

# 江西乐安古樟林香樟根系及根际土壤 AM 真菌

苏丹<sup>1</sup>, 张春明<sup>1,2</sup>, 许榕凡<sup>1,2</sup>, 姚吉祥<sup>1,2</sup>, 张妍<sup>2,3</sup>, 李琳琳<sup>2</sup>, 吕国忠<sup>2</sup>, 杨红<sup>2\*</sup>

1 沈阳大学生命科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110044

2 大连民族大学环境与资源学院, 辽宁 大连 116600

3 辽宁师范大学生命科学学院, 辽宁 大连 116029

**摘 要:** 江西省乐安县牛田镇古樟林素有“中国第一古樟林”之美称, 拥有 3 000 余棵 100–1 200 年的古樟树, 现已被列为国家生态公益林加以保护。为探明该古樟林不同树龄香樟菌根类型及 AM 真菌种类多样性, 本研究采用根系组织染色、根际土壤 AM 真菌孢子过筛分离, 以及显微形态观察的方法进行了研究和分析。结果表明, 香樟菌根以产生丛枝和泡囊结构的 AM 为主要类型, 并观察到少量产生深色有隔菌丝和微菌核结构的 DSE 共生类型; 从采自 100、200、400、600、800 及 1 200 年树龄的古香樟树根际土壤样品中分离和鉴定出 5 科 8 属 15 种 AM 真菌, 其中以黄孢球囊霉 *Glomus flavisporum* 和黑孢球囊霉 *G. melanosporum* 分布最广; 从古香樟根系 AM 真菌定殖频率和根际土壤 AM 真菌孢子数量来看, 呈现随树龄增加而下降的趋势。研究结果表明, 江西省乐安古樟林拥有丰富的 AM 真菌种类多样性, 其在 1 000 余年树龄香樟的根系和根际土壤中不断生长和繁殖, 为保持古香樟树的健康生长发挥了重要生态学功能。本研究为加强乐安古樟林生态保护和 AM 菌根菌资源利用提供了理论依据。

**关键词:** 香樟; 丛枝菌根真菌; 根际土壤; 菌根结构类型

## [引用本文]

苏丹, 张春明, 许榕凡, 姚吉祥, 张妍, 李琳琳, 吕国忠, 杨红, 2025. 江西乐安古樟林香樟根系及根际土壤 AM 真菌. 菌物学报, 44(6): 240349

Su D, Zhang CM, Xu RF, Yao JX, Zhang Y, Li LL, Lyu GZ, Yang H, 2025. AM fungi in the roots and rhizosphere soil of *Cinnamomum camphora* in ancient camphor forest of Le'an, Jiangxi Province. Mycosystema, 44(6): 240349

资助项目: 中央高校自主基金项目

This work was supported by the Independent Fund Project of the Central Universities.

\*Corresponding author. E-mail: yanghong136@dlnu.edu.cn

Received: 2024-12-19; Accepted: 2025-03-01

# AM fungi in the roots and rhizosphere soil of *Cinnamomum camphora* in ancient camphor forest of Le'an, Jiangxi Province

SU Dan<sup>1</sup>, ZHANG Chunming<sup>1,2</sup>, XU Rongfan<sup>1,2</sup>, YAO Jixiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Yan<sup>2,3</sup>, LI Linlin<sup>2</sup>, LYU Guozhong<sup>2</sup>, YANG Hong<sup>2\*</sup>

