

DOI:10.19856/j.cnki.issn.1001-5663.2020.03.023

左江流域崇左段沉积物重金属分布特征及生态风险

陈 彪¹, 吕璞良², 何显锦², 刘 芳³

(1. 广西壮族自治区地质调查院, 广西 南宁 530023;

2. 南宁师范大学北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室/广西地表过程与智能模拟重点实验室, 广西 南宁 530001;

3. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640)

摘 要:为揭示左江流域崇左段沉积物中重金属分布特征及其生态风险,共采集了 27 个表层水系沉积物样品,对其进行 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 等 8 种重金属元素含量和有机质(TOC、TN)的测定。结果表明:表层沉积物中重金属含量空间离散性中等,处于较低污染状态,主要为 Cd 重金属元素的污染,工业区附近点位出现 Hg、Pb 和 Zn 的污染;Cd 和 Hg 表现出中等程度的潜在生态风险;Cd、As、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 金属之间及与有机质间呈极显著的正相关,来源基本相似,主要来源是交通污染以及城市生活废水排放,且有机质是影响重金属分布与富集的重要因素。Hg 对各金属和有机质相关性较低,Hg 的来源与其他组分不同,主要来源于农业灌溉区化肥及农药污染。

关键词:重金属;沉积物;来源;空间分布特征;生态风险;左江流域

中图分类号:X832;X820.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-5663(2020)03-0571-08

0 引言

重金属在表生环境中具有持久性、不可降解性和显著生物毒性等特征,可通过食物链富集对人体健康构成潜在危害,是典型的累积性污染物^[1-4]。河流是地表环境中重金属累积和扩散的重要场所,水体中的重金属可以通过吸附、沉淀等作用进入水系沉积物,但随着河流水体的理化性质发生变化以及受到生物扰动作用等因素的影响,沉积物中的重金属又能被重新释放到水体中,在适当条件下又可被再次吸附、沉淀,以此循环反复,对水环境质量和生态系统构成了潜在的威胁^[5-8]。因此,水系沉积物中重金属含量及其分布特征作为评估水系沉积物重金属污染和水环境质量的重要指标,被广泛运用于环境科学领域。

左江是珠江流域西江水系的主要支流之一,其上游发源于越南与广西交界的枯隆山,全长 539 km,总流域面积为 3.2 km²,其中 2.1 km²在中国境内,年径

流量约 174 亿立方米^[9-10]。左江由西南向东北斜贯崇左市江州区中部,是桂西南重要居民饮用水源和农业灌溉水源,其水质安全对广西社会稳定和经济发展具有十分重要的意义^[11-13]。近年来,随着经济活动显著增加和自然环境的恶化,开发旅游资源、过度放牧、砍伐灌丛、农业污水灌溉和交通运输等过程中所产生的重金属污染物被冲刷/排放入左江流域水体中,造成了不容忽视的重金属污染问题^[11,15]。然而,目前关于左江流域崇左段水体水环境地球化学特征的研究不足,尤其是针对流域内沉积物中重金属的分布特征及其污染状况等仍缺乏清晰的认识。

因此,本文以左江流域崇左段沉积物为研究对象,系统采集左江流域崇左段 27 个点位表层水系沉积物样品,分析测定了沉积物样品中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 重金属含量。探讨了左江流域崇左段水系沉积物中重金属含量的空间分布特征、重金属

收稿日期:2020-03-05;修回日期:2020-04-22

基金项目:国家自然科学基金项目资助(41867049)、广西自然科学基金项目(2016GXNSFBA380106)、北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室、广西地表过程与智能模拟重点实验室(南宁师范大学)联合开放基金(GTEU-KLOP-X1818)、广西崇左市江州区土地质量地球化学评价(桂国土资办〔2017〕123号)共同资助。

第一作者:陈彪(1982—),男,硕士,高级工程师,主要从事地质及地球化学研究工作。E-mail:120236379@qq.com

通信作者:吕璞良(1990—),男,博士,助理研究员,主要从事岩石地球化学研究。E-mail:lyupuliang@163.com

引文格式:陈彪,吕璞良,何显锦,等.左江流域崇左段沉积物重金属分布特征及生态风险[J].矿产与地质,2020,34(3):571-578.

