

文章编号: 1006 - 544X (2004) 04 - 0507 - 05

清除土壤重金属污染的植物修复技术

刘杰, 朱义年, 罗亚平, 张徽林

(桂林工学院 资源与环境工程系, 广西 桂林 541004)

摘要: 根据清除土壤重金属污染的机理不同, 植物修复技术可分为植物固定、植物挥发和植物提取3种基本类型。与传统的土壤重金属污染治理技术比较, 该技术存在成本低、利于环保、方便操作等优点, 但同时也存在修复速度慢、受环境条件限制等局限性。今后研究的重点: 寻找超累积植物并研究重金属富集的机理; 通过基因工程发展植物修复技术; 通过物理、化学和生物方法强化植物修复技术, 如发展对环境安全的化学添加剂。

关键词: 植物修复技术; 重金属污染; 土壤

中图分类号: X173

文献标识码: A

随着经济发展及人口的增加, 工业“三废”和生活污水的排放与日俱增, 土壤环境污染, 尤其是重金属污染日益严重。重金属污染的土壤不仅对作物的生长发育及产量、品质有影响, 而且会通过食物链对人体健康造成危害。日本农田土壤总污染面积为7 030 hm², 主要受Cd, Cu, As等重金属污染^[1]。据统计, 我国约有3万多hm²土地受汞的污染, 有1万多hm²土地受镉的污染, 每年仅生产“镉米”就达5万t以上, 而每年因污染而损失的粮食约1 200万t, 严重影响了我国的粮食生产和食品安全^[2]。因此, 土壤重金属污染的治理对于我国的农业可持续发展和环境质量的改善十分重要。

由于重金属污染物在土壤中难迁移, 又不能微生物降解, 价态变化复杂, 使得其治理非常困难^[3]。传统的修复方法有客土法、化学冲洗法、电化学等。但这些方法往往存在着投资昂贵、需要复杂设备或打乱土层结构、不适用于大面积污染等缺点。近年来出现的植物修复技术由于成本低、效果良好、不破坏环境等优点, 正成为农业和环境科学领域研究和开发的热点^[4,5]。

1 植物修复技术的概念和发展

1.1 植物修复技术的概念

植物修复技术 (phytoremediation) 广义上是指利用植物提取、吸收、分解、转化或固定土壤、沉积物、污泥或地表、地下水中有毒有害污染物的总称^[6]。而狭义上的植物修复技术是指将某种特定的植物种植在重金属污染的土壤上, 该种植物对土壤中的污染元素具有特殊的吸收富集能力, 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^[7], 也就是通常所指的植物提取技术 (phytoextraction)。

1.2 植物修复技术的发展

1583年人们在意大利托斯卡纳首次发现了一种特殊植物, 命名为 *Alyssum bertolonii* (庭荠属)。后来经测定, 发现该植物叶片中 $w(\text{Ni}) = 7\ 900 \times 10^{-6}$ (干燥状态下), 这是有关超积累植物 (Hyperaccumulator) 的最早报道^[8]。以后的研究证明这些植物是一些地方性的物种, 其区域分布与土壤中某些重金属含量呈明显的相关性。这些植物作为指示植物在矿藏勘

收稿日期: 2004 - 02 - 25

基金项目: 广西自然科学基金资助项目 (桂科基 0342001 - 4)

作者简介: 刘杰 (1977 -), 男, 硕士, 环境工程专业。

探中发挥了一定的作用,而重金属污染土壤上大量地方性植物物种的发现促进了耐金属植物的研究,同时某些能够富集重金属的植物也相继被发现.文献[9]提出了超积累植物的概念.文献[10]提出了利用超积累植物清除土壤重金属污染的思想.随后有关耐重金属植物与超积累植物的研究逐渐增多,植物修复作为一种治理污染土壤的技术被提出,并以其安全、廉价的特点成为研究和开发的热点.以美国环保局公布的 Phytoremediation bibliography 为例,1977年有关文献仅7篇,到1997年已增长到214篇.美国、英国都设立了植物修复公司,如美国的 Edenspace 公司,专门从事土壤、水体重金属和放射性元素的植物修复商业化工作.

