

EGTA 对 Cd 胁迫下蓖麻 Cd 积累和营养元素吸收的影响

李 君, 葛 跃, 王明新*, 孙向武, 刘建国

(常州大学 环境与安全工程学院, 江苏常州 213164)

摘 要:以‘溜蓖麻 5 号’蓖麻品种为材料,通过盆栽试验研究了重度 Cd 土壤污染($100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)条件下,不同浓度(0、0.5、1.0、2.0 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)外源螯合剂——乙二醇双(2-氨基乙基醚)四乙酸(EGTA)对蓖麻植株生长、Cd 积累和营养元素吸收的影响,探讨外源螯合剂调控 Cd 污染土壤上植物生长和修复效应。结果显示:(1)在 Cd 胁迫下,土壤中外源添加 0.5~2.0 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ EGTA 使蓖麻根系鲜、干重比不添加 EGTA 对照不同程度降低,但植株总干重没有受到显著影响。(2)外源 EGTA 能有效促进 Cd 从蓖麻根部向地上部的转移,2.0 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 EGTA 处理使蓖麻叶片 Cd 含量显著增加了 41.34 倍;与不添加 EGTA 对照相比,外源 EGTA 处理蓖麻叶片中 Cd 积累量随添加 EGTA 的浓度增加而显著大幅度增加 14.0~45.6 倍,占相应植株总积累量的 36.89%~58.63%,而茎中 Cd 积累量增加幅度较小,根中 Cd 积累量则显著降低。(3)Cd 胁迫条件下,外源 EGTA 对蓖麻各器官矿质元素含量的影响不一,EGTA 促进 K 向蓖麻地上部的转运,同时抑制 Mg 向植株地上部转运;随土壤添加的 EGTA 浓度提高,蓖麻植株对 Ca 吸收表现为低促高抑,叶片 Zn 含量和植株 Cu 含量逐渐增加,叶片和根系 Fe 含量及植株各器官 Mn 含量显著增加。与无 Cd 胁迫对照相比,EGTA 在提高植株 Cd 积累的同时,降低了根系对 K 的吸收。研究表明,Cd 胁迫显著抑制了蓖麻植株的生长,适宜浓度的外源 EGTA 对 Cd 的这种抑制有显著的缓解作用;外源 EGTA 改变了 Cd 在蓖麻根、茎、叶中的积累分布情况,提高了 Cd 从根系向地上部,尤其是向叶片的转移能力,从而强化了蓖麻对 Cd 污染土壤的修复效率;在采用 EGTA 强化植物修复 Cd 污染土壤时,应适量增施 K 肥以保证植株的正常生理代谢。

关键词:蓖麻;Cd 胁迫;乙二醇双(2-氨基乙基醚)四乙酸(EGTA);营养元素

中图分类号:Q945.79

文献标志码:A

Regulation of EGTA on Cd and Nutrient Elements Accumulation in *Ricinus communis* under Cd Stress

LI Jun, GE Yue, WANG Mingxin*, SUN Xiangwu, LIU Jianguo

(School of Environmental & Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou, Jiangsu 213164, China)

Abstract: A pot experiment was conducted to investigate the plant growth, Cd content, Cd accumulation and nutrient uptake and transport in *Ricinus communis* (Zibima 5) when exposed to heavy metal polluted soil ($100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) and different EGTA treatments (0, 0.5, 1, and 2 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$). The results showed that: (1) compared with no EGTA treatment (E0), 0.5–2 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ EGTA inhibited the growth of castor roots, decreased the fresh and dry weight of roots by different degrees, but had no significant effect on plant total dry weight. (2) EGTA can effectively promote the translocation of Cd from roots to shoots, 2 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ of EGTA treatment increased Cd contents in leaves by 41.34 times. The accumulation of Cd in the leaves increased significantly with elevation of EGTA doses. Compared with E0, the Cd accumulation in the leaves of EGTA treatments increased 14.0–45.6 times, and accounted for 36.89%~58.63% of the total

收稿日期: 2015-03-31; 修改稿收到日期: 2015-07-19

基金项目: 江苏省高校自然科学研究项目(14KJB610001); 国家自然科学基金(41302025)。

作者简介: 李 君(1990—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事污染土壤修复研究。E-mail: 972334215@qq.com

