

## 资水下游某石煤矿区沉积物重金属污染评价和来源解析

代馨悦, 申志成, 胡华玲, 师华定, 何泽新, 李藜, 刘安富

### 引用本文:

代馨悦, 申志成, 胡华玲, 师华定, 何泽新, 李藜, 刘安富. 资水下游某石煤矿区沉积物重金属污染评价和来源解析[J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43(5): 1123–1130.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-1016>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 汉江上游水体表层沉积物重金属污染特征评价

宋凤敏, 岳晓丽, 刘智峰, 葛红光, 李琛, 赵佐平

*农业环境科学学报*. 2020, 39(7): 1576–1584 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0143>

#### 夜郎湖表层沉积物重金属分布特征及生态风险评估

徐梦, 刘鸿雁, 罗凯, 崔俊丽, 刘艳萍, 李家飞

*农业环境科学学报*. 2017, 36(6): 1202–1209 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1179>

#### 广西某采选废矿区重金属生态风险与源汇关系

毛志强, 田康, 刘本乐, 张晓辉, 卞子金, 黄标, 袁旭音, 吴龙华, 罗栋源

*农业环境科学学报*. 2021, 40(5): 987–998 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1338>

#### 安徽迪沟采煤沉陷区土壤和沉积物重金属特征及潜在生态风险评价

陈城, 鲁潇, 于坤, 张明珠, 孙庆业

*农业环境科学学报*. 2021, 40(3): 570–579 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1076>

#### 贵州草海表层沉积物重金属污染特征与源解析

林绍霞, 柳小兰, 张转铃, 肖致强, 张清海

*农业环境科学学报*. 2021, 40(2): 390–399 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1078>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

代馨悦, 申志成, 胡华玲, 等. 资水下游某石煤矿区沉积物重金属污染评价和来源解析[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(5): 1123–1130.

DAI X Y, SHEN Z C, HU H L, et al. Evaluation assessment and source analysis of heavy metals in sediment near the stone coal mining area in the lower reaches of the Zi River, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(5): 1123–1130.



开放科学 OSID

# 资水下游某石煤矿区沉积物重金属污染评价和来源解析

代馨悦<sup>1,2</sup>, 申志成<sup>1,2</sup>, 胡华玲<sup>2</sup>, 师华定<sup>2\*</sup>, 何泽新<sup>2</sup>, 李藜<sup>2</sup>, 刘安富<sup>2</sup>

(1. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2. 生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心, 北京 100012)

**摘要:**以资水下游某石煤矿区为研究区域, 分析该矿区河流沉积物中重金属的空间分布、污染程度和来源。研究共采集了28个表层沉积物样本, 并对其中8种重金属的含量进行了测定, 包括镉(Cd)、铬(Cr)、汞(Hg)、砷(As)、铅(Pb)、铜(Cu)、镍(Ni)和锌(Zn)。采用地累积指数和潜在生态风险指数进行重金属污染评价, 运用主成分分析(PCA)、正定矩阵因子(PMF)等方法识别重金属污染源。结果表明, 除Cr外, Cd、Hg、As、Pb、Cu、Zn、Ni含量的中值均高于洞庭湖水系沉积物背景值。其中, Cd、As含量超标问题较为严重, 超过《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)风险筛选值的样点比率分别为96.55%、58.62%。地累积指数和潜在生态风险指数分析表明, 沉积物中Cd、Hg污染最为严重, Cr污染程度最低。沉积物重金属主要来源为石煤开采源、交通和农业混合源、自然源以及大气沉降源, 贡献率分别为33.8%、20.4%、17.7%和28.1%。研究表明, 研究区沉积物受到石煤开采影响, 重金属Cd超标严重, 应加强管控。

**关键词:** 重金属; 资水; 沉积物; 石煤; 来源解析; 污染评价

中图分类号: X52 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2024)05-1123-08 doi:10.11654/jaes.2023-1016

## Evaluation assessment and source analysis of heavy metals in sediment near the stone coal mining area in the lower reaches of the Zi River, China

DAI Xinyue<sup>1,2</sup>, SHEN Zhicheng<sup>1,2</sup>, HU Hualing<sup>2</sup>, SHI Huading<sup>2\*</sup>, HE Zexin<sup>2</sup>, LI Li<sup>2</sup>, LIU Anfu<sup>2</sup>

(1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Technical Center for Soil, Agriculture, and Rural Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China)

**Abstract:** In this study, the downstream area of a shale coal mining site located along the Zi River was selected as the research area to analyze the spatial distribution, pollution levels, and sources of heavy metals in the river sediment of the mining region. A total of 28 surface sediment samples were collected, and the concentrations of eight heavy metals were determined: cadmium (Cd), chromium (Cr), mercury (Hg), arsenic (As), lead (Pb), copper (Cu), nickel (Ni), and zinc (Zn). The Geo-Accumulation Index and Potential Ecological Risk Index were employed to assess the level of heavy metal pollution. Various methods, such as Principal Component Analysis (PCA) and Positive Matrix Factorization (PMF), were applied to identify the sources of heavy metal pollution. The results indicated that apart from Cr, the median concentrations of all heavy metals were higher than the background values of the sediment in the Dongting Lake Basin. Specifically, Cd and As demonstrated severe contamination, with the percentage of sampling points exceeding the risk screening values specified in the *Soil Environmental Quality Risk Control Standard for Soil Contamination of Agricultural Land (Trial)* (GB 15618—2018) being 96.55% and 58.62%, respectively. The Geo-Accumulation Index and Potential Ecological Risk Index analysis showed that Cd and Hg were the most severe pollutants in the sediment and Cr the least. The main sources of heavy metals in the sediment were identified as

收稿日期: 2023-11-30 录用日期: 2024-02-27

作者简介: 代馨悦(1999—), 女, 湖北襄阳人, 硕士研究生, 研究方向为重金属污染防治。E-mail: a13339859080@163.com

\*通信作者: 师华定 E-mail: shihuading@tcare-mee.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(42377259); 国家重点研发计划项目(2022YFC3704805)

Project supported: National Natural Science Foundation of China(42377259); National Key Research and Development of China(2022YFC3704805)

shale coal mining, mixed sources from transportation and agriculture, natural sources, and atmospheric deposition, contributing 33.8%, 20.4%, 17.7%, and 28.1%, respectively. In summary, the sediments in the study area are seriously affected by the mining of stone coal, leading to the serious exceedance of Cd content. Therefore, pollution management and control should be strengthened.

