

螯合剂对大叶井口边草 Pb、Cd、As 吸收性影响研究^①

熊国焕¹, 潘义宏², 何艳明¹, 栾景丽¹, 王宏镔³, 高建培^{3*}

(1 昆明冶金研究院, 昆明 650031; 2 云南瑞升烟草技术(集团)有限公司, 昆明 650106;

3 昆明理工大学环境科学与工程学院, 昆明 650093)

摘要: 用室内土培试验方法, 研究在采自田间的 Pb、Cd、As、Zn 和 Cu 复合污染土壤上种植大叶井口边草条件下, 外源分别添加 0、1.5、3、6、12 mmol/kg 乙二胺二琥珀酸(EDDS)、氨三乙酸(NTA)和乙二胺四乙酸(EDTA)对大叶井口边草吸收 Pb、Cd 和 As 的影响。结果表明, 3 种螯合剂处理对大叶井口边草生物量没有显著影响, 说明大叶井口边草对 3 种螯合剂耐性较强; 6、12 mmol/kg EDTA 处理能极显著提高土壤 Pb 有效态浓度, 进而促进大叶井口边草对 Pb 的吸收。大叶井口边草地上部 Pb 吸收量最高达 (47.4 ± 1.7) mg/kg, 是对照的 3.66 倍。6、12 mmol/kg EDTA 处理能极显著地提高土壤中 Cd 的有效性, 但未促进大叶井口边草地上部对 Cd 吸收。6 mmol/kg EDDS 和 3 mmol/kg NTA 显著提高了土壤中 As 有效态浓度, 进而提高大叶井口边草地上部对 As 的吸收, 大叶井口边草地上部吸收 As 最高达 (276 ± 10) mg/kg。6 mmol/kg EDTA 和 6 mmol/kg EDDS 处理下大叶井口边草提取的 Pb、As 量最大, 分别为 (317 ± 53) μg/盆和 (873 ± 41) μg/盆, 说明 6 mmol/kg EDDS 处理下大叶井口边草对复合污染土壤中 As 的修复具有较大的潜力。

关键词: 植物提取; 大叶井口边草; 重金属; 螯合剂

中图分类号: X53

植物提取(phytoextraction)是利用超富集植物从污染土壤中超量吸收、积累一种或几种重金属元素之后将植物地上部或整体收获并集中处理, 然后继续种植超富集植物以使土壤中重金属含量降低到可以接受的水平^[1]。该技术以原位修复、低投入、操作简便等优点在土壤重金属污染治理中有很大的应用潜力。植物提取技术成功关键取决于植物地上部分生物量及其重金属含量。超富集植物适合于重金属污染土壤的修复, 但由于其专一性强的特点在重金属复合污染土壤中运用具有局限性。施加螯合剂可以溶解土壤中重金属, 增加生物有效态, 从而促进植物吸收^[2-4]。目前, 螯合剂诱导植物修复重金属污染土壤在盆栽和野外田间试验均取得较好效果^[5-7], 但是螯合剂诱导超富集植物大叶井口边草(*Pteris cretica* var. *nervosa*)^[8]修复重金属复合污染农田土壤研究较少。

本研究通过室内土培试验, 研究在采自田间的 Pb、Cd、As、Zn 和 Cu 复合污染土壤中种植 As 的超富集植物大叶井口边草条件下, 外源添加不同浓度乙二胺二琥珀酸(EDDS)、氨三乙酸(NTA)和

乙二胺四乙酸(EDTA)对大叶井口边草吸收 Pb、Cd 和 As 的影响基础上, 初步探讨 EDTA、EDDS、NTA 提高大叶井口边草提取重金属 Pb、Cd 和 As 可能性, 旨在为大叶井口边草进一步开发利用于 Pb、Cd 和 As 复合污染农田土壤的修复和治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤属高原红壤, 采自云南省个旧市乍甸村某农田 0~20 cm 耕作层。土壤风干后过 5 mm 筛, 充分混匀。土壤基本理化性质和重金属含量为: pH 7.12、有机质 36.8 g/kg、总氮 1.43 g/kg、总磷 1.86 g/kg、CEC 9.49 cmol/kg、总 Pb 569 mg/kg、总 Cd 2.09 mg/kg、总 Cu 219 mg/kg、总 Zn 260 mg/kg、总 As 261 mg/kg, 供试土壤为重金属复合污染土壤。大叶井口边草(*P. cretica* var. *nervosa*)幼苗采自中国科学院昆明植物研究所, 选取 5~7 cm 高、带 3~5 片小叶、长势一致的幼苗进行盆栽试验。

①基金项目: 国家环境保护科技项目(E-2007-06)、云南省环境保护专项项目(2007[262])和云南省教育厅科学研究基金重点项目(09Z0019)资助。

* 通讯作者(gaojp99@yahoo.com.cn)

