

有机物及重金属植物修复研究进展*

旷远文 温达志** 周国逸

(中国科学院华南植物研究所, 广州 510650)

摘要 植物修复技术是近年来发展起来的一种非常有前途的生物治理技术,也是当前学术界研究的热点领域。本文对植物修复的类型,植物修复土壤、水体有机污染物、重金属和某些放射性核素的过程、机理及可能影响因子作了概括和详尽讨论,并就国内外近年来植物修复技术在污染环境中的应用和研究成果进行了综述。

关键词 植物修复,重金属,有机物,污染土壤和水体

中图分类号 X592 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2004)01-0090-07

Advances in researches on the phytoremediation of organic contaminants and heavy metals. KUANG Yuanwen, WEN Dazhi*, ZHOU Guoyi (South China Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(1): 90~96. Phytoremediation is considered as the most efficient and prospective approach in removing contaminants in soil and water, and has been developed very quickly during the last years. Considerable studies have been carried out in cleaning up heavy metals and organic contaminants resided in environments. In this paper, we summarized the types of phytoremediation. Processes of the interaction of plants with heavy metals and organic contaminants, their relevant mechanisms and possible impacting factors were also revealed in details. Finally, the application and perspective of phytoremediation in contaminated environments were presented.

Key words phytoremediation, heavy metals, organic contaminants, contaminated soil and water.

1 引言

近年来,环境中的污染物越来越多地引起了人们的关注。如何廉价、高效、安全地处理环境中的有毒污染物,已迫切地摆在了人们的面前。植物修复(Phytoremediation)技术是近年来发展起来的一项主要用于清除环境中有毒污染物的绿色修复(Green remediation)技术,是当前生物修复(Bioremediation)研究领域中的热点。土壤中的重金属、水体中的放射性核素是很难降解的污染物,植物修复能有效地降低其毒害程度,将它从环境中去除。除有害金属外,植物修复还可以清除土壤中的有机污染物。植物发生修复作用时,通常是几个过程同时进行,但以某种类型为主。国外对这方面的研究较多,有的已进行了野外大规模试验,并达到了商业化水平。美国等一些发达国家大规模的实验表明,植物修复技术是一项切实有效的、有希望的、能廉价处理某些有毒污染物的新方法^[65]。尽管植物修复还受到某些因素如植物种类和生态型、植物根系分布、污染物浓度及其在土壤中的滞留时间等的影响,但已有的研

究表明,与传统的修复技术相比,植物修复在环境保护中的重要理论价值和广阔应用前景是不容置疑的。本文对国内外近年来利用植物修复技术去除环境中有机物和重金属的应用和研究进展进行了综述。

2 植物修复及其类型

植物修复是利用植物的一系列生理、生化过程部分或完全修复和消除被污染土壤、水体、空气中特定有毒物质。广义的植物修复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降解有机污染物等方面^[7]。归纳起来,植物修复的类型有以下几种:植物降解(Phytodegradation)——植物吸收污染物后,在体内同化污染物或释放出某种酶,将有毒物质降解为无毒物质;根降解(Rhizodegradation)——通过土壤中植物根系及

*国家自然科学基金(30370283)和广东省环保局项目(200010, 200009)、广东省自然科学基金项目(990762)。

**通讯作者

收稿日期:2002-08-28 改回日期:2002-10-28

其周围微生物的活动,把有机污染物分解为小分子产物,或完全矿化为 CO_2 、 H_2O ,去除其毒性;植物萃取(Phytoextraction)——植物从土壤中吸收金属污染物,并在植物地上部分富集,对植物体收获后进行处理;根滤(Rhizofiltration)——通过植物根系吸收、沉淀水中的污染物来达到修复目的。它与植物萃取的相似之处在于:都是使污染物在植物体表或体内富集。但根滤只发生在植物根系或植物的水下部分,而植物萃取引起的污染物的富集出现在植物地上部分,而不是在根系中。根滤适合于修复水中污染物,植物萃取适合于清除土壤中的污染物。有时常把植物萃取和根滤统称为植物富集(Phytoaccumulation);植物挥发(Phytovolatilization)——植物吸收污染物后,将其降解,散发到大气中,或把原先非挥发性的污染物变为挥发性污染物送入大气中。如有毒的 Hg^{2+} 经植物挥发后变成了低毒的 Hg ,高毒的硒变成了低毒的硒化物气体^[15]。Meagher等人^[31]发现经基因工程改良过的烟草(*Nictioana tabacum*)和拟南芥菜(*Arabidopsisthaliana*)能把 Hg^{2+} 变为低毒的单质 Hg 挥发掉;植物固定(Phytostabilization)——植物通过改变土壤的化学、生物、物理条件来抑制其中的污染物,使其发生沉淀或被束缚在腐殖质上,减少它对生物和环境的危害。当前植物固定的研究重点集中在重金属的去除上,Pb、Cr、Hg是植物固定最可能的选择目标^[72]。通常指的植物修复是指利用植物去除被污染土壤中的重金属。

