

典型锰矿区河流沉积物重金属分布特征、来源解析及生态风险评估

张永江¹, 李希希¹, 邓茂², 吴丽君¹, 马双¹, 周洵平¹

- 重庆化工职业学院, 重庆 401220
- 重庆市黔江区生态环境监测站, 重庆 409000

摘要:以重庆市溶溪镇典型锰矿区河流沉积物为研究对象,探究了该区域河流沉积物中重金属(Cd、Zn、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb和As)的污染特征,评价了其可能产生的生态风险,并解析了这些重金属的来源。监测结果表明,大部分采样点沉积物中的Cd、Zn、Cu、Mn、Ni和As含量超过了重庆土壤背景值和中国土壤元素背景值。春季和冬季沉积物中各重金属的平均含量高于夏季和秋季。单因子污染指数表现为Mn>Zn>As>Ni>Cd>Cu>Pb>Cr,其中Mn表现为极强污染,Zn和As表现为重度污染。地质累积指数表现为Mn>Zn>Cd>As>Ni>Cu>Cr>Pb,其中Mn表现为偏重污染。重金属潜在生态风险评估结果显示,该区域为中等生态风险。其中,仅Cd和Mn分别出现了强和中等生态风险,说明Cd和Mn是造成当地重金属潜在生态风险的主要贡献因子。此外,相关性分析结果和主成分分析结果进一步揭示: Cd、Zn、Cu、Mn和Ni具有相似的污染来源,主要为锰矿开采; Cr和Pb的来源属于自然源; As主要来自农业活动。因此,应对该锰矿区沉积物中Mn、Zn、Cd和As的污染情况予以重视,并加强矿区重金属来源管控和污染防治。同时,应关注其他同类锰矿区沉积物中重金属的污染情况,并采取相应的污染治理策略。该研究结果可为锰矿区重金属污染治理提供参考。

关键词: 锰矿区; 重金属; 分布特征; 生态风险

中图分类号: X522 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-6002(2024)04-0183-12

DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2024.04.19

Distribution Characteristics, Source Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Fluvial Sediments of Typical Manganese Ore Areas

ZHANG Yongjiang¹, LI Xixi¹, DENG Mao², WU Lijun¹, MA Shuang¹, ZHOU Xunping¹

- Chongqing Chemical Industry Vocational College, Chongqing 401220, China
- Ecological Environmental Monitoring Station of Qianjiang District in Chongqing, Chongqing 409000, China

Abstract: Taking the river sediments of a representative manganese mining area in Rongxi Town, Chongqing, as the study subject, the contamination characteristics of heavy metals (Cd, Zn, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb and As) in the sediments in this area were investigated, the potential ecological risks were evaluated, and the origins of these heavy metals were analyzed. The detection results revealed that the contents of Cd, Zn, Cu, Mn, Ni and As in the sediments of most of the sampling sites surpassed the background values for Chongqing soils and the background values for soil elements in China. The average content of each heavy metal in the sediments in spring and winter was higher than that in summer and fall. The single-factor pollution index values showed that Mn>Zn>As>Ni>Cd>Cu>Pb>Cr, with Mn displaying extremely severe pollution and Zn and As presenting heavy pollution. The value of geoaccumulation index exhibited Mn>Zn>Cd>As>Ni>Cu>Cr>Pb, of which Mn displayed heavy pollution. Meanwhile, the results of the potential ecological risk of heavy metals indicated a moderate ecological risk in this region, in which only the heavy metals Cd and Mn appeared as strong and moderate ecological risks, respectively, suggesting that Cd and Mn in sediments in the region are the main sources of local ecological risks. Furthermore, the findings of correlation and principal component analysis further revealed that Cd, Zn, Cu, Mn and Ni in the sediments have similar origins of pollution, mainly from manganese mining; the origins of Cr and Pb belong to natural sources; and As mainly comes from agricultural activities. Therefore, attention should be paid to the pollution of Mn, Zn, Cd and As in the sediments of this manganese mining area, and the source control and pollution prevention of heavy metals in the mining area should be emphasized. Simultaneously, efforts should be made to focus on the heavy metal pollution in the sediments of other similar manganese mining areas and to adopt corresponding

收稿日期: 2023-05-11; **修订日期:** 2023-12-13

基金项目: 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202104501, KJQN202304505)

第一作者简介: 张永江(1983-), 男, 重庆彭水人, 博士, 正高级工程师。

pollution control strategies. The findings of this research can offer a reference for heavy metal pollution management in manganese mining areas.

Keywords: manganese ore areas; heavy metals; distribution characteristics; ecological risk

重金属具有种类多样、生物毒性强、难以降解、易生物富集以及来源广泛等特性,其污染已经成为备受全球关注的环境问题之一^[1-4]。随着城市化的推进和工农业的快速发展,工业生产和居民生活过程中产生的大量重金属污染物通过多种途径进入水体,并在沉积物中积累^[5]。当水体环境发生改变时,沉积物中的重金属会通过解吸作用被缓慢释放并再次进入上覆水体,造成二次污染^[6-8]。沉积物既是河流重金属的汇集地,又是河流重金属的重要内源^[9]。因此,研究河流沉积物中重金属的分布状况、污染特征和潜在生态风险,可为河流污染防治提供基础数据和科学依据。

近年来,研究人员在沉积物重金属污染状况和生态风险领域开展了大量研究。例如:李国莲等^[10]对长江下游南岸南漪湖沉积物重金属污染进行了调查,发现 As、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb 和 Zn 的平均含量高出土壤背景值 1.13~3.36 倍,且 Pb 的潜在生态风险等级为中等。丁平等^[11]以淮江苏段表层沉积物为研究对象,采用富集系数与生物毒性不利影响(mPEC-Q)对重金属进行了污染评价分析,发现沉积物中 Zn、Mn、As、Ni 和 Cu 等的含量均高于江苏土壤重金属背景值,Mn 和 Zn 的富集系数最大,沉积物重金属生物毒性总体处于中风险状态。雷雁翔等^[12]对长岛北部海域沉积物中的重金属进行了风险评价,其中:潜在生态风险指数法评价结果显示,研究区域整体处于较低生态风险状态;来源分析表明,Cd、Hg、Cu、Zn、Hg、Ni 和 Cr 含量主要受水产养殖和污水排放等人类活动的影响,As 含量仅受到区域周边岛屿和近岸土母质的影响。丁亚鹏等^[13]对开封市河流沉积物中重金属的分布特征和污染来源进行分析发现,2021 年沉积物重金属含量较 2015 年出现大幅降低。其中:2015 年,Cd、Cr、Pb 和 Zn 是主要污染物;2021 年,Cu 替代 Pb 成为主要污染物。此外,产业布局、土地利用类型等是开封市河流沉积物重金属含量的主要影响因素^[13]。

重庆市秀山县溶溪镇作为锰矿开采和冶炼典型区域,河流沉积物重金属含量受到采矿活动的极大影响。本研究以该区域河流沉积物为研究对象,首先通过测定 Cd、Zn、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb 和 As

的含量,分析重金属的分布特征。随后,运用单因子污染指数法、地质累积指数法以及潜在生态风险指数法等,对沉积物重金属污染进行评价和分析。最后,通过联合相关性分析和主成分分析方法,对沉积物重金属进行溯源。研究结果对强化重庆市秀山县溶溪镇锰矿区沉积物重金属污染防治具有重要的指导意义,也可为其他同类矿区的污染防治提供数据支撑与理论依据。

