

刘 燕,曾维军,秦 维,等. 威宁短柱油茶丛枝菌根真菌和深色有隔内生真菌定殖特征及其与果实经济性状的相关性[J]. 江苏农业科学, 2023,51(22):145-153.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.22.021

# 威宁短柱油茶丛枝菌根真菌和深色有隔内生真菌定殖特征及其与果实经济性状的相关性

刘 燕,曾维军,秦 维,罗文敏

(贵州省生物研究所,贵州贵阳 550009)

**摘要:**以贵州省高海拔地区野生油茶(威宁短柱油茶)为研究对象,调查不同季节和不同样地的威宁短柱油茶根系丛枝菌根真菌(AMF)和深色有隔内生真菌(DSE)的定殖特征,并分析2种真菌与土壤理化性质和果实经济性状之间的联系。结果表明,AMF和DSE能双重定殖于威宁短柱油茶根系,AMF定殖率最高在6月,最低在12月;DSE定殖率最高在6月,3月次之,最低出现在9月、12月;样地A1的AMF菌丝定殖率、丛枝定殖率、总定殖率和DSE总定殖率、微菌核定殖率、菌丝定殖率、定殖强度最高,样地A5的AMF定殖率最低,样地A6的DSE定殖率最低。相关性分析结果表明,AMF菌丝定殖率、AMF定殖强度与土壤有效磷含量呈显著负相关关系( $P < 0.05$ ),AMF总定殖率与土壤有机质含量显著负相关,AMF泡囊定殖率与土壤脲酶活性显著正相关,AMF孢子密度与土壤速效钾含量和碱性磷酸酶活性呈显著正相关关系,AMF丛枝定殖率与DSE总定殖率、DSE定殖强度呈显著正相关关系;AMF菌丝定殖率、AMF定殖强度与单果质量呈显著正相关关系;DSE定殖与土壤因子和果实经济性状间无显著相关性。可见,AMF和DSE均能与威宁短柱油茶根系形成良好共生关系,土壤因子对AMF定殖影响较大,而对DSE定殖影响较小,AMF定殖会促进果实产量的增加。

**关键词:**威宁短柱油茶;丛枝菌根真菌;深色有隔内生真菌;土壤因子;果实经济性状;相关性

**中图分类号:**S182 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)22-0145-08

内生真菌(endophytic fungi)是一类在生活史中至少有一个阶段生活于植物组织内,但不会对植物造成显著不良影响的真菌<sup>[1]</sup>。自然生态系统中的绝大部分植物都能与内生真菌共生,植物与内生真菌关联似乎是植物适应胁迫环境的一个关键策略<sup>[2]</sup>。丛枝菌根真菌(AMF)和深色有隔内生真菌(DSE)是植物根系中最主要的两大类型内生真菌<sup>[3]</sup>,它们能同时定殖在许多植物根系中。丛枝菌根真菌是一类广泛分布于陆地生态系统的土壤真菌,它可以和80%维管束植物形成共生关系。AMF在改善植物根系构型、提高养分吸收能力、改良土壤性质、促进植物生长发育以及增强植物抗逆性方面有着重要作用<sup>[4-5]</sup>。深色有隔内生真菌泛指一群定居于健康植物根的表皮、皮层甚至维管束组织的细胞内或细胞间隙的一类小型共生真菌,这种真菌

菌丝较粗,为棕色或深棕色,隔膜明显,且能够在植物细胞内形成微菌核结构<sup>[6]</sup>。DSE分布十分广泛,几乎在地球的所有生境中均有发现,作为和丛枝菌根真菌一样具有广布性的一大类真菌类群,深色有隔内生真菌的生态学意义不可小觑<sup>[7-8]</sup>。DSE能够产生黑色素,增加植物对不良环境的抵抗能力,同时DSE的黏质菌丝还能帮助植物吸收土壤中的水分和矿质营养,促进植物生长<sup>[9]</sup>。现有研究表明,DSE有着和AMF相似的生态功能,在极端胁迫环境中,DSE的定殖甚至比AMF更有优势<sup>[10-11]</sup>。在大自然中,DSE可以与AMF共存于寄主植物同一根系<sup>[6]</sup>。

威宁短柱油茶(*Camellia weiningensis* Y. K. Li.)属山茶科(Theaceae)山茶属(*Camellia*)植物,是一种野生油茶种类,其主要分布于贵州省威宁县海拔1 800~2 700 m的山区内<sup>[12]</sup>。该品种除了具有普通油茶耐旱、耐土壤瘠薄的特性外,还具有耐寒、果实早熟、壳薄、出油率高、油质好等优点<sup>[13]</sup>,具有很高的经济和生态价值。目前,在油茶内生真菌中研究较多的是AMF。前人已对野生油茶林和油茶不同品种间根际AMF多样性<sup>[14-17]</sup>、AMF促进油茶生长和氮磷吸收<sup>[18-19]</sup>、AMF提高油茶抗逆性<sup>[20-21]</sup>等

收稿日期:2022-11-15

基金项目:贵州科学院博士基金(编号:黔科院R字[2021]2号);贵州省林业科研项目(编号:黔林科合[2022]05号);贵州省科技计划项目(编号:黔科合支撑[2020]1Y060号)。

作者简介:刘 燕(1981—),女,贵州贵阳人,博士,副研究员,主要从事植物种苗繁育及内生真菌研究。E-mail:472395057@qq.com。

方面做了细致研究,而有关油茶其他内生真菌如 DSE 的研究还鲜见报道。植物根系 AMF 和 DSE 真菌的定殖研究虽已有报道<sup>[10-11,22]</sup>,但关于野生油茶根际 AMF 和 DSE 真菌同时定殖的分布规律及土壤理化性质和果实经济性状的相关性研究还缺乏全面认识。本研究旨在探索威宁短柱油茶根系 AMF 和 DSE 的定殖特征和生态分布规律,分析 AMF 和 DSE 的定殖与土壤理化性质和果实经济性状的关系,可为充分利用土壤共生真菌促进油茶生长和荒漠植被恢复提供依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2020 年 3 月、6 月、9 月和 12 月分别在贵州省

毕节市威宁彝族回族苗族自治县草海镇大山村的野生油茶林设置样地,分析不同季节对 AMF 和 DSE 定殖率的影响。2021 年 8 月在威宁县野生油茶分布面积较大的 7 个区域设置采样地点(表 1),分析不同样地对 AMF 和 DSE 定殖率的影响。每个采样点选取 3 个小样地,每个样地随机选取长势相似的野生油茶各 5 株。去掉枯枝落叶层后,分别在距离植株主干 0~5 cm 范围内采集 0~20 cm 土层深度的根系和土壤样品。样品装入自封塑料袋后做好标记放入冰盒带回实验室。挑选新鲜根样,洗净泥土,用甲醛-乙酸-乙醇(FAA)固定液保存,用于 AMF、DSE 定殖结构观测和定殖率测定。土壤样品放入实验室自然风干,用于土壤理化性质和 AMF 孢子密度测定。

