

湘江岳阳段沉积物重金属污染特征 及其初步生态风险评估

曾祥英¹, 王 晨^{1,2}, 于志强^{1*}, 秦延文³, 张 雷³,
盛国英¹, 傅家谟¹

(1. 有机地球化学国家重点实验室, 广东省环境资源利用与保护重点实验室, 中国科学院 广州地球化学研究所, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 中国环境科学研究院 河流与海岸带环境创新基地, 北京 100012)

摘 要: 分析了湘江岳阳段表层沉积物样品中 10 种典型重金属元素(Cd、Cu、Pb、Zn、Cr、Tl、V、Mn、Co 和 Ni)的含量水平和分布规律, 并采用地累积指数法和潜在生态风险指数法, 初步评价了沉积物中重金属污染状况和潜在生态风险。研究结果表明: (1)湘江岳阳段沉积物中重金属 Cd、Zn、Mn 和 Cu 等污染较为严重, 其含量范围分别为 8.56~19.4 mg/kg、250~367 mg/kg、1489~2258 mg/kg 和 40.5~64.7 mg/kg; (2)研究区域中多种重金属潜在生态风险指数(RI)为 369~698, 表明研究区域沉积物重金属污染导致的潜在生态风险高, 且主要风险污染物为 Cd 和 Tl; (3)湘江岳阳段沉积物呈现出以 Cd 为主的多种重金属复合污染特征。

关键词: 重金属; 沉积物; 湘江岳阳段; 地累积指数; 潜在生态风险指数法

中图分类号: P595; P593 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2012)01-0063-07

The occurrence, distribution and preliminary risk assessment of heavy metals in sediments from Xiangjiang River (Yueyang Section)

ZENG Xiang-ying¹, WANG Chen^{1,2}, YU Zhi-qiang^{1*}, QIN Yan-wen³, ZHANG Lei³,
SHENG Guo-ying¹ and FU Jia-mo¹

1. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangdong Key Laboratory of Environment and Resources, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. River and Coastal Environmental Research Center, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Abstract: The occurrence and distribution of 10 heavy metals, Cd, Cu, Pb, Zn, Cr, Tl, V, Mn, Co and Ni in sediments collected from Xiangjiang River (Yueyang section) were analyzed. Meanwhile the potential ecological risks of these heavy metals were calculated and assessed using Index of geoaccumulation (I_{geo}) as well as Lars Hanson method based on concentrations measured in this study. The results indicated that (1) Xiangjiang River (Yueyang section) was heavily polluted by Cd, Zn, Mn and Cu, with concentrations ranging from 8.56–19.4 mg/kg, 250–367 mg/kg, 1489–2258 mg/kg and 40.5–64.7 mg/kg, respectively; (2) RI values in this area varied from 369 to 698, implying high ecological risks in most of the sampling sites in the studied area, which were mainly from Cd and Tl; (3) The pollution characteristic of multi-metals in this section was mainly related to Cd.

Key words: heavy metal; sediment, Xiangjiang River (Yueyang Section), index of geoaccumulation, lars hanson method

收稿日期(Received): 2011-10-10; 改回日期(Revised): 2011-11-08; 接受日期(Accepted): 2011-11-09

基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX07528-002); 国家重点基础研究发展计划项目(2008CB418205)

作者简介: 曾祥英(1968-), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为环境毒害污染物研究与风险评估研究。E-mail: zengxy@gig.ac.cn

* 通讯作者(Corresponding author): YU Zhi-qiang, E-mail: zhiqiang@gig.ac.cn; Tel: +86-20-85292391

ZENG Xiang-ying et al.: The occurrence, distribution and preliminary risk assessment of heavy metals in sediments