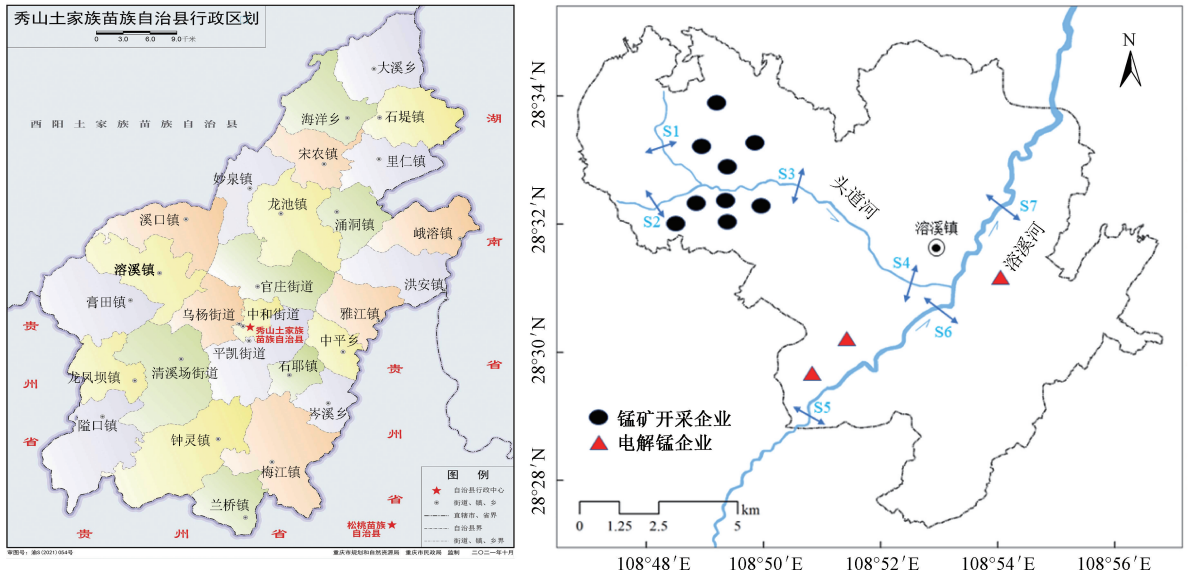
1 材料与方 法

1.1 采样点布置与样品采集

研究区域位于重庆市秀山县溶溪镇。在锰矿采矿区(头道河)布设 4 个断面,在冶炼区(溶溪河)布设 3 个断面,作为采样点位,具体位置如图 1 所示。分别于 2017 年 5 月 20 日(春)、2017 年 7 月 8 日(夏)、2017 年 9 月 14 日(秋)、2018 年 1 月 13 日(冬),利用沉积物采样装置采集 0~10 cm 表层样品,并置于聚乙烯袋中,于 4℃ 低温保存,转运至实验室。在样品预处理过程中,需将石块和动植物残体等杂物去除,经冷冻干燥后研磨,过 100 目(0.147 mm)筛备用。

1.2 样品测定与质量分析

沉积物 pH 依照《土壤 pH 值的测定 电位法》(HJ 962—2018)进行测定^[14]。有机质含量采用酸性重铬酸钾($K_2Cr_2O_7$)法进行测定^[15],重复测定 3 次,取平均值。沉积物样品重金属(Cd、Zn、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb 和 As)含量采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)(美国 Agilent, 7900),按照相关标准(GB 15618—1995、GB/T 17141—1997、HJ 491—2019)进行测定^[16]。利用 GBW07405(GSS-5)标准物质(Cd、Zn、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、As 的标准值分别为 0.45 $\mu\text{g/g} \pm 0.06 \mu\text{g/g}$ 、494 $\mu\text{g/g} \pm 25 \mu\text{g/g}$ 、118 $\mu\text{g/g} \pm 7 \mu\text{g/g}$ 、144 $\mu\text{g/g} \pm 6 \mu\text{g/g}$ 、1360 $\mu\text{g/g} \pm 71 \mu\text{g/g}$ 、40 $\mu\text{g/g} \pm 4 \mu\text{g/g}$ 、552 $\mu\text{g/g} \pm 29 \mu\text{g/g}$ 、412 $\mu\text{g/g} \pm 16 \mu\text{g/g}$)对方法进行验证。验证结果显示,测定结果均在误差范围内。同时,为保证样品在测定过程中不受污染,每 30 个样品测定 2 个空白。测定结果显示,空白样品重金属含量均小于被测样品重金属含量的 1%。



注:底图下载自重庆市标准地图服务系统(<https://yuditu.com/bzdt/index.html?Name=秀山土家族苗族自治县行政区划>), 审图号为渝S(2021)054号,下载日期为2024-07-07。

图1 沉积物采样点分布

Fig. 1 Locations of sediment sampling sites

1.3 评价方法

分别采用单因子污染指数法^[17]、地质累积指数法^[18-19]和潜在生态风险指数法^[20]对重金属进

行污染评价分析。其中,各重金属的毒性系数^[16]如下: Cd, 30; Zn, 1; Cr, 2; Cu, 5; Mn, 1; Ni, 5; Pb, 5; As, 10。各分级标准见表1。

表1 沉积物重金属污染指数分级标准

Table 1 Classification standard of heavy metal pollution indexes in sediments

指标	数值范围	污染水平/风险等级	指标	数值范围	污染水平/风险等级
单因子污染指数 (P_i)	$P_i \leq 1$	无污染	潜在生态风险系数 (E_r)	$E_r < 40$	轻微
	$1 < P_i \leq 2$	轻微污染		$40 \leq E_r < 80$	中等
	$2 < P_i \leq 3$	轻度污染		$80 \leq E_r < 160$	强
	$3 < P_i \leq 5$	重度污染		$160 \leq E_r < 320$	很强
	$P_i > 5$	极强污染		$E_r \geq 320$	极强
地质累积指数 (I_{geo})	$I_{geo} < 0$	无污染	潜在生态风险指数 (RI)	$RI < 150$	轻微
	$0 \leq I_{geo} < 1$	轻度污染		$150 \leq RI < 300$	中等
	$1 \leq I_{geo} < 2$	偏中污染		$300 \leq RI < 600$	强
	$2 \leq I_{geo} < 3$	中度污染		$600 \leq RI < 1200$	很强
	$3 \leq I_{geo} < 4$	偏重污染		$RI \geq 1200$	极强
	$4 \leq I_{geo} < 5$	重污染			
	$I_{geo} \geq 5$	严重污染			

1.4 数据处理

采用 SPSS 26.0 软件完成相关性分析和主成分分析,采用 Excel 完成数据统计和图表制作。

2 结果与讨论

2.1 沉积物重金属含量特征

重庆市秀山县溶溪镇锰矿区沉积物重金属含量统计结果见表2。所有采样点的 Cd、Zn 含量都

较高。除 S2 采样点的 Zn 含量低于重庆土壤背景值外,其他采样点的 Cd、Zn 含量均高于重庆土壤背景值。所有采样点的 Cd、Zn 含量均高于中国土壤元素背景值^[21]。所有采样点的 Cr 含量均低于重庆土壤背景值。仅 S3 采样点的 Cr 含量高于中国土壤元素背景值,为中国土壤元素背景值的 1.15 倍。S3、S4、S5、S6、S7 采样点的 Cu 含量高于重庆土壤背景值和中国土壤元素背景值,分别为重庆土壤背景值的 1.28、2.68、1.38、2.86、

