

## 赣南某矿区土壤重金属污染评价与研究

张德强<sup>1</sup>, 王英男<sup>2</sup>, 乔雯<sup>1</sup>, 王议<sup>1</sup>, 白光宇<sup>1</sup>

(1. 中国地质环境监测院, 自然资源部矿山生态效应与系统修复重点实验室, 北京 100081; 2. 自然资源部国土整治中心, 北京 100035)

**摘要:** 这是一篇矿山环境工程领域的论文。对赣南某矿区 40 个土壤样品的重金属含量进行了测定, 结果显示, Cu、Zn、Cr、Ni、Cd、As 和 Hg 含量的平均值均低于江西省土壤重金属背景值, 而 Pb 含量高于背景值。相关性分析结果表明, 研究区内土壤重金属 Cu 和 Cr、Ni、Cd, Zn 和 Cd, Ni 和 Cr、Cd, Hg 和 As 呈现显著正相关, 说明其可能具有较高的同源性或复合关系。分别利用单因子污染指数法、Nemerow 综合污染指数法、污染负荷指数法和潜在生态风险分析法对研究区内土壤污染程度进行了评价和风险评估。单因子污染指数法评价结果表明, 单一元素污染程度由高到低依次是 Pb>Cd>Zn, 但总体污染程度较低; Nemerow 综合污染指数指出重金属重度污染的样本点主要集中在矿区和河流中下游地区; 土壤样本重金属污染系数均值从高到低依次是 Pb、Cd、Zn、Cr、Cu、Hg、Ni 和 As, 整个研究区内土壤污染负荷指数适中, 污染水平中等; 重金属 Cu、Zn、Cr、Ni 和 As 的潜在生态风险评价属于轻微生态风险, 而 Cd、Hg、Pb 在研究区土壤生态环境中的贡献率较高。综合四种方法可知, 整个研究区土壤重金属的综合潜在生态风险处于轻微-中等生态风险危害水平, 土壤环境质量总体良好。

**关键词:** 矿山环境工程; 矿区; 土壤重金属; 污染评价; 相关性分析; 生态风险

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.03.031

中图分类号: TD982 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2023) 03-0181-11

矿业开采为国家和地区的发展提供了重要的能源保障, 为社会和人类都带来了巨大的经济收益, 却对生态环境却造成了污染和破坏, 引发了一系列的环境问题<sup>[1]</sup>。重金属具有持久性、富集性且难以降解等特点, 在极低的浓度就可以产生较强的毒性<sup>[2]</sup>, 在人体内长久累积会危害人体健康, 引发多种疾病<sup>[3]</sup>。重金属污染来源广泛, 掌握其来源对土壤重金属污染防治意义重大<sup>[4]</sup>。在无人活动影响的环境中, 土壤重金属含量通常偏低, 然而人为活动频繁的区域, 土壤重金属富集程度高, 累积量大<sup>[5-6]</sup>。常见的会导致土壤重金属污染的人类活动包括: 工业活动和煤炭燃烧导致重金属 Cr、Mn、Ni 等元素大量富集<sup>[7]</sup>; 农业活动使用的化肥和农药导致 Cu、Zn、As、Hg 等重金属含

量超标<sup>[8]</sup>; 交通运输活动导致土壤中 Pb、Cd、Cu 和 Zn 富集<sup>[9]</sup>; 矿山开采易使大量重金属释放进入周边地区的土壤中, 从而造成严重的土壤重金属污染<sup>[10]</sup>。

目前, 国内外学者对土壤重金属污染评价的方法主要包括单因子污染指数法、Nemerow 综合污染指数法、潜在生态风险指数法、污染负荷指数法等<sup>[11]</sup>。陈宇宁等<sup>[12]</sup>通过使用单因子污染指数法、Nemerow 综合污染指数法和潜在生态风险指数法对江西南丰土壤重金属含量、空间分布和污染特征进行评价; 刘应冬等<sup>[13]</sup>利用 Nemerow 综合污染指数法和地累积污染指数法评价了青海某金矿矿集区土壤 As 等重金属污染; 姚玉玲等<sup>[14]</sup>采用改进内梅罗土壤肥力综合法评价了赣南某未开发

收稿日期: 2022-10-17

基金项目: 全国矿山地质环境综合调查与评价 (DD20190701); 省部级科研平台联合开放基金项目 (SES-UF-07); 中国地质环境监测院研发基金项目 (20220101)

作者简介: 张德强 (1976-), 男, 正高级工程师, 从事矿山地质环境调查、矿山生态修复研究工作。

通信作者: 王英男 (1971-), 女, 高级经济师, 从事生态破坏评估与修复技术工作。

离子型稀土矿区土壤肥力, 并采用单因子指数法和 Nemerow 综合污染指数法对土壤重金属污染程度开展评价; 卢君勇等<sup>[15]</sup>通过潜在生态危害指数法和地累积指数法对四川省马边老河坝磷矿区水土环境重金属污染程度进行分析评价; 庞妍等<sup>[16]</sup>使用相关性分析和主成分分析探究了渭北旱原矿区土壤重金属来源, 并利用污染负荷指数法和潜在生态风险指数法对研究区域土壤污染风险进行评价。采用单一方法对土壤重金属污染程度进行评价可能会造成污染程度的片面认识, 而通过多种不同的评价方法可以对研究区土壤重金属污染程度得到更加准确的认识, 从而对重金属污染防治提供依据。

稀土是全世界广泛关注的重要战略资源, 对于发展高精尖科学技术和尖端国防科技具有重要意义<sup>[17-18]</sup>。赣南地区是典型离子型稀土矿产资源开发区<sup>[19-20]</sup>, 同时也是我国重要的粮食产地和脐橙种植区。近年来当地稀土矿产资源开发活动频繁, 且脐橙种植规模不断扩大, 种植过程中长期使用农药化肥, 造成土壤中重金属含量明显超过背景值, 从而导致了生态环境污染恶化<sup>[20-21]</sup>, 但是针对该区土壤重金属污染现状的研究少有报道。因此, 对当地土壤重金属污染程度作出评价, 并分析其重金属分布特征和污染来源亟待解决。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于赣南某矿区周边, 主要为低山—丘陵地形, 矿区内为亚热带东南风气候, 温暖潮湿, 四季分明, 雨量充沛, 地表水体较发育, 主要为受季节影响较大的山间沟谷溪流, 平水期流量 0.5~100 L/s, 部分在枯水季节干涸, 洪水期流量基本上为平水期的 2~3 倍。

研究区内矿产开采主要采用“露采-池浸”工艺, 方法简单易行, 技术含量低, 成本低。露天开采、就地造池、矿渣排放等诱发产生的矿山生态环境问题严重。因人类采矿活动的干扰, 大量地形地貌景观被破坏; 采矿、选矿、废渣废液的无序排放将矿区原生地形地貌彻底改变, 水土流失现象严重; 同时, 采矿作业种使用了大量的药剂, 对土壤也产生了一定的破坏, 造成了水土污染。