污染程度和潜在生态风险,采用几种评价方法相结合的方式,准确、科学、综合的评价沉积物中重金属的污染特征及风险等级,旨在为左江流域水环境重金属污染防治提供理论参考^[16-17]。

1 材料和方法

1.1 样品的采集

样品于 2017 年 5 月采集,通过 GPS 定位采集左

江流域崇左段共计 27 个点位的表层水系沉积物(图 1)。采样选点主要考虑了汇入支流的影响和城镇对左江的影响,采集了主要支流汇入点、流经城镇入口和出口处等点位。表层沉积物样品用沉积物采样器采集,用自封袋封装后冷藏保存。

1.2 样品处理与测试

样品低温烘干后,除去非土壤杂质,研磨至 200 目。样品采用 X 射线荧光光谱法(XRF)测定 Cr、Pb、Zn;采用等离子体发射光谱法(ICP-OES)测定 Cu;采

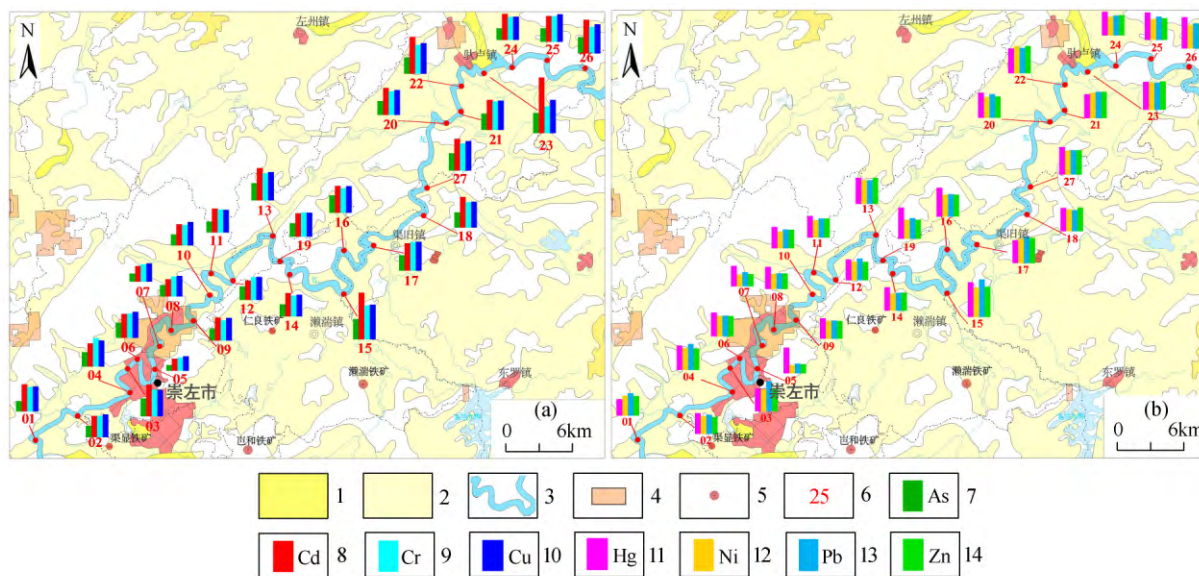


图 1 左江流域崇左段水系沉积物采样点分布与重金属 EF 值柱状分布示意图 (柱状图的高度代表 EF 值)

Fig.1 Distribution map of sedimentary sample sites and EF values of heavy metals in the Zuojiang River in Chongzuo region

(a) As、Cd、Cr、Cu 元素 EF 值 (b) Hg、Ni、Pb、Zn 元素 EF 值

1—水田 2—旱地 3—河流湖泊 4—重点企业区 5—矿产地 6—点号 7—As 元素
8—Cd 元素 9—Cr 元素 10—Cu 元素 11—Hg 元素 12—Ni 元素 13—Pb 元素 14—Zn 元素

用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定 Cd、Ni;采用原子荧光光谱法(AFS)测定 As、Hg;采用硫酸亚铁铵滴定测定总有机碳(TOC);采用凯氏定氮仪测定总氮(TN)^[18]。主要参考标准有《多目标区域地球化学调查规范(1:25万)》、《土地质量样品技术要求(DZ/T 0258-2014)》和《土地质量地球化学调查评估样品分析测试技术要求(试行)》等。

1.3 评价方法

1.3.1 地累积指数法

地累积指数法是评价水系沉积物中重金属富集程度的重要方法,能够直观地反映外源性重金属在沉积物中的富集程度^[19-20]。根据 I_{geo} 值 0~6 将污染程度划分为 7 级,对应的污染程度为无污染至严重污染(表 1)。

表 1 I_{geo} 等级划分与重金属污染程度

Table 1 I_{geo} classification and heavy metal pollution degree

I_{geo} 值	级数	污染程度
<0	0	无污染
0~1	1	轻度
1~2	2	偏中度
2~3	3	中度
3~4	4	偏重度
4~5	5	重度
5~6	6	严重

