植物营养与肥料学报 2006,12(4):530-536
Plant Nutrition and Fertilizer Science

三种土壤上六种丛枝菌根真菌生长特征和接种效应

刘文科[1,2], 冯 固[1], 李晓林[1]

(1 中国农业大学资源与环境学院植物营养系,农业部植物营养与养分循环重点实验室,教育部植物—土壤相互作用重点实验室 北京 100094; 2 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,北京 100081)

摘要: 以分离于华北、华中和华南3个生态区及法国引进的丛枝菌根真菌为试验菌株,采用三室根箱培养的方法,研究了它们在华北、华中和华南3种典型土壤—褐土、棕壤和红壤上的菌根形成、接种效应、磷吸收贡献和根外菌物量情况。结果表明,6种菌株在上述指标上存在显著的种间或生态型差异,土壤与菌株间存在显著的交互作用。6种菌株在3种土壤上都能与玉米形成菌根,在褐土和棕壤上大多数菌株在分离地所在地区土壤类型上的菌根侵染率较高,说明其对该土壤条件的适应性较强;在红壤强酸性土壤条件抑制了菌根真菌的侵染。菌株BEG168、BEG167、BEG151、BEG221和BEG141在褐土上,BEG151和BEG221在棕壤上,BEG168和BEG150在红壤上显著提高了玉米的生物量。在褐土和棕壤上,除BEG150外,BEG168、BEG167、BEG151、BEG221和BEG141能显著促进宿主吸磷;而在红壤上,BEG168和BEG141显著促进了宿主吸磷。若以真菌的根外菌物量作为衡量AM真菌菌株土壤生态适应性的指标,BEG141和BEG167是生态适应性强的菌株,为广幅生态型菌株;菌株BEG168和BEG151次之,前者在棕壤上适应性高,后者在红壤上适应性高。BEG150和BEG221生态适应性较窄,仅适应红壤或褐土,为窄幅生态型菌株。*Glomus etunicatum* 的两个生态型BEG168和BEG221在土壤生态适应性上差异很大,前者在两种土壤上收集到菌物量,而后者只在褐土上收集到菌物量。土壤条件可以决定丛枝菌根真菌的生长状况和功能。

关键词: 丛枝菌根真菌; 土壤类型; 侵染率; 接种效应; 菌物量

中图分类号: Q142.3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1008-505X(2006)04-0530-07

The growth characteristics and symbiotic effectiveness of six arbuscular mycorrhizal fungi on three soils associated with maize

LIU Wen-ke[1,2], FENG Gu[1], LI Xiao-lin[1]

(*1 Dept. of Plant Nutrition, CAU, Key Lab. of Plant Nutrition, MOA, Key Lab. of Plant-Soil Interactions, MOE, Beijing 100094, China; 2 Inst. of Environment and Sustainable Developmen in Agricultrue, CAAS, Beijing 100081, China*)

Abstract: The mycorrhizal formation, inoculation effectiveness, extraradical fungal biomass and P uptake contribution of six arbuscular mycorrhizal isolates screened from South China, Center China and North China on typical cinnamon soil, brown soil and red soil collected in above three regions were investigated using three-compartment glass-bead culture system associated with maize. The results showed that there were significant differences among fungal species or ecotypes in all above index, which varied with soil types. First, six fungi could colonize maize root on three soils, and the fungal colonization rate was higher on soil collected in the region that had been screened for cinnamon soil and brown soil. On red soil, the fungal colonization rate was lower compared with those on the other soils for the inhibiting effects on spore germination and growth. The fungi BEG168, BEG167, BEG151, BEG221 and BEG141 on cinnamon soil, BEG151 and BEG221 on brown soil as well as BEG168 and BEG150 on red soil significantly improved maize biomass, so they had potential to be used in the area of the soil collected. The inoculation effectiveness of fungi varied with soil types, especially

收稿日期: 2005-06-01　　**修改稿收到日期**: 2005-07-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(30470341)资助。

