

# 重金属富集林木的应用研究进展

刘希华, 林仙菊, 邢建宏, 梁一池\*

(三明学院 化学与生物工程系, 福建 三明 365004)

**摘要:** 阐述了重金属离子对林木生理生化的影响、林木吸收重金属的根际效应和林木富集重金属的分子机制, 提出收集和筛选重金属富集能力强的树种, 加强林木分子生物学与基因工程技术研究将是今后的研究热点。同时, 应该关注林木根圈在污染土壤修复中所起到的重要作用。

**关键词:** 植物修复; 林木; 土壤污染

中图分类号: Q948 文献标识码: A 文章编号: 1004-3268(2011)11-0013-04

## Advances in Application of Forest Trees as Hyperaccumulators of Heavy Metal

LIU Xi-hua, LIN Xian-ju, XING Jian-hong, LIANG Yi-chi\*

(Department of Chemistry & Biology Engineering, Sanming University, Sanming 365004, China)

**Abstract:** This paper summarizes the effect of heavy metal on physiological and biochemical characteristics of forest trees, the rhizosphere effect of heavy metal absorption and the molecular mechanism of heavy metal accumulation in forest trees. To collect and select forest tree species with high ability of accumulating heavy metal and to strengthen studies on techniques of molecular biology and genetic engineering of forest trees will be the research hotspots. At the same time, the rhizosphere of forest trees plays an important role in phytoremediation of contaminated soil, which should be more conceded.

**Key words:** Phytoremediation; Forest trees; Soil pollution

由于人们对工业高度发达的负面影响预料不够, 预防不利, 导致了全球性的三大危机: 资源短缺、环境污染、生态破坏。土壤污染已经成为我国继水污染、大气污染、噪声污染和固体废物污染之后的另一个重大的污染问题。近几年来, 中国受污染的耕地面积逐年增加, 约占耕地总面积的 1/5<sup>[1]</sup>, 直接影响到人类健康和经济利益。中国的受污染土壤多为重金属污染, 其中重金属污染源包括矿山的开采和冶炼, 工业生产“三废”的排放, 农田化肥和农药的施用以及城市生活垃圾的排放等等。重金属污染由于其难降解性、易于积累且滞留时间长等特点而成为环境污染治理中的一个棘手难题, 而且重金属污染可通过食物链危害人类健康, 日本的水俣病(Hg 中

毒)和骨痛病(Cd 中毒)即是典型例证。重金属污染土地的治理大致有客土法、石灰改良法、化学淋洗法等<sup>[2]</sup>。但这 3 种方法在实际应用过程中或多或少存在着某些局限, 近几年来发展起来的植物修复技术因其具有安全、廉价的优点正成为研究和开发的热点<sup>[1]</sup>。植物修复技术是依据植物从环境中积累重金属元素和化合物的能力及将这些有毒物质在植物体内代谢成无毒生物小分子的能力而建立的新的生物修复技术<sup>[3]</sup>。森林生态系统是构成陆地生态系统物质循环和能量流动的重要枢纽, 在保持生态平衡中起到非常重要的作用。林木个体大, 生活周期长, 栽培适应性强, 这些生长特性是草本植物不具备的, 这使之成为研究植物修复与植物环境适应等机制的理

收稿日期: 2011-06-12

基金项目: 福建省高校服务海西建设重点项目(HX200801); 福建省科技厅重点项目(2010N0028)

作者简介: 刘希华(1978-), 男, 福建闽清人, 讲师, 博士, 主要从事生物技术研究。E-mail: xihua7808@163.com

\* 通讯作者: 梁一池(1952-), 男, 福建福鼎人, 教授, 主要从事生物技术研究。E-mail: fafulyc@126.com

想材料。因此,林木生态学正受到越来越多的关注,近几年来,有关林木在重金属离子污染土壤植物修复中的应用研究较多,而且部分树种已经取得了重大进展,显示出林木生态学的独特作用。鉴此,综述林木在富集重金属离子方面的应用研究进展,以期 为林木生态学的发展提供有益的参考。

