

廖晓勇, 陈同斌, 阎秀兰, 等. 2007. 提高植物修复效率的技术途径与强化措施 [J]. 环境科学学报, 27 (6): 881 - 893

Liao X Y, Chen T B, Yan X L, *et al*. 2007. Enhancement of heavy metal removal in phytoremediation of soils contaminated with heavy metals [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 27 (6): 881 - 893

# 提高植物修复效率的技术途径与强化措施

廖晓勇, 陈同斌\*, 阎秀兰, 聂灿军

中国科学院地理科学与资源研究所环境修复中心, 北京 100101

收稿日期: 2007-02-06 录用日期: 2007-04-26

**摘要:** 通过物理、化学或生物学手段, 从土壤、植物及其生境 3 个方面着手来提高植物去除土壤重金属能力是植物修复技术应用研究的重要方向. 对国内外植物修复过程中所应用的强化手段与辅助措施进行了一定的研究, 分别阐述了施肥、水分管理、耕作栽培、修复剂、生物技术等方法的作用机制及应用效果. 今后, 植物修复技术需针对有应用前景的超富集植物进行生境特征的系统研究, 并着重开发高效、低风险的土壤修复剂, 注重植物修复成套技术的工程应用研究.

**关键词:** 植物修复; 重金属; 超富集植物; 土壤; 螯合剂

文章编号: 0253-2468 (2007) 06-0881-13

中图分类号: X171.4

文献标识码: A

## Enhancement of heavy metal removal in phytoremediation of soils contaminated with heavy metals

LIAO Xiaoyong, CHEN Tongbin\*, YAN Xiulan, NIE Canjun

Center for Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and National Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

Received 6 February 2007;

accepted 26 April 2007

**Abstract:** Phytoremediation is a promising and environment-friendly method for cleanup of soils contaminated by heavy metals. Heavy metal removal in phytoremediation of soils contaminated with heavy metals can be enhanced by means of physics, chemistry and biotechnology. Phytoremediation efficiency has been proved to be elevated through applying some assistant measures, such as fertilization, irrigation, cultivation, additives, biotechnology and so on. Using these measures appropriately is helpful in increasing bioavailability of heavy metal in soils, enhancing growth of hyperaccumulator and improving the environment of plant growing. These measures using in phytoremediation of heavy metal polluted soils were summarized in this paper for identifying their function. Some promising hyperaccumulators should be paid more attention to further study. Undivided reagent for phytoremediation should be exploited for enhancing removal efficiency of heavy metal from soils. Engineering of phytoremediation will be further developed to dispose soil contamination with heavy metal.

**Keywords:** phytoremediation; heavy metal; hyperaccumulator; soil; chelating agent

### 1 引言 (Introduction)

植物修复技术 (phytoremediation) 是利用超富集植物 (hyperaccumulator) 从被污染的环境介质中去除重金属污染物或降低重金属污染风险的一类新技术. 它既可以修复重金属污染土地、也可以改善矿区生态环境, 还能从低品位的尾矿或土地中富集

贵金属, 实现土地环境保护和金属矿产资源高效回收利用的统一. 该技术具有 3 大优点: 投资和维护成本低; 接近于自然生态过程, 二次污染风险小; 实现污染土地增值.

超富集植物是指能够从土壤中大量吸收一种或几种重金属并将其转运到地上部的特殊植物 (Baker *et al*, 2000; 陈同斌等, 2005b). 这类植物

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目 (No. 40325003); 国家高技术研究发展计划课题 (No. 2006AA10Z405); 云南省省院省校合作项目 (No. 2005YX10)

Supported by the National Foundation for Distinguished Youth of China (No. 40325003), the High-Tech Research & Development Program of China (No. 2006AA10Z405) and Science and Technology Cooperative Program of Yunnan Province (No. 2005YX10)

作者简介: 廖晓勇 (1977—), 男, 博士, E-mail: liaoxy@igsnr.ac.cn; \*通讯作者 (责任作者), E-mail: chentb@igsnr.ac.cn

Biography: LIAO Xiaoyong (1977—), male, Ph.D., E-mail: liaoxy@igsnr.ac.cn; \*Corresponding author, E-mail: chentb@igsnr.ac.cn

对金属元素的吸收量超过一般植物 100倍以上,砷、铬、镍、铜、铅等超富集植物中相应重金属的含量一般占植物干重的 0.1%以上,锰和锌超富集植物中的锰和锌含量更高,一般应占植物干重的 1%以上 (Baker and Brooks, 1989). 超富集植物是植物修复技术的核心,对植物修复效率起着关键性的作用. 但大部分超富集植物存在生长速度慢、生物量小等缺陷,因此,通过强化措施提高超富集植物的修复效率是植物修复技术应用的重要发展方向.

目前,应用植物修复重金属污染土壤主要是采用超富集植物或生物量大且重金属含量高的植物去除土壤重金属 (phytoextraction). 通过运用农学、工程学、植物营养学、物理、化学、生物学等手段,为修复植物提供有利的生长发育和吸收重金属的环境,增加土壤中植物可利用态重金属的数量或提升修复植物累积重金属的能力,以达到提高植物修复效率的目的. 我们曾对不同的植物修复技术和植物富集重金属的分子生物学机制进行过综述 (韦朝阳等, 2002; 李文学等, 2003), 本文的重点则主要是总结提高植物对重金属富集效率的途径及其强化措施,尤其是对植物修复过程中所应用的施肥、添加剂、生物技术等技术进行分析、比较和评价,提出强化植物修复的技术途径并展望其未来的研究方向与应用前景.

## 2 施肥技术 (Fertilization technology)

施肥是一种提高农作物产量与品质的传统农艺措施,也已成为植物修复过程中十分必要的手段. 首先,重金属污染土壤常出现在矿区、废弃地等养分贫瘠区域,修复中需要根据待修复土壤的养分状况及超富集植物的需肥特性进行施肥 (Shu *et al*, 2002; Walker *et al*, 2003); 其次,土壤中较高浓度的重金属元素会影响植物对营养元素的吸收,严重时会出现缺素症状甚至死亡 (Wallace *et al*, 1977; Ebbs *et al*, 1998; Steams *et al*, 2005); 此外,超富集植物也会从土壤中带走大量营养元素 (Liao *et al*, 2004; Jacob *et al*, 2004). 因此,需要通过施肥来确保超富集植物修复过程中的营养供应.

肥料的施用量需要在一个适当的范围内才会有利于提高超富集植物的重金属去除效率 (Soudek *et al*, 2004), 并且合理施肥可以使植物修复效率提高数倍 (Anderson *et al*, 1999; Tassi *et al*,

2004; Wu *et al*, 2004a). 廖晓勇等 (2004) 研究磷肥施用量对砷超富集植物蜈蚣草富集砷的影响发现,施用  $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  磷肥条件下的蜈蚣草积累砷量是不施磷肥处理的 2.4 倍和施用  $600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  磷肥时的 1.2 倍 (表 1). 但施肥不当也可能引起某些元素与重金属离子产生共沉淀或者竞争吸附,从而减少植物对重金属离子的吸收,如 Suhadolc 等 (2004) 在铅、锌和镉污染的土壤上施加磷肥导致这 3 种重金属的生物有效性分别下降了 20%、15% 和 10%. 施肥不当还可能导致营养失衡而使植物出现中毒症状 (Hovsepian *et al*, 2004) 以及产生次生环境效应,如造成土壤酸化或碱化等危害 (Sword *et al*, 1998; Dach *et al*, 2005).

与普通作物的施肥不同,在植物修复过程中施肥除需要考虑养分功能之外,同时还需了解肥料中各种元素与重金属的相互关系及其对植物吸收重金属的影响. 综合考虑选择合适的肥料类型和最佳施肥量. 我们的研究表明,不同形态氮肥对蜈蚣草富集砷量有明显影响:  $\text{NH}_4^+ \text{-N} > \text{CO}(\text{NH}_2)_2 > \text{NO}_3^- \text{-N}$ ; 不同种类的磷肥对蜈蚣草积累砷的促进顺序为:  $\text{CaH}_2\text{PO}_4 > \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + \text{CaO} + \text{MgO} > \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 > \text{NaH}_2\text{PO}_4 > \text{KH}_2\text{PO}_4 > \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 + \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (廖晓勇, 2004; Liao *et al*, 2007). 在污染土壤修复过程中,有时应根据土壤及植物的生长需要,搭配施用多种肥料. Robinson 等 (1997) 利用镍超富集植物 *Alyssum bertolonii* 修复镍污染土壤时发现,不同肥料的配合施用对植物修复效率的促进作用表现为:  $\text{N-P-K} > \text{N-P-K-Ca} > \text{N-P} > \text{N} > \text{P} > \text{Ca}$ , 在同时施用氮、磷、钾 ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ 、 $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ 、 $\text{KCl}$ ) 的使用量均为  $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  3 种肥料时,植物的生物量是不施肥处理的 3 倍多,修复效率也提高了 2.3 倍. 根据修复植物的需肥规律还可以施加一些功能性肥料, Wide 等 (2005) 利用高生物量的重金属耐性植物香根草 (*Vetiver grass*) 修复铅污染土壤时,施加缓释肥 (Osmocote) 的效果明显优于施用等量养分的氮、磷、钾肥料. 在植物修复的实际应用过程中,应根据修复植物的种类、土壤性质和养分状况、重金属污染物的种类及特性等因素综合考虑,进行合理施肥,提高植物修复效率.

