

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2018120706

陈明, 李凤果, 陶美霞, 等. 赣南典型矿区河流上覆水与表层沉积物重金属分布特征及风险评价[J]. 环境化学, 2019, 38(7): 1461-1469.
CHEN Ming, LI Fengguo, TAO Meixia, et al. Distribution characteristics and risk assessment of heavy metals in overlying water and surface sediments in rivers in typical mining areas of southern Jiangxi Province[J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(7): 1461-1469.

赣南典型矿区河流上覆水与表层沉积物 重金属分布特征及风险评价*

陈明** 李凤果 陶美霞 胡兰文 师艳丽 刘燕 郑小俊 刘友存

(江西理工大学, 江西省矿冶环境污染控制重点实验室, 赣州, 341000)

摘要 为揭示赣南典型矿区河流重金属含量、赋存形态及生态风险, 本文选取桃江为研究对象, 采集 10 个监测点位的上覆水和沉积物. 运用电感耦合等离子体质谱法对上覆水和沉积物重金属铜(Cu)、锌(Zn)、砷(As)和钨(W)的含量和形态进行分析. 采用内梅罗综合污染指数法与风险评估编码法对桃江沉积物中 4 种重金属的污染状况进行评价. 结果表明, 上覆水中 Cu、Zn、As 和 W 的含量平均值分别为 53.12、38.92、1.71、0.15 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 沉积物中 Cu、Zn、As 和 W 的含量平均值分别为 43.09、135.55、16.4、17.23 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 4 种重金属的各形态占比由高到低为残渣态>可氧化态>可还原态>酸溶态; 内梅罗综合污染指数法评价结果显示 50% 的采样点都属于中污染级别, 40% 的采样点处于重污染级别; 风险评估编码法评价结果中只有 10% 采样点处于低生态风险, 90% 的采样点均处于中等生态风险.

关键词 桃江河, 重金属, 上覆水, 沉积物, 污染评价.

Distribution characteristics and risk assessment of heavy metals in overlying water and surface sediments in rivers in typical mining areas of southern Jiangxi Province

CHEN Ming** LI Fengguo TAO Meixia HU Lanwen SHI Yanli
LIU Yan ZHENG Xiaojun LIU Youcun

(Jiangxi Key Laboratory of Mining and Metallurgy Environmental Pollution Control, Jiangxi University of
Science and Technology, Ganzhou, 341000, China)

Abstract: In order to reveal the heavy metal content, occurrence form and ecological risk of the rivers in the typical mining area of southern Jiangxi province, this paper selects Taojiang as the research object and collects the overlying water and sediments from 10 monitored points. The contents and morphology of heavy metals Cu, Zn, As and W in overlying water and sediment were analyzed by inductively coupled plasma mass spectrometry. The pollution status of four heavy metals in Taojiang sediments was evaluated by Nemerov comprehensive pollution index method and risk assessment coding method. The results show that the average contents of Cu, Zn, As and W in the overlying water are 53.12, 38.92, 1.71 and 0.15 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. The average values of Cu, Zn, As and W in sediments are respectively 43.09, 135.55, 16.43 and 17.23 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; The comparison of the proportion of the four heavy metals is residue state > oxidizable state > reducible

2018年12月7日收稿(Received: December 7, 2018).

* 国家自然科学基金(51664025, 41861002)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (51664025, 41861002).

** 通讯联系人, Tel: 13979708320, just168@163.com

Corresponding author, Tel: 13979708320, E-mail: just168@163.com

state > acid soluble state from high to low; the evaluation results of Nemero comprehensive pollution index method show that 50% of the sampling points belong to the middle pollution level, and 40% of the sampling points are at the level of heavy pollution; Only 10% of the sampling points in the risk assessment coding method are at low ecological risk, and 90% of the sampling points are at medium ecological risk.

Keywords: Taojiang River, heavy metal, overlying water, sediment, pollution assessment.

重金属由于其环境持久性和潜在生物毒性,难被微生物分解,易通过食物链富集对生态环境和人类健康造成极大的威胁,因此重金属污染成为当前环境领域研究的热点之一^[1-2].河流沉积物是污染物的重要载体,也是水体重金属污染物的源和汇^[3-5],长期的工业生产、农业废水及金属冶炼废水等这些人为活动将大量重金属带入河流.随着地表径流重金属会随颗粒物进入沉积物中,当外界条件发生改变时,重金属又会被重新释放出来,容易造成水体二次污染,并对水体生物及人类健康产生危害.

