

# 青葙修复镉污染土壤的田间试验研究

傅校锋<sup>1</sup>, 刘杰<sup>1,2</sup>, 朱文杰<sup>1</sup>, 吕黛琳<sup>1</sup>, 江文晔<sup>1</sup>

(1. 桂林理工大学环境污染控制理论与技术广西重点实验室, 广西 桂林 541004;

2. 桂林理工大学岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 为探索氯化铵与柠檬酸和青葙(*Celosia argentea* L.)联合修复重金属 Cd 污染土壤的方法,通过田间试验,研究了氯化铵与柠檬酸对青葙生长和吸收富集 Cd 的影响、根际土与非根际土之间的差异,以及对土壤 Cd 含量和形态的影响。结果表明,种植青葙并施加氯化铵(C+AC)处理能显著促进青葙地上部干重的提高,比只种植青葙(C)处理增产 53.03%;种植青葙并施加柠檬酸(C+CA)处理能提高青葙对 Cd 的吸收富集能力,地上部 Cd 含量比 C 处理提高 16.64%;而 C+AC 处理对青葙地上部 Cd 积累量的促进效果最佳,比 C 处理提高 69.49%;青葙的种植均显著降低根际土 Cd 的酸溶态含量,C、C+AC 和 C+CA 处理的降低幅度分别为 10.31%,15.00%和 12.67%,显著大于非根际土;C+CA 处理的土壤 Cd 含量降率最大,为 5.33%,而不种植青葙,不施加药剂(CK)处理为 1.43%,只有 C+CA 处理的 26.83%。因此,青葙植物提取对 Cd 的降低仍起关键作用,且施加柠檬酸对表层土壤 Cd 的修复性能最好。

**关键词:** 青葙; Cd; 氯化铵; 柠檬酸; 田间试验

**中图分类号:** X53; X173

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2019)04-0329-06

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.04.046

## Field Experiment on Remediation of Cadmium Contaminated Soil by *Celosia argentea* L.

FU Xiaofeng<sup>1</sup>, LIU Jie<sup>1,2</sup>, ZHU Wenjie<sup>1</sup>, LÜ Dailin<sup>1</sup>, JIANG Wenye<sup>1</sup>

(1. Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology,

Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004; 2. Guangxi Collaborative Innovation Center for

Water Pollution Control and Water Safety in Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004)

**Abstract:** In order to explore the remediation method of heavy metal cadmium (Cd) contaminated soil by combining ammonium chloride with citric acid and *Celosia argentea* L., the effects of ammonium chloride and citric acid on the growth and absorption and enrichment of Cd of *C. argentea* L., the difference between rhizosphere soil and non-rhizosphere soil, and the effects of ammonium chloride and citric acid on soil Cd content and morphology were studied through field experiment. The results indicated that planting *C. argentea* L. and applying ammonium chloride treatment (C+AC) could significantly improve the dry weight of above-ground parts of *C. argentea* L., which increased the yield by 53.03% compared with only planting *C. argentea* L. (C) treatment. C+CA treatment could improve the ability of Cd absorption and enrichment of *C. argentea* L., and the Cd content in the above ground parts was 16.64% higher than that of C treatment. The C+AC treatment had the best effect on the accumulation of Cd in the above ground parts of *C. argentea* L., which was 69.49% higher than that of C treatment. The cultivation of *C. argentea* L. had significantly reduced the acid-soluble content of Cd in the rhizosphere soil, and the reductions of acid-soluble content of Cd in C, C+AC and C+CA treatments were 10.31%, 15.00% and 12.67%, respectively, which were significantly greater than that in non-rhizosphere soil. The soil Cd reduction rate of C+CA treatment was the highest, which was 5.33%, while that of the CK (without planting *C. argentea* L. or applying chemicals) was 1.43%, which was only 26.83% of the C+CA treatment. Therefore, the extraction of *C. argentea* L. still played a key role in Cd reduction, and

收稿日期: 2018-12-31

资助项目: 广西科技重大专项(桂科 AA17204047)

第一作者: 傅校锋(1994—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事受损土壤环境的生态修复研究。E-mail: 409981523@qq.com

通信作者: 刘杰(1978—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事受损环境的生态修复研究。E-mail: liujie@glut.edu.cn

the best remediation performance of citric acid on surface soil Cd pollution.