## 3 水分管理 (Water management)

除能忍耐高浓度的重金属以外,某些超富集植物还可在微域环境较为干旱的地方生长. 蜈蚣草的

自然分布受水分条件限制较小,高于 500 mm 的年降水量即可满足其正常生长与繁殖的需要(陈同斌等, 2005c). 有些超富集植物虽具有较强的耐旱性,但过度缺水仍会减弱其修复重金属污染土壤的能力(Angle *et al*, 2003; Marchiol *et al*, 2004),在种植过程中需进行适当的水分管理,以提高植物修复效率(Sung *et al*, 2001; Whiting *et al*, 2003). Angle 等(2003)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,在低湿度(土壤含水量为田间持水量的 30% ~ 40%)条件下,超富集修复植物的生长明显受到抑制,植物体内重金属浓度随着土壤湿度的增大呈增加的趋势,并且植物修复效率的提高也非常明显,2种超富集植物的最高修复效率都出现在土壤水分为田间持水量 80% 的处理条件下,分别为 30% 水分处理的 37 和 77 倍. 由此可见,合理的水分管理可以提高土壤中重金属的生物有效性,促进植物生长发育,进而有利于提高植物修复效率.

#### 4 栽培措施 (Cultivation measures)

在应用超富集植物修复污染土壤时,主要的栽培措施包括育苗、翻耕、种植密度、除草及轮作、间作、套作、收割等措施.

苗源问题是植物修复工程应用所面临的首要问题,超富集植物往往存在育苗难或育苗周期过长等问题. 不同的育苗方式对超富集植物的育苗速度、发芽率和成活率等都有很大影响(Huang *et al*, 1996; Lasat, 2000; Li *et al*, 2003). 砷超富集植物蜈蚣草作为蕨类植物(陈同斌等, 2002c),其从孢子萌发到生长 2~4 叶的幼体就需要 3~6 个月,这种育苗速度是不利于缩短砷污染土壤的植物修复周期;但是,陈同斌等(2005a)通过组织培养方法解决了砷超富集植物蜈蚣草在植物修复实际应用中快速繁殖的难题.

翻耕有利于土壤团粒结构的形成,起到保墒的作用. 翻耕的深度要考虑到植物根系生长、污染物在土壤中的分布以及土壤的理化性质等(Cunningham *et al*, 1995). 一般而言,重金属污染物主要集中在表层土壤,通过翻耕可将表层以下的污染物质翻到土壤表层植物根系分布较密集的区域,有利于植物去除土壤深层的重金属.

适宜的栽培密度有利于植株充分利用光照、土

壤水分与营养物质,提高单位面积植物地上部的生物量,促进植物对重金属的吸收,提高植物修复效率. Li 等(2003)研究表明,镍超富集植物 *A. murale* 和 *A. corsicum* 的最佳种植密度为 4 株  $\cdot m^{-2}$ . Liphadzi 等(2003)研究不同栽培密度条件下耐性植物向日葵修复重金属污染土壤的效果表明,在稀植(20000 株  $\cdot hm^{-2}$ )条件下,植物叶片中的重金属(Cd, Ni, Pb, Cu, Zn)含量明显高于密植(60000 株  $\cdot hm^{-2}$ )处理,但由于密植时单位面积的生物量是稀植时的 1.5 倍左右,所以向日葵在密植条件下对土壤中重金属的去除效率比稀植条件下要高.

在植物修复过程中,常常会出现本土杂草与超富集植物竞争生存空间,影响修复植物的正常生长,需要采取适当方式控制杂草的生长. Li 等(2003)研究了除草剂在 *A. murale* 和 *A. corsicum* 修复过程中的应用,其中 4 种除草剂对控制杂草具有很好效果,另外 12 种除草剂或除草剂搭配应用却对修复植物产生严重的毒害作用.

植物的生长发育与气候条件和种植方式密切相关,科学种植有利于提高植物的修复效率. 根据植物生长的季节性差异,可利用冷暖季轮作修复植物,延长植物对污染土壤的修复时间,提高污染土壤的修复效率(Sung *et al*, 2004). 根据研究,轮作、间作或套作等多种种植方式有利于减少杂草与病虫害等对植物生长发育的影响(Peters *et al*, 2003; Bradford *et al*, 2006). Wu 等(2004d)利用锌、镉超富集植物东南景天(*Sedum alfredii* Hance)与普通植物(玉米)进行套种,在进行重金属污染土壤修复的同时还有一定经济产出,降低了土壤修复的经济成本. 另外,在复合污染的土壤修复上,可应用间作或套作 2 种或 2 种以上超富集植物以缩短修复时间,提高修复效率.

对于多年生、再生能力强的超富集植物,可以借鉴在牧草种植中广泛应用的刈割措施来提高其生物量. 砷超富集植物蜈蚣草是一种蕨类植物,具有多年生、抗逆性和再生能力强的特点,可以通过刈割等方式节约育苗时间和育苗成本,增加生物量产出,提高修复效率(李文学等, 2005). 廖晓勇等(2004)研究发现,在湖南郴州的地理和气候条件下,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,蜈蚣草砷浓度保持在 1000  $mg \cdot kg^{-1}$  左右,其修复效率是 1 年收获 1 次处理的 1.9 倍(表 1).

表 1 各种辅助措施对植物修复效率的影响

Table 1 Summary of enhancing measures to increase heavy metal removal in phytoremediation

