

王振楠, 杨美玲, 刘 鸯, 等. 丛枝菌根真菌对红花生长及根际土壤微环境的影响[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(4): 904-909.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2016.04.030

丛枝菌根真菌对红花生长及根际土壤微环境的影响

王振楠, 杨美玲, 刘 鸯, 马晓丽, 郭维后, 张 霞

(石河子大学, 新疆 石河子 832000)

摘要: 为提高红花产量与品质, 通过田间试验研究了接种丛枝菌根真菌对红花生长、产量以及根际微环境的影响。试验设计 4 个处理: 摩西球囊霉菌 (*Glomus mosseae*) 单菌接种组 (GM)、根内球囊霉菌 (*Glomus intraradices*) 单菌接种组 (GI)、*G. mosseae* 与 *G. intraradices* 混合菌接种组 (H)、不接种的对照组 (CK), 测定了红花伸长期的生物量、丛枝菌根真菌侵染率、土壤有机质含量、土壤酶活性、土壤 pH 值及根际土壤碱解氮、速效钾、有效磷含量等指标。结果表明: 3 个接种组丛枝菌根真菌均有侵染, 混合菌接种组侵染率最大 (69.00%); 与对照组相比, 接种组的生物量和产量均明显提高 ($P < 0.05$), 其中接种混合菌的效果最大, 红花生物量、花绒产量、单株籽粒质量比对照组分别提高 35.67%、17.79%、24.86%; 接种组根际土壤碱解氮含量、速效钾含量、全磷含量均降低, 而土壤有机质含量、速效磷含量和磷酸酶活性均提高; 红花生物量、产量、土壤有效磷含量、磷酸酶活性与丛枝菌根真菌侵染率呈显著正相关关系。说明红花丛枝菌根的形成改善了根际土壤微环境, 提高了土壤肥力, 从而促进红花生长, 增加红花产量, 根际效应与丛枝菌根真菌的种类有关。

关键词: 丛枝菌根化; 红花; 根际土壤; 产量; 土壤微环境

中图分类号: S154.36

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2016)04-0904-06

Effects of arbuscular mycorrhization on the growth of safflower and the microenvironment of rhizosphere soil

WANG Zhen-nan, YANG Mei-ling, LIU Yang, MA Xiao-li, GUO Wei-hou, ZHANG Xia

(Shihezi University, Shihezi 832000, China)

Abstract: To study the effects on the growth of safflower and the microenvironment of rhizosphere soil of single-strain inoculation of arbuscular mycorrhiza (AM) fungi *Glomus mosseae* (GM), *G. intraradices* (GI), mixed infection of *G. mosseae* and *G. intraradices* (referred to as H), the safflower biomass, the infection rate, soil organic matter, soil pH, soil enzyme activity, N, P and K nutrients in the rhizosphere were determined. No inoculation was set as control (CK). The infection rate in mixed inoculation group was the highest, up to 69.00%. Compared with the control group, the biomass and yield of inoculation groups were improved markedly ($P < 0.05$), and the improvement was the biggest in mixed inoculation

group which were 35.67% in safflower biomass, 17.79% in velvet flower yield and 24.86% in single plant grain weight. The soil available nitrogen content, available potassium content, total phosphorus content, pH and electrical conductivity decreased in the rhizosphere soil of the inoculated groups, while the soil organic matter content, available phosphorus content, water content and phosphatase activity increased. The regression analysis showed that there were positive correlations between saf-

收稿日期: 2015-11-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31160410); 石河子大学优秀青年项目 (2012ZRKXYQI3)

作者简介: 王振楠 (1991-), 女, 河南封丘人, 硕士, 主要从事植物与土壤生态学研究。(E-mail) nancyzhenwang@163.com

通讯作者: 刘 鸯, (E-mail) 524718312@qq.com

flower biomass, yield, soil available phosphorus content, phosphatase activity and mycorrhizal infection rate. AM inoculation improved micro-ecological environment and soil fertility in the rhizosphere, resulting in the improvement of the growth and yield of safflowers. The effects was AM species-dependent.

