

AM 真菌和施钾对宁夏枸杞响应干旱胁迫的交互影响

韦素贞¹,张好强²,胡文涛¹,张翔宇²,唐 明^{2*}

(1. 西北农林科技大学 生命科学院,陕西 杨陵 712100;2. 西北农林科技大学 林学院,陕西 杨陵 712100)

摘 要:通过盆栽控水法研究干旱条件下接种丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungus, AMF)根内球囊霉(*Rhizophagus irregularis*, Ri)和施钾对宁夏枸杞生长、各组织中钾元素含量、叶片抗氧化酶活性及叶绿素荧光参数的影响。结果表明:干旱条件下,随着施钾量的升高,AMF 侵染率逐渐升高;AMF 和施钾均不同程度地影响了宁夏枸杞的生长,提高了宁夏枸杞根和叶中的钾元素含量。干旱条件下,施钾显著提高了宁夏枸杞叶片的 PS II 最大光化学量子产量(F_v/F_m)、PS II 实际光化学量子产量($\Phi PS II$)、光合电子传递速率(ETR),降低了非光化学猝灭系数(qN); AMF 在不同施钾水平下均显著提高了宁夏枸杞叶片的 F_v/F_m 、 $\Phi PS II$ 、 ETR 、光化学猝灭系数(qP),降低了 qN 。干旱胁迫时,随着施钾量的升高,宁夏枸杞叶片的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)活性增强,过氧化氢酶(CAT)活性变化不显著;在施钾量 2 mmol 时,AMF 显著提高了叶片 POD、SOD 的酶活性。因此,AMF 和钾能够通过调控植物体的营养状况、提高植物的抗氧化酶系统活性和改善植物对光能的利用效率帮助植物抵御干旱胁迫,双因素方差分析结果显示接种 AMF 比施钾的效果更显著。

关键词:丛枝菌根真菌;钾;宁夏枸杞;干旱胁迫;抗氧化酶;叶绿素荧光参数

中图分类号:S763.15 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2016)05-0165-06

Interactive Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungus and Potassium Application on Response of *Lycium barbarum* to Drought Stress

WEI Su-zhen¹,ZHANG Hao-qiang²,HU Wen-tao¹,ZHANG Xiang-yu²,TANG Ming^{2*}

(1. College of Life Sciences, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In current study, the influence of arbuscular mycorrhizal fungus (AMF) (*Rhizophagus irregularis*) inoculation and potassium application on growth, potassium content of different tissues, activities of antioxidative enzymes in leaf and the chlorophyll fluorescence parameters of *Lycium barbarum* responding to drought stress were assessed. The results showed that mycorrhizal colonization rates increased as the increase of potassium application under drought stress, growth and potassium content in roots and leaves of *L. barbarum* were improved by AMF and potassium application. Potassium application significantly increased the F_v/F_m , $\Phi PS II$, ETR and decreased the qN of leaf under drought stress. Under drought stress, AMF significantly enhanced the F_v/F_m , $\Phi PS II$, ETR , qP at different potassium levels, and significantly reduced the qN . The SOD, POD activities were enhanced significantly as the rise of potassium levels under drought stress, except for the CAT activity. The SOD, POD activities in leaves were only significantly improved by AMF at 2 mmol potassium level. Therefore, AMF and potassium application could help plants to

收稿日期:2015-11-06 修回日期:2015-12-07

基金项目:林业公益性行业科研专项经费项目(201404217);国家自然科学基金项目(31170567);西北农林科技大学博士科研启动基金(Z109021503)。

作者简介:韦素贞,女,在读硕士,研究方向:微生物生态学。E-mail: 377478401@qq.com

*通信作者:唐 明,女,博士,教授,博士生导师,研究方向:森林微生物学。E-mail: tangmingyl@163.com

resist drought stress by regulating nutrition status, increasing anti-oxidant enzymes activities and improving light energy use efficiency, and the result of two-way ANOVA indicated that the effects of AMF were better than potassium application.

Key words: arbuscular mycorrhizal fungus; potassium; *Lycium barbarum*; drought stress; antioxidant enzyme; chlorophyll fluorescence parameter

丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungus, AMF)是一类能与陆地上约 80%的植物形成共生体(丛枝菌根)的土壤微生物^[1]。研究表明,AMF 能够提高植物对营养元素的吸收^[2],增强植物的抗旱性^[1,3]。唐明^[4]等和赵平娟^[5]等发现接种 AMF 能够提高沙棘(*Hippophae rhamnoides*)和连翘(*For-sythia suspensa*)的超氧化物歧化酶(SOD)活性,降低干旱对沙棘和连翘细胞膜的伤害。田帅^[6]等和 Li^[7]等研究表明,干旱胁迫条件下,AMF 能够通过提高植物的光合作用能力和光能利用效率来增强其适应水分胁迫的能力。陈婕^[8]等研究发现,接种 AMF 可以通过稳定紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)叶绿素荧光参数,增强其抗旱性。