0 引言

湘江是长江中游的重要支流之一,发源于广西壮族自治区灵川县,流经广西和湖南两省区后,从岳阳市湘阴县入洞庭湖。湘江干流全长 856 km,其中湖南省境内干流长 670 km,流域面积为 85383 km²,沿途接纳大小支流 1300 多条。湖南省是我国著名的“有色金属之乡”,大部分有色金属的开采和冶炼均集中在湘江流域。作为纳污水体,湘江接纳了沿岸大量的工业废水,废水中有毒重金属 Cu、Hg、Cd 和 Pb 等超标异常严重^[1]。自 20 世纪 70 年代起湘江已经成为我国重金属污染严重的河流之一。值得注意的是,湘江同时也是流域内居民主要的饮用水源以及工农业用水水源,因此多年以来湘江流域重金属污染一直备受关注^[2]。已有研究表明,湘江衡阳段及其主要支流沉积物、周围土壤中 Cu、Cd 和 Pb 等重金属严重超标,其综合污染指数显示出重度污染^[3-6]。受到株洲清水塘工业区内企业废水超标排放的影响,湘江霞湾段沉积物中 Cd 和 Pb 污染十分严重^[7-8]。截至目前,针对湘江干流重金属污染的研究较多,但是关于湘江入湖口(洞庭湖)沉积物中重金属污染现状研究的报道并不多见。尹春艳等^[9]通过对湘江河口三角洲沉积柱芯的研究发现,河口沉积物中重金属污染严重,并通过主成分分析初步探讨了沉积物中重金属的污染来源。

为了解湘江入湖口(岳阳段)表层沉积物重金属污染现状,探讨湘江中上游矿山开采、冶炼等活动对入湖口沉积物质量的影响,本研究选择湘江入湖河段湘阴和屈原农场两地作为研究对象。本研究区域较为特殊,丰水期为洞庭湖的一部分,而枯水期部分河床裸露呈现河流形态。在研究区域设定监测断面 6 个,在各监测断面的中部,分别采集一份表层沉积物样品。本研究拟通过研究 10 种典型重金属的含量水平及其分布规律,初步探讨沉积物中重金属的主要来源;同时采用地积累指数和潜在生态风险指数法,初步评价岳阳段沉积物中重金属的污染水平和潜在的生态风险危害。

1 材料与方法

1.1 试剂

实验用水由 Milli-Q 高纯水发生器制得

(>18.2MΩ/cm)。实验用 HCl 由优级纯 HCl 等温吸收纯化得到, HNO₃ 由优级纯 HNO₃ 经石英蒸馏器亚沸蒸馏得到。标准物质 GBW07129、GBW07309、GBW07103、GBW07104、GBW07105 和 GBW07123 从国家地质实验测试中心购得, W-2a 和 AGV-2 从美国地质调查局购得。

1.2 样品的采集、处理和定性定量分析

2010 年 4 月,在湘江入湖河段(岳阳段)设定 6 个监测断面,其中屈原农场 4 个(QY₁ - QY₄),湘阴 2 个(XY₁ - XY₂),用抓斗式采泥器分别采集沉积物样品,采样点如图 1 所示。沉积物样品经冷冻干燥除去水分,并用玛瑙研钵研磨达到测试要求。所有化学处理过程均在中国科学院广州地球化学研究所同位素超净化学实验室(100 级)进行。沉积物中重金属的定性定量分析参照刘颖等人报道的方法进行^[10]。

1.3 沉积物重金属污染现状评价和潜在生态风险评估

1.3.1 地累积指数法

地累积指数(index of geoaccumulation, I_{geo})是德国科学家 Müller 提出的研究水环境沉积物中重金属污染的定量指标^[11],其计算公式为:

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

式中: C_n 是元素 n 在沉积物中的实测含量, B_n 为该元素在普通页岩中的地球化学背景值,本研究中采用中国土壤平均值(CAS);考虑到各地岩石差异可能会引起背景值的变动, K 取值为 1.5。

1.3.2 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法(RI)可以定量评估单一污染物的污染程度(单因子污染风险程度),也可以综合评估多种污染物复合污染所致的潜在生态危害^[12]。本研究综合考虑了 10 种典型重金属的浓度以及毒性水平等因素影响,初步评估它们的潜在生态风险程度。计算公式如下:

$$RI = \sum_i^m E_r^i = \sum_i^m T_r^i \times \frac{c^i}{c_n^i}$$

式中: T_r^i 为第 i 种重金属毒性响应系数^[13],目前关于 T1 毒性效应的研究较少,本文参照高博等^[14]的研究,将 T1 的毒性响应系数定义为 40; c^i 为表层沉积物中第 i 种重金属的实测值(mg/kg); c_n^i 为计算所需要的参照值(mg/kg),在本研究中,选择现代工业化前全球沉积物中重金属最高背景值为参照^[15]; E_r^i 为第 i 种重金属的潜在生态危害系数; RI 指示了沉积物中

