

花卉植物修复重金属污染技术的国内外研究进展

白向玉^{1a,1b}, 韩宝平^{1b,2}, 刘汉湖^{1a,1b}, 王晓青^{1b}

(1. 中国矿业大学 a. 江苏省资源环境信息工程重点实验室; b. 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116;

2. 徐州工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘 要: 重金属污染的植物修复技术是可以利用绿色植物从环境中吸收带走重金属或将它们无害化的技术, 是目前发展最快的环境友好、经济、高效的治理技术, 成为当前国内外环境界研究的热点。文章在综述植物修复技术的概念、类型和优点的基础上, 着重分析了目前国内外植物修复技术的新进展, 对该方向的研究工作发挥了引题作用。

关键词: 植物修复; 超积累植物; 花卉植物

中图分类号: X171 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-358X(2010)03-0056-05

随着现代工农业的迅速发展, 环境中的污染物质逐渐增多, 并通过食物链进入人体, 威胁人类健康。针对这一现状, 传统处理方法(物理法、化学法)存在耗资大、效率低、产生二次污染等诸多不足, 因此如何高效、安全、廉价的处理环境中的污染物质成为全球关注的焦点。

在此背景下, 植物修复技术应运而生。植物修复是以清除污染、修复或治理为目的, 利用绿色植物从环境中转移、容纳或转化污染物的环境污染治理技术^[1]。其主要对象是土壤、水体、污泥等介质中的重金属污染和有机污染, 采用的修复植物主要包括水生植物、乔木和草类等。根据修复植物的特点和功能, 用于重金属污染土壤、水体等接种的植物修复技术主要包括植物稳定(或植物固化)、植物挥发、植物提取和植物过滤四种类型。

人类采用绿色植物修复重金属污染的土壤或水体始于 20 世纪 80 年代, 并迅速在欧美等发达国家得到推广和使用。我国对于重金属污染土壤植物修复技术的研究始于 2000 年, 并以在中国科学院南京土壤研究所举办的第一届土壤污染和修复国际会议为标志。相对于重金属污染治理的传统方法, 植物修复技术具有以下明显特点: (1) 以太阳能为动力, 投入少、处理费用低, 适合大面积的污染修复; (2) 可用于土壤、地表水、地下水等介质中多种重金属的清除与治理, 应用范围广; (3) 该技术是目前最清洁的污染处理技术, 不仅能够永久性地解决被修复基质中的重金属污染问题, 不造成二次污染, 还可回收利用一些植物体内的金属; (3) 能使土壤保持良好的结构和肥力状态, 不破坏土壤生态环境; (4) 植物修复是一个自然过程, 易为公众所接受。综上所述, 重金属污染的植物修复技术具有成本低、安全可靠、环境友好、简单易行等诸多优点, 显现出广阔的市场前景, 已经得到国内外学术界和产业界的广泛关注和青睐, 成为研究的热点问题。

1 国内外植物修复技术的研究进展

1.1 国外植物修复技术的研究进展

植物修复技术的研究可以分为两个方面: 耐重金属植物忍耐重金属、超积累植物超量积累重金属的机制研究和利用植物进行污染土壤修复的应用研究。

从已有文献看, 关于植物修复技术的理论研究已有较长的历史。20 世纪 50—70 年代, 对植物修复重金属的机理研究已经成为当时的一个热点; 而至上世纪 70 年代末至 90 年代初, 各国学者又把注意力转向了超积累植物的研究, 这一阶段 Minguzzi 和 Vergnano 发现了超积累植物的先驱。随后, Nicks 和 Chambers 的

收稿日期: 2010-03-22

基金项目: 江苏省教育厅普通高校研究生科研创新计划资助项目(CX08B_140Z); 中国矿业大学青年科研基金资助项目(OP080269)