作者简介: 刘文科(1974—),男,回族,河北孟村县人,博士,助理研究员,主要从事设施环境工程、环境微生物方面的研究。

for BEG167. BEG167 performed positively on cinnamon soil, and neutral on brown soil, but negatively on red soil. Except for BEG150 all All other fungi, except BEG150, increased maize P uptake on cinnamon soil and brown soil, however, only BEG168 and BEG 141 improved P uptake significantly on acidic soil. BEG 141 and BEG 167 were wide range ecotypes if regarded fungal extraradical biomass as ecological adaptation index, and followed by BEG168 and BEG151, and BEG150 and BEG221 were narrow range ecotypes. Two ecotypes of *Glomus etunicatum* BEG168 and BEG221presented differently in edaphic adaptability, the former produced large biomass on two soils instead of one soil of the latter. That indicated that edaphic conditions could alter the growth and symbiotic status of arbuscular mycorrhizal fungi.

Key words: arbuscular mycorrhizal fungi; soil types; root colonization; inoculation effectiveness; extraradical fungal biomass

丛枝真菌(Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)是一类几乎存在于所有自然和农业土壤中的重要微生物，可与近 80% 的植物种类形成共生关系，促进宿主对土壤中矿质养分吸收(尤其是磷)，促进生长，增强抗逆境能力。至今，已报道的 AM 真菌约有 170 余种，但因分离地生态条件的差异，存在大量同一种类的不同生态型，资源储量巨大。研究证实，AM 真菌的种间及生态型之间存在生理学或形态学的差异[1-4]。分离地不同的菌株种类或生态型在菌根效应和吸磷贡献上的差异也相当明显[5-9]。表明分离地生态条件的差异影响 AM 真菌菌株的生态生理学特性，导致菌株对土壤生态环境的适应性不同。因此，确认不同分离地菌株在各种土壤类型上的生长特征和有效性，对菌株高效利用具有重要意义。

自 2000 年开始，通过中国—欧盟合作项目，国内 3 个菌根研究小组新近在华南、华中和华北 3 个主要生态区分离出许多 AM 菌株或生态型，其中不乏对华北的甘薯、华中的玉米和华南的木薯等重要农作物有菌根效应的有效菌株种类或生态型，大大地丰富了中国丛枝菌根真菌资源。但是，菌株分离地的生态条件差异非常大，尤其在土壤条件方面。华南菌株分离于强酸性土壤，华中菌株分离于接近中性土壤，而华北菌株分离于石灰性土壤。因此，这些菌株种类或生态型在土壤生态适应性及不同土壤类型上的有效性上必然存在差异。因此，为了推进这些菌株更有效地在农业生产中应用，开展了不同菌株在 3 种主要土壤类型上生态适应性和有效性的研究和评价。

1　材料与方法

1.1　供试材料

用于试验的 6 种 AM 真菌菌株包括：华北菌株，BEG168 (*Glomus etunicatum*，分离于河北，纬度 40°23′，经度 115°33′，土壤 pH 8.2)，由本系筛选；华中菌株，BEG221 (*G. etunicatum*，分离于湖北，纬度 30°32′，经度 112°24′，土壤 pH 7.96)，由华中农业大学农业微生物实验室提供；华南菌株，BEG150 (*G. claroideum*，分离于香港，纬度 22°25′，经度 114°16′，土壤 pH 3.92)和 BEG151 (*G. geosporaum*，分离于广东，纬度 23°51′，经度 115°22′，土壤 pH 3.81)，由香港大学应用生物生化技术系提供；参比菌种，BEG167 (*G. mosseae*，分离于新疆，纬度 80°20′，经度 42°39′，土壤 pH 8.2)，以及由法国国家农业研究所提供 BEG141 (*G. intraradices*，分离于法国，土壤 pH 7.6)。6 种真菌的接种剂是采用盆栽方式扩繁而成，含有培养基质、孢子、菌丝和侵染根段的混合物。

供试作物为玉米 (*Zea mays* L.)，品种为农大 108。播种前，种子用 10% H_2O_2 浸泡消毒 10 min，随后用蒸馏水冲洗，催芽，备播种。

