

杨 卓,陈 婧. 重金属污染土壤植物修复的 EDTA 调控效果[J]. 江苏农业科学,2017,45(2):258-261.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.02.072

重金属污染土壤植物修复的 EDTA 调控效果

杨 卓,陈 婧

(中国环境管理干部学院,河北秦皇岛 066004)

摘要:通过盆栽试验比较乙二酸四乙酸(EDTA)对印度芥菜修复镉(Cd)污染土壤的增效作用,探讨 EDTA 施入量与不同施入阶段对复合污染土壤中 Cd、铅(Pb)、锌(Zn)的活化能力和印度芥菜吸收 3 种重金属的影响。结果表明: Cd 添加量相同的条件下,EDTA 的施入使印度芥菜生物量明显下降,地上部 Cd 吸收量明显增加,重金属提取量是未施入 EDTA 组的 0.5~1.63 倍,收获时土壤有效态 Cd 含量施入组低于未施入组;生物量和 Cd 吸收量随着 Cd 添加量的增加呈现先升高后下降的抛物线形规律,临界 Cd 添加量为 120 mg/kg;EDTA 一次性使用剂量为 3 mmol/kg 与分 3 个阶段施入 1 mmol/kg 相比,后者取得了最佳修复效果,Cd、Pb、Zn 提取量分别是对照的 1.13、3.78、1.29 倍。将最优方案应用于微区试验,地上部重金属含量较对照显著增加,对 Cd、Pb、Zn 的提取量分别是对照的 1.24、2.06、2.07 倍。

关键词:印度芥菜;复合污染;植物修复;重金属;EDTA

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)02-0258-04

土壤重金属污染问题已成为全球关注的环境问题。土壤中的重金属污染,不仅使土壤肥力退化,降低作物产量与质量,而且恶化水环境,并通过食物链在人和生物体内富集,严重威胁着人类的生命和健康。植物修复是 20 世纪 90 年代初发展起来的一种经济有效、环境友好、适用于大面积轻度到中度污染土壤的生物修复技术^[1-4]。其中,植物吸取(phytoextraction)旨在通过收获富集重金属的植物将重金属带出土壤,从而逐渐降低土壤重金属总量尤其是有有效态重金属的含量。植物修复技术受制于 2 个因素:第 1 个限制因素是超累积分植物的生长速度缓慢和生物量小;第 2 个限制因素是土壤中重金属的生物有效性低,重金属一旦进入土壤,将通过沉淀、专性吸附等物理、化学过程变为难溶态,无法被植物吸收利用。向土壤中施加人工合成的螯合剂以解析与土壤固相结合的重金属,增加土壤溶液中的重金属浓度是克服上述瓶颈效应的重要途径之一^[5]。大量研究表明:乙二胺四乙酸(EDTA)、二乙基三胺五乙酸(DTPA)、乙二胺二戊二酸(EDGA)、氨三乙酸(NTA)等螯合剂均能不同程度地活化土壤重金属,促进植物对重金属的吸收乃至诱导植物对重金属的超量吸收^[6-10]。然而螯合剂的负面效应也是不容忽视的。因此,螯合剂的种类、剂量、使用方式和阶段都是目前须要研究的热点。

EDTA 是公认的效果明显的诱导活化剂。本试验以印度芥菜(*Brassica juncea*)为试验材料,通过温室盆栽试验研究在镉(Cd)污染土壤及 Cd、铅(Pb)、锌(Zn)复合污染土壤中,在 EDTA 的调控下对重金属的吸收和累积,分别研究 EDTA 加

与不加、加入量、加入阶段对植物修复重金属污染的增效作用。以期筛选出效果最佳的合理的 EDTA 使用方法,探讨 EDTA 对印度芥菜吸收富集土壤中重金属的效果,并通过测试和统计分析,明确印度芥菜对重金属的吸收富集特点,探讨它在环境净化上的应用潜力,为控制土壤重金属复合污染和植物修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试植物为印度芥菜的 Wild Garden Pangent Mix 品种。种子来自美国俄勒冈州的 Wild Garden Seed 农场。

