

狮牡河重金属污染及生态风险评价

王宇¹, 郑青雅¹, 胡兆云², 崔彩云², 储茵^{1*}, 刘盛全³

(1. 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036; 2. 铜陵市义安区农业技术推广中心, 铜陵 244100;

3. 安徽农业大学林学与园林学院, 合肥 230036)

摘要: 为探明上游硫铁矿停产3年后狮牡河重金属污染状况, 于2020年11月河流平水期对河水和底泥进行了一次沿河分布式采样, 测定了河水和底泥中Cd、Pb、As、Hg、Cu和Zn等6种重金属的含量, 对河水采用单因子污染指数法, 对底泥采用地累积污染指数法和潜在生态风险指数法进行了生态风险评价。结果表明, 在平水期河水中Cd污染比较严重, 污染主要出现在从上游矿区河段到中游河段, 其他重金属污染较轻或无污染。底泥重金属除Hg外, 其他5种重金属的平均含量都显著高于农用地土壤污染风险管制值(GB 15618-2018)和铜陵土壤背景值, 中游河段含量最高。底泥不同重金属地累积污染指数平均值为Cd(3.39)>Zn(2.97)>Pb(2.49)>As(2.00)>Cu(1.93)>Hg(-0.97), 其中Cd达到重污染; 潜在生态风险系数平均值表明Cd风险极高, As为高风险, Cu和Pb为中风险, Hg和Zn为低风险。河水和底泥重金属含量和分布及风险评价均表明狮牡河重金属污染主要受到矿区影响。

关键词: 底泥; 河水; 重金属污染; 风险评价

中图分类号: X522

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X(2022)03-0469-07

Pollution and ecological risk assessment of heavy metals in Shimu River

WANG Yu¹, ZHENG Qingya¹, HU Zhaoyun², CUI Caiyun², CHU Yin¹, LIU Shengquan³

(1. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036;

2. Agricultural Technology Extension Center, Yian District, Tongling City, Tongling 244100;

3. School of Forestry and Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

Abstract: In order to investigate the heavy metal pollution status of Shimu River 3 years after the suspension of mining of a pyrite mine, which is located in the upstream part of the watershed, a distributed sampling protocol was carried out along the river for water and sediment in November 2020. The samples were analyzed for Cd, Pb, As, Hg, Cu, and Zn. The single factor pollution index was calculated to evaluate the river water. The sediments were assessed by the Geo-accumulation index (I_{geo}) and the potential ecological risk index (RI). The results showed that the pollution of Cd in river water was more serious among the six heavy metals, and the pollution mainly occurred from the upstream branch draining the mine to the middle reaches of the river, while the pollution of other heavy metals was less or no pollution during the normal dry season. In the sediment, the average contents of heavy metals except for Hg were significantly higher than the Risk Intervention Values for Soil Contamination of Agricultural Land (GB 15618-2018) and the soil background value of Tongling. The content of the heavy metals was the highest in the middle reaches. The average values of I_{geo} of the six heavy metals in the sediment were Cd(3.39)>Zn(2.97)>Pb(2.49)>As(2.00)>Cu(1.93)>Hg(-0.97), which indicated that Cd was at heavy-pollution grade. The average values of RI showed that Cd was at the very-high-risk grade, with As at high-risk, Cu and Pb at medium-risk, and Hg and Zn were at low-risk. The heavy metal content, distribution, and risk assessment of river and sediment showed that the heavy metal pollution mainly came from the mining area.

