

# 超富集植物治理重金属污染土壤研究进展

刘小梅<sup>1</sup>, 吴启堂<sup>2</sup>, 李秉滔<sup>1</sup>

(1. 华南农业大学林学院, 广东 广州 510642; 2. 华南农业大学资源与环境学院, 广东 广州 510642)

**摘要:** 就国内外植物修复技术领域的研究进展作了综述, 阐述了迄今报道的超富集植物、超富集植物吸收重金属生理机制、研究动态与前景。

**关键词:** 植物修复; 超富集植物; 重金属污染土壤

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 1672 – 2043(2003)05 – 0636 – 05

## Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soil by Hyper – Accumulators: A Review of Researches in China and Abroad

LIU Xiao-mei<sup>1</sup>, WU Qi-tang<sup>2</sup>, LI Ping-tao<sup>1</sup>

(1. College of Forestry, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. College of Natural Resources and Environmental Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** Phytoremediation is a promising technique for treatment of heavy metal contaminated soil. Hyper – accumulator and phytoremediation are research hotspots in many fields such as environmental science, plant science, soil science and ecology science now. There are reports about utilization of hyper – accumulators capable of accumulating heavy metals such as Co, Cu, Ni, Pb, Mn, Zn, Cd, Cr, Se. This paper reviews the studies on this field in China and abroad, with special focuses on hyper – accumulators, their mechanism of hyperaccumulating heavy metals and the possible applications.

**Keywords:** hyper – accumulator; phyto – remediation; heavy metal contaminated soils

土壤污染是当今面临的一个重要环境问题, 常规的污染土壤修复方法, 如客土换土法、淋洗法、热处理、固化、动电修复法等, 由于其技术要求高或经济成本昂贵、对土壤结构破坏严重等原因, 因而大规模推广存在许多问题<sup>[1]</sup>。超富集植物的发现和利用, 为土壤修复开辟了新的途径。由于它具有投资和维护成本低、操作简便、不造成二次污染、具有双重经济效益等特点, 因而越来越受到各国政府、科技界和企业界的高度重视和青睐<sup>[2]</sup>, 并广泛应用于土壤、水体、污泥的修复处理。

超富集植物 (Hyperaccumulator) 是能超量吸收重金属并能将其运移到地上部的植物。通常, 超富集植物的界定主要考虑以下两个因素: 植物地上部富集的重金属达到一定的量; 植物地上部的重金属含量高于根部。目前采用较多的是 Baker 和 Brooks 1983 年提出的参考值, 即把植物叶片部分或地上部分 (干重) 中含 Cd 达到  $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 含 Co、Cu、Ni、Pb 达到  $1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 含 Mn、Zn 达到  $10000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  以上的植物称为超

富集植物<sup>[3]</sup>。

## 1 超富集植物的概念与发展

1583 年意大利植物学家 Cesalpino 首次发现在意大利托斯卡纳“黑色的岩石”上生长的特殊植物, 这是有关超富集植物 (Hyperaccumulator) 的最早报道。1814 年, Desvaux 将其命名为 *Alyssum bertolonii*, 1848 年 Minguzzi 和 Vergnano 首次测定该植物的叶片中富含 Ni 达  $7900 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[4]</sup>。1977 年, Brooks 提出了超富集植物的概念<sup>[5]</sup>; 1983 年, Chaney 提出了利用超富集植物清除土壤中重金属污染的思想<sup>[6]</sup>, 即植物修复。英国 Sheffield 大学 Baker 博士是介绍植物修复概念的首批科学家之一, 提出超富集植物具有清洁金属污染土壤和实现金属生物回收的实际可能性, 这种植物具有与一般植物不同的生理特性<sup>[3]</sup>。在工业废物或污泥使用而引起的重金属污染土壤上, 连续种植几茬超富集植物, 就能去除土壤中的 (有毒) 重金属, 特别是生物有效性部分, 从而复垦和利用被重金属污染的土壤<sup>[7]</sup>, 也就是我们现在常说的植物修复。植物修复 (Phytoremediation) 是指将某种特定的植物种在重金属污染的土壤上, 而该种植物对土壤中的污染元素有特殊的吸收和吸附能力, 将植物收获并进行妥善处理 (如灰化回收) 后即可将该种重金属移出土壤, 达到污染治理与生态修复的目的<sup>[8]</sup>。

