

三峡沉积物中重金属污染累积及潜在生态风险评估

贾旭威^{1,2}, 王 晨^{1,2}, 曾祥英¹, 于志强^{1*}, 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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 分析了三峡库区主要支流表层沉积物样品中 15 种重金属元素(Cd、Cu、Pb、Zn、Cr、Tl、V、Mn、C、Ni、Sr、Ag、Sb、Sn 和 Mo)的含量水平和分布规律, 并采用内梅罗污染指数、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) 三峡库区支流表层沉积物中重金属 Cd、Zn 和 Cu 等呈现污染加剧态势, 其含量范围分别为 0.36~1.22 mg/kg、55.8~182 mg/kg、24.0~93.1 mg/kg; (2) 内梅罗单因子污染指数(I_i)和地累积指数(I_{geo})指示研究区域中 Ag、Sb 和 Sn 等多种重金属污染累积效应显著; (3) 研究区域中多种重金属内梅罗多因子污染指数(P_n)和潜在生态风险指数(RI)分别为 3.41~11.1 和 204~568, 表明研究区域为重度重金属污染, 潜在生态风险较高; (4) 三峡库区主要支流表层沉积物呈现出以 Cd 为主的多种重金属复合污染特征。

关键词: 重金属; 沉积物; 三峡库区; 内梅罗指数; 地累积指数; 潜在生态风险指数

中图分类号: P593; X142 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2014)02-0174-06

The occurrence, accumulation and preliminary risk assessment of heavy metals in sediments from the main tributaries in the Three Gorges Reservoir

JIA Xu-wei^{1,2}, WANG Chen^{1,2}, ZENG Xiang-ying¹, YU Zhi-qiang^{1*}, 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. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The occurrence and accumulation of 15 heavy metals, Cd, Cu, Pb, Zn, Cr, Tl, V, Mn, C, Ni, Sr, Ag, Sb, Sn and Mo in the sediments collected from main tributaries in the Three Gorges Reservoir were analyzed. Meanwhile the potential ecological risks of these heavy metals were calculated and assessed using Nemerow Index method, index of geoaccumulation (I_{geo}) as well as Lars Hakanson Method based on concentrations measured in this study. The results indicated that (1) the Three Gorges reservoir was increasingly polluted by Cd, Zn and Cu, with concentrations ranging from 0.36–1.22 mg/kg, 55.8–182 mg/kg and 24.0–93.1 mg/kg, respectively; (2) Nemerow Index and I_{geo} disclosed the obvious accumulation of Ag, Sb and Sn; (3) Nemerow Index and RI values in this area varied from 3.41–11.1 and 204–568, respectively, implying heavily pollution by heavy metals and resultant high ecological risks in the studied area, which were mainly from Cd; (4) The pollution characteristic of multi-metals in this section was mainly related to Cd.

Key words: heavy metal; sediment; Three Gorges Reservoir; Nemerow Index method; index of geoaccumulation; Lars Hakanson Method

收稿日期(Received): 2013-04-03; 改回日期(Revised): 2013-05-22; 接受日期(Accepted): 2013-06-04

基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX07528-002)

作者简介: 贾旭威(1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境毒害污染物与风险评估。E-mail: steve5566@126.com

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

JIA Xu-wei et al.: Occurrence and risk of heavy metals in the Three Gorges

0 引言

三峡工程建成以后, 水体由河流变为典型的河道型水库, 该区域水文特征发生显著变化。一方面, 库区水位升高导致支流入江处形成大范围回水区。已有的研究表明, 三峡水库蓄水后, 部分支流的回水区已出现了水体富营养化现象^[1-2], 严重威胁城市水源地饮用水安全和工农业用水水质。另一方面, 三峡工程的建成引起河道过水面积增大, 水体平均流速从三峡建坝前的 0.85 m/s 降低至 0.17 m/s。由于水流缓慢, 水体扩散能力减弱, 颗粒物易于沉降, 直接影响到库区水体中污染物分布、赋存状态、迁移转化等环境地球化学行为。沉积物成为水体难降解毒害污染物(如持久性有机污染物和重金属等)的“汇”, 并成为水体二次污染的“源”。因此, 在上游相同排污方式、相同排污负荷情况下, 势必会导致沿岸水体和沉积物中污染物浓度增加。