试验所用的培养基质包括土壤、粗砂和玻璃珠。3 种土壤采集于北京大兴、广东省广州市，湖北省武汉市，是华北、华中和华南 3 个气候带内典型的土壤类型。3 种土壤的类型和基本理化性状见表 1。

土壤风干后过 2 mm 筛，在 121℃下湿热灭菌 2 h，备用。粗沙经稀酸浸泡 5 h，用自来水和蒸馏水洗净，风干、灭菌(同土壤)后备用。玻璃珠规格为白色，直径 2～3 mm，挑去杂质、洗净，风干、灭菌后备用。

1.2　试验设计

试验采用三室玻璃珠培养系统，此装置是有机玻璃板加工而成。其规格为宽 × 长 × 高 (5 + 3 + 5) cm × 10 cm × 15 cm，中间为植物室，左边为菌丝室，右边为土壤室。三室间用 2 层 30 μm 的尼龙网隔开。

试验为三种土壤、六个菌株接种处理和一个不接种对照的 3 × 7 的 2 因素设计，每个处理重复 4 次，总计 84 盆。

表1 试验土壤主要化学性状

Table 1 Collecting sites, types and chemical properties of soils used in experiment

地点 Sites	土壤类型 Soil	pH	有效磷 Avail. P (mg/kg)	有机质 OM (g/kg)
北京大兴 Beijing Daxing	褐土 Cinnamon soil	8.16	10.2	10.8
湖北武汉 Hubei Wuhan	棕壤 Brown soil	7.20	24.1	17.3
广东广州 Guangdong Guangzhou	红壤 Red soil	4.74	20.6	14.7

试验在中国农业大学资源与环境学院植物营养系网室进行。土壤在用前混入底肥,肥料用量为每千克土壤施入N 300 mg(硝酸铵)、P 30 mg(磷酸二氢钾)、K 200 mg(硫酸钾)、Mg 100 mg(硫酸镁)、Zn 5 mg(磷酸锌)和Cu 3 mg(硫酸铜)。植物室装土量为480 g(含70 g接种剂),菌丝室装土700 g,玻璃珠室装入玻璃珠800 g。在植物室中播4粒玉米种子,出苗后,留苗2株。玻璃珠上覆洗净灭菌处理的海绵,定期向玻璃珠室浇去离子水,保持玻璃珠湿润。

植物生长期温度为20～30℃,光照时间为10 h/d。每4周向植物生长室中补加氮肥,剂量为每千克土壤N(硝酸钾)100 mg。试验在种植84 d时收获。

1.3 测定项目与方法

玉米根系用自来水洗净后,取下全部细根剪成1 cm的根段,混匀后取样,测定根系的菌根侵染率,即:根系经常规步骤(透明、酸化)[10],并用曲利本蓝染色[11]、乳酸甘油脱色后,采用网格交叉法[10]测定。根系和地上部在70℃下烘干,称取干重。

植株磷含量采用干灰化—钒钼黄比色法,氮含量采用H_2SO_4—H_2O_2消煮—蒸馏法测定。测定按照《土壤农化分析》[12]中所介绍的方法进行。

玻璃珠中的菌物采用水浸泡过筛法收集,收集到的菌物在显微镜下用解剖针去除杂质,并用去离子水洗净。最后,在60 ℃下烘至恒重,用精密度为$1/10^5$ g的分析天平称重。

试验数据采用SAS 6.02软件进行统计分析,5%水平下LSD检验各处理平均值之间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同菌株在不同土壤上的菌根侵染率

表2看出,6种真菌在3种土壤上均形成了菌根,但不同菌株在同种土壤上的菌根形成能力不同。在褐土上,BEG167接种处理的菌根侵染率最高,达55.59%;BEG141次之,菌根侵染率达44.04%。BEG168、BEG151和BEG221接种处理的菌根侵染率较低,在31.61%～34.56%之间。在棕壤上,BEG221接种菌根侵染率最高,达36.46%,显著高于BEG168和BEG167接种处理。在红壤上,BEG141、BEG168和BEG151的菌根侵染率较高,达到19.74%～21.22%,BEG221较低,只有12.52%。BEG150在3种土壤上的侵染率都小于10%。