供试土壤:采自河北农业大学西校区标本园 0~40 cm 深度的潮褐土,理化性质特征见表 1。

供试底泥:取自河北省安新县北际头乡保定纳污河、府河末梢入淀口处。所取为 0~20 cm 底泥,呈深黑色淤泥状,上部为稀浆状,下部呈流塑状,内有大量淡水贝壳、软体动物,附近有大规模养鸭产业,底泥有明显臭味。该层为近二三十年人类活动的产物,沉积年代新,沉积速率快,是该区域污染内源的主要蓄积库。供试底泥主要理化性质见表 1,底泥中有有效态 Cd、Pb、Zn 含量分别为 1.70、16.80、61.50 mg/kg。

1.2 试验方案与布置

本研究采取盆栽试验,在河北农业大学西校区温室中进行。试验用塑料小盆钵,其上缘直径 10 cm,底面直径 9 cm,高 14 cm。每盆装土 1 000 g(以烘干土计),供试土壤、底泥风干后过 3 mm 筛。重金属 Cd、Pb、Zn 分别以 $\text{Cd}(\text{Ac})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Pb}(\text{Ac})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Zn}(\text{Ac})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 固体粉末形式,按各自的处理量加入土壤,制成含不同浓度 Cd、Pb、Zn 的污染土壤。同时每盆加入 0.2 g 尿素、0.4 g 磷酸二氢氮作底肥,均采用分析纯试剂,与土壤一并混合均匀装盆。加入蒸馏水使含水量为田间持水量的 60%,保持 10 d 后播种,生长 1 周后见苗,每盆保留 10 株苗。试验共分以下 4 个部分。

试验 1:土壤中加入 EDTA 效果研究。本试验以印度芥

收稿日期:2015-11-16

基金项目:2013 年度河北省科学技术研究与发展计划“重金属污染土壤原位微生物修复技术研究”(13227504D)。

作者简介:杨 卓(1980—),女,河北秦皇岛人,博士,副教授,主要从事土壤重金属污染与植物修复方面的研究。E-mail: yangzhuo315566@126.com。

表 1 供试土壤与地泥的理化性质特征

土壤类型	重金属含量(mg/kg)			有机质含量(g/kg)	全氮含量(g/kg)	碱解氮含量(mg/kg)	速效磷含量(mg/kg)	速效钾含量(mg/kg)	粒径<0.01 mm	
	Cd	Pb	Zn						pH 值	物理性黏粒(%)
潮褐土	0.83	30.54	75.88	10.89	0.63	22.71	14.02	98.04	7.4	38.78
底泥	6.86	63.67	234.42	24.99	1.56	46.76	29.69	107.42	7.9	28.97
混合土	3.85	47.11	155.15	17.94	1.10	34.74	21.86	102.73		33.88

注:混合土为质量比 1:1 的潮褐土、底泥。

菜中的 Wild Garden Pangent Mix 品种为试材,混合土(表 1,下同)种植印度芥菜,Cd 添加量设为 0、40、80、120、160、200 mg/kg,不加 EDTA 的处理分别记作 1-a、2-a、3-a、4-a、5-a、6-a,添加 EDTA 的处理分别记作 1-b、2-b、3-b、4-b、5-b、6-b。在印度芥菜出苗 30 d 后,在 1-b~6-b 处理中,加入 3 mmol/kg EDTA,诱导活化重金属。

试验 2:不同 EDTA 施用量的效果研究。用混合土种植印度芥菜,加入 Cd、Pb、Zn 的含量分别为 100、500、800 mg/kg,生长 30 d 后,向印度芥菜中分别加入 0、1、3、5、7 mmol/kg EDTA(编号分别为 a、b、c、d、e),收获后测定植株株高、地上部生物量、植株地上部 Cd、Pb、Zn 含量及土壤中有效态重金属含量。

试验 3:不同 EDTA 施用阶段的效果研究。用混合土盆栽种植印度芥菜,加入 Cd、Pb、Zn 的量分别为 100、500、800 mg/kg。处理 1:不施 EDTA(编号为 A,CK);处理 2:播种前一次性施入 3 mmol/kg EDTA(编号为 B);处理 3:生长 30 d 后一次性施入 3 mmol/kg EDTA(编号为 C);处理 4:收获前 7 d 一次性施入 3 mmol/kg EDTA(编号为 D);处理 5:于播种前、生长 30 d 后、收获前 7 d,分别施入 1 mmol/kg EDTA(编号为 E)。于收获后测定植株株高、地上部生物量、Cd、Pb、Zn 含量以及土壤中有效态重金属含量。

