地球化学

doi:10.12134/j.dzykt.2026.01.006

伊洛河有色金属矿集区河流沉积物重金属地球化学特征分析

冯雪珍[1,2],盛 奇[1,2],王明国[1,3],赵新雷[1,2],张 妍[1,2]
(1.河南省地质研究院,河南郑州 450000;2.河南省地球化学生态修复工程技术研究中心,河南郑州 450000;
3.中国地质调查局水文地质环境地质调查中心,天津 300309)

[摘 要] 本研究以伊洛河有色金属矿集区河流沉积物重金属为研究对象,通过分析沉积物重金属地球化学特征,揭示其生态风险分异规律与多源驱动机制。本文基于矿产开发空间格局,沿干流及主要支流汇口采集35个沉积物样品,测定As、Hg、Cr、Cd、Cu、Zn、Pb、Ni含量,综合利用地累积指数(I_{geo})、潜在生态危害指数(*RI*)及APCS-MLR受体模型等方法,构建"富集特征-风险等级-源贡献"三维解析框架。结果表明:(1)Cd、Pb富集最显著,平均含量达区域背景值的10.17倍和4.78倍,空间分布呈现矿区向河道下游递减的梯度特征;(2)I_{geo}指数分级显示Cd属中度-重度富集(1.32~3.15),Pb(0.82~1.45)、Hg(0.65~1.12)为轻度富集;(3)生态风险呈现三级分异:Cd为极高风险(E_r^i=389.7),Hg(E_r^i=72.5)、Pb(E_r^i=52.3)分属高、中风险等级;(4)源解析识别三大贡献源:自然背景源平均贡献率最大(36.06%),其次为工业农业源(21.62%)、矿业活动源(19.67%)。本研究创新性构建了"元素簇-污染源-风险级"三维矩阵模型,明确Cr-Ni(自然源/低风险)、Cd-Zn-Pb-Cu(矿业源/高风险)、Hg-As(工农业源/中风险)三类管控单元,可为流域尺度重金属污染迁移模拟、生态风险预警及靶向治理技术研发提供关键数据支撑,对黄河流域生态保护和高质量发展战略实施具有重要实践价值。

[关键词] 有色金属 矿集区 河流沉积物 重金属 地球化学 伊洛河
[中图分类号] X820.4; P595 [文献标识码] A [文章编号] 0495-5331(2026)01-0079-13

Feng Xuezhen, Sheng Qi, Wang Mingguo, Zhao Xinlei, Zhang Yan. Geochemical characteristics of heavy metals in river sediments from nonferrous metal mining area of the Yiluo River[J]. Geology and Exploration, 2026, 62(1): 0079-0091.

0 引言

矿产资源开发作为国民经济发展的重要支柱,在为工业化进程提供基础原材料的同时,也引发了复杂的生态环境问题。矿山开采过程中产生的废水、废渣和废气等"三废"污染物(Chen Hui et al., 2024; Soili et al., 2024),不仅制约着矿山企业的可持续发展,更对矿区及周边区域的生态系统平衡、居民健康安全构成持续性威胁。其中,流域性重金属污染因其隐蔽性、累积性和不可逆性特征,已成为全球性环境治理难题(徐金英等,2019; Cheng et al., 2020;秦元礼等,2020; Zhang et al., 2023; 夏梦等,2024)。不同于常规污染物,重金属可通过水体-沉积物-生物链的多元介质迁移,在水生态系统中形成复杂的污染循环:沉积物既可作为重金属的"汇"通过吸附作用暂时截留污染物,又可能在环境条件改变时转化为"源"释放储存的重金属(Zhang et al., 2023),这种动态平衡的打破将导致流域水环

[收稿日期] 2025-07-06;[改回日期] 2025-10-28;[责任编辑] 黄 华。
[基金项目] 河南省地质研究院2025年地质科技攻关项目(编号:2025-902-XM04、2025-902-XM10)资助。
[第一作者] 冯雪珍(1987年-),女,2013年毕业于华北水利水电大学,结构工程专业,获硕士学位,工程师,主要从事环境地质调查研究工作。E-mail:471655938@qq.com。
[通讯作者] 王明国(1983年-),男,2010毕业于中国科学院地球化学研究所,地球化学专业,获博士学位,高级工程师,主要从事微量元素地球化学行为研究。E-mail: wangmingguo@mail.cgs.gov.cn。

境安全的系统性风险(江涛等,2020)。

伊洛河流域作为中原经济区的重要生态廊道,近年来矿产资源开发强度持续加大,流域内金属采选、冶炼企业的空间集聚已引发显著的环境胁迫效应。尽管已有研究对流域土壤和地表水体重金属污染特征进行了初步解析(张军正等,2023;夏梦等,2024;吴明明等,2024),但针对沉积物介质中重金属的赋存状态、迁移规律及其生态风险仍缺乏系统性研究。本文创新性地构建了三维研究框架:首先基于流域地球化学背景值建立重金属污染基准;继而采用地累积指数法与潜在生态风险指数法对As、Hg、Cd等8种特征重金属进行空间分异解析;最后运用主成分分析(PCA)和绝对因子分析-多元线性回归受体模型(APCS-MLR)解析污染源及其贡献率。研究成果可为流域尺度重金属污染迁移模拟、生态风险预警及靶向治理技术研发提供关键数据支撑,对黄河流域生态保护与高质量发展战略实施具有重要实践价值。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

伊洛河水系作为黄河下游一级支流,具有典型双源汇流特征:西源洛河(34°32′N, 109°32′E)发源于秦岭东段华山南麓,东源伊河(33°49′N, 111°30′E)源自伏牛山主脉,两河在偃师-巩义构造盆地完成径流整合后,于桃花峪(34°55′N, 113°09′E)注入黄河(图1)。全流域呈扇形结构展布,发育三级阶梯地貌:上游(海拔800~2000 m)为侵蚀剥蚀中山区,森林覆盖率>65%;中游(海拔400~800 m)过渡为红层丘陵地貌;下游(海拔<400 m)形成冲积平原,耕地占比达41.3%,是黄淮海平原重要粮食生产基地。

研究区聚焦卢氏-栾川-嵩县-洛宁多金属成矿带。该带位于华北克拉通南缘与秦岭造山带接合部,受栾川断裂带控制形成特色金属矿床群。据全国矿产资源储量通报统计,区内已探明战略金属矿产23种,其中钼(286万吨)、金(142吨)、银(3800吨)储量分别占全国总量的18%、3.2%和6.5%,构成"三位一体"的优势矿产组合。空间分布呈现典型构造控矿特征:金矿在马超营断裂与洛宁山前断裂之间呈带状聚集;钼矿在栾川逆冲推覆带前端形成特大型钼钨矿田;银铅锌矿则受控于熊耳山拆离断层系统,在卢氏-洛宁地区形成脉状矿床群。特别是栾川钼钨矿田,作为全球第二大钼生产基地,其成矿强度(8.73 t/km²)远超世界同类矿床平均水平。流域分布呈现出以下特征:伊河流域栾川、嵩县多分布钼钨矿、金矿、银铅锌矿等。洛河流域卢氏、洛宁多分布金银矿、铁铜锌矿等。