收稿日期: 2002 – 10 – 02

基金项目: 863 项目 (2001AA645010 – 3); 广东省自然科学基金 (021007)

作者简介: 刘小梅 (1976—), 女, 湖北人, 在读博士研究生, 从事植物修复方向的研究。E – mail: liuxmei@163.net

植物修复概念早期验证是在英国小规模田间实验中进行的,多种超富集植物种植在曾多年施用富含重金属的工业污泥实验地上。示范性实验表明十字花科遏蓝菜属植物遏蓝菜 (*Thlaspi carulescens*) 具有很大的吸收 Zn、Cd 的潜力<sup>[9]</sup>。这种植物是一种可在富含 Zn、Pb、Cd 和 Ni 的土壤上生长的野生草本植物。近 5 a, 各国科学家们对利用这种植物修复 Zn、Pb、Cd 和 Ni 污染的土壤表现出浓厚的兴趣。欧洲、美国、澳大利亚和东南亚一些国家都启动了包括这种植物在内的超富集植物积累重金属生理生化机理、重金属吸收效率和农艺管理等方面的研究项目。遏蓝菜 (*Thlaspi carulescens*) 已经成为当前国际上开展重大相关研究项目时经常被选择的研究材料。

目前,世界上已经发现 Cd、Co、Cu、Ni、Pb、Mn、Zn 超富集植物 400 多种,其中 73% 为 Ni 的超富集植物<sup>[10]</sup>。它们分布在世界少数几个地区,可能有更多的分布于世界各地的超富集植物尚待发现。表 1 列出了已经发现的典型的超累积植物物种以及植物体中最大重金属含量。从事植物修复研究与发展的国际著名美籍科学家 Chaney 博士预言,总有一天这些植物会被用来清洁重金属 (Cd、Cu、Ni、Pb) 或放射性核素 (Co、U、Sr) 污染的农地和矿区,其成本可能不到各种物理化学处理技术的 1/10,并且通过回收和出售植物中的金属 (Phytomining) 还可以进一步降低植物修复的成本<sup>[11]</sup>。

在中国,1999 年陈同斌等首次发现了 As 的超富集植物蜈蚣草 (*Pteris vittata*),其叶片含 As 高达 5 000 mg · kg<sup>-1</sup><sup>[12]</sup>。室内栽培研究发现,蜈蚣草羽片中最大含 As 量可达 5 070 mg · kg<sup>-1</sup>。这些研究表明 *Pteris vittata* 具有特殊的耐 As 毒能力。Ma 等人也有类似的发现,其研究指出,欧洲蕨对 As 具有很强的超富集能力,种植在受木材防腐剂 (CCA) 污染的土壤 (含 As 97 mg · kg<sup>-1</sup>) 中,其叶片最大含 As 量达 1 442 ~ 7 256 mg · kg<sup>-1</sup>,生物富集系数可达 14.9 ~ 77.6<sup>[13]</sup>。韦朝阳等<sup>[14]</sup>发现了另一种 As 的超富集植物大叶井口边草 (*Pteris cretica*),其地上部分平均含 As 量为 418 mg · kg<sup>-1</sup>,最大含 As 量可达 694 mg · kg<sup>-1</sup>,其生物富集系数为 1.3 ~ 4.8。龙新宪等<sup>[15]</sup>通过野外调查和温室栽培发现了一种新的 Zn 的超富集植物东南景天 (*Sedum alfredii*),营养液培养试验表明,东南景天的地上部分含量最高值可达 19 674 mg · kg<sup>-1</sup>。

## 2 重金属超富集植物的生理机制

有关超富集植物吸收富集重金属的机理尚不完全清楚。植物对重金属产生富集的首要条件是,该种植物的根和茎叶细胞能够耐受高浓度的相应元素,称作超耐受性 (Hypertolerance),主要机制之一是液泡的分室化效应及对重金属的络合作用<sup>[16]</sup>。利用电子探针和 X 射线分析对 *Thlaspi carulescens* 的观察表明,根中的 Zn 主要分布在液泡中,在细胞壁中分布较少;而叶片中的 Zn 主要积累于表皮细胞,特别是亚表皮细胞中。在高浓度 Zn 处理中,叶片的液泡内 Zn 高于质外体;植物的蒸腾作用驱动了 Zn 在叶片中的运输,然后积聚在近轴表皮细胞壁的质外体中。Kupper 等<sup>[17]</sup>利用分散 X 射线法和单细胞液泡法,发现 *Thlaspi carulescens* 成熟叶片中 Zn 主要积累在表皮细胞中,而

