

低磷和干旱胁迫条件下接种摩西球囊霉 对白花草木犀营养吸收和生长的影响

吴福勇^{1,2}, 武玉坤², 毕银丽²

1. 河南城建学院市政与环境工程学院, 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 利用盆栽试验研究了低磷和干旱胁迫条件下接种摩西球囊霉(*Glomus mosseae*)对白花草木犀营养吸收和生长的影响。设置土壤相对含水量 65% 和 35% 两个处理, 并设置磷营养 0、25、50 mg·kg⁻¹ 3 个水平 (P₀, P₂₅, P₅₀), 在上述两个因素的基础上分别进行接种和不接种摩西球囊霉处理。结果表明, 干旱胁迫对白花草木犀根系菌根侵染率的影响不明显, 但高磷水平 (50 mg·kg⁻¹) 和干旱胁迫显著抑制了白花草木犀根系 AM 真菌的侵染 (P<0.01)。接种 AM 真菌不仅能够显著促进白花草木犀对 N、P 营养元素的吸收, 还能够减弱干旱逆境对白花草木犀生长的影响。此外, 无论是正常供水或者是干旱胁迫, 接种 AM 真菌均显著增加了白花草木犀水分利用效率。在室内温室条件下, 初步发现接种菌根能够促进干旱区、半干旱区牧草生长, 恢复退化草原。

关键词 AM 真菌; 草场退化; 植物恢复; 水分胁迫

中图分类号 S154.3

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.13.010

Effects of Inoculation of *Glomus mosseae* on the Growth and Nutrition Uptake of *Melilotus albus* Desr. Under Water Stress and Phosphorus Deficiency Conditions

WU Fuyong^{1,2}, WU Yukun², BI Yinli²

1. Department of Environmental and Municipal Engineering, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467036, Henan Province, China
2. School of Safety and Resource Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

Abstract A pot experiment was conducted to investigate the effects of inoculation of *Glomus mosseae* on the growth and nutrition uptake of *Melilotus albus* Desr. under water stress and/or phosphorus deficiency conditions. The pot trials include two levels of soil relative water contents (35% and 65%) and three levels of phosphorus (0, 25, 50 mg·kg⁻¹), either with inoculation of *Glomus mosseae* or without inoculation. The results show that the water stress does not inhibit the mycorrhizal infection of *Melilotus albus*. However, a high level of P in soils (50 mg·kg⁻¹) under water stress would significantly inhibit the mycorrhizal colonization. The inoculation of *Glomus mosseae* significantly increases the uptake of N and P in *Melilotus albus* and consequently alleviates the negative effects of *Melilotus albus* under water stress. The highest biomass of the shoot and the root of *Melilotus albus* is recorded in the treatments of inoculation in 50 mg·kg⁻¹ soils. In addition, the inoculation of *Glomus mosseae* significantly enhances the coefficient of the water use of *Melilotus albus* under water stress or not. The results suggest that the inoculation of Arbuscular Mycorrhizal (AM) fungus may be a promising approach for increasing the growth of grass and enhancing the revegetation of the degraded grassland in arid and semi-arid regions.

Keywords AM fungi; degraded grassland; revegetation; water stress

收稿日期: 2012-06-12; 修回日期: 2013-01-25

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目 (2013AA102904); 高等学校博士学科点专项科研基金项目 (20090023110009); 中央高校基本科研业务费项目 (2009KD01)

作者简介: 吴福勇, 副教授, 研究方向为生态恢复技术、污染土壤修复与治理, 电子信箱: wfy09@163.com; 毕银丽 (通信作者, 中国科协所属全国学会个人会员登记号: E382450003M), 教授, 研究方向为土地复垦、生态恢复技术、微生物复垦技术, 电子信箱: byl@cumtb.edu.cn

0 引言

近年来,由于全球气候变暖、过度放牧等自然和人为因素的影响,中国草场退化现象十分普遍。目前 90% 的天然草场存在不同程度地退化和沙化,严重制约了畜牧业的可持续发展。此外,在中国干旱和半干旱地区,缺水问题一直是限制牧草生产的主要因素之一。刘艳萍等^[1]研究显示,内蒙古明安图镇草场退化的主要因素为超载放牧和土壤含水量低。周斌等^[2]研究表明,干旱是新疆伊犁河谷春秋草场植被生长的一个重要制约因素。退化草场往往存在化肥投入量少,普遍缺氮、磷营养。在中国干旱和半干旱地区,农业生产中的主要任务是解决如何在水分胁迫条件下合理使用肥料、提高水分利用效率^[3]。因此,合理的土壤水分、养分管理是恢复退化草场的关键因素之一。

