

王雨涵, 陈冬月, 江志勇, 等. EDTA 强化盐生植物修复 Pb、Cd 和盐渍化复合污染土壤[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(9): 1866-1874.

WANG Yu-han, CHEN Dong-yue, JIANG Zhi-yong, et al. Phytoremediation of the soil contaminated by Pb, Cd and secondary salinization with the enhancement of EDTA[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(9): 1866-1874.

# EDTA 强化盐生植物修复 Pb、Cd 和盐渍化复合污染土壤

王雨涵<sup>1</sup>, 陈冬月<sup>1</sup>, 江志勇<sup>2</sup>, 聂文翰<sup>1</sup>, 张进忠<sup>1,3\*</sup>

(1. 西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715; 2. 重庆化工职业学院环境与质量检测系, 重庆 401228; 3. 重庆市农业资源与环境重点实验室, 重庆 400716)

**摘要:**为修复重金属和盐渍化复合污染土壤, 采用温室盆栽实验, 研究了 EDTA 强化盐生植物景天三七(*Sedum aizoon* L.) 和翅碱蓬(*Suaeda salsa*) 对土壤中 Pb、Cd 和盐分阴离子( $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ ) 的去除效果。结果表明, EDTA 能够促进盐生植物吸收和富集污染土壤中的 Pb、Cd, 当添加  $4 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  的 EDTA 时, 对于 Pb、Cd 中度污染土壤, 景天三七对 2 种重金属的去除率分别为 32.59% 和 36.47%, 翅碱蓬分别为 22.93% 和 29.36%; 对于 Pb、Cd 和盐分阴离子复合污染土壤, 景天三七对轻度污染土壤中 2 种重金属的去除率分别为 41.37% 和 47.25%, 翅碱蓬对中度污染土壤中 2 种重金属的去除率分别为 36.42% 和 41.48%, 景天三七对 3 种盐分阴离子的去除率表现为  $\text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ , 而翅碱蓬对盐分阴离子的去除效果差异较小。景天三七的生物量明显大于翅碱蓬, 植物抗逆性指标显示景天三七耐受 Pb、Cd 和盐分阴离子的能力更强。EDTA 强化景天三七修复实际污染土壤, Pb、Cd 的去除率分别达到 37.87% 和 41.61%,  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Cl}^-$  分别为 59.22%、42.11% 和 51.65%, 能够有效修复重金属和盐渍化复合污染土壤。

**关键词:**土壤修复; 重金属; 次生盐渍化; 盐生植物; EDTA

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2018)09-1866-09 doi:10.11654/jaes.2018-0206

## Phytoremediation of the soil contaminated by Pb, Cd and secondary salinization with the enhancement of EDTA

WANG Yu-han<sup>1</sup>, CHEN Dong-yue<sup>1</sup>, JIANG Zhi-yong<sup>2</sup>, NIE Wen-han<sup>1</sup>, ZHANG Jin-zhong<sup>1,3\*</sup>

(1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Department of Environmental and Quality Inspection, Chongqing Chemical Engineering Vocational College, Chongqing 401228, China; 3. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400716, China)

**Abstract:** In order to remedy the soil contaminated by heavy metals and secondary salinization, the pot experiments were conducted to investigate the removal efficiencies of Pb, Cd and salt anions ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  and  $\text{SO}_4^{2-}$ ) by two halophytes with the enhancement of EDTA. The results showed that the addition of EDTA could significantly promote halophytes to absorb and enrich Pb and Cd in the contaminated soils. With the enhancement of  $4 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  EDTA, the removal efficiencies of Pb and Cd were 32.59% and 36.47% by *Sedum aizoon* L., and those were 22.93% and 29.36% by *Suaeda salsa* for the moderately polluted soil with Pb and Cd, respectively. For the combined pollution soils with Pb, Cd and salt anions, the removal efficiencies of Pb and Cd in the mildly polluted soil were 41.37% and 47.25% by *Sedum aizoon* L., and those in the moderately polluted soil were 36.42% and 41.48% by *Suaeda salsa*, respectively. The removal ability of the three salt anions showed a decreasing order of  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  by *Sedum aizoon* L., whereas that showed little difference by *Suaeda salsa*. The exist-

收稿日期: 2018-02-07 录用日期: 2018-04-27

作者简介: 王雨涵(1994—), 女, 硕士研究生, 从事污染土壤修复技术研究。E-mail: wyh\_1121@hotmail.com

\*通信作者: 张进忠 E-mail: jzhzhang@swu.edu.cn

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2012AA101405)

Project supported: The National High Technology Research and Development Program of China(2012AA101405)

tence of appropriate amount of salt anions could activate Pb and Cd in the contaminated soil, and increase their mobility and bioavailability, which may promote the halophytes to absorb heavy metals. When the contents of salt anions in the contaminated soil exceeded the tolerance thresholds of the halophytes, excess salinity might reduce the absorption ability of plant to Pb and Cd. In addition, the biomass of *Sedum aizoon* L. was obviously greater than that of *Suaeda salsa*, and plant resistance indices indicated that the tolerance ability of *Sedum aizoon* L. to Pb, Cd and salt anions was much stronger. The combined pollution soil with heavy metals and secondary salinization could be effectively remedied by *Sedum aizoon* L. with the enhancement of EDTA, and the removal efficiencies of Pb, Cd were 37.87% and 41.61%, and those of  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  and  $\text{Cl}^-$  were 59.22%, 42.11% and 51.65% for the actual pollution soil, respectively.

