

doi:10.20008/j.kckc.202301017

# 宁镇矿集区小流域水系沉积物重金属污染评价及来源解析

陈雪, 汪小祥, 邱杨, 陈彪, 景山

(江苏省地质局, 江苏南京 210007)

**摘要** 为查明有过矿业活动史的水源地汇水区内水系沉积物的重金属含量特征、主要来源及其贡献率,本文以宁镇矿集区小流域表层水系沉积物为研究对象,在调查与采样测试基础上,采用潜在生态危害指数计算、相关性分析、主成分分析和绝对主成分—多元线性回归模型分析等方法,对表层水系沉积物重金属(Cr、Cu、Ni、As、Hg、Cd、Pb)的分布特征及潜在生态风险、污染来源及各来源贡献率进行研究。结果表明:研究区7种水系沉积物重金属变异系数为0.51~2.80,属中到强变异;除Hg外,其他6种元素均呈现富集现象,其中Cd、Cu累积明显;且因Cd、Cu的高累积而使部分采样点处于高—极高生态风险水平,但大部分采样点处于低生态风险。经源解析,研究区表层水系沉积物重金属主要有自然源、采矿活动源和农业源3个来源,7种元素受几种源共同作用,其中自然源对As、Cr、Ni的贡献率分别为92.18%、87.48%、74.00%,采矿活动源对Cd、Cu的贡献率为63.54%、69.57%,而农业源对Pb、Hg的贡献率为50.41%和73%。研究成果能够为该水源地水系沉积物重金属针对性污染防治与修复工作提供一定的理论和数据依据。

**关键词** 宁镇地区;重金属;生态风险;绝对主成分—多元线性回归模型;源解析

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1674-7801(2023)01-0144-09

## Pollution assessment and source identification of heavy metals in the stream sediments of small watershed in the Ningzhen ore cluster area

CHEN Xue, WANG Xiaoxiang, QIU Yang, CHEN Biao, JING Shan

(Geological Bureau of Jiangsu Province, Nanjing 210007, Jiangsu, China)

**Abstract:** In order to ascertain the content characteristics, main sources and source identification of heavy metals in stream sediments in small watershed with a history of mining activities, this paper takes the Ningzhen ore cluster area as an example, on the basis of sampling and testing, to study the content characteristics, pollution sources and contribution rate of heavy metals(Cr, Cu, Ni, As, Hg, Cd and Pb) in top stream sediments by the Ha-

[收稿日期]2021-12-23; [改回日期]2022-05-09

[基金项目]本文受江苏省地质勘查专项资金(苏财建[2018]96号、苏财资环[2021]46号)和江苏省有色金属华东地质勘查局基础研究专项资金项目(苏色华东地科[2021]146号)联合资助。

[第一作者简介]陈雪,女,1982年生,硕士,高级工程师,主要从事成矿机理及矿业活动与地质环境作用机理研究;E-mail: 215779199@qq.com。

[引文格式]陈雪,汪小祥,邱杨,陈彪,景山. 2023. 宁镇矿集区小流域水系沉积物重金属污染评价及来源解析[J]. 矿产勘查, 14(1): 144-152.

Chen Xue, Wang Xiaoxiang, Qiu Yang, Chen Biao, Jing Shan. 2023. Pollution assessment and source identification of heavy metals in the stream sediments of small watershed in the Ningzhen ore cluster area[J]. Mineral Exploration, 14(1): 144-152.

kanson's potential ecological risk index ( $E_\gamma^i$  and  $RI$ ) methods, correlation analysis, principal component analyses and the absolute principal component scores/multiple linear regression (APCS-MLR) receptor model. The results showed that the variation coefficients of 7 heavy metals in stream sediments were 0.51~2.80, belonging to medium to strong variation; except Hg, the concentrations of all elements were almost higher than the ecological risk values (1:200000) and the deep soil background of Jiangsu Province, in which Cd and Cu were significantly enriched in the top stream sediments; and the potential ecological risk index of heavy metals belongs to the low potential ecological risk in the most of sampling points, while some of the stream sediments samples categorized as the high-risk level due to the high accumulation of Cd and Cu. Through source analysis, heavy metals in top stream sediments mainly come from three sources: natural source, mining activity source and agricultural source. Seven heavy metals are affected by several sources. The contribution of natural sources to As, Cr and Ni was 92.18%, 87.48% and 74.00%, respectively, the contribution of mining activity sources to Cd and Cu was 63.54% and 69.57%, respectively; While the agricultural sources contributed 50.41% and 73% to Pb and Hg, respectively. The research results can provide a certain theoretical and data basis for the prevention, control and remediation of heavy metal pollution in stream sediments in the water source area.

**Keywords:** Ningzhen ore cluster area; heavy metal; ecological risk assessment; absolute principal component-multiple linear regression (APCS-MLR); source identification

## 0 引言

水是人类生命之源,水系沉积物是污染物重要的“源”和“汇”(袁旭音等,2004;苏桂荣,2012)。由于沉积物是水生生态系统中重要的组成部分,因此水系沉积物污染也被认为是水体水质状况的指示剂(周军等,2017)。关于水系沉积物重金属,有关学者们开展了大量的研究工作(陈静生等,1996;徐争启等,2004;张江华等,2013;阳金希等,2017;王闯等,2017;徐泽峰等,2020;郭杰等,2021),也有不少关于地质高背景区水系沉积物重金属方面的研究(肖宇,2019;沈宸宇等,2021;朱英海等,2022),但是针对矿集区流域内水系沉积物重金属研究相对偏少(蔡敬怡等,2019;孙厚云等,2019),尤其是位于水源地上游汇水区内的矿集区,而定量解析重金属污染来源是流域污染防治的重要基础。因此,以矿集区内小流域为对象,开展水系沉积物重金属含量及污染风险调查评价,识别并定量解析污染源,对提出具有针对性的污染风险防治措施具有重要的现实意义。

