

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.04.033

引用格式:黄荣雁, 乔圣迪, 孟维珊, 等. 丛枝菌根真菌对两种小檗生长和根小檗碱含量的影响[J]. 草地学报, 2026, 34(4): 1524—1533

HUANG Rong-yan, QIAO Sheng-di, MENG Wei-shan, et al. Effects of *Arbuscular Mycorrhizal* Fungi on the Growth and Content of Berberine in Two kinds of *barberis*[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(4):1524—1533

丛枝菌根真菌对两种小檗生长和根小檗碱含量的影响

黄荣雁^{1,2}, 乔圣迪¹, 孟维珊³, 刘雪松³, 季世达¹, 崔婷婷¹, 李馨园¹,
刘殿辉¹, 王丽辉¹, 刘万龙¹, 颜雪娇¹

(1. 齐齐哈尔大学生命科学与农林学院, 黑龙江 齐齐哈尔 161006; 2. 东北林业大学林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 3. 黑龙江省农业科学院畜牧兽医分院, 黑龙江 齐齐哈尔 161006)

摘要:为筛选细叶小檗(*Berberis poiretii* Schneid.)与刺叶小檗(*Berberis sibirica* Pall.)的最优AMF菌种,助力小檗属植物高效培育,本试验以两种小檗幼苗为材料,选用摩西斗管囊霉菌(Fm)和幼套近明球囊霉菌(Ce),设单接Fm、单接Ce、混合接种(Mix)3种处理及不接菌对照(CK),测定菌根侵染率、生长与生理指标及小檗碱含量。结果表明:细叶小檗Mix处理侵染最佳,刺叶小檗Ce处理最优;细叶小檗Ce处理根系指标最优,刺叶小檗根尖数和根长度Ce处理最大且差异显著,根平均直径和根体积Mix处理最高,根表面积无显著差异;两种小檗可溶性蛋白(Soluble protein, Sp)和超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)活性均以Ce处理最高、CK最低,细叶小檗过氧化物酶(Peroxidase, POD)活性以Ce处理最优,刺叶小檗以Fm处理最佳。综上,接种AMF可促进两种小檗生长,增强其抗氧化能力与小檗碱合成能力,为小檗属植物培育提供实践参考。

关键词:细叶小檗;刺叶小檗;生长指标;生理指标;小檗碱

中图分类号:S793.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)04-1524-10

Effects of *Arbuscular Mycorrhizal* Fungi on the Growth and Content of Berberine in Two kinds of *barberis*

HUANG Rong-yan^{1,2}, QIAO Sheng-di¹, MENG Wei-shan³, LIU Xue-song³, JI Shi-da¹, CUI Ting-ting¹,
LI Xin-yuan¹, LIU Dian-hui¹, WANG Li-hui¹, LIU Wan-long¹, YAN Xue-jiao¹

(1. College of Life Science, Agriculture and Forestry, Qiqihar University, Qiqihar, Heilongjiang Province 161006, China; 2. Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang Province 150040, China; 3. Animal Husbandry and Veterinary Branch of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Qiqihar, Heilongjiang Province 161006, China)

Abstract: To screen the optimal *Arbuscular mycorrhizal* fungus (AMF) for *Berberis poiretii* Schneid. and *B. sibirica* Pall. and thereby accelerate commercial propagation of the genus, seedlings of both species were inoculated with *Funneliformis mosseae* (Fm), *Claroideoglossum etunicatum* (Ce), a 1:1 mixture of both (Mix), or left non-inoculated (CK). Mycorrhizal colonization, growth and physiological parameters, and berberine concentration were subsequently quantified. Colonization peaked under Mix in *B. poiretii* and under Ce in *B. sibirica*. Root architecture responded similarly: Ce produced the greatest root-tip number and total root length in both species (significantly so in *B. sibirica*), whereas Mix maximized mean root diameter and root volume, root surface area did not differ among treatments. Soluble-protein content and superoxide dismutase (SOD) activity were highest after Ce inoculation and the lowest in CK for both taxa. Peroxidase (POD) activity was

收稿日期:2025-06-11;修回日期:2025-09-24

基金项目:黑龙江省省属高校基本科研业务费项目(145309629);黑龙江省自然科学基金项目(LH2023C115)资助

作者简介:黄荣雁(1982-),女,汉族,河北昌黎人,博士研究生,副教授,主要从事森林培育学和林木病理学研究, E-mail:hry_ok@163.com;

*通信作者 Author for correspondence, E-mail:hry_ok@163.com

also the highest under Ce in *B. poiretii*, but under Fm in *B. sibirica*. In conclusion, AMF inoculation consistently stimulated growth, antioxidant capacity, and berberine biosynthesis in the two *Berberis* species, providing a practical references for their large-scale cultivation.

Key words: *Berberis poiretii*; *Berberis sibirica*; Growth index; Physiological index; Berberine

丛枝菌根真菌 (Arbuscular mycorrhizas fungi, AMF) 是一类以菌丝体或菌丝在土壤中生存的专性寄生于植物根部的真菌, 具有特殊的形态结构和生理生化特性, 是土壤中一种重要而特殊的生物资源^[1]。近年来, AMF 在植物生长发育、生态系统功能维持方面的作用备受关注。研究表明, AMF 可通过改善植物对养分的吸收、增强植物的抗逆性等机制, 显著影响植物的生长和代谢过程^[2]。AMF 在自然界中分布广泛, 能够在不同类型生态系统中生存和繁殖, 对环境条件有着很强的适应性, 可以与 80% 以上维管植物形成共生结构^[3], 在协助宿主植物吸取营养^[4]、增强光合作用^[5]、提高抗性^[6-7]、增加次生代谢产物合成等方面具有重要作用^[8-9]。