近年来, 工业废水排放导致水体中重金属含量逐渐增加, 生态安全和人体健康受到严重威胁。此外, 重金属具有持久性和累积性, 部分重金属还具有显著的毒性效应。因此, 研究三峡库区蓄水后沉积物中重金属污染现状, 初步评估沉积物中重金属污染富集程度及生态风险, 对保护库区水环境生态健康和风险管理具有重要意义。

三峡库区蓄水后, 库区沉积物中重金属污染已经引起众多学者关注, 但是大多的研究多针对数种重金属(如 Cd、Cr、Hg、Pb 和 Zn 等), 或者集中在部分支流^[3-6]。本研究选择三峡库区重要支流为研究区域, 以 15 种毒性较强或者分布较广泛的重金属(Cd、Cu、Cr、Zn、Pb、Mn、Ni、V、Co、Tl、Sr、Ag、Sb、Sn 和 Mo)为目标污染物, 研究沉积物中各重金属含量水平和分布特征, 并初步评估其潜在生态风险, 以期为库区水污染防治和水环境保护提供基础数据和科学依据。

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(>18.2 MΩ/cm)。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。沉积物标准物质 GBW07129、GBW07309、GBW07103、GBW07104、GBW07105 和 GBW07123 购自国家地质实验测试中心。

1.2 样品采集、预处理与定性定量分析

2010年10月, 在三峡库区中下游支流, 包括汝溪河、黄金河、汤溪河、长滩河、磨刀溪、澎溪河、梅溪河、草堂河以及大宁河。采样点主要布设于支流河口及其上游和中游(见图 1), 共采集沉积物

