

植物修复技术与农业生物环境工程*

唐世荣 B. M. Wilke
(浙江大学) (德国柏林工业大学)

摘 要 介绍了植物修复技术的概念、内涵、研究方法等,探讨了植物修复技术的优缺点和控制因素,指出农业生物环境工程手段的引进将有可能大幅度提高植物修复污染土壤的相对效率。

关键词 植物修复技术 优缺点 农业生物环境工程

随着工农业生产的发展和人口的增加,各种化学的、物理的和生物的因素正在加剧环境中污染物的积累。工业污泥和垃圾农用、污水农灌、大气中的污染物沉降、含重金属矿质化肥和农药长期施用于农田、水产养殖……这些活动加剧环境中重金属和其它污染物的积累。其中有些污染物如重金属在环境中具有相对的稳定性和难降解性,很难将它们从环境中清除出去。事实上,传统的环境污染清洁技术表现出许多方面的弱点^[1]。因此,开发新颖的环境治理技术是形势的需要。植物修复技术就是在这种形势下应运而生的。它是一种较为廉价的绿色治理技术。植物为人类提供食品、能源、建筑材料、自然纤维、药品和各种各样有价值的化学品,将植物用于环境治理是植物为人类服务功能的延伸和拓展。本文就植物修复技术的概念、内涵、优缺点、影响因素以及农业生物环境工程技术的引进对提高修复效率的影响等进行了简要的分析。

1 植物修复技术的概念及类型

植物修复技术是以植物忍耐和超量积累某种或某些污染物的理论为基础,利用植物及其共存微生物体系清除环境中的污染物的一门环境污染治理技术。它是一门新兴起的应用技术。广义的植物修复技术包括利用植物固定或修复重金属污染土壤、利用植物净化水体和空气、利用植物清除放射性核素和利用植物及其根际微生物共存体系净化环境中有机污染物等方面^[1]。狭义的植物修复技术主要指利用植物清除污染土壤中的重金属。

植物修复技术由下列三部分组成^[2]:

1) 植物萃取技术(phytoextraction): 利用金属积累植物或超积累植物^[3,4]将土壤中的金属萃取出来,富集并搬运到植物根部可收割部分和植物地上的枝条部位^[5];

2) 根际过滤技术(rhizofiltration): 利用超积累植物或耐重金属植物从污水中吸收、沉淀和富集有毒金属^[6];

3) 植物固化技术(phytostabilization): 利用耐重金属植物或超积累植物降低重金属的活性,从而减少重金属被淋洗到地下水或通过空气载体扩散进一步污染环境的可能性^[2]。

植物修复技术主要包括下面两大方面的内容^[7]: 一是土壤的植物修复,包括植物萃取技术、植物固化技术、植物蒸发技术(phytovolatilization,指与吸收和释放挥发性化合物到大气圈

收稿日期: 1998-11-09 1999-05-15 修订

* 国家自然科学基金(39600085)和浙江省自然科学基金项目

唐世荣, 博士, 副教授, 杭州市凯旋路 268 号 浙江大学华家池校区核农业科学研究所, 310029

有关的植物修复过程)、根际生物降解的植物诱导技术 (phytostimulation of rhizosphere biodegradation, 指与植物或植物组织分泌物刺激根圈微生物降解污染物作用有关的植物修复过程) 等类型; 二是水的植物修复, 包括根际过滤技术、水力泵技术 (hydraulic pumping, 指通过天然植物的泵吸作用去除大量水分的作用过程)、废物填埋淋洗技术 (landfill leachate, 指由大气降水渗入固体或有害废弃填埋物后所引起的有害物质随地表径流或地下水迁移的作用过程)、人工湿地构建技术 (constructed wetlands) 等类型^[7]。尽管植物修复技术的类型很多, 目前基本成熟的类型主要有下面几种。

1) 植物萃取技术: 适合于植物萃取的理想植物应该具有如下特点: (1) 植物可收割部位必须能忍耐和积累高含量的污染物; (2) 植物在野外条件下生长速度快、生长周期短、生物量高、个体高大、向上垂直生长以利于机械化作业等; (3) 植物对农业措施如施肥等能产生积极的反应。因为只有这样才能够反复种植, 多次收割。然而, 天然条件下所见到的植物往往难以同时满足上述条件。目前常用植物包括各种野生的超积累植物^[3]、某些高产的农作物如芸苔属植物 (印度芥菜等)^[8]、油菜^[9]、工业用的大麻等。