**Keywords:** heavy metal; Zi River; sediment; stone coal; source identification; pollution assessment

随着国家工业化、城市化和农业集约化的快速发展,环境中的重金属污染日益严重。重金属通过大气沉降、地表径流、污水排放等多种途径进入水体,对水生生态系统造成了严重的污染<sup>[1-2]</sup>。重金属具有累积性和不可逆性,通过食物链在生物体内积累,对水生生物和人类健康构成潜在的健康风险<sup>[3-4]</sup>。秦俊法等<sup>[5]</sup>发现低骨矿与血液Cd的浓度存在相关性,而“痛痛病”正是由Cd对骨矿的影响引发的疾病表现。此外,水生生态系统中重金属大多通过沉淀、吸附等物理化学过程附着在沉积物中<sup>[6-7]</sup>,因此沉积物中重金属污染程度是评估水生生态系统的重要指标<sup>[8]</sup>。

有研究表明,采矿活动是导致沉积物重金属累积的重要原因<sup>[9-10]</sup>。我国拥有丰富的石煤资源,大部分石煤分布在浙江、湖南、陕西等地,其中湖南的石煤储量最为丰富<sup>[11-12]</sup>。石煤是可燃、低热值的高阶沉积岩,含有丰富的Cd、V、Ni等伴生金属。在开采过程中,产生的矸石中也含有大量的重金属<sup>[13]</sup>。这些废弃的矸石经过雨水和风化的作用释放出的重金属并累积在环境介质中,最终通过地表径流和地下渗滤等方式进入河流,导致河流沉积物重金属污染<sup>[14-15]</sup>。目前,矿区重金属污染研究主要集中在铁矿、铅锌矿等金属矿,对于石煤矿区的研究比较少,对相关沉积物重金属污染的研究更少<sup>[9,16-17]</sup>。因此,分析石煤矿区河流沉积物重金属污染风险水平、探究主要污染来源,可为我国矿区重金属污染防治提供重要参考。

目前,重金属的来源解析包括源识别和源解析<sup>[18]</sup>。源识别是对污染来源的方法的定性判断,不能确定污染源的贡献率,主要方法有主成分分析法(Principal component analysis, PCA)、因子分析(Factor analysis, FA)等<sup>[16]</sup>。源解析能够计算污染源的贡献率,常见的方法有正定因子矩阵(Positive matrix factorization, PMF)、UNMIX模型、随机森林、同位素比值法等<sup>[19-20]</sup>。其中PMF模型由于不需要源成分谱、不产生负值等特点,应用较为广泛<sup>[21]</sup>。然而,单一的源解析方法往往存在不可避免的缺陷,难以全面准确地揭示沉积物中重金属的来源。为了弥补这一不足,可以采取多种方法联用的策略,通过相互补充和验证,提高源解析结果的准确性和可靠性<sup>[22-23]</sup>。

因此,本研究以资水下游某石煤矿区水系为研究对象,拟采用地累积指数和潜在生态风险指数对沉积物重金属进行污染风险评价,采用PMF和PCA两种方法联用分析沉积物重金属污染的来源,为重金属污染源治理提供理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

研究区域(28°19'23"~28°37'05" N, 112°11'38"~112°23'06" E)位于湖南省赫山区,资水流域下游,以平原、山地为主,南高北低;降水集中在4—8月,上游山区雨水丰沛,下游平原降雨较少,降水时空分布不均,年降雨量在1 500 mm以上;夏季多偏南风,其他季节以偏北风为主导风向,年主导风向为西北风(图1)。研究区域内的石煤矿存在开采历史,目前均已关停,部分矿洞已封堵。矿区周边水系密集,通过地表径流等进入河道,经河道汇入资水支流,最后汇入资水主河道直通洞庭湖。河流周边主要土地利用类型为耕地(约1万hm<sup>2</sup>),种植类型以水稻为主,灌溉水主要来自河流。

### 1.2 样品采集与分析

本研究样品采样时间为2022年8月,采样地点位于矿区支流沿河流向下至资水干流,采集样品28个。其中,采样点D11~D28靠近矿区,间隔1 km采样,采样点D1~D10在矿区下游,间隔3 km采样。GPS定位采样点位置,具体采样位置如图1所示。采集的样品为近岸沉积物,采用不锈钢铲采集表层(0~10 cm)沉积物样品。收集后,所有样品立即用塑料袋密封,运到实验室。在实验室风干,轻微压碎,通过100目筛。采用HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub>混合物对干燥样品进行消解,消解方式为微波消解,然后采用电感耦合等离子体法(ICP-MS)测定Cd、Cr、Pb、Cu、Ni、Zn的含量,原子荧光分光光度法(AFS)测定Hg和As的含量。为确保数据的可靠性,使用国家标准物质(GBW076632)进行验证,每5个样品设置两个平行样,结果显示金属回收率在91.6%~105.2%的范围内,测量相对标准偏差小于10%。Cd、Cr、Hg、As、Pb、Cu、Ni、Zn的检出限分别为0.07、2、0.002、0.01、2、0.5、2、7 mg·kg<sup>-1</sup>。

