

汞污染土壤植物修复中转基因技术的应用^{*}

崔丽巍^{1,2} 冯新斌^{1**}

(¹ 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 汞是一种全球性污染物。随着工业的发展、汞矿开采的加速, 土壤汞污染日益严峻, 给生态环境和人类生活带来了严重的威胁。因此, 汞污染土壤的修复问题受到了广大学者的关注。针对受污染的土壤修复问题, 植物修复技术具有成本低和不会给环境带来新的危害等特点。本文对目前国内外汞污染土壤修复植物修复技术的研究进行了综述, 介绍了转基因技术在汞污染土壤中的应用, 探讨了转基因技术在环境治理和环境修复中潜在的应用价值。

关键词 汞污染土壤; 植物修复; 转基因技术

中图分类号 X131.3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2011)5-0883-06

Transgenic technology used for phytoremediation of mercury contaminated soil: A review. CUI Li-wei^{1,2}, FENG Xin-bin^{1**} (¹ State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; ² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30** (5): 883–888.

Abstract: Mercury (Hg) is considered as a global extreme destructive pollutant. Now, the problem of contaminated soil was more and more serious because of industry development and mercury mine exploitation, which took painful results not only to environment, but also to mankind. So, this problem has been concerned by many scientists. Phytoremediation of mercury-contaminated soil had many advantages, including low cost and environment-friendly. This paper introduced the technology of phytoremediation in mercury contaminated sites, especially, the application of transgenic technology in mercury contaminated soil. The significance of transgenic technology in mercury contaminated soil was also discussed.

Key words: mercury contaminated soil; phytoremediation; transgenic technology.

汞是具有强烈毒性的重金属污染物之一。近年, 土壤中汞含量逐年增高, 并且此种污染是一个不可逆的过程(李怒云和龙怀玉, 2000)。由于人类的工业农业活动的影响, 进入大气、水体、土壤的汞, 造成了对环境的破坏。有机汞农药的大量施用, 是农田土壤含汞量剧增的主要原因; 同时, 受矿山活动的影响, 矿区土壤汞污染问题十分严峻。调查结果显示, 土壤汞污染所带来的问题已经对水体和农作物造成了严重威胁(Horvat *et al.*, 2003; Qiu *et al.*, 2005)。汞在土壤中停留时间长, 微生物和植物不能直接对其进行降解, 而且还会对作物、农产品及地下水产生二次污染(黄昌勇, 2002)。进入土壤中的

无机汞, 在硫酸盐还原菌作用下, 转化为甲基汞, 通过食物链产生生物放大效应而直接危害到人类健康(刘平等, 2007)。Nriagu 和 Pacyna 等(1988)统计, 全球每年释放到环境中的有毒重金属高达数百万吨, 其中 Hg 为 1.2 万 t。到 2002 年, 汞的排放量达到 1.5 万 t(郑喜坤等, 2002)。短短的十几年内, 汞的排放量剧增。而在一些发展中国家, 如印度和中国(Cheng, 2003; Meharg, 2004), 土壤汞污染变得日趋严重。因此, 汞污染土壤的治理引起了各国学者的关注, 这也是国际学术界所面临的具有挑战性的问题之一。

对土壤汞污染的治理的方法, 目前常用的有客土法、淋滤法、吸附固定法等物理方法(王庆仁等, 2001), 以及通过物理化学方法固定和提取等技术。

^{*} 国家自然科学基金项目(40773067)资助。

^{**} 通讯作者 E-mail: qiuguangle@vip.skleg.cn

收稿日期: 2010-10-28 接受日期: 2011-03-02

但是这些方法费用昂贵,治理效率低,同时破坏了土壤的原有生物环境(Rausser,1995)。因此,在20世纪80年代,植物修复技术受到广泛关注,为重金属污染土壤的治理提供了较大的发展空间(Barceló & Poschenrieder,2003)。