1.3.2 富集因子法

富集因子是定量评价沉积物污染程度的重要指标^[21-22]。富集因子对水系沉积物重金属污染等级划分法则列于表 2 中^[23]。由于左江流域崇左段水系沉

表 2 富集因子和污染等级

Table 2 The enrichment factor and pollution level

富集因子范围	富集程度	污染等级
$EF < 2$	无或低富集	无或低
$2 < EF < 5$	中度富集	中度
$5 < EF < 20$	偏高富集	偏高
$20 < EF < 40$	高富集	高
$EF > 40$	极高富集	极高

积物中 Fe 含量相对稳定(1.45%~4.40%),平均含量为 3.21%,与我国广西土壤中 Fe 平均含量相近(3.81%),

因此,本研究中选择 Fe 元素作为参比元素,所用背景值与地累积指数法所选背景值相同。

1.3.3 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法是瑞典学者 Hakanson 提出的一种评价沉积物中重金属生态风险的方法^[24]。本研究以我国广西土壤重金属元素背景值作为参比。前人研究报道了 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的生物毒性系数分别为 10、30、2、5、40、5、5 和 1^[25-27]。沉积物中重金属的生态风险指数(E_i^r 和 RI)和单个重金属生态风险等级与综合风险等级列于表 3 中。

表 3 生态风险评价指数与分级标准

Table 3 Ecological risk assessment index and classification standard

E_i^r 值范围	单项污染物生态风险等级	RI	综合潜在生态风险等级
$E_i^r < 40$	低	$RI < 150$	低
$40 \leq E_i^r < 80$	中	$150 \leq RI < 300$	中等
$80 \leq E_i^r < 160$	较重	$300 \leq RI < 600$	重
$160 \leq E_i^r < 320$	重	$600 \leq RI$	严重
$320 \leq E_i^r$	严重		

2 结果与讨论

2.1 左江流域崇左段沉积物重金属含量分布特征

左江流域崇左段水系沉积物重金属含量描述性统计结果列于表 4。结果表明:左江流域崇左段水系沉积物中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的平均含量分别为 14.46、0.49、66.64、23.65、0.19、27.20、26.86、79.83 mg/kg,与我国广西土壤平均含量^[28]相比,左江流域崇左段水系沉积物中 Cd、Hg、Ni、Pb、Zn 的平均含量相对较高,As、Cr 和 Cu 平均含量都较低;与国家土壤环境质量二级标准《土壤环境质量农用地土

壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018))相比($pH > 7.5$),左江流域崇左段水系沉积物中这几种元素含量均较低,在 27 个取样点中,发现有 3 个取样点 Cd 超标,超标样品含量分别为 0.654mg/kg、0.986mg/kg 和 0.830mg/kg,超标样品百分比为 11.1%,另外,发现有 2 个取样点 As 元素含量稍微高于临界值,含量分别为 20.7mg/kg 和 20.9mg/kg,其他元素的所有取样点均未超标。除 Hg 外,其余元素的变异系数均介于 16%和 36%之间,根据 Wilding 对变异系数的分类法则^[29],均属于中等变异,说明左江流域崇左段沉积物中重金属的空间分布较不均匀,空间离散性中等。

表 4 沉积物中重金属含量描述性统计

Table 4 Statistical table of heavy metal contents in sedimentary samples

元素	最小值 /(mg/kg)	最大值 /(mg/kg)	平均值 /(mg/kg)	标准差 /(mg/kg)	变异系数 /%	超标率 /%	广西土壤背景值 /(mg/kg)	国家土壤质量二级标准 /(mg/kg)
As	6.01	20.90	14.46	3.50	24.2	0	20.5	20
Cd	0.21	0.99	0.49	0.16	32.7	11.1	0.267	0.6
Cr	36.20	93.20	66.64	11.35	17.0	0	82.1	250
Cu	13.40	32.20	23.65	4.03	17.0	0	27.8	100
Hg	0.13	0.26	0.19	0.03	15.9	0	0.152	1.0
Ni	11.3	38.8	27.20	6.10	22.4	0	26.6	190
Pb	11.8	45	26.86	6.38	23.8	0	24	170
Zn	35.3	114	79.83	17.85	22.4	0	75.6	300

注:国家土壤质量二级标准中取最严格的临界值,pH 值范围为 7.72~8.64。

左江流域崇左段水系沉积物中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的含量空间变化见图 2。左江流域崇左段水系沉积物 Cu、Zn、Ni、Pb、Hg 和 Cr 含量从上游至下游较稳定,随着地形变化和水流缓急而有小的波动。Cd 含量在 15 点位、22 点位和 23 点位有显著升高且超过国家二级标准值,在其他区域有波动但并未超标。可能由于 15 点位处于河流弯道处,水流

