

江西于都某钨矿区土壤重金属特征及生态风险评价

郭俊刚^{1,2,3}, 赵恒勤^{1,2,3}, 卞孝东^{1,2,3}, 孙晓艳⁴

GUO Jungang^{1,2,3}, ZHAO Hengqin^{1,2,3}, BIAN Xiaodong^{1,2,3}, SUN Xiaoyan⁴

1. 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 河南 郑州 450006;

2. 自然资源部多金属矿重点实验室, 河南 郑州 450006;

3. 西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710054;

4. 黄河水利职业技术学院, 河南 开封 475004

1. Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Zhengzhou 450006, Henan, China;

2. Key Laboratory for Polymetallic Ores' Evaluation and Utilization, MNR, Zhengzhou 450006, Henan, China;

3. Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

4. Yellow River Conservancy Technical Institute, Kaifeng 475004, Henan, China

摘要:金属矿产资源的持续开发活动通常会导致矿区土壤重金属含量累积,厘清土壤重金属环境污染特征并评价其生态风险,可为监测土壤环境质量和预防土壤污染提供依据。选择江西于都某百年开采钨矿山,采用单因子污染指数法、内梅罗综合指数法和 Hakanson 潜在生态风险指数法,对其周边土壤中 Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb、As、Hg 污染特征及潜在生态风险进行调查评价。评价结果表明,研究区土壤受到 Cu、Zn、Cd、Pb、As 等重金属的污染,单因子污染指数分别为 6.74、3.72、45.1、3.36、8.88;综合污染评价表明,Cd 是主要污染贡献因子,其次为 As、Cu、Pb、Zn;土壤综合潜在生态风险指数平均值高达 2065,属很强生态风险;强生态风险及以上区域主要分布在矿山周边及矿山下游河道附近,分布面积约占研究区总面积的 43.89%;研究区土壤重金属相关性分析表明,Cu、Zn、Cd、Pb 之间具有显著的相关性。综合研究结果可知,该区域土壤 Cd 具有一定的潜在生态风险,应引起充分重视,矿山开发利用可能是导致 Cu、Zn、Cd、Pb 污染的主要原因。

关键词:于都;钨矿;土壤;重金属;污染特征;生态风险

中图分类号:P618.67;X14 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)07-1195-08

Guo J G, Zhao H Q, Bian X D, Sun X Y. Characteristics and ecological risk of soil heavy metals of a Tungsten mine in Yudu, Jiangxi Province. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(7): 1195-1202

Abstract: The accumulation of heavy metals in soil is generally originated from the persistent exploitation in the mining area, thus clarifying the environmental pollution characteristics of heavy metals in soil and evaluating the ecological risk can provide a basis for monitoring soil environmental quality and preventing soil pollution. A tungsten mine with history of a hundred years in Yudu of southern Jiangxi Province was selected as a case study. Based on the assaying data, single-factor index and Nemerow multifactor index methods were used to assess the quality of soil, then the potential ecological risks of the eight heavy metals were evaluated by Hakanson potential ecological risk index method. The evaluation results show that the single-factor pollution index of Cu, Zn, Cd, Pb and As are 6.74, 3.72, 45.1, 3.36, 8.88, respectively. Cd contributes most to the Nemerow composite pollution index, followed by As, Cu, Pb, and Zn. The average value of the comprehensive potential ecological risk index reaches up to 2065, indicating strong potential hazard. The areas with strong potential heavy metals ecological risk account for 43.89%, which are mainly distributed around mines and their downstream near the river. Correlation analysis of soil heavy metals in the study area shows that Cu, Zn, Cd and Pb are significantly

收稿日期:2020-10-09; **修订日期:**2021-03-24

资助项目:中国地质调查局项目《江西于都地区钨等矿产绿色利用调查评价》(编号:DD20190625)、河南省科技攻关项目《胡敏酸诱导富集植物吸收 Pb 修复重金属污染土壤方法及微观机理研究》(编号:202102310593)、开封市科技攻关项目《典型污灌区农田土壤重金属高效功能菌群原位矿化修复技术研究》(编号:2002003)

作者简介:郭俊刚(1980-),男,硕士,高级工程师,从事矿山地质环境调查及研究。E-mail:gg801@163.com

correlated. In conclusion, Cd has a certain potential ecological risk and should be paid more attention, and mineral exploitation activities may be the primary cause of Cu, Zn, Cd, and Pb pollution.

