

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2021.09.016

某铜铅锌多金属矿区土壤重金属污染评价

张永康^{1,2,3}, 冯乃琦^{1,2,3}, 张耀^{1,2,3}, 王庆^{1,2,3}, 王振宁^{1,2,3}

- (1. 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 郑州 450006;
2. 自然资源部多金属矿综合利用评价重点实验室, 郑州 450006;
3. 西北地质科技创新中心, 西安 710054)

摘要:对某铜铅锌多金属矿区土壤和稻谷样品中重金属元素含量进行分析检测,分析研究了该矿区土壤重金属污染程度、分布范围以及典型稻谷样品中重金属污染情况。结果表明,铜铅锌多金属矿区土壤环境质量总体较好,土壤重金属污染集中分布在选矿厂周边,主要污染元素为Cd和Cu,污染程度以轻度污染为主,Cd元素富集程度相对较高;该矿区尾矿库北侧河流上下游土壤样品重金属含量大致相当,尾矿堆放对北侧河流周边土壤重金属累积影响十分轻微;该矿区周边稻谷样品中Cd元素含量均不超标,矿山采选活动并未对矿区周边稻谷食品安全造成显著影响。

关键词:铜铅锌多金属矿;土壤;重金属污染;稻谷

中图分类号:X825

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2021)09-0097-08

Assessment of Heavy Metal Pollution in Soil in a Cu-Pb-Zn Polymetallic Mining Area

ZHANG Yong-kang^{1,2,3}, FENG Nai-qi^{1,2,3}, ZHANG Yao^{1,2,3},
WANG Qing^{1,2,3}, WANG Zhen-ning^{1,2,3}

- (1. Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Zhengzhou 450006, China;
2. Key Laboratory for Polymetallic Ores' Evaluation and Utilization, MNR, Zhengzhou 450006, China;
3. Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710054, China;)

Abstract: Contents of heavy metals both in soil and rice samples from a Cu-Pb-Zn polymetallic mining area were analyzed. Pollution degree and distribution of heavy metals in soil of this mining area as well as pollution of heavy metals in typical rice samples were studied. The results show that soil environmental quality in Cu-Pb-Zn polymetallic mining area is generally good. Heavy metal pollution in soil is concentrated around concentration plant, and main pollution elements are Cd and Cu, pollution degree of which is mainly in light level. Cumulative degree of Cd element is relatively high. Contents of heavy metals in soil samples from upstream of river on north side of tailings pond are about the same as those from its downstream. Stockpiling of tailings only has a very slight effect on accumulation of heavy metals in soil around river on north side. Contents of Cd element in rice samples in mining area are below the standard, and mining mineral processing has no significant impact on food safety of rice around mining area.

Key words: Cu-Pb-Zn polymetallic ore; soil; heavy metal pollution; rice

收稿日期:2021-04-20

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(DD20190269)

作者简介:张永康(1987-),男,江西上饶人,硕士,工程师

土壤是最重要的自然资源,也是污染物最终的接纳场所,污染物进入土壤后造成土壤污染,并在循环过程中造成水、大气和生物体污染,进而危害人类健康^[1-3]。据统计,每生产1 t金属,要平均开采110 t矿石^[4],采、选、冶过程中产生大量的废水、废气和固体废弃物,这些废水、废气和固体废弃物含有大量有毒有害的重金属元素,若处置不当,会造成土壤重金属污染。土壤中重金属累积到一定程度不仅影响植物生长,还可通过食物链对生物体和人类健康造成严重危害^[5-7]。因此,查清矿山周边土壤和农作物重金属污染状况,查明矿业活动对土壤、农作物的影响十分必要。目前,对铜矿、铅锌矿和多金属矿矿区土壤重金属污染调查评价已经开展了大量研究^[8-14],取得的重要成果为矿山周边生态环境保护与治理提供了重要支撑。

