

菌根真菌接种方式对蓝莓幼苗生长及生理特性的影响

安常蓉¹, 李芸², 崇慧影², 文光琴², 段如雁^{1*}

(1. 贵州省生物研究所, 贵阳 550009; 2. 贵州省植物园, 贵阳 550004)

摘要: 为探讨蓝莓接种菌根真菌的有效方法, 该研究以一年生蓝莓组培苗和 1 株菌根真菌 (*Talaromyces aculeatus*) 为材料, 设计了根系与菌悬液浸泡 (F1)、菌悬液与基质混合 (F2)、挑取固体菌块 (F3)、修剪根系后与菌悬液浸泡 (F4) 和菌悬液浇灌 (F5) 5 种接种方式进行盆栽试验, 以无菌水浸泡及不接种菌根真菌的盆栽苗为对照 (CK), 观察接种后幼苗根系侵染情况, 测定幼苗生长生理指标。结果表明: (1) F2 处理的蓝莓幼苗根系侵染率最高, 其次是 F5 处理, 各接种方式处理的根系侵染率分别是 CK 的 2.6 倍、3.7 倍、3.4 倍、3.2 倍和 3.6 倍。(2) 除了叶生物量和根生物量指标外, 接种菌根的蓝莓幼苗生长指标整体高于 CK, 与 CK 相比, 5 种接种方式处理下的苗高、地径生长量和总生物量增幅分别为 3.21%~30.47%、16.37%~37.43% 和 9.69%~39.79%; 总根长、总根表面积、总根体积和根尖数的增幅分别为 38.63%~118.43%、5.08%~94.89%、11.97%~65.14% 和 28.90%~92.44%。(3) 不同接种方式处理的蓝莓幼苗生理特性差异明显, 叶片最大电子传递速率、最小饱和光强、叶绿素 b 含量和叶绿素总量较高为 F3 处理, 叶绿素 a 含量和根系活力较高为 F2 处理, CK 处理的初始斜率高于接种处理。(4) 通过隶属函数法对各接种方式处理进行综合评价, 排名依次为 F3>F2>F5>F4>F1>CK。接种方式显著影响蓝莓菌根真菌的促生效果, 适宜接种方式为固体菌块、菌悬液与基质混合以及菌悬液浇灌接种, 为蓝莓菌根苗高效栽培提供重要参考。

关键词: 菌根真菌, 蓝莓幼苗, 接种方式, 侵染率, 促生效应, 隶属函数

中图分类号: Q945

文献标识码: A

文章编号:

Effects of inoculation ways of mycorrhizal fungi on growth and physiological characteristics of blueberry seedlings

AN Changrong¹, LI Yun², CHONG Huiying², WEN Guangqin², DUAN Ruyan^{1*}

(1. Guizhou Institute of Biology, Guiyang 550009, China; 2. Guizhou Botanical Garden, Guiyang 550004, China)

Abstract: To explore effective methods for inoculating blueberry with mycorrhizal fungi, a pot experiment was conducted using one-year-old tissue-cultured blueberry seedlings and a strain of mycorrhizal fungus (*Talaromyces aculeatus*). Five inoculation ways were designed, as root immersion in fungal suspension (F1), mixing fungal suspension with substrate (F2), inoculating with solid fungal blocks (F3), root immersion in fungal suspension after root pruning (F4), and irrigation with fungal suspension (F5). Seedlings immersed in sterile water without inoculation served as the

基金项目: 财政部和农业农村部 国家现代农业产业技术体系 (CARS-29-24); 贵州省科技重大专项 (黔科合重大专项字 [2024] 028 号); 贵州省科技计划项目 (黔科合支撑 [2019] 2267 号, 黔科合 [2020] 4Y012 号)。

第一作者: 安常蓉 (1991—), 硕士, 助理研究员, 主要从事小浆果栽培和分子生物学技术研究, (E-mail) 1522281316@qq.com。

***通信作者:** 段如雁, 博士, 副研究员, 研究方向为小浆果栽培和分子生物学技术研究, (E-mail) 282625485@qq.com。

control (CK). Root infection situation after inoculation was statistically analyzed, and determined some indexes that relate to growth and physiology. The results were as follow: (1) The root infection rates of blueberry were Significantly different among the inoculation ways, the seedlings inoculated by F2 showed a higher infection rate than those by other ways, and the seedlings infection rate by F5 were second highest. The root infection rates of treatments F1, F2, F3, F4 and F5 were 2.6, 3.7, 3.4, 3.2 and 3.6 times higher than CK, respectively. (2) Except for leaf biomass and root biomass, all other growth parameters of blueberry seedlings inoculated with mycorrhizal fungi were significantly higher than those of CK. Compared to the CK, the height, ground diameter, and total biomass of seedlings treated by five inoculation ways increased by 3.21%–30.47%, 16.37%–37.43%, and 9.69%–39.79%, respectively. The total root length, total root surface area, total root volume and root tip number increased by 38.63%–118.43%, 5.08%–94.89%, 11.97%–65.14%, and 28.90%–92.44%. (3) The physiological characteristic of blueberry seedlings by different inoculation ways showed Significant difference, the electron transport rate, light saturation point, chlorophyll b, and total chlorophyll under the F3 were higher than other treatments , the chlorophyll a and root activity showed higher with F2, while the CK had a higher initial slope than inoculation with mycorrhizal fungi. (4) Based on the membership function analysis, the comprehensive evaluation result was $F3 > F2 > F5 > F4 > F1 > CK$. The inoculation method significantly affects the impact on the growth-promoting effect of mycorrhizal fungi. The suitable inoculation ways are solid fungal blocks, mixing fungal suspension with substrate, and fungal suspension irrigation, which provide important insights for the efficient cultivation of mycorrhizal blueberry seedlings.

Key words: mycorrhizal fungi, blueberry seedlings, inoculation ways, infection rate, growth-promotion, membership function

蓝莓 (*Vaccinium* spp.) 又名越橘, 属杜鹃花科 (Ericaceae) 越橘属 (*Vaccinium*), 是一种灌木小浆果植物 (吴文勇, 2008)。其果实富含丰富的维生素 C、果糖、花青素等营养成分, 具有极高的营养价值和保健功能, 被联合国粮农组织评选为有利于人类健康的五大食品之一 (Norberto et al., 2013)。贵州从 20 世纪末开始种植, 截至 2024 年其种植推广面积居全国首位 (李亚东等, 2025), 随着种植需求的增加, 对苗木培育的要求越来越高。目前, 蓝莓育苗主要采用无菌组培和扦插繁殖方式, 但由于蓝莓的根系不发达, 根系吸收土壤养分、适应土壤生态环境的能力较差, 需要与菌根真菌共生促进蓝莓植株生长发育 (罗晓辉, 2017; 尤式备等, 2020)。大量研究表明, 接种菌根真菌显著促进蓝莓植株的生长 (刘凤红等, 2014; 安常蓉等, 2022; 杨威平等, 2025), 提高果实产量 (刘静等, 2016; 肖龙海等, 2021) 和增强植株的抗逆性等 (许庆龙等, 2016; Yang et al., 2020)。亦有研究表明, 接种菌根真菌对蓝莓的生长并没有起促进作用 (刘小燕等, 2012; 乔洁等, 2019)。可见, 接种后对植株是否有促生效果是受多种因素的影响, 找出发挥菌根真菌作用的重要环节很有必要。