| 方法   | 具体措施                                                           | 试验<br>类型 | 植物                                                     | 植物类型  | 目标元素 | 浓度/(mg·kg <sup>-1</sup> ) |                        | 提高修复<br>效率(倍) | 资料来源                          |
|------|----------------------------------------------------------------|----------|--------------------------------------------------------|-------|------|---------------------------|------------------------|---------------|-------------------------------|
|      |                                                                |          |                                                        |       |      | 介质                        | 植物                     |               |                               |
| 施肥   | 磷酸二氢钠 800 mg·kg <sup>-1</sup>                                  | 盆栽       | 蜈蚣草 <i>Pteris vittata</i> L.                           | 超富集植物 | 砷    | 410                       | 4384                   | 1.8           | 陈同斌等, 2002a                   |
|      | 过磷酸钙 200 kg·hm <sup>-2</sup> (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )  | 大田       | 蜈蚣草                                                    | 超富集植物 | 砷    | 63.9                      | 1535                   | 2.4           | 廖晓勇等, 2004                    |
|      | 磷酸二氢钙 150 mg·kg <sup>-1</sup> (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) | 盆栽       | 蜈蚣草                                                    | 超富集植物 | 砷    | 207                       | 6272                   | 5.5           | 廖晓勇, 2004                     |
|      | 磷酸二氢钠、硝酸铵、氯化钾各 100 kg·hm <sup>-2</sup>                         | 大田       | <i>Alyssum bertolonii</i>                              | 超富集植物 | 镍    | 4.43<br>(有效态)             | 760                    | 2.3           | Robinson <i>et al.</i> , 1997 |
| 水分管理 | 80% 田间持水量                                                      | 盆栽       | <i>A. murale</i>                                       | 超富集植物 | 镍    | 500                       | 11035                  | 36.8          | Angle <i>et al.</i> , 2003    |
|      | 80% 田间持水量                                                      | 盆栽       | <i>Berkheya coddii</i>                                 | 超富集植物 | 镍    | 500                       | 12189                  | 77.0          | Angle <i>et al.</i> , 2003    |
|      | 100% 田间持水量                                                     | 盆栽       | <i>A. montanum</i> cv. <i>Mountain Gold</i>            | 超富集植物 | 镍    | 500                       | 50                     | 135           | Angle <i>et al.</i> , 2003    |
|      | 60% 田间持水量                                                      | 盆栽       | 遏蓝菜 <i>Thlaspi caerulescens</i> L.                     | 超富集植物 | 锌    | 1000                      | 6686                   | >5            | Angle <i>et al.</i> , 2003    |
| 刈割   | 3 次·a <sup>-1</sup>                                            | 大田       | 蜈蚣草                                                    | 超富集植物 | 砷    | -                         | 1050                   | 1.9           | 廖晓勇, 2004                     |
| 螯合剂  | EDDS                                                           | 盆栽       | 大白菜 <i>Brassica rapa</i> L.                            | 普通植物  | 铅    | 1100                      | 720                    | 102           | Greman <i>et al.</i> , 2003   |
|      | EDDS                                                           | 盆栽       | 烟草                                                     | 普通植物  | 铅    | 1400                      | 809                    | 7.2           | Sudová <i>et al.</i> , 2007   |
|      | EDTA                                                           | 盆栽       | <i>Berkheya coddii</i>                                 | 超富集植物 | 镍    | 305                       | 400                    | -2.6          | Robinson <i>et al.</i> , 1999 |
|      | EDTA                                                           | 盆栽       | 向日葵 <i>Helianthus annuus</i>                           | 普通植物  | 镍    | 11.6                      | 117                    | 7.8           | Chen <i>et al.</i> , 2001     |
|      | EDTA                                                           | 盆栽       | 大白菜                                                    | 普通植物  | 铅    | 1100                      | 780                    | 97.2          | Greman <i>et al.</i> , 2003   |
|      | EDTA                                                           | 盆栽       | 印度芥菜 <i>Brassica juncea</i>                            | 耐性植物  | 铅    | 100                       | 11000                  | 75            | Vassil <i>et al.</i> , 1998   |
|      | EDTA                                                           | 盆栽       | 印度芥菜                                                   | 耐性植物  | 铅    | 1000                      | 771                    | 96            | Barosi <i>et al.</i> , 2003   |
|      | EDTA                                                           | 盆栽       | 印度芥菜                                                   | 耐性植物  | 铅    | 492                       | 15.8                   | 2             | Wu <i>et al.</i> , 2004b      |
|      | EDTA                                                           | 盆栽       | 印度芥菜                                                   | 耐性植物  | 锌    | 3100                      | 1.3 mg·株 <sup>-1</sup> | 1.1           | Ebbs <i>et al.</i> , 1998     |
|      | EDTA                                                           | 盆栽       | 印度芥菜                                                   | 耐性植物  | 铜    | 169                       | 39.8                   | 1.6           | Wu <i>et al.</i> , 2004a      |
|      | EDTA                                                           | 盆栽       | 大麦 <i>Hordeum vulgare</i>                              | 普通植物  | 锌    | 3100                      | 2 mg·株 <sup>-1</sup>   | -0.2          | Ebbs <i>et al.</i> , 1998     |
|      | EDTA                                                           | 盆栽       | 燕麦 <i>Avena sativa</i>                                 | 普通植物  | 锌    | 3100                      | 0.6 mg·株 <sup>-1</sup> | 0             | Ebbs <i>et al.</i> , 1998     |
|      | EDTA                                                           | 盆栽       | 印度芥菜                                                   | 耐性植物  | 铜    | 63                        | 61                     | 6             | 吴龙华等, 2001                    |
|      | EDTA                                                           | 盆栽       | 芥菜型油菜 <i>Brassica juncea</i> L. cv. <i>Liyangkucui</i> | 普通植物  | 铅    | 5000                      | 14000                  | 200           | Chen <i>et al.</i> , 2002     |
|      | EDTA + 乙酸                                                      | 大田       | 印度芥菜                                                   | 耐性植物  | 铅    | 1200                      | 1471                   | 51            | Blaylock <i>et al.</i> , 1997 |
|      | EGTA                                                           | 盆栽       | 印度芥菜                                                   | 耐性植物  | 镉    | 100                       | 2800                   | 12.7          | Blaylock <i>et al.</i> , 1997 |
|      | HEDTA                                                          | 盆栽       | 玉米 <i>Zea mays</i>                                     | 普通植物  | 铅    | 2500                      | 10600                  | 265           | Huang <i>et al.</i> , 1996    |
|      | EDTA                                                           | 盆栽       | 玉米                                                     | 普通植物  | 铅    | 1360                      | 365                    | 3.6           | Komárek <i>et al.</i> , 2007  |

续表 1

| 方法    | 具体措施                                   | 试验类型 | 植物                                                      | 植物类型  | 目标元素 | 浓度/(mg·kg <sup>-1</sup> )                      |                          | 提高修复效率(倍) | 资料来源                             |
|-------|----------------------------------------|------|---------------------------------------------------------|-------|------|------------------------------------------------|--------------------------|-----------|----------------------------------|
|       |                                        |      |                                                         |       |      | 介质                                             | 植物                       |           |                                  |
| 有机酸   | 柠檬酸                                    | 盆栽   | 印度芥菜                                                    | 耐性植物  | 铀    | 750                                            | 5000                     | 1000      | Huang <i>et al.</i> , 1998       |
|       | 柠檬酸                                    | 盆栽   | 印度芥菜                                                    | 耐性植物  | 铜    | 100                                            | 12.5                     | 0         | 吴龙华等, 2001                       |
|       | 苹果酸                                    | 盆栽   | 印度芥菜                                                    | 耐性植物  | 铜    | 100                                            | 12.1                     | 0         | 吴龙华等, 2001                       |
| 化学调理剂 | S                                      | 盆栽   | <i>Berkheya coddii</i>                                  | 超富集植物 | 镍    | 305                                            | 1350                     | 3         | Robinson <i>et al.</i> , 1999    |
|       | S                                      | 盆栽   | <i>Berkheya coddii</i>                                  | 超富集植物 | 钴    | 27                                             | 290                      | 5         | Robinson <i>et al.</i> , 1999    |
|       | S, Ca(OH) <sub>2</sub>                 | 盆栽   | <i>Thalaspia arvense</i> L.                             | 超富集植物 | 锌    | 48445                                          | 52000                    | 6         | Brown <i>et al.</i> , 1994       |
|       | S, Ca(OH) <sub>2</sub>                 | 盆栽   | <i>T. arvense</i>                                       | 超富集植物 | 镉    | 1020                                           | 1740                     | 10        | Brown <i>et al.</i> , 1994       |
|       | 石灰、硝酸                                  | 盆栽   | <i>A. murale</i>                                        | 超富集植物 | 镍    | 1700                                           | 11300                    | 2.6       | Li <i>et al.</i> , 2003          |
|       | 石灰、硝酸                                  | 盆栽   | <i>A. corsicum</i>                                      | 超富集植物 | 镍    | 2550                                           | 7200                     | 1.8       | Li <i>et al.</i> , 2003          |
|       | 石灰、硝酸                                  | 田间   | <i>A. murale</i>                                        | 超富集植物 | 镍    | 1700                                           | 3370                     | 1.5       | Li <i>et al.</i> , 2003          |
|       | 石灰、硝酸                                  | 田间   | <i>A. corsicum</i>                                      | 超富集植物 | 镍    | 2550                                           | 3780                     | 1.7       | Li <i>et al.</i> , 2003          |
|       | CaCO <sub>3</sub>                      | 盆栽   | <i>Berkheya coddii</i>                                  | 超富集植物 | 钴    | 27                                             | 72                       | -3.6      | Robinson <i>et al.</i> , 1999    |
|       | CaCO <sub>3</sub>                      | 盆栽   | <i>Berkheya coddii</i>                                  | 超富集植物 | 镍    | 305                                            | 500                      | -3.3      | Robinson <i>et al.</i> , 1999    |
|       | MgCO <sub>3</sub>                      | 盆栽   | <i>Berkheya coddii</i>                                  | 超富集植物 | 镍    | 305                                            | 510                      | -4        | Robinson <i>et al.</i> , 1999    |
|       | MgCO <sub>3</sub>                      | 盆栽   | <i>Berkheya coddii</i>                                  | 超富集植物 | 钴    | 27                                             | 70                       | -2.3      | Robinson <i>et al.</i> , 1999    |
| 微生物   | Spingomonas macrogoltabidus            | 盆栽   | <i>A. murale</i>                                        | 超富集植物 | 镍    | 10200                                          | 10200                    | 0.17      | Abou-Shanab <i>et al.</i> , 2003 |
|       | Microbacterium liquefaciens            | 盆栽   | <i>A. murale</i>                                        | 超富集植物 | 镍    | 10600                                          | 10600                    | 0.24      | Abou-Shanab <i>et al.</i> , 2003 |
|       | Microbacterium arabinogalactanolyticum | 盆栽   | <i>A. murale</i>                                        | 超富集植物 | 镍    | 11250                                          | 11250                    | 0.32      | Abou-Shanab <i>et al.</i> , 2003 |
|       | Glomus mosseae                         | 盆栽   | 蜈蚣草                                                     | 超富集植物 | 神    | 16000                                          | 16000                    | 0.43      | Liu <i>et al.</i> , 2005         |
|       | 根际细菌                                   | 盆栽   | 遏蓝菜                                                     | 超富集植物 | 锌    | -                                              | -                        | 3.0       | White <i>et al.</i> , 2001       |
|       | 根际细菌                                   | 盆栽   | 印度芥菜                                                    | 超富集植物 | 硒    | 1.8<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> ) | 1.8                      | 4.0       | Souza <i>et al.</i> , 1999       |
|       | Glomus claroidium                      | 盆栽   | <i>Solanum nigrum</i>                                   | 耐性植物  | 锌    | 426                                            | 411                      | 1.83      | Marques <i>et al.</i> , 2007     |
| 有机废弃物 | 堆肥                                     | 盆栽   | 海州香薷<br><i>Elsholtzia splendens</i> Nakai ex F. Maekawa | 耐性植物  | 铜    | 1022                                           | 252(μg·株 <sup>-1</sup> ) | 6         | Yang <i>et al.</i> , 2005        |
|       | 赤泥 + 污泥 + 沸石                           | 盆栽   | 东南景天                                                    | 超富集植物 | 锌    | -                                              | 14355                    | 1.57      | 陈爱胜等, 2004                       |
|       | 赤泥                                     | 盆栽   | 东南景天                                                    | 超富集植物 | 镉    | -                                              | 684                      | 3.42      | 陈爱胜等, 2004                       |
|       | 水稻秸秆                                   | 盆栽   | 东南景天                                                    | 超富集植物 | 锌    | 2607                                           | 9557                     | 1.12      | 龙新宪等, 2004                       |
|       | 菜籽饼                                    | 盆栽   | 东南景天                                                    | 超富集植物 | 锌    | 2900                                           | 8944                     | 1.17      | 龙新宪等, 2004                       |
|       | 堆肥                                     | 盆栽   | 蜈蚣草                                                     | 超富集植物 | 神    | 135                                            | 5.9                      | 1.13      | Cao <i>et al.</i> , 2003         |
|       | 牛粪                                     | 盆栽   | 萝卜<br><i>Raphanus sativus</i> L.                        | 普通植物  | 锌    | 2602                                           | 300                      | -2.6      | Walker <i>et al.</i> , 2003      |
|       | 牛粪                                     | 盆栽   | 萝卜                                                      | 普通植物  | 铅    | 1572                                           | 13                       | -2        | Walker <i>et al.</i> , 2003      |