**Keywords:** *Celosia argentea* L.; cadmium; ammonium chloride; citric acid; field trial

根据中国环境保护部和国土资源部 2014 联合发布的《全国土壤污染状况调查公报》<sup>[1]</sup>显示, Cd 的点位超标率为 7.0%, 是所有无机污染物中最高的, 并且 Cd 是环境中生物毒性和迁移性最强的元素之一<sup>[2]</sup>, 极易被作物吸收并通过食物链在人体内积累, 致使人体健康受到威胁<sup>[3]</sup>。因此, 治理土壤 Cd 污染迫在眉睫。而植物修复 (phytoremediation) 技术因同时具备治理效果的永久性、治理过程的原位性、治理成本的低廉性、后期处理的简易性、环境美学的兼容性等多项优点<sup>[4-6]</sup>, 是一项有广阔应用前景的新兴土壤污染修复技术<sup>[7]</sup>。

目前国内研究土壤重金属污染治理的植物修复技术大多以盆栽试验和水培试验为主, 它们主要显示了植物富集重金属的能力和趋势, 并不能真实地反映出植物修复的实际效果。如姚诗音等<sup>[8]</sup>通过盆栽试验, 研究了青葙在不同浓度下对土壤 Cd 的富集特征, 表明当外源投加 Cd 含量为 1 mg/kg 时, 青葙叶片中 Cd 含量大于 100 mg/kg; 魏树和等<sup>[9]</sup>研究表明, 在 Cd 投加含量为 25 mg/kg 条件下, 龙葵茎和叶中 Cd 含量分别为 103.8, 124.6 mg/kg。但多数超富集植物往往生物量较小, 体内污染物含量较低, 造成植物修复的效率较低, 修复年限过长, 限制植物修复技术的发展。而施肥和施加小分子有机酸能提高植物修复污染土壤的效率。Fayiga 等<sup>[10]</sup>研究表明, 施肥是提高超富集植物修复污染土壤效率的重要辅助措施。氮是植物生长必需的营养元素之一, 施用氮肥显著提高植物修复镉污染土壤的效率<sup>[11-13]</sup>。汪洁等<sup>[14]</sup>研究表明, 氮肥形态对伴矿景天生物量的影响显著大于对植物地上部 Zn、Cd 含量的影响, 施用铵态氮肥的伴矿景天 Cd 总吸收量增加率为 123%。氯化铵是一种生理酸性铵态氮肥, 能够增加植物的生物量, 而不减少植物体内的 Cd 含量, 进而提高植物对 Cd 的富集。林昕<sup>[15]</sup>研究表明, 施加氯化铵后油菜的生物量比对照增长约 1.5 倍, 且体内 Cd 含量没有下降。柠檬酸是一种天然螯合剂, 能改变重金属 Cd 的形态并促进其释放, 进而提高植物吸收和积累土壤中的 Cd。大量研究<sup>[16-17]</sup>表明, 柠檬酸能有效提高 Cd 污染土壤的植物修复效率。贾倩闻等<sup>[18]</sup>研究表明, 施加柠檬酸使海州香薷地上部 Cd 平均含量比对照增加 1.50 倍。Ehsan 等<sup>[19]</sup>研究表明, 施加外源柠檬酸不仅可以增加植物对 Cd 的吸收, 还能缓解 Cd 对植物的胁迫, 并有利于促进超富集植物欧洲油菜对 Cd 的提取。本课题组前期研究发现, 当柠檬酸的施加量为 5 mmol/kg 时对提高青

葙各部分 Cd 含量的促进效果最佳<sup>[20]</sup>。因此, 作者采用田间试验的方法, 以青葙为对象, 研究氯化铵和柠檬酸对青葙修复 Cd 污染土壤的强化作用, 以期寻找出有效治理土壤重金属 Cd 污染的途径, 为植物修复技术的实际应用提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

