

有色金属矿山尾矿土壤化生态修复技术研究进展

迟崇哲,刘 影,王 超,张大勇,王春慧

(长春黄金研究院有限公司)

摘要:有色金属矿山尾矿产生量大、成分复杂、重金属含量高、利用率低,堆存不仅占用大量土地,而且对周边环境也存在一定的污染隐患。以尾矿经过土壤化改良后形成的“人造土”为基质进行生态修复是一种新型的绿色、高效和可持续化的尾矿综合利用方式。阐述了有色金属矿山典型尾矿土壤化技术,分析了铅锌尾矿、铜尾矿、黄金尾矿、稀土尾矿土壤化技术现状,探讨了有色金属尾矿土壤化面临的挑战,并进行了展望,以为有色金属矿山大宗尾矿资源的绿色综合利用提供参考依据。

关键词:有色金属矿山;尾矿土壤化;综合利用;生态修复;铜尾矿;铅锌尾矿;黄金尾矿;稀土尾矿

中图分类号:TD167 TD926.4

文章编号:1001-1277(2024)12-0008-05

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20241202

引 言

尾矿是指选矿后产生的有用目标组分含量较低而无法用于生产的废弃物,在有色金属矿山,尾矿量占矿石量的 70%~95%,而在黄金、钼、钨等稀有金属矿山中占比可达 99%以上^[1]。随着新建矿山数量的增加及矿山生产能力的不断提升,尾矿的排放量、堆积量逐渐增大。2021 年,中国尾矿总产量约为 14.19 亿 t,其中,铜尾矿约为 3.92 亿 t,黄金尾矿约为 1.61 亿 t,其他有色金属尾矿约为 1.35 亿 t^[2]。这些尾矿堆积在尾矿库中,既占用了大量土地资源,造成资源的严重浪费,又对环境造成了严重污染。随着国家对资源安全重视程度的不断提升,尾矿合理化处置及资源化利用的需求也在逐渐增强。

尾矿土壤化改良是指通过物理、化学、生物改良剂并结合相应的农业、水利、生物等措施,使尾矿具备土壤相关的物理、化学、生物功能和特征,并用于生态修复的过程。本文综述了有色金属矿山尾矿土壤化生态修复技术现状,包括尾矿利用现状、尾矿土壤化技术及研究现状,分析存在的挑战,并对未来发展进行展望。

1 有色金属矿山尾矿资源利用现状

有色金属矿产资源是指除黑色金属矿产之外的其他所有金属矿产^[3],主要包括铜、铅、锌、铝、镁、金、银、铂及稀有金属等。有色金属矿山尾矿成分复杂,通常含有一定量的有用金属,具有较高的资源回收价值。

然而,目前中国矿产资源总回收率约为 30%,尾矿综合利用率仅为 8%左右^[4],与西方发达国家差距很大。随着资源日益紧缺和环保压力的增大,有色金属矿山尾矿的资源化利用成为一个重要的研究领域。尾矿综合利用手段包括二次回收,用作土壤改良剂和微量元素肥料、建筑工业材料及回填等^[5]。近年来,围绕中国“双碳”目标的战略布局,低碳绿色可持续发展成为未来尾矿处置的发展趋势^[6]。以尾矿土壤化改良形成的“人造土”为植被生长基质进行生态修复是一种新型的绿色、高效和可持续的尾矿综合利用方式,逐渐被国内外矿山生态修复行业广泛接受。

2 尾矿土壤化技术

尾矿土壤化改良方法主要包括物理化学处理法和生物处理法。物理化学处理法利用改良剂并结合相应的农林保水措施,调整尾矿的酸碱度、持水保水能力和透气结构,提高基质养分含量。该方法具有长效性,更是植物改良和微生物改良的必要基础措施。改良剂既可以通过络合、沉淀、吸附、氧化还原等系列物理化学作用,改变尾矿中重金属的赋存形态,降低其生物有效性和迁移性,同时又可以调节尾矿的理化性质,为植物定植和生长提供条件,达到尾矿土壤化的目的。目前,土壤改良剂主要分为有机改良剂、无机改良剂和复合改良剂 3 种类型。有机改良剂主要包括有机物料和生物炭材料;无机改良剂主要包括含磷物质、黏土矿物类、石灰类、工业固废类等;复合改良剂通常由有机改良剂、无机改良剂和新材料按一定

配比混合而成。生物处理法包括植物修复技术和微生物修复技术,主要通过对尾矿中的重金属污染物进行提取、吸附等净化方式,降低重金属迁移性,从而达到促进植物定植和生长的目的。

