

接种丛枝菌根真菌对干旱胁迫下木棉幼苗地上部水分供应的影响

马 坤¹, 杨建军², 李 璐¹, 马焕成¹, 王彦淇¹, 王 颖¹

(1. 西南林业大学 国家林业局西南地区生物多样性保育重点实验室, 云南 昆明 650224;

2. 云南省林业调查规划院 大理分院, 云南 大理 671000)

摘 要:以接种和不接种丛枝菌根真菌木棉幼苗为试材,采用盆栽试验的方法,研究了不同干旱胁迫对不同处理下木棉幼苗的根茎叶水分特征及其生长和生理生化特征,以期探究干旱河谷中的木棉(*Bombax ceiba* L.)普遍存在与丛枝菌根真菌(AMF)的共生系统是否是它对干旱环境适应的策略之一。结果表明:对照条件下接菌植株根系干质量是未接菌植株的2.2倍,重度干旱胁迫下,接菌植株的根系干质量是未接菌植株的2倍,接菌有助于植株根系的生长,增加根系对水分的吸收效率。接菌植株在中度干旱胁迫下避免了植株的“茎干缩”,重度胁迫下减轻了“茎干缩”,且接菌植株茎含水率是未接菌植株的1.95倍,接菌提高了植株茎干的吸水保水能力。在重度干旱胁迫下,接菌加速了植株调节体内游离氨基酸和丙二醛(MDA)含量,较未接菌植株提前了约18 d,且未接菌植株MDA含量的最大值是接菌植株的1.5倍;接菌植株脯氨酸含量的最大值是未接菌植株的1.4倍,接种显著增加了渗透物质含量并减少了细胞的伤害,提高了植物叶片的保水能力。可见,接种AMF可改善木棉幼苗干旱胁迫下根茎的水分供应和叶片水分维持能力,同时也增加渗透调节物质以降低水势,减少水分蒸散作用,启动调节系统提前清除细胞有害物质,减少对细胞膜的伤害,提高了木棉的抗旱性。

关键词:木棉;丛枝菌根真菌(AMF);干旱胁迫

中图分类号:S 685.99 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2017)16-0095-07

丛枝菌根真菌(*Arbuscula mycorrhizal fungi*, AMF)能与90%的植物形成互惠共生体^[1-2],提高植物在盐碱、干旱等逆境中的生存能力。干旱胁迫条件下AMF高效的营养物质吸收和转运

系统,提高了植物养分吸收效率^[3-4];调节根系水力导度,改变进出植物的水流速率,增加叶片水势,缓解了干旱胁迫对宿主植物造成的伤害^[4-7]。AMF促使植物产生较多的抗氧化分子或抗氧化酶,发出的生长调节信号诱导气孔关闭以减少水分蒸腾耗散^[8-9],提高植物的光合速率^[10]。

木棉(*Bombax ceiba* L.)属木棉科(Bombacaceae)落叶大乔木,是干热河谷的河谷型萨王纳植被的建群种,许多植物在该区域难以存活,造成许多生态恢复造林保存率过低^[11-13]。木棉在干热河谷地区长势良好,表现出较好的适应性^[14],对该地区生态恢复具有重要作用。对云南干热河谷地区木棉丛枝菌根真菌的调查发现,AMF普遍分布于干热河谷地区野生木棉根及根

第一作者简介:马坤(1990-),男,硕士研究生,研究方向为生态公益林培育理论与技术。E-mail: makunweige@qq.com.

责任作者:李璐(1974-),女,博士,副研究员,研究方向为植物适应与进化。E-mail: lilusaraca@foxmail.com.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31260175, 31560207);云南省教育厅科学研究基金产业化培育资助项目(2016CYH14);云南省“云岭教学名师”培育和云南省省级重点学科(林学)共同资助项目。