在叶肉细胞中 Zn 的含量很低;估计在成熟细胞中,60% 的 Zn 积累在表皮细胞的液泡中。说明表皮细胞中的液泡化 (Vacuolation) 可能是优先积累 Zn 的驱动力。将烟草和大麦中分离出来的完整的液泡暴露于 Zn<sup>2+</sup> 中,结果表明液泡中有 Zn<sup>2+</sup> 的积累,这一结果在遏蓝菜的根和地上部分再次得到证实。将紫羊茅 (*Festuca rubra*) 用 Zn<sup>2+</sup> 胁迫,发现其分生组织液泡体积明显增加<sup>[18]</sup>。以上证据表明通过液泡将重金属区室化是植物重金属抗性的重要机制。

其次,植物必须有能力将某种元素从根系运转到茎叶。通常情况下,根内的 Zn、Cd 和 Ni 浓度往往比茎叶中的相应元素高 10 倍以上,但在超富集植物中,茎叶中的重金属浓度可以超过根内元素水平,Kumar 等<sup>[19]</sup>发现,虽然某种庭芥属 (*Alyssum*) 超富集体叶片提取物中 Ni 的化学形态主要是由苹果酸和柠檬酸形成的络合物,但在木质部伤流物中,组氨酸络合物可达 Ni 总量的 40%,伤流物中几乎所有的组氨酸与 Ni 形成络合态,而在营养液中加入组氨酸时显然可以增加非超富集植物 *Alyssum montarum* 对 Ni 的抗性及由根部向地上部分的转运。

再次,超富集植物对重金属的高需求性。如 Brown 等<sup>[20]</sup>发现了对某种金属有耐性的超富集植物本身相对于非超富集体需要更高的金属离子浓度才能正常生长,普遍认为,超富集植物的耐性由植物本身不同的生理机制所控制。络合作用是指重金属离子与植物中对重金属具有高亲和力的大分子结合形成螯合物,可使土壤中自由重金属离子的浓度降低,从而降低重金属毒性。目前在植物中发现两种主要的重金属结合肽,即金属硫蛋白 (Metallothionein, 简称 MT) 和植物络合素 (Phytochelation, 简称 PC)。多种重金属离子可诱导 PC 合成,例如 Cd<sup>2+</sup>、Cu<sup>2+</sup>、Ag<sup>+</sup>、Hg<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup> 等,并能与 PC 形成复合物<sup>[21]</sup>。研究表明 PC 与重金属解毒有关。

## 3 超富集植物的研究动态与前景

广义上的植物修复是指利用植物 (包括草、灌、乔) 去除土壤和废水中的重金属的技术,有时候又称生理修复。植物修复包括植物萃取<sup>[19]</sup>、根际过滤<sup>[22]</sup>、植物挥发<sup>[23]</sup>和植物固定<sup>[24]</sup>。其中最有前景的是植物萃取,即通常所指的植物修复。

在所有污染环境的重金属中,Pb 是最常见的一种,目前有关 Pb 的植物修复研究最多。Reeves<sup>[27]</sup>曾报道圆叶遏蓝菜 (*Thlaspi rotundifolium*) 可吸收 Pb 达 8 500 mg · kg<sup>-1</sup> 茎干重。Kumar 等<sup>[19]</sup>发现印度芥菜 (*Brassica Juncea* L.) 培养在含高浓度可溶性 Pb 的营养液中,可使茎中 Pb 含量达到 1.5%。Huang 等<sup>[31]</sup>研究发现一些农作物,如玉米和豌豆也可大量吸收 Pb,但达不到植物修复的要求。Kumar<sup>[19]</sup>还发现印度芥菜 (*Brassica Juncea*) 不仅可吸收 Pb,还可吸收并积累 Cd、Cu、Ni、Cr、Zn 和 Ni 等。