作者简介: 熊国焕(1984—), 女, 云南西双版纳人, 助理工程师, 主要从事污染生态学研究。E-mail: xgh198412@126.com

1.2 盆栽试验设计与实施

盆栽试验采用底直径 14 cm 和高 15 cm 的 PVC 盆，每盆 1.5 kg 土。采用 NH_4Cl 、 KH_2PO_4 、 KCl （均为分析纯）作基肥，用量分别为 N 0.15、 P_2O_5 0.10、 K_2O 0.15 g/kg 土。基肥与土充分混匀，平衡 1 周后进行盆栽试验。每盆移栽大叶井口边草 4 株，植物生长 80 天后分别施加 NTA、EDTA (Na_2EDTA)、EDDS (Na_3EDDS) 等螯合剂，3 种螯合剂溶于 200 ml 蒸馏水（其中 NTA 用 NaOH 调节 pH 至 7.0 完全溶解）后施加。螯合剂施加后第 8 天收获。NTA、EDTA、EDDS 均施加 5 个浓度水平：0（对照）、1.5、3.0、6.0、12.0 mmol/kg 土。植物在室内自然光照 $18^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ 条件下培养，期间用自来水浇灌，土壤湿度保持在 60% 田间持水量左右。试验中每个处理设 3 个重复。

1.3 样品处理与测定

将收获植物分为地上部和根部，用自来水冲洗干净后再用去离子水淋洗 2~3 次，于 105°C 下杀青 30 min，在 70°C 下烘至恒重，测定干重。磨碎后过 60 目尼龙筛，用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 法消解，原子吸收光谱仪（美国 Varian AA240FS 型）测定 Pb、Cd 含量；采用氢化物发生-原子吸收光谱法测定总 As^[9]，氢化物发生器购自北京瀚时制作所（WHG-103 型）。

土样风干后过筛，土壤 pH 值测定采用电位法；有机质的测定采用重铬酸钾容量法-稀释热法；总氮测定采用半微量凯氏定氮法；总磷测定采用 $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$

法；阳离子代换量（CEC）测定采用乙酸铵交换法；总 Pb、总 Cd、总 Cu 和总 Zn 采用王水-高氯酸消煮原子吸收光谱法测定；土壤 Pb、Cd 有效态含量采用二乙三胺五乙酸-三乙醇胺（DTPA-TEA）法测定；总 As 采用氢化物发生-原子吸收光谱法测定。具体操作方法参照中国科学院南京土壤研究所《土壤理化分析》^[10] 及鲍士旦《土壤农化分析》（第三版）^[9]。土壤 As 有效态采用 0.5 mol/L NaH_2PO_4 提取法^[11]测定。

空白样品、茶叶标准样品（GBW-08505）、土壤标准样品（GBW-08303）以及 As 和 Pb、Cd、Cu、Zn 标准溶液购自国家标准物质研究中心。各元素的加标回收率在 92%~99% 之间，符合元素质量分数分析质量控制要求。

1.4 数据处理与分析

数据分析用 SAS 9.0 软件进行双因素方差分析，并采用 Tukey's HSD 法进行多重比较。显著性差异水平 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 施加螯合剂对大叶井口边草生长的影响

由表 1 可知，对照的大叶井口边草地上部生物量达 (2.66 ± 0.28) g/盆，观察未见受害症状。施加螯合剂大叶井口边草表现出较强耐性，收获时除 12 mmol/kg EDTA、EDDS、NTA 处理叶片中少许缺绿、部分灼伤毒害症状外，其余处理与对照差异不大。

表 1 不同螯合剂处理条件下大叶井口边草生物量
Table 1 Biomass of *P. cretica* var. *nervosa* under different chelators treatments

螯合剂种类	螯合剂浓度 (mmol/kg)	地上部 (g/盆)	根部 (g/盆)	株高 (cm)
EDTA	0	2.66 ± 0.28	1.36 ± 0.49	32.3 ± 10.1
	1.5	2.65 ± 0.44	1.84 ± 0.08	38.7 ± 11.9
	3.0	2.49 ± 0.44	1.36 ± 0.23	34.7 ± 7.6
	6.0	2.49 ± 0.35	1.67 ± 0.26	41.3 ± 4.2
	12.0	2.12 ± 0.74	1.67 ± 0.13	35.0 ± 4.4
EDDS	0	2.66 ± 0.28	1.36 ± 0.49	32.3 ± 10.0
	1.5	2.56 ± 0.23	1.32 ± 0.35	44.0 ± 13.9
	3.0	2.32 ± 0.13	1.09 ± 0.10	41.0 ± 5.2
	6.0	2.42 ± 0.13	1.64 ± 0.28	33.3 ± 4.0
	12.0	2.56 ± 0.36	1.55 ± 0.27	39.3 ± 11.6
NTA	0	2.66 ± 0.28	1.36 ± 0.49	32.3 ± 10.1
	1.5	2.37 ± 0.46	1.43 ± 0.35	36.7 ± 10.7
	3.0	2.58 ± 0.33	1.35 ± 0.30	34.7 ± 12.5
	6.0	2.83 ± 0.53	1.14 ± 0.15	36.0 ± 13.2
	12.0	2.54 ± 0.27	1.42 ± 0.18	34.0 ± 7.8
双因素方差分析	螯合剂种类 (A)	$P = 0.677$	$P = 0.089$	$P = 0.659$
	螯合剂不同浓度 (C)	$P = 0.654$	$P = 0.247$	$P = 0.614$
	$A \times C$	$P = 0.726$	$P = 0.483$	$P = 0.956$

