

外源螯合剂 CA 和 NTA 对苧麻修复铅镉复合污染土壤的影响

樊扬帆 刘云国* 龚小敏 江卢华 曾晓霞

(湖南大学环境科学与工程学院,长沙 410082)

摘要 采用盆栽实验,研究了在两组铅镉复合污染(Cd ($10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)/ Pb ($100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和 Cd ($50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)/ Pb ($500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$))条件下,不同浓度的柠檬酸(CA)和氮三乙酸(NTA) ($0, 1, 5, 10 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)对苧麻生物量、地上部分丙二醛(MDA)含量和抗氧化酶活性、苧麻各部分对Pb和Cd的积累的影响。结果表明,CA和NTA的应用均能促进苧麻的生长和提高Pb和Cd在苧麻体内积累。CA在促进苧麻生长、增强了苧麻对Cd的吸收和转移方面效果显著,但是,CA对Pb的提取和转移促进效果不显著。NTA促进苧麻对Pb的吸收和转移,并且同样有助于Cd的植物修复。苧麻体内CAT、SOD、POD活性和MDA含量变化表明CA和NTA缓解了Cd和Pb对苧麻的氧化胁迫。因此,外源螯合剂CA和NTA的应用有利于铅镉复合污染土壤的植物修复。

关键词 铅;镉;苧麻;柠檬酸;NTA;植物修复

中图分类号 X53 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2016)08-4547-06 DOI 10.12030/j.cjee.201503113

Effect of exogenous chelates CA and NTA on remediation of Pb and Cd-contaminated soil by ramie (*Boehmerianivea* (L.))

FAN Yangfan LIU Yunguo* GONG Xiaomin JIANG Luhua ZENG Xiaoxia

(College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract Pot experiments were conducted to investigate the influence of citric acid (CA) and nitrilotriacetic acid (NTA) levels ($0, 1, 5, 10 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$) on the biomass, malondialdehyde (MDA) content, shoot antioxidant enzyme activities, and accumulation of cadmium (Cd) and lead (Pb) in ramie exposed to Cd ($10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)/Pb ($100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) and Cd ($50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)/Pb ($500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). The results demonstrated that CA and NTA promoted growth and increased Cd and Pb uptake in ramie. CA promoted growth and increased Cd uptake and transfer in ramie; however, no significant effect was observed on Pb uptake and transfer. Application of NTA increased Pb uptake and transfer in ramie, and also contributed to the phytoextraction of Cd. The activities of CAT, SOD, and POD, and the MDA content indicated that CA and NTA relieved oxidative stress and damage induced in ramie by Cd and Pb. Overall, exogenous chelates CA and NTA are beneficial for phytoremediation of Pb and Cd-contaminated soil.

Key words lead (Pb); cadmium (Cd); ramie; citric acid; NTA; phytoremediation

采矿、冶金工业的快速发展,带来巨大经济利益的同时,也使土壤重金属污染形势日趋严重。土壤重金属污染不但危害地下水和植物生长,而且对人类生存造成巨大的威胁^[1]。治理日益严峻的重金属污染土壤需要成熟安全的土壤修复技术。目前,相较于投资成本高,且易于造成二次污染的物理和

化学修复方法,植物修复以其经济节约和环境友好的特点展现出较高的研究价值和较好的应用前景^[2]。

苧麻是中国特有的以纺织为主要用途的纤维作物,中国的苧麻产量约占全世界苧麻产量的90%以上,被国际上称为“中国草”。苧麻主要生长于我国

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41271332);湖南省自然基金重点项目(11JJ2031)

收稿日期:2015-03-13;修订日期:2015-03-25

作者简介:樊扬帆(1989—),女,硕士研究生,研究方向:植物修复重金属污染。E-mail: yangfan_fan@126.com

* 通讯联系人, E-mail: liuyunguo@hnu.edu.cn

亚热带地区,其中长江流域是苧麻的主要产区,其栽培面积及产量占全国总栽培面积入总产量的 90% 以上^[3]。有研究报道,苧麻对土壤重金属具有较强的吸附作用,同时生物量大,生长速度快,易繁殖,茎叶茂盛,易于收割,经济效益高,且苧麻根莖发达,可以活化和吸收浅层土壤重金属,降解深层土壤污染物,适合应用于修复亚热带地区的土壤重金属污染^[4]。

