

我国洛阳与菏泽牡丹主栽园区 AM真菌多样性研究

郭绍霞¹ 张玉刚² 李敏³ 刘润进^{3*}

1 (青岛农业大学环境艺术学院, 山东青岛 266109)

2 (青岛农业大学园艺学院, 山东青岛 266109)

3 (青岛农业大学菌根生物技术研究所, 山东青岛 266109)

摘要: 为探明我国特有花卉牡丹 (*Paeonia suffruticosa*) 根围内的丛枝菌根(AM)真菌资源状况, 作者对河南省洛阳市与山东省菏泽市牡丹主产区土壤中的AM真菌进行了调查。共分离到AM真菌5属35种, 其中球囊霉属(*Glomus*)在各采样点相对多度最高, 其次是无梗囊霉属(*Acaulospora*)。两地土壤中AM真菌种的丰度、孢子密度和物种多样性指数等存在差异: 菏泽赵楼牡丹园AM真菌种的孢子密度最高, 而其种的丰度最低; 洛阳婁里牡丹种苗基地的孢子密度最低; 菏泽种苗基地的Shannon-Wiener指数显著高于其他样地。地球囊霉(*Glomus geosporum*)是洛阳王城公园和菏泽赵楼牡丹园的优势种; 缩球囊霉(*Glomus constrictum*)为洛阳土桥花木基地、洛阳牡丹园、菏泽牡丹种苗基地和菏泽赵楼牡丹园的优势种。本研究结果表明我国牡丹主栽园区AM真菌具有丰富的多样性。

关键词: AM真菌, 牡丹, 种的丰度, 频度, 孢子密度, 物种多样性

AM fungi diversity in the main tree-peony cultivation areas in China

Shaoxia Guo¹, Yugang Zhang², Min Li³, Runjin Liu^{3*}

1 Landscape and Architectural College, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109

2 Horticultural College, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109

3 Institute of Mycorrhizal Biotechnology, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109

Abstract: In order to characterize arbuscular mycorrhizal (AM) fungal resources in the rhizosphere of tree-peony (*Paeonia suffruticosa*), we collected soil and root samples, and isolated 35 species in five genera of AM fungi from the main tree-peony cultivation areas, Heze and Luoyang of China. *Glomus* showed the highest relative abundance, followed by *Acaulospora*. There were differences in species richness, spore density and species diversity of AM fungi between the two regions. Spore density in the rhizospheric soil of tree-peony grown in Heze Zhaolou Tree-peony Garden was highest, while in soil of the Luoyang Cuoli Tree-peony Nursery it was lowest. The species richness in Heze Zhaolou Tree-peony Garden was lowest. Species diversity in the rhizospheric soil of tree-peony grown in Heze Tree-peony Nursery was significantly higher than in other sampling sites. *Glomus geosporum* was the dominant species in Heze Zhaolou Tree-peony Garden and Luoyang Wangcheng Garden, while *G. constrictum* was the dominant species in Heze Tree-peony Nursery, Heze Zhaolou Tree-peony Garden, Luoyang Tuqiao Seedling Nursery and Luoyang Tree-peony Garden. The results suggest that AM fungal diversity is rich in the main tree-peony cultivation areas.

Key words: AM fungi, tree-peony, species richness, frequency, spore density, species diversity

丛枝菌根(arbuscular mycorrhizas, AM)真菌是陆地生态系统土壤中最重要的一员, 北美、欧

洲和澳洲都十分重视对该类真菌种质资源、分布特征、生物多样性及其生态功能的研究(Talukdar &

收稿日期: 2006-10-27; 接受日期: 2007-02-05

基金项目: 国家自然科学基金(30471164)和山东省自然科学基金重点项目(Z2005D03)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: liurj93@163.com

