

遵义松林 Ni-Mo 矿区耕地土壤的镉砷污染 及潜在生态风险评价

金昭贵, 周明忠*

(贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550001)

摘要: 贵州遵义松林 Ni-Mo 矿区为华南下寒武统黑色页岩 Ni-Mo 矿化带中的典型矿区之一, 对与其矿产资源开采活动相关的土壤环境质量评价具有重要的科学及实际意义。以松林 Ni-Mo 矿区耕地土壤为研究对象, 采用 ICP-MS 方法分析其中镉和砷的含量。分析结果显示, 该矿区耕地土壤中镉和砷的平均含量分别为 $1.82 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $69.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 具有高镉、砷含量特征。运用地质累积指数和潜在生态风险指数分别对耕地土壤镉、砷污染程度和潜在生态风险进行评价, 评价结果表明: 遵义松林 Ni-Mo 矿区耕地土壤已遭受镉、砷相对较高程度的污染; 该区耕地土壤镉、砷具有较高潜在生态风险, 值得进行进一步的土壤污染修复研究。

关键词: 土壤; 镉; 砷; 污染评价; 潜在生态风险

中图分类号: X820.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2012)12-2367-07

An Assessment on Contamination and Potential Ecological Risk of Cadmium and Arsenic in the Cultivated Soils Around the Ni-Mo Mining Area in Songlin, Zunyi, China

JIN Zhao-gui, ZHOU Ming-zhong*

(School of Geographic and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: The Ni-Mo mining area in Songlin, Zunyi, Guizhou is a type within the lower Cambrian Ni-Mo mineralization zone in South China. Therefore, assessing the environmental quality of the soils around the mining area is of important scientific and practical significances. The concentrations of cadmium and arsenic in cultivated soils around the Ni-Mo mining area in Songlin were analyzed using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) in this study. The result showed that the soils were characterized by high contents of cadmium (with an average of $1.82 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) and arsenic (with an average of $69.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), and that the concentrations of cadmium and arsenic in the soils of the study area were 12.68 times and 4.24 times higher than those of the background soils in Guizhou Province, respectively. In the present study, we evaluated the degree of contamination and potential ecological risk for the soils through geoaccumulation index and potential ecological risk index, respectively. It suggested that the soils around the Ni-Mo mining area in Songlin, Zunyi, Guizhou had been contaminated by cadmium (most of the soil samples with moderate to heavy pollution) and arsenic (with moderate pollution dominantly). It also indicated that the studied soils had relatively high potential ecological risk caused by cadmium and arsenic (with moderate to high potential ecological risk levels). Therefore, further researches on remediation for the contaminated soils deserve to be carried out.

Keywords: soil; cadmium; arsenic; contamination assessment; potential ecological risk

近年来, 全球土壤重金属污染日趋严重, 每年土壤中被输入大量的有害金属^[1]。由于土壤重金属具有隐蔽性、不可逆性、有毒等特征, 其污染评价、污染特

征、污染机制及潜在生态风险等科学问题已引起国内外学者的重视^[2]。随着矿产资源的开发, 在给人类带来财富的同时也引起一系列生态与环境问题。在矿产开采过程中, 重金属从地下相对封闭的环境进入地表开放的环境, 其向环境释放的机会大大增加, 开采过程中产生的含矿围岩碎石、尾矿及矿渣等已成为矿区环境重金属的主要污染源^[3]。重金属元素通过物理、化学和生物等表生地质作用, 借助地表径流、地下水和大

收稿日期: 2012-04-24

基金项目: 贵州省科学技术基金项目(黔科合 J 字[2011]2047 号); 国家自然科学基金项目(40963002)

作者简介: 金昭贵(1983—), 男, 硕士研究生, 研究方向为土壤重金属污染评价。E-mail: jinzhaoGui_2006@126.com

* 通信作者: 周明忠 E-mail: mzzhou@yahoo.cn

气传输进入表生地球化学循环系统,进而进入生态链的循环中,对矿区环境构成潜在的生态威胁。镉、砷作为环境中毒性很强的元素,在土壤中易累积富集,很难被生物降解,同时,它们是人体和植物非必需元素^[5-6]和易致癌物质^[7-8]。镉、砷进入土壤后,以可溶态和可交换态^[9-10]发挥生物有效性,富集在植物根、茎、叶部位,通过进入食物链实现生物毒性积累放大^[11]。若镉进入人体累积,便会对人体肾、肺、肝、睾丸、脑、骨骼及血液系统等产生损伤^[12];砷进入人体则易引起慢性中毒、细胞突变以致癌变等^[13-14]。

