

Doi:10.3969/j.issn.1007-3701.2020.04.006

粤北一六矿周边土壤重金属污染特征及其生态风险

马明杰, 游远航*, 陈 强, 杨 棣

MA Ming-Jie, YOU Yuan-Hang, CHEN Qiang, YANG Di

(广东省地质局第三地质大队, 广东 韶关 512000)

(The Third Geological Brigade of Guangdong Geological Bureau, Shaoguan 512000, Guangdong, China)

摘要:为阐明粤北地区一六矿周边土壤重金属含量、污染程度和生态风险,对一六矿周边土壤进行实地采样,并对土壤中的Cd、As、Pb、Zn、Cu、Hg、Cr、Ni等元素进行分析。采用地累积指数法和潜在生态风险法,评价土壤中的重金属污染程度和风险。一六矿周边土壤受到重金属不同程度的污染,且污染差异性较大,重金属元素Cd和As污染最为严重;矿区周边土壤重金属综合污染程度为严重;矿区周边土壤多金属元素潜在生态风险高,应进行生态修复。

关键词:土壤;重金属污染;生态风险评价;一六矿;粤北

中图分类号:P596

文献标识码:A

文章编号:1007-3701(2020)04-0368-10

Ma M J, You Y H, Chen Q and Yang D. Pollution Characteristics and Ecological Risk of Heavy Metals in Soil Around the Yiliu Mining Area in Northern Guangdong Province. *South China Geology*, 2020, 36(4): 368-377.

Abstract: The soils surrounding the Yiliu mining area in northern Guangdong were analyzed their Cd, As, Pb, Zn, Cu, Hg, Cr and Ni abundance to determine the pollution degree and ecological risk of these heavy metals around the Yiliu deposit. The geo-accumulation index and potential ecological risk method were used to evaluate the degree and risk of heavy metal pollution in soil. The results show that the soils surrounding the Yiliu mining area have been polluted by heavy metals with different degrees. The pollution of heavy metal elements such as Cd and As is the most serious; the comprehensive pollution degree of heavy metals is serious; the potential ecological risk of polymetallic elements is high in the soils surrounding around the mining area, so ecological restoration should be carried out.

Key words: soil; heavy metal pollution; ecological risk assessment; the Yiliu mining area; northern Guangdong Province

随着社会经济的快速发展,人类对矿产资源的开发速度日趋加快,矿山的开采和选冶会造成矿区及周边区域水体与土壤重金属的积累,积累在土壤中的重金属最终通过食物链或地下水迁移进入植物或人体,进而影响人类健康^[1]。由于不同地区的地质背景、污染种类和土壤性质不同,矿区周边的重金属污染具有不同的特征。叶永钦等^[2]对粤北凡口铅锌矿区及周边土壤的研究表明,凡口铅锌矿区土

收稿日期:2020-10-14;修回日期:2020-12-24;责任编辑:董好刚

基金项目:国家重点研发计划项目“运积型农田重金属污染识别与形成机制(2017YFD0800304)”资助

第一作者:马明杰(1988—),男,工程师,地球化学专业,主要从事矿产和地球化学勘查工作,E-mail:443225300@qq.com

通信作者:游远航(1972—),男,教授级高级工程师,地球化学专业,主要从事地球化学研究,E-mail:357563192@qq.com

壤受到较严重的重金属污染,未受矿山开采影响的地区的土壤因具有较高的地质背景值,也受到不同程度的重金属污染;孙德尧等^[3]对冀北山区某金属矿区周边耕地的研究表明,土壤重金属存在一定的综合潜在生态风险,总体处于中等和轻微水平,其 Cd 和 Hg 是潜在生态风险的主要贡献因子;吴劲楠等^[4]对某铅锌矿区周边农田的研究发现,其土壤综合污染水平为重度,综合生态风险中部高,两边低,Cd 的贡献率最大。

粤北一六矿区发现于清朝末年,1910 年首次为英国人开采含银方铅矿,之后有多家公司进行了钨矿、铅锌矿和砷矿的开采。经多年的开采、选矿活动,造成矿山地形地貌景观严重破坏,产生大量的矿渣、废石、废土等固体废弃物,并直接随意排(堆)在水沟、山坡中,均未采取安全环保措施,导致其中所含重金属随降雨进入周边农田及河流,对周边区域土壤、地表水、地下水及周边生态环境构成严重威胁。前人对一六矿做过较多研究,大都从构造、蚀变、导矿控矿以及矿化模式和成矿规律等方面进行研究^[5-8]。另外,前人对一六矿区也进行了矿山地质环境调查和矿区风险管控设计,主要调查了土地资源的占用与破坏,地形地貌的破坏以及固废和废水的分布及其对地质环境的影响等,仅对极小部分地

块进行过取样分析和环境评价,反映部分探矿权范围内存在 Cd 和 As 的严重污染,但尚未对整个一六矿区从土壤重金属污染特征和生态风险方向进行深入研究。本文以一六矿区周边土壤为研究对象,分析矿区周边土壤重金属的空间分布规律;采用富集因子法和潜在生态风险指数,对一六矿区周边土壤中重金属的污染特征及生态风险进行分析与评价,以期为该区域山水林田湖草生态环境保护修复提供科学依据。