利用超富集植物改良土壤的一个典型例子是 Mel Chin, 纽约的一位艺术家从 1991 年开始,在环境科学家 Chaney、Homer、Brown 的协助下,进行了为期 3 a 的“雕刻”大作。即在明尼苏达州圣堡罗遭受 Cd 污染的土壤上,种植 5 种植物: *Thlaspi carulescens* (遏蓝菜属)、*Silene vulgaris* (麦瓶草属)、*Lactuca sativa*

表1 一些典型的超富集植物体中最大重金属含量(mg · kg<sup>-1</sup>)Table 1 Several popular hyperaccumulators and maximum contents of heavy metals in their shoots(mg · kg<sup>-1</sup>)

金属元素	植物种	茎或叶片中重金属含量(干物质)	文献来源 <sup>[25-28,30]</sup>
Cu	<i>Ipomoea alpina</i> 甘薯属高山薯	12 300	Cunningham, S. D. et al. (1995)
	<i>Aeollanthus biformifolius</i> 异叶柔花	13 700	Brooks, et al. (1978)
	<i>Haumaniastrum robertii</i> 星香草	2 070	Reeves, et al (1995)
Cd	<i>Thlaspi carulescens</i> 遏蓝菜属遏蓝菜	1 800	Cunningham, S. D. et al. (1996)
Co	<i>Haumaniastrum robertii</i> 星香草	10 200	Cunningham, S. D. et al. (1995)
	<i>Aeollanthus biformifolius</i> 异叶柔花	2 820	Reeves, et al (1995)
Pb	<i>Minuaritia verna</i> 高山漆姑草属高山漆姑草	11 400	Reeves, et al (1995)
	<i>T. rotundifolium</i> 遏蓝菜属圆叶遏蓝菜	8 500	Reeves, et al (1984)
	<i>Ameica martitima</i> var. <i>balleri</i>	1 600	Reeves, et al (1995)
Mn	<i>Macadamia neurophylla</i> 澳洲坚果属脉叶坚果	51 800	Cunningham, S. D. et al. (1995)
	<i>Alyxia rubricaulis</i> 串珠藤属红茎串珠藤	11 500	Brooks, et al (1981)
Ni	<i>Psychotria doarrei</i> 九节属套哇九节	47 500	Cunningham, S. D. et al. (1995)
	<i>Phyllanthus serpentinae</i> 叶下珠属匍匐叶下珠	38 100	Kersten, et al. (1979)
	<i>Bormuelleria tymphacea</i> 庭花菜	31 200	Reeves, et al (1995)
	<i>Alyssum bertolonii</i> 庭芥属贝托庭芥	13 400	Reeves, et al (1995)
	<i>Berkheya coddii</i>	7 880	Robinson R H, et al. (1997)
Zn	<i>Thlaspi carulescens</i> 遏蓝菜属遏蓝菜	51 600	Cunningham, S. D. et al. (1995)
	<i>Dichapetalum gelonioides</i> 铜钱属白铜钱	30 000	Reeves, et al (1995)
	<i>T. rotundifolium</i> subsp. <i>cepaefolium</i> 景天叶遏蓝菜	17 300	Reeves, et al (1995)
	<i>Thlaspi brachypetalum</i> 遏蓝菜属短瓣遏蓝菜	15 300	Reeves, et al (1995)
	<i>Cardaminossis balleri</i> 芥菜属巴丽芥菜	13 600	Reeves, et al (1995)
	<i>Viola calaminaria</i> 堇菜属芦苇堇菜	10 000	Reeves, et al (1995)
	<i>Sedum alfredii</i> 景天属东南景天	19 674	Long, et al (2002)
Se	<i>Astragalus racemosus</i> 黄氏属总状黄氏	14 900	Beath, et al(1937)
Re	<i>Dicranopteris dichodoma</i> 铁芒萁	3 000	Wang, et al (1997)
As	<i>Pteris vittata</i> 凤尾蕨科蜈蚣草	5 000	Chen, et al (2002)
	<i>Pteris cretica</i> 凤尾蕨科大叶井口边草	694	Wei, et al (2002)
Cr	<i>Sutera fodina</i> 线蓬	2 400	Reeves, et al (1995)
	<i>Dicoma niccolifera</i> 尼科菊	1 500	Reeves, et al (1995)