贵州遵义松林 Ni-Mo 矿床为华南下寒武统 Ni-Mo 矿化带中的典型矿床之一^[15-16],其赋矿层位为下寒武统牛蹄塘组底部黑色页岩^[17]。由于 Ni-Mo 矿及其围岩富含多种重金属,开采过程中暴露在地表的富含多金属尾矿和黑色页岩围岩碎石等在外界媒介(水、气、热等)作用下,有毒元素镉、砷等活化浸出,迁移至矿区周围耕地土壤中,可能造成镉、砷污染,并对当地居民和生态环境构成潜在风险。

前人报道了遵义松林 Ni-Mo 矿区周围土壤中有毒元素(Mo、Ni、As、Cd、Zn、Cu、Pb、V、Hg、Cr)的分布状况及可能的环境影响^[18-19],然而,针对 Ni-Mo 矿区耕地土壤重金属元素的系统而精细的污染程度及潜在生态风险评价亟待深入。本研究的目的在于提供该矿区耕地土壤中镉和砷的含量数据,同时评价土壤中镉、砷污染状况及其潜在生态风险,为确定遵义松林 Ni-Mo 矿区耕地土壤是否存在针对镉、砷污染修复必要性提供初步的科学数据和依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

贵州遵义松林 Ni-Mo 矿区位于遵义地区西部,距遵义市约 25 km(图 1)。研究区地貌类型复杂,地势起伏较大。区内土壤种类有黄壤土、石灰土、水稻土及特殊土壤如以黑色页岩为成土母岩的黑色页岩土壤等。该区气候属中亚热带季风湿润气候。研究区出露地层主要为震旦系灯影组白云岩及下寒武统牛蹄塘组黑色页岩,广泛分布于研究区的牛蹄塘组黑色页岩富含多种元素,多以硫化物形式赋存,在地表环境及当地气候条件下易发生风化(氧化)作用。当地居民的耕地或直接分布于黑色页岩之上,或分布于海拔高程低于黑色页岩的出露位置的邻近地带(通常覆于灯影组白云岩之上)。该区 Ni-Mo 矿床开采过程中产生的尾矿及黑色页岩围岩碎石被随机堆弃于耕地附近。

1.2 样品采集与实验分析

耕地土壤样品采集过程中,根据矿区地形,以遵义松林 Ni-Mo 矿采场附近耕地为采样起点,以 20 m 为间距由近及远依次采集 Ni-Mo 矿区耕地表层 0~20 cm 土壤样品,每个样品约 500 g,依次进行编号。

