

# 三峡库区重金属含量空间分布及污染状况

郭宜薇<sup>1,2</sup>, 丁文峰<sup>1,2</sup>, 朱秀迪<sup>3</sup>, 崔威<sup>4</sup>

(1.长江水利委员会 长江科学院, 湖北 武汉 430010; 2.水利部 山洪地质灾害防治工程技术研究中心, 湖北 武汉 430010; 3.长江水资源保护科学研究所, 湖北 武汉 430051; 4.河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** [目的] 对三峡库区坡面土壤与消落带沉积泥沙中重金属含量特征开展研究, 为该区重金属污染评价提供理论与数据支持。[方法] 在三峡库区选取 53 个采样点, 分析区域内坡面土壤与消落带沉积泥沙中 Cr, Cu, Pb, Zn, Mn 5 种重金属元素的含量, 利用单因子污染指数法、内梅罗综合指数法、地累积指数法和潜在生态风险指数法开展污染状况评价。[结果] 研究区域内重金属含量平均值大小依次为: Mn > Zn > Cr > Cu > Pb, 仅 Cu, Zn 和 Mn 存在污染。Zn 和 Mn 在消落带沉积泥沙与坡面土壤中皆富集, 而 Cu 仅在坡面土壤中富集。研究区域内重金属在空间分布上呈上、下游高, 中游低分布。单因子污染指数法表明, 研究区内仅存在 Zn ( $P_{ia} = 1.07$ ) 的轻度污染与 Mn ( $P_{ia} = 2.65$ ) 的中度污染。研究区域内梅罗综合指数为 2.93, 为中度污染。根据地累积指数法, 研究区域内仅存在 Mn 轻度污染, 其余重金属皆为无污染。Cr, Cu, Pb, Zn, Mn 的潜在生态危害皆为轻微生态危害; 研究区域的综合生态危害指数为 14.09, 为轻微生态危害。[结论] 研究区域内 Cr 含量主要受到研究区地质背景影响, 而 Cu, Pb, Zn 和 Mn 含量同时受到地质背景与人类活动的影响。研究区内存在 Mn 和 Zn 污染, 且有轻微生态危害。

**关键词:** 三峡库区; 单因子污染指数; 内梅罗综合指数; 地累积指数法; 潜在生态危害指数法

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2021)06-0105-08

**中图分类号:** X53, X522

**文献参数:** 郭宜薇, 丁文峰, 朱秀迪, 等. 三峡库区重金属含量空间分布及污染状况[J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 105-112. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.06.015; Guo Yiwei, Ding Wenfeng, Zhu Xiudi, et al. Spatial distribution and pollution characteristics of heavy metal contents in Three Gorges Reservoir area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(6): 105-112.

## Spatial Distribution and Pollution Characteristics of Heavy Metal Contents in Three Gorges Reservoir Area

Guo Yiwei<sup>1,2</sup>, Ding Wenfeng<sup>1,2</sup>, Zhu Xiudi<sup>3</sup>, Cui Wei<sup>4</sup>

(1. Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Committee, Wuhan, Hubei 430010, China; 2. Research Center on Mountain Torrent & Geologic Disaster Prevention of Ministry of Water Resources, Wuhan, Hubei 430010, China; 3. Changjiang Water Resources Protection Institute, Wuhan, Hubei 430051, China; 4. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

**Abstract:** [Objective] The content characteristics of heavy metals in slope soil and sediment in fluctuating zone in the Three Gorges reservoir area were studied, in order to provide theoretical and data support for heavy metal pollution assessment in this area. [Methods] Three Gorges reservoir area was selected as the study area. Fifty-three sample points were selected to analyze the contents of heavy metals (Cr, Cu, Pb, Zn and Mn) in slope soil and fluvial zone sediments. The pollution situation was assessed by the methods of the single factor pollution index, Nemer pollution index, geo-accumulation index and potential ecological risk index, and the map of heavy metals content was formed by combining the geographic information system. [Results] The average contents of heavy metals were Mn > Zn > Cr > Cu > Pb, and only Cu, Zn, and Zn had

收稿日期: 2021-03-17

修回日期: 2021-06-13

资助项目: 长江科学院中央级公益性科研院所基本科研业务费项目“基于指纹追踪的丹江流域侵蚀产沙关键源区识别”(CKSF2019185/TB); 国家自然科学基金项目(41877082); 水利技术示范项目(SF-201905)

第一作者: 郭宜薇(1997—), 女(汉族), 江苏省吴江市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持及流域侵蚀产沙与调控。Email: 350753761@qq.com。

通讯作者: 丁文峰(1975—), 男(汉族), 河南省汝州市人, 教授级高级工程师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持、土地资源与环境方面的研究。Email: dingwf@mail.crsri.cn。

pollution. Zn and Mn enriched in both sediment in water level fluctuating zone and slop soil, while Cu only enriched in slop soil. The spatial distribution of heavy metals showed a pattern as high in upper and lower reaches while low in the middle reach. The single factor pollution index method show that there were only light pollution of Zn and moderate pollution of Mn in study area. The Nemerow composite index of the study area was 2.93, which was moderate. According to the geo-accumulation index, there was only slight pollution of Mn, the other heavy metals were pollution-free. The potential ecological risk of Cr, Cu, Pb, Zn, and Mn were slight ecological hazard. The comprehensive ecological risk index of the study area was 14.09, which was slight ecological risk. [Conclusion] The content of Cr in the study area is mainly affected by the geological background contents of the study area, while the content of Cu, Pb, Zn, and Mn are affected by both geological background contents of the study area and human activities. There are Mn and Zn pollution in the study area, and there is slight ecological harm.

