



温婷, 游欣, 吴靖, 等. 两种 AMF 组合对石蒜叶生长及光合效能的影响[J]. 江西农业大学学报, 2024, 46(6): 1436–1444.
WEN T, YOU X, WU J, et al. Effects of two AMF combinations on leaf growth and photosynthetic efficiency of *Lycoris radiata*[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2024, 46(6): 1436–1444.

两种 AMF 组合对石蒜叶生长 及光合效能的影响

温 婷¹, 游 欣¹, 吴 靖¹, 魏绪英², 王 琼¹, 蔡军火^{1*}

(1. 江西农业大学 园林与艺术学院, 江西 南昌 330045; 2. 江西财经大学 艺术学院, 江西 南昌 330032)

摘要:【目的】旨在探究接种丛枝菌根真菌(AMF)对红花石蒜生长及光合效能的影响, 筛选适宜其栽培的伴生菌种。【方法】将盆栽红花石蒜放在人工气候箱内进行培养(25/20 ℃), 以摩西斗管囊霉(*Funneliformis mosseae*, FM)和根内根孢囊霉(*Rhizophagus intraradices*, RI)这 2 种 AMF 为试验菌剂, 采用 3 种 AMF 接种处理(FM、RI、FM+RI), 以不接种处理为对照(CK), 分别统计其根系侵染率、叶片生长情况, 并测定光合生理指标。【结果】(1)AMF 能与红花石蒜形成良好的共生关系; 3 种 AMF 处理的平均根系侵染率为 83.55%, 以混合双接(FM+RI)处理最高(达 87.00%)。(2)不同 AMF 接种处理对红花石蒜的叶片生长有显著的促进作用, 其中 FM、RI 和 FM+RI 组的叶片长度最大值分别较 CK 增加了 5.04%、6.85% 和 18.89%。(3)在 25/20 ℃条件下, 4 种处理的叶片均始终处于“不断更新”状态。(4)3 种 AMF 接种处理均能有效提高红花石蒜叶片的叶绿素相对含量、光能利用率以及气孔交换能力, 并减少能量散失。其中, 以 FM+RI 组效果最佳, 其叶绿素相对含量、PSII 的实际光合效率、光化学淬灭系数、光合电子传递速率、净光合速率、气孔导度和水分利用率分别较 CK 增加了 9.89%、42.5%、25.91%、37.93%、50.00%、22.33% 和 75.53%, 并显著降低了非光化学淬灭系数(54.68%)和胞间 CO₂ 浓度(30.03%)。(5)不同接种处理对红花石蒜叶片生长及其光合效能的促进效应由好到差依次为 FM+RI、FM、RI 和 CK。【结论】3 种 AMF 处理均能有效侵染红花石蒜的根系, 也能明显促进其叶片的伸长生长和光合效率的提高, 其中以混接处理(FM+RI)的综合效果最好, 可考虑在红花石蒜的产业化栽培中推广。

关键词: 红花石蒜; AMF 真菌; 生长效应; 光合特性

中图分类号: S682.29 文献标志码: A

文章编号: 1000-2286(2024)06-1436-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of two AMF combinations on leaf growth and photosynthetic efficiency of *Lycoris radiata*

WEN Ting¹, YOU Xin¹, WU Jing¹, WEI Xuying², WANG Qiong¹, CAI Junhuo^{1*}

(1. College of Landscape Architecture, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2. College of Art, Jiangxi Finance and Economics University, Nanchang 330032, China)

Abstract: [Objective] This study aims to examine the impact of inoculating *Lycoris radiata* with arbuscular

收稿日期: 2024-05-16 修回日期: 2024-06-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(32360420、31960327)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(32360420、319603220)

作者简介: 温婷, 硕士生, orcid.org/0000-0002-1804-9350, 1794862481@qq.com; *通信作者: 蔡军火, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事球根花卉的开花调控与应用研究, orcid.org/0000-0002-7731-4492, cjhuo7692@163.com。