表 1 采样地概括

样地编号	采样地点	经纬度	海拔(m)	土壤类型	主要伴生植物
A1	雪山镇大发村	27.137 979°N,104.271 068°E	2 110	黄棕壤	大白杜鹃、白栎
A2	兔街镇新光村	27.202 778°N,104.137 222°E	2 210	黄棕壤	大白杜鹃、栓皮栎
A3	云贵乡高发村	27.271 858°N,104.074 979°E	2 212	黄棕壤	大白杜鹃、栓皮栎
A4	大街乡高华村	27.029 088°N,104.248 046°E	2 258	黄棕壤	杜鹃、榛子、云南松
A5	草海镇大山村	26.755 160°N,104.340 620°E	2 352	黄棕壤	映山红、栓皮栎
A6	黑石镇陆平村	26.677 883°N,104.083 009°E	2 375	黄棕壤	大白杜鹃、云南松
A7	麻乍镇吊水村	26.681 131°N,104.080 366°E	2 421	棕壤	大白杜鹃、云南松

1.2 AMF、DSE 结构观察和定殖率的测定

将各处理根段从 FAA 固定液中取出,剪成 1 cm 左右长度,采用 Phillips 等的方法<sup>[23]</sup>处理根样。根样经过解离-透明-酸化-染色-脱色等处理后,在显微镜下观察 AMF 和 DSE 定殖结构并测定 2 种真菌的定殖率及定殖强度<sup>[24]</sup>。

1.3 土壤理化性质测定

全氮含量用凯氏定氮法测定,全磷含量用 NaOH-钼锑抗比色法测定,全钾含量用火焰光度法测定,有效磷含量用双酸浸提-钼锑抗比色法测定,速效钾含量用火焰光度法测定,碱解氮含量用碱解扩散法测定,土壤 pH 值用电位法测定,土壤有机质含量用重铬酸钾-浓硫酸外加热法<sup>[25-26]</sup>测定。土壤酸性磷酸酶、碱性磷酸酶和脲酶的活性采用酶联免疫吸附试验(ELISA)方法测定,具体方法参照试剂盒中使用说明。

1.4 数据处理方法

数据用 Excel 2007 整理,用 SPSS 20.0 软件对数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和 Pearson 相关性分析,用 Origin 2019b 作图。

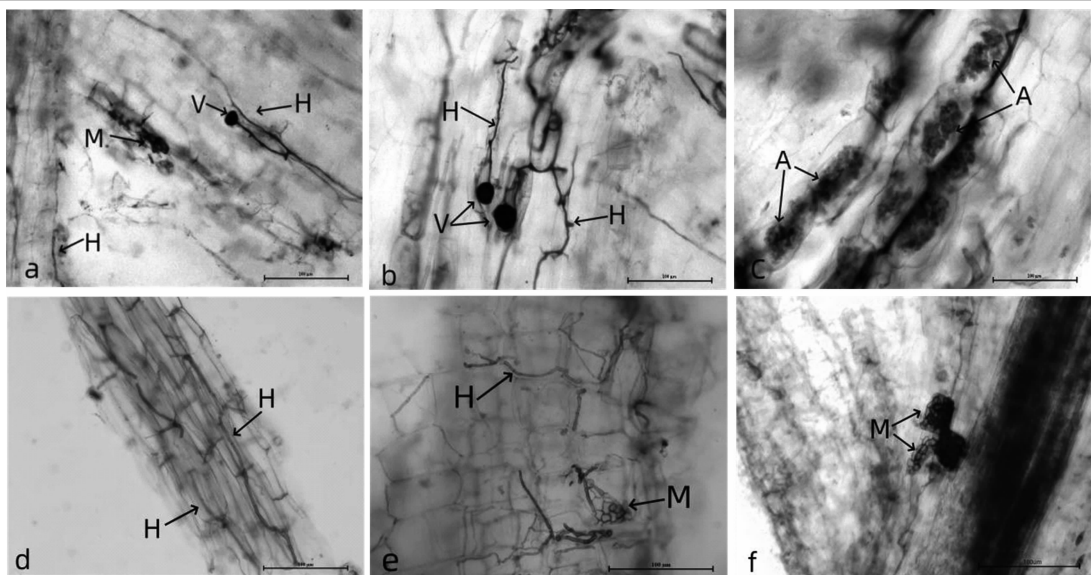
2 结果与分析

2.1 AMF 和 DSE 定殖结构

由图 1 可知,所有样地的威宁短柱油茶根系中均发现 AMF 和 DSE 的双重定殖结构,表明 2 种真菌均能与威宁短柱油茶根系形成良好的共生关系。AMF 定殖威宁短柱油茶根系主要结构有菌丝、泡囊、丛枝和菌丝圈。AMF 菌丝直径约 5 μm,在根外形成菌丝网络,在根内延纵轴延伸;泡囊大小不一、形态各异,有圆形、椭圆形、方形等形状;丛枝为 2 种,主要以 A-型(疆南星型)丛枝为主,偶见 P-型(重楼型)丛枝;菌丝圈结构清晰,在细胞中明显可见。DSE 的定殖结构主要为菌丝和微菌核。DSE 菌丝分为 2 种:棕色和黄色。棕色菌丝以根外菌丝为主,直径约 5 μm,黄色菌丝以根内菌丝为主,直径约 3.5 μm。微菌核颜色较深,簇生型,大小形状不一,有长条状、块状、叶状等,多分布于皮层,偶见分布于中柱。

2.2 季节对 AMF 和 DSE 定殖的影响

单因素方差分析结果(表 2)表明,AMF 和 DSE



a—AMF 和 DSE 同时定殖在根系中；b—AMF 的菌丝和泡囊；c—AMF 的丛枝；d—DSE 的菌丝；  
e、f—DSE 的菌丝及微菌核；H—菌丝；V—泡囊；A—丛枝；M—微菌核；标尺=100 μm

图1 威宁短柱油茶根系 AMF 和 DSE 定殖结构

定殖存在时间异质性。AMF 总定殖率、菌丝定殖率、丛枝定殖率、泡囊定殖率和定殖强度最高在 6 月,最低在 12 月。7 个样地 AMF 菌丝平均定殖率、丛枝平均定殖率、泡囊平均定殖率、AMF 平均总定殖率和平均定殖强度分别为 54.72%、10.56%、45.00%、59.72%和 49.75% ;定殖率表现为菌丝最高,泡囊次之,丛枝最低。AMF 孢子密度最高在 12 月,最低在 3 月,平均孢子密度为 78.25 个/10 g 干