**Keywords:** soil remediation; heavy metal; secondary salinization; halophyte; EDTA

近年来,我国设施农业发展迅猛,设施土壤面积已经达到340万 $\text{hm}^2$ <sup>[1]</sup>。设施栽培由于环境封闭、高温高湿、复种指数高、过度施肥与灌溉等特点,经常出现土壤酸化、次生盐渍化和重金属累积等问题<sup>[2-3]</sup>。据报道,我国次生盐渍化土壤面积占农业土壤总面积的30%以上,并呈现逐年增加的趋势,盐渍土中的盐分阴离子主要有 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ <sup>[4]</sup>;Tian等<sup>[5]</sup>发现华东地区日光温室土壤、塑料大棚土壤中分别出现Cd和Pb累积,且含量明显高于土壤背景值。土壤重金属和次生盐渍化复合污染,不仅危害土壤生态环境和农产品安全,还严重阻碍了设施农业的可持续发展。因此,发展重金属和次生盐渍化复合污染土壤修复技术迫在眉睫。

植物修复技术具有高效、价格低廉、环境友好等优点,是目前研究较多、应用前景较好的治理技术。景天三七(*Sedum aizoon* L.)和翅碱蓬(*Suaeda salsa*)是两种典型的盐生植物,景天三七为多年生肉质草本植物,抗逆环境能力强、生长周期短、生物量大<sup>[6-7]</sup>;翅碱蓬一般生长在沿海滩涂、荒漠等盐碱地,具有较强的抗盐和耐盐能力<sup>[8-9]</sup>。盐生植物还能应对重金属离子胁迫,何洁等<sup>[10]</sup>测定了Cd、Zn胁迫下翅碱蓬的生长和生理指标,获得翅碱蓬对Cd、Zn的耐受阈值分别为 $2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;侯柯等<sup>[7]</sup>采用水培实验,研究了景天三七对Pb的吸收富集作用,在 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Pb溶液中景天三七对Pb的富集系数高达12.46。由此可见,盐生植物对修复盐渍化和重金属复合污染土壤具有一定潜力<sup>[11-12]</sup>。但是,植物修复时间长、效率低,如何提高其修复能力并开展应用研究还有待进一步探索。

螯合剂对重金属离子具有较强的螯合能力,能够提高重金属的迁移能力和生物有效性<sup>[13-14]</sup>。一些研究表明,EDTA对多种重金属有很强的螯合能力,还能促进植物对重金属的吸收及向地上部转运<sup>[15-16]</sup>,将EDTA和盐生植物结合,有望提高植物对重金属的提

取效率。为此,本文利用EDTA强化盐生植物吸收土壤中的Pb、Cd,提高其对重金属污染盐渍土的修复效率,开展实际污染土壤修复研究,以期对重金属和盐渍化复合污染土壤修复提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 主要试剂

EDTA、 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NaNO}_3$ 、 $\text{NaCl}$ 和 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 均为分析纯试剂,购于成都科龙化学试剂公司。

Pb、Cd试液:分别称取 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 试剂32 g和0.33 g,加入去离子水搅拌溶解,定容至1000 mL,配制成Pb、Cd浓度分别为 $20.02\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 和 $0.12\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的溶液,其中 $\text{NO}_3^-$ 浓度分别为 $11.98\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 和 $0.13\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。

$\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 试液:分别称取 $\text{NaNO}_3$ 、 $\text{NaCl}$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 试剂180、60 g和60 g,加入去离子水搅拌溶解,定容至1000 mL,配制成浓度分别为 $131.48$ 、 $36.40$ 和 $40.58\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的溶液。

#### 1.1.2 主要仪器

恒温摇床:ZHWHY-211B型,上海智城分析仪器制造有限公司;离心机:TDL-5C型,上海安亭科学仪器厂;紫外-可见分光光度计:UV-3200S型,上海精密科学仪器有限公司;原子吸收分光光度计:TAS-990型,北京普析通用仪器有限责任公司;电热恒温鼓风干燥箱:DHG-9240A型,上海精宏实验设备有限公司。

#### 1.1.3 供试土壤

##### (1)原土

土壤类型为紫色土,采自西南大学紫色土基地的表土样品(0~20 cm),经自然风干、研磨混匀后,过10目筛,测定土壤理化性质;过100目筛,测定Pb、Cd和盐分阴离子含量。测得原土的pH为6.73,有机质含量为 $13.21\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,Pb、Cd的本底含量分别为27.14

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 的本底含量分别为 $0.127$ 、 $0.071 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.054 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

### (2) 模拟Pb、Cd污染土壤

称取3份过10目筛的原土2 kg, 分别加入Cd、Pb试液各5、10 mL和15 mL, 搅拌混匀, 保持田间持水量的60%, 装入塑料桶中于阴凉处钝化3周, 制得模拟Pb、Cd轻度、中度和重度污染土壤各1份待用。测得模拟轻度污染土壤中Pb、Cd含量分别为 $71.63 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 中度污染土壤中分别为 $117.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.84 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 重度污染土壤中分别为 $166.87 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

### (3) 模拟Pb、Cd和盐渍化复合污染土壤

称取2 kg模拟Pb、Cd轻度、中度和重度污染土壤各1份, 分别加入 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 试液各5、10 mL和15 mL, 搅拌混匀, 保持田间持水量的60%, 装入塑料桶中于阴凉处钝化3周, 制得模拟Pb、Cd和盐渍化轻度、中度和重度污染土壤各1份待用。表1为模拟复合污染土壤中Pb、Cd和3种盐分阴离子的实测含量。

表1 模拟复合污染土壤中Pb、Cd和3种盐分阴离子的含量

Table 1 The contents of Pb, Cd and three salt anions in the stimulated combined pollution soils

污染程度	Pb/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Cd/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{NO}_3^-$ / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{Cl}^-$ / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{SO}_4^{2-}$ / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$
轻度	73.47	0.52	0.687	0.224	0.288
中度	121.16	0.82	1.886	0.581	0.694
重度	166.83	1.15	3.176	0.897	1.095

### (4) 实际污染土壤

土壤类型为冲积土, 采自上海市崇明区连续种植黄瓜11年的设施农业土壤(0~20 cm), 测得土壤pH为7.23, 有机质含量为 $19.57 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 土壤电导率为 $1.184 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ , Pb、Cd含量分别为 $107.62 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.63 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 含量分别为 $1.58$ 、 $0.47 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.53 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。该土壤中Pb、Cd含量均达到中度污染水平, 盐分阴离子含量达到中度盐渍化水平, 为典型的Pb、Cd与盐渍化复合污染土壤。

#### 1.1.4 盐生植物

景天三七(*Sedum aizoon* L.)和翅碱蓬(*Suaeda salsa*)种子购于重庆悠禾科技种业公司, 种子经10%的酒精消毒30 min, 用自来水冲洗, 再用自来水浸泡24 h, 播于育苗盘腐殖质表层, 置于 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 恒温培养箱培育1个月, 得到景天三七和翅碱蓬幼苗。

