

金属尾矿废弃地植物稳定技术研究进展

薛生国^{1,2}, 周菲¹, 叶晟¹, 田守祥¹, 王钧¹, 周晓花¹

(1.中南大学冶金科学与工程学院环境工程系,湖南长沙 410083; 2.中国科学院生态环境研究中心,北京 100085)

摘要 尾矿库是维持矿山正常生产的必要设施,但也是矿山的重大危险源。废弃尾矿库是金属矿山最常见、最难恢复的矿业废弃地,含有大量的有毒有害物质,危及人类健康。采取经济有效的金属尾矿废弃地稳定技术已势在必行,然而传统的物理化学方法存在潜在的环境风险。植物稳定技术利用耐性植物的机械固定作用减轻风蚀和水蚀以及根系吸附和根际沉淀实现尾矿的长期稳定,降低重金属的生物有效性,是一种比较有前景的环境友好技术。文章在概述金属尾矿废弃地环境特征的基础上,对传统金属尾矿稳定技术的各种方法进行了述评,并对金属尾矿废弃地植物稳定技术国内外研究进展进行分析,提出植物稳定技术研究发展的方向。

关键词 尾矿废弃地; 植物稳定; 耐性植物; 基质改良; 植物促生菌

中图分类号:Q948.1:X751 文献标志码:A 文章编号:1003-6504(2009)08-0101-04

Progress on Phytostabilization of Tailing Wasteland from Metalliferous Mines

XUE Sheng-guo^{1,2}, ZHOU Fei¹, YE Sheng¹,

TIAN Shou-xiang¹, WANG Jun¹, ZHOU Xiao-hua¹

(1.Department of Environmental Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2.Research Centre for Eco-Environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Tailing wasteland from metalliferous mines which contains harmful toxic pollutants is tougher for ecological restoration. As a newly emerged environment-friendly technology, phytostabilization is defined as the use of metal-tolerant plant species to reduce the mobility and bioavailability of heavy metals in the substrates either by immobilization or by prevention of migration. Based on the analysis of traditional techniques, the progress on disposal of tailing wasteland was reviewed.

Key words: tailing wasteland; phytostabilization; tolerant species; substrate amendment; plant growth-promoting bacteria

环境与发展,是当前国际社会普遍关注的重大问题。矿业作为中国的重要基础产业,为国民经济发展提供了95%的一次能源,80%以上的工业原材料和70%以上的农业生产资料。然而,采矿活动及其废弃物的排放不仅破坏和占用大量的土地资源,加剧我国土地资源的短缺,也带来了一系列影响深远的环境问题。2006年全国耕地12177.59万 hm^2 ,与1998年相比耕地减少790万 hm^2 ^[1]。矿山开发过程中产生的废弃物(尾矿砂、矿石等)需要大面积的堆置场地,从而导致矿区土地生态系统的严重破坏。2006年全国矿业开发占用和破坏土地面积达154.5万 hm^2 ,其中尾矿堆放91.5万 hm^2 ,露天采坑23.0万 hm^2 ,采矿塌陷33.0万 hm^2 ,造成了巨大的经济损失和生态破坏^[2]。因此,加强矿业废弃地的治理和植被恢复已成为我国当前所面临的紧迫任务之一。

本文在概述金属尾矿废弃地环境特征的基础上,对传统金属尾矿稳定技术的各种方法进行了述评,并对金属尾矿废弃地植物稳定技术国内外研究进展进行分析,提出植物稳定技术研究发展的方向。

1 金属尾矿废弃地的环境特征

矿业废弃地是指为采矿活动所破坏的,非经治理而无法使用权用的土地。根据其来源可分为三种类型:(1)由剥离表土、开采的废石及低品位矿石堆积所形成的废石堆废弃地;(2)随着矿物的开采形成大量的采空区域,即开采坑废弃地;(3)利用各种分选方法选取出精矿后的剩余物排放形成的尾矿废弃地。矿业废弃地不仅占用大量耕地,它还是持久而严重的污染源。

