

迪娜·吐尔生江, 李典鹏, 胡毅, 等. 新疆奴拉赛铜矿周边土壤理化特征和重金属污染生态风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(1):17-23.  
Dina·Tursenjan, LI Dian-peng, HU Yi, YANG Lei, et al. Physicochemical Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals Contaminated Soils in Copper Mining of Nulasai, Xinjiang, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(1):17-23.

## 新疆奴拉赛铜矿周边土壤理化特征和 重金属污染生态风险评价

迪娜·吐尔生江<sup>1</sup>, 李典鹏<sup>1</sup>, 胡毅<sup>2</sup>, 杨磊<sup>3</sup>, 徐晓龙<sup>1</sup>, 贾宏涛<sup>1\*</sup>

(1.新疆农业大学草业与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2.南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095; 3.西安市秦岭生态环境保护监察大队, 陕西 西安 710025)

**摘要:**以新疆奴拉赛铜矿的矿区、尾矿和周边农田土壤为研究对象,研究了该区域土壤理化特性、重金属含量特征,并对其生态环境风险进行了初步评价。结果表明,受矿区废水的长期影响,奴拉赛矿区土壤 pH 较低。土壤电导率和盐分含量高于周边农田土壤,而土壤有机质、速效氮、速效钾、有效磷含量均低于周边农田土壤;矿区、尾矿区和农田土壤重金属 Cr、Cd、Pb、Cu、Ni 和 Zn 含量均较低,除 Cu 外,均低于新疆土壤自然背景值。总体上看,土壤重金属含量表现为矿区>尾矿区>农田;单一因子( $P_i$ )、内梅罗综合污染指数( $I$ )以及潜在生态危害指数( $RI$ )表明,矿区周边土壤重金属生态风险表现为尾矿>矿区>农田,0~30 cm 表层土壤重金属潜在生态风险指数高于 30~70 cm 深层土壤,但不同土地利用类型土壤总体生态风险程度较低。

**关键词:**奴拉赛铜矿区;重金属;土地利用方式;风险评价

中图分类号:X820.4

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2018)01-0017-07

doi: 10.13254/j.jare.2017.0159

### Physicochemical Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals Contaminated Soils in Copper Mining of Nulasai, Xinjiang, China

Dina·Tursenjan<sup>1</sup>, LI Dian-peng<sup>1</sup>, HU Yi<sup>2</sup>, YANG Lei<sup>3</sup>, XU Xiao-long<sup>1</sup>, JIA Hong-tao<sup>1\*</sup>

(1.College of Grassland and Environment Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 3.Supervision Team of Qinling Ecological Environment Protection of Xi'an City, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** Taking the mining areas, tailings and surrounding farmland soil of the Nulasai copper mine in Xinjiang as the research object, the characteristics of soil physical and characteristics of heavy metal contents in this area were studied, and their ecological and environmental risks were preliminarily evaluated. The results showed that due to the long-term impact of mining wastewater, soil pH in the Nulasai mining area was relatively low. Soil conductivity and salt content were higher than those in the surrounding farmland, while soil organic matter, available nitrogen, available potassium and available phosphorus were lower than those in the surrounding farmland. The contents of heavy metals Cr, Cd, Pb, Cu, Ni and Zn in the mining area, tailing area and farmland soil were all lower than those in Xinjiang except for Cu. Overall, the heavy metal content of the soil manifested the area> tailing area> farmland. Single factor ( $P_i$ ), Nemerow comprehensive pollution index ( $I$ ) and potential ecological risk index ( $RI$ ) indicated that the ecological risk of heavy metals in the soil around the mining area was manifested tailings> mining area> farmland. The potential ecological risk index of heavy metals in 0~30 cm topsoil was higher than that in 30~70 cm deep soil, but the overall ecological risk was lower in different land use types.

**Keywords:** Nulasai copper mining area; heavy metals; land use type; risk assessment

收稿日期:2017-06-14 录用日期:2017-09-21

基金项目:中科院战略先导专项(XDA05050504)