江西宜春某铜铅锌多金属矿区位于居民聚居区,选矿厂、采矿厂、尾矿库旁种植了大量水稻,矿山采选活动和固体废弃物处置等对矿区周边土壤风险未知,对矿区周边粮食作物食品安全的影响也不清楚。本文以铜铅锌多金属矿选矿厂、采矿厂、尾矿库等矿业活动集中区为重点,采集典型土壤、农作物样品,研究分析了矿区土壤和农作物重金属污染状况,可为该矿区土壤重金属污染防治提供支撑。

1 调查区自然地理状况及矿山概况

调查区面积约6 km²,属亚热带大陆性气候,区域年平均降雨量2 032.4 mm,降雨量集中在4~6月,年平均蒸发量1 336.8 mm,最高气温40℃,最低气温-8℃。常年主导风向为偏东风,夏季主导风向为东南风。区内地势平坦,以冲积地貌为主,少量丘陵,属河流阶地型平原地形。区内分布大片农田及村庄,大量种植水稻,长势良好。

该铜铅锌多金属矿为隐伏的中型铜、铅、锌多金属矿床。矿山采选规模为60万t/a,2006年投产,采用地下开采方式,采矿方法为上向水平胶结充填法。选矿有两个生产系列,铜硫铁矿石采用铜硫混合浮选—磁选铁工艺流程;铜铅锌硫矿石采用铅优先浮选—锌硫混合浮选—磁选铁工艺流程。目前矿山正常生产,拥有采矿厂1座,选矿厂1座,尾矿库1座。尾矿库北侧约400 m有一西东流向的溪流,该溪流是区内农田主要灌溉水源。

矿山固废处置:绝大部分矿山废石、围岩用于井下采空区回填,少量外售或用于铺路材料,地面无废石堆置。选矿尾矿大部分充填井下,剩余部分经管道运输至尾矿库堆放。

2 材料与方 法

2.1 样品采集

参考文献^[14]中的样品采集方法,土壤样品以网格布设方法为主,表层土壤样品一般采样深度为0~20 cm。

矿山选矿厂、尾矿库、采矿厂等矿业活动集中区,样品加密采集。选矿厂、采矿厂区域地势平坦,结合地貌特征和农作物种植情况,在选矿厂西北侧农田布设典型土壤样品;采矿厂、选矿厂周边农田密布,水力联系密切,重点考察水力传播对采矿厂、选矿厂周边土壤重金属污染的影响,以选矿厂东南侧农田为重点,沿水流方向布设土壤样品。

尾矿库地处丘陵植被茂密,库区尾砂干滩面积小,扬尘、风力对重金属传播作用弱,暂不考虑风力、扬尘的影响;尾矿水经净化后在雨季有少量外排至北侧溪流,重点考察水力作用对尾矿库北侧农田土壤重金属元素迁移、扩散的影响,在尾矿库北侧农田沿水流方向布设土壤样品。

在土壤重金属污染地块,布设典型土壤剖面,采集不同深度的土壤样品,研究土壤重金属元素在垂直深度上的分布状况。

根据矿区土壤污染状况,在水稻成熟期(7月中旬)分别在土壤重金属未污染区、污染区采集典型稻谷样品。

样品采集时详细记录采样地点、坐标、高程、农作物种植、污染源等情况,共采集土壤样品28件,稻谷样品7件。采样点分布如图1所示。

2.2 样品检测

土壤样品采集后置于阴凉通风处自然阴干,除杂、过筛、混匀、干燥后,磨细至-0.074 mm送检测;样品中Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Cd元素含量采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)检测,As和Hg元素含量选择原子荧光法分析,土壤pH采用玻璃电极法测定。

