DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2013.12.019

基于重金属污染土壤修复目标下的超积累植物  
与速生乔木研究进展分析**＊**

李松柳丹井叶正钱吴家森陈俊任茅芮菁

（浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室，浙江农林大学，浙江 临安311300**）**

摘要 植物修复是一种绿色、经济、可行的修复土壤重金属污染的实用技术，针对性地选择修复植物类型是其关键之一。 当 前，国内外在草本与木本植物修复技术方面，展开了大量的研究，但对两者之间的修复能力、科学机制、技术应用等方面对比分析的 论述，则相对缺乏。综述了超积累植物与速生乔木在重金属修复方面的优缺点，从逆境耐性、吸收转运能力、外源强化技术、经济技 术成本、环境风险及后续处理技术等方面进行了论述，以期为今后重金属污染土壤植物修复工作的开展提供科学参考。

关键词 植物修复 超积累植物 速生乔木 重金属 土壤

**Research progress analysis of hyperaccumulators and fasbgrowing trees based on the objective of remediation for heavy metals contaminated soil** *LI Song , LIU Dan ,YE Zhengqian ^WU Jiasen , CHEN Junren , MAO Ruijing. (Zhejiang Province Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration , Zhejiang Agriculture and Forest University ,Lin'n Zhejiang* 311300**)**

**Abstract**: Phytoremediation is a green,economic and feasible practical technology for remediation of heavy met­als contaminated soil,and selecting the targeted remediation species is the key point of phytoremediation. At present, lots of studies were carried out on the herbaceous and woody plant repair technology. However,the comparative analy**­**sis on their remediation ability and scientific mechanism as well as technology application are quite lack. This paper re- viewsbothadvantagesanddisadvantagesofhyperaccumulatorplantsandfast**-**growingtreesinremediationofheavy metals, which focus on the stress tolerance, absorption and transport capacity, external strengthening technology, cost of economic and technological, environment risk and subsequent processing technology. This review could provide sci enificreferenceonphyoremediaionofheavy mealsconaminaedsoilsforfuuresudies．

**Keywords**: phytoremediation； hyperaccumulator； fasbgrowing tree； heavy metals； soil

近年来 ，重金属污染已经成为危害最大、最难治 理的环境问题之一。重金属含量超标的农作物约占 污染物超标农作物种植面积的80%以上，因重金属 污染而导致粮食减产高达1 000多万t,合计经济损 失至少200亿元，足以每年多养活4 000多万人^。 当前植物修复技术的重点,主要集中于超积累植物 或速生乔木两类修复材料上；研究内容则侧重于植 物的萃取能力2、耐受范围「34、转移能力旧、螯合诱 导归等方面的研究，但对于这两类修复材料之间对 比性的研究,则相对缺失。 明确超积累植物与速生 乔木在修复过程中的优劣势，对提高修复效率、深化 修复机制具有重要的研究意义与应用价值。

**1** 重金属污染土壤植物修复研究前沿概述

土壤重金属污染是一个全球范围内棘手的环境 污染问题，而利用草本、木本植物修复是现在修复土 壤重金属的一项重要技术。 以中国为例，如图1 所 示，在中国知网中首先通过摘要检索土壤＋重金属 ＋植物修复＋超积累或者富集， 得到超积累植物的 文献数目；在摘要中检索土壤＋重金属＋树，得出关 于乔木的文献数目。 数据显示在植物修复土壤重金 属方面超积累植物具有其不可忽视的地位；每年研 究乔木对土壤重金属的修复少于超积累植物，推测 这跟乔木的生长情况是有关系的 。

如表1 所示，在国内外的植物修复研究中，超积 累植物多是针对单一重金属的超积累特性的研究， 而速生乔木多是对多种重金属的修复研究。 超积累 植物的研究重点是各种不同的辅助措施对超积累植 物吸收土壤重金属的影响，达到更加有利的修复效 果，如利用基因工程措施。 相对来看，速生乔木的研 究重点基本上就是植物本身对重金属的吸收状况 （和对重金属的胁迫的反应生长状况。同时发现，国 外对于植物修复的研究一般比中国要早，有很多的 研究方式、研究方法和实验成果，对以后研究现在国

第一作者：李松，男，1988年生，硕士研究生，主要从事重金属污染土壤植物修复的研究」通讯作者。

\*国家自然科学基金青年科学基金资助项目（N。. 31300520"浙江省自然科学基金资助项目（No. LY12C16004）。

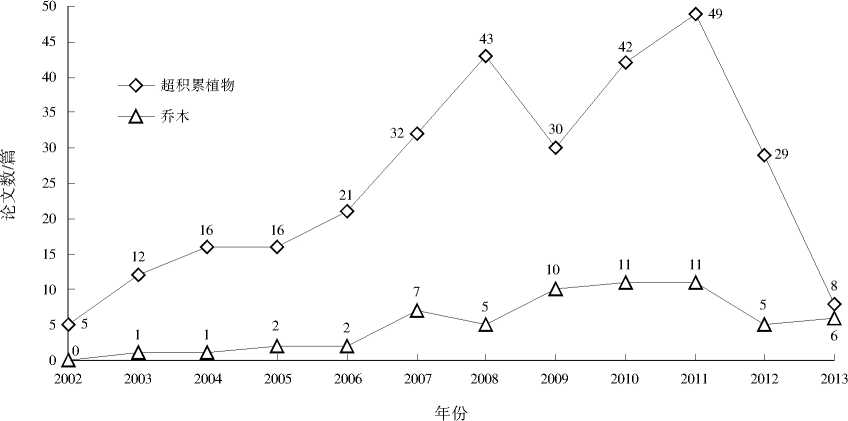


图1超积累植物与乔木在重金属污染土壤修复领域研究热度

Fig. 1 The number of literature research on phytoremediation of heavy metals contaminated soil

by hyperaccumulator and fast-growing trees  
注：检索数据更新至2013年7月。

表1 国内外主要超积累植物及速生乔木研究情况

Table 1 Researchs of hyperaccumulator and fast-growing trees in domestic and foreign countries

