

三峡水库小江流域消落区土壤重金属的时空分布

杨启红¹, 郑志伟¹, 张志永¹, 安然², 胡红青², 胡莲¹, 万成炎¹

(1. 水利部中国科学院水工程生态研究所, 湖北 武汉 430079; 2. 华中农业大学, 湖北 武汉 430070)

摘要:2009年5月、7月和9月对小江流域消落区5个断面土壤重金属的监测结果表明, Cu、Zn、Pb、Cd、Fe和Mn浓度均值分别为28.41、90.54、16.94、1.46、5.053 × 10⁴和554.04 mg/kg。随海拔高程升高, 各重金属浓度均值在高程160 m处最小, 170 m处增加; 流域沿程在养鹿段减少, 高阳和黄石段增加, 在双江段又减少; 随时间变化, 7月增加, 9月减少。Zn和Cu、Fe呈极显著正相关性, Pb和Cd、Fe, Cu和Fe、Pb呈较显著正相关性; pH和Mn呈正相关, 与其他5种重金属呈负相关, 与Fe的相关性显著, 与其他重金属的相关性不显著。Cu、Zn、Pb、Cd和Mn地质累积指数分别为1.40、0.86、0.62、10.03和1.07。按照Mull污染分类等级判别, Zn和Pb无污染, Cu和Mn为中度污染, Cd为重度污染。

关键词:消落区; 土壤重金属; 时空分布; 小江流域

中图分类号:X833 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2011)02-0011-06

重金属在土壤环境中的溶解度小, 可以长时间滞留, 易在表土层中蓄积, 不易被微生物降解, 并可通过食物链进入人体, 危害人体健康。因此, 土壤重金属污染具有隐蔽性、长期性和不可逆性。三峡水库蓄水运行后, 在库周形成面积逾300 km²的消落区, 其环境的显著变化对土壤重金属和植物群落结构的影响引起广泛关注, 相关研究集中于三峡水库消落区土壤重金属背景值以及三峡水库分期蓄水至135 m(2003年)和156 m(2006年)后消落区不同土壤类型及三峡库区沿程重金属的分布特征(喻菲, 2006; 喻菲等, 2006; 李强等, 2007; 裴廷权等, 2008; 唐将等, 2008; 裴廷权等, 2010)。

小江为三峡重庆库区长江北岸的一级支流(30°49' ~ 31°41' N, 107°56' ~ 108°54' E), 上游位于开县境内, 下游位于云阳县境内, 在云阳县双江镇汇入长江, 干流全长182.4 km, 其中库区部分长117.5 km。小江流域面积5 172.5 km², 地处四川盆地东北缘, 属川东平行岭谷的一部分, 地貌主要受控于地质构造和岩性, 依成因可分为堆积型、构造剥蚀型、构造侵蚀型和构造溶蚀型4种, 土壤类型主要有

紫色土、水稻土和石灰土。小江流域气候温和, 雨量充沛, 年平均气温18.5℃, 年降雨量1 100 ~ 1 500 mm, 多集中于6-9月, 雨热同季。小江流域消落区面积为48.02 km², 占三峡库区消落区总面积的15.9%, 是三峡库区消落区面积最大的支流。

2008年三峡水库试验性蓄水至172.8 m, 笔者以小江流域消落区为研究对象, 于2009年5-9月研究了消落区出露期土壤重金属Cu、Zn、Pb、Cd、Fe和Mn等的时空分布特征, 以期对三峡水库的水质保护及重金属污染防治提供依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

在小江流域消落区设置渠口、养鹿、高阳、黄石和双江等5个采样断面, 如图1所示。采样时间为2009年5月、7月和9月。根据地形条件在每个断面设置1个50 m × 50 m的样地, 在样地海拔150、160和170 m处各设置3个1 m × 1 m样方, 样方间距10 ~ 20 m, 在样方内采用手动轻便式土壤取样套件采集0 ~ 20 cm表层土壤。土壤样本的采集及保存按照HJ/T166-2004《土壤环境监测技术规范》的要求进行。

1.2 样品分析

经消解处理后的土壤, 主要测定Cu、Zn、Pb、Cd、Fe和Mn等重金属。Pb和Cd采用KI-MIBK萃取火焰原子吸收分光光度法测定(GB/T17140-1997); Cu、Zn、Fe和Mn采用ICP-AES法测定; pH采用pH酸度计法(仪器名称及型号: HANNA,