L. var. *Longifolia*(长叶茛苳)、累积型玉米(*Zea may* L.)近交系、Zn和Cd抗性*Festuca rubra*(紫羊茅)。结果表明,遏蓝菜属植物对金属的吸收能力远大于茛苳,且土壤酸化通常可提高植物对Cd、Zn的吸收能力;对于Pb表现不稳定,但施硫显然可以增加茛苳对Pb的吸收能力<sup>[32]</sup>。

Baker等<sup>[10]</sup>在英国络桑实验站首次以田间试验研究了在被Zn污染土壤(440 mg · kg<sup>-1</sup>)上栽种不同的超富集植物和非超富集植物对土壤中Zn的吸收清除效果。结果表明,超富集植物*Thlaspi carulescens*富集Zn是非超富集植物萝卜的150倍,富集Cd则相应是10倍。Baker同时也发现,尽管*Thlaspi carulescens*吸收重金属能力很强,但由于其生物量小,需要13~14 a的连续栽种才能将实验地的重金属含量修复到欧共体规定的临界标准(300 mg · kg<sup>-1</sup>)。Robinson等<sup>[29]</sup>在法国南部利用盆栽和田间试验结合进一步研究了遏蓝菜(*Thlaspi carulescens*)修复污染土壤的潜力,通过施肥使*Thlaspi carulescens*的生物量增加了2倍,而其地上部Zn、Cd含量没有下降,但修复小于500 mg · kg<sup>-1</sup>被Zn污染土壤仍需8.13 a。Ebbs等<sup>[33]</sup>筛选了30种十字花科植物(约300个品种),发现印度芥菜(*Brassica juncea*)、芸苔(*B. Napus*)、芜菁(*B. rapa*)对重金

属Zn的富集能力虽不如*Thlaspi carulescens*,但其生物量至少是遏蓝菜的10倍,因而更具有实用价值。因此,继续寻找开发生物量大、富集金属能力强的超富集植物是今后植物修复技术的重点。

Steven等<sup>[34]</sup>通过套种超富集植物*Thlaspi carulescens*和非超富集植物*Thlaspi arvense*,发现当这两种植物的根系交织在一起时,*Thlaspi carulescens*对Zn的富集能力显著提高。Steven等<sup>[35]</sup>的研究还发现根际细菌能增加Zn在土壤水溶液中的溶解度,从而提高*Thlaspi carulescens*对Zn的超富集能力,与无细菌的土壤比较,*Thlaspi carulescens*对Zn的富集能力提高了4倍。而对于非超富集植物*Thlaspi arvense*则无明显效应。陈同斌等<sup>[36]</sup>研究则发现添加磷能显著提高蜈蚣草对As的富集能力,当添加磷超过400 mg · kg<sup>-1</sup>时,蜈蚣草对As的富集效果显著提高;当添加磷达800 mg · kg<sup>-1</sup>时,相应的富集系数分别为10.7和9.8,分别是不添加磷对照处理的2.8和2.7倍。

在美国加州的一个人工构建的1 hm<sup>2</sup>二级湿地功能区中,种植不同的湿地植物品种,显著降低了该区农田灌溉水中Se的含量(有的使Se含量从25 mg · kg<sup>-1</sup>降低到5 mg · kg<sup>-1</sup>以下)<sup>[37]</sup>。目前,人工湿地常用的植物为水生或半水生的维管植

