

丛枝菌根真菌种间差异对柚苗营养生长及矿质含量的影响*

仝瑞建¹ 杨晓红^{1,2} 李东彦¹

(¹ 西南大学园艺园林学院, 重庆 400715; ² 华中农业大学柑桔研究所, 武汉 430070)

【摘要】 在温室盆栽条件下研究了3种AM真菌 *Gigaspora margarita*, *Glomus mosseae* 和 *Glomus versiforme* 对长寿沙田柚 (*Citrus grandis* cv. Changshou Shatian You) 无菌苗营养生长及矿质含量的影响。结果表明, 接种AM真菌的植株均有效地被感染; 与对照相比, 接种AM真菌能显著促进植株地上和地下部分生长, 尤其促进了须根的生长, 接种 *Glomus mosseae* 处理的主根长度比对照增加了22.7%, 侧根数量增加了35.7%, 须根数量和总长分别增加了160.8%和103.2%; 接种AM真菌显著地提高了叶片的N、P、K、Ca、Mg、Zn、Cu和Mn含量, 与对照相比, 3种真菌处理的P含量分别增加了46.8%、88.7%和32.3%。3种AM真菌处理中, 以接种 *Glomus mosseae* 处理营养生长最好, 菌根依赖性最大, 矿质元素N、P、K、Ca、Zn和Cu的含量最高, 其效应顺序为 *Glomus mosseae* > *Gigaspora margarita* > *Glomus versiforme*, 可见, 3种AM真菌对长寿沙田柚生长均有正效应, 以 *Glomus mosseae* 最为显著, 为长寿沙田柚适宜的优良菌种(株)。

关键词 AM真菌 种间差异 长寿沙田柚 营养生长 矿质含量

文章编号 1001-9332(2006)07-1229-05 **中图分类号** Q948.3 **文献标识码** A

Effects of interspecies difference of arbuscular mycorrhizal fungi on *Citrus grandis* cv. Changshou Shatian You seedlings vegetative growth and mineral contents. TONG Ruijian¹, YANG Xiaohong^{1,2}, LI Dongyan¹ (¹College of Horticulture and Landscape Architecture, Southwest University, Chongqing 400715, China; ²Institute of Citrus, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2006, 17(7): 1229 ~ 1233.

In a pot experiment, axenic pomelo (*Citrus grandis* cv. Changshou Shatian You) seedlings were inoculated with arbuscular mycorrhizal (AM) fungi *Gigaspora margarita*, *Glomus mosseae* and *Glomus versiforme*, respectively, and their vegetative growth and mineral contents were studied. The results showed that the seedlings inoculated with test AM fungi could be infected effectively, and their shoot and root growth, especially fibrous root growth, was significantly improved, compared with the control. After inoculated with *G. mosseae*, the root length, lateral root number, and fibrous root number and length of the seedlings were increased by 22.7%, 35.7%, 160.8% and 103.2%, respectively. The inoculation of these three AM fungi could significantly elevate the N, P, K, Ca, Mg, Zn, Cu and Mn contents in seedlings leaves. For example, the P content was increased by 46.8%, 88.7% and 32.3%, respectively, compared with the control. Among the three treatments, the seedlings inoculated with *G. mosseae* had the best vegetative growth, and the highest mycorrhizal dependence and N, P, K, Ca, Zn and Cu contents. The relative occurrence of AM fungal species decreased in the order of *G. mosseae* > *G. margarita* > *G. versiforme*, indicating that *G. mosseae* was most suitable for *C. grandis* seedlings inoculation.

Key words Arbuscular mycorrhizal fungi, Interspecies difference, *Citrus grandis* cv. Changshou Shatian You, Vegetative growth, Mineral content.