收稿日期: 2010-11-18 收修改稿日期: 2011-03-22

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07104-003)和农业科技成果转化资金项目“三峡库区小江生态恢复技术研究与示范”(2009GB23320489)资助。

通讯作者: 万成炎, 1964年生, 男, 研究员, 主要从事水生态与环境保护研究。E-mail: chywan@mail.ihe.ac.cn

作者简介: 杨启红, 1979年生, 女, 博士, 助理研究员, 主要从事生态水文和生态修复研究。E-mail: yangqihong0354@163.com

pH211 酸度计)测定。

1.3 数据处理

用 SPSS 16.0 和 Excel 2007 进行数据统计分析。

土壤重金属的相关性分析采用 Pearson Correlation 相关性系数,双尾检验。

用地质累积指数 (Muller, 1981) 对重金属污染状况进行分析,该指数在计算过程中加入了表层沉积特征、岩石地质及其他因素的修正指数,不仅可反映重金属分布的自然变化特征,而且可以判别人为活动对环境的影响,是区分人类活动影响的重要参数。其表达式为:

$$I_{geo} = \log \frac{C_i}{1.5B_i}$$

式中: C_i 为样品中重金属元素 i 的含量; B_i 为沉积物重金属元素 i 的背景值; 1.5 为常数,考虑到岩石差异、成岩作用等因素可能引起背景值地波动而设。

Cu、Zn、Pb、Cd 和 Mn 的地质累积指数分别为 1.40、0.86、0.62、10.03 和 1.07。按照 Mull (1981) 污染分类等级判别, Zn 和 Pb 无污染, Cu 和 Mn 为中度污染, Cd 为重度污染。

土壤重金属主要来源于其成土的母质,另外与赋存介质的酸碱度、氧化还原电位、粘土与有机质含量、地形地貌特征、气候条件、生物作用及人为活动等因素密切相关。从元素自身的地球化学特性看,小江成土母质主要是沉积(泥)页岩、石灰岩等,其 Cd 含量高可能是石灰岩形成时发生了富集,岩石风化过程中成土母质的碱性环境不利于 Cd 的迁移而导致 Cd 的累积。小江流域近年来工农业快速发展,废气、废水和废渣的大量排放以及农业面源污染,使流域土壤受到了不同程度的重金属污染。

2.2 小江流域消落区土壤重金属的空间分布

2.2.1 横向(不同高程)分布

高程 150 ~ 170 m 消落区土壤重金属分布情况见图 2。Cu、Zn、Cd、Pb、Fe 和 Mn 的均值均在 160 m 高程处最小。Cu 的均值变化范围为 26.72 ~ 30.94 mg/kg, Zn 和 Pb 的变化范围分别为 85.72 ~ 97.91 和 16.27 ~ 17.90 mg/kg, Cd 的变化范围为 1.33 ~ 1.70 mg/kg, Fe 和 Mn 的变化范围分别为 4.934×10^4 ~ 5.186×10^4 和 522.74 ~ 584.54 mg/kg。高程 150 m 处 Cd 的变异系数最大,为 29.91%; Cu 的变异系数最小,为 8.09%。高程 160 m 处 Mn 的变异系数最小,为 9.26%; Pb 的变异系数最大,为 23.11%。高程 170 m 处 Fe 的变异系数最小,为 11.96%; Pb 的变异系数最大,为 35.80%。

2.2.2 纵向(流域沿程)分布

小江上游(渠口)到下游(双江)各断面重金属分布情况见图 3。各土壤重金属均值在养鹿段减少,高阳和黄石段增加,在双江段又减少。Cu 均值变化范围为 24.01 ~ 32.35 mg/kg, Mn 和 Fe 均值变化范围分别为 595.56 ~ 489.08 和 4.416×10^4 ~ 5.647×10^4 mg/kg, Cd 均值变化范围为 1.25 ~ 1.68 mg/kg, Zn 和 Pb 均值变化范围分别为 78.21 ~ 104.83 和 12.06 ~ 21.09 mg/kg。除 Pb 外, Cu、Zn、Fe、Cd 和 Mn 均值以养鹿最小,分别为 24.01、78.21、 4.416×10^4 、1.25 和 489.08 mg/kg, Cu、Pb 和 Mn 均值以上游渠口最高,分别为 32.35、21.09 和 595.56 mg/kg, Fe、Zn 和 Cd 均值以黄石最高,分别为 5.647×10^4 、104.83 和 1.68 mg/kg。各采样点中, Cu、Zn、Fe、Cd 和 Mn 含量的变异系数以黄石最大,分别为 27.55%、27.99%、24.28%、48.57% 和