金属尾矿废弃地常具有极端的生境条件,影响植物定居的主要胁迫因子有:(1)重金属元素(As、Cd、Cu、

收稿日期:2008-08-15 修回:2008-11-14

基金项目:国家自然科学基金项目(40771181);国家高技术研究发展计划项目资助(2005AA644010);中国博士后科学基金资助项目(20080430565);中国博士后科学基金特别项目资助(2008);中南大学贵重仪器设备开放中心基金(ZKJ2008005)

作者简介:薛生国(1970-),男,副教授,博士,主要从事污染土壤植物修复与金属矿山废弃地生态恢复技术研究(手机)13787148441(电子信箱)sgxue70@yahoo.com.cn。

Pb、Zn、Cr、Mn 含量高达 100~150000mg/kg) 含量过高,影响植物各种代谢途径,抑制植物对营养元素的吸收及根的生长,加剧干旱。(2)极端贫瘠,N、P、K及有机质含量极低或者养分的不平衡。(3)强酸性条件加剧重金属的溶出和毒害,并会导致养分不足。(4)尾矿废弃地土壤结构不良,表层疏松、风蚀严重,持水保肥能力差。(5)表面温度过高、蒸发量大、渗透性差、盐分含量过高等,加剧生理干旱。未复垦的堆放场常常弃置数十年至数百年,裸露尾矿由于风蚀和水蚀作用影响周边居民,污染农田,引起牧草、农作物和地下水重金属含量增加,危及人类健康^[3-4]。

2 传统的金属尾矿废弃地稳定技术

传统的矿业废弃地稳定技术主要集中在物理稳定方法和化学稳定方法。物理稳定方法指利用物理措施对金属尾矿废弃地表面进行固化处理。通常采用无害材料(采矿废石、附近的表土、粘土等)覆盖或利用水泥将尾矿表面封实。化学方法指在废弃地表面施用化学物质,固定表层尾矿,通常采用木质素磺酸盐和树脂胶形成一个硬壳。这两种方法稳定效果差,经常是暂时性的^[5-6]。此外,采用先进工艺回收尾矿减轻重金属含量和毒害的方法已提上日程,在某些情况下还能产生经济效益^[3]。然而,尾矿再加工后废料仍然必须稳定。传统的修复费用约 30~300 \$/m³,而新兴的植物稳定技术稳定尾矿,仅需 0.4~11 \$/m³^[7]。植物稳定技术通过植被覆盖减轻风蚀和水蚀,根系吸附和积累固定金属、根际沉淀实现尾矿的长期稳定和保存,降低重金属的生物有效性,减轻家畜、野生动植物和人类的暴露水平^[8]。

3 金属尾矿废弃地植物稳定技术

由于矿业废弃地物理结构不良、养分缺乏、重金属毒性大等因素,一般植物难以生长^[8]。因此,对矿业废弃地植被恢复与重建机理研究,并提出的可行的植被恢复模式,已成为一项紧迫而极其重要的研究课题。尾矿废弃地是金属矿山最常见并且最难恢复的矿业废弃地,对其实施植被恢复和环境风险评价已刻不容缓。植被恢复强调矿业废弃地的植被重建,而植物修复则更多地强调矿业废弃地的污染治理。金属矿业废弃地的植物修复主要包括植物提取和植物稳定两种基本类型。

3.1 耐性植物筛选

尾矿废弃地含有大量的有毒有害物质及重金属元素,不可能通过植物提取技术来控制潜在的环境风险,而植物稳定技术是比较有前景的技术。植被重建是植物稳定的基础,金属尾矿废弃地植被重建的主要

