doi:10.3969/j.issn.2095-1744.2022.07.24

我国西南某红土镍尾矿重金属污染特征及潜在生态风险

王 艳[1],洪 松[1],张 云[1],李 奏[2],叶志祥[1],巴 图[1]
(1. 武汉大学 资源与环境科学学院,武汉 430070;
2. 湖北省水利水电科学研究院,武汉 430079)

摘 要:为探究红土镍尾矿对周边环境的潜在风险,以我国西南地区某典型红土镍尾矿为研究对象,采集了尾矿库及周边环境中尾矿、土壤、地表水、底泥及植被共 67 个样品,分析了该尾矿库的污染特征及周边环境污染风险,为该尾矿库重金属污染治理和修复提供依据。采用电感耦合等离子体光谱仪(ICP-OES)测定重金属铜、镍、钴、铬等含量;通过测试尾矿库中各重金属的形态特征,分析其潜在迁移能力。运用潜在生态风险指数分析尾矿库周边土壤的生态风险水平。结果表明:与我国西北、东北地区硫化镍尾矿中重金属 Cu、Ni 含量较高不同,该红土镍尾矿及其周边土壤中主要重金属为 Ni、Co、Cr,Cu 含量较小。形态分析结果表明,总体上各元素残渣态占比高于其他形态,但在个别深度上,Co 还原态占比高于残渣态,Co 潜在迁移能力大于 Ni 和 Cr。库周边土壤及河流底泥中 Ni、Co 和 Cr 超标严重,土壤综合潜在生态风险平均值达到了严重污染,表明该镍尾矿库周边土壤已经受到了 Ni、Co、Cr 等重金属的严重威胁。尾矿库附近植物中重金属含量分析结果表明,部分植物中 Ni、Co 含量超过了生态土壤筛选值中植物体内重金属含量限值。

关键词:镍尾矿;重金属;土壤;底泥;污染风险
中图分类号:X53 **文献标志码**:A **文章编号**:2095-1744(2022)07-0186-07

Heavy Metals Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk Analysis Around a Nickel Laterite Ore Tailings Pond in Southwest China

WANG Yan[1], HONG Song[1], ZHANG Yun[1], LI Yan[2], YE Zhixiang[1], BA Tu[1]
(1. School of Resources and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430070, China;
2. Hubei Water Resources Research Institute, Wuhan 430079, China)

Abstract: In order to explore the potential impact of laterite nickel tailings on the surrounding environment, a typical laterite nickel tailings pond in southwest China were chosen as the research object. 67 samples of tailings, soil, surface water, sediment and vegetation in the tailings pond and surrounding environment were collected, and the pollution characteristics of the tailings pond and the pollution risk of the surrounding environment were analyzed, so as to provide basic support for the treatment and restoration of heavy metal pollution in the tailings pond. The concentrations of heavy metals such as copper, nickel, cobalt and chromium were determined by inductively coupled plasma-optical emission spectroscopy(ICP-OES). By testing the morphological characteristics of heavy metals in the

收稿日期:2021-12-26
基金项目:国家重点研发计划(2018YFC1801701);湖北省水利重点科研项目(HBSLKY201814)
Fund: Supported by the National Key R&D Program of China(2018YFC1801701); Key Scientific Research Projects of Water Conservancy in Hubei Province(HBSLKY201814)
作者简介:王 艳(1982—),女,博士,讲师,主要从事场地重金属污染研究。
通信作者:李 奏(1982—),男,硕士,高级工程师,主要从事水污染防治研究。
引用格式:王艳,洪松,张云,等. 我国西南某红土镍尾矿重金属污染特征及潜在生态风险[J]. 有色金属工程,2022,12(7):186-192.
WANG Yan, HONG Song, ZHANG Yun, et al. Heavy Metals Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk Analysis Around a Nickel Laterite Ore Tailings Pond in Southwest China[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(7): 186-192.