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 超积累植物／速生乔木 | | 积累重金属 | 研究重点 | 参考文献 |
|  | 蜈蚣草 | 砷 | 微生物*Glmu mosseae* .堆肥对砷吸收的影响、堆肥除砷的应用前 景、原位去除的效果及对铅锌的吸收 | [7-11] |
|  | 大叶井口边草 | 砷 | 间作条件下的吸收情况、施加螯合剂的影响效率 | [12-14] |
|  | 东南景天 | 锌 | 可溶性磷、石灰和泥炭、氮素营养对锌铅的吸收修复影响 | [15-17] |
| 超积累植物 | 商陆 | 锰、镉 | 在镉、锌、铜胁迫下生长和吸收重金属的影响，对锰污染修复后对后  续植物的影响，对锰胁迫的抗氧化响应研究 | [18-19] |
|  | 龙葵 | 镉 | 柠檬酸、螯合剂、外源氨基酸对龙葵吸收重金属的影响，根际和内生  抗性细菌与产表面活性剂根际菌协同修复重金属 | [20-23] |
|  | 李氏禾 | 铬 | 水分、光照强度、肥料、温度对铬超富集植物的影响，电镀污泥污染土 壤中铬铜镍的吸收和积累 | [24-26] |
|  | *A. murale* | 镍 | 微生物对*A. mul* 吸收镍的影响，石灰、硝酸对*A***.** *mul* 修复镍的 效率影响 | [27-28] |
|  | 紫穗槐、桤木和黄连木 | 铅、锌、铜 | 修复铅锌矿和铜矿尾矿的潜力 | [29] |
|  | 杨树、胡杨 | 镉、铜、锌、铅 | 重金属在杨树体内的分配特性，胡杨对重金属污染土壤的胁迫反应 | [30-31] |
| 速生乔木 | 桑树 | 镉、铜、锌、铅 | 矿区中桑树对4种金属的吸收能力 | [32] |
| 白花泡桐 | 镉、铜、锌、铅 | 白花泡桐大规模修复应用可行性分析 | [33] |
|  | 柳树 | 镉、铜、锌、铅 | 不同Cd胁迫浓度下，秋华柳的生长、光合耐性及其对Cd的富集特性 和转移能力；柳树中重金属的抗性和积累特性 | [34-38] |

内所独有的超积累植物和速生乔木具有借鉴意义**。** 如图2 所示**，**当前国内重金属修复技术研究热 点以耐性机制**、**吸收能力**、**经济成本**、**环境风险**、**修复 材料的利用、强化技术6个方面为主题，在中国知网 查询结果**（**数据时间截止至2013年7月**）**表明**，**近几 年国内在重金属修复领域的研究中**，**有关重金属吸 收能力的研究为最热领域，占全部论文的52% ；其 次分别为环境风险**、**强化技术**、**耐性机制**、**修复材料 利用等方面，分别占到19%、11%、8%和8% ；有关 经济成本的研究相对缺失**，**仅占到全部论文的2%**，** 此领域的研究需要在今后进一步加强**。**

**2**植物对土壤中重金属的逆境耐性机制研究

污染土壤的植物修复是通过绿色植物的新陈代 谢活动来实现的**，**因此植物能够在污染土壤上正常 生长就显得尤为重要**。**针对植物耐性机制的研究又 可以分为植物自身对逆境的抗性机制与外在人为干 预对植物耐性机制的影响两个方面**。**

2．1 植物自身 对重金 属逆境 的耐性 机制

有研究提出**，**超积累植物能够超量积累重金属

强化技术(49篇),11% 耐性机制(站篇),8%

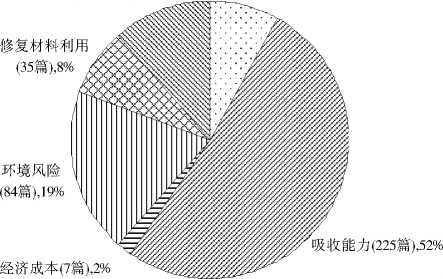


图2重金属修复技术研究热点分布

Fig．2 Thedistributionofresearchfocusofheavy metals remediationtechnology 而生物量又没有明显下降的可能机制在于**：**液泡的 区室化作用和植物体内某些有机酸对重金属的螯合 作用消除了重金属对植物的生长抑制**。**KnPPER 等3和ZHAO等3研究表明，天蓝遏蓝菜中的Zn 优先存在于叶面表皮细胞的液泡**，**从而起到解毒作 用**。** 细胞壁的重金属结合作用是植物耐重金属的原 因之一**，**能阻止重金属离子进入细胞原生质**。** 杨居 荣等研究发现，77%〜89%的铅沉积于黄瓜和菠 菜细胞壁上**,**MACFARLANE等〔42〕发现，大量的 Zn离子积累在红树植物白骨壤的细胞壁上，这可能 是Zn离子与细胞壁上的多聚半乳糖醛酸和碳水化 合物形成沉淀**，**大大降低了自由金属离子的浓度**，**阻 止了金属离子对植物正常代谢的干扰**。**

2．2 人为 干 预 对 重 金 属的 抗 性 能 力 的影响

在不同方式的人为干预下**，**可以有效增强超积

累草本植物与速生乔木的抗性：①在植物中导入植 络素合成酶基因**。**ZHU等际〕研究发现 **,***Escherich­ia coll*的谷氨酰半胱氨酸合成酶基因(gshl )和谷 胱甘肽合成酶基因(gshn)融合体过量表达的印度 芥菜*(Brassica juncea* )转基因植株，比对照积累更 多的Cd2+**。**②通过改变重金属的状态提高植物的 耐性**。**merA转基因杨树对汞的修复结果表明，转 基因杨树比对照中Hg0含量高出10倍，植物抗汞能 力也提高了3〜4倍**［**44**］。** 导入 merA 的拟南芥菜籽 粒，其幼苗中Hg0含量是对照的2〜3倍，对Au3+也 产生一定抗性**［**45**］，**相同的基因导入草本植物与速生 乔木的提高效果是有差异的**。**