宁镇矿集区是长江中下游多金属成矿带重要的矿集区之一(翟裕生等,1992),其内分布着北山水库、仑山水库、固江口水库等。其中,北山水库是句容市重要的饮用水水源地之一。该矿集区内多数矿山都经历过露天开采,由于这些矿山处在山脊附

近,岩石风化后的产物易受水、重力等外力作用搬运,并在地势相对低缓的部位沉积而形成地球化学高背景,甚至引起水土环境污染(赵元艺等,2014)。

因此,本文以宁镇矿集区北山水库小流域表层水系沉积物为研究对象,通过调查研究矿集区内水系沉积物重金属元素的含量、污染风险与来源等,为开展该流域重金属防治工作提供基础资料和技术支撑。

## 1 研究区概况

研究区位于宁镇铜多金属矿集区中段内的北山水库流域,地理中心坐标为 $32^\circ 6'00''N, 119^\circ 10'12''E$ (图1)。研究区寒武系—第四系出露较全,其中寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系及下三叠统岩性主要为碳酸盐岩,志留系、泥盆系、下—中侏罗统、上白垩统岩性为碎屑岩,下白垩统以火山碎屑岩为主;区内中生代岩浆活动强烈,石英二长斑岩、石英闪长斑岩等大面积分布。研究区金属矿产成矿地质条件良好,成矿作用广泛发育,在大华山—马虎山—盘龙岗—武岐山—仙桃山一带,分布有大华山—西银坑铜矿、老人峰铜多金属矿、盘龙岗铜铁硫矿和仙桃山铁矿等具有一定规模的矿床(点)。由于地方经济需要,20世纪70年代末期起对部分矿床(点)进行了开采,主要开采浅部氧化铜矿体和硫铁矿体,并于21世纪初陆续关停。

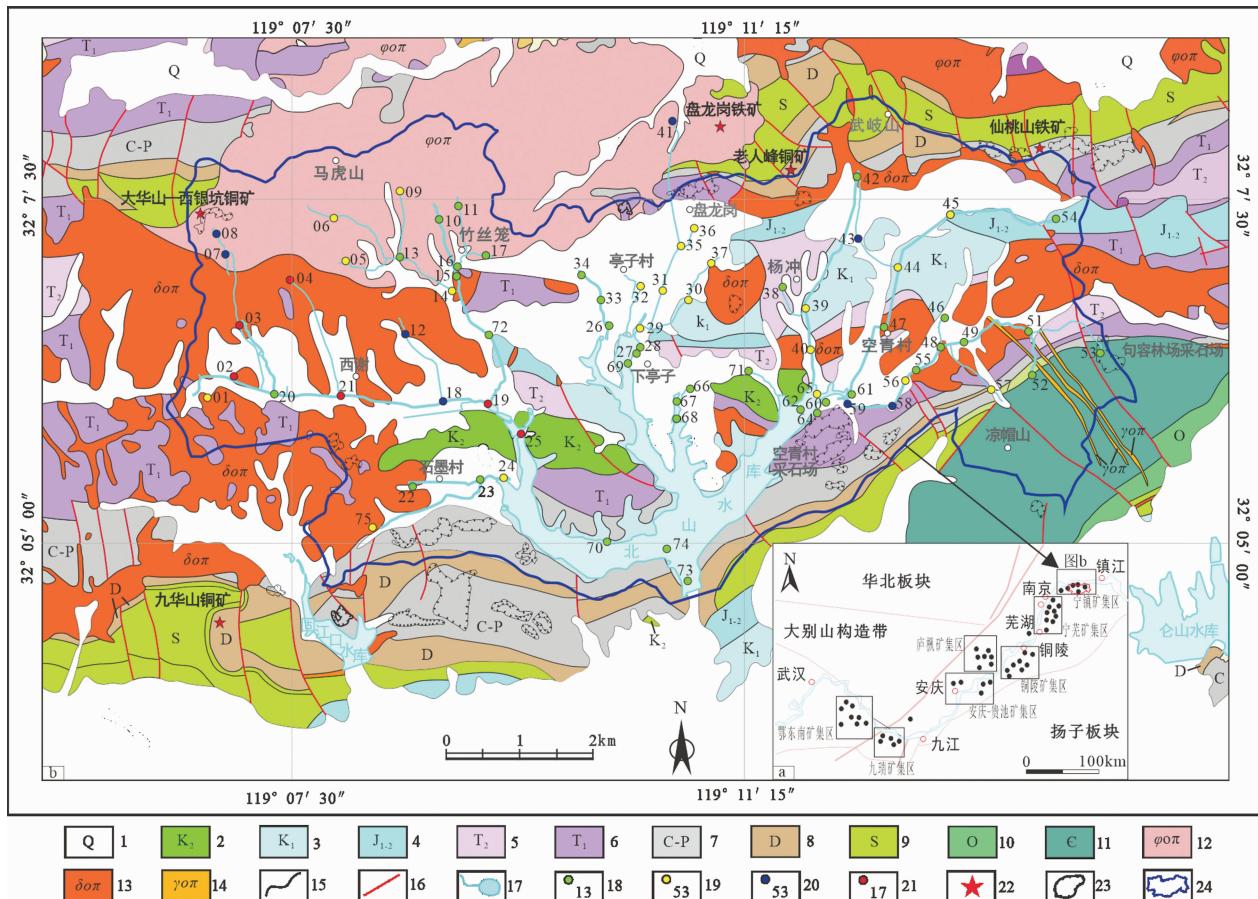


图1 研究区大地构造简图(a)及地质水系沉积物采样点分布图(b)(据江苏省冶金地质勘探公司八一〇队,1982<sup>①</sup>修编)  
1—第四系;2—上白垩统;3—下白垩统;4—下—中侏罗统;5—中三叠统;6—下三叠统;7—石炭系—二叠系;8—泥盆系;9—志留系;10—奥陶系;  
11—寒武系;12—石英二长斑岩;13—石英闪长斑岩;14—斜长花岗斑岩;15—地质界线;16—断裂;17—地表水体;  
18—水系沉积物采样点及编号;19—中等潜在生态风险样品点及编号;20—高度潜在生态风险样品点及编号;21—极高潜在生态风险样品点及编号;  
22—金属矿床(点);23—采石范围;24—研究区范围