多种重金属复合污染状态下潜在生态危害指数。

目前，根据 E_i^j 和 RI 值划分风险等级的标准尚不一致，本研究中采用胡朝晖等的定级标准，定量评估岳阳段沉积物中重金属的生态风险等级(见表 1)^[16-17]。

2 结果与讨论

2.1 湘江岳阳段沉积物中重金属含量水平与分布特征

表 2 中列出了湘江岳阳段沉积物中 10 种重金属含量水平及均值，同时列出了辽河、大辽河、珠江水系北江支流和长江沉积物中几种典型重金属的平均含量，以及辽宁二道坊河沉积物中 Tl 含量

水平^[16,18-20]。

2.1.1 5 种常见毒害重金属污染水平及分布规律

从表 2 中可以看出，研究区域沉积物中 Cd 含量变化较为显著(8.56~19.4 mg/kg)，其平均含量(13.8 mg/kg)与北江(16.7 mg/kg)相当，远远高于辽河(0.11 mg/kg)与大辽河(0.72 mg/kg)的均值； Cr 含量为 60.5~83.1 mg/kg，其均值(74.9 mg/kg)远低于北江均值(206 mg/kg)，也低于大辽河均值(113 mg/kg)，与长江(73.3 mg/kg)平均水平相当；研究区域沉积物中 Cu 含量变化为 40.5~64.7 mg/kg，其均值 53.9 mg/kg 远低于北江污染水平，而与大辽河均值(50.9 mg/kg)水平相当；沉积物中 Pb 含量为 26.8~38.1 mg/kg，其均值 32.1 mg/kg 远低于珠江水系北江污染水平(213 mg/kg)，而与大辽河和长江含量水平大致相当。研究区域中 Zn 的含量(223~367 mg/kg，均值