表2 三种土壤上不同菌株接种处理玉米的菌根侵染率(%)

Table 2 Root colonization of maize inoculated with or without AM isolate on three soils

菌株 Isolates	褐土 Cinnamon soil	棕壤 Brown soil	红壤 Red soil
CK	0.0 e	0.0 d	0.0 e
BEG168	33.0 c	24.1 b	20.8 a
BEG167	55.6 a	25.8 b	15.7 bc
BEG150	6.8 d	7.8 c	8.6 d
BEG151	34.6 c	27.6 ab	19.7 ab
BEG221	31.6 c	36.5 a	12.5 cd
BEG141	44.0 b	30.8 ab	21.2 a

注:表中同一列中数值为四个重复的平均值。不同字母表示5%水平上的差异显著性,下同.

Notes: The values in the same colomn were the means of four replicates. Means followed by different letters indicated significant difference at 5% level. same as follows.

2.2 不同土壤上AM菌株接种对玉米生长的影响

同一土壤上,不同真菌的促生效应存在显著差异(表3)。在褐土上,除BEG150外,菌株BEG168、BEG167、BEG151、BEG141和BEG221接种处理的宿主地上部、地下部和植株干重显著高于不接种处理;在棕壤上,除BEG151和BEG221外,其它菌株接种没有显著增加宿主地上部和植株的生物量;在红壤上,只有BEG150和BEG168显著提高了宿主地上部和植株的生物量,BEG141、BEG151和BEG221无促生效应,而EGB167却表现出显著的负效应。

同一菌株接种对宿主地上部生长的影响随土壤类型改变而不同。BEG141和BEG167在褐土上均显著促进了宿主生长,而在棕壤上均无效应,BEG141在红壤上也无效应,但BEG167在红壤上却

抑制了宿主的生长，为负效应。BEG151 和 BEG221 在褐土和棕壤上为显著的促生效应，但在红壤却无效应。BEG150 和 BEG168 在红壤上具有显著的促生效应，但前者在褐土上和棕壤上均无效应，而 BEG168 在褐土上也表现出了显著的促生效应。

两个 *Glomus etunicatum* 的生态型 BEG168 和 BEG221 相比，在各土壤类型上的促生能力表现不同。在褐土上，两者在促生能力上无差异，均显著促进了宿主生长。在棕壤上，BEG168 的促生能力显著小于 BEG221，前者与对照相比无促生效应，而后者显著提高了宿主的生物量。在红壤上，BEG168 的促生能力显著高于 BEG221，两者均显著提高了宿主的生物量。上述结果表明 2 个生态型的有效性差异很大。

表 3　三种土壤上不同接种处理玉米生物量

Table 3　The biomass of maize inoculated with or without AM fungi on three soils

土壤类型 Soils	菌株 Isolates	玉米干生物量 (g/pot, DW) Dry biomass of maize		
		地上部 Shoot	根系 Root	全株 Total
褐土 Cinnamon soil	CK	16.75 c	5.47 e	22.22 d
	BEG168	20.20 a	9.64 a	29.84 a
	BEG167	19.49 ab	7.32 d	26.80 bc
	BEG150	17.70 bc	5.65 e	23.35 d
	BEG151	20.46 a	8.83 b	29.29 a
	BEG221	20.18 a	8.13 bc	28.31 ab
	BEG141	18.66 ab	7.45 cd	26.10 c
棕壤 Brown soil	CK	21.37 c	6.33 d	27.70 c
	BEG168	23.18 bc	7.74 abc	30.92 bc
	BEG167	20.71 c	7.31 abcd	28.01 c
	BEG150	24.09 abc	6.67 cd	30.75 bc
	BEG151	25.01 ab	7.88 ab	32.89 ab
	BEG221	27.41 a	8.16 a	35.57 a
	BEG141	21.94 bc	7.03 bcd	28.97 bc
红壤 Red soil	CK	9.46 c	3.12 ab	12.58 b
	BEG168	11.10 ab	3.65 a	14.75 a
	BEG167	7.30 d	2.51 b	9.81 c
	BEG150	11.57 a	3.57 a	15.14 a
	BEG151	10.26 abc	3.56 a	13.82 ab
	BEG221	9.20 c	2.91 b	12.11 b
	BEG141	9.87 bc	3.58 a	13.45 ab

