

水分胁迫下 AM 真菌和根瘤菌对沙打旺生长及养分吸收的影响

吴福勇^{1,2}, 武玉坤², 毕银丽², 齐礼帅², 李丽娟²

(1. 河南城建学院市政与环境工程系, 河南 平顶山 467036; 2. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

摘要: 利用温室盆栽试验研究水分胁迫下接种丛枝菌根(Arbuscular mycorrhizal, AM)真菌和根瘤菌(*Rhizobium meliloti*)对沙打旺(*Astragalus adsurgens* Pall.) 生长和养分吸收的影响。在土壤相对含水量 65% 和 35% 条件下, 分别设不接种(对照)、单接根瘤菌、单接摩西球囊霉(*Glomus mosseae*)和双接根瘤菌与摩西球囊霉等 4 个处理。结果表明: 干旱胁迫显著抑制沙打旺 AM 真菌侵染率($P < 0.05$), 而接种根瘤菌在两种水分条件下均显著促进摩西球囊霉对沙打旺根系的侵染($P < 0.05$)。接种 AM 真菌不仅显著提高沙打旺对 P 的吸收($P < 0.05$), 而且明显促进根瘤的生长。无论是在干旱条件下或是在正常供水条件下, 双接根瘤菌与摩西球囊霉处理对沙打旺生长及养分吸收的效应显著高于单接菌处理, 植株地上部、地下部生物量以及 N、P、K 等吸收量均为最大。结果表明: AM 真菌与根瘤菌双接种技术在干旱、半干旱区受损生态系统的植被恢复中具有一定的应用潜力。

关键词: AM 真菌; 根瘤菌; 豆科植物; 植被恢复; 水分胁迫

中图分类号: Q948.12+2.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)04-0161-06

Inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi and *Rhizobium* on the growth and nutrition uptake of *Astragalus adsurgens* Pall. under water stress

WU Fu-yong^{1,2}, WU Yu-kun², BI Yin-li², QI Li-shuai², LI Li-juan²

(1. Faculty of Municipal and Environmental Engineering, He'nan University of Urban Construction, Pingdingshan, He'nan 467036, China;

2. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: A pot trial was conducted in greenhouse to investigate the effects of arbuscular mycorrhizal (AM, *Glomus mosseae*) and *Rhizobium* on the growth and nutrition uptake of *Astragalus adsurgens* Pall. under water stress. There were four treatments, including control (no inoculation), inoculation of *Rhizobium*, inoculation of *G. mosseae* and dual inoculation of *Rhizobium* and *G. mosseae*, either in 35% or 65% of soil relative water content. The results showed that water stress significantly ($P < 0.05$) decreased the mycorrhizal infection of *A. adsurgens*, while the inoculation of *Rhizobium* significantly ($P < 0.05$) increased the infection regardless of water condition. The inoculation of *G. mosseae* not only significantly increased P uptake of *A. adsurgens*, but also increased the growth of root nodules. Regardless of water condition, the dual inoculation of *G. mosseae* and *Rhizobium* was superior to the single inoculation with either *G. mosseae* or *Rhizobium*. Both the largest biomass of shoot and root and the highest uptake of N, P and K were recorded in the dual inoculation treatment. Therefore, the dual inoculation of *G. mosseae* and *Rhizobium* might be a promising approach for revegetation of damaged ecosystem in arid and semi-arid regions.

Keywords: AM fungi; *Rhizobium meliloti*; legume; revegetation; water stress

我国旱地面积占全国总土地面积的 52.5%, 干旱、半干旱地区农作物经常遭受周期性或不可预测性的干旱而减产, 同时水资源匮乏还会造成土地荒漠化和沙漠化等问题^[1]。丛枝菌根(Arbuscular mycorrhizal, AM)真菌是自然界中广泛存在的一种土壤微生物, 能与陆地生态系统中 90% 以上的有花植物

收稿日期: 2012-07-06
基金项目: 863 计划(2013AA102904); 国家十二五支撑计划(2012BAC10803); 中央高校基本科研业务费(2009KD01)
作者简介: 吴福勇(1973—), 男, 博士, 副教授, 主要从事污染土壤修复与治理研究。E-mail: wfy09@163.com。
通信作者: 毕银丽(1971—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土地复垦及生态恢复技术研究。E-mail: byl@cumt.edu.cn。

形成菌根共生体^[2]。AM 真菌不仅能够增加宿主植物对土壤矿质元素和水分的吸收利用、改善植物营养、促进植物生长,而且还可以提高植物抗旱性和抗逆性^[2-3]。在被干扰生境的恢复中,接种外来 AM 真菌或培育土著 AM 真菌均能够促进原生植被的恢复,增加生物多样性^[4-5]。因此,菌根技术在干旱环境中的应用备受关注。