3 植物修复的机理

3.1 重金属的修复机理

植物固定作用:植物通过某种生化过程使污染基质中金属的流动性降低,生物可利用性下降,从而减轻有毒金属对植物的毒性。Cunningham等^[31]在研究植物对土壤中Pb的固定时发现一些植物可以降低Pb的生物可利用性,缓解Pb对环境中生物的毒害作用。

植物吸收和挥发:植物在吸收营养的过程中,由于某些重金属元素与营养元素具有相似的化学结构会被植物“误认”吸收到植物体内,如Cd与Ca、Zn相似,As与P相似^[57],Se与S相似^[60]等,进入植物体内的金属污染物到达表皮层后,或被植物代谢掉或成为植物的成份之一,或通过气孔挥发到大气中^[56,69]。

植物根系活动:植物根系对重金属的吸收主要与重金属的形态有关^[2]。根系活动能活化土壤中的重金属,提高其生物有效性。有研究表明,Cd、Pb、Cu、Zn、As 5种元素交互作用能促进Cd、Pb、Cu的活化,增加植物对它们的吸收^[4]。植物根系在生长过程中可以产生诸如简单酚类及其它有机酸等分泌物。研究表明,植物光合产物的28%~59%转移到了地下部分,其中有4%~7%通过分泌作用进入土壤^[51],这些物质可以降低土壤的pH值,提高金属离子的生物可利用量^[37]。

根际微生物的作用:有研究表明,植物根系与真菌形成的菌根能增加植物对微量元素特别是Cu、Zn的吸收^[40,67]。黄芝等^[9]的研究结果也说明了菌根菌可以通过增加Cu的交换态来增加其生物有效性,这也表明植物根系能影响根际中重金属形态的变化,菌根可通过调节根际中重金属形态来调节土壤重金属的生物有效性。

有毒金属在植物体内富集要经历植物吸收、转移和生理耐受过程。植物所吸收的金属必须溶解在土壤溶液中,金属进入土壤溶液的方式有:植物在根际分泌金属螯合分子,通过这些分子的螯合溶解与土壤结合的金属元素。近年来的一些研究发现,EDTA人工合成有机物能显著活化土壤中Zn、Cu、Cd的活性和迁移性^[5,47]。根能通过具体的与金属还原酶相关的离子膜还原与土壤结合的金属离子。植物通过根系分泌有机酸使土壤溶液pH下降,溶解与土壤结合的金属离子,降低金属对植物的毒性,促进植物对重金属的吸收^[20,68]。Chaney等人^[29]认为植物能吸收富集重金属,与其根部细胞具有与重金属较多的结合位点有关,即重金属存在于细胞壁和液泡中,从而降低其毒性。

3.2 有机污染物的修复机理

有机化合物能否被植物吸收,并在植物体内发生转移,完全取决于有机化合物的亲水性、可溶性、极性和分子量^[22,64]。Cunningham等^[32]发现,有机质亲水性越强,被植物吸收就越少。植物主要通过三种机理去除环境中的有机污染物^[8]:植物直接吸收有机污染物;植物根系释放分泌物和酶;植物和根际微生物的联合作用。

3.2.1 植物直接吸收污染物 植物根对有机物的吸收近乎直接与有机物的相对亲脂性有关,某些化合物被吸收后,有的以一种很少能被生物利用的形式束缚在植物组织中。如利用胡萝卜(*Daucus*

carota) 吸收二氯二苯基——三氯乙烷, 然后收获胡萝卜, 晒干后完全燃烧以破坏污染物, 在这个过程中, 亲脂性污染物离开土壤进入胡萝卜根中^[33]。也有某些有机污染物进入植物体内后, 其代谢产物可能粘附在植物的组份如木质素中^[43]。环境中大多数苯系物 (BTEX) 化合物、有机氯化剂和短链脂肪族化合物都是通过植物直接吸收途径去除的^[65]。

3.2.2 植物与根际微生物的转化 Anderson 等^[16]的实验表明, 植物能以多种方式刺激微生物对有机污染物进行转化, 根际微生物在生物降解中起着重要作用。土壤由于植物根系的存在, 增加了微生物的活动和数量。具植物根系的土壤其微生物数量和活性比无根系土壤中微生物数量和活性增加了 5~10 倍, 有的高达 100 倍, 这些微生物可以加速许多有机农药及三氯乙烯和石油烃的降解^[13], 甲基硫类物质和某些杀虫剂也能被几种根际微生物所降解^[60]。Jordahl 等^[44]发现具杂交杨 (*Populus deltoides*) 根系的土壤中, 异养生物、B TX 类降解微生物和除草剂阿特拉津 (Atrazine) 降解者的数量高于无根系土壤。Katayama 等^[45]也作了用根际真菌降解多种有机化合物如五氯苯酚、DDT 等方面的研究, 证实了根际微生物能对有机污染物的降解起作用。其降解的原因可能是植物根系分泌物刺激了微生物的活动。Prikyl 等^[58]的研究表明, 植物根际分泌物的数量与土壤中微生物的存在密切相关。

