

干旱胁迫下丛枝菌根真菌对疏叶骆驼刺和多枝怪柳生长及生理的影响

麦格皮热提古丽·达吾提^{1,2}, 王海鸥^{1,2},
陈晓楠^{1,2}, 伊丽努尔·艾力^{1,2}, 马晓东^{1,2*}

(1 新疆师范大学 生命科学院; 2 新疆特殊环境物种保护与调控生物试验室, 乌鲁木齐 830054)

摘 要: 多枝怪柳(*Tamarix ramosissima*)与疏叶骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)是塔里木河下游优势种,也是重要的丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)共生植物,二者常相伴而生且均受水分严重限制。研究采用盆栽试验法,以疏叶骆驼刺和多枝怪柳幼苗为试验材料,设定正常水分[土壤相对含水量(70±5)%, D₀]、中度水分胁迫[土壤相对含水量(40±5)%, D₁]和重度水分胁迫[土壤相对含水量(20±5)%, D₂]3个水分梯度,设置接种(AMF+)和不接种(AMF-)2种处理,以及供体植物疏叶骆驼刺和受体植物多枝怪柳之间2种菌丝传递距离(长菌丝传递距离30 cm, L;短菌丝传递距离15 cm, S),探究了干旱胁迫下丛枝菌根真菌菌丝传递距离对2种不同生活型的植物生长和生理的影响。结果表明,(1)供体植物接种AMF后在供、受体间形成丛枝菌根菌丝网络(arbuscular mycorrhizal networks, AMNs),其中与正常水分(D₀)处理下的侵染率相比,重度水分(D₂)处理下长距离处理受体侵染率的降幅为73.22%。(2)在中度水分处理下,AMF对长、短距离处理受体均有促进作用,而在重度水分处理下对长距离处理受体株高、茎径相对增长率和生物量无促进作用。(3)各水分处理下AMF对受体植物根系生长指标具有显著促进作用($P<0.05$),且S处理优于L处理,但在重度水分及长距离处理下的受体表现出显著较低的水平。(4)在中度水分处理下,AMF对长、短距离处理受体抗氧化酶活性、渗透调节物质含量、叶绿素含量和叶片相对含水量均有促进作用,且不同距离处理间差异不显著,而在重度水分处理下对长距离处理幼苗无促进作用。因此,在正常水分和适度水分处理下,接种AMF可显著促进长距离端受体植物的表观生长、生物量积累、抗氧化酶活性、渗透调节物质和叶绿素的含量,提高受体植物的抗旱性,在重度水分胁迫下AMF对长距离端受体植物的促进作用不显著。

关键词: 干旱胁迫;丛枝菌根真菌(AMF);疏叶骆驼刺;多枝怪柳;生理变化

中图分类号: Q945.79

文献标志码: A

Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Physiological Characteristics of *Alhagi sparsifolia* and *Tamarix ramosissima* under Drought Stress

MAIGEPIRETIGULI Dawuti^{1,2}, WANG Haiou^{1,2},
CHEN Xiaonan^{1,2}, YILINUER Aili^{1,2}, MA Xiaodong^{1,2*}

(1 College of Life Science, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 2 Xinjiang Key Laboratory of Special Species Conservation and Regulatory Biology, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China)

收稿日期: 2023-04-06; **修改稿收到日期:** 2023-09-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(42367069, 42067067)

作者简介: 麦格皮热提古丽·达吾提(1997—),女,在读硕士研究生,主要从事植物生理生态研究。E-mail: 2099968853@qq.com

* 通信作者: 马晓东,博士,教授,主要从事植物生理生态研究。E-mail: mxdl1107@126.com

Abstract: *Tamarix ramosissima* and *Alhagi sparsifolia* are dominant species in the lower reaches of the Tarim River and important symbiotic plants with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF). Both species often grow together and are severely limited by water availability. In this study, a pot experiment was conducted using seedlings of *Alhagi sparsifolia* and *T. ramosissima*. Three water gradient levels were set: Normal moisture [(70±5)% soil relative moisture content, D0], moderate moisture stress [(40±5)% soil relative moisture content, D1], and severe moisture stress [(20±5)% soil relative moisture content, D2]. set two inoculation treatments (inoculation AMF+ and no inoculation AMF-), and set hyphal transmission distance (long hyphal transmission distance 30 cm, L; short hyphal transmission distance 15cm, S) between the donor plant *Alhagi sparsifolia* and the receiver plant *T. ramosissima*. The effects of arbuscular mycorrhizal fungi hyphal transmission distance on the growth and physiology of these two different life forms under drought stress were investigated. The results showed that, (1) after inoculation with AMF, arbuscular mycorrhizal networks (AMNs) was formed between the donor and receiver plants, and the decrease in infection rate of the long hyphal transmission distance receiver under severe moisture stress (D2) compared to normal moisture conditions (D0) was 73.22%. (2) Under moderate moisture stress, AMF had a promoting effect on both long hyphal transmission distance and short hyphal transmission distance receiver, but had no promoting effect on plant height, basal diameter relative growth rate, and biomass of long-distance receiver under severe moisture stress. (3) Under all moisture treatments, AMF significantly promoted the root growth indicators of the receiver plants ($P<0.05$), with the S treatment being superior to the L treatment, but the receiver plants showed significantly lower level under severe moisture stress and long hyphal transmission distance treatment. (4) Under moderate moisture stress, AMF had a promoting effect on the antioxidant enzyme activities, osmoregulation substance contents, chlorophyll contents, and leaf relative water content of both long and short hyphal transmission distance receiver, with no significant difference between the different hyphal transmission distance treatments. However, under severe moisture stress, AMF had no promoting effect on the growth of long hyphal transmission distance receiver. Therefore, under normal and moderate moisture conditions, inoculating with AMF significantly promoted the apparent growth, biomass accumulation, antioxidant enzyme activities, osmoregulation substance contents, and chlorophyll contents of long hyphal transmission distance receiver, enhancing the drought resistance of the receiver plants. However, under severe moisture stress, the promoting effect of AMF on long hyphal transmission distance receivers was not significant.

Key words: drought stress; arbuscular mycorrhizal fungi (AMF); *Alhagi sparsifolia*; *Tamarix ramosissima*; physiological change

幼苗发育是植物生命中最关键而脆弱的阶段，易受干旱等非生物胁迫的影响^[1]。塔里木河下游属于典型的极端干旱区，对环境变化极为敏感、降水量稀少、蒸发强度大、土壤持水性差、具有自然资源相对丰富但生态环境极端脆弱的双重性特点，该地区生长着乔木、灌木、草本等天然植被，骆驼刺与怪柳是该植被群落常相伴而生的优势物种，维持该区生态平衡起着重要的作用^[2-3]。土壤水分主要通过影响植物根系生长速率、生物量的分配、土壤养分有效性、资源综合利用等，最终影响植物的生理生态功能^[4]。

疏叶骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)是豆科，典型的荒漠深根草本植物，是塔克拉玛干沙漠南缘适应性强、根系发达、耐旱、耐盐的优势种之一，防风、固沙的重要植被，是该区域重要的牧草资源，也是药用

和花蜜来源的植物^[5-6]。多枝怪柳(*Tamarix ramosissima*)是怪柳科怪柳属，具有耐旱的特征，塔里木河下游荒漠河岸林的关键物种，改善荒漠生态系统的稳定性、荒漠河岸植被带的恢复方面起着重要作用^[7]。这2个重要的优势种在维持荒漠河岸林的生态系统中起着极其重要的作用。与全球其他生态系统相比，荒漠生态系统的荒漠土壤含水量较陆地低，干旱胁迫是影响荒漠植物生存的胁迫因子之一^[8]。因此，研究荒漠植物在干旱胁迫下的生存策略和提高存活状况对于维护荒漠生态系统稳定性具有重要意义。

荒漠区植物通常与土壤微生物形成共生体系从而适应严酷的生态环境^[9]。丛枝菌根真菌(AMF)是存在于土壤中的根际微生物，与植物根系形成互利共生关系，具有能够明显提高植物抵抗自然生物