赣南是中国最早的钨资源开采区,规模开采有百年历史^[6],早期矿产资源的无序开采导致大量的钨尾矿和废石直接排入河中,导致地表水和地下水受到重金属污染^[7].此外,赣南钨矿床多为密集分布的离子稀土矿,以全南县桃江流域为例,除了大吉山和关山的两个大型钨矿外,还有 277 个废弃稀土矿^[8-9].通过原位浸出法开采的离子稀土矿,在开采后依然会产生大量污染物.密集分布的钨矿石和稀土矿物在开发过程中产生的污染物均被排入同一河流,使桃江形成一个独特的酸性强、氨氮和重金属离子浓度高的矿区水质环境,对沉积物中重金属的迁移产生了深远的影响^[10-12].河流沉积物重金属分布特征和污染评价已成为当前研究河流重金属污染领域的热点^[13-14],虽然很多学者针对矿区水体开展重金属污染特征研究,但是对赣南典型矿区复合污染这一独有的水质环境中沉积物重金属污染特征研究鲜见报道^[15-16].赣江支流桃江是国家规划建设的赣粤运河修建的必经之地,这使得桃江河的污染治理显得尤为重要.

本文主要以桃江平水期沉积物为研究对象,测定沉积物和上覆水中重金属含量,评价其污染状况及风险程度,为开展桃江河沉积物重金属污染治理工程和赣粤运河的建设提供理论支撑和科学依据.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 区域概况与样品采集

桃江发源于赣粤交界的全南县海拔 1145 m 的饭池嶂主峰,属于鄱阳湖流域赣江水系的二级支流,也是贡水的分支河流,地理位置介于 24°20'—25°30'N, 114°11'—116°13'E,流经全南、龙南、信丰、赣县于大田乡汇入贡水注入赣江^[11].主河长 289 km,流域面积约 7800 km².

本实验于 2017 年 10 月布设 10 个采样点进行采样,如图 1 所示.在实地采样过程中,充分合理考虑流域范围内的生产生活对水质影响,采用 GPS 定位系统对各采样点进行定位导航,详细记录采样点周边植被覆盖、水文条件、农工业布局以及支流汇水等采样点环境特征如表 1.上覆水(覆盖于沉积物上的水层)采集用 500 mL 聚乙烯塑料瓶,取样前用 10%硝酸浸泡 10 h 后洗净烘干.取样时,选用 Ruttner 采样器采河流表面 10—50 cm 深度的水样,加酸至 pH<2,贴好标签.沉积物采集使用不锈钢抓斗式采样器,采用多点混合法采集表层(0—10 cm)沉积物,装入聚乙烯塑料袋后排出空气,密封后记录编号.以上上覆水与沉积物均采集 3 份以减小误差,低温保存,并及时送回实验室进行检测.

1.2 样品处理与分析

上覆水样品用 0.45 μm 滤膜过滤后待测.沉积物样品在自然条件下风干,再 105 °C 烘烤至恒重,剔除砾石、贝壳及动植物残体等杂质,经玛瑙研钵研细过 200 目尼龙筛后,称取 0.5000 g(精确到 0.0001 g)沉积物样品放入聚四氟乙烯坩埚中加入 10 mL 盐酸(优级纯 GR),90 °C 加热蒸干至 3 mL,再分别加入 5 mL 硝酸(优级纯 GR,500 mL,国药)、5 mL 氢氟酸(优级纯 GR,500 mL,国药)和 3 mL 高氯酸(优级纯 GR,500 mL,国药),加盖 120 °C 消解,待完全消解后 180 °C 赶酸 1 h,赶酸后用去离子水清洗坩埚,将样品完全转移至样品瓶内,再用 1%硝酸稀释定容至 50 mL 过滤待测^[17].形态采用改进 BCR 三步提取法进行

预处理^[18-19],称取 1.000 g 沉积物于 50 mL 坩埚中,先用 40 mL 0.1 mol·L⁻¹醋酸溶液,240 r·min⁻¹摇床振荡 18 h 提取形态 1(酸溶态);剩余残渣用 40 mL 0.5 mol·L⁻¹盐酸羟胺溶液(调 pH=1.5),240 r·min⁻¹摇床振荡 18 h 提取形态 2(可还原态);然后将形态 2 残渣用 10 mL 30%过氧化氢溶液搅拌静置 1 h 加热至 85℃,再加 10 mL 30%过氧化氢溶液(85±2)℃水浴消解,然后 1 mol·L⁻¹乙酸铵溶液 50 mL(调 pH=2)240 r·min⁻¹摇床振荡 18 h 提取形态 3(可氧化态);最后,形态 3 的残渣使用 15 mL 硝酸+10 mL 磷酸+5 mL 30%过氧化氢消解提出形态 4(残渣态)。