1 引言

丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, 简称AM真菌或AMF)是一种新型的生物肥料^[12], 存在于几乎所有类型的土壤中, 可以与绝大多数植物共生形成丛枝菌根(arbuscular mycorrhiza, 简称AM)。柑桔(*Citrus*)生产是农业生产的重要组成部分, 产量居世界各种果品之首。柑桔是内生菌根果树, 在土壤中一般不生根毛, 主要依靠与其共生的真菌进行吸收活动^[7], 对丛枝菌根的依赖性较强。大

量实验证明^[8,18,19], 绝大多数柑桔类植物可形成菌根, 尤其AM真菌对柑桔有显著效应^[14,23,24,28], 主要表现在促进植株营养生长, 改善果实品质, 增加根系对矿质养分的吸收和利用等方面, 且不同品种所适宜的菌根菌存在差异^[5,7,9]。

近年来, 柚类发展迅速, 长寿沙田柚(*Citrus grandis* cv. Changshou Shatian You)为重庆地方发展

* 中国博士后科学基金项目(2003034492)和重庆市教委科学基金资助项目(040216)。

** 通讯联系人, E-mail: yangxh@swu.edu.cn
2005-07-22 收稿, 2006-04-27 接受。

的名柚。幼苗菌根化是有机名柚生产的重要途径之一。本实验通过对长寿沙田柚实生无菌苗接种不同的 AM 真菌,旨在探讨 AM 真菌种间差异对其生长及矿质含量的不同效应,筛选适宜的优良菌种(菌株),为 AM 真菌的实际应用提供理论依据。

2 材料与方法

2.1 供试材料与试验设计

2.1.1 供试材料 供试菌剂为 *Gigaspora margarita* Becker & Hall 记为 *Gi. margarita*, 购自国际菌种保藏中心 INVAM, 经白三叶草 (*Trifolium repense*) 富集培养后使用; *Glomus mosseae* Nicolson & Gerdemann 记为 *G. mosseae* 和 *Glomus versiforme* Berch 记为 *G. versiforme*, 由莱阳农学院刘润进教授提供。长寿沙田柚果实于 2004 年 11 月中下旬采自重庆市长寿区邻封镇沙田柚果园。

2.1.2 试验设计 按照 Murashige 等^[15]的方法配制 MT 培养基, 培养瓶中每瓶分装 40 ml, 封口后, 121 °C 高压灭菌 20 min, 冷凝后待用。

长寿沙田柚的播种在超净工作台上进行, 将成熟种子先用 1% 的 NaOH 溶液处理 15 min, 洗去果胶后, 用 70% 酒精浸泡 1 min, 再用 0.2% 的 HgCl₂ 溶液灭菌 10 min, 最后用无菌蒸馏水冲洗 5 次。将已消毒的种子剥去种皮后, 胚端朝下插到盛有 MT 培养基的培养瓶中, 25 °C ± 2 °C 暗培养 6 d 后, 移到培养架上光照培养, 温度为 25 °C ± 2 °C, 每天光照 13 h, 光照强度为 1 500 ~ 2 000 lx。

培养基质(紫色土、腐质土和蛭石按体积比 2: 2: 1 混合均匀)的理化性状为: pH 5.82、有机质 28.37 g · kg⁻¹、全 N 1.31 g · kg⁻¹、全 P 0.62 g · kg⁻¹、全 K 19.42 g · kg⁻¹、有效 P 6.65 mg · kg⁻¹。用 Co⁶⁰ 辐射灭菌后, 等量装入已用福尔马林消毒的塑料钵(上口内径 16 cm、下口内径 11 cm、高 12 cm) 中, 分别于土表下约 3 cm 处接种 AM 真菌菌剂(每钵接种菌剂中含有约 200 个孢子。一些菌丝和菌根根段) *Gi. margarita*、*G. mosseae* 和 *G. versiforme*, 对照接种已灭菌的菌剂。具体做法为: 先在塑料钵中装入所需土壤的 2/3, 将菌剂均匀铺到上面, 再将剩余 1/3 装入钵中, 所有与菌剂和土壤接触的材料都经过严格灭菌或消毒处理。将生长 20 d 的无菌根柚苗移栽到相应的培养钵中, 每钵 5 株, 4 个重复。随机区组排列, 25 °C ± 2 °C 培养, 每隔 14 d 每钵喷施 1/10 的低磷 Hoagland 营养液 100 ml, 每 5 d 每钵浇水 200 ml。