Germida, 1990; Muthukumar & Udaiyan, 1997; Vander Heijden *et al.*, 1998; Schwob *et al.*, 1999; Tadych & Blaszkowski, 2000)。我国近年来在该领域也开展了大量的调查(王发园和刘润进, 2001;王焱焱等, 2006a, b; Gai *et al.*, 2006; 刘润进和陈应龙, 2007)。这些工作主要集中在野生植物(Wang *et al.*, 2004; Li & Zhao, 2005; 乔红权等, 2005; Stromberg & Stutz, 2006)、农作物(盖京革等, 2004; Oehl *et al.*, 2004)和一些经济林木(石兆勇等, 2003; Mangan *et al.*, 2004; Lovelock & Ewel, 2005)根围内AM真菌的资源状况, 而针对我国一些特有名贵植物根围内AM真菌的研究较少。因此, 有必要对一些传统名花和观赏价值较高的植物根围内AM真菌资源进行调查、收集和保存, 为进一步加强菌种筛选工作、研制专用AM菌剂奠定基础。

世界传统名花牡丹(*Paeonia suffruticosa*)原产中国, 是AM真菌寄主植物之一。我国洛阳、菏泽两地区的牡丹栽培历史悠久, 其独特的栽培生产模式与生境条件对牡丹根围内AM真菌种属构成和分布可能有重要影响。因此, 系统地开展牡丹栽培(包括生产栽培和观赏栽培)园地土壤中AM真菌的种质资源、分布特征、生物多样性等研究, 不仅具有理论意义, 同时具有经济价值。本文将报道相关的研究结果。

1 材料与方法

1.1 采样方法

于2002年10月从河南洛阳偃里牡丹种苗基地、洛阳土桥花木基地、洛阳牡丹园以及洛阳王城公园共选取4个采样点; 从山东菏泽赵楼牡丹园、菏泽牡丹种苗基地共选取2个采样点。每个地点选取5个牡丹常见栽培品种: “凤丹”、“胡红”、“赵粉”、“乌龙捧盛”和“洛阳红”, 每品种随机选5株。每株挖取根围土壤1–2 kg, 填写采样记录。表1列出了各采样点的土壤基本状况。

1.2 AM真菌的分离和鉴定

用湿筛倾注—蔗糖离心法分离、镜检孢子, 记录孢子数和孢子的分类特征(刘润进和陈应龙, 2007), 参照检索表(Schenck & Perez, 1988)和近几年发表的新种、新记录种以及Internet上(<http://invam.caf.wvu.edu>)提供的种的描述及图片对AM真菌孢子进行鉴定。

1.3 AM真菌丰度、孢子密度、相对多度、频度、重要值、多样性指数的计算方法

丰度(species richness, *SR*)指牡丹根围50 g土壤中含有的AM真菌种数, 即: $SR = \text{AM真菌总种次数} / \text{土样数}$ 。

孢子密度 (spore density, *SD*)采用每50 g土样中AM真菌孢子数表示, 即: $SD = \text{某采样点AM真菌所有孢子数} / \text{土样数}$ 。

相对多度 (relative abundance, *RA*)指该采样点AM真菌某属或种的孢子数占总孢子数的比率, 即: $RA = (\text{该采样点AM真菌某属或种的孢子数} / \text{该采样点AM真菌总孢子数}) \times 100\%$ 。

频度(*F*)是指某物种在样本总体中的出现率, 即: $F = (\text{AM真菌某属或种的出现次数} / \text{土样数}) \times 100\%$ 。

重要值(importance value, *I*)即频度和相对多度的平均值: $I = (F+RA)/2$ 。本文以重要值大于60的定为优势种。

多样性采用Shannon-Wiener指数和Simpson指数来描述。假设有1个包含*N*个个体的随机样本, 其中种*i*的个体数为*N_i*, 则 $P_i = N_i / N$, 从而Shannon-Wiener指数:

$$H = - \sum_{i=1}^s (P_i \ln P_i)$$

Simpson多样性指数:

$$D = 1 - \sum_{i=1}^s (P_i)^2$$

*s*为某采样点AM真菌的种类数, *P_i*为种*i*所占的比例。

1.4 数据分析

采用SAS统计软件进行方差分析。

2 结果

2.1 AM真菌的丰度

从90个土样中共分离到35种AM真菌(表2)。所有采样点中, 以洛阳偃里牡丹种苗基地的AM真菌种类最多(20种); 其次是洛阳土桥花木基地(17种); 菏泽赵楼牡丹园的种类最少(11种)。在所有采样点中, 球囊霉属(*Glomus*)和无梗囊霉属(*Acaulospora*)均有出现, 并且在所发现的5个属中, 以*Glomus*属种类最多, 其次是*Acaulospora*属。

