8-10]、污染程度评价及环境效应^[11-13]等方面进行了较深入的分析,取得了重要的研究成果。但有关湘江河床沉积物重金属污染的特征及其生态风险等一些问题的认识,目前并未取得明确的认识。特别是,以往的研究中,研究大多集中于某一个区域,且背景值的采用尚未结合湖南地质矿藏特点形成统一标准。如曾北危等^[3]评价了湘江沉积物重金属污染,结果表明湘江长沙河段沉积物中相对富集重金属 Cd、Hg、Pb、As、Cr、Cu、Zn,对该地区生态环境构成潜在威胁。童霆^[1]、王晓丽^[10]从区域地质背景的角度,对湘江河口表层沉积物的重金属元素也进行了大量的分析,得到湘江流域本身即位于多种金属元素的高背景区内。彭利等^[11]仅对长沙段表层沉积物中重金属进行了监测和分析,采用潜在生态危害指数法对各种重金属的生态风险进行评价。结果表明:按当地最高背景值为参比值计算,湘江长沙段表层沉积物中各种重金属潜在生态危害系数大小排序为 $Cd > Hg > As > Pb > Cu > Cr > Zn$,多种重金属的潜在生态风险综合指数为 560.8,表明湘江长沙段沉积物重金属污染属于强生态危害^[8]。另一方面,部分研究对河床沉积物并未进行系统的取样分析,因而得到的结果具有一定的局限性。本次工作对湘江株洲、湘潭、长沙河段河床沉积物进行系统的取样分析,试图在认识沉积物重金属污染特征及其空间变化规律的基础上,探讨河床沉积物重金属污染的生态风险危害等问题,为流域重金属的基础研究和污染防治提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 药品与溶液配制

质量分数为 65% 的浓硝酸;质量分数约为 40%~42% 的氢氟酸;质量分数为 37% 的稀盐酸;浓度为 $1\,000\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Rh 内标溶液;蒸馏水等级 I (ISO 3696—1995)。

1.2 仪器设备

自制 65 mm 有机玻璃管(使用前用稀盐酸洗净),MDJ2000 双目金相显微镜,筛网(60 目筛、200 目筛),玛瑙研钵,Teflon 密封容器,超声波振荡器 DL-800D,电热板 C-MAG HP 10,Perkin-Elmer Elan6000 型(ICP-MS)等离子质谱仪。

1.3 样品采集与处理

样品采集点根据湘江流域特征,从上游至下游,选取株洲、湘潭、长沙三段河段进行沉积物柱芯采样(采样点位置见图 1),分别在株洲段(株洲 ZH1、石峰大桥北 ZF2、石峰大桥东 ZF1、霞湾 ZX)、湘潭段(竹埠港 ZB、醴潭高速 XT、鹤山岭锰矿 XM、昭山 ZS)、长沙段(猴子石大桥 HZ、橘洲大桥 JZ、三汊矶大桥 SG、霞凝 XW)12 处河床获得沉积柱芯 12 个。沉积柱芯采用有机玻璃管(管长 120 cm,内径 65 mm,外径 75 mm,配有橡胶活塞及密封盖),现场取样进行观察、记录后对 12 个沉积柱芯按 2 cm 间隔切割后获得 384 份样品(由于本文不进行随地质年代变化的重金属特征分析,故采集的不同长度、不同岩性的沉积柱芯及切割后样品适合于沉积物重金属元素特征的分析与研究),记录归类后分别装入塑料密封袋,送入实验室做后续处理。沉积物样品在实验室经自然风干后,在双目镜下进行矿物成分分析。

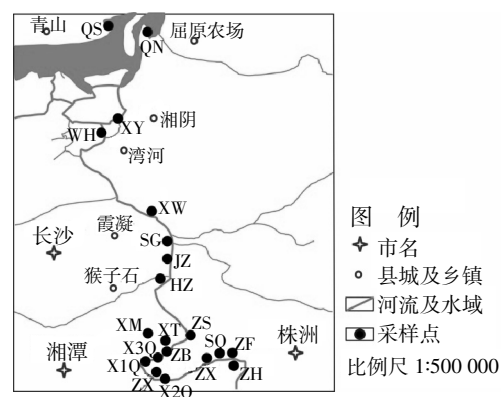


图 1 湘江长株潭三地及入湖口表层沉积物采样点

Figure 1 Sampling sites of surface sediments from Chang-Zhu-Tan Reach, Xiang Jiang River

