

接种 AM 真菌对胡萝卜生长和辛硫磷残留的影响

王发园^{1,2}, 陈欣¹, 孙鲜明¹, 石兆勇¹

(1. 河南科技大学农学院, 洛阳 471003; 2. 清华大学环境科学与工程系, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084)

摘要:在温室盆栽条件下研究了接种 AM(arbuscular mycorrhiza) 真菌对灭菌土壤中胡萝卜生长及其辛硫磷残留的影响. 试验设置不施加、低($200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、中($400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、高($800\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)等 4 个辛硫磷施用量水平, 以及 *Glomus intraradices* BEG 141 (141) 和 *Glomus mosseae* BEG 167 (167) 和不接 AM 真菌的对照 (CK) 等 3 个接种处理. 播种 5 个月收获植株. 辛硫磷在收获前 14 d 以灌根的方式施加. 结果表明, 尽管菌根侵染率在高辛硫磷施用量时有所降低, 但均超过 70%. 辛硫磷施用量高低对于胡萝卜产量和地上部鲜重没有显著影响; 在所有辛硫磷水平下, 接种 AM 真菌均显著增加了胡萝卜产量和地上部鲜重. 胡萝卜中辛硫磷残留随农药施用量增加而升高, 接种 AM 真菌显著降低了胡萝卜根和地上部辛硫磷残留. 无论在促生效应还是在降低辛硫磷残留方面, 141 菌剂要优于 167 菌剂. 研究结果显示了 AM 真菌用于胡萝卜生产和降低农药残留的潜力.

关键词:丛枝菌根; 蔬菜; 有机磷农药; 农药残留; 胡萝卜

中图分类号: X171; X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)12-3075-06

Influence of Arbuscular Mycorrhizal Inoculation on Growth and Phoxim Residue of Carrot (*Daucus carota* L.)

WANG Fa-yuan^{1,2}, CHEN Xin¹, SUN Xian-ming¹, SHI Zhao-yong¹

(1. Agricultural College, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China; 2. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A pot culture experiment was carried out to study the influence of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi on the growth and phoxim residue of carrot (*Daucus carota* L.). Four levels of phoxim (0, 200, 400, 800 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) and two AM fungal inocula, *Glomus intraradices* BEG 141 (141), *Glomus mosseae* BEG 167 (167), and one nonmycorrhizal inoculum (CK), were applied to the sterilized soil. The plants were harvested after 5 months of growth and phoxim was irrigated into the root zone 14 d before plant harvest. Although decreasing with the increase of phoxim dosage, root infection rates of all the mycorrhizal plants were higher than 70%. Phoxim showed no significant dose effect on shoot wet weights and root yields, which were all increased by AM inoculation at four phoxim dosages. Phoxim residues in shoots and roots increased with the increase of phoxim dosage, but decreased by AM inoculation. In general, *Glomus intraradices* BEG 141 showed more pronounced effects on the growth and phoxim residue of carrot than *Glomus mosseae* BEG 167 did. Our results show a promising potential of AM fungi in carrot production and controlling pesticide residues.

Key words: arbuscular mycorrhizae; vegetable; organophosphorus pesticide; pesticide residue; carrot

蔬菜质量安全是人们关注的焦点问题之一, 近年来时有关于蔬菜质量安全问题的报道^[1]. 有关资料表明, 农药残留超标是影响我国蔬菜质量安「主要因素, 蔬菜农药残留超标现象较突出, 尤其是有有机磷农药超标较为普遍^[2]. 除了限制高毒、高残留农药品种、合理施用农药外, 生物技术手段也是降低蔬菜农药残留的重要措施之一.

AM(arbuscular mycorrhiza) 真菌广泛分布于农田、菜地、果园等各陆地生态系统中, 可以改善宿主的营养状况(尤其是磷素营养)、增强宿主植物抗逆性(如抗旱、抗病、耐盐碱性、耐重金属等)、减少农药和化肥施用量、加快污染土壤修复、提高农作物产量和品质, 对于维持植物多样性和生态系统稳定性

具有重要意义^[3,4]. AM 真菌对于提高污染土壤中农产品质量安全也有一定的潜力^[5].