沙打旺 (*Astragalus adsurgens* Pall.) 是豆科黄芪属多年生草本植物,具有适应性广、抗旱、抗寒、抗风沙、耐瘠薄、产草量高等特性,在我国北方干旱、半干旱地区广泛种植。沙打旺对退化草地生态恢复与植被重建、防止水土流失、保护生态环境和促进畜牧业发展等方面具有重要作用。在野外自然生境下,沙打旺根际土壤中发现 AM 真菌孢子^[6],这预示着 AM 真菌将会对沙打旺的生长发挥一定作用。室内盆栽试验结果显示:水分胁迫条件下,AM 真菌能够促进沙打旺根系对土壤水分和矿质营养的吸收,改善植物生理代谢活动,从而提高沙打旺抗旱性,促进其生长^[7]。通常情况下,根瘤菌—豆科植物—AM 真菌三者之间会形成共生关系^[8]。AM 真菌与根瘤菌之间存在的交互作用会提高固氮效率、促进磷吸收和增加农作物的产量^[9]。室内及室外研究结果均显示:在正常供水条件下,双接 AM 真菌和根瘤菌对豆科植物的益处要远远大于单接 AM 真菌或单接根瘤菌对宿主的益处^[10-11]。然而, Ruiz - Lozano et al.^[12]研究发现:干旱能够引起豆科植物根瘤死亡,从而减低其固氮能力。因此,在干旱半干旱环境中,接种 AM 真菌和根瘤菌对豆科植物的生长效应及其作用机理需进一步研究。

本试验利用摩西球囊霉 (*Glomus mosseae*) 和根瘤菌作为接种剂,研究两种土壤水分条件下 (65% 和 35%) 接种 AM 真菌和根瘤菌对沙打旺生长和养分吸收的影响,为干旱、半干旱环境中利用双接种技术进行植被恢复和促进畜牧业发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试沙打旺种子由中国农科院中农种子公司提供,种子播种前用 10% H₂O₂ 浸泡 10 min,去离子水清洗数遍后沥干备用。供试 AM 真菌为摩西球囊霉,由北京市农林科学院植物营养与资源研究所提供。以白三叶草为宿主进行盆栽扩繁,以含有宿主植物根段、菌根真菌孢子的根际土为接种剂。供试根瘤菌剂由中国农业科学院提供,其最初由草木犀根部活性根瘤分离获得。根瘤菌剂按照 Wu et

al.^[13]描述的方法进行培养,试验所用根瘤菌剂含量大约 1.0 × 10⁸ cfu · mL⁻¹。

采集于北京市东郊农田土 (褐土) 与河沙按质量比 1:2 混匀,过 2 mm 筛,经 121℃ 灭菌 2 h,放置 7 d 风干待用。该基质基本化学性状如下:有机质 2.83 g · kg⁻¹,有效氮 11.84 mg · kg⁻¹,有效磷 2.80 mg · kg⁻¹,速效钾 49.31 mg · kg⁻¹,pH 8.67,土壤最大持水量 14.8%。

盆栽容器为 20 cm × 20 cm × 15 cm (高 × 盆口直径 × 盆底直径) 的白色塑料盆,使用前用 75% 酒精消毒,自来水冲洗晾干待用。

1.2 试验设计

试验设 2 个土壤相对含水量:即 35% (重度胁迫) 和 65% (正常水分)。同一水分条件下设不接种 (对照)、单接根瘤菌 (Rh.)、单接摩西球囊霉 (G. m) 和双接根瘤菌与摩西球囊霉 (Rh. + G. m) 等 4 个处理,每个处理设 3 个重复。AM 真菌以穴播方式接种,每盆用接种剂 25 g,不接种和单接根瘤菌处理则添加等量灭活菌剂及 25 mL 菌剂滤液,以保持基质中除 AM 真菌外其他微生物区系的一致性。根瘤菌剂在避光条件下与基质混合均匀,每盆接种 50 mL 根瘤菌剂,不接种与单接摩西球囊霉处理则添加等量无菌水。10 月 6 日播种,1 个月后定苗至 7 株并施肥,每盆施肥水平为:N (硝酸铵) 100 mg · kg⁻¹,P (磷酸二氢钾) 25 mg · kg⁻¹,K (硝酸钾) 150 mg · kg⁻¹。11 月 6 日开始进行不同水分处理,每天用称重法保持土壤含水量相对恒定,并记录每天浇水量。试验在北京市园林科学研究所温室中进行,自然光照,次年 5 月 17 日收获,将地下部和地上部分开,地下部用自来水冲洗干净,取少量新鲜根样保存,用于测定 AM 真菌侵染率,其余根样和地上部烘干测定干重,粉碎后干燥保存待用。

1.3 测定方法

植物组织中全 N、全 P、全 K 经浓硫酸双氧水消解后分别用凯氏定氮法、钒钼黄比色法、火焰光度计法测定。沙打旺根系 AM 真菌侵染率采用 Phillips 和 Hayman^[14]方法染色,以侵染根段占总根段的百分比计算 AM 真菌侵染率。