2.3　接种处理对玉米磷营养的影响

如表 4 所示，在褐土上，与不接种处理相比，除 BEG150 接种处理外，其它菌株接种处理显著地提高玉米地上部、根系和植株的磷含量和吸磷量。菌株间比较，BEG221 接种处理地上部磷含量和吸磷量显著低于 BEG141、BEG168、BEG151 和 BEG167 的接种处理。在棕壤上，与不接种相比，BEG167、BEG168、BEG151、BEG141 和 BEG221 显著提高了宿主地上部、根系和植株的磷含量，以及根系和植株的吸磷量。但只有 BEG168、BEG141 和 BEG221 接种处理显著提高了宿主的地上部吸磷量。在红壤上，BEG141 接种处理提高了宿主地上部磷含量，而 BEG168 接种处理显著促进地上部吸磷量。对植株而言，与对照相比，菌株 BEG168 和 BEG141 接种处理显著促进了宿主的吸磷量。

2.4　真菌的根外菌物量

由表 5 可知，各菌株的菌物量不仅在同一土壤上差异显著，而且同一菌株在不同土壤类型上也不同。在褐土上，菌株 BEG168、BEG167、BEG221 和 BEG141 接种处理收集到了菌物，而在棕壤上，BEG167、BEG151 和 BEG141 收集到了菌物，在红壤上有五个菌株 BEG168、BEG167、BEG151、BEG150 和

表4 三种土壤上不同菌株接种处理玉米磷含量与吸磷量

Table 4 P concentration and P uptake by maize inoculated with or without AM fungi on three soils

土壤类型 Soils	菌株 Isolates	地上部磷含量 Shoot P conc. (%)	地上部吸磷量 Shoot P uptake (mg/pot)	根系磷含量 Root P conc. (%)	根系吸磷量 Root P uptake (mg/pot)	吸磷总量 Total P uptake (mg/pot)
褐土 Cinnamon soil	CK	0.06 c	10.03 c	0.06 c	3.41 c	13.44 c
	BEG168	0.12 a	23.20 a	0.12 ab	11.11 a	34.31 a
	BEG167	0.12 a	22.56 a	0.11 ab	7.98 b	30.55 ab
	BEG150	0.06 c	10.19 c	0.06 c	3.21 c	13.40 c
	BEG151	0.11 a	22.44 a	0.10 b	8.93 b	31.37 a
	BEG221	0.08 b	17.40 b	0.10 ab	8.33 b	25.72 b
	BEG141	0.13 a	23.33 a	0.12 a	8.55 b	31.87 a
棕壤 Brown soil	CK	0.08 c	16.74 d	0.06 d	3.69 c	20.43 e
	BEG168	0.11 b	26.02 bc	0.09 ab	6.68 ab	32.70 bc
	BEG167	0.11 b	23.46 cd	0.08 b	6.08 b	29.54 cd
	BEG150	0.08 c	19.26 cd	0.06 d	3.64 c	22.89 de
	BEG151	0.09 bc	23.37 cd	0.07 c	5.65 b	28.91 cd
	BEG221	0.14 a	38.51 a	0.09 a	7.67 a	46.18 a
	BEG141	0.15 a	32.67 ab	0.09 a	6.57 ab	39.24 ab
红壤 Red soil	CK	0.06 bc	5.62 b	0.05 c	1.47 c	7.09 b
	BEG168	0.06 abc	6.65 a	0.06 ab	2.09 a	8.75 a
	BEG167	0.06 ab	4.51 c	0.06 bc	1.35 c	5.86 c
	BEG150	0.05 d	6.12 ab	0.05 c	1.76 b	7.88 ab
	BEG151	0.06 c	5.95 ab	0.06 ab	2.06 a	8.01 ab
	BEG221	0.06 ab	5.78 ab	0.05 bc	1.57 bc	7.34 b
	BEG141	0.06 a	6.28 ab	0.06 a	2.27 a	8.55 a