菌根化植物对农药有很强的耐受性, 并能将一些有机成分转化为 AM 真菌和植株的养分源, 降低农药对植物的胁迫^[6]. 大豆在被 *Glomus mosseae* 侵染后, 生长不但没有受到 $0.15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 乐果的影响, 反而促进了 *G. mosseae* 孢子的萌发^[7]. AM 真菌对甲胺磷有较强的耐性, 甲胺磷污染条件下接种 AM 真菌促进了番茄的生长, 并可加速甲胺磷的矿

收稿日期: 2010-01-06; 修订日期: 2010-03-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(40801120); 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室专项基金项目(08K08ESPCT); 中国博士后科学基金项目(20080440373)

作者简介: 王发园(1975~), 男, 博士, 主要研究方向为丛枝菌根和生物修复, E-mail: wfy1975@163.com

化^[8].也有一些研究发现接种 AM 真菌后影响植物对农药的吸收和农药残留.接种 AM 真菌可以降低北瓜 (*Cucurbita pepo*) 果实对农药 *p,p*-DDE 的生物富集,但是与北瓜品种和 AM 真菌种类密切相关^[9].AM 真菌可以从土壤中吸收阿特拉津(或残留物)并运输到玉米根中,但是与 AM 真菌种类有关^[10].Huang 等^[11]发现接种 AM 真菌后阿特拉津在玉米地上部的累积降低、在根中的累积增加,促进了阿特拉津的降解,他们认为 AM 真菌一般很少或不直接降解阿特拉津,而可能是接种导致根系酶活性和微生物增加所致.AM 真菌能否用于降低蔬菜农药残留尚值得深入研究.

有机磷农药是目前我国使用量最大、应用最广泛的杀虫剂,农业部 2008 年批准的农药产品生产批准证书名单中依然有敌敌畏、辛硫磷、马拉硫磷等多种有机磷农药,其中不少属于高毒品种,也是施用量较大的农药品种,在蔬菜质量安全中值得重点关注.胡萝卜在我国栽培历史悠久,种植面积较大,产量较高,是我国重要的出口创汇蔬菜.AM 真菌用于控制蔬菜有机磷农药残留的研究很少.本研究以胡萝卜为供试植物,辛硫磷为代表有机磷农药,在盆栽条件下分析接种 AM 真菌对胡萝卜产量的影响,确定接种 AM 真菌能否有效降低有机磷农药残留,以期 AM 真菌能否应用于蔬菜生产和质量安全控制提供依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试植物为胡萝卜 (*Daucus carota* L.) (常丰牌特级三红五寸参),播种前用 10% H_2O_2 消毒,自来水冲洗几遍.土壤采自河南科技大学开元校区农场.土壤基本理化性状如下:土壤类型为潮土,土壤质地为壤土, pH 7.9 (水土比 2.5/1), 土壤碱解氮 $65.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效钾 $120.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效磷 $21.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有机质 1.62%, 土壤过 2 mm 筛, 101 kPa、121℃ 高压蒸汽灭菌, 风干后备用. 2 种供试菌剂为 AM 真菌 *Glomus intraradices* BEG 141 和 *Glomus mosseae* BEG 167, 由中国农业大学提供. 菌根菌剂使用前经过紫花苜蓿扩繁, 基质为河沙. 同时培养不含 AM 真菌的对照菌剂. 菌剂使用前去除植物地上部分, 把根系剪碎, 与基质混匀, 风干后使用. 菌根菌剂包括 AM 真菌孢子、菌丝、侵染根段以及基质, 对照菌剂不含菌根繁殖体, 其他同菌根菌剂. 供试农药为 40% 辛硫磷乳油. 辛硫磷标准品购买于北京北化恒

信生物技术有限公司. 色谱分析药品均为分析纯. 用于液相色谱的无水硫酸钠经 650℃ 干燥 4 h, 于干燥器中冷却至室温备用.

