

doi: 10.11720/wtyht.2025.1043

程琰勋,徐磊,吴亮,等.金沙江流域底泥重金属污染特征及来源解析——以蜻蛉河为例[J].物探与化探,2025,49(2):500–509.
http://doi.org/10.11720/wtyht.2025.1043

Cheng Y X, Xu L, Wu L, et al. Characteristics and source analysis of heavy metal contamination in the sediments of the Jinsha River Basin: A case study of the Qingling River[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2025, 49(2): 500–509. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2025.1043>

金沙江流域底泥重金属污染特征及来源解析 ——以蜻蛉河为例

程琰勋^{1,2}, 徐磊^{1,2}, 吴亮^{1,2}, 赵萌生^{1,2}, 王福华^{1,2}, 钱坤^{1,2}, 郑洪福^{1,2},
李文辉^{1,2}, 张宏辉^{1,2}

(1. 中国地质调查局 昆明自然资源综合调查中心, 云南 昆明 650100; 2. 自然资源部 自然生态系统碳汇工程技术创新中心, 云南 昆明 650100)

摘要: 为了解金沙江流域底泥重金属的污染特征及来源情况, 以金沙江南岸支流龙川江的一级支流蜻蛉河流域为研究区, 共选取 22 个代表性断面布设底泥采样点, 对底泥中 8 种重金属元素 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 含量进行测试分析。通过数据统计分析了底泥重金属元素的含量分布特征和沿程分布特征; 运用相关性分析、主成分分析方法探究了重金属的来源; 运用地累积指数法、内梅罗指数法对蜻蛉河底泥重金属的污染程度进行了评价。研究表明, As、Cd、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 主要受矿产开采、农业活动和工业活动的共同影响; Cr、Ni 主要来源于成土母质, 而 Ni 除了自然来源外, 还受到了人为来源的影响。地累积指数法、内梅罗指数法的评价结果表明, 8 种重金属元素的平均污染程度不高, 但存在部分元素在流域局部污染富集, 主要集中在老街子 Au-Pb-Ag 多金属矿区和县城下游的城乡结合区, 代表元素为 Cd、Hg、Pd 和 Zn。

关键词: 底泥; 重金属; 污染特征; 来源分析; 金沙江; 蜻蛉河

中图分类号: X142

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2025)02-0500-10

0 引言

随着城市化、工业化、现代化的快速发展, 越来越多含重金属的废水和废弃物被排入水体中, 对河流、湖泊等生态系统造成严重威胁^[1-2]。重金属具有不易降解、累积性强、生物毒性或生态毒性大等特征^[3]。经各种方式进入河流中的重金属大部分通过吸附、沉降等方式转移至底泥中^[4-5], 而当环境发生变化时, 富集在底泥中的重金属可能又会被释放至河流中, 对水体质量造成“再次污染”^[6], 对生态环境系统造成直接或间接的危害, 并通过食物链的放大作用对人类健康造成严重威胁^[7-9]。因此, 底泥重金属污染问题已引起了国内外学者的广泛关注和研究^[10-13]。当

前, 关于底泥重金属污染的评价方法较多, 如内梅罗综合指数法^[14-15]、地累积指数法^[16-17]、污染负荷指数法^[18]和潜在生态风险指数法^[19-20]等。由于每种评价方法都有各自的优缺点和适用范围^[21], 所以采用多种方法进行对比和综合分析显得十分具有必要性, 各方法可互相借鉴补充, 使评价结果更为科学、准确。

长江流域是我国最宝贵的生态资源之一, 其生态文明建设是该流域可持续发展的关键。长江的污染与生态环境质量下降势必制约长江经济带的发展与建设, 其水体底泥的重金属污染值得引起社会的关注。近年来, 有关长江流域底泥重金属的分布特征、风险评价和来源分析等已有学者进行过研究。易雨君等^[22]对长江中下游流域重点断面及湖泊的底泥进行了调查研究, 发现 Cd、Hg、Cr、Pb、Cu、As 和

收稿日期: 2024-01-30; 修回日期: 2024-05-13

基金项目: 中国地质调查局项目 (DD20220987, ZD20220211)

第一作者: 程琰勋 (1991-), 男, 学士, 工程师, 主要从事地质矿产、生态地质调查相关工作。Email: 2553407445@qq.com

通讯作者: 吴亮 (1985-), 男, 正高级工程师, 主要从事区域地质矿产调查相关工作。Email: 229471514@qq.com

Zn 在部分样点中含量均高于背景值,在湖泊、港口和城市化较高的区域表现出明显的富集趋势。杨帆等^[15]在对长江中游流域的湖南省主要水系底泥的研究中发现,该流域重金属 Cd 和 Mn 含量超过了湖南省表层沉积物重金属元素背景值,污染相对严重,多种重金属具有相同污染来源或产生了复合污染,总体潜在生态风险属于中等级别。但目前关于长江上游的底泥重金属研究较少,尤其是金沙江流域。本文以金沙江南岸支流龙川江的一级支流蜻蛉河流域为研究区,通过分析底泥中 8 种重金属元素(As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn)的含量和沿途分布特征,运用相关性分析、主成分分析的方法探究底泥中重金属的可能来源,运用地累积指数法和内梅罗指数法对底泥的重金属污染程度进行分析与评价,以期金沙江流域的重金属污染防治和流域生态保护提供基础数据和参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况与样品采集

蜻蛉河发源于云南省楚雄彝族自治州姚安县太平镇黎梅山,向南流入姚安县平坝农业区,后经大姚县向东北方向在元谋县黑泥坡村汇入龙川江^[23]。蜻蛉河全长 132 km,流域面积达 3 546 km²,属亚热带季风气候,总体气候特征冬夏季短、春秋季节长,干

湿季明显,无霜期长。日温差大、年温差小,年均气温 15.6 ℃。雨季主要集中在 7~10 月,年均降水 796.3 mm。研究区地处青藏高原东南缘哀牢山—金沙江断裂带东侧和扬子板块西缘楚雄凹陷带内^[24],地貌上表现为以高中山和低山丘陵为主的格局。土壤类型以紫色土、黄棕壤、水稻土为主,在干热河谷区发育有燥红土。研究区内出露的地层主要为侏罗系、白垩系地层以及第四系沉积物^[25],河流两岸出露沉积岩岩性主要为中生代红层的紫红色砂岩、泥岩和第四系冲积物,在河流源头处出露小面积的碱性岩浆岩。罗晨皓等^[26]发现附近的姚安老街金矿和铅矿等多金属矿床与出露的碱性岩浆岩具有密切关系,由此发现,姚安老街富碱斑岩区多金属矿床的开采可能是导致河流重金属富集的重要原因。河流流经姚安县平坝农耕区和大姚县城区,还可能受到工农业废水污染导致重金属富集。