## 1.2 实验设计

在西南大学农场的温室大棚内进行盆栽实验, 所

用塑料盆的规格为高度20 cm、直径15 cm, 每盆装入2 kg土壤。

#### 1.2.1 EDTA强化盐生植物修复Pb、Cd污染土壤

分别取2 kg原土、Pb、Cd轻度污染土壤、中度污染土壤和重度污染土壤于塑料盆中, 每盆植入长势和株高相近的3株景天三七幼苗, 每种土壤12个盆。盆栽实验期间每日称重, 用去离子水补充水分, 使土壤水分保持在田间持水量的60%。植物生长60 d时, 每种土壤随机选取3盆, 加入一定体积的EDTA溶液, 使其加入量分别为0、2、4  $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $8 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土; 10 d后收获植物, 采集盆栽土样, 沿土面1 cm剪取植株地上部, 采集植物根系、地上部样品, 用自来水和蒸馏水冲洗, 再用滤纸吸干表面水分。

土样经风干、磨碎后, 过100目尼龙筛, 用 $\text{HCl-HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$ 消解; 植物样品在 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 下杀青30 min, 在 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘48 h至恒重, 磨碎后, 用 $\text{HCl-HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消解。过滤消解液, 定容, 测定土壤和植物样品中的Pb、Cd含量。

翅碱蓬的盆栽实验中, 每盆植入10株翅碱蓬幼苗, 其他处理与景天三七的盆栽实验一致。

#### 1.2.2 EDTA强化盐生植物修复Pb、Cd和盐渍化复合污染土壤

分别取2 kg原土、Pb、Cd和盐渍化轻度、中度和重度污染土壤分别置于塑料盆中, 每盆中植入长势和株高相近的3株景天三七幼苗, 每种土壤3个盆。盆栽实验期间每日称重, 用去离子水补充水分, 使土壤水分保持在田间持水量的60%。植物生长60 d时, 均加入 $4 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  EDTA, 10 d后收获植物, 并采集盆栽土样, 测定Pb、Cd、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 含量; 采集植物茎叶测定叶绿素、丙二醛的含量和超氧化物歧化酶(SOD)活性, 沿土面上1 cm剪取植株地上部, 用自来水和蒸馏水冲洗根系, 滤纸吸干植物表面水分, 测定鲜重。

翅碱蓬的盆栽实验中, 每盆植入10株翅碱蓬幼苗, 其他处理与景天三七的盆栽实验一致。

#### 1.2.3 实际污染土壤修复实验

由1.2.1和1.2.2部分, 筛选出对Pb、Cd和盐渍化复合污染土壤修复效果较好的植物, 开展实际污染土壤修复实验。采用温室盆栽实验, 植入长势和株高相近的植物幼苗, 设置3次重复, 土壤水分保持在田间持水量的60%。植物生长60 d时, 均加入 $4 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  EDTA, 10 d后采集盆栽土样, 测定Pb、Cd和3种盐分阴离子的含量。

### 1.3 测定方法及数据处理

土壤中水溶性 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 和 $\text{NO}_3^-$ 分别用EDTA间接配位滴定法、沉淀滴定法和紫外分光光度法测定,Pb、Cd用原子吸收分光光度法测定。植物抗逆性指数叶绿素、SOD活性和丙二醛分别用乙醇比色法、氮蓝四唑光化还原法和硫代巴比妥酸法测定。

采用Excel 2014和SPSS 19.0软件进行数据处理与统计分析,用Origin 8软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 EDTA强化盐生植物修复Pb、Cd污染土壤

#### 2.1.1 添加EDTA对盐生植物积累Pb、Cd的影响

图1为添加EDTA对2种植物地上部Pb、Cd含量的影响。从图1可以看出,与对照比较,添加EDTA能够显著提高2种植物地上部的Pb、Cd含量,且随着EDTA加入量的增加,植物地上部的Pb、Cd含量逐渐增加;对于相同污染程度的土壤,景天三七地上部的Pb、Cd含量显著高于翅碱蓬,且Pb、Cd含量增幅高于翅碱蓬。当加入 $4\text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  EDTA时,对于轻度、中

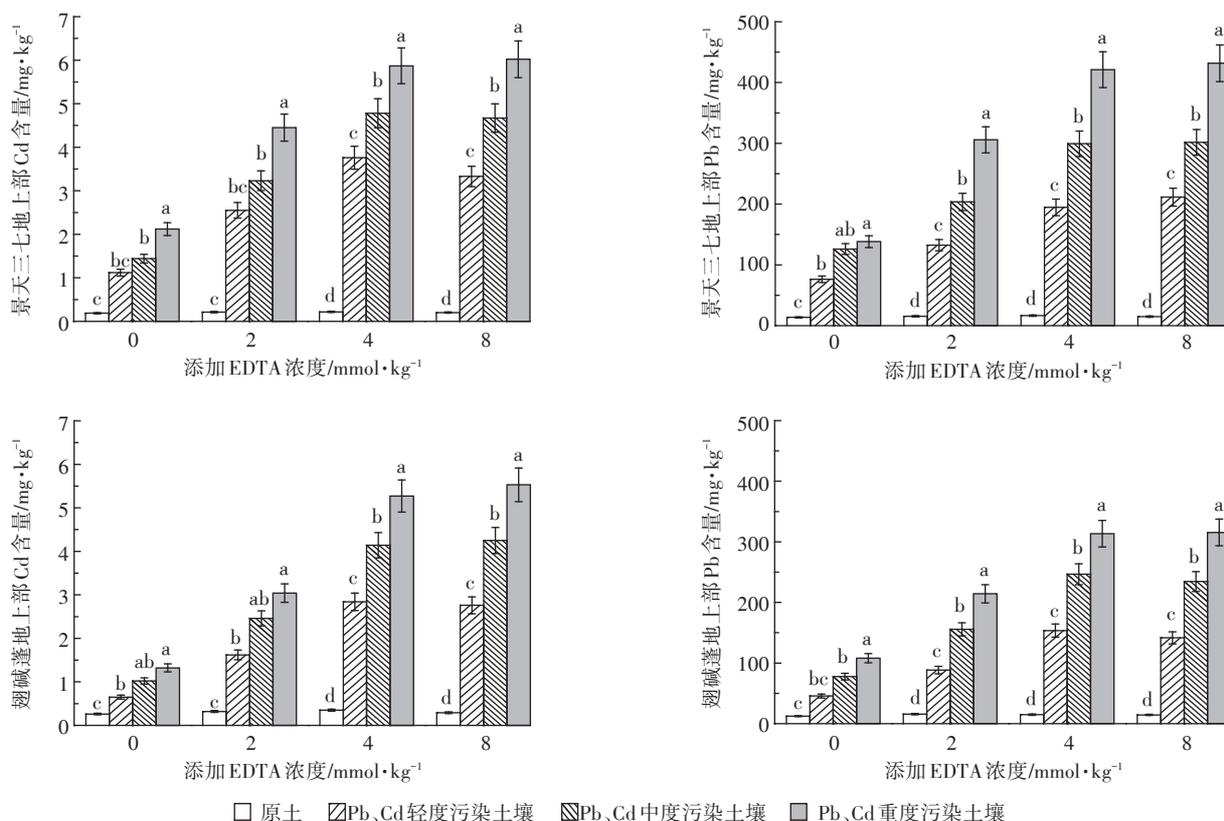
度和重度污染土壤,景天三七地上部的Pb含量分别为 $195$ 、 $299\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $421\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,分别是对照的 $2.7$ 、 $2.4$ 倍和 $3.1$ 倍;景天三七地上部的Cd含量分别为 $3.76$ 、 $4.78\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $5.87\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,分别是对照的 $3.4$ 、 $2.7$ 倍和 $2.5$ 倍。当加入 $8\text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  EDTA时,植物地上部Pb、Cd含量不再显著增加,可能是EDTA浓度过高会抑制植物生长,进而限制植物对Pb、Cd的吸收。因此,本研究探讨添加 $4\text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  EDTA时2种盐生植物对Pb、Cd和盐渍化复合污染土壤的修复效果。

