

文章编号: 1674-7054(2021)04-0500-08



# 铅锌矿区周边土壤重金属污染及植物富集特征

杨宁<sup>1</sup>, 李东海<sup>2</sup>, 杨小波<sup>2</sup>, 左永令<sup>2</sup>, 田璐嘉<sup>2</sup>, 陈琳<sup>2</sup>

(1. 海南大学热带作物学院, 海口 570228; 2. 海南大学生态与环境学院, 海口 570228)

**摘要:** 为了寻求适合矿区废弃地土壤修复的重金属耐性植物, 对海南省昌江县昌化镇铅锌矿区废弃地及其周边植物进行调查。在调查区内设定 3 个采样点, 对采样点内采集的 13 种植物的地上部分及其所在区域的土壤样品进行重金属含量检测。结果表明: (1) 该矿区周边土壤普遍受到 Pb、Cd、Zn 和 Cu 的污染, 矿区周边重金属综合污染指数为 19.86, 按照土壤综合评价分级标准可知该矿区周边土壤污染等级属于重度污染; (2) 在海南昌化铅锌矿区周边生长的植物中, 心叶黄花稔(*Corchorus aestuans*)表现出对重金属 Cd 的富集潜力, 酒饼簕(*Atalantia buxifolia*)表现出对重金属 Zn 的富集潜力。

**关键词:** 铅锌矿区; 土壤污染; 重金属; 植物富集

**中图分类号:** X 53      **文献标志码:** A

**引用格式:** 杨宁, 李东海, 杨小波, 等. 铅锌矿区周边土壤重金属污染及植物富集特征 [J]. 热带生物学报, 2021, 12(4): 500-507. DOI: 10.15886/j.cnki.rdsxb.2021.04.013

土壤重金属污染已经成为当今世界重要的环境问题之一, 已经受到世界各国人们的关注。土壤污染不仅会带来生态环境问题, 还会给人体健康造成伤害。矿山开采, 带来经济效益的同时也带来了许多环境污染问题, 排放的废水、乱堆放的废渣, 空气中的污染物随着降雨沉降在周边的土壤中, 造成土壤重金属污染, 土壤中的重金属随着食物链进入人体, 严重威胁人体健康, 因此, 土壤重金属污染修复问题亟待解决<sup>[1-2]</sup>。矿产资源开采是迄今为止人类最大规模破坏地表生态系统的有组织的人类活动<sup>[3]</sup>。据统计, 全世界的矿区废弃地面积共有  $6.7 \times 10^6 \text{ hm}^2$ , 我国现有国营矿山企业 8 000 多个, 矿区破坏地面积达  $2.88 \times 10^6 \text{ hm}^2$ , 且每年以  $4.67 \times 10^4 \text{ hm}^2$  的速度增长<sup>[4]</sup>。矿产资源的开发和利用引发了许多环境问题, 比如水土流失、重金属污染、生态系统破坏等, 这些问题使矿山废弃地的土壤结构发生改变, 重金属含量偏高, 土壤有机质含量偏少, 植物所需的营养元素缺乏, 严重影响植物的生长和其他生物的活动<sup>[5]</sup>。土壤污染会导致农产品中重金属含量超标且通过食物链进入人体, 会对长期生活在矿区周围居民的身体健康产生严重的危害<sup>[6]</sup>。海南省昌江县昌化镇为滨海沙地平原地带, 地势东高西低, 是典型的热带季风气候区, 光照充足, 年平均降水为 900 ~ 1200 mm, 属严重干旱地区<sup>[7]</sup>。海南昌化铅锌矿由于在其开发利用过程中没有采取环境保护措施, 造成了矿区生态环境的严重破坏, 当地现已停止农业种植。对海南昌化铅锌矿区废弃地的土壤调查发现, 重金属 Cd、Pb、Zn、Cu 含量严重超标, 为重度污染土壤。虽然土壤重金属含量很高, 但仍能生长出一些植物, 这些植物种类较为单一, 多以灌木和草本为主, 乔木零星分布。本研究拟通过对海南昌化铅锌矿区废弃地污染土壤和植物现状进行分析, 旨在找出适合矿区废弃地土壤修复的重金属耐性植物, 为今后矿区污染治理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究地概况 海南昌化铅锌矿区位于海南省昌江黎族自治县昌化镇附近, 昌江黎族自治县位于海

收稿日期: 2021-04-20

修回日期: 2021-06-30

基金项目: 华南镉铅污染农田一体化修复技术体系集成示范与管理模式构建 (2018YFD0800706)