研究区属宁镇山脉,为典型低山丘陵区,山体形态呈现出上陡下缓的地貌特征。山体上部裸露基岩,裂隙发育,坡度30°~50°;下部为由残坡积及冲洪积、风成松散沉积物构成的山前缓坡,坡度8°~15°,在山前缓坡中有沟谷及岗地发育(阎长虹等,2019)。研究区年平均气温15.1℃,降水量1018.6 mm,降雨多集中在6—8月,占年均降雨量的30%~50%,属北亚热带季风气候。水系较发育,沿河流有水田分布(周铮等,2020)。

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集与测试

水系沉积物的采样点主要布设在小流域水系源头处、河流交汇处、河流转弯处以及入库口等部

位(图1),除水系源头附近分布有金属遗留废弃矿山外,其余采样点点位周边无明显污染源。样品使用皮尔逊抓泥斗采样器和塑料铲直接采集河流表层(0~30 cm)沉积物,并将采集的样品装入塑料自封袋保存,做好标记,于当日送至实验室。共采集79件水系沉积物样品,每件湿重2 kg左右。

样品测试由具有检验检测机构资质认定证书的江苏华测品标检测认证技术有限公司完成。依据GB17141—1997、GB/T 22105.2—2008、HJ 491—2019等有关国家标准(国家环境保护局,1997;中国国家标准化管理委员会,2008;中华人民共和国生态环境部,2019),采用石墨炉原子吸收光谱法、火焰原子吸收分光光度法及原子荧光光谱法等方法,分析测定了水系沉积物中重金属Cr、Cu、Ni、As、Hg、Cd和Pb的含量。

样品采集和测试质量控制要求按照《多目标区域地球化学调查规范(1:250000)》(DZ/T 0258—2014)和《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)规范标准执行(中华人民共和国国土资源部,2015,2016),各元素分析方法的各项技术指标均满足规定要求。

## 2.2 污染评价与源解析方法

### 2.2.1 生态风险评价方法

#### (1) 评价基准

由于目前尚未有具有普遍意义的水系沉积物环境质量评价基准,为较系统地评价北山水库流域水系沉积物重金属的污染状况,本文选择宁镇地区1984年完成的1:200000水系沉积物重金属背景值(何春林等,1988<sup>②</sup>)、宁镇扬丘陵岗地深层(150~200 cm)土壤背景值(廖启林等,2009)和考虑水体底栖生物效应的国外一致性沉积物质量基准值(Macdonald et al., 2000)(表1)作为评价参考值进行污染评价。对于国外一致性沉积物质量基准值,沉积物中污染物的含量若低于临界效应值(TEC),认为沉积物未发生污染;含量若介于临界效应值(TEC)与可能效应值(PEC)之间,则沉积物处于中度污染水平;含量若大于可能效应值(PEC),则认为沉积物已经发生了重度污染,并呈现严重生物毒性效应(Macdonald et al., 2000;陈云增等,2005)。

#### (2) 变异系数

选用变异系数(CV)来分析研究区表层水系沉积物重金属含量变化差异,计算公式为:

$$CV = S^2 / \bar{X} \quad (1)$$

式(1)中, $S^2$ 为各重金属元素相应的标准差, $\bar{X}$ 为各重金属元素平均值。 $CV > 100\%$ 为强变异, $10\% < CV \leq 100\%$ 为中等变异, $CV \leq 10\%$ 为弱变异(李三中等,2017)。

#### (3) 潜在生态危害指数

采用将重金属环境生态效应与毒理学联系起来的潜在生态危害指数法(Hakanson, 1980;李珊珊等,2013;陈自然等,2021),来评价水系沉积物重金属潜在生态风险。公式为:

$$RI = \sum_{i=1}^m E_{\gamma}^i = \sum_{i=1}^m T_{\gamma}^i \times C_{\gamma}^i = \sum_{i=1}^m T_{\gamma}^i \times \frac{C_{\text{实测}}^i}{C_n^i} \bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (2)$$

式(2)中,RI为沉积物中多种重金属潜在生态危害指数; $E_{\gamma}^i$ 是重金属元素*i*的潜在生态风险系数; $T_{\gamma}^i$ 为重金属*i*的毒性系数,见表1; $C_{\gamma}^i$ 为重金属*i*的污染指数; $C_{\text{实测}}^i$ 为沉积物中重金属*i*的实测值( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ); $C_n^i$ 为重金属*i*的背景参照值( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),本文以宁镇地区水系沉积物重金属平均值作为背景参照值; $m$ 为重金属元素数量。

由于Hakanson(1980)提出的潜在生态风险指数( $Er$ )和RI分级标准是基于Cr、Cu、As、Hg、Cd、Pb、Zn、PCB等8种污染物,而本文针对7种重金属元素,因此按照重金属毒性响应系数的计算方法(马建华等,2020),根据参评重金属元素种类和数量重新计算相应分级标准。计算得出调整后的RI分级标准为:低度[0, 120]、中度[120, 240]、高度[240, 480]和极高[480,  $\infty$ ]等4个风险等级。Hg的毒性系数为40,是本研究7种重金属中毒性系数最大的元素,故单元素污染指数( $E_{\gamma}^i$ )可分为低度[0, 40]、中度[40, 80]、较高[80, 160]、高度[160, 320]和极高[320,  $\infty$ ]等5级。

