花卉植物应用于污染土壤修复的可行性研究

刘家女12周启星""孙 挺’王晓飞4

(1东北大学理学院，沈阳110011； 2中国科学院沈阳应用生态研究所中国科学院陆地生态过程重点实验室，沈阳11001$ 3 南开大学环境科学与工程学院，天津300071； 4中国科学院生态环境研究中心，北京100085)

摘 要 植物修复是解决污染土壤问题的有效途径之一,而已报道的超积累植物的种类非常 有限•如果能从物种繁多的花卉植物中筛选出修复植物，不但能够弥补这一不足，而且还能在 美化环境的同时,产生一定的经济效益•从植物修复的重要性和修复植物的筛选出发,概括了 修复植物的判断标准及基本特征•通过描述花卉植物资源及其在环境保护中的作用，列举花 卉植物与其它植物相比的优势,分析花卉植物的耐性、积累性和修复类型，探讨花卉植物应用 于污染土壤修复实践的可行性•从花卉中筛选超积累植物，将为污染土壤的修复工作提供的 生物材料.

关键词花卉植物污染土壤植物修复超积累

文章编号 1001—9332(2007)07-1617\_07中图分类号 X171. 4文献标识码 A

Feasibility of app ]y pg ornam entaj Plants jn con tarn jnated soil ran ediatjon LU 2

ZHOUQIxjig] gQNT隅 WANGXixt挡(i Col屁eofScimc卑 NonheastemUnivers谭 Sh巳 nyangiiooii, Chm 2 Key ofTerrestria 1Eco]ogica 1 process Jistimte ofAPPlied Ecolo­

gy ChheseAcadmy of Sciences Shmyangl 10016 Chha 3 Collie of Envirornimtal Science and Engpeerp^ Nankai University Ti^nj讥300071, Chm 4 Research C^ter EcQ-Enviiorniental Screes Chinese Acadmy of Sci^ices Beijing 100085 Ch讥Q). -Ch讣 J APP1 E®, 2007 **18** (7)： 1617-1623.

Abstracj： Phy term ediatjon is one of ef^ctjveways 讥 resojvpg pm]□旳 s of contsm pa ted soi]s but United hyPeraccimuktion Plant species were reported and documented This shortage couJd be of^et if rmejiatjon Plants can be screened out frem various omamen^l Plants ]n addition such do 讥g can beauty enviromi ent while br 讥 g seme econcm ic ef^cts frem !he inportance

of Phy term ej iatjon bis paper generalized characters and standards of rmejiatjon Plants 7^lough describing 1he resources of Omanentai Plants and 旺ejr fjnetjons on envirormental piotec\_ tjon particujarizpg ^eir superiorities to o^er pjante and ana]yzpg ^eir endurance acctmulatjon tiaits and remediation iypes ihe ^asjbili^ of appjypg ornamental Plants 讥 1he practices of contsm\_ pated soil ran ediatjon was discussed T° screen pg out hyPeiaccunu tors flxm ornamental Plants wou]d be an entirely *ne^* research area 讥 ihe ran ediatjon of con tan pated soils

Key words Omanen^ 1 pJant contanpated soil Phy©怕nediatjo[[1]](#footnote-2) [[2]](#footnote-3) hyPemccimuIatjon

**1**引 言

土壤既是最为重要的环境要素,又是农业生产 和城市建设的基础随着工农业生产的发展，土 壤污染问题日益突出•由于有限的土壤资源不断受 到污染的损害，土壤环境保护以及污染土壤的修复、 治理已引起有关方面的重视，污染土壤修复的研究 也成为环境科学日益活跃的领域[6 U 43].经过近年 来的不断探索，污染土壤的修复技术得到了较快的 发展，如物理修复、化学修复和生物修复等.这些修 复手段对污染土壤的治理具有非常重要的实践意 义，但其各自又有一定的局限，例如耗资大，治理过 程中可能会导致次生污染，引起土壤基本理化性质 和相关生态过程的改变，处理效率低等飞16取40].相 比较而言，植物修复由于能够克服这些缺点，尤其是 能够广泛利用绿色植物的新陈代谢活动来固定、降 解、提取和挥发污染环境中的污染物质，就像一座 “绿色清洁工厂”一样将污染物质加工成可直接去 除的物质形态，或转化为毒性小甚至无毒的物 质[17-1S 25-26 28].植物修复尤其是超积累植物的筛选 和在污染土壤修复中的实际应用已越来越成为热点 研究内容，但其中尚未见关于花卉植物在这方面应 用的系统报道.如果能从物种繁多的花卉资源中筛 选出对污染土壤修复有重要意义和作用的超积累花 卉植物，则将为植物修复开辟一条新的途径.