#### 2.1.2 EDTA强化盐生植物修复Pb、Cd污染土壤

表2为不添加和添加 $4\text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  EDTA时,2种植物对土壤中Pb、Cd的去除率。从表2看出,添加 $4\text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  EDTA后土壤中Pb、Cd的去除率高于不添加EDTA。总体来说,在中度污染土壤中,2种植物对Pb、Cd的去除率较大;与不添加EDTA比较,翅碱蓬对Pb和Cd的去除率分别提高 $62\%$ 和 $37\%$ ,景天三七分别提高 $52\%$ 和 $28\%$ 。

#### 2.1.3 EDTA强化盐生植物对Pb、Cd的富集与转运

表3给出了添加和不添加 $4\text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  EDTA时,



图中不同字母代表相同处理不同污染土壤间的差异显著( $P<0.05$ )。下同

图1 添加EDTA对植物地上部Pb、Cd含量的影响

Figure 1 Effects of the addition of EDTA on Pb and Cd contents in plant shoots

表2 土壤中Pb、Cd的去除率(%)

Table 2 Removal efficiencies of Pb and Cd in soils(%)

污染程度	重金属	翅碱蓬		景天三七	
		不加EDTA	加4 mmol·kg <sup>-1</sup> EDTA	不加EDTA	加4 mmol·kg <sup>-1</sup> EDTA
轻度	Pb	15.58±2.81b	20.37±3.67b	17.26±3.11a	30.84±5.55a
	Cd	19.37±3.49b	29.47±5.30b	25.68±4.62a	34.22±6.16a
中度	Pb	14.17±2.55b	22.93±4.13b	21.48±3.87a	32.59±5.87a
	Cd	21.48±3.87b	29.36±5.28b	28.46±5.12a	36.47±6.56a
重度	Pb	12.53±2.26b	19.14±3.45b	19.57±3.52a	28.78±5.18a
	Cd	19.56±3.52b	27.57±4.96b	26.37±4.75a	35.83±6.45a

注:同行数据后不同字母表示同种处理不同品种间差异显著( $P<0.05$ )。

表3 添加EDTA对翅碱蓬和景天三七富集和转运Pb、Cd的影响

Table 3 Effects of the addition of EDTA on the enrichment and translocation of Pb, Cd in *Suaeda salsa* and *Sedum aizoon* L.

污染程度	EDTA添加量/ mmol·kg <sup>-1</sup>	翅碱蓬				景天三七			
		富集系数		转运系数		富集系数		转运系数	
		Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd
轻度	0	0.63±0.07b	1.25±0.19b	0.37±0.04b	0.64±0.08b	1.05±0.09b	2.15±0.24b	0.78±0.10b	1.24±0.11b
	4	2.11±0.19a	5.46±0.75a	0.72±0.06a	1.03±0.14a	2.68±0.32a	7.23±0.68a	1.09±0.11a	1.61±0.15a
中度	0	0.66±0.09b	1.21±0.15b	0.40±0.05b	1.07±0.11b	0.63±0.09b	1.71±0.15b	0.83±0.09b	1.27±0.12b
	4	2.08±0.27a	4.93±0.58a	0.83±0.10a	0.98±0.13a	2.53±0.29a	5.69±0.64a	1.16±0.16a	1.65±0.15a
重度	0	0.65±0.08b	1.16±0.15b	0.54±0.06b	0.64±0.07b	0.83±0.08b	1.86±0.15b	0.81±0.06b	1.30±0.14b
	4	1.88±0.21a	4.62±0.61a	0.86±0.12a	0.89±0.14b	2.52±0.31a	5.15±0.73a	1.11±0.23a	1.69±0.15a