作者简介: 白向玉(1978-), 男, 内蒙古赤峰人, 讲师, 博士研究生, 主要从事环境污染生态修复研究。

研究表明:在蛇纹岩形成的富 Ni 的土壤上种植 Ni 的超积累植物(*Streptanthus Polygaloides*),辅施 N、P、K 后植物生物量可增长 5 倍,并通过焚烧可以回收重金属,这样就可以加快被 Ni 污染土地的修复工作。这项工作成为了植物修复重金属污染土地的开创性工作。据美国 D. GlaSS 公司统计,2005 年美国植物修复技术市场投入就高达 3.7 亿美元。随后,该项技术被广泛应用,世界上现已发现 400 余种可超量积累 Cd、Co、Cu、Pb、Ni、Se、Mn、Zn 等的植物^[2],例如 Edenspace 公司已经研发出铅、锌、镉、和砷污染的植物修复。英国利物浦大学的 Bradshaw 长期致力于矿山废弃地的生态恢复研究工作,最早利用当地的耐性植物对矿山土地进行了修复,并且成功的开发出可商业化应用的针对不同重金属矿山废弃地的耐性品种系列。Kumar 在含铅 625 mg/kg 的土壤盆栽处理中种植(印度芥菜) *Brassiacajuneca*,3 个星期后就使淋溶液中的铅含量由 740 $\mu\text{g/kg}$ 下降到 22 $\mu\text{g/kg}$ 。

在上世纪 90 年代,植物修复技术进入了一个全新的发展阶段。这一阶段最明显的标志是:大型国际会议频繁召开、学术性成果大量出版、科研立项资助率增加、许多专利得到批准、植物修复技术研究由温室盆栽转向大田试验、各种先进的理化分析测试手段被应用到植物修复领域。

在此期间,许多研究者注意到植物和微生物共存体系对重金属超积累的重要性的同时,还对土壤环境因子进行调控,以达到提高植物对重金属可吸收性的目的。随着全球环境污染的加剧,污染胁迫使得敏感种类个体消失,有关植物抗污染分化的研究也成为了一个热点。关于植物抗重金属的进化研究将为应用分子生物技术选择生物修复高效的植物品种提供重要材料。

在研究超积累植物的基础上,许多研究者又转向了对超积累植物耐性机理的研究,用基因工程和现代分子生物技术对超量积累植物和生物量高的亲缘植物进行杂交。近年来已经筛选出能吸收、转移和耐受金属的许多作物和草类,并改变了超富集植物生物量小、生长慢的缺点。此外还对土壤修复工艺进行研究,并结合土壤改良剂等各方面因素,提高植物对重金属积累的有效性,加快对重金属污染土壤的植物修复。其中,使用一些络合剂或螯合剂可增强根际环境对土壤中重金属和有机物的活化作用。根际的酸化作用也能明显增加重金属和有机物的可移动性。需要指出的是利用植物菌根技术对重金属和有机物污染土壤进行直接或间接修复,可有效降低污染物毒性。现有研究表明菌根能促进植物对重金属的纯化,有利于吸收降解重金属有毒物质。例如 Wu 和 Luo 在芥子草的盆栽实验中发现,添加 EDTA 可显著提高植物体内 TOC、Cu、Zn、Pb 和 Cd 的含量,显著增加了根际土壤中可交换态重金属的含量,从而提高了植物的生物可利用性。另外,由于植物根系分泌甲酸、乙酸、柠檬酸等有机酸,可降低根际土壤的 pH 值。一般而言,根际土壤的 pH 值比非根际土壤低 1 到 2 个单位,就能显著活化重金属^[3]。Morphna 通过研究发现,根际土壤的酸化作用可明显增加重金属的可移动性^[4],Ulla 等用 HPLC 法对含有不同重金属浓度的菌根真菌培养物进行分析,发现草酸、柠檬酸、苹果酸、琥珀酸等有机酸随着重金属浓度的增加而增加,这可能是真菌利用这些有机酸降低 pH 值及与重金属结合、纯化重金属的结果^[5];Jones 也发现有机酸能与重金属结合,具有降低重金属毒性的作用^[6]。所有这些研究成果均表明了菌根能促进菌根植物对重金属的纯化。