变缓而导致更多水中的 Cd 沉降、吸附固定在水系沉积物中。22 和 23 点位临近城镇生活区和农业灌溉区,另外,23 点附近支流口的上游有重点企业,可能受到污染物排放的影响。As 除了 15、22 和 23 点位升高之外,在 3 和 6 号点位也都出现了小高峰,主要是因为这两个点位均位于崇左市区内,受到人类生产活动影响相对较大。

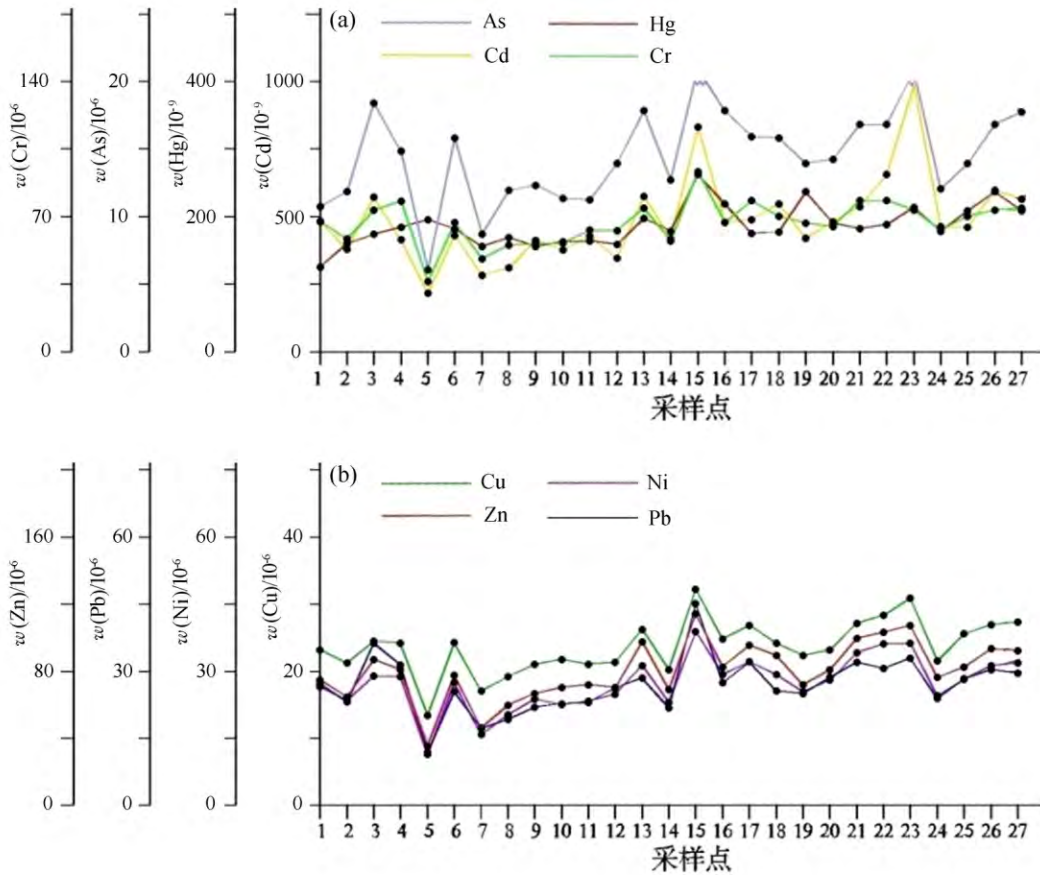


图 2 左江流域崇左段水系沉积物重金属含量空间分布图

Fig.2 Distribution diagram of heavy metal content in stream sediment of the Zuojiang River in Chongzuo region

2.2 左江流域崇左段沉积物中重金属污染程度评价

2.2.1 地累积指数法

本研究采用我国广西土壤重金属平均含量作为参比值,计算得到的 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的平均地累积指数分别为 -1.14(-2.35~-0.56)、0.21(-0.90~1.30)、-0.91(-1.77~-0.40)、-0.84(-1.64~-0.37)、-0.31(-0.87~0.20)、-0.59(-1.82~-0.04)、-0.46(-1.61~0.32)和 -0.55(-1.68~0.01)(图 3)。左江流域崇左段水系沉积物中主要表现为 Cd 重金属元素的污染,有 77.8%(21 个点位)的采样点位的地累积指数污染程度表现为轻度污染;而 Hg、Pb 和 Zn 在大多数点位(>88%)中地累积指数

均小于 0,仅分别有 11.1%(3 个点位)、7.4%(2 个点位)和 3.7%(1 个点位)的位点的 I_{geo} 值介于 0~1 之间;此外,As、Cr、Cu 和 Ni 元素的地累积指数均小于 0,表明左江流域崇左段水系沉积物中 As、Cr、Cu 和 Ni 几种元素的污染程度较低。

