第 27 卷第 6 期
2003 年 12 月
物 探 与 化 探
GEOPHYSICAL & GEOCHEMICAL EXPLORATION
Vol. 27, No. 6
Dec., 2003

被污染土壤的植物修复研究

周 国 华
(中国地质科学院 物地球物理地球化学勘查技术研究所,河北 廊坊 065000)

摘 要:植物修复是利用植物吸收、降解、挥发、根滤、稳定、泵吸等作用机理,达到去除土壤、水体中污染物,或使污染物固定以减轻其危害性,或使污染物转化为毒性较低化学形态的现场治理技术。植物修复对于重金属污染土壤的治理修复具有重要意义。已有研究在累积与超累积植物的寻找筛选、植物对重金属等有害物的耐毒和解毒机理、植物修复现场环境调控及根际处理技术等方面取得了大量成果。现代分子生物学、基因工程技术发展有可能使植物修复技术取得重大突破。

关键词:土壤污染治理;植物修复;重金属污染;超累积植物
中图分类号:P632 文献标识码:A 文章编号:1000-8918(2003)06-0473-03

土壤污染治理是一个世界性难题。在治理局部性热点污染时,客土换土、冲洗、热处理、固化、玻璃化、动电修复等常规治理技术或许能发挥一定的作用,但对于大面积污染区,传统治理方法在经济上是难以承受的,技术可操作性也很差。因此,探索开发新的污染治理和环境修复技术是当前环境领域的研究热点。由于植物修复具有治理效果永久性、治理过程原位性(对土壤环境扰动小)、治理成本低廉性、环境美学兼容性、后期处理简易性等经济技术优势,而成为国内外热点研究课题。

1 植物修复及超累积植物的概念

植物修复是指利用植物吸收、降解、挥发、过滤、固定等作用,净化土壤和水体中金属元素、有机污染物、放射性核素的环境修复技术。与有机污染物可降解性不同,利用植物吸收并通过收割以去除重金属元素和放射性核素,是治理土壤、水体中这类污染物的根本途径。因而,累积、超累积植物对于土壤金属污染修复具有异乎寻常的意义。

早在半个世纪以前,金属矿产的植物勘查方法研究发现,某些植物可以在富含金属元素的矿区土壤上生长良好,甚至成为优势物种,具有良好的找矿指示意义[1]。这类植物在忍耐高含量金属元素的同时往往表现出超乎寻常的金属元素吸收富集能力,通常称之为累积植物(accumulator plant)。比较典型的如广泛分布于蛇纹岩发育形成的富 Ni 土壤上的庭荠属植物以及欧洲铅锌矿区的锌芹菜等。Brooks 等研究认为[2,3],重金属含量超过一般植物 100 倍的植物属于超累积植物(hyperaccumulator plant),即 Cr、Co、Ni、Cu、Pb 含量要求达 1000×10^{-6} 以上,Mn、Zn 含量要求达 $10\ 000\times10^{-6}$ 以上。现已发现 As、Cd、Co、Cu、Mn、Ni、Pb、Se 和 Zn 等元素的超累积植物近千种,以 Ni 超累积植物为最多。Cunningham 等列举了已发现的典型超累积植物种及其元素含量(表 1)[4]。

表 1 典型重金属超累积植物 10^{-6}(干重)

元素	植物元素含量	典型的超累积植物种名	植物地上部元素含量
Cd	>100	天蓝遏蓝菜(thlaspi caerulenscens)	1800
Co	>1000	haumaniastrum robertii	10200
Cu	>1000	高山甘薯(ipomoea alpina)	12300
Mn	>10000	粗脉叶澳洲坚果(macadamia neurophylla)	51800
Ni	>1000	九节木属(psychotria douarret)	47500
Pb	>1000	圆叶遏蓝菜(thlaspi. Rotundifolium)	8200
Zn	>10000	天蓝遏蓝菜(thlaspi caerulenscens)	51600

与一般植物不同的是,超累积植物在重金属含量高的污染土壤以及重金属含量低的非污染或弱污染土壤上,均具强烈的吸收富集能力,并且能将所吸收的重金属元素大量运移至植物茎叶等地上部器官中。据 Baker 等[5] 和 Lasat 等[6] 的研究,超累积植物茎叶与根中重金属元素浓度比可达 1 以上,而普通植物一般远低于 1。Robinson 等对地中海沿岸一种 Ni 超累积植物(A. bertolonii)的研究表明,这一植物不仅具有治理修复 Ni 污染土壤的能力,而且基本满

