

土壤重金属污染植物修复研究进展*

武正华

(盐城工学院 化学工程系, 江苏 盐城 224003)

摘 要 土壤重金属污染是全球面临的一个急待解决的环境问题。近年来新兴的污染土壤植物修复技术是利用绿色植物来固定、提取土壤中的重金属从而降低或清除其对环境的毒害;与传统的土壤污染治理技术相比,该技术由于具有成本低、不破坏环境、保护人类健康和易于大众接受等优点而引起了人们极大的关注。系统地介绍了植物修复的类型、机理、优缺点、基因工程在提高植物修复能力中的应用等有关内容,最后探讨了植物修复技术今后发展的方向。

关键词 重金属污染;植物修复;基因工程

中图分类号 X171

文献标识码 A

文章编号 :1671-532X(2002)02-0053-05

人为活动或自然作用释放出的重金属经过物理、化学或生物的过程,在土壤中逐渐积累从而造成了土壤的重金属污染,土壤重金属污染已成为全球面临的一个严重的环境问题^[1-6]。土壤重金属污染对环境产生危害主要有下列途径:(1)土壤中的重金属通过雨水淋溶作用向下渗透,可能导致地下水的污染;(2)受污染的土壤直接暴露在环境中,通过土壤颗粒物等形式能直接或间接地为人或动物所吸入;(3)外界环境条件的变化如酸雨、某些土壤添加剂等因素提高了土壤中重金属的生物可利用性,使得重金属较容易地为植物吸收利用而进入食物链,对食物链上的生物产生毒害。与有机污染物不同的是,由于土壤中的重金属具有生物不可降解性和相对的稳定性,使得重金属污染土壤的修复比较困难。

传统的污染土壤的修复方法有客土法、化学冲洗法、电化学等方法。近年来,在国外出现了一种用植物来修复土壤污染的方法。该方法由于成本低、效果良好、不破坏环境而受到了广泛的关注。在美国,出现了一家名为 Phytotech 的公司,专门利用植物来清除环境中的污染物。超累积植物(hyperaccumulator plant)——对某种重金属有很高积累量的植物的不断发现以及转基因技术的

应用,促进了植物修复技术的发展,无论是在生态应用领域,还是在微观的分子水平如发现控制重金属吸收的基因、金属离子蛋白载体、超累积植物的超累积机理研究等方面,都取得了长足的进展。1999 年全世界植物修复的市场为 3400~3800 万美元,2000 年到 2005 年市场预计扩大 10 倍(D. Class Associates: Phytoremediation Market Reports, 1999-2000; <http://www.channel1.com/dglassoc/INFO/phytrept.ht>),植物修复的对象既可以是重金属也可以是有机污染物和放射性元素,由于篇幅限制,本文仅对重金属污染土壤的植物修复进行介绍。

1 植物修复(phytoremediation)

1.1 植物修复的定义

根据 Cunningham^[7]等人的定义,植物修复是利用绿色植物来转移、容纳或转化污染物使其对环境无害。

1.2 植物修复的类型和机理

土壤重金属的植物修复主要分为下面几种:

(1)植物提取(phytoextraction):重金属富集能力较高的植物通过吸收和转运的过程,将重金属富集在可收割的部位,然后将植物富集部位进

* 收稿日期 2001-06-23

作者简介:武正华(1971-)男,江苏东台市人,盐城工学院讲师,南京大学在职博士研究生,主要研究方向为土壤污染修复技术。

行收割并经过热、微生物、物理或化学的处理,减少植物的体积或重量,以达到降低加工、填埋和人工操作费用的目的。能应用于植物提取的植物往往是一些超累积植物。Reeves 和 Brook(1983)发现 *Thlaspi rotundifolium* 的茎中 Pb 含量可高达 8200 ug/g(干物质)^[7];在南非蛇纹岩发育的土壤地区,发现了一种对镍超累积的植物—*Berkheya coddii* 地上部分富集量高达 7880 ug/g(干物质),对于含镍量为 100 ug/g 的土壤,只要种两次这种植物就能达到欧洲规定(CEC,1986)的水平(75 ug/g)^[9]。对其它重金属如 Cu、Cd、Zn、Ni、Co、Mn 等富集能力较高的植物也发现很多,表一列举了一些金属的超累积植物。到目前为止,大约有 400 中超累积植物被发现,这些植物主要集中在欧洲、美国、新西兰和澳大利亚。