收稿日期:2017-03-07

际周围^[15]。目前,干旱胁迫下,接种 AMF 对枳、连翘、紫穗槐、柠条锦鸡儿等已经做了相关研究,发现接种 AMF 在干旱胁迫下提高了植株的生物量,促进了植株的生长,降低 MDA 含量,调节脯氨酸渗透调节物质等,从而提高植株的抗旱能力^[10,16-21]。木棉在干热河谷能正常生长和适应极端干热的环境是否与其根系共生的丛枝菌根真菌有关有待进一步研究。现以木棉为试验材料,采用盆栽试验的方法,探索接菌处理和后期干旱胁迫处理下幼苗的生长和生理生化参数的变化规律,阐明 AMF 与木棉抗旱性的生理机制,旨在为干热河谷地区水土保持和植被恢复提供一定的参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料采集于云南省红河州个旧市保和乡冷墩村,收集野生木棉 0~40 cm 土层内细根(<2 mm)处的接菌土、孢子、灭菌土等。取当年成年母树成熟种子培养幼苗。

1.2 试验方法

孢子收集和扩繁,采用湿筛-倾析法收集土壤中的丛枝菌根真菌的孢子,用三叶草进行扩繁,单盆接种丛枝菌根孢子 20 个,扩繁期间使用无菌水浇水,扩繁后,获取每克土壤有丛枝菌孢子 100 个的接菌土。

对饱满木棉种子进行消毒处理后,在超菌工作台内接种到灭菌的培养皿后放到人工气候箱进行催芽。露白后播种到培养盆中,设置 2 个处理。接菌处理 AMF(AM):2.85 kg 灭菌土和 0.15 kg 菌土。不接菌处理(NO,对照):3 kg 灭菌土,共播种 108 盆。对生长 5 个月高约 10 cm 苗木进行干旱胁迫处理:对照处理 CK(为 70%~65%,土壤相对田间持水量含水率(RFWC))、中度胁迫 MS(50%~45%)、重度胁迫 SS(35%~30%)。共计 6 个处理。

1.3 项目测定

水分控制:采用称重法控水,每天傍晚称质量后补充水分。

生长测定:在干旱胁迫开始时和干旱胁迫后第 5、15、25、35、45、55 天时分别测定每个处理左

起第 1、4、7、10、13 盆木棉植株的苗高、地径,其中,增长量=测定值-初始值。干旱处理末期收获每个处理左起第 3、9、17 盆整个植株和掉落的叶片,分根、茎、叶测定干质量和含水率。

生理测定:分别于干旱胁迫后第 1、3、5、7、25、45 天从下往上采集每个处理其余盆的叶片,采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛(MDA)含量,磺基水杨酸提取茚三酮显色法测定游离脯氨酸含量,水合茚三酮法测定游离氨基酸含量^[22],称重法测定含水率,每个指标 3 次重复。

1.4 数据分析

采用 SPSS 21.0 软件进行数据统计分析、Sigmaplot 12.0 软件制图。运用单因素和多因素方差分析法分析。

2 结果与分析

2.1 接种 AMF 条件下木棉植株对干旱胁迫的生长响应

由表 1 地径、苗高在不同干旱胁迫下的显著性可以看出,接菌对干旱胁迫第 15、35、45、55 天地径增长量影响差异显著($P(AM)<0.05$),对干旱胁迫期间苗高增长量影响差异不显著($P(AM)>0.05$)。干旱胁迫期间,接菌和干旱胁迫对苗高和地径增长量无显著交互作用($P(W\times AM)>0.05$)。

在 CK 中,干旱胁迫期间接菌株地径增长量均大于未接菌株,第 15、35、45、55 天接菌株苗高增长量大于未接菌株。在中度和重度胁迫下,接菌株地径增长量均大于未接菌株。中度胁迫下,除第 15 天外,接菌株苗高增长量大于未接菌株;重度胁迫下,除第 5 天外,接菌株地径增长量小于未接菌株。

在 CK 中,植株苗高、地径增长量随胁迫时间逐渐增大。中度胁迫下,接菌株地径约在第 25 天停止生长,未接菌株约在第 15 天停止生长;苗高均约在第 45 天停止生长。重度胁迫下,接菌株和未接菌株地径均约在第 5 天停止生长;接菌株苗高约在第 15 天停止生长,未接菌株约在第 25 天停止生长。中度胁迫下的未接菌株和重度胁迫下的植株地径增长量为负值,即出现了“茎干缩”现象。