2.08倍和中国土壤元素背景值的1.47、3.09、1.59、3.29、2.39倍。所有采样点的Mn含量都远高于重庆土壤背景值和中国土壤元素背景值,分别为重庆土壤背景值的5.73~158.00倍和中国土壤背景值的6.05~166.44倍。S3、S4、S5、S6和S7采样点的Ni含量高于重庆土壤背景值,为重庆土壤背景值的1.34~5.73倍。所有采样点的

Ni含量均高于中国土壤元素背景值,为中国土壤元素背景值的1.59~6.82倍。仅S3采样点的Pb含量高于重庆土壤背景值和中国土壤元素背景值,分别为重庆土壤背景值的1.25倍和中国土壤元素背景值的1.25倍。所有采样点的As含量都高于重庆土壤背景值,S1、S4、S5、S6和S7采样点的As含量高于中国土壤元素背景值。

表2 沉积物重金属含量描述统计
Table 2 Descriptive statistics of heavy metal contents in sediments

采样点	统计值	Cd	Zn	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	As
S1	平均值/(mg/kg)	0.32	85.36	47.45	21.31	3 525.43	27.40	18.94	11.50
	标准差/(mg/kg)	0.10	13.92	7.26	1.77	1 099.04	3.45	6.60	7.08
	变异系数/%	31.50	16.31	15.29	8.32	31.17	12.58	34.84	61.56
S2	平均值/(mg/kg)	0.26	75.09	51.68	20.16	6 514.97	29.23	20.92	8.69
	标准差/(mg/kg)	0.07	15.88	12.49	3.27	3 142.19	6.20	4.12	6.45
	变异系数/%	26.20	21.15	24.17	16.21	48.23	21.20	19.71	74.24
S3	平均值/(mg/kg)	0.46	135.33	70.34	33.23	12 484.81	42.88	32.50	9.83
	标准差/(mg/kg)	0.13	42.74	29.17	10.74	6 632.65	14.43	13.79	5.53
	变异系数/%	27.51	31.58	41.47	32.33	53.13	33.64	42.43	56.24
S4	平均值/(mg/kg)	0.68	220.54	42.92	69.76	38 045.13	45.53	16.41	27.10
	标准差/(mg/kg)	0.15	93.32	5.78	27.52	24 800.93	17.55	12.39	9.51
	变异系数/%	21.51	42.32	13.46	39.45	65.19	38.53	75.53	35.13
S5	平均值/(mg/kg)	0.53	227.81	36.28	35.99	11 752.90	48.72	18.87	12.93
	标准差/(mg/kg)	0.28	184.90	5.96	19.55	5 892.22	38.55	3.73	5.71
	变异系数/%	53.35	81.16	16.44	54.32	50.13	79.13	19.76	44.38
S6	平均值/(mg/kg)	0.68	591.74	45.42	74.30	49 785.54	117.60	20.14	18.22
	标准差/(mg/kg)	0.29	486.32	8.45	39.55	48 201.40	96.76	13.87	8.62
	变异系数/%	43.40	82.19	18.60	53.23	96.82	82.25	68.84	47.41
S7	平均值/(mg/kg)	0.79	858.21	51.34	53.98	97 031.81	183.34	17.97	12.90
	标准差/(mg/kg)	0.26	1 025.10	9.36	27.91	125 484.12	154.40	9.39	9.16
	变异系数/%	33.36	119.43	18.23	51.70	129.34	84.19	52.25	71.27
重庆土壤背景值		0.11	80	80	26	615	32	26	5
中国土壤元素背景值		0.097	74.2	61.0	22.6	583	26.9	26.0	11.2

受河流自身环境条件及人类活动等因素的影响,不同河流沉积物中重金属的含量存在一定的差异性^[22-24]。变异系数能更好地反映沉积物中重金属含量的变化状况。其中,变异系数越大,说明该种重金属含量的离散程度越大,沉积物受外界变化影响越显著^[25-26]。变异系数分析结果表明:研究区S1、S2、S3采样点中,As的差异性最显著,变异系数分别为61.56%、74.24%、56.24%;S4采样点中,Pb的差异性最显著,变异系数为75.53%;S5采样点中,Zn的差异性最显著,变异系数为81.16%;S6和S7采样点中,Mn的差异性最显著,变异系数分别为96.82%和129.34%。As、Pb、Zn和Mn的变异系数较高,表明其在空间上的分布不均匀^[27-28],受外界干扰较为显著。

如图2所示,各采样点pH的范围为5.29~8.36,平均值为7.03,空间分布规律不显著,季节

差异不明显,表明沉积物pH受外界影响较小,可能主要受河流运动和沉积作用等自然因素的影响。重庆市溶溪镇锰矿区沉积物中8种重金属的含量排序为Mn>Zn>Ni>Cu=Cr>Pb>As>Cd。从不同季节来看(表3),春季(5月)和冬季(1月)沉积物中Zn、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb和As的平均含量高于夏季(7月)和秋季(9月)。沉积物中重金属的含量受温度以及有机质含量等多种因素的影响^[29]。与春季和冬季相比,夏季和秋季较高的温度可能加快了沉积物中重金属的解吸和释放。相关研究表明,沉积物有机质可以和环境介质中的金属离子形成简单络合物或者混合配位络合物,这就使得有机质浓度与重金属浓度呈正相关^[30]。重庆市溶溪镇锰矿区沉积物中有机质的含量在春季和冬季较高(图2),从而造成春季和冬季沉积物中重金属的含量也较高。