稻谷样品采样后,易腐败变质,应在两天内送样分析。稻谷样品中Cu、Cd元素含量采用ICP-MS检测。

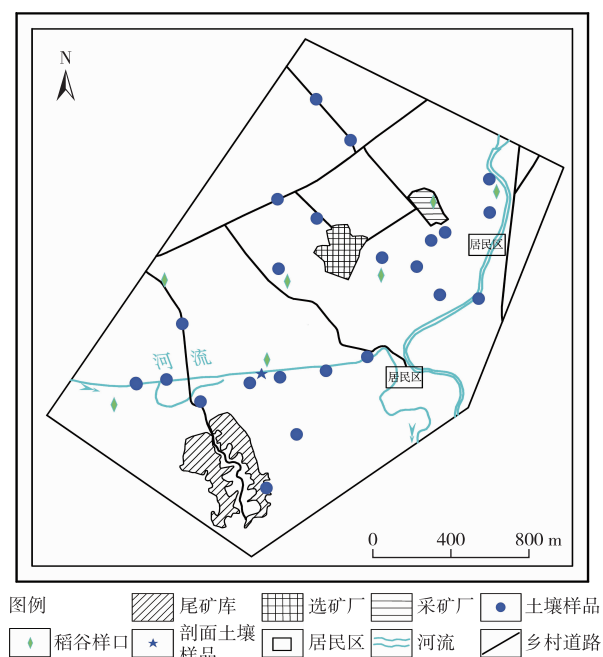


图1 采样点分布示意图
Fig. 1 Distribution sketch map of sampling points

2.3 评价方法

土壤重金属污染评价采用单因子指数法^[7,14-15]和地质累积指数法^[16-18],单因子指数法参比标准为《农用地土壤污染风险管控标准(试行)(GB 15618—2018)》中的农用地土壤风险筛选值。地质累积指数

法评价标准为宜春地区土壤背景值^[19]。稻谷中重金属污染参照《食品安全国家标准 食品中污染物限量(GB 2762—2017)》对比分析。

3 结果与分析

3.1 土壤样品重金属元素检测结果分析

调查区土壤样品重金属元素含量分析及数据统计如表1所示。

由表1可知,调查区样品中重金属元素含量均低于对应农用地土壤风险筛选值(以土壤样品重金属元素含量平均值计),表明铜铅锌多金属矿区周边土壤环境质量总体良好,但Cu、Zn、As、Cd元素含量平均值显著高于宜春地区土壤重金属背景值;样品中超标元素为Cu、Zn、Pb、As、Cd,超标件数均较少,Pb、As元素超标件数仅为1件,Cd元素超标率最大,也仅达到21.43%。为了查明超标样品的分布情况,对照了土壤采样点记录表,发现Cu、Zn、Pb、Cd元素超标点集中分布在选矿厂周边,其超标样品达到4件;选矿厂西北侧主导风向下风向的样品重金属元素含量不超标;As元素超标点位于尾矿库北侧河流上游约400 m一菜地内,推测As元素污染源来自其他活动,与矿业活动无关。由表2样品单因子指数分析结果可知,调查区内Cu、Zn、Pb、As、Cd元素污染均较轻微,以非污染样品为主,受污染样品污染程度以轻度污染为主。

表1 土壤重金属元素分析结果

Table 1 Statistic results of heavy metals in soil

元素	最大值	最小值	平均值	中位数	标准差	宜春地区背景值	土壤风险筛选值	超标件数	超标率/%
Cu	128	7.8	34.18	26.4	24.91	22.14	50	5	17.86
Zn	368	30.6	103.29	89.3	69.97	71.3	200	2	7.14
Pb	133	15.3	35.16	31.5	21.00	33.01	100	1	3.57
Ni	32.9	5.62	18.63	17.75	6.88	21.43	70	0	0
Cr	113	28.3	61.87	61.65	22.64	58.08	250	0	0
As	143	5.53	17.18	12.5	24.94	11.67	30	1	3.57
Cd	1.44	0.06	0.30	0.24	0.27	0.11	0.4	6	21.43
Hg	0.19	0.01	0.08	0.08	0.05	0.1	0.5	0	0

注:表中重金属元素实测含量和标准限值单位均为 mg/kg

表2 单因子指数分析结果

Table 2 Results of single factor index method

元素	污染程度样本百分比/%			
	非污染	轻度污染	中度污染	重度污染
Cu	82.14	14.29	3.57	0
Zn	92.86	7.14	0	0
Pb	96.43	3.57	0	0
Ni	100.0	0	0	0
Cr	100.0	0	0	0
As	96.43	0	0	3.57
Cd	78.57	17.86	0	3.57
Hg	100.0	0	0	0