表 1 接种 AMF 后干旱胁迫对植株地径、苗高增长量变化

Table 1 Influence of drought stress on diameter and plant height changes of plants after AMF inoculation

指标	干旱胁迫	接种	胁迫时间 Stress time/d					
Index	Drought stress	Inoculation	5	15	25	35	45	55
地径 Diameter /mm	CK	AM	0.30±0.44abD	0.57±0.27aCD	0.71±0.25aCD	0.89±0.28aBC	1.20±0.32aAB	1.38±0.45aA
		NO	0.23±0.21abC	0.33±0.24abcBC	0.69±0.52aABC	0.81±0.58aABC	0.91±0.61abAB	1.00±0.68abA
	MS	AM	0.40±0.37aA	0.47±0.38abA	0.51±0.37aA	0.49±0.34aA	0.46±0.31bA	0.42±0.31bA
		NO	0.11±0.12abA	0.09±0.22bcdA	-0.01±0.19bA	-0.05±0.27bA	-0.15±0.41cA	-0.26±0.41cA
	SS	AM	0.14±0.18abA	-0.03±0.22cdAB	-0.14±0.26bABC	-0.23±0.29bABC	-0.38±0.37cBC	-0.46±0.44cC
		NO	-0.02±0.39bA	-0.11±0.46dA	-0.34±0.52bA	-0.58±0.66bA	-0.55±0.67cA	-0.73±0.64cA
	显著性 Significance	P(W)	0.223	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
		P(AM)	0.099	0.032	0.061	0.032	0.029	0.014
		P(W×AM)	0.666	0.515	0.274	0.429	0.520	0.598
	苗高 Plant height /cm	CK	AM	0.63±0.40aE	1.17±0.44aDE	1.40±0.53aCD	1.92±0.55aBC	2.35±0.48aAB
NO			0.75±0.66aB	1.13±0.81aAB	1.58±1.14aAB	1.85±0.95aAB	2.13±0.90aA	2.25±0.91abA
MS		AM	0.58±0.64aA	0.17±1.46aA	1.40±1.31aA	1.50±1.29abA	1.57±1.39abA	1.58±1.37bcA
		NO	0.25±0.39aB	0.47±0.55aAB	0.65±0.44aAB	0.88±0.46abA	0.95±0.45bA	0.92±0.50cA
SS		AM	0.25±0.16aB	0.50±0.44aAB	0.58±0.38aA	0.58±0.38bA	0.58±0.38bA	0.58±0.38bA
		NO	0.50±0.58aA	0.82±0.69aA	1.02±0.86aA	1.02±0.86abA	1.02±0.86bA	1.02±0.86cA
显著性 Significance		P(W)	0.263	0.330	0.146	0.010	0.001	0.000
		P(AM)	0.948	0.611	0.877	0.761	0.630	0.217
		P(W×AM)	0.345	0.310	0.218	0.302	0.302	0.305

注：同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著，同行不同大写字母表示在 0.05 水平差异显著， $P(W)<0.05$ 表示干旱胁迫下在 5% 水平上差异显著， $P(AM)<0.05$ 表示接种 AM 下在 5% 水平上差异显著， $P(W\times AM)<0.05$ 表示干旱胁迫和接种 AM 具有显著交互作用， $P<0.01$ 表示差异极显著。下同。

Note: In the same column indicates significant difference at 0.05 level, while the capital letters in the same row indicates significant difference at 0.05 level. $P(W)<0.05$ show drought stress at 0.05 level, $P(AM)<0.05$ show AMF inoculation at 0.05 level, $P(W\times AM)<0.05$ show drought stress and AMF inoculation have the significant interactions. The same below.