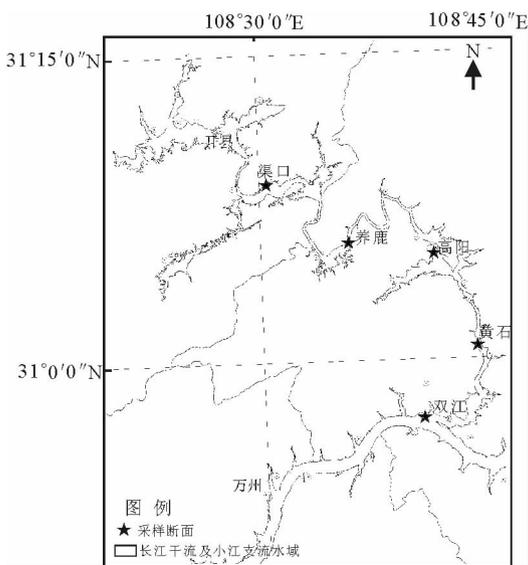


图 1 采样断面设置

Fig. 1 Sampling sections set in water-level-fluctuation zone of Xiaojiang watershed

2 结果与分析

2.1 小江流域消落区土壤重金属含量及来源

2009 年小江流域消落区 5 个断面土壤的 Cu、Zn、Pb、Cd、Fe 和 Mn 均值分别为 28.41、90.54、16.94、1.46、 5.053×10^4 和 554.04 mg/kg。以库区消落区土壤重金属为背景值(喻菲, 2006), Cu、Zn、Pb 和 Cd 的平均值分别为 25.00、69.88、23.88、0.134 mg/kg, Mn 参考紫色土背景值(李健, 1989), 其均值为 344.0 mg/kg; 该区域无 Fe 的相关数据。

27.83%; Pb 含量的变异系数以高阳最大,为 46.30%; Cu、Zn、Fe 和 Pb 含量的变异系数以双江最小,分别为 8.27%、4.14%、4.22% 和 14.43%; Cd

含量的变异系数以养鹿最小,为 2.00%; Mn 含量的变异系数以高阳最小,为 11.11%。

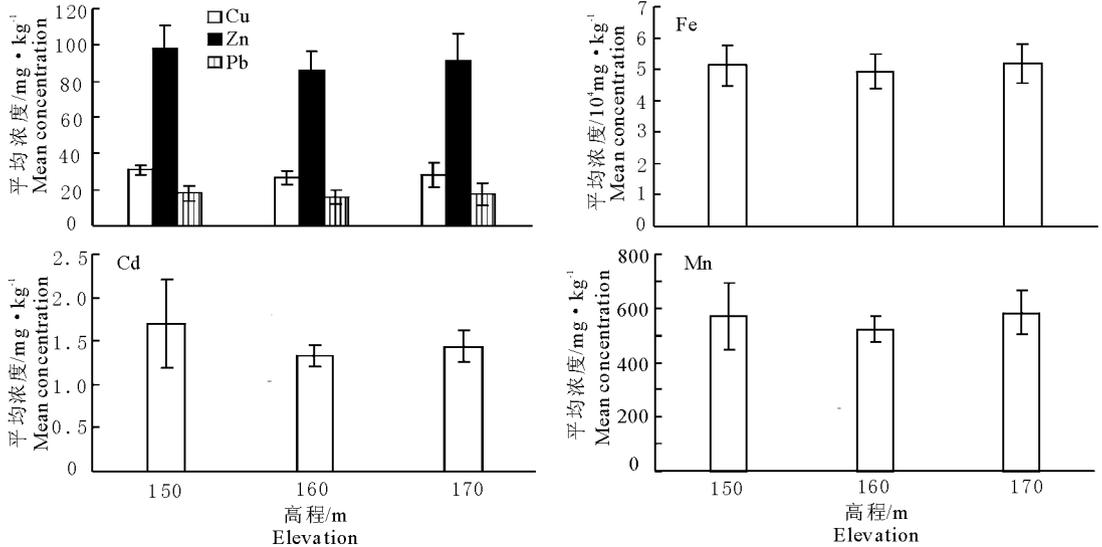


图2 小江流域消落区不同高程土壤重金属的分布

Fig.2 Distribution of soil heavy metals at different elevation in water-level-fluctuation zone of Xiaojiang watershed