### 2.2.2 源解析方法

采用目前应用广泛且成熟的多元统计分析法,结合空间分布分析和地质地貌特点来分析河流沉积物重金属来源。

采用Pearson相关性分析和主成分分析(PCA)进行源解析,利用绝对主成分—多元线性回归模型(APCS-MLR模型)对研究区水系沉积物重金属污

表1 水系沉积物重金属污染现状评价标准参考值( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

项目	Cr	Cu	Ni	As	Hg	Cd	Pb	数据来源
宁镇地区1:20万水系沉积物均值	76	26.1	30.6	12.5	0.06	0.23	26.8	何春林等,1988 <sup>②</sup>
宁镇扬丘陵岗地深层(150~200 cm)土壤均值	84	29	38	11.3	0.03	0.094	24.5	廖启林等,2009
国外一致性沉积物质量基准值	临界效应值(TEC)	43.4	31.6	22.7	9.79	0.18	0.99	Macdonald et al., 2000
	可能效应值(PEC)	111	149	48.6	33	1.06	4.98	
	毒性系数( $T_{\gamma}^i$ )	2	5	5	10	40	30	徐争启等,2004

染源进行定性定量解析。根据APCS-MLR模型,将主成分分析的3个主因子得分,按照引入0浓度样本转换步骤计算绝对主成分因子得分(杜展鹏等,2020),再将绝对主因子得分与各种重金属元素含量分别进行多元线性回归分析,作各重金属元素的多元线性回归方程,得到回归系数,将绝对主成分(APCS)转化为主因子所对应污染源对每个样本的浓度贡献(Cheng et al., 2020; 史文昌等,2020; 霍明珠等,2021; 张旺等,2022),公式为:

$$C_i = b_{i0} + \sum_{n=1}^P (b_{pi} \times APCSp) \quad (3)$$

式(3)中: $b_{i0}$ 为多元线性回归的常数项, $b_{pi}$ 为回归系数, $APCS_p$ 为因子 $p$ 的绝对主因子得分, $b_{pi} \times APCSp$ 为因子 $p$ 对重金属元素 $i$ 含量的贡献,所有样品的 $b_{pi} \times APCSp$ 平均值为因子 $p$ 对应的污染源平均绝对贡献量。其中,因子 $p$ 对应的污染源贡献率为其平均绝对贡献量与所有源贡献量的比值(霍明珠等,2021)。

### 2.2.3 数据统计

采用Excel 2016和SPSS 19.0对样品数据进行描述性统计、箱线图分析、相关性分析、主成分分析及绝对主成分—多元线性回归模型(APCS-MLR)计算,利用MapGIS 6.7进行地质背景及各采样点的潜在生态风险水平空间分布特征分析,对水系沉积物中重金属的来源进行探讨。

## 3 结果与讨论

### 3.1 表层沉积物重金属含量特征

研究区表层沉积物重金属含量参数特征显示(表2):表层水系沉积物中Cr、Cu、Ni、As、Hg、Cd和Pb的含量范围分别为38.00~243.00、16.00~

3330.00、23.00~93.00、3.20~117.00、0.01~0.21、0.01~17.30、9.60~166.00 mg·kg<sup>-1</sup>,7种重金属平均含量按大小依次为:Cu(152.38 mg·kg<sup>-1</sup>)>Cr(78.61 mg·kg<sup>-1</sup>)>Pb(41.98 mg·kg<sup>-1</sup>)>Ni(38.65 mg·kg<sup>-1</sup>)>As(19.32 mg·kg<sup>-1</sup>)>Cd(1.38 mg·kg<sup>-1</sup>)>Hg(0.05 mg·kg<sup>-1</sup>)。Cr、Cu、Ni、As、Hg、Cd和Pb平均含量分别是1:200000宁镇地区水系沉积物背景值的1.03、5.84、1.26、1.55、0.83、6.00、1.57倍,并且是宁镇扬丘陵岗地深层(150~200 cm)土壤背景值的1.29、5.25、1.25、1.61、0.82、6.57和1.45倍。各重金属元素超标倍数普遍大于1,而Cu和Cd的平均含量是背景值的5倍以上,表明水系沉积物已受到人为污染,倍数越大说明水系沉积物重金属累积污染程度越高。相较于国外一致性沉积物质量评价标准,除Hg外,Cr、Ni、As、Cd和Pb超过了临界效应值(TEC)处于中度污染水平,而Cu达到了可能效应值(PEC),处于严重污染水平。

7种水系沉积物重金属变异系数(CV)为0.51~2.80,属中到强变异。其中,Cu、Cd为强变异,变异系数为2.80和2.39,表现出受人类活动影响严重;Hg、As、Cr、Pb相对于Cu、Cd变异性较小,属中等变异,变异系数接近表明人类活动对4种元素含量分布的影响因素较为一致;Ni变异系数小于0.3,说明其分布相对均匀,受外界的影响相对较小。

