第 31 卷第 11 期
2011 年 11 月

环 境 科 学 学 报
Acta Scientiae Circumstantiae

Vol. 31, No. 11
Nov., 2011

王鸣宇,张雷,秦延文,等. 2011. 湘江表层沉积物重金属的赋存形态及其环境影响因子分析[J]. 环境科学学报,31(11):2447-2458
Wang M Y, Zhang L, Qin Y W, *et al*. 2011. Speciation of heavy metals in sediments from Xiang River and analysis of their environmental factors [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(11): 2447-2458

湘江表层沉积物重金属的赋存形态及其环境影响因子分析

王鸣宇[1,2],张雷[1],秦延文[1,*],李发生[2],贾静[1],曹伟[1],郑丙辉[1]

1. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室,北京 100012
2. 中国环境科学研究院国家环境保护河口与海岸带环境重点实验室,北京 100012

收稿日期:2011-02-10　　修回日期:2011-03-02　　录用日期:2011-03-16

摘要:采用 BCR 三步分级提取法分析了湘江衡阳段与岳阳段表层沉积物中 4 种重金属(Cd、Pb、Cu、Zn)不同赋存形态的含量,阐述了重金属赋存形态及其环境影响因子的关系,评估了这 4 种重金属的生物有效性. 结果表明,4 种元素均以弱酸溶解态、可还原态和可氧化态 3 种可提取态为主,各元素生物有效性即可提取态含量排序为: Cd > Pb > Zn > Cu,4 种重金属的污染程度与其可提取态含量呈正相关关系. 由相关性分析可知,有机质是湘江表层沉积物中重金属总量及赋存形态的主要环境影响因子. 4 种重金属生态风险指数的空间分布特征均表现出中下游明显高于上游的趋势,并在衡阳水口山地区达到峰值,表明沿江重金属污染源企业的排放是影响本次湘江调查水域沉积物重金属污染元素空间分布的主要因素.

关键词:湘江; 表层沉积物; 重金属形态; 环境影响因子

文章编号:0253-2468(2011)11-2447-12　　中图分类号:X171　　文献标识码:A

Speciation of heavy metals in sediments from Xiang River and analysis of their environmental factors

WANG Mingyu[1,2], ZHANG Lei[1], QIN Yanwen[1,*], LI Fasheng[2], JIA Jing[1], CAO Wei[1], ZHENG Binghui[1]

1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012
2. State Environmental Protection Key Laboratory of Estuary and Coastal Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012

Received 10 February 2011;　　**received** in revised form 2 March 2011;　　**accepted** 16 March 2011

Abstract: BCR three stages sequential extraction procedure was applied to investigate the speciation and contents of four types of heavy metals (Cd, Pb, Cu, Zn) in the surface sediments in Hengyang-to-Yueyang section of Xiang River. The relationship between the speciation of these heavy metals and their environmental factors were described. Morerover, the bioavailability of these four types of heavy metals was also determined preliminarily. The results showed that all of these four types of metals existed mainly in extractable fractions which included weak soluble fraction, reducible fraction and oxidisable fraction, and the bioavailability for four types of metals were in the descending order of Cd > Pb > Zn > Cu. Heavy metals had positive correlation with their contents of extractable fractions. Correlation Analysis showed that organic matter was the most important environmental factor that influenced the contents and speciation of heavy metals deposited on surface sediments of Xiang River. Accumulation and ecological risk of these four types of metals in the middle and lower reaches were higher than that in the upper reaches, peaking at Shuikoushan aera in Hengyang. This phenomenon showed that emissions from industries along the river was the main impact factor of spatial distribution of heavy metals in sediments in Xiang River area.

Keywords: Xiang River; surface sediment; speciation of heavy metal; BCR sequential extraction; environmental factors

1 引言(Introduction)

水体重金属污染物主要富集在沉积物中,通过水-沉积物界面的交换反应在固液两相间相互迁移转化(Andrew *et al*., 2000; Jiries, 2001; Davies, 2003; 梁英等, 2009). 沉积物中重金属的环境行为和生物

基金项目:国家水体污染与控制重大专项课题(No. 2009ZX07528-002)
Supported by the Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment (No. 2009ZX07528-002)
作者简介:王鸣宇(1985—),男,E-mail: wmy511@163.com; * 通讯作者(责任作者),E-mail: qinyw@craes.org.cn
Biography: WANG Mingyu(1985—), male, E-mail: wmy511@163.com; * **Corresponding author**, E-mail: qinyw@craes.org.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

有效性及毒性不仅与重金属的总量有关，而且与重金属的地球化学形态也密切相关. 重金属赋存形态是判断沉积物中重金属的毒性响应以及生态风险的重要指标(Kwon *et al.* ,2001; 范文宏等,2008) ,形态不同,重金属活性、生物毒性与迁移特征也不同(弓晓峰等,2008) ,且沉积环境的变化也会使重金属在颗粒态和溶解态之间发生转化(王海等,2002; Chen *et al.* ,2001; Teasdale *et al.* ,2003; 于瑞莲等,2008; 卢少勇等,2010) ,因此,相对于总量,重金属赋存形态的研究对于了解重金属的来源、迁移转化规律和生物有效性等具有更为重要的意义.

湘江是长江中游重要支流之一,干流全长 856 km,流域面积 94600 km^2. 由于湘江流域有丰富的矿产资源,沿岸采选矿业和冶炼业有着多年的发展历史,因此湘江的重金属污染问题由来已久,目前湘江沉积物的重金属污染已非常严重(郭飞燕,2007; 周召梅等,2003; 唐文清等,2008) . 前人对湘江流域沉积物重金属的研究主要集中于株洲-长沙段关于重金属总量的空间分布等的分析(毛美洲等,1985; 邱丽君等,2008; 彭利等,2009; 李军等,2009; 黄钟霆等,2009) ,而对其重金属形态的研究较少,尤其是污染严重的湘江中游地区衡阳段以及湘江入洞庭湖的岳阳段研究相对较少. 目前,关于沉积物重金属形态分析,应用较广的形态分级方法有 Tessier 等提出的 5 步提取法(Tessier *et al.* ,1979) 和 1993 年欧共体标准局提出的相对简化的 “3 步形态分类法”,即 BCR 形态分析法(Ure *et al.* ,1993) ,BCR 法被证明是可以在不同地区获得可比数据的成熟方法(周怀东等,2008; Dang *et al.* ,2006) .

本文以湘江衡阳、岳阳两段为主要研究区域,选择 BCR 形态分析法,结合潜在生态危害指数法(Hakanson,1980) ,对湘江水系表层沉积物中不同重金属含量、赋存形态及其环境影响因子进行了分析研究,以期为湘江流域水系沉积物中重金属污染状况和潜在风险的评价和环境质量的改进提供基础数据.

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 调查区域与站位设置

本文选择湘江干流典型的重金属污染江段衡阳段、岳阳段作为研究区域. 衡阳市位于湘江中游,是一座有着多年采选矿业和冶炼业历史的工业城市,湘江由南向北纵贯市区. 湘江衡阳段沿途分布多个金属冶炼、矿山开采等污染源,如水口山有色金属集团有限公司、常宁龙鑫矿业有限公司等矿冶企业等,是典型的重金属污染水域.