Key words: arbuscular mycorrhization; safflower; rhizosphere soil; yield; soil micro-environment

丛枝菌根真菌(Arbuscular mycorrhizal fungus)是一类在陆地生态系统中分布最广的内生菌^[1-2]。真菌侵染植株后,可与植物根系形成互惠共生体,目前已知90%的维管植物可形成丛枝菌根^[3]。大量试验结果表明,这种共生体可以帮助植物改善根际微环境^[4],增加宿主对矿物质元素的摄取,提高植物抗逆、抗病等特性,促进植物的生长^[5]与经济作物产量的提高^[6-9]。红花系菊科植物(*Carthamus tinctorius* L.),是一种集药用、食用、化工原料为一体的优良作物^[10-11]。新疆是中国红花的主要栽培区,产品远销国内外,红花已成为新疆“红色产业”中的支柱作物^[10,12]。如何更有效地提高红花产量与质量是红花产业发展的一大关键。为此,本试验通过在育苗基质中添加AM真菌,研究丛枝菌根真菌对红花生长、产量以及土壤微环境的影响,探讨丛枝菌根真菌促进红花生长的机理,为开发红花适用的生物肥料提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于新疆石河子大学农学院试验站(43°20'N~45°20'N, 84°45'~86°40'),该地区属典型干旱半干旱大陆性气候,日照充沛,年日照时数为2 721~2 818 h,无霜期为168~171 d,年平均气温为6.5~7.2℃,夏季平均气温为24.2~25.7℃,年降水量为125.0~207.7 mm,一年中降水较多的月份主要出现在7月、5月、6月和4月,年蒸发量为1 500~2 400 mm。该地区为灌溉农业区,样地土壤含水量18%, pH7.4,有机质15.200 g/kg,全氮0.077 g/kg,全磷0.175 g/kg,全钾2.574 g/kg,速效氮43.9 mg/kg,有效磷27.5 mg/kg,速效钾183.5 mg/kg。

1.2 供试材料与菌种来源

供试红花新红四号种子采自新疆石河子。盆栽育苗土壤采自石河子大学农学院试验站耕作层(0~25 cm)。设置4个处理,分别为*Glomus mosseae*单菌接种组(GM)、*G. intraradices*单菌接种组(GI)、

*mosseae*与*G. intraradices*混合菌接种组(H)、不接种的对照组(CK)。*G. mosseae*和*G. intraradices*菌种由青岛农业大学植物保护研究所刘润进提供。菌种由石河子大学生命科学学院曾广萍将其接种在三叶草根进行土壤扩大繁殖,获得含孢子菌丝和侵染根际土等混合物后接种。

1.3 试验方法

1.3.1 育苗 2013年3月26号育苗,用塑料盆(21 cm×21 cm×14 cm)作为育苗容器,每盆装基质4 kg,基质为蛭石、土和砂子(质量比为2:1:1),土壤灭菌及种子消毒参照杨晶等^[13]的方法。选取粒大、饱满、色白的红花种子,每盆播15粒种子,处理组接种菌剂10 g,对照不接种菌剂。各盆随机放置,室温15~20℃下培养至发芽。待红花幼苗生长35~40 d出现一定的菌根效应后,从每个处理中选取5~10株生长状况良好的幼苗,利用染色镜检法检测根部菌根侵染率。当菌根侵染率达到30%以上时,可进行移栽。

1.3.2 大田移栽 5月8日移栽,按株距25 cm、行距35 cm规格种植。施肥量为:尿素450 kg/hm²,三料过磷酸钙375 kg/hm²,硫酸钾150 kg/hm²。施肥方法为:尿素50%做基肥,50%在初花期追施;三料磷过磷酸钙30%做基肥,40%定苗后追施,30%初花期追施;硫酸钾60%定苗后追施,40%初花期追施。浇水:整个生育期浇水3次,分别在定苗后30%、初花期40%、终花期30%,共3 000 m³/hm²。

1.4 样品处理和测定

于伸长期(6月25日)采集土壤和植株样品,盛花期(7月27日)和成熟期(8月20日)采集植株样品进行分析。其中伸长期每个处理选择10株标准的植株,用米尺及游标卡尺测量株高、茎粗、叶面积、冠幅,之后挖出整株红花,抖掉根周围松散的土壤,将附着在红花根上的土壤刷下来作为根际土,装入封口袋密封后带回实验室,过1 mm筛,自然风干后用于土壤理化性质测定分析,并将红花整株带回实验室测定根干质量、植株干质量、根长及丛枝菌根真