磷素营养与土壤水分之间存在着密切的关系。一方面土壤水分影响磷素在土壤中的有效性以及植物对磷素的吸收、利用和分配;另一方面适量磷素营养能够在一定程度上提高植物对干旱的适应性及水分利用效率,提高作物产量,达到“以肥调水”的目的^[4,5]。已有研究表明,干旱条件下增施磷肥能够增强大豆抗旱性,从而增加大豆产量^[6,7]。钟鹏等^[8]研究发现,干旱胁迫下磷素营养能有效增加大豆根系的生长和干物质积累,增强超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)与过氧化氢酶(CAT)的活性,减少丙二醛(MDA)的积累。然而,目前关于磷素营养对牧草抗旱性影响的研究还比较少。

草地生态系统中土壤微生物的生物化学活性对土壤肥力、土壤健康状况以及草地植物的生长发育发挥着重要作用^[9]。顾爱星等^[10]的野外调查结果表明,天山北坡未退化草原土壤中微生物数量最多,而中度退化草原土壤中微生物数量最少。丛枝菌根真菌(简称 AM 真菌)是土壤中分布最广泛的一种土壤真菌,可以促进植物对水分的吸收和利用,提高植物的抗旱能力。AM 真菌主要通过菌丝增加植物对土壤水分的吸收、改善植物磷素及其他矿质营养、提高蒸腾速率和气孔导度等增强宿主植物的抗旱性^[11]。然而,乌恩等^[12]发现,锡林浩特市周边中度退化和重度退化草场优势种——羊草(*Leymus chinensis*)根系 AM 真菌侵染率及其根际土壤中 AM 真菌孢子的密度显著低于未退化和轻度退化草场($P < 0.05$)。这预示着可以通过向退化草场接种 AM 真菌的方法来促进植被恢复。室内盆栽试验结果初步表明,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,从而提高宿主植物抗旱性^[13]。白花草木犀(*Melilotus albus* Desr.)系二年生草本豆科植物,广泛栽培于中国北方干旱、半干旱地区,是一种优良的牧草和绿肥作物。然而,低磷和干旱胁迫条件下接种 AM 真菌对白花草木犀的营养吸收及生长效应尚不清楚。

本试验利用摩西球囊霉(*Glomus mosseae*)为接种剂,研究不同土壤水分和施磷水平条件下接种 AM 真菌对白花草木犀生长和营养吸收的影响,以期于干旱、半干旱环境中利用菌根技术促进退化草场恢复和增加牧草生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试白花草木犀种子由中国农业科学院中农种子公司提供,播种前种子用 10% H_2O_2 浸泡 10min,去离子水反复清洗数遍,沥干备用。供试菌种为摩西球囊霉,以白三叶草为宿主进行室内盆栽扩繁,以含有宿主植物根段、AM 真菌孢子的根际土为接种剂,孢子密度为 22.5/mL 菌剂,由北京市农林科学院植物营养与资源研究所提供。

试验土壤采自北京市东郊农田土(褐土),与河沙 1:2(质量比)混匀,过 2mm 筛,经 121℃ 蒸汽间歇灭菌 2h,取出放置 7d 风干后待用。该基质基本理化性状如表 1 所示。

表 1 供试基质基本理化性状(均值, $n=4$)

Table 1 Physical and chemical properties of the medium used in pot trial (mean, $n=4$)

基质	田间持水量/%	pH 值	有机质/%	有效 N/($mg \cdot kg^{-1}$)	速效 P/($mg \cdot kg^{-1}$)	速效 K/($mg \cdot kg^{-1}$)
沙土	14.83	7.67	0.28	11.84	2.80	49.31

盆栽容器为 20cm×20cm×15cm(高×盆口直径×盆底直径)的白色塑料盆,使用前 75% 酒精消毒,自来水冲洗后晾干待用。每盆装风干、灭菌基质 2.5kg。