从表3可知,Pb、Ni、Hg元素无污染样品占比占92.86%以上,且无中度以上污染样品,调查区内Pb、Ni、Hg元素富集程度很低;Cu、Zn、Cr、As元素污染较轻微,富集程度较低,主要以无污染到中度污染为主;Cd元素污染样本较多,未污染样品仅占35.72%,主要以中度污染为主,0≤I_{geo}<2样品占60.71%。总体来说,调查区重金属元素富集程度较轻微,Cd元素富集程度相对较高。

表3 地质累积指数法分析结果

Table 3 Results of geological accumulation method

元素	污染程度样本百分比/%						
	I _{geo} <0,	0≤I _{geo} <1,	1≤I _{geo} <2,	2≤I _{geo} <3,	3≤I _{geo} <4,	4≤I _{geo} <5,	I _{geo} ≥5,
	未污染	无污染到中度污染	中度污染	中度污染到强污染	强污染	强污染到极强污染	极强污染
Cu	67.86	25.00	7.14	0	0	0	0
Zn	71.43	21.43	7.14	0	0	0	0
Pb	92.86	3.57	3.57	0	0	0	0
Ni	96.43	3.57	0	0	0	0	0
Cr	78.57	21.43	0	0	0	0	0
As	85.72	7.14	3.57	0	3.57	0	0
Cd	35.72	28.57	32.14	0	3.57	0	0
Hg	92.86	7.14	0	0	0	0	0

3.2 矿业活动集中区土壤重金属污染分析

首先研究选矿厂周边土壤重金属污染分布特征。结合选矿厂周边地形地貌情况,在其东南侧沿水流方向布设了4件土壤样品,采样位置距选矿厂的距离分别为30、200、300、600m。选矿厂东南侧土壤样品重金属元素分析结果见图2所示。

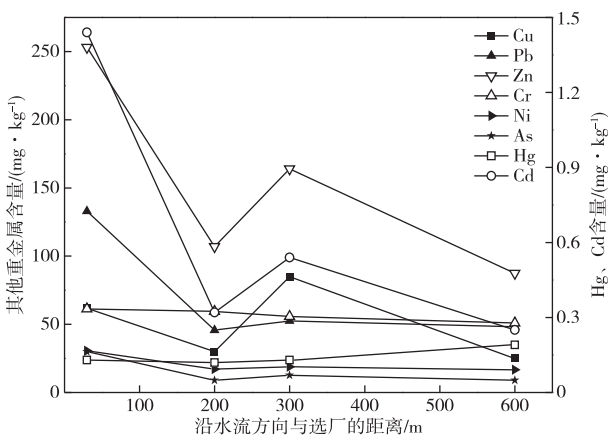


图2 选矿厂沿水流方向土壤重金属元素含量分析结果

Fig. 2 Results of heavy metals in soil along water flow direction of concentration plant

由图2可知,选矿厂东南侧沿水流方向农田土壤重金属分布特征总体为:随距离增加,重金属元素

含量递减;在选矿厂东南侧30m农田土壤样品中,Cu、Pb、Zn、As等元素轻微超标,Cd元素超标较严重,Cd元素含量达到1.44mg/kg,是农用地土壤筛选值的3.6倍,距选矿厂东南侧300m,Cu、Cd元素轻微超标,选矿厂东南侧600m的土壤样品重金属均不超标,这表明选矿厂周边土壤重金属污染范围大致在选矿厂外300m内。选矿厂生产活动对周边土壤环境影响范围小。

为研究尾矿堆放对周边农田重金属的影响,在尾矿库北侧上游400m处(记为-400m)设置了一个对照点,下游沿水流方向50、400、800、1200m处各布设一个农田土壤样品。土壤样品重金属含量结果如图3所示。由图3可知,尾矿库北侧沿水流方向土壤中Cu、Pb、Zn、As、Ni、Cr元素均不超标,仅距尾矿库下游400m位于河道旁的土壤Cd元素轻微超标;尾矿库北侧河流上下游各采样点重金属含量大致相当,可见尾矿堆放对北侧河流周边表层土壤重金属累积影响十分轻微。

