

镉污染土壤的植物修复及其 EDTA 调控研究¹

I. 镉对富集植物印度芥菜的毒性

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 本文通过温室盆栽试验研究了在 10~190 mg/kg 共 10 个浓度梯度的 Cd 处理下,印度芥菜生长对 Cd 的响应、Cd 在根与地上部的积累以及在 Cd 胁迫和毒害条件下对 Ca 和 Zn 吸收的影响。结果表明,Cd 对印度芥菜生长的毒害浓度在各个生育期各有不同:幼苗期与营养生长前期在 70~110 mg/kg 左右;营养生长后期在 110 mg/kg 以上;成熟期在 150 mg/kg 左右。植物吸收的镉随土壤镉处理浓度的增加而增加,本试验中印度芥菜根和叶积累镉最高浓度分别为 300 和 160 mg/kg。在 Cd 胁迫下,印度芥菜吸收的 Ca 和 Zn 增加;在 Cd 毒害条件下,印度芥菜吸收的 Ca 和 Zn 下降。认为高浓度的 Cd 对印度芥菜生长有抑制,但印度芥菜对镉也表现出很强的耐性,这种耐性可能与植物体内 Cd 和 Ca、Zn 之间的平衡有关。

关键词 镉胁迫;印度芥菜;毒害临界值;植物修复

我国遭受镉污染的农田有 12000hm²^[1],某污灌区农田土壤中镉含量高达 130 mg/kg,成都东郊污灌区内米中含镉量高达 1.65 mg/kg^[2];沈阳张土灌区一闸严重污染区米中含镉量达 1~2 mg/kg^[3]。镉是环境中对植物、动物以及人类毒性最强的重金属元素之一,镉污染土壤的治理一直是备受关注的热点研究课题。采用工程措施或化学治理方法成本昂贵,破坏土壤结构以及微生物区系,可能造成“二次污染”。植物提取修复是采用超积累植物将土壤中某种过量的元素大量地转移到植株体内(特别是地上部)从而修复土壤的技术^[4,5]。这种途径修复潜力大,而且可维持土壤肥力和营造良好的生态环境,因而对其研究已风靡全球。

用来修复污染土壤的理想植物应具有高的生物量并能忍耐和积累污染物。目前全世界发现的重金属超积累植物有 360 多种,以富集 Ni 的最多。但超积累镉的植物只有一种,即十字花科的 *Thlaspi caerulescens*,地上部积累的镉可达 1800 mg/kg^[6,7]。但这种植物生长缓慢、植株矮小、地上部生物量小,在实际应用中受到很大的限制。近期的研究表明,印度芥菜(*Brassica juncea*)对镉有一定的忍耐和积累能力,而且生物量较大,但过高浓度的镉对印度芥菜仍产生毒害^[8]。本文通过温室盆栽试验研究了在 10~190 mg/kg 共 10 个浓度梯度的 Cd 处理下,印度芥菜生长对 Cd 的响应、Cd 在根与地上部的积累以及在 Cd 胁迫和毒害条件下对 Ca 和 Zn 吸收的影响,从生物响应的角度探讨 Cd 对印度芥

¹ 国家自然科学基金重点项目(49831070),国家重点基础研究发展规划项目(G1999011807)和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项目资助。

菜的毒性。

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) 7.80, 有机质 36.3 g/kg, 全氮 2.25g/kg, 全磷 0.75 g/kg, 全钾 17.4 g/kg, 游离 Fe₂O₃ 16.25g/kg, CEC 215.9 mmol/kg, 并含痕量的 CaCO₃。土壤全 Zn 含量为 69.5 mg/kg, 全 Cd 含量为 0.07 mg/kg。

1.2 盆栽试验

称取过筛风干土, 以溶液态加入分析纯 Cd(NO₃)₂, 制成含不同浓度 Cd 的污染土壤, 处理浓度为 (cd) 10~190 mg/kg, 共 10 个处理, 3 次重复。将处理过的土壤装入塑料盆, 每盆 350g (以烘干土计), 加入分析纯 KH₂PO₄ 使 P 含量为 80 mg/kg, K 含量为 100 mg/kg; 加入分析纯 NH₄NO₃ 作为氮肥, NH₄NO₃ 的加入量视处理而异, 以弥补因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 3 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%。生长 42 天后收获, 沿土面剪取地上部, 测量株高、鲜重, 同时洗出根系; 在 105°C 下烘干, 称地上部和根的干重。植物样品用硝酸-高氯酸法消煮, ICP 测定 Cd、Ca、Zn 的浓度。