**2**修复植物的判断标准与筛选

植物修复是近20年来发展起来的一项新兴的 环境污染治理技术，它可应用于环境污染治理的很 多方面，既可以净化空气和水体，又可以清除土壤中 的污染物[Un20].植物修复的主要驱动力为太阳能， 处理成本低，不破坏场地，对周围环境的扰动小，不 易引起次生污染等•植物修复对污染土壤治理有着 非常重要的意义.因此，筛选具备此种能力的植物就 显得尤为重要，这就要求植物要符合一定的标准，才 能达到修复的目的.超积累植物的判断标准可分为 耐性特征和积累特征两大评定指标[2\_a 7 35] •其中， 耐性特征要求植物能够在污染物浓度较高的土壤上 正常生长，完成其生命周期，无明显的受毒害症状， 并且污染处理的植物地上部生物量与对照植物的地 上部生物量相比没有明显的下降（M少当植物的地 上部重金属含量达到该种重金属超积累植物所应达 到的临界含量时,地上部生物量没有明显下降2这 才说明该种植物对此重金属污染土壤具有一定的耐 性•积累特征可具体分为以下几方面：1）植物地上 部重金属含量能够达到普通同一植物在同一生长条 件下的100倍，临界含量值分别为Zn Mnioooo mg 。Cd 100 mg。A" mgo 离Pb Cu N、i Co A韵为1 000 mg。2）植物必须有能力 将重金属从根系转移到茎叶，一般植物体内重金属 含量常表现为根大于地上部，而超积累植物则与此 相反,表现为地上部含量大于根部含量；3）植物地 上部富集系数〉1,即植物地上部重金属含量大于其 土壤重金属含量;其中对于2）和3）至少当植物地 上部重金属含量达到临界值时的污染处理及小于此 污染浓度的处理时应满足这两个条件.理想的超积 累植物还应具有根系长、生长快、生物量大、抗病虫 能力强，能同时富集两种或两种以上重金属的特点.

国内外在植物修复方面已有许多报道.从目前 已报道的修复植物来看，大部分采取野外采样法，即 到重金属污染较为严重的矿区及周围地区采集仍能 正常生长的植物耐性较强的植物〉并分析其各部 位的重金属含量，它们涉及藻类植物、蕨类植物、裸 子植物和被子植物，既有草本植物，也有木本植 物14 27 已发现的超积累植物有400多种,但大多 数是篠超积累植物，此外有匕捡辱⑼、E咖零凶 发现的天蓝遏蓝菜（Thlasi c^emlescms）^ Z耶口 Cd 超积累植物，以及M睜⑷发现的超积累植物蟆蚣 草（Pterisvittata帶.我国在植物修复技术方面也取 得了一些进展，如杨肖娥等閑研究发现的东南景天 （S^g 训氓lii）为Z嘔积累植物;魏树和等a发 现了龙葵（Sokmm nignni）为镉超积累植物等.但 迄今为止，已报道超积累植物的种类仍然非常有限， 没有关于金属超积累花卉植物的相关报道，有必要 寻找更多种类、更为有效的超积累植物来实施污染 土壤的植物修复.随着人们生活水平的提高及生活 质量的改善，环境问题也越来越被大家所关注•如果 花卉植物能够在美化环境的同时与治理、修复污染 环境联系起来，将是很有意义也是很值得研究的.

花卉植物物种繁多，盲目地以所有花卉为研究 对象一一筛选是不科学的.因此，应首先根据各种花 卉的特点及其本身生长习性，从中选取最有可能成 为修复植物的花卉物种进行研究，之后再进一步确 认•例如，可从生长情况不易受环境变化影响或影响 较小的物种着手，或到受污染较严重的地区采集仍 能够正常生长的物种进行实验.花卉植物的根、茎、 叶在一定程度上可用来判断该植物是否具备作为筛 选对象•根在植物修复中的作用至关重要.根系吸收 表面积的大小、纵深分布情况、系分泌能力及特性等 涉及对污染物质的吸收、降解及根际圈微生物区系 的繁殖生长，因而根系表面积、根系分布方式及根分 泌特性等根部性状是重要的选择标准;茎主要起到 水分和物质运输的作用，同时是多数植物保持整株 直立的关键器官，因而发达的茎组织和抗倒能力是 必不可少的；叶是重要的挥发和排泄器官，同时较大 的叶面积及较长的光合作用时间也利于植物的蒸腾 作用和生物量的增加，所以叶面积指数和功能叶片 寿命长短也是重要的选择依据[43].对于提取植物来 说，生物量越大，越能提高修复效果，而生物量通常 与株高成正比，所以株高也是重要的选择依据•此 外,生育期、抗倒性、抗虫性、休眠期等也可作为选择 依据的考虑因素，因为短的生育期、弱的休眠性有利 于花卉植物的繁殖生长，可加快修复步伐，强的抗 病、虫能力有利于修复功效的提高•由于多数花卉植

物不会生长在其它超积累植物被发现时的生长环境 中，即矿山区或富含某种或某些化学元素的岩石风 化而成的土壤上，但为了使筛选出的修复植物更具 有实际应用价值，也应尽可能地人为模拟与特定污 染土壤条件相一致的环境条件•模拟筛选条件的土 壤盆栽试验是一种筛选修复植物的有效方法.盆栽 筛选时，在适当时机收获花卉植物，测量其各部分如 根、茎、叶、籽实中的重金属含量,便可进行确认，方 法简便，易于操作•另外，水培花卉植物的方法、根分 泌物及根系微生物体系鉴定法、细胞或组织培养 法、种子发芽试验法等也可应用于研究花卉植物的 积累性⑷.