障碍是土壤因子,即土壤组成、水分、养分和重金属毒性^[9],因此,耐性植物的筛选是植被重建的难点。国内外学者在耐性植物筛选方面做了大量的工作,取得显著的成果:云南铜矿废弃地发现 *Polygonum microcephalum* 和 *Rumex hastatus* 有较强的稳定金属污染土壤的潜力^[10];西班牙 Cartagena-La Union mountain 矿业废弃地的乡土植物 *Sporobolus pungens*、*Brassica fruticulosa*、*Lygenum spartum* 有极强的铅耐性^[11];湖南湘潭锰矿发现的 *Pteridium aquilinum var. latiusculum*、*Imperata cylindrica var. major*、*Cynodon dactylon*、*Phytolacca acinosa*、*Chenopodium ambrosioides* 和 *Alternanthera philoxeroide* 等在锰平均含量高达 80000mg/kg 尾矿废弃地上正常生长^[12];意大利矿业废弃地的 *Lolium italicum* 和 *Festuca arundinacea*、热带地区铅矿废弃地的 *Vetiveria zizanioides* 和 *Thysanolaena maxima*、*Chenopodium dactylon*、*Gentiana pennelliana* 等能固定重金属、加速植被恢复,是污染区域植物稳定的理想植物^[13-14]。Remon 等发现生长在污染区域的优势植物重金属含量和生长在未污染区域的植物相似,乡土植物在稳定重金属具有很强适用性^[15]。温室条件下 *Lygeum spartum* 的实生苗重金属富集量要高于根茎萌生苗和自然条件下原生苗,尾矿条件下 *Hyparrhenia hirta* 和 *Zygophyllum fabago* 重金属积累量较低,有利于减轻食品安全风险^[16]。因此,筛选适于重金属高含量生境、但是重金属富集能力低、生长快、生物量大的耐性物种是尾矿废弃地植物稳定的重要环节。

3.2 基质改良

尽管耐性植物筛选是植物稳定技术的重要环节,但是矿业废弃地基质改良却是实施植物稳定技术的一个重要辅助措施。在 Gyongyosoroszi 尾矿废弃地土壤添加石灰等改良剂、种植 *Festuca rubra* 能有效地稳定酸性矿业废弃地的金属^[17];施用石灰,种植 *Agropyron elongatum* 可通过植物稳定方式修复镍污染土壤。施用堆肥和污泥,种植 *Vetiveria zizanioides* 和 *Phragmites australis* 可有效降低乐昌铅锌矿尾矿 DTPA 提取态 Pb、Zn 含量和大宝山铜矿尾矿 DTPA 提取态 Cu 含量^[18-19]。施用改良剂能有效地稳定污染土壤中的 As、Cr、Cu、Pb 和 Zn,煤灰和泥炭还能提高种子萌发率、减少植物地上部分积累量和重金属沥滤^[20-21]。Ruttens 发现当实施金属污染土壤植物稳定技术、堆肥和无机改良剂混合使用时可有效降低污染土壤的植物毒性,但添加有机质时 Cu、Pb 沥滤量加大,存在潜在的环境风险^[22]。因此在金属尾矿废弃地实施植被恢复时,有必要对其进行环境风险评价。

3.3 植物促生菌筛选

植物稳定通常需要大量的改良剂,在尾矿中混入30%~60%底泥或60%~90%的垃圾才可显著促进植物在尾矿中的生长^[23],成本很高。因此,筛选一种减少尾矿改良剂使用量的方法必将大降低稳定技术的成本。菌根是高等植物根系与一类特殊土壤真菌建立起来的共生体,能够明显增强耐性植物对重金属污染环境的生态适应性,在强化重金属污染环境植物修复方面已有较多研究。植物促生菌(Plant growth-promoting bacteria, PGPB)接种植物是一种有效提高植物生物量的方法,在农业方面已有较多应用。近年来,国外科研人员已开始将PGPB菌用于废弃地和污染场地的植被重建。Bashan等发现接种*Azospirillum brasilense*后,移植到城市废弃地的三种仙人掌生长加快^[24]。Burd等接种PGPB菌后,幼苗的镍毒性大大降低^[25]。Dell等分析淹水草甸土根际微生物,筛选一株重金属耐性PGPB菌^[26]。Petrisor等和Wu等已开始探索将PGPB菌应用在尾矿植物稳定方面^[27-28]。PGPB可通过各种代谢途径来促进植物生长,如固氮、磷酸增溶、产生植物激素、合成含铁细胞或对植物病原菌的生物控制等^[29-30]。上述研究多集中在接种单一菌种研究其植物促生效果,然而,原生状态下菌根菌更具多样性,使植物在一个多样性的植物促生菌条件下生存。因此,筛选适生于重金属高含量生境、促进植物生长的植物促生菌组合模式将更有助于减少尾矿改良剂的使用,降低费用,有利于尾矿植物稳定技术的商业化应用和推广。

