

# 重金属污染与植物修复

李晓静, 周晓阳

(北京林业大学 生物科学与技术学院 北京 100083)

**摘要:**概述了重金属对植物的毒害作用及植物耐重金属的机理、植物修复技术及其优缺点、超积累植物的特征及种类,并对植物修复技术今后的研究方向作出展望。

**关键词:**重金属污染;植物修复;超积累植物

**中图分类号:**S 432.3<sup>+</sup>5 **文献标识码:**B **文章编号:**1001-0009(2010)04-0214-04

环境污染与环境保护近年来已被全世界关注。随着经济全球化的迅速发展,工业“三废”和机动车尾气的排放,污水灌溉及农药、除草剂和化肥的使用,严重地污染了土壤、水质和大气。土壤和水受到有毒有机物和无机物的污染,将对环境和人类健康产生重大影响。重金属是重要的环境污染物,土壤中重金属污染对植物的影响现已引起广泛关注<sup>[1]</sup>。

重金属是指密度在 5.0 g/cm<sup>3</sup> 以上的金属元素,砷和硒是非金属元素,但由于其毒性及某些性质与重金属相似,所以将砷和硒列入重金属污染范围内。重金属包括 Hg、Cd、Cr、Pb、Zn、Ni、Cu、Fe、Co、Ag、Mo、Sn、Au 等 45 种,其中一些为生物体生理学上必需的微量元素(如: Zn、Ni、Cu、Fe、Co),而另一些重金属元素至今未发现其具有生物学功能(如: Cd、Ag、Sn)。环境污染方面所指的重金属主要是生物毒性显著的 Hg、Cd、Cr、Pb 和类重金属 As,以及具有毒性的重金属 Zn、Ni、Cu、Co 和 Sn 等污染物,但生理学上的必需微量元素(如: Zn、Ni、Cu、Fe、Co)一旦过量也同样具有相当毒性。目前 Hg、Cd、Cr、Cu 和 As 等重金属的污染已引起人们广泛关注<sup>[2]</sup>。

重金属在植物根、茎、叶及籽粒中的大量积累,不仅严重地影响植物的生长和发育(如生长缓慢、生育期推迟及产量降低等)<sup>[3]</sup>,而且还可以通过径流和淋洗作用污染地表水和地下水,恶化水文环境,并可能通过直接接触、食物链等途径危及人类的生命和健康<sup>[4]</sup>。

## 1 重金属对植物的毒害作用

### 1.1 抑制植物生长

研究表明,重金属胁迫下植物的生长受到抑制。

Pol Kieffer 等人指出:一旦镉存在于植物体内,它将抑制植物根和芽的生长并常使得叶片松动,叶绿体/叶肉细胞也陷与坏死<sup>[5]</sup>。这一抑制的主要原因是镉对质子泵不可逆转的抑制使得细胞伸长受到抑制。另外,学生实验显示:胁迫处理 3 d 后影响到植株的初级生长(发芽),胁迫植株表现出生长量大幅下降;对照植株直线生长,而镉胁迫植株从 14 d 开始完全受到抑制。

### 1.2 使植物产生缺素症

重金属与植物营养元素之间存在着交互作用。交互作用指在一定条件下,两个或多个元素的结合生理效应小于或超过它们各自效应之和,植物元素离子之间存在着交互作用关系<sup>[6]</sup>。离子的交互作用主要有拮抗作用和协同作用两类<sup>[7]</sup>。重金属的胁迫通常会导致植物矿质营养的缺乏,引起它们参与代谢和物质组成过程的紊乱失调,产生缺素症状<sup>[8]</sup>,成为植物 N、P、K 等大量营养元素缺乏或有效性降低的主要原因。

植物的缺绿与缺铁有关,随着环境中镉含量的升高,根对铁的吸收量下降;镉在土壤中积累,可能导致细菌数量降低,硝化细菌的活性降低,抑制硝化作用<sup>[9]</sup>,从而抑制 N 的矿化作用;同时土壤中过量的重金属会大大抑制植物对硝酸根离子的吸收。