**Keywords:** Three Gorges reservoir area; the single factor pollution index; Nemerow pollution index; geo-accumulation index method; potential ecological risk index method

重金属具有不易降解的生化毒性、累积性、持久性和迁徙性<sup>[1]</sup>,而河流生态系统的重金属污染更具有隐蔽性和潜在性,不仅会对水域生态环境造成影响,降低沿岸土壤中微生物的数量与酶的活性从而对土壤的地吸收代谢产生抑制,还可直接或间接进入食物链,对人体健康造成危害<sup>[2]</sup>。在研究河流健康方面我国起步较晚,早期多将重点放在研究河流的化学污染上,近年来,河流生态系统的健康问题越来越受关注<sup>[3]</sup>,刘昭<sup>[4]</sup>、黄宏伟等<sup>[5]</sup>分别针对清江流域和漓江流域运用 USEPA 水环境健康风险评估模型对水体重金属污染机理和风险评估开展研究,在评价方法、重金属空间分布、重金属迁移转换规律、重金属赋存形态和生物有效性等方面取得了许多进展。三峡库区是长江流域重要生态屏障,库区内土壤重金属污染情况与整个长江流域的生态安全息息相关。多年来,许多学者针对三峡库区干流及其支流流域中的重金属对生态环境的影响展开研究,方志青等<sup>[6]</sup>对三峡库区支流河口重金属空间分布进行研究并使用地累积指数法与生物毒性效应评价方法对重金属污染程度做出评价;王图锦<sup>[7]</sup>就三峡库区消落带重金属迁移转化特征展开研究;黄迪等<sup>[8]</sup>对土壤重金属生物有效性评价技术的进展作出总结。然而目前的研究大多仅关注于水体重金属污染或沉积物泥沙重金属污染,较少开展从支流到干流、从坡面到河流沉积物的全链研究,故无法全面对库区重金属污染情况做出评价。基于此,本文通过对三峡库区支流、干流以及不同坡位的土壤和沉积泥沙采样,获得 Cr, Cu, Pb, Zn 和 Mn 这 5 种重金属元素含量,运用单因子污染指数法、内梅罗综合指数法、地累积指数法、地累积指数法和生态风险指数法等方法对三峡库区坡面土壤与消落带

沉积泥沙中重金属含量特征开展研究,以期为三峡库区重金属污染评价提供理论与数据支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

三峡水库上自重庆主城区,下至宜昌,总面积达  $1.20 \times 10^4 \text{ km}^2$  (图 1),属于亚热带季风气候,年平均气温为  $14.7 \sim 18.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,总降水量为  $1\ 200 \sim 1\ 400 \text{ mm}$ 。为长期保留有效库容,在每年汛期(6—9 月)时将水库水位降至 145 m 运行,而在汛期末将水位提高至 175 m 运行<sup>[9]</sup>,形成一条落差达 30 m,面积达  $349 \text{ km}^2$  的暴露区域即消落带<sup>[10]</sup>。三峡库区地貌以丘陵为主,土壤类型以紫色土、冲积潮土和黄壤为主<sup>[11]</sup>,库区周边人口密集,导致土地超负荷利用,库区内主要经济活动为农业活动<sup>[12]</sup>,且坡耕地大约占耕地面积的 65.15%。此外库区内水土流失情况严重,大约有 57.15% 的土地存在水土流失的问题<sup>[13]</sup>,生态较为脆弱。近年来随着国家对三峡库区生态环境越来越重视,自 2000 年以来退耕还林政策在库区内大力推广,且退耕还林面积逐年增大<sup>[14]</sup>。

### 1.2 样品采集与分析

根据三峡库区遥感数据,支流产沙情况,人口密度及耕地分布情况,于 2017 年 6 月(消落带显露期)进行野外考察及采样,使用手持 GPS 获取精确坐标,沿长江自上游重庆段向下游依次在五步河、御临河、龙河、磨刀溪、澎溪河、大宁河和香溪河共设 53 个采样点(图 1)。每个采样点采集混合土壤两份(采样深度 0—10 cm),每份约 500 g,所有样品密封后带回实验室于阴凉处室温风干后,剔除杂物后用四分法取部分样品过 2 mm 的尼龙筛。