为研究土壤重金属垂向分布,在尾矿库北侧下游400m的河道旁布设了1个垂向土壤剖面,剖面样品深度80cm,底部有水渗出,河道旁遍布野草和小灌丛,土壤类型为水稻土,呈灰褐色。该剖面土壤重金属元素分析结果如图4所示。从图4可知,河道旁剖面土壤样品中仅表层土(深度0~20cm)Cd

元素轻微超标(Cd 0.56 mg/kg),其他元素均不超标。剖面样重金属元素分布总体特征为:随土壤深度增加重金属元素含量递减,重金属元素在垂向上并没有明显的迁移与富集。

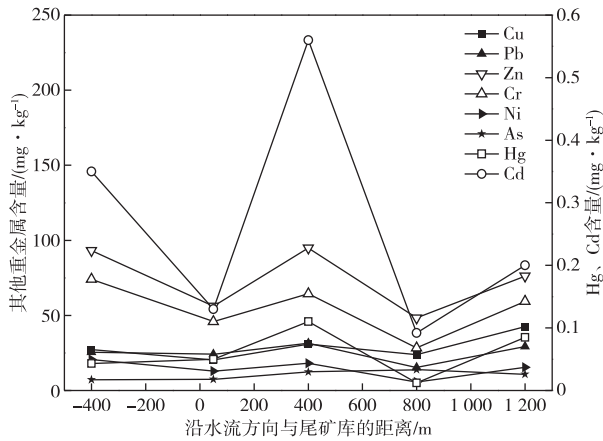


图3 尾矿库北侧沿水流方向土壤重金属元素分析结果

Fig. 3 Results of heavy metals in soil along direction of water flow downstream on north side of tailings pond

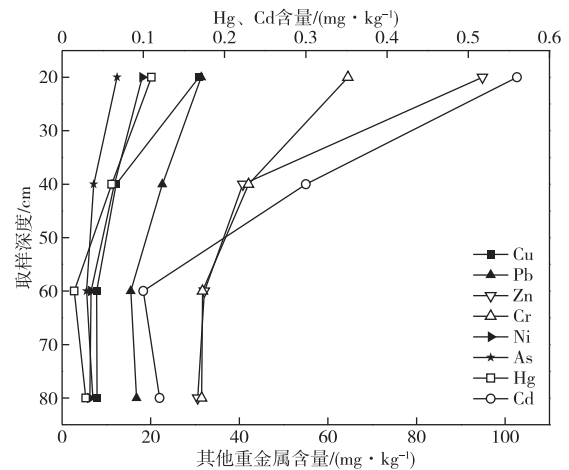


图4 剖面土壤样品重金属元素分析结果

Fig. 4 Results of heavy metals in profile samples

3.3 稻谷中重金属元素含量分析

根据调查区土壤重金属污染现状,水稻成熟期在尾矿库、选矿厂、采矿厂周边采集了典型的稻谷样品7件。结合调查区土壤重金属污染分析结果,重点检测了稻谷中Cu、Cd元素,结果如表4所示。

表4 稻谷样品中重金属含量

Table 4 Contents of heavy metals in rice

样品	采样位置	Cu	Cd
ZW-01	采矿厂旁农田内	5.65	0.027
ZW-02	选矿厂旁东南侧30m农田内	13.00	0.021
ZW-03	选矿厂西南侧50m农田内	4.26	0.065
ZW-04	采矿厂东侧约300m农田内	4.84	0.075
ZW-05	尾矿库北侧约800m农田内	5.18	0.031
ZW-06	尾矿库北侧上游约450m农田内	5.22	0.12
ZW-07	尾矿库北侧下游约400m农田内	4.54	0.081
食品安全国家标准 食品中污染物限量(GB 2762—2017)		/	0.20

由表5可知,调查区内稻谷中Cd元素含量均未超过食品中污染物限量标准,土壤重金属污染较严重的选矿厂周边稻谷样品中Cd元素含量远低于食品中污染物限量标准。可见,目前调查区内铜铅锌矿的采选活动并未对矿区周边稻谷食品安全造成显著影响。