### 1.3 引起氧化损伤

重金属的毒害作用常与其引起的氧化损伤有关。和其它胁迫相似,重金属胁迫下植物体内也会大量产生活性氧,如: H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、过氧化物阴离子(O<sub>2</sub><sup>-</sup>)和氧自由基等,使植物受到氧化损伤。

### 1.4 使某些酶失活

重金属能与某些蛋白质结合使其失活。如:由于 Cd 与 Zn 和 Ca 的化学相似性,从而可以与它们竞争酶的结合部位,毒害 Zn/Ca 依赖蛋白和 Zn/Ca 结合蛋白。另外,镉对硫醇盐有较高的吸附力,通过镉结合蛋白与巯基(-SH)的结合使重要酶失活。

### 1.5 使蛋白质差异表达

研究表明,随着重金属胁迫时间的延长,植物体内越来越多的蛋白质表现出差异表达。包括蛋白质水解

第一作者简介:李晓静(1984-),女,在读硕士,现从事植物重金属胁迫研究工作。E-mail: xiaojing6608@163.com。

通讯作者:周晓阳(1965-),男,副教授,硕士生导师,现从事植物细胞生物学和生物电子显微技术研究工作。E-mail: lhxl@yahoo.com.cn。

收稿日期:2009-11-20

酶类、致病蛋白、与碳代谢相关的蛋白、与光合作用相关的蛋白、氧化胁迫应答蛋白、谷胱甘肽代谢酶等上百种蛋白的表达都表现出显著的上升或下降。

### 1.6 诱导胁迫应答基因表达

重金属胁迫下, 涉及细胞防御、细胞死亡、细胞老化、蛋白质合成代谢、促进运输等的基因高度表达, 而光合作用相关基因的表达下调。

## 2 植物耐重金属的机理

### 2.1 限制对重金属的吸收和外排作用

据研究, 在蝇子草属(*Silene vulgaris*)耐性细胞系中 Cu 的积累量明显低于敏感细胞系; 在蝇子草属(*Silene cucubalus*)耐性细胞系中 Cd 的积累量明显低于敏感细胞系; 绒毛草(*Holcus lanatus*)耐砷品种体内砷的积累速率远低于敏感品种; 烟草(*Nicotiana tabacum* L.)可以通过表皮毛末端细胞形成 Cd/Ca 的分泌晶体将 Cd 排出。

### 2.2 重金属离子积累在叶表皮特化的结构中

重金属超积累植物可把重金属贮存在叶片表皮的表皮毛、表皮腺或吸水细胞中, 从而避免重金属对叶肉细胞或其它组织器官的直接伤害(如: 印度芥菜)。

### 2.3 细胞的区域化作用

植物对进入细胞内的重金属可通过区域化作用(如 Al 和 Cd 积累在液泡或细胞壁中), 形成沉淀(如磷酸铜沉淀)及螯合的方式解毒。

螯合是植物进行细胞内重金属解毒的主要方式之一, 谷胱甘肽(GSH)、组氨酸和柠檬酸等小分子物质及金属螯合蛋白都能螯合重金属, 但金属螯合蛋白对金属的螯合能力远大于 GSH 和柠檬酸。金属螯合蛋白包括金属硫蛋白(MT)和植物络合素(PC)。

### 2.4 抗氧化系统的保护作用

重金属胁迫与其它形式的氧化胁迫相似, 能导致大量的活性氧自由基产生, 自由基损伤主要的生物大分子(如蛋白质和 DNA)以及引起膜脂过氧化, 而植物中的多种抗氧化防卫系统能够清除自由基, 保护细胞免受氧化胁迫的伤害, 这也是植物忍耐重金属胁迫的主要机理之一。