危害和逆境的能力^[10]。菌根真菌侵染宿主植物的根系后形成根外菌丝并不断向外扩展侵染邻近植物的根系,形成广泛的菌根菌丝网络^[11]。有研究表明,AMF通过根外菌丝网络直接吸收水分、提高养分吸收和根系的水分运输能力、增强植物的光合能力、增加渗透调节物质的含量和抗氧化酶活性^[12]。此外,菌根菌丝直径小(2~5 μm),通过与土壤水分直接接触吸收宿主植物根系无法获得的水分,提高宿主植物对胁迫的耐受度^[13]。Schutz等^[14]在微体系当中不同距离处理的木豆和谷子的研究证明,AMF与宿主植物的共生也跟菌丝传递距离有关。前人的研究^[15-16]已证明,在干旱条件下,菌根真菌的接种显著增加了根系生长指标。当发生水分亏缺时,植株体内活性氧的产生与消除会被破坏,细胞器的完整性受到结构和功能上的损伤,AMF在根系定植后能够激活抗氧化酶系统,从而减轻胁迫对植株所带来的伤害^[17]。齐晨汐等^[18]的研究表明,在干旱条件下接种AMF降低了MDA含量、增加了抗氧化酶活性和可溶性蛋白含量,AMF在一定程度上增强鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina* L.)的抗旱能力。

近年来,荒漠植物疏叶骆驼刺、多枝怪柳等的研究多集中在单一物种在水分、盐分条件下的形态结构、生理特性、光合生长以及影响因素和抗逆性方面^[19-20]。疏叶骆驼刺和多枝怪柳作为生态优势物种和极其重要的菌根共生植物,在维持塔河下游的生态平衡中起着极其重要的作用,而关于干旱胁迫及不同菌丝传递距离下疏叶骆驼刺和多枝怪柳生长及生理方面的研究鲜有报道。丛枝菌根真菌的优势种广泛分布在在豆科植物根部以及根际土壤的周围,豆科植物与AMF的亲合力高于其他生活型植物^[21]。AMF通过菌丝网络将植物与周边的植物连接起来,维持该地区的植物多样性起着极其重要的作用。因此本研究是以骆驼刺作为供体植物,多枝怪柳作为受体植物,设置供受体之间长距离(30 cm)和短距离(15 cm),研究干旱胁迫下菌丝传递距离对疏叶骆驼刺、多枝怪柳的根系形态和生理特征的影响,探讨它们的水分适应策略,为荒漠植物的恢复和生态维护提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

疏叶骆驼刺、多枝怪柳种子和试验用的土均来自于塔里木河下游地区。

播种前,解除疏叶骆驼刺种子休眠,再用75%的酒精浸泡10 min,最后用无菌水清洗备用,多枝怪柳用落水法播种。供试沙土经过2 mm筛去除杂质后,用清水洗3次,再用无菌水洗1次,经110℃、0.14 MPa的条件下进行2 h连续湿热灭菌处理^[22-23],沙土与蛭石按体积1:3比例均匀混合成栽培基质,再装入花盆内。供试AMF采用摩西球囊霉(*Glomus mosseae*)和幼套球囊霉(*Gl. etunicatum*)(比例为1:1)的混合菌株,购买于北京市农林科学院植物营养与资源研究所,菌剂孢子密度为22.87个/g。试验开始之前,供试土壤的田间持水量为32.6%。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计

试验于2022年3—10月进行。选取颗粒饱满、大小基本一致的疏叶骆驼刺和多枝怪柳种子,在塑料花盆中育苗。将长势一致且健康的疏叶骆驼刺及多枝怪柳幼苗分别移栽到试验装置的供体室和受体室,并在每个供体室、受体室留3株健壮的幼苗。

试验设计包括3个因素即水分处理、接种处理、菌丝传递距离,根据前期研究^[5,21,24]水分等级设定,共设定正常水分[土壤相对含水量(70±5)%,D0]、中度水分胁迫[土壤相对含水量(40±5)%,D1]、重度水分胁迫[土壤相对含水量(20±5)%,D2]3个水分梯度;接种处理包括接种AMF与不接种AMF;菌丝传递距离包括供受体之间长菌丝传递距离(30 cm,L)和短菌丝传递距离(15 cm,S)。AMF的接种方法为:精确称取丛枝菌根真菌接种物22.87 g,接种于供体室幼苗根部离土壤表层下5 cm处,对照组加入等量灭活菌土。

使用便携式水分快速测定仪(WET-2)测定土壤含水量,计算失水量并用称重补水法来控制土壤相对含水量。水分胁迫持续40 d,期间保证幼苗正常生长,采集功能叶片用于各生理指标的测定。

1.2.2 菌根侵染率测定

干旱胁迫培养40 d后,疏叶骆驼刺及多枝怪柳带着盆土育苗,再将幼苗浸泡到无菌水中,洗净后取新鲜根样剪成长度1~2 cm的根段,对其进行固定、碱解离、酸化、染色处理,制成装片在显微镜下观察。用网格交叉法计算菌根侵染率。计算公式为:AMF侵染率= 侵染根段数/全部根段数×100%。

1.2.3 生长指标测定

株高和基径:在干旱胁迫处理开始的第1天和

第 40 天,分别使用游标卡尺和卷尺测量不同处理组幼苗的基径、株高,计算如下指标:

相对株高增长率=(最终幼苗高度-最初幼苗高度)/最初幼苗高度;相对基径增长率=(最终幼苗基径-最初幼苗基径)/最初幼苗基径。

生物量:不同处理组植物幼苗从地径部分分为地上部分和地下部分,105 ℃杀青 15 min 后将其置于 80 ℃的恒温干燥箱中烘干至恒重,称取生物量。

1.2.4 根系生长和生理指标测定

清水洗干净后的幼苗根系用(EpsonV700, Japan)根系扫描仪扫描,使用根系分析软件 Win-Rhizo 进行总根长、根表面积、根体积等指标分析。

SOD、POD、CAT 活性分别采用羟胺法、愈创木酚法、钼酸铵法进行测定。可溶性糖、可溶性蛋白、游离脯氨酸含量测定分别用蒽酮比色法、考马斯亮蓝法、磺基水杨酸法。试剂盒来源于南京建成生物工程研究所和北京索莱宝科技有限公司。

1.2.5 叶绿素含量和叶片相对含水量测定

用乙醇丙酮混合提取法^[25-26]测定各处理组幼苗叶绿素含量,用烘干法测定叶片相对含水量。

1.3 数据分析

用 Excel 2021 进行数据整理和处理,通过 SPSS 26.0 分析软件,采用单因素方差分析,用 Duncan 法对不同处理数据进行多重对比检验($P<0.05$),结果用平均值±标准误差表示。采用 Origin 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫下 AMF 对植物侵染率的影响

AMF 与供体植物疏叶骆驼刺和受体植物多枝怪柳幼苗根系均能形成良好的菌根共生关系(表 1)。对供体植物来说,随着 D0-D1-D2 水分梯度变化侵染率和孢子数量呈下降的趋势,各水分之间差异显著($P<0.05$)。在 D1、D2 水分处理下,受体植物在 L 处理下的侵染率比 S 处理分别显著降低 39.74%、46.16%($P<0.05$),D1 水分处理下 L 处理的孢子数量比 S 处理的显著降低 19.53%,D2 水分处理下 S 与 L 处理孢子数量之间无显著差异($P>0.05$)。可见,干旱胁迫会降低菌根在供受体植物中的侵染和孢子数量,D2 水分处理下严重降低了 L 处理下受体植物的侵染率和孢子数量。

表 1 干旱胁迫下 AMF 对供体和受体植物侵染率的影响
Table 1 Effect of AMF on infection rates of donor and receiver plants under drought stress

处理 Treatment	供体 Donor		受体 Receiver	
	侵染率 AMF infection rate/%	孢子数量 Spore number/(number/g)	侵染率 AMF infection rate/%	孢子数量 Spore number/(number/g)
D0+S	83.67±0.01a	17.80±0.49a	62.67±0.02a	15.70±0.56a
D0+L	86.33±0.02a	16.40±0.37a	61.00±0.04a	15.00±0.83a
D1+S	75.33±0.02b	13.20±0.80b	50.33±0.01b	12.80±0.98b
D1+L	72.33±0.01bc	12.70±0.34b	30.33±0.00c	10.30±0.63c
D2+S	66.67±0.02cd	9.10±0.96c	30.33±0.04c	9.60±0.67c
D2+L	64.33±0.03d	9.70±0.73c	16.33±0.01d	9.10±0.78c

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$);D0、D1 和 D2 分别表示正常水分、中度水分胁迫和重度水分胁迫,S 和 L 分别表示短菌丝传递距离与长菌丝传递距离。供体植物为疏叶骆驼刺,受体植物为多枝怪柳。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments ($P<0.05$); D0, D1, D2 denote respectively normal moisture, moderate moisture stress and severe moisture stress, while S and L represent short hyphal transmission distance treatment and long hyphal transmission distance treatment. The donor plant is *A. sparsifolia* and the receiver plant is *T. ramosissima*. The same as below.