作者简介:迪娜·吐尔生江(1992—),女,新疆尼勒克人,硕士研究生,主要从事矿区土壤重金属污染评价研究。E-mail:1453783674@qq.com

\*通信作者:贾宏涛 E-mail:hongtaojia@126.com

随着矿产资源的开发与利用,重金属通过各种途径进入环境,造成土壤污染<sup>[1]</sup>。我国 70 个矿区的 1 672 个土壤点位中,超标点位占 33.4%<sup>[2]</sup>。目前我国 95% 的能源和 80% 的原材料均依靠开采矿产资源。由于开矿、冶矿的废弃矿址的废渣中会含有大量 Cd、Pb、Zn 等重金属,这些重金属进入土壤环境后,因不能被微生物分解而易于在土壤中积累,并在农作物中积累,有可能通过食物链进入人体,从而对人体健康构成严重威胁,这已经引起了国内外学者的广泛关注<sup>[3]</sup>。意大利北部 Vigonzano 区铜矿区研究发现尾矿区有较高含量的 Cr、Ni、Cu、Co 等元素富集<sup>[4]</sup>。内蒙古包头铁矿区土壤受到 Pb、Cu、Zn 和 Mn 不同程度的污染,综合污染指数分别达到 1.9、1.6、10.2 和 2.4<sup>[5]</sup>。贵州万山汞矿区土壤中 Cr、Cu、Cd、Pb 和 Hg 含量超过贵州省土壤背景值,大多数土壤处于中重度污染水平<sup>[6]</sup>。西部矿业城市土壤重金属总体污染程度为 Ni>Co>Cu>Cd>As,而不同土壤利用类型的综合污染程度存在明显差异,其中水域、绿地、工业用地、道路广场用地和居住用地均达到重污染<sup>[7]</sup>。南京栖霞山铅锌矿区菜园土壤中 Pb、As、Cd 和 Zn 等重金属污染严重,部分土壤存在 Cu 的轻度污染<sup>[8]</sup>。可见,矿区重金属污染不可忽视。

奴拉赛铜矿区位于新疆尼勒克县,距今有 2 500 多年的开采历史,是国内典型的铜矿开采区。长期的开采是否对周围土壤环境造成影响是大家关注的热点;通过对尼勒克县奴拉赛铜矿矿区、尾矿、农田的土壤进行调查与取样分析,研究不同土地利用方式下土壤重金属 Cu、Zn、Ni、Pb、Cd、Cr 含量的分布特征,通过单因子污染指数、综合污染指数法和潜在生态风险法对土壤重金属污染及生态风险进行评价,为该区域土壤安全及矿产资源合理开发提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

奴拉赛铜矿遗址位于新疆尼勒克县城南约 3 km,于 20 世纪 50 年代被地质勘探所发现,并于 80 年代由考古与地质部门合作先后进行了调查和发掘<sup>[9]</sup>,是新疆维吾尔自治区和国务院重点文物保护单位。其地理位置为 43°76'76.1"N,82°47'45.5"E,海拔 1 256 m,属大陆性温带气候,较温和湿润,年平均气温为 5.6℃,无霜期 110 d 左右,5—8 月平均气温为 13.9~17.93℃,年平均积温达 2 820.8℃。降水量较为充沛,年平均为 345.1 mm。冬季积雪较多,覆雪稳定。

### 1.2 样品采集与处理

在奴拉赛铜矿及周边不同土地利用方式(矿区、尾矿、农田)进行布点,共采集土壤剖面 21 个,其中矿区 9 个、尾矿 4 个、农田 8 个(图 1),各采样点均用 GPS 准确定位,采样深度为 70 cm,采样层次为 0~5、5~10、10~20、20~30、30~50 cm 和 50~70 cm,按照土壤环境质量标准进行土壤样品采集。采集的土壤经自然风干,去除石头和植物残体等杂物后磨碎,过 16、60 目(1.025 mm 孔径)尼龙筛后分别进行土壤理化性质和重金属含量测定。

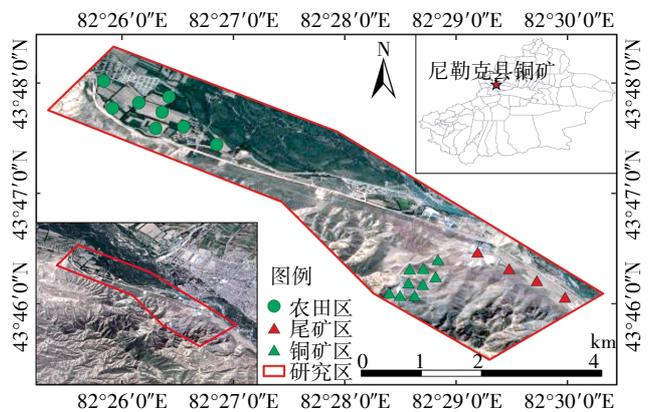


图 1 研究区域及采样点分布示意

Figure 1 Study area and sampling point distribution diagram

### 1.3 试验方法

重铬酸钾-外加热法<sup>[10]</sup>测定土壤有机质含量;碱解扩散法测定土壤速效氮含量;碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定土壤有效磷含量;乙酸铵浸提-火焰光度法测定土壤速效钾含量<sup>[11]</sup>;浸提法(土水比 1:5)测定土壤电导率及 pH 值,残渣烘干-质量法测定总盐;Cu、Zn、Ni、Pb、Cd、Cr 6 种重金属全量用王水(HCl 与 HNO<sub>3</sub> 为 3:1)-HClO<sub>4</sub> 和过氧化氢消煮,石墨炉原子吸收光谱法(TAS-990)测定。