Key words: sediment; river water; heavy metal pollution; risk assessment

收稿日期: 2021-07-14

基金项目: 国家自然科学基金(31770595)和安徽省自然科学基金(1908085MD102)共同资助。

作者简介: 王宇, 硕士研究生。E-mail: wangyu683@126.com

* 通信作者: 储茵, 博士, 教授。E-mail: chuyin@ahau.edu.cn

随着我国工业化进程加快,对金属资源的种类和数量需求不断增加,加上对矿产的无序、违规开采,重金属污染问题已经变得越来越突出^[1]。水体和土壤重金属超标对动植物生长发育的各阶段都会产生不利影响,甚至导致死亡^[2]。重金属还会通过食物链直接或间接进入人体,且不易被排出,会对人体健康造成严重威胁^[3]。当前,重金属污染方面的研究已经涉及多方面,包括矿区土壤、尾矿库、水环境,以及城区表土与灰尘等^[4]。矿业活动引发的重金属污染问题十分突出,矿区河流作为重金属向外迁移扩散的主要途径之一,当重金属在河道积累到一定量,在一定环境条件下还会成为潜在的二次污染源^[5]。周芬琦等^[6]分析了安徽庐江某地受铁矿酸性矿山废水影响的河流重金属污染状况,结果表明河流沉积物重金属 Zn、Cu、Pb 和 Cd 含量均值超过长江水系沉积物背景值。高月等^[7]对贵州省丹寨县某铅锌矿及周边土壤重金属污染进行评价,表明尾矿下游河流的生态风险处于高生态风险等级。

铜陵位于安徽省中南部,在长江中下游著名的铜、铁、金、多金属成矿带上,矿产资源非常丰富。其拥有几千年的采、冶铜历史,享有“中国古铜都”之称^[8]。多年采矿在促进铜陵经济发展的同时,也让铜陵遭受较为严重的重金属污染^[9]。例如夏毅民等^[10]为了解铜陵某富硫尾矿库周边土壤重金属污染特征,对尾矿库和周边土壤做了相关分析,证明富硫尾矿库对周边环境造成了重度污染。朱兰保等^[11]收集了安徽省合肥、蚌埠、淮南、安庆、芜湖、宿州和铜陵 7 个城市的地表灰尘,对重金属 Pb、Cd、Cr、Zn、Cu 的含量进行对比分析,结果表明铜陵的各重金属含量在 7 个城市中均是最高的,指出其与铜陵的地理位置、盛产金属和金属冶炼加工活动有关。本研究则是选取铜陵市郊狮牡河小流域作为研究对象,通过测定硫铁尾矿下游河流河水及底泥中 Cd、Pb、As、Hg、Cu 和 Zn 的含量,采用单因子污染指数法、地累积污染指数法和潜在生态风险系数法进行生态风险评价。

1 材料与方 法

1.1 研究区域与概况

狮牡河是一条位于铜陵市义安区钟鸣镇郊区的小河,河流发源于牡丹水库(图 1)。在水库下游约 1 km 处,有一硫铁尾矿,面积约 0.27 km²,开采于 20 世纪 80 年代中期,采矿、选矿都在矿区进行,现已停产 3 年。该矿区通过一条小溪与河流干流相连。研究流域面积约 20 km²,多为农田,流域地势

东南稍高。狮牡河流经若干村落,汇入一条大的河流,最终在西北方向距流域出口(R6)约 30 km 处汇入长江。受尾矿的影响,矿区下游十几千米的河流沉积物呈明显的黄色,而水库及其下游矿区小溪汇入前的河段和东边支流(R0-b)水体清澈。由于中下游地势平缓,洪水期河水泛滥会流入周边农田。流域属于亚热带季风气候区,夏季炎热,冬季温和,降水集中在春夏季,年平均降水量超过 1 200 mm,河流水位季节变化明显^[12]。

1.2 样品采集与测定

沿河道布设 8 个采样点(图 1),R2 以上为上游,R2 至 R4 为中游,R4 以下为下游,R0 和 R0-b 设为对照。于 2020 年 11 月中旬收集了 8 个水样,但只收集到除 R0 的其他 7 点的底泥样。采样季节为秋季,流域已连续十几天未降水,河流属于平水期。在采集过程中,用 GPS 测定每个采样点的经纬度及海拔高度。

河水通过多点采样法使用水质采样器进行采集,将 500 mL 聚乙烯塑料瓶浸洗 3 遍后装入水样,密封贴上标签后放入冰箱保存,24 h 内检测原水样和 0.45 μm 孔径过滤膜过滤之后水样中的 Cd、Pb、As、Hg、Cu 和 Zn 的含量,分别为重金属的全量和可溶态含量。不搅动表层底泥的情况下,用底泥采样器采取表层底泥并装入聚乙烯自封袋,然后密封贴上标签放入冰箱。样品运回实验室后去除石粒、树枝等杂质,放入托盘避免光照自然干燥,然后研磨并透过 100 目尼龙筛。水样中 Cd、Pb、Cu、Zn 参照 GB/T 7475—1987^[13]使用石墨炉电源原子吸收分光光度计(GF-990 TAS-990)^[14]测定,Hg、As 参照 DB37/T 1954—2011 使用非色散原子荧光光度计(PF6-2)测定;底泥样中 Cd、Pb 和 Cu、Zn 分别参照 GB/T 17141—1997^[15]、GB/T 17138—1997^[16]使用石墨炉电源原子吸收分光光度计(GF-990 TAS-990)测定,Hg、As 参照 GB/T 22105.2—2008^[17]使用非色散原子荧光光度计(PF6-2)测定。