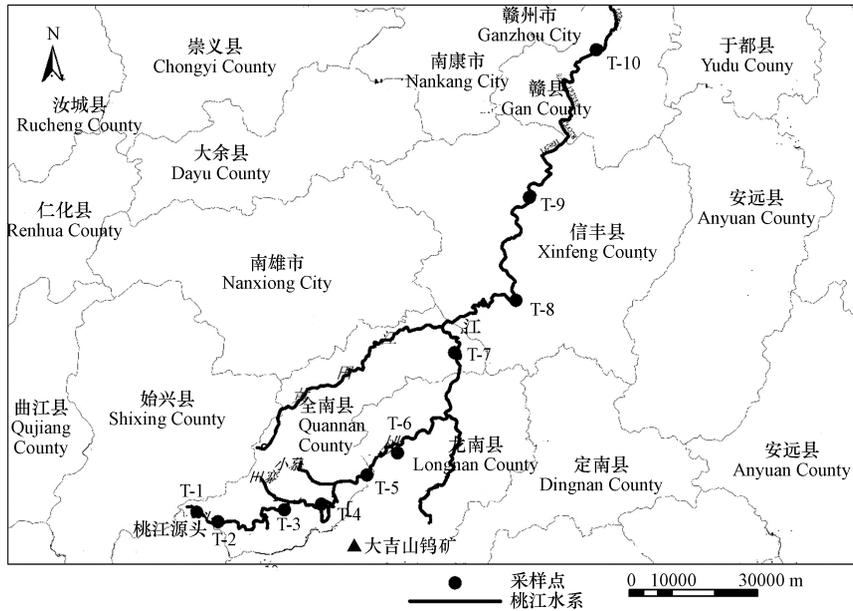


图 1 采样点分布

Fig.1 Sampling sites distribution

表 1 采样点环境特征

Table 1 Environmental characteristics at the sampling sites

采样点 Sampling point	点位名称 Point name	坐标 Coordinate	周边环境特征 Surrounding environment characteristics
1	桃江 T-1	E114°13'54", N24°40'09"	桃江源头,村庄,农田 Taojiang source, village, farmland
2	桃江 T-2	E114°16'43", N24°39'02"	养猪场,沙场 Pig farm, battlefield
3	桃江 T-3	E114°25'36", N24°41'31"	矿山开采区,村庄,农田 Mining area, village, farmland
4	桃江 T-4	E114°30'34", N24°42'30"	矿产开采区,养殖基地 Mineral mining area, Breeding base
5	桃江 T-5	E114°36'31", N24°46'57"	邻近公路,砖厂 Adjacent road, brick factory
6	桃江 T-6	E114°40'45", N24°49'59"	邻近公路,村庄 Adjacent road, village
7	桃江 T-7	E114°47'14", N25°02'17"	邻近公路,农田 Adjacent road, farmland
8	桃江 T-8	E114°55'22", N25°09'25"	村庄,农田 Village, farmland
9	桃江 T-9	E114°56'08", N25°42'51"	信丰县城段,生活区 Xinfeng County, living area
10	桃江 T-10	E115°04'43", N25°41'04"	村庄,农田,邻近公路 Village, farmland, adjacent road

以上重金属元素 Cu、Zn、W、As 含量均做 3 个平行样,采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Agilent 8800)测定^[20-21],样品测定送江西理工大学工程研究院完成.分析过程中采用标准参考物质(GBW07309)进行质量控制,测量误差小于±10%,各金属元素回收率在 89%—110%之间。

采用 Excel 2016, Spss 22.0, Origin 2017 等软件进行数据分析,并使用 Arcgis 10.0 绘制采样点图。

1.3 评价方法

1.3.1 内梅罗综合污染指数法

内梅罗综合指数法主要是在单因子污染指数评价的基础上对研究区域内多种重金属的综合污染程度进行评价^[22],这种评价方法兼顾了多种重金属对研究区域的污染共同产生的作用。

$$P_{\text{综合}} = \sqrt{(P_{\text{ave}}^2 + P_{\text{max}}^2)}/2 \quad (1)$$

$$P_{\text{ave}} = \frac{C_{i\text{ave}}}{S_{i\text{ave}}}, P_{\text{max}} = \frac{C_{i\text{max}}}{S_{i\text{max}}} \quad (2)$$

式中, $P_{\text{综合}}$ 表示内梅罗综合污染指数值的大小; i 表示的是沉积物中重金属种类数; C_i 、 S_i 分别表示的是沉积物中重金属 i 的实测浓度及评价标准; P_{ave} 表示的是某一区域沉积物内各种重金属单项污染指数的平均值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), P_{max} 表示的是某一区域沉积物中各种重金属污染指数的最大值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). 根据内梅罗综合污染指数将污染程度分为了 5 个等级, 如表 2 所示. 该评价法不仅能够反映单个重金属对研究区域造成的的污染程度, 还能够表征研究区域内的多种重金属所造成的综合污染的状况.