### 1.4 土壤重金属污染评价方法

根据不同采样点位和不同区段的整体调查,分别采用单因子指数法和内梅罗综合污染指数法对研究区域土壤重金属污染状况进行综合评价。土壤环境背景值参考新疆土壤背景值<sup>[12-14]</sup>。

#### 1.4.1 综合指数法

单因子指数法是国内外普遍采用的方法之一,可用于监测某一个重金属元素对区域的污染程度。是对土壤中的某一污染物的污染程度进行评价,其计算公式为<sup>[15]</sup>:

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

式中: $P_i$ 表示污染因子单因子指数; $C_i$ 表示实际测得土壤浓度, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; $S_i$ 表示土壤环境质量标准, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。单因子污染指数分级见表1。

### 1.4.2 内梅罗综合污染指数法

内梅罗综合污染指数法能够较为综合地反映土壤中不同污染物的污染程度,兼顾污染物的平均值和最大值,是当前被广泛使用的综合评价方法之一<sup>[15]</sup>。其计算公式为:

$$I = \sqrt{\frac{P_{\max}^2 + P_{\text{ave}}^2}{2}} \quad (2)$$

式中: $I$ 为综合污染指数, $P_{\max}$ 为各单因子环境质量指数中最大的指数, $P_{\text{ave}}$ 表示各单因子环境质量指数的平均值。重金属污染越严重则数值越大。内梅罗污染指数分级见表1。依据单因子指数法和内梅罗综合污染指数法可将土壤重金属污染划分为5个等级,如表1所示。

### 1.4.3 潜在生态风险指数

对于重金属的生态危害评价,瑞典学者 Hakanson 于 1980 年提出了潜在生态风险指数法,该方法兼顾了环境中各项污染物影响和多种污染物综合影响,并定量地划分出潜在危害程度<sup>[16]</sup>,是目前科学评价土壤重金属污染的先进方法。潜在生态风险指数  $RI$  的计算方法如下:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n T_i \times \frac{C_i}{S_i} \quad (3)$$

式中: $C_i$ 为重金属  $i$  的实测值; $S_i$ 为评价参照值,参比值和评价标准为新疆土壤元素背景值<sup>[12-14]</sup>。 $E_i$ 为重金属单项潜在生态危害指数。 $T_i$ 为重金属  $i$  的毒性系数,此值反映了该种重金属的毒性水平及水体对其污染敏感性。分级标准见表2。

### 1.4.4 数据处理方法

试验数据使用 Excel 2010、Origin 9.0 和 SPSS19.0

表1 土壤重金属污染分级标准<sup>[15]</sup>

Table 1 Criteria for classification of soil heavy metal pollution<sup>[15]</sup>

等级划分	单项污染指数	综合污染指数	污染等级	污染水平
1	$P_i \leq 0.7$	$I \leq 0.7$	安全	清洁
2	$0.7 < P_i \leq 1.0$	$0.7 < I \leq 1.0$	警戒线	尚清洁
3	$1.0 < P_i \leq 2.0$	$1.0 < I \leq 2.0$	轻污染	土壤开始受到污染
4	$2.0 < P_i \leq 3.0$	$2.0 < I \leq 3.0$	中污染	土壤受中度污染
5	$P_i > 3.0$	$I > 3.0$	重污染	土壤受污染已相当严重

进行统计与绘图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 奴拉赛矿区周边土壤基本理化性质

表3为奴拉赛铜矿周边土壤基本理化性质。从表中可以看出,奴拉赛铜矿区、尾矿和农田土壤偏碱性,pH值变化范围不大,其中0~30cm表层土壤中pH值为6.5~7.5,30~70cm土层中土壤pH值为6.7~7.8。0~30cm土壤中,矿区的电导率最高,其次为农田和尾矿;而在30~70cm土壤中电导率大小为:矿区>尾矿>农田。随着矿石的开采,废渣暴露地表后,土壤酸化明显,土壤电导率增高。研究发现,矿区土壤表层以下50cm范围,酸化明显,土壤总酸和交换性酸高于周边农田土壤,分别达到2.9~4.1倍和2.4~2.5倍,且显著高于土壤背景值<sup>[17]</sup>。不同土地利用类型表层(0~30cm)土壤有机质含量高于深层(30~70cm)土壤,且矿区<尾矿<农田。矿区、尾矿和农田在表层(0~30cm)土壤速效氮含量分别为 $2.0 \pm 1.0$ 、 $12.0 \pm 0.1$ 、 $15.0 \pm 2.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,土壤速效钾含量分别为 $78.0 \pm 2.0$ 、 $191.0 \pm 2.0$ 、 $311.0 \pm 3.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;深层(30~70cm)土壤,矿区、尾矿和农田在土壤速效氮含量分别为 $2.0 \pm 0.2$ 、 $12.0 \pm 0.5$ 、 $14.5 \pm 3.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,速效钾含量分别为 $104.0 \pm 3.0$ 、 $153.0 \pm 1.9$ 、 $265.0 \pm 4.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,不同土地利用类型土壤速效氮和速效钾含量均表现为:农