为了能较好地反映蜻蛉河底泥的重金属富集情况,考虑到流域的水文条件、采样点的可达性以及样品的代表性等实际情况,在研究区共选取 22 个代表性断面布设底泥采样点(图 1)。为了减少样品的随机误差产生的影响,每个采样点采集 4~5 个子样等量混合组成 1 件样品,采样深度为 0~20 cm。将采集后的样品放于室内自然风干,过程中确保样品未受到污染,去掉杂草、砾石、动物残体等杂物,用玛瑙碾钵把样品磨碎,过 100 目尼龙筛后装入聚乙烯塑料瓶保存。

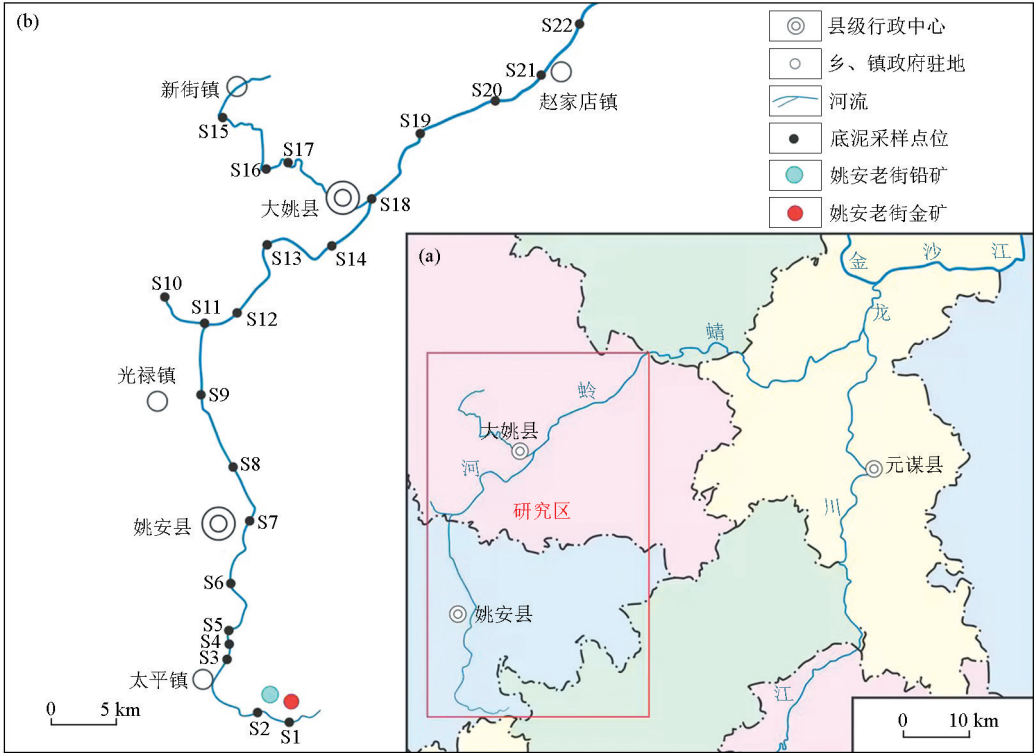


图 1 研究区位置 (a) 和底泥样点分布 (b)
Fig. 1 Study area location (a) and distribution of the sediment samples (b)

1.2 分析方法

本次研究所采集的底泥样品由昆明自然资源综合调查中心分析测试实验室进行分析测试。底泥重金属监测指标为 8 项(As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn),其中 As、Hg 采用原子荧光光谱法(AFS)测定,检出限分别为 0.63×10^{-6} 和 $0.000\ 3\times 10^{-6}$; Cr 采用 X 射线荧光光谱法(XRF)测定,检出限为 4×10^{-6} ; Cu、Cd、Pb 采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定,检出限分别为 0.46×10^{-6} 、 0.03×10^{-6} 和 1×10^{-6} ; Zn、Ni 采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)测定,检出限分别为 2×10^{-6} 和 1×10^{-6} 。分析采用国家一级标准物质进行质量监控,每 50 件样品中密码插入 4 件国家一级标准物质,随机均匀插入各分析批次中与样品一起进行分析,计算单件监控样测定值与标准值之间的对数差,以控制分析的准确度;计算 4 件监控样测定值与标准值之间的平均对数差值,用以衡量批与批间的分析偏倚;计算 4 件监控样对数差的标准偏差,以衡量同批试样分析的精密度,并绘制日常监控图,确保样品测试质量。国家标准物质分析要求一次性原始合格率大于 98%,准确度合格率要求大于 98%,精密度合格率要求大于 98%。分析过程中通过对检出限、精密度、准确度、重复性、异常点和报出率的检验及控制,确保了样品的质量控制与质量水平,并采用内检和外检相结合的方法,确保了样品数据的准确性和可靠性。

1.3 重金属污染评价方法

1.3.1 地累积指数法

地累积指数(I_{geo})法由于其既考虑了自然地质作用对背景值的影响,也综合考虑了人类活动对环境的影响,可定量分析重金属元素的污染程度,现已成为评价河流沉积物重金属污染程度的重要方法之一^[15,17,19]。计算公式如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C_i / (k \times B_i)]。$$

式中: I_{geo} 为地累积指数; C_i 为底泥中重金属 i 元素含量的实测浓度(10^{-6}); B_i 为重金属 i 元素的背景值(10^{-6}); k 为修正系数,旨在修正区域成岩作用产生的背景值差异,一般取 $1.5^{[27]}$ 。重金属元素的地累积指数的分级标准^[28]见表 1。

1.3.2 内梅罗综合污染指数法

综合污染指数法可较为全面地评价水系沉积物的重金属污染程度,不仅考虑了重金属含量的平均值,同时也兼顾了可能来自人类活动的重金属含量极值对污染评价等级的影响^[15,29]。计算公式如下:

$$P_i = C_i / S_i,$$

表 1 地累积指数评价指标

Table 1 Grading criteria of geo-accumulation index

等级	I_{geo} 值	污染程度
I	≤ 0	无污染
II	0~1	轻微污染
III	1~2	中度污染
IV	2~3	中度—重度污染
V	3~4	重度污染
VI	4~5	重度—极度污染
VII	>5	极度污染

$$P_{\text{综}} = \sqrt{(P_i^2 + P_{\text{imax}}^2) / 2} = \sqrt{[(C_i / S_i)_{\text{ave}}^2 + (C_i / S_i)_{\text{max}}^2] / 2}。$$