### 1.2 样品采集

在矿山开采区周围选定典型研究区, 共采集土壤样本 40 个, 每个采样点采样深度控制在 0~20 cm。采集过程中需要记录点位、坐标、土壤类型等信息, 并去除表面石块和杂草, 采样量约 500 g, 最后装入密封袋内编号。采集的土壤样本当天送回实验室进行处理, 所有过程常温遮光<sup>[22-23]</sup>。

### 1.3 样品测试与分析

样本送回实验室后需经过风干和过筛处理, 再进行消解实验。消解过程使用的混酸主要为硝酸、高氯酸和氢氟酸, 取上清液过滤检测重金属含量。Cr、Ni、Cu、Zn 和 Pb 元素含量使用双向观测等离子体发射光谱仪 (ICAP6300MFC) 测定<sup>[24]</sup>; Hg 和 As 含量使用原子荧光法测得<sup>[25-26]</sup>; Cd 元素含量使用电感耦合等离子体质谱仪 (Agilent7700x) 测得<sup>[27]</sup>。随批做空白实验, 并且需利用国家标准物质 (GBW-07409、GBW-07413) 和 20% 平行样对测试进行质量控制, 标样测试值和平行样间的相对标准偏差 (RSD) 需要控制在规定范围 5% 以内。

### 1.4 土壤重金属污染评价方法

#### 1.4.1 单因子污染指数法

单因子污染指数法是一种相对比较简单的评价方法, 主要是通过对单一重金属污染物的污染程度进行评价, 从而反映出土壤受重金属污染程度以及土壤环境的质量等级<sup>[28]</sup>。其计算公式为:

$$P_i = C_i/S_i \quad (1)$$

其中:

$P_i$ ——单因子土壤重金属 i 污染指数;

$C_i$ ——土壤重金属 i 的测定值;

$S_i$ ——土壤重金属元素标准背景值<sup>[29]</sup>

其中,  $P_i \leq 1$  表示土壤未受到污染;  $P_i > 1$  时表示土壤存在重金属污染;  $P$  值越大说明污染程度越严重。具体土壤重金属单因子污染指数评价分级标准可见表 1。

表 1 单因子污染指数评价分级标准

等级	区间范围	污染等级
1	$P_i \leq 1$	安全
2	$1 < P_i \leq 2$	轻微污染
3	$2 < P_i \leq 3$	中度污染
4	$3 < P_i$	重度污染

### 1.4.2 Nemerow 综合污染指数法

Nemerow 综合污染指数是一种兼顾极值或突出最大值的计权型多因子环境质量指数评价法。综合考虑了单因子污染指数法得到的平均值和最大值，能更加全面考虑到土壤重金属污染物的平均污染水平和最大污染程度，可以对研究区内土壤重金属污染水平得到较全面的认识<sup>[30]</sup>。其计算公式为：

$$P_N = \sqrt{\frac{\bar{P}_i^2 + P_{\max}^2}{2}} \quad (2)$$

其中：

$P_N$ ——Nemerow 综合污染指数；

$\bar{P}_i^2$ ——单因子污染指数平均值；

$P_{\max}$ ——单因子污染指数最大值；

其中， $P_N < 0.7$  表示土壤未受到污染； $P_N > 0.7$  说明土壤受到了相关重金属的污染； $P_N$  值越大，说明土壤受重金属污染程度越高。Nemerow 综合污染指数对研究区土壤重金属污染的评价标准见表 2。

表 2 Nemerow 综合污染指数评价分级标准  
Table 2 Classification standards for Nemerow comprehensive pollution index evaluation

等级	区间范围	污染等级
1	$P_N < 0.7$	安全
2	$0.7 < P_N < 1.0$	警戒线
3	$1.0 < P_N < 2.0$	轻微污染
4	$2.0 < P_N < 3.0$	中度污染
5	$3.0 < P_N$	重度污染

### 1.4.3 污染负荷指数法

污染负荷指数法是在 1980 年由 Tomlinson 提出，可以对研究区土壤的多种重金属成分共同进行评价。该评价方法不仅可以表现出每个土壤样本的重金属污染情况，还可以反映整个研究区的土壤综合污染状况<sup>[31]</sup>。某一样本点的污染负荷指数为：

$$P = \sqrt[n]{C_{f1}C_{f2}C_{f3}\cdots C_{fm}} \quad (3)$$

其中：

$C_{fi} = C_i / C_{0i}$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ )；

$C_{fi}$ ——土壤重金属  $i$  的污染系数；

$C_i$ ——土壤重金属  $i$  的测定值；

$C_{0i}$ ——重金属  $i$  的参比值，采用江西省土壤背景值<sup>[29]</sup>；

$m$ ——污染负荷指数法评价的重金属种类数目。

某研究区内的污染负荷指数计算公式为：

$$P_N = \sqrt[n]{P_1P_2P_3\cdots P_n} \quad (4)$$

其中：

$P_N$ ——研究区内土壤污染负荷指数；

$n$ ——研究区内土壤样本数目。

其中， $P < 1$  时表示土壤未受到污染； $P \geq 1$  说明土壤受到了相关重金属的污染； $P$  值越大，说明土壤受重金属污染程度越高。污染负荷指数对研究区土壤重金属污染的评价标准可见表 3。

表 3 污染负荷指数评价分级标准  
Table 3 Classification standards for pollution load index evaluation

等级	区间范围	污染等级
1	$P_N < 1$	无污染
2	$1 \leq P_N < 2$	中度污染
3	$2 \leq P_N < 3$	强污染
4	$3 \leq P_N < 3.0$	极强污染

### 1.4.4 潜在污染生态指数法

潜在污染生态指数法是在 1980 年由 Hakanson 提出，多用于对土壤潜在的重金属污染风险进行评价。该方法将土壤重金属含量、生态敏感性等多方面因素进行综合考量，得到了相对应用广泛的生态风险评价的方法<sup>[32]</sup>。土壤重金属潜在生态风险指数和综合潜在风险指数计算公式分别为：

$$E_r^i = T_r^i \times C_r^i / C_n^i \quad (5)$$

$$RI = \sum E_r^i \quad (6)$$

其中：

$C_r^i$ ——土壤重金属  $i$  的测定值；

$C_n^i$ ——土壤重金属  $i$  的参考背景值，采用江西省土壤背景值<sup>[29]</sup>；

$T_r^i$ ——土壤重金属元素的毒性响应系数，Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Cd、As、Hg 的毒性响应系数分别为 5、5、1、2、5、30、10、40；

$E_r^i$ ——土壤重金属潜在风险系数；

$RI$ ——综合潜在风险系数。

其中， $E_r^i < 40$  表示土壤重金属仅存在轻微的潜在风险； $E_r^i \geq 40$  说明潜在风险的程度提高； $RI < 150$  表示土壤重金属的潜在生态风险较低； $RI \geq 150$  说明潜在生态风险逐渐增加。具体潜在风险指数对研究区土壤重金属的评价标准见表 4。