1 College of Life Science and Engineering, Shenyang University, Shenyang 110044, Liaoning, China

2 College of Environment and Resources, Dalian Minzu University, Dalian 116600, Liaoning, China

3 College of Life Science, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China

**Abstract:** The ancient camphor forest in Niutian Town, Le'an County, Jiangxi Province, is well known as 'the first ancient camphor forest in China', having more than 3 000 ancient camphor trees dating from 100 to 1 200 years, and it is listed as a national ecological public welfare forest for protection. To explore the mycorrhizal types and the species diversity of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi in the ancient camphor trees with different tree ages, root tissue staining, AM fungal spore separation, and microscopic morphological observation were carried out. The results show that the main type of camphor tree mycorrhiza was AM with characteristic arbuscular and vesicle structures, intermixed with a small amount of DSE (dark septate endophytic) symbiotic fungi with dark septate mycelia and microsclerotia in root cells. Totally 15 species belonging to 8 genera of 5 families of AM fungi were identified from the rhizosphere soil samples of ancient camphor trees covering 100, 200, 400, 600, 800 and 1 200 years. Among them, *Glomus flavisporum* and *G. melanosporum* were the most widely distributed species. The colonizing rate of AM fungi in roots and the amount of AM fungal spores in the rhizosphere soil showed a decreasing trend with the increase of tree age. The probability is that these AM fungi have long been symbiotically associated with the 1 000-year-old camphor trees, and they play an important ecological function in maintaining the healthy growth of the ancient camphor forest.

**Keywords:** *Cinnamomum camphora*; arbuscular mycorrhizal fungi (AMF); rhizosphere soil; mycorrhizal structure type

香樟 *Cinnamomum camphora* (L.) Presl, 又称樟、樟树、樟木、芳樟等, 为樟科植物, 属亚热带常绿阔叶树种, 广泛分布于东亚和南亚等国家或地区。香樟树的高度可达 30–40 m, 直径可达 3 m, 通常生长在海拔 900–2 500 m 处(李锡文 1984)。香樟具有四季常绿、树冠开展、枝叶繁茂、浓荫覆地、枝叶秀丽等特点, 因此, 香樟树被视为行道树、庭荫树、风景林、防风林以及隔音林带的优良树种(张廷忠等 2024)。另外, 香樟富含多种化合物, 具有广泛的经济开发和应用价值, 如香樟精油具有防虫

效果, 可以保护地下建筑免受白蚁的侵害, 是一种潜在的天然熏蒸剂和杀虫剂(Roszaini 2013); 香樟的己烷和乙酸乙酯提取物具有抗炎活性, 对炎症有调节作用, 可调节巨噬细胞介导的炎症(Lee *et al.* 2006)。

位于江西省乐安县牛田镇的古樟林与“千古第一村”(明清古建筑群)——流坑相依相伴, 沿乌江岸边绵延 5 000 m 左右, 拥有 3 000 余株古树, 树龄大多在 200–800 年之间, 树龄最长的一株围径 6 m 多, 树龄超过 1 200 年(张妍 2023)。该古樟林于 2016 年正式入选上海大世

界吉尼斯之最,被认定为“规模最大的古樟林——中国第一古樟林”(谢艺和严小平 2016),现已被列为国家生态公益林加以保护。江西乐安古樟林的香樟树长势和健康状况显然与其根系发育及生长土壤存在着密切的联系,其中,作为植物根系和根际土壤生态系统重要组成部分的菌根真菌对植物营养吸收和抗逆作用发挥了重要作用(Gomez *et al.* 2006; 张静等 2021)。

香樟树根系可与多种丛枝菌根(AM)真菌共生形成菌根关系。吴长榜和何跃军(2011)、何跃军和钟章成(2011, 2012)采用德国 AM 菌剂 Amykor 对樟树幼苗进行了接种试验,证明菌根菌剂可显著促进樟树幼苗的健康生长和抗病性。贺佳勇(2019)对南昌主干路行道树种樟树的根际土壤 AM 真菌进行了分离鉴定,共鉴定出无梗囊霉属 *Acaulospora*、根孢囊霉属 *Rhizophagus*、球囊霉属 *Glomus*、双型囊霉属 *Ambispora*、斗管囊霉属 *Funneliformis*、巨孢囊霉属 *Scutellospora*、隔球囊霉属 *Septoglomus* 及近明球囊霉 *Claroideoglomus* 8 属 20 个种,并发现土壤铅浓度与樟树根系 AM 真菌侵染呈负相关关系,但差异不显著。张妍(2023)采用 Illumina 高通量测序方法对江西乐安古樟林香樟根际土壤真菌多样性进行了分析,发现不同树龄的香樟根际土壤均含有球囊霉目 *Glomerllales* 和柔膜菌目 *Helotiales* 等菌根真菌。近年来国内学者对植物根际 AM 真菌多样性的研究逐渐增加(满孝武等 2022; 胡学意等 2023; 李挺等 2023; 孟兆云等 2023; 史加勉等 2023; 张从明等 2023),但对古樟林香樟根际 AM 真菌多样性的研究报道较少。

