

## 螯合诱导植物修复中污染土壤的重金属淋滤行为

陈亚华, 刘亮, 王桂萍, 郭强, 朱迪, 沈振国\*

(南京农业大学生命科学院, 江苏 南京 210095)

**摘要:** 采用土柱淋滤试验, 研究乙二胺二琥珀酸 (EDDS) 和乙二胺四乙酸 (EDTA) 诱导植物修复过程中的土壤重金属淋滤行为, 同时比较了香根草 (*Vetiveria zizanioides* L.) 和玉米 (*Zea mays* L.) 在减少重金属淋滤方面的作用。结果表明, 在 25 d 内经过 480 mm 降雨的淋洗, EDDS 处理的土柱 (80 cm 土层) 没有出现重金属的淋滤; 而 EDTA 明显导致表层土壤重金属向下层土壤迁移, 该迁移行为与降水量的大小、种植植物与否关系密切。香根草和玉米可明显延缓 EDTA 引起的土壤重金属向下层土壤的淋滤, 且香根草的延缓效果好于玉米。上述结果表明, EDDS 诱导的高生物量植物修复是相对安全的, 而使用 EDTA 需要考虑当地的降水条件。

**关键词:** 土柱淋滤试验; 重金属污染土壤; 植物修复; 香根草; 玉米; 乙二胺二琥珀酸; 乙二胺四乙酸

**中图分类号:** X53      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-2030 (2007) 04-0046-06

## The leaching behavior of heavy metals in contaminated soils during the process of chelant-enhanced phytoremediation

CHEN Ya-hua, LIU Liang, WANG Gui-ping, GUO Qiang, ZHU Di, SHEN Zhen-guo\*

(College of Life Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** Using soil column-leaching test, the leaching behavior of heavy metals in soils was studied in the process of EDDS or EDTA-enhanced phytoextraction, and the roles of high-biomass plants (corn and vetiver grass) on the decrease of heavy metals leaching were also examined. Results showed that, application of EDDS into soil surface did not lead to the leaching of heavy metals from the soil columns (80 cm in height) after 480 mm of rainfall percolation within 25 days. However, EDTA application led to the migration of heavy metals from up-soil to deep-soil in the columns, and the migration of metals tightly related to the amount of added rainwater and with or without planting. The seedlings of corn or vetiver grass could be effectively delay the movement of heavy metals downward, and vetiver grass showed more effective than corn. This implies that, combined planting with some high-biomass plants, EDDS can be regarded as a good chelator candidate for the environmentally safe phytoextraction heavy metals from contaminated soils. It should be careful to use of EDTA in the field phytoremediation, especially in some heavily raining areas.

**Key words:** soil column-leaching test; heavy metal-contaminated soils; phytoremediation; *Vetiveria zizanioides* L.; *Zea mays* L.; EDDS; EDTA

自 1983 年 Chaney 提出利用超积累植物清除土壤重金属污染以来, 植物修复 (phytoremediation) 所具有的独特技术及经济优势, 已成为污染土壤修复的研究热点<sup>[1-3]</sup>。重金属污染土壤的植物修复主要包含植物提取、植物挥发和植物钝化。诱导性植物提取 (chelant-enhanced phytoextraction) 是基于通过向土壤添加化学物质以增加土壤重金属的生物有效性, 诱导植物大量富集土壤重金属的技术<sup>[1]</sup>。

诱导性植物提取的研究历经十余年, 其中以 EDTA 为代表的有机螯合剂强化植物提取土壤重金属的研究最为普遍<sup>[4]</sup>。由于 EDTA 以及 EDTA-金属复合物不易分解, 螯合剂溶解的土壤重金属存在向地下水渗漏的风险<sup>[5-9]</sup>, 因此, 重金属淋滤问题能否解决将直接关系到诱导性植物提取的前途。通过微生物合成的化学物质 [S,S]-EDDS 是 EDTA 的同分异构体<sup>[10]</sup>, 由于其在环境中易被降解, 残留时间短<sup>[11-12]</sup>, 近几年, 有关 EDDS 在诱导修复中的研究迅速升温<sup>[13-15]</sup>。与 EDTA 相比, EDDS 具有更好的