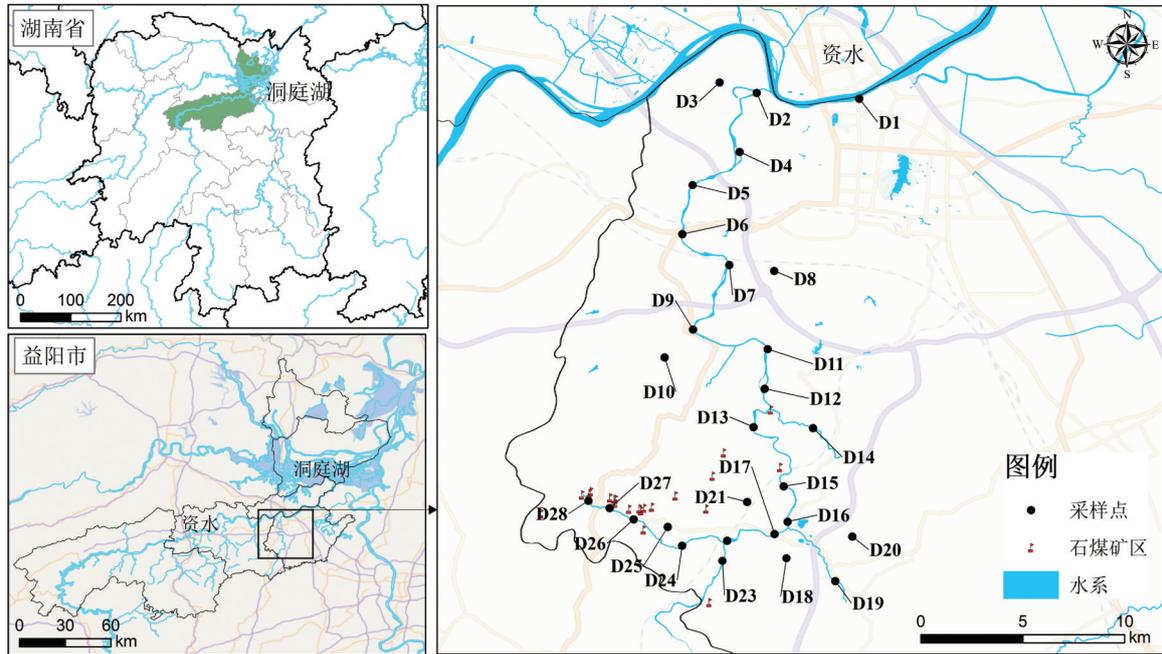


图1 研究区域位置和采样点分布图

Figure 1 Location of study area and distribution of sampling points

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 地累积指数

地累积指数( $I_{geo}$ )能够直接反映出重金属的富集程度,为环境评估和治理提供依据,广泛用于沉积物重金属污染程度的评价<sup>[1]</sup>。

#### 1.3.2 潜在生态风险指数

潜在生态风险指数( $E_r$ )综合了毒理学和环境生态效应,为潜在环境风险和人类健康提供了科学依据<sup>[24-25]</sup>。

#### 1.3.3 PMF模型

PMF模型是以因子分析为基础的多变量因子分析模型,也是一种受体源解析模型,最早于1993年Paatero提出<sup>[26]</sup>。模型基本原理是通过最小二乘法和迭代法多次分解样品含量数据,通过找到最小目标函数 $Q$ ,确定最佳贡献值和成分谱数据。

#### 1.3.4 数据处理

采用Excel和SPSS 25计算地累积指数、潜在生态风险指数并进行PCA分析;运用EPA PMF 5.0对重金属进行污染来源解析;利用ArcGIS 10.7和Origin 2023绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 重金属描述性统计分析

研究区域沉积物中重金属含量和pH见表1。沉积物pH值的中位数为6.40,范围在5.20~6.90之间,

呈现较强的酸性。Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Zn、Ni含量的中位数分别为4.76、0.22、25.15、31.00、39.00、62.85、219.00、21.50  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,除Cr外,其他重金属含量的中位数均高于洞庭湖水系沉积物背景值。与湖南省土壤背景值相比较,Cd、Hg、As、Pb、Cu、Zn的中值含量均高于该背景值。上述结果表明,研究区域水系存在重金属污染。Cd、Hg、Cu、Zn变异系数分别为1.17、1.10、1.00、0.73,变异系数较高,表明这4种重金属受人类活动影响较高;Cr的变异系数为0.25,变异系数较低,说明其受人为影响较低。与《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)风险筛选值比较,Cd、As、Cu、Zn存在一定程度的超标,超标个数分别为28、10、17、15,点位超标率为96.55%、34.48%、58.62%、51.72%。总体来说,该地区Cd、Cu超标较为严重。

### 2.2 沉积物重金属的空间分布特征

利用ArcGIS 10.7,对重金属含量进行分级显示,生成重金属的空间分布图(图2)。由图2可知,Cd、Cu、Ni、Zn空间分布趋势相似,高值点分布在D13~D26,集中在石煤矿区附近,这可能与矿区开采有关。且4种重金属含量从上游至下游逐渐降低,说明距离矿区越远重金属含量越低。Hg含量最高的点为D8( $1.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),而该高值区域存在火力发电厂等企业,说明Hg污染与发电厂等相关。As的上游区域存在高值点,在D13~D26,与Cd、Cu、Ni、Zn的空间的

表1 重金属含量和pH的描述统计( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

Table 1 Descriptive statistics of heavy metals concentration and pH( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