## 5 植物修复剂 (Phytoremediation agent)

土壤中重金属大都难以被植物吸收,加入特定的添加剂可以提高重金属生物有效性.目前研究过的植物修复剂包括有机螯合剂、酸碱调节剂、微生物菌剂和有机废弃物等.另外,施用植物修复剂还可以增强植物对重金属的耐性,提高其对重金属土壤的修复能力.

### 5.1 有机螯合剂

添加有机螯合剂提高植物对土壤中重金属的吸收,可能存在2种机制:一是活化土壤中的重金属离子,提高其生物有效性 (Jiang *et al*, 2003);二是促进植物对重金属的吸收及向地上部转移.土壤中重金属总含量较高,但通常其生物有效性较低,植物能够吸收的数量有限,即使转运能力很强的超富集植物往往也是如此 (Kumar *et al*, 1995; Meers *et al*, 2004).添加螯合剂能够促使重金属离子解吸和溶解,提高其生物有效性 (Blaylock *et al*, 1997).螯合剂与重金属形成能被植物吸收的螯合物,从而降低重金属对植物的毒性,有利于植物吸收富集重金属 (Vassil *et al*, 1998).以铅为例,添加螯合剂可以使土壤中水溶态铅的浓度增加100倍以上,这样即使采用普通植物(玉米)也能大量吸收土壤中的铅 (Huang *et al*, 1996; Komárek *et al*, 2007).Pickering等(2000)研究发现,添加二巯基丁二酸(DMS)对印度芥菜(*Brassica juncea* L.)的砷吸收总量影响不明显,形成的螯合物却明显促进砷在植物体内的向上转运,印度芥菜根部砷浓度下降到对照的57%,而茎和叶的砷浓度分别提高2倍和4倍多,叶片中67%砷以 $As(III)$ -DMS形态存在.

尽管添加螯合剂具有强化植物修复能力,但其应用还存在潜在风险和不利因素.施用螯合剂可能由于其本身具有生物毒性而降低植物对重金属污染土壤的修复效率 (Robinson *et al*, 1997; Chen *et al*, 2001; Wong *et al*, 2004).Robinson等(1999)通过盆栽试验研究表明,添加EDTA、DTPA、NTA 3种螯合剂明显抑制了 *Berkheya coddii* 对镍的富集,植物体内镍浓度分别为对照的41%、38%和37%.不同螯合剂的生物毒性存在差异,如EDDS比EDTA对植物与微生物毒性小 (Grman *et al*, 2003).螯合剂一般残留期较长不易降解,容易导致修复时连续种植的超富集植物或经修复后的土壤存在环境风险.螯合剂的加入会导致重金属活

化后向深层土壤或地下水转移,引起土壤或水体环境的二次污染;螯合剂价格比较昂贵,增加了修复成本.某些螯合剂也许有一定的潜在应用价值,但是其实用性和可行性仍值得进一步研究.以后应着重于安全、经济、有效的天然或人工螯合剂的研制,同时确定螯合剂最佳施用时间,以最大程度地提高螯合诱导效率,提升植物修复重金属污染土壤的能力.

### 5.2 酸碱调节剂

土壤pH值的变化会使重金属的赋存形态发生改变,从而影响其活性与生物有效性 (Robinson *et al*, 1999).对于铅、锌、镉等重金属而言,降低土壤pH值能促使部分结合态重金属溶解而进入土壤溶液,成为植物可吸收态重金属 (Brown *et al*, 1994).如果土壤过酸,则植物正常生长会受到影响;同时有些超富集植物适宜于中性或偏碱性土壤条件下生长,这时需要通过添加碱性调节剂来促进植物生长与对重金属的富集 (Brown *et al*, 1994; Heeran *et al*, 2001).

应用酸碱调节剂(单质硫或氢氧化钙)可通过改变土壤酸碱度来影响锌、镉超富集植物遏蓝菜(*Thlaspi caerulescens*)对锌和镉的吸收:在pH最低(5.84)时,遏蓝菜对锌与镉的吸收达到最大,分别为 $52000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1740\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;随着pH的升高,遏蓝菜富集锌、镉的量均呈下降的趋势 (Brown *et al*, 1994).在镍钴污染土壤上施用硫磺,其pH值由6.9下降到5.5时,镍超富集植物(*Berkheya coddii*)体内镍与钴的浓度分别提高了3倍和5倍;而当添加 $\text{CaCO}_3$ 与 $\text{MgCO}_3$ 时,由于土壤pH的升高(6.9~8.7)和离子竞争吸附,植物修复效率随着这2种调节剂施入量的增加而呈下降趋势 (Robinson *et al*, 1999).Li等(2003)在加拿大Welland的土壤(镍浓度为 $2550\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )和Quarry的土壤(镍浓度为 $1700\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )中添加 $\text{CaCO}_3$ 和 $\text{HNO}_3$ 来调节土壤pH值,在5.0~6.5范围内,无论是温室试验还是大田试验,*A. murale*和*A. corsicum*地上部的生物量及镍含量均随着土壤pH值升高而升高,镍的累积量也随着土壤pH值的增加而呈增加的趋势.

在重金属污染的土壤上添加有机酸,能够促进土壤中重金属的解吸与植物对重金属的累积,且一些低分子有机酸如苹果酸、柠檬酸等在土壤中的降解速度快,降解终产物为二氧化碳与水,不易出现残留 (Franky *et al*, 1998).在铀污染土壤(750

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )中添加醋酸、柠檬酸和苹果酸并运用印度芥菜等 10种植物进行修复时发现,以上 3种有机酸均能使土壤 pH降低 0.5~1.0个单位,提高植物对铀的吸收,其中柠檬酸的效果最好,能使印度芥菜地上部铀浓度由  $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 提高到  $5000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上 (Huang *et al*, 1998).

### 5.3 微生物菌剂

微生物是土壤的重要组成部分,参与土壤生态系统的物质循环与能量转换过程,对提高土壤肥力和维持土壤生态平衡具有重要意义.在污染土壤中,接种微生物能够促进植物对营养元素与重金属的吸收 (Hovsepyan *et al*, 2004; Loana *et al*, 2004);同时微生物能够分泌一些生长调节剂和保护植物的抗生素、抑菌剂和螯合剂等,这些物质都能增强植物对环境的适应能力 (Sung *et al*, 2001; Mayak *et al*, 2004). Liu等 (2005)在  $300\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 砷污染土壤上种植蜈蚣草的根系上接种菌根真菌 (*Glaucus mosseae*)后,蜈蚣草中砷累积量提高了 43%. Whiting等 (2001)研究表明,接种根际细菌后土壤溶液中锌含量增加,遏蓝菜地上部的鲜重和锌含量均增加 1倍,其对锌的吸收能力增加 3倍,这可能是由于细菌产生一种能被根系吸收的 Zn螯合载体的缘故. Abou-Shanab等 (2003)研究表明,在 *A. murale*上接种 3种细菌均能够明显促进植物对镉的富集,其中接种 *Sphingomonas macrogoltabidus*, *M. iobacterium* *liquefaciens*, *M. iobacterium* *arabinogalactanolyticum* 分别比对照处理地上部多富集 17%、24%、32.4%的镉. Souza等 (1999)研究表明,接种根际细菌可以使印度芥菜根部 (挥发性的位点之一)硒浓度达到无菌对照处理的 5倍,挥发速度也提高 4倍.