菌侵染率。盛花期及种子成熟期每个处理分别选择 10 株标准株分单株采集花绒及籽粒,测定质量。

丛枝菌根真菌侵染率采用脱色-酸性品红染色方法^[14]测定;伸长期,每个处理取 100 个 0.5 cm 长的根段,将其在载玻片上染色固定,并镜检观察记录染色结果。土壤化学性质测定参考鲍士旦的《土壤农化分析》^[15];pH 值测定采用水土比 1.0:2.5 玻璃电位法,电导率测定采用水土比 1:5 电导仪法,含水率测定采用烘干法,有机质含量测定采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法,碱解氮含量测定采用减解扩散法,有效磷含量测定采用盐酸-氟化铵提取-钼锑抗比色法,速效钾含量测定采用乙酸铵提取-火焰原子吸收分光光度法。土壤磷酸酶活性测定参照吴金水的《土壤微生物生物量测定方法及其应用》^[16],采用对硝基苯酚比色法测定。花绒和籽粒质量采用烘干法测定,恒温 70 ℃ 烘至恒质量。

1.5 数据处理

采用 Excel 2003 进行数据汇总及作图,用 SPSS 17.0 对试验数据进行 ANOVA 方差分析、多重比较 (Duncan's 法) 及相关性分析。

表 1 丛枝菌根对伸长期红花生长的影响

Table 1 Effect of different inoculation treatments on the growth of safflower at elongation

处理	株高 (cm)	茎粗 (cm)	叶面积 (cm ²)	冠幅 (cm ²)	根干质量 (g)	地上部干质量 (g)	根冠比	根长 (cm)	丛枝菌根 真菌侵染率 (%)
CK	56.33a	0.73a	54.42a	24.47a	0.52a	16.65a	0.031 2	13.75a	6.32a
GI	79.61b	0.97b	62.91b	29.33b	1.28b	21.30b	0.060 0	17.00b	58.67b
GM	88.05c	0.93b	64.29b	35.01c	1.21b	20.54b	0.058 9	17.00b	60.67c
H	95.34d	1.03c	65.67b	33.66c	3.07c	22.59c	0.135 9	18.00c	69.00d

GM: *Glomus mosseae* 单菌接种; GI: *G. intraradices* 单菌接种; H: *G. mosseae* 与 *G. intraradices* 混合菌接种; CK: 不接种对照。同列不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平。

2.2 不同接种处理对红花产量的影响

花绒质量与籽粒质量是衡量红花经济价值的重要指标。由图 1、图 2 可知,接种处理无论是单株花绒产量还是籽粒产量都得到明显提高,与对照差异显著。接种处理花绒干质量较对照增加了 10.32%~17.79%,籽粒质量较对照增加了 14.68%~24.86%。混合菌接种处理的促生效果最佳,产量最高。可见,接种处理明显地提高了红花产量,改善了红花生长条件。

2 结果与分析

2.1 不同接种处理对红花伸长期丛枝菌根真菌侵染率与生物量分配的影响

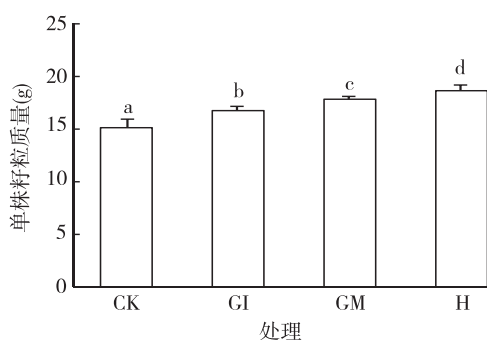
丛枝菌根真菌侵染率是衡量真菌在宿主植物根系扩展能力的重要指标,侵染率越高,其在宿主根系上扩展的能力越大。红花移植到大田后,伸长期植株不同程度被侵染,对照及 GI、GM 和 H 处理组分别有 6.32%、58.67%、60.67% 和 69.00% 的植株被侵染(表 1)。表明接种丛枝菌根真菌可显著提高侵染率,其中以混合菌种接种组侵染率最高 ($P < 0.05$)。