样品经室内晾干,剔除其中碎石、植物残渣后,于玛瑙研钵内研磨至过 200 目尼龙筛。制备好的粉末样置于干燥处以备测试。

样品检测前,首先准确称取试样 50 mg 于封闭坩埚溶样装置中,加入 1 mL HF 和 0.5 mL HNO₃,加盖封

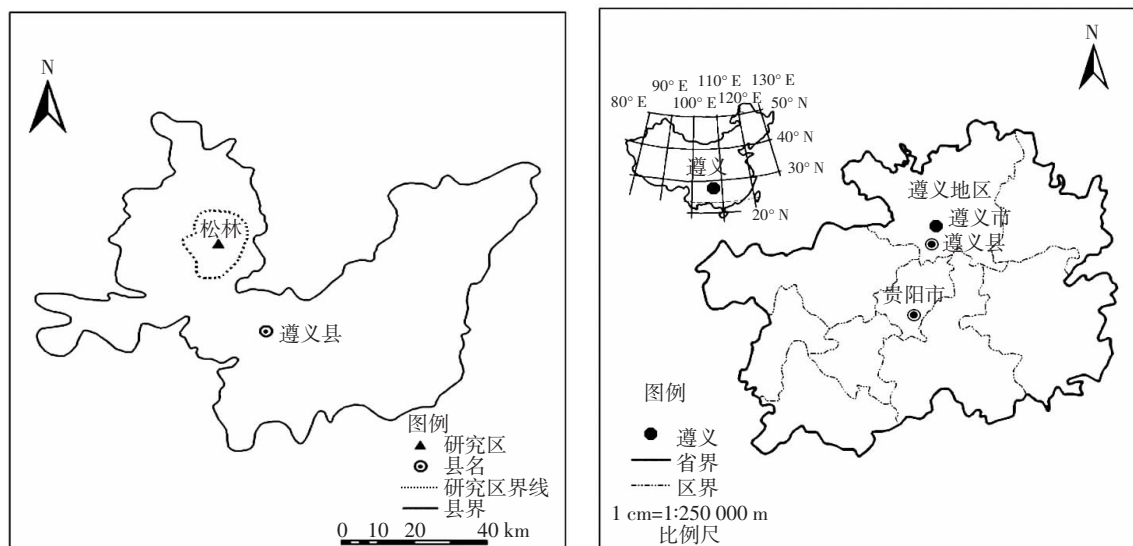


图 1 研究区地理位置

Figure 1 Sketch map showing the location of the study area

闭放入已升温至 190 ℃的烘烤箱中,加热 48 h,取出冷却后去盖,加入 0.5 mL 浓度为 1 mg·mL⁻¹ 的 Rh 内标溶液,在电热板上蒸干,加入 1 mL HNO₃ 再蒸干,重复一次。最后将残渣用 6 mL 40%HNO₃ 在 140 ℃封闭溶解 3 h,取出冷却后将溶液转移至 50 mL 塑料离子管中,待 ICP-MS(电感耦合等离子体质谱仪)测试样品中 Cd、As 含量。仪器测试过程中采用平行样品及国家一级标准土壤样品(GBW07401)进行质量控制。上述实验在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。

2 结果与讨论

2.1 耕地土壤镉砷含量分析结果

遵义松林 Ni-Mo 矿区土地利用类型主要为旱耕地,其土壤的理化性质为 C_{org}=1.89%,CO₂=0.03%,S_{tot}=0.062%,pH=4.38^[19]。本研究所采耕地表层土壤样品的镉、砷含量分析结果列于表 1。由表 1 可见,矿区耕地土壤中镉、砷含量范围分别为 0.72~4.63 mg·kg⁻¹ 和 45.30~129 mg·kg⁻¹, 平均值分别为 1.82 mg·kg⁻¹ 和 69.72 mg·kg⁻¹。土壤镉、砷含量明显高于国家土壤环境质量标准(GB 15618—1995)的三级标准(Cd 1.0 mg·kg⁻¹,As 40.0 mg·kg⁻¹)及贵州省土壤镉、砷环境背景值(Cd 0.133 mg·kg⁻¹,As 13.30 mg·kg⁻¹),分别是贵州省土壤镉和砷环境背景值的 13.68 倍和 5.24 倍。与遵义其他地区碳酸盐岩发育的土壤(Cd 0.20 mg·kg⁻¹,As 22.50 mg·kg⁻¹)、碎屑岩风化的土壤(Cd 0.18 mg·kg⁻¹,As 28.78 mg·kg⁻¹)相比^[20],所研究土壤镉、砷含量明显偏高。上述对比初步表明,遵义松林 Ni-Mo 矿区耕地土壤具有高镉、砷含量特征,可能遭受这两种重金属元素污染,值得进一步评价。

2.2 土壤镉砷污染及潜在生态风险评价

2.2.1 评价方法的选取

富集指数法、地质累积指数法、潜在生态风险指数法、尼梅罗综合指数法等是目前土壤重金属污染评价中应用最多的方法^[22-23],而潜在生态风险指数法可与地质累积指数法相互补充和借鉴^[24]。因此,本研究选择该两种评价方法对矿区耕地土壤的环境质量进行系统评价。

(1)地质累积指数法:地质累积指数法^[25]由Muller提出,是 20 世纪 70 年代晚期欧洲用于研究沉积物中重金属污染程度的定量指标。该方法以土壤中重金属含量高低反映污染水平,给出很直观的重金属污染级别,反映土壤、沉积物中重金属累积程度,目前在土壤重金属污染评价研究领域有着广泛应用^[23,26-29]。其计算式如下:

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

式中: I_{geo} 为地质累积指数; C_i 为评价元素 i 在土壤中的浓度; B_i 为评价元素 i 的环境背景值; k 一般取 1.5,是为消除各地岩石差异可能引起背景值的变动的修正系数。

Forstner 等^[30]将地质累积指数分为 7 个等级,不同等级代表不同的污染程度,具体分级见表 2。

(2)潜在生态风险指数法:潜在生态风险指数法^[31]是 Hakanson 应用沉积学原理建立的评价重金属污染和潜在生态风险的方法。该方法作为国际上土壤(沉积物)中重金属研究的先进方法之一^[32],不仅可以反映某一特定环境中不同污染物的影响,还可以反映多种污染物的综合影响,并以定量的方法划分出重金属的潜在生态风险程度,是目前评价重金属潜在生态风险广泛应用的方法,其计算式如下:

表 1 遵义松林 Ni-Mo 矿区耕地土壤镉、砷含量(mg·kg⁻¹)

Table 1 Cadmium and arsenic concentrations for cultivated soils around the Ni-Mo mining area in Songlin, Zunyi(mg·kg⁻¹)

样号	11GD-1	11GD-2	11GD-3	11GD-4	11GD-5	11GD-6	11GD-7	11GD-8	11GD-9	11GD-10	11GD-11	均值	国家三级标准	贵州土壤背景值
Cd	1.78	0.72	1.13	4.63	1.74	1.17	1.23	1.13	1.40	1.13	3.96	1.82	1.00	0.133
As	45.80	45.30	129.0	96.5	61.3	56.10	48.20	54.00	53.30	81.80	95.60	69.72	40.00	13.30

注:贵州土壤环境背景值引自文献[21]。

表 2 地质累积指数与污染程度分级

Table 2 Contamination degrees corresponding to geoaccumulation indexes

I_{geo} 值	<0	(0,1]	(1,2]	(2,3]	(3,4]	(4,5]	>5
污染级别	0	1	2	3	4	5	6
污染程度	无污染	轻度污染	中度污染	中度污染~重污染	重污染	重污染~极重污染	极重污染

$$RI=\sum_{i=1}^n E_r^i=\sum_{i=1}^n (T_r^i\times C_f^i), C_f^i=C_r^i/C_o^i$$

式中: E_r^i 为单一重金属的潜在生态风险因子; C_r^i 为土壤重金属浓度实测值; C_o^i 为参比值; T_r^i 为重金属*i*的毒性系数; n 为样品数, RI 为多种重金属的潜在生态风险指数。

根据 Hakanson 的分级标准^[31],重金属潜在生态风险评价指标见表 3。

2.2.2 镉砷污染地质累积指数法评价

为了评价遵义松林 Ni-Mo 矿区耕地土壤镉、砷的污染状况,本研究以贵州镉、砷土壤环境背景值^[21]

分别作为研究区土壤镉、砷的背景值,取 k 值为 1.5 进行地质累积指数计算,计算结果列于表 4。遵义松林 Ni-Mo 矿区耕地土壤镉、砷地质累积指数的变化范围分别为 1.85~4.54 和 1.20~2.69,对应的污染等级范围分别为 2~5 和 2~3。通过与地质累积指数相对应的污染程度评价,研究区 11 个耕地土壤样品的镉污染程度为中度污染至极重污染,多数样品具中度污染~重污染程度(占 55%);矿区 11 个耕地土壤样品的砷污染程度为中度污染至中度污染~重污染的范围,样品普遍(64%)具中度污染程度(表 4,图 2)。上

表 3 潜在生态风险等级划分
Table 3 Grades of potential ecological risk assessment

单元生态风险因子(E_r^i)	风险等级	潜在生态风险	多元素潜在生态风险指数(RI)	风险等级	潜在生态风险
$E_r^i<40$	A	低	$RI<150$	A	低
$40\leq E_r^i<80$	B	中等	$150\leq RI<300$	B	中等
$80\leq E_r^i<160$	C	较高	$300\leq RI<600$	C	较高
$160\leq E_r^i<320$	D	高	$RI\geq 600$	D	高
$E_r^i\geq 320$	E	极高			

表 4 遵义松林 Ni-Mo 矿区耕地土壤样品镉、砷的地质累积指数(I_{geo})和污染程度
Table 4 Geoaccumulation indexes and contamination degrees of cadmium and arsenic in cultivated soils around Ni-Mo mining area in Songlin, Zunyi

样号	$I_{geo}(\text{Cd})$	$I_{geo}(\text{As})$	污染级别(Cd)	污染级别(As)	Cd 污染程度	As 污染程度
11GD-1	3.16	1.20	4	2	重污染	中度污染
11GD-2	1.85	1.18	2	2	中度污染	中度污染
11GD-3	2.50	2.69	3	3	中度污染~重污染	中度污染~重污染
11GD-4	4.54	2.27	5	3	重污染~极重污染	中度污染~重污染
11GD-5	3.12	1.62	4	2	重污染	中度污染
11GD-6	2.55	1.49	3	2	中度污染~重污染	中度污染
11GD-7	2.62	1.27	3	2	中度污染~重污染	中度污染
11GD-8	2.50	1.44	3	2	中度污染~重污染	中度污染
11GD-9	2.81	1.42	3	2	中度污染~重污染	中度污染
11GD-10	2.50	2.04	3	3	中度污染~重污染	中度污染~重污染
11GD-11	4.31	2.26	5	3	重污染~极重污染	中度污染~重污染

