麻云霞,贺琴,李钢铁,等.接种丛枝菌根真菌下文冠果幼苗对干旱胁迫的生理响应[J].山西农业大学学报(自然科学版),2025,45(2):9-19.
Ma Y X, He Q, Li G T, et al.Physiological responses of *Xanthoceras sorbifolium* seedlings inoculated with *Arbuscular* mycorrhizal fungi under drought stress[J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2025,45(2):9-19.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202408017

接种丛枝菌根真菌下文冠果幼苗对干旱胁迫的生理响应

麻云霞,贺琴,李钢铁*,张月欣

(内蒙古农业大学 沙漠治理学院,内蒙古 呼和浩特 010018)

摘　要:[目的]文冠果是我国北方唯一的木本油料作物,干旱是影响文冠果生长的主要因素之一,丛枝菌根*Arbuscular* mycorrhizal(AM)真菌与植物共生能提高植物抗逆性,本文探究AM真菌对文冠果抗旱性的影响。[方法]采取室内盆栽试验,分别对接种地表多样孢囊霉(*Diversispora versiformis*)、根内根孢囊霉(*Rhiaophagus intraradices*)、摩西斗管囊霉(*Funneliformis mosseae*)和3种菌种混合菌剂的文冠果进行正常供水和轻度、中度、重度干旱胁迫,分析各处理对文冠果幼苗生长特征、渗透调节物质和抗氧化酶的影响。[结果](1)4种菌剂均可以与文冠果幼苗形成共生关系,随着干旱胁迫的加重,菌根侵染率总体呈先增后减的趋势,各菌剂的侵染效果各异;(2)干旱胁迫抑制了植株生长,接种AM真菌后增加了植物株高、地上生物量和根系生物量;(3)接种AM真菌会促进文冠果积累可溶性糖、可溶性蛋白含量,降低了脯氨酸和丙二醛含量的积累,提高了SOD、POD和CAT活性,从而提高文冠果幼苗的抗旱性;(4)通过隶属函数综合分析可知,混合菌剂提高文冠果幼苗抗旱性的效果最佳,接种地表多样孢囊霉的抗旱性次之。[结论]接种AM真菌可以有效提高文冠果幼苗的抗旱性,不同AM真菌的促进效益各异,混合菌剂的促进效益较单一菌剂更明显。

关键词:丛枝菌根真菌; 干旱胁迫; 文冠果; 综合评价
中图分类号:S794.9　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2025)02-0009-11

Physiological responses of *Xanthoceras sorbifolium* seedlings inoculated with *Arbuscular* mycorrhizal fungi under drought stress

Ma Yunxia, He Qin, Li Gangtie*, Zhang Yuexin

(*College of Desert Control Science and Engineeering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China*)

Abstract:[Objective]*X sorbifolia* Bunge is the only woody oil crop in northern China, and drought is one of the main factors affecting its growth. *Arbuscular* mycorrhizal (AM) fungi can form symbiotic relationships with plants and improve their stress resistance. However, the effects of AM fungi on the drought resistance of *X. sorbifolia* remain unclear. [Methods] The indoor pot experiment was carried out under controlled condition. Seedlings of *X. sorbifolia* were inoculated with *Diversispora versiformis*, *Rhiaophagus intraradices*, *Funneliformis mosseae*, or a mixture of three AM fungal species. The seedlings were subjected to normal watering and mild, moderate, and severe drought stress. The effects of these treatments on the growth characteristics, osmotic adjustment substances, and antioxidant enzyme activities of *X. sorbifolia* seedlings were analyzed. [Results] (1) All four AM fungal treatments successfully formed symbiotic relationships with *X. sorbifolia* seedlings. As drought stress intensified, the mycorrhizal colonization rate initially increased and then decreased, with varying colonization efficiencies among different fungal treatments. (2) Drought stress inhibited plant growth, but inoculation with AM fungi increased plant height, aboveground biomass and root biomass. (3) Inoculation with AM fungi promoted the accumulation of soluble sugars and solu-

收稿日期:2024-08-12　　**修回日期**:2024-12-18
基金项目:内蒙古自治区高校科研自然科学重点项目(NJZZ23030);内蒙古自治区自然科学基金项目(2023QN03049);内蒙古农业大学高层次/优秀博士引进人才科研启动项目(NDYB2021-9)
作者简介:麻云霞(ORCID:0000-0002-2587-9352),博士,讲师,研究方向:沙区植物资源保护与利用,E-mail:1572666975@qq.com
*通信作者:李钢铁,博士,教授,研究方向:沙区植物资源保护与利用,E-mail:13848817183@163.com

ble proteins in *X. sorbifolia*, reduced the accumulation of proline and malondialdehyde content, and increased the activities of SOD, POD and CAT, thereby improving the drought resistance of *X. sorbifolia* seedlings. (4) Comprehensive analysis using the membership function method revealed that the mixed fungal treatment provided the best improvement in drought resistance, followed by inoculation with *D. versiformis*. [Conclusion] Inoculation with AM fungi can effectively improve the drought resistance of *X. sorbifolia* seedlings. The promotion effects vary among different AM fungi species, with the mixed fungal treatment showing more significant benefits than single-species inoculations.

Keywords: Arbuscular mycorrhizal fungi, Drought stress, *X. sorbifolia*, Comprehensive evaluation

干旱是影响植物生长发育的重要因素之一，随着全球气候变化，干旱对植物的影响范围和程度将进一步扩大。如何提高植物耐旱性，改善植物的生长状况和生活力对旱区农林业发展有重要意义[1]。

丛枝菌根(*Arbuscular* mycorrhizal，AM)真菌广泛分布于自然界，可以与大约80%的陆地植物形成共生关系[2]，接种AM真菌是增强植物对非生物胁迫耐受力的一种可持续方法[3]。AM真菌庞大的菌丝网络扩大了宿主植物根系与土壤的接触面积，提高宿主植物吸收水分和养分的能力[4-5]，通过调节植物渗透调节物质含量、抗氧化酶活性等途径增加植物对干旱、盐碱、重金属等不良环境的抵抗能力[6]。同时也发现AM真菌对不同的宿主植物有一定的适应性和选择性，黄檀(*Dalbergia hupeana*)接种摩西斗管囊霉(*Funneliformis mosseae*)、幼套近明囊霉(*Claroideoglomus etunicatum*)、根内根孢囊霉(*Rhizophagus intraradices*)和混合菌剂均可以显著提高生物量、株高和根系生长，增强黄檀抗旱性，其中混合菌剂的效果最佳，根内根孢囊霉次之[7]。对红花石蒜(*Lycoris radiata*)单接种摩西斗管囊霉、根内根孢囊霉提高养分含量的效果优于混合菌剂[8]。分别对香橙(*Citrus Junos* Sieb. ex Tanaka)和枳(*Poncirus trifoliate* (L.) Raf)接种9种AM真菌，结果表明不同AM真菌对不同砧木的生长发育表现出促进和抑制的效应[9]，因此，明确AM真菌对植物的影响对农、林业生产有重要意义。