注：表中数据表示平均值±标准差（ $n=3$ ），下表同。

双因素方差分析表明：不同螯合剂、不同螯合剂浓度及其两者的交互作用对大叶井口边草生物量均没有显著影响 ($P>0.05$)。说明大叶井口边草对螯合剂耐性强。

2.2 施加螯合剂对大叶井口边草吸收 Pb、Cd 和 As 的影响

施加螯合剂后大叶井口边草体内 Pb 含量变化见

图 1。对照大叶井口边草地上部 Pb 含量为 (13.0 ± 1.9) mg/kg，而 3 种螯合剂处理后大叶井口边草地上部 Pb 含量最高达到 (47.4 ± 1.7) mg/kg，是对照的 3.66 倍。与 NTA、EDDS 比较，EDTA 极显著提高了大叶井口边草地上部和根部对 Pb 的吸收 ($P<0.01$)。与对照相比较，6、12 mmol/kg EDTA 处理极显著提高了大叶井口边草对 Pb 的吸收 ($P<0.01$)。

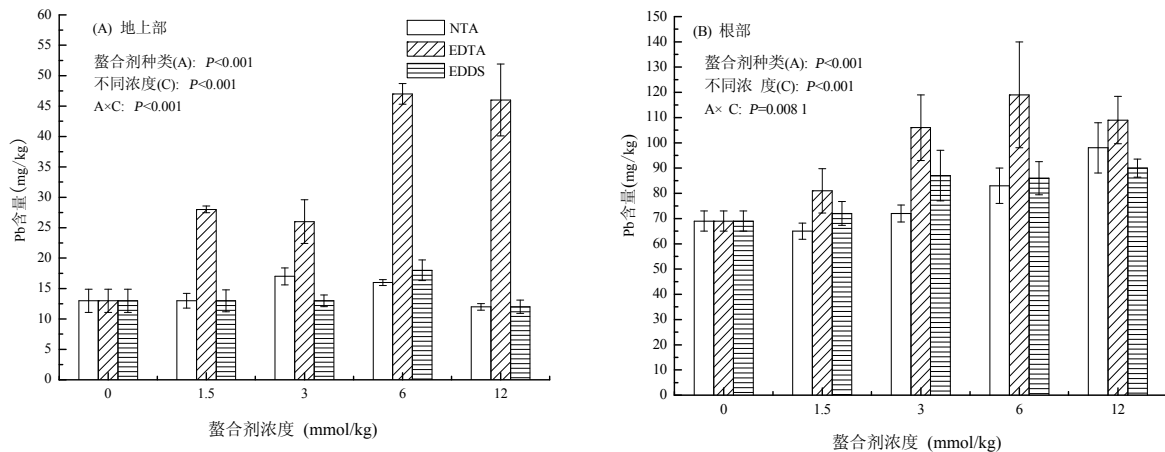


图 1 不同螯合剂对植物体内 Pb 浓度的影响

Fig. 1 Effects of different chelators on Pb concentrations of *P. cretica* var. *nervosa*

3 种螯合剂处理对大叶井口边草吸收 Cd 的影响见图 2。与对照相比较，任何浓度 EDTA 处理没有显著提高大叶井口边草地上部对 Cd 吸收 ($P>0.05$)，12 mmol/kg EDDS 和 NTA 处理极显著抑制了大叶井口边

草地上部对 Cd 的吸收 ($P<0.01$)。不同螯合剂处理对大叶井口边草地上部和根部吸收 Cd 产生显著影响 ($P<0.01$)。与 EDDS 比较，EDTA、NTA 显著提高了大叶井口边草根对 Cd 的吸收 ($P<0.01$)。

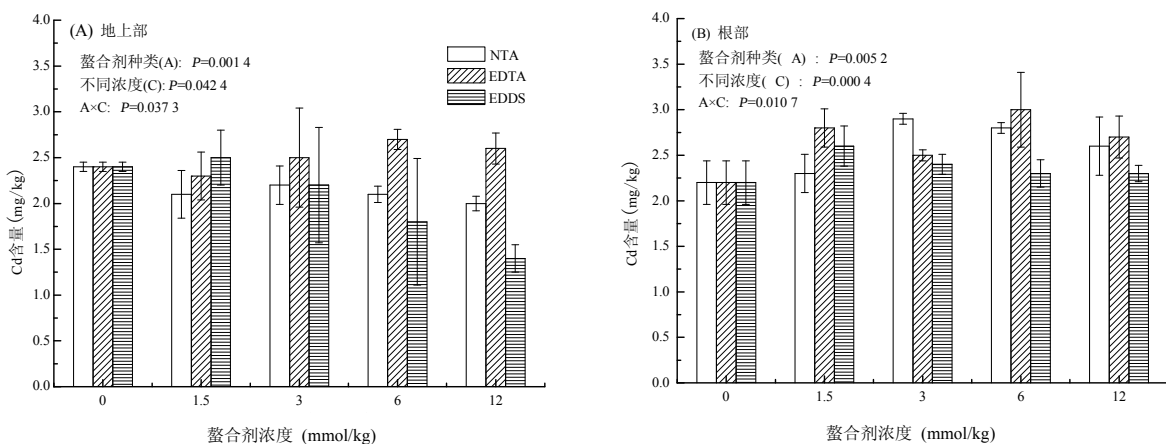


图 2 不同螯合剂对植物体内 Cd 浓度的影响

Fig. 2 Effects of different chelators on Cd concentrations of *P. cretica* var. *nervosa*