螯合剂可以直接通过酸化、沉淀、络合、氧化还原等方式改变重金属在土壤中的溶解性或者间接通过对土壤酶活性和微生物群落的作用来影响重金属的活性^[5]。GAO 等^[6-7]研究结果表明,CA 处理促使龙葵的实验组中各组织镉和铅浓度比空白对照组分别高出 30% 和 15%。LAN 等^[8]研究结果表明,可降解螯合剂 NTA 的应用促进了豨莶对镉污染土壤的植物修复。基于此,本实验选择 CA 和 NTA 为实验螯合剂,研究它们在苧麻植物修复 Cd 和 Pb 复合污染土壤中的作用,为提高植物修复 Cd 和 Pb 复合污染土壤的提供一些理论参考依据。

1 实验材料与方法

1.1 供试材料

供试苧麻品种为“湘苧 1 号”(*Boehmerianivea* (L.)),由湖南农科院苧麻研究基地提供。供试土壤采集自长沙岳麓山 0~20 cm 表层土,去除有机物残体和石块后过 2 mm 筛风干以备用。土壤基本性质如下, pH 5.4,有机质 3.34 g · kg⁻¹,速效磷 10.86 mg · kg⁻¹,速效钾 133.32 mg · kg⁻¹,总氮 4.42 mg · kg⁻¹,土壤湿度 23.4%。2 种螯合剂包括 CA 和 NTA,2 种重金属分别来自 Cd(NO₃)₂ 和 Pb(NO₃)₂。

1.2 实验方法

1.2.1 盆栽实验

盆栽实验在湖南大学环境科学与工程温室进行。实验设置 15 组,每组均为 3 个平行样。

1)空白组:无 Cd,无 Pb。

2)对照组:10 mg · kg⁻¹ Cd + 100 mg · kg⁻¹ Pb、50 mg · kg⁻¹ Cd + 500 mg · kg⁻¹ Pb。

3)CA1:10 mg · kg⁻¹ Cd + 100 mg · kg⁻¹ Pb + 1 mg · kg⁻¹ CA、50 mg · kg⁻¹ Cd + 500 mg · kg⁻¹ Pb + 1 mg · kg⁻¹ CA。

4)CA5:10 mg · kg⁻¹ Cd + 100 mg · kg⁻¹ Pb + 5 mg · kg⁻¹ CA、50 mg · kg⁻¹ Cd + 500 mg · kg⁻¹ Pb +

5 mg · kg⁻¹ CA。

5)CA10:10 mg · kg⁻¹ Cd + 100 mg · kg⁻¹ Pb + 10 mg · kg⁻¹ CA、50 mg · kg⁻¹ Cd + 500 mg · kg⁻¹ Pb + 10 mg · kg⁻¹ CA。

6)NTA1:10 mg · kg⁻¹ Cd + 100 mg · kg⁻¹ Pb + 1 mg · kg⁻¹ NTA、50 mg · kg⁻¹ Cd + 500 mg · kg⁻¹ Pb + 1 mg · kg⁻¹ NTA。

7)NTA5:10 mg · kg⁻¹ Cd + 100 mg · kg⁻¹ Pb + 5 mg · kg⁻¹ NTA、50 mg · kg⁻¹ Cd + 500 mg · kg⁻¹ Pb + 5 mg · kg⁻¹ NTA。

8)NTA10:10 mg · kg⁻¹ Cd + 100 mg · kg⁻¹ Pb + 10 mg · kg⁻¹ NTA、50 mg · kg⁻¹ Cd + 500 mg · kg⁻¹ Pb + 10 mg · kg⁻¹ NTA。

1.2.2 样品处理与分析

生物量的测定:样品收获后,先用自来水冲洗植物表明的泥土和尘粒,再用去离子水反复冲洗,将植物按照地上部分和地下部分分别进行烘干处理。设置烘箱温度为 70 °C 烘干 48 h 使样本达恒重,对植物干重进行测量。

Cd 和 Pb 含量的测定:收集的样品分为地上部分和地下部分,采用浓硝酸与高氯酸(3:1)进行混合酸消解,用 AAnalyst300 型原子吸收分光光度计测定 Pb、Cd 含量。转移系数(TF)表示植物体内地上部分与地下部分所含重金属元素浓度的比值。

丙二醛的测定:丙二醛(MDA)与硫代巴比妥酸发生显色反应进行检测。

超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)测定:采用试剂盒(购自南京建成生物工程研究所)进行测定。SOD 和 CAT 的测定在酶标仪上读数,而 POD 测定在紫外可见分光光度计上进行。