从图1可以看出, AM真菌种的丰度在6个不同

表1 各采样点的土壤状况

Table 1 Soil characters of different sampling sites in Heze of Shandong and Luoyang of Henan

采样点 Sampling site	位置 Locality	pH	N (mg/kg)	P (mg/kg)	K (mg/kg)	有机质含量 Organic matter (%)
LYC	洛阳婁里牡丹种苗基地 Luoyang Cuoli Tree-peony Nursery	7.0	81.39	16.70	236.7	1.79
LYT	洛阳土桥花木基地 Luoyang Tuqiao Seedling Nursery	7.1	44.66	40.58	181.9	1.57
LYM	洛阳牡丹园 Luoyang Tree-peony Garden	7.1	11.53	8.20	127.0	1.47
LYW	洛阳王城公园 Luoyang Wangcheng Garden	7.0	87.16	111.40	326.5	1.95
HZZ	菏泽赵楼牡丹园 Heze Zhaolou Tree-peony Garden	7.2	59.06	19.65	204.8	1.55
HZJ	菏泽牡丹种苗基地 Heze Tree-peony Nursery	7.2	29.53	14.45	186.9	1.21

表2 AM真菌种在不同采样点的分布频度

Table 2 Distribution frequency of AM fungi in different sampling sites

AM真菌 AM fungal species	洛阳 Luoyang			菏泽 Heze		
	LYC	LYT	LYM	LYW	HZZ	HZJ
<i>Acaulospora delicata</i>	—	—	—	—	53.3	—
<i>A. denticulate</i>	13.3	20.0	—	66.7	—	—
<i>A. elegans</i>	20.0	—	—	—	80.0	—
<i>A. excavata</i>	—	—	—	33.3	—	—
<i>A. foveata</i>	—	33.3	—	—	—	20.0
<i>A. lacunosa</i>	53.3	53.3	—	20.0	—	73.3
<i>A. mellea</i>	6.7	40	73.3	13.3	—	20.0
<i>A. rehmsii</i>	40.0	—	40.0	20.0	93.3	—
<i>A. scrobiculata</i>	46.7	—	—	—	—	—
<i>A. spinosa</i>	—	13.3	—	—	—	—
<i>A. tuberculata</i>	6.7	33.3	—	—	—	—
<i>Acaulospora</i> sp.	80.0	40.0	60.0	100	80.0	33.3
<i>Archaeospora gerdemannii</i>	33.3	—	—	53.3	13.3	—
<i>Gigaspora albida</i>	13.3	—	—	—	—	—
<i>Gi. gigantea</i>	6.7	66.7	100	—	93.3	53.3
<i>Glomus albidum</i>	—	—	—	13.3	—	—
<i>G. caledonium</i>	—	6.7	13.3	—	—	20.0
<i>G. clarioideum</i>	40.0	—	93.3	46.7	—	53.3
<i>G. clarum</i>	40.0	—	46.7	33.3	—	—
<i>G. constrictum</i>	—	100	100	—	100	100
<i>G. dolichosporum</i>	—	—	—	—	—	46.7
<i>G. deserticola</i>	—	—	—	40.0	—	—
<i>G. etunicatum</i>	40.0	20.0	20.0	73.3	26.7	—
<i>G. formosanum</i>	46.7	60.0	—	—	100	—
<i>G. geosporum</i>	80.0	46.7	40.0	100	100	93.3
<i>G. lacteum</i>	—	—	—	—	—	13.3
<i>G. manihotis</i>	20.0	13.3	—	—	—	13.3
<i>G. melanosporum</i>	46.7	—	—	—	—	—
<i>G. microaggregatum</i>	20.0	26.7	—	—	—	—
<i>G. mosseae</i>	—	33.3	26.7	13.3	—	80.0
<i>G. pansihalos</i>	—	—	—	—	—	20.0
<i>G. reticulatum</i>	66.7	60.0	100	100	13.3	100
<i>Scutellospora arenicola</i>	—	—	26.7	—	—	—
<i>S. erythropha</i>	—	46.7	6.7	—	—	—
<i>S. reticulata</i>	—	—	—	—	80.0	—