3.2.3 植物分泌物和酶的降解作用 植物分泌物包括糖类、氨基酸、有机酸、脂肪酸、甾醇、生长素、核苷酸、黄烷酮及其它化合物^[56], 这些化合物能改变土壤的理化条件。现已证明, 某些能降解有机污染物的酶类不是来源于微生物而是来源于植物, 如植物根系中的硝基还原酶能对含硝基的有机污染物进行降解^[49]。美国佐治亚洲 Athens 的 EPA 实验室证明了脱卤酶、硝基还原酶、过氧化物酶、漆酶和脲水酶等 5 种酶来源于植物^[65]。植物释放到根系土壤中的酶系统可以直接降解有关的化合物, 如硝酸还原酶和漆酶可以降解 TNT, 使之成为无毒物质, 脱卤酶可降解氯化剂如 TCE, 生成 Cl^- 、 H_2O 和 CO_2 ^[65]。研究植物特有酶的降解功能为植物修复有机污染物的潜力提供了有利证据。

4 植物修复的应用

4.1 土壤重金属的植物修复

由于土壤重金属的非降解性和难清除性, 被重

金属污染土壤的修复非常困难, 成本也昂贵^[36]。导致土壤污染的重金属主要包括 As、Cd、Co、Cr、Cu、Hg、Mn、Ni、Pb 和 Zn 等, 一般为几种重金属的复合污染^[14]。它们都可以通过植物萃取技术加以修复^[62]。许多研究表明, 植物还可以通过植物固定、植物挥发和植物吸收来去除土壤中的重金属。如剪股颖属植物 *Agrostis tenuis* cv. *Goginan* 可固定 Pb 和 Zn, *Agrostis tenuis* cv. *Parys* 可固定 Cu^[70], 印度芥 (*Brassica juncea* (L.)) 能移走土壤中的 Pb, 栽种了印度芥的沙地含铅量只有 $22 \text{ ug} \cdot \text{ml}^{-1}$, 而对照地竟达 $740 \text{ ug} \cdot \text{ml}^{-1}$ ^[62]。庭芥属植物 *Alyssum heldreichii* 中能发现高浓度的 Ni、Cd、Zn, 遏蓝芥属 *Thlaspi caerulescens* 中也发现高浓度的 Zn^[35]。值得注意的是近年来重金属超富集植物 (Hyperaccumulator) 的研究已成为植物修复的一个热点^[3]。苏德纯等^[10]在研究油菜 (*Brassica juncea*) 对 Cd 的修复时发现, 土壤中 Cd 浓度在 $0 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内, 油菜的地上部生物量、地上部吸收 Cd 量对土壤的净化率均明显高于参比超富集植物印度芥, 其体内 Cd 浓度也和印度芥相当, 吸收的 Cd 88% 以上分布在地上部分, 他们认为油菜有较强的耐 Cd 毒能力, 可作为一种很有潜力的修复 Cd 污染土壤的植物。一些超富集植物及其富集重金属的能力见下^[33]:

表 1 某些超富集植物及其金属含量(以干重计)

Tab. 1 Hyperaccumulators and their heavy metal content

重金属离子	植物种类	可收获部分金属含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
Cd	<i>Thlaspi caerulescens</i>	1 800
Cu	<i>Ipomea alpina</i>	12 300
Co	<i>Haumaniastrum robertii</i>	10 200
Pb	<i>T. otundifolium</i>	8 200
Mn	<i>Macadamia neurophylla</i>	51 800
Ni	<i>Psychotria doarrei</i>	47 500
Zn	<i>T. aerulenscens</i>	51 600

玉米 (*Zea mays*)、高粱 (*Sorghum bicolor*)、苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 和柳树 (*Salix* spp.) 由于生物量大而经常用于植物修复技术之中。某些豆科植物在这方面也有很重要的功能。张志权等^[11]在铅锌矿尾地上引入木本豆科植物银合欢 (*Leucaena glauca*), 发现它能在尾矿地上成功定居并开花结果, 其体内所吸收的 Pb 转移总量的 80% 以上富集在根和茎中, 木本豆科植物的这一优点在植物修复重金属污染地的实践中是非常有价值的^[12]。

4.2 水中有害金属的植物修复

应用植物去除水中的有害金属是近年来才发展

起来的一项环保型技术,它的修复方式主要是根滤。根滤最初是用来处理大面积水体中低浓度的金属元素,如 Pb、Cd、Cu、Fe、Ni、Mn、Zn、Cr⁶⁺^[35,61,73]和放射性元素,如⁹⁰Sr、¹³⁷Cs、²³⁸U、²³⁶U^[34]。由于陆生植物生物量比水生植物大,根系生长快,根滤常选用陆生植物^[35],但也有人发现漂浮植物凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)有发达的纤维根系和高生物量,能够从中有效地去除 Cd、Cr、Se 和 Cu^[75]。但根滤技术的应用推广目前还处于探索阶段^[27],Ohio 的温室里已建立了根滤系统,此系统用太阳花(*Helianthus annuus*)把被污染水体中的 U 几乎全部集中在根部,根部与水相中的 U 浓度的生物系数达到 30 000,太阳花生长 4~8 周后,去除了水中的¹³⁷Cr、⁹⁰Sr^[67]。有人指出,根滤技术更适用于清除放射性核素^[48]。水生植物如凤眼莲、伞形科植物 *Hydrocotyle umbellata* 和浮萍(*Lemna minor*)都被曾用于实验处理水体^[62],但它们个体小,生长慢^[35]。Zayed 等人^[74]发现,废水中的浮萍是 Cd、Cr、Cu 和 Se 的有效修复植物,Zhu 等^[75]发现凤眼莲是植物修复 Cd、Cr、Cu 和 Se 的最有前景的植物。