1.2 试验设计

把 1.2 kg 土壤装于 1 L 陶瓷花盆中, 每盆接种菌剂 20 g, 将菌剂均匀撒于花盆中上层. 均匀播种胡萝卜种子, 出苗且成活后, 间苗, 胡萝卜每盆留 2 棵. 辛硫磷在实际施用过程中, 施用量可能因施用目的、施用方法等不同而存在很大差异, 所以本试验设置了不同的农药施用量, 包括不施加农药、低、中、高等 4 个浓度水平. 3 种菌剂处理包括 *Glomus intraradices* BEG 141 号菌剂 (141)、*Glomus mosseae* BEG 167 菌剂 (167)、对照菌剂 (CK), 共计 12 个处理, 每处理重复 3 次.

农药处理过程如下, 在胡萝卜收获前 14 d 给花盆分别浇蒸馏水 (不施加农药)、低 ($200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、中 ($400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、高 ($800\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 的辛硫磷溶液各 100 mL. 施加农药时, 把表层土壤去除 0.5 cm, 把农药慢慢均匀浇于根系周围, 盖好取出来的土. 施加农药前 2 d 植物不浇水, 使土壤保持一定干燥度, 浇农药时防止农药从土壤中漏出.

2008 年 7 月 31 日播种. 试验在日光温室内进行, 浇自来水, 维持土壤含水量 70% 左右, 细心管理, 及时拔除杂草. 于 12 月 16 日施药, 14 d 后收获.

1.3 测定项目和方法

植物样品地上部和根系分开取样, 洗净, 擦干. 胡萝卜须根用于测定菌根侵染率, 肉质根用于测定产量和农药含量. 把胡萝卜肉质根和地上部称量鲜重后在液氮罐中冷冻, 之后于 -20℃ 冰箱保存用于测定辛硫磷含量. 把整盆土壤混匀, 取样 50 g 用于测定土壤速效磷.

菌根侵染率用曲利苯蓝-方 A 叉法测定^[12], 土壤速效磷用 NaHCO_3 浸提-钼锑抗比色法测定^[13]. 辛硫磷含量用液相色谱法测定, 色谱条件: 色谱仪为 Agilent1100 高效液相色谱仪, 色谱柱为 Agilent ZORBAX SB-C18 柱 (150 mm × 2.1 mm i. d., 5 μm), 流动相为乙腈/水 = 65/35 (体积比), 流速 0.45 mL/min, 进样量 4 μL , 柱温 30℃, 检测波长 280 nm, 洗脱时间为 10 min. 辛硫磷回收率为 100.4%.

1.4 数据分析

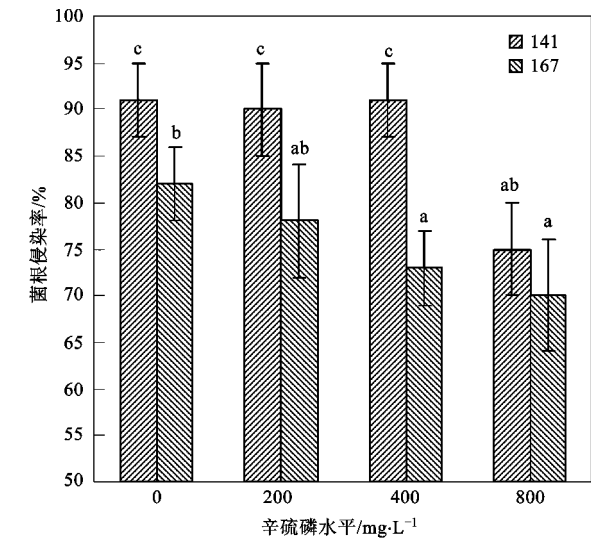
利用 Excel 和 SPSS13.0 等统计软件对数 C 行统计分析. Duncan 多重比较各处理之间的差异显著性, 双因子方差分析接种 AM 真菌菌剂和施加辛硫磷的作用及二者之间的交互作用.

2 结果与分析

2.1 菌根侵染率

CK 处理未发现菌根侵染. 2 个接种 AM 真菌处理菌根侵染率均高于 70 % (图 1). 与不施加辛硫磷相比, 辛硫磷 800 mg·L⁻¹ 时显著抑制了 *Glomus intraradices* BEG 141 对胡萝卜的侵染, 其他水平下没有显著影响; 167 处理中菌根侵染率随辛硫磷水平增加而逐渐降低. 141 处理菌根侵染率在所有辛硫磷水平下均高于 167.