土。DSE 总定殖率、微菌核定殖率、菌丝定殖率和定殖强度最高值出现在 6 月,3 月次之,9 月、12 月最低;7 个样地 DSE 平均总定殖率、微菌核平均定殖率、菌丝平均定殖率和平均定殖强度分别为 63.25%、14.17%、61.94%和 48.76%。定殖率表现为菌丝最高,微菌核最低。从总体来看,7 个样点 AMF 定殖率略低于 DSE 定殖率。

表 2 不同采样时间 AMF 和 DSE 定殖率测定

采样时间	AMF 菌丝定殖率 (%)	AMF 丛枝定殖率 (%)	AMF 泡囊定殖率 (%)	AMF 总定殖率 (%)	AMF 定殖强度 (%)
3 月	41.11 ± 2.70c	6.67 ± 2.65a	42.22 ± 3.44b	47.78 ± 2.72b	40.78 ± 2.72b
6 月	75.56 ± 3.44a	15.56 ± 2.44ab	62.22 ± 3.45a	76.67 ± 3.65a	66.67 ± 3.45a
9 月	65.56 ± 5.02b	14.44 ± 2.72b	58.89 ± 7.80a	71.11 ± 5.44a	61.23 ± 3.44a
12 月	36.67 ± 3.65c	5.56 ± 1.00c	16.67 ± 2.71c	43.33 ± 3.65b	30.33 ± 2.65c

采样时间	AMF 孢子密度 (个/10 g 干土)	DSE 总定殖率 (%)	DSE 微菌核定殖率 (%)	DSE 菌丝定殖率 (%)	DSE 定殖强度 (%)
3 月	44.00 ± 2.22d	63.33 ± 3.65b	16.67 ± 3.65b	63.33 ± 3.65b	55.33 ± 3.65b
6 月	54.00 ± 2.54c	74.44 ± 2.72a	23.33 ± 3.65a	77.78 ± 3.44a	64.44 ± 2.72a
9 月	94.00 ± 4.20b	57.58 ± 3.44c	8.89 ± 1.44c	54.44 ± 2.72c	37.58 ± 3.04c
12 月	121.00 ± 3.50a	57.67 ± 3.65c	7.78 ± 1.27c	52.22 ± 2.73c	37.67 ± 3.65c

注:同列数据后标有不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。表 3、表 4 同。

2.3 样地对 AMF 和 DSE 定殖的影响

由表 3 可知,不同样地间 AMF 和 DSE 定殖率存在一定差异。样地 A1 的 AMF 菌丝定殖率、丛枝定殖率、总定殖率最高,样地 A4 的 AMF 泡囊定殖率最高,样地 A7 的 AMF 菌丝定殖率、泡囊定殖率、

定殖强度最高;AMF 菌丝定殖率、丛枝定殖率、泡囊定殖率、总定殖率和定殖强度最低的均为样地 A5;7 个样地 AMF 菌丝平均定殖率、丛枝平均定殖率、泡囊平均定殖率、平均总定殖率和定殖强度分别为 59.53%、13.49%、52.54%、65.87%和 49.25%。

AMF 孢子密度最大的是样地 A2,最小的是样地 A5,7 个样地 AMF 孢子密度平均为 185.99 个/10 g 干土。DSE 总定殖率、微菌核定殖率、菌丝定殖率和定殖强度最高的是样地 A1,最低的是样地 A6;7 个采样点 DSE 平均总定殖率、微菌核平均定殖率、菌

丝平均定殖率及定殖强度分别为 64.68%、16.03%、61.59% 和 46.91%。从总体来看,7 个样点 AMF 定殖率略高于 DSE 定殖率,DSE 定殖规律和 AMF 定殖规律基本一致。

表 3 不同样地 AMF 和 DSE 定殖率测定

样地编号	AMF 菌丝定殖率 (%)	AMF 丛枝定殖率 (%)	AMF 泡囊定殖率 (%)	AMF 总定殖率 (%)	AMF 定殖强度 (%)
A1	75.56 ± 3.65a	23.33 ± 3.65a	61.11 ± 5.02a	78.89 ± 2.72a	62.11 ± 1.71a
A2	65.56 ± 5.02b	14.44 ± 2.72b	58.89 ± 7.80a	71.11 ± 5.44b	54.67 ± 3.15b
A3	57.78 ± 3.44c	11.11 ± 3.44bc	60.00 ± 5.96a	65.56 ± 5.02b	50.33 ± 2.82c
A4	61.11 ± 2.70bc	16.67 ± 2.70b	62.22 ± 3.44a	67.78 ± 2.72b	52.22 ± 4.21bc
A5	36.67 ± 3.65e	5.56 ± 0.50d	16.67 ± 2.71c	43.33 ± 3.65d	30.22 ± 2.17e
A6	44.44 ± 3.44d	7.78 ± 0.72c	46.67 ± 5.96b	57.77 ± 5.44c	31.11 ± 4.23d
A7	75.56 ± 3.44a	15.56 ± 2.44b	62.22 ± 3.45a	76.67 ± 3.65a	64.10 ± 2.82a

样地编号	AMF 孢子密度 (个/10 g 干土)	DSE 总定殖率 (%)	DSE 微菌核定殖率 (%)	DSE 菌丝定殖率 (%)	DSE 定殖强度 (%)
A1	226.00 ± 12.90b	76.56 ± 3.45a	24.44 ± 3.44a	74.44 ± 5.02a	62.55 ± 3.46a
A2	332.33 ± 9.29a	65.32 ± 2.36b	16.67 ± 3.65b	63.33 ± 3.65b	53.66 ± 2.99b
A3	115.60 ± 6.30d	57.89 ± 3.44c	14.44 ± 2.72b	55.56 ± 3.44c	40.22 ± 3.11c
A4	189.00 ± 11.31b	74.44 ± 2.72a	23.33 ± 3.65a	67.78 ± 3.44a	57.58 ± 2.44b
A5	74.00 ± 1.20e	63.33 ± 3.65b	16.67 ± 3.65b	63.33 ± 3.65b	40.33 ± 3.25c
A6	154.67 ± 3.91c	57.58 ± 3.44c	8.89 ± 1.44c	54.44 ± 2.72c	34.54 ± 3.72d
A7	210.33 ± 9.87b	57.67 ± 3.65c	7.78 ± 1.27c	52.22 ± 2.73c	39.46 ± 2.13c