表2 重金属潜在生态危害水平和毒性系数<sup>[16]</sup>

Table 2 The level of potential ecological hazard and toxicity coefficients of heavy metals<sup>[16]</sup>

项目	污染程度的等级划分					
	$E_i < 40$	$40 \leq E_i < 80$	$80 \leq E_i < 160$	$160 \leq E_i < 320$	$E_i \geq 320$	
$E_i$	$E_i < 40$	$40 \leq E_i < 80$	$80 \leq E_i < 160$	$160 \leq E_i < 320$	$E_i \geq 320$	
$RI$	$RI < 150$	$150 \leq RI < 300$	$300 \leq RI < 600$	$RI \geq 600$		
污染程度	轻微生态危害	中等生态危害	强生态危害	很强生态危害	极强生态危害	
总生态风险程度	低	中等	重	严重		
重金属元素	Cr	Cd	Cu	Ni	Zn	Pb
新疆土壤元素背景值 <sup>[12-14]</sup>	47.4	0.27	28.8	33.8	51.6	17.5
毒性系数 $T_i$ <sup>[16]</sup>	2	30	5	5	1	5

田>尾矿>矿区。矿区土壤有机质含量较低,速效氮、有效磷和速效钾含量特征基本一致,土壤氮素主要来自土壤有机质的生物降解,因而与有机质含量存在一定的正相关性<sup>[18]</sup>。裸露岩矿加速风化过程,堆置于土壤上的采矿碎石和尾砂的雨水淋洗过程,导致大量 Ca、Al、Fe 等元素释放,通过固定、沉淀作用使土壤有效磷含量明显降低<sup>[19-20]</sup>。而在酸性条件下,土壤中钾离子可溶性增加,流失量加大,使得土壤速效钾含量降低。

### 2.2 奴拉赛矿区不同土地利用类型重金属含量及分布特征

不同土地利用类型重金属含量如表 4 所示,矿区土壤 Cr、Cd、Cu、Ni、Zn、Pb 含量分别为 3.17、0.14、17.86、0.66、0.64、0.91 mg·kg<sup>-1</sup>,均未超过新疆土壤自然背景值,处于安全水平。尾矿土壤 Cr、Cd、Cu、Ni、Zn、Pb 含量分别为 2.07、0.06、106.21、1.06、0.67、2.5 mg·kg<sup>-1</sup>,土壤中仅 Cu 含量超过新疆土壤自然背景值(28.8 mg·kg<sup>-1</sup>)<sup>[12-14]</sup>;农田土壤中 Cr、Cd、Cu、Ni、Zn、Pb

含量为 2.14、0.06、19.96、0.91、0.47、1.13 mg·kg<sup>-1</sup>,均未超过新疆土壤背景值,处于安全水平。不同土地利用方式的 6 种重金属元素的变异系数最大的是矿区 Cu,高达 59.63%,变异系数最小是农田区 Cd,只有 11.11%。整体上,重金属元素矿区变异系数由小到大的顺序为:Zn<Cr<Pb<Cd<Ni<Cu。除了 Cu 以外,其他 5 种重金属的变异系数都小于 50%。Cu 的变异性较强,空间分布差异显著,受人类工业生产、交通、商业等活动的干扰较为强烈,而其他元素受人类活动的干扰则较小。尾矿区变异系数由小到大的顺序为:Cr<Pb<Ni<Zn<Cd<Cu,变异系数都小于 50%,受人类活动的干扰则较小。农田区变异系数由小到大的顺序为:Cd<Pb<Cr<Ni<Cu<Zn,除 Zn(50.84%)外其他 5 种重金属的变异系数都小于 50%。由此看来,人为活动对奴拉赛矿区周边土壤环境的影响不大。

### 2.3 矿区周边土壤重金属环境风险评估

#### 2.3.1 单因子和综合指数评价

单因子评价法和内梅罗(Nemerow N L)综合污

表 3 土壤样品基本理化性质

Table 3 Basic physical and chemical properties of tested soil samples

采样区	土层/cm	速效氮/mg·kg <sup>-1</sup>	有效磷/mg·kg <sup>-1</sup>	速效钾/mg·kg <sup>-1</sup>	电导率/μS·cm <sup>-1</sup>	盐分/g·kg <sup>-1</sup>	pH 值	有机质/g·kg <sup>-1</sup>
矿区	0~30	2.0±1.0	34.8±0.7	78.0±2.0	150.0±2.2	2.3±0.4	6.7±0.2	23.9±2.5
	30~70	2.0±0.2	23.4±0.3	104.0±3.0	156.5±2.6	2.0±0.3	6.7±0.3	23.5±2.3
尾矿	0~30	12.0±0.1	26.6±0.9	191.0±2.0	121.8±2.2	1.6±0.6	6.5±0.8	29.4±8.6
	30~70	12.0±0.5	25.3±1.6	153.0±1.9	135.6±2.0	1.6±0.3	6.9±0.5	28.4±8.4
农田	0~30	15.0±2.0	62.6±0.8	311.0±3.0	132.3±3.3	1.9±0.3	7.5±0.6	36.4±5.7
	30~70	14.5±3.0	43.5±0.5	265.0±4.0	120.8±2.9	1.8±0.4	7.8±0.3	35.3±5.5