表 2 内梅罗综合污染指数法

Table 2 Nemerom comprehensive pollution index evaluation method

等级 Grade	污染指数分级标准 Pollution index grading standard		
	值 Value	污染等级 Pollution level	污染水平 Pollution Discription
1	$P_{\text{综合}} \leq 0.7$	安全 Safety	清洁 Clean
2	$0.7 < P_{\text{综合}} \leq 1$	警戒级 Alert level	尚清洁 Still clean
3	$1 < P_{\text{综合}} \leq 2$	轻污染 Light pollution	开始受污染 Start contaminated
4	$2 < P_{\text{综合}} \leq 3$	中污染 Medium pollution	受到中度污染 Moderately polluted
5	$P_{\text{综合}} > 3$	重污染 (heavy pollution)	受到重度污染 (Severely polluted)

1.3.2 风险指数编码法

风险指数编码法(RAC)与重金属形态组成密切相关, 常被作为一种评价重金属风险的评价方法. 该方法主要是通过分析重金属酸溶态与重金属各形态之和的比值来对该重金属造成的生态风险进行评价. 通常而言, 酸溶态在环境中活性最大, 易于迁移和转化, 易于为植物所吸收, 从而容易对环境造成潜在威胁. RAC 值越大, 则该重金属对环境所造成的风险也就越大, 风险评价等级如表 3 所示.

表 3 风险指数编码法等级划分

Table 3 Risk index coding method

等级标准 Grade standard	酸溶态所占百分比 Percentage of acid soluble state /%	风险等级 Risk level
1	RAC < 1	无风险 Nno risk
2	$1 \leq \text{RAC} < 10$	低风险 Low risk
3	$10 \leq \text{RAC} < 30$	中等风险 Medium risk
4	$30 \leq \text{RAC} < 50$	高风险 High risk
5	RAC > 50	极高风险 Extremely high risk

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 上覆水与沉积物重金属含量分布

桃江上覆水 4 种重金属含量统计见表 4, Cu、Zn、As 和 W 的含量范围分别为 31.5—111、19.1—81.2、1.26—2.77、0.1—0.34 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 10 个采样点中 Cu 含量值均处于一类水质标准限值与三类水质标准限值之间, 10% 的采样点 Zn 含量超过一类水质标准限值, 表明 Zn 超一类水质标准的比例较低. 10 个采样点 As 的含量值均未达到一类水质标准限值, W 的含量均低于俄罗斯渔业河流湖泊水质标准, 表明上覆水体中 As 和 W 的含量都未超过地表水环境质量一类标准限值标准.

桃江沉积物中 4 种重金属含量统计如表 5, Cu、Zn、As 和 W 的含量分别介于 37.4—87.49、55.12—252.69、8.92—31.33、3.56—49.44 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间; 沉积物中 4 种重金属的含量从大到小排序为 $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{W} > \text{As}$. 浓度最高的是 Zn, 平均浓度为 135.55 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占 4 种重金属总量的 64%, 其次是 Cu 和 As, 平均浓度

分别为 $43.09 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $16.42 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 浓度最低的是 As, 平均浓度为 $17.23 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 各采样点重金属含量变化差异较大, 其中 W 的变异系数较大, 为 97.54%, 可能存在点源污染, Zn、As、Cu 的变异系数较小, 分别为 41.50%、38.10%、24.20%, 可能是面源污染.

表 4 桃江上覆水中重金属含量

Table 4 Heavy metal content in the overlying water of Taojiang

项目 Project	上覆水中重金属的含量 Heavy metal content in overlying water/ $(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$			
	Cu	Zn	As	W*
地表水环境质量一级标准限值	10	50	50	8
地表水环境质量三级标准限值	1000	1000	50	8
水样重金属含量范围($n=10$)	31.5—111	19.1—81.2	1.26—2.77	0.1—0.34
平均值	53.12	38.92	1.71	0.15
标准偏差	24.23	19.78	0.48	0.08
超过一级标准限值/%	100	10	0	0
超过三级标准限值/%	0	0	0	0

* 钨的标准限值参考俄罗斯渔业河流湖泊水质标准(因我国目前还未制定关于钨的水质标准限值)

表 5 桃江沉积物中重金属含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 5 Heavy metal content in Taojiang sediments($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

	沉积物中重金属的含量 Heavy metal content in sediments/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$			
	Cu	Zn	As	W
江西省土壤背景值 ^[23]	35	78	9.6	5.1
重金属含量范围($n=10$)	37.4—87.49	55.12—252.69	8.92—31.33	3.56—49.44
平均值	43.09	135.55	16.42	17.23
标准偏差	11.96	56.25	6.25	16.81
CV/%	24.20	41.50	38.10	97.54
超过背景值百分比/%	100	100	90	100

图 2 为桃江沉积物中 4 种重金属含量分布, 由图 2 可知, 1 号、3 号和 4 号采样点 4 种重金属含量均较高, 表明该桃江全南段重金属污染较为严重, 桃江全南段不仅分布着大大小小的稀土矿区, 还分布着两大钨矿区, 早期的矿产资源开采与冶炼, 大量重金属排入河流, 造成了河流重金属污染. 尤其 3、4 号采样点 W 含量超出江西省土壤背景值的 9 倍以上. 7—10 号采样点重金属污染较为严重, 可能与人为影响(如公路修建、生产养殖及生活排污等)有关.