赵方贵^[9]等研究表明,在常钾和低钾条件下,AMF 可以提高烟草(*Nicotiana tabacum*)根部和叶片中的钾元素含量,促进其生长;Nisha^[10]等发现在干旱条件下接种 AMF 和施钾,使瓜尔豆(*Cyamop-sis tetragonoloba*)叶片的总叶绿素含量、酸性和碱性磷酸酶活性提高,减轻了干旱胁迫对其造成的伤害;张海涵^[11]研究表明,干旱条件下 AMF 通过提高宁夏枸杞叶片的光合参数、改变根系形态和叶片形态来提高其抗旱性。然而,接种 AMF 和施钾对宁夏枸杞响应干旱胁迫的交互影响的研究还未见报道。本研究利用盆栽控水法模拟干旱胁迫,探究接种 AMF 和施钾对宁夏枸杞响应干旱胁迫的交互影响。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试真菌 根内球囊霉(*Rhizophagus ir-regularis*, Ri),由西北农林科技大学林学院微生物研究室提供,经玉米扩繁,以孢子(每 1 g 接种剂含 10 个孢子)、菌丝及侵染根段作为接种体。

1.1.2 供试植物 宁杞 1 号(*L. barbarum*)种子,由宁夏农林科学院枸杞研究所提供。种子用 2%的 NaClO 表面消毒 5~10 min,无菌水清洗 3 次后置于铺有湿润滤纸的培养皿中催芽。选择露白一致的种子进行盆栽试验。

1.1.3 供试基质 将农田土和沙子过 2 mm 筛后(经清水冲洗干净)按照 1:1 的体积比混合,121

℃、0.1 MPa 高温高压蒸汽灭菌 2 h 后备用。其中含有有机质 7.57 g·kg⁻¹、速效磷 22.56 mg·kg⁻¹、碱解氮 34.12 mg·kg⁻¹、速效钾 76.23 mg·kg⁻¹。基质的田间持水量为 20%。

1.2 试验设计

采用随机区组设计(2×2×3),包括 AMF 处理(接菌与不接菌)、水分胁迫处理(胁迫:30%的田间持水量,非胁迫:80%的田间持水量)、施钾处理(KCl 含量:0、2、8 mmol),共 12 个处理,每个处理 10 个重复,单株重复,共 120 盆。

2014 年 6 月在塑料盆(13 cm×11 cm×9 cm,使用前用 0.1% KMnO₄ 溶液浸泡 2 h,再用水冲洗后晾干)中装 1 kg 供试基质,将催芽一致的枸杞幼苗移栽于盆中,接菌处理每盆加 8.0 g 的接种体,非接菌处理添加等量的灭菌基质。苗移栽后的前 20 d 每隔 10 d 浇 1 次 Hoagland 营养液,每盆浇 20 mL,期间正常供水。移苗 45 d 后进行施钾处理,将 KCl 配成不同浓度溶液,每天浇 1 次,每次浇 50 mL,确保钾溶液不会溢出,5 d 浇完。施钾处理 1 周后进行水分胁迫,利用称重补水法于每天 17:00 进行水分控制(30%和 80%的田间持水量)。水分胁迫 20 d 后进行指标测定。试验在西北农林科技大学温室大棚内完成,培养温度 25~35℃,湿度 40%~80%,自然光照,光照时间 12~14 h·d⁻¹。

1.3 指标测定

1.3.1 宁夏枸杞生物量及侵染率的测定 收获时每个处理随机选取 8 株幼苗,两两合并后,利用分析天平分别称取地上部分和地下部分鲜重。用清水冲洗根系,剪取部分根系放于 FAA 固定液中,经曲利苯蓝染色后^[12],采用十字交叉法测定 AMF 侵染率^[13]。

1.3.2 宁夏枸杞叶片抗氧化酶活性的测定 收获时每个处理随机选取 8 株幼苗,将 2 株幼苗的叶片合并后,利用磷酸缓冲盐溶液(PBS)溶解并离心提取叶片粗酶液^[14]。采用氮蓝四唑法测定粗酶液中超氧化物歧化酶(SOD)活性^[15],采用愈创木酚显色法测定过氧化物酶(POD)活性、紫外吸收法测定过氧化氢酶(CAT)活性^[16]。