表 4 潜在生态风险指数评价分级标准  
Table 4 Classification standards for potential ecological risk index evaluation

潜在生态风险	区间范围	潜在风险程度
$E_r^i$	$E_r^i < 40$	轻微
	$40 \leq E_r^i < 80$	中度
	$80 \leq E_r^i < 160$	强
	$160 \leq E_r^i < 320$	很强
	$320 \leq E_r^i$	极强
RI	$RI < 150$	轻微
	$150 \leq RI < 300$	中度
	$300 \leq RI < 600$	强
	$600 \leq RI$	很强

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤重金属含量特征

针对研究区内土壤样品重金属含量的分析, 结果见表 5。研究区内土壤样品重金属元素 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Cd、As 和 Hg 的均值分别为 12.0、106、67.6、28.4、8.44、0.13、3.14 和 0.05 mg/kg, 除了 Pb 元素, 其他元素含量均值均低于《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)<sup>[33]</sup> 中的风险筛选值。

表 5 研究区土壤重金属含量分布值与背景值  
(n=40) / (mg·kg<sup>-1</sup>)

Table 5 Distribution parameters and background values of soil heavy metals in the study area

元素	含量范围	中值	均值	标准差	江西省背景值	筛选值	超标件数	超标率/%
Cu	1.24~34.5	8.11	12	10.5	20.8	150	10	25.0
Pb	41.7~296	102	106	50.1	32.1	70	31	77.5
Zn	31.9~137	60.2	67.6	25.8	69	200	16	40.0
Cr	8.39~209	20.3	28.4	33.5	48	150	5	12.5
Ni	1.04~27	7.69	8.44	6.68	19	60	3	7.20
Cd	0.02~0.65	0.09	0.13	0.13	0.1	0.3	15	37.5
As	1.11~7.17	2.64	3.14	1.56	10.4	40	0	0
Hg	0.0092~0.12	0.04	0.05	0.03	0.09	1.3	6	15.0

研究区内土壤样品中 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Cd 和 Hg 元素含量相较于江西省土壤重金属背景值<sup>[31]</sup> 均有不同程度的超标。其中, Cr、Ni 和 Hg 元素超标样本数目较少, 分别仅有 5、3 和 6 件样本中这三种元素超标, 超标率均低于 15%。而 Cu、Zn 和 Cd 元素超标样本数目较多, Cu 元素超标率达到了 24.4%, 有 10 件土壤样本中存在 Cu 元素超标; Zn 元素超标率达到了 39.0%, 有

16 件土壤样本中存在 Zn 元素超标; Cd 元素超标率达到了 36.6%, 有 15 件土壤样本中存在 Cd 元素超标。Pb 元素超标率最大, 达到了 75.6%, 共有 31 件土壤样本中的 Pb 含量超过了背景值, 说明研究区内土壤存在重金属 Pb 污染, 且已经受到人为活动不同程度的污染破坏。

### 2.2 土壤重金属相关性分析

土壤重金属含量之间的相关性通常可以用于推断各个重金属之间是否具有伴生或同源的关系<sup>[34]</sup>。因此, 对研究区内土壤样品的重金属 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Cd、As 和 Hg 含量进行相关性分析可以进一步解释其来源。结果见图 1, 研究区内土壤样品各重金属元素之间均呈现出显著正相关关系, 反映出重金属之间具有一定程度的同源或伴生关系。由图 1 可见, 研究区土壤样本的 Cu 元素分别与 Cr、Ni、Cd 表现出了显著的正相关关系, 其相关性可以分别达到 0.88, 0.91 和 0.68 ( $p < 0.01$ )。表明研究区内的土壤重金属 Cu 与 Cr、Ni、Cd 可能具有相似的来源; 此外, Zn 元素和 Cd 元素也具有明显的正相关关系 ( $r = 0.51, p < 0.05$ ), Ni 元素和 Cr、Cd 的相关性也很显著, 相关性系数分别为 0.97 和 0.59。而重金属 Hg 则与 As ( $r = 0.61, p < 0.05$ )、Ni ( $r = 0.55, p < 0.05$ ) 元素具有较高的相关性系数, 均说明了研究区内土壤重金属 Cu 和 Cr、Ni、Cd, Zn 和 Cd, Ni 和 Cr、Cd, Hg 和 As 可能具有相同的污染源或污染路径, 以及可能重金属之间存在复合型污染等。

### 2.3 土壤重金属污染评价

#### 2.3.1 单因子污染指数评价结果

参照《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)<sup>[33]</sup>、江西省土壤中元素背景值<sup>[29]</sup> 及评价等级划分标准, 采用单因子污染指数法对研究区内土壤重金属污染进行评价, 评价结果和污染程度分布情况见表 6 和图 2。

研究区内土壤重金属 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Cd、As 和 Hg 均存在不同程度的污染。其中, 整个研究区土壤重金属单因子污染指数评价结果见图 3 和表 6, 所有样本均未受到重金属 As 污染。Cu、Zn、Ni、As 和 Hg 这 5 种重金属单因子污染指数分别介于 0.06~1.66、0.46~1.98、0.05~1.42、0.11~0.69 和 0.11~1.45; 均值分别为 0.58、0.98、

