

# 重金属污染土壤及场地的植物修复技术发展与应用

胡鹏杰<sup>1</sup>, 吴龙华<sup>1,2\*</sup>, 骆永明<sup>1,2,3</sup>

(1 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室, 南京土壤研究所, 江苏 南京 210008

2 中国科学院研究生院, 北京 100049, 3 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003)

**摘要:** 重金属污染土壤及场地的治理工作迫在眉睫, 植物修复技术以其成本低、不破坏土壤生态环境、无二次污染、易被公众接受等优点, 受到了学术界的广泛关注。近年来, 国内外在植物修复技术的植物资源筛选、调控技术、修复植物产后处理等方面进行了广泛的研究。植物修复已经从实验室阶段走向了田间示范和推广应用阶段。现就近年来植物修复技术在重金属污染土壤和场地的发展和应用方面进行了综述。

**关键词:** 重金属; 污染土壤与场地; 植物吸取修复; 植物稳定修复; 调控技术

中图分类号: S154.4 X53 文献标识码: A 文章编号: 1006-2009(2011)03-0039-04

## Development and Application of Phytoremediation on Heavy Metal Contaminated Soils and Sites

HU Peng-jie<sup>1</sup>, WU Long-hua<sup>1,2\*</sup>, LUO Yong-ming<sup>1,2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai, Shandong 264003, China)

**Abstract** Heavy metal pollutions in soils and sites are becoming more and more serious and their remediation is receiving extensive attention nowadays. Due to its low-cost and environment-friendly, phytoremediation is considered to be a potential usable technique for soil remediation. During the past decades, there have been significant improvements in phytoremediation including plant species scanning, remediation control techniques, post-treatments of plants biomass, demonstration in field-scale and practical applications. This review provides an overview of the development and application of phytoremediation on the remediation of heavy metal contaminated soils and sites.

**Key words** Heavy metals; Contaminated soils and sites; Phytoremediation; Phytostabilization; Remediation control

随着工矿业的发展、工业三废的排放、污水灌溉、农药化肥的不合理施用等, 使得大面积土地受到了重金属污染。据有关研究资料统计, 我国目前的土壤污染情况日趋严重, 主要表现为土壤污染面积不断增加, 土壤污染类型呈多样化, 不仅部分农用耕地的土壤受到污染, 而且城市和矿山土壤污染问题呈发展之势, 对食品安全和人体健康造成严重影响<sup>[1]</sup>。最近, 国内报导的市售大米镉超标问题, 湖南浏阳发生的镉污染事件, 陕西凤翔、湖南武冈

发生的血铅超标事件, 使人们对重金属污染问题的关注程度愈来愈高, 已成为影响社会稳定的重要因素<sup>[2-3]</sup>。土壤污染治理工作迫在眉睫<sup>[4]</sup>。在刚出

收稿日期: 2011-04-25

基金资助: 中国科学院知识创新工程重要方向基金资助项目 (KSCX2-YW-G053); 江苏省自然科学基金重点基金资助项目 (BK2010098); 国家环保公益性基金资助项目 (2010467016)

作者简介: 胡鹏杰 (1983-), 男, 山西交城人, 助理研究员, 博士, 主要从事重金属污染土壤的植物和化学修复研究。

\* 通讯作者: 吴龙华 Email: llw@issas.ac.cn

台的“十二五”规划纲要中明确指出,在未来 5 年,要加强重金属污染综合治理,以湘江流域为重点,开展重金属污染治理与修复试点示范。因此迫切需要开发出一批适合各类重金属土壤(农田)和场地的修复技术。

