自然资源学报

JOURNAL OF NATURAL RESOURCES

重金属污染土壤修复中杂草资源的利用

魏树和，周启星：刘睿

（中国科学院沈阳应用生态研究所陆地生态过程重点实验室，沈阳110016）

**摘要：**对重金属污染土壤植物修复基本原理、作用方式及亟待解决的问题进行了论述，认为现有修 复植物均不同程度存在一些弱点，还难以大规模应用于修复实践。杂草具有抗逆境能力强、生长迅 速、繁殖能力强以及在环境条件适宜情况下生物量能够急剧提高等特点，可以弥补现有修复植物的 缺点和不足,是较理想的植物修复资源。结合笔者的研究情况，对杂草资源在重金属污染土壤植物 修复中的利用方式、修复植物筛选方法进行了论述,而且在植物修复生物量处理方面也进行了讨论， 试图为重金属污染土壤植物修复进一步发展提供科学依据。

**关 键 词**：植物修复；杂草资源；重金属；污染土壤

**中图分类号：**X506 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-3037（2005）03-0432-09

土壤是人类赖以生存的重要自然资源之一，是复杂的多阶层环境系统的一个子系统，一 般是指陆地表面能生长植物的疏松表层叫土壤一方面为人类提供丰富的生活和生产资源, 另一方面也成为人类排放各种污染物的承载者。尽管土壤对于进入其中的污染物质具有一 定的自净作用，但这种净化能力是有一定限度的，当进入土壤中污染物质的数量超过其本身 承载力时，土壤就会被污染，其功能就会发生质的变化，进而严重威胁着人类生产和身体健 康。重金属是一类污染性质非常严重的土壤污染源，其中镉、汞、铅、碑、鎔、篠、铜、锌等是环 境科学中最受瞩目的重金属⑵。重金属污染物的独特之处就是不能为生物所分解，大多数不 能通过焚烧的方法从土壤中去除，相反地可以在生物体内富集，有些还会转化为毒性更大的 甲基化合物。此外，重金属污染土壤还具有隐蔽性、潜伏性和累积性等区别于大气和水体污 染的特点，因此，重金属污染土壤修复问题是世界性的难题，同时也是环境科学研究日益活 跃的领域。我国受重金属污染的农田土壤约2 500x104hm2,每年被重金属污染的粮食多 达1 200x10%在我国耕地资源日益紧张的情况下，重金属污染土壤的修复显得极为必要 和异常迫切⑶。

重金属污染土壤修复技术从反应机理来看主要包括物理方法和化学方法，如换土法、蒸 汽浸提法、玻璃化法、电动力学法，化学淋洗法、溶剂浸提法、氧化法、还原法等，以及由上述 两种或两种以上方法共同进行的联合修复方法。这些技术有很多已成功应用于修复实践，尤 其是对于污染面积较小、污染程度较重的污染土壤修复效果较好。但这些技术存在很大缺 点，如破坏场地结构，改变土壤原有理化性质使污染土壤修复后难以利用，容易带来二次污 染以及实施方式难以为公众所接受等，而且对于污染面积较大的土壤，尤其是污染面积巨大 且污染程度较轻的农田土壤，或是因为技术上难以实施或是因为经济上难以承受而难以应 用。因此，人们寄希望于费用低廉、不破坏场地结构、能起到一定美化环境作用和易于为社会

**收稿日期：**2004-11-02；**修订日期：**2004-12-24。

**基金项目：**国家杰出青年科学基金项目（20225722）；国家自然科学基金重点项目（20337010）。

**第一作者简介：**魏树和（1970〜），男，辽宁省铁岭县人，生态学博士，副研究员，研究方向为污染土壤生态修复。E-mail:

[shuhewei@tom.com](mailto:shuhewei@tom.com)

**\* 通讯作者,**E-mail: [Zhouq@mail.sy.ln.cn](mailto:Zhouq@mail.sy.ln.cn)

所接受等优点的植物修复技术心，这方面研究因而也成为当前国内外的热点科学问题和前 沿研究领域®刀。但总的来看，现有修复植物资源比较缺乏，多数修复植物本身存在一些弱点, 其修复性能也有待于进一步强化，植物修复技术还不成熟。杂草是一类环境适应性很强的植 物类型，对杂草资源加以利用，充分发挥杂草植物在植物修复中的优势，对于重金属污染土壤 的修复是十分必要的罔。

1重金属污染土壤植物修复原理及亟待解决的问题

1.1基本原理与主要作用方式

植物修复是20世纪前期提岀的，其最初的学术思想是利用超积累植物对重金属的超量 富集作用以去除污染土壤中超标的重金属。目前，植物修复是指利用植物来修复污染环境，如 利用植物净化空气（如室内空气污染和城市烟雾控制等），利用植物及其根际圈微生物体系 净化污水（如污水的湿地处理系统等）和治理污染土壤,其中利用植物修复污染土壤是最活 跃领域。适于植物修复的土壤污染物既包括可降解的有机污染物，也包括不能被降解的重金 属等。那些具有污染环境修复功能的特殊植物统称为修复植物，如对空气净化效果较好的绿 化树木和花卉等，能直接吸收、转化有机污染物质的降解植物，利用根际圈生物降解有机污