2.4 不同样地土壤因子空间分布

单因素方差分析结果(图 2)表明,各个样地间土壤理化性质差异显著( $P < 0.05$ )。土壤全氮含量、全磷含量、速效钾含量、碱解氮含量、碱性磷酸酶活性和酸性磷酸酶活性最高的是样地 A2,显著高于其他样地,土壤全氮含量、全磷含量和速效钾含量最低的样地分别是 A7、A6 和 A5;碱解氮含量最低的是样地 A6,酸性磷酸酶和碱性磷酸酶活性最低的是样地 A5;全钾含量最高的样地是 A6,最低的是样地 A4、A5、A7,且 3 个样地间无显著性差异;有效磷含量最高的是样地 A6,最低的是样地 A1 和 A7,且这 2 个样地间无显著性差异;有机质含量最高的是样地 A5,最低的是样地 A1、A4、A6 和 A7,且这 3 个样地间无显著性差异;pH 值最高的是样地 A7,最低的是样地 A3;脲酶活性最高的是样地 A1、A3、A4,且这 3 个样地间无显著性差异,含量最低是样地 A5。可见 7 个样地间土壤因子空间异质性明显。

2.5 不同样地油茶果经济性性状调查

由表 4 可知,不同样地间果实经济性性状存在一定差异。果高最大的是样地 A2 和样地 A7,两者显著高于其他样地;果径最大的是样地 A7,最小的是

样地 A5,两者差异显著;果型指数最高的是样地 A3,样地 A2 次之,其余样地果型指数均较小;单果质量最高的是样地 A7,最低是样地 A5 和 A6;干籽含油率最高的是样地 A7,最低的是样地 A4。可见,果实经济性性状并不稳定,随生境不同会产生差异。

2.6 2 种真菌与土壤因子相关性分析

相关性分析结果(表 5)表明,AMF 菌丝定殖率、AMF 定殖强度与土壤有效磷含量呈显著负相关关系;AMF 泡囊定殖率与土壤有机质含量呈显著负相关,但与土壤脲酶活性显著正相关;AMF 总定殖率与土壤有机质含量呈显著负相关关系;AMF 孢子密度与土壤速效钾含量、碱性磷酸酶活性呈显著正相关关系。DSE 菌丝定殖率、DSE 微菌核定殖率、DSE 总定殖率、DSE 定殖强度与土壤因子均无显著相关性。由表 6 可知,AMF 丛枝定殖率与 DSE 总定殖率、DSE 定殖强度呈显著正相关关系,AMF 菌丝定殖率、AMF 泡囊定殖率、AMF 总定殖率、AMF 定殖强度与 DSE 菌丝定殖率、DSE 微菌核定殖率、DSE 总定殖率、DSE 定殖强度均无显著相关性。