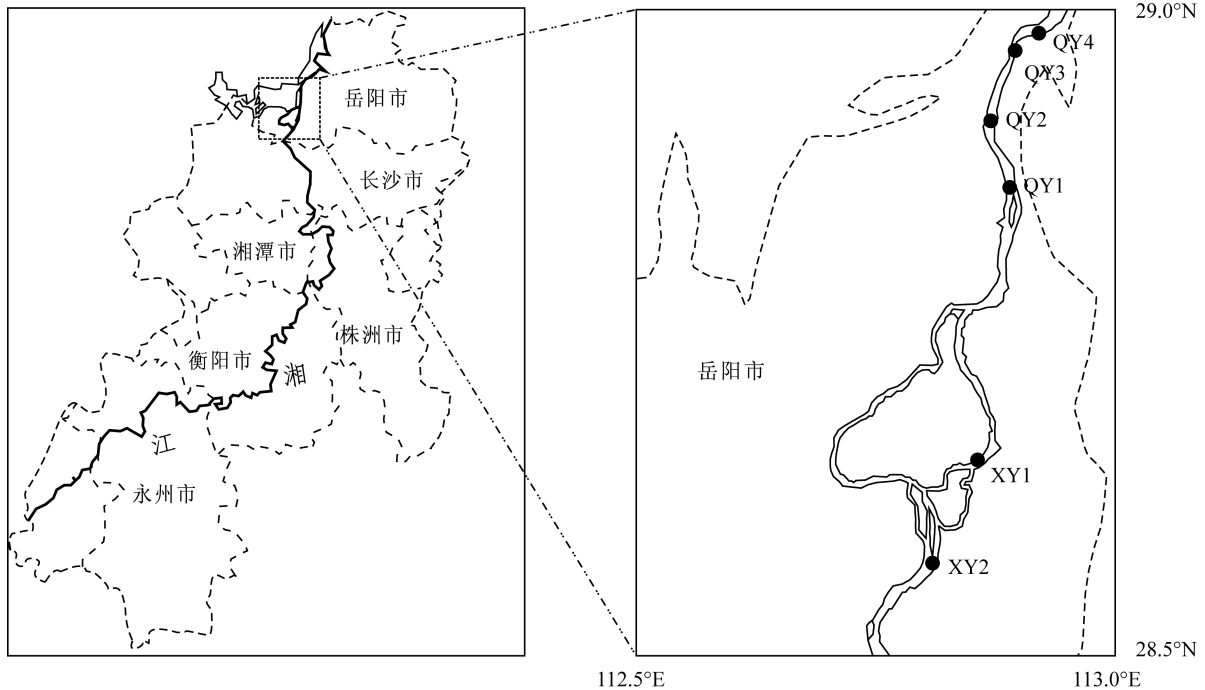


图 1 湘江岳阳段沉积物采样点示意图

Fig.1 Sampling sites in Xiangjiang River (Yueyang Section)

表 1 E_i^j 和 RI 值对应的污染程度以及潜在生态风险程度

Table 1 Pollution degrees indicated by E_i^j and RI

潜在污染生态风险参数	单因子污染风险程度	潜在生态风险指数 RI	潜在生态风险程度
$E_i^j < 25$	轻微	$RI < 50$	轻微
$25 \leq E_i^j < 50$	中等	$50 \leq RI < 100$	中等
$50 \leq E_i^j < 100$	高	$100 \leq RI < 200$	高
$100 \leq E_i^j < 200$	很高	$RI \geq 200$	很高
$E_i^j \geq 200$	极高		

表 2 湘江(岳阳段)沉积物中 10 种重金属含量(mg/kg)
Table 2 Concentrations of 10 heavy metals (mg/kg) in sediments from Xiangjiang River (Yueyang Section)

采样点	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Tl	Pb
QY1	105	77.3	1489	17.3	44.3	57.5	316	19.4	1.09	32.4
QY2	113	66.0	2258	23.7	47.3	64.7	367	18.6	1.26	38.1
QY3	93.4	82.7	1781	17.6	39.2	47.0	223	8.79	0.99	27.4
QY4	115	83.1	1761	17.9	43.5	53.7	337	8.56	1.12	32.8
XY1	106	79.6	1882	23.6	43.4	60.0	301	15.6	1.27	34.9
XY2	71.9	60.5	1471	15.1	28.3	40.5	250	11.8	1.05	26.8
均值	101	74.9	1774	19.2	40.1	53.9	299	13.8	1.13	32.1
大辽河	/	113	/	/	28.9	50.9	/	0.72	/	42.2
北江	61.8	206	860	9.90	38.6	316	619	16.7	1.67	213
辽河	/	52.6	/	/	22.6	16.2	/	0.11	/	17.4
长江	/	73.3	753	14.2	33.9	26.6	31.6	/	/	37.8
二道坊河	/	/	/	/	/	/	/	/	0.74	

299 mg/kg)仅次于北江(619 mg/kg)、远高于长江(31.6 mg/kg)。

研究区域沉积物中 Cr 和 Pb 的均值均未超过国家土壤环境质量标准值(GB 15618-1995)中的一级标准(为保护区域自然生态环境,维护自然背景的土壤环境质量限制值);Cu 和 Zn 均值则超过了一级标准,但低于三级标准阈值(为保障农业生产和植物正常生长的土壤临界值)。值得注意的是,研究区域沉积物中 Cd 含量超过三级标准 8~20 倍。与现代工业化前全球沉积物中重金属最高背景值对比^[15],发现研究区域中 Cd 富集非常显著,形成了湘江岳阳段以 Cd 为主的多种重金属复合污染的特征,与前文报道的湘江衡阳段重金属分布特征较为一致^[3,21],表明岳阳段沉积物重金属污染可能主要受到上游湘江水的影响,尹春艳等通过主成分分析也证实湘江河口沉积物中 Cd、Pb 主要源于湘江水的输入^[9]。

2.1.2 4 种中等毒性重金属污染水平及分布规律

研究区域沉积物中 V 含量为 71.9~115mg/kg (均值 101 mg/kg),高于北江平均水平(61.8 mg/kg);值得注意的是,研究区域中 Mn 的含量(1471~2258 mg/kg,均值 1774 mg/kg)几乎是北江(860 mg/kg)和长江(753 mg/kg)含量的 2 倍。从表中可以看出,研究区域中 Co(19.2 mg/kg)和 Ni(40.1 mg/kg)的均值与另外几条河流沉积物中污染水平大致相当。

