

超累积植物与高生物量植物提取镉效率的比较

杨 勇, 王 巍, 江荣风, 李花粉*

(中国农业大学资源与环境学院, 教育部植物-土壤相互作用重点实验室, 农业部植物营养与养分循环重点实验室, 北京 100193)

摘要: 利用植物修复污染的土壤已受到广泛的关注。采用土壤盆栽试验, 比较了超累积植物遏蓝菜与 3 种高生物量植物印度芥菜、烟草和向日葵对长期施用含镉有机、无机肥料污染的土壤(总 Cd, $2.87 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的提取效率。研究表明, 遏蓝菜富集镉的能力明显高于其他 3 种植物, 其地上部镉含量可达 $43.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分别是烟草、印度芥菜和向日葵(叶)的 10、27 和 56 倍; 而地上部生物量最高的植物烟草, 其生物量干重为 $24.8 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$, 分别是遏蓝菜、印度芥菜、向日葵的 35 倍、3 倍、2 倍。4 种植物提取镉最多的是烟草, 每盆可以提取 $117 \mu\text{g}$, 遏蓝菜和印度芥菜提取镉量分别为 $35 \mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$ 和 $30 \mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$, 向日葵提取量最少, 每盆仅为 $10 \mu\text{g}$ 左右。植物对土壤中镉的提取效率分别为: 烟草 1%, 遏蓝菜 0.6%, 印度芥菜 0.5%, 向日葵 0.08%。4 种植物种植后, 土壤总镉和有效态镉含量没有显著的变化。

关键词: 植物修复; 重金属; 烟草; 超累积植物

文章编号: 1000-0933(2009)05-2732-06 中图分类号: Q143, Q948, X171 文献标识码: A

Comparison of phytoextraction efficiency of Cd with the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* and three high biomass species

YANG Yong, WANG Wei, JIANG Rong-Feng, LI Hua-Fen*

College of Resources and Environmental Sciences; Key Laboratory of Plant-Soil Interactions, Ministry of Education; Key Laboratory of Plant Nutrition, Ministry of Agriculture; China Agriculture University, Beijing 100193, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2732 ~ 2737.

Abstract: Phytoremediation has attracted much more attention in environmental cleanup. The relatively low biomass and slow growth of metal hyperaccumulators restrict the efficiency of phytoextraction of heavy metals using these plants. The objective of this study was to compare the efficiency of phytoextraction of cadmium (Cd) with the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* and three high biomass plant species (India mustard, tobacco and sunflower). A pot experiment was conducted using a soil contaminated with Cd ($2.87 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) from past application of manure and fertilizer with Cd for long time. The results showed that the *Thlaspi caerulescens* had a higher ability of Cd accumulation than other three plants species. The Cd concentration in the shoots of *Thlaspi caerulescens* reached $43.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, whereas only $1.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd was found in the shoots of sunflower. Cd concentration in the shoots of *Thlaspi caerulescens* was 10, 27 and 56 times of that of tobacco, Indian mustard, and sunflower, respectively. However, tobacco had the highest biomass, which was 35, 3 and 2 times of *Thlaspi caerulescens*, Indian mustard and sunflower, respectively. Total uptake of Cd from the soil was 117, 35, 30 and 10 $\mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$ for tobacco, *Thlaspi caerulescens*, India mustard and sunflower, respectively. Phytoextraction efficiency was 1%, 0.6%, 0.5% and 0.08% for tobacco, *Thlaspi caerulescens*, India mustard and sunflower, respectively. Furthermore, there was no significant difference in either total or extractable Cd concentration in the soil after the four plant species were harvested.

Key Words: phytoremediation; heavy metal; tobacco; hyperaccumulator

基金项目: 国家农业部 948 重大国际合作-养分资源综合管理资助项目(2004-Z53)

收稿日期: 2008-01-03; 修订日期: 2008-06-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lihuafen@cau.edu.cn

随着我国经济的飞速发展和工业废水、废气和废渣的大量排放,土壤和农作物重金属污染问题日趋严重。2002 年农业部环保监测系统曾对全国 24 省、市 320 个污染严重区 548 万 hm^2 调查发现,大田类农产品污染超标面积占污染区农田面积的 20%,其中重金属超标占污染土壤和农作物的 80%^[1]。