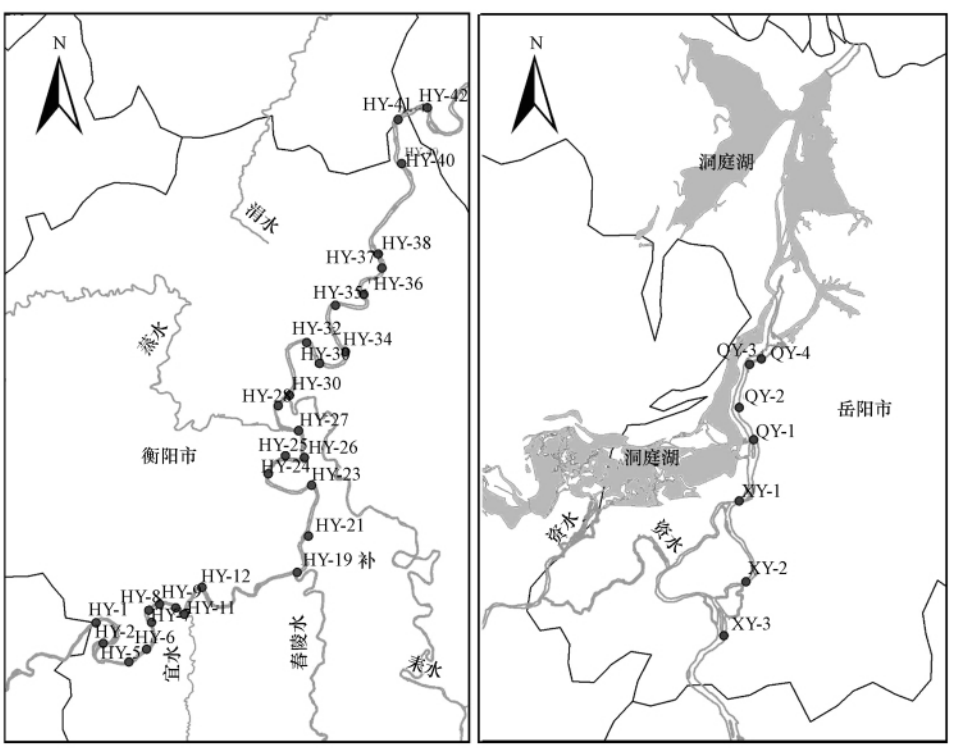

图 1 湘江衡阳和岳阳采样断面示意图

Fig. 1 Location of sampling sites in Hengyang and Yueyang section of Xiangjiang River

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

湘江自长沙流出进入岳阳,在岳阳湘阴县入洞庭湖继而汇入长江. 岳阳地处两江一湖交汇处,交通便利,是一座崛起中的工业城市,辖区内企业类型多以化工、建材、造纸等为主.

本次现场调查的采样时间为 2010 年 4 月. 采样断面的布设主要考虑了以下 3 点,即河流流速较缓河床(HY-2、HY-5、HY-7 ~ HY-10、HY-12、HY-23 ~ HY-27、HY-32 ~ HY-37、HY-41、HY-42、QY-1 ~ QY-4、XY-1 ~ XY-3) ,主要大型一级支流的入江处(HY-11、HY-19B、HY-30) 以及大型污染源的排污口(HY-19B、HY-29、HY-34、QY-1) . 本次野外调查共采得表层泥样 36 个,其中衡阳段 29 个,岳阳段 7 个. 具体采样站位如图 1 所示.

2.2　样品采集与处理

用抓斗式重力采泥器采集表层沉积物样品,用木勺取顶部 0 ~ 5 cm 表层沉积物,将样品装入聚乙烯袋中密封,在实验室中于 -20℃ 条件下冷冻保存,经 FD-1A-50 型冷冻干燥机(西安德派生物仪器有限公司) 冷冻干燥处理,用重物捣碎研磨,过 100 目(0.149 nm) 筛,然后保存于封口袋中,置于干燥器中备用.

2.3　测试项目与方法

本文中沉积物重金属形态分析采用 BCR 形态分析法(Quevauviller *et al.* ,1997; 李晶等,2009; 黄光明等,2009) ,重金属元素的总量取各形态重金属元素含量之和. 各形态提取液中重金属元素含量利用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Agilent 7500cx 型) 测定,仪器的检出限为 ppt 级,精密度短期为 1% ~3% RSD,长期(几个小时) 为≤5% RSD (Davidson *et al.* ,1994; 冯素萍等,2006; 刘恩峰等,2005; 李晶等,2009; 黄光明等,2009) .

为保证分析的准确性,同步分析了由国家地质实验测试中心及中国计量科学研究院生产的湖底沉积物顺序提取微量元素标准物质(GBW07436) ,各重金属元素不同形态回收率在 81.8% ~119.6% 范围内,符合美国 EPA 标准要求的 80% ~120% 的范围.

沉积物有机质含量(TOC) 采用重铬酸钾容量法测定; 沉积物粒度使用英国 Malvern 公司的 Mastersizer 2000 型激光粒度分析仪进行测定.

3　结果与讨论(Results and discussion)

3.1　沉积物地球化学特性

参照 Shepard 沉积物粒度分类方法(王中波等,2007) ,湘江衡阳与岳阳段表层沉积物主要属于粉砂质砂,其中粉砂所占百分比范围为 30.39% ~ 67.12%,平均为 47.86%; 粘土所占百分比为 4.43% ~31.86%,平均为 17.44%,中值粒径(杨世伦,1994) 在 3.14 ~7.00 μm 范围内,平均值为 4.91 μm. 相比较而言,衡阳段平均粘土含量与中值粒径高于岳阳段,表明衡阳段沉积物较岳阳段粒度较细.

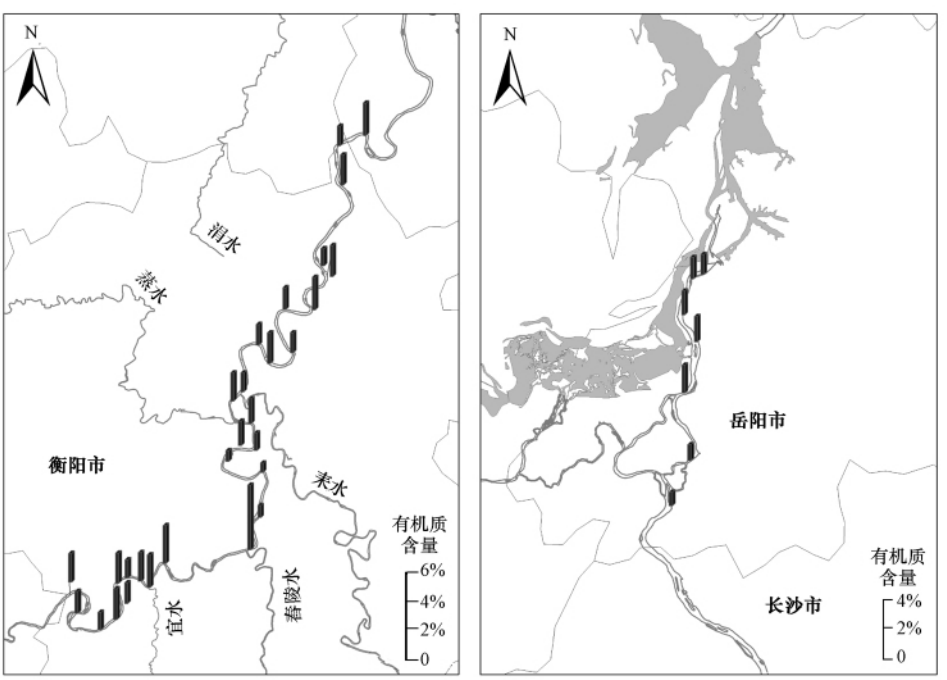

图 2　湘江衡阳和岳阳段有机质含量

Fig. 2　Content of organic matter in Hengyang and Yueyang section of Xiang River

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

湘江衡阳与岳阳段表层沉积物有机质含量在0.88% ~6.34%范围内,平均为2.40%,变化范围较大(图2).有机质含量的高低与沿途污染源排放关系密切.总体而言,衡阳段有机质平均含量高于岳阳段,含量最高点出现在衡阳水口山地区的HY-19B站点.

3.2 表层沉积物中重金属含量与空间分布特征

本文根据湘江重金属的特点,选择湘江沉积物中受人为污染影响较大且对环境影响较大的4种重金属Cd、Pb、Cu、Zn为研究对象(张立成等,1983;唐文清等,2008;雷鸣等,2010).由于目前国内环境质量标准中尚无河流沉积物的质量标准,因此本文以湘江沉积物质量背景值(株洲市环境保护局等,1985)作为评价重金属污染的主要依据,对湘江衡阳段和岳阳段的表层沉积物4种重金属含量与湘江沉积物中重金属背景值及全国水系沉积物平均值进行了对比(表1).