1 植物修复的概念和研究动态

植物修复是指将某种特定的植物种植在受污染的土壤中,利用植物特有的吸收、降解、挥发、根滤、稳定等作用机理,植物从环境中富集或者吸收某种污染物,而维持正常的代谢活动,不对自身产生毒害作用。以去除土壤、水体中污染物,或使污染物固定,或使污染物转化为毒性较小的化学状态以减轻对环境的危害为目的,最终达到净化环境的目的(Aikorta *et al.*,2004)。近年来,植物修复技术得到了广泛的应用,其费用低廉、不破坏场地结构、不会对地下水造成二次污染、而且能对环境起到美化作用,因此,此项修复技术具有较大的应用价值和发展前景(房妮,2008)。植物修复技术主要包括:植物提取(phytoextraction)、植物挥发(phytovolatilization)、根际过滤(rhizofiltration)和植物固定(phytostabilization)等方法(Krämer & Chardonens,2001)。

自从20世纪80年代,植物修复概念的提出,植物修复技术在重金属污染土壤修复中得到了广泛的应用(蒋先军等,2000)。超积累植物一直以来都是应用于植物修复的理想植物。国内外有关超积累植物的报道很多(韦朝阳和陈同斌,2001;Chandra *et al.*,2005)。植物提取、植物挥发、根际过滤等技术,在很大程度上,都是依赖超积累植物来实现的(吴双桃等,2004;宗良纲,2005)。Jaffré等(1976)在新喀里多尼亚发现了对Ni、Co和Mn的超富集植物,此类植物体富集Ni、Co和Mn的浓度竟高出几倍,在其外层皮汁液中,Ni的含量高达其干重的25%。目前,如何提高超积累植物的提取效率是研究重点,例如可以通过改进农业措施,包括添加有机配体、施用肥料等等,来筛选和寻找超积累植物(宗良纲等,2005)。Ebbs等(1997)发现,多种类型油菜例如野芥菜、甘蓝型油菜、芥菜型油菜对Cd、Cu和Zn具有超积累能力,同时也发现这些植物在受污染的土壤中,对Zn的吸收具有较高的效率。然而,不同品种的超积累植物及其生长条件的不同,植物吸收的重金属的种类不同,在植物体内,重金属离子的吸收和运输机制也不同,主要取决于超积累植物的遗传、形

态、生理及其解剖学上的特性(Lone *et al.*,2008)。

然而,重金属超积累富集体植物是在重金属胁迫条件下生长的,在长期的环境诱导下,易产生突变体,且常常会受到周围杂草的胁迫(魏树和等,2003)。其次,超积累植物大多数为野生型稀有植物,其生长条件苛刻,生长状况易受环境影响,因而引种受到限制。因此,随着分子生物学和基因工程的发展,近些年,通过转基因技术对重金属污染的土壤进行植物修复已经成为发展的主题,具有较大的发展前景(赵丽红等,2004)。

2 转基因技术在汞污染土壤植物修复中的应用

2.1 植物修复中转基因技术基本原理

Silver等(1996)提出了利用基因工程和分子生物学手段设计超积累植物的基本原理。首先,通过分子生物学手段找到超积累植物,研究植物体内的超积累控制基因和机制;其次,在植物体内提取这些具有特殊功能的基因,将其连接到植物表达载体上,然后转化到特定的细胞或者植物体内,使其具有遗传和生物学特性;最后,将转基因植物进行大规模田间试验,来验证转基因植物对环境的影响,是否能对特定的重金属具有超积累现象(Silver,1996;Krämer,2005)。

利用转基因技术获得对重金属具有超积累或者具有耐性的植物,成功的关键在于外源基因在植物体内的高效表达(Stomp *et al.*,1994)。因此,在汞污染土壤植物修复中,获得对汞的吸收、转运、络合及耐性基因,是此项修复技术成功的关键。近些年,现代分子遗传学和分子生物学的发展,为上述问题提供了良好的基础。

目前,转基因技术应用在植物修复方面,显示出了较大的发展空间(表1)。例如,Cobbett(2000)报道PCs和MTs中都具有巯醇基(-SH)能与金属离子结合形成疏态复合物,通过转基因技术将人工合成的PCs或者其同源蛋白在耐重金属生物体内表达,可以提高重金属污染物的生物去除效率(Zenk,1996)。Gisbert等(2003)将小麦的络合素基因转入烟草中,获得的转基因烟草积累Pb的量是非转基因烟草2倍。Kärenlampi等(2000)将动物体内的MTs转入拟南芥中,获得的转基因拟南芥对Cu的吸收能力大大提高了。但是,目前对PCs在细胞内外的合成和作用机制还尚不清楚,尤其是PCs与重金属螯合物是否在生物体内安全转化等问题有待研究。