双因子方差分析结果菌剂 (M): $F = 248.9, p = 3.57 \times 10^{-11}$; 辛硫磷水平 (P): $F = 64.3, p = 3.81 \times 10^{-9}$; M × P 交互作用: $F = 13.3, p = 1.28 \times 10^{-4}$. 说明接种 AM 真菌和辛硫磷处理对菌根侵染率均有显著影响 ($p < 0.01$), 且二者之间存在显著交互作用 ($p < 0.01$).



141 和 167 分别代表接种 *Glomus intraradices* BEG 141、*Glomus mosseae* BEG 167 真菌菌剂; 图中竖棒表示标准误差, 不同字母表示在 $p < 0.05$ 水平差异显著, 下同

图 1 不同接种处理和辛硫磷水平下胡萝卜的菌根侵染率

Fig. 1 Root infection rates of carrot plants under different inoculation treatments and phoxim addition levels

2.2 胡萝卜产量和地上部鲜重

在 CK 和 167 处理中, 与不施加辛硫磷相比, 辛硫磷施加量对于胡萝卜产量和地上部鲜重没有显著影响 (图 2 和图 3). 在 141 处理中, 400 mg·L⁻¹ 的辛硫磷甚至使胡萝卜地上部生物量增加, 施用高水平辛硫磷 (800 mg·L⁻¹) 胡萝卜产量有降低趋势. 在所有辛硫磷水平下, 接种 AM 真菌均显著增加了胡萝卜产量和地上部鲜重 (图 2 和图 3). 141 和 167 处理

中胡萝卜的平均产量分别为 CK 的 5.2 倍和 4.1 倍, 地上部鲜重是 CK 的 3.7 和 2.9 倍. 2 种菌剂相比, 在辛硫磷低于 800 mg·L⁻¹ 时接种 *Glomus intraradices* BEG 141 比 *Glomus mosseae* BEG 167 显著提高胡萝卜产量和地上部鲜重.

图 2 双因子方差分析结果菌剂 (M): $F = 288.6, p = 1.64 \times 10^{-17}$; 辛硫磷水平 (P): $F = 2.41, p = 0.09$; M × P 交互作用: $F = 4.00, p = 0.006$. 说明接种 AM 真菌对胡萝卜产量有显著影响 ($p < 0.01$), 且在菌剂与辛硫磷水平之间存在显著交互作用 ($p < 0.01$). 图 3 双因子方差分析结果菌剂 (M): $F = 253.5, p = 7.27 \times 10^{-17}$; 辛硫磷水平 (P): $F = 5.65, p = 0.004$; M × P 交互作用: $F = 6.87, p = 2.45 \times 10^{-4}$. 说明接种 AM 真菌和辛硫磷均对胡萝卜地上部鲜重有显著影响 ($p < 0.01$), 且二者之间存在显著交互作用 ($p < 0.01$).

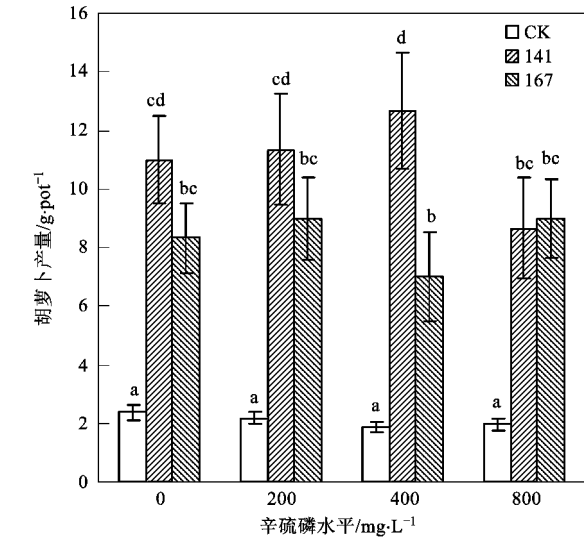


图 2 不同接种处理和辛硫磷水平下胡萝卜的产量

Fig. 2 Carrot yields under different inoculation treatments and phoxim addition levels

2.3 辛硫磷残留

如图 4 和图 5 所示, 不施加农药时胡萝卜体内辛硫磷没有检出. 随着农药施加量增加, 所有处理胡萝卜根内辛硫磷含量逐渐升高, 均超过国家农药残留限量值 (0.05 mg·kg⁻¹, 鲜重). 地上部辛硫磷含量也有类似趋势. 同处理下胡萝卜根内辛硫磷含量显著高于地上部.