1.3 评价方法

重金属污染评价的方法有很多,如单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法、地累积指数法、污染负荷指数法和潜在生态风险指数法等。本研究用单因子污染指数法对河水重金属进行评价,用地累积指数法和潜在生态风险指数法对狮牡河底泥重金属进行评价。

1.3.1 单因子污染指数法 单因子污染指数法是用单项水质指标测定值与评价标准的比值来评判该水质指标受污染的程度^[18]。其计算方法为:

$$P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

式中 P_i 为单因子污染指数; C_i 为 i 指标的实测浓度; S_i 为 i 指标的评价标准 (本研究 S_i 以地表水环境质量 III 类标准 (GB 3838-2002) 的限值作为评价标准, Cd、Pb、As、Hg、Cu、Zn 的限值分别为 0.005、0.05、0.05、0.000 1、1 和 1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [19])。当 $P_i \leq 1$ 时, 无污染; 当 $P_i > 1$ 时, 说明存在污染, 值越大表明污染越严重[20]。

1.3.2 地累积指数法 (I_{geo}) 地累积指数法是德国科学家 Muller 1969 年提出的方法[21]。该方法广泛应用于量化河流沉积物中的重金属, 从而确定重金属污染等级。地累积指数计算方法为:

$$I_{geo} = \log_2(C_i / 1.5B_i) \quad (2)$$

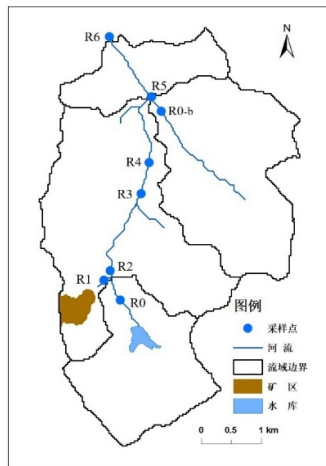


图 1 狮牡河采样点分布

Figure 1 Sampling sites of Shimu River

表 1 地累积指数污染等级划分标准[24]

Table 1 Pollution classes of geo-accumulation index

等级	I_{geo}	污染程度
0	$I_{geo} \leq 0$	无污染
1	$0 < I_{geo} \leq 1$	无污染—中污染
2	$1 < I_{geo} \leq 2$	中污染
3	$2 < I_{geo} \leq 3$	中污染—重污染
4	$3 < I_{geo} \leq 4$	重污染
5	$4 < I_{geo} \leq 5$	重污染—极度污染
6	$I_{geo} > 5$	极度污染

表 2 重金属风险系数及潜在生态风险等级标准[29]

Table 2 The classification of potential ecological risk index

单一重金属风险系数 E_r^i	潜在生态风险指数 RI	潜在风险等级
$E_r^i < 40$	$RI < 150$	低风险
$40 \leq E_r^i < 80$	$150 \leq RI < 300$	中风险
$80 \leq E_r^i < 160$	$300 \leq RI < 600$	高风险
$160 \leq E_r^i < 320$	$RI \geq 600$	很高风险
$E_r^i \geq 320$	—	极高风险

式中 C_i 为沉积物中 i 重金属的测定浓度, B_i 为 i 重金属的背景值 (Cd、Pb、As、Hg、Cu、Zn 的

铜陵土壤重金属背景值分别为 0.71、67.00、22.70、0.05、79.00、和 139.00 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [22-23])。地累积指数将污染划分为表 1 所示的 7 个等级:

1.3.3 潜在生态风险指数法 (RI) Hakanson 1980 年提出的潜在生态风险指数法能够评估由重金属带来的潜在生态风险。这是一种综合的方法, 考虑到 4 个因素, 即污染物浓度、污染物种类、毒性水平和水体对重金属污染的敏感度[25]。计算方法如下[26]:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times C_f^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times \frac{C_d^i}{C_r^i} \quad (3)$$