收稿日期: 2007-01-30

基金项目: 江苏省社会发展项目 (BS2006055); 江苏省自然科学基金 (BK2006711-1); 南京农业大学 SRT 计划 (0409A10, 0506A02)

作者简介: 陈亚华, 副教授, 从事生物修复、植物生理方面的研究, E-mail: yahuachen@njau.edu.cn。

\* 通讯作者: E-mail: zgshen@njau.edu.cn。

修复铜污染土壤的潜力<sup>[16-17]</sup>, 但有关 EDDS 强化植物提取过程中的土壤重金属迁移行为尚未见报道。

本试验参考南京当地自然降水条件, 研究在模拟降水的条件下, 降解性能不同的两种螯合剂 (EDDS、EDTA) 对土壤重金属迁移行为的影响。同时研究两种高生物量植物 (香根草和玉米) 在减少重金属淋滤方面的作用, 为诱导性植物提取的可行性研究提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 土壤及土柱准备

无污染土壤 (A 土) 采自南京农业大学校园试验田 0~20 cm 的表层土, 经自然风干, 过 4 cm 筛。土壤类型为黄棕壤。重金属污染土壤 (B 土) 为上述无污染土壤与人工复配重金属污染土壤混合而成。人工复配重金属污染土壤是经过添加不同浓度的 Pb (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>、CuSO<sub>4</sub>、ZnSO<sub>4</sub> 和 Cd (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> · 4H<sub>2</sub>O 等重金属复配而成, 经过多季的植物种植 (未施加过螯合剂处理)。土壤重金属含量及理化性质见表 1。

表 1 供试土壤的理化性质

Table 1 Selected physicochemical properties of tested soils

土壤 Soils	pH	有机质含量/ g · kg <sup>-1</sup> Organic content	不同质地土壤比例/% Rate of different texture soil			土壤饱和持水量/% Field water capacity	土壤重金属含量/mg · kg <sup>-1</sup> Content of heavy metals			
			①	②	③		Pb	Cu	Zn	Cd
			①	②	③					
A 土 A soil	6.9	11.7	39.3	44.7	17.0	34.3	44.6	28.4	97	0.87
B 土 B soil	7.0	20.2	35.8	42.8	21.4	38.2	1 480	203	388	2.39

注: A 土、B 土分别代表无污染土壤和重金属污染土壤。A soil stands for the un-contaminated soil, B soil stands for the heavy metal-contaminated soil. 土壤质地 Soil texture: ① >0.05 mm; ② 0.05~0.001 mm; ③ <0.001 mm

采用两种规格的土柱: 大柱: 内径 15.5 cm, 小柱: 内径 11.0 cm, 柱高均为 115 cm 的塑料管。柱子底部安装拦土及收集土壤淋滤液的装置。土柱下层装入 80 cm 高的无污染土壤, 然后再装入 25 cm 高的重金属污染土壤。边装土边压实, 土壤体积质量保持在 1.2 g · cm<sup>-3</sup> 左右。大、小土柱各 12 根。

### 1.2 植物种植及螯合剂处理

2004 年 7 月末, 在土柱装污染土壤后, 分别在 4 个大柱和 4 个小柱内移栽 1 株香根草幼苗。于 2006 年 4 月 1 日, 分别在另外的 4 个大柱和 4 个小柱内播种玉米种子 (此时, 香根草幼苗经过 20 个月的生长繁殖, 具备了相当大的生物量, 株高达 1 m)。植物生长期间保证水分供应, 余留的 4 个大柱和 4 个小柱作为对照未种植植物。土柱放置于室外, 用透明雨棚防雨。

2006 年 5 月 25 日, 玉米生长近开花期, 将各土柱土壤加水至饱和状态。5 月 31 日, 对 9 根大土柱 (香根草、玉米以及无植物的土柱各 3 根) 进行 EDDS 处理, 对 9 根小土柱 (香根草、玉米以及无植物的土柱各 3 根) 进行 EDTA 处理。分别以 25 mmol · L<sup>-1</sup> 的 EDDS-Na<sub>3</sub> 或 EDTA-Na<sub>2</sub> 溶液进行土面浇灌, 使表层重金属污染土壤的螯合剂处理量均为 2.5 mmol · kg<sup>-1</sup>。其余的土柱不施加螯合剂处理。