tailings pond, its potential migration ability was analyzed. The potential ecological risk indexes were used to analyze the ecological risk level of the soil around the tailings pond. The results shown that, the heavy metals Ni, Co and Cr in the surrounding soil of this nickel laterite tailings account for a high proportion, while copper concentration was low, which is different from the nickel sulfide tailings in Northwest and Northeast China, where the main heavy metals were Cu and Ni. The results of morphological analysis shown that the proportion of residual state of each element is higher than that of other forms, but in some depths the proportion of reduced state is higher than that of residual state. And the potential migration ability of Co is greater than that of Ni and Cr. Concentrations of heavy metals Ni, Co and Cr in the surrounding environmental soil and river sediment seriously exceeded the standard, and the average value of soil comprehensive potential ecological risk has reached serious pollution level, indicating that the soil around the nickel tailings pond has been seriously threatened by heavy metals such as Ni, Co and Cr. The analysis results of heavy metal content in plants near the tailings pond shown that the concentrations of Ni and Co in some plants exceed the screening value of ecological soil(in plant).

Key words: Ni tailings; heavy metals; soil; sediment; pollution risk

我国镍矿资源主要分布在西北,其次为西南和东北。镍矿的开采过程中产生大量尾矿,不仅占用土地,对周边土壤和植物等也产生了一定影响[1-2]。高静[3]对甘肃金昌某铜镍矿区进行了调查,结果表明,矿区土壤和植被中,Cu、Zn、Ni、Co、Pb 和 Mn 的平均含量均超过了该地区相应的土壤重金属背景值,Cu、Ni 污染严重,矿区植物多样性受 Cu、Ni、Co 影响较大,冶炼厂周边 Co 含量较高。夏瑜等[4]以我国东北典型镍矿区为研究对象,分析了尾矿中 Ni 的溶出特性,但未明确分析尾矿对周边环境的影响。贾丽[5]研究了吉林省某镍矿区耕地土壤/玉米体系中重金属污染特征及迁移规律,结果表明该矿区耕地土壤受到不同程度的污染,Ni、Cu 污染最严重,局部伴随 Cd、Zn 污染,Cr、Pb、As 对土壤污染较小,矿区耕地上玉米粒中 Ni 含量超标严重。李泽熙等[6]对我国四大硫化镍生产企业的尾矿废水进行了分析,结果表明,尾矿库排水重点防控的重金属依次为铜、镍、砷、铬、铅。王芳等[7]选取我国三个典型硫化镍矿的尾矿和废石进行分析,结果表明废石和尾矿中重点防控的重金属为砷、镉、铬,主金属镍和铜也应重点防控。目前关于镍矿的研究多集中于采选技术、废水处理技术[8-11],而关于镍尾矿对周边环境影响的研究不多,且主要集中于镍矿资源较丰富的西北以及东北地区的部分矿区[12-14],对西南地区的研究较少。且西北和东北的镍矿主要为硫化镍矿,未涵盖红土镍矿的研究。不同类型尾矿主要重金属含量及形态差异较大,表现出不同的污染特征。因此,对西南地区红土镍矿开展重金属污染特征及环境风险研究具有重要意义。

本文以西南某典型红土镍尾矿为研究对象,通过现场取样回室内分析,分析了尾矿及周边土壤、地表水、底泥中重金属含量、尾矿主要重金属的赋存形态,研究了重金属迁移能力和土壤潜在生态风险,并对尾矿库区内植被的重金属富集开展初步研究,为该类型尾矿库修复提供理论依据。

1　实验材料与方法

在研究对象尾矿库及周边耕地、水体等分别设置采样点,共计样品数 62 个,其中尾矿样 43 个,土样 11 个,水样 8 个,同时采集尾矿及附近典型植株样品 5 个,所取样品带回实验室分析。先采用手持式 X 射线荧光分析仪(XRF)分析尾矿重金属含量,再选择其中重点重金属进行实验室分析。重点重金属含量采用电感耦合等离子体光谱仪(ICP-OES)测定,采用三步法(BCR 连续提取法)进行重金属形态分析。采用潜在生态风险指数评估土壤中金属生态风险的程度,具体计算方法见作者已发表文献[15]。

