

铅污染土壤的植物修复研究进展^①

伍 钧^{1,2} 孟晓霞¹ 李 昆³

(1 四川大学建筑与环境学院 成都 610065; 2 四川农业大学资源环境学院 四川雅安 625014;

3 四川省农业环境监测站 成都 610041)

摘 要 利用植物修复技术对土壤重金属污染进行治理是目前国内外有关学者研究的热点和难点问题。本文系统地阐述了重金属 Pb 污染土壤的植物修复, 从 Pb 超富集植物、植物吸收累积 Pb 的机制和影响因素以及螯合剂在 Pb 污染土壤植物修复中的作用等几方面介绍了国内外的有关研究现状及其发展趋势。

关键词 铅; 土壤; 植物修复; 超富集植物

中图分类号 X53

随着经济的全球化, 含 Pb 的污染物通过污水灌溉、污泥利用、农药和化肥的施用、大气沉降等途径进入到土壤环境中, 造成了严重的土壤污染^[1,2]。含 Pb 污染物不仅影响土壤微生物、土壤酶活性以及土壤的理化性质^[3,4], 而且会对农作物产量和质量产生影响, 甚至通过食物链危害人类的健康。考虑到 Pb 对人体的危害以及土壤 Pb 污染的普遍性和严重性, 如何修复 Pb 污染土壤已成为世界各国科学家的研究热点。植物修复技术作为一种新兴的、高效的生物修复途径现已被科学界和政府部门认可和选用。该技术在海外应用较早, 1977 年 Brooks 提出了超富集植物的概念^[5], 1983 年 Chaney 提出了利用超富集植物清除土壤重金属的思想^[6], 之后有关耐重金属植物与超富集植物的研究逐渐增多, 植物修复作为一种治理污染土壤的技术被提出并得到广泛应用。我国在这方面的研究起步较晚, 虽然利用指示植物—铜草 (*Elsholtzia harchowensis* Sun) 寻找铜矿工作开展较早^[7], 但从 1999 年首次发现一种 As 的超富集蕨类植物^[8]开始, 植物修复工作才真正开展。目前关于重金属 Pb 的植物修复技术已引起广泛关注, 多数研究倾向于一些高生物量植物的修复潜力, 如农作物、观赏植物等^[9-12], 也有人提出应用螯合剂来提高生物修复的效率^[13-15]。

1 铅的超富集植物

与一般植物不同的是, 超富集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污染较轻的土壤上, 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迁移至植物茎叶地上部器官中。据 Baker 等^[16]的研究, 超富集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。至今, 普遍认为富集重金属含量超过一般植物 100 倍的植物属于超富集植物, 即 Cr、Co、Ni、Cu、Pb 含量应在 1000 mg/kg 以上。但也有人认为普通植物品种通过人工驯化栽培, 配合添加土壤改良剂 (如螯合剂等), 可显著提高植物对重金属的吸收富集能力, 因此这些植物也可以称为超富集植物^[17]。

目前, Pb 的超富集植物被发现的并不多^[18]。自然界中多数植物对 Pb 的吸收能力很低, 普通植物一般 Pb 含量为 10 mg/kg 干重^[19]。而且, 由于 Pb 特殊的化学性质 (Pb 有很高的负电性, 被认为是弱 Lewis 酸, 易与 Fe、Al、Mn 氧化物、有机质和碳酸盐形成共价键), 土壤中的 Pb 不易被植物吸收, 即使 Pb 进入植物根系也只有很少部分能向地上部转移。仅见的几种 Pb 的超富集植物都是生长在富含 Pb 和 Zn 的矿化土壤、采矿区和冶炼厂废弃物等处, 见表 1。另有研究发现^[10,26-29], 紫花苜蓿、羽叶鬼针草、酸模、白麻、芥子草和普通豚草对 Pb 也具有很高的生物富集量, 是很有利用价值的土壤 Pb 污染修复植物。

2 植物吸收累积铅的机制

2.1 植物对 Pb 的吸收

根系是植物直接接触土壤的器官, 也是植物吸收重金属的主要器官。Pb 到达根表面, 主要有两条

^①四川省科技厅应用基础项目资助。

表1 典型超富集植物中Pb最大含量(mg/kg)

Table 1 Several popular hyperaccumulators and maximum lead contents in their shoots (mg/kg)

