

# 矿山重金属污染土壤的植物修复技术

毕亚凡, 徐俊虎\*

(武汉工程大学环境与城市建设学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**为了减少采矿废弃地重金属元素的流失,保护矿区周围居民饮食安全和生态安全,通过比较分析国内外矿山重金属污染土壤修复技术与修复实践,发现植物稳定技术能提高植物适应性并改善其生存环境;调控微生物、化学添加剂等因素,将强化植物提取的效果,促进耐性植物对重金属元素的吸收.提出矿区生态修复应在矿山废弃地中心采用植物稳定技术,在矿区外围采用植物提取和植物-微生物-化学联合修复来逐步减少矿山土壤重金属含量,进而达到彻底修复矿山生态的目的.

**关键词:**重金属; 污染土壤; 植物修复

**中图分类号:**X171.4;TD167

**文献标识码:**A

**doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2012.10.007

## 0 引言

开采矿山资源为人类社会经济活动提供了丰富的物质原料、推动了社会经济的发展、带动了相关科技与学术研究的进步,然而接踵而来却是严重的环境污染和生态破坏.采矿活动是土壤重金属的主要来源,我国已经有743万 $\text{hm}^2$ 土地因此遭受破坏,并且每年新增4万 $\text{hm}^2$ .此外我国因矿业活动破坏土地的复垦率仅有13.3%,远远不及发达国家的75%.从生物化学角度看,因矿业活动流失的土壤重金属将会通过食物链等进入生物体内<sup>[1]</sup>,严重威胁着矿山周边地区居民饮食安全、生态安全和社会和谐稳定,因此矿区重金属污染土壤生态恢复问题亟需解决.植物修复成本低廉、操作简单,不会造成二次污染,符合我国目前阶段的现实条件.另一方面植物修复周期长、效率较低,在我国环保领域尚处于起步研究阶段,但从长远角度考虑,植物修复应对矿山重金属土壤恢复是一种比较可行的策略.

## 1 植物修复的概念

植物修复(phytoremediation)是以植物忍耐、分解或超量积累某种或某些化学元素为基础,利用植物及其共存微生物体系来吸收、超量积累、降解、固定、挥发及富集环境中污染物,实现部分或完全修复土壤污染的一门环境污染原位治理技术.图1为植物修复原理示意图.

植物修复技术(phytoremediation)包括:植物

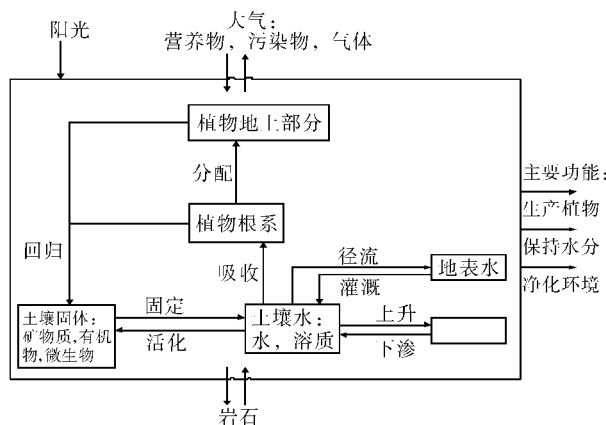


图1 土壤-水-植物根系统及其边界

Fig.1 Soil-water-plant root system and its boundary

稳定(phytostabilization)、植物挥发(phytovolatilization)、植物提取(phytoextraction)和根际过滤(rhizofiltration).其中植物稳定和植物提取适合应用于修复矿区受重金属污染土壤.植物稳定(phytostabilization)是利用植物根际分泌的特殊物质将根系周围重金属污染物包围使其相对无害,如利用耐重金属植物根系分泌黏胶状多糖类物质,将大量的金属离子黏附到根周围.香蒲植物、香根草、无叶紫花苕子(vicia villosa)对Pb、Zn具有强的忍耐性和吸收能力且生长量大可用于净化矿区受污染土壤.由于该类植物根系通常含较高浓度重金属,应尽量连根割除植物<sup>[2]</sup>.英国利物浦大学Bradshaw等最早利用矿山废弃地耐性植物对矿山土壤进行了修复<sup>[3]</sup>.植物提取(phytoextraction)是指利用耐重金属植物从土壤溶液中吸收转移重金属离子,并将其转移、贮存到