1 研究区概况

一六矿区位于广东省韶关市,中心地理坐标:东经 113°25'20",北纬 24°50'50"。矿区位于南岭山脉中段南麓,属丘陵地貌,海拔标高 75~300 m 之间,属中亚热带湿润季风气候,四季明显,昼夜温差较大;年平均气温 20.3℃,年平均湿度 76%,年平均降雨量 1540~1674 mm。研究区内主要河流为重阳水,属武江支流,河水由西南流向东北;土地利用现状主要为水田、旱地、采矿用地、林地、坑塘等,具体位置见图 1。

研究区内出露的地层主要为晚泥盆世天子岭组(D_{3t})白云质灰岩、生物碎屑灰岩、鲕状灰岩及瘤

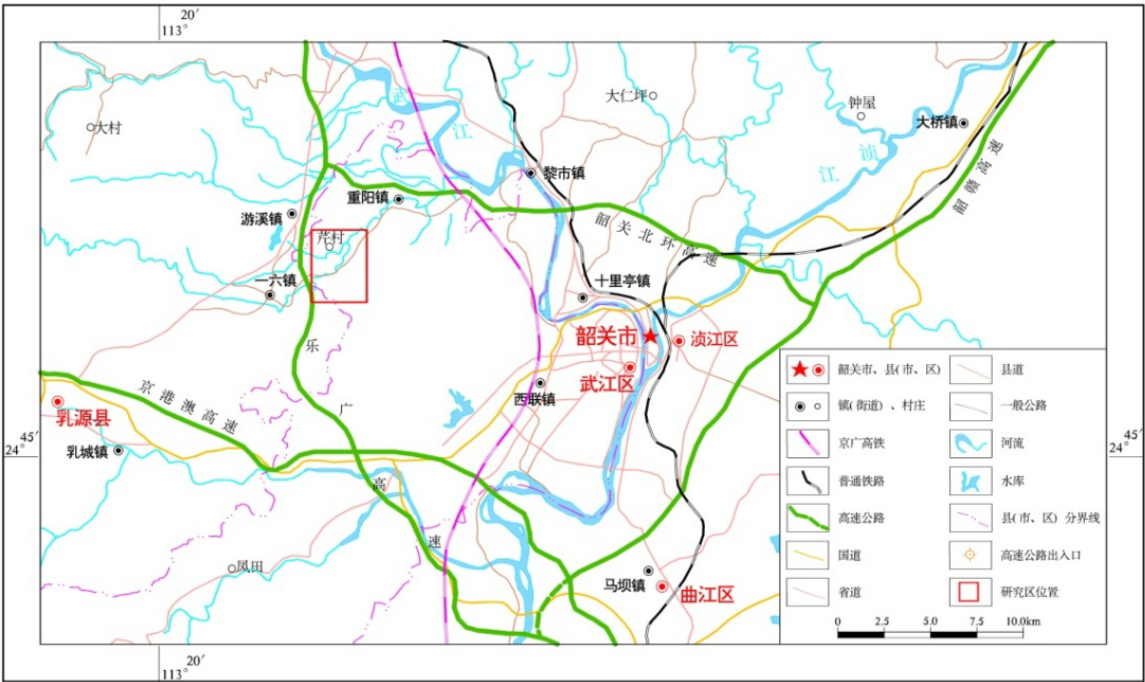


图1 研究区交通位置图

Fig. 1 Traffic and location map of the study area

状灰岩,帽子峰组(D_3C_1m)钙泥质粉砂岩、粉砂质泥岩及泥质页岩,早石炭世长垌组(C_1cl)生物碎屑泥晶灰岩及第四系(Q)松散堆积物。岩浆岩主要发育于研究区的东部和南部,为燕山期花岗岩,岩性为白云母花岗岩、斑状黑云母花岗岩和花岗伟晶岩等。

一六矿区为铅锌钨砷多金属矿,主要矿种有钨矿、铅锌矿、砷矿等;矿体受大理岩层面构造控制,呈脉状产出,矿石的主要成分有透辉石、石榴石、符山石、方解石、白云石、石英、绿泥石、毒砂、黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、白钨矿。围岩蚀变种类较多,主要为重结晶与褪色化、矽卡岩化、含锰白云岩化,其次有绿泥石化、黄铁矿化、角闪化。矿区开采方式主要为地下开采,但废石废渣大都堆积地表。因矿山靠近重阳水,矿权到期后采取了政策性关闭并全面停产,目前该矿区已关闭。

2 样品采集和测试

根据前人资料和现场调研情况,在研究区进行实地取样,样点布设在三条近似垂直矿体走向和地层走向的剖面线上,其中两条剖面线穿越一六矿区,一条位于矿区下游,另外在矿区下游农田适当加密样点。共采集样品 24 件,采集深度 0–20 cm,主要分布在矿山周边的农田、荒地、林地和矿区,其中表层土壤样品 22 件,渣土样品 2 件。样点主要采样点位分布情况见图 2。

研究区土壤样品由广东省地质实验测试中心分析测试。其中 pH 测定采用玻璃电极法,Cd、Ni、Pb 的测定采用电感耦合等离子体质谱法,As、Hg 的测定采用原子荧光法,Cr、Cu、Zn 的测定采用电感耦合等离子体原子发射光谱法。在分析过程中通过插入国家标准样、实验室平行样进行检测质量监