变量 Variable	pH	Cd	Hg	As	Pb	Cr	Cu	Zn	Ni
最小值	5.20	0.31	0.01	9.44	12.00	16.00	11.50	51.00	6.00
最大值	6.90	52.70	1.70	40.30	102.00	57.00	355.00	775.00	74.00
均值	6.24	12.98	0.33	23.05	36.18	39.18	101.26	287.04	26.79
中位数	6.40	4.76	0.22	25.15	31.00	39.00	62.85	219.00	21.50
CV	0.08	1.17	1.10	0.43	0.63	0.25	1.00	0.73	0.59
洞庭湖水系沉积物背景值 <sup>[27]</sup>	—	0.33	0.047	12	23	44	20.2	83.3	21.2
湖南省土壤背景值 <sup>[28]</sup>	—	0.142	0.09	12.8	30	58.3	25.0	84.2	27.8
超标个数	—	28	3	10	1	0	17	15	2
超标率%	—	96.55	10.34	34.48	3.45	0.00	58.62	51.72	6.90

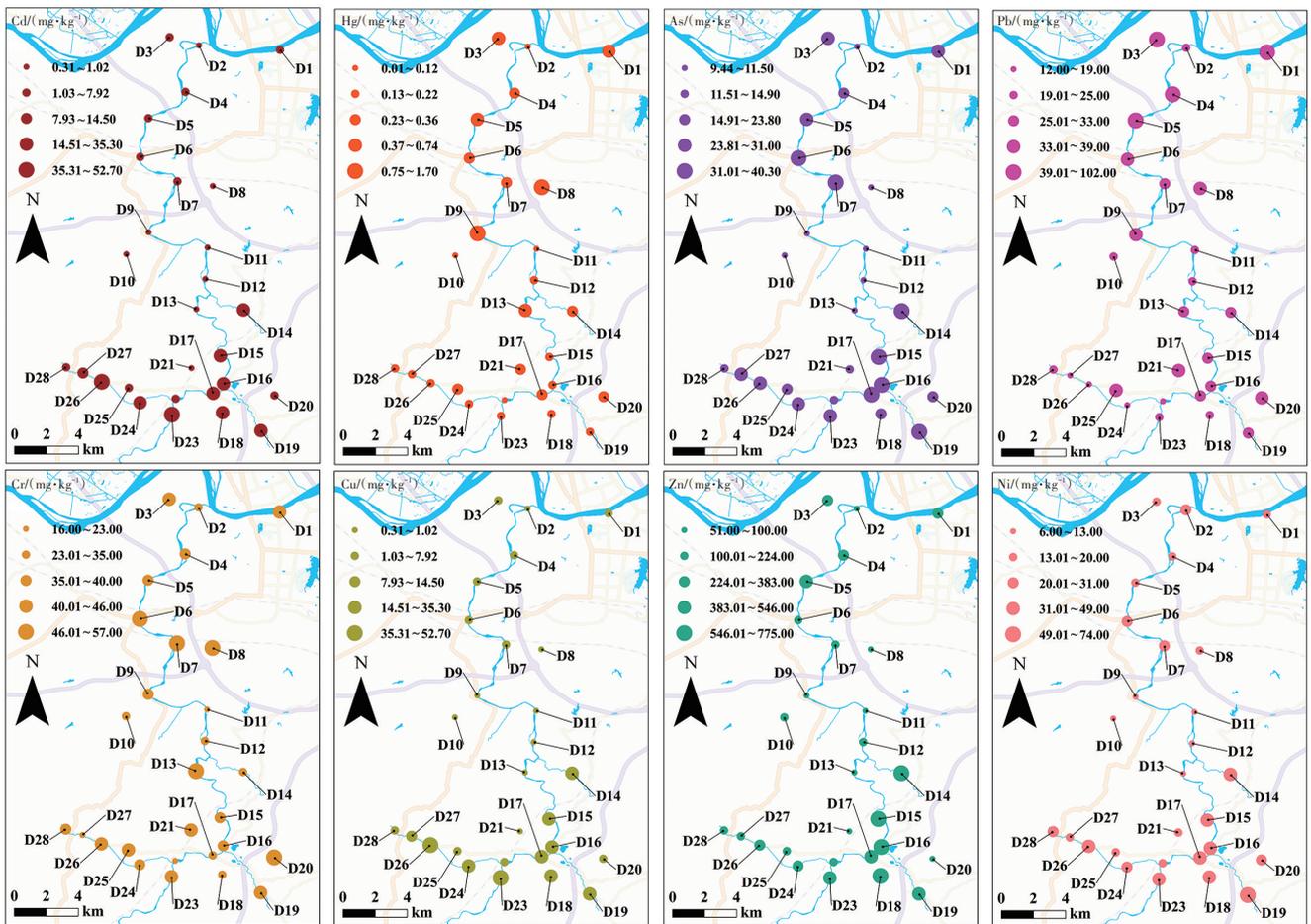


图2 沉积物重金属的空间分布

Figure 2 Space distribution of heavy metals in sediments

分布相似。下游区域在D6~D7存在As高值点,说明As可能存在两种污染来源。Cr除了中游区域存在高值点外,其他区域重金属浓度均较低。Pb含量最高值在D5( $102 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),从上游至下游Pb的含量基本呈现升高趋势,高值区域靠近城市道路密集区,可能与汽车排放相关。总的来说,不同重金属呈现不同的

空间分布特征,这与重金属来源相关。

### 2.3 沉积物重金属污染评价

#### 2.3.1 地累积指数

28个样点重金属的地累积指数如图3所示。Cr的地累积指数均小于0,表明Cr并未受到人为活动的影响。As、Pb、Ni的地累积指数小于2,处于中

度污染水平,其中Ni有71.48%的样点地累积指数小于0,处于清洁水平;Zn有17.8%的样点地累积指数为2,达到中-强度污染水平,其余样点的地累积指数均小于2;Cu有22.1%的样点地累积指数为3,达到了强度污染水平,其余样点的地累积指数均小于2。Cd、Hg整体上存在较大的污染,其中达到强污染水平(地累积指数大于3)以上的样点比例约为57.1%、10.7%。因此,沉积物中重金属的地累积指数平均污染程度大致可划分为: Cd>Hg>Cu>Zn>Pb≈As>Ni>Cr。