物,如凤眼兰、破铜钱、印度葵等,它们能在水中中长期吸收 Zn、Cd 和 Cu 等金属<sup>[38]</sup>。

在我国,植物修复方面也有许多人进行探索研究。如据黄会一<sup>[39]</sup>报道,某种旱柳 *Salix matsudana* 品系可富集 Cd $47.19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,当年生加拿大杨对 Hg 的富集量高达  $6.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,为对照株 130 倍;龙育堂等<sup>[40]</sup>在 Hg 污染的稻田种苧麻 (*Boehmeria nivea*)后,对 Hg 的净化率达 41%。骆永明等<sup>[41]</sup>研究了印度芥菜 (*Brassica juncea*)对 Zn、Pb、Cd 和 Cu 污染的响应,结果表明,在含 Zn $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Pb $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 Cu $250 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的污染土壤上,印度芥菜能够忍耐且正常生长,这种植物适合 Zn、Pb、Cu 中等污染土壤的植物修复。而印度芥菜在含 Cd $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的土壤上发生中毒而出现绿黄化症状,说明 Cd 与中等浓度的 Zn、Pb、和 Cu 共存时毒害更严重。王凯荣等<sup>[42]</sup>研究了 Cd 污染农田生态模式,筛选出了湖桑、苧麻、红麻、棉花等一批适生耐 Cd 作物品种,种植后使土壤中 Cd 含量普遍下降。孟庆强<sup>[43]</sup>研究了套种超富集植物 *Thlaspi carulescens* 和非超富集植物黑麦草 (*Lolium perence* L) 和玉米对重金属污染土壤的处理效果,盆栽试验结果表明, *Thlaspi carulescens* 对土壤中 Cd 的去除率 3 个月达 35%, 是黑麦草吸收能力的 10 倍。吴启堂等<sup>[44]</sup>研究了 *Thlaspi carulescens* 和非超富集植物玉米处理 Zn 和 Cu 超标的城市污泥,结果表明,植物处理半年后,污泥体积降低为原来的 1/4, EDTA 浸取 Zn 明显降低。而且用该处理技术产出的玉米,经多次试验均表明符合食品卫生标准 (Cu  $<10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 对人体健康安全。Moussa 等<sup>[45]</sup>进一步研究发现了一种生物量大、生长迅速的 Zn 的累积植物—山芋 (*Alocasia macrorrhiza*), 其茎中 Zn 含量达  $1109.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。Moussa 等通过套种 *Thlaspi carulescens* 和非超富集植物玉米 (Huidan-4), 收获的玉米子粒中含 Cu $4.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 符合食品卫生标准 (Cu  $<10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。这种套种生物量大的富集植物和经济植物的方法为 Zn 污染污泥的植物修复与利用提供了新的思路。苏德纯等<sup>[46]</sup>对油菜作为超富集植物修复 Cd 污染土壤的潜力进行了研究,结果发现,油菜溪口水籽有较弱的吸收 Cd 的能力,其地上部分生物量、地上部吸 Cd 量和对 Cd 污染土壤的净化率均明显高于目前公认的参比植物印度芥菜 (*Brassica juncea*)。

总之,植物修复技术为重金属土壤的修复提供了新的思路,但也尚有很多问题值得研究。目前,所发现的超富集植物一般生物量小,所需时间长,需进一步开发和寻找新的生物量大的植物;另一方面,可以利用基因工程的手段,将植物进行改造,从而产生理想的适合需求的转基因超富集植物。例如拟南芥菜 (*Arabidopsis thaliana*) 经转基因后对 Cu 的吸收能力提高了 7 倍<sup>[47]</sup>;还可以把生长慢、低生物量的超富集植物育成生长快、生物量大的品种或把超富集植物的特异基因转入到高生物量的植物体中<sup>[36]</sup>。另外,对受金属影响的突变体进行遗传分析将是理解调控重金属积累作用机制的一个很好的开端。比如,化学诱变剂产生了大量的突变体,连续的突变作用引起豌豆 (*Pisum sativum*) 10~100 倍量高的 Fe 的累积<sup>[48]</sup>,而在拟南芥菜 (*Arabidopsis thaliana*) 中,连续的突变过程导致其 Mn 的含量增

加 8 倍,并且与 Cd、Cu、Hg 等的结合呈高敏感性<sup>[49]</sup>。第三,对于已经发现的超富集植物,如何提高其富集效果值得深入研究,如可通过添加微生物、螯合剂或其他元素的办法等。