Key words: Yudu; tungsten ore; soil; heavy metals; pollution characteristics; ecological risk

土壤是人类赖以生存和发展的物质基础,也是重金属等污染物驻留的重要储存池。目前中国约有 $10 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的土地存在重金属污染问题^[1], 矿山是土壤污染的主要污染源之一^[2-3]。矿区土壤中的重金属主要来自矿山开发利用过程中所产生的废水和固体废弃物^[4], 主要表现为矿山周边土壤中重金属富集^[5-10]。赣南地区是中国钨矿资源的集中产地,素有“世界钨都”之称。赣南地区钨矿床处于南岭东西向构造岩浆带与北东向武夷山对接带复合部位的中东段,赋存有一系列分布广泛、规模巨大的以钨为主的铜、钼、铋、锡、锌等多金属矿床^[11-12]。

矿山的无序开采和选矿过程中形成的废水、废物严重污染矿山周边的生态环境。土壤重金属污染具有隐蔽性、长期性、滞后性和不可逆性^[13-14], 可导致土壤质量下降,影响农作物生长,进而危害人体健康^[15-16]。研究人员通过对地表土壤和谷粒中重金属浓度与癌症患者之间关系的研究发现,土壤中 Pb 与上消化道癌症发生率之间存在显著的相关性,而谷粒中 Hg 浓度与肝癌之间存在显著的相关性,尽管某些区域的土壤重金属含量在限定值范围内,但是长期暴露也会对人体健康产生不可忽视的影响^[17-21]。因此,对矿区及其周边土壤重金属元素的污染特征和生态风险开展调查和评价具有重要的意义^[22-23]。

本文以赣南于都地区某钨矿区及周边土壤为研究对象,通过野外调查与室内分析,运用空间分析和地理信息系统探讨了研究区土壤中 8 种重金属元素(Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb、As、Hg)的污染现状和空间分布特征,并采用多种土壤重金属污染评价方法,科学评价了矿区的土壤环境,全面掌握矿区土壤的污染现状,同时对其进行了潜在生态风险评价,为指导矿区生态恢复与重建提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江西于都南部钨矿资源基地的某钨矿区,矿区为低山区,分布地层主要为第四系冲洪积物和泥盆系、寒武系的砂岩、砾岩。区内气候

属亚热带大陆性季风湿润气候,年平均气温 20°C , 年平均降雨量为 1507.5 mm 。丰田河呈北西—南东向从矿区北侧流过,流向南东,最终汇入濂水,全长约 12 km 。矿山开采活动历史悠久,矿石类型属原生矿,主要矿物为黑钨矿,少量黄铜矿、辉铋矿、闪锌矿等。目前矿山选厂主要以浮选工艺生产黑钨精矿,综合回收铜、铋、钼、锡、锌、银等金属。矿山开采出的废石、尾矿堆积于天然沟谷中,表面基本裸露、疏松,水蚀现象严重。矿山周边主要为林地、荒地;尾矿库下游为河谷平原地带,村庄和人口分布较集中,且分布有旱田、水田,主要种植水稻和蔬菜。

1.2 样品采集与制备

土壤样品的采集充分考虑样品的代表性,布点位置综合考虑地形地貌、土壤类型、土地利用方式等因素;对于尾矿库、废石堆、废水排放点等适当加密采样。样品采用“梅花法”采集 5 个表层土壤($0 \sim 20 \text{ cm}$)样品,各样点距离 $30 \sim 60 \text{ m}$,在中心点用 GPS 定位;然后将 5 个土壤样品充分混合均匀,以四分法取 3 kg 土壤样品装入样品袋。本次共采集土壤样品 26 件,各土壤采样点分布如图 1。

土壤样品在日光下自然风干,挑出落叶、石块,用橡皮锤轻轻敲碎至自然粒级状态后,过 20 目(0.85 mm)尼龙筛,分别取 500 g 装入聚乙烯袋中,一份作为副样留存,一份送分析测试。

1.3 检测方法与质量控制

本次土壤样品在具有相应测试资质的河南省地矿局第一地质矿产勘查院实验室完成。Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb 等土壤中重金属总量利用 ICP-MS(iCAP Q, 美国 ThermoFisher)进行分析,称取 0.1000 g 土壤样品于聚四氟乙烯坩埚中,加 3 mL HNO_3 、 2 mL HCl 、 5 mL HF 、 1 mL HClO_4 , 蒸干后加入新制 1+1 王水 1 mL 复溶、定容、稀释、上机测试。As、Hg 分析,称取土壤样品 0.5000 g ,于玻璃烧杯中加入 20 mL 1+1 王水进行消解,使用双道原子荧光光度计(AFS-3100, 北京海光)进行测定;土壤 pH 值以无 CO_2 的蒸馏水作为浸提液,将 10 g 样品加入浸提液,搅拌 1 min ,静置 30 min 后使用离子计(PYSJ-