但也有一些研究发现,接种微生物可能会抑制植物对重金属的累积 (Hartley-Whitaker *et al*, 2000; Hovsepyan *et al*, 2004). Vogel-Mikuš等 (2006)研究表明,接种 AM 真菌导致锌、镉、铅超富集植物 *T. praecox* Wulfen的地上部生物量下降了 17%,地上部锌、镉、铅浓度最大下降幅度分别达 13%、25%和 31%,从而降低其对这些重金属污染土壤的修复能力.

目前有关微生物在超富集植物富集重金属过程中的作用目前还没有统一的认识,相关研究多集中在可控环境下接种微生物的室内模拟,侧重于现象描述与理论探索,很少有人探讨该制剂在植物修

复大田试验中的应用及其可行性.

### 5.4 有机废弃物

在植物修复过程中,少数研究者开始尝试通过施用堆肥、污泥及畜禽粪便等有机固体废弃物和有机废液以提高植物修复效率,并达到“以废制污”的目的 (Cao *et al*, 2003; Wu *et al*, 2004c; Clemente *et al*, 2005).在污染土壤上添加这些有机废弃物,一方面可以改良土壤结构、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 (Walker *et al*, 2003).污泥及畜禽粪便等有机固体废弃物中的 DOM能够抑制土壤对镉等重金属的吸附,促使土壤中的镉被解吸出来并形成螯合物,增加其在土壤中的移动性 (陈同斌等, 2002b; 黄泽春等, 2002).蔡保松 (2004)研究也发现,堆肥和磷石膏不仅能够显著增加蜈蚣草株高和生物量,还可提高土壤可溶性有机碳和可溶性砷的含量,从而促进蜈蚣草对砷的富集. Yang等 (2005)研究表明,向每  $\text{kg}$ 土壤中添加 50g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. Wu等 (2004b)研究表明,味精生产中的废液可以增加污染土壤中锌与镉的生物有效性,明显增加东南景天地上部的镉浓度,提高东南景天对镉污染土壤的修复效率.将味精废液与柠檬酸、EDTA、KCl按照 1:10:2:3的比例配成混合添加剂施用,可以促使东南景天多富集 68%的锌与 48%的镉.

当土壤中重金属生物有效性较高时,添加有机固体废弃物也可能会减少重金属的移动性,抑制植物对重金属的吸收与累积 (Zheljazkov *et al*, 2004; Yang *et al*, 2005). Nawal等 (1998)研究表明,添加猪粪、牛粪后土壤中可交换态镉减少,Fe-Mn结合态增加.这可能是由于施用猪粪、牛粪在提高土壤有机质的同时也增加土壤对重金属的吸附能力,从而降低其生物有效性.

总的来说,通过添加有机废弃物辅助植物修复重金属污染土壤是一种经济可行的措施,特别是在土壤肥力低而重金属含量高的尾矿等贫瘠的污染土壤 (土地)中具有很好的应用前景.在植物修复过程中施用有机废弃物,我们需要根据有机废弃物成分、重金属污染土壤特性及修复植物吸收规律等多

方面结合起来考虑施用量和施用方法.此外,添加有机废弃物也可能带来一些风险,如带入病原菌等,因此,在使用之前必须经过严格的无害化处理.根据我们小组的研究,通过堆肥处理不仅可以降低有机废弃物的污染风险,而且可以钝化城市污泥和畜禽废弃物中的重金属 (Zheng *et al* , 2004; Gao *et al* , 2005; 郑国砥等, 2005)

### 5.5 生长调理剂

植物调控体内激素水平是其适应重金属胁迫的重要方式 (Monni *et al* , 2001; Pang *et al* , 2003). 外施乙烯、脱落酸等生长调理剂可以增强印度芥菜抵抗镉等重金属胁迫的能力 (Salt *et al* , 1995; Steams *et al* , 2005). López等 (2005)研究表明,生长素 (IAA)不仅可以提高紫花苜蓿根、茎的生物量,同时也能增加该植物叶片中的铅浓度,特别是生长素与 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,显著提高了植物修复效率.因此,合理地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.

Ensley等 (1999)研究表明,一些商用激素性除草剂,如 Paraquat Roundup 和 Rockland,可能因含有二甲四氯、草甘磷与 2,4-D 等成分而促进印度芥菜对铅的富集,这 3种除草剂促使印度芥菜富集铅浓度分别达到 6216、6682和 4710  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,是对照处理铅富集量的 5.3、5.7、4.0倍.其中,含有 2,4-D 的 Rockland除草剂可以促进印度芥菜对铜、镉、铅和锌等重金属的富集,均可以达到对照的 2倍左右.研究还发现, Rockland主要是促进印度芥菜体内重金属由根部向地上部转移,并且必须与 EDTA 等螯合剂或者柠檬酸等配合施用才能取得显著的促进作用.

### 6 植物基因改良 (Application of genetic technology)

目前已发现的超富集植物很少同时具备生长速度快、生物量大与富集能力强的优点,一些研究者试图通过转基因技术或遗传育种技术手段来改善修复植物对重金属的富集能力和提高其生长速度或生物量.从转基因技术可使植物大量表达关键酶来提高植物螯合剂的活性与含量,提高其对重金属的解毒与富集能力.盆栽试验的初步结果表明,转基因印度芥菜对镉、锌、铜、铬、铅等金属的富集和转运能力有明显提高,将这种植物应用于尾矿或污染农田的修复,土壤中锌和镉的去除效率可分别

达到 6%与 25% (Bennett *et al* , 2003). Wangeline等 (2004)曾研究印度芥菜在大量表达 ATP 硫化酶 (APS)后对铜、砷、镉、铅、汞、锌、铬等重金属的耐性及富集能力.在水培试验中,转基因的印度芥菜体内镉、铬、铜等重金属浓度是未转基因印度芥菜的 2.5倍,但其耐性与未转基因印度芥菜没有差异.转入 *SRS1p/AtsC*、*ACT2p/γ-ECS* 基因与转入 *γ-ECS* 基因植株或未转基因的拟南芥 (*Arabidopsis thaliana*) 相比,对砷的耐性显著增加,同时其地上部植物鲜重是转入单个基因或野生植株的 4~17倍,富集砷浓度为 2~3倍,达到 700  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  (Dhankher *et al* , 2002). 已有研究探讨通过转基因来促使植物改变体内重金属形态,从而降低重金属对植物的毒性,以此来提高植物对重金属的修复能力 (LeDuc *et al* , 2005). Rugh 等 (1998) 在鹅掌楸 (*Liriodendron tulipifera*) 中转入 *MeA18* 后,植物可以将高毒性的二价离子汞转化成低毒的单质汞,其转化效率是野生植物的 10倍,增加植物挥发释放汞的能力,提高了植物修复汞污染土壤的效率.

要将克隆到的耐重金属或富集金属的关键基因转入其它植物并高效表达往往还存在一定困难,并且,从转入基因到直接应用转基因植物修复大面积的污染土壤也需要一个较长的时期,况且转基因植物还可能存在目前无法预见的生态风险.因此,传统的杂交育种仍然是一种很值得考虑的途径.通过利用不同植物基因的多样性进行杂交育种也是提高植物修复能力的重要途径. Li等 (2003)通过对 6种镍超富集植物的杂交选育,得到大量的遗传变异,其中 *A. murale* 和 *A. corsicum* 中镍浓度变化由 4200  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  提高到 20400  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Molitor 等 (2005)研究了锌超富集植物 (*T. caenulescens*) 47种生态型的遗传变异特征及其对生物量与重金属富集能力的影响,其中镉与锌浓度变化范围分别为 183~334  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 8030~16295  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . 以上研究结果表明,母系基因家族能够通过选育达到提高超富集植物的修复效率,培育优势超富集基因植物的目的.

虽然转基因植物的理论研究已经取得一定成就,但是这些研究都是一些局限于实验室范围的阶段性成果,究竟其在田间条件下的实际应用效果如何? 目前还不能确定,相关的生态风险问题也有待研究和探讨.