3 尾矿土壤化技术研究现状

3.1 铅锌尾矿土壤化

铅锌矿是有色金属矿产资源的重要组成部分,在铅锌矿石开采和选别过程中不可避免地产生大量的尾矿。据统计,中国明确计量的铅锌尾矿总量已达 1.6 亿~2 亿 t^[7],但大量的铅锌尾矿目前处于堆存弃置状态,综合利用率不足 36 %^[8],存在较大环境污染风险与安全隐患。

铅锌尾矿引起的土壤污染是以 Cd、Pb 和 Zn 为主的多种金属复合污染,在土壤中的化学形态以残渣态为主。此外,铅锌尾矿污染物还包括 Cr、Cu、Hg、Ni 和 As 等重金属^[9-12]。对于这种组分复杂和重金属含量高的尾矿,土壤化难度较大。Cd、Pb 和 Zn 污染土壤常用的无机物类固化稳定物质主要有硅钙类材料、含磷类材料和黏土矿物等^[13-15],有机物类则包括有机肥^[16]、畜禽肥^[17]等。

采用改良剂联合植物修复是治理铅锌尾矿的一种自然、有效和常用的方法。该方法需要人工添加外源物对尾矿基质进行改良,增加重金属稳定性,提高土壤肥力,以创造适合植物生长的立地条件。付雄略^[18]开展了铅锌矿渣基质改良效应与植物耐性研究,结果表明,蛭石和泥炭土可作为铅锌矿尾矿库重金属污染的改良剂;蓖麻、泡桐、夹竹桃均可作为铅锌矿尾矿库重金属污染植物修复潜力植物。TANG 等^[19]以泥炭为改良剂,采用盆栽试验研究了泥炭添加对植物富集重金属的影响,发现泥炭可以同时降低植物根部及茎叶中 Pb 和 Zn 的含量。目前,各种各样的工农业有机废弃物已被广泛应用于铅锌尾矿的基质改良和植被重建中,包括酒糟、中药渣^[20]、蘑菇渣^[21]、牲畜粪便^[22]、秸秆^[23-24]等。王璐等^[17]采用原位基质改良方法研究了 8 种有机废弃物作为改良剂对铅锌尾矿污染基质修复效果的影响,结果表明鸡粪、污泥在尾矿基质改良实践中具有较大的修复潜力。研究表明,将有机废弃物作为改良剂修复尾矿,能有效改善尾矿基质物理结构,补充营养元素,降低重金属活性,提高微生物活性、植物成活率及盖度和生物量。添加改良剂可以改善尾矿基质性质,有效辅助矿山尾矿的植物稳定性^[17,20-22,24]。

除了添加有机废弃物外,一些无机材料也可以用于铅锌矿区土壤改良。张东等^[25]采用生化黄腐酸(BFA)、磷酸二氢铵、沸石和有机肥改良后的尾矿渣

基质作为种植土壤,利用牛筋草、波斯菊和籽粒苋对萤石型铅锌矿山进行了生态修复。CAI 等^[26]将蘑菇菌渣堆肥和碳酸钙加入铅锌尾矿中,采用盆栽试验研究了鱼腥草对重金属的富集作用,发现添加的复合改良剂可以缓解铅和锌对鱼腥草的胁迫作用。杨胜香等^[20]向铅锌尾矿废弃地添加不同碳氮磷源改良剂(药渣、尿素和过磷酸钙)进行植被重建,发现碳氮磷源改良剂混合材料是铅锌尾矿废弃地植被恢复的良好改良剂。

铅锌尾矿土壤化的研究重点在于探索复合改良剂配比,开发新型绿色土壤改良剂^[27],以达到综合改善尾矿理化性质、降低重金属生物有效性和增加养分,以及高效低碳修复铅锌尾矿的目的。

3.2 铜尾矿土壤化

铜尾矿虽然是一种固体废弃物,但也是一种宝贵资源。目前,全国每年铜尾矿产生量超 3 亿 t,堆存有几十亿吨^[2],数量巨大,但利用率较低。由于尾矿中含有 Zn、Mn、Cu、Mo、P 等植物生长必备微量元素,经过一系列处理,可以将铜尾矿制成土壤改良剂或生态修复基质。

要实现铜尾矿的土壤化,需将铜尾矿培肥改良,使肥力低、无土壤结构的铜尾矿达到类似土壤的理化性质,从而保证植物的正常生长^[28]。因此,在铜尾矿中添加环境友好的外源物质创造植物定植条件是目目前铜尾矿土壤化的一种主要方式^[29]。