2) 根际过滤技术: 适用于根系过滤技术的植物, 必须有较大的根系生物量, 最好是须根植物。目前常用的植物有各种耐盐的野草如弗吉尼亚盐角草 (*Salicornia virginica*)、牙买加克拉莎草 (*Cladium jamaicense*)、盐地鼠尾粟 (*Sporobolus virginicus*)^[10, 11]、杂交杨树^[12]、印度芥菜、向日葵^[13]及各种水生植物如宽叶香蒲^[14]等。根际过滤技术主要用来处理石油天然气生产过程中产生的废水、含放射性污染物质的废水、含重金属的各种废水以及富含其它污染物 (如氮、磷、钾) 废水。

3) 植物固化技术: 适用于固化污染土壤的理想植物, 应是一种能忍耐高含量污染物、根系发达的多年生绿叶植物。这些植物通过根吸收、沉淀或还原作用可使污染物 (如金属) 惰性化。当然, 植物枝条部位的污染物含量低更好, 因为这样可以减少收割植物枝条器官并将其作为有害废弃物处理的必要性。植物固化技术对废弃场地重金属污染物和放射性核素污染物固定尤为重要, 原地固定这两类污染物是上策, 可显著降低风险性。生长茂盛的植物对污染场地的水文条件有时会产生明显的控制作用, 并使场地污染物惰性化, 调节当地的小气候环境。

4) 植物辅助生物修复技术, 也称植物刺激技术, 或称植物辅助修复技术: 指通过根圈范围内植物的活动刺激微生物的生物降解的植物修复过程。根圈的植物修复可增加土壤有机质含量、细菌数量和菌根真菌数量。反过来, 这些因子又有利于土壤中有机化合物的降解。Jordahl 等^[15]研究发现, 与未种植树木的地方相比, 杂交杨树根圈带中细菌的数量明显增加。植物还向土壤环境释放出一种有助于刺激有机物降解的根际分泌物。来自植物和植物转化物的糖、乙醇和酸的量每年将达到植物光合作用的 10% ~ 20%^[16]。Fletcher 等^[17]报导, 桑树、桑橙树和苹果树被人们用来刺激能降解多氯联苯 (PCB) 和多环芳烃 (PAH) 的微生物生长, 它们的根际产物包含黄酮类化合物和氧杂萘邻酮。

5) 植物转化技术: 指通过植物新陈代谢作用降解环境污染物的过程。植物转化取决于污染物从土壤和水体中的直接吸收和在植物器官中新陈代谢物的积累。从环境治理的角度考虑, 植物中积累的新陈代谢产物必须是非毒性的, 或者至少与其母体成分相比较毒性明显降低。植物转化技术目前主要的应用领域包括石化产品污染地和贮藏地、武器弹药废弃物、燃料溢出物、氯化溶剂、垃圾掩埋中的淋滤物、农用化合物 (杀虫剂和化肥) 等。如有机化合物迁移进入植物体内, 植物便会将这些化学物及分解的碎片通过木质化作用贮藏在新的植物组织中 (化合物或其碎片以共价键形式结合在植物的木质部), 或者使化合物完全蒸发、新陈代谢或矿质化成为

二氧化碳和水。植物中的硝基还原酶和树胶氧化酶可以将弹药废弃物如 TNT (2, 4, 6-三硝基甲苯) 分解, 并把断掉的环形结构加入到新的植物组织或有机物碎片中, 成为沉积有机物质的组成部分^[18]。

2 植物修复技术的研究内容与研究方法

植物修复的研究内容至少包括下面几个方面:

- 1) 积累植物和超积累植物的筛选及其在污染土壤和水体修复方面的应用潜力评估;
- 2) 影响植物修复污染土壤和水体的因素研究, 包括土壤化学、农业化学、地理气候、温度、湿度、光、灌溉及病虫害等因素;
- 3) 与积累植物和超积累植物共存的微生物体系研究;
- 4) 积累植物和超积累植物根际生态环境特征研究及其对植物修复效率的影响;
- 5) 植物积累土壤和水体中污染物的生物学机制(包括根部吸收机制、体内运输机制及抗性机制)研究;
- 6) 水产养殖系统中废弃养分的植物吸收与再利用研究;
- 7) 农业生物环境工程措施在污染土壤和污染水体植物修复中的应用;
- 8) 基因工程技术对植物性状的改良及其应用。