2 植物修复技术的类型及其机理

根据机理的不同,土壤重金属污染的植物修复技术有3种类型:植物固定、植物挥发和植物提取^[11].

2.1 植物固定

植物固定(Phytostabilization)是指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^[11]. Cotter-Howells^[12]等发现铅可与磷结合,形成难溶的磷酸铅沉淀在植物根部,减轻铅的毒害. Cunningham 等研究了植物对环境中土壤 Pb 的固定,发现一些植物可降低 Pb 的生物可利用性,缓解 Pb 对环境中生物的毒害作用.还有研究表明六价铬可被还原为毒性较低的三价铬^[13].然而植物固定并没有将环境中的重金属离子去除,只是暂时的固定.如果环境条件发生改变,金属的生物可利用性可能又会发生改变.因此植物固定不是一个很理想的去除环境中重金属的方法.

2.2 植物挥发

植物挥发(Phytovolatilization)是指利用植物去除土壤中的一些挥发性污染物的一种方法,即植物将污染物吸收到体内后又将其转化为气态物质,释放到大气中.过去,人们发现微生物能促使土壤中的 Se 挥发,最近研究表明,植物对 Se 的挥发有着同样的功能.如, *B. juncea* 能使土壤中的 Se 以甲基硒的形式挥发去除^[14].还有的研究表明烟草能使毒性大的二价汞转化为气态的零价

汞^[15]. Rugh 等将细菌的汞还原酶基因转入 *Arabidopsis thaliana* 中,发现该植物对 $HgCl_2$ 的抗性和将 Hg^{2+} 还原为 Hg 的能力明显增强^[16].植物挥发只适用于挥发性的污染物(如 Se, As 和 Hg 等),应用范围很小,并且将污染物转移到大气中对人类和生物仍有一定的风险,因此它的应用仍受到限制.

2.3 植物提取

植物提取是目前研究最多且最有发展前景的植物修复方式.通过种植一些特殊植物,利用其根系吸收污染土壤中的有毒有害物质并运移至植物的地上部分,收割地上部的物质后即可带走土壤中的污染物.植物提取技术需要选择既能耐受重金属污染又能大量积累重金属的植物种类,因此研究不同植物对金属离子的吸收特性,筛选出超积累植物是研究和开发的关键.重金属的超积累植物应具有以下特征:植物体内某一金属元素的浓度应达到一定的临界值.但是,由于各种金属元素在土壤和植物中的背景值差异较大,因此对不同重金属超积累植物的临界值没有统一的标准.目前公认的是 Baker 等^[17]提出的参考值(表1).植物地上部的重金属含量应高于根部.

在重金属污染的土壤上植物能良好地生长,一般不发生重金属中毒现象.目前,世界上发现的超富集植物共有400多种,其中 Ni 的超富集植物有277种^[18].在中国,陈同斌等首次发现了砷的超积累植物蜈蚣草(*Pteris vittata* L.)^[19].

表1 不同重金属超积累植物的临界浓度
Table 1 Critical concentration of several heavy metals hyperaccumulator $w_B/10^{-6}$

元素	临界标准	元素	临界标准
Cd	100	Mn	10 000
Co	1 000	Ni	1 000
Cr	1 000	Pb	1 000
Cu	1 000	Zn	10 000

至今为止,有关超积累植物大量富集重金属的机理仍不十分清楚.文献[20]认为,超积累植物的根部能通过以下几种方式增加重金属的移动性,促进重金属离子的吸收:植物的根系能分泌一些金属离子的螯合剂(如苹果酸、柠檬酸、组氨酸等)以螯合、溶解土壤中束缚的重金属;根部具有特殊的原生质膜,这种原生质膜上绑

缚有金属还原酶,能增加金属的有效性;植物的根能释放质子,提高根际土壤的酸性,从而增加重金属的移动性;植物可以通过根际微生物促进对金属离子的吸收。此外,还有研究表明某些超积累植物能够通过区隔化机制(Compartmentation)降低体内存储的重金属的毒性。Nishizono^[21]等人分析了 *Athyrium yokoscense* 的根细胞壁在重金属抗性中的作用,发现该植物所吸收的 Cu, Zn, Cd 总量中的大约 70%~90% 都位于细胞壁。Brooks 等^[22]对 *A. serpyllifolium* 的组织进行离心分离,发现 72% 的 Ni 分布在液泡中。