试验 4:上述试验结束后进行微区试验。采用玻璃材料制成的底为正方形的长方体(高 30 cm,底的边长 60 cm)。重金属 Cd、Pb、Zn 分别以 Cd(Ac)₂·2H₂O、Pb(Ac)₂·3H₂O、Zn(Ac)₂·2H₂O 固体粉末形式,按各自的处理量加入土壤,制成 Cd 含量为 50 mg/kg、Pb 含量为 500 mg/kg、Zn 含量 500 mg/kg 的污染土壤,土壤层高 30 cm,填充密度保持与田间相似,施入含 0.2 g/kg 尿素、0.4 g/kg 磷酸二氢铵的底肥,用蒸馏水润湿土壤,静置 6 个月,使土壤条件接近外界条件,保持田间持水量的 60%。将 0.2 g 植物种子直播于微区中,每池保持尽可能密的苗,使池中植物覆盖率达到 90% 以上。在植物生长 30 d 后进行以上试验中 EDTA 施用方式的最优处理。试验设 2 个处理:处理 I,试验筛选出来的 EDTA 最优处理;处理 II,不添加 EDTA 的空白对照(CK)。每个处理重复 3 次。

以上试验均在植物生长 60 d 后收获,印度芥菜沿土面剪取地上部,测定鲜质量,植物样品在 105 ℃ 条件的烘箱内杀青 0.5 h,并在 80 ℃ 条件下烘至恒质量,烘干后粉碎测定重金属元素 Cd、Pb、Zn 含量。植物样采用硝酸-高氯酸消煮,原子吸收分光光度法测定重金属 Cd、Pb、Zn 含量;土壤样品采用 DTPA 浸提,原子吸收分光光度法测定重金属 Cd、Pb、Zn 含量。

2 结果与分析

2.1 EDTA 诱导印度芥菜富集 Cd 增效研究

在 Cd 添加量为 0~200 mg/kg 的不同处理中,印度芥菜

都能够顺利发芽生长,除高浓度处理叶片少部分有萎蔫发黄的症状外,均无明显受毒害现象,说明印度芥菜对 Cd 表现出极强的忍耐性。在同类盆栽试验中,在重金属添加量为 50 mg/kg 时,油菜就受到了明显的重金属毒害而无法正常工作^[8]。在本试验中,Cd 毒害主要影响印度芥菜的生育进程,在 Cd 浓度 0.40 mg/kg 时,印度芥菜在试验期内已经顺利进入生育期,拔节开花结籽,而其他浓度处理都未能开花。随着 Cd 浓度增大,a 与 b 组处理均呈现地上部生物量先升高后降低的规律,其临界 Cd 添加浓度均为 120 mg/kg,在添加量为 0~120 mg/kg 时,生物量增加,Cd 添加量为 120 mg/kg 时,a 组生物量比不添加 Cd 处理增加了 57.67%,b 组增加了 58.06%;在添加量为 120~200 mg/kg 时,生物量降低(图 1)。高 Cd 处理影响了印度芥菜的生殖生长,而对营养生长并没有明显干扰,相反,一定浓度的 Cd 处理还提高了植株地上部的生物量。随着 Cd 处理浓度的增加,植株趋于矮小化,即矮小植株在盆体内的比例增加。添加 EDTA 比不添加 EDTA 印度芥菜生物量显著下降,6 个处理平均值下降了 26.52%。2 组试验在同一 Cd 添加量时的生物量之差也呈现出先升后降的规律,在 Cd 添加量为 120 mg/kg 时相差最多,为 11.36 g/pot。EDTA 的施入会使印度芥菜生长受到抑制,生物量下降。

土壤重金属的植物提取量是描述植物修复效果最直观的指标,它是指用植株地上部重金属的含量乘以生物量,得出每盆植物提取重金属的量,它综合了植物生物量、吸收量 2 个指标,能够更为直接地反映某种植物对某种重金属的修复效果。由图 2 不同处理印度芥菜对 Cd 的提取量可见,随着外源 Cd 添加量的增加,印度芥菜对 Cd 的提取量呈现先升后降的规律,a 组提取量达 0.02~0.36 mg/盆,b 组提取量达 0.01~0.55 mg/盆,其最高值均出现在 Cd 添加量为 120 mg/kg,a 组、b 组此时的提取量分别为不添加 Cd 时的 18、55 倍。EDTA 诱导调控分别可显著增加印度芥菜地上部对 Cd 的提取量,Cd 添加量分别为 0、40、80、120、160、200 mg/kg 的处理中,b 组的提取量分别是 a 组的 0.50、1.36、1.63、1.53、1.54、1.45 倍。由结果可见,EDTA 的加入可以提高植物修复的效果,缩短修复年限。