定植后,伸长期接种处理的红花长势明显好于对照,无论株高、茎粗、叶面积、冠幅、根干质量、干质量及根长都有不同程度的增加,且差异显著 ($P < 0.05$)。其中混合菌接种组根干质量、地上部干质量和根冠比均为最大,为对照组的 5.90 倍、1.36 倍、4.36 倍,而叶面积和冠幅相对于对照组增加较小。说明丛枝菌根真菌接种对红花生物量的分配产生了较大影响,混合菌接种更有利于生物量向根部分配。

2.3 不同接种处理对红花根际土壤理化性质的影响

土壤有机质是指存在于土壤中含碳的有机物质,包括各种动植物的残体、微生物体及其分解和合成的各种有机质,它对土壤形成、土壤肥力等有着重要作用^[17]。由表 2 可知,接种处理的有机质含量与对照的差异显著,尤其是混合菌接种处理,相对于对照增加了 0.76 g/kg。

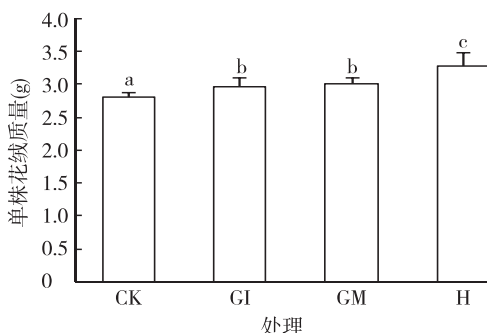
伸长期是红花整个生长期的重要时期,此时期



各处理见表1注。不同小写字母表示处理间差异达到0.05显著水平。

图1 丛枝菌根真菌接种处理对红花单株籽粒质量的影响

Fig.1 The effects of arbuscular mycorrhization on safflower seed weight per plant



各处理见表1注。不同小写字母表示处理间差异达到0.05显著水平。

图2 丛枝菌根真菌接种处理对红花单株花绒质量的影响

Fig.2 The effects of arbuscular mycorrhization on safflower velvet flower weight per plant

土壤的营养物质制约着植株的生长,充足的营养供给对植株生长更有益。表2显示,各处理间碱解氮和速效钾含量均呈显著差异,且碱解氮和速效钾含量都表现为CK>GM处理>GI处理>H处理。说明AM真菌接种促进了植物对氮、钾的吸收,从而导致根际碱解氮浓度降低。

土壤有机磷转化受多种因子制约,尤其是磷酸酶对土壤磷素的有效性具有重要作用。磷酸酶活性也是评价土壤磷素生物转化方向与强度的指标,有机磷经磷酸酶水解后才能被作物吸收利用,磷酸酶活性高低反映作物对有机磷利用的潜力。表2显示,红花伸长期全磷含量表现为CK>GM处理>GI处理>H处理,对照组全磷含量明显高于丛枝菌根真菌侵染组;土壤中速效磷含量则表现为H处理>

GM处理>GI处理>CK,可见侵染率越高速效磷积累越多,各处理间差异显著可能与菌种种类相关;磷酸酶活性以混合菌处理(H处理)最大,其次为GM处理、GI处理。

2.4 丛枝菌根真菌侵染率与红花生物量及土壤养分相关性

相关性分析结果表明,丛枝菌根真菌侵染率与红花生物量的积累($r=0.976, P<0.01$)、速效磷含量($r=0.983, P<0.01$)、磷酸酶活性($r=0.957, P<0.01$)呈极显著的正相关关系,与土壤全磷含量呈负相关关系($r=-0.446, P>0.05$),与碱解氮含量呈极显著负相关关系($r=-0.994, P<0.01$),与速效钾含量呈显著负相关关系($r=-0.708, P<0.05$)。红花单株花绒质量($r=0.945, P<0.01$)、红花单株籽粒质量($r=0.967, P<0.01$)与丛枝菌根真菌侵染率呈极显著正相关关系。

