

重金属污染土壤的植物修复研究

III 金属富集植物 *Brassica juncea* 对锌镉的吸收和积累*

蒋先军 骆永明 赵其国

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要 采用温室盆栽试验研究了印度芥菜对土壤中锌镉污染的忍耐、积累能力, 以检验这种植物修复 Zn、Cd 污染土壤的可能性及其潜力。在加入 Zn 500 和 1 000 mg kg⁻¹ 的土壤中, 印度芥菜生长 66 天后, 叶片中积累 Zn 的平均浓度分别达 280 和 662 mg kg⁻¹, 地上部带走的 Zn 分别为每盆 2 195 和 3 412 μg。在加入 Cd 200 mg kg⁻¹ 的土壤中生长的印度芥菜, 叶片中积累 Cd 浓度为 161 mg kg⁻¹, 地上部带走的 Cd 为每盆 381 μg。和普通植物相比, 印度芥菜更能将 Zn 和 Cd 从根运输到地上部。Zn 500 mg kg⁻¹ 处理的土壤在种植印度芥菜后其 NH₄NO₃ 提取的 Zn 显著高于不种植物的处理; 土壤添加 Cd 200 mg kg⁻¹ 的处理 NH₄NO₃ 提取的 Cd 也显著高于不种植物的处理, 可能的原因是植物根分泌出特殊的分泌物, 专一性地螯合溶解根系附近的难溶态 Zn 和 Cd, 从而提高土壤溶液中的浓度。印度芥菜对 Zn、Cd 有较强的忍耐和富集能力, 是 Zn、Cd 污染土壤修复有潜力的植物。

关键词 植物修复, 印度芥菜, 重金属, 土壤污染

中图分类号 X131.3

我国铅锌矿蕴藏量丰富, 分布遍及全国。随着铅锌矿的累年开发, 矿渣、矿井深处的地下水与选矿水不断排放到周围农田。此外, 冶炼、电镀等工业废水的排放及农田污泥的施用都造成农田土壤的锌镉污染。我国农田土壤中锌镉污染状况令人担忧。华南某矿区周围农田土壤中锌含量达 690~ 4 000 mg kg⁻¹; 华北某污灌区土壤含锌量超过 1 500 mg kg⁻¹; 长期施用污泥的土壤中锌含量可达 370~ 470 mg kg⁻¹[1]。某污灌区农田土壤中镉含量高达 130 mg kg⁻¹, 我国污灌区已有 11 处到了生产“镉米”的程度, 例如, 成都东郊污灌区内米中含镉量高达 1.65 mg kg⁻¹[2]。土壤被重金属污染后, 不仅影响作物产量和品质, 而且可以进入食物链影响人类健康。所以, 土壤重金属污染的治理一直备受人们关注。

锌镉等重金属进入土壤后, 由于移动性小而很难清除。常用的工程措施或化学方法治理土壤重金属污染, 不仅成本昂贵, 而且还会破坏土壤结构以及微生物区系, 并且可能造成“二次污染”。植物提取修复技术作为一种新兴的绿色生物技术, 能在不破坏土壤生态环境, 保持土壤结构和微生物活性的状况下, 通过植物的根系直接将污染元素吸收, 从土壤中带走, 从而修复被污染的土壤[3,4]。

* 江苏省青年科技基金(BQ98050), 国家自然科学基金(49831070、40125005 和 49831042), 国家重点基础研究发展规划项目(G1999011807), 中国科学院南京土壤研究所土壤与环境联合开放研究实验室基金项目资助

收稿日期: 2001-02-19; 收到修改稿日期: 2001-08-22

用来修复重金属污染土壤的理想植物应能忍耐和积累金属污染物并具有高的生物量。但现在发现的 Zn/Cd 的超积累植物如 *Thlaspi caerulescens* 生长缓慢、植株矮小、地上部生物量小, 限制了在实际中的应用^[5]。与 *Thlaspi caerulescens* 同科的印度芥菜(*Brassica juncea*) 生物量大, 并可同时积累 Pb、Cr、Cd、Ni、Zn、Cu^[6] 和 Se^[7], 采用基质(砂和珍珠岩)培养^[6]和营养液培养^[8]时印度芥菜可以积累相当高浓度的 Zn 和 Cd。土培的资料较少, Ebbs 等在美国 Silver Bow Creek 的 Zn/Cd 污染土壤上盆栽种植印度芥菜, 并采用一种微酸性的复合肥进行调控, 得到的实验结果^[9]远远低于营养液及基质培养, 对于种植前后土壤中的金属形态变化没有详细报道, 我们还无法知道印度芥菜吸收、运输 Zn/Cd 与土壤中 Zn/Cd 形态的关系。