综上所述，CK 接菌处理促进了苗高和地径的生长。中度胁迫下，接菌延长了地径停止生长的时间，约 10 d，避免了“茎干缩”。重度胁迫下，接菌株较未接菌株提前 10 d 停止高生长，减缓了“茎干缩”。从地径、苗高的生长状况可以看出，接菌提高了植株的避旱性和耐旱性。

由图 1 干旱胁迫末期不同处理根茎叶干质量可知，除重度胁迫下未接菌株叶>根>茎外，其余

的同一处理根>叶>茎，植株的质量主要集中在根系。在 CK 中，接菌株根系干质量为非接菌株的 2.2 倍，为 4.914 g；茎干质量约为非接菌株的 1.8 倍，为 0.918 g。中度胁迫下，接菌株根、茎、叶干质量均大于未接菌株。重度胁迫下，接菌株根系干质量是未接菌株的 2 倍，为 0.919 g；叶片干质量大于未接菌株；茎干质量与未接菌株差异不大，接菌显著的促进了植株根系的生长。

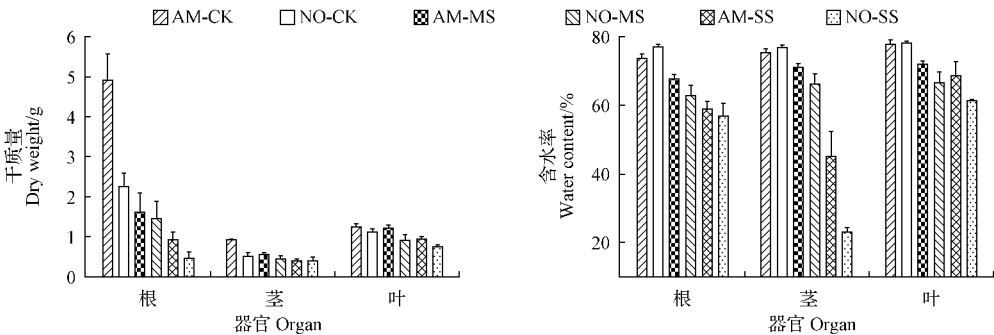


图 1 接种 AMF 后干旱胁迫对各处理末期根、茎、叶的干质量和含水率的影响

Fig. 1 Effects of water stress on the dry weight of root, stem and leaf and water content in last stage after AMF inoculation

由图 1 干旱胁迫末期各处理根茎叶含水率可知,CK 接菌处理株根、茎、叶含水率小于未接菌株,植株含水率叶>茎>根。中度胁迫下,接菌株根、茎、叶含水率大于未接菌株;植株的茎、叶含水率大于根系,接菌提高了植株的含水率,改善了植株地上部水分的供应。重度胁迫下,接菌株根、茎、叶含水率大于未接菌株,植株含水率叶>根>茎,接菌株茎含水率是未接菌株的 1.95 倍,接菌显著的提高了茎的含水率。从图 2 叶片含水率随干旱时间的变化可以看出,干旱胁迫期间接菌株含水

率大于未接菌株,植株叶片含水率在干旱胁迫期间变化不大,接菌在一定程度上提高了叶片含水率。

由表 2 干旱胁迫末期各处理根茎叶干质量、含水率的双因子方差分析可知,接菌对根干质量和茎含水率影响差异极显著($P(AM) < 0.01$),对茎、叶干质量和根、叶含水率影响差异显著($P(AM) < 0.05$)。接菌和干旱胁迫对根、茎干质量和茎、叶含水率有显著的交互作用($P(W \times AM) < 0.05$)。接菌促进了植株的生长,提高了植株根茎叶含水率。

表 2 接种 AMF 后干旱胁迫对各处理末期根、茎、叶的干质量和含水率的双因子方差分析

Table 2 Double factor variance analysis of the dry weight of root, stem and leaf and water content under water stress in last stage after AMF inoculation

指标 Index	显著性 Significance	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf
干质量 Dry weight	$P(W)$	0.000	0.002	0.008
	$P(AM)$	0.007	0.010	0.010
	$P(W \times AM)$	0.020	0.038	0.613
含水率 Water content	$P(W)$	0.008	0.000	0.002
	$P(AM)$	0.010	0.007	0.010
	$P(W \times AM)$	0.613	0.020	0.038