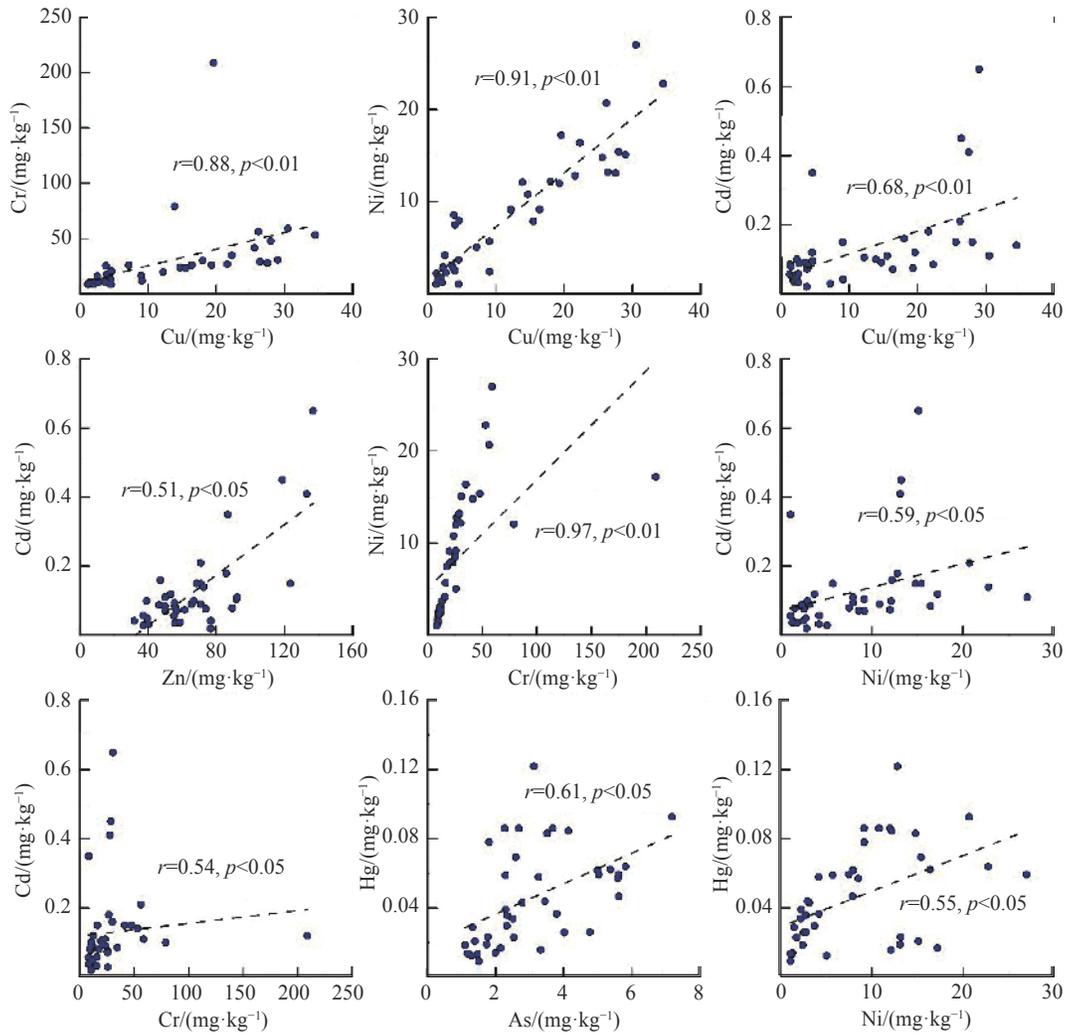


图1 土壤重金属含量相关性散点

Fig.1 Scatter plot of correlation of soil heavy metal contents

表6 单因子污染指数评价结果 (n=40)

Table 6 Results of single factor pollution index evaluation

元素	污染指数			污染等级/%			
	最小值	最大值	平均值	安全	轻微污染	中等污染	重度污染
Cu	0.06	1.66	0.58	75	25	0	0
Pb	1.30	9.22	3.29	0	22.5	0	55
Zn	0.46	1.98	0.98	60	40	0	0
Cr	0.17	4.35	0.59	87.5	10	0	2.50
Ni	0.05	1.42	0.44	92.5	7.50	0	0
Cd	0.20	6.50	1.29	60	27.5	0	10
As	0.11	0.69	0.30	100	0	0	0
Hg	0.11	1.45	0.55	85	15	0	0

0.44、0.30和0.55，均小于1，说明Cu、Zn、Ni和Hg重金属仅存在轻微污染。Pb、Cd和Cr这三种重金属的单因子污染指数的平均值较大，重度污染率分别是55%、10%和2.5%，说明

研究区内存在重金属Pb、Cd和Cr污染。这可能与工业来源的灰尘、有机质以及农业生产过程中化肥、农药的使用等人为活动有关<sup>[35]</sup>。

### 2.3.2 Nemerow综合污染指数评价结果

相较于单因子污染指数评价结果，Nemerow综合污染指数可以对研究区内多种重金属综合污染程度进行评价，同时对较高浓度的重金属对环境的影响也有所考虑<sup>[36]</sup>。具体评价结果和重金属污染程度见表7和图3。

由表7可知，研究区内40个土壤样本中处于安全和警戒线级别的样品数目为0，有7个土壤样品污染级别是轻微污染，占采样点总数的17.5%；9个样本处于中等污染，占采样点总数的22.5%；而24个样本处于重度污染级别，占比60%。因此，研究区内土壤样本重金属污染以中等和重度

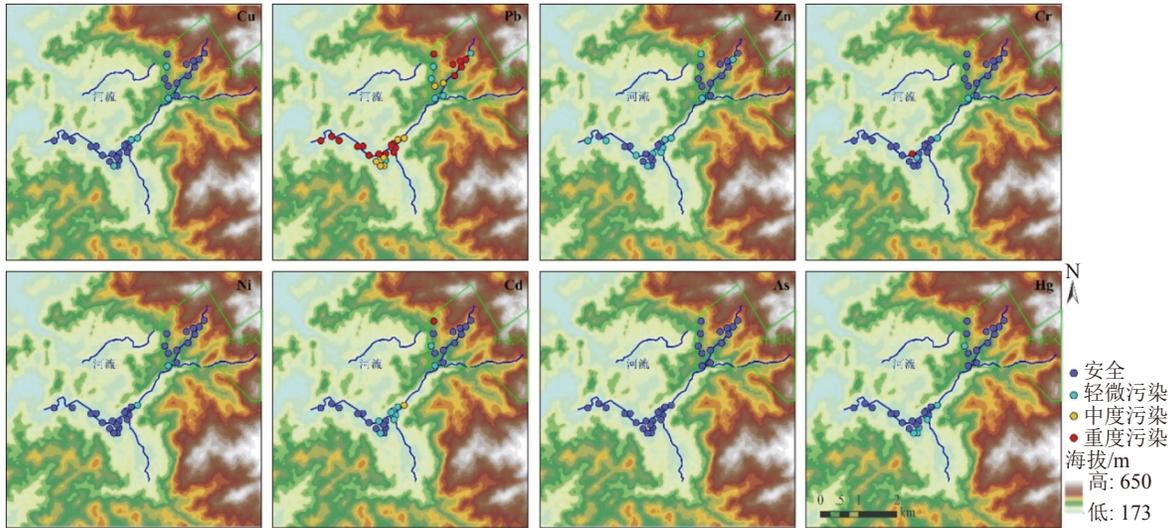


图2 单因子污染指数评价结果  
Fig.2 Distribution of single factor pollution index evaluation

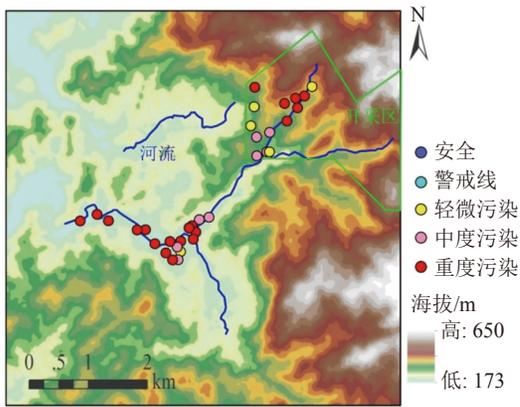


图3 Nemerow 综合污染指数法评价结果  
Fig.3 Distribution of Nemerow Comprehensive Pollution Index evaluation