第一作者: 杨宁 (1993-), 女, 海南大学热带作物学院 2018 级硕士研究生. E-mail: 972682271@qq.com

通信作者: 李东海 (1971-), 男, 高级实验师. 研究方向: 植物资源与生态. E-mail: dhlye@163.com

南岛西北偏西部, 地理位置为  $18^{\circ}53' \sim 19^{\circ}30'N$ ,  $108^{\circ}38' \sim 109^{\circ}17'E$ , 西北部濒临北部湾。昌化铅锌矿区属热带海洋性季风气候, 全年无冬, 四季如春, 年平均气温  $24.3^{\circ}C$ , 年降水量  $902 \sim 1\,805\text{ mm}$ , 冬春 6 个月降水量仅占年降雨量的 15%, 为海南省春旱最严重的地区之一<sup>[7]</sup>。金属矿物以方铅矿、闪锌矿为主, 并含有少量 Au、Ag、Cd 等贵金属。1958 年前为个体开采, 1963 年由海南有色冶金处接管, 1965 年由广东冶金设计院选厂投产, 1991 年采完闭坑, 目前为铅锌矿废弃地, 周边土壤以沙地和裸地为主, 植被覆盖以灌木和草本为主, 乔木零星分布<sup>[8]</sup>。

**1.2 试验设计与样品采集** 采用间隔布点法分别在尾矿库周边 3 个区域(图 1) 采集窿缘桉(*Eucalyptus exserta*)、细基丸(*Polyalthia cerasoides*)、仙人掌(*Opuntia stricta*)、潺槁木姜子(*Litsea glutinosa*)、心叶黄花稔(*Corchorus aestuans*)、山香(*Hyptis suaveolens*)、破布叶(*Microcos paniculata*)、细叶桉(*Eucalyptus tereticornis*)、赤才(*Erioglossum rubiginosum*)、酒饼簕(*Atalantia buxifolia*)、飞机草(*Chromolaena odorata*)、木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)、斑茅(*Saccharum arundinaceum*)等 11 科 13 种植物和相应区域的土壤(0~20 cm)进行重金属含量的测定。根据植物高度生长状况, 每种植物随机采集 3 株, 在相应植株所在区域随机采集土壤样品, 采样深度为 0~20 cm, 每个采样点采集 1 kg 土壤, 所有样品用聚乙烯塑料袋封装后运回实验室。

**1.3 样品处理与测定** 土壤样品: 将采回的土壤样品置于室内自然风干, 之后剔除样品中残根、石块等杂物。风干后样品先用细木棒碾碎, 再置于研钵内研磨, 过 0.15 mm 尼龙筛网后, 按 4 分法弃去多余的部分, 保留 100 g 装入自封袋密封保存。依据《土壤质量铅、镉的测定石墨炉原子吸收分光光度法》(GB/T 17141—1997)和《土壤和沉积物铜、锌、铅、镍、铬的测定火焰原子吸收分光光度法》(HJ 491—2019)分别测定土壤中镉(Cd)、铅(Pb)、锌(Zn)、铜(Cu) 4 种重金属元素质量分数( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[9]</sup>。Cd、Pb、Cu、Zn 的检出限分别为 0.01、10、1、1  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

植物样品: 用自来水冲洗掉植物地上部分表面的灰尘、泥土等, 再用蒸馏水冲洗 3 次, 最后用去离子水冲洗 3 次, 放入纸质信封, 置于烘箱中  $105^{\circ}C$  杀青 30 min 后, 于鼓风箱中  $60^{\circ}C$  烘至恒重。样品用粉碎机粉碎后, 0.15 mm 尼龙筛, 装入自封袋密封保存。依据《食品安全国家标准食品中多元素的测定》(GB 5009.268—2016), 使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)(7800 ICP-MS) YQ-250-02 测定各种样品中镉(Cd)、铅(Pb)、锌(Zn)、铜(Cu) 4 种重金属元素质量分数( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。Cd、Pb、Cu、Zn 的检出限分别为 0.002、0.02、0.05、0.5  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

**1.4 数据处理与分析** 土壤重金属污染评价采用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法。其中, 单因子污染指数法的计算公式为:

$$I_i = C_i/S_i,$$

式中:  $I_i$  表示第  $i$  种污染物单项指数;  $C_i$  表示第  $i$  种污染物的测定含量;  $S_i$  表示第  $i$  种污染物的土壤环境质量标准值。