土壤重金属的植物提取,以其安全、廉价的特点正成为污染土壤修复研究的热点。目前植物提取技术存在两种途径,一是利用超累积植物的超强吸收能力,提取土壤中重金属^[2]。McGrath 等人于 1998 年至 2000 年在英国 Bedfordshire 进行了 3a 的田间试验研究,研究结果表明,种植 14 个月的遏蓝菜对镉和锌的修复效率分别可高达 21.7% 和 4.4%^[3]。虽然超累积植物显示出高效的吸收能力和提取效果,但是多数超累积植物生长缓慢、生物量较小、不易成活,难以在实际生产中得以广泛应用。而另一种修复方式是,选用生长较为迅速、生物量较大、富集重金属能力相对较强的非超累积植物提取重金属。Blaylock 等在含镉 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤中,施用 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 EDTA 1 周后,印度芥菜(*Brassica juncea*)地上部镉浓度达到 $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[4]。

植物对重金属的吸收累积能力和植物地上部的生物量对植物修复效率有着重要的影响^[5],本研究的目的是为了比较超累积植物与高生物量的非超累积植物对于镉污染土壤的修复效率,为利用植物修复技术解决土壤重金属污染问题奠定基础。

1 材料与 方法

1.1 试验材料

试验用土壤采自北京市大兴区蔬菜生产基地($39^{\circ}41'N$; $116^{\circ}36'E$)0~20cm 的表层土壤,该基地由于长年施用含镉有机、无机肥料,致使土壤镉含量超过我国土壤三级环境质量标准 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。供试土壤基本理化性质及镉含量如下:pH7.3,有机质 2.4%,碳酸钙 2.8%,土壤全镉含量 $2.87 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

供试植物为镉超积累植物遏蓝菜(*Thlaspi caerulescens*, Ganges 生态型)和 3 种富集镉能力较强、生物量较大的植物烟草(*Nicotiana tabacum* L. cv. K236)、印度芥菜(*Brassica juncea* L. Czern)和向日葵(*Helianthus annuus* L. 品种为京乐美人葵)。

1.2 试验方法

供试土壤风干过 5mm 筛后装盆,同时施入底肥,N 用量为 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土,P 用量为 $120 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土,K 用量为 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土。印度芥菜和遏蓝菜种植于小盆,每盆装土 2kg,向日葵和烟草种植于大盆,每盆装土 4kg。将育苗 4 周后的遏蓝菜和烟草,移栽于盆中,遏蓝菜每盆 5 株,烟草每盆 1 株;印度芥菜和向日葵采用直播方式,每盆播种 10 粒,植物出苗后及时间苗,10d 后印度芥菜留苗每盆 4 株,向日葵留苗每盆 1 株。每天利用称重法控制水分含量占土壤质量的 20%。以上作物均设 4 个平行,植物种植 60d 后收获。

1.3 样品分析及数据处理

将收获的植物样品洗净烘干后称重,植物体内镉含量的测定按照微量元素采样和样品制备方法处理植株样,用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消化,原子吸收——石墨炉法测定样品中 Cd 的含量^[6]。土壤总镉含量采用 $\text{HCl-HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$ 消解,原子吸收——石墨炉法测定样品中 Cd 的含量^[6]。标准物质(中国环境监测总站)进行全程质量控制。

土壤有效态镉含量采用 Pueyo 等人的方法,土壤用 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 CaCl_2 溶液浸提振荡 2h 离心 10min,过滤后取上清液用石墨炉原子吸收光谱法测定镉含量^[7]。

数据用 SAS8.02 软件进行统计分析,多重比较采用 Duncan 检验。

2 结果与 讨论

2.1 修复植物的生物量比较

试验过程中,4 种植物生长状况良好。植物的生物量见表 1,4 种植物地上部和地下部生物量差异显著。地上部生物量最大的是烟草,其次是向日葵、印度芥菜,超累积植物遏蓝菜生物量最小,其干重不足 1g。烟草的地上部生物量分别是遏蓝菜、印度芥菜、向日葵的 35 倍、3 倍、2 倍。对于地下部生物量而言,4 种植物的高低顺序依次为印度芥菜 > 烟草 > 向日葵 > 遏蓝菜。

表 1 植物生物量的比较 ($\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$ Dry Weight)