染物质的根际圈降解植物，以及提取重金属的 超积累植物、挥发植物和用于污染现场稳定的 排异植物等肌

**图**1**重金属污染土壤植物修复的主要方式**

植物提取修复

植物挥发修复

植物稳定修复

Fig.l The main ways of phytoremediation of soils contaminated by heavy metals

重金属污染土壤的植物修复是指利用修 复植物的提取、挥发或转化、稳定作用对重金 属污染土壤加以修复，其作用方式主要有以下三 种，即植物提取、植物挥发和植物稳定（图l）o

植物提取修复指利用重金属超积累植物 从污染土壤中超量吸收、积累一种或几种重金 属元素，之后将植物整体（包括部分根）收获并集中处理，然后再继续种植超积累植物以使土 壤中重金属含量降低到可接受的水平。植物提取修复是目前研究最多且最有发展前途的一 种植物修复技术。

植物挥发修复是利用植物将土壤中的重金属吸收到植物体内，然后将其转化为气态物 质释放到大气中，从而对污染土壤起到治理作用。这方面的研究主要集中在易挥发性的重金 属如汞、硒等方面，但转化、挥发的机制还不清楚。一般认为植物通过生物甲基化过程使汞、 硒等形成可挥发性的分子而排出体外进入大气中。植物挥发应用范围较小，而且将汞、硒等 挥发性重金属转移到大气中有没有环境风险仍有待于进一步研究，因此，这方面研究基本处 于次要地位。

植物稳定修复是指通过排异植物根系分泌物质来积累和沉淀根际圈重金属，使其失去生 物有效性，以减少污染物质的毒害作用。但更重要的是利用排异植物在污染土壤上的生长来 减少污染土壤的风蚀和水蚀，防止重金属向下淋移而污染地下水或向四周扩散进一步污染周 围环境。这一类植物尽管对重金属吸收积累量并不是很高，但它们可以在重金属含量很高的 土壤上正常生长。这方面的研究偏重于废弃矿山的复垦工程，金属尾矿库的植被重建等。

1.2超积累植物筛选仍然是植物提取修复研究的基础

超积累植物（Hyperaccumulator） 一词最初是由Brooks等凹提出的，当时用以命名茎中Ni 含量（干重）大于1 OOOmg/kg的植物。现在超积累植物的概念已扩大到植物对所有重金属元 素的超量积累现象，即是指能超量积累一种或同时积累几种重金属元素的植物。现一般认为 超积累植物最显著的特征是临界含量特征，即植物茎或叶富集重金属的临界含量分别为Zn、 Mn 10 000mg/kg, Cd lOOmg/kg, Au lmg/kg, Pb、Cu、Ni、Co、As 均为 1 OOOmg/kg；二是转移特 征，植物地上部重金属含量大于其根部重金属含量31］。而笔者的研究表明［12、码超积累植物还 应具有耐性特征和富集系数特征，这与最近报道的超积累植物的表现特征是一致的吟呵。

植物提取修复研究已有20多年的研究历史，但其应用技术还不成熟，目前大多还只处于 试验阶段。其主要原因在于已发现的超积累植物还不能满足商业应用的需要,如尽管国际上 报道的超积累植物已有400多种，但其富集重金属的种类还比较有限，其中超积累Ni的植 物约300多种、Co 26种、Cu 24种、Se 19种、Zn 16种、Mn 11种，Cd 1种叫况且上述这些超 积累植物中很少具有同时超积累2种或2种以上重金属的能力。再有,上述已发现的超积累 植物绝大多数并不具有人们所期望的理想性状，在很多方面还存在着不同缺陷，如生物量较 小,生育期较长等。因而，在污染土壤修复试验中，常表现为修复效率较低，修复时间较长等缺 点而难以形成较完善的植物修复技术以直接大规模应用于修复实践。另外，在利用转基因 技术构建理想超积累植物方面的研究在短时间内也很难满足修复实践的要求，其根本原因 在于人们对于超积累植物的富集机理还不十分清楚，超积累植物是否具有某种或某些利于 植物超积累的基因也有待于进一步研究问。由此可见,超积累植物筛选仍然是植物修复技 术的基础和关键所在，通过各种方式筛选超积累植物,哪怕只筛选到具有超积累植物的某 些特征的植物，对于植物修复种质资源库的建立乃至理想超积累植物的构建都可能具有重 要意义。