2.7 2 种真菌与果实经济性性状相关性分析

由表 7 可知,AMF 菌丝定殖率、AMF 定殖强度

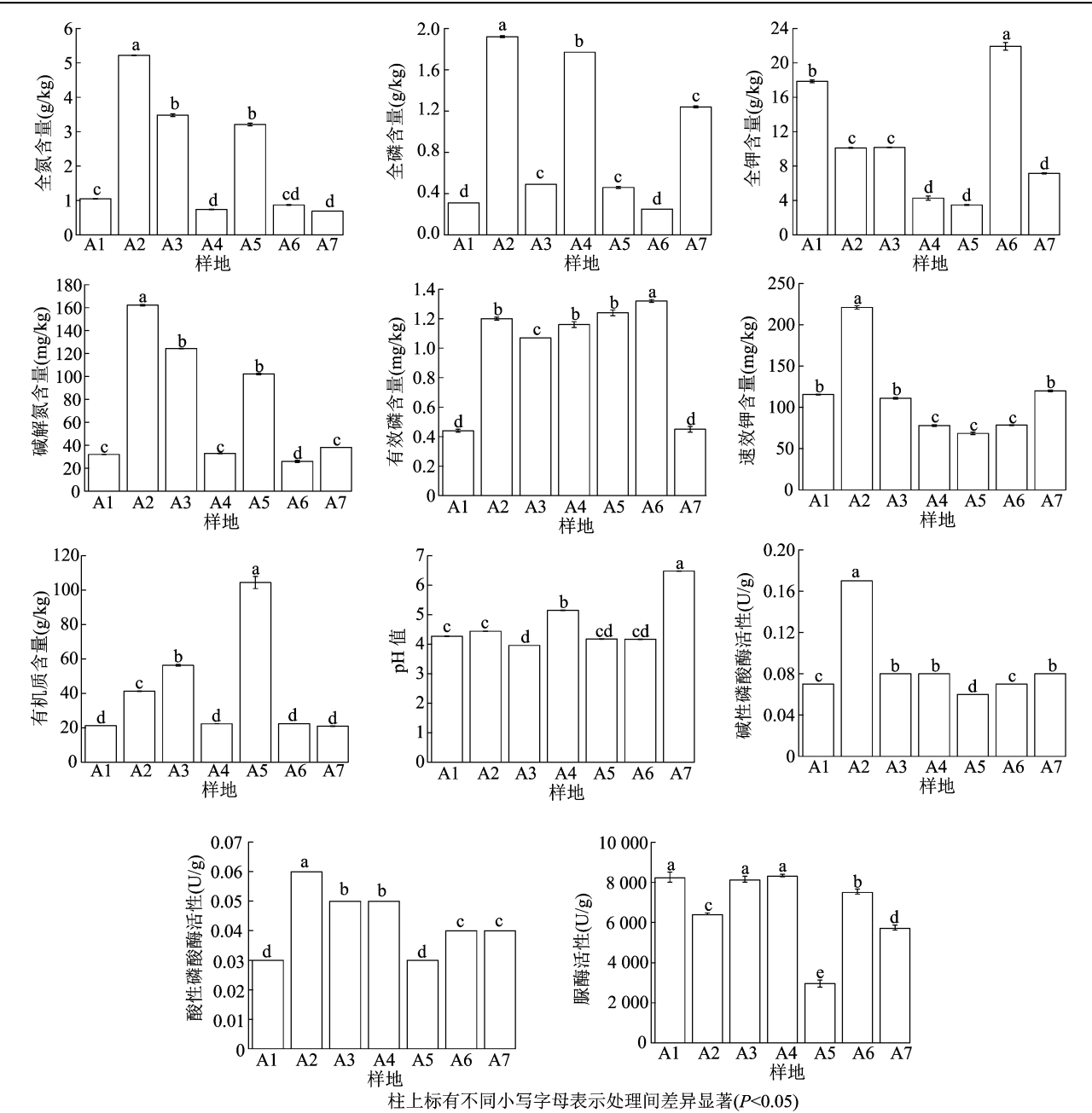


图2 7个样地的土壤理化性质

表 4 威宁短柱油茶不同采样地油茶果实经济性状

样地编号	果高 (mm)	果径 (mm)	果型指数	单果质量 (g)	干籽含油率 (%)
A1	26.21 ± 2.42b	29.81 ± 2.80b	0.88 ± 0.06c	11.97 ± 0.83c	40.23 ± 0.24ab
A2	30.03 ± 2.83a	31.33 ± 3.93b	0.96 ± 0.05b	15.96 ± 2.41b	38.20 ± 0.70cb
A3	27.15 ± 2.23b	32.48 ± 2.36b	1.04 ± 0.04a	13.88 ± 1.70bc	42.82 ± 0.82a
A4	23.26 ± 1.68c	27.14 ± 2.37bc	0.86 ± 0.05c	9.28 ± 0.80c	37.63 ± 0.43c
A5	22.42 ± 1.66c	25.18 ± 1.38c	0.89 ± 0.05c	7.81 ± 0.69d	39.48 ± 0.48b
A6	23.36 ± 1.26c	27.16 ± 1.91bc	0.86 ± 0.05c	8.57 ± 0.83cd	37.97 ± 0.26c
A7	29.51 ± 3.66a	36.56 ± 2.41a	0.81 ± 0.07c	21.82 ± 1.52a	43.94 ± 0.07a

与单果质量呈显著正相关关系,AMF 泡囊定殖率、丛枝定殖率、总定殖率、孢子密度与果高、果径、果型指数、单果质量、干籽含油率间无显著相关性。DSE 菌丝定殖率、微菌核定殖率、总定殖率、定殖强

表 5 AMF 和 DSE 定殖率与土壤因子相关性分析结果

指标	相关系数										
	全氮含量	全磷含量	全钾含量	碱解氮含量	有效磷含量	速效钾含量	有机质含量	pH 值	脲酶活性	碱性磷酸酶活性	酸性磷酸酶活性
AMF 菌丝定殖率	-0.202	0.382	0.067	-0.162	-0.806 *	0.499	-0.679	0.535	0.466	0.193	0.190
AMF 泡囊定殖率	-0.213	0.415	0.218	-0.163	-0.459	0.427	-0.835 *	0.365	0.807 *	0.185	0.512
AMF 丛枝定殖率	-0.307	0.267	0.148	-0.307	-0.734	0.316	-0.658	0.301	0.568	0.078	0.02
AMF 总定殖率	-0.234	0.352	0.222	-0.202	-0.725	0.499	-0.792 *	0.453	0.620	0.203	0.265
AMF 定殖强度	-0.129	0.434	-0.088	-0.073	-0.785 *	0.492	-0.576	0.545	0.416	0.188	0.231
AMF 孢子密度	0.214	0.657	0.170	0.182	-0.254	0.851 *	-0.572	0.261	0.297	0.776 *	0.532
DSE 菌丝定殖率	-0.186	0.226	-0.059	-0.239	-0.232	0.011	-0.224	-0.091	0.324	0.034	-0.118
DSE 微菌核定殖率	-0.010	0.080	-0.016	-0.082	-0.166	0.048	-0.020	-0.294	0.187	0.090	-0.205
DSE 总定殖率	-0.010	0.080	-0.016	-0.082	-0.166	0.048	-0.020	-0.294	0.187	0.090	-0.205
DSE 定殖强度	-0.006	0.392	-0.049	-0.046	-0.313	0.320	-0.322	-0.035	0.409	0.278	0.117

注:“\*”表示相关性达显著水平( $P<0.05$ )。下表同。

表 6 AMF 和 DSE 定殖相关性分析结果

指标	相关系数			
	DSE 菌丝定殖率	DSE 微菌核定殖率	DSE 总定殖率	DSE 定殖强度
AMF 菌丝定殖率	0.218	0.218	0.349	0.562
AMF 丛枝定殖率	0.593	0.593	0.704 *	0.822 *
AMF 泡囊定殖率	0.031	0.031	0.214	0.431
AMF 总定殖率	0.184	0.184	0.326	0.544
AMF 定殖强度	0.220	0.220	0.349	0.567
AMF 孢子密度	0.252	0.252	0.318	0.563

表 7 AMF 和 DSE 定殖率与果实经济性状相关性分析结果

指标	相关系数				
	果高	果径	果型指数	单果质量	干籽含油率
AMF 菌丝定殖率	0.649	0.631	-0.309	0.775 *	0.396
AMF 泡囊定殖率	0.286	0.286	-0.324	0.464	0.071
AMF 丛枝定殖率	0.288	0.450	-0.482	0.577	0.216
AMF 总定殖率	0.607	0.571	-0.252	0.714	0.357
AMF 定殖强度	0.679	0.679	-0.360	0.821 *	0.429
AMF 孢子密度	0.679	0.429	-0.162	0.643	0.000
DSE 菌丝定殖率	-0.107	-0.286	0.234	-0.036	-0.214
DSE 微菌核定殖率	-0.324	-0.505	0.273	-0.306	-0.378
DSE 总定殖率	-0.324	-0.505	0.273	-0.306	-0.378
DSE 定殖强度	-0.107	-0.286	0.234	-0.036	-0.214

度与果高、果径、果型指数、单果质量及干籽含油率间也无显著相关性。

3 讨论

植物土壤微生物对植物适应环境有重要作用,研究土壤有益微生物与植物形成的共生关系和生

态功能,对理解植物适应极端逆境有重要意义<sup>[27]</sup>。植物根系 AMF 和 DSE 真菌定殖规律的相关研究已有广泛报道<sup>[28-30]</sup>,表明 AMF 和 DSE 是植物根系中 2 种重要的土壤微生物。本研究中,AMF 和 DSE 均能双重定殖于威宁短柱油茶根系且自然定殖率较高(7 个样地 2 种真菌平均定殖率均在 60% 左右),表明威宁短柱油茶能与 AMF 和 DSE 能形成良好的共生关系。AMF 和 DSE 的菌丝能帮助植物吸收水分和营养物质,提高植物在逆境中的生长能力已被众多研究所证实<sup>[9,31-32]</sup>。AMF 和 DSE 的双重定殖,在威宁短柱油茶根内或根外形成紧密的菌丝网络,可为威宁短柱油茶进行水分、矿质营养和其他代谢物输送与传递提供有效途径,继而帮助威宁短柱油茶在干旱、寒冷的环境中生长。AMF 和 DSE 的双重定殖可能是威宁短柱油茶适应高寒、干旱山地的有效途径。