接种 AM 真菌显著降低了胡萝卜根和地上部辛硫磷含量, 在 200 mg·L⁻¹ 辛硫磷时, 接种 AM 真菌的处理地上部没有检出. 不同 AM 真菌表现出差异,

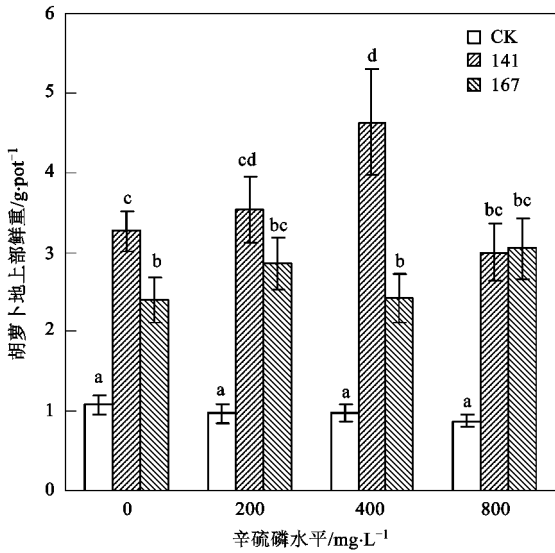


图3 不同接种处理和辛硫磷水平下胡萝卜地上部鲜重

Fig.3 Shoot wet weights of carrot plants under different inoculation treatments and phoxim addition levels

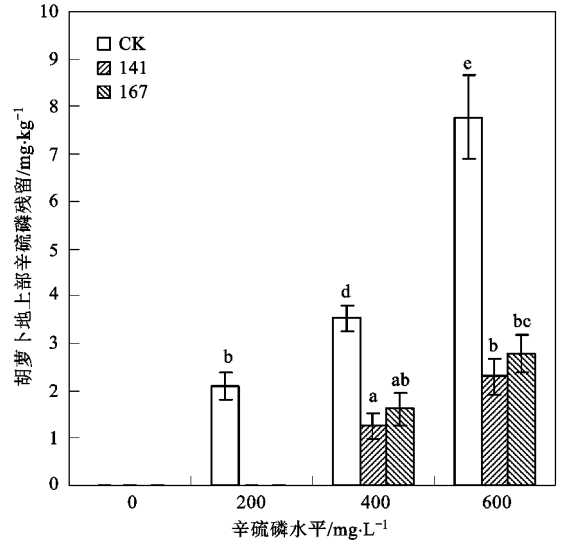


图5 不同接种处理和辛硫磷水平下胡萝卜地上部辛硫磷残留

Fig.5 Phoxim residues in carrot shoots under different inoculation treatments and phoxim addition levels

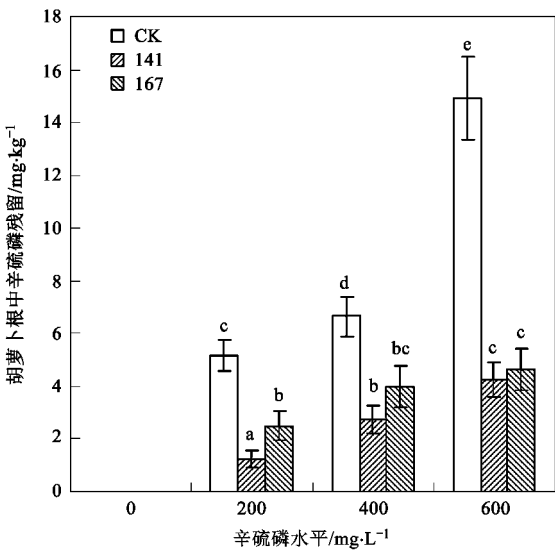


图4 不同接种处理和辛硫磷水平下胡萝卜根中辛硫磷残留

Fig.4 Phoxim residues in carrot roots under different inoculation treatments and phoxim addition levels

总体上 141 处理胡萝卜体内辛硫磷低于 167 处理.