1. 植物修复过程中重金属在土壤-植物系统中的吸 收转运规律研究

影响植物对土壤重金属吸收**、**转运的因素有很 多**，**其核心包括土到根系**、**根系到地上部两个过程**，**

**•** 80 **•**

前者是根际圈的重金属吸收**，**后者的核心在于植物 对重金属转运规律**、**富集系数的影响**。**

3．1 植物把重 金属从 土壤中 吸收到 根系的 过程

植物修复首先是把重金属从土壤中吸收到根 部**：**超积累植物的根系对重金属的吸收是具有选择 性的**，**可能这就是具有超积累性的重要原因之一**；**而 速生乔木可以吸收比超积累植物更深**、**更广的土壤 重金属**。** 对于部分超积累植物来说**，** 根系对重金属 的选择性吸收起到主导作用**，**其机制在于根表细胞 膜或根木质部细胞的质膜上**，**存在重金属诱导产生 的专一性运输蛋白或通道调控蛋白**，**控制着重金属 从土壤进入到根部**，**再从根部到植物其他部位的运 输**。**WHITING等「46〕研究表明*,T. caerulescens* 根 系具有主动探寻Zn与Cd的能力，通过根毛直接接 触土壤颗粒获取重金属**。**王文卿等指出，红树的 耐盐机制对各元素的吸收具有高度的选择性**，**红树 根部具有发达的凯氏带**，**防止根部吸收过多的重金 属和运输有害物质**。** 速生乔木因其具有庞大的根 系**，**可以深入到更深层的土壤**，**更加适合根系对土壤 重金属的深层吸收**。**

3．2 重金属从 植物根 系到地 上部的 转运过 程

重金属离子不能通过内皮层凯氏带**，** 只有转入 共质体途径才能进入木质部导管**，**这一运输途径是 植物将重金属转移到地上部的限制性步骤**，**木质部 细胞壁的阳离子交换量较高**，**能严重阻碍重金属离 子的向上运输**。** 超积累植物体内大部分重金属离子 与柠檬酸**、**氨基酸等有机酸结合**，**从而提高了在木质 部导管中的运输速率**。**LASAT等〔48〕研究发现*,T. caerulescens* 中 Zn 主要以水合阳离子形态运输**(**占 79%),其余则以柠檬酸结合态存在**。**童方平等〔49〕 研究表明**，**锑矿区构树积累重金属Sb、As、Pb的顺 序为：叶 ＞枝＞茎＞根，积累Zn的顺序为：叶 ＞枝 ＞根＞茎**。**针对速生乔木中具有重金属主要集中在 地上部分的能力**，**值得在今后的研究中予以关注**。**

**4**重金属污染土壤修复技术强化途径

4．1 改善根际 圈土壤 中重金 属活性 的技术 途径 4．1．1 土 壤 pH

何振立等〔河和金彩霞等〔51〕研究表明，土壤pH 的变化会使重金属的赋存形态发生改变**，**降低土壤 pH 通常会提高土壤溶液重金属的浓度**。** 不同植物 对pH的要求不同，不同重金属对pH的要求也不 同**。**文献［28**］**报道，在土壤中添加HNOs和CaCO3 调节土壤的pH在5. 0-6. 5范围内 ， *A．murale* 和

*A.corsicum* 的镍含量均随着土壤pH升高而升高， 镍的累积量也随着土壤pH的增加而呈增加的趋 势。水稻、小麦籽实中元素含量受土壤pH影响，土 壤酸性越大，Cd、Pb、Cu、Zn含量越高，pH越高，吸 收量越少［52\

412 有机废弃物

一方面，有机废弃物可以改良土壤结构、增加土 壤有机质含量与微生物活性，提高土壤保水、保肥的 能力；另一方面，有机废弃物含有丰富的水溶性有机 质(DOM)，可以促使重金属从土壤表面解吸出来， 从而提高其生物有效性。 污泥施用于杨树后， 可明 显改善土壤的化学特性，污泥施用量越大，土壤重金 属Cu和Zn的质量分数残留越多。YANG 等研究表明，向每千克土壤中添加50 g堆肥可 以提高铜污染水稻土中可交换态与有机结合态铜的 含量，增加铜的生物有效性，与不施肥处理相比，海 州香薷地上部铜浓度提高了近6倍。

1. 1 3 内 生 细 菌 内生细菌可以通过多种代谢途径合成分泌改变

重金属存在形态的物质，从而增加重金属的可溶性， 进一步促进植物吸收重金属并将其转运至地上部 分；同时，还可以促进和帮助寄主植物，来克服污染 物引起的应激反应， 从而提高 植物的 生长［55］ 。 BRAUD等［56］从铜矿区的海州香薷和鸭跖草根部 筛出的根际促生菌提高地上部分的铜含量63%〜 125%，提高了土壤的植物修复土壤重金属的效率。 Cd抗性假单胞*(Pseudomonas* sp.)菌株RJ10与芽 抱杆菌*(.Bacillus* sp.)菌株RJ16可提高环境中的溶 解态的 Cd 与 Pb 含量，感染番茄后， 能够促进番茄 的生长， 提高 Cd 和 Pb 的吸收率［57］。 与黄花柳 *(Salix caprea)*锌、镉积累相关的内生细菌能够增 强重金属在叶片的积累［58］。

1. 生物质炭 生物质炭表面的官能团可以增强土壤保持重金

属元素(Ni2+、Cu2+、Pb2+和Cd2+ )的能力，因此在 选择生物质炭作为土壤改良剂时应根据改良的目的 和土壤的性质选择合适的生物质炭。 生物质炭可以 通过提高土壤pH降低重金属(Cu和Zn)在土壤中 的移动性。 经石灰、活性炭及石灰+活性炭处理均 缓解了重金属的毒害症状［59］，显著促进小白菜的生 长，生物量较对照提高1〜2倍(*p*<0. 05)。