式中 n 为重金属种类数; E_r^i 为某单一重金属的潜在生态风险系数; T_r^i 为单个重金属的毒性响应系数 (Cd、Pb、As、Hg、Cu 和 Zn 的毒性响应系数分别是 30、5、10、40、5 和 1[27]); C_f^i 为 i 重金属的污染系数; C_d^i 为 i 重金属的实测含量; C_r^i 为 i 重金属的参考值 (以铜陵市土壤背景值作为参考)。

2 结果与分析

2.1 狮牡河河水重金属含量与空间分布

2.1.1 河水中重金属的含量 河水重金属含量检测结果表明, 全量和可溶态含量差别不大, 仅有少量采样点的部分重金属全量含量略高于可溶态含量, 表明狮牡河平水期河水重金属以可溶态为主。下面以重金属全量作具体分析。

以地表水环境质量 III 类标准和 V 类标准 (GB 3838—2002) [19] 为参照 (表 3), 狮牡河河水中 Cd 含量较高, 其平均含量为 0.012 3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 超过地表水环境质量 III 类标准限值 146.2%, 超过地表水环境质量 V 类标准限值 23.1%, 8 个采样点有 4 个点超过 III 类标准限值, 3 个超过 V 类标准限值。Hg 仅 3 个点有检出, 平均含量为 0.000 11 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 几乎与地表水环境质量 III 类标准限值一致。Pb、As、Cu 和 Zn 的平均含量分别为 0.001 6、0.000 6、0.035 和 0.58 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均低于地表水环境质量 III 类标准限值。Pb、As、Cu 最高含量也未超过 III 类标准限值, 而有 2 个采样点的 Zn 含量超过 III 类标准限值, 表明 Zn 在部分河段含量较高。

这仅仅是采样时段内特定水文条件下河水的重金属含量。采样前流域内连续十几天为晴朗天气, 矿区未受雨水冲刷侵蚀。同时, 河流处于平水期, 水流平稳, 河流底泥未受到扰动。水力扰动会改变沉积物的理化性质, 还会增加溶解氧有利于沉积物中有机的氧化, 可能会进一步促进沉积物中重金属释放[29]。因此, 为了更准确地反映河水的重金属含量, 后期还要对不同水文条件下的河水进行采样分析。

表 3 狮牡河河水重金属含量统计

Table 3 Contents of heavy metals in the water from Shimu River

(mg·L⁻¹)

采样点	镉	铅	砷	汞	铜	锌
R0	0.000 48	0.000 99	0.000 44	ND	0.002 5	0.007 5
R0-b	0.000 4	0.001 9	0.001 04	0.000 21	0.003 7	0.02
R1	0.04	0.008 2	0.000 83	ND	0.22	2.18
R2	0.005 5	0.000 29	0.000 58	ND	0.011	0.048
R3	0.022	0.000 38	0.000 48	ND	0.015	0.92
R4	0.026	0.000 1	0.000 55	ND	0.005 1	1.36
R5	0.001 6	0.000 57	0.000 55	0.000 052	0.016	0.051
R6	0.002 5	0.000 53	0.000 56	0.000 054	0.005 7	0.076
最大值	0.04	0.008 2	0.001 04	0.000 21	0.22	2.18
最小值	0.000 4	0.000 1	0.000 44	ND	0.002 5	0.007 5
中值	0.004	0.000 55	0.000 555	0.000 052	0.008 35	0.063 5
平均值	0.012 3	0.001 6	0.000 6	0.000 11	0.035	0.58
地表水环境质量Ⅲ类标准限值	0.005	0.05	0.05	0.000 1	1	1
地表水环境质量Ⅴ类标准限值	0.01	0.1	0.1	0.001	1	2

注: ND, 未测出。

表 4 狮牡河底泥重金属含量统计

Table 4 Contents of heavy metals in the sediment from Shimu River

(mg·kg⁻¹)