内梅罗综合污染指数计算公式为:

$$P_N = \sqrt{\frac{P_{i(ave)}^2 + P_{i(max)}^2}{2}},$$



图 1 海南昌化铅锌矿区采样点

Fig. 1 Sampling sites around the Changhua lead-zinc mine in Hainan

式中:  $P_N$  表示污染物综合污染指数;  $P_{i(\text{ave})}$  表示第  $i$  种污染物污染分指数平均值;  $P_{i(\text{max})}$  表示第  $i$  种污染物污染分指数最大值。

试验使用 Microsoft Excel 2016 和 SPSS 22.0 软件进行数据整理和分析, 使用 Origin 2018 软件作图。

## 2 结果与分析

**2.1 矿区周边土壤污染分析** 矿区周边土壤 pH 为 5.82, 整体呈弱酸性, 土壤中重金属 Pb 含量  $640.50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、Cd 含量  $13.53 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、Cu 含量  $94.47 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、Zn 含量  $448.54 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。参照《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB15618—2018), 对矿区周边土壤污染水平进行评价, 通过对矿区周边土壤中重金属元素含量的测定和分析, 结合本研究重金属污染的特点, 选择单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法对矿区周边重金属污染情况用单项污染指标和综合污染指数法进行评价<sup>[10]</sup>, 结果(表 1)表明, 该矿区周边土壤普遍受到 Pb、Cd、Zn 和 Cu 的污染, 矿区周边土壤受 Pb 的轻度污染, 单项污染指数为 2.56; 受到重金属 Cd 的重度污染, 单项污染指数是 45.12; Cu 是轻微污染, 单项污染指数 1.89; Zn 是轻度污染, 其单项污染指数是 2.24。矿区周边重金属综合污染指数为 19.86, 按照土壤综合评价分级标准可知该矿区周边土壤污染等级属于重度污染, 污染水平为土壤、植物均受到严重污染。如表 2 所示, 矿区周边土壤污染情况为 Cd 污染最严重, Pb 的污染指数次之, 然后是 Zn 污染, Cu 污染最低。矿区周边土壤中 Pb 含量高于风险管制值( $500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )1.28 倍, 土壤中 Cd 含量高于风险管制值( $2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )的 6.77 倍, 土壤中 Cu 含量高于风险筛选值( $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )的 0.90 倍, 土壤中 Zn 含量高于风险筛选值( $200 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )的 0.24 倍, 土壤污染风险极高, 应当采取严格管控措施。

**2.2 矿区周边常见自然植物** 本次调查共采集矿区周边常见植物 13 种, 分属 12 科, 12 属。其中桃金娘科(占 16.67%); 菊科、木麻黄科、番荔枝科、禾本科、樟科、唇形科、无患子科、锦葵科、芸香科和仙人掌科各一种, 分别占 7.69%。海南昌化铅锌矿区自然常见植物种类见表 3。由表 3 可知, 乔木 7 种, 占比 53.85%, 草本 4 种, 占比 30.77%, 说明在海南昌化铅锌矿区的复杂生存条件下, 乔木和草本植物都具有很强的抗性。

**2.3 矿区周边植物重金属含量特征** 在矿区周边采集的自然生长植物体内重金属 Pb 含量如图 2 所示, 植物地上部分重金属 Pb 含量从大到小依次仙人掌  $9.20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ >山香  $8.09 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ >赤才  $7.04 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ >细基丸  $6.57 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ >酒饼筋  $6.33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ >潺槁木姜子  $5.17 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ >心叶黄花稔  $4.93 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ >木麻黄  $3.07 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ >细叶桉  $2.89 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ >破布叶  $2.83 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ >窿缘桉  $2.71 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ >斑茅  $2.09 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ >飞机草  $1.57 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 一般植物体内重金属的正常含量参照 GB 2762—2017《食品安全国家标准食品中污染物限量》<sup>[11]</sup>为: Pb  $0.10 \sim 41.70 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 所有植物地上部分重金属 Pb 含量均在正常范围值内<sup>[12-13]</sup>。

从图 3 得出, 植物地上部分重金属 Zn 含量从大到小依次是酒饼筋  $1053.81 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ >赤才  $530.42 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ >山香  $499.00 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ >仙人掌  $383.00 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ >细叶桉  $292.83 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ >破布叶  $269.00 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ >心叶黄花稔

表 1 土壤综合污染评价分级标准

Tab. 1 Grading standards for comprehensive soil heavy metal contamination evaluation