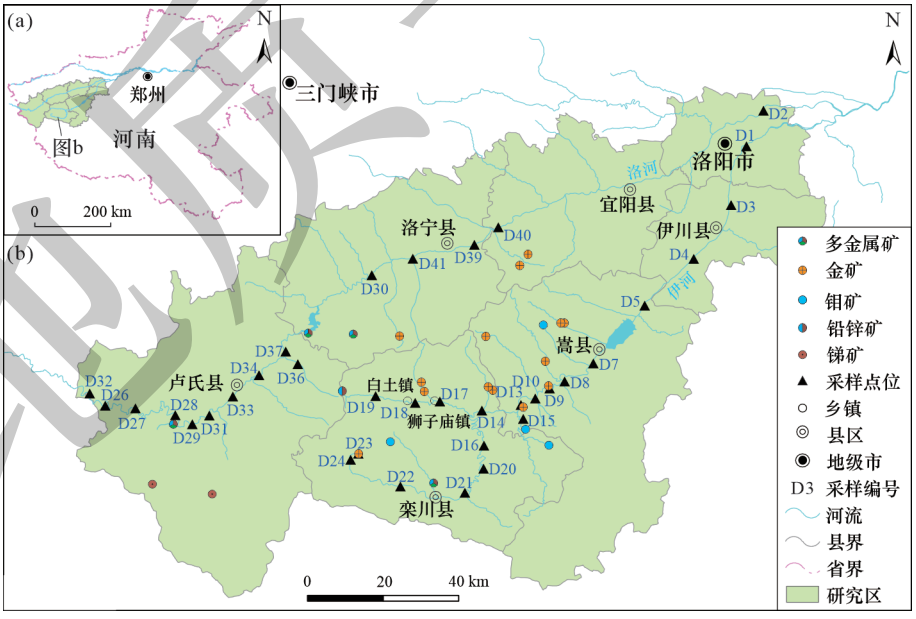

图1 伊洛河水系分布及沉积物采样点位图

Fig. 1 Distribution of the Yiluo River system and sediments sampling sites

1.2 样品采集及处理

本文基于流域重金属污染空间分异规律研究需求,于2016年9月丰水期开展系统采样。为考虑研究的整体性、系统性、代表性,结合流域内金属矿

产开发分布情况，本研究将采样点相对均匀布设在伊洛河干流以及影响较大的支流与城区下游，其中27个采样点分布在金矿、钼矿、银铅锌矿等采矿点或选厂、尾矿库的下游，又分别在卢氏、洛宁、栾川、嵩县四县下游及伊川上下游、洛阳城区及下游布设8个控制点。研究共采集35件沉积物样，样品采集河流表层0~10 cm的沉积物，单样采集500~1000 g，采用聚乙烯自封袋盛装，并于常温下自然风干。之后去除石子等杂物，四分法取样，玛瑙研磨，过200目筛备用。

本次样品分析测试由河南省地质研究院实验室承担，测定As、Hg、Cd、Cr、Pb、Cu、Zn、Ni八项指标。Zn、Cr、Pb、Ni、Cu、Cd六项指标分析方法为电感耦合等离子体质谱法（ICP-MS），检出限分别为4、3、2、2、1、0.021 μg/g；As分析方法为氢化物发生-原子荧光光谱法（HG-AFS），检出限为0.15 μg/g；Hg分析方法为冷蒸气发生-原子荧光光谱法（CV-AFS），检出限为0.002 μg/g。样品测试同步设置国家一级标准物质（GBW）进行方法验证和质控。结果显示所插标准物质满足质控要求。

1.3　重金属富集及生态风险评价方法

1.3.1　地累积指数法

地积累指数I_{geo}（Geo-accumulation Index），可直观地评价各项重金属的富集程度（沈东波等，2025）。地累积指数法（I_{geo}）公式：

$$I_{geo} = \log_2[C_n/(kB_n)] \quad (1)$$

其中：I_{geo}为地累积指数值；C_n为重金属n的实测值，单位mg/kg；B_n为重金属n背景值，单位mg/kg。k为考虑成岩作用影响所设置的常数（Wang et al.，2021），取1.5。B_n背景值采用洛阳地区1∶20万水系沉积物背景值。地累积指数富集分级见表1。

表1　I_{geo}富集程度分级

Table 1　I_{geo} enrichment classification

I_{geo}	分级	富集程度	I_{geo}	分级	富集程度
≤0	0	无富集	3~4	4	重度富集
0~1	1	轻度富集	4~5	5	严重富集
1~2	2	中度富集	>5	6	极严重富集
2~3	3	中-重度富集			

注：数据来源Zhao et al.，2021；李致春等，2025。

1.3.2　潜在生态危害指数法

潜在生态危害指数法RI（the potential ecological risk index），兼顾了单个重金属毒性效应、多种重金属协同作用及环境敏感性等多个影响因素，常用于土壤或沉积物中重金属污染评价（Xia et al.，2020；孟晓飞等，2021；秦元礼等，2022；Zhang et al.，2023；秦红，2024）。

潜在生态危害指数法公式：

$$E_r^i = T_r^i \times \frac{C_s^i}{C_n^i} \quad (2)$$

$$RI = \sum_{i=1}^{n} E_r^i = \sum_{i=1}^{n} T_r^i \times \frac{C_s^i}{C_n^i} \quad (3)$$

其中：RI表示沉积物综合潜在生态危害值；E_r^i表征沉积物中重金属i的潜在生态危害指数值；T_r^i定义为重金属i的毒性响应系数（表2）；C_s^i为沉积物重金属i的实测值，单位mg/kg；C_n^i为沉积物重金属i的背景值，单位mg/kg。C_n^i背景值采用洛阳地区1∶20万水系沉积物背景值（表3），为水系沉积物原始数据连续剔除异常值（$X\pm3$标准差）后求得的算术均值（史长义等，2016）。1∶20万水系沉积物数据来源于1981~1990年间先后由河南省多家地勘单位开展的1∶20万区域化探扫面工作，主要涉及三门峡幅、洛阳幅、洛宁幅、临汝幅、栾川幅、鲁山幅内洛阳地区数据。

表2　潜在生态危害指数分级

Tabel 2　Classification of potential ecological hazard index

单项生态风险因子（E_r^i）		综合生态风险指数（RI）	
等级	得分	等级	得分
低生态风险	<40	低生态风险	<150
中等生态风险	40～80	中等生态风险	150～300
较高生态风险	80～160	高生态风险	300～600
高生态风险	160～320	极高生态风险	≥600
极高生态风险	≥320		

注：数据来源于孟晓飞等，2021。

表3　重金属背景值和毒性响应系数

Tabel 3　Heavy metal background values and toxicity response coefficients

元素	Hg	Cd	As	Pb	Cu	Ni	Cr	Zn
C_n^i	0.03	0.1	9.5	39	24.1	28.3	77.1	91.6
T_r^i	40	30	10	5	5	5	2	1

注：数据来源Zhang et al.，2023。

1.4　重金属来源解析方法

1.4.1　主成分分析法

主成分分析法（PCA）是在确定各项目间存在一定相关性的前提下，通过线性变换降维，将众多的原始变量转化为数量少且互不相关的新变量，来推测有关污染源（匡荟芬等，2020）。

1.4.2　APCS-MLR模型

APCS-MLR模型能够定量评估各污染源对单

个重金属的贡献率(钟晓宇等,2020)。详细计算方法见文献(王美华,2023)。

1.5 数据处理与分析

本研究的数据处理、统计采用Excel,各空间分布图的绘制采用Arcgis 10.8软件,PCA分析、APCS-MLR分析采用IBM SPSS23软件,箱型图、相关性热度图和PCA载荷图的制作采用Origin 2024软件。

2 结果与讨论

2.1 沉积物重金属含量及空间分布特征

沉积物重金属As、Hg、Cr、Cd、Pb、Cu、Zn、Ni含量变化范围分别为1.2~7.9 mg/kg、0.01~0.12 mg/kg、10~97 mg/kg、0.1~5.9 mg/kg、13~728 mg/kg、5.4~321 mg/kg、7.3~921 mg/kg、8.1~37 mg/kg(表4)。与背景值相比,除As、Cr、Ni含量均值(表4)低于背景值之外,其余元素Cd、Pb、Hg、Cu和Zn含量均值均超过背景值,分别为背景值的10.17、4.78、2.17、1.56、1.55倍。这说明这五种元素在流域内表现出富集现象,其中Cd的富集程度最为显著,其次是Pb。重金属的变异系数受到多种因素的影响,可用来反映其分布的不均匀性。由表4可知,流域内除Ni以外,其余重金属分布均不均匀,尤其Cd、Cu、Zn、Pb表现出强分异性,说明部分样点可能受到了外部环境较大的影响,使这几种重金属在空间分布上表现出很大差异。矿点下游沉积物重金属含量明显偏高,距离增加,含量有所降低(图2)。伊河干流的栾川三合金矿上下游(D24、D23)、三道庄钼钨矿田下游(D22)、白土铅锌矿区下游(D19)、狮子庙金矿田下游(D17)、嵩县鱼池岭钼矿下游(D15)、东湾金矿下游(D9)以及洛河干流故县水库上游(D37)、洛宁上宫金矿田下游(D41)、花果山乡金矿区下游(D40)点位重金属Cd、Pb、Zn、Cu含量明显高于上(下)游点位,而城区下游(D3、D33、D39、D2)点位部分重金属含量会有所增加。由此说明,伊洛河支流及干流受周边矿业生产影响较大。