1.4 样品分析与测试

样品在 40 °C 条件下烘干后,过 60 目筛,再称取 5.0 g 样品用玛瑙研钵研磨,过 200 目筛($<75\ \mu\text{m}$),得到粉末样品备分析之用。40.0 mg 粉末样品置于 Teflon 密封容器中,加入 0.3 mL 浓硝酸,氢氟酸 1.0 mL 超声波震荡后于电热板上蒸干,然后再加入 0.3 mL 浓硝酸,氢氟酸 1.0 mL 密封加热(100 °C)7 d。样品蒸干后再加 2.0 mL 浓硝酸恒温 24 h 后再蒸干,加 2.0 mL 浓硝酸溶解盐类,后用 1% 的硝酸将样品转移至 50 mL 容量瓶中,加入 Rh 内标溶液,以 1% 硝酸稀释至 40 g 备测,采用中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学重点实验室 Perkin-Elmer Elan 6000 型(ICP-MS)

等离子质谱仪对所有沉积物样品进行 Pb、Zn、Cu、Mn、Ni、Cr 6 种重金属元素含量分析,分析数据均为 7 次平行分析的平均值,检测极限为 10×10^{-9} ,分析精度高于 5%。

1.5 沉积物重金属生态风险评价方法

鉴于我国在水体沉积物环境质量评价还没有统一标准,故采用地累积指数法、变异系数法、潜在生态危害指数法,来评价湘江株洲、湘潭及长沙三段区域水体沉积物环境质量状况。使用变异系数 CV (Coefficient of variance) 法^[14]来统计和衡量三段沉积物重金属各观测值变异程度;使用地累积指数法^[15]分析三段沉积物重金属富集情况;使用沉积物重金属潜在危害指数 (RI) 评价方法^[16]对三段沉积物重金属潜在生态危害进行评价。

1.6 数据分析

采用 SPSS 11.0 软件进行数据分析和处理。利用独立样本 t 检测评价株洲、湘潭、长沙三地湘江表层沉积物重金属含量差异,用 Pearson 相关系数进行相关分析,显著性水平设置为 0.05。

2 结果与分析

2.1 沉积物中重金属含量及污染水平

湘江株洲、湘潭、长沙三地重金属平均含量见表 1。总体来看(图 2),在 6 种重金属含量分析当中,变化幅度依次为 $Pb > Zn > Cu > Mn > Ni > Cr$,其中,湘江长株潭三地 Pb 含量变化较大,株洲段 Pb、Zn、Cu 含量最高。其中,株洲霞湾(ZX 采样点)Pb 含量达到 $1\ 299.05\ mg \cdot kg^{-1}$ 、Zn 含量为 $3\ 781.01\ mg \cdot kg^{-1}$ 、Cu 含量为 $291.50\ mg \cdot kg^{-1}$ 。观测的 6 种重金属元素中,Pb、Zn、Cu 含量最高,这可能与位于该地的株洲市清水塘工业区有关。该地重金属含量与中国土壤背景值 Mn($450\ mg \cdot kg^{-1}$)、Zn($76\ mg \cdot kg^{-1}$)、Pb($22\ mg \cdot kg^{-1}$)、Cu($20\ mg \cdot kg^{-1}$)、Cr

($44\ mg \cdot kg^{-1}$)、Ni($21.2\ mg \cdot kg^{-1}$)相比,分别高出 5.35、49.75、59.05、14.58、2.39、2.79 倍^[17]。