YOU 等^[30]通过在中性 Cu-Mo-Au 尾矿中添加生物炭提高了尾矿的保水能力、阳离子交换能力和不稳定有机碳水平,并且降低了植物对铜的利用率和吸收率;KHAN 等^[31]通过在铜尾矿中添加石灰,极大地降低了重金属可提取性及 Cu、Fe 的植物有效性;MUJTABA 等^[32]发现由煤矸石和生物炭制备的复合改良剂增强了 Cu 和 Zn 等重金属的固定效果,改善了铜尾矿的理化性质,从而显著降低了植物对 Cu 和 Zn 重金属的吸收、转移和生物累积。在基质改良基础上,利用植物可对铜尾矿进行进一步的修复,通过植物定植和生长,可减少铜尾矿的风蚀水蚀。储昭霞^[33]利用煤矸石协同植物对铜尾矿进行了改良机制与改良效果的研究,利用植物对铜尾矿进行生态修复,黑麦草、高羊茅、披碱草等草本植物较为常见^[34-36]。

3.3 黄金尾矿土壤化

中国黄金矿山数量多、分布广,尾矿产量大、利用率低。黄金矿山常用选矿工艺有重选、浮选和氰化 3 种,其尾矿化学成分主要为 SiO₂,少量的 CaO、Al₂O₃、MgO、Na₂O、Fe₂O₃、贵金属(如 Au、Pt、Ag)和重金属(如 Cu、Pb、Zn)^[37],可能存在的有毒有害成分主要有

浮选药剂、氰化物、部分重金属等^[38-39]。目前,黄金尾矿综合利用主要有2种方式:一是回收有价组分;二是将尾矿加工处理成工业或建筑材料^[40]。而对黄金尾矿的土壤化及复垦,特别是黄金尾矿无土植被恢复的研究报道并不多。

黄金尾矿具有重金属污染、高氰、高盐、碱性、低营养特征,需要通过添加合适的土壤改良剂,改变土壤的酸碱度、改善土壤性状、提高土壤肥力,并挑选耐盐碱、耐瘠化的植物对黄金尾矿土壤进行修复。张大勇等^[41]以玉米秸秆、牛羊粪便、生物菌剂等为原料制备的改良材料对黄金矿山排土场废石粉进行土壤化改良试验研究,验证了黄金矿山固体废物土壤化改良的可行性。钱玲等^[42]采用泥炭与污泥混合作为黄金尾砂的改良剂,发现改良剂可有效提高尾砂中速效氮、速效磷、速效钾及有机质含量,黑麦草的发芽率和平均株高均高于原尾砂。LIN等^[43]选择了6种植物对黄金矿山进行无土修复,发现植被修复对黄金尾矿理化性质、细菌群落结构和功能均有改善。QIAN等^[44]利用泥炭、污泥和膨润土组成的复合改良剂对黄金尾矿进行改良,并种植高羊茅对改良效果进行验证,结果表明,改良剂的添加使尾砂重金属含量降低,改变了植被根际微生态特征,促进了高羊茅的生长。植物与尾矿具有相互依存的关系,植被恢复后尾矿的营养物质和有机质增加,反过来,尾矿的改善也促进了植被生长^[45]。因此,改良剂辅助植被重建是一种具有生态友好性和低成本的黄金尾矿生态修复方法。

微生物群落是尾矿生态系统的基本组成部分,在生态功能中发挥着重要作用^[46]。微生物能够利用自身的抗性减缓重金属对植物的毒性,从而促进植物的生长^[47]。LIU等^[48]对某黄金尾矿库进行了无土植物修复试验,宏基因组分析表明,植物生长和生态修复效果与微生物群落和功能基因组成密切相关。LIU等^[49]研究发现,接种经过筛选和驯化的微生物可以显著提高重金属尾矿植物修复效率。CHEN等^[50]研究表明,接种根际细菌可显著改变黄金尾矿的微生物群落结构,提高高羊茅的平均发芽率,增强植物对重金属的吸收,验证了根际细菌辅助植物修复黄金尾矿的有效性^[51]。

3.4 稀土尾矿土壤化

中国是世界上稀土资源最为丰富的国家之一^[52]。中国稀土矿主要有包头混合型稀土矿、四川氟碳铈矿和南方离子吸附型稀土矿3种^[53]。目前,中国稀土矿开采以传统露天开采工艺和原地浸矿工艺为主^[54],开采过程中,以土壤酸化、浸矿剂残留、土壤肥力退化、重金属污染及稀土元素污染为主要表现形式的土壤退化问题尤为突出^[55-57]。

