

# 土壤重金属污染的植物修复 与金属超富集植物及其遗传工程研究<sup>\*</sup>

王松良 郑金贵

(福建农林大学作物科学学院 福州 350002)

**摘要** 本文综述了土壤重金属污染的植物修复、金属超富集植物及其遗传工程的最新研究进展及存在问题,并提出加紧筛选和发现野生高生物量的金属超富集植物,在现有高生物量作物种质资源中筛选金属超富集作物,应用遗传工程技术把野生植物的超富集基因转移到现有高生物量植物(作物)中,寻找综合、可持续的植物修复手段等对策。

**关键词** 土壤重金属污染 植物修复 金属超富集植物 遗传工程

**Phytoremediation for heavy metal contamination in soil, metal hyperaccumulator and their genetic engineering.** WANG Song-Liang, ZHENG Jin-Gui (College of Crop Sciences, Fujian Agriculture and Forest University, Fuzhou 350002, China), *CJEA*, 2007, 15(1):190~194

**Abstract** The field applications of phytoremediation on heavy metal contamination in soil rely on the discovery, screening and exploitation of metal hyperaccumulators, in which the genetic engineering has broad perspectives. The authors address the latest advances on phytoremediation for heavy metal contamination in soil, metal hyperaccumulators and their genetic engineering, and figure out the existing problems subsequently. To speed up the researches in China, several strategies have been suggested, including screening the metal hyperaccumulators with high biomass among the natural vegetation, screening the metal hyperaccumulators among crop varieties, transferring the metal-accumulating gene of wild hyperaccumulators to the potential crops by means of the genetic engineering, and finding an integrated and sustainable phytoremediation method.

**Key words** Heavy metal contamination in soil, Phytoremediation, Metal hyperaccumulator, Genetic engineering  
(Received July 7, 2005; revised Sept. 21, 2005)

在世界范围内,由于工矿三废排放和农用化学品的过量使用,造成工矿区周围土壤和农业土壤有毒重金属过量累积,带来严重的环境和健康的风险<sup>[3]</sup>。因此,土壤重金属的脱污技术备受关注。在我国,由于工农业生产规模和乡镇城市化的快速发展,有相当数量农田受到工业三废和农用化学品的污染,土壤质量日趋下降。据统计,1998年我国由于耕地土壤重金属污染而引起的粮食减产达1000万t<sup>[1]</sup>。在我国重金属污染的土壤中,Cd污染耕地1.3万hm<sup>2</sup>,涉及11省市的25个地区;Hg污染3.2万hm<sup>2</sup>,涉及15个省市的21个地区。其中大部分地区生产的稻米中含Hg量超过国家食品卫生标准(0.2mg/kg),粮食含Pb量大于1.0mg/kg的产地有11个,有6个地区生产的粮食含As量超过0.7mg/kg<sup>[2]</sup>。清除土壤重金属污染物事关我国食品安全和人民健康。然而,由于土壤重金属累积的不断加剧和重金属的相对稳定性,使清除土壤重金属污染困难重重。传统治理土壤重金属污染的方法如淋滤法、客土法、吸附固定法等物理方法以及生物还原法、络合浸提法等化学方法<sup>[14]</sup>,往往投资昂贵、需要复杂设备条件或打乱土层结构,且可能带来二次污染,不适于大面积污染的治理。植物修复(Phytoremediation)是通过种植某种对土壤重金属有相当耐性和富集能力的植物来排除污染物的技术<sup>[14,15]</sup>。这种方法成本低、对环境扰动少,可以克服传统土壤重金属污染物治理方法的不足,展现了广阔的应用前景。

## 1 土壤重金属污染植物修复技术的组成和优势

土壤重金属污染的植物修复指通过种植对土壤重金属元素有特殊富集能力的植物,将植物收获并进行妥善处理(如灰化回收)后,可将该种重金属移出土壤,达到清除土壤重金属污染物的目的<sup>[3]</sup>。由于应用这