表 1 转基因技术在植物修复方面的应用

Table 1 Transgenic technology used for phytoremediation

植株	基因	修复作用	参考文献
拟南芥	<i>merA</i> 、 <i>merB</i> 基因	耐汞能力提高了近 50 倍	Rugh <i>et al.</i> ,1996
黄杨	<i>merA</i> 基因	汞的挥发能力提高了 10 倍	Rugh <i>et al.</i> ,1998
印度芥菜	γ -谷氨酰半胱氨酸合成酶基因(<i>gsh I</i> 、 <i>gsh II</i>)	积累更多的 Cd ²⁺	Zhu <i>et al.</i> ,1999
烟草	NiCB P4 基因	对必需元素镍有更高耐受性	Arazi <i>et al.</i> ,1999
番茄	ACC 脱氨基酶	对镉、铜富集分别提高了 5 倍	Varvara <i>et al.</i> ,2000
拟南芥	金属硫蛋白(MTs)	对镉、铜等增加了吸收	Kärenlampi <i>et al.</i> ,2000
印度芥菜	ATP 硫酸化酶	对 12 种重金属积累吸收加强	Wangeline <i>et al.</i> ,2004
烟草	细菌磷酸盐激酶基因(<i>ppk</i>)	对汞的吸收加强	Takeshi <i>et al.</i> ,2006
烟草	<i>merA</i> 、 <i>merB</i> 基因	对汞的积累增加了 100 倍(叶绿体转化)	Hussein <i>et al.</i> ,2007
拟南芥	汞离子结合蛋白(MerP)	对汞的抗性、吸收加强	Hsieh <i>et al.</i> ,2009

2.2 汞污染土壤转基因技术的应用

2.2.1 与汞代谢相关基因 *merA* 和 *merB* 研究发现,单质汞(Hg⁰)容易在空气中挥发,因此,可以利用转基因技术,通过植物体的吸收作用,受污染土壤中的汞被植物所吸收,在植物体内转运,最终通过植物体的蒸腾作用进行挥发,从而达到对土壤的净化。

merA、*merB* 是从细菌中克隆的 2 种基因,二者都与 Hg 的转运有关。*merB* 基因编码有机汞裂解酶,能将有机汞还原为毒性小的挥发性 Hg²⁺,*merA* 基因编码 Hg 离子还原酶,可以将 Hg²⁺ 进一步还原为 Hg 原子(Bizily *et al.* ,1999)。在拟南芥体内单独表达 *merB* 基因,对有机汞的耐受能力和体内 Hg²⁺ 累积量增加(Bizily *et al.* ,1999)。由于单独表达 *merA*、*merB* 基因,并不能达到预期的效果,因此,Meagher(2000)构建了含有 *merA* 和 *merB* 基因的植物表达载体,当这 2 种基因同时表达时,转基因后代植株可以使甲基汞还原成单质汞挥发到空气当中。同时发现,与非转基因拟南芥相比,转基因拟南芥对汞的耐受能力提高了近 50 倍(Rugh *et al.* ,1996; Heaton *et al.* ,1998)。在其他植物体内,表达 *merA*、*merB* 基因,也获得较好的效果。Rugh 等(1998)报道,将 *merA* 基因转入到北美鹅掌楸(*Liriodendron tulipifera*)中,获得的转基因树木能在 Hg 含量高达 500 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土壤中正常生长,具有较强的耐受性,同时与非转基因此树木相比,Hg 的挥发能力提高了 10 倍。

2.2.2 汞的运载体(MerT) 最理想的植物修复过程,表现在植物体不仅仅对重金属有耐受性和超积累现象,而且还应该有相当高的生物量(McGrath & Zhao,2003)。