## 1 超富集重金属林木

重金属超富集植物是植物修复的核心部分,只有找到对应的重金属超富集植物才能具体地实施植物修复。导致土壤污染的重金属主要包括 As、Cd、Co、Cr、Cu、Hg、Mn、Ni、Pb、Zn 等,一般为几种重金属的复合污染。重金属进入植物体内后,通过干扰细胞正常的代谢过程,抑制植物的生长发育,最终使植物表现出明显的症状,这就是植物重金属中毒,但有些植物能在重金属含量较高的土壤中生长。由于不同重金属在地壳中的丰度以及在土壤和植物中的背景值存在较大差异,因此,不同树种对重金属的吸收、积累特性不同。蒋德明等通过盆栽试验发现,旱柳和加拿大杨吸收蓄积的 Cd 量可分别高出对照数倍以上,充分说明杨柳科植物对土壤 Cd 具有较高的吸收积累效率,可以用柳树来进行土壤的 Cd 污染修复<sup>[4]</sup>。白花泡桐富集金属离子的能力随其在重金属污染土壤中种植时间延长而增强,白花泡桐叶和茎富集较高浓度的 Pb、Cu、Cd 和 Zn,是复合重金属污染地有效修复的树种之一<sup>[5]</sup>。九龙江口桐花树红树林可以富集多种土壤金属元素,且不同部位富集能力不同,以细根富集系数最高<sup>[6]</sup>。不同的树种对金属的敏感性不同,可根据相应情况,来选用树种进行植物修复。如垂枝榕、菩提树、凤凰木分别对 Pb、Cd、Hg 的积累作用较大,宜用这些林木进行重金属污染的治理和修复,洋紫荆、南洋杉、高山榕、小叶榕对 Pb、Cd、Hg 则相反,可用于重金属污染的监测<sup>[7]</sup>。木本落叶植物生长周期长,因此,对于木本落叶植物来说,叶片中的重金属含量应少于植物茎和根中部分,这样防止落叶中的重金属又回到土壤中,达到修复的目的。如木本植物银合欢其叶片中重金属 Pb 的含量只占所吸收的重金属总量的 15%,其他的 85%以上积累在体内其他部分,因此,在利用植物修复重金属污染土壤的实践中,它是一个特别值得利用的树种<sup>[8]</sup>。另外,不同的基因型对于金属离子的吸收和富集能力也不同,如柳树无性系之间就存在明显差异,通常选择高忍耐和高吸收性垂柳无性系以提高修复效率来达到植物修复目的<sup>[9]</sup>,而且现在采用水培筛选方法对重金属高抗和高积累无

性系进行早期选择已取得良好效果<sup>[10-11]</sup>。此外,树种本身的解剖构造也决定了其对 Cd 的吸收蓄积能力,如速生树种中的散孔材树木(沙兰杨、健杨、北京杨、旱柳、加拿大杨、宽柳)对 Cd 的吸收蓄积量要比环孔材树木(桑树、刺槐、榆树和紫穗槐)大得多<sup>[4,12-13]</sup>。

## 2 重金属对林木的生理生化影响

重金属离子进入植物体内后,可以在细胞表面和细胞内通过置换或者置换其他金属离子与核酸、蛋白质和多糖等大分子结合,导致各种代谢紊乱,严重危害植物<sup>[14]</sup>。Pb 的胁迫除了会导致细胞的微核率上升,引起马尾松染色体结构损伤外,还会使细胞质膜产生损伤,导致质膜的选择性通透屏障被严重破坏,膜体系崩溃。如面对 Pb 胁迫导致的各种损伤,马尾松出现超氧化物歧化酶(SOD)活性和过氧化物酶(POD)含量上升等应激反应,启动不同抗性机制以便进行自我保护<sup>[15]</sup>。加拿大杨在 Hg 胁迫下,根系 POD 含量及组成随 Hg 处理浓度增大而显著增加,启动了自我保护机制以增强自身的抗逆生理生化代谢功能<sup>[16]</sup>。杨树在受低浓度 Cd 胁迫后,其叶片 POD、SOD 和 CAT 的活性升高,说明细胞内的保护酶系统正在发挥作用,清除自由基及其衍生物,从而提高杨树的抗 Cd 能力<sup>[17]</sup>。