©《江西农业大学学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

mycorrhizal fungi (AMF) on its growth and photosynthetic efficiency, in order to screen good strains suitable for the cultivation of *L. radiata*. [Method] The Potted *L. radiata* was cultivated in an artificial climate chamber (25/20 °C). Two types of AMF, *Funneliformis mosseae* (FM) and *Rhizophagus intraradices* (RI), were used as test inoculants, and three AMF inoculation treatments (FM, RI, and FM+RI) were adopted, with no inoculation treatment as the control (CK). The root infection rate, leaf growth and photosynthetic physiological indexes were measured respectively. [Result] The results showed that: (1) AMF can form a beneficial symbiotic relationship with *Lycoris radiata*. The average root infestation rate of the three AMF treatments was 83.55%, with the mixed double inoculation treatment (FM+RI) having the highest root infestation rate (up to 87%). (2) Different AMF inoculation treatments had a significant promoting effect on the leaf growth of *L. radiata*. Compared with the control group (CK), the average maximum leaf length in the FM, RI, and FM+RI groups increased by 5.04%, 6.85%, and 18.89%, respectively. (3) Under the conditions of 25/20 °C, the leaves of the four treatments were always in a “constantly renewing” state. (4) All three AMF inoculation treatments were effective in increasing the relative chlorophyll content, light energy utilisation and leaf stomatal exchange capacity of *L. radiata*, and reducing energy loss. Among them, FM+RI was the most effective, which increased the relative chlorophyll content, the actual photosynthetic efficiency of PSII, the photochemical quenching coefficient, the photosynthetic electron transfer rate, the net photosynthetic rate, the stomatal conductance, and the water utilisation by 9.89%, 42.5%, 25.91%, 37.93%, 50.00%, 22.33%, and 75.53%, respectively, compared with that of CK. It also significantly reduced the non-photochemical quenching coefficient (54.68%) and intercellular CO₂ concentration (30.03%). (5) The effects of different inoculation treatments on leaf growth and photosynthetic efficiency of *L. radiata* were in the order of FM + RI > FM > RI > CK. [Conclusion] The three AMF treatments were effective in infesting the root system of *L. radiata*, and they also significantly promoted the elongation growth of the leaves and the improvement of the photosynthetic efficiency of *L. radiata*. Among them, the mixed treatment group (FM+RI) showed the best combined effect, which can be considered to be applied in the production and cultivation of *L. radiata* in the future.

Keywords: *Lycoris radiata*; arbuscular mycorrhizae fungi; growth effect; photosynthetic characteristics

【研究意义】丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizae fungi, AMF)是一种广泛存在于自然界中的菌根真菌类型,可与大部分植物建立菌根共生体系^[1],从宿主植物根系中获取光合碳水化合物,同时又能促进植物对土壤养分和水分的吸收^[2-3],是极具潜力的生物肥料。红花石蒜(*Lycoris radiata*)为我国特色球根花卉^[4],具自发的“夏眠”特性^[5]。红花石蒜花形奇特、叶形优美,有较高的观赏价值,且其鳞茎中含有丰富的石蒜碱和加兰他敏,亦可作药用^[6-7]。光照对红花石蒜的生长至关重要,在遮光45%条件下,红花石蒜叶片净光合速率最高,且花支数、花葶长度、花径也最大,适宜用于切花生产;而全光照条件下,其鳞茎干质量最多,适宜种球生产以提炼药用成分^[8]。因此,研究AMF对红花石蒜的生长及光合能力的影响,对于完善红花石蒜人工栽培措施及进一步探究AMF对红花石蒜的促生效应有着重要意义。【前人研究进展】接种AMF能显著增加百合(*Lilium brownii*)、郁金香(*Tulipa gesneriana*)等球根类植物的株高、干重(地上和地下部分)和叶面积,其叶片的净光合速率和气孔导度也显著提高^[9-10]。接种AMF还能增加植物光合色素含量,有效提高其对光能的吸收、利用和碳同化效率^[11],从而促进生长发育^[12]。此外,AMF还能增强植物的抗逆能力,缓解逆境带来的伤害^[13]。目前,国内外学者已对红花石蒜生长发育过程中碳水化合物、内源激素含量以及淀粉代谢相关酶活性的变化^[14-17]做了大量研究,同时研究了环境因子对其生长发育的影响^[18-19]和花芽分化等^[20-22],并利用转录组学^[23-24]和蛋白质组学^[25]对其发育过程进行了分子层面的探讨,但尚未见接种AMF对其叶片生长及光合作用影响的报道。

【本研究切入点】为探究不同AMF接种处理对红花石蒜的叶片生长和光合特性的影响,本试验以空白处理为对照组(CK),采用3种AMF接种处理(FM、RI、FM+RI),分别统计各处理组的根系侵染率、叶片

生长情况,并测定光合生理指标。【拟解决的关键问题】旨在筛选出适宜的AMF菌种,为红花石蒜的产业化栽培提供新的参考。

1 材料与方法

1.1 供试植物及菌种

本试验供试红花石蒜种球直径(2.6 ± 0.2)cm,健康无病虫害,采集于江西农业大学花卉盆景实训基地($28^{\circ}76'N$, $115^{\circ}83'E$),将种球剥去外层褐表皮备用。接种AMF菌剂为长江大学根系生物学研究所提供的摩西斗管囊霉(*Funneliformis mosseae*)和根内根孢囊霉(*Rhizophagus intraradices*)。红花石蒜种植前的准备及具体的接种方法参照温婷等^[26]的方法。

1.2 试验设计

试验采用单因素试验设计,设置3个AMF接菌处理组,分别为摩西斗管囊霉组(FM)、根内根孢囊霉组(RI)和二者混合接种处理组(FM+RI),以不接菌处理为对照组(CK),共计4个处理组。每个处理设置12个重复,每个重复为1盆红花石蒜,共计48盆红花石蒜。