4.3 土壤中有有机污染物的植物修复

植物修复有机污染物的方式主要有植物固定、根-植物降解,以后者为主。有机污染物的植物修复技术最初用于清除军用物质如 TNT,但现在已在许多方面加以应用^[38]。与传统的植物修复相比,植物修复更适合于现场修复。近年来有关的研究很多,有的已达到野外应用的水平。修复的对象有石油碳氢化合物(TPH)、多环芳烃(PAHs)、杀虫剂、氯化剂、五氯苯酚(PCP)、PCBs 和表面活性剂等^[44]。Schwab 和 Banks^[66]调查了几个被原油、石油提炼物污染地的总 TPH,发现在黑麦(*Secale cereale*)与大豆(*Glycine max*)轮作的地块上,TPH 消失量显著($P < 0.05$)高于无植被的地块。Aprill 和 Sims^[19]用禾本科植物 *Andropogon gerardi*、*Schizachyrium scoparium*、*Sorghastrum nutan*、*Panicum virgatum*、*Elymus Canadensis*、*Agropyron smithii*、*Bouteloua curtipendula*、*Bouteloua gracilis*。实验时发现,在 PAHs 含量为 100 mg·kg⁻¹的土壤中,有植被地 PAHs 消失量显著高于无植被地。其结果与 Reilley 等^[59]的研究结论一致。但有关植物修复 PAHs 的研究成果目前报道不多^[11]。一些研究还表明,植物还能降解杀虫剂和除草剂^[17,24]。Anderson 和 Walton^[18]也发现与无植被的土壤相比,有胡枝子属

Lespedera cuneata (Dumont.)、松属 *Pinus taeda* (L.)、的土壤中 TCE 的矿化得到加强。桑科植物 *Morus rubra* L. *Malus fusca* (Raf.) *schneid* 及蔷薇科植物 *Maclara pomifera* (Raf.) *schneid* 的根系分泌物能促进 PCB 降解菌的生长^[39]。

短链的脂肪族化合物可被植物吸收^[53]。植物还能同化许多有机化合物,如 TCE^[52]、TN T^[71]、除草剂^[28]。现已发现,小麦和大豆的植物细胞能部分同化许多化合物如 2,4-D、2,4,5-T、4-氯胺、3,4-二氯胺、PCP、DEHP、苯类、DDT 和 PBC 等^[43,63,74]。水生植物 *Myriophyllum aquaticum* 能把土壤中的 TNT 从浓度 128 mg·kg⁻¹降低到 10 mg·kg⁻¹^[65]。另外,Conger 和 Portier^[30]发现,柳树(*Salix nigra*)、鹅掌楸(*Liriodendron tulipifera*)、落羽松(*Taxodium distichum*)、桦木(*Betula nigr*)及栎属植物(*Quercus falcate*、*Quercus virginiana*)等都能有效地降解除草剂 Bentazon。

4.4 水中有机污染物的植物修复

植物还可以通过植物挥发来清除水中的有机污染物如 TCE,但修复过程通常是与其他修复方式同时进行的^[27]。Newman 等^[54]发现生长于 TCE 浓度为 50 mg·kg⁻¹的水培杂交杨,三年中从水里移走了 98%~99%的 TCE,而无杂交杨的对照处仅有 33%的 TCE 被丢失。Burken 和 Schnoor^[28]收获水培的杂交杨也发现,溶液中约有 20%的苯和 TCE 被植物挥发掉。

5 影响植物修复的因素

5.1 环境条件

包括土壤水分、pH、有机质含量、孔隙度等,这些因素间接决定土壤微生物的数量、种类和生物活性^[27]。pH 变化显著影响耐重金属植物对重金属的吸收,在不同 pH 值处理的被 Zn、Cr 污染的土壤盆栽试验中,*T. careulesences* 吸收的 Zn、Cr 量大小值随土壤 pH 值下降而增加^[26]。改善土壤的环境条件,可以显著提高 PAHs 生物降解效果^[28]。

5.2 污染物性质

在低 pH 值下重金属呈吸附态进入土壤溶液,会增加植物对重金属的生物获取量^[42]。有机化合物的亲水性大小是影响它能否被植物吸收的因素之一,亲水性越大,进入土壤溶液的机会越小,被植物吸收量越少^[64,65]。通常 PAHs 环的数目越多越难被植物降解^[27]。加入 EDTA 会增加金属的活性和