表 1 一些重金属的超累积植物

Table 1 Some heavy metals' hyperaccumulator plant

重金属	超累积植物	浓度/ug/g(干物质)
Cu	<i>Ipomoea alpina</i>	12300(茎) ^[8]
Cd	<i>Thlaspi caerulescens</i>	1800(茎) ^[8]
Pb	<i>T. rotundifolium</i>	8200(茎) ^[8]
Zn	<i>Thlaspi caerulescens</i>	51600(茎) ^[8,10]
Mn	<i>Macadamia neurophyl-</i>	51800(茎) ^[8]
Co	<i>thaumaniastrium rober-</i>	10200(茎) ^[8]
Ni	<i>tij Berkheya coddii</i>	7880(地上部分) ^[9]
Re	铁芒萁 (<i>Dicranopteris dichodoma</i>)	3000(地上部分) ^[11]

(2)植物转化(phytotransformation):在植物的根部或其它部位通过新陈代谢作用将重金属转为无害的形态^[12]。

(3)植物挥发(phytovolatilization):利用一些植物来促进重金属转变为可挥发的形态,并将之挥发出土壤和植物表面。一些植物在植物体内能将 Se、As 和 Hg 等甲基化而形成挥发性的分子,释放到大气中去。

(4)植物固定(phytostabilization):利用植物活动来降低重金属的活动性,使其不能为生物所利用,如植物枝叶分解物、根系分泌物对重金属的固定作用、腐殖质对金属离子的螯合作用等过程^[13]。

(5)植物促进(phytostimulation):植物本身不能吸收重金属,但植物的根系分泌物如氨基酸、糖、酶等物质能促进根系周围土壤的微生物的活性和生化反应,有利于重金属的释放和微生物的

吸收。^[14]

1.3 适合于修复的植物特点

应用于植物修复的植物具有下列特征:

- (1)具有一定的生物量和较快的生长速率;
- (2)对重金属具有一定的耐性;
- (3)植物地上部分对重金属有一定的积累量;
- (4)植物易于种植,便于人工或机械操作;

1.4 提高植物吸收能力的途径

1.4.1 添加化学配体,提高重金属的生物可利用性

土壤中重金属以多种化学形态存在,这些化学形态受土壤的物理化学条件控制,处于一个很复杂的平衡体系,其中生物可利用形态只占其中的很少的一部分。通过人为的添加化学配体能破坏其平衡,提高可利用形态的含量,常见的配体包括 EDTA、DTPA、弱有机酸如柠檬酸、苹果酸等。

Salt 等人(1995)通过对印度芥菜(*B. juncea*)研究发现,添加 EDTA 到 Cd 污染的土壤中,与对照相比,茎中的 Cd 含量能提高 5 倍,达到 875 ug/mg(干物质)^[11];Blaylock M J 等(1997)将 *B. juncea* 种植在添加过 EDTA 的 Pb 污染的土壤,一周后,*B. juncea* 地上部分 Pb 含量达到 1.5%(干物质)^[15];Huang 等(1997)发现柠檬酸能有效地提高植物茎中的铀的含量^[16]。但是,也有施加 EDTA 引起植物吸收减少的报道^[16,17],其中原因有待进一步探索。需要注意的是,添加强配体如 EDTA、EGTA,能提高重金属的迁移性能,重金属很可能通过淋滤的方式扩散到非污染区域,从而扩大了污染的区域^[15];同时,强配体可导致大量元素的流失,发生土壤贫瘠化,而施加弱有机酸和它们的盐如柠檬酸、苹果酸等能克服上述缺点,被认为是环境友好的修复技术^[18]。

1.4.2 施加植物营养,促进植物对重金属的吸收

Robinson B H 等人对 Ni 的超累积植物 *Berkheya coddii* 研究发现,土壤中施加硫能促进植物对钴和镍的吸收,植物中钴和镍的含量与施加硫呈明显的正相关($P < 0.01$),含量可以分别达到 1500 mg/kg(干物质)、300 mg/kg(干物质);施加氮肥产生同样的效果,但施加磷肥对吸收影响不明显^[9,17]。施加植物营养,能促进植物的生长,提高根部活动强度,相应地提高了植物对重金属的吸收。

1.5 植物修复的优点和缺点^[3,19-21]

与传统的污染土壤修复技术相比,植物修复有如下优点:

(1)植物修复最显著的优点是价格便宜。同样对 666.67 m² 受污染的土壤进行修复,传统的方法需要花费 25 万美元,而植物修复仅为其的 1/100~1/10000;