供试植物为青葙 (*Celosia argentea* L.), 种子采集于广西桂林市上等元村。供试试剂为氯化铵、柠檬酸, 均为分析纯。

### 1.2 田间试验设计

研究区位于广西壮族自治区东北面, 桂林市南面, 隶属桂林市管辖, 县城距离桂林市区 65 km, 地处东经 110°13'—110°40', 北纬 24°38'—25°04'。由于区域上游铅锌矿开采导致下游农田被 Cd 污染<sup>[21]</sup>。土壤 pH 为 6.48 (水土比 2.5 : 1), 有机质含量 0.7%, 铵态氮、速效磷、速效钾含量分别为 15.2, 51.4, 225.8 mg/kg, 镉含量为 3.37 mg/kg。2018 年 5—8 月, 进行田间小区试验。2018 年 5 月 21 日, 播种青葙, 采用条播方式, 由于青葙种子很小, 播种时采用种子和沙子 1 : 1 混匀后再播, 行距 30 cm, 按行距拉线踩印, 开沟播种, 播种时应尽量保证播种均匀, 深浅一致, 覆土 0.5~1 cm。青葙定苗后约 15 天, 适当间苗。生长过程中, 适时除草, 生长周期为 3 个月, 于 2018 年 8 月 21 日收获植物。

试验共设置 4 个处理, 分别为: (1) CK 处理, 不种植青葙, 不施加任何药剂; (2) C 处理, 种植青葙, 不施加任何药剂; (3) C+AC 处理, 种植青葙并施加铵态氮肥氯化铵, 浓度为 200 mg/kg; (4) C+CA 处理, 种植青葙并施加小分子有机酸柠檬酸, 浓度为 5 mmol/kg。每个处理重复 3 次, 共 12 个小区, 每个小区面积为 2 m×4 m。氯化铵和柠檬酸的施加时间为植株收获前 1 个月, 将药剂均匀撒在土壤表面。

### 1.3 样品处理与分析

(1) 植物样品。植物成熟后对其进行采样 (每块小区采集 1 m<sup>2</sup> 植物样), 收获的植物分成根、茎、叶三部分。根部先用 5 mmol/L Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 溶液浸泡 15 min, 交换掉表面吸附的重金属镉离子<sup>[22]</sup>, 然后超声波清洗仪清洗 10 min, 再用去离子水冲洗干净。茎和叶先用自来水冲洗掉表面的尘土, 再用去离子水冲洗干净。洗净的植物样品在 105 °C 下杀青 30 min,

70 °C下烘干至恒重(48 h)。烘干后的样品用电子称称量生物量(以干重计),粉碎,过5 mm筛,供分析测定用。青苜地上部生物产量计算方法:在每个小区中随机采集1 m<sup>2</sup>地上部样品,现场称重即为1 m<sup>2</sup>的地上部鲜重,洗净烘干后称重即为1 m<sup>2</sup>的地上部干重。称取粉碎的样品(约0.5 g)用HNO<sub>3</sub>+HClO<sub>4</sub>(9:1)湿法消解,采用电感耦合等离子体发射光谱仪(PerkinElmer Optima 7000 DV)测定样品Cd含量。分析过程中所用试剂均为优级纯,采用国家标准参比物质(GBW 07602(GSV-1))和平行空白样进行植物样品消解及质量控制,样品回收率控制在95%~105%。

(2)土壤样品。植物收获时,抖落松散黏附在根系表面1~4 mm范围内的土壤作为根际土<sup>[23]</sup>,收获完所有植物后,五点取样法采取12个小区0~20 cm的土壤作为非根际土,置阴凉处自然风干,压碎后过100目筛,备用。土壤样品重金属全量采用EPA推荐的HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>法<sup>[24]</sup>消煮,土壤重金属全形态测定采用改进的BCR连续浸提法,它将土壤中的重金属分为酸溶态(AE)、可还原态(Red)、可氧化态(Oxi)和残渣态(Res)4个形态<sup>[25]</sup>。

所有待测样品重金属Cd含量均采用电感耦合等离子体光谱仪(PerkinElmer NexION 305X)进行测定,分析过程中所用试剂均为优级纯,采用国家标准土壤样品(GBW 07404(GSS-4))和平行空白样进行土壤样品消解及质量控制,样品回收率为90%~110%。

#### 1.4 数据处理与分析

统计分析采用SPSS 19.0软件中的单因素方差(ANOVA),并采用最小显著差数法(LSD)进行显著性检验( $p < 0.05$ ),用Origin 9.1软件作图。镉的富集系数(BCF)、转运系数(TF)和植物含水率的计算公式分别为:

富集系数(BCF) = 植物叶镉含量(mg/kg)/土壤镉含量(mg/kg)