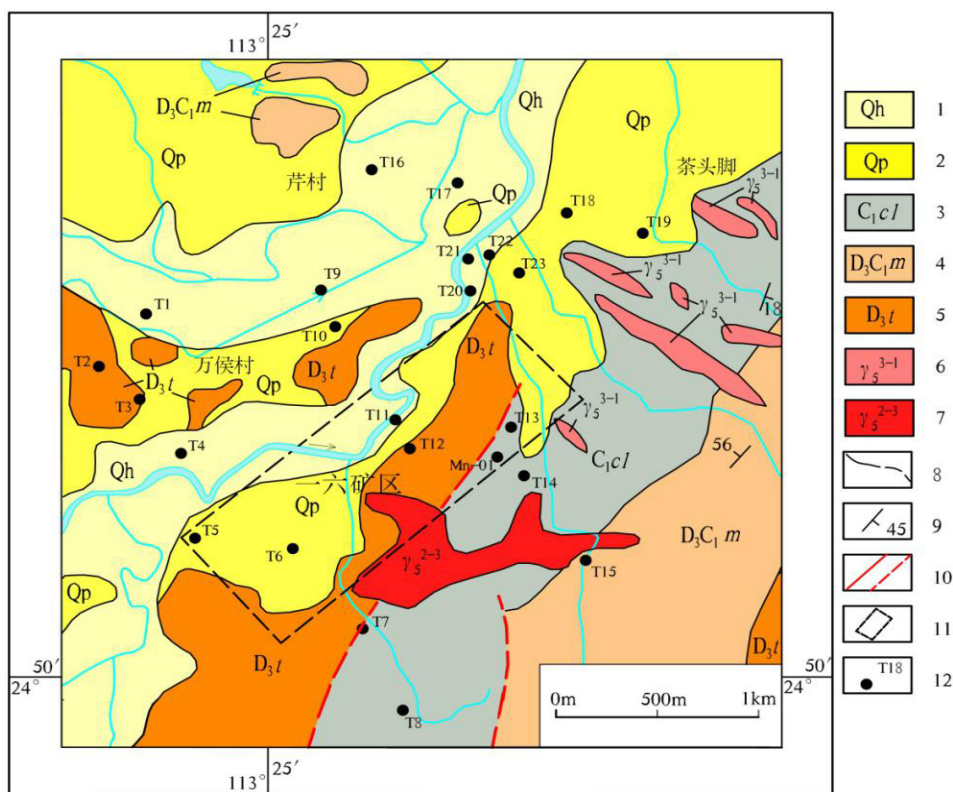


图2 研究区采样点位图

Fig. 2 Sampling locations in the study area

1-第四纪全新统;2-第四纪更新统;3-早石炭世长垌组;4-帽子峰组;5-晚泥盆世天子岭组;6-燕山晚期第一阶段:中细粒白云母花岗岩;7-燕山早期第三阶段:中细粒斑状黑云母花岗岩;8-实、推测地质界线;9-岩层产状;10-实、推测性质不明断裂;11-一六矿区范围;12-采样点位置及编号

控。其中标准样为 GSS-24,实验测试值见表 1,其准确度和分析精度均满足相关规定。

表1 GSS-24标准样测试结果表								
Table 1 Test results of GSS-24 standard sample								
元素	Cd	Cr	Ni	Pb	Cu	Zn	As	Hg
测试值	0.106	61	23	41	28	82	15.5	0.072

3 土壤重金属污染评价方法

采用地累积指数法和潜在生态危害指数法,进行了土壤重金属污染程序和风险评价。

3.1 地累积指数评价法。

地累积指数法是德国科学家 Muller 在 1969 年提出的,是一种研究土壤、沉积物中重金属污染程度的定量指标^[9]。其计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2[C_i / (1.5B_i)]$$

式中, I_{geo} 为地累积指数, C_i 为重金属 i 在土壤中的实测含量 (mg/kg), B_i 为重金属 i 在土壤中的背景值(mg/kg)。地累积指数重金属污染等级划分见表 2。

表2 地累积指数分级		
Table 2 Grading of the geo-accumulation index		
地累积指数 I_{geo}	分级	污染程度
$I_{geo} \leq 0$	0	无污染
$0 < I_{geo} \leq 1$	1	轻度污染
$1 < I_{geo} \leq 2$	2	中度污染
$2 < I_{geo} \leq 3$	3	中强污染
$3 < I_{geo} \leq 4$	4	强污染
$4 < I_{geo} \leq 5$	5	极强污染
$I_{geo} > 5$	6	极严重污染

3.2 潜在生态危害指数法

瑞典科学家 Hakanson 提出的生态危害指数法是目前最为流行的一种对土壤或沉积物中重金属污染进行评价的方法^[10]。该法综合了重金属的生态效应、环境效应和毒理学,不仅反映了某一特定环境中各种污染物对环境的影响,也反映了多种污染物的综合效应,并且用定量的方法划分出了潜在生态风险的程度。其计算公式为:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \cdot C_f^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \cdot (C_p^i / C_n^i)$$