表7 Nemerow 综合污染指数评价结果  
Table 7 Results of Nemerow comprehensive pollution index evaluation

污染程度	安全	警戒线	轻微污染	中等污染	重度污染
污染指数 $P_N$	<0.7	0.7~1.0	1.2~2.0	2.0~3.0	>3.0
样本数	0	0	7	9	24
百分比/%	0	0	17.5	22.5	60

污染为主。

由图3可见，研究区内土壤样本重金属Nemerow综合污染指数范围是1.55~9.35，均值3.61，大量样本均处于污染状态。重度污染的样本点主要集中在开采区和河流中下游地区，开采区边缘以及河流上游区域主要为轻微和中等污染。说明重金属的主要来源于矿业开发以及农业化肥使用等人为活动。

### 2.3.3 污染负荷指数评价结果

基于污染负荷指数法计算得到的研究区土壤样本重金属污染系数和污染程度分布情况见图4、表8和图5。由图4可见，研究区内土壤各重金属元素的污染系数均值从高到低依次是Pb、Cd、Zn、Cr、Cu、Hg、Ni和As。说明土壤所受重金属污染程度不同，这是由重金属在土壤中的赋存特征、迁移方式以及外源输入量等存在的差异造成的<sup>[37]</sup>。在矿业开采活动中会产生Pb、Cd、Zn等重金属污染，以及工矿企业生产过程中所产生的原料、废渣、以及运输产生的尾气中，均存在一定的重金属污染<sup>[38]</sup>，导致了Pb、Cd、Zn等重金属元素的富集。

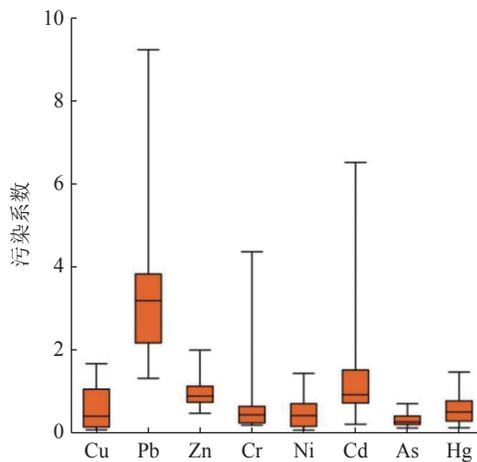


图4 研究区内土壤重金属污染系数  
Fig.4 Heavy metal pollution coefficient of soil in the study area

表8 污染负荷指数评价结果

污染程度	无污染	中等污染	强污染	极强污染
污染指数P	<1	1~2	2~3	≥3
样本数	34	6	0	0
百分比/%	85	15	0	0

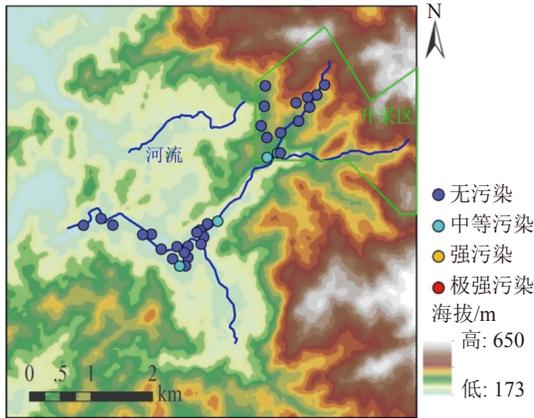


图5 污染负荷指数污染程度分布

Fig.5 Distribution of pollution load index evaluation

由表8可知，研究区内土壤样本重金属污染指数P的范围是0.27~1.24，均值0.65，总体呈无污染到中等污染状态。其中，有85%的样本处于无污染状态，大部分样本较均匀地分布在研究区内；有15%的样本处于中等污染，主要分布在开

采区和河流的中上游地区。整个研究区内污染负荷指数  $P_a$  为0.59，说明研究区内土壤污染负荷指数适中，污染水平中等，需要对重点区域采取污染治理等措施。

### 2.3.4 潜在生态风险评价分析

使用 Hakanson 提出的潜在生态风险评价方法对研究区内土壤样品进行分析，该方法综合考虑了研究区内土壤重金属污染的敏感性，较为全面的反映了土壤重金属污染对环境质量的影响和潜在生态风险<sup>[39]</sup>。具体分析结果见表9和图6。

表9  $E_i^r$ 、RI 统计值及潜在生态风险评价结果

Table 9 Results of  $E_i^r$ 、RI values and potential ecological risk index evaluation

元素	潜在风险系数 $E_i^r$			污染等级/%				
	最小值	最大值	平均值	轻微	中等	强	很强	极强
Cu	0.30	8.29	2.89	100	0	0	0	0
Pb	6.50	46.1	16.5	97.5	2.5	0	0	0
Zn	0.46	1.98	0.98	100	0	0	0	0
Cr	0.35	8.70	1.18	100	0	0	0	0
Ni	0.27	7.11	2.22	100	0	0	0	0
Cd	6.00	195	38.7	72.5	17.5	7.50	2.50	0
As	1.07	6.89	3.02	100	0	0	0	0
Hg	4.38	58.1	22.1	85.0	15.0	0	0	0
综合潜在风险系数RI	30.2	237	87.5	85.0	15.0	0	0	0

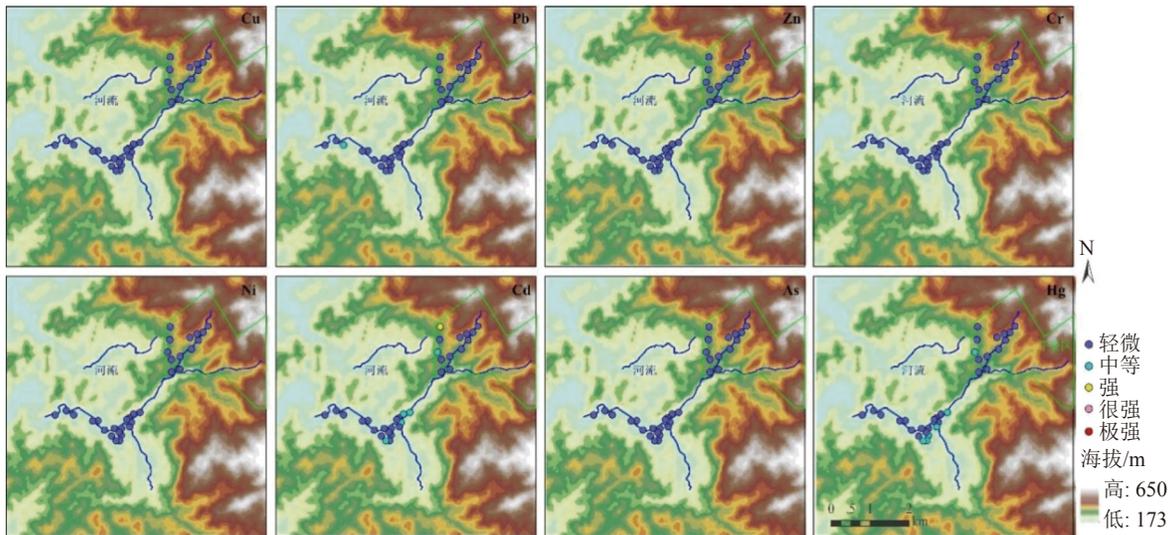


图6 潜在生态风险程度分布

Fig.6 Distribution of potential ecological risk index evaluation

由表9可知，重金属Cu、Zn、Cr、Ni和As的潜在风险系数  $E_i^r$  均值均较低，均未超过40，存在轻微潜在风险。而重金属Cd的潜在风险系数  $E_i^r$  变化范围为6.00~195，平均值为38.7，其中有