从各重金属含量的空间变异参数可以看出,长株潭三地湘江沉积物中株洲段 Pb 含量的变幅最大,其变异系数为 1.07, Cu 和 Zn 变异系数都大于 0.5;湘潭段 Ni 的变幅较大,其变异系数为 0.51;长沙段所有被测重金属元素的变异系数均小于 0.50,这说明该地 6 种重金属的含量空间分布较均匀,波动程度不大,离散性较小。

2.2 沉积物中重金属元素相关性分析

研究水体表层沉积物中重金属含量的相关性可以判断重金属的来源是否相同。如果重金属含量之间显著相关,则说明它们出自同一来源的可能性较大。为探讨长株潭三地湘江沉积物各种重金属之间的相关状况,利用 SPSS 统计软件计算各重金属含量之间的 Pearson 相关系数(表 2)。被测各重金属含量除 Zn 和 Cu、Pb 和 Cu、Pb 和 Zn 呈显著相关外,其他重金属含量之间的相关性都比较弱,其中 Pb 和 Zn 相关性达到了 1.0,说明长株潭三地湘江沉积物 Pb 和 Zn 重金属元素来源相同。

2.3 沉积物中重金属的污染评价

2.3.1 地累积指数法

湘江长株潭三地湘江表层沉积物重金属 I_{geo} 和指数分级见图 3,在采样点中,ZX(株洲霞湾段)Pb、Zn 的 I_{geo} 均大于 5,属于极重污染程度;三地 Cr 的 I_{geo} 均处于 $[0, 1]$ 之间,属于轻度污染;三地除株洲外,湘潭与长沙各重金属元素均处于 $[0, 3]$ 范围内,属于中度污染。综上,各种重金属污染长株潭三地湘江沉积物强弱顺序为 $Pb > Zn > Cu > Mn > Ni > Cr$ 。

2.3.2 潜在生态风险指数 (RI) 法

根据 Hakanson 潜在生态风险指数法,计算湘江长株潭三地湘江表层沉积物 6 种主要重金属 E_i^r 和

表 1 湘江株洲、湘潭、长沙三地及入湖口表层沉积物重金属含量

Table 1 Heavy metals concentration in surface sediments from Chang-Zhu-Tan Reach, Xiang Jiang River

重金属	株洲			湘潭			长沙			背景值
	含量变化 区间/ $mg \cdot kg^{-1}$	平均值/ $mg \cdot kg^{-1}$	变异系数	含量变化 区间/ $mg \cdot kg^{-1}$	平均值/ $mg \cdot kg^{-1}$	变异系数	含量变化 区间/ $mg \cdot kg^{-1}$	平均值/ $mg \cdot kg^{-1}$	变异系数	
Cu	64~291	138.89	0.52	77~141	95.22	0.40	64~80	73.07	0.31	20
Pb	152~1 300	696.00	1.07	127~188	174.12	0.32	87~175	138.63	0.20	22
Zn	450~3 782	1 560.55	0.70	443~756	563.89	0.29	323~576	460.56	0.29	76
Mn	1 646~2 498	2 144.24	0.34	975~3 317	2 339.03	0.30	1 229~2 933	2 487.13	0.27	450
Cr	77~127	101.22	0.39	72~104	89.29	0.16	89~129	96.66	0.19	44
Ni	52~85	63.29	0.55	36~80	53.68	0.51	35~56	48.64	0.22	21.2