采样点	镉	铅	砷	汞	铜	锌
R0-b	2.65	196.32	9.83	0.034	28	290
R1	3.66	1 192.31	147.21	0.047	300	1 400
R2	21.66	1 176.82	390.15	0.034	1 600	4 300
R3	59.63	984.52	582.35	0.048	2 900	6 400
R4	28.77	694.35	286.77	0.042	1 600	3 300
R5	4.82	892.41	238.06	0.053	560	1 300
R6	12.23	107.56	39.25	0.021	110	660
最大值	59.63	1 192.31	582.35	0.053	2 900.00	6 400.00
最小值	2.65	107.56	9.83	0.021	28.00	290.00
中值	12.23	892.41	238.06	0.04	560.00	1 400.00
平均值	19.06	749.18	241.95	0.04	1 014.00	2 521.00
农用地土壤管制值	3	700	120	4	—	—
铜陵土壤背景值	0.71	67.00	22.70	0.05	79.00	139.00

注: “—”表示未提及。

表 5 狮牡河河水单因子污染指数

Table 5 Single-factor pollution index of water from Shimu River

采样点	镉	铅	砷	汞	铜	锌
R0	0.096	0.019 8	0.008 8	—	0.002 5	0.007 5
R0-b	0.08	0.038	0.020 8	2.1	0.003 7	0.02
R1	8	0.164	0.016 6	—	0.22	2.18
R2	1.1	0.005 8	0.011 6	—	0.011	0.048
R3	4.4	0.007 6	0.009 6	—	0.015	0.92
R4	5.2	0.002	0.011	—	0.005 1	1.36
R5	0.32	0.011 4	0.011	0.52	0.016	0.051
R6	0.5	0.010 6	0.011 2	0.54	0.005 7	0.076

注: 低于检测含量, “—”表示无法计算

2.1.2 河水中重金属的空间分布 河水中重金属的空间分布差异较大。其中 Cd、Cu、Zn 的含量最低

值多出现在 R0, 支流 R0-b 也偏低, 最高值都出现在上游矿区下小溪 R1(表 3), 并表现出从 R1 到中游

R2—R4 段, 再到下游 R5—R6 逐渐降低的总趋势; Pb 也在 R1 含量最高, 其他各点都较低; 表明河水受硫铁矿尾矿的影响比较明显。As 和 Hg 在所有采样点的含量都很低, 其中 Hg 仅在 R0-b、R5 和 R6 3 个采样点有检出, 最高含量在 R0-b, 其空间分布显然与其他重金属不同, 说明 Hg 的分布未明显受到矿区影响。

2.2 狮牡河底泥重金属含量与空间分布

2.2.1 底泥中重金属的含量

狮牡河底泥重金属含量参照农用地土壤污染风险管制值 (GB 15618—2018) ($6.5 < \text{pH} \leq 7.5$ 的取值, 下文称管制值)^[30]和铜陵土壤背景值 (下文称背景值) 进行分析 (表 4)。Hg 的含量最低, 其平均含量低于管制值和背景值, 最大值也只略高于背景值, 而其他 5 种重金属含量均较高。Cd 的最小值接近管制值, 是背景值的 3.73 倍, 平均值分别为管制值和背景值的 6.35 倍和 26.85 倍, 说明底泥中 Cd 的含量很高。Pb 的平均含量超过管制值, 是背景值的 11.18 倍; As 的平均含量是管制值的 2.02 倍, 是背景值的 10.66 倍; Cu 和 Zn 是含量最高的两种重金属, 均远高于相应的背景值。

2.2.2 底泥中重金属的空间分布

底泥重金属含量的空间分布变化与河水有所不同。底泥中 Cd、As、

Cu 和 Zn 的含量在空间分布几乎一致, 这 4 种重金属含量最低值都在 R0-b 点, 最高值并不在 R1, 而是在中游的 R3 点, 表现出从上游到中游逐渐增加, 在 R3 达到最大值, 然后从中游到下游总体降低的特点 (表 4)。Pb 含量最大值在 R1, 然后沿中、下游呈递减趋势, R0-b 略高于 R6。Hg 相对其他重金属在整个流域的含量都很低, 空间变化不明显。