**3**花卉植物资源及其在污染土壤修复中的应用潜力

**3.1**花卉植物资源及其在环境保护中的应用

花卉的概念包括狭义和广义两个方面.狭义概 念：“花”是植物的繁殖器官「卉”是草本植物的总 称，狭义的花卉，仅指草本的观花植物和观叶植物， 但随着人类生产水平和科学技术的不断进步以及艺 术的相互交流与渗透，花卉的范围也在不断扩大.因 此，广义的花卉，是指凡具有一定观赏价值，并经过 一定技艺进行栽培管理和养护的植物，有观花的、观 叶的、观芽的、观茎的、观果的和观根的，也有欣赏其 姿态或闻其香的；从低等到高等植物，从水生到陆 生;有草本也有木本,有灌木、乔木和藤木，应有尽 有，种类繁多•中国不仅是世界上拥有花卉种类最多 的国度之一,亦为世界花卉栽培的发源地，有“世界 园林之母”的美誉，尤其经过不断引种、驯化，又培 育出了许多新品种.近年来，随着人民生活水平的提 高，人们对花卉植物有了更多的需求，也使我国的花 卉产业具有了新的、更强的、旺盛的生命力.

研究表明，不同的花卉，可以消除或监测不同的 大气污染物0】.由表1可见,花卉植物在大气污染 防治与监测方面有许多实际应用.尤其是，花卉植物 通过光合作用，吸收人口密集区空气中的二氧化碳， 放出大量氧气，从而使空气保持新鲜;花卉还可释放 一种被人称为空气“维生素”的负离子，可以增加空 气的新鲜感•负离子可以与空气中的病毒、病菌以及 各种阳离子结合昇吏它们失去活性，达到清洁空气的 作用，如木槿(Hibiscus syriaCUS)、女贞(Ligustnni K cidim)、玉兰(Magnolia d^udate)等都是理想的防 尘花卉，所以有人称花卉为活的“空气净化器”.一 些具有香味的花卉，其鲜花都含有抗菌成分,可以消 除空气中的细菌、病毒•咼大的花卉具有很强的隔音

表**1**花卉植物种及可消除或监测的大气污染物

Tab **1** Ornamental species anj the elfn JnateJ or monj, torej atnosPheric contam Jnants

|  |  |
| --- | --- |
| 花卉植物  0mamen切 species | 大气污染物  AtnosPheric contam jiant |
| 吊兰 ChloroPhYtm ocmosim 芦荟 Aloe $>onaria | 甲醛 FomaJdehyde |
| 菊花 DmdmntiEiamoriQliim | 苯 Eenzene |
| 梔子花 Gaidenia >snjioides石榴 punica granaun | 二氧化硫 Sul^ir dMe |
| 月季 Rosa chinensis | 硫化氢 Hydrogen sujphide 苯 Benzene 苯酚 Phenol 氟化氢 Hydrogen fluoride 乙瞇 Ae^ier 氯气 Chlorjie |
| 金盏菊 Calendula officjialis | 氧化物 Cyanide 硫化氢 Hydiogen su]. Ph ide |
| 石竹 Diantius chjiensis | 二氧化硫SulMr dQx逛氯气Chlorjie |
| 木槿 Hibiscus 涉riacus | 二氧化硫Sul^irdMe氯气ChWe 氟化氢Hydrogen fluoride氧化锌Zffic oxide |
| 山茶花 Camellia >Pcmica | 二氧化硫Sul^ir dMe氯化氢Hydu gen chloride 辂酸 Ch«mic acjd 硝酸 烟雾 Snog of nitric acid |
| 桂花 0snamtius fragrans | 化学烟雾Chmical sn厚氯化氢HX dWn chloride 硫化氢 Hydrogen suj. Phidf 酚 Phenol |
| 梅花 pmnusmime | 二氧化硫Sul^ir dMe氟化氢Hyd«i gen fluoride 硫化氢 Hydrogen sujphide 乙烯 EVlene 苯 Benzene |
| 桃花 prunus persica | 硫化物SulPhidf氯化物Chloride |