图4 双因子方差分析结果菌剂(M): $F = 195.8, p = 1.38 \times 10^{-15}$; 辛硫磷水平(P): $F = 257.9, p = 2.19 \times 10^{-18}$; M × P 交互作用: $F = 52.1, p = 1.37 \times 10^{-12}$. 图5 双因子方差分析结果菌剂(M): $F = 284.7, p = 1.91 \times 10^{-17}$; 辛硫磷水平(P): $F = 412.0, p = 9.10 \times 10^{-17}$; M × P 交互作用: $F = 60.2, p = 2.79 \times 10^{-13}$. 说明接种 AM 真菌和辛硫磷均对胡萝卜根和地上部辛硫磷含量有显著

影响($p < 0.01$), 且二者之间存在显著交互作用($p < 0.01$).

2.4 土壤速效磷

植物收获后, 所有处理土壤速效磷含量显著降低(图6). 与不施加辛硫磷相比, 施加 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 辛硫磷没有增加土壤速效磷, 施加 400 和 $800 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的辛硫磷使得土壤速效磷显著升高. 与 CK 处理相比, 接种 AM 真菌的处理土壤速效磷显著降低. 施加 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 辛硫磷时, 167 处理土壤速效磷含量低于 141 处理, 其他辛硫磷水平下未见显著

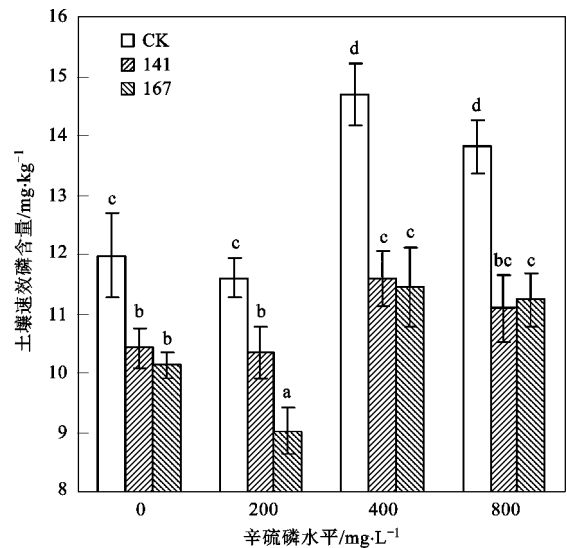


图6 胡萝卜收获后土壤速效磷含量

Fig.6 Concentrations of soil available phosphorus after carrot harvest

差异.

双因子方差分析结果菌剂(M): $F = 99.1, p = 2.52 \times 10^{-12}$;辛硫磷水平(P): $F = 42.9, p = 8.56 \times 10^{-10}$;M $\times$ P交互作用: $F = 3.35, p = 0.015$.说明接种 AM 真菌和辛硫磷均对土壤速效磷含量有显著影响($p < 0.01$),且二者之间存在显著交互作用($p < 0.05$).

3 讨论

胡萝卜是菌根依赖性极强的作物^[14].本研究证实,接种 AM 真菌显著促进了胡萝卜的生长,其原因显然与 AM 真菌提供较多的矿质营养有关,尤其是磷.这一点已被许多研究所证实.在本研究中,供试土壤速效磷含量较高,但是对于胡萝卜等作物来说,112 mg·kg⁻¹以下均属于贫磷条件^[14],这可能是 AM 真菌能够发挥显著作用的原因之一.

研究证实,适量的辛硫磷不会抑制菌根侵染,但在较高水平时体现出一定的抑制作用.这说明 AM 真菌对有机磷农药有一定的耐性^[8].低剂量灭克磷(0.5 mg·kg⁻¹)对 AM 真菌生长和代谢活性都有一定刺激作用,但是在高剂量时抑制活性菌丝的增长^[15].本试验中辛硫磷施加于作物生长后期,此时菌根已经发育,辛硫磷的抑制作用可能没有充分体现出来.