### 2.3.2 潜在生态风险指数评价

潜在生态风险指数是对沉积物重金属毒性的综合评价<sup>[29]</sup>。8种重金属的潜在生态风险指数分布情况如图4所示。Pb、As、Ni、Cr和Zn的生态风险指数均小于40,为低生态风险,其中Cr在这5种重金属中具有相对较低的生态风险。Cu有5个沉积物样品属于中生态风险,1个样品属于高生态风险,其余样品均属于低生态风险。而沉积物中的Cd、Hg出现较高的潜在生态风险,具体而言Cd、Hg存在21.4%、3.6%的沉积物样品属于中生态风险,10.7%、71.4%的沉积物样品属于较高生态风险和高生态风险,64.3%、21.4%的沉积物样品属于极高生态风险。综合来看,沉积物中重金属的潜在生态风险指数大小依次是Cd>Hg>Cu>Pb≈As≈Ni≈Zn>Cr,其中Cd的潜在生态风险最严重,这与Xu等<sup>[30]</sup>的研究结果一致。

## 2.4 沉积物重金属来源解析

### 2.4.1 基于PCA的源解析

将重金属数据进行PCA分析,结果如表2所示。分析显示,前四个成分共同解释了总方差的88.61%。成分1解释了46.41%的方差,主要载荷因子是Cd、As、Cu、Zn、Ni。空间分布表明Cd、As、Cu、Zn、Ni的高值聚集区在北部区域,该区域历史上存在多座石煤矿

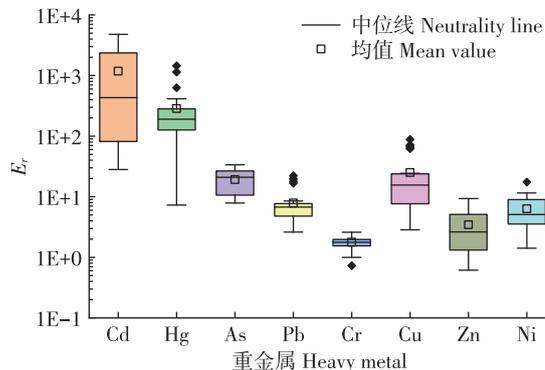


图4 沉积物中重金属的潜在生态风险指数

Figure 4 Potential ecological risk index of heavy metals in sediments

采,开采过程产生的重金属通过废水等途径进入沉积物中,因此成分1可能代表煤矿开采。成分2解释了21.10%的方差,主要载荷因子是Pb、As、Zn。空间分布上Pb、Zn高值聚集区与流域内交通路网存在一定部分的重合且靠近城市人口密集区,可能是交通排放引起的,因此推测成分2是交通排放源。成分3解释了13.68%的方差,主要载荷因子是Cr。描述性统计分析中,Cr变异系数较小,且含量接近洞庭湖背景值,说明Cr可能受到自然背景影响,如岩石风化等<sup>[31]</sup>,因此推测成分3是自然源。成分4解释了7.42%的方差,主要载荷因子是Hg,一般认为大气沉降是Hg的主要来源,因此成分4可能是大气沉降源。

### 2.4.2 基于PMF的源解析

PCA只能分析重金属的污染源,不能确定重金属各个污染来源的贡献率。因此,需要使用EPA PMF 5.0对8种重金属进行来源分析,计算不同来源的贡献率。通过调整因子数和重金属的类别(强、弱),使重金属的拟合系数大于0.65,大多数残差在-3和3之间,且 $Q_{\text{bust}}/Q_{\text{true}}$ 比值小于1.5<sup>[19,32]</sup>,最后解析出4个因子,结果如图5所示。根据不同来源对重金属的贡

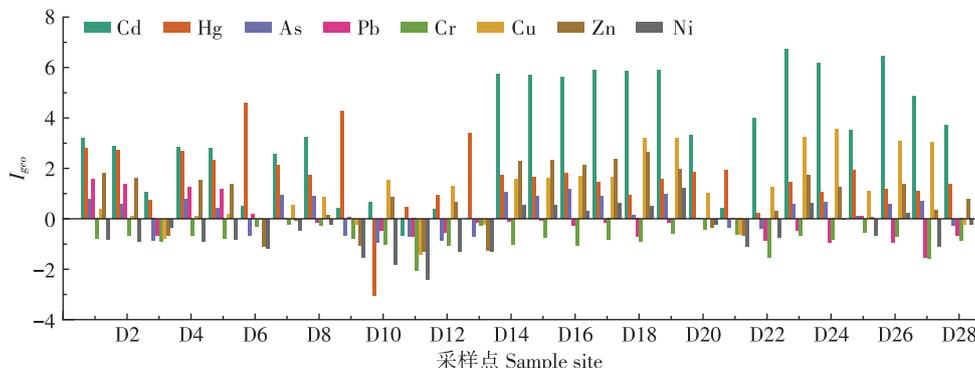


图3 沉积物中重金属的地累积指数

Figure 3 Geo-accumulation index of heavy metals in sediments

表2 重金属PCA分析结果

Table 2 PCA analysis results of heavy metals

变量 Variable	成分1 Component 1	成分2 Component 2	成分3 Component 3	成分4 Component 4
Cd	0.906	-0.305	-0.067	-0.052
Hg	-0.202	0.161	0.251	0.913
As	0.731	0.387	0.221	-0.284
Pb	-0.061	0.925	0.087	0.164
Cr	0.006	0.102	0.952	0.216
Cu	0.747	-0.482	-0.133	-0.015
Zn	0.843	0.316	-0.214	-0.129
Ni	0.879	-0.123	0.179	-0.184
方差贡献率/%	46.41	21.10	13.68	7.42
累积方差贡献率/%	46.41	67.51	81.18	88.61