1. 螯合剂 施用螯合剂，可以对一些难移动的重金属如

Pb、Cu 和 Cd 进行螯合作用或配位反应， 使其形成 可移动的化合物，进而被修复植物吸收利用。LIU 等［60］在对合成螯合剂和低分子量有机酸提高植物 修复重金属的比较研究中发现，对铅在土壤中的溶 解度的提高，在与其他螯合剂或小分子有机酸比较 得出EDTA是最有效的螯合剂，说明不同类型的螯 合剂对不同的重金属的影响效果是有差异的。 高生 物量的农作物玉米(*Zea mays* )和向日葵(*Helian- thus annuus)*在施入螯合剂(如EDTA)的情况下也 能够累积大量的Pb〔61〕。LIU等〔62〕在以东南景天为 材料进行螯合剂优化修复能力的实验中考虑到经济 支出和潜在的环境风险，螯合剂辅助植物修复更适 合于轻度污染的土壤。

4．2 促进植物 生长性 状途径

4．21 施 肥

在重金属修复地区，土壤养分贫瘠、存在高浓度 的重金属影响植物对营养元素的吸收从而导致缺素 症状、同时植物会从土壤中带走大量营养元素。 对 于Zn/Cd超积累东南景天〔63〕，通过KH2 PO八 Ca(H2PO4)2、NaH2PO4、NH4H2PO44 种磷肥的处 理，植物锌的积累量分别是不施磷肥对照的26、24、 22、28 倍，镉的提取效率分别比对照增加了20%、 4%、11%和37%。 通过玉米盆栽试验，得到加入磷肥 后，不同的磷肥配比处理对玉米茎叶根中重金属含量 有比较明显的差异，在配比15. 0-17. 5 mg/kg范围 内，玉米茎叶中Zn、Cd、Cu、Pb出现了浓度含量最低 点，而根中各种重金属含量反而增加［64］。 王激清 等［65］盆栽试验表明，在非石灰性的中度污染土壤上， 施相当于300 mg/kg(以N计)的硫酸铵，可显著提高 印度芥菜和油菜对镉的吸收累积量。

4．22 水分管理

即使是某些超富集植物具有较强的耐旱性，但 过度缺水仍会减弱其修复重金属污染土壤的能力。 ANGLE 等［66］利 用 镍 超 富集植 物 *A.murale*、 *Berkheya coddii* 与对照植物 *A. montanum cv. Mountain Gold* 修复镍污染土壤时发现，在田间持 水量为80%处理下2 种超积累植物都出现最高修 复效率，分别为30%水分处理的37 倍和77 倍。 在 Pb、Zn尾矿的土壤中，与干旱条件相比，淹水条件下 *P.australis* 的生物量降低，但对Pb、Zn的吸收量明 显增加［67］。

4．23 栽培与收割

在重金属环境下植物的幼苗往往不容易存活， 对土壤进行翻耕，可将重金属含量高的土壤表层翻 到植物根系分布密集的区域，有利于植物的生长吸 收。在非污染土壤育苗然后移植的玉米，其地上部 铅含量和铅的转运系数比直接在污染土壤播种的植 株提高很多。廖晓勇等［68］研究发现，在湖南郴州， 蜈蚣草的最佳频率刈割为每年3 次，每次刈割留茬 高度在7. 5 cm左右，蜈蚣草砷保持在1 000 mg/kg 左右，其修复效率是1 年收获1 次处理的19 倍。

1. 植物生长调节剂

合理使用生长调节剂可以减少重金属对植物生 理的不利影响，在缓和重金属胁迫的同时维持植物 正常的生长发育，有利于植物对重金属的吸收累积。 研究表明，生长素吲哚乙酸（IAA）可以提高紫花苜 蓿根、茎的生物量，其与EDTA同时添加时，叶片中 铅浓度是对照处理的28倍和EDTA处理的6 倍〔69〕。生长素吲哚丁酸（IBA）不仅可以提高枫香幼 苗根、叶的生物量，且枫香根、叶中的Cd2+含量是对 照的236 倍和203 倍［70］。 周建民等［71］研究发现， IAA 能促进玉米根系伸长，增加植物生物量，协同 螯合剂促进植物对重金属的吸收转运和积累。

1. 激素性除草剂

ENSLEY 等「72 研究表明*,ParaquatRoundup* 和*Rockland*可能因含有二甲四氯、草甘磷与2,4-二 氯苯氧乙酸（2,4-D）等成分而促进印度芥菜铅的富 集，这3 种除草剂促使印度芥菜富集铅质量浓度分 别达到6 216.6 682.4 710 mg/kg,是对照处理铅富 集量的5．3 倍、5．7 倍和 4．0 倍。 大田中 施用 1 L/hm2的草甘膦降低了玉米镉的吸收量™。结果 差异可能与不同植物对重金属的吸收转运机制不同 有关，结果有待研究。

43 基 因工 程调 控 途径

运用基因技术对重金属进行处理，可明显提高 植物对重金属的耐性和积累性。 拟南芥过量表达 Zn的运载蛋白基因ZAT1转基因植物对Zn的抗性 明显提高，在200 gmol/L Zn的水培条件下，对照植 株的根生长被抑制了85%，而转基因植物的根只被 抑制了15%［74］。 SONG 等［75］将酵母的 ATP 结合 盒运载蛋白基因 Ycf1 导入拟南芥中过量表达，转 Ycf1拟南芥显著增强了对Pb和Cd的耐受性和累 积量。 基因工程是通过转基因技术培育的，目前人 工超积累植物还处于实验室开发探索阶段，其优点 是一些功能基因及其工程植物已显示出商业化潜 力，而且基因技术可以从植物本身解决重金属修复 的问题。

1. 经济技术可行性分析

植物修复不仅可以节约经济成本，还可以创造 一定的经济价值。例如：随着大量Ni超积累植物的 发现，有人提出了以金属Ni为主要目标的植物采矿 思想，并进行了大量的经济技术可行性研究。 有研 究表明，在蛇纹岩形成的富 Ni 土壤上种植 Ni 超积 累植物 *Streptanthus p olygaloides* （该植物含 Ni 可 达14 800 mg/kg）,施N、P、K肥后可使植物生物量 增长5倍，通过焚烧植物回收金属Ni并利用其热 能，收益相当于甚至超过种植小麦。