植物种	茎或叶片中重金属含量(干物质)	文献来源
<i>Agrostis ovina</i> 牧草剪股颖	13488	Williams 等 ^[20]
<i>Festuca ovina</i> 羊茅草	130~11750	Barry 等 ^[21]
<i>Thlaspi Rotundifolium</i> 圆叶遏蓝菜	8500	Reeves 等 ^[22]
<i>Brassica Jouncea</i> 印度芥菜	34500	Kumur 等 ^[23]
<i>Minuaritia verna</i> 高山漆姑草	11400	Reeves 等 ^[22]
<i>Biscutella laevigata</i> 高河菜属	1000	Wenzel 等 ^[24]
<i>Sedum alfredii Hance</i> 东南景天	1182	何冰等 ^[25]

途径：一是质体流途径，即污染物随蒸腾拉力，在植物吸收水分时与水一起达到植物根部；另一条途径是扩散途径，即通过扩散而到达根表面。根系对Pb的吸收在前期是以表面吸附为主，吸附能力大小可能与根系的吸附表面、吸附位点、平衡浓度有关。溶液中Pb浓度越高，根系吸附量相对越多。在Pb被吸附到根表面后，主要是细胞的吸收过程和化学沉淀过程，该过程只有活细胞才能进行。到达植物根表面的Pb进入植物体，有主动吸收，也有被动吸收。

Pb一旦进入根系，可贮存在根部或运输到地上部。从根表面吸收的Pb能横穿根的中柱，被送入导管，进入导管后随蒸腾流被动运输到地上部。一般认为穿过根表面的Pb离子到达内皮层有两条途径：一是质外体途径，即Pb离子和水在根内横向迁移，到达内皮层是通过细胞壁和细胞间隙等质外体空间；二是代谢性的共质体途径，是一种代谢性的主动吸收过程，由ATP酶和酸性磷酸酶提供能量，通过细胞内原生质流动和通过细胞间相连接的细胞质通道。但由于内皮层上有凯氏带，Pb离子不能通过，只有转入共质体后，才能进入木质部导管。

Wozny 等^[30]认为Pb进入中柱后随蒸腾流被动运输到地上部，运输过程中由于Pb会与中柱内的阳离子交换位点而被固定在茎部中柱内。根部吸收的Pb是植物体内Pb的主要来源，其在植物体内的累积与植物体内物质的结合形态有关。进入根细胞后，Pb可以游离态存在，当浓度过高的时候，会对细胞产生毒害作用，干扰细胞的正常代谢，因而细胞质中的Pb会与细胞质中的有机酸、氨基酸、多肽和无机物等结合，通过液泡膜上的运输体或通道蛋白转入液泡中。因此，植物体内Pb的累积分配规律为：根>茎>叶>籽粒^[10, 11]。从分子水平来看^[10, 31, 32]，

胞间隙是富集Pb浓度最高的部位，细胞壁和液泡次之，细胞质最低。周鸿等^[33]从组织水平探讨了玉米幼根吸收Pb及Pb的迁移途径，结果表明到达玉米主胚根的Pb大部分被吸附在根表面，进入根的Pb总量很少。刘云惠等^[34]通过玉米根、茎、叶上的伤流、蒸腾等试验探讨了玉米对Pb的吸收及运输机制。其结果也表明：Pb在植物体内活性较低，到达根部的Pb大部分被固定，向地上部运输的比例较低，玉米吸收Pb经共质体途径定向运输进入导管，是一个主动过程；另外大部分是通过自由Pb空间被根吸收。

对于超富集植物，金属阻隔在液泡中对其转运到地上部是不利的，因而在超富集植物的液泡膜上可能存在一些特殊的运输体，能把暂时贮存在液泡中的金属装载到木质部导管，但目前还缺乏直接的证据。