献,获得了4个来源的空间分布(图6)。

因子1的贡献率为28.1%,主要贡献因子为Cr(61.16%)、Ni(38.58%)。一般而言, Cr、Ni的分布异质性受成土母质的影响<sup>[33]</sup>。Li等<sup>[34]</sup>经过研究发现洞庭湖表层沉积物中Cr主要来自于自然侵蚀。从图2可知, Cr的地累积指数均小于0, Ni有71.4%的样品地累积指数小于0,表明这两种重金属受人为活动的影响较小,因此,因子1代表与成土母质有关的自然源。

因子2的贡献率为17.7%,主要贡献因子为Hg(80.56%)。Hg是燃煤的主要元素<sup>[35]</sup>, Li等<sup>[12]</sup>认为石煤燃烧是大气汞的主要来源。煤矿开采过程中产生的煤矸石,富含汞元素,常用作燃料。如图6所示,因子2的高值区域集中在矿区下游,该区域历史上存在以石煤为燃料的火力发电厂,导致石煤燃烧产生的污染随风迁移到该区域。因此,因子2代表大气沉降。

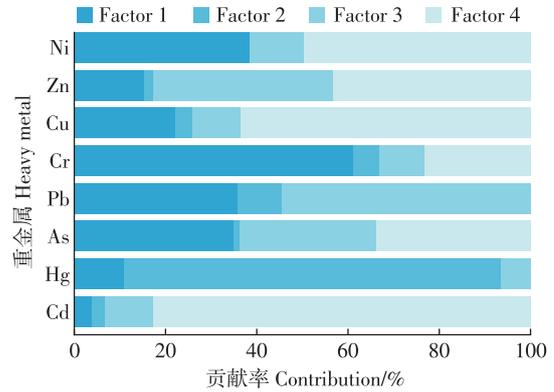


图5 沉积物中重金属污染来源的贡献率

Figure 5 Source contributions of heavy metals in sediments according to PMF mode

因子3的贡献率为20.4%,主要贡献因子为Pb(54.46%)、Zn(39.46%)、As(30.12%)。Pb一般与汽车尾气的排放相关<sup>[36]</sup>, Zn可能来自轮胎磨损<sup>[23]</sup>。如图6所示,因子3的高值区域集中在下游地区,该区域靠近城市,道路网密集,因此很可能是交通源。另一方面, As是肥料的添加剂<sup>[21, 37]</sup>,也是畜禽养殖中饲料的添加剂<sup>[38]</sup>,而农田施用化肥可能导致大量未被利用的肥料随地表径流进入河流<sup>[20]</sup>。因此,因子3代表交通和农业混合源。

因子4的贡献率为33.8%,主要贡献因子为Cd(37.65%)、As(33.73%)、Zn(57.55%)、Cu(32.6%)、Ni(49.6%)。如图6所示,因子4贡献率的高值区域在河流上游区域,靠近石煤矿集中开采区域。石煤开采过程产生的污染以及部分矿山在开采后未得到有效治理都对周边环境造成了严重的污染。先前的研究表明,煤矿开采活动可能导致周边地区的Cd污染问

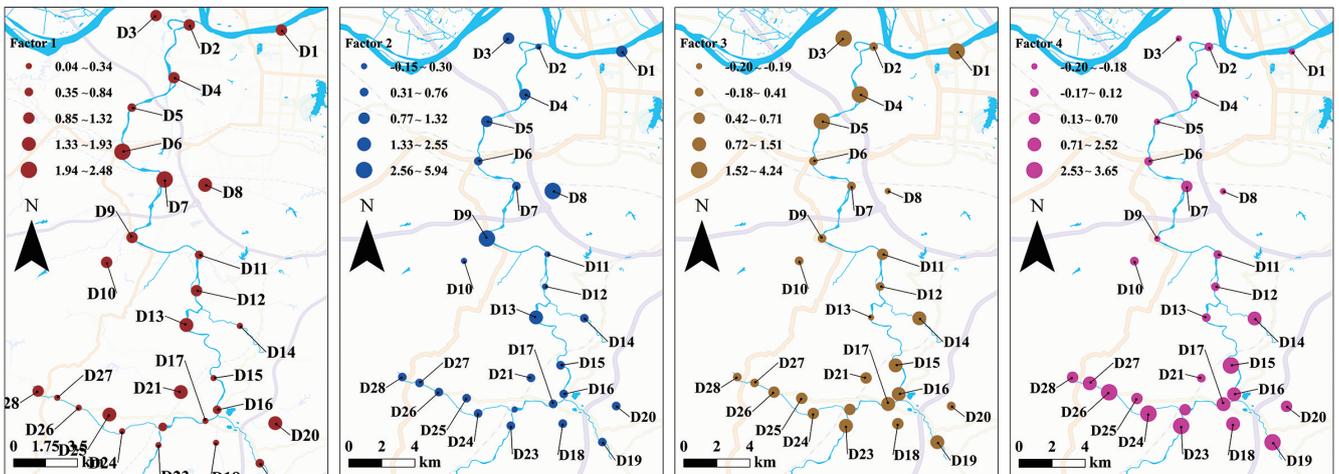


图6 四个因子的贡献分布

Figure 6 Spatial distribution of the four factors

题严重<sup>[22,39]</sup>。李莹等<sup>[40]</sup>研究发现湖南石煤矿排放废水中Cd、Zn的浓度超过国家《污水综合排放标准》的3~4倍。因此,因子4可以被解释为石煤开采的影响。