本文的结果为 3 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 结果与分析

2.1 镉对印度芥菜生长的影响

2.1.1 苗期的叶片症状 本试验中观察到, 植物生长 7 天后, 叶片出现失绿症状, 从 Cd 处理 150 mg/kg 开始出现新叶黄化, Cd 处理 110~130 mg/kg 出现白斑, 老叶蜷曲。生长 13 天后, 新叶失绿症状有所减缓, 随叶片生长, 从叶片基部复绿, 叶片顶部、叶缘呈黄色。株高差异逐渐明显, Cd 对生长的抑制开始有所表现。

2.1.2 营养生长期 生长 17 天后, 植物进入营养生长期。叶片出现第二次失绿症状, 白斑和蜷曲现象日益明显。株高差异显著。植物生长 30 天后, 低浓度处理已进入抽薹期, 而高浓度处理的植物生长明显滞后。

图 1 是植物生长 20 天后不同浓度处理的株高曲线。从图中可以看出, 植物生长 20 天后株高的分异明显化。多重比较结果表明, 植物生长 20 天时, 70 mg/kg Cd 处理的株高与低浓度相比, 差异达显著水平 ($p < 0.05$), 170 mg/kg Cd 处理的株高差异达

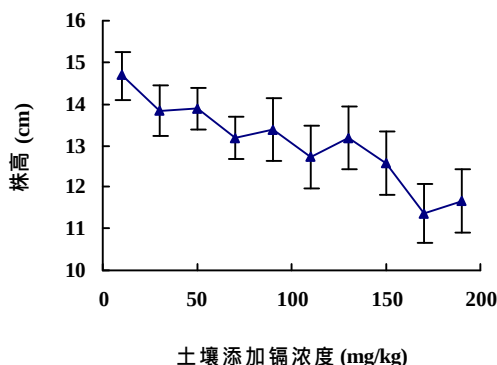


图 1 不同浓度 Cd 对印度芥菜株高的影响

极显著水平 ($p < 0.01$)。这与苗期植物叶片的症状相吻合,说明镉对印度芥菜苗期及营养生长前期的毒性临界点在 70 mg/kg 左右;而严重毒害浓度大约在 170 mg/kg 。随着植物的生长,前期产生的镉毒害症状从表观上看逐渐消失。

2.1.3 镉对印度芥菜成熟期生长的影响 图 2 是收获后根的干重。多重比较表明,与低浓度处理相比, 150 mg/kg 以上的镉对印度芥菜根的生长有显著的抑制作用 ($p < 0.01$)。

图 3 是收获后地上部的干重。镉对印度芥菜地上部生物量有显著抑制作用的临界点出现在 110 mg/kg ($p < 0.01$)。

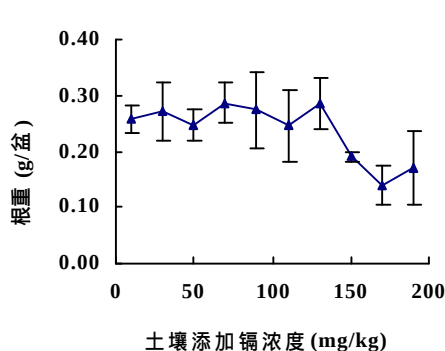


图 2 不同浓度镉对印度芥菜根重的影响

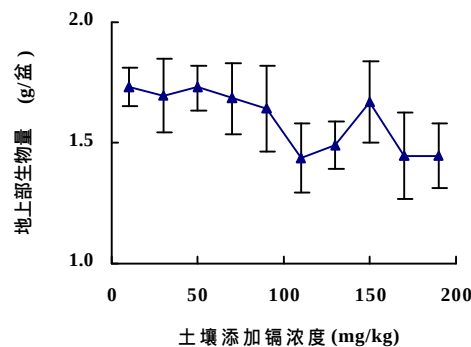


图 3 不同浓度镉对印度芥菜地上部生物量的影响

从实验结果中我们可以看出,镉对印度芥菜生长有抑制作用,总体上是镉浓度越高,对印度芥菜生长的抑制作用越大。另一方面,印度芥菜对镉也表现出很强的耐性。例如苗期的叶片症状,生长 7 天后,叶片出现失绿症状,一周后,失绿症状有所减缓,然后随着叶片生长,开始复绿。株高以及根和地上部的生物量结果都有类似的特征。从这个意义上讲,镉对印度芥菜的生长并不存在一个明确的临界毒性点,而且,镉对印度芥菜生长的影响还与其生物有效性有关,而土壤性质又是影响镉生物有效性的重要因子。