2.2 植物对Pb的耐性

2.2.1 植物通过改变根际化学性状、原生质泌溢等限制Pb离子跨膜吸收

在Pb胁迫下，植物可反馈分泌一些物质，如柠檬酸、苹果酸、乙酸、乳酸等。这些物质与Pb离子可形成可溶性络合物抑制Pb的跨膜运输，增加Pb在根际土壤的移动性，降低植物周围环境中Pb离子的有效含量，减少植物对Pb的吸收，从而避免植物受害。杨仁斌等^[35]指出有机酸和氨基酸对土壤中重金属Pb具有较强的活化效应，其中柠檬酸、酒石酸和草酸的活化能力最强。Tatar 等^[36]用Pb处理黄瓜幼苗，发现其茎部柠檬酸、苹果酸、反丁烯二酸的含量发生变化，说明这几种酸可能与Pb结合，并参与了Pb的运输。其他研究也证实了这一说法^[37, 38]。

2.2.2 与植物细胞壁结合

研究认为，植物细胞壁是重金属离子进入的第一道屏障，它的金属沉淀

作用是植物耐重金属的原因,这种作用能阻止重金属离子进入细胞原生质,而使其免受危害。由于金属离子被局限于细胞壁上,不能进入细胞质影响细胞内的代谢活动,使植物对重金属表现出耐性。只有当重金属与细胞壁结合达到饱和时,多余的金属离子才会进入细胞质。黄瓜茎叶可溶性组分的凝胶层析及 HPLC 的分析结果表明,Pb 大量沉积在细胞壁上^[39]。

2.2.3 形成 Pb 络合物 螯合是植物对细胞内重金属解毒的主要方式之一。当部分金属离子穿过细胞壁和细胞膜进入细胞后,能和细胞质中的蛋白质、草酸、柠檬酸、苹果酸等形成复杂的稳定螯合物,它们能使重金属的毒性降低。

金属硫蛋白(Metallothionein, MT)是富含半胱氨酸残基的低分子量金属结合蛋白^[40]。不同的 pH 条件下,Pb²⁺与 MT 结合成不同的 Pb-MT 复合物^[41]。郝守进等^[42]对金属硫蛋白的 α 、 β 结构域与 Pb 结合形式及稳定性的研究,揭示出 α 结构域与 Pb 可产生两种形式的结合物,一种为结合 4 个 Pb 的 MT (Pb4- α -MT),另一种则为结合 7 个 Pb 的 MT (Pb7- α -MT),而 β 结构域与 Pb 反应仅生成一种结合 3 个 Pb 的产物 (Pb3- β -MT)。李伟等^[43]实验表明转基因植株对 Pb 的吸收分别比对照提高了 28 % 和 35 %。由此推测,金属硫蛋白对 Pb 的螯合作用使细胞质内游离 Pb 的浓度降低。

植物螯合肽(Phytochelatins, PC)是重金属胁迫下植物体内产生的一类结构与 MT 相似的、由酶催化合成的富含谷胱甘肽的多肽物质。PC 与金属离子螯合后形成无毒的化合物,降低了细胞内游离的重金属离子浓度,从而能够减轻重金属对植物的毒害作用。研究发现 Pb 可诱导 *Stichococcus bacillaris*^[44], *Hydrilla verticillata*^[45], *Phaedactylum tricornerutum*^[46] 产生植物螯合肽,PC 与 Pb 螯合后形成无毒的化合物从而减少 Pb 对细胞的损伤。

2.2.4 酶系统的作用 正常情况下,植物体内的活性氧代谢保持平衡。当遭受重金属胁迫时,其体内的活性氧代谢失调,活性氧水平上升,引起膜脂过氧化。目前,认为活性氧水平升高导致的膜脂过氧化加剧是膜损伤的重要原因。植物体内存在清除活性氧的抗氧化酶类系统,主要包括超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT) 3 种酶类,其中 SOD 是抗氧化酶系统中极为重要的金属酶,催化快速歧化反应,在保护酶系统中处于

核心地位。

许多研究表明,Pb 处理使植物体内的抗氧化酶类活性发生变化^[47]。严重玲等^[48,49]的研究表明,在 Pb 胁迫下,烟草体内的活性氧增加,诱导 SOD 活性增强,当活性氧水平超过 SOD 的歧化能力极限时,过多的活性氧对多种功能膜及酶系统的破坏,导致 SOD 活性急剧下降,甚至低于同一生育期的对照水平。