式中,RI 为土壤中 n 种重金属元素的综合潜在生态危害指数; E_i^i 为第 i 种元素的潜在生态危害系数; T_r^i 为第 i 种元素的毒性响应系数,本文运用徐争启等^[11]计算的毒性响应系数值: $Hg=40, Cd=30, As=10, Pb=Cu=Ni=5, Cr=2, Zn=1$; C_f^i 为第 i 种元素的污染参数, C_p^i 为表层土壤中第 i 种重金属元素的实测含量, C_n^i 为第 i 种重金属元素的背景值。重金属潜在生态风险程度划分如表 3 所示。

表3 重金属潜在生态风险程度划分			
Table 3 Grading of potential ecological risk degree of heavy metals			
E_i^i	单一重金属潜在生态风险程度	RI	多金属潜在生态风险程度
$E_i^i < 40$	轻度	$RI < 150$	低
$40 \leq E_i^i < 80$	中度	$150 \leq RI < 300$	中
$80 \leq E_i^i < 160$	强	$300 \leq RI < 600$	较高
$160 \leq E_i^i < 320$	很强		
$E_i^i \geq 320$	超强	$RI \geq 600$	高

4 结果与分析

4.1 土壤重金属的含量及分布特征

研究区的 22 件表层土壤样品中,pH 值变化范围为 4.20-6.59,中位数值为 5.49。土壤重金属元素含量统计见表 4。以《中国土壤元素背景值》中广东省 A 层土壤重金属元素算数平均值为土壤背景值^[12-13],As、Cd、Pb 和 Zn 的平均值分别是广东省土壤背景值的 70.9、43.1、13.1 和 7.8 倍,重金属有不同程度的富集。变异系数指标准偏差和平均值的比值,土壤中重金属的变异系数大小反映出样本空间变异程度,变异系数 (C_v) $<10\%$,表示弱变异; $10\% \leq C_v \leq 100\%$,表示中等变异; $C_v > 100\%$ 表示强变异^[14];由变异系数可知,元素变异程度之间存在较大差异,其值为 $Cd > Zn > Pb > As > Cu > Ni > Hg > Cr$,其中 Cd、Pb、As、Zn 变异系数超过 100%,属于强变异;Cu、Cr、Hg 和 Ni 变异系数为 99%、24%、38%和 39%,属

于中等变异程度。As 含量平均值为 630.5 mg/kg, 最大值 2172.3 mg/kg, 为样点 T5, 位于一六矿区农田内, 受一定程度的人为影响; Cd、Pb、Zn 含量平均值分别为 2.411 mg/kg、473 mg/kg 和 371 mg/kg, 最大值分别为 19.641 mg/kg、1956 mg/kg 和 2782 mg/kg, 全部为样点 T7, 位于晚泥盆世天子岭组 (D_3t) 和早石炭世长垌组 (C_1cl) 交界处, 基岩的矿化蚀变明显。从测试结果来看, 重阳水南北两侧的土壤重金属元素含量差异很大, 采矿区在重阳水南侧, 矿区及周边土壤重金属元素含量对应较高, 而北侧大多为第四系冲洪积物, 且受矿山开采影响较小, 土壤重金属元素含量相应较低。

两件渣土样品的重金属元素含量见表 5, 其中 T12 采于矿山生活区, 矿渣含量较少; Mn-01 采于废矿堆积区, 矿渣肉眼可见。Mn-01 样品 As、Cd、Pb、Zn、Cu 含量明显高于表层土壤样。

4.2 土壤重金属污染评价

针对研究区 22 件土壤样品, 依据《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准 (试行)》(GB 15618-2018)^[15], 以农用地土壤环境风险筛选值为标准, 一六矿周边土壤主要存在 As、Cd、Pb、Cu 和 Zn 超标, 超标率分别为 95.5%、86.4%、77.3%、54.6%、50.0%, 其中, As、Cd 和 Pb 分别有 72.7%、40.9% 和 27.3% 超出风险管制值。土壤中 Hg、Cr 和

Ni 均未超过农用地土壤环境质量标准。为了解研究区污染特征, 采用土壤重金属的地累积分析进行土壤重金属污染评价。以《中国土壤元素背景值》中广东省 A 层土壤重金属元素算术平均值为土壤背景值^[12]计算研究区主要污染元素的地累积指数及其污染情况, Cr 最大污染程度为轻度污染, Ni、Hg 最大污染程度为中度污染, 其他元素都达到了强污染, 分布结果见图 3。从计算结果来看, 重金属 As、Cd、Pb 和 Zn 的 I_{geo} 最大值达极强污染水平; Cu 的 I_{geo} 最大值属于强污染; Cd 和 As 极强污染和极严重污染地段主要分布在一六矿区内、一六矿区下游和一六矿区南侧, Pb 极强污染和极严重污染地段主要分布在一六矿区内和一六矿区南侧, Zn 和 Cu 主要污染地段为一六矿区南侧; 一六矿区内和一六矿区下游, 污染点大部分位于第四系的农田和荒地中, 张伟等^[16]对韶关第四系松散沉积物母质土壤的研究表明, As 为其强富集元素, 且主要分布在一六镇东北部河流冲积相, 这表明矿区内和下游污染可能以自然背景为主, 受一定程度的人为活动影响; 一六矿区南侧并未受人为采矿影响, 主要污染点为样点 T7 和 T8, 样点 T7 为荒地, 处于天子岭组 (D_3t) 和长垌组 (C_1cl) 交界处, 样点 T8 为林地, 处于长垌组 (C_1cl), 两样点周边基岩皆为变质灰岩, 可能为地质背景值较高所致; 对于 As、Cd、Pb、Zn 和 Cu 而言,

