

doi: 10.11720/wtyht.2020.1210

钟晓宇,吴天生,李杰,等.柳江流域沉积物重金属生态风险评价及来源分析[J].物探与化探,2020,44(1):191-198.http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1210

Zhong X Y, Wu T S, Li J, et al. Ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in sediments of Liujiang River Catchment[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(1): 191-198. http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1210

# 柳江流域沉积物重金属生态风险评价 及来源分析

钟晓宇<sup>1</sup>, 吴天生<sup>1</sup>, 李杰<sup>1</sup>, 郑国东<sup>1</sup>, 卓小雄<sup>1</sup>, 关东超<sup>2</sup>, 王磊<sup>3</sup>, 莫斌吉<sup>4</sup>

(1.广西壮族自治区地质调查院, 广西南宁 530023; 2.广西壮族自治区地质矿产测试研究中心, 广西南宁 530023; 3.广西壮族自治区第四地质队, 广西南宁 530031; 4.广西壮族自治区区域地质调查研究院, 广西桂林 541003)

**摘要:**以柳江中下游流域沉积物为研究对象, 采集 91 件水系沉积物样品, 计算并分析 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 等元素地球化学参数特征, 对当前污染现状及潜在风险进行预测评价, 并解析重金属元素来源。结果显示: 柳江流域重金属元素含量分布表现出较强的地域特征; 柳江流域污染等级以轻度及偏中度为主, 潜在生态风险等级为中低等级, 主要影响因子为 Cd; As、Cr、Cu、Hg、Ni 来源以自然源为主, Cd、Pb 以人为源为主, 其中 Cd 自然源贡献率高值区主要分布于龙江流域, 工矿业源贡献率高值区主要分布于金城江周边以及柳江柳州市区段。

**关键词:** 柳江流域; 沉积物; 重金属污染; 生态风险; 来源分析

**中图分类号:** P632

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8918(2020)01-0191-09

## 0 引言

经济的发展造成大量重金属污染物质通过各种途径排入水体, 使水体中的重金属在物理沉淀、化学吸附等作用下沉积到河床底部<sup>[1]</sup>, 从而影响水生生物生产发育, 造成水生生态系统退化<sup>[2]</sup>, 当外界环境改变时, 还有可能重新释放进入水体形成二次污染<sup>[3]</sup>。因此河流沉积物重金属污染研究一直受到中外学者的普遍关注<sup>[4]</sup>。

柳江属中国珠江水系西江干流第二大支流, 全长 773.3 km, 流域面积 5.7 万 km<sup>2</sup>, 水力资源丰富, 不仅为周边区域人类生活、农业灌溉及工业用水来源, 亦是黔桂水上交通要道。该区域人口稠密, 工农产业发达, 坐落有区内重要的综合性工业基地, 亦是广西主要经济及粮食作物产地<sup>[5]</sup>。为查明柳江流域目前污染状况, 笔者通过对柳江流域沉积物元素含

量地球化学特征分析研究, 评价污染现状, 预测潜在风险, 并开展重金属来源解析, 为今后合理开发利用水资源及制定污染防治措施提供依据。

## 1 研究区概况

研究区地处柳江中下游河段, (部分) 涵盖柳州市、来宾市等 4 市 6 县。柳江干流中段称为融江, 流经都安、柳城等县, 河道相对较窄, 滩多流急; 下游段俗称柳江, 流经柳州市、象州县, 水势平缓, 河曲较发育, 水系多呈树枝状, 大部分属喀斯特地貌, 沿河阶地、丘陵广布。下文分别用融江及柳江代指柳江水系干流中、下游河段。支流则包括金城江、龙江、洛清江、罗秀河。整个柳江水系地表径流大体顺地势自西北向东南, 横贯整个区域, 大小支流主要从两侧汇入。

**收稿日期:** 2019-04-11; **修回日期:** 2019-07-18

**基金项目:** 中国地质调查局项目“广西桂中-桂东北重要农业区土地质量地球化学调查”(DD20160327-03)

**作者简介:** 钟晓宇(1983-), 男, 广西南宁人, 硕士, 工程师, 主要从事地球化学研究工作。Email: walkofmelody@163.com

**通讯作者:** 李杰(1983-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事生态地球化学和勘查地球化学应用研究工作。Email: 187292565@qq.com

2 样品采集及分析测定

2018 年 6~10 月,使用抓斗式取样器均匀采集柳江流域水底 0~20 cm 沉积物共 91 件(图 1),采集样品原始质量约 3 000 g,样品在室温下自然风干并剔除其中的水草、贝壳、生物碎屑等杂质,物理敲打破碎过 20 目尼龙筛后装入自封袋送至实验室。