2.5%的样本存在很强的潜在生态风险，主要分布于开采区附近（图6）；有7.5%的样本处于强潜在生态风险，多分布于河流中上游位置；17.5%的样本处于中等潜在生态风险，多分布于河流中游

区域。15% 的样本重金属 Hg 的潜在生态风险等级达到中等生态危害风险，样本多分布于开采区和河流中下游区域，其余样本均处于轻微生态危害风险。此外，重金属 Pb 的潜在风险系数 $E_i$ 最大值为 46.1，有 2.5% 的样本存在中等潜在生态风险，位于河流下游位置。其他样本未见明显生态危害风险。由此可见，Cd、Hg、Pb 在研究区土壤生态中的贡献率较高，是主要的潜在生态风险因子。

研究区内土壤样本综合潜在生态风险指数 RI 范围是 30.2~237，均值为 87.5，主要处于轻微生态风险和中等生态风险危害水平。如图 7 所示，中等生态风险样本主要位于河流中游区域，这说明矿区以及河流周边土壤重金属问题亟需引起重视，特别是 Cd、Hg、Pb 的重金属污染风险应当重点治理，及时遏制其对环境及人体健康的潜在危害。

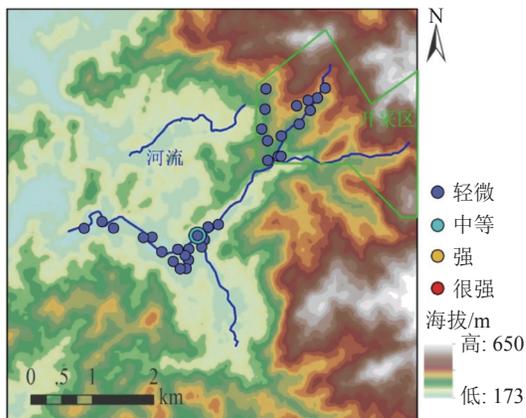


图 7 综合生态风险程度分布

Fig.7 Distribution of comprehensive ecological risk index evaluation

#### 2.4 几种评价方法的对比分析

对研究区土壤重金属污染采用了 4 种不同的方法进行评价，计算方式与侧重点均不相同。通过对研究区土壤重金属单因子指数评价后发现，Pb、Cd 和 Cr 这 3 种重金属的单因子污染指数较大，污染程度较高。实际上，整个研究区内仅在河流的中下游的局部地区存在 Pb、Cd 和 Cr 重金属轻度或中度污染。此外，研究区内土壤存在多种重金属交叉污染的情况，污染类型可能呈复合污染<sup>[40]</sup>。因此，使用单因子指数法对整个研究区土壤重金属污染情况进行评价，仅可以显示出单一污染物的污染水平，无法得到整个研究区内多种污染因子的交叉污染程度。

本研究区由 Nemerow 综合指数法评价重金属污染程度得到研究区内土壤样本重金属污染以中等和重度污染为主，大量样本均处于污染状态。然而研究区内土壤重金属除 Pb 元素外，Cu、Zn、Ni 等元素含量均值均低于江西省土壤重金属背景值。因此仅用 Nemerow 综合污染指数法可能会突出重度重金属污染物对整个研究区环境综合评价结果的影响。

采用污染负荷指数法评价得到，土壤中 Pb、Cd、Zn 等重金属元素富集，土壤污染负荷指数适中，整体污染水平中等。然而，在计算过程中土壤污染负荷指数也容易受到污染系数数值的干扰，可能会对评价结果产生影响。

通过潜在生态风险评价得到，Cd、Hg、Pb 是主要的潜在生态风险因子，应当重点治理。

综上，单因子污染指数评价方法适用于评价单一污染因子的污染水平，而 Nemerow 综合污染指数法适用于多种污染物的综合评价，但侧重突出重度污染物对评价结果的影响。污染负荷指数法可以同时多个污染因子负荷展开综合评价，而潜在生态风险评价则在综合考虑多个污染因子特征的基础上，重点突出了各重金属元素的毒性程度。从本研究评价结果来看，污染负荷指数法和潜在生态风险评价法对研究区的评价结果相似，说明存在明确重金属元素污染的区域，两种方法评价结果相似，而对于污染程度较低的区域，污染负荷指数法可能会低估毒性较大的重金属元素的污染程度和生态风险。因此，针对土壤重金属污染评价往往并无标准化方法和评价模式，应根据重金属类型、含量、毒性等具体情况采用多种方法综合评价，使评价结果客观公正，更具科学性。

### 3 结 论

(1) 研究区内土壤环境质量总体良好，除 Pb 元素外，其他 Cu、Zn、Cr、Ni、Cd、As 和 Hg 元素含量均值均低于江西省土壤重金属背景值。Pb 的污染最严重，其含量均值是背景值的 3.3 倍，样本超标率达到了 75.6%。

(2) 土壤重金属之间具有显著正相关关系，可以推测研究区内土壤重金属 Cu 和 Cr、Ni、Cd、Zn 和 Cd、Ni 和 Cr、Cd、Hg 和 As 可能具有相同的污染源或污染路径，重金属之间可能存在

复合型污染。

(3) 单因子污染指数评价得到, 研究区内存在重金属 Pb、Cd 和 Cr 污染, 可能是由人为活动影响造成的; Nemerow 综合污染指数法对研究区土壤样本评价得到, 污染指数区间为 1.55~9.35, 处于中-重度污染。重度污染的样本点主要集中在矿区和河流中下游地区, 说明重金属主要来源于矿业开发以及农业化肥使用等人为活动影响。污染负荷指数评价得出, Pb、Cd、Zn 元素在研究区土壤污染最严重, 这可能是工矿企业生产过程中所产生的原料、废渣等存在一定的污染从而导致了 Pb、Cd、Zn 等重金属元素的富集。潜在生态风险评价得到 Cd、Hg、Pb 在研究区土壤生态中的贡献率较高, 表明研究区内的 Cd 和 Hg 元素应进行重点治理。