### 1.3 模拟雨水淋洗及淋滤液收集

2006 年 6 月 1 日至 25 日对土柱进行淋洗试验。6 月 1 日至 20 日的土柱模拟加水量参考南京地区 2002 至 2005 年当日最大降水量, 分别为 0、0、0、0、27、0、2、4、11.5、25、8、0、0、36、34、1、0、0、36 和 30 mm。6 月 3 日、4 日各补充 6 mm 降水以满足植物正常生长的需要。6 月 21 日至 25 日进行模拟大量雨水淋洗处理, 每日对土柱分别添加 50.9 mm 的降水, 使 6 月 1 日至 25 日的累积总加水量相当于南京地区 1997 至 2005 年 6、7、8 月 3 个月降水量总和的平均值 (481 mm)。每天收集淋滤液。淋滤液经过滤后加一滴浓 HNO<sub>3</sub>, 测定重金属含量。

### 1.4 土柱各层土壤以及植物样品取样

由于在浇水过程中土柱土壤发生沉降, 根据初期放置在底层无污染土壤与表层重金属污染土壤之间的标记 (塑料丝), 用电锯将土柱锯开, 将表层土壤 (大约 0~20 cm) 和底层土壤 (分 3 层: 20~40 cm, 40~60 cm, 60~80 cm) 分别混合均匀、取样, 测定土壤水溶性重金属含量及土壤重金属总量。对地上部植物样品分段剪取, 混合均匀取样, 测定重金属含量。

### 1.5 测定方法

土壤 pH、土壤质地、饱和持水量及有机质含量测定参考鲁如坤<sup>[18]</sup>的方法测定。

土壤水溶性重金属含量测定：称 5.0 g 土壤样品（过 2 mm 筛）置于 50 mL 塑料瓶中，加 25.0 mL H<sub>2</sub>O，经恒温（25 ℃）水浴摇床水平振荡（60 r · min<sup>-1</sup>）2 h 后，桌面静置 10 ~ 15 min，过滤取上清液测定。

土壤及植物样品重金属含量测定：称取土壤样品（过 100 目筛），用 HNO<sub>3</sub> 与 HClO<sub>4</sub>（V（HNO<sub>3</sub>）/V（HClO<sub>4</sub>）= 4:1）的混合液消煮<sup>[19]</sup>。植物样品经研磨、粉碎后过 60 目筛，用 HNO<sub>3</sub> 与 HClO<sub>4</sub>（V（HNO<sub>3</sub>）/V（HClO<sub>4</sub>）= 87:13）的混合液消煮<sup>[20]</sup>。消煮后的样品经 50 g · L<sup>-1</sup> HNO<sub>3</sub> 溶解、定容。

用原子吸收分光光度计（TAS-986，北京普析公司）测定金属元素含量。分析试剂采用优级纯，水为纯水（密里博公司纯水设备）。用国家地球化学标准参考样土壤 GSS-1 和 GSS-6、国际土壤标准样（SRM2586）以及国际植物标准样（SRM1515）内插法进行分析质量控制，分析样品的重复数为 10% ~ 15%，样品回收率为 93% ~ 108%。

## 1.6 统计方法

利用 SPSS 11.0 软件统计，对数据进行差异显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同螯合剂处理对土壤重金属淋滤的影响

由表 2 可见，未种植植物的土柱，所浇灌的水大约有 70% ~ 80% 淋滤出土柱；种植玉米的土柱，淋滤液大约占加水总量的 30%；种植香根草的土柱收集到的淋滤液最少，大约是加水量的 22%。从淋滤出土柱的重金属总量可以看出，在集中大量降水条件下（总降水量为 481 mm），EDTA 处理的土柱土壤重金属向地下水淋滤；种植玉米和香根草可以有效减少重金属的淋滤量；种植植物以后，重金属的淋滤量会下降 90% 以上；两种植物对减少重金属的淋滤量差异不大。使用易生物降解的螯合剂 EDDS，即使单位面积收集的淋滤液与 EDTA 处理所收集的相当，也一直未能从淋滤中检测到重金属。其原因可能是 EDDS 在土壤中降解速度比较快，在大量雨水淋洗前，已经被完全降解。

