

吴晓蕾,李潘,张艳芳,等.丛枝菌根育苗基质对 Cd 胁迫下黄瓜幼苗生长及生理特性的影响[J].福建农业学报,2016,31(12):1323-1328.
WU X-L, LI P, ZHANG Y-F, et al. Effect of Arbuscular Mycorrhizal on Growth and Physiology of Cucumber Seedlings Under Cd-stress [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 31 (12): 1323-1328.

丛枝菌根育苗基质对 Cd 胁迫下黄瓜幼苗生长及生理特性的影响

吴晓蕾¹, 李 潘¹, 张艳芳², 贾匆匆¹, 武琳琳¹, 张宏僖¹, 高洪波^{1*}

(1. 河北农业大学园艺学院, 河北 保定 071000; 2. 西北农林科技大学园艺学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 采用基质栽培的方法, 通过添加 2 个浓度 (0.2、0.4 mmol·L⁻¹) 的 Cd²⁺, 研究 AM 菌根育苗基质对 Cd 胁迫下黄瓜幼苗生长、光合及叶绿素荧光参数和活性氧代谢的影响。结果表明: 在 Cd 胁迫下黄瓜幼苗的生长、光合作用以及光合系统活性均受显著抑制, 而抗氧化酶活性显著提高, 且表现为较高浓度的 Cd 胁迫下的幼苗生长和生理特性受抑制情况更严重; 经菌根基质育苗的幼苗在不同浓度 Cd 胁迫下, 均表现为叶面积、根系活力和地下干鲜重显著提高; 叶片的 Pn、Gs 和 Tr 显著提高, Ci 显著降低; 叶片 Fv/Fm、ETR、qP、 ϕ PSII 显著提高, NPQ 显著降低; POD、CAT 等抗氧化酶活性进一步提高, 而细胞 MDA 含量和 O₂⁻ 产生速率显著降低。结果表明 AM 菌根可缓解黄瓜幼苗在 Cd 胁迫下所受到的生长抑制, 并降低光合系统及细胞遭受的伤害, 且对于较低浓度 (0.2 mmol·L⁻¹) Cd 胁迫的缓解作用更好。

关键词: 黄瓜; 丛枝菌根基质; Cd 胁迫; 生长; 光合作用; 叶绿素荧光参数; 活性氧代谢

中图分类号: Q 945.78; S 642.2

文献标识码: A **文章编号:** 1008-0384 (2016) 12-1323-06

Effect of Arbuscular Mycorrhizal on Growth and Physiology of Cucumber Seedlings Under Cd-stress

WU Xiao-lei¹, LI Pan, ZHANG Yan-fang², JIA Cong-cong¹, WU Lin-lin¹, ZHANG Hong-xi¹, GAO Hong-bo^{1*}

(1. College of Horticulture, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000, China;

2. College of Horticulture, Northwest A & F University, Yangling, Shanxi 712100, China)

Abstract: Effect of nursery substrates inoculated with arbuscular mycorrhizal on the growth and physiological characteristics of cucumber seedlings under Cd-stress was studied. Two levels of Cd, i. e., 0.2 and 0.4 mmol·L⁻¹, were artificially imposed on the substrate during the experimentation for observation. The results showed that the growth, photosynthesis and photosynthetic activity of the seedlings were inhibited, while the antioxidant enzymatic activities increased significantly under the Cd-stresses. The inhibitions were more pronounced with higher addition of Cd. On the other hand, with the aid of arbuscular mycorrhizal, the leaf area, root activity and underground dry weight of the seedlings cultivated under the Cd-stress increased dramatically. Meanwhile, Pn, Gs and Tr improved significantly, Ci decreased significantly, Fv/Fm, ETR, qP and ϕ PSII improved significantly, and NPQ decreased significantly; while, the activities of POD and CAT were enhanced, and the O₂⁻ producing rate and MDA content decreased. It appeared that arbuscular mycorrhizal could alleviate the growth inhibition effects and decrease the damage to the photosynthetic system on the cucumber seedlings due to Cd-stress, especially, when the stress was less severe at a low level, such as 0.2 mmol·L⁻¹.