可溶性,但 EDTA 活化土壤重金属存在污染地下水的风险^[6],这一点必须加以考虑。

5.3 植物种类

Paterson 等^[56]发现有 88 种植物能有效吸收和富集 70 余种有机污染物;Bellin 和 O'Connor^[21]发现有些植物对重金属的耐受性特别高,其体内重金属含量是同类土壤上其他植物的 100 倍或 1 000 倍。如果能找到或驯化出这种植物(超富集植物),植物修复效率将大幅提高。遏蓝菜属植物 *Thlaspi rotundifolium* spp. *cepaefolium* 是已知的唯一能富集 Pb 的植物^[25]。

不同植物甚至同一种植物的亚种或变种所产生的分泌物和酶的种类、数量、功效是不同的^[27],这对植物修复的功效产生一定的影响。经基因工程改造的植物能显著提高修复的功效。如改造的拟南芥菜和烟草在能杀死未改造种的 Hg^{2+} 浓度下存活,并把有毒的 Hg^{2+} 变为低度的单质 Hg 挥发掉^[50]。黄杨 (*Lrriodendron tulipifera*) 中也如此^[60]。

5.4 根系分布

许多植物根系分布很窄,穿透的深度受土壤条件和土壤结构的影响。用 *Brassica juncea* 提取土壤中的 Pb 污染物时,其深度最多只能达到 15 cm,而 Pb 的移动范围在 15 ~ 45 cm^[23]。但在有些情况下,根的深度可达 110 cm,并扩展到高浓度的污染物的土壤中^[55]。修复过程发生时植物根系必须和污染物接触,所以根系的分布深度直接影响着被修复土壤或地下水的深度。多数能富集重金属污染物的植物根系分布在土壤表层,这对植物修复的效果会产生影响^[27]。3 年生的橡树 (*Querus phellos* L.) 的根系在 30 cm 的土层内,90% 的根密度是分布在 20 cm 土层内^[46]。

5.5 污染物浓度和滞留时间

柳树 (*Salix nigra*) 能降解除草剂 Bentazon,但当除草剂的浓度太高时,会对植物产生毒害,使植物无法生长或引起植物生长的衰退。浓度在 1 000 ~ 2 000 mg/kg 时,Bentazon 对 6 种植物产生毒害^[30]。土壤中存留几年的污染物的生物获取量比新鲜污染物要少的多,降低植物的修复功效^[27]。

6 植物修复的评价

植物修复是一项对环境友好的绿色的、低技术要求的修复方法,容易为社会接受,与传统的修复技术相比,成本要低得多。如把 Pb 从土壤中清除的

预期成本只有传统修复技术的 50% ~ 70%^[23];既可应用于土壤、地表水,也可是用于地下水;在修复土壤时,对土壤肥力和土壤结构没有破坏,还能增加土壤有机质含量和土壤肥力,同时能减少土壤侵蚀的发生;永久解决被修复基质中的污染问题,而不是将污染物从一个基质搬运到另一个基质,甚至还有可能回收一些重金属,而且适用的污染物广泛。

但植物修复也存在缺点:要求植株具有高生物量,对污染物的耐性要高,否则当污染物浓度太高时,植物不能生长。它受植物根系分布的限制,处于根系分布之外的污染物很难被清除。由于根系或地上部分生长慢,清除污染物要求的时间太长,某些生物量低和生长慢的超富集植物在修复金属污染物时要 10 ~ 20 年的时间^[4]。Salt 等^[62]发现,用 *Thlaspi caerulescens* 在野外试验去除重金属污染地段要 13 ~ 14 年的时间。Greger 和 Landberg^[41]计算出用柳树去除浓度为 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Cd 污染要 12 年时间;另外由于植物修复富集了重金属和放射性核素污染物,要对其材料进行处理和风险分析。如要将萃取了 ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 的太阳花当作放射性废物进行处理^[15];植物生长受季节、气候、病虫害的影响;目前的植物修复技术所采取的途径仅仅是种植单一的修复型植物,往往修复不彻底,还有可能引起土壤环境和生物效应的发生,如由于拮抗或化感作用使修复型植物生长不良生物量下降。今后的研究方向应把注意力放在寻找和培育高效修复型植物,尤其是某些重金属超富集植物上,并开展多种植物混作以提高修复效率。

7 结 语

植物修复技术不但能修复地下水、地表水、废水,还可修复土壤和空气,可清除的污染物包括无机污染物(金属、类金属、非金属、放射属性核素和废料)和有机污染物(石油碳氢化合物、氯化剂、杀虫剂、除草剂、木材防腐剂、表面活性剂等)。尽管此技术还处于研究探索阶段,仍有不完善的地方,它涉及到植物生理学、土壤学、生态学、化学、遗传学、环境保护学、生物工程等多学科知识的交叉和综合应用,有许多理论研究和应用工作要做,如土壤中重金属的活化技术、植物根系分泌物对根际污染物的影响、超富集植物的选取及植物基因工程的实施等。但随着各方面研究和实践的深入,它必将得到广泛推广与应用,并为环境保护和治理工作带来新的希望。