1.3.3 宁夏枸杞叶绿素荧光参数的测定 采样前利用叶绿素荧光仪测定叶绿素荧光参数。每个处理

随机选取 4 株幼苗,暗适应 30 min 后,选取顶端第 4、第 5 片完全展开叶,于 09:30—11:30 用叶绿素荧光仪 (IMAG-PAM, 德国) 测定并计算初始荧光 (F_0)、最大荧光 (F_m),PS II 最大光化学量子产量 (F_v/F_m)、光合电子传递速率 (ETR)、PS II 实际光化学量子产量 (Φ PS II) 和光化学猝灭系数 (qP)、非光化学猝灭系数 (qN)^[17]。

1.3.4 宁夏枸杞幼苗根茎叶中钾元素含量的测定
收获时每个处理随机选取 8 株幼苗,两两合并后,分别将根茎叶 105℃ 杀青 20 min,80℃ 烘干至恒重,称取过 0.2 mm 筛的烘干样品各 0.1~0.2 g 于 100 mL 的消化管中,用硫酸-过氧化氢消化后,原子吸收分光光度法测定钾元素含量^[18]。

1.4 数据处理

使用 SPSS20. 0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA)、双因素方差分析和三因素方差分析进行统计分析,使用 SigmaPlot 10. 0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫时 AMF 和施钾对宁夏枸杞生长量的影响

干旱条件下 AMF 侵染率高于非干旱条件,但是差异不显著(表 1)。随着施钾量的升高,AMF 侵染率逐渐升高,在干旱条件下 KCl8mmol (K2) 时

差异达到极显著,相比 KCl 0 mmol (K0)、KCl 2 mmol (K1) 时 AMF 侵染率分别提高了 11. 5%、9. 9%。

干旱显著降低了宁夏枸杞地上和地下部分的鲜重。施钾促进了宁夏枸杞生长,随着施钾量的升高,地上和地下部分鲜重逐渐升高,且干旱条件下增幅大于非干旱条件下的增幅;相比 K0,干旱条件下 K1 和 K2 时地上部分的鲜重分别提高了 40. 5% 和 59. 1%。接种 AMF 影响了宁夏枸杞地上和地下部分的生长,促进了宁夏枸杞地上部分的生长,但干旱条件下 K0 和 K2 以及非干旱条件下 K2 时差异不显著,K1 时接种 AMF 显著提高了宁夏枸杞的地上生长;非干旱时 AMF 降低了宁夏枸杞地下部分的生物量,干旱时接种 AMF 对宁夏枸杞地下部分的生物量变化无显著影响(表 1)。

2.2 干旱胁迫时 AMF 和施钾对宁夏枸杞叶绿素荧光参数的影响

干旱胁迫显著降低了宁夏枸杞叶片的 F_v/F_m 、 Φ PS II、ETR,提高了 qN ,对 qP 没有显著影响。施钾影响了宁夏枸杞叶片的荧光参数,随着施钾量的升高, F_v/F_m 、 Φ PS II、ETR 参数均呈现显著性的升高趋势,但是干旱胁迫条件下的荧光参数值显著低于非干旱胁迫条件下的值;施钾降低了宁夏枸杞叶片的 qN ,在 K2 时达到最低值。干旱胁迫条件下,

表 1 干旱胁迫时 AMF 和施钾对宁夏枸杞生长量的影响

Table 1 Effects of AMF and potassium application on the growth of *L. barbarum* under drought stress

水分处理	钾处理	接种处理	鲜重/g		侵染率/%
			地上	地下	
干旱	K0	NM	7. 17±0. 15f	12. 40±0. 36d	
		AM	7. 43±0. 40f	12. 67±0. 32d	61. 6±2. 0bc
	K1	NM	10. 07±0. 06e	13. 40±0. 98d	
		AM	11. 70±0. 52d	13. 47±0. 51d	62. 5±1. 8bc
	K2	NM	11. 40±0. 44d	14. 10±2. 41cd	
		AM	12. 63±0. 35bcd	14. 07±0. 15cd	68. 7±1. 9a
非干旱	K0	NM	11. 37±1. 36d	16. 13±0. 72bc	
		AM	13. 60±0. 44abc	14. 53±0. 31cd	58. 4±2. 2c
	K1	NM	12. 50±0. 26cd	17. 43±0. 29ab	
		AM	14. 27±0. 23a	15. 93±0. 21bc	61. 1±2. 0bc
	K2	NM	13. 83±0. 06ab	19. 10±0. 10a	
		AM	14. 53±0. 47a	18. 37±0. 29a	65. 0±4. 9ab
显著性		P _K	* *	* *	* *
		P _{WATER}	* *	* *	*
		P _{AMF}	* *	*	
		P _{AMF * K}	NS	NS	
		P _{AMF * WATER}	NS	*	
		P _{K * WATER}	* *	*	NS
		P _{K * AMF * WATER}	*	NS	