从变异系数来看,春季差异最为显著的是 Zn,差异最小的是 Mn;夏季和秋季差异最显著的是 Mn,差异最小的是 Cr;冬季差异最显著的是 Zn,

差异最小的是 Cr。这表明各采样点的 Zn 含量在春季和冬季差异较明显,Mn 含量在夏季和秋季差异较明显。

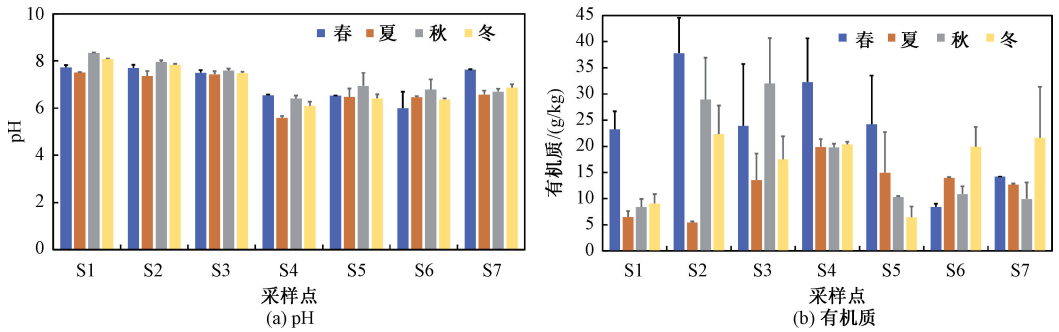


图 2 沉积物 pH 和有机质含量

Fig. 2 The pH and organic matter contents of sediment

表 3 沉积物重金属含量季节变化特征

Table 3 Seasonal variation characteristics of heavy metal content in sediments

季节	统计值	Cd	Zn	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	As
春季	最大值/(mg/kg)	1.30	1 298.00	122.84	150.81	19 651.23	299.51	53.30	27.30
	最小值/(mg/kg)	0.16	80.36	40.70	22.31	4 138.21	29.20	0.75	0.86
	平均值/(mg/kg)	0.38	459.01	60.97	63.98	14 925.61	107.83	15.10	10.77
	标准差/(mg/kg)	0.28	414.84	23.15	38.60	5 450.50	86.01	13.25	7.38
	变异系数/%	73.25	90.36	37.98	60.33	36.52	79.81	87.75	68.53
夏季	最大值/(mg/kg)	1.21	486.81	63.60	78.39	45 345.40	96.30	61.30	41.59
	最小值/(mg/kg)	0.23	61.28	28.88	19.02	2 205.75	22.02	9.60	2.57
	平均值/(mg/kg)	0.60	168.93	37.59	41.05	17 568.51	42.17	21.60	19.14
	标准差/(mg/kg)	0.29	114.22	7.81	20.76	14 597.12	21.73	11.94	8.63
	变异系数/%	47.94	67.63	20.79	50.57	83.09	51.53	55.27	45.08
秋季	最大值/(mg/kg)	0.99	912.23	95.38	120.14	170 442.03	288.00	32.98	42.61
	最小值/(mg/kg)	0.25	65.30	33.29	16.76	2 073.30	25.45	1.00	0.59
	平均值/(mg/kg)	0.61	279.61	53.95	43.49	40 582.62	74.20	14.28	10.54
	标准差/(mg/kg)	0.25	251.34	15.60	29.30	52 004.72	69.33	8.89	12.63
	变异系数/%	40.71	89.86	28.92	67.37	128.20	93.44	62.25	119.91
冬季	最大值/(mg/kg)	1.14	3 785.10	74.57	125.44	343 315.23	567.82	51.31	33.15
	最小值/(mg/kg)	0.32	73.15	36.41	16.67	3 221.57	17.12	17.75	1.63
	平均值/(mg/kg)	0.54	466.60	52.79	43.99	43 424.21	82.48	28.25	15.86
	标准差/(mg/kg)	0.25	966.83	12.14	34.09	87 589.73	141.52	7.93	7.19
	变异系数/%	45.74	207.22	22.99	77.51	201.71	171.60	28.06	45.34

2.2 沉积物重金属污染评价

2.2.1 单因子污染指数法评价结果

单因子污染指数法评价结果如表 4 所示。研究区 S1 采样点沉积物中,Cd、Zn 和 As 表现为轻微污染,Mn 表现为极强污染,Cr、Cu、Ni 和 Pb 表现为无污染。S2 采样点沉积物中,As 表现为轻微污染,Mn 表现为极强污染,Cd、Zn、Cr、Cu、Ni 和 Pb 表现为无污染。S3 采样点沉积物中,Cd、Zn、Cu、Ni、Pb 和 As 表现为轻微污染,Mn 表现为极强污染,Cr 表现为无污染。S4 采样点沉积物中,Ni 表现为轻微污染,Cd、Zn 和 Cu 为轻度污染,As 为重度污染,Mn 为极强污染,Cr 和 Pb 为无污染。

S5 采样点沉积物中,Cd、Cu、Ni 和 As 表现为轻微污染,Zn 表现为轻度污染,Mn 表现为极强污染,Cr 和 Pb 表现为无污染。S6 采样点沉积物中,Cd 和 As 表现为轻度污染,Cu 和 Ni 表现为重度污染,Zn 和 Mn 表现为极强污染,Cr 和 Pb 表现为无污染。S7 采样点沉积物中,As 表现为轻微污染,Cd 和 Cu 为轻度污染,Zn、Mn 和 Ni 为极强污染,Cr 和 Pb 为无污染。8 种重金属元素的各采样点单因子污染指数平均值表现为 Mn>Zn>As>Ni>Cd>Cu>Pb>Cr。其中:Mn 最大,均值为 48.2;其次为 Zn 和 As,均值分别为 3.83 和 3.04;其余的重金属元素均小于 3。因此,应加强对沉积物中

Mn、Zn、As 的实时监测和污染防治。此外,在针对其他地区的锰矿区开展沉积物重金属污染治理

时,除了关注 Mn 污染外,还应重点关注 Zn 和 As 污染。

表 4 沉积物重金属单因子污染指数

Table 4 Single-factor pollution standard index for heavy metals in sediments

采样点	Cd	Zn	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	As
S1	1.13	1.04	0.64	0.87	5.42	0.87	0.67	1.74
S2	0.93	0.92	0.69	0.82	10.02	0.93	0.74	1.31
S3	1.64	1.65	0.95	1.42	19.21	1.41	1.23	1.49
S4	2.42	2.69	0.58	2.80	58.53	1.43	0.58	4.09
S5	1.90	2.78	0.49	1.51	18.08	1.50	0.67	1.94
S6	2.42	7.22	0.61	3.03	76.59	3.74	0.72	2.75
S7	2.83	10.52	0.69	2.24	149.31	5.83	0.64	1.94
平均值	1.90	3.83	0.66	1.83	48.16	2.22	0.74	2.18

2.2.2 地质累积指数法评价结果

运用地质累积指数法对重庆市溶溪镇锰矿区沉积物重金属进行评价,结果如表 5 所示。研究区 S1 和 S2 采样点沉积物中, Mn 累积污染最重, 分别表现为偏中污染和中度污染; 其余 7 种重金属均表现为无污染。S3 采样点沉积物中, Mn 累积污染最重, 表现为偏重污染; 其次是 Cd 和 Zn, 表现为轻度污染; 而 Cr、Cu、Ni、Pb 和 As 则表现为无污染。S4 采样点沉积物中, Mn 累积污染最重, 表现为严重污染; 其次是 As, 表现为偏中污染; 再次是 Cd、Zn 和 Cu, 表现为轻度污染; 最后是 Cr、Ni 和 Pb, 表现为无污染。S5 采样点沉积物中, Mn 累积污染最重, 表现为偏重污染; 其次是 Cd、Zn 和 As, 表现为轻度污染; Cr、Cu、Ni 和 Pb 则

表现为无污染。S6 采样点沉积物中, Mn 累积污染最重, 表现为重污染; 其次是 Zn 和 As, 表现为偏中污染; 再次是 Cd、Cu 和 Ni, 表现为轻度污染; Cr 和 Pb 则表现为无污染。S7 采样点沉积物中, Mn 累积污染最重, 表现为严重污染; 其次是 Zn, 表现为中度污染; 再次是 Ni, 表现为偏中污染; 最后是 Cd 和 Cu, 表现为轻度污染。单因子污染指数和地质累积指数评价结果显示, Cr 和 Pb 均为无污染, 表明研究区沉积物未受到 Cr 和 Pb 污染。沉积物地质累积指数平均值排序为 $Mn > Zn > Cd > As > Ni > Cu > Cr > Pb$, 其中 Mn 的地质累积指数最大。因此, 应加强对溶溪镇锰矿区沉积物中 Mn 的持续关注和长期监测, 并开展相应整治, 防止其对该地区河流造成重金属污染。

表 5 沉积物重金属地质累积指数

Table 5 Geoaccumulation index for heavy metals in sediments

采样点	Cd	Zn	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	As
S1	-0.48	-0.55	-1.25	-0.80	1.78	-0.80	-1.29	-0.16
S2	-0.74	-0.74	-1.16	-0.89	2.59	-0.73	-1.04	-0.74
S3	0.06	0.06	-0.80	-0.23	3.44	-0.23	-0.49	-0.33
S4	0.65	0.73	-1.39	0.81	5.03	-0.16	-2.30	1.41
S5	0.17	0.54	-1.64	-0.20	3.39	-0.28	-1.19	0.02
S6	0.54	1.73	-1.32	0.81	4.96	0.76	-1.51	1.03
S7	0.81	2.11	-1.15	0.40	5.33	1.50	-1.73	-0.85
平均值	0.14	0.55	-1.24	-0.01	3.79	0.00	-1.36	0.04