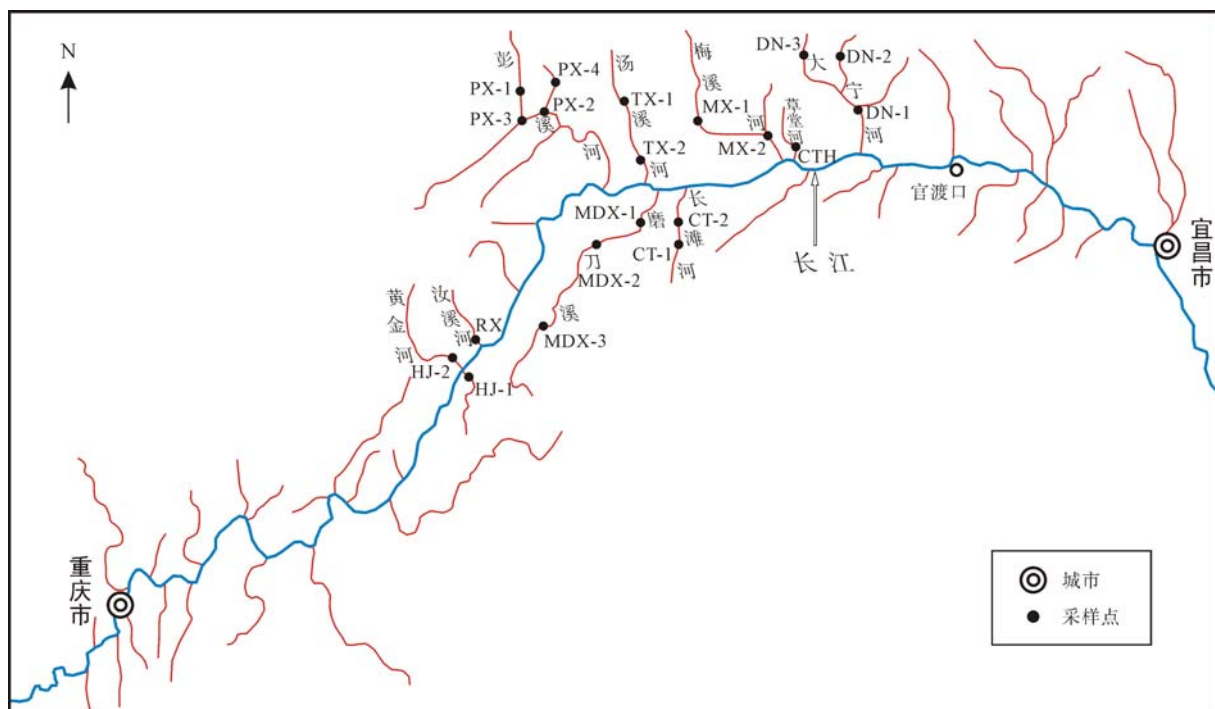


图 1 三峡库区采样点示意图

Fig.1 Sampling sites in the Three Gorges Reservoir

样品 20 份。样品采集后置于-20℃ 冰箱中冷冻保存。分析前取出冷冻干燥,然后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。样品经 HNO₃-HF-HNO₃ 消解后,加入 Rh 做内标,采用 P-E Elan 6000 型(PerkinElmer)测定了 15 种重金属含量^[7]。所有样品均平行进样 5 次,各重金属元素总量的相对标准偏差(RSD)均小于 8%,检测限为 0.001~0.124 μg/L。每批样品中同时进行空白样品分析确保没有背景污染;同时对样品进行加标回收率试验,回收率在 90%~110%之间。

1.3 沉积物重金属污染累积与潜在生态风险评估

1.3.1 地累积指数法

地累积指数法(Index of geoaccumulation, I_{geo})^[8]是目前常用的一种水环境沉积物中重金属污染的定量指标,其计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 [C_n / (K B_n)] \quad (1)$$

式中: C_n 是元素 n 在沉积物中的实测含量; B_n 为该元素的地球化学背景值; K 是考虑了各地岩石差异可能会引起背景值的变动而取的系数,一般取值为 1.5。可根据 I_{geo} 将污染等级分为清洁(≤ 0)、轻度污染(0~1)、偏中度污染(1~2)、中度污染(2~3)、偏重污染(3~4)、重污染(4~5)和严重污染(>5)等 7 个等级^[9]。

1.3.2 内梅罗综合污染指数

在实际环境中,沉积物中往往存在多种重金属污染并存的现象。为全面反映重金属污染现状以及各种重金属对复合污染的不同贡献,并甄别主要污染物,可以采用内梅罗(Nemerom)综合污染指数法,这也是目前应用较多的一种评价方法^[10]。

(1) 单因子污染指数:

$$I_i = C_i / S_i \quad (2)$$

(2) 多因子综合污染指数:

$$P_n = \sqrt{\frac{\max(I_i)^2 + \text{ave}(I_i)^2}{2}} \quad (3)$$

式(2)和式(3)中: I_i 为单一重金属的污染指数(单因子污染指数); C_i 为元素 i 在沉积物中的实测含量; S_i 为相应的地球化学背景值; P_n 为沉积物污染综合指数; $\max(I_i)$ 为沉积物重金属单因子污染指数的最大值; $\text{ave}(I_i)$ 为各重金属单因子污染指数的算术平均值。

按照 P_n 值,可以将污染划分为安全(≤ 0.7)、警戒(0.7~1.0)、轻度污染(1.0~2.0)、中度污染(2.0~3.0)

和重度污染(>3.0)等 5 个污染等级^[10]。

1.3.3 潜在生态风险指数法

瑞典学者提出的潜在生态风险指数法^[11],综合考虑了沉积物中各种重金属的浓度效应、不同重金属的毒性效应以及多种重金属复合污染的协同效应。该方法既能反映单一重金属的污染风险程度,也能反映多种重金属污染的综合影响。计算公式如下:

$$RI = \sum_i^m E_r^i = \sum_i^m T_r^i \times \frac{c^i}{c_n^i} \quad (4)$$

式中: T_r^i 为第 i 种重金属毒性响应系数; c^i 为表层沉积物第 i 种重金属的实测值(mg/kg); c_n^i 为第 i 种重金属的地球化学背景值(mg/kg), E_r^i 为第 i 种重金属的潜在生态危害系数。