在农业和园艺领域, 利用 AMF 制成的生物肥料展现出成本低、收效好的优势。它不仅能够提高作物产量、改善农产品品质, 还能改良土壤结构、增强土壤生态系统的稳定性^[10]。针对不同种类植物, 筛选有效的 AMF, 将环保型生物肥料, 应用于农业生产, 是缓解生产与生态环境之间矛盾的重要手段。例如, 有研究发现接种 AMF 能促进番茄对氮、磷等养分的吸收, 提高果实的维生素 C 含量, 同时增加土壤中有益微生物的数量, 改善根际微生态环境^[11]。对于药用植物而言, 接种 AMF 的意义更为重大。药用植物作为天然活性成分的重要源泉, 蕴含着结构多样、功能独特的次生代谢产物, 是现代医药创新发展的关键基石。AMF 能够调控药用植物的次生代谢过程, 促进活性物质的合成、转运与积累^[12]。例如在黄檗 (*Phellodendron amurense*) 栽培中, 接种 AMF 不仅能提高植株对氮、磷、钾等营养元素的吸收效率, 助力植株生长发育、增加生物量, 还能显著提升其根系中黄柏碱、小檗碱等生物碱的含量^[13]。对半夏 (*Pinellia ternata*) 而言, 接种 AMF 可改善块茎的营养供给状况, 进而提升半夏碱甲、 β -谷甾醇等有效成分的含量, 显著提高半夏块茎的入药质量^[14]; 而在喜树 (*Camptotheca acuminata*) 栽培中, AMF 能帮助植株更好地吸收土壤养分, 间接促进喜树碱的合成与积累, 同时增强植株对环境胁迫的抵抗力, 为喜树生长提供有利条件^[15]。这些研究共同证实, AMF 对植物生物碱的

调控具有“养分供给”与“信号诱导”的双重属性, 且这种调控效应会因 AMF 菌种特性、植物物种差异及生物碱合成途径的不同而表现出特异性。这一结论为理解 AMF 对细叶小檗 (*Berberis poiretii* Schneid.)、刺叶小檗 (*Berberis sibirica* Pall.) 等小檗属植物小檗碱合成的影响, 提供了重要的理论参考。

细叶小檗和刺叶小檗是小檗科、小檗属落叶灌木, 其根、根茎、根皮含小檗碱, 可治肠胃炎等症; 果实为浆果, 有开胃健脾等功效。二者兼具冬季果实不脱落、根系发达等特点, 在生态修复和景观营造中作用重要, 是东北地区具有高经济与生态价值的优良灌木, 开发利用潜力广阔。目前针对小檗属植物的研究主要集中在药用成分提取方面, 其繁殖技术的研究相对匮乏, 这严重制约了该属植物的推广应用。为了填补这一研究空白, 本文聚焦于 AMF 接种促进小檗属植物高效栽培方面的研究。通过筛选适宜的 AMF 菌种, 接种后观察 AMF 对细叶小檗和刺叶小檗生长、生理及小檗碱含量的影响, 旨在为 AMF 菌剂在小檗属植物育苗中的应用提供科学依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验种子: 细叶小檗和刺叶小檗种子采自齐齐哈尔市青年林场。

供试菌剂: 购自甘肃渤丰农林牧科技有限公司 (菌剂 1: 摩西斗管囊霉 *Funneliformis mosseae*, Fm; 菌种 2: 幼套近明球囊霉 *Claroideoglossum etunicatum*, Ce)。

试验基质: 由田园土: 蛭石: 珍珠岩 = 1: 1: 1 配置而成, 混合后装入灭菌袋于 120 °C、0.05 MPa 高温高压蒸汽锅中灭菌 2 h 备用。

栽植容器: 黑色塑料育苗盆 (口径 70 mm, 高度 78 mm, 容积为 240 mL)。

1.2 试验设计

本试验采用温室盆栽试验方法, 首先用 0.5% 高锰酸钾溶液浸泡两种小檗种子 2 h, 再闷种 30 min,

洗净后置床于消毒好的培养皿中,转置于恒温光照培养箱,光周期为25℃,8 h进行催芽处理,待1/3种子露白后,将两种小檗种子播种于装有灭菌基质的容器中,培育无菌苗。苗木在移栽到育苗盆前,先用基质装至容器3/4的高度,然后倒入事先称好的菌剂(非接菌处理添加等量灭菌基质),充分混匀后植入幼苗,再加入剩余1/4高度的基质并压实^[16]。基质中分别接种3 g摩西斗管囊霉菌(Fm)、接种3 g幼套近明球囊霉菌(Ce)和混合接菌(1.5 g Fm+1.5 g Ce, Mix),以不接菌苗(CK)为对照组,试验共8个处理,每个处理3个重复,每个重复15株,共360株,接菌处理于两种小檗幼苗长出2片真叶时完成。处理完毕后每3 d浇一次水。在处理30 d和90 d时进行生长指标和生理指标的测定。

1.3 试验方法

1.3.1 菌根侵染率 处理结束后,采集各处理植株的根系,采用台盼蓝染色法^[17]对菌根侵染率(Mycorrhizal infection rate, Mir)进行测定,每个处理随机选取3株幼苗根系,每株分别剪取10根1 cm长1级根,共30根,染色制片观察侵染情况。

菌根侵染率=被侵染根数/观察总根数×100%。

1.3.2 生长指标测定 苗高和地径测定:接菌第30 d和90 d,随机选取5株幼苗用卷尺测量地面至植株顶部的苗高,用游标卡尺测定地径(植株地茎部的直径)。

根系指标及生物量测定:90 d时每个处理随机挖取5株完整苗木,用去离子水冲洗干净根系和叶面上的杂质后将幼苗地上部分与根系分开;根系使用Epson根系扫描仪扫描,用winRHIZO(Pro2004)软件分析后得到根长(Root length, RL)、根尖数(Root tip number, RTN)、根体积(Root volume, RV)、根表面积(Root surface area, Rsa)和根系平均直径(Average root diameter, Ard)指标,然后将苗木地上部分和地下部分分别包上锡纸,置于150~160℃烘烤箱中烘烤0.5~1 h至恒重,测定苗木地上生物量(茎和叶)及地下生物量(根),计算30 d至第90 d时苗高增长量(Increase in seedling height, Sh)、地径增长量(Increase in ground diameter, Gd)、地下生物量增长量(Increase in underground biomass, Udm)、地上生物量增长量(Increase in aboveground biomass, Adm)。

1.3.3 生理指标测定 90 d时各处理剪取5 g新鲜

叶片并放入-80℃冰箱内保存,用于测定以下生理指标:过氧化物酶(Peroxidase, POD)活性采用愈创木酚法测定,超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)活性采用靛蓝四唑(NBT)法测定,采用紫外-可见分光光度计法测定过氧化氢酶(Catalase, CAT)活性,采用考马斯亮蓝法测定可溶性蛋白(Soluble protein, Sp)含量^[18]。

1.3.4 小檗碱含量测定 (1)供试品溶液制备。取细叶小檗和刺叶小檗样品,于烘箱中65℃干燥至恒重后研磨粉碎并过60目筛,每个样品准确称取1 g,精密加入15 mL 60%甲醇浸提1 h,再在超声功率500 W、超声频率40 kHz条件下提取30 min,随后以5000 r·min⁻¹离心5 min;收集上清液,将过滤后的滤渣重复提取2次,每次均加入15 mL 60%甲醇并超声1 h,合并三次离心液,用盐酸-甲醇将提取物定容至100 mL容量瓶中,摇匀后过0.45 μm微孔滤膜,取滤液备用。