### 2.5 重金属胁迫相关蛋白

重金属胁迫相关蛋白能提高植物的抗重金属能力。重金属胁迫能诱导硫氧还蛋白、泛肽、热休克蛋白(HSP) DnaJ-like 蛋白、几丁质酶、 $\beta$ -1, 3 葡聚糖酶、富含脯氨酸细胞壁蛋白(PRP)、富含甘氨酸细胞壁蛋白(GRP)和病原相关蛋白(PR)等基因的表达。重金属胁迫下, 这些胁迫蛋白协同作用可能在清除重金属变性蛋白、维持细胞的正常代谢和提高细胞的重金属抗性方面具有重要作用。

### 2.6 菌根和细菌可以提高植物重金属耐性

生长在重金属污染土壤中的菌根植物其真菌菌丝能与金属结合, 限制重金属向菌根植物地上部迁移, 可增加宿主植物耐重金属的能力, 有助于达到植物稳定和植被重建的目的<sup>[19]</sup>。

## 3 重金属污染的修复—植物修复技术

土壤重金属污染因污染范围广、持续时间长、污染隐蔽、不可逆等原因使治理污染土壤十分困难, 一直是污染治理中的热点和难点。在治理过程中, 物理方法费时费工, 化学方法又会造成二次污染。1983 年, 美国科学家 Chaney<sup>[11]</sup>首次提出了利用某些能够富集重金属的植物清除土壤重金属污染的设想——植物修复技术的思想。与传统治理方法相比, 这项技术以其潜在的安全、高效、经济及其生态协调性等优势显示出巨大的生命力, 成为学术界研究的热点。因此筛选对重金属耐受能力高以及具有富集和超富集能力的植物成为目前较新的修复途径之一<sup>[12]</sup>。依据美国国家环保局的定义<sup>[13]</sup>, 广义上的植物修复技术是指利用植物提取、吸收、分解、转化或固定土壤、沉积物、污泥或地表、地下水中有毒有害污染物技术的总称。尽管美国国家环保局已开展了一些有机污染物如阿特拉津、多环芳烃等的植物修复研究与应用工作, 目前有关植物修复技术仍主要集中在无机污染(重金属和类金属)的植物修复上<sup>[14]</sup>。近年来, 人们大量研究重金属对植物的影响, 期望寻找到耐重金属和重金属修复植物, 以利于环境的生态恢复<sup>[15]</sup>。

## 4 重金属污染土壤植物修复的主要内容

植物修复技术按其修复的机理和过程可分为植物萃取、植物固定、根系过滤、根际降解和植物挥发。其中与重金属污染土壤植物修复有关的内容包括植物萃取、植物固定和植物挥发和根系过滤。

### 4.1 植物萃取

植物萃取是指种植一些特殊植物, 利用其根系吸收污染土壤中的有毒有害物质并运移至植物地上部, 通过收割地上部物质带走土壤中污染物的一种方法。植物萃取技术利用的是一些对重金属具有较强富集能力的特殊植物。目前有关植物萃取的研究开展的较多, 工程性的试验也已开展。Baker 等<sup>[16]</sup>在英国首次利用阿尔卑斯芥(*Thlas picaerulesences*)修复了长期施用污泥导致重金属污染的土地, 证实了这一技术的可行性。植物萃取技术的关键是要求所用植物具有生物量大、生长快和抗病虫害能力强的特点, 并具备对多种重金属较强的富集能力。

### 4.2 植物稳定

植物稳定指利用植物根际的一些特殊物质使土壤中的污染物转化为相对无害物质的一种方法。其中包括了分解、沉淀、螯合、氧化还原等多种过程。研究发现铅可与磷结合形成难溶的磷酸铅沉淀在植物根部, 减轻铅的毒害<sup>[17]</sup>; 六价铬可被还原为毒性较轻的三价铬<sup>[18]</sup>。英国利物浦大学 Bradshaw 等<sup>[19]</sup>长期致力于矿山废弃地的生态恢复研究工作, 他们最早利用当地耐性植物对矿山土地进行了修复, 并成功地开发出可商业化应用的针

对不同金属矿山废弃物的耐性植物品种系列<sup>[20]</sup>。Kumar 等<sup>[21]</sup>在含铅 625 mg/kg 的土壤盆栽处理中种植印度芥菜 (*Brassica juncea*)，3 个星期后即使淋溶液中的铅含量由 740 g/mL 下降到 22  $\mu$ g/mL。