Nagata 等(2010)报道,在烟草中表达由细菌多

聚磷酸盐激酶(*ppk*)编码的多聚磷酸盐激酶基因(*polyP*),转基因烟草可以从受汞污染的土壤中吸取 Hg²⁺,同时,不会向大气中排放汞蒸气,并且阻止了烟草受到汞的毒害。表达金属运载体还可以提高对金属的吸收,因而可以缩短纯化时间。基于以上实验结果,Nagata 等(2009)研究表明,利用基因工程手段,同时构建含有汞运载体(MerT)和过表达超积累汞的多聚磷酸盐激酶基因(*polyP*)的表达载体,通过转化烟草,获得的转基因烟草,不仅对汞的吸收加强,而且体内对汞的积累也大大加强。利用此项技术,可以在短时间内就可以对汞污染的土壤进行修复,与野生型烟草相比,转基因烟草对汞的耐受性及对汞的吸收量大大增加了。因此,利用转基因植物表达汞运载体基因,对汞污染土壤进行植物修复具有深远意义。

2.3 转基因技术在汞污染土壤修复中的常见问题及解决办法

利用转基因技术进行汞污染土壤修复,是复杂而且具有挑战性的修复技术。获得能高效吸收土壤中汞的外源基因,同时对汞污染土壤有较程度的改善,这是转基因技术能否得到广泛应用的前提。此外,在利用此项技术的同时,必然会产生很多转基因植物。转基因植物是否会给生态环境带来潜在的威胁,也是必须考虑的问题。

2.3.1 植物修复转基因技术的研究方法 在自然界中,存在许多对汞超富集及吸收的体系。一般来讲,微生物和对汞的吸收、积累达到一定程度的植物体系,是获取植物修复基因的主要基因源(姚斌等,2005)。理论上讲,凡是能参与汞的吸收、转运、转化、隔离、络合及挥发等过程的基因都可作为目的基因,在超积累植物或具有高生物量的植物体中进行

表达,从而对汞污染土壤进行修复(宗良纲等,2005)。但是,提取外源基因,并向植物体内导入外源基因是一个较复杂的过程。首先,一些外源基因的特性由许多基因共同控制,目前只有单一功能基因被转化到植物体内,对汞污染土壤进行修复(Rugh *et al.*,1998)。其次,每种基因都有其特定的分子机制,获得具有高富集或者抗性的植物,才适合于对污染的土壤修复。

获得高效表达的外源基因,是转基因植物修复汞污染土壤的前提。通常先识别出对汞具有高积累或者抗性的生物,通过分子生物学手段,获得功能基因片段,然后将基因整合到特定的表达载体上,并在受体细胞中表达,使受体细胞具有新的遗传学功能。然后进行大规模的田间试验(Kärenlampi *et al.*,2000;姚斌等,2005)。

2.3.2 转基因植物对环境的影响 在利用转基因植物对污染土壤修复的同时,必须考虑转基因植物能否会给生态环境和人类带来潜在的威胁。转基因植物的生物安全性问题,是决定转基因植物是否商业化的主要因素。因此,获得良好性状的转基因植物,对汞污染土壤进行修复,必须处理好以下问题:1)利用无害的筛选标记基因;剔除转基因植物中选择标记基因;利用无选择标记基因的转化系统。2)为了防止转基因植物的外源基因向非转基因植物或杂草逃逸,消除人们对转基因植物的担忧,可以利用“外源基因清除”技术(gene-deletor),根据人的意愿将果实、种子、叶片等器官或者整个植株的外源基因清除(Luo *et al.*,2007;安新民等,2010)。3)加快对超积累汞植物的研究,以开发和完善转基因植物对汞污染土壤的修复。

3 我国汞污染土壤植物修复研究近况

由于汞的特殊理化性质,汞污染的土壤对环境和人类带来了较严重的危害性,汞污染治理越来越受到人们关注。我国学者在利用转基因技术对汞污染土壤进行植物修复方面取得了一些成果。He等(2001)将人工改造后的 *merA* 的基因转入烟草,获得的转基因烟草对汞的吸收增加了5~8倍。田吉林等(2002)将 *merB* 基因进行改造后,通过农杆菌介导转入烟草中,转基因烟草后代对汞表现出较强的抗性,此项研究对培育抗汞烟草,对汞污染土壤进行植物修复提供了依据。