沉积物重金属Cd、Pb含量均值超过参考标准的风险筛选值但低于风险管控值(表4),存在污染风险,其余元素均值均低于风险筛选值。从采样点各重金属的超标率来看,所有采样点的As、Hg、Cr、Ni四项重金属含量均未超过风险筛选值,但分别有1个、3个、7个、18个采样点位Cu、Zn、Pb、Cd含量超过风险筛选值,尤其Cd、Pb含量出现超风险管控值点位(4个、1个)。Cu、Zn、Pb、Cd超标点位主要分布在伊河:D24、D23及D22三个点位Pb、Zn含量均超标,Cd含量均超过风险筛选值,且D23点Cu含量超标;D19、D17、D15三个点位Cd、Pb含量超标,且D19点Pb含量超过风险筛选值;D9及上游点位多数存在Cd超标。洛河部分采样点主要为Cd超标,仅D37存在Pb超标。伊河、洛河沉积物重金属超标率的差异可以反映出地域矿产开发强度的不同。

表4 伊洛河沉积物重金属含量特征统计

Table 4 Statistics of heavy metal content characteristics in sediments of the Yiluo River

元素	均值(mg/kg)	范围(mg/kg)	变异系数(%)	背景值(mg/kg)	实测值/背景值	风险筛选值*(mg/kg)	风险管控值*(mg/kg)
As	3.02	1.2~7.9	55	8.7	0.35	30	120
Hg	0.05	0.01~0.12	77	0.023	2.17	2.4	4.0
Cr	34	10~97	59	69.1	0.49	200	1000
Cd	1.2	0.1~5.9	116	0.118	10.17	0.3	3.0
Cu	33.8	5.4~321	176	21.7	1.56	100	
Zn	134	7.3~921	158	86.6	1.55	250	
Ni	20.12	8.1~37	34	26.1	0.77	100	
Pb	131	13~728	134	27.4	4.78	120	700

注:*为《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)中水田、6.5<pH≤7.5条件下相应标准值。由于本次研究未进行pH值分析,此次评价参照6.5<pH≤7.5标准来确定。

2.2 沉积物重金属富集程度及生态风险评价

2.2.1 地累积指数

伊洛河沉积物重金属地累积指数计算结果显示(图3),Cd、Pb、Hg地累积指数均值分别为2.06、0.83和0.01,分别处于中-重度富集、轻度富集、轻度富集;其余五项重金属地累积指数均值均小于0,整体表现为无富集。所有点位的As、Cr、Ni三种重金属均为无富集状态,部分点位的Cu、Zn、Hg处于轻度至重度富集状态,大部分点位的Pb、Cd处于轻度至严重富集状态。尤其是Cd绝大部分样点均处在轻度富集及以上状态,原因是这些点位的Cd含量均超过背景值。在空间分布上(图4),矿点下游采样

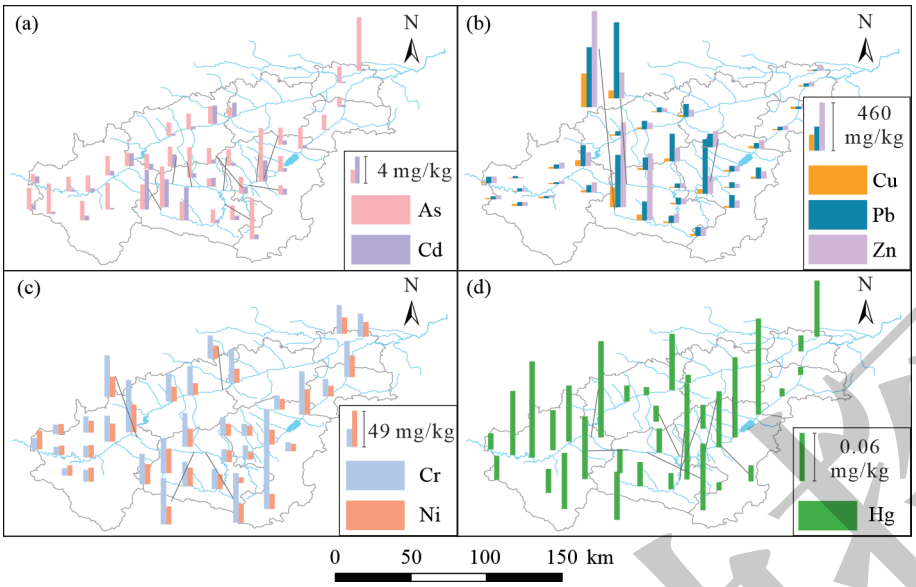

图 2　伊洛河沉积物重金属含量空间对比

Fig. 2　Spatial comparison of heavy metal content in sediments of the Yiluo River

点位的 Cu、Zn、Cd、Pb 富集程度相对较重，距离越远富集相对减轻。另外，城区下游的采样点 Cd、Hg 富集程度会有所加重。

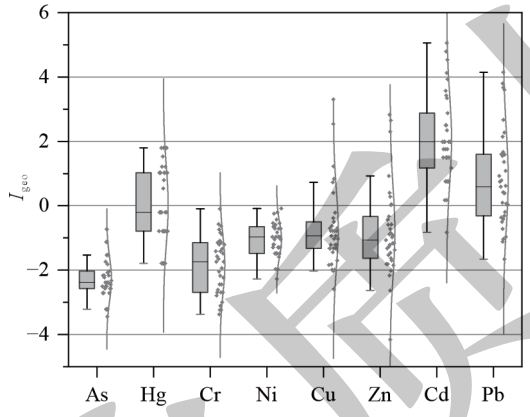

图 3　伊洛河沉积物重金属 I_{geo} 统计

Fig. 3　I_{geo} statistics of heavy metals in sediments of the Yiluo River

2.2.2　潜在生态危害指数

比较各重金属元素的单项生态风险均值结果（表 5），Cd 潜在危害最大，其次为 Hg、Pb。依据表 3 对各重金属单项潜在生态风险进行分级（图 5），流域内有 5 个点位 Pb（D24、D23、D19、D17、D15）处于中等至较高生态风险，近 60% 的点位 Hg 处于中等至高生态风险，35 个点位 Cd 均处在中等及以上生态风险，仅伊河源头 D24、D23 两个点位沉积物 Cu 处于中等生态风险，各点位其余 4 种重金属均处于低生态风险。综合生态风险指数 RI 均值为 426.79，范围 58.08~1804.30，流域综合生态风险在四个水平均有分布（图 5e）。

2.3　沉积物重金属来源解析

2.3.1　主成分分析

对伊洛河沉积物 8 种重金属元素进行了主成分分析（PCA），解析了其重金属可能的来源。PCA 分析采用 Kaiser 标准的最大方差法旋转，并进行了 KMO 和 Bartlett 球形度检验。结果显示，KMO 检验系数为 0.727＞0.7，Bartlett 球形度检验的 P＜0.01，满足 PCA 条件，说明本次分析的结果对各变量较为有效（Bhardwaj et al.，2017）。PCA 从 8 种重金属中共提取出 3 个主成分因子（以特征值大于 1 为原则），累积贡献率达到 79.367%（表 6），能够分析重金属的基本信息。

主成分因子 $F1$ 的贡献率为 45.604%，在 Cd、Cu、Zn 和 Pb 的含量上均具有强正载荷值（载荷值大于 0.8）（表 6），且 Pearson 相关性分析显示 Cu、Zn、Cd、Pb 两两之间存在极显著正相关性（P＜0.01）（图 6a、b），表明这几种元素具有相似的来源（卢洪斌等，2024）。前述 Cd、Pb、Cu、Zn 含量均值均超背景值，绝大部分点位沉积物 Cd、Pb 含量超过了背景值，部分点位 Cu、Zn 含量超过背景值，且分布不均匀，表现出强分异，说明这几种重金属受人为影响很大。据研究，在长期和大规模有色金属采矿活动的地区，沉积物往往会受到附近金属矿的严重污染（陈思睿，2023；Wu et al.，2023），而 Zn、Pb、Cd、Cu 等重金属是采矿和冶炼活动的重要污染物（Li et al.，