菌根真菌侵入、定殖植物组织内部是发挥作用的前提。近年来, 菌根真菌接种技术研究相继报道、日趋成熟, 在外生菌根方面, 袁贵云 (2023) 选用截根接菌、直接接菌和基质拌菌 3 种接菌方法, 宋瑞清等 (2008) 采用截根蘸根和沟施 2 种接种方法接种外生菌根, 表明合适的接种方法显著促进植物的生长发育。在内生真菌方面, 王佳玮等 (2024) 采用菌丝片段悬液灌根和菌丝团包根接种, 毕银丽等 (2023) 采用浸根方式和模拟土培接种, 崔雨虹等 (2017) 采用土壤施用和叶面喷施接种, 结果均表明接种方式是内生真菌发挥促生作用的关键环节。在丛枝菌根方面, 朱凡高等 (2025) 采用菌剂与基质混合和菌剂单独接种, 张玉银

等（2025）采用菌剂与基质混合、菌剂蘸根和固体菌块 3 种接种方式，表明合适的接种方式是促进植株生长和生物量积累的关键。在杜鹃花科菌根方面，于芳等（2008）在开展云锦杜鹃菌根真菌接种技术研究时，采用 3 种方式接种，结果表明固体菌剂接种有利于菌株与植物根系的生长。此外，在蓝莓菌根真菌接种方式方法方面，刘凤红等（2014）采用基部接种、浸泡接种和喷雾接种 3 种接种方法接种菌根真菌，结果表明喷雾接种处理时蓝莓扦插苗的根系菌根侵染率、生长及生理特性指标低于基部接种和浸泡接种。肇莹等（2015）采用菌块、浇灌菌剂和浸根 3 种接种方式对不同苗木类型进行接种，表明采用合适的接种方式明显促进了蓝莓植株的生长。综上所述，选择合适的接种方式是发挥菌根真菌作用的重要环节，但不同的菌株种类、植株类型和接种方式之间存在差异显著，导致在生产中应用存在困难，同时关于蓝莓菌根接种方式的系统性研究较少。因此开展菌根真菌不同接种方式对蓝莓幼苗促生效应的研究，筛选出最适接种方式，对提高蓝莓菌根侵染效果、促进植株生长具有重要意义。

本研究以一年生蓝莓组培苗为研究材料，选取前期经过分离鉴定并验证具有促生效果较好的 1 株菌根真菌 *Talaromyces aculeatus* 为供试菌株，采用根系与菌悬液浸泡、菌悬液与基质混合、挑取固体菌块、修剪根系后与菌悬液浸泡和菌悬液浇灌 5 种接种方式进行盆栽试验，以无菌水浸泡及不接种的盆栽苗为对照，旨在探讨菌根真菌不同接种方式处理对蓝莓幼苗根系侵染和其产生的促生效应的影响，通过综合评价找出蓝莓幼苗接种菌根真菌的适宜方式，为蓝莓幼苗培育中人工接种菌根菌剂、提高接种效果及苗木质量提供理论依据和技术指导。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试菌株：供试菌株菌属为篮状菌属（*Talaromyces*），最相似种为 *Talaromyces aculeatus*，相似度为 99.82%。其菌株在 PDA 培养基上纯化后，一部分接入 PDB 液体培养基上，于 25 °C 下摇床培养 7 d 左右，收集菌悬液备用。

供试材料：试验用的接种材料为 1 年生蓝莓组培苗，品种为‘莱克西’（‘Legacy’）。待蓝莓长出胚根为 5~6 cm、6~8 片叶子后，进行室外炼苗一周，挑选平均苗高和地径为 8.0 cm ± 0.4 cm 和 7.80 mm ± 0.39 mm 的幼苗开始试验处理。

栽培基质与容器：采用泥炭、草炭和珍珠岩等量混合为栽培基质，使用前于高压灭菌锅灭菌 2 h。测得其基质 pH4.86、全氮 2.59 g·kg、全磷 1.51 g·kg、全钾 5.89 g·kg、有机质 23.19%、碱解氮 55.33 mg·kg、有效磷 0.25 mg·kg、速效钾 89.00 mg·kg。栽培容器规格为 25.0 cm × 16.5 cm × 14.5 cm，用 0.1%高锰酸钾溶液浸泡消毒半小时，蒸馏水清洗无数次。

1.2 试验方法

试验设计 5 种接种方式于 2024 年 5 月中旬同时进行，具体接种方式如下。

根系与菌悬液浸泡接种：即将炼苗后的蓝莓苗从培养基取出并清理干净，根部完全浸入菌悬液中浸泡 1 h 后移栽，用 F1 表示。菌悬液与基质混合接种：即将菌悬液与无菌水按 1 : 1 比例混合与已灭菌的栽培基质充分混合搅拌，后移栽幼苗，用 F2 表示。固体菌块接种：即先将炼苗的蓝莓苗移栽，用镊子挑取直径为 1 cm 的固体菌块施入幼苗根部周围并覆盖，每株苗接种 7~8 个菌块，用 F3 表示。根系修剪与菌悬液浸泡接种：即将炼苗的蓝莓苗根系作适当修剪 2~3 cm 与菌悬液浸泡 1 h 后移栽，用 F4 表示。菌悬液浇灌接种：即先将炼苗的蓝莓苗移栽，将菌悬液浇灌至苗木根基周围，每株幼苗接种 50 mL，用 F5 表示。空白对照：将炼苗的蓝莓苗根部完全浸入无菌水中浸泡 1 h 后移栽，后只浇无菌水保持其水分需要，用 CK 表示。

以上每种接种方式 4 个重复，每个重复 10 株苗。为防止外界环境的污染，启用保鲜膜覆盖花盆的表面，放在平均温度为 25 °C 左右，光照为全光照的 75%左右的大棚中培养，并定期浇灌无氮营养液或无菌水，期间不施加任何肥料，处理后幼苗的管理方式一致。处理时第一次测定幼苗的苗高和地径，后每隔 1 个月测定，直至苗木生长期结束停止监测（10 月下旬）。处理 60 d 后，采集根系观察植株根系的侵染情况。同时，在苗木生长旺期（8 月中旬）采集

蓝莓植株测定其生理生化指标，生长期结束采集植株测定生物量和根系形态等指标。

1.3 指标测定

1.3.1 根系侵染统计

参照张春英（2013）方法进行根段处理及染色，用 phmias 显微镜及拍照系统进行根系观察及拍照，每个处理观察 50 个根段。在观察中，能够观察有菌丝的根段长度记为侵染的根段，根据所观察的侵染根段与观察根段的数计算侵染率（ R ），同时参考刘润进和陈应龙（2007）方法划分侵染等级。