国内外用于稀土尾矿土壤化的方法主要有添加土壤改良剂的化学修复和利用植物的自净功能及微生物特异性功能的生物修复。由于稀土矿山开采工艺的特殊性,改良剂联合植被恢复是稀土尾矿生态修复的最主要方式^[58]。即在种植植物之前,施加土壤改良剂来调整土壤的理化性质,为植物和微生物提供生长所必需的营养元素,之后通过种植先锋植物增加植被覆盖度,减轻降雨侵蚀稀土尾矿造成的面源污染风险。因此,稀土尾矿复垦的关键在于尾矿基质改良和先锋植物筛选。宽叶雀稗是南方离子型稀土尾矿上的一种常见乡土植物^[59]。研究发现,宽叶雀稗能够充分利用南方离子型稀土尾矿中残留的铵态氮,适合在废弃稀土尾矿上生长,是一种优良的禾本科牧草兼绿肥^[60]。ZHANG等^[61]利用有机肥和本地植物(芒草+马尾松+青竹)联合模式对广东省稀土尾矿进行了修复,建议中国南方稀土矿山可以选用此种生态修复模式。宋乐等^[62]通过添加不同配比的改良剂对稀土浸矿废渣进行了改良,得出黑麦草的最佳生长条件所需改良剂及其添加水平为:0.01%聚丙烯酰胺(PAM)、1%腐熟鸡粪和1%生物质电厂灰。张艳^[63]发现利用废弃菌糟和鸡粪制作的土壤改良剂,联合耐受草本植物(早熟禾、高羊茅、杂交狼尾草、高丹草)对稀土尾砂土壤及养分有显著改善作用。罗杰^[64]选择生物炭+粉煤灰+3种有机肥作为土壤改良剂,种植当地经济作物赣南脐橙,并选取林下种草(三叶草、宽叶雀稗)模式,在废弃稀土矿区进行大田试验;结果表明,三叶草+生物炭+粉煤灰+赣南脐橙专用有机肥处理的效果最好。DAI等^[65]以花生秸秆生物炭、磷镁化合物和改性沸石分别与石灰石和有机肥按一定质量比混合制备复合改良剂,施加到堆浸稀土尾矿中,种植紫花苜蓿。田间试验结果表明,3种改良剂均降低了尾矿中 NH_4^+ 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 含量,有利于稀土尾矿的植被恢复。

近年来,微生物在稀土尾矿土壤改良中的作用逐渐被人们所关注。以往对稀土尾矿微生物群落的研究主要集中在细菌群落的研究,忽视了真菌群落的作用,而真菌比细菌更适应贫瘠的土壤环境^[7]。王钰^[58]利用植物覆盖与生物炭-有机肥改良剂联合方法对南方离子型稀土尾矿土壤进行修复,发现该方法有利于功能性真菌类群在植物根部的定殖,对土壤养分循环及稀土尾矿土壤生态系统的恢复重建有正向效果。CHEN等^[66]通过向稀土尾矿施加厌氧发酵废渣,并种植能源植物(杂交狼尾草)进行修复,结果发现,施加沼气残渣或泥浆能有效缓解土壤酸化,增加土壤养分,并显著促进了微生物群落中的共营养类群及植物的生长。李金苗^[67]利用室内盆栽试验研究了

“丛枝菌根真菌(AM 真菌)+改良剂(生物炭+粉煤灰)+修复植物”的复合型修复模式在赣南离子型稀土尾矿土壤改良中的潜在作用及机制。这种采用生物改良剂结合功能性微生物协同修复的方式,为离子型稀土尾矿退化土壤的生态修复提供了新思路,但目前尚属起步阶段。

4 挑战与展望

尽管有色金属尾矿土壤化生态修复技术已经取得了显著进展,但仍面临一些挑战:

1)技术集成。单一的修复技术难以解决尾矿土壤化的复杂问题,往往需要多种技术联合应用。

2)经济性。尾矿土壤化需要添加有机、无机、复合改良材料,材料成本往往较高,制约了其大规模推广应用。

3)长效性。部分修复技术的效果难以长期维持,需要进行长期的监测和维护。

未来尾矿土壤化生态修复技术的发展应重点关注以下2个方面:

1)技术创新。未来应不断研发更加高效、低成本的土壤改良材料,新型绿色高效复合改良剂,以及改良剂结合功能性微生物(细菌、真菌)的协同修复技术,提高尾矿土壤化生态修复的效果和可持续性。