在研究转基因技术的同时,对植物体本身对汞

的吸收机理研究极为重要。大量研究表明,树木对汞具有富集行为。加拿大杨(*Populus canadensis*)和红树(*Rhizophora apiculata*)等树木对土壤中汞的吸收及富集能力较强,加拿大杨在汞污染土壤中,植物体内吸收和富集汞的能力是对照树木的130倍(林治庆和黄会一,1989;陈荣华和林鹏,1989;刘平等,2007)。龙育堂等(1994)对汞污染的稻田改种苧麻和用氯化汞处理土壤盆栽苧麻试验,改种苧麻后,土壤汞的年净化率高达41%,土壤的自净恢复年限比种植水稻缩短8.5倍。田吉林等(2004)研究发现,大米草(*Spartina anglica*)有较强的抗汞性,因此利用氯化甲基汞处理大米草,大米草可以吸收有机汞,能将有机汞转化为无机汞,具有修复土壤的潜力。王建旭等(2010)将硫代硫酸铵添加到汞污染土壤中,种植的印度芥菜根、茎、叶片含汞量提高了2倍,而且土壤渗滤液中汞浓度也增加了。因此,添加硫代硫酸铵能提高汞污染土壤植物修复效率。

4 展 望

利用转基因技术对汞污染土壤进行植物修复,无论从技术上还是经济效益上,都是具有开发价值的研究,它为汞污染土壤的修复提供了广阔的发展空间。目前,人们对转基因植物尤其是基因逃逸存在的风险争议颇多,但是用于植物修复的转基因植物,其基因逃逸的优势很小或者没有。因此,不必担心转基因植物会对环境造成影响(姚斌等,2005)。目前,国内对汞污染土壤的植物修复技术已取得了一定进展,但转基因技术的应用刚刚起步,尤其是对汞超积累基因的研究和植物的汞毒性及其抗性基因报道很少,这使转基因技术在植物修复中的发展受到了限制。今后的工作重点应集中在植物超富集汞基因的研究和植物耐受汞的关键基因的探究。通过对这些基因的鉴定、分离、克隆,以便利用基因工程方法获得超积累汞植物和对汞耐受的植物。因此,我们还应该结合土壤学,环境化学,植物生理学,植物基因工程等相关交叉学科,这不仅对研究超积累汞基因植物机理奠定良好的基础,同时对环境的良性循环做出了正确的判断。

参考文献

- 安新民,荆艳萍,刘军梅,等.2010.一种消除转基因植物潜在风险的新技术.中国生物工程杂志,30(2):115-119.