PMF模型分析得到的4个污染源主要的载荷因子与PCA分析的存在差异,如自然来源中PMF模型解析的主要载荷因子是Cr、Ni,PCA解析的主要载荷因子是Cr。造成这种差异的主要原因是两种方法的计算原理不同。PMF基于因子分析,旨在通过数学模型揭示各组分间的内在关系,从而确定污染源的类型和贡献。而PCA则基于统计分析,强调通过组分数数据的降维处理,简化数据的复杂性,突出主要影响因素<sup>[41]</sup>。总的来说,经过PMF与PCA两种方法的分析,石煤矿区下游流域沉积物重金属的主要来源是一致的,分别是石煤开采源、交通和农业混合源、自然源以及大气沉降源。

### 3 结论

(1)石煤矿区下游沉积物中,除Cr外,Cd、Hg、As、Pb、Cu、Zn、Ni含量的中位数均高于洞庭湖水系沉积物背景值。Cd、Cu与GB 15618—2018风险筛选值相比,超标较为严重。

(2)空间分布表明,沉积物中重金属呈现出空间异质性特征,这种差异性与重金属的不同来源密切相关。

(3)综合地累积指数和潜在生态风险指数,沉积物中Cd、Hg污染最为严重,分别有64.3%、21.4%的沉积物样品属于极高生态风险;Cr污染程度最低,基本接近背景值。

(4)研究区域沉积物重金属主要来源为石煤开采源、交通和农业混合源、自然源以及大气沉降源,各自的贡献率分别33.8%、20.4%、17.7%和28.1%。其中石煤矿开采是研究区沉积物中Cd、As、Cu、Zn、Ni的主要来源。

#### 参考文献:

- [1] KANG M, TIAN Y, ZHANG H, et al. Distribution, ecological risk assessment, and source identification of heavy metals in river sediments from Hai River and its tributaries, Tianjin, China[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2020, 231(2): 38.
- [2] WANG Y, LI B, ZHU J, et al. Assessment of heavy metals in surface water, sediment and macrozoobenthos in inland rivers: a case study of the Heihe River, Northwest China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(23): 35253–35268.
- [3] ZHAO L, MI D, CHEN Y, et al. Ecological risk assessment and sources of heavy metals in sediment from Daling River basin[J]. *Environmental*

*Science and Pollution Research*, 2015, 22(8): 5975–5984.

- [4] GARCIA-ORDIALES E, LOREDO J, COVELLI S, et al. Trace metal pollution in freshwater sediments of the world's largest mercury mining district: sources, spatial distribution, and environmental implications [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(7): 1893–1904.
- [5] 秦俊法, 李增禧. 镉的人体健康效应[J]. *广东微量元素科学*, 2004(6): 1–10. QIN J F, LI Z X. The effect of cadmium on human health [J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2004(6): 1–10.
- [6] WANG F, REN X, QIU Y, et al. Characterization and risk assessment of heavy metals in river sediments on the western bank of Taihu Lake, China[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2022, 109(4): 609–615.
- [7] ZHANG L, YANG Z, WANG Q, et al. Temporal and spatial accumulation of potentially toxic elements (PTEs) in stream sediments from a large lead-zinc mine concentration area of Baoshan, Southwest China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2022, 22(8): 2290–2308.
- [8] ZHANG Y, TIAN Y, SHEN M, et al. Heavy metals in soils and sediments from Dongting Lake in China: occurrence, sources, and spatial distribution by multivariate statistical analysis[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(14): 13687–13696.
- [9] SHAHMORADI B, HAJIMIRZAEI S, AMANOLLAHI J, et al. Influence of iron mining activity on heavy metal contamination in the sediments of the Aqyazi River, Iran[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, 192(8): 521.
- [10] ARAB L H, BOUTALEB A, BERDOUS D. Environmental assessment of heavy metal pollution in the polymetallic district of Kef Oum Teboul (El Kala, Northeast Algeria)[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80(7): 277.
- [11] DAI S F, ZHENG X, WANG X B, et al. Stone coal in China: a review [J]. *International Geology Review*, 2018, 60(5/6): 736–753.
- [12] LI Z, LI X, LIU J, et al. Stone coal as a potential atmospheric mercury source in Da-Ba-Shan mountain areas, China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2019, 206: 21–30.
- [13] 张卫国, 杨帆, 张池, 等. 陕南地区石煤矸石中主要伴生元素迁移规律研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(3): 189–193. ZHANG W G, YANG F, ZHANG C, et al. Study on migration law of main associated elements in stone coal and gangue in South Shaanxi[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(3): 189–193.
- [14] YI L, GAO B, LIU H, et al. Characteristics and assessment of toxic metal contamination in surface water and sediments near a uranium mining area[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(2): 548.
- [15] CHEN M, LU W X, HOU Z Y, et al. Heavy metal pollution in soil associated with a large-scale cyanidation gold mining region in south-east of Jilin, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(3): 3084–3096.
- [16] LU D T, ZHANG C L, ZHOU Z R, et al. Pollution characteristics and source identification of farmland soils in Pb-Zn mining areas through an integrated approach[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2022, 45(5): 2533–2547.
- [17] 崔雅红, 崔炜, 孟庆俊, 等. 陕西蒿坪石煤矿区重金属污染及生态风险评价[J]. *矿产保护与利用*, 2021, 41(2): 157–162. CUI Y H, CUI W, MENG Q J, et al. Heavy metal pollution and ecological risk