Key words: cucumber; substrates with arbuscular mycorrhizal; Cd-stress; growth; photosynthesis; chlorophyll fluorescence parameters; metabolism of reactive oxygen species

Cd 是对生物体具有高度毒性的重金属元素, 可在土壤中长期滞留, 极易被蔬菜等作物吸收, 其中菜园土壤受 Cd 污染的问题日益严重。因 Cd 一方面造成重金属胁迫逆境, 影响作物产量和品质,

收稿日期: 2016-05-30 初稿; 2016-06-30 修改稿

作者简介: 吴晓蕾 (1979-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向: 设施作物栽培与生理 (E-mail:yywxl@hebau.edu.cn)

* 通讯作者: 高洪波 (1976-), 女, 教授, 硕士生导师, 研究方向: 设施蔬菜和无土栽培的教学和研究工作 (E-mail: hongbogao@hebau.edu.cn)

基金项目: 河北农业大学大学生创新训练计划项目 (2015076); 河北农业大学青年科学基金项目 (QN201313)

另一方面造成 Cd 超标, 危害人体健康。丛枝菌根 *Arbuscular mycorrhiza*, AM 真菌广泛存在于土壤中, 可与宿主植物根系形成良好的共生关系, 对促进植物生长和提高植物抗逆性均有重要作用。相关报道显示, 黄瓜、番茄等蔬菜接种 AM 真菌后, 对于盐胁迫^[1]、低温胁迫^[2]、Co 胁迫^[3]及 As 胁迫^[4]的抗性增强; 同时 AM 真菌也是目前应对土壤重金属污染的微生物修复剂的主要成分, 对于缓解重金属胁迫伤害以及改善重金属土壤环境具有重要意义。

本试验以黄瓜为试材, 采用基质栽培方式, 以富含 AM 真菌的育苗基质进行育苗, 研究受 AM 真菌侵染的黄瓜幼苗在 Cd 胁迫条件下的生长、叶片光合参数、叶绿素荧光以及活性氧代谢相关酶活性的变化, 可对缓解重金属对蔬菜的危害、提高蔬菜产量及品质以及菌根基质的开发提供实践依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验于 2015 年 5 月至 2016 年 2 月在河北农业大学农林教学基地内进行。供试品种为黄瓜“津优一号”, 由天津黄瓜所提供。菌根基质购自江苏柴米河公司; 进行生理指标测定的药剂均为分析纯试剂。

1.2 试验设计

选用 50 孔穴盘, 分别采用普通育苗基质和富含 AM 真菌混合菌剂的育苗基质进行黄瓜幼苗的培养, 播种 30d 后将已被 AM 真菌侵染的黄瓜幼苗定植于基质栽培槽中, 栽培基质采用蛭石。试验设计如下: (1) CK: 正常栽培, 不添加 Cd²⁺; (2) Cd1: 定植普通基质育苗的黄瓜幼苗, 栽培槽内 Cd²⁺添加浓度为 0.2 mmol·L⁻¹; (3) Cd1+AM: 定植菌根基质育苗的黄瓜幼苗, Cd²⁺添加浓度为 0.2 mmol·L⁻¹; (4) Cd2: 定植普通基质育苗的黄瓜幼苗, 栽培槽内 Cd²⁺添加浓度为 0.4 mmol·L⁻¹; (5) Cd2+AM: 定植菌根基质育苗的黄瓜幼苗, Cd²⁺添加浓度为 0.4 mmol·L⁻¹。

每处理定植 40 株, 于定植后第 30 d 测定下列指标, 重复 3 次。

1.3 指标测定

1.3.1 生长指标的测定 用直尺测定主枝高度作为株高; 用数显游标卡尺测定茎基部 2 cm 处直径作为茎粗; 用 AM-350 便携式叶面积仪测定顶数第二片叶的叶面积; 采用 TTC 法测定根系活力^[5]。

整株取出幼苗, 用去离子水清洗后吸干水分, 从根茎部位剪开幼苗, 用分析天平称量幼苗地下部和地上部鲜重; 80℃烘干 24 h 后用分析天平称量干重; 根冠比采用公式计算: 地下部干重/地上部干重。

1.3.2 光合参数及叶绿素荧光参数的测定 采用便携式光合速率测定仪 (L-iCor6400 型, 美国 L-iCor 公司) 测定生长点下第 2 片展开叶的净光合速率 (Pn)、气孔导度 (Gs)、胞间二氧化碳浓度 (Ci)、蒸腾速率 (Tr)^[6]。采用 Mini-Imaging-PAM 调制叶绿素荧光成像系统 (德国, WALZ 公司) 测定 PSII 最大光化学效率 (Fv/Fm)、光合电子传递速率 (ETR)、PS II 实际量子效率 (φPSII)、光化学猝灭系数 (qP)、非光化学猝灭系数 (NPQ)。测定条件参照罗黄颖等^[7]方法。采用叶绿素测定仪 (SPAD-502, 美国) 进行叶色指数测定。