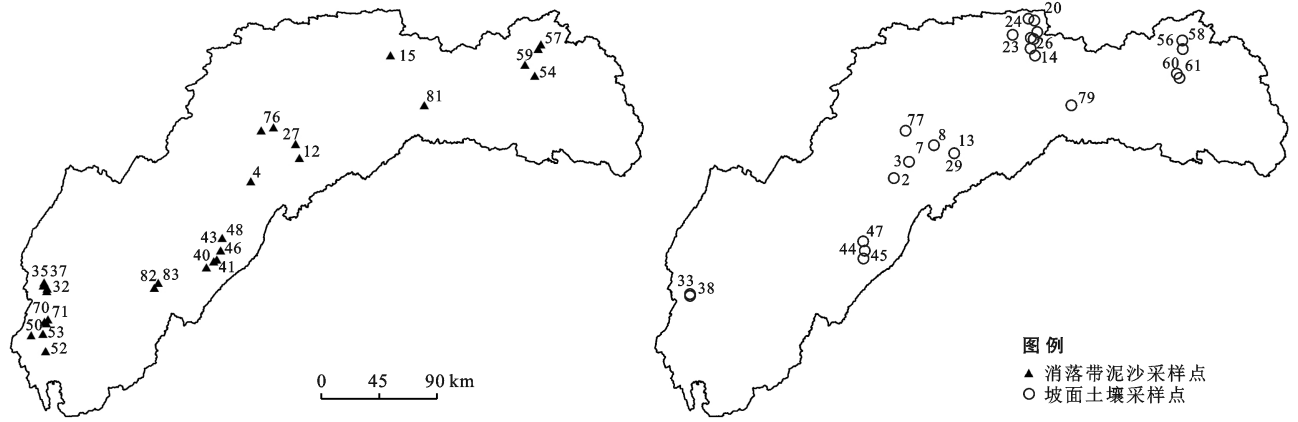


图 1 三峡库区采样点分布

过筛后的每个样品,分别称取 0.100 g 进行微波消解,消解结束后,用浓度为 1% 的硝酸溶液进行定容,混合均匀,待测。同时进行空白样品的制备,作为对照。之后选取铬(Cr)、铜(Cu)、铅(Pb)、锌(Zn)、锰(Mn),根据采集的泥沙样品的元素浓度的范围配置不同浓度的标准溶液。标准溶液制备完成后,使用 IACP6000 等离子体电子耦合光谱仪按照混合溶液浓度由低到高的顺序依次进行发射强度的测量。测量结束后,以测出的发射强度值作为纵坐标,以混合溶液的浓度值作为横坐标,绘制标准曲线。再依次将制备好的泥沙样品溶液在相应标准曲线的条件下进行指定元素浓度的测定,过程中若有个别样品的元素浓度超出标准曲线的界限,需要将该样品进行稀释后再进行测定。测定完成后,按照公式(1)进行相应泥沙样品中金属元素的含量  $\omega$  (mg/kg) 的计算。

$$\omega = \frac{(l_1 - l_0) \times V_0}{m_1} \quad (1)$$

式中: $\omega$  为泥沙样品中金属元素的含量 (mg/kg);  $l_1$  为泥沙样品溶液中金属元素的测定浓度 (mg/L);  $l_0$  为空白溶液中金属元素的测定浓度 (mg/L);  $V_0$  为消解结束后试样的定容体积 (ml);  $m_1$  为泥沙样品的称取量 (g)。通过分析空白试剂,重复样品以及参考材料 [中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局发布的 GBW07309(GSD-9) 水系沉积物成分分析标准物质] 进行质量控制,相对标准偏差均低于 10%。

采用 Excel 2020 分析上述 5 种重金属含量与生态风险;用 ArcGIS 10.5 分析各重金属含量分布。

### 1.3 研究方法

1.3.1 单因子污染指数法和内梅罗综合指数法 ①单因子污染指数法主要用于对某区域土壤中某单一元素进行污染评价。 $P_i$  为重金属  $i$  的单因子污染指数,当  $P_i$  越小时,则表示该土壤污染风险值越小。②而内梅罗综合指数法是建立在单因子指数法之上

的多因子综合评价方法,它将单因子污染指数的平均值和最大值归纳到一起进行污染评价,可以更全面的反映土壤的污染情况<sup>[15]</sup>,本研究将内梅罗综合污染指数记作 NI。③重金属单因子污染指数法与内梅罗综合指数法的计算公式以及分级见文献<sup>[16]</sup>。

1.3.2 地累积指数法 地累积指数法是一种能直观地反映重金属在沉积物中的富集程度的方法,其通过计算研究区域土壤所含重金属  $i$  的含量与其背景值的比值,对该地区重金属污染程度进行评估<sup>[17]</sup>,本研究将为地累积指数记作  $I_{geo}$ 。 $I_{geo}$  越大,则表示土壤所含重金属含量越高。地累积指数法污染法计算公式以及污染等级分级见文献<sup>[18]</sup>。

1.3.3 潜在生态危害指数法 土壤重金属潜在生态危害指数法瑞典科学家 Lars Hakanson<sup>[19]</sup>于 1980 年提出的一种以重金属生物毒性为基础,综合重金属含量、环境效应的一种评估方法,其主要用于评估某地潜在的生态危害程度。本研究将重金属  $i$  的潜在生态危害指数记作  $E_i^p$ ,某地区综合生态危害指数记作 RI,将重金属  $i$  的毒性系数记作  $T_i^p$  (详见表 1)<sup>[20]</sup>。潜在生态危害指数法计算公式与分级详见文献<sup>[20]</sup>。

表 1 重金属综合生态危害毒性系数

重金属	Cr	Cu	Pb	Zn	Mn
毒性系数	2	5	5	1	1

## 2 结果与分析

### 2.1 三峡库区坡面土壤与消落带沉积泥沙重金属含量特征

三峡库区消落带泥沙与坡面土壤中重金属含量水平详见表 2,重金属富集系数详见表 3。在消落带沉积泥沙中除 Cr, Cu 外, Pb (20.18 mg/kg), Zn (35.72 mg/kg), Mn (604.21 mg/kg) 的平均含量均高

于三峡库区土壤重金属背景值,在坡面土壤中,除 Cr, Pb 外, Cu (25.15 mg/kg), Zn (71.24 mg/kg), Mn (669.17 mg/kg) 的平均含量均高于三峡库区土壤重金属背景值。无论是在消落带沉积泥沙还是在坡面土壤中皆以 Mn 的含量增加最为显著,分别是背景值的 2.49 与 2.76 倍。变异系数反映各采样点重金属浓度的平均变异程度,当变异系数大于 0.50,表明重金属浓度存在空间差异,重金属分布可能受人类活动的影响<sup>[21-23]</sup>。从变异系数来看,坡面土壤中 Cu, 消落带沉积泥沙中 Pb 的变异系数相对较高,分别为 0.65 和

0.51,表明其积累受人为因素影响更剧烈。Luo 等<sup>[24]</sup>的研究表明三峡库区内 Cu 的主要由农业活动所产生;龚宇等<sup>[25]</sup>的研究表明三峡库区内 Pb 主要来自于工业活动;此外,张显强等<sup>[26]</sup>的研究表明,三峡库区内植物对 Cu 的转运能力较强而吸附能力较弱。本研究的坡面采样点均位于坡耕地,农药化肥的不当使用使得重金属的污染加剧,所以 Cu 受流域内农业活动影响较大,而 Pb 在消落带泥沙沉积物中波动较大是由于周边工厂污水排放,重金属随细颗粒的沉积泥沙迁徙并沉积于部分区域。