表 4 奴拉赛矿区周边土壤重金属含量特征

Table 4 The contents of heavy metals in the soils of Nulasai mining areas

采样区	数值	重金属含量					
		Cr	Cd	Cu	Ni	Zn	Pb
矿区	最小值/mg·kg <sup>-1</sup>	1.30	0.08	2.37	0.10	0.37	0.34
	最大值/mg·kg <sup>-1</sup>	4.40	0.25	42.20	1.20	0.85	1.40
	平均值/mg·kg <sup>-1</sup>	3.17	0.14	17.86	0.66	0.64	0.91
	变异系数/%	28.13	42.85	59.63	48.66	17.78	31.73
尾矿	最小值/mg·kg <sup>-1</sup>	1.21	0.03	20.88	0.65	0.37	1.34
	最大值/mg·kg <sup>-1</sup>	2.64	0.12	181.87	1.47	0.92	3.10
	平均值/mg·kg <sup>-1</sup>	2.07	0.06	106.21	1.06	0.67	2.50
	变异系数/%	16.13	30.09	40.63	21.45	23.32	20.16
农田	最小值/mg·kg <sup>-1</sup>	1.61	0.05	8.36	0.37	0.03	0.69
	最大值/mg·kg <sup>-1</sup>	3.16	0.08	42.04	1.47	0.85	1.40
	平均值/mg·kg <sup>-1</sup>	2.14	0.06	19.96	0.91	0.47	1.13
	变异系数/%	17.96	11.11	44.55	31.14	50.84	15.85
	背景值	47.4	0.27	28.8	33.8	51.6	17.5

染指数法是常用来评估土壤重金属污染程度关键指标<sup>[21-22]</sup>。不同深度土壤重金属含量分析有助于判断土壤重金属的来源,表层0~30 cm一般是农业利用主要层次,即农业土壤的耕作层,若深层(30~70 cm)土壤重金属含量高于表层,表明土壤重金属有可能来自于土壤自然成土过程。对奴拉赛矿区不同土地利用类型土壤重金属污染现状进行分析,见表5。结果表明,单因子污染指数和综合污染指数均较低,分别为 $P_i \leq 0.7$ 和 $I \leq 0.7$ ,因此不同土地利用类型土壤均处于安全范围之内。从表层(0~30 cm)土壤来看,3种不同土地利用方式土壤都未受到6种重金属污染;深层(30~70 cm)土壤来看,矿区、尾矿和农田土壤6种重金属的单因子污染指数和综合污染指数均为 $P_i \leq 0.7$ 和 $I \leq 0.7$ ,在安全范围之内。

2.3.2 潜在生态风险指数

潜在生态风险指数(Potential ecological risk index, RI)根据重金属毒性来评价土壤中重金属污染程度<sup>[22-23]</sup>。为了进一步研究矿区周边土壤潜在生态风险污染级别,计算并统计该区域6种重金属的潜在风险指数,结果见表5。从表5可知,总体上来看,不同土层土壤重金属的潜在生态环境风险均较低,矿区、尾矿、农田的 $E_{Cr}$ 、 $E_{Cd}$ 、 $E_{Cu}$ 、 $E_{Ni}$ 、 $E_{Zn}$ 、 $E_{Pb}$ 均小于40。从不同土层来看,0~30 cm土层土壤的重金属潜在风险高于30~70 cm的土壤。评价结果表明(图2),从3种土地利用方式来看,在0~30 cm和30~70 cm土层中,RI大小顺序为 $R_{尾矿} > R_{矿区} > R_{农田}$ ,但是3种土地利用方式

土壤的生态风险指数都小于150,其生态风险程度较低,不同土地利用类型土壤中,表层土壤0~30 cm重金属含量高于深层土壤30~70 cm重金属含量,说明矿产资源开发对周边土壤有一定潜在影响。对于农业土壤来说,0~30 cm耕作层土壤重金属含量偏高还可能与化肥和农药的使用有关;总体看,不同土地利用类型土壤中重金属含量都较低,未受到污染。