1.3排异植物的筛选是植物稳定修复的关键

排异植物是指能在重金属污染土壤上正常生长，植物地上部及根部重金属含量均较低 或根部重金属含量虽较高但地上部重金属含量较低的植物⑶。如菊科婆罗门参属植物 *(Trachypogon spicatus* )生活在高含量Cu污染土壤上，能将Cu大部分束缚在根部，含量 高达1 200-2 600mg/kg,而叶片中Cu含量只有2~16mg/kgo生长在铅矿脉土壤中铅含量为 1 000mg/kg的锐利三齿稈草*(Trix)dia pungens* )和灰叶属植物*(Tcphrosia* sp.)地上部也不含高 量的铅。香拟婆婆纳(丹必€ *odord)*生长在较高銘含量的土壤上，其地上部鎔含量也很低凹。排异 植物的排异机理可能在于植物根系具有某种排斥机制限制了重金属由根部向地上部运输㈣。 排异植物最重要的特征就是植物体内尤其是地上部重金属含量较低卩创,但具体规定排异植物 的量化指标是很困难的，这是因为植物对重金属的积累量最低可以达到检测不出的程度。

排异植物是重金属污染土壤稳定修复较理想的修复植物。这是因为尽管许多耐性较强 植物也可以通过在污染严重土壤上生存，从而达到对污染土壤进行稳定修复的目的，但这些 耐性植物地上部积累的重金属含量往往过高，其落叶或枯枝的四下分散仍然对周围环境造 成安全隐患，因而，排异植物资源的筛选是植物稳定修复的关键之所在。

2杂草在重金属污染土壤植物修复中的优势

2.1杂草可能是超积累植物和排异植物的丰富资源

从已报道的超积累植物和排异植物的属性来看，在野生植物、杂草和作物这三大类植物 类群中，几乎都有修复植物分布，如碑超积累植物蕨类植物蝦蚣草(P比皿*vittata)^*锌、镉超积 累植物杂草天蓝遏兰菜*(Thlaspi caerulescens^^*排异植物作物玉米(Zwa *mays* )［20］等。但杂草 植物用于植物修复则更有潜力，这是因为：杂草特别是农田杂草是一类人为与自然选择双重 压力下产生的高度进化的植物类群。与作物相比，杂草抗逆境能力强，经过长期的自然进化和 人工选择，具有广泛的适应性和顽强的生命力閉、绚,这些特性可能使杂草对重金属有较强的 耐性和排异性；同时杂草也具有较强的争光、争水、争肥能力，吸收能力很强处型这种较强的吸 收特性可能利于杂草对重金属的积累。因此,杂草可能是超积累植物和排异植物的丰富资源。 又由于杂草具有耐不良环境、生长迅速、繁殖能力强，以及在生长条件改善条件下生物量急 剧提高等特点閉〜26\可以弥补现有修复植物的某些缺点和不足单而且杂草具有某些栽培性状, 在修复实践中容易管理，因此，总体来看杂草对于植物修复来说是一类较理想的植物资源。

2.2杂草作为修复植物的优势

一般来说，杂草是指在特定地理区任何生长在被人为干扰了的环境中，其本身又不是目 的植物的植物汽世界上约有30 000多种，我国约有2 000多种。对于农业生产来说,那些除 田园种植的作物之外，所有其它受到人为栽培条件影响，但本身又不是栽培对象而在田间滋生 并带有野生植物特性的草本植物统称为农田杂草。全世界的农田杂草共有约8 000多种，我 国的农田杂草种类约有600多种，其中旱地杂草400余种，水田杂草约200余种国。杂草包括农 田杂草是一个比较广义的概念。杂草既不是栽培植物，也不是野生植物,是介于野生植物和栽 培作物之间的一类植物单因此既具有某些野生植物性状，也具有作物的某些栽培性状。

经过优胜劣汰的人工与自然的共同选择,杂草比作物的生态适应性及竞争能力更强［24、2舄 常常表现为生长迅猛，如幼苗及根系生长、发育快，光合速率高，营养生长向生殖生长过渡快, 能够在较短时间内完成其生活史，并且当生长条件适宜时生物量会急剧升高；种子生命力强， 能在恶劣生态条件下及较宽的环境范围内长时期地不断萌发；种子数量巨大而且容易脱落, 繁殖系数大；抗逆性及抗虫害能力较强。作为重金属污染土壤的修复植物，上述特性利于修 复植物在污染场地定植，尤其是利于在土壤比较贫瘠的金属矿山污染区定植,并可以迅速生 长，在较短时间内完成修复周期,从而提高其修复效率，这是作物所无法比拟的。此外,杂草也 具有某些栽培性状如整齐度较好和熟期较一致等特点，利于栽培管理,这些特性是野生植物 所不具有的。可见，从杂草中筛选修复植物既可以弥补现有修复植物的缺陷,又利于修复实 践，因而具有一定的优势。

3杂草中超积累植物及排异植物筛选方法

3.1超积累植物常用筛选方法及缺点

目前,关于超积累植物的筛选还没有统一的方法和标准，从文献报道来看,常用的寻找和 验证超积累植物的方法有：微量分析法、野外试纸初步诊断法、采样分析法和温室营养液或 土壤盆栽模拟法⑶。