2　结果与讨论

2.1　尾矿库及周边重金属污染特征

2.1.1　元素含量初步筛选

首先采用 XRF 分析尾矿中各元素含量,以筛选重点元素。各采样点元素含量如表 1 所示。结果表明,尾矿样品中,高于检出限的元素分别是 Ni、Co、Cu、Cr 和 Zn,其中,Ni、Co、Cr 显著高于农用地土壤污染风险筛选值和当地土壤背景值,Cu 和 Zn 低于农用地土壤环境标准风险值和当地土壤背景值。As、Cd、Hg、Pb 含量较低,均低于仪器检出限。尾矿主要重金属为 Ni、Co、Cr,选择 Ni、Co、Cr 作为尾矿和周边土壤及水体样品进一步分析的指标,同时为了与硫化镍尾矿对照,将 Cu 元素也作为本研究各样品的分析指标。

表 1 基于 XRF 的尾矿中金属元素含量

Table 1 Heavy metals concentration of tailings based on XRF

Element	Content	RSV		Local background value
		6.5<pH<7.5	pH>7.5	
As	ND	30	25	21.9
Cd	ND	0.3	0.6	0.19
Co	123—192	—	—	18.95
Cr	1 387—4 082	200	250	71.6
Cu	23.9—36.1	100	100	47.25
Hg	ND	2.4	3.4	0.067
Ni	2 796—3 274	100	190	46.75
Pb	ND	120	170	40.4
Zn	56—81	250	300	94.4
pH	6.93—8.26	—	—	—

Note: Local background values refers to the background values of soil elements for Yunnan Province, China(1990). RSV refer to risk screening values for soil contamination of agricultural land, according to the national Soil Environmental Quality Standard(GB15618-2018).

2.1.2 尾矿和土壤中重金属含量分析

利用 ICP-OES 分析尾矿、周边土壤和河流底泥各样品中重金属 Ni、Co、Cr 含量，平均值如表 2 所示。

表 2 尾矿、土壤和河流底泥中重金属含量及 pH 平均值

Table 2 pH and average concentration of heavy metals in tailings and soil samples

Element	Tailings	Soil	Sediment in the river	Local background value	RSV6.5<pH<7.5/ pH>7.5	RIV6.5<pH<7.5/ pH>7.5
Cu/(mg·kg^{-1})	23.6	46	26.86	47.3	100/100	—
Ni/(mg·kg^{-1})	4 710	5 708	5 453.04	46.8	100/190	—
Co/(mg·kg^{-1})	132	329	275.06	19	—	—
Cr/(mg·kg^{-1})	3 301	2 615	2 395.77	72	200/250	1 000/1 300
pH	7.63	7.36	7.76	—	—	—

Note: Local background values refers to the background values of soil elements for Yunnan Province, China(1990). RSV and RIV refer to risk screening values and risk intervention values for soil contamination of agricultural land, respectively, according to the National Soil Environmental Quality Standard(GB15618-2018).

由表 2 可见：

1)尾矿、土壤以及底泥样品的 pH 平均值在 7.3～7.8，呈弱碱性。

2)尾矿中 Ni、Co、Cr 的平均含量高于当地背景值[16]，分别是背景值的 101、6.9 和 46 倍，铜含量低于背景值，表明该红土镍尾矿中富含 Ni、Co、Cr 三种重金属，Cu 含量较低，这与我国西北和东北地区硫化镍尾矿中富含 Cu 和 Ni 而 Co 与 Cr 含量较少有所不同。

3)库区土壤中 Ni、Co、Cr 的平均含量也高于背景值，分别是背景值的 122 倍、17 倍和 36 倍。Ni、Cr 含量约是农用地土壤污染风险筛选值的 10～50 倍，Cr 含量超过农用地土壤污染风险管制值，约是风险管制值的 2～3 倍。