从其空间分布来看,研究区域内 6 个采样点 10 种重金属污染没有显著区别。湘江岳阳段已经临近入湖口,该区域采矿冶炼工业并不发达,初步推断出其沉积物中重金属污染主要受湘江上游水输入的影响^[9]。

2.1.3 沉积物中 Tl 污染现状

岳阳段沉积物中 Tl 的含量范围为 0.99~1.27 mg/kg(均值为 1.13 mg/kg),高于我国大陆沉积物中 Tl 的含量(0.55 mg/kg)以及中国土壤 Tl 的背景值(0.58 mg/kg)^[14]。同时,研究还发现,6 个沉积物样品中 Tl 的含量没有明显差异,表明在研究区域没有明显的点源污染排放。目前关于沉积物中 Tl 污染的研究较少,张淑香等^[20]研究发现,由于受研究区域高背景值的影响,辽宁草河口地区二道坊河沉积物中 Tl 含量也较高,为 0.44~1.12 mg/kg(均值为 0.74 mg/kg)。受到电子垃圾处理的废液废渣排放的影响以及矿山开采和金属冶炼行业工业废水的影响,珠江水系北江干流沉积物中富集了较高含量的 Tl (0.92~2.32 mg/kg),韶关冶炼厂附近的沉积物中 Tl 含量则高达 7.78 mg/kg,显示了极高的 Tl 生态风险^[14]。

2.2 沉积物重金属的污染现状评价和生态风险程度评价

2.2.1 地累积指数法

表 3 中列出了 10 种重金属的 I_{geo} 值。本文参照尹春艳等^[9]沉积物重金属污染等级分类标准来评估岳阳段沉积物中重金属污染等级。从表 3 中可以看出,所有沉积物样品中 Cd 的 $I_{geo}>5$,揭示出岳阳段沉积物中 Cd 严重污染;沉积物样品中 Zn 的 I_{geo} 范围 1.00~1.72,呈现出偏中度污染;对 Mn 而言, QY₁(0.77)和 XY₂(0.75)为轻度 Mn 污染,其余 4 个采样点均为偏中度污染;相对而言,湘江岳阳段面临轻度的 Cu 污染和 Tl 污染($0 < I_{geo} \leq 1$)。同时,从表

中可以看出, 部分沉积物样品显现出轻度的 Ni 污染(QY₁、QY₂、QY₄和 XY₂)、Co 污染(QY₂和 XY₂)。所有样品中 V、Cr 和 Pb 的地累积指数均小于 0。

以 10 种重金属 I_{geo} 的均值排序, 湘江沉积物中不同重金属元素的污染程度从大到小的排序依次为: Cd > Zn > Mn > Cu > Tl > Ni > Co > Pb > Cr > V。

2.2.2 潜在生态风险指数

表 4 中列出了研究区域沉积物中 10 种重金属的单因子风险系数(E_i^f)以及 10 种重金属复合污染的潜在生态风险指数(RI)。从空间分布看, 湘江岳阳段沉积物中 10 种重金属 RI 值变化较大, 其范围为 369~698。依据表 1 中列出的分级指标^[17], 研究区域所有采样点均面临“很高”生态风险。

从单一重金属生态风险看, 研究区域中 Cd 生态风险“极高”(257~583); 由于 Tl 的毒性效应显著, 其单因子风险不容忽视(72.0~92.4), 显示了“高”生态风险, 其风险程度仅次于 Cd。同时, 研究还发现, 除 Cd 和 Tl 以外的 8 种重金属(Cr、Cu、Pb、Zn、Mn、Co、Ni 和 V), 其 E_i^f 值均远小于 25, 显示出轻微生态风险; 从 10 种重金属 E_i^f 值对 RI 值的贡献来看, Cd 是主要的风险组分, 其次是 Tl。依据各重金属单因子风险系数来看, 沉积物中重金属生态危害程度顺序为 Cd > Tl > Ni > Co > Mn > Cu > V > Pb > Zn > Cr。