植物修复技术是在多科学交叉点上生长起来的新技术, 涉及的相关学科包括生物地球化学找矿学、地质学、植物分类学、植物生理学、植物营养学、土壤化学、环境生态学、农业生物环境工程等。常用的方法有:

- 1) 污染土壤和水体调查方法: 主要涉及到的方法有土壤学研究法、土壤化学研究法、土微生物学研究法及水质分析方法;
- 2) 积累植物和超积累植物的筛选方法, 包括野外评价方法、温室栽培试验法、营养液栽培试验方法、根际生物测定技术(root bioassay technique)、细胞和组织培养试验方法、种子发芽试验方法;
- 3) 利用植物修复污染土壤和水体的方案设计及实施方法;
- 4) 植物种植方法、田间管理与观察方法、收获及植物器官的处理方法、考种方法;
- 5) 植物修复污染土壤和污染水体研究成果的示范与推广方法;
- 6) 农业生物环境工程方法。

3 植物修复技术的优缺点

与其它污染土壤处理方法相比, 优点突出表现在以下几个方面:

- 1) 植物修复的成本低(仅需传统修复技术 1/3~ 1/10 的成本, 投资和运作成本均较低), 对环境扰动少, 清理土壤中的污染物的同时, 还可同时清除污染土壤周围的大气或水体中的污染物;
- 2) 有较高的环境美学价值, 大众对该项技术也有较好的心理承受能力, 易为社会所接受。污染地附近的居民总是期望有一种治理方案既能保护他们的身心健康, 美化其生活环境, 又能消除环境中的污染物, 植物修复技术恰恰能满足这一点;
- 3) 植物向环境释放根际分泌物和根器官腐烂的过程是根系周围土壤碳和氧含量增加的过程, 因此, 植物修复可增加土壤有机质含量和土壤肥力, 被植物修复过的干净土壤适合于多种农作物的生长;

4) 植物固化技术能使地表长期稳定, 有利于污染物的固定、生态环境改善和野生生物繁衍, 而且维持固化的成本低。

5) 如果从超积累植物中回收重金属的工艺问题得到解决, 人们在治理重金属污染土壤的同时还能回收一定量的重金属。相当于组建一个廉价的、以太阳光为能源的生物加工厂, 每收割一茬植物便可回收数量可观的重金属。与通过正常的矿石冶炼方法获取金属比较, 焚烧植物获取重金属对环境损害更少, 因为用矿石冶炼金属会向空气中排放含硫的污染物。

6) 对于植物修复可用作微肥的重金属如铜、锌来说, 富集重金属的植物在收割后可用作制成微肥的原材料, 用这种原材料制成的微肥更易被植物吸收。如铜超积累植物收割后可用作加工(如堆肥)铜微肥的原材料。

7) 植物修复技术能永久性解决土壤中的重金属污染问题。相比之下, 多数传统的重金属处理方法只是将污染物从一个地点搬运到另一个地点或从一种介质搬运到另一种介质或使其停留在原地, 其结果只能是延期剔除土壤中的重金属。而植物修复技术则能彻底、永久性地将重金属从土壤中清除出去, 并加以回收和利用。

8) 植物修复有两个特点: 一是植物既可以从污染较严重的土壤中萃取重金属也可以从轻度污染的土壤中吸取重金属。这种特性对于修复因施用工业污泥导致表层(耕作层)重金属轻度污染的农田、农地来说, 效果更为理想; 二是植物吸收具有选择性, 它能够直接针对目标污染物进行吸收。

9) 植物修复技术通过萃取和浓集作用可极大地减少污染物的体积。以一块面积为 400 m^2 的重金属污染土壤为例, 假如污染深度在 45 cm 以内, 用填埋法处理, 污染土壤总量可达 5000 t 。而如果用植物吸收掉所有的重金属, 并将这些植物器官焚烧, 只产生 $25 \sim 30 \text{ t}$ 的废弃物^[19]。因此, 需要处理的废弃物总量大大地减少。