本试验采用与 Ebbs 等研究的土壤相似 pH 的土壤, 在前面^[10]的基础上进一步研究了印度芥菜对土壤中 Zn、Cd 污染的忍耐、积累能力, 以及土壤中 Zn、Cd 形态的变化, 以检验这种植物修复 Zn、Cd 污染土壤的可能性及其潜力。

1 材料与方 法

1.1 土壤样品

土壤采自江苏省常熟市中国科学院南京土壤研究所生态试验站, 为河湖相沉积物发育的水稻土。供试土样(0~20 cm)风干后过 2 mm 尼龙筛备用。土壤基本性质如下: pH(H₂O) 7.40, 有机质 36.3 g kg⁻¹, 全氮 2.25 g kg⁻¹, 全磷 0.75 g kg⁻¹, 全钾 17.4 g kg⁻¹, 游离 Fe₂O₃ 16.25 g kg⁻¹, CEC 215.9 mmol kg⁻¹, 并含痕量的 CaCO₃。土壤全 Zn 含量为 69.5 mg kg⁻¹, 全 Cd 含量为 0.07 mg kg⁻¹。分析方法见参考文献 [11]。

1.2 盆栽试验

设 4 个处理: 1) 对照(CK), 不加 Zn 和 Cd; 2) Zn1, 以溶液态(分析纯 Zn(NO₃)₂) 加入 Zn 500 mg kg⁻¹ (烘干土计, 下同); 3) Zn2, 以溶液态(分析纯 Zn(NO₃)₂) 加入 Zn 1 000 mg kg⁻¹; 4) Cd, 以溶液态(分析纯 Cd(NO₃)₂) 加入 Cd 200 mg kg⁻¹。各处理同时设不种植物的空白, 每个处理 4 次重复。将处理过的土壤装入塑料盆, 每盆 1.5 kg (以烘干土计), 用分析纯 KH₂PO₄ 加入 P 80 mg kg⁻¹ 和 K 100 mg kg⁻¹; 氮肥以分析纯 NH₄NO₃ 加入, NH₄NO₃ 的加入量视处理而异, 以弥补因施用金属硝酸盐造成的处理间氮素差异。土样混和均匀后, 加入蒸馏水使含水量为田间持水量的 60%, 保持 2 天后, 播入印度芥菜(*Brassica juncea*) 种子, 生长一周后间苗, 每盆留 4 苗; 植物生长期间每天以称重法加入蒸馏水, 保持土壤湿度为田间持水量的 60%。播种 66 天后收获, 沿土面剪取植株地上部, 测量株高、鲜重, 同时洗出根系; 在 105℃ 下杀青, 70℃ 烘干(48h), 称地上部和根的干重。植物样品磨碎后用硝酸-高氯酸法消煮, Hitachi Z-8200 石墨炉原子吸收分光光度计测定 Zn、Cd 含量。

收获后的土壤调节水分至 40% WHC, 两天后, 取土样混匀, 过 2 mm 筛, 土壤 Zn、Cd 采用如下方法提取: 用 1 mol L⁻¹ 的 NH₄NO₃, 土水比 1: 2.5 提取, 120 r min⁻¹ 振荡 16 小时, 中速滤纸过滤; 0.43 mol L⁻¹ HOAc, 1: 5 土液比提取, 其余同前。滤液用 Hitachi Z-8200 石墨炉原子吸收分光光度计测定 Zn、Cd 含量。