矿区周边稻谷样品中重金属元素含量低,这一结果也进一步佐证了矿区土壤重金属污染轻微,土壤环境质量较好;综合矿区土壤和稻谷样品重金属污染分析评价结果可见,目前该多金属矿区矿业活动对周边土壤环境影响较小。

4 结论

1)铜铅锌多金属矿区土壤环境质量总体较好,

土壤重金属污染集中分布在选矿厂周边,主要污染元素为Cd、Cu,污染程度以轻度污染为主,Cd元素富集程度相对较高。

2)铜铅锌多金属矿区尾矿库北侧河流上下游各采样点样品重金属含量大致相当,重金属超标样品少;尾矿堆放对北侧河流周边表层土壤重金属累积影响十分轻微。

3)铜铅锌多金属矿区稻谷样品中Cd元素含量均不超标,目前矿山采选活动并未对周边稻谷食品安全造成显著影响。

参考文献

[1] 江丽,钟九生,黄国金,等.贵州丹寨县铅锌矿区小流域土壤重金属污染特征及生态风险评价[J].有色金属

- (冶炼部分),2021(3):57-64.
JIANG L, ZHONG J S, HUANG G J, et al. Heavy metal pollution characteristics and ecological risk assessment of soils in small watershed of lead-zinc mine in Danzhai county, Guizhou province [J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2021(3): 57-64.
- [2] 杨奇勇,谢运球,罗为群,等.基于地统计学的土壤重金属分布与污染风险评价[J].农业机械学报,2017,48(12):248-254.
YANG Q Y, XIE Y Q, LUO W Q, et al. Spatial distribution and soil pollution risk evaluation of soil heavy metals content based on geostatistics [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 20(6): 2507-2514.
- [3] 叶俊,任大军,张晓晴,等.中国部分林地土壤重金属含量特征及污染评价[J].科学技术与工程,2020,20(6): 2507-2514.
YE J, REN D J, ZHANG X Q, et al. Heavy metal contents distribution and contamination assessment in some Chinese forest soils[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(6): 2507-2514.
- [4] 王妍.我国有色金属工业土壤重金属污染防治的现状与对策[J].有色金属(冶炼部分),2021(3):1-9.
WANG Y. Status and countermeasures on soil heavy metals pollution control in nonferrous metals industry in China[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2021(3):1-9.
- [5] KANKIA H I, ABDULHAMID Y. Determination of accumulated heavy metals in benthic invertebrates found in Ajiwa Dam, Katsina State, Northern Nigeria[J]. Archives of Applied Science Research, 2014, 6(6): 80-87.
- [6] 陶美霞,胡虎,胡兰文,等.上饶市某铜矿废弃地土壤重金属污染特征及健康风险评价[J].生态环境学报,2018,27(6):1153-1159.
TAO M X, HU H, HU L W, et al. Characteristics and health risk assessment of heavy metals in polluted abandon soil of Shangrao, Jiangxi [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(6): 1153-1159.
- [7] 周艳,陈樯,邓绍坡,等.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.
ZHOU Y, CHEN Q, DENG S P, et al. Principal component analysis and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils around a Pb-Zn mine in southwestern China[J]. Environmental Science, 2018, 39(6): 2884-2892.
- [8] 毛香菊,卞孝东,肖芳,等.某铜矿区水土环境重金属污染及其农作物效应[J].矿产保护与利用,2018,38(5): 131-138.
MAO X J, BIAN X D, XIAO F, et al. Heavy metal elements pollution and crop effect of a copper mine[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2018, 38(5): 131-138.
- [9] 毛香菊,卞孝东,肖芳,等.某高纬高寒铜矿区土壤重金属的时空变异及迁移规律研究[J].矿产保护与利用,2020,40(1):124-131.
MAO X J, BIAN X D, XIAO F, et al. Research on the spatiotemporal variation and migration rule of soil heavy metals in a high latitude alpine copper mining area [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(1): 124-131.
- [10] 刘晓媛,刘品祯,杜启露,等.地质高背景区铅锌矿废弃地土壤重金属污染评价[J].有色金属(冶炼部分),2019(2):76-82.
LIU X Y, LIU P Z, DU Q L, et al. Evaluation of heavy metal pollution in soil of lead-zinc mine waste land with geological high background [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2019(2): 76-82.
- [11] 梁雅雅,易筱筠,党志,等.铅锌尾矿库对周围环境重金属污染风险评价指标的建立及方法[J].生态学杂志,2018,37(6):1772-1780.
LIANG Y Y, YI X Y, DANG Z, et al. Methods and indices for risk assessment of heavy metal pollution surrounding Pb-Zn tailing ponds[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(6): 1772-1780.
- [12] 苏耀明,陈志良,雷国建,等.多金属矿区土壤重金属垂直污染特征及风险评估[J].生态环境学报,2016,25(1):130-134.
SU Y M, CHEN Z L, LEI G J, et al. Vertical pollution characteristic and ecological risk assessment of heavy metal of soil profiles in polymetallic ore mine[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(1): 130-134.
- [13] 罗浪,刘明学,董发勤,等.某多金属矿周围牧区土壤重金属形态及环境风险评测[J].农业环境科学学报,2016,35(8):1523-1531.
LUO L, LIU M X, DONG F Q, et al. Speciation distribution characteristics of heavy metals in soil of multi-metal mining pastoral area and pollution assessment[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(8): 1523-1531.
- [14] 张永康,冯乃琦,张耀,等.某铅锌矿区土壤重金属污染分析[J].有色金属(冶炼部分),2021(3):102-108.
ZHANG Y K, FENG N Q, ZHANG Y, et al. Analysis of heavy metal pollution in soil of a lead-zinc mining