各样点土壤中 Cu 的含量差别不大，除尾矿库内土壤中 Cu 含量达 116.87 mg/kg 外，其余各点土壤中 Cu 含量均小于 50 mg/kg，与背景值相当。

尾矿库内、坝上和坝下土壤，以及坝下河流底泥中重金属 Ni、Co 和 Cr 富集，受尾矿影响大，需要对尾矿中的这三种重金属重点关注。

2.1.3 尾矿库内水体及周边河流中重金属分析

采样过程中采样坑内有水渗出，因此采集了渗出水样，利用 ICP-OES 分析尾矿库内积水及库内采样坑渗水的重金属浓度，如表 3 所示。库内表层积水中 Ni 浓度平均为 0.115 mg/L，Co 的浓度分别为 0.003 1 mg/L。采样坑渗水中，Ni、Co 浓度分别为 1.22 mg/L 和 0.06 mg/L，显著高于库内表层积水，表层积水和采样坑渗水中 Cr 浓度差异不大。尾矿库内表层积水 pH 值为 8.0，大于采样坑渗水 pH 值 7.1，表明在尾矿库内部废水 pH 影响下，尾矿库内重金属较容易释放，Ni、Co 从尾矿迁移至水相中的能力较强，应重视尾矿库废水的排放。

尾矿库排水沟汇入附近河流，在尾矿库汇入河流上下游 3 个点位(汇入点上游 700 m、汇入点下游 400 m 和汇入点下游 1.6 km，相对位置见图 1)采集水样，分析重金属含量，以进一步研究重金属向周边

环境的迁移情况,各元素浓度结果见表 3。结果表明,位于汇入口下游 400 m 处的中游点 Ni、Co 浓度最大,达 6.0 mg/L 和 0.4 mg/L,其次为下游点,Ni、Co 浓度分别为 0.22 mg/L 和 0.02 mg/L,上游点水样中 Ni、Co 浓度最小。可以看出,尾矿库对坝下河流中 Ni、Co 浓度有较大贡献,中游点和下游点水样中 Ni 浓度均超过了灌溉用水标准,上游点各元素均未超标,中游点河水中 Ni 浓度是灌溉用水标准的 30 倍,应避免利用尾矿排水沟汇入口以下河段的河水进行农田灌溉。

此外,在河流上游采样点附近,发现有来自尾矿库区产生的降雨径流汇入河流,其颜色较为浑浊,与河流的清澈水体差异较大,对该浑浊径流进行采样分析,见表 3。结果表明,其 Ni、Co 浓度分别为 2.51 mg/L、0.153 mg/L,Ni 浓度为灌溉用水标准限值的 12.6 倍,说明尾矿区可能存在较大的面源污染隐患。在降雨影响下,矿区内重金属随径流进入河流,对河流水质产生较大影响,如利用河水灌溉或用于牲畜饮水,将对农作物和牲畜产生危害。

表 3　水样中重金属含量平均值及 pH 值

Table 3　pH and average concentration of heavy metals in water samples

Elements	River water			Rainfall runoff	Surface water in the tailings pond	seepage in sampling pit	Criterion*
	Upper reaches	Middle reaches	Lower reaches				
Cu/(mg·L^{-1})	0.000 6	0.010 5	0.001 4	0.000 2	0.001 4	0.010 2	0.5
Ni/(mg·L^{-1})	0.036 4	6.050 0	0.219 0	2.510 0	0.115 0	1.220 0	0.2
Co/(mg·L^{-1})	0.001 3	0.394 0	0.017 1	0.153 0	0.003 1	0.060 5	1.0
Cr/(mg·L^{-1})	—	—	0.027 8	—	0.124 0	0.180 0	—
pH	7.73	7.72	8.18		8.0	7.1	5.5—8.5

Note: * Criterion refers to the National Standard for Irrigation Water Quality(GB 5084-2021).