江西省乐安县古樟林历经千余年仍枝繁叶茂,其根系中一定存在某些真菌类群,可能与古樟树的健康生长存在密切的联系。因此,本研究以江西乐安古樟林不同树龄香樟根系及根际土壤为研究对象,探索香樟树龄与菌根关系,从而明确乐安县古樟林香樟根系及其根际土壤 AM 真菌的多样性及其发生规律,对于揭示菌根菌在古樟林的生态保护作用机制具有重

要理论研究意义,同时对保护当地古樟树健康生长和促进香樟树产业良性发展具有重要实践指导意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集地概况

江西省乐安县牛田镇古樟林的地理位置为 115°73'82"E、27°29'50"N,占地面积 73.3 hm<sup>2</sup>,地处华南气候区与华中气候区过渡地带,属于典型的亚热带季风气候,其特征为四季分明(潘莹 2004)。牛田镇年均气温 17.7 °C,年均降水量 1 560 mm,年降雨日数 117 d,无霜期 265 d 以上,气候总体比较温和。牛田镇古樟林土壤 pH 在 4.16–6.50 范围,总体偏酸性(油畅 2022)。该古樟林中的树木主要为香樟树,同时夹杂少许青枫 *Acer palmatum* Thunb.。

### 1.2 样品采集

2021 年和 2023 年 7–8 月间两次赴江西省乐安县牛田镇古樟林采集香樟根系和根际土壤样品。在古樟林中分别选取 100、200、400、600、800 及 1 200 年的古树进行样品采集,每个树龄段的古香樟树分别采集 3 份根系和土壤样品,共采集 15 份根系样品和 18 份土壤样品。采样时,先轻轻去除土壤表层的枯枝落叶、石块及腐殖层,选取距地表 5–20 cm 深土壤中香樟树侧根和须根样品(基于对古树名木的保护,未采集 1 200 年香樟根系样品)及土壤样品(根际土壤,即根系表面 0.5–1 cm 范围内的土壤) 200 g 装入无菌聚乙烯自封袋中,编号后装入干冰保温箱中带回实验室,置于 4 °C 冰箱中保存备用。

### 1.3 香樟根系菌根真菌结构观察

选取细、坚韧的须根,用自来水将根洗净,用滤纸吸干水分,剪成 1 cm 长根段,加入 FAA 固定液浸没根段,固定 4 h 以上(王幼珊等 2012)。参照 Grace & Stribley (1991)的方法稍作改动,取出经 FAA 固定液固定的香樟须根,用无菌水清洗干净,加入 10% KOH 于 121 °C 高温高压解离 15 min 至根系透明,冷却后用自来水清洗 4–5 次,加入 5% 乳酸进行软化,再分别

用 0.05% 的酸性品红、苯胺蓝、台盼蓝溶液于 121 °C 高温高压染色 15 min, 最后用乳酸甘油浸泡过夜脱色, 随机选取长度为 0.5 cm 的根段制成临时玻片, 每个树龄根段样品数量为 100 条。在光学显微镜下观察菌根菌定殖情况, 并拍照, 记录菌丝、泡囊及丛枝等菌丝复合体结构, 计算菌根菌定殖率(刘润进和陈应龙 2007)。

菌根菌定殖率(%)=菌根菌定殖的交叉点数总和/总交叉点数×100%

## 1.4 土壤 AM 真菌孢子的分离及鉴定

### 1.4.1 AM 真菌孢子的分离

将土样置于通风处自然风干, 待风干后将土样混匀, 称取 10 g 风干土样置于 500 mL 烧杯中, 用适量自来水浸泡 30 min 以上, 浸泡期间不时用玻璃棒轻轻搅拌, 浸泡充分后, 采用湿筛倾析-蔗糖离心法(陶光耀等 2017)对土壤中的 AM 真菌孢子进行分离。将分离得到的孢子收集于盛有 0.9% 生理盐水的培养皿或离心管中, 并保存于 4 °C 冰箱中备用。