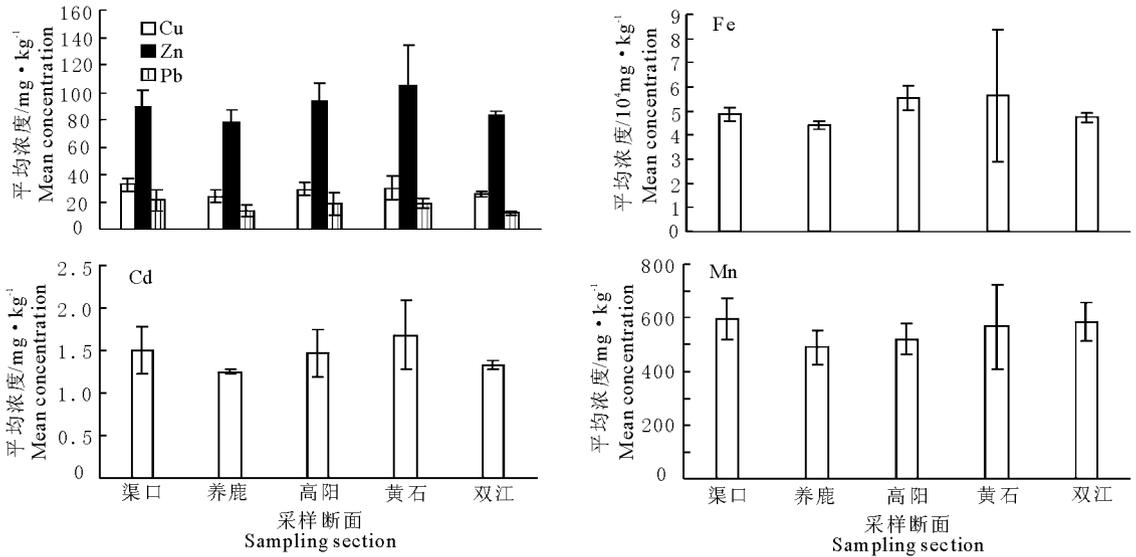


图3 小江流域消落区沿程土壤重金属的分布

Fig.3 Distribution of soil heavy metals along the Xiaojiang River in water-level-fluctuation zone of Xiaojiang watershed

2.3 小江流域消落区土壤重金属的时间分布

2009年小江流域消落区5月、7月和9月土壤重金属分布情况见图4。随时间进程,7月增加、9月减少。Cu、Pb和Fe均值的变化范围为24.16~32.31、12.88~23.80和 $4.809 \times 10^4 \sim 5.428 \times 10^4$ mg/kg,Zn、Cd和Mn均值的变化范围为76.78~100.69、1.23~1.63和522.25~591.70 mg/kg。Cu、Zn、Pb、Cd、Fe和Mn均值7月最大,分别为32.31、100.69、23.8、1.63、 5.428×10^4 和591.7 mg/kg。Fe含量的变异系数小(7.19%),Cu、

Pb和Mn含量的变异系数较大,分别为17.12%、34.47%和31.57%,7月Pb含量的变异系数达到34.47%。7月各重金属均值都较高,可能是因为该期间降雨量大,重金属随地表径流向消落区转移。

2.4 小江流域消落区土壤重金属的相关性

经多元统计分析,6种土壤重金属之间及它们与pH的相关性分析结果见表2。Zn和Cu、Fe的相关性极显著,相关系数分别为0.836和0.878 ($P < 0.01$);Pb和Cd、Fe,Cu和Fe、Pb的相关性较显著,相关系数为0.618~0.779 ($P < 0.05$)。pH