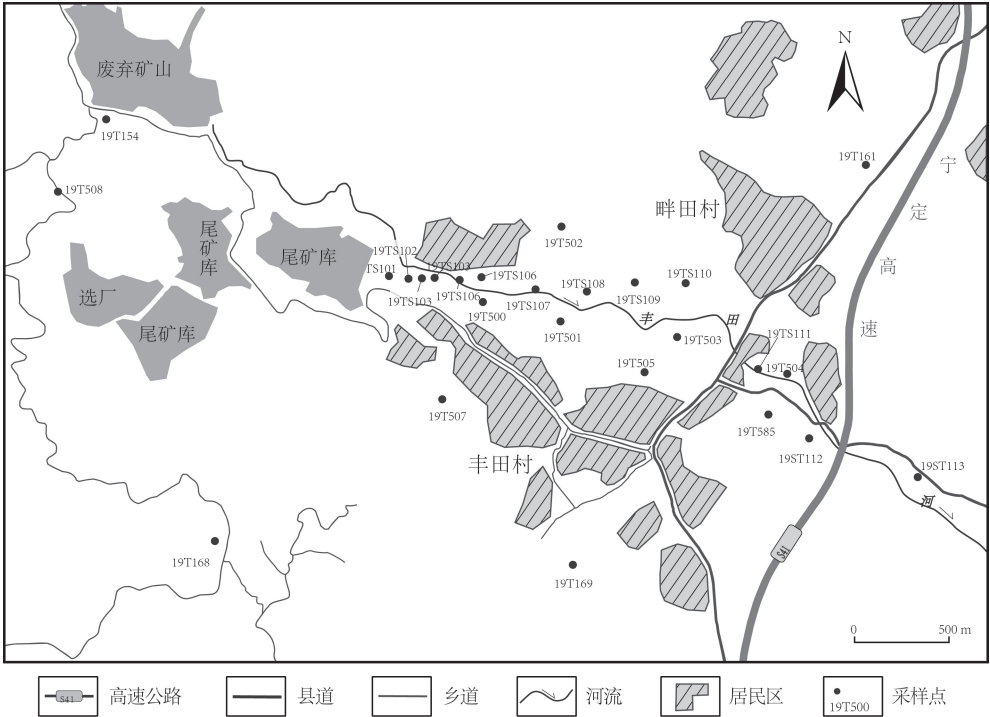


图 1 研究区土壤采样点分布图

Fig. 1 Distribution of soil sampling sites in the study area

216F、上海仪电)进行测定。

分析测试过程通过加标和平行样的方式进行质量控制,8 种重金属元素平行样测定的相对偏差范围控制在 5% 以内;采用国家标准土样(GBW07430)进行回收试验,Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb、As、Hg 的回收率均控制在 95%~105% 之间。

1.4 土壤重金属污染的评价方法

土壤重金属污染评价临界值采用《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)^[24]中较严格的筛选值作为评价标准(表 1)。土壤采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数

法开展评价。

1.4.1 单因子污染指数法

单因子污染指数法计算公式为:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

式中: P_i 为土壤中污染物*i*的单因子污染指数; C_i 为土壤中污染物*i*的实测含量(mg/kg); S_i 为污染物*i*的评价标准(mg/kg)。

单项污染指数评价分为 5 个等级,详见表 2。

1.4.2 内梅罗综合污染指数法

内梅罗综合污染指数法是较常用的综合评价方法,可全面反映土壤中各污染物的整体污染水平,也突出了最严重的污染物给环境造成的危害^[25]。其计算公式如下:

表 2 土壤重金属单因子污染指数评价标准

Table 2 Single-factor pollution index evaluation levels of soil heavy metals

污染等级	安全	警戒限	轻污染	中污染	重污染
单因子指数	$P_i \leq 0.7$	$0.7 < P_i \leq 1.0$	$1.0 < P_i \leq 2.0$	$2.0 < P_i \leq 3.0$	$P_i > 3$

表 1 土壤重金属污染风险筛选值

Table 1 Pollution risk screening values of soil heavy metals mg/kg

风险筛选值	重金属元素							
	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	As	Hg
pH≤5.5	250	60	50	200	0.3	80	30	0.5
5.5<pH≤6.5	250	70	50	200	0.4	100	30	0.5
6.5<pH≤7.5	300	100	100	250	0.6	140	25	0.6
7.5<pH	350	190	100	300	0.8	240	20	1

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

式中: P_N 为某土壤样品的综合污染指数; $P_{\max}$ 为各污染物中污染指数最大值; $\bar{P}_i$ 为各污染物中污染指数的算术平均值。

内梅罗综合污染指数评价分为 5 级, 详见表 3。

1.5 土壤重金属潜在生态风险评价方法

本文采用由瑞典科学家 Hakanson 建立的生态危害指数法^[26] 进行土壤生态风险评价。该方法根据重金属性质及环境行为特点, 对土壤中重金属风险进行综合评价, 不仅考虑了重金属的含量, 而且将重金属的生态效应、环境效应与毒性效应联系在一起, 采取潜在生态危害指数 (RI) 进行分析及评价^[27-28]。其计算公式如下:

$$RI = \sum E_r^i; E_r^i = T_r^i \times C_f^i; C_f^i = C_{\text{实测}}^i / C_n^i \quad (3)$$

式中: RI 为土壤中多种重金属综合潜在生态危害指数; E_r^i 为第 i 种重金属的潜在生态危害系数; T_r^i 为第 i 种重金属的毒性响应系数; C_f^i 为第 i 种重金属的污染参数; $C_{\text{实测}}^i$ 为第 i 种重金属元素的实测含量; C_n^i 为元素对应的评价标准。本文采用 Hakanson 等^[26] 提出的标准化重金属元素的毒性影响系数, 并结合徐争启等^[29] 计算得出的几种重金属元素的毒性影响系数作为评价依据, Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb、As、Hg 毒性系数依次为 20、5、5、1、30、5、10、40。土壤重金属对应评价标准采用当地土壤背景值, 土壤重金属潜在生态风险程度分级参照徐争启等^[29] 的分级方法 (表 4)。

