

重金属污染土壤的花卉植物修复技术研究进展及发展趋势

白向玉^{1,2},刘汉湖^{1,2},胡佳佳¹,秦 峰^{1,2},苏晓丽¹

(1. 江苏省资源环境信息重点实验室(中国矿业大学),江苏徐州 221008; 2. 中国矿业大学环境与测绘学院,江苏徐州 221008)

摘要 近年来兴起的污染土壤植物修复技术是指利用绿色植物从环境中吸收带走重金属或将其无害化而达到治理目的的方法,是目前发展最快的环境友好、经济、高效的治理技术,也是当前国内外研究的热点。在综述植物修复技术的概念、类型和优点的基础上,详细论述了花卉植物修复重金属污染土壤的国内外研究进展情况及存在问题,并对发展趋势进行了分析。
关键词 植物修复;超积累植物;花卉植物
中图分类号 X171.4 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2009)18-08672-03

Research Progress and Development Trend of Floral Bioremediation Technology in the Soil Polluted by Heavy Metal
BAI Xiang-yu et al (Key Laboratory of Jiangsu Resource and Environment Information, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008)
Abstract In recent years, the rise of the contaminated soil phytoremediation technology, which refers to the use of green plants absorb heavy metals from the environment or bio-safety disposal to achieve the purpose, is the fastest-growing environment-friendly, economic, and efficient management of technology and also is the main focus of recent research. On the basis of the summary of phytoremediation technology's concept, types and advantages, the research progress and problems about flower phytoremediation technology was discussed in detail, and the future trend was also analyzed.
Key words Bioremediation; Hyperaccumulative Plants; Floral Plants

土壤作为环境的主要组成部分,为人类提供生存所需的各种营养物质,但是随着工矿业的迅速发展,含重金属废水的农田灌溉、汽车尾气排放、污泥的农业利用以及矿区飘尘的沉降,许多土壤已经或即将被重金属污染。土壤被重金属污染后,不但肥力下降,直接影响作物产量和品质,而且会通过食物链的“生物放大”作用对人体健康造成极大的威胁^[1]。更严重的是有害重金属在土壤系统中所产生的污染过程具有隐蔽、不可逆和后果严重的特点^[2],治理难度大、费用高。因此,土壤系统中重金属的污染与治理一直是国际性的难题和热点研究问题。为了控制和治理已被污染的土壤,目前常用的方法有淋滤法、客土法、吸附固定法等物理方法以及生物还原法、络合物浸提法等化学方法^[1]。物理方法见效缓慢,化学方法见效快但花费高,且易带来2次污染,不能从根本上解决问题。

近年来,植物修复技术的出现和快速发展为土壤重金属污染修复提供了一条新途径^[3]。植物修复技术是用于清除土壤重金属污染的绿色生态技术,是当前国内外环境污染修复的研究热点。

1 植物修复技术概况

植物修复(Phytoremediation)是利用自然生长植物或者遗传工程培育的植物提取、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技术的总称。广义的植物修复技术包括利用植物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生体系净化环境中有机污染物等^[4]。狭义的植物修复技术主要指利用植物清洁污染土壤中的重金属、放射性核素和有机污染物。因此,植物修复的对象既包括铜、铅、锌、镍、锰、铬、砷、硒、汞、铀等重金属、类金属和

放射性无机元素,也包括有机氯溶剂、农药、炸药、多环芳烃、防腐剂等有毒有机污染物。用于植物修复的植物包括高大的乔木、草类、作物、水生植物等。植物修复的介质既包括固相的土壤沉积物、污泥,也包括液相的地下水和地表水。植物修复的过程既包括对污染物的吸收和清除,也包括对污染物的原位固定或分解转化。

植物修复是植物、土壤和根际微生物相互作用的综合效果,涉及土壤化学、植物生理生态学、土壤微生物学和植物化学等多学科研究领域。对于重金属污染土壤和水体的植物修复技术,主要包括4种类型:植物稳定或植物固化(Phytostabilization or Phytolmmolization);植物挥发(Phytovolatilization);植物提取(Phytoextraction);植物过滤(Phytofiltration or Rhizofiltration)。

与其他物理、化学和工程方面治理污染的技术相比,植物修复具有自己的优点。成本低。以太阳能为动力,投入少,成本低,尤其适合大面积污染的修复。以植物提取为例,土壤的修复费用约为5~40美元/t,而填埋的费用可高达100~500美元/t。不破坏土壤生态环境。能使土壤保持好的结构和肥力状态,无需进行2次处理即可种植其他植物。不造成2次污染。可以对植物进行集中处理,还可回收利用一些植物体内的金属。植物修复是一个自然过程,易为公众所接受。