### 1.4.2 AM 真菌鉴定

将分离得到的 AM 真菌孢子置于玻璃表面皿中, 于体式显微镜下观察孢子的直径、颜色、形状及连孢菌丝等形态, 进行初步形态鉴定, 再吸取外表健康完整的单个孢子于含载浮剂的载玻片上, 置于 ZEISS Imager. ZEN 2.6 全自动光学显微镜下进行观察, 详细记录孢子的直径、形状、颜色、孢子表面纹饰、孢子壁及发芽壁的结构、连孢菌丝、产孢子囊及发芽盾室等形态结构, 再滴加适量 Melzer's 试剂于载玻片上, 待试剂与孢子稍作反应后观察孢子与辅助试剂是否发生染色反应, 并对观察到的特征进行拍照。依照国际 AM 真菌保藏中心 INVAM (<http://invam.caf.wvu.edu/>; <http://www.zor.zut.edu.pl/>) 及 <http://www.amf-phylogeny.com> 网站提供的 AM 真菌物种特征描述及相应图片, 再查阅相关物种报道描述(姚莉梅 2021), 进行 AM 真菌的种属鉴定。中文学名参照刘润进和陈应龙(2007)发表的 AM 真菌最新分类系统菌种名录。

## 1.5 AM 真菌多样性分析

对不同树龄香樟的根际土壤选取 5 份土样进行 AM 真菌的分离和鉴定, 按以下计算方法进行 AM 真菌多样性指数分析。

孢子密度(spore density, SD): 每 10 g 风干土样中含有的孢子总数。

物种数(S): 从该采样地土样中分离和鉴定出的 AM 真菌物种数。

相对多度(relative abundance, RA): 指该采样点 AM 真菌某种孢子数占孢子总数的比率, 即  $RA = (\text{某种 AM 真菌孢子数} / \text{该采样点 AM 真菌孢子总数}) \times 100\%$ 。

频度(frequency, F): 指 AM 真菌某一类在样本总体中出现的频率, 即  $F = (\text{某种 AM 真菌出现次数} / \text{土样数}) \times 100\%$ 。

重要值(importance value, I): 指频度和相对多度的平均值, 即  $I = (F + RA) / 2$ 。

优势度(Dom): 按重要值(I)划分为 4 个等级, 分别为 A、B、C 及 D, 即 A:  $I > 60\%$  为优势种/属; B:  $40\% < I \leq 60\%$  为亚优势种/属; C:  $20\% < I \leq 40\%$  为常见种/属; D:  $I \leq 20\%$  为偶见种/属。

Shannon 指数(H): 表示该树龄植物群落下的 AM 真菌群落复杂程度;  $H = -\sum (P_i) \ln (P_i)$ 。

Simpson 指数(D): 表示每个植物群落的土壤样品中随机选取 2 个 AM 真菌孢子不为同一个 AM 真菌物种的概率;  $D = 1 - \sum (P_i^2)$ 。

Pielou 指数(J): 表示每个树龄香樟根际土壤中不同种类 AM 真菌在数量上的接近程度;  $J = H / \ln S$ 。

以上  $P_i = n_i / N$ , 表明第  $i$  个物种的相对多度,  $n_i$  为第  $i$  个种的个体数目,  $N$  为香樟根际土壤中 AM 真菌孢子总数,  $S$  为香樟根际土壤中的 AM 真菌孢子总物种数(钟凯等 2010; 董怡然等 2018)。

## 1.6 数据分析

Shannon 指数(H)、Simpson 指数(D)、Pielou 均匀度指数(J)均通过 PAST 4.09 软件获得, 应用 Excel 2019 及 SPSS 21.0 软件对数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 香樟根系 AM 真菌定殖率

香樟根系样品经酸性品红和台盼蓝染色后，通过显微镜观察发现，在香樟根系样品的细胞内拥有大量典型的丛枝和泡囊结构(图 1)，表明香樟根系与相关真菌形成特征性 AM 互惠共生关系。另外，在部分香樟根细胞内还观察到暗色有隔内生真菌(dark septate endophytes, DSE)形成的微菌核结构。经对 3 种染色方法的比较，发现样品经酸性品红染色后更适于 AM 真菌结构观察。

经对不同树龄香樟根系 AM 真菌定殖率统计分析，发现 100、200、400、600 及 800 年的香樟根系 AM 真菌的定殖率分别为 98.5%、94.4%、90.2%、86.3%及 64.2% (表 1)，其中 100 年和 200 年树龄的香樟根系的 AM 真菌的定殖率较高，接近或超过 95%；400 年和 600 年树龄香樟根系的 AM 真菌的定殖率在 80%–90%之