螯合剂处理对大叶井口边草吸收 As 的影响见图 3, 对照大叶井口边草地上部、根部 As 含量分别为 (134 ± 13) mg/kg、 (91.9 ± 3.5) mg/kg, 施加螯合剂后大叶井口边草地上部、根部 As 含量最大分别达到 (276 ± 10) mg/kg、 (182 ± 16) mg/kg。施加不同螯合剂间、不同螯合剂浓度间及其二者交互作用间均极显著提高大叶井口边草对 As 的吸收 ($P < 0.01$)。与 EDTA 相比较,

EDDS 促进大叶井口边草地上部对 As 的吸收效果更好, 与对照相比较, 6 mmol/kg EDDS 处理极显著提高大叶井口边草地上部对 As 的吸收 ($P < 0.01$)。但对大叶井口边草根而言, NTA 在大叶井口边草根吸收 As 的促进作用中最好, 与对照相比, 3 mmol/kg NTA 极显著提高大叶井口边草地上部和根部对 As 的吸收 ($P < 0.01$)。

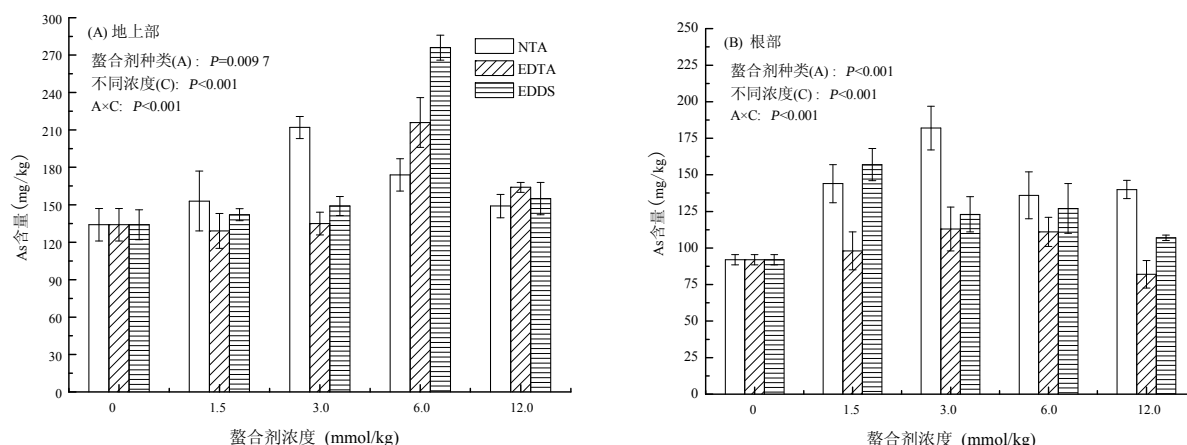


图3 不同螯合剂对植物体内 As 含量影响

Fig. 3 Effects of different chelators on As concentrations of *P. cretica* var. *heterophylla*

2.3 施加螯合剂对土壤重金属有效态的影响

植物收获后土壤中 Pb、Cd 和 As 有效态含量见表 2。Pb、Cd、As 含量变化范围分别为 110~145、1.21~1.54、46.2~68.5 mg/kg。不同螯合剂及用量处理之间土壤 Pb、Cd 有效态浓度差异均达到极显著水平 ($P < 0.01$)。与 NTA 相比, EDTA 处理对土壤中 Pb、Cd 有效态含量促进作用效果较好。与对照相比, 6、12 mmol/kg EDTA 螯合剂浓度极显著提高土壤中 Pb、Cd 有效态含量 ($P < 0.01$)。不同螯合剂处理对土壤有效态 As 含量没有显著影响 ($P > 0.05$); 不同螯合剂浓度均显著提高土壤有效态 As 含量 ($P < 0.05$); 与对照相比, 3、6 mmol/kg EDDS 和 NTA 处理显著提高土壤中 As 有效态含量 ($P < 0.05$)。

2.4 施加螯合剂对大叶井口边草提取 Pb、Cd 和 As 量的影响

螯合剂处理后大叶井口边草提取 Pb、Cd 和 As 的量见表 3。大叶井口边草对 Pb、Cd、As 的提取量范围分别为 109~317、7.15~11.7、481~873 $\mu\text{g}/\text{盆}$ 。与 EDDS、NTA 相比, EDTA 处理极显著提高大叶井口边草对 Pb、Cd 的提取 ($P < 0.01$)。6、12 mmol/kg EDTA