参考文献

- [1] 丁克强, 骆永明. 2001. 多环芳烃污染土壤的生物修复研究[J]. 土壤, **34**(4): 169~178.
- [2] 王慎强, 陈怀满, 司有斌. 1999. 我国土壤环境保护研究的回顾与展望[J]. 土壤, **5**: 255~260.
- [3] 韦朝阳, 陈同斌. 2001. 重金属超富集植物及植物修复技术研究进展[J]. 生态学报, **21**(7): 1196~1203.
- [4] 吴燕玉, 王新, 梁仁禄, 等. 1997. 重金属复合污染对土壤—植物系统的生态效应——对作物、苜蓿、树木吸收元素的影响[J]. 应用生态学报, **8**(5): 545~552.
- [5] 吴龙华, 骆永明, 赵其国. 2000. 镉污染土壤的植物修复及其EDTA调控研究——镉对富集植物印度芥(*Brassica juncea*)的毒性[J]. 土壤, **33**(4): 35~39.
- [6] 吴龙华, 骆永明, 张海波. 2001. 有机络合物修复的环境风险研究——EDTA对复合污染土壤中TOC和重金属动态变化的影响[J]. 土壤, **34**(4): 189~192.
- [7] 唐世荣, 黄昌勇, 朱祖洋. 1996. 利用植物修复重金属污染土壤[J]. 环境科学进展, **4**(12): 10~15.
- [8] 桑伟莲, 孔繁翔. 1999. 植物修复研究进展[J]. 环境科学进展, **7**(3): 40~44.
- [9] 黄艺, 陈有键, 陶澍. 2000. 菌根植物根际环境对污染土壤中Cu、Zn、Pb、Cd形态的影响[J]. 应用生态学报, **11**(3): 431~434.
- [10] 苏德纯, 黄焕忠. 2002. 油菜作为超积累植物修复镉污染土壤的潜力[J]. 中国环境科学, **22**(1): 48~51.
- [11] 张志权, 束文圣, 廖文波, 等. 2002. 豆科植物与矿业废弃地植被恢复[J]. 生态学报, **21**(2): 47~52.
- [12] 张志权, 束文圣, 蓝崇钰, 等. 2001. 土壤种子库与矿业废弃地植被恢复研究: 定居植物对重金属的吸收与再分配[J]. 植物生态学报, **25**(3): 306~311.
- [13] 张福锁, 曹一平. 1992. 根际动态过程和植物营养[J]. 土壤学报, **29**(3): 239~250.
- [14] 谢正苗, 黄昌勇, 徐建民. 1997. 土壤污染化学[M]. 见黄昌勇. 土壤化学研究与应用[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 168~199.
- [15] Adler T. 1996. Botanical cleanup crews using plants to tackle[J]. *Environ. Sci. Technol.*, **30**: 42~43.
- [16] Anderson TA, Elizabeth AG, Walton BT. 1993. Bioremediation in the rhizosphere[J]. *Environ. Sci. Technol.*, **27**(13): 2630~2635.
- [17] Anderson TA, Kruger EL, Coats JR. 1994. Enhanced degradation of a mixture of three herbicides in the rhizosphere of a herbicide-tolerant plant[J]. *Chemosphere*, **28**: 1551~1557.
- [18] Anderson TA, Walton BT. 1995. Comparative fate of ¹⁴C-trichloroethylene in the root zone of plants from a former solvent disposal site[J]. *Environ. Toxicol. Chem.*, **14**: 2041~2047.
- [19] Aprill W, Sims RC. 1990. Evaluation of the use of prairie grasses for stimulating polycyclic aromatic hydrocarbon treatment in soil[J]. *Chemosphere*, **20**: 253~265.
- [20] Baker AJM, Brooks RR. 1998. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metal elements: A view of their distribution, ecology and phytochemistry[J]. *Biorecovery*, **1**: 81~126.
- [21] Bellin CA, O'Connor GA. 1990. Plant uptake of pentachlorophenol from sludge-amended soils[J]. *J. Environ. Qual.*, **19**: 598~602.
- [22] Bell RM. 1992. Higher plant accumulation of organic pollutants from soils[R]. Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati, OH. EPA/600/R-92/138.
- [23] Blaylock MJ, et al. 1997. Enhanced accumulation of Pb in Indian Mustard by soil applied chelating agents[J]. *Environ. Sci. Technol.*, **31**: 860~865.
- [24] Boyle JJ, Shann JR. 1995. Biodegradation of phenol, 2,4-DCP, 2,4-D and 2,4,5-T in field collected rhizosphere and nonrhizosphere soils[J]. *J. Environ. Qual.*, **24**: 782~785.
- [25] Brooks RR. 1998. Phytoarcheology and hyperaccumulators[A]. In: Brooks RR(ed.). *Plants and Hyperaccumulate Heavy Metals*[C]. New York: NY CAB Intern., 153~180.
- [26] Brown SL, et al. 1994. Phytoremediation potential of *Thlaspi caerulescens* and bladder campion for zinc and cadmium contaminated soil[J]. *J. Environ. Qual.*, **23**: 1151~1157.