2 结果与讨论

2.1 土壤中重金属含量的分布特征

研究结果表明, 研究区土壤环境受到人为活动影响, 导致重金属污染 (表 5)。研究区土壤 pH 值为 4.38~7.19, 平均 5.87, 除远离矿山点样品 pH 值低于土壤背景值外, 矿区周边及下游土壤 pH 值均高于土壤背景值。研究区土壤重金属含量的平均值

表 3 土壤重金属内梅罗综合污染指数评价标准

Table 3 Nemerow composite pollution index evaluation levels of soil heavy metals

污染等级	安全	警戒限	轻度污染	中度污染	重度污染
综合污染指数	$P_N \leq 0.7$	$0.7 < P_N \leq 1$	$1 < P_N \leq 2$	$2 < P_N \leq 3$	$3 < P_N$

表 4 土壤重金属潜在生态风险程度分级标准

Table 4 Classification levels of potential ecological risk of soil heavy metals

等级	I	II	III	IV	V
E_r^i	$E_r^i < 40$	$40 \leq E_r^i$ <80	$80 \leq E_r^i$ <160	$160 \leq E_r^i$ <320	$320 \leq E_r^i$
RI	$RI < 150$	$150 \leq RI$ <300	$300 \leq RI$ <600	$600 \leq RI$	—
风险程度	轻微	中等	强	很强	极强

均高于土壤背景值, 其中土壤中 Cd 含量的均值为土壤背景值的 61.7 倍, As、Cu 平均含量是背景值的 8.05 倍和 7.97 倍, 表明该区域土壤存在重金属污染现象。土壤中 8 种重金属元素富集系数均大于 1, 其中 Cd 富集倍数是区内背景值的 61 倍, 其余 7 种元素富集倍数介于 1.23~8.51 之间, 表明研究区土壤均受到不同程度的外来重金属污染源影响。研究区土壤中重金属浓度在空间分布上差异显著, 土壤中 8 种重金属元素的变异系数范围为 20%~130%, Cd 变异系数为 130%, 属强变异, 其余 7 种均为中等变异, 说明各重金属元素不同程度地受到人为活动的影响。赵永红等^[30] 研究发现, 赣南某钨矿区土壤中也存在人为污染现象, 分析的 Cr、As、Mn、Pb 元素分别是背景值的 2.26、3.06、1.85、2.59 倍。

2.2 研究区土壤重金属污染评价

2.2.1 单因子污染指数法评价

采用单因子污染指数法对土壤中各种重金属元素的污染状况进行评价。土壤中各重金属单因子污染指数 P (均值) 的大小排序为: Cd (45.1) > As (8.88) > Cu (6.74) > Zn (3.72) > Pb (3.36) > Ni (1.51) > Hg (1.4) > Cr (1.3), 其中 Ni、Hg、Cr 为警戒污染等级, Cd、As、Cu、Zn 和 Pb 为重污染等级。利用 MapGIS 软件通过 Kriging 空间插值方法^[31-32], 采用《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)^[24] 中的筛选值标准, 绘制土壤中各重金属元素单因子指数评价图 (图 2)。可以看出, Pb、Cu、Zn 的单因子污染指数评价多数表现为安全等级和警戒等级, 仅在近矿山尾矿库、废石堆下游河流两侧区域表现为轻度污染等级, 占研究区总面积的 26.06%、3.38%、1.80%; 研究区约 61% 的面积 Cd、As 的单因子污染指数评价表现为轻度污染以上, 其中 As 在矿山尾矿库下游, Cd 在矿山周边及下