和 Mn 呈正相关, 相关系数 0.005, 与其他 6 种重金属呈负相关, 与 Fe 的相关系数为 -0.330

($P < 0.05$), 与其他重金属元素的相关性不显著。

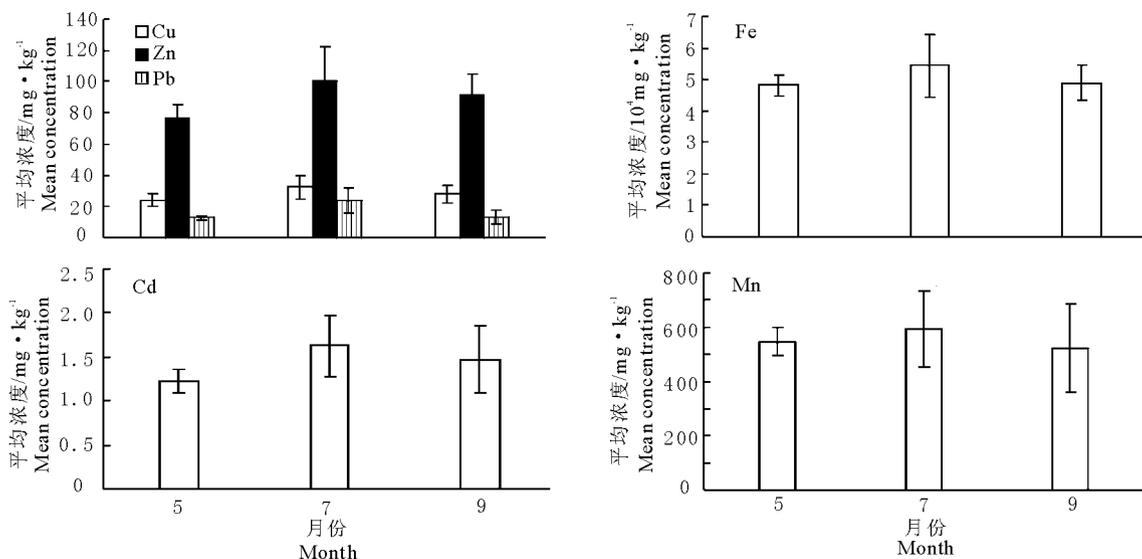


图4 小江流域消落区2009年不同月份土壤重金属的分布

Fig. 4 Temporal distribution of soil heavy metals in water-level-fluctuation zone of Xiaojiang watershed in 2009

表2 小江流域消落区土壤重金属之间及其与 pH 的相关性分析

Tab. 2 Correlation analysis among soil heavy metals and correlation analysis of heavy metals and pH in water-level-fluctuation zone of Xiaojiang watershed

	Cu	Cd	Fe	Mn	Pb	Zn	pH
Cu	1.000	0.575 **	0.711 **	0.408 **	0.779 **	0.836 **	-0.237
Cd		1.000	0.630 **	0.378 *	0.618 **	0.743 **	-0.124
Fe			1.000	0.437 **	0.682 **	0.878 **	-0.330 *
Mn				1.000	0.472 **	0.415 **	0.005
Pb					1.000	0.707 **	-0.218
Zn						1.000	-0.142
pH							1.000

注: * 表示 0.05 显著水平; ** 表示 0.01 显著水平。

3 讨论

已有研究表明, 库区不同土壤类型重金属含量差异明显 (喻菲等, 2006)。消落区形成之前土地利用情况差别较大, 三峡水库运行导致水文条件变化后, 泥沙沿坡面出现较明显的分选作用, 其携带的重金属在不同高程沉降不同。这可能是不同高程消落区土壤重金属变异系数差别较大的原因。

由于地球化学条件的相似性以及造成土壤污染的重金属元素在土壤中的共存性, 重金属元素在总量上存在相关性 (Romic et al, 2003; 陆安祥等, 2007)。Fe 和 Mn 的水合氧化物是沉积物中重要的无机胶体, 它们通过吸附、共沉淀等作用影响沉积物中重金属含量 (Marchand et al, 2006)。很多重金属元素以强的结合能力吸附在土壤或沉积物中的铁、

锰氧化物上, 重金属在向表层迁移和富集的过程中, 铁、锰氧化物发挥了重要作用 (Urasa et al, 1996; 张丽洁等, 2003), 本研究中初步认为 Zn 和 Cu、Fe 有同源性。pH 与重金属的相关系数除 Fe 外都很小, 说明在研究区域的中碱性土壤环境下, pH 对重金属含量的影响有限, 这与 Manta 等 (2002)、Chen 等 (2008) 和李勇等 (2010) 的研究结果一致。