螯合剂处理极显著提高大叶井口边草对 Pb 的提取量 ($P < 0.01$), 其中, 6 mmol/kg EDTA 处理下大叶井口边草提取 Pb 量为 (317 ± 53) $\mu\text{g}/\text{盆}$, 是对照的 2.45 倍, 若以大叶井口边草一年收割 3 次计算, 则每年大叶井口边草提取 Pb 的量为 949 $\mu\text{g}/\text{盆}$ 。不同螯合剂浓度间对大叶井口边草提取 As 没有显著影响 ($P > 0.05$)。与对照相比, 6 mmol/kg 的 3 种螯合剂处理极显著提高大叶井口边草对 As 的提取 ($P < 0.01$)。6 mmol/kg EDDS 处理提取 As 含量最高到 (873 ± 40) $\mu\text{g}/\text{盆}$, 若以大叶井口边草一年收割 3 次计算, 则每年大叶井口边草去除 As 的量为 2 620 $\mu\text{g}/\text{盆}$ 。

3 讨论

不同螯合剂处理对大叶井口边草生物量均无显著影响, 这一方面与大叶井口边草对 3 种螯合剂耐性较强有关, 另一方面可能与螯合剂施加后较短时间收获植物有关。土壤中的大部分重金属与有机质或 Fe-Mn 氧化物结合, 具有较低的可溶性和生物有效性^[12-13]。合适的螯合剂可以增加土壤中重金属的溶解性, 从而促进植物地上部对重金属的吸收和积累^[2-4]。但植物吸

表 2 螯合剂对土壤重金属有效态的影响 (mg/kg)

Table 2 Effects of different chelators on bioavailability concentrations of soil heavy metals

螯合剂种类	螯合剂浓度 (mmol/kg)	Pb	Cd	As
EDTA	0	110 ± 7	1.21 ± 0.15	46.2 ± 7.1
	1.5	129 ± 5	1.29 ± 0.26	52.0 ± 14.7
	3.0	133 ± 9	1.54 ± 0.14	52.6 ± 6.8
	6.0	143 ± 17	1.54 ± 0.40	57.9 ± 2.9
	12.0	145 ± 16	1.55 ± 0.13	68.5 ± 12.8
EDDS	0	110 ± 7	1.21 ± 0.148	46.2 ± 7.1
	1.5	111 ± 15	1.20 ± 0.13	58.0 ± 6.5
	3.0	122 ± 4	1.25 ± 0.30	65.8 ± 6.7
	6.0	122 ± 1	1.37 ± 0.25	48.2 ± 1.5
	12.0	144 ± 17	1.44 ± 0.16	54.0 ± 7.9
NTA	0	110 ± 7	1.21 ± 0.15	46.2 ± 7.1
	1.5	107 ± 6	1.22 ± 0.08	47.9 ± 9.2
	3.0	120 ± 18	1.25 ± 0.10	55.9 ± 2.9
	6.0	126 ± 17	1.35 ± 0.25	59.6 ± 9.5
	12.0	126 ± 5	1.30 ± 0.11	48.1 ± 3.7
双因素方差分析	螯合剂种类 (A)	$P = 0.008$	$P = 0.001$	$P = 0.387$
	螯合剂不同浓度 (C)	$P < 0.001$	$P < 0.001$	$P = 0.025$
	A × C	$P = 0.559$	$P = 0.118$	$P = 0.038$

表 3 螯合剂对大叶井口边草重金属吸收量的影响 (μg/盆)

Table 3 Effects of different chelators on heavy metal total uptake by *P. cretica* var. *nervosa*

螯合剂种类	螯合剂浓度 (mmol/kg)	Pb	Cd	As
EDTA	0	129 ± 39	9.31 ± 1.33	482 ± 101
	1.5	223 ± 18	11.1 ± 1.4	525 ± 105
	3.0	208 ± 23	9.65 ± 0.50	489 ± 72
	6.0	317 ± 53	11.7 ± 1.57	680 ± 142
	12.0	279 ± 23	10.0 ± 2.1	530 ± 137
EDDS	0	129 ± 39	9.32 ± 1.33	482 ± 101
	1.5	129 ± 40	9.99 ± 2.58	574 ± 93
	3.0	121 ± 7	7.68 ± 1.18	481 ± 28
	6.0	187 ± 34	8.10 ± 1.37	873 ± 41
	12.0	171 ± 12	7.15 ± 0.50	565 ± 67
NTA	0	129 ± 39	9.31 ± 1.33	482 ± 101
	1.5	109 ± 23	8.33 ± 2.11	566 ± 128
	3.0	141 ± 28	9.68 ± 0.63	793 ± 73
	6.0	139 ± 5	9.08 ± 1.27	644 ± 63
	12.0	171 ± 25	8.69 ± 0.40	579 ± 77
双因素方差分析	螯合剂种类 (A)	$P < 0.001$	$P = 0.004$	$P = 0.114$
	螯合剂不同浓度 (C)	$P < 0.001$	$P = 0.439$	$P < 0.001$
	A × C	$P = 0.002$	$P = 0.226$	$P = 0.006$

收重金属的效率不仅与螯合剂和金属的亲合力直接相关，且与植物种类有关^[14]。其中 Pb-EDTA 络合物具有较高稳定系数 (K_f 达 17.88)^[15-16]，其次是 Pb-EDDS (12.7) 和 Pb-NTA (11.3)^[16-17]，说明 EDTA 比 EDDS、