1.2 试验设计

试验设 2 个土壤相对含水量:即 35%(干旱胁迫,浇水量为最大持水量的 35%)和 65%(正常水分,浇水量为最大持水量的 65%)。每种水分设 3 个磷水平(P_0, P_{25}, P_{50}),分别为 0、25、50 $mg \cdot kg^{-1}$ 。同时,设不接种(NM)、接种摩西球囊霉(Gm)两个处理。整个试验共计 12 个处理,重复 3 次,共 36 盆。

AM 真菌接种以穴播方法进行,每盆接种 50g,对照分别加入相应的 50g 灭菌菌剂(121℃, 2h)和 50mL 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。试验盆栽容器随机排列。10 月 6 日播种,1 个月后备苗至 5 株并施肥,每盆施肥水平为:N 为 100 $mg \cdot kg^{-1}$,K 为 150 $mg \cdot kg^{-1}$ 。11 月 6 日开始进行不同水分梯度处理,每天用称重法保持土壤含水量稳定,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,将地下部分和地上部分分开,地下部分用自来水冲洗干净,取部分新鲜根样保存,测定 AM 真菌侵染率,其余地下部分和地上部分用去离子水冲洗、烘干测定干重,粉碎后保存待用。

1.3 测定方法

土壤有机质、有效 P、有效 N 和土壤 pH 值分别采用重铬酸钾硫酸外加热法、Olsen 法、碱解扩散法和电位法(液土比 2.5:1,试验用水为无 CO_2 去离子水)测定,植物地上部分及地下部分经浓硫酸消解后分别采用凯氏定氮法、钒钼黄比色法、火焰光度计法测定全 N、全 P、全 K 含量。白花草木犀菌根侵染率采用 Phillips 和 Hayman 方法^[14]测定。

1.4 数据分析

植株水分利用效率按照式(1)^[15]计算:

$$\text{水分利用系数} = \frac{\text{植株生物总量(mg)}}{\text{生育期耗水总量(mL)}} \quad (1)$$

数据结果采用 SAS 8.1 软件进行三因素方差分析, 所有数据处理均在 0.05 水平下进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 低磷和干旱胁迫对白花草木犀根系 AM 真菌侵染的影响

不同水分处理和施磷水平下, 接种 AM 真菌对白花草木犀根系侵染率的影响如图 1 所示。与未接种处理相比, 两种水分条件下接种处理均显著增加了白花草木犀根系菌根侵染率。白花草木犀根系侵染率随土壤相对含水量变化无明显

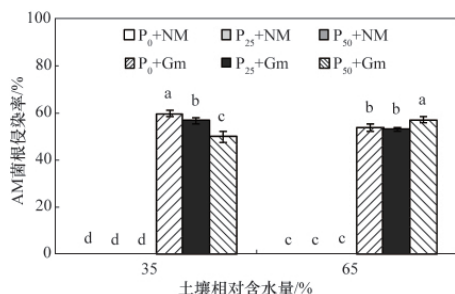


图 1 不同水分处理和施磷水平下接种摩西球囊霉对白花草木犀根系侵染率的影响

Fig. 1 Effects of *Glomus mosseae* on mycorrhizal colonization of *Melilotus albus* Desr. under different level of water and P treatments

差异($P=0.0613$), 这说明土壤干旱对 AM 真菌的生长发育影响不大。施磷水平对白花草木犀根系菌根侵染率的影响因土壤相对含水量的不同而不同: 干旱胁迫条件下, 接种处理, 白花草木犀根系 AM 真菌侵染率随土壤施磷水平的增加而显著减少($P<0.01$)。而在正常供水条件下, 高磷水平($50\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)显著促进了接种处理白花草木犀根系 AM 真菌侵染率 ($P<0.05$), 而未施磷处理与低磷水平($25\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)之间白花草木犀根系 AM 真菌侵染率则无明显差异。此外, 在两种水分处理条件下, 未接种处理均未引起白花草木犀根系菌根侵染, 如图 1 所示。

2.2 低磷和干旱胁迫条件下接种 AM 真菌对白花草木犀生长和水分利用系数的影响

表 2 显示不同水分处理和施磷水平下, 接种 AM 真菌对白花草木犀生长和水分利用系数的影响。水分胁迫条件下, 3 种施磷水平下白花草木犀地上部分干重仅是正常供水条件下的 70.9%、70.3%和 67.8%, 说明干旱严重抑制了白花草木犀的生长。无论是在水分胁迫条件下还是在正常供水条件下, 增施磷肥均显著促进了白花草木犀地上部分及地下部分的生长($P<0.01$)。另外, 在正常供水条件下, 接种处理显著促进了白花草木犀地上部分及地下部分的生长($P<0.05$)。在水分胁迫条件和施磷 $25\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 水平下, 接种处理也显著促进了白花草木犀地上部分及地下部分的生长($P<0.05$)。方差分析表明, 接种和施磷水平对白花草木犀地上部分及地下部分