各种先进的分析测试手段在植物修复领域内的应用,使人们对植物蓄积重金属机制的认识进一步深入。如利用同步辐射包括扩展 X 射线吸收精细结构谱(EX-AFS)和 X 射线吸收近边结构谱(XANES)探测重金属污染介质与生物体系中微量元素的化学信息,包括元素存在的化学价态、配位数、近邻原子数及键长等。再如利用质子激发 X 射线荧光分析技术结合质子探针分析技术可了解重金属积累植物、超积累植物和污染土壤样品微区的点成分和面成分分析特征等。这些先进的分析技术以其高灵敏度等优点而成为人们研究植物修复与植物过滤技术强有力的手段。

1.2 国内植物修复技术的研究进展

我国在植物耐重金属机制的基础研究方面也做了不少工作,但总体上来说,我国重金属积累植物和超积累植物的基础研究起步较晚。随着我国经济实力的增强,环保投入的加大,近此年来,我国在该方面的研究发展十分迅速。据不完全统计,我国目前从事植物修复及相关领域研究的单位已有 40 余家。已有报道,陈同斌领导的研究小组在国际上率先开发出修复砷污染土壤的技术,并建立了第 1 个植物修复示范工程基地。其研究可以证实,在中国南方湖南、广西等大面积地区分布的蕨类植物蜈蚣草对砷具有很强的超富集能力,其叶片含砷量较高,远远地超过了植物体内氮磷养分的含量^[7]。

刘金林的研究表明原产北美的一年蓬(*Erigeron annuus*)对重金属有较强的富集能力^[8];黄会一等发现杨树(*Popul* spp)对汞和镉有很好的耐性和净化功能^[9];Lin等研究汞污染稻田改种苕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^[10];林匡飞等通过盆栽试验和田间研究发现对镉污染稻田采用苕麻改良5年后,土壤镉含量降低率为27.6%,年均降低率为5.5%^[11];唐世荣等发现安徽、湖北、云南境内铜矿区的富铜植物海州香薷(*Elsholtzia haichowensis* Sun)、鸭跖草(*Commelina communis* Linn)、酸模(*Rumex acetosa* Linn)、艾蒿(*Artemisia argyi*)叶片含铜分别达到596,102,216 mg/kg,但未能显示出有超富集特性^[12]。旱柳(*Salix matsudana* Koide)幼树能在50 mg/kg的铜污染土壤中生长,加拿大白杨(*Populus canadensis* Moench)幼苗对汞的富集浓度达到233.77 mg/kg,植物体内的耐受阈值为90~100 mg/kg。红树(*Rhizophora apiculata* BL)能将大量的汞吸收并储藏在植物体内,汞浓度达到1 mg/kg时仍能正常生长。

对砷超富集植物蜈蚣草的发现标志着植物修复在我国进入了一个崭新阶段。杨肖娥等在浙江衢州市发现锌的超富集植物——东南景天(*Sedum alfredii* Hance),地上部锌含量达4 134~5 000 mg/kg,平均为4 515 mg/kg。通过营养液试验证明:东南景天地上部Zn含量高达19 674 mg/kg,在外界Zn浓度达到240 mg/kg时仍能够生长基本正常^[13];薛生国等在湖南湘潭锰矿污染区发现锰超富集植物——商陆(*Phytolacca acinosa* Roxb),其叶片锰含量最高达19 299 mg/kg,最低也达12 069 mg/kg,平均锰含量达14 476 mg/kg^[14];韦朝阳等在湖南一些高砷区发现与蜈蚣草同属、生境相同的另一种凤尾蕨植物——大叶井口边草(*Pteris cretica*),对砷也具有明显的富集功能,其上部平均含砷量可达418 mg/kg(干重),最大含砷量可达694 mg/kg,且大叶井口边草明显符合超富集植物的特征^[15]。刘威等发现宝山堇菜(*Viola baoshanensis*)在自然条件下地上部Cd平均含量为1 168 mg/kg,变化范围为465~2 310 mg/kg;地下部Cd平均含量为981 mg/kg,变化范围为233~1 846 mg/kg,营养液Cd浓度为50 mg/kg时地上部Cd平均含量达到4 825 mg/kg^[16-17]。

