

# 多金属矿区复合污染土壤植物修复策略研究

卢楠<sup>1,2,3,4,5\*</sup>, 张振飞<sup>1</sup>

<sup>1</sup>陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西 西安

<sup>2</sup>西安交大土地工程与人居环境技术创新中心, 陕西 西安

<sup>3</sup>自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 陕西 西安

<sup>4</sup>陕西省土地整治工程技术研究中心, 陕西 西安

<sup>5</sup>陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 陕西 西安

收稿日期: 2023年2月20日; 录用日期: 2023年3月15日; 发布日期: 2023年3月29日

## 摘要

多金属矿区在自然界中存在较多, 重金属类型具有伴生性和综合性, 其引起的污染具有多种元素复合的特点。多金属矿区的冶炼尾渣等废弃物、矿石及酸性矿山排水是引起多金属矿区污染的主要原因, 且目前有色金属矿区周边土壤镉(Cd)、砷(As)、铅(Pb)污染较为严重, 矿区土壤-植物体系作为Pb和Cd等重金属污染物的环境载体和最终受体, 环境要素及驱动因素的多样性增加了对其进行生态修复和恢复治理的难度。目前的研究表明, 植物修复虽然具有较多优点, 且已经筛选出具有累积效应的植物种类及生理特点, 但是在修复后的管护措施等方面仍然存在一定的局限性, 有待继续研究。

## 关键词

多金属矿区, 尾渣, Pb、Cd复合污染, 植物修复

# Study on Phytoremediation Strategies of Contaminated Soil in Polymetallic Mining Area

Nan Lu<sup>1,2,3,4,5\*</sup>, Zhenfei Zhang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Shaanxi Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>Technology Innovation Center for Land Engineering and Human Settlements, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi

<sup>3</sup>Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, The Ministry of Natural Resources, Xi'an Shaanxi

<sup>4</sup>Shaanxi Land Consolidation Engineering Technology Research Center, Xi'an Shaanxi

<sup>5</sup>Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

\*通讯作者。

文章引用: 卢楠, 张振飞. 多金属矿区复合污染土壤植物修复策略研究[J]. 植物学研究, 2023, 12(2): 71-75.

DOI: 10.12677/br.2023.122011

## Abstract

There are many polymetallic mining areas in nature. The types of heavy metals are associated and comprehensive, and the pollution caused by them has the characteristics of multiple elements. Wastes such as tailings from polymetallic mining areas, ores and acid mine drainage are the main reasons for the pollution of polymetallic mining areas. At present, the pollution of cadmium (Cd), arsenic (As) and lead (Pb) in the soil around the nonferrous metal mining areas is relatively serious. The mining area soil-plant system is the environmental carrier and final receptor of heavy metal pollutants such as Pb and Cd, the diversity of environmental factors and driving factors increases the difficulty of ecological restoration and restoration. The current research shows that although phytoremediation has many advantages and has screened out plant species and physiological characteristics with cumulative effects, there are still some limitations in the management and protection measures after remediation, which need to be further studied.

## Keywords

Polymetallic Mining Area, Tailings, Pb and Cd Combined Pollution, Phytoremediation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

我国矿产资源储量丰富、分布广泛, 各省(区、市)均拥有不同类型、不同规模的矿产, 矿业生产是工业发展的基础, 对区域经济发展具有重要影响。矿产资源的开采对地球表层造成剧烈扰动, 由此造成土地结构破坏、土壤污染、土壤退化、生物多样性减少等一系列生态地质环境问题。世界上已经发现的金属矿产在我国基本都有探明储量[1]。共生、伴生矿床多, 单一矿床少; 贫矿较多、富矿稀少, 开发利用难度大是我国有色矿产的主要特点, 开采模式单一、矿产综合利用率低, 在造成资源浪费的同时, 还导致了严重的生态破坏和环境污染。

有色金属矿产开发与利用过程中诱发的多种地质安全问题, 学界给予了大量研究。土壤是有色矿区生态地质环境的重要组成部分, 也是资源开采直接破坏的环境要素之一。冶炼尾渣是矿山选冶过程中产生的常见废弃物, 生产量巨大, 且常含有大量重金属元素。据 2021 年 8 月生态环境部发布的《2019 年中国生态环境统计年报》显示, 我国有色金属矿采选业的一般工业固体废物产生量超 5 亿吨, 占全国一般工业固体废物产生量的 14.9% [2], 大量生产、大量消耗、大量排放的生产方式尚未发生根本性扭转, 冶炼尾渣且因其颗粒细小, 随地表径流、风力传送、雨水淋滤等自然作用不断扩散, 严重降低矿区及周边土壤环境质量[3] [4] [5], 有色金属冶炼尾渣是造成环境污染的主要来源。酸性矿山排水也是加剧矿区多金属复合污染的重要原因。因此, 探讨冶炼尾渣中多金属污染形成原因和机制, 及其对矿区周边土壤-植物体系重金属累积及其贡献是值得关注的课题。