2.2 测定方法

盆栽 150 d 后, 将植株从钵中取出, 冲洗干净, 分别测量苗高、地径、叶面积、主根长度、须根长度、真叶数、节数、侧根数量、须根数量、地上和地下部分鲜重和干重, 其中叶面积测量采用数字图象处理技术^[26], 即先用 SCA-XX 型影像扫描仪(清华紫光股份有限公司)扫描, 再用软件 Photoshop 7.0 处理, 计算 3 个处理的菌根依赖性(mycorrhizal dependence, MD), 公式为: MD = 菌根植株干重/非菌根植株干重 × 100%。

菌根感染率测定: 取约 2 cm 长具有完整根尖的根段于 FAA 液(福尔马林 5 ml, 冰醋酸 5 ml, 50% 酒精 90 ml) 中固定, 按照改良的 Phillips 和 Hayman 方法^[17]对根样染色, 以长度测量软件^[27]测量根段的总长, 用测微尺在生物显微镜(BS 202, 重庆光学仪器厂)下直接测量感染根段长, 按照下列公式计算菌根感染率: 菌根感染率(%) = 感染根段长/观察根段长 × 100%。

每切片观察 5 个根段, 每重复观察 5 张切片, 4 个重复。

植株矿质元素的测定^[1]: N、P 和 K 测定采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮法处理样品, 用凯氏定氮蒸馏法测定 N 含量, 钼钒黄比色法(UV-240 紫外可见分光光度计, 日本津岛公司)测定 P 含量, 火焰光度计法(FP640 火焰光度计, 上海精密科学仪器有限公司分析仪器总厂)测定 K 含量; Ca、Mg、Zn、Cu、和 Mn 用马福炉灰化后, 用 WFX-10 型原子吸收分光光度计(北京第二光学仪器厂)测定。

2.3 统计分析

采用 SAS 8.1(美国 SAS 软件研究所)统计软件进行数据分析, 变量的变异幅度用标准误差表示。

3 结果与分析

3.1 AM 真菌种间差异对柚苗菌根形成和依赖性的影响

长寿沙田柚接种 AM 真菌 *Gi. margarita*、*G. mosseae* 和 *G. versiforme* 3 个处理及对照的菌根依赖性和菌根感染率见表 1。从表 1 可以看出, 接种 *G. mosseae* 处理的菌根感染率和菌根依赖性均显著高于其它处理, 对照无 AM 真菌感染。AM 真菌感染长寿沙田柚根系形成丛枝菌根能力强弱及菌根依赖性的顺序均为 *G. mosseae* > *Gi. margarita* > *G. versiforme* > 对照。

表 1 AM 真菌种间差异对长寿沙田柚菌根感染率和依赖性的影响
Table 1 Effect of interspecies difference of AM fungi on infection rate and mycorrhizal dependency of pomelo seedlings

| 项目 Item | 对照 Control | 接种 AM 真菌 Inoculation with AM fungi | | |
|-------------------------------------|----------------------|------------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| | | <i>G. mosseae</i> | <i>Gi. margarita</i> | <i>G. versiforme</i> |
| 菌根感染率 Infection rate (%) | 0 ± 0 ^c | 55.6 ± 2.2 ^a | 48.2 ± 2.4 ^b | 47.4 ± 1.5 ^b |
| 菌根依赖性 Mycorrhizal dependency (%) | 100 ± 0 ^c | 119.6 ± 3.4 ^a | 109.4 ± 0.9 ^b | 105.0 ± 0.8 ^{bc} |

同一行中不同的小写字母表示差异显著 Different letters in rows indicate significant difference ($P < 0.05$). 下同 The same below.