注:表中不同字母表示同种污染程度不同EDTA添加水平间差异显著( $P<0.05$ )。

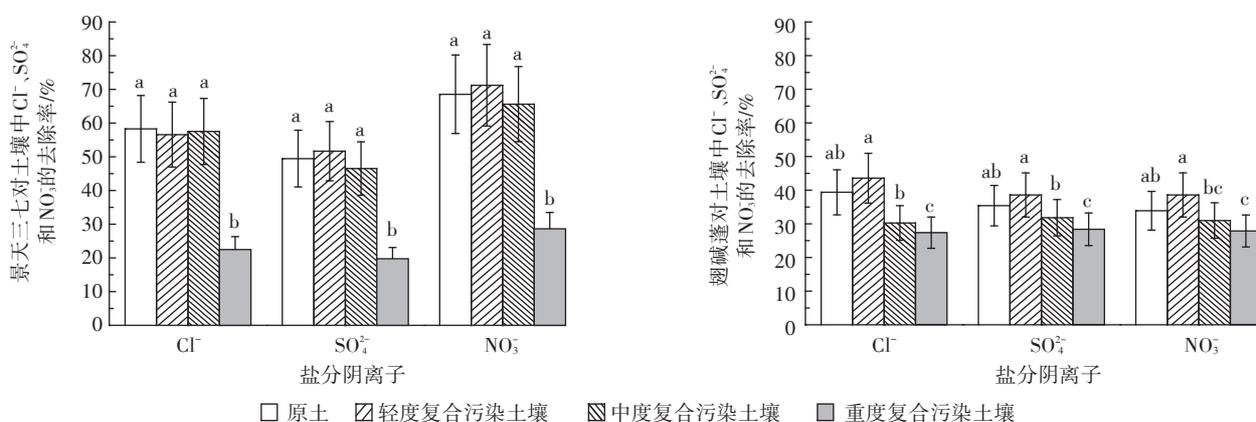
2种植物对Pb、Cd的富集系数和转运系数。可以看出,与不添加EDTA比较,添加EDTA后2种盐生植物对Pb、Cd的富集系数和转运系数均显著增大,且对Cd的富集和转运能力强于Pb。在Pb、Cd轻度污染土壤中,当添加4 mmol·kg<sup>-1</sup> EDTA时,景天三七和翅碱蓬对Cd的富集系数分别达到7.23和5.46。比较发现,景天三七对Pb、Cd的富集和转运能力强于翅碱

蓬,说明景天三七对土壤中Pb、Cd的吸收能力更强,吸收后更易向地上部迁移,对Pb、Cd污染土壤表现出更大的修复潜力。

## 2.2 EDTA强化盐生植物修复Pb、Cd和盐渍化复合污染土壤

### 2.2.1 盐生植物去除复合污染土壤中的盐分阴离子

图2给出了添加4 mmol·kg<sup>-1</sup> EDTA后,翅碱蓬和

图2 盐生植物对复合污染土壤中Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>的去除率Figure 2 Removal efficiencies of Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> in combined pollution soil with the two halophytes

景天三七对复合污染土壤中盐分阴离子的去除率。可以看出,翅碱蓬对盐分阴离子的去除受污染程度的影响较小,3种盐分阴离子的去除率差异不大;景天三七对盐分阴离子的去除率受污染程度的影响较大,在轻、中度复合污染土壤中,景天三七对盐分阴离子的去除效果较好,在重度污染条件下去除率明显下降,3种盐分阴离子的去除率表现为 $\text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ 。另外,由于景天三七的生物量大于翅碱蓬,对土壤中盐分阴离子的吸收和去除能力强于翅碱蓬。

### 2.2.2 EDTA强化盐生植物去除复合污染土壤中的Pb、Cd

表4为添加 $4 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  EDTA后,2种盐生植物对复合污染土壤中Pb、Cd的去除率。可以看出,对于相同污染程度的土壤,2种盐生植物对Cd的去除效果好于Pb;对于轻、中度污染土壤,景天三七对Pb、Cd的去除效果均好于翅碱蓬,说明景天三七具有修复重金属与盐渍化复合污染土壤的潜在价值。

比较表2和表4发现,在相同重金属污染水平下,添加 $4 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  EDTA,盐生植物对复合污染土壤中重金属的去除率高于单一重金属污染的土壤,翅碱蓬对中度污染土壤中Pb、Cd的去除率分别提高59%和41%,景天三七对轻度污染土壤中2种重金属去除率分别提高34%和38%。

### 2.2.3 盐生植物对复合污染土壤中Pb、Cd的富集与转运

表5为添加 $4 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  EDTA后,盐生植物对复

表4 复合污染土壤中Pb、Cd的去除率(%)

Table 4 The removal efficiencies of Pb and Cd in combined pollution soil (%)

污染程度	翅碱蓬		景天三七	
	Pb	Cd	Pb	Cd
轻度	27.47±5.21b	33.47±6.35b	41.37±7.86a	47.25±8.97a
中度	36.42±6.91a	41.48±7.88a	39.51±7.50a	42.84±8.13b
重度	37.25±7.07a	40.87±6.76a	29.22±5.58b	34.28±6.51c

注:同列不同字母表示不同污染程度处理间差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

表5 翅碱蓬和景天三七对复合污染土壤中Pb、Cd的富集和转运

Table 5 Enrichment and translocation factors of Pb, Cd in *Suaeda salsa* and *Sedum aizoon* L.

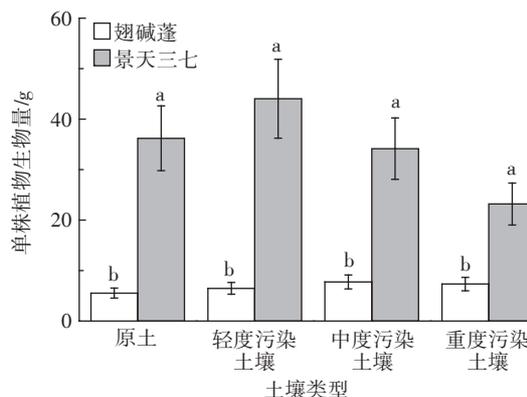
污染程度	翅碱蓬				景天三七			
	富集系数		转运系数		富集系数		转运系数	
	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd
轻度	3.37±0.65ab	8.17±1.56b	0.85±0.11b	1.12±0.18b	5.16±0.87a	11.12±2.14ab	1.38±0.17a	1.63±0.22b
中度	3.53±0.61a	10.30±1.84a	0.98±0.14ab	1.27±0.21ab	4.68±0.51b	12.07±2.04a	1.23±0.14ab	2.11±0.23ab
重度	3.05±0.43b	6.35±0.43c	1.01±0.12a	1.36±0.16a	2.22±0.32c	8.47±0.85b	1.13±0.15b	2.32±0.35a

合污染土壤中Pb、Cd的富集系数和转运系数。可以看出,景天三七对Pb、Cd的富集系数最大值分别为5.16和12.07,转运系数最大值分别为1.38和2.32;翅碱蓬对Pb、Cd的富集系数最大值分别为3.53和10.30,转运系数最大值分别为1.01和1.36。对于相同污染程度的土壤,2种盐生植物对Cd的富集和转运能力比Pb强,景天三七对2种重金属的富集和转运能力比翅碱蓬强。