1.3 数据处理

每个处理组均重复 3 次,实验结果采用 Origin 9.0 和 SPSS 19.0. 进行单因子分析和 Duncun 多重比较法。数据采用(平均数 ± 标准误),显著性差异水平 $P < 0.05$ 。

2 实验结果

2.1 苧麻生物量的影响

从图 1 可见,当 Cd 和 Pb 处于低浓度时,苧麻地上部分生物量表现为对照组低于空白组,CA 和 NTA 处理导致生物量的提高,有向空白组回归的趋势。苧麻地上部分生物量随着 Cd 和 Pb 处理浓度

增加而减少。除 NTA 浓度为 10 mmol · kg⁻¹ 的处理组以外,苎麻生物量的变化趋势表现为:当 Cd 和 Pb 处于高浓度时,苎麻生物量随着 CA 和 NTA 浓度的增加而增大;当 Cd 和 Pb 处于低浓度时,苎麻生物量随着 CA 和 NTA 浓度的增加先增加再减少,总体上高于对照组。

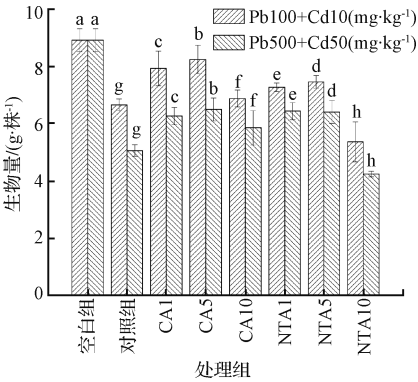


图 1 不同螯合剂浓度对苎麻地上部分生物量的影响
Fig.1 Effects of different chelant levels on biomass of ramie

2.2 苎麻吸收重金属的影响

2.2.1 吸收 Cd 的影响

由图 2 可见,苎麻地上部分对 Cd 的积累量随 Cd 的浓度增加,并且随着 CA 和 NTA 浓度的增大而增加。CA 和 NTA 处理组相比较,低浓度组处理下苎麻体内 Cd 的浓度没有显著差异;高浓度组处理下苎麻体内 Cd 的浓度有显著差异。且在高浓度 Cd 处理下,施加 NTA 的苎麻组的转移系数 TF 普遍大于 1 且大于 CA 处理组的苎麻的转移系数 TF。