由图 3 可见。土壤 Cd 添加量与试验结束后土壤中有效态 Cd 含量呈较好的线性关系,a 组 $r^2=0.916\ 1(n=6)$,b 组 $r^2=0.867\ 4(n=6)$ 。EDTA 的施入在试验结束后的表现为土壤有效态 Cd 含量低于对照组(a 组),这与理论上预想的结果有些偏差,这可能是由于土壤中重金属不同形态之间处于不停转换的动态变化之中,EDTA 的加入使这种转换更为活跃。如图 4 所示,印度芥菜地上部 Cd 吸收量明显高于对照组,说明植物吸收量增大,使此时土壤中有效态 Cd 含量反而低于对照组。由此说明,有效态重金属含量的高低并不能直接反映植物吸收该种重金属的情况。由图 3、图 4 可以看出,a 组

有效态 Cd 含量增加的幅度是低浓度时较大,高浓度时较小, b 组则相反;而印度芥菜地上部 Cd 吸收量在 EDTA 的诱导下不仅增大,而且随着 Cd 添加量的增加,吸收量增加的幅度变化也加大。在 Cd 添加量为 160 mg/kg 时,芥菜地上部吸收量

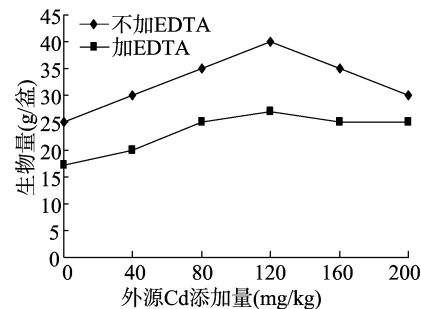


图1 不同 EDTA 处理对地上部生物量的影响

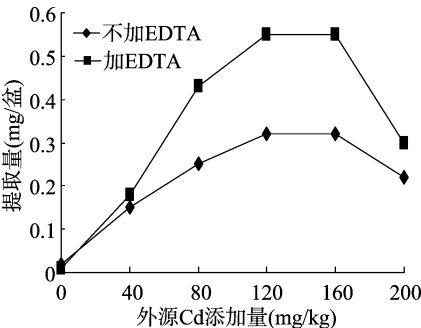


图2 不同 EDTA 处理对 Cd 提取量的影响

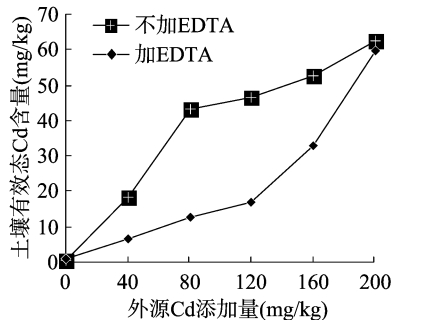


图3 不同 EDTA 处理对土壤有效态 Cd 含量的影响

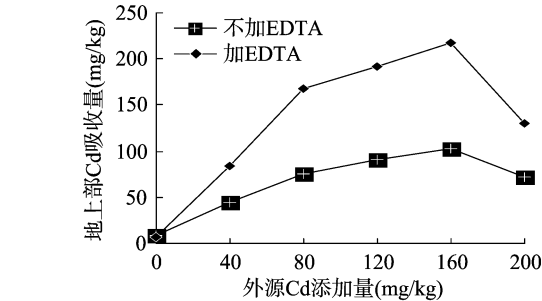


图4 不同EDTA处理对印度芥菜地上部 Cd 吸收量的影响

2.2 不同 EDTA 施用量对印度芥菜富集 Cd、Pb、Zn 效果影响

本研究用混合土种植印度芥菜,加入 Cd、Pb、Zn 的量分别为 100、500、800 mg/kg,加上表 1 的背景含量,供试土壤 Cd、Pb、Zn 的含量分别为 100.83、530.54、875.88 mg/kg。由表 2