- area[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2021(3):102-108.
- [15] 张文娟,王利军,王丽,等. 西安市地表灰尘中重金属污染水平与健康风险评价[J]. *土壤通报*, 2017, 48(2):481-487.
ZHANG W J, WANG L J, WANG L, et al. Assessment of pollution level and health risks of heavy metals in surface dust in Xi'an city, NW China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(2):481-487.
- [16] MÜLLER G. Schwermetalle in den sedimenten des rheins-veränderungen seit 1971 [J]. *Umschau*, 1979, 79(24):778-783.
- [17] 孙厚云,吴丁丁,毛启贵,等. 新疆东天山某铜矿区土壤重金属污染与生态风险评价[J]. *环境化学*, 2019, 38(12):2690-2699.
SUN H Y, WU D D, MAO Q G, et al. Soil heavy metal pollution and ecological risk assessment in a copper mining area in East Tianshan, Xinjiang[J]. *Environmental Chemistry*, 2019, 38(12):2690-2699.
- [18] 孙厚云,卫晓锋,甘凤伟,等. 承德市滦河流域土壤重金属地球化学基线厘定及其累积特征[J]. *环境科学*, 2019, 40(8):3753-3763.
SUN H Y, WEI X F, GAN F W, et al. Determination of heavy metal geochemical baseline values and its accumulation in soils of the Luanhe River Basin, Chengde [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(8):3753-3763.
- [19] 何纪力,徐光炎,朱惠民,等. 江西省土壤环境背景值研究[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2006:135-142.
HE J L, XU G Y, ZHU H M, et al. Study on the Environmental Background Values of Soils in Jiangxi Province [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006:135-142.

(上接第 53 页)

- [23] 余永建. 镇江香醋有机酸组成及乳酸合成的生物强化[D]. 江苏无锡:江南大学, 2014.
YU Y J. Organic acid composition of Zhenjiang aromatic vinegar and bioaugmentation of lactic acid synthesis[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014.
- [24] 秦忠雪,黎源倩,余倩. 高效液相色谱法测定双歧杆菌的有机酸代谢产物[J]. *现代预防医学*, 2010, 37(2):320-323.
QIN Z X, LI Y Q, YU Q. Determination of organic acid metabolites of *Bifidobacterium* by HPLC[J]. *Modern Preventive Medicine*, 2010, 37(2):320-323.