1.4 数据分析

植物水分利用效率按照如下公式^[15]进行计算:

$$\text{水分利用系数} = \frac{\text{植株生物总量 (mg)}}{\text{生育期耗水总量 (mL)}}$$

数据结果采用 SAS 8.1 软件进行方差分析及相关性分析,所有处理均在 0.05 水平下进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理对沙打旺 AM 真菌侵染率的影响

不同水分条件和不同接菌处理对沙打旺根系 AM 真菌侵染率的影响如图 1 所示。AM 真菌侵染率明显受土壤含水量的影响:正常供水条件显著高于干旱条件 ($P < 0.05$)。同一水分条件下,无论是单接摩西球囊霉或是双接摩西球囊霉与根瘤菌均显著促进了沙打旺 AM 真菌侵染率 ($P < 0.05$)。2 种水分条件下,接种根瘤菌均显著提高了摩西球囊霉对沙打旺根系的侵染 ($P < 0.05$),分别是单接摩西球囊霉的 1.28、1.09 倍。相关分析结果显示(表 1):沙打旺地上部干重 ($r = 0.57, P < 0.01$)与地下部干

重($r = 0.41, P < 0.05$)以及地上部 P 吸收量($r = 0.65, P < 0.001$)与地下部 P 吸收量($r = 0.57, P < 0.01$)分别与 AM 真菌侵染率呈显著正相关。

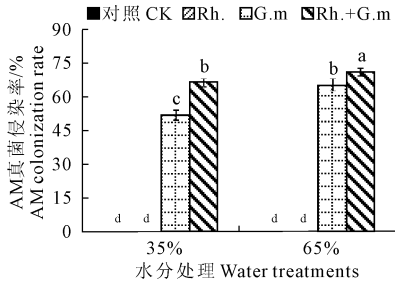


图 1 AM 真菌和根瘤菌对沙打旺 AM 真菌侵染率的影响

Fig.1 Effects of *Glomus mosseae* and *Rhizobium meliloti* on mycorrhizal colonization of *Astragalus adsurgens* Pall.

表 1 相关性分析
Table 1 Pearson correlation coefficients ($n = 24$)

指标 Indices	地上部 干重 Shoot biomass	地下部 干重 Root biomass	地上部 Shoot			地下部 Root			侵染率 Mycorrhizal colonization	根瘤数 Number of root nodules	根瘤鲜重 Fresh weight of root nodules
			N	P	K	N	P	K			
地上部干重 Shoot biomass	1.00										
地下部干重 Root biomass	0.92***	1.00									
地上部 N 吸收量 Shoot N uptake	0.99***	0.91***	1.00								
地上部 P 吸收量 Shoot P uptake	0.98***	0.88***	0.98***	1.00							
地上部 K 吸收量 Shoot K uptake	0.98***	0.88***	0.98***	0.98***	1.00						
地下部 N 吸收量 Root N uptake	0.94***	0.99***	0.93***	0.90***	0.91***	1.00					
地下部 P 吸收量 Root P uptake	0.93***	0.95***	0.92***	0.92***	0.92***	0.95***	1.00				
地下部 K 吸收量 Root K uptake	0.94***	0.98***	0.93***	0.91***	0.92***	0.98***	0.97***	1.00			
侵染率 Mycorrhizal colonization	0.57**	0.41*	0.56**	0.64***	0.62**	NS	0.57**	0.49*	1.00		
根瘤数 Number of root nodules	0.88***	0.78***	0.91***	0.89***	0.93***	0.85***	0.82***	0.82***	NS	1.00	
根瘤鲜重 Fresh weight of root nodules	0.80***	0.69***	0.83***	0.80***	0.86***	0.76***	0.75***	0.73***	NS	0.94***	1.00

注 Note: * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$; NS 未达到显著水平 No significant correlation.

2.2 不同处理对沙打旺根瘤菌生长的影响

水分处理和接菌处理均对沙打旺根瘤数和根瘤鲜重产生明显影响(图 2)。正常供水条件下沙打旺的根瘤数、根瘤鲜重均显著高于水分胁迫条件下相应根瘤数和根瘤鲜重 ($P < 0.05$),3 种接菌处理的根瘤鲜重分别是干旱条件下的 4.91、2.34 倍和 3.16 倍。此外,3 种接菌处理在正常供水条件下均显著

增加了沙打旺根瘤数和根瘤鲜重,根瘤鲜重分别是对照的 71.2、35.2 倍和 101.8 倍;而在水分胁迫条件下,只有双接根瘤菌与摩西球囊霉(Rh. + G.m)处理显著增加了沙打旺根瘤数和根瘤鲜重 ($P < 0.05$)。相关分析结果显示(表 1):沙打旺地上部干重($r = 0.88, P < 0.001$; $r = 0.80, P < 0.001$)与地下部干重($r = 0.78, P < 0.001$; $r = 0.69, P < 0.001$)及