4 结论

(1)筛选适生于重金属高含量生境、但是重金属富集能力低、生长快、生物量大的耐性物种是尾矿废弃地植物稳定的重要环节。

(2)矿业废弃地基质改良是实施植物稳定技术的一个重要辅助措施,但是有可能导致重金属沥流量加大。在金属尾矿废弃地实施植被恢复时,有必要对其进行环境风险评价。

(3)筛选适生于重金属高含量生境、促进植物生长的植物促生菌组合模式将更有助于减少尾矿改良剂的使用,降低费用。

[参考文献]

- [1] 中华人民共和国国土资源部. 2007 中国地质环境公报[R]. 2006.
- [2] 中华人民共和国国家环境保护总局. 2007 中国环境状况公报[R]. 2006.
- [3] Schwegler F. Air quality management : a mining perspec-

ive. In : Longhurst JWS & Brebbia CA (Eds) Air Pollution XIV, WIT Transactions on Ecology and the Environment, Vol 86, Southampton, UK: WIT Press, 2006.

- [4] Gonzalez R C, Gonzalez-Chavez MCA. Metal accumulation in wild plants surrounding mining wastes : Soil and Sediment Remediation(SSR)[J]. Environmental Pollution, 2006, 144 :84-92.
- [5] Tordoff G M, Baker A J M, Willis A J. Current approaches to the revegetation and reclamation of metalliferous mine wastes[J]. Chemosphere, 2000, 41 :219-228.
- [6] Newson T A, Fahey M. Measurement of evaporation from saline tailings storages : Third British Geotechnical Society Geoenvironmental Engineering Conference[C]. Eng Geol, 2003, 70 :217-233.
- [7] Ford K L, Walker M. Abandoned mine waste repositories : site selection, design and cost[R]. Technical Note 410. Bureau of Land Management, U. S. Department of Interior 2003.
- [8] Wong M H. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils[J]. Chemosphere, 2003, 50 :775-780.
- [9] 薛生国. 湘潭锰矿矿业废弃地生态恢复技术试验研究[D]. 长沙 :中南林学院, 2002.
Xue Sheng-guo. Ecological restoration experiment on Xi-angtan manganese tailings in Southern China[D]. Changsha: Central South University, China. 2002.
- [10] Tang S R, Fang Y H. Copper accumulation by *Polygonum microcephalum* D. Don and *Rumex hastatus* D. Don from copper mining spoils in Yunnan Province, P.R. China[J]. Environment Geology, 2001, 40 :902-907.
- [11] Conesa H M, Faz A, Arnaldos R. Heavy metal accumulation and tolerance in plants from mine tailings of the semi-arid Cartagena-La Union mining district (SE Spain)[J]. Science of the Total Environment 2006, 366 :1-11.
- [12] Xue S G, Chen Y X, Reeves R D, et al. Manganese uptake and accumulation by the hyperaccumulator plant *Phytolacca acinosa* Roxb. (Phytolaccaceae)[J]. Environmental Pollution, 2004, 131(3) :393-399.
- [13] Rizzi L, Petruzzelli G, Poggio G, et al. Soil physical changes and plant availability of Zn and Pb in a treatability test of phytostabilization[J]. Chemosphere, 2004, 57 :1039-1046.
- [14] Rio-Celestino M D, Font R, Moreno-Rojas R, et al. Uptake of lead and zinc by wild plants growing on contaminated soils[J]. Industrial Crops and Products 2006, 24 :230-237.
- [15] E Remon, J L Bouchardon, B Cornier, et al. Soil characteristics, heavy metal availability and vegetation recovery at a former metallurgical landfill. Environmental Pollution, 2005, 137 :316-323.
- [16] Conesa H M, Faz A, Arnaldos R. Initial studies for the