- [27] Bruce E P. 2001. Phytoremediation of contaminated soil and groundwater at Hazardous waste sites[R]. EPA/540/S-01-500.
- [28] Burken J G, Schnoor JL. 1997. Uptake and metabolism of atrazine by poplar trees[J]. *Environ. Sci. Technol.*, **31**: 1339~1406.
- [29] Chaney RL, et al. 1997. Phytoremediation of soil metals[J]. *Current Opinion Biotechnol.*, **8**: 279~284.
- [30] Conger RM, Portier R. 1997. Phytoremediation experimentation with the herbicide bentazon[J]. *Remediation*, **7**(2): 19~37.
- [31] Cunningham SD, Berti WR, Huang JW. 1995. Phytoremediation of contaminated soils[J]. *Trends Biotechnol.*, **13**: 393~397.
- [32] Cunningham SD, et al. 1997. Phytoremediation of contaminated water and soil[A]. In: Ktuger EL, Anderson TA, and Coats JR. (eds.). *Phytoremediation of Soil and Water Contaminants*[C]. ACS Symposium Series NO. 664. Washington, DC: American Chemical Society.
- [33] Cunningham SD, OW DW. 1996. Promises and prospects of phytoremediation[J]. *Plant Physical.*, **110**: 715~719.
- [34] Dushenkov S, et al. 1997. Removal of uranium from water using terrestrial plants[J]. *Environ. Sci. Technol.*, **31**(12): 3468~3474.
- [35] Dushenkov V, et al. 1995. Rhizofiltration: The use of plants to remove heavy metals from aqueous streams[J]. *Environ. Sci. Technol.*, **29**(5): 1239~1245.
- [36] Ebbs OSD, et al. 1997. Phytoremediation of Cadmium and Zinc from a contaminated soil[J]. *J. Environ. Qual.*, **26**: 1424~1430.
- [37] Ernst WHO. 1996. Bioavailability of heavy metals and decontamination of soils by plants[J]. *Appl. Geochem.*, **11**(1/2): 163~167.
- [38] ESTCP. 1990. The Use of Constructed Wetlands to Phytoremediate Explosives-Contaminated Groundwater at the Milan Army Ammunition Plant[R], Milan, Tennessee. ESTCP Cost and Performance Report, Environmental Security Technology Certification Program, U. S. Department of Defense.
- [39] Fletcher JS, Hegde RS. 1995. Release of phenols by importance in bioremediation[J]. *Chemosphere*, **31**: 3009~3016.
- [40] Gnekov MA, Marschner H. 1989. Roles of VA-mycorrhiza in growth and mineral nutrition of apple (*Malus pumila* var. *domestica*) stock cuttings[J]. *Plant and Soil*, **119**(9): 285~293.
- [41] Grege M, Landberg T. 1999. Use of willow in phytoremediation[J]. *J. Phytoremed.*, **1**(2): 115~123.
- [42] Grosser RJ, Warszewsky D. 1991. Robie, vestol, indigenous and enhanced mineralization of pyrene, benzo(a)pyrene and carbazole in soils[J]. *Appl. Environ. Microbio.*, **57**: 3462~3469.
- [43] Harms H, Langebartels C. 1986. Standardized plant cell suspension test systems for an ecotoxicologic evaluation of the metabolic fate of xenobiotics[J]. *Plant Sci.*, **5**: 157~165.
- [44] Jordahl JL, et al. 1997. Effect of hybrid poplar tree on microbial populations important to hazardous waste bioremediation[J]. *Environ. Toxicol. Chem.*, **16**(6): 1318~1321.
- [45] Katayama A, Matsumura F. 1993. Degradation of organochlorine pesticides, particularly endosulfun, by *Trichoderma harzianum*[J]. *Environ. Toxicol. Chem.*, **12**: 1059~1065.
- [46] Katul G, et al. 1997. Soil water depletion by oak trees and the influence of root water uptake on the moisture content spatial statistics[J]. *Water Resour. Res.*, **33**(4): 611~623.