一般认为,矿产资源开发会对周边环境造成不良的影响,而金属矿区周边土壤重金属含量较高,土壤污染较为严重<sup>[24-25]</sup>。土壤中的Cu、Zn、Pb、Cd、Cr等重金属,其中Cu和Cd是导致矿区土壤重金属污染的主要因素,导致很强的生态危害<sup>[26]</sup>。尾矿的堆积造成了矿区周边土壤中重金属不同程度的富集,严重影响周边的生态环境。硫化铜矿矿区上游和下游农田Cu、

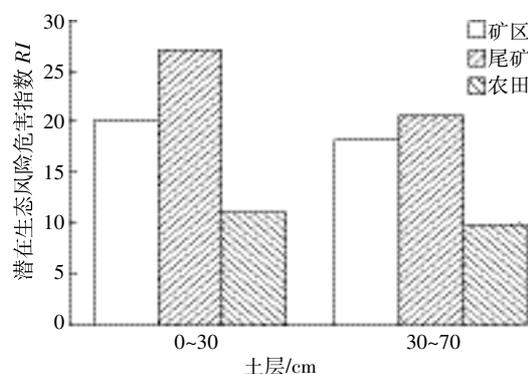


图2 不同土地利用类型土壤重金属生态危害综合指数

Figure 2 Ecological index of heavy metals in soil of different land use types

表5 奴拉赛矿区不同土地利用类型土壤重金属污染评价指数及生态风险指数

Table 5 Evaluation and potential ecological risk indexes of heavy metal pollution in soils of different land use types in Nulasai mining areas

采样区	土层/cm	单因子污染指数( $P_i$ )						$I$
		Cr	Cd	Cu	Ni	Zn	Pb	
矿区	0~30	0.010 2	0.200 2	0.062 3	0.002 3	0.002 2	0.003 0	0.200 2
	30~70	0.0114	0.1229	0.0376	0.0039	0.0009	0.0012	0.1430
尾矿	0~30	0.006 6	0.205 7	0.387 2	0.003 4	0.002 4	0.008 9	0.205 7
	30~70	0.0076	0.0587	0.1877	0.0058	0.0014	0.0442	0.1448
农田	0~30	0.008 9	0.200 4	0.085 1	0.004 0	0.002 1	0.004 6	0.200 4
	30~70	0.008 3	0.145 7	0.180 2	0.003 7	0.001 5	0.003 1	0.145 7

采样区	土层/cm	生态风险系数( $E_i$ )						$RI$
		Cr	Cd	Cu	Ni	Zn	Pb	
矿区	0~30	0.13	16.34	3.25	0.10	0.01	0.26	20.09
	30~70	0.14	13.65	2.60	0.11	0.01	0.25	18.20
尾矿	0~30	0.08	5.93	20.17	0.15	0.01	0.77	27.11
	30~70	0.09	6.52	13.03	0.17	0.01	0.62	20.45
农田	0~30	0.09	6.86	3.70	0.15	0.01	0.33	11.13
	30~70	0.08	6.68	2.70	0.12	0.01	0.29	9.91

Zn 和 Pb 均未超过土壤环境质量的二级标准,而污染区则超过了土壤环境质量的二级标准,因此存在一定的污染<sup>[6]</sup>。大兴安岭森林土壤 Cd、Cr、Pb、Cu、Zn、Ni、Hg、As 8 种重金属含量均超过二级标准限值,其中 Cu、Zn、As 的最大值超过一级标准<sup>[7]</sup>。但也有研究表明,一个未开采的铅锌矿周边土壤也存在一定的重金属污染<sup>[28]</sup>,可能与成土环境有关。部分矿区周边土壤、蔬菜、玉米样品中,As、Pb、Cd 超标率很大<sup>[29]</sup>。矿区土壤重金属污染对周边环境是否存在危害取决于人为活动的影响。奴拉赛铜矿开发对周边土壤环境未造成不良影响,这与该矿区矿产开发强度、规模、保护措施得当密切相关。因此在合理利用矿产资源的同时,要重视成矿元素和伴生元素的复合污染,实行清洁生产制度,加强管理,规范开采、选冶和运输方式,最大程度地防止尾矿、废水、矿渣等对当地生态环境及居民、牲畜等造成危害,并选择合理的生态恢复措施,避免矿区重金属污染<sup>[5]</sup>。

### 3 结论

(1)与周边农田土壤相比,奴拉赛矿区和尾矿区土壤酸化明显,电导率和盐分含量增加,土壤肥力下降,表现为土壤有机质、速效氮、速效钾、有效磷含量均有所降低。

(2)奴拉赛铜矿区周边土壤重金属 Cr、Cd、Pb、Cu、Ni 和 Zn 含量总体较低,仅 Cu 超过新疆土壤自然背景值,处于安全水平。总体上矿区重金属含量较高,农田土壤重金属含量较低。

(3)单一因子、内梅罗综合和潜在生态风险评估发现,在 0~30 cm 土层和 30~70 cm 土层,3 种不同土地利用类型土壤重金属风险为尾矿>矿区>农田,各土地利用类型土壤生态风险指数较低。