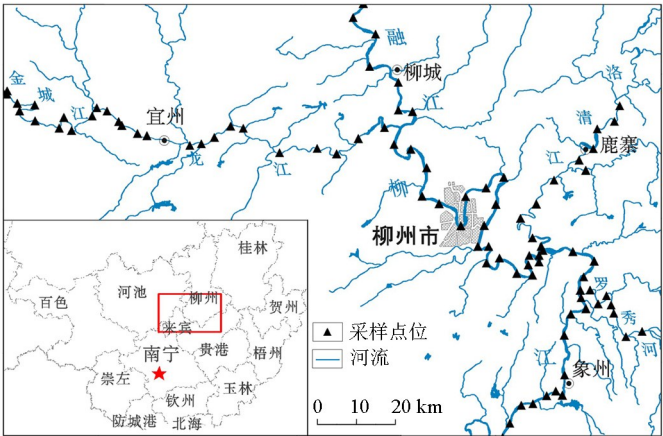


图 1 柳江流域沉积物采样点位置

Fig.1 The location of Liujiang Rriver and the distribution of sampling points

3 研究方法

3.1 地累积指数法

采用地累积指数法  $I_{geo}$  (index of geoaccumulation) 进行评价,该方法由德国学者 Müller 和 Suess 于 1979 年提出<sup>[6]</sup>,主要用于研究沉积物重金属污染程度。该评价法能够兼顾重金属元素的自然分布特征和人类活动的影响<sup>[7-8]</sup>。计算式为:

$$I_{geo} = \log_2 [C_n / (k \times B_n)]。$$

式中: $C_n$  为沉积物中元素含量; $B_n$  为背景浓度,采用研究区表层土壤地球化学背景值作为参比值; $k$  为修正系数,一般为 1.5。土壤中重金属含量分级见表 1。综合污染程度  $I_{geo}$  为取各元素污染最大值。计算式为: $I_{geo} = \text{Max}(I_{geo})。$

表 1 地累积指数与污染程度分级

Table 1 The relation between the $I_{geo}$ and exccesed standard of heavy metal							
污染程度	无	轻度	偏中度	中度	偏重度	重度	严重
$I_{geo}$	$\leq 0$	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	>5
级别	0	1	2	3	4	5	6

表 2 广西中部地区土壤基准值

Table 2 Reference value of heavy metals in middle part of Guangxi surface soil								
元素	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
背景值/ $10^{-6}$	24.17	459	106	30.9	203.8	45.65	33	117

分析测试方法如下:使用 X 射线荧光光谱法(XRF)测定 Cr、Pb、Zn、P、S、 $Al_2O_3$ 、CaO、 $Fe_2O_3$ ,使用原子荧光法(AFS)测定 As 及 Hg,使用全谱直读等离子体光谱法(ICP-OES)测定 Cu、Mn、Ni、Cd、Corg 则分别用石墨炉原子吸收光谱法(GFAAS)以及容量法(VOL)测定。结果显示,以上分析方法的检出限、检出合格率均满足或优于《多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)》(DZ/T 0258-2014)的要求。

3.2 潜在污染预测

潜在生态危害指数于 20 世纪 80 年代由瑞典学者 Lars Hakanson 提出<sup>[9]</sup>,以定量的方法划分重金属潜在危害的程度,能够将污染物浓度与生物毒性、生态危害有机的结合起来,综合反映重金属对生态环境的影响潜力<sup>[10]</sup>。

单因子潜在生态风险系数(the potential ecological risk index)计算公式为:

$$E_r^i = T_r^i \times C_d^i / C_n^i。$$

式中: $T_r^i$  为重金属的毒性响应系数(the toxic response factor),响应因子值分别为 Hg(40)>Cd(30)>As(10)>Pb= Ni=Cu(5)>Cr(2)>Zn(1); $C_d^i$  为沉积物重金属元素含量; $C_n^i$  为对比值,采用广西中部地区深层土壤地球化学基准值,具体数值见表 2。

表 3 重金属潜在生态风险指数分级标准

Table 3 Pollution grade for the single heavymetal and potential ecological risk index

单因子潜在风险系数	单因子风险等级	潜在生态危害指数 RI	多因子风险等级
<40	低	<150	低
40~80	中	150~300	中
80~160	较高	300~600	较高
160~320	高	>600	极高
≥320	极高	>600	极高

多因子潜在生态危害指数 RI (the potential ecological risk index) 计算公式为

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i$$

重金属潜在风险系数及潜在生态危害指数分级标准见表 3。

3.3 绝对主成分分析—多元线性回归模型 (APCA-MLR)