2 国内外花卉植物修复技术的研究进展

随着人类生产水平和科学技术的不断进步以及艺术的相互交流与渗透,花卉的种类和范围也在不断扩大,从水生植物到陆生植物,从低等植物到高等植物,应有尽有、种类繁多。具体而言,花卉的概念包括狭义和广义两个方面。狭义的花卉是指具有观赏价值的草本植物,如唐菖蒲、香石竹、芍药和菊花等;广义的花卉除指具有观赏价值的草本植物外,还包括草本或木本的地被植物、花灌木、盆景和开花乔木等,如沿阶草类、麦冬类和景天类等。

花卉类植物除具备一般植物的特点外,还具有以下突出特点:(1)花卉大部分属于观赏性植物,将其用于重金属污染修复时,不会进入食物链而危害人体健康,安全可靠;(2)花卉种类繁多、资源丰富、潜力巨大,可从中筛选出众多用于重金属污染治理的超积累花卉植物;(3)采用花卉植物进行土壤重金属污染修复的同时,起到了美化环境的作用;(4)某些花卉对人类健康具有积极作用,如花卉芳香油能抗菌,可作为保健食品,或用于治疗疾病,提高人体免疫力;(5)在长期的生产实践过程中人类积累了丰富的品种选育、花卉栽培以及病虫害防治等经验。上述原因正作为从花卉植物中筛选超积累植物的根据,是完全可行的。

花卉植物作为一种广泛的植物类群,具有较强的生命力,抗逆环境能力较强,生长迅速、吸收能力强,可以充分吸收光、水分、肥料、等。这些特性不仅有利于花卉植物生物量的生长,而且有利于对重金属的耐性和积累性^[13]。从花卉植物在环境保护中的应用能够看出,许多花卉植物对重金属污染物具有相当的耐性,这就为花卉植物应用于重金属污染土壤修复的可能性提供了依据。

Hernandez-Apaolaza等研究了椰子根、松树皮和污水污泥混合后对花卉植物的影响,其研究结果表明松树皮或椰子根与30%的污水污泥混合后能够促进花卉植物的生长。王晓飞等通过用14种花卉进行盆栽实验发现,黄蜀葵(*Abelmoschus manihot*)等6种花卉植物具有一定的耐重金属的潜力,尤其对重金属Cd表现出较强耐性,约占花卉品种的43%;紫茉莉(*Mirabilis jalapa*)、蜀葵(*Althaea rosea*)等5种花卉表现出了较强的重金属积累能力,并且二者地上部的重金属含量大于根部重金属含量,表现出较强的金属转运能力,这正是重金属超积累植物应具备的特征^[18]。另外,部分花卉植物在有机-无机复合污染情况下表现出较强的耐性和积累性,为花卉植物应用于重金属污染土壤修复以及为重金属超积累花卉植物的筛选提供了良好

的开端。通过对重金属耐性和积累性较强的紫茉莉(*Mirabilis jalapa*)、凤仙(*Impatiens Balsamina*)、金盏菊(*Calendula officinalis*)和蜀葵(*Althaea rosea*) 4 种花卉植物的盆栽实验,表明,它们对重金属 Cd、Pb 单一污染及 Cd—Pb 复合污染表现出很强的耐性和积累性^[19],尤其是在 Cd 和 Pb 单一污染土壤浓度达到 100 mg/kg 和 1 000 mg/kg 的情况下,这 4 种花卉植物仍能正常生长且没有表现出明显受毒害症状,并且当土壤中 Cd 污染浓度达到 100 mg/kg 时地上部重金属含量也都超过 Cd 超积累植物的临界标准值 100 mg/kg。由此可见,这几种花卉植物应用于重金属污染土壤修复具有很大潜力。