<sup>\*</sup> 福建省教育厅基金项目(K20024、K02060)和省长基金项目(2002)资助

收稿日期:2005-07-07 改回日期:2005-09-21

种方法不必把污染物质转移处理,因此可节省大量治理费用,且可实现废物资源化,因此备受关注。

植物修复通常包括植物萃取作用(Phytoextraction),即植物对重金属的吸收;植物挥发作用(Phytovolatilization),即通过植物使土壤中的某些重金属(如  $Hg^{2+}$ )转化为气态(如  $Hg^0$ )而从土壤中挥发出去;根际滤除作用(Rhizofiltration),即利用植物根孔通过水流移出土壤重金属;以及植物钝化作用(Phytostabilization),即利用植物将土壤重金属转变成无毒或毒性较低的形态<sup>[4]</sup>。其中最具有前景的是植物萃取作用,即狭义的植物修复<sup>[14]</sup>。

与常规的土壤重金属清除方法相比,植物修复有如下优势<sup>[5,16]</sup>:一是土壤的物理结构不被破坏,生物功能保存完好。二是不产生废物残留的产品和能量。三是治理费用低,据 Schnoor<sup>[16]</sup>对一个 5 年期的植物修复项目与同期常规治理的费用比较,植物修复总费用为 \$ 250000,而常规的治理需要 \$ 660000,比植物修复高 1.6 倍。四是可以长期、大面积的田间应用。五是可回收重金属元素,并加以循环利用。

## 2 金属超富集植物与土壤重金属污染的植物修复

植物修复技术依赖于植物组织对土壤污染物的直接吸收累积<sup>[16]</sup>,发现对某种(些)重金属具有特殊富集能力的植物生态型或基因型,即“金属超富集植物”(Metal hyperaccumulator)<sup>[17,18]</sup>是技术的关键。Brooks 最早引入“超富集植物”一词,认为植物组织干重中含 Ni 超过 1000mg/kg,则该种植物就是 Ni 的超富集植物<sup>[14]</sup>。在 Chaney<sup>[19]</sup>首次提出利用超富集植物修复环境污染物的设想后,引起了广泛的关注。目前,随着对专性和广谱性金属超富集植物的不断发现和筛选,关于“在地上部能够较普通植物富集 10~500 倍以上某种重金属的植物”是“金属超富集植物”的定义<sup>[20]</sup>,已经被广泛接受。通常对金属超富集植物的界定涉及到以下 2 个主要因素:一是植物地上部富集的重金属应达到一定的量;二是植物地上部的重金属含量应高于根部<sup>[21]</sup>。实际上,由于各种重金属在地壳中的丰度及在土壤和植物中的背景值存在较大差异,因此对不同重金属,其超富集植物富集浓度界限也有所不同。目前采用较多的是综合 Brooks<sup>[17]</sup>、Baker 和 Walker<sup>[18]</sup>和 Chaney 等<sup>[20]</sup>提出的参考值,即把植物叶片或地上部(干重)中含 Cd 达到

表 1 某些植物种对重金属的超富集状况及其来源

Tab.1 Accumulative amount and sources of some existing heavy metal hyperaccumulators