1.3.2 生长指标的测定

用卷尺测苗高（精确至 0.1 cm），用游标卡尺测地径（精确至 0.01 mm）。

生物量的测定：在苗木生长期结束后（10 月下旬）进行生物量测定，按平均地径和平均苗高 \pm 5%选取 10 株标准株，将每株叶片、茎干和根系分装在不同的牛皮信封纸张中，后放入 105 °C 烘箱中杀青 30 min，再用 80 °C 烘至恒质量并称干重。

根系形态参数的测定：根系形态参数测定的样品是测量生物量的根系，即先进行根系分析再进行生物量的测定。将待测根系用万深 LA-S 根系分析仪根系分析系统（万深 LA-S，杭州万深检测科技有限公司，中国）进行扫描和分析得到总根长、总根表面积、总根体积和根尖数。

1.3.3 生理指标的测定

叶片光响应参数测定：选择持续向好的晴天（8 月中旬），随机选取每个处理 10 株标准株叶片用叶绿素荧光仪（Junior-PAM，上海泽泉科技股份有限公司，德国）测定 PAR（光合有效辐射）和 ETR（相对电子传递速率）等，对曲线进行拟合后得到初始斜率、最大电子传递速率以及最小饱和光强 3 个主要参数。

叶绿素含量、根系活力测定参照方法（郝建军等，2006）。在苗木生长旺期（8 月中旬）采集蓝莓植株新鲜叶片和根系进行测定，采用丙酮乙醇混合液（丙酮：乙醇=1：1）浸提法测定叶绿素含量；采用 TTC 法测定根系活力。

1.4 数据处理

数据采用平均值 \pm 标准差表示，用 Excel 2010 版软件统计数据，用 Origin pro 2021 软件制图，采用 SPSS 23.0 软件对数据进行单因素方差分析和 Pearson 相关性分析，用 Duncan 多重比较进行显著性差异分析。用模糊数学中的隶属函数法对 5 种接种方式处理下蓝莓幼苗生长及生理特性指标进行综合评价，隶属函数法的计算公式为 $R(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ 。

2 结果与分析

2.1 不同接种方式对蓝莓幼苗根系侵染率的比较

由表 1 可知，采取 F1 接种处理的蓝莓幼苗根系侵染率与 F2、F3、F4 接种方式相比差异显著（ $P < 0.05$ ），其余接种方式之间差异不显著（ $P > 0.05$ ）。其中，F2 处理的蓝莓幼苗根系侵染率较高，其次是 F5 接种处理，F1 处理的根系侵染率较低。5 种接种方式处理的蓝莓幼苗根系侵染率分别是 CK 的 2.6 倍、3.7 倍、3.4 倍、3.2 倍和 3.6 倍。此外，从侵染等级来看，F1 处理的侵染等级为 4 级，其余接种方式侵染等级均为 5 级。

表 1 不同接种方式对蓝莓幼苗根系侵染率的比较

Table 1 Comparison of different inoculation ways on root infection rate of blueberry seedlings

接种方式	侵染根段数	侵染率	侵染等级
Inoculation way	Infection root number	Infection rate (%)	Infection grade
F1	26	52.00 \pm 3.98b	4
F2	37	74.00 \pm 3.50a	5
F3	34	68.00 \pm 9.32a	5
F4	32	64.00 \pm 2.65ab	5

F5	36	72.00±4.18a	5
CK	10	20.00±3.33c	2

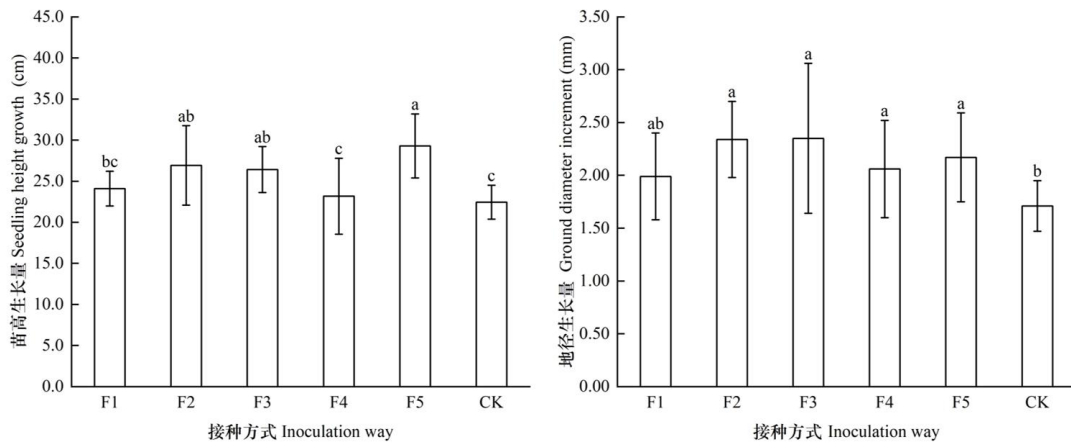
注：同列不同小写字母表示不同接种方式之间 Duncan's 检验达到显著水平 ($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the column indicate that the Duncan's test between different inoculation ways reached a significant level ($P<0.05$). The same below.

2.2 不同接种方式对蓝莓幼苗生长的影响

2.2.1 苗高和地径生长量

由图 1 可知，不同接种方式处理的蓝莓幼苗苗高生长量差异显著 ($P<0.05$)，地径生长量差异不显著 ($P>0.05$)。其中，F5 处理的蓝莓幼苗苗高生长量最大，F3 接种处理的地径生长量最大，苗高生长量较小为 F4 处理，地径生长量较小为 F1 处理。另外，接种菌根真菌对蓝莓幼苗苗期生长具有明显的促进作用，与 CK 相比，5 种接种方式处理的苗高生长量和地径生长量增幅为 3.21%~30.47%和 16.37%~37.43%。



注：不同小写字母表示不同接种方式之间 Duncan's 检验达到显著水平 ($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate that the Duncan's test between different inoculation ways reached a significant level ($P<0.05$). The same below.