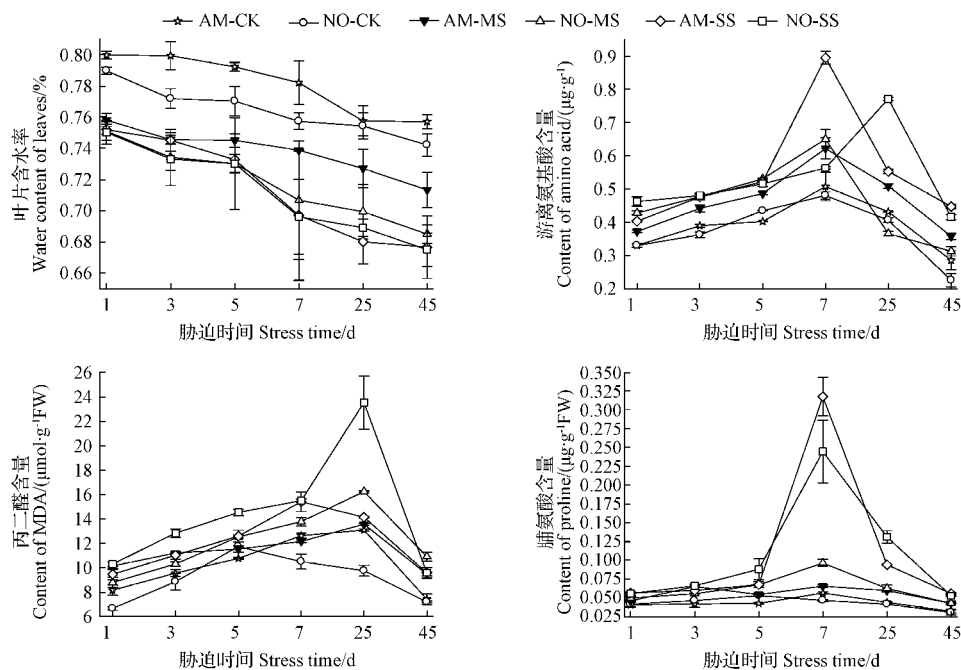


图 2 接种 AMF 后干旱胁迫对不同时期植株叶片含水量、游离氨基酸含量、丙二醛含量、游离脯氨酸含量的影响

Fig. 2 Effects of water stress on the water content of leaves, MDA content, amino acid content, proline content of host plants in different stages after AMF inoculation

2.2 接种 AMF 后干旱胁迫对木棉植株叶片渗透调节物质和丙二醛含量的影响

从图 2 不同干旱时期游离氨基酸含量可以看

出,中度胁迫下,游离氨基酸含量在干旱胁迫第 7 天达到最大值,接菌株含量小于未接菌株;在干旱胁迫的第 25、45 天,接菌株含量大于未接菌株。

重度胁迫下,接菌株游离氨基酸含量在第 7 天达到最大值,未接菌株在第 25 天达到最大值,提前约 18 d。表明当植株受到中度胁迫时,接菌有助于调节植株体内游离氨基酸含量使其维持在一个相对较高的水平;重度胁迫下,促使植株体内游离氨基酸含量快速达到一个较高水平,从而提高植株渗透调节能力。

从图 2 不同干旱时期脯氨酸含量可知,在中度和重度胁迫下,脯氨酸含量均在干旱胁迫的第 7 天达到最大值,中度胁迫下接菌株含量小于未接菌株。重度胁迫下,接菌株含量的最大值约为未接菌株的 1.4 倍,为 $0.317\ 5\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$ 。中度干旱胁迫下,接菌同样有助于调节植株体内游离氨基酸含量使其维持在一个相对较高的水平;重度胁迫下,显著增加了植株体内脯氨酸含量,提高植株的渗透调节能力。

从图 2 不同干旱时期 MDA 含量可以看出,中度胁迫下,MDA 含量在第 25 天达到最大值,从干旱胁迫第 5~45 天,未接菌株含量大于接菌株。重度胁迫下,接菌株 MDA 含量在干旱胁迫第 7 天达到最大值,未接菌株在第 25 天达到最大