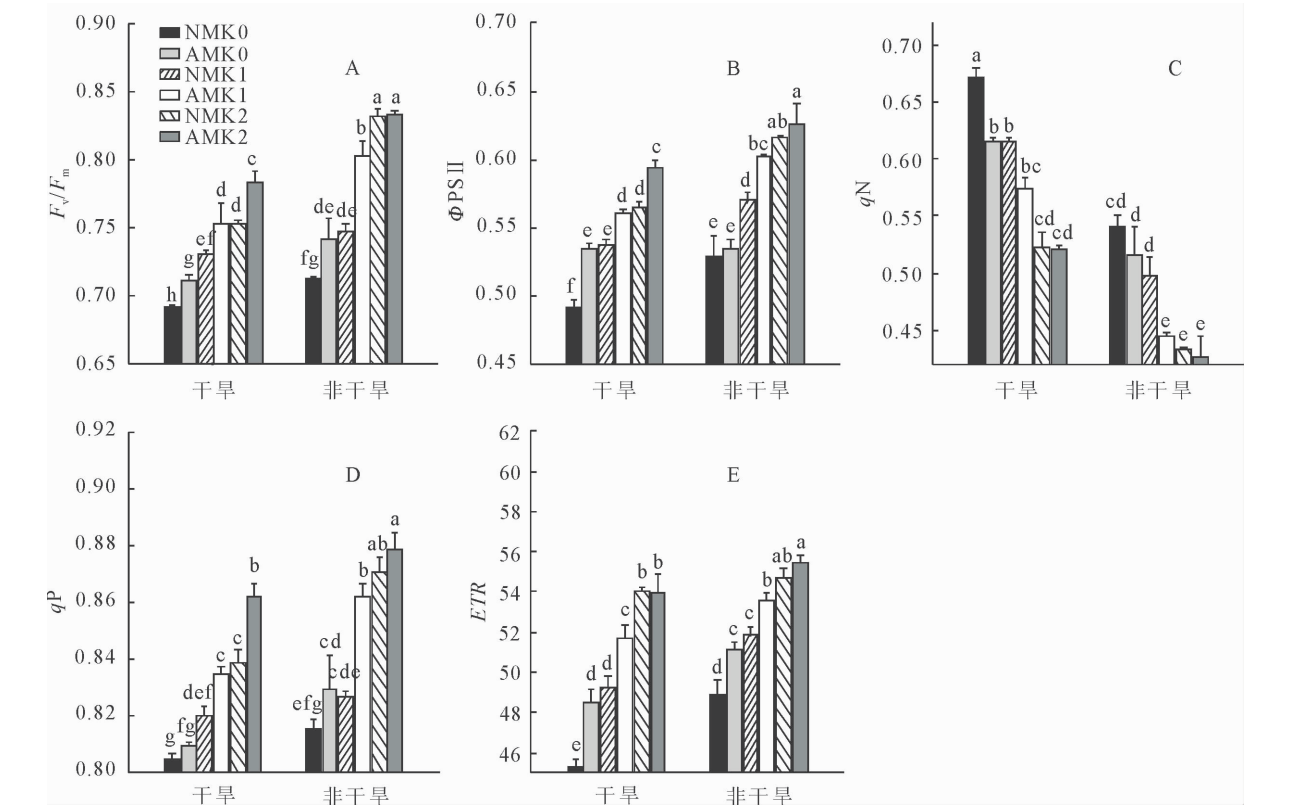
注:D 为干旱,W 为非干旱,NM 为不接菌,AM 为接菌;K0 为 KCl 0 mmol,K1 为 KCl 2 mmol,K2 为 KCl 8 mmol。* 表示 Duncan's 检验时处理间在 0. 05 水平差异显著,* * 表示 Duncan's 检验时处理间在 0. 01 水平差异显著,NS 表示 Duncan's 检验时处理间差异不显著。表 2 同。

接种 AMF 显著提高了宁夏枸杞叶片的 F_v/F_m 、 $\Phi PS II$ 、 ETR 、 qP 荧光参数,且在 K2 时达到最大值;接种 AMF 降低了叶片的 qN ,在 K2 时变化不显著(图 1)。说明接种 AMF 和施钾均可以不同程度地提高宁夏枸杞 PS II 的实际电子传递速率,增强其光能利用效率,且低施钾时 AMF 的效果比较显著,高施钾时 AMF 的作用被钾有所替代。