表1 湘江衡阳段和岳阳段表层沉积物重金属元素含量

Table 1 Content of heavy metal in surface sediment of Hengyang and Yueyang section of Xiangjiang River

江段	统计值	重金属元素含量/($\mu g \cdot g^{-1}$)			
		Cd	Pb	Zn	Cu
衡阳	最小值	3.10	36.74	74.86	18.25
	最大值	184.06	2246.09	3656.94	514.49
	平均值	29.28	238.58	509.88	80.45
岳阳	最小值	3.16	76.68	184.70	33.38
	最大值	17.86	120.15	320.41	61.85
	平均值	12.07	94.82	247.30	47.65
湘江沉积物中重金属背景值(株洲市环境保护局等,1985)		0.50	25.00	71.60	16.70
全国水系沉积物平均值(马力等,2008)		0.13	25.00	68.00	21.00

通过对比可以发现,4种污染元素Cu、Pb、Zn、Cd的含量均超过了湘江的背景值与全国的平均值,其中Cd的富集最为严重,Cu的富集程度相对最轻.衡阳段各重金属富集程度均高于岳阳段.

总体而言,Cu、Pb、Zn、Cd的空间分布特征近似.简而言之,不论是衡阳段还是岳阳段,均表现为中下游的含量高于上游(图3和图4).其中衡阳段水口山区域(采样点HY-19B)重金属含量达到最高值,其中Zn含量为3656.94 $\mu g \cdot g^{-1}$,Pb含量为2246.09 $\mu g \cdot g^{-1}$,Cd含量为184.06 $\mu g \cdot g^{-1}$,Cu含量为514.49 $\mu g \cdot g^{-1}$.

这种空间分布特征主要与沿江城市工业布局关系密切.一般来讲,沿湘江城市均选择上游作为饮用水源地,鲜有大型工矿业等污染源存在,水质较好;大型工矿等污染企业均分布于中下游,因此在衡阳段与岳阳段,重金属在表层沉积物含量的空间分布特征均表现为上游低,中下游高.

位于衡阳段中游的水口山地区,是我国重要的有色金属工业生产基地和衡阳市化工生产基地,有着百余年的重金属采选冶炼历史.此段分布了水口山矿务局等厂矿28个,比较典型的污染企业有从事铅、锌、铜和稀贵金属冶炼的常宁市龙鑫矿业有限公司和水口山有色金属集团,和我国具有代表性的氧化锌骨干企业水口山有色金属有限责任公司第二冶炼厂.这些冶炼企业在采选和冶炼过程中排放的三废已成为湘江主要污染源,高峰时二氧化硫年排放达2万t以上,年产生工业废渣达15万t,日排放工业废水4000 t以上,年入湘江的废水量达到2752×10^4 m^3.尤其是大量排放的砷、铅、镉等重金属,给湘江中下游的环境质量及饮用水安全带来了巨大威胁(王秋衡等,2004).重金属元素积累最为严重HY19B站点就位于该地区内,很好地反映了水口山地区重金属污染严重的现状.衡阳美仑颜料化工有限责任公司也是典型的涉镉企业,且位于洣水汇于湘江口处,直接威胁湘江的环境质量.在湘江岳阳段的下游的QY-1站点附近,沿江分布着天发有色金属公司、金渊铜业和屈原机械厂等污染源企业,导致了该水域重金属元素含量相对较高.可以看出,重金属元素的空间分布与污染源企业的排放存在着十分密切的关系.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

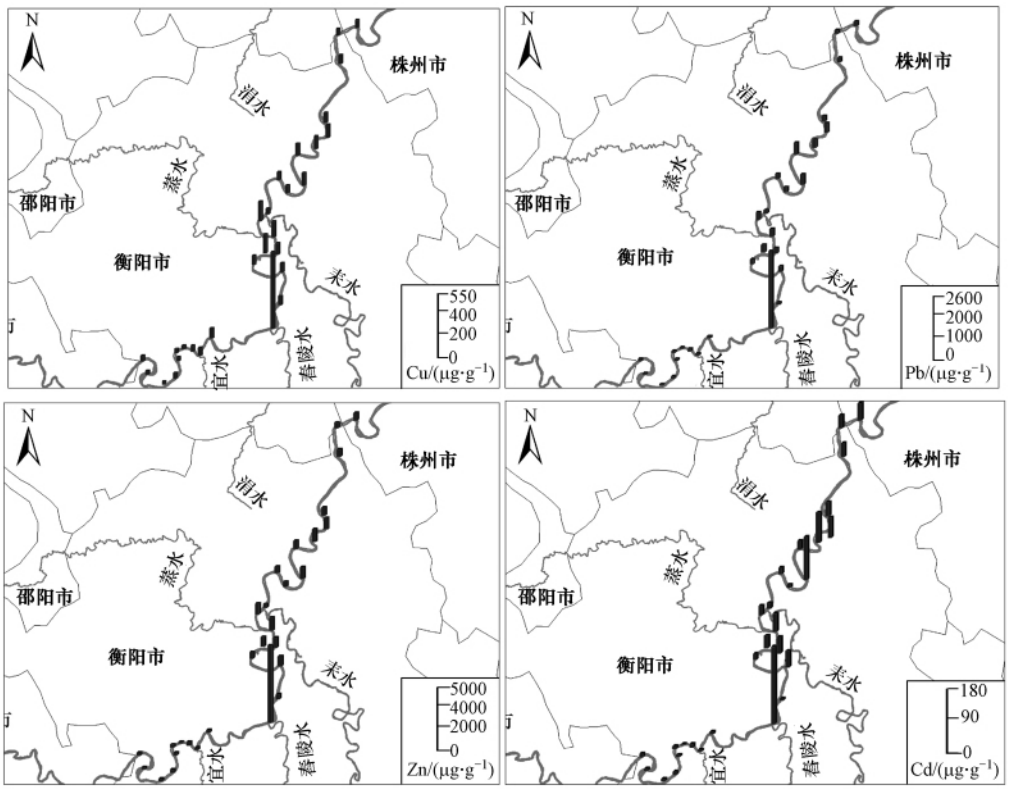

图 3　湘江衡阳段沉积物 Cu、Pb、Zn、Cd 的含量

Fig. 3　Content of Cu, Pb, Zn, Cd in the surface sediments from Hengyang of Xiang River

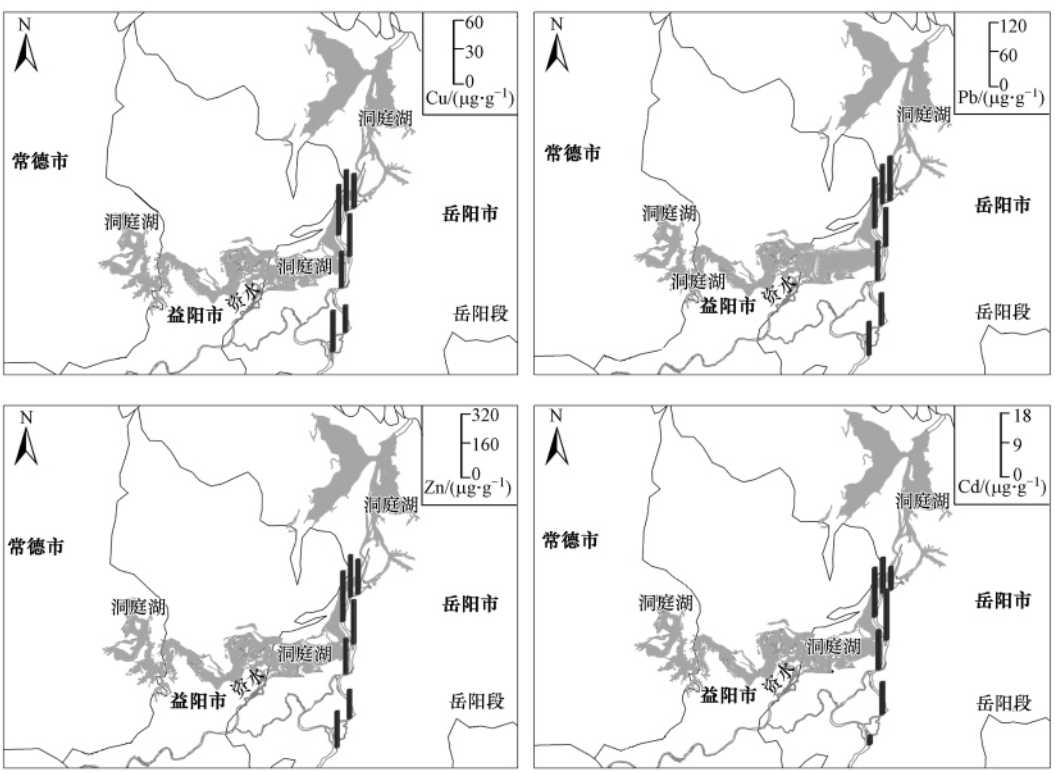

图 4　湘江岳阳段沉积物 Cu、Pb、Zn、Cd 的含量

Fig. 4　Content of Cu, Pb, Zn, Cd in the surface sediments from Yueyang of Xiang River

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3.3 表层沉积物中重金属赋存形态及其空间分布特征

3.3.1 BCR 法重金属各形态的地球化学性质

BCR 法将沉积物重金属赋存形态分为 4 类，第一类是弱酸溶解态（简称 B1 态），包括水溶态、可交换态及碳酸盐结合态. 其中，可交换态是指吸附在黏土、腐殖质等组分上的重金属. 水溶态和可交换态对环境变化敏感，易于迁移转化，生物有效性和毒性最强；碳酸盐结合态是指重金属与碳酸盐矿物形成的共沉淀结合形态，在酸性条件下容易释放.