参考文献

- 李健, 郑春江. 1989. 环境背景值数据手册 [M], 北京: 中国环境科学出版社: 321 - 322.
- 李强, 张芹, 刘宏立, 等. 2007. 三峡库区重庆段淹没区土壤重金属背景调查 [J]. 微量元素与健康研究, 24 (4): 34 - 36.
- 李勇, 周永章, 窦磊. 2010. 基于多元统计和傅立叶和谱分析的土壤重金属的来源解析及其风险评价 [J]. 地学前

- 缘, 17(4):253-261.
- 陆安祥,王纪华,潘瑜春,等. 2007. 小尺度农田土壤中重金属的统计分析与空间分布研究[J]. 环境科学, 28(7):1578-1583.
- 裴廷权,王里奥,包亮. 2010. 三峡库区小江流域土壤重金属的分布特征与评价分析[J]. 土壤通报, 41(1):206-211.
- 裴廷权,王里奥,韩勇,等. 2008. 三峡库区消落区土壤剖面中重金属分布特征[J]. 环境科学研究, 1(5):72-78.
- 唐将,钟远平,王力. 2008. 三峡库区土壤重金属背景值研究[J]. 中国生态农业学报, 16(14):848-852.
- 喻菲,张成,张展,等. 2006. 三峡水库消落区土壤重金属含量及分布特征[J]. 西南农业大学学报:自然科学版, 28(1):165-168.
- 喻菲. 2006. 三峡库区消落区土壤重金属调查及评价[D]. 重庆:西南大学.
- 张丽洁,王贵,姚德,等. 2003. 近海沉积物重金属研究及环境意义[J]. 海洋地质动态, 19(3):6-9.
- Chen T, Li X, Zhu M Z, et al. 2008. Identification of trace element sources and associated risk assessment in vegetable soils of the urban-rural transitional area of Hangzhou, China[J]. Environmental Pollution, 151(1):67-78.
- Manta D S, Angelone M, Blelanca A. 2002. Heavy metals in urban soils: A case study from the city of Palermo(Sicily), Italy [J]. Science of the Total Environment, 300(1/2/3):229-243.
- Marchand C, Lallier-Verges E, Baltzer F, et al. 2006. Heavy metals distribution in mangrove sediments along the mobile coastline of French Guiana[J]. Marine Chemistry, 98:1-17.
- Muller G. 1981. Sediment Index [J]. Chemiker Zeitung, 105(52):53-58.
- Romic M, Romic D. 2003. Heavy metals distribution in agricultural top soils in urban area [J]. Environmental Geology, 43(7):795-805.
- Urasa I T, Macha S F. 1996. Speciation of heavy metals in soils, sediments, and sludge using DC-plasma atomic emission spectrometry coupled with ion chromatograph [J]. International Journal of Environment Analytical Chemistry, 64(2):83-95.

(责任编辑 杨春艳)

Temporal and Spatial Distribution of Soil Heavy Metals in Water-level-fluctuation Zone of Xiaojiang Watershed in Three Gorges Reservoir

YANG Qi-hong¹, ZHENG Zhi-wei¹, ZHANG Zhi-yong¹, AN Ran²,
HU Hong-qing², HU Lian¹, WAN Cheng-yan¹

- (1. Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430079, China;
2. Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Soil samples were collected from the surface of five sections in the watershed of Xiaojiang River during May, July and September in 2009. The average concentration of Cu, Zn, Cd, Pb, Fe and Mn were 28.41, 90.54, 16.94, 1.46, 5.053×10^4 and 554.04 mg/kg. With the increasing of elevation, the average concentrations were the smallest at 160m and increased at 170 m. Along the Xiaojiang River, the average concentrations of soil heavy metals reduced in Yanglu and Shuangjiang section, increased in Gaoyang and Huangshi sections. With the alternating of seasons, the average concentrations of soil heavy metals increased in July then reduced in September. A markedly positive correlation was found between the concentration of Zn and Cu or Fe, while the correlation between the concentration of Pb and Cd, Pb and Fe, Cu and Fe, Cu and Pb were good positive. The value of pH showed positive correlation to the concentration of Mn and negative to the concentration of other metals especially Fe. The Sediment Index of Cu, Zn, Pb, Cd and Mn were 1.40, 0.86, 0.62, 10.03 and 1.07. According to the Grading of Mull pollution category, the soil was pollution-free by Zn and Pb, moderate polluted by Cu and Mn and heavily polluted by Cd.

Key words: water-level-fluctuation zone; soil heavy metals; temporal and spatial distribution; Xiaojiang watershed