微量分析法是对植物标本馆样本取微量样品（如1片或几片植物叶标本）进行化学分 析，检测植物体内重金属含量，从而判断该植物是否为超积累植物⑷。这种方法具有筛选面 大、简单、快速等优点，但由于取样量少，分析可信度低，而且，由于样本采集地点的土壤不一 定都被重金属污染，因而许多修复植物资源可能被漏掉。野外试纸初步诊断法是将试纸浸渍 制成特制测试纸，在野外采样时，将新鲜树叶紧按在潮湿的测试纸上，然后根据试纸颜色变 化来判断叶片重金属含量的高低。这种方法简单、快速，但目前仅局限于对镰超积累植物的 筛选旳。温室营养液或土壤盆栽模拟法是通过人为向容器或盆栽土壤中投加一定浓度重金 属模拟植物生长环境污染状态的一种试验方法，通常是通过不同浓度梯度试验以检验植物 对重金属的耐性和积累特性，但大多数试验均用于植物对重金属积累潜力的分析®〜汽还很少 用于超积累植物的筛选试验。

采样分析法是寻找超积累植物最常用的方法，通常的作法是在重金属污染区同时采集 植物及其根区土壤样品，然后再测定样品中重金属总量，从而确定是否是超积累植物,现已报 道的超积累植物多数是通过这种方法找到的。然而，这种筛选方法很难操作并且存在着较大 缺点O首先体现在采集的目标植物种很不明确。如从文献报道来看汽多数采集对象是金属矿 区重金属污染区的优势种，这些优势种多数是蕨类、灌木或乔木，这些木本植物多数植株高 大、质地坚硬，野外样品采集相当困难，同时也容易造成“滥砍乱伐”，严重破坏矿区植被，而且 由于污染土壤中重金属分布的不均一性，每一种植物种要采集多少棵植物才能体现出超积 累植物特征也很难确定。若以非优势种为采集对象，同样也存在着采集哪一种植物，每一种植 物采集多少棵的目标不确定的困难。其次，许多超积累植物也容易被忽略，如矿区没有分布但 其本身又是超积累的植物。再有，对于普通环境工作者来说，植物种的识别也相当困难，如果 没有丰富的植物分类学知识与实践经验,仅依靠植物检索表是很难识别的。因此，采用这种方 法要想从几十万种植物当中筛选出超积累植物的确具有相当大的难度，这可能是超积累植 物筛选进展缓慢较重要的技术原因，因而需要采用更为有效的方法来筛选超积累植物。

另外，现报道的超积累植物很多是从重金属污染区通过采样分析的方法发现的,因而通 常认为超积累植物是重金属污染区植物对重金属污染长期适应和进化的结果，超积累植物 只分布在较狭窄的生态区域，这也是超积累植物筛选的重要理论基础之一。但从文献报道口 34〜36］来 看，重金属污染区植物并非都是超积累植物，绝大多数也不具有超积累植物通常具有的重金 属含量地上部大于根部的特点，其地上部重金属含量也很难达到超积累植物应达到的临界 含量标准,不同植物种之间对重金属的积累也存在着相当大的差别，这说明并非所有植物经 过对重金属的长期适应和进化都能成为超积累植物，重金属对植物积累特性的诱导或驯化 可能只有通过植物本身所固有的某种机制才能起作用，植物对重金属的积累特性可能是由 植物本身所固有的这些特有机制决定的。因此，超积累植物对重金属所表现岀的超积累特性 可能是植物对污染长期适应与进化的结果，也可能是植物本身就具有某种特殊机制而对重 金属表现出超积累特性，从而也就存在着植物未经重金属长期污染诱导或驯化，其本身就可 以超积累重金属的可能性。

3.2未污染区从杂草中筛选超积累植物的方法

为避免采样分析方法中植物种识别困难、采集目标植物不明确、许多超积累植物容易被 漏掉等问题，笔者采取了室外土壤盆栽模拟试验的方法来筛选超积累植物具体做法是将 杂草种类较为丰富、取样方便、未受重金属污染的地点作为试验场地，在植物生长幼苗期将 生长一致的一定数量的植物幼苗移栽到投加一定量重金属的盆栽土壤中，然后在植物成熟 期测定植物对重金属的积累特性,从而筛选具有超积累特征的植物。

利用上述方法，在未污染生态区，通过3年的研究，从22科65种杂草植物中，发现球果薄菜是 一种镉超积累植物。其中，在Cd投加浓度为25和50mg/kg的处理中球果蒋菜地上部生物量均 未下降(p<0.05),表现出较强的耐性，茎和叶中Cd含量分别为107.7、150.1及119.3>203.6mg/ 羁,其地上部Cd富集系数也均大于1,分别为5.75和4.17,且地上部Cd含量大于根部Cd含 量,所有这些特性均满足Cd超积累植物应具有的4个基本特征，是Cd的超积累植物。