表 2 三峡库区重金属含量

重金属	坡面土壤					背景值	消落带沉积泥沙				
	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数		最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数
Cr	35.86	88.47	56.20	13.98	0.25	78.03	26.01	79.51	50.32	14.76	0.29
Cu	13.15	98.60	25.15	16.22	0.65	25.00	12.47	52.37	24.30	10.59	0.44
Pb	14.30	23.73	17.45	2.41	0.14	23.88	8.69	57.76	20.18	10.36	0.51
Zn	44.05	105.23	71.24	14.35	0.20	69.88	33.63	164.78	75.92	35.72	0.47
Mn	242.05	1 662.05	669.17	305.88	0.46	242.80	238.55	1 332.05	604.21	281.38	0.47

注:重金属含量单位为 mg/kg。

表 3 三峡库区重金属富集系数

样品类型	Cr	Cu	Pb	Zn	Mn
坡面土壤	0.72	1.01	0.73	1.02	2.76
消落带沉积泥沙	0.64	0.98	0.88	1.11	2.55

注:背景值为三峡库区土壤重金属背景值<sup>[21-22]</sup>。

富集系数反映土壤和沉积物中重金属富集程度受人类活动影响程度<sup>[27]</sup>,土壤中的 Cu, Zn, Mn, 消落带沉积泥沙中的 Zn, Mn 的富集系数较高,分别为 1.01, 1.02, 2.76, 1.11 和 2.55,这表明 Zn 和 Mn 在消落带沉积物和坡面土壤中富集,而 Cu 仅在坡面土壤中富集。此外, Pb 与 Zn 在消落带沉积物中的富集系数较坡面土壤中的富集系数高,表明 Pb 和 Zn 不仅源于周遭工、农业活动,还来自于坡面土壤,即随坡面土壤迁徙至消落带并沉积(表 3)。此外,研究区域内坡面土壤与消落带沉积泥沙中的 Cr, Cu, Pb, Zn 和 Mn 的超标率分别为 12%, 28%, 0.00%, 48% 和 96%。消落带沉积泥沙中 Cr, Cu, Pb, Zn 和 Mn 的超标率分别为 0%, 32.14%, 17.86%, 32.14% 和 100%,表现为以 Mn 和 Zn 为主导的多种重金属复合污染。Mn 常被视为是自然来源的特征且作为参照元素被用于测定人类活动对重金属富集的影响<sup>[2]</sup>,在本研究中 Mn 与 Cr, Cu, Pb 和 Zn 的皮尔逊相关系数分别为 0.544, 0.688, 0.656 和 0.689,且在 0.01 水平处显著相关,表明研究区域内 Cr, Cu, Pb 和 Zn 部分源于自然母质。但由于 Mn 和 Zn 超标率较高,存在一定程度的污染,因此除母岩风化外,其还源于农业面源和工业点源,

这与 Luo<sup>[24]</sup>的研究结果类似。

总体而言,研究区域坡面土壤与消落带沉积泥沙中重金属含量大小顺序均为: Mn > Zn > Cr > Cu > Pb,而刘丽琼等<sup>[11]</sup>对在 2008 年沿长江江岸采集的 50 个三峡库区消落带表层土壤样品的研究表明,沿江两岸消落带土壤重金属含量为: Zn > Cr > Pb > Cu,与本研究的结果稍有不同。这可能是由于长江两岸城市化程度高于库区其他流域,人类活动使得土壤中 Cu 的含量增加。此外研究区域内 Mn 污染最为严重, Pb 污染程度较低,与莫孝福等<sup>[28]</sup>在 2013 年基于单因子污染指数法三峡库区消落带不受 Pb 污染研究结果不同,这是由于 2013 年后,库区内农工业发展迅速、废水排放量增多导致 Pb 污染加剧。

## 2.2 三峡库区消落带沉积泥沙和坡面土壤重金属空间分布

三峡库区坡面土壤与消落带沉积泥沙重金属空间分布图如图 2 所示。重金属元素 Cr, Cu, Pb, Zn 和 Mn 自上游至下游的分布特征呈多峰型, Cr, Cu 和 Zn 在御临河、五步河流域和大宁河流域出现两个峰值,且在消落带沉积泥沙中的含量远高于坡面土壤,表明这 3 种元素在御临河、五步河及大宁河流域存在自坡面向消落带迁徙、沉积。Mn 在大宁河及香溪河流域的坡面土壤中存在峰值, Pb 在大宁河流域存在峰值,且在坡面土壤中的含量远高于在消落带沉积泥沙中的含量。这是由于御临河、五步河流域主要位于重庆市、大宁河贯穿巫溪县,周遭人类活动例如生活污水

排放、交通面源污染、工业废水排放导致该流域内 Cr, Cu 和 Zn 含量较高,且由于城市化加剧,植被覆盖减少,水土流失加剧,重金属与细颗粒泥沙结合并随着其流入消落带并沉积,导致消落带沉积泥沙中重金属含量较高。

总体而言,5 种重金属元素沿江的整体分布呈现上游和下游较高,中游较低的趋势,表明上游及下游

的重金属污染情况较严重。这是由于上游靠近重庆主城区,重金属含量受城市生活污水与工业废水排放以及交通工具尾气排放影响,下游奉节县畜牧业较为发达,巫山县与巫溪县为发展工、农业,化肥使用量与废水排放量逐年增加,加剧了重金属污染<sup>[29]</sup>。中游多为林地与荒地,受人类活动影响较少,因此重金属含量较上、下游少。