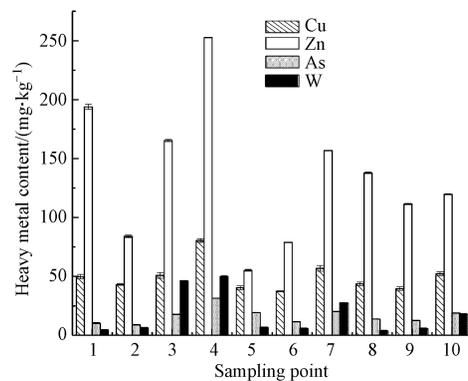


图 2 桃江沉积物重金属含量分布

Fig.2 Heavy metal content in Taojiang sediments

2.2 沉积物中重金属相关分析

相关性分析主要是被用于研究变量之间的密切度, 对沉积物中重金属进行相关分析, 可以明确不同

重金属之间的相关关系,通过相关系数的大小,可以初步判断几种重金属之间来源的相关性.本节采用 Pearson 相关系数对沉积物中 4 种重金属之间的相关系数进行分析,结果如表 6 所示,Cu 与 Zn、As 和 W 之间存在显著相关性,Zn 与 W 存在显著相关性,但与 As 之间的相关性不大,As 与 W 之间存在显著相关性,表明 4 中重金属中,Cu、As、W 可能存在相同的来源,但 Zn 与 As 之间的来源可能存在一定的差异,鉴于其两两之间的相关系数也不低,表明这 4 种重金属可能主要是钨矿山和离子型稀土矿山的开采与冶炼有关.Zn 的一部分污染可能也受城市生活污水污染.

表 6 重金属元素间 Pearson 相关性

Table 6 Pearson correlation between heavy metal elements

	Cu	Zn	As	W
Cu	1			
Zn	0.860**	1		
As	0.847**	0.568	1	
W	0.804**	0.679**	0.784**	1

注: ** $P < 0.01$.

2.3 沉积物中重金属形态分布特征

图 3 为桃江沉积物中 4 种重金属 Cu、Zn、As 和 W 形态分布特征,赋存形态依次分别为酸溶态、可还原态、可氧化态和残渣态.由图 3 可知,沉积物中 4 种重金属形态特征各有差异.重金属有效态(本文将酸溶态、可还原态、可氧化态之和视为有效态)的大小顺序为 $Zn > Cu > As > W$, Zn 的有效态含量占比例在 36.59%—64.25%之间,Cu 的有效态含量占比例在 19.61%—66.15%之间,As 和 W 这两种元素主要赋存形态为残渣态,分别占总量的 72.28%—89.34%和 74.6%—99.54%,表明 As 和 W 这两种元素较为稳定,所产生的生态风险较低,而 Zn 和 Cu 存在的生态风险相对较高.

Cu 可还原态、可氧化态和残渣态分别占总量的 6.10%—25.95%, 6.14%—27.43% 和 38.49%—83.42%之间,各形态所占比例由高到低排序为残渣态>可氧化态>可还原态>酸溶态.Zn 可还原态、可氧化态和残渣态分别占总量的百分比为 10.20%—27.46%, 13.30%—23.80% 和 25.74%—63.40%,各形态所占比例由高到低排序为残渣态>可还原态>可氧化态>酸溶态.