- [47] Luo, *et al.* 1999. Thapsi caerulescens J. and *C. presl* metal solubility in a Zn/ Cd contaminated soil after addition of EDTA[C]. Vienna, Australia: Proceeding of 5th International Conference of Biochemistry of Trace Elements.
- [48] Macaskie L.E. 1991. The application of biodegradation to the treatment of waste products from the nuclear fuel cycle: Biodegradation and bioaccumulation as a mean of treating radionuclide-contaminating streams[J]. *Crit. Rev. Biotechnol.*, **11**:41 ~ 112.
- [49] Macek T, Mackova M, Kas J. 2000. Exploitation of plants for the removal of organics in environmental remediation[J]. *Biotechnol. Adv.*, **18**(1):23 ~ 24.
- [50] Meagher RB, *et al.* 2000. Engineered Phytoremediation of Mercury Pollution in Soil and Water Using Bacterial Gense[C]. In: Terry N and Banuelos G(eds.). *Phytoremediation of Contaminated Soil and Water*. Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 201 ~ 219.
- [51] Lynch JM, Whipps JM. 1990. Substrate flow in the rhizosphere [J]. *Plant and Soil.*, **129**:1 ~ 10.
- [52] Newman LA, *et al.* 1997. Uptake and biotransformation of trichloroethylene by hybrid poplars[J]. *Environ. Sci. Technol.*, **31**:1062 ~ 1067.
- [53] Newman LA, *et al.* 1998. Phytoremediation of organic contaminants: A review of phytoremediation research at the University of Washington[J]. *J. Soil Contam.*, **7**(4):531 ~ 542.
- [54] Newman LA, *et al.* 1999. Remediation of trichloroethylene in an artificial aquifer with trees: A controlled field study[J]. *Environ. Sci. Technol.*, **33**(13):2257 ~ 2265.
- [55] Olson PE, Fletcher JS. 2000. Ecological recovery of vegetation at a former industrial sludge basin and its implications to phytoremediation[J]. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **4**:195 ~ 204.
- [56] Paterson S, *et al.* 1990. Uptake of organic chemicals by plants: A review of processes, correlations and models[J]. *Chemosphere*, **21**(3):297 ~ 331.
- [57] Pierzynski GM, *et al.* 1994. Vegetative remediation at superfund sites[R]. In: Hester RE. and Harrison RM. (Eds.): *Issues in Environmental Science and Technology 1. Mining and its environmental impact*[C]. U. K. Society of Chemistry, 49 ~ 69.
- [58] Prikry LZ, Vancura V. 1980. Root exudates of plant. Wheat root exudation as dependent on growth, concentration gradient of exudates and the presence of bacteria[J]. *Plant and Soil.*, **57**:69 ~ 83.
- [59] Reilley KA, Bandks MK, Schawab AP. 1996. Dissipation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the rhizosphere[J]. *J. Environ. Qual.*, **25**:212 ~ 219.
- [60] Rugh CL, *et al.* 1998. Development of transgenic yellow poplar for mercury phytoremediation[J]. *Nat. Biotechnol.*, **16**(10):925 ~ 928.
- [61] Salt DE, *et al.* 1997. Metal accumulation by aquacultured seedlings of Indian Mustard[J]. *Environ. Sci. Technol.*, **31**(6):1636 ~ 1644.
- [62] Salt DE, *et al.* 1995. Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants[J]. *Biotechnology.*, **13**:468 ~ 474.
- [63] Sandermann H, Scheel JD, Trenck THVD. 1984. Use of plant cell cultures to study the metabolism of environmental chemicals [J]. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, **8**:167 ~ 182.
- [64] Schnoor JL. 1997. Phytoremediation[R]. Technology Evaluation Report TE-98-01. Groundwater Remediation Technologies Analysis Center. Pittsburgh. PA.
- [65] Schnoor JL, *et al.* 1995. Phytoremediation of organic and nutrient contaminants [J]. *Environ. Sci. Technol.*, **29**:318A ~ 323A.
- [66] Schwab AP, Banks MK. 1999. Phytoremediation of petroleum ~ contaminated soils [C]. Chapter 28. In: Adriano DC. (eds.). *Bioremediation of Contaminated Soils*. Agronomy Monograph 37. Madison: American Society of Agronomy.
- [67] Sharma AK, Srivastava PC. 1991. Effect of VAM and zinc application on dry matter and zinc uptake of greengram (Influence of soil moisture regime on VA-mycorrhiza L. wilczek) [J]. *Biol. Fertil. Soils*, **11**(1):52 ~ 56.
- [68] Shen ZG, Zhao FJ, McGrath SP. 1997. Uptake and transport of Zinc in the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescense* and the non-hyperaccumulator *Thlaspi ochroleucum* [J]. *Plant, Cell Environ.*, **20**:898 ~ 906.
- [69] Shimp JF, *et al.* 1993. Beneficial effects of plants in the remediation of soil and groundwater contaminated with organic material [J]. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, **23**:41 ~ 77.
- [70] Smith RAH, Bradshaw AD. 1979. The use of metal tolerant plant populations for the reclamation of metalliferous wastes[J]. *J. Appl. Ecol.*, **16**:595 ~ 612.
- [71] Thompson PL, Ramer LA, Schnoor JL. 1998. Uptake and transformation of TNT by hybrid poplar trees[J]. *Environ. Sci. Technol.*, **32**(7):975 ~ 980.
- [72] U. S. EPA. 1997. Status of *in situ* phytoremediation technology [R]. In: Recent developments for *in situ* treatment of contaminated soils. EPA-542-R-97-004. 1997. March: 31 ~ 42.
- [73] Wilken A, *et al.* 1995. Metabolism of different PCB congeners in plant cell cultures[J]. *Environ. Toxicol. Chem.*, **14**(12):2017 ~ 2022.
- [74] Zayed A, Gowthaman S, Terry N. 1998. Phytoaccumulation of trace elements by wetlands plants I: *Duckweed Lemna L* [J]. *J. Environ. Qual.*, **27**:715 ~ 721.
- [75] Zhu YL, *et al.* 1999. Phytoremediation of trace elements by wetland plant: Water hyacinth[J]. *J. Environ. Qual.*, **28**:339 ~ 344.

作者简介 旷远文,男,1974年生,硕士,从事森林生态与环境生态研究。E-mail: kuangywn@scib.ac.cn
责任编辑 魏丽萍