## 1 植物修复技术简介

植物修复(phytoremediation)技术以其成本低、不破坏土壤生态环境、无二次污染、易被公众接受等优点,受到了学术界的广泛关注<sup>[4-8]</sup>。植物修复技术包括利用植物超积累或积累性功能的植物吸取修复、利用植物根系控制污染扩散和恢复生态功能的植物稳定修复、利用植物转化功能的植物挥发修复<sup>[6]</sup>。目前,普遍认为,植物吸取修复适用于重金属污染程度不是很高的农田土壤,经过种植几季或几年超富集植物,可以使土壤重金属浓度降到土壤环境质量标准以下,使粮食作物可以安全生产。而植物稳定技术则更适用于工矿业造成的高重金属污染场地的生态恢复,以减少地表径流侵蚀、风蚀等造成的重金属元素的迁移扩散<sup>[9]</sup>。植物稳定技术也被视为一种植物固碳技术和生物质能源生产技术,易于被公众接受和大范围应用<sup>[6]</sup>。

## 2 植物修复技术的植物资源

### 2.1 植物吸取修复植物资源

植物修复技术应用的关键在于筛选具有高产和高去污能力的植物,摸清植物对土壤条件和生态环境的适应性。到目前为止,国际上发现的重金属超富集植物有近 500 种<sup>[10]</sup>。大多植物都是在金属矿区发现的,对高浓度重金属有着先天的耐性。但其中多数植物因生物量小,生长缓慢,吸收能力不稳定等因素,限制了实际修复应用<sup>[8-11]</sup>。自上世纪 90 年代后期以来,我国已经发现了不少重金属的超富集植物品种资源,如 As 超富集植物蜈蚣草<sup>[12]</sup>、Cd/Zn 超富集植物东南景天<sup>[13-14]</sup>、伴矿景天<sup>[15]</sup>、圆锥南芥<sup>[16]</sup>、Mn 超富集植物商陆<sup>[17]</sup>等。目前已经从吸收、转运、分布、解毒等角度对重金属耐性和超富集生理机制做了深入的探讨,为这些植物的应用提供了理论支持。除超富集植物外,植物吸取修复可以采用的另一类植物是生物量大的富集植物或作物。例如日本采用高 Cd 积累性杂交稻品种 Milyang 23 在旱作条件下,秸秆中 Cd 质量比可以达到 20 mg/kg~50 mg/kg 可以有效去除土

壤中 Cd<sup>[18-19]</sup>。国内已经筛选出了对 Cd 具有高积累性的作物品种,如油菜溪口花籽和朱苍花籽等<sup>[20]</sup>。另外研究发现花卉植物如紫茉莉<sup>[21]</sup>等也对土壤中的 Cd 具有较强的富集能力。

### 2.2 植物稳定修复植物资源

超富集植物或富集植物大多对重金属都具有很强的耐性,可作为植物稳定技术的候选植物资源。而目前,利用经济植物如能源植物或纤维类植物等,对重金属污染场地进行的植物稳定修复技术,被认为在达到污染修复的同时,实现生态、环境和经济效益的统一<sup>[22]</sup>。能源植物通常是指那些具有合成较高还原性烃能力、可产生接近石油成分和替代石油使用的产品的植物,以及富含油脂的植物。能源植物具有 4 大优点:(1)环保,能保持地球上大自然碳——二氧化碳的平衡;(2)可再生;(3)能源植物种类较多,易于普及推广;(4)能源使用安全等。目前在重金属污染场地植物稳定过程中用到的植物资源包括麻疯树、芦苇、芦竹、荻、五节芒、纤维大麻、芥菜、甜玉米、向日葵、红麻和甜高粱等。

## 3 植物修复调控技术

对于重金属污染农田土壤,一般重金属活性较低,加上已发现的超富集植物生物量较小、生长缓慢等原因,同时还需考虑作物生长等因素,单纯使用植物吸取修复技术效率通常很低;而对于重金属高污染场地土壤,往往土壤贫瘠、重金属含量高,并伴随极端酸性等条件,对植物定植非常不利。