地上部 N 吸收量($r = 0.91, P < 0.001$; $r = 0.83, P < 0.001$)与地下部 N 吸收量($r = 0.85, P < 0.001$; $r = 0.76, P < 0.001$)分别与植株根瘤数、根瘤鲜重呈显著正相关关系。

2.3 不同处理对沙打旺生长和水分利用系数的影响

表 2 显示不同水分条件及接菌处理对沙打旺生长的影响。结果显示:水分胁迫条件下,沙打旺地上部干重仅是正常供水条件下的 18% ~ 53%。无论是在水分胁迫条件下还是在正常供水条件下,3 种接菌处理均显著增加了植株地上部及地下部的生物量($P < 0.05$),其中双接种(Rh. + G.m)处理植株地上部干重均显著高于单接根瘤菌(Rh.)和单接摩西球囊霉(G.m)处理($P < 0.05$)。不同接菌处理对沙打旺水分利用系数也有明显影响(表 2)。单接摩西球囊霉(G.m)和双接根瘤菌与摩西球囊霉(Rh. + G.m)均显著增加了沙打旺的水分利用系数($P < 0.05$),而单接根瘤菌(Rh.)仅在水分胁迫条件下显著增加了沙打旺的水分利用系数($P < 0.05$)。表 2 还显示:双接根瘤菌与摩西球囊霉对沙打旺水分利用系数的影响具有显著的交互作用($P < 0.05$)。

表 2 根瘤菌及摩西球囊霉菌对沙打旺生长及水分利用系数的影响
Table 2 Effects of *Rhizobium meliloti* and *Glomus mosseae* on the growth of *Astragalus Adsurgens* Pall. and coefficient of water use(mean ± S.E., $n = 3$)

水分处理 Water treatment	接种处理 Inoculation treatments	地上部干重 Shoot biomass /(g·pot ⁻¹)	地下部干重 Root biomass/(g·pot ⁻¹)	水分利用系数 Coefficient of water use/(mg·mL ⁻¹)
35%	对照 CK	0.23 ± 0.03e	0.09 ± 0.01f	0.16 ± 0.02e
	Rh.	0.68 ± 0.11d	0.30 ± 0.08e	0.47 ± 0.07d
	G.m	1.33 ± 0.09c	0.32 ± 0.12de	0.59 ± 0.06bcd
	Rh. + G.m	1.48 ± 0.02c	0.47 ± 0.04cd	0.66 ± 0.02abc
65%	对照 CK	1.27 ± 0.05c	0.60 ± 0.02bc	0.56 ± 0.03cd
	Rh.	2.25 ± 0.10b	0.74 ± 0.01ab	0.65 ± 0.01abc
	G.m	2.20 ± 0.11b	0.78 ± 0.01a	0.69 ± 0.03ab
	Rh. + G.m	2.76 ± 0.16a	0.90 ± 0.03a	0.75 ± 0.03a

方差分析 Analysis of variance		<i>F</i> 值 <i>F</i> - value	显著性 Sig.	<i>F</i> 值 <i>F</i> - value	显著性 Sig.	<i>F</i> 值 <i>F</i> - value	显著性 Sig.
水分处理	Water treatment	312.74	< 0.0001***	143.09	< 0.0001***	50.39	< 0.0001***
	Rh.	62.43	< 0.0001***	17.07	< 0.0008**	24.98	0.0001***
水分处理 × Rh.	Water treatment × Rh.	11.96	0.0032**	0.47	0.502	4.61	0.475
	G.m	153.36	< 0.0001***	23.28	0.0002***	62.09	< 0.0001***
水分处理 × G.m	Water treatment × G.m	2.71	0.119	0.12	0.730	11.86	0.0033**
	Rh. × G.m	7.01	0.0176*	0.30	0.594	6.43	0.0211*
水分处理 × Rh. × G.m	Water treatment × Rh. × G.m	0.19	0.6678	0.09	0.766	3.83	0.068

注:以 SAS 软件 LSD 最小显著法进行方差分析。同列不同字母表示差异显著。* 表示差异达到 5% 水平,** 表示差异达到 1% 水平,*** 表示差异达到 0.1% 水平。下同。

Note:The Fisher's protected least significant difference (LSD) in SAS 8.1 is used to compare means after ANOVA. *, ** and *** indicate significance at $P < 0.05$, $P < 0.05$ and $P < 0.001$ respectively. The same as below.

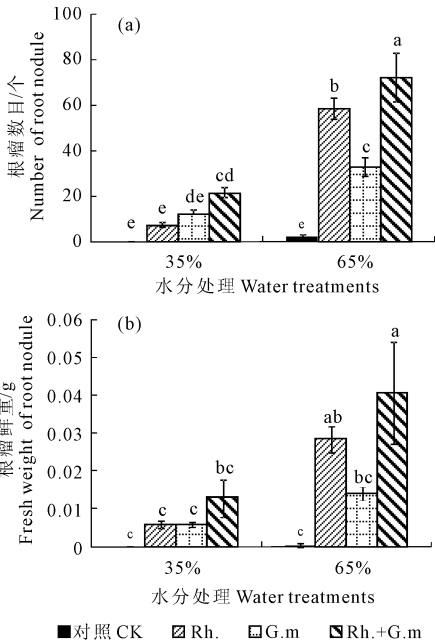


图 2 AM 真菌和根瘤菌对沙打旺根瘤数目(a)和根瘤鲜重(b)的影响
Fig.2 Effects of *Glomus mosseae* and *Rhizobium meliloti* on the number (a) and fresh weight (b) of root nodules in *Astragalus adsurgens* Pall.