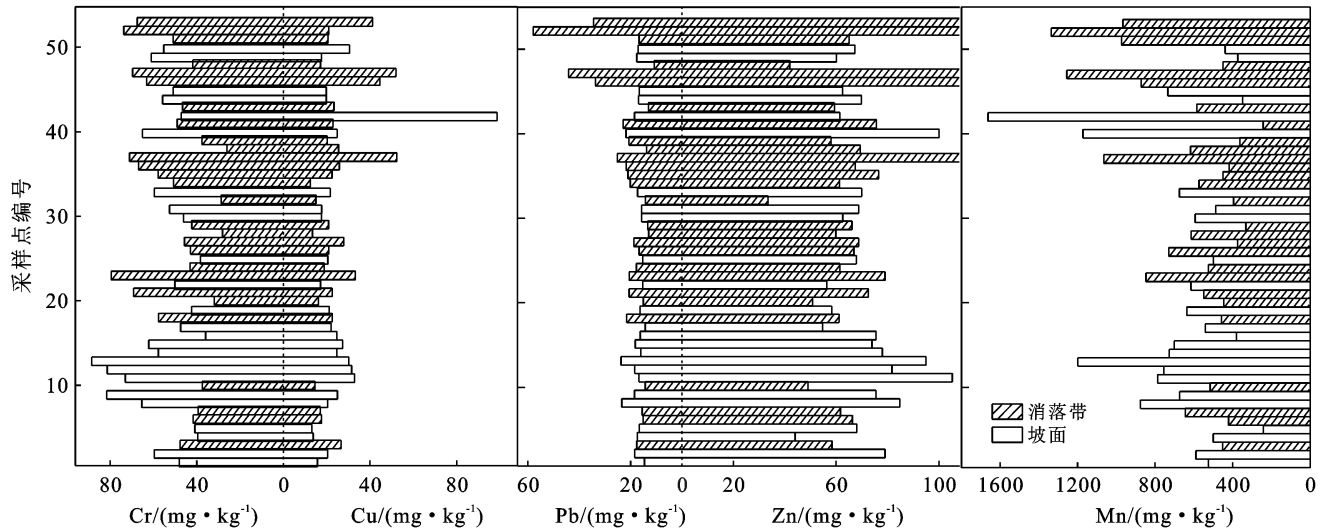


图 2 三峡库区 Cr, Cu, Pb, Zn, Mn 分布图

### 2.3 三峡库区消落带沉积泥沙重金属污染评价

2.3.1 单因子污染指数法和内梅罗综合指数法 针对单因子污染指数法对各采样点的重金属含量进行分析后发现,仅 Mn 的单因子污染指数平均值( $P_{ia}$ )大于 2,为中度污染,Zn 的  $P_{ia}$  为 1.07,为轻度污染,其余 3 种重金属的  $P_{ia}$  均小于 1,为无污染,表明研究

区域内存在 Mn 与 Zn 污染。研究区域内各个采样点中的 Cr, Cu, Pb, Zn 和 Mn 点位总污染率分别为 7.55%, 30.19%, 9.43%, 37.74% 和 96.23%, 污染程度从重到轻分别为 Mn, Zn, Cu, Pb 和 Cr。研究区域内沉积物重金属单因子污染指数及各重金属不同等级污染点位所占比例详见表 4。

表 4 三峡库区土壤重金属单因子污染指数及各重金属不同等级污染点位所占比例

重金属	单因子污染指数( $P_i$ )	单因子污染指数平均值( $P_{ia}$ )	总污染率/%	不同等级污染点位比例/%			
				无污染	轻度污染	中度污染	重度污染
Cr	0.33~1.13	0.68	7.55	92.45	7.55	0.00	0.00
Cu	0.50~3.94	0.99	30.19	69.81	28.30	1.89	0.00
Pb	0.45~2.42	0.81	9.43	90.57	7.55	1.89	0.00
Zn	0.48~2.36	1.07	37.74	62.26	30.19	7.55	0.00
Mn	0.98~6.85	2.65	96.23	3.77	28.30	41.51	26.42

研究区域内内梅罗综合(NI)指数范围为 1.27~7.33,平均值为 2.93,表现为中度污染。三峡库区土壤重金属内梅罗综合指数法评价结果显示(图 3),大宁河流域的采样点 13(坡面土壤)、御临河流域的采样点 32(消落带沉积泥沙)、龙河流域的采样点 42(坡面土壤)和香溪河流域的 50(消落带沉积泥沙)存在较高值。香溪河流域的 NI 较其他流域大,这是由于香溪河流域内不仅农业活动发达,流域内还存在磷矿厂,矿区的废水与矿渣的不合理排放加剧了重金属污

染<sup>[30]</sup>。御临河流域靠近重庆市区,居民城市污水与工业污水排放及交通尾气排放使得御临河流域的 NI 较高。此外,流域内存在大量坡耕地,农药与化肥的不当使用也使得重金属污染程度增加。大宁河流域 NI 值偏高的原因是大宁河沿岸有采石场,采石活动会加剧重金属污染,且流域内坡耕地较多,在坡耕地上使用的农药和化肥会部分随地表径流、地下潜流及渗流作用迁徙至消落带<sup>[31]</sup>,黄岁梁等<sup>[32]</sup>的研究表明沉积泥沙粒径越小与之结合的重金属含量就越高,残