重金属元素	植物种	叶重金属浓度 /mg·kg <sup>-1</sup>	发现地点	引用文献
Heavy metals	Plant species	Metal concentration in leaf	Sites discovered	Documents cited
Zn	遏蓝菜属 <i>Thlaspi calaminare</i>	39600	德国	Brook <sup>[18]</sup>
	遏蓝菜属 <i>Thlaspi goesingense</i>	50000	法国	Escarre 等 <sup>[13]</sup>
	遏蓝菜属 <i>Thlaspi caerulescens</i>	25000	德国	Escarre 等 <sup>[13]</sup>
	碎米荠属 <i>Cardaminopsis halleri</i>	21500	法国	Muller 等 <sup>[22]</sup>
	东南景天 <i>Sedum alfredii</i>	4515	中国	杨肖娥等 <sup>[9]</sup>
Cd	遏蓝菜属 <i>Thlaspi caerulescens</i>	1800	美国	Robinson 等 <sup>[23]</sup>
	遏蓝菜属 <i>Thlaspi goesingense</i>	15000	法国	Brook <sup>[18]</sup>
	碎米荠属 <i>Cardaminopsis halleri</i>	281	法国	Muller 等 <sup>[22]</sup>
	凤眼莲 <i>Eichhornia crassipes</i>	4000~9300	中国	郭静等 <sup>[10]</sup>
Ni	宝山堇菜 <i>Viola baoshanensis</i>	1168	中国	刘威等 <sup>[11]</sup>
	叶下珠属 <i>Phyllanthus serpentinus</i>	13700	非洲	Collins <sup>[24]</sup>
Pb	庭荠菜属 <i>Alyssum</i>	10000	美国	Robinson 等 <sup>[25]</sup>
	遏蓝菜属 <i>Thlaspi caerulescens</i>	667	英国	Baker 和 Walker <sup>[17]</sup>
	香蒲属 <i>Typha latifolia</i>	1635	英国	Ye 等 <sup>[26]</sup>
Se	遏蓝菜属 <i>Thlaspi rotundifolium</i>	8200	德国	Baker 和 Walker <sup>[17]</sup>
Mn	黄芪属 <i>Astragalus racemosus</i>	14900	美国	Baker 和 Walker <sup>[17]</sup>
As	串珠藤属 <i>Alyxia rubricaulis</i>	11500	非洲	Brooks 等 <sup>[18]</sup>
	蜈蚣草 <i>Pteris vittata</i>	800	中国	陈同斌等 <sup>[12]</sup>

1000mg/kg, Co、Cu、Ni、Pb 达到 10000mg/kg 以上的植物称为金属超富集植物。目前,世界上共发现 500 多种金属超富集植物<sup>[6]</sup>,主要分布在北美洲、大洋洲和欧洲等发达国家。Ni 的超富集植物最多,有 277 种,多为十字花科(Cruciferae)芸苔属(Brassica)、芸香科(Brassicaceae)遏蓝菜属(Thlaspi)(表 1)植物。如龙新宪等的水培试验发现遏蓝菜属植物是 Zn 和 Cd 的超富集植物,其地上部 Zn、Cd 含量分别达到 36000 mg/kg 和 1140mg/kg(干重)时植物尚未表现中毒症状<sup>[7]</sup>;王松良等发现,在 50 $\mu$ mol/L 的 Cd<sup>2+</sup>胁迫下芸苔属蔬菜地上部 Cd 含量最高可达 658.25mg/kg(干重)而不表现中毒症状<sup>[8]</sup>。

对植物重金属脱毒(Detoxification)的机理研究表明,超富集植物对重金属的耐性主要通过植物吸收的重金属元素与根部多肽类物质形成金属螯合肽(Metallothins, MTs),或与植物组织蛋白质形成植物络合素

(Phytochelatin, PCs), 以及通过心包维管束的分隔化作用 (Vacuolar sequestration) 等 3 种途径达到解毒的目的<sup>[27]</sup>。研究证明, 主要有 4 种生理酶参与植物体内重金属解毒或耐性过程, 即谷胱甘肽合成酶 (Glutathione Synthetase, GS)、谷胱甘肽还原酶 (Glutathione reductase, GR)、 $\gamma$ -谷氨酰半胱氨酸合成酶 ( $\gamma$ -glutamylcysteine synthetase,  $\gamma$ -GCS) 和 ATP-硫酸化酶 (ATP-sulfurylase)<sup>[28,29]</sup>, 它们均与植物体内谷胱甘肽 (Glutathione, GSH) 代谢有关<sup>[28~30]</sup>。因此, 为加速金属超富集植物的筛选和植物修复的田间应用, 辅以遗传工程技术是有益的<sup>[30]</sup>。目前基于遗传工程的土壤重金属污染的植物修复和金属超富集植物的研究进展较快, 已从识别与植物微量元素营养相关的生理学机理 (如蛋白质、酶等), 转到对控制植物吸收、转化重金属的限速酶基因的克隆和转化上。如 Misra 和 Gedamu 首次成功地将克隆了的植物抗重金属基因 MT 转移到烟草细胞中, 得到了转基因细胞系<sup>[31]</sup>; Evans 等从豌豆中分离到一个抗重金属基因 PsMT<sub>A</sub><sup>[32]</sup>; Robinson 从同一作物中分离到 2 个重金属抗性基因 PsMT<sub>B</sub> 和 PsMT<sub>C</sub><sup>[33]</sup>。表 2 列出了目前已克隆或成功转入其他目标植物并得以表达的与植物对重金属吸收、转化有关的基因。王松良 (2004) 从芸苔属蔬菜中克隆了在植物 Cd 脱毒的生化代谢中起限速作用的半胱氨酸合成酶基因保守序列。