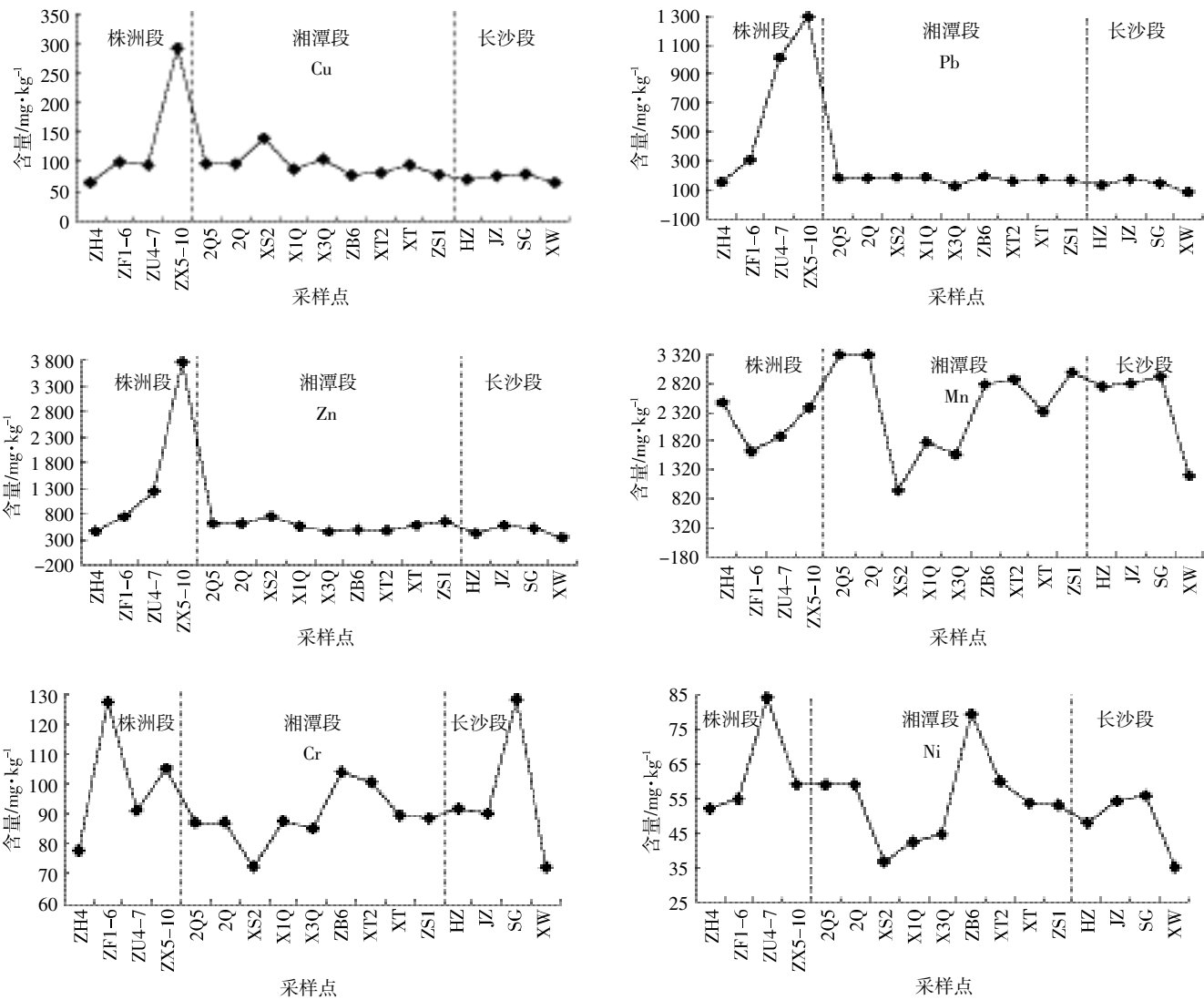


图 2 湘江长株潭三地表层沉积物 6 种重金属含量变化

Figure 2 The contents change of 6 kinds of heavy metals concentration in surface sediments from Chang-Zhu-Tan Reach, Xiang Jiang River

表 2 长株潭三地湘江沉积物重金属含量的相关分析

Table 2 The correlation analysis of the heavy metal contents from Chang-Zhu-Tan Reach, Xiang Jiang River

重金属	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Pb
Cr	1					
Mn	0.326	1				
Ni	0.414	0.452	1			
Cu	0.146	-0.138	0.042	1		
Zn	0.198	-0.068	0.483	0.773**	1	
Pb	0.198	-0.068	0.483	0.773**	1.000**	1

注:“**”表示 $P<0.01$ 。

RI ,结果见表 3。对照 RI 评价标准可以看出,Cr、Ni 的 E_i 均小于 40,处于轻微的生态风险等级,无潜在生态风险影响;Mn 在 2Q5 采样点达到 40.94,达到中等生