间，而 800 年树龄的香樟根系的 AM 真菌的定殖率相对低，表明不同树龄的香樟根系 AM 真菌的定殖率存在差异，香樟古树树龄越长，其根系 AM 菌根真菌的定殖率越低。

2.2 香樟根际土壤 AM 真菌的形态鉴定

根据孢子形态特征，对分离自江西省乐安县古樟林 6 个不同树龄的香樟根际土壤中的 AM 真菌孢子进行鉴定(图 2)，共鉴定出 3 目 5 科 8 属 15 种 AM 真菌(表 2)，其中无梗囊霉属 *Acaulospora* 3 种(蜜色无梗囊霉 *Ac. mellea*、铁杉无梗囊霉 *Ac. tsugae* 及浅窝无梗囊霉 *Ac. lacunosa*)；盾巨孢囊霉属 *Scutellospora* 1 种(美丽盾巨孢囊霉 *Sc. calospora*)；和平囊霉属 *Pacispora* 1 种(锈色和平囊霉 *P. robigina*)；双型囊霉属 *Ambispora* 2 种(厚皮双型囊霉 *Am. callosa* 和网纹双型囊霉 *Am. reticulata*)；斗管囊霉属 *Funneliformis* 1 种(地斗管囊霉 *F. geosporum*)；球囊霉属 *Glomus* 4 种(双型球囊霉 *G. ambisporum*、黄孢球囊霉 *G. flavisporum*、黑

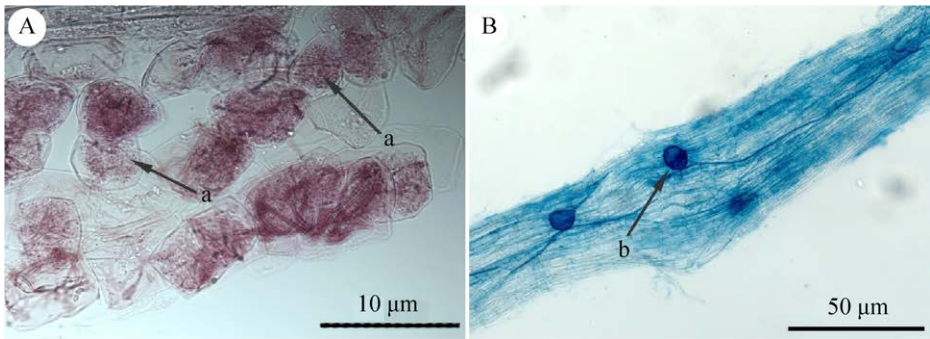


图 1 香樟根系皮层细胞中 AM 真菌的泡囊、菌丝及丛枝结构 A：酸性品红染色的丛枝结构；B：台盼蓝染色的泡囊结构；a：丛枝；b：泡囊

Fig. 1 The vesicle, hypha and arbuscular structures of AM fungi in root cortical cells of *Cinnamomum camphora*. A: Arbuscular structure stained with acid fuchsin; B: Vesicle structure stained by trypan blue. a: Arbuscle; b: Vesicle structure.

表 1 香樟根系皮层细胞菌根真菌定殖率

Table 1 The colonizing rate of mycorrhizal fungi in root cortical cells of *Cinnamomum camphora*

| 菌丝体形态<br>Hyphal morphology                      | 菌根类型<br>Mycorrhizal type | 定殖率<br>Colonization rate (%) |           |           |           |           |
|-------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                                                 |                          | 100 years                    | 200 years | 400 years | 600 years | 800 years |
| 分叉式无横隔菌丝<br>Bifurcated without transverse septa | AM                       | 98.5                         | 94.4      | 90.2      | 86.3      | 64.2      |
| 泡囊<br>Vesicle                                   |                          | 82.2                         | 76.7      | 76.4      | 44.3      | 14.4      |