AMF 和 DSE 的时空分布具有明显异质性<sup>[29,33-34]</sup>。本研究中,威宁短柱油茶根系 AMF 和 DSE 侵染率随采样时间和采样地点的不同存在差异性,表明 AMF 和 DSE 易受季节和立地条件影响。李襄乔等在研究油茶菌根分布和环境条件的关系时发现,油茶菌根的分布与季节、立地条件和树龄有关<sup>[35]</sup>,本研究结果与其一致。从采样时间来看,AMF 平均定殖率(59.72%)略低于 DSE 平均定殖率(63.25%),而从样地来看,AMF 平均定殖率(65.87%)略高于 DSE 平均定殖率(64.68%),造成差异原因的可能与不同时间、不同分布点的威宁短柱油茶生长状况有关,或与 2 种真菌遇到干旱或寒冷生境的表现有关。此外,AMF 和 DSE 定殖是动

态变化的,AMF 的丛枝和泡囊结构会随气温的升高而增多,也会随气温下降而减少(威宁县 3 月份气温开始上升,9 月后气温开始下降),DSE 的定殖规律和 AMF 一致,微菌核也是 3 月后定殖结构增多,到 6 月达到最高,9 月后开始减少,表明 2 种真菌的定殖结构会受到土壤温度的影响,这可能是 2 种真菌适应环境的一种策略。

AMF 的定殖与土壤因子密切相关已被众多研究所证实<sup>[29,33-35]</sup>。本研究中 AMF 的菌丝定殖率、定殖强度与土壤有效磷含量呈显著负相关关系,AMF 的囊泡定殖率、总定殖率与土壤有机质含量显著负相关,这与 Das 等的研究结果<sup>[36]</sup>一致,但与张雪等的研究<sup>[33,37]</sup>存在差异,他们认为有机质含量、有效磷含量与 AM 真菌各定殖结构呈极显著或显著正相关关系。这可能是不同环境、不同植物、不同 AM 真菌类型造成的分歧。土壤脲酶可使土壤有机化合物尿素水解生成氨,它的活性在一定程度上决定了植物对尿素氮的利用程度<sup>[38]</sup>。相关性分析结果表明,AMF 泡囊定殖率与脲酶活性呈显著正相关关系,表明土壤脲酶活性影响了 AMF 的定殖。泡囊是 AM 真菌储存营养物质的场所,同时也是具有繁殖功能的器官<sup>[5]</sup>,氮元素的积累促使 AM 真菌产生更多泡囊去储存营养物质,同时加强了 AMF 的繁殖能力。AMF 孢子密度与土壤因子有显著相关性。谢靖等研究紫穗槐根际 AMF 时发现,AMF 孢子密度与土壤各种酶活性相关<sup>[39]</sup>。贺学礼等研究沙蒿根围 AMF 空间分布时指出,AMF 孢子密度除了与土壤酶活性相关外,还与碱解氮含量和有机碳含量呈显著正相关<sup>[40]</sup>。威宁短柱油茶根围孢子密度与土壤速效钾含量和碱性磷酸酶活性呈显著正相关关系,表明孢子密度易受土壤因子影响,这可能与土壤因子影响了 AMF 的生长和发育有关。国内外研究表明,DSE 有着和 AMF 相似的生态功能<sup>[6-8]</sup>,但 DSE 与土壤因子相关性研究还不多见。本研究中,威宁短柱油茶根系的 DSE 定殖与土壤因子间无显著相关性,此结果与 Das 等的研究结果<sup>[36,40]</sup>一致,但与孙茜等的研究结果<sup>[41-42]</sup>存在差异。

AMF 和 DSE 能同时定殖于同一根段已有大量报道<sup>[33-34,37]</sup>,但 2 种真菌之间的相互关系至今仍不明。一些学者认为,AMF 各种定殖结构与 DSE 定殖率呈极显著或显著负相关关系,两者间存在生态位竞争<sup>[37,43]</sup>。另一些学者则指出,AM 定殖与 DSE 定殖呈极显著或显著正相关关系,DSE 能提高植物

形成丛枝菌根的比例<sup>[33-34]</sup>。产生差异的原因可能与土壤因子、菌株或植物种类有关,也可能是 AMF 与 DSE 竞争碳源、定殖位点,或其产生的可溶性、挥发性次级代谢产物影响了其他真菌的定殖所致<sup>[44]</sup>。本研究中 AMF 丛枝定殖率与 DSE 总定殖率和定殖强度呈显著正相关关系,表明在威宁短柱油茶根系中 DSE 定殖促进了 AMF 形成更多的丛枝结构。丛枝是 AMF 与宿主植物之间进行物质交换的场所<sup>[45]</sup>,丛枝数量的增加促使 AMF 与宿主之间更好地交换营养物质和能量,同时促进了 AMF 和宿主植物的生长和发育。

AMF 能提高植物的产量和品质在玉米<sup>[46]</sup>、高粱<sup>[47]</sup>、马铃薯<sup>[48]</sup>等作物上已得到体现。Agbodjato 等在研究玉米时发现,AMF 提高了玉米的籽粒大小和质量<sup>[49]</sup>。狄晨璐则指出,接种 AMF 对草莓果实纵横径、糖酸比、果实硬度和平均单果质量都有不同程度的提高<sup>[50]</sup>。张智慧等研究三七根中 AMF 和 DSE 侵染状况时发现,三七根鲜质量与 AMF 侵染率呈显著正相关,而与 DSE 侵染率无显著相关性<sup>[28]</sup>。本研究中 AMF 菌丝定殖率、AMF 定殖强度与单果质量呈显著正相关关系,各果实性状与 DSE 侵染无显著相关性,表明 AMF 对提高油茶产量具有比 DSE 更为重要的作用。大量研究表明,DSE 广泛分布于各种受胁迫的生态系统中<sup>[6-8]</sup>,其可提高植物耐干旱、盐碱、重金属等能力。DSE 在威宁短柱油茶根部的定殖可能与其适应干旱和贫瘠环境有关。下一步将对 2 种真菌进行菌种分离、各自在油茶根系的具体生态功能方面展开研究,筛选出高效、优质菌种接种到油茶苗木中,培育优质的油茶菌根苗木,在今后油茶种植中减少农药、化肥施用量,促进油茶产业的健康发展。

## 4 结论

本研究中 AMF 和 DSE 能双重定殖于威宁短柱油茶根系,表明 AMF 和 DSE 均能与威宁短柱油茶根系形成良好共生关系。季节会影响 AMF 和 DSE 定殖,土壤因子对 AMF 定殖影响较大,而对 DSE 定殖影响较小。AMF 定殖会促进果实产量的增加,表明 AMF 对提高油茶产量具有比 DSE 更为重要的作用。

## 参考文献:

- [1] Worchel E R, Giauque H E, Kivlin S N. Fungal symbionts alter plant drought response[J]. Microbial Ecology, 2013, 65(3): 671-678.