3 螯合剂在铅植物修复中的应用

Pb 在土壤中的形态决定了植物对 Pb 吸收的有效性大小。在 pH5.4 ~ 7.5 时,Pb²⁺在土壤溶液中的最大活度为 $10^{-8.5}$,相当于 $0.6 \mu\text{g}/\text{kg}$ ^[50],大大地限制了植物的吸收。研究表明,向土壤中施加人工合成的螯合剂和硫磺等土壤改良剂能够活化土壤中的 Pb,提高 Pb 的生物有效性,促进植物吸收^[51~53]。这些人工合成剂包括邻环己二胺四乙酸(CDTA)、乙二胺四乙酸(EDTA)、二乙三胺五乙酸(DTPA)、乙二醇双-四乙酸(EGTA)、乙二胺-N,N'-二(2-)羟基苯乙酸(EDDHA)、2-羟乙基乙二胺三乙酸(HEDTA)、氮川三乙酸(NTA)和柠檬酸等。

不同螯合剂处理土壤后,均显著增加土壤溶液中 Pb 的浓度,一种解释是螯合态 Pb 能直接被根系吸收并向地上部运输。不同螯合剂对 Pb 活性的影响有较大差异。Wu 和 Luo^[54]在芥子草的盆栽试验中发现,添加 EDTA 可显著提高土壤溶液中总有机 C、Cu、Zn、Pb 和 Cd 浓度,而柠檬酸、草酸、苹果酸等其他低分子量有机酸的作用效果较差。Wenzel 等^[55]研究得出各种络合剂对土壤 Pb 的解吸活化顺序为: EDTA > HEDTA > CDTA = DTPA > EGTA > EDDHA > NAT。Huang 和 Cunningham^[50]研究发现,EDTA 和 HEDTA 对增加土壤溶液和豌豆及玉米中 Pb 浓度的效果最好,植物组织及木质部汁液中的 EDTA 与 Pb 含量之间显著正相关。Blaylock 等^[51]对印度芥菜的研究发现,EDTA 和 DTPA 在增加植物吸收 Pb 量方面最有效。陈亚华等^[13]的研究表明,EDTA 能显著增加土壤 Pb 的有效性,提高油菜地上部 Pb 的含量;但 EDTA 诱导 Pb 的富集需要一个最低的 EDTA 处理浓度,大于这一处理浓度时,Pb 在植物地上部的富集才大幅度地增加。这可能与 EDTA 破坏植物根系控制离子跨膜运输的生理机制有关。

螯合剂使土壤中重金属生物有效性提高,从而

诱导植物的超累积作用。然而我们必须考虑到这种诱导作用所引起的环境问题。

4 影响超富集植物吸收铅的因素

4.1 土壤条件

通常根系周围土壤溶液中的重金属含量是影响其生物有效性的重要因素之一。当土壤溶液中 Pb 浓度增加时,植物吸收的 Pb 也会增多。而重金属含量多少受其在土壤中吸附-解吸、沉淀-溶解和氧化-还原平衡的控制,不同土壤类型上的植物对 Pb 的吸收能力不同。另外,土壤 pH、有机质、阳离子交换能力、质地等不仅影响土壤中 Pb 的有效性、也会影响 Pb 在植物体内的形态和迁移^[56-59]。同时土壤中的一些阴离子也会影响 Pb 的生物有效性^[60]。

4.2 土壤中 Pb 的存在形态

土壤中重金属的形态受土壤物理化学性质的控制。植物吸收 Pb 的量与总 Pb 量呈正相关,与交换态 Pb 量无关^[61]。在一定条件下,呈吸附态和沉淀态的重金属可以在土壤溶液之间相互转化。一般 pH 降低,可使呈吸附态的重金属解吸进入土壤溶液中,从而增加植物对重金属的吸收。但 Harter^[62]指出 Pb 在土壤中常以专性吸附态形式存在,因此降低 pH 并不能有效地增加植物对 Pb 的吸收,而增加土壤有机质含量可使部分呈沉淀态的重金属与柠檬酸和苹果酸络合,转化为有机吸附态被植物吸收利用。