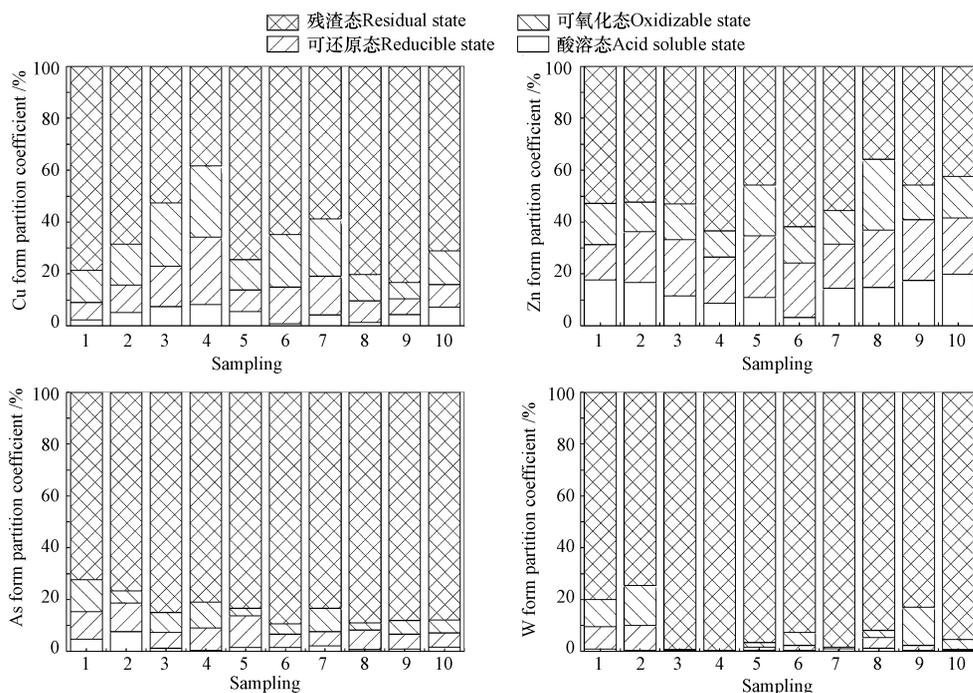


图 3 表层沉积物重金属形态分布特征

Fig.3 Distribution characteristics of heavy metals in surface sediments

Zn 和 Cu 主要赋存形态虽是残渣态,但可氧化态和可还原态也占有一定比例,表明这两种重金属很容易受环境影响而迁移转化,从而对水环境系统造成威胁.可还原态的重金属一般以矿物的外囊物和细粉颗粒存在,专属吸附作用比较强,在水体氧化还原电位降低或水体缺氧时易被释放,具有较大的生物可利用性,存在一定环境风险;可氧化态重金属是反映水生生物活动及人类排放富含有机物污水作用的结果,沉积物中这种形态存在的重金属是相对稳定的,但在强氧化条件下,可形成迁移能力进入水体;Zn 在沉积物中酸可提取态对环境变化最敏感,在酸性和中性条件下即可释放出来,可以直接被生物利用^[24].

2.4 沉积物中重金属污染分析

桃江表层沉积物重金属污染内梅罗综合污染指数法评价结果如表 7 所示.10 个采样点仅桃江 T-8 属于轻度污染程度,其余采样点属于中度及以上污染程度,其中桃江 T-3 和 T-4 污染最严重.50%的采样点都属于中污染级别,受到中等程度污染,40%的采样点处于重污染级别,明显受到了重度的污染.一方面是由于长期受到大吉山钨矿和其他离子型矿的矿山开采、有色金属冶炼的影响;另一方面是因为采样点邻近公路,附近矿产资源开采后精选出来的优质矿产会被运送至外地,运输的过程中会产生难以避免的散落与飞尘,从而一些重金属进入水体并富集于沉积物造成的污染.

表 7 重金属内梅罗综合污染指数评价结果

Table 7 Evaluation results of heavy metal Nemeru comprehensive pollution index

采样点 Sampling sites	$P_{综合}$	污染等级 Pollution level	污染水平 Pollution Discription
桃江 T-1	2.20	中污染	中度污染
桃江 T-2	2.71	中污染	中度污染
桃江 T-3	18.91	重污染	重度污染
桃江 T-4	20.45	重污染	重度污染
桃江 T-5	2.89	中污染	中度污染
桃江 T-6	2.48	中污染	中度污染
桃江 T-7	11.28	重污染	重度污染
桃江 T-8	1.80	轻污染	轻度污染
桃江 T-9	2.50	中污染	中度污染
桃江 T-10	7.46	重污染	重度污染

风险评估指数法评价结果如表 8 所示,4 种重金属中 Zn 的风险等级最高,除 10%采样点处于低风险程度,剩余 90%的采样点均处于中等风险程度;Cu 在所有采样点风险程度均属于低等风险程度,As 在 70%采样点属于低等风险程度,30%的采样点风险水平则属于无风险程度;W 在所有采样点的污染水平都属于无风险程度;总体来看,4 种重金属风险评估指数等级由大到小排序为 Zn>Cu>As>W.

表 8 重金属形态风险评估指数评价结果

Table 8 Evaluation results of heavy metal speciation risk assessment index

编号 Number	Cu		Zn		As		W	
	RAC	风险等级 Risk level	RAC	风险等级 Risk level	RAC	风险等级 Risk level	RAC	风险等级 Risk level
桃江 T-1	2.13	2	16.98	3	0.68	1	0.45	1
桃江 T-2	5.13	2	17.01	3	0.90	1	0.32	1
桃江 T-3	7.27	2	11.30	3	1.25	2	0.82	1
桃江 T-4	8.09	2	12.68	3	1.12	2	0.67	1
桃江 T-5	5.31	2	10.87	3	1.11	2	0.46	1
桃江 T-6	1.04	2	3.13	2	1.65	2	0.36	1
桃江 T-7	4.24	2	14.58	3	2.13	2	0.07	1
桃江 T-8	1.28	2	14.74	3	0.73	1	0.28	1
桃江 T-9	4.20	2	16.50	3	0.80	1	0.36	1
桃江 T-10	7.03	2	19.65	3	1.59	2	0.17	1

同种重金属在桃江 T-3 和桃江 T-4 的 RAC 值均较高,主要是由于受到大吉山钨矿开采的影响,矿产开采会把埋藏于地下的矿物质挖出并暴露于地面,从而会导致各类矿物质的化学形态与其存在形式产生变化,当在地面堆积时,会增加重金属向环境的释放通量,造成区域内土壤、水体以及沉积物的重金属被各种类型的污染物质所污染,这与郭伟等^[25]人对呼和浩特市各类型土壤的重金属污染来源基本上一致。