态危害;Zn 在采样点 ZU4-7 和 ZX5-10 分别达到 48.31 和 61.86,达到中等生态危害;Cu 在采样点 XS2 处达到 87.81,属于强生态危害;Pb 和 Cu 在采样点 ZU4-7 和 ZX5-10 均达到中等或很强的生态危害。株洲段湘江沉积物重金属潜在生态危害指数为强生态危害,湘潭段湘江沉积物重金属潜在生态危害指数为中等生态危害,长沙段湘江沉积物重金属潜在生态危害指数为轻微生态危害。

2.4 评价方法比较与分析

采用地累积指数、潜在生态危害指数评价法对湘江株洲-湘潭-长沙河段河床沉积物重金属污染进行分析和评价,2 种方法评价结果基本相同,都发现株洲段河床沉积物存在较严重的重金属污染,湘潭段和长沙段重金属污染有递减趋势,6 种重金属中 Pb、Zn、

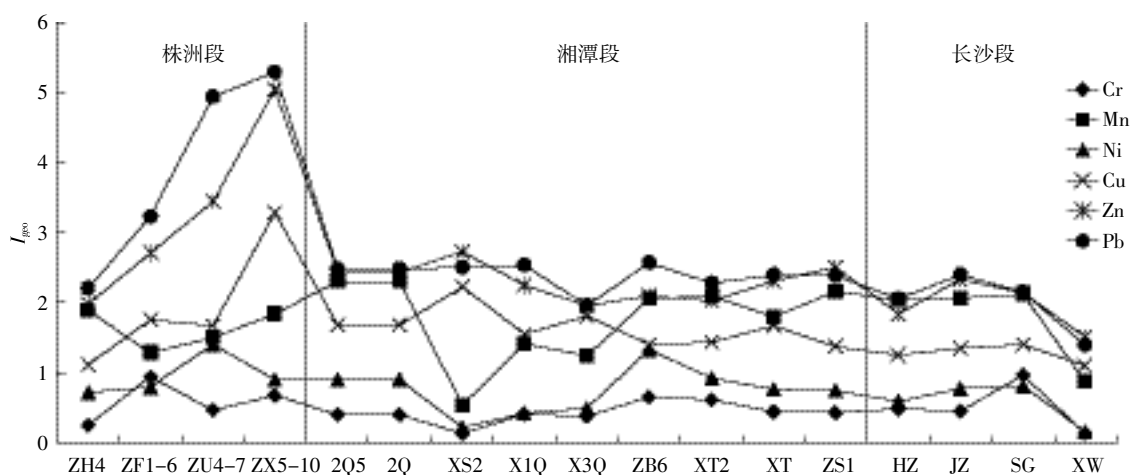


图 3 湘江长株潭三地沉积物重金属元素地累积指数和划分等级

Figure 3 Index of geo-accumulation (I_{geo}) and classification of heavy metals pollution in surface sediments from Chang-Zhu-Tan Reach, Xiang Jiang River

表 3 长株潭三地湘江沉积物 E_r^i 和 RI 结果

Table 3 Potential ecological risk coefficient (E_r^i) and risk indices (RI) of heavy metals in surface sediments from Chang-Zhu-Tan Reach, Xiang Jiang River