2.2 干旱胁迫下接种 AMF 对植物表现生长的影响

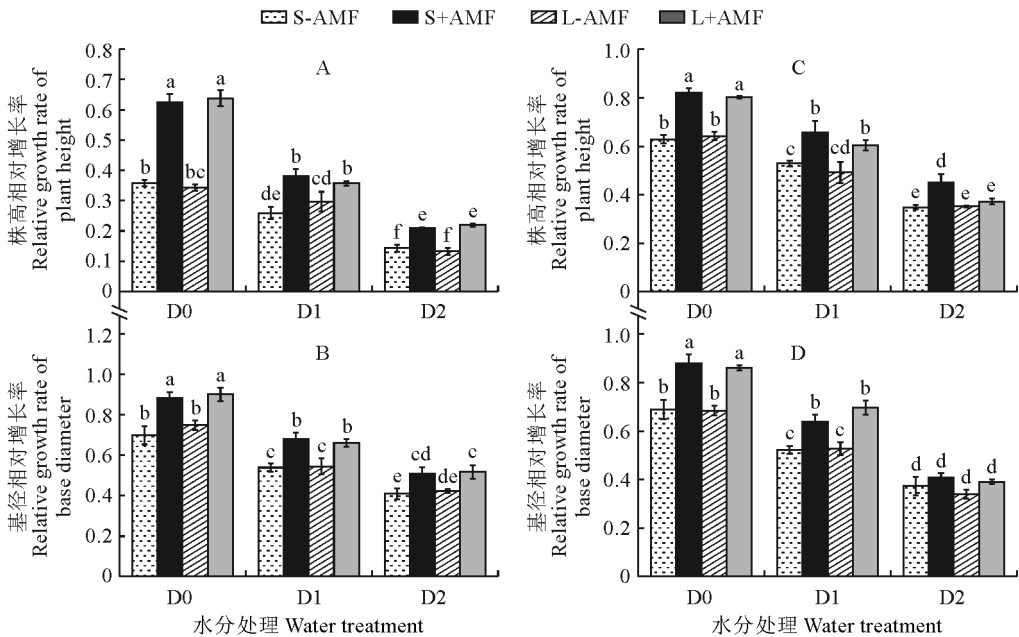
随着干旱胁迫程度的增大,供、受体株高、基径相对增长率均呈下降趋势(图 1)。各水分处理下与未接种相比接种 AMF 显著提高了供体植物株高、

基径相对增长率($P<0.05$)。

对于受体植物,在 D0、D1 水分处理下与未接种相比接种 AMF 显著提高了 S 和 L 处理受体株高、基径相对增长率,在 D2 水分处理下 AMF 对 S 处理

株高增长率具有显著促进作用,增幅为 29.22%,对 L 处理受体的株高、基径增长率均无促进作用($P>0.05$)。

可见,接种 AMF 能够促进干旱胁迫下供、受体植物的生长,但在重度水分处理下,对长距离处理的受体植物生长无促进作用。



柱上不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上存在显著性差异($P<0.05$)。D0 为正常水分、D1 为中度水分胁迫、D2 为重度水分胁迫,S-AMF、S+AMF、L-AMF、L+AMF 分别表示短菌丝传递距离下未接种 AMF,短菌丝传递距离下接种 AMF,长菌丝传递距离下未接种 AMF,长菌丝传递距离下接种 AMF。下同。

图 1 干旱胁迫下 AMF 对供体(A、B)和受体植物(C、D)生长的影响

Different lowercase letters on the columns indicate significant differences between treatments at the 0.05 level ($P<0.05$). D0 is normal moisture, D1 is moderate moisture stress, D2 is severe moisture stress, S-AMF, S+AMF, L-AMF, and L+AMF denote: Not inoculated with AMF under short hyphal transmission distance, inoculated with AMF under short hyphal transmission distance, not inoculated under long hyphal transmission distance, inoculated with AMF at long hyphal transmission distance, respectively. The same as below.

Fig.1 Effects of AMF on the growth of donor (A, B) and receiver plants (C, D) under drought stress

2.3 干旱胁迫下接种 AMF 对幼苗根系形态的影响

随着胁迫程度的严重,供、受体植物总根长、根表面积、根体积逐渐呈降低的趋势。各水分处理下,与未接种 AMF 相比,接种 AMF 提高了供体植物(图 2,A-C)总根长、根表面积、根体积,各水分处理间差异显著($P<0.05$)。对于受体植物多枝怪柳,各水分处理下接种 AMF 对 S、L 处理的总根长、根表面积、根体积均具有显著促进作用($P<0.05$),其中 D0、D1 水分处理下,总根长、根体积在 S 处理和 L 处理之间存在显著差异,S 处理的均高于 L 处理,D2 水分处理下 L 处理根体积比 S 处理显著降低 36.48%。由此可见,在重度水分胁迫下 AMF 对 L 处理幼苗根系生长并不能起到跟 S 处理同样的促进作用。

2.4 干旱胁迫下 AMF 对幼苗生物量的影响

由表 2 可知,与未接种处理相比接种 AMF 不

同程度的提高了供、受体生物量(地上、地下、总生物量)。对于供体植物,各水分下接种 AMF 对地上、地下、总生物量均有显著促进作用($P<0.05$)。对受体植物,与未接种相比接种 AMF 在 D0 水分处理下的地上、地下、总生物量均有显著促进作用($P<0.05$),在 D1 水分处理下与未接种相比接种 AMF 对 S、L 处理地下部分干重和总干重均有显著促进作用且 S 处理的显著高于 L 处理($P<0.05$),在 D2 水分处理下接种 AMF 仅对 S 处理地上、地下、总生物量具有显著促进作用,增幅分别为 29.41%、73.91%、47.37%,对 L 处理地上、地下、总生物量在接种 AMF 与未接种 AMF 处理间无显著差异($P>0.05$)。可见,接种 AMF 能够促进干旱胁迫下供、受体植物的生物量积累,但在重度水分处理下,对长距离处理的受体植物生物量积累无促进作用。

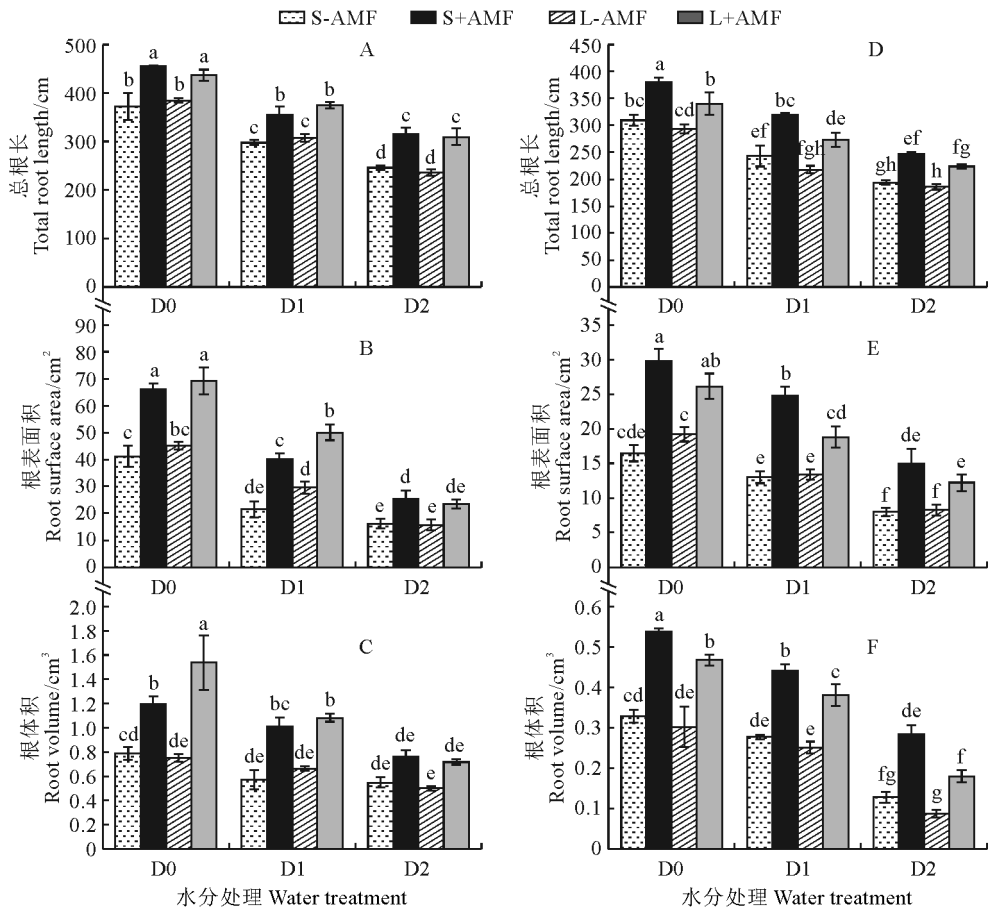


图 2 干旱胁迫下接种 AMF 对供体(A、B、C)和受体植物(D、E、F)根系形态参数的影响
Fig. 2 Effects of AMF inoculation on root morphological parameters of donor (A, B, C) and receiver plants (D, E, F) under drought stress