效果,枝叶表面的气孔和绒毛可削弱声波的强度，并 有吸收声波的作用，可有效减轻噪音污染•此外，水 生花卉如凤眼莲(Eichhomid crassipes)、金鱼藻( atoPhylKni d^nerstm)、浮萍(EichhcmiQ crassjpes)等 可吸收五毒 氯、酚、汞、碑和縮);水面种植凤眼莲， 还可抑制水中藻类的生长，使水澄清,并提高景观价 值•凤眼莲具有净化水体的功能，特别在富营养化的 水体中表现出良好的净化作用.李周玉等3研究表 明，养殖了一段时期的凤眼莲可使水体中总氮、总 磷、氯化物去除相当一部分，BOD^n COD值也在很 大程度上下降，水中溶解氧增加.凤眼莲对金属离子 的富集作用也很显著，例如在铜离子浓度为0.5 mg °匸|的养殖水体中，培养10射凤眼莲其根状茎 与根的富集数为796叶的富集系数为217可见凤 眼莲根状茎与根的富集能力远高于其叶的富集能 力.凤眼莲对其它金属离子的富集作用亦相当显著. 凤眼莲在1.0 mgo匸1离子浓度的养殖液中养殖10 诟，根与根状茎的富集系数分别为ZP3、0269、 Ni46、AS7&叶的富集系数分别为ZM4、0108、Ni 12、AS35.

**3.2**花卉植物在污染土壤修复中的应用潜力

**3. 2. 1**花卉植物的优势以花卉植物为筛选超积累 植物对象是有根据可言的•花卉类植物除具备一般 植物的特点外，还有以下优势：1）花卉资源相当丰 富、潜力巨大,这就使筛选工作有了坚实的基础；2） 进行土壤修复的同时，能够美化环境，一举两得；3 ） 花卉属观赏性植物，不会进入食物链,可减少对人体 的危害；4）花卉对人类健康也有着一定的作用，如 花卉芳香油可抗菌，提高人体免疫力,可作为保健食 品或用于治疗疾病；5）人类在长期的生产实践中积 累了丰富的品种选育、花卉栽培以及病虫害防治等 经验•由此可见,从花卉中筛选修复植物是完全可行 的.

**3. 2. 2**花卉植物的耐性及积累性 从花卉植物在环 境保护中的应用（如部分花卉对大气及水体污染物 的适应及吸收）可以看出，许多花卉植物对污染物 有相当的耐性，这就为花卉植物应用于污染土壤修 复的可能性提供了依据.花卉植物还作为一种广泛 的植物类群，抗逆环境能力较强、生长迅速、具有较 强的生命力，吸收能力也强,能充分吸收光、水分、月巴 料等，这些特性有利于花卉植物生物量的生长及其 对重金属的耐性⑻和积累性.He吒nde^APaolaza 等3研究了松树皮、椰子根和污水污泥对花卉植物 的影响，其中松树皮或椰子根与30%的污水污泥组 合表现出最好的效果，促进花卉植物的生长.王晓飞 等㈤通过盆栽实验发现，在14种参试花卉中，有黄 蜀葵（AbemoschusmBniho疇6种植物对C岐现出 较强的耐性，约占参试花卉种的43%,说明花卉植 物有一定的耐重金属的潜力；5种花卉表现出了较 强的重金属积累能力，并且紫茉莉（Mi^bilis >lapa） 和蜀葵（AlihHx 口冋）地上部的重金属含量大于根 部含量，表现出较强的金属转运能力,而这正是重金 属超积累植物应具备的特征•在有机无机复合污染 情况下也有部分花卉表现出了较强的耐性和积累 性•这些实验结果为花卉植物应用于污染土壤修复， 尤其是为筛选超积累花卉植物提供了良好的开端. 我们对耐性和积累性较强的4种花卉植物紫茉莉 （Mi^bilis jalapa^凤仙（Inpatims Balsam金盏 菊（0皿山13 offic讥31is）和 蜀葵（AWi^ea rosea）的研 究表明，它们对重金属Cd PW一污染及CUP塡 合污染表现出了很强的耐性和积累性限役尤其是在

C砾口 P1#—污染土壤浓度达到100和1 000 mg。 殳旷的情况下这4种花卉植物仍能正常生长，没有 表现出明显的受毒害症状，并且当土壤中Cd?亏染 浓度达到100 mg。殳即时地上部重金属含量也都 超过C媪积累植物的临界标准值100 mg。k「. 由此可见，这几种花卉植物应用于重金属污染土壤 修复是很有潜力的.