留在坡面土壤的部分重金属与细颗粒泥沙相结合并随其向消落带迁徙、沉积。

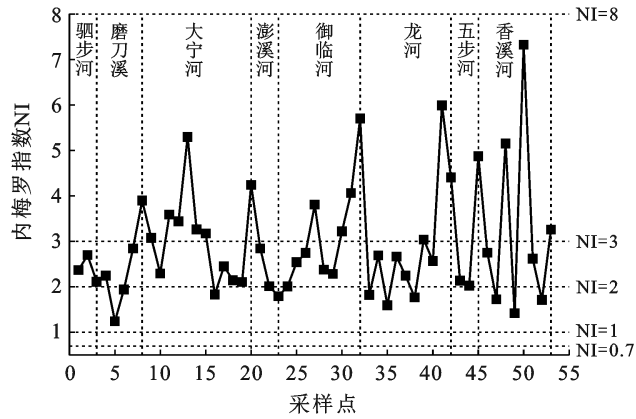


图 3 三峡库区土壤重金属内梅罗综合指数法评价

2.3.2 地累积指数法 由图 4 可知,研究区域内 5 种重金属元素  $I_{geo}$  平均值特征呈现为:  $Mn > Zn > Cu > Pb > Cr$ , 分别为 0.69, -0.56, -0.72, -0.97 和 -1.20。除了 Mn 元素为轻度污染,其余 4 种重金属元素皆为清洁。Cr 在所有采样点中的  $I_{geo}$  值都小于 0; Cu 的清洁点位占比为 90.57%, 采样点 46 (位于香溪河消落带) 的  $I_{geo}$  值最大, 为偏中度污染, 其次在御临河与五步河流域皆存在轻度污染。Pb 的清洁点位占比为 96.23%, 轻度污染点位占比为 3.77%, 仅采样点 37 (龙河消落带沉积泥沙) 与采样点 51 (位于御临河沉积泥沙) 存在轻度污染; Zn 的清洁点位占比为 88.68%, 轻度污染点位占比为 11.32%。在龙河、大宁河、御临河与五步河均有采样点存在轻度污染。Mn 的清洁点位占比为 9.43%, 轻度污染点位占比为 64.15%, 偏中度污染点位占比为 24.53%, 中度污染点位占比为 1.89%, 仅采样点 57 (香溪河消落带沉积泥沙) 为中度污染, 其余皆为轻度、偏中度污染。结果显示, 无论在坡面土壤还是消落带沉积泥沙中皆为 Cr 的污染程度最轻, Mn 的  $I_{geo}$  值远高于其他几种元素, 污染最重, 这是由于三峡库区内 Cr 的主要来源为自然源的母岩风化<sup>[33]</sup>, 人类活动对其影响较小, 且植物对 Cr 的吸附能力较强<sup>[26]</sup>, 近年来, 随着三峡库区植被恢复, 吸收 Cr 的植物增多, 使得研究区域内 Cr 污染程度最轻。一般而言 Mn 的主要来源为自然母质风化, 不会造成污染, 但随着人类活动的加剧, 农业面源、工业点源及城市面源与点源都会提供 Mn, 且植物对其的吸附及转运能力都较差<sup>[10]</sup>, 因此其污染程度最重。目前并没有研究得出三峡库区 Mn 的明确来源, 因此后续研究需要对研究区内 Mn 的来源做进一步的分析。此外, 消落带沉积泥沙较坡面土壤污染程度高, 重金属更易在消落带沉积泥沙中沉积, 这

是由于库区内多为坡耕地, 农药化肥使用量较大且水土流失较为严重, 重金属与细颗粒泥沙结合后, 向消落带迁徙并沉积在消落带中。而且每年消落带会被定期淹没, 消落带中的重金属元素在还原状态与氧化状态中转换, 对重金属的迁移产生影响, 导致消落带重金属污染程度较高。御临河流域较其余几个流域的重金属污染种类更多, 即存在 Cu, Pb, Zn 和 Mn 的污染, 其原因是御临河位于重庆市, 周围居民区、工业区及农业区较其他流域更多, 人类活动对其的影响程度更大, 污染类型更为多样, 工业活动提供了 Pb, Zn 和 Mn, 而 Cu 则是由农业活动所提供<sup>[34-35]</sup>。

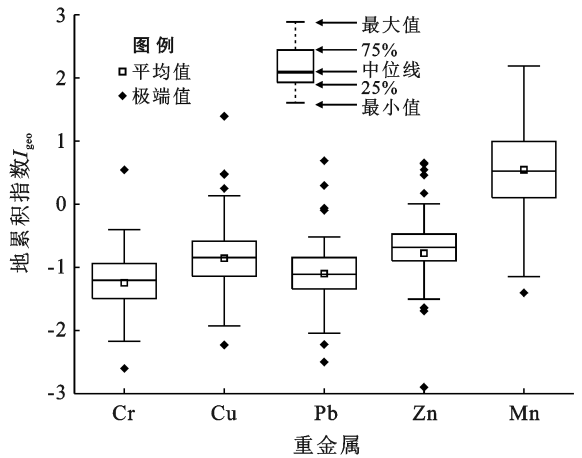


图 4 研究区地累积指数评价箱型图

2.3.3 潜在生态危害指数法 三峡库区各流域消落带沉积泥沙与坡面土壤中重金属的潜在生态危害系数详见表 5。研究区域内土壤中 Cr, Cu, Pb, Zn 和 Mn 的潜在生态危害指数 ( $E_i^p$ ) 平均值分别为 1.36, 4.97, 4.04, 1.07 和 2.65, 综合生态危害指数 (RI) 皆小于 150, 为轻微生态危害。Cu 和 Pb 的潜在生态危害指数明显高于其他元素, 表明 Cu 和 Pb 在研究区域内有潜在生态危害。且由表 4 可知重金属元素 Cu 的  $E_i^p$  在香溪河、五步河和御临河的采样点中波动较大, 其标准差分别达到 5.06, 2.67 和 2.45, 重金属元素 Cu 在这几个流域中的部分地区潜在生态危害更高, Pb 的  $E_i^p$  在龙河流域的采样点中波动较大, 且仅五步河与香溪河流域存在 RI 大于 20 的采样点, 表明五步河与香溪河流域的生态安全较其余流域更有可能受到 Pb 危害。与叶琛等<sup>[36]</sup>在 2008 年在长江干流荒地采样所得结果不同, 即三峡库区消落带土壤重金属总体处于中等生态风险水平。这是由于近年来随着对三峡库区生态环境保护意识的提高, 对库区土地利用方式进行了大规模调整, 重金属污染程度有所减轻, 使得整个研究区域内潜在生态危害较小。但随着人口数量激增导致的城镇扩张所带来的生活垃圾排放增