第二类是可还原态（简称 B2 态），即 Fe-Mn 氧化物结合态，指重金属元素被 Fe-Mn 氧化物包裹或本身成为氢氧化物沉淀的部分，Fe-Mn 氧化物结合态的重金属在还原条件下容易释放、对水体造成二次污染.

第三类是可氧化态（简称 B3 态），即有机物及硫化物结合态，指重金属元素与有机质活性基团或硫离子结合的部分. 在碱性或氧化环境下，可转化至活性态，对生物具有潜在的危害性.

第四类是残渣态（简称 B4 态），是指结合在土壤硅铝酸盐矿物晶格中的金属离子，性质十分稳定，一般情况下难以释放，活性与毒性最小，通常被认为不具有生物有效性（李晶等，2009；汪玉娟等，2009；刘爱菊等，2010；徐圣友等，2008）.

不同形态重金属具有不同的生物有效性及地球化学特性（程晓东等，2001）前三态为可被生物所利用的形态，统称为可提取态（刘恩峰等，2007；金相灿，1992；Quevauviller *et al.*，1997；张凤英等，2010；Fan *et al.*，2002）. 可提取态占总量比例越高，重金属越易释放造成二次污染. 重金属元素的可提取态含量可判断重金属的人为污染程度（刘恩峰等，2007；金相灿，1992；Abd *et al.*，2005；霍文毅等，1997），可提取态也被（陈静生，1987；霍文毅等，1997）归为次生相态，次生相态是原生矿物中重金属经各种物理化学作用（专属吸附、离子交换、沉淀与共沉淀、赘合等）与沉积物各相重新结合而形成的存在形式. 残渣相态作为重金属存在于矿物晶格中的化学形态，被列为原生相态.

3.3.2 重金属的赋存形态及分布特征

湘江重金属形态分布特征如图 5 与图 6 所示.

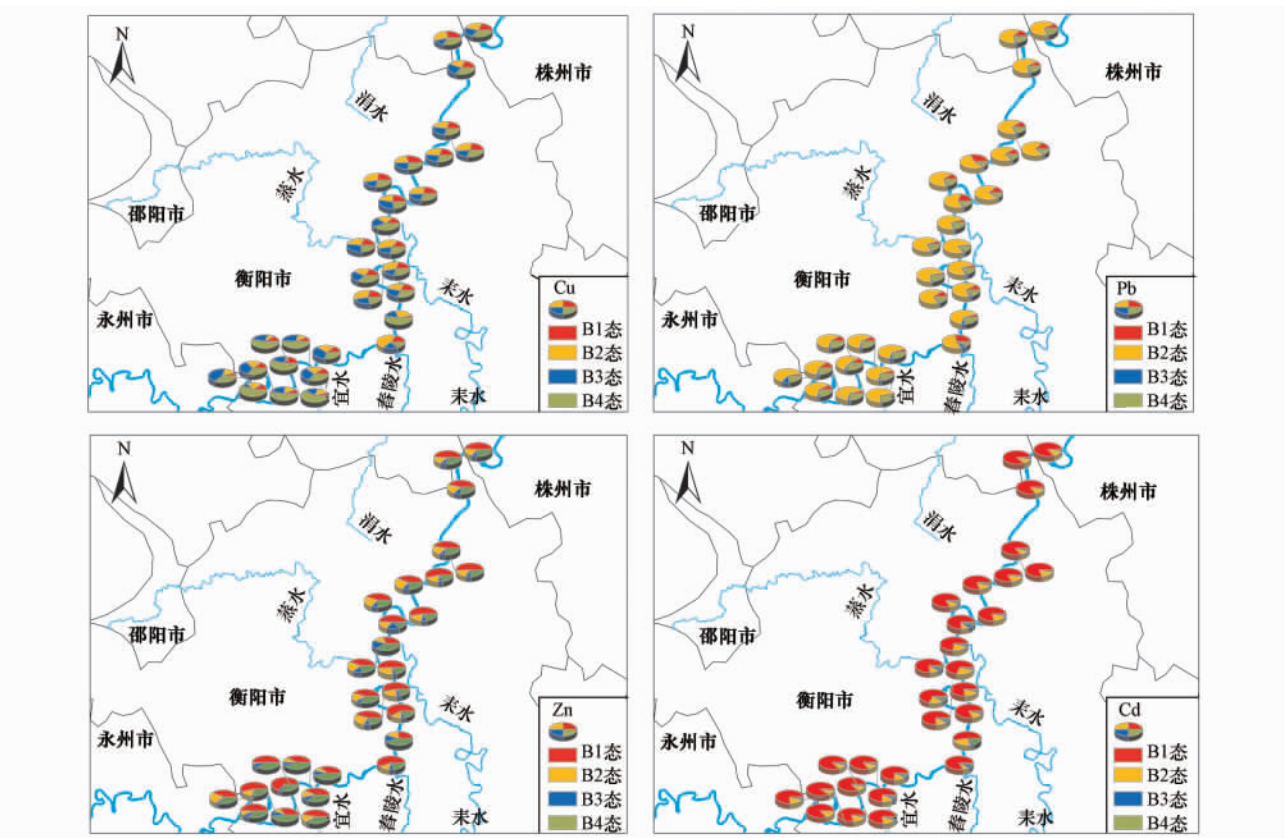

图 5 湘江衡阳段沉积物形态分布特征

Fig. 5 Speciation of Cd, Pb, Cu and Zn in the surface sediments from Hengyang of Xiang River

