

# 转基因植物修复重金属污染土壤研究进展

李长阁<sup>1</sup>, 于涛<sup>2</sup>, 傅桦<sup>1</sup>, 赵同科<sup>3</sup>

(1 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100037; 2 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 3 北京市农林科学院, 北京 100089)

**摘要:** 通过基因工程技术提高植物对金属的耐性, 增加金属在植物体内的累积被认为是进行污染土壤生态恢复以及减少食物链金属污染的一条切实可行的有效途径。随着细胞和分子水平上对金属在植物体内的新陈代谢机理的认识及相关基因的不断鉴定, 应用转基因技术提高植物对重金属的耐性和积累量的研究已取得了一些进展。本文就近年来分子水平上植物体内金属新陈代谢机理及基因技术在植物修复重金属污染方面的研究进展进行综述。

**关键词:** 植物修复; 基因技术; 重金属; 耐性; 积累性

**中图分类号:** Q943; X53

金属以各种不同的浓度分布于地壳之中, 但是由于工业、农业以及矿山的开采加速了金属进入生物圈的速度, 引起了各种严重的环境问题并对人类的健康安全造成了威胁。一些金属是植物生长发育所必需的微量营养素, 如 Cu、Fe、Mn、Zn; 而另一些金属则是植物生长发育的有害元素, 如 Cd、Hg、Pb、As 等<sup>[1-2]</sup>。有害金属元素通过与酶活性中心或蛋白质中的巯基结合, 并取代金属蛋白中的必需元素, 导致生物大分子构象改变、酶活性丧失及必需元素缺乏, 干扰细胞的正常新陈代谢过程。另外, 还能干扰物质在细胞中的运输过程, 并通过氧化还原反应产生自由基而导致细胞氧化损伤, 最终引起植物生长发育受抑, 甚至死亡。而植物必需金属元素其离子水平达到或超过植物所能忍受的生理极限时便会刺激生成自由基和活性氧成分, 造成氧化胁迫, 也会对生物体产生毒害作用<sup>[3-5]</sup>。

植物修复技术 (phytoremediation) 是指利用植物吸收、提取、分解、转化或固定土壤、沉积物、污泥、地表或地下水中有毒有害污染物质技术的总称。按照修复的机理和过程, 可将植物修复技术分为: 植物稳定 (phytostabilization)、植物挥发 (phytovolatilization)、植物提取 (phytoextraction) 以及根系过滤 (rhizofiltration)。相对于其他的常规治理方法, 植物修复以其廉价、清洁、不破坏环境、不会造成二次污染等特性引起了学术界和政府部门的重视。但自然界中发现的绝大多数超积累植物大多生物量低、生长缓慢、植株矮小, 因而限制了其对污染土壤重金属的移除效率, 也不利于大面积的机械化操作。通过基因工程技术提高

植物对重金属的耐性, 增加重金属在植物体内的累积被认为是进行污染土壤生态恢复以及减少食物链重金属污染的一条切实可行的有效途径。随着细胞和分子水平上对重金属在植物体内新陈代谢机理的认识及相关基因的不断鉴定, 应用转基因技术提高植物对重金属的耐性和积累量已取得了一些进展。本文就近年来分子水平上植物体内重金属新陈代谢机理及其转基因技术应用方面的研究进展进行阐述。

## 1 重金属积累性和耐性的分子机制

用于植物修复的植物要求有高的生物量、短的生长周期、同时对多种重金属具有较高的积累性和耐性。利用基因技术可以提高超积累植物的生物产量和生长速率或是提高高产作物或植物的重金属富集量和耐性, 由于植物的高产性状是由多基因控制的性状, 对其改良的难度极大, 而超积累性状可能由少数几个关键基因控制<sup>[6]</sup>, 因此利用超积累基因改良高产作物或植物的途径较为可行。要实现上述目标, 首先要了解在植物重金属超积累、拒吸收及耐性中起关键作用的基因, 以及探明其分子生物学机制。

### 1.1 吸收机制

金属在土壤中一般以多种形式存在, 不同的化学形态对植物的有效性不同, 只有具有生物可用性的金属才能被植物体吸收。植物根系通过与土壤颗粒的竞争来获得金属离子, 土壤的性质可以影响金属的有效性, 土壤中黏土或有机物含量越高, 土壤中金属的生物有效性就越低<sup>[7]</sup>。植物通过一些方法来提高土壤中金属的生物有效性。例如许多植物分泌有机酸 (苹果

酸、柠檬酸等)与金属生成螯合物,并且降低根际 pH 值,从而提高金属的生物有效性<sup>[7]</sup>。有机酸可以促进 *Brassica* 对 U 的吸收<sup>[8]</sup>,但在另一方面有机酸通过在根外部与金属生成螯合物从而抑制植物对金属的吸收,提高植物对金属的耐性,例如柠檬酸可以抑制多种植物对 Al 的吸收<sup>[9-11]</sup>。

植物通过根细胞膜的质子泵来影响根际 pH 值,例如, AHA2 编码的 H-ATP 酶在植物缺 Fe 时被上调,可以增加根向土壤中的质子排放量,促进对 Fe 的吸收<sup>[12]</sup>。同样, *Arabidopsis* 的突变型提高了质子的吸收,使根际 pH 值升高,导致了 Al(OH)<sub>3</sub> 的沉淀,从而降低了植物对 Al 的吸收,提高了对 Al 的耐性<sup>[11]</sup>。

植物可以分泌金属螯合分子螯合和溶解土壤结合的金属,促进植物对金属的吸收,例如在 Fe、Zn 缺乏时,禾本科植物分泌植物含 Fe 细胞 (pytosiderophores),从土壤中活化金属,促进 Fe 的吸收<sup>[13]</sup>。根际微生物也可以影响植物对金属的吸收,细菌可以提高植物对 Se 和 Hg 的吸收,菌根可以降低植物对金属的吸收,从而提高对金属的耐性<sup>[14]</sup>。

金属的吸收需要通过根的细胞膜进入到根的共质体中。特异性的膜转运体蛋白参与了这一过程。超积累植物拟南芥 (*A.thaliana*) 的基因组编码了超过 150 个的不同的阳离子转运体,这些转运体最少属于 9 个不同的转运体家族<sup>[12, 15-17]</sup>。如此丰富的基因显示了在超积累植物拟南芥以及其他的生物体的金属转运过程中体内平衡的重要性。有机体必须在为新陈代谢而获得必要的金属元素的同时又要避免金属元素的缺乏和过多而造成的毒性。金属离子被吸收进入细胞可能受穿过原生质膜的电化学梯度驱动,但对转运时能量的来源还不清楚<sup>[16]</sup>。通常一种金属可以被多个转运体系统转运。例如,在拟南芥中, Nramp (Natural resistance associated macrophage proteins) 家族的多个转运体都可以将 Fe 转运至细胞中。ZIP(ZRT, IRT-like proteins) 家族的成员,其中 ZRT (zinc-regulated transporter) 是酵母的 Zn 转运体,IRT (iron-regulated transporter) 是拟南芥的 Fe 转运体,以及 8-member YSL 家族的多个成员也参与了 Fe 转运到细胞内的活动<sup>[18]</sup>。由于转运体的不同,各个吸收系统的性能和亲和性也就不同。转运体可能对特定的细胞具有特异性。一些转运体可以转运多种金属离子,例如,IRT 蛋白可以转运 Fe 和 Cu。另外,细胞内的转运体可能参与了金属在细胞内组织中的分布与贮存。

## 1.2 转运机制

在金属从根到叶的运输中,转运体将金属离子转运出根的共质体,转运到木质部的非原质体中,其能

量可能来源于木质部薄壁细胞膜上的 H-ATP 酶产生的负性跨膜电势<sup>[19]</sup>。蒸腾作用可能驱动了金属在木质部的运输<sup>[20]</sup>。不同的螯合体可能参与了金属在木质部的运输。如有机酸螯合体(苹果酸、柠檬酸、组氨酸)<sup>[20-21]</sup>或者 NA (nicotianamine)<sup>[21-22]</sup>。金属从木质部的非原质体到叶的共质体转运由叶细胞膜中的转运体完成。另外 NA 可能作为螯合体参与了金属在韧皮部的运输<sup>[21]</sup>。

## 1.3 贮存机制

一旦金属进入到叶细胞,植物必需金属将被转移到它们的目的地,膜金属转运体及金属螯合蛋白可能参与了这一过程。金属硫蛋白 MTs (metallothioneins) 是富含半胱氨酸的低分子量蛋白,对金属阳离子如 Cd、Cu 和 Zn 具有高亲和力<sup>[22]</sup>。它们通过半胱氨酸残基上的巯基与重金属结合形成无毒或低毒的络合物,从而清除重金属的毒害。同时 MTs 还被认为在金属的体内平衡中起作用。金属伴侣蛋白 (metal chaperones) 是另一类蛋白,其在细胞内将金属带往具体的目标,如 ATX 蛋白在 Cu 缺乏时被上调<sup>[23]</sup>。在细胞中,必需的和非必需的金属通过一些转运体被储存在那些对重要的细胞活动影响最小的特殊部分。如 CDF 转运体的 ZAT1 将 Zn 转运至液泡中<sup>[24]</sup>。区室化作用可能在非原质体中,或者在特殊的细胞类型中,如表皮细胞、亚表皮细胞及毛状体<sup>[25-26]</sup>。

在液泡中,金属可能与植物络合素 PCs (phytochelatins) 形成化合物。PCs 是一种小的富半胱氨酸的金属螯合缩氨酸 (5~23 个氨基酸),至今为止所有被检测的植物<sup>[27-28]</sup>,以及一些菌类和动物中<sup>[29]</sup>都发现了 PCs。PCs 对多种金属具有清除和解毒作用,通过巯基与金属离子螯合形成无毒化合物,减少细胞内游离的金属离子,从而减轻金属对植物的毒害。在金属 Cd、Hg、Ag、Cu、Ni、Au、Pb、Zn 的诱导下,植物和酵母可以迅速产生 PCs,其中 Cd 的诱导能力最强<sup>[28]</sup>。金属与谷胱甘肽或者 PCs 形成复合物后,被细胞液中的 ABC 型转运体蛋白转运至液泡<sup>[30]</sup>。与金属在液泡中形成复合物有关的还有有机酸<sup>[31]</sup>。不同于其他的金属,过量的 Fe 被储存在叶绿体中,与铁蛋白 (ferritin) 结合<sup>[32]</sup>。

## 1.4 化学转化机制

金属转化酶可能参与了将金属从无机分子中转移入有机分子的过程,如硒酸盐被转化为二甲基硒化物<sup>[33]</sup>,或者改变金属的氧化还原状态,如有毒的 Cr(VI) 被降解为无毒的 Cr(III)<sup>[34]</sup>、在双子叶植物中 Fe 在被吸收之前被降解酶降解即从不溶的 Fe(III) 转化为可溶的 Fe(II)<sup>[35]</sup>。

### 1.5 超积累机制

通常超积累植物被定义为可以积累高于普通植物大约 100 倍高的重金属浓度的植物。例如, 1% 干重的 Mn 和 Zn、0.1% 干重的 Cu 和 Ni、0.01% 干重的 Cd。大约 75 个科的 500 种植物被发现具有超积累性<sup>[36]</sup>。超积累植物通常生长慢、生物量低, 但即使土壤中重金属含量很低时, 这些植物也可以积累很高浓度的重金属, 并且绝大多数吸收的重金属被转移到茎叶中。

超积累植物的根膜对重金属的吸收水平通常很高, 这可能是由于金属转运体在原生质膜的构成型的高度表达。超积累植物对重金属的高水平吸收还可能是由于有机酸(如缩氨酸<sup>[37]</sup>)的分泌以及根际微生物对土壤重金属离子的活化作用<sup>[38]</sup>。超积累植物 *Thlaspi caerulescens* 显示重金属在其根液泡中的降低积累, 在根到茎叶的转运及叶肉细胞中的吸收提高, 以及较高的耐性<sup>[39]</sup>。较高的耐性可能在某种程度上是由于细胞内有效的区室化作用。相对于非超积累植物 *orthologues*, Ni 的超积累植物 *T.goelsingense* 体内的液泡中存在金属转运体 TgMTP1 构成型的高度表达<sup>[40]</sup>。有效的螯合作用可能是超积累植物耐性和积累性的另一个关键因素, 不同的螯合分子可能在植物体的不同部位发挥功能。在 Ni 的超积累植物 *Alyssum lebiacum* 中, Ni 与缩氨酸的螯合作用在 Ni 在木质部的转运中发挥了重要作用<sup>[37]</sup>。在 Ni 的超积累植物 *T.goelsingense* 中, 缩氨酸并不是 Ni 积累的关键化合物<sup>[41]</sup>。Ni 主要是以有机酸化合物的形式储存在液泡中<sup>[31]</sup>。Zn 的超积累植物 *T.caerulescens* 中, Zn 在根中与缩氨酸螯合, 在木质部与有机酸螯合或不螯合, 在茎叶中与有机酸螯合<sup>[42]</sup>。

### 1.6 抗氧化胁迫机制

金属的氧化胁迫作用是其产生毒性的一个原因。高浓度的金属量能引发植物产生胁迫反应, 当植物与高浓度的金属接触时, 其体内积累活性氧类物质 (active oxygen species, AOS), 如超氧化物、过氧化物等, 如果植物不能有效地清除这些物质就会造成膜脂过氧化、酶活性丧失及 DNA 破坏。金属氧化胁迫作用启动抗氧化系统, 抗氧化系统产生具有清除功能的分子, 如抗坏血酸盐 (ascorbate) 和谷胱甘肽, 同时酶参与了它们的生物合成和降解<sup>[43]</sup>。其他参与抗氧化胁迫作用的分子是过氧化歧化酶, 其自身需要 Cu/Zn、Mn、Fe 作为辅酶<sup>[44]</sup>, 过量合成的这些化合物可以产生较高的对金属胁迫的耐性。如果协调金属诱导基因活动的调控基因能够被鉴定, 过量表达这些基因就可以有效地提高植物对金属的耐性。一个 Fe 依赖的顺势调控因子在玉米中被鉴定出来, 这一因子在 Fe 含量低时抑制

铁蛋白基因的表达<sup>[45]</sup>。同样地, 控制植物对盐度、干旱、寒冷耐性的调控因子也已经被鉴定出来<sup>[46-47]</sup>。

## 2 基因技术在植物修复中的应用

许多基因参与了金属的吸收、转运、区室化、化学转化以及植物对金属的耐性, 过表达这些基因来提高植物体内原有作用的效率是一种可行的植物修复途径。耐性是进行植物修复时植物体必须具备的特性, 因此提高植物对金属的耐性是进行植物修复的关键步骤。提高植物对金属的耐性可以通过多种途径来实现, 如降低金属的吸收、有效的区室化作用、大量合成金属螯合分子、增加与抗胁迫机制有关的酶的活性等。

依靠基因在植物组织(根、茎叶、维管束)和细胞内(细胞膜、液泡膜)中过表达金属转运体基因可能提高金属的吸收、转运、或区室化的效率。过表达与金属螯合物的生物合成有关的基因, 通过螯合物的不同和螯合物所处部位的不同, 可以提高或降低金属的吸收, 提高金属的转运和区室化。

### 2.1 金属螯合分子

大量合成各种金属螯合分子可以影响植物对重金属的耐性和积累性。过表达 MTs 可以有效提高植物对重金属的耐性和积累性。过表达哺乳动物 MTs 的烟草 (*Nicotiana tabacum*) 在 100 ~ 200  $\mu\text{mol/L}$  Cd 浓度下正常生长, 而对照野生类型在 10  $\mu\text{mol/L}$  的 Cd 浓度下生长受到严重抑制<sup>[48-49]</sup>。在组成型启动子的控制下拟南芥表达大豆 MT 基因 (PsMTA), 其幼苗比非转基因植株累积了 8 倍多的 Cu<sup>[50]</sup>。过表达酵母 MTs 基因 CUP1 的 *B.oleracea* 可以忍耐 400  $\mu\text{mol/L}$  的 Cd, 而对照野生型植物在 25  $\mu\text{mol/L}$  的 Cd 浓度下便不能生长, 转基因植株在 50  $\mu\text{mol/L}$  的 Cd 浓度下比对照野生型植物在 25  $\mu\text{mol/L}$  的 Cd 浓度下在上部叶片中多积累 10% ~ 70% 的 Cd<sup>[51]</sup>。酵母的 MTs 基因 CUP1 导入烟草中表达, 结果表明, 在含 Cu 量高的沙地上生长, CUP1 烟草幼苗叶片比对照累积了 2 ~ 3 倍高的 Cu, 但转 CUP1 烟草却没有表现出对 Cd 的显著耐性<sup>[52]</sup>。过量表达 MTs 可以提高植物对某一特殊重金属的抗性如 Cd、Cu 等, 但只有少数例子表现了略微增加的茎叶部重金属累积量, 这明显限制了 MTs 在植物修复中的应用。

过量表达与 PCs 生物合成有关的酶, 促进 PCs 的大量合成也可以提高植物体对重金属的耐性和积累性。将大肠杆菌 (*E.coli*) GS 基因 (gsh2) 转入印第安芥菜 (*Brassica juncea*), Cd 处理时转 gsh2 印第安芥菜根部谷胱甘肽 (GSH) 水平提高了 5 倍多, 其中还有 2 倍多的 ( $\gamma\text{-Glu-Cys}$ )<sub>2</sub>-Gly(PC2)。表达 gsh2 的印第安芥

菜茎叶部 Cd 浓度增加了 25%，在 150  $\mu\text{mol/L}$  的琼脂培养基上其根的生长没有受到影响，而对照野生型幼苗的根生物量被抑制了 50%<sup>[53]</sup>。又将 *E.coli* 的  $\gamma$ -ECS 基因 (*gsh1*) 转入印第安芥菜，*gsh1* 融合了含有双倍增强子 P70 的 CaMV35S 启动子，使转 *gsh1* 印第安芥菜过量表达  $\gamma$ -ECS。结果表明， $\gamma$ -ECS 转基因植株比野生型(WT)表现了较高的 Cd 耐受性和植物螯合肽 (PCs)、谷胱甘肽 (GSH) 和总非蛋白巯基水平。在水培 Cd 胁迫体系中，尽管转 *gsh1* 印第安芥菜茎叶 Cd 浓度比对照高出 40% ~ 90%，长势仍好于对照，转基因植株与野生型植株 14 天内的鲜重损失分别为 44%和 70%<sup>[54]</sup>。在 *Arabidopsis* 中过表达  $\gamma$ -ECS 时提高了 GSH 的量； $\gamma$ -ECS 基因敲除时 GSH 的量降低，同时转基因植物对 Cd 的耐性降低，显示了 GSH 和 PCs 对 Cd 耐性的重要。但是提高 GSH 的转基因植物却没有显示出对 Cd 耐性的提高，显示在这种植物中 GSH 的量并不能限制 PCs 的合成以及对 Cd 的耐性<sup>[55]</sup>。过表达半胱氨酸合酶可以提高转基因植物中 PCs 的含量，提高了对 Cd 的耐性但降低了对 Cd 的积累<sup>[56]</sup>。烟草中引入小麦 PCs 基因 TaPCs，转基因烟草比其野生型对重金属如 Pb、Cd 的耐性大大增强，根长高出野生型 16 倍，在高浓度 Pb ( $1572 \times 10^{-6} \text{ mol/L}$ ) 污染土壤中，转基因烟草比野生型累积了 2 倍多的 Pb<sup>[57]</sup>。

过表达柠檬酸合成酶 CS (citrate synthase) 可以提高金属螯合柠檬酸的合成量，根细胞分泌的柠檬酸在根外部与 Al 螯合，提高了转基因植物对 Al 的耐性，同时提高了对 P 的吸收以及对 Fe 缺乏的抗性，说明柠檬酸的分泌以不同的方式影响不同元素的吸收<sup>[58]</sup>。

在水稻中过表达 NAAT (nicotianamine aminotransferase) 使植物铁载体 (phytosiderophores) 过量合成。得到的转基因水稻释放出更多的植物铁载体并且可以在缺 Fe 的土壤中更好地生长<sup>[59]</sup>。过表达铁蛋白导致转基因烟草在叶中积累 1.3 倍高的 Fe<sup>[60]</sup>，在水稻种子中积累了 3 倍的 Fe<sup>[61]</sup>。

## 2.2 膜转运体

运用基因技术对重金属转运体处理后可以明显提高植物对重金属的耐性和积累性。从超积累植物 *T.goessingense* 中分离出来的 ZAT 是一个可能的液泡转运体，和 TgMTP1 同属于一个基因家族<sup>[40]</sup>。拟南芥过表达 Zn 的转运体 ZAT(即 AtMTP1)，转基因植物对 Zn 的抗性明显提高，在根中积累了 2 倍的 Zn，在 200  $\mu\text{mol/L}$  的水培条件下，对照植株的根生长被抑制了 85%，而转基因植物的根只被抑制了 15%<sup>[24]</sup>。在 35S 启动子控制下，烟草过表达拟南芥的 Ca 液泡转运体 CAX2，相对于空载体转基因植物，积累了约 2 倍浓度

的 Ca 和 Mn，4 倍浓度的 Cd，以及对 Mn 的耐性提高<sup>[62]</sup>。过表达另外一个液泡转运体 AtMHX 的烟草显示出对 Mg 和 Zn 耐性的降低，但对这些金属的积累没有改变<sup>[63]</sup>。另一个可能的金属转运体基因 NtCBP4 来源于烟草，编码一个植物钙调素 (calmodulin) 螯合蛋白，当其过表达时，表现了对 Pb 的敏感性，对 Ni 的耐性提高和 1.5 ~ 2.0 倍茎叶 Pb 的积累量，野生型和转基因植物 50% 生物量的减少分别发生在 90  $\mu\text{mol/L}$  和 200  $\mu\text{mol/L}$  Ni 浓度下，转基因植物对 Ni 的耐性提高但在茎叶中对 Ni 的积累降低<sup>[64]</sup>。烟草过表达两个编码 3 价铁还原酶的酵母基因 FRE1 和 FRE2 (与 Fe 的吸收有关)，在水培条件下转基因植物茎叶中的 Fe 含量是相对的野生型的 1.5 倍<sup>[65]</sup>。过表达 AtNramp1 可以提高对 Fe 的耐性<sup>[66]</sup>，而过表达 AtNramp3 降低了对 Cd 的耐性，但对 Cd 的积累没有影响<sup>[67]</sup>。

通过对金属转运体基因的修改，可以改变它的金属特异性。*Arabidopsis* 的铁转运体 IRT1，能够转运 Fe、Zn、Mn 和 Cd，当其基因中的一个氨基酸被替代后，失去了转运 Fe 和 Mn 的能力，或者失去转运 Zn 的能力<sup>[68]</sup>。过表达经过这样处理的基因，能使转基因体有目的地积累单一金属。

## 2.3 金属的新陈代谢

不同于通过过量表达关键酶来提高植物体内原有作用效率的方法，将与修复相关的外源基因转入体内，从而在植物体内引入一条自身原本不具有的反应通路，是另一条有效的植物修复途径。Hg 污染土壤或沉积物中分离出的抗 Hg 细菌，可以将有机 Hg 转化为低毒金属 Hg。在这一过程中，被 merB 编码的有机 Hg 裂解酶将有机 Hg 转化成为低毒的 Hg (II)，另一种被 merA 编码的酶素，以 NADPH 作为电子供体，将 Hg (II) 还原为 Hg 元素<sup>[69-71]</sup>。由于 Hg 细菌的挥发速率太慢而不适合用于重金属的生物修复，研究人员将这些基因引入高等植物中，为了使其在植物体内高度表达，细菌的 merA 基因的核苷酸序列经过修饰。在花椰菜嵌合体病毒 35S 启动子的控制下过表达 merAPe9 的拟南芥种子，在含有 50  $\mu\text{mol/L}$  和 100  $\mu\text{mol/L}$  的 HgCl<sub>2</sub> 的琼脂培养基中发芽并且生长，而其普通的非转基因种子在这一环境中其萌发则完全受到抑制。同时转基因体对 Au<sup>3+</sup> 的耐性也有所提高<sup>[72]</sup>。而后 merA 基因被引入了更高生物量的植物体中，过表达经过修饰了的 merA 基因的烟草转基因体，可以在最高含有 500  $\mu\text{g/kg}$  的 Hg (II) 土壤中生长并且开花<sup>[73]</sup>。过表达 merA 的转基因黄杨，与普通黄杨相比，Hg 的挥发能力提高了 10 倍，当在 10  $\mu\text{mol/L}$  的 HgCl<sub>2</sub> 的琼脂培养基中生长时，挥发 Hg (0) 的平均量为每天 1  $\mu\text{g/g}$  组织<sup>[74]</sup>。无

论普通拟南芥还是过表达 merA<sub>Pe9</sub> 的拟南芥在亚微摩尔含量的高毒性的有机 Hg 中, 其种子的萌发都将受到抑制<sup>[75]</sup>。而在 35S 启动子的控制下, 过表达细菌的 merB (编码生物裂解酶) 的种子可以在 Hg 浓度为 2 μmol/L 下不受影响。merB 基因的表达量与 Hg 原子的挥发速率呈正相关, 而 merA 的表达量与挥发速率无关。因此, merB 基因编码的有机 Hg 裂解酶是这一反应的限速酶。同时过表达 merA 和 merB 的拟南芥能够在 Hg 10 μmol/L 的浓度下生长, 其对有机 Hg 的耐受能力相对非转基因类型提高了 40 倍。将同时表达 merA 和 merB 的转基因体根部浸入到浓度为 25 μmol/L 的有机 Hg 的溶液中, 其蒸发元素 Hg 的速率大致为每天 14.4 ~ 85.0 μg/g 鲜生物量<sup>[76]</sup>。将砷酸还原酶基因(arsC)转入拟南芥, 在光诱导的特异性启动子大豆核酮糖 1, 5-二磷酸羧化酶 (rubisco) 小亚基 SRS1 启动子的作用下, 基因只在拟南芥的叶部表达; 促进 AsO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 向上运输, 在此基础上再将 γ-ECS 基因转入已经表达 arsC 基因的拟南芥中, 叶部表达的 γ-ECS 产生大量的巯基肽配基可以大量螯合亚砷酸盐, 使其不被生物利用, 极大地提高了植物体内 As 的累积量。表达 arsC 和 γ-ECS 的拟南芥表现了对 As 高的耐受力和累积量, 能够耐受 250 μmol/L 的砷酸盐, 在含有 150 μmol/L 砷酸盐的琼脂培养基上生长 3 周后, 叶部 As 的累积量与对照相比提高了 3 ~ 4 倍<sup>[77]</sup>。

#### 2.4 氧化胁迫的抗性机制

过表达参与抗胁迫机制的酶可以提高植物对重金属的耐性。如参与氧化胁迫响应有关的酶 (谷胱甘肽 S 转氨酶 (glutathione-S-transferase)、过氧化酶) 可以提高 Al 的耐性<sup>[78]</sup>。过表达一个醛糖或乙醛降解酶, 可以使脂过氧化物的降解产物脱氧化, 同时转基因体对金属的耐性提高<sup>[79]</sup>。通过对叶绿素含量和荧光性的检测发现, 过表达谷胱甘肽还原酶可以降低 Cd 的积累, 提高对 Cd 耐性<sup>[80]</sup>。过表达 ACC (1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid) 去氨酶可以提高多种金属的耐性和积累性<sup>[81]</sup>。

### 3 展望

植物修复研究尽管起步较晚, 但由于其成本低、对环境影响小、不会造成二次污染等优点受到重视而逐渐深入研究。目前用于植物修复的主体植物仍然是自然界中已发现的重金属富集或超富集植物, 通过转基因培育的人工超积累植物还处于实验室开发探索阶段, 不过一些功能基因及其工程植物已显示出商业化潜力。但是, 应用转基因手段进行植物修复的研究还有许多问题需要解决。

(1) 用于转基因植株的实验绝大多数都是以水培或琼脂为基质, 由于土壤中金属离子的生物利用率要明显低得多, 所以转基因植物的表现能否与以污染土壤为基质的实际修复效果相一致还不能确定。最近的研究表明来自水培体系的实验结果可以作为转基因植物是否具有植物修复潜力的标识。他们把分别过量表达 ECS、GS 和 APS 的转基因印度芥菜种植在重金属污染的土壤上, 结果均显著减少了土壤中重金属的含量, 约 6% 的 Zn 和 25% 的 Cd 被转基因印度芥菜移除。此外, 转 ECS 印度芥菜比野生型累积了 2 ~ 3 倍多的 Cr、Cu 和 Pb<sup>[82]</sup>。这也同时表明金属结合肽对植物富集金属的重要性。

(2) 目前, 对金属在植物特别是超积累植物体内的新陈代谢、耐性以及超积累性的机制及其控制因素的了解还很少。应用转基因手段进行植物修复的突破, 很大程度上依赖于对植物活化、吸收、运输、积累金属的生理生化机理的了解, 尤其是重金属吸收和体内的运输形态及其调控。多数的研究结果显示, 实验植物积累量的提高主要表现在根部, 而地上部分积累量的提高不明显。而部分研究对耐性提高也是通过使重金属在体外螯合来减少金属的可利用性或是将重金属富集在根部而提高地上部分的耐性。因此对金属在体内的运输机制及其调控因子的研究尤其重要, 特别是减少金属在根中的积累、增加向地上部分运输的控制因子的研究应该是今后研究的一个重点。

(3) 开展转基因植物进行植物修复应用的风险评价。一些可能的风险包括用来进行植物修复的植物可食部分被动物利用, 从而进入食物链对生物和人类健康安全造成的危害; 通过植物蒸发造成对大气的危害; 转基因植物由于其相对较高的竞争力, 如不受限制的向外扩散, 可能打破原有生态系统的平衡, 或是与野生类型杂交繁殖, 造成基因漂移。至今为止, 应用转基因植物进行植物修复还处在实验室阶段, 其应用的实际风险还难以评价, 但是对于植物挥发风险的理论计算显示被植物挥发的 Hg 对环境没有明显的危害, 相对于其他形式的污染其作用可以忽略。即使挥发量是污染土壤浓度的 400 倍, 仍然低于控制标准 25 倍<sup>[83]</sup>。但在进行实际的应用之前对转基因植物进行风险评价实验是必要的科学举措。

#### 参考文献:

- [1] 蒋成爱, 吴启堂, 陈杖榴. 土壤中砷污染研究进展. 土壤, 2004, 36 (3): 264-270
- [2] 伍钧, 孟晓霞, 李昆. 铅污染土壤的植物修复研究进展. 土壤, 2005, 37 (3): 258-264

- [3] Zhang MK, Ke ZX. Heavy metal, phosphorus and some other elements in urban soils of Hangzhou City, China. *Pedosphere*, 2004, 14 (2): 177-185
- [4] 薛生国, 陈英旭, 骆永明, Roger D Reeves, 林琦, 商陆. *Phytolacca acinosa* Roxb 的锰耐性和超积累. *土壤学报*, 2004, 41 (6): 889-895
- [5] Zhang MK, Ke ZX. Copper and Zinc enrichment in different size fractions of organic matter from polluted soils. *Pedosphere*, 2004, 14 (1): 27-36
- [6] Macnair MR, Bert V, Huitaon SB, Saumitou-Laprade P, Petit D. Zinc tolerance and hyperaccumulation are genetically independent characters. *Proc. R. Soc. London. Ser. B*, 1999, 266: 2175-2179
- [7] Ross SM. *Toxic Metals in Soil-Plant Systems*. United Kingdom: Wiley chichester, 1994
- [8] Huang JW, Blaylock MJ, Kapulnik Y, Ensley BD. Phytoremediation of uranium-contaminated soils: role of organic acids in triggering uranium hyperaccumulation in plant. *Environ. Sci. Technol.*, 1998, 32: 2004-2008
- [9] Papernik LA, Bethea AS, Singleton TE, Magalhaes JV, Garvin DF, Kochian LV. Physiological basis of reduced Al tolerance in ditelosomic lines of Chinese Spring wheat. *Planta*, 2001, 212: 829-834
- [10] Pineros MA, Kochian LV. A patch-clamp study on the physiology of aluminum toxicity and aluminum tolerance in maize. Identification and characterization of  $Al^{3+}$ -induced anion channels. *Plant Physiol.*, 2001, 125: 292-305
- [11] Moffat AS. Engineering plants to cope with metals. *Science*, 1999, 285: 369-370
- [12] Fox TC, Guerinot ML. Molecular biology of cation transport in plants. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 1998, 49: 669-696
- [13] Higuchi K, Kanazawa K, Nishizawa NK, Chino M, Mori S. Purification and characterization of nicotianamine synthase from Fe-deficient barley roots. *Plant Soil*, 1994, 165: 173-179
- [14] Frey B, Zierold K, Brunner I. Extracellular complexation of Cd in the Harting net and cytosolic Zn sequestration in the fungal mantle of *Picea abies-Hebeloma crustuliniforme* ectomycorrhizas. *Plant Cell Environ.*, 2000, 23: 1257-1265
- [15] Axelsen KB, Palmgren MG. Inventory of the superfamily of P-type ion pumps in *Arabidopsis*. *Plant Physiol.*, 2001, 126: 696-706
- [16] Mäser P, Thomine S, Schroeder JI, Ward JM, Hirschi K, Sze H, Talke IN, Amtmann A, Maathuis FJM, Sanders D, Harper JF, Tchieru J, Gribskov M, Persans MW, Salt DE, Kim SA, Guerinot ML. Phylogenetic relationships within cation transporter families of *Arabidopsis*. *Plant Physiol.*, 2001, 126: 1646-1667
- [17] Williams LE, Pittman JK, Hall JL. Emerging mechanisms for heavy metal transport in plants. *Biochim. Biophys. Acta*, 2000, 1465: 104-126
- [18] Curie C, Panaviene Z, Coullergue C, Dellaporta SL, Briat JF, Walker EL. Maize *yellow stripe1* encodes a membrane protein directly involved in Fe (III) uptake. *Nature*, 2001, 409: 346-349
- [19] Marschner H. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. London: Academic Press 1995
- [20] Salt DE, Prince RC, Pickering IJ, Raskin I. Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian mustard. *Plant Physiol.*, 1995, 109: 1427-1433
- [21] Von Wieren N, Klair S, Bansal S, Briat JF. Nicotianamine chelates both FeIII and FeII Implications for metal transport in plants. *Plant Physiol.*, 1999, 119: 1107-1114
- [22] Hamer DH. Mtetallothionein. *Annu. Rev. Biochem.*, 1986, 55: 913-951
- [23] Himelblau E, Mira H, Lin S, Cullota V, Penarrubia L, Amasino RM. Identification of a functional homolog of the yeast copper homeostasis gene *ATX1* from *Arabidopsis*. *Plant Physiol.*, 1998, 117: 1227-1234
- [24] Van der Zaal BJ, Neuteboom LW, Pinas JE, Chardonnens AN, Schat H, Verlei JAC, Hooykaas PJJ. Overexpression of a novel *Arabidopsis* gene related to putative zinc-transporter genes from animals can lead to enhanced zinc resistance and accumulation. *Plant Physiol.*, 1999, 119: 1047-1055
- [25] Hale KL, McGrath S, Lombi E, Stack S, Terry N, Pickering IJ, George GN, Pilon-Smits EAH. Molybdenum sequestration in *Brassica*: A role for anthocyanins?. *Plant Physiol.*, 2001, 126: 1391-1402
- [26] Küpper H, Zhao F, McGrath SP. Cellular compartmentation of zinc in leaves of the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Plant Physiol.*, 1999, 119: 305-311
- [27] Rauser WE. Phytochelations and related peptides. *Plant Physiol.*, 1995, 109: 1141-1149
- [28] Zenk MH. Heavy metal detoxification in higher plants-A review. *Gene*, 1996, 179: 21-30
- [29] Vatamaniuk OK, Bucher E A, Ward JT, Rea PA. A new pathway for heavy metal detoxification in animals. *Biol. Chem.*, 2001, 276: 20817-20820
- [30] Lu YP, Li ZS, Rea PA. AtMRP1 gene of *Arabidopsis* encodes a glutathione-S-conjugate pump: isolation and functional definition of a plant ATP-binding cassette transporter gene. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 1997, 94: 8243-8248
- [31] Krämer U, Pickering IJ, Prince RC, Raskin I, Salt DE. Subcellular localization and speculation of nickel in hyperaccumulator and non-accumulator *Thlaspi* species. *Plant Physiol.*, 2000, 122: 1343-1353

- [32] Theil EC. Ferritin: structure, gene regulation, and cellular function in animals, plants and microorganisms. *Annu. Rev. Biochem.*, 1987, 56: 289–315
- [33] Raskin I, Ensley BD. *Phytoremediation of Toxic Metals-Using Plants to Clean up the Environment*, New York: Wiley, 2000, 171–190
- [34] Lytle CM, Lytle FW, Yang N, Qian JH, Hansen D, Zayed A, Terry N. Reduction of Cr (VI) to Cr (III) by wetland plants: potential for in situ heavy metal detoxification. *Environ. Sci. Technol.*, 1998, 32: 3087–3093
- [35] Robinson NJ, Procter CM, Connolly ML, Guerinot ML. A ferric-chelate reductase for iron uptake from soils. *Nature*, 1999, 397: 694–497
- [36] Baker AJM, McGrath SP, Reeves RD, Smith JAC. Metal hyperaccumulator plants: A review of the ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metal-polluted soils // Terry N, Banuelos G. *Phytoremediation of Contaminated Soil and Water*. Boca Raton, Florida: Lewis, 2000, 85–108
- [37] Krämer U, Cotter-Howells JD, Charnock JM, Baker AJM, Smith JAC. Free histidine as a metal chelator in plants that accumulate nickel. *Nature*, 1996, 379: 635–638
- [38] Whiting SN, de Souza MP, Terry N. Rhizosphere bacteria mobilize Zn for hyperaccumulation by *Thlaspi caerulescens*. *Environ. Sci. Technol.*, 2001, 35: 3144–3150
- [39] Lasat MM, Pence NS, Garvin DF, Ebbs SD, Kochian LV. Molecular physiology of zinc transport in the Zn hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Exp. Bot.*, 2000, 51: 71–79
- [40] Persans MW, Nieman K, Salt DE. Functional activity and role of cation-efflux family members in Ni hyperaccumulation in *Thlaspi goesingense*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.*, 2001, 98: 9995–10000
- [41] Persans MW, Yan X, Patnoe JML, Krämer U, Salt DE. Molecular dissection of the role of histidine in nickel hyperaccumulation in *Thlaspi goesingense*. *Plant Physiol.*, 1999, 121: 1117–1126
- [42] Salt DE, Prince RC, Baker AJM, Raskin I, Pickering IJ. Zinc ligands in the metal hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* as determined using X-ray absorption spectroscopy. *Environ. Sci. Technol.*, 1999, 33: 713–717
- [43] Noctor G, Foyer CH. Ascorbate and glutathione: keeping active oxygen under control. *Annu Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 1998, 49: 249–279
- [44] Bowler C, Van Camp W, Van Montagne M, Inze D. Superoxide dismutase in plant. *Crit. Rev. Plant Sci.*, 1994, 13: 199–218
- [45] Petit JM, Van Wuytswinkel O, Briat JF, Lobreaux S. Characterization of an iron-dependent regulatory sequence involved in the transcriptional control of AtFer1 and ZmFer1 plant ferritin genes by iron. *Bio. Chem.*, 2001, 276: 5584–5590
- [46] Kasuga M, Liu Q, Miura S, Yamaguchi-Shinozaki K, Shinozaki K. Improving plant drought, salt, and freezing tolerance by gene transfer of a single stress-inducible transcription factor. *Nature Biotechnol.*, 1999, 17: 287–291
- [47] 张敏, 王校常, 严蔚东, 梁永超, 施卫明. 盐胁迫下转 Bt 基因棉的 K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>转运及 SOD 活性的变化. *土壤学报*, 2005, 42 (3): 460–467
- [48] Misra S, Gedamu L. Heavy metal tolerant transgenic *Brassica napus* L and *Nicotiana tabacum* L plant. *Theor. Appl. Genet.*, 1989, 78: 161–168
- [49] Pan A, Yang M, Tie F, Li L, Chen Z, Ru B. Expression of mouse metallothionein- gene confers cadmium resistance in transgenic tobacco plants. *Plant Mol. Biol.*, 1994, 24: 341–351
- [50] Evans KM, Gatehouse JA, Lindsay WP, Shi J, Tommey AM, Robinson NJ. Expression of the pea metallothionein-like gene PsMT<sub>A</sub> in *Escherichia coli* and *Arabidopsis thaliana* and analysis of trace metal ion accumulation: Implications for gene PsMT<sub>A</sub> function. *Plant Mol. Biol.*, 1992, 20: 1019–1028
- [51] Hasegawa I, Terada E, Sunairi M, Wakita H, Shinmachi F, Noguchi A, Nakajima M, Yazaki J. Genetic improvement of heavy metal tolerance in plants by transfer of the yeast metallothionein gene (CUP1). *Plant Soil*, 1997, 196: 277–281
- [52] Thomas JC, Davies EC, Malick FK, Endreszi C, Williams CR, Abbas M. Yeast metallothionein in transgenic tobacco promotes copper uptake from contaminated soils. *Biolechnol. Prog.*, 2003, 19 (2): 273–280
- [53] Zhu Y, Pilon-Smits EAH, Jouanin L, Terry N. Overexpression of glutathione synthetase in *Brassica juncea* enhances cadmium tolerance and accumulation. *Plant Physiol.*, 1999, 119: 73–79
- [54] Zhu Y, Pilon-Smits E A H, Tarun A, Weber SU, Jouanin L, Terry N. Cadmium tolerance and accumulation in Indian mustard is enhanced by overexpressing γ-Glutamylcysteine synthetase. *Plant Physiol.*, 1999, 121: 1169–1177
- [55] Xiang C, Werner BL, Christensen EM, Oliver DJ. The biological functions of glutathione revisited in *Arabidopsis* transgenic plants with altered glutathione levels. *Plant Physiol.*, 2001, 126: 564–574
- [56] Harada E, Choi YE, Tsuchisaka A, Obata H, Sano H. Transgenic tobacco plants expressing a rice cysteine synthase gene are tolerant to toxic levels of cadmium. *Plant Physiol.*, 2001, 158: 655–661
- [57] Gisbert C, Ros R, De Haro A, Walker DJ, Pilar Bernal M, Serrano R, Navarro-Avino. A plant genetically modified that accumulates Pb is especially promising for phytoremediation. *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 2003, 303 (2): 440–445

- [58] De La Fuente JM, Ramirez-Rodriguez V, Cabrera-Ponce JL, Herrera-Estrella L. Aluminum tolerance in transgenic plants by alteration of citrate synthesis. *Science*, 1997, 276: 1566-1568
- [59] Takahashi M, Nakanishi H, Kawasaki S, Nishizawa NK, Mori S. Enhanced tolerance of rice to low iron availability in alkaline soils using barley nicotianamine aminotransferase genes. *Nature Biotechnol.*, 2001, 19: 466-469
- [60] Goto F, Yoshihara T, Saiki H. Iron accumulation in tobacco plants expressing soybean ferritin gene. *Transgenic Res.*, 1998, 7: 173-180
- [61] Goto F, Yoshihara T, Shigemoto N, Toki S, Takaiwa F. Iron fortification of rice seed by the soybean ferritin gene. *Nature Biotechnol.*, 1999, 17: 282-286
- [62] Hirschi KD, Korenkov V, Wilganowski NL, Wagner GJ. Expression of *Arabidopsis CAX2* in tobacco. Altered metal accumulation and increased manganese tolerance. *Plant Physiol.*, 2000, 124: 125-133
- [63] Shaul O, Hilgemann DW, De Almeida-Engler J, Van Montagu M, Galili G. Cloning and characterization of a novel  $Mg^{2+}/H^{+}$  exchanger. *Embo J.*, 1999, 18: 3973-3980
- [64] Arazi T, Sunkar R, Kaplan B, Fromm H. A tobacco plasma membrane calmodulin-binding transporter confers  $Ni^{2+}$  tolerance and  $Pb^{2+}$  hypersensitivity in transgenic plants. *Plant*, 1999, 20: 171-182
- [65] Samuelsen AI, Martin RC, Mok DWS, Machteld CM. Expression of the yeast FRE genes in transgenic tobacco. *Plant Physiol.*, 1998, 118: 51-58
- [66] Curie C, Alonso JM, Le Jean M, Ecker JR, Briat JF. Involvement of Nramp1 from *Arabidopsis thaliana* in iron transport. *Biochem.*, 2000, 347: 749-755
- [67] Thomine S, Wang R, Ward JM, Crawford NM, Schroeder JI. Cadmium and iron transport by members of a plant metal transporter family in *Arabidopsis* with homology to Nramp genes. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.*, 2000, 97: 4991-4996
- [68] Rogers EE, Eide DJ, Guerinot ML. Altered selectivity in an *Arabidopsis* metal transporter. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.*, 2000, 97: 12356-12360
- [69] Ogawa HI, Tolle CL, Summers AO. Physical and genetic map of the organomercury resistance (Omr) and inorganic mercury resistance (Hgr) loci of the IcnM plasmid R831b. *Gene*, 1984, 32: 311-320
- [70] Hamlett NV, Landale EC, Davis BH, Summers AO. Roles of the Tn21 merT, merP, and merC gene products in mercury resistance and mercury binding. *Bacteriol.*, 1992, 174: 6377-6385
- [71] Bizili SP, Rugh CL, Meagher RB. Phytodetoxification of hazardous organomercurials by genetically engineered plants. *Nat. Biotechnol.*, 2000, 18: 213-217
- [72] Rugh CL, Wilde HD, Stack, NM, Thompson, DM, Summers AO, Meagher RB. Mercuric ion reduction and resistance in transgenic *Arabidopsis thaliana* plants expressing a modified bacterial merA gene. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.*, 1996, 93: 3182-3187
- [73] Heaton ACP, Rugh CL, Wang NJ, Meagher RB. Phytoremediation of mercury and methylmercury-polluted soils using genetically engineered plants. *Soil Contam.*, 1998, 7: 497-509
- [74] Rugh CL, Senecoff JF, Meagher RB, Merkle SA. Development of transgenic yellow poplar for mercury phytoremediation. *Nat Biotechnol.*, 1998, 16: 925-928
- [75] Bizili SP, Rugh CL, Summers AO, Meagher RB. Phytoremediation of methylmercury pollution: merB expression in *Arabidopsis thaliana* confers resistance to organomercurials. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.*, 1999, 96: 6808-6813
- [76] Bizili SP, Rugh CL, Meagher RB. Phytodeoxification of hazardous organomercurials by genetically engineered plants. *Nat. Biotechnol.*, 2000, 18: 213-217
- [77] Dhankher OP, Yu JL, Rosen BP. Engineering tolerance and hyperaccumulation of arsenic in plants by combining arsenate reductase and  $\gamma$ -glutamylcysteine synthetase expression. *Nature Biotechnol.*, 2002, 20: 1140-1145
- [78] Ezaki B, Gardner RC, Ezaki Y, Matsumoto H. Expression of aluminum-induced genes in transgenic *Arabidopsis* plants can ameliorate aluminum stress and/or oxidative stress. *Plant Physiol.*, 2000, 122: 657-665
- [79] Oberschall A, Deak M, Torok K, Sass L, Vass I, Kovacs I, Feher A, Dudits D, Horvath GV. A novel aldose/aldehyde reductase protects transgenic plants against lipid peroxidation under chemical and drought stress. *Plant*, 2000, 24: 437-446
- [80] Pilon-Smits EAH, Zhu YL, Sears T, Terry N. Overexpression of glutathione reductase in *Brassica juncea*: Effects on cadmium accumulation and tolerance. *Plant Physiol.*, 2000, 110: 455-460
- [81] Grichko VP, Filby B, Glick BR. Increased ability of transgenic plants expressing the bacterial enzyme ACC deaminase to accumulate Cd, Co, Cu, Ni, Pb, and Zn. *Biotechnol.*, 2000, 81: 45-53
- [82] Bennett LE, Burkhead JL, Hale KL, Terry N, Pilon M, Pilon-Smits EAH. Analysis of transgenic Indian mustard plants for phytoremediation of metal-contaminated mine tailings. *J. Environ. Qual.*, 2003, 32 (2): 432-440
- [83] Rugh CL, Bizily SP, Meagher RB. Phytoreduction of environmental mercury pollution // Raskin I, Ensley BD. *Phytoremediation of Toxic Metals-Using Plants to Clean up the Environment*. New York: Wiley, 2000, 151-171



## Phytoremediation of Heavy Metal Polluted Soils with Transgenic Plants

LI Chang-ge<sup>1</sup>, YU Tao<sup>2</sup>, FU Hua<sup>1</sup>, ZHAO Tong-ke<sup>3</sup>

( 1 College of Resource, Environment & Touris, Capital Normal University, Beijing 100037, China;

2 School of the Earth Sciences and Resources, China University of Geoscience, Beijing 100083, China;

3 Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100089, China )

**Abstract:** With the use of genetic engineering technology, it is feasible to manipulate a plant's capacity to tolerate, accumulate and metabolize metal pollutants, and hence create ideal plants for environmental cleanup. If we know which molecules are involved in these tolerating and accumulating processes, and which genes control these mechanisms, we can manipulate them to our advantage. This review aims to give a succinct overview of plants' metal tolerance and accumulation mechanisms, to identify possible strategies for genetic engineering of plants for metal phytoremediation, and to present an introduction to what has been achieved so far regarding manipulation of metal metabolism in plant.

**Key words:** Phytoremediation, Genetic engineering, Heavy metal, Tolerance, Accumulation