文冠果(*Xanthoceras sorbifolium*)是无患子科的小乔木或灌木，主要分布在黄土高原和内蒙古高原[10]。文冠果根系发达，是中国北方重要的水土保持树种，也是北方唯一的木本油料作物，其果实提取的油料具有较高的营养和药用价值[11]。近些年来，文冠果天然林种群濒危，人工林主要集中于内蒙古自治区，对环境变化极为敏感[12]，因此，明确文冠果对环境干旱的适应策略对推广文冠果种植、建设文冠果产业具有重要意义。李硕等[13]发现干旱胁迫下文冠果通过提高抗氧化酶活性，增加可溶性蛋白等物质含量等途径抵抗干旱胁迫对植株的伤害，但在中、重度干旱胁迫下的效果较弱[14]。冯朝红等[15]对文冠果幼苗喷施外源油菜素内酯，发现抗氧化酶活性显著提高，植物体的抗旱增强。宗建伟等[16]基于光合、叶片生理等方面研究发现，摩西斗管囊霉可以提高文冠果对盐胁迫的抗性。目前，接种AM真菌对干旱胁迫下文冠果幼苗生长与生理以及文冠果幼苗抗旱性的影响还未明确。本研究通过对接种AM真菌的文冠果幼苗进行干旱胁迫，分析其生长与生理的变化，明确接种不同AM真菌下文冠果幼苗生长与生理对干旱胁迫的响应，旨在探索AM真菌提高文冠果幼苗抗旱性的机制，并为选育文冠果菌根化幼苗以及在干旱地区推广菌根化植物提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试种子由内蒙古自治区鄂尔多斯市鄂托克前旗文冠果种植基地提供。选取颗粒饱满且大小一致的种子，采用温水浸种的方法进行催芽，当有2/3的种子裂口时进行播种。

供试菌种为地表多样孢囊霉(*Diversispora versiformis*)、根内根孢囊霉(*Rhiaophagus intraradices*)、摩西斗管囊霉(*Funneliformis mosseae*)以及3种菌种混合菌剂。菌剂购买于长江大学根系生物学研究所，由三叶草盆栽扩繁得到的干燥全培养物。

培养基质为草炭土、蛭石、珍珠岩按5∶3∶1体积比混合而成，基质经过121 ℃高温高压灭菌2 h，冷却后按照每盆1 kg装入培养容器，即花盆中。

1.2 试验设计

本试验于2023年4月13日在内蒙古农业大学

林学院温室中进行,设接种试验5个处理、干旱胁迫4个处理,共20个处理,每个处理5盆,共100盆。将处理好的种子播种于17 cm×14 cm的花盆,出苗25 d后观察到文冠果幼苗有侧根生出进行接种试验。接种试验设置接种地表多样孢囊霉(简记为Dv)、根内根孢囊霉(简记为Ri)、摩西斗管囊霉(简记为Fm)、3种菌种混合菌剂(简记为RFD)和未接种(CK)5个处理,采用蘸根法接种菌剂,每盆接种20 g菌剂,为控制误差,对照组等量接种灭菌后的菌剂。接种菌剂后常规管理2个月,期间每周浇灌1次Holagland营养液。之后观察到文冠果幼苗有菌根侵染,采用称量法进行干旱胁迫处理,干旱胁迫处理设置正常供水W1(田间持水量的75%~80%)、轻度干旱W2(田间持水量的55%~60%)、中度干旱W3(田间持水量的40%~45%)和重度干旱W4(田间持水量的25%~30%)4个处理,每2 d称量1次以保证土壤相对含水量恒定,干旱胁迫45 d后进行各项指标测定。

1.3　试验方法

1.3.1　文冠果幼苗株高、生物量和菌根依赖性的测定

选取生长一致的3株幼苗,使用卷尺测量株高。将植株带回实验室,冲洗干净后分别称取地上和地下部分的鲜重,之后放入烘箱中105 ℃杀青10 min,80 ℃烘干至恒重,称量干重。菌根依赖性计算公式如下:

$$菌根依赖性=\frac{菌根苗干重-非菌根苗干重}{非菌根苗干重}\times 100\%$$

1.3.2　菌根侵染率的测定

干旱胁迫结束后3株植物每株随机选取10段细根,剪成1 cm的根段,参考Trouvelot等[17]方法采用台盼蓝染色法进行染色制片,使用光学显微镜观察侵染情况并统计。

$$菌根侵染率=\frac{侵染根段数}{检测总根段数}\times 100\%$$

1.3.3　生理生化指标的测定

可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定,可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝法测定,脯氨酸含量测定采用茚三酮法测定,丙二醛含量采用硫代巴比妥酸法测定,超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑光还原法测定,过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定,过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外光度计法测定[18],以上指标均重复3次。

1.4　统计分析

使用Excel 2019、Origin 2021对试验数据进行统计和绘制图表,使用SPSS 26.0进行单因素方差分析。利用模糊隶属函数综合评价,计算公式如下:

$$R(X_i)=\frac{X_i-X_{min}}{X_{max}-X_{min}}$$

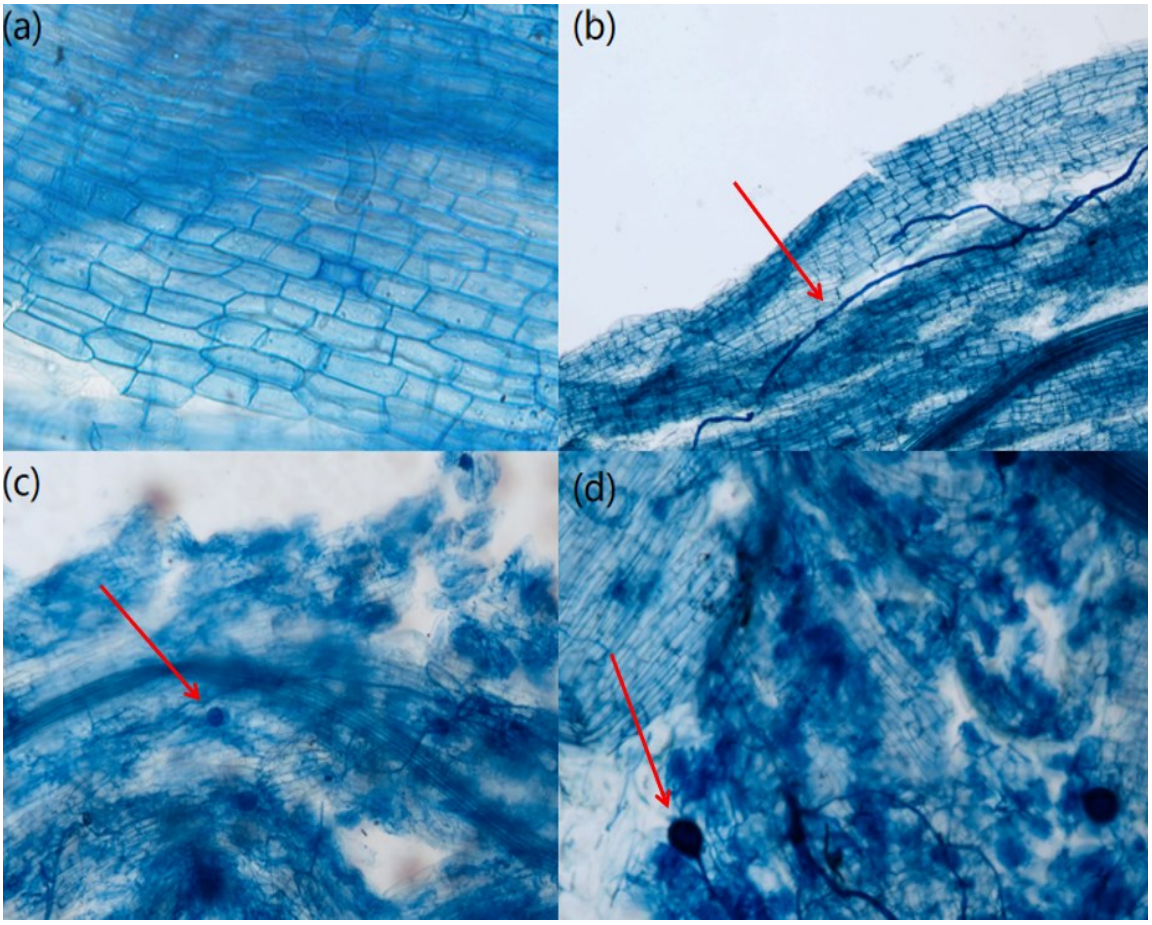
式中,$R(X_i)$表示指标的隶属函数值,X_i表示第i个指标值,X_{min}和X_{max}表示指标的最小值和最大值。

2　结果与分析

2.1　接种AM真菌下文冠果幼苗的生长及根系侵染率对干旱胁迫的响应

在文冠果幼苗接种AM真菌后常规管理2个月,对文冠果幼苗根系进行染色制片(图1),可以明显观察到孢子、菌丝、泡囊和丛枝结构,表明AM真菌已成功侵染文冠果根系,在未接种处理组中未观察到有菌丝、孢子等侵染迹象。由图2可见,文冠果幼苗的侵染率随干旱胁迫加强呈先增加后降低的趋势,在轻度干旱胁迫下各菌剂的侵染率均达到峰值。相同干旱胁迫下,各菌剂的侵染效果各异,其中RFD的侵染效果最佳,在正常供水、中度干旱和重度干旱下显著高于其它菌剂处理,侵染率为54%~75%,Dv次之。随干旱胁迫加重,文冠果幼苗对AM真菌菌根的依赖性呈增加的趋势,各组间在正常供水和重度干旱下的差异不显著,在轻度和中度干旱下,RFD显著高于Fm处理,为86.61%和89.47%,在重度干旱下RFD的依赖性最高为151.69%。

随着干旱胁迫的加强,未接种和接种处理组文冠果幼苗的地上生物量和根系生物量均呈先增加后减少的趋势,株高整体呈减小的趋势(表1)。在同一干旱胁迫下,接种AM真菌较显著促进了文冠果幼苗地上生物量、根系生物量和株高的增长,可缓解胁迫的影响。在轻度干旱下各处理组的地上和根系生物量达到最大值,相较于CK处理,接种Dv、Ri、Fm和RFD植株地上生物量分别

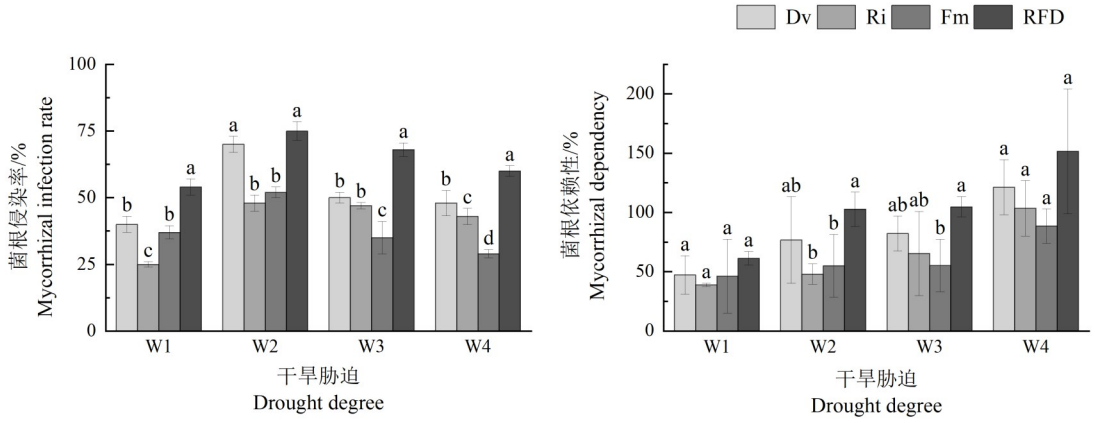


(a)为未接种文冠果幼苗根系,(b)为菌丝,(c)为泡囊,(d)为孢子和丛枝

(a) Roots of uninoculated *Xanthoceras sorbifolia* seedlings, (b)mycelium, (c)vesicle, (d) spores and arbusculars

图1 文冠果幼苗根系菌根结构

Fig.1 Root mycorrhizal structure of *X. sorbifolia* seedlings



W1:正常供水,W2:轻度干旱,W3:中度干旱,W4:重度干旱,Dv:地表多样孢囊霉,Ri:根内根孢囊霉,Fm:摩西斗管囊霉。不同小写字母表示相同水分条件下不同菌剂之间差异显著($P<0.05$)

W1: normal water, W2: feebly drought, W3: medium drought, W4: heavy drought, Dv: *Diversispora versiformis*, Ri: *Rhiaophagus intraradices*, Fm: *Funneliformis mosseae*. Different lowercase letters indicate that there are differences between the same moisture of different microbial agents ($P<0.05$)

图2 文冠果幼苗根系侵染率及菌根依赖性对干旱胁迫的响应

Fig.2 Responses of root infection rate and mycorrhizal dependence of *X. sorbifolia* seedlings to drought stress

增长了53.85%、41.03%、53.85%和82.05%,根系生物量分别增加了86.00%、51.00%、56.00%和110.00%。在轻度干旱下,接种Dv、Ri、Fm和RFD对植株株高的促进较明显,相较于CK,分别增长了16.88%、24.53%、36.08%和54.83%。整体而言,RFD菌剂在各干旱程度下对文冠果幼苗生物量和株高的促进效应最佳。