* 通信作者: 王明新, 教授, 主要从事土壤污染与修复研究。E-mail: wmxau@163.com

plant amount, respectively. (3) EGTA had different effects on the mineral nutrient concentration in *R. communis* under Cd stress. EGTA promoted translocation of K to the shoots, while inhibited translocation of Mg to the shoots; Moreover, Ca contents in the roots, stems and leaves were increased under low dose of EGTA treatment, while high dose of EGTA decreased them. Zn contents in the leaves and Cu contents in roots and shoots were increased as EGTA concentration increased. Fe contents in leaves and roots, Mn contents in roots and shoots were significantly increased with increasing dose of EGTA treatments. Compared with no Cd control, EGTA can increase the available cadmium in soil, but reduce the absorption of K in roots. Therefore, Cd stress inhibits the growth of the plant, appropriate concentration of exogenous EGTA can significantly alleviate Cd stress in *R. communis*. EGTA changed the distribution of the accumulation of Cd in roots, stems and leaves of *R. communis* and improved the translocation of Cd from roots to shoots, especially to the leaves. It can strengthen the remediation efficiency of castor on Cd contaminated soil. K fertilizer should be applied to ensure the normal physiological metabolism of the plant.

Key words: *Ricinus communis* L.; cadmium stress; EGTA; nutrient elements

随着工业化、城市化和经济的快速增长,中国土壤 Cd 等重金属污染也日趋严重^[1-2]。据环保部调查,目前受污染的耕地约有 0.1 亿 hm^2 ,耕地质量堪忧,主要是重金属和有机物污染。Cd 是生物毒性极强的一种重金属,土壤中过量的 Cd 被植物吸收后积累在体内,会对植物产生一系列毒害作用,还会通过食物链传递进入人体,直接威胁人类健康。因此,在减少或禁止污染排放的同时,Cd 污染土壤的生物、非生物修复已经成为生态学研究热点问题。

蓖麻作为世界十大油料作物之一,其生物量大,适应性广,是理想的油料作物和环保植物。蓖麻虽然生物量大,但也存在地上部重金属积累量较低的问题,这限制了其对土壤重金属的修复能力。因此,提高地上部重金属含量是提高蓖麻对重金属积累量的关键问题。有研究表明,向土壤中施加螯合剂(如 EDTA、EGTA、DTPA、柠檬酸等)能够活化土壤中的重金属,提高重金属的生物有效性,促进植物吸收^[3]。其中,螯合剂 EGTA 对 Cd 选择性高、Cd-EGTA 络合物稳定,可优先用于活化土壤中的 Cd^[4]。但过量施用往往对植物生长造成严重的负面作用,从而会影响修复植物的经济价值^[5]。Cd 能损伤植物细胞质膜的透性,影响营养元素的吸收和转运,导致植株中元素含量的改变。有研究表明,随着 Cd 浓度的增加,花生籽粒中 P 元素不断下降,而 K、Mg、Ca、Fe、Zn 元素呈现先升后降的趋势^[6]。Cd 促进龙葵叶片吸收 Ca、叶片和根系吸收 K,也促进根系吸收 Mg,但抑制其向地上部转运;龙葵根、茎、叶 Zn 含量随 Cd 处理浓度的提高均表现为低促高抑;随 Cd 浓度提高,其根系 Cu 吸收增加,叶片 Cu 吸收先增后降;各器官 Fe 含量随 Cd 浓度提高逐渐降低,而根系 Mn 含量受 Cd 抑制^[7]。可见,Cd 胁迫对植株吸收和转运不同营养元素有着不同的影响,

但外源 EGTA 强化 Cd 萃取修复条件下植株对矿质元素的吸收还鲜有报道。

因此,本研究选择‘淄蓖麻 5 号’品种为供试材料,通过盆栽实验分析了 Cd 胁迫下 EGTA 对蓖麻生长情况、Cd 吸收积累以及植株各部分器官中 K、Ca、Mg、Fe、Mn、Cu、Zn 等营养元素含量的影响,旨在揭示外源 EGTA 对 Cd 胁迫条件下蓖麻生长、Cd 积累与转运以及矿质营养元素吸收的效应,为通过外源螯合剂调控 Cd 污染土壤上植物修复效应提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 实验材料

供试土壤采自江苏省常州科教城周边菜地,将采集的表层 0~20 cm 土壤样品经风干后过 2 mm 筛,混匀后备用。土样速效氮、速效磷和速效钾含量分别为 35.51、54.73 和 121.32 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤有机质含量为 26.37 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 为 6.8,土壤全 Cd 含量为 0.37 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。重金属 Cd 以分析纯 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 溶液形式喷施入土壤,充分混匀,将经过 Cd 处理的过筛风干土装入塑料盆内(直径 20 cm,高 15 cm),每盆装人工污染土 2.5 kg,静置平衡 4 个月,模拟 Cd 重度污染土壤(Cd 含量为 100 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