2.3 干旱胁迫时 AMF 和施钾对宁夏枸杞抗氧化酶活性的影响

由图 2 可知,干旱胁迫提高了宁夏枸杞叶片的抗氧化酶活性,但差异不显著。施钾对宁夏枸杞的抗氧化酶活性产生了不同程度的影响,随着施钾量

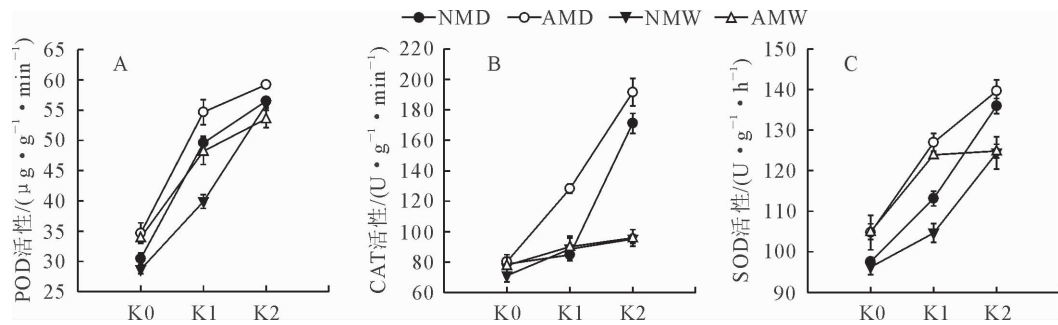
的升高,叶片 POD、SOD 酶活性呈显著升高趋势,在 K2 时其酶活性达到最大值,且干旱胁迫条件下的酶活性高于非干旱胁迫下的酶活性;而对于 CAT,非干旱胁迫条件下在 K1 时其酶活性相比不施钾显著提高了 24.6%,干旱胁迫条件下其酶活性在 K2 时相比不施钾存在极显著差异($P<0.01$)。K0 和 K1 时,接种 AMF 均显著提高了宁夏枸杞叶片 POD、SOD 的酶活性,且干旱胁迫时的增幅大于非干旱胁迫时的增幅,而 K2 时,接菌对其酶活性影响不显著,酶活性维持在某一范围内;接种 AMF 在 K1 和 K2 水平时显著提高了叶片 CAT 的酶活性(51.2% 和 11.9%)。



注:NMK0:不接菌/KCl 0 mmol;AMK0:接菌/KCl 0 mmol;NMK1:不接菌/KCl 2 mmol;AMK1:接菌/KCl 2 mmol;NMK2:不接菌/KCl 8 mmol;AMK2:接菌/KCl 8 mmol。图中不同小写字母表示利用 Duncan's 检验时在 0.05 水平时差异显著。下同。

图 1 干旱胁迫时 AMF 和施钾对宁夏枸杞叶绿素荧光参数的影响

Fig. 1 Effects of AMF and potassium application on the Chlorophyll II fluorescence parameters of *L. barbarum* under drought stress



注:NMD:不接菌干旱;AMD:接菌干旱;NMW:不接菌非干旱;AMW:接菌非干旱。

图 2 干旱胁迫时 AMF 和施钾对宁夏枸杞抗氧化酶活性的影响

Fig. 2 Effects of AMF and potassium application on antioxidative enzymes activities of *L. barbarum* under drought stress

2.4 干旱胁迫时 AMF 和施钾对宁夏枸杞根茎叶钾元素含量分布的影响

由表 2 可知,无论是干旱还是非干旱条件,随着施钾量的升高,宁夏枸杞根茎叶中的钾元素含量逐渐升高,且干旱条件下比非干旱条件下的含量高,接

菌比非接菌的高;干旱条件下,K2 时接种 AMF 对宁夏枸杞根和叶中钾元素含量具有显著影响,相比未接菌分别提高了 19.9%和 52.5%;接种 AMF 对茎中钾元素含量的变化不显著。结果表明,干旱条件下 AMF 提高了植物对钾元素的吸收。

表 2 干旱胁迫时接种 AMF 和施钾对宁夏枸杞根茎叶钾元素含量分布的影响					
Table 2 Effects of AMF and potassium application on the potassium distribution in tissues of <i>L. barbarum</i> under drought stress					
水分处理	钾处理	接种处理	钾含量/(mg · g ⁻¹)		
			根	茎	叶
干旱	K0	NM	8.66±1.35e	8.95±1.78a	12.71±1.15e
		AM	10.92±1.82cde	9.56±0.80a	13.44±1.36de
	K1	NM	13.23±1.93bcde	9.15±1.90a	19.31±1.0bc
		AM	15.57±1.23abcde	10.94±0.77a	19.75±0.70bc
	K2	NM	17.67±3.07bc	9.61±0.42a	19.35±3.62bc
		AM	21.18±2.97a	11.31±0.80a	29.49±3.78a
非干旱	K0	NM	8.77±0.90e	8.67±1.39a	12.67±0.68e
		AM	10.22±2.22de	9.51±1.09a	13.15±0.75de
	K1	NM	10.63±1.01de	8.77±0.53a	17.71±0.74cde
		AM	13.86±1.70bcde	10.1±0.22a	18.48±3.38cd
	K2	NM	15.81±1.67abcd	8.82±0.92a	23.04±0.84bc
		AM	17.85±3.53ab	10.13±0.85a	24.22±2.59b
显著性		P _K	* *	NS	* *
		P _{WATER}	*	NS	* *
		P _{AMF}	* *	NS	* *
		P _{AMF * K}	NS	NS	NS
		P _{AMF * WATER}	NS	NS	NS
		P _{K * WATER}	NS	NS	NS
		P _{K * AMF * WATER}	NS	NS	NS