在铅锌矿区重金属自然污染生态区采样分析测定结果表明，采集土壤中Cd总量为2.4〜 13.5mg/kg,有效态含量为1.21〜6.06mg/kg,采集的球果蒋菜茎中Cd含量为4.2~24.6mg/kg,叶 中Cd含量为7.8~39.2mg/kg,地上部Cd富集系数为1.45〜2.39,也均大于1，且其地上部Cd 含量也均大于其根部Cd含量，植物的生长未出现受毒害症状，上述这些对重金属的反应特性 也均具有超积累植物的主要特征，与盆栽模拟试验中Cd投加浓度为10mg/kg时球果薄菜对 Cd污染的响应相似，因此，可以认为该铅锌矿污染生态区生态型球果薄菜是Cd超积累植物, 至少是Cd超积累特征植物。

3.3杂草中排异植物的筛选

排异植物一词最早报道于1981年，当时Baker根据植物对重金属的不同响应将植物分 为富集植物、指示植物和排异植物三种类型㈤。他认为排异植物对重金属的积累特征为:在一 定污染水平范围内，植物地上部重金属含量较低并基本上是稳定不变的，但当土壤中重金属 含量超过某一临界含量时，植物地上部重金属含量会急剧增加。由于排异植物只是将重金属 稳定在污染现场，其对污染土壤的修复没有超积累植物对污染土壤修复的彻底，因而其研究 进展比较缓慢，发现的排异植物也比较有限旳。

排异植物筛选方法与超积累植物筛选方法基本相同，如Poschenrieder等卩利用采样分析 方法从32种植物中筛选出了铜排异植物*Hyparrhenia hirta;* Seregin等〔勿采用营养液培养利 用组织分析法则鉴定出玉米是篠排异植物;Brewin等囱利用采样分析与盆栽相结合的方法 筛选出铜排异植物彳*rme ria maritima*。

利用室外盆栽模拟试验MU在未污染区从杂草植物中筛选超积累植物的同时，笔者就杂 草植物对重金属的排异特征也进行了分析，结果表明:当土壤中Cd投加浓度为10mg/kg时, 月见草根中Cd含量为1.4mg/kg,茎中Cd含量为0.4mg/kg,叶中Cd含量为0.4mg/kg,籽实 Cd含量为O.lmg/kgo在铅锌矿区重金属自然污染生态区采样分析测定结果表明，采集土壤 中Cd总量为15.2mg/kg,有效态含量为9.4mg/kg,此时月见草体内Cd含量分别为根1.9mg/ 熄茎0.8mg/kg,叶0.9mg/kg,籽实0.7mg/kg。通常，天然土壤中Cd的浓度范围为0.05〜l.Omg/ kg，普通植物体中Cd含量小于lmg/kg,通常为O.Z-O.Smg/kgZ、％、40］。上述两种生态型月见草 在Cd污染水平较重条件下植物地上部Cd含量都比较低，几乎与植物背景值含量相当，具有 明显的排异植物的特征，而且该种植物对Cd具有较强的耐性,因而是Cd的排异植物。

4杂草修复生物量处理探讨

植物修复是以植物为载体的修复过程，不论修复植物是一年生草本植物还是多年生草 本或木本植物，最终都需要将修复植物积累的干物质即生物量从修复过的污染土壤上移走。 移走这些生物量的方法很多，可以是人工移走，也可以是利用机械移走，问题在于移走后的 生物量如何处理。

重金属污染土壤植物修复后的生物量的处理问题始终是植物修复难以解决的问题，常 用的方法是将生物量灰化，再从中回收重金属，但这种技术成本太高，通常是将灰分填埋。从 对重金属污染土壤的利用来看，生物量的处理主要有以下几种处理方式跑:①在污染土壤上 繁殖作物良种，种子作为良种用于生产，秸秆作为薪材利用；②种植能源作物，提取酒精、油 脂等工业原料，秸秆压制成纤维板，或进行沼气发酵;③种植木本植物如杨树，所得木材用于 造纸和建材等。然而，这些处理方式都存在不同的潜在风险，在应用过程中可能会造成重金 属在某一局部的重新积累，从而引起二次污染。同时，随着人们环保意识的不断提高，这些处 理方式也难以让人们接受。因此，需要有更为稳妥的办法来处理这些生物量，以便利于植物 修复技术的平稳发展。