供试蓖麻品种为“淄蓖麻 5 号”,种子由山东淄博农业科学研究院提供。选择饱满种子经日晒后直接播种于潮湿的石英砂中,置于全封闭光照培养箱中进行育苗,光周期为 12 h : 12 h(光 : 暗),昼/夜温度为 25 $^{\circ}\text{C}$ / 18 $^{\circ}\text{C}$,培养 1 周后挑选大小一致、长势良好的蓖麻幼苗移栽入盆,每盆“品”字型栽植 3 株,10 d 后进行间苗,每盆留下 1 株长势最好的蓖麻定株。培养期间土壤湿度保持在 60%田间持水量。

1.2 实验设计

盆栽试验在常州大学温室大棚内进行。移栽前 1 d 每盆施入氮素(尿素)200 mg·kg⁻¹、磷素(磷酸二氢钙)40 mg·kg⁻¹、钾素(氯化钾)160 mg·kg⁻¹作为基肥,充分混匀。根据天气情况和土壤持水量情况,移栽后浇适量去离子水,每 2 d 浇 1 次水,使土壤湿度保持在 60%田间持水量左右;塑料花盆编号并随机排列,置于温室大棚内(上覆阳光板)。试验土壤 Cd 含量为 100 mg·kg⁻¹,试验共设对照(CK)、E₀、E₁、E₂、E₃ 5 个处理,每个处理 6 次重复。其中,CK 为不施入任何外源添加剂,土壤 Cd 含量为 0.37 mg·kg⁻¹;E₀~E₃ 的土壤 Cd 含量为 100 mg·kg⁻¹,再分别加入 0、0.5、1.0 和 2 mmol·kg⁻¹外源 EGTA。以移栽日为盆栽第 0 天开始计时,盆栽第 30 天时以溶液滴灌形式加入不同浓度的 EGTA 处理试剂,处理 20 d 后即盆栽第 50 天时收获植株。

1.3 样品处理与分析

用自来水将植株冲洗干净后用 20 mmol·L⁻¹ Na₂-EDTA 浸泡 20 min,去除根系表面吸附的 Cd^[8],再用自来水冲洗 3~4 次,最后用去离子水润洗,吸干表面水分,分成根、茎、叶 3 部分,用电子天平称取植株各部分鲜重后,于 105 ℃下杀青 0.5 h,75 ℃烘干至恒重,用电子天平称取各部分干质量。测定 Cd 含量时,取 450 mg 植株叶片的粉碎烘干样品(植株茎部和根系各取 150 mg 和 100 mg 粉碎烘干样品,其余同叶片操作)加入 65% HNO₃ 8 mL 和 30% H₂O₂ 1 mL,采用微波消解仪(上海新仪 MDS-8G)进行消解,消解液中的 Fe、Mn、Cu、Zn、K、Ca、Mg 及 Cd 含量采用火焰原子吸收分光光度计(德国耶拿 novAA300)测定并换算成植物各组织干重单位重量的 Cd 含量。进而计算出植株 Cd 积累量。

1.4 数据分析

实验数据采用 SPSS19 统计软件进行方差分析和 LSD 差异显著性检验,采用 Microsoft Excel 2010 制表。

2 结果与分析

2.1 外源 EGTA 对镉胁迫条件下蓖麻生长的影响

由表 1 可以看出,Cd 胁迫条件下蓖麻根、茎、叶生物量(干重和鲜重)与 CK 相比均显著降低。与 E₀ 相比,加入不同浓度的 EGTA 后,蓖麻植株叶片和茎部鲜重及叶片和单株干重没有显著变化;根系鲜重和茎干重仅在 EGTA 投加量达到 2 mmol·kg⁻¹时比 E₀ 处理分别显著降低 37.75%和 31.82%(*P*<0.05),其余添加量处理也无显著变化;单株鲜重和根系干重在加入不同量 EGTA 后均较 E₀ 处理显著下降(*P*<0.05),但不同浓度 EGTA 处理间差异不显著。以上结果说明 Cd 胁迫抑制了蓖麻植株的生长,外源添加适宜浓度的 EGTA 对 Cd 胁迫下蓖麻植株生长受到的抑制有显著的缓解作用。