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

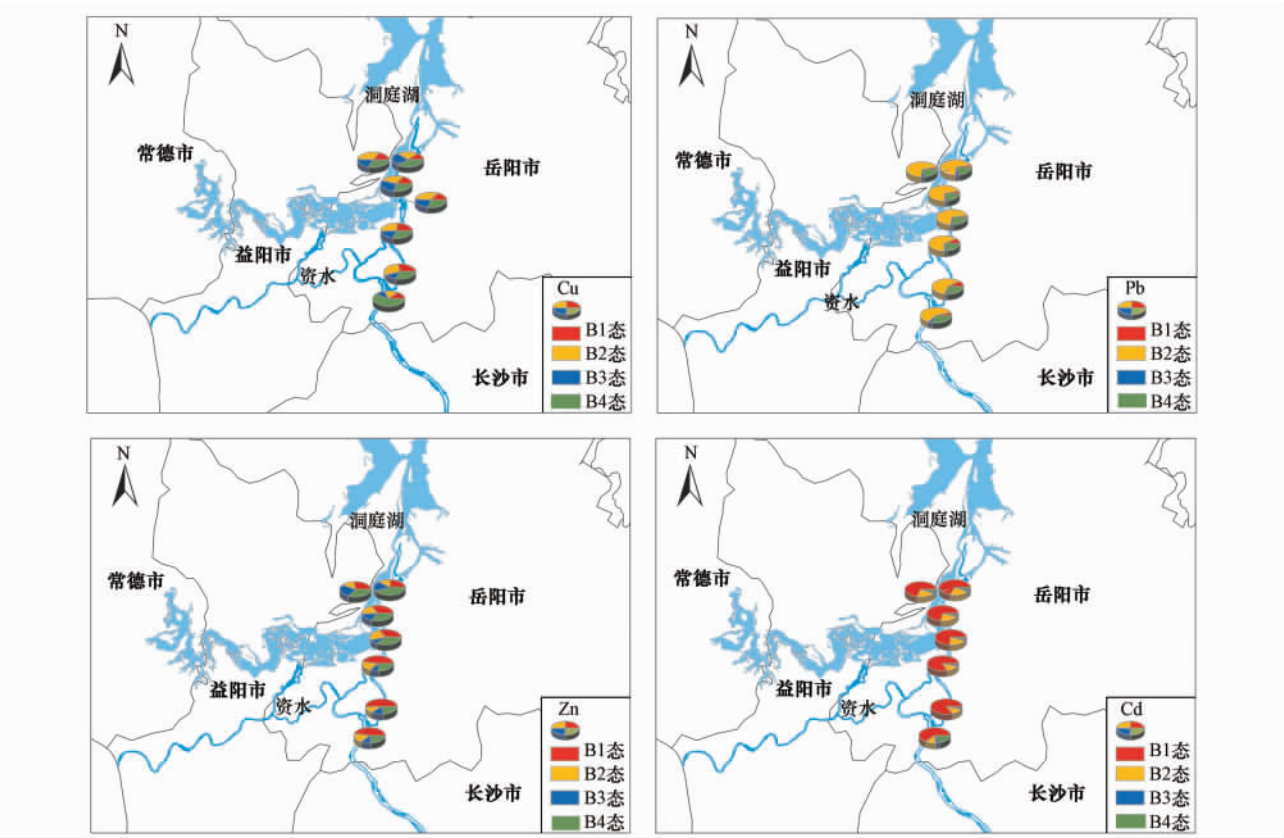

图 6　湘江岳阳段沉积物形态分布特征

Fig. 6　Speciation Cd, Pb, Cu and Zn in the surface sediments from Yueyang section of Xiang River

重金属在原生相和次生相中的分配比例在一定程度上可以反映沉积物是否被污染及其污染程度(陈静生,1987). 根据可提取态重金属含量在总量中所占比例,可知湘江表层沉积物中各金属的生物有效性大小.

Cu: 在污染较轻的衡阳和岳阳段上游采样站位,可提取态金属含量平均百分比分别为 51.2% 和 60.0%,而在污染较重的中下游站位,可提取态金属百分比则增至 70.5% 和 67.5%,说明人为污染的重金属在沉积物中多以可提取态金属(次生相)存在. 同时,衡阳与岳阳段中下游沉积物 Cu 在其可提取态又主要以 B2 态为主,由 2.3.1 节分析可知(下同),Cu 具有较强的潜在生态危害,但迁移性不强.

Pb: 赋存形态特征明显,在污染较轻的衡阳和岳阳段上游采样站位可提取态平均含量分别为 76.1% 和 74.4%,略低于污染较重衡阳岳阳两段的中下游站位的 84.2% 和 78.8%,Pb 在可提取态中均为 B2 态为主,平均含量达到 64.9%,其次为 B1 态,可知 Pb 具有较强的潜在危害,但水溶性及迁移性较弱.

Zn: 在衡阳污染较轻的上游采样站位,可提取态所占比例平均为 63.5%,低于污染较重的衡阳段中下游站位的 74.2%,而在岳阳段上游 Zn 可提取态的含量却高于下游,这很可能是受到了湘江长沙段涉锌污染企业排放的影响. 总体来看,Zn 在湘江衡阳和岳阳段表层沉积物重金属可提取态中主要以 B1 态形式存在,平均含量达到 48.9%,说明 Zn 有很强的迁移性与生物有效性.

Cd: 赋存形态特征极为明显,可提取态含量在衡阳和岳阳段全程均处于极高的水平,平均达到 96.2%,在 Cd 的可提取态中,B1 态为其主要赋存形态,平均含量高达 79.2%,其次为 B2 态,说明 Cd 具有极强的迁移性与生态危害. 相比 4 种污染重金属,可以看出,Cd 为本次湘江调查区域最主要的污染元素.

相比于前人的研究(张立成等,1983),整体上看,可提取态的含量增加明显. 其中,Cu、Zn 和 Cd 的 B1 态含量增加,尤其以 Cd 最为明显,Zn 和 Cd 的 B2 态的含量变化不大,而 Cu 和 Pb 的 B2 态含量明显增加,Cu 的 B3 态含量略有下降,但依然相对高于

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

其他 3 种重金属 B3 态的含量，这很可能与其和有机质亲和力较强有关（张立成等，1983）.

重金属在中下游水域可提取态（次生相）比例的明显增加，印证了人为污染的重金属主要累积在沉积物次生相中（何江等，2003），也可以看出中下游沉积物受到人为污染的影响加重. 其中 Cu、Pb、Zn 3 种金属次生态比例均在其衡阳水口山地区的 HY19B 站点达到最高值，分别为：85.9%、90.5%、80.5%，加之在此站点 Cd 的次生态比例达到 95.7%，说明水口山为湘江干流流域重要的重金属污染排放地区. 也可以看出，可提取态重金属含量占总量比例越高，湘江表层沉积物中重金属受到的人为污染越为严重. 也可以看出，相对于改革开放初期，湘江重金属的排放伴随着社会经济的发展已有了相当程度的增长.

湘江表层沉积物中各金属潜在危害程度大小的顺序为 Cd（97.07%）> Pb（85.69%）> Zn（75.36%）> Cu（70.84%），4 种重金属元素都具有非常高的二次释放能力. 该结果也与 2.2 节中分析各重金属总量与其对应的背景值相比所得到的富集程度大小的结果相一致.

3.4 相关性分析

3.4.1 表层沉积物重金属含量与其地化指标的关系 对重金属元素的中值粒径、粒度、有机质及其含量进行相关分析，获得相关系数矩阵，如表 2 所示. 可知，湘江表层沉积物的粒度与重金属元素之间相关性较低，说明沉积物粒度不是影响该水域重金属污染的主要环境因子. 4 种重金属元素 Cu、Pb、Zn、Cd 与有机质之间呈现显著相关，说明有机质含量与重金属在水环境中的行为存在密切关系. Cu、Pb、Zn、Cd 之间呈显著相关，说明了它们之间的同源特性，4 种重金属元素主要来源于湘江沿江污染企业的人为排放（秦延文等，2007）.

表 2 湘江沉积物地化性质与重金属总量间的相关分析

Table 2 Correlation matrix of geochemical characters of sediment and heavy metal contents

	粉砂	粘土	Cu	Pb	Zn	Cd	有机质
粉砂	1						
粘土	0.781**	1					
Cu	0.044	−0.014	1				
Pb	0.054	−0.056	0.978**	1			
Zn	0.073	−0.029	0.984**	0.991**	1		
Cd	0.093	−0.015	0.858**	0.868**	0.899**	1	
有机质	0.266	0.156	0.688**	0.687**	0.672**	0.574**	1

注：** $p<0.01$.

3.4.2 表层沉积物中有机质含量与重金属不同形态间的关系 对湘江调查区域表层沉积物中重金属的 3 种可提取形态含量对应的有机质含量进行相关分析，如表 3 所示. 可知，4 种重金属元素的不同可提取形态均与有机质呈显著正相关，相比而言，B3 态与有机质的相关性最为显著，其次是 B2 态和 B1 态，说明 B3 态重金属与有机质结合的趋势相对于其他两种可提取形态较高（卢少勇等，2010）.