- [2] Rodriguez R J, White Jr J F, Arnold A E, et al. Fungal endophytes: diversity and functional roles[J]. The New Phytologist, 2009, 182(2): 314–330.
- [3] 曹冠华, 张雪, 顾雯, 等. 不同产地滇黄精丛枝菌根真菌、深色有隔内生真菌定殖调查及与主要功效成分含量相关性分析[J]. 中草药, 2019, 50(16): 3930–3936.
- [4] Wu Q S. Arbuscular mycorrhizas and stress tolerance of plants[M]. Singapore: Springer, 2017.
- [5] 刘润进, 陈应龙. 菌根学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [6] Jumpponen A. Dark septate endophytes – are they mycorrhizal? [J]. Mycorrhiza, 2001, 11(4): 207–211.
- [7] 张玉洁. 植物深色有隔内生真菌(DSE)的研究进展[J]. 文山学院学报, 2010, 23(1): 145–150.
- [8] 刘茂军, 张兴涛, 赵之伟. 深色有隔内生真菌(DSE)研究进展[J]. 菌物学报, 2009, 28(6): 888–894.
- [9] Barrow J R. Atypical morphology of dark septate fungal root endophytes of *Bouteloua* in arid southwestern USA rangelands[J]. Mycorrhiza, 2003, 13(5): 239–247.
- [10] Zhao D K, Li T, Shen M, et al. Diverse strategies conferring extreme cadmium (Cd) tolerance in the dark septate endophyte (DSE), *Exophiala pisciphila*: evidence from RNA – seq data [J]. Microbiological Research, 2015, 170: 27–35.
- [11] Postma J W M, Olsson P A, Falkengren – Grerup U. Root colonisation by arbuscular mycorrhizal, fine endophytic and dark septate fungi across a pH gradient in acid beech forests[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(2): 400–408.
- [12] 李永康, 王道植, 梁纬祥, 等. 威宁短柱油茶的初步研究[J]. 林业科学, 1980, 16(3): 198–202.
- [13] 王道植, 梁纬祥, 黄鹤先, 等. 贵州高寒山区发现野生的威宁短柱油茶[J]. 林业科技通讯, 1979(9): 16–17.
- [14] 邓小军, 周国英, 刘君昂, 等. 湖南油茶林丛枝菌根真菌多样性及其群落结构特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(10): 38–42.
- [15] 周光荣, 尚昆, 江龙. 野生油茶根围土壤的 AM 真菌多样性调查[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2019, 36(6): 26–31.
- [16] 林宇岚, 李正响, 吴斐, 等. 不同品种油茶根际丛枝菌根真菌群落结构特征[J]. 林业科学研究, 2020, 33(5): 163–169.
- [17] Liu R C, Xiao Z Y, Hashem A, et al. Mycorrhizal fungal diversity and its relationship with soil properties in *Camellia oleifera* [J]. Agriculture, 2021, 11(6): 470.
- [18] 王东雪, 陈国臣, 江泽鹏. 丛枝菌根对油茶幼苗生长和氮磷吸收的影响[J]. 林业科技开发, 2010, 24(1): 23–26.
- [19] 林宇岚, 李正响, 张林平, 等. 有机磷和 AM 真菌对油茶生长、根系形态和光合作用的影响[J]. 经济林研究, 2021, 39(1): 121–128, 210.
- [20] 林宇岚, 王琳, 楼玫娟, 等. AM 真菌与有机磷施肥对油茶光合特性的影响[J]. 江西农业大学学报, 2021, 43(1): 136–143.
- [21] 王东雪, 张乃燕, 陈国臣. AM 真菌对油茶生长和抗旱性的影响[J]. 广西林业科学, 2011, 40(4): 259–261, 273.
- [22] 李正响. 油茶 AM 真菌多样性及其对有机磷吸收的影响[D]. 南昌: 江西农业大学, 2019.
- [23] Phillips J M, Hayman D S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular – arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection[J]. Transactions of the British Mycological Society, 1970, 55(1): 158–161.
- [24] Biermann B, Linderman R G. Quantifying vesicular – arbuscular mycorrhizae: a proposed method towards standardization[J]. New Phytologist, 1981, 87(1): 63–67.
- [25] 中华人民共和国林业部. 森林土壤分析方法: GB 7830 ~ 7892—1987[S]. 北京: 中国标准出版社, 1987.
- [26] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 146–195.
- [27] 毕银丽, 解琳琳. 丛枝菌根真菌与深色有隔内生真菌生态修复功能与作用[J]. 微生物学报, 2021, 61(1): 58–67.
- [28] 张智慧, 陈迪, 赵丹丹, 等. 三七根中丛枝菌根真菌与深色有隔内生真菌侵染状况研究[J]. 中国中药杂志, 2011, 36(17): 2311–2315.
- [29] 卯吉华, 贾代顺, 景跃波, 等. 野生蒜头果丛枝菌根真菌和深色有隔内生真菌调查研究[J]. 中国林副特产, 2016(5): 1–4.
- [30] Öpik M, Zobel M, Cantero J J, et al. Global sampling of plant roots expands the described molecular diversity of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. Mycorrhiza, 2013, 23(5): 411–430.
- [31] 王茜, 王强, 王晓娟, 等. 丛枝菌根网络的生态学功能研究进展[J]. 应用生态学报, 2015, 26(7): 2192–2202.
- [32] Varma A, Choudhary D K. Mycorrhizosphere and pedogenesis[M]. Singapore: Springer, 2019.
- [33] 张雪, 郭亚楠, 李烨东, 等. 西北荒漠带细枝岩黄耆 AM 真菌与 DSE 真菌时空分布研究[J]. 菌物学报, 2019, 38(11): 2030–2042.
- [34] 徐浩博, 贺学礼, 许伟, 等. 蒙古沙冬青根围丛枝菌根和深色有隔内生真菌的空间分布[J]. 贵州农业科学, 2013, 41(12): 105–109, 114.
- [35] 李襄乔, 陈耀畅. 油茶内生菌根分布与环境条件的关系[J]. 林业科技通讯, 1982(11): 20–21.
- [36] Das P, Kayang H. Association of dark septate endophytes and arbuscular mycorrhizal fungi in potato under field conditions in the northeast region of India[J]. Mycology, 2010, 1(3): 171–178.
- [37] 姜桥, 贺学礼, 陈伟燕, 等. 新疆沙冬青 AM 和 DSE 真菌的空间分布[J]. 生态学报, 2014, 34(11): 2929–2937.
- [38] 陈文新. 土壤和环境微生物学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 1990.
- [39] 谢靖, 唐明. 黄土高原紫穗槐丛枝菌根真菌与土壤因子和球囊霉素空间分布的关系[J]. 西北植物学报, 2012, 32(7): 1440–1447.
- [40] 贺学礼, 王银银, 赵丽莉, 等. 荒漠沙蒿根围 AM 真菌和 DSE 的空间分布[J]. 生态学报, 2011, 31(3): 812–818.
- [41] 孙茜, 贺超, 贺学礼, 等. 沙冬青与伴生植物深色有隔内生真菌定殖规律及其与土壤因子的相关性[J]. 植物生态学报, 2015, 39(9): 878–889.
- [42] Das P, Kayang H. Arbuscular mycorrhizal fungi and dark septate endophyte colonization in bamboo from Northeast India [J]. Frontiers of Agriculture in China, 2010, 4(3): 375–382.