研究表明， 植物修复的费用为每公顷200〜 10000 美元，即每平方米污染土壤的处理费用 为 0．02〜1．00 美元［76］，人们可以从富含重金属的植 物残体中回收贵重金属，获得直接的经济效益。 荷 兰在20 世纪80 年代花费了约15 亿美元进行土壤 修复工作，德国在1995 年投资约60 亿美元净化土 壤，美国20 世纪90 年代用于污染土壤修复方面的 投资约有数百亿到上千亿美元［77］。 中国的土壤修 复处于发展阶段，同时中国的土壤污染也十分严重， 所以中国的土壤修复前景广阔。 如果按2015 年中 国土壤修复产值是美国的十分之一计算，届时中国 土壤修复市场规模将达到400 亿人民币。

**6**环境风险及植物材料循环利用

6．1 植物修复 过程中 的环境 风险评 价

6．1 1 基因技术

一些可能的风险包括用来进行修复的植物可食 部分被动物利用，从而进入食物链对生物和人类健 康安全造成的危害；通过植物蒸发造成对大气的危 害；转基因植物由于其相对较高的竞争力，如不受限 制的向外扩散，可能打破原有生态系统的平衡等。 MEAGHER™构建了含有 merA和merB基因的 植物表达载体，当这2 种基因同时表达时，转基因后 代植株可以使甲基汞还原成单质汞挥发到空气当 中，相对大气中的汞含量，挥发到空气中的量很少。 至今为止，应用转基因植物进行植物修复还处在实 验室阶段，其应用的实际风险还难以评价。 在进行 实际的应用之前对转基因植物进行风险评价实验是 必要的科学举措。

6．12 螯合剂

螯合剂技术应用所导致的环境风险，主要表现 在土壤元素淋失与水质污染、螯合物残留与挥发以

及植物金属胁迫等方面。选用螯合剂时决不可以用 有毒性的化学试剂诱导植物修复，遇到降水，会因淋 失对地下水造成严重的重金属污染，应尽量避免在 降水期间施用EDTA〔79〕。JAWORSKA等⑻〕报道， [S,S]-乙二胺二琥珀酸(EDDS)较EDTA生物毒性 小且易于生物降解，EDDS在土壤中的半衰期只有 25 d。MEERS等皿报道，在重金属污染土壤上施 用EDDS后，其对土壤重金属的增溶效果随处理时 间的延长迅速下降，其作用半衰期估计在38-75 d。 因而施用EDDS比施用EDTA的环境风险小，应使 用那些可生物、物理、化学降解的螯合剂。

62 植 物 修复 材料 的 循 环 利 用

1976 年瑞典率先启动了瑞典能源林业工程，以 柳树与杨树作为主要能源树种，目前其能源供应的 15%来自于生物质能。 近年来研究发现，植物修复 材料的循环利用，主要体现以下3个方面：①“植物 冶金”。 文献[77]报道，通过超积累植物回收重金属 产生的直接经济价值为539美元/hm2,如果采用焚 烧法产生热能的25%能够得到回收利用，产生额外 的利润219美元/hm2,那么Ni的回收和能量的利 用产生的总经济效益达758美元/hm2,去掉整个过 程中的费用，净利润可达379美元/hm2,高于种植 小麦309美元/hm2。②“有机微肥”。Cu作为植物 生长必需的微量元素，适量的Cu可促进植物生长。 由于重金属在土中的分布不均衡性，需要将植物生 长必须的重金属，从含量高的地方转移到含量低的 地方。将高Cu含量的海州香薷植物进行一定的处 理后作为含Cu有机肥施用，将可起到既缓解作物 缺Cu症状、改善土壤肥力状况，又能高效处置修复 植物残体的双重效果[82]。 ③“防腐原料”。 As 的三 氧化物———“砒霜”是传统的中药成分之一。 研究发 现，它可用于治疗急性粒细胞白血病，As也是很好 的防腐剂原料。 蜈蚣草[83]在23400 mg/kg 的含 As 土壤中也能正常生长并且富集含量很高，可以作 为 As 的富集采集器。

植物修复技术的发展将带动“重金属修复植物 回收利用”领域走向产业化，可以降低处理成本，提 高重金属的回收效率，避免产生“二次污染”，将污染 物永久去除，“变废为宝”，具有明显的经济效益及社 会效益，必将成为世界上另一种新兴的“绿色产业”。

**7**结论与展望

1. 植物筛选或培育时注重考虑植物吸收累积 金属元素的能力，是否能同时累积多种金属，生长速 度，提高地上部可收割的生物量，根系发育程度、分 布深度，对气候环境的适应性及抗病虫害能力等因 素。 对于速生乔木不能只是停留在植物本身对重金 属的吸收层次上，要像超积累植物的研究深度进行， 达到细胞水平、基因层次的研究。
2. 继续研究当前植物修复研究中的土壤处理 和调控技术以及农业耕作技术分别对草本与速生乔 木的差异影响。
3. 应用转基因工程技术，将自然界中超积累 草本植物的耐重金属、超积累基因移植到速生乔木 中，培育出具有实用价值的转基因植物，克服天然超 积累植物的缺点，提高植物修复的实用性。 至今，在 Se、Hg、Cd、Zn等重金属元素转基因植物研究领域 已取得了较大的成果。
4. 研发出新型的螯合剂，使其螯合诱导、强化 金属吸收作用足够迅速，这种螯合物在土壤中能迅 速分解，减少滞留；则螯合诱导强化途径就能有效应 用于金属污染土壤或含金属废弃物的生物修复或开 采中，不对环境造成次生污染，成为一种环保的环境 污染治理技术。
5. 植物修复重金属后的处理主要是借鉴废弃 物的处置技术，较少有针对修复植物特性的先进工 艺技术，还需更系统、深入地开展植物回收的技术原 理研究，以提高其回收效率和利用价值。 超积累植 物的产后处置需要特定的技术支持，专门的工艺原 理和技术，才能使其综合利用既有一定的经济效益， 又使污染物得到妥善处理，避免产生“二次污染”。

参考文献：

[1]骆永明，滕应.我国土壤污染退化状况及防治对策「门.土壤， 2006，38(5)：505-508．

[2. 白彦其，谢英荷，陈灿灿，等．14 种本土草本植物对污染土壤铅 形态特征与含量的影响「J].水土保持学报，2012,26 (1)：136- 140．

[3. 安志装，陈同斌，雷梅，等．蜈蚣草耐铅、铜、锌毒性和修复能力 的研究[J]. 生态学报,003,23(12):2594-2598.