运用两种评价方法, I_{geo} 评价结果显示 Cd 和 Zn 是主要的风险重金属; E_i^f 值和 RI 值则揭示出 Cd 和 Tl 是主要的风险因子。两种评价方法得出的结论并不完全相同, 这主要是因为 RI 值不仅与污染物种类和浓度有关, 还与污染物本身的毒性响应系数有关。例如, Cd 的毒性响应系数 30 是 Cu 和 Pb 的 6 倍, 是 Zn 的 30 倍。而 Tl 具有极高毒性, 本研究定义为 40。因此, 虽然 I_{geo} 评价结果显示研究区域中 Tl 为轻度污染, 但其潜在生态风险不容忽视。综合两种评价结果可知, 湘江岳阳段依然呈现出以 Cd 为主的多种重金属复合污染特征^[21]。

3 结 论

(1) 湘江岳阳段沉积物中重金属污染严重, 其中 Cd 富集严重。根据地累积指数评估结果看, 不同重金属元素的污染程度按 I_{geo} 从大到小的排序依次为: Cd > Zn > Mn > Cu > Tl > Ni > Co > Pb > Cr > V; 按生态风险危害指数大小分, 各重金属生态风险危害顺序为 Cd > Tl > Ni > Co > Mn > Cu > V > Pb > Zn > Cr。依据不同的评价方法, 评价结果出现一定的差异。主要原因在于, 潜在生态风险指数法综合考虑了各重金属的毒理效应。研究结果表明, 岳阳段

表 3 湘江沉积物地累积指数 I_{geo} 值

Table 3 I_{geo} of 10 heavy metal in sediments from Xiangjiang River (Yueyang Section)

I_{geo}	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Tl	Pb
QY1	-0.24	-0.24	0.77	-0.14	0.14	0.76	1.51	7.02	0.23	-0.27
QY2	-0.12	-0.47	1.37	0.31	0.23	0.93	1.72	6.95	0.44	-0.03
QY3	-0.40	-0.15	1.03	-0.12	-0.04	0.47	1.00	5.87	0.09	-0.51
QY4	-0.10	-0.14	1.01	-0.09	0.11	0.66	1.60	5.83	0.27	-0.25
XY1	-0.22	-0.20	1.11	0.31	0.11	0.82	1.44	6.70	0.45	-0.16
XY2	-0.78	-0.59	0.75	-0.33	-0.51	0.26	1.17	6.29	0.18	-0.54
均值	-0.31	-0.30	1.00	-0.01	0	0.65	1.40	6.45	0.28	-0.29

表 4 湘江岳阳段沉积物重金属潜在生态危害评价结果

Table 4 Potential ecological risk assessment results in sediments from the Xiangjiang River (Yueyang Section)

指数	E_i^f										RI
	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	Mn	Co	Ni	Tl	V	
QY1	583	1.72	5.75	2.32	1.81	4.85	7.02	9.60	79.3	2.55	698
QY2	558	1.47	6.47	2.72	2.10	7.36	9.62	10.2	91.6	2.75	692
QY3	264	1.84	4.70	1.96	1.27	5.81	7.15	8.49	72.0	2.27	369
QY4	257	1.85	5.37	2.34	1.92	5.74	7.28	9.41	81.5	2.80	375
XY1	469	1.77	6.00	2.50	1.72	6.13	9.58	9.39	92.4	2.58	601
XY2	353	1.34	4.05	1.91	1.43	4.80	6.14	6.13	76.4	1.74	457
均值	414	1.66	5.39	2.29	1.71	5.78	7.80	8.87	82.2	2.45	532

沉积物呈现出以 Cd 为主的多种重金属复合污染的特征。

(2) 本研究区域中, 所有采样点均面临着很高的生态风险。鉴于研究区域已是入湖口, 丰水期与洞庭湖连成一片, 沉积物中富集的重金属对洞庭湖水质的影响以及湖中水生态系统的影响, 还需要开展进一步的研究。