表 2 土柱淋滤液总量及淋滤重金属总量

Table 2 Total volume of leachates and the total amount of leached heavy metals

土柱 Soil columns	螯合剂 Chelators	植物种类 Plant species	淋滤液总量/mL Total leached volume	淋滤液占加水 量的比例/% Percentage	淋滤出的重金属总量/mg Total amount of leached heavy metals			
					Pb	Cu	Zn	Cd
小柱 Small column	EDTA	无植物 No-plant	3 602 ± 199	78.8	15.2 ± 3.4	31.7 ± 6.5	23.9 ± 3.9	0.80 ± 0.04
		玉米 Corn	1 530 ± 266	33.5	3.6 ± 0.9	2.4 ± 2.4	2.0 ± 0.7	0.08 ± 0.14
		香根草 Vetiver grass	1 018 ± 117	22.3	0.9 ± 1.2	2.3 ± 0.1	1.7 ± 0.1	0.04 ± 0.00
大柱 Large column	EDDS	无植物 No-plant	6 505 ± 572	71.7	—	—	—	—
		玉米 Corn	2 648 ± 525	29.2	—	—	—	—
		香根草 Vetiver grass	1 992 ± 215	21.9	—	—	—	—

### 2.2 EDTA 处理对小土柱土壤 Pb、Cu 等重金属淋滤行为的影响

从图 1 可见，EDTA 处理 0 ~ 14 d，累积降水量达 126 mm 时，所有土柱均未发生 Pb、Cu 淋滤。随着降水量增加，未种植植物的土柱，淋滤液重金属含量逐渐增加，与降水量成明显的相关性。种植植物

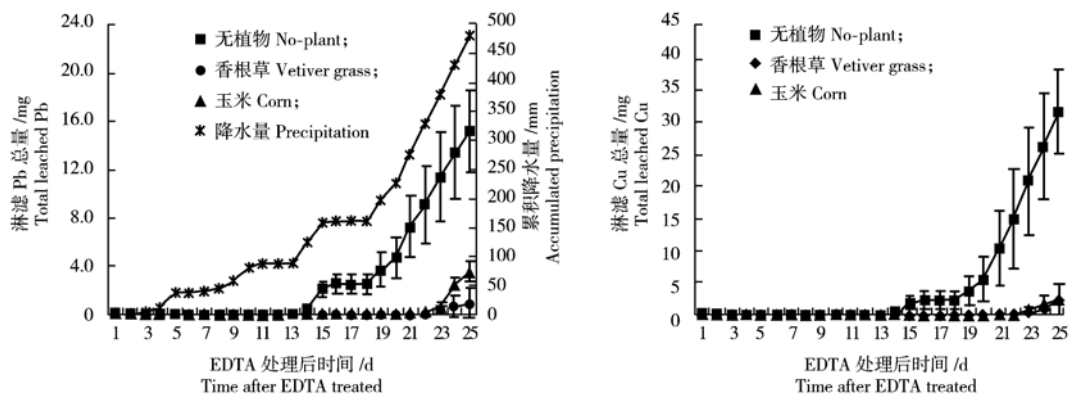


图 1 降水量对 EDTA 诱导修复过程中土壤 Pb、Cu 淋滤行为的影响

Fig. 1 Effects of precipitation on the leaching patterns of Pb and Cu from the soil columns treated with EDTA

的土柱，在 EDTA 处理 23 d 后，即开始大量加水淋洗时，淋滤液中开始检测到重金属。因此，在持续 23 d 累积降水量 380 mm 之前，EDTA 诱导植物（玉米和香根草）提取土壤重金属的过程是相对安全的。香根草延缓 Pb 淋滤的效果好于玉米。土壤 Zn、Cd 的淋滤特征与 Pb、Cu 相似（数据未列出）。

2.3 不同土层土壤水溶性重金属含量

由表 3 可见，EDDS 处理的大土柱，只在表层重金属污染土壤检测到水溶性重金属，而底层（20 ~ 80 cm）土壤均未检测到。EDTA 处理的小土柱，在各层土壤均检测出水溶性重金属；但种植不同植物的土柱土层，水溶性重金属含量存在较大差异。未种植物的土柱，各层水溶性重金属总和显著低于种植植物的土柱，说明在大量降水淋洗后，土壤中可溶性重金属大部分被淋滤出土柱，这与表 2 数据相吻合。比较种植玉米和香根草的土柱可以发现：种植香根草的土柱，大部分水溶性重金属存在于表层 0 ~ 20 cm 土层土壤；种植玉米的土柱，水溶性重金属主要集中于 20 ~ 40 cm 土层。与玉米相比，香根草更有效地阻止可溶性重金属向下层土壤迁移。