Table 1 Shoot biomass of four plants

项目 Item	烟草 Tobacco	印度芥菜 Indian mustard	向日葵 Sunflower	遏蓝菜 <i>Thlaspi caerulescens</i>
地上部 Shoot	24.8 ± 1.7 (a)	8.1 ± 0.8 (b)	13.7 ± 0.6 (b)	0.7 ± 0.2 (c)
地下部 Root	0.9 ± 0.2 (a)	1.0 ± 0.2 (a)	0.8 ± 0.1 (a)	0.1 ± 0.0 (b)

表中数据为平均值 $\pm$ 标准差,同行括号内不同字母表示差异显著 (Dunn, $p < 0.01$),以下同 Data are shown as mean $\pm$ SD of four replicates, different letters in brackets of the same row indicate significant differences for the each plant at $p < 0.01$, the same below

2.2 植物体内镉含量的差异

4 种植物不同部位镉含量结果见图 1。统计分析结果表明 4 种植物地上部和地下部镉含量差异显著,地上部镉含量在 $1.7\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 到 $43.7\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,地下部镉含量差异略小,在 $1.2 \sim 26.2\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间。尽管遏蓝菜地上部镉含量未达到超累积植物 $100\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的参考值^[8],但是仍然表现出能够超量吸收镉的超累积特性。遏蓝菜体内地上部和地下部镉含量明显高于其他 3 种植物,其地上部镉含量分别是烟草、印度芥菜和向日葵(叶)的 10、27 倍和 56 倍;其地下部镉含量也分别是烟草、印度芥菜和向日葵的 16、22 和 17 倍(图 1)。

生物富集系数(植物地上部镉含量与土壤中镉含量比值)能够反应植物吸收累积重金属的能力。Baker^[9]认为,超累积植物富集系数远远大于 1,而排斥型作物富集系数往往小于 1。本研究中镉超累积植物遏蓝菜富集系数高达 14 以上,其他人研究结果同样表明,遏蓝菜(Ganges 生态型)其富集系数在 3 ~ 73 之间,平均值为 16.7^[10]。而印度芥菜和烟草富集系数分别为 1.3 和 1.6,其富集系数均大于 1,说明印度芥菜和烟草对土壤中的镉具有一定的富集能力。而向日葵的富集系数仅为 0.4 左右,说明向日葵对镉元素的富集作用,明显低于超累积植物(遏蓝菜),和富集能力强的作物(印度芥菜、烟草)。

2.3 土壤总镉和有效态镉含量分析

土壤总镉含量及有效态含量见图 2。4 种植物种植后土壤总镉含量基本没有变化。土壤有效态镉含量在 $3.05 \sim 4.19\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,与对照相比,种植印度芥菜和烟草后,土壤有效态镉含量有所降低,但统计结果表明差异并不显著。

2.4 植物提取镉效率的比较

植物提取镉量可以通过植物地上部镉含量与生物量相乘得到。盆栽试验中 4 种植物提取镉最多的是烟草,每盆可以提取 $117\mu\text{g}$,遏蓝菜和印度芥菜提取镉量相当分别为 $35\mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$ 和 $30\mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$,向日葵提取量最少,每盆仅为 $10\mu\text{g}$ 左右,显著低于其他修复类作物(表 2)。4 种植物对土壤中重金属的提取效率分别为:烟草 1%,遏蓝菜 0.6%,印度芥菜 0.5%,向日葵 0.08%(表 2)。

尽管高生物量植物烟草提取镉量较高,但从表 2 中提取效率中可以看出,植物地上部吸收镉的量仅为土壤中总镉的 1%。假设修复类作物体内浓度值无变化,田

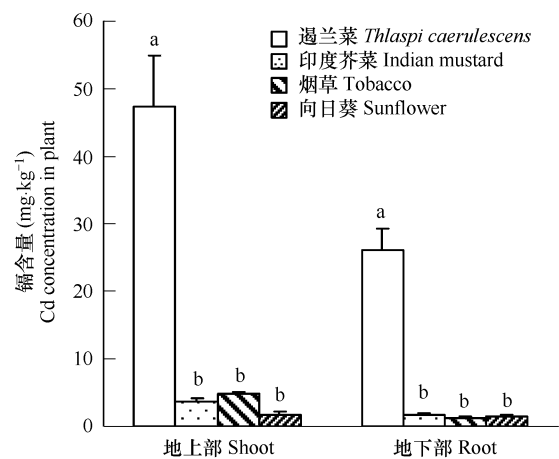
图 1 植物体内镉含量的差异 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ DW)