其实，可以考虑先将生物量贮存于金属矿区尾矿库中，待技术成熟时再将尾矿库中的重 金属加以回收。尾矿库是金属采矿和选矿过程中废液、废渣的暂时贮存库。金属矿品位虽可 达70%〜80%,有的甚至更高，但百分之百地将其提炼出来是不可能的，在采矿和选矿过程中 总会产生大量的废液、废渣，这些废弃物中也有大量的重金属，一般浓度可达几十mg/kg,有 的甚至高达几千mg/kg,如此高浓度的重金属若释放到环境中去，无疑会造成严重污染，但 将其提取出来，在目前的技术条件下还难以完成或费用上难以承担，所以只好将其暂时放置 在一些贮存库存中即尾矿库保存起来，待时机成熟了再将其开采出来创造经济效益。由于在 采矿、选矿过程中使用了大量的酸性物质，使得尾矿库pH值非常低，为防止这些废液引起 地下水等环境的二次污染，通常要向尾矿库中加入碳酸钙以综合酸度，从而形成尾矿泥沙。 尾矿库面积一般都很大，有的几十公顷，有的上百公顷，因水分的不断蒸发形成了大片的裸 露表面而呈现出白茫茫的一片，之所以形成裸露表面是因为尾矿库表层理化性质难以适合 植物自然定植。在风力较大的时候，尾矿库沙土飞扬，有时遮天蔽日，对周围环境造成严重污 染。如果将重金属修复植物的生物量放置在尾矿库中，一方面可以覆盖裸露的泥沙表面防止 尘土飞扬、污染环境，同时植物体自然降解后可以改善尾矿库的成土条件，对于杂草植物来 说，由于其繁殖能力极强,其自身所携带的种子也可能在尾矿库中自发生长，起到绿化环境的 作用；另一方面，植物体所积累的重金属不断蓄积于尾矿库中，在技术成熟时也可以回收一 定量的重金属，既有社会效益又创造了经济效益。

5结语

目前，关于超积累植物积累重金属的机理以及排异植物限制重金属向上转移的机理还 不十分清楚，利用转基因技术以现有修复植物为基础构造理想的修复植物在短时间内还难 以实现，因此，修复植物的大力筛选是十分必要的。然而，世界上植物多种多样，已知植物种的 总数就有约50X104多种，其中种子植物约有20多万种跑,因此,单从种子植物开始筛选超积 累植物和排异植物也无异于“大海捞针”。本研究表明，杂草是重金属污染土壤较理想的植物 资源，具有较大筛选潜力，以杂草为对象筛选修复植物将会取得一定突破。

排异植物对重金属污染土壤的修复虽没有超积累植物对污染土壤修复的彻底，但如果 能够将重金属排异基因转移到作物体内，则排异作物便可以在重金属污染土壤上正常生长， 安全生产农产品，对难以根治的重金属污染土壤既起到保护环境的作用，又对污染土壤加以 开发利用，可谓一举两得。其实，这种具有重金属排异作用的作物即使不用于污染土壤的生 产，由于排异作物本身可以对重金属的转移进行限制，对其农产品品质也会起到保护作用，这 对于日益严重的土壤污染条件下的农业质量安全生产具有重大意义。因此，排异植物的筛选 及利用应得到重视。

参考文献(References):

1. 林谷成.土壤[M].北京:农业出版社,1983.[LIN Gu-cheng.SoiLBeijing:Agricultural Press,1983.]
2. 窦贻俭，李春华.环境科学原理[M].南京:南京大学出版社,1998.[DOU Yi-jian,LI Chun-hua.Principles of Environmental Science.Nanjing:Nanjing University Press,1998.]
3. 周启星，宋玉芳，等.污染土壤修复原理与方法[M].北京：科学出版社,2004.[ZHOU Qi-xing,SONG Yu-fang,e^ *al.Re-* mediation of Contaminated Soils:principals and Methods.Beijing:Science Press,2004.]
4. Chaney R L,Malik M,Li Y M.Phytoremediation of soil metalsfj]. *Curve nt Opinions in* 1997,8:279〜284.
5. Reeves R D,Baker A J M.Metal accumulating plants [A].In:Raskin I,Ensley B D.Phytoremediation of Toxic Metals.Using Plant to Clean Up the Environment[C].New York John Wiley,2000.
6. Mattina M I,Lannucci-Berger W,Mussante *C,et* aZ.Concurrent plant uptake of heavy metals and persistent organic pollutants from soil [J] *.Env ironme ntal Pollution,2003,124:315-37 S.*
7. 周启星，宋玉芳，孙铁新生物修复研究与应用进展[J].自然科学进展,2004,14(7):721〜728JZHOU Qi-xing,SONG Yu-fang, SUN Tie-heng.Bioremediation:a review of applications and problems to be resolved.Progres^ *in Natural Science,2004,14* (11): 937-944.]
8. WEI Shu-he,ZHOU Qi-xing,WANG Xin,e£ oZ.Potential of weed species applied to remediation of soils contaminated with

heavy *Journal of Environmental* Sciences,2004,16(5):868〜873.