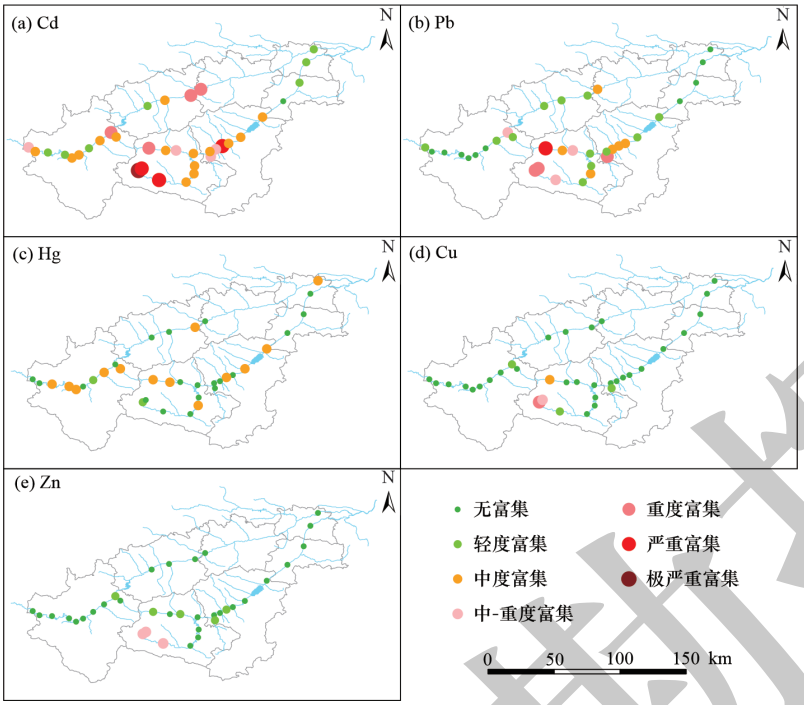

图 4 伊洛河沉积物重金属 I_{geo} 富集程度空间对比

Fig. 4 Spatial comparison of I_{geo} enrichment of heavy metals in sediments of the Yiluo River

表 5 伊洛河沉积物重金属元素 E_r^i(mg/kg)和 *RI* 统计表

Table 5 E_r^i and *RI* statistics of heavy metals in sediments of the Yiluo River

元素	均值	范围	元素	均值	范围	元素	均值	范围
Cd	302.18	25.42~1500.00	Cu	7.80	1.24~73.96	Zn	1.55	0.08~10.64
Hg	82.98	17.39~208.70	Ni	3.85	1.55~7.09	Cr	0.99	0.29~2.81
Pb	23.96	2.37~132.85	As	3.47	1.38~9.08	*RI*	426.79	58.08~1804.30

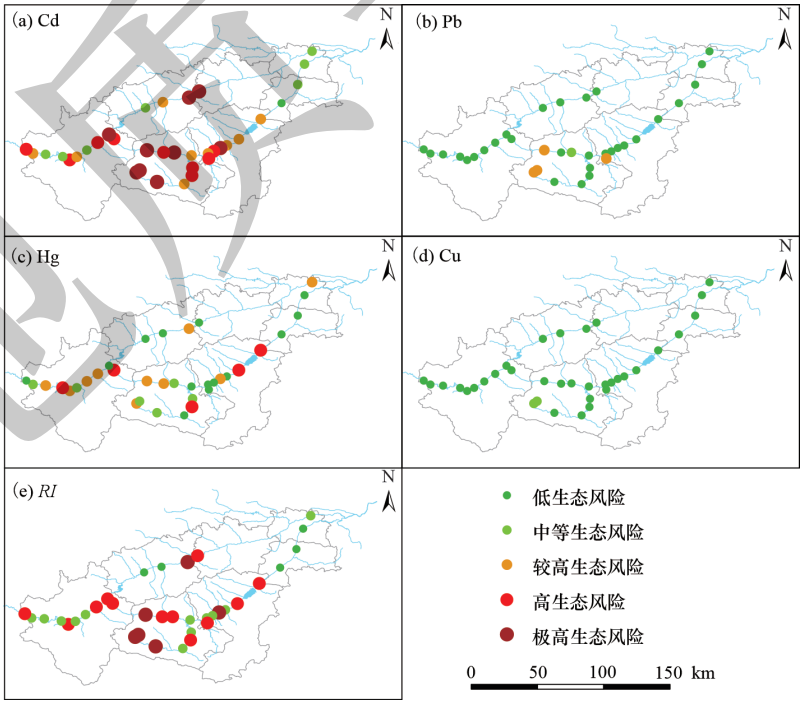

图 5 伊洛河沉积物重金属潜在生态风险空间对比

Fig. 5 Spatial comparison of potential ecological risks of heavy metals in sediments of the Yiluo River

2013；卢洪斌等，2024）。伊洛河流域分布有大量的金、银、铅、锌、铜、铁、钼等有色金属矿产，且矿产开采活动密集，在矿产的开采、选冶过程中，一些硫化矿物（如黄铁矿、闪锌矿、方铅矿等）所含重金属Zn、Pb、Cd、Cu会被氧化释放从而进入地表径流。由此可见，Cd、Zn、Pb、Cu主要来源应为矿产开采、选冶等矿业活动。因此，第一主成分因子主要为矿业活动源。

表6　伊洛河沉积物重金属PCA分析结果

Table 6　PCA analysis of heavy metals in sediments of the Yiluo River

成分	方差贡献			重金属	因子		
	特征值	解释百分比	累计百分比		*F*1	*F*2	*F*3
1	3.648	45.604	45.604	As	0.282	−0.335	0.619
2	1.683	21.035	66.638	Hg	−0.118	0.058	0.896
3	1.018	12.728	79.367	Cr	0.092	0.895	−0.156
4	0.692	8.656	88.022	Ni	0.297	0.861	0.025
5	0.451	5.633	93.655	Cu	0.915	0.177	0.058
6	0.276	3.446	97.102	Zn	0.957	0.128	0.065
7	0.175	2.186	99.288	Cd	0.901	0.067	0.067
8	0.057	0.712	100.000	Pb	0.800	0.142	−0.059

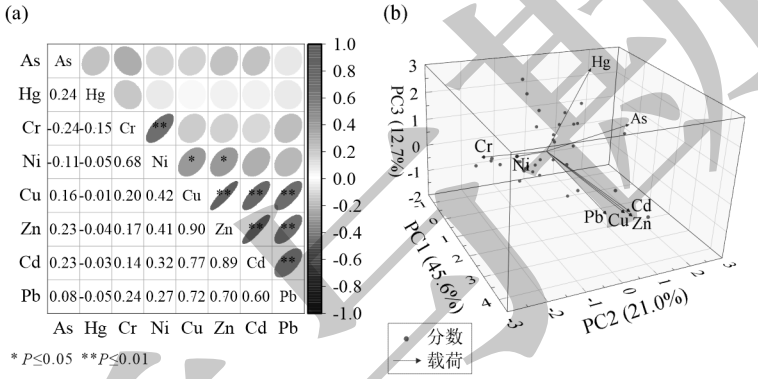

图6　伊洛河沉积物重金属相关性热度图（a）和PCA载荷图（b）

Fig. 6　Correlation heat map (a) and PCA loading plot (b) of heavy metals in sediments of the Yiluo River

主成分因子*F*2的贡献率为21.035%，在Cr、Ni的含量上具有强正载荷值，且Ni−Cr间存在0.01水平的显著强相关性（r=0.68，>0.6），表明Cr、Ni有相同的来源。研究表明，沉积物中Cr主要来源为自然风化（Bhardwaj et al.，2017；Guo et al.，2022；Cai et al.，2023），而Ni化学性质稳定，含量差异主要受母质（岩）控制（Trajče et al.，2010；钟晓宇等，2020）。前述Ni、Cr元素含量均值低于洛阳地区水系沉积物背景值，变异系数仅为0.34、0.59，属于贫化状态，且重金属污染评价均为无污染或低生态风险状态。由此，沉积物Ni、Cr主要来源于成土母岩或地质背景（江涛等，2020；孟晓飞等，2021；卢洪斌等，2024）。因此，第二主成分因子应为自然背景源，受地层岩石风化、侵蚀及地形地貌等的影响。

主成分*F*3的贡献率为12.728%，在Hg的含量上具有高载荷，As的含量上具有中等载荷（载荷值为0.6~0.8）。研究表明，Hg的产生主要由人为活动引起（卢新哲等，2020；Guo et al.，2022），且根据Hg含量分布情况，Hg高值点上游或支流大多有尾矿库、选矿厂或是人类生活密集城区。各采样点位As含量均未超过背景值，但洛阳城区下游点位As含量相对较高，应与城区工业生产排放有关。此外，伊洛河流域中上游多数地貌为高低山川、丘陵，农用地大多依河谷、沟岔而耕。农业生产所需的肥料及农药中也含有As、Hg等重金属（甘婷婷等，2021；郑敏慧等，2023）。这些元素进入土壤后，随地表径流汇入伊洛河产生富集（Dong et al.，2019；江涛等，2020；张雅然等，2022）。以上说明，主成分*F*3应为工业农业源。