## 7 结论与展望 (Conclusion and prospect)

应用各种技术与方法从土壤、植物及其生境 3 个方面来强化植物修复重金属污染土壤的能力 (图 1), 对推动植物修复技术的应用具有重要的意义. 合理高效的施肥、水分管理、刈割等农艺措施均可以成倍地提高植物的修复效率, 这主要是从改善植物的养分、水分及空间分布等生境条件来促进植物的生长发育, 以获取理想的生物量, 提高植物修复效率. 在添加剂措施上虽已进行了深入广泛的研究, 也发现通过某些添加剂可改变土壤中重金属的有效性, 与植物对重金属的吸收累积能力, 显著提高植物的修复效率, 但还存在成本高、二次污染风险偏高与操作困难等问题, 需要开发出具有高效、廉价并且环境友好的添加剂. 转基因技术在减少重金属对植物的毒性方面取得了阶段性成果, 但该技术离重金属污染土壤的实际应用距离尚远. 相比而言, 杂交育种可能是培育高富集新品种的快捷手段, 应适当加强相关研究.

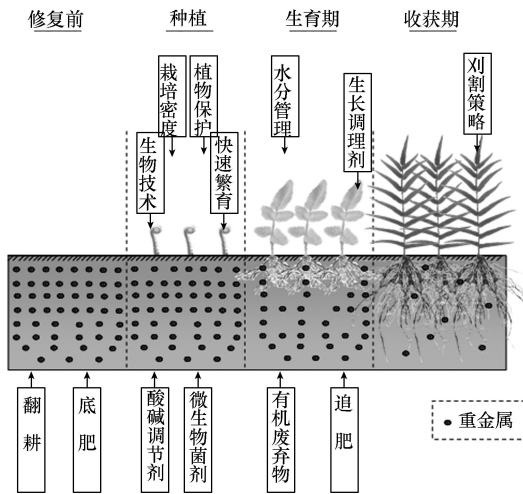


图 1 提高植物修复效率的技术应用示意图

Fig 1 Application of enhancing technology for phytoremediation

植物修复是一种新兴的环境治理技术, 在修复植物的品种筛选、修复机理研究及应用方面都存在不足, 借助各类技术与方法提高植物修复效率是目前弥补植物修复技术缺陷的最有力手段, 近期应在以下 3 方面开展深入研究:

1) 系统地研究重要超富集植物的生境特征, 通过调控其水、肥、气、热条件来促进修复植物的生长发育和提高其修复效率.

2) 针对特定的重金属污染土壤进行强化修复

措施的专一性、修复效率与环境风险研究, 开发经济、环境友好及效果显著的修复剂.

3) 重视植物修复中各种配套技术与方法的系统集成研究和工程应用. 现有研究多局限于室内实验, 盆栽所得的结论与田间实际情况差距甚大, 植物修复作为一个以应用为主导的科技领域, 需要开展多学科交叉研究并针对特定的修复环境进行应用技术开发, 以解决不同辅助措施之间相互协调与制约等问题, 提高其综合修复效率.



通讯作者简介: 陈同斌, 博士生导师、研究员, 中国科学院地理科学与资源研究所环境修复中心主任、地表环境化学过程与健康实验室主任. 主要从事植物修复、固体废弃物堆肥、区域土壤环境质量与风险评估研究. 主持“863”课题、国家自然科学基金重点项目等 40 多项, 发表论文近 200 篇, 获得发明专利 18 项.

## References:

- Abou-Shanab R A, Angle J S, Delorme T A, et al 2003. Rhizobacterial effects on nickel extraction from soil and uptake by *Alyssum murale* [J]. *New Phytologist*, 158: 219—224
- Anderson C W N, Brooks R R, Chianucci A, et al 1999. Phytomining for nickel, thallium and gold [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 67: 407—415
- Angle J S, Baker A J M, Whiting S N, et al 2003. Soil moisture effects on uptake of metals by *Thlaspi*, *Alyssum* and *Berkheya* [J]. *Plant and Soil*, 256: 325—332
- Baker A J M, Brooks R R. 1989. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements: A review of their distribution, ecology and phytochemistry [J]. *Biorecovery*, 1 (2): 81—126
- Baker A J M, McGrath S P, Reeves R D, et al 2000. Metal hyperaccumulator plants: A review of ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metal-polluted soils // Terry N & Banuelos G S (Eds). *Phytoremediation of Contaminated Soil and Water* [M]. Florida: Lewis Publishers, 85—108
- Balogi A, Csintalan Z, Kocsanyi L, et al 2003. Optimizing phytoremediation of heavy metal-contaminated soil by exploiting plants stress adaptation [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 5 (1): 13—23
- Bennett L E, Burkhead J L, Kerry L H, et al 2003. Pilon-smits analysis of transgenic Indian mustard plants for phytoremediation of metal-contaminated mine tailings [J]. *Journal of Environmental Quality*, 32: 432—440
- Blaylock M J, Salt D E, Dushenkov S, et al 1997. Enhanced

- accumulation of Pb in Indian mustard by soil-applied chelating agents [J]. *Environmental Science & Technology*, 31: 860—865
- Bradford K R, George O K, Calvin G M, *et al* 2006. Long-term effects of spring wheat-soybean cropping systems on weed populations [J]. *Field Crops Research*, 97 (2-3): 197—208
- Brown S L, Chaney R L, Angle J S, *et al* 1994. Phytoremediation potential of *Thlaspi caerulescens* and *B. lagger champion* for zinc- and cadmium-contaminated soil [J]. *Journal of Environmental Quality*, 23: 1151—1157
- Cao X, Ma L Q, Shiralipour A. 2003. Effects of compost and phosphate amendments on arsenic mobility in soils and arsenic uptake by the hyperaccumulator, *Pteris vittata* L. [J]. *Environmental Pollution*, 126: 157—167
- Cai B S 2004. Genotypic difference in arsenic-accumulating ability and their reaction to environmental factor in *Pteris vittata* [D]. Hangzhou: Zhejiang University (in Chinese)
- Chen A S, Lin C X, Long X X, *et al* 2004. Effects of soil treatments on the extraction of Zinc and Cadmium from contaminated soil by *Sedum alfredii* Hance [J]. *Ecology and Environment*, 13 (4): 556—559
- Chen H, Cutright T. 2001. EDTA and HEDTA effects on Cd, Cr and Ni uptake by *Helianthus annuus* [J]. *Chemosphere*, 45: 21—28
- Chen T B, Fan Z L, Lei M, *et al* 2002a. Effect of phosphorus on arsenic accumulation in As-hyperaccumulator *Pteris vittata* L. and its implication [J]. *Chinese Science Bulletin*, 47 (22): 1876—1879
- Chen T B, Huang Z C, Chen H. 2002b. Effect of DOMs extracted from five solid organic wastes on cadmium adsorption in soils [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 22 (2): 150—155 (in Chinese)
- Chen T B, Wei C Y, Huang Z C, *et al* 2002c. Arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. and its arsenic accumulation [J]. *Chinese Science Bulletin*, 47 (11): 902—905
- Chen T B, Mo L Y, Liao X Y, *et al* 2005a. An easy method to breed *Pteris vittata* L. from spores [P]. The People's Republic of China Application No: 200510086651.8 (in Chinese)
- Chen T B, Yan X L, Liao X Y, *et al* 2005b. Perspective on the translation of the English term "hyperaccumulator" into Chinese [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 25 (9): 1148—1150 (in Chinese)
- Chen T B, Zhang B C, Huang Z C, *et al* 2005c. Geographical distribution and characteristic of habitat of As-hyperaccumulator *Pteris vittata* L. in China [J]. *Geographical Research*, 24 (6): 825—833 (in Chinese)
- Clemente R, Walker D J, Bernal M P. 2005. Uptake of heavy metals and As by *Brassica juncea* grown in a contaminated soil in Aznalcóbar (Spain): the effect of soil amendments [J]. *Environmental Pollution*, 138: 46—58
- Cunningham S D, Berti W R, Huang J W W. 1995. Phytoremediation of contaminated soils [J]. *Trends in Biotechnology*, 13: 393—397
- Dach A, Stamans D. 2005. Heavy metals balance in Polish and Dutch agronomy: Actual state and previsions for the future [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 107: 309—316
- Dhankher O P, Li Y, Rosen B P, *et al* 2002. Engineering tolerance and hyperaccumulation of arsenic in plants by combining arsenate reductase and  $\gamma$ -glutamylcysteine synthetase expression [J]. *Nature Biotechnology*, 20: 1140—1145
- Ebbs S, Kochian L. 1998. Phytoextraction of zinc by oat (*Avena sativa*), Barley (*Hordeum vulgare*), and Indian mustard (*Brassica juncea*) [J]. *Environmental Science & Technology*, 32: 802—806
- Ensley B D, Blaylock M J, Dushenkov S, *et al* 1999. Inducing hyperaccumulation of metals in plant shoots [P]. United States Patent, PN: 5917117
- Franky C H, Patrick V B, Gren E R L, *et al* 1998. Biodegradation of uranium-citrate complexes: implications for extraction of uranium from soils [J]. *Environmental Science & Technology*, 32: 379—382
- Gao D, Zheng G D, Chen T B, *et al* 2005. Changes of Cu, Zn, and Cd speciation in sewage sludge during composting [J]. *Journal of Environmental Sciences-China*, 17 (6): 957—961
- Grman H, Vodnik D, Velikonja B S, *et al* 2003. Ethylenediaminedisuccinate as a new chelate for environmentally safe enhanced lead phytoextraction [J]. *Journal of Environmental Quality*, 32: 500—506
- Hartley-Whitaker J, Caimey J W G, Meharg A A. 2000. Sensitivity to Cd or Zn of host and symbiotic of ectomycorrhizal *Pinus sylvestris* L. (Scots pine) seedlings [J]. *Plant and Soil*, 218: 31—42
- Heeraman D A, Claassen V P, Zasoski R J. 2001. Interaction of lime, organic matter and fertilizer on growth and uptake of arsenic and mercury by Zorro fescue (*Vulpia myuros* L.) [J]. *Plant and Soil*, 234: 215—231
- Hovsepyan A, Greppson S. 2004. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on phytoextraction by corn (*Zea mays*) of lead-contaminated soil [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 6 (4): 305—321
- Huang J W, Michael J B, Yoram K, *et al* 1998. Phytoremediation of uranium-contaminated soils: Role of organic acids in triggering uranium hyperaccumulation in plants [J]. *Environmental Science & Technology*, 32: 2004—2008
- Huang J W, Cunningham S D. 1996. Lead phytoextraction: species variation in lead uptake and translocation [J]. *New Phytology*, 134: 75—84
- Huang Z C, Chen T B, Lei M. 2002. Effect of DOM derived from sewage sludge on Cd adsorption in different soils in China (I): Difference in latitudinal zonal soils [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 22 (3): 349—353 (in Chinese)
- Jiang X J, Luo Y M, Zhao Q G, *et al* 2003. Soil Cd availability to Indian mustard and environmental risk following EDTA addition to Cd-contaminated soil [J]. *Chemosphere*, 50: 813—818
- Jacob D L, Otte M L. 2004. Influence of *Typha latifolia* and fertilization on metal mobility in two different Pb-Zn mine tailings types [J]. *Science of the Total Environment*, 333: 9—24
- Johansson L, Xydias C, Messios N, *et al* 2005. Growth and Cu accumulation by plants grown on Cu containing mine tailings in Cyprus [J]. *Applied Geochemistry*, 20: 101—107
- Komáček M, Tlustoš P, Székely J, *et al* 2007. The use of maize and