图 1 不同接种方式对蓝莓幼苗苗高和地径生长量的影响

Fig.1 Effects of different inoculation ways on the the growth of height and ground diameter in blueberry seedlings

2.2.2 生物量

由表 2 可知，不同接种方式处理的蓝莓幼苗生物量及分配与 CK 相比差异显著 ($P<0.05$)。其中，F3 处理的蓝莓幼苗叶生物量较大，其次是 F5 处理，F1 和 F2 处理的叶生物量低于 CK；F2 处理的茎生物量最高，茎生物量较低则为 F1 处理且接种处理的蓝莓幼苗茎生物量均高于 CK；F2 处理的根生物量较高，其次是 F5 处理，其余处理的根生物量低于 CK。5 种接种方式处理的植株总生物量均大于 CK 且分别为 CK 的 1.10 倍、1.40 倍、1.31 倍、1.22 倍和 1.27 倍。就生物量的分配而言，各接种方式处理的蓝莓幼苗地上生物量>地下生物量，对植株的不同部位的分配，F2、F3 和 F4 处理的茎生物量大于叶生物量、根生物量；F1、F5 和 CK 处理的根生物量大于叶生物量、茎生物量。

表 2 不同接种方式对蓝莓幼苗生物量及分配的影响

Table 2 Effects of different inoculation ways on biomass and distribution of blueberry seedlings

接种方式 Inoculation way	叶 Leaf (g)	茎 Stem (g)	根 Root (g)	总生物量 Total biomass (g)
F1	1.50±0.12bc	1.85±0.34b	1.97±0.45ab	5.32±0.76bc
F2	1.42±0.49c	2.84±0.20a	2.52±0.51a	6.78±0.66a
F3	2.16±0.26a	2.20±0.19b	2.01±0.20ab	6.37±0.63a

F4	1.89±0.34abc	2.31±0.37ab	1.74±0.34c	5.94±0.12ab
F5	2.01±0.19ab	2.07±0.22b	2.11±0.37ab	6.18±0.39ab
CK	1.57±0.23bc	1.26±0.44c	2.02±0.13ab	4.85±0.17c

2.2.3 根系形态

从图 2 可以看出，不同接种方式处理的蓝莓幼苗根系形态指标差异显著 ($P<0.05$)，其中 F5 处理的幼苗总根长和总根体积表现最好，F3 处理的总根表面积表现最好，F2 处理的根尖数最多，而 F1 处理时幼苗根系形态各项指标均表现较差。与 CK 相比，接种处理的蓝莓幼苗根系形态指标均有不同程度的增长，总根长、总根表面、总根体积和根尖数的增幅分别为 22.05%~118.43%、5.08%~94.89%、11.97%~65.14%和 28.90%~92.44%。不同接种方式处理中，F2 显著促进植株根系根尖数的增加，F3 显著扩大植株根系的表面积，F5 处理显著促进植株总根长的生长和扩大根系总体积。

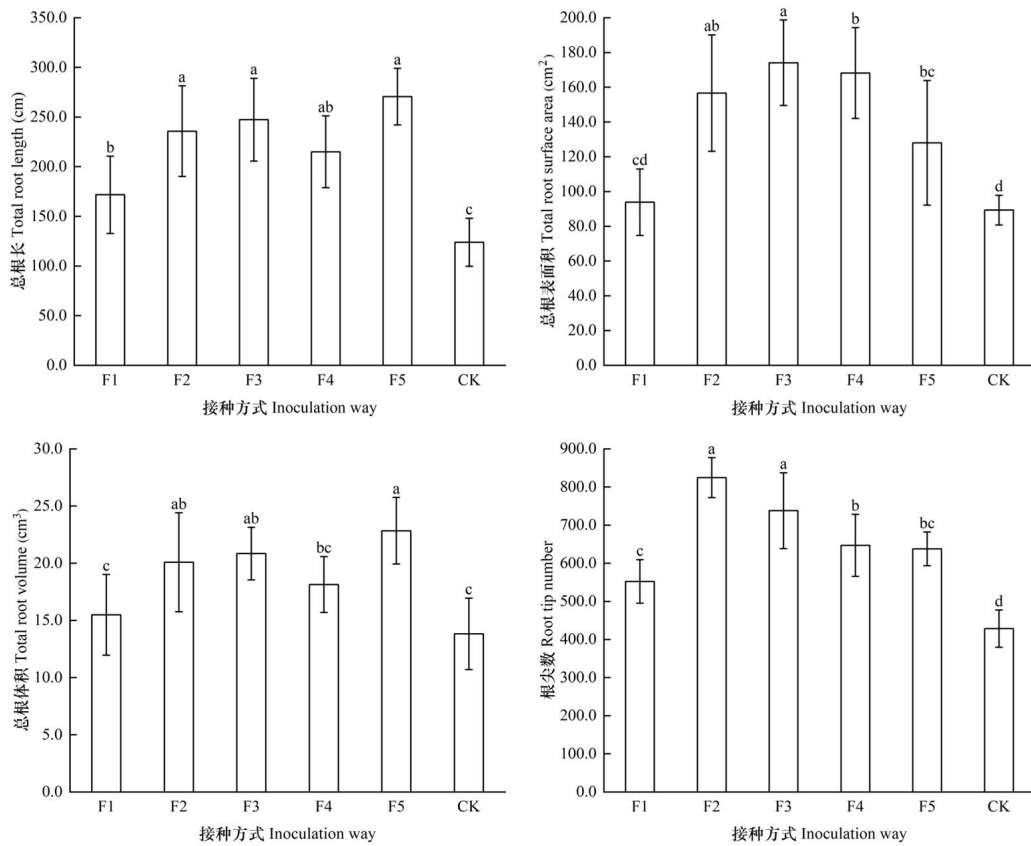


图 2 不同接种方式对蓝莓幼苗根系形态的影响

Fig.2 Effects of different inoculation ways on root shape of blueberry seedlings

2.3 不同接种方式对蓝莓幼苗光响应参数的影响

由表 3 可以看出，不同接种方式处理的蓝莓幼苗叶片初始斜率差异不显著 ($P>0.05$)，同时接种菌株处理的叶片初始斜率均低于 CK，表明在光能利用初期，接种菌株处理的幼苗叶片和对光能利用效率低于 CK 处理。不同接种方式处理下蓝莓幼苗叶片最大电子传递速率差异显著 ($P<0.05$)，其中 F3 处理下蓝莓幼苗叶片最大电子传递速率最高，其次是 F2 处理，电子传递速率相对较低则为 F1 处理。同时，各接种方式处理的蓝莓幼苗叶片最大电子传递速率比 CK 增加了 21.412%~59.08%，表明接种菌株的蓝莓幼苗对强光的适应能力比 CK 强。与最大电子传递速率变化规律相似，F3 处理的蓝莓幼苗叶片最小饱和光强最高，其次是 F2 处理，最小饱和光强较低为 F1 处理。不同接种方式处理的蓝莓幼苗叶片最小光合光强均高于 CK，其增

加幅度为 24.80%~98.04%。综上，F2、F3 和 F5 处理的蓝莓幼苗叶片在光能利用之初对光能的利用效率较低，在光饱和时其电子传递速率较快，同时对强光的耐受能力较强。

表 3 不同接种方式对蓝莓幼苗光响应参数的影响

Table 3 Effects of different inoculation ways on optical response parameters of blueberry seedlings

接种方式 Inoculation way	初始斜率 Initial slope	最大电子传递速率 Maximum electron transfer rate ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	最小饱和光强 Minimum saturated light intensity ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
F1	0.236±0.021ab	103.301±13.105bc	441.848±82.789cd
F2	0.208±0.011ab	124.085±14.187ab	597.301±39.707ab
F3	0.193±0.030b	135.351±14.680a	701.174±89.353a
F4	0.229±0.022ab	109.427±13.025b	481.311±81.871bc
F5	0.217±0.029ab	115.279±12.706ab	535.978±67.933bc
CK	0.248±0.054a	85.085±13.274d	354.058±88.750d