(2)植物修复是原位修复,不需要挖掘、运输和巨大的处理场所;

(3)植物修复不会破坏景观生态,能绿化环境,容易为大众所接受;

任何技术都不是万能的,植物修复也有其局限性,其局限性如下:

(1)修复速度慢;

(2)植物修复受到土壤类型、温度、湿度、营养等环境条件限制;

(3)污染物必须是植物可利用态并且只能处于根系区域;

(4)污染物在植物中累积,可能提高了污染物对野生生物的威胁;

(5)用于修复的植物与当地植物的竞争,可能破坏本地的生态平衡。

2 基因工程在植物修复中的应用

2.1 基因技术应用

随着植物修复研究的深入,人们发现超累积植物往往植株矮小,生长速度慢,很难具有实际应用价值,而生长速度快、生物量大的植物往往对重金属忍耐力低,组织中富集量不高。自然界中,某些生物尤其是细菌在进化过程中,形成了对金属的耐性和累积性,这些优良性能很可能是受某种基因控制,将这些基因引入受体植物中,就有可能得到适合于植物修复的品种^[3]。最近几年,已有一些将转基因技术成功引入到修复植物中的报导。

研究发现,具有汞离子还原酶基因(merA)的细菌不仅能还原 Hg²⁺,对 Au³⁺ 和 Ag⁺ 也有一定的还原能力。Rugh(1998)将 merA 引入到 *Arabidopsis thaliana*,发现转基因的植物抗汞能力提高了 3 倍,并提高了对汞的吸收的能力,这种植物对 Au³⁺ 抗性也得到提高^[22]。同样引入 merB 基因 *Arabidopsis thaliana* 能有效地将甲基汞和其它有机汞转化为无机汞,前者的毒性是后者的 100 倍^[23]。Varvara P Grichko 等(2000)将细菌中的 1-氨基环丙烷-1-羧酸(ACC)脱氨基酶基因引入到番茄 *Lycopersicon esculentum* 后,分别在启动基因 35S(花椰菜同源嵌合体病毒)、rolD(*Agrobacterium rhizogenes*)和 PRB-1K(番茄)的控制

下,番茄具有了对 Cd、Co、Cu、Mg、Ni、Pb 和 Zn 的耐性并不同程度地提高了这些重金属在植物组织中富集^[25]。

长期以来一直认为植物对金属的解毒与金属硫蛋白 MTs 有关,金属硫蛋白基因可以从人、小白鼠、中国仓鼠、酵母中等获得。许多研究结果表明,某些植物引入 MTs 后,能明显提高对 Cd、Cu 等的耐性或增加对它们的吸收^[25-27]。另外,研究人员还发现了与铁吸收有关的基因-FRO2、FRE1、FRE2 和铁蛋白基因,引入这些基因能促进植物如水稻对铁的吸收,最大的达 3 倍^[28-29],这项研究为预防贫血病提供了一种新途径。

超累积植物也是提供有修复价值基因的一个重要来源,但前提是必须详细了解这些植物的超累积机理和基因控制机制。另外研究发现植物中的有机酸如组氨酸、苹果酸、柠檬酸等与重金属的累积有关,如 Kramer 等(1996)研究了 Ni 的超累积植物 *Alyssum*,发现植物伤流液中组氨酸与镍含量成正相关,组氨酸在植物体内与 Ni²⁺ 配位,能提高植物对 Ni²⁺ 的耐受性并促进在植物中的运输,这一发现突破了目前的理论—植物对金属的耐受性与金属硫蛋白的配位有关^[30]。如果能通过基因技术,调控这些有机酸的新陈代谢,就可能促进植物对重金属的吸收和提高耐性。

2.2 植物修复中基因技术的研究方法

首先要找到对重金属耐性强或累积性高的生物,通过生物化学、分子生物学等方法鉴别出控制这些特性的基因,然后将这些基因按特定方案定向连接起来,并在特定的受体细胞中,与载体一起得到复制与表达,使受体细胞获得新的遗传特性。最后,要将转基因植物进行田间实验,确定是否达到目的^[31]。

需要强调的是,要持谨慎的态度来进行转基因技术的研究,预防基因污染。

3 展望

植物修复研究尽管起步较晚,但由于成本低、有益于环境等优点而备受欢迎并得到迅速发展,可广泛地应用于矿山恢复、改良重金属污染的土壤等。随着人们对良好环境的要求和高效农业发展的需要,植物修复技术将会越来越受到重视。植物修复技术本身还有待进一步的发展,将植物修复应用到实际中去还存在许多问题,需要生物学、土壤学、植物学、基因技术、环境化学等多门交叉学科的研究。下面一些研究领域应给予特别的