表 2 不同水分及接种处理下供体和受体植物生物量的变化

Table 2 Biomass changes of donor and receiver plants under different water and inoculation treatments

水分处理 Water treatment	菌丝传递距离 Hyphal transmission distance	供体 Donor			受体 Receiver		
		地上干重 Dry shoot weight/g	地下干重 Dry root weight/g	总干重 Total biomass/g	地上干重 Dry shoot weight/g	地下干重 Dry root weight/g	总干重 Total biomass/g
D0	S-AMF	0.81±0.06c	0.91±0.04c	1.72±0.05c	0.53±0.06cd	0.52±0.03b	1.06±0.03c
	S+AMF	1.30±0.01a	1.82±0.09a	3.12±0.08a	0.79±0.03a	0.73±0.02a	1.52±0.02a
	L-AMF	0.84±0.05c	0.94±0.01c	1.78±0.04c	0.56±0.01bcd	0.50±0.02b	1.06±0.02c
	L+AMF	1.37±0.04a	1.87±0.09a	3.24±0.12a	0.80±0.02a	0.67±0.03a	1.47±0.03a
D1	S-AMF	0.82±0.07c	0.76±0.1cd	1.58±0.17cd	0.50±0.03de	0.38±0.02c	0.87±0.04d
	S+AMF	1.09±0.03b	1.69±0.06a	2.78±0.25a	0.63±0.01b	0.68±0.03a	1.31±0.03b
	L-AMF	0.75±0.08cd	0.71±0.09cd	1.46±0.16cd	0.50±0.02de	0.40±0.05c	0.90±0.07d
	L+AMF	1.05±0.05b	1.71±0.14a	2.76±0.30a	0.61±0.00bc	0.52±0.01b	1.13±0.01c
D2	S-AMF	0.57±0.03e	0.57±0.10d	1.14±0.11d	0.34±0.00g	0.23±0.02d	0.57±0.02e
	S+AMF	0.87±0.08c	1.41±0.06b	2.27±0.03b	0.44±0.03ef	0.40±0.03c	0.84±0.04d
	L-AMF	0.64±0.06de	0.54±0.07d	1.18±0.13d	0.32±0.05g	0.21±0.02d	0.53±0.05e
	L+AMF	0.85±0.04c	1.39±0.09b	2.24±0.11b	0.37±0.02fg	0.25±0.02d	0.62±0.02e

注: 同列不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上存在显著性差异 ($P < 0.05$)。D0 为正常水分、D1 为中度水分胁迫、D2 为重度水分胁迫; S-AMF、S+AMF、L-AMF、L+AMF 分别表示短菌丝传递距离下未接种 AMF、短菌丝传递距离下接种 AMF、长菌丝传递距离下未接种 AMF、长菌丝传递距离下接种 AMF。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between treatments at the 0.05 level ($P < 0.05$). D0 is normal moisture, D1 is moderate moisture stress, and D2 is severe moisture stress; S-AMF, S+AMF, L-AMF, and L+AMF denote: Not inoculated with AMF under short hyphal transmission distance, inoculated with AMF under short hyphal transmission distance, not inoculated under long hyphal transmission distance, inoculated with AMF under long hyphal transmission distance, respectively. The same as below.

2.5 干旱胁迫下接种 AMF 对幼苗抗氧化酶活性的影响

供、受体 SOD、POD 活性变化随干旱程度增加呈先增加后下降的趋势;CAT 活性变化随着胁迫程度的增加持续增加。与未接种相比接种 AMF 提高了供体植物(图 3,A—C)的 SOD、POD、CAT 活性。对于菌根化受体植物,在 D1 水分处理下,S 处理受体 SOD 活性显著高于 L 处理,增幅为 14.11%,长、短距

离处理下的 POD、CAT 活性差异均不显著($P>0.05$)。在 D2 水分处理下,S 处理的 SOD、POD 活性比 L 处理分别显著升高 13.24%、13.02%,对 L 处理的 SOD、POD、CAT 活性均无显著促进作用。由此可见,接种 AMF 均能提高供体植物抗氧化酶活性,其中中度水分胁迫处理下不同距离处理菌根化受体间 POD、CAT 活性无显著差异,但在重度水分胁迫下 AMF 对 L 处理受体的抗氧化酶活性无显著促进作用。

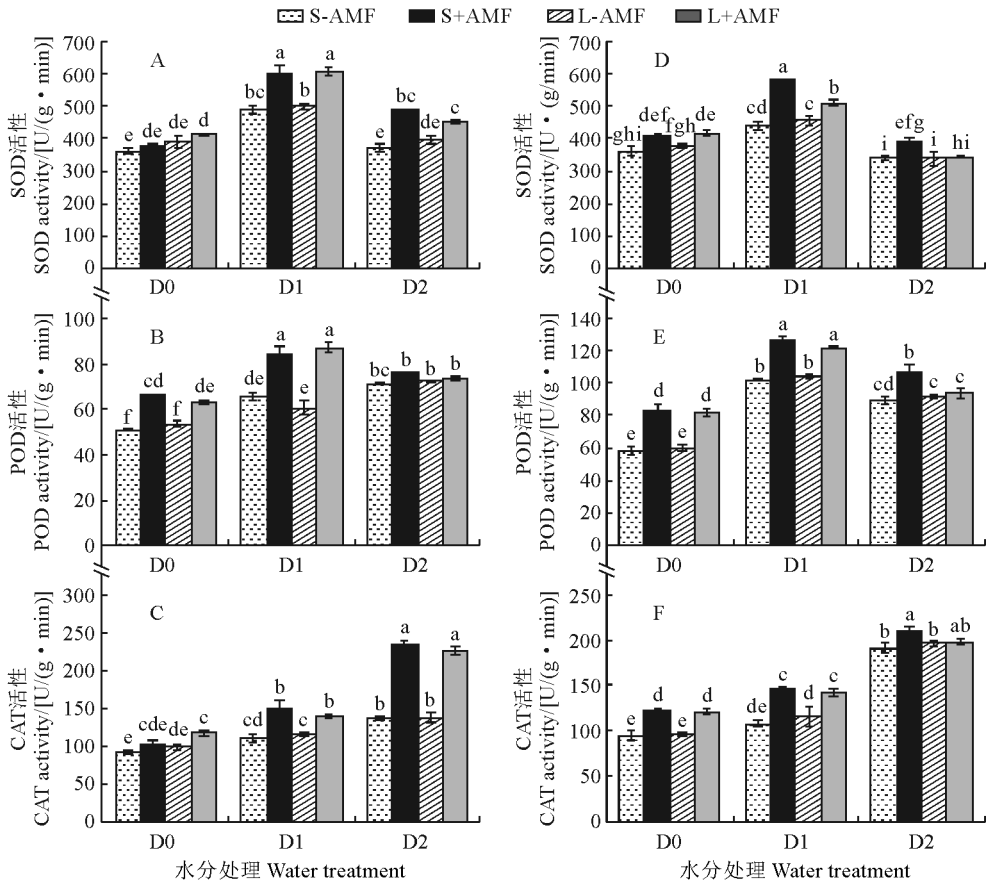


图 3 干旱胁迫下接种 AMF 对供体(A、B、C)和受体植物(D、E、F)抗氧化酶活性的影响

Fig. 3 Effects of AMF inoculation on the antioxidant oxidase activities of donor (A, B, C) and receiver plants (D, E, F) under drought stress

2.6 干旱胁迫下 AMF 对幼苗渗透调节物质的影响

由表 3 可知,随着胁迫程度的增加供、受体幼苗可溶性糖和脯氨酸含量整体呈“先升后降”,可溶性蛋白含量逐渐降低。对于供体,各水分处理下,与未接种处理相比,接种 AMF 对可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸含量具有显著促进作用($P<0.05$)。对于受体植物,D1 水分处理下 AMF 对 S、L 处理的 3 种渗透调节物质均有显著促进作用,S 与 L 处理间无显著差异($P>0.05$),在 D2 水分处理下 AMF 仅对 S 处理可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸含量具有显著促进作用,S 处理可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸含