研究花卉植物应用于污染土壤的潜力不能单一 从花卉植物对重金属的耐性或积累性方面考虑，而 应该综合2个因素后进一步确认.研究表明,有的花 卉植物对土壤中重金属的耐性较强，而且积累性也 较强，但地上部重金属积累量没有达到超积累植物 应达到的临界标准，原因可能是实验中向土壤中投 加的重金属浓度本身就较低，因此可以通过加大土 壤中重金属的浓度来进一步确认它们是不是超积累 花卉植物;而有些花卉植物虽然耐性较强，但积累性 较差，并不能完全代表它不具备超积累的能力，可以 通过进一步的实验来研究、确认，即通过其它辅助手 段（如特定的强化措施等）来提高它的积累能 力l呻㈤研究表明，ED1AIE够促进土壤中 P啲移动性,从而促进植物Bmssi^ 氏叹寸P啲 吸收.某些花卉植物长到一定高度时对其进行摘心, 这样可在一定程度上提高地上部重金属含量•花卉 植物的重金属绝对积累量（即一株植物积累重金属 元素的总量）也是一个重要的指标.对生物量较高 的植物而言，即使植物体内重金属含量没有达到临 界含量标准，但因植物生物量远远大于超积累植物 的生物量，此时其所积累的绝对量反而比超积累植 物积累的绝对量大，对土壤重金属的提取作用更大. 有些花卉植物虽然具有较强的积累性，但其耐性较 差（如生物量较小等乂这点可以通过改善其耐性的 办法来解决，即尽量提高花卉植物的生物量.与现代 农业高新技术相结合是花卉植物大规模地应用于污 染土壤修复的一条捷径•植物修复归根到底是利用 具有修复性能的植物的生命活动，对污染土壤进行 修复的一项新技术，因此，在找到具有较强积累能力 的花卉植物之后，就需要对植物的生长发育规律及 生育调控措施进行研究，从而不断提高植物修复的 效率•人类在漫长的改造自然过程中，已积累了丰富 的育种与栽培经验，这些农业生产原理与技术对植 物修复来说无疑是至关重要的•魏树和等在研究和 发现超积累植物龙葵的过程中，施加鸡粪后使植物 对Cd的提取率提高35. 7% ~97. 0%；采用开花期 收获超积累植物的复种方式，可以使植物对Cdfi勺 提取率提高1.43 ~1.75倍a.如果再将现有的农 业高新技术加以充分利用，植物修复技术将得到较 大的进展.

**3.2.3**花卉植物与土壤的关系 土壤是花卉生长的 基础.只有土壤,才能源源不断地提供花卉生长发育 所需要的空气、水分和营养元素，所以土壤的理化性

质与肥力状况对花卉的生长具有重要意义•土壤性 状主要由土壤矿物质、有机质、温度、水分、微生物、 酸碱度等因素所决定•衡量一种土壤的好坏,必须分 析上述各因素的状况，它们对花卉根系、球根及地上 部的生长发育起重要作用.例如，同其它重金属污染 物一样，水溶性C堆土壤环境中的行为受土壤ffl 值和氧化还原电位等因素的制约.在不同的 旧值 和氧化还原电位条件下，Cda勺溶解度不同.一般水 溶性Cc|勺溶解度随土壤悬浮液中的氧化还原电位 的增大而增加，并且随 旧值的降低而相应地增加. 土壤中水溶性PE农度同样也受到土壤氧化还原电 位和旧值的制约,水溶性PE农度随氧化还原电位 和 田值的增大而逐渐减少•造成这种现象的原因 是多方面的，但是以Pb(OH)2和PbCQ形态出现 的卩肮淀,可能是支配土壤溶液P®农度的一个重 要因素.土壤的氧化还原电位不仅影响水溶性Pb 浓度，而且还影响植物对P啲吸收能力.有研究表 明，水稻吸收量随氧化还原电位的增加而相 应地减少；旧值由8降低到5时，水稻幼苗P啾累 相应地逐渐增加.由此可见，酸性土壤条件更有利于 P晌水稻幼苗迁移.

综上所述，如果能采取有效的农业技术措施，合 理地调整土壤环境的各种参数，可影响重金属在土 壤环境中的行为，从而减少或增加花卉植物对重金 属的吸收和积累.

**3. 2. 4**花卉植物的修复类型 部分花卉在污染土壤 的降解修复、稳定修复、提取修复方面具有极强的潜 力，因此可利用这些花卉特殊的积累与固定能力，去 除土壤中某些重金属或者有机污染物.在Cc^P喋 油复合污染处理下，7种花卉植物——翠菊(OL listePhus ch讥ensis )、蜀葵(Alfcaea rosea)、黄蜀葵 (Abefnoschus manjhot)^ 红觅菜 (Anaran^us tricoL 金盏菊(Olmduk officpalis)^ 百日草(Zinnia e^ans)^鸡冠花(Ce]osia cristata)的地上部生物量 与没有污染物的情况相比没有明显的下降.这7种 花卉植物对3种污染物不仅具有一定的耐性，而且 在柴油这种有机污染物存在的情况下仍能正常生 长，并完成生命周期，可见其降解土壤有机物污染物 的能力，因此可以利用这些花卉植物的转化和降解 作用，去除土壤中的有机污染物⑼⑰.