2.3.2　基于APCS-MLR模型的源解析

在PCA的基础上，采用APCS−MLR模型进行各污染源对各项重金属贡献率的定量解析。线性拟合后得到的可决系数R^2数值越接近1，其线性拟合度越高，拟合效果越好（王美华，2023）。表7显示

Hg、Cr、Cd、Cu、Zn、Ni 的 R^2 均大于 0.8，As、Pb 略低（0.534、0.630），表明本研究拟合度较好。同时，预测值与实测值的比值均接近 1，表明本次分析结果准确度、可信度较高。

表 7　APCS-MLR 模型线性回归系数

Table 7　Linear regression coefficients of the APCS-MLR model

项目		未标准化系数		标准化系数	t	显著性	R^2	预测值/实测值
		B	标准误差	Beta				
As	常量	2.077	0.599		3.467	0.002	0.534	1.001
	APCS1	0.468	0.195	0.282	2.405	0.022		
	APCS2	−0.556	0.195	−0.335	−2.858	0.008		
	APCS3	1.029	0.195	00.619	5.289	0.000		
Hg	常量	−0.018	0.009		−2.080	0.046	0.804	0.954
	APCS1	−0.004	0.003	−0.118	−1.553	0.131		
	APCS2	0.002	0.003	0.058	0.763	0.451		
	APCS3	0.033	0.003	0.896	11.792	0.000		
Cr	常量	0.045	4.612		0.010	0.992	0.817	1.009
	APCS1	1.886	1.497	0.092	1.260	0.217		
	APCS2	18.252	1.497	0.895	12.193	0.000		
	APCS3	−3.181	1.497	−0.156	−2.125	0.042		
Ni	常量	6.054	1.576		3.840	0.001	0.814	1.000
	APCS1	2.056	0.512	0.297	4.017	0.000		
	APCS2	5.952	0.512	0.861	11.631	0.000		
	APCS3	0.175	0.512	0.025	0.343	0.734		
Cu	常量	−17.075	11.805		−1.446	0.158	0.859	1.001
	APCS1	54.390	3.832	0.915	14.194	0.000		
	APCS2	10.523	3.832	0.177	2.746	0.010		
	APCS3	3.424	3.832	0.058	0.893	0.378		
Zn	常量	−30.999	29.676		−1.045	0.304	0.930	1.004
	APCS1	203.322	9.633	0.957	21.107	0.000		
	APCS2	27.146	9.633	0.128	2.818	0.008		
	APCS3	13.708	9.633	0.065	1.423	0.165		
Cd	常量	0.320	0.324		0.988	0.331	0.803	0.991
	APCS1	1.243	0.105	0.901	11.820	0.000		
	APCS2	0.092	0.105	0.067	0.873	0.389		
	APCS3	0.093	0.105	0.067	0.880	0.386		
Pb	常量	41.584	56.424		0.737	0.467	0.630	1.002
	APCS1	140.382	18.315	0.800	7.665	0.000		
	APCS2	24.858	18.315	0.142	1.357	0.184		
	APCS3	−10.341	18.315	−.059	−0.565	0.576		

矿业活动源（APCS1）对各种金属的平均贡献率为 19.67%，且对 Cd、Zn、Pb、Cu 四种重金属贡献率最高（图 7），分别为 41.36%、40.94%、32.52%、31.67%。矿业开采、选冶废水可能是沉积物中 Cu、Zn、Cd、Pb 含量的主要来源（李德亮等，2010；卢洪斌等，2024）。自然背景源（APCS2）平均贡献率为 36.06%，对 Cr、Ni 贡献率最大，其次对 Cu、Zn、Pb、As 也有一定比例的贡献。Pearson 相关性显示 Ni-Cu、Ni-Zn 存在 0.05 水平的显著相关性，说明其有相似的来源。伊洛河矿集区各类矿石中大多含有黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等矿物，伴生有 Cu、Zn、Pb、Cd 等元素组分。另据调查，钼矿区综合异常显示有岩石样 Cu 含量较高，且存在 Pb、Zn 异常（张四清和曾文青，2014），钼矿尾矿渣中 Cd、Pb、Cu、Zn 含量较高（潘飞飞等，2024），说明 Cd、Pb、Cu、Zn 在研究区内具有高地质背景。金矿矿体中砷呈强富集

（高灶其等，2008），铅锌矿石中也富含 As（田浩浩等，2015），且矿业生产对环境中的 As、Cr 基本无影响（张江华等，2013）。工业农业源（APCS3）平均贡献率为 21.62%，对 Hg 的贡献率最高（72.51%），其次为 As（36.19%）。农业生产所需的氮磷钾肥、复合肥、有机肥中含有较高的 Cd、Zn、Pb、Cu、As、Ni 等重金属（Peris et al.，2008；王美和李书田，2014），As、Hg、Cd、Pb、Cu、Zn 又是市场常用杀虫剂、除草剂及除菌剂的主要组成元素（叶雪珠等，2023）。同时，冶金、机械制造、机械电子等行业是老工业城市洛阳的支柱产业，工业排放也会增加河流重金属污染（刘德鸿等，2012）。

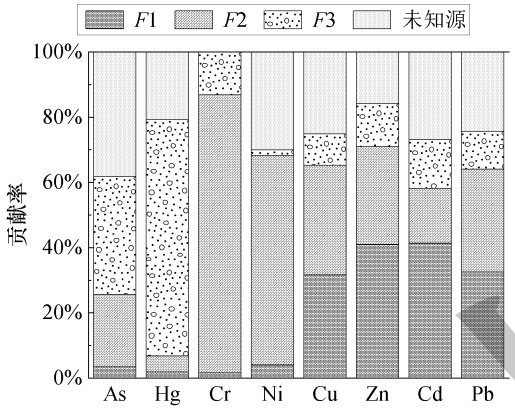

图 7　APCS-MLR 模型源贡献率

Fig. 7　Source contribution rate of the APCS-MLR model

此外，APCS-MLR 模型计算得出 22.65% 的未知源对除 Cr 以外的其余七种重金属均有一定的贡献率。根据 PCA 总方差贡献可知，未知源代表了剩余的 20.63% 的成分。流域内交通发达，道路沿河而建。通行车辆排放尾气中含有 Cd、Zn、Pb、Cu 等重金属，采矿选冶大型设备（如机械车、大卡车等）消耗柴油也会产生 Pb 污染（魏洪斌等，2023），过去燃烧汽油通常也含有 Pb（Shahab et al.，2020）。同时，汽车零件的防腐镀层、汽车轮胎和制动系统的添加剂中含有 Zn、Ni（余符合等，2023；陶玲等，2025）。同时，研究表明，工业生产活动（冶炼、燃煤）所产废气也是 As、Hg 的主要来源之一（陈雅丽等，2019）。这些元素通过大气沉降进入河流沉积物（郑敏慧等，2023）。由此，未知源可能为大气沉降源。

重金属来源解析结果显示出伊洛河沉积物重金属来源的多元性和复杂性。其中自然背景源贡献率最大（36.06%），说明研究区高地质背景对沉积物重金属富集起主导作用。但大气沉降源、工业农业源、矿业活动源这些人类生产活动源贡献率之和超 60%，可见人类活动对伊洛河沉积物重金属富集造成了很大影响，应加以重视。今后伊洛河流域重金属污染防治工作中，除了加强矿产开发重金属污染防治水平外，工农业面源污染也需作为防治重点。

3　结论

（1）伊洛河表层沉积物 Cd、Cu、Zn、Pb 含量超过洛阳地区水系沉积物背景值，尤其 Cd、Pb、Hg 超出比例较高；部分采样点 Cd、Cu、Zn、Pb 含量超过风险筛选值，尤其个别点位 Cd、Pb 含量超过风险管控值，这表明 Cd、Pb 可能会产生潜在的生物毒性。

（2）地积累指数评价结果显示，伊洛河沉积物 Cd、Hg、Pb 整体处于中-重度富集、轻度富集、轻度富集级别，其余五项重金属整体表现为无富集。单项重金属潜在生态危害指数表明，Cd 生态风险等级最高，其次为 Hg、Pb，其余元素均处于低生态风险；35 个采样点综合生态风险在四个水平均有分布。

（3）PCA 与 APCS-MLR 模型分析结果表明，伊洛河沉积物中八种重金属的来源以矿业活动源、自然背景源、工业农业源为主。自然背景源平均贡献率最大（36.06%），其次为工业农业源（21.62%）、矿业活动源（19.67%）。未知源的平均贡献率为 22.65%，可能为大气沉降源。

（4）伊洛河有色金属矿集区河流沉积物重金属来源解析结果显示，伊洛河沉积物重金属富集与区域内人类生产活动关系密切。在伊洛河流域重金属污染防治工作中，除了提升矿产开发污染防治水平，还需做好工农业面源污染精准防控工作。

［References］

Bhardwaj R, Gupta A, Garg J K. 2017. Evaluation of heavy metal contamination using environmetrics and indexing approach for River Yamuna, Delhi stretch, India[J]. Water Science, 31(1): 52-66.