2.2.2 富集因子法

结果显示(图 4 和图 1),左江流域崇左段水系沉积物主要表现为重金属 Cd 的中度富集,富集因子大于 2 的点位为 1、3、4、6、9、11、13、14、15、16、17、18、19、20、21、22、23、24、25、26 和 27 共计 21 个点位,占所有 27 个位点的比例为 77.8%。部分点位出现 Hg(仅 3 点位)、Pb(仅 2 点位)和 Zn(仅 1 点位)的中

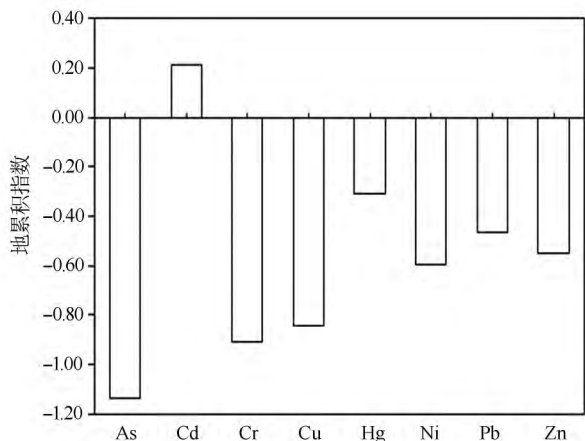


图 3 左江流域崇左段水系沉积物重金属元素的平均地累积指数

Fig.3 The average values of I_{geo} of heavy metals in stream sediment of the Zuojiang River in Chongzuo region

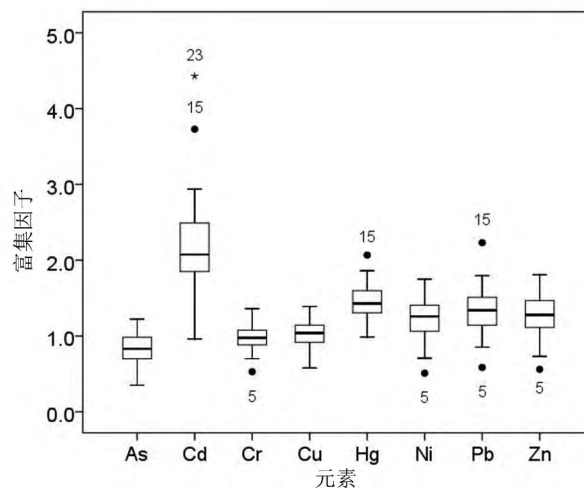


图 4 左江流域崇左段水系沉积物中元素富集因子箱状图

Fig.4 Whisker-box plot for the EF values of heavy metals in stream sediment of Zuojiang River in Chongzuo region

度富集。对于其他元素,所有点位的富集因子均低于 2,没有出现富集现象。这些信息表明,左江流域崇左段水系沉积物受到 Cd 的污染,个别点位存在 Hg、Pb 和 Zn 的污染。左江流域崇左段水系沉积物重金属富集因子法所得结果与地累积指数法所得结果相似。

2.2.3 潜在生态风险指数法

左江流域崇左段水系沉积物重金属潜在生态风险指数计算结果列于表 5 中。结果表明:左江流域崇左段水系沉积物中潜在生态风险指数 E_i^p 最高的为 Cd,其 E_i^p 平均值为 54.59(范围为 24.04~110.79),其

中有 15($E_i^p=93.26$)和 23($E_i^p=110.79$)两个点位 E_i^p 值高于 80,属于较重生态风险等级,5、7、8 和 12 四个点位 E_i^p 值均低于 40,属于低生态风险等级,其他点位的 E_i^p 值均介于 40 和 80 之间,属于中等生态风险等级。其次为 Hg, E_i^p 平均值为 48.96,除了 1 点位($E_i^p=32.89$)低于 40 外,其余均高于 40,属于中等生态风险等级。而 As、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 所有点位的 E_i^p 值均低于 40,都为低生态风险等级。各金属潜在生态风险指数高低顺序依次为 Cd > Hg > As > Pb > Ni > Cu > Cr > Zn。

表 5 左江流域崇左段水系沉积物中重金属潜在生态风险评价结果
Table 5 Potential ecology risk assessment result of heavy metals in stream sediment of Zuojiang River in Chongzuo region