(2)盐酸小檗碱标准品溶液的配制。取纯度98%的盐酸小檗碱对照品,精密称定10.0 mg,用甲醇溶解并定容至50 mL容量瓶中,制成浓度为0.196 mg·mL⁻¹的对照品溶液。

(3)色谱条件。色谱柱为InertSustainC18,以乙腈-0.05 mol·L⁻¹磷酸二氢钾溶液(50:50)为流动相,每100 mL流动相中加入0.4 g十二烷基硫酸钠后,再用磷酸调节pH值至4.0,检测波长为345 nm,流速为1 mL·min⁻¹,柱温为25℃,计算小檗碱的含量^[19]。

1.4 数据处理

采用Excel 2019软件进行数据整理;利用IBM SPSS Statistics 26软件中的One-Way ANOVA对处理间菌根侵染率、生长指标和生理指标进行差异显著性分析;采用LSD、Duncan法进行多重比较;采用Origin 2021软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 接菌苗的生长响应

2.1.1 两种小檗接种不同AMF的菌根侵染率 对细叶小檗和刺叶小檗幼苗根系进行不同方式的AMF接种处理,细叶小檗接种AMF后, Mix处理和Ce处理的侵染效果较好,侵染率分别为90.1%和89.4%。刺叶小檗接种AMF后, Ce处理侵染率最高达

82.5%。而细叶小檗和刺叶小檗的对照处理均未观测到AMF对根系的侵染(图1)。不同接种处理下,两

种小檗幼苗根系的菌根侵染率存在差异,表明不同AMF接种处理对菌根共生关系的建立有不同影响。

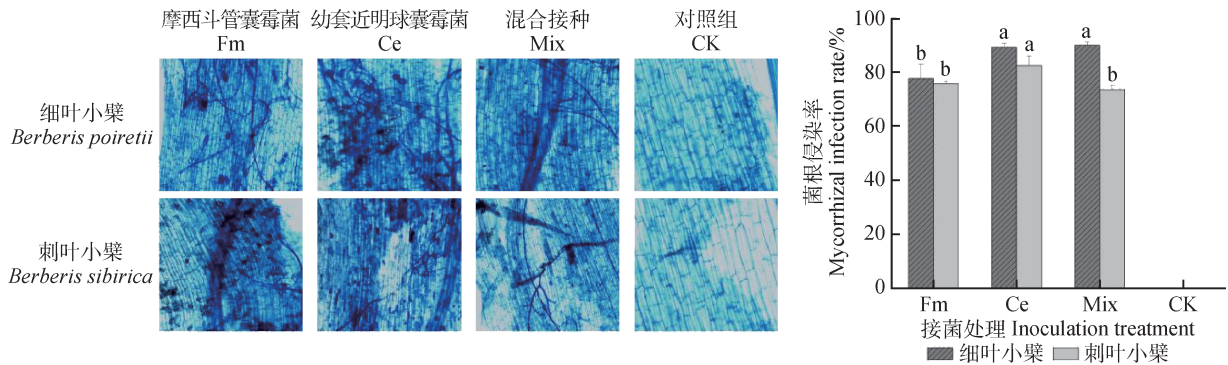


图1 不同接种处理下细叶小檗和刺叶小檗菌根侵染的情况

Fig. 1 The mycorrhizal infection status of *B. poiretii* and *B. sibirica* under different inoculation treatments

注: Fm, 摩西斗管囊霉菌; Ce, 幼套近明球囊霉; Mix, 混合接菌; CK, 空白对照。不同小写字母标注, 表示不同接种处理之间差异显著 ($P < 0.05$)。下同

Note: Fm, *Funneliformis mosseae*; Ce, *Claroideoglomus etunicatum*; Mix, mixed inoculation; CK, Blank control. Different lowercase letters mean significant difference at the 0.05 level. The same as below

2.1.2 两种小檗接种不同AMF的生长响应 接种AMF对两种小檗的苗高和生物量有显著影响。接种AMF的细叶小檗苗高均高于CK, 其中Fm接菌苗的苗高增长量显著高于CK ($P < 0.05$), 为CK的248.34%。刺叶小檗中, Ce接菌苗的苗高增长量显著高于CK ($P < 0.05$), 为CK的202.49%; Fm接菌苗的苗高增长量显著高于CK ($P < 0.05$), 为CK的198.03%。不同接种处理的细叶小檗幼苗地茎增长量无显著性差异; 刺叶小檗CK的地茎增长量显

著高于Fm接菌苗 ($P < 0.05$), 为Fm接菌苗的123.28%(图2)。接种AMF两种小檗的地上部分生物量和地下部分生物量不同程度增加。在细叶小檗的地上生物量增量方面, Fm接菌苗较CK增加的比例最大, 为CK的160%; 而在地下生物量增量方面, Ce接菌苗地下生物量增量较CK增加的比例最大, 为CK的175%。刺叶小檗Ce接菌苗的地上和地下生物量增量与CK差异显著 ($P < 0.05$), 分别为CK的288.89%, 133.33%(图3)。

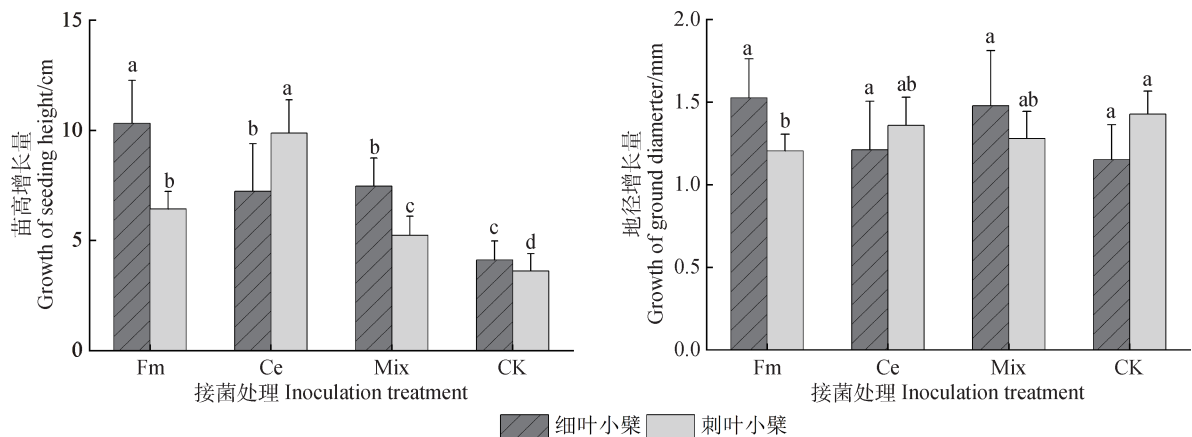


图2 不同接种处理对细叶小檗和刺叶小檗幼苗生长指标的影响

Fig. 2 Effects of different inoculation treatments on the growth indexes of *B. poiretii* and *B. sibirica* seedlings