2.4 不同处理对沙打旺 N、P、K 吸收的影响

沙打旺 N、P、K 吸收状况在不同水分条件下存在明显差异(表 3)。无论是否接种根瘤菌或摩西球囊霉,水分胁迫条件下均显著低于正常供水条件下沙打旺 N、P、K 吸收量($P < 0.05$)。双接种处理时,水分胁迫条件下沙打旺根上部分 N、P、K 吸收量分别是正常供水条件下的 51.8%、50.1% 和 46.0%。与对照相比,3 种接菌处理均显著增加了植株 N、P、

K 的吸收量($P < 0.05$),其中双接种处理效果最佳,这与沙打旺的生长状况基本一致。多因素方差分析结果显示(表 3):接种根瘤菌与摩西球囊霉均显著影响沙打旺对 N、P、K 的吸收,其中双接种处理对植株根上部 N 吸收存在交互作用。相关分析结果显示(表 1):沙打旺地上与地下部 N、P、K 的吸收量分别与植株地上与地下部干重呈显著正相关关系。

表 3 根瘤菌及摩西球囊霉菌对沙打旺氮、磷、钾吸收的影响
Table 3 Effects of *Rhizobium meliloti* and *Glomus mosseae* on the uptake of N,P and K in *Astragalus Adsurgens* Pall. (mean ± S. E., $n = 3$)

水分处理 Water treatment	接种处理 Inoculation treatments	地上部 Shoot/(mg·pot ⁻¹)						地下部 Root/(mg·pot ⁻¹)					
		N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
35%	对照 CK	2.38 ± 0.36f	0.49 ± 0.07f	3.09 ± 0.59f	0.91 ± 0.05e	0.16 ± 0.02f	1.17 ± 0.06e						
	Rh.	9.15 ± 1.79e	1.55 ± 0.29e	10.9 ± 1.69e	3.87 ± 1.05d	0.63 ± 0.15e	4.88 ± 1.11d						
	G. m	16.5 ± 1.14cd	3.41 ± 0.31cd	22.1 ± 1.23cd	3.72 ± 1.38d	0.74 ± 0.30de	5.48 ± 2.13cd						
	Rh. + G. m	20.1 ± 0.49c	3.94 ± 0.15c	27.8 ± 0.51c	5.78 ± 0.51cd	1.10 ± 0.10d	7.84 ± 0.63c						
65%	对照 CK	14.4 ± 0.65d	2.77 ± 0.06d	17.8 ± 0.73de	6.89 ± 0.38c	1.07 ± 0.07de	8.01 ± 0.70c						
	Rh.	31.8 ± 1.54b	5.35 ± 0.66b	40.6 ± 2.10b	10.4 ± 0.37ab	1.59 ± 0.11c	11.0 ± 0.24b						
	G. m	29.4 ± 1.71b	5.75 ± 0.15b	41.7 ± 1.41b	9.91 ± 0.24b	2.17 ± 0.09b	11.8 ± 0.41ab						
	Rh. + G. m	38.8 ± 2.18a	7.88 ± 0.33a	60.3 ± 6.33a	12.1 ± 0.63a	2.63 ± 0.19a	14.6 ± 0.61a						
方差分析 Analysis of variance		<i>F</i> 值 <i>F</i> - value	显著性 Sig.	<i>F</i> 值 <i>F</i> - value	显著性 Sig.	<i>F</i> 值 <i>F</i> - value	显著性 Sig.	<i>F</i> 值 <i>F</i> - value	显著性 Sig.	<i>F</i> 值 <i>F</i> - value	显著性 Sig.	<i>F</i> 值 <i>F</i> - value	显著性 Sig.
水分处理	Water treatment	286.29	<0.0001***	199.47	<0.0001***	178.97	<0.0001***	155.96	<0.0001***	131.15	<0.0001**	93.80	<0.0001***
	Rh.	90.39	<0.0001***	51.96	<0.0001***	58.11	<0.0001***	28.67	<0.0001***	18.64	0.0005**	19.22	0.0005***
水分处理 × Rh.		17.59	0.0007***	12.69	0.0026**	15.05	0.0013**	0.11	0.742	0.11	0.741	0.01	0.904
Water treatment × Rh.													
	G. m	144.24	<0.0001***	153.13	<0.0001***	121.84	<0.0001***	22.68	0.0002***	56.98	<0.001***	30.04	<0.001***
水分处理 × G. m		0.59	0.454	0.05	0.833	1.17	0.296	0.00	0.968	6.59	0.0207*	0.00	0.946
Water treatment × G. m													
	Rh. × G. m	8.09	0.0117*	1.30	0.272	0.78	0.389	1.15	0.300	0.14	0.716	0.33	0.576
水分处理 × Rh. × G. m		1.56	0.229	0.01	0.929	0.08	0.786	0.03	0.873	0.02	0.891	0.19	0.666
Water treatment × Rh. × G. m													