根据 E_r 值,可将单因子污染程度划分为低度(<40)、中度(40~80)、较高(80~160)、高度(160~320)和很高(≥ 320)等 5 级;根据 RI 值,可将总潜在生态风险程度分为低度(<150)、中度(150~300)、较高(300~600)和极高(≥ 600) 4 个风险等级^[9,12]。

所用的三种评价方法中,地球化学背景值均为关键参数之一,内梅罗指数法和地累积指数法对地球化学背景值的选择更为敏感。通常情况下可采用研究区域或者临近区域的背景值,或者与研究区域环境条件相似区域的背景值。在本研究中,7 种重金属(Cr、Mn、Co、Cu、Ni、Pb 和 Zn)采用重庆地区土壤重金属背景值^[13],其余重金属采用四川(含重庆)土壤元素背景值^[14]。

2 结果与讨论

2.1 沉积物中重金属含量水平与空间分布

表 1 中列出了三峡库区主要支流表层沉积物中 15 种重金属含量水平,以及湘江(岳阳段)^[9]、2008 年三峡库区^[6]、长江中下游^[15]以及珠江水系北江水体沉积物中相应重金属含量水平^[16]。同时列出了相应的内梅罗单因子污染指数(I_i)、地累积指数(I_{geo})和潜在生态危害系数(E_r)。

三峡库区主要支流表层沉积物中 5 种常见毒害重金属(Cr、Cu、Zn、Cd 和 Pb)平均含量分别为 75.2 mg/kg、40.8 mg/kg、93.0 mg/kg、0.66 mg/kg 和 14.7 mg/kg,其中 Cr 的含量与长江中下游沉积物中含量大致相当,而 Cu、Zn 和 Cd 的含量则要明显高于长江中下游水平^[15];V、Mn、Co、Ni 和 Tl 的含量分别为 102 mg/kg、716 mg/kg、14.8 mg/kg、40.2 mg/kg

表 1 三峡库区沉积物中重金属含量水平(mg/kg)、污染累积及潜在生态风险

Table 1 Concentration levels (mg/kg), accumulation and preliminary risk of heavy metals in the sediments from the Three Gorges Reservoir

元素	含量范围(均值)	I_i (均值)	I_{geo} (均值)	E_r (均值)	高值点	长江	三峡库区	湘江	北江
V	73.2~141 (102)	0.76~1.47 (1.06)	-0.98~-0.03 (-0.53)	1.53~2.93 (2.12)	HJ-1	/	/	101	61.8
Cr	42.0~106 (75.2)	0.77~1.96 (1.39)	-0.96~-0.38 (-0.15)	1.55~3.91 (2.77)	HJ-1	73.3	86.3	74.9	206
Mn	451~1240 (716)	0.76~2.10 (1.21)	-0.98~-0.48 (-0.36)	0.76~2.10 (1.21)	HJ-1	753	/	1774	860
Co	10.6~20.5 (14.8)	0.60~1.15 (0.83)	-1.33~-0.38 (-0.88)	2.98~5.75 (4.16)	MDX-1	14.2	/	19.2	9.9
Ni	29.8~55.5 (40.2)	0.83~1.55 (1.13)	-0.85~-0.05 (-0.44)	4.17~7.77 (5.63)	MDX-1	33.9	46.8	40.1	40.1
Cu	24.0~93.6 (40.8)	0.89~3.44 (1.51)	-0.76~-1.20 (-0.10)	4.43~17.18 (7.54)	MDX-1	26.6	44.2	53.9	316
Zn	55.8~182 (93.0)	0.70~2.29 (1.17)	-1.09~-0.61 (-0.44)	0.70~2.29 (1.17)	HJ-1	31.6	137	299	619
Cd	0.36~1.22 (0.66)	4.57~15.4 (8.39)	1.61~3.36 (2.42)	137~462 (252)	HJ-1	0.20	0.75	13.8	16.7
Pb	8.12~34.0 (14.7)	0.37~1.53 (0.66)	-2.04~-0.03 (-1.31)	1.83~7.66 (3.32)	HJ-1	37.8	59.4	32.1	213
Tl	0.45~1.01 (0.66)	0.83~1.84 (1.20)	-0.86~-0.29 (-0.35)	33.1~73.5 (48.2)	PX-3	/	/	1.13	1.67
Sr	122~261 (179)	1.01~2.17 (1.49)	-0.57~-0.53 (-0.04)	/	DN-1	/	/	/	/
Ag	0.35~0.59 (0.48)	3.22~5.39 (4.39)	1.09~1.86 (1.53)	/	HJ-2	/	/	/	/
Sb	0.55~4.62 (2.10)	0.43~3.61 (2.10)	-0.56~-1.27 (0.00)	/	PX-2	/	/	/	/
Sn	4.33~8.09 (6.31)	1.88~3.52 (2.74)	0.33~1.22 (0.85)	/	MDX-1	/	/	/	/
Mo	0.81~1.85 (1.34)	0.81~1.68 (1.34)	-0.89~-0.30 (-0.19)	/	HJ-1	/	/	/	/