本文所列结果为 4 次重复的平均值, 数据进行方差分析, 并用新复极差法进行多重比较。

2 结 果

2.1 Zn 和 Cd 对印度芥菜生长的影响

Zn 和 Cd 对印度芥菜生长影响的结果见表 1。在高浓度的 Zn(1 000 mg kg⁻¹) 或 Cd

(200 mg kg^{-1}) 环境里, 印度芥菜的生长显著地受抑制, 而土壤加入 500 mg kg^{-1} Zn 处理对印度芥菜的生长没有显著影响。

表 1 Zn 和 Cd 对印度芥菜生长影响¹⁾

Table 1 Influence of Zn and Cd on the growth of *B. juncea*

处理 Treatments	株高 Plant height (m)	根干重 Roots dry weights (g)	地上部干重 Shoots dry weights (g)
CK	$22 \pm 2.8^{\text{a}}$	$1.87 \pm 0.2^{\text{a}}$	$9.48 \pm 0.4^{\text{a}}$
Zn1	$25.6 \pm 2.0^{\text{a}}$	$1.44 \pm 0.4^{\text{a}}$	$8.05 \pm 2.5^{\text{a}}$
Zn2	$26.1 \pm 2.4^{\text{a}}$	$0.83 \pm 0.1^{\text{b}}$	$5.38 \pm 0.7^{\text{b}}$
Cd	$13.5 \pm 1.2^{\text{b}}$	$0.25 \pm 0.1^{\text{c}}$	$1.60 \pm 0.3^{\text{c}}$

1) 用新复极差法(SSR)统计, 表中小写字母为 5% 显著差异水平, 大写字母为 1% 显著差异水平

2.2 印度芥菜对 Zn 和 Cd 的富集

印度芥菜对 Zn 的积累随 Zn 处理浓度的增加而显著增加(见图 1)。在加入 500 mg kg^{-1} Zn 的土壤中生长的印度芥菜, 叶片中积累 Zn 平均浓度为 280 mg kg^{-1} , 茎为 187 mg kg^{-1} , 根为 395 mg kg^{-1} 。加入 Zn 1000 mg kg^{-1} 的处理中, 叶片积累 Zn 浓度为 662 mg kg^{-1} , 茎为 520 mg kg^{-1} , 根为 784 mg kg^{-1} 。在加入 200 mg kg^{-1} Cd 的土壤中生长的印度芥菜, 叶片中积累 Cd 浓度为 161 mg kg^{-1} , 茎为 105 mg kg^{-1} , 根为 431 mg kg^{-1} 。

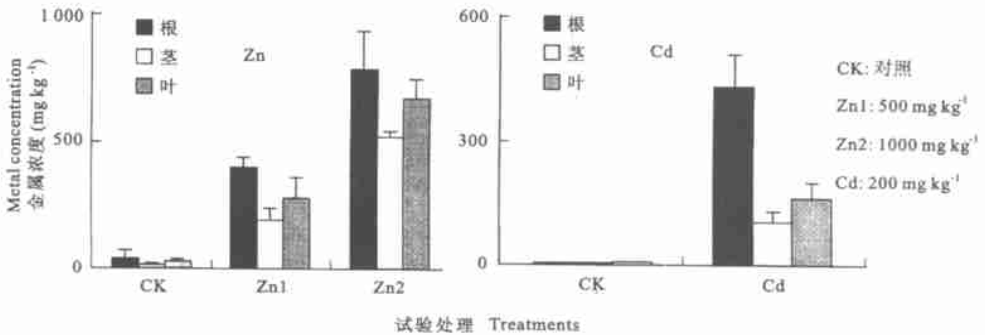


图 1 Zn 和 Cd 在印度芥菜根、茎和叶中的积累与分配(误差线表示 S. D.)

Fig. 1 Distribution of Zn and Cd in *B. juncea* (Error bars represent S. D.)