表4 22件表层土壤重金属元素含量统计表

Table 4 Statistical analysis of heavy metals content of 22 surface soil samples

元素 项目	Cd (mg/kg)	As (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Hg (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Ni (mg/kg)
最大值	19.641	2172.3	1956	2782	378	0.344	107	50
最小值	0.122	38.1	31	85	21	0.060	47	12
平均值	2.411	630.5	473	371	88	0.206	78	27
标准偏差	4.19	655.42	589.65	568.22	87.10	0.08	18.55	10.68
变异系数 (%)	174	104	125	153	99	38	24	39
背景值	0.056	8.9	36.0	47.3	17.0	0.078	50.5	14.4
平均值/背景值	43.1	70.9	13.1	7.8	5.2	2.6	1.5	1.9

表5 渣土重金属元素含量表

Table 5 Heavy metals content of slag soil samples

元素 样品号	Cd (mg/kg)	As (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Hg (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Ni (mg/kg)
T12	16.659	2145.6	5694	1780	224	0.245	63	24
Mn-01	56.523	12228.3	20759	6152	995	0.405	65	45

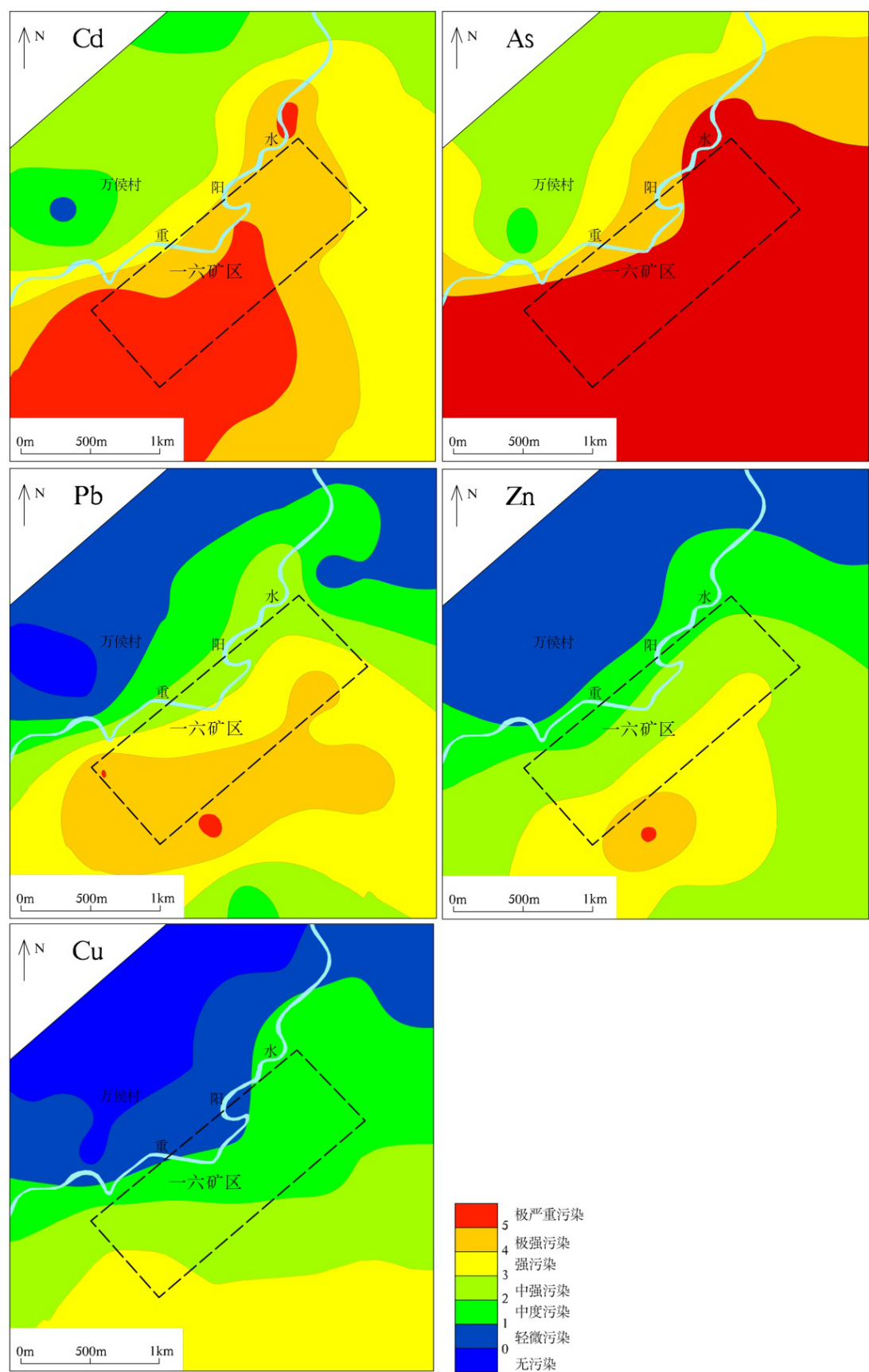


图3 一六矿区重金属地累积指数等值线图

Fig. 3 Contour map of heavy metal geo-accumulation index in the Yiliu mining area