1. 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].生态学杂志，2004,23(1):65〜72JWEI Shu-he, ZHOU Qi-xing.Disscussion on basic principles and strengthening measures for phytoremediation of soils contaminated by heavy metals[J].*Chinese Journal of* EcoZogy,2004,23(1):65〜72.]
2. Brooks R R,Lee J,Reeves R D.Detection of nickliferous rocks by analysis of herbarium species of indicator plants [J]. *Jour­nal of Geochemical Exploration,* 1977, 7:49〜77.
3. Baker A J M,Brooks R R.Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements一A review of their distribution, ecology and phytochemistry[J].Biorecot?ery,1989,(1):811-826.
4. 魏树和，周启星，王新，等.杂草中具重金属超积累特征植物的筛选[J].自然科学进展.2003,13(12):1259〜1265JWEI Shu- he,ZHOU Qi-xing,WANG Xin,e力 a/.Identification of weed species with hyperaccumulative characteristics of heavy metals. *Progress in Natural* Science,2003,13( 12): 1259〜1265.]
5. 魏树和，周启星，王新.18种杂草对重金属的超积累特性研究[J].应用基础与工程科学学报,2003,11 (2)： 152〜160. [WEI Shu-he,ZHOU Qi-xing,WANG Xin.Characteristics of 18 species of weed hyperaccumulating heavy metals in contaminated *soils.Journal of Basic Science and Engineering,2003* > 11(2)： 152-160.]
6. 杨肖娥，龙新宪,倪吾钟，等.东南景天(SedMi *alfredii* H): —种新的锌超积累植物[J].科学通报,2002,47(13):1003〜1006.

[YANG Xiao-e,L0NG Xin-xian,NI Wu-zhong,e£ *al.Sedum, alfredii* H:A new Zn hyperaccumulating plant first found in

China. *Chinese Science Bulletin,2002,41* (19): 1634-1637.]

1. 陈同斌，韦朝阳,黄泽春，等.神超富集植物岷蚣草及其对碑的富集特征[J].科学通报,2002,47(3):207〜210JCHEN Tong­bin,WEI Chao-yang,HUANG Ze-chun,a/.Arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata L.Chinese Science Bulletin,2002,41* (11):902〜905.]
2. 刘威凍文圣,蓝崇饪.宝山堇菜*(Viola bavshanensis)*——一种新的镉超富集植物[J].科学通报,2003,48(19): 2046〜2049. [LIU Wei,SHU Wen-sheng,LAN Chong-yu.VioZa *baoshanensis* a plant that hyperaccumulates *cadmium.Chinese Science*

应加,2003,49(1):29〜33.]

1. Brooks R R,Chambers M F,Nicks L J,就 *al.Phytominin^J].Trends in Plant* Science,1998,3(9):359〜362.
2. Karenlampi S,Schat H,Vangronsveld J,e力 aZ.Genetic engineering in the improvement of plants for phytoremediation of me­tal polluted soils[J].Emi;*ironmental* Po〃加ozi,2000,107:225〜231.
3. 孔令韶.植物对重金属元素的吸收积累及忍耐、变异[J].环境科学,1982,(1):65〜69JKONG Ling-shao.Accumulation,en­durance and variation of plant to heavy *metals.Environmetai Science,* 1982, (1): 65〜69.]
4. Seregin I V,Kozhevnikova A D,Kazyumina E M,e£ a/.Nickel toxicity and distribution in Maize *roots\J].Russian Journal of Plant Physiology,2Q03*;50(5):711-717.
5. Baker A J M. Accumulators and excluders-strategies in the response of plants to heavy metals [J] *Journal of Plant Nutrient,* 1981,(3):643〜654.
6. Ma L Q,Kenneth M K,Tu *C,et al.k* fern that hyperaccumulates arsenic [J] *.Nature* ,2001,409(6820) :579.
7. Zhao F J,Lombi E,McGrath S P.Assessing the potential for zinc and cadmium phytoremediation with the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*[J]*.Plant and* So认2003,249:37〜43.
8. 肖文一，陈铁保.农田杂草及防除[M].北京:农业出版社,1982.[XIAO Wen-yi,CHEN Tie-bao.Farmland Weed and Its Pre­vention and Elimination.Beijing: Agricultural Press, 1982.]
9. 郭水良，李扬汉.杂草的基本特点及其在丰富栽培地生物多样性中的作用[J].自然资源,1996,(3):48〜53.[GUO Shui- liang,LI Yang-han.The basic characteristics of weeds and their important role in enriching biodiversity in cultivated environments*Resources,1996,^* ):48〜53.]
10. 陈欣,唐建军，赵惠明,等侬业生态系统中杂草资源的可持续利用[J].自然资源学报,2003,18⑶:340〜346JCHEN Xin, TANG Jian-jun,ZHAO Hui-ming,e^ a/.Sustainable utilization of weed diversity resources in agroecosystem.Joitma/ *of Natural* Resources,2003.18(3):340〜346.]
11. 魏树和，周启星，王新，等.农田杂草的重金属超积累特性研究[J].中国环境科学,2004,24(1): 105〜109.[WEI Shu-he, ZHOU Qi-xing,WANG Xin,就 a/.Studies on the characteristics of heavy metal hyperaccumulation of weeds in farmland. *China Environmental Scienee*,2004,24(1): 105~ 109.]
12. Baker H G.The evolution of weedsfj] *nnucd of Review of Ecological* Sys力em,1974,(5):1 〜24.
13. 杨文饪.农学概论[M].北京：中国农业出版社,2002. [YANG Wen-yu.An Introduction to Agronomy.Beijing:China Agri­cultural Press,2002.]
14. Baker A J M,Protor J,Van Balgooy M M J.Hyperaccumulation of nickel by the flora of ultramafics of Palawan,Republic of Philippines [A].Baker A J M,Proctoy I,Reeves R D.Proceedings of the First International Conference on Serpentine EcoZogy.Andover[C].UK:Intercept Ltd., 1996,291~303.
15. Dahmani-Muller H,Oort F V,Balabane M.Metal extraction by Arabidopsis halleri grown on an unpolluted soil amended with various metal-bearing solids:a pot experimentfJ].Em?;*ironmental Pollution,2001,114:17SA.*
16. Long X X,Yang X E,Ye Z Q,e£ aZ.Differences of uptake and accumulation of zinc in four species of Sedum *[]].Acta Bota- nica* S诚ca,2002,44(2):152〜157.
17. Schwartz C,Echevarria G,Morel J L.Phytoextraction of cadmium with *Thlaspi caerulescens[J].Plant and* So认2003,249:27〜35.
18. Visoottiviseth P,Francesconi K,Sridokchan W.The potential of Thai indigenous plant species for the phytoremediation of arsenic contaminated land[J]*.Environmental Pollution,2Q02* >118: 453〜461.
19. Koch M,Mummenhoff K,Hurka H.Systematics and evolutionary history of heavy metal tolerant *Thlaspi caerulescens* in