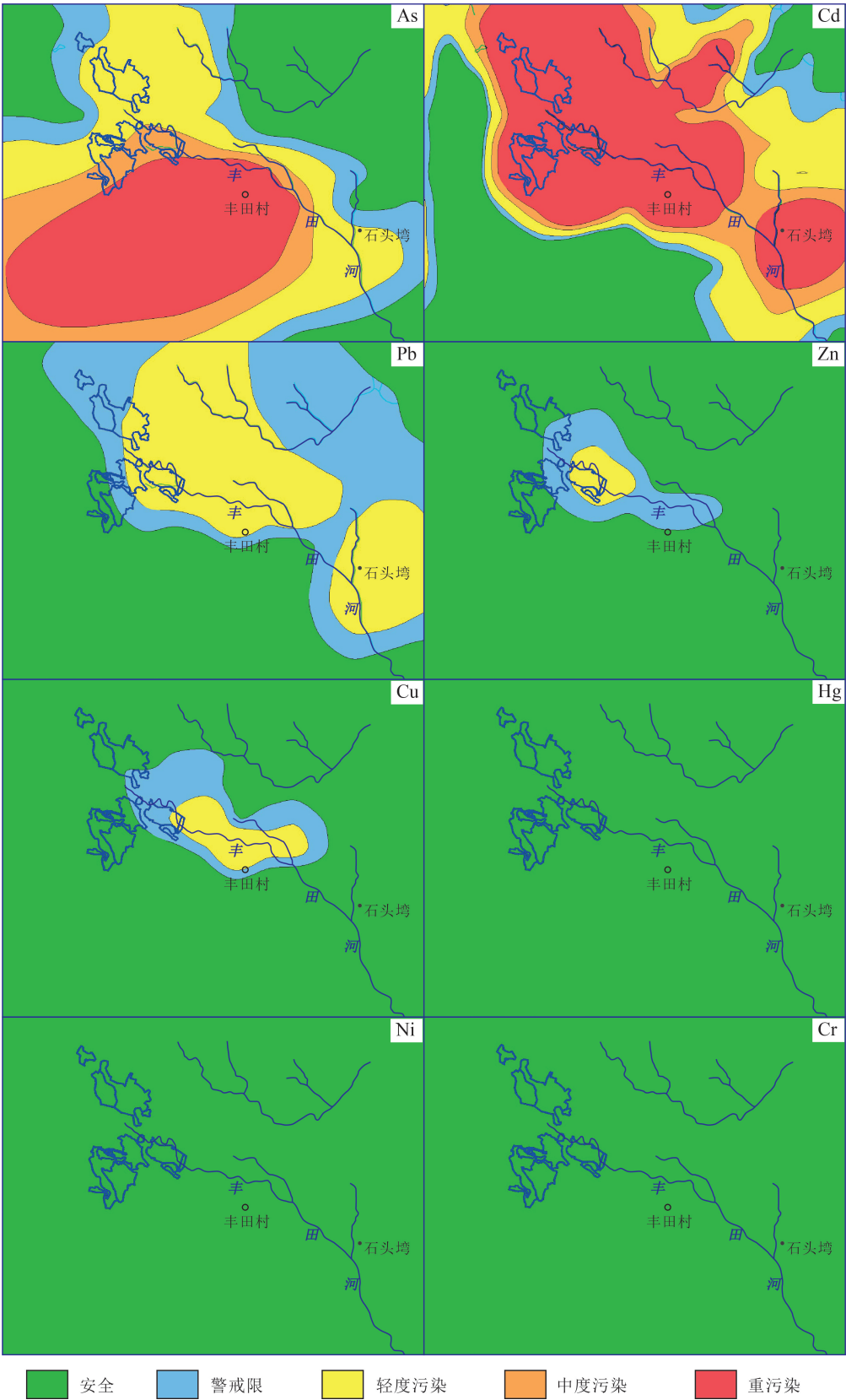


图 2 研究区土壤中重金属单因子指数评价图

Fig. 2 Assessment map of surface soil heavy metals pollution by single factor index method

表 5 研究区土壤重金属含量统计结果

Table 5 Statistical results of soil heavy metals contents

项目	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	As	Hg
最小值	36.35	11.83	13.75	39.66	0.05	23.49	8.71	0.036
最大值	85.50	31.20	456.00	975.00	42.20	352.00	206.28	0.241
平均值	53.61	21.72	152.32	237.41	7.47	117.77	72.05	0.108
标准离差	13.7	5.0	118.1	194.4	9.6	75.7	49.4	0.048
富集系数	1.2	1.5	8.0	4.4	61.7	3.7	8.5	1.4
变异系数	0.3	0.2	0.8	0.8	1.3	0.6	0.7	0.5
土壤背景值	43.7	14.1	19.1	53.7	0.121	32.0	8.47	0.078

注:富集系数、变异系数无量纲;土壤背景值参考《江西省赣州市于都县 1:5 万土壤地球化学调查成果》^①

游区域均表现出较多的重度污染,其中中-重污染面积分别达 35.75%、44.07%;由此可见,Cd、As 为研究区土壤中最主要的污染因子。钨矿山附近及其东南方向,土壤中重金属污染较重,矿山下游河流流向为东南向,与区内重金属元素分布一致,说明研究区水体对重金属元素的迁移具有一定的作用。

2.2.2 内梅罗综合污染指数法评价

采用内梅罗污染指数法对研究区土壤中重金属元素的综合污染程度进行综合评价(图 3)。可以看出,研究区各个采样点土壤综合污染指数(P_N)相差较大,最大值达 75.3,最小值为 0.5,平均值为 13.4,标准离差为 16.3。土壤综合污染指数等级达重污染($P_N > 3$)的样品数占总样品数的 80.8%。利用 MapGIS 软件通过 Kriging 空间插值方法^[31-32],采用《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)中的筛选值标准,绘制土壤中重