等级划分 Grading	$P_N$	污染等级 Contamination level	污染水平 Contamination level
1	$\leq 0.7$	安全	清洁
2	$0.7 < P_N \leq 1.0$	警戒线	尚清洁
3	$1.0 < P_N \leq 2.0$	轻污染	土壤轻污染, 植物开始受污染
4	$2.0 < P_N \leq 3.0$	中污染	土壤、植物均受中度污染
5	$P_N > 3.0$	重污染	土壤、植物均受严重污染

表 2 矿区周边土壤污染风险管控标准

Tab. 2 Soil heavy metal contamination risk management and control standards around the lead-zinc mine

	Pb/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	Cd/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	Cu/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	Zn/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
土壤实测值A	640.50	13.53	94.47	448.54
风险筛选值B	90.0	0.3	50.0	200.0
风险管制值C	500	2	400	500
A/C	1.28	6.77	0.24	0.90



表 3 海南昌化铅锌矿区自然常见植物种类

Tab. 3 Common natural plant species around the Changhua lead-zinc mine in Hainan

植物名称 Plant	科 Family	属 Genus	生活型 Biotype
飞机草 <i>Chromolaena odorata</i>	菊科 Compositae	泽兰属 <i>Eupatorium</i>	草本 Herbal
木麻黄 <i>Casuarina equisetifolia</i>	木麻黄科 Casuarinaceae	木麻黄属 <i>Casuarina</i>	乔木 Arbor
窿缘桉 <i>Eucalyptus exserta</i>	桃金娘科 Myrtaceae	桉属 <i>Eucalyptus</i>	乔木 Arbor
细基丸 <i>Polyalthia cerasoides</i>	番荔枝科 Annonaceae	暗罗属 <i>Polyalthia</i>	乔木 Arbor
斑茅 <i>Saccharum arundinaceum</i>	禾本科 Poaceae(Gramineae)	甘蔗属 <i>Saccharum</i>	草本 Herbal
仙人掌 <i>Opuntia stricta</i>	仙人掌科 Cactaceae	仙人掌属 <i>Opuntia</i>	灌木 Shrubs
潺槁木姜子 <i>Litsea glutinosa</i>	樟科 Lauraceae	木姜子属 <i>Litsea</i>	乔木 Arbor
心叶黄花稔 <i>Corchorus aestuans</i>	锦葵科 Malvaceae	黄花稔属 <i>Sida</i>	草本 Herbal
山香 <i>Hyptis suaveolens</i>	唇形科 Labiatae	山香属 <i>Hyptis</i>	草本 Herbal
赤才 <i>Erioglossum rubiginosum</i>	无患子科 Sapindaceae	鳞花木属 <i>Lepisanthes</i>	乔木 Arbor
酒饼筋 <i>Atalantia buxifolia</i>	芸香科 Rutaceae	芸香属 <i>Ruta</i>	灌木 Shrubs
破布叶 <i>Microcos paniculata</i>	椴树科 Tiliaceae	破布叶属 <i>Microcos</i>	乔木 Arbor
细叶桉 <i>Eucalyptus tereticornis</i>	桃金娘科 Myrtaceae	桉属 <i>Eucalyptus</i>	乔木 Arbor

260.00 mg·kg<sup>-1</sup>>斑茅 176.65 mg·kg<sup>-1</sup>>细基丸 173.53 mg·kg<sup>-1</sup>>窿缘桉 147.82 mg·kg<sup>-1</sup>>木麻黄 78.63 mg·kg<sup>-1</sup>>潺槁木姜子 65.87 mg·kg<sup>-1</sup>>飞机草 45.73 mg·kg<sup>-1</sup>。非污染区植物中 Zn 含量一般在 20~150 mg·kg<sup>-1</sup> 范围内<sup>[14]</sup>, 植物地上部分重金属 Zn 积累量最高的是酒饼筋, 其地上部分含量超出普通植物范围最大值 7 倍。