表1　接种AM真菌下文冠果幼苗株高和生物量对干旱胁迫下的响应

Table 1　Response of plant height and biomass of *X. sorbifolia* seedlings to drought stress under AM fungi inoculation

干旱程度 Drought degree	菌剂 Bacteria agent	地上生物量/g Aboveground biomass	根系生物量/g Root biomass	株高/cm Plant height
正常供水 Normal water	CK	0.37±0.04c	1.20±0.25b	7.77±0.25a
	Dv	0.57±0.10b	1.74±0.35ab	8.23±0.40a
	Ri	0.52±0.04b	1.66±0.02ab	8.07±2.00a
	Fm	0.57±0.04b	1.73±0.52ab	8.63±0.31a
	RFD	0.68±0.01a	1.86±0.10a	9.27±1.30a
轻度干旱 Feebly drought	CK	0.39±0.04b	1.00±0.16c	6.93±0.42c
	Dv	0.60±0.06ab	1.86±0.45ab	8.10±1.08bc
	Ri	0.55±0.02ab	1.51±0.11b	8.63±0.96c
	Fm	0.60±0.20ab	1.56±0.17b	9.43±0.15ab
	RFD	0.71±0.16a	2.10±0.16a	10.73±1.17a
中度干旱 Medium drought	CK	0.24±0.02c	0.76±0.53b	6.13±0.81b
	Dv	0.49±0.03b	1.33±0.17a	7.30±1.61ab
	Ri	0.43±0.07b	1.22±0.29a	7.43±0.50ab
	Fm	0.38±0.07bc	1.18±0.15a	7.17±1.60ab
	RFD	0.62±0.10a	1.43±0.03a	9.13±0.35a
重度干旱 Heavy drought	CK	0.22±0.02b	0.50±0.04c	5.80±0.60b
	Dv	0.42±0.07a	1.15±0.12ab	7.03±0.96ab
	Ri	0.39±0.04a	1.06±0.15ab	7.10±1.28ab
	Fm	0.39±0.04a	0.95±0.12b	6.53±0.25b
	RFD	0.47±0.09a	1.32±0.31a	8.13±0.15a

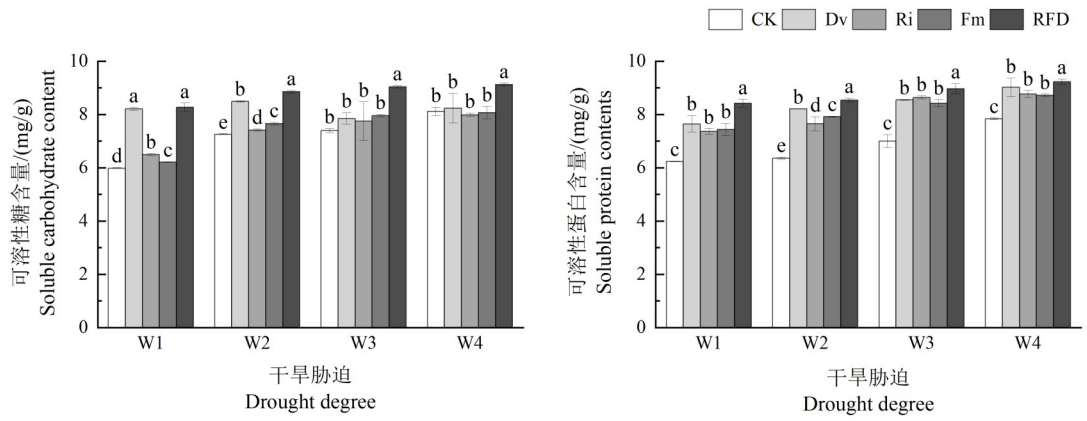
注:Dv:地表多样孢囊霉;Ri:根内根孢囊霉;Fm:摩西斗管囊霉。同列不同小写字母表示相同水分条件下不同菌剂之间差异显著($P<0.05$)。

Note:Dv: *D. versiformis*, Ri: *R. intraradices*, Fm: *F. mosseae*. Different lowercase letters in the same column indicate that there are differences between the same moisture of different microbial agents ($P<0.05$).

2.2　接种AM真菌下文冠果幼苗的生理指标对干旱胁迫的响应

随着干旱胁迫的加强,未接种和接种处理组文冠果幼苗叶片的可溶性糖和可溶性蛋白含量均呈增加的趋势,均在重度干旱胁迫下达到最大(图3)。在同一干旱胁迫下,接种AM真菌显著促进了文冠果幼苗可溶性蛋白的积累。相较于CK,接种Dv、Ri、Fm和RFD在正常供水下对叶片可溶性蛋白含量增加的促进作用明显,分别增加了22.58%、18.01%、19.24%和34.93%。相较于CK,接种Dv、Ri、Fm和RFD在正常供水和轻度干旱胁迫下显著提高了叶片可溶性糖含量,尤其在正常供水下分别增加了37.01%、8.51%、3.78%和38.12%。

随着干旱胁迫的加重,文冠果幼苗叶片的脯氨酸含量和丙二醛含量呈增加的趋势。在同一干旱胁迫下,接种AM真菌显著降低了文冠果幼苗叶片中脯氨酸含量,丙二醛含量各处理间差异性不显著(图4)。相较于CK,接种Dv、Ri、Fm和RFD后叶片脯氨酸和丙二醛含量的降幅随干旱胁迫的加重有所减少,其中正常供水下的降幅最明显,脯氨酸含量分别减少了7.35%、1.83%、



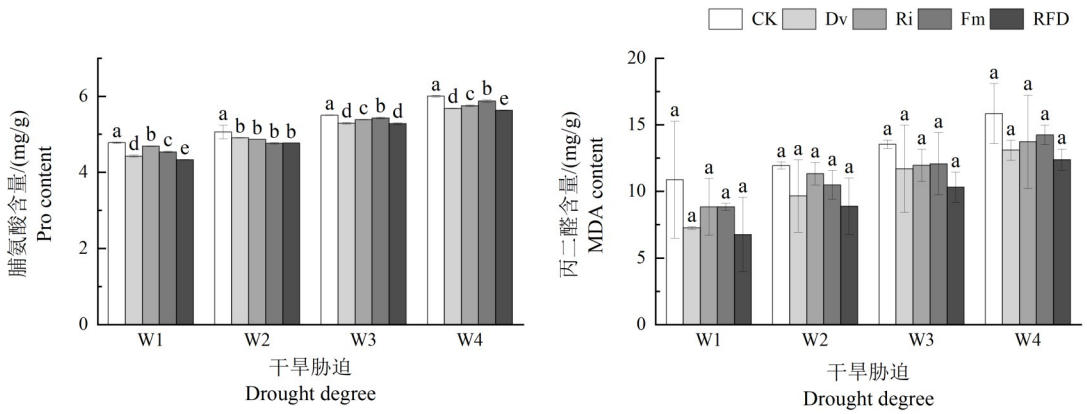
W1:正常供水,W2:轻度干旱,W3:中度干旱,W4:重度干旱。不同小写字母表示相同水分不同菌剂之间存在差异性($P<0.05$)