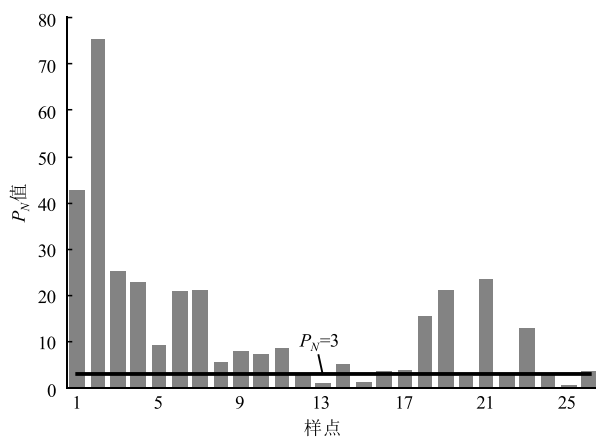


图 3 研究区土壤重金属综合污染

Fig. 3 Comprehensive pollution index of soil heavy metals

金属元素综合污染指数评价图(图 4)。可以看出,研究区钨矿山周边土壤均为重度污染,结合单因子指数评价,Cd 为主要污染贡献因子,As、Cu、Pb、Zn 为次要贡献因子。矿山周边土壤中重金属污染主要是由于矿山开发利用造成土壤中 Cd、As、Pb、Zn 等富集。矿山开发的固体废弃物无序堆放并在降雨的作用下,重金属元素以离子的形式被淋滤出来,造成周边土壤的重金属污染;矿山下游土壤中重金属污染则是矿山选矿废水、固体废弃物淋滤水等进入水体,重金属随水流迁移,造成河流沿岸土壤中形成重金属复合污染。通过野外调查,部分农田以受污染河流作为灌溉水源,亦加剧了农田土壤的重金属污染。

2.3 研究区土壤重金属潜在生态风险评价

研究区土壤中 8 种重金属元素平均潜在生态危害大小排序为: Cd(1851.3) > As(85.1) > Hg(55.4) > Cu(39.9) > Pb(18.4) > Ni(7.7) > Zn(4.4) > Cr(2.5) (表 6)。其中,平均潜在生态危害最高的为 Cd, 73.0% 的土壤样品中 Cd 为极强生态风险, 84.6% 为强风险生态风险; As 处于强生态风险水平, Hg 处于中等生态风险水平,其余重金属元素为轻微生态风险水平。重金属的综合潜在生态风险指数(RI)最高可达 10749.9, 96.2% 的采样点处于中等及以上风险水平, 80.8% 的采样点生态风险水平为强及以上,说明研究区土壤重金属潜在生态风险水平较高。

利用 MapGIS 软件通过 Kriging 空间插值方法,绘制土壤中重金属元素潜在生态危害风险评价图(图 5)。可以看出,研究区总面积的 23.35% 为很强生态风险,轻微生态风险仅占总面积的 19.83%。强生态风险及以上区域主要分布在研究区中北部,均分布于矿山周边及矿山下游河流附近,占研究区总面积的 44.63%。综合以上评价结果,研究区大部分土壤样品的 Cd、As 的污染较为严重, Cu、Pb、Zn 等 3 种重金属元素的污染处于中等水平,也应引起重视,而 Cr、Ni、Hg 的污染程度处于较低水平。王斐等^[2]在江西大余县钨矿区土壤环境分析中,以潜在生态危害指数进行评价,发现 Pb、As 和 Cu 达到或超过中等生态风险的样品点较多,而 Ni 元素均属轻微风险以下,与本文研究结果相近。刘丹等^[33]对赣南某钨矿区土壤中 Pb、Cr、Mn、Zn、Cu、Cd 进行

表 6 研究区土壤重金属潜在生态危害评价结果

Table 6 Evaluation results of soil heavy metals potential ecological risk

项目	E_i^p								RI
	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	As	Hg	
最大值	4.0	11.1	119.4	18.2	10462.8	55.0	243.5	123.6	10749.9
最小值	1.7	4.2	3.6	0.7	13.5	3.7	10.3	18.4	100.9
平均值	2.5	7.7	39.9	4.4	1851.3	18.4	85.1	55.4	2064.7
标准差	0.6	1.7	30.3	3.6	2324.4	11.6	57.2	24.2	2365.4

注: E_i^p 为第 i 种重金属的潜在生态危害系数; RI 为土壤中多种重金属潜在生态、危害指数

表 7 研究区土壤重金属浓度之间相关关系

Table 7 Correlation coefficient of soil heavy metals

元素	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	As	Hg
Cr	1							
Ni	0.577 **	1						
Cu	-0.440 *	0.318	1					
Zn	-0.502 **	0.238	0.769 **	1				
Cd	-0.499 **	0.206	0.666 **	0.973 **	1			
Pb	-0.430 *	0.25	0.905 **	0.627 **	0.547 **	1		
As	0.086	0.127	0.243	0.119	0.114	0.273	1	
Hg	0.042	0.145	0.302	0.143	0.12	0.32	0.536 **	1

注: 数据采用 SPSS19 双变量 Pearson 相关分析, 进行了双边显著性检验, ** 为极显著性差异 ($P<0.01$), * 为显著性差异 ($P<0.05$)