紫茉莉(Mimbilis戶囱①和蜀葵(Althea rosea) 两种花卉植物在单一重金属C圳染土壤上生长， 不但生物量与对照相比没有减少，而且表现出极强 的耐性，尤其是地上部cat量大于根部含量，表现 出极强的转运能力，因此具有修复cw亏染土壤的 潜力•一般情况下，金属离子被根吸收后，需要柠檬 酸、氨基酸等有机酸作为选择体，才能进入根内部， 此后重金属只有转入共质体途径，才能进入木质部 导管,而普通植物中重金属在这一步受到了限制，使 其不能向地上部继续运输•超积累植物中可能存在 一些特殊的运输体，把在液泡的区室化作用下解毒 的重金属装载到木质部导管，以利于继续向地上部 运输㈤•重金属向花瓣、茎叶籽实等部位的运输与 水分代谢、营养代谢及气孔分布也有关系，而花卉植 物能有效地进行光合作用，充分吸收水分及养分，这 就为重金属的吸收、转移甚至超量积累提供了可能 性.

我们的研究还表明⑺1,凤仙(mPQtioisbQ辰nH nd)和金盏菊(OEluk皿忆丽响两种花卉植物在 重金属C砾口 P塡合污染水溶液中生长，生物量与 对照相比没有明显减少，表现出极强的耐性，并且它 们对重金属的积累能力很强，尤其是金盏菊，C壕 高处理浓度时的根部和地上部Cd含量分别可达 1 62审950 mg。厲：如果溶液中投加的Cd浓度 继续增加，它有积累更多Cdfi勺可能性.因此，可利 用它们对重金属Cdfi勺较强积累能力，将重金属吸 收至体内，避免重金属向环境中扩散，直至收获植株 时将重金属回收，达到稳定修复的目的.

4研究展望

我国对超积累植物的研究起步较晚，筛选工作 做得不多，大量的超积累植物还有待发现，尤其是以 花卉为筛选对象将成为一个突破口 .总的来说，用花 卉植物修复污染土壤的潜力巨大.与其它手段相结 合的超积累花卉植物在污染土壤修复中的大面积应 用，不仅可美化环境，而且可带来巨大的经济效益. 今后可从以下几个方面进行深入研究：

1弃专基因技术在土壤重金属植物修复上的应 用是一个很有意义的课题，例如警㈤将 酵母金属硫蛋白基因的结构因子CM导入具有较 大生物量的植物向日葵中，转基因的向日葵因此对 土壤中的CdM有了较强的耐性，同时具备了较大 的生物量和较强的重金属耐性，即具备了植物修复 的潜力.现代分子生物学的快速发展使利用转基因 技术成为可能•利用转基因技术可培养出具有超量 蓄积重金属的花卉植物，或利用转基因技术可将超 积累植物的基因转到花卉植物中，这样就使花卉植 物在具有较强耐性的同时也具有强积累性.

2用」用现代生物技术，提高花卉的生物量，从 而提高其重金属吸收量•在找到具有修复性能的植 物仗口超积累花卉植物)之后，就需要通过与现代农 业高新技术相结合来提高花卉植物的生物量.

*3*吐壤中的污染物很多，可添加螯合剂或表面 活性剂，促进花卉对土壤的修复.例如，陈亚华等问 研究了 EOT埒甫助下油菜对修复P®亏染土壤的潜 力;王莉玮等凹研究了表面活性剂与螯合剂对植物 吸收C圾C啲影响，以及表面活性剂强化重金属 污染土壤植物修复的可行性.

4 %其它污染土壤修复手段相结合，如化学修 复、物理修复以及工程技术手段等[L5].

参考文献

1. Arnold WA Roberts AL 199& Pafevays of chlorinated e^ylene anj chlorinated acetylene reaction wi出 Zn (0). Enviioimenta] Science and Technology **32；** 3017

—3025

1. Baker AJVI 1984. Enviroimentail^ induced cadmium tolerance ji grass Holes Janatus J Ch^nodhere **13** (4 )： 585-589
2. Baker AJ4 MoQmb Sf Sidoli CMp eta」1994 The possibility of jn sim heavy metal decontan jnation of polluted soils using crops of meta] accumulating Plants Resources Conservation and Recycling **11** (1 ). 41—49
3. Baiona A^anguiz J El as A 2001. Metal associ乩 tions in soils before and afterEDTA extractive decontan\_ ination JnPlications for 出e ef徑ctiveness of fliriher cleanup procedures Enviroimental pollution n、 79

—85

1. Blaylock MJ Salt D 耳 Dushen及 ov $ et aj 1997. Em hanced acctmulation of Pb in Mian mustard by soiLap\_ Plied chelating agents Enviioimental Science and Tech nology **31：** 860-865
2. Boulaibah^ SchwartzQ BittonQ etaj 2006. Heav. ymetal con tan jnation frcm m 讥讥 g sites jn sou 住! Momu co jj . Assesanent of metal acctmulation anj toxicity in Plan啤 Ch^io爭he竽 **63** (5 )： 811-817

[7j Brooks RH 199& Plants ^at hVPeracctmu]ate heavy metals Annals of Botany **82(2)：** 267-271