2.2 Cd 的积累与其毒性

图 4 是不同浓度的土壤添加 Cd 处理下印度芥菜根和地上部积累的 Cd。从图中可见,印度芥菜地上部积累的 Cd 随处理浓度的增加而呈线性增加,根中 Cd 的积累在土壤添加 Cd 浓度低于 90 mg/kg 时,与地上部积累的 Cd 浓度相当;在此浓度之上,根积累的 Cd 浓度显著高于地上部。这一结果与前人一致^[9]。土壤添加 Cd 浓度为 130 mg/kg 时,根积累的 Cd 浓度最高。本试验中,镉在印度芥菜根和叶中积累的最高浓度分别达 300 和 160 mg/kg 。

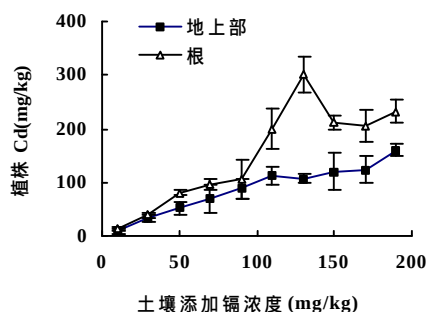


图 4 不同镉处理下印度芥菜根和地上部 Cd 浓度

将植物的生长情况与 Cd 的积累相比较,地上部生物量的变化(图 1, 2, 3)总体上有下降的趋势与 Cd 在植物体内的积累浓度有较好的对应关系(图 4)。根积累的 Cd 浓度在土壤添加 Cd 浓度从 110 mg/kg 开始急剧增加,与生物量的急剧下降相吻合。

2.3 Ca、Zn 的积累与 Cd 毒性

土壤添加镉为 $10 \sim 70 \text{ mg/kg}$ 时,地上部中 Ca 浓度随镉处理浓度增加没有显著差异;

土壤添加镉从 70~110 mg/kg 时, Ca 浓度随镉处理浓度增加显著增加;土壤添加镉为 110~190mg/kg 时,地上部中 Ca 浓度随镉处理浓度增加显著下降 ($p<0.001$)。地上部中 Zn 的浓度随镉处理浓度的变化有所变化,但幅度不大(图 5)。

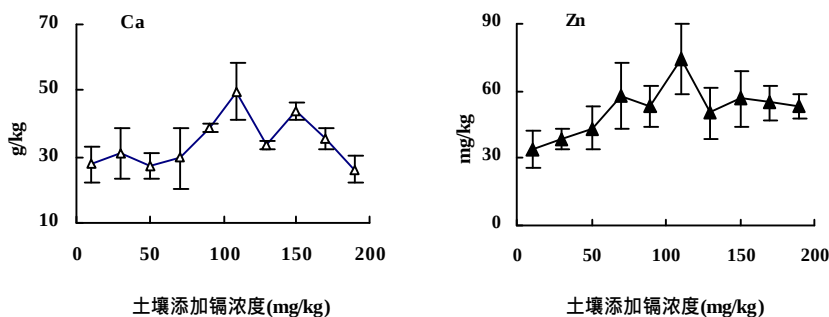


图 5 不同浓度镉处理对印度芥菜地上部 Ca 和 Zn 含量的影响

土壤添加镉为 10~90 mg/kg 时,根中 Ca 浓度随镉处理浓度的变化经统计检验均不显著。土壤添加镉为 90~130 mg/kg 时,根中 Ca 浓度随镉处理浓度增加显著增加,然后随镉处理浓度的继续增加而显著下降($p<0.01$)。土壤添加镉为 10~50 mg/kg 时,根中 Zn 浓度随镉处理浓度增加而增加;土壤添加镉为 50~110 mg/kg 时,根中 Zn 浓度显著下降 ($p<0.05$),然后随着土壤添加镉的增加而不再继续下降(图 6)。