2.2.3 潜在生态风险指数法评价结果

潜在生态风险指数法评价结果如表 6 所示。潜在生态风险系数计算结果表明, 该区域河流沉积物中, Cd 和 Mn 均表现为中等生态风险。各采样点 Cd 和 Mn 的潜在生态风险系数分别在 27.96~84.80 和 5.42~149.31 之间, 平均值分别为 56.83 和 48.16。S1 和 S2 采样点的 Cd 的潜在

生态风险系数均低于 40, 表现为轻微生态风险; S3、S4、S5 和 S6 采样点表现为中等生态风险; S7 采样点表现为强生态风险。S1、S2、S3 和 S5 采样点的 Mn 的潜在生态风险系数均低于 40, 表现为轻微生态风险; S4 和 S6 采样点表现为中等生态风险; S7 采样点表现为强生态风险。S4 采样点的 As 的潜在生态风险系数为 40.88, 表现为中等生

态风险;其他采样点的潜在生态风险系数均低于 40,表现为轻微生态风险。各采样点的 Zn、Cr、

Cu、Ni 和 Pb 的潜在生态风险系数均低于 40,表现为轻微生态风险。

表 6 沉积物重金属潜在生态风险指数及风险等级
Table 6 Potential ecological risk index values and risk levels of heavy metals in sediments

采样点	潜在生态风险系数(E_r)								潜在生态风险指数(RI)	危害程度
	Cd	Zn	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	As		
S1	34.04	1.04	1.28	4.33	5.42	4.34	3.37	17.38	71.20	轻微
S2	27.96	0.92	1.39	4.10	10.02	4.63	3.72	13.13	65.87	轻微
S3	49.11	1.65	1.89	6.75	19.21	6.78	5.78	14.85	106.00	轻微
S4	72.46	2.69	1.15	14.23	58.53	7.20	2.92	40.88	200.02	中等
S5	56.97	2.78	0.98	7.32	18.08	7.71	3.36	19.43	116.60	轻微
S6	72.47	7.22	1.22	15.13	76.59	18.62	3.58	27.46	222.34	中等
S7	84.80	10.52	1.38	11.00	149.31	29.03	3.20	19.42	308.54	强
平均值	56.83	3.83	1.33	8.96	48.16	11.20	3.70	21.79	155.80	中等
贡献率/%	36.52	2.46	0.85	5.75	30.91	7.18	2.38	14.03	—	—

注:“—”表示不涉及。

潜在生态风险指数计算结果(表 6)表明,重庆市溶溪镇锰矿区沉积物中重金属的潜在生态风险指数范围为 71.20~308.54,平均值为 155.80。其中,S1、S2、S3 和 S5 采样点表现为轻微生态风险,S4 和 S6 采样点表现为中等生态风险,S7 采样点表现为强生态风险。此外,Cd 和 Mn 是沉积物重金属潜在生态风险的主要贡献因子,贡献率分别高达 36.52% 和 30.91%。As 的贡献率为 14.03%,Ni、Cu、Zn、Pb 的贡献率分别为 7.18%、5.75%、2.46%、2.38%,Cr 的贡献率仅为 0.85%。因此,未来应加强对重庆市溶溪镇锰矿区沉积物中重金属的污染监测,尤其应加强 Cd 和 Mn 污染治理。同时,也应加强对全国其他同类矿区沉积物中 Mn 和 Cd 污染的关注及治理。

前人的研究表明,联合采用多种研究方法评价重金属污染,可以更全面地揭示沉积物中重金属的复合污染特征^[5]。采用单因子污染指数法进行评价时,需要提前获取重金属含量值和国家标准值。该方法操作简便,可以快速筛选出主要污染因子,但忽略了多种环境因子的复合作用,因而其评价结果不能全面反映沉积物污染程度^[31]。单因子污染指数法仅适用于由单一环境因子导致的重金属污染严重区域,但需要强调的是,该方法是其他综合评价方法的基础。采用地质累积指数法进行评价时,需要提前获取重金属含量值、地球化学背景值和修正系数。该方法评价结果能反映重金属在环境介质中的分布的变化特征,并且综合考虑了人为活动对环境的影响^[31]。但该方法侧重于单一重金属污染,并且无

法反映沉积物中重金属的化学活性和对生物的毒性效应,故无法有效评价重金属的迁移转化过程和潜在生态危害。采用潜在生态风险指数法进行评价时,需要提前获取重金属含量值、地球化学背景值(或当地参考值)和毒性系数。该方法简便、快速,且评价结果较为准确,考虑了重金属的化学特性和对环境健康的危害程度,能综合反映沉积物中重金属的潜在生态危害^[32]。但该方法也存在一定的不足,如毒性系数带有一定的主观性,且未考虑其他环境因素对重金属分布特征和生态毒性的影响,更适用于对流域重金属污染造成的生态风险进行评价。因此,本研究采用了多种沉积物重金属污染评价方法,以更好地探究研究区域重金属的复合污染特征。总体而言,研究区域沉积物受到了一定程度的重金属污染,尤其是 Mn 的单因子污染指数和潜在生态风险系数相对较高,而潜在生态风险指数评价结果略有不同,Mn 和 Cd 的潜在生态风险指数相对较高。从空间上来看,3 种评价方法均显示,S7、S4 和 S6 采样点的重金属污染指数相对较高。刘昭等^[33]利用随机地质累积矢量模型对鄂西典型锰矿区河流表层沉积物的研究表明,研究区 Mn 污染最为严重,其次为 Cd 和 As。曾青等^[34]采用污染负荷指数法和潜在生态风险指数法分析了秀山县锰矿区梅江河沉积物重金属污染特征,结果表明,研究区 Mn 污染最为严重,Cd 的潜在生态风险最大。这与本研究的分析结果一致,即锰矿区河流沉积物易受 Mn、Cd 和 As 污染。因此,本研究通过对典型锰矿区开展研究,可为同类矿区的污染防治提供数

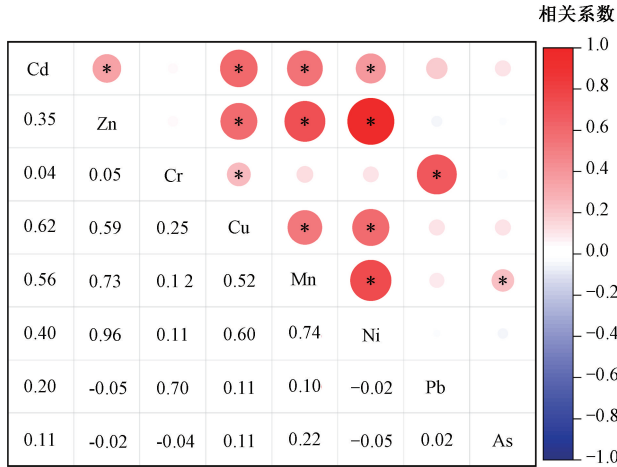
据支撑与理论依据。

2.3 沉积物重金属潜在来源分析

2.3.1 沉积物重金属相关性分析

Pearson 相关性分析结果见图 3。Cu 分别与 Cd、Zn 存在显著的正相关关系 ($P < 0.01$), 相关系数分别为 0.62、0.59; Mn、Cu、Zn 和 Ni 两两之间存在显著正相关关系 ($P < 0.01$), 相关系数在