表 2 不同 EDTA 施用量印度芥菜 Cd、Pb、Zn 含量与土壤中有有效态重金属浓度及提取量

编号	EDTA 施用量 (mmol/kg)	生物量 (g/盆)	土壤有效态含量 (mg/kg)			植株地上部含量 (mg/kg)			提取量 (mg/盆)		
			Cd	Pb	Zn	Cd	Pb	Zn	Cd	Pb	Zn
a	0	45.79 ± 3.24d	36.01 ± 3.22d	24.16 ± 2.98d	89.39 ± 4.37bc	114.83 ± 8.92a	21.64 ± 1.85a	504.73 ± 23.18a	0.53	0.99	2.31
b	1	36.43 ± 3.36c	32.46 ± 2.89c	11.11 ± 1.56b	86.31 ± 6.88b	176.53 ± 6.71d	72.14 ± 3.47d	605.67 ± 36.22c	0.64	2.63	2.21
c	3	29.13 ± 2.14b	25.33 ± 1.79a	15.28 ± 2.79c	94.16 ± 7.26d	122.40 ± 4.79c	58.33 ± 4.88c	651.97 ± 21.56d	0.36	1.70	1.90
d	5	18.62 ± 1.87a	29.59 ± 0.87b	4.44 ± 0.46a	92.28 ± 6.77cd	118.52 ± 8.26b	46.08 ± 5.35b	584.62 ± 24.59b	0.22	0.86	1.09
e	7	—	39.68 ± 3.18e	11.40 ± 2.67b	78.29 ± 6.43a	—	—	—	—	—	—

注:差异显著性用 Duncan's 检验,同列不同小写字母表示处理间有显著差异 ($P < 0.05$);提取量为各处理平均值;“—”表示因植株死亡而无数据。下同。

2.3 不同 EDTA 施用阶段对印度芥菜富集 Cd、Pb、Zn 效果影响

由表 3 可知,D 处理使印度芥菜生物量降低程度最小,与对照几乎无差别,其次是 E 处理,生物量只降低 5.63%, B 处理未能发芽,可能由于 EDTA 的加入使种子所处环境骤变,未能顺利生长。土壤有效态 Cd、Pb、Zn 含量最低的是 D 处理,且除 Zn 外均低于对照。EDTA 的施入使植株地上部含量均有所提高,最高的是 E 处理,Cd、Pb、Zn 含量分别比对照提高 20.11%、300.14%、37.16%; C 处理分别提高 6.59%、169.55%、29.17%; D 处理 Pb、Zn 含量分别提高 186.74%、26.29%,Cd 含量略有下降。提取量最高的均为 E 处理,Cd、Pb、Zn 提取量分别为对照的 1.13、3.78、1.29 倍。

2.3 不同 EDTA 施用阶段对印度芥菜富集 Cd、Pb、Zn 效果影响

达最大,a、b 组分别达 107.67、217.34 mg/kg,Cd 添加量分别为 0、40、80、120、160、200 mg/kg 的处理中,b 组的吸收量分别是 a 组的 0.80、1.85、2.22、2.14、2.12、1.83 倍。由此可见,EDTA 的加入可以明显提高印度芥菜对 Cd 的吸收量。

可知,EDTA 的添加使印度芥菜地上部生物量低于对照,随着加入量的增加,生物量显著下降,当施入量达 7 mmol/kg (处理 e) 时,印度芥菜死亡,b、c、d 处理生物量分别降低 20.44%、36.38%、59.34%。土壤有效态 Cd、Pb、Zn 含量变化无明显规律性,除 Zn 外,多数显著低于对照。印度芥菜地上部 Cd、Pb 含量最大的为 b 处理,Zn 为 c 处理,分别比对照提高 53.73%、233.36%、29.17%。印度芥菜地上部 Cd、Pb 提取量最大的为 b 处理,Cd、Pb 提取量分别为对照的 1.21、2.66 倍,Zn 提取量则均低于对照。综合以上结果,EDTA 施用量不宜太高,当 > 5 mmol/kg 时则对植株生长造成严重威胁,本研究中 EDTA 施用量为 1 mmol/kg 时取得了最好的试验修复效果,此时 EDTA 与土壤中 Cd、Pb、Zn 物质质量之比分别为:10 : 9、5 : 13、5 : 73,由于 Zn 物质的量与 EDTA 相差较大,因此诱导效果并不理想。