目前,国内外在植物修复技术方面已有许多报道。从已报道的修复植物来看,大部分采取野外采样法,即到重金属污染较为严重的矿区及周围地区采集仍能正常生长的植物(耐性较强的植物),并分析其各部位的重金属含量,涉及藻类植物、蕨类植物、裸子植物和被子植物,既有草本植物,也有木本植物^[5]。迄今为止,已发现的超积累植物有400多种,但已报道超积累植物的种类仍然非常有限,更没有关于重金属超积累花卉植物的相关报道。因此,如果将花卉植物在美化环境的同时与治理、修复污染环境联系起来,将会很有意义也很值得研究。

基金项目 中国矿业大学青年科研基金项目(OP080269);江苏省普通高校研究生科研创新计划(CX08B_140Z)。
作者简介 白向玉(1978-),男,内蒙古赤峰人,在读博士,讲师,从事水污染控制和土壤污染植物修复研究。
收稿日期 2009-03-20

2 花卉植物修复重金属污染土壤的研究进展

花卉的概念包括狭义和广义 2 个方面。狭义概念中,“花”是植物的繁殖器官,“卉”是草本植物的总称,狭义的花卉仅指草本的观花植物和观叶植物。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,花卉的范围也在不断扩大。广义的花卉是指凡具有一定观赏价值,并经过一定技艺进行栽培管理和养护的植物,有观花的、观叶的、观芽的、观茎的、观果的和观根的,也有欣赏其姿态或闻其香的;从低等到高等,从水生到陆生;有草本也有木本,有灌木、乔木和藤木等,应有尽有,种类繁多。

以花卉植物为筛选超积累植物对象是有根据的。花卉类植物除具备一般植物的特点外,还具有以下优势:花卉资源相当丰富、潜力巨大,这就使筛选工作有了坚实的基础;

进行土壤修复的同时,能够美化环境,一举两得;花卉属观赏性植物,不会进入食物链,可减少对人体的危害;花卉对人类健康也有着一定的作用,如花卉芳香油可抗菌,提高人体免疫力,可作为保健食品或用于治疗疾病;人类在长期的生产实践中积累了丰富的品种选育、花卉栽培以及病虫害防治等经验。由此可见,从花卉中筛选修复植物是完全可行的。从花卉植物在环境保护中的应用可以看出,许多花卉植物对污染物有相当的耐性,这就为花卉植物应用于污染土壤修复的可能性提供了依据。花卉植物还作为一种广泛的植物类群,抗逆环境能力较强、生长迅速、具有较强的生命力,吸收能力也强,能充分吸收光、水分、肥料等,这些特性有利于花卉植物生物量的生长及其对重金属的耐性和积累性^[6]。

王晓飞等通过盆栽试验发现,在 14 种参试花卉中,黄蜀葵等 6 种植物对 Cd 表现出较强的耐性,约占参试花卉种的 43%,说明花卉植物有一定的耐重金属潜力;5 种花卉表现出了较强的重金属积累能力,并且紫茉莉和蜀葵地上部的重金属含量大于根部含量,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^[7]。在有机-无机复合污染情况下,也有部分花卉表现出了较强的耐性和积累性。这些试验结果为花卉植物应用于污染土壤修复,尤其是为筛选超积累花卉植物提供了良好的开端。通过对耐性和积累性较强的 4 种花卉植物紫茉莉、凤仙、金盏菊和蜀葵的研究表明,它们对重金属 Cd、Pb 单一污染及 Cd-Pb 复合污染表现出了很强的耐性和积累性^[8],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的受毒害症状,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是很有潜力的。

研究花卉植物应用于污染土壤的潜力不能单从花卉植物对重金属的耐性或积累性方面考虑,而应该综合 2 个因素后进一步确认。研究表明,有的花卉植物对土壤中重金属的耐性较强,而且积累性也较强,但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,原因可能是试验中向土壤中投加的重金属浓度较低,因此可以通过加大土壤中重金属的浓度来进一步确认其是不是超积累花卉植物;而有些花

卉植物虽然耐性较强,但积累性较差,并不能完全说明其不具备超积累的能力,可以通过进一步的试验来研究、确认,即通过其他辅助手段(如特定的强化措施等)来提高其积累能力^[9]。Lin 等研究表明,EDTA 能够促进土壤中 Pb 的移动性,从而促进植物 *Brassica juncea* 对 Pb 的吸收^[10]。某些花卉植物长到一定高度时对其进行摘心,这样可在一定程度上提高地上部重金属含量。花卉植物的重金属绝对积累量(即一株植物积累重金属元素的总量)也是一个重要的指标。对生物量较高的植物而言,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,此时其所积累的绝对量反而比超积累植物积累的绝对量大,对土壤重金属的提取作用更大。有些花卉植物虽然具有较强的积累性,但其耐性较差(如生物量较小等),这点可以通过改善其耐性的办法来解决,即尽量提高花卉植物的生物量。与现代农业高新技术相结合是花卉植物大规模应用于污染土壤修复的一条捷径。植物修复归根到底是利用具有修复性能植物的生命活动对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生育调控措施进行研究,从而不断提高植物修复的效率。人类在漫长的改造自然过程中,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来说无疑是至关重要的。魏树和等在研究和发现超积累植物龙葵的过程中,施加鸡粪后使植物对 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。如果再将现有的农业高新技术加以充分利用,植物修复技术将得到较大发展。