采样点代号同表1 The sampling sites correspond to those in Table 1

的采样点中存在差异: 菏泽赵楼牡丹园(HZZ)、菏泽牡丹种苗基地(HZJ)的AM真菌种的丰度较高, 洛阳土桥花木基地(LYT)以及洛阳牡丹园(LYM)AM真菌种的丰度较低。

2.2 孢子密度

所有采样点中, 以菏泽赵楼牡丹园的AM真菌的孢子密度最高(52.4个/50 g土), 与其他地点之间的差异达显著水平; 洛阳雒里牡丹种苗基地(28.1个/50 g土)的最低(表4)。

2.3 相对多度

在分离得到的AM真菌5个属中, *Glomus*属的相对多度最高, 其次是*Acaulospora*属(表5)。

2.4 频度

Acaulospora sp.、地球囊霉(*G. geosporum*)与网状球囊霉(*G. reticulataum*)不仅在各个采样点都有发

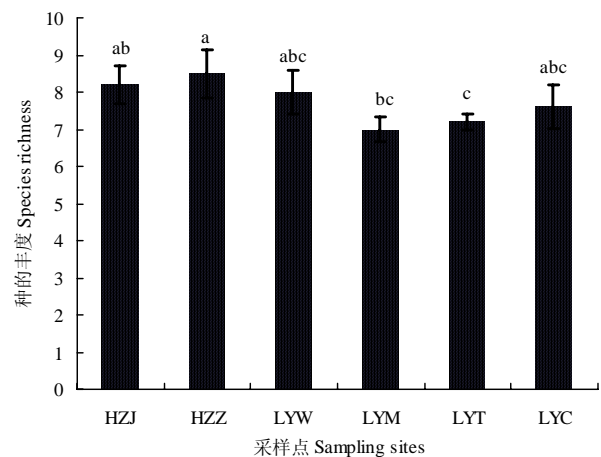


图1 不同采样点AM真菌种的丰度(不同小写字母表示在 $P = 0.05$ 水平差异显著。采样点代号同表1)

Fig. 1 Species richness of AM fungi in different sampling sites. Different small letters mean significantly different at $P = 0.05$. The sampling sites correspond to those in Table 1

表3 5个AM真菌属在不同采样点的分布频度

Table 3 Distribution frequency of AM fungal genera in different sampling sites

采样地点 Sampling site	无梗囊霉属 <i>Acaulospora</i>	原囊霉属 <i>Archaeospora</i>	球囊霉属 <i>Gigaspora</i>	巨孢囊霉属 <i>Glomus</i>	盾巨孢囊霉属 <i>Scutellospora</i>
LYC	100	33.3	13.3	100	0
LYT	53.3	—	66.7	100	60.0
LYM	100	—	100	100	26.7
LYW	100	53.3	—	100	—
HZZ	100	13.3	93.3	100	80.0
HZJ	100	—	53.3	100	—

采样点代号同表1 The sampling sites correspond to those in Table 1

采样点 Sample site	孢子密度 Spore density(No./50 g soil)	Shannon-Wiener index <i>H</i>	Simpson index <i>D</i>
LYC	28.1 ^e	1.882 ^b	0.818 ^{ab}
LYT	40.4 ^b	1.463 ^c	0.731 ^{cd}
LYM	35.3 ^{cd}	1.526 ^c	0.741 ^c
LYW	34.5 ^d	1.449 ^c	0.713 ^{cd}
HZZ	52.4 ^a	1.763 ^b	0.776 ^{bc}
HZJ	36.6 ^{bc}	2.102 ^a	0.853 ^a

同列中不同小写字母表示在 $P = 0.05$ 水平上差异显著。采样点代号同表1。

Different small letters mean significantly different at $P = 0.05$. The sampling sites correspond to those in Table 1.