区域	采样点	E_r^i						RI
		Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Pb	
株洲	ZH4	4.32	30.83	9.49	40.48	7.26	32.57	124.96
	ZF1-6	7.02	20.33	10.03	63.04	14.78	66.31	181.51
	ZU4-7	5.04	23.46	15.35	59.49	48.31	216.79	368.45
	ZX5-10	5.81	29.72	10.77	182.19	61.86	277.57	567.92
湘潭	2Q5	4.82	40.94	10.79	59.93	8.79	39.45	164.72
	2Q	4.82	40.93	10.79	59.93	8.80	39.46	164.72
	XS2	4.00	12.04	6.70	87.81	8.93	40.09	159.57
	X1Q	4.84	22.22	7.73	55.06	9.09	40.79	139.72
	X3Q	4.72	19.67	8.14	65.44	6.09	27.31	131.37
	ZB6	5.75	34.50	14.50	49.35	9.33	41.86	155.30
	XT2	5.57	35.62	10.94	50.63	7.63	34.22	144.60
	XT	4.94	28.88	9.78	59.51	8.29	37.20	148.61
	ZS1	4.90	37.15	9.64	48.38	8.18	36.71	144.96
长沙	HZ	5.08	34.15	8.72	44.68	6.51	29.23	128.37
	JZ	4.98	34.83	9.90	47.55	8.30	37.23	142.78
	SG	7.09	36.20	10.19	49.57	6.95	31.19	141.19
	XW	4.01	15.18	6.41	40.17	4.11	18.45	88.33

和 Cu 都呈现出较强相关性,证明株洲-湘潭-长沙河段河床沉积物中 Pb、Zn 和 Cu 重金属来源基本相同。株洲霞湾港(采样点 ZX5-10)Cu、Pb、Zn 含量都达到了最大值,处于严重污染水平。

3 结论

(1)湘江长株潭河流沉积物重金属变动趋势变动较大,顺序依次为 Pb>Zn>Cu>Mn>Ni>Cr。

(2)地累积指数显示,除 Ni 和 Cr 外,长株潭三地都存在 Pb、Cu、Zn、Mn 污染,其中株洲霞湾段(ZX5-10)Pb、Zn 达严重污染程度,Mn 和 Cu 达到中度或轻度污染程度;湘潭与长沙两地湘江沉积物 Pb、Zn 达到中度污染,其余重金属为轻度或偏中度污染水平。

(3)潜在生态风险指数显示,株洲段湘江沉积物重金属潜在生态危害指数为强生态危害,湘潭段湘江沉积物重金属潜在生态危害指数为中等生态危害,长

沙段湘江沉积物重金属潜在生态危害指数为轻微生态危害。株洲霞湾段湘江沉积物的重金属潜在生态危害应引起有关部门重视。

同时,研究表明湘江长株潭流域中重金属污染是有关联性的,只有从株洲段着手重金属治理,才能从较大程度上缓解当前长株潭城市群环境中存在的重金属污染问题。

参考文献:

- [1] 童 霆. 河口三角洲元素含量与矿产资源[J]. 第四纪研究, 2005, 25(3): 298-305.
TONG Ting. Element concentrations in river delta sediments and mineral resources potential in the drainage basin[J]. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(3): 298-305. (in Chinese)
- [2] 翟鹏济. 株洲霞湾港底沉积物柱样中微量元素的分布[J]. 科学通报, 1986(16): 932-935.
ZHAI Peng-ji. The microelements distribution of the sediment samplings from Xia-wan, Zhuzhou[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1986(16): 932-935. (in Chinese)
- [3] 曾北危, 潘佑民, 黄 璋, 等. 湘江沉积物污染初步评价[J]. 环境化学, 1982, 1(5): 352-358.
ZENG Bei-wei, PAN You-min, HUANG Zhang, et al. The evaluation of sediments pollution in Xiangjiang river (in Chinese)[J]. *Environmental Chemistry*, 1982, 1(5): 352-358. (in Chinese)
- [4] 王秋衡, 王淑云, 刘美英. 湖南湘江流域污染的安全评价[J]. 中国给水排水, 2004, 20(8): 104-106.
WANG Qiu-heng, WANG Shu-yun, LIU Mei-ying. Safety evaluation of Xiang-jiang basin pollution in Hunan province[J]. *China Water & Wastewater*, 2004, 20(8): 104-106. (in Chinese)
- [5] 张立成, 屈翠辉, 董文江. 湘江水体中重金属的迁移转化和归宿[J]. 环境科学, 1983, 2(5): 28-35.
ZHANG Li-cheng, QU Cui-hui, DONG Wen-jiang. The migration and transformation of heavy metals in Xiang-jiang River[J]. *Environmental Sciences*, 1983, 2(5): 28-35. (in Chinese)
- [6] 张立成, 章 申, 董文江, 等. 湘江江水中重金属转化的主要地球化学因素[J]. 环境科学学报, 1986, 6(4): 395-402.
ZHANG Li-cheng, ZHANG Shen, DONG Wen-jiang, et al. Geochemical factors affecting heavy metal translocation in Xiang-jiang River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1986, 6(4): 395-402. (in Chinese)
- [7] 代昭华, 黄衍初, 王庆广. 湘江中下游若干金属元素的分布状况[J]. 环境科学丛刊, 1982, 4(9): 32-35.
DAI Zhao-hua, HUANG Yan-chu, WANG Qing-guang. The distribution of some metal elements contents in the sediments in the middle and lower reaches of Xiang-jiang River[J]. *Environmental Science Periodicals*, 1982, 4(9): 32-35. (in Chinese)
- [8] 陈喜保, 章 申. 湘江水体中重金属的化学形态及分布特征的研究[J]. 环境科学学报, 1986, 6(2): 131-140.
CHEN Xi-bao, ZHANG Shen. A study on chemical speciation and distribution characteristics of heavy metals in Xiang-jiang River water[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1986, 6(2): 131-140. (in Chinese)
- [9] 钱杏珍, 李 霞. 洞庭湖水系沉积物的地球化学背景值[J]. 科学通报, 1988(6): 458-462.
QIAN Xing-zhen, LI Xia. The geochemistry background value of Dongting Lake stream sediments[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1988(6): 458-462. (in Chinese)
- [10] 王晓丽. 河口沉积物采样代表性研究—以湘资沅江为例[D]. 北京: 中国地质大学, 2006.
WANG Xiao-li. Research on representativeness of estuarine sediment sampling[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2006. (in Chinese)
- [11] 彭 利, 罗 钰, 朱 奕, 等. 湘江长沙段沉积物重金属污染状况及潜在生态风险评价[J]. 环境研究与监测, 2009, 22(3): 1-4.
PENG Li, LUO Yu, ZHU Yi, et al. The assessment of heavy metal pollution and potential ecological risk assessment of the sediments in Chanagsha reach, Xiang-jiang River[J]. *Environmental Research and Monitoring*, 2009, 22(3): 1-4. (in Chinese)
- [12] 张立成, 董文江, 郑建勋. 湘江河流沉积物重金属的形态类型及其形成因素[J]. 地理学报, 1983, 38(1): 55-63.
ZHANG Li-cheng, DONG Wen-jiang, ZHENG Jian-xun, et al. The metal form and form factors of heavy metals in the Xiang-jiang River sediments[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1983, 38(1): 55-63. (in Chinese)
- [13] 毛美洲, 刘子蕙, 魏金玺. 湘江表层底泥中重金属化学形态的研究[J]. 环境科学, 1983, 2(5): 35-41.
MAO Mei-zhou, LIU Zi-hui, WEI Jin-xi. The research about the chemical forms of heavy metals in surface sediment in Xiang-jiang River[J]. *Environmental Science*, 1983, 2(5): 35-41. (in Chinese)
- [14] Long E R, Field I J, Macdonald D D. Predicting toxicity in marine sediments with numerical sediment quality guidelines[J]. *Environ Toxicol Chem*, 1998, 17(4): 714-727.
- [15] Muller G. Index of geo-accumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geo Journal*, 1969, 2(3): 108-118.
- [16] Macdonald D D, Ingersoli C G, Berger T A. Development and evaluation of consensus based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems[J]. *Archive of Environmental Contamination and Toxicology*, 2000, 39(1): 20-31.
- [17] 彭 渤, 唐晓燕, 余昌训, 等. 湘江入湖河段沉积物重金属污染及其Pb同位素地球化学示踪[J]. 地质学报, 2011, 85(2): 282-299.
PENG Bo, TANG Xiao-yan, YU Chang-xun, et al. Heavy metal contamination of inlet sediments of the Xiangjiang river and Pb isotopic geochemical implication[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(2): 282-299. (in Chinese)