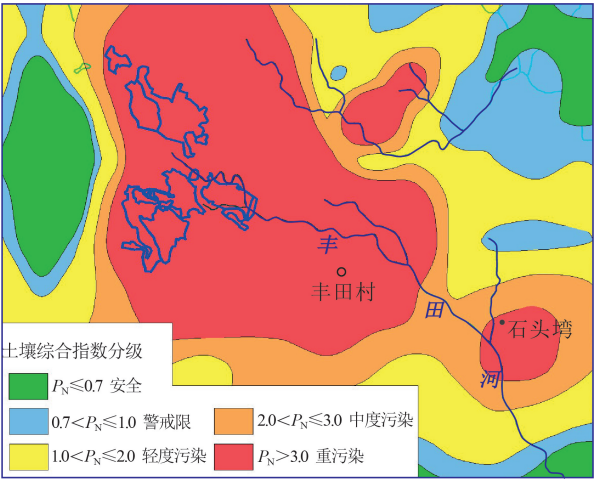


图 4 研究区土壤重金属综合污染评价

Fig. 4 Comprehensive pollution assessment map of soil heavy metals

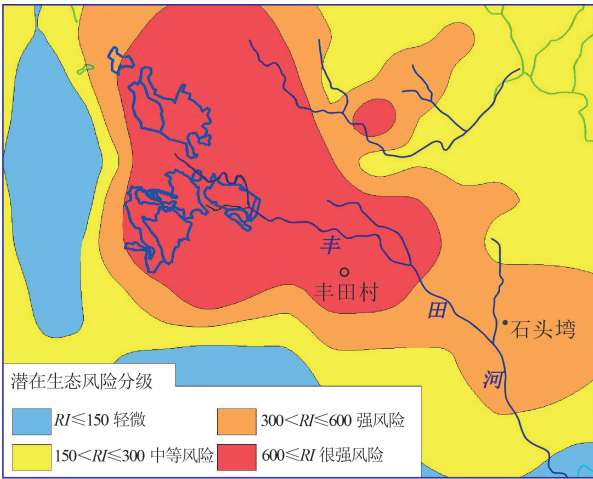


图 5 研究区土壤重金属潜在生态危害风险评价图

Fig. 5 Risk assessment map of potential ecological hazards of heavy metals in soils in the study area

潜在生态风险评价, 也发现 Cd 是土壤重金属潜在生态风险贡献因子。

2.4 研究区土壤重金属污染源识别

同一来源的重金属污染在周边土壤中的累积浓度之间往往存在一定的相关性^[34-35]。采用 SPSS 统计软件对各采样点的差异性、数据的显著性检验和相关性进行了分析。研究区土壤中的 Cu、Zn、Cd、Pb 和 As 存在显著相关性(表 7), Cu、Zn、Cd、Pb、As 等的平均浓度均高出区域背景值浓度, 说明该区域的人类活动对环境产生了一定的影响; Cr 和 Ni 之间呈极显著相关性, 且相关系数达 0.577, 这 2 种元素通常来源于成土过程中母岩风化, 主要为自然源, 受成土母质影响较大, 受人为活动影响较小^[36]。As、Hg 之间存在显著的相关性, 与其他重金

属元素之间没有显著相关性, 说明其主要受自然源的影响。

3 结 论

(1) 研究区存在土壤重金属污染现象。土壤中 Cd、As、Pb、Zn、Cu 为重度污染等级, Ni、Hg、Cr 为警戒污染等级。Cd、As 为主要污染元素, 中-重度污染面积分别占研究区总面积的 44.07% 和 35.75%; 但二者空间分布不同, As 在矿山尾矿库下游, Cd 在矿山周边及下游均表现出重度污染。

(2) 研究区土壤中重金属污染主要与矿山开发利用有关, 矿山选矿废水、固体废弃物淋滤水等进入水体后, 其中的重金属元素随水流迁移, 造成土壤中重金属元素污染; 同时部分农田以污水进行灌

溉,亦加剧了土壤的重金属污染。

(3)研究区土壤重金属污染存在一定的生态风险,应引起充分重视。土壤中各重金属元素潜在生态风险指数排序为: $Cd > As > Hg > Cu > Pb > Ni > Zn > Cr$,其中重金属元素 Cd 的生态危害指数最高,达10463,约占73%的土壤样品中 Cd 为极强生态风险;其次为 As ,为强生态风险水平。研究区约44.6%的面积为强生态风险及以上区域,主要分布在矿山周边及矿山下游河流附近。