2.3 印度芥菜地上部从土壤带走 Zn 和 Cd 的量

在加入 500 mg kg^{-1} Zn 的土壤中生长的印度芥菜, 地上部带走的 Zn 为每盆 $2195 \mu\text{g}$ (浓度与生物量干重之积), 加入 Zn 1000 mg kg^{-1} 的处理为 $3412 \mu\text{g}$; 在加入 200 mg kg^{-1} Cd 的土壤中生长的印度芥菜, 地上部带走的 Cd 为 $381 \mu\text{g}$ (见图 2)。

2.4 土壤 NH_4NO_3 和 HOAc 提取的 Zn 和 Cd

如图 3 所示, 加入 Zn 500 mg kg^{-1} 的土壤在种植印度芥菜后 NH_4NO_3 提取的 Zn 显著高于不种植物的处理 ($p < 0.01$); 加入 Zn 1000 mg kg^{-1} 的处理 NH_4NO_3 提取的 Zn 也有相同的趋势, 但差异不显著。土壤添加 Cd 200 mg kg^{-1} 的处理, 其 NH_4NO_3 提取的 Cd 也显著高于不种植物的处理 ($p < 0.01$)。HOAc 提取的 Zn 和 Cd 与 NH_4NO_3 提取的浓度有着相似的趋势, 但幅度要小得多(图 4)。

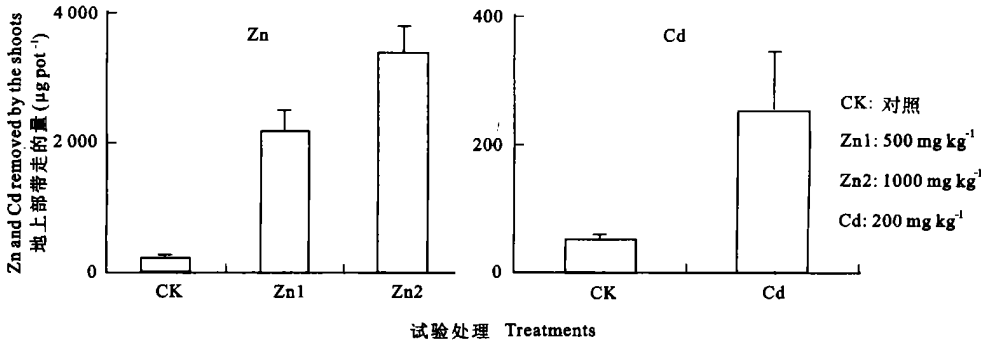


图 2 印度芥菜地上部从土壤带走 Zn 和 Cd 的量(误差线表示 S. D.)

Fig. 2 Zn and Cd removed by the shoots of *B. juncea* (Error bars represent S.D.)

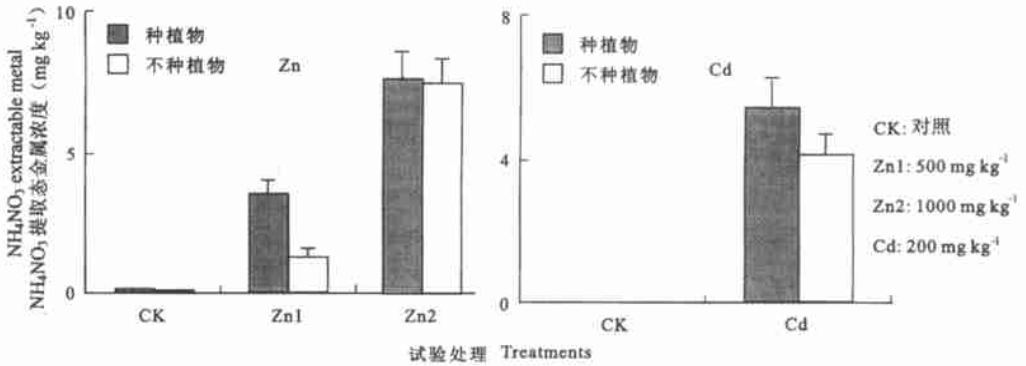


图 3 种植印度芥菜后土壤中 NH_4NO_3 提取态 Zn、Cd 的变化(误差线表示 S. D.)

Fig. 3 Changes in soil NH_4NO_3 extractable Zn and Cd after growth of *B. juncea* (Error bars represent S.D.)