重阳水南侧表层土壤样的 I_{geo} 明显高于重阳水北侧,这表明铅锌矿、砷矿的成矿作用形成的自然背景和人为开采对周边土壤重金属元素含量有较大影响。

4.3 土壤重金属潜在生态风险评价

为进一步评价研究区土壤重金属的生态风险,以广东省土壤元素背景值^[12]为参照,应用 Hakanson^[10]提出的潜在生态危害指数法,计算了一六矿周边 22 件土壤样单项污染潜在生态危害系数特征值和潜在生态危害指数。如表 6 所示,一六矿周边土壤重金属 Cd 和 As 的单项污染潜在生态危害系数特征值最大值分别为 10522 和 2441,属于超强风险;土壤重金属 Pb 和 Hg 的单项污染潜在生态危害系

数特征值最大值分别为 272 和 177,属于很强风险;土壤重金属 Cu 的单项污染潜在生态危害系数特征值最大值为 111,属于强风险;一六矿周边土壤重金属 Zn 的单项污染潜在生态危害系数特征值最大值为 59,属于中度危险;土壤重金属 Cr 和 Ni 的单项污染潜在生态危害系数特征值最大值分别为 4 和 17,属于轻度风险;其中 Cd、As 的潜在生态风险指数远远大于其他重金属元素,这一方面与 Cd 的毒性响应系数较大有关,另一方面和 Cd、As 的含量较高有关。从表 6 可以看出,在土壤样品中,Cd、As 分别有 95.45%、86.36%的采样点存在强、很强和超强的环境风险,不存在轻微环境风险样点。由多元素综合潜在生态风险指数(RI)来看,重阳水

表6 一六矿区土壤重金属潜在生态风险指数

Table 6 Potential ecological risk indexes of soil heavy metals in the Yiliu mining area

样品号	Cd	As	Pb	Zn	Cu	Hg	Cr	Ni	RI
T1	314	71	14	2	6	153	2	4	567
T2	143	181	6	2	7	130	3	9	481
T3	65	74	4	2	10	106	4	6	271
T4	203	43	9	2	6	57	2	6	328
T9	273	134	17	2	7	69	3	6	511
T10	189	231	17	2	8	133	3	5	587
T16	159	98	8	2	7	108	3	6	389
T17	305	114	15	2	6	31	2	4	480
T5	3994	2441	249	9	50	102	3	11	6859
T6	1669	1790	153	8	51	152	3	13	3839
T7	10522	2195	272	59	61	95	3	16	13223
T8	815	1261	23	10	111	51	4	17	2293
T11	1499	408	53	8	14	177	3	13	2173
T13	1022	785	174	15	30	111	4	10	2151
T14	620	657	103	12	25	126	4	11	1558
T15	612	1860	156	10	55	169	4	11	2877
T18	480	377	25	3	17	113	3	7	1025
T19	351	294	9	3	12	113	3	7	790
T20	1661	982	49	5	25	44	3	12	2781
T21	1693	555	53	6	19	131	2	12	2472
T22	1334	570	28	4	25	78	2	9	2051
T23	493	464	10	4	21	73	4	12	1080
轻度风险占比(%)	0.0	0.0	59.09	95.45	77.27	4.55	100	100	0.0
中度风险占比(%)	4.55	13.64	13.64	4.55	18.18	27.27	0.0	0.0	4.55
强风险占比(%)	0.00	4.55	0.00	0.0	0.0	4.55	0.0	0.0	31.82
很强风险占比(%)	31.82	22.73	27.27	0.0	4.55	63.64	0.0	0.0	63.64
超强风险占比(%)	63.64	59.09	0.0	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	

北侧的最小值为 271,最大值为 587,属于中度-较高风险;重阳水南侧最小值和最大值分别为 790 和 13223,都大于 600,所有样点都是强风险。该地区重阳水南侧土壤生态风险严重。

4.4 重金属相关性分析

土壤重金属来源具有多源性特征,主要包括成土母质和人为来源^[17-18]。元素间相关性显著和极显著,说明元素间可能来源途径相似或是复合污染^[19-20]。为了解矿区周边土壤重金属间是否具有共同行为、来源等特征^[21],运用 SPSS 软件,对土壤中各重金属总量进行相关性分析。由表 7 可知,研究区土

壤重金属之间存在不同程度的相关性,Cd 和 Zn 之间相关系数为 0.934,Pb 和 As 之间相关系数为 0.885,Ni 和 Cu 之间相关系数为 0.801,达到显著相关水平,可见研究区 Cd 和 Zn、Pb 和 As、Ni 和 Cu 之间可能存在一定的伴生关系,属于同源污染物。其中,Cd 和 Zn 的相关系数极高,涂光帜等^[22]利用铅锌矿数据计算出 Cd 与 Zn 的相关系数为 0.95,张伟等^[23]对广东典型铅锌多金属矿床镉的分布特征进行研究表明 Cd 与 Zn 具有极其相似的成矿作用地球化学行为,与本研究区的结果相同。

表7 研究区土壤中重金属含量的相关系数
Table 7 Correlation coefficients of soil heavy metal contents in the study area