2.4 不同接种方式对蓝莓幼苗叶绿素含量和根系活力的影响

由表 4 可知，不同接种方式处理的蓝莓幼苗叶片叶绿素含量差异显著 ($P<0.05$)。其中，F2、F4 和 F5 处理的叶绿素 a 含量较高，F3 处理的叶绿素 b 含量和叶绿素总量最高。接种菌株处理显著促进蓝莓幼苗叶绿素含量的积累，与 CK 相比，叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量和叶绿素总量增幅分别为 14.74%~33.33%、23.91%~152.17%和 27.72%~52.48%。不同接种方式处理的蓝莓幼苗根系活力差异显著 ($P<0.05$)。其中，F2 处理的根系活力值最大，其次是 F3 处理，幼苗根系活力值最小的是 F1 处理，各接种方式处理的幼苗根系活力与 CK 相比增幅为 19.58%~95.46%。

表 4 不同接种方式对蓝莓幼苗叶绿素含量和根系活力的影响

Table 4 Effects of different inoculation ways on chlorophyll content and root activity of blueberry seedlings

接种方式 Inoculation way	叶绿素 a 含量 Content of chlorophyll a ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	叶绿素 b 含量 Content of chlorophyll b ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	叶绿素总量 Total content of chlorophyll ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	根系活力 Root activity ($\mu\text{g} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$)
F1	1.79±0.23bc	0.79±0.22b	2.58±0.27b	87.39±15.32bc
F2	2.08±0.16a	0.75±0.18b	2.83±0.07ab	142.84±19.11a
F3	1.93±0.19ab	1.16±0.12a	3.08±0.31a	140.03±22.28a
F4	2.08±0.16a	0.57±0.14bc	2.65±0.26b	106.57±29.89b
F5	2.06±0.08a	0.69±0.16bc	2.76±0.15ab	120.79±34.11ab
CK	1.56±0.08c	0.46±0.03c	2.02±0.07c	73.08±8.70c

2.5 不同接种方式处理下蓝莓幼苗各指标的相关性分析

由表 5 可知，不同接种方式处理下蓝莓幼苗各指标之间的相关性较多，在所有指标中具有显著和极显著相关指标共有 71 个，其中极显著相关 26 个且所有的显著和极显著相关性中正相关 61 个，负相关 10 个，各指标之间相关性不显著或极显著有 82 个。

表 5 不同接种方式处理下蓝莓幼苗各指标的相关性分析

Table 5 Correlation analysis of different inoculation ways on all indicators of blueberry seedlings

指标 Index	IR	SHG	GDI	LB	SB	RB	TB	TRL	TRSA	TRV	TN	Chla	Chlb	Chl	IS	METR	MSLI	RA
IR	1																	
SHG	0.739	1																
GDI	0.920**	0.752	1															
LB	0.377	0.373	0.365	1														
SB	0.886*	0.506	0.867*	0.041	1													
RB	0.295	0.537	0.452	-0.449	0.481	1												
TB	0.920**	0.723	0.959**	0.293	0.930**	0.524	1											
TRL	0.939**	0.860*	0.879*	0.589	0.735	0.264	0.886*	1										
TRSA	0.746	0.330	0.791	0.536	0.778	0.054	0.824*	0.723	1									
TRV	0.876*	0.908*	0.838*	0.603	0.661	0.322	0.858*	0.986**	0.665	1								
TN	0.887*	0.606	0.960**	0.189	0.957**	0.529	0.979**	0.797	0.827*	0.747	1							
Chla	0.946**	0.617	0.792	0.341	0.886*	0.206	0.872*	0.883*	0.773	0.818*	0.822*	1						
Chlb	0.532	0.443	0.740	0.468	0.378	0.137	0.529	0.528	0.494	0.49	0.581	0.263	1					
Chl	0.916*	0.668	0.961**	0.513	0.774	0.216	0.868*	0.877*	0.781	0.815*	0.871*	0.768	0.820*	1				
IS	-0.797	-0.697	-0.954**	-0.523	-0.71	-0.383	-0.885*	-0.833*	-0.792	-0.821*	-0.876*	-0.64	-0.829*	-0.930**	1			
METR	0.868*	0.669	0.980**	0.498	0.779	0.325	0.905*	0.856*	0.821*	0.816*	0.909*	0.72	0.829*	0.977**	-0.984**	1		
MSLI	0.793	0.656	0.952**	0.526	0.708	0.342	0.870*	0.814*	0.801	0.792	0.872*	0.631	0.855*	0.941**	-0.997**	0.989**	1	
RA	0.870*	0.733	0.976**	0.375	0.856*	0.519	0.979**	0.872*	0.823*	0.858*	0.962**	0.776	0.657	0.896*	-0.957**	0.954**	0.944**	1

注: **IR.** 侵染率; **SHG.** 苗高生长量; **GDI.** 地径生长量; **LB.** 叶生物量; **SB.** 茎生物量; **RB.** 根生物量; **TB.** 总生物量; **TRL.** 总根长; **TRSA.** 总根表面积; **TRV.** 总根体积; **TN.** 根尖数; **Chla.** 叶绿素 a 含量; **Chlb.** 叶绿素 b 含量; **Chl.** 叶绿素含量; **IS.** 初始斜率; **METR.** 电子传递速率; **MSLI.** 最小饱和光强; **RA.** 根系活力。*表示在 0.05 水平上显著相关(双侧); **表示在 0.01 水平上极显著相关(双侧)。

Note: **IR.** Infection rate; **SHG.** Seedling height growth; **GDI.** Ground diameter increment; **AGB.** Above-ground biomass; **LB.** Leaf biomass; **SB.** Stem biomass; **RB.** Root biomass; **TB.** Total biomass; **TRL.** Total root length; **TRSA.** Total root surface area; **TRV.** Total root volume; **TN.** Tip number; **Chla.** Content chlorophyll a content; **Chlb.** Content chlorophyll b content; **Chl.** Chlorophyll content; **IS.** Initial slope; **METR.** Maximum electron transfer rate; **MSLI.** Minimum saturated light intensity; **RA.** Root activity. * indicates significant correlations at 0.05 level(Bilateral); ** indicates significant correlation at 0.01 level(Bilateral).