式中: P_i 为单因子污染指数,可较为直观反映重金属 i 元素的污染情况^[30],其分级标准为: $P_i \leq 1$ 时,为无污染; $1 < P_i \leq 2$ 时,为潜在污染; $2 < P_i \leq 3$ 时,为轻度污染; $P_i > 3$ 时,为重度污染^[31]。 $P_{\text{综}}$ 为综合污染指数; $\overline{P_i}$ 为单因子污染指数的算数平均值; P_{imax} 为单因子污染指数最大值; C_i 为底泥中重金属 i 元素的实测浓度(10^{-6}); S_i 为重金属 i 元素的背景值。内梅罗综合评价指数的分级标准^[32]见表 2。

表 2 综合污染指数评价指标

Table 2 Grading criteria of comprehensive pollution index

等级	$P_{\text{综}}$ 值	污染程度
I	≤ 0.7	清洁
II	0.7~1	尚清洁
III	1~2	轻度污染
IV	2~3	中度污染
V	>3	重度污染

2 结果与分析

2.1 重金属含量特征

蜻蛉河 22 件底泥样品的重金属含量统计分析情况见表 3,As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 含量平均值分别为 10.81×10^{-6} 、 0.38×10^{-6} 、 101.19×10^{-6} 、 33.51×10^{-6} 、 0.04×10^{-6} 、 44.61×10^{-6} 、 115.24×10^{-6} 、 119.20×10^{-6} ,超过云南省土壤背景值^[33]的样品比例分别为 31.82%、50.00%、86.36%、18.18%、18.18%、68.18%、27.27% 和 54.55%,超过全国土壤背景值^[33-34]的样品比例分别为 54.55%、77.27%、100.00%、77.27%、22.73%、90.91%、40.91% 和 72.73%。可以看出,底泥样品的 8 种重金属元素中 As、Cu 超标幅度较小,Cd、Cr、Ni、Zn 的超标幅度较大。从变异系数看,8 种重金属的变异系数大小为:Pb>Cd>Hg>Zn>As>Cu>Ni>Cr。

根据 Wilding^[35]对变异系数的等级划分方法,Cr 为轻度变异,Ni 为中度变异,其余元素均为高度

表 3 底泥重金属元素含量分析统计

Table 3 Statistics of heavy metals concentration in the sediments

项目	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
平均值/ 10^{-6}	10.81	0.38	101.19	33.51	0.04	44.61	115.24	119.20
最小值/ 10^{-6}	3.79	0.09	74.30	11.90	0.01	20.00	13.00	34.50
中位数/ 10^{-6}	9.40	0.28	104.50	32.90	0.03	48.75	24.40	98.05
最大值/ 10^{-6}	28.00	1.66	118.00	68.50	0.18	64.30	1003.00	493.00
标准偏差/ 10^{-6}	6.29	0.36	11.16	13.83	0.04	12.28	246.67	99.20
变异系数	0.58	0.95	0.11	0.41	0.93	0.28	2.14	0.83
云南省土壤背景值/ 10^{-6}	10.60	0.27	91.00	40.00	0.07	38.00	39.00	96.00
全国土壤背景值/ 10^{-6}	9.10	0.15	63.00	23.00	0.05	26.00	25.00	67.00

变异。一般来说,变异系数大于 20%可能指示人类活动是造成重金属元素空间分布差异的主要因素^[17,36-37],所以较高的变异系数值可能表明工业废水、生活污水的排放及矿产开采等人为输入或特殊地质体风化的影响。可以看出,Cr、Ni 变异系数较低,说明其在流域底泥中含量分布相对均匀;而 Pb、Cd、Hg、Zn、As、Cu 变异系数较高,说明其在底泥中有明显的元素迁移或外来聚集,可能受到外源输入的影响而导致其分布不均匀。总体上蜻蛉河流域的底泥重金属空间变异性以高度变异为主。

2.2 重金属沿程分布特征

蜻蛉河底泥重金属含量的沿程分布特征如图2

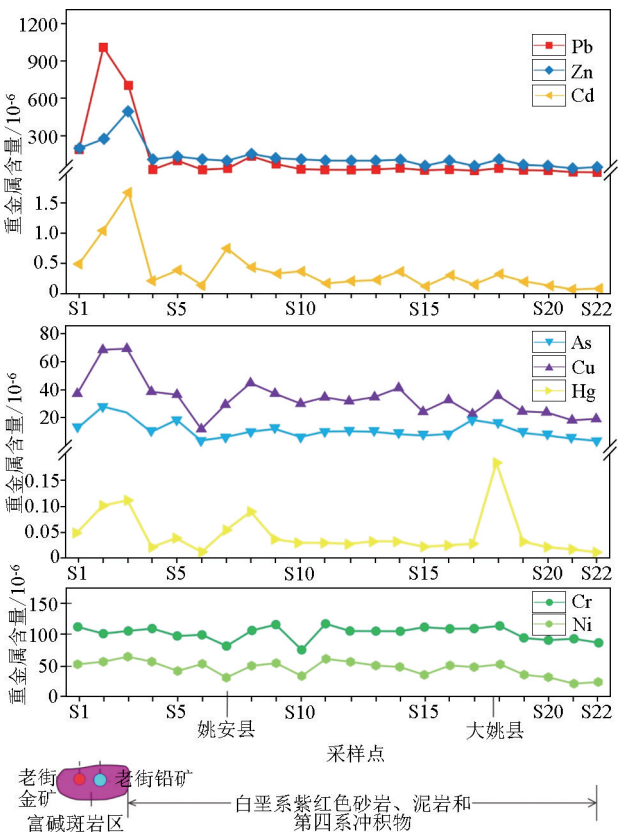


图 2 蜻蛉河底泥重金属沿程分布

Fig. 2 Distribution of heavy metals in the sediments of Qingling river

所示,从其沿程分布特征可以发现可能发生重金属污染的河段和分析重金属的可能来源。图中 Pb、Zn、As、Cd、Cu 表现出相似的分布特征,基本都在 S1~S3 段呈现出最大波峰,Pb、As 的最高值出现在 S2,Zn、Cd、Cu 的最高值出现在 S3,而 S1~S3 段在位置上与姚安县南部富碱斑岩区老街子 Au-Pb-Ag 多金属矿床相耦合,其富集可能与该区域矿业开采有关,而在 S8、S18 出现小幅度峰值,S8、S18 为蜻蛉河分别经姚安县和大姚县流出的下游部位,这也表明其可能受到一定人类活动的影响。Hg 与 Pb、Zn、As、Cd、Cu 表现出相似的分布特征,在 S3、S8 出现小幅度峰值,在 S18 出现最高值,表明其可能也受到了人类活动的影响。Cr、Ni 与其他元素呈现了完全不同的分布特征,二者变化趋势相同,整体变化不大,分布较为均匀,表明二者受人类活动影响不大,可能主要来源为自然来源。