表 2 不同水分处理与施磷水平下接种摩西球囊霉对白花草木犀生长及水分利用系数的影响 (均值±SE, $n=3$)

Table 2 Effects of *Glomus mosseae* on the growth of *Melilotus albus* and coefficient of water use under different level of water and P treatments (mean±SE, $n=3$)

水分处理	磷处理	接种处理	地上部分干重/(g·pot ⁻¹)	地下部分干重/(g·pot ⁻¹)	水分利用系数/(mg·mL ⁻¹)			
35%	0	未接种	5.28±0.12 ^{cd}	0.59±0.29 ^e	0.64±0.03 ^e			
		Gm	5.12±0.32 ^f	0.47±0.23 ^e	0.81±0.05 ^f			
	25	未接种	6.11±0.36 ^e	1.16±0.06 ^f	0.74±0.02 ^e			
		Gm	5.94±0.14 ^{ef}	1.95±0.07 ^{de}	1.08±0.04 ^{de}			
	50	未接种	5.85±0.06 ^{ef}	1.65±0.12 ^{ef}	0.86±0.04 ^f			
		Gm	8.03±0.52 ^c	2.32±0.05 ^{cd}	1.21±0.02 ^c			
65%	0	未接种	7.04±0.55 ^d	1.32±0.05 ^f	0.79±0.04 ^f			
		Gm	7.62±0.14 ^{cd}	2.62±0.03 ^c	1.16±0.05 ^{cd}			
	25	未接种	8.13±0.11 ^c	1.90±0.07 ^{de}	1.01±0.05 ^e			
		Gm	9.00±0.12 ^b	3.55±0.08 ^b	1.34±0.01 ^b			
	50	未接种	9.37±0.37 ^b	2.32±0.03 ^{cd}	1.14±0.06 ^{cd}			
		Gm	11.1±0.17 ^a	4.78±0.53 ^a	1.75±0.05 ^a			
方差分析			F 值	Sig 值	F 值	Sig 值	F 值	Sig 值
水分处理			240	<.0001	154	<.0001	164	<.0001
磷处理			19.9	<.0001	25.2	<.0001	87	<.0001
水分处理×磷处理			45.7	<.0001	39.9	<.0001	4.50	0.022
Gm			24.2	<.0001	100	<.0001	221	<.0001
水分处理×Gm			1.74	0.119	36.7	<.0001	9.12	0.006
磷处理×Gm			3.00	0.069	5.27	0.013	7.23	0.004
水分处理×磷处理×Gm			9.50	0.001	2.69	0.090	2.85	0.077

注: 同列相同字母表示在 0.05 水平下差异不显著, 不同字母表示在 0.05 水平下差异显著。下同。

Notes: Different letters within the same column indicate significant difference at the level of <0.05 and vice versa. The same as below.

的生长具有显著的交互作用($P<0.01$)。此外,无论是在水分胁迫条件下还是在正常供水条件下,接种处理均显著增加白花草木犀的水分利用系数(表2)。在正常供水条件下,接种处理白花草木犀的水分利用系数分别是相应未接种处理的1.46、1.32和1.54倍,说明AM真菌能够增强宿主植物。

2.3 低磷和干旱胁迫条件下接种AM真菌对白花草木犀N、P、K吸收的影响

不同水分条件下,白花草木犀对N、P、K营养的吸收存在明显差异(表3)。无论是否接种AM真菌,水分胁迫条件下白

花草木犀地下部分N、P、K吸收量均显著低于正常供水条件下相应的吸收量($P<0.01$)。与对照相比,接种AM真菌显著增加了白花草木犀地上与地下部分N、P、K的吸收量($P<0.01$)。白花草木犀N、P、K的最大吸收量均出现在正常供水条件下高磷处理,这与其生长状况一致(表2)。三因素方差分析结果显示,水分处理及施磷水平均显著影响白花草木犀对N、P、K的吸收。此外,相关分析结果显示,白花草木犀地上与地下部分N、P、K的吸收量分别与地上与地下部分植株干重成正相关关系。