试验在人工气候箱中进行,气候箱昼夜温度设置为 $25/20^{\circ}C$,设置光周期12h昼/12h夜,光照强度10000lx昼/0lx夜,相对湿度为40%~80%,红花石蒜生长期按常规管理。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 AMF侵染率

菌根侵染率采用改良后的醋酸墨水法染色和十字交叉法镜检。菌根侵染率=(总侵染交叉点数/总观察交叉点数) $\times 100\%$ 。

1.3.2 生长形态指标

试验期间,每个处理组随机选取长势相近的3盆植株作为观测对象,每隔5d利用卷尺(0.1cm)测量最初萌发的2片叶片的长度,并持续记录至叶片自然枯萎。

1.3.3 叶绿素相对含量(SPAD)

仪器为SPAD-502型手持便携式叶绿素仪。

1.3.4 叶绿素荧光参数

仪器为PAM-2500便携式调制叶绿素荧光仪(Walz,德国)。测定项目为叶绿素初始荧光(F_0)、PS II的实际光合效率 $Y(II)$ 、光化学淬灭系数(qP)、非光化学淬灭系数(NPQ)以及光合电子传递速率(ETR)。

1.3.5 光合参数

仪器为Ci-340便携式光合仪(美国CID公司),选择晴朗无云的09:00—11:00进行测定。具体的测定指标包括净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i)。并进一步得出水分利用效率(WUE),其计算公式为 $WUE = P_n / T_r$ 。

以上各指标除生长形态指标外,均在接种6个月后(11月中旬)进行,此时红花石蒜处于叶成熟期,叶片发育完全。为准确测量红花石蒜的光合效率,选取植株基部第2片成熟叶片的中上部作为测定区域,并避开叶脉。每个处理组不少于3个重复。

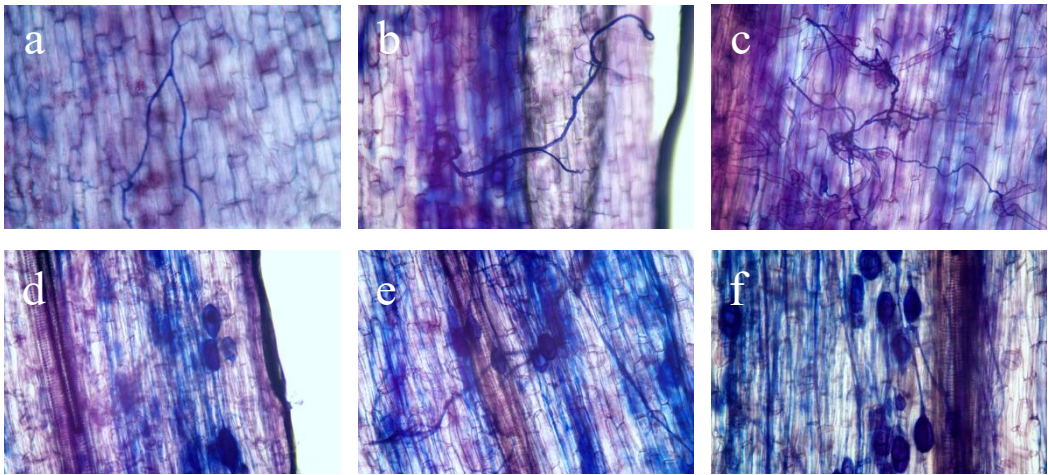
1.4 数据处理

利用SPSS 26软件对数据进行单因素方差分析,并使用Origin 2021软件进行数据可视化作图。

2 结果与分析

2.1 AMF对红花石蒜根系的侵染情况

在红花石蒜的根部土壤接种AMF 6个月后,对各处理组根系的侵染情况进行观察。由图1可知,3种AMF处理组的根系均受到一定程度的侵染,可明显观察到菌丝和泡囊结构。CK组的根系未检测到侵染(侵染率为0),而不同AMF处理组的平均侵染率为83.55%。其中以FM+RI组的根系侵染率最高(达87.00%),其次依序为RI组(84.33%)和FM组(79.33%)。这一结果表明,FM与RI的混合接种在促进红花石蒜根系侵染方面表现出了显著的协同作用。