元素	重金属潜在生态风险指数(E_i^p)		
	含量范围/(mg/kg)	平均值	贡献率/%
As	2.93~10.20	7.06	5.10
Cd	24.04~110.79 $\mu\text{g}/\text{kg}$	54.59	39.80
Cr	0.88~2.27	1.62	1.20
Cu	2.41~5.79	4.25	3.10
Hg	32.89~68.95 $\mu\text{g}/\text{kg}$	48.96	35.70
Ni	2.12~7.29	5.11	3.70
Pb	2.46~9.38	5.6	4.10
Zn	0.47~1.51	1.06	0.80
综合指数 RI 值	86.63~199.31	128.24	100

左江流域崇左段水系沉积物重金属综合潜在生态风险指数 RI 值表明,本研究中所有采样点位中,低级生态风险的样点占 85.2%,中等生态风险的样点占 14.8%。其中,中等生态风险的样点主要集中在河流

弯道处(15,26),居民生活区和农业灌溉区(22,23)。左江流域崇左段水系沉积物各重金属生态风险指数平均为 128.2,小于 150,表明左江流域崇左段水系属于低生态危害范畴,8 种金属中仅 Cd 和 Hg 的生态风

险指数超过了40,属中等潜在生态风险,其余6种重金属As、Cr、Cu、Ni、Pb和Zn均属于低风险等级。总体而言,左江流域水系沉积物以Cd、Hg的生态风险最为突出,原因一方面是由于Cd、Hg的毒性系数数值较高,另一方面由于受流域附近的农业污水灌溉,居民生活交通等污染物排入的影响。因此,今后对左江流域崇左段水系进行重金属治理时,着重考虑针对Cd、Hg元素的治理^[30-31]。

2.3 左江流域崇左段沉积物中的重金属污染源识别

PCA分析广泛应用于重金属的溯源研究。由表6可见,前两个主成分PC1和PC2的方差分别占据总方差的84.21%和8.83%,累积方差达到93.04%。其中As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb和Zn在第一主成分占有较高载荷,Hg在第二主成分占有较高载荷。

表6 左江流域崇左段水系沉积物中

As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb和Zn含量主成分分析(PCA)

Table 6 Principal component analysis (PCA) of heavy metal (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn) contents in stream sediment of Zuojiang River in Chongzuo region

元素	主成分	
	PC1	PC2
As	0.950	0.042
Cd	0.900	0.023
Cr	0.948	-0.142
Cu	0.985	-0.066
Hg	0.594	0.799
Ni	0.981	-0.124
Pb	0.938	-0.109
Zn	0.980	-0.113

表7列出了左江流域崇左段水系沉积物重金属、

有机质、总氮间的Pearson相关系数。由表7可知,沉积物中各金属元素含量均与有机质含量呈显著的正相关性。这主要是由于有机质中的腐殖质属高分子化合物,具有较高的表面活性,可通过表面吸附、络合作用及螯合反应等将重金属吸附于颗粒沉积物中^[32]。Cd、As、Cr、Cu、Ni、Pb和Zn金属相互之间具有极显著的正相关,说明这7种元素地球化学性质相似,来源相近;相比较而言,Hg对有机质和各金属的相关性较低,呈中等程度相关,说明Hg有不同于其他元素的来源。

PCA分析和Pearson相关性分析结果表明,Cd、As、Cr、Cu、Ni、Pb和Zn具有同源性。这些元素发生污染及潜在污染点位主要集中居民生活区下游河段,表明这些元素主要来源是交通污染以及城市生活废水排放^[33-34]。Hg相对其他元素而言明显不同,与其他元素相关性较低,和其他元素来源也有所差别,主要来源于农业灌溉区化肥及农药污染^[35-36]。

3 结论

1)与我国广西土壤平均含量相比,左江流域崇左段水系沉积物中Cd、Hg、Ni、Pb、Zn的平均含量相对较高,As、Cr和Cu平均含量都较低,与我国土壤质量二级标准相比,左江流域崇左段水系沉积物中这几种重金属含量均较低,总体而言,左江流域崇左段水系总体环境状况良好。从重金属的空间分布来看,左江流域崇左段水系沉积物中Cu、Zn、Ni、Pb、Hg和Cr含量从上游至下游分布较稳定,Cd、Hg和As含量在河流弯道处及临近城镇生活区和重点企业区出现显著升高。

表7 左江流域崇左段水系沉积物重金属与有机质的相关系数

Table 7 Correlation coefficients between heavy metals and organic matter in stream sediment of Zuojiang River in Chongzuo region

	TOC	TN	Cd	Hg	As	Cr	Cu	Ni	Pb
TN	0.967**	1							
Cd	0.867**	0.885**	1						
Hg	0.432*	0.467*	0.523**	1					
As	0.814**	0.858**	0.844**	0.583**	1				
Cr	0.796**	0.847**	0.756**	0.472*	0.865**	1			
Cu	0.875**	0.922**	0.891**	0.532**	0.919**	0.934**	1		
Ni	0.866**	0.924**	0.865**	0.486*	0.922**	0.949**	0.984**	1	
Pb	0.837**	0.853**	0.790**	0.483*	0.869**	0.946**	0.906**	0.907**	1
Zn	0.872**	0.935**	0.882**	0.492**	0.918**	0.939**	0.977**	0.987**	0.896**