1.3.3 抗氧化酶活性测定 超氧化物歧化酶 (SOD) 活性测定参考 Giannopolitis 等^[8]测定; 过氧化物酶 (POD) 活性测定采用曾韶西等^[8]方法; 过氧化氢酶 (CAT) 活性测定采用 Dhindsa 等^[9]方法。

1.3.4 超氧阴离子 (O₂⁻) 产生速率和 H₂O₂ 含量测定 O₂⁻ 产生速率测定采用王爱国^[10]等的方法。

1.3.5 丙二醛 (MDA) 含量的测定 丙二醛 (MDA) 含量测定采用 Heath^[11]的方法。

1.4 统计分析

使用 Microsoft Excel 软件对数据进行处理, 采用 SAS 8.1 软件 Duncan 多重比较法 (α=0.05) 进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 丛枝菌根对 Cd 胁迫下黄瓜幼苗生长的影响

由表 1 可知, 与对照相比, 黄瓜幼苗在 2 个浓度的 Cd 胁迫下均表现为生长指标的显著下降, 各指标出现随 Cd 浓度上升而下降的现象。经菌根基质育苗后的黄瓜苗根系活力较 Cd 胁迫处理均显著提高, 同时 Cd1+AM 处理的叶面积也显著提高。对比菌根基质育苗对 2 个浓度 Cd 胁迫处理的效果, 可以看出虽然 Cd1+AM 处理和 Cd2+AM 处理的各生长指标均较胁迫处理有一定提高, 但受菌根侵染的幼苗对于较低浓度 (0.2 mmol·L⁻¹) 的 Cd 胁迫的缓解作用更好, 对于各指标的提高优于对较高浓度 (0.4 mmol·L⁻¹) 的 Cd 胁迫处理的效果。

表 1 丛枝菌根基质对 Cd 胁迫下黄瓜幼苗生长的影响

Table 1 Effect of substrates inoculated with arbuscular mycorrhizal on the growth of cucumber seedling under Cadmium stress

处理	株高/cm	茎粗/cm	叶面积/cm ²	根系活力/ ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)
CK	65.52±2.92a	1.08±0.02a	47.22±1.55a	186.25±4.50a
Cd1	52.46±0.90b	0.92±0.01b	39.26±0.74c	119.63±8.93c
Cd1+AM	56.81±0.60b	0.95±0.01b	43.46±0.40b	151.79±4.42b
Cd2	49.63±0.99b	0.89±0.11b	35.59±0.82b	117.11±6.78c
Cd2+AM	52.84±0.29b	0.92±0.01b	37.92±0.96b	141.43±3.47b

注：同列数据后不同小写字母表示差异达显著($P < 0.05$)水平。表 2~5 同。

2.2 丛枝菌根对 Cd 胁迫下黄瓜幼苗生长量的影响

从表 2 可以看出，2 个浓度的 Cd 胁迫下的黄瓜幼苗地上和地下干鲜重均显著低于对照处理，且 0.2 mmol·L⁻¹的 Cd 胁迫处理各指标均高于 0.4 mmol·L⁻¹处理。菌根基质育苗显著提高了 0.2 mmol·L⁻¹的 Cd 胁迫处理的黄瓜幼苗地上和地下

干鲜重；同时显著提高了 0.4 mmol·L⁻¹的 Cd 胁迫处理的黄瓜幼苗地上鲜重和地下干鲜重。同时，菌根基质育苗处理均提高了黄瓜幼苗的根冠比。说明，AM 菌根通过促进植株生长，提高幼苗的生长量，来应对 Cd 胁迫，但其对于较低浓度 (0.2 mmol·L⁻¹) 的 Cd 胁迫作用更好。

表 2 丛枝菌根基质对 Cd 胁迫下黄瓜幼苗生长量的影响

Table 2 Effect of substrate inoculated with arbuscular mycorrhizal on growth of cucumber seedlings under Cd-stress