量比 L 处理分别显著升高 23.92%、21.71%、22.14%。对 L 处理的 3 种渗透调节物质均无促进作用。可见,随着干旱胁迫程度的增大,接种 AMF 均能够显著促进各处理供体植物渗透调节物质的积累,对于重度水分处理下的长距离端受体均无促进作用。

2.7 干旱胁迫下接种 AMF 对幼苗叶绿素含量和叶片相对含水量的影响

随着胁迫程度的增加,叶绿素含量、叶片相对含水量逐渐降低。供体植物(图 4,A—C),各水分条件下,与未接种相比接种 AMF 不同程度增加了叶绿素含量和叶片相对含水量。

表 3 干旱胁迫下接种 AMF 对供体和受体植物渗透调节物质含量的影响

Table 3 Effects of AMF inoculation on osmotic regulatory substances content of donor and receiver plants under drought stress

水分处理 Water treatment	菌丝传递距离 Hyphal transmission distance	供体 Donor			受体 Receiver		
		可溶性糖 Soluble sugar/ (mg/g)	可溶性蛋白 Soluble protein/ (mg/g)	脯氨酸 Proline/ (μg/g)	可溶性糖 Soluble sugar/ (mg/g)	可溶性蛋白 Soluble protein/ (mg/g)	脯氨酸 Proline/ (μg/g)
D0	S-AMF	3.72±0.15c	2.41±0.05bc	152.49±7.86c	3.28±0.02d	2.42±0.07c	115.77±5.56h
	S+AMF	5.72±0.18b	3.27±0.11a	216.87±6.70b	4.42±0.31c	3.15±0.11a	150.64±8.27de
	L-AMF	3.84±0.02c	2.68±0.25b	145.07±6.78c	3.08±0.10d	2.78±0.07b	121.18±7.91gh
	L+AMF	5.91±0.11b	3.23±0.09a	211.89±8.01b	4.34±0.31c	3.43±0.09a	146.05±0.63def
D1	S-AMF	5.74±0.13b	1.75±0.10d	202.96±4.80b	5.25±0.05b	1.84±0.03d	171.40±4.92bc
	S+AMF	8.64±0.68a	2.33±0.22bc	276.76±8.66a	7.24±0.12a	2.49±0.09bc	219.34±6.70a
	L-AMF	6.00±0.27b	1.85±0.05d	210.29±8.62b	5.58±0.19b	1.85±0.06d	187.34±6.30b
	L+AMF	8.93±0.48a	2.30±0.08c	270.39±5.02a	6.89±0.16a	2.27±0.06c	206.35±6.49a
D2	S-AMF	3.97±0.63c	1.33±0.04e	160.30±9.48c	4.42±0.17c	1.46±0.06e	135.02±4.64efg
	S+AMF	5.86±0.04b	1.85±0.05d	215.41±5.50b	5.75±0.22b	1.85±0.06d	158.88±4.38cd
	L-AMF	3.54±0.44c	1.31±0.03e	156.39±9.12c	4.49±0.15c	1.60±0.23de	133.00±4.71efgh
	L+AMF	5.98±0.04b	1.82±0.04d	220.02±7.86b	4.64±0.23c	1.52±0.14e	130.08±5.84fgh

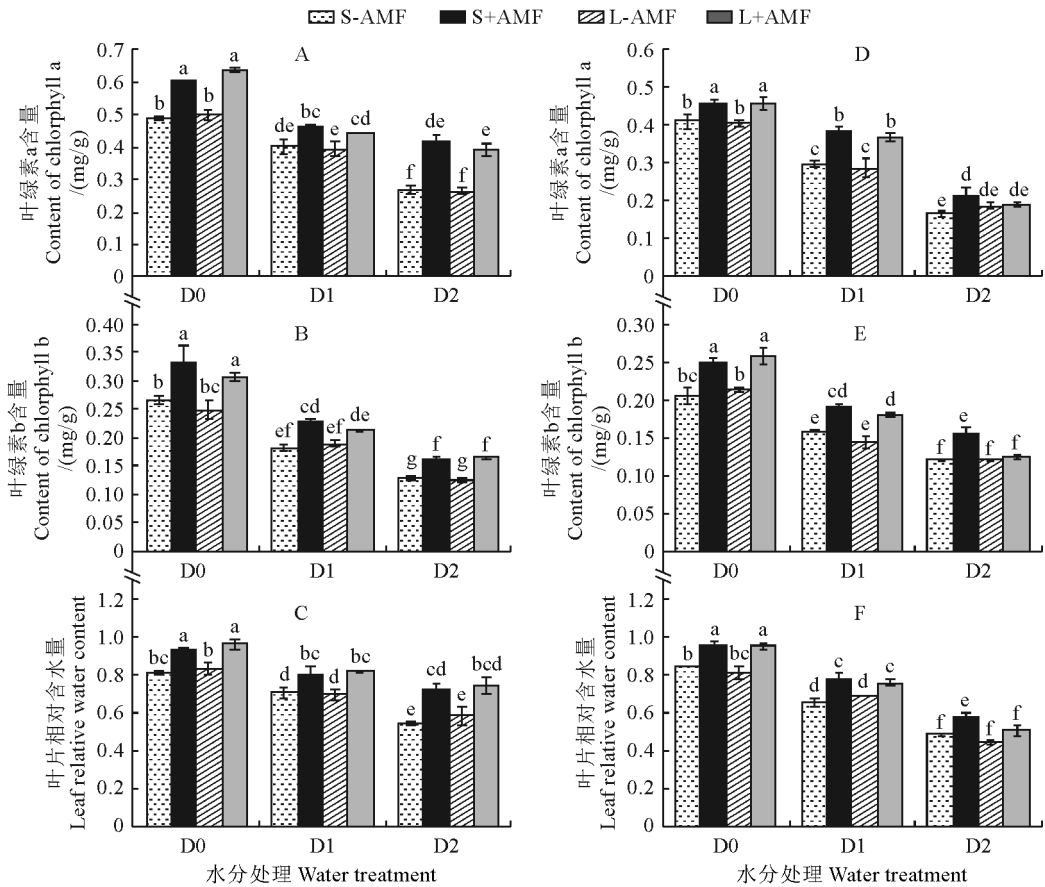


图 4 干旱胁迫下接种 AMF 对供体(A、B、C)和受体植物(D、E、F)叶绿素含量及叶片相对含水量的影响

Fig. 4 Effects of AMF inoculation on chlorophyll content and leaf relative water content of donor (A, B, C) and receiver plants (D, E, F) under drought stress

对于受体植物,在 D0、D1 水分条件下 AMF 对 S、L 处理受体叶绿素 a、b、叶片相对含水量均具有显著促进作用且 S 与 L 处理间无显著差异($P > 0.05$)。D2 水分处理下 AMF 仅对 S 处理叶绿素 a、b、叶片相对含水量具有显著促进作用($P < 0.05$),对 L 处理叶绿素 a、b、叶片相对含水量均无显著促进作用($P > 0.05$)。由此可见,随着胁迫程度的增大 AMF 能够促进供、受体植物叶绿素含量和叶片相对含水量,但在重度水分胁迫下对 L 处理受体无促进作用。

3 讨 论

疏叶骆驼刺,作为塔里木河下游典型的荒漠深根草本植物,与 AMF 有很高的共生能力^[20-21,24]。根际微生物—丛枝菌根真菌对植物没有严格的专一性,接种 AM 真菌后形成的菌丝网络将同种或不同种的菌根植物连接在一起^[27]。本研究发现,AM 真菌侵染供体植物疏叶骆驼刺根系后,菌根向外伸长生长,跨过一定的距离会侵染受体植物多枝怪柳的根系,这与前人^[28]的研究中得出的供体植物接种菌根真菌后第 8 周时,在供体和受体植物根系均检测到菌根侵染的结论一致。研究^[29-30]证明,摩西球囊霉是骆驼刺根系周围 AM 真菌的优势种,促进幼苗生长方面摩西球囊霉的接种效果最优,提高幼苗抗旱性方面幼套球囊霉的接种效果最好,本研究中,干旱条件下根外菌丝跨越 15 cm、30 cm 距离能侵染受体植物且侵染率为 16.33%~62.67%,桑钰等^[21]对多枝怪柳的研究中 AMF 侵染率为 33.4%~86.4%,两者相比相差不大,说明摩西球囊霉和幼套球囊霉的混合菌株对于菌丝传递研究效果最好。Fang 等^[31]的研究中,接种菌根真菌的供体植物(白三叶草)和受体植物(柑橘)之间成功建立了 CMN,这与本试验结果相符。遭遇干旱胁迫后供受体菌根侵染率均显著降低,AMF 对长距离、短距离处理的受体均有侵染,但是 AMF 对与供体植物较近的受体侵染率显著高于比供体距离远的受体,这与 Schutz 等^[14]的研究结果一致。本研究又发现,在重度水分胁迫下长距离处理受体与短距离处理受体之间的孢子数量无显著差异,可能是因为植物遭受胁迫时,长、短距离处理的寄主植物都减少了对碳水化合物的供应,导致孢子萌发受到限制,AMF 的孢子数量逐渐降低。