- poplar in chelant-enhanced phytoextraction of lead from contaminated agricultural soils[J]. *Chemosphere*, 67: 640—651
- Kumar P B A N, Dushenkov V, Motto H, *et al* 1995. Phytoextraction: The use of plants to remove heavy metals from soils [J]. *Environmental Science & Technology*, 29: 1232—1238
- Lasat M M. 2000. Phytoextraction of metal from contaminated soil: A review of plant/soil/metal interaction and assessment of pertinent agronomic issues [J]. *Journal of Hazardous Substance Research*, 2 (5): 1—25
- LeDuc D L, Tarun A S, Maria M B, *et al* 2004. Overexpression of selenocysteine methyltransferase in Arabidopsis and Indian mustard increases selenium tolerance and accumulation [J]. *Plant Physiology*, 135: 377—383
- Li W X, Chen T B, Liu Y R. 2005. Effects of harvesting on As accumulation and removal efficiency of As by Chinese brake (*Pteris vittata* L.) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 25 (3): 538—542 (in Chinese)
- Li W X, Chen T B. 2003. Physiological and molecular biological mechanisms of heavy metal absorption and accumulation in hyperaccumulators [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 14 (4): 627—631 (in Chinese)
- Li Y M, Chaney R, Brewer E, *et al* 2003. Development of a technology for commercial phytoextraction of nickel: economic and technical considerations [J]. *Plant and Soil*, 249: 107—115
- Liao X Y. 2004. Phytoremediation of As-contaminated site using hyperaccumulator *Pteris vittata* L.: A field study [D]. Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Resource Research, Chinese Academy of Sciences, 89—188 (in Chinese)
- Liao X Y, Chen T B, Lei M, *et al* 2004. Root Distributions and Elemental Accumulations of Chinese Brake (*Pteris vittata* L.) from As-contaminated Soils [J]. *Plant and Soil*, 261: 109—116
- Liao X Y, Chen T B, Xie H, *et al* 2004. Effect of application of P fertilizer on efficiency of As removal from As-contaminated soil using phytoremediation: Field study [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 24 (3): 455—462 (in Chinese)
- Liao X Y, Chen T B, Xiao X Y, *et al* 2003. Spatial distributions of arsenic in contaminated paddy soils [J]. *Geographical Research*, 22 (5): 635—643 (in Chinese)
- Liphadzi M S, Kirkham M B, Mankin K R, *et al* 2003. EDTA-assisted heavy-metal uptake by poplar and sunflower grown at a long-term sewage-sludge farm [J]. *Plant and Soil*, 257: 171—182
- Liu Y, Zhu Y G, Chen B D, *et al* 2005. Influence of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glaucus mosseae* on uptake of arsenate by the As hyperaccumulator fern *Pteris vittata* L. [J]. *Mycorrhiza*, 15: 187—192
- Loana G P, Smaranda D, Kostas K, *et al* 2004. Artificial inoculation - perspectives in tailings phytostabilization [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 6 (1): 1—15
- Long X X, Ni W Z, Ye Z Q, *et al* 2004. Effects of organic materials on zinc phytoextraction from contaminated soils by *Sedum alfredii* Hance [J]. *Microelement Science in Guangdong*, 11 (4): 22—28 (in Chinese)
- López M L, Peralta-Videa J R, Benitez T, *et al* 2005. Enhancement of lead uptake by alfalfa (*Medicago sativa*) using EDTA and a plant growth promoter [J]. *Chemosphere*, 61 (4): 595—598
- Marchiol L, Asolari S, Sacco P, *et al* 2004. Phytoextraction of heavy metals by canola (*Brassica napus*) and radish (*Raphanus sativus*) grown on multicontaminated soil [J]. *Environmental Pollution*, 132: 21—27
- Marques A P G C, Oliveira R S, Samardjieva K A. *et al* 2007. *Solanum nigrum* grown in contaminated soil: Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on zinc accumulation and histolocalisation [J]. *Environmental Pollution*, 145: 691—699
- Mayak S, Tirosh T, Glick B R. 2004. Plant growth-promoting bacteria that confer resistance to water stress in tomatoes and peppers [J]. *Plant Science*, 166 (2): 525—530
- Meers E, Hopgood M, Lesage E, *et al* 2004. Enhanced phytoextraction: In search of EDTA alternatives [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 6 (2): 95—109
- Molitor M, Dechamps C, Gruber W, *et al* 2005. *Thlaspi caerulescens* on nonmetalliferous soil in Luxembourg: ecological niche and genetic variation in mineral element composition [J]. *New Phytologist*, 165: 503—512
- Monni S, Uhlig C, Hansen E, *et al* 2001. Ecophysiological responses of *Empetrum nigrum* to heavy metal pollution [J]. *Environmental Pollution*, 112: 121—129
- Nawal R P, Singh B R. 1998. Effect of organic materials on partitioning, extractability and plant uptake of metals in an alum shale soil [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 103: 405—421
- Pang J, Chan G S Y, Zhang J, *et al* 2003. Physiological aspects of *Vetiver grass* for rehabilitation in abandoned metalliferous mine wastes [J]. *Chemosphere*, 52: 1559—1570
- Peters R D, Stutz A V, Carter M R, *et al* 2003. Developing disease-suppressive soils through crop rotation and tillage management practices [J]. *Soil & Tillage Research*, 72: 181—192
- Pickering I J, Prince R C, George M J, *et al* 2000. Reduction and coordination of arsenic in Indian mustard [J]. *Plant Physiology*, 122: 1171—1177
- Robinson B H, Brooks R R, Clothier B E. 1999. Soil amendments affecting nickel and cobalt uptake by *Berkheya codii*: Potential use for phytomining and phytoremediation [J]. *Annals of Botany*, 84: 689—694
- Robinson B H, Chiarucci A, Brooks R R, *et al* 1997. The nickel hyperaccumulator plant *Alyssum bertolonii* as a potential agent for phytoremediation and phytomining of nickel [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 59: 75—86
- Rugh C L, Senecoff J F, Meagher R, *et al* 1998. Development of transgenic yellow poplar for mercury phytoremediation [J]. *Nature Biotechnology*, 16: 925—928
- Salt D E, Prince R C, Pickering I J, *et al* 1995. Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian mustard [J]. *Plant Physiology*, 109: 1427—1433
- Shu W S, Xia H P, Zhang Z Q, *et al* 2002. Use of vetiver and three other grasses for revegetation of Pb/Zn mine tailings: Field