[4. 孟杰，王人民，万吉丽，等．硫酸锌浸种对水稻幼苗生长和细胞 保护酶活性的影响:J].浙江大学学报：农业与生命科学版， 2010，36(4)：411-418

[5. 王红新，郭绍义，胡锋，等 螯合剂对铅锌尾矿改良基质上蓖麻幼 苗生长和铅锌积累的影响[J]. 土壤学报，2012,49():491-49&

[6. 韩少华，唐浩，黄沈发 重金属污染土壤螯合诱导植物修复研究 进展「J].环境科学与技术，2011,34() ： 157-163.

[7. LIU Y，ZHU Y G，CHEN BD，etalInfluence ofthearbuscu- lar mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* on uptake of arsenate by the As hyperaccumulator fern *Pieris villala* L[J]. Mycor­rhiza,2005,15(3) : 187-192.

[8] CAO X,MA L Q, SIIIRALIPOUR A. Effects of compost and phosphate amendments on arsenic mobility in soils and arsenic uptake by the hyperaccumulator,*Pieris villala* L[J]. Environ­mental Pollution,003,26(2) : 157-167.

：9]朱启红，夏红霞.蜈蚣草对Pb、Zn复合污染的响应:J]环境化 学,2012,31(7):1029-1035．

[10] 王海娟,宁平,唐兴进,等．含砷金矿蜈蚣草除砷应用前景探讨 [J] 矿业研究与开发,2010(2):94-98．

「11]谢景千，雷梅，东同斌，等.蜈蚣草对污染土壤中As、Pb、Zn、Cu 的原位去除效果「J].环境科学学报,010,0(1):165-171.

「12]熊国焕，番义宏,可艳明，等.螯合剂对大叶井口边草Pb、Cd、 As 吸收性影响研究「J]. 土壤,012,44(2):282-289.

「13] 秦欢,可忠俊,熊俊芬,等 间作对不同品种玉米和大叶井口边 草吸收积累重金属的影响:J],农业环境科学学报，2012,31 (7):1281-1288

「14] 熊国焕,高建培,王宏镔,等 间作条件下螯合剂对龙葵和大叶 井口边草吸收重金属的影响「].农业环境科学学报,011,0 (4):666-676

「15] 黄化刚,李廷强,朱治强,等 可溶性磷肥对重金属复合污染土 壤东南景天提取锌/镉及其养分积累的影响「]•植物营养与 肥料学报,2012(2):382-389

「16] 可冰,陈莉,李磊,等 石灰和泥炭处理对超积累植物东南景天

清除土壤重金属的影响「].安徽农业科学,2012 (5):2948- 2951

「17] 张圆圆,窦春英,姚芳,等 氮素营养对重金属超积累植物东南 景天吸收积累锌和镉的影响:J]浙江林学院学报，2010,27 (6) 831-838

「18] 黄五星,高境清,黄宇,等 商陆对镉锌铜胁迫的生理响应与金 属积累特性「]•环境科学与技术,010,3(1)77-79.

「19] 向言词,冯涛,彭秀花,等 利用美洲商陆修复锰尾渣污染土壤 对后茬植物的影响「].生态与农村环境学报，2009,25 (3)： 63-68

「20] 刘萍,翟崇治,余家燕,等 Cd、Pb 复合污染下柠檬酸对龙葵修 复效率及抗氧化酶的影响「J].环境工程学报，2012,6(4)： 1387-1392

「1]黄文.产表面活性剂根际菌协同龙葵修复镉污染土壤「].环 境科学与技术,2011,34(10):48-52

「2]何琳燕，李娅，刘涛，等.龙葵根际和内生Cd抗性细菌的筛选 及其生物学特性「].生态与农村环境学报，2011,27 (6)： 83- 88

「3]魏树和，周启星，张蕾，等.外源氨基酸对龙葵修复Cd-PAIIs 污染土壤的强化作用:J].生态学杂志，2009,28 (9)： 1829- 1834

「24] 陶笈汛,张学洪,罗昊,等 李氏禾对电镀污泥污染土壤中铬铜 镍的吸收和积累「].桂林工学院学报,010,0(1) 144-147.

「25] 蔡湘文,张学洪 光照强度和温度对铬超富集植物李氏禾生长 的影响「]•安徽农业科学,009,7(4):16832-16834.

「26] 蔡湘文,张学洪,郝文佳,等 水分、光照和肥料交互作用对铬 超富集植物李氏禾生长的影响「].江西农业大学学报,009, 31(6) 989-993

「7] ABOU SHANAB R A, ANGLE J S, DELORME T A,t al. Rhizobacterial effects on nickel extraction from soil and up­take by *Alyssum murale[\_J].* New Phytologist,003,158(1): 219-224

「8] LI Y,CHANEY R,BREWER E,et al. Development of a tech- nologyforcommercialphytoextractionofnickeleconomicand technicalconsiderations「J] PlantandSoil,2003,249(1) 107-

115

「29] 施翔,陈益泰,王树凤,等 3种木本植物在铅锌和铜矿砂中的 生长及对重金属的吸收:J].生态学报，2011,31(7)： 1818- 1826

「30] 刘艳丽,吴凤霞,徐莹,等 杨树修复重金属污染土壤的研究进 展「].林业科学,012,8() ： 139-144.