河流底泥重金属含量与其来源、迁移输送过程和重金属本身特性有关。Cd、As、Cu 和 Zn 并不是距矿区越近含量越高, 而是在中游河段含量最高, 这可能与流域地形和水流有关。R1 靠近矿山山麓, 水流较急, 不利于沉积; R2 河段之后地势比较平坦, 利于沉积, 但在 R2 点由于来自水库的水流较大, 带来较大扰动, 所以直到 R3 点, 沉积达到最大。水流紊动强度、流速等水动力因素会通过改变水体物理化学环境和泥沙运动状态对污染物在水体中的迁移转化过程产生影响^[31]。在采样过程中, 就注意到小溪 R1 沉积物很少, 且多为砂质沉积物; R2 之后沉积物变多, 多为泥质沉积物。而 Pb 相比其他重金属更更容易被沉积物吸附沉淀, Pb 的迁移性最弱^[32]。因此在距离矿区最近的 R1 含量最高, 然后沿中、下游逐渐递减。

表 6 狮牡河底泥重金属地累积指数

Table 6 Geo-accumulation index of heavy metals in the sediment from Shimu River

采样点	镉	铅	砷	汞	铜	锌
R0-b	1.32	0.97	-1.79	-1.14	-2.08	0.48
R1	1.78	3.57	2.11	-0.67	1.34	2.75
R2	4.35	3.55	3.52	-1.14	3.76	4.37
R3	5.81	3.29	4.10	-0.64	4.61	4.94
R4	4.76	2.79	3.07	-0.84	3.76	3.98
R5	2.18	3.15	2.81	-0.50	2.24	2.64
R6	3.52	0.10	0.21	-1.84	-0.11	1.66

2.3 重金属污染评价

2.3.1 河水重金属污染评价

以地表水环境质量 III 类标准 (GB 3838—2002)^[19] 的限值为评价标准, 河水单因子污染指数如表 5 所示。R1-R4 段河水均存在 Cd 污染, Cd 在 R1、R3 和 R4 的污染指数分别为 8、4.4 和 5.2, 污染很严重; Zn 在 R1 和 R4 的污染指数分别为 2.18 和 0.92, 也存在污染; Hg 仅在 R0-b 有较严重的污染, 污染指数为 2.1; Pb、As 和 Cu 无污染。所以, 河流平水期重金属污染主要是集中在 R1—R4 河段, 主要污染物为 Cd 和 Zn, 尤其是 Cd 污染最严重。

2.3.2 底泥重金属污染评价

狮牡河底泥中 Cd、Pb、As、Hg、Cu、Zn 的地累积指数如表 6 所示。平均值分别为 3.39、2.49、2.00、-0.97、1.93 和 2.97, 污染程度为 $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{As} > \text{Cu} > \text{Hg}$ 。根据地累积指数污染等级 (表 1), 6 种重金属中 Cd 污染最严重, 达到重污染; Zn 和 Pb 污染次于 Cd 污染, 为中污染—重污染; As、Cu 为中污染; Hg 为无污染。从空间上看, 河段污染程度不同: 中游污染最严重, 上游和下游污染相对较轻。R3 污染最为严重, 除 Hg 无污染外, 其他重金属污染都很严重, Cd 达到极度污染级别; R2 和 R4 次之, 污染也比较严重;