植物株高、基径、生物量等生长指标是干旱胁迫下植物损伤最直观的表现。本研究发现,接种 AMF

可显著提升供体株高、基径的增长率和生物量;在正常水分和中度水分胁迫下,AMF 显著提升长、短距离处理受体植物的株高、基径和生物量的积累。有研究^[32]表明,AMF 定殖的增加导致供体和受体植物生物量的显著增加,这与本研究结果一致,可能根外菌丝增强了根系养分吸收表面积,从而促进了植物的生物量积累。赵第银等^[33]的研究中西瓜-水稻系统中接种并未影响植株的生物量,这表明寄主植物种类和 AMF 都可能对双系统的生长反应产生显著影响。在重度水分胁迫下 AMF 对长距离处理受体株高、基径增长率和生物量的促进作用未达到显著水平,这可能是长距离端受体菌根定殖水平显著变弱,同时较细的根外菌丝对水分和养分吸收能力极其有限,从而无法对幼苗的光合碳积累做出贡献,因此对幼苗株高、基径的增长和生物量影响较低。根系形态参数是判断植物抗旱性的重要指标^[34]。本研究中供、受体幼苗各根系形态参数均随着干旱胁迫加重而呈逐渐下降的趋势。接种 AM 真菌后根系形态指标显著增加,这与王宁等^[35]和王如岩等^[36]的研究结果一致,但与艾为党等^[37]的研究相反,对三叶草(供体)接种菌根真菌后三叶草(供体)、黑麦草(受体)根长均有变短的趋势,这可能源于宿主的差异。研究表明,各水分处理下接种 AMF 对长、短距离处理受体根系形态参数均具有显著促进作用,这可能是因为根系作为直接与 AMF 联系的部位,根内菌丝以及向外延伸而形成的根外菌丝通过获取地下水分来帮助宿主植物优先促进根系的生长;但在重度水分处理下的短距离受体根体积显著优于长距离处理端受体的根体积,说明较长的传递距离不利于 AMF 对根体积这个与生物量的积累紧密联系的指标产生显著促进作用,这与前述生物量的研究结果相互印证。

POD、SOD 和 CAT 是植物细胞内主要的抗氧化酶^[38],与生物机体的免疫水平密切相关^[39],能够清除细胞内多余的活性氧、维持细胞的稳态,体内 SOD、POD 和 CAT 活性较高的植物抗逆性较强^[40]。AMF 与植物的共生关系可以显著促进幼苗的生长,增加抗氧化酶和渗透物质的积累,减少干旱对植物的伤害,从而提高植物对干旱胁迫的耐受性^[41]。本研究表明,AMF 在正常水分和中度水胁迫处理下发挥更大的促进作用,提高受体植物抗氧化酶活性;在 Ding 等^[42]的研究中,玉米和大豆以 CMNs 连接的处理当中,受体植物 POD 活性比其他处理相比显著提高了,本研究中接种 AMF 的供

体相连的受体植株的抗氧化酶活性比未接种 AMF 相连的受体植物的抗氧化酶活性高。在重度水分胁迫下,AMF 对短距离的促进作用显著,对长距离处理下受体的 3 种酶活性均无显著影响,这可能是在重度水分胁迫下由于受体植物细胞膜系统和 AMF 也会受到严重的损伤,导致 AMF 没能明显提升长距离端受体植物的抗氧化酶能力。干旱胁迫下,植物体为缓解干旱胁迫的影响会诱导或加速多种生理反应,如可溶性糖和脯氨酸等渗透调节物质的积累^[43]。本研究表明,AMF 对中度水分胁迫下的长距离端受体渗透调节物质的积累发挥极大的促进作用,提高受体植物的渗透调节能力,从而提高其抗旱能力,但在重度水分处理下,受体植物本身就受到严重的干旱胁迫且菌根定殖水平显著变弱,导致 AMF 对长距离端受体 3 种渗透调节物质均无显著促进作用。

叶绿素含量是反映植物光合能力的重要因素^[44];植物组织相对含水量是反映植物水分状况的重要参数^[45]。干旱胁迫会损害光合过程和植物含水量,叶绿体结构破坏,从而影响光合色素的合成,对植物生长产生负面影响^[46-47]。本研究发现,干旱胁迫下接种 AMF 可增加供、受体植物叶绿素含量和叶片相对含水量,Muneer 等^[48]的研究中,与非菌根处理相比,在菌根处理中 CMNs 增加了供体和受

体植物中的叶绿素含量(Chl a、Chl b 和类胡萝卜素),这与本试验结果一致。本研究还发现,在重度水分处理下 AMF 对长距离处理的受体叶绿素 a、b 含量和叶片相对含水量没有显著的促进作用,这可能是因为多枝怪柳以同化枝来代替叶片进行光合作用完成植物的生活史,遭受干旱胁迫时荒漠植物可通过减少光合色素的合成来适应逆境,虽 AMF 可在一定程度上提高光合色素的合成,但仍抵消不了干旱胁迫对植物光合作用的伤害。

4 结 论

(1)干旱胁迫下供、受体植物 AMF 侵染率、孢子数量有所降低,在重度水分胁迫长距离处理下受体的侵染率和孢子数量显著降低。

(2)AMF 侵染可显著促进供体植物在干旱胁迫下的表观生长,增加生物量和根系生长,通过供、受体间的菌丝网络也能促进受体植物的生长,但在重度水分处理下 AMF 仅对长距离受体总根长、根表面积、根体积有显著促进作用,对长距离处理受体的表观生长和生物量积累均无显著作用。

(3)正常和中度干旱胁迫下,接种 AMF 显著提高供、受体植物抗氧化酶活性和渗透调节物质的积累,但在重度水分处理下 AMF 对长距离端受体无显著作用。

参考文献:

[1] 戴海根,董文科,柴澍杰,等. 模拟干旱胁迫下鹰嘴紫云英幼苗生长及生理特性[J]. 中国草地学报, 2021, **43**(10): 63-75.
DAI H G, DONG W K, CHAI S J, *et al.* The growth and physiological characteristics of *Astragalus cicer* L. seedlings under simulated drought stress[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2021, **43**(10): 63-75.
[2] 伊力努尔·艾力,陈晓楠,高文礼,等. AMF-多枝怪柳幼苗共生体对干旱胁迫的生理响应[J]. 植物科学学报, 2022, **40**(5): 724-732.
AILI YILINUER, CHEN X N, GAO W L, *et al.* Physiological responses of arbuscular mycorrhizal fungus- *Tamarix ramosissima* Ledeb. seedling symbionts to drought stress[J]. *Plant Science Journal*, 2022, **40**(5): 724-732.
[3] 曹美芹,陈芸芝,汪小钦,等. 荒漠森林生态系统健康评价与分析;以塔里木河下游为例[J]. 遥感信息, 2021, **36**(2): 72-80.
CAO M Q, CHEN Y Z, WANG X Q, *et al.* Evaluation and analysis of desert forest ecosystem health: Taking lower rea-

ches of Tarim River for an example[J]. *Remote Sensing Information*, 2021, **36**(2): 72-80.
[4] 张亚敏,马克明,曲来叶. 干旱条件下接种 AM 真菌对小马鞍羊蹄甲幼苗根系的影响[J]. 生态学报, 2017, **37**(8): 2 611-2 619.
ZHANG Y M, MA K M, QU L Y. Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi enhances the root system of *Bauhinia faberi* var. *microphylla* seedlings under drought stress conditions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(8): 2 611-2 619.
[5] 徐梦琦,高艳菊,张志浩,等. 骆驼刺叶片和根系主要功能性状对水分胁迫的适应[J]. 草业科学, 2021, **38**(8): 1 559-1 569.
XU M Q, GAO Y J, ZHANG Z H, *et al.* Adaptation of the main functional trait of *Alhagi sparsifolia* leaves and roots to soil water stress[J]. *Pratacultural Science*, 2021, **38**(8): 1 559-1 569.
[6] 袁祯燕,黄培佑,何兴金. 豆科植物骆驼刺研究现状及进展[J]. 安徽农业科学, 2012, **40**(18): 9 674-9 677.
YUAN Z Y, HUANG P Y, HE X J. Research status and pro-

gress on *Alhagi sparsifolia* [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, **40**(18): 9 674-9 677.