该理论首先由 Thurston 和 Spengler 在 1985 年提出<sup>[11]</sup>,能够定量确定各污染源的污染贡献率。该方法最开始主要用于大气污染物的来源解析<sup>[12-13]</sup>,对水体、沉积物中重金属(有机质)来源解析也应用较广<sup>[14-16]</sup>,它不但可以定量确定每个变量对每个源的载荷,还可以定量确定源对其重金属的平均贡献量和在每个采样点的贡献量。计算过程为:对所有重金属元素含量进行标准化,经主成分分析后求出归一后的各样本的因子分数,引入 0 浓度样本,计算出 0 浓度样本的因子分数,归一后的各样本因子分数减去 0 浓度样本的因子分数得到每个重金属元素的绝对主成分因子,用重金属浓度数据对绝对主成分因子做多元线性回归,得到的回归系数可将绝对主成分因子转化为每个污染源对每个样本的浓度贡献:

$$C_i = b_{0i} + \sum_{p=1}^n (APCS_p \cdot b_{pi})。$$

式中: $b_{0i}$ 为对金属元素  $i$  做多元线性回归所得的常数项; $b_{pi}$ 是源  $p$  对重金属元素  $i$  的回归系数; $APCS_p$ 为调整后的因子  $p$  的分数; $APCS_p \cdot b_{pi}$ 表示源  $p$  对  $C_i$  的质量浓度贡献;所有样本的  $APCS_p \cdot b_{pi}$  平均值即为源平均绝对贡献量。

表 4 柳江流域沉积物元素参数统计

Table 4 Contents of heavy metals in sediments of Liujiang Rriver Catchment

参数	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	Mn	P	S	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Corg
最小值	2.2	0.06	23.4	6.6	0.016	8.5	6.3	19.1	75.4	154	92	3.55	1.45	0.07	0.15
平均值	17.6	1.04	53.7	21.6	0.12	22.5	32.7	112	688	422	262	9.79	3.77	0.58	0.68
最大值	45.8	6.86	89.1	52	0.474	38.9	169	503	1275	2173	2129	17.1	6.59	3.94	2.5
变异系数	0.49	0.91	0.26	0.39	0.61	0.34	0.8	0.69	0.42	0.5	0.83	0.34	0.27	0.97	0.63

注:Corg 及氧化物含量单位为%,其他元素含量单位为 10<sup>-6</sup>

4 结果与分析

4.1 地球化学参数特征

柳江沉积物元素特征值统计见表 4。结果显示,元素的变异系数均小于 0.1,大于 0.1,属中等变异,离散程度较大<sup>[17]</sup>,其中 CaO 含量变异值最高,为 0.97,最低 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 变异系数为 0.27。整体上看,金属元素的变异系数区间为 0.26~0.91,非金属元素的变异系数区间为 0.09~0.97,两者区别不明显。元素含量主要受成土母质,即碳酸盐岩及碎屑岩分布差异的影响,数值分布具有一定的连续性,离散数值样点较少。

柳江不同河段沉积物重金属元素含量相比,Cr、Cu、Ni 含量相差不大,As、Cd、Hg、Pb、Pb 则差异明显,且分布具有典型的地域特征。金城江 Cd、Hg、Pb、Zn 含量明显高于其他水系,均值分别为 4.07×10<sup>-6</sup>、0.296×10<sup>-6</sup>、112×10<sup>-6</sup>、316×10<sup>-6</sup>;As 高含量区域分布于融江流域,平均含量为 35.5×10<sup>-6</sup>,为柳江流域平均值的 1.9 倍;重金属元素的低含量区则集中于罗秀河、洛清江流域,仅为柳江流域平均值的 20%~98%。不同水系重金属元素含量详见图 2。

4.2 污染现状

柳江流域环境质量良好,综合污染等级以轻度及偏中度为主,占比分别为 31.87%、32.97%。主要影响因子为 Cd, $I_{geo}$  范围为-3.5~3.3,平均为 0.6;其余元素  $I_{geo}$  均小于 0,其中 Cr、Ni 无污染。总体上,80%的水系沉积物样品中 As、Cu、Hg、Pb、Zn 无污染。不同河段污染现状相比,柳江支流水系污染现状呈现两极分化;洛清江及罗秀河底积物最为清洁,