处理	地上部鲜重 /g	地上部干重 /g	地下部鲜重 /g	地下部干重 /g	根冠比
CK	96.38±1.86a	8.07±0.15a	10.18±0.17a	0.93±0.03a	0.115±0.0004a
Cd1	81.56±3.16b	7.10±0.08c	8.06±0.09c	0.75±0.02c	0.106±0.0006c
Cd1+AM	91.33±0.65a	7.59±0.15b	8.75±0.17b	0.83±0.01b	0.109±0.0007b
Cd2	73.96±1.11c	6.87±0.10b	7.16±0.09c	0.63±0.02c	0.092±0.0086b
Cd2+AM	81.66±0.48b	7.33±0.05b	8.03±0.05b	0.73±0.02b	0.010±0.0008ab

2.3 丛枝菌根对 Cd 胁迫下黄瓜幼苗光合作用的影响

如表 3 所示，黄瓜幼苗叶片经 Cd 胁迫处理后 Pn、Gs、Tr 显著降低，而 Ci 则显著上升。菌根基质育苗的幼苗则表现为显著提高了 0.2 mmol·L⁻¹的 Cd 胁迫处理的黄瓜幼苗叶片 Tr 指标，并显著

降低了 Ci，Pn、Gs 也有了一定提高。菌根处理对于 0.4 mmol·L⁻¹的 Cd 胁迫处理的黄瓜幼苗叶片光合参数的改善效果优于对于 0.2 mmol·L⁻¹的 Cd 胁迫处理的效果，表现为 Pn、Gs、Tr 显著提高，而 Ci 显著下降。说明菌根处理可有效缓解 Cd 胁迫对于黄瓜叶片光合作用的抑制。

表 3 丛枝菌根基质对 Cd 胁迫下黄瓜幼苗光合参数的影响

Table 3 Effect of substrates inoculated with arbuscular mycorrhizal on photosynthetic parameters in leaves of cucumber seedling under Cadmium stress

处理	净光合速率 Pn /($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	气孔导度 Gs /($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 Tr /($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	胞间 CO ₂ 浓度 Ci /($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)
CK	14.91±0.34a	0.194±0.004a	8.250±0.22a	237.75±7.70c
Cd1	12.19±0.18b	0.176±0.003b	5.460±0.29c	307.57±7.11a
Cd1+AM	13.20±0.34b	0.186±0.003ab	6.903±0.08b	269.13±6.28b
Cd2	10.89±0.08c	0.167±0.003c	5.037±0.47c	336.29±3.91a
Cd2+AM	12.49±0.27b	0.180±0.001b	6.373±0.26b	276.51±1.44b

2.4 丛枝菌根对 Cd 胁迫下黄瓜幼苗叶绿素荧光参数的影响

与对照相比, Cd 胁迫使叶片叶色指数和叶绿素荧光参数均发生显著变化, 其中叶色指数显著降低, 同时 PSII 系统的活性也受到显著抑制, 表现为 Fv/Fm、ETR、qP、 ϕ PSII 的显著降低和 NPQ 的

显著上升。菌根处理可显著提高 Cd 胁迫黄瓜叶片的 Fv/Fm、ETR、qP、 ϕ PSII 及 $0.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Cd 胁迫处理的叶色指数。说明 AM 真菌可有效提高两个浓度 Cd 胁迫叶片的光合系统效率, 从而减轻 Cd 胁迫对光合系统和细胞膜的伤害 (表 4)。

表 4 丛枝菌根基质对 Cd 胁迫下黄瓜幼苗叶绿素荧光参数的影响

Table 4 Effect of substrates inoculated with arbuscular mycorrhizal on chlorophyll fluorescence parameters in leaves of cucumber seedling under Cadmium stress

处理	叶色指数	PSII 的最大光化学效率	光合电子传递速率	PSII 实际量子效率	光化学淬灭系数	非光化学淬灭系数
CK	43.39±1.46a	0.824±0.004a	46.20±0.58a	0.583±0.010a	0.833±0.009a	0.247±0.009c
Cd1	36.52±0.91b	0.779±0.009b	33.51±1.37c	0.473±0.050c	0.750±0.006c	0.343±0.009a
Cd1+ AM	39.80±0.43b	0.805±0.002a	39.51±0.67b	0.530±0.006b	0.793±0.007b	0.283±0.009b
Cd2	34.81±0.56c	0.750±0.009c	29.64±0.49c	0.417±0.009c	0.687±0.019c	0.400±0.015a
Cd2+ AM	38.22±0.70b	0.789±0.006b	35.67±0.87b	0.487±0.012b	0.750±0.006b	0.343±0.007b