0.52~0.96 之间; Mn 和 Cd、Pb 和 Cr 之间存在显著正相关关系 ($P < 0.01$), 相关系数分别为 0.56、0.70。两种重金属的含量之间的相关系数越大, 表明两种重金属来自同一污染源的可能性越高^[11]。因此, Cd、Zn、Cu、Mn 和 Ni 可能具有相似的污染来源, Pb 和 Cr 也可能来自同一污染源, 而 As 的来源具有特殊性。



注: “*”表示 $P \leq 0.05$ 。

图 3 沉积物重金属 Pearson 相关性分析结果

Fig. 3 Pearson correlation matrix for heavy metals in sediments

2.3.2 沉积物重金属主成分分析

重庆市溶溪镇锰矿区沉积物重金属主成分分析结果见表 7。计算结果显示, Kaiser-Meyer-Olkin 检验的统计值为 0.608 (> 0.5), Bartlett 球体检验的 P 值 < 0.01 , 表明各元素之间的相关性较强, 适

合进行主成分分析。主成分分析共提取到 3 个因子, 其特征值 (3.507、1.706 和 1.110) 均大于 1, 累积贡献率达 79.0%, 表明 3 个因子能够解释河流沉积物中 8 种重金属元素含量所包含的大部分信息。

表 7 沉积物重金属主成分分析结果

Table 7 Results of principal component analysis of heavy metals in sediments

项目	第一主因子		第二主因子		第三主因子	
	贡献率/%	旋转后载荷系数	贡献率/%	旋转后载荷系数	贡献率/%	旋转后载荷系数
Cd		0.624		0.162		0.369
Zn		0.926		-0.090		-0.176
Cr		0.099		0.906		-0.094
Cu	42.97	0.764	21.87	0.201	14.20	0.173
Mn		0.847		0.056		0.221
Ni		0.937		-0.036		-0.190
Pb		0.008		0.920		0.078
As		0.032		-0.045		0.916

第一主因子的贡献率为 42.97%。其中, Cd、Zn、Cu、Mn、Ni 具有较高的正载荷, 载荷值分别为 0.624、0.926、0.764、0.847、0.937, 表明 Cd、Zn、Cu、Mn 和 Ni 具有较强的相关性。这与 Pearson 相关性分析结果一致。由表 2 可知, 大部分采样点的 Cd、Zn、Cu、Mn 和 Ni 含量都高于当地土壤背

景值和中国土壤元素背景值, 变异系数在 8.32%~129.34% 之间, 说明这些重金属的污染情况受工业或农业活动干扰较大。前人的研究表明, 电解锰渣及其浸出液中含有一定量的 Cd、Zn、Cu 和 Ni^[35], 而研究区域内建有正在开采的大型锰矿和多家电解锰企业, 因此, 水体中的 Cd、Zn、

Cu 和 Ni 可能来源于锰矿开采、冶炼和加工过程中排放的工业废水。此外,电解锰渣中的 Cd、Zn、Cu、Mn 和 Ni 等重金属可在雨水的淋溶作用下进入周围的河流,并经过常年积累,造成严重的沉积物重金属污染^[36]。此外,锰矿开采和冶炼过程产生的大量扬尘颗粒可通过大气干沉降或者降雨等方式进入河流沉积物,使得沉积物重金属含量增加。因此,推测河流沉积物中的 Cd、Zn、Cu、Mn 和 Ni 主要来源于锰矿开采。

第二主因子的贡献率为 21.87%。其中,Cr 和 Pb 具有较高的正载荷,载荷值分别为 0.906 和 0.920,表明 Cr 和 Pb 具有较强的相关性。这与 Pearson 相关性分析结果一致。由表 2 可知,除 S3 采样点以外,其他采样点的 Cr 和 Pb 含量均低于重庆土壤背景值和中国土壤元素背景值,变异系数在 13.46%~75.53%之间,表明 Cr 和 Pb 受人为活动影响较小。此外,除 S3 采样点的 Pb 的单因子污染指数法评价结果为轻微污染外,其他采样点的 Cr 和 Pb 的单因子污染指数法、地质累积指数法评价结果均为无污染。因此,推测沉积物中的 Cr 和 Pb 的来源属于自然源。

第三主因子的贡献率为 14.20%。其中,As 具有较高的正载荷,载荷值为 0.916。大部分采样点的 As 含量都超过了重庆土壤背景值和中国土壤元素背景值,且变异系数较大。单因子污染指数法和地质累积指数法评价结果表明,研究区受到了一定程度的 As 污染。有研究显示^[37-39],农药、肥料和家畜粪便是 As 的潜在来源,农药、肥料和家畜粪便的过量施用可能会导致环境中 As 的富集。研究区周边有成片农田,主要农作物为水稻、玉米、红薯和大豆等,因此,长期大量施用农药、肥料及家畜粪便可能导致了研究区土壤和周围环境的 As 污染。张涵等^[40]对黄土高原北洛河沉积物重金属的研究也表明,As 主要来源于农业活动。因此,推测沉积物中的 As 的来源主要为农业源。

3 结论

1) 重庆市溶溪镇锰矿区沉积物中 8 种重金属的含量均值排序为 Mn>Zn>Ni>Cu=Cr>Pb>As>Cd。春季(5月)和冬季(1月)沉积物中 Zn、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb 和 As 的平均含量高于夏季(7月)和秋季(9月),水温以及有机质含量等对沉积

物中重金属的含量具有重要的调节作用。

2) 研究区沉积物受到一定程度的重金属污染,各采样点 8 种重金属的污染程度表现为 Mn>Zn>As>Ni>Cd>Cu>Pb>Cr。其中:Mn 的单因子污染指数最大,平均值为 48.16,表现为极强污染;其次为 Zn 和 As,平均值分别为 3.83 和 3.04,表现为重度污染。因此,应加强对沉积物中 Mn、Zn、As 的实时监测和污染防治。

3) 重金属地质累积指数排序为 Mn>Zn>Cd>As>Ni>Cu>Cr>Pb,其中 Mn 的地质累积指数(3.79)最大。因此,应加强对溶溪镇典型锰矿区沉积物中 Mn 的持续关注 and 长期监测,并开展相应整治,防止其对该地区河流造成重金属污染。同时,也应加强对全国其他同类矿区沉积物中 Mn 污染的关注和治理。

4) 锰矿区河流沉积物中重金属的潜在生态风险指数均值为 155.79,其中 S1、S2、S3 和 S5 采样点处于轻微生态风险,S4 和 S6 采样点处于中等生态风险,S7 采样点处于强生态风险。Cd 和 Mn 是沉积物重金属潜在生态风险的主要贡献因子,贡献率分别高达 36.52%和 30.91%。

5) 相关性和主成分分析结果显示: Cd、Zn、Cu、Mn 和 Ni 具有相似的污染来源,主要来源于锰矿开采;Cr 和 Pb 的来源属于自然源;As 主要来源于农业活动。

参考文献(References):

- [1] 王燕,刘彦斌,赵红雪,等.半咸水宁夏沙湖沉积物中重金属的分布特征、潜在生态风险及来源解析[J].环境化学,2023,42(11):1-14.
WANG Yan, LIU Yanbin, ZHAO Hongxue, et al. Distribution Characteristics, Potential Ecological Risk and Source Analysis of Heavy Metals in the Sediments of the Brackish-Water Lake Ningxia Sand Lake[J]. Environmental Chemistry, 2023, 42(11): 1-14.
- [2] 唐文忠,孙柳,单保庆.土壤/沉积物中重金属生物有效性和生物可利用性的研究进展[J].环境工程学报,2019,13(8):1 775-1 790.
TANG Wenzhong, SUN Liu, SHAN Baoqing. Research Progress of Bioavailability and Bioaccessibility of Heavy Metals in Soil or Sediment [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(8): 1 775-1 790.
- [3] 王军广,王鹏,伏箫诺,等.海南清澜港红树林湿地沉积物中重金属形态及生物有效性[J].西南农业学报,2019,32(10):2 425-2 431.