## 3 林木吸收重金属的根系效应

林木的根系是接触并吸收金属离子的重要部分,因此,以往对林木吸收重金属根系效应开展了大量的研究,主要集中在 4 个方面:(1)培育耐性强的木本豆科植物,促进植物对金属离子的耐性。研究发现,耐 Ti 性强的木本豆科植物不仅因为可以与根瘤菌共生而促进其在瘦瘠的废弃地生长,而且由于其深根的特点还能避免废弃地上常常遇到的干旱胁迫<sup>[8]</sup>。大叶相思根瘤菌可以耐受  $Zn^{2+} < 0.180 \text{ mmol/L}$  的离子浓度胁迫<sup>[18]</sup>。(2)采用基因工程手段将有关控制酶的基因转移到深根系植物中改变植物的根系形态,促进植物对金属的吸收。如转基因松树与对照植物相比根系的数量和生长量有明显增加,根尖的数量增加了 2~4 倍。通过这种基因转移途径可促进植物提取、植物降解和挥发等修复过程<sup>[19]</sup>;(3)加强对菌根植物的研究,提高菌根根际酶的活性。Rigou 等<sup>[20]</sup>研究发现,接种菌根真菌的松苗根能够分泌更多的质子,并改变根际酸碱环境,从而影响土壤中重金属及其他化合物的生物学效应。同时菌根能分泌大量的黏液,其中含有有机

酸、蛋白质、氨基酸和糖类等,这些分泌物黏液能与重金属结合,从而改变了环境中重金属对植物的伤害。接种菌根真菌后,分泌物的糖类和氨基酸含量有所增加<sup>[21-22]</sup>。重金属对脱氢酶活性有重大影响,在较高的重金属浓度下,重金属能显著降低非菌根根际酶的活性<sup>[23]</sup>; (4) 调节根际微生物的种类、数量和活性等。如专一性的真菌促进超富集植物 *Pinus ponderosa* 和 *P. radiata* 对<sup>90</sup>Sr 和放射性核元素的吸收<sup>[24]</sup>。

#### 4 林木富集重金属的分子机制

许多超富集植物对重金属的富集与其体内的组氨酸含量有关,目前国内外对于植物超富集重金属有大量研究,已发展到分子水平<sup>[25-27]</sup>。近年来,植物科学家已经关注耐重金属污染植物物种的筛选及其蕴藏的基因资源,开始利用现代生物技术克隆耐重金属污染的基因,试图培育出适于在重金属污染土壤上生长的植物种类<sup>[3]</sup>,目前已分离克隆出 *Cad1* 和 *Cad2* 基因(镉敏感性基因)、铁吸收基因、高亲和性锌和铜跨膜转运体基因,还有一些重金属转运体基因 *ZTP1*、*ZNT1* 和 *ZNT2*,并运用转基因等基因工程技术改良植物的修复能力<sup>[27-28]</sup>。克隆和鉴定出金属硫蛋白(metallothionein, MT)基因,其编码蛋白是富含半胱氨酸残基的低分子量金属结合蛋白。不同的 pH 值条件下,  $Pb^{2+}$  与 MT 结合成不同的 Pb-MT 复合物<sup>[29]</sup>。在同样的 Cd 污染胁迫下,杉木叶片内 Cd 富集最高,但受害程度却低于香樟、冬青,推测杉木可能是通过细胞内络合解毒机制,降低 Cd 毒伤害<sup>[30]</sup>。螯合是植物对细胞内重金属解毒的主要方式之一。植物螯合肽(phytochelatins, PC)是重金属胁迫下植物体内产生的一类结构与 MT 相似的,通常是由酶催化合成的富含谷胱甘肽的多肽研究。当部分金属离子穿过细胞壁和细胞膜进入细胞后,能和细胞质中的蛋白质、草酸、柠檬酸、苹果酸等形成复杂的稳定螯合物,降低细胞内游离的重金属离子浓度,这样就降低了重金属的毒性<sup>[29]</sup>。Rugh 等<sup>[31]</sup>将改造的 *merA* 导入了黄白杨(*Liriodendron tulipifera*)中,获得的转基因植株与对照相比, Hg 的含量提高 10 倍以上。