2)政策支持。加强政府对尾矿土壤化生态修复的支持力度,促进高效、经济、环境友好型土壤化改良技术的推广应用。制定相关政策和标准,规范各类生产矿山尾矿土壤化的有关制度体系和工作机制,特别是修复后的监测评价工作。

5 结论

1)有色金属矿山尾矿产生量大、成分复杂、重金属含量高、利用率低,堆存存在极大的环境安全隐患。以尾矿土壤化改良形成的“人造土”为植被生长基质进行生态修复是一种新型的绿色、高效和可持续的尾矿综合利用方式。

2)综述了铅锌尾矿、铜尾矿、黄金尾矿及稀土尾矿的土壤化技术现状,尾矿土壤化改良主要包括物理化学处理法和生物处理法,通过物理、化学、生物作用调整尾矿的酸碱度、重金属赋存形态、持水保水能力和透气结构,提高基质养分含量,为植物定植和生长提供条件,达到尾矿土壤化的目的。

3)针对有色金属尾矿土壤化生态修复技术面临的技术集成难度大、经济性及长效性差等问题,未来应重点关注2个方面:一是技术创新,不断研发更加高效、低成本的土壤改良材料,新型绿色高效复合改良剂,以及改良剂结合功能性微生物(细菌、真菌)的

协同修复技术,提高尾矿土壤化生态修复的效果和可持续性;二是政策支持,加强政府对尾矿土壤化生态修复的支持力度及土壤化改良技术的推广应用,制定相关政策和标准,特别是修复后的监测评价工作。

[参考文献]

- [1] 赖才书,胡显智,字富庭.我国矿山尾矿资源综合利用现状及对策[J].矿产综合利用,2011(4):11-14.
- [2] 郭万进,吴明海,王阳,等.我国铜矿尾矿资源化利用技术现状及进展[J].矿产综合利用,2023(5):127-134.
- [3] 张晗.有色金属矿产资源勘查方法的研究[J].世界有色金属,2024(6):178-180.
- [4] 唐宇,吴强,陈甲斌,等.提高我国尾矿资源综合利用效率的思考[J].金属材料与冶金工程,2012,40(3):59-63.
- [5] 刘小龙.我国矿山尾矿资源综合利用现状及对策[J].科技创新导报,2019,16(30):100,102.
- [6] 孟文文,李鹏.黄金行业尾矿处置政策与综合利用实践[J].黄金科学技术,2023,31(6):1 023-1 034.
- [7] LEI C, YAN B, CHEN T, et al. Comprehensive utilization of lead-zinc tailings, part 1: Pollution characteristics and resource recovery of sulfur[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2015, 3(2):862-869.
- [8] 王艳平.铅锌尾矿系统管理的实证研究——以绍兴银山矿为例[D].杭州:杭州电子科技大学,2011.
- [9] 冯乾伟,王兵,马先杰,等.黔西北典型铅锌矿区土壤重金属污染特征及其来源分析[J].矿物岩石地球化学通报,2020,39(4):863-870.
- [10] OBIORA S C, CHUKWU A, CHIBUIKE G, et al. Potentially harmful elements and their health implications in cultivable soils and food crops around lead-zinc mines in Ishiagu, Southeastern Nigeria[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2019, 204:289-296.
- [11] JAMAL A, DELAVAR M A, NADERI A, et al. Distribution and health risk assessment of heavy metals in soil surrounding a lead and zinc smelting plant in Zanjan, Iran[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2019, 25(4):1 018-1 033.
- [12] 刘小燕,陈棉彪,李良忠,等.云南会泽铅锌冶炼厂周边土壤重金属污染特征及健康风险评价[J].农业资源与环境学报,2016,33(3):221-229.
- [13] 谢伟强.铅锌矿区污染土壤及废渣的固化/稳定化修复及机理研究[D].长沙:湖南大学,2016.
- [14] 周智全,徐欢欢,张丽,等.固化/稳定化技术应用于重金属污染土壤修复的研究进展[J].广东化工,2017,44(15):188-189.
- [15] 黄占斌,赵鹏,王颖南,等.土壤重金属固化稳定化材料研发及其应用基础研究进展[J].农业资源与环境学报,2022,39(3):435-445.
- [16] 黄凯,张学洪,张杏锋.改良剂对铅锌尾矿砂重金属形态的影响[J].湖北农业科学,2014,53(21):5 126-5 130.
- [17] 王璐,杨胜香,赵东波,等.不同有机废弃物对铅锌尾矿基质性质和植物生长的影响[J].农业环境科学学报,2020,39(9):1 946-1 956.
- [18] 付雄略.衡阳市某铅锌尾矿库植被多样性与矿渣基质改良效果研究[D].长沙:中南林业科技大学,2017.
- [19] TANG C F, CHEN Y H, ZHANG Q N, et al. Effects of peat on plant growth and lead and zinc phytostabilization from lead-zinc mine tailing in southern China: Screening plant species resisting and accumulating metals[J]. Ecotoxicology Environmental Safety, 2019, 176:42-49.
- [20] 杨胜香,李凤梅,彭禧柱,等.不同碳氮磷源改良剂对铅锌尾矿废弃地植被与土壤性质的影响[J].环境科学,2019,40(9):4 253-4 261.
- [21] 张晓君,杨胜香,段纯,等.蘑菇渣作为改良剂对铅锌尾矿改良效果研究[J].农业环境科学学报,2014,33(3):526-531.
- [22] 悦飞雪,李继伟,王艳芳,等.施用秸秆生物炭和鸡粪对镉胁迫下玉米生长及镉吸收的影响[J].农业环境科学学报,2018,37(10):2 118-2 126.
- [23] 朱佳文,邹冬生,向言词,等.铅锌尾矿重金属胁迫下秸秆对蓖麻生理特性和重金属积累的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2012,38(3):325-329.
- [24] 李凤梅,杨胜香,彭禧柱,等.中药渣配合氮磷肥施用对铅锌尾矿的改良效果研究[J].农业环境科学学报,2015,34(11):2 114-2 119.
- [25] 张东,龙军,杨微,等.萤石型铅锌尾矿渣的基质改良与矿山修复应用[J].环境工程,2023,41(2):156-165.
- [26] CAI B, CHEN Y H, DU L, et al. Spent mushroom compost and calcium carbonate modification enhances phytoremediation potential of *Macleaya cordata* to lead-zinc mine tailings[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 294:113029.