## 参考文献:

- [1] 李永涛,吴启堂. 土壤污染治理方法研究[J]. 农业环境保护, 1997, 16(3): 118-122.
- [2] 陈同斌. 中国科学技术协会“青年科学家论坛”污染环境的植物修复研讨会[J]. 科学通报, 2002, 47(3): 238-239.
- [3] Baker A J M, Brooks R R, Pease A J, et al. Studies on copper and cobalt tolerance in three closely related taxa within the genus *Silene* L. (Caryophyllaceae) from Zaire[J]. *Plant and Soil*, 1983, 73: 377-385.
- [4] Brooks R R. Plant that hyper-accumulate heavy metals[J]. *CAB international*. 1989, 1-2.
- [5] Brooks R R, Lee J, Reeves R D, et al. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium species of indicator plants[J]. *Journal of Geochemical Exploration*. 1977, 7: 49-57.
- [6] Chaney R L. Plant uptake of inorganic waste constituents[A]. In: Parr J. F eds. Land treatment of Hazardous wastes[C]. Noyes Data Corporation, Park Ridge, New Jersey, USA. 1983. 50-76.
- [7] McGrath S P. Plants that hyper-accumulate heavy metals[J]. *Brooks R R (ed) CAB international, Wallingford, UK*, 1998, 261-287.
- [8] Anderson T A, Guthrie E A, Walton B T. Bio-remediation in the rhizosphere[J]. *Environ Sci Technol*, 1993, 27(13): 2630-2636.
- [9] McGrath S P, et al. In: *Integrates Soil and sediment Research: A Basis for Proper Protection*, Eijsackers H J P and Hamers T (eds), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1993. 673-676.
- [10] Baker A J M, McGrath S P, et al. The possibility of in situ heavy metal decontamination of polluted soil using crops of metal-accumulating plants[J]. *Resource Conservation and Recycling*, 1994, 11: 41-49.
- [11] Chaney, et al. Proceedings of Extended Abstracts of 5th International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements, 1999, 1: 14-15.
- [12] 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, 7: 1196-1203.
- [13] 陈同斌,韦朝阳. 超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征[J]. 科学通报, 2002, 47(3): 207-210.
- [14] 韦朝阳,等. 大叶井口边草——一种新发现的富集砷的植物[J]. 生态学报, 2002, 22(5): 777-778.
- [15] 龙新宪. 东南景天 (*Sedum alfredii*) 对砷的耐性和超积累机制研究[D]. 杭州: 浙江大学博士学位论文, 2002.
- [16] Shen Z G, Zhao F J, McGrath S P. D transport of zinc in the hyper-accumulator *Thlaspi carulescens* and non-hyper-accumulator *Thlaspi ochroleucum*[J]. *Plant Cell and Environ*, 1997, 20: 898-906.
- [17] Kupper H, Zhao F J and McGrath S P. Cellular compartmentation of Zinc in leaves of hyperaccumulator *Thlaspi carulescens*[J]. *Plant Physiology*, 1999, 119: 305-311.
- [18] Salt D E, Smith R D, Raskin I. Phytoremediation[J]. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Boil*, 1998, 49: 643-68.
- [19] Kumar P B A N, Dushenkov V, Motto H, et al. Phytoextraction the

