

硒与丛枝菌根真菌对镉胁迫下人参菜生长及品质的影响

仰路希, 谢永东, 贺忠群, 严文一

引用本文:

仰路希, 谢永东, 贺忠群, 等. 硒与丛枝菌根真菌对镉胁迫下人参菜生长及品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 982-988.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1309>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

外源硒对镉胁迫下菜心Fe、Mn、Cu、Zn吸收与转运的影响

刘帅, 吴志超, 赵亚荣, 张卫杰, 王富华

农业环境科学学报. 2018, 37(3): 431-439 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1046>

施硒对花生镉吸收与抗性及化学形态的影响

卞威乐斯, 闫家普, 崔良, 张磊

农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1094-1101 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1436>

两种AMF对巨菌草根际土壤Cd生物可利用性以及Cd积累的影响

姬朋朋, 尹光彩, 陈志良, 周兵, 林亲铁, 刘千钧, 刘德玲

农业环境科学学报. 2016, 35(12): 2306-2313 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0878>

丛枝菌根真菌对旱稻生长、Cd吸收累积和土壤酶活性的影响

罗方舟, 向垒, 李慧, 张丽君, 冯乃宪, 李彦文, 赵海明, 蔡全英, 莫测辉

农业环境科学学报. 2015(6): 1090-1095 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.06.011>

黑麦草与丛枝菌根对大田番茄抗性Cd吸收的影响

秦余丽, 江玲, 徐卫红, 李桃, 张春来, 李彦华, 王卫中, 迟荪琳, 陈序根, 陈永勤, 赵婉伊, 张进忠, 熊治廷

农业环境科学学报. 2017, 36(6): 1053-1061 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1515>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

仰路希, 谢永东, 贺忠群, 等. 硒与丛枝菌根真菌对镉胁迫下人参菜生长及品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 982–988.

YANG Lu-xi, XIE Yong-dong, HE Zhong-qun, et al. Effects of selenium and arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and quality of *Talinum paniculatum* (Jacq.) Gaertn under cadmium stress[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(5): 982–988.



开放科学 OSID

硒与丛枝菌根真菌对镉胁迫下人参菜生长及品质的影响

仰路希, 谢永东, 贺忠群*, 严文一

(四川农业大学园艺学院, 成都 611130)

摘要: 采用盆栽试验, 通过土壤中添加硒(Se)和接种丛枝菌根真菌(Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF), 研究镉(Cd)胁迫下人参菜生长、品质、矿质元素及Cd、Se积累的变化规律。结果表明: Cd胁迫抑制了人参菜生长, 降低了其品质, Cd在人参菜内大量积累。单独施Se、单独接菌和Se菌交互处理提高了人参菜的株高、茎粗、根长、植株分支数及生物量。维生素C、总黄酮、总酚含量显著增加, 人参菜品质得到改善。人参菜中钙(Ca)、铜(Cu)和锌(Zn)含量增加, 但镁(Mg)、铁(Fe)未受影响。单独施Se、单独接菌和Se菌交互处理降低了人参菜根系对Cd的吸收, 抑制了Cd向地上部的转运, 叶片中Cd含量较Cd处理分别降低了41.94%、70.50%和72.28%。综合来看, 土壤施Se和接菌均能促进Cd胁迫下人参菜的生长, 提高其品质, 降低其可食用部位中Cd含量, 尤以Se菌交互处理效果最佳。

关键词: 人参菜; 硒; 丛枝菌根真菌; 镉胁迫

中图分类号: S47 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)05-0982-07 doi:10.11654/jaes.2019-1309

Effects of selenium and arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and quality of *Talinum paniculatum* (Jacq.) Gaertn under cadmium stress

YANG Lu-xi, XIE Yong-dong, HE Zhong-qun*, YAN Wen-yi

(College of Horticulture, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: This study investigated the growth and quality of *Talinum paniculatum* (Jacq.) Gaertn under cadmium stress and after the addition of selenium to the soil and inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF). The study conducted a pot experiment to investigate the changes in growth, quality, mineral elements, and accumulation of Cd and Se in *T. paniculatum*. The results showed that Cd stress inhibited the growth and reduced the quality of *T. paniculatum*, and large amounts of Cd accumulated in *T. paniculatum*. Applying Se and AMF alone or Se and AMF together increased plant height, stem diameter, root length, plant branch number, and biomass of *T. paniculatum*. Vitamin C, total flavonoid, and total phenol contents increased significantly and the quality of *T. paniculatum* was improved with the application of Se and AMF. The contents of Ca, Cu, and Zn in *T. paniculatum* increased, but Se and AMF had no significant effect on either Mg or Fe. The application of Se alone, AMF alone, and Se and AMF together reduced Cd uptake by the roots and inhibited Cd transport to the shoots. The Cd contents in leaves decreased by 41.94%, 70.50%, and 72.28%, respectively, compared to Cd treatment alone. In conclusion, the application of Se and inoculation of AMF in soil can promote growth and quality and reduce the Cd content in edible parts of *T. paniculatum* under Cd stress. The Se and AMF interaction treatment is the most effective.