地上部分,连续种植这种植物,即可不断降低土壤中重金属含量。

## 2 植物修复应用最新进展

### 2.1 植物稳定(固定)技术

植物固定只是暂时将环境中的重金属元素固定,使其生物毒性降低更有利于植物种群的生存,并没有彻底解决环境的重金属污染问题,如果环境条件发生变化,重金属离子依旧会进入土壤造成危害。可添加改土剂来改进效果和植物一起来固定重金属,如 Mench 等在炼砷厂大气降尘污染的重金属复合污染土壤上,施用土重 5% 的粉煤灰(beringite)和 1% 的废铁粉,使植物固定的效果明

显提高,根瘤等生物多样性指标明显改善<sup>[4]</sup>。

### 2.2 植物提取技术

植物对重金属的吸收随着时间的推移往往表现为三个阶段<sup>[5]</sup>。第一阶段植物对重金属的提取吸收效率与其在土壤水溶液中的停留时间成正比相关,第二阶段是饱和阶段,第三阶段为释放阶段。释放是因为植物吸收过多的重金属而中毒死亡,重金属又回到土壤溶液中。因此应定期收割死亡植物,以减少对土壤的二次污染。植物提取技术依赖一些特异性植物(主要指超富集植物),超累积植物(hyperaccumulator)是指对重金属元素的吸收量超过一般植物 100 倍以上的植物。根据积累金属元素的种类,可以把超累积植物分类见表 1。

表 1 国内外发现的主要重金属超富集植物  
Table 1 Hyperaccumulators found at home and abroad

重金属元素	典型浓度/(mg/kg 干重)	主要植物种类
Ni	5 000	庭芥属( <i>Alyssum murale</i> )/ <i>Sebertia acuminata</i> /遏蓝菜( <i>Thlaspi caerulescens</i> ) 十字花科( <i>Brassicaceae</i> )/紫罗兰科( <i>Violaceae</i> )/大风子科( <i>Flacourtiaceae</i> )
Zn	10 000	遏蓝菜( <i>Thlaspi caerulescens</i> )/ <i>Cardaminopsis balleri</i>
Cd	100	遏蓝菜( <i>Thlaspi caerulescens</i> )
Cu	5 000	<i>Ascoletis metallorum</i>
Co	5 000	麦瓶草属( <i>Silenecolbalticola</i> )/ <i>Haumaniastrum katangense</i>
Pb	1 000	圆叶遏蓝菜( <i>Thlaspicarulescens</i> )/海石竹( <i>Armeria maritime</i> )
As	3 000	蜈蚣草( <i>Pterse vittata</i> )
Se	1 000	黄芪属( <i>Astragalus</i> )

注:根据 Brooks,1998 补充修改<sup>[6]</sup>

超富集植物虽然已发现数百种,大多综合抗性差,很难适应不同的气候环境,真正可利用率于某污染区的很少;植物修复的效益取决于植物地上部分重金属含量及其生物量,目前已知的超富集植物绝大多数生长慢、生物量小;此外重金属在土壤中的生物有效性低,植物难以吸收,并且难以将重金属由根系转移到地上部分<sup>[7]</sup>。

植物提取技术有如下改进:

a. 螯合诱导的植物提取技术。是指施用螯合剂或配位基来诱导或强化植物对金属的超富集作用,此技术早已应用于植物修复或植物采矿(phytomining)中<sup>[8]</sup>。一般这种技术是在植物生物量已经很高时加入螯合剂或配位剂,减少植物对高浓度重金属的适应时间,这样植物能快速吸收较多重金属离子,并且即使植物因毒害作用死亡也不会影响重金属去除的效果。

b. 接种特殊微生物。如接种丛枝菌根强化植物修复,丛枝菌根(*Arbuscular mycorrhiza*)在重

金属土壤中可与植物根系共生,AM 可通过减轻重金属对植物的毒害改善植物生长状况,加快植物对重金属的吸收和转运<sup>[9]</sup>。此外 Tyagi 等利用部分微生物对重金属的耐性使土壤酸化,加强重金属的溶出,从而进行生物淋滤(bio-leaching)。目前生物淋滤只在污水污泥处理中运用,可以考虑在土壤的植物提取中应用<sup>[10]</sup>。

c. 增加营养。养分是影响植物吸收重金属的重要因素,施加营养使超富集植物生长旺盛、生物量提高、促进植物根系发育,从而提高植物提取效率。选用生理酸性肥料,如硫酸铵、过磷酸钙、氯化钾,可明显增加植物提取重金属。适当使植物缺 P,可以增加植物根系分泌有机酸,从而提高植物提取重金属的效率<sup>[11]</sup>。