据笔者所知,这是国内外首次证实接种 AM 真菌能够降低胡萝卜中的辛硫磷残留.已有文献表明,AM 真菌有促进农药降解、降低农药残留的潜力,其机制包括多个方面.首先,AM 真菌直接或间接促进宿主植物根系分泌某些水解酶(如磷酸酶、脲酶、酯酶等)和氧化酶(如过氧化物酶、过氧化氢酶、多酚氧化酶等)来降解土壤中的有机污染物^[16~18].其次,AM 真菌侵染影响根系分泌物的组成,导致根际微生物群落和活性改变^[18,19],影响污染物的生物降解.第三,AM 真菌侵染改变宿主植物的生长代谢状况,影响植物对有机磷农药的吸收和分配.本试验中,接种 AM 真菌后,植物生长代谢旺盛,可能分泌了更多酶类和根系分泌物,直接或间接地促进了土壤中辛硫磷的降解.事实上,接种 AM 真菌也显著降低了土壤中辛硫磷的残留(待发表资料).此外,胡萝卜菌根依赖性很强,接种 AM 真菌后更高的生物量会对辛硫磷残留产生一定程度的“稀释”作用.

辛硫磷农药有可能作为有机磷源、氮源等被微生物降解利用. AM 真菌具有利用有机磷源的潜力^[20,21]. AM 真菌能产生多种水解酶,如磷酸酶^[22],

并提高土壤磷酸酶的活性^[23].在离体培养条件下,*G. intraradices* 的根外菌丝能在无菌条件下水解 5-溴-4-氯-3-吡啶-磷酸对甲苯胺盐、二磷酸酚酞、肌醇六磷酸等有机磷源,并吸收转运给宿主植物^[21].此外,AM 真菌也能利用有机物中的氮^[24].在一定限制的有机氮源条件下,氮作为信号分子可以诱导 *G. intraradices* 根外菌丝在转录水平的反应^[25].显然,辛硫磷的菌根降解机制尚需要全面研究.

研究初步证实 AM 真菌可以降低胡萝卜中的辛硫磷残留,但不同 AM 真菌的效果存在差异.虽然接种 AM 真菌没有把辛硫磷残留降低到所期望的 0.05 mg·kg⁻¹以下,但依然显示较好的作用,说明 AM 真菌可以具有用于控制蔬菜作物质量安「潜力.未来需要更系统的深入研究:①进一步筛选效应良好的 AM 真菌菌种(菌株);②需要在更多种类的农药和蔬菜上开展研究;③利用同位素标记等多种手段进一步研究有机磷农药在菌根中的代谢过程和吸收、运输机制.

4 结论

(1)AM 真菌容易与胡萝卜共生,受辛硫磷施用量影响较小.

(2)AM 真菌在所有辛硫磷施用量下均可以显著提高胡萝卜产量,说明胡萝卜菌根依赖性强.

(3)在所有辛硫磷水平下,接种 AM 真菌显著降低了胡萝卜中的辛硫磷含量,说明 AM 真菌有用于降低胡萝卜辛硫磷残留的潜力.

参考文献:

- [1] 周启星,宋玉芳. 污染土壤修复原理与方法[M]. 北京: 科学出版社,2004.
- [2] 周启星. 健康土壤学——土壤健康质量与农产品安全[M]. 北京: 科学出版社,2005.
- [3] Smith S E, Read D J. Mycorrhizal Symbiosis [M]. London: Academic Press,1997.
- [4] 李晓林,冯固. 丛枝菌根生态生理[M]. 北京: 华文出版社,2001.
- [5] 王发园,林先贵. 丛枝菌根真菌对污染土壤中农产品质量安「影响[J]. 土壤学报,2008,45(6): 1142-1147.
- [6] 王曙光,林先贵. 菌根在污染土壤生物修复中的作用[J]. 农村生态环境,2001,17(1): 56-59.
- [7] Menendez A, Martinez A, Chiochio V, et al. Influence of the insecticide dimethoate on arbuscular mycorrhizal colonization and growth in soybean plants[J]. Int Microbiol,1999,2(1): 43-45.
- [8] 刘茵,刘秀花,冯固,等. 甲胺磷污染对丛枝菌根(AM)共生体形成及宿主番茄生长的影响[J]. 湖北农业科学,2004,(4): 64-67.
- [9] White J C, Ross D W, Gent M N, et al. Effect of mycorrhizal