贾 辉,孔雅丽. 硒、硅复配对六妹羊肚菌菌丝形态及子实体呈味品质的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(22):153–161.  
doi:10.15889/j.issn.1002–1302.2023.22.022

# 硒、硅复配对六妹羊肚菌菌丝形态 及子实体呈味品质的影响

贾 辉,孔雅丽

(甘肃民族师范学院化学与生命科学系,甘肃合作 747000)

**摘要:**以六妹羊肚菌(*Morchella sextelata*)为试材,采用大棚划区试验,设置3个硒水平(0、10、20 mg/L,分别记为 $Se_0$ 、 $Se_1$ 、 $Se_2$ )与3个硅水平(0、30、60 mg/L,分别记为 $Si_0$ 、 $Si_1$ 、 $Si_2$ )的复配组合处理,探索硒、硅复配对六妹羊肚菌菌丝体形态及子实体呈味物质的影响,为硒、硅应用于羊肚菌的田间生产提供理论依据。结果表明,硒–硅复配可影响羊肚菌菌丝形态、呈鲜氨基酸(Glu、Asp)含量、呈味核苷酸(5′-XMP、5′-GMP、5′-IMP、5′-CMP、5′-AMP)含量及挥发性物质含量。较高的Se水平处理使得菌丝螺旋程度增加、菌丝变细。整体而言,相应Se处理( $Se_1Si_0$ 、 $Se_1Si_1$ 、 $Se_1Si_2$ 、 $Se_2Si_0$ 、 $Se_2Si_1$ )呈鲜氨基酸、呈味核苷酸及醛、醇、烃、酸等挥发性物质的含量较高,当Se、Si水平最高时则不利于提高六妹羊肚菌的整体风味品质。主成分及层次聚类分析结果表明,呈味贡献率受指标间含量高低的影响,Se是决定呈味差异的主要因子。此外,研究进一步表明,处理间的鲜浓浓度值(EUC)、呈味品质评分值(TQV)变化规律高度一致,均以 $Se_1Si_2$ 处理最高。综上,10 mg/L Se与60 mg/L Si复配处理( $Se_1Si_2$ )效果较佳,其可提升羊肚菌子实体非挥发性、挥发性呈味物质含量,EUC、TQV较其他硒硅处理分别显著( $P<0.05$ )提高19.61%~72.99%、16.69~68.49百分点。

**关键词:**六妹羊肚菌;硒–硅复配;菌丝形态;核苷酸;风味物质

**中图分类号:**S646.706 **文献标志码:**A **文章编号:**1002–1302(2023)22–0153–09

羊肚菌(*Morchella* spp.)属于囊菌亚门(Aseomycotina)羊肚菌科(Morchellaceae)羊肚菌属(*Morchella*)中最著名的食用蕈菌,因其菌盖表面由不规则交叉皱褶网格似羊肚而得名<sup>[1–3]</sup>。羊肚菌富含多种人体必需氨基酸、风味物质以及微量元素,味道鲜美。羊肚菌也是重要的药用菌,其含有多

糖、黄酮、脂肪酸及多种维生素<sup>[4]</sup>,具有提高机体免疫力、抗癌症、抗病毒、降血脂及补益气等多种功效<sup>[5]</sup>,因此广受美食爱好者追捧。目前,羊肚菌的来源分为野生和人工栽培,然而随着生态环境的恶化,野生羊肚菌极为珍贵且价格高昂,因此现今供应市场的羊肚菌主要为人工产业化栽培<sup>[6]</sup>。目前,我国羊肚菌规模化、产业化栽培的品种主要为黑脉羊肚菌(*M. importuna*)、梯棱羊肚菌(*M. septimelata*)、六妹羊肚菌(*M. sextalata*)及七妹羊肚菌(*M. eximia*),其中以六妹羊肚菌栽培技术较为成

收稿日期:2023–05–12

基金项目:甘肃省省级引导科技创新发展专项(编号:2018ZX–01)。

作者简介:贾 辉(1981—),男,甘肃武威人,博士,副教授,主要从事羊肚菌种植技术与优良菌种研发。E-mail:jiah66@163.com。

[43] Uma E, Sathiyadash K, Loganathan J, et al. Tree species as hosts for arbuscular mycorrhizal and dark septate endophyte fungi [J]. Journal of Forestry Research, 2012, 23(4): 641–649.

[44] 吴佳育,胡 伟,杨智宇,等. 菌根真菌与植物根部微生态系统中不同真菌相互作用研究进展[J]. 河南农业科学, 2022, 51(2): 1–9.

[45] Gianinazzi – Pearson V, Smith S E, Gianinazzi S, et al. Enzymatic studies on the metabolism of vesicular – arbuscular mycorrhizas [J]. New Phytologist, 1991, 117(1): 61–74.

[46] 张晨曦,田明慧,杨 硕,等. 酸性土壤中丛枝菌根真菌菌剂多样性对玉米产量及其磷钾吸收的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(15): 2899–2910.

[47] Zhang S J, Lehmann A, Zheng W S, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi increase grain yields: a meta – analysis [J]. New Phytologist, 2019, 222(1): 543–555.

[48] 白灯莎. 买买提艾力,张少民,孙良斌. 接种丛枝菌根真菌对脱毒马铃薯微型薯生长及产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2011(1): 80–82.

[49] Agbodjato N A, Assogba S A, Babalola O O, et al. Formulation of biostimulants based on arbuscular mycorrhizal fungi for maize growth and yield [J]. Frontiers in Agronomy, 2022, 4: 894489.

[50] 狄晨璐. 丛枝菌根真菌对设施草莓品质及产量的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2021.