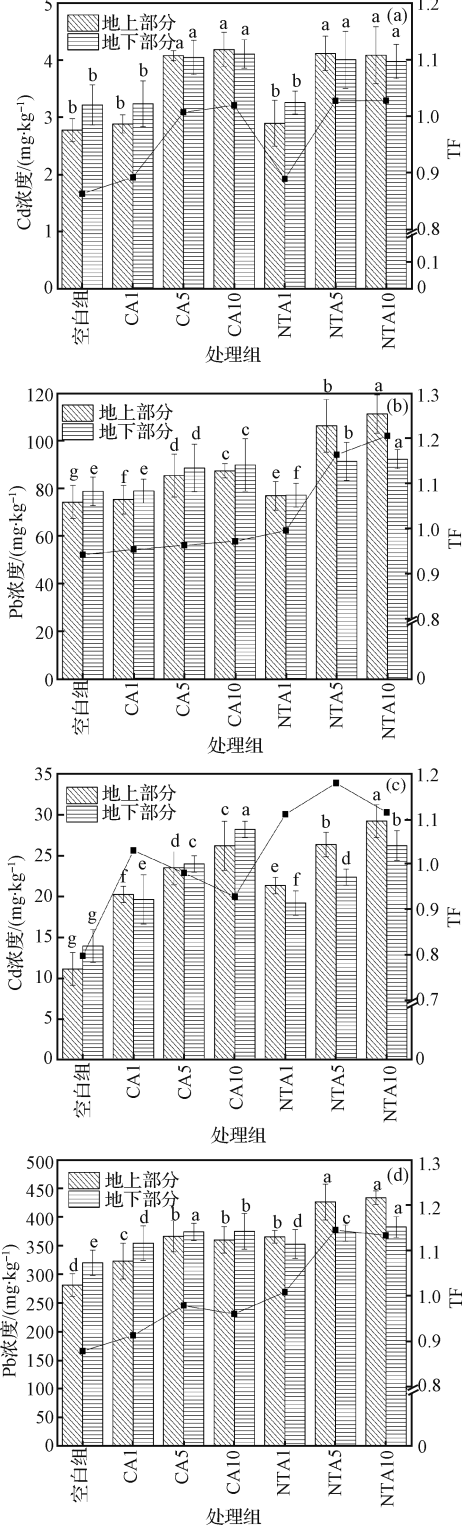
2.2.2 吸收 Pb 的影响

由图 2 可见,CA 和 NTA 处理组相比较,低浓度组处理下苎麻体内 Pb 的浓度有显著差异;高浓度组处理下苎麻体内 Pb 的浓度显著差异不明显。NTA 处理组 Pb 在苎麻体内的浓度和转移系数 TF 均明显高于 CA 处理组。说明 NTA 的应用不仅促进了苎麻对重金属 Pb 的富集,而且促进了苎麻体内 Pb 从地下部分向地上部分转移。CA 的施加对促进苎麻吸收重金属 Pb 的效果并不明显。

2.3 苎麻脂质过氧化的影响

活性氧在植物体内过度积累就会导致生物脂质过氧化。MDA 是膜脂质过氧化的终产物,其含量的高低可以用来表示脂质过氧化程度。由图 3 可见,Cd 和 Pb 的浓度越高,苎麻地上部分的脂质过氧化

程度就越大。无论 Cd 和 Pb 处于低浓度或是高浓



((a)和(b)为 10 mg · kg⁻¹ Cd + 100 mg · kg⁻¹ Pb 处理组;(c)和(d)为 50 mg · kg⁻¹ Cd + 500 mg · kg⁻¹ Pb)

图 2 不同螯合剂对苎麻 Cd 和 Pb 提取浓度和转移系数的影响

Fig.2 Effect of different treatments on activities of SOD in ramie

度,MDA 的浓度随 CA 和 NTA 应用浓度的升高而降低,表现出显著性差异,说明 CA 和 NTA 有缓解脂质过氧化程度的作用。

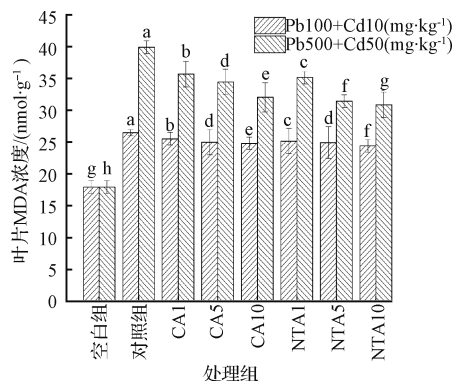


图3 不同处理对叶片MDA浓度的影响

Fig.3 Effect of different treatments on contents of MDA in ramie

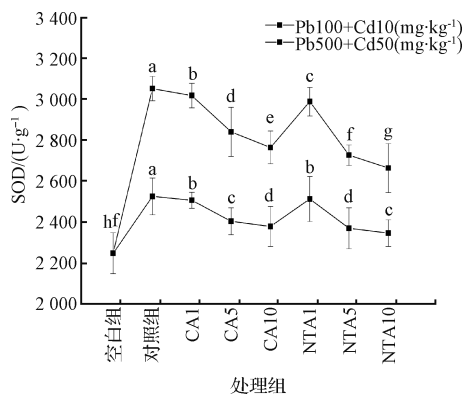


图4 不同处理对苎麻体内SOD活性的影响

Fig.4 Effect of different treatments on activities of SOD in ramie

2.4 苎麻抗氧化防御系统的影响

重金属 Cd 和 Pb 的胁迫会诱导植物产生大量自由基,造成氧化损伤,而 SOD、POD 和 CAT 等抗氧化酶能够抵御自由基所造成的氧化伤害。由图 4、图 5 和图 6 可见,随着 Cd 和 Pb 浓度升高,POD 和 SOD 活性升高,CAT 活性下降。和对照组相比较,随着 CA 和 NTA 浓度的增加,苎麻体内 CAT 的活性增加,并且在低浓度 Cd 和 Pb 条件下,当 CA 和 NTA 处理浓度为 $5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $10 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,CAT 活性接近于空白组。SOD 和 POD 变化趋势相似,均是随着 CA 和 NTA 处理浓度的增加而活性下降,表现为向空白组回归变化的趋势。2 组不同浓度 Cd 和 Pb 处理组相比较,CA 和 NTA 的应用效果表现为