3 人工诱导植物修复技术

3.1 利用基因工程促进植物修复

传统的植物修复技术往往受到植物的生物量、生长速度、适应性和对重金属的选择性等因素的制约,表现出一定的局限性。利用基因工程来培育出高产、高效和可富集多种重金属的超积累植物,已经成为人工诱导植物修复技术的一个新思路。Varara 等将细菌中的 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, rol D 和 PRB-1b 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的富集^[23]。

3.2 化学添加剂强化植物修复技术

植物修复技术的效果与重金属在土壤中的生物可利用性密切相关。而大部分重金属在土壤中的生物有效性较低,能够直接被植物利用的部分很少。有研究表明,向土壤中施加化学物质,能够改变土壤重金属的形态,提高重金属的植物可利用性^[24],于是化学诱导植物修复技术就应运而生了。在化学诱导植物修复技术中,使用最多的化学物质是螯合剂,其余依次为酸碱类物质、植物营养物质以及共存离子物质。近年来还有植物激素、腐质酸、CO₂及表面活性剂等。

螯合剂对土壤中重金属的活化作用是其应用于植物修复的关键所在。活化作用主要是通过螯合剂与土壤溶液中的重金属离子结合,降低土壤液相中的金属离子浓度,为维持金属离子在液相和固相之间的平衡,重金属从土壤颗粒表面解吸,由不溶态转化为可溶态,为植物的吸收创造有利条件。De-

ram 等的研究表明,向土壤中加入 EDTA 后,大大地提高了 *Arrhenatherum elatius* 对 Cu, Co 和 Ni 的吸收,其中 Cu 的质量分数由对照的 200×10^{-6} 增加到 $7\,500 \times 10^{-6}$, Co 由 40×10^{-6} 增加到 175×10^{-6} , Ni 由 8×10^{-6} 增加到 $1\,276 \times 10^{-6}$ ^[25]。柠檬酸也是较理想的化学添加剂。Huang 等研究发现,向铀污染土壤中加入 20 mmol/L 的柠檬酸,3 d 后,印度芥菜地上部分铀的浓度提高了 1 000 多倍^[26]。而且柠檬酸容易降解,不会造成残留毒性,使用更安全。

4 植物修复技术的优点与不足

与传统的污染土壤修复技术相比,植物修复技术有以下显著的优点。

(1) 成本低。Cunningham^[27]对利用各种技术治理一块 4.86 hm² 铅污染土地的成本进行了估测比较(美元):挖掘填埋法,1200万;化学淋洗法,6300万;客土法,60万;植物提取法,仅为20万。

(2) 植物修复是原位修复,不需要挖掘、运输,能适用于大面积的污染。

(3) 植物修复技术对土壤性质和周围生态环境的影响小,是真正意义上的“绿色修复技术”。

由于植物修复技术还处于研究和开发阶段,仍然是一种不成熟的技术,因此现在还存在很多局限性。

(1) 植物修复受到植物生长速度和生物量的限制,修复速度较慢。

(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) 植物修复土壤只能到达根系所延伸的范围。

(4) 用于修复的植物与当地植物的竞争,可能威胁到本地的生物多样性。

5 展望

(1) 继续寻找、筛选出理想的超积累植物。我国有广袤的国土面积和丰富的物种资源,是寻找超积累植物较理想的地区。在调查、收集到相当数量的超积累植物资源的基础上,筛选出富集能力强、生长快,易于繁殖和培养的可用于植物修复的理想植物。这是植物修复技术走向产业化的前提条件。

(2) 深入研究超积累植物对重金属富集的机理。目前,超积累植物对重金属的吸收、转运和积累的机制仍然不清楚,研究超积累的机理,揭示出植物富集重金属的生理生态过程,有利于提高植物对重金属的富集能力和筛选出低选择性的超积累植物。

(3) 通过基因工程发展植物修复技术。应用基因技术培育出高产、高效和可富集多种重金属的转基因植物,可以克服天然超积累植物生长慢、生物量低和适应环境能力差等不足,是植物修复技术的一个很有价值的研究方向。