Cai Yuqi, Mao Longjiang, Deng Xiaoqian, Zhou Chaofan, Zhang Yuanzhi. 2023. Trace elements in surface sediments from Xinyanggang River of Jiangsu Province, China: Spatial distribution, risk assessment and source appointment[J]. Marine Pollution Bulletin, 187: 114550.

Chen Hui, Qiao Shuo, Li Chang, Wu Yong, Li Donghao, Li Ling, Liu Jianwei. 2024. Source-oriented risk assessment of heavy metal (loid) s in agricultural soils around a multimetal smelting area near the Yellow River, China[J]. Environmental Geochemistry and Health, 46(2): 1-59.

Chen Sirui. 2023. Source risk assessment and analysis of key influencing factors of As and heavy metals in river sediments in the typical karst gold mining area[D]. Guiyang: Guizhou University: 3 (in Chinese

with English abstract).

Chen Yali, Weng Liping, Ma Jie, Wu Xiaojuan, Li Yongtao. 2019. Review on the last ten years of research on source identification of heavy metal pollution in soils[J]. Journal of Agro-Environment Science, 38(10): 2219-2238 (in Chinese with English abstract).

Cheng Wei, Lei Shaogang, Bian Zhengfu, Zhao Yibo, Li Yuncong, Gan Yandong. 2020. Geographic distribution of heavy metals and identification of their sources in soils near large, open-pit coal mines using positive matrix factorization[J]. Journal of Hazardous Materials, 387: 121666.

Dong Bo, Zhang Renzhi, Gan Yandong, Cai Liqun, Ariel Freidenreich, Wang Kepeng, Guo Tianwen, Wang Hongbin. 2019. Multiple methods for the identification of heavy metal sources in cropland soils from a resource-based region[J]. Science of the Total Environment, 651(Pt 2): 3127-3138.

Gan Tingting, Zhao Nanjing, Yin Gaofang, Ma Mingjun, Meng Deshuo, Fang Li, Yang Ruifang, Liu Wenqing. 2021. A review on heavy metal pollution of agricultural land soil in the Yangtze River Delta and relevant pollution control strategy[J]. Strategic Study of CAE, 23(1): 174-184 (in Chinese with English abstract).

Gao Zaoqi, Li Yun, Liang Lichun. 2008. Geological characteristics and genesis of Dongwan gold deposit in Song County, Henan Province[J]. Geology and Mineral Resources of South China, (2): 31-36 (in Chinese with English abstract).

Guo Guanghui, Li Kai, Zhang Degang, Lei Mei. 2022. Quantitative source apportionment and associated driving factor identification for soil potential toxicity elements via combining receptor models, SOM, and geodetector method[J]. Science of the Total Environment, 830: 154721.

Jiang Tao, Lin Weiwen, Cao Yingjie, Li Kun, Xuan Yingxue, Li Rui, Chen Jianyao. 2020. Pollution and ecological risk assessment and source apportionment of heavy metals in sediments of Qingliangshan reservoir in the Meijiang Basin[J]. Environmental Science, 41(12): 5410-5418 (in Chinese with English abstract).

Kuang Huifen, Hu Chunhua, Wu Genlin, Chen Miao. 2020. Combination of PCA and PMF to apportion the sources of heavy metals in surface sediments from Lake Poyang during the wet season[J]. Journal of Lake Sciences, 32(4): 964-976 (in Chinese with English abstract).

Li Deliang, Zhang Ting, Yu Jianbo, Xiao Tiaoyi. 2010. Distribution and risk evaluation of heavy metals in typical Lakes in middle reaches of the Yangtze River-Taking the Datong lake for example[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 19(z1): 183-189 (in Chinese with English abstract).

Li Fei, Huang Jinhui, Zeng Guangming, Yuan Xingzhong, Li Xiaodong, Liang Jie, Wang Xiaoyu, Tang Xiaojiao, Bai Bing. 2013. Spatial risk assessment and sources identification of heavy metals in surface sediments from the Dongting Lake, Middle China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 132: 75-83.

Li Zhichun, Wang Yunhao, Chen Song, Ma Jie, Wang Guoxiang, Xu Xiaoguang, Huang Heyong, Zhu Yikun. 2025. Pollution assessment and source analysis of heavy metals in sediment of Lake Tuohu in Huaihe River Basin[J]. Journal of Lake Sciences, 37(3):889-901 (in Chinese with English abstract).

Liu Dehong, Kou Taiji, Wang Fayuan, Xu Xiaofeng. 2012. Heavy metal pollution in river sediment from Luoyang City and its potential ecological risk [J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 33(6): 87-90, Ⅷ (in Chinese with English abstract).

Lu Hongbin, Lu Shaoyong, Li Xiang, Zhang Senlin, Huang Zhanggen. 2024. Distribution characteristics, ecological risk assessment, and source tracing of heavy metals in the sediments of typical lakes in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Environmental Science, 45(3): 1402-1414 (in Chinese with English abstract).

Lu Xinzhe, Wei Yingchun, Huang Chunlei, Gu Anqing, Hu Xuefeng. 2020. Characteristics of heavy metal pollution in soil in typical black shale area in the lower reaches of the Yangtze River [J]. Environmental Ecology, 2(10): 29-38 (in Chinese with English abstract).

Meng Xiaofei, Guo Junmei, Yang Junxing, Yang Jun, Zheng Guodi, Qiao Pengwei, Bian Jianlin, Chen Tongbin. 2021. Spatial distribution and risk assessment of heavy metal pollution in farmland soils surrounding a typical industrial area of Henan Province [J]. Environmental Science, 42(2): 900-908 (in Chinese with English abstract).

Pan Feifei, Chen Hongwei, Chen Danli, Zhao Lv, Li Zhengzui, Chen Hui, Peng Xiangxun, Liu Jing. 2024. Mechanism of molybdenum migration and transformation in the tailings and soils in the Luanchuan mining area[J]. Geoscience, 38(3): 755-763 (in Chinese with English abstract).

Peris M, Recatalá L, Micó C, Sánchez R, Sánchez J. 2008. Increasing the knowledge of heavy metal contents and sources in agricultural soils of the European Mediterranean region [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 192(1): 25-37.

Qin Hong. 2024. Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in sediments in coastal area of Taihu Lake[J]. Water Purification Technology, 43(6): 161-168, 178 (in Chinese with English abstract).

Qin Yuanli, Zhang Fugui, Peng Mi, Zhang Li, Tang Ruiling, Cheng Hangxin. 2022. Influencing factors and ecological risk assessment of soil heavy metals in agricultural areas of Xuanwei City, Yunnan Province [J]. Geology and Exploration, 58(2): 360-368 (in Chinese with English abstract).

Qin Yuanli, Zhang Fugui, Peng Min, Zhang Shunyao, Ma Honghong, Tang Ruiling, Zhao Zhihui, Cheng Hangxin. 2020. Geochemical distribution characteristics and sources of heavy metals in soils of Wuding County, Yunnan Province[J]. Geology and Exploration, 56(3): 540-550(inChinese with English abstract).

Shahab A, Zhang Hui, Ullah H, Rashid A, Rad S, Li Jieyue, Xiao He. 2020. Pollution characteristics and toxicity of potentially toxic elements in road dust of a tourist city, Guilin, China: Ecological and health risk assessment[J]. Environmental Pollution, 266: 115419.

Shen Dongbo, Shi Dong, Li He, Shen Xian, Wang Shuhang, Jiang Xia, Che Feifei. 2025. Pollution characteristics and potential risks of heavy

metals in reservoir basin sediments of the hilly areas in the upper Yangtze River[J/OL]. Environmental Science, 2025-04-14, https://doi. org/10.13227/j. hjkx. 202411144 (in Chinese with English abstract).