[7] 马晓东, 朱成刚, 李卫红. 多枝怪柳幼苗根系形态及生物量对不同灌溉处理的响应[J]. 植物生态学报, 2012, **36**(10): 1 024-1 032.

MA X D, ZHU C G, LI W H. Response of root morphology and biomass of *Tamarix ramosissima* seedlings to different water irrigations [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, **36**(10): 1 024-1 032.

[8] 余 洋, 张志浩, 杨建明, 等. 疏叶骆驼刺叶、根生态化学计量特征对水氮添加的响应[J]. 干旱区研究, 2022, **39**(2): 551-559.

YU Y, ZHANG Z H, YANG J M, *et al.* Stoichiometric characteristics of leaves and fine roots in *Alhagi sparsifolia* in response to the addition of nitrogen and water [J]. *Arid Zone Research*, 2022, **39**(2): 551-559.

[9] 董 硕, 阿拉木萨, 马 群, 等. 丛枝菌根真菌在荒漠化防治中的作用及应用潜力[J]. 中国沙漠, 2021, **41**(4): 70-78.

DONG S, ALAMUSA, MA Q, *et al.* The role and potential application of arbuscular mycorrhizal fungi in preventing desertification [J]. *Journal of Desert Research*, 2021, **41**(4): 70-78.

[10] 刘凯洋, 邱智军, 张巧明, 等. 丛枝菌根真菌对砷胁迫下棉花根系形态和生理特征的影响[J]. 西北植物学报, 2021, **41**(7): 1 188-1 198.

LIU K Y, QIU Z J, ZHANG Q M, *et al.* Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on root morphological and physiological characteristics of cotton under arsenic stress [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, **41**(7): 1 188-1 198.

[11] 谢丽君, 宋圆圆, 曾任森, 等. 丛枝菌根菌丝桥介导的番茄植株根间抗病信号的传递[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(5): 1 145-1 152.

XIE L J, SONG Y Y, ZENG R S, *et al.* Disease resistance signal transfer between roots of different tomato plants through common arbuscular mycorrhiza networks [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, **23**(5): 1 145-1 152.

[12] 李月灵, 金则新, 罗光宇, 等. 干旱胁迫下接种丛枝菌根真菌对七子花非结构性碳水化合物积累及 C、N、P 化学计量特征的影响[J]. 应用生态学报, 2022, **33**(4): 963-971.

LI Y L, JIN Z X, LUO G Y, *et al.* Effects of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on non-structural carbohydrate contents and C, N, P stoichiometry of *Heptacodium miconioides* under drought stress [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, **33**(4): 963-971.

[13] 蒲子天, 张 林, 张 弛, 等. 丛枝菌根真菌与植物共生影响植物水分状态的研究进展[J]. 土壤, 2022, **54**(5): 882-889.

PU Z T, ZHANG L, ZHANG C, *et al.* Research progress of arbuscular mycorrhizal fungi and plant symbiosis affecting plant water regime [J]. *Soils*, 2022, **54**(5): 882-889.

[14] SCHÜTZ L, SAHARAN K, MÄDER P, *et al.* Rate of hyphal spread of arbuscular mycorrhizal fungi from pigeon pea to finger millet and their contribution to plant growth and nutrient uptake in experimental microcosms [J]. *Applied Soil Ecology*, 2022, **169**: 104 156.

[15] 张中峰, 张金池, 黄玉清, 等. 水分胁迫和接种菌根真菌对青冈栎根系形态的影响[J]. 生态学杂志, 2015, **34**(5): 1 198-1 204.

ZHANG Z F, ZHANG J C, HUANG Y Q, *et al.* Effects of water stress and mycorrhizal fungi on root morphology of *Cyclobalanopsis glauca* seedlings [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, **34**(5): 1 198-1 204.

[16] 何跃军, 钟章成. 水分胁迫和接种丛枝菌根对香樟幼苗根系形态特征的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2012, **34**(4): 33-39.

HE Y J, ZHONG Z C. Effects of water stress and AM inoculation on root morphological characteristics in *Cinnamomum camphora* seedlings [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2012, **34**(4): 33-39.

[17] 朱珊珊, 米俊珍, 赵宝平, 等. 干旱胁迫下喷施黄腐酸对燕麦光合及其抗氧化酶活性的影响[J]. 西北植物学报, 2022, **42**(11): 1 902-1 909.

ZHU S S, MI J Z, ZHAO B P, *et al.* Effect of fulvic acid on photosynthesis and antioxidant enzyme activities of *Avena sativa* under drought stress [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, **42**(11): 1 902-1 909.

[18] 齐晨汐, 易观涛, 付晓璇, 等. 丛枝菌根真菌对干旱胁迫下鹅绒委陵菜生理指标的影响[J]. 草地学报, 2021, **29**(11): 2 407-2 412.

QI C X, YI G T, FU X X, *et al.* Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on physiological indexes of *Potentilla anserina* under drought-stress [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, **29**(11): 2 407-2 412.

[19] 李泽厚, 李蕊希, 张舒斌, 等. 多枝怪柳叶片结构和化学性状对土壤水分变化的响应[J]. 干旱区研究, 2022, **39**(5): 1 486-1 495.

LI Z H, LI R X, ZHANG S B, *et al.* Responses of leaf structural and chemical trait of *Tamarix ramosissima* to soil water changes [J]. *Arid Zone Research*, 2022, **39**(5): 1 486-1 495.

[20] CHEN X N, AILI Y, MA X D, *et al.* Mycorrhizal fungal colonization promotes apparent growth and physiology of *Alhagi sparsifolia* seedlings under salt or drought stress at vulnerable developmental stage [J]. *Plant Growth Regulation*, 2023: 1-12.

[21] 桑 钰, 高文礼, 再努尔·吐尔逊, 等. 干旱胁迫下 AMF 对多枝怪柳幼苗和疏叶骆驼刺根系生长和氮素吸收分配的影响

响[J]. 干旱区研究, 2021, **38**(1): 247-256.

SANG Y, GAO W L, ZAINUR TURSU, *et al.* Effects of drought stress and arbuscular-mycorrhizal fungi on root growth, nitrogen absorption, and distribution of two desert riparian plant seedlings[J]. *Arid Zone Research*, 2021, **38**(1): 247-256.

[22] 徐嘉美, 郭静怡, 吴 杨, 等. AM 真菌对留兰香和常夏石竹耐盐性的影响[J]. 西北植物学报, 2021, **41**(12): 2 104-2 112.

XU J M, GUO J Y, WU Y, *et al.* Effect of AM fungi on the salt tolerance of *Mentha spicata* and *Dianthus plumarius* [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, **41**(12): 2 104-2 112.

[23] 张中峰, 张金池, 黄玉清, 等. 接种菌根真菌对青冈栎幼苗耐旱性的影响[J]. 生态学报, 2016, **36**(11): 3 402-3 410.

ZHANG Z F, ZHANG J C, HUANG Y Q, *et al.* Effects of mycorrhizal fungi on the drought tolerance of *Cyclobalanopsis glauca* seedlings[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(11): 3 402-3 410.

[24] 高文礼, 陈晓楠, 伊力努尔·艾力, 等. 干旱及复水条件下接种 AMF 和根瘤菌对疏叶骆驼刺根系生长的影响[J]. 西北植物学报, 2022, **42**(7): 1 189-1 197.

GAO W L, CHEN X N, YILINUER AILI, *et al.* Effect of double inoculation of AMF and rhizobia on root growth of *Alhagi sparsifolia* under drought and rehydration conditions [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, **42**(7): 1 189-1 197.

[25] 陈爱萍, 隋晓青, 王玉祥, 等. 干旱胁迫及复水对伊犁绢蒿幼苗生长及生理特性的影响[J]. 草地学报, 2020, **28**(5): 1 216-1 225.

CHEN A P, SUI X Q, WANG Y X, *et al.* Effects of drought and re-watering on growth and physiological characteristics of *Seriphidium transiliense* seedlings[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, **28**(5): 1 216-1 225.