## 2. 冶炼尾渣引发矿区多金属污染原因

冶炼工业产生的残渣是土壤等环境介质中最主要的重金属来源。目前, 大多数湿法炼金属工艺有焙

烧、浸出、电沉积等过程,在焙烧过程中不可避免会形成含镉铁氧体。铁氧体由于化学结构稳定,往往需要高温强酸环境。二氧化硫常被用作还原浸出技术的还原剂,与传统热酸工艺相比,还原技术有效提高了铁氧体的分解效率,并产生较少的浸出残渣,在提取大多数重金属后,冶炼尾渣中剩余金属的环境活性和潜在生态危害仍有待于进一步评价[6]。与此同时,冶炼尾渣等固体废物中的矿物形态、结构、矿物转化过程等,可用于研究和预测尾渣中有毒元素的潜在生态危害及其环境地球化学过程。矿物重金属元素多数以离子的形式对环境产生影响和破坏,冶炼尾渣等固体废物中的重金属元素既可通过沉淀作用、吸附作用或离子交换等方式进入次生矿物中,也可以以离子形式进入水体,进而影响和污染水体和土壤。土壤中的有机成分、土壤 pH 值等物理化学特征,也会对重金属离子的螯合作用产生影响,进而改变冶炼尾渣中重金属离子的迁移、累积和可生物提取等性质[5]。

### 3. 铅镉对环境及人体的危害

据 2014 年 4 月环境保护部和国土资源部发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示,工矿业废弃地土壤环境问题突出,有色金属矿区周边土壤镉(Cd)、砷(As)、铅(Pb)污染较为严重[7]。同时,Pb、Cd 也是被我国纳入《“十三五”生态环境保护规划》重点监控与污染物排放量控制的五种重金属之一[8],《“十四五”生态环境保护规划》中也同样强调了,要加强包含铅、镉等五种重金属污染防控部署,为此,生态环境部还制定了《关于进一步加强重金属污染防控的意见》(环固体[2022] 17 号),并于 2022 年 3 月发布,明确了多种重金属污染防控工作重点和目标任务。

Pb 是一种对人体危害极大的有毒重金属,也是所有元素中仅次于 As 的第二大有害重金属[9]。Pb 会引起急性和慢性并发症,例如血红蛋白合成异常、肾脏损害、神经系统疾病、学习能力下降、行为障碍,甚至死亡[10]。据世界卫生组织统计,2016 年全球范围内,大约有 54 万人因接触铅而死亡,其中大多数人来自发展中国家[11]。国际癌症研究机构(IARC)也将 Pb 列为 2B 组(一种人类可能的致癌物)(IARC, 2006)[12]。流行病学研究也表明,Pb 暴露与癌症,特别是肾、肺、胃和神经系统癌症密切相关[13]。

Cd 自发现以来,在工业上发挥了重要作用,常被用作电镀、制作电池等。镉是一种多器官毒性的危险金属,对人体健康造成极大危害。人体中 Cd 的累积会增加患肥胖症、心血管疾病、糖尿病和代谢综合征的风险[14]。综合以上原因,亟需采用必要手段对有色金属矿区及周边环境中的铅镉污染进行修复治理。

### 4. 土壤铅镉污染的植物修复策略

矿产资源开采等活动过程造成的重金属污染对生态环境的危害是多方面的,且具有隐蔽性。植物修复因其具有不影响土体结构、改善土壤质量,不会造成二次污染等优点,被认为是金属矿山生态修复中应用前景最好的技术之一[15][16]。

矿区土壤-植物体系作为 Pb 和 Cd 等重金属污染物的环境载体和最终受体,环境要素及驱动因素的多样性增加了对其进行生态修复和恢复治理的难度。一般来说,植物通过吸收土壤中的营养物质及部分矿质元素以维持其正常生长,但在 Pb、Cd 污染区,植物在吸收必需元素的同时,也吸收了 Pb、Cd 等有害重金属元素,并累积在根部及其他部位。累积的过程一般取决于植物的种类。根系作为直接与土壤接触的部分,在累积 Pb、Cd 的过程中起至关重要的作用,根系也是发生生化反应过程的重要场所,因此,在根系分布密集的表层土壤中,与较深层土壤相比,Pb、Cd 的污染程度较高。而植物对 Pb、Cd 毒性的形态或者生理反应取决于吸收总量和植物类型,较大的 Pb、Cd 吸收量可能导致植物胁迫、威胁光合作用和养分吸收等正常的植物生理功能,从而降低生物量,改变生长形态,严重时会导致植物会进一步黄化,直至死亡。在土壤-植物系统中,土壤的理化性质往往会影响 Pb、Cd 生物活性,如土壤有机质、矿物质含量和微生物数量等。

但仍然存在较多种类植物对 Pb、Cd 具有较强的耐受性, 能够吸收、积累这两种物质, 并且不会对植物生长速度、生物量和生理指标等产生过多影响。目前为止, 已经有许多研究对多种植物对 Pb、Cd 的修复能力进行了评估, 如香根草、积雪草、香蒲、菠菜等, 且有研究表明, 香根草具有快速生长、较长的根系, 根系中的重金属累积量相对较高, 可作为 Pb 和 Cd 的修复材料[17]。