### 3.2 水系沉积物重金属污染风险评价

各采样点7种重金属的单元素污染指数( $E_y^i$ )及综合潜在生态危害指数(RI)计算结果如图2所示,重金属元素不同潜在生态风险等级占比情况见图3。

表2 宁镇矿集区水系沉积物重金属元素含量描述性统计

重金属	含量/(mg·kg <sup>-1</sup> ) (n=79)				变异系数	平均值相对评价标准超标倍数		
	最大值	最小值	平均值	标准差		宁镇地区水系沉积物背景值	宁镇扬丘陵岗地深层土壤	国外标准
Cr	243.00	38.00	78.61	39.87	0.51	1.03	1.29	中度污染
Cu	3330.00	16.00	152.38	427.19	2.80	5.84	5.25	重度污染
Ni	93.00	23.00	38.65	9.95	0.26	1.26	1.25	中度污染
As	117.00	3.20	19.32	17.69	0.92	1.55	1.61	中度污染
Hg	0.21	0.01	0.05	0.04	0.69	0.83	0.82	未发生
Cd	17.30	0.04	1.38	3.31	2.39	6.00	6.57	中度污染
Pb	166.00	9.60	41.98	30.18	0.72	1.57	1.45	中度污染

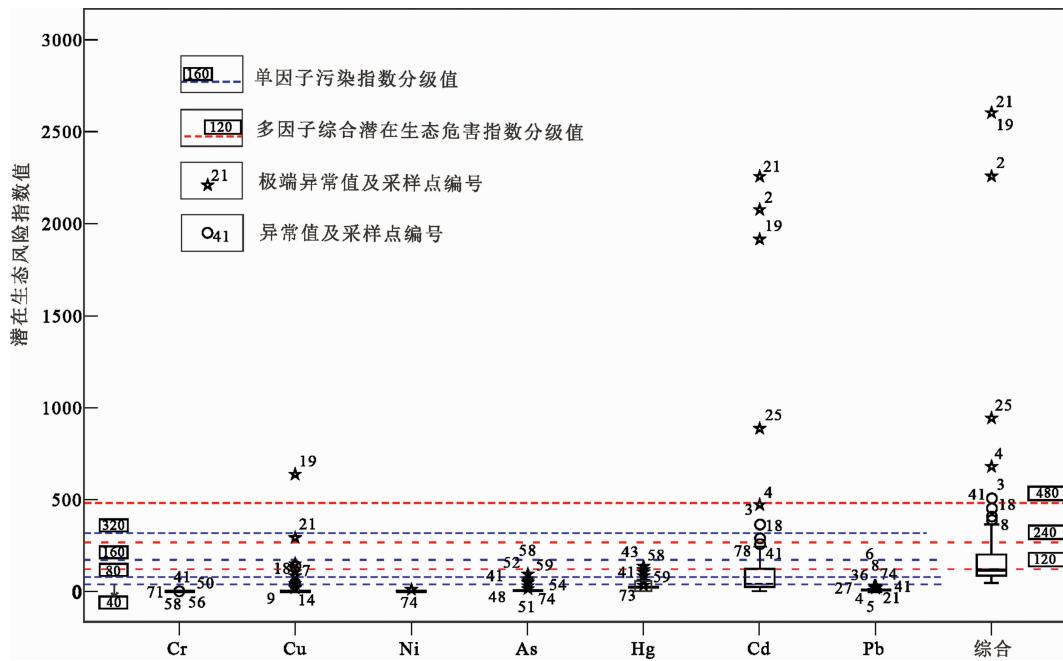


图2 单个元素生态风险系数( $Er$ )及综合潜在生态风险指数( $RI$ )箱形图

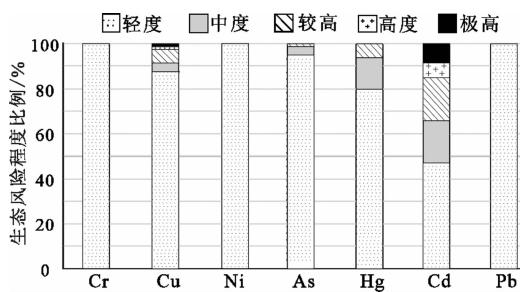


图 3 研究区 7 种重金属不同生态风险程度等级占比

综合图2和图3可以看出,单元素污染指数中Cd污染最严重,有超半数(53%)的采样点属中度—极高风险水平( $E^i$ 值 $\geq 40$ ),其中12%的采样点处于极高风险等级;Cu的大部分采样点处于低度风险水平,仅2个采样点风险等级为高度—极高;Cu和Cd超背景值倍数相似,但评价得出的结果不同,主要是由于毒性系数差异所引起(Cu=5,Cd=30);有20%采样点中Hg的 $E^i$ 值大于40,处于中度—较高生态风险;绝大部分采样点中的As风险等级属于低度风险等级;Cr、Ni和Pb风险等级均为低度风险等级。

就综合潜在生态危害指数而言,50% 的采样点处于中度生态风险水平以上,其中 7、8、18、41、43、58、59 和 2、3、4、19、21、25 等采样点分别达到了高生态风险水平和极高生态风险水平。采样点处于

高—极高风险水平,主要由于采样点中 Cd 和 Cu 的高含量所引起。

在空间分布上(图1),处于中等一极高生态风险水平的采样点主要分布在大华山—西谢、竹丝笼、亭子村、空青村北、石墨村等地。除下亭子村、石墨村外,其余高一极高风险点主要分布水系上游,在采样调查过程中发现,这些地段以往均有过采石和开采铁铜金属矿的历史。

### 3.3 水系沉积物重金属污染来源解析

### 3.3.1 污染源定性识别

### (1) 相关性分析

由重金属元素相关性分析(表3)可知:研究区水系沉积物 Cd-Cu、As-Cr、As-Ni、As-Hg、Cr-Ni 之间呈显著正相关( $P < 0.01$ ),相关系数分别为 0.788、0.628、0.625、0.505 和 0.546;相关系数越大说明这些重金属两两之间关系越强,出自同一来源的可能性也越大。而 As-Cu、As-Cd 之间基本呈现负相关性,表明重金属 As 与 Cu、Cd 的来源不同。