表 3 湘江沉积物中有机质与不同形态重金属间的相关分析

Table 3 Correlation matrix of TOC and heavy metal concentrations in different fractions

重金属形态	重金属	有机质	Cu	Pb	Zn	Cd
B1 态	Cu	0.645**	1			
	Pb	0.690**	0.929**	1		
	Zn	0.671**	0.951**	0.969**	1	
	Cd	0.584**	0.878**	0.827**	0.904**	1
B2 态	Cu	0.689**	1			
	Pb	0.679**	0.984**	1		
	Zn	0.625**	0.973**	0.978**	1	
	Cd	0.351*	0.598**	0.652**	0.721**	1
B3 态	Cu	0.727**	1			
	Pb	0.697**	0.935**	1		
	Zn	0.679**	0.951**	0.964**	1	
	Cd	0.660**	0.945**	0.969**	0.970**	1

注：** $p<0.01$.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3.5　沉积物重金属潜在生态危害评价

Hakanson 提出的潜在生态危害指数法(Hakanson,1980)是目前应用较多的评价沉积物中重金属的生态危害的方法,该方法从沉积学角度对沉积物中重金属污染进行评价,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态效应、环境效应和生物毒性系数联系在一起,得到生态危害指数. 潜在生态危害指数法的计算公式如下:

$$f_i = C_i/B_i \quad (1)$$

$$E_i = T_i \times f_i \quad (2)$$

$$\mathrm{RI} = \sum_{i=1}^{n} E_i = \sum_{i=1}^{n} T_i \times f_i = \sum_{i=1}^{n} T_i \times C_i/B_i \quad (3)$$

式中,f_i为第 i 种重金属的污染系数; C_i为沉积物中第 i 种重金属的实测含量; B_i为重金属 i 的评价参比值; E_i为单个重金属的潜在生态危害系数; T_i为单个污染物的毒性响应参数,反映重金属的毒性水平及生物对重金属污染的敏感程度; RI 为多种重金属潜在生态风险危害指数,等于所有重金属潜在生态危害系数的总和. 重金属污染程度及潜在生态危害分级划分标准见表 4.

表 4　重金属污染程度及潜在生态危害等级划分标准

Table 4　Dividing standards of heavy metal pollution and ecological risk levels

f_i范围	单个污染物污染程度	E_i范围	单个污染物生态危害程度	RI 范围	总潜在生态危害程度
$f_i<1$	轻微	$E_i<40$	轻微	RI<150	轻微
$1\leqslant f_i<3$	中等	$40\leqslant E_i<80$	中等	$150\leqslant \mathrm{RI}<300$	中等
$3\leqslant f_i<6$	强	$80\leqslant E_i<160$	强	$300\leqslant \mathrm{RI}<600$	强
$f_i\geqslant 6$	很强	$160\leqslant E_i<320$	很强	$\mathrm{RI}\geqslant 600$	很强
		$E_i\geqslant 320$	极强		

将湘江调查水域各重金属元素的实测浓度代入公式(1)~(3),B_i选用国际上常用的工业化以前沉积物中重金属的全球最高背景值(Cu、Pb、Zn、Cd 分别取值 30、25、80、0.50,单位: $mg\cdot kg^{-1}$)(陈静生等,1987; 陈静生等,1992); 重金属元素 Cu、Pb、Zn、Cd 的毒性响应参数 T_i分别为 5,5,1,30(范文宏等,2008),计算得本次湘江调查水域沉积物中重金属的污染系数 f_i和潜在生态危害系数 E_i及重金属潜在生态危害指数 RI 值见表 5.

表 5　湘江沉积物中重金属污染系数及潜在生态危害指数

Table 5　f_i E_i and RI of heavy metals in surface sediment of Xiang River

水域	f_i				E_i				RI
	Cu	Pb	Zn	Cd	Cu	Pb	Zn	Cd	
衡阳段上游	1.29	2.55	1.93	11.89	6.46	12.74	1.93	356.80	377.92
衡阳段中游	4.57	17.89	11.65	86.37	22.87	89.45	11.65	2591.16	2715.13
衡阳段下游	2.37	9.03	6.07	80.22	11.84	45.13	6.07	2406.49	2469.54
岳阳段上游	1.42	3.34	2.67	18.99	7.09	16.69	2.67	569.58	596.03
岳阳段下游	1.72	4.13	3.40	28.02	8.58	20.67	3.40	840.66	873.31
总平均值	2.44	8.30	5.68	51.72	12.20	41.52	5.68	1551.72	1611.12
衡阳段平均值	2.68	9.54	6.37	58.57	13.41	47.72	6.37	1757.01	1824.51
岳阳段平均值	1.59	3.79	3.09	24.15	7.94	18.96	3.09	724.48	754.48

从单个重金属的污染指数 f_i来评价,可以看出,湘江衡阳、岳阳段表层沉积物中 Cd 和 Pb 的平均污染程度为很强,Cd 污染指数平均值超过很强程度范围 8 倍,说明 Cd 为该水域最主要污染元素; Zn 和 Cu 的污染程度分别为强和中等. 4 种重金属污染程度由大到小排序为: Cd > Pb > Zn > Cu.

从单个重金属潜在生态危害指数 E_i来评价,可以看出,湘江衡阳、岳阳段表层沉积物中 Cd 的平均潜在生态危害程度为极强,Pb 的程度达到了中等,Cu 和 Zn 则为轻微. 4 种重金属潜在生态危害由大到小排序为: Cd > Pb > Cu > Zn.

从多种重金属潜在生态危害指数 RI 来评价,可

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

以看出，湘江衡阳、岳阳段表层沉积物的 RI 指数为很强. 各站点 RI 值中 Cd 的贡献比例最大，这主要是由于本次湘江调查水域表层沉积物中 Cd 总量远高于背景值，且 Cd 毒性水平较高所致.

从空间分布来看，4 种金属元素 Cu、Pb、Zn、Cd 的各评价指数数的均在 HY-19B 站点达到最高值，RI 值达到了 11703.01，与重金属总量含量的空间分布特征结果相一致；4 种重金属元素 RI 值最低点均出现在衡阳段上游，表明该段的生态危害最小. 分段分析比较各水域可以看出，湘江重金属潜在生态危害由大到小为：衡阳段中游（很强）＞衡阳段下游（很强）＞岳阳段下游（很强）＞岳阳段上游（强）＞衡阳段上游（强），与重金属形态的空间分布特征相一致.

4 结论（Conclusions）

1）湘江衡阳、岳阳段表层沉积物中重金属元素 Cu、Pb、Zn、Cd 污染严重，富集程度排序为：Cd＞Pb＞Cu＞Zn，各元素的空间分布规律近似，表现为中下游段普遍高于上游段.

2）湘江衡阳、岳阳段表层沉积物中重金属元素 Cu、Pb、Zn、Cd 主要以可提取态形式存在，各元素生物有效性即可提取态含量大小依次为：Cd（97.07%）＞Pb（85.69%）＞Zn（75.36%）＞Cu（70.84%）. 4 种重金属元素可提取态（次生相）含量在水口山地区达到和接近峰值.

3）通过相关性分析，可知湘江衡阳、岳阳段表层沉积物重金属及其形态主要与有机质显著正相关，表明有机质是重金属赋存形态的主要环境影响因子.

4）湘江衡阳、岳阳段表层沉积物 4 种重金属潜在生态危害由大到小排序为：Cd＞Pb＞Cu＞Zn，多元素综合生态风险水平较高，在衡阳水口山地区达到最大值，与各重金属元素总量及相应赋存形态的分析结果相一致.

综上可知，湘江沿江重金属污染源企业的排放是影响表层沉积物中重金属的赋存形态极其空间分布的主要影响因子.

责任作者简介：秦延文（1973—），女，研究员，博士，主要研究方向为环境化学. E-mail：qinyw@craes.org.cn.