- phytostabilization of a mine tailing from the Cartagena-La Union Mining District (SE Spain)[J]. *Chemosphere* 2007 , 66 :38–44.
- [17] Simon L. Stabilization of metals in acidic mine spoil with amendments and red fescue (*Festuca rubra* L.) growth[J]. *Environmental Geochemistry and Health* , 2005 , 27 :289–300.
- [18] Chiu K K , Ye Z H, Wong M H. Growth of *Vetiveria zizanioides* and *Phragmites australis* on Pb/Zn and Cu mine tailings amended with manure compost and sewage sludge : A greenhouse study[J]. *Bioresource Technology* , 2006 , 97 : 158–170.
- [19] Mendez M O , Glenn E P, Maier R M. Phytostabilization potential of quailbush for mine tailings : growth , metal accumulation and microbial community changes[J]. *Journal of Environmental Quality* , 2007 , 36 : 245–253.
- [20] Kumpiene J , Lagerkvist A, Maurice C. Stabilization of Pb- and Cu-contaminated soil using coal fly ash and peat[J]. *Environmental Pollution* , 2007 , 145 :365–373.
- [21] Kurate J , Lagerkvist A, Maurice C. Stabilization of As , Cr , Cu , Pb and Zn in soil using amendments—A review[J]. *Waste Management* , 2007 , 145 :384.
- [22] Ruttens A , Colpaert J V , Mench M. Phytostabilization of a metal contaminated sandy soil II Influence of compost and or inorganic metal immobilizing soil amendments on metal leaching[J]. *Environmental Pollution* 2006 , 144 :533–539.
- [23] Ye Z H , Yang Z Y , Chan G Y S , et al. Growth response of *Sesbania rostrata* and *S. cannabina* to sludge-amended lead/zinc mine tailings : a greenhouse study[J]. *Environment International* 2006 , 26 :449–554.
- [24] Bashan Y , Rojas A, Puente M E. Improved establishment and development of three cactus species inoculated with *Azospirillum brasilense* transplanted into disturbed urban desert soil[J]. *Canadian Journal of Microbiology* , 1999 , 45: 441–451.
- [25] Burd G I , Dixon D G, Glick B. A plant growth promoting bacterium that decreases nickel toxicity in seedlings[J]. *Applied Environmental Microbiology* , 1998 , 64: 3663–3668.
- [26] Dell Amico E, Cavalca L, Andreoni V. Analysis of rhizobacterial communities in perennial Gramineae from polluted water meadow soil and screening of metal-resistant , potentially plant growth-promoting bacteria[J]. *Microbial Ecology* 2005 , 52:153–162.
- [27] Petrisor I G , Dobrota S , Komnitsas K , et al. Artificial inoculation—perspectives in tailings phytostabilization[J]. *International Journal of Phytoremediation* , 2004 , 6:1–15.
- [28] Wu S C , Cheung K C , Luo Y M , et al. Effects of inoculation of plant growth-promoting rhizobacteria on metal uptake by *Brassica juncea*[J]. *Environmental Pollution* 2006 , 140:124–135.
- [29] Patten C L, Glick B R. Role of *Pseudomonas putida* indoleacetic acid development of the host plant root system[J]. *Applied Environmental Microbiology* 2002 , 68 :3795–3801.
- [30] Compant S , Duffy B, Nowak J. Use of plant growth-promoting bacteria for biocontrol of plant diseases : principles , mechanisms of action and future prospects[J]. *Applied Environmental Microbiology* 2005 , 71:4951–4959.