2.6 不同接种方式对蓝莓幼苗接种效应的综合评价

由表 6 可知, 5 种接种方式处理的蓝莓扦插幼苗侵染率、生长及生理特性指标的综合评价均大于 CK, 排序依次为 F3、F2、F5、F4、F1 和 CK, 表明不同接种方式对蓝莓幼苗的侵染和促生效应有差异。因此, 针对蓝莓菌根化苗木培育中提高侵染效果、促生效应较好以及提高苗木质量的接种方式可以选择固体菌块、菌悬液与基质混合以及菌悬液浇灌接种。

表 6 不同接种方式对蓝莓接种效应隶属函数综合评价法

Table 6 Comprehensive evaluation of different inoculation ways on growth-promotion of blueberry seedlings

指标 Index	接种方式 Inoculation way					
	F1	F2	F3	F4	F5	CK
侵染率 Infection rate	0.59	1.00	0.89	0.81	0.96	0.00
苗高生长量 Seedling height growth	0.24	0.65	0.58	0.11	1.00	0.00
地径生长 Ground diameter increment	0.44	0.98	1.00	0.55	0.72	0.00
叶生物量 Leaf biomass	0.11	0.00	1.00	0.64	0.80	0.20
茎生物量 Stem biomass	0.37	1.00	0.59	0.66	0.51	0.00
根生物量 Root biomass	0.29	1.00	0.35	0.00	0.47	0.36
总生物量 Total biomass	0.24	1.00	0.79	0.56	0.69	0.00
总根长 Total root length	0.33	0.76	0.84	0.62	1.00	0.00
总根表面积 Total root surface area	0.06	0.79	1.00	0.93	0.46	0.00
总根体积 Total root volume	0.18	0.69	0.78	0.48	1.00	0.00
根尖数 Tip number	0.31	1.00	0.78	0.55	0.53	0.00
叶绿素 a 含量 Content chlorophyll a content	0.44	1.00	0.71	1.00	0.96	0.00
叶绿素 b 含量 Content chlorophyll b content	0.47	0.41	1.00	0.16	0.33	0.00
叶绿素含量 Chlorophyll content	0.53	0.76	1.00	0.59	0.70	0.00
初始斜率 Initial slope	0.78	0.27	0.00	0.65	0.44	1.00
最大电子传递速率 Maximum electron transfer rate	0.36	0.78	1.00	0.48	0.60	0.00
最小饱和光强 Minimum saturated light intensity	0.25	0.70	1.00	0.37	0.52	0.00
根系活力 Root activity	0.21	1.00	0.96	0.48	0.68	0.00
平均值 Average	0.34	0.77	0.79	0.54	0.69	0.09
排 名 Rank	5	2	1	4	3	6

3 讨论与结论

蓝莓根系没有根毛, 需要与菌根真菌形成互惠共生关系, 与宿主植物形成共生关系后, 显著促进植物根系对水分、养分的吸收, 最终体现在对植株的生长上(袁继鑫和侯智霞, 2012)。菌根侵染率是菌根真菌能否成功侵染根系的直接体现, 其侵染率高低与植物种类、菌株类型、环境条件等有关(李性苑, 2015)。本研究结果表明, 不同接种方式处理对蓝莓幼苗根系侵染率有明显差异, 说明蓝莓幼苗与菌根真菌共生程度受接种方式的影响。其中, 采用 F2 接种方式处理的蓝莓幼苗根系侵染率高于其他接种方式处理, 与袁贵云(2023)研究结果相反, 产生差异的原因可能是本研究采用的菌剂是前期筛选较好的菌株, 同时处理时菌液与无菌水按等比例混合, 使其栽培基质中菌剂浓度较高, 短时间受杂菌的影响较小, 为与根系产生共

生关系提供充足条件；其次是 F5 处理的侵染率较高，可能是幼苗根系能直接接触并迅速识别，故而侵染效果较好（刘凤红，2014）；F2 处理的根系侵染率处于中等，可能因为接种固体菌块后，在苗木生长初期根系与菌剂的接触未充分，随着根系的生长，与菌剂充分接触。对于 F1 和 F4 接种方式处理的根系侵染率低于其他接种方式，可能原因是蓝莓不发达的根系与菌剂接触时感染时间较短，但采用截根处理时明显提高根系侵染率，与朱江华（2016）、陈猛（2017）研究结果相似。此外，本研究也发现采用无菌水浸泡、不接种菌根的对照根系也有侵染，产生的原因可能是蓝莓幼苗在大棚中培养时，不可避免受空气中或周围杂菌的影响，栽培基质中可能存在一种或多种混合菌，从而产生根系侵染，但根系侵染率显著低于接种处理。

菌根真菌与宿主植株形成共生关系后，最终体现在植物的生长上，其中，苗高、地径、生物量是反映植物生长的重要形态指标。有研究表明，接种菌根真菌对植株生长和生物量积累有显著的促进作用，随着接种方式的不同，促生效果有差异（于芳等，2008；刘凤红等，2014；王佳玮等，2024）。本研究结果表明，采用不同接种方式处理的蓝莓幼苗苗高生长量、地径生长量和生物量积累差异明显且作用部位不同，F5 接种处理显著促进幼苗苗高的生长，F3 接种处理显著促进苗木地径和叶生物量的积累，F2 接种处理显著促进幼苗根、茎生物量积累和总生物量的积累。造成以上差异的原因可能为，一是菌剂与植株根系接触方式、时间以及菌剂浓度不同；二是菌剂产生促生效果高峰期不同，处理后期目的菌的促生效果存在不明显或者减弱现象；三是在大棚中培养时，栽培基质中可能存在一种或多种混合菌，与目的菌形成协同和拮抗作用，从而影响植株的生长。

根系形态是反映植株对水分和养分吸收能力大小的指标，其中，根尖是根系最活跃的部位，对水分和养分的吸收能力有关。有研究表明，根尖数量的增加一方面促进根系的伸长，另一方面也增加根系的表面积和体积（李竹，2024）。本研究结果表明，不同接种方式处理的蓝莓幼苗根系形态差异显著且促进部位有差异，F5 处理的植株总根长和总根体积表现最好，F3 处理的植株总根表面积表现最好，F2 处理的植株根尖数最多，分析其原因可能为，F5 处理时根系直接与液体菌剂接触很快建立共生关系，促使根尖数增加，增加其总根长和总根体积，之后菌根效应减弱；F3 处理时因接种的菌块分布在栽培基质中层，根系与菌剂发生共生关系后，促使根系向根际周围生长，从而扩大植株的总根表面积；F2 处理初期不发达的根系与菌剂产生密切接触，根尖数增加，但由于受环境温度和湿度的影响，根尖从土壤中吸收水分和养分减弱，从而限制根系生长。采用 F1 和 F4 接种处理的蓝莓幼苗根系形态指标总体上小于其他接种方式处理，与刘凤红等（2014）、张玉银等（2025）研究结果不同，产生差异的原因可能是幼苗移栽后基质中仅有少量的菌剂，菌根效应较弱，同时截根处理后基质中存在的杂菌也会同时侵染根系。此外，根系活力能够间接反映根系生长情况和营养吸收状况水平，通常与植株根系生长有密切关系（袁澜芳，2022）。本研究结果表明，接种菌根的蓝莓幼苗根系活力均高于未接种处理，同时不同接种方式处理的根系活力差异明显，可能原因是幼苗根系与菌剂接触受感染的程度不同以及根系本身产生的代谢不同（刘江东，2020）。