表 2 提高植物对重金属的富集和耐性的基因克隆  
Tab.2 Altered metal tolerance/uptake in transgenic plants

基因名称 Genes	来源 Host plants	目标植物 Target plants	效果 Expressing effects	文献来源 Original documents
MT-1	豌豆 <i>Pisum sativum</i>	烟草 <i>Nicotian tabacum</i>	Cd 抗性提高	Yeagan 等 <sup>[34]</sup>
PsMT <sub>A</sub>	豌豆 <i>Pisum sativum</i>	拟南芥 <i>A. thaliana</i>	Cu 富集能力提高	Evans 等 <sup>[32]</sup>
Fe <sup>3+</sup> 还原酶	拟南芥 <i>Arabidopsis thaliana</i>	烟草 <i>N. tabacum</i>	Fe <sup>3+</sup> 还原酶活性提高	Samuelsen 等 <sup>[35]</sup>
FRE1 \ FR-E2	拟南芥 <i>A. thaliana</i>	烟草 <i>N. tabacum</i>	抗铁能力提高	Samuelsen 等 <sup>[35]</sup>
Zrt4	遏蓝菜属植物 <i>B. thlaspi</i>	拟南芥 <i>A. thaliana</i>	抗锌能力提高	Guerinot <sup>[36]</sup>
CNGC1	拟南芥 <i>A. thaliana</i>	烟草 <i>N. tabacum</i>	铅耐性提高	Sunkar 等 <sup>[37]</sup>
Cad2	燕麦 <i>Avena fatua</i> L.	拟南芥 <i>A. thaliana</i>	$\gamma$ -GCS 表达能力提高	Clemens 等 <sup>[38]</sup>

### 3 问题与展望

金属超富集植物的不断发现, 使植物修复有望成为降低土壤重金属污染的替代方法。但核心问题是, 这些植物能否容纳足够多的金属元素, 以及通过多少次复种可以有效抽提污染土壤中的金属元素。具体表现为下列 3 个方面: 一是田间应用难度大和效果的不确定性。尽管发现、筛选金属超富集植物的研究已取得进展, 但大多的证据来自于实验室水培试验的结果, 田间实际应用可能存在很多不确定性。因为田间土壤的重金属元素大多处于不溶状态, 植物吸收缓慢。例如, Schnoor 总结了美国几个田间应用植物修复项目, 发现效果各异 (表 3)<sup>[16]</sup>。总之, 植物修复技术基本上还处于试验摸索阶段, 大规模的田间工程应用较少。二是现有的金属超富集植物大部分是野生植物资源, 生长速度慢, 生物量低, 修复时间长。一般野生金属超富集植物的生物量较低, 例如, 尽管 *T. caerulea* 富集重金属能力很强, 但由于其生物量小, 需 13~14a 的连续栽种才能将试验地的重金属含量修复到欧共体规定的临界标准<sup>[29]</sup>; 即使通过施肥可把 *T. caerulea* 的生物量增加 2 倍, 而其地上部 Zn、Cd 含量没有下降, 但修复低于 500mg/kg 的 Zn 污染土地仍需 8.13a<sup>[30]</sup>。一般认为用于修复土壤污染的植物年生物产量应不低于 3t DW/hm<sup>2</sup><sup>[16]</sup>, 如印度芥菜对重金属的富集能力虽不如 *T. caerulea*, 但其生物量至少是前者的 20 倍, 因而印度芥菜在土壤重金属修复上具有更大的潜力。因此, 继续寻找开发生物量大、富集重金属能力强的超富集植物是植物修复技术走向工程应用的首要任务。三是金属超富集植物的农作和植保技术没有形成。此外诸如动物或昆虫取食金属超富集植物后的后果也是植物修复技术应用中应考虑的问题。