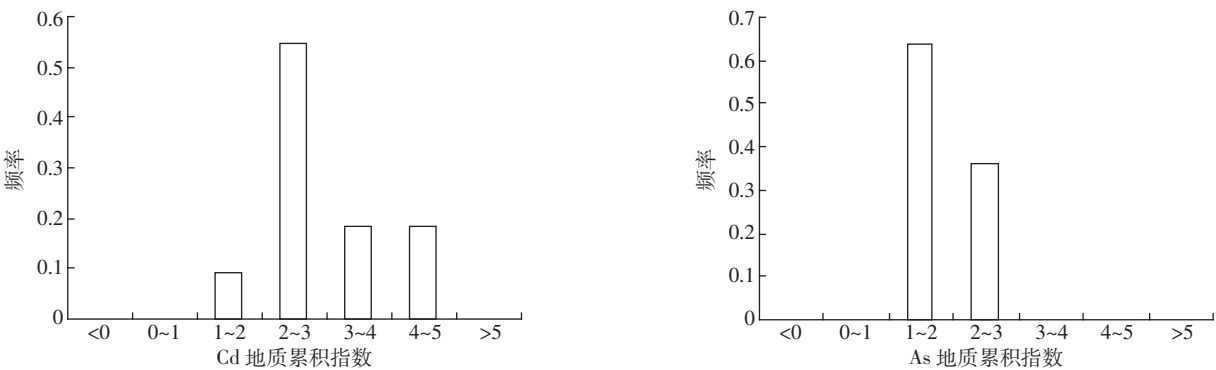


图 2 遵义松林 Ni-Mo 矿区耕地土壤镉、砷的地质累积指数分布
Figure 2 The distribution of geoaccumulation indexes for cadmium and arsenic in cultivated soils around Ni-Mo mining area in Songlin, Zunyi

述评价结果表明, 遵义松林 Ni-Mo 矿区耕地土壤已遭受镉、砷污染, 且其污染程度相对较高。

2.2.3 镉砷的潜在生态风险评价

据 Hakanson 归一化处理后的毒性系数^[31], 本研究将镉和砷的毒性系数 T_i^r 分别取值为 30 和 10, 对遵义松林 Ni-Mo 矿区耕地土壤镉和砷潜在生态风险因子及指数进行计算, 在此过程中, 选取贵州土壤镉、砷环境背景值为参比值^[21], 结果列于表 5。

由表 5 可知, 遵义松林 Ni-Mo 矿区耕地土壤镉和砷的潜在生态风险因子(E_i^r)的变化范围分别为 161.73~1044.36 和 34.44~96.99。据以潜在生态风险因子为指标进行生态风险评价, 所研究的 11 个耕地土壤样品中, 镉具有高至极高的潜在生态风险, 多数样品(64%)为高潜在生态风险; 砷具有低至较高的潜在生态风险, 样品普遍(64%)具有中等潜在生态风险(表 5, 图 3)。进一步以镉、砷两种重金属元素作为综合影响因素, 通过以二者在耕地土壤样品中的含量为基础计算的潜在生态风险指数为指标, 对遵义松林 Ni-Mo 矿区耕地土壤镉、砷的潜在生态风险进行评价。结果显示, 所研究的耕地土壤样品的潜在生态风险指数介于 195.79 与 1 116.92 之间, 对应于中等至高潜在生态风险范围(表 5)。同时, 统计结果显示多数(64%)耕地土壤样品具有较高潜在生态风险(图 3)。上述评价结果表明, 遵义松林 Ni-Mo 矿区耕地土壤中重金属元素镉与砷对该区生态环境构成了潜在威胁, 具有对其进行进一步土壤污染修复研究的必要性。

3 结 论

(1) 遵义松林 Ni-Mo 矿区耕地土壤中镉、砷含量范围分别为 0.72~4.63 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 45.30~129 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,