表4 不同采样点AM真菌的孢子密度和物种多样性指数

Table 4 Spore density and species diversity indices of AM fungi in different sampling sites

现, 而且分布的频度也相对较高。缩球囊霉(*G. constrictum*)在洛阳雒里牡丹种苗基地和洛阳王城公园没有分布, 但在另外4个采样点的分布频度高达100% (表2)。从表3可以看出, AM真菌不同属在牡

丹根围的分布频度不同, 以巨孢囊霉属(*Gigaspora*)最高, 在各采样点的分布频度均为100%; 而原囊霉属(*Archaeospora*)在洛阳土桥花木基地(LYT)、洛阳牡丹园(LYM)、菏泽牡丹种苗基地(HZJ)3个采样

表5 AM真菌各属和部分种的相对多度

Table 5 Relative abundance of genera and some species of AM fungi in different sampling sites

采样点 Sampling site	<i>Acaulo- spora</i>	<i>Archaeo- spora</i>	<i>Giga- spora</i>	<i>Glomus</i>	<i>Scutello- spora</i>	<i>Acaulospora</i> sp.	<i>Glomus</i> <i>constrictum</i>	<i>Glomus</i> <i>geosporum</i>	<i>Glomus</i> <i>reticulatum</i>
LYC	28.0	2.4	0.6	69.1	—	12.4	—	31.7	10.8
LYT	18.7	—	7.0	70.4	3.8	5.1	21.2	20.7	11.4
LYM	15.8	—	9.1	74.7	0.5	9.1	21.9	11.6	22.2
LYW	25.1	3.8	—	71.1	—	14.0	—	26.4	20.9
HZZ	18.3	0.1	5.5	73.8	2.3	8.0	26.2	33.7	3.5
HZJ	12.4	—	5.3	82.3	—	4.2	22.2	22.4	20.8

采样点代号同表1 The sampling sites correspond to those in Table 1

表6 部分AM真菌种的重要值

Table 6 Importance value of some AM fungi species

采样地点	<i>Acaulospora</i> sp.	<i>Glomus constrictum</i>	<i>Glomus geosporum</i>	<i>Glomus reticulatum</i>
LYC	46.20	—	55.85	38.75
LYT	22.55	60.60	33.70	35.70
LYM	34.55	60.95	25.80	61.10
LYW	57.00	—	63.20	60.45
HZZ	44.00	63.10	66.85	8.40
HZJ	18.75	61.10	57.85	60.40

采样点代号同表1 The sampling sites correspond to those in Table 1

点均未出现。

2.5 优势种

各个采样点的优势种不同,各优势种重要值也不一样(表6)。如*G. constrictum*在菏泽赵楼牡丹园为63.10,但在洛阳舜里牡丹种苗基地和洛阳王城公园却没有分布;*G. geosporum*在菏泽赵楼牡丹园和洛阳王城公园的重要值分别为66.85和63.20,表明它是这两个采样点的优势种。

2.6 物种多样性

在所调查的采样点中,AM真菌物种多样性指数差别较大,菏泽牡丹种苗基地的Shannon-Wiener指数(2.102)显著高于其他5个采样点(表4)。

3 讨论

国内外研究表明,AM真菌分布广泛,具有丰富的物种多样性(乔红权等,2005;王淼焱等,2006a; Stromberg & Stutz, 2006)。通常认为野生植物根围内AM真菌物种多样性高于栽培植物,这可能由于野生植被具有较高的植物多样性和生态环境多样性;而大田中栽培作物因品种单一,自然环境单调,再加上传统农业措施的不利影响,降低了AM真菌的多样性(张美庆等,1999;刘润进和陈应龙,2007)。