W1: normal water, W2: feebly drought, W3: medium drought, W4: heavy drought. Different lowercase letters indicate that there are differences between the same moisture of different microbial agents($P<0.05$)

图3 接种AM真菌下文冠果幼苗可溶性糖和可溶性蛋白含量对干旱胁迫下的响应

Fig.3 Response of soluble sugar and soluble protein content of *Xanthoceras sorbifolia* seedlings to drought stress under AM fungi inoculation

5.08%和9.36%;丙二醛含量分别比CK减少了33.18%、18.75%、18.69%和37.87%,RFD抑制植物叶片产生脯氨酸和丙二醛的效果优于其它菌剂处理。



W1:正常供水,W2:轻度干旱,W3:中度干旱,W4:重度干旱。不同小写字母表示相同水分条件下不同菌剂之间差异显著($P<0.05$)

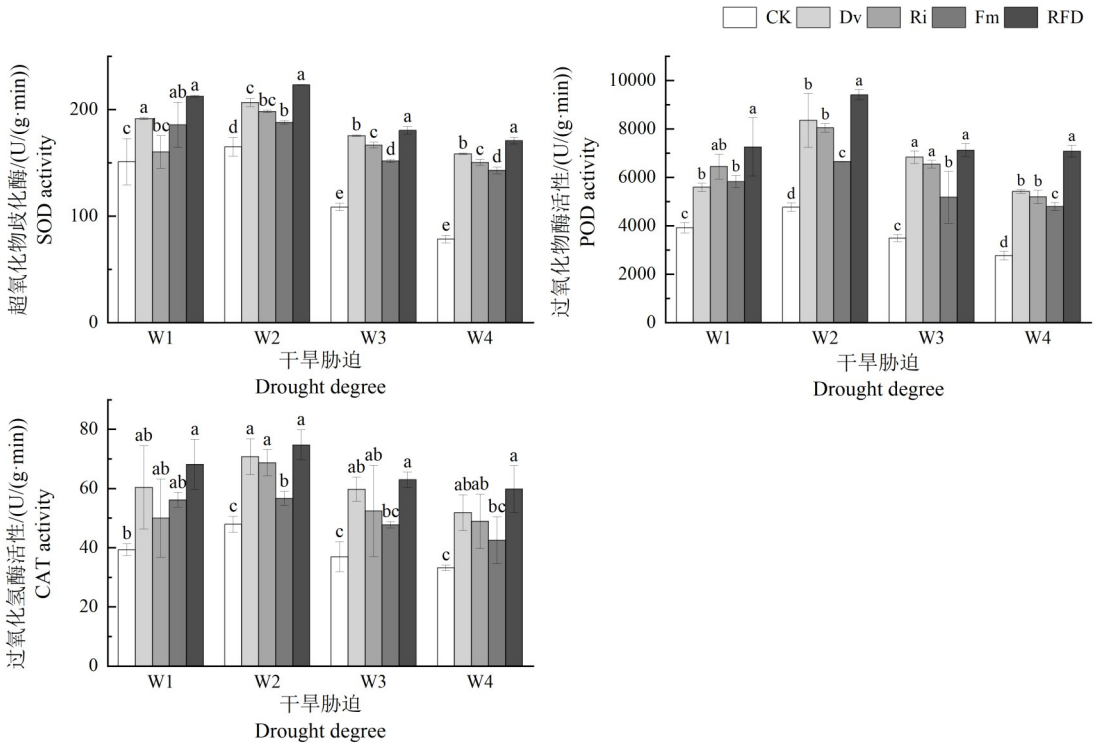
W1: normal water, W2: feebly drought, W3: medium drought, W4: heavy drought. Different lowercase letters indicate that there are differences between the same moisture of different microbial agents($P<0.05$)

图4 接种AM真菌下文冠果幼苗脯氨酸和丙二醛含量对干旱胁迫下的响应

Fig.4 Responses of proline and malondialdehyde contents of *Xanthoceras sorbifolia* seedlings to drought stress under AM fungi inoculation

随着干旱胁迫的加强,未接种和接种处理组文冠果幼苗叶片的SOD、POD和CAT活性均呈先增加后减少的趋势(图5)。在同一水分条件下接种AM真菌较CK处理组显著提高了文冠果幼苗叶片中SOD活性,在轻度干旱、中度干旱和重度干旱下显著促进植物叶片中POD活性。相较于CK,接种Dv、Ri、Fm和RFD对重度干旱下叶片SOD活性增加的促进作用最明显,叶片SOD活性分别增加了102.06%、91.86%、82.35%和117.90%,叶片POD活性分别增加了96.16%、87.87%、73.46%和156.25%;在正常供水下,相较于CK,接种Dv、Ri、Fm和RFD后叶片CAT活

性分别增加了56.08%、47.36%、28.13%和80.04%。整体而言,RFD对促进植物体SOD、POD和CAT活性增加的促进作用最明显,Dv的促进作用次之。



W1:正常供水,W2:轻度干旱,W3:中度干旱,W4:重度干旱。不同小写字母表示相同水分条件下不同菌剂之间差异显著($P<0.05$)

W1: normal water, W2: feebly drought, W3: medium drought, W4: heavy drought. Different lowercase letters indicate that there are differences between the same moisture of different microbial agents($P<0.05$)

图5　接种AM真菌下文冠果幼苗抗氧化酶活性对干旱胁迫下的响应

Fig.5　Response of antioxidant enzyme activity of *Xanthoceras sorbifolia* seedlings to drought stress under inoculation of AM fungi

2.3　综合评价

为了综合评价接种AM真菌对不同干旱胁迫下文冠果幼苗的影响,本试验选取地上生物量、根系生物量、株高、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、脯氨酸含量、丙二醛含量、SOD活性、POD活性、CAT活性共10个指标进行隶属函数计算。不同程度的干旱胁迫下,接种AM真菌后文冠果幼苗的隶属函数值均远高于未接种处理(表2),说明AM真菌可提高文冠果幼苗的抗旱能力,在不同干旱胁迫下RFD的总隶属函数值均大于单一菌剂,为最大值,表明在不同程度干旱胁迫下RFD提高文冠果幼苗抗旱性的效应均大于单一菌剂。