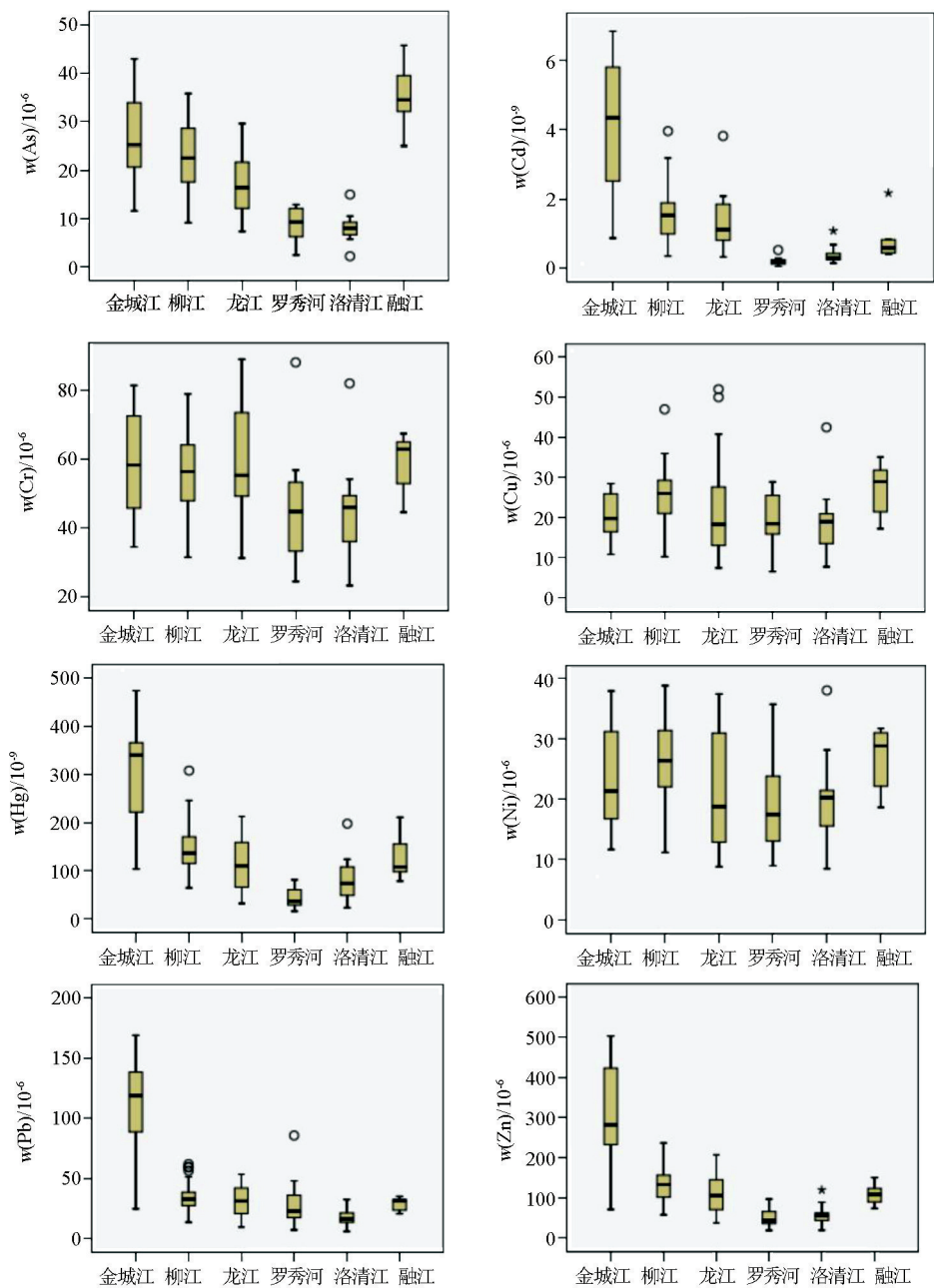


图 2 不同河段重金属元素含量差异对比

Fig.2 Comparison of heavy metal elements contents in different reaches

无污染等级样点分别占 85.71%及 90%;金城江沉积物污染程度最大,中度及以上污染等级样点占比 63.64%。不同河段沉积物重金属元素地累积指数见表 5。

4.3 风险预测

柳江潜在生态风险等级为中低等级,其中单元素 Cd 潜在风险系数均值为 101,整体属于较高风险等级,较高风险等级占比 35.16%,中等风险等级占比 27.47%。As、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 潜在风险系数值均小于 40,除 Hg 有少量中—较高风险等级区域

分布外,其余元素皆为属低生态风险等级。各重金属的生态风险等级整体排序为 Cd>Hg>As>Pb>Cu>Ni>Zn>Cr。

融江、柳江、金城江、龙江、罗秀河、洛清江综合风险指数均值分别为 107、155、263、130、37.8、56.6。金城江流域属中等风险等级,明显高于其他水系,生态风险压力较大,主要受 Cd、Hg 因子的影响,采集的 11 个水系沉积物样点中,有 10 个样点综合生态风险等级处于中等以上。不同河段风险预测结果见表 6。



表 5 柳江各河段沉积物重金属元素地累积指数

Table 5  $I_{\text{geo}}$  index of heavy metals in sediments of Liujiang Rriver Catchment

河段	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
融江	-0.06	-0.02	-1.45	-0.83	-1.32	-1.40	-0.81	-0.73
柳江	-0.77	1.05	-1.51	-0.93	-1.14	-1.42	-0.62	-0.45
金城江	-0.51	2.33	-1.48	-1.24	-0.16	-1.65	1.04	0.68
龙江	-1.20	0.69	-1.48	-1.25	-1.60	-1.83	-0.78	-0.81
洛清江	-2.28	-1.01	-1.87	-1.35	-2.02	-1.84	-1.58	-1.70
罗秀河	-2.23	-2.00	-1.86	-1.38	-2.96	-1.95	-1.00	-1.92

表 6 柳江流域沉积物重金属元素潜在生态风险评价结果

Table 6 Ecological risk of heavy metals in sediments of Liujiang Rriver Catchment