2.2 外源 EGTA 对 Cd 胁迫条件下蓖麻植株 Cd 含量及积累量的影响

由表 2 可见,在 E₀ 处理中,蓖麻根系和茎部 Cd 含量、Cd 积累量及植株总 Cd 积累量均比 CK 显著上升,而叶片 Cd 含量及 Cd 积累量虽呈上升趋势,但与 CK 的差异未达到显著水平,表明蓖麻对 Cd 的积累主要集中在根系,地上部对 Cd 的富集能力较弱。在 Cd 胁迫条件下,EGTA 的加入明显增加了植株各器官对 Cd 的富集,并有随 EGTA 添加量增加而上升的趋势(表 2)。其中,蓖麻茎部 Cd 含量在 E₁、E₂、E₃ 处理下分别是 E₀ 的 1.51、2.16 和 2.62 倍,叶片 Cd 含量分别是 E₀ 的 20.26、33.22 和 41.34 倍;根系 Cd 含量在 E₃ 处理条件下达到最大

表 1 不同处理下蓖麻各组织生物量的变化

Table 1 The organ biomass of *R. communis* under different treatments

处理 Treatment	鲜重 Fresh weight/g				干重 Dry weight/g			
	叶 Leaf	茎 Stem	根 Root	合计 Total	叶 Leaf	茎 Stem	根 Root	合计 Total
CK	11.82±1.20a	7.69±1.21a	9.35±0.49a	28.86±0.02a	2.14±0.33a	0.77±0.04a	0.81±0.06a	3.72±0.23a
E ₀	2.85±0.01b	1.90±0.03b	2.04±0.25b	6.79±0.29b	0.53±0.08b	0.22±0.02b	0.22±0.008b	0.97±0.05b
E ₁	2.27±0.21b	1.78±0.09b	1.44±0.27bc	5.49±0.05c	0.37±0.04b	0.17±0.02bc	0.14±0.01c	0.68±0.05b
E ₂	2.86±0.07b	1.78±0.12b	1.37±0.14bc	6.01±0.19c	0.64±0.14b	0.17±0.02bc	0.11±0.008c	0.92±0.19b
E ₃	2.86±0.05b	1.53±0.09b	1.27±0.03c	5.66±0.07c	0.54±0.05b	0.15±0.005c	0.12±0.006c	0.81±0.08b

注:CK 为不施入任何外源添加剂,土壤 Cd 含量为 0.37 mg·kg⁻¹;E₀~E₃ 的土壤 Cd 含量为 100 mg·kg⁻¹,再分别加入 0、0.5、1.0 和 2 mmol·kg⁻¹外源 EGTA。同列不同字母表示各处理间在 5%水平上存在显著性差异;下同。

Note:CK, no exogenous additives, and the Cd concentration in soil was 0.37 mg·kg⁻¹. E₀—E₃: The content of Cd in soil is 100 mg·kg⁻¹, with dose of exogenous EGTA at 0, 0.5, 1.0 and 2 mmol·kg⁻¹, respectively. Different letters in the same column indicate significant difference among the treatments at 0.05 level; The same as below.

值(463.88 mg · kg⁻¹), 分别是 E₀、E₁ 和 E₂ 的 1.57、1.69 和 1.33 倍; 在 Cd 胁迫条件下, 蓖麻各组织中 Cd 含量分布特征表现为根>茎>叶。同时, 随着投加 EGTA 浓度的增加, E₁、E₂ 和 E₃ 处理蓖麻叶片中 Cd 积累量也逐渐显著大幅度增加($P<0.05$), 分别是 E₀ 处理的 15.0、25.3 和 46.6 倍, 分别占相应植株总积累量的 36.89%、48.25% 和 58.63%; 茎中 Cd 积累量在 E₁ 处理下比 E₀ 处理稍低, 其在 E₂ 和 E₃ 处理下虽比 E₀ 处理显著提高, 但其增幅远低于叶片; 而根系 Cd 积累量在加入 EGTA 后与 E₀ 相比则显著降低($P<0.05$), 但其占植株总积累量比例仍明显高于茎部。可见, 外源 EGTA 处理改变了 Cd 在蓖麻根、茎、叶中的积累分布情况, 提高了 Cd 从根系向地上部, 尤其是向叶片的转移能力, 从而强化了蓖麻对 Cd 污染土壤的修复效率。

2.3 外源 EGTA 对 Cd 胁迫条件下蓖麻各器官营养元素含量的影响

Cd 胁迫下, 外源 EGTA 对蓖麻植株营养元素的吸收有着显著影响(表 3)。与 CK 相比, Cd 胁迫

显著降低了根系 Fe、Mn、Cu、Zn、Mg 含量($P<0.05$), 同时也明显抑制了植株对 K 的吸收, 但促进了蓖麻根系对 Ca 的吸收。E₃ 处理下, 根系 Fe、Mn、Cu 含量分别是 E₀ 的 1.33、4.23 和 6.86 倍($P<0.05$); EGTA 处理使根系 Zn 含量呈先升后降的趋势, 根系 K 吸收无明显变化, 植株 Ca 吸收表现为低促高抑; 根系 Mg 含量在 E₃ 处显著增加, 较 E₀、E₁ 和 E₂ 分别增加了 28.66%、62.50% 和 36.37%($P<0.05$)。