1) *表示显著性相关(显著性水平 $P < 0.05$), **表示极显著相关(显著性水平 $P < 0.01$)。

2)左江流域崇左段水系沉积物中有77.8%的采样点位的累积指数大于0小于1,富集因子 >2 ,主要表现为Cd重金属元素的污染,个别点位存在Hg、Pb和Zn的污染,其他元素的污染程度较低。

3)左江流域崇左段水系沉积物重金属潜在生态风险指数RI平均为128.24,小于150,总体属于低潜在生态风险范畴。8种重金属中,Ni、Pb、Zn、As、Cr和Cu均属于低生态风险等级,Cd和Hg的平均值分别为54.59和48.96,属中等生态风险等级,重金属潜在生态风险指数的排序为 $Cd > Hg > As > Pb > Ni > Cu > Cr > Zn$,表明左江流域崇左段水系沉积物中Cd、Hg的潜在生态风险最高。

4)Cd、As、Cr、Cu、Ni、Pb和Zn金属相互之间及其与有机质之间呈极显著的正相关,表明本区域重金属具有基本相似的来源,主要来源是下游污染点位附近交通污染以及城市生活废水排放,且沉积物中的有机质(TOC、TN)的存在是影响重金属分布与富集的重要因素。Hg对各金属和有机质的相关性较低,表明Hg和其他元素来源也有所差别,主要来源于农业灌溉区化肥及农药污染。

参考文献:

- [1] KAUSHIK A, KANSAL A, SANTOSH, et al. Heavy metal contamination of river Yamuna, Haryana, India: assessment by metal enrichment factor of the sediments[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 164(1): 265-270.
- [2] 郑江鹏, 矫新明, 方南娟, 等. 江苏近岸海域沉积物重金属来源及风险评价[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(4): 1514-1522.
- [3] 王岚, 王亚平, 许春雪, 等. 长江水系表层沉积物重金属污染特征及生态风险性评价[J]. *环境科学*, 2012, 33(8): 2599-2606.
- [4] SUN W M, XIAO E Z, DONG Y R, et al. Profiling microbial community in a watershed heavily contaminated by an active antimony (Sb) mine in Southwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 550: 297-308.
- [5] LAFABRIE C, PERGENT G, KANTIN R, et al. Trace metals assessment in water, sediment, mussel and seagrass species-Validation of the use of *Posidonia oceanica* as a metal biomonitor [J]. *Chemosphere*, 2007, 68(11): 2033-2039.
- [6] 王毅, 王少鹏, 王英辉, 等. 防城港近岸海域及河口溶解态重金属污染特征[J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2018, 43(5): 2069-2078.
- [7] ZHANG L, LIAO Q J H, SHAO S G, et al. Heavy metal pollution, fractionation, and potential ecological risks in sediments from Lake Chaohu (Eastern China) and the surrounding rivers [J]. *International journal of environmental research and public health*, 2015, 12(11): 14115-14131.
- [8] BERMEJO C S J, BELTRAN R, ARIZA L G J, et al. Spatial variations of heavy metals contamination in sediments from Odiel river (Southwest Spain)[J]. *Environment International*, 2003, 29(1): 69-77.
- [9] 李川琳, 黄琳. 左江流域水文特性分析[J]. *广西水利水电*, 2015(4): 52-55.
- [10] 卢远, 苏文静, 华璀. 基于景观格局和生态敏感性的左江流域生态脆弱性分析[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(3): 78-82, 87.
- [11] 黄杰彦, 牟永红. 广西左江流域生态经济环境特征及其开发策略[J]. *沿海企业与科技*, 2007(3): 124-126.
- [12] 韦太焕, 黄孟善, 黄洪光, 等. 2009—2011年崇左市农村生活饮用水监测分析[J]. *应用预防医学*, 2013, 19(6): 372-374.
- [13] 苏友华. 崇左市突发性水污染事件应急调水分析[J]. *企业科技与发展*, 2011(20): 115-117.
- [14] 覃玲玲. 以崇左市为例的区域自然资源承载力研究[J]. *湖北农业科学*, 2011, 50(16): 3451-3456.
- [15] 周婵, 吴曼菲, 钟广智, 等. 2016年广西左江流域水环境主要污染状况的分析及评价[J]. *轻工科技*, 2018, 34(2): 87-89.
- [16] KUMAR R N, SOLANKI R, KUMAR J I N. Seasonal variation in heavy metal contamination in water and sediments of river Sabarmati and Kharicut canal at Ahmedabad, Gujarat [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(1): 359-368.
- [17] AKBAL F, GÜREL L, BAHADT, et al. Multivariate statistical techniques for the assessment of surface water quality at the mid-black sea coast of Turkey [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2011, 216(1-4): 21-37.
- [18] BEDNAR A J, JONES W T, CHAPPELL M A, et al. A modified acid digestion procedure for extraction of tungsten from soil [J]. *Talanta*, 2009, 80(3): 1257-1263.
- [19] MÜLLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. *Geojournal*, 1969, 2(3): 108-118.
- [20] 迟清华. 应用地球化学元素丰度数据手册[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- [21] LIU Y Z, XIAO T F, NING Z P, et al. High cadmium concentration in soil in the Three Gorges region: geogenic source and potential bioavailability [J]. *Applied Geochemistry*, 2013, 37: 149-156.
- [22] CHEN J B, GAILLARDET J, BOUCHEZ J, et al. Anthropophilic elements in river sediments: overview from the Seine River, France [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems: G3*, 2014, 15(11): 4526-4546.
- [23] SUTHERLAND R A. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii [J]. *Environmental Geology*, 2000, 39(6): 611-627.
- [24] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [25] SARAEE K R E, ABDI M R, NAGHAVI K, et al. Distribution of heavy metals in surface sediments from the South China Sea ecosystem, Malaysia [J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2011, 183(1-4): 545-554.
- [26] 宁增平, 肖青相, 蓝小龙, 等. 都柳江水系沉积物镉等重金属空间分布特征及生态风险[J]. *环境科学*, 2017, 38(7): 2784-2792.
- [27] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 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, 148(2): 112-115.
- [28] 国家环境保护局. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科