比较表3和表5发现,在相同重金属污染水平下,添加 $4 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  EDTA,盐生植物对复合污染土壤中重金属的富集和转运能力强于单一重金属污染的土壤。翅碱蓬对中度污染土壤中Pb、Cd的富集系数分别提高70%和109%,转运系数分别提高18%和30%;景天三七对轻度污染土壤中Pb、Cd的富集系数分别提高93%和54%,转运系数分别提高27%和1%。

### 2.2.4 盐生植物的生物量和生理生化参数变化

生物量是反映植物修复能力的一个重要指标。从图3可以看出,添加 $4 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  EDTA后,随着土壤复合污染程度的增加,两种植物的生物量呈现先增加后降低的趋势,且景天三七的生物量显著高于翅碱蓬。



图中不同字母代表相同处理不同盐生植物间的差异显著  
图3 添加 $4 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  EDTA后不同土壤中盐生植物的生物量  
Figure 3 Biomasses of halophytes in different soils with the addition of  $4 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  EDTA

蓬;在轻度污染土壤中,每株景天三七的平均生物量可以达到44 g,比不加EDTA提高21%。

表6给出了与2种盐生植物抗逆性有关的生理生化参数。从表6可以看出,随着土壤复合污染程度的加剧,翅碱蓬的叶绿素含量呈现逐渐下降的趋势,而景天三七的叶绿素含量随土壤污染程度的变化较小。景天三七中SOD活性呈上升趋势,能够有效清除重金属和盐分阴离子胁迫产生的活性氧;翅碱蓬能够抵御一定的重金属和盐分阴离子胁迫,但污染程度继续增加,SOD活性下降,此时已对翅碱蓬产生毒害作用。2种盐生植物中丙二醛含量均呈上升趋势,在重度污染条件下达到最高,翅碱蓬、景天三七中丙二醛含量比原土分别提高104%和19%,说明景天三七耐受重金属和盐分阴离子的能力更强。因此,景天三七更适合于修复重金属和盐分阴离子复合污染土壤。

### 2.3 EDTA强化景天三七修复实际污染土壤

采用EDTA强化景天三七修复实际污染土壤,获得土壤中Pb、Cd的去除率分别为37.87%和41.62%, $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{Cl}^-$ 分别为59.22%、51.65%和42.11%。景天三七对实际污染土壤中Pb、Cd和阴离子的去除效果与模拟实验基本一致,尽管景天三七不是Pb、Cd的超积累植物,但它生长快速、生物量大、耐盐能力强,具有对重金属和盐渍化复合污染土壤的修复潜力,值得进一步研究。

## 3 讨论

本研究用模拟Pb、Cd的轻度、中度和重度污染土壤进行盆栽实验,添加低浓度EDTA后,景天三七和翅碱蓬能够正常生长,对2种重金属都有较好的吸收富集能力,比其他盐生植物(如草木樨、大叶补血草、野榆钱菠菜)表现出更强的富集Cd能力<sup>[17]</sup>。这是因为EDTA与Pb、Cd的螯合稳定常数( $\lg K_f$ )分别为19和16.4,对Pb、Cd具有很强的螯合能力<sup>[18-19]</sup>,EDTA与Pb、Cd形成的螯合物容易被植物吸收,促进重金属从植物根系向地上部迁移,增大植物地上部的重金属含

量<sup>[20]</sup>。Bareen等<sup>[21]</sup>研究证实,添加低剂量EDTA可以促进碱蓬属盐生植物紫穗槐修复Cr污染土壤,添加1 mmol·kg<sup>-1</sup>的EDTA时,植物体内Cr平均积累量比对照增加131 mg·kg<sup>-1</sup>。Zaier等<sup>[22]</sup>研究发现,添加10 mmol·kg<sup>-1</sup>的EDTA时海马齿地上部Pb含量比对照增加2382 mg·kg<sup>-1</sup>,说明添加EDTA可以提高海马齿对土壤中Pb的提取效率,显著促进Pb从根部向地上部转运。添加高浓度EDTA后,植物出现生物量下降、对重金属离子吸收富集能力下降等现象,可能是EDTA浓度过高会抑制植物生长,进而限制植物对Pb、Cd的吸收。这与刘霞等<sup>[23]</sup>的研究结果相似,用EDTA淋洗Pb污染土壤,当EDTA加入量从0.1 mmol·kg<sup>-1</sup>增加到5 mmol·kg<sup>-1</sup>时,Pb去除率增幅较大,而继续增大EDTA加入量时,Pb去除率增幅减小。

在修复Pb、Cd和盐渍化复合污染土壤时,2种盐生植物对3种盐分阴离子的去除率均表现为 $\text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ ,与李成保等<sup>[24]</sup>的研究结果相似,在pH为3.5~8时,砖红壤对3种盐分阴离子的吸附顺序为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ ,与土壤胶体对它们的亲和能力顺序恰好相反,亲和能力越强,越不容易被植物吸收。在相同重金属污染水平下,盐生植物对复合污染土壤中重金属的去除率、对重金属离子的富集和转运能力强于单一重金属污染的土壤,可能与盐分离子的存在有关, $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 可以与Pb、Cd络合,进而增加土壤表面负电荷,如它们与土壤颗粒表面、Cd之间形成三重表面络合物,能够增强Cd的生物有效性<sup>[25-26]</sup>;  $\text{NO}_3^-$ 的存在能增大土壤溶液的电导率,Cd<sup>2+</sup>进入吸附位点后土壤释放H<sup>+</sup>,从而增大Cd在土壤中的游离度,进而增加可交换态Cd含量<sup>[27]</sup>。因此,适量盐分阴离子的存在能够活化土壤中的重金属,增大重金属离子的移动性和生物有效性,进而促进盐生植物吸收重金属<sup>[28-29]</sup>。随着污染程度的增加,翅碱蓬体内叶绿素a、叶绿素b、SOD活性和丙二醛含量均呈现先增加后降低的趋势,说明过度的重金属和盐分阴离子胁迫已经超过翅碱蓬的耐受阈值,植物受到伤害,出现生长缓慢和生物

表6 翅碱蓬和景天三七叶片内叶绿素含量、SOD活性、丙二醛含量变化

Table 6 Variations of chlorophyll, SOD, and malonaldehyde in *Suaeda salsa* and *Sedum aizoon* L.