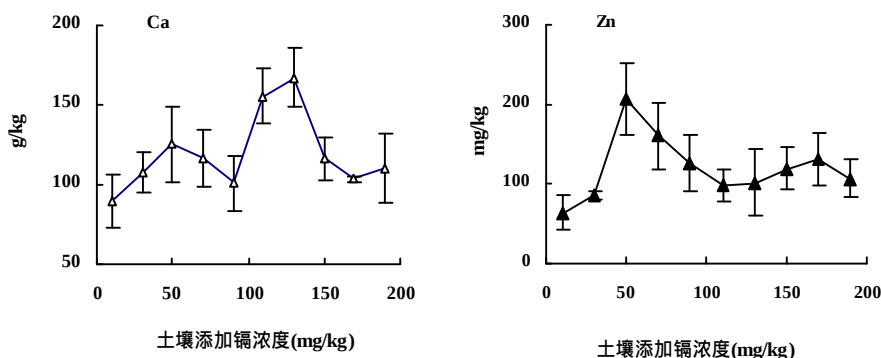


图 6 不同浓度镉处理对印度芥菜根中 Ca 和 Zn 含量的影响

植物细胞中大量的 Ca 结合在原生质膜外表面的细胞壁上^[10],在分子间连接中起纽带作用,对细胞壁和膜的稳定性有着非常重要的作用。Wang 等提出在 Ca 和细胞壁之间有着很重要的作用,通过这种交互作用可提供足够的 Ca 来维持细胞膜的稳定^[11]。本试验中,在 Cd 胁迫下印度芥菜吸收的 Ca 增加可能是植物细胞通过多吸收 Ca 来维持细胞膜的稳定,以减轻 Cd 的毒害;在 Cd 毒害条件下印度芥菜吸收的 Ca 下降,可能是由于 Cd 与 Ca 之间的颞抗作用使得植物对 Ca 的吸收降低或过量的 Cd 取代了细胞组织中的 Ca,导致毒害。Brune 和 Dietz 报道了类似的结果,在高浓度 Cd 毒害条件下,大麦根中 Ca 浓度先增加后下降^[12]。

锌是一种十分重要的生物必需微量元素,参与 18 种酶的合成并可激活 80 多种酶。其中存在于叶绿体中的碳酸酐酶只能为锌所活化。已有研究表明,过量镉引起植物叶片失绿直接或间接地与缺 Fe^[13, 14]或缺 Zn^[15]有关。在我们的实验中,土壤添加镉为 10~50 mg/kg 时,根中 Zn 浓度随镉处理浓度增加而增加,没有观察到叶片失绿的症状,可能是

在 Cd 胁迫下印度芥菜通过多吸收 Zn 来减轻 Cd 的压力从而维持正常的生理活动；当土壤添加镉为 50~110 mg/kg 时，根中 Zn 浓度显著下降($p < 0.05$)，并观察到叶片失绿的症状，可能是由于 Cd 与 Zn 之间的拮抗作用使得植物对 Zn 的吸收降低或过量的 Cd 取代了细胞组织中的 Zn，导致毒害。植物对养分的吸收总是通过根系，再运输到地上部。所以根系中养分的变化总是先于叶片。我们的实验中，叶片中 Ca 和 Zn 的浓度变化都不如根系的明显。

根据试验结果，我们可得出以下结论：重金属镉对印度芥菜生长有抑制或毒害作用，印度芥菜对镉也表现出很强的适应能力或耐性。在 Cd 胁迫下，印度芥菜吸收的 Ca 和 Zn 增加；在 Cd 毒害条件下，印度芥菜吸收的 Ca 和 Zn 开始下降。

参 考 文 献

- 1 廖自基. 微量元素的环境化学及生物效应. 北京：中国环境科学出版社，1993，299~302
- 2 陈怀满，郑春荣. 镉. 陈怀满等著. 土壤-植物系统中的重金属污染. 科学出版社，1996，71~125
- 3 吴燕玉，陈涛. 沈阳张士灌区 Cd 污染生态研究. 生态学报，1989，9(1): 21~26
- 4 Moffat A S. Science, 1995, 269: 302~303
- 5 Baker A. J. M. *et al.* Resources, Conservation and Recycling. 1994, 11: 41~49
- 6 Brooks R. R. General Introduction. pp.1~15. In: Brooks R. R (Eds.), Plants that hyperaccumulate heavy metals. 1998, CAB International, Wallingford, U.K
- 7 沈振国，刘友良. 重金属超量积累植物研究进展，植物生理学通讯，1998，34(2): 133~139
- 8 蒋先军等. 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、镉、铅污染的响应 土壤, 2000, 32(2): 71~74
- 9 Salt D. E., Prince R. C., Pickering I. J. and Raskin I. Plant Physiol., 1995, 109: 1427~1433
- 10 Marschner H. Nutrient physiology, pp 243~254. In: H. Marschner (ed.) Mineral Nutrition of Higher Plants. 1986, Academic Press, London, England
- 11 Wang, J., B.P. Evangelou, and M.T. Nielsen. Plant Physiol., 1992, 100: 496~501
- 12 Brune, A. and K.J. Dietz. J. Plant Nutr., 1995, 18: 853~868
- 13 Foy, C.D., R.L. Chaney and M.C. White. Ann. Rev. Plant Physiol., 1978, 29: 511~566
- 14 Root, R.A., R.J. Miller and D.E. Koeppe.. J. Environ. Qual., 1975, 4: 473~476
- 15 Turner, M.A. J. Environ. Qual., 1973, 2: 118~119