转运系数(TF) = 植物叶镉含量(mg/kg)/植物根镉含量(mg/kg)

植物含水率(%) = (1 - 干重/鲜重) × 100%

## 2 结果与分析

### 2.1 青苜种植前后土壤pH的对比

从图1可以看出,种植青苜后所有处理根际土pH均下降,且C处理的根际土pH低于中性土的下限值(pH=6.5),说明青苜的根际环境为酸性。C+CA处理非根际土pH与种植前土壤pH略有降低,可能由于施加柠檬酸降低了土壤pH。

### 2.2 不同处理对青苜地上部生物产量的影响

青苜地上部生物产量计算方法:在小区中随机采

集1 m<sup>2</sup>地上部样品,现场称重即为1 m<sup>2</sup>的地上部鲜重,洗净烘干后称重即为1 m<sup>2</sup>的地上部干重。C处理青苜地上部鲜重为42.67 t/hm<sup>2</sup>,干重为2.80 t/hm<sup>2</sup>,含水率为93%。植物修复技术中,重金属的降低率除了与植物地上部重金属含量有关,还与植物的地上部生物量有关,生物量越大,则重金属的降低率越大。从图2可以看出,施加氯化铵显著促进青苜生长。施加氯化铵的青苜生长旺盛,植株高大,分枝较多,叶色浓绿,长势明显优于C处理。C+AC处理的地上部干重显著高于C处理,比C处理提高53.03%。而施加柠檬酸的青苜叶片泛黄,有部分叶片枯萎脱落。施加柠檬酸对青苜地上部生物量有略微的降低,但差异不显著,可能由于柠檬酸的施加对青苜有一定程度的生理毒害,正如沈斌等<sup>[26]</sup>研究表明,低浓度柠檬酸对鱼腥草没有产生明显的生理毒性,但高浓度柠檬酸的施加对鱼腥草有明显的生理毒性,导致鱼腥草生物量降低。综上,施加氯化铵可以显著增加青苜地上部生物量,从而提高青苜对Cd污染土壤的修复效率。

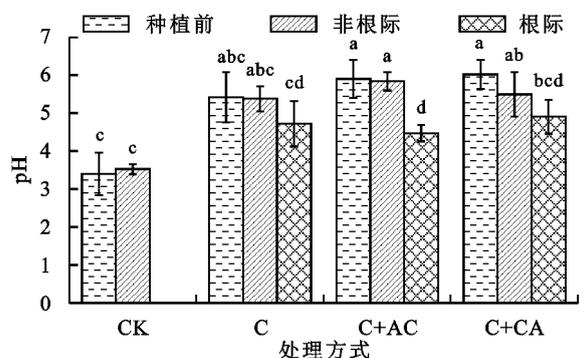


图1 青苜种植前后土壤pH的对比

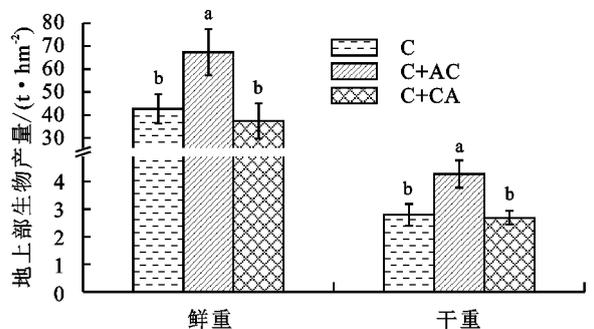


图2 不同处理对青苜地上部生物产量的影响

### 2.3 不同处理对青苜各部分Cd含量的影响

由图3可知,向土壤中施加小分子有机酸能提高超富集植物地上部重金属的含量。C+CA处理的青苜地上部和根Cd含量显著高于C处理,比C处理增加16.64%和19.24%,这可能由于柠檬酸能提高土壤中Cd的生物有效性,促进青苜对Cd的吸收富集。C+AC处理青苜地上部和根Cd含量与C处理没有

显著差异,可能由于  $\text{NH}_4^+$  将土壤上吸附的  $\text{Cd}^{2+}$  释放出来的这种交换作用较小,对青箱各部分 Cd 含量提高没有显著作用。