花卉植物能否应用于重金属污染土壤的修复应综合考虑花卉植物对重金属的耐性和积累性两个方面,而不能依据其中某个因素来判定修复潜力的大小。已有研究表明,有的花卉植物虽然对土壤中重金属的耐性和积累性都较强,但是地上部重金属积累量没有达到超积累植物应达到的临界标准。出现这一状况的缘故可能是实验过程中向土壤中投加的重金属浓度配比较低而导致,此时需要通过加大土壤中重金属的浓度配比来进一步确认它们是超积累花卉植物;而有些花卉植物虽然耐性较强,但积累性较差,此时也不能完全判定这类花卉植物不具备超积累的能力,还需要通过进一步的实验来予以确认,即通过其它辅助手段(如特定的强化措施等)来提高花卉的积累能力^[20]。Lim 等的研究表明,在土壤中添加 EDTA 能够促进土壤中重金属 Pb 的移动性,从而促进植物对 Pb 的吸收^[21]。

另外,花卉植物对重金属的绝对积累量(即一株植物积累重金属元素的总量)也是判别花卉植物能否应用于重金属污染土壤修复的一个重要指标。对生物量较高的植物,即使植物体内重金属含量没有达到临界含量标准,但因植物生物量远远大于超积累植物的生物量,此时对重金属的绝对积累量反而比超积累植物积累的绝对量大,这样的花卉植物对土壤重金属的提取和修复效果高于超积累花卉植物的修复效果。

总之,植物修复是利用具有修复性能的植物的生命活动,对重金属污染土壤进行修复的一项新技术;因此,在找到具有较强积累能力的花卉植物之后,就需要对植物的生长发育规律及发育调控措施进行研究,从而不断提高植物修复的效率。人类在生产实践中,已积累了丰富的育种与栽培经验,这些农业生产原理与技术对植物修复而言无疑是至关重要的。魏树和、周启星等在研究和发现超积累植物龙葵的过程中,施加鸡粪后可使植物对 Cd 的提取率提高 35.7%~97.0%;采用开花期收获超积累植物的复种方式,可以使植物对 Cd 的提取率提高 1.43~1.75 倍^[20]。可以预言将能充分利用农业高新技术加以充分利用,那么植物修复技术将得到非常大的进展。

3 结语

植物修复技术尽管起步较晚,但发展迅速,已在很多国家和地区应用于重金属污染土壤环境的修复中,产生了显著的生态、经济和社会效益。目前,国内外许多研究者正在从事植物修复技术的完善和技术系统化工作。近些年来,对重金属污染的植物修复(包括花卉植物修复)的研究主要集中在以下几个方面:(1)植物修复与传统方法相结合的综合技术研究;(2)不同类型超积累植物的选择、培育和超积累机理的深入研究;(3)植物—微生物修复技术的研究;(4)植物修复的分子生物学和基因工程技术的应用研究。

目前,我国对于重金属污染植物修复技术的研究虽然还处于起步阶段,但已开发出一批适合我国国情的植物修复技术在某些地区得到了推广和使用。我国因其野生植物资源丰富,所以从中寻找积累、超积累的植物,并进行培育和驯化以满足实际应用是今后相当时期内植物修复技术研究的重点。同时,加强植物修复技术示范基地的建设,以推进我国该领域的进展,提高科技竞争力。

参考文献:

- [1]唐世荣. 污染环境植物修复的原理与方法[M]. 北京:科学出版社, 2006, 19.
- [2]张太平,潘伟斌. 根际环境与土壤污染的植物修复研究进展[J]. 生态环境, 2003, 12(1): 31—36.
- [3]何章莉,潘伟斌. 受污染土壤环境的植物修复技术[J]. 广东工业大学学报, 2004, 21(1): 56—62.
- [4]周国华,黄怀曾,何红寥. 重金属污染土壤植物修复及进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3(6): 33—39.
- [5]A honen-go an arch U, A W P. Organic acids produced by mycorrhizal *Pinus sylvestris* exposed to elevated aluminum and heavy metal concentrations[J]. Mycorrhizal Research, 2000, 146, 57—576.
- [6]D L J. Organic acid in the phots sphere—a critical review[J]. Plant and soil, 1998, 205, 25—41.