NTA 具有更强的溶解土壤 Pb 和增加植物吸收积累 Pb 能力, 本研究结果也证明了这一点。本试验中 EDTA 比 EDDS 具有更强的溶解土壤 Cd 的能力, 可能是由于 Cd-EDTA 稳定常数 17.4 大于 Cd-EDDS 稳定常数 10.8^[18]。Lai 等^[19]研究发现, 在外源添加重金属土壤中种植香根草 (*Vetiveria zizanioides*) 条件下施加 2 和 5 mmol/kg EDTA 对土壤中 Pb 有效态浓度没有产生显著性影响, 而本研究中土壤 Pb 有效态浓度随 NTA、EDTA 和 EDDS 浓度增加而增加, 施加 6、12 mmol/kg EDTA 显著提高 Pb 有效态浓度, 这可能与土壤污染方式、污染时间和螯合剂施加浓度大小有关, 与外源添加重金属的土壤相比, 长期污染土壤中金属有效态较低^[20]。本研究中 6、12 mmol/kg EDTA 处理与对照相比极显著增加土壤中 Pb 有效态浓度, 进而提高了大叶井口边草对 Pb 的吸收 ($P < 0.01$), 与 Vaxevanidou 等^[21]和 Nascimento 等^[22]研究结果一致。6、12 mmol/kg EDTA 处理与对照相比极显著提高土壤中 Cd 有效态浓度 ($P < 0.01$), 但本研究中所有 EDTA 处理没有显著提高大叶井口边草地上部对 Cd 吸收 ($P > 0.05$), 与 Tandy 等^[23]发现在重金属复合污染土壤中 EDDS 不会促进向日葵 (*Helianthus annuus*) 地上部吸收 Cd 的结果相似。另 Evangelou 等^[5]施加 1.5 mmol/kg EDTA 和 EDDS 未显著提高烟草 (*Nicotiana tabacum*) 地上部 Cd 吸收, 与本研究中施加 1.5 mmol/kg EDTA 和 EDDS 处理没有显著提高大叶井口边草地上部吸收 Cd 相符。但 Luo 等^[24]研究却表明 EDTA 和 EDDS 均能显著提高地上部 Cd 浓度, 这可能与研究植物的种类有关, 大叶井口边草对 As 吸收具有专一性, 我们先前的研究表明, 土壤中 Cd 浓度为 2、5、10 mg/kg 时, 大叶井口边草地上部 Cd 浓度分别为 (0.86 ± 0.20)、(1.37 ± 0.33) 和 (2.18 ± 0.37) mg/kg。本研究中 EDTA、EDDS 和 NTA 处理对土壤有效态 As 没有显著影响, Chiu 等^[25]研究认为, 对于土壤中 As 的有效态而言, 施加 NTA 比 HEDTA (羟乙基替乙二胺三乙酸)、EDTA、EGTA (乙二醇双四乙酸)、CDTA (环己烷二胺四乙酸) 和 DTPA (二乙基三胺五乙酸) 效果较好。目前, 螯合剂诱导植物修复 As 污染土壤研究较少, 且是否与植物种类、种植方式有关, 还需进一步研究。且 Chiu 等^[25]研究表明低于 20 mmol/kg NTA 没有显著提高香根草地上部 As 浓度, 而本研究 3 mmol/kg NTA 处理与对照相比能极显著提高大叶井口边草对 As 的吸收, 这可能是因为本研究中 3 mmol/kg NTA 处理比对照显著提高土壤中 As 有效态含量 ($P < 0.05$), 大叶井口边草为 As 的超富集植物, 螯合剂增加了土壤中 As 有效态含量进而促进大

叶井口边草对 As 的吸收。

螯合剂在土壤环境中滞留可能会淋溶出土壤中重金属元素或 Fe、Ca、Mg 等营养元素, 增加土壤中重金属和其他阳离子可溶态, 在降雨等条件下, 可能会导致可溶态重金属在土壤环境中迁移, 污染地下水 and 地表水和营养元素流失。本研究中所用的 3 种螯合剂在环境中均能滞留一段时间, 其中, EDTA 被认为是一种对大多数重金属都有效的螯合剂, 能有效增加重金属的可溶态, 特别是对 Pb 元素, 但由于 EDTA 在环境中滞留时间较长^[26-28], 在施用后较长时间, 甚至是植物收获 1 年后, 对土壤环境中重金属仍在起作用^[29]。EDDS 是一种易被生物降解的螯合剂, 最初从放线菌 (*Amycolatopsis orientalis*) 的滤液中分离出来的^[12], EDDS 施加到土壤中 28 天后即可降解完全^[30], 其半衰期为 3.8~7.5 天^[31], 具体时间依赖于 EDDS 施加的量而定。NTA 在土壤中 21 天后可降解完全^[31]。尽管螯合剂增加土壤中重金属的生物有效态, 促进植物吸收, 但螯合剂施加不仅存在环境风险, 而且会破坏土壤肥力, 使用过程中必须合理考虑螯合剂使用量。