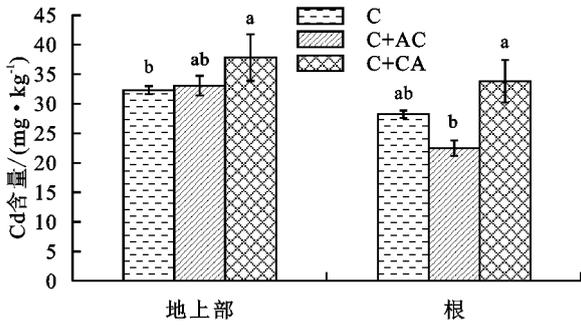


图 3 不同处理对青箱各部分 Cd 含量的影响

## 2.4 不同处理对青箱富集转运系数的影响

富集系数被用来反映土壤—植物体系中元素迁移的难易程度,是植物将重金属吸收转移到体内能力大小的评价指标<sup>[27]</sup>。从图 4 可以看出,柠檬酸的施加提高青箱地上部的富集系数,说明柠檬酸的施加有利于青箱地上部对 Cd 的富集吸收。

转运系数用来评价植物将重金属从根部向地上部运输和富集的能力<sup>[27]</sup>。C+AC 处理青箱的转运系数显著高于 C 处理。由此可见,C+AC 处理在提高青箱地上部生物产量的同时,促进青箱根吸收的 Cd 向地上部转运,与于志国<sup>[28]</sup>的研究结果一致,即氯化铵的施加提高紫茉莉的转移系数。

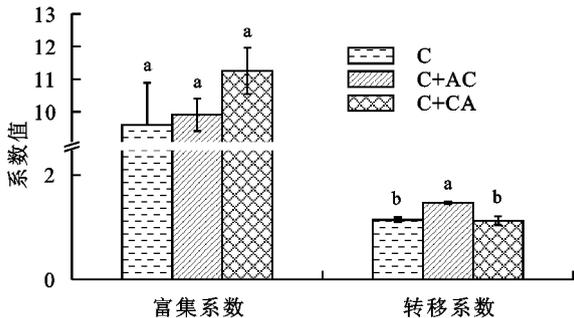


图 4 不同处理对青箱富集转运系数的影响

## 2.5 不同处理对青箱地上部 Cd 积累量的影响

植物修复收获的是植物地上部,青箱地上部 Cd 积累量表征了青箱的修复潜力。地上部 Cd 积累量 = 叶生物量 × 叶 Cd 含量 + 茎生物量 × 茎 Cd 含量。从图 5 可以看出,施加氯化铵和柠檬酸对青箱地上部 Cd 积累量的顺序依次为: C+AC 处理 > C+CA 处理 > C 处理。C+AC 处理和 C+CA 处理比 C 处理分别提高 69.49% 和 20.99%。因为施加氯化铵显著提高青箱地上部产量,施加柠檬酸提高青箱地上部 Cd 含量,均提高青箱地上部 Cd 积累量。

## 2.6 不同处理对土壤 Cd 形态的影响

BCR 连续提取法中的酸溶态包括水溶态、可交

换态和碳酸盐结合态,是最易被植物吸收的形态<sup>[29]</sup>,因此在一定程度上代表重金属的生物可给性<sup>[30]</sup>。

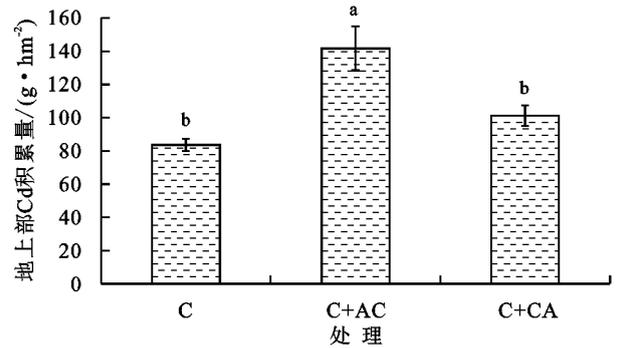
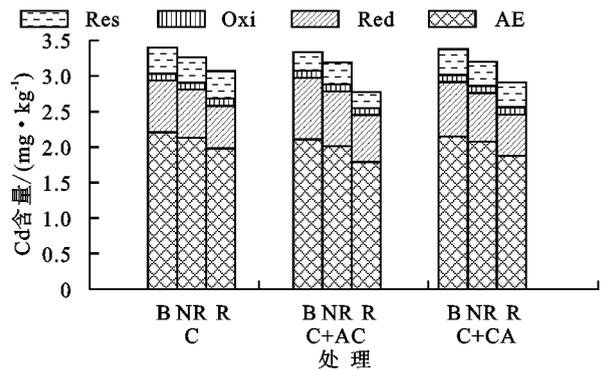