表 3 植物修复技术在美国的田间应用及其效果  
Tab.3 Examples for phytoremediation in field practice in USA and their efficiency

应用地点 Applying sites	应用方式 Kinds of phytoremediation	金属超累积植物 Metal hyperaccumulators	重金属 Heavy metals	效果 Effects
Trenton	植物萃取作用	印度芥菜 <i>Brassica Juncea</i>	Pb	把 Pb 控制到标准以下
Dearing, KS	植物钝化作用	白杨 <i>Pupulus .spp.</i>	Pb、Zn、Cd	50% 植物存活 3 年
Whitewood	植物钝化作用	白杨 <i>Pupulus .spp.</i>	As、Cd	95% 的植物死亡
Pennsylvania	植物萃取作用	遏蓝菜属植物 <i>T. caerulea</i>	Zn、Cd	植物吸收迅速, 但修复效果不好
San Francisco	植物挥发作用	芸苔属植物 <i>Brassica .spp.</i>	Se	部分 Se 被吸收并挥发, 但不能完全修复

综上所述,土壤重金属污染的植物修复、金属超富集植物及其遗传工程研究已取得相当的进展,技术开发和田间推广工作也在展开。英国已将多种耐重金属的草本植物商品化。美国《未来学家》杂志曾将“利用植物净化污染土壤”列为全球科技发展十大趋势之一,预示良好的市场前景。据统计,2000年植物修复技术在北美和欧洲将占4亿美元的市场,到2005年美国植物修复的市场将达到25亿美元<sup>[40]</sup>。美国、英国、德国、荷兰等国家已把治理土壤重金属污染问题摆到与大气、水体污染问题同等重要的位置,并从政府高度制定了相关的植物修复计划。英国渔业与食品部专门设立一个工作站,资助有关植物修复用于实践的科研和推广项目。2002年,由美国环保署、国家自然科学基金会和国家国防与能源部联合立项,每年资助220万美元给加利福尼亚大学、华盛顿州立大学、康耐尔大学等7个大学共同致力于植物修复土壤和水体污染物的基础和和应用研究(个人通信)。

在全球性环境和食物安全问题日趋受到关注的今天,土壤重金属污染的植物修复已成为世界科学研究和技术开发的前沿。对此,作者认为我国应加紧着手以下4个方面的基础工作:一是加紧筛选和发现高生物量的野生金属超富集植物。尽管我国幅员广阔,地理地质复杂多样,植物资源丰富。但由于对土壤污染的严重性和治理工作的紧迫性没有足够重视,对金属超富集植物资源的筛选研究较少,可以在田间应用的资源更是缺乏。今后应加大资助力度,加快资源的筛选和发现步伐。二是从现有高生物量的作物种质资源中筛选金属超富集作物。为取得更好的富集和栽培效果,这类植物资源必须有足够的生物量。获得这类植物的可能途径之一是通过常规手段从现有高生物量作物品种中筛选。虽然,国际学术界对能否从现有作物中筛选超富集植物还存在争议<sup>[15,20,39]</sup>,国外也鲜有报道,但作者认为可以作一个有益的尝试,因为作物生物量大、适应于栽培、易于收获、具有可预测的萌发和生理发育特性以及稳定的遗传方式等。作者正在致力于从生长周期短、生物量大的蔬菜资源中筛选潜在的超富集金属基因型,目前已取得初步的进展<sup>[8]</sup>。三是应用遗传工程技术把野生植物的超富集基因转移到现有高生物量的植物(作物)中。遗传工程技术的应用将有助于深入研究植物富集重金属的机理,并有望通过改良遗传特性提高植物对重金属污染物的耐性、富集能力或提高已有超富集植物的生长速率和生物产量。通过遗传工程把已有的野生超富集植物,如把遏蓝菜属(*T. caerulescens*)植物的超富集重金属基因转入生物产量高、生长速度快的同类作物中,从而提高土壤重金属污染的修复效率,已成为国外植物修复研究的热点。四是寻找综合的、可持续的植物修复手段。单一种植某种金属超富集植物,由于受到土壤环境的限制,可能达不到理想的修复效果。利用植物与其根际微生物的互作形成共生修复体系,通过根际微生物提高土壤重金属的可给性(Bioavailability),是值得深入研究的课题。