- [27] WANG Y Y, LIU Y D, ZHAN W H, et al. Stabilization of heavy metal-contaminated soils by biochar: Challenges and recommendations[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 729: 1–10.
- [28] 林益超. 高海拔铜矿区尾矿土壤化及生态修复先锋植物筛选研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2023.
- [29] 孙清斌, 尹春芹, 邓金锋, 等. 施用外源物对尾矿土壤种植胡枝子修复效应初探[J]. *土壤学报*, 2019, 51(5): 986–994.
- [30] YOU F, DALAL R, HUANG L B. Biochar and biomass organic amendments shaped different dominance of lithoautotrophs and organoheterotrophs in microbial communities colonizing neutral copper(Cu)–molybdenum(Mo)–gold(Au) tailings[J]. *Geofisica Internacional*, 2018, 309: 100–110.
- [31] KHAN M J, JONES D L. Effect of Composts, Lime and diammonium phosphate on the phytoavailability of heavy metals in a copper mine tailing soil[J]. *Pedosphere*, 2009, 19(5): 631–641.
- [32] MUJTABA M M A, LIU G J, BALAL Y, et al. Contrasting effects of biochar and hydrothermally treated coal gangue on leachability, bioavailability, speciation and accumulation of heavy metals by rape-seed in copper mine tailings – science direct[J]. *Ecotoxicology Environmental Safety*, 2020, 191: 110244.
- [33] 储昭霞. 煤矸石协同植物对铜尾矿改良的效果与作用机制研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2020.
- [34] 张永兰, 王友保. 多年生黑麦草对覆土作用下铜尾矿的修复[J]. *草业科学*, 2019, 36(1): 3–10.
- [35] 张旭情, 吴亭亭, 王友保, 等. 高羊茅生长对不同处理铜尾矿的土壤酶活性的影响[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(26): 14 814–14 815.
- [36] 罗于洋, 王树森. 大井古铜矿优势植物对铜的富集特性研究[J]. *内蒙古草业*, 2009, 21(1): 52–54, 61.
- [37] 陈平. 中国黄金尾矿综合利用的现状和发展趋势[J]. *黄金*, 2012, 33(10): 47–51.
- [38] 赵龙. 国内黄金尾矿综合利用现状及趋势[J]. *现代矿业*, 2023, 39(9): 39–43.
- [39] 李杨, 孟凡涛, 王鹏. 黄金尾矿综合利用的研究进展[J]. *山东理工大学学报(自然科学版)*, 2019, 33(1): 40–44.
- [40] 陈萍, 刘娟. 黄金尾矿综合利用研究进展[J]. *世界有色金属*, 2020(12): 228–229.
- [41] 张大勇, 杨小牛, 刘立波, 等. 矿山固体废物土壤化改良试验研究[J]. *黄金*, 2024, 45(6): 91–95, 108.
- [42] 钱玲, 林海, 董颖博, 等. 不同改良剂对金矿尾砂适生性能的影响研究[J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(7): 70–74.
- [43] LIN H, JIANG X Y, LI B, et al. Soilless revegetation: An efficient means of improving physicochemical properties and reshaping microbial communities of high-salty gold mine tailings[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 207: 111246.
- [44] QIAN L, LIN H, LI B, et al. Physicochemical characteristics and microbial communities of rhizosphere in complex amendment-assisted soilless revegetation of gold mine tailings[J]. *Chemosphere*, 2023, 320: 138052.
- [45] ALDAY J G, MARRS R H, MARTÍNEZ – RUIZ C. Soil and vegetation development during early succession on restored coal wastes: A six-year permanent plot study[J]. *Plant and Soil*, 2012, 353(1): 305–320.
- [46] LU H, YAN M X, WONG M H, et al. Effects of biochar on soil microbial community and functional genes of a landfill cover three years after ecological restoration[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 717: 137133.