图 5 不同处理对青箱地上部 Cd 积累量的影响

从图 6 可以看出,土壤中 Cd 的赋存形态主要为酸溶态和可还原态。青箱种植后 3 个处理的根际和非根际土酸溶态含量均发生明显的降低,C、C+AC 和 C+CA 处理的根际土分别比种植前降低 10.31%,15.00% 和 12.67%,非根际土分别比种植前降低 3.40%,4.59% 和 3.57%,根际土的酸溶态显著低于非根际土,可能由于青箱的种植,根际土酸溶态 Cd 能被青箱根部直接吸收,而非根际的降低可能由于补充根际土酸溶态 Cd,致使种植后非根际土酸溶态 Cd 含量也低于青箱种植前。C+AC 处理的根际土酸溶态降低量大于 C 处理,这可能是由于 C+AC 处理的青箱地上部 Cd 积累量大于 C 处理,C+AC 处理的青箱吸收了更多的酸溶态 Cd。



注: B 为修复前; NR 为非根际; R 为根际。

图 6 不同处理对土壤 Cd 形态的影响

## 2.7 青箱种植前后土壤 Cd 含量的对比

从表 1 可以看出,C+CA 处理的土壤 Cd 含量降低率最大,为 5.33%,而 CK 处理土壤 Cd 含量降低率为 1.43%,分别占 C、C+AC 和 C+CA 处理土壤 Cd 含量降低率的 36.54%,32.38% 和 26.83%,因此青箱植物提取对 Cd 的降低仍然起重要作用,这与周建利等<sup>[31]</sup>的研究结果一致。

由图 1 可知,修复后非根际土壤 pH 均为 6.5~7.0。根据 2018 版《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》<sup>[32]</sup>,土壤 Cd 含量超过农用地土壤污染风

险管制值 3.0 mg/kg。因此,该修复地块仍应禁止种植食用农产品,继续进行植物修复。

表1 青苜种植前后土壤 Cd 含量的对比

处理	植株收获前	植株收获后	土壤 Cd 降低率/%
	土壤 Cd 含量/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	土壤 Cd 含量/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	
CK	3.27±0.34	3.23±0.34	1.43±0b
C	3.40±0.42	3.27±0.40	3.91±0.01a
C+AC	3.34±0.06	3.19±0.11	4.41±0.01a
C+CA	3.38±0.51	3.20±0.51	5.33±0.01a

### 3 讨论

C+AC 处理显著促进青苜地上部干重的提高,比 C 处理增产 53.03%,这是由于氮是植物生长必需的营养元素之一,施加氯化铵能有效增加青苜地上部生物量。C+AC 处理对青苜地上部 Cd 的富集能力没有下降,并没有出现因生物量增加而产生的“稀释效应”,这可能是由于:一方面 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 可以将土壤中吸附的 Cd<sup>2+</sup> 释放出来,促进 Cd 的有效态含量的增加<sup>[28]</sup>;另一方面铵态氮肥的酸化作用本身也可以提高土壤中 Cd 的活性,进而增加青苜地上部 Cd 的积累量,提高青苜对 Cd 污染土壤的修复效率。C+CA 处理对青苜地上部 Cd 含量的促进效果最好,提高幅度为 14.29%,但没有显著差异,这可能由于:一方面柠檬酸通过与土壤中的 Cd 形成络合物影响土壤中 Cd 的溶解度和移动性,从而提高 Cd 的生物有效性;另一方面由于柠檬酸添加的时间晚,对青苜地上部 Cd 含量的促进作用不明显,正如曹志远等<sup>[33]</sup>研究表明,整合剂在土壤中存留时间长有助于提高植物对重金属的富集能力。

植物修复收获的是植物地上部,青苜地上部 Cd 积累量表征青苜的修复潜力。各处理地上部 Cd 积累量顺序依次为:C+AC 处理>C+CA 处理>C 处理,C+AC 处理增加了青苜地上部产量,C+CA 处理提高了青苜地上部 Cd 含量,但 C+CA 处理对青苜修复潜力的提高最大。综上,可以通过施加氯化铵提高青苜对 Cd 污染土壤的修复潜力。