- use of plants to remove heavy metals from soils[J]. *Environ Sci Technol*, 1995, 29(5): 1232 – 1238.
- [20] Brown S L, Chaney R L, Angle J S, et al. Zinc and Cadmium uptake of *Thlaspi carulescens* grown in nutrient solution[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1995, 59: 125 – 133.
- [21] Maitani T. The composition of metals bound to class III metallothionein (Phytochelation and its desglycyl peptide) induced by various metals in root cultures of *Rubia tinctorum*[J]. *Plant Physiol*, 1996, 110: 1145 – 1150.
- [22] Dushenkov V, Kumar P B, et al. The use of plants to remove heavy metals from aqueous streams[J]. *Environ Sci Technol*, 1995, 29(5): 1239 – 1245.
- [23] Watanabe M E. Phytoremediation on the brink of commercialization[J]. *Environ Sci Technol*, 1997, 31: 182A – 186A.
- [24] Salt D E, Kumar P B, et al. Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants[J]. *Biotechnology*, 1995, 13: 468 – 474.
- [25] Cunningham S D, et al. Remediation of contaminated soils and sludges by green plants. In: Hinchey R. E & Means J. L. (eds.) [M]. *Bioremediation of inorganics*, Battelle Press, Columbus, Ohio, 1995.
- [26] Reeves R D, Baker A J M, Brooks R R. Abnormal accumulation of trace metals by plants[J]. *Mining Environmental Management*, 1995, 9: 4 – 8.
- [27] Reeves R D, Baker A J M. Studies on metal uptake by plants from serpentine and non-serpentine populations of *Thlaspi goesingense* Halacsy (Cruciferae)[J]. *New Phytol*, 1984, 98: 191 – 204.
- [28] 王玉琦, 孙景信, 陈红民, 等. 种子活化法研究稀土矿区植物体中稀土元素的分布特征[J]. *中国稀土学报*, 1997, 15(2): 160 – 164.
- [29] Robinson R H, et al. The potential of *Thlaspi carulescens* for phytoremediation of contaminated soils[J]. *Plants and Soil*, 1998, 203: 47 – 56.
- [30] Robinson B H. The potential of the high-biomass Nickel hyperaccumulator *Berkheya coddii* for phytomining and phytoremediation[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1997, 60: 115 – 126.
- [31] Huang J W, et al. Phytoremediation of lead-contaminated soils: Role of synthetic lead phytoextraction[J]. *Environ Sci Technol*, 1997, 31(3): 800.
- [32] Chaney R L, Makik M, Li Y M, et al. Phytoremediation of soil metals[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 1997, 8: 279 – 284.
- [33] Ebbs S D and Kochian L V. Phytoextraction of zinc by oat (*Avena sativa*), Barley (*Hordeum vulgare*) and Indian mustard (*Brassica juncea*) [J]. *Environ Sci Technol*, 1998, 2: 802 – 806.
- [34] Steven N W, et al. Rhizosphere bacteria mobilize Zn for hyperaccumulation by *Thlaspi carulescens*[J]. *Environ Sci Technol*, 2001, 35: 3144 – 3150.
- [35] Steven N W, et al. Hyperaccumulation of Zn by *Thlaspi carulescens* can ameliorate Zn toxicity in the rhizosphere of co-cropped *Thlaspi arvense* [J]. *Environ Sci Technol*, 2001, 35: 3237 – 3241.
- [36] 陈同斌, 等. 磷对超富集植物蜈蚣草吸收砷的影响及其科学意义[J]. *科学通报*, 2002, 47(15): 1156 – 1159.
- [37] Terry N, et al. Proceedings of Extended Abstracts of 5th International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements, 1999, 2: 24 – 25.
- [38] David E. Salt, Ingrid J Pickering, et al. Metal accumulation by aquatic cultured seedlings of Indian mustard[J]. *Environ Sci Technol*, 1997(31): 1636 – 1644.
- [39] 黄会一. 木本植物对土壤镉的吸收积累和耐性[J]. *中国环境科学*, 1989, 9(5): 327 – 330.
- [40] 龙育堂, 等. 苜蓿对稻田土壤汞净化效果研究[J]. *农业环境保护*, 1994, 13(1): 30 – 33.
- [41] 骆永明, 等. 重金属污染土壤的植物修复研究[J]. *土壤*, 2000, 2: 71 – 79.
- [42] 王凯荣, 等. 镉污染农田生态整治与安全高效利用模式[J]. *中国环境科学*, 1998, 18(2): 97 – 101.
- [43] 孟庆强. 利用超富集植物处理重金属污染土壤和污泥[D]. 广州: 华南农业大学硕士学位论文, 2002.
- [44] Wu Q T, Jiang C A, et al. Bioremediation of heavy metal contaminated biosolids by bacterial biosorption and hyperaccumulator plants. 1st ASEM conference on bio-remediation, 2002, 9, Hanoi, Viet Nam.
- [45] Moussa S, Wu Q T, et al. Plants grown on sewage sludge in South China and its relevance to sludge stabilization and metal removal[J]. *Journal of Environ Sci* (In press).
- [46] 苏德纯, 黄焕忠. 油菜作为超累积植物修复 Cd 镉污染土壤的潜力[J]. *中国环境科学*, 2002, 22(1): 48 – 51.
- [47] Karenlampi S, et al. Genetic engineering in the improvement of plants for phytoremediation of metal polluted soil[J]. *Environmental Pollution*, 2000, 107: 225 – 231.
- [48] Cunningham S D, Owens D W. Promises and prospects of phytoremediation[J]. *Plant Physiol*, 1996, 110: 715 – 719.
- [49] Murphy A, Taiz L. A new vertical mesh transfer technique for metal tolerance studies in *Arabidopsis* ecotypic variation and copper-sensitive mutants[J]. *Plant Physiol*, 1995, 108: 29 – 38.