污染程度	翅碱蓬				景天三七			
	叶绿素 a/mg·g <sup>-1</sup>	叶绿素 b/mg·g <sup>-1</sup>	SOD活性/U·g <sup>-1</sup>	丙二醛/μg·g <sup>-1</sup>	叶绿素 a/mg·g <sup>-1</sup>	叶绿素 b/mg·g <sup>-1</sup>	SOD活性/U·g <sup>-1</sup>	丙二醛/μg·g <sup>-1</sup>
原土	0.42±0.08b	0.24±0.05b	279.24±15.78c	0.28±0.03c	0.19±0.04c	0.09±0.05c	67.53±6.78d	0.57±0.04b
轻度污染	0.57±0.15a	0.35±0.08a	297.62±26.53c	0.28±0.03c	0.23±0.04b	0.11±0.04b	83.74±13.76c	0.49±0.05c
中度污染	0.41±0.05c	0.21±0.04b	428.59±41.88a	0.41±0.05b	0.28±0.05a	0.16±0.04a	102.73±16.72b	0.55±0.07b
重度污染	0.27±0.05d	0.16±0.04c	386.48±26.43b	0.57±0.08a	0.27±0.06a	0.16±0.04a	137.88±19.82a	0.68±0.09a

量下降等问题<sup>[30-31]</sup>。而景天三七的生理生化参数受污染土壤程度的影响较小,比翅碱蓬更适合于修复复合污染土壤。当污染土壤中盐分阴离子含量超过盐生植物的耐受阈值时,过量的盐分会降低植物对重金属的吸收能力<sup>[32]</sup>。总体来说,2种盐生植物适合于修复轻、中度重金属污染的土壤,对重金属污染严重的土壤修复效果较差。因此,今后需要加强盐胁迫程度对盐生植物修复重金属污染土壤的研究。

从本研究来看,景天三七对Pb、Cd具有更强的富集转运能力和更高的去除率,且有较强的吸盐能力,具有修复重金属和盐渍化复合污染土壤的潜力和应用价值。采用EDTA强化景天三七修复实际污染土壤,对Pb、Cd和3种盐分阴离子都取得了较好的去除效果。

#### 4 结论

采用EDTA强化盐生植物修复Pb、Cd与盐渍化复合污染土壤,不仅能有效去除 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 和 $\text{Cl}^-$ ,还可以显著提高翅碱蓬和景天三七对Pb、Cd的去除率,增大植物对2种重金属的富集和转运能力;用EDTA强化景天三七修复实际污染土壤,对Pb、Cd和3种盐分阴离子都有较好的去除效果,可以有效修复Pb、Cd和盐渍化复合污染土壤。

#### 参考文献:

- [1] 张金锦,段增强.设施菜地土壤次生盐渍化的成因、危害及其分类与分级标准的研究进展[J].土壤,2011,43(3):361-366.  
ZHANG Jin-jin, DUAN Zeng-qiang. Preliminary study on classification & grading standards and causes & hazards of secondary salinization of facility vegetable soils[J]. Soils, 2011, 43(3):361-366.
- [2] 文方芳.种植年限对设施大棚土壤次生盐渍化与酸化的影响[J].中国土壤与肥料,2016(4):49-53.  
WEN Fang-fang. Effect of planting years on soil secondary salinity and soil acidification in greenhouse[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2016(4):49-53.
- [3] 史静,张乃明,包立.我国设施农业土壤质量退化特征与调控研究进展[J].中国生态农业学报,2013,21(7):787-794.  
SHI Jing, ZHANG Nai-ming, BAO Li. Research progress on soil degradation and regulation of facility agriculture in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(7):787-794.
- [4] 唐冬,毛亮,支月娥,等.上海市郊设施大棚次生盐渍化土壤盐分含量调查及典型对应分析[J].环境科学,2014,35(12):4705-4711.  
TANG Dong, MAO Liang, ZHI Yue-e, et al. Investigation and canonical correspondence analysis of salinity contents in secondary salinization greenhouse soils in Shanghai suburb[J]. Environmental Science, 2014, 35(12):4705-4711.
- [5] Tian K, Hu W, Xing Z, et al. Determination and evaluation of heavy metals in soils under two different greenhouse vegetable production systems in eastern China[J]. Chemosphere, 2016, 165:555-563.
- [6] 陈佳楠,袁小环,刘艳芬.十四种地被植物的耐盐性评价[J].北方园艺,2015(22):74-78.  
CHEN Jia-nan, YUAN Xiao-huan, LIU Yan-fen. Assessment of salt tolerance of fourteen species of ground cover plant[J]. Northern Horticulture, 2015(22):74-78.
- [7] 侯柯,陈克克,马晓毅,等.园艺植物景天三七对重金属铅的富集作用研究[J].陕西农业科学,2014,60(6):3-5.  
HOU Ke, CHEN Ke-ke, MA Xiao-yi, et al. Study on the enrichment of lead by horticultural plant *Sedum aizoon* L.[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2014, 60(6):3-5.
- [8] 李悦,陈忠林,王杰,等.盐胁迫对翅碱蓬生长和渗透调节物质浓度的影响[J].生态学杂志,2011,30(1):72-76.  
LI Yue, CHEN Zhong-lin, WANG Jie, et al. Effects of salt stress on *Suaeda heteroptera* Kitagawa growth and osmosis-regulating substance concentration[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(1):72-76.
- [9] 朱鸣鹤,丁永生,郑道昌,等.滩涂植物翅碱蓬对Cu、Zn、Pb和Cd累积及其重金属耐性[J].海洋环境科学,2005,24(2):13-16.  
ZHU Ming-he, DING Yong-sheng, ZHENG Dao-chang, et al. Accumulation and tolerance of Cu, Zn, Pb and Cd in plant *Suaeda heteroptera* Kitag in tideland[J]. Marine Environmental Science, 2005, 24(2):13-16.
- [10] 何洁,高钰婷,贺鑫,等.重金属Zn和Cd对翅碱蓬生长及抗氧化酶系统的影响[J].环境科学学报,2013,33(1):312-320.  
HE Jie, GAO Yu-ting, HE Xin, et al. The effect of Zn and Cd on growth and antioxidant enzymes activity of *Suaeda heteroptera* Kitagawa[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(1):312-320.
- [11] Mariem W, Kilani B R, Benet G, et al. How does NaCl improve tolerance to cadmium in the halophyte *Sesuvium portulacastrum*?[J]. Chemosphere, 2014, 117(1):243-250.
- [12] Wang H L, Tian C Y, Jiang L, et al. Remediation of heavy metals contaminated saline soils: A halophyte choice?[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(1):21-22.
- [13] Babaeian E, Homae M, Rahnamaie R. Chelate-enhanced phytoextraction and phytostabilization of lead-contaminated soils by carrot (*Daucus carota*) [J]. Archives of Agronomy & Soil Science, 2016, 62(3):339-358.
- [14] 胡亚虎,魏树和,周启星,等.螯合剂在重金属污染土壤植物修复中的应用研究进展[J].农业环境科学学报,2010,29(11):2055-2063.  
HU Ya-hu, WEI Shu-he, ZHOU Qi-xing, et al. Application of chelator in phytoremediation of heavy metals contaminated soils: A review [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(11):2055-2063.
- [15] 曾清如,廖柏寒,杨仁斌,等.EDTA溶液萃取污染土壤中的重金属及其回收技术[J].中国环境科学,2003,23(6):597-601.  
ZENG Qing-ru, LIAO Bo-han, YANG Ren-bin, et al. Extraction of heavy metals in contaminated soils with EDTA solution and their recovery technique[J]. China Environmental Science, 2003, 23(6):597-601.
- [16] Yan L, Li C, Zhang J, et al. Enhanced phytoextraction of lead from ar-