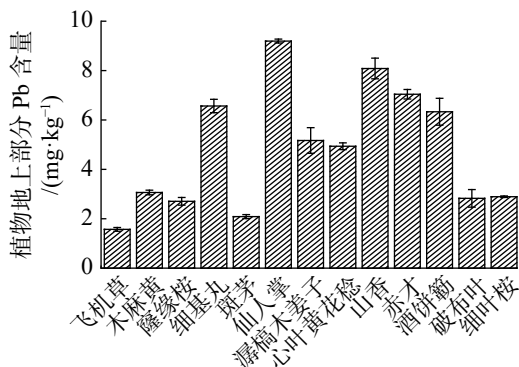


图 2 13 种植物体内 Pb 的含量与分布

Fig. 2 The content and distribution of Pb in 13 species of plants

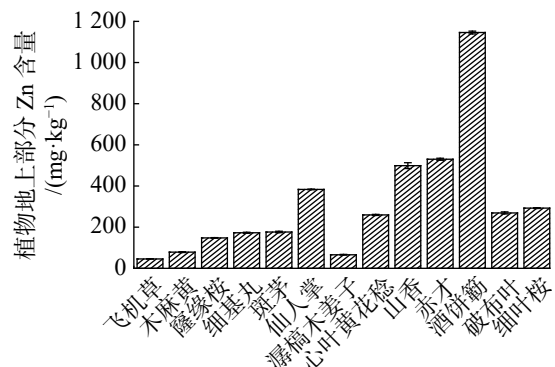


图 3 13 种植物体内 Zn 的含量与分布

Fig. 3 The content and distribution of Zn in 13 species of plants

Cd 是矿区重金属污染治理的重点, 普通植物中 Cd 含量范围是 0.05~0.2 mg·kg<sup>-1</sup><sup>[15]</sup>。从图 4 得出, 植物地上部分重金属 Cd 含量从大到小依次是心叶黄花稔 10.02 mg·kg<sup>-1</sup>>酒饼筋 7.32 mg·kg<sup>-1</sup>>破布叶 7.19 mg·kg<sup>-1</sup>>赤才 6.08 mg·kg<sup>-1</sup>>仙人掌 5.27 mg·kg<sup>-1</sup>>山香 2.49 mg·kg<sup>-1</sup>>细叶桉 2.14 mg·kg<sup>-1</sup>>窿缘桉 1.48 mg·kg<sup>-1</sup>>木麻黄 0.67 mg·kg<sup>-1</sup>>潺槁木姜子 0.63 mg·kg<sup>-1</sup>>飞机草 0.57 mg·kg<sup>-1</sup>>斑茅 0.29 mg·kg<sup>-1</sup>>细基丸 0.21 mg·kg<sup>-1</sup>, 所有植物地上部分重金属 Cd 含量均超出正常范围, 心叶黄花稔地上部分重金属 Cd 含量超出普通植物范围最大值 50 倍。Cu 在植物体内的含量一般为 5~30 mg·kg<sup>-1</sup><sup>[16]</sup>, 从图 5 得出, 植物地上部分重金属 Cu 的含量依次是山香 33.10 mg·kg<sup>-1</sup>>破布叶 23.71 mg·kg<sup>-1</sup>>心叶黄花稔 20.22 mg·kg<sup>-1</sup>>细基丸 17.05 mg·kg<sup>-1</sup>>酒饼筋 16.52 mg·kg<sup>-1</sup>>窿缘桉 12.54 mg·kg<sup>-1</sup>>飞机草 8.22 mg·kg<sup>-1</sup>>赤才 8.00 mg·kg<sup>-1</sup>>木麻黄 7.23 mg·kg<sup>-1</sup>>细叶桉 6.80 mg·kg<sup>-1</sup>>潺槁木姜子 5.99 mg·kg<sup>-1</sup>>仙人掌 4.58 mg·kg<sup>-1</sup>>斑茅 4.00 mg·kg<sup>-1</sup>, 植物体内 Cu 的含量均在正常范围内, 没有超标。

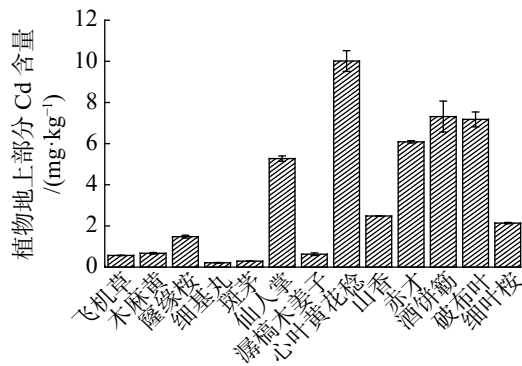


图4 13种植物体内Cd的含量与分布

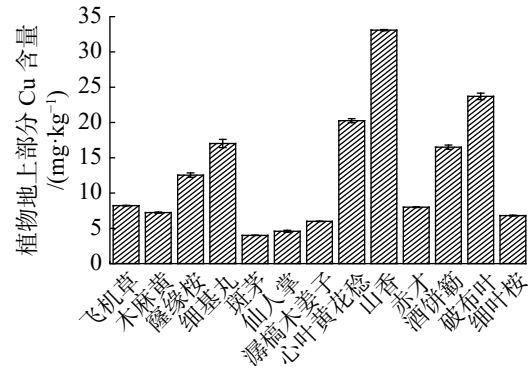


图5 13种植物体内Cu的含量与分布

Fig. 4 The content and distribution of Cd in 13 species of plants

Fig. 5 The content and distribution of Cu in 13 species of plants

为探究矿区周边不同自然植物地上部分不同重金属间的相关性的内在联系, 利用 SPSS 软件进行相关性检验得到, 如表 4 所示, 不同植物与 Cd 含量、不同植物与 Cu 含量、不同植物与 Zn 含量、Pb 含量与 Cd 含量、Pb 含量与 Zn 含量、Cd 含量与 Cu 含量、Cd 含量与 Zn 含量呈显著正相关( $P < 0.05$ )。