a.FM组根系菌丝结构;b.RI组根系菌丝结构;c.FM+RI组根系菌丝结构;d.FM组根系泡囊结构;e.RI组根系泡囊结构;f.FM+RI组根系泡囊结构。

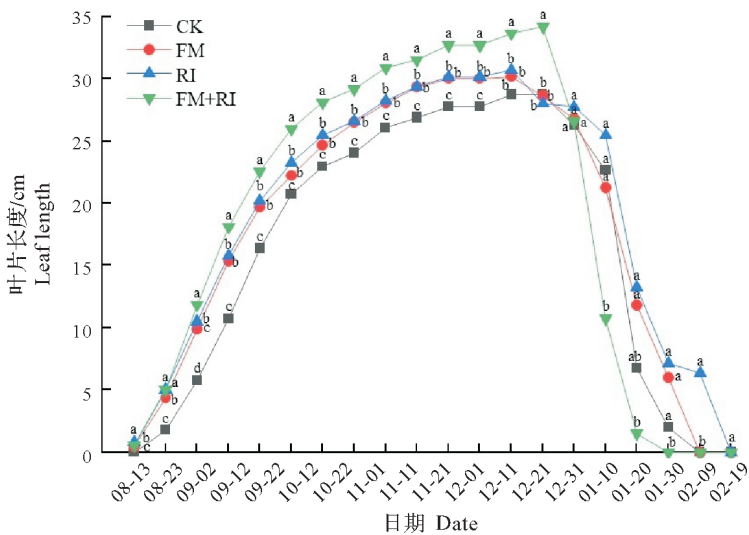
a: Inoculated FM root fungal mycelial structure; b: Inoculated RI root fungal mycelial structure; c: Mixed fungal mycelial structure of both strains; d: Inoculated FM root vesicular structure; e: Inoculated RI root vesicular structure; f: Mixed vesicular structure of both strains in root.

图1 不同接种方式下红花石蒜根系侵染情况

Fig.1 Root infestation of *Lycoris radiata* under different inoculation methods

2.2 AMF对红花石蒜叶片生长的影响

叶片的生长状况是植物整体生长趋势的直观反映。以4种不同处理的红花石蒜基部2片叶为观测和记录对象,动态测定其长度变化,结果表明,叶片长度的动态变化在各处理间保持了一致性,均呈“短—长—短”的变化趋势。即在8—12月,叶片长度持续增长(以8—10月增速最快,11—12月较缓),1—2月份则快速减少(图2)。在叶片伸长生长过程中,AMF处理组的叶片长度均显著大于CK组。各处理的叶片长度均在12月中旬至下旬达最大值,且FM组、RI组、FM+RI组的叶片长度最大值分别较CK增加了5.04%、6.85%、18.89%。另外,3种AMF接种处理组中,以FM+RI组的叶片始黄期最晚(12月21日),且单叶黄枯(枯萎)期最早(次年1月30日)。这说明,接种AMF真菌不仅能够有效促进红花石蒜的叶片伸长生长,还能在一定程度上缩短其叶枯黄期。



不同小写字母表示同一时期不同处理之间差异显著($P<0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) between treatments in the same period.

图2 红花石蒜叶片长度动态变化趋势

Fig.2 Dynamic change trend of leaf length in *Lycoris radiata*

在南昌地区露地栽培的红花石蒜,一般于9月下旬至10月上旬抽生新叶,10—11月为叶旺盛生长期,12月至翌年2月为叶成熟期,3—4月为叶黄枯期,至5月叶枯萎休眠^[26]。然而,在本试验中却发现,在人工气候箱中恒温(25/20℃)培养的红花石蒜,叶片于8月中旬便抽出,同时8月生长出的叶片于次年2月左右完全枯黄,即红花石蒜展叶期与叶黄枯期均较露地栽培的群体提前约2个月。另外,在试验期间,所有处理的“叶片始终处于不断更新状态”(图3)。即在25℃(昼12h)/20℃(夜12h)条件下的盆栽红花石蒜,不断地有新叶抽出,同时伴有叶片不断枯死(新叶萌生与老叶黄枯并存)。



CK、FM、RI和FM+RI为红花石蒜接种AMF第375天。

CK、FM、RI、and FM+RI are shown in the figure for *Lycoris radiata* inoculated with AMF on day 375.

图3 不同接种方式下红花石蒜叶片生长对比状况

Fig.3 Comparison of leaf growth of *Lycoris radiata* under different inoculation methods

2.3 AMF对红花石蒜叶片光合特性的影响

接种不同的AMF菌种均能显著($P<0.05$)增加红花石蒜叶片的叶绿素相对含量,但3个接种处理组之间无显著差异(表1)。与CK相比,FM、RI、FM+RI处理组的叶绿素相对含量分别提高了11.48%、11.58%、9.89%。另外,3种AMF处理组的 F_v 、 $Y(II)$ 、 qP 和ETR也都有显著提高,且NPQ显著降低。FM、RI、FM+RI处理组的 F_v 值均显著高于CK,但3个接种处理组之间无显著差异;而 $Y(II)$ 、 qP 和ETR值,均以FM+RI处理组最高,较CK分别提高了42.5%、25.91%和37.93%,且FM+RI处理组NPQ值最小(较CK降低了54.68%)。这说明,接种AMF可以显著提高红花石蒜叶片的叶绿素含量及光能利用效率,从而使其更有效地利用光能进行光合作用。