## (2) 主成分分析

采用主成分分析(PCA)来分析识别水系沉积物重金属中的污染来源。研究区水系重金属含量数据 KMO 检验系数和 Bartlett's 检验  $P$  值分别为 0.663 ( $>0.6$ ) 和 0.00 ( $<0.05$ )，说明样品数据可进

表 3 表层水系沉积物重金属元素相关系数矩阵

类型	重金属	Cu	Ni	Cr	Cd	Pb	As	Hg
表层水系沉积物	Cu	1	0.187	-0.150	0.788 **	0.211	-0.096	-0.188
	Ni		1	0.547 **	0.238 *	0.158	0.625 **	0.242 *
	Cr			1	-0.148	-0.127	0.628 **	0.270 *
	Cd				1	0.151	-0.072	-0.140
	Pb					1	-0.038	0.063
	As						1	0.505 **
	Hg							1

注: \*\* 在 0.01 水平(双侧)上显著相关, \* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

行主成分分析(Kaiser, 1974; 张旺等, 2022)。主成分分析结果显示(表 4),初始特征值超过 1 的前 3 个提取因子的累积解释总方差为 78.14%,基本能够反映样品数据的大部分信息。因此,7 种重金属的污染源信息基本可由 3 个因子表示。

表 4 表层水系沉积物重金属主成分载荷

重金属	成份		
	1	2	3
Cr	0.82	-0.01	-0.25
Cu	-0.22	0.89	-0.15
Ni	0.73	0.49	-0.02
As	0.90	0.08	-0.08
Hg	0.63	-0.11	0.35
Cd	-0.18	0.89	-0.18
Pb	0.01	0.40	0.86
特征值	2.469	1.991	1.001
方差贡献率/%	35.42	28.58	14.14
累积方差贡献率/%	35.42	64.00	78.14

第 1 主成分的贡献率为 35.42%,其中 Cr、Ni、As、Hg 具有较大载荷,分别为 0.82、0.73、0.90 和 0.63。相关性分析表明,As 与 Cr、Ni、Hg 及 Cr 与 Ni 之间呈显著相关;Cr、Ni 含量均值接近为宁镇地区重金属含量背景值,以往地球化学工作发现 Cr、Ni 含量主要受地质因素影响(何春林等,1988<sup>②</sup>; 廖启林等,2009);研究区处于 As 岩石地球化学高背景带内(江苏省冶金地质勘探公司 814 队,1984<sup>③</sup>),由于水系沉积物地球化学异常通常对原生晕(岩石地球化学异常)在元素组合和元素含量两个方面具有较好的继承性(龚庆杰等,2020),As 的相对高含量与水系沉积物母质关系密切。因此综合推断,第 1 主成分主要与水系沉积物自身组成有关,主要源于流域岩石的自然风化。

第 2 主成分的贡献率为 28.58%,其中 Cu 和 Cd 的因子载荷均为 0.89。Cu 与 Cd 的相关系数为 0.788,具有相似的来源特征。Cu 与 Cd 的高—极高潜在风险水平等级样品点主要分布在研究区西部的大华山一带,经野外调查结合地质和地形地貌特征发现,上陡下缓的地貌特征(坡度 30°~50°),使得岩石内 Cu 等元素主要以机械迁移的形式进入沉积物中;但 Cu 在大华山一带水系沉积物的平均含量( $381.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )远高于周围岩石中 Cu 的平均含量( $99.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )(江苏省冶金地质勘探公司 814 队,1984<sup>③</sup>),表明多年的采矿活动,造成山体上部岩石大面积裸露于地表,进而加剧了 Cu 元素从物源岩石到水系沉积物中的迁移。因此,第 2 主成分(Cu 和 Cd)主要代表了采矿活动对水系沉积物重金属含量的影响。

第 3 主成分的贡献率为 14.14%,以 Pb 为主,重金属载荷为 0.86。从图 1、图 2 分析结合现场调查和人员访谈,Pb 在除大华山一带外,大部分中—高潜在风险点分布在亭子村等居民区,沿岸种植水稻、蔬菜等,并长期施用化肥、农家肥和农药,推测水系沉积物中 Pb 的累积可能是农药和不合理施肥引起的。故推断第 3 主成分反映了农药、化肥施用等“农业源”。

同时,Pb 元素在第 2 主成分中因子载荷为 0.40,说明 Pb 的来源还受采矿活动影响,这也与 Pb 在大华山一带水系沉积物的平均含量( $108.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )远高于周围岩石中 Pb 平均含量( $27.92 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )(江苏省冶金地质勘探公司 814 队,1984<sup>③</sup>)现象相吻合。

### 3.3.2 污染源定量解析

多元线性回归模型(APCS-MLR 模型)的重金

属预测含量与实测含量的线性拟合的  $R^2$  在 0.75 ~ 0.87 之间,表明二者具有较好的一致性,该模型解析结果是可靠的,可利用该方法计算获得污染源贡献率数值。根据上述相关性分析、主成分分析和APCS-MLR 模型分析,结合地质调查,得到研究区水系沉积物污染源定量源解析结果,如图 4 所示。

由重金属主要污染来源定量解析结果可以看出(图 4),水系沉积物重金属中 Cu、Cd 的来源以采矿活动源为主,贡献率分别为 69.57% 和 63.54%,自然源对 Cu、Cd 贡献率次之,农业源对这 2 种元素的贡献较低;As、Cr 的平均含量均接近背景值,自然源的贡献率分别为 92.18% 和 87.48%,采矿活动源和农业源贡献率较低;Ni 的来源除受自然背景(74.00%)影响外,采矿活动也产生一定影响;对 Pb 而言,贡献率较大的是农业源(50.41%),其次为采矿活动源(39.78%);农业源对 Hg 的贡献率为 73%。此外,Cd、Hg 还分别有 11% 和 17% 的其他来源,其代表的具体来源有待进一步研究。