2.5 丛枝菌根对 Cd 胁迫下黄瓜幼苗叶片活性氧代谢的影响

如表 5 所示, Cd 胁迫处理的黄瓜幼苗叶片的抗氧化酶活性变化呈现两种趋势, SOD 活性较对照显著降低, 而 POD、CAT 活性显著提高; 而 MDA 含量和 $\text{O}_2^{\cdot -}$ 产生速率也显著上升。2 个浓度胁迫处理相比, 随 Cd 添加浓度上升 MDA 含量和

$\text{O}_2^{\cdot -}$ 产生速率也上升。经菌根基质育苗后 2 个胁迫处理的叶片 SOD、POD、CAT 活性显著提高, 并细胞内 $\text{O}_2^{\cdot -}$ 产生速率和 MDA 含量显著降低。说明菌根处理通过提高黄瓜叶片细胞内的抗氧化酶活性, 降低细胞的活性氧含量, 从而减轻 Cd 胁迫对于细胞的伤害。

表 5 丛枝菌根基质对 Cd 胁迫下黄瓜幼苗叶片活性氧代谢的影响

Table 5 Effect of substrates inoculated with arbuscular mycorrhizal on metabolism of reactive oxygen species in leaves of cucumber seedling under Cadmium stress

处理	SOD /($\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$)	POD /($\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$)	CAT /($\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$)	$\text{O}_2^{\cdot -}$ /($\text{nmol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$)	MDA /($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$)
CK	83.36±1.68b	208.29±4.29c	107.79±2.93c	0.70±0.01c	4.72±0.08b
Cd1	51.71±4.85c	311.80±6.52b	146.79±4.40b	0.94±0.02a	6.52±0.37a
Cd1+ AM	124.58±3.91a	367.80±11.17a	163.57±3.41a	0.83±0.02b	5.30±0.23b
Cd2	44.95±1.83c	265.08±4.48b	139.04±1.84b	1.14±0.05a	7.45±0.32a
Cd2+ AM	103.16±3.05a	301.44±1.53a	161.04±1.98a	0.89±0.01b	6.01±0.08b

3 讨论与结论

近年来, 随着工矿企业的粗放式增长, 重金属已成为威胁耕地安全的污染源之一^[12]。据统计, 我国受重金属污染的耕地约 $10 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占耕地总面积的 8% 以上, 仅京津冀地区比例已超过 10%^[13]。而这种重金属积累不可降解, 污染土壤的修复十分困难。因此, 如何经济有效的修复重金属污染的土壤成为当前研究的热点。植物-微生物

修复是近年来新兴的一种生物修复重金属污染土壤的手段, 因其高效环保而被国内外学者广泛认可。大量研究表明, AM 真菌侵染植物根系后可有效改善植物根际环境, 影响植物对于重金属离子的吸收^[14], 增加植物对于重金属胁迫的适应性, 达到缓解重金属胁迫伤害和修复重金属污染土壤的效果。因此, AM 真菌在植物中的应用成为目前重金属胁迫研究以及修复污染土壤的常用手段之一。

黄瓜属我国栽培面积较广的蔬菜, 根系抗性

差,常作为多种逆境胁迫,尤其是重金属胁迫的研究材料。石爽等^[15]以水培法研究了铅、砷污染对黄瓜种子萌发的影响,发现低浓度铅和砷溶液可促进种子的萌发和幼苗生长,高浓度则有抑制作用。Pb 和 NaCl 复合胁迫对于黄瓜幼苗伤害机理的研究表明,叶片的叶绿素含量显著下降,而 SOD、POD 活性和 MDA 含量显著提高^[16]。黄瓜水培条件下对于镉胁迫的响应表现为随胁迫时间延长,叶片光合作用及光合系统参数均显著下降^[17]。本试验中采用基质栽培法,模拟重金属胁迫条件,在基质中添加了 $0.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 两种浓度的 Cd^{2+} ,比较了菌根育苗基质培育的幼苗和普通育苗基质培育的幼苗在 Cd 胁迫下的生长和生理特性。结果表明黄瓜幼苗生长、光合参数、叶绿素荧光参数和活性氧代谢指标均发生显著变化。Cd 胁迫显著降低了黄瓜幼苗株高、茎粗、叶面积、根系活力、地上和地下干鲜重等生长指标,且表现为浓度效应,即较高浓度 ($0.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) Cd 对于植株生长的抑制作用更明显。Verma 等^[18]认为 Cd 胁迫影响 Fe 的吸收,会引起植株 Fe 缺乏,且在高浓度镉处理中更明显,这可能也是 Cd 胁迫导致植物生长不良的原因之一。