3.2 AM 真菌种间差异对柚苗生长的影响

3.2.1 对地上部分生长的影响 图 1 为接种不同 AM 真菌的柚苗生长 150 d 的情况。从图 1 可以看出, 接种 AM 真菌的 3 个处理长势均显著好于对照, 植株高大健壮, 叶片较浓绿。其中接种 *G. mosseae* 处理生长最好, 且长势均匀, 叶片生长较直立。各处理长势顺序为 *G. mosseae* > *Gi. margarita* > *G. versiforme* > 对照。



图1 AM 真菌种间差异对长寿沙田柚实生苗营养生长的影响
Fig.1 Effect of interspecies difference of AM fungi on vegetable growth of pomelo seedlings.

AM 真菌种间差异对长寿沙田柚实生苗地上部分生长的影响见表 2。由表 2 可知,接种 AM 真菌 *Gi. margarita*、*G. mosseae* 和 *G. versiforme* 处理均好于对照,且各项目趋势基本一致。以接种 *G. mosseae* 处理最好,与其它处理间的差异均达到显著水平;接种 *Gi. margarita* 处理优于 *G. versiforme* 处理,且除真叶数外,差异均达到显著水平;接种 *G. versiforme* 处理与对照相比,地径、叶面积和地上部分鲜重差异达到显著水平。可见,接种 AM 真菌可显著促进长寿沙田柚地上部分的生长,且其效应在不同菌种间有所不同。

表 2 AM 真菌种间差异对长寿沙田柚地上部分生长的影响
Table 2 Effect of interspecies difference of AM fungi on shoot growth of pomelo seedlings

| 项目 Item | 对照 Control | 接种 AM 真菌 Inoculation with AM fungi | | |
|---|----------------------------|------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| | | <i>G. mosseae</i> | <i>Gi. margarita</i> | <i>G. versiforme</i> |
| 苗高 Shoot length (cm) | 8.98 ± 0.2 ^c | 10.29 ± 0.2 ^a | 9.76 ± 0.2 ^b | 9.20 ± 0.1 ^c |
| 地径 Diameter (mm) | 0.191 ± 0.003 ^c | 0.210 ± 0.003 ^a | 0.203 ± 0.002 ^{ab} | 0.200 ± 0.002 ^b |
| 叶面积 Leaf area (cm ² · plant ⁻¹) | 52.32 ± 0.9 ^c | 60.66 ± 1.1 ^a | 55.82 ± 1.0 ^b | 54.11 ± 1.4 ^{bc} |
| 真叶数 Leaf number | 9.16 ± 0.2 ^b | 10.00 ± 0.2 ^a | 9.32 ± 0.2 ^b | 9.23 ± 0.2 ^b |
| 节数 Node number | 5.40 ± 0.2 ^c | 7.20 ± 0.3 ^a | 6.30 ± 0.2 ^b | 5.55 ± 0.2 ^c |
| 地上部鲜重 Shoot fresh weight (g · plant ⁻¹) | 1.34 ± 0.04 ^c | 1.64 ± 0.03 ^a | 1.44 ± 0.03 ^b | 1.38 ± 0.05 ^{bc} |
| 地上部干重 Shoot dry weight (g · plant ⁻¹) | 0.44 ± 0.02 ^b | 0.51 ± 0.01 ^a | 0.47 ± 0.02 ^{ab} | 0.44 ± 0.02 ^b |

3.2.2 对地下部分生长的影响 表 3 为 AM 真菌种间差异对长寿沙田柚地下部分生长的影响。从表 3 可以看出,接种 AM 真菌对植株整个根部体系产生显著影响。接种 AM 真菌的 3 个处理地下部分各项目均显著大于对照,尤其是须根长度和须根数量。接种 *G. mosseae* 处理与对照相比,主根长度增加了 22.7%,侧根数量增加了 35.7%,须根数量增加了 160.8%,须根总长增加了 103.2%,鲜重和干重的增加幅度接近,分别为 23.4% 和 21.9%。对 AM 真菌种间效应进行比较,以接种 *G. mosseae* 处理的根

系生长最好,与接种 *Gi. margarita* 和 *G. versiforme* 的处理间差异显著。接种 *Gi. margarita* 的处理,除须根长度外,其它指标均大于接种 *G. versiforme* 的处理,其中侧根数量增加了 9.6%,差异达到显著水平。