表 4 矿区周边植物中不同重金属间的相关性分析

Tab. 4 Correlation analysis of different heavy metals in the plants around the lead-zinc mine

指标 Index	不同植物 Different plants	Pb 含量 Pb Full amount	Cd 含量 Cd Full amount	Cu 含量 Cu Full amount	Zn 含量 Zn Full amount
不同植物	Pearson 相关性	1	0.262	0.590**	0.333*
	显著性(双侧)	-	0.107	0.000	0.038
Pb 含量	Pearson 相关性	1	0.333*	0.269	0.5078*
	显著性(双侧)	-	0.038	0.097	0.001
Cd 含量	Pearson 相关性		1	0.363*	0.558**
	显著性(双侧)		-	0.023	0.000
Cu 含量	Pearson 相关性			1	0.302
	显著性(双侧)			-	0.061
Zn 含量	Pearson 相关性				1
	显著性(双侧)				-

注: \* 差异显著  $P < 0.05$ , \*\* 差异极显著  $P < 0.01$ 。

Note: \*Significant difference at  $P < 0.05$ ; \*\* Highly significant difference at  $P < 0.01$ .

**2.4 矿区周边植物的重金属富集系数分析** 富集系数是指植物地上部分从土壤中富集重金属的系数, 当植物地上部分的富集系数大于 1 时, 说明植物地上部分重金属含量大于土壤中相应有效态重金属含量, 且富集系数越大, 表明植物修复、提取土壤中重金属的能力越强<sup>[7]</sup>。从表 5 可知, 13 种植物对重金属 Cd 富集系数均小于 1, Cd 富集能力表现为心叶黄花稔>酒饼筋>破布叶>赤才; 13 种植物对重金属 Pb 富集系数均小于 1, Pb 富集能力表现为仙人掌>山香>赤才>细基丸>酒饼筋; Zn 富集能力表现为酒饼筋>赤才>山香>仙人掌>细叶桉>破布叶, 其中酒饼筋、赤才、山香对重金属 Zn 富集系数大于 1; 13 种植物对重金属 Cu 富集系数均小于 1, Cu 富集能力表现为山香>破布叶>心叶黄花稔>细基丸>酒饼筋>隆缘桉。由此可知, 酒饼筋、赤才对重金属 Cd、Pb、Zn 有较好的富集能力, 破布叶对重金属 Cd、Zn、Cu 有富集能力, 山香对重金属 Pb、Zn、Cu 有富集能力。

表5 昌化铅锌矿区植物对 Pb、Cd、Cu、Zn 重金属富集系数

Tab. 5 The enrichment coefficients of Pb, Cd, Cu, and Zn in the plants around the Changhua lead-zinc mine

植物名称 Plant	Cd	Pb	Zn	Cu
飞机草	0.001±0.000	0.120±0.024	0.107±0.030	0.090±0.202
木麻黄	0.001±0.000	0.236±0.061	0.183±0.050	0.079±0.017
窿缘桉	0.002±0.001	0.206±0.038	0.345±0.096	0.138±0.034
细基丸	0±0	0.501±0.100	0.405±0.122	0.186±0.039
斑茅	0±0	0.161±0.043	0.413±0.177	0.044±0.101
仙人掌	0.010±0.002	0.705±0.164	0.898±0.260	0.050±0.011
潺槁木姜子	0.001±0.000	0.402±0.130	0.154±0.044	0.066±0.015
心叶黄花稔	0.019±0.003	0.378±0.088	0.608±0.174	0.221±0.048
山香	0.005±0.001	0.619±0.147	1.162±0.298	0.362±0.081
赤才	0.012±0.002	0.539±0.128	1.238±0.342	0.087±0.019
酒饼筋	0.016±0.004	0.486±0.121	2.679±0.756	0.181±0.044
破布叶	0.014±0.003	0.220±0.074	0.631±0.184	0.260±0.063
细叶桉	0.004±0.001	0.222±0.053	0.685±0.198	0.074±0.017