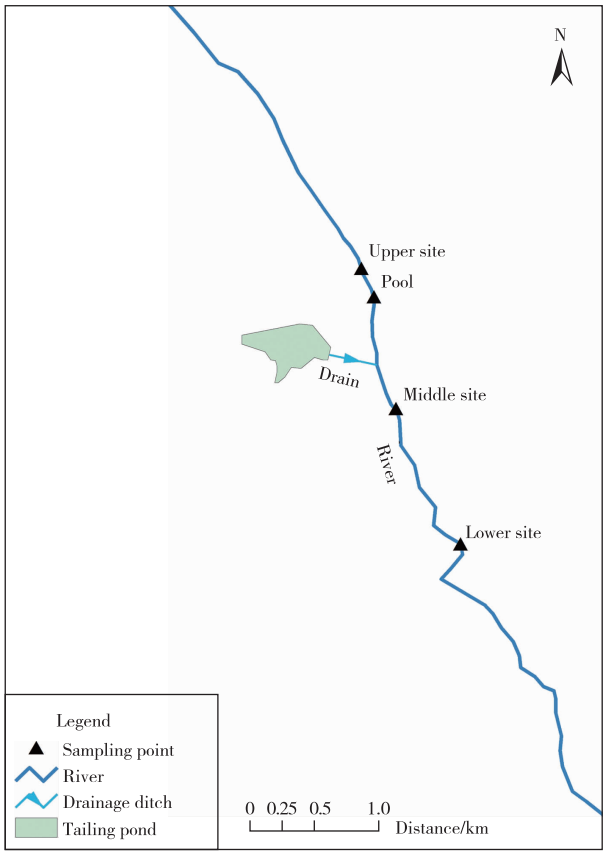

图 1　河流采样点相对位置示意图

Fig. 1　Location of river sampling points

2.2　尾矿中重金属潜在迁移能力分析

利用改进 BCR 法分析尾矿中不同深度样品中重金属形态,结果如图 2 所示。

Ni 各形态在不同深度上差异不大,在各深度上均以残渣态为主,其次为可氧化态,其平均含量分别占总量的 76.7%和 14.2%,pH 值降低和强氧化环境有利于可氧化态 Ni 从尾矿中释放,对周边环境造成污染。Co 在各深度以残渣态为主,其次为可还原态,其平均含量分别占总量的 58.3%和 31.1%,当环境 pH 值降低或进入还原状态,可还原态 Co 容易重新释放出来;从表层至 1.4 m,残渣态 Co 占比呈增加趋势,可还原态 Co 占比呈减小趋势。Cr 在各深度以残渣态为主,其次为可氧化态,其平均含量分别占总量的 90.4%和 7.7%,在酸性或强氧化环境下,可氧化态 Cr 会释放至环境中;表层 Cr 可氧化态小于中层和底层,表明表层在氧化作用下,可氧化态溶出,含量降低。

将弱酸提取态、可还原态和可氧化态之和占总量的百分比视为重金属的潜在迁移能力。结果表明,Co、Ni 和 Cr 的潜在迁移率分别为:Co(41.7%)＞Ni(23.3%)＞Cr(9.5%)。Co 具有较大的潜在迁移能力,需加以重视。研究表明[17],Co 是人体必需微量元素,具有刺激造血、参与辅酶反应等生理功能。但过量接触钴及其化合物可引起呼吸道刺激反应、皮肤过敏、心肌病等一般毒性反应,其遗传毒性、致癌作用及生殖发育毒性已得到体外和动物实验证实。