表5 三种土壤上不同菌株的菌物量(mg/pot, DW)

Table 5 Fungal biomass of AM isolate on three soils

菌株 Isolates	褐土 Cinnamon soil	棕壤 Brown soil	红壤 Red soil
CK	0.00 b	0.00 c	0.00 c
BEG168	1.68 b	0.00 c	5.46 a
BEG167	17.88 a	2.36 a	4.76 ab
BEG150	0.00 b	0.00 c	0.26 c
BEG151	0.00 b	1.74 ab	1.19 c
BEG221	1.74 b	0.00 c	0.00 c
BEG141	1.75 b	1.09 b	3.94 b

BEG141 收集到了菌物。

2.5 土壤与真菌间的交互作用

进一步分析可知,土壤类型和菌株种类在侵染率、地上部干重、植株干重、地上部磷含量、根系磷含量、地上部吸磷量、根系磷吸收量和菌物量含量上存在极显著的交互作用。见表6。

3 讨论

长期进化过程中,受生态条件的影响,AM真菌表现出明显的生物多样性和功能多样性[13]。故此,

表6 土壤与真菌间的交互作用

Table 6 Interactions between soils and isolates

因素 Factors	侵染率 Root colonization	地上部干重 Shoot dry wt	植株干重 Total dry wt	地上部磷含量 Shoot P conc.	根系磷含量 Root P conc.	地上部吸磷量 Shoot P uptake	根系磷吸收量 Root P uptake	菌物量 Fungal biomass
土壤×菌株 Soil × Isolate	**	**	**	**	**	**	**	**
CV %	18.86	9.58	8.23	13.26	10.38	20.48	15.58	55.33

** 表示土壤与菌株之间的交互作用极显著 Indicated that there are significant interaction between soils and isolates.

分离和筛选特定生态条件下，尤其是土壤条件下的高效 AM 菌株一直是菌根研究的重点。AM 真菌的功能状态是由真菌种类、宿主种类和土壤生态条件共同决定，真菌因素尤为重要。真菌根内菌丝和根外菌丝的数量及其比例，菌丝的空间分布，以及真菌的吸收活性和磷酸酶的分泌等在一定程度上决定着真菌的磷吸收和共生状态。真菌的根内外的生物学发育均受土壤条件的影响。如 Sylvia 等[6]研究结果，不同的 AM 真菌或同一 AM 真菌的不同生态型（4 个 *G. etunicatum* 分离种）在不种土壤类型上的功能表现差异很大。本试验结果也说明了这一点，表明真菌的生物多样性在功能上很明显。因此，针对特定的土壤类型进行丛枝菌根生态生理的研究，明确各种菌株在特定土壤条件下的生态适应性和功能表现是非常有必要的。