3 讨论

3.1 重金属来源解析

3.1.1 相关性分析

不同重金属元素间的相关性分析可以了解其空间变化趋势,反映元素是否具有同源性^[16,25]。蜻蛉河底泥重金属元素间的相关性见表 4。由表 4 可知,As、Cd、Cu、Hg、Pb 和 Zn 之间表现出显著的正相关关系,变化趋势相似,说明这些元素具有一定程度上的同源性。Cr 除了与 Ni 呈现显著正相关外,与其他元素均无相关性,而 Ni 与 As、Cu、Zn 表现出显著的正相关性,说明 Cr、Ni 二者有相同来源,而 Ni 除了与 Cr 有同一来源外,还有其他来源。

3.1.2 主成分分析

Bartlett 球形度检验结果(0<0.05)与 KMO 度量值检验结果(0.801>0.5)表明各个元素间相关性较强,适合进行主成分分析,分析结果见表 5。采用 Kaiser 标准化的正交旋转法,提取出了 2 个主成分(图 3),

表 4 底泥重金属相关性分析

Table 4 Correlation analysis of heavy metals in the sediments

元素	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
As	1	0.710**	0.310	0.808**	0.621**	0.562**	0.817**	0.727**
Cd		1	-0.045	0.839**	0.572**	0.406	0.825**	0.940**
Cr			1	0.283	0.228	0.730**	0.073	0.155
Cu				1	0.617**	0.615**	0.840**	0.852**
Hg					1	0.387	0.500*	0.541**
Ni						1	0.406	0.574**
Pb							1	0.828**
Zn								1

注：“*”表示 $P<0.05$ ，“**”表示 $P<0.01$ 。

表 5 底泥重金属含量的主成分分析

Table 5 Principal component analysis of heavy metals concentrations in the sediments

重金属元素	主成分		变量共同度
	F1	F2	
As	0.890	0.019	0.792
Cd	0.885	-0.371	0.921
Cr	0.329	0.911	0.938
Cu	0.945	-0.033	0.894
Hg	0.702	0.009	0.493
Ni	0.682	0.634	0.868
Pb	0.881	-0.273	0.851
Zn	0.922	-0.168	0.878
初始特征值	5.161	1.475	
方差贡献率/%	64.507	18.432	
累积方差贡献率/%	64.507	82.939	

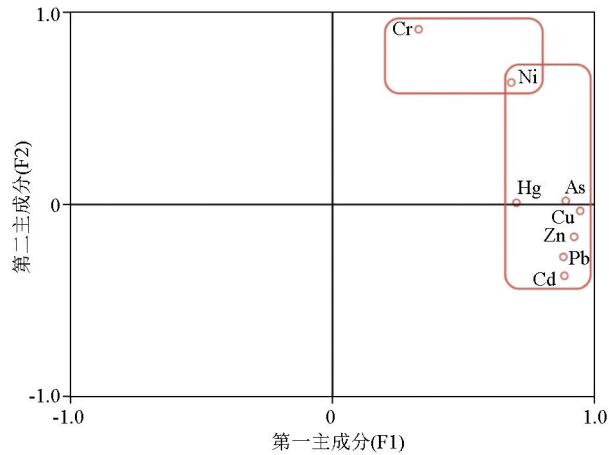


图 3 底泥重金属主成分载荷

Fig. 3 Principal component loading of heavy metals in the sediments

特征值均大于 1, 分别为 5.161 和 1.475, 贡献率为 64.507% 和 18.432%, 累积贡献率为 82.939%。各元素的变量共同度均较高, 除 Hg 为 0.493 外, 其余均介于 0.792~0.938 之间, 说明元素的大部分信息可以被 2 个主成分解释, 提取的效果较好。

第一主成分 (F1) 贡献率 (64.507%) 远高于第二主成分, 除 Cr 载荷较低外, 其余重金属元素载荷

均较高, As、Cd、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 的载荷分别为 0.890、0.885、0.945、0.702、0.682、0.881、0.922。7 个元素除 Ni 的变异系数为中度变异外, As、Cd、Cu、Hg、Pb 和 Zn 均为高度变异, As、Cd、Cu、Hg、Pb 和 Zn 之间表现出显著的正相关关系, Ni 与 As、Cu、Zn 表现出显著的正相关性, 变化趋势相似, 而从底泥的沿程分布特征情况来看, Pb、Zn、As、Cd、Cu 和 Hg 表现出相似的分布特征, 这些特征可能共同指向人类活动这一影响因素。有研究发现, 矿山开采会显著增加周边土壤中的 Cd、Hg、Pb、Cu、Zn、As、Ni^[38], 周艳等^[39]的研究中发现, 铅锌矿开采、选冶等生产活动所产生的废水、废渣等是周边土壤中 As、Cd、Hg、Pb 和 Zn 的主要来源。而这些积累在土壤中的重金属元素又会随着地表径流等方式进入河流和底泥中, 所以其高值段在老街子 Au-Pb-Ag 多金属矿区出现可能与矿业开采有关。这些元素高值段另外还集中在河流从姚安县、大姚县流出的下游采样点位置。有研究表明, 土壤和底泥中的 Cd、Hg、Pb 和 Zn 不仅会受到矿业活动的影响, 还会受到农业活动的影响。如王美等^[40]的研究发现长期施用磷肥易造成耕地中 Cd、Pb 的富集, 长期施用有机肥易造成 Cd、Cu、Zn 和 Pb 的富集。Madrid 等^[41]的研究发现含 Hg 农药和化肥的使用会造成 Hg 的累积和污染。李旗等^[42]的研究认为沉积物中 Cd、Zn 和 Pb 主要源于长期施用含有重金属的农药、化肥所造成的农业污染。研究区农业施肥主要以有机肥、复合肥和磷肥为主, 少数区域存在农药过度使用的情况, 所以这些高值段集中在县城下游位置可能与农业污染有关。还有研究表明, 城郊农田土壤中 As、Cd、Cu、Pb 和 Zn 的来源与工业生产关系密切^[43]。这些重金属高值区位于蜻蛉河在县城下游的城乡结合区, 存在着工业企业, 其生产活动排放的污染物也是造成这些重金属累积的重要因素。因此, 综合分析判断可知, F1 受矿产开采、农业活动和工业活动的共同影响。