10) 适用植物修复的污染物范围很广, 如重金属(Cd, Cr, Pb, Co, Cu, Ni, Se, Zn)、放射性核(Cs, Sr, U)、氯化溶剂(TCE, PCE)、石油碳氢化合物(BTEX)、聚氯联苯(PCBs)、多环芳烃(PAHs)、氯化杀虫剂、有机磷酸盐杀虫剂(如对硫磷)、爆炸物(TNT, DNT, TNB, RDX, HMX)、营养物(硝酸盐、氨、磷酸盐)、表面活性剂等。

虽然植物修复技术有许多优点, 但它也不是万能的, 仍有一定的局限性。并且不同类型的植物修复技术的局限性也各不相同。最明显的不足之处为:

1) 需针对不同的目标污染选用不同的生态型植物。重金属污染严重的土壤易选用超积累植物; 而污染较轻的土壤可栽种耐重金属植物;

2) 对土壤肥力、地理气候、水分、盐度、酸碱度、排水与灌溉系统等自然和人为的条件有一定要求;

3) 一种植物往往只吸收一种或两种重金属元素, 对土壤中其它浓度较高的重金属则表现出某些中毒症状, 从而限制了植物萃取技术在多种重金属污染土壤治理方面的应用前景;

4) 用于清理重金属污染土壤的超积累植物通常矮小、生物量低、生长缓慢、生长周期长, 因而修复效率低, 不易于机械化作业;

5) 用于清洁污染物的植物器官往往会通过腐烂、落叶等途径使污染物重返土壤。因此, 必须在植物落叶前收割并处理植物器官;

6) 修复的时间较长(通常需要一个生长季节以上);

7) 土壤的处理一般只局限在地表 1 m 以内; 地下水的处理只局限在地表 3 m 以内。短根植物, 只能原地修复近地表的土壤和水体, 一般深度为 $1 \sim 2 \text{ m}$; 长根植物, 可以清除更深处的

污染物,一般深度为 3~ 5 m^[19];

8) 污染物可通过食用含污染物植物的昆虫和动物进入食物链;

9) 为了破坏污染物与土壤颗粒之间的结合作用以增加重金属的生物可获得性,有时可能要在土壤中加入添加剂(如螯合剂),这样做的结果往往会造成二次污染。

4 农业生物环境工程与植物修复技术

尽管植物修复技术具有众多的优点,但大范围推广这项技术仍存在许多客观上的不利因素,其中最主要的控制因素包括两个方面:植物的耐性遗传特性和环境特性,遗传特性决定植物能否在污染环境生长以及植物器官积累污染物的绝对量。目前世界各地至少发现了 400 种植物能超量积累环境中的污染物,包括重金属;环境因子则决定植物的耐性潜力能在多大程度上得以实现以及实现这种特性的效率如何。没有对污染物的耐性遗传特性,植物无法在污染介质中生长,但是如果如果没有适宜的环境条件,植物的耐性遗传特性就无法得到充分的发挥。然而,在天然条件下,土壤肥力、海拔、气候、水分、盐度、酸碱度、排水与灌溉系统等自然的和人为的环境因子难以达到超积累植物生长的适宜要求,结果导致植物在自然条件下生长缓慢、生长周期长、生物量低、植物修复的年限长,相对修复效率不高,单位面积上植物吸收和积累污染物的总量低,在很大程度上限制了积累植物和超积累植物在修复环境污染物方面的潜力发挥。因此,采用工程的手段为植物生长创造适宜的环境条件,将会越来越受到人们的重视。预测将来的工作是:一方面进一步寻找具有良好遗传性状的积累植物和超积累植物,增加植物修复环境中污染物的绝对效率;另一方面通过农业生物环境的手段使这种优良性状得以最大限度地实现,提高植物修复的相对效率。为此,人们将建造由催芽、育苗、栽培、收获和烘干等车间组成的植物修复工厂,实现不断播种,不断收获,达到治理的同时增产、增效。这样不仅可以大幅度提高植物修复的效率,减少环境污染治理年限,而且可以降低成本,产生经济效益。对重金属污染土壤的植物修复来说,真正实现所谓的“种植物,收金属”。