Shi Changyi, Liang Meng, Feng Bin. 2016. Average background values of 39 chemical elements in stream sediments of China[J]. Earth Science, 41(2): 234-251 (in Chinese with English abstract).

Solismaa S, Ruskeeniemi K L, Nuottimäki K, Tolvanen H, Järvinen K, Müller I. 2024. Historical mining towns: The establishment of 'Soil Planning Areas' for the risk management of contaminated soil[J]. Journal of Hazardous Materials, 486: 136962.

Stafilov T, Šajn R, Boev B, Cvetković J, Mukaetov D, Andreevski M, Lepitkova S. 2010. Distribution of some elements in surface soil over the Kavadari region, Republic of Macedonia[J]. Environmental Earth Sciences, 61(7): 1515-1530.

Tao Ling, Xue Xiangyu, Ren Hanru, Li Yunmeng, Mu Xuri, Zhu Rui, Tong Caili, Ren Jun. 2025. Analysis of the influencing factors and sources of spatial differentiation of heavy metals in surface sediments of the Shaanxi section of the Yellow River[J/OL]. Environmental Science, 2025-04-19, https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202412254 (in Chinese with English abstract).

Tian Haohao, Zhang Shouting, Cao Huawen, Han Jiangwei, Lv Pengrui, Zhang Yunhui. 2015. Geochemical characteristics of trace elements of sphalerite in the Chitudian Pb-Zn deposit, west Henan Province [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 34(2): 334-342 (in Chinese with English abstract).

Wang Feng, Dong Wenyi, Zhao Zilong, Wang Hongjie, Li Wenzheng, Chen Guanhan, Wang Feifei, Zhao Yue, Huang Jie, Zhou Ting. 2021. Heavy metal pollution in urban river sediment of different urban functional areas and its influence on microbial community structure[J]. Science of the Total Environment, 778(23): 146383.

Wang Mei, Li Shutian. 2014. Heavy metals in fertilizers and effect of the fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 20(2): 466-480 (in Chinese with English abstract).

Wang Meihua. 2023. Source analysis of heavy metals in typical farmland soils based on PCA-APCS-MLR and geostatistics[J]. Environmental Science, 44(6): 3509-3519 (in Chinese with English abstract).

Wei Hongbin, Luo Ming, Xiang Lei, Zha Lisi, Yang Huili. 2023. Analysis on the distribution characteristics and influence mechanism of migration and transformation of heavy metals in mining wasteland[J]. Environmental Science, 44(6): 3573-3584 (in Chinese with English abstract).

Wu Lijun, Yue Weifeng, Wu Jin, Cao Changming, Liu Hong, Teng Yanguo. 2023. Metal-mining-induced sediment pollution presents a potential ecological risk and threat to human health across China: A meta-analysis[J]. Journal of Environmental Management, 329: 117058.

Wu Mingming, Huang Yang, Zhang Junzheng, Wang Hanyu. 2024. Change characteristics of soil heavy metal elements and prediction analysis of element content in Yihe River Basin (Luanchuan-Songxian section)[J]. Modern Chemical Research, 13: 67-69 (in Chinese with English abstract).

Xia Meng, Cang Bo, Zhang Zhanshuo, Zhang Yang, Jia Jia, Tian Shimin. 2024. Characteristics and source analysis of heavy metal pollution in water and sediment of Yiluo River[C]. Proceedings of the 2024 China Water Conservancy Conference. Xi'an: Yellow River Water Conservancy Press: 517-525 (in Chinese).

Xia Pinhua, Ma Li, Sun Rongguo, Yu Yang, Tang Xiangchen, Yan Dingbo, Lin Tao, Zhang Yutao, Yin Yi. 2020. Evaluation of potential ecological risk, possible sources and controlling factors of heavy metals in surface sediment of Caohai Wetland, China[J]. Science of the Total Environment, 740: 140231.

Xu Jinying, Zheng Lilin, Xu Ligang, Wang Xiaolong. 2019. Ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in surface sediments of rivers located in the hilly area of southern China[J]. China Environmental Science, 39(8): 3420-3429 (in Chinese with English abstract).

Ye Xuezhu, Chen De, Xiao Wendan, Zhang Qi, Zhao Shouping. 2023. Distribution characteristics and risk analysis of heavy metals in pesticides[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 25(1): 227-236 (in Chinese with English abstract).

Yu Fuhe, Wang Shu, Qian Chengyuan, Jiang Qiao, Chen Tao, Tang Yunyun, Tong Hui, Wang Jianjun, Cheng Xiaoying. 2023. Distribution, sources, and ecological risk evaluation of heavy metals in surface sediments of Taihu Lake [J]. Environmental Science, 44(10): 5524-5535 (in Chinese with English abstract).

Zhang Jianghua, Wang Kuiying, Zhao Aning, Chen Huaqing, Ke Hailing, Liu Ruiping. 2013. Heavy metal characteristics of stream sediments in the Xiaoqinling gold ore district [J]. Geology in China, 40(2): 2819-2826 (in Chinese with English abstract).

Zhang Jing, Liu Kunyi, Guo Chenlin, Zhang Jianmin, Xing Bing. 2023. Assessment of potential ecological risk based on the vertical characteristics of potential toxic elements in sediments from a high-density cage culture reservoir in China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 262: 115136.

Zhang Junzheng, Huang Yang, Wu Mingming, Lu Jingjing, Shen Zhagen, Chen Zhen. 2023. Investigation and risk assessment of soil heavy metal pollution in Luanchuan-Songxian section of Yihe River Basin[J]. Journal of Green Science and Technology, 25(16): 194-197 (in Chinese with English abstract).

Zhang Shaoxuan, Zeng Xia, Sun Ping, Ni Tianhua. 2023. Ecological risk characteristics of sediment-bound heavy metals in large shallow lakes for aquatic organisms: The case of Taihu Lake, China[J]. Journal of Environmental Management, 342: 118253.

Zhang Siqing, Zeng Wenqing. 2014. Genesis of molybdenum ore in the Baimiaogou mining area, Luanchuan, Henan Province[J]. China Water Transport, 14(6): 220-221 (in Chinese with English abstract).

Zhang Yaran, Che Feifei, Fu Zhenghui, Xu Ye, Li Wei. 2022. Distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Lake Qinghai[J]. Environmental Science, 43(6): 3037-3047 (in Chinese with English abstract).

Zhao Qingqing, Bai Junhong, Gao Yongcho, Zhang Guangliang, Lu

Qiongqiong, Jia Jia. 2021. Heavy metal contamination in soils from freshwater wetlands to salt marshes in the Yellow River Estuary, China[J]. Science of the Total Environment, 774: 145072.

Zheng Minhui, Bai Dongrui, Zhang Tao, Chen Tan, Wang Hongtao, Yang Ting, Zhang Bing, Jin Jun. 2023. Distribution characteristics and pollution risk of heavy metals in river sediment of Suzhou water network area, China[J]. Environmental Science, 44(1): 198-209 (in Chinese with English abstract).

Zhong Xiaoyu, Wu Tiansheng, Li Jie, Zheng Guodong, Zhuo Xiaoxiong, Guan Dongchao, Wang Lei, Mo Binji. 2020. Ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in sediments of Liujiang River Catchment [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 44(1): 191-198 (in Chinese with English abstract).

［附中文参考文献］

陈思睿. 2023. 喀斯特典型金矿开采区水系沉积物中砷和重金属的源风险评估及关键影响因素解析[D]. 贵阳: 贵州大学: 3.

陈雅丽, 翁莉萍, 马杰, 武晓娟, 李永涛. 2019. 近十年中国土壤重金属污染源解析研究进展[J]. 农业环境科学学报, 38(10): 2219-2238.

甘婷婷, 赵南京, 殷高方, 马明俊, 孟德硕, 方丽, 杨瑞芳, 刘文清. 2021. 长江三角洲地区农用地土壤重金属污染状况与防治建议[J]. 中国工程科学, 23(1): 174-184.

高灶其, 李云, 梁黎春. 2008. 河南省嵩县东湾金矿成矿地质特征及成因分析[J]. 华南地质与矿产, (2): 31-36.