3 讨论

前人研究结果表明,接种AM真菌对甜椒、棉花、番茄、苜蓿等的生长和产量均具有促进作用^[18-23]。而这种增产促进作用一般依赖于菌根效应,即AM真菌与宿主之间的亲和力。侵染率反映真菌的感染情况和在根系中的多寡,是AM真菌功能发挥的基础^[23]。有研究表明,AM真菌的侵染能诱导植物根系形态发生明显变化,导致高级次生根形成^[24]。菌根真菌自身菌丝的扩展,能更有效地增加植株根系的吸收面积,从而提高根系对所吸收营养元素的转化和利用效率,这是菌根真菌促进植物生长发育的一个原因。经典的功能平衡假说认为植物通过在不同器官组织间进行生物量分配,以最大程度地吸收养分、光和水从而达到最大生长速率^[25]。本试验结果表明,不接菌种的对照组生物量指标均低于接种处理组,且混合菌接种组红花花绒及种子产量、丛枝菌根真菌侵染率均最高,尤其是根系生物量比对照组增加了5.90倍,与此同时丛枝菌根真菌的接种对红花生物量的分配也产生了一定的影响,接种处理具有较大的根冠比,这种变化更有利于红花的生长,以及更好地利用有限的营养资源。由于营养吸收的改善,接种处理显著促进了红花的生长,提高了红花的产量。

AM真菌属于专性共生菌,为了能够生长和得到其生活史所需碳源,它与植物建立了一个共生体

表2 丛枝菌根对伸长期红花根际土壤养分的影响

Table 2 Effects of arbuscular mycorrhization on soil nutrients in the rhizosphere of safflower

处理	有机质 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	速效磷 (mg/kg)	全磷 (mg/kg)	磷酸酶 [$\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$]	pH 值	含水率 (%)	电导率 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
CK	14.63a	15.58d	84.21c	0.954a	0.423c	54.93a	7.75d	0.336a	184.50b
CI	14.80b	12.21b	77.64b	1.528b	0.417b	61.23b	7.63c	0.364b	192.37c
GM	14.87c	12.48c	81.93c	1.636c	0.418b	62.13b	7.57b	0.476d	196.30d
H	15.39d	11.61a	70.87a	1.826d	0.402a	64.50bc	7.49a	0.453c	166.87a

各处理见表1注。不同小写字母表示处理间差异达到0.05显著水平。

系。AM 真菌主要贡献是向植物提供矿物营养,特别是磷元素^[1]。而磷是限制植物生长的主要营养元素之一,在土壤中主要以难溶的矿物态存在,土壤中存在的根际细菌、内部共生菌被认为是最有效的解磷微生物,它们能将土壤固定的矿物态磷释放出来^[26-27]。本研究结果表明,AM 真菌侵染的红花根际土壤中磷酸酶活性显著增高,说明丛枝菌根真菌对红花根际的磷酸酶起到了刺激作用,加速了全磷的分解,导致根际土壤全磷含量减少,并出现速效磷富集现象,增强了植株对土壤可利用磷的吸收,且接种混合菌的红花富集率最大。不仅如此,接种 AM 真菌的红花根际速效钾、碱解氮含量出现了降低,这与前人的研究结果不一致^[28],导致这种结果的原因可能是接种处理增加了生物量,使土壤中消耗的氮磷钾增多,而接种菌根只能有效增加土壤速效磷的含量,从而使造成土壤中氮钾元素匮乏。

红花丛枝菌根真菌侵染率、生物量、土壤养分相关性分析结果表明,接种 AM 真菌的红花生长状况与丛枝菌根真菌侵染率直接相关,红花丛枝菌根真菌侵染率越高,土壤速效磷含量越高,磷酸酶活性越强,植株越高,茎越粗,叶面积越大,生物量越多,产量越高;同时,红花丛枝菌根真菌侵染率与土壤全磷含量呈负相关关系,与土壤碱解氮、速效钾含量呈显著负相关关系。

综上所述,接种 AM 真菌后红花产量的增加是多方面的作用结果,植株本身与 AM 真菌的共生作用,改变了根际的生态环境,影响了植株生物量分配比例,混合 AM 真菌对这种影响与改变最大,最有利于植株的生长。针对红花增产效果的突破,可以进一步研究各种 AM 真菌菌群间的混合比例,以达到最优的促生效果,提高红花的种植经济效益。

参考文献:

- [1] SMITH S E, F ANDREW S, IVER J. Mycorrhizal fungi can dominate phosphate supply to plants irrespective of growth responses [J]. *Acta Horticulturae*, 2005, 133(1): 16-20.
- [2] HARLEY J L, SMITH S E. Mycorrhizal symbiosis [J]. *Mycorrhizal Symbiosis*, 1997, 3(3): 273-281.
- [3] ARINES J, QUINTELA M, VILARIÑO A, et al. Protein patterns and superoxide dismutase activity in non-mycorrhizal and arbuscular mycorrhizal *Pisum sativum* L. plants [J]. *Plant & Soil*, 1994, 166(1): 37-45.
- [4] 赵维奇,廉宁霞,张弛,等. 丛枝菌根真菌(AMF)处理后红花土壤深度生态化学计量的时空变化 [J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(11): 468-471.
- [5] 任祺,韩丽,张永福,等. 不同丛枝菌根真菌对玉米生长生理的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(5): 63-66.
- [6] ESTRADA B, AROCA R, MAATHUIS F J M, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi native from a Mediterranean saline area enhance maize tolerance to salinity through improved ion homeostasis [J]. *Plant Cell & Environment*, 2013, 36(10): 1771-1782.
- [7] 任祺,韩丽,张永福,等. 不同丛枝菌根真菌对玉米生长生理的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2015(5): 63-66.
- [8] MYCORRHIZAE A V. The friendly fungi: What we know, what should we know and how do we know? [M]. New York: Springer, Berlin, Heidelberg, 1998: 1-24.
- [9] 张峰,段廷玉,闫飞扬,等. 丛枝菌根真菌与根际微生物的互作 [J]. *草业科学*, 2014, 31(9): 1673-1685.
- [10] 郭晓凤. 中药红花的研究进展 [J]. *中国民族民间医药*, 2008, 17(2): 73-74.
- [11] 范仲学,王志芬,闫树林,等. 多用途经济植物红花及其高产栽培技术 [J]. *山东农业科学*, 2004(1): 40-41.
- [12] 朱明娟. 新疆红花的研究进展及发展前景 [J]. *科技信息*, 2008(25): 40-47.
- [13] 杨晶,邵明龙,李天航,等. 新疆红花组织培养与快速繁殖的研究 [J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(8): 3439-3440.
- [14] PHILLIPS J M, HAYMAN D S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection [J]. *Trans Br Mycol Soc*,

- 1970, 55(1): 158-163.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [16] 吴金水. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [17] 汪吉东, 张永春, 俞美香, 等. 不同有机无机肥配合施用对土壤活性有机质含量及pH值的影响[J]. 江苏农业学报, 2007, 23(6): 573-578.
- [18] 李 涛, 刘润进, 陈 敏, 等. 盐渍条件下AM真菌对大豆生长和离子含量的影响[J]. 菌物学报, 2009, 28(3): 410-414.
- [19] 王林闯, 贺超兴, 张志斌. AM真菌对不同栽培基质甜椒生长及产量品质的影响[J]. 中国蔬菜, 2010(16): 32-37.
- [20] 王奎萍, 郑 颖, 褚光耀, 等. 解磷、固氮、产吡啶乙酸微生物菌株的筛选及其对植物的促生效果[J]. 江苏农业学报, 2013, 29(6): 1352-1359.
- [21] 贺学礼, 赵丽莉, 李英鹏. NaCl胁迫下AM真菌对棉花生长和叶片保护酶系统的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(1): 188-193.
- [22] 朱培森, 杨兴明, 徐阳春, 等. 高效解磷细菌的筛选及其对玉米苗期生长的促进作用[J]. 应用生态学报, 2007, 18(1): 107-112.
- [23] 韩华雯, 孙丽娜, 姚 拓, 等. 不同促生菌株组合对紫花苜蓿产量和品质的影响[J]. 草业学报, 2013, 22(5): 104-112.
- [24] KOIDE R T, MOSSE B. A history of research on arbuscular mycorrhiza[J]. Mycorrhiza, 2004, 14(3): 145-163.
- [25] BROUWER R. Nutritive influences on the distribution of dry matter in the plant[J]. Wageningen, 1962(2): 150-155.
- [26] JE H, KE B. Arbuscular mycorrhizal fungi as components of sustainable soil plant systems[J]. Critical Reviews in Biotechnology, 1995, 15(4): 201-212.
- [27] IGUAL J M, VALVERDE A, CERVANTES E, et al. Phosphate solubilizing bacteria as inoculants for agriculture: use of updated molecular techniques in their study[J]. Agronomie, 2001, 21(6): 561-568.
- [28] 袁丽环, 闫桂琴. 丛枝菌根化翅果油树幼苗根际土壤微环境[J]. 植物生态学报, 2010, 34(6): 678-686.

(责任编辑:张震林)