4.3 土壤中其他元素的影响

土壤中其他元素的存在可与 Pb 发生竞争吸附、拮抗或协同的吸收作用。如在石灰性土壤中, Ca 与 Pb 竞争而被植物吸收,植物体内 Ca 的含量低时对 Pb 有较大的敏感性。同样,缺 P 的土壤,植物对 Pb 吸收显著增加,供 P 可以降低土壤中 Pb 对植物的有效性。Pb 与 Cd 的相互作用研究得较多,土壤中的 Cd 能降低植物对 Pb 的吸收,而 Pb 能促使植物对 Cd 的吸收。夏增禄^[63]认为 Pb 可能是夺取了 Cd 在土壤中的吸附位点而提高了土壤中 Cd 的有效性,或者是取代根中吸附的 Cd,促进了根中滞留 Cd 的活性,使之进一步向茎叶转移。郑春荣等^[64]发现水稻对 Pb 的吸收量和土壤中总 Pb、Cu、Zn 含量呈正相关,与 Cd、Ni 呈负相关。Zn 能促进 Pb 向叶片传递,S 能抑制 Pb 由根向地上部分运输,因此,缺 S 就会大大提高植物地上部 Pb 的含量。

4.4 植物种类

不同种类或不同基因型的植物吸收 Pb 的能力

不同,如三叶草、甜菜、萝卜 3 种植物对 Pb 的富集量依次为三叶草>甜菜>萝卜。李伟等^[43]将金属硫蛋白 $\alpha\alpha$ 双突变体基因导入矮牵牛,得到了对 Pb 具有高耐受性和吸收能力的转基因植物。Grichko^[65]将细菌中的 1-氨基环丙烷-1-羧酸 (ACC) 脱氨基酶基因引入到番茄后,分别在启动基因 35S、rolD 和 PRB-1b 的控制下,番茄具有了对 Pb 的耐性。

4.5 其他因素

土壤温度也会影响植物对 Pb 的吸收,温度升高,吸收量增大。施肥也可能影响植物对 Pb 的吸收,如有机肥的施用可降低植物对 Pb 的吸收量,施 P 肥也有相似的效果。

5 展望

植物修复技术为 Pb 污染土壤的治理提供了新的思路,但它还是一项尚不十分成熟的技术,将其应用到实际中还存在许多问题,有待进一步研究。今后应加强以下几个方面研究。

5.1 继续寻找 Pb 超富集植物及研究超富集机理

目前发现的为数不多的 Pb 超富集植物主要来自国外,国内发现的对 Pb 有较高生物量的物种很少,而具有推广价值的 Pb 超富集植物植株普遍矮小、生物量低、生长周期长。我国物种资源丰富,因此应多致力于发现生物量大、所需时间短的 Pb 超富集植物。在机理方面的研究应着重探讨 Pb 在植物体内的结合方式、反应机理、反应动力学、运移规律等。

5.2 植物修复与传统的化学、物理方法相结合的综合治理技术的研究

植物修复的主要问题是如何提高植物修复速率和效率。结合化学和物理方法将弥补单一植物修复的不足,有利于短时间内推上市场。

5.3 进行基因工程的研究

将基因技术和现代分子生物学应用于植物修复,培养生物量大、生长速率快、体内重金属含量高的超级超富集植物。已有的研究表明基因技术是植物修复研究中一个重要的方向,包括基因的筛选等技术。

5.4 植物-微生物体系修复的研究

与植物共生的微生物尤其是菌根真菌类,它们发达的菌丝会提高植物根系吸收营养的范围,促进植物对重金属的吸收;同时许多真菌对重金属也有很高的耐性和累积性,真菌的活动能降低重金属对

植物的毒害,有利于修复植物的生长。植物-微生物体系修复的研究内容包括与超富集植物根际共存的微生物群落的生态、生理学特性、根际分泌物在微生物群落进化选择过程中的作用和地位,最佳微生物的筛选和植物-微生物相互作用机理研究等内容。

5.5 植物螯合肽(PC)与Pb作用机理的研究

目前,对于PC在植物中与Pb的作用机理还研究得不够透彻。因此,有必要加强PC在植物中与Pb作用过程的研究,从而通过转基因技术获得对Pb高抗性、高累积、高生物量的植物,为Pb污染土壤的植物修复提供理论依据。