收稿日期:2003-09-10
基金项目:国家973项目(G19990457)资助
万方数据

足植物采矿的经济技术指标要求[7]。与植物采矿的技术指标相比,植物修复的要求则低得多,因此,不少重金属累积植物、超累积植物具有巨大的土壤污染修复应用潜力。

2 植物修复的主要方式

环境污染物按化学类型可分为有机污染物、重金属元素和放射性核素,按介质形态则包括土壤沉积物、尾矿砂、固体废物、污水以及大气污染等。据与环境介质、污染物的作用方式及其净化机制,可以将植物修复方式归结为以下几种。

(1)植物吸收作用(phytoextraction)。利用累积植物、超累积植物大量吸取土壤中金属元素、放射性核素,通过收获植物体并加以适当处理,达到去除或降低土壤中元素污染物的目的。

(2)植物降解作用(phytodegradation)。包括两方面作用机理 植物体内含有能快速分解有机污染物的酶,可将吸收进入植物体内的有机污染物降解成无害的 CO_2 和 H_2O 等组分 通过植物根系分泌物提供碳源和氧源,促进根系环境中喜氧菌群及其它菌种的发育及活性,从而增强根际原位细菌对有机污染物的氧化降解作用。

(3)根滤作用(rhizofitration)。借助植物羽状根系所具有的强烈吸收作用,从污水中吸收、浓集、沉淀去除金属或有机污染物。根滤是水体和湿地系统植物净化的重要作用方式。

(4)植物挥发作用(phytovolalization)。利用植物根系吸收金属、类金属及有机污染物,转化成易挥发化合物,通过叶面挥发进入大气,达到减轻土壤污染的目的。已有的研究主要针对挥发性重金属元素 Hg[8] 和易于形成生物毒性低的挥发性有机物的元素 Se[9,10] 进行的。如将细菌体内的汞还原酶基因转入芥子科植物(arabidopsis)后,得到的转基因植物能忍耐、吸收土壤环境中的汞,并将汞还原成零价后挥发进入大气[11]。挥发进入大气的污染物有可能产生二次污染问题,因而此方式尚存不少疑虑。

(5)植物稳定作用(phytostabilization)。主要是利用耐重金属植物或超累积植物降低重金属的活动性,是植物修复概念的扩展和延伸。包括借助植物吸收和根际作用降低重金属的生物有效性及重金属淋滤作用,通过植被重建减轻(尾矿堆)风蚀、水蚀作用及水土流失强度,达到固定、隔绝、阻止重金属进入水体和生物链的目的。

(6)泵吸作用(hydraulic pumping)。在干旱、半干旱地区,蒸腾作用促使植物根系发达,可大量吸收土壤水分及浅层地下水,有效地降低浅层地下水位、增加饱气带厚度,降低了近地表土壤中污染物活动性及其向地下水迁移和在含水层内侧向运移,从而起到保护饮用水的目的。同时,饱气带的增厚,植物向根际供给氧源,可以促进有机污染物的降解。

至今,英、美、德、意、澳等欧美国家已就上述植物修复方式进行了大量的研究。90 年代初以来我国许多科研机构、大专院校在跟踪国外研究动态的同时,也进行了一些探索性研究工作[12,13]。

3 重金属污染土壤的植物修复研究

利用累积、超累积植物去除土壤中重金属元素、放射性核素,可以从根本上解决土壤重金属污染问题,因此,累积植物、超累积植物是植物修复的重点研究内容。已有研究主要涉及以下几个方面。

(1) 植物修复机理的研究。主要是从分子生物学、遗传基因学角度,研究植物对金属元素的忍受解毒机理以及吸收、运移、富集累积机制。通过基因表达、转基因植物的培育初步证实了金属硫蛋白基因所起的耐毒和解毒作用、植物中单宁体等有机化合物与金属元素的螯合解毒机制等。这些机理研究成果为转基因工程技术应用提供了基础依据。由于自然界中超累积植物种属稀少,分布受地域局限,而且这类植物往往生长缓慢,生物量小,导致修复治理效率低、周期长而难于满足商业要求。将自然界中超累积的基因组移接入大生物量植物以提高植物修复的效率,是当前植物修复的重要攻关方向。

(2)累积与超累积植物的筛选。普通植物对重金属吸收富集量有限而无应用价值,筛选合适的累积、超累积植物是进行植物修复的前提。除表 1 典型重金属超累积植物外,自然界中还有许多种累积植物。虽然这类植物对金属元素的累积程度明显低于超累积植物,但由于其生长速度较快、生物量大、适应性强而具有较高的治理效率。十多年来对累积植物和超累积植物已作了大量应用研究,例如试验研究了日本横须贺蹄蕨、向日葵、遇兰菜属(thlaspi caerulensens)、芥子草(brassica juncea)、苎麻、纸皮桦、加拿大杨、红树等植物对 Hg 的累积修复作用。筛选植物时通常需考虑植物对金属元素的吸收富集能力、生长速度,地上部生物量,气候适应性,根系发育程度,抗病虫害能力,种植管理技术要求,收割物后处理和管理技术,引入治理目标区引发生物侵入的风险性,等等。