d. 结合农艺技术。超富集植物多数是野生植物,通过农艺技术提高植物地上部生物量,将野生超富集植物驯化成栽培作物等,进而更有效地应用于植物修复。

### 3 矿山重金属污染土壤修复思路

我国矿产资源总量丰富,但分布过于分散导致贫矿多,富矿少,且成分中多含伴生矿物质.因此在矿产开采过程中尾矿较多,在降水淋滤作用下,尾矿中重金属元素可长期稳定地向外释放.硫化物往往和其他矿产共(伴)生,硫化物产生的酸性水将进一步淋溶矿山废弃地中的尾矿,造成更为严重的生态环境危害.建议矿业废弃地应采用植物稳定技术促使恢复植物生长环境,针对矿业废弃地外围应采用植物提取技术逐步减轻土壤中重金属含量,在整个矿山外围应组合使用植物—微生物—化学联合修复技术达到彻底生态恢复的目的.

#### 3.1 化学添加剂强化植物稳定

植物稳定技术通过减少矿山废弃地内部径流侵蚀、外部风蚀等防止重金属元素迁移,适合于较高污染且难以运用植物提取技术的矿业废弃地.伴生硫化物的金属矿业废弃地,其酸性条件极端、重金属元素含量过高,会直接抑制种子的萌发和植物的生长.通过添加化学固定剂强化植物稳定降低重金属毒性,可逐步使植物适应、生长并生存于矿山废弃地.我们可以采取如下措施:**a.** 利用碱性物质如煤渣、淤泥等改善土壤 PH、提高营养、降低重金属活性<sup>[12]</sup>; **b.** 利用采矿细砂设置隔离层,将外界环境和矿业废弃地隔开,能有效的阻止和固定重金属元素.经过土壤基质改良并利用当地耐性植被隔离,可成功的修复一些矿业废弃地<sup>[13]</sup>.

#### 3.2 化学添加剂强化植物提取

植物提取技术常运用在重金属污染相对较轻的矿业废弃地周围,通常添加化学螯合剂来强化植物提取效果<sup>[14]</sup>.化学螯合剂活化过程涉及了多种反应机理:**a.** 螯合剂通过络合作用与重金属结合<sup>[15]</sup>; **b.** 酸洗导致重金属氧化物或矿物成份溶解等<sup>[16]</sup>.

#### 3.3 多因素强化植物稳定和植物提取

矿山废弃地这一特殊环境往往会造成多重金属污染土壤,单纯的植物修复技术显然无法彻底解决.化学添加剂可影响土壤重金属的吸附和活化等环境化学行为:添加化学固定剂降低重金属活性可强化植物稳定效果;而植物提取技术,实际应用中常结合化学螯合剂强化植物提取修复效果<sup>[17]</sup>.

证据表明土壤微生物在矿山重金属污染土壤修复过程中起着重要的作用.如促进植物生长和营养吸收,提高植物对重金属的忍耐性<sup>[18]</sup>,与植物

根系共生产生影响重金属活性的特殊物质,增强了植物对重金属的吸收积累能力,提高了植物修复效率<sup>[19]</sup>.

### 4 植物修复前景展望及建议

植物修复最显著的优点是处理成本低廉,美国 Cunningham 等研究表明其比物理化学处理费用低好几个数量级<sup>[20]</sup>.以植物稳定和植物提取为核心技术分别控制物理化学、微生物等因素研究化学—微生物—植物联合修复体系及机理,一方面可为矿山及周边地区多金属污染土壤修复提供实践依据和技术支撑,另一方面能加速我国矿山废弃地推广和应用植物修复技术.

建议结合矿山及周边地区多金属污染土壤的治理实践中,阐明多金属污染土壤条件下化学固定或活化过程与机理;加大研究不同微生物于不同类型金属影响机制(活化与固定)及其与植物忍耐/吸收之间关系.建议我们在今后矿区重金属污染土壤的修复实践中应遵循生态学客观规律,以矿山废弃地为中心向矿区外围划三个圆圈,内圈为采矿废弃地,中圈为矿山土壤带,外圈为矿山外围矿区耕地.针对内圈应逐步改善植物的生存环境以植物稳定技术为主体以便进一步移植重金属超累积植物;针对中圈应提高重金属超累积植物的生物量,并强化植物提取的效果,阻止重金属元素的迁移;针对外圈植物生存环境相对良好、土壤重金属含量相对较低,应综合运用微生物—化学—植物联合修复,分别调控化学添加剂、微生物等因素强化植物稳定和植物提取效果,吸收/固定土壤溶液中的重金属离子,逐步修复受重金属污染土壤,最终彻底修复矿区生态.