参考文献（References）：

Abd El-Azim H, El-Moselhy Kh M. 2005. Determination and partitioning ofmetals in sediments along the Suez Canal by sequential extraction [J]. Journal of Marine Systems, 56: 363-374

Andrew W R, Alistair E R, Audrey T B. 2000. Distribution of heavy metals in near-shore sediments of the swan river estuary, western Australla [J]. Water Air and Soil Pollution, 124: 155-168

陈静生，董林，邓宝山，等. 1987. 铜在沉积物各相中分配的实验模拟与数值模拟研究——以鄱阳湖为例 [J]. 环境科学学报，7(2)：140-149

Chen J S, Dong L, Deng B S, *et al*. 1987. Modeling study on copper partitioning in sediments, a case study of Poyang lake [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 7(2): 140-149(in Chinese)

陈静生，陶澍，邓宝山，等. 1987. 水环境化学 [M]. 北京：高等教育出版社. 179-181

Chen J S, Tao S, Deng B S, *et al*. 1987. Water Environmental Chemistry [M]. Beijing: Higher Education Press. 179-181 (in Chinese)

陈静生，周家义. 1992. 中国水环境重金属研究 [M]. 北京：中国环境科学出版社

Chen J S, Zhou J Y. 1992. Study on Heavy Metals of Water Environment of China [M]. Beijing: China Environmental Science Press (in Chinese)

Chen S Y, Lin J G. 2001. Bioleaching of heavy metals form sediment: significance of pH [J]. Chemosphere, 44: 1093-1102

程晓东，郭明新. 2001. 河流底泥重金属不同形态的生物有效性 [J]. 农业环境保护，20(1)：19-22

Cheng X D, Guo M X. 2001. Bioavailability of heavy metals at different forms in sediment [J]. Agro-environmental Protection, 20(1): 19-22(in Chinese)

Dang C T, Jeffrey O P. 2006. Metal speciation in coastal marine sediments from Singapore using a modified BCR-sequential extraction procedure [J]. Applied Geochemistry, 21: 1335-1346

Davidson C M, Thomas R P, Mcvey S E, *et al*. 1994. Evaluation of a sequential extraction procedure for the speciation of heavy metals in sediments [J]. Analytica Chimica Acta, 291: 277-286

Davies S I K A B. 2003. A comparison of metals in sediments and water in the river Nahr-Ibrahim, Lebanon; 1996 and 1999 [J]. Enviromental Geochemistry and Health, 25: 41-50

Fan W H, Wang W X, Chen J S, *et al*. 2002. Cu, Ni, and Pb speciation in surface sediments from a contaminated bay of northern China [J]. Marine Pollution Bulletin, 44: 816-832

范文宏，张博，张融，等. 2008. 锦州湾沉积物中重金属形态特征及其潜在生态风险 [J]. 海洋环境科学，27(1)：54-58

Fan W H, Zhang B, Zhang R, *et al*. 2008. Speciation characteristics and potential ecological risk of heavy metals in surface sediments of Jinzhou Bay. [J]. Marine Environmental Science, 27(1): 54-58 (in Chinese)

冯素萍，鞠莉，沈永，等. 2006. 沉积物中重金属形态分析方法研究进展 [J]. 化学分析计量，15(4)：72-74

Feng S P, Ju L, Shen Y, *et al*. 2006. Study on speciation analysis method of heavy metal in sediments [J]. Chemical Analysis and Meterage, 15(4): 72-74(in Chinese)

弓晓峰，陈瑶，尹丽，等. 2008. 鄱阳三江流域沉积物中 Zn Pb Cd 的形态分布 [J]. 环境科学与技术，31(11)：48-57

Gong X F, Chen Y, Yin L, *et al*. 2008. Speciation of Zn, Pb and Cd in

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Sediments of Three River Drainage Area around Poyang Lake [J]. Environmental Science & Technology, 31(11): 48-57(in Chinese)

郭飞燕. 2007. 湖南省水资源安全评价 [D]. 长沙: 长沙理工大学.

Guo F Y. 2007. Safety evaluation on water resources of hunan province [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology(in Chinese)

Hakanson L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control, a sedimentological approach [J]. Water Res, 14: 975-986

何江,王新伟,李朝生,等. 2003. 黄河包头段水-沉积物系统中重金属的污染特征 [J]. 环境科学学报, 23(1): 53-57

He J, Wang X W, Li C S, *et al*. 2003. Pollution character of heavy metals in the water-sediment system from Baotou section of the Yellow River [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 23(1): 53-57 (in Chinese)

黄光明,周康民,汤志云,等. 2009. 土壤和沉积物中重金属形态分析 [J]. 土壤, 41(2): 201-205

Huang G M, Zhou K M, Tang Z Y, *et al*. 2009. Analytical method of heavy metal fractions in soil and sediment [J]. Soil, 41(2): 201-205(in Chinese)

黄钟霆,周振,罗岳平. 2009. 湘江霞湾港段底泥的含镉量分布研究 [J]. 环境污染与防治, 31(7): 56-58

Huang Z T, Zhou Z, Luo Y P. 2009. Distribution of Cd in sediments from Xiawan drainage area of the Xiang River [J]. Environmental Pollution & Control, 31(7): 56-58(in Chinese)

霍文毅,黄风茹,陈静生,等. 1997. 河流颗粒物重金属污染评价方法比较研究 [J]. 地理科学, 17(1): 81-86

Huo W Y, Huang F R, Chen J S, *et al*. 1997. Comparative study of assessment method for river particulate heavy metal pollution [J]. Scientia Geographica Sinica, 17(1): 81-86(in Chinese)

金相灿. 1992. 沉积物污染化学 [M]. 北京: 中国环境科学出版社. 327-356

Jin X C. 1992. Chemistry of Contaminated Sediment [M]. Beijing: China Environmental Science Press. 327-356(in Chinese)

Jiries T E-H a A. 2001. Heavy metal distribution in valley sediments in Wadial-Karak catchment area, South Jordan [J]. Enviromental Geochemistry and Health, 23: 105-116

Kwon Y T, Lee C W. 2001. Ecological risk assessment of sediment in waster water discharging area by means of metal speciation [J]. Microchemical Journal, 70: 255-264

雷鸣,秦普丰,铁柏清. 2010. 湖南湘江流域重金属污染的现状与分析 [J]. 农业环境与发展, 2: 62-65

Lei M, Qin P F, Tie B Q. 2010. Analysis on pollution status of heavy metal in Xiangjiang River basin of Hunan Province [J]. Agro-Environment & Development, 2: 62-65(in Chinese)

李军,刘云国,许中坚. 2009. 湘江长株潭段底泥重金属存在形态及生物有效性 [J]. 湖南科技大学学报, 24(1): 116-121

Li J, Liu Y G, Xu Z J. 2009. Heavy metals speciation and its biological availability in sediment patterns of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan section of the Xiangjiang River [J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 24(1): 116-121 (in Chinese)

李晶,臧淑英,宋延山,等. 2009. 连环湖阿木塔泡沉积物中重金属形态及其对环境影响分析 [J]. 环境科学与管理, 34(1): 37-41

Li J, Zang S Y, Song Y S, *et al*. 2009. Specition analysis of heavy metals in sediment from Amuta lake of Lianhuan Lake [J]. Environmental Science and Management, 34(1): 37-41 (in Chinese)

梁英,何江,吕昌伟,等. 2009. 南海湖沉积物中生物有效态重金属含量及其空间分布 [J]. 农业环境科学学报, 28(6): 1208-1213

Liang Y, He J, Lü C W, *et al*. 2009. Concentration and spatial distribution of bio-available fraction of heavy metals in the sediments from the Nanhai Lake. [J]. Journal of Agro-Environment Science, 28(6): 1208-1213(in Chinese)

刘爱菊,王洪海,刘家弟,等. 2010. 孝妇河水体沉积物中重金属的污染及形态分布特征 [J]. 环境化学, 29(5): 875-879

Liu A J, Wang H H, Liu J D, *et al*. 2010. Characteristic of contamination and speciation of heavy metals in sediment of Xiaofu river in the Zibo section [J]. Environmental Chemistry, 29(5): 875-879(in Chinese)

刘恩峰,沈吉,杨丽原,等. 2007. 南四湖及主要入湖河流表层沉积物重金属形态组成及污染研究 [J]. 环境科学, 28(6): 1377-1383

Liu E F, Shen J, Yang L Y, *et al*. 2007. Chemical fractionation and pollution characteristics of heavy metals in the sediment of N ansihu Lake and its main inflow rivers, China [J]. Environmental Science, 28(6): 1377-1383(in Chinese)

刘恩峰,沈吉,朱育新. 2005. 重金属元素 BCR 提取法及在太湖沉积物研究中的应用 [J]. 环境科学研究, 18(2): 57-60

Liu E F, Shen J, Zhu Y X. 2005. Determination of heavy metal chemical forms by BCR method for Taihu Lake sediments [J]. Research of Environmental Sciences, 18(2): 57-60(in Chinese)

卢少勇,焦伟,金相灿,等. 2010. 滇池内湖滨带沉积物中重金属形态分析 [J]. 中国环境科学, 30(4): 487-492

Lu S Y, Jiao W, Jin X C, *et al*. 2010. Speciation of heavy metals in sediments from inner lakeside belt of Lake Dianchi [J]. China Environmental Science, 30(4): 487-492(in Chinese)