重金属	Cd	As	Pb	Zn	Cu	Hg	Cr	Ni
Cd	1	0.683 **	0.758 **	0.934 **	0.426 *	-0.025	0.045	0.564 **
As		1	0.885 **	0.619 **	0.764 **	0.124	0.371	0.705 **
Pb			1	0.739 **	0.518 *	0.226	0.308	0.531 *
Zn				1	0.479 *	0.027	0.26	0.588 **
Cu					1	-0.087	0.544 **	0.801 **
Hg						1	0.226	0.032
Cr							1	0.554 **
Ni								1

** 表示在 $\alpha=0.01$ 水平上显著相关,* 表示在 $\alpha=0.05$ 水平上显著相关。

4.5 重金属主成分分析

通过前述相关性分析,发现大部分重金属元素之间具有显著的相关性,且 Bartlett 球形度检验相伴概率为 0.00,小于显著水平 0.05,KMO 检验统计值为 0.569,表明本研究中数据适合于做主成分分析。研究区土壤主成分分析结果见表 8,根据特征值大于 1 的原则,筛选出 3 个主成分,共解释了 86.97%的原有信息。

由表 9 可知,第一主成分贡献率为 56.9%,在 As、Pb、Zn、Ni、Cd、Cu 的含量上载荷较高,主要反映了 As、Pb、Zn、Ni、Cd、Cu 的富集信息。这六种元素的平均值均高于广东省土壤背景值(表 4),其中 As、Cd 和 Pb 的平均值分别是背景值的 70.9、43.1 和 13.1 倍,部分高值点处于未受人为影响的林地,且 As 的荷载因子达到了 0.913,吴剑^[24]的研究表明研究区分布有中温热液型砷-多金属矿床,Cu、Pb、

Zn、As 伴生,分析判断第一主成分代表自然来源的中温热液型地质成矿作用。

第二主成分的贡献率为 16.3%,Cr、Hg、Cu 和 Ni 有较高载荷,这四种元素变异程度未达到强变异程度,总体上受人为活动影响较小,张超兰等^[25]对广西某铅锌矿的研究发现,Cu、Cr 和 Ni 主要来源于成土母质,故第二主成分代表了未受成矿作用影响的自然来源。

第三主成分的贡献率为 13.7%,Hg 有较高载荷,可能代表自然来源的低温热液型辰砂矿化^[23]。

图 4 中重金属距离反映了元素含量间的相关性^[25],Pb、Zn 和 Cd 距离较近,Cu、Cr 和 Ni 距离较近,As 离这两组距离相近,Hg 离其他元素较远。这表明,Pb、Zn 和 Cd 之间有一定的同源性,Cu、Cr 和 Ni 之间可能有一定的同源性,As 可能与这两组元素都有一定关系。

表8 研究区域土壤重金属含量的主成分分析

Table 8 Principal components of heavy metal concentration in soils of the study area

主成分	初始特征值			提取特征值		
	特征值	解释方差/%	累积方差/%	特征值	解释方差/%	累积方差/%
1	4.555	56.94	56.94	4.56	56.94	56.94
2	1.304	16.30	73.24	1.30	16.30	73.24
3	1.098	13.73	86.97	1.10	13.73	86.97
4	0.491	6.14	93.11			
5	0.340	4.26	97.36			
6	0.153	1.91	99.27			
7	0.046	0.58	99.85			
8	0.012	0.15	100.00			

表9 研究区域土壤重金属含量主成分分析成分矩

Table 9 Component matrix of principal components of heavy metal concentrations in soils of the study area

重金属	因子荷载		
	1	2	3
Cd	0.815	-0.532	0.086
As	0.913	0.009	0.033
Pb	0.868	-0.166	0.29
Zn	0.837	-0.365	0.09
Cu	0.796	0.306	-0.385
Hg	0.123	0.384	0.887
Cr	0.503	0.747	-0.047
Ni	0.837	0.248	-0.246
方差			
贡献率/%	56.94	16.30	13.73
累积方差			
贡献率/%	56.94	73.24	86.97

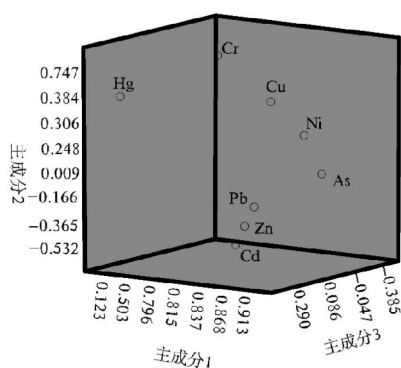


图4 土壤重金属元素主成分载荷

Fig. 4 Heavy metal loading of the principal components

5 结论

(1) 一六矿周边土壤中主要存在 As、Cd、Pb、Zn、Cu 污染,其中 As 和 Cd 的超标率和超标倍数最高,Hg、Cr、Ni 均未超出农用地土壤环境质量标准。重阳水南侧土壤中重金属元素含量明显高于北侧。矿区周边土壤重金属污染主要受地质背景影响,其次,矿山开采有一定的影响。

(2) As、Cd、Pb 和 Zn 达极强污染水平,Cu 属于强污染;Hg 和 Ni 属于中度污染。其中重金属 As 受污染最为显著,多为极严重污染,其次 Cd 多为极