第二主成分 (F2) 方差贡献率为 18.432%, 载荷

较高的重金属元素为 Cr 和 Ni, 分别为 0. 911 和 0. 634, 其余元素除 As、Hg 为较小正载荷, 其他元素均为负荷载。蜻蛉河底泥中 Cr 和 Ni 具有显著正相关关系, 表明二者具有相似来源。从变异系数上来看, Cr、Ni 变异程度较低, 表明二者受人类活动影响较小, 可能主要受地质背景影响。有研究发现, 蜻蛉河所流经的姚安县土壤中的 Cr、Ni 主要受自然因素影响, 受控于成土母质和地质背景^[25]。宁增平等^[44]的研究发现水系沉积物中的 Cr、Ni 主要源自岩石自然风化。秦元礼等^[45]的研究也发现滇中地区武定县土壤中 Cr、Ni 主要来源于成土母质。因此可知 F2 主要代表了重金属元素的自然来源。

3.2 蜻蛉河底泥重金属污染程度评价

3.2.1 地累积指数法

蜻蛉河底泥中 8 种重金属的地累积指数统计结果如表 6 所示。8 种元素 I_{geo} 平均值排序为: Ni

(-0. 42)>Cr(-0. 44)>Cd(-0. 50)>Pb(-0. 56)>Zn(-0. 57)>As(-0. 76)>Cu(-0. 95)>Hg(-1. 68)。从 I_{geo} 平均值来看, 8 种元素均为无污染($I_{geo}<0$)。从点上看, 有 81. 82% 采样点的 As、100% 采样点的 Cr、90. 91% 采样点的 Cu、90. 91% 采样点的 Hg、90. 91% 采样点的 Ni、81. 82% 采样点的 Zn 为无污染; 除 Cr 外的 7 个元素有 9. 09%~18. 18% 的采样点为轻微污染; 4. 55% 采样点的 Cd、Zn 和 9. 09% 采样点的 Pb 为中度污染; Cd 有 4. 55% 的采样点为中度—重度污染; Pd 均有 4. 55% 的采样点为重度—极度污染和极度污染。从不同采样点的地累积指数变化情况来看, 大部分存在污染的点主要集中在老街子多金属矿区及河流经过县城的位置, 这表明蜻蛉河流域的底泥中 Zn、Pd、Cd 可能在人类生产生活的影 响下积累明显, 存在流域局部的点状富集状况。

表 6 底泥重金属地累积指数等级分布情况
Table 6 Class distribution of I_{geo} for heavy metals in the sediments

元素	I_{geo}		比例/%					
	变化范围	平均值	$I_{geo}<0$	$0<I_{geo}<1$	$1<I_{geo}<2$	$2<I_{geo}<3$	$3<I_{geo}<4$	$4<I_{geo}<5$
As	-2. 07~0. 82	-0. 76	81. 82	18. 18	0	0	0	0
Cd	-2. 20~2. 04	-0. 50	77. 27	13. 63	4. 55	4. 55	0	0
Cr	-0. 88~-0. 21	-0. 44	100. 00	0	0	0	0	0
Cu	-2. 33~0. 19	-0. 95	90. 91	9. 09	0	0	0	0
Hg	-3. 39~0. 78	-1. 68	90. 91	9. 09	0	0	0	0
Ni	-1. 51~0. 17	-0. 42	90. 91	9. 09	0	0	0	0
Pb	-2. 17~4. 10	-0. 56	72. 72	9. 09	9. 09	0	4. 55	4. 55
Zn	-2. 06~1. 78	-0. 57	81. 82	13. 63	4. 55	0	0	0

3.2.2 内梅罗指数法

蜻蛉河底泥中 8 种重金属的单因子污染指数统计结果如表 7 所示。8 种元素 P_i 平均值排序为: Pb(2. 95)>Cd(1. 41)>Zn(1. 24)>Ni(1. 17)>Cr(1. 11)>As(1. 02)>Cu(0. 84)>Hg(0. 63)。从各元素的 P_i 平均值来看, Pb 为轻度污染($2<P_i\leq3$), As、Cd、Cr、Ni、Zn 为潜在污染($1<P_i\leq2$), Cu、H 为无污染($P_i\leq1$)。从点上看, 81. 82% 采样点的 Cr、68. 18% 采样点的 Ni 和 40. 91% 采样点的 Zn 为潜在污染, 远高于其他元素达到潜在污染的比例; As、Cd、Hg、Pd、Zn 分别有 9. 09%、4. 55%、4. 55%、4. 55%、9. 09% 的采样点为轻度污染; Cd、Pd、Zn 分别有 9. 09%、18. 18%、4. 55% 的采样点为重度污染。这表明底泥中 Cd、Hg、Pd、Zn 可能在人类生产生活的影 响下明显积累, 存在局部富集现象, 而 Cr、Ni 虽然总体为潜在污染程度, 但二者的 P_i 最高值均未超过 2, Cr 分别有 18. 18%、81. 82% 的采样点处于无污染和潜在污染区间, Ni 分别有 36. 36%、63. 64% 的

表 7 底泥重金属单因子污染指数等级分布情况
Table 7 Class distribution of P_i of heavy metals in the sediments

元素	P_i		比例/%			
	变化范围	平均值	$P_i\leq1$	$1<P_i\leq2$	$2<P_i\leq3$	$P_i>3$
As	0. 36~2. 64	1. 02	68. 18	22. 73	9. 09	0
Cd	0. 33~6. 15	1. 41	50. 00	36. 36	4. 55	9. 09
Cr	0. 82~1. 30	1. 11	18. 18	81. 82	0	0
Cu	0. 30~1. 71	0. 84	81. 82	18. 18	0	0
Hg	0. 14~2. 57	0. 63	81. 82	13. 63	4. 55	0
Ni	0. 53~1. 69	1. 17	31. 82	68. 18	0	0
Pb	0. 33~25. 72	2. 95	72. 72	4. 55	4. 55	18. 18
Zn	0. 36~5. 14	1. 24	45. 45	40. 91	9. 09	4. 55