3 结论与讨论

研究表明,随着施钾量的升高,AMF 的侵染率逐渐升高^[9-10],而且本研究发现,干旱条件下施钾量高时差异达到极显著,表明干旱条件下施钾会影响 AMF 的定殖状况。这说明土壤中的钾含量与 AMF 的侵染有一定的相关性,高钾环境有利于 AMF 协助宿主植物吸收干旱条件下其他营养元素,进而促进了 AMF 在宿主根部的侵染^[2,19]。本研究结果表明,随着施钾量的升高,宁夏枸杞根茎叶中的钾元素含量逐渐升高,且干旱条件下比非干旱条件下的含量高,表明植物通过吸收更多的营养来抵抗逆境胁迫^[20]。

本试验结果表明,干旱显著降低了宁夏枸杞叶片的叶绿素荧光参数,表明干旱胁迫破坏了植物的光合结构^[21-23]。施钾增加了叶片的 F_v/F_m 、 $\Phi PS II$ 、 ETR 参数,降低了 qN ,并且随着施钾量的升高分别呈现升高和降低的趋势^[24],表明钾能直接影响宁夏枸杞的叶绿素荧光参数,增强其对光能的利用效率。干旱胁迫条件下,接种 AMF 在不同含量钾时均显

著地提高了宁夏枸杞叶片的 F_v/F_m 、 $\Phi PS II$ 、 ETR 、 qP 荧光参数,且在施钾量高时达到最大值,降低了 qN ,但是在高含量施钾时与不接菌相比差异不显著;接种 AMF 对宁夏枸杞叶绿素荧光参数的结果与周朝彬^[25]等和 Li^[7]等提高 qN 参数的结果不一致,而与赵昕^[26]等、陈婕^[8]等的研究结果相一致,这可能与不同植物体内的自我保护机制不同有关。

本试验中,干旱条件下随着施钾量的升高,宁夏枸杞叶片的 SOD、POD 活性显著升高,CAT 活性在高含量施钾时达到显著水平,表明施钾通过提高抗氧化酶系统的活性来提高宁夏枸杞的抗旱性,这与 Soleimanzadeh^[27]等施钾使抗氧化酶活性降低的研究不一致,该作者认为钾降低了自由基的含量,进而降低了抗氧化酶的活性,但同时有研究认为钾能够通过提高抗氧化酶的活性来清除活性氧^[28-29]。接种 AMF 在不同钾水平下对 3 种抗氧化酶的活性产生了不同的影响,Benhiba^[30]等的研究结果与本研究相似。表明接种 AMF 和施钾均可以不同程度地提高宁夏枸杞活性氧(ROS)清除能力,减轻 ROS 对原生质膜的伤害,保护生物膜的完整性,从而维持生物

膜的正常功能。

本研究认为对宁夏枸杞幼苗接种 AMF 或施钾均可缓解干旱对幼苗的损伤。接种 AMF 从改善植物的营养状况和提高光能利用效率等方面更显著地增加了宁夏枸杞抵御逆境胁迫的能力,有利于其在干旱环境中生长。

参考文献:

[1] SMITH S E, READ D J. Mycorrhizal symbiosis[M]. 3rd edit. London; Elsevier Academic Publishers, 2008.

[2] CARTMILLA D L, ALARCON A, VOLDER A, *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate growth of *Ulmus parvifolia* Jacq at suboptimal planting depths [J]. Scientia Horticulture, 2012, 144: 74-80.

[3] AUGÉ R M. Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis [J]. Mycorrhiza, 2001, 11(1): 3-42.

[4] 唐明, 任嘉红, 胡景江, 等. AMF 提高沙棘抗旱性的研究[J]. 西北林学院学报, 2003, 18(4): 29-31.

TANG M, REN J H, HU J J, *et al.* Mechanism of the promotion of drought resistance of *Hippophae rhamnoides* with arbuscular mycorrhizal fungi [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2003, 18(4): 29-31. (in Chinese).