Keywords: *Talinum paniculatum* (Jacq.) Gaertn; selenium; arbuscular mycorrhizal fungi; cadmium stress

收稿日期: 2019-11-28 录用日期: 2020-02-15

作者简介: 仰路希(1993—), 女, 四川都江堰人, 硕士研究生, 从事蔬菜栽培生理研究。E-mail: 1039379834@qq.com

*通信作者: 贺忠群 E-mail: hzqun328@163.com

基金项目: 雅安雨城区项目(063H0201); 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0303)

Project supported: Ya'an Yucheng District Project(063H0201); The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program(2019QZKK0303)

镉(Cd)是主要的土壤污染物之一,在土壤中具有隐蔽性、长期性和不可逆的特点。植物受到Cd毒害时表现为细胞以及整个植株的生长发育受到较强抑制,线粒体和叶绿体受到较大破坏,导致呼吸作用和光合作用受到影响^[1],影响作物的产量和品质。同时,Cd容易在植物的根、茎、叶及籽粒中大量积累,通过食物链进入人体,危害人类健康^[2]。目前,已经有许多方法来缓解Cd胁迫的毒害,降低植物对Cd的吸收,比如施用有机肥^[3]、生物炭^[4]、硒肥^[5]、接种有益菌^[6]等。

硒(Se)是重要的生命元素之一,适当浓度的Se可以促进植株生长,提高产量及品质,增强蔬菜作物抵抗重金属污染、病虫害侵袭和逆境胁迫的能力^[7]。夏永香等^[8]研究发现,叶面施Se能有效提高大蒜叶片光合性能,提高蒜薹和鳞茎质量、Se含量、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量和维生素C含量,提高鳞茎游离氨基酸含量。Pedrero等^[9]研究发现,硒酸盐可以减少西兰花可食部位的Cd含量。He等^[10]的大田试验表明,在Pb和Cd胁迫的莴苣土壤中施入亚硒酸盐,显著降低了这两种重金属在植物地上部的含量。

丛枝菌根真菌(Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)是土壤中与植物关系最为密切的微生物之一。土壤中的AMF与植物根系紧密结合,并依赖寄主植物的光合产物维持自身的生长和繁殖,同时能够以多种途径影响植物的代谢过程^[11]。大量的研究表明,AMF共生体能够促进宿主植物对矿质营养的吸收^[12],提高植物的生物量,增强逆境中宿主植物的抗逆性^[13]。刘丽丽等^[14]通过研究土壤施亚硒酸钠并接种5种AMF对猕猴桃的影响,发现AMF可以显著增加猕猴桃叶片的Se含量。刘茵等^[15]研究发现,在Cd污染土壤中接种AMF降低了紫羊茅地上部对Cd的积累。

人参菜[Talinum paniculatum (Jacq.) Gaertn]是马齿苋科土人参属多年生草本植物。人参菜适应性强、较少受病虫害危害^[16],其营养价值丰富,味道鲜美,爽滑可口。目前,国内外关于土壤施Se、接种菌对蔬菜的影响研究已有较多报道,但关于土壤施Se、接种菌以及Se菌交互对人参菜的研究未见报道。通过前期的筛选研究发现,土壤添加5 mg·kg⁻¹的Se^[17]、接种 *Glomus mossea* (BEG167)真菌可以促进人参菜的生长,提高其品质。本试验旨在以人参菜为研究对象,通过施加外源Se和接种AMF,研究Cd胁迫下人参菜生长、品质、矿质元素及Cd、Se积累的变化规律,以期为人参菜的安全生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

植物材料:人参菜由四川农业大学园艺学院提供。种子繁殖,人参菜四叶一心时移栽。

供试化合物:Na₂SeO₃(分析纯)、CdCl₂·2.5H₂O(分析纯)。

供试AMF:菌种为 *Glomus mossea* (BEG167),孢子数量为178个孢子·10 g⁻¹菌剂,由四川农业大学园艺学院提供。

供试土壤:选择四川农业大学成都校区周边农田土,风干后,过1 mm筛,经160℃高温消毒2 h,冷却后备用。土壤的理化性状为pH 6.6,速效氮53.6 mg·kg⁻¹,速效磷44.1 mg·kg⁻¹,速效钾176.7 mg·kg⁻¹,有机质10.2 mg·kg⁻¹,Cd含量未检出。