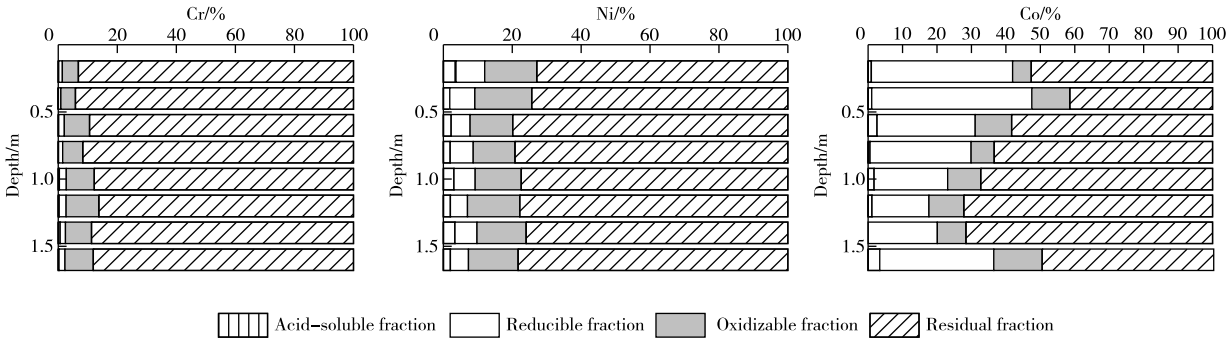

图 2 不同深度样品中 Co、Ni 和 Cr 的形态分布

Fig. 2 Morphological distribution of Co, Ni and Cr in samples at different depths

2.3 尾矿库周边土壤潜在生态风险分析

通过尾矿库周边土壤采样分析可知，尾矿库周边土壤中 Co、Ni 和 Cr 富集严重，本研究通过计算土壤单一潜在生态风险指数 *Er* 和综合潜在生态风险指数 *RI*，见表 4，分析尾矿库及周边土壤环境潜在的生态风险。

结果表明，土壤中 Cu 的 *Er* 均低于 40，处于较低水平；Ni 的 *Er* 较高，均值为 212.60，处于高度潜在生态风险水平，其中 80%的样点达到高度潜在生态风险水平；Co 的 *Er* 均值为 104.97，属严重潜在生态风险，60%的样点达到严重潜在生态风险水平；Cr 的 *Er* 均值为 45.53. 达到中度潜在生态风险，10%的样品为严重潜在生态风险。

综合潜在生态风险指数 *RI* 计算结果显示，研究区域内 40%的样品污染程度为中度污染，50%的样品处于严重污染，10%的样品为高度污染，表明该镍尾矿库周边土壤已经受到了 Ni、Co、Cr 等重金属的严重威胁。镍对综合潜在生态风险指数的贡献最大，占 57.8%，其次为 Co 和 Cr，在对该地区土壤修复中，应首先考虑由 Ni、Co 和 Cr 引起的潜在生态风险。

表 4 单一潜在生态风险指数 *Er* 和综合潜在生态风险指数 *RI*

Table 4 Potential ecological risk index *Er* and *RI* of heavy metals in soil samples

Risk index		The minimum	Mean/Contribution/%	The maximum
Potential risk index of individual metal(*Er*)	Cu	2.04	4.92/1.3	10.84
	Ni	113.9	212.6/57.8	354.38
	Co	52.2	104.97/28.5	256.7
	Cr	28.01	45.53/12.4	83.05
Total potential ecological risk index(*RI*)	—	225.43	368.02	664.03

2.4 尾矿库周边植物生态风险分析

潜在生态风险分析表明，研究区属于中度至严重污染水平，本研究采集了镍尾矿库内 5 种植物，通过测定重金属含量分析各植物对重金属的累积程度，研究该区域重金属累积对植物的生态风险，结果如表 5 所示。3 号植物（羊耳菊）中各重金属含量均较高，其次是 5 号植物（地梢花）。1 号样品（蕨）中各重金属含量均较少。Ni、Co、Cr 均在 3 号植物种累积最多，其含量分别为 81.5、19.9 和 27.4 mg/kg。