关注：

(1) 植物修复与传统的化学、物理方法相结合的综合技术的研究。

有研究表明,将电化学、土壤淋洗法和植物提取综合应用到土壤修复中,比使用任何单一方法效果要好。电流能有效地将吸附的重金属从土壤颗粒中释放出来,含配体的溶液能提高土壤溶液中重金属的浓度,植物利用根系巨大的表面积将溶液中金属离子或金属配位离子进行吸附、吸收和进一步转运。Scott Cunningham(1996)认为:综合技术可以弥补单一技术的缺陷,有利于在短时间内推上市场。综合技术的研究跨越多种学科,研究内容十分丰富^[1]。

(2) 继续对超累积植物的寻找及超累积机理研究。

目前发现的 400 多种超累积植物主要集中在北美洲、大洋州和欧洲等发达国家。中国物种资源丰富,但发现的超累积植物比较少。超累积植物的鉴别一个简单而有效的方法是到矿区采集各种植物进行分析,如在稀土矿区、铜矿区发现了各自的超累积植物^[8,11]。但这样做的缺点是工作量大和可能失去许多潜在的有价值的超累积植物,利用根毛(hairy root)在实验室内确定植物对重金属的生物吸收能力和长期累积能力的新方法

正在被建立^[32],该方法的意义是能克服自然条件的限制,加快对超累积植物的筛选速度。多种重金属超累积植物的寻找是一项有意义的基础性工作,是超累积机理研究的前提并能提供丰富的基因资源。

(3) 进行基因工程的研究

目前,将基因技术应用于植物修复的研究才刚刚起步,但已有的令人鼓舞的研究结果表明基因技术的研究将是植物修复研究中的一个重要并很有价值的方向,包括有价值基因的筛选、基因技术、基因工程立法等研究。

(4) 植物-微生物体系修复的研究

自然界中,与许多植物共生的微生物尤其是真菌类紧靠着植物根系,它们发达的菌丝提高了植物根系吸收营养的范围,能促进植物对营养物质和重金属的吸收;同时,许多真菌对重金属有很高的耐性和积累性,真菌的活动能降低重金属对植物的毒性,提供了对植物根系的保护,有利于修复植物的生长。将适合某种污染的真菌接种在超累积植物的根部,有可能促进植物修复。植物-微生物体系修复的研究内容包括:针对特定污染的最佳微生物的筛选、土壤性质对微生物生长的影响和植物-微生物相互作用机理等研究内容^[3,5,33]。

参考文献：

[1] Salt D E. Phytoremediation: a novel strategy for removal of toxic metals from the environment using plants[J]. *Bio/Technology*, 1995, 13: 468 - 478.

[2] Chen Z S. The effect of chemical remediation treatments on the extractability and speciation of cadmium and lead in contaminated soil[J]. *Chemosphere*, 2000, 41: 235 - 242.

[3] Khan A G. Role of plants, mycorrhizae and phytochelators in heavy metal contaminated land remediation[J]. *Chemosphere*, 2000, 41: 197 - 207.

[4] 温志良. 重金属污染生物技术研究[J]. *环境科学动态*, 1999 (3): 15 - 18.

[5] Chaudhry T M. Phytoremediation - focusing on accumulator plants that remediate metal contaminated soil[J]. *Australasian J Ecotoxicol*, 1998, 4: 37 - 51.

[6] Chen H M. Chemical methods and phytoremediation of soil contaminated with heavy metals[J]. *Chemosphere*, 2000, 41: 229 - 234.

[7] Cunningham SD. Remediation of contaminated soil with green plants: an overview[J]. *In Vitro Cell Dev Biol*, 1993, 29: 207 - 212.

[8] Baker AJM, Walker PL. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metal elements - a review of their discovery of their distribution[J]. *Ecology and phytochemistry, Biodiscovery*, 1990 (1): 81 - 126.

[9] 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.

[10] Brown S L. Zinc and cadmium uptake by *Thlaspi caerulescens* and *silence vulgaris* in relation to soil metals and soil pH[J]. *J Environment Quality*, 1994, 23: 1151 - 1157.

[11] 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.