表 3 AM 真菌种间差异对长寿沙田柚地下部分生长的影响
Table 3 Effect of interspecies difference of AM fungi on root growth of pomelo seedlings

| 项目 Item | 对照 Control | 接种 AM 真菌 Inoculation with AM fungi | | |
|---|--------------------------|------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | | <i>G. mosseae</i> | <i>Gi. margarita</i> | <i>G. versiforme</i> |
| 主根长度 Root length (cm) | 14.62 ± 1.0 ^b | 17.94 ± 0.7 ^a | 16.97 ± 0.8 ^{ab} | 16.94 ± 0.9 ^{ab} |
| 侧根数量 Lateral root number | 18.06 ± 0.7 ^c | 24.50 ± 1.1 ^a | 21.80 ± 0.8 ^b | 19.89 ± 0.7 ^{bc} |
| 须根长度 Fibrous root length (cm · plant ⁻¹) | 74.08 ± 4.8 ^c | 150.52 ± 11.0 ^a | 104.27 ± 2.9 ^b | 109.33 ± 3.9 ^b |
| 须根数量 Fibrous root Number | 32.67 ± 2.1 ^c | 85.20 ± 5.1 ^a | 48.20 ± 4.8 ^b | 43.17 ± 2.1 ^b |
| 地下部鲜重 Root fresh weight (g · plant ⁻¹) | 1.37 ± 0.04 ^c | 1.69 ± 0.05 ^a | 1.51 ± 0.04 ^b | 1.50 ± 0.03 ^b |
| 地下部干重 Root dry weight (g · plant ⁻¹) | 0.32 ± 0 ^b | 0.39 ± 0.01 ^a | 0.35 ± 0.02 ^{ab} | 0.34 ± 0.02 ^{ab} |

3.3 AM 真菌种间差异对柚苗矿质元素含量的影响

表 4 为 AM 真菌种间差异对柚苗叶片矿质元素含量的影响。从表 4 中可以看出,接种 AM 真菌促进了植株对矿质元素 N、P、K、Ca、Mg、Zn、Cu 和 Mn 的吸收,尤其促进了 P、K、Ca、Mg 和 Cu 的吸收。除元素 Mn 外,3 个处理的各矿质元素含量与对照间均达到显著性差异,如接种 *Gi. margarita*、*G. mosseae* 和 *G. versiforme* 3 个处理的 P 元素含量分别比对照增加了 46.8%、88.7% 和 32.3%。对接种 AM 真菌的 3 个处理进行比较可知,接种 *G. mosseae* 处理的 N、P、K、Ca、Zn 和 Cu 的含量最高,其中, P、K 和 Zn 的含量与其它 2 个处理达到显著性差异。对于元素 Mg 和 Mn,以接种 *Gi. margarita* 处理的含量最高,且与其它处理差异显著。对接种 *Gi. margarita* 和 *G. ver-*

表 4 AM 真菌种间差异对长寿沙田柚实生苗叶片矿质元素含量的影响

Table 4 Effect of interspecies difference of AM fungi on mineral contents in leaves of pomelo seedlings

| 矿质元素 Mineral elements | 对照 Control | 接种 AM 真菌 Inoculation with AM fungi | | |
|-----------------------------|----------------------------|------------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | | <i>G. mosseae</i> | <i>Gi. margarita</i> | <i>G. versiforme</i> |
| N (%) | 2.03 ± 0.03 ^b | 2.31 ± 0.05 ^a | 2.24 ± 0.04 ^a | 2.20 ± 0.02 ^a |
| P (%) | 0.062 ± 0 ^c | 0.117 ± 0.002 ^a | 0.091 ± 0.004 ^b | 0.082 ± 0.007 ^b |
| K (%) | 0.49 ± 0.02 ^c | 0.55 ± 0.02 ^a | 0.50 ± 0 ^{bc} | 0.54 ± 0 ^{ab} |
| Ca (%) | 1.70 ± 0 ^b | 2.09 ± 0.08 ^a | 2.00 ± 0.10 ^a | 1.98 ± 0.02 ^a |
| Mg (%) | 0.136 ± 0.008 ^c | 0.163 ± 0.006 ^b | 0.191 ± 0.003 ^a | 0.164 ± 0.008 ^b |
| Zn (mg · kg ⁻¹) | 20.63 ± 0 ^c | 24.88 ± 0.4 ^a | 22.75 ± 0.3 ^b | 22.19 ± 0.9 ^{bc} |
| Cu (mg · kg ⁻¹) | 4.19 ± 0.4 ^b | 6.25 ± 0 ^a | 6.06 ± 0.3 ^a | 5.63 ± 0 ^a |
| Mn (mg · kg ⁻¹) | 45.94 ± 2.8 ^b | 50.63 ± 0 ^b | 64.69 ± 0.9 ^a | 50.00 ± 3.1 ^b |