强-极严重污染,而 Hg、Cr、Ni 影响较小,多为无污染-轻度污染。

(3)Cd 是潜在生态危害最大的因子,Hg、As、Pb 潜在生态危害次之,Cu、Cr、Ni 的生态危害轻微。各重金属之间存在不同程度的相关性,Cd 和 Zn 之间相关系数超过 0.9。重阳水南侧生态风险程度高,对人类活动地带,进行生态修复很有必要。

(4)达到显著相关水平,可见 Cd 和 Zn 之间存在一定的伴生关系,具有极其相似的成矿作用地球化学行为。

编辑老师和匿名审稿专家给本文提出了十分宝贵的修改意见,在此深表谢意。

参考文献:

- [1] 黄兴星,朱先芳,唐磊,季宏兵.北京市密云水库上游金铁矿区土壤重金属污染特征及对比研究[J].环境科学学报,2012,32(6):1520-1528.
- [2] 叶永钦,黄国龙,林子江,陈桂兰,曹豪杰,牟忠钰,李海东.粤北凡口铅锌矿区土壤重金属元素污染特征及评价[J].地质学刊,2018,42(1):137-144.
- [3] 孙德尧,薛忠财,韩兴,赵颖璠,孙维悦,张科.冀北山区某矿区周边耕地土壤重金属污染特征及生态风险评价[J].生态与农村环境学报,2020,36(2):242-249.
- [4] 吴劲楠,龙健,刘灵飞,李娟,廖洪凯,彭四清,万洪富.某铅锌矿区农田重金属分布特征及其风险评价[J].中国环境科学,2018,38(3):1054-1063.
- [5] 吴卫国.综合物化探方法在粤北一六多金属矿区中的应用[J].物探与化探,2015,39(6):1097-1103.
- [6] 和秋姣,赖健清,梅嘉靖,唐一昂,刘启.广东乳源一六钨矿构造-蚀变-矿化模式浅析[J].南方金属,2017,218:17-23.
- [7] 吴卫国.1:5万岩石构造地球化学测量在粤北一六矿田中的应用[J].物探与化探,2018,42(5):866-872.
- [8] 唐一昂,赖健清,杨牧,梅嘉靖,刘启,吴剑,湛后成,郭兰莹,胡理芳,和秋姣.广东韶关市一六钨矿床流体包裹体特征及成矿作用[J].地质学报,2018,91(10):2240-2255.
- [9] Muller G. Index of Geoaccumulation in Sediments of the Rhine River[J]. GeoJournal, 1969, 2(3):109-118.
- [10] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8):975-1001.
- [11] 徐争启,倪师军,虞先国,张成江.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,2008,48(2):112-115.
- [12] 国家环境保护局,中国环境监测总站.中国土壤元素背景值[J].北京:中国环境科学出版社,1990.
- [13] 柴世伟,温琰茂,张亚雷,赵建夫.地积累指数法在土壤重金属污染评价中的应用[J].同济大学学报:自然科学版,2006,34(12):1657-1661.
- [14] 高灯州,闵庆文,陈桂香,章文龙,胡伟芳,王维奇.联合梯田农业文化遗产稻田土壤养分空间变异特征[J].生态学报,2016,36(21):6951-6959.
- [15] 生态环境部,国家市场监督管理总局.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].2018.
- [16] 张伟,刘子宁,贾磊,李婷婷.广东韶关地区土壤地球化学基准值研究[J].华南地质与矿产,2020,36(2):153-161.
- [17] 孙德尧,臧淑英,孙华杰,张囡囡,张科,孙丽.近150年呼伦湖重金属污染历史及潜在生态风险[J].农业环境科学学报,2018,37(1):143-153.
- [18] 杨杉,汪军,李洪刚,张晟,张勇,邹家素,刘坤.重庆市绿地土壤重金属污染特征及健康风险评价[J].土壤通报,2018,49(4):966-972.
- [19] 阿吉古丽·马木提,麦麦提吐尔逊·艾则孜,艾尼瓦尔·买买提.新疆焉耆县耕地土壤重金属垂直分布特征与污染风险[J].水土保持研究,2018,25(2):367-373.
- [20] 柴世伟,温琰茂,韦献革,张云霓,董汉英,陈玉娟.珠江三角洲主要城市郊区农业土壤的重金属含量特征[J].中山大学学报:自然科学版,2004,43(4):90-94.
- [21] 周艳,陈楠,邓绍坡,万金忠,张胜田,龙涛,李群,林玉锁,吴运金.西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价[J].环境科学,2018,39(6):2884-2892.
- [22] 涂光炽.中国层控矿床地球化学:第三卷[M].北京:科学出版社,1988:133-168.
- [23] 张伟,张高强,窦磊,文俊.广东省典型铅锌多金属矿床镉的分布特征[J].物探与化探,2012,36(4):21-25.
- [24] 吴剑.广东省粤北一六矿田成矿规律浅析[J].资源环境与工程,2015,29(4):412-417.
- [25] 张超兰,李忠义,邓超冰.铅锌矿区农田土壤重金属的统计分析及其空间分布研究[J].上海环境科学,2009,28(6):253-257.
- [26] 张连科,李海鹏,黄学敏,李玉梅,焦坤灵,孙鹏,王维大.包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析[J].环境科学,2016,37(3):1139-1146.