### 3.1 化学调控

在土壤中添加重金属络合物、表面活性剂等可以改良土壤的理化性状,提高土壤重金属的生物有效性,使其易于被植物吸收。目前常用的络合剂可以分为 3 大类:一是人工合成有机螯合剂,如 EDTA、DTPA、HEDTA、NTA 等;二是天然有机螯合剂,主要是一些小分子有机酸,包括柠檬酸、苹果酸、丙二酸、乙酸、组氨酸、草酸和酒石酸等;三是无机络合剂,主要包括硫氰化物和氯化物等。植物修复的化学调控技术是领域研究最多、但同时也是最具争议性的方向之一<sup>[23]</sup>。主要因为:螯合剂如 EDTA 等,活化的重金属不能被植物全部吸收,多余的重金属则可能污染地表水和地下水;目前所用的螯合剂大多数是非专一性的,在活化重金属的同时也活化了土壤了其他养分元素如 Fe、Mn、Ca、Mg 等,使这些元素淋失量增加,导致土壤肥力下降;另外很

多螯合剂本身及与重金属形成的络合物在土壤中很难降解,使用不当则可能造成长期污染。

对于重金属污染场地,化学调控主要施加改良剂以改善土壤理化,便于植物定植、生长<sup>[24]</sup>。例如添加石灰石、粉煤灰、钢渣、磷矿粉等可以有效提高土壤 pH 值、降低重金属有效性、改善土壤结构;同时通过施加有机粪肥、NPK 肥等提高土壤养分含量,便于植物定植,促进修复植物生长。

### 3.2 微生物-植物联合修复

土壤是微生物生活的良好环境,植物根际土壤中的微生物、原生动植物(如蚯蚓等)不仅可以增强土壤的养分循环,有些微生物还可以吸收富集重金属,对土壤的重金属污染起到修复作用。目前探清的微生物修复土壤重金属污染的机理主要有胞外络合作用、胞外沉淀作用、胞内积累作用以及通过氧化、还原、甲基化生物转化作用来完成的生物解毒机制。许多证据表明土壤微生物(如固氮菌、溶磷菌、菌根菌等)在重金属污染矿山废弃地的植物修复过程中起着重要的作用<sup>[25]</sup>,如:促进植物生长和营养吸收、通过固定重金属提高植物耐性和定居能力、提高重金属有效性促进植物吸收等<sup>[9]</sup>。

### 3.3 农艺调控

对于重金属污染农田土壤,建立既可快去除重金属,又能生产符合国家卫生标准的农产品的生产技术,达到边生产边修复的目的,是目前植物吸取修复研究的重要方向之一。而将超富集植物和农作物,尤其是重金属低积累的农作物进行套作或者轮作,结合适当的农艺管理技术,是实现这一目标的重要途径。研究表明<sup>[26]</sup>,将东南景天与低累积作物玉米套种,重金属的吸取修复效率比单种要高,同时生产出的玉米符合卫生标准的食品或动物饲料或生物能源。有研究发现<sup>[27]</sup>,超富集植物与水稻或小麦套作或轮作,会显著提高这些作物对重金属的吸收,原因可能是景天的种植活化了土壤中重金属,提高重金属的生物可利用性,而在土壤中添加适量钙镁磷肥则可以在不降低重金属去除效率的情况下,降低作物对重金属的吸收。另外,将镉富集植物油菜中油杂 1 号与叶菜类蔬菜如小白菜、菜心等间作,可以减轻 Cd 对这些叶菜的毒性,但仍存在较高的健康风险<sup>[28]</sup>。

另外值得注意的是,已有的一些重金属超富集植物品种,多数只能对某一种或有限几种重金属有耐性和富集能力,而实际污染土壤大多表现出多金

属复合污染的特性。而采用多种超富集植物的套作或轮作修复多金属污染土壤,对该问题解决提供一种可行的办法。例如,在 Cu Zn Cd 等重金属复合污染土壤上,同时种植 Cd/Zn 超富集植物伴矿景天和 Cu 超富集植物海州香薷,可以降低重金属对植物的毒性,还可以同时去除这几种重金属。