siforme 处理进行比较,除元素 K 含量外,*Gi. margarita* 处理的各矿质元素含量均高于 *G. versiforme*,其中 Mg 和 Mn 含量达到显著性差异.由此可见,接种 AM 真菌促进了长寿沙田柚实生苗对矿质元素的吸收,但各处理的矿质元素含量增长规律并不完全一致.

4 讨 论

4.1 AM 真菌显著地促进了柚苗营养生长和矿质元素的吸收

菌根在柑桔中的应用较为广泛^[3,5,7,9,14,24],但在沙田柚上的应用未见报道.本实验表明,长寿沙田柚实生苗可有效地被供试的 3 种 AM 真菌感染,接种 AM 真菌可全面促进植株的营养生长,提高 N、P、K、Ca、Mg、Zn、Cu 和 Mn 的含量.

AM 真菌对柑桔的有益作用主要是通过改善根系对矿质养分的吸收和利用而达到的^[7].这一方面是由于外生菌丝极大地扩展了根系的吸收范围^[12],另一方面是由于 AM 真菌促进了柚苗须根的生长,从而增加了根系的吸收面积. Fidelibus 等^[3]研究表明,接种 4 种 AM 真菌(*G. mosseae* 51C、144C、*G. intraradices* FL208 和 *Glomus* sp. 25A)显著增加了粗柠檬(*Citrus jambhiri*)实生幼苗根系的干重与长度.本实验结果与其基本一致,接种 3 种 AM 真菌均可显著促进柚苗根系生长,其主根长度、侧根数量、须根数量、须根总长、鲜重和干重都显著增加.

AM 真菌改善植物矿质元素营养的作用已得到广泛认可^[11].菌根对根系的影响,一方面是由于菌根改善了矿质元素的吸收,另一方面是 AM 真菌与植物细胞物质循环的结果^[6,25].在本实验所测定的 8 种矿质元素中,AM 真菌对长寿沙田柚 P 和 Ca 的促进效应比较显著,由于我国农田大多缺磷,土壤中有效磷浓度低^[12],而柑桔类又是喜钙植物^[23],因此对于长寿沙田柚的生长尤为重要.尤其是对 P 元素,AM 真菌改善植物 P 营养的效应是 AM 真菌与植物共生关系中最重要基础,也是 AM 真菌所具有的各种作用中最为显著和稳定的^[11].其它矿质元素对菌根植物的效应或机理有待进一步研究.

4.2 AM 真菌对柚苗营养生长和矿质元素吸收的促进效应存在种间差异

AM 真菌菌种不同,对植物影响亦不同^[20,21].有研究表明,AM 真菌种间差异对三叶草^[22]、芋^[10]、小麦^[28]和香蕉^[29]等的效应不同. AM 真菌种间差异主要表现在菌根感染、植物营养生长、矿质元素吸收和

植物基因表达上^[2].近两年,分子水平的研究逐渐被运用^[4,13],而 AM 真菌对柑桔的效应在分子水平的研究还有待进行.本研究结果表明,对长寿沙田柚而言,接种不同菌种(株),菌根感染率、菌根依赖性、植株的营养生长以及矿质元素含量等均存在显著差异,尤其是对根系的生长影响较大.本研究同时发现矿质元素 K、Mg 和 Mn 的浓度与生长规律并不完全一致,即营养生长较好,部分矿质元素含量不一定高,可能有以下 3 个方面的原因:1) 随着生长量的增加,由于“稀释效应”^[16]使其部分矿质元素浓度持平或呈下降趋势;2) 对部分矿质元素,不同菌种的敏感性不同;3) 某些矿质元素间可能存在拮抗作用.