3 花卉植物修复重金属污染存在的问题及发展趋势

3.1 存在的问题 重金属污染土壤的植物修复技术作为一种新兴的绿色生物技术,具有物理、化学等修复方法无法比拟的优点,在污染土壤治理方面具有极大的潜力和应用前景。然而,植物修复技术(包括花卉植物修复技术)的成功施用受制于以下因素。

(1)超积累植物的生长速度缓慢和生物量小。植物提取修复技术的应用有 2 个前提,一是植物组织能积累高浓度的某种元素;二是植物的生物量高。但现在发现的许多超积累植物生长缓慢、植株矮小、地上部生物量小,这些成为植物修复效率的限值因素。

(2)土壤中重金属的生物有效性低。重金属一旦进入土壤,将通过沉淀、老化、专性吸附等物理、化学过程成为难溶态,而溶解态和易溶态才是植物吸收的主要形态^[11]。因此,重金属的生物有效性往往是植物修复效率的限值因素。

(3)植物修复具有专一性。植物修复专一性强,一种植物往往只作用于 1 种或 2 种特定的重金属元素,对土壤中其他浓度较高的重金属则表现出中毒症状。而土壤的污染往往是多种重金属的复合污染,从而限制了在多种重金属污染土壤治理方面的应用前景。

(4)植物修复耗时长和修复范围有限。受污染物生物有效性和污染物向地上部转运效率的限制,植物修复耗时一般较长,因而更适合于受轻度污染的土壤。受到根系伸展深度

的限制,植物修复只适用于植物根系所能延伸的表土范围。

3.2 发展趋势 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,是土壤环境污染治理的新技术,开发潜力很大。但是,植物修复应用于实际还存在很多问题,需要生物学、土壤学、植物学、基因技术和环境化学等多门交叉学科的研究^[12],花卉植物修复技术同样面临这些问题。因此,花卉植物修复技术研究趋势应集中在以下几个方面:

(1)超积累花卉的选择、培育。我国花卉资源丰富,从中寻找积累、超积累的花卉,并培育、驯化以满足实际应用是今后一个时期内花卉植物修复技术研究的重点。

(2)加强基础理论研究。花卉植物中金属的赋存形态、植物积累、根际环境条件对重金属的生物有效性制约机理等一系列基础理论问题有待深入研究。

(3)分子生物学和基因工程技术的应用。应用转基因工程技术,将自然界中超积累花卉植物的耐重金属、超积累基因移植到生物量大、生长速率快的花卉植物中去,以克服天然超积累植物的缺点,提高花卉植物修复效率其实用化。