5 结 论

综上所述,植物修复技术是一个很新的研究领域,在“谁污染谁治理”的环保政策监督下必将具有很大的市场潜力。真正大范围推广使用这项技术,使之有效地为社会服务还有许多的问题有待解决。今后的工作重点除了进一步寻找和开发具有良好遗传性能的积累植物和超积累植物外,还应该重视通过农业生物环境工程的手段来保证这种遗传性能得到充分发挥。我国植物资源丰富,研究、驯化和利用这些植物资源于环境治理是一项关系到我们自身生存环境质量和子孙后代的工程。

参 考 文 献

- 1 唐世荣, 黄昌勇, 朱祖详. 利用植物修复重金属污染土壤. 环境科学进展, 1996, 4(12): 10~ 15
- 2 Salt D E, B laylock M, Kumar N P B A, et al. Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. Bio/Technology, 1995, 13: 468~ 474
- 3 唐世荣. 超积累植物. 农业环境与发展. 1996, 49(3): 14~ 18
- 4 唐世荣, 黄昌勇, 朱祖祥. 超积累植物与找矿. 物探与化探, 1997, 25(3): 14~ 17
- 5 Kumar P B A N, Sushenkov V, Motto H, et al. Phytoextraction—the use of plants to remove heavy metals from soils. Environ Sci Technol, 1995, 29: 1272~ 1238
- 6 Dushenkov V, Kumar P B A N, Motto H. Rhizofiltration: the use of plants to remove heavy metals

- from aqueous streams *Environ Sci Technol*, 1995, 29: 1239~ 45
- 7 Glass D. The 1998 United States Market for Phytoremediation. D Glass Associates, Inc., 1998: 1~ 20
 - 8 Kumar P B A N, Dushenkov V, Motto H, et al. Phytoextraction: The use of plants to remove heavy metals from soils. *Environ Sci Technol*, 1995, 29: 1232~ 1238
 - 9 Leendertse P C, Pak G A. Green soil clean-up by farmers: a challenge? Conference Proceedings Contaminated Soil 98 Volume Two, Thomas Telford, London, 1998, 1105~ 1106
 - 10 唐世荣, 黄昌勇, 朱祖祥. 利用野草处理石油天然气生产过程中的废水. *中国人口·资源与环境*, 1998, 8: 81~ 83
 - 11 Hinchman R R, M C Negri. The grass can be cleaner on the other side of the fence. *Logos*, 1994, 12(2): 8~ 12
 - 12 Burken J G, J L Schnoor. Hybrid poplar tree phytoremediation of volatile organic compounds. Abstracts of Papers of the American Chemical Society, 1996, 212: 106-A GRO
 - 13 Dushenkov V, P B A Nanda Kumar, H Motto, et al. Rhizofiltration: The use of plants to remove heavy metals from aqueous streams. *Environ Sci Technol*, 1995, 29: 1239~ 1245
 - 14 李科德, 胡正嘉. 用水生植物处理污水. *国外农业环境保护*, 1993, 38(4): 28~ 31
 - 15 Jordahl J, Foster L, Alvarez P J, et al. Effect of hybrid poplar trees on microbial populations important to hazardous waste bioremediation. *Environ Toxicol Chem*, 1997, 16: 1318~ 1381
 - 16 Foth H D. *Fundamentals of Soil Science*. 8th edition, Wiley, New York, 1990
 - 17 Fletcher J S, R S Hegde. Release of phenols by perennial plant roots and their potential importance in bioremediation. *Chemosphere*, 1995, 31: 3009~ 3016
 - 18 Newman, L A, S E Strand, M P Gordon. Uptake and biotransformation of trichloroethylene by hybrid poplars. *Environ Sci Technol*, 1997, 31(4): 1062~ 1065
 - 19 Miller R R. *Phytoremediation: Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center*. Pittsburgh, PA October, 1996

Phytoremediation and Agrobiological Environmental Engineering

Tang Shirong

(Zhejiang University, Hangzhou, 310029)

B. M. Wilke

(Technische Universität Berlin)

Abstract The paper introduces aspects of phytoremediation such as its concept, its meanings, and research methodology. The advantages, disadvantages, and controlling factors of phytoremediation are discussed in the paper. It is pointed out that the introduction of agrobiological environmental engineering means into phytoremediation greatly improved the relative efficiency.

Key words phytoremediation, advantages and disadvantages, agrobiological environmental engineering