表3 不同水分处理与施磷水平下接种摩西球囊霉对白花草木犀氮、磷、钾吸收的影响(均值 \pm SE, $n=3$)
 Table 3 Effects of *Glomus mosseae* on the uptake of N, P and K of *Melilotus albus* under different level of water and P treatments (mean \pm SE, $n=3$)

水分处理	磷处理	接种处理	地上部分/(mg·pot ⁻¹)			地下部分/(mg·pot ⁻¹)								
			N	P	K	N	P	K						
35%	0	未接种	126 \pm 1.95 ^f	1.21 \pm 0.36 ^h	139 \pm 6.25 ^g	15.7 \pm 7.62 ^{ef}	0.39 \pm 0.18 ^f	11.8 \pm 5.93 ^g						
		Gm	149 \pm 4.16 ^{de}	5.59 \pm 1.52 ^{gh}	150 \pm 11.0 ^g	13.2 \pm 6.37 ^f	0.41 \pm 0.20 ^f	11.0 \pm 5.28 ^g						
	25	未接种	142 \pm 4.93 ^{ef}	9.58 \pm 0.33 ^{fg}	158 \pm 6.90 ^{fg}	27.9 \pm 1.23 ^{de}	2.84 \pm 0.56 ^d	25.6 \pm 0.79 ^f						
		Gm	150 \pm 9.77 ^{de}	16.3 \pm 1.26 ^{bcd}	174 \pm 3.12 ^{ef}	50.2 \pm 2.45 ^{bc}	5.46 \pm 0.04 ^c	48.0 \pm 4.08 ^d						
	50	未接种	150 \pm 7.36 ^{de}	12.9 \pm 0.95 ^{def}	170 \pm 6.41 ^{ef}	36.2 \pm 3.55 ^{cd}	2.53 \pm 0.15 ^d	36.7 \pm 2.55 ^e						
		Gm	186 \pm 11.4 ^e	17.1 \pm 1.48 ^{bcd}	237 \pm 22.1 ^{bcd}	53.2 \pm 1.49 ^b	5.57 \pm 0.38 ^c	56.2 \pm 0.86 ^{cd}						
65%	0	未接种	133 \pm 10.0 ^{ef}	4.47 \pm 1.81 ^h	194 \pm 17.0 ^e	24.9 \pm 1.74 ^{def}	1.55 \pm 0.16 ^e	29.0 \pm 1.25 ^{ef}						
		Gm	168 \pm 3.28 ^{cd}	10.4 \pm 0.37 ^{fg}	230 \pm 4.70 ^{cd}	56.3 \pm 0.55 ^b	3.16 \pm 0.21 ^d	64.5 \pm 0.91 ^e						
	25	未接种	214 \pm 9.24 ^b	14.3 \pm 3.45 ^{def}	204 \pm 2.67 ^{de}	52.2 \pm 3.13 ^b	2.43 \pm 0.22 ^d	38.0 \pm 1.21 ^e						
		Gm	259 \pm 7.45 ^a	19.4 \pm 0.79 ^{bc}	259 \pm 2.51 ^{bc}	104 \pm 4.49 ^a	6.76 \pm 0.40 ^b	84.2 \pm 2.47 ^b						
	50	未接种	227 \pm 7.12 ^b	21.2 \pm 5.05 ^b	269 \pm 17.5 ^b	53.7 \pm 0.99 ^b	5.49 \pm 0.13 ^c	54.0 \pm 2.36 ^d						
		Gm	273 \pm 10.3 ^a	34.6 \pm 2.88 ^a	334 \pm 17.8 ^a	111 \pm 11.0 ^a	13.8 \pm 0.44 ^a	118 \pm 4.93 ^a						
方差分析			F值	Sig值	F值	Sig值	F值	Sig值	F值	Sig值	F值	Sig值		
水分处理			187	<.0001	30.2	<.0001	126	<.0001	154	<.0001	247	<.0001	310	<.0001
磷处理			39.8	<.0001	54.8	<.0001	17.2	<.0001	15.9	<.0001	348	<.0001	60.8	<.0001
水分处理 \times 磷处理			56.6	<.0001	5.57	0.010	23.8	<.0001	52.7	<.0001	81.7	<.0001	75.9	<.0001
Gm			50.3	<.0001	27.8	<.0001	36.9	<.0001	115	<.0001	384	<.0001	275	<.0001
水分处理 \times Gm			4.68	0.041	1.42	0.246	2.13	0.158	39.4	<.0001	71.5	<.0001	86.5	<.0001
磷处理 \times Gm			2.82	0.080	0.80	0.462	1.27	0.299	3.44	0.049	69.1	<.0001	11.1	0.0004
水分处理 \times 磷处理 \times Gm			6.15	0.007	1.63	0.216	5.47	0.011	4.44	0.023	12.9	0.0002	6.58	0.005