R1、R5、R6 污染相对较轻；R0-b 的污染最轻，只有 Cd 达到中污染。

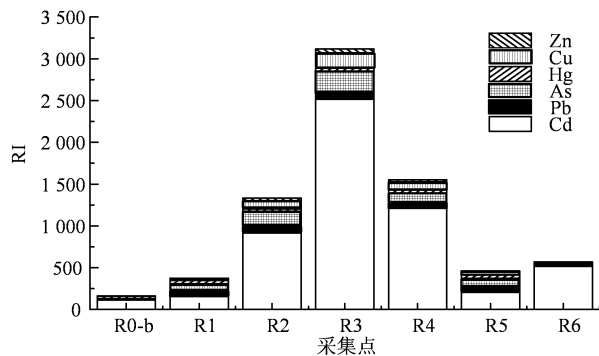


图 2 狮牡河底泥潜在生态风险

Figure 2 Potential ecological risk in sediment of Shimu River

重金属潜在生态风险见图 2。从单一重金属风险系数 E_r 的平均值看，6 种重金属风险排序为 Cd(805)>As(107)>Cu(64)>Pb(56)>Hg(32)>Zn(18)，与窦智勇等^[33]关于铜陵矿区农田土壤 4 种重金属 (Cd、Cu、Pb、Zn) 的潜在生态风险指数排序一致。与池源^[34]在安徽铜陵地区土壤和河流沉积物重金属分布特征与污染评价中关于沉积物重金属的风险评价结果 Hg(280)>As(46)>Cu(22)>Pb(13)>Zn(3) 相比，存在较大差异，可能与其样品来源和采集时间不同有关。根据表 2 的划分标准，Cd 的潜在风险等级最高，为极高风险；As 为高风险；Cu 和 Pb 为中风险；Hg 和 Zn 为低风险。7 个采样点的平均潜在生态风险指数 RI 达 1 082.05，风险很高。其中 Cd 是潜在生态风险指数 RI 的主要贡献因子，贡献率高达 74%。采样点潜在风险 R3 > R4 > R2 > R6 > R5 > R1 > R0-b。R2、R3 和 R4 的潜在风险等级都达到最大等级，风险很高；R1、R6 和 R5 为高风险等级；R0-b 风险等级最低，为低风险（图 2）。

两种底泥评价的结果均表明河流底泥重金属污染比较严重，其中 Cd 污染最为严重，R2—R4 中游河段风险很高。R3 污染最严重，风险最高；下游支流 R0-b 污染最轻，风险最低。

3 结论

在平水期河水 6 种重金属中 Cd 污染比较严重，污染出现在从上游矿区河段到中游河段，其他重金属污染较轻或无污染。但底泥中重金属除 Hg 外，其他 5 种重金属平均含量都显著高于农用地土壤污染风险管制值(GB 15618—2018)^[30]和铜陵土壤背景值，中游河段含量最高。

河水和底泥的重金属含量和空间变化均表明河流重金属污染主要受到矿区影响。

河水的单因子污染指数法表明 Cd 污染最严重。河流底泥重金属的地累积指数 I_{geo} 表明 Cd 达到重度污染；重金属风险系数 E_r 表明 Cd 风险极高，对潜在生态风险贡献最高。As、Pb 和 Cu 的地累积指数和潜在风险系数都比较高，Zn 有较高的地累积指数，但潜在风险系数低。Hg 的地累积指数和潜在风险系数都低。

根据单因子污染指数法，平水期河水在上游污染相对最严重，下游无污染；地累积指数法和潜在生态风险指数法都表明中游河段底泥污染最严重、风险最高。

参考文献：

- [1] 罗吉. 我国重金属污染防治立法现状及改进对策[J]. 环境保护, 2012, 40(18): 22-24.
- [2] 吕桂兰, 郝宪彬, 马秀芳. 水土重金属污染的危害及防治对策[J]. 辽宁农业科学, 2013(6): 40-43.
- [3] 洪亚军, 冯承莲, 徐祖信, 等. 重金属对水生生物的毒性效应机制研究进展[J]. 环境工程, 2019, 37(11): 1-9.
- [4] 李如忠, 潘成荣, 陈婧, 等. 铜陵市区表土与灰尘重金属污染健康风险评估[J]. 中国环境科学, 2012, 32(12): 2261-2270.
- [5] GUAN J N, WANG J, PAN H, et al. Heavy metals in Yinma River sediment in a major Phaeozems zone, Northeast China: Distribution, chemical fraction, contamination assessment and source apportionment[J]. Sci Rep, 2018, 8: 12231.
- [6] 周芬琦, 王小芳, 赵新如, 等. 安徽庐江尾矿区河流重金属分布及污染评价[J]. 环境化学, 2020, 39(10): 2792-2803.
- [7] 高月, 孙荣国, 叶彩, 等. 贵州省丹寨县某铅锌矿区土壤重金属污染生态风险评价[J]. 生态学杂志, 2020, 39(3): 928-936.
- [8] 李闽, 王联军, 罗小利. 铜陵矿区矿山地质环境问题及治理对策[J]. 中国矿业, 2014, 23(5): 67-70.
- [9] 陈莉薇, 徐晓春, 王军, 等. 铜陵相思河流域重金属分布特征研究[J]. 环境科学, 2014, 35(8): 2967-2973.
- [10] 夏毅民, 郑刘根, 邱征, 等. 铜陵某富硫尾矿库周边土壤重金属污染特征及风险评估[J]. 环境污染与防治, 2020, 42(4): 493-499.
- [11] 朱兰保, 盛蒂, 马莉, 等. 安徽省城市地表灰尘重金属污染及人体健康风险评估[J]. 地球与环境, 2019, 47(1): 97-104.
- [12] 耿浩, 刘瑞雪, 刘军省, 等. 铜陵硫铁矿基地集中开采区水文地球化学特征[J]. 地球与环境, 2020, 48(2): 240-249.
- [13] 国家环境保护局规划标准处. 水质 铜、锌、铅、镉的测定 原子吸收分光光度法:GB/T 7475-1987[S]. 北京: 中国标准出版社, 1987.