黄瓜幼苗外观表现为生长不良现象的主要原因在于幼苗内部生理特性的变化。试验中发现 Cd 胁迫直接导致幼苗光合作用的减低和光合系统反应中心活性的下降。直接反映光合作用的指标,如 Pn、Gs、Tr 显著下降,而反映光合受抑制程度的 Ci 显著上升;表明光合系统受胁迫程度的 Fv/Fm、ETR、 ϕPSII 等指标均显著下降,而 NPQ 较对照显著上升,说明 Cd 胁迫通过降低 PSII 系统的光化学效率,抑制光合系统电子传递效率,增加了光合系统产量的非光散失,导致光合系统活性降低,光合效率下降,从而抑制了植株光合作用,最终导致植株生长的减缓。活性氧代谢是反映生物体受胁迫程度的另一重要指标,Cd 胁迫处理的黄瓜幼苗叶片的 SOD 活性显著降低,而 POD、CAT、MDA 含量和 O_2^- 产生速率则显著上升,且出现细胞活性氧含量随 Cd 浓度上升而增加的现象。这与石爽等^[15]结果一致。主要原因为植物在逆境下启动自我保护反应,机体通过提高抗氧化酶活性而降低有害于细胞的活性氧含量,从而减轻自身在逆境中所受伤害。

蔬菜由于其栽培位置靠近市郊,是当前受重金属污染最严重的作物之一。现有丛枝菌根真菌对于植物重金属胁迫的缓解作用的报道,主要集中于大

田作物或林木^[19-23],而对于蔬菜的研究较少^[3-4];且采用的多为实验室接种和外源添加的手段,尚未见应用商品化菌根育苗基质进行生产研究的报道。黄瓜等瓜类蔬菜,根系与 AM 真菌共生状态好,由于其需经育苗移栽且育苗期长达 3~4 周,因此,应用富含 AM 真菌的菌根基质育苗除简化试验程序外,还可在提高抗逆性的同时,促进幼苗生长。采用的菌根基质育苗可经育苗过程令 AM 菌株活化,直接侵染黄瓜幼苗根系,育苗过程与普通穴盘育苗无异,操作简单,成本低,接近生产实践,且便于推广应用。本试验中菌根基质培育的幼苗对于不同浓度 Cd 胁迫处理的耐受性好于普通基质培育的幼苗。表现为幼苗根系活力、叶面积和地下干鲜重的显著提高,叶片光合参数和叶绿素荧光参数的改善以及 POD、CAT 氧化酶等抗氧化酶活性提高。这与已有的对于其他作物的研究结果一致。但本试验结果还表明,菌根处理对于不同浓度 Cd 胁迫处理幼苗的生长和生理特性改善效果存在一定差异,虽然均表现为促进植株生长和优化各生理相关参数,但 AM 菌根对于较低浓度的 Cd 胁迫处理 ($0.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) 黄瓜幼苗各项生长和生理指标的改善效果好于对于较高浓度的 Cd 胁迫处理 ($0.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) 的效果,说明针对较高浓度的重金属胁迫,还需进一步调整 AM 菌根基质的菌种成分和比例,使之更适用于缓解较严重 Cd 胁迫伤害,更大限度发挥其生物修复重金属污染土壤的效果。

参考文献:

- [1] 韩冰,贺超兴,郭世荣,等.丛枝菌根真菌对盐胁迫下黄瓜幼苗渗透调节物质含量和抗氧化酶活性的影响[J].西北植物学报,2011,31(12):2492-2497.
- [2] 刘爱荣,陈双臣,刘燕英,等.丛枝菌根真菌对低温下黄瓜幼苗光合生理和抗氧化酶活性的影响[J].生态学报,2011,31(12):3497-3503.
- [3] 代威,王丹,李黎,等.不同丛枝菌根真菌(AMF)对Co污染土壤下番茄生长和核素富集的影响[J].安徽农业科学,2015,43(9):264-267.
- [4] 胡义钰,孙亮,袁坤,等.砷胁迫条件下接种丛枝菌根真菌对番茄生长和磷吸收的影响[J].中国土壤与肥料,2015,(5):108-115.
- [5] 李剑峰,张淑卿,师尚礼,等.2 酸度水平下亚铁离子对苜蓿幼苗生理特性的影响[J].草地学报,2009,17(5):570-574.
- [6] 樊怀福,郭世荣,焦彦生,等.外源一氧化氮对 NaCl 胁迫下黄瓜幼苗生长、活性氧代谢和光合特性的影响[J].生态学报,2007,27(2):546-553.
- [7] 罗黄颖,高洪波,夏庆平,等.γ-氨基丁酸对盐胁迫下番茄活性氧代谢及叶绿素荧光参数的影响[J].中国农业科学,2011,

- 44 (4): 753-761.
- [8] ZENG S X, WANG Y R, LIU H X. Comparison of the changes of membrane protective system in rice seedlings during enhancement of chilling resistance by different stress pretreatment [J]. *Acta Botanica Sinica*, 1997, 39 (4): 308-314.
- [9] DHINDSA R S, PLUMB-DHINDSA P, THORPE T A. Leaf senescence correlated with increased levels of membrane permeability and lipid peroxidation and decreased levels dismutase and catalase [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1982, 32: 91-101.
- [10] 王爱国, 罗广华. 植物的超氧化物自由基与羟胺反应的定量关系 [J]. *植物生理学通讯*, 1990, 26 (6): 55-57.
- [11] HEATH R L, PACKER L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation [J]. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 1986, 125: 189-198.
- [12] 刘晓娜, 赵中秋, 陈志霞. 螯合剂、菌根联合植物修复重金属污染土壤研究进展 [J]. *环境科学与技术*, 2011, (S2): 127-133.
- [13] 何昌垂. 粮食安全: 世纪挑战与应对 [M]. 社会科学文献出版社, 2013. 3-4.
- [14] 费云舟. 污泥污染土壤中接种 AM 真菌对紫云英生长及重金属吸收的影响 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2010. 4-5.
- [15] 石爽, 魏晓晴, 胡晓静, 等. Pb^{2+} 、 As^{3+} 污染对黄瓜种苗生长发育及防御酶的影响 [J]. *辽宁农业科学*, 2009, (2): 1-5.
- [16] 孙涌栋, 赵一鹏, 林紫玉. Pb 和 NaCl 胁迫对黄瓜幼苗生理生化特性的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28 (4): 85-88.
- [17] 刘劲松, 石辉, 李秧秧. 镉胁迫对黄瓜幼苗光合和叶绿素荧光特性的影响 [J]. *水土保持研究*, 2011, 18 (5): 187-195.
- [18] VERMA R K, KAPOOR K S, RAWAI R S, et al. Analysis of plant diversity in degraded and plantation forests in Kunihar Forest Diversion of Himachal Pradesh [J]. *Indian Journal of Forestry*, 2005, 28 (1): 11-16.
- [19] 李霞, 彭霞薇, 伍松林, 等. 丛枝菌根对翅荚木生长及吸收积累重金属的影响 [J]. *环境科学*, 2014, 35 (8): 3142-3148.
- [20] 肖家欣, 安静, 杨安娜, 等. 五种丛枝菌根真菌对白三叶耐铜污染的影响 [J]. *中国草地学报*, 2011, 33 (6): 57-63.
- [21] 谢翔宇, 翁铂森, 赵素贞, 等. Cd 胁迫下接种丛枝菌根真菌对秋茄幼苗生长于抗氧化酶系统的影响 [J]. *厦门大学学报: 自然科学版*, 2013, 52 (2): 244-253.
- [22] 李瑞, 刘晓娜, 赵中秋. 螯合剂和 AM 菌根对玉米吸收重金属及重金属化学形态的影响 [J]. *生态环境学报*, 2014, 23 (2): 332-338.
- [23] 黄艺, 彭博, 李婷, 等. 外生菌根真菌对重金属铜镉污染土壤中油松生长和元素积累分布的影响 [J]. *植物生态学报*, 2007, 31 (5): 923-929.

(责任编辑: 黄爱萍)