[26] 刘淑兰, 李 进, 马永慧, 等. 独脚金内酯对干旱胁迫下黑果枸杞种子萌发和幼苗生理变化的影响[J]. 草地学报, 2023, **31**(1): 130-139.

LIU S L, LI J, MA Y H, *et al.* Effects of strigolactones on seed germination and seedling physiological changes of *Lycium ruthenicum* under drought stress[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, **31**(1): 130-139.

[27] 王 茜, 王 强, 王晓娟, 等. 丛枝菌根网络的生态学功能研究进展[J]. 应用生态学报, 2015, **26**(7): 2 192-2 202.

WANG Q, WANG Q, WANG X J, *et al.* Research progress on ecological function of arbuscular mycorrhizal network[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(7): 2 192-2 202.

[28] 吕艳萍, 任爱天, 鲁为华, 等. 丛枝菌根真菌根外菌丝形成时间及对牧草的促生长效应[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2016, **34**(1): 41-45.

LÜ Y P, REN A T, LU W H, *et al.* Colonization time of different species of hyphal network and their effect on the growth of two forage grasses[J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2016, **34**(1): 41-45.

[29] 王幼珊, 陈 理, 张淑彬, 等. 新疆天然胡杨林和野生骆驼刺丛枝菌根真菌多样性研究初报[J]. 干旱区研究, 2010, **27**(6): 927-932.

WANG Y S, CHEN L, ZHANG S B, *et al.* Biodiversity of arbuscular mycorrhizal fungi in the natural forests of *Populus euphratica* and *Alhagi sparsifolia* in Xinjiang[J]. *Arid Zone Research*, 2010, **27**(6): 927-932.

[30] 王 斌, 任学花, 党兴东, 等. 3 种丛枝菌根真菌对沙冬青的接种效应[J]. 甘肃林业科技, 2022, **47**(2): 28-32.

WANG B, REN X H, DANG X D, *et al.* The inoculum effects of 3 arbuscular mycorrhizal fungi on *Ammopiptanthus mongolicus* [J]. *Journal of Gansu Forestry Science and Technology*, 2022, **47**(2): 28-32.

[31] FANG L F, HE X H, ZHANG X L, *et al.* A small amount of nitrogen transfer from white clover to *Citrus* seedling via common arbuscular mycorrhizal networks [J]. *Agronomy*, 2020, **11**(1): 32.

[32] MUNEEER M A, CHEN X H, MUNIR M Z, *et al.* Inter-plant transfer of nitrogen between C3 and C4 plants through common mycorrhizal networks under different nitrogen availability [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2023, **16**(2): rtac058.

[33] 赵第锐, 张瑞萍, 任丽轩, 等. 旱作水稻西瓜间丛枝菌根菌丝桥诱导水稻磷转运蛋白的表达及对磷吸收的影响[J]. 土壤学报, 2012, **49**(2): 339-346.

ZHAO D K, ZHANG R P, REN L X, *et al.* Expression of rice phosphate transporter induced by mycorrhizal hyphal links between aerobic rice and watermelon and its effects on phosphorus absorption[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, **49**(2): 339-346.

[34] 种培芳, 李航逸, 李 毅. 荒漠植物红砂根系对干旱胁迫的生理响应[J]. 草业学报, 2015, **24**(1): 72-80.

CHONG P F, LI H Y, LI Y. Physiological responses of seedling roots of the desert plant *Reaumuria soongorica* drought stress[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, **24**(1): 72-80.

[35] 王 宁, 秦 艳. AM 真菌对宿主植物三叶鬼针草根系形态的影响[J]. 安徽农业科学, 2012, **40**(1): 13-14.

WANG N, QIN Y. Effects of AM fungus on root morphology of host plant *Bidens pilosa* L[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, **40**(1): 13-14.

[36] 王如岩, 于水强, 张金池, 等. 干旱胁迫下接种菌根真菌对滇柏和楸树幼苗根系的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2012, **36**(6): 23-27.

WANG R Y, YU S Q, ZHANG J C, *et al.* Effects of mycorrhizal fungus inoculation on the root of *Cupressus duclouxiana* and *Catalpa bungei* seedlings under drought stress[J]. *Journal of Nanjing Forestry University* (Natural Sciences Edition), 2012, **36**(6): 23-27.

[37] 艾为党, 张俊伶, 李 隆, 等. 三叶草体内磷通过菌丝桥向黑麦草的传递研究[J]. *应用生态学报*, 1999, **10**(5): 615-618.

AI W D, ZHANG J L, LI L, *et al.* Phosphorus transfer via mycorrhizal hyphal links from red clover to rye grass[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, **10**(5): 615-618.

[38] 龚远博, 胡吉怀, 胡丁猛, 等. 丛枝菌根真菌对盐碱胁迫下杜梨幼苗生长和生理特性的影响[J]. *西北植物学报*, 2022, **42**(8): 1 320-1 329.

GONG Y B, HU J H, HU D M, *et al.* Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and physiological traits of *Pyrus betulifolia* under salt-alkali stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, **42**(8): 1 320-1 329.

[39] 张涵洋, 李 爱, 张卫华, 等. 镉胁迫对西瓜幼苗生长及其叶片解剖结构和生理特性的影响[J]. *西北植物学报*, 2023, **43**(3): 401-409.

ZHANG H Y, LI A, ZHANG W H, *et al.* Effects of cadmium stress on the growth, leaf anatomical structure and physiological characteristics of *Citrullus lanatus* seedlings[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2023, **43**(3): 401-409.

[40] 仲晓君, 李 强, 周喜新, 等. 3 种外源植物生长调节剂对干旱胁迫下烟草生理的影响[J]. *安徽农业大学学报*, 2017, **44**(6): 1 139-1 143.

ZHONG X J, LI Q, ZHOU X X, *et al.* Effects of three exogenous plant growth regulators on tobacco physiology under drought stress[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2017, **44**(6): 1 139-1 143.

[41] AILI Y, CHEN X N, GAO W L, *et al.* Response of *Alhagi sparsifolia* seedlings to AMF inoculation and nitrogen addition under drought stress[J]. *Atmosphere*, 2023, **14**(3): 446.

[42] DING C H, ZHAO Y, ZHANG Q R, *et al.* Cadmium transfer between maize and soybean plants via common mycorrhizal networks[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, **232**: 113 273.

[43] 方林林, 周昀晖, 杨春雪. 丛枝菌根-黑心菊共生体对盐碱逆境的生理响应特性[J]. *西北植物学报*, 2023, **43**(3): 421-431.

FANG L L, ZHOU Y H, YANG C X. Physiological characteristics of arbuscular mycorrhiza-*Rudbeckia hirta* symbiont under saline-alkali stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2023, **43**(3): 421-431.

[44] 曹镭镭, 曹基武, 刘 佳, 等. 干旱胁迫对多花黄精叶片光合特性的影响[J]. *西北植物学报*, 2023, **43**(4): 638-647.

CAO L B, CAO J W, LIU J, *et al.* Effects of drought stress on the leaf photosynthetic characteristics of *Polygonatum cyrtoneura* [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2023, **43**(4): 638-647.

[45] 王明慧, 马晓东, 张瑞群, 等. 塔里木河下游多枝怪柳幼苗生长和光合生理指标对输水漫溢的响应特征[J]. *西北植物学报*, 2016, **36**(10): 2 038-2 046.

WANG M H, MA X D, ZHANG R Q, *et al.* Response of growth dynamic and photosynthetic characteristics of *Tamarix ramosissima* seedlings to river flooding in the lower reaches of Tarim River[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2016, **36**(10): 2 038-2 046.

[46] 庞进平, 王永生. 油菜幼苗光合及叶绿素荧光参数对干旱胁迫的响应及其抗旱性分析[J]. *西北植物学报*, 2023, **43**(2): 276-284.

PANG J P, WANG Y S. Photosynthetic and chlorophyll fluorescence responses of rape seedlings to drought stress and its drought resistance evaluation[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2023, **43**(2): 276-284.

[47] TANG H Y, HASSAN M U, FENG L A, *et al.* The critical role of arbuscular mycorrhizal fungi to improve drought tolerance and nitrogen use efficiency in crops[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, **13**: 919 166.

[48] MUNEEB M A, WANG P, ZHANG J, *et al.* Formation of common mycorrhizal networks significantly affects plant biomass and soil properties of the neighboring plants under various nitrogen levels[J]. *Microorganisms*, 2020, **8**(2): 230.

(编辑:潘新社)