- 陈荣华, 林 鹏. 1989. 红树幼苗对汞的吸收和净化. 环境科学学报, **9**(2): 218–221.
- 房 妮. 2008. 重金属污染土壤植物修复研究进展. 河北农业科学, **12**(7): 212–220.
- 黄昌勇. 2000. 土壤学. 北京: 中国农业出版社.
- 蒋先军, 骆永明, 赵其国, 等. 2000. 重金属污染土壤的植物修复研究. I. 金属富集植物 *Brassica juncea* 对 Cu、Zn、Cd、Pb 污染的响应. 土壤, (2): 71–74.
- 林治庆, 黄会一. 1989. 木本植物对汞耐性的研究. 生态学报, **9**(4): 315–319.
- 李怒云, 龙怀玉. 2000. 植树造林与 21 世纪我国盐渍土开发利用的关系. 北京林业大学学报, **22**(3): 99–100.
- 刘 平, 仇广乐, 商立海. 2007. 汞污染土壤植物修复技术研究进展. 生态学杂志, **26**(6): 933–937.
- 龙育堂, 刘世凡, 熊建平. 1994. 苎麻对稻田土壤汞净化效果研究. 农业环境保护, **13**(1): 30–33.
- 田吉林, 沈瑞娟, 何玉科. 2002. *merB* 基因的序列修饰及转基因烟草对有机汞的高抗作用. 科学通报, **47**(23): 1815–1819.
- 田吉林, 诸海焘, 杨玉爱, 等. 2004. 大米草对有机汞的耐性、吸收及转化. 植物生理与分子生物学报, **30**(5): 577–582.
- 王建旭, 冯新斌, 商立海, 等. 2010. 添加硫代硫酸铵对植物修复汞污染土壤的影响. 生态学报, **29**(10): 1998–2002.
- 王庆仁, 崔岩山, 董艺婷. 2001. 植物修复——重金属污染土壤整治有效途径. 生态学报, **21**(2): 326–331.
- 韦朝阳, 陈同斌. 2001. 重金属超富集植物及植物修复技术研究进展. 生态学报, **21**(7): 1196–1203.
- 吴双桃, 吴晓芙, 胡日利, 等. 2004. 铅锌冶炼厂土壤污染及重金属富集植物的研究. 生态环境, **13**(2): 156–157.
- 魏树和, 周启星, 王 新. 2003. 18 种杂草对重金属的超积累特性研究. 应用基础与工程科学学报, **2**(11): 152–160.
- 姚 斌, 尚 鹤, 韩景军, 等. 2005. 重金属及有机污染土壤转基因植物修复研究进展. 林业科学, **41**(4): 162–167.
- 赵丽红, 扬宝玉, 吴礼树, 等. 2004. 重金属污染的转基因植物修复: 原理与应用. 中国生物工程杂志, **24**(6): 68–73.
- 郑喜坤, 鲁安怀, 高 翔, 等. 2002. 土壤中重金属污染现状与防治方法. 土壤与环境, **11**(1): 79–84.
- 宗良纲, 李义纯, 张丽娜. 2005. 土壤重金属污染的植物修复中转基因技术的应用. 生态环境, **14**(6): 976–980.
- Aikorta I, Hernandez-allica J, Becerril JM, et al. 2004. Recent findings on the phytoremediation of soils contaminated with environmentally toxic heavy metals and metalloids such as zinc, cadmium, lead, and arsenic. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, **3**: 71–90.
- Arazi T, Sunkar R, Kaplan B, et al. 1999. A tobacco plasma membrane calmodulin-binding transporter confers Ni^{2+} tolerance and Pb^{2+} hypersensitivity in transgenic plants. *The Plant Journal*, **20**: 171–182.
- Barceló J, Poschenrieder C. 2003. Phytoremediation: Principles and perspectives. *Contributions to Science*, **2**: 333–344.
- Bizily SP, Rugh CL, Summers AO, et al. 1999. Phytoremediation of methylmercury pollution: *merB* expression in *Arabidopsis thaliana* confers resistance to organomercurials. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **96**: 6808–6813.
- Chandra SK, Kamala CT, Chary NS, et al. 2005. Potential of *Hemidesmus indicus* for phytoextraction of lead from industrially contaminated soils. *Chemosphere*, **58**: 507–514.
- Cheng S. 2003. Heavy metal pollution in China: Origin, pattern and control. *Environmental Science and Pollution Research*, **10**: 192–198.
- Cobbett CS. 2000. Phytochelatins and their roles in heavy metal detoxification. *Plant Physiology*, **123**: 825–832.
- Ebbs SD, Lasat MM, Brady DJ, et al. 1997. Phytoextraction of cadmium and zinc from a contaminated soil. *Environmental Quality*, **26**: 1424–1430.
- Gisbert C, Ros R, de Haro A, et al. 2003. A plant genetically modified that accumulates Pb is especially promising for phytoremediation. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, **303**: 440–445.
- He YK, Sun JG, Feng XZ, et al. 2001. Differential mercury volatilization by tobacco organs expressing a modified bacterial *merA* gene. *Cell Research*, **11**: 231–236.
- Heaton ACP, Rugh CL, Wang NJ, et al. 1998. Phytoremediation of mercury and methylmercury polluted soils using genetically engineered plants. *Journal of Soil Contamination*, **7**: 497–509.
- Horvat M, Nolde N, Fajon V, et al. 2003. Total mercury, methylmercury and selenium in mercury polluted areas in the province Guizhou, China. *Science of the Total Environment*, **304**: 231–256.
- Hsieh JL, Chen CY, Chiu MH, et al. 2009. Expressing a bacterial mercuric ion binding protein in plant for phytoremediation of heavy metals. *Journal of Hazardous Materials*, **161**: 920–925.
- Hussein HS, Ruiz ON, Terry N, et al. 2007. Phytoremediation of mercury and organomercurials in chloroplast transgenic plants: Enhanced root uptake, translocation to shoots and volatilization. *Environmental Science and Technology*, **41**: 8439–8446.
- Jaffré T, Brooks RR, Lee J, et al. 1976. *Sebertia acuminata*: A hyperaccumulator of nickel from New Caledonia. *Science*, **193**: 579–580.
- Kärenlampi S, Schat H, Vangronsveld J, et al. 2000. Genetic engineering in the improvement of plants for phytoremediation of metal polluted soil. *Environmental Pollution*, **107**: 225–231.
- Krämer U. 2005. Phytoremediation: Novel approaches to cleaning up polluted soils. *Current Opinion in Biotechnology*, **16**: 133–141.
- Krämer U, Chardonnens AN. 2001. The use of transgenic