值,提前约 18 d 且未接菌株 MDA 含量最大值是接菌株的 1.5 倍,为 $23.538\ 5\ \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$ 。说明,干旱胁迫下接菌降低了植株体内 MDA 含量,尤其当植株受到重度胁迫时能快速降低植株体内 MDA 含量,并使其维持在较低水平,清除细胞有害物质,减少了对细胞膜的伤害,提高了植株的抗旱性。

由表 3 不同干旱时期丙二醛、游离脯氨酸、氨基酸含量双因子方差分析可知,同一水分条件下,接菌株和未接菌株丙二醛含量在干旱胁迫的第 1、5、25 天差异显著,游离脯氨酸含量在干旱胁迫的第 5、25 天差异显著,游离氨基酸含量在干旱胁迫的第 1、5、7、25、45 天差异显著($P(\text{AM}) < 0.05$),其余时间差异不显著。干旱胁迫和接种 AMF 在干旱胁迫的第 1、3、7、25 天对植株的 MDA 有显著的交互作用,在干旱胁迫的第 3、25 天对植株的游离脯氨酸含量具有显著的交互作用,在干旱胁迫的第 1、3、5、7、25 天对植株游离氨基酸含量有显著的交互作用($P(\text{W}\times\text{AM}) < 0.05$),其余时间无显著交互作用。

表 3 接种 AMF 后干旱胁迫对不同时期丙二醛、游离脯氨酸、氨基酸含量双因子方差分析

Table 3 Double factor variance analysis of the contents of MDA,proline,amino acid under water stress in different stage after AMF inoculation

指标 Index	显著性 Significance	胁迫时间 Stress time/d					
		1	3	5	7	25	45
丙二醛含量 Content of MDA/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW})$	$P(\text{W})$	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
	$P(\text{AM})$	0.035	0.819	0.005	0.705	0.002	0.195
	$P(\text{W}\times\text{AM})$	0.009	0.005	0.517	0.005	0.000	0.080
脯氨酸含量 Content of proline/ $(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW})$	$P(\text{W})$	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
	$P(\text{AM})$	0.480	0.858	0.011	0.312	0.002	0.354
	$P(\text{W}\times\text{AM})$	0.558	0.007	0.676	0.067	0.001	0.752
氨基酸含量 Content of amino acid/ $(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	$P(\text{W})$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	$P(\text{AM})$	0.000	0.515	0.000	0.000	0.004	0.006
	$P(\text{W}\times\text{AM})$	0.003	0.003	0.000	0.000	0.000	0.710

3 讨论与结论

该试验结果表明,木棉苗期的生长主要集中在根部且接菌促进了根系的生长,CK 中接菌株根系干质量为未接菌株的 2.2 倍,重度胁迫下是未接菌株的 2 倍(图 1),增加了根系对水分的吸收效率,为植株在逆境中生存提供了保障。接菌使植株在中度胁迫下避免了“茎干缩”,重度胁迫

下减轻了“茎干缩”且接菌株含水率是未接菌株的 1.95 倍(表 1、图 1)。中度胁迫下,植株水分优先供应茎和叶,即地上部分;重度胁迫下,水分优先供应叶片和根系(图 1),避免了叶片因过度失水而严重萎蔫,接菌改善了这一水分供应过程,增强了植株的耐旱性。BOOMSMA 等^[5]研究表明,接种 AMF 能够改善宿主植物水分状况,提高水分利用效率,增强植物的耐旱性。对柠条锦鸡儿的

研究中发现,室内自然干燥条件下,接种株叶片保水能力好于未接种株,特别是干旱后期,接种株叶片保水能力显著优于未接种株^[20],究其原因接种菌促进了植株根系的生长,改善了植株地上部分水分的供应。