我国现行土壤质量标准对土壤中重金属含量做了规定，但尚未规定植物中重金属含量限值。本次采集植物均为野生植物，非可食用农作物，也不适用于《食品安全国家标准 食品中污染物限量》（GB 2762—2017）中相关限值。因此，本文选取了美国生态土壤筛选值（Eco—SSLs）中植物体内金属含量的限值，分析该尾矿库区域植物体内重金属含量水平。由表 5 可以看出，3 号（羊耳菊）、5 号（地梢花）两种植物中，Ni、Co 含量均超过生态土壤筛选值。由于不同植物对重金属累积效应不同，需进一步系统研究该尾矿库对当地农作物的影响，采集不同类别农作物，分析其重金属累积效应，评估当地农作物安全生产与风险。

表 5　尾矿库植被中重金属含量

Table 5　Concentration of heavy metals in local crops

Element	1#	2#	3#	4#	5#	Eco-SSLs(For plant)
Cu	4.73	3.83	7.45	1.39	7.45	70
Ni	9.8	25.6	81.5	21.4	52.8	38
Co	0.984	3.22	19.9	1.29	15.9	13
Cr	5.40	8.06	27.4	5.23	13.5	—

Note:Eco—SSLs stands for American ecological soil screening levels.

3　结论

1)该红土镍矿尾矿库污染特征与我国西北和东北地区硫化镍尾矿不同,尾矿和周边土壤中主要重金属为 Ni、Co、Cr,在后期尾矿库污染治理中给予重点关注。尾矿内采样点的渗水中,Ni、Co 浓度显著高于库内表层积水,表明尾矿库内重金属较容易从尾矿迁移至水相,并通过下渗迁移至周边环境,存在较大风险,需对尾矿库内重金属释放特点开展深入研究。Co 潜在迁移能力较强,需特别关注。

2)尾矿库降雨径流中 Ni、Co 浓度较高,且明显高于上游水体中元素的含量,需加强矿区面源污染防治工作,减少重金属随降水径流进入周边河流。

3)研究区域土壤潜在生态风险分析表明,该镍尾矿库周边土壤已经受到了 Ni、Co、Cr 等重金属的严重威胁。潜在生态风险指数中镍和钴的贡献率为 57.8%和 28.5%,需特别加以重视。研究区调查的两种植物中,Ni 和 Co 含量均超过生态土壤筛选值,具有一定生态风险,需对当地农作物安全开展进一步研究。

参考文献:

[1] HEIKKINEN P,KORKKA-NIEMI K,LAHTI M,et al. Groundwater and surface water contamination in the area of the Hitura nickel mine[J]. Environmental Geology,2002,42(4):313-329.

[2] SABRY MS V A E K. Soil contamination by potentially toxic elements and the associated human health risk in geo and anthropogenic contaminated soils: A case study from the temperate region (Germany) and the arid region (Egypt)[J]. Environmental Pollution,2020,262(5):102-109.

[3] 高静.甘肃金昌市镍铜矿区重金属污染的生态风险评价研究[D].衡阳:南华大学,2012.
GOA Jing. Study of ecological risk evaluation of heavy metal pollution at nickel-copper mining area in Jinchang city of Gansu province[D]. Hengyang: University of South China,2012.

[4] 夏瑜,冯泽珅,张清,等.含铜镍尾矿重金属溶出特性试验研究[J].材料与冶金学报,2019,18(2):147-152.
XIA Yu,FENG Zekun,ZHANG Qing,et al. Study on the dissolution characteristics of heavy metals in nickle-copper tailings[J]. Journal of Materials and Metallurgy,2019,18(2):147-152.

[5] 贾丽.吉林省镍矿区耕地土壤/玉米体系中重金属的污染特征及迁移规律[D].长春:吉林大学,2016.
JIA Li. Pollution characteristics and migration of heavy metals in soil-corn system located in nickel mining area of Jilin province[D]. Changchun:Jilin University,2016.

[6] 李泽熙,赵志龙,徐荣强,等.硫化镍矿采选废水中重金属排放特征与防治对策[J].价值工程,2019,38(19):244-246.
LI Zexi,ZHAO Zhilong,XU Rongqiang,et al. Emiision characteristics and prevent countermeasures of heavy metals in wastewater from mickel sulfide ore mining and mineral processing[J]. Value Engineering,2019,38(19):244-246.