采样点处于无污染和潜在污染区间, 这可能和流域在区域上 Cr、Ni 两种元素的背景值较高有关。通过表 8 可以看出, 蜻蛉河底泥中 8 种重金属的内梅罗综合污染指数变化范围为 0. 74~18. 54, 平均值为 2. 75, 总体处于中度污染程度。从点上看, 流域没有一个采样点为清洁程度, 只有 22. 73% 的采样点为尚清洁, 而达到轻度污染的比例为 45. 45%, 分

别有 18.18% 和 13.64% 的采样点为中度污染和重度污染。一半多的样点达到轻度污染程度及以上,这可能因为在区域上 Cr、Ni 两种元素的背景值较高,从而提高了重金属含量极值对结果权重的影响。而大部

分存在中度和重度污染的点分布在流域南部老街子多金属矿区及其下游附近河道,这可能与矿区开采有关;而少部分存在中度污染的点分布在流域经过县城的位置,可能受到人类生活和工农业排污的影响。

表 8 底泥重金属内梅罗综合污染指数等级分布情况
Table 8 Class distribution of Nemero comprehensive pollution index of heavy metals in the sediments

内梅罗综合 污染指数	$P_{\text{综}}$		比例/%				
	变化范围	平均值	$P_{\text{综}} \leq 0.7$	$0.7 < P_{\text{综}} \leq 1$	$1 < P_{\text{综}} \leq 2$	$2 < P_{\text{综}} \leq 3$	$P_{\text{综}} > 3$
	0.74~18.54	2.75	0	22.73	45.45	18.18	13.64

4 结论

1) 蜻蛉河底泥样品的重金属含量平均值超过云南省土壤背景值的样品比例分别为 9.09%、54.55%、100%、9.09%、18.18%、63.64%、27.27% 和 68.18%, 超过全国土壤背景值的样品比例分别为 31.82%、90.91%、100.00%、86.36%、18.18%、90.91%、40.91% 和 72.73%。As、Cu 超标幅度较小,Cd、Cr、Ni、Zn 的超标幅度较大。8 种重金属元素的变异系数大小为: Pb>Cd>Hg>Zn>As>Cu>Ni>Cr。Cr 为轻度变异,Ni 为中度变异,其余元素均为高度变异,总体上蜻蛉河流域底泥重金属的空间变异性以高度变异为主。蜻蛉河底泥重金属含量的沿程分布特征显示,Pb、Zn、As、Cd、Cu 表现出相似的分布特征,其两个高值段分别集中在老街子 Au-Pb-Ag 多金属矿区和蜻蛉河经县城流出的下游区域;Cr、Ni 也表现出相似的分布特征,二者变化趋势相同,整体变化不大,分布较为均匀。

2) 应用相关性分析和主成分分析的方法探讨了蜻蛉河底泥重金属的来源,分别为矿产开采、农业活动和工业活动的复合污染源和自然来源。As、Cd、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 主要受矿产开采、农业活动和工业活动的共同影响,Cr、Ni 主要来源于成土母质,而 Ni 除了自然来源外,还受到了人为来源的影响。

3) 运用地累积指数法、内梅罗指数法对蜻蛉河底泥的重金属污染程度的评价结果表明,8 种重金属元素的平均污染程度不高,但存在部分元素在流域局部的污染富集,主要集中在老街子 Au-Pb-Ag 多金属矿区和县城下游的城乡结合区,代表元素为 Cd、Hg、Pd 和 Zn。

参考文献 (References):

[1] 魏伟伟,李春华,叶春,等. 基于底泥重金属污染及生态风险评价的星云湖疏浚深度判定[J]. 环境工程技术学报,2020,10(3):385-391.

Wei W W,Li C H,Ye C,et al. Determination of dredging depth of Xingyun Lake based on heavy metal pollution and ecological risk assessment of sediment[J]. Journal of Environmental Engineering Technology,2020,10(3):385-391.

[2] 毛志刚,谷孝鸿,陆小明,等. 太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 环境科学,2014,35(1):186-193.

Mao Z G,Gu X H,Lu X M,et al. Pollution distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in sediments from the different eastern dredging regions of Lake Taihu[J]. Environmental Science,2014,35(1):186-193.

[3] Sakan S,Dević G,Relić D,et al. Risk assessment of trace element contamination in river sediments in Serbia using pollution indices and statistical methods; A pilot study[J]. Environmental Earth Sciences,2015,73(10):6625-6638.

[4] Zhu Y J,Lu X W,Yang L N,et al. Accumulation and source of heavy metals in sediment of a reservoir near an industrial park of northwest China[J]. Frontiers of Earth Science,2016,10(4):707-716.

[5] 王博,赵爽,夏敦胜,等. 兰州市城区河道表层沉积物重金属污染及磁学参数相关关系研究[J]. 环境科学,2011,32(5):1430-1440.

Wang B,Zhao S,Xia D S,et al. Characteristics of heavy metal elements and their relationship with magnetic properties of river sediment from urban area in Lanzhou[J]. Environmental Science,2011,32(5):1430-1440.

[6] Li X C,Bing J P,Zhang J H,et al. Ecological risk assessment and sources identification of heavy metals in surface sediments of a river-reservoir system[J]. Science of the Total Environment,2022,842:156683.

[7] Young S M,Ishiga H,Roser B P,et al. Geochemistry of sediments in three sectors of Trincomalee Bay, Sri Lanka: Provenance, modifying factors and present environmental status[J]. Journal of Soils and Sediments,2014,14(1):204-217.

[8] 韦丽丽,周琼,谢从新,等. 三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响[J]. 环境科学,2016,37(1):325-334.

Wei L L,Zhou Q,Xie C X,et al. Bioaccumulation and biomagnification of heavy metals in Three Gorges Reservoir and effect of biological factors[J]. Environmental Science,2016,37(1):325-334.

[9] 韩瑞杰,任逸晨,黄涛,等. 包头市三类湿地中重金属污染程度及生物富集研究[J]. 环境工程,2019,37(1):29-34.
Han R J,Ren Y C,Huang T,et al. Study on pollution degree and bio-concentration of heavy metals in three types of wetlands in Baotou,China[J]. Environmental Engineering,2019,37(1):29-34.