(4)总体来看,虽然矿产资源开发历史悠久,但由于受开采规模及强度的制约,新疆奴拉赛矿区矿产资源开发未对周边土壤环境造成显著不良影响。

#### 参考文献:

[1] 樊 霆,叶文玲,陈海燕,等.农田土壤重金属污染状况及修复技术研究[J].生态环境学报,2013,22(10):1727-1736.  
FAN Ting, YE Wen-ling, CHEN Hai-yan, et al. Review on contamination and remediation technology of heavy metal in agricultural soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22 (10):1727-1736. (in Chinese)

[2] 环境保护部,国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[J].中国环保产业,2014(5):10-11.

Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources. National soil pollution survey bulletin[J]. *China Environmental Protection Industry*, 2014(5):10-11. (in Chinese)

[3] 陆泗进,王业耀,何立环.会泽某铅锌矿周边农田土壤重金属生态风险评价[J].生态环境学报,2014,23(11):1832-1838.  
LU Si-jin, WANG Ye-yao, HE Li-huan. Heavy metal pollution and ecological risk assessment of the paddy soils around a Pb-Zn mine in Huize County [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(11): 1832-1838. (in Chinese)

[4] Dinelli E, Tateo F. Factors controlling heavy metals associated with natural weathering of coal mine spoils[J]. *Environment Pollution*, 2003: 1138-1150.

[5] 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):3099-3105.  
GUO Wei, ZHAO Ren-xin, ZHANG Jun, 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): 3099-3105. (in Chinese)

[6] 胡国成,张丽娟,齐剑英,等.贵州万山汞矿周边土壤重金属污染特征及风险评价[J].生态环境学报,2015,24(5):879-885.  
HU Guo-cheng, ZHANG Li-juan, QI Jian-ying, et al. Contaminant characteristics and risk assessment of heavy metals in soils from Wanshan mercury mine area, Guizhou Province[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(5):879-885. (in Chinese)

[7] 王 轲,宫惠峰,张 辉.不同土地利用方式下西部矿业城市土壤重金属污染状况调查[J].安徽农业科学,2009,37(9):4254-4256.  
WANG Ke, GONG Hui-feng, ZHANG Hui. Survey on the heavy metal pollution in soil under different land-utilization ways in west mining city[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(9):4254-4256. (in Chinese)

[8] 储彬彬,罗立强.南京栖霞山铅锌矿地区土壤重金属污染评价[J].岩矿测试,2010,29(1):5-8,13.  
CHU Bin-bin, LUO Li-qiang. Evaluation of heavy metal pollution in soils from Nanjing Qixiashan lead-zinc mines[J]. *Rock Mineral Analysis*, 2010, 29(1):5-8, 13. (in Chinese)

[9] 梅建军,李延祥.新疆奴拉赛古铜矿冶遗址冶炼技术初步研究[J].自然科学史研究,1998,17(3):289-295.  
MEI Jian-jun, LI Yan-xiang. Tentative study on the smelting technology of Nulasai site in Nileke county of Xinjiang[J]. *Studies in the History of Natural Sciences*, 1998, 17(3):289-295. (in Chinese)

[10] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2005.  
BAO Shi-dan. Soil agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005. (in Chinese)

[11] 中华人民共和国农业部. GB 9834—1988 土壤有机质测定法[S].北京:中国国家标准出版社,1988.  
The Ministry of agriculture of the People's Republic of China. Measurement of soil organic matter GB 9834—1988[S]. Beijing: China National Standard Publishing House, 1988. (in Chinese)

[12] 李 健,郑春江.环境背景值数据手册[M].北京:中国环境科学出版社,1989:220-221.  
LI Jian, ZHENG Chun-jiang. Environmental background value data handbook[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1989:220-