Fig. 1 Cd concentration in four plants

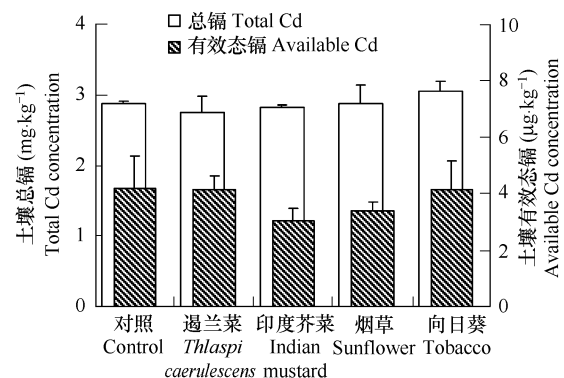


图 2 土壤总镉和有效态镉的比较

Fig. 2 Total Cd and available Cd concentration in soil

间生物量遏蓝菜按 $0.9\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 计,印度芥菜按 $7.3\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 计,烟草按 $12.6\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 计,向日葵按 $12\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 计^[11],将 0~20cm 表层土壤(土壤容重按 $1.3\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 计)中镉含量降至我国土壤环境二级环境质量标准($\text{Cd} < 1.0\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),预计每茬作物田间提取镉量和所需种植茬数见表 2。预计田间提取镉量最高的仍为烟草,其次为遏蓝菜、印度芥菜和向日葵,而所需修复种植茬数,最少也要 81 茬。

3 讨论

与大多数超累积植物一样,遏蓝菜生长缓慢,生物量较小。Ozturk 等人^[12]研究结果表明,即使在锌供应充分的条件下,生长 75d 的遏蓝菜,干重仅为 $30\text{mg}\cdot\text{plant}^{-1}$ 左右。McGrath 等人^[3]田间种植 4 个月的遏蓝菜,其生物量仅为 $0.38\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。而玉米、向日葵等高生物量植物在田间地上部生物量可高达 $25\sim 30\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[13]。

表 2 修复类作物提取效率的比较
Table 2 The phytoextraction efficiency of four plants

植物 Plants	提取镉量 Total uptake Cd ($\mu\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$)	提取效率 Phytoextraction efficiency(%)	地上部镉含量 Cd concentration ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	预计田间每茬 植物地上部产量 Predicted yield in field ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	预计田间每茬 提取镉量 Predicted total uptake Cd ($\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$)	预计所需 修复茬数 Predicted No. of planting
遏蓝菜 <i>Thlaspi caerulescens</i>	35	0.6	47.42	0.9	42.68	114
烟草 Tobacco	117	1.0	4.76	12.6	59.96	81
印度芥菜 Indian mustard	30	0.5	3.72	7.3	27.16	179
向日葵 Sunflower	9	0.08	1.21	12	14.52	335

提取镉量 = 地上部生物量 $\times$ 地上部镉含量;提取效率 = 提取镉量 / (土壤镉含量 $\times$ 土壤质量) $\times 100\%$; 预计田间提取镉量 = 地上部镉含量 $\times$ 预计田间提取镉量;预计所需修复茬数 = 土壤质量 $\times$ (土壤镉含量 - 土壤三级质量标准值) / 预计田间提取镉量 Total uptake Cd = shoot biomass $\times$ shoot Cd con.; phytoextraction efficiency = total uptake Cd / (soil Cd con. $\times$ soil weight) $\times 100\%$; predicted total uptake Cd = shoot Cd con. $\times$ predicted yield in field; predicted No. of planting = soil weight $\times$ (soil Cd con. - the 3rd grade of Environmental Quality Standard for Soils) / predicted total uptake Cd

本试验的结果表明(图 1),超累积植物遏蓝菜对重金属的吸收能力明显高于其它 3 种高生物量植物。kayser 等人^[13]的研究结果同样显示,在土壤总镉为 $2.5\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土壤中,烟草、柳树等大生物量作物地上部镉含量不到超累积植物遏蓝菜的 1/2。一些研究结果表明,遏蓝菜对重金属的吸收能力可能是由于在其单位鲜重的根系细胞膜上分布更多的金属转运蛋白,而使植物对重金属具有较高的亲和力,因此植株具有对重金属的超积累特性^[14-16]。