- [14] 山东省农业标准化技术委员会. 农用水中汞、砷的测定 原子荧光光度法:DB37/T 1954—2011[S]. 北京:中国标准出版社,2011.
- [15] 国家环境保护局科技标准司.土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法:GB/T 17141-1997[S]. 北京:中国标准出版社,1997.
- [16] 国家环境保护局科技标准司.土壤质量 铜、锌的测定 火焰原子吸收分光光度法:GBT 17138-1997[S]. 北京:中国标准出版社,1997.
- [17] 中华人民共和国农业部.土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第2部分:土壤中总砷的测定:GB/T 22105.2—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [18] 王辉, 赵悦铭, 刘春跃, 等. 辽河干流沉积物重金属污染特征及潜在生态风险评价[J]. 环境工程, 2019, 37(11): 65-69,165.
- [19] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准: GB 3838—2002[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [20] 李慧明, 候林丽, 徐鹏. 不同水质指数法在峡江水库水质评价中的应用[J]. 人民长江, 2020, 51(S2): 32-36,87.
- [21] ISLAM M S, HOSSAIN M B, MATIN A, et al. Assessment of heavy metal pollution, distribution and source apportionment in the sediment from Feni River estuary, Bangladesh[J]. Chemosphere, 2018, 202: 25-32.
- [22] 李如忠, 徐晶晶, 姜艳敏, 等. 铜陵市惠溪河滨岸带土壤重金属形态分布及风险评估[J]. 环境科学研究, 2013, 26(1): 88-96.
- [23] 胡园园, 陈发扬, 杨霞, 等. 铜陵铜官山矿区土壤重金属污染状况研究[J]. 资源开发与市场, 2009, 25(4): 342-344.
- [24] PATEL P, RAJU N J, REDDY B C S R, et al. Heavy metal contamination in river water and sediments of the Swarnamukhi River Basin, India: risk assessment and environmental implications[J]. Environ Geochem Heal, 2018, 40(2): 609-623.
- [25] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. Water Res, 1980, 14(8): 975-1001.
- [26] ZHANG Z, JUYING L, MAMAT Z, et al. Sources identification and pollution evaluation of heavy metals in the surface sediments of Bortala River, Northwest China[J]. Ecotoxicol Environ Saf, 2016, 126: 94-101.
- [27] LIU Y, MA Z W, LV J, et al. Identifying sources and hazardous risks of heavy metals in topsoils of rapidly urbanizing East China[J]. J Geogr Sci, 2016, 26(6): 735-749
- [28] 伍娟丽, 王永刚, 王旭, 等. 通州区河流沉积物重金属污染评价[J]. 水生态学杂志, 2020, 41(1): 71-78.
- [29] 柳肖竹, 刘群群, 王文静, 等. 水力扰动对河口沉积物中重金属再释放的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(11): 1460-1467.
- [30] 生态环境部.土壤环境质量标准 农用地土壤污染风险管控标准(试行): GB 15618 - 2018[S].北京:中国环境出版社, 2018.
- [31] 肖洋, 成浩科, 唐洪武, 等. 水动力作用对污染物在河流水沙两相中分配的影响研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(5): 480-488.
- [32] 崔斌, 朱美霖, 姜阳, 等. 尾矿重金属的释放迁移及其生物有效性研究概述[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(7): 12-19.
- [33] 窦智勇, 程建华, 周平, 等. 基于总量及有效态的铜陵矿区农田土壤重金属生态风险评价[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(11): 6-10.
- [34] 池源. 安徽铜陵地区土壤和河流沉积物重金属分布特征与污染评价[D]. 南京: 南京大学, 2013.