而作者的研究发现,菏泽、洛阳两地牡丹主栽园区土壤中AM真菌物种多样性十分丰富,每一个采样点AM真菌的种的丰度在7.2–8.5之间,高于一些已报道的野生植物根围(4–6)(盖京苹和刘润进,2000)。仅在一种寄主植物上就分离到如此多的菌种,这在国内外研究报道中尚属少见。这可能与牡丹的独特生物学特性有关:多年生木本、多起源杂种、遗传背景复杂,进而影响到其共生真菌的组成和数量。不同品种的牡丹根围内AM真菌种属构成存在差异(数据未列)的事实也支持了上述推断。

栽培牡丹根围内AM真菌种的丰度也高于一些人工林、次生群落和一年生栽培作物(2.64–4.34)(张美庆等,1998),这与不同寄主植物的生长习性及其对AM真菌选择性(Munkvold, *et al.*, 2004)的差异有关。例如,盖京苹和刘润进(2000)的调查主要集中于一些一年生草本植物,而本研究调查的寄主植物是多年生木本。

另外,不同采样点中AM真菌物种多样性指数差别较大。例如菏泽牡丹种苗基地的Shannon-Wiener指数最高,达到2.102。这可能与牡丹栽培时间有关:该样地栽培牡丹的历史只有3–4年,而同一地区菏泽赵楼牡丹园栽培历史长达几百年。在长

期的栽培和演化过程中,随着优势菌种的积累,非优势菌种逐渐消失,从而降低了AM真菌物种多样性指数。同时,长期而持久的连作障碍也抑制AM真菌的生长发育(刘润进和陈应龙,2007),可能导致物种多样性指数降低。关于这一点尚需实验证实。

业已证实,从西双版纳热带雨林(赵之伟等,2001)到我国北部新疆(张美庆等,1994),*Glomus*属和*Acaulospora*属的分布都非常广泛。本研究发现在牡丹园地中,这两属的分布频度和相对多度均较高,受土壤肥力条件的影响较小,是牡丹园地中的优势属。该结论支持了张美庆等(1994)对我国北方地区AM真菌属种的调查结果。

不同采样点4个典型菌种的相对多度变化趋势不同:如洛阳嵯里牡丹种苗基地为*G. geosporum* > *Acaulospora* sp. > *G. reticulatum*;洛阳土桥花木基地的则为*G. constrictum* > *G. geosporum* > *G. reticulatum* > *Acaulospora* sp.。值得注意的是,*Glomus mosseae*是北方分布最广泛的典型AM真菌,然而在所调查的牡丹根围(除个别地点外)出现频度很低,有的地点甚至没有分离到。可见,与以往大多数报道不同,本研究证明*G. mosseae*不是牡丹根围AM真菌的优势种。而*G. geosporum*和*G. reticulatum*在所有采样点都有分布,对各种肥力条件的土壤适应性较广;微白巨孢囊霉(*Gigaspora albida*)和网纹盾巨孢囊霉(*Scutellospora reticulate*)的分布频度很低;还有一些菌种属于中间类型,如*G. constrictum*和*Acaulospora* sp.。

另外,我们还发现*G. constrictum*受土壤pH值以及各种营养成分的影响很大,在适宜的土壤理化性质指标范围内(如土壤pH 7左右、速效P含量 < 50 mg/kg、有机质含量 < 2.0%、可溶性N含量 < 70 mg/kg和速效K含量 < 200 mg/kg),其分布频度和相对多度均比其他菌种高,占绝对的优势。但当超过适宜范围时,土壤中几乎没有分布。这说明*G. constrictum*可以与牡丹形成良好的共生关系,但对土壤肥力的要求较为严格。这些结果表明牡丹园地中*G. geosporum*和*G. reticulatum*对土壤肥力的适应范围较广,是优势种,而*G. constrictum*虽受土壤肥力条件的影响较大,但在特定土壤肥力条件下分布占绝对优势,所以是特定土壤肥力条件下的优势种。

至于*G. mosseae*与牡丹共生的生物学相互作用及其机制的研究可能是一个有价值的课题。十分有

趣的是,*G. constrictum*是洛阳土桥花木基地和洛阳牡丹园等的优势菌种,在洛阳嵯里牡丹种苗基地和洛阳王城公园却没有分布。原因除了可能的不同生态环境和不同管理措施外,特定AM真菌与特定寄主植物或与同一种植物不同品种之间的亲和性值得进一步研究。