有研究<sup>[34]</sup>证明,重金属在土壤中的向下迁移与其类型有关,As、Cu、Pb 向下迁移的趋势不明显,这可能主要与其迁移能力较差有关。但 Cd 的生物可利用性浓度较高,向下层迁移的趋势相对较强<sup>[35]</sup>。殷永超等<sup>[35]</sup>研究表明,张士污灌区土壤中 Cd 存在明显的向亚表层的迁移。C+CA 处理土壤 Cd 降低率最大,为 5.33%,大于 C+AC 处理,可能由于 C+CA 处理的土壤中外源施加柠檬酸,与土壤固相结合在一

起的重金属 Cd 与柠檬酸结合成金属络合物进入到土壤溶液中<sup>[36-37]</sup>,降雨等产生的淋溶作用导致土壤中的 Cd 往土壤亚表层或地势更低的土壤中迁移。

本试验种植一茬青苜,通过施加铵态氮肥和小分子有机酸提高植物生物量和体内 Cd 含量,从而提高青苜的修复效率,意图通过采用合理的植物修复技术修复中低浓度 Cd 污染土壤,为植物修复实施的可行性、适宜性及效率评价提供科学依据。

### 4 结论

(1)种植青苜并施加氯化铵处理能显著促进青苜地上部生物量的提高,比只种植青苜处理增产 53.03%;种植青苜并施加柠檬酸处理增加青苜体内 Cd 含量,比只种植青苜处理提高 16.64%。

(2)种植青苜并施加氯化铵处理青苜地上部 Cd 积累量显著高于只种植青苜处理,增加幅度为 69.49%。

(3)青苜种植一茬,种植青苜并施加柠檬酸处理的土壤 Cd 降低率最大,为 5.33%。因此,施加柠檬酸对表层土壤 Cd 的修复性能最佳,可以通过种植青苜并施加柠檬酸降低表层土壤 Cd。

#### 参考文献:

- [1] 环境保护部,国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[R].北京:环境保护部,国土资源部,2014.
- [2] 包姣,韦惠琴,赵秀兰.低分子量有机酸强化烟草修复镉污染土壤的适用性研究[J].水土保持学报,2012,26(2):265-270.
- [3] 李江遐,张军,马友华,等.不同水稻品种对镉的吸收转运及其非蛋白巯基含量的变化[J].生态环境学报,2017,26(12):2140-2145.
- [4] Meers S E, Qadir M, Caritat P, et al. EDTA-assisted Pb phytoextraction [J]. Chemosphere, 2009, 74 (10): 1279-1291.
- [5] Hazrat A, Ezzat K, Muhammad A S. Phytoremediation of heavy metals concepts and applications [J]. Chemosphere, 2013, 91(7):869-881.
- [6] 魏树和,周启星.重金属污染土壤植物修复基本原理及强化措施探讨[J].生态学杂志,2004,23(1):65-72.
- [7] 梁俊.东南景天镉解毒相关代谢过程及关键基因克隆[D].杭州:浙江大学,2017.
- [8] 姚诗音,刘杰,王怡璇,等.青苜对镉的超富集特征及累积动态研究[J].农业环境科学学报,2017,36(8):1470-1476.
- [9] 魏树和,周启星,王新,等.一种新发现的镉超积累植物龙葵(*Solanum nigrum* L.)[J].科学通报,2004,49(24):2568-2573.
- [10] Fayiga A O, Ma L Q, Rathinasabapathi B. Effects of nutrients on arsenic accumulation by arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L.[J]. Environmental and Ex-