1.2 试验方法

试验于2019年4—6月在四川农业大学成都校区(30°42'N, 103°51'E, 530 m)采用盆栽法进行。试验设置5个处理,如表1。

表1 不同处理组的Se、Cd浓度及AMF

Table 1 Se, Cd concentrations and AMF in different treatment groups

处理 Treatments	Cd/mg·kg ⁻¹	Se/mg·kg ⁻¹	AMF
T ₀ 不添加Cd、Se和AMF	0	0	—
T ₁ Cd	10	0	—
T ₂ Cd+Se	10	5	—
T ₃ Cd+AMF	10	0	BEG167
T ₄ Cd+Se+AMF	10	5	BEG167

模拟土壤中Cd含量为10 mg·kg⁻¹,将CdCl₂·2.5 H₂O配制成Cd溶液与土壤混匀,平衡2~3周后使用;将部分Cd处理土壤中混入由Na₂SeO₃配制的Se溶液,模拟Cd处理土壤中Se含量为5 mg·kg⁻¹。选用直径21.5 cm、高13 cm的塑料盆,用70%酒精擦后晾干。添加菌剂的处理,在塑料盆中先装入2 kg的灭菌土壤,分别在土壤表面均匀撒上AMF(BEG167),每盆接种15 g菌剂后,覆上0.5 kg灭菌土壤;其余处理每盆装预先处理好的土壤2.5 kg。最后移栽人参菜,每盆种人参菜3株,每个处理重复7次,共35盆。随机摆放塑料盆,两盆间距10 cm,并不定期交换盆与盆的位置以减弱边际效应;定期浇水至田间持水量的70%左右。定植人参菜40 d后,随机采样进行生长指标、品质指标及Cd、Se含量测定。

1.3 指标测定方法

1.3.1 生长指标测定

用直尺测定人参菜的株高和根长, cm; 用游标卡尺测定人参菜的茎粗, mm。记录植株分枝数, 随机选取9株, 取平均值。

将人参菜从营养钵中取出, 用流水将根部的土壤冲洗掉后, 用蒸馏水冲洗3~5次, 再用吸水纸吸去根部的水分, 分为根部和地上部分。接着放入电热恒温鼓风干燥箱内, 105℃杀青15 min后在70℃下烘干至恒质量, 测定其干质量。根冠比=根系干质量/地上部干质量。

1.3.2 菌根侵染率的测定

取出人参菜根系, 用水洗净, 剪为长约1 cm的根段, 置于FAA固定液中固定24 h, 采用台盼蓝染色法观察菌根侵染情况, 统计菌根侵染率^[18]。

侵染率(%) =

$$\frac{\sum (0 \times \text{根段数} + 10\% \times \text{根段数} + 20\% \times \text{根段数} + \dots + 100\% \times \text{根段数})}{\text{观察总根段数}}$$

1.3.3 品质指标的测定

可滴定酸含量采用曹建康等^[19]的方法, 维生素C含量采用2, 6-二氯酚靛酚滴定法^[19], 纤维素含量采用蒽酮硫酸法^[19], 总黄酮含量采用芦丁法^[20], 总酚含量采用福林酚法^[20]。

1.3.4 人参菜叶片中矿质元素的测定

Ca、Cu、Zn、Mg、Fe矿质元素含量测定分别参考鲍士旦^[21]的方法, 用原子吸收分光光度计(SP-3520AA)测定。

1.3.5 人参菜中Cd、Se含量的测定

Cd含量参考《食品安全国家标准 食品中镉的测定》(GB 5009.15—2014)^[22], 用原子吸收分光光度计(SP-3520AA)测定, 检出限 $\leq 0.006 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。其中, Cd转运系数=植物地上部分Cd含量/根系Cd含量^[23]。Se含量参考《食品安全国家标准 食品中硒的测定》

(GB 5009.93—2017)^[24], 用原子荧光光度计(AFS-8230)测定, 检出限 $< 0.01 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

1.4 数据分析

用Excel 2016对试验数据进行整理, SPSS 20.0软件对数据进行方差分析, 采用单因素方差分析显著性差异($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 Se与AMF对Cd胁迫下人参菜生长的影响

由表2可知, $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的Cd浓度显著抑制了人参菜株高、根长、植株分枝数的生长, 说明Cd对人参菜的生长有一定的抑制作用。通过单独施Se、单独接菌与Se菌交互处理增加了人参菜的株高、茎粗, 但与Cd处理差异不显著。单独施Se、单独接菌与Se菌交互处理显著增加了人参菜的根长, 分别较Cd处理增加了19.41%、7.77%、7.28%; 其中促进效果单独施Se处理最好, 单独接菌与Se菌交互处理效果次之。土壤施Se和接菌不同程度地增加了人参菜的分枝数, 仅Se菌交互处理与Cd处理间有显著差异。