同时, 与 CK 相比, Cd 胁迫对蓖麻茎部 Fe、Mn 含量无显著影响, 而使茎部 Cu、Zn 含量均显著降低($P<0.05$); Cd 胁迫抑制茎部对 Ca 的吸收, 茎部 Mg 含量显著增加($P<0.05$)。添加 EGTA 对蓖麻茎部 Fe 吸收无显著影响; 而茎部 Mn 和 Cu 含量均在 E₃ 处理下达到最大, E₃ 处理茎部 Mn 含量是 E₀ 的 4.22 倍, 而 E₀ 和 E₁ 处理茎部 Cu 含量未检测出; 茎部 Zn 含量呈先升后降的趋势; EGTA 使蓖麻地上部 K 含量呈上升趋势, E₃ 处理茎部 K 含量较 E₀ 增加了 38%; 茎部 Mg 含量在 E₂ 处达到峰值, 之后又下降, E₃ 茎部 Mg 吸收已经下降到与 E₀ 相近水平。

表 2 不同处理下蓖麻各组织 Cd 含量及 Cd 积累量的变化

Table 2 The cadmium content and cadmium accumulation in the tissues of *R. communis* under different treatments

处理 Treatment	Cd 含量 Cd content/(mg · kg ⁻¹)			Cd 积累量 Cd accumulation/μg			
	叶 Leaf	茎 Stem	根 Root	叶 Leaf	茎 Stem	根 Root	合计 Total
CK	0.69±0.22d	3.75±0.33d	8.02±0.09c	1.33±0.21d	3.15±0.23c	5.79±0.42d	10.27±0.46d
E ₀	3.94±0.67d	33.64±7.83c	295.00±78.48b	2.06±0.21d	8.93±0.11b	76.69±1.29a	87.68±0.98c
E ₁	79.84±1.25c	50.74±7.32b	274.88±45.78b	30.87±2.88c	8.50±0.25b	44.30±0.71c	83.67±2.62c
E ₂	130.89±28.68b	72.53±3.76a	347.76±14.48b	52.18±4.62b	12.32±2.30a	43.64±5.25c	108.14±2.94b
E ₃	162.86±6.56a	88.28±8.38a	463.88±39.42a	96.03±5.78a	13.59±0.83a	54.17±1.99b	163.79±5.13a

表 3 不同处理下蓖麻各组织营养元素含量的变化

Table 3 The concentrations of nutrient elements in the tissues of *R. communis* under different treatments

器官 Organ	处理 Treatment	Fe /(mg · kg ⁻¹)	Mn /(mg · kg ⁻¹)	Cu /(mg · kg ⁻¹)	Zn /(mg · kg ⁻¹)	K /(mg · kg ⁻¹)	Ca /(mg · kg ⁻¹)	Mg /(mg · kg ⁻¹)
根系 Root	CK	1 842.19±163.34a	128.92±10.24a	13.60±3.82b	54.25±3.20a	7 951.46±609.88a	7 761.68±897.14c	17 353.75±731.42a
	E ₀	1 044.07±100.23c	20.05±2.66d	3.99±0.48c	16.54±0.60d	3 666.77±166.61b	12 692.93±1321.41b	6 016.56±203.73c
	E ₁	1 041.32±46.85c	20.52±0.11d	6.04±0.08c	26.97±0.27b	3 398.65±85.29b	15 292.93±428.68a	4 763.44±247.92d
	E ₂	1 074.19±14.49c	60.79±8.26c	14.47±0.63b	24.26±1.38bc	3 331.68±47.42b	15 126.40±116.19a	5 676.11±244.14cd
	E ₃	1 389.94±138.24b	84.86±13.29b	27.37±2.84a	22.66±0.32c	4 088.33±570.98b	12 111.68±57.45b	7 740.63±658.49b
茎部 Stem	CK	47.85±1.52b	29.91±2.40c	3.66±0.007a	30.97±0.81a	23 077.85±29.47a	36 223.54±1443.67a	6 221.25±953.12d
	E ₀	57.58±9.14ab	24.94±0.96c	—	6.45±0.57c	3 623.89±403.64c	26 858.96±2194.97b	11 265.00±767.50c
	E ₁	74.62±18.02a	27.29±6.83c	—	9.27±0.89b	3 863.47±123.74c	28 442.30±1 782.50b	12 733.30±80.38b
	E ₂	80.38±6.66a	50.79±2.05b	0.44±1.40b	7.80±0.81bc	4 700.97±241.59b	33 661.04±383.02a	14 833.75±137.00a
	E ₃	75.38±2.96a	105.27±2.41a	2.36±0.48a	4.37±0.42d	5 000.97±106.07b	26 994.38±1 384.75b	10 154.59±310.83c
叶片 Leaf	CK	63.49±4.95c	174.48±0.16c	10.66±0.25a	50.36±0.88a	21 338.57±0.00a	30 148.15±795.49c	5 425.84±299.53c
	E ₀	83.35±7.66bc	182.62±6.41c	2.85±0.12d	13.79±0.06d	4 631.39±269.09d37	405.09 ±2 199.88ab	10 425.14±64.81a
	E ₁	134.13±59.12abc	201.70±8.88bc	3.62±0.10cd	14.92±0.10d	5 039.72±151.24d	37 550.93±1 384.75ab	10 409.86±306.42a
	E ₂	152.17±44.32ab	213.60±17.76b	5.00±0.41c	18.75±1.54c	7 606.39±622.65c	39 939.82±147.32a	8 774.44±405.60b
	E ₃	170.32±15.95a	349.40±15.83a	7.36±1.63b	31.01±1.32b	8 780.00±526.39b	34 905.09±785.67b	8 559.17±454.71b