3 讨 论

3.1 AM 菌根真菌侵染率

本试验结果表明:无论是在干旱条件下或是在正常供水条件下,摩西球囊霉均能够与沙打旺根系形成良好的共生关系,侵染率达 51.5% ~ 70.5%。干旱胁迫显著降低了沙打旺根系摩西球囊霉的侵染率,这可能是不同种类 AM 真菌往往具有不同的水分适应范围。贺学礼等^[3]研究也发现:水分胁迫严重抑制了油蒿的摩西球囊霉侵染率。两种水分处理条件下,双接根瘤菌与摩西球囊霉均显著促进了 AM 真菌侵染率,这说明根瘤菌能够影响摩西球囊霉对沙打旺的侵染。众所周知,AM 菌根共生体形成及维持均需要碳氢化合物作为能量来源^[2]。根瘤

菌能够增加豆科植物对氮的吸收,改善宿主植物的营养状况,因此能够促进 AM 真菌的侵染率^[11]。然而,Tobar et al.^[16]发现,在苜蓿根系形成过程中,根瘤菌对与 AM 菌根形成有关的参数(如孢子发芽率、菌根繁殖体上菌丝的生长及 AM 菌根入侵点的生成)均未产生影响。Xavier 和 Germida^[9]研究结果显示:根瘤菌对 AM 真菌侵染率的影响因根瘤菌菌株与 AM 真菌组合的不同而存在差异,双接 *G. clarum* 和根瘤菌菌株 RGL14 对扁豆的侵染率要显著高于双接 *G. mosseae* 和根瘤菌菌株 RGL14 的侵染率。因此,干旱条件下根瘤菌对 AM 真菌侵染率的影响需要更深入地研究。

3.2 摩西球囊霉对根瘤菌生长的影响

本研究结果显示:无论是在干旱条件下或是在

正常供水条件下,接种 AM 真菌不仅能够促进沙打旺对 P 的吸收,而且可以促进植株根瘤的生长,提高植株固 N 能力。在正常供水条件下, Antunes et al.^[17]也得出类似的研究结果。与非菌根植物相比,AM 真菌似乎更有利于植物根瘤占领^[18]。Lesueur 和 Duponnois^[19]研究发现:AM 菌根共生体有助于根瘤菌的产瘤过程。AM 真菌与根瘤菌之间的交互作用有利于增加根瘤菌的结瘤数、鲜瘤重和固氮酶的活性^[20]。与单接根瘤菌相比,双接 AM 真菌与根瘤菌处理乙炔还原酶的活性增加 112%^[12]。

3.3 摩西球囊霉和根瘤菌对沙打旺生长和养分吸收的影响

无论是在干旱条件下或是在正常供水条件下,双接种处理对沙打旺的生长及养分吸收的效应均显著高于单接 AM 真菌或单接根瘤菌处理($P < 0.05$)。在两种水分处理条件下,沙打旺地上部及地下部最大生物量以及 N、P、K 的最大吸收量均出现于双接种处理。N、P 是植物生长所必须的主要营养元素。双接 AM 真菌与根瘤菌于豆科植物,根瘤菌通过生物固氮为豆科植物生长提供有效的氮源,AM 真菌为植物生长提供有效的磷源,因此促进豆科植物的生物量显著增加^[20-21]。Aryal et al.^[11]发现:在正常供水条件下,双接孢囊属菌根真菌与混合根瘤菌(*R. leguminosarum*)处理大豆根上部分 N、P 浓度显著高于单接种处理。Barea et al.^[22]证实:双接种 AM 真菌与根瘤菌苜蓿氮的固定速率要明显高于单接根瘤菌处理。Antunes et al.^[23]研究显示:双接 AM 真菌与根瘤菌处理根瘤干重、氮吸收量及固氮速率均显著高于单接 AM 真菌或单接根瘤菌处理。国内外其他研究结果也证实:在正常供水条件下,双接种处理与单接 AM 真菌或单接根瘤菌处理相比,具有更多的优势^[24]。

由于营养条件的改善,AM 真菌减弱了干旱逆境对植株生长的影响,明显促进了沙打旺的生长。无论是单接摩西球囊霉(G.m)或者是双接根瘤菌与摩西球囊霉(Rh. + G.m)均显著增加了沙打旺的水分利用系数,而且双接种处理对沙打旺水分利用系数具有明显的交互作用,这说明在干旱逆境下,双接种技术与单接 AM 真菌或单接根瘤菌处理相比,在增强宿主植物抗旱性方面具有更多的优势。毕银丽等^[14]也发现菌根可以改善水分胁迫条件下玉米的水分状况,使叶片相对含水量增加,同时也提高了植株水分利用效率。其他学者也证实:水分胁迫条件下,单接 AM 真菌能够改善植物生理代谢活动,提高植株抗旱性^[7]。在室内温室条件下,本研究结果表