从真菌角度而言，丛枝菌根的生态适应性可从其侵染率和根外菌物量来考察。侵染率是表示真菌与宿主之间亲和力的重要指标，它表明真菌在根内组织的形成情况，能够表征真菌根内生物量的多寡，是 AM 真菌功能发挥的基础；同时，侵染根段也是 AM 真菌的繁殖体，其多少是衡量 AM 真菌土壤生态适应性的重要指标。本试验条件下，在侵染能力上，菌株在分离地所在气候带的土壤类型上的菌根形成能力较强。酸性红壤上，菌株的菌根侵染率较褐土和棕壤明显降低。本试验中 6 个不同来源的菌株在红壤上的侵染率只在 8.56%～21.22% 之间。已有研究表明，球囊霉属菌株在酸性土壤上菌根形成能力很低，侵染率一般在 20%～30% 左右[14]，甚至小于 10%[15]，而石灰性土壤上 *P. lanceolata* 菌根侵染率可达 30%～60%[14]，并且土壤中的菌丝量较大。一定程度上反映了菌株在不同土壤类型上的生态适应性差异。AM 真菌菌株生态适应性决定其应用范围宽窄，一般以其繁殖体数量来衡量。根外菌物不仅是真菌养分吸收功能的实施者，更重要的是表明菌株根外繁殖体的数量。本试验条件下，根外菌物是包括孢子和菌丝的纯净混合物，能够代表该菌株的繁殖体的数量。因此，我们认为可以采用玻璃珠培养的方法收集根外菌物量，并以此来衡量丛枝菌根对特定介质的适应性；可用该方法检验各种菌株在不同土壤条件下的功能及生长发育状况。若以真菌的根外菌物量作为衡量 AM 真菌菌株土壤生态适应性的指标，根据张美庆等人的定义[16]，在本试验条件下 BEG141 和 BEG167 是生态适应性很强的菌株，在 3 种土壤上均有一定的菌物量，为广幅生态型菌株；菌株 BEG168 和 BEG151 次之，前者在北京和棕壤上适应性强，后者在武汉和红壤上适应性强；BEG150 和 BEG221 的生态适应性较窄，仅适应红壤或褐土，为窄幅生态型菌株。这也说明 AM 真菌在生态适应性上差异很大，表现出多样性的特点。

从应用的角度出发，真菌的价值在于其共生状态和功能的取向，也就是从菌株的接种效应和吸磷功能角度评价菌株有效性。当然，菌株的土壤生态适应性与有效性是密不可分的，一个菌株只有适应某种土壤条件才可能生存并发挥功能。在不同土壤类型上，适应性菌株的功能表现总是处于由寄生到互惠关系的连续相上的某个位置[17]。因此，评价菌株能否在特定土壤上发挥功能，首先看它能否在此土壤上促进宿主的生长。其次是其改善宿主的磷营养状况的能力。现今，大多以生物量、氮吸收量和磷吸收量作为评价菌株有效性的指标，但不同指标的评价结果常不一致。就本试验而言，若以促进宿主生长为指标确定有效性菌株，则菌株 BEG168、BEG167、BEG151、BEG221 和 BEG141 在褐土上，BEG151 和 BEG221 在棕壤上，BEG168 和 BEG150 在红壤上有效。而以真菌吸磷效应指标来考察菌株有效性，则菌株 BEG168、BEG167、BEG151、BEG221 和 BEG141 在褐土和棕壤上，BEG168 和 BEG141 在红壤上有效。

菌株在分离地所在气候带的土壤类型上的菌根形成水平较高，不同来源的菌株在共生状态上的变异很大[8]，这与 AM 菌株适应分离地环境条件的能力要强于引入菌株的规律一致。同一真菌在 3 种土壤上的功能状态存在变异，大多数是处于有效或无效之间。其中，以 BEG167 变异最大，从褐土—棕壤—红壤上其功能状态由正效应到无效应最后却在红壤上表现为负效应。其它菌株的共生状态有一定的变化，而且变化的方向也不尽相同。表明在功能上菌株间差异是很大的，而且受土壤类型的调控，其中主要是土壤磷水平和 pH。3 种土壤上，BEG150 对宿主吸磷均无促进作用，表明此菌株在 3 种土壤上的有效性和生态适应性很弱。两个 *Glomus etunicatum* 生态型的菌株不同土壤上的表现差异很大，在褐土和红壤上，BEG168 接种宿主的吸磷量显著高于 BEG221。棕壤上，BEG168 接种处理宿主的吸磷量却显著小于 BEG221 接种处理。说明两个菌株在植株吸磷上的表现与其对宿主生长的表现不一致。此外，同一菌株在 3 种土壤上对宿主磷营养的影响程度差异也很大，以 BEG167 来讲，在褐土上它显著促