(3) 以往针对湘江流域重金属污染的研究多集中在 Cd 等常见高毒性重金属污染, 而忽视了沉积物中 Tl 的赋存及其潜在生态风险。从本文研究结果看, 湘江流域 Tl 的潜在生态风险值得高度关注。

本研究得到国家科技重大专项(2009ZX07528-002)和国家重点基础研究发展计划项目(2008CB418205)经费的支持, 在此致谢。

参考文献(References):

- [1] 王秋横, 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 on pollution of Xiang River valley in Hunan province [J]. China Water Wastewater, 2004, 20(8): 104-106 (in Chinese with English abstract).
- [2] 雷鸣, 秦普丰, 铁柏清. 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, 2010, 2: 62-65.
Lei Ming, Qin Pu-feng, Tie Bai-qing. Analysis on the pollution status of heavy metal in Xiangjiang River, Hunan Province [J]. Argo Environ Dev, 2010, 2: 62-65 (in Chinese).
- [3] 王晨, 曾祥英, 于志强, 盛国英, 傅家谟. 湘江衡阳段沉积物中重金属污染特征及其初步生态风险评估[J]. 地球环境学报, 2011, 2(2): 344-349.
Wang Chen, Zeng Xiang-ying, Yu Zhi-qiang, Sheng Guo-ying, Fu Jia-mo. The occurrence, distribution and risk assessment of heavy metals in sediments from Xiangjiang River (Hengyang section) [J]. J Earth Environ, 2011, 2(2): 344-349 (in Chinese with English abstract).
- [4] 唐文清, 曾荣英, 冯泳兰, 张幸, 李小明, 曾光明. 湘江(衡阳段)河流沉积物中重金属潜在生态风险评估[J]. 环境监测管理与技术, 2008, 20(5): 25-27.
Tang Wen-qing, Zeng Rong-ying, Feng Yong-lan, Zhang Xing, Li Xiao-ming, Zeng Guang-ming. Potential ecological risk assessment of heavy metal in the fluvial sediment of the Xiangjiang River (Hengyang section)[J]. Admin Tech Environ Monit, 2008, 20(5): 25-27 (in Chinese with English abstract).
- [5] 邱丽君, 杨喆. 湘江衡阳段底泥重金属沉积现状分析[J]. 科技资讯, 2008, 8: 166-168.
Qiu Li-jun, Yang Zhe. Analysis on the deposition of heavy metals in sediment from Xiangjiang (Hengyang section) [J]. Sci Technol Inf, 2008, 8: 166-168 (in Chinese).
- [6] Wei CY, Wang C, Yang L S. Characterizing spatial distribution and sources of heavy metals in the soils from mining-smelting activities in Shuikoushan, Hunan Province, China[J]. J Environ Sci, 2009, 21: 1230-1236.
- [7] 黄钟霆, 周振, 罗岳平. 湘江霞湾港段底泥的含镉量分布研究[J]. 环境污染与防治, 2009, 31(7): 56-58.
Huang Zhong-ting, Zhou Zhen, Luo Yue-ping. Distribution of Cd in sediments from Xiawan drainage area of the Xiang River[J]. Environ Pollut Contr, 2009, 31(7): 56-58 (in Chinese with English abstract).
- [8] 黄钟霆, 罗岳平, 周振. 湘江霞湾港段底泥的铅含量与分布研究[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(6): 34-36.
Huang Zhong-ting, Luo Yue-ping, Zhou Zhen. Lead content distribution of sediments in xiawan drainage area of the Xiang River[J]. Environ Sci Manag, 2009, 34(6): 34-36 (in Chinese with English abstract).
- [9] 尹春艳, 于一尊, 唐晓燕, 杨广, 余昌训, 刘茜, 杨克苏. 湘江三角洲沉积物元素重金属污染地球化学特征[J]. 江西科学, 2010, 28(2): 210-215.
Yin Chun-yan, Yu Yi-zun, Tang Xiao-yan, Yang Guang, Yu Chang-xun, Liu Qian, Yang Ke-su. Elemental geochemical characteristic of the sediments of Xiangjiang River estuary, Hunan Province, China[J]. Jiangxi Sci, 2010, 28(2): 210-215 (in Chinese with English abstract).
- [10] 刘颖, 刘海臣, 李献华. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素[J]. 地球化学, 1996, 25(6): 552-558.
Liu Ying, Liu Hai-chen, Li Xian-hua. Simultaneous and precise determination of 40 trace elements in rock samples using ICP-MS[J]. Geochimica, 1996, 25(6): 552-558 (in Chinese with English abstract).
- [11] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Geojournal, 1969, 2: 108-118.
- [12] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control of sediment [J]. Wat Res, 1980, 14(8): 975-1001.
- [13] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 张成江. 潜在生态危害指数法评价重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 112-115.
Xu Zheng-qi, Ni Shi-jun, Tu Xian-guo, Zhang Cheng-jiang. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. Environ Sci Technol, 2008, 31(2): 112-115 (in Chinese with English abstract).
- [14] 高博, 孙可, 任明忠, 梁细荣, 彭平安, 盛国英, 傅家谟. 北江表层沉积物中铊污染的生态风险[J]. 生态环境, 2008, 17(2): 528-532.
Gao Bo, Sun Ke, Ren Ming-zhong, Liang Xi-rong, Peng Ping-an, Sheng Guo-ying, Fu Jia-mo. Ecological risk assessment of thallium pollution in the surface sediment of Beijiang River[J]. Ecol Environ, 2008, 17(2): 528-532 (in Chinese with English abstract).
- [15] 刘芳文, 颜文, 黄小平, 施平. 珠江口沉积物中重金属及其相态分布特征[J]. 热带海洋学报, 2003, 22(5): 16-24.
Liu Fang-wen, Yan Wen, Huang Xiao-ping, Shi Ping. Distribution characteristic of heavy metal and its available phases in sediments from Zhujiang River mouth[J]. J Trop Oceanogr, 2003, 22(5): 16-24 (in Chinese with English abstract).