## 4 修复植物产后处理

对重金属污染土壤进行植物修复所得的生物质同样存在着一个后处理问题,如采用焚烧发电、压缩填埋、堆肥等。目前中国对修复植物的后处理已经做了不少研究如铁芒萁、蜈蚣草、伴矿景天等。许多研究表明,焚烧可以大幅度降低植物的体积,同时可以得到热能,但挥发性重金属如汞、镉、铅等以及焚烧过程中的多环芳烃等会形成二次污染,这是目前需要特别注意一个重要问题。日本在 Cd 积累水稻收获后,经过现场干燥、打包、储存、运输、焚烧等过程已经建立了一套标准化程序<sup>[29]</sup>。

## 5 国内已有的植物修复应用

自 20 世纪 90 年代中叶开始在重金属污染土壤的植物修复进行了许多理论性和技术性的探索,取得了显著的进展。90 年代后期在国家自然科学基金委和中国科学院等部门的资助下,重金属污染土壤的超富集植物修复研究在全国兴起。“十五”期间国家科学技术部“八六三”计划首次立项研究重金属污染土壤的植物修复技术,研发了 As Cu Zn Cd Pb 等污染土壤的植物修复技术,建立了植物修复示范工程。2005 年随着一批国家和省部级科研项目通过验收,标志着我国在植物修复成套技术的开发、应用方面取得了突破性进展。截至目前,全国已建立的多个重金属污染土壤和场地植物修复示范工程,污染类型包括 As Cu Zn Cd Pb 等。近年来,已经有了一些较成功的植物修复工程应用案例,这也使我国重金属污染土壤和场地植物修复技术,尤其是植物吸取修复技术在一定程度上开始引领国际前沿研究方向<sup>[30]</sup>。

## 6 植物修复技术发展趋势

目前重金属污染土壤的植物修复技术还处于田间试验与示范阶段,尚未做到大规模推广,对修复成本、修复植物后续处置风险等环节也尚未进行系统评价,因此还需更多的田间结果来支撑这种技

术的研究和发展。但植物修复技术作为一种新兴高效、绿色廉价的生物修复途径,具有良好的经济、生态综合效益,并且易被大众接受,因此,具有广阔的应用前景。今后应当:(1)要加强对超富集植物资源的生物修复性状优异种质的发掘研究,同时充分运用基因工程等先进育种技术;(2)建立和完善边生长边修复的技术体系和生态体系;(3)深入开展多金属污染土壤的修复技术研究;(4)开展以植物修复为核心的化学、微生物、联合修复技术;(5)建立完善的植物修复工艺、设备、装置;(6)促进植物修复技术应用推广。