(4) 通过物理、化学和生物方法强化植物修复技术。电流能有效地提高重金属在土壤中的移动性,促进植物对重金属的吸附和吸收。许多真菌对重金属有很高的耐受性和积累性,真菌的活动能降低重金属对植物的毒性,提供对植物根系的保护,有利于修复植物的生长。将适合某种污染的真菌接种在超积累植物的根部,有可能促进植物修复。化学添加剂能改变土壤中重金属的形态,提高重金属的生物可利用性。寻找能够提高植物蓄积量、对植物生长无害、对环境安全可靠的化学添加剂是今后化学诱导植物修复技术的主要研究方向。

参考文献

- [1] 岛崎和夫. 日本农田土壤污染现状与对策 [J]. 孙米敏译. 国外农业环境保护, 1990, (2): 33 - 34.
- [2] 陈怀满. 土壤-植物系统中的重金属污染[M]. 北京: 科技出版社, 1996.
- [3] 夏星辉, 陈静生. 土壤重金属污染治理方法研究进展 [J]. 环境科学, 1997, 18(3): 72 - 75.
- [4] Salt D E, Smith R D, Raskin L. Phytoremediation [J]. Annu Rev Plant Physiol Mole Biol, 1998, 49: 643 - 668.
- [5] Pulford I D, Watson C. Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees—a review [J]. Environment International, 2003, 29: 529 - 540.
- [6] USEPA. Introduction to Phytoremediation [R]. Washington DC: USEPA, 2000.
- [7] 王庆仁, 崔岩山, 董艺婷. 植物修复——重金属污染土壤整治有效途径 [J]. 生态学报, 2001, 21(2): 326 - 331.
- [8] Brooks R R. Plants that hyperaccumulate heavy metals [J]. CAB international, 1989, (1): 1 - 2.
- [9] Brooks R R, Lee J, Reeves R D, et al. Detection of nickeliferous rocks by alyssum of herbarium species of indicator plants [J]. Journal of Geochemical Exploration, 1977, 7: 49 - 57.
- [10] Chaney R L, Malike M, Li Y M, et al. Phytoremediation of soil metals [J]. Current Opinion in Biotechnology, 1997, 8: 279 - 284.
- [11] Cunningham S D. Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants [J]. Adv Agron, 1996, 56: 55 - 114.
- [12] Cotter - Howells J D, Caporn S. Remediation of contaminated land by formation of heavy metals phosphates [J]. Appl Geochem, 1996, 11: 335 - 342.
- [13] James B R. Remediation - by - reduction strategies for chromate-contaminated soils [J]. Environ Geochem Health, 2001, 23: 175 - 179.
- [14] Terry N, Carlson C, Raab T K, et al. Rates of selenium volatilization among crop species [J]. J. Environ Qual, 1992, 21: 341 - 344.
- [15] Ouyang Y. Phytoremediation: modeling plant uptake and contaminant transport in the soil-plant-atmosphere continuum [J]. Journal of Hydrology, 2002, 266: 66 - 82.
- [16] Rugh C L, Wilde H D, Stack N M, et al. Mercuric ion reduction and resistance in transgenic *Arabidopsis thaliana* plants expressing a modified bacterial merA gene [J]. Proc Natl Acad Sci USA, 1996, 93: 3182 - 3187.
- [17] 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.
- [18] 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 plants [J]. Resource, Conservation and Recycling, 1994, 11: 41 - 49.
- [19] 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春, 等. 超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.
- [20] Raskin L, Smith R D, Salt D E. Phyto-remediation of metals: using plants to remove pollutants from the environment [J]. Current Opinion in Biotechnology, 1997, (8): 221 - 226.
- [21] Nishizono H. The role of the root cell wall in the heavy metal tolerance of *Athyrium yokoscense* [J]. Plant and Soil, 1987, 101: 15 - 20.
- [22] Brooks R R, Shaw S, Marfil A A. The chemical form and physiological function of nickel in some Iberian *Alyssum* species [J]. Plant Physiol, 1981, 51: 167 - 170.
- [23] Varara P G. 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.
- [24] Chen H M, Zheng C R, Tu C, et al. Chemical methods and phytoremediation of soil contaminated with heavy metals [J]. Chemosphere, 2000, 41: 229 - 234.
- [25] Deram A, Petit D, Robwson B, et al. Natural and Induced Heavy-Metal Accumulation by *Arrhenatherum elatius*: Implication for phytoremediation [J]. Commu Soil Sci Plant Anal, 2000, 31 (3): 413 - 421.
- [26] Huang J W. Phytoremediation of Uranium-contaminated soils: role of Organic acids in triggering Uranium hyperaccumulation in plant [J]. Environmental Science and Technology, 1998, 32: 2004 - 2008.
- [27] Cunningham S D, Berti W R. Phyto-remediation and phytostabilization: technical, economical and regulatory considerations of the soil - lead issue [A]. In: Terry N, Banuelos G. eds. Phytoremediation of Contaminated Soil and water [C]. New York: CRC Press, 2000.