#### 5 讨论与展望

植物修复技术是一项处于迅速发展中具有广阔应用前景的新技术,林木树体高大,种植简单,适应性强,在污染土壤修复中起着重要的作用,但因林木植物修复起步较晚,因此,将这一技术应用到实际

中去还存在一些问题,结合国内外研究进展,提出下列几点展望。

1) 重金属离子对林木的生长具有重要的影响,部分林木在低浓度的金属离子中生长正常,但在高浓度的离子浓度中则表现生长迟缓,个体矮小,另外大多数超富集林木往往只能富集某种重金属离子,但现有受污染的土壤往往存在多种重金属的复合污染。因此,关键是应该选择合适的超富集树种。目前,首要任务是进行全国超富集树种资源的调查、收集和筛选,建立超富集体的数据库,从而最终选择出生长快、适应性强、抗逆性好的树种进行污染土壤修复。

2) 积累大量重金属的树木,特别是其落叶的再处理也是一个棘手的问题,另外还存在污染物及其降解产物的重新活化问题。为防止重金属离子二次回流到土壤,应尽量选择落叶,或者叶片中金属含量远少于茎或者枝条的树种。

3) 关于重金属离子超富集林木的基因研究正处于起步阶段,很多基因尚未发现,因此,需要加强林木分子生物学特性的研究,特别是重金属离子超富集基因的筛选与克隆。同时加强转基因技术方面的研究,将其他超富集植物的耐重金属、超富集基因通过转基因技术,转入到生物量大、生长速率快的林木中去,提高林木修复效率,增加社会和生态效应。

4) 林木根圈是在土壤、大气、水,还有微生物等因素综合作用的微环境中,根系进行着吸收、生长和分泌生理过程。因此,根圈是具有独特的生物学、物理和化学性质的微型生态系统,对污染物的吸收、迁移转化和分流有着重要的影响。但目前对林木根系效应的研究还比较少,因此,需要加强对植物根系的生理生态研究,进一步探索根系分泌物对土壤重金属的活化机制,加强对重金属的过量吸收和积累及其解毒机制、根际作用以及根际微生物群落的生态学和生理学特征、根际土壤环境条件对重金属的生物有效性制约机制等方面的研究,以指导基因技术、根际土壤处理和调控技术、合理耕作技术的应用。

#### 参考文献:

- [1] 韦朝阳,陈同斌. 重金属超富集植物及植物修复技术研究进展[J]. 生态学报, 2001, 21(7): 1197-1203.
- [2] 夏星辉,陈静生. 土壤重金属污染治理方法研究进展[J]. 环境科学, 1997(3): 72-76.
- [3] 王剑虹,麻密. 植物修复的生物学机制[J]. 植物学通报, 2000, 17(6): 504-510.
- [4] 蒋德明,黄会一,张春兴,等. 木本植物对土壤镉污染物吸收蓄积能力及其种间差异[J]. 城市环境与城市生态