参考文献

- [1] 周建军,周桔,冯仁国.我国土壤重金属污染现状及治理战略[J].中国科学院院刊,2014,29(3): 315-320,350,封312.
- [2] 王斐,金姝兰,李季,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.
- [3] 刘瑞平,徐友宁,张江华.青藏高原典型金属矿山河流重金属污染对比[J].地质通报,2018,37(12): 2154-2168.
- [4] 刘敬勇.矿区土壤重金属污染及生态修复[J].中国矿业,2006,15(12): 66-69.
- [5] Demková Lenka, Július Árvay, Lenka Bobulská, et al. Accumulation and environmental risk assessment of heavy metals in soil and plants of four different ecosystems in a former polymetallic ores mining and smelting area (Slovakia)[J]. Journal of Environmental Ence & Health Part A Toxic/hazardous Substances & Environmental Engineering, 2017, 52(5): 479-490.
- [6] Xu D M, Yan B, Chen T, et al. Contaminant characteristics and environmental risk assessment of heavy metals in the paddy soils from lead (Pb) - zinc (Zn) mining areas in Guangdong Province, South China[J]. Environmental Ence & Pollution Research, 2017, 24(31): 24387-24399.
- [7] Qin F X, Wei C F, Zhong S Q, et al. Soil heavy metal(loid)s and risk assessment in vicinity of a coal mining area from southwest Guizhou, China[J]. Journal of Central South University, 2016, 23(9): 2205-2213.
- [8] 王菲,吴泉源,吕建树,等.山东省典型金矿区土壤重金属空间特征分析与环境风险评估[J].环境科学,2016,37(8): 3144-3150.
- [9] 康宏宇,康日峰,张乃明,等.迪庆某铜矿土壤重金属污染潜在生态风险评价[J].环境科学导刊,2016,35(1): 75-81.
- [10] Jowett D. Populations of Agnostics spp. tolerant of heavy metals[J]. Nature, 1958, 182: 816-817.
- [11] 徐繁昌.赣南钨矿类型划分及其成矿流体特征[J].地质与资源,2016,25(4): 339-344.
- [12] 阮瑜瑜,温珍海.赣南钨矿区域地质特征及找矿标志[J].江西建材,2015,(23): 219-219.
- [13] 赵庆龄,张乃弟,路文如.土壤重金属污染研究回顾与展望Ⅱ——基于三大学科的研究热点与前沿分析[J].环境科学与技术,2010,33(7): 102-106.
- [14] 龙新宪,杨肖娥,倪吾钟.重金属污染土壤修复技术研究的现状与展望[J].应用生态学报,2002,13(6): 757-762.
- [15] Surkan P, Zhang A, Trachtenberg F, et al. Neuropsychological Function in Children With Blood Lead Levels [J]. Epidemiology, 2007, 18(Suppl): S55-S56.
- [16] Aelion C M, Davis H T, Lawson A B, et al. Associations of estimated residential soil arsenic and lead concentrations and community-level environmental measures with mother-child health conditions in South Carolina[J]. Health & Place, 2012, 18(4): 774-781.
- [17] Zhao Q H, Wang Y, Cao Y, et al. Potential health risks of heavy metals in cultivated topsoil and grain, including correlations with human primary liver, lung and gastric cancer, in Anhui province, Eastern China[J]. Science of the Total Environment, 2014, 470/471 (FEB.1): 340-347.
- [18] Cho J, Hyun S, Han J H, et al. Historical trend in heavy metal pollution in core sediments from the Masan Bay, Korea[J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, 95(1): 427-432.
- [19] Salem Z B, Capelli N, Laffray X, et al. Seasonal variation of heavy metals in water, sediment and roach tissues in a landfill draining system pond (Etuefont, France)[J]. Ecological Engineering, 2014, 69: 25-37.
- [20] 张菊,陈明文,鲁长娟,等.东平湖表层沉积物重金属形态分布特征及环境风险评价[J].生态环境学报,2017,29(5): 850-856.
- [21] 代杰瑞,庞绪贵,宋建华,等.山东淄博城市和近郊土壤元素地球化学特征及生态风险研究[J].中国地质,2018,45(3): 617-627.
- [22] 顾继光,周启星,王新.土壤重金属污染的治理途径及其研究进展[J].应用基础与工程科学学报,2003,11(2): 31-39.
- [23] 高健翁,龚晶晶,杨剑洲,等.海南岛琼中黎母山—湾岭地区土壤重金属元素分布特征及生态风险评价[J].地质通报,2021,40(5): 807-816.
- [24] GB 15618—2018.土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准[S].北京:中国环境出版集团,2019.
- [25] 高军侠,党宏斌,郑敏,等.郑州市郊农田土壤重金属污染评价[J].中国农学通报,2013,29(21): 116-120.
- [26] Lars Hakanson. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [27] 范拴喜,甘卓亭,李美娟,等.土壤重金属污染评价方法进展[J].中国农学通报,2010,26(17): 310-315.
- [28] 宋恒飞,吴克宁,刘霏珈.土壤重金属污染评价方法研究进展[J].江苏农业科学,2017,45(15): 11-14.
- [29] 徐争启,倪师军,庾先国,等.潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J].环境科学与技术,2008,31(2): 112-115.
- [30] 赵永红,张静,周丹,等.赣南某钨矿区土壤重金属污染状况研究[J].中国环境科学,2015,35(8): 2477-2484.
- [31] 张铁婵,常庆瑞,刘京.土壤养分元素空间分布不同插值方法研究——以榆林市榆阳区为例[J].干旱地区农业研究,2010,28(2): 177-182.
- [32] 吕建树,张祖陆,刘洋,等.日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价[J].地理学报,2012,67(7): 971-984.
- [33] 刘丹,赵永红,周丹,等.赣南某钨矿区土壤重金属污染生态风险评价[J].环境化学,2017,36(7): 1557-1567.
- [34] 郭鹏然,雷永乾,周巧丽,等.电镀厂周边环境重金属分布特征及人体健康暴露风险评价[J].环境科学,2015,36(9): 3447-3456.
- [35] 余璇,宋柳霆,滕彦国.湖南省某铅锌矿土壤重金属污染分析与风险评价[J].华中农业大学学报,2016,35(5): 27-32.
- [36] 赵曦.大型垃圾焚烧厂周边土壤重金属含量水平、空间分布、来源及潜在生态风险评价[J].生态环境学报,2015,(6): 1013-1021.
- ①周墨,唐志敏,张明,等.江西省赣州市于都县1:5万土地质量地球化学调查成果.中国地质调查局南京地质调查中心,2018.