加、工业扩张都会导致土壤重金属元素增加,这使得部分区域较其他区域的潜在生态危害更高(例如香溪

河流域)。总体而言,研究区域内 5 种重金属元素对三峡库区的生态危害较低(图 5)。

表 5 三峡库区各流域消落带沉积泥沙与坡面土壤中重金属的潜在生态危害系数

流域	潜在生态危害系数( $E_i'$ )				
	Cr	Cu	Pb	Zn	Mn
五步河	1.67±0.14	6.71±2.67	4.70±0.38	1.47±0.61	2.64±1.22
御临河	1.39±0.40	5.46±2.45	4.60±1.99	1.20±0.51	2.89±0.99
龙河	1.27±0.36	4.17±1.60	4.59±2.79	1.11±0.50	2.60±1.20
澎溪河	1.24±0.23	3.72±0.36	3.11±0.63	0.76±0.12	2±0.46
磨刀溪	1.16±0.26	3.28±0.53	3.67±0.64	0.93±0.19	2.20±0.88
大宁河	1.56±0.42	5.11±1.01	3.68±0.55	1.05±0.22	2.79±0.94
香溪河	1.21±0.28	6.38±5.06	3.75±0.71	1±0.18	2.94±1.86

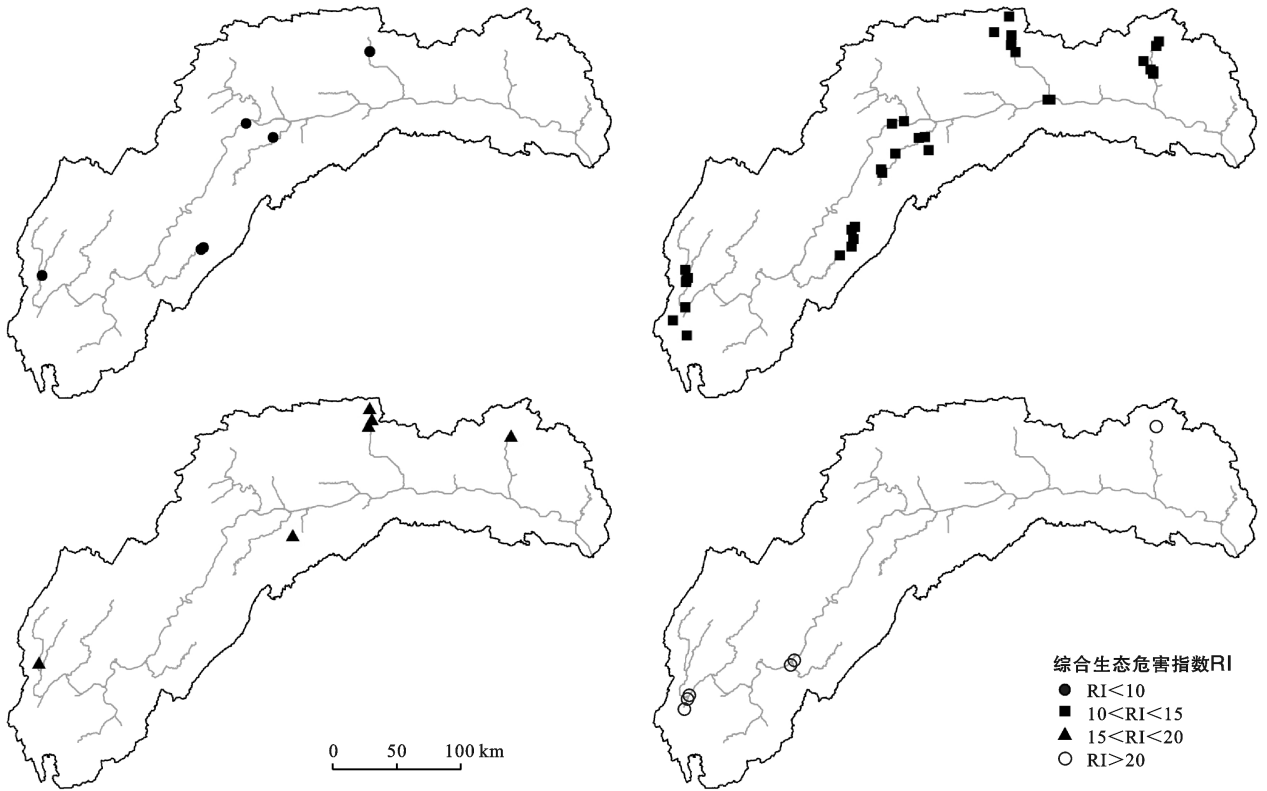


图 5 三峡库区土壤重金属综合生态危害指数评价结果

### 3 结论

(1) 三峡库区土壤重金属污染问题较为突出,土壤中 Cr, Cu, Zn 和 Mn 在御临河、大宁河、龙河和香溪河流域呈明显富集,其中 Mn 含量在消落带沉积物中与坡面土壤中较高,分别为三峡库区土壤背景值的 2.49 与 2.76 倍,点位超标率分别为 96% 和 100%。

(2) 单因子指数法、内梅罗综合指数法及地累积指数法结果表明,土壤中 Cu, Zn 和 Mn 存在局部污染,且污染主要集中在大宁河、御临河、龙河和香溪河流域的坡耕地及消落带沉积泥沙中。且重金属污染物存在由坡面向消落带沉积泥沙迁徙并富集的现象。

(3) 潜在生态危害指数法显示目前研究区域内

暂无生态风险,但 Cu 在香溪河、五步河和御临河流域内, Pb 在龙河流域的生态危害指数波动较大,表明 Cu, Pb 存在局部污染,潜在生态危害高于研究区内其他流域。

(4) 受农业面源污染等因素影响,三峡库区土壤中存在 Cu, Zn 和 Mn 的污染,且重金属会在消落带沉积泥沙中富集沉积,对三峡库区造成了潜在的生态风险,须采取积极的防治、修复措施,以减轻该区域内土壤重金属污染问题。

(5) 本研究选取的采样点存在不足。例如多数取于产沙较严重的 8 个流域。坡面采样点皆位于坡耕地,采样点所在地土地利用类型不够丰富等,后续研究可针对这一点增加城市及工矿用地、林地、草地