3　讨论

本试验中,对照组未观察到侵染结构,地表多样孢囊霉、根内根孢囊霉和摩西斗管囊霉均能在各干旱处理下的文冠果根系中形成菌根结构,随着干旱胁迫加重,各菌剂的定殖率逐渐下降,说明干旱阻碍了AM真菌孢子萌发和定殖,从而抑制了菌根形成,这与杉木接种AM真菌的研究结果一致[19]。虽然干旱胁迫降低了菌根强度,但AM真菌依然对文冠果幼苗的抗旱性有一定作用,文冠果幼苗在重度干旱下对AM真菌有极高的依赖性。此外,在轻度干旱下菌根侵染率为48%~75%,相较于正常供水有明显增加,在大豆的水淹试验中也发现了潮湿的土壤条件会使AM真菌的定殖率降低[20],当土壤含水量高于田间持水量的80%时,AM真菌对植物的侵染率显著降低,这可能是由于土壤含水量过高导致土壤透风率下降,从而抑制了AM真菌菌丝入侵点生成[21]。在不同

表 2 文冠果幼苗抗旱性的综合得分

Table 2 Comprehensive score of drought resistance of *X. sorbifolia* seedlings

干旱程度 Drought degree	菌剂 Bacteria agent	株高 Plant height	根系生物量 Root biomass	地上生物量 Aboveground biomass	可溶性糖含量 Soluble sugar	可溶性蛋白含量 Soluble protein	丙二醛含量 MDA	脯氨酸含量 Pro	超氧化物歧化酶活性 SOD	过氧化物酶活性 POD	过氧化氢酶活性 CAT	综合得分 Score
正常供水 Normal water	CK	0.27	0.16	0.10	0.01	0.01	0.29	0.03	0.24	0.03	0.04	1.17
	Dv	0.49	0.59	0.67	0.90	0.62	0.68	0.75	0.73	0.41	0.60	6.44
	Ri	0.45	0.53	0.53	0.21	0.49	0.51	0.12	0.35	0.60	0.32	4.12
	Fm	0.57	0.58	0.66	0.10	0.53	0.51	0.50	0.66	0.46	0.49	5.06
	RFD	0.71	0.69	0.98	0.93	0.95	0.73	0.98	0.99	0.78	0.81	8.55
轻度干旱 Feebly drought	CK	0.06	0.09	0.08	0.01	0.02	0.06	0.40	0.16	0.04	0.09	1.01
	Dv	0.28	0.68	0.45	0.76	0.83	0.46	0.97	0.60	0.75	0.76	6.53
	Ri	0.38	0.44	0.37	0.11	0.58	0.16	0.71	0.45	0.69	0.70	4.59
	Fm	0.52	0.47	0.47	0.26	0.70	0.31	0.78	0.27	0.41	0.35	4.54
	RFD	0.77	0.85	0.68	0.98	0.97	0.59	0.99	1.00	0.95	0.87	8.65
中度干旱 Medium drought	CK	0.18	0.07	0.04	0.22	0.11	0.13	0.04	0.05	0.03	0.13	0.99
	Dv	0.46	0.79	0.55	0.43	0.77	0.42	0.89	0.90	0.87	0.78	6.86
	Ri	0.50	0.64	0.44	0.38	0.81	0.38	0.50	0.79	0.81	0.57	5.82
	Fm	0.43	0.59	0.32	0.48	0.71	0.37	0.33	0.60	0.50	0.44	4.76
	RFD	0.91	0.91	0.81	0.97	0.95	0.64	0.93	0.97	0.94	0.87	8.89
重度干旱 Heavy drought	CK	0.19	0.03	0.07	0.33	0.02	0.21	0.07	0.02	0.04	0.02	1.01
	Dv	0.59	0.58	0.63	0.41	0.80	0.60	0.85	0.84	0.60	0.54	6.43
	Ri	0.61	0.50	0.54	0.24	0.64	0.51	0.68	0.76	0.55	0.46	5.49
	Fm	0.54	0.41	0.56	0.30	0.60	0.44	0.38	0.68	0.47	0.28	4.64
	RFD	0.95	0.72	0.75	0.97	0.94	0.70	0.98	0.96	0.95	0.75	8.67

干旱处理下各菌剂的侵染率表现各异,其中混合菌剂的侵染率均高于单一菌剂,这与在玉米接种AM真菌上的试验结果相似[22],表明多种菌剂相互协调,功能互补,更有利于植物生长,这与Jansa等[23]提出的观点一致。但在紫花苜蓿接种AM真菌的试验中表明单一菌剂的效果优于混合菌剂[24],产生这种差异的原因可能与不同AM真菌对宿主植物的适应性和选择性有关,还可能与不同菌剂之间的相互作用有关。菌根效应不仅受到AM真菌种类的影响,同时也受到宿主植物、环境等多方面因素的影响[25]。

干旱胁迫是植物生长发育过程中主要的限制因素之一[26]。AM真菌可促进植物的生长发育,增强植物对非生物胁迫的耐受能力[27]。本试验表明,相同干旱程度下,AM真菌能明显增加文冠果幼苗株高和生物量,说明AM真菌可以显著促进植物生长,增加植物生物量,提高植物对干旱胁迫的抵抗能力,这与前人对西瓜和辣椒的研究结果一致[28-29]。在不同干旱程度下,不同菌剂的促进效应各异,其中,混合菌剂的促进作用最明显。造成这一现象的原因可能是菌株对文冠果的亲和不同和环境因素的影响[30]。

在干旱胁迫下植物需要调节渗透压以保证根系可以吸收更多水分,维持正常生理代谢活动。本试验发现接种AM真菌比未接种处理组的文冠果叶片有更高的可溶性糖和可溶性蛋白含量。甘蔗接种AM真菌后在干旱胁迫下也有更高的可溶性糖和可溶性蛋白含量[31],这可能是由于菌根获取了植物体存储糖的库效应[32]。脯氨酸可以保持原生质与环境的渗透平衡,是植物在逆境胁迫下最有效的渗透调节物质[33]。本试验发现,接种AM真菌比未接种处理显著降低文冠果叶片中脯氨酸含量,这与三叶橙的研究结果一致[34]。但也有研究表明,接种AM真菌比未接种植物中脯氨酸含量显著增加[35],这可能与植物种类和脯氨酸的合成与降解等因素有关。丙二醛会破坏生物膜的结

构,常被作为衡量植物细胞膜损伤的指标。大量研究表明,逆境胁迫下,植物体内的丙二醛含量越高,植物受到的损伤越大[36]。本试验中随干旱胁迫加重,各处理组丙二醛含量呈增加趋势,而接种AM真菌较未接种处理组的增加趋势有明显减少,与白刺花接种AM真菌的试验结果一致[37],说明接种AM真菌可以在一定程度上增加植物的抗旱性,缓解干旱胁迫导致的损伤。