「叮 HERMLE S, VOLLENWEIDER P,GnNTHARDT GOERG M S,t al. Leaf responsiveness of *Populus tremula* and *Salix viminalis* tosoilcontaminated with heavy metalsandacidic rainwater「J] TreePhysiology,2007,27(11):1517-1531

「32] 张兴,王冶,揭雨成,等 桑树对矿区土壤中重金属的原位去除 效应研究「]•中国农学通报,012,8():59-63.

「33] 朱连秋,祖晓明,汪恩锋 白花泡桐对土壤重金属的积累与转 运研究:J].安徽农业科学，2009, 37 (25 )： 12063-12065, 12069

「4]孙晓灿，魏虹，谢小红，等.水培条件下秋华柳对重金属Cd的 富集特性及光合响应「]•环境科学研究，2012,25 (2)： 220- 225

「5]房娟,东光才，楼崇，等.Pb胁迫对柳树根系形态和生理特性 的影响「]•安徽农业科学,011,9(15) 8951-8953.

「6]施翔，东益泰，吴天林，等.7个柳树无性系在Cu/Zn污染土 壤中的生长及对Cu/Zn的吸收「].中国环境科学,010,0 (12) 1683-1689

「7]杨卫东，东益泰.垂柳对镉吸收、积累与耐性的特点分析「]. 南京林业大学学报：自然科学版,2009,33(5) 17-20

「38] PUNSHON T,DICKINSON N Heavy metalresistanceand accumulationcharacteristicsinwi**l**ows「J]InternationalJour- nalofPhytoremediation,1999,1(4) 361-385

「9] KnPPER H,ZHAO F J,MCGRATH S P. Cellular compart­mentation of zinc in leaves of the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*「J] PlantPhysiology 1999，119(1):305-312

「40] ZHAO FJ LOMBIE，BREEDON T Zinchyperaccumulation and cellular distribution in *Arabidopsis halleri* Q]. Plant, Cell ＆Environment 2000，23(5):507-514

「叮 杨居荣，查燕，刘虹.污染稻、麦籽实中Cd、Cu、Pb的分布及其 存在形态初探「].中国环境科学，1999,19():500-504.

「42] MACFARLANE G R,BURCHETT M D Zincdistribution andexcretionintheleavesofthegrey mangrove,*Avicennia marina* (Forsk ) Vierh「J] EnvironmentalandExperimental Botany,1999,41(2):167-175

「43] ZHU YL,PILON SMITS E A,JOUANIN L,etal Overex- pressionofglutathionesynthetaseinIndianmustardenhances cadmiumaccumulation andtolerance「J] Plant Physiology, 1999,119(1):73-80

「44] RUGH C L,SENECOFF J F, MEAGHER RB,etal Devel- opmentoftransgenicye**l**owpoplarformercuryphytoremedi- ation「J] NatureBiotechnology,1998,16(10):925-928

「45] RUGH C L, WILDE H D,STACK N M,etal Mercuricion reductionandresistanceintransgenic *Arabidopsis thaliana* plantsexpressingamodifiedbacterialmerAgene「J] Proceed- ingsoftheNationalAcademyofSciences,1996,93(8):3182- 3187

「46] WHITINGSN,LEAKEJR,MCGRATHSP,etalPositive responsestoZnandCdbyrootsoftheZnandCdhyperaccu- mulator*Thlaspi caerulescens*「J] New Phytologist,2000,145 (2):199-210

「7]王文卿，林鹏.红树林生态系统重金属污染的研究「].海洋科 学 ,1999,3(3):86-90

1. LASAT M M,BAKER AJ M,KOCIIIAN L V. Physiological characterizationofrootZn2＋absorptionandtranslocationto shootsin Zn hyperaccumulatorandnon-accumulatorspecies of *Thlaspi[:J].* Plant Physiology ,996,12 (4) : 1715-1722.
2. 童方平，龙应忠，杨勿享，等 锑矿区构树富集重金属的特性研 究[J].中国农学通报,010,6(14):328-331.
3. 何振立，杨金燕，杨肖娥，等.pH和Cu2+、Zn2+对两种可变电 荷土壤中吸附态Pb解吸行为的影响[].农业环境科学学报， 2005,24(3):469-475

「51]金彩霞，周启星.pH对水-土界面镉迁移特征的影响「J].沈阳 建筑大学学报:自然科学版,2006,22(4):626-628,652

1. 吴燕玉,王新,梁仁禄,等 重金属复合污染对土壤植物系统的 生态效应U.对作物、苜蓿、树木吸收元素的影响[].应用生 态学报,1997,8(5):545-552
2. 辛涛,白莉萍,宋金洪,等 施用城市污泥对杨树土壤化学特性 及金属含量的影响:J]. 生态环境学报，2010,19(11)： 2722- 2727
3. YANG X,PENG H,JIANG L,et al. Phytoextraction of cop­per from contaminated soil by *ElshoUzia splendens* as afect- edbyEDTA**,**citricacid**,**andcompost**[**J**]** InternationalJour- nalofPhytoremediation**,**2005**,**7**(**1**)** 69-83
4. WEYENS N,VAN DER LELIED,TAGHAVI S,et al Phy- toremediation**：**plant-endophyte partnerships take the chal- lenge**[**J**]** CurrentOpinioninBiotechnology**,**2009**,**20**(**2**)** 248­254

[6] BRAUD A,lzlQUEL K, VIEILLE E **,**etal Changesinex- tractabilityofCrandPbinapolycontaminatedsoilafterbio- augmentation wth microbial producers of biosurlactants, or- ganicacidsandsiderophores**[**J**]** Water**,**Air**,**＆SoilPo**l**ution**：** Focus,2006,6(3/4)：261-279.