3 结论(Conclusion)

(1)桃江上覆水中 4 种重金属含量和介于 61.68—136.55 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,平均值为 99.41 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。4 种重金属由大到小排序为:Cu>Zn>As>W,沉积物中 4 种重金属含量之和介于 121.07—143.95 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 218.62 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。4 种重金属含量由大到小次序是 Zn>Cu>W>As。空间分布来看,桃江 T-1 段 Zn 含量较高,桃江 T-2 沉积物中 4 种重金属含量均较低,桃江 T-3 和 T-4 段沉积物中 4 种重金属的含量都有明显的上升,这主要受到大吉山钨矿开采及种植业的影响。桃江中下游河段 4 种重金属的含量明显降低,其中 T-5 和 T-6 段最为明显,主要由于该河段附近少有矿产资源,且人为活动影响相对较小。

(2)相关性分析结果表明,4 种重金属来源基本一致,其中 Cu、As 和 W 来源相关系数较高,Zn 与 As 之间的来源存在一定的差异,主要是受到矿产资源开采影响所致。重金属形态分布表明,沉积物中 4 种重金属的形态特征各有差异。重金属有效态大小分布次序为 Zn>Cu>As>W,As 与 W 两种元素比较稳定,所产生的生态风险较低。

(3)内梅罗综合污染指数法评价表明,除桃江 T-8 外其他点均受到中度及其以上程度的污染,其中桃江 T-3 和 T-4 污染状况最严重。风险编码评估结果显示,4 种重金属对研究区域造成污染程度大小排序为 Zn>Cu>As>W,且在桃江 T-3 和 T-4 段 Zn、Cu 和 As 均存在低等或中等生态风险。

参考文献(References)

- [1] 丁涛,田英杰,刘进宝,等. 杭州市河道底泥重金属污染评价与环保疏浚深度研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(3): 911-917.
DING T, TIAN Y J, LIU J B, et al. Heavy metal pollution assessment and environmental dredging depth of river bottom sediment in Hangzhou [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(3): 911-917 (in Chinese).
- [2] 贾英,方明,吴友军,等. 上海河流沉积物重金属的污染特征与潜在生态风险[J]. 中国环境科学, 2013, 33(1): 147-153.
JIA Y, FANG M, WU Y J, et al. Pollution characteristics and potential ecological risk of heavy metals in Shanghai river sediments [J]. China Environmental Science, 2013, 33(1): 147-153 (in Chinese).
- [3] 肖冬冬,史正涛,苏斌,等. 滇池宝象河表层沉积物重金属含量空间分布特征及污染评价[J]. 环境化学, 2017, 36(12): 2719-2728.
XIAO D D, SHI Z T, SU B, et al. Spatial distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metal content in surface sediments of Baoxiang River, Dianchi Lake [J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(12): 2719-2728 (in Chinese).
- [4] ROGNERU S, FJELD E. Trace Element contamination of norwegian lake sediments [J]. Ambio, 2001, 30(1): 11-19.
- [5] 陈小敏,朱保虎,杨文,等. 密云水库上游金矿区土壤重金属空间分布、来源及污染评价[J]. 环境化学, 2015, 34(12): 2248-2256.
CHEN X M, ZHU B H, YANG W, et al. Spatial distribution, source and pollution evaluation of soil heavy metals in gold deposits in the upper miyun reservoir [J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(12): 2248-2256 (in Chinese).
- [6] 陈明,杨涛,徐慧,等. 赣南某钨矿区土壤中 Cd、Pb 的形态特征及生态风险评价[J]. 环境化学, 2015, 34(12): 2257-2262.
CHEN M, YANG T, XU H, et al. Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals Cd and Pb in soils around a tungsten mine of Gannan [J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(12): 2257-2262. (in Chinese)
- [7] 陈明,杨涛,李登宇,等. 赣南某钨矿区稻田土壤中重金属污染特征及生态风险评价[J]. 有色金属工程, 2016, 6(2): 89-95.
CHEN M, YANG T, LI D Y, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in rice field soils around a tungsten mine in Gannan of Jiangxi [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2016, 6(2): 89-95. (in Chinese)
- [8] 王小玲,王歆,刘腾云,等. 江西主要类型重金属污染现状与修复实践[J]. 江西科学, 2014, 1(5): 594-599.
WANG X, WANG X, LIU T Y, et al. Contaminated situation and remediation practice of the main types by heavy metals in Jiangxi Province [J]. Jiangxi Science, 2014, 1(5): 594-599 (in Chinese)
- [9] 王斐,黄益宗,王小玲,等. 江西钨矿周边土壤重金属生态风险评价:不同评价方法的比较[J]. 环境化学, 2015, 34(2): 225-233.
WANG F, HUANG Z, WANG X L, et al. Ecological risk assessment of heavy metals in soil around Jiangxi tungsten mine: Comparison of different evaluation methods [J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(2): 225-233 (in Chinese).
- [10] 曾等志,匡晓亮. 河床沉积物稀土元素对重金属污染指标探析[J]. 商丘师范学院学报, 2017(3): 34-41.
ZENG K Z, YAN X L. Analysis of heavy metal pollution indexes of rare earth elements in river bed sediments [J]. Journal of Shangqiu Teachers College, 2017(3): 34-41 (in Chinese)