### 3 讨论

在本次研究中可知该矿区周边土壤污染等级属于重度污染, 污染水平为土壤、植物均受到严重污染。在4种重金属中Cd污染最严重, Pb的污染指数次之, 然后是Zn污染, Cu污染最低, 这同江倩倩等研究一致<sup>[6]</sup>。徐伟健对湖南湘西李梅铅锌矿区的矿业废弃地的污染状况及植被组成进行调查, 发现由于大量尾矿砂的堆砌及矿毒水污染, 矿区土壤极度贫瘠, 且Cd、Pb、Zn3种重金属元素总量超过国家土壤环境质量标准, 严重影响植物在其上的定居和生长<sup>[18]</sup>。说明铅锌矿区污染主要残留的重金属元素为Cd、Pb、Zn, 且污染修复已经是亟需解决的问题, 不仅影响人体健康还会影响植物的生长。

植被的重建被公认是固定矿业废弃物, 减少污染物对周边环境的污染及美化环境的最好方法<sup>[19]</sup>, 考虑到引种可能会带来的生态问题, 且当地自然生长的植物能适应当地的气候条件, 因此, 筛选出适合当地的重金属耐性植物十分必要, 对矿山绿植恢复尤为重要<sup>[20]</sup>。张龙等对云南兰坪铅锌矿区优势植物进行研究, 发现13种植物对矿区重金属污染有着较好的耐性, 可以用作矿区植被修复<sup>[21]</sup>。陈昌东通过测定河南省平顶山市某煤矿废弃地8种优势植物对重金属的富集, 发现平顶山矿区矸石山周边优势植物苍耳(*Xanthium strumarium*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、蒙古蒿(*Artemisia mongolica*)和狗尾草(*Setaria faberi*)具有较强的富集重金属的能力, 可作为治理该地区环境污染的目标植物<sup>[22]</sup>。当植物地上部分重金属含量达到或超过临界值一半及以上, 就被认定为具备良好修复潜力的植物。在海南昌化铅锌矿区周边生长的自然植物, 心叶黄花稔表现出对重金属Cd的富集潜力, 仙人掌表现出对重金属Pb富集的潜力, 酒饼筋对重金属Zn表现出富集的潜力, 所有植物地上部分对重金属Cu的富集均在植物正常含量范围内, 不同植物对重金属Pb、Cd、Zn的富集呈正相关。所以心叶黄花稔、仙人掌、酒饼筋都可以作为铅锌矿区污染修复和植被恢复的目标植物。

本研究结果表明: 海南昌化铅锌矿区周边土壤污染等级属于重度污染, 污染水平为土壤、植物均受到严重污染。在4种重金属中Cd污染最严重, Pb的污染指数次之, 然后是Zn污染, Cu污染最低, 昌化铅锌矿区周边环境污染问题亟需解决。在海南昌化铅锌矿区周边生长的植物中, 心叶黄花稔地上部分重金属Cd含量为 $10.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 超出普通植物范围最大值50倍, 对重金属Cd表现出富集潜力; 酒饼筋地上

部分重金属 Zn 含量达  $1053.81 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 超出普通植物范围最大值 7.03 倍, 对重金属 Zn 表现出富集的潜力。本研究结果对海南昌化铅锌矿区废弃地土壤重金属污染的治理具有参考意义。