2.1.3 两种小檗接种不同AMF的根系响应 不同处理的细叶小檗根系表面积、根尖数、平均直径、体积和长度均高于CK, 其中Ce接菌苗的根系表面积、根尖数、体积和长度均相比CK差异显著 ($P < 0.05$), 分别高于CK 57.8%、53.57%、116.67%和48.57%;

接种和不接种的刺叶小檗, 表面积差异不显著, Ce接菌苗的根尖数较其他处理具有显著性 ($P < 0.05$), 分别高于Fm接菌苗、Mix接菌苗和CK, 29.24%、51.96%、34.14%。Fm接菌苗根尖数超出CK约3.89%, 根系体积低于CK 20%。Mix接菌苗根尖数

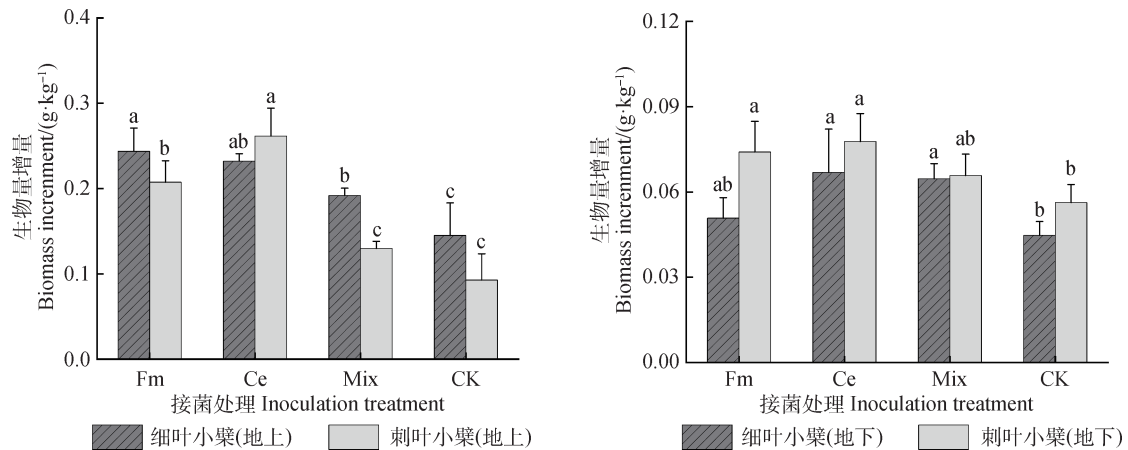


图3 不同接种处理对细叶小檗和刺叶小檗幼苗生物量的影响

Fig. 3 Effects of different inoculation treatments on the biomass of *B. poiretii* and *B. sibirica* seedlings

低于CK 11.73%,根系体积高于CK 16%。在平均直径和长度上,Fm接菌苗和Mix接菌苗最低,其与几种

处理间差异不显著,Mix接菌苗的根系体积显著高于其他处理($P < 0.05$)(表1)。

表1 接种AMF对细叶小檗和刺叶小檗根系的影响

Table 1 Effects of AMF inoculation on the root system of *B. poiretii* and *B. sibirica*

物种 Species	处理 Treatment	表面积 Specific root area/cm ²	根尖数 Apex number/个	平均直径 Average diameter/mm	体积 Volume/cm ³	长度 Length/mm
细叶小檗	Fm	23.04±0.40 ^b	73.33±4.62 ^{bc}	0.36±0.01 ^b	0.29±0.06 ^b	243.16±9.82 ^b
	Ce	27.87±2.68 ^a	100.33±7.10 ^a	0.40±0.02 ^a	0.39±0.03 ^a	291.49±16.18 ^a
	Mix	23.59±2.03 ^{ab}	82.33±4.04 ^b	0.35±0.01 ^b	0.30±0.06 ^b	258.47±3.43 ^b
	CK	17.66±3.29 ^c	65.33±6.66 ^c	0.34±0.01 ^b	0.18±0.01 ^c	196.20±15.36 ^c
刺叶小檗	Fm	23.41±1.94 ^a	100.33±7.77 ^b	0.33±0.01 ^b	0.20±0.02 ^c	265.99±25.37 ^a
	Ce	23.14±1.53 ^a	129.67±5.69 ^a	0.35±0.01 ^{ab}	0.25±0.01 ^b	268.82±12.87 ^a
	Mix	22.51±1.05 ^a	85.33±0.58 ^c	0.37±0.02 ^a	0.29±0.02 ^a	226.58±15.29 ^b
	CK	20.56±1.66 ^a	96.67±6.43 ^b	0.35±0.02 ^a	0.25±0.02 ^b	249.21±9.60 ^{ab}

注:不同的字母上标表示同一列内各均值存在显著性差异($P < 0.05$)。下同

Note: Different superscripts indicate that there are significant differences among the mean values in the same column ($P < 0.05$). The same as below

2.2 接菌苗的生理响应

2.2.1 两种小檗接种不同AMF的抗氧化调节响应 接种AMF对细叶小檗与刺叶小檗的生理指标存在不同程度影响,且在多数指标中Ce接菌处理表现最优:在CAT(过氧化氢酶)活性上,两种小檗均以Ce接菌苗活性最高,其中细叶小檗Ce接菌苗显著高于Fm接菌苗(18.67%)与未接菌苗(15.92%)($P < 0.05$),刺叶小檗Ce接菌苗显著高于Mix接菌苗(27.21%)($P < 0.05$);SOD(超氧化物歧化酶)活性方面,两种小檗Ce接菌苗活性均最高且显著高于Fm接菌苗($P < 0.05$),细叶小檗、刺叶小檗Ce接菌苗分别为Fm接菌苗的132.22%和116.18%;POD(过氧化物酶)活性则呈现物种差异,细叶小檗各处理间无显著差异,刺叶小檗以Mix接菌苗活性最低,Fm接菌苗、Ce接菌苗、未接菌苗分别较其高出