- 学出版社,1990.
- [29] WILDING L. Spatial variability; its documentation, accommodation, and implication to soil surveys [M] // NIELSEN D R, BOUMA J. Soil Spatial Variability. Pudoc: Wageningen, 1985: 166-194.
- [30] 李波,喻庆国,危锋,等. 滇西北剑湖表层沉积物重金属分布特征和生态风险[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(4): 468-473.
- [31] 徐东海,万太平,乌日根. 黑龙江铁力卫林地区水系沉积物地球化学特征及找矿方向[J]. 矿产与地质, 2019, 33(5): 879-884.
- [32] BORG H, JONSSON P. Large-scale metal distribution in Baltic Sea sediments [J]. Marine Pollution Bulletin, 1996, 32(1): 8-21.
- [33] 张军,胡方洁,卢陈彬,等. 稀土矿区土壤重金属污染控制研究的几点建议[J]. 应用化工, 2018, 47(6): 1254-1257, 1262.
- [34] 王友生,侯晓龙,吴鹏飞,等. 长汀稀土矿废弃地土壤重金属污染特征及其评价[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(4): 259-262.
- [35] 刘琰,续衍雪,郑丙辉,等. 清溪河许昌段表层沉积物污染评价[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(2): 5-10.
- [36] 张杰,郭西亚,曾野,等. 太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估[J]. 环境科学, 2019, 40(5): 185(1): 2202-2210.

Spatial distribution characteristics and ecological risk of heavy metals in stream sediment of the Zuojiang River

CHEN Biao¹, LYU Puliang², HE Xianjin², LIU Fang³

(1. Guangxi Institute of Geological Survey, Nanning 530023, Guangxi, China;

2. Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf/Key Laboratory of Earth Surface Processes and Intelligent Simulation, Nanning Normal University, Nanning 530001, Guangxi, China;

3. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract: In order to investigate the distribution characteristics of heavy metals in the stream sediment from Zuojiang River in Chongzuo region, 27 samples of the surface stream sediment are collected. The organic matter (TOC, TN) and heavy metal (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn) contents of the samples are analyzed. The result shows that the spatial divergence of heavy metals is moderate and in a relatively low pollution state. There is mainly the heavy metal pollution of Cd element. Hg, Pb and Zn pollution occurs near the industrial zone. Cd and Hg show potential ecology risk of moderate level. Cd, As, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn metals have a very significant positive correlation with the organic matter, the sources are basically similar in the region. The main sources are traffic pollution and urban domestic wastewater discharge, and the organic matter is an important factor to impact the distribution and enrichment of heavy metals. Hg has a low correlation with metals and organic matter, indicating that the source of Hg is different from other components. Hg is mainly from the fertilizer and pesticide pollution in agricultural irrigation area.

Keywords: heavy metal, sediment, source, spatial distribution characteristics, ecological risk, Zuojiang River