4 结论

大叶井口边草对 3 种螯合剂耐性较强。6、12 mmol/kg EDTA 处理能极显著提高土壤中 Pb 有效态浓度, 进而促进大叶井口边草对 Pb 的吸收。大叶井口边草地上部吸收 Pb 最高达 (47.4 ± 1.7) mg/kg, 是对照的 3.66 倍。6 mmol/kg EDDS 和 3 mmol/kg NTA 显著提高土壤中 As 有效性, 进而提高大叶井口边草地上部对 As 的吸收, 大叶井口边草地上部吸收 As 最高达 (276 ± 10) mg/kg。6 mmol/kg EDTA 和 6 mmol/kg EDDS 处理下, 一次大叶井口边草分别提取 Pb、As 最大, 分别为 (317 ± 53) $\mu\text{g}/\text{盆}$ 和 (873 ± 41) $\mu\text{g}/\text{盆}$, 每年大叶井口边草去除 As 量为 2 620 $\mu\text{g}/\text{盆}$, 说明 6 mmol/kg EDDS 处理下大叶井口边草对 As 污染土壤修复具有较好的潜力。

参考文献:

- [1] Chaney RL. Plant uptake of inorganic waste constituents // Parr JF, Marsh PB, Kla JM. Land Treatment of Hazardous Wastes. Parkridge, USA: Noyes Data Corporation, 1983: 50-76
- [2] Salt DE, Blaylock M, Kumar NPBA, Dushenkov V, Ensley BD, Chet I, Raskin I. Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. Biotechnology, 1995, 13: 468-474
- [3] Lasat MM. Phytoextraction of toxic metals: A review of

- biological mechanisms. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31: 109–120
- [4] Lombi E, Zhao FJ, Dunham SJ, McGrath SP. Phytoremediation of heavy metal contaminated soils: Natural hyperaccumulation versus chemically enhanced phytoextraction. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(6): 1919–1926
- [5] Evangelou MWH, Bauer U, Ebel M, Schaeffer A. The influence of EDDS and EDTA on the uptake of heavy metals of Cd and Cu from soil with tobacco *Nicotiana tabacum*. *Chemosphere*, 2007, 68(2): 345–353
- [6] Liu D, Ejazul I, Li TQ, Yang XE, Jin XF, Qaisar M. Comparison of synthetic chelators and low molecular weight organic acids in enhancing phytoextraction of heavy metals by two ecotypes of *Sedum alfredii* Hance. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 153(1/2): 114–122
- [7] McGrath SP, Lombi E, Gray CW, Caille N, Dunham SJ, Zhao FJ. Field evaluation of Cd and Zn phytoextraction potential by the hyperaccumulators *Thlaspi caerulescens* and *Arabidopsis halleri*. *Environmental Pollution*, 2006, 141(1): 115–125
- [8] 韦朝阳, 陈同斌, 黄泽春, 张学青. 大叶井口边草—一种新发现的富集砷的植物. *生态学报*, 2002, 22(5): 777–778
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析 (3 版). 北京: 中国农业出版社, 2000
- [10] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978
- [11] Huang RQ, Gao SF, Wang WL, Staunton S, Wang G. Soil arsenic availability and the transfer of soil arsenic to crops in suburban areas in Fujian Province, southeast China. *Science of the Total Environment*, 2006, 368(2/3): 531–541
- [12] Alkorta I, Hernandez-Allica J, Becerril JM, Amezcaga I, Albizu I, Oraindia M, Garbisu C. Chelate-enhanced phytoremediation of soils polluted with heavy metals. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 2004, 3(1): 55–70
- [13] Koopmans GF, Schenkeveld WDC, Song J, Luo YM, Japenga J, Temminghoff EFJ. Influence of EDDS on metal speciation in soil extracts: Measurement and mechanistic multicomponent modeling. *Environmental Science and Technology*, 2008, 42(4): 1123–1130
- [14] Evangelou MWH, Ebel M, Schaeffer A. Chelate assisted phytoextraction of heavy metals from soil: Effect, mechanism, toxicity and fate of chelating agents. *Chemosphere*, 2007, 68(6): 989–1003
- [15] Vassil AD, Kapulnik Y, Raskin I, Salt DE. The role of EDTA in lead transport and accumulation by Indian mustard. *Plant Physiology*, 1998, 117(2): 447–453
- [16] Tandy S, Bossart K, Mueller R, Ritschel J, Hauser L, Schlin R, Nowack B. Extraction of heavy metals from soils using biodegradable chelating agents. *Environmental Science and Technology*, 2004, 38(3): 937–944
- [17] Martell AE, Smith RM. *Critical Stability Constants*. Vol. 1: Amino Acids. New York, USA: Plenum Press, 1974
- [18] Whitburn JS, Wilkinson SD, Williams DR. Chemical speciation of ethylenediamine–N,N′-disuccinic acid (EDDS) and its metal complexes in solution. *Chemical Speciation and Bioavailability*, 1999, 11(3): 85–93
- [19] Lai HY, Chen ZS. Effects of EDTA on solubility of cadmium, zinc, and lead and their uptake by rainbow pink and vetiver grass. *Chemosphere*, 2004, 55(3): 421–430
- [20] Vig K, Megharaj M, Sethunathan N, Naidu R. Bioavailability and toxicity of cadmium to microorganisms and their activities in soil: A review. *Advances in Environmental Research*, 2003, 8(1): 121–135
- [21] Vaxevanidou K, Papassiopi N, Paspaliaris I. Removal of heavy metals and arsenic from contaminated soils using bioremediation and chelant extraction techniques. *Chemosphere*, 2008, 70(8): 1329–1337
- [22] Do Nascimento CWA, Amarasiwardena D, Xing B. Comparison of natural organic acids and synthetic chelates at enhancing phytoextraction of metals from a multi-metal contaminated soil. *Environmental Pollution*, 2006, 140(1): 114–123
- [23] Tandy S, Schulin R, Nowack B. Uptake of metals during chelant-assisted phytoextraction with EDDS related to the solubilized metal concentration. *Environmental Science and Technology*, 2006, 40(8): 2753–2758
- [24] Luo C, Shen Z, Lou LQ, Li X. EDDS and EDTA-enhanced phytoextraction of metals from artificially contaminated soil and residual effects of chelant compounds. *Environmental Pollution*, 2006, 144(3): 862–871
- [25] Chiu KK, Ye ZH, Wong MH. Enhanced uptake of As, Zn, and Cu by *Vetiveria zizanioides* and *Zea mays* using chelating agents. *Chemosphere*, 2005, 60(10): 1365–1375
- [26] Kos B, Lestan D. Chelator induced phytoextraction and in situ soil washing of Cu. *Environmental Pollution*, 2004, 132(2): 333–339
- [27] Luo CL, Shen ZG, Li XD. Enhanced phytoextraction of Cu, Pb, Zn and Cd with EDTA and EDDS. *Chemosphere*, 2005, 59(1): 1–11
- [28] Tandy S, Bossart K, Mueller R, Ritschel J, Hauser L, Schulin R, Nowack B. Extraction of heavy metals from soils using