#### 4.3 植物挥发

植物挥发是指利用植物根系分泌的一些特殊物质或微生物使土壤中的汞、硒转化为挥发形态以去除其污染的一种方法。

#### 4.4 根系过滤

根系过滤是利用植物根系过滤沉淀水体中重金属的过程。

### 5 植物修复的优缺点

植物修复技术的显著优点是在其工程中可以原位实施，从而减小了对土壤性质的破坏和对周围生态环境的影响，可称是真正意义上的“绿色修复技术”；植物修复技术无需专门设备和专业操作人员，因而工程上易于推广和实施；植物修复技术的最大优势是其运行成本大大低于传统方法。Cunningham<sup>[22]</sup>对利用各种技术治理一块 4.86 hm<sup>2</sup> 铅污染土地的成本进行了估测比较。其中挖掘填埋法为 1 200 万美元，化学淋洗法为 6 300 万美元，客土法为 60 万美元，植物萃取法为 20 万美元，显示了植物修复技术的优势。当超富集植物地上部可富集 10 000 mg/kg 的重金属，产量达到 25 t/hm<sup>2</sup> 时，其每年可使表层土壤 (20 cm) 中重金属浓度下降 125 mg/kg。总之，植物修复技术的优势在于其符合人类可持续发展的最终目标。在目前地球环境污染日益严重，但缺乏安全、廉价而有效的治理措施的情况下，植物修复技术以其潜在的巨大优势得到了社会的广泛关注和期待。

植物修复技术也具有自身的不足。主要表现在：超富集植物个体矮小，生长缓慢，修复重金属污染土地需时太长，因而经济上并不一定很合理；这是目前限制超富集植物大规模应用于植物修复的最重要因素；植物修复土壤只能局限在植物根系所能延伸的范围内，一般不超过 20 cm 土层厚度；超富集植物对重金属具有一定的选择性，即一般只对一种重金属具有富集能力，而土壤重金属污染多为几种重金属复合污染，且常常伴生有机污染；因此，用一种超富集植物难以全面清除土壤中的所有污染物；富集了重金属的超富集植物需收割并作为废弃物妥善处置；异地引种对生物多样性的威胁，也是一个不容忽视的问题<sup>[23]</sup>。

### 6 超积累植物

超积累植物指可以超量累积某些化学元素的野生植物。一般而言，这些植物的地上部组织对该化学元素的吸收量，可超过普通植物的 100 倍以上，且不影响正常生命活动。超积累植物的界定可考虑以下两个主要因素：植物地上部分富集的重金属应达到一定的量；植物地上部分的重金属含量应高于根部。同时这些植物还

应满足  $S/R > 1$  的条件 ( $S$  和  $R$  指植物地上部分和根部重金属浓度)<sup>[24]</sup>。

理想的超积累植物一般具有以下特征<sup>[25]</sup>：可以耐受高水平的重金属；地上部超量积累某种或几种重金属时，不影响植物的正常生长，通常超出普通植物的 100 倍以上，比如超积累植物积累的 Cd 含量可达 100  $\mu$ g/g (干重) 以上，Co、Ni、Cu、Pb 达 1 mg/g 以上，而 Mn、Zn 达 10 mg/g 以上；生长迅速；生物量大；根系发达。超积累植物可以用于环境污染的植物修复、提取或回收重金属、地质探矿等方面，同时也为研究植物进化机制提供了优良素材。重金属超积累植物目前已被广泛研究，许多已成功用于环境污染的植物修复<sup>[26]</sup>。