- assessment in Haoping stone coal mine area of Shaanxi Province[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2021, 41(2):157-162.
- [18] 陈雅丽, 翁莉萍, 马杰, 等. 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, 2019, 38(10):2219-2238. CHEN Y L, WENG L P, MA J, et al. Review on the last ten years of research on source identification of heavy metal pollution in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(10):2219-2238.
- [19] CHENG W, LEI S, BIAN Z, et al. 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*, 2020, 387:121666.
- [20] WANG S, CAI L M, WEN H H, et al. Spatial distribution and source apportionment of heavy metals in soil from a typical county-level city of Guangdong Province, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 655:92-101.
- [21] BU Q, LI Q, ZHANG H, et al. Concentrations, spatial distributions, and sources of heavy metals in surface soils of the coal mining city Wuhai, China[J]. *Journal of Chemistry*, 2020, 17(2):1-10.
- [22] 赵家印, 杨地, 杨湘智, 等. 云南省某煤矿开采遗址周边农用地土壤重金属污染评价及源解析研究[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(11):1473-1481. ZHAO J Y, YANG D, YANG X Z, et al. Pollution assessment and source identification of heavy metals in farmland soils around a coal mine area in Yunnan Province[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(11):1473-1481.
- [23] LIANG J, LIU Z, TIAN Y, et al. Research on health risk assessment of heavy metals in soil based on multi-factor source apportionment: a case study in Guangdong Province, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 858(3):159991.
- [24] WANG Q, CHEN Q, YAN D, et al. Distribution, ecological risk, and source analysis of heavy metals in sediments of Taizihe River, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(16):569.
- [25] 李军, 李旭, 李开明, 等. 黄河兰州段城市河道表层沉积物重金属空间分布特征及来源解析[J]. 环境科学, 2023, 44(5):2562-2573. LI J, LI X, LI K M, et al. Spatial distribution characteristics and source analysis of heavy metals in urban river surface sediments from the Lanzhou Reach of the Yellow River[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(5):2562-2573.
- [26] PAATERO P. Least squares formulation of robust non-negative factor analysis[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 1997, 37(1):23-35.
- [27] 李健. 环境背景值数据手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社. 1988:373-378. LI J. Environment background values data sheet [M]. Beijing: China Environmental Science Press. 1988:373-378.
- [28] 陈丹丹, 谭璐, 聂紫萌, 等. 湖南典型金属冶炼与采选行业企业周边土壤重金属污染评价及源解析[J]. 环境化学, 2021, 40(9):2667-2679. CHEN D D, TAN L, NIE Z M, et al. Evaluation and source analysis of heavy metal pollution in the soil around typical metal smelting and mining enterprises in Hunan Province[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(9):2667-2679.
- [29] ZHENG L, ZHOU Z, RAO M, et al. Assessment of heavy metals and arsenic pollution in surface sediments from rivers around a uranium mining area in East China[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2020, 42(5):1401-1413.
- [30] XU J, CHEN Y, ZHENG L, et al. Assessment of heavy metal pollution in the sediment of the main tributaries of Dongting Lake, China[J]. *Water*, 2018, 10(8):1060.
- [31] 宋凤敏, 岳晓丽, 刘智峰, 等. 汉江上游水体表层沉积物重金属污染特征评价[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(7):1576-1584. SONG F M, YUE X L, LIU Z F, et al. Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in surface sediments of the upper Hanjiang River, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(7):1576-1584.
- [32] WANG H Z, CAI L M, WANG Q S, et al. A comprehensive exploration of risk assessment and source quantification of potentially toxic elements in road dust: a case study from a large Cu smelter in central China[J]. *Catena*, 2021, 196:104930.
- [33] WU D, LIU H, WU J, et al. Spatial distribution, ecological risk assessment and source analysis of heavy metals pollution in urban lake sediments of Huaihe River Basin[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(22):14653.
- [34] LI F, HUANG J, ZENG G, et al. Spatial risk assessment and sources identification of heavy metals in surface sediments from the Dongting Lake, Middle China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, 132:75-83.
- [35] GUO S, CHEN X, WEI W, et al. Risk assessment and source analysis of heavy metal contamination in the soil of the Juanshui River Mouth [J]. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 2023, 35(1):2212127.
- [36] 施亚盛, 李光耀, 吴爱静, 等. 东苕溪沉积物重金属生态风险评价和源解析[J]. 生态科学, 2021, 40(6):67-74. SHI Y S, LI G Y, WU A J, et al. Ecological risk assessment and source identification of heavy metals in surface sediments of east Tiaoxi River[J]. *Ecological Science*, 2021, 40(6):67-74.
- [37] WANG L, GAO S, YIN X, et al. Arsenic accumulation, distribution and source analysis of rice in a typical growing area in north China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 167:429-434.
- [38] HU Y, HE K, SUN Z, et al. Quantitative source apportionment of heavy metal(loid)s in the agricultural soils of an industrializing region and associated model uncertainty[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 391:122244.
- [39] LIU X, BAI Z, SHI H, et al. Heavy metal pollution of soils from coal mines in China[J]. *Natural Hazards*, 2019, 99(2):1163-1177.
- [40] 李莹, 叶际达, 张亮, 等. 石煤开发利用重金属污染现状调查研究[J]. 能源环境保护, 2005, 19(2):58-61. LI Y, YE J D, ZHANG L, et al. The survey of status quo on heavy-metal contamination in the bone-coalmining and utilization[J]. *Energy Environmental Protection*, 2005, 19(2):58-61.
- [41] 于旦洋, 王颜红, 丁茯, 等. 近十年来我国土壤重金属污染源解析方法比较[J]. 土壤通报, 2021, 52(4):1000-1008. YU D Y, WANG Y H, DING F, et al. Comparison of analysis methods of soil heavy metal pollution sources in China in last ten years[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(4):1000-1008.

(责任编辑:叶飞)