植物受到胁迫时会产生大量活性氧,活性氧与抗氧化酶平衡改变,导致植物细胞结构遭到氧损伤[3],而SOD、POD和CAT是清除活性氧和过氧化物的关键抗氧化酶,对提高植物抗逆性有重要作用。研究表明抗氧化酶的活性越高,植物对逆境的抵抗能力越强[38]。本研究中,随着干旱胁迫的加重,接种AM真菌处理组和未接种处理组植物叶片SOD、POD和CAT活性均呈先增加后减小趋势,这与百合接种AM真菌后的结果一致[39],说明在干旱胁迫下植物自身具有一定程度的增加抗氧化酶活性的能力,但这种能力仅在轻度度干旱胁迫下有效。接种AM真菌后文冠果叶片SOD、POD和CAT活性显著高于未接种处理,说明AM真菌可以提高植物抗氧化酶活性,清除活性氧,降低干旱胁迫对植物细胞膜的损伤。接种混合菌剂后各干旱处理下文冠果幼苗渗透调节物质和抗氧化酶活性的变化幅度大于单一菌剂,各菌剂处理组的渗透调节物质和抗氧化酶的变化规律基本与侵染率的变化规律一致,但AM真菌通过什么途径影响植物的渗透调节物质还需要进一步的研究讨论。

本研究仅基于文冠果幼苗生长和部分生理指标对接种AM真菌后各干旱程度下文冠果幼苗抗旱性进行分析,关于AM真菌如何影响文冠果生理指标和抗旱性的机制还有待进一步研究,今后可从开展更多菌种和基因调控等方面进行研究,全面而深入的阐明AM真菌促进文冠果抗旱性的效应和机制。

4　结论

地表多样孢囊霉、根内根孢囊霉和摩西斗管球囊霉均可以侵染文冠果幼苗,与其形成共生关系,其中,各菌剂在轻度干旱时的侵染率最好,混合菌剂接种的侵染率最高。3种AM真菌在相同干旱程度下均可以促进文冠果地上和根系生长,增加植物体对可溶性糖、可溶性蛋白的积累,降低脯氨酸和丙二醛含量的积累,增强植物抗氧化酶活性,有效提高了植物对干旱环境的适应力。隶属函数分析表明,相较于未接种处理,接种处理均提高了文冠果幼苗的抗旱性,其中,混合接种的效果最佳,其次为地表多样孢囊霉。本研究基于生长和生理指标初步揭示了不同AM真菌对宿主植物文冠果抗旱性的影响,可为文冠果菌根化育苗提供一定的科学依据。

参　考　文　献

[1]Cracknell A P, Varotsos C A. Understanding global climate change: modelling the climatic system and human impacts[M]. Boca Raton: CRC Press,2021:189-277.

[2]何广,李侠,赵若桐,等.丛枝菌根真菌调控土壤氧化亚氮排放的机制[J].土壤学报,2021,58(1):23-30.
He G, Li X, Zhao R T, et al. Mechanisms underlying the regulation of soil nitrous oxide emissions by arbuscular mycorrhizal fungi[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(1): 23-30.

[3]Begum N, Qin C, Ahanger M A, et al. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: implications in abiotic stress tolerance.[J].Frontiers in plant science, 2019, 10: 1068.

[4]喻志,梁坤南,黄桂华,等.丛枝菌根真菌对植物抗旱性研究进展[J].草业科学,2021,38(4):640-653.
Yu Z, Liang K N, Huang G H, et al. Research progress on the mechanisms of arbuscular mycorrhizalfungi on drought resistance in plants[J]. Pratacultural Science, 2021, 38(4): 640-653.

[5]屈璐璐,郭秀芳,贾振宇,等.丛枝菌根真菌提高植物非生物逆境胁迫适应性研究进展[J].草学,2024(1):4-9.
Qu L L, Guo X F, Jia Z Y, et al. Review on the progress of adaptability to abiotic stress adversity by arbuscular mycorrhizal fungi in plants[J].Journal of Grassland and Forage Science, 2024 (1):4-9.

[6]苑海鹏,叶云舒,司皓,等.丛枝菌根真菌对植物逆境胁迫抗性及次生代谢产物合成的影响[J].生物技术通报,2024,40(6):45-56.
Yuan H P, Ye Y S, Si H, et al.Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on plant stress resistance and secondary metabolite synthesis[J].Biotechnology Bulletin, 2024, 40(6):45-56.

[7]邓创,王志高,朱锦茹,等.丛枝菌根接种对黄檀的抗旱性影响[J].分子植物育种,2024,22(15):5107-5114.
Deng C, Wang Z G, Zhu J R, et al. Effects of AM fungal inoculation on the growth and physiology of *Dalbergia hupeana* under drought stress [J]. Molecular Plant Breeding, 2024, 22 (15):5107-5114.

[8]温婷,吴靖,蔡军火,等.丛枝菌根真菌对红花石蒜植株及根际土壤养分影响[J].江西农业大学学报,2023,45(5):1196-1207.

Wen T, Wu J, Cai J H, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on plant and rhizosphere soil nutrients of *Lycoris radiata* [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2023, 45(5): 1196-1207.

[9]康贻豪,张金莲,温云英,等.9种丛枝菌根真菌对柑橘砧木枳和资阳香橙生长发育的影响[J].中国土壤与肥料,2023(9):200-208.
Kang Y H, Zhang J L, Wen Y Y, et al. Effects of nine arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and development of *Poncirus trifoliate Raf* and *Citrus Junos*. ex Tanaka seedlings[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2023(9): 200-208.

[10]Wu Y X, Yang Y, Liu C, et al. Potential suitable habitat of two economically important forest trees (*Acer truncatum and Xanthoceras sorbifolium*) in east Asia under current and future climate scenarios[J]. Forests, 2021, 12(9): 1263.

[11]Shi T L, Ma H Y, Wang X, et al. Differential gene expression and potential regulatory network of fatty acid biosynthesis during fruit and leaf development in yellowhorn (*Xanthoceras sorbifolium*), an oil-producing tree with significant deployment values[J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 14: 1297817.

[12]淑敏,青云,敖敦格日乐,等.水氮添加对文冠果幼苗C、N、P和K分配模式及化学计量特征的影响[J].西北植物学报,2024,44(11):1769-1779.
Shu M, Qing Y, Aodungerile, et al. Effect of water and nitrogen additions on the allocation pattern and stoichiometric characteristics of C, N, P, and K in *Xanthoceras sorbifolia* seedlings[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2024, 44(11): 1769-1779.

[13]李硕,李美玄,刘英卉,等.干旱-复水处理对吉林文冠果幼苗生理特性和光合参数的影响[J].江苏农业科学,2023,51(18):134-143.
Li S, Li M X, Liu Y H, et al. Influences of drought-rewatering on physiological characteristics and photosynthetic parameters of *Xanthoceras sorbifolia* seedlings in Jilin Province[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(18): 134-143.

[14]谢志玉,张文辉,刘新成.干旱胁迫对文冠果幼苗生长和生理生化特征的影响[J].西北植物学报,2010,30(5):948-954.
Xie Z Y, Zhang W H, Liu X C. Growth and physiological characteristics of *Xanthoceras sorbifolia* seedlings under soil drought stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2010, 30(5): 948-954.