表 3 土柱各层土壤水溶性重金属含量

Table 3 Content of water soluble-heavy metals in the different layers of soil

螯合剂处理（土柱） Chelator treated (Soil columns)	植物种类 Plant species	重金属 Heavy metals	各土层土壤水溶性重金属含量/mg · kg <sup>-1</sup> Water soluble heavy metal in the different layers of soil			
			0 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	40 ~ 60 cm	60 ~ 80 cm
EDTA (小柱 Small column)	无植物 No-plant	Pb	1.29 ± 0.11	0.31 ± 0.09	0.11 ± 0.04	0.11 ± 0.06
	玉米 Corn		4.24 ± 2.99	6.89 ± 11.4	0.03 ± 0.02	0.05 ± 0.05
	香根草 Vetiver grass		62.3 ± 8.4	5.09 ± 4.70	0.11 ± 0.12	0.01 ± 0.01
	无植物 No-plant	Cu	0.06 ± 0.01	0.33 ± 0.28	0.50 ± 0.53	1.57 ± 1.82
	玉米 Corn		1.68 ± 1.39	6.77 ± 9.47	0.35 ± 0.30	0.48 ± 0.78
	香根草 Vetiver grass		20.25 ± 3.05	5.70 ± 3.47	1.31 ± 0.97	0.19 ± 0.21
EDDS (大柱 Large column)	无植物 No-plant	Pb	0.64 ± 0.22	—	—	—
	玉米 Corn		0.60 ± 0.19	—	—	—
	香根草 Vetiver grass		0.82 ± 0.31	—	—	—
	无植物 No-plant	Cu	0.51 ± 0.15	—	—	—
	玉米 Corn		0.52 ± 0.05	—	—	—
	香根草 Vetiver grass		0.47 ± 0.29	—	—	—

2.4 不同土层土壤重金属总含量变化

以小土柱土壤 Pb 和大土柱土壤 Pb、Cu 的变化为代表，比较分析了 EDTA 和 EDDS 诱导植物提取过程中土壤重金属在垂直土层中的迁移情况。

由表 4 可见，施用 EDTA 可使底层（20 ~ 80 cm）无污染土壤 Pb 含量明显增加，而种植植物可以明显减少 Pb 含量。比较两种植物，种植香根草的土柱底层无污染土壤中 Pb 的增加量较小。

0 ~ 20 cm 土层，在没有种植植物而施用 EDTA 处理的土壤，其 Pb 含量为对照的 93%，说明施用 EDTA 后，可溶性 Pb 已经向下层土壤迁移。20 ~ 80 cm 无污染土层由上至下 Pb 的增加量逐渐减少，反映了表层 Pb 向下淋滤的进程（表 4）。重金属 Cu、Zn 和 Cd 在小土柱各层土壤中的含量变化与 Pb 的变化趋势相似（数据未列出）。

EDDS 处理的大土柱（表 5）：表层 0 ~ 20 cm 土壤 Cu 含量略有降低，Pb 含量变化不明显；20 ~ 40 cm 土壤 Cu、Pb 含量有所升高，各处理间 40 ~ 80 cm 土壤 Cu 或 Pb 含量没有明显差异。说明 EDDS 处理对土壤 Cu、Pb 的迁移行为影响不大。这与 EDDS 处理的土柱淋滤液检测不出重金属（表 2）是一致的。

表 4 EDTA 处理对各层土壤 Pb 总量的影响

Table 4 Total Pb concentration of soils in the different layers under EDTA-treated