(4) 综合以上四种评价结果得到, 土壤中 Pb、Cd、Zn 等重金属元素富集, 整体污染水平中等, Cd、Hg、Pb 是主要的潜在生态风险因子, 需及时治理以遏制其对生态环境和人体健康的影响。该评价结果可以为研究区及其周边土壤重金属污染的环境修复提供参考和指导, 从而有效减少土壤重金属污染, 保障人类身体健康和生命安全。此外, 还需要进一步对重金属来源和迁移路径进行进一步的查明和探究, 有助于土壤污染的治理和修复。

## 参考文献:

[1] 全双梅, 连国奇, 杨琴, 等. 矿区农田土壤重金属污染评价与研究[J]. 金属矿山, 2019, 516(6):189-194.  
TONG S M, LIAN G Q, YANG Q, et al. Assessment and research of heavy metals pollution in farmland soil from mining areas[J]. Metal Mine, 2019, 516(6):189-194.  
[2] Zhang J, Hua P, Krebs P. Influences of land use and antecedent dry-weather period on pollution level and ecological risk of heavy metals in road-deposited sediment[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 228:158-168.  
[3] Fei X F, Lou Z H, Xiao R, et al. Contamination assessment and source apportionment of heavy metals in agricultural soil through the synthesis of PMF and GeogDetector models[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 747:141293.  
[4] 赵慧, 何博, 王铁宇, 等. 我国南方典型城市土壤重金属污染特征及源汇关系分析[J]. 环境科学学报, 2019, 39(3):2231-2239.  
ZHAO H, HE B, WANG T Y, et al. Pollution characteristics of heavy metals and source-sink relationship in typical city of the South China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019,

39(3):2231-2239.  
[5] Facchinelli A, Sacchi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils[J]. *Environmental Pollution*, 2001, 114(3):313-324.  
[6] 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.  
[7] Yang Q, Li Z, Lu X, et al. A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: Pollution and risk assessment[J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 642:690-700.  
[8] Huang Y, Li T, Wu C, et al. An integrated approach to assess heavy metal source apportionment in peri-urban agricultural soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 299:540-549.  
[9] Dong B, Zhang R, Gan Y, et al. Multiple methods for the identification of heavy metal sources in cropland soils from a resource-based region[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 651(Pt 2): 3127-3138.  
[10] Liang J, Feng C, Zeng G, et al. Atmospheric deposition of mercury and cadmium impacts on topsoil in a typical coal mine city, Lianyuan, China[J]. *Chemosphere*, 2017, 189:198-205.  
[11] 赵艳玲, 王亚云, 何厅厅, 等. 基于组合权区间欧式距离模型的重金属污染评价[J]. 金属矿山, 2013(3):132-136.  
ZHAO Y L, WANG Y Y, HE T T, et al. The evaluation of heavy metal pollution based on interval euclid distance model with combination weights[J]. *Metal Mine*, 2013(3):132-136.  
[12] 陈宇宁, 刘平辉, 高金栋. 江西省南丰蜜桔土壤重金属特征评价及源解析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(19):07965-11.  
CHEN Y N, LIU P H, GAO J D. Evaluation and source analysis of heavy metals in the soil of tangerine in Nanfeng, Jiangxi Province[J]. *Science Technology Engineering*, 2021, 21(19):07965-11.  
[13] 刘应冬, 代力, 张卫华. 青海某金矿矿集区土壤重金属污染评价及综合利用讨论[J]. 矿产综合利用, 2018, 39(5):21-24.  
LIU Y D, DAI L, ZHANG W H. Assessment of soil heavy metals pollution and comprehensive utilization in a gold mine area in Qinghai[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2018, 39(5):21-24.  
[14] 姚玉玲, 代力, 舒荣波, 等. 赣南某未开发离子型稀土矿区土壤环境质量评价[J]. 矿产综合利用, 2022(4):152-156+161.  
YAO Y L, DAI L, SHU R B, et al. Soil environmental quality assessment around the undeveloped ion adsorption type rare earth ore in Southern Jiangxi[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(4):152-156+161.  
[15] 卢君勇, 吴浪, 阳开龙, 等. 四川省马边老河坝磷矿重金