#### 参考文献:

- [1] 仇荣亮,仇浩,雷梅,等. 矿山及周边地区多金属污染土壤修复研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28 (6): 1085-1091.
- [2] 吴启堂,陈同斌. 环境生物修复技术[M]. 北京: 化学工业出版社 2007: 92-96.
- [3] HU Yuan-yuan. Study on copper contents in several compositae plants growing in copper area [J]. Resource Development & Market, 2009, 7: 596-598.
- [4] Mench M, Vangronsveld J. Long-term monitoring of the efficiency of the phytostabilization of metal-contaminated soils. [C]// Nanjing: SoilRem, 2004, 194-195.
- [5] 刘素纯,萧浪涛,王惠群,等. 植物对重金属的吸收机制与植物修复技术[J]. 湖南农业大学学报. 2004, 30

- (5):493-498.
- [6] Brooks R R. Plants that Hyperaccumulate Heavy Metals [M]. Wallingford (UK): CAB International, 1998.
- [7] 周启星,宋玉芳. 污染土壤修复原理与方法[M]. 北京:科学出版社,2004:160-162.
- [8] 骆永明. 强化植物修复的整合诱导技术及其环境风险[J]. 土壤,2000(2):58.
- [9] 朱雅兰. 重金属污染土壤植物修复的研究进展与应用[J]. 湖北农业科学,2010,49(6):1495-1499.
- [10] Tyagi R D, Blais J F, Auclair J C, Meunier N. Bacterial leaching of toxic metals from municipal sludge: influence of sludge characteristics. Water Environ. Research [J], 1993, 65(5):196-204.
- [11] Sun Q, Ni W Z, Yang X X, et al. Effect of phosphorus on the growth, zinc absorption and accumulation in hyperaccumulator-Sedum alfredii Hance [J]. Acta Sci Circum, 2003, 23:818-824.
- [12] Kumpiene J, Lagerkvist A, Maurice C. Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments-A review [J]. Waste Management, 2008, 28: 215-225.
- [13] Ye ZH, Shu WS, Zhang ZQ, et al. Evaluation of major constraints on revegetation of lead/zinc mine tailings using bioassay technique [J]. Chemosphere, 2002, 47:1103-1111.
- [14] 孙荪. 矿山植物修复技术的研究及发展趋势[J]. 矿业工程, 2010, 8(3):62-63.
- [15] Mari S, Suzelle B. Effectiveness of the iodide ligand along with surfactants on desorbing heavy metals from soils[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2005, 161:193-208.
- [16] Dermont G, Bergeron M, Mercier G, et al. Soil washing for metal removal: A review of physical/chemical technologies and field applications [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 158 (1): 1-31.
- [17] 仇荣亮. 工矿废弃地重金属污染土壤修复进展[C]//土壤资源持续利用与生态环境安全学术会议论文集. 南京:中国土壤学会, 2009:170-178.
- [18] Gonzalez-Chavez C, Harris PJ, Dodd L et al. Arbuscular mycorrhizal confer enhanced arsenate resistance on Holcus lanatus[J]. New Phytologist 2002, 155:163-171.
- [19] Khan AG. Role of soil microbes in the rhizospheres of plants growing on trace metal contaminated soils in phytoremediation[J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2005, 18(4):355-364.
- [20] 韦朝阳, 陈同斌. 重金属污染植物修复技术的研究与应用现状[J]. 地球科学进展, 2002, 17(6): 833-839.

## Reviews on phytoremediation technology of heavy metal contaminated soil in mining area

BI Yan-fan, XU Jun-hu

(School of Environment and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** To reduce the loss of heavy metals in mining wasteland and to protect food safety and ecological security of the residents surrounding the mines, by comparing with remediation techniques and practices of heavy-metal-contaminated soils in domestic and foreign mining regions, it was found that phytostabilization could improve the adaptability and the survival environment of the plants. Factors such as microbe manipulation and chemical additives would strengthen phytoextraction and promote absorption of heavy metal to tolerant plants. It is proposed that phytostabilization techniques should be adopted in the center of waste mine land, phytoextraction and the combination of plant-microbial-chemical techniques should be adopted in its peripheral to decrease heavy metals of heavy-metal-contaminated soils in mining area, so as to restore the ecological environment thoroughly.

**Key words:** heavy metal; contaminated soil; phytoremediation

本文编辑: 龚晓宁