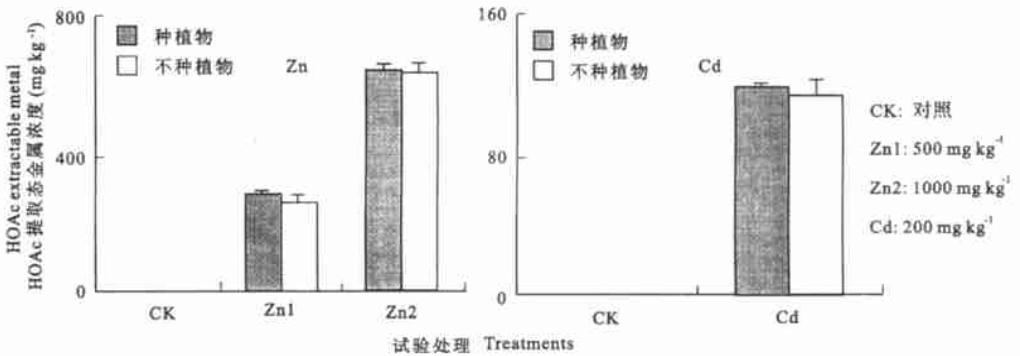


图 4 种植印度芥菜后土壤中 HOAc 提取态 Zn、Cd 的变化(误差线表示 S. D.)

Fig. 4 Changes in soil HOAc extractable Zn and Cd after growth of *B. juncea* (Error bars represent S.D.)

3 讨论

3.1 印度芥菜对 Zn 和 Cd 的吸收与运输

关于植物对 Zn 和 Cd 的吸收与运输已有许多的研究工作,如玉米^[12]、黄瓜^[13]、大豆^[14]以及向日葵^[15]。大多数植物吸收的重金属都吸持在根部,植物吸收的重金属随土壤中重金属浓度的增加而增加;一般而言,根中 Cd 的浓度是地上部的 10~100 倍,根中 Zn 的浓度也数倍于地上部。印度芥菜根中 Zn 的浓度和地上部大致相当;其根中 Cd 的浓度大约是叶中的 2~3 倍(图 1)。由此可见,和一般植物相比,印度芥菜更能将 Zn 和 Cd 从根部运输到地上部。

3.2 印度芥菜对土壤中 Zn 和 Cd 有效性的影响及其与吸收的关系

Hamon 等种植 7 种 Zn 和 Cd 吸收能力不同的植物,植物地上部的 Cd 浓度为 0.075~2.27 mg kg⁻¹, Zn 的浓度为 33~259 mg kg⁻¹;植物地上部吸收的 Zn 总量为每盆 10~120 μg, Cd 为每盆 0.01~1.3 μg。种植物一周后发现土壤溶液中的 Zn 和 Cd 浓度略有下降,以后不再下降^[16]。Knight 等在欧洲 7 种被重金属污染的土壤上种植超积累植物 *Thlaspi caerulescens* 以后,土壤溶液中 Zn 浓度平均下降了 0.8%, 7 种土壤中的 5 个甚至小于 0.5%^[17]。地上部 Zn 的浓度平均为 36 000 mg kg⁻¹。在我们的试验中,加入 Zn 500 mg kg⁻¹ 和 Cd 200 mg kg⁻¹ 的土壤在种植印度芥菜后 NH₄NO₃ 提取的金属显著高于不种植物的空白(图 3, 4)。Hamon 等采用的是普通植物,植物从土壤中带走的 Zn/Cd 较少,土壤溶液中 Zn/Cd 浓度变化不大可以用化学平衡的理论来解释。我们采用的印度芥菜地上部 Cd 的浓度为 160 mg kg⁻¹, Zn 的浓度较低,但由于生物量大,植物从土壤中吸收的量远远超过普通植物,印度芥菜地上部吸收的 Zn 是 Hamon 等结果的 20 倍以上, Cd 是他们的 300 倍。在这种情况下,土壤溶液中浓度变化不大甚至有所增加是很难全部用普通的化学平衡理论来解释。已有前人的研究证实种植超积累植物与非超积累植物之间、种植超积累植物前后根区 pH 并没有太大的变化^[17, 18], 根际与非根际土在整个生长过程中 pH 也没有多大的差别^[18], 我们也有相同的研究结果(数据未列出)。所以,更可能的原因是植物根分泌出特殊的分泌物,可以专一性地螯合溶解根系附近的难溶态 Zn 和 Cd, 从而提高土壤溶液中的金属离子浓度。其他可能的原因是植物根际存在特殊的微生物区系,通过微生物的活动或微生物的特殊分泌物来溶解难溶态 Zn 和 Cd 以及根细胞通过特殊的原生质膜包被金属,提高 Zn 和 Cd 的生物有效性^[16]。