1. BK^vn SV Chaney Angle Jg et a 1 1994. Zinc and cadmium uptake by hyPeraccunulatorThla^\*i caer ulescens and metaltolerant Sil^e vu]garis grcwn on s]udge\_ an ended soils Enviroimental Science and Tech nology 29(6)： 1581-1585
2. ChenH-R鯨辉蓉》Wu乙E (吴振斌\ He F (贺 锋)， et aj 2001. The research Progress of Plant stress

resistance Techniques and EQujpnent for Enviroimenta 1 pollution Control 境污染治理技术与设备2 **2** (3)： 7-13 ( in Cheese)

1. Chen Y-H (陈亚华 \ Li X-D (李向东)，Liu H-Y 仗U红云 \ et aj 2002 The potential of Mia mustaid (grassfca juncea L) for Phytoranediation of Pb- con\_ tanffiated soils wi^ aid ofEDTA addition Journal ofNanjing Agricultural University (南京农业大学学 报乂 **25** (4)： 15-18 ( in Chinese)
2. C 阿 enteR Walker DJ B ema IM? 2005. UPtake of heavy metals and As by Bossies juncea grcwn Jn a con\_ tan Jia ted soil in Aznafe liar( SPaji)： The efj^ct of soil anendments Enviroimenta 1 pollution 138(1)： 46—58
3. Fla如an P£ Lanza GR 199& PhYtOKmediation cur rent view on an energing green technology Journal of Soil Contamination 7(5). 415—432

\ 131 French CJ Die殳讥son MJ puwin PQ 2006. Woody bicm ass PhY K>ran ej ia tion of con tan inated b^wnfieR land EnviroimentalPollution 141(3)： 387—395

1. GisbertQ RosR Haro Ap et a」2003. A Plant netically modified bat accumulates Pb is especially picmising for PhYtoranejiation Biochenica 1 anj Bid Physical Research Coiimunications 303(2)： 440—445
2. Hen^nde^APaolaza \ Gas© Gas© Jo憊 M et aj 2005. Reuse of waste materials as grew Jng media for ornamental Plants B ioresource Technology 96(1). 125 -131
3. Jia J-Y (M建业乂 Tang Y\_J (汤艳杰).2003. Con\_

tributing 粗 ctors to con tan jnation of soils and ranedy

techniques TroPica 1 Geography带地理)，23 (2 )： 115-122 ( in Chinese)

1. Ktmar PBAT>[ Sushengv y Motto 耳 et aj 1995. PhY toextrac tion use of Plants to ranove heavy meta Is firm soils Enviroimental Science anj Technology **29** (5)： 1232-1238
2. LasatMM 2002 Phy Bextrac tion of toxic me tap A 圮 view of b io logica 1 m echan ian s Journal of Enviroimental Quality 31(1). 109-120
3. Li乙Y (李周玉》RanM\_L (冉梦莲)，Wang H-B 住鸿博).2001. Waterhyacin出(Eichhomia crassjpes S 乂 a kind of purging waters aquatic flewer Journal of Biology^ 物学杂志乂 18(5)： 47 ( in Chinese)
4. LiShiyJS SlicoxQp Pershing etaj 1989< Fukl d amen tai experjnents on ^emaj Jesoiptipn of con tan j\_ nants fran soils Enviroimental piogre亭 8(])・ 127—

141

1. Lm JvJ Sa lido Butcher D J 2003. Phytoran edi\_

ation of lead using India mustard( Erassica juncea) witi EDIA and electrodics Microchenica 1 Journal 76(])： 3-9

1. Liu J\_N 6(|J家女》Zhou Q\_X 倜启星 R SunTG小 挺).2006. Gering responses and hYPeracctmulat讥g

characteristics of ^ree **Oman**entai Plants to Cd-Pb ccm\_ bined pollution Acta Scientiae Circtmstantiae 仰境科 学学报 2 26(12)： 2039-2044 (讥 Chinese)

1. MaLQ KonarKN^ Tu Q etaj 2001. A 徑m ^ath^ peraccunulates arsenic Nami^ **409** 579
2. MaY—L (马艳丽).2003. A ^nction of hone flewering Plants Jn prevention and control of pollution Journal of Changchun University (长春大学学报)，13(6).*力一*

29 (讥 Chinese)

1. Mccutcheon SQ Rocks 2001. Phytoi^nediatiOQ State of tie sc[ence conference anj o^er developments

International Journal of PhytoraneJiation 3(1)： ]—11

1. M ills J Arnold Siva^tmaran $ et a」2005. Ph龙 gran ediatjon and long： tem s ite m anagan ent of so il coil tan inated wi^i Pen tach loropheno 1( PCP) and heavy metals Journal of EnviroimentalMa-nagenent **79**(3).