参考文献

- 郭义龙,林壹兵,胡少宜.漳州市农业土壤重金属现状、分析及防治.土壤,2003,35(2):131~135
- 蒋定安,汤旭东.宜兴市农田保护区重金属铅污染状况研究.土壤,2002,34(3):156~159
- 刘霞,刘树庆,唐兆宏.潮土和潮褐土中重金属形态与土壤酶活性的关系.土壤学报,2003,40(4):581~587
- Khan KS, Xie ZM, Huang CY. Effect of cadmium, lead, and zinc on size of microbial biomass in red soil. Pedosphere, 1998, 8(1): 27~32
- Brooks RR, Lee J, Reeves RD, Jaffre T. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants. Geochem. Explor., 1977, 7: 49~57
- Chaney RL. Plant uptake of inorganic waste constituents. In: Parr JF. ed. Land Treatment of Hazardous Wastes. Park Ridge, New Jersey, USA: Noyes Data Corporation, 1983, 50~76
- 谢学锦,徐邦梁.铜矿指示植物海州香薷.地质学报,1952,32(4)
- 韦朝阳,陈同斌.重金属超富集植物及植物修复技术研究进展.生态学报,2001,21(7):1196~1203
- 蒋先军,骆永明,赵其国,吴胜春,吴龙华,乔显亮,宋静.重金属污染土壤的植物修复研究.土壤,2000,32(2):71~74,61
- 叶春和.紫花苜蓿对铅污染土壤修复能力及其机理研究.土壤与环境,2002,11(4):331~334
- 匡少平,徐仲,张书圣.玉米对土壤中重金属的吸收特性及污染防治.安全与环境学报,2002,2(1):28~31
- Jiang LY, Yang XE, Ye ZQ, Shi WY. Uptake, distribution and accumulation of copper in two ecotypes of *Elsholtzia*. Pedosphere, 2003, 13(4): 359~366
- 陈亚华,李向东,刘红云,沈振国. EDTA 辅助下油菜修复铅污染土壤的潜力. 南京农业大学学报, 2002, 25(14): 15~18
- Blaylock MJ, Huang JW. Phytoextraction of metals. In: Raskin I, Ensley BD. eds. Phytoremediation of toxic metals: Using plants to cleaning up the environment. New York: John Wiley & Sons Inc, 2000, 53~70
- 蒋先军,骆永明,赵其国,葛元英. 镉污染土壤植物修复的 EDTA 调控机理. 土壤学报, 2003, 40(2): 205~209
- Baker AJM, Reeves RD, Hajar ASM. Heavy metal accumulation and tolerance in British populations of the metallophyte *Thlaspi caerulescens*. New phytol., 1994, 127: 61~68
- 韦朝阳,陈同斌. 重金属超富集植物及植物修复技术研究进展. 生态学报, 2001, 21(7): 1196~1203
- Reeves RD, Baker AJM. Metal-accumulating plants. In: Raskin I. ed. Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean up the environment. New York: John Wiley & Sons Inc, 2000, 193~229
- McGrath SP, Dunham SJ, Correll RL. Potential for phytoextraction of zinc and cadmium from soils using hyperaccumulator plants. In: Terry N. ed. Phytoremediation of Contaminated Soil and Water. Boca Raton: Lewis Publishers, 2000, 109~128
- Williams ST, McNeilly T, Wellington EMH. The decomposition of vegetation growing on metal mine wastes. Soil Biology and Biochemistry, 1977, 9: 271~275
- Barry SAS, Clark SC. Problems of interpreting the relationship between the amounts of lead and zinc in plants and soil on metalliferous wastes. New Phytol., 1978, 81: 773~783
- Reeves RD, Brooks RR. Hyperaccumulation of lead and zinc by two metallophytes from a mine area in Central Europe. Environmental Pollution, 1983, 31: 277~287
- Kumar PBAN, Dushenkov V, Salt DE, Raskin I. Crop brassicas and phytoremediation a novel environment technology. Cruciferae Newsletter, 1994, 16: 18~19
- Wenzel WW, Jockwer F. Accumulation of heavy metals in plants grown on mineralized soils of the Austrian Alps. Environmental Pollution, 1999, 104: 145~155
- 何冰,杨肖娥,倪吾钟. 一种新的铅富集植物—富集生态型东南景天. 植物学报, 2002, 44(11): 365~370
- 刘秀梅,聂俊华,王庆仁. 6种植物对Pb的吸收与耐性研