表1 不同接种方式下红花石蒜叶片相对叶绿素含量及荧光参数比较

Tab.1 Relative chlorophyll content and chlorophyll fluorescence parameters of *Lycoris radiata* leaves under different inoculation methods

处理组 Treatment	相对叶绿素含 量SPAD	初始荧光 F_v	PS II 的实际光 合效率 $Y(II)$	光化学淬灭系 数 qP	非光化学淬灭 系数NPQ	光合电子传递速 率ETR
CK	77.86±1.94 ^b	0.15±0.00 ^b	0.40±0.01 ^d	0.66±0.01 ^c	1.39±0.01 ^a	87.00±1.73 ^d
FM	86.80±1.50 ^a	0.16±0.01 ^a	0.45±0.02 ^c	0.74±0.03 ^b	1.15±0.03 ^b	97.00±3.69 ^c
RI	86.88±0.88 ^a	0.16±0.00 ^a	0.51±0.01 ^b	0.80±0.01 ^a	0.95±0.03 ^c	110.00±1.89 ^b
FM+RI	85.56±1.26 ^a	0.16±0.00 ^a	0.57±0.02 ^a	0.83±0.02 ^a	0.63±0.10 ^d	120.00±3.78 ^a

不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant differences among various treatments at $P<0.05$.

从表2可知,与CK组相比,3种AMF处理组红花石蒜叶片的 P_n 、 G_s 和WUE均显著增加,而 C_i 却显著减少。其中,FM、RI和FM+RI处理组的 P_n 值分别较CK提高了70.83%、43.06%和50.00%, G_s 分别增加了17.37%、17.37%和22.33%,WUE增加了32.41%、67.42%和75.53%, T_r 仅有FM处理组显著提高(达70.00%);而FM、RI和FM+RI处理组的 C_i 浓度却分别下降了52.40%、23.22%和30.03%。其中以FM处理组的净光合速率最高,但该组的 C_i 浓度和WUE却相对较低。综上所述,3种AMF接种处理可以显著提高红花石蒜的光合效能、气体交换能力及水分利用效率。

表 2 不同接种方式下红花石蒜叶片气体交换参数

Tab.2 Gas exchange parameters of *Lycoris radiata* leaves under different inoculation methods

处理组 Treatment	净光合速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) P_n	蒸腾速率/ ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) T_r	气孔导度/ ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) G_s	胞间 CO_2 浓度/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-1}$) C_i	水分利用率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$) WUE
CK	0.72±0.12 ^c	0.10±0.00 ^b	4.03±0.25 ^b	215.33±32.65 ^a	6.17±0.29 ^c
FM	1.23±0.03 ^a	0.17±0.03 ^a	4.73±0.13 ^a	102.50±6.73 ^c	8.17±1.38 ^b
RI	1.03±0.03 ^b	0.10±0.00 ^b	4.73±0.16 ^a	165.33±23.37 ^b	10.33±0.29 ^a
FM+RI	1.08±0.03 ^b	0.10±0.00 ^b	4.93±0.00 ^a	150.67±13.32 ^b	10.83±0.29 ^a

不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant differences among various treatments at $P<0.05$.

2.4 AMF 处理对石蒜叶片生长及光合影响的主成分分析

为客观地反映不同接种处理对红花石蒜生长性状的影响,将红花石蒜叶片长度(L)、叶绿素相对含量(SPAD)、叶绿素荧光参数(F_o 、 $Y(\text{II})$)、qP、NPQ、ETR)以及叶片气体交换参数(P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i 、WUE)作为自变量,对不同处理的红花石蒜生长性状进行主成分分析。由表 3 可知,共筛选出 2 个特征值大于 1 的主成分,累计贡献率高达 97.12%,可较好地代表数据反映的信息。因此,综合考虑植株的叶片形态指标与光合生理指标,能够更全面合理地评价 AMF 对红花石蒜生长状况的影响。

表 3 红花石蒜生长和光合性状指标主成分分析

Tab.3 Principal component analysis of growth and photosynthetic trait indices of *Lycoris radiata*

性状指标 Character index	第 1 主成分 First principal component	第 2 主成分 Second principal component	性状指标 Character index	第 1 主成分 First principal component	第 2 主成分 Second principal component
叶长 Leaf length	0.86	-0.36	T_r	0.08	0.98
SPAD	0.89	0.38	G_s	0.99	0.14
F_o	0.94	0.30	C_i	-0.66	-0.75
$Y(\text{II})$	0.92	-0.38	WUE	0.95	-0.27
qP	0.97	-0.22	特征值 Eigen value(λ)	8.86	2.80
NPQ	-0.93	0.35	方差贡献率/% Proportion of variance	73.81	23.31
ETR	0.93	-0.38	累计方差贡献率/% Cumulative variance	73.81	97.12
P_n	0.79	0.61			