进了地上部和植株吸磷量，在棕壤上却无效，而在红壤上表现出显著的负效应，降低了宿主的吸磷量。

玉米是土壤生态性很强的作物，在华北、华中和华南均有大面积种植，可在褐土、棕壤和红壤上生长，这有利于本试验揭示 AM 菌株的土壤生态适应性和有效性。需要注意的是，由于不同气候带的土壤和真菌集中在华北气候条件下进行研究，菌株的生长和功能可能因气候条件的改变而变化，这种影响尚需在今后的试验中进一步探讨。但是，此类试验性的筛选是非常有意义的，通过比较可明确真菌在那些土壤类型上是可用的，并且可知其潜力的大小。

参考文献：

[1] Bethlenfalvay G J, Franson R L, Dakessian S *et al*. The Glycine-Glomus-Rhizobium symbiosis. Ⅵ. Nutritional, morphological and physiological responses of nodulated soybean to geographic isolates of the mycorrhizal fungus Glomus mosseae[J]. Physiologia Plantarum, 1989, 76: 226-232.

[2] Bentivenga S P, Morton J B. A monograph of the genus Gigaspora incorporating developmental patterns of morphological characters[J]. Mycologia, 1995, 87: 720-732.

[3] Smith F A, Smith S E. Structural diversity in (vesicular)-arbuscular mycorrhizal symbiosis[J]. New Phytologist, 1997, 137: 373-388.

[4] Bago B, Azcón-aguilar C, Goulet A, Piché Y. Branched absorbing structures (BAS): A feature of the extraradical mycelium of symbiotic arbuscular mycorrhizal fungi[J]. New Phytologist, 1998, 139: 375-388.

[5] Boerner R E J. Role of mycorrhizal fungus origin in growth and nutrient uptake by geranium[J]. American J. of Botany, 1990, 77: 483-489.

[6] Sylvia D M, Wilson D O, Graham J H *et al*. Evaluation of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in diverse plants and soils[J]. Soil Biol. and Bioch., 1993, 25(6): 705-713.

[7] Scullion J, Eason W R, Scott E P. The effectivity of arbuscular mycorrhizal fungi from high input conventional and organic grassland and grass-arable rotations[J]. Plant and Soil, 1998, 204: 243-254.

[8] Klironomos J N. Variation in plant response to native and exotic arbuscular mycorrhizal fungi[J]. Ecology, 2003, 84(9): 2292-2301.

[9] 宋勇春，冯固，李晓林.丛枝菌根真菌对红三叶草利用不同有机磷源的研究[J].植物营养与肥料学报，2001，7(4)：452-458.
Song Y C, Feng G, Li X L. Effect of inoculated AMF on red clover in utilizing organic phosphorus[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2001, 7(4): 452-458.

[10] Giovannetti M B, Mosse B. An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots[J]. New Phytologist, 1980, 84: 489-500.

[11] Phillips J M, Haymann D S. Improved procedures for cleaning and staining parasitic and vesicular arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection[J]. Transactions of the British Mycological Society, 1970, 55: 158-160.

[12] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京：中国农业出版社，2000.316-320.
Bao S D. Soils and agro-chemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000. 316-320.

[13] Newsham K K, Fitter A H, Watkinson A R. Multifunctionality and biodiversity in arbuscular mycorrhizas[J]. Trends in Ecology Evolution, 1995, 10: 407-411.

[14] Clark R B, Zeto S K. Mineral acquisition by mycorrhizal maize grown onacid and alkaline soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1996, 28: 1495-1503.

[15] Van Aarle I M, Söderström B, Olsson P A. Growth and interactions of arbuscular mycorrhizal fungi in soils from limestone and acid rock habitats[J]. Soil Biol. and Bioch., 2003, 35: 1557-1564.

[16] 张美庆，王幼珊，刑礼军.AM 真菌在我国东、南沿海各土壤气候带的分布[J].菌物系统，1999，18(2)：145-148.
Zhang M Q, Wang Y S, Xing L J. Distribution of AM fungi in soils of southeast climate zones[J]. Mycosystems, 1999, 18(2): 145-148

[17] Johnson N C, Graham J H, Smith F A. Functioning of mycorrhizal associations along the mutualism-parasitism continuum[J]. New Phytologist, 1997, 135: 575-586.