- 究. 植物生态学报, 2002, 26 (5): 533 ~ 537
- 27 王庆仁, 刘秀梅, 董艺婷, 崔岩山. 典型重工业与污灌区植物的重金属污染状况及特征. 农业环境保护, 2002, 21 (2): 115 ~ 118, 149
- 28 戴树桂, 刘小琴, 徐鹤. 污染土壤的植物修复技术进展. 上海环境科学, 1998, 17 (9): 25 ~ 27, 31
- 29 周国华, 黄怀曾, 何红蓼. 重金属污染土壤植物修复及进展. 环境污染防治治理技术与设备, 2002, 3 (6): 33 ~ 39
- 30 Wozny A, Schneider J, Goozdz EA. The effect of lead and kinetin on green barley leaves. *Biology Plant*, 1995, 37: 541 ~ 552
- 31 刘军, 李先恩, 王涛, 沈忠耀. 板蓝根细胞壁吸附铅的特性研究. 农业环境保护, 2001, 20 (6): 438 ~ 440
- 32 江行玉, 赵可夫. 铅污染下芦苇体内铅的分布和铅胁迫相关蛋白. 植物生理与分子生物学学报, 2002, 28 (3): 169 ~ 174
- 33 周鸿, 刘成远. 玉米幼根对铅的吸收途径及有关的两种酶活性变化初探. 环境科学学报, 1986, 6 (1): 66 ~ 70
- 34 刘云惠, 魏显有, 王秀敏, 肖崇斌. 土壤中铅镉的作物效应研究. 河北农业大学学报, 1999, 22 (1): 24 ~ 28
- 35 杨仁斌, 曾清如, 周细红, 铁柏青, 刘声扬. 植物根系分泌物对铅锌尾矿污染土壤中重金属的活化效应. 农业环境保护, 2000, 19 (3): 152 ~ 155
- 36 Tater E, Mihucz VG, Varga A, Zaray GY, Fodor F. Determination of organic acids in xylem sap of cucumber: Effect of lead contamination. *Microchemical Journal*, 1998, 58: 306 ~ 314
- 37 李玉红, 宗良纲, 黄耀, 赵永红. 不同有机酸对水稻吸收铅的影响. 南京农业大学学报, 2002, 25 (3): 45 ~ 48
- 38 罗春玲, 沈振国. 植物对重金属的吸收和分布. 植物学通报, 2003, 20 (1): 59 ~ 66
- 39 杨居荣, 鲍子平, 张素芹. 镉、铅在植物细胞内的分布及其可溶性结合形态. 中国环境科学, 1993, 13 (4): 263 ~ 268
- 40 刘小梅, 吴启堂, 李秉滔. 超积累植物治理重金属污染土壤研究进展. 农业环境科学, 2003, 22 (5): 636 ~ 640
- 41 贺卫国, 褚德莹, 杨静岳, 姚丹凤, 邵美成. 一种新型结构的金属硫蛋白—Pb-MT. 高等学校化学学报, 1999, 20: 248 ~ 250
- 42 李铨, 郝守进, 刘颖, 茹炳根. 金属硫蛋白的 α 、 β 结构域与铅结合形式及稳定性的研究. 卫生研究, 2001, 30 (4): 198 ~ 200
- 43 李伟, 张竟, 张晓钰, 单龙, 茹炳根. 转金属硫蛋白 aa 突变体基因的矮牵牛对铅的抗性及其富集的研究. 生物化学与生物物理进展, 2001, 28 (3): 405 ~ 409
- 44 Pawlik-skowronska B. Relationship between acid-soluble thiol peptides and accumulated Pb in the green alga *Stichococcus bacillaris*. *Aquatic Toxicology*, 2000, 50: 221 ~ 230
- 45 Gupta M, Rai NU, Tripathi DR, Chandra P. Lead induced changes in glutathione and phytochelatin in *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle. *Chemosphere*, 1995, 30 (10): 2011 ~ 2020
- 46 Morelli E, Scarano G. Synthesis and stability of phytochelatin induced by cadmium and lead in the marine diatom *Phaeodactylum tricornutum*. *Marine Environment Research*, 2001, 52: 383 ~ 395
- 47 Rucinska R, Waplak S, Gwozdz EA. Free radical formation and activity of antioxidant enzymes in *Lupin* roots exposed to lead. *Plant Physiol. Biochem.*, 1999, 37 (3): 187 ~ 194
- 48 严重玲, 钟章成, 陈蓉蓉. 土壤中 Pb、Hg 及其交互作用对烟草叶片抗氧化酶的影响. 环境科学学报, 1997, 17 (4): 469 ~ 473
- 49 严重玲, 洪业汤, 付舜珍, 芳重华, 雷基祥, 沈芹. Cd、Pb 胁迫对烟草叶片中活性氧清除系统的影响. 生态学报, 1997, 17 (5): 488 ~ 492
- 50 Huang JW, Cunningham SD. Lead phytoextraction: species variation in lead uptake and translocation. *New Phytol.*, 1996, 134: 75 ~ 84
- 51 Blaylock MJ, Salt DE, Dushenkov S, Zakharova O, Gussman C, Kapulnik Y, Raskin I. Enhanced accumulation of Pb in *Indian Mustard* by soil-applied chelating agents. *Environment Science & Technology*, 1997, 31 (3): 860 ~ 865
- 52 Epstein A. EDTA and Pb-EDTA accumulation in *Brassica juncea* grown Pb-amended soil. *Plant and Soil*, 1999, 208: 87 ~ 94
- 53 Wu J, Hsuf C, Cunningham SD. Chelate-Assisted Pb phytoextraction: Pb availability, uptake and translocation constraints. *Environmental Science and Technology*, 1999, 33: 1898 ~ 1904
- 54 Wu LH, Luo YM. Effects of EDTA and low molecular weight organic acids on soil solution properties of heavy metal polluted soil. *Proceedings of Soil Rem Hangzhou, China*, 2000, 2000, 213 ~ 218