河段	$E_r^i$								RI
	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	
金城江	11.23	266.33	1.12	3.31	58.15	2.58	16.95	2.70	362.37
柳江	9.31	102.90	1.07	4.10	28.83	2.89	5.15	1.16	155.41
龙江	7.02	87.52	1.12	3.71	22.51	2.35	4.87	0.97	130.07
罗秀河	3.63	13.88	0.89	3.17	8.83	2.13	4.87	0.45	37.84
洛清江	3.39	26.49	0.86	3.21	17.12	2.25	2.72	0.51	56.56
融江	14.69	53.26	1.11	4.35	25.38	2.91	4.36	0.93	106.99
平均	8.46	100.89	1.05	3.79	28.17	2.63	6.18	1.17	152.34

4.4 因子分析

分析前,应用 Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) 和 Bartlett 球形方法对水系沉积物数据进行相关矩阵检验,检验结果显示 Bartlett 显著性均小于 0.01,在 99%的置信区间内可靠,数据符合结构效度。

柳江水系沉积物元素可提取 3 个特征值大于 1 的主成分,提取方法采用主成分法,旋转方式为凯撒正态化等量最大法,累积贡献率为 83.769%,基本包含了 16 个变量的全部信息,特征值分析结果见表 7。

第一因子贡献率 55.85%,表征因子为 As、Cr、Cu、Ni、Mn、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,其中 Cr、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 属造岩元素;As、Cu、Ni、Mn、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为亲铜及亲铁元素,自然背景下,其含量变化主要取决于岩石侵蚀、风化、变

质等物理化学过程,特别是 Mn、Ni,在表生作用的土壤迁移转化过程中,能够保持良好、稳定的亲合性,元素含量差异性往往主要受土壤母质地质年代变化的影响,如 Mn 被认为是来自古生代和中生代等最古老的地质岩石中,Ni 来自于上新世松散沉积等地质区<sup>[18]</sup>。与广西桂中地区土壤基准值相比,沉积物中 As、Cr、Cu、Ni、Mn、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量均较低,富集系数仅为 0.49~0.73,属贫化状态。综上所述,第一因子主要为自然背景因子,反映地层时代、岩石矿物、地形地貌以及侵蚀风化作用等要素的影响。

第二因子由 Cd、Hg、F、Pb、Zn、Cao 组成,特征贡献率 20.58%。Cd、Hg、Pb、Zn 属重金属元素,元素含量分布与人类活动存在密切关系,高值点皆分布于金城江流域河池市下游段,受人类污水排放影响。

表 7 柳江流域沉积物元素含量主成分分析结果

Table 7 Results of PCA of heavy metal concentrations in sediments of Liujiang Rriver Catchment

公因子	方差贡献			元素	因子			元素	因子		
	特征值	贡献率	累积贡献率%		PC1	PC2	PC3		PC1	PC2	PC3
1	8.942	55.885	55.885	As	<u>0.64</u>	0.57	-0.16	Zn	0.30	<u>0.92</u>	0.14
2	3.293	20.584	76.469	Cd	0.17	<u>0.94</u>	0.02	P	0.46	0.01	<u>0.58</u>
3	1.168	7.301	83.769	Cr	<u>0.84</u>	0.31	0.31	S	-0.08	0.61	<u>0.67</u>
4	0.703	4.394	88.163	Cu	<u>0.90</u>	0.07	0.26	Mn	<u>0.86</u>	0.19	-0.12
5	0.574	3.585	91.748	Hg	0.25	<u>0.90</u>	0.13	Al2O3	<u>0.94</u>	0.05	0.14
6	0.337	2.107	93.855	F	0.25	<u>0.90</u>	0.13	Fe2O3	<u>0.90</u>	0.27	0.26
7	0.268	1.677	95.533	Ni	<u>0.92</u>	0.21	0.21	CaO	0.02	<u>0.70</u>	0.11
8	0.243	1.519	97.052	Pb	0.14	<u>0.86</u>	0.32	Corg	0.46	0.38	<u>0.74</u>

注:提取方法为主成份分析法;旋转法为具有 Kaiser 标准化的正交旋转法;旋转在 4 次迭代后收敛;下划线表示所占因子较大的元素,即某成份的主要组成元素

该区域矿产资源丰富,周边已探明的矿场有 54 个,矿点有 32 个,包括铅、锌、锑、锡等有色金属矿,沉积物元素含量与矿产开发“三废”排放存在一定关系。该河段沉积物重金属元素含量较高,其中 Cd 含量为  $1.04\times 10^{-6}$ ,为区域土壤地球化学基准值的 2.3 倍。前人研究认为,Zn 是工业活动的标识元素,其不但用于压铸合金(汽车、轻工业、机械行业)、电池业、印染业、橡胶业、化学工业等,还与其他合金金属广泛应用于电镀、喷涂等行业<sup>[19]</sup>。因此,综合分析认为第二因子应与人为因素有关,主要反映工矿产业对元素含量的影响。