## 5. 小结

多金属矿区的重金属往往具有伴生性和综合性, 引起的污染具有多元素复合的特点。冶炼尾渣中矿物形态、结构、矿物转化过程可用于研究和预测尾渣中有毒元素的潜在生态危害及其环境地球化学过程。目前, 有色金属矿区周边土壤镉(Cd)、砷(As)、铅(Pb)污染较为严重, 植物修复技术因其低成本等显著优势常被应用于矿区污染物治理。土壤-植物体系作为重金属污染物的环境载体和最终受体, 有一些具有累积效应的植物种类已经被发现, 但植物修复仍具有一定的局限性, 植物修复后的管控措施同样重要, 必须妥善处置含有重金属的植物, 防止产生二次污染。

## 基金项目

陕西地建-西安交大土地工程与人居环境技术创新中心开放基金项目(2021WHZ0094); 陕西省土地工程建设集团内部科研项目(DJNY-YB-2023-29)。

## 参考文献

- [1] 龙安举. 有色金属矿产资源的开发利用与可持续发展[J]. 世界有色金属, 2017(10): 42-43.
- [2] 中华人民共和国生态环境部. 2019年中国生态环境统计年报[R]. 2021-08-27.
- [3] Liu, J., Liu, Y., Li, C., et al. (2002) Characteristics and Conditions of Formation of an Excellent Fossil Wood Cell Texture from the Vein Copper Deposits in Lanping-Simao Basin, SW China. *Ore Geology Reviews*, **20**, 55-63. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(02\)00038-0](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(02)00038-0)
- [4] Zhang, S., Zhu, N., Shen, W., et al. (2022) Relationship between Mineralogical Phase and Bound Heavy Metals in Copper Smelting Slags. *Resources, Conservation and Recycling*, **178**, Article ID: 106098. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106098>
- [5] Pająk, M., Błońska, E., Szostak, M., Gąsiorek, M., Pietrzykowski, M., Urban, O. and Derbis, P. (2018) Restoration of Vegetation in Relation to Soil Properties of Spoil Heap Heavily Contaminated with Heavy Metals. *Water, Air and Soil Pollution*, **229**, Article No. 392. <https://doi.org/10.1007/s11270-018-4040-6>
- [6] Zhang, C., Wang, A., Jiang, H., Deng, Y. and Yang, Y. (2020) Environmental Activity and Ecological Assessment of Heavy Metals in the Reductive Leaching Residue from Zinc Hydrometallurgy Industry. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, **73**, 1755-1761. <https://doi.org/10.1007/s12666-020-01991-z>
- [7] 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.
- [8] 国务院. 国务院关于印发“十三五”生态环境保护规划的通知[EB/OL]. [http://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content\\_5148753.htm](http://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content_5148753.htm), 2016-11-24.
- [9] Pourrut, B., Shahid, M., Dumat, C., Winterton, P. and Pinelli, E. (2011) Lead Uptake, Toxicity, and Detoxification in Plants. In: Whitacre, D., Ed., *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, Vol. 213, Springer, New York, 113-136. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9860-6\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9860-6_4)
- [10] Golpayegani, A. and Khanjani, N. (2012) Environmental and Occupational Lead Exposure in Iran: A Systematic Review. *Journal of Health Development*, **1**, 74-89.
- [11] Mohammadyan, M., Moosazadeh, M., Borji, A., et al. (2019) Investigation of Occupational Exposure to Lead and Its Relation with Blood Lead Levels in Electrical Solderers. *Environmental Monitoring and Assessment*, **191**, Article No. 126. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7258-x>
- [12] International Agency for Research on Cancer (IARC) (2006) Group Authors from the World Health Organization. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. International Agency for Research on Cancer, Lyon.
- [13] García-Lestón, J., Méndez, J., Pásaro, E. and Laffon, B. (2010) Genotoxic Effects of Lead: An Updated Review. *Environment International*, **36**, 623-636. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2010.04.011>

- 
- [14] Saman, S., Sara, E., Watson, J.L., *et al.* (2023) Does Maternal Low-Dose Cadmium Exposure Increase the Risk of Offspring to Develop Metabolic Syndrome and/or Type 2 Diabetes? *Life Sciences*, **315**, Article ID: 121385.  
<https://doi.org/10.1016/j.lfs.2023.121385>
- [15] 张怡悦. 金/铁矿区土壤-植物体系铅锌同位素特征及微生物演化机制[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2021.
- [16] 李念. 潼关某重金属污染农田的化学-植物联合修复研究[D]: [硕士学位论文]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [17] Ng, C.C., Boyce, A.N., Rahman, M.M. and Abas, M.R. (2017) Tolerance Threshold and Phyto-Assessment of Cadmium and Lead in Vetiver Grass, *Vetiveria zizanioides* (Linn.) Nash. *Chiang Mai Journal of Science*, **44**, 1367-1378.