由表 3 可知,D 处理使印度芥菜生物量降低程度最小,与对照几乎无差别,其次是 E 处理,生物量只降低 5.63%, B 处理未能发芽,可能由于 EDTA 的加入使种子所处环境骤变,未能顺利生长。土壤有效态 Cd、Pb、Zn 含量最低的是 D 处理,且除 Zn 外均低于对照。EDTA 的施入使植株地上部含量均有所提高,最高的是 E 处理,Cd、Pb、Zn 含量分别比对照提高 20.11%、300.14%、37.16%; C 处理分别提高 6.59%、169.55%、29.17%; D 处理 Pb、Zn 含量分别提高 186.74%、26.29%,Cd 含量略有下降。提取量最高的均为 E 处理,Cd、Pb、Zn 提取量分别为对照的 1.13、3.78、1.29 倍。

2.4 最优处理 EDTA 诱导对印度芥菜吸收重金属的影响

由上述试验结果可知,EDTA 单次施用量为 1 mmol/kg,于播种前、生长 30 d 后、收获前 7 d,分别施入 1 mmol/kg EDTA 的处理取得了最好的诱导效果,因此微区试验中采用此 EDTA

表 3 不同 EDTA 施用时间印度芥菜 Cd、Pb、Zn 含量与土壤中有有效态重金属浓度及提取量

编号	生物量 (g/盆)	土壤有效态含量(mg/kg)			植株地上部含量(mg/kg)			提取量(mg/盆)		
		Cd	Pb	Zn	Cd	Pb	Zn	Cd	Pb	Zn
A(CK)	45.79±2.18b	36.01±1.74c	24.16±3.19c	89.39±7.74a	114.83±9.11a	21.64±3.16a	504.73±9.71a	0.53	0.99	2.31
B	—	34.27±2.96c	7.56±1.62a	94.24±8.21b	—	—	—	—	—	—
C	29.13±1.75a	25.33±4.76b	15.28±3.06b	94.16±5.79b	122.40±8.23b	58.33±6.57b	651.97±6.67c	0.36	1.70	1.90
D	45.44±3.89b	19.59±1.57a	6.67±0.88a	87.95±8.37a	113.91±6.54a	62.05±4.54c	637.43±9.28b	0.52	2.82	2.90
E	43.21±4.26b	23.68±4.11b	12.22±1.21b	94.15±6.95b	137.92±9.58c	86.59±5.78d	692.31±9.77d	0.60	3.74	2.99

处理方法。由表 4 可知,EDTA 的加入使印度芥菜生物量略有下降,但统计上差异并不显著;EDTA 的添加显著增加了植物地上部重金属的含量,但在收获时土壤中有有效态重金属含量均显著低于对照,这可能是由于土壤中重金属各形态间一直处于动态变化之中,无效态重金属向有效态转变,有效态重金属被植物根系吸收。笔者取样测定的是某一时刻土壤中的情况,在以上试验中不难发现,有效态含量高的处理并不意味着植物吸收量也高,两者之间不存在简单的量之间的依赖关系,比如在表 2、表 3 的数据中,土壤中有有效态重金属含量高

的处理相对应的植株吸收量并不一定高。由表 4 还可见,植物地上部重金属含量较对照显著增加,Cd、Pb、Zn 含量分别是对照的 1.31、2.88、2.18 倍,印度芥菜对重金属的提取量(以每个微区为单元)均明显增加,对 Cd、Pb、Zn 的提取量分别是对照的 1.24、2.06、2.07 倍。由此可见,EDTA 较大幅度地增加了印度芥菜对重金属的吸收与富集量,由于本试验受种植面积、时间、气温等条件影响,如果开展较大规模田间试验,可能会取得更为理想的诱导活化效果。

表 4 EDTA 诱导下印度芥菜 Cd、Pb、Zn 含量与土壤中有有效态重金属浓度及提取量

编号	生物量 (g/盆)	土壤有效态含量(mg/kg)			植株地上部含量(mg/kg)			提取量(mg/盆)		
		Cd	Pb	Zn	Cd	Pb	Zn	Cd	Pb	Zn
I	260.89±5.29a	20.93±2.32a	27.78±3.26a	89.85±7.65a	116.78±6.55b	155.73±9.19b	870.92±7.64b	3.05	3.05	22.72
II(CK)	274.56±6.03a	26.30±1.88b	31.42±4.25b	92.86±6.89b	89.23±5.78a	54.06±4.38a	400.25±9.86a	2.45	1.48	10.99