- WANG Junguang, WANG Peng, FU Xiaonuo, et al. Speciation and Bioavailability of Heavy Metals in Sediments of Mangrove Wetland in Qinglan Harbor, Hainan Island [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 32(10): 2 425-2 431.
- [4] 张小龙,王伟民,戴伟强,等. 鄱阳湖边缘地带沉积物重金属的累积特征及其生态风险研究[J]. *地球与环境*, 2023, 51(4): 431-440.
- ZHANG Xiaolong, WANG Weimin, DAI Weiqiang, et al. Accumulation Characteristics and Ecological Risk of Sediment Heavy Metals in the Marginal Area of Poyang Lake [J]. *Earth and Environment*, 2023, 51(4): 431-440.
- [5] 赵华荣,李梦豪,姚越,等. 广西内苗溪沉积物重金属污染及其生态风险评价[J]. *人民长江*, 2023, 54(2): 112-119.
- ZHAO Huarong, LI Menghao, YAO Yue, et al. Heavy Metal Pollution in Sediments of Neimiao Creek, Guangxi Autonomous Region and Its Ecological Risk Assessment [J]. *Yangtze River*, 2023, 54(2): 112-119.
- [6] 林杰锐,梁培芬,文震,等. 可溶性硫化物介导对矿区拦泥库沉积物中重金属垂直迁移特征的影响[J]. *环境工程学报*, 2022, 16(10): 3 392-3 401.
- LIN Jierui, LIANG Peifen, WEN Zhen, et al. Effects of Soluble Sulfide on the Vertical Migration of Heavy Metals in the Sediment of Mine Retaining Reservoir [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022, 16(10): 3 392-3 401.
- [7] 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): 1 460-1 467.
- LIU Xiaozhu, LIU Qunqun, WANG Wenjing, et al. Effect of Hydraulic Disturbance on Re-release of Heavy Metals in Estuarine Sediments [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(11): 1 460-1 467.
- [8] 齐翠翠,张雨笛,胡淑恒,等. 巢湖东湖心沉积物重金属的分布及其在外力扰动下的释放特征[J]. *环境化学*, 2022, 41(10): 3 267-3 278.
- QI Cuicui, ZHANG Yudi, HU Shuheng, et al. Distribution and Release Characteristics of Heavy Metals in Sediments from the East Chaohu Lake Under External Disturbance [J]. *Environmental Chemistry*, 2022, 41(10): 3 267-3 278.
- [9] 邓瑜衡,赵军. 沉积物中重金属的迁移转化影响机制研究[J]. *环境工程*, 2017, 35(4): 179-182.
- DENG Yuheng, ZHAO Jun. Influence of Sediment Properties on Migration and Bioavailability of Heavy Metals [J]. *Environmental Engineering*, 2017, 35(4): 179-182.
- [10] 李国莲,李肖,张玉,等. 南漪湖沉积物中重金属分布及其潜在生态风险评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(6): 1 267-1 280.
- LI Guolian, LI Xiao, ZHANG Yu, et al. Distribution of Heavy Metals in Sediments of Nanyi Lake and Its Potential Ecological Risk Assessment [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, 32(6): 1 267-1 280.
- [11] 丁平,张丽娟,吴庆瑶,等. 淮河江苏段沉积物重金属的分布特征、来源解析及其生态风险[J]. *环境化学*, 2023, 42(2): 425-434.
- DING Ping, ZHANG Lijuan, WU Qingyao, et al. Pollution Characteristics, Potential Sources, and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Jiangsu Section of Huaihe River [J]. *Environmental Chemistry*, 2023, 42(2): 425-434.
- [12] 雷雁翔,张斌,吴治国,等. 长岛北部海域表层沉积物重金属分布特征与风险评价及来源分析[J]. *海洋地质前沿*, 2023, 39(3): 40-50.
- LEI Yanxiang, ZHANG Bin, WU Zhiguo, et al. Spatial Distribution of Heavy Metals in the Surface Sediments of Changdao Island and Their Sources and Pollution Assessment [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2023, 39(3): 40-50.
- [13] 丁亚鹏,卢希昊,王晓婧,等. 开封市主要河道沉积物重金属时空分布特征及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2023, 44(11): 6 095-6 105.
- DING Yapeng, LU Xihao, WANG Xiaojing, et al. Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Heavy Metals in Main Rivers Sediments and Ecological Risk Assessment in Kaifeng City [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(11): 6 095-6 105.
- [14] 黄翔,陈钢,洪娟,等. 耕地土壤 pH 测定方法比较研究[J]. *湖北农业科学*, 2021, 60(19): 106-109.
- HUANG Xiang, CHEN Gang, HONG Juan, et al. Comparing pH Determination in Cultivated Land Soil [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2021, 60(19): 106-109.
- [15] 张少彬,冯钟钟. 重铬酸钾容量法测定广东省部分地区土壤中有机质含量的研究[J]. *广东化工*, 2023, 50(4): 189-191, 213.
- ZHANG Shaobin, FENG Zhongzhong. Study on Determination of Organic Matter Content in Soil in Some Areas of Guangdong Province by Potassium Dichromate Volumetric Method [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2023, 50(4): 189-191, 213.