- [7]陈同斌,韦朝阳. 砷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).
- [8]LIU Jin-lin. The research of absorption and accumulation of higher aquatic vascular plants to heavy metals[J]. Chinese Environmental Science, 1986, 5(2): 24—28.
- [9]HUANG Hui-yi, JIANG De-ming, ZHANG Chun-xing, et al. Study on control of cadmium polluted soil by forestry eco-engineering[J]. Chian encironmental science, 1989, 9(6): 419—426.
- [10]LIN Zhi-qing, HUANG Hui-yi. Study on the tolerance of woody-plants to mercury[J]. Acta Ecology Sinica, 1989, 9(4): 316—319.
- [11]LIN Kuang-fei, ZHANG Da-ming, LI Qiu-hong, et al. The property of the absorption of *Becheria nivea* L. to cadmium and the improvement experiment of cadmium soil[J]. Agro-ebvironmental Protection, 1996, 15(1): 1—4.
- [12]Tang S R. B M Wilke, Huang C Y. The uptake of copper by plants dominantle growing on copper minning spoils along the Yangtze River, the Peples's Republic of China[J]. Plant and Soil, 1999, 209(2): 225—232.
- [13]杨肖娥,龙新宪,倪吾钟,等. 东南景天(*Sedum alfredii* H) 一种新的锌超积累植物[J]. 科学通报, 2002, 47(13): 1003—1007.
- [14]薛生国,陈英旭,林琦,等. 中国首次发现的锰超积植物——商陆[J]. 生态学报, 2003, 5(23): 935—937.
- [15]韦朝阳,陈同斌,黄泽春,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.
- [16]刘威,束文圣,蓝崇钰. 宝山堇菜(*Viola baoshanensis*) 一种新的镉超富集植物[J]. 科学通报, 2003, 48(19): 2046—2049.
- [17]钱荣孙. 关于优化城市(镇)污水厂污泥处置的五方面设想[EB/OL]. 中国水网, (2006—12—12)[2010—01—21]. <http://www.cuwa.org.cn/rdzt/wuniganhua/6911..shtml>.
- [18]Wang X F. Resource potential analysis of ornamaentals applied in contaminated soil Remediation[M]. A Dissertation in Graduate School of Chinese Academy of Sciences; 2005, 36—52.
- [19]刘家女,周启星,孙挺. Cd—Pb 复合污染条件下 3 种花卉植物的生长反应及超积累特性研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(12): 2039—2044.
- [20]魏树和,周启星. 重金属污染土壤植物修复基本原理及强化措施探讨[J]. 生态学杂志, 2004, 23(1): 65—72.
- [21]Lim J M, Salido A L, Butcher D J. Phytoremediation of lead using India mustard(*Brassica juncea*) with EDTA and electrodes[J]. Microchemical Journal, 2003, 76(1): 3—9.

Development of Phytoremediation of Flower Plants on Heavy Metals Pollution

BAI Xiang-yu^{1a,1b}, HAN Bao-ping^{1b,2}, LIU Han-hu^{1a,1b}, WANG Xiao-qing^{1b}

(1. a. Jiangsu Key Laboratory of Resources and Environmental Information Engineering,

b. School of Environment Science & Spatial Informatics, China University of Mining and technology, Xuzhou 221116, China;

2. Xuzhou Institute of Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Phytoremediation technology refers to utilizing green plants to extract heavy metals from soils. It is environmentally friendly, economic and highly efficient. Also, it is the hot research subject at present. This paper introduced the concept, types and advantages of phytoremediation. Then development of phytoremediation was discussed. In the end, the application of flower plants on phytoremediation was analyzed.

Key words: phytoremediation; hyper accumulation plant; flower plants

(责任编辑 崔思荣)