3 结论

本研究采用盆栽试验探讨了 EDTA 施用对印度芥菜吸收 Cd 的增效作用,比较了不同剂量、不同施用方式 EDTA 诱导活化的效果,结果表明:

(1)在 Cd 添加量为 0~200 mg/kg 的不同处理中,印度芥菜都能够顺利发芽生长,印度芥菜对 Cd 表现出极强的忍耐特征。Cd 毒害主要影响了印度芥菜的生育进程,地上部生物量随 Cd 添加量的增加出现先升高后降低的抛物线形规律,其临界 Cd 添加浓度均为 120 mg/kg。施入 EDTA 印度芥菜生物量比未施入的明显下降,6 个处理平均下降了 26.52%。土壤 Cd 添加量与试验结束后土壤中有有效态 Cd 含量呈较好的线性关系,在收获后土壤有效态 Cd 含量表现为施入 EDTA 组低于不施 EDTA 的对照组,但 EDTA 的加入可以明显提高印度芥菜对 Cd 的吸收量。EDTA 诱导调控可明显增加印度芥菜地上部对 Cd 的提取量,提高植物修复的效果,缩短修复年限。

(2)EDTA 施用量不宜太大,当 >5 mmol/kg 时则对植株生长造成严重威胁,本研究中 EDTA 施用量为 1 mmol/kg 时取得了最好的试验修复效果。

(3)不同阶段施入 EDTA 对印度芥菜生物量和吸收量的影响也是不同的。于播种前、生长 30 d 后、收获前 7 d 3 个阶段分别施入 1 mmol/kg EDTA(E 处理)时印度芥菜生物量和吸收量最大,达到较好的修复效果,这种方式优于其他处理。在这种方式处理的微区试验中,印度芥菜对 Cd、Pb、Zn 的提取量均提高了。

(4)微区试验采用上述试验的最优处理,即 EDTA 单次施用量为 1 mmol/kg,于播种前、生长 30 d 后、收获前 7d,分别施入 1 mmol/kg EDTA,极大地提高了印度芥菜地上部对 Cd、Pb、Zn 的吸收与富集量,对 Cd、Pb、Zn 的提取量分别是对照的

1.24、2.06、2.07 倍。

参考文献:

[1] Chaney R L, Broadhurst C L, Centofanti T, et al. Phytoremediation of soil metals [J]. Current Opinion in Biotechnology, 1997, 8 (3): 279-284.

[2] Salt D E, Smith R D, Raskin I. Phytoremediation [J]. Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol, 1998, 49: 643-668.

[3] Meagher R B. Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants [J]. Current Opinion in Plant Biology, 2000, 3 (2): 153-162

[4] McGrath S P, Zhao F J. Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils [J]. Current Opinion in Plant Biology, 2003, 14 (3): 277-282.

[5] Huang J W, Chen J, Berti W R, et al. Phytoremediation of lead-contaminated soils: role of synthetic chelates in lead phytoextraction [J]. Environment Science & Technology, 1997, 31 (3): 800-805.

[6] Vassil A D, Kapulnik Y, Raskin I, et al. The role of EDTA in lead transport and accumulation by Indian mustard [J]. Plant physiology, 1998, 117 (2): 447-453.

[7] Blaylock M J, Salt D E, Dushenkov S, et al. Enhanced accumulation of Pb in Indian mustard by soil-applied chelating agents [J]. Environment Science & Technology, 1997, 31 (31): 860-865.

[8] Cooper E M, Sims J T, Cunningham S D, et al. Chelate-assisted phytoextraction of lead from contaminated soils [J]. Journal of Environmental Quality, 1999, 28 (6): 1709-1719.

[9] 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 [J]. Environment Science & Technology, 2000, 34 (9): 1778-1783.

[10] Song J, Luo Y M, Wu H. Chelate enhanced phytore-mediation of heavy metal contaminated soil [M]//Van Briesen J M, Nowack B. Biogeochemistry of chelating agents. Washington DC: American Chemical Society, 2005.