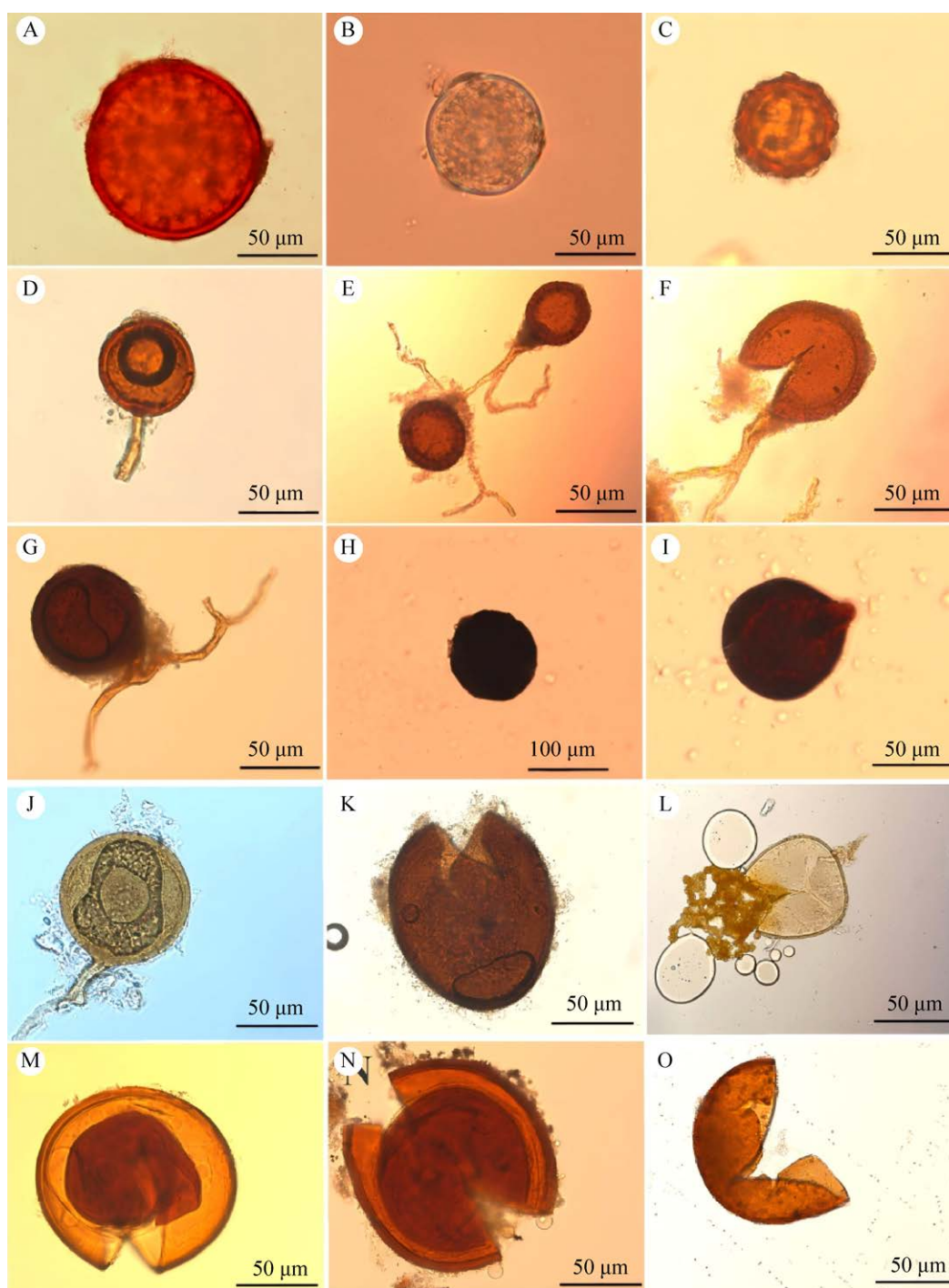


图 2 香樟根际土壤 AM 真菌孢子形态 A: 蜜色无梗囊霉; B: 厚皮双型囊霉; C: 网纹双型囊霉; D: 地斗管囊霉; E: 双型球囊霉; F: 黄孢球囊霉; G: 黑孢球囊霉; H: 巴氏球囊霉; I: 缩隔球囊霉; J: 聚生根孢囊霉; K: 高山隔球囊霉; L: 铁杉无梗囊霉; M: 美丽盾巨孢囊霉; N: 浅窝无梗囊霉; O: 