对相关数据进行标准化后,利用 2 个主成分的贡献率和隶属函数模型,得出了不同接种处理叶片生长特性的综合得分。由表 4 可知,3 种 AMF 处理的综合得分均高于 CK 组,其中以 FM+RI 组最高,说明其对红花石蒜的生长及其光合作用的促进效果最好,其次为 FM 组,再次为 RI 组。

表 4 红花石蒜生长和光合性状指标的综合排序

Tab.4 Comprehensive ranking of growth and photosynthetic trait indices of *Lycoris radiata*

菌株处理 Strain Treatment	第 1 主成分得分 First principal component score	第 2 主成分得分 Second principal component score	综合得分 Comprehensive score	排序 Sort
CK	-4.20	-0.74	-3.28	4
FM	0.34	2.46	0.82	2
RI	1.12	-0.48	0.72	3
FM+RI	2.74	-1.24	1.74	1

3 讨论与结论

3.1 讨论

本研究表明,3种不同的AMF接种处理均能有效促进红花石蒜的叶片生长,且以混合接种(FM+RI组)的促进效果最好。究其原因有二:(1)这与3种不同AMF接种处理的根系侵染率(平均超过75%,其中FM+RI组高达87%)均显著高于CK处理有关;(2)还与3种AMF接种处理均能增加红花石蒜叶片的叶绿素相对含量,同时显著提高其光合效能有关,具体表现为提高其PS II实际光合效率、光合电子传递速率以及净光合速率等,同时降低其非光化学淬灭系数和胞间CO₂浓度。因为菌根侵染率是评估菌株与宿主植物共生情况的关键指标之一,高侵染率通常反映出良好的共生效应,对植物生长发育的促进作用就越显著^[27]。AMF能有效提高植物对养分的吸收能力,从而改善植物的生长^[28]。混合菌种的叠加使侵染能力增强及其扩展的菌丝网络面积更大,其对植物生长发育产生的促生效应就更佳^[29]。此外,菌根的共生有利于增强植物叶绿素的内囊体以及碳同化酶的活性,促进叶绿素合成过程中水、矿质元素等物质的循环效率,通过增加叶片的叶绿素含量^[30-31],增强其捕光能力和叶绿素荧光效率,增大叶片气孔导度并改善水分代谢(使更多的CO₂和水分进入叶肉细胞)^[32],并显著降低光能耗散,提升光能利用率,使得光合产物得以积累^[33],进而促进植物的生长与发育。

另外,本研究还发现在25/20℃条件下,红花石蒜在整个生长期(8月至翌年6月下旬)始终呈现为“伴随着老叶的枯黄,不断有新叶抽出”的现象。这与梁素秋等^[34]发现的“忽地笑持续生长于25/20℃条件下时,其叶片寿命更长,同时会不定期抽出新叶”的结果相似。与此同时,红花石蒜的展叶期(抽叶期:8月份)与叶黄枯期(变黄至枯萎期:2月下旬)均较露地栽培的群体提前约2个月。这说明,红花石蒜的地上部“夏眠”的特殊习性可以通过温度进行调控。有研究表明,14℃左右的日均气温最适合红花石蒜叶片的高生长,其中20℃以上的变温(昼/夜)贮藏会显著促进其提前出叶^[19],而日均气温超过24℃则会明显抑制其叶芽生长^[35]。可见,石蒜叶片生长受温度变化的影响较大。

3.2 结论

不同AMF接种组合处理对红花石蒜的根系平均侵染率高达83.55%,说明AMF能与红花石蒜形成良好的共生关系。接种AMF不仅能够有效提高红花石蒜叶片中的叶绿素相对含量、光能利用率以及气孔交换能力,增强光合效能,还能显著促进其叶片的伸长生长。不同处理组对红花石蒜叶片生长及光合作用的促进效应由好到差依次为:FM+RI、FM、RI和CK,即FM+RI混合接种处理的综合促进效应最佳。因此,可以考虑在石蒜属植物的产业化生产中适当接种AMF。另外,本研究还发现红花石蒜在25/20℃条件下时,可基本保持“营养生长”状态,并不时伴有“老叶枯黄—新叶抽出”现象,但对于其内在的调控机制暂不得而知,有待下一步深入研究。

致谢:江西省研究生创新专项资金项目(YC2023-S353)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

参考文献 References:

- [1] 王茂胜,卫亚丽.烟草丛枝菌根(AM)研究进展[J].中国土壤与肥料,2007,39(2):13-16.
WANG M S, WEI Y L. Advances in the research of tabacco arbuscular mycorrhizas fung [J]. Soil and fertilizer sciences in China, 2007, 39(2): 13-16.
- [2] ZHANG H H, XU N, LI X, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi (*Glomus mosseae*) improves growth, photosynthesis and protects photosystem ii in leaves of *Lolium perenne* L. in cadmium contaminated soil [J]. Frontiers in plant science, 2018, 9: 1156.
- [3] SHAFIQ M, CASAS-SOLÍS J, NERI-LUNA C, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi as a plant growth stimulant in a tomato and onion intercropping system [J]. Agronomy, 2023, 13(8): 2003.
- [4] 令狐昱慰,李多伟.石蒜属植物的研究进展(综述)[J].亚热带植物科学,2007,36(2):73-76.
LINGHU Y W, LI D W. Advances in the research of *lycoris* [J]. Subtropical plant science, 2007, 36(2): 73-76.
- [5] LIU K, TANG C F, ZHOU S B, et al. Comparison of the photosynthetic characteristics of four *Lycoris* species with leaf appearing in autumn under field conditions [J]. Photosynthetica, 2012, 50(4): 570-576.
- [6] 金雅琴,黄雪芳,李冬林.江苏石蒜的种质资源及园林用途[J].南京农专学报,2003,19(3):17-21.

- JIN Y Q, HUANG X F, LI D L. Resource of *Lycoris* in Jiangsu province and its garden use[J]. Journal of Nanjing agricultural technology college, 2003, 19(3): 17-21.
- [7] 杨馨. 石蒜生物碱和多糖的提取及其与酒精发酵关系的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2011.
- YANG X. The extraction of alkaloids and polysaccharide from *Lycoris radiata* and study their relationships with the ethanol fermentation[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2011.
- [8] 蔡军火, 魏绪英, 张露. 遮光对石蒜物质积累与切花品质的影响[J]. 草业科学, 2013, 30(9): 1401-1406.
- CAI J H, WEI X Y, ZHANG L. Effects of shading on matter accumulation, bulb yield and cut flower morphologic quality of *Lycoris radiata*[J]. Pratacultural science, 2013, 30(9): 1401-1406.
- [9] 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 prataculturæ Sinica, 2017, 26(11): 85-93.
- [10] 李文彬, 卢文倩, 谢佳委等. 丛枝菌根真菌对郁金香生长及其切花生理的影响[J]. 菌物学报, 2018, 37(4): 456-465.
- LI W B, LU W Q, XIE J W, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and cut flower physiology of *Tulipa gesneriana*[J]. Mycosystema, 2018, 37(4): 456-465.
- [11] YE Q H, WANG H, LI H. Arbuscular mycorrhizal fungi improve growth, photosynthetic activity, and chlorophyll fluorescence of *Vitis vinifera* L. cv. ecolly under drought stress[J]. Agronomy, 2022, 12(7): 1563.
- [12] 邹慧, 王春胜, 曾杰. 西南桦幼苗接种丛枝菌根真菌的生长与光合生理响应[J]. 热带亚热带植物学报, 2018, 26(4): 383-390.
- ZOU H, WANG C S, ZENG J. Growth and photosynthetic physiology response of *Betula alnoides* seedlings to inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. Journal of tropical and subtropical botany, 2018, 26(4): 383-390.
- [13] LI H, ZHANG L L, WU B C, et al. Physiological and proteomic analyses reveal the important role of arbuscular mycorrhizal fungi on enhancing photosynthesis in wheat under cadmium stress[J]. Ecotoxicology and environmental safety, 2023, 261(13): 115105.
- [14] CAI J H, FAN J J, ZHANG Y, et al. Relationship among changes in nonstructural carbohydrate content, metabolic enzyme activity, and growth rhythm in *Lycoris radiata*[J]. Russian journal of plant physiology, 2022, 69(5): 85.
- [15] 马美霞, 魏绪英, 于芬, 等. 红花石蒜开花过程中鳞茎淀粉粒分布动态[J]. 江西农业大学学报, 2022, 44(4): 862-870.
- MA M X, WEI X Y, YU F, et al. Distribution dynamics of starch grains during flowering of *Lycoris radiata*[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2022, 44(4): 862-870.
- [16] XU J X, LI Q Z, YANG L Y, et al. Changes in carbohydrate metabolism and endogenous hormone regulation during bulblet initiation and development in *Lycoris radiata*[J]. BMC plant biology, 2020, 20(1): 1-17.
- [17] XU J X, LI Q Z, YANG L Y, et al. Changes in starch synthesis and metabolism within developing bulbs of *Lycoris radiata* during the vegetative growth stage[J]. Journal of plant growth regulation, 2020, 39(2): 785-794.
- [18] 蔡军火, 魏绪英, 李金峰, 等. 环境温度对红花石蒜生长节律的调控研究[J]. 江西农业大学学报, 2018, 40(1): 24-31.
- CAI J H, WEI X Y, LI J F, et al. The regulation and control of ambient temperature on growth rhythm of *Lycoris radiata*[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2018, 40(1): 24-31.
- [19] 魏绪英, 陈慧婷, 李金峰, 等. 变温处理对红花石蒜鳞茎生理及开花的影响[J]. 江西农业大学学报, 2019, 41(6): 1086-1092.
- WEI X Y, CHEN H T, LI J F, et al. Effects of alternating temperature on the bulb physiology and flowering of *Lycoris radiata* [J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2019, 41(6): 1086-1092.
- [20] PARK C H, YEO H J, KIM Y J, et al. Profiles of secondary metabolites (phenolic acids, carotenoids, anthocyanins, and galantamine) and primary metabolites (carbohydrates, amino acids, and organic acids) during flower development in *Lycoris radiata*[J]. Biomolecules, 2021, 11(2): 248.
- [21] CAI J H, FAN J J, WEI X Y, et al. Differences in floral development between *Lycoris radiata* and *Lycoris sprengeri*[J]. Scienceasia, 2020, 46(3): 271-279.
- [22] CHENG G H, ZHANG F J, SHU X C, et al. Identification of differentially expressed genes related to floral bud differentiation and flowering time in three populations of *Lycoris radiata*[J]. International journal of molecular sciences, 2022, 23(22): 14036.
- [23] WANG N, SHU X C, ZHANG F J, et al. Comparative transcriptome analysis identifies key regulatory genes involved in an-