- [11] 王丽,陈凡,马千里,等.东江淡水河流域地表水和沉积物重金属污染特征及风险评价[J].环境化学,2015,34(9):1671-1684.
WANG L, CHEN F, MA Q L, et al. Pollution characteristics and risk assessment of surface water and sediment heavy metals in the Dajiang River Basin of Dongjiang River [J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(9):1671-1684 (in Chinese).
- [12] 许文泽,刘锦军,成应向,等.湘江底泥重金属污染特征与生态风险评价[J].环境化学,2016,35(1):189-198.
XU Y Z, LIU J J, CHENG Y X, et al. Heavy metal pollution characteristics and ecological risk assessment of Xiangjiang River sediment [J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(1):189-198 (in Chinese).
- [13] LIU Y, ZHANG J, HUIJUN H E. Assessment of the tesser and BCR sequential extraction procedures for elemental partitioning of Ca, Fe, Mn, Al, and Ti and their application to surface sediments from Chinese continental shelf [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2018, 37(5):22-28.
- [14] CHEN S Y, LIN J G. Bioleaching of heavy metals from sediment: Significance of pH [J]. Chemosphere, 2001, 44(5):1093-1102.
- [15] 苏文湫,祝怡斌.赣南稀土矿山废弃地土壤重金属污染现状评价[J].有色金属(矿山部分),2016,68(4):81-85.
SU W Z, ZHU Y B. Evaluation of heavy metal pollution in wasteland of Ganzhou rare earth mine [J]. Nonferrous Metals (Mine), 2016, 68(4):81-85 (in Chinese).
- [16] 杨泉.桃江中上游河段水体富营养化特征和重金属污染评价[D].赣州:江西理工大学,2018.
YANG Q. Eutrophication characteristics and heavy metal pollution assessment of the upper reaches of the Taojiang River. [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Technology Master's Thesis, 2018 (in Chinese).
- [17] US EPA. Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils. SW-846 method 3051A, 1997 [EB/OL]. 2018-11-20. <https://www.epa.gov/lep/simplified-chinese>.
- [18] CHABUKDHARA M, NEMA A K. Assessment of heavy metal contamination in hindon river sediments: A chemometric and geochemical approach [J]. Chemosphere, 2012, 87(8):945-953.
- [19] 冯精兰,胡鹏转,刘群,等.黄河中下游干流沉积物中重金属的赋存形态及其生态风险[J].环境化学,2015,34(1):178-185.
FENG J L, HU P Z, et al. Occurrence and ecological risk of heavy metals in the main stream sediments of the middle and lower reaches of the Yellow River [J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(1):178-185 (in Chinese).
- [20] BEDNAR A J, JONES W T, CHAPPELL M A, et al. A modified acid digestion procedure for extraction of tungsten from soil [J]. Talanta, 2010, 80(3):1257-1263.
- [21] ZHAO G, YE S, YUAN H, et al. Surface sediment properties and heavy metal pollution assessment in the Pearl River Estuary, China [J]. Environmental Science & Pollution Research, 2017, 24(3):2966-2979.
- [22] 郭伟,孙文惠,赵仁鑫,等.呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J].环境科学,2013,34(4):1561-1567.
GUO W, SUN W H, ZHOU R X, et al. Characteristics and evaluation of heavy metal pollution in different functional areas of Hohhot City [J]. Environmental Science, 2013, 34(4):1561-1567 (in Chinese).
- [23] 赵永红,张静,周丹,等.赣南某钨矿区土壤重金属污染状况研究[J].中国环境科学,2015,35(8):2477-2484.
ZHOU Y H, ZHANG J, ZHOU D et al. Study on soil heavy metal pollution in a tungsten mine area in southern Anhui [J]. China Environmental Science, 2015, 35(8):2477-2484 (in Chinese).
- [24] GONZALEZ M J, RAMOS L, HEMANDEZ L M. Distribution of trace metals in sediments and the relationship with their accumulation in earthworms [J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 1994, 57(2):135-150.
- [25] 刘亚纳,朱书法,魏学锋,等.河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J].环境科学,2016,37(6):2322-2328.
YIU Y N, ZHU S F, WEI X F, et al. Characteristics and evaluation of heavy metal pollution in different functional areas of Luoyang City, Henan Province [J]. Environmental Science, 2016, 37(6):2322-2328 (in Chinese).