(4)建立花卉植物修复技术示范基地,取得经验后加以推广。

4 结语

目前,重金属污染土壤的花卉植物修复技术研究尚处于起步阶段,该项技术除具备一般植物修复技术的特点外,还

具有诸多不可替代的优势,会有更为广阔的市场前景。但是,由于制约花卉植物修复技术的因素较多,还需要从理论和技术问题上开展大量研究工作,以使该项技术得以推广和应用。

参考文献

- [1] 黄运湘,廖柏寒,王志坤.超积累植物的富集特征及耐性机理[J].湖南农业大学学报:自然科学版,2005,31(6):693-697.
- [2] 骆永明.金属污染土壤的植物修复[J].土壤,1999,31(5):261-265,280.
- [3] 王华,曹启民,桑爱云.超积累植物修复重金属污染土壤的机理[J].安徽农业科学,2006,34(22):5948-5950.
- [4] 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.
- [5] 刘家女,周启星,孙挺,等.花卉植物应用于污染土壤修复的可行性研究[J].应用生态学报,2007,18(7):1617-1623.
- [6] 杨肖娥,龙新,倪吾钟.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):1003-1006.
- [7] WANG X F. Resource potential analysis of ornamentals applied in contaminated soil remediation[M]. Beijing A Dissertation in Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2005: 36-52.
- [8] 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.
- [9] 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].生态学报,2004,23(1):65-72.
- [10] L M J M, SAL DO A L, BUTCHER D J. Phytoremediation of lead using India mustard (*Brassica juncea*) with EDTA and electrodics[J]. Microchemical Journal, 2003, 76(1): 3-9.
- [11] 冯凤玲,成杰民,王德霞.蚯蚓在植物修复重金属污染土壤中的应用前景[J].土壤通报,2006,37(4):809-813.
- [12] 黄铮,徐力刚,徐南军,等.土壤物系系统中重金属污染的植物修复技术研究现状与前景[J].农业环境科学学报,2007,26(S1):58-62.
- [13] 王健,袁永俊,张弛松.纤维素发酵产酒精研究进展[J].中国酿造,2006(6):9-13.
- [14] 李先德,罗鸣,马晓春.世界主要国家生物燃料发展动态与政策法规[J].世界农业,2008(9):29-32.
- [15] 刘力强,林章凛,曹竹安,等.生物燃料发展概况[J].生物产业技术,2007(2):21-32.
- [16] 毕艳兰.油脂化学[M].北京:化学工业出版社,2005:45-46.
- [17] 余灯华.生物柴油合成催化剂及工艺的研究进展[C].第二届全国工业催化技术及应用年会论文集,2006.
- [18] 杨丽特,朱金华.酸催化制备生物柴油的研究概况及发展[J].化工技术与开发,2007,36(2):35-37.
- [19] 邓利,谭天伟,王芳.脂肪酶催化合成生物柴油的研究[J].生物工程学报,2003,19(1):97-101.
- [20] 盛梅,郭登峰.固化酶催化菜籽油合成生物柴油稳定性研究[J].中国油脂,2005,30(5):68-70.
- [21] H ROSHI YAMADA, YOSH IKI SOR MACHI Operation optimization of lipase-catalyzed biodiesel production[J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 2007, 40(7): 571-574.
- [22] ENOCH Y PARK, MASA YASU SATO. Lipase-catalyzed biodiesel production from waste activated bleaching earth as raw material in a pilot plant[J]. Bioresource Technology, 2007, 99(8): 3130-3135.
- [23] 张全国,尤希凤,周汝雁,等.国内外生物制氢技术研究进展[C].中国农业工程学会2005年学术年会论文集,2005.
- [24] 袁传敏,颜涌捷,曹建勤.生物质制氢气的研究[J].煤炭转化,2002,25(1):18-22.
- [25] 阎桂焕,孙立,许敏,等.几种生物质制氢方式的探讨[J].新能源与工艺,2004(5):38-41.
- [26] CHORNET E ETAL. Biomass to hydrogen via pyrolysis and reforming[C]. Proc 1994 US DOE Hydrogen Program Review, 1994: 407-432.
- [27] CZRN IK S, FRENCH R, FEIK C, et al Production of hydrogen from biomass-derived liquids[J]. Process in the chemical biomass conversion [M]. Golden, Colorado, USE: National Renewable Energy Laboratory, 2000: 13.
- [28] TUM S, KNOSH ITA C, ZHANG Z, et al An experimental investigation of hydrogen production from biomass gasification [J]. Int J Hydrogen Energy, 1998, 23(8): 641-64.
- [29] RAPAGNA S, NJAND, P. U. FOSCOLO. Catalytic gasification of biomass to produce hydrogen rich gas [J]. Hydrogen Energy, 1998, 23(7): 551-557.
- [30] 田亚峻,陈宏刚,李凡,等.煤与等离子体的作用机理探讨[J].煤炭转化,1998(4):3-8.
- [31] M NOWA T, NOUE S Hydrogen production from biomass by catalytic gasification in hot compressed water [J]. Renewable Energy, 1999, 16: 1114.
- [32] 张全国,尤希凤,张军合.生物制氢技术研究现状及其进展[J].生物质化学工程,2006,40(1):27-31.
- [33] 王亚楠,傅秀梅,刘海燕,等.生物制氢最新研究进展与发展趋势[J].应用与环境生物学报,2007,13(6):895-900.
- [34] 任南琪,李建政.生物制氢技术[J].太阳能,2003(2):4-6.
- [35] 储矩,李友荣.现代工业发酵调控学[M].北京:化学工业出版社,2001:67-74.
- [36] 马隆龙,吴创之,孙立.生物质气化技术及应用[M].北京:化学工业出版社,2002.
- [37] DASAPPA S, SR DHAR H V, SR DHAR G, et al Biomass gasification — a substitute to fossil fuel for heat application [J]. Biomass and Bioenergy, 2003, 22(2): 79-98.
- [38] REED T T. Biomass gasification pyrolysis and technology [M]. Data Corporation USA, 1981.
- [39] 金汉强,赵思远,陈永平.二甲醚燃料的应用及生产[J].化工时刊,2002(8):47-48.

(上接第 8599 页)