牡丹是中国的传统名花,深受我国人民的喜爱,随着全球花卉业的迅速发展,国际上也掀起了一股牡丹热,这给中国牡丹带来了良好的发展机遇。但是由于栽培技术等原因,牡丹目前仍是孤芳自赏,难以形成产业化生产,一统天下的霸主地位也面临挑战,如日本在生产设备、管理方法、科研水平方面具有明显的优势,已成为当今世界牡丹出口最多的国家。而我国目前的牡丹种苗生产仍采用传统的大田生产模式,大部分的耕作土壤由于受不合理的耕作制度及过量使用化肥等影响,土壤结构恶化,生产的种苗质量低劣,市场竞争力低下。而AM真菌能够改善土壤理化特性、促进植物对养分和水分的吸收与利用、增加植物生长、提高产量和品质(刘润进和陈应龙,2007)。研究表明牡丹对菌根有一定的依赖性(郭绍霞,2003)。本调查发现牡丹根围AM真菌资源十分丰富,其中*Acaulospora* sp.、*G. constrictum*、*G. geosporum*与*G. reticulatum*与牡丹的亲合力最强,这些真菌可能与牡丹的生长发育密切相关。因此,通过进一步的实验可能筛选到促进牡丹生长的高效菌种,进而研制开发适宜牡丹专用的AM菌剂。这将为AM真菌在牡丹种苗生产和观赏栽培中的应用提供依据,并将为牡丹菌根化苗的产业化和大规模栽培开辟一条新途径。

参考文献

- Gai JP (盖京苹), Liu RJ (刘润进) (2000) Arbuscular mycorrhizal fungi on wild plants. I. *Mycosystema*(菌物系统), **19**, 24–28. (in Chinese with English abstract)
- Gai JP (盖京苹), Feng G (冯固), Li XL (李晓林) (2004) Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in field soils from North China. *Biodiversity Science* (生物多样性), **12**, 435–440. (in Chinese with English abstract)
- Gai JP, Feng G, Cai XB, Christie P, Li XL (2006) A preliminary survey of the arbuscular mycorrhizal status of grassland plants in southern Tibet. *Mycorrhiza*, **6**, 1–6.
- Guo SX (郭绍霞)(2003) *Resources of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Tree-peony and Culture of Mycorrhizal Seedlings* (牡丹AM真菌资源调查与菌根化苗培养研究). PhD Dissertation of Beijing Forestry University. (in Chi-