明:与单接 AM 真菌相比,双接种技术在干旱区、半干旱区受损生态系统的恢复过程中具有明显的优势。

参 考 文 献:

- [1] 田汉勤,徐小锋,宋 霞.干旱对陆地生态系统生产力的影响[J].植物生态学报,2007,31:231-241.
- [2] Smith SE, Read DJ. Mycorrhizal symbiosis[M]. London: Academic Press, 1997.
- [3] 贺学礼,张焕仕,赵丽莉.不同土壤中水分胁迫和 AM 真菌对油菜抗旱性的影响[J].植物生态学报,2008,32(5):994-1001.
- [4] Allen EB, Allen MF. Competition between plants of different successional stages: mycorrhizae as regulators[J]. Can J Bot., 1984,62: 2625-2629.
- [5] 毕银丽,吴王燕,刘银平.丛枝菌根在煤矿石山土地复垦中的应用[J].生态学报,2007,27(9):3738-3743.
- [6] 白春明,贺学礼,山宝琴,等.漠境沙打旺根围 AM 真菌与土壤酶活性的关系[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2009,37:84-90.
- [7] 郭辉娟,贺学礼.水分胁迫下 AM 真菌对沙打旺生长和抗旱性的影响[J].生态学报,2010,30(21):5933-5940.
- [8] 王树和,王 昶,王晓娟,等.根瘤菌、丛枝菌根(AM)真菌与宿主植物共生的分子机理[J].应用与环境生物学报,2008,14(5):721-725.
- [9] Xavier LJC, Germida JJ. Response of lentil under controlled conditions to co-inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobia varying in efficacy[J]. Soil Biol Biochem., 2002,34:181-188.
- [10] Jia Y, Gray VM, Strdker CJ. The influence of *Rhizobium* and arbuscular mycorrhizal fungi and nitrogen and phosphorus accumulation by *Vicia faba*[J]. Ann Bot., 2004,94:251-258.
- [11] Aryal UK, Xu HL, Fujita M. Rhizobia and AM fungal inoculation improve growth and nutrient uptake of bean plants under organic fertilization[J]. J Sustain Agr., 2003,21:29-41.
- [12] Ruiz - Lozano JM, Collados C, Barea JM, et al. Arbuscular mycorrhizal symbiosis can alleviate drought-induced nodule senescence in soybean plants[J]. New Phytol., 2001,151:493-502.
- [13] Wu FY, Bi YL, Wong MH. Dual inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi and *Rhizobium* to facilitate the growth of alfalfa on coal mine substrates[J]. J Plant Nutr., 2009,32:755-771.
- [14] Phillips JM, Hayman DS. Improved procedures for clearing and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection[J]. Transactions of the British Mycological Society, 1970,55:158-160.
- [15] 毕银丽,李晓林,丁保健.水分胁迫条件下接种菌根对玉米抗旱性的影响[J].干旱地区农业研究,2003,21(2):7-12.
- [16] Tobar RM, Azcon-Aguilar C, Sanjuan J, et al. Impact of a genetically modified *Rhizobium* strain with improved nodulation competitiveness on the early stages of arbuscular mycorrhiza formation[J]. Appl Soil Ecol., 1996,4:15-21.
- [17] Antunes PM, Deavill D, Goss MJ. Effect of two AMF life strategies on the tripartite symbiosis with *Bradyrhizobium japonicum* and soybean[J]. Mycorrhiza, 2006,16:167-173.

理的光合速率均高于低氮处理。此外,适宜的施氮量能改善叶片的光合性能,优化生育后期冠层结构,提高群体光合速率,使其具有较大的增产优势。本试验结果表明,追施氮肥的时期不同,对棉花功能叶片的 SPAD 值、净光合速率和叶面积指数都有影响。其中,施基肥和花铃期追肥的 N3 处理显著提高了功能叶片的 SPAD 值和净光合速率,保证了合理的叶面积指数,蕾期和花铃期施追肥的 N4 处理仅次于 N3 处理。

不合理的氮肥运筹比例会导致棉花营养器官生长发育不良或徒长,使蕾铃脱落率增加,减少成铃数,降低单铃重,最终使产量下降;而当氮肥运筹比例合理时,棉花的营养生长与生殖生长关系协调,为棉花高产优质的形成奠定下良好的物质基础。国内外针对氮肥运筹比例对棉花产量的影响已开展了许多的研究^[14-15],但由于棉花产量及其构成因素既受自身因素的影响又受外界环境因素的影响,如各地土壤肥力条件、气候条件和品种特性等,所以不同研究其结果也不尽相同。