[10] Hakima Z,Mohamed M,Aziza M,et al. Environmental and ecological risk of heavy metals in the marine sediment from Dakhla Bay, Morocco[J]. Environmental Science and Pollution Research International,2017,24(9):7970-7981.

[11] 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.

[12] 张俊华,卢翠玲,刘玉寒,等. 开封城郊河道底泥重金属形态垂向分布特征及风险评价[J]. 农业环境科学学报,2017,36(6):1192-1201.
Zhang J H,Lu C L,Liu Y H,et al. Vertical distribution characteristics and risk assessment of heavy metals in core sediments from Kaifeng suburban rivers[J]. Journal of Agro-Environment Science,2017,36(6):1192-1201.

[13] 庞阔,李敏,刘璐,等. 基于蒙特卡洛模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析[J]. 环境科学,2022,43(8):4008-4017.
Pang K,Li M,Liu L,et al. Evaluation and source analysis of heavy metal pollution in sediments of the Yellow River Basin based on Monte Carlo simulation and PMF model[J]. Environmental Science,2022,43(8):4008-4017.

[14] Bi S P,Yang Y,Xu C F,et al. Distribution of heavy metals and environmental assessment of surface sediment of typical estuaries in eastern China[J]. Marine Pollution Bulletin,2017,121(1-2):357-366.

[15] 杨帆,袁隆湖,黎一夫,等. 湖南省主要水系底泥重金属污染特征及其生态风险评价[J]. 生态学报,2022,42(5):1934-1946.
Yang F,Yuan L H,Li Y F,et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of main water systems in Hunan Province[J]. Acta Ecologica Sinica,2022,42(5):1934-1946.

[16] 宫健,王耀锋,李强,等. 某区饮用水源地重金属分布特征、污染评价及源解析[J]. 环境化学,2022,41(7):2276-2288.
Gong J,Wang Y F,Li Q,et al. Distribution characteristics,pollution assessment and source analysis of heavy metals in a drinking water source area[J]. Environmental Chemistry,2022,41(7):2276-2288.

[17] 郑敏慧,白冬锐,张涛,等. 苏州水网地区河道底泥的重金属分布特征与污染风险[J]. 环境科学,2023,44(1):198-209.
Zheng M H,Bai D R,Zhang T,et al. Distribution characteristics and pollution risk of heavy metals in river sediment of Suzhou water network area,China[J]. Environmental Science,2023,44(1):198-209.

[18] Ra K,Bang J H,Lee J M,et al. The extent and historical trend of metal pollution recorded in core sediments from the artificial Lake Shihwa,Korea[J]. Marine Pollution Bulletin,2011,62(8):1814-1821.

[19] 白冬锐,张涛,包峻松,等. 苏州古城区河道底泥的重金属污染分布及生态风险评价[J]. 环境科学,2021,42(7):3206-3214.
Bai D R,Zhang T,Bao J S,et al. Pollution distribution and ecological risk assessment of heavy metals in river sediments from the ancient town of Suzhou[J]. Environmental Science,2021,42(7):3206-3214.

[20] 张国涵,解倩,闫琨,等. “十三五”期间滇池外海底泥重金属污染特征分析及生态风险评价[J]. 水土保持学报,2023,37(3):240-247.
Zhang G H,Xie Q,Yan K,et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Dianchi outer lake during the ‘13th Five-Year Plan period’[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2023,37(3):240-247.

[21] 陈豪,左其亨,窦明. 河流底泥重金属污染研究进展[J]. 人民黄河,2014,36(5):71-75.
Chen H,Zuo Q T,Dou M. Research progress and prospects of heavy metal pollution in river sediment[J]. Yellow River,2014,36(5):71-75.

[22] 易雨君,王文君,宋劼. 长江中下游底泥重金属污染特征、潜在生态风险评价及来源分析[J]. 水利水电技术,2019,50(2):1-7.
Yi Y J,Wang W J,Song J. Pollution characteristics,potential ecological risk assessment and source analysis of heavy metals of sediment in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2019,50(2):1-7.

[23] 丁文荣. 变化环境下滇中地区典型流域水资源演变特征[J]. 水土保持通报,2017,37(2):274-277.
Ding W R. Evolutions of water resources in typical basin of central Yunnan Province under changing environment[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2017,37(2):274-277.

[24] 严清高,江小均,吴鹏,等. 滇中姚安老街子板内富碱火山岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及火山机构划分[J]. 地质学报,2017,91(8):1743-1759.
Yan Q G,Jiang X J,Wu P,et al. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology and volcanic edifice division of the laojiezi intraplate alkali-rich volcanic rocks in Yao'an,central Yunnan province[J]. Acta Geologica Sinica,2017,91(8):1743-1759.

[25] 程琰勋,赵萌生,张亚,等. 滇中姚安地区土壤重(类)金属来源分析及生态风险评价[J]. 沉积与特提斯地质,2024,44(1):172-184.
Cheng Y X,Zhao M S,Zhang Y,et al. Sources analysis and ecological risk assessment of soil heavy metals and metalloids in Yao'an area of central Yunnan[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology,2024,44(1):172-184.

[26] 罗晨皓,周晔,沈阳. 云南姚安 Au-Pb-Ag 矿床含矿富碱岩浆岩地球化学特征及岩石成因[J]. 地球科学,2019,44(6):2063-2083.
Luo C H,Zhou Y,Shen Y. The geochemical characteristics and