第三因子贡献率为 7.3%,反映 P、S、Corg 的来源聚类信息,从其组成上看表现出较强的亲生物特性。研究发现 Corg、P 在一定程度能够反映农业活动的影响<sup>[20-22]</sup>,但是因子分析结果却表明 Corg 及 P 在第一因子载荷也较高,如 P 的特征值为 0.46,因

此综合来看该因子为复合因子,主要侧重于人类农业生产活动。

4.5 源解析

4.5.1 重金属元素污染来源识别

通过 APCS-MLR 模型线性拟合后得到各重金属来源的贡献比率、复相关系数  $R^2$  见表 8。结果显示,除 As 外,其余重金属元素的复相关系数均超过 0.8,模型与数据的拟合程度较好。估计值与实测值比(E/O)均接近于 1,多元线性回归的拟合度好,预测值与实测值误差较小。元素来源贡献率存在大于 100%或为负值的情况,如 As 和 Cd 的源 3 贡献率为 -0.14、-0.09,原因在于以各重金属浓度作为因变量,从 PCA 法得到的绝对主成分得分作为自变量进行多元线性回归时,当多元回归系数为负值时,常常导致计算出的贡献值为负值,表明元素该类型来源可忽略<sup>[23-25]</sup>。

表 8 柳江流域沉积物重金属不同来源贡献率  
Table 8 Source contribution ratios of heavy metal

元素来源	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
自然源	0.69	0.39	0.68	0.73	0.79	0.78	0.36	0.45
人为源	工矿业	0.14	0.44	0.07	0.07	0.04	0.52	0.33
	农业	-0.14	-0.09	0.09	0.03	0.03	0.01	0.07
不确定源	0.31	0.26	0.26	0.17	0.16	0.17		0.15
$R^2$	0.75	0.91	0.89	0.87	0.84	0.94	0.88	0.95

研究区不同元素自然源、人为源占比差异明显:As、Cr、Cu、Hg、Ni 以自然源为主,贡献率占比 68%~79%,人为源贡献均小于 20%,不确定源贡献率 15%~30%;Zn 人为源占比约为 40%,其中工矿业源占比 33%,农业源占比 7%,不确定源占比约 15%;Cd、Pb 主要以人为源为主,占比分别为 44%及 66%,可见柳江中 Cd 含量较大,人为因素起相当重要的作用。通过 APCS-MLR 模型定量分析重金属来源贡献率,其结果与主成分分析、聚类分析结果一致。

4.5.2 Cd 来源空间分布特征

根据前文污染现状评价及潜在风险评价结果,柳江水系中主要污染影响元素及生态风险元素皆为 Cd,其主要来源贡献率空间分布见图 3。

Cd 自然源贡献率高值区主要分布于龙江流域,融江流域柳城县周边分布面积亦较大,该区域属石炭系及二叠系石灰岩地区,侵蚀风化程度较大,成土母质风化为 Cd 的主要来源;低值区则分布于洛清江及罗秀河区域,丘陵地貌,成土母质多为泥盆系黏土岩,侵蚀风化程度较低,符合受河流冲积、地形地貌影响的结论。Cd 工矿业源贡献率高值区主要分布于金城江周边以及柳江柳州市区段,前者位于河

池市下游段,受周边矿山开采冶炼的影响较大,后者处于城市周边,与工业生产排放存在一定的相关性;低值区及低背景面积较广,分布区域人类活动均较弱。

5 结论

- 1) 研究区水系沉积物中各元素空间离散程度较大。重金属元素含量分布表现出较强的地域特征:高值区分布于金城江流域,低值区集中于罗秀河、洛清江流域。
- 2) 研究区水系沉积物污染等级以轻度及偏中度为主,Cd 为主要污染因子。潜在生态风险等级为中低等级,潜在风险因子主要为 Cd,其次为 Hg。金城江水系为柳江流域中应予以重点关注的河段。
- 3) 不同重金属元素其自然源、人为源占比差异明显:As、Cr、Cu、Hg、Ni、Zn 均以自然源为主,但 Zn 人为源占比较大,约为 40%;Cd、Pb 则主要以人为源为主,占比分别为 44%、66%;Cd 自然源贡献率高值区主要分布于龙江流域,工矿业源贡献率高值区主要分布于金城江周边以及柳江柳州市区段。