本试验结果表明,追施氮肥的时期不同,对棉花蕾铃脱落率、三桃比例和产量都有影响。其中,施基肥和花铃期追肥的 N3 处理显著降低了蕾铃脱落率,明显增加了单株结铃数和单铃重,单株结铃数分别比 N1、N2、N4 处理分别提高了 25.58%、7.40%、13.10%;单铃重分别提高了 5.73%、3.74%、1.76%,皮棉产量比 N1、N2 和 N4 处理分别提高了 29.61%、14.30% 和 11.63%;蕾期和花铃期施追肥的 N4 处理产量仅次于 N3 处理。可见,棉花施氮肥策略上应重施基肥,在生殖生长时期增施追肥,可使棉花获得高产,这与前人的研究结论基本一致^[14]。

(上接第 166 页)

[18] Marques MS, Pagano M, Scotti MRMMML. Dual inoculation of a woody legume (*Centrosema tomentosum*) with rhizobia and mycorrhizal fungi in south-eastern Brazil[J]. Agroforestry Syst., 2001, 52:107-117.

[19] Lesueur D, Duponnois R. Relations between rhizobial nodulation and root colonization of *Acacia crassiparpa* [J]. Ann Forest Sci., 2005, 62:467-474.

[20] 李淑敏,李 隆,张福锁.丛枝菌根真菌和根瘤菌对蚕豆吸收磷和氮的促进作用[J].中国农业大学学报,2004,9(1):11-15.

[21] 董昌金,赵 斌.AM 真菌与根瘤菌互作及类黄酮对互作效果的影响[J].应用生态学报,2004,15:1585-1588.

[22] Barea JM, Toro M, Orozco MO, et al. The application of isotopic

参考文献:

[1] 薛晓萍,陈兵林,郭文琦,等.棉花临界需氮量动态定量模型[J].应用生态学报,2006,17(12):2363-2370.

[2] 薛晓萍,郭文琦,周治国.氮素对棉花氮素利用率和产量的影响[J].中国科学通报,2008,24(10):462-466.

[3] Rochester I J, Peoples M B, Hulugalle N R, et al. Using legumes to enhance nitrogen fertility and soil condition in cotton cropping systems [J]. Field CropsResearch,2001,70:27-41.

[4] 凌启鸿.作物群体质量[M].上海:上海科学技术出版社,2000:178-197.

[5] ROCHESTER I J, Peoples M B, Hulugalle N R, et al. Using legumes to enhance nitrogen fertility and soil condition in cotton cropping systems[J]. Feild Crop Research, 2001,70:27-41.

[6] 薛晓萍,郭文琦,王 琳,等.不同施氮水平下棉花生物量动态增长特征研究[J].棉花学报,2006,18(6):323-326.

[7] 薛晓萍,王建国,郭文琦,等.氮素水平对初花后棉株生物量、氮素积累特征及氮素利用动态变化的影响[J].生态学报,2006,26(11):3631-3640.

[8] 王 娇,江 振,徐文修,等.不同施氮水平对陆地棉棉铃空间分布及产量的影响[J].新疆农业科学,2011,6:1078-1082.

[9] 赵双印,林忠东,李小斌,等.不同施氮水平棉花氮磷钾养分吸收规律研究[J].新疆农业科学,2010,47(1):141-145.

[10] 王 娟,韩登武,任 岗,等.SPAD 值与棉花叶绿素和含氮量关系的研究[J].新疆农业科学,2006,43(3):167-170.

[11] 艾天成,李方敏,周治安,等.作物叶片叶绿素含量与 SPAD 值相关性研究[J].湖北农学院学报,2000,20(1):6-8.

[12] 王荣栋,尹经章.作物栽培学[M].乌鲁木齐:新疆科技卫生出版社,2000,467.

[13] 孙红春,李存东,周彦珍.不同氮素水平对棉花功能叶生理特性、植株性状及产量构成的影响[J].河北农业大学学报,2005,28(6):9-14.

[14] 冯克云,张秉贤.南宏宇河西内陆灌区不同灌水施氮水平对棉花产量构成的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(6):49-53.

(³²P and ¹⁵N) dilution techniques to evaluate the interactive effect of phosphate – solubilizing rhizobacterial, mycorrhizal fungi and *Rhizobium* to improve the agronomic efficiency of rock phosphate for legume crops[J]. Nutr Cycl Agroecosy., 2002,63:35-42.

[23] Antunes PM, De Varennes A, Rajcan I, et al. Accumulation of specific flavonoids in soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) as a function of the early tripartite symbiosis with arbuscular mycorrhizal fungi and *Bradyrhizobium japonicum* (Kirchner) Jordan [J]. Soil Biol Biochem., 2006,38:1234-1242.

[24] Sampedro I, Aranda E, Diaz R, et al. Xyloglucanases in the interaction between the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* and *Rhizobium* [J]. Symbiosis, 2007,43:29-36.