小柱土层/cm Soil layers in small column	Pb 总量/mg · kg <sup>-1</sup> Total Pb concentrations			
	无 EDTA 处理 No-EDTA	EDTA - 玉米 EDTA-corn	EDTA - 香根草 EDTA-vetiver grass	EDTA - 无植物 EDTA-no plant
0 ~ 20	1 492.0 ± 56.0 <sup>a</sup>	1 435.0 ± 58.0 <sup>a</sup>	1 476.0 ± 29.0 <sup>a</sup>	1 392.0 ± 21.0 <sup>b</sup>
20 ~ 40	65.5 ± 14.4 <sup>a</sup>	187.0 ± 88.0 <sup>b</sup>	135.0 ± 38.0 <sup>b</sup>	205.0 ± 125.0 <sup>b</sup>
40 ~ 60	45.3 ± 5.8 <sup>a</sup>	68.1 ± 12.0 <sup>b</sup>	58.0 ± 7.2 <sup>ab</sup>	83.8 ± 5.6 <sup>c</sup>
60 ~ 80	43.8 ± 3.1 <sup>a</sup>	50.5 ± 4.3 <sup>ab</sup>	46.5 ± 2.8 <sup>ab</sup>	60.3 ± 13.4 <sup>b</sup>

注：同行不同字母表示 0.05 水平差异显著。Different letters in the same line mean significant difference at 0.05 level. The same as follows.

表 5 EDDS 处理对各层土壤 Cu 和 Pb 总量的影响

Table 5 Total Cu and Pb concentration of soils in different layers under EDDS-treated

重金属 Heavy metals	大柱土层/cm Soil layers in large column	重金属总量/mg · kg <sup>-1</sup> Total heavy metal concentrations			
		无 EDDS 处理 No-EDDS	EDDS-玉米 EDDS-corn	EDDS-香根草 EDDS-vetiver grass	EDDS-无植物 EDDS-no plant
Cu	0~20	195.0 ± 17.0 <sup>a</sup>	188.0 ± 15.0 <sup>a</sup>	178.0 ± 28.0 <sup>a</sup>	193.0 ± 19.0 <sup>a</sup>
	20~40	29.6 ± 2.0 <sup>a</sup>	31.2 ± 2.7 <sup>a</sup>	36.2 ± 3.0 <sup>ab</sup>	36.9 ± 1.7 <sup>b</sup>
	40~60	27.1 ± 1.1 <sup>a</sup>	29.0 ± 2.2 <sup>a</sup>	29.6 ± 2.0 <sup>a</sup>	28.5 ± 1.8 <sup>a</sup>
	60~80	27.1 ± 1.6 <sup>a</sup>	29.1 ± 0.7 <sup>a</sup>	29.8 ± 2.1 <sup>a</sup>	28.4 ± 0.3 <sup>a</sup>
Pb	0~20	1 506.0 ± 48.0 <sup>a</sup>	1 488.0 ± 56.0 <sup>a</sup>	1 498.0 ± 43.0 <sup>a</sup>	1 458.0 ± 75.0 <sup>a</sup>
	20~40	59.1 ± 5.6 <sup>a</sup>	73.7 ± 2.6 <sup>b</sup>	73.4 ± 9.3 <sup>b</sup>	82.0 ± 10.1 <sup>b</sup>
	40~60	55.8 ± 5.2 <sup>a</sup>	52.9 ± 6.1 <sup>a</sup>	48.6 ± 3.1 <sup>a</sup>	53.9 ± 7.8 <sup>a</sup>
	60~80	46.8 ± 2.3 <sup>a</sup>	48.3 ± 3.2 <sup>a</sup>	44.7 ± 4.5 <sup>a</sup>	46.0 ± 3.4 <sup>a</sup>

## 2.5 植物地上部重金属含量

EDTA 和 EDDS 处理可以明显增加两种植物地上部 Pb 的含量, 但 Cu 的增加量不明显 (表 6)。这与土壤 Pb 含量 (1 480 mg · kg<sup>-1</sup>) 明显高于土壤 Cu 含量 (203 mg · kg<sup>-1</sup>) 有关。

表 6 螯合剂处理 25 d 后植物地上部 Pb、Cu 含量

Table 6 Pb and Cu concentration in the shoots of vetiver grass and corn 25 d after EDTA or EDDS treatment

土柱 Soil columns	螯合剂 Chelators	Pb 含量/mg · kg <sup>-1</sup> Pb concentration		Cu 含量/mg · kg <sup>-1</sup> Cu concentration	
		香根草 Vetiver grass	玉米 Corn	香根草 Vetiver grass	玉米 Corn
小柱 Small column	No-EDTA	1.32	5.78	12.52	7.48
	+ EDTA	11.49 ± 1.86	20.35 ± 1.57	12.42 ± 0.81	9.39 ± 1.44
大柱 Large column	No-EDDS	1.17	4.46	13.75	8.29
	+ EDDS	5.26 ± 0.41	6.75 ± 0.69	15.33 ± 0.56	10.92 ± 1.01