Phytoremediation of Heavy Metal-Contaminated Soil

LIU Jie, ZHU Yi-nian, LUO Ya-ping, ZHANG Hui-lin

(Department of Resources and Environmental Engineering, Guilin Institute of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract : As a safe and reliable technology for heavy metal contaminated soil, phytoremediation becomes the focus in current research. According to the different mechanism of eliminating heavy metal contamination in soil, phytoremediation can be subdivided into phytostabilization, phytovolatilization and phytoextraction. Compared with the traditional technology for recovery of polluted soil with heavy metals, phytoremediation has such advantages as low cost, protecting environment and easier operation. But the development of this technology is limited for low speed restoration and sensitivity of environmental condition. To solve these problems, further studies on gene technology application and soil amendment in improving remediation ability should be developed.

Key words : phytoremediation; heavy metal contamination; soil

《有机宝石学》序言选登

由周佩玲教授等人编著的《有机宝石学》是近来宝石学著作中难得的、有关有机宝石研究的专著，也是一本有机宝石的优秀教材。

《有机宝石学》有其显著的特色，主要表现为：

一是全面性。作者从有机宝石学的基本理论、基本知识、基本技能、国内外有机宝石的珍品鉴赏、有机宝石的商贸与文化、产业投资指南等各方面进行了全面的论述，可称为有机宝石的百科全书。

二是系统性。该书首次创立了有机宝石学的总论，对其基本概念定义、分类、共性特征、发展现状和展望作了系统的、深入浅出的论述；在分论中对各类有机宝石都有单独的论述，该书为有机宝石学建立了一个完善的科学体系，所以“系统性”是该书的又一个显著的特征。

三是先进性。首先，表现为利用耗散结构理论、仿生材料学、生物矿物学等相关理论的发展作为本教材的支柱，总结了这些方面的新成果和新认识，展望了未来的发展前景。其次，把现代测试技术运用于有机宝石研究作为本教材的另一个支撑点，论述了现代测试技术使有机宝石的研究，由原来的结构水平跃升到内部电子层水平，粒度从毫米级跃至微米级、纳米级的粒度范畴，为有机宝石的研究开发工作开阔了前景。再次，资料新，反映了最新信息和成果。

四是科学性。本书作者对有机宝石珍珠、珊瑚、琥珀、玳瑁、贝壳等都进行过系统全面的专题研究，获得了大批第一手新资料，有些资料在本书中首次发表，在大量资料基础上，提出了一些新观点和新认识，保证了本书的资料真实可靠，论点明确，论据充分，章节安排合理，科学性强。

五是实践性。有机宝石学是来自周佩珍教授及桂林工学院师生们的教学、科研的实践，也必将指导人们进行有关有机宝石学的教学、科研，有机宝石的文化、市场营销等实践活动。它既是一本实践性很强的教材，也是一本指导有机宝石科研实践的参考书。

全面性、系统性、先进性、科学性、实践性是教材五大特色及成功之处。

人们对事物的认识是无止境的，对有机宝石自然也不例外。《有机宝石学》既是对过去实践经验和理论认识的系统总结，也为今后进一步的研究和认识创造了一个新的高起点。

北京大学地球与空间科学学院教授、博士生导师 崔文元