- [12] Schnoor J L. Phytoremediation of organic and nutrient contaminants Environment and Techno[J]. 1995 ,29 318 – 323.
- [13] Cunningham S D. Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants.[J] Adv Agron ,1996 56 :55 – 114.
- [14] Marcia Pletsch. Novel biotechnology approaches in environmental remediation research Biotechnological approaches in environmental research Biotechnology Advances[J]. 1999 ,17 :679 – 687.
- [15] Blaylock M J. Enhanced accumulation of lead in Indian Mustard by soil – applied chelating agent[J]. Environ Sci Technol ,1997 31 :860 – 865.
- [16] Huang J W W. Phytoremediation of lead contaminated soils – role of synthetic chelates in lead phytoextraction[J]. Environ Sci Technol ,1997 31 :800 – 805.
- [17] Robinson B H. Soil amendment affecting Nickel and Cobalt uptake by *Berkheya coddii* – potential use for phytomining and phytoremediation *Berkheya coddii*[J]. Annals of Botany ,1999 84 :689 – 694.
- [18] Wasay S A. Remediation of soils polluted by heavy metals using organic acids and chelating[J]. Environ Technol ,1998 ,19 (4) :369 – 379.
- [19] Scott D Cunningham. David W. Ow , Promises and Prospect of Phytoremediation[J]. Plant Physiol ,1996 ,110 :715 – 719.
- [20] Scott D Cunningham. Phytoremediation of contaminated soil[J]. TIBTECH ,1995 ,13 :393 – 397.
- [21] Macek T. Exploitation of plants for the removal of organics in environmental remediation[J]. Biotechnology ,2000 ,18 :23 – 24.
- [22] Rugh C L. Development of transgenic yellow for mercury phytoremediation[J]. Nature Biotechnology ,1998 ,23 :925 – 928.
- [23] Bizily S P. Phytoremediation of methylmercury pollution – merB expression in *Arabidopsis thaliana* confers resistance to organomercurials[J]. Proc Natl Acad Sci U S A ,1999 96 :6808 – 6813.
- [24] Varvara P Grichko. Increased ability of transgenic plants expressing the bacterial enzyme ACC deaminase to accumulate Cd ,Co ,Cu ,Ni ,Pb and Zn[J]. Journal of Biotechnology ,2000 81 :45 – 53.
- [25] Murphy. A Comparison of metallothionein gene expression and nonprotein thiols in ten *Arabidopsis* ecotypes. Plant Physiology ,1995 ,109 :945 – 954.
- [26] Hasegawa I. Genetic improvement of heavy metal tolerance in plants by transfer of the yeast metallothionein gene (CUP) [J]. Plant and Soil ,1997 ,196 :277 – 281.
- [27] Karenlampi S. Genetic engineering in the improvement of plants for phytoremediation of metal polluted soil[J]. Environmental Pollution ,2000 ,107 :225 – 231.
- [28] Goto F. Iron fortification of rice seed by the soybean ferritin gene[J]. Nature Biotechnology ,1999 ,17 :282 – 286.
- [29] Robinson C L. A ferric – chelate reductase for iron uptake from soil[J]. Nature ,1999 397 :694 – 697.
- [30] Ute Kramer. Free histidine as a metal chelator in plants that accumulate nickel Natur[J]. 1996 ,379(15) :635 – 638.
- [31] 沈同,王镜岩.生物化学[M].北京:高等教育出版社,1991.
- [32] Nedelkosk T V. Characteristic of heavy metal uptake by plant species with potential for phytoremediation[J]. Minerals Engineering ,2000 ,13(5) :549 – 561.
- [33] Noyd R K. Field responses to added organic matter , arbuscular mycorrhizal fungi and fertilizer in reclamation of torbonite iron ore tailing[J]. Plant Soil ,1996 ,179 :89 – 97.

Advance of phytoremediation on soils polluted by heavy metal

WU Zheng-hua

(Department of Chemical Engineering of Yancheng Institute of Technology Jiangsu Yancheng 224003 ,China)

Abstract Soil pollution by heavy metal has become a global problem urgently needed to be solved. A recent developed technology called phytoremediation uses green plant to stabilize or extract heavy metals in soil to make them less harmful to environment. Compared with traditional technology for recovery of polluted soil by heavy metals ,this technology has such advantages as lower cost ,protecting environment and easily acceptable to public ,due to which the technology has caught much attention from scientific field. Details about phytoremediation of type and mechanism of the technology ,advantage and disadvantage ,application of gene technology in improving remediation ability and so are introduced greatly in this paper. Also a probe to the future development of the technology is made.

Keywords heavy metal ; phytoremediation ; gene engineering