1. HE L**,**CHEN Z**,**REN G**,** et al Increased cadmium and lead uptakeofacadmium hyperaccumulatortomatobycadmium- resistant bacteria]〕]. Ecotoxicology and Environmental Sale- ty,2009,72(5) 1343-1348
2. KUFFNER M,DE MARIAS,PUSCHENREITER M,etal Culturable bacteria from Zn-and Cd- accumulating *Salix ca - prea* withdi**f**erentiale**f**ectsonplantgrowthandheavymetal availability**[**J**]** Journalof Applied Microbiology**,**2010**,**108 (4) 1471-1484
3. 杨林,陈志明,刘元鹏,等 石灰、活性炭对铬污染土壤的修复 效果研究[]• 土壤学报,012,9():518-525.
4. LIU D**,**ISLAM E**,**LIT**,**etal Comparisonofsyntheticchela- torsandlow molecularweightorganicacidsinenhancingphy- toextraction of heavy metals by two ecotypes of *Sedum alfre~ dii nance]].* Journal of hazardous materials, 2008,153 (1)： 114-122
5. BLAYLOCK M J,SALT D E,DUSHENKOV S,etal En- hancedaccumulationofPbinIndian mustardbysoil-applied chelatingagents**[**J**]** EnvironmentalScience ＆ Technology**,** 1997,31(3) 860-865
6. LIU D**,**ISLAM E**,**MAJ**,**etal Optimizationofchelator-assis- ted phytoextraction**,**using EDTA**,**leadand*Sedum alfredi nance* asa modelsystem**[**J**]** Bu**l**etinofEnvironmentalCon- taminationandToxicology**,**2008**,**81**(**1**)** 30-35
7. 贺庭,刘婕,朱宇恩,等 重金属污染土壤木本-草本联合修复 研究进展[].中国农学通报,012,8(11)：237-242.
8. 李海英,顾尚义,吴志强 磷肥对铅锌矿渣污染土壤中玉米生 长的影响试验研究「J].广州化工,013,1():69-71.
9. 王激清,茹淑华,苏德纯 印度芥菜和油菜互作对各自吸收土

壤中难溶态镉的影响:J]环境科学学报，2004,24 (5)： 890-

894

1. ANGLEJS,BAKER A J, WHITING S N,etal Soilmois­ture effects on uptake of metals by *Thlaspi, Alyssum,* and *Berkheya]].* Plant and Soil,2003,256(2)： 325-332.
2. YEZ H**，**WONG M H**，**BAKER AJ M**，**etal Comparisonof biomassand metaluptakebetweentwopopulationsofphrag- mitesaustralisgrowninfloodedanddryconditions**[**J**]** An- nalsofBotany 1998**，**82**(**1**)：**83-87
3. 廖晓勇，陈同斌，谢华，等 磷肥对砷污染土壤的植物修复效率 的影响：田间实例研究[]•环境科学学报,2004,24(3):455- 462
4. L&PEZ M L，PERALTA VIDEAJR，BENITEZT，etalEn- hancement of lead uptake by alfalfa *(Aedicago sadva* ) using EDTAandaplantgrowthpromoter**[**J**]** Chemosphere**,**2005**,** 61(4)：595-598

[0]王德娜，薛建辉.施用IBA对枫香幼苗吸收土壤Cd2+的影响 [J] 南京林业大学学报：自然科学版,2012,36(2)：121-124

1. 周建民,党志,陈能场,等 3-吲哚乙酸协同螯合剂强化植物提 取重金属的研究「J].环境科学,007,8():2085-2088.
2. ENSLEY B D,BLAYLOCK MJ,DUSHENKOVS,etalIn- ducinghyperaccumulation of metalsin plantshoots**:** United States**,**5917117**[**P**]** 1999-06-29
3. EVANGELOU M W H,EBEL M,SCHAEFFER A Evalua- tionofthee**f**ectofsma**l**organicacidsonphytoextractionof Cu and Pb from soil wth tobacco *Nicodana Labacum* [J ]. Chemosphere**,**2006**,**63**(**6**):**996-1004
4. VAN DER ZAAL B J, NEUTEBOOM L W,PINASJE,et al. Overexpression of a novel *Arabidopsis* gene related to pu­tative zinc-transporter genesfrom animals canleadto en- hancedzincresistanceandaccumulation**[**J**]** PlantPhysiolo- gy,1999,119(3):1047-1056
5. SONG W,SOHNEJ,MARTINOIAE,etalEngineeringtol- eranceandaccumulation of lead and cadmium in transgenic plants**[**J**]** NatureBiotechnology**,**2003**,**21**(**8**):**914-919
6. CUNNINGHAM SD,BERTIW R,HUANGJ W Phytore- mediationofcontaminatedsoils**[**J**]** TrendsinBiotechnology**,** 1995,13(9):393-397

：77]马文漪，杨柳燕.环境微生物工程「M].南京：南京大学出版 社,1998

**[**78**]** MEAGHERRB Phytoremediationoftoxicelementalandor- ganicpo**l**utants**[**J**]** CurrentOpinioninPlantBiology**,**2000**,**3 (2):153-162

[9]孙宝山.EDTA螯合诱导技术及其环境风险[].辽宁农业科 学,2006(2):67-68

1. JAWORSKAJS,SCHOWANEK D,FEIJTEL T CJ Envi- ronmentalriskassessmentfortrisodium**[**S**,**S**]**-ethylenediam- inedisuccinate**,**abiodegradablechelatorusedindetergentap- plications**[**J**]** Chemosphere**,**1999**,**38**(**15**):**3597-3625
2. MEERSE,RUTTENSA,HOPGOOD MJ,etalComparison ofEDTA and EDDS as potentialsoilamendmentsforen- hancedphytoextraction ofheavy metals**[**J**]** Chemosphere**,** 2005,58(8):1011-1022
3. 李锋民,熊治廷,胡洪营 海州香薷对铜的蓄积及铜的毒性效 应[]•环境科学,003,4() ：30-34.
4. 陈同斌,韦朝阳,黄泽春,等 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的 富集特征[]•科学通报,002,7():207-210.

编辑：陈泽军 (修改稿收到日期：2013-08-26)