44.59%,27.84%,26.80%;Sp(可溶性蛋白)含量上,两种小檗Ce接菌苗均显著高于其他处理($P < 0.05$),细叶小檗Ce接菌苗分别为Fm接菌苗、Mix接菌苗、CK的117.67%,117.59%,132.01%,刺叶小檗Ce接菌苗分别为Fm接菌苗、Mix接菌苗、CK的120.99%,113.82%,115.54%(图4)。

2.3 两种小檗接种AMF的小檗碱含量响应

接种AMF的细叶小檗、刺叶小檗小檗碱含量不同程度增加,细叶小檗Ce接菌苗和Mix接菌苗的小檗碱含量与CK有显著差异($P < 0.05$),分别为CK的151.20%,140.48%,且二者间无显著差异;刺叶小檗Fm接菌苗和Ce接菌苗与CK有显著差异($P < 0.05$),分别为CK的145.59%,147.12%(表2)。

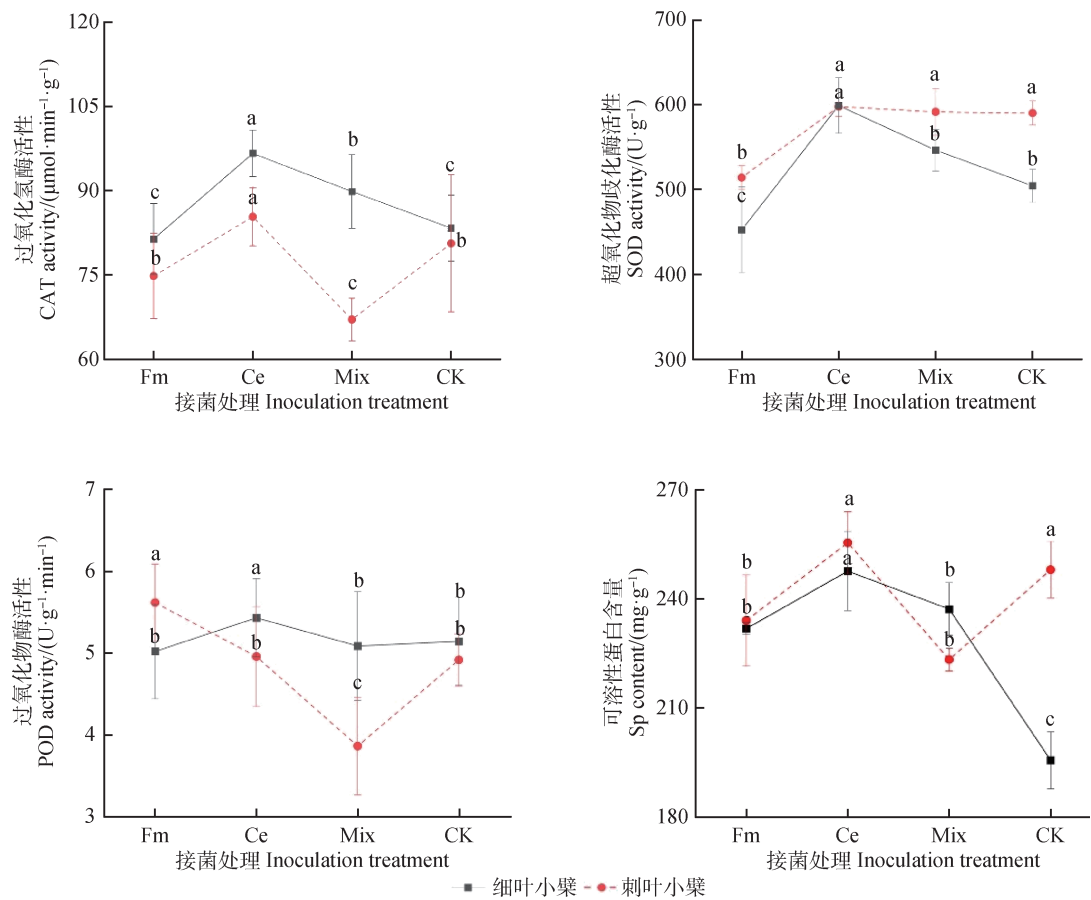


图 4 不同接种处理两种小檗幼苗的抗氧化调节响应

Fig. 4 Antioxidant regulatory response of two types of *Berberis* seedlings under different inoculation treatments

表 2 不同接种处理对两种小檗小檗碱含量的响应

Table 2 The response of berberine content in two *Berberis* species to different inoculation treatments

处理 Treatment	细叶小檗碱含量 The content of berberine in <i>B. poiretii</i>	刺叶小檗碱含量 The content of berberine in <i>B. sibirica</i> ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)
Fm	12.88 ± 0.67^b	18.97 ± 1.63^a
Ce	17.07 ± 1.16^a	19.17 ± 1.55^a
Mix	15.86 ± 1.37^a	14.32 ± 0.64^b
CK	11.29 ± 0.15^b	13.03 ± 0.59^b

2.4 两种小檗接种 AMF 的各参数相关性

接种 AMF 的细叶小檗,各指标间存在显著关联。Mir 与小檗碱含量 (Berberine, BBR)、RL、Rsa、RNT、Udm 显著正相关 ($P < 0.05$),与 RV、Ard、Adm、SOD 活性、Sp 含量、CAT 活性正相关,但不显著。小檗碱含量 BBR 与 RL、Rsa、RV、RNT、Udm、SOD 活性、Sp 含量、CAT 活性显著正

相关 ($P < 0.05$)。

接种 AMF 的刺叶小檗,各指标间存在显著关联。Mir 与 BBR、Sh、RV、Adm、Udm 正相关,但不显著,与 Gd、RV、Ard、RNT、SOD 活性、Sp 含量、CAT 活性含量负相关,但不显著。小檗碱含量与 Sh、NRT、Adm、Udm 显著正相关 ($P < 0.05$),与 Ard 显著负相关 ($P < 0.05$)(图 5)。