- [16] 高博. 典型环境样品中重金属污染及 Cd 和 Pb 同位素示踪的初步研究[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2008.
Gao Bo. Heavy metals pollution in typical environment samples and preliminary study on Cd and Pb isotopic tracing [D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2008 (in Chinese with English abstract).
- [17] 胡朝晖, 张干, 邱耀文, 林田, 徐维海. 我国渔港沉积物的重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 地球化学, 2010, 39(4): 297-304.
Hu Zhao-hui, Zhang Gan, Qiu Yao-wen, Lin Tian, Xu Wei-hai. Heavy metal pollution and their ecological risk assessment in surface sediments from chinese coastal fishing harbors[J]. Geochimica, 2010, 39(4): 297-304 (in Chinese with English abstract).
- [18] 沈敏, 于红霞, 邓西海. 长江下游沉积物中重金属污染现状与特征[J]. 环境监测管理与技术, 2006, 18(5): 15-18.
Shen Min, Yu Hong-xia, Deng Xi-hai. Heavy metals in surface sediments from lower reach of the Yangtze River[J]. Admin Tech Environ Monit, 2006, 18(5): 15-18 (in Chinese with English abstract).
- [19] 张婧, 王淑秋, 谢琰, 王幸福, 盛向军, 陈吉平. 辽河水系表层沉积物中重金属分布及污染特征研究[J]. 环境科学, 2008, 29(9): 2414-2418.
Zhang Jing, Wang Shu-qiu, Xie Yan, Wang Xing-fu, Sheng Xiang-jun, Chen Ji-ping. Distribution and pollution character of heavy metals in the surface sediments of Liao River [J]. Environ Sci, 2008, 29(9): 2414-2418 (in Chinese with English abstract).
- [20] 张淑香, 董淑萍, 颜文. 草河口地区沉积物和土壤中铊的地球化学行为[J]. 农业环境保护, 1998, 17(1): 113-115.
Zhang Shu-xiang, Dong Shu-ping, Yan Wen. Thallium in sediment and soil in Caohekou region[J]. Agro Environ Protect, 1998, 17(1): 113-115 (in Chinese).
- [21] Wang L X, Guo Z H, Xiao X Y, Chen T B, Liao X Y, Song J, Wu B. Heavy metal pollution of soil and vegetables in the midstream and downstream of the Xiangjiang River, Hunan Province[J]. J Geog Sci, 2008, 18: 353-362.