232-241

1. Pendergrass A Butcher D J 2006. UPtake of lead and arsenic Jn fboj Plants gicwn Jn con tan inated soil frcm

BaiberOrchar^ NQ Microchenica 1 Journal 83(1)：

1什16

1. Robinson^ Green g Mills J eta」2003. Phytoinn^ diatio® Us&ig Plants as b ioPun ps to in prove degraded envrioiments Australian Journal of Soil Reasearcb **41** (3)： 599-561
2. Schwi谑uebe]止＞ 2001. HVPeorhoP乍 The potential of Phytoran ediation as an oneiging green technology Re\_ mediation 11(4). 63—78
3. WangLW 住莉玮 乂 Chen Y-C 怫玉成)，Dong S- Y 僅姗燕).2004. Ef^cts of sur^ctants and chelators on Cd anj Cu uptake by com and musta坦 Journal of Southwest ASriculmral Universiiy (南京农业大学学

报)，**26** (6)： 745-749 (讥 Chinese)

1. WangX-F 住晓飞).2005. Resource potential Ana 15L

sfs ofOmanenta]s APPlied in Contan inated S°il Rarie\_ diation Beijing A Dissertation in Graduate School of

Ch讥ese Acad血y of Science? 3^—52 (讥 Ch讥ese)

1. Watanabe M Shimachi Noguchi A et aJ 2005.

Jntioduction of yeastmetallo^ionein gene( QJP[)into Plant and evaluation of heavy metal tolerance of trans genic Plant at calJus stage S°il Science and Plant Nutrition 51(1). 129~133

1. WeiSH 勰树和)，ZhouQ\_X 倜启星).2004. Dis

cussjon on basic principles and streng^ening measures for Phytoran ed iation of soils con tan inated by heavy met

Chinese Journal of Ecology (生态学杂志)，**23**

(1)： 65-72 ( in Chinese)

1. Wei 田 ZhouQX Kova] py 2006. Flcwering stage

characteristics of Cd hyPeraccunulator S°lantm njgnrn

L and ^eir significance to Phytoranejiation Science of Tota 1 Enviroim ent **369 (**1—3 )： 441—446

1. WeiSH (魏树和乂 Zhou Q\_X 倜启星乂 Wang X

住 新 $ et aJ 2004. Sadies on characteristics of heavy metal hYPeraccimulatipn of weeds Jn 粗 inland China Enviroimentai Science (中 国环境科学乂 **24** (1)： 105-109 ( in Chinese)

1. WeiSH (魏树和)，Zhou Q\_X 凋启星》W ang X

旺新)，et aJ 2005. A new ^discovered Cd-hyPer acctmulator Solanim njgnm Ch讥ese Science EuHetJn

斜学通报乂 50(1)： 33-38 (讥 Chinese)

1. YangX-E ® 肖娥乂 Long X一 X (龙新宪》NiW-Z 0兒吾钟).2002 Physiological and molecular mecha\_ nians of heavy metal uptake by hYPeracctmult讥g Plants P lantNutrition and Fertilizer Science 循物营养

与肥料学报》8(1)： 8-15 ( in Chinese)

1. YangX-E (杨肖娥》Long X-X 越新宪 \ NiW-Z 0兒吾钟 \ et aJ 2002 Sedun a]fr叼iiH： A newly Zn hyPeracctmulator Chinese Science Bulletin 斜学通

报)，47(13)： 1003-1006 ( in Chinese)

1. ZhouQ\_X 倜启星).1995. Ecology ofCcmbined po^ jutjon Beijing Ch讥a Enviroimental Science press 166-170 ( in Chinese)
2. Zhou Q\_X 倜启星).2002. Technological reQiger and prospect of con tan jia ted soil ranediatiog Techniques anj Equipment for Enviioimental pollution Control 仰

境污染治理技术与设备乂 3 (8)： 36-40 (讥Chi nese)

1. Zhou Q\_X 倜启星).2005. Hea血 Soil Science Soil Healih Qualiiy and Qualiiy of Agricu也ira] products Beijffig Science presp 66—79 (讥 Cheese)
2. Zhou Q\_X 倜启星乂 Cheng Y 程 *云、*Zhang Q\_R g长倩茹 \ et aJ 2003. Quantitative analyses of rela\_ tionshiP beween ecoioxicological ef^cts and canbined pollution Science in China Series C (中国科学 C

辑)，33(6)： 566-572 ( in Chinese)

1. Zhou Q-X 倜启星)，Song Y\_F 味玉芳).2004. principles and MetiOds of Con tarn inated Soil Renedia\_ tion Beijpg Science presp 22—24 (讥 Cheese)

作者简介 刘家女，女，1981年生，博士研究生.主要从事污 染环境修复与环境化学研究.E>mail jianv2005@163. can

责任编辑梁仁禄

1. \*国家重点基础研究发展规划项目(2004CBR8503 )、国家自然科学 基金重点项目(20337010)和中俄自然资源与生态环境联合研究中 心资助项目. [↑](#footnote-ref-2)
2. \*通讯作者.EJnail Zhouq?@ iae ac cn 2006-05^6 收稿，2007-04-05接受. [↑](#footnote-ref-3)