[7] 王芳,黄羽飞,张望,等.硫化镍矿废石和尾矿中重金属排放特征与防治对策[J].有色金属工程,2014,4(1):57-59.
WANG Fang,HUANG Yufei,ZHANG Wang,et al. Emission characteristics and control countermeasures of heavy metals in waste rock and tailings of nickel sulfide ore[J] Nonferrous Metals Engineering,2014,4(1):57-59.

[8] 杨泽宇,张文,申亚芳,等.红土镍矿处理方法现状[J].中国有色冶金,2020,49(4):1-6.
YANG Zeyu,ZHANG Wen,SHEN Yafang,et al. Current status of smelting process of laterite nickel ore[J]. China Nonferrous Metallurgy,2020,49(4):1-6.

[9] 曾军.从净化硫化渣中回收锰、钴、镍及动力学机理的研究[D].桂林:桂林理工大学,2020.
ZENG Jun. Study on recovery of managanese,cobalt and nickel from purified sulfide slag and its kinetic mechanism[D]. Guilin: Guilin University of Technology,2020.

[10] 李浩.丁基黄药对土壤微生物毒性和镍赋存形态的影

响研究[D].北京:中国地质大学(北京),2019.
LI Hao. Effects of butyl xanthate on microbial toxicity and nickel speciation in soil [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing),2019.

[11] 田丰,夏文喜,李飞飞,等.镍矿山废水治理技术研究进展[J].中国矿业,2014,23(增刊2):85-88.
TIAN Feng,XIA Wenxi,LI Feifei,et al. A review on the treatment technology of nickel mine wastewater [J]. China Mining Magazine,2014,23(S2):85-88.

[12] 章艳红,唐玉红,陈俊华,等.某工业废渣堆放场地重金属污染特征与健康风险评估[J].有色金属工程,2021,11(2):120-126.
ZHANG Yanhong,TANG Yuhong,CHEN Junhua,et al. Pollution characteristics and health risk assessemnt of heavy metal in a waster residue disposal site [J]. Nonferrous Metals Engineering,2021,11(2):120-126.

[13] 胡小娜,南忠仁,刘晓文,等.金昌城市居民区土壤重金属分布特征研究[J].干旱区资源与环境,2011,25(1):180-184.
HU Xiaona,NAN Zhongren,LIU Xiaowen,et al Study on distribution characteristics of soil heavy metals in Jinchang urban residential area[J]Journal of Arid Land Resources and Environment,2011,25(1):180-184.

[14] 廖晓勇,陈同斌,武斌,等.典型矿业城市的土壤重金属分布特征与复合污染评价——以"镍都"金昌市为例[J].地理研究,2006(5):843-852.
LIAO Xiaoyong, CHEN Tongbin, WU Bin, et al Distribution characteristics and compound pollution evaluation of heavy metals in soil of typical mining cities-a case study of Jinchang city, the "nickel capital"[J]. Geographical Research,2006(5):843-852.

[15] 张云,胡正生,王艳,等.某氧化铜矿尾矿区重金属污染特征及农作物健康风险评价[J].有色金属工程,2021,11(4):125-132.
ZHANG Yun, HU Zhengsheng, WANG Yan, et al. Heavy metals pollution characteristics and crop healthy risk assessment assessment around a copper oxide taillings pond [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021,11(4):125-132.

[16] 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,1990:330-381.
China National Environmental Monitoring Centre. Chinese soil elements background value[M]. Beijing: China Environmental Science Press,1990:330-381.

[17] 刘武忠,王剑明,张红,等,钴及其化合物对人体健康的影响[J].职业卫生与应急救援,2016,34(2):111-113.
LIU Wuzhong,WANG Jianming,ZHANG Hong,et al. Health effects of cobalt and its compounds [J]. Occupational Health & Emergency Rescue, 2016, 34(2):111-113.

(编辑 崔 颖)