- thocyanin metabolism during flower development in *Lycoris radiata*[J].Frontiers in plant science,2021,12:761862.
- [24] JIANG D X.Transcriptome analysis of *Lycoris radiata* bulb tips at different developmental stages[J].Pakistan journal of botany,2022,55(3):1023-1034.
- [25] JIANG X R, CHEN H T, WEI X Y, et al.Proteomic analysis provides an insight into the molecular mechanism of development and flowering in *Lycoris radiata*[J].Acta physiologiae plantarum,2021,43(1):1-13.
- [26] 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.
- [27] CAI J H, FAN J J, WEI X Y, et al.A three-dimensional analysis of summer dormancy in the red spider lily(*Lycoris radiata*). Hort science,2019,54(9):1459-1464.
- [28] 贾艳艳,诸俊,顾大路,等.接种丛枝菌根真菌对麦秆分解和旱稻生长的影响[J].中国农学通报,2020,36(30):1-6.
- JIA Y Y, ZHU J, GU D L, et al.Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi: effects on wheat-straw decomposition and upland rice growth[J].Chinese agricultural science bulletin,2020,36(30):1-6.
- [29] 杨波,王邵军,赵爽,等.丛枝菌根真菌共生对石漠化生境白枪杆生长及光合特性的影响[J].浙江农林大学学报,2022,39(5):1028-1036.
- YANG B, WANG S J, ZHAO S, et al.Effects of arbuscular mycorrhizal fungi symbiosis on growth and photosynthetic characteristics of *Fraxinus malacophylla* in rocky desertification habitats[J].Journal of Zhejiang A&F university,2022,39(5):1028-1036.
- [30] 姚玉珊,林珍珍,李媛,等.丛枝菌根真菌感染对高粱生长及光合特性的影响[J].山西大学学报(自然科学版),2022,45(5):1377-1384.
- YAO Y S, LIN Z Z, LI Y, et al.Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and photosynthetic characteristics of *Sorghum bicolor*[J].Journal of Shanxi university(natural science edition),2022,45(5):1377-1384.
- [31] MASUMOTO C, ISHII T, HATANAKA T, et al.Mechanism of high photosynthetic capacity in bc2f4 lines derived from a cross between oryza sativa and wild relatives *O. rufipogon*[J].Plant production science,2005,8(5):539-545.
- [32] HUBBARD R M, RYAN M G, STILLER V, et al.Stomatal conductance and photosynthesis vary linearly with plant hydraulic conductance in ponderosa pine[J].Plant, cell & environment,2001,24(1):113-121.
- [33] 李琴,陈琪,贺芙蓉,等.丛枝菌根真菌促进南美蟛蜞菊生长及对难溶磷的吸收[J].热带亚热带植物学报,2020,28(4):339-346.
- LI Q, CHEN Q, HE F R, et al.Arbuscular mycorrhizal fungi promote the growth of *Wedelia trilobata* and the absorption of insoluble phosphorus[J].Journal of tropical and subtropical botany,2020,28(4):339-346.
- [34] 梁素秋,许圳塗.金花石蒜(*Lycoris aurea* Herb.)预生花芽分化与发育特性及其诱导因素探讨[J].中国园艺,1992,38(20):91-99.
- LIANG S Q, XU Z T.Characterization of prenatal flower bud differentiation and development of *Lycoris aurea* herb and its inducing factors[J].Chinese horticulture,1992,38(20):91-99.
- [35] 沈明山,陈睦传,徐金森,等.石蒜的人工栽培[J].厦门科技,1999,6(2):21-22.
- SHEN M S, CHEN M C, XU J S, et al.Artificial cultivation of *Lycoris radiata*[J].Xiamen science & technology,1999(2):21-22.