- perimental Botany, 2008, 62: 231-237.
- [11] 王林, 周启星, 孙约兵. 氮肥和钾肥强化龙葵修复镉污染土壤[J]. 中国环境科学, 2008, 28(10): 915-920.
- [12] Kuldeep B, Rana P S. Effects of organic and inorganic amendments on bio-accumulation and partitioning of Cd in *Brassica juncea* and *Ricinus communis*[J]. Ecological Engineering, 2015, 74(1): 93-100.
- [13] Liu W X, Zhang C J, Hu P J, et al. Influence of nitrogen form on the phytoextraction of cadmium by a newly discovered hyperaccumulator *Carpobrotus rossii*[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(2): 1246-1253.
- [14] 汪洁, 沈丽波, 李柱, 等. 氮肥形态对伴矿景天生长和镉吸收性的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11): 2118-2124.
- [15] 林昕. 利用油菜对镉、铅污染农田土壤植物修复研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2010.
- [16] Vigliotta G, Matrella S, Ciatelli A, et al. Effects of heavy metals and chelants on phytoremediation capacity and on rhizobacterial communities of maize[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 179: 93-102.
- [17] Han Y L, Zhang L L, Gu J G, et al. Citric acid and EDTA on the growth, photosynthetic properties and heavy metal accumulation of *Iris halophila* Pall. cultivated in Pb mine tailings[J]. International Biodeterioration and Biodegradation, 2016, 128: 15-21.
- [18] 贾倩闻, 雄治廷. 外源柠檬酸和乳酸对海州香薷吸收和转运镉的影响[J]. 武汉大学学报(理学版), 2017, 63(1): 81-85.
- [19] Ehsan S, Ali S, Noureen S, et al. Citric acid assisted phytoremediation of cadmium by *Brassica napus* L. [J]. Ecotoxicology Environmental Safety, 2014, 106: 164-172.
- [20] 姚诗音. 超富集植物青葙对土壤镉的修复性能及强化措施研究[D]. 广西 桂林: 桂林理工大学, 2017.
- [21] 张云霞, 宋波, 杨子杰, 等. 广西某铅锌矿影响区农田土壤重金属污染特征及修复策略[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(2): 239-249.
- [22] 吴秉奇, 刘淑杰, 张森, 等. 接种耐镉细菌对青葙吸收积累土壤中镉的影响[J]. 生态学杂志, 2014, 33(12): 3409-3415.
- [23] 苏宝玲, 韩士杰, 王建国. 根际微域研究中土样采集方法的研究进展[J]. 应用生态学报, 2000, 11(3): 477-480.
- [24] USEPA. Risk-based concentration table[R]. Washington DC: USEPA, 2000: 165.
- [25] Rauret G, Lopez-Sanchez J F, Sahuquillo A, et al. Improvement of the BCR three step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials[J]. Journal of Environmental Monitoring Jem, 1999, 1(1): 59.
- [26] 沈斌, 伍钧, 孟晓霞, 等. 柠檬酸对鱼腥草吸收累积铅锌矿区土壤中重金属的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 320-324.
- [27] 聂发辉. 关于超富集植物的新理解[J]. 生态环境, 2005, 14(1): 136-138.
- [28] 于志国. 紫茉莉富集土壤中镉的机理及强化修复技术研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2008.
- [29] 陈英旭. 土壤重金属的植物污染化学[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [30] 景琪, 李晔, 张譔, 等. 螯合剂和商陆联合修复重金属 Cd、Cu 污染土壤的田间试验[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(4): 139-143.
- [31] 周建利, 邵乐, 朱凤榕, 等. 间套种及化学强化修复重金属污染酸性土壤: 长期田间试验[J]. 土壤学报, 2014, 51(1): 1056-1065.
- [32] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. GB 15618—2018 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准[S]. 北京: 生态环境部, 2018.
- [33] 曹志远, 王开爽, 谢修鸿, 等. 螯合剂不同施用方式下花卉植物修复铅污染土壤的效果[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5): 287-290.
- [34] 杨军, 郑袁明, 陈同斌. 中水灌溉下重金属在土壤中的垂直迁移及其对地下水的污染风险[J]. 地理研究, 2006, 25(3): 449-455.
- [35] 殷永超, 吉普辉, 宋雪英, 等. 龙葵(*Solanum nigrum* L.) 野外场地规模 Cd 污染土壤修复试验[J]. 生态学杂志, 2014, 33(11): 3060-3067.
- [36] Jalali M, Khanlari Z V. Redistribution of fractions of zinc, cadmium, nickel, copper, and lead in contaminated calcareous soils treated with EDTA[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2007, 53: 519-532.
- [37] Sarkar D, Andra S S, Saminathan S K M, et al. Chelant-aided enhancement of lead mobilization in residential soils[J]. Environmental Pollution, 2008, 156: 1139-1148.