3 讨论

无论是在干旱或是在正常供水条件下,摩西球囊霉均能够与白花草木犀根系形成良好的共生关系,干旱胁迫对白花草木犀根系侵染率影响不大,侵染率达53.8%~60.0%。然而,贺学礼等^[16]研究发现,水分胁迫严重抑制了油蒿根系摩西球囊霉的侵染率。在干旱胁迫条件下,高磷水平(50mg·kg⁻¹)显著抑制了白花草木犀根系AM真菌的侵染率($P<0.01$)。众所周知,AM菌根共生体的形成和维持均需一定的碳氢化合物作为能量来源^[17]。因此,宿主植物的AM真菌侵染率受土壤磷水平的影响。在高磷水平下,白花草木犀不需要AM真菌提供

磷素供应就能够获得足够的磷营养,因此其侵染率水平显著低于其他相应磷处理。低磷和干旱胁迫条件下AM真菌对牧草根系侵染率的影响需要更深入的研究。

接种AM真菌在两种水分处理条件下不仅能够显著促进白花草木犀对磷素营养的吸收,而且能够显著促进对氮素营养吸收。石伟琦等^[18]发现,接种*Glomus mosseae*显著增加了内蒙古典型草原优势种——羊草地上部的N、P含量及吸收量,改善了植株N、P营养。接种AM真菌显著促进白花草木犀对N营养元素的吸收可能与AM真菌对根瘤菌生长的有益作用有关。Antunes等^[19]研究发现,接种AM真菌能够促进植株根

瘤的生长,进而提高植株固 N 能力。Lesueur 等^[20]研究结果表明,AM 菌根共生体有助于根瘤菌产瘤。此外,其他研究也发现,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^[21]。

N、P 是植物生长所必需的主要营养元素。由于营养条件的改善,AM 真菌减弱了干旱逆境对白花草木犀生长的影响,明显促进了植株的生长。此外,无论是正常供水或者是干旱胁迫条件下,接种 AM 真菌均显著增加了白花草木犀的水分利用效率。毕银丽等^[15]也发现,AM 真菌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,AM 真菌能够明显改善水分胁迫条件下宿主植物的生理代谢活动,提高植株的抗旱性^[3]。本研究结果还显示,在干旱胁迫条件下,增施磷肥能够显著增加白花草木犀的水分利用系数,而且接种菌根和施磷水平在增加白花草木犀水分利用效率方面具有交互作用。在室内温室条件下,本研究结果初步认为,在干旱区、半干旱区接种菌根技术对促进牧草生长、恢复退化具有可行性。

4 结论

在干旱及正常供水条件下,接种 AM 真菌和适当增施磷肥显著促进了干旱区、半干旱区常见牧草白花草木犀的生长,这主要是由于 AM 真菌侵染大大改善了植株氮、磷营养,提高宿主植物的水分利用系数所致。野外自然条件下菌根效应易受其他土壤土著微生物的影响,因此菌根技术在干旱区、半干旱区退化草场的推广利用需要深入系统的探索。

参考文献 (References)