- tificially contaminated soil by *Mirabilis jalapa* with chelating agents [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2017, 99(2):208-212.
- [17] 陈柯罕, 张科, 李取生, 等. 四种盐生植物对Cd、Pb复合污染提取修复效果比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(3):458-465. CHEN Ke-han, ZHANG Ke, LI Qu-sheng, et al. Remediation effects of four halophytes on Cd and Pb compound pollution[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(3):458-465.
- [18] Bucheli-Witschel M, Egli T. Environmental fate and microbial degradation of aminopolycarboxylic acids[J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2001, 25(1):69-106.
- [19] 卫泽斌, 陈晓红, 吴启堂, 等. 可生物降解螯合剂GLDA诱导东南景天修复重金属污染土壤的研究[J]. 环境科学, 2015, 36(5):1864-1869. WEI Ze-bin, CHEN Xiao-hong, WU Qi-tang, et al. Enhanced phyto-extraction of heavy metals from contaminated soils using *Sedum alfredii* Hance with biodegradable chelate GLDA[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(5):1864-1869.
- [20] 王亚琴. EDTA和NTA对苧麻吸收重金属的影响机制研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014. WANG Ya-qin. The mechanism of EDTA and NTA on the accumulation and translocation of cadmium in ramie[D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [21] Bareen F E, Tahira S A. Metal accumulation potential of wild plants in tannery effluent contaminated soil of Kasur, Pakistan: Field trials for toxic metal cleanup using *Suaeda frutescens*[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 186(1):443-450.
- [22] Zaier H, Ghnaya T, Ghabriche R, et al. EDTA-enhanced phytoremediation of lead-contaminated soil by the halophyte *Sesuvium portulacastrum*[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(12):7607-7615.
- [23] 刘霞, 王建涛, 张萌, 等. 螯合剂和生物表面活性剂对Cu、Pb污染壤土的淋洗修复[J]. 环境科学, 2013, 34(4):1590-1597. LIU Xia, WANG Jian-tao, ZHANG Meng, et al. Remediation of Cu-Pb-contaminated loess soil by leaching with chelating agent and bio-surfactant[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(4):1590-1597.
- [24] 李成保, 季国亮. 恒电荷土壤和可变电荷土壤动电性质的研究 II. 阴离子吸附和pH的影响[J]. 土壤学报, 2000, 37(1):62-68. LI Cheng-bao, Ji Guo-liang. Study on electrokinetic properties of constant charge soils and variable charge soils II. Effect of anion adsorption and pH[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(1):62-68.
- [25] Collins C R, Ragnarsdottir K V, Sherman D M. Effect of inorganic and organic ligands on the mechanism of cadmium sorption to goethite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(19):2989-3002.
- [26] Zhang G Y, Peak D. Studies of Cd(II) sulfate interactions at the goethite-water interface by ATR-FTIR spectroscopy[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(9):2158-2169.
- [27] 徐明岗, 李菊梅, 李志杰. 利用耐盐植物改善盐土区农业环境[J]. 中国土壤与肥料, 2006(3):6-10. XU Ming-gang, LI Ju-mei, LI Zhi-jie. Salt-tolerance plants used for improving agricultural environments in saline soil regions[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2006(3):6-10.
- [28] Acosta J A, Jansen B, Kalbitz K, et al. Salinity increases mobility of heavy metals in soils[J]. *Chemosphere*, 2011, 85(8):1318-1324.
- [29] Manousaki E, Kadukova J, Papadantonakis N, et al. Phytoextraction and phytoexcretion of Cd by the leaves of *Tamarix smyrnensis*, growing on contaminated non-saline and saline soils[J]. *Environmental Research*, 2008, 106(3):326-332.
- [30] Feng J, Lin Y, Yang Y, et al. Tolerance and bioaccumulation of Cd and Cu in *Sesuvium portulacastrum*[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 147:306-312.
- [31] 王凤永, 郭朝晖, 苗旭峰, 等. 东方香蒲(*Typha orientalis* Presl)对重度污染土壤中As、Cd、Pb的耐性与累积特征[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(10):1966-1971. WANG Feng-yong, GUO Zhao-hui, MIAO Xu-feng, et al. Tolerance and accumulation characteristics of *Typha orientalis* Presl for As, Cd and Pb in heavily contaminated soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(10):1966-1971.
- [32] Mei X, Li S, Li Q, et al. Sodium chloride salinity reduces Cd uptake by edible amaranth (*Amaranthus mangostanus* L.) via competition for Ca channels[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, 105:59-64.