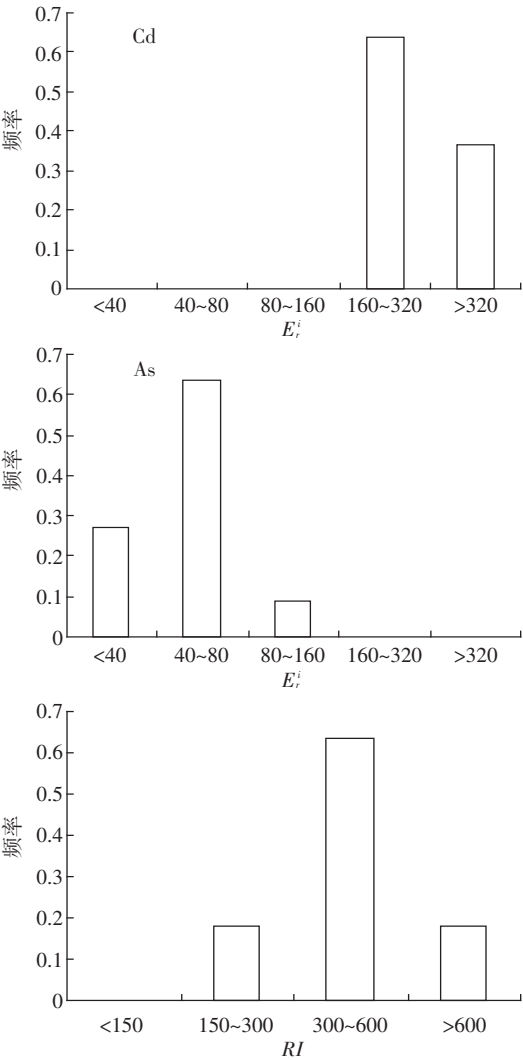


图 3 遵义松林 Ni-Mo 矿区耕地土壤镉和砷的潜在生态风险因子及指数分布

Figure 3 The distribution of potential ecological risk factors and indexes for cadmium and arsenic in the cultivated soils around Ni-Mo mining area in Songlin, Zunyi

表 5 遵义松林 Ni-Mo 矿区耕地土壤镉、砷的潜在生态风险指数

Table 5 Potential ecological risk indexes of cadmium and arsenic in cultivated soils around Ni-Mo mining area in Songlin, Zunyi

样号	E_i^r (Cd)	风险等级	潜在生态风险(Cd)	E_i^r (As)	风险等级	潜在生态风险(As)	RI	风险等级	潜在生态风险
11GD-1	401.50	E	极高	34.44	A	低	435.94	C	较高
11GD-2	161.73	D	高	34.06	A	低	195.79	B	中等
11GD-3	254.89	D	高	96.99	C	较高	351.88	C	较高
11GD-4	1 044.36	E	极高	72.56	B	中等	1 116.92	D	高
11GD-5	392.48	E	极高	46.09	B	中等	438.57	C	较高
11GD-6	263.91	D	高	42.18	B	中等	306.09	C	较高
11GD-7	277.44	D	高	36.24	A	低	313.68	C	较高
11GD-8	254.89	D	高	40.60	B	中等	295.49	B	中等
11GD-9	315.79	D	高	40.08	B	中等	355.86	C	较高
11GD-10	254.89	D	高	61.50	B	中等	316.39	C	较高
11GD-11	893.23	E	极高	71.88	B	中等	965.11	D	高

平均值分别为 $1.82 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $69.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 具有高镉、砷含量特征。

(2)通过采用地质累积指数法评价,研究区耕地土壤样品的镉污染程度以中度污染~重污染为主,样品砷污染程度普遍为中度污染。因此,评价结果表明遵义松林 Ni-Mo 矿区耕地土壤已遭受镉、砷污染,且其污染程度相对较高。

(3)通过以潜在生态风险因子为指标进行生态风险评价,所研究的耕地土壤样品中,镉以高潜在生态风险为主;砷则以中等潜在生态风险为主。进一步以镉、砷两种重金属元素作为综合影响因素的潜在生态风险指数为指标,对遵义松林 Ni-Mo 矿区耕地土壤镉、砷的潜在生态风险进行评价,结果表明研究区耕地土壤镉、砷具有较高潜在生态风险,值得展开进一步的土壤污染修复研究。

参考文献:

- [1] 胡恭任,于瑞莲.应用地累积指数法和富集因子法评价 324 国道塘头段两侧土壤的重金属污染[J].中国矿业,2008,17(4):48-51.
HU G R, YU R L. Application of index of geo-accumulation and enrichment factor in assessment of heavy metal contamination in soils of tang-tou section on No. 324 main roads[J]. *China Mining Magazine*, 2008, 17(4):48-51.
- [2] 郭伟,赵仁鑫,张君,等.内蒙古包头铁矿区土壤重金属污染特征及其评价[J].环境科学,2011,32(10):3100-3105.
GUO W, ZHAO R X, ZHANG J, et al. Distribution characteristic and assessment of soil heavy metal pollution in the iron mining of Baotou in Inner Mongolia[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(10):3100-3105.
- [3] 何志祥,朱凡,陈永华.长株潭矿山土壤重金属的分布及污染评价[J].中南林业科技大学学报,2011,31(4):197-199.
HE Z X, ZHU F, CHEN Y H. Distribution and pollution evaluation of heavy metal in mine soils of Changzhutan City region[J]. *Journal of Central of South University of Forestry & Technology*, 2011, 31(4):197-199.
- [4] 周广柱,杨锋杰,程建光,等.土壤环境质量综合评价方法探讨[J].山东科技大学学报(自然科学版),2005,24(4):114-118.
ZHOU G Z, YANG F J, CHENG J G, et al. Research on synthetic assessment method for soil environmental quality[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science)*, 2005, 24(4):114-118.
- [5] 叶寒青,杨祥良.环境污染镉毒性作用机理研究进展[J].广东微量元素科学,2001,8(3):9-12.
YE H Q, YANG X L. The research progress of toxicity mechanism of environmental pollutant of cadmium[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2001, 8(3):9-12.
- [6] 张国祥,杨居荣,华路.土壤环境中的砷及其生态效应[J].土壤,1996(2):64-68.
ZHANG G X, YANG J R, HUA L. Arsenic in soil environment and its ecological effect[J]. *Soils*, 1996(2):64-68.
- [7] Hartwig A, Beyersmann D. Biol trace elements[J]. *Res*, 1989, 21:359-365.
- [8] WHO. Arsenic, environmental health criteria 18[R]. Geneva: World Health Organization, 1981.
- [9] 毕春娟,陈振楼.根际环境重金属地球化学行为及其生物有效性研究进展[J].地球科学进展,2001,16(3):387-392.
BI C J, CHEN Z L. Research progress in geochemical activities and bioavailability of heavy metal in rhizosphere environment [J]. *Advances in Earth Sciences*, 2001, 16(3):387-392.
- [10] 王洋洋,沈阿林,寇长林.根际与非根际镉生态化学行为的研究进展[J].河南农业科学,2008,6:5-8.
WANG Y Y, SHEN A L, KOU C L. Progress cadmium ecological and chemical behavior in rhizosphere and non-rhizosphere[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2008, 6:5-8.
- [11] 李勋光,李小卫.土壤砷吸附及砷的水稻毒性[J].土壤,1996(2):98-100.
LI X G, LI X W. Study on soil arsenic adsorption and rice toxicity of arsenic[J]. *Soils*, 1996(2):98-100.
- [12] Eneman J D, Potts R J, Osier M, et al. Suppressed oxidant induced apoptosis in cadmium adapted alveolar epithelial cells and its potential involvement in cadmium carcinogenesis[J]. *Toxicology*, 2000, 147:215-228.
- [13] 白爱梅,李跃,范中学.砷对人体健康的危害[J].微量元素与健康研究,2007,24(1):61-62.
BAI A M, LI Y, FAN Z X. Arsenic harm to human health[J]. *Studies of Trace Elements and Health*, 2007, 24(1):61-62.
- [14] 牛健林,徐洪兰,高增林.砷对人体健康的影响及其致癌机制的探讨[J].山西医药杂志,2000,29(6):478-480.
NIU J L, XU H L, GAO Z L. Discussion on arsenic on human health and the carcinogenic mechanism[J]. *Shanxi Medical Journal*, 2000, 29(6):478-480.
- [15] 周洁,胡凯,边立曾,等.贵州遵义下寒武统黑色岩系 Ni-Mo 多金属矿地球化学特征及成矿作用[J].矿床地质,2008,27(6):742-750.
ZHOU J, HU K, BIAN L Z, et al. Geochemical characteristics and ore-forming processes of Ni-Mo polymetallic deposits in Lower Cambrian black shale, Zunyi, Guizhou Province[J]. *Mineral Deposits*, 2008, 27(6):742-750.
- [16] 罗泰义,张欢一,李晓彪,等.遵义牛蹄塘组黑色岩系中多元素富集层的主要矿化特征[J].矿物学报,2003,23(4):296-302.
LUO T Y, ZHANG H Y, LI X B, et al. Mineralization characteristics of the multi-element-rich strata in the Niutitang formation black shale series, Zunyi, Guizhou, China [J]. *Acta Mineralogical Sinica*, 2003, 23(4):296-302.
- [17] 施春华,曹剑,胡凯,等.华南早寒武世黑色岩系 Ni-Mo 多金属矿床成因研究进展[J].地质论评,2011,57(5):718-730.
SHI C H, CAO J, HU K, et al. A review on origin of Ni-Mo polymetallic deposits in Lower black shale rock series in South China[J]. *Geological Review*, 2011, 57(5):718-730.
- [18] Pasava J, Bohdan K, Karel Z, et al. Environmental impacts of mining of