- experiment [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 4(1): 47—57
- Soudek P, Tykva R, Vaněk T. 2004. Laboratory analyses of  $^{137}\text{Cs}$  uptake by sunflower, reed and poplar [J]. *Chemosphere*, 55: 1081—1087
- Souza M P, Chu D, Zhao M, *et al*. 1999. Rhizosphere bacteria enhance selenium accumulation and volatilization by Indian mustard [J]. *Plant Physiology*, 119: 565—573
- Stearns J C, Saleh S, Greenberg B M, *et al*. 2005. Tolerance of transgenic canola expressing 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid deaminase to growth inhibition by nickel [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 43(7): 701—708
- Sudová R, Pavlíková D, Macek T, *et al*. 2007. The effect of EDDS chelate and inoculation with the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* on the efficacy of lead phytoextraction by two tobacco clones [J]. *Applied Soil Ecology*, 35: 163—173
- Suhadolc M, Schroll R, Gättinger A, *et al*. 2004. Effects of modified  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ , and  $\text{Cd}^{2+}$  availability on the microbial communities and on the degradation of isoproturon in a heavy metal contaminated soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 36: 1943—1954
- Sung K, Munster C L, Corapcioglu M Y, *et al*. 2004. Phytoremediation and modeling of contaminated soil using eastern gamagrass and annual ryegrass [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 159(1): 175—195
- Sung K, Yavuz M, Drew M C, *et al*. 2001. Plant and environment interactions plant contamination by organic pollutants in phytoremediation [J]. *Journal of Environmental Quality*, 30: 2081—2090
- Sword M A. 1998. Seasonal development of loblolly pine lateral roots in response to stand density and fertilization [J]. *Plant and Soil*, 200: 21—25
- Tassi E, Pedron F, Barbaferri M, *et al*. 2004. Phosphate-assisted phytoextraction in As-contaminated soil [J]. *Engineering in Life Sciences*, 4(4): 341—346
- Vassil A D, Kapulnik Y, Raskin I, *et al*. 1998. The role of EDTA in lead transport and accumulation by Indian mustard [J]. *Plant Physiology*, 117: 447—453
- Vogel-Mikuš K, Pongrac P, Kump P, *et al*. 2006. Colonisation of a Zn, Cd and Pb hyperaccumulator *Thlaspi praecox* Wulfen with indigenous arbuscular mycorrhizal fungal mixture induces changes in heavy metal and nutrient uptake [J]. *Environmental Pollution*, 139(2): 362—371
- Wallace A, Romney E M, Alexander G V, *et al*. 1977. Some interactions in plants among cadmium, other heavy metals, and chelating agents [J]. *Agronomy Journal*, 69: 18—20
- Walker D J, Clemente R, Roig A, *et al*. 2003. The effects of soil amendments on heavy metal bioavailability in two contaminated Mediterranean soils [J]. *Environmental Pollution*, 122: 303—312
- Wangelin A L, Burkhead J L, Hale K L, *et al*. 2004. Overexpression of ATP sulfurylase in Indian mustard: effects on tolerance and accumulation of twelve metals [J]. *Journal of Environmental Quality*, 33: 54—60
- Wei C Y, Chen T B. 2001. Hyperaccumulators and phytoremediation of heavy metal contaminated soil: A review of studies in China and abroad [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 21(7): 1196—1203 (in Chinese)
- Whiting S N, Souza M P D E, Terry N. 2001. Rhizosphere bacteria mobilize Zn for hyperaccumulation by *Thlaspi caerulescens* [J]. *Environmental Science & Technology*, 35: 3144—3150
- Whiting S N, Neumann P N, Baker A J M. 2003. Nickel and zinc hyperaccumulation by *Alyssum murale* and *Thlaspi caerulescens* (Brassicaceae) do not enhance survival and whole-plant growth under drought stress [J]. *Plant, Cell and Environment*, 26: 351—360
- Wide E W, Brignon R L, Dunn D L, *et al*. 2005. Phytoextraction of lead from firing range soil by vetiver grass [J]. *Chemosphere*, 61(10): 1451—1457
- Wong J W C, Wong W W Y, Wei Z G, *et al*. 2004. Alkaline biosolids and EDTA for phytoremediation of an acidic loamy soil spiked with cadmium [J]. *Science of the Total Environment*, 324: 235—246
- Wu L H, Luo Y M, Huang H Z, *et al*. 2001. Chelate-induced phytoextraction of copper contaminated upland red soil [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 12(3): 435—438 (in Chinese)
- Wu L H, Li H, Luo Y M, *et al*. 2004a. Nutrients can enhance phytoremediation of copper-polluted soil by Indian mustard [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 26: 331—335
- Wu L H, Luo Y M, Xing X R, *et al*. 2004b. EDTA-enhanced phytoremediation of heavy metal contaminated soil with Indian mustard and associated potential leaching risk [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 102: 307—318
- Wu Q T, Deng J C, Guo Z M. 2004c. Comparison between organic chelators in enhancing zinc and cadmium uptake by hyperaccumulators [C]. *The Fourth International Symposium of the Working Group MO*. Wuhan, China, 20—23
- Wu Q T, Deng J C, Guo Z M, *et al*. 2004d. Phytoremediation of Zn/Cd contaminated soil with enhancing-chelates and co-crop system [C]. *The Second International Conference on Soil Pollution and Remediation*. Nanjing, China, 9—12
- Yang X E, Peng H Y, Jiang L Y. 2005. Phytoextraction of copper from contaminated soil by *Ehretia splendens* as affected by EDTA, citric acid and compost [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 7(1): 69—83
- Zheljazzkov V D, Waman P R. 2004. Phytoavailability and fractionation of copper, manganese and zinc in soil following application of two composts to four crops [J]. *Environmental Pollution*, 131: 187—195
- Zheng G D, Chen T B, Gao D, *et al*. 2005. Influence of high temperature aerobic composting treatment on the form of heavy metals in pig manure [J]. *China Environmental Science*, 25(1): 6—9 (in Chinese)
- Zheng G D, Chen T B, Gao D, *et al*. 2004. Dynamic of lead speciation in sewage sludge composting [J]. *Water Science and Technology*, 50(9): 75—82

## 中文参考文献:

- 陈爱胜,林初夏,龙新宪,等. 2004 不同土壤处理对东南景天吸取土壤中锌和镉效率的影响 [J]. 生态环境, 13(4): 556—559
- 陈同斌, 范稚莲, 雷梅, 等. 2002a 磷对超富集植物蜈蚣草吸收砷的影响及其科学意义 [J]. 科学通报, 47(15): 1156—1159
- 陈同斌, 黄泽春, 陈煌. 2002b 废弃物中水溶性有机质对土壤吸附 Cd 的影响及其机制 [J]. 环境科学学报, 22(2): 150—155
- 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春, 等. 2002c 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征 [J]. 科学通报, 47(3): 207—210
- 陈同斌, 莫良玉, 廖晓勇, 等. 2005a 利用蜈蚣草孢子进行快速组培繁殖的方法 [P]. 中华人民共和国. 申请号: 200510086651. 8
- 陈同斌, 阎秀兰, 廖晓勇, 等. 2005b 关于 hyperaccumulator 中文译名的探讨 [J]. 环境科学学报, 25(9): 1148—1150
- 陈同斌, 张斌才, 黄泽春, 等. 2005c 超富集植物蜈蚣草在中国的地理分布及其生境特征 [J]. 地理研究, 24(6): 825—833
- 黄泽春, 陈同斌, 雷梅. 2002 污泥中的 DOM 对中国土壤中 Cd 吸附的影响 I 纬度地带性差异 [J]. 环境科学学报, 22(3): 349—353
- 李文学, 陈同斌, 刘颖茹. 2005 刈割对蜈蚣草的砷吸收和植物修复效率的影响 [J]. 生态学报, 25(3): 538—542
- 李文学, 陈同斌. 2003 超富集植物吸收富集重金属的生理和分子生物学机制 [J]. 应用生态学报, 14(4): 627—631
- 廖晓勇, 陈同斌, 肖细元, 等. 2003 污染水稻田中土壤含砷量的空间变异特征 [J]. 地理研究, 22(5): 635—643
- 廖晓勇, 陈同斌, 谢华, 等. 2004 磷肥对砷污染土壤的植物修复效率的影响: 田间实例研究 [J]. 环境科学学报, 24(3): 455—462
- 廖晓勇. 2004 典型地区土壤砷污染的现状评价与植物修复 [D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 89—188
- 龙新宪, 倪吾钟, 叶正钱, 等. 2004 有机物料对东南景天提取污染土壤中锌的影响 [J]. 广东微量元素科学, 11(4): 22—28
- 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
- 吴龙华, 骆永明, 黄焕忠. 2001 铜污染旱地红壤的络合诱导植物修复作用 [J]. 应用生态学报, 12(3): 435—438
- 郑国砥, 陈同斌, 高定, 等. 2005 好氧高温堆肥处理对猪粪中重金属形态的影响 [J]. 中国环境科学, 25(1): 6—9