另外,与 CK 相比,Cd 胁迫增加了蓖麻叶片 Fe、Mn 吸收量,但均未达到显著差异水平;但使叶片 Cu、Zn 含量均显著降低($P<0.05$);Cd 胁迫增加了蓖麻叶片 Ca 和 Mg 含量。 E_3 处理蓖麻叶片 Fe、Mn、Cu、Zn 含量分别是 E_0 的 2.04、1.91、2.58 和 2.25 倍,其 K 含量较 E_0 显著增加了 89.58%,但叶片 Mg 含量较 E_0 显著下降了 17.90%($P<0.05$)。

总之,Cd 胁迫明显抑制了蓖麻植株对 Cu 和 Zn 的吸收,使根系 Fe、Mn 含量显著降低,而其地上部 Fe、Mn 含量无显著变化,说明 Cd 胁迫不影响 Fe 和 Mn 向地上部的转移;同时,Cd 胁迫明显抑制了植株对 K 的吸收,也抑制了根系对 Mg 的吸收,促进其向地上部转运,增加了蓖麻根系和叶片 Ca 含量。Cd 胁迫条件下,EGTA 使根系 Fe、Mn、Cu、Mg 含量均在 E_3 处理下达到最大,同时使根系 Zn 含量先升后降,而根系 K 吸收无明显变化;植株 Ca 吸收表现为低促高抑;叶片 Fe、Mn、Cu、Zn、K 含量均在 E_3 处达到最大,其 Mg 含量在 E_3 处明显下降。由此可见,在 Cd 污染的土壤介质中添加 EGTA 对蓖麻矿质元素含量的影响随着不同元素、不同植株部位及 EGTA 在介质中的浓度不同而有所差异。

3 讨 论

螯合剂通常会显著增加植株对重金属的吸收,因此广泛用于重金属污染土壤植物修复的外源调控^[9]。本研究表明,投加不同浓度的 EGTA 均提高了蓖麻植株的 Cd 积累总量,且对于不同浓度的 EGTA 处理,蓖麻叶片 Cd 积累量显著高于不添加处理(E_0),其中的高 EGTA 处理(E_3)使蓖麻叶片 Cd 积累量比 E_0 增加了 41.34 倍,这与雒焕章等^[5]对 EGTA 强化杨树富集土壤 Cd 的研究结果一致。这可能是由于 EGTA 对于 Cd 的高活化能力增大了蓖麻根部 EGTA-Cd 络合物的浓度,致使 Cd 通过植物蒸腾作用向地上部的迁移量也随之增多。

Cd 影响植物对矿质元素的吸收和运输,导致营养元素不足或营养元素间失去平衡,扰乱了植物正常的生理代谢,从而影响植物生长^[7]。首先,Fe 是一种需求量较多的植物必需微量营养元素,在植物的许多生理生化过程中都起作用。本研究中,蓖麻叶片和根系 Fe 含量在高 EGTA(E_3)条件下显著增加,茎部 Fe 含量基本不受影响。刘建国等的研究结果也表明,水稻根系和叶片 Fe 含量在 Cd 胁迫下均与 Cd 含量存在正相关关系^[10]。根系 Fe 含量的增加很可能是因为根表面有铁氧化物胶膜的形成,