- [1] 刘艳萍, 荣浩, 邢恩德. 干旱、半干旱草场退化影响因素分析[J]. 水土保持研究, 2006, 13(5): 276-281.
Liu Yanpin, Rong Hao, Xing Ende. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(5): 276-281.
- [2] 周斌, 乔木, 冯纛. 伊犁河谷春秋草场草地生态调查及其恢复对策[J]. 生态学杂志, 2007, 26(4): 528-532.
Zhou Bin, Qiao Mu, Feng Ying. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(4): 528-532.
- [3] 张士功, 刘国栋, 刘更另. 植物营养和作物抗旱性[J]. 植物学通报, 2001, 18(1): 35-40.
Zhang Shigong, Liu Guodong, Liu Gengling. Chinese Bulletin of Botany, 2001, 18(1): 35-40.
- [4] Rodrigueza D, Goudriaanb J, Oyarzabala M, et al. Phosphorus nutrition and water stress tolerance in wheat plants[J]. Journal of Plant Nutrition, 1996, 19(1): 29-39.
- [5] 王庆仁, 李继云, 李振声. 磷高效基因型小麦对缺磷胁迫的根际适应性反应[J]. 西北植物学报, 2000, 20(1): 1-7.
Wang Qingren, Li Jiyun, Li Zhensheng. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2000, 20(1): 1-7.
- [6] Gutierrez-Boem F H, Thomas G W. Phosphorus nutrition and water deficits in field-grown soybeans[J]. Plant and Soil, 1999, 207(1): 87-96.
- [7] Jin J, Wang G H, Liu X B, et al. Interaction between phosphorus nutrition and drought on grain yield, and assimilation of phosphorus and nitrogen in two soybean cultivars differing in protein concentration in grains[J]. Journal of Plant Nutrition, 2006, 29(8): 1433-1449.
- [8] 钟鹏, 朱占林, 李志刚, 等. 干旱和低磷胁迫对大豆叶保护酶活性的影响[J]. 中国农学通报, 2005, 21(2): 153-155.
Zhong Peng, Zhu Zhanlin, Li Zhigang, et al. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(2): 153-155.
- [9] 赵吉, 廖仰南, 张桂枝, 等. 草原生态系统的土壤微生物生态[J]. 中国草地, 1999(3): 57-67.
Zhao Ji, Liao Yangnan, Zhang Guizhi, et al. Grassland of China, 1999(3): 57-67.
- [10] 顾爱星, 范燕敏, 武红旗, 等. 天山北坡退化草地土壤环境与微生物数量的关系[J]. 草业学报, 2010, 19(2): 116-123.
Gu Aixing, Fan Yanmin, Wu Hongqi, et al. Acta Prataculturae Sinica, 2010, 19(2): 116-123.
- [11] 夏建国, 李静. 利用丛枝菌根真菌(AMF)提高植物抗旱性的研究进展[J]. 中国农学通报, 2005, 21(2): 326-329.
Xia Jianguo, Li Jing. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(2): 326-329.
- [12] 乌恩, 李重祥, 张宇, 等. 草原退化对典型草原羊草菌根共生的影响[J]. 草地学报, 2009, 17(6): 731-734.
Wu En, Li Chongxiang, Zhang Yu, et al. Acta Agrestia Sinica, 2009, 17(6): 731-734.
- [13] 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.
Guo Huijuan, He Xueli. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(21): 5933-5940.
- [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]. Transactions of the British Mycological Society, 1970, 55(1): 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.
Bi Yinli, Li Xiaolin, Ding Baojian. Agricultural Research in the Arid Areas, 2003, 21(2): 7-12.
- [16] 贺学礼, 张焕仕, 赵丽莉. 不同土壤中水分胁迫和 AM 真菌对油蒿抗旱性的影响[J]. 植物生态学报, 2008, 32(5): 994-1001.
He Xueli, Zhang Huanshi, Zhao Lili. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(5): 994-1001.
- [17] Smith S E, Read D J. Mycorrhizal symbiosis [M]. London: Academic Press, 1997.
- [18] 石伟琦, 丁效东, 张士荣. 丛枝菌根真菌对羊草生物量和氮磷吸收及土壤碳的影响[J]. 西北植物学报, 2011, 31(2): 357-362.
Shi Weiqi, Ding Xiaodong, Zhang Shirong. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2011, 31(2): 357-362.
- [19] Antunes P M, Deavill D, Goss M J. Effect of two AMF life strategies on the tripartite symbiosis with Bradyrhizobium japonicum and soybean[J]. Mycorrhiza, 2006, 16(3): 167-173.
- [20] Lesueur D, Duponnois R. Relations between rhizobial nodulation and root colonization of Acacia Crassicarpa [J]. Annals of Forest Science, 2005, 62(5): 467-474.
- [21] 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.
Li Shumin, Li Long, Zhang Fusuo. Journal of China Agricultural University, 2004, 9(1): 11-15.

(责任编辑 吴晓丽)