- Ni-Mo black shale-hosted deposits in the Zunyi region, Southern China Preliminary results of the study of toxic metals in the system rock-soil-plant[J]. *Bulletin of Geosciences*, 2003, 78(3):251-260.
- [19] Ponavic M, Pasava J, Vymazalova A, et al. Fractionation of toxic trace elements in soils around Mo-Ni black shale-hosted mines, Zunyi region, Southern China: Environmental implications[J]. *Bulletin of Geosciences*, 2006, 81(3):197-206.
- [20] 樊正烈. 贵州遵义地区表层土壤微量元素均匀化现象及其农业地质环境效应[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(24):13172-13174.
- FAN Z L. Homogeneity phenomenon of trace elements in the surface soil in Zunyi Area of Guizhou and its agro-geological environment effect[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(24):13172-13174.
- [21] 王 云, 魏复盛, 杨国治, 等. 土壤元素化学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1993:52-251.
- WANG Y, WEI F S, YANG G Z, et al. Soil elements chemistry[M]. Beijing: China Environment Science Publishing House, 1993:52-251.
- [22] 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.
- FAN S X, GAN Z T, LI M J, et al. Progress of assessment methods of heavy metal pollution in soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(17):310-315.
- [23] 郭笑笑, 刘丛强, 朱兆洲, 等. 土壤重金属污染评价方法[J]. 生态学杂志, 2011, 30(5):889-896.
- GUO X X, LIU C Q, ZHU Z Z, et al. Evaluation methods for soil heavy metals contamination: A review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(5):889-896.
- [24] 刘文新, 栾兆坤, 汤鸿霄. 乐安江沉积物中金属污染的潜在生态风险评价[J]. 生态学报, 1999, 19(2):206-211.
- LIU W X, LUAN Z K, TANG H X. Environmental assessment on heavy metal pollution in the sediments of Lean River in the with potential ecological risk index[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(2):206-211.
- [25] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geojournal*, 1969, 2(3):108-118.
- [26] 滕彦国, 庾先国, 倪师军, 等. 应用地质累积指数评价攀枝花地区土壤重金属污染[J]. 重庆环境科学, 2002, 21(2):25-28.
- TENG Y G, TUO X G, NI S J, et al. Applying the Index of geoaccumulation to evaluate heavy metal pollution in soil in Panzhihua region[J]. *Chongqing Environmental Science*, 2002, 4(24):26-27.
- [27] Loska K, Wiechla A D, Barska B, et al. Assessment of arsenic enrichment of cultivates soils in Southern Poland[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2003, 12(2):187-192.
- [28] 谢淑容, 彭 渤, 唐晓燕, 等. 湘中地区发育于黑色页岩上的土壤重金属污染特征[J]. 土壤通报, 2008, 39(1):137-142.
- XIE S R, PENG B, TANG X Y, et al. Characteristics of heavy metal contamination of soils derived from black shale in the Central Hunan, China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(1):137-142.
- [29] Kurtz A C, Derry L A, Chadwick O A, et al. Refractory element mobility in volcanic soils[J]. *Geology*, 2000, 28:683-686.
- [30] Forstner U, Muller G. Concentrations of heavy metals and polycyclic Aromatic hycarbons in river sediments: Geochemical background man's influence and environmental impact [J]. *Geojournal*, 1981, 5:417-425.
- [31] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14:975-1001.
- [32] 贾振邦, 梁 涛, 林建枝, 等. 香港河流重金属污染及潜在生态危害研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1997, 33(4):485-492.
- JIA Z B, LIANG T, LIN J Z, et al. Study on heavy metal contamination and potential ecological risk in Hongkong rivers[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1997, 33(4):485-492.