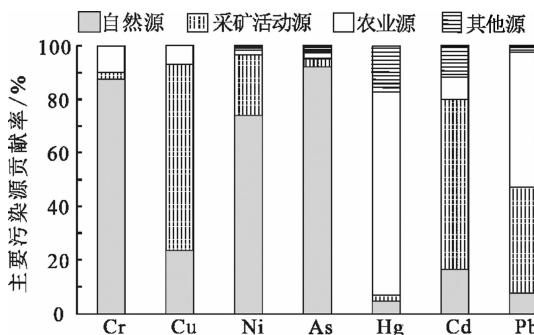


图 4 研究区水系沉积物重金属主要污染来源贡献率

## 4 结论

(1) 研究区 7 种水系沉积物重金属平均含量普遍超过宁镇地区水系沉积物背景值和宁镇扬丘陵岗地深层土壤背景值,其中 Cd、Cu 平均含量超过背景值倍数 5 倍以上,累积污染明显。变异系数为 0.51 ~ 2.80,总体属中到强变异,Cu、Cd 具有强变异性,表明水系沉积物 Cu、Cd 受采矿活动影响严重。

(2) 重金属单元素污染指数  $E_y^i$  表明,Cd 污染最严重,53% 的采样点处于中度—极高风险等级,其次为 Cu、Hg。重金属多元素综合潜在生态危害指数结果(RI)显示,50% 的采样点处于低生态风险水平,部分采样点处于高—极高潜在生态风险水平。在空间分布上,Cd 高潜在风险点主要分布在大华山—

西谢、亭子村一带,Cu 高潜在风险点分布与 Cd 大体相似。

(3) 依据相关性分析、主成分分析、APCS-MLR 模型结合以往地质资料和野外地质调查可知,研究区水系沉积物中重金属的主要污染来源为自然源、采矿活动源和农业源,自然源对 Ni、As、Cr 具有较大贡献率,分别为 74.00%、92.18%、87.48%;采矿活动源对 Cd 和 Cu 的贡献率较大,分别为 69.57% 和 63.54%,对 Pb 也有 39.78% 的贡献率;农业源对 Hg 和 Pb 具有较大影响,贡献率分别为 73% 和 50.41%。

(4) 综合实地地质调查的解析结果表明,APCS-MLR 模型与其他源分析方法综合应用,能够较为有效地进行重金属污染来源识别和贡献率计算,定性定量分析结果与实际情况基本相符合。

虽然北山水库区内的水体尚未发现重金属污染(王文军等,2020<sup>④</sup>),但其上游水系沉积物重金属累积程度高,对下游水库存在潜在威胁,值得重视。本研究结果可为研究区内水源地水系沉积物重金属污染防治与修复工作提供一定的理论支撑和数据基础。因此,建议加强水源地上游汇水区内重金属方面的水环境和底泥环境质量监测,并开展源头治理,阻断污染源。

## 注 释

- ① 江苏省冶金地质勘探公司八一〇队. 1982. 江苏省宁镇地区成矿预测研究报告[R]. 南京.
- ② 何春林, 刘伯铃, 吴昭明. 1988. 江苏省 1:20 万区域化探报告[R]. 南京:江苏省地矿局区域地质调查大队.
- ③ 江苏省冶金地质勘探公司 814 队. 1984. 江苏省宁镇地区岩石地球化学测量工作报告[R]. 南京.
- ④ 王文军, 罗昆, 陈雪, 王芳, 金鑫. 2020. 句容市北山水库饮用水水源地地质环境调查与评价报告[R]. 南京:江苏华东基础地质勘查有限公司.

## 参考文献

- Cheng G W, Wang M J, Chen Y, Gao W. 2020. Source apportionment of water pollutants in the upstream of Yangtze River using APCS-MLR [J]. Environmental Geochemistry and Health, 42 (11): 3795 – 3810.
- Hakanson L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach [J]. Water Research, 14 (8): 975 – 1001.
- Kaiser H. 1974. An Index of Factorial Simplicity[J]. Psychometrika, 39 (1): 31 – 36.
- Macdonald D D, Ingersoll C G, Berger T A. 2000. Development and e-