尽管遏蓝菜富集重金属能力相对较强,但是实际修复效率仍低于高生物量植物烟草。实际上除了其生物量明显低于烟草之外,植物的根系形态分布特征也有可能是影响植物吸收效率的关键因素之一^[17]。Keller 等^[17]在田间试验中比较了遏蓝菜与高生物量植物烟草、遏蓝菜、印度芥菜、玉米和柳树的根系在土壤中分布对吸收土壤重金属的影响。其研究表明,遏蓝菜根系主要分布在 20cm 土层中,而印度芥菜和烟草的根系在土壤中可达 50cm 至 60cm。植物累积根长密度(L_A)和地上部生物量的比值与地上部重金属浓度显著相关。在本试验中,烟草地下部的生物约为遏蓝菜的 10 倍左右,其根系在土壤中的分布范围应强于遏蓝菜,可通过根系接触更多的土壤颗粒获取较多的重金属。

4 种供试植物对于土壤中总镉和有效态镉的影响甚微(图 2);对试验数据的计算结果同样显示植物提取效率较低(表 2)。对于提取镉量最高的烟草,其提取效率也仅为土壤中总镉的 1%。植物对土壤中重金属的吸收,除了与土壤中重金属的总量有关外,在很大程度上还依赖于重金属在土壤中的生物有效性^[18-20]。由于本试验供试土壤 pH(7.3)较高,有效态镉含量仅为 $4.2\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,尚不足总镉含量的 1%,过低的生物有效性限制了植物对土壤中镉的吸收。

尽管一些试验研究表明,超累积植物遏蓝菜根系吸收重金属的能力很强,可导致根际土壤中可溶态重金属产生大量的耗竭^[16,21,22];但对于本试验的供试土壤测定结果显示,土壤中有效态镉含量没有明显的变化。

实际上由于重金属在土壤中的移动性较差,植物根系对土壤中重金属的影响范围仅局限于根表数毫米到 1 ~ 2 cm 的根际区域内。在本试验中,由于遏蓝菜生长缓慢,地下部生物量干重仅有 0.1 g/pot,其根际区域在土体中所占的比例较低,测定土壤不能代表根际土壤,因此可能导致在试验中没有发现有效态镉有明显的降低趋势。

一些学者认为^[11,23],虽然大生物量植物其体内重金属含量低,但是其生物量远胜于遏蓝菜,因此更具有实际修复意义。本试验所得数据表明,具有一定富集能力的烟草,其提取效率在一定程度上胜过超积累植物遏蓝菜。但是从预计的所需种植茬数来看,如果想要将供试土壤中镉含量降至我国土壤环境二级环境质量标准($\text{Cd} < 1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),最少也要种植 81 茬烟草,显然这并不具备现实意义。McGrath 和 Zhao^[5]曾分析过植物修复的可行性,他们认为植物提取技术的成功取决于生物量和生物富集系数两个重要的参数。如果植物每茬生物量为 $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,其生物富集因子应该达到 20 或者更大,通过种植 10 茬植物才可能使土壤中重金属的浓度减半。实际上预计烟草的田间每茬生物量可达到 $12.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,但是其生物富集系数只有 1.6(远远低于 20),因此不能取得满意的结果。所以根据田间土壤重金属的污染程度和分布状况,选择合适的植物、扩大植物根际分布范围、提高土壤中重金属的有效态性等关键因素,仍是今后所需重点研究的科学问题。

References:

- [1] Zhou Q X, Song Y F, eds. Principle and methods of contaminated soil remediation. Beijing: Science Press, 2004.
- [2] Baker A J M, McGrath S P, Sidoli C M D, *et al.* The possibility of in situ heavy metal decontamination of polluted soils using crops of metal-accumulating plants. *Resource Conservation Recycling*, 1994, 11: 41—49.
- [3] McGrath S P, Lombi E, Gray C W, *et al.* Field evaluation of Cd and Zn phytoextraction potential by the hyperaccumulators *Thlaspi caerulescens* and *Arabidopsis halleri*. *Environment Pollution*, 2006, 141:115—125.
- [4] Blaylock M J, Salt D E, Dushenkov S, *et al.* Enhanced accumulation of Pb in India mustard by soil applied chelating agents. *Environmental Science and Technology*, 1997, 31:860—865.
- [5] McGrath S P, Zhao F J. Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils. *Current Opinion in Biotechnology*, 2003, 14:277—282.
- [6] Zhao Y R, Zhang J S, Gao J H, eds. Handbook of determination technology and method of pollution-free vegetables. Beijing: China Agriculture University Press, 2004, 105—107.
- [7] Pueyo M, Lopez-Sanchez J F, Rauret G. Assessment of CaCl_2 , NaNO_3 and NH_4NO_3 extraction procedures for the study of Cd, Cu, Pb and Zn extractability in contaminated soils. *Analytica Chimica Acta*, 2004, 504:217—226.
- [8] Brooks R R. Gerbotany and hyperaccumulators. In: R. R. Brooks ed. *Plants that hyperaccumulate heavy metals* Wallingford, UK, CAB International, 1998. 55—94.
- [9] Baker A J M. Accumulators and excluders - Strategies in the response of plants to heavy metals. *Journal of Plant Nutrition*, 1981, 3: 643—654.
- [10] Zhao F J, Lombi E, McGrath S P. Assessing the potential for zinc and cadmium phytoremediation with the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Plant and Soil*, 2003, 249:37—43.
- [11] Keller C, Hammer D. Alternatives for phytoextraction biomass plants versus hyperaccumulators. *Geophysical Research Abstracts*, 2005, 7:3285—3293.
- [12] Ozturk L, Karanlik S, Ozkutlu F, *et al.* Shoot biomass and zinc/cadmium uptake for hyperaccumulator and non-accumulator *Thlaspi* species in response to growth on a zinc deficient calcareous soil. *Plant Science*, 2003, 164:1095—1101.
- [13] Kayser A, Wenger K, Keller A, *et al.* Enhancement of phytoextraction of Zn, Cd and Cu from calcareous soil: the use of NTA and sulfur amendments. *Environmental Science and Technology*, 2000, 34:1778—1783.
- [14] Küpper H, Zhao F J, McGrath S P. Cellular compartmentation of zinc in leaves of hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Plant Physiology*, 1999, 119:305—312.
- [15] Salt D E, Kato N, Krämer U, *et al.* The role of root exudates in nickel hyperaccumulation and tolerance in accumulator and nonaccumulator species of *Thlaspi*. In: Terry N, eds. *Phytoremediation of Contaminated Soil and Water*. Boca Raton. FL. USA. : Lewis Publisher, 2000. 189—200.
- [16] Pence N S, Larsen P B, Ebbs S, *et al.* The molecular physiology of heavy metal transport in the Zn/Cd hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2000, 97: 4956—4960.

- [17] Keller C, Hammer D, Kayser A, *et al.* Root development and heavy metal phytoextraction efficiency: comparison of different plant species in the field. *Plant and Soil*, 2003, 249: 67—81.
- [18] Ahumada I, Mendoza J, Navarrete E, *et al.* Sequential extraction of heavy metals in soils irrigated with wastewater. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1999, 30:1507—1519.
- [19] Alloway B J, Jackson A P, Morgan H. The accumulation of cadmium by vegetables grown on soils contaminated from a variety of sources. *The Science of the Total Environment*, 1990, 91: 223—236.
- [20] Brown S L, Chaney R L, Angle J S, Ryan J A. The phytoavailability of cadmium to lettuce in long-term biosolids-amended soils. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27: 1071—1078.
- [21] Shen Z G, Zhao F J, McGrath S P. Uptake and transport of zinc in the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* and the non-hyperaccumulator *Thlaspi ochroleucum*. *Plant, Cell and Environment*, 1997, 20:898—906.
- [22] Lasat M M, Baker A J M, Kochian L V. Physiological characterization of root Zn^{2+} absorption and translocation to shoots in Zn hyperaccumulator and non accumulator species of *Thlaspi*. *Plant Physiology*, 1996, 112:1715—1722.
- [23] Nie F H. New comprehensions of Hyperaccumulator. *Ecology and Environment*, 2005, 14:136—138.

参考文献:

- [1] 周启星, 宋玉芳. 污染土壤修复原理与方法. 北京:科学出版社,2004.
- [6] 赵婴荣,张敬锁,高景红. 无公害蔬菜产品质量监测技术规范手册. 北京:中国农业大学出版社,2004. 105~107.
- [23] 聂发辉. 关于超积累植物的新理解. *生态环境*,2005,14:136~138.