MDA可降低膜的稳定性,增加膜的透性,导致叶绿体受损,进一步影响光合作用。干旱胁迫下,植株会主动调动保护系统来调节MDA的形成,从而减轻细胞膜脂过氧化伤害。试验发现,干旱胁迫下接菌降低了植株体内MDA含量,当植株受到重度胁迫时能快速降低植株体内MDA含量,并使其维持在较低水平(图2),这与前人研究发现接种AMF可以减少膜脂过氧化产物MDA的合成,提高植株的抗旱性结果相一致^[16,18-20]。干旱胁迫下,植株可通过合成大量脯氨酸来增强植株的渗透调节作用,从而对酶、抗逆性蛋白及生物膜起保护作用,因此,脯氨酸含量常被用来衡量植物遭受干旱的强弱程度^[21]。同时,叶片中游离氨基酸不断积累,参与渗透调节、离子运输和自由基清除等,可有效缓解叶肉细胞受到的生理伤害^[23]。试验结果显示,中度胁迫下,接菌有助于调节植株体内游离氨基酸、脯氨酸含量使其维持在一个相对较高的水平。重度胁迫下,接菌株脯氨酸含量约为未接菌株的1.4倍,接菌促使植株体内游离氨基酸含量提前18d达到一个较高水平(图2),提高了植株的渗透调节能力。

接菌促进了植株根系的生长,有助于植株对水分的吸收。同时,接菌改善了植株体内水分的供应,避免了中度胁迫下“茎干缩”和减轻了重度胁迫下“茎干缩”,避免叶片应过度失水而严重萎蔫。此外,接菌使得植株受到严重胁迫时能迅速降低MDA含量和提高游离氨基酸含量,提高脯氨酸含量,降低植株膜脂过氧化产物和增强植株的渗透调节能力,从而提高植株的抗旱能力。该研究为今后利用菌根生物技术恢复干热河谷地区植被生态环境提供了参考依据。

参考文献

- [1] GRÜMBERG B C, URCELAY C, SHROEDER M A, et al. The role of inoculum identity in drought stress mitigation by arbuscular mycorrhizal fungi in soybean[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2015, 51(1): 1-10.
- [2] SMITH S E, SMITH F A. Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutrition and growth: New paradigms from cellular to ecosystem scales[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2011, 62: 227-250.
- [3] ZHAO R X, GUO W, BI N, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi affect the growth, nutrient uptake and water status of maize (*Zea mays* L.) grown in two types of coal mine spoils under drought stress[J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 88: 41-49.
- [4] 李涛, 杜娟, 郝志鹏, 等. 丛枝菌根提高宿主植物抗旱性分子机制研究进展[J]. *生态学报*, 2012, 32(22): 7169-7176.
- [5] BOOMSMA C R, VYN T J. Maize drought tolerance: Potential improvements through arbuscular mycorrhizal symbiosis[J]. *Field Crops Research*, 2008, 108: 14-31.
- [6] HODGE A, BERTA G, DOUSSAN C, et al. Plant root growth, architecture and function[J]. *Plant and Soil*, 2009, 321: 153-187.
- [7] LIU T, SHENG M, WANG C Y, et al. Impact of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth, water status, and photosynthesis of hybrid poplar under drought stress and recovery[J]. *Photosynthetic*, 2015, 53(2): 250-258.
- [8] SHVALEVA A L, SILVA F C E, BREIA E, et al. Metabolic responses to water deficits in two *Eucalyptus globulus* clones with contrasting drought sensitivity[J]. *Tree Physiology*, 2006, 26: 239-248.
- [9] HABERER K, HERBINGER K, ALEXOU M, et al. Effects of drought and canopy ozone exposure on antioxidants in fine roots of mature European beech (*Fagus sylvatica*) [J]. *Tree Physiology*, 2008, 28: 713-719.
- [10] 宋会兴, 彭远英, 钟章成. 干旱生境中接种丛枝菌根真菌对三叶鬼针草 (*Bidens pilosa* L.) 光合特征的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(8): 3744-3751.
- [11] 金振洲, 欧晓昆. 干热河谷植被[M]. 昆明: 云南大学出版社, 2000.
- [12] 赵高卷, 徐兴良, 马焕成, 等. 红河干热河谷木棉种群的自然更新[J]. *生态学报*, 2016, 36(5): 1342-1350.
- [13] RUTTEN G, PRATI D, HEMP A, et al. Plant-soil feedback in East-African savanna trees[J]. *Ecology*, 2016, 97(2): 294-301.
- [14] 谢保富. 干热河谷地区的英雄树-木棉[J]. *云南林业*, 1985, 28(2): 1-5.
- [15] 伍建榕, 汪洋, 赵春燕, 等. 云南干热河谷地区木棉科植物丛枝菌根真菌的调查研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2014(1): 205-210.
- [16] 吴强盛, 夏仁学, 胡正嘉. 丛枝菌根对枳实生苗抗旱性的影响研究[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(3): 459-463.
- [17] 赵平娟, 安锋, 唐明. 丛枝菌根真菌对连翘幼苗抗旱性的影响[J]. *西北植物学报*, 2007, 27(2): 396-399.
- [18] 陈婕, 谢靖, 唐明. 干旱胁迫下丛枝菌根真菌对紫穗槐生长和抗旱性的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2014, 36(6): 142-148.
- [19] 秦子烟, 朱敏, 郭涛. 干旱胁迫下丛枝菌根真菌对玉米生理生化特性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(2): 510-516.