马力,杨晓波,佟成冶,等. 2008. 辽宁省浑河流域底质中重金属元素地球化学特征 [J]. 岩矿测试, 27(3): 184-188

Ma L, Yang X B, Tong C Y, *et al*. 2008. The geochemical characteristics of heavy metal elements in sediments of hunhe drainage area in Liaoning Province [J]. Rock and Mineral Analysis, 27(3): 184-188(in Chinese)

毛美洲,张光元,崔春国,等. 1985. 水体中重金属形态沿程分布变化及转化条件的研究 [R]. (65) 37-3(1/2) 2. 北京,长沙: 中国科学院环境化学所,湖南省环保所. 5-10

Mao M Z, Zhang G Y, Cui C G, *et al*. 1985. Study on the distribution and transformation condition of speciation of heavy metals in the water along the river [R]. (65) 37-3(1/2) 2. Beijing, Changsha: Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Environmenntal Protection Department of Hunan. 5-10 (in Chinese)

彭利,罗钰,朱奕,等. 2009. 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, 22(3): 1-4

Peng L, Luo Y, Zhu Y, *et al*. 2009. Pollution situation and assessment of potential ecological risk of heavy metals in the sediment of Changsha section of Xiang river [J]. Environmental Study and Monitoring, 22(3): 1-4(in Chinese)

邱丽君,杨喆. 2008. 湘江衡阳段底泥重金属沉积现状分析 [J]. 资

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

源与环境，8:166-168

Qiu L J，Yang Z. 2008. Analysis on pollution status of heavy metal in sediment of the Xiang River (Hengyang section) [J]. Science & Technology Information，8:166-168(in Chinese)

秦延文，苏一兵，郑丙辉，等. 2007. 渤海湾表层沉积物重金属与污染评价 [J]. 海洋科学，31(12):28-33

Qin Y W，Su Y B，Zheng B H，*et al*. 2007. Heavy metals and pollution assessment in surface sediments of Bohai Bay [J]. Marine Sciences，31(12):28-33(in Chinese)

Quevauviller Ph，Rauret G，López-Sánchez J F，*et al*. 1997. Certification of trace metal extractable contents in a sediment reference material (CRM 601) following a three-step sequential extraction procedure [J]. Science of the Total Environment，205: 223-234

Seidemann D E. 1991. Metal pollution in sediment of Jamaica Bay，New York，USA-An Urban Estuary [J]. Environment，15: 73-81

唐文清，刘利，冯泳兰，等. 2008. 河流底泥重金属污染现状分析及评价 [J]. 衡阳师范学院学报，29(6):55-59

Tang W Q，Liu L，Feng Y L，*et al*. 2008. Analysis and assessment on pollution status of heavy metal in the fluvial sediment [J]. Journal of Hengyang Normal University，29(6):55-59(in Chinese)

唐文清，曾荣英，冯泳兰，等. 2008. 湘江(衡阳段)河流沉积物中重金属潜在生态风险评价 [J]. 环境监测管理与技术，20(5): 25-27

Tang W Q，Zeng R Y，Feng Y L，*et al*. 2008. Potentail ecological risk assessment of heavy metal in the fluvial sediment of the Xiang River (Hengyang section) [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring，20(5):25-27(in Chinese)

Teasdale P R，Apte S C，Ford P W，*et al*. 2003. Geochemical cycling and speciation of copper in waters and sediments of Macquarie Harbour，Western Tasmania [J]. Estuarine，Coastal and Shelf Science，57:475-487

Tessier A，Campbell P G C，Bisson M，*et al*. 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. Anal Chem，51:844-851

Ure A M，Quevauviller Ph，Munteau H，*et al*. 1993. Speciation of heavy metals in soils and sediments: An account of the improvementand harmonization of extraction techniques undertaken under the auspices of the BCR of the commission of the european communities [J]. Int J Environ Anal Chem，51:135-151

王海，王春霞，王子健. 2002. 太湖表层沉积物中重金属的形态分析 [J]. 环境化学，21(5):430-435

Wang H，Wang C X，Wang Z J. 2002. Speciations of heavy ments in surface sediment of Taihu Lake [J]. Environmental Chemistry，21(5):430-435(in Chinese)

王秋衡，王淑云，刘美英. 2004. 湖南湘江流域污染的安全评价 [J]. 中国给水排水，20(8): 104-106

Wang Q H，Wang S Y，Liu M Y. 2004. Safety evaluation on pollution of Xiang River valley in Hunan Province [J]. China Water & Wastewater，20(8): 104-106(in Chinese)

汪玉娟，吕文英，刘国光，等. 2009. 沉积物中重金属的形态及生物有效性研究进展 [J]. 安全与环境工程，16(4):28-29，37

Wang Y J，Lü W Y，Liu G G，*et al*. 2009. Progress in research on heavy metal speciation and bioavailability in sediment [J]. Safety and Environmental Engineering，16(4):28-29，37(in Chinese)

王中波，杨守业，张志珣. 2007. 两种碎屑沉积物分类方法的比较 [J]. 海洋地质动态，23(3):36-40

Wang Z B，Yang S Y，Zhang Z X. 2007. The comparison of two classification methods of clastic sediments [J]. Marine Geology Letters，23(3):36-40(in Chinese)

徐圣友，叶琳琳，朱燕，等. 2008. 巢湖沉积物中重金属的 BCR 形态分析 [J]. 环境科学与技术，31(9):20-23，28

Xu S Y，Ye L L，Zhu Y，*et al*. 2008. Chemical speciation of heavy metals from Chaohu Lake sediments using BCR procedure [J]. Environmental Science & Technology，31(9): 20-23，28(in Chinese)

杨世伦. 1994. 长江口沉积物粒度参数的统计规律及其沉积动力学解释 [J]. 泥沙研究，3:23-31

Yang S L. 1994. Statistic features for grain-size parameters of the Yangtze River estuary and their hadrodynamic explanation [J]. Journal of Sediment Research，3:23-31(in Chinese)

于瑞莲，胡恭任. 2008. 泉州湾沉积物重金属形态特征及生态风险 [J]. 华侨大学学报，29(3):419-423

Yu R L，Hu G R. 2008. Speciation and ecological risk of heavy metals in sediments from Quanzhou Bay [J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science)，29(3):419-423(in Chinese)

株洲市环境保护局，湖南省环境保护科学研究所. 1985. 湘江重金属水环境容量研究——湘江株洲江段重金属水质管理规划 [R]. (65)37-3(1/2)16. 株洲，长沙: 株洲市环境保护局，湖南省环境保护科学研究所. 29

Environmental Protection Agency of Zhuzhou，Hunan Research Acadny of Environmental Sciences. 1985. Study on water environmental capacity of heavy metals in xiang river-water quality management planning of heavy metals in zhuzhou section of Xiang River [R]. (65)37-3(1/2)16. Zhuzhou，Changsha: Environmental Protection Agency of Zhuzhou，Hunan Research Acadny of Environmental Sciences. 29(in Chinese)

张凤英，阎百兴，朱立禄. 2010. 松花江沉积物重金属形态赋存特征研究 [J]. 农业环境科学学报，29(1):163-167

Zhang F Y，Yan B X，Zhu L L. 2010. Speciation of heavy metals in sediment of the Songhua River，northeast of China [J]. Journal of Agro-Environment Science，29(1):163-167(in Chinese)

张立成，董文江，郑建勋，等. 1983. 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，38(1):54-64

Zhang L C，Dong W J，Zheng J X，*et al*. 1983. The metalform and form factors of heavy metals in the Xiangjiang river sediments [J]. Acta Geographica Sinica，38(1):54-64(in Chinese)

周怀东，袁浩，王雨春，等. 2008. 长江水系沉积物中重金属的赋存形态 [J]. 环境化学，27(4):516-519

Zhou H D，Yuan H，Wang Y C，*et al*. 2008. The chemical speciation of heavy metals in sediments from Yangtze Basin [J]. Environmental Chemistry，27(4):516-519(in Chinese)

周召梅，李强. 2003. 湖南省入河废污水对江河水质的影响分析 [J]. 水资源保护，3:44-46

Zhou Z M，Li Q. 2003. Impacts of wastewater discharge on water quality of rivers in Hunan Province [J]. Water Resources Protection，3: 44-46(in Chinese)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net