和 0.66 mg/kg; Sr、Ag、Sb、Sn 和 Mo 的含量分别为 179 mg/kg、0.48 mg/kg、2.10 mg/kg、6.31 mg/kg 和 1.34 mg/kg。

与 1995 年调查结果^[17]相比, 沉积物中 Cu、Ni、Zn 和 Cd 污染态势明显加剧, Mn、Co 和 Cr 含量没有明显变化, Pb 含量则呈现下降的趋势。与 2008 年三峡库区重要支流沉积物调查结果^[6]相比, Cr、Ni、Cu、Zn 和 Cd 含量水平大致相当, Pb 含量同样呈现下降的趋势。与徐小清的研究结果^[18]相比, 部分研究区域中 Sr 含量呈上升趋势。

研究区域 9 条支流中, 重金属污染较重的主要是忠县境内的黄金河和云阳县境内的磨刀溪和澎溪河。忠县位于重庆中部矿产资源富集区, 分布有煤矿、硫铁矿、铜、铅、砂金等矿种, 因此可以推测采矿、冶炼等工业活动是该支流重金属污染的重要来源。澎溪河是三峡库区北岸最大的次级支流, 人口较为密集, 承受了来自工业、农业以及生活污水的污染。

不同重金属也呈现不同的空间分布规律, 例如 V、Cr、Mn、Zn、Cd、Pb 和 Mo 的最高值均出现在黄金河(HJ-1), Cu、Co 和 Ni 的高值点位于云阳县磨刀溪(MDX-1), Tl 的高值点位于云阳县澎溪河(PX-3)。总体而言, 各重金属(除 Tl 外)的高值点多出现在支流入江口采样点, 三峡库区蓄水后, 断面水深增加, 流速减小, 受库区回水顶托的影响, 部分支流回水区水体处于相对静止状态, 造成局部水体污染加剧^[19-20]。

2.2 三峡库区主要支流沉积物重金属污染累积评价

2.2.1 内梅罗单因子污染指数(I_i)与多因子综合污染指数(P_n)

从表 1 中列出的内梅罗单因子污染指数(I_i)看, 三峡库区主要支流沉积物中 Cd 累积效应最为显著(4.57~15.4), 除采矿、冶炼等工业排污影响外, 与三峡库区大量使用含 Cd 化肥、农药有关^[21]。此外, 研究区域中 Ag (3.22~5.39)和 Sn (4.33~8.09)也表现出较为明显的污染累积, 是沉积物中仅次于 Cd 的污染因子。其余 12 种重金属在部分研究区域也表现出不同程度的污染累积。从空间分布看, 所有重金属的 I_i 最低值都出现在支流的最上游采样点, 而除了 Tl 以外的最高值都出现在近支流入江口采样点。