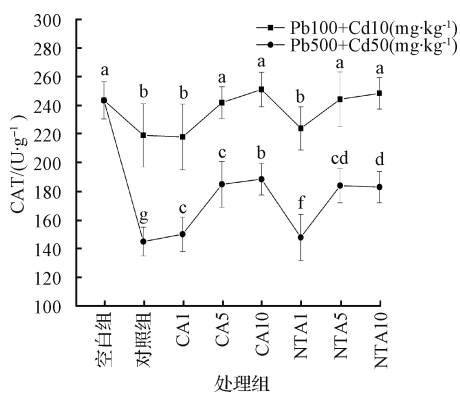


图5 不同处理对苎麻体内CAT活性的影响

Fig.5 Effect of different treatments on activities of CAT in ramie

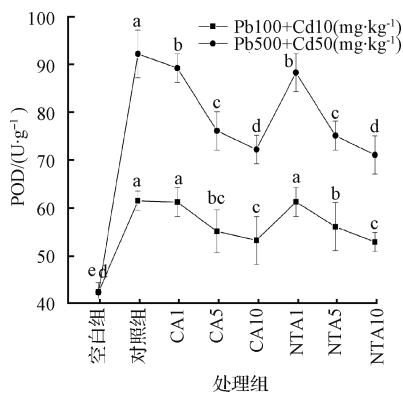


图6 不同处理对苎麻体内POD活性的影响

Fig.6 Effect of different treatments on activities of POD in ramie

高浓度的 Cd 和 Pb 处理组比低浓度的 Cd 和 Pb 处理组缓解 Cd 和 Pb 胁迫损害效果明显。

3 讨论

本实验表明,苎麻对重金属 Cd 和 Pb 均具有较强的耐性和积累能力,并且适宜浓度的 CA 和 NTA 的施加能够缓解重金属 Cd 和 Pb 对苎麻的生理胁迫,提高苎麻对土壤中重金属 Cd 和 Pb 的吸收和提取效率。

在植物修复重金属污染土壤的研究中,生物量不仅能作为评价植物对重金属耐性的重要指标,而且能直接影响植物对重金属污染土壤的修复效果^[4]。超富集植物一度因为在重金属植物修复过程中表现出较强耐性和较高的富集系数和转移系数而备受青睐,但是大部分超富集植物同时也具有生物量低,生长缓慢的特点,影响了重金属污染土壤植

物修复的效果^[9]。苎麻虽然不是 Cd 和 Pb 超积累植物,但具有耐 Cd 耐 Pb 能力强、生长速度快、经济价值高等优势^[3],如果能提高其对 Cd 和 Pb 的吸收和转移,苎麻将在植物修复重金属污染土壤中将发挥重要作用,其应用前景广阔。本实验发现,外源螯合剂 CA 和 NTA 在一定浓度范围内,均能提高苎麻地上部分生物量和重金属在苎麻体内的浓度,说明通过施加外源螯合剂 CA 和 NTA,能促进苎麻对重金属的富集,进而提高了苎麻修复重金属污染土壤的能力。本实验中,CA 处理组和 NTA 处理组苎麻转移系数(TF)明显远超过对照组。并且在低浓度 Cd 胁迫下,当 CA 和 NTA 浓度大于 $5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,苎麻对 Cd 的 TF 大于 1;在高浓度 Cd 胁迫下,除 CA 浓度为 $10 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,螯合剂应用组中苎麻对 Cd 的 TF 大于 1。当 NTA 处理浓度大于 $5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,苎麻对 Pb 的 TF 大于 1。表明螯合剂 CA 和 NTA 的施加促进了苎麻体内重金属 Cd 和 Pb 从地下部分向地上部分转移,对植物修复重金属污染土壤应用价值高。

外源螯合剂促进植物对重金属的吸收和转移的原因主要 3 点:其一,螯合剂酸化植物根际,降低了土壤 pH,增强重金属离子移动性,并且向植物根际环境释放的大量有机配合体,促进了重金属的溶解性,提高了植物根部的吸收效率及向茎叶的转移效率。其次,外源螯合剂激活了细胞质膜上的 ATP 酶,导致主要负责重金属转运的离子通道发生了变化。最后,外源螯合剂能够与重金属发生螯合作用,促进部分重金属向有的金属螯合态转移,从而促进根系的吸收^[9-10]。