- biodegradable chelating agents. Environmental Science and Technology, 2004, 38(3): 937–944
- [29] Vandevivere PC, Saveyn H, Vcratmete W, Feijtel TCJ, Schowanek DR. Biodegradation of metal-[S,S]-EDDS complexes. Environmental Science and Technology, 2001, 35(9): 1765–1770
- [30] Jaworska JS, Schowanek DR, Feijtel TC. Environmental risk assessment for trisodium [s, s]-ethylene diamine disuccinate, a biodegradable chelator used in detergent applications. Chemosphere, 1999, 38(15): 3597–3625
- [31] Meers E, Ruttens A, Hopgood MJ, Samson D, Tack FMG. Comparison of EDTA and EDDS as potential soil amendments for enhanced phytoextraction of heavy metals. Chemosphere, 2005, 58(8): 1011–1022

Chelate Assisted Uptake of Heavy Metal of Lead, Cadmium and Arsenic from Soil with *Pteris cretica* var. *nervosa*

XIONG Guo-huan¹, PAN Yi-hong², HE Yan-ming¹, LUAN Jing-li¹, WANG Hong-bin³, GAO Jian-pei³

(1 Kunming Metallurgical Research Institute, Kunming 650031, China; 2 Yunnan Reascend Tobacco Technology (Group) CO., LTD, Kunming 605106, China; 3 Faculty of Environmental Sciences and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: Chemically enhanced phytoextraction has been proposed as an effective approach to remove heavy metals from contaminated soil. Pot experiments was conducted to evaluate the effects of ethylene diamine disuccinate (EDDS), ethylene diamine tetraacetate (EDTA) and nitrilotriacetic acid (NTA) on the uptake of heavy metals (Pb, Cd and As) from multiple metal-contaminated field soils with *Pteris cretica* var. *nervosa*. Each chelant was applied to soil pots cultivated with *P. cretica* var. *nervosa* at the rates of 0, 1.5, 3, 6, 12 mmol/kg. The results showed that all tested Chelators induced no significant effects on biomass, which indicated that *P. cretica* var. *nervosa* was high tolerant to tested Chelators. The application of 6, 12 mmol/kg EDTA significantly increased soil Pb bioavailability and the concentrations of Pb of *P. cretica* var. *nervosa*. The maximum Pb concentrations reached (47.4 ± 1.7) mg/kg in shoot of *P. cretica* var. *nervosa* which was 3.66 times higher than that in CK with no chelators were applied. Additionally, the application of 6, 12 mmol/kg EDTA also significantly increased soil Cd bioavailability but did not significantly affect Cd concentrations in shoots of tested plant. The application of 6 mmol/kg EDDS and 3 mmol/kg NTA significantly increased soil As bioavailability as well as the concentrations of As in shoots of tested plant. The maximum As concentrations reached (276 ± 10) mg/kg in shoot of *P. cretica* var. *nervosa*. The uptakes of Pb and As in *P. cretica* var. *nervosa* respectively exposed to 6 mmol/kg EDTA and 6 mmol/kg EDDS reached (317 ± 53) µg/pot and (873 ± 41) µg/pot.

Key words: Phytoextraction, *Pteris cretica* var. *nervosa*, Heavy metal, Chelators