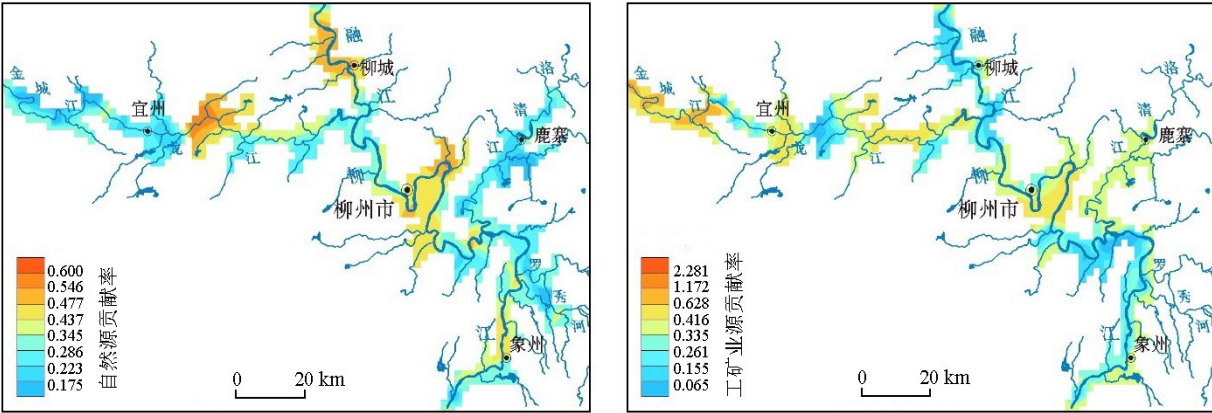


图3 柳江流域沉积物 Cd 主要源贡献率分布  
Fig.3 The contribution maps of major sources to Cd

参考文献 (References) :

[1] 刘伟,陈振楼,许世远,等.上海市小城镇河流沉积物重金属污染特征研究[J]. 环境科学, 2006, 27(3): 538-543.  
Liu W, Chen Z L, Xu S Y, et al. Pollution character of heavy metals in river sediments from small towns, Shanghai [J]. Environmental Science, 2006, 27(3): 538-543.

[2] Suresh G, Sutharsan P, Ramasamy V, et al. Assessment of spatial distribution and potential ecological risk of the heavy metals in relation to granulometric contents of Veeranam lake sediments, India [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2012, 84: 117-124.

[3] 张伟,张洪,单保庆.北运河源头区沙河水库沉积物重金属污染特征研究[J]. 环境科学, 2012, 33(12): 4284-4290.  
Zhang W, Zhang H, Shan B Q. Characteristics of heavy metal pollution in the sediments from Shahe reservoir, the upper reach of the north canal river [J]. Environmental Science, 2012, 33(12): 4284.

[4] 王瑞霖,程先,孙然好.海河流域中南部河流沉积物的重金属生态风险评价[J].环境科学,2014,1(10):3740-3747.  
Wang R L, Cheng X, Sun R H. Ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments in the southern and central Haihe river [J]. Environmental Science, 2014, 1(10): 3740-3747.

[5] 杨昆,贺磊,许乃中,等.柳江流域生态系统服务价值的影响研究[J].生态科学,2016,35(4),148-156.  
Yang K, He L, Xu N Z, et al. The study of ecosystem service values of Liujiang River Basin [J]. Ecological Science, 2016, 35(4), 148-156.

[6] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. Geojournal, 1969, 2: 108-118.

[7] 滕彦国,庾先国,倪师军,等.应用地质累积指数评价沉积物中重金属污染:选择地球化学背景的影响[J].环境科学与技术, 2002, 25(2): 7-9.  
Teng Y G, Tuo X G, Shijun Ni, et al. Applying geo-accumulation index to assess heavy metal pollution in sediment; influence of different geochemical backgrounds [J]. Environmental Science & Technology, 2002, 25(2): 7-9.

[8] Santos B J C, Beltran R, Gomez A J L. Spatial variations of heavy

metals contamination in sediments from Odiel River ( southwest Spain) [J]. Environment International, 2003 ( 129) : 69-77.

[9] Larks H L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedi-mentological approach [J]. Water Research, 1980, 14( 2) : 975-1001.

[10] Weeks J M, Combr S D W. Ecological risk assessment of soil [J]. Mineralogical Magazine, 2005, 69( 5) : 601-613.

[11] Thurston G D, Spengler J D, et al. A auantitative assessment of source contribution to inhalable particulate matter pollution in metropolis boston [J]. Atmospheric Environment, 1985, 19( 1) : 9-25.

[12] Song Y, Xie S D, Zhang Y H, et al. Source apportionment of PM2. 5 in Beijing using principal component analysis absolute principal component scores and UNMIX [J]. Science of the Total Environment, 2006, 372( 1) : 278-286.

[13] Luo X S, Ip C C M, Li W, et al. Spatial-temporal variations, sources, and transport of airborne inhalable metals ( PM10) in urban and rural areas of northern China [J]. Atmospheric Chemistry & Physics Discussions, 2014, 14( 9) : 13133-13165.

[14] Yuan X, Deng X, Shen Z, et al. Speciation and potential remobilization of heavy metals in sediments of the Taihu Lake, China [J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2007, 26( 4) : 384-393.

[15] Sofowote U, Marvin C H, et al. Source apportionment of PAH in hamilton harbour suspended sedi-ments: Comparison of two factor analysis methods [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42( 3) : 6007-6014.