[5] 赵平娟, 安峰, 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.

ZHAO P J, AN F, TANG M. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on drought resistance of *Forsythia suspense* [J]. Acta Botanica. Boreali. -Occidentalia. Sinica, 2007, 27(2): 396-399. (in Chinese).

[6] 田帅, 刘振坤, 唐明. 不同水分条件下丛枝菌根真菌对刺槐生长和光合特性的影响[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(4): 111-115.

TIAN S, LIU Z K, TANG M. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and photosynthetic characteristics of *Robinia pseudoacacia* under different water conditions [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(4): 111-115. (in Chinese).

[7] LI Z, WU N, LIU T, *et al.* Effect of arbuscular mycorrhizal inoculation on water status and photosynthesis of *Populus cathayana* males and females under water stress [J]. Physiologia Plantarum, 2015, 155: 192-204.

[8] 陈婕, 谢靖, 唐明. 水分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.

CHEN J, XIE J, TANG M. Effects of Arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and drought resistance of *Amorpha fruticosa* under water stress [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2014, 36(6): 142-148. (in Chinese).

[9] 赵方贵, 王玮, 车永涛, 等. AM 真菌提高烟草钾含量机制的初步研究[J]. 植物生理学报, 2014, 50(7): 1002-1008.

ZHAO F G, WANG W, CHE Y T, *et al.* One possible mechanism of *Glomus mosseae* infection increasing Tobacco potassium uptake [J]. Plant Physiology Journal, 2014, 50(7): 1002-1008. (in Chinese).

[10] NISHA K, KULDEEP Y, ASHOK A. Interactive effect of ar-

buscular mycorrhizal fungi and potassium on growth and yield in *Cyamopsis tetragonoloba* (L.) under water stress [J]. Researcher, 2014, 6(8): 86-91.

[11] 张海涵. 黄土高原枸杞根际微生态特征及其共生真菌调控宿主生长与耐旱响应机制[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2011.

[12] 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): 158-168.

[13] GIOVANNETTI M, MOSSE B. Evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots [J]. New Phytologist, 1980, 84: 489-500.

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

[15] 郑炳松. 现代植物生理生化研究技术[M]. 北京: 气象出版社, 2006.

[16] 孙群, 胡景江, 王渭玲, 曹翠玲. 植物生理学研究技术[M]. 杨陵: 西北农林科技大学出版社, 2006.

[17] GONG M G, TANG M, CHEN H, *et al.* Effects of two *Glomus* species on the growth and physiological performance of *Sophora davidii* seedlings under water stress [J]. New Forests, 2013, 44(3): 399-408.

[18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[19] CASTELLANOS-MORALES V, VILLEGAS J, WENDELIN S, *et al.* Root colonization by the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* alters the quality of strawberry fruits (*Fragaria × ananassa* Duch.) at different nitrogen levels [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2010, 90(11): 1774-1782.

[20] CAKMAK I. The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2005, 168(4): 521-530.

[21] ALBERT K R, BOESGAARD K, RO-POULSEN H, *et al.* Antagonism between elevated CO₂, nighttime warming, and summer drought reduces the robustness of PSII performance to freezing events [J]. Environmental and Experimental Botany, 2013, (93): 1-12.

[22] ZONG Y Z, WANG W F, XUE Q W, *et al.* Interactive effects of elevated CO₂ and drought on photosynthetic capacity and PS II performance in maize [J]. Photosynthetica, 2014, 52(1): 63-70.

[23] 周强, 向芬, 田向荣, 等. 干旱胁迫对吉首蒲儿根光合机构的影响[J]. 西北植物学报, 2014, 34(7): 1404-1410.

ZHOU Q, XIANG F, TIAN X R, *et al.* Effects of drought stress on photosynthetic apparatus in *Sinosenecio jishouensis* [J]. Acta Botanica. Boreali. -Occidentalia. Sinica, 2014, 34(7): 1404-1410. (in Chinese)

[24] 高天鹏, 郭睿, 王东, 等. 保水剂与钾肥对旱地马铃薯产量和叶绿素荧光动力学参数的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(5): 1221-1226.

GAO T P, GUO R, WANG D, *et al.* Effects of applying super absorbent polymer and potassium fertilizer on the yield index and chlorophyll fluorescence parameters of dry land potato [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(5): 1221-1226. (in Chinese)

944-949.

[16] HAMEED B H, AHMAD A L, LATIFF K N A. Adsorption of basic dye (methyleneblue) onto Activated carbon prepared from rattan sawdust [J]. Dyes and Pigments, 2007, 75: 143-149.

[17] GRAG V K, GUPTA R, YADAV A B, *et al.* Dye removal from aqueous solution by adsorption on treated sawdust [J]. Bioresource Technology, 2003, 89: 121-124.