## 3 讨论

本试验参考了南京地区 6 月份的日降水情况, 以 4 年的日最大降水量为日浇灌量。采用模拟集中降水的淋洗法, 研究了螯合诱导修复过程中重金属的淋滤行为。试验结果表明, EDDS 是一种风险性小的螯合剂, 在充分淋洗条件下, 一直未能在淋滤液中检测到重金属的存在, 该螯合剂对土壤中重金属的迁移行为影响很小。其原因主要与 EDDS 在土壤中的半衰期短, 易被生物降解有关。Jaworska 等<sup>[11]</sup>计算出 EDDS 的半衰期只有 2.5 d, Meers 等<sup>[12]</sup>估算出 EDDS 加入重金属污染土壤中的半衰期在 3.8~7.5 d。由此推测, 在本试验中后期, EDDS 已经在土柱中被降解, 水溶性重金属已经转变成非可溶形态, 因而在淋滤液中检测不出重金属的存在。因此, 只要在 EDDS 施用后短时间内 (10~20 d) 不存在大量降水, EDDS 可以安全地用于污染土壤的诱导性植物提取。它是一种对环境影响小, 安全性高的螯合剂。

本试验在大量雨水淋洗条件下, EDTA 对表层土壤重金属的迁移行为影响较大。不论种植植物与否, EDTA 处理均导致表层土壤重金属向下迁移。因此, EDTA 诱导植物提取只能慎重应用于低降水量地区或具有防雨设施的条件下。种植植物有利于延缓重金属向下层土壤迁移, 尤其是高生物量、深根系植物。

虽然本试验中 EDTA 和 EDDS 处理的土柱直径不同, 但两处理土柱均比较粗 (内径分别为 11.0 cm 和 15.5 cm), 可以减少水分因侧向迁移而引起的误差。由于大、小土柱高度一致, 土柱内土壤组成和降水量一致, 因此, 试验结果有一定的可比性。较 EDTA 而言, EDDS 是一种安全性较高的土壤添加剂; 与 EDDS 比较, EDTA 对多种重金属具有较高的螯合效率<sup>[16]</sup>, 因而对污染土壤的适用范围更广。

本试验螯合剂处理的植物地上部重金属含量普遍低于 20 mg · kg<sup>-1</sup>, 该值远低于在一些盆栽试验中螯合剂辅助诱导的植物地上部重金属含量。其原因可能由以下几个方面: 1) 植物根系分布在污染 (0~20 cm) 与未污染土壤 (20~80 cm) 之中。试验中观察到, 未进行螯合剂处理前, 玉米和香根草的根系已经生长到土柱的底部, 因此在污染土壤中生长的根系仅占植物总根系量的 1/4 左右, 而一般的盆栽试验根系全部接触污染土壤。2) 螯合剂处理的生育期不同。盆栽试验中, 螯合剂处理的时间一般在植物生长发育的苗期, 植物生物量较小, 苗幼嫩, 对 EDTA 等螯合剂处理比较敏感, 每千克植物地上部重金属含量一般在几百甚至上万毫克<sup>[7,21]</sup>。本试验中螯合剂处理时, 香根草在开春后重新恢复生长已近

3个月,玉米也已到开花成熟期,植物在成熟期对外界的逆境抵抗力相对于苗期要强。因此,植物对螯合剂的施用相对不敏感。这可以直接从植株的外观上看出:在本试验中,螯合剂( $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ )处理后,玉米和香根草地上部均未出现明显的毒害症状。在植物品种筛选试验中,玉米在苗期经过EDTA( $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ )处理,叶片会出现明显的毒害症状<sup>[7]</sup>。3)根系与高浓度可溶性重金属的土壤溶液接触时间短。盆钵试验中,植物的绝大部分根系可以接触到高含量重金属的土壤,而且接触时间长。本试验中,随着土柱土壤表面不断加水,重金属淋滤液向下层迁移(或EDDS过早的生物降解),只有部分根系可以接触到高含量重金属的土壤,影响了植物根系与可溶性重金属的接触时间,进而影响了植物对重金属的总吸收量。