[15]冯朝红,李凯荣,张鹏文,等.干旱胁迫下油菜素内酯对文冠果苗木抗氧化酶活性和抗氧化剂含量的影响[J].干旱地区农业研究,2008,26(4):152-155.
Feng C H, Li K R, Zhang P W, et al. Effects of brassinolide on antioxidant enzymes activities and antioxidants contents of *Xanthoceras sorbifolia Bunde* seedlings under drought stress [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26(4): 152-155.

[16]宗建伟,李柽,张静,等.接种丛枝菌根真菌对盐胁迫下文冠果生长及生理特性的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2024,48(4):168-176.
Zong J W, Li C, Zhang J, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and physiological characteristics of *Xanthoceras sorbifolium* under salt stress[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2024, 48(4): 168-176.

[17]Giovannetti M, Mosse B. An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots [J]. New Phytologist, 1980, 84(3): 489-500.

[18]高俊凤.植物生理学试验指导[M].北京:高等教育出版社,2005:142-228.
Gao J F. Guidance of plant physiology experiment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2005: 142-228.

[19]Dong J, Jiang Y M, Lyu M K, et al. Drought changes the trade-off strategy of root and arbuscular mycorrhizal fungi growth in a subtropical chinese fir plantation[J]. Forests, 2023, 14(1): 114.

[20]Hattori R, Matsumura A, Yamawaki K, et al. Effects of flooding on arbuscular mycorrhizal colonization and root-nodule formation in different roots of *soybeans* [J]. Agricultural Sciences, 2013, 4(12): 673-677.

[21]林先贵,郝文英,施亚琴.VA菌根对植物耐旱、涝能力的影响[J].土壤,1992,24(3):142-145.
Lin X G, Hao W Y, Shi Y Q. Effects of VA mycorrhiza on drought and waterlogging tolerance of plants[J]. Soils, 1992, (3): 142-145.

[22]任禛,韩丽,张永福,等.不同丛枝菌根真菌对玉米生长生理的影响[J].江苏农业科学,2015,43(5):63-66.
Ren Z, Han L, Zhang Y F, et al. Effects of different arbuscular mycorrhizal fungi on growth physiology of *Maize*, Jiangsu agricultural sciences[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2015, 43(5): 63-66.

[23]Jansa J, Smith F A, Smith S E. Are there benefits of simultaneous root colonization by different arbuscular mycorrhizal fungi? [J]. The New phytologist, 2008, 177(3): 779-789.

[24]于洁,贾振宇,梁燕,等.丛枝菌根真菌接种对紫花苜蓿抗旱性的影响[J].中国草地学报,2016,38(5):13-18.
Yu J, Jia Z Y, Liang Y, et al. Effect of arbuscular mycorrhiza fungi on drought resistance of Alfalfa (*Medicago sativa*) [J]. Chinese Journal of Grassland, 2016, 38(5): 13-18.

[25]王宇涛,辛国荣,李韶山.丛枝菌根真菌最新分类系统与物种多样性研究概况[J].生态学报,2013,33(3):834-843.
Wang Y T, Xin G R, Li S S. An overview of the updated classification system and species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(3): 834-843.

[26]Zhang X H, Han C Z, Wang Y B, et al. Integrated analysis of transcriptomics and metabolomics of garden *Asparagus* (*Asparagus officinalis* L.) under drought stress[J]. BMC Plant Biology, 2024, 24(1): 563.

[27]Founoune-Mboup H, Diallo B, Adigoun R F R, et al. Contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to the bioavailability of micronutrients (iron and zinc) in millet accessions[J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15: 1364469.

[28]Ma J, Zhao Q, Zaman S, et al. The transcriptomic analysis

revealed the molecular mechanism of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) inoculation in watermelon [J]. Scientia Horticulturae,2024,332113184.

[29]Pereira J A P, Vieira I J C, Freitas M S M, et al. Effects of phosphorus and arbuscular mycorrhizal fungi on the quality of chili pepper fruits[J]. Journal of Plant Nutrition, 2024, 47(8): 1319-1330.

[30]Kaur S, Campbell B J, Suseela V. Root metabolome of plant-arbuscular mycorrhizal symbiosis mirrors the mutualistic or parasitic mycorrhizal phenotype.[J].New phytologist,2022,234(2):672-687.

[31]Mirshad P P, Puthur J T. *Arbuscular mycorrhizal* association enhances drought tolerancepotential of promising bioenergy grass (*Saccharum arundinaceum* Retz.) [J]. Environmental Monitoringand Assessment,2016, 188(7): 425.

[32]Yooyongwech S, Phaukinsang N, Cha-umS, et al. Arbuscular mycorrhizaimproved growth performance in *Macadamia tetraphylla L.* grown under water deficit stressinvolves soluble sugar and proline accumulation[J]. Plant Growth Regulation, 2013,6(3)9: 285-293.

[33]侯颖,张立伟,王立涛,等.丛枝菌根真菌对香樟幼苗生长和抗寒生理指标的影响[J].东北林业大学学报,2023,51(9):95-100.
Hou Y, Zhang L W, Wang L T, et al. Effects of arbuscular mycorrhiza fungi on seedlings growth and physiological indexes of cold resistance in *Cinnamomum camphora* [J]. Journal of Northeast Forestry University,2023,51(9):95-100.

[34]Zhang F, He J D, Ni Q D, et al. Enhancement of drought tolerance in trifoliate orange by mycorrhiza: changes in root sucrose and proline metabolisms[J]. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca,2018,46(1):270-276.

[35]Chitarra W, Maserti B, Gambino G, et al. Arbuscular mycorrhizal symbiosis-mediated tomato tolerance to drought. [J].Plant signaling & behavior,2016,11(7):e1197468.

[36]马子元,钱志豪,马红彬,等.宁夏荒漠草原乡土植物的抗旱性评价[J].中国草地学报,2022,44(4):67-75.
Ma Z Y, Qian Z H, Ma H B, et al. Evaluation of drought resistance of native plants in Ningxia desert steppe[J].Chinese Journal of Grassland,2022,44(4):67-75.

[37]田方,陈锡,钟理,等.丛枝菌根真菌对白刺花苗期抗旱酶系及生理特性的影响[J].西北农业学报,2022,31(12):1625-1634.
Tian F, Chen X, Zhong L, et al. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on eenzyme system and biochemical indexes of drought resistance in *Sophora davidii*[J].Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica,2022,31(12):1625-1634.

[38]Li W, Wu H Y, Hua J K, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi enhanced resistance to low-temperature weak-light stress in snapdragon (*Antirrhinum majus L.*) through physiological and transcriptomic responses[J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15:1330032-1330032.

[39]刘兆娜,郭绍霞,李伟.AM真菌对百合生长和生理特性的影响[J].草业学报,2017,26(11):85-93.
Liu Z N, Guo S X, Li W. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and physiological characteristics of *Lilium brownii* [J].Acta Prataculturae Sinica,2017,26(11):85-93.

(编辑:郭玥微)