铁胶膜可以作为 Fe 的储存库,增加细胞对 Fe 的吸收,从而增强了植物对重金属的耐性,进而促进 Fe 以及其它化学结构类似的重金属吸收的增加,这也是其它微量营养元素根系含量增加的原因之一^[11]。

其次,随着 EGTA 浓度的提高,本研究中蓖麻植株 Mn 吸收量显著增加,同时 Mg 含量则表现为根系中先降后升,叶片中先升后降,这可能是由于 EGTA 处理同时提高了土壤中有效态 Cd 和 Mg 的含量,有助于促进植株根系对它们的吸收,但也可能是植株根系对两者的吸收存在竞争关系,使得 EGTA 低浓度时以抑制为主,高浓度时又逐渐恢复了对 Mg 的吸收。有研究表明,Mg 含量增加能够防止 Cd 阻碍叶绿体合成叶绿素,并且能够减缓 Cd 毒害作用^[12]。因此,Mg 吸收量的增加可能是蓖麻防御 Cd 毒害的重要生理机制之一。

再次,本实验中 EGTA 也促进了蓖麻地上部对 K 的吸收,对根部 K 的吸收无显著影响,表明 EGTA 处理显著提高了土壤中 Cd 的有效性,显著提高蓖麻对 Cd 的吸收,进而产生逆境胁迫。蓖麻遇到逆境胁迫后,通过增加体内的 K 含量来抵御逆境^[13]。Ca 是植物细胞壁胶层的组成成分,主要以果胶酸钙形式存在,可增强细胞壁的强度,并能调节细胞的充水度、粘性、弹性及渗透性等使其维持在正常的生理状态。此外,Ca 也参与植物蛋白质的合成、酶的代谢等过程,对植物生长发育具有重要的意义。蓖麻植株 Ca 含量在高 EGTA 处理条件下显著降低,这可能是因为高浓度 EGTA 处理使 Cd 胁迫程度加剧,引起蓖麻植株的膜脂过氧化,从而导致细胞质膜的透性增加,导致小分子物质外流^[14]。

另外,微量元素 Cu 和 Zn 营养与植物蒸腾作用有关,同时 Cu、Zn 浓度也会影响植物的枯萎过程。Zn 还参与植物生长素的形成,促进光合作用和蛋白质合成,因此它是植物生长发育过程中必需的微量元素之一^[15]。Cu 是植物所必须的微量元素,是多种酶的组成成分,参与碳素同化、氮素代谢以及多条生理代谢途径,对植物的生长发育具有重要影响^[16]。本研究中,蓖麻叶片 Zn 含量随 EGTA 浓度的增加呈现上升趋势,而茎部和根系 Zn 含量随 EGTA 浓度的提高呈现先升后降的趋势。说明 EGTA 处理有助于提高植株根系对 Zn 的吸收,但高浓度处理可能由于伤害了植株的正常生长而又降低了根系对 Zn 的吸收能力;EGTA 处理也显著提高了 Zn 从根系到叶片的迁移能力,因而提高了地上部对 Zn 的积累量。同时,随着 EGTA 浓度的提

高,也促进了蓖麻植株对 Cu 的吸收。

综上所述,EGTA 可以提高蓖麻植株体内重金属的含量,对植株不同营养元素的吸收则有着不同的影响。外源 EGTA 能促进蓖麻地上部对 K 的吸收,对根部 K 的吸收无显著影响($P>0.05$),同时抑制 Mg 向植株地上部转运。随外源 EGTA 浓度的提高,蓖麻植株对 Ca 吸收表现为低促高抑,其叶片 Zn 含量和植株 Cu 含量增加,其叶片和根系 Fe 含

量及植株各器官 Mn 含量也显著增加($P<0.05$)。这可为外源 EGTA 强化蓖麻修复 Cd 污染土壤的营养调控提供参考。EGTA 对 Cd 胁迫下植物营养元素吸收呈抑制或促进作用可能受植物的种类、品种、EGTA 投加浓度及元素种类有关^[17],也可能与非必需重金属离子与不同微量营养元素之间的相互作用关系有关,这些都有待于进一步的深入研究。

参考文献:

- [1] YU L L(于玲玲), ZHU J Y(朱俊艳), HUANG Q Q(黄青青), *et al.* Bioavailability of cadmium in the rotation system of oilseed rape and rice grown in Cd-contaminated soil[J]. *Environmental Science and Technology*(环境科学与技术), 2014, **37**(1): 1—6(in Chinese).
- [2] QIU Q, WANG Y T, YANG Z Y, *et al.* Responses of different chinese flowering cabbage(*Brassica parachinensis* L.) cultivars to cadmium and lead exposure; screening for Cd+Pb pollution-safe cultivars[J]. *CLEAN-Soil Air Water*, 2011, **39**(11): 925—932.
- [3] CHEN Y H(陈亚慧), LI J(李君), WANG M X(王明新), *et al.* Regulation of EGTA and tartaric acid on Cd stress and accumulation in *Ricinus communis* L. [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*(西北植物学报), 2014, **34**(5): 1025—1031(in Chinese).
- [4] HU Y H(胡亚虎), WEI SH H(魏树和), ZHOU Q X(周启星), *et al.* Application of chelator in phytoremediation of heavy metals contaminated soils: A review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*(农业环境科学学报), 2010, **29**(11): 2055—2063(in Chinese).
- [5] LUO H ZH(雒焕章), NAN ZH R(南忠仁), HU Y H(胡亚虎), *et al.* Chelate-induced uptake and accumulation of Cd in soil by poplar (*Populus bolleana* Lauche)[J]. *China Environmental Science*(中国环境科学), 2013, **33**(3): 461—465(in Chinese).
- [6] WANG L X(王丽香), CHEN H(陈虎), GUO F(郭峰), *et al.* Effects of cadmium on peanut growth and mineral nutrient uptake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*(农业环境科学学报), 2013, **32**(6): 1106—1110(in Chinese).
- [7] GUO ZH(郭智), YUAN H Y(原海燕), AO Y S(奥岩松). Effect of cadmium on photosynthesis and nutrient elements uptake of *Solanum nigrum* L. seedlings[J]. *Ecology and Environmental Sciences*(生态环境学报), 2009, **18**(3): 824—829(in Chinese).
- [8] DU R J, HE E K, TANG Y T, *et al.* How phytohormone IAA and chelator EDTA affect lead uptake by Zn/Cd hyperaccumulator *Picris divaricata* [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2011, **13**(10): 1024—1036.
- [9] ZHENG M X(郑明霞), FENG L(冯流), LIU J(刘洁), *et al.* Effects of chelators on species and bioavailability of cadmium in soil[J]. *Environmental Chemistry*(环境化学), 2007, **26**(5): 606—609(in Chinese).
- [10] LIU J G, LI K Q, XU J K, *et al.* Interaction of Cd and five mineral nutrients for uptake and accumulation in different rice cultivars and genotypes[J]. *Field Crops Research*, 2003, **83**(3): 271—281.
- [11] ALI N A, BERNAL M P, ATER M. Tolerance and bioaccumulation by *Phragmites australis* grown in the presence of elevated concentrations of cadmium, copper, and zinc[J]. *Aquatic Botany*, 2004, **80**(3): 163—176.
- [12] KÜPPER H, KOCHIAN L V. Transcriptional regulation of metal transport genes and mineral nutrition during acclimatization to cadmium and zinc in the Cd/Zn hyperaccumulator, *Thlaspi caerulescens* (Ganges population)[J]. *New Phytologist*, 2010, **185**(1): 114—129.
- [13] DENG L J(邓禄军), XIA J H(夏锦慧), ZHANG Y L(张亚莉), *et al.* Effects of cadmium pollution in soil on nitrogen, phosphorus, potassium and cadmium elements content and accumulation of potato[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*(安徽农业科学), 2013, **41**(14): 6238—6240(in Chinese).
- [14] LI S(李隼), HUANG SH D(黄胜东), ZHAO F G(赵福庚). Effects of cadmium on K⁺ uptake in root hair cells of rice[J]. *Plant Physiology Journal*(植物生理学报), 2011, **47**(5): 481—487.
- [15] WU F(吴峰), XIONG J F(熊俊芬). Interaction between arsenic and phosphorus, potassium, calcium and other nutrient elements in *Pteris vittata* L. [J]. *Modern Agricultural Sciences and Technology*(现代农业科技), 2010, (8): 278—280(in Chinese).
- [16] LI H Y(李虹颖), SU Y H(苏彦华). Effect of cadmium on tolerance physiology and nutrient accumulation in *Amaranthus hypochondriacus* L. [J]. *Ecology and Environmental Sciences*(生态环境学报), 2012, **21**(2): 308—313(in Chinese).
- [17] ZHAO X L(赵秀兰), LIU X(刘晓). Differences in plant growth, Cd and nutrient uptake, Cd translocation between two tobacco cultivars under Cd stress[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*(水土保持学报), 2009, **23**(1): 117—122(in Chinese).

(编辑:裴阿卫)