- 属污染分析[J]. 矿产综合利用, 2022(2):187-193.
- LU J Y, WU L, YANG K L, et al. Analysis of heavy metal pollution in the environment of Laoheba phosphate mine in Mabian Region, Sichuan Province[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(2):187-193.
- [16] 庞妍, 同延安, 梁连友, 等. 矿区农田土壤重金属分布特征与污染风险研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11):165-171.
- PANG Y, TONG Y N, LIANG L Y, et al. Study on distribution characteristics and pollution risk of heavy metals in farmland soil of mining area[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2014, 45(11):165-171.
- [17] 周贺鹏, 胡洁. 离子型稀土矿化学溶浸影响因素及其调控[J]. 矿产综合利用, 2019(3):146-151.
- ZHOU H P, HU J. Influencing factors and control of chemical leaching of ion-type rare earth ore[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(3):146-151.
- [18] 张博, 宁阳坤, 曹飞, 等. 世界稀土资源现状[J]. 矿产综合利用, 2018, 39(4):2-7.
- ZHANG B, NING Y K, CAO F, et al. Current situation of worldwide rare earth resources[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2018, 39(4):2-7.
- [19] 何淼, 周进生. 稀土综合利用新途径探究—华沙大学锡矿尾矿实验的启示[J]. 矿产综合利用, 2017, 38(5):24-29.
- HE M, ZHOU J S. New approach to the comprehensive utilization of rare earth—the revelation of the tin mine tailings test at the university of Warsaw[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2017, 38(5):24-29.
- [20] 蒯亚青, 胡方洁, 张军, 等. 赣南离子型稀土矿区土壤吸附铜的特征研究[J]. 应用化工, 2018, 48(3):434-437.
- LIN Y Q, HU F J, ZHANG J, et al. Adsorption features of copper in Gannan ion-type rare earth mining soil[J]. Applied Chemical Industry, 2018, 48(3):434-437.
- [21] 韩张雄, 万的军, 胡建平, 等. 土壤中重金属元素迁移转化规律及其影响因素[J]. 矿产综合利用, 2017, 38(6):2-6.
- HAN Z X, WAN D J, HU J P, et al. Migration and transformation of heavy metals in soil and its influencing factors[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2017, 38(6):2-6.
- [22] 高德政, 周开灿, 冯启明, 等. 川南硫铁矿开发中的环境污染与治理[J]. 矿产综合利用, 2001(4):23-27.
- GAO D Z, ZHOU K C, FENG Q M, et al. Environmental pollution and harness of exploiting pyrite in South Sichuan[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2001(4):23-27.
- [23] 代力, 邓杰. 川南典型硫铁矿土壤污染调查方法[J]. 矿产综合利用, 2022(3):113-120+147.
- DAI L, DENG J. Experimental study on investigation method of soil pollution in typical pyrite mining area in South Sichuan[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(3):113-120+147.
- [24] Qiao W, Guo H M, He C, et al. Molecular evidence of arsenic mobility linked to biodegradable organic matter[J]. Environmental Science and Technology, 2020, 54(12):7280-7290.
- [25] 高巍. 火焰原子吸收分光光度法测定矿石中的铜、铅、锌、钴、镍的含量[J]. 世界有色金属, 2019(4):182-183.
- GAO W. Determination of copper, lead, zinc, cobalt and nickel in ore by flame atomic absorption spectrophotometry[J]. Chemical Engineering, 2019(4):182-183.
- [26] 张渊, 洪秉信. 川南硫铁矿尾矿的工艺性质与综合利用[J]. 矿产综合利用, 2006(5):21-24.
- ZHANG Y, HONG B X. Technological properties and comprehensive utilization of the pyrite tailings in South Sichuan[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2006(5):21-24.
- [27] Qiao W, Guo H M, He C, et al. Unraveling roles of dissolved organic matter in high arsenic groundwater based on molecular and optical signatures[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 406:124702.
- [28] 李瑞娟, 周冰. 安徽铜陵铜尾矿土壤污染评价及综合利用研究[J]. 矿产综合利用, 2021(4):36-40.
- LI R J, ZHOU B. Study on soil pollution evaluation and multipurpose utilization of copper tailings in Tongling, Anhui[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(4):36-40.
- [29] 国家环境保护局. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- State Environmental Protection Administration. Background values of soil elements in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [30] 罗妍, 黄艺, 余大明, 等. 东北典型煤矿区重金属环境评价与分析[J]. 矿产综合利用, 2021(4):50-58.
- LUO Y, HUANG Y, YU D M, et al. Environmental assessment of heavy metals in typical coal mining areas in Northeast China[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(4):50-58.
- [31] Suresh G, Sutharsan P, Ramasamy V, et al. Assessment of spatial distribution and potential ecological risk of the heavy metals in relation to granulometric contents of Veeranam lake sediments, India[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2012, 84:117-124.
- [32] 王斐, 黄益宗, 王小玲, 等. 江西钨矿周边土壤重金属生态风险评价: 不同评价方法的比较[J]. 环境化学, 2015, 34(2):225-233.
- WANG F, HUANG Y Z, WANG X L, et al. Ecological risk assessment of heavy metals in surrounding soils of tungsten ores: Comparison of different evaluation methods[J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(2):225-233.
- [33] 生态环境部. 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行): GB 15618-2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.

Ministry Of Ecology and Environment. Soil environment quality risk control standard for soilcontamination of agriculture land (On trail): GB 15618-2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.

[34] Qiao W, Guo H M, He C, et al. Identification of processes mobilizing organic molecules and arsenic in a thermal-confined Pliocene aquifer[J]. *Water Research*, 2021, 198:117140.

[35] Li F, Zhang J D, Huang J H, et al. Heavy metals in road dust from Xiandao District, Changsha City, China: characteristics, health riskassessment, and integrated source identification[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(13): 13100-13113.

[36] Nemerow N L. Scientific stream pollution analysis[M]. Washington: Scripta Book Co. , 1974.

[37] 庞夙, 李廷轩, 王永东, 等. 县域农田土壤铜、锌、铬含量空间变异特征及其影响因子分析[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(4):737-743.

PANG S, LI T X, WANG Y D, et al. Spatial variability and influencing factors of the concentrations of Cu, Zn, and Cr in cropland soil on county scales[J]. *Scientia Agricultura Sinica*,

2010, 43(4):737-743.

[38] Schuhmacher M, Domingo J, Garreta J. Pollutants emitted by a cement plant: health risks for the population living in the neighborhood[J]. *Environmental Research*, 95(2): 198-206.

[39] 何云峰, 朱广伟, 陈英旭, 等. 运河杭州段沉积物中重金属的潜在生态风险研究[J]. *浙江大学学报农业与生命科学版*, 2002, 28(6):669-674.

HE Y F, ZHU G W, CHEN Y X, et al. Study on the ecological risk of the sediment from the Hangzhou section of the Grand Canal, China, with potential ecological risk index[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences)*, 2002, 28(6):669-674.

[40] 董燕, 孙璐, 李海涛, 等. 雄安新区土壤重金属和砷元素空间分布特征及源解析[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(3):172-181.

DONG Y, SUN L, LI H T, et al. Sources and spatial distribution of heavy metals and arsenic in soils from Xiongan New Area, China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(3):172-181.

## Evaluation of Heavy Metal Pollution in Soils from a Mining Area in Southern Jiangxi

Zhang Deqiang<sup>1</sup>, Wang Yingnan<sup>2</sup>, Qiao Wen<sup>1</sup>, Wang Yi<sup>1</sup>, Bai Guangyu<sup>1</sup>

(1.China Institute of Geo-Environment Monitoring, China Geological Survey, Key Laboratory of Mine Ecological Effects and Systematic Restoration, Ministry of Natural Resources, Beijing, China; 2.Land Consolidation and Rehabilitation Center, Ministry of Natural Resources, Beijing, China)

**Abstract:** This is a paper in the field of mining environmental engineering. Contents of heavy metals in 40 soil samples from a mining area in the Southern Jiangxi Province were determined. Results suggest that average contents of Cu, Pb, Zn, Cr, Ni, Cd and Hg were all lower than the background values of soil heavy metals in the Jiangxi Province, while the content of Pb was higher than the background value. The significant positive correlations between Cu, Cr, Ni, and Cd, and Zn and Cd, and Ni, Cr, Cd, As, and Hg indicated that these heavy metals may have homologous or concomitant sources. The single pollution index method, Nemerow index method, pollution load index method, and potential ecological risk index method were used to evaluate the pollution degree of soil by heavy metals in study area. Results of the single pollution index method showed that the single element pollution degree decreased following the sequence of Pb > Cd > Zn, while the overall pollution degree was low. The Nemerow index method revealed that soils being heavily polluted by heavy metals were mainly distributed in the mining area and middle reaches of river. The mean value of heavy metal pollution coefficient calculated from the pollution load index method decreased following the sequence of Pb > Cd > Zn > Cr > Cu > Hg > Ni. The soil pollution load index was moderate. The potential ecological risk assessment revealed mild ecological risk in relevant of Cu, Pb, Zn, Cr, and Ni, while much higher ecological risk was observed regarding Cd and Hg. In combination of the four pollution evaluation methods, soils from the study area were at the mild to moderate ecological risk in relevant of the eight heavy metals, indicating relatively good soil quality in the study area.

**Keywords:** Mining environmental engineering; Mining area; Heavy metals in soil; Pollution assessment; Correlation analysis; Ecological risk