此外,印度芥菜地上部 Zn 的浓度与土壤中 HOAc 提取的 Zn 有极显著的线性相关(图 5)。

3.3 印度芥菜对 Zn 和 Cd 的积累及其与植物修复的关系

植物提取修复是利用植物特别是其地上部分去除土壤中污染物质,使污染土壤环境净化、恢复的过程^[3, 4]。从本试验结果来看,印度芥菜对 Zn、Cd 有较好的忍耐和积累能力,植物从土壤中带走的 Zn 分别占土壤全 Zn 量的 0.29% (Zn 500 mg kg⁻¹ 处理) 和 0.22% (Zn 1 000 mg kg⁻¹ 处理), 从土壤中带走的 Cd 占土壤全 Cd 量的 0.13% (Cd 200 mg kg⁻¹ 处理)。Ebbs 等研究了印度芥菜对 Zn 和 Cd 污染土壤的修复作用,植物从土壤中

带走的 Zn 和 Cd 都小于全量的 0.1%^[9], 这与我们以上的结果大致相当。考虑到本试验是在冬季进行, 温度低(0~15℃), 光照弱, 而且植物生长在 1.5 kg 的小盆中。这些都对植物生长产生不利影响。如果植物生长的环境条件改善, 并采用一些调控措施, 植物从土壤中带走的金属量会大幅度增加。从这个角度来讲, 采用印度芥菜来修复重金属污染土壤是很有潜力的。

4 结 论

盆栽试验结果表明, 与一般植物相比, 印度芥菜更能将 Zn 和 Cd 从根运输到地上部。种植印度芥菜后土壤 NH_4NO_3 提取的 Zn 和 Cd 显著高于不种植物的空白处理, 这种结果很难全部用化学平衡来解释, 更可能的原因是植物根分泌出特殊的分泌物, 可以专一性地螯合溶解根系附近的难溶态 Zn 和 Cd, 从而提高土壤溶液中的浓度。印度芥菜对 Zn 和 Cd 有较好的忍耐和富集能力, 通过改善植物生长条件并配合其他调控可以大幅度提高其富集能力, 是有潜力的 Zn、Cd 污染土壤的修复植物。

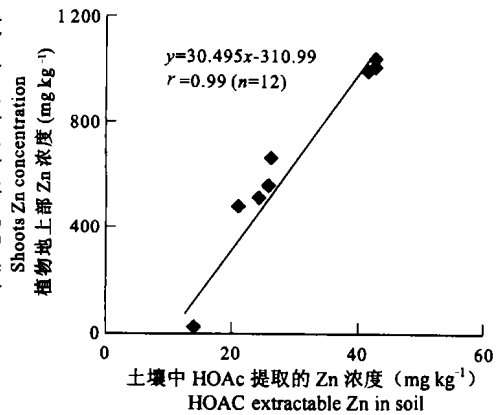


图5 印度芥菜地上部积累 Zn 与土壤中 HOAc 提取的 Zn 的关系

Fig. 5 Relationship between Zn accumulation in the shoots of *Brassica juncea* and HOAc extractable Zn in soil