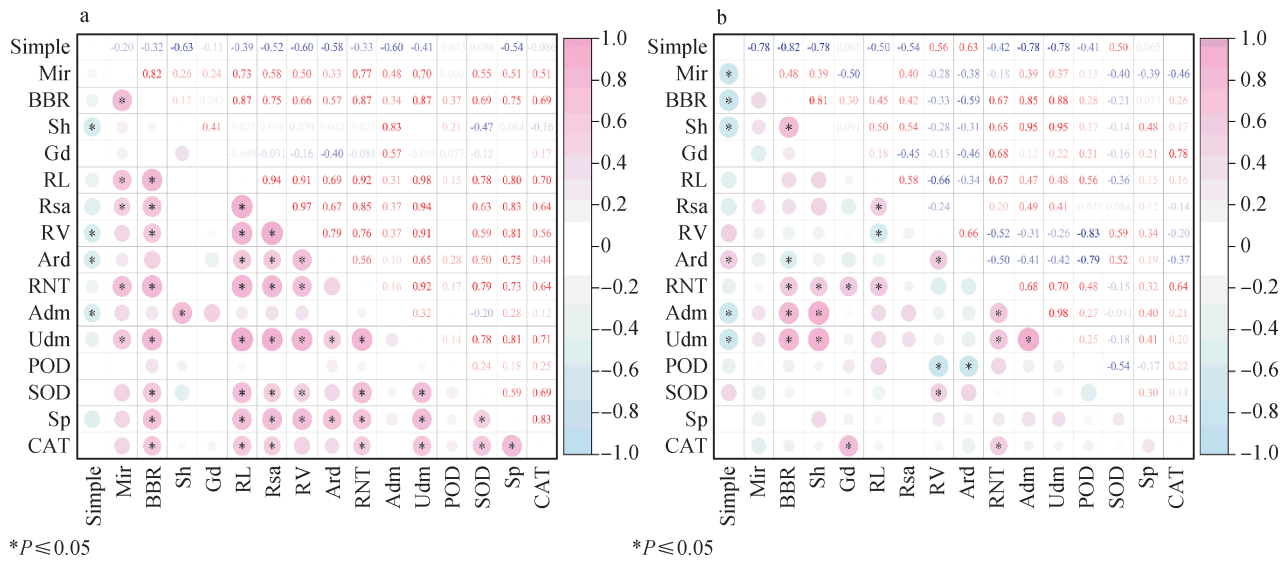


图 5 不同接种处理细叶小檗和刺叶小檗各参数的 Spearman 相关性

Fig. 5 Spearman correlations of parameters in *B. poiretii* and *B. sibirica* under different inoculation treatments

注: a 为细叶小檗; b 为刺叶小檗; 颜色深浅代表显著性强弱; * 为显著 ($P < 0.05$)。Simple: 接种方式; Mir: 菌根侵染率; BBR: 小檗碱; Sh: 苗高增长量; Gd: 地径增长量; RL: 根长; Rsa: 根表面积; RV: 根体积; Ard: 根系平均直径; RTN: 根尖数; Adm: 地上生物量增长量; Udm: 地下生物量增长量; POD: 过氧化物酶; SOD: 超氧化物歧化酶; Sp: 可溶性蛋白; CAT: 过氧化氢酶

Note: a, *B. poiretii*; b, *B. sibirica*; The intensity of the color indicates the strength of significance. An asterisk (*) indicates significance ($P < 0.05$). Simple, Inoculation method; Mir, Mycorrhizal infection rate; BBR, Berberine; Sh, Increase in seedling height; Gd, Increase in ground diameter; RL, Root length; Rsa, Root surface area; RV, Root volume; Ard, Average root diameter; RTN, Root tip number; Adm, Increase in aboveground biomass; Udm, Increase in underground biomass; POD, Peroxidase; SOD, Superoxide dismutase; Sp, Soluble protein; CAT, Catalase

3 讨论

3.1 丛枝菌根真菌对细叶小檗和刺叶小檗生长的影响

有研究表明, AMF 可以通过调节植物激素平衡来促进植物生长^[20]。在小檗属植物中, AMF 可能也通过类似机制, 影响植物生长素、细胞分裂素等激素的合成与运输, 进而促进植物的生长发育和生物量积累^[21]。还有研究发现, AMF 能够改善植物根际土壤微生物群落结构, 增强土壤养分循环, 为植物生长提供更有利的土壤环境^[22]。这也可能是接种 AMF 促进细叶小檗和刺叶小檗生长的重要原因之一。丛枝菌根真菌对细叶小檗和刺叶小檗生长的影响体现在, 植物与 AMF 形成共生关系后, AMF 可显著调控宿主的营养吸收与生理代谢过程, 且该效应会进一步反映在植物形态结构的变化上。

根系侵染率是衡量共生真菌与植物亲和力及生态适应性的关键指标, 可用菌根侵染率衡量其生态适应性^[23], 接种 AMF 的细叶小檗和刺叶小檗根系侵染率均可达到 74.0%~90.1%, 单一接种 Fm

与 Ce 的侵染率较高。这表明这两种菌剂与小檗属植物具有良好的共生潜力。从生物量来看, AMF 对两种小檗生物量的促进作用具有确定性, 但菌种选择需结合植物物种特性与目标培育需求: 若以提升刺叶小檗整体生物量为目的, Ce 是最优选择; 若针对细叶小檗进行定向培育, 需根据“地上生长优先”或“地下生长优先”分别选用 Fm 或 Ce^[24]。这一研究结果为小檗属植物的人工育苗及生态修复应用提供了重要的菌种选择依据, 后续可进一步结合土壤养分条件, 探究 AMF 与环境因子的交互作用对小檗生物量的影响。

根系是植物重要的功能器官, 在植物生长中起着关键作用。细叶小檗接种 AMF 后, 根系各指标均优于 CK, 且 Ce 处理与其他处理对比具有显著性差异; 刺叶小檗在 Ce 处理下, Rsa、NRT 和 RI 也均高于 CK。表明接种 AMF 能够有效促进植物根系的生长发育, 增强植物对水分和养分的吸收能力。这与宋桃李^[25]和 Moreira 等^[26]的研究结果一致。

在植物生理方面, 植物抗氧化系统可以通过 SOD、POD 和 CAT 来减少活性氧自由基对膜质的伤害和保护膜结构的完整性^[27]。Sp 含量能反映植

物的催化效率,是衡量植物叶片衰老程度的重要指标^[28]。细叶小檗和刺叶小檗CAT活性、SOD活性、Sp含量在Ce处理时均高于其他处理,接种AMF的刺叶小檗和细叶小檗POD活性均高于未接菌处理,说明AMF能够增强植物的抗氧化能力,促进相关生理指标的提升,这与王介华等人^[29]的研究结果相似,且细叶小檗Fm菌处理最佳,细叶小檗的Fm菌处理地上生物量最大可能与此相关,证明AMF对这4个生理指标具有促进效果。

3.2 丛枝菌根真菌对细叶小檗和刺叶小檗根小檗碱含量的影响

小檗碱具有杀毒抑菌作用,常用来治疗炎症性疾病,目前还发现其能诱导癌细胞死亡^[30],对治疗神经退行性和神经精神疾病具有有益的作用^[31],并且Imenshahidi等^[32]经过众多临床试验证明小檗碱在常规剂量下副作用很小,这更说明小檗碱在医药领域具有很大的应用潜力。