- plants in the bioremediation of soils contaminated with trace elements. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **55**: 661–672.
- Lone MI, He ZL, Stoffella PJ, *et al.* 2008. Phytoremediation of heavy metal polluted soils and water: Progresses and perspectives. *Journal of Zhejiang University Science B*, **9**: 210–220.
- Luo K, Duan H, Zhao DG, *et al.* 2007. ‘GM-gene-deletor’: Fused loxP-FRT recognition sequences dramatically improve the efficiency of FLP or CRE recombinase on transgene excision from pollen and seed of tobacco plants. *Plant Biotechnology Journal*, **5**: 263–274.
- McGrath SP, Zhao FJ. 2003. Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils. *Biotechnology*, **75**: 1–56.
- Meagher RB. 2000. Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants. *Current Opinion in Plant Biology*, **3**: 153–162.
- Meharg AA. 2004. Arsenic in rice: Understanding a new disaster for South-East Asia. *Trends in Plant Science*, **9**: 415–417.
- Nagata T, Morita H, Akizawa T, *et al.* 2010. Development of a transgenic tobacco plant for phytoremediation of methylmercury pollution. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **72**: 777–782.
- Nagata T, Nakamura A, Akizawa T, *et al.* 2009. Genetic engineering of transgenic tobacco for enhanced uptake and bioaccumulation of mercury. *Biological and Pharmaceutical Bulletin*, **32**: 1491–1495.
- Nriagu JO, Pacyna JM. 1988. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soil by trace metals. *Nature*, **333**: 134–139.
- Qiu GL, Feng XB, Wang SF, *et al.* 2005. Mercury and methylmercury in riparian soil, sediments, mine-waste calcines, and moss from abandoned Hg mines in east Guizhou province, southwestern China. *Applied Geochemistry*, **20**: 627–638.
- Rausser WE. 1995. Phytochelatins and related peptides: Structure, biosynthesis and function. *Plant Physiology*, **109**: 1141–1149.
- Rugh CL, Wilde HD, Stack NM, *et al.* 1996. Mercuric ion reduction and resistance in transgenic *Arabidopsis thaliana* plants expressing a modified bacterial merA gene. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **93**: 3182–3187.
- Rugh CL, Senecoff JF, Meager RB, *et al.* 1998. Development of transgenic yellow poplar for mercury phytoremediation. *Nature Biotechnology*, **16**: 925–928.
- Silver S. 1996. Bacterial resistances to toxic metal ions: A review. *Gene*, **179**: 9–11.
- Stomp AM, Han KH, Wilbert S, *et al.* 1994. Genetic strategies for enhancing phytoremediation. *Annals of the New York Academy of Sciences*, **721**: 481–491.
- Takeshi N, Hirofumi M, Toshifumi A, *et al.* 2006. Development of a transgenic tobacco plant for phytoremediation of methylmercury pollution. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **72**: 777–782.
- Varvara PG, Filby B, Glick BR. 2000. Increased ability of transgenic plants expressing the bacterial enzyme ACC deaminase to accumulate Cd, Co, Cu, Ni, Pb and Zn. *Journal of Biotechnology*, **81**: 45–53.
- Wangeline AL, Burkhead JL, Hale KL, *et al.* 2004. Overexpression of ATP sulfurylase in Indian mustard: Effects on tolerance and accumulation of twelve metals. *Journal of Environmental Quality*, **33**: 54–57.
- Zenk MH. 1996. Heavy metal detoxification in higher plants: A review. *Gene*, **179**: 21–30.
- Zhu YL, Pilon-Smits EA, Tarun AS, *et al.* 1999. Cadmium tolerance and accumulation in Indian mustard is enhanced by overexpressing γ -glutamylcysteine synthetase. *Plant Physiology*, **121**: 1169–1178.

作者简介 崔丽巍,女,1983年生,博士研究生,主要从事汞污染土壤植物修复方面的研究。E-mail: liweicui@yahoo.com.cn

责任编辑 魏中青