高效的栽培不仅体现在苗木的形态上，还体现在苗木的生理特性上，相关指标含量在一定程度上反映植株进行光合作用的能力和对光环境适应能力。有研究表明，接种菌根真菌能显著促进植株叶绿素含量积累和光合特性（安常蓉等，2022；付香等，2023；李竹等，2024）。本研究结果表明，不同接种方式处理时蓝莓幼苗叶绿素 a、b 含量和叶绿素含量，叶片最大电子传递速率和最小饱和光强高于 CK 处理，而 CK 处理的初始斜率高于接种处理，产生差异原因可能为，一是接种处理时根系与菌剂接触扩大根系吸收范围，增加相关元素的转运，促进叶绿素的合成，同时通过产生共生作用提升叶片酶活性，维持叶绿素稳定；二是接种处理增强 PSII 的活性，有利于植株进行光合作用。但不同接种方式处理下蓝莓幼苗的叶绿素含量和光响应参数差异明显，与接种的菌剂类型、感染程度和监测时环境因子有关。

本研究进行了不同接种方式处理下各指标间的相关性分析和综合评价,相关性分析结果表明,接种菌根真菌对蓝莓幼苗产生的促生效应与根系侵染率的高低呈显著或极显著正相关,生长指标与生理指标之间存在显著或极显著正相关,可见接种方式是菌根真菌发挥促生作用的关键。同时,综合评价结果表明,采用固体菌块、菌悬液与基质混合和菌悬液浇灌接种是较适宜的接种方式。值得注意的是,在实际应用中应根据菌株与苗木的共生特性选择合适的接种方式,选择能够协同促进、效果达到最佳的接种方式,浇灌菌根菌剂、挑选菌饼或菌块、菌悬液与基质混合以及修剪幼苗根系浸泡方式是提高菌株促生效应,同时也是降低成本的适宜接种方式。

参考文献:

- AN CR, LI Y, LIU CH, et al., 2022. Effects of inoculating endophytic fungi on the growth and physiological indexes of blueberry seedlings [J]. *China Fruits*(7): 16-22. [安常蓉, 李芸, 刘昌阔, 等, 2022. 接种内生真菌对蓝莓幼苗生长生理效应的影响 [J]. *中国果树*(7): 16-22.]
- BI YL, SONG YL, BAI XR, et al., 2023. DSE and its metabolites on medicago sativa growth and its potential for ecological restoration in mining areas [J]. *Coal Science Technology*, 51(12): 90-99. [毕银丽, 宋雅宁, 白雪蕊, 等, 2023. DSE 及其代谢物对紫花苜蓿促生作用及其矿区生态修复潜力 [J]. *煤炭科学技术*, 51(12): 90-99.]
- CHEN M, 2017. Study on the diversity of blueberry endophytic fungi resources and the selection and application of high-efficiency strains [D]. Guangzhou: South China Agricultural University: 64-69. [陈猛, 2017. 蓝莓内生真菌资源多样性及高效菌株的筛选与应用研究 [D]. 广州: 华南农业大学: 64-69.]
- CUI YH, BAI Y, CAO N, et al., 2017. Effects of *Beauveria bassiana* inoculated with different methods on maize as growth promoter [J]. *China Trop Crops*, 38(2): 206-212. [崔雨虹, 白云, 曹娜, 等, 2017. 球孢白僵菌不同施用方式对玉米促生作用的研究 [J]. *热带作物学报*, 38(2): 206-212.]
- FU X, WANG HX, WANG D, et al., 2023. Isolation and identification of trichoderma asperellum and its effects on growth and development of blueberry [J]. *China Fruits*(6): 46-53. [付香, 王贺新, 王碟, 等, 2023. 棘孢木霉的分离鉴定及其对蓝莓生长发育的影响 [J]. *中国果树*(6): 46-53.]
- HAO JJ, KANG ZL, YU Y, 2006. Experimental techniques in plant [M]. Beijing: Chemical Industry Press: 55, 68. [郝建军, 康宗利, 于洋, 2006. 植物生理学实验技术 [M]. 北京: 化学工业出版社: 55, 68.]
- LI XY, YANG Q, TIAN X, et al., 2015. Studies on mycorrhiza infection characteristics of cultivated blueberry [J]. *South China Fruits*, 44(4): 11-15. [李性苑, 杨琴, 田鑫, 等, 2015. 栽培蓝莓菌根侵染特性研究 [J]. *中国南方果树*, 44(4): 11-15.]
- LI YD, LIU C, WEI X, et al., 2025. Development report of 2024 China blueberry industry [J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 47(1): 1-14. [李亚东, 刘成, 魏鑫, 等, 2025. 2024 年中国蓝莓产业发展报告 [J]. *吉林农业大学学报*, 47(1): 1-14.]
- LI Z, JI KX, YUAN NX, et al., 2024. Effects of inoculating endophytic fungi into rhizosphere on growth and development of potted blueberry [J]. *South China Fruits*, 53(1): 136-142,149. [李竹, 嵇康轩, 原宁欣, 等, 2024. 盆栽蓝莓根际接种内生真菌的效应 [J]. *中国南方果树*, 53(1): 136-142,149.]
- LIU FH, CHENG XH, GU L, 2014. Effect of *Zalerion varium* inoculation on the rooting and growth of blueberry cutting seedling [J]. *Northern Horticulture*(6): 100-104. [刘凤红, 程显好, 顾亮,