根据公式(3)算得 15 种重金属多因子综合污染指数(P_n)为 3.41~11.1, 结果表明研究区域重金属污染属于重度污染($P_n > 3.0$)。三峡水库是周边居民的饮用水源, 也是库区工农业用水水源, 库区水质安全不仅关系到居民饮水安全, 也制约着库区经济发展和生态安全。根据沉积物中重金属 I_i 均值从大到小排序, 依次为 Cd > Ag > Sn > Sb > Cu > Sr > Cr > Mo > Mn > Tl > Zn > Ni > V > Co > Pb。

2.2.2 地累积指数(I_{geo})

研究结果表明(表 1), 研究区域沉积物中 Cd 地累积指数均大于 1, 其中 4 个采样点表现为偏中度污染(I_{geo} 1~2), 14 个采样点为中度污染(I_{geo} 2~3), 2 个采样点(HJ-1 和 MDX-1)为偏重度污染(I_{geo} 3~4)。研

究区域中 Ag 污染累积现象更为严重(I_{geo} 3.2~5.4), 全部采样点均表现为偏重度以上污染等级, 其中 5 个采样点为严重污染水平(HJ-1、HJ-2、TX-2、MDX-1 和 MDX-2); Sn 为轻度(I_{geo} 0~1)至偏中度污染(I_{geo} 1~2)。MDX-1 采样点沉积物中 Cu 污染较为严重(I_{geo} 1.20), 其余采样点污染轻微甚至无污染。 I_{geo} 指示研究区域内 Pb、Cr 和 Zn 的污染累积并不显著。

根据沉积物中重金属的 I_{geo} 均值从大到小排序, 依次为 Cd > Ag > Sn > Sb > Cu > Sr > Cr > Mo > Mn > Tl > Zn > Ni > V > Co > Pb。

2.3 三峡库区主要支流沉积物重金属风险评估

目前可查毒性响应系数的重金属只有 10 种 (Cd、Cu、Cr、Zn、Pb、Mn、Ni、V、Co 和 Tl), 本研究中仅针对这 10 种重金属计算单一重金属潜在生态危害系数(E_r)及总潜在生态风险指数(RI)。

研究区域 RI 值差异显著(204~568), 总体呈现中度以上生态风险, 其中 11 个采样点为较高生态风险程度(315~568)。各支流 RI 值从上游到下游呈现递增趋势, 在支流入江口处达到最高值, 该研究结果与安立会等的研究结果一致^[5]。研究区域内 RI 值最高点为 HJ-1, 该采样点多种重金属污染严重。

从单个重金属 E_r 分析, 研究区域沉积物中 Cd (137~462, 均值 252)生态风险最强, 显著高于其他 9 种重金属, 是主要的风险重金属。20 个采样点中, 有 4 个采样点属于很高的生态风险程度(≥ 320), 15 个采样点属于高生态风险程度(160~320)。Tl 的 E_r 值范围为 33.1~73.5, 有 15 个采样点达到了中度风险程度(40~80), 其余为低度生态风险, 是仅次于 Cd 的重要风险重金属。研究区域沉积物中除了 Cd 和 Tl 以外的 8 种重金属的 E_r 值都低于 40, 风险轻微。

依据沉积物中各重金属 E_r 均值大小排序, 研究区域生态危害程度顺序为 Cd > Tl > Cu > Ni > Co > Pb > Cr > V > Mn > Zn。研究结果再次表明, 研究区域沉积物呈现以重金属 Cd 为主的污染特征; Tl 污染的生态风险不容乐观。

3 结论

(1) 三峡库区主要支流表层沉积物中重金属污染较为严重, 其中 Cd、Ag 和 Sn 富集严重。根据内梅罗指数和地累积指数评估结果, 不同重金属元素的污染程度从大到小依次为: Cd > Ag > Sn > Sb > Cu > Sr > Cr > Mo > Mn > Tl > Zn > Ni > V > Co >

Pb; 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 > Cu > Ni > Co > Pb > Cr > V > Mn > Zn。由于潜在生态风险指数法引入重金属响应参数, 评价结果与内梅罗指数和地累积指数结果出现一定差异。研究结果表明, 三峡库区呈现出以 Cd 为主的多种重金属复合污染的特征。