参 考 文 献

- 林玉锁, 韩凤祥. 锌. 见: 陈怀满等. 土壤-植物系统中的重金属污染. 北京: 科学出版社, 1996. 253~293
- 陈怀满, 郑春荣. 镉. 见: 陈怀满等. 土壤-植物系统中的重金属污染. 北京: 科学出版社, 1996. 71~125
- Moffat A S. Plants proving their worth in toxic metal cleanup. *Science*, 1995, 269: 302~303
- 骆永明. 金属污染土壤的植物修复. *土壤*, 1999, 31(5): 261~265
- Brown S L, Chaney R L, Angle J S, *et al.* Zinc and cadmium uptake by *Thlaspi caerulescens* and *Silene cucubalis* in relation to soil metals and soil pH. *J. Environ. Qual.*, 1994, 23: 1151~1157
- Nanda Kumar P B A, Dushenkov V, Motto H, *et al.* Phytoextraction: The use of plants to remove heavy metals from soils. *Environ. Sci. Technol.*, 1995, 29: 1232~1238
- Barnelos G S, Meed R, Phene C J, *et al.* Relations between phosphorus in drip irrigation water and selenium uptake by wild mustard. *Journal of Environmental Science and Health. Part A Environmental Science and Engineering*, 1992, 27: 283~298
- Salt D E, Prince R C, Pickering U, *et al.* Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian mustard. *Plant Physiol.*, 1995, 109: 1427~1433
- Ebbs S D, Lasat M M, Brady D J, *et al.* Phytoextraction of cadmium and zinc from a contaminated soil. *J. Environ. Qual.*, 1997, 26: 1424~1430
- 蒋先军, 骆永明, 赵其国, 等. 重金属污染土壤的植物修复研究 I. 金属富集植物 *Brassica juncea* 对铜、锌、铅、镉污染的响应. *土壤*, 2000, (2): 71~74
- Sparks D L *et al.* (Eds). *Methods of Soil Analysis, Part 3: Chemical Methods*. Soil Science Society of America, Inc., American Society of Agronomy, Inc., Madison, Wisconsin, USA. 1996
- Florijn P J, Van Beusichen M L. Uptake and distribution of cadmium in maize inbred lines. *Plant Soil*, 1993, 150: 25~32
- Moreno Caselles J, Moral R, Perez Espinosa A, *et al.* Cadmium accumulation and distribution in cucumber plant. *J. Plant*

Nutr., 2000, 23: 243~ 250

14. Harsiman R T, Jacoby B, Barin A. Factors affecting the distribution of cadmium, copper and lead and their effect upon yield and zinc content in bush beans (*Phaseolus vulgaris* L.). Plant Soil, 1984, 81: 17~ 27
15. Simon L. Cadmium accumulation and distribution in sunflower plant. J. Plant Nutr., 1998, 21: 341~ 352
16. Hamon R, Wundke J, McLaughlin M, et al. Availability of zinc and cadmium to different plant species. Aust. J. Soil Res., 1997, 35: 1267~ 1277
17. Knight B, Zhao F J, McGrath S P, et al. Zinc and cadmium uptake by the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* in contaminated soils and its effects on the concentration and chemical speciation of metals in soil solution, Plant Soil, 1997, 197: 71~ 78
18. Luo Y M, Christie P, Baker A J M. Soil solution Zn and pH dynamics in non-rhizosphere soil and in the rhizosphere of *Thlaspi caerulescens* grown in a Zn/Cd contaminated soil. Chemosphere, 2000, 41: 161~ 164

STUDY ON PHYTOREMEDIATION OF HEAVY METAL POLLUTED SOILS

III. CADMIUM AND ZINC UPTAKE AND ACCUMULATION BY INDIAN MUSTARD (*BRASSICA JUNCEA*)

Jiang Xiarr jun Luo Yongming Zhao Qirguo

(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

Summary

A pot experiment with Indian Mustard (*Brassica juncea*) growing on soils spiked with Zn and Cd was conducted to study metal tolerance and accumulation by *B. juncea*, and its potential for phytoremediation. Average Zn concentration in the leaves were 280 and 662 mg kg⁻¹ respectively for 66 days' growing in the soil spiked with 500 and 1 000 mg kg⁻¹ Zn, Zn removed by plant shoots were 2 195 and 3 412 μg pot⁻¹, respectively. Average Cd concentration in the leaves was 161 mg kg⁻¹ in the soil spiked with 200 mg kg⁻¹ Cd, and Cd removed by the shoots was 381 μg pot⁻¹. *B. juncea* showed a higher ability in translocating Zn and Cd from roots to shoots compared to ordinary crops. NH₄NO₃ extractable Zn and Cd increased after the growth of *B. juncea* compared with blank (without plants). Those results can not be fully explained by the natural equilibrium between solid and solution phase. The root exudates possibly involved in increasing metal solubilisation. It can be concluded that *Brassica juncea* appeared to be a moderate Zn and Cd accumulator making it suitable for phytoremediation of zinc and cadmium contaminated soil.

Key words Phytoremediation, Heavy metal, *Brassica juncea*, Soil contamination