- 态,1992,5(1):26-30.
- [5] 朱连秋,祖晓明,汪恩锋. 白花泡桐对土壤重金属的积累与转运研究[J]. 安徽农业科学,2009,37(25):12063-12065.
- [6] 郑文教,王文卿,林鹏. 九龙江口桐花树红树林对重金属的吸收与累积[J]. 应用与环境生物学报,1996,2(3):207-213.
- [7] 张炜鹏,陈金林,黄全能,等. 南方主要绿化树种对重金属的积累特性[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2007,31(5):125-128.
- [8] 张志权,束文圣,蓝崇钰,等. 土壤种子库与矿业废弃地植被恢复研究:定居植物对重金属的吸收和再分配[J]. 植物生态学报,2001,25(3):306-311.
- [9] Pulford I D, Watson C. Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by tree—a review[J]. Environment International,2003,29(4):529-540.
- [10] Watson C, Pulford I D, Riddell-Black D. Screening of willow species for resistance to heavy metals: comparison of performance in a hydroponics system and field trials[J]. Int J Phytoremediation,2003,5(4):351-365.
- [11] Punshon T, Dickinson N. Heavy metal resistance and accumulation characteristics in willows[J]. International Journal of Phytoremediation,1999,1(4):361-385.
- [12] Robinson B H, Mills T M, Petit D, et al. Natural and induced cadmium-accumulation in poplar and willow: Implications for phytoremediation[J]. Anglais,2000,227:301-306.
- [13] 陆秀君,刁诚轩,邹永田,等. 壳聚糖辅助下火炬树修复铅污染土壤潜力及其生长[J]. 北方园艺,2010(14):34-38.
- [14] Seregin I V, Ivanov V B. Physiological aspects of cadmium and lead toxic effects on higher plants[J]. Russian Journal of Plant Physiology,2001,48(4):523-544.
- [15] 吴若菁,庄捷,陈清松,等. 铅胁迫下马尾松微核率与生理指标变化的相关分析[J]. 林业科学,2010,46(8):78-83.
- [16] 林治庆,黄会一. 木本植物对汞耐性的研究[J]. 生态学报,1989,9(4):315-319.
- [17] Gu J, Qi L, Jiang W, et al. Cadmium accumulation and its effects on growth and gas exchange in four *populus* cultivars [J]. Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica,2007,49(2):7-14.
- [18] 聂湘平,蓝崇钰,束文圣,等. 锌对大叶相思—根瘤菌共生固氮体系影响研究[J]. 植物生态学报,2002,26(3):264-268.
- [19] Stomp A M, Han K H, Wilbert S, et al. Genetic strategies for enhancing phytoremediation[J]. Ann N Y Acad Sci,1994,721:481-491.
- [20] Rigou L, Mignard E, Plassard C, et al. Influence of ectomycorrhizal infection on the rhizosphere pH around roots of maritime pine (*Pinus pinaster* Soland in Ait.) [J]. New Phytologist,1995,130(1):141-147.
- [21] Denny H J, Ridge I. Fungal slime and its role in the mycorrhizal amelioration of zinc toxicity to higher plants[J]. New Phytologist,1995,130(2):251-257.
- [22] Leyval C, Berthelin J. Rhizodeposition and net release of soluble organic compounds by pine and beech seedlings inoculated with rhizobacteria and ectomycorrhizal fungi[J]. Biology and Fertility of Soils,1993,15(4):259-267.
- [23] Ajungla T, Sharma G D, Dkhar M S. Heavy metal toxicity on dehydrogenase activity on rhizospheric soil of ectomycorrhizal pine seedlings in field condition [J]. J Environ Biol,2003,24(4):461-463.
- [24] Entry J A, Rygielwicz P T, Emmingham W H. <sup>90</sup>Sr uptake by *Pinus ponderosa* and *Pinus radiata* seedlings inoculated with ectomycorrhizal fungi [J]. Environ Pollut,1994,86(2):201-206.
- [25] Assunção A G L, Martins P D C, De Folter S, et al. Elevated expression of metal transporter genes in three accessions of the metal hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* [J]. Plant, Cell & Environment,2001,24(2):217-226.
- [26] Lombi E, Tearall K L, Howarth J R, et al. Influence of iron status on cadmium and zinc uptake by different ecotypes of the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* [J]. Plant Physiol,2002,128(4):1359-1367.
- [27] Pence N S, Larsen P B, Ebbs S D, et al. The molecular physiology of heavy metal transport in the Zn/Cd hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* [J]. Proc Natl Acad Sci USA,2000,97(9):4956-4960.
- [28] Kramer U, Cotter-Howells J D, Charnock J M, et al. Free histidine as a metal chelator in plants that accumulate nickel [J]. Nature,1996,379:635-638.
- [29] 伍钧,孟晓霞,李昆. 铅污染土壤的植物修复研究进展 [J]. 土壤,2005,37(3):258-264.
- [30] 周青,黄晓华,施国新,等. 镉对 5 种常绿树木若干生理生化特性的影响 [J]. 环境科学研究,2001,14(3):9-11.
- [31] Rugh C L, Senecoff J F, Meagher R B, et al. Development of transgenic yellow poplar for mercury phytoremediation [J]. Nat Biotechnol,1998,16(10):925-928.