(2) 研究区域中, 一半以上采样点面临着较高生态风险。三峡水库是库区居民饮用水源, 也是库区工农业用水水源, 库区处于西部大开发关键生态位置, 库区水质安全关系到库区居民饮用水安全和当地经济发展。

(3) 针对环境样品中重金属污染的研究多集中在 Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 等几种毒害重金属, 由于受区域性矿产分布以及工矿企业生产的影响, 自然环境往往承受着多种重金属的复合污染。因此, 针对数种毒害重金属开展的研究不可避免会低估重金属复合污染带来的环境压力和生态风险。

参考文献(References):

- [1] 林艳华, 罗毅平. 三峡库区的水环境污染[J]. 河北农业科学, 2010, 14(7): 84-86, 130.
Lin Yan-hua, Luo Yi-ping. Water environment pollution in the Three Gorges Reservoir area [J]. J Hebei Agr Sci. 2010, 14(7): 84-86, 130 (in Chinese with English abstract).
- [2] 张可. 三峡水库成库后对典型污染物迁移与时空分布的影响[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
Zhang Ke. Transference and temporal-spatial distribution of typical contamination after the Three Gorges Reservoir impoundment [D]. Chongqing: Chongqing University, 2008 (in Chinese with English abstract).
- [3] 张科. 梁滩河流域重金属复合污染研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
Zhang Ke. Study on the complex pollution of heavy metals in Liangtan River [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011 (in Chinese with English abstract).
- [4] 罗财红, 吴庆梅, 康清蓉. 嘉陵江入江河段沉积物重金属污染状况评估[J]. 环境化学, 2010, 29(4): 636-639.
Luo Cai-hong, Wu Qing-mei, Kang Qing-rong. Assessment on heavy metal pollution in the sediment of infall reach of Jialing River [J]. Environ Chem, 2010, 29(4): 636-639 (in Chinese with English abstract).
- [5] 安立会, 张艳强, 郑丙辉, 刘玥, 宋双双, 李子成, 陈浩, 赵兴茹, 林进. 三峡库区大宁河与磨刀溪重金属污染特征[J]. 环境科学, 2012, 33(8): 2592-2598.
An Li-hui, Zhang Yan-qiang, Zheng Bing-hui, Liu Yue, Song Shuang-shuang, Li Zi-cheng, Chen Hao, Zhao Xing-ru, Lin Jin. Characteristics of heavy metal pollution in Daning River and Modaoxi River of Three Gorges Reservoir areas [J]. Environ Sci, 2012, 33(8): 2592-2598 (in Chinese with English abstract).