Western *Europe\J].Biochemical Systematics and* Ecology,199&26:823〜838.

1. 魏树和，周启星，王新，等.某铅锌矿坑口周围具有重金属超积累特征植物的研究[J].环境污染治理技术与设备, 2004,5(3):33-39.[WEI Shu-he,ZHOU Qi-xing,WANG Xin,e£ a/.Hyperaccumulative characteristics of some weeds dist-ribu- ted a round Pb-Zn mining *sites .Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control,2004,5(3):33* 〜39.]
2. Wenzel W W,Bunkowski M,Puschenrerter *M,et* aZ.Rhizosphere characteristics of indigenously growing nickel hyperaccu­mulator and excluder plants on serpentine soil[J]*.Environmental Pollution,2003*,123:131-138.
3. Poschenrieder C,Bech J,Llugany M,e£ aZ.Copper in plant species in a copper gradient in Catalonia (North East Spain) and their potential for phytoremediationfj]*.Plant and* So认2001,230:247〜56.
4. Brewin L E,Mehra A,Lynch PT,e£ oZ.Mechanisms of copper tolerance by Armeria maritima in Dolfrwynog Bog,North Wales— Initial studiesfJ]*.Environmental Geochemistry and* Z/eo/力y,2003,25:147〜56.
5. 何振立，周启星,谢正苗.污染及有益元素的土壤化学平衡[M].北京冲国环境科学岀版社,1998.[HE Zhen-li,ZHOU Qi- xing,XIE Zheng-miao.Soil-chemical Balances of Pollution and Beneficial Elements.Beijing:China Environmental Science Press,1998.]
6. 陈涛，吴燕玉,孔庆新，等.含镉工业废水对农田污染的防治和土地利用——生态农业工程初探[A].高拯民.土壤一植物 系统污染生态研究[C].北京：中国科学技术出版社,1986.[CHEN Tao,WU Yan-yu,KONG Qing-xin,^ aZ.Control and utilization of the farmland polluted by Cd-containing urban industrial waste water.In:GAO Zheng-min.Studies on Pollution Ecology of Soil-Plant Systems.Beijing:Chines Science and Technology Press,1986.]
7. 李扬汉.植物学[M].上海：上海科学技术出版社,1988.[LI Yang-han.Plant.Shanghai:Shanghai Science and Technology Press,1988.]

Utilization of Weed Resource in the Remediation of Soils  
Contaminated by Heavy Metals

WEI Shu-he, ZHOU Qi-xing, LIU Rui

(Key Laboratory of Terrestrial Ecological Process, Institute of Applied Ecology, CAS, Shenyang 110016, China)

**Abstract：** Phytoremediation of soils contaminated by heavy metals refers to the utilization of some special plants to clean polluted environment through extraction,volatilization,translocation and stabilization.The two main methods are phytoextraction and phytostabilization,i.e.,to remove heavy metals using hyperaccumulators from contaminated soils or stabilize them by excluder plants in situ.At present,phytoremdiation technologies are not successfully used in large-scale remediative practice.The results partly lie in many disadvantages of the documented hyperaccumulators, such as small aboveground biomass,slow growth and long maturity phase.As for excluder plants, there are few materials published.With the properties of strong endurance to adverse environment,fast growing and high reproduction,especially the characteristics of the fast increase in biomass under feasible environmental factors,weed can make good the defect or cover the shortage of the available remediation plants,so it is a kind of ideal remediative resource. Based on our researches into phytoremediation,applications and screening methods of remediative weed plants were introduced,moreover,the dispose of remediative plant biomass was also discussed.lt was suggested that the comprehensive utilization of weed plant resource would make a great progress in the remediation of soils contaminated by heavy metals.

**Key words：** phytoremediation; weed resource; heavy metal; contaminated soil