#### 参考文献:

- [1] Salt D E, Smith R D, Raskin I. Phytoremediation [J]. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol*, 1998, 49: 643-668
- [2] McIntyre T C. Phytoremediation of heavy metals from soils [J]. *Adv Biochem Eng Biotechnol*, 2003, 78: 97-123
- [3] Alkorta I, Hernández-Allica J, Becerril J M, et al. Recent findings on the phytoremediation of soils contaminated with environmentally toxic heavy metals and metalloids such as zinc, cadmium, lead, and arsenic [J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2004, 3: 71-90
- [4] Lasat M M. Phytoextraction of toxic metals: a review of biological mechanisms [J]. *J Envir Qual*, 2002, 31: 109-120
- [5] Sun B, Zhao F J, Lombi E, et al. Leaching of heavy metals from contaminated soils using EDTA [J]. *Environ Pollut*, 2001, 113: 111-120
- [6] Römkens P, Bouwman L, Japenga J, et al. Potentials and drawbacks of chelate-enhanced phytoremediation of soils [J]. *Environ Pollut*, 2002, 116: 109-121
- [7] Chen Y H, Li X D, Shen Z G. Leaching and uptake of heavy metals by ten different species of plants during an EDTA-assisted phytoextraction process [J]. *Chemosphere*, 2004, 57: 187-196
- [8] Chen Y H, Shen Z G, Li X D. The use of vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*) in the phytoremediation of soils contaminated with heavy metals [J]. *Appl Geoch*, 2004, 19: 1553-1565
- [9] Wu L H, Luo Y M, Xing X R, et al. EDTA-enhanced phytoremediation of heavy metal contaminated soil with Indian mustard and associated potential leaching risk [J]. *Agr Ecosyst Environ*, 2004, 102: 307-318
- [10] Takahashi R, Yamayoshi K, Fujimoto N, et al. Production of [S,S]-ethylenediamine-N,N'-disuccinic acid from ethylenediamine and fumaric acid by bacteria [J]. *Biosci Biotechnol Biochem*, 1999, 63: 1269-1273
- [11] Jaworska J S, Schowanek D, Feijtel T C J. Environmental risk assessment for trisodium [S,S]-ethylene diamine disuccinate, a biodegradable chelator used in detergent applications [J]. *Chemosphere*, 1999, 38: 3597-3625
- [12] Meers E, Ruttens A, Hopgood M J, et al. Comparison of EDTA and EDDS as potential soil amendments for enhanced phytoextraction of heavy metals [J]. *Chemosphere*, 2005, 58: 1011-1022
- [13] Grčman H, Vodnik D, Velikonja-Bolta Š, et al. Ethylenediaminedisuccinate as a new chelate for environmentally safe enhanced lead phytoextraction [J]. *J Envir Qual*, 2003, 32: 500-506
- [14] Kos B, Leštan D. Induced phytoextraction/soil washing of lead using biodegradable chelate and permeable barriers [J]. *Environ Sci Technol*, 2003, 37: 624-629
- [15] Tandy S, Bossart K, Mueller R. Extraction of heavy metals from soils using biodegradable chelating agents [J]. *Environ Sci Technol*, 2004, 38: 937-944
- [16] Luo C L, Shen Z G, Li X D. Enhanced phytoextraction of Cu, Pb, Zn and Cd with EDTA and EDDS [J]. *Chemosphere*, 2005, 59: 1-11
- [17] 魏岚, 陈亚华, 钱猛, 等. 可降解螯合剂EDDS诱导植物修复重金属污染土壤的潜力 [J]. *南京农业大学学报*, 2006, 29(2): 33-38
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 147-211
- [19] Li X D, Poon C S, Liu P S. Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong [J]. *Appl Geochem*, 2001, 16: 1361-1368
- [20] Zhao F, McGrath S P, Crosland A R. Comparison of 3 wet digestion methods for the determination of plant sulfur by inductively-coupled plasma-atomic emission-spectroscopy (ICP-AES) [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1994, 25: 407-418
- [21] 陈亚华, 李向东, 刘红云, 等. EDTA辅助下油菜修复铅污染土壤的潜力 [J]. *南京农业大学学报*, 2002, 25(4): 15-18