- abstract).
- [6] 王健康, 高博, 周怀东, 陆瑾, 王雨春, 殷淑华, 郝红, 袁浩. 三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评估[J]. 环境科学, 2012, 33(5): 1693-1699.
Wang Jian-kang, Gao Bo, Zhou Huai-dong, Lu Jin, Wang Yu-chun, Yin Shu-hua, Hao Hong, Yuan Hao. Heavy metals pollution and its potential ecological risk of the sediment in Three Gorges Reservoir during its impounding period [J]. Environ Sci, 2012, 33(5): 1693-1699 (in Chinese with English abstract).
- [7] 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).
- [8] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. Geojournal, 1969, 2: 108-118.
- [9] 曾祥英, 王晨, 于志强, 秦延文, 张雷, 盛国英, 傅家谟. 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[J]. 地球化学, 2012, 41(1): 63-69.
Zeng Xiang-ying, Wang Chen, Yu Zhi-qiang, Qin Yan-wen, Zhang Lei, Sheng Guo-ying, Fu Jia-mo. The occurrence, distribution and preliminary risk assessment of heavy metals in sediment from Xiangjiang River (Yueyang Section) [J]. Geochimica, 2012, 41(1): 63-69 (in Chinese with English abstract).
- [10] 桑稳姣, 程建军. 墨水湖底泥重金属污染现状与评价研究[J]. 安徽农业大学学报, 2008, 35(3): 469-472.
Sang Wen-jiao, Cheng Jian-jun. Assessment on pollution status of heavy metal in sediment of Moshui Lake in Wuhan [J]. J Anhui Agr Univ, 2008, 35(3): 469-472 (in Chinese with English abstract).
- [11] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control of sediment [J]. Wat Res, 1980, 14(8): 975-1001.
- [12] 王晨, 曾祥英, 于志强, 盛国英, 傅家谟. 湘江衡阳段沉积物中铊等重金属的污染特征及其生态风险评估[J]. 生态毒理学学报, 2013, 8(1): 16-22.
Wang Chen, Zeng Xiang-ying, Yu Zhi-qiang, Sheng Guo-ying, Fu Jia-mo. Distribution and risk assessment of thallium and other metals in sediments from Xiangjiang River Hengyang Section [J]. Asia J Ecotoxicol, 2013, 8(1): 16-22 (in Chinese with English abstract).
- [13] 西南师范学院环境科研组. 重庆地区土壤中 11 种元素背景值的数据处理与结果表示[J]. 重庆环境科学, 1982, 4(4): 18-38.
Research Group on Environment from Southwest Normal University. Data processing and results of background value of 11 elements in soils collected in Chongqing Area [J]. Chongqing Environ Sci, 1982, 4(4): 18-38 (in Chinese).
- [14] 魏复盛. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 501p.
Wei Fu-sheng. Chinese Soil Element Background Value [M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1990 (in Chinese).
- [15] 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).
- [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] 张朝生, 章申, 张立成, 王立军. 长江水系河流沉积物重金属元素含量的计算方法研究[J]. 环境科学学报, 1995, 15(3): 257-264.
Zhang Chao-sheng, Zhang Shen, Zhang Li-cheng, Wang Li-jun. Calculation of heavy metal contents in sediment of the Changjiang River system [J]. Acta Sci Circums, 1995, 15(3): 257-264 (in Chinese with English abstract).
- [18] 徐小清, 邓冠强, 惠佳玉, 张晓华, 丘昌强. 长江三峡库区江段沉积物的重金属污染特征[J]. 水生生物学报, 1999, 23(1): 1-10.
Xu Xiao-qing, Deng Guan-qiang, Hui Jia-yu, Zhang Xiao-hua, Qiu Chang-qiang. Heavy metal pollution in sediments from the Three Gorges Reservoir area [J]. Acta Hydrobiol Sinica, 1999, 23(1): 1-10 (in Chinese with English abstract).
- [19] 翟世涛, 杨健, 张磊, 王娟, 胡正峰. 三峡库区支流彭溪河浮游动物的季节性变化与水质评价[J]. 中国农学通报, 2012, 28(14): 307-312.
Zhai Shi-tao, Yang Jian, Zhang Lei, Wang Juan, Hu Zheng-feng. Water quality evaluation and zooplankton seasonal changes in backwater area of Pengxi River in the Three Gorges Reservoir [J]. Chinese Agr Sci Bull, 2012, 28(14): 307-312 (in Chinese with English abstract).
- [20] 王娟, 胡正峰, 张磊, 翟世涛, 李兴琼. 三峡库区支流彭溪河汇水区水质调查与评价[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2011, 33(7): 67-74.
Wang Juan, Hu Zheng-feng, Zhang Lei, Zhai Shi-tao, Li Xing-qiong. Water quality survey and evaluation in the backwater area of the Pengxi River in the Three Gorges Reservoir [J]. J Southwest Univ (Nat Sci Ed), 2011, 33(7): 67-74 (in Chinese with English abstract).
- [21] 张雷, 秦延文, 赵艳敏, 马应群, 曹伟, 贾静. 三峡彭溪河回水区消落带岸边土壤重金属污染分布特征[J]. 环境科学学报, 2012, 32(12): 3021-3029.
Zhang Lei, Qin Yan-wen, Zhao Yan-min, Ma Ying-qun, Cao Wei, Jia Jing. Distribution and characteristic of heavy metals in soils of water-level-fluctuating zone of Pengxi River, Three Gorges Reservoir [J]. Acta Sci Circums, 2012, 32(12): 3021-3029 (in Chinese with English abstract).