- fungi on the phytoextraction of weathered *p,p*-DDE by *Cucurbita pepo* [J]. J Hazard Mater, 2006, **137**: 1750-1757.
- [10] Nelson S D, Khan S U. Uptake of atrazine by hyphae of *Glomus vesicular-arbuscular* mycorrhizae and root systems of corn (*Zea mays* L.) [J]. Weed Sci, 1992, **40**(1): 161-170.
- [11] Huang H L, Zhang S Z, Shan X Q, *et al.* Effect of arbuscular mycorrhizal fungus (*Glomus caledonium*) on the accumulation and metabolism of atrazine in maize (*Zea mays* L.) and atrazine dissipation in soil [J]. Environ Pollut, 2007, **146**(2): 452-457.
- [12] Giovannetti M, Mosse B. An evaluation of techniques for measuring vesicular-arbuscular mycorrhizal infection in roots [J]. New Phytol, 1980, **84**: 489-500.
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [14] Plenchette C, Fortin J A, Furlan V. Growth responses of several plant species to mycorrhizae in a soil of moderate P- fertility. I. Mycorrhizal dependency under field conditions [J]. Plant Soil, 1983, **70**: 199-209.
- [15] 范洁群, 冯固, 李晓林. 有机磷杀虫剂——灭克磷对丛枝菌根真菌 *Glomus mosseae* 生长的效应 [J]. 菌物学报, 2006, **25**(1): 127-132.
- [16] Salzer P, Corbiere H, Boller T. Hydrogen peroxide accumulation in *Medicago truncatula* roots colonized by the arbuscular mycorrhiza-forming fungus *Glomus intraradices* [J]. Planta, 1999, **208**: 319-325.
- [17] Criquet S, Joner E J, L  glize P, *et al.* Anthracene and mycorrhiza affect the activity of oxidoreductases in the roots and the rhizosphere of lucerne (*Medicago sativa* L.) [J]. Biotechnol Lett, 2000, **22**: 1733-1737.
- [18] Wu N Y, Zhang S Z, Huang H L, *et al.* DDT uptake by arbuscular mycorrhizal alfalfa and depletion in soil as influenced by soil application of a non-ionic surfactant [J]. Environ Pollut, 2008, **151**(3): 569-575.
- [19] Joner E J, Leyval C. Rhizosphere gradients of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) dissipation in two industrial soils, and the impact of arbuscular mycorrhiza [J]. Environ Sci Technol, 2003, **37**(11): 2371-2375.
- [20] Feng G, Song Y C, Li X L, *et al.* Contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to utilization of organic sources of phosphorus by red clover in a calcareous soil [J]. Appl Soil Ecol, 2003, **22**(2): 139-148.
- [21] Koide R T, Kabir Z. Extraradical hyphae of the mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* can hydrolyse organic phosphate [J]. New Phytol, 2000, **148**: 511-517.
- [22] Joner E J, Johansen A. Phosphatase activity of external hyphae of two arbuscular mycorrhizal fungi [J]. Mycol Res, 2000, **104**: 81-86.
- [23] Tarafdar J C, Marschner H. Phosphatase activity in the rhizosphere and hyphosphere of VA-mycorrhizal wheat supplied with inorganic and organic phosphorus [J]. Soil Biol Biochem, 1994, **26**: 387-395.
- [24] Hodge A, Campbell C, Fitter A H. An arbuscular mycorrhizal fungus accelerates decomposition and acquires nitrogen directly from organic material [J]. Nature, 2001, **413**: 297-299.
- [25] Cappellazzo G, Lanfranco L, Bonfante P. A limiting source of organic nitrogen induces specific transcriptional responses in the extraradical structures of the endomycorrhizal fungus *Glomus intraradices* [J]. Curr Genet, 2007, **51**(1): 59-70.