万方数据

(3)根际作用及管理技术研究。植物修复最终需要通过现场种植植物来实现,利用现有累积、超累积植物,采用适当的根际环境处理技术,确保植物在现场环境下生长良好并达到较高的治理修复效率,不失为当前比较现实的做法。

根际环境不仅是物质和能量交换的场所,也是土壤物质循环的重要作用界面,是养分、水分、有益或有害微生物、有机和无机污染物进入植物的门户。一方面,由于植物根系分泌糖类、有机酸、氨基酸、脂肪酸等有机质,降低了根际土壤的 pH 值,加上植物根系对土壤水分、氧含量、土壤通气性的调适,刺激了根系附近微生物群体的发育,使根际环境成为微生物作用的活跃区域,可使根际环境中金属元素生物有效性增加,从而提高植物对元素的吸收、挥发或固定效率。另一方面,根际土壤组分间的作用十分复杂,有机质、络合剂、pH、E_h、微生物等诸多土壤环境要素影响到根际土壤中重金属元素的生物有效性,人为地调控根际环境可以改变重金属的生物有效性,增强或抑制植物根系对重金属的吸收。过去大量的实验研究主要包括:化学试剂(络合剂、螯合剂)、微生物或土壤改良剂、酸碱调节剂的试验应用效果、土壤氧化还原条件(施有机肥、水作或旱作)、pH 值的调控技术及效果等。研究表明,采取这些技术措施可以在一定程度上增加目标重金属的生物有效性,提高植物吸收率,加速有机污染物的吸收和降解作用。辅以合理种植、施肥、深耕等措施,可以促进植物生长,提高植物的生物量或增加收获次数,从而提高植物修复的综合效率。根际处理及栽培管理工艺技术已成为植物修复的重要辅助技术。

4　植物修复的应用前景及主要研究方向

由于植物修复技术适用于中、低强度的大范围污染治理,对治理现场扰动小,绿色环保,社会生态综合效益良好而易为公众所接受,尤其是治理费用要比传统技术低 1 至几个数量级,并且对重金属污染土壤的治理成效具有永久性。因此,植物修复概念提出后很快成为环境领域的世界性、前沿性热点研究课题,普遍认为将成为环保领域的朝阳产业。

由于该项技术起步时间不长,在基础理论、修复机理及技术工艺方面还需要进行大量研究。植物修复的近期研究工作主要集中于以下几方面[14]。

(1)寻找、筛选自然界中累积、超累积植物,培育训化以满足实际应用需要,仍然是今后一个时期内植物修复研究的重要任务。我国野生植物资源十分丰富,经过初步调查已发现了一批超累积植物[15],但这方面总体研究程度低,通过系统的调查研究有可能取得重大发现。

(2)深化应用基础理论研究。植物对重金属的超量吸收和积累及其解毒机理、根际作用以及根际微生物群落的生态学和生理学特征、根际土壤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,以指导基因技术、根际土壤处理和调控技术、合理耕作技术的应用。

(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,将自然界中超累积植物的耐重金属、超累积基因移殖到生物量大、生长速率快的植物中去,以克服天然超累积植物的缺点,提高植物修复效率使其实用化。近些年来,在 Se、Hg、Cd、Zn 等重金属元素转基因植物研究方面已初获成果,预期基因技术的应用将为植物修复技术的突破带来机遇。

参考文献:

[1] 谢学锦,徐邦樑. 铜矿指示植物海州香薷[J]. 地质学报. 32(4):88 - 90.

[2] Brooks R R, Lee J, Reeves R D, et al. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1977, 7:49 - 57.

[3] Brooks R R. Plant that hyperaccumulate heavy metals[M]. CAB International, Wallingford, Oxon, UK, 1998, 392.

[4] Cunningham S D, Ow D W. Promises and Prospects of Phytoremediation[J]. Plant physiology, 1996, 110:715 - 716.

[5] Baker A J M, Reeves R D, Hajar A S M. Heavy metal accumulation and tolerance in British populations of the metallophyte Thlaspi caerulescens[J]. New phytol., 1994, 127:61 - 68.

[6] Lasat M M, Baker A J M, Kochian L V. Physiological characterisation of root Zn^{2+} absorption and translocation to shoots in Zn hyperaccumulator and nonaccumulator species of Thlaspi[J]. Plant physiology, 1996, 112:1715 - 1722.