4.3 适宜的优良菌种(株)

从 AM 真菌种间差异对长寿沙田柚菌根感染率、菌根依赖性、营养生长、矿质元素含量和吸收能力的综合比较结果来看,接种 *G. mosseae* 处理菌根感染率最高,菌根依赖性最大,地上和地下部分营养生长最好,矿质元素 N、P、K、Ca、Zn 和 Cu 的含量最高,吸收矿质元素的能力最强,且差异显著.因此,*G. mosseae* 对长寿沙田柚的正效应最大.在研究的 3 个菌种中,*G. mosseae* 为长寿沙田柚适宜的优良菌种(株).

参考文献

- 1 Bao S-D (鲍士旦). 2000. Soil Analysis. 3rd Edition. Beijing: China Agricultural Press. 39 ~ 141 (in Chinese)
- 2 Burleigh SH, Cavagnaro T, Jakobsen I. 2002. Functional diversity of arbuscular mycorrhizas extends to the expression of plant genes involved in P nutrition. *J Exp Bot*, **53**: 1593 ~ 1601
- 3 Fidelibus MW, Martin CA, Stutz JC. 2001. Geographic isolates of *Glomus* increase root growth and whole-plant transpiration of *Citrus* seedlings grown with high phosphorus. *Mycorrhiza*, **10**: 231 ~ 236
- 4 Gianinazzi-Pearson V, Brechenmacher L. 2004. Functional genomics of arbuscular mycorrhiza: Decoding the symbiotic cell programme. *Can J Bot*, **82**: 1228 ~ 1234
- 5 Graham JH. 1982. Effect of citrus root exudates on germination of chlamyospores of the vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus epigaeum*. *Mycologia*, **74**: 831 ~ 835
- 6 Hooker JE, Atkinson D. 1996. Arbuscular mycorrhizal fungus-induced alteration to tree-root architecture and longevity. *Z Pflanz Bodenkunde*, **159**: 229 ~ 234
- 7 Huang Q (黄勤), Tang Z-Y (唐振尧). 1994. Advances in research on *Citrus vesicular* - arbuscular mycorrhiza: A literature review. *Acta Hort Sin* (园艺学报), **21**(1): 47 ~ 53 (in Chinese)
- 8 Kleinschmidt JW, Gerdemann JW. 1972. Stunting of citrus seedlings in fumigated nursery soils related to the absence of endomycorrhizae. *Phytopathology*, **62**: 1447 ~ 1453
- 9 Lai Y (赖毅), Huang Q (黄勤), Tang Z-Y (唐振尧). 1993. Study on mycorrhizal dependency of different types of trifoliate orange. *Chin Citrus* (中国柑桔), **22**(2): 14 ~ 16 (in Chinese)
- 10 Li M (李敏), Liu P-Q (刘鹏起), Liu R-J (刘润进). 2002. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on micropagated taro (*Colocasia esculenta* Schott.). *Acta Hort Sin* (园艺学报), **29**(5): 451 ~ 453 (in Chinese)