- petrogenesis of the mineralized alkali-rich magmatic rock in Yao'an Au-Pb-Ag deposit, Yunnan Province[J]. *Earth Science*, 2019, 44(6): 2063–2083.
- [27] Zhang L L, Lyu J G. Ecological risk assessment of the metallic pollution in the soil and sediment in Tingjiang Basin[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(4): 1799–1803.
- [28] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geology Journal*, 1969, 2(3): 109–118.
- [29] Wang G X, Zeng C, Zhang F, et al. Traffic-related trace elements in soils along six highway segments on the Tibetan Plateau; Influence factors and spatial variation[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 581: 811–821.
- [30] 周葆华, 胡睿鑫, 赵宽, 等. 皖江经济带土壤 Cd 空间分布特征与生态风险评价[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(12): 3261–3270.
- Zhou B H, Hu R X, Zhao K, et al. Spatial distribution characteristic of Cd in soils and its ecological risk assessment in the economic belt of Yangtze River in Anhui[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(12): 3261–3270.
- [31] 汤金来, 赵宽, 胡睿鑫, 等. 滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价[J]. *环境科学*, 2023, 44(6): 3562–3572.
- Tang J L, Zhao K, Hu R X, et al. Heavy metal concentration, source, and pollution assessment in topsoil of Chuzhou City[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(6): 3562–3572.
- [32] 王玉, 辛存林, 于爽, 等. 南方丘陵区土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2022, 43(9): 4756–4766.
- Wang Y, Xin C L, Yu S, et al. Evaluation of heavy metal content, sources, and potential ecological risks in soils of southern hilly areas[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(9): 4756–4766.
- [33] 侯青叶, 杨忠芳, 余涛, 等. 中国土壤地球化学参数[M]. 北京: 地质出版社, 2020.
- Hou Q Y, Yang Z F, Yu T, et al. Soil geochemical dataset of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2020.
- [34] 奚小环, 侯青叶, 杨忠芳, 等. 基于大数据的中国土壤背景值与基准值及其变化特征研究——写在《中国土壤地球化学参数》出版之际[J]. *物探与化探*, 2021, 45(5): 1095–1108.
- Xi X H, Hou Q Y, Yang Z F, et al. Big data based studies of the variation features of Chinese soil's background value versus reference value: A paper written on the occasion of *soil geochemical parameters of China's* publication[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, 45(5): 1095–1108.
- [35] Wilding L P. Spatial variability: Its documentation, accommodation and implication to soil surveys[G]//Nielsen D R, Bouma J. *Soil spatial Variability*, 1985: 166–194.
- [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): 2202–2210.
- Zhang J, Guo X Y, Zeng Y, et al. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in river sediments from Lake Taihu Basin[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(5): 2202–2210.
- [37] Wang L F, Yang L Y, Kong L H, et al. Spatial distribution, source identification and pollution assessment of metal content in the surface sediments of Nansi Lake, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 140: 87–95.
- [38] 董鑫, 胡浩然, 张晓晴, 等. 基于 Meta 分析的矿区周边土壤重金属污染特征及风险评价[J]. *地学前缘*, 2024, 31(2): 93–102.
- Dong X, Hu H R, Zhang X Q, et al. A Meta-analysis of the distribution characteristics and ecological risk of heavy metals in mining areas[J]. *Earth Science Frontiers*, 2024, 31(2): 93–102.
- [39] 周艳, 陈樯, 邓绍坡, 等. 西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2018, 39(6): 2884–2892.
- Zhou Y, Chen Q, Deng S P, et al. Principal component analysis and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils around a Pb-Zn Mine in south-western China[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(6): 2884–2892.
- [40] 王美, 李书田. 肥料重金属含量状况及施肥对土壤和作物重金属富集的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(2): 466–480.
- Wang M, Li S T. Heavy metals in fertilizers and effect of the fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(2): 466–480.
- [41] Madrid L, Díaz-Barrientos E, Madrid F. Distribution of heavy metal contents of urban soils in parks of Seville[J]. *Chemosphere*, 2002, 49(10): 1301–1308.
- [42] 李旗, 白凯华, 姜大伟, 等. 漓江上游青狮潭灌区干支渠沉积物重金属分布规律及来源解析[J]. *中国农村水利水电*, 2022(7): 16–24.
- Li Q, Bai K H, Jiang D W, et al. Distribution and source analysis of heavy metals in sediments of qingshitian irrigation district in Lijiang River Basin[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022(7): 16–24.
- [43] 陈志凡, 化艳旭, 徐薇, 等. 基于正定矩阵因子分析模型的城郊农田重金属污染源解析[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(1): 276–283.
- Chen Z F, Hua Y X, Xu W, et al. Analysis of heavy metal pollution sources in suburban farmland based on positive definite matrix factor model[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(1): 276–283.
- [44] 宁增平, 肖青相, 蓝小龙, 等. 都柳江水系沉积物锑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.
- Ning Z P, Xiao Q X, Lan X L, et al. Spatial distribution characteristics and potential ecological risk of antimony and selected heavy metals in sediments of Duliuijiang river[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(7): 2784–2792.
- [45] 秦元礼, 张富贵, 彭敏, 等. 云南省武定县土壤重金属地球化学分布特征及其来源浅析[J]. *地质与勘探*, 2020, 56(3): 540–550.
- Qin Y L, Zhang F G, Peng M, et al. Geochemical distribution characteristics and sources of heavy metals in soils of Wuding County, Yunnan Province[J]. *Geology and Exploration*, 2020, 56(3): 540–550.

Characteristics and source analysis of heavy metal contamination in the sediments of the Jinsha River Basin: A case study of the Qingling River

CHENG Yan-Xun^{1,2}, XU Lei^{1,2}, WU Liang^{1,2}, ZHAO Meng-Sheng^{1,2}, WANG Fu-Hua^{1,2}, QIAN Kun^{1,2},
ZHENG Hong-Fu^{1,2}, LI Wen-Hui^{1,2}, ZHANG Hong-Hui^{1,2}

(1. Kunming Natural Resources Comprehensive Survey Center of China Geological Survey, Kunming 650100, China; 2. Technology Innovation Center for Natural Ecosystem Carbon Sink, Ministry of Natural Resources, Kunming 650100, China)

Abstract: To understand the characteristics and sources of heavy metal contamination in the sediments of the Jinsha River basin, this study investigated the Qingling River basin—a primary tributary of Longchuan River on the south bank of the Jinsha River. Samples were collected from the sediments of 22 representative sections, and the concentrations of eight heavy metal elements, i. e. , As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, and Zn, were tested and analyzed. Statistical analysis was conducted on the distribution characteristics of these heavy metal elements in the sediments along the basin. The sources of these heavy metals were investigated using correlation analysis and principal component analysis, and the degree of heavy metal contamination in the sediments was assessed using the geo-accumulation index and the Nemero index. The results indicate that As, Cd, Cu, Hg, Ni, Pb, and Zn are primarily influenced by mining, agricultural, and industrial activities. Cr and Ni originate primarily from soil-forming parent materials. Besides natural sources, Ni is also affected by anthropogenic sources. The assessment results derived using the geo-accumulation and Nemero indices reveal that the eight heavy metal elements exhibit moderate or low contamination on average. However, partial elements, represented by Cd, Hg, Pb, and Zn, exhibit localized enrichment within the basin, primarily concentrated in the Laojiezi Au-Pb-Ag polymetallic mining area and the urban-rural junction in the lower reaches of the county.

Key words: sediment; heavy metal; contamination characteristic; source analysis; Jinsha River; Qingling River

(本文编辑:蒋实)