- [47] 马莹, 骆永明, 滕应, 等. 根际促生菌及其在污染土壤植物修复中的应用[J]. *土壤学报*, 2013, 50(5): 1 021–1 031.
- [48] LIU C J, LI B, CHEN X, et al. Insight into soilless revegetation of oligotrophic and heavy metal contaminated gold tailing pond by metagenomic analysis[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 435: 128881.
- [49] LIU C J, LIN H, LI B, et al. *Endophyte Pseudomonas putida* enhanced *Trifolium repens* L. growth and heavy metal uptake: A promising in-situ non-soil cover phytoremediation method of nonferrous metallic tailing[J]. *Chemosphere*, 2021, 272: 129816.
- [50] CHEN X, SUN C Y, ZHANG Q, et al. Selected rhizobacteria facilitated phytoremediation of barren and heavy metal contaminated gold mine tailings by *Festuca arundinacea* [J]. *Chemosphere*, 2023, 337: 139297.
- [51] 刘丽珠. 植物根际促生菌的筛选及其应用[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- [52] BRADL H B. Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, 277(1): 1–18.
- [53] 黄小卫, 张永奇, 李红卫. 我国稀土资源的开发利用现状与发展趋势[J]. *中国科学基金*, 2011, 25(3): 134–137.
- [54] 高志强, 周启星. 稀土矿露天开采过程的污染及对资源和生态环境的影响[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(12): 2 915–2 922.
- [55] HAO X Z, WANG D J, WANG P R, et al. Evaluation of water quality in surface water and shallow groundwater: a case study of a rare earth mining area in southern Jiangxi Province, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, 188(1): 1–11.
- [56] 张塞, 于扬, 王登红, 等. 赣南离子吸附型稀土矿区土壤重金属形态分布特征及生态风险评价[J]. *岩矿测试*, 2020, 39(5): 726–738.
- [57] 王哲, 赵莹晨, 骆逸飞, 等. 内蒙古白云鄂博矿区土壤稀土元素污染特征及评价[J]. *环境科学*, 2021, 42(3): 1 503–1 513.
- [58] 王钰. 不同土壤改良剂和植物覆盖对赣南离子型稀土尾矿土壤真菌群落的影响[D]. 南昌: 江西农业大学, 2023.
- [59] 师艳丽. 离子型稀土废弃矿区 AM 真菌多样性及对宽叶雀稗氮降解能力的影响[D]. 赣州: 江西理工大学, 2020.
- [60] 练冬梅, 姚运法, 张树河, 等. 长汀稀土矿区乔灌草绿化模式生态修复效果研究[J]. *亚热带水土保持*, 2016, 28(2): 1–4.
- [61] ZHANG L, LIU W, LIU S H, et al. Revegetation of a barren rare earth mine using native plant species in reciprocal plantation: Effect of phytoremediation on soil microbiological communities[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(2): 2 107–2 119.
- [62] 宋乐, 张佳森, 闫佰忠, 等. 基于改良剂复配的离子型稀土矿渣生态修复试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(4): 1 714–1 718.
- [63] 张艳. 废弃稀土矿区尾砂土壤改良及其植物修复试验研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2014.
- [64] 罗杰. 赣南稀土尾矿土壤修复及脐橙种植研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2022.
- [65] DAI W J, ZHANG P, YANG F, et al. Effects of composite materials and revegetation on soil nutrients, chemical and microbial properties in rare earth tailings[J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 850: 157854.
- [66] CHEN L M, CHEN S S, XING T, et al. Phytoremediation with application of anaerobic fermentation residues regulate the assembly of ecological clusters within co-occurrence network in ionic rare earth tailings soil: A pot experiment[J]. *Environmental Pollution*, 2023, 340: 122790.
- [67] 李金苗. 丛枝菌根真菌在赣南离子型稀土尾矿退化土壤生态修复中的作用[D]. 南昌: 江西农业大学, 2021.