等采样点,进一步地对研究区域潜在的重金属污染与生态危害做出评价。

### [参 考 文 献]

- [1] 余成,陈爽,张路.坦噶尼喀湖东北部入湖河流沉积物重金属分布特征与生态风险评价[J].环境科学,2016,37(2):499-506.
- [2] 杨阳,周正朝,张福平,等.沱河沿岸土壤重金属分布特征及来源分析[J].干旱区研究,2014,31(2):237-243.
- [3] 杨阳,周正朝,王欢欢,等.沱河沿岸土壤和优势植物重金属富集特征和潜在生态风险[J].生态学报,2013,33(21):6834-6843.
- [4] 刘昭,周宏,曹文佳,等.清江流域地表水重金属季节性分布特征及健康风险评价[J].环境科学,2021,42(1):175-183.
- [5] 黄宏伟,肖河,王敦球,等.漓江流域水体中重金属污染特征及健康风险评价[J].环境科学,2021,42(4):1714-1723.
- [6] 方志青,陈秋禹,尹德良,等.三峡库区支流河口沉积物重金属分布特征及风险评价[J].环境科学,2018,39(6):2607-14.
- [7] 王图锦.三峡库区消落带重金属迁移转化特征研究[D].重庆:重庆大学,2011.
- [8] 黄迪,杨燕群,肖选虎,等.土壤重金属生物有效性评价技术进展[J].现代化工,2019,39(S1):89-94,8.
- [9] 谢红勇,扈志洪.三峡库区消落带生态重建原则及模式研究[J].开发研究,2004(3):36-39.
- [10] 刘佳瑞.三峡库区消落带植物生长特征及与重金属相互作用机理研究[D].湖北 武汉:湖北工业大学,2020.
- [11] 刘丽琼,魏世强,江韬.三峡库区消落带土壤重金属分布特征及潜在风险评价[J].中国环境科学,2011,31(7):1204-1211.
- [12] 李乐,刘常富.三峡库区面源污染研究进展[J].生态科学,2020,39(2):215-226.
- [13] 牛晓旭.基于水华发生程度的三峡库区澎溪河与磨刀溪水环境比较[D].重庆:西南大学,2019.
- [14] 曾立雄,肖文发,黄志霖,等.三峡库区不同退耕还林模式水土流失特征及其影响因子[J].长江流域资源与环境,2014,23(1):146-152.
- [15] 陈明,蔡青云,徐慧,等.水体沉积物重金属污染风险评价研究进展[J].生态环境学报,2015,24(6):1069-1074.
- [16] 祝培甜,赵中秋,陈勇,等.江苏省某镇土壤重金属污染评价[J].环境工程学报,2017,11(4):2535-2541.
- [17] Hazzeman H, Ahmad Z A. The geoaccumulation index and enrichment factor of mercury in mangrove sediment of Port Klang, Selangor, Malaysia [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2013,6:4119-4128.
- [18] 陈文轩,李茜,王珍,等.中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J].环境科学,2020,41(6):2822-33.
- [19] 季建万,沙晋明,金彪,等.平潭岛土壤重金属污染评价及生态风险研究[J].福建师范大学学报(自然科学版),2018,34(5):73-82.
- [20] 徐争启,倪师军,庾先国,等.潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J].环境科学与技术,2008(2):112-115.
- [21] 李新宇,吴庆梅,叶翠,等.三峡库区重庆段重点水域沉积物中重金属污染现状及源解析[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2017,34(2):36-41.
- [22] 唐将,钟远平,王力.三峡库区土壤重金属背景值研究[J].中国生态农业学报,2008(4):848-852.
- [23] 雷国建,陈志良,刘千钧,等.广州郊区土壤重金属污染程度及潜在生态危害评价[J].中国环境科学,2013,33(S1):49-53.
- [24] Luo Lei, Ma Yibing, Zhang Shuzhen, et al. An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China [J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(8): 2524-2530.
- [25] 龚宇,向晓军,李征南,等.应用因子分析法研究三峡库区忠县—万州地区重金属的主要来源[J].江西农业学报,2011,23(4):159-161,66.
- [26] 张显强,谌金吾,孙敏.三峡库区消落带土壤重金属污染及植物富集特征[J].环境化学,2020,39(9):2490-2497.
- [27] 陈明,郑小俊,陶美霞,等.桃江流域河流沉积物中重金属污染特征与风险评价[J].环境化学,2020,39(10):2784-2791.
- [28] 莫福孝,秦宇.三峡库区消落带土壤重金属含量特征及污染评价[J].安徽农学通报,2013,19(15):16-18.
- [29] 廖和平,洪惠坤,陈智.三峡移民安置区土地生态安全风险评价及其生态利用模式:以重庆市巫山县为例[J].地理科学进展,2007,26(4):33-43.
- [30] 王林泉,罗玉红,戴泽龙,等.香溪河沉积物重金属形态分布特征及生态风险评价[J].农业环境科学学报,2017,36(8):1610-1617.
- [31] Bai Junhong, Jia Jia, Zhang Guangliang, et al. Spatial and temporal dynamics of heavy metal pollution and source identification in sediment cores from the short-term flooding riparian wetlands in a Chinese delta [J]. Environmental Pollution, 2016,219:379-388.
- [32] 黄岁梁.泥沙解吸重金属污染物动力学模式研究[J].地理学报,1995(06):497-505.
- [33] 杨丹,谢宗强,樊大勇,等.三峡水库蓄水对消落带土壤Cu, Zn, Cr, Cd含量的影响[J].自然资源学报,2018,33(7):1283-1290.
- [34] 罗友进,韩国辉,余端,等.三峡库区土壤重金属污染评价及其来源[J].长江流域资源与环境,2018,27(8):1800-1808.
- [35] 卢珏安.三峡库区主要支流氮磷与金属元素分布特征、来源及风险评价[D].四川 绵阳:西南科技大学,2019.
- [36] 叶琛,李思悦,卜红梅,等.三峡水库消落区蓄水前土壤重金属含量及生态危害评价[J].土壤学报,2010,42(6):1264-1269.