- 11 Li X-L (李晓林), Feng G (冯 固). 2001. Ecology and Physiology of Arbuscular Mycorrhiza. Beijing: Huawen Press. 108 (in Chinese)
- 12 Li X-L (李晓林), Yao Q (姚 青). 2000. VA mycorrhiza and mineral nutrition of plant. *Prog Nat Sci* (自然科学进展), **10**(6): 524 ~ 531 (in Chinese)
- 13 Liu JY, Blaylock LA, Harrison MJ. 2004. cDNA arrays as a tool to identify mycorrhiza-regulated genes: Identification of mycorrhiza-induced genes that encode or generate signaling molecules implicated in the control of root growth. *Can J Bot*, **82**: 1177 ~ 1185
- 14 Menge JA, Johnson ELV, Platt RG. 1978. Mycorrhizal dependency of several citrus cultivars under three nutrient regimes. *New Phytol*, **81**: 553 ~ 559
- 15 Murashige T, Tucher DPH. 1969. Growth factor requirement of citrus tissue culture. Proceedings of the First International Citrus Symposium. Riverside: University of California. 1155 ~ 1169
- 16 Olsen SR. 1972. Micronutrient interactions. *Soil Sci Soc Am Proc*, **36**: 243 ~ 261
- 17 Phillips KM, Hayman DS. 1970. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Trans Br Mycol Soc*, **55**: 158 ~ 161
- 18 Rayner JC. 1933. Mycorrhiza in the genus citrus. *Nature*, **131**: 399 ~ 402
- 19 Rayner JC. 1935. Mycorrhizal habit in the genus citrus. *Nature*, **136**: 516 ~ 517
- 20 Shi Z-Y (石兆勇), Chen Y-L (陈应龙), Liu R-J (刘润进). 2003. Mycorrhizal diversity and its significance in plant growth and development. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **14**(9): 1565 ~ 1568 (in Chinese)
- 21 Smith FA, Jakobsen I, Smith SE. 2000. Spatial differences in acquisition of soil phosphate between two arbuscular mycorrhizal fungi in symbiosis with *Medicago truncatula*. *New phytol*, **147**: 357 ~ 366
- 22 Su Y-B (苏友波), Lin C (林 春), Zhang F-S (张福锁), et al. 2003. Effect of arbuscular mycorrhiza fungi (*Glomus mosseae*, *Glomus versiformea*, *Gigaspora margarita* and *Gigaspora rosea*) on phosphatase activities and soil organic phosphate content in clover rhizosphere. *Soils* (土壤), **35**(4): 334 ~ 338 (in Chinese)
- 23 Tang Z-Y (唐振尧), He S-L (何首林). 1990. A preliminary report on the effect of a mycorrhizal fungus on iron uptake by citrus seedlings. *Acta Hort Sin* (园艺学报), **17**(4): 257 ~ 261 (in Chinese)
- 24 Tang Z-Y (唐振尧), Lai Y (赖 毅), He S-L (何首林). 1989. A preliminary study on the effect of vesicular arbuscular mycorrhizal fungus on calcium uptake of citrus seedlings. *Acta Mycol sin* (真菌学报), **8**(2): 133 ~ 139 (in Chinese)
- 25 Timonen S, Smith FA, Smith SE. 2001. Microtubules of mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* in symbiosis with tomato roots. *Can J Bot*, **79**: 307 ~ 313
- 26 Yang J-F (杨劲峰), Chen Q (陈 清), Han X-R (韩晓日). 2002. Measurement of vegetable leaf area using digital image processing techniques. *Trans CSAE* (农业工程学报), **18**(4): 155 ~ 158 (in Chinese)
- 27 Yang X-H (杨晓红), Zeng M (曾 明), Li D-G (李道高). 2001. Hyphal growth of mycorrhizal fungi in time turning vertical plate culture. *Mycosystema* (菌物系统), **20**(3): 358 ~ 361 (in Chinese)
- 28 Yao Q (姚 青), Feng G (冯 固), Li X-L (李晓林). 1999. Factors and mechanism affecting the dependency of wheat genotypes with different phosphorus efficiencies on VA mycorrhizae. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), **5**(5): 450 ~ 454 (in Chinese)
- 29 Yao Q (姚 青), Zhu H-H (朱红惠), Yang S-Z (羊宋贞). 2004. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi on mineral nutrients uptake and growth of micro-propagated banana plantlets. *J Fruit Sci* (果树学报), **21**(5): 425 ~ 428 (in Chinese)

作者简介 全瑞建, 男, 1978 年生, 硕士研究生. 主要从事菌根生理生态研究, 发表论文 8 篇. E-mail: tongrujian@126.com

责任编辑 张凤丽