迄今发现超积累植物 700 种，广泛分布于约 50 个科，但绝大多数属于镍超积累植物、铜超积累植物、钴超积累植物、锌超积累植物、硒超积累植物、铅超积累植物、锰超积累植物、砷超积累植物，其它超积累植物种类较少<sup>[27]</sup>。有的超积累植物可同时积累多种重金属，如在 32 种铜的超积累植物和 30 种钴的超积累植物中，有 12 种对铜和钴都有超积累能力，但目前还没发现哪一种植物具有广谱的重金属超积累特性<sup>[28]</sup>。而最重要的超积累植物主要集中在十字花科，世界上研究最多的植物主要在芸苔属、庭芥及遏蓝菜属<sup>[29]</sup>。中国科学院地理科学与资源研究所陈同斌等人发现在中国南方地区大面积分布的蕨类植物蜈蚣草对砷具有很强的超富集功能，其叶片含砷量高达 8%，大大超过植物体内的氮磷养分含量。

### 7 应用与展望

目前植物修复技术大多停留于实验室模拟研究阶段，一些报道根据盆栽试验估算了相应的植物修复潜力。但必须引起注意的是从实验室获得的超富集植物生物富集系数、最大富集量等并不能简单地换算成实际工程中的植物修复系数和单位面积重金属去除量，因为两者在重金属有效态含量、土壤物理化学性质及其它影响因素方面存在巨大差异<sup>[30]</sup>。但利用植物修复被重金属污染的土壤在国内外均有成功的应用。如美国俄勒冈州和衣阿华州利用杂交杨树、柳树、玉米等植物混合种植，去除生活垃圾填埋场的重金属及有机物等，获得成功。国内这方面的报道也有不少，如龙育堂通过种植蓖麻来净化稻田中的汞，收到了良好效果。土壤汞含量在 5 ~ 130 mg/kg 范围内，对蓖麻产量和品质未造成显著影响，蓖麻对土壤汞的年净化率高达 41%，土壤的自净年限缩短 8.5 倍。

植物修复不仅是一条绿色的、生态的净化途径，一种符合公众心理需求的新技术，而且也是一种经济有效的净化的方案。它既能回收金属所具有潜在的经济价值，又能使土壤保持结构和微生物的活性，因此是一种廉价有效颇具吸引力的原位绿色技术。从近期看，植物修复近期研究工作主要集中于以下几个方面。第一，寻

找、筛选自然界中累积、超累积植物, 培育驯化以满足实际应用需要, 仍然是今后一个时期内植物修复研究的重要任务。第二, 植物对重金属的超量吸收和积累及其解毒机理、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理等一系列基础理论问题有待深入研究, 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。第三, 分子生物学和基因工程技术的应用, 将自然界中超累积植物的耐重金属、超累积基因移植到生物量大、生长速率快的植物中去, 以克服天然超累积植物的缺点, 提高植物修复效率使其实用化。

### 参考文献

- [1] 陈怀满. 土壤-植物系统中的重金属污染[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 7-15.
- [2] 张玉秀, 柴团耀. 植物重金属调节基因的分离和功能[M]. 北京: 中国农业出版社.
- [3] 邱廷省, 王俊峰, 罗仙平. 重金属污染土壤治理技术应用现状与展望[J]. 四川有色金属, 2003(2): 48-52.
- [4] 许秀琴, 朱勇, 杨挺, 等. 水体重金属的污染危害及其修复技术[J]. 污染防治技术, 2007, 20(4): 67-69.
- [5] Pol Kieffer, Jacques Dommes, Lucien Hoffmann, et al. Quantitative changes in protein expression of cadmium-exposed poplar plants. Proteomics 2008, 8: 2514-2530.
- [6] 祖艳群, 林克惠. 氮钾营养的交互作用及其对作物产量和品质的影响[J]. 土壤肥料, 2000, 2: 3-7.
- [7] 胡克伟, 颜丽, 关连珠. 土壤硅磷元素交互作用研究进展[J]. 土壤通报, 2004, 35(2): 230-234.
- [8] Prasad M N V. Trace metals in Plant Ecophysiology. Ed. M N V Prasad [M]. John Wiley and Sons Inc New York, 1997: 207-249.
- [9] 王焕校. 污染生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [10] 廖继佩, 林先贵, 曹志洪. 内外生菌根真菌对重金属的耐受性及机理[J]. 土壤, 2003, 35(5): 370-377.
- [11] Chaney R L, Minnie M, Li Y M, et al. Phytoremediation of soil metals[J]. Current Opinion in Biotechnology 1997, 8: 279-284.
- [12] Chaney R L, Li Y M, Angle J S, et al. Improving metal hyperaccumulator wild plants to develop commercial phytoextraction systems[C]. Approaches and progress.// Terry N and Baculos G. S. eds. Phytoremediation of Trace Elements. Ann Arbor Press, Miami, USA, 1999.
- [13] USEPA. Introduction to Phytoremediation[R]. EPA/600/R-99/107, Washington DC, 2000.
- [14] 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.