### 参考文献:

- [1] 张小俊. 土壤重金属污染及其危害[J]. *农业开发与装备*, 2020(10): 109 – 110.
- [2] 李俊凯, 张丹, 周培, 等. 南京市铅锌矿采矿场土壤重金属污染评价及优势植物重金属富集特征[J]. *环境科学*, 2018, 39(8): 3845 – 3853.
- [3] 肖乃川, 张云霞, 宋波, 等. 广东省典型富镉铅锌矿区中优势植物重金属富集特性与应用潜力[J]. *环境污染与防治*, 2021, 43(3): 343 – 347.
- [4] 王娜. 矿区废弃地土壤生态恢复研究进展[J]. *南方农业*, 2020, 14(13): 51 – 54.
- [5] 刘月莉, 伍钧, 唐亚, 等. 四川甘洛铅锌矿区优势植物的重金属含量[J]. *生态学报*, 2009, 29(4): 2020 – 2026.
- [6] 江倩倩, 高洁, 黄鑫, 等. 昌化铅锌矿尾矿库区土壤重金属污染综合评价及重金属在自然生植物中的富集比较[J]. *海南师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 32(1): 93 – 98.
- [7] 陆彬斌, 孟柱, 赵志忠, 等. 海南昌化铅锌矿区土壤重金属含量及优势植物富集特征[J]. *河南科技*, 2013(1): 184 – 189.
- [8] 张振磊, 袁建平, 吴丹, 等. 海南昌化铅锌矿废弃地重金属污染评价及其空间分布特征[J]. *湖北农业科学*, 2016, 55(12): 3031 – 3035.
- [9] 中国环境监测总站. GB/T 17141—1997 土壤质量 铅、镉的测定石墨炉原子吸收分光光度法[S], 北京: 国家环境保护局, 1997.
- [10] 程睿. 金属矿山废弃地土壤质量综合评价指标体系初探[J]. *江西农业学报*, 2021, 33(3): 106 – 112.
- [11] 国家卫生健康委, 国家市场监督管理总局. GB 2762—2017 食品安全国家标准 食品中污染物限量[J]. *中国食品卫生杂志*, 2018, 30(3): 329 – 340.
- [12] 卢楠. 重金属 Cd、Pb 复合污染对植物生理生化和细胞结构影响的研究进展[J]. *现代农业科技*, 2019(8): 176 – 177.
- [13] 陈世川. 土壤中铅污染的危害与治理[J]. *广西节能*, 2020(4): 26 – 27.
- [14] 卢楠, 李刚, 朱代文, 等. 尾渣堆周边土壤重金属污染对植物影响研究[J]. *中国矿业*, 2018, 27(5): 113 – 117.
- [15] 薛永, 王苑颀, 姚泉洪, 等. 植物对土壤重金属镉抗性的研究进展[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(3): 528 – 534.
- [16] 赵雅曼, 陈顺钰, 李宗勋, 等. 铅锌矿集区 7 种草本植物对重金属的富集效果[J]. *森林与环境学报*, 2019, 39(3): 232 – 240.
- [17] GERBER G. B, LÉONARD A, HANTSON P H Carcinogenicity, mutagenicity and teratogenicity of manganese compounds [J]. *Critical Reviews in Oncology and Hematology*, 2002, 42(1): 25 – 34.
- [18] 徐伟健, 宋旭燕, 龚正君, 等. 西南某铅锌矿区土壤重金属污染现状与评价研究[J]. *四川环境*, 2019, 38(5): 49 – 54.
- [19] WONG M H. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils [J]. *Chemosphere*, 2003, 50(6): 775 – 780.
- [20] 徐玉霞, 汪庆华, 王华斌, 等. 矿区周边土壤重金属污染治理的优势植物筛选——以关中西部某铅锌冶炼区为例[J]. *环境保护科学*, 2016, 42(6): 61 – 67.
- [21] 张龙, 张云霞, 宋波, 等. 云南兰坪铅锌矿区优势植物重金属富集特性及应用潜力[J]. *环境科学*, 2020, 41(9): 4210 – 4217.
- [22] 陈昌东, 张安宁, 腊明, 等. 平顶山矿区矸石山周边土壤重金属污染及优势植物富集特征[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(6): 1216 – 1223.

# Heavy Metal Contamination in the Soil and Enrichment Characteristics in the Plants around the Abandoned Lead-zinc Mine

YANG Ning<sup>1</sup>, LI Donghai<sup>2</sup>, YANG Xiaobo<sup>2</sup>, ZUO Yongling<sup>2</sup>, TIAN Lujia<sup>2</sup>, CHEN Lin<sup>2</sup>

(1. College of Tropical Crops, Hainan University, Haikou, Hainan 570228;

2. College of Ecology and Environment, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China)

**Abstract:** A survey was made of the soil and plants around the abandoned lead-zinc mine in Changhua Town, Changjiang County, Hainan Province, and three sampling sites were arranged. The soil and 13 species of plants in the sampling sites were collected to determine and analyze their contents of heavy metals. The results showed that the soil around the lead-zinc mine is generally contaminated by Pb, Cd, Zn and Cu, with a comprehensive heavy metal contamination index of 19.86, indicating the soil contamination level around the lead-zinc mine is high according to the grading standard for the comprehensive soil heavy metal contamination evaluation. Of the 13 species of plants sampled around the lead-zinc mine, *Artemisia chinensis* showed an enrichment potential for the heavy metal Cd, and *Atalantia buxifolia* showed an enrichment potential for the heavy metal Zn.

**Keywords:** lead-zinc mine; contamination in soil; heavy metals; enrichment in plant

(责任编辑: 葛成军 责任编辑: 潘学峰)