## 参 考 文 献

- 褚贵新,任 岗.土壤重金属污染的植物修复技术的研究进展.石河子大学学报,2001,5(4):342~346
- 陈怀满,郑春荣,涂 从,等.中国土壤重金属污染现状与防治对策.Ambio,1999,28(2):130~134
- 肖鹏飞,李法云,付宝荣,等.土壤重金属污染及其植物修复研究.辽宁大学学报(自然科学版),2004,31(3):279~283
- 闫晓明,何金柱,苗青松.污染土壤植物修复技术研究进展.中国生态农业学报,2004,12(3):131~133
- 单孝全.土壤的植物修复与超积累植物研究.分析科学学报,2004,20(4):430~433
- 武正华,张宇峰,王晓蓉.土壤重金属污染植物修复及基因技术的应用.农业环境保护,2002,21(1):84~86
- 龙新宪,杨肖娥,倪吾钟.重金属污染土壤修复技术研究的现状与展望.应用生态学报,2003,13(6):757~762
- 王松良,郑金贵.芸苔属蔬菜的Cd富集及其修复土壤Cd污染的潜力.福建农业大学学报,2004,33(1):94~99
- 杨肖娥,龙新宪,倪吾钟,等.东南景天(*Sedum alfredii* H.)——一种新的锌超积累植物.科学通报,2002,47(13):1003~1006
- 郭 静,阮宜纶,林荣忱.水生植物对地热废水净化作用的研究.环境科学学报,1995,15:251~255
- 刘 威,衷文圣,蓝崇钰.宝山堇菜(*Viola baoshanensis*)——一种新的镉富集植物.科学通报,2003,48(19):2046~2049
- 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.科学通报,2002,47(3):207~210
- Escarre J., Lefebvre W., Gruber M., et al. Zinc and cadmium hyperaccumulating by *thlaspi caerulescens* from metalliferous and non-metalliferous site in the Mediteranean area; implications for phytoremediation. New Phytologist, 2000, 145: 429~437
- Salt D.E., Blaylock M., Kumar N.B., et al. Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plant. Biotechnology, 1995, 13: 468~474
- Salt D.E., Smith R.D., Raskin I. Phytoremediation. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1998, 49: 643
- Schnoor J.L. Emerging chemical contaminants. Environmental Science and Technology, 2003, 37(21): 375~388
- Brooks R.R. Copper and cobalt uptake by *haumaniastrum* species. Plant Soil, 1977, 48: 541~544
- Baker A.J.M., Walker P.L. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic element — A review of their distribution, ecology,