[7] Robinson B H, Chiarucci A, Brooks R R, et al. The nickel hyperaccumulator plant Alyssum bertolonii as a potential agent for phytoremediation and phytomining of nickel[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1997, 59:75 - 86.

[8] Bizily S P, Rugh C L, Summers A O, et al. Phytoremediation of methylmercury pollution: merB expression in Arabidopsis thaliana confers resistance to organomercurials[J]. Economy, 1999, 96.

[9] Salt D A, Smith R D, Raskin I. Annual review of plant physiology and plant molecular biology[J]. Phytoremediation, 1998, 49.

[10] Teery N, de Souza M. Phytoremediation of Selenium in soil and water[M]. Proceedings of SoilRem 2000, 2000, 156 - 160.

[11] Meagher R B, Rugh C L, Kandasamy M K, et al. Engineering phytoremediation of mercury pollution in soil and water using bacterial genes[A]. In: Terry N, Baelos G S. Phytoremediation of contaminated soil and water[C]. Ed CRC Press Inc, Boca Raton, FL, USA, 2000, 201 - 219.

[12] 张从,夏立江. 污染土壤生物修复技术[M]. 北京:中国环境科学出版社,2000.

万方数据

下转 489 页

沙化,培养土壤植被,增施有机肥使土壤粘土化,同时应避免在 Se 平原区的沙质土里打饮用水井。

6　结语

呼和浩特市土壤环境地球化学调查工作查明了呼和浩特市地区 22 种元素在原生环境、次生环境土壤中的分布特征,初步探讨了影响土壤中物质地球化学元素迁移的主要原因。为农业土壤改良,地方病防治、环境污染治理提供了一定的资料。同时为土壤环境地球化学治理提出了一些具体方案。由于工作开展比较早,故测试元素比较少,有一定的局限性。但也为该区的医疗卫生、环境、农、牧业等领域提供了可以使用和借鉴的地球化学资料,为地质科技在这些部门的应用,率先展示了前景,为环境地质工作的开展迈出了可喜的第一步。

参考文献:

[1]　国家环境保护总局监督管理司. 中国环境影响评价[M]. 北京:化学工业出版社,2000.

A PRELIMINARY STUDY OF ENVIRONMENTAL GEOCHEMISTRY OF HOHHOT CITY, INNER MONGOLIA

DING Tian-cai[1], AN Cun-jie[1], SU Mei-xia[1], TIAN Lin-hao[1,2], LIU Huan-lin[1], ZHANG Yu-bao[1,2]

(*Geological Investigation Institute of Inner Mongolia, Hohhot*　010020, *China*; 2. *China University of Geosciences, Beijing*　100083, *China*)

Abstract: In this paper, the authors studied environmental geochemistry of Hohhot, divided soil secondary environments according to their qualities, probed into the soil environmental geochemical element migration, and put forward some opinions for tackling various environmental geochemical problems.

Key words: characteristics of environmental geochemistry; geochemical elements migration; tackling; Hohhot City

作者简介:丁天才(1961 –),男,高级工程师,2002 年毕业于中国地质大学地球科学与资源学院,硕士,现主要从事地球物理、地球化学勘查工作。

上接 475 页

[13] 蒋先军,骆永明,赵其国. 土壤重金属污染的植物提取修复技术及其应用前景[J]. 农业环境保护,2000,19(3):179 – 183.

[14] 周国华,黄怀曾,何红蓼. 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.

[15] Chen T B, Wei C Y. Arsenic hyperaccumulation in some plant species in south China[M]. Proceedings of SoilRem, 2000.

PHYTOREMEDIATION IN CONTAMINATED SOIL

ZHOU Guo-hua

(*Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang*　065000, *China*)

Abstract: Remediation of soil contaminated by heavy metals remains a difficult problem in the world. Phytoremediation is a new technique to eliminate contaminants or weaken their adverse effects on ecosystem by such means as phytoextraction, phytodegradation, phytovolatilization, rhizofiltration, phytostabilization and hydraulic pumping. Hyperaccumulator and accumulator plants play an important role in soil remediation. In the past decade some achievements have been made on the selection of hyperaccumulator plants and investigation of their mechanism on detoxification and hyperaccumulation with the help of molecule biology and gene technique as well as rhizosphere treatment and planting management. With the introduction of molecular biology and gene technique, we can expect a breakthrough in this technology in near future.

Key words: remediation of soil contamination; phytoremediation; heavy metal contamination; hyperaccumulator plant

作者简介:周国华(1964 –),男,浙江昆山人,1989 年获长春地质学院岩化专业硕士学位,现为中国地质大学(北京)在读博士,发表论文 20 余篇。

万方数据