[18] SONAWANE G H, SHRIVASTAVA V S. Kinetics of decolorization of malachite green from aqueous medium by maize cob (*Zea mays*): an agricultural solid waste[J]. Desalination, 2009, 247 (1-3): 430-441.

[19] 廖钦洪, 刘庆业, 蒙冕武, 等. 稻壳基活性炭的制备及其对亚甲基蓝吸附的研究 [J]. 环境工程学报, 2011, 5 (11): 2447-2452.

[20] 张文轩. 改性秸秆对污水中染料物质的吸附脱除研究[D]. 南京: 南京大学, 2012.

[21] KUMAR P S, RAMALINGAM S, SENTHAMARAI C, *et al.* Adsorption of dye from aqueous solution by cashew nut shell: studies on equilibrium isotherm, kinetics and thermodynamics of interactions[J]. Desalination, 2010, 261(1-2): 52-60.

[22] 邢占赢. 改性松针对染料的吸附研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2011.

[23] TANYILDIZI M S. Modeling of adsorption isotherms and kinetics of reactive dye from aqueous solution by peanut hull [J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 168(3): 1234-1240.

[24] KHAN M M R, RAY M, GUHA A K. Mechanistic studies on the binding of acid yellow 99 on coir pith[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(3): 2394-2399.

[25] BATZIAS F, SIDIRAS D, SCHROEDER E, *et al.* Simulation of dye adsorption on hydrolyzed wheat straw in batch and fixed-bed systems [J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 148(2-3): 459-472.

[26] GONG R M, ZHONG K D, HU Y, *et al.* Thermochemical esterifying citric acid onto lignocellulose for enhancing methylene blue sorption capacity of rice straw[J]. Journal of Environmental Management, 2008, 88(4): 875-880.

[27] 杨超, 蔡亚非, 龚仁敏, 等. 葛苳皮生物材料吸附水溶液中阳离子染料的研究[J]. 南京农业大学学报, 2006, 29(2): 45-49.

YANG C, CAI Y F, GONG R M, *et al.* Removal of cationic dyes from aqueous solution by biosorption on lettuce peel[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2006, 29(2): 45-49. (in Chinese)

[28] 李山. 改性花生壳对水中重金属离子和染料的吸附特性研究[D]. 西安: 西北大学, 2009.

[29] 汪洋, 吴纓. 改性油菜秸秆对 Co(II) 的吸附[J]. 环境工程学报, 2016, 10(1): 379-384.

[30] 李红萍, 刘利娥, 韩秀丽, 等. 改性松针对水体中铅(II) 的吸附[J]. 环境工程学报, 2014, 8(9): 3755-3760.

[31] HAN R P, WANG Y F, YU W H, *et al.* Biosorption of methylene blue from aqueous solution by rice husk in a fixed-bed column[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 141(3): 713-718.

(上接第 170 页)

[25] 周朝彬, 宋于洋, 王炳举, 等. 干旱胁迫对胡杨光合和叶绿素荧光参数的影响[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(4): 5-9.

ZHOU C B, SONG Y Y, WANG B J, *et al.* Effects of drought stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of *Populus euphratica* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(4): 5-9. (in Chinese)

[26] 赵昕, 宋瑞清, 阎秀峰. 接种 AM 真菌对喜树幼苗生长及光合特性的影响[J]. 植物生态学报, 2009, 33(4): 783-790

ZHAO X, SONG R Q, YAN X F. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on growth and photosynthesis of *Camptotheca acuminata* seedlings [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33(4): 783-790. (in Chinese)

[27] SOLEIMANZADEH H, HABIBI D, ARDAKANI M, *et al.* Effect of potassium levels on antioxidant enzymes and malondialdehyde content under drought stress in sunflower (*Helianthus annuus* L.) [J]. American Journal of Agricultural and Biological Science, 2010: 56-61.

[28] 孙业民, 张俊莲, 李真, 等. 氯化钾对于干旱胁迫下马铃薯幼苗抗旱性的影响及其机制研究[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(3): 29-34.

SUN Y M, ZHANG J L, LI Z, *et al.* Effects of potassium chloride on drought resistance of potato seedlings [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(3): 29-34. (in Chinese)

[29] OOSTERHUIS D M, LOKA D A, KAWAKAMI E M, *et al.* The physiology of potassium in crop production [J]. Advances in Agronomy, 2014, 126: 203-233.

[30] BENHIBA L, FOUAD M O, ESSAHIBI A, *et al.* Arbuscular mycorrhizal symbiosis enhanced growth and antioxidant metabolism in date palm subjected to long-term drought [J]. Trees, 2015, 29: 1-9.