## [参考文献]

- [1] 孙波,周生路,赵其国. 基于空间变异分析的土壤重金属复合污染研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22: 248-251
- [2] 南浏阳数千人上街抗议化工企业污染[N/OL]. (2009-08-01)[2011-04-25]. <http://news.sina.com.cn/c/2009-08-01/014016047310s.shtml>
- [3] 调查显示我国约 10% 大米镉超标可引起骨痛病[J/OL]. (2011-02-14)[2011-04-25]. <http://news.sina.com.cn/c/sd/2011-02-14/085521950212.shtml>
- [4] 中国环境保护部. 关于加强土壤污染防治工作的意见[R]. 北京: 中国环境保护部, 2008
- [5] CHANEY R L, MALIK M, LIY M, et al. Phytoremediation of soil metals [J]. *Current Opinion in Biotechnology* 1997(8): 279-284.
- [6] 骆永明. 金属污染土壤的植物修复[J]. 土壤, 1999, 31(5): 261-265.
- [7] 沈振国, 陈怀满. 土壤重金属污染生物修复的研究进展[J]. 农村生态环境, 2000, 16(2): 39-44.
- [8] MCGRATH S P, ZHAO F J. Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2003, 14: 277-282.
- [9] 仇荣亮, 仇浩, 雷梅, 等. 矿山及周边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.
- [10] VERBURGEN N, HERMANS C, SCHAT H. Molecular mechanisms of metal hyperaccumulation in plants [J]. *New Phytologist* 2009(181): 759-776
- [11] CHANEY F L, ANGLE J S, BROADHURST C L, et al. Improved understanding of hyperaccumulation yields commercial phytoextraction and phytomining technologies [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2007(36): 1429-1443
- [12] 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春, 等. 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征[J]. 科学通报, 2002, 47(3): 207-210
- [13] 杨晓娥, 龙新宪, 倪吾钟, 等. 东南景天 (*Sedum alfredii* H)——一种新的新超积累植物[J]. 科学通报, 2002, 47(13): 1003-1006.
- [14] YANG X E, LONG X X, YE H B, et al. Cadmium tolerance and hyperaccumulation in a new Zn-hyperaccumulating plant species (*Sedum alfredii* Hance) [J]. *Plant Soil* 2004(259), 181-189
- [15] 吴龙华, 周守标, 毕德, 等. 锌镉复合污染土壤的植物修复方法. 中国: 200710020380.5[P]. 2007.
- [16] 汤叶涛, 仇荣亮, 曾晓雯, 等. 一种新的多金属超富集植物——圆锥南芥 (*Arabis paniculata* L.) [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 2005, 44(4): 135-136.
- [17] 薛生国, 陈英旭, 林琦, 等. 中国首次发现的锰超积累植物——商陆[J]. 生态学报, 2003, 23(5): 935-937.
- [18] AE N, ARAO T. Utilization of rice plants for phytoremediation in heavy metal polluted soils [J]. *Farming Japan*, 2002, 36(6): 16-21.
- [19] MURAKAMI M, AE N, ISH KAWA S. Phytoextraction of cadmium by rice (*Oryza sativa* L.), soybean (*Glycine max* (L.) Merr.), and maize (*Zeamays* L.) [J]. *Environmental Pollution* 2007, 145: 96-103.
- [20] 苏德纯, 黄焕忠. 油菜作为超积累植物修复镉污染土壤的潜力[J]. 中国环境科学, 2002, 22(10): 48-51.
- [21] 刘家女, 周启星, 孙挺, 等. 花卉植物应用于污染土壤修复的可行性研究[J]. 应用生态学报, 2007, 18(7): 1617-1623
- [22] 余海波, 周守标, 宋静, 等. 铜尾矿库能源植物稳定化修复过程中定居植物多样性研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(18): 341-346
- [23] WU L H, LUO Y M, XING X R, et al. EDTA-enhanced phytoremediation of heavy metal contaminated soil with Indian mustard and associated potential leaching risk [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 2004, 102: 307-318
- [24] 束文圣, 叶志鸿, 张志权, 等. 华南铅锌尾矿生态恢复的理论与实践[J]. 生态学报, 2003, 23(8): 1629-1639
- [25] KHAN A G, KUEK C, CHAUDHRY T M, et al. Role of plants mycorrhizae and phytochelators in heavy metal contaminated land remediation [J]. *Chemosphere* 2000, 41: 197-207.
- [26] WU Q T, WEI Z B, OUYANG Y. Phytoextraction of metal contaminated soil by hyperaccumulator *sedum alfredii* H: Effects of chelator and coplanting [J]. *Water Air and Soil Pollution* 2007, 180: 131-139.
- [27] 沈丽波, 吴龙华, 谭维娜, 等. 伴矿景天-水稻轮作及磷修复剂对水稻镉吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2952-2958
- [28] LU Y G, YE F, ZENG G M, et al. Effects of added Cd on Cd uptake by oilseed rape and paritsai cropping [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 2007, 17: 846-852.
- [29] ARAO T, ISH KAWA S, MURAKAMI M, et al. Heavy metal contamination of agricultural soil and countermeasures in Japan [J]. *Paddy and Water Environment* 2010, 8(3): 247-257.
- [30] 骆永明. 污染土壤修复技术研究现状与趋势[J]. 化学进展, 2009, 21(2-3): 558-565