AMF促进药用植物次生代谢产物积累的机制可能与增强植物对养分的吸收、调节植物激素信号通路以及激活相关次生代谢途径关键酶的活性有关^[33]。细叶小檗和刺叶小檗等小檗属植物根系中含有小檗碱,可用来制作相关药物。本试验接种AMF的细叶小檗和刺叶小檗所生成的小檗碱含量大于CK处理,证明接种AMF能够促进小檗碱生成^[13]。在细叶小檗和刺叶小檗中,接种Ce菌可能提高植物对磷、氮等养分的吸收效率,为小檗碱的合成提供更多的物质基础;同时,可能调节植物激素信号,激活小檗碱合成途径中的关键酶,从而促进小檗碱的合成与积累。细叶小檗和刺叶小檗Ce处理的小檗碱含量最高,说明Ce对小檗属植物生成小檗碱具有较好的促进作用。

3.3 丛枝菌根真菌对细叶小檗和刺叶小檗各参数相关性的影响

不同处理下细叶小檗和刺叶小檗的各项参数间呈现出复杂的相关性。细叶小檗的Mir和BBR含量与RL、Rsa、RNT、Udm均显著正相关($P < 0.05$)。刺叶小檗的菌根侵染率与Sh、Rsa、Adm、POD活性正相关。说明AMF通过提升根系侵染率,促进根系扩张与养分吸收能力,既推动地下生物量积累,又为小檗碱合成提供物质基础。细叶小檗比刺叶小檗的相关性更强,表明接种AMF后的

细叶小檗菌丝在土壤中延伸生长,扩大了植物根系的吸收范围,增加了养分和水分的吸收量。且细叶小檗SOD活性、Sp含量、CAT活性与BBR含量显著正相关($P < 0.05$),但刺叶小檗并没有明显相关性。有研究表明,AMF可通过调节植物体内活性氧代谢平衡,增强抗氧化酶活性,缓解氧化胁迫。在本研究中,这些抗氧化酶相关参数与其他生长或生理参数间的正相关,可能暗示着AMF通过提升抗氧化能力,促进植物整体生长和生理功能的协调。这与程鑫等^[16]做的水曲柳丛枝菌根真菌接菌试验研究结果相一致。

AMF对植物的影响还涉及激素调节、信号传导通路等多个层面。这些潜在机制可能进一步影响细叶小檗和刺叶小檗各参数间的相关性。但目前对于AMF影响植物各参数相关性的研究仍存在一些不足,如对分子机制的深入解析还不够全面,不同环境条件下AMF作用的稳定性及特异性有待进一步探究。

4 结论

接种AMF可通过调节植物激素平衡、改善根际土壤环境,显著提升两种小檗的根系侵染率,促进根系生长与生物量积累,且菌种适配性存在物种特异性——刺叶小檗整体生物量提升以Ce为最优,细叶小檗需按“地上或地下生长优先”分别选用Fm或Ce。AMF能有效增强两种小檗的抗氧化系统功能,且显著促进药用成分小檗碱的合成与积累,其中Ce处理对小檗碱含量的提升效果最为突出。相关性分析表明,AMF可提高根系侵染率,且在细叶小檗中更为显著。接菌后,两种小檗幼苗的生长,但细叶小檗的渗透调节能力与抗氧化调节能力的增强与抗逆性增加比刺叶小檗幼苗好。接种AMF可作为细叶小檗和刺叶小檗育苗的有效途径之一,可以为两种小檗属幼苗扩大培育提供借鉴。

参考文献

- [1] WANG B, QIU Y L. Phylogenetic distribution and evolution of mycorrhizas in land plants[J]. *Mycorrhiza*, 2006, 16(5): 299-363
- [2] NIE W J, HE Q H, GUO H E, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi: boosting crop resilience to environmental stresses[J]. *Microorganisms*, 2024, 12(12): 2448
- [3] EVELIN H, KAPOOR R, GIRI B. Arbuscular mycorrhizal fungi in alleviation of salt stress: a review[J]. *Annals of Botany*, 2009, 104(7): 1263-1280