Research progress on tailings soilification and ecological restoration technologies for non-ferrous metal mines

Chi Chongzhe, Liu Ying, Wang Chao, Zhang Dayong, Wang Chunhui
(Changchun Gold Research Institute Co., Ltd.)

Abstract: Non-ferrous metal mine tailings are characterized by large quantities, complex compositions, high heavy metal content, and low utilization rates. The stockpiling of these tailings not only occupies vast tracts of land but also poses potential environmental pollution risks. Using "artificial soil" formed by tailings soilification as a substrate for ecological restoration represents a novel, green, efficient, and sustainable approach to comprehensive tailings utilization. This paper elaborates on the typical soilification technologies for non-ferrous metal mine tailings, analyzes the current status of soilification technologies for lead–zinc, copper, gold, and rare earth tailings, discusses the challenges in utilizing soilified non-ferrous metal tailings, and provides a forward-looking perspective to offer a reference for the green and comprehensive utilization of large-scale tailings from non-ferrous metal mines.

Keywords: non-ferrous metal mines; tailings soilification; comprehensive utilization; ecological restoration; copper tailings; lead–zinc tailings; gold tailings; rare earth tailings

场“微生物氧化-化学固定”等创新型研究成果,实施工程 10 余项。在 Environmental Science & Technology, Science of the Total Environment, Environmental Pollution, Journal of Hazardous Materials 等期刊发表 SCI 论文 100 余篇;出版 Remediation of Chromium-contaminated Soil: Theory and Practice,《矿冶污染场地治理与生态修复》《铬污染微生物治理理论与技术》3 部专著,授权国家专利 60 多项;获国家科技进步奖二等奖 1 项、省部级自然科学/科技进步奖一等奖 2 项。

特约召集人简介



迟崇哲,长春黄金研究院有限公司环境保护研究所所长,正高级工程师,中国有色金属产业技术创新战略联盟专家委员会委员,吉林省环境保护产业协会固体废物处理利用委员会副主任委员,中国有色金属学会第八届环境保护学术委员会委员,《黄金》第三届编委会编委。长期从事有色金属及黄金行业环境保护与资源化利用研究工作,参与和负责国家重点研发计划项目 1 项、吉林省重大科技专项 3 项、黄金行业重点科研项目若干,参与编制黄金行业标准与规范 3 项,主持及参与黄金行业“三废”治理技术开发及工程化应用项目 20 余项,开发出多项黄金行业环保适用、先进核心技术,经专家鉴定均达到了国际领先、国际先进或国内领先水平。先后获得省部级科技奖 23 项,其中,环保部科学技术奖 2 项、中国黄金协会科学技术奖 19 项,中国安全协会科学技术奖 2 项;核心期刊发表论文 23 篇,申请并授权国家发明专利 11 项。



刘兴宇,中国地质大学(北京)教授,博士生导师,华润环保土壤修复首席科学家,中组部“万人计划”青年拔尖人才,科技部重点研发计划项目首席,国家科技奖励评审专家。长期从事环境生物技术研究工作,研发了成套针对重金属污染治理与生态修复的微生物技术体系,获授权国家发明专利 40 余项;发表 SCI、EI 等高水平论文 70 余篇。主持科技部重点研发计划项目、国家自然科学基金重点项目、面上项目等多项纵向科研项目;获省部级科技奖 7 项,其中,2 项排名第一。技术成果应用于国内全域 20 个不同类型有色金属矿冶区污染防控与生态修复工程,合同总额 9.69 亿元,利税 1.20 亿元,节支 2.03 亿元。



曹百川,博士,华南师范大学生命科学学院副研究员,注册环保工程师,主要从事微生物生态与矿山生态修复领域的研究工作。先后主持国家自然科学基金项目、广东省基础与应用基础研究基金项目等十余项课题。在 Water Research, Global Change Biology,《科学通报》等国内外学术期刊发表学术论文 20 余篇,授权国家发明专利 7 项,参与编写地方标准、团体标准 4 项,获教育部自然科学奖二等奖 1 项,以技术负责人身份参与十余项矿区生态修复工程(含多个中央环保督察项目)。