- 55 Wenzel WW, Puschenreiter M, Horak O. Role and manipulation of the rhizosphere in soil remediation revegetation. Proceeding of SoilRem 2000, Hangzhou, China, 2000, 176 ~ 180
- 56 Chen XT, Wang G, Liang ZC. Effect of amendments on growth and element uptake of *Pakchoi* in a cadmium, zinc and lead contaminated soil. *Pedosphere*, 2002, 12 (3): 243 ~ 250
- 57 Zhuang J, Yu GR, Liu XY. Characteristics of lead sorption on clay minerals in relation to metal oxides. *Pedosphere*, 2000, 10 (1): 11 ~ 20
- 58 Zhao XL, Qing CL, Wei SQ. Heavy metal runoff in relation to soil characteristics. *Pedosphere*, 2001, 11 (2): 137 ~ 142
- 59 张乃明, 陈建军, 常晓冰. 污灌区土壤重金属累积影响因素研究. *土壤*, 2002, 34 (3): 90 ~ 93
- 60 杨亚提, 张一平. 陪伴离子对土壤胶体吸附 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 的影响. *土壤学报*, 2003, 40 (2): 218 ~ 223
- 61 Li YM, Chaney RL, Angle JS, Chen KY, Kerschner BA, Baker AJM. Genotypical difference in zinc and cadmium hyperaccumulation in *Thlaspi caerulescences*[abstract]. *Agron. Abstr.*, 1996, 27
- 62 Harter DD. Effect of soil pH on adsorption of lead, copper, zinc and nickle. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1983, 47: 47 ~ 51
- 63 夏增禄主编. 中国土壤环境容量. 北京: 地震出版社, 1992
- 64 郑春荣, 陈怀满. 土壤-水稻体系中污染重金属的迁移及其对水稻的影响. *环境科学学报*, 1990, 10 (2): 145 ~ 152
- 65 Grichko VP. Increased ability of transgenic plants expressing the bacterial enzyme ACC deaminase to accumulate Cd, Co, Cu, Ni, Pb and Zn. *Journal of Biotechnology*, 2000, 81: 45 ~ 53

PHYTOREMEDIATION OF SOILS CONTAMINATED BY LEAD

WU Jun^{1,2} MENG Xiao-xia² LI Kun³

(1 College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065;

2 College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Yaan, Sichuan 625014;

3 Sichuan Agricultural Environmental Monitoring Station, Chengdu 610041)

Abstract Phytoremediation, a technology using plants to remove contaminants from soil, has become a hot topic in current research. This paper reviews studies in the field of phytoremediation of soils contaminated by lead with special focuses on hyperaccumulator, mechanism of lead hyperaccumulation and it's affecting factors, application of chelators in improving remediation and trend of the future development of the technology.

Key words Lead, Soil phytoremediation, Hyperaccumulators