- [16] 季天委,俞丹宏,钟杭,等. ICP-MS 标准模式下土壤中铬、镍、铜、铅含量测定研究[J]. 中国土壤与肥料,2022(5):245-250.
- JI Tianwei, YU Danhong, ZHONG Hang, et al. Determination of Cr, Ni, Cu and Pb in Soil Samples by Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry in the Standard Mode[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022(5):245-250.
- [17] 李惠敏,周川,梁睿雨. 重庆秀山锰矿影响区土壤重金属污染风险评[J]. 中国锰业, 2022, 40(2): 11-14.
- LI Huiming, ZHOU Chuan, LIANG Ruiyu. A Risk Assessment of Soil Heavy Metal Pollution in Xiushan Manganese Mine Affected Area in Chongqing[J]. China Manganese Industry, 2022, 40(2): 11-14.
- [18] 成杭新,李括,李敏,等. 中国城市土壤化学元素的背景值与基准值[J]. 地学前缘, 2014, 21(3): 265-306.
- CHENG Hangxin, LI Kuo, LI Min, et al. Geochemical Background and Baseline Value of Chemical Elements in Urban Soil in China[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(3): 265-306.
- [19] 马杰,刘萍,刘今朝,等. 重庆市煤矸山周边农用地土壤重金属污染评价和定量溯源解析[J]. 环境科学, 2022, 43(12): 5 698-5 709.
- MA Jie, LIU Ping, LIU Jinzhao, et al. Pollution Evaluation and Quantitative Traceability Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of a Coal Mine in Chongqing[J]. Environmental Science, 2022, 43(12): 5 698-5 709.
- [20] 徐争启,倪师军,庾先国,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, 31(2): 112-115.
- XU Zhengqi, NI Shijun, TUO Xianguo, et al. Calculation of Heavy Metals' Toxicity Coefficient in the Evaluation of Potential Ecological Risk Index[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31(2): 112-115.
- [21] 魏复盛,陈静生,吴燕玉,等. 中国土壤环境背景值研究[J]. 环境科学, 1991, 12(4): 12-19.
- WEI Fusheng, CHEN Jingsheng, WU Yanyu, et al. Study on the Background Contents on Elements of Soils in China[J]. Environmental Science, 1991, 12(4): 12-19.
- [22] 李国展,王晓雨,颜梦霞,等. 西昌邛海沉积物重金属含量时空变化与污染评价[J]. 环境科学, 2023, 44(10): 5 536-5 545.
- LI Guozhan, WANG Xiaoyu, YAN Mengxia, et al. Spatial-Temporal Variations and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sediments of Qionghai Lake in Xichang City[J]. Environmental Science, 2023, 44(10): 5 536-5 545.
- [23] 石要红,梁开,夏真. 珠江口伶仃洋海底表层沉积物重金属污染及潜在生态危害评价[J]. 南海地质研究, 2006(1): 52-59.
- SHI Yaohong, LIANG Kai, XIA Zhen. Pollution of Heavy Metals in the Lingdingyang of Pearl River Estuary and Its Assessment of Potential Ecological Risk[J]. Geological Research of South China Sea, 2006(1): 52-59.
- [24] 余符合,王姝,钱程远,等. 太湖表层沉积物重金属的分布、来源与生态风险评价[J]. 环境科学, 2023, 44(10): 5 524-5 535.
- YU Fuhe, WANG Shu, QIAN Chengyuan, et al. Distribution, Sources, and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals in Surface Sediments of Taihu Lake[J]. Environmental Science, 2023, 44(10): 5 524-5 535.
- [25] 马杰,张秀,刘今朝,等. 某铅锌尾矿库周边土壤重金属污染特征及其来源分析[J]. 有色金属(冶炼部分), 2022(6): 101-109.
- MA Jie, ZHANG Xiu, LIU Jinzhao, et al. Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soils of a Lead-Zinc Tailings Pond[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2022(6): 101-109.
- [26] 蒋宗宏,陆凤,马先杰,等. 贵州铜仁典型锰矿区土壤及蔬菜重金属污染特征及健康风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(2): 293-300.
- JIANG Zonghong, LU Feng, MA Xianjie, et al. Characteristics and Health Risk Assessments of Heavy Metals in Soils and Vegetables in Manganese Mining Areas in Tongren County, Guizhou Province, China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2020, 37(2): 293-300.
- [27] 李礼,徐龙君,李斗. 重庆秀山锰矿区土壤重金属污染分析与评价[J]. 地球与环境, 2014, 42(5): 646-651.
- LI Li, XU Longjun, LI Dou. Analysis and Evaluation of Soil Heavy Metal Pollution in Chongqing Xiushan Manganese Mine-Zone[J]. Earth and Environment, 2014, 42(5): 646-651.
- [28] 黄钟霆,易盛炜,陈贝贝,等. 典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价[J]. 环境科学, 2022, 43(2): 975-984.
- HUANG Zhongting, YI Shengwei, CHEN Beibei, et al. Pollution Properties and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around a Typical Manganese Mining Area[J].

- Environmental Science, 2022, 43(2):975-984.
- [29] 王钦,丁明玉,张志洁,等.太湖不同湖区沉积物重金属含量季节变化及其影响因素[J].生态环境, 2008,17(4):1362-1368.
WANG Qin, DING Mingyu, ZHANG Zhijie, et al. Seasonal Varieties and Influential Factors of Heavy Metals in Sediments of Taihu Lake[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(4):1362-1368.
- [30] 王勇.底泥中营养物质及其他污染物释放机理综述[J].工业安全与环保,2006,32(9):27-29.
WANG Yong. A Summary of Release Mechanism of Nutrient Substances and Other Pollutants in Sludge [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2006, 32(9):27-29.
- [31] 郭曙林,王荔娟.沉积物重金属污染生态风险评估方法比较研究[J].广东化工,2015,42(16):158-159.
GUO Shulin, WANG Lijuan. Comparative Study on Ecological Risk Assessment Methods of Heavy Metal Pollution in Sediments [J]. Guangdong Chemical Industry, 2015, 42(16):158-159.
- [32] 吴文星,李开明,汪光,等.沉积物重金属污染评价方法比较——以潭江为例[J].环境科学与技术, 2012,35(9):143-149.
WU Wenxing, LI Kaiming, WANG Guang, et al. Comparison of Assessment Methods for Heavy Metal Pollution in Sediments; A Case Study of Tanjiang[J]. Environmental Science and Technology, 2012, 35(9):143-149.
- [33] 刘昭,周宏,陈丽,等.鄂西典型锰矿区河流表层沉积物中重金属的空间分布特征与污染评价[J].安全与环境工程,2020,27(3):110-117.
LIU Zhao, ZHOU Hong, CHEN Li, et al. Spatial Distribution and Pollution Evaluation of Heavy Metals in River Surface Sediments in Typical Manganese Ore Areas of Western Hubei [J]. Safety and Environmental Engineering, 2020, 27(3):110-117.
- [34] 曾青,杨清伟,刘雪莲,等.秀山锰矿区梅江河沉积物重金属含量及污染特征[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2011,30(4):843-847.
ZENG Qing, YANG Qingwei, LIU Xuelian, et al. Heavy Metal Content and Pollution Characteristics of Meijiang River Sediments in Xiushan Manganese Ore Area[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2011, 30(4):843-847.
- [35] 陆凤,陈森,陈兰兰.贵州松桃某电解锰企业锰渣重金属污染特征及对植物生长的毒性效应[J].科学技术与工程,2018,18(5):124-129.
LU Feng, CHEN Miao, CHEN Lanlan. Characteristics of Heavy Metal Pollution in Manganese Residues of Electrolytic Manganese in Songtao, Guizhou and Its Toxic Effects on Plant Growth [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(5):124-129.
- [36] 郑杰炳,周川,王力,等.城口县典型锰矿区土壤重金属潜在生态风险评估[J].南方农业,2020,14(28):16-19.
ZHENG Jiebing, ZHOU Chuan, WANG Li, et al. Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Manganese Ore Areas of Chengkou County[J]. South China Agriculture, 2020, 14(28):16-19.
- [37] 刘海,魏伟,黄健敏,等.长江流域(安徽段)土壤-作物系统重金属污染特征及健康风险评估[J].环境科学,2023,44(3):1686-1697.
LIU Hai, WEI Wei, HUANG Jianmin, et al. Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Soil-Crops System in Anhui Section of the Yangtze River Basin[J]. Environmental Science, 2023, 44(3):1686-1697.
- [38] 袁平旺,王黎栋,何培雍,等.粤北某离子吸附型稀土矿山土壤和地表水重金属分布及风险评估[J].中国环境监测,2023,39(1):146-158.
YUAN Pingwang, WANG Lidong, HE Peiyong, et al. Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Surface Water of an Ion-Adsorbed Rare Earth Mine in Northern Guangdong [J]. Environmental Monitoring in China, 2023, 39(1):146-158.
- [39] 曾昭婵,曾昭朝,胡佳佳.贵州煤矿区表层水-沉积物重金属分布特征及来源分析——以新寨河为例[J].中国环境监测,2023,39(4):147-157.
ZENG Zhaochan, ZENG Zhaochao, HU Jiajia. Distribution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Surface Water-Sediment Within Guizhou Coal Mining Area: The Case Study of Xinzhai River [J]. Environmental Monitoring in China, 2023, 39(4):147-157.
- [40] 张涵,王芝麟,邹彬,等.黄土高原北洛河沉积物生态风险解析[J].南水北调与水利科技,2023,21(2):332-341.
ZHANG Han, WANG Zhilin, ZOU Bin, et al. Ecological Risk Assessment of Sediments in Beiluo River, Loess Plateau [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(2):332-341.