2.2 Se与AMF对Cd胁迫下人参菜生物量的影响

由表3可知, Cd胁迫下人参菜地上部干质量、根系干质量、根冠比显著降低, 说明Cd抑制了人参菜的生物量的增加。单独施Se、单独接菌与Se菌交互处理显著提高了人参菜地上部干质量、根系干质量、根冠比; 其中, 单独施Se处理效果最好, 单独接菌、Se菌交互处理效果次之, 说明单独施Se、单独接菌、Se菌交互处理在一定程度上缓解了Cd毒害。菌根的侵染率不同, 单独接菌处理的侵染率高于Se菌交互处理的侵染率。

2.3 Se与AMF对Cd胁迫下人参菜品质的影响

由表4可知, $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的Cd浓度对人参菜可滴定酸、维生素C、纤维素含量的影响不显著, 而显著提高了人参菜总黄酮、总酚含量。通过单独施Se、单独

表2 Se与AMF对Cd胁迫下人参菜生长的影响

Table 2 Effects of Se and AMF on the growth of *Talinum paniculatum* under Cd stress

处理 Treatments	株高 Plant height/cm	根长 Root length/cm	茎粗 Stem thick/cm	分枝数 Number of branches
T ₀	18.23±0.41a	13.21±0.31a	0.54±0.04a	4.22±0.39a
T ₁	16.31±0.24b	8.93±0.12d	0.49±0.04a	3.33±0.17b
T ₂	16.66±0.70b	10.66±0.50b	0.54±0.02a	3.56±0.19b
T ₃	17.09±0.30b	9.62±0.10c	0.50±0.00a	3.67±0.29b
T ₄	16.55±0.22b	9.58±0.08c	0.51±0.05a	4.33±0.29a

注: 不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference at $P < 0.05$. The same below.

接菌与Se菌交互处理人参菜可滴定酸含量变化不大,与Cd处理差异不显著。人参菜维生素C含量显著增加,其中,单独接菌处理的维生素C含量最高,较Cd处理增加了17.03%。与Cd处理相比,各处理的人参菜纤维素含量增加,其中,单独施Se处理显著提高了人参菜纤维素含量,较空白对照增加13.00%。单独施Se、单独接菌与Se菌交互处理中人参菜总黄酮含量与Cd处理相比显著降低,但均显著高于空白对照。人参菜总酚含量显著升高,其中,Se菌交互处理含量最高,单独施Se、单独接菌次之,分别较Cd处理增加了26.64%、19.74%、12.19%。

2.4 Se与AMF对Cd胁迫下人参菜矿质元素含量的影响

由表5可知,10 mg·kg⁻¹的Cd浓度显著降低了人参菜叶片中Ca、Zn含量,而对Mg、Fe、Cu含量的影响不显著。通过单独施Se、单独接菌与Se菌交互处理

显著增加了人参菜中的Ca含量,较Cd处理增加了28.76%、19.80%、36.23%。单独施Se、单独接菌与Se菌交互处理对人参菜中Mg、Fe含量影响不显著,与Cd处理无显著差异。单独接菌、Se菌交互处理显著增加了人参菜中Cu含量,单独施Se与Cd处理相比差异不显著。与Cd处理相比单独施Se、单独接菌与Se菌交互处理显著增加了人参菜中的Zn含量;其中,单独施Se处理增加最多,较Cd处理增加了28.52%。

2.5 Se与AMF对Cd胁迫下人参菜中Cd、Se含量的影响

由表6可知,Cd胁迫下人参菜中Cd含量分布为:根>地上部。单独施Se、Se菌交互处理显著降低了人参菜根系中的Cd含量,根系中Cd含量较Cd处理降低了29.00%、17.83%;单独接菌处理对降低人参菜中Cd含量无显著影响。单独施Se、单独接菌与Se菌交互处理均显著降低了人参菜地上部的Cd含量,较Cd处理降低了41.94%、70.50%、72.28%;Se菌交互处理

表3 Se与AMF对Cd胁迫下人参菜生物量的影响

Table 3 Effects of Se and AMF on biomass of *Talinum paniculatum* under Cd stress

处理 Treatments	地上干质量 Dry weight of shoot/g	根系干质量 Dry weight of root/g	根冠比 Root shoot ratio	侵染率 Colonization rate /%
T ₀	1.084±0.027a	0.233±0.023a	0.215±0.012a	—
T ₁	0.782±0.038d	0.087±0.003e	0.111±0.001d	—
T ₂	0.967±0.050b	0.189±0.013b	0.196±0.015b	—
T ₃	0.854±0.027c	0.154±0.007c	0.181±0.013b	36
T ₄	0.852±0.008c	0.113±0.003d	0.133±0.003c	28

表4 Se与AMF对Cd胁迫下人参菜品质的影响

Table 4 Effects of Se and AMF on quality of *Talinum paniculatum* under Cd stress