2014. Zalerion varium 接种对蓝莓扦插苗生根及生长的影响 [J]. 北方园艺(6): 100-104.]
- LIU J, LIU FH, SU HY, et al., 2016. Effect of inoculation DSE fungi on blueberry fruit quality [J]. Northern Horticulture(20): 33-36. [刘静, 刘凤红, 宿红艳, 等, 2016. 接种深色有隔内生真菌对蓝莓果实品质的影响 [J]. 北方园艺(20): 33-36.]
- LIU JD, 2020. Evaluation of the characteristics of 4 strains of phialocephala and the effects of their co-inoculation on blueberry growth [D]. Beijing: Beijing Forestry University: 45. [刘江东, 2020. 4 株 Phialocephala 属真菌特性评价及其共接种对蓝莓生长的影响 [D]. 北京: 北京林业大学: 45.]
- LIU RJ, CHEN YL, 2007. Mycorrhizology [M]. Beijing: Science press: 135-139. [刘润进, 陈应龙, 2007. 菌根学 [M]. 北京: 科学出版社: 135-139]
- LIU XY, QU A, YAN JJ, 2012. Effect of mycorrhizal fungi on transplanting survival rate and growth of blueberry tissue culture seedlings [J]. Shandong Agriculture Sciences, 44(5): 40-44. [刘小燕, 屈艾, 闫晶晶, 2012. 不同菌根真菌对蓝莓组培苗移栽成活率和生长的影响 [J]. 山东农业科学, 44(5): 40-44.]
- LUO XH, 2017. Study on the mechanism of blueberry root hair loss and its adaptive mechanism [D]. Hangzhou: Zhejiang Normal University: 10-18. [罗晓辉, 2017. 蓝莓根毛缺失的机理及其适应机制研究 [D]. 杭州: 浙江师范大学: 10-18.]
- NORBERTO S, SILVA S, MEIRELES M, et al., 2013. Blueberry anthocyanins in health promotion: ametabolic overview [J]. Journal of Function Foods, 5(4): 1518-1528.
- QIAO J, TIAN XF, FU YJ, et al., 2019. Effects of 3 strains of mycorrhizal fungi on growth of blueberry seedlings and absorption of mineral elements [J]. Journal of Langfang Normal University(Natural Science Edition), 19(2): 68-72. [乔洁, 田晓飞, 付亚娟, 等, 2019. 3 株菌根真菌对蓝莓幼苗生长及矿质元素吸收的影响 [J]. 廊坊师范学院学报(自然科学版), 19(2): 68-72.]
- SONG RQ, LI XM, QI JY, 2008. Effects of inoculation of ectomycorrhizal fungi on the seedling growth of Mongol scotch pine(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) [J]. Journal of Plant Ecology(Chinese Version), 32(6): 1378-1385. [宋瑞清, 李喜梅, 祁金玉, 2008. 外生菌根真菌不同接种方法对樟子松苗木生长的影响 [J]. 植物生态学报, 32(6): 1378-1385.]
- WANG JW, LI C, LIU JL, et al., 2024. Effects of endophytic fungal inoculation on the seedling growth of Silage Maize [J]. Biotechnology Bulletin, 40(4): 189-202. [王佳玮, 李晨, 刘建利, 等, 2024. 内生真菌接种方式对青贮玉米幼苗生长的影响 [J]. 生物技术通报, 40(4): 189-202.]
- WU WY, 2008. Biological characteristics and cultivation techniques of blueberries [J]. South China Fruits, 37(2): 50-51. [吴文勇, 2008. 蓝莓的生物学特性及栽培技术 [J]. 中国南方果树, 37(2): 50-51.]
- XIAO LH, WANG DL, CAO M, et al., 2021. Effects of inoculation of five mycorrhizal fungi on the yield and quality of blueberry fruit [J]. Non-wood Forest Research, 39(1): 168-175. [肖龙海, 王德炉, 曹漫, 等, 2021. 接种 5 种菌根菌对蓝莓果实产量和品质的影响 [J]. 经济林研究, 39(1): 168-175.]
- XU QL, LIU XM, XU XB, et al., 2016. Effects of four arbuscular mycorrhizal fungi on tolerance of *Vaccinium corymbosum* to drought stress [J]. Journal of Zhejiang University(Agriculture and Life Sciences), 42(4): 427-434. [许庆龙, 刘晓敏, 徐小兵, 等, 2016. 4 种丛枝菌根真菌对南高丛蓝莓抗旱性的影响 [J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 42(4): 427-434.]
- YANG L, LI QQ, YANG Y, et al., 2020. Comparative transcriptome analysis reveals positive

- effects of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on photosynthesis and high-pH tolerance in blueberry seedlings [J]. *Trees*, 34(2): 433-444.
- YANG WP, LI S, HOU R, 2025. Isolation and identification of two dark septate endophytes and their effects on the growth of blueberry tissue culture seedlings [J]. *China Fruits*(3): 74-81. [杨威平, 李思, 侯瑞, 2025. 两株深色有隔内生真菌的分离鉴定及其对蓝莓组培苗生长的影响 [J]. *中国果树*(3): 74-81.]
- YOU SB, XU JH, GUO YW, et al., 2020. Mechanism of root hair deficiency and growth-promoting effect of endophytic mycorrhizal fungi in blueberry [J]. *Journal of Zhejiang University(Agriculture and Life Sciences)*, 46(4): 417-427. [尤式备, 徐佳慧, 郭怡文, 等, 2020. 蓝莓根毛缺失的机制及内生菌根真菌的促生作用 [J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 46(4): 417-427.]
- YU F, ZHANG CY, YIN LJ, et al., 2008. *In vitro* inoculation technology of *Rhododendron fortunei* L. with ericoid mycorrhizal fungi and its inoculation effect [J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University(Natural Science Edition)*, 37(4): 360-364. [于芳, 张春英, 尹丽娟, 等, 2008. 云锦杜鹃菌根真菌接种技术及其效应 [J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 37(4): 360-364.]
- YUAN GY, 2023. Diversity of ectomycorrhizal fungi associated with *Pinus massoniana* and synthesis of their mycorrhizae [D]. Guiyang: Guizhou University: 53-59. [袁贵云, 2023. 马尾松外生菌根真菌多样性及其菌根合成研究 [D]. 贵阳: 贵州大学: 53-59.]
- YUAN JX, HOU ZX, 2012. Research progress of blueberry [J]. *China Fruits*(4): 65-68. [袁继鑫, 侯智霞, 2012. 蓝莓菌根研究进展 [J]. *中国果树*(4): 65-68.]
- YUAN LF, 2022. Diversity of blueberry mycorrhizal fungi and its effects on growth of blueberry seedlings in Guizhou Province [D]. Guiyang: Guizhou University: 42-52. [袁澜方, 2022. 贵州蓝莓菌根真菌多样性及其对蓝莓幼苗生长的影响 [D]. 贵阳: 贵州大学: 42-52.]
- ZHANG CY, 2013. Ericoid mycorrhizal research and application of rhododendron [M]. Beijing: China Forestry Publishing House: 24-25. [张春英, 2013. 杜鹃花菌根研究及其应 [M]. 北京: 中国林业出版社: 24-25.]
- ZHANG YY, YANG J, GE ZX, et al., 2025. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi species and inoculation methods on growth of flue-cured tobacco seedlings [J]. *Chinese Tobacco Science*, 46(2): 9-17. [张玉银, 杨杰, 葛子僊, 等, 2025. 丛枝菌根真菌种类和接种方式对烤烟幼苗生长的影响 [J]. *中国烟草科学*, 46(2): 9-17.]
- ZHAO Y, YANG T, SUN JJ, et al., 2015. Identification of blueberry mycorrhizal fungi and its effect on blueberry growth [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 27(3): 400-405. [肇莹, 杨涛, 孙进杰, 等, 2015. 一株蓝莓菌根真菌的鉴定及对蓝莓生长的影响 [J]. *浙江农业学报*, 27(3): 400-405.]
- ZHU FG, WANG YS, ZHANG Y, et al., 2025. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and inoculation methods on the growth and physiology of *Verbena bonariensis* seedlings [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 33(1): 79-86. [朱凡高, 王幼珊, 张颖, 等, 2025. 丛枝菌根真菌及接种方式对柳叶马鞭草幼苗生长和生理的影响 [J]. *草地学报*, 33(1): 79-86.]
- ZHU JH, 2016. The separation, screening and application of mycorrhizal fungi from *Vaccinium bracteatum* Thunb. [D]. Changsha: South University of Forestry and Technology: 30-36. [朱江华, 2016. 乌饭越橘菌根真菌的分离、筛选与利用 [D]. 长沙: 中南林业科技大学: 30-36.]