- [4] 孙佳琦,曹文琪,冷平生,等. 接种4种外生菌根真菌对榿树幼苗生长、光合及营养元素含量的影响[J]. 中南林业科技大学学报,2021,41(10):67-74,101
SUN J Q, CAO W Q, LENG P S, et al. Effect of four ectomycorrhizal fungi inoculation on the growth, photosynthesis, and nutrient element content of *Quercus dentata* seedlings[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2021,41(10):67-74,101
- [5] MATHUR S, SHARMA M P, JAJOO A. Improved photosynthetic efficacy of maize (*Zea mays*) plants with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) under high temperature stress[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 2018, 180:149-154
- [6] SOLIMAN E R S, ABDELHAMEED R E, METWALLY R A. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in drought-resilient soybeans (*Glycine max* L.): unraveling the morphological, physiological, biochemical traits, and expression of polyamine biosynthesis genes[J]. Botanical Studies, 2025, 66(1):9
- [7] ABDALLA M, BITTERLICH M, JANSÁ J, et al. The role of arbuscular mycorrhizal symbiosis in improving plant water status under drought [J]. Journal of Experimental Botany, 2023, 74(16):4808-4824
- [8] 黄京华,谭钜发,揭红科,等. 丛枝菌根真菌对黄花蒿生长及药效成分的影响[J]. 应用生态学报,2011,22(6):1443-1449
HUANG J H, TAN J F, JIE H K, et al. Effects of inoculating arbuscular mycorrhizal fungi on *Artemisia annua* growth and its officinal components[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(6):1443-1449
- [9] 刘璐. 丛枝菌根真菌诱导下的广藿香生长及其有效成分积累的研究[D]. 南宁:广西大学,2020:20-45
LIU L. Study on the growth and effective medicinal ingredient accumulation of pogostemon cablin induced by arbuscular mycorrhizal fungi [D]. Nanning: Guangxi University, 2020: 20-45
- [10] GANUGI P, MASONI A, PIETRAMELLARA G, et al. A review of studies from the last twenty years on plant - arbuscular mycorrhizal fungi associations and their uses for wheat crops [J]. Agronomy, 2019, 9(12):840
- [11] ADESEMOYE A O, TORBERT H A, KLOPPER J W. Enhanced plant nutrient use efficiency with PGPR and AMF in an integrated nutrient management system[J]. Canadian Journal of Microbiology, 2008, 54(10):876-886
- [12] 张华,孙纪全,包玉英. 丛枝菌根真菌影响植物次生代谢产物的研究进展[J]. 农业生物技术学报,2015,23(8):1093-1103
ZHANG H, SUN J Q, BAO Y Y. Advances in studies on plant secondary metabolites influenced by arbuscular mycorrhizal fungi[J]. Journal of Agricultural Biotechnology, 2015, 23(8): 1093-1103
- [13] 范继红,杨国亭,穆立蕾,等. 接种丛枝菌根菌对黄檗苗木主要3种生物碱含量的影响[J]. 防护林科技,2006(5):24-26
FAN J H, YANG G T, MU L Q, et al. Effect of AMF on the content of berberine, jatrorrhizine and palmatine of *Phellodendron amurense* seedlings [J]. Protection Forest Science and Technology, 2006(5):24-26
- [14] 郭巧生,程俐陶,刘作易. 丛枝菌根真菌对半夏产量及化学成分的影响[J]. 中国中药杂志,2010,35(3):333-338
GUO Q S, CHENG L T, LIU Z Y. Study on influence of arbuscular mycorrhizal fungi *Pinellia ternata* yield and chemical composition [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2010, 35(3):333-338
- [15] 于洋. 喜树幼苗丛枝菌根形成与喜树碱含量的对应分析[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2010:13-32
YU Y. Corresponding analysis on camptothecin content and arbuscular mycorrhiza formation in *Camptotheca acuminata* seedlings [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2010: 13-32
- [16] 程鑫,吴纯泽,韦庆钰,等. 水曲柳丛枝菌根真菌接菌苗对干旱胁迫的生长和生理响应[J]. 林业科学,2023,59(2):58-66
CHENG X, WU C Z, WEI Q Y, et al. Growth and physiological responses of *Fraxinus mandshurica* seedlings inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi to drought stress[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2023, 59(2):58-66
- [17] STONE J M, HEARD J E, ASAI T, et al. Simulation of fungal-mediated cell death by fumonisin B1 and selection of fumonisin B1-resistant (*fbr*) *Arabidopsis* mutants [J]. The Plant Cell, 2000, 12(10):1811-1822
- [18] 王燕凌. 植物生理学实验指导[M]. 北京:中国农业出版社, 2014:73-88
WANG Y L. Plant physiology experiment guide[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2014:73-88
- [19] 刘颖,李世颂,刘娟. HPLC测定关黄柏中生物碱的含量[J]. 中国实验方剂学杂志,2013,19(16):88-91
LIU Y, LI S S, LIU J. Determination of alkaloids in phellodendri amurenensis cortex by HPLC[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2013, 19(16):88-91
- [20] WU N, LI Z, LIU H G, et al. Influence of arbuscular mycorrhiza on photosynthesis and water status of *Populus cathayana* Rehder males and females under salt stress[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2015, 37(9):183
- [21] 黄荣雁,孟维珊,朱琨,等. 细叶小檗生理、光合特性及叶表微形态对干旱胁迫的响应[J]. 草地学报,2023,31(5):1386-1392
HUANG R Y, MENG W S, ZHU K, et al. Responses of physiological, photosynthetic characteristics and leaf surface micro-morphology of *Berberis poirietii* to drought stress [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(5):1386-1392
- [22] ZHANG Y L, LI T T, WU H H, et al. Effect of different fertilization practices on soil microbial community in a wheat - maize rotation system[J]. Sustainability, 2019, 11(15):4088
- [23] 曹磊,李逸雯,凌康杰,等. 盐渍化胁迫下接种不同丛枝菌根真菌对番茄耐盐性的影响[J]. 福建农业学报,2022,37(2):188-196
CAO L, LI Y W, LING K J, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on salt-tolerance of tomato plants [J].

- Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2022, 37(2): 188-196
- [24] 阙海明, 徐恒康, 鲁佳男, 等. 不同丛枝菌根真菌接种对3种草地植物生长特性的影响[J]. 草地学报, 2023, 31(7): 1922-1930
- KAN H M, XU H K, LU J N, et al. The influence of different arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on the growth characteristics of three forage species[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(7): 1922-1930
- [25] 宋桃李. 接种丛枝菌根真菌对不同施氮水平下荆条根系生长和生理特征的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2023: 8-43
- SONG T L. Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi inoculation on root growth and physiological characteristics of *Vitex Negundo* under different nitrogen application levels[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2023: 8-43
- [26] MOREIRA H, PEREIRA S I A, MARQUES A P G C, et al. Mine land valorization through energy maize production enhanced by the application of plant growth-promoting rhizobacteria and arbuscular mycorrhizal fungi[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(7): 6940-6950
- [27] 王穗子, 金则新, 李月灵, 等. 铜胁迫条件下AMF对海州香薷光合色素含量、抗氧化能力和膜脂过氧化的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(23): 7699-7708
- WANG S Z, JIN Z X, LI Y L, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on the photosynthetic pigment contents, anti-oxidation capacity and membrane lipid peroxidation of *Elsholtzia splendens* leaves under copper stress[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(23): 7699-7708
- [28] 朱一民, 李婷, 景宇杭, 等. 八种红树植物幼苗的叶片可溶性蛋白和抗氧化酶活性对光强的响应[J]. 广西植物, 2023, 43(4): 606-615
- ZHU Y M, LI T, JING Y H, et al. Responses of soluble protein contents and antioxidant enzyme activities in leaves of eight mangrove species seedlings to light intensities[J]. Guihaia, 2023, 43(4): 606-615
- [29] 王介华, 睢金凯, 崔令军, 等. AMF对盐胁迫下桢楠生长和生理特性的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(6): 51-58
- WANG J H, SUI J K, CUI L J, et al. Effects of AMF on the growth and physiological characteristics of *Phoebe zhennan* under salt stress[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2023, 43(6): 51-58
- [30] GUAMÁN ORTIZ L M, LOMBARDI P, TILLHON M, et al. Berberine, an Epiphany against cancer[J]. Molecules, 2014, 19(8): 12349-12367
- [31] KULKARNI S K, DHIR A. Berberine: a plant alkaloid with therapeutic potential for central nervous system disorders[J]. Phytotherapy Research, 2010, 24(3): 317-324
- [32] IMENSHAHIDI M, HOSSEINZADEH H. Berberine and barberry (*Berberis vulgaris*): A clinical review[J]. Phytotherapy Research, 2019, 33(3): 504-523
- [33] RAN Z, DING W, CAO S, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi: effects on secondary metabolite accumulation of traditional Chinese medicines[J]. Plant Biology, 2022, 24(6): 932-938

(责任编辑 刘婷婷)