[16] Zhou F, Gprdon H H, Guo H C, et al. Spatio-temporal patterns and source apportionment of coastal water pollution in eastern Hong Kong [J]. Water Research, 2007, 41( 6) : 3429-3439.

[17] 吕建树,张祖陆,刘洋,等.日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价[J].地理学报,2012,67(7): 109-122.  
Lyu J S, Zhang Z L, Liu Y, et al. Sources identification and hazardous risk delineation of heavy metals contamination in Rizhao city [J]. Journal of Geographical Sciences, 2012, 67( 7) : 109-122.

[18] Stafilov T R, Sajin B, Boev J, et al. Distribution of some elements in surface soil over the Kavadarci region, Republic of Macedonia [J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 61( 7) : 1515-1530.

[19] 于瑞莲,胡恭任,林燕萍,等.泉州城市表层土壤中金属元素来

源分析[J].矿物学报,2012,32(1):156-165.

Yu R L,HU G R,Lin Y P, et al.Sources of metals in the urban topsoil of Quanzhou city[J]. Acta Mineralogica Sinia,2012, 32 (1):156-165.

[20] 陈国潮,何振立,黄昌勇.菜茶园红壤微生物量磷与土壤磷以及磷植物有效性之间的关系研究[J].土壤学报,2001,38(1):75-80.

Chen G C, He Z L, Huang C Y. Study on relationships among microbial biomass P, soil P and plant-availability of P in red soils [J].Acta Pedologica Sinica,2001,38(1):75-80.

[21] Joergensen R G, Scheu S. Response of soil microorganisms to the addition of carbon, nitrogen and phosphorus in a forest Rendzina [J]. Soil Biology & Biochemistry, 1999,31: 215-219.

[22] 周彩云,魏宗强,颜晓,等.不同施肥处理对水稻土颗粒有机碳与磷的影响[J].江西农业大学学报,2016,38(2):398-402.

Zhou C Y,Wei Z Q,Yan Xi, et al. Effects of different fertilization regimes on organic carbon and phosphorus status in particulate fractions of paddy soil[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis,2016,38(2):398-402.

[23] 陈丹青,谢志宜,张雅静,等.基于 PCA/APCS 和地统计学的广州市土壤重金属来源解析[J].生态环境学报,2016, 25(6):1014-1022.

Chen D Q,Xie Z Y,Zhang Y J, et al. Source apportionment of soil heavy metals in Guang-zhou based on the PCA/APCS model and geostatistics [J].Ecology and Environmental Sciences,2016,25 (6):1014-1022.

[24] 瞿明凯,李卫东,张传荣,等.基于受体模型和地统计学相结合的土壤镉污染源解析[J]. 中国环境科学, 2013, 33(5):854-860.

Qu M K,Li W D, Zhang C R, et al. Source apportionment of soil heavy metal Cd based on the combination of receptor model and geostatistics. [J]. China Environmental Science, 2013, 33(5): 854-860.

[25] 刘慧琳,葛畅,沈强,等.铁矿废弃地复垦土壤重金属来源解析研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(2):75-82.

Liu H L,Ge C,Shen Q, et al. Source apportionment of heavy metals in reclaimed soil of iron mine wasteland [J]. Journal of Agro Environment Science, 2019, 38(2):75-82.

Ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in sediments of Liujiang River Catchment

ZHONG Xiao-Yu<sup>1</sup>,WU Tian-Sheng<sup>1</sup>,LI Jie<sup>1</sup>,ZHEN Guo-Dong<sup>1</sup>,  
ZHUO Xiao-Xiong<sup>1</sup>,GUAN Dong-Chao<sup>2</sup>,WANG Lei<sup>3</sup>,MO Bing-Ji<sup>4</sup>

(1.Guangxi Geological Survey,Nanning 530023,China; 2.Guangxi Geological and Mineral Testing Research Center,Nanning 530023,China; 3.Geology Team No.4 of Guangxi, Nanning 530031, China; 4. Institute of Regional Geological Survey of Guangxi,Guilin 541003,China)

**Abstract:** In this study, 91 sediment samples were collected from the middle and lower reaches of Liujiang River. The geochemical characteristics of As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn and other elements were analyzed. The current pollution situation and potential risks were predicted and evaluated, and the sources of heavy metals were analyzed. The results show that: The spatial dispersion of elements in the sediments of Liujiang River Catchment is relatively large, and the distribution of heavy metal elements shows strong regional characteristics.Distribution of heavy metal elements in Liujiang River Catchment shows strong regional characteristics.As, Cr, Cu, Hg and Ni are mainly from natural sources, while Cd and Pb are mainly from human sources. The high-value areas of Cd natural source contribution mainly distribute in Longjiang River Catchment, while the high-value areas of industrial and mining sources contribution mainly distribute around Jincheng River and Liuzhou District of Liujiang River.

**Key words:** Liujiang River;sediments;pollution of heavy metals;ecological risk; source analysis

( 本文编辑:蒋实)