- [15] 张利, 周立, 郑荷, 等. Pb、Hg<sup>2+</sup>胁迫对蔓花生逆境生理影响的研究[J]. 现代农业科学, 2008, 15(1): 49-52.
- [16] Baker A J M, McGrath S P, Sidoli C M D, et al. The possibility of in situ heavy metal decontamination of polluted soils using crops of metal-accumulating plants[J]. Resources, Conservation and Recycling, 1994, 11: 41-49.
- [17] Dushenkov V, Kumar P B A N, Harry M, et al. Rhizofiltration: The use of plant roots to move heavy metals from aqueous streams[J]. Environmental Science and Technology, 1995, 29: 1239-1245.
- [18] Salt D E, Blylock M, Kumar P B A N, et al. Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants[J]. Bio/Technology, 1995, 13: 468-474.
- [19] Bradshaw A D, Hadwick M J. The Restoration of Land[M]. Oxford: Blackwell Science Publications, 1980.
- [20] Smith R A H, Bradshaw A D. The use of metal tolerant plant populations for the reclamation of metaliferous wastes[J]. Journal of Applied Ecology, 1979, 16: 595-612.
- [21] Kumar N P B A, Dushenkov V, Motto H, et al. Phytoremediation: The use of plants to remove heavy metals from soils[J]. Environmental Science and Technology, 1995, 29: 1232-1238.
- [22] Mench M, Van gronsveld J, Lepp N W, et al. Physicochemical aspects and efficiency of trace element immobilization by soil amendments[A]. In: Van gronsveld J, Cunningham S, eds. Metal contaminated Soils. In Situ Inactivation and Phytoremediation[C]. New York: Landes Biosciences, Springer, 2000.
- [23] 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.
- [24] Baker A J M, Brooks R R. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements[J]. Biorecovery, 1989(1): 81.
- [25] Garbisu C, Alkorta I. Phytoremediation: a cost-effective plant-based technology for the removal of metals from the environment[J]. Bioresource Technology, 2001, 77: 229.
- [26] 陈一萍. 重金属超积累植物的研究进展[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(3): 20-24.
- [27] Reeves R D. Metal-accumulating plants. Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean up the environment (eds. Raskin I. and Ensley B. D. ) [J]. John Wiley & Sons, 2000: 193-229.
- [28] Kham A G, Knek G, Chaudhry T M, et al. Role of plants, mycorrhizae and phytochelators in heavy metal contaminated land remediation[J]. Chemosphere, 2000, 41(1-2): 197-207.
- [29] 邢前国, 潘伟斌, 张太平. 重金属污染土壤的植物修复技术[J]. 生态科学, 2003, 22(3): 275-279.
- [30] Smith R A H, Bradshaw A D. The use of metal tolerant plant populations for the reclamation of metalliferous wastes[J]. Journal of Applied Ecology, 1979, 16: 595-612.

## Metallic Pollution and Plant Renovation

LI Xiao-jing, ZHOU Xiao-yang

(Biology Science and Technology Institute, Forest University in Beijing, Beijing 100083)

**Abstract:** Having a summary of poison effect of heavy metal to plant, plant renovation mechanism and its advantage and defect, variety and character of super accumulate plant, prospecting the study direction of plant renovation mechanism.

**Key words:** heavy metallic pollution; plant renovation; super accumulate plant