江涛, 林伟温, 曹英杰, 黎坤, 禤映雪, 李睿, 陈建耀. 2020. 梅江流域清凉山水库沉积物重金属污染、生态风险评价及来源解析[J]. 环境科学, 41 (12): 5410-5418.

匡荟芬, 胡春华, 吴根林, 陈苗. 2020. 结合主成分分析法(PCA)和正定矩阵因子分解法(PMF)的鄱阳湖丰水期表层沉积物重金属源解析[J]. 湖泊科学, 32 (4): 964-976.

李德亮, 张婷, 余建波, 肖调义. 2010. 长江中游典型湖泊重金属分布及其风险评价—以大通湖为例[J]. 长江流域资源与环境, 19(z1): 183-189.

李致春, 王运好, 陈松, 马杰, 王国祥, 许晓光, 黄鹤勇, 朱义坤. 2025. 淮河流域沱湖沉积物重金属污染评价与来源分析[J]. 湖泊科学, 37(3): 889-901.

刘德鸿, 寇太记, 王发园, 徐晓峰. 2012. 洛阳城市河流底质重金属污染及潜在生态风险[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 33(6): 87-90+Ⅷ.

卢洪斌, 卢少勇, 李响, 张森霖, 黄张根. 2024. 长江中游典型湖泊沉积物重金属分布特征、生态风险评估及溯源[J]. 环境科学, 45 (3): 1402-1414.

卢新哲, 魏迎春, 黄春雷, 谷安庆, 胡雪峰. 2020. 长江下游典型黑色页岩区土壤重金属累积特征研究[J]. 环境生态学, 2(10): 29-38.

孟晓飞, 郭俊姆, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 乔鹏炜, 卞建林, 陈同斌. 2021. 河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价[J]. 环境科学, 42 (2): 900-908.

潘飞飞, 谌宏伟, 陈丹利, 赵膂, 李正最, 陈辉, 彭向训, 刘京. 2024. 栾川矿集区钼矿尾渣与土壤中钼的迁移转化机理[J]. 现代地质, 38(3): 755-763.

秦红. 2024. 太湖沿岸湖区底泥重金属污染分布特征及生态风险评价[J]. 净水技术, 43(6): 161-168, 178.

秦元礼, 张富贵, 彭敏, 张利, 唐瑞玲, 成杭新. 2022. 云南省宣威市农耕区土壤重金属元素分布影响因素及生态风险评价[J]. 地质与勘探, 58(2): 360-368.

秦元礼, 张富贵, 彭敏, 张舜尧, 马宏宏, 唐瑞玲, 赵智慧, 成杭新. 2020. 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, 56(3): 540-550.

沈东波, 石东, 李贺, 沈娴, 王书航, 姜霞, 车霏霏. 2025. 长江上游丘陵区水库流域沉积物重金属污染特征及潜在风险[J/OL]. 环境科学, 2025-04-14, https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202411144.

史长义, 梁萌, 冯斌. 2016. 中国水系沉积物39种元素系列背景值[J]. 地球科学, 41 (2): 234-251.

陶玲, 薛向宇, 任汉儒, 李云梦, 母旭日, 朱睿, 童彩丽, 任珺. 2025. 黄河陕西段表层沉积物重金属空间分异影响因子及来源解析[J/OL]. 环境科学, 2025-04-19, https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202412254.

田浩浩, 张寿庭, 曹华文, 韩江伟, 吕鹏瑞, 张云辉. 2015. 豫西赤土店铅锌矿床闪锌矿微量元素地球化学特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 34(2): 334-342.

王美, 李书田. 2014. 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, 20(2): 466-480.

王美华. 2023. PCA-APCS-MLR 和地统计学的典型农田土壤重金属来源解析[J]. 环境科学, 44 (6): 3509-3519.

魏洪斌, 罗明, 向垒, 查理思, 杨慧丽. 2023. 矿业废弃地重金属形态分布特征与迁移转化影响机制分析[J]. 环境科学, 44(6): 3573-3584.

吴明明, 黄杨, 张军正, 王焓钰. 2024. 伊河流域(栾川-嵩县段)土壤重金属元素变化特征及元素含量变化预测分析[J]. 当代化工研究, 13: 67-69.

夏梦, 仓博, 张展硕, 张杨, 贾佳, 田世民. 2024. 伊洛河水体和沉积物重金属污染特征与源解析[C]. 2024中国水利学术大会论文集. 西安:黄河水利出版社, 517-525.

徐金英, 郑利林, 徐立刚, 王晓龙. 2019. 南方丘陵区河流表层沉积物重金属污染评价[J]. 中国环境科学, 39 (8): 3420-3429.

叶雪珠, 陈德, 肖文丹, 张棋, 赵首萍. 2023. 不同类型农药中重金属分布特征及风险分析[J]. 农药学学报, 25(1): 227-236.

余符合, 王姝, 钱程远, 江桥, 陈涛, 唐芸芸, 仝晖, 王建军, 成小英. 2023. 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, 44(10): 5524-5535.

张江华, 王葵颖, 赵阿宁, 陈华清, 柯海玲, 刘瑞平. 2013. 小秦岭金矿区水系沉积物重金属特征研究[J]. 中国地质, 40(2): 2819-2826.

张军正, 黄杨, 吴明明, 逯静静, 申扎根, 陈震. 2023. 伊河流域栾川-嵩县段土壤重金属污染调查及风险评估[J]. 绿色科技, 25 (16): 194-197.

张四清, 曾文青. 2014. 河南省栾川白庙沟矿区钼矿成因[J]. 中国水运, 14(6): 220-221.

张雅然, 车霏霏, 付正辉, 许野, 李薇. 2022. 青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析[J]. 环境科学, 43(6): 3037-3047.

郑敏慧, 白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 杨婷, 张冰, 金军. 2023. 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, 44(1): 198-209.

钟晓宇，吴天生，李杰，郑国东，卓小雄，关东超，王磊，莫斌吉．2020. 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，44(1)：191-198.

Geochemical Characteristics of Heavy Metals in River Sediments from Nonferrous Metal Mining Area of the Yiluo River

FENG Xuezhen[1,2], SHENG Qi[1,2], WANG Mingguo[1,3], ZHAO Xinlei[1,2], ZHANG Yan[1,2]

(1. *Henan Academy of Geology, Zhengzhou, Henan* 450000; 2. *Henan Geochemical Ecological Restoration Engineering Research Center, Zhengzhou, Henan* 450000; 3. *Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geological Survey, Tianjin* 300309)

Abstract: This study investigated the heavy metals in river sediments from the nonferrous metal mining area of the Yiluo River. Analysis of the geochemical characteriatics of heavy metals in sediments revealed the ecological risk differentiation patterns and multi-source driving mechanisms. Based on the spatial pattern of mineral development, thirty-five sediment samples along the main stream and at the confluences of major tributaries were collected, and the content of eight heavy metals (As, Hg, Cr, Cd, Cu, Zn, Pb, and Ni) in sediments was analyzed. The geo-accumulation index (I_{geo}), potential ecological risk index (*RI*), and the absolute principal component scores-multiple linear regression (APCS-MLR) were combined to constructed the three-dimensional analytical framework of "enrichment characteristics-risk level-source contribution". The results show that: (1) Cd and Pb exhibited the most significant enrichment, with average contents 10.17 and 4.78 times the regional background values, respectively. Their spatial distribution showed a gradient decreasing from the mining areas to the downstream along the river. (2) I_{geo} classification indicated that Cd was moderately to heavily enriched (1.32~3.15), while Pb (0.82~1.45) and Hg (0.65~1.12) were slightly enriched. (3) The ecological risks showed three-level differentiation: Cd posed an extremely high risk (E_r^i= 389.7), Hg (E_r^i= 72.5) posed a high risk, and Pb (E_r^i= 52.3) posed a moderate risk. (4) Source apportionment identified three major contributing sources: natural background source (36.06%), industrial and agricultural source (21.62%), and mining activity source (19.67%). A novel "element cluster-pollution source-risk level" three-dimensional matrix model was developed, categorizing Cr-Ni as natural source (low risk), Cd-Zn-Pb-Cu as mining source (high risk), and Hg-As as industrial and agricultural source (moderate risk). This model provides key data support for the simulation of heavy metal pollution migration at the basin scale, ecological risk early warning, and the research and development of targeted control technologies, offering significant practical value for the implementation of ecological conservation and high-quality development strategies in the Yellow River Basin.

Key words: nonferrous metals, ore-concentrated area, river sediments, heavy metals, geochemistry, Yiluo River