221. (in Chinese)
- [13] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1990:329-492.  
China's Environmental Monitoring Station. The soil element background values[M]. Beijing:China Environmental Science Press, 1990:329-492. (in Chinese)
- [14] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 北京:科学出版社, 2005:522-523.  
CHEN Huai-man. Environmental soil science[M]. Beijing:Science Press, 2005:522-523. (in Chinese)
- [15] 汪芳芳. 淮北矿区土壤重金属污染现状评价与风险评估[D]. 合肥:合肥工业大学, 2014.  
WANG Fang-fang. The status assessment and risk evaluation of soil heavy metals pollution in Huaibei mining area[D]. Hefei:Hefei University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [16] 涂常青, 温欣荣, 张 镜, 等. 硫化铜矿区周边农田土壤重金属污染及其生态危害评价[J]. 土壤通报, 2013, 44(4):987-992.  
TU Chang-qing, WEN Xin-rong, ZHANG Jing, et al. Evaluation of the heavy metals pollution and its ecological risks of the farmland soil around the cupric sulfide ore district[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(4):987-992. (in Chinese)
- [17] 林文杰. 莲花山钨矿区土壤重金属污染与理化特征[J]. 土壤通报, 2014, 45(1):232-236.  
LIN Wen-jie. Characterization of heavy metals contamination and physicochemical properties of soils in Lianhuashan tungsten mine area of Guangdong Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(1):232-236. (in Chinese)
- [18] 聂斌斌, 蔡强国, 张卓文, 等. 植被恢复过程中土壤有机质和全氮的变化特征及区域差异 [J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2):363-371.  
NIE Bin-bin, CAI Qiang-guo, ZHANG Zhuo-wen, et al. Change characteristics and regional differences in organic matter and total nitrogen contents in topsoil under restored vegetation[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(2):363-371. (in Chinese)
- [19] 李 焱, 孙约兵, 徐应明, 等. 镉污染区水稻土磷素含量特征及其形态分布规律[J]. 环境化学, 2017, 36(3):542-548.  
LI Ye, SUN Yue-bing, XU Ying-ming, et al. Characteristics and speciation distribution of phosphorus in Cd contaminated paddy soil[J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(3):542-548. (in Chinese)
- [20] Shi R Y, Li J Y, XU R K, et al. Ameliorating effects of individual and combined application of biomass ash, bone meal and alkaline slag on acid soils[J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 162:41-45.
- [21] 邹素敏, 杜瑞英, 文 典, 等. 大宝山矿区某农田蔬菜重金属污染状况及健康风险评估[J]. 农业资源与环境学报, 2016(6):568-575.  
ZOU Su-min, DU Rui-ying, WEN Dian, et al. Heavy metals pollution in vegetables grown on some farmlands around Dabaoshan mine and its healthy risk evaluation[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016(6):568-575. (in Chinese)
- [22] Sun Y B, Zhou Q X, Xie X K, et al. Spatial, sources and risk assessment of heavy metal contamination of urban soils in typical regions of Shenyang, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 174:455-462.
- [23] 何东明, 王晓飞, 陈丽君, 等. 基于地积累指数法和潜在生态风险指数法评价广西某蔗田土壤重金属污染[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(2):126-131.  
HE Dong-ming, WANG Xiao-fei, CHEN Li-jun, et al. Assessment on heavy metals contaminations of sugarcane soil in Guangxi Province by the geo-accumulation index and potential ecological risk index[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2014, 31(2):126-131. (in Chinese)
- [24] 王 斐, 黄益宗, 王小玲, 等. 江西某铜矿冶炼厂周边土壤重金属生态风险评价[J]. 环境化学, 2014, 33(7):1066-1074.  
WANG Fei, HUNG Yi-zong, WANG Xiao-ling, et al. Ecological risk assessment of heavy metals in surrounding soils of a copper smelting plant in Jiangxi Province[J]. *Environmental Chemistry*, 2014, 33(7):1066-1074. (in Chinese)
- [25] 石 平. 辽宁省典型有色金属矿区土壤重金属污染评价及植物修复研究[D]. 沈阳:东北大学, 2010.  
SHI Ping. Research on disused tailing land in Liaoning mine area and assessment of its soil pollution by heavy metal[D]. Shenyang:North-eastern University, 2010. (in Chinese)
- [26] 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.  
KANG Hong-yu, KANG Ri-feng, ZHANG Nai-ming, et al. Assessment of potential ecological risk of heavy metals in soils in a copper mine in Diqing autonomous prefecture[J]. *Environmental Science Survey*, 2016, 35(1):75-81. (in Chinese)
- [27] 张继舟, 吕 品, 王立民, 等. 大兴安岭森林土壤重金属含量空间变异与污染评价[J]. 生态学杂志, 2015, 34(3):810-819.  
ZHANG Ji-zhou, LV Pin, WANG Li-min, et al. Spatial variability of heavy metal contents and contamination assessment in forest soils of Daxing'an Mountains[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(3):810-819. (in Chinese)
- [28] 张广胜, 徐文彬, 李俊翔, 等. 一个未开采的铅锌矿周边土壤重金属含量及生态安全评价[J]. 生态环境学报, 2015, 24(3):522-528.  
ZHANG Guang-sheng, XU Wen-bin, LI Jun-xiang, et al. Heavy metals pollution and eco-security evaluation in the surrounding soil of an untapped lead-zinc mining[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(3):522-528. (in Chinese)
- [29] 余元元, 黄宇妃, 宋 波, 等. 南丹县矿区周边土壤与农产品重金属含量调查及健康风险评估[J]. 环境化学, 2015, 34(11):2133-2135.  
YU Yuan-yuan, HUANG Yu-fei, SONG Bo, et al. Investigation on heavy metal content and health risk assessment of soil and agricultural products in Nandan country mining area[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 34(11):2133-2135. (in Chinese)