[20] 贺学礼,刘妮,安秀娟. 干旱胁迫下 AM 真菌对柠条锦鸡儿 (*Caragana korshinskii*) 生长和抗旱性的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(1): 47-52.

[21] 贺学礼,高露,赵丽莉. 干旱胁迫下丛枝菌根 AM 真菌对民勤绢蒿生长与抗旱性的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(4): 1029-1037.

[22] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社, 2006: 211-228.

[23] 燕辉,彭晓邦,薛建杰. NaCl 胁迫对花棒叶片光合特性及游离氨基酸代谢的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(7): 1790-1796.

Inoculation of *Arbuscula Mycorrhizal Fungi* Improved Water Supply in Aboveground Part of *Bombax ceiba* Seedling Under Drought Stress

MA Kun¹, YANG Jianjun², LI Lu¹, MA Huancheng¹, WANG Yanqi¹, WANG Ying¹

(1. Key Laboratory of Biodiversity Conservation in Southwest China, State Forestry Administration, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224; 2. Dali Branch, Yunnan Institute of Forestry Inventory and Planning, Dali, Yunnan 671000)

Abstract: The plants of *Bombax ceiba* always have a symbiotic system with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in the dry-hot valley. To study whether the symbiotic system one of the key strategies when plants adapting to the drought stress, a series of pot experiment was carried out to determine whether the AMF could affect the growth and the physiological process in *B. ceiba* under drought stress. The data on the characteristics of water content, growth and physiology, biochemistry of the root, stem and leaf was analyzed. It turned out that plants could benefit from the symbiotic system under drought stress. Firstly, the inoculation of AMF could improve the growth. Under no drought stress, the amount of the dry weight of roots with inoculation of AMF was 2.2 times of those without inoculation. Simultaneously, under severe drought condition, the amount of dry weight of roots with inoculation of AMF was 2 times of those without inoculation of AMF. It indicated that inoculation of AMF enhanced the yield of the root system and increased the efficiency of water absorption. Secondly, inoculation of AMF was helpful to avoid the stem shrinkage under drought stress. It reduced the loss of water contained in stem. Under the severe drought stress, the amount of water content in the inoculated plants was 1.95 times of those without inoculation. So, inoculation of AMF contributed to improving the capacity of water absorption and containing. Thirdly, inoculation of AMF accelerated the accumulation speed of the contents of amino acid and MDA. The peak of their contents appeared 18 days earlier in inoculated plants than those in non-inoculated plants under severe stress. The maximum contents of MDA and proline in inoculated plants were 1.5 times and 1.4 times of those without inoculation under drought stress. It was obvious that AMF significantly increased the penetration levels and reduced cell damages, and improved the water retention capacity of plant leaves. Therefore, it could be suggested that inoculation of AMF could improve the drought resistance in *B. ceiba* by increasing the plant growth and water absorption and retaining and accelerating the osmotic regulation by accumulating the MDA and proline.

Keywords: *Bombax ceiba* L.; arbuscula mycorrhizal fungi; drought stress