处理 Treatments	可滴定酸 Tratable acid/% FW	维生素C Vitamin C/mg·100g ⁻¹ FW	纤维素 Cellulose/% DW	总黄酮 Total flavones/mg·g ⁻¹ DW	总酚 Total phenols/mg·g ⁻¹ DW
T ₀	0.123±0.008a	153.844±0.604d	0.100±0.013b	28.305±0.900d	43.379±1.424d
T ₁	0.116±0.000a	152.080±1.330d	0.090±0.002b	35.771±0.709a	48.293±0.373c
T ₂	0.113±0.009a	175.565±1.901b	0.113±0.004a	30.988±0.563c	57.830±2.614a
T ₃	0.121±0.009a	177.978±1.436a	0.095±0.012b	33.282±1.279b	54.183±2.372b
T ₄	0.116±0.003a	168.894±0.530c	0.095±0.002b	32.720±0.590b	61.160±1.614a

表5 Se与AMF对Cd胁迫下人参菜矿质元素含量的影响

Table 5 Effects of Se and AMF on mineral elements of *Talinum paniculatum* under Cd stress

处理 Treatments	Ca/mg·g ⁻¹	Mg/mg·g ⁻¹	Fe/mg·g ⁻¹	Cu/mg·kg ⁻¹	Zn/mg·kg ⁻¹
T ₀	8.565±0.220b	21.138±0.260a	0.411±0.017a	16.819±0.981b	100.476±2.056a
T ₁	7.261±0.385c	22.843±2.000a	0.406±0.002a	17.083±0.577b	77.166±2.420c
T ₂	9.349±0.112a	21.655±0.278a	0.414±0.004a	17.521±0.477ab	99.176±2.072a
T ₃	8.699±0.201b	22.526±0.536a	0.418±0.011a	18.384±0.460a	88.115±0.555b
T ₄	9.892±0.446a	22.991±2.217a	0.401±0.004a	18.536±0.631a	85.101±1.184b

表6 Se与AMF对Cd胁迫下人参菜中Cd、Se含量的影响

Table 6 Effects of Se and AMF on the content of Cd and Se in *Talinum paniculatum* under Cd stress

处理 Treatments	Cd			Se	
	根 Root/mg·kg ⁻¹	地上部 Shoot/mg·kg ⁻¹	转运系数 TF	根 Root/mg·kg ⁻¹	地上部 Shoot/mg·kg ⁻¹
T ₀	—	—	—	—	—
T ₁	117.576±4.716a	99.565±2.597a	0.848	—	—
T ₂	83.477±1.774c	57.811±1.217b	0.693	0.712±0.059a	0.343±0.015b
T ₃	114.234±0.074a	29.373±0.459c	0.257	—	—
T ₄	96.615±1.858b	27.211±0.609c	0.282	0.733±0.070a	0.398±0.020a

注:“—”代表未检出。

Note: “—” means not detected.

缓解Cd胁迫效果最好,单独接菌次之。就转运系数而言,单独施Se、单独接菌与Se菌交互处理均降低了Cd的转运系数,说明其抑制了Cd从人参菜根系向地上部转运。Cd胁迫下人参菜中Se含量分布为根>地上部。单独施Se、Se菌交互处理间人参菜根系中Se含量无显著差异;但Se菌交互处理地上部Se含量显著高于单独施Se处理。

3 讨论

Cd是植物生长的非必需元素,通过根系吸收并在植物体内积累,会对植物造成毒害作用。大量研究表明,单独施用外源Se或接种AMF均能促进Cd胁迫下植物的生长,在一定程度上缓解Cd的毒害,这在萝卜^[25]、玉米^[26]等植物上得到证实。本研究发现,Cd胁迫下,人参菜的生长受到抑制,从而导致生物量降低;通过单独施Se、单独接菌和Se菌交互应用对人参菜的生长有一定的促进作用,人参菜的株高、茎粗、根长、植株分支数、生物量在一定程度上有提高。这与李继伟等^[27]通过施用生物炭和接种AM单独或复合处理均能提高玉米的株高、生物量、光合色素含量、光合特性和抗氧化酶活性的研究结果相似。

蔬菜中维生素C、纤维素、可滴定酸含量等常作为评价蔬菜质量优劣的重要指标。杨燕君等^[28]研究发现,叶面施Se均提高了3种甜柿果实的可溶性糖、维生素C和可溶性固形物的含量,抑制柿树体内重金属的积累,有效提高甜柿叶片及果实中的Se含量,改善果实品质。本试验研究发现,Cd胁迫下人参菜叶片中品质指标变化趋势为:总黄酮、总酚含量显著增加,维生素C含量下降,可滴定酸、纤维素含量无显著变化。其中,Se菌交互处理使人参菜中可滴定酸、纤维素含量增加,且维生素C、总黄酮、总酚含量显著增加,缓解Cd胁迫效果最好;单独施Se、单独接菌效果次之。本试验结果中维生素C含量变化与戚霄晨