- nese with English summary).
- Li T, Zhao ZW (2005) Arbuscular mycorrhizas in a hot and arid ecosystem in southwest China. *Applied Soil Ecology*, **29**, 135–141.
- Liu RJ (刘润进), Chen YL (陈应龙) (2007) *Mycorrhizology* (菌根学). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Lovelock CE, Ewel JJ (2005) Links between tree species, symbiotic fungal diversity and ecosystem functioning in simplified tropical ecosystems. *New Phytologist*, **167**, 219–228.
- Mangan SA, Eom AH, Adler GH, Yavitt JB, Herre EA (2004) Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi across a fragmented forest in Panama: insular spore communities differ from mainland communities. *Oecologia*, **141**, 687–700.
- Munkvold L, Kjølner R, Vestberg M, Rosendahl S, Jakobsen I (2004) High functional diversity within species of arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist*, **164**, 357–364.
- Muthukumar T, Udaiyan K (1997) Influence of native endomycorrhiza, soil flooding and nurse plant on mycorrhizal status and growth of purple nutsedge (*Cyperus rotundus* L.). *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **6**, 51–58.
- Oehl F, Sieverding E, Mader P, Dubois D, Ineichen K, Boller T, Wiemken A (2004) Impact of long-term conventional and organic farming on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. *Oecologia*, **138**, 574–583.
- Qiao HQ (乔红权), Zhang Y (张英), Guo LD (郭良栋), Fu JF (傅俊范) (2005) Arbuscular mycorrhizal fungi associated with most common plants in north Xinjiang. *Mycosystema* (菌物学报), **24**, 130–136. (in Chinese with English abstract)
- Schenck NC, Perez Y (1990) *Manual for the Identification of VA Mycorrhizal Fungi*, 3rd edn. Synergistic Publications, Gainesville, USA
- Schwob L, Ducher M, Coudret A (1999) Effect of climatic factors on native arbuscular mycorrhizae and *Meloidogyne exigua* in a Brazilian rubber tree (*Hevea brasiliensis*) plantation. *Plant Pathology*, **48**, 19–25.
- Shi ZY (石兆勇), Chen YL (陈应龙), Liu RJ (刘润进) (2003) Arbuscular mycorrhizal fungi of Dipterocarpaceae in Xishuangbanna, southern Yunnan. *Mycosystema* (菌物系统), **22**, 402–409. (in Chinese with English abstract)
- Stromberg JC, Stutz JC (2006) Arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Populus-Salix* stands in a semiarid riparian ecosystem. *New Phytologist*, **170**, 369–380.
- Tadych M, Blaszkowski J (2000) Arbuscular fungi and mycorrhizae (Glomales) of the Slowinski National Park, Poland. *Mycotaxon*, **74**, 463–482.
- Talukdar NC, Germida JJ (1990) The distribution of vesicular-arbuscular mycorrhizal (VAM) species in Saskatchewan, Canada and the influence of short-term crop rotation on spore numbers and infection. In: *Proceedings of the 8th North American Conference on Mycorrhizas—Innovation and Heirachial Integration* (eds Allen MF, Williams SE). Agricultural Experimental Station, University of Wyoming, USA.
- Vander Heijden MGA, Klironomos JN, Ursic M, Moutoglis P., Streitwolf-Engel R, Boller T, Wiemken A, Sanders IR (1998) Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. *Nature*, **396**, 69–72.
- Wang FY (王发园), Liu RJ (刘润进) (2001) A preliminary survey of arbuscular mycorrhizal fungi in saline-alkaline soil of the Yellow River Delta. *Biodiversity Science* (生物多样性), **9**, 389–392. (in Chinese with English abstract)
- Wang FY, Liu RJ, Lin XG, Zhou JQ (2004) Arbuscular mycorrhizal status of wild plants in saline-alkaline soils of the Yellow River Delta. *Mycorrhiza*, **14**, 133–137.
- Wang MY (王淼焱), Li M (李敏), Liu ST (刘树堂), Sui FG (隋方功), Liu RJ (刘润进) (2006a) Arbuscular mycorrhizal fungi in long-term fixed fertilization field. *Journal of Fungal Research* (菌物研究), **4** (4), 5–9.
- Wang MY (王淼焱), Cong L (丛蕾), Li M (李敏), Liu RJ (刘润进) (2006b) Three new records of arbuscular mycorrhizal fungi in China. *Mycosystema* (菌物学报), **25**, 244–246. (in Chinese with English abstract)
- Zhang MQ (张美庆), Wang YS (王幼珊), Xing LJ (邢礼军) (1998) The ecological distribution of AM fungi community in south and east coast of China. *Mycosystema* (菌物系统), **17**, 274–277. (in Chinese with English abstract)
- Zhang MQ (张美庆), Wang YS (王幼珊), Xing LJ (邢礼军) (1999) The relationship between the distribution of AM fungi and environmental factors. *Mycosystema* (菌物系统), **18**, 25–29. (in Chinese with English abstract)
- Zhang MQ (张美庆), Wang YS (王幼珊), Zhang C (张驰), Huang L (黄磊) (1994) The ecological distribution characteristics of some genera and species of VAM fungi in Northern China. *Acta Mycologia Sinica* (真菌学报), **13**, 166–172. (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZW (赵之伟), Li XW (李习武), Wang GH (王国华), Cheng LZ (程立忠), Sha T (沙涛), Yang L (杨玲), Ren LC (任立成) (2001) AM fungi in the tropical rain forest of Xishuangbanna. *Mycosystema* (菌物系统), **20**, 316–323. (in Chinese with English abstract)

(责任编辑: 杨祝良 责任编辑: 时意专)