有研究发现,重金属 Cd 和 Pb 能与巯基酶上的必须基团巯基(—SH)反应或者增强脂肪氧合酶的活性导致植物机体内氧化性损伤^[11]。当植物处于重金属逆境胁迫时,植物体内活性氧产生和消除的平衡受到破坏,而有利于体内活性氧的产生,所累积的活性氧引发的质膜过氧化,使植物生长异常^[12]。Cd 和 Pb 的胁迫扰乱了苎麻体内活性氧代谢系统的平衡,导致了大量的氧自由基的产生,对植物生理产生毒害作用。本实验中,随着 Cd 和 Pb 胁迫的增强,MDA 含量增加,SOD 和 POD 的活性上升,CAT 的活性下降^[2,13]。作为清除活性氧自由基的第一道防线,抗氧化防御体系的 SOD 和 POD 随着重金属胁迫水平的提升逐渐提高,外源螯合剂 CA 和 NTA 的施加适当的减轻了过度氧化性伤害。CAT 活性

的下降可能是由于酶合成受抑制或者是酶的子单元组装发生了改变,进而限制了清除 H_2O_2 的效率,导致脂质过氧化的产生,这也与受到 Cd 和 Pb 胁迫苎麻体内 MDA 含量增加的实验结果相一致。添加外源螯合剂 CA 和 NTA 的处理组,脂质过氧化程度减轻了,抗氧化酶的活性也有向空白组数据回归变化的趋势,表明 CA 和 NTA 施加能够缓解 Cd 和 Pb 的氧化性伤害,其原因可能是 CA 和 NTA 易于与金属离子的发生螯合作用,将重金属从自由离子态转变成低毒或无毒的螯合态^[7,14],从而减轻 Cd 和 Pb 对植物细胞中的生物毒性。CA 和 NTA 相比较,由于 NTA 对重金属具有更强的络合能力,所以其对重金属生理伤害的缓解效应更为明显。重金属通常通过细胞质的收缩和金属沉积作用入侵破坏植物细胞,CA 在维持细胞结构和功能稳定性,保护细胞形状,阻止质壁分离的发生等方面起到了关键作用^[2,9],有效阻隔了自由金属离子在细胞液中的移动性,保证了光合作用和蛋白质合成过程的正常进行,降低了 Cd 和 Pb 的氧化性伤害^[15]。

植物对不同浓度的重金属复合污染修复也受到广泛关注。本研究发现,苎麻在外源螯合剂 CA 和 NTA 的作用下对较高浓度的 Cd 和 Pb 胁迫表现出较强的耐性,并且在抵御氧化伤害方面表现出明显缓解作用。本研究可以为 Cd 污染场地的修复提供有效的策略,为投入实际应用提供了理论依据。

4 结 论

1) 总体来看,螯合剂 NTA 和 CA 促进苎麻生长,缓解了重金属 Cd 和 Pb 对苎麻的氧化胁迫,增加了苎麻各部分 Cd 和 Pb 的吸收量,并且提高了苎麻对 Cd 和 Pb 的转移系数,有利于对 Cd 和 Pb 复合污染土壤的植物修复。

2) 施加低浓度螯合剂 NTA 和 CA,植物修复效果随着螯合剂 NTA 和 CA 浓度的增强而增加,但是,当螯合剂 NTA 和 CA 的超过一定限度时,苎麻的植物修复效果没有显著提高,甚至当螯合剂浓度达到 $10 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的时候,苎麻对 Cd 和 Pb 的吸收量表现为下降趋势。

3) 相比高低两组 Cd 和 Pb 复合污染实验,除螯合剂 NTA 和 CA 的应用对苎麻提取 Pb 的影响以外,螯合剂 NTA 和 CA 的应用对苎麻生物量、Cd 的吸收量、酶活性等的影响,高浓度组 Cd ($10 \text{ mg} \cdot$

kg^{-1})/Pb($100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)均表现比低浓度组 Cd($50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)/Pb($500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)更加敏感。