等^[29]通过叶面施硒甜樱桃,果实维生素C含量增加、部分重金属的含量降低,果实品质改善的结果相似。

矿质元素对植物的生长及发育有重要作用,Cd胁迫会对植物矿质元素的吸收产生影响。许多研究表明,Cd显著改变了必需元素的吸收和转运水平,而Cd通常会显著降低这些基本元素在植物中的浓度^[30]。Zhang等^[31]研究报道,Cd引起植物体内微量元素代谢失调,继而抑制植物生长。本试验研究发现,Cd胁迫下,人参菜叶片中Ca、Zn含量显著降低,而Mg、Fe、Cu的含量变化不显著。原因可能是因为Mg、Fe是植物中的大量元素,且Mg在植物中的移动性强,可以被重新分配和再利用^[32]。通过单独施Se、单独接菌与Se菌交互处理,人参菜中Ca、Cu、Zn含量与Cd处理相比增加,Mg、Fe含量无显著变化。本研究结果中的Cu、Zn含量变化与刘春梅等^[33]施Se使Cd胁迫下寒地水稻叶片的Zn、Fe含量增加、茎鞘Cu含量增加的结果相似。本研究的部分结果与前人结果^[34]略有不同,可能是与Se的浓度、接菌的种类有关。施Se、接种AMF以及Se菌交互应用如何影响Cd胁迫下人参菜对矿质元素吸收,不仅与矿质元素种类、施Se浓度、接菌的种类和密度有关,还与植物种类、生长阶段等均有关系,其作用机理有待于进一步的研究和证实。

本试验研究发现,人参菜中Cd、Se含量分布均为根>地上部,且根系是Cd、Se积累的主要部位。通过单独施Se、单独接菌与Se菌交互处理可以直接抑制人参菜对Cd的吸收,并阻止Cd向地上部转运。这与代邹等^[35]的研究结果一致,施Se能够直接抑制水稻对Cd的吸收。其原因之一可能是Se和Cd互相竞争根部中的相关蛋白质结合位点,导致Cd与根部中的蛋白质结合概率下降^[36];原因之二可能是AMF在土壤中形成庞大的根外菌丝网络,通过根外菌丝的过滤机制和螯合作用^[37],以及根部定殖的AMF菌丝能够

结合进入根系的Cd离子,降低了Cd²⁺的移动性。

4 结论

(1)Cd胁迫抑制了人参菜生长,使人参菜生物量降低,品质下降,Cd在人参菜内积累,且根系是Cd积累的主要部位。

(2)单独施Se、单独接菌和Se菌交互处理均能促进人参菜的株高、茎粗、根长、植株分支数的生长,增加人参菜的生物量;人参菜品质得到改善,其叶片中维生素C、总黄酮、总酚含量增加;单独施Se、单独接菌和Se菌交互处理影响了人参菜叶片对Ca、Cu、Zn、Mg、Fe、Cd的吸收,并阻止Cd²⁺往地上部转运,从而缓解Cd胁迫。综合来看,以Se菌交互处理效果最佳,单独施Se、接菌处理效果次之。

参考文献:

- [1] 薛永,王苑嫒,姚泉洪,等.植物对土壤重金属镉抗性的研究进展[J].生态环境学报,2014(3):528-534.
XUE Yong, WANG Yuan-yuan, YAO Quan-hong, et al. Research progress of plants resistance to heavy metal Cd in soil[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2014(3):528-534.
- [2] 杨亚丽,李友丽,陈青云,等.土壤铅、镉、铬对蔬菜发育影响及迁移规律的研究进展[J].华北农学报,2015(增刊1):511-517.
YANG Ya-li, LI You-li, CHEN Qing-yun, et al. The research progress of lead, cadmium and chromium in soil on the growth and migration of vegetables[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2015(Suppl 1):511-517.
- [3] 刘秀珍,马志宏,赵兴杰,等.不同有机肥对镉污染土壤镉形态及小麦抗性的影响[J].水土保持学报,2014,28(3):243-247.
LIU Xiu-zhen, MA Zhi-hong, ZHAO Xing-jie, et al. Effect of different organic manure on cadmium form of soil and resistance of wheat in cadmium contaminated soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(3):243-247.
- [4] 聂新星,张自咏,黄玉红,等.生物炭与氮肥配施对高粱生长及镉吸收的影响[J].农业环境科学学报,2019,38(12):2749-2756.
NIE Xin-xing, ZHANG Zi-yong, HUANG Yu-hong, et al. Effects of simultaneous biochar and nitrogen fertilizer application on the photosynthesis and Cd uptake of sorghum[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(12):2749-2756.
- [5] 张翠翠,常介田,赵鹏.叶面施硒对西瓜镉和铅积累的影响[J].华北农学报,2013(3):159-163.
ZHANG Cui-cui, CHANG Jie-tian, ZHAO Peng. Effects of foliar application of Se on Cd and Pb accumulation in the leaves and fruits of watermelon[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2013(3):159-163.
- [6] 刘灵芝,张玉龙,李培军,等.丛枝菌根真菌(*Glomus mosseae*)对玉米吸镉的影响[J].土壤通报,2011,42(3):568-572.
LIU Ling-zhi, ZHANG Yu-long, LI Pei-jun, et al. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi (*Glomus Mosseae*) on Cd accumulation in maize plants[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(3):568-572.
- [7] 张雯,耿增超.外源硒对蔬菜硒积累和产量品质影响的研究现状[J].园艺学报,2012,39(9):1749-1756.
ZHANG Wen, GENG Zeng-chao. Research progress regarding the effect of exogenous selenium on vegetables[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2012, 39(9):1749-1756.
- [8] 夏永香,刘世琦,李贺,等.硒对大蒜生理特性、含硒量及品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(3):733-741.
XIA Yong-xiang, LIU Shi-qi, LI He, et al. Effects of selenium on physiological characteristics, selenium content and quality of garlic[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2012, 18(3):733-741.
- [9] Pedrero Z, Madrid Y, Hartikainen H, et al. Protective effect of selenium in broccoli (*Brassica oleracea*) plants subjected to cadmium exposure[J]. *J Agric Food Chem*, 2008, 56(1):266-271.
- [10] He P P, Lv X Z, Wang G Y. Effects of Se and Zn supplementation on the antagonism against Pb and Cd in vegetables[J]. *Environ Int*, 2004, 30(2):167-172.
- [11] Smith S E, Read D J. Mycorrhizal symbiosis[M]. 2nd Edition. San Diego: Academic Press, 1997.
- [12] Dodd J C, Dougall T A, Clapp J P, et al. The role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant community establishment at Samphire Hoe, Kent, UK: The reclamation platform created during the building of the channel tunnel between France and the UK[J]. *Biodiversity & Conservation*, 2002, 11(1):39-58.
- [13] Augé R M. Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis[J]. *Mycorrhiza*, 2001, 11:3-42.
- [14] 刘丽丽,刘仁道,黄仁华.丛枝菌根真菌(AMF)对红阳猕猴桃叶片富硒能力及光合特性的影响[J].食品工业科技,2014,35(10):234-237,242.
LIU Li-li, LIU Ren-dao, HUANG Ren-hua. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on accumulation capability for Se and photosynthesis characteristics of *Actinidia chinensis* 'hongyang' leaves[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(10):234-237, 242.
- [15] 刘茵,孔凡美,冯固,等.丛枝菌根真菌对紫羊茅镉吸收与分配的影响[J].环境科学学报,2004,24(6):1122-1127.
LIU Yin, KONG Fan-mei, FENG Gu, et al. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on cadmium uptake and translocation in *Festuca rubra* plant[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(6):1122-1127.
- [16] 叶信苗.人参菜栽培技术[J].浙江农业科学,2004,1(3):165.
Ye Xin-miao. Cultivation technique of *Talinum paniculatum* (Jacq.) Gaertn[J]. *Zhejiang Agricultural Science*, 2004, 1(3):165.
- [17] 仰路希,谢永东,贺忠群.施硒对人参菜生长及生理特性的影响[J].西北植物学报,2019,39(9):1636-1641.
YANG Lu-xi, XIE Yong-dong, HE Zhong-qun. Effects of selenium application on the growth and physiological characteristics of *Talinum paniculatum* (Jacq.) Gaertn[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, 39(9):1636-1641.
- [18] Brenda B, Linderman R G. Quantifying vesicular-arbuscular mycorrhizae: A proposed method towards standardization[J]. *New Phytologist*, 1981, 87(1):63-67.
- [19] 曹建康,姜微波,赵玉梅.果蔬采后生理生化实验指导[M].北京:

- 中国轻工业出版社, 2007.
- CAO Jian-kang, JIANG Wei-bo, ZHAO Yu-mei. Guidance of post-harvest physiological and biochemical experiments on fruits and vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007.
- [20] 施衡乐, 吴伟杰, 邵海燕, 等. 短波紫外线处理对紫背天葵采后贮藏品质的影响[J]. 核农学报, 2018, 32(7): 1377-1383.
- SHI Heng-le, WU Wei-jie, GAO Hai-yan, et al. Effect of UV-C treatment on post-harvest storage quality of gynura bicolor[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2018, 32(7): 1377-1383.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 12.
- BAO Shi-dan. Soil agrochemical analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 12.
- [22] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中镉的测定(GB 5009.15—2014)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- Hatimal Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. Determination of cadmium in food safety national standard (GB 5009.15—2014) [S]. Beijing: China Standard Press, 2015.
- [23] 辛艳卫, 梁成华, 杜立宇, 等. 不同玉米品种对镉的富集和转运特性[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(5): 839-846.
- XIN Yan-wei, LIANG Cheng-hua, DU Li-yu, et al. Accumulation and translocation of cadmium in different maize cultivars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(5): 839-846.
- [24] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中硒的测定(GB 5009.93—2017)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- Hatimal Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. Determination of selenium in national standard food for food safety (GB 5009.93—2017) [S]. Beijing: China Standard Press, 2017.
- [25] 铁梅, 刘阳, 李华为, 等. 硒处理对萝卜镉吸收的影响及其交互作用[J]. 生态学杂志, 2014, 33(6): 1587-1593.
- TIE Mei, LIU Yang, LI Hua-wei, et al. Uptake of Se and Cd in radish and their effects on growth[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(6): 1587-1593.
- [26] Liu L, Gong Z, Zhang Y, et al. Growth, cadmium uptake and accumulation of maize (*Zea mays* L.) under the effects of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Ecotoxicology*, 2014, 23(10): 1979-1986.
- [27] 李继伟, 悦飞雪, 王艳芳, 等. 施用生物炭和AM真菌对镉胁迫下玉米生长和生理生化指标的影响[J]. 草业学报, 2018, 27(5): 120-129.
- LI Ji-wei, YUE Fei-xue, WANG Yan-fang, et al. Effects of biochar amendment and arbuscular mycorrhizal inoculation on maize growth and physiological biochemistry under cadmium stress[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(5): 120-129.
- [28] 杨燕君, 刘晓华, 宁娟娟, 等. 叶面施硒对甜柿果实品质及重金属含量的影响[J]. 园艺学报, 2013, 40(3): 523-530.
- YANG Yan-jun, LIU Xiao-hua, NING Chan-juan, et al. Effects of foliar feeding of selenium on fruit quality and accumulation of cadmium, lead and mercury in sweet persimmon[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2013, 40(3): 523-530.
- [29] 戚霄晨, 简在海, 张琦, 等. 叶面喷施硒对甜樱桃硒和重金属含量及果实品质的影响[J]. 果树学报, 2019, 36(6): 748-754.
- QI Xiao-chen, JIAN Zai-hai, ZHANG Qi, et al. Effects of foliar application of selenium on selenium and heavy metal contents and fruit quality in sweet cherry[J]. *Journal of Fruit Science*, 2019, 36(6): 748-754.
- [30] Krupa Z, Siedlecka A, Skórzynska-Polit E, et al. Heavy metal interactions with plant nutrients[J]. *Physiology and Biochemistry of Metal Toxicity and Tolerance in Plants*, 2002: 287-301.
- [31] Zhang S, Hu F, Li H, et al. Influence of earthworm mucus and amino acids on tomato seedling growth and cadmium accumulation[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(10): 2737-2742.
- [32] 宇克莉, 邹婧, 邹金华. 镉胁迫对玉米幼苗抗氧化酶系统及矿物质元素吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(6): 1050-1056.
- YU Ke-li, ZOU Jing, ZOU Jin-hua. Effects of cadmium stress on antioxidant enzyme system and absorption of mineral elements in maize seedlings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(6): 1050-1056.
- [33] 刘春梅, 罗盛国, 王孟雪, 等. 硒对镉胁迫下寒地水稻Cd、Zn、Fe、Cu、Mn含量的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6): 136-142.
- LIU Chun-mei, LUO Sheng-guo, WANG Meng-xue, et al. Effects of selenium on cadmium, zinc, iron, copper, manganese content in rice under cadmium stress in cold climate[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(6): 136-142.
- [34] 刘帅, 吴志超, 赵亚荣, 等. 外源硒对镉胁迫下菜心Fe、Mn、Cu、Zn吸收与转运的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018(3): 431-439.
- LIU Shuai, WU Zhi-chao, ZHAO Ya-rong, et al. Effects of selenium on the uptake and transport of trace elements by cadmium-stressed flowering Chinese cabbage[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018(3): 431-439.
- [35] 代邹, 王春雨, 李娜, 等. 硒对不同水稻幼苗镉胁迫的缓解作用及其对矿质营养的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2016, 42(6): 720-730.
- DAI Zou, WANG Chun-yu, LI Na, et al. Alleviation role and effects of selenium on mineral nutrients in rice (*Oryza sativa*) seedlings under cadmium stress[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences)*, 2016, 42(6): 720-730.
- [36] Lin L, Zhou W, Dai H, et al. Selenium reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 235-236: 343-351.
- [37] 罗巧玉, 王晓娟, 林双双, 等. AM真菌对重金属污染土壤生物修复的应用与机理[J]. 生态学报, 2013, 33(13): 3898-3906.
- LUO Qiao-yu, WANG Xiao-juan, LIN Shuang-shuang, et al. Mechanism and application of bioremediation to heavy metal polluted soil using arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(13): 3898-3906.