- valuation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 39(1): 20–31.
- 蔡敬怡, 谭科艳, 路国慧, 殷效彩, 郑宇, 邵鹏威, 王竞, 杨永亮. 2019. 贵州万山废弃矿区小流域系统沉积物及悬浮物重金属的空间分布特征[J]. 岩矿测试, 38(3): 305–315.
- 陈静生, 王飞越, 宋吉杰, 陈江麟. 1996. 中国东部河流沉积物中重金属含量与沉积物主要性质的关系[J]. 环境化学, (1): 8–14.
- 陈云增, 杨浩, 张振克, 秦明周. 2005. 淡水沉积物环境质量基准差异分析[J]. 湖泊科学, 17(3): 193–201.
- 陈自然, 孙厚云, 卫晓峰, 黄行凯, 李多杰, 张晓敏, 郭颖超. 2021. 承德黑山钒钛磁铁矿矿集区土壤重金属空间结构特征与生态风险评价[J]. 矿产勘查, 12(4): 1019–1029.
- 杜展鹏, 王明净, 严长安, 高伟. 2020. 基于绝对主成分-多元线性回归的滇池污染源解析[J]. 环境科学学报, 40(3): 1130–1137.
- 郭杰, 王珂, 于琪, 段辛斌, 刘绍平, 陈大庆. 2021. 长江中游近岸表层沉积物重金属污染特征分析及风险评估[J]. 环境科学学报, 41(11): 4625–4636.
- 国家环境保护局. 1997. 土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法 (GB/T 17141—1997) [S]. 北京: 中国环境科学出版社.
- 龚庆杰, 吴轩, 严桃桃, 刘宁强, 李晓蕾, 李睿堃, 刘梦翔. 2020. 地球化学基因的构建与检验[J]. 现代地质, 34(5): 865–882.
- 霍明珠, 高秉博, 乔冬云, Sainbayan B, 安毅, 霍莉莉. 2021. 基于APCS-MLR受体模型的农田土壤重金属源解析[J]. 农业环境科学学报, 40(5): 978–986.
- 李三中, 徐华勤, 陈建安, 李建胜, 代枝兴, 刘光明, 杨晶, 赵俊龙, 王勇. 2017. 某矿区砷碱渣堆场周边土壤重金属污染评价及潜在生态风险分析[J]. 农业环境科学学报, 36(6): 1141–1148.
- 李珊珊, 单保庆, 张洪. 2013. 澄阳河河系表层沉积物重金属污染特征及其风险评价[J]. 环境科学学报, 33(8): 2277–2284.
- 廖启林, 华明, 金洋, 黄顺生, 朱伯万, 翁志华, 潘永敏. 2009. 江苏省土壤重金属分布特征与污染源初步研究[J]. 中国地质, 36(5): 1163–1174.
- 马建华, 韩昌序, 姜玉玲. 2020. 潜在生态风险指数法应用中的一些问题[J]. 地理研究, 39(6): 1233–1241.
- 沈宸宇, 闫钰, 于瑞莲, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌. 2021. APCS-MLR结合PMF模型解析厦门杏林湾近郊流域沉积物金属来源[J]. 环境科学, 43(5): 2476–2488.
- 史文昌, 古正刚, 冯燕, 吴雅楠, 伍籼融, 张志尚. 2020. 基于APCS-MLR的宝象河沉积物重金属污染源解析[J]. 环境科学与技术, 43(10): 51–59.
- 苏桂荣. 2012. 淮南潘谢矿区底泥与土壤中重金属竖向分布规律研究[D]. 淮南: 安徽理工大学.
- 孙厚云, 金兴, 王晨昇, 祝新友, 黄行凯, 蔚玉泽. 2019. 基于RS、GIS与AHP的巴音高勒小流域矿集区地质环境综合评价[J]. 矿产勘查, 10(8): 2093–2103.
- 王闯, 单保庆, 唐文忠, 朱晓磊, 金鑫, 王卫民. 2017. 官厅水库主要入库河流(洋河)表层沉积物重金属污染特征及风险水平[J]. 环境科学学报, 37(5): 1632–1640.
- 肖宇. 2019. 江中下游典型矿集区水系沉积物来源示踪研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 徐泽锋, 赵晓丽, 赵建, 代燕辉, 王震宇. 2020. 长江流域沉积物重金属污染特征及优控因子筛选[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 50(S1): 101–109.
- 徐争启, 倪师军, 张成江, 庾先国, 滕彦国. 2004. 金沙江攀枝花段水系沉积物中重金属的分布特征及污染评价[J]. 物探化探计算技术, (3): 252–255.
- 阎长虹, 许宝田, 吴澄宇, 谈金忠, 徐成华, 郭书兰, 刘羊. 2019. 宁镇地区山前缓坡地层结构及其稳定性分析[J]. 工程地质学报, 27(1): 48–54.
- 阳金希, 张彦峰, 祝凌燕. 2017. 中国七大水系沉积物中典型重金属生态风险评估[J]. 环境科学研究, 30(3): 423–432.
- 袁旭音, 王爱华, 许乃政. 2004. 太湖沉积物中重金属的地球化学形态及特征分析[J]. 地球化学, 33(6): 611–618.
- 翟裕生, 姚书振, 林新多. 1992. 长江中下游地区铁铜矿床[M]. 北京: 地质出版社.
- 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): 602–611.
- 张旺, 高珍冉, 邹粤鹰, 陈小然, 黄啸云, 何腾兵. 2022. 基于APCS-MLR受体模型的贵州喀斯特矿区水田土壤重金属源解析[J]. 农业工程学报, 38(3): 212–219.
- 赵元艺, 曾辉, 徐友宁, 路璐. 2014. 金属矿集区地球化学环境累积效应的理论与工作方法[J]. 地质通报, 33(8): 1106–1113.
- 周军, 马彪, 高凤杰. 2017. 河流重金属生态风险评估与预警[M]. 北京: 化学工业出版社.
- 周铮, 吴剑锋, 杨蕴, 陈干, 宋健, 孙晓敏, 林锦. 2020. 基于SWAT模型的北山水库流域地表径流模拟[J]. 南水北调与水利科技, 18(1): 66–73.
- 朱英海, 施泽明, 王新宇, 张凯亮, 朱伯丞. 2022. 攀西大梁子铅锌矿区水系沉积物重金属地球化学特征及源解析[J]. 现代地质, 36(3): 923–932.
- 中国国家标准化管理委员会. 2008. 土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定, 原子荧光法, 第2部分: 土壤中总砷的测定 (GB/T 22105.2—2008) [S]. 北京: 中国标准出版社.
- 中华人民共和国国土资源部. 2015. 多目标区域地球化学调查规范 (1:250000) (DZ/T 0258—2014) [S]. 北京: 中国标准出版社.
- 中华人民共和国国土资源部. 2016. 土地质量地球化学评价规范 (DZ/T 0295—2016) [S]. 北京: 中国标准出版社.
- 中华人民共和国生态环境部. 2019. 土壤和沉积物铜、锌、铅、镍、铬的测定火焰原子吸收分光光度法 (HJ 491—2019) [S]. 北京: 中国环境科学出版社.