参考文献

- [1] LEE K. K. , CHO H. S. , MOON Y. C. , et al. Cadmium and lead uptake capacity of energy crops and distribution of metals within the plant structures. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **2013**, 17(1): 44-50
- [2] NAJEEB U. , JILANI G. , ALI S. , et al. Insights into cadmium induced physiological and ultra-structural disorders in *Juncus effusus* L. and its remediation through exogenous citric acid. *Journal of Hazardous Materials*, **2011**, 186(1): 565-574
- [3] WANG Xin, LIU Yunguo, ZENG Guangming, et al. Sub-cellular distribution and chemical forms of cadmium in *Beckmeria nivea* (L.) Gaud. *Environmental and Experimental Botany*, **2008**, 62(3): 389-395
- [4] 林琦, 陈英旭, 陈怀满, 等. 有机酸对 Pb、Cd 的土壤化学行为和植株效应的影响. *应用生态学报*, **2001**, 12(4): 619-622
LIN Qi, CHEN Yingxu, CHEN Huaiman, et al. Effect of organic acids on soil chemical behavior of lead and cadmium and their toxicity to plants. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **2001**, 12(4): 619-622 (in Chinese)
- [5] 刘萍, 翟崇治, 余家燕, 等. Cd、Pb 复合污染下柠檬酸对龙葵修复效率及抗氧化酶的影响. *环境工程学报*, **2012**, 6(4): 1387-1392
LIU Ping, ZHAI Chongzhi, YU Jiayan, et al. Effect of citric acid on remediation efficiency and antioxidant enzyme of *Solanum nigrum* L. under Cd and Pb combined pollution. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2012**, 6(4): 1387-1392 (in Chinese)
- [6] GAO Yang, MIAO Chiyuan, Mao Liang, et al. Improvement of phytoextraction and antioxidative defense in *Solanum nigrum* L. under cadmium stress by application of cadmium: Resistant strain and citric acid. *Journal of Hazardous Materials*, **2010**, 181(1/2/3): 771-777
- [7] GAO Yang, MIAO Chiyuan, XIAO Jun, et al. Effect of citric acid on phytoextraction and antioxidative defense in *Solanum nigrum* L. as a hyperaccumulator under Cd and Pb combined pollution. *Environmental Earth Sciences*, **2012**, 65(7): 1923-1932
- [8] LAN Jichuan, ZHANG Shirong, LIN Haichuan, et al. Efficiency of biodegradable EDDS, NTA and APAM on enhancing the phytoextraction of cadmium by *Siegesbeckia orientalis* L. grown in Cd-contaminated soils. *Chemosphere*, **2013**, 91(9): 1362-1367
- [9] GHNAYA T. , ZAIER H. , BAIQUI R. , et al. Implication of organic acids in the long-distance transport and the accumulation of lead in *Sesuvium portulacastrum* and *Brassica juncea*. *Chemosphere*, **2013**, 90(4): 1449-1454
- [10] SOMASEKARAIHA B. V. , PADMAJA K. , PRASAD A. R. K. Phytotoxicity of cadmium ions on germinating seedlings of mung bean (*Phaseolus vulgaris*): Involvement of lipid peroxides in chlorophyll degradation. *Physiologia Plantarum*, **1992**, 85(1): 85-89
- [11] EVANGELOU M. W. H. , EBEL M. , SCHAEFFER A. Evaluation of the effect of small organic acids on phytoextraction of Cu and Pb from soil with tobacco *Nicotiana tabacum*. *Chemosphere*, **2006**, 63(5): 996-1004
- [12] KRISHNAMURTHY P. , RANATHUNGE K. , FRANKE R. , et al. The role of root apoplastic transport barriers in salt tolerance of rice (*Oryza sativa* L.). *Planta*, **2009**, 230(1): 119-134
- [13] LASAT M. M. , BBKER A. J. M. , KOCHIAN L. V. Altered Zn compartmentation in the root symplasm and stimulated Zn absorption into the leaf as mechanisms involved in Zn hyperaccumulation in *Thlaspi caerulescens*. *Plant Physiology*, **1998**, 118(3): 875-883
- [14] 王欣, 刘云国, 艾比布·努扎艾提, 等. 苧麻对镉毒害的生理耐性机制及外源精胺的缓解效应. *农业环境科学学报*, **2007**, 26(2): 487-493
WANG Xin, LIU Yunguo, AIBIBU · Nuzhaaiti, et al. Endurance mechanism of ramie to Cd and the alleviating effect of exogenous spermine. *Journal of Agro-Environment Science*, **2007**, 26(2): 487-493 (in Chinese)
- [15] AIBIBU N. A. , LIU Yunguo, ZENG Guangming, et al. Cadmium accumulation in *vetiveria zizanioides* and its effects on growth, physiological and biochemical characters. *Biore-source Technology*, **2010**, 101(16): 6297-6303