- phytochemistry .Biorecovery , 1990 , 1 ;81~126
- 19 Chaney R.L. Plant uptake of inorganic wast constituents . Land Treatment of Hazardous Wastes . Park Ridge , New Jersey : Noyes Date Corp. , 1983 . 50~76 .
- 20 Chaney R.L. , Malik M . , Li Y .M . , *et al.* Phytoremediation of soil metals . Current Opinions in Biotechnology , 1997 , 8 : 279~284
- 21 Karenlampi S . , Schat H . , Vangronsveld J . , *et al.* Genetic engineering in improvement of plant for phytoremediation of metal polluted soils . Environment Pollution , 2000 , 107 ; 225~231
- 22 Dahmani-Muller H . , Oort F.V . , Gelle B . , *et al.* Strategies of heavy metal uptake by three plant species growing near a metal smelter . Environmental Pollution , 2001 , 109 ; 231~238
- 23 Robinson B.H . , Leblanc M . , Petit D . , *et al.* The potential of *Thlaspi caerulescens* for phytoremediation of contaminated soils . Plant and Soil , 1998 , 203 (1) ; 47~56
- 24 Collins C. D. Strategies for minimizing environmental contaminants . Trends in Plants Science , 1999 , 4(2) ; 45
- 25 Robinson B. H. Brooks R.R . ,Howes A.W . ,*et al.* The potential of high-biomass nickel hyperaccumulator *Berkheya coddii* for phytomining and phytoremediation .Journal of Geochemical Exploration , 1997 , 60 ; 115~126
- 26 Ye Z.H . ,Baker A .J.M .Wong M .H . ,*et al.* Zinc , lead and cadmium accumulation and tolerance in *Typha latifolia* as affected by iron plaque on the root surface . Aquatic Botany , 1998 , 61 ; 55~67
- 27 Jemal F . , Didierjean L . , Chrir R . , *et al.* Characterization of cadmium binding peptides from pepper(*Capsicum annuum*) . Plant Science , 1998 , 137 ; 143~154
- 28 Zhu Y.L . ,Pilon-Smits E .A .H ,Alice S . , *et al.* Cadmium tolerance and accumulation in Indian mustard is enhanced by overexpressing  $\gamma$ -glutamylcysteine synthetase . Plant Physiology , 1999 , 121 ; 1169~1177
- 29 Pilon-Smits E .A .H . , Zhu Y .L . ,Sears T . ,*et al.* Overexpressing glutathione reductase in *Brassica juncea* ; Cadmium accumulation and tolerance . Physiologia Plantarum , 2000 , 110 ; 455~460
- 30 McGrath S.P . , Lombi E . , Zhao F.J. What's new about cadmium hyperaccumulation . New Phytologist , 2001 , 149 ; 2~3
- 31 Misra S . , Gedamu L. Heavy metal tolerant transgenic *Brassica napus* L. and *Nicotiana tabacum* L. plants . Theoretical and Applied Genetics , 1989 , 78 ; 161~168
- 32 Evans K. M . , Gatehouse J.A . ,Lindsay W .P . , *et al.* Expression of the pea metallothionein-like gene PsMTA in *Escherichia coli* and *Arabidopsis thaliana* and analysis of trace metal ion accumulation ; implications for PsMTA function .Plant Molecular Biology , 1992 , 20 ; 1019~1028
- 33 Robinson N.J . , Procter C.M . , Connolly E.J . ,*et al.* A ferric-chelate reductase for iron uptake from soils . Nature , 1999 , 397 ; 694~697
- 34 Yeargan R . , Maiti I.B . , Nielsen M.T . , *et al.* Tissue partitioning of cadmium in transgenic tobacco seedlings and field grown plants expressing the mouse metallothionein I gene . Transgenic Research , 1992 , 1 ; 261~267
- 35 Samuelsen A.I . , Martin R.C . ,Mok D. W . S . , *et al.* Expression of the yeast FRE genes in transgenic tobacco . Plant Physiology , 1998 , 118 ; 51~58
- 36 Guerinet M .L. The ZIP family of metal transporters . Biochimica et Biophysica Acta , 2000 , 1465 ; 190~198
- 37 Sunkar R . , Kaplan B . , Bouche N . , *et al.* Expression of a truncated tobacco NtCBP4 channel in transgenic plants and disruption of homologous *Arabidopsis* CNGC1 gene confer  $Pb^{2+}$  tolerance . The Plant Journal , 2000 , 24(4) ; 533~542
- 38 Clemens S . , Kimm E.J . , Neumann D . ,*et al.* Tolerance to toxic metals by a gene family of phytochelatin syntheses from plants and yeast . The EMBO Journal , 1999 , 18(12) ; 3325~3333
- 39 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 crops . Resources , Conservation and Recycling , 1994 , 11 ; 41~49
- 40 Glass D.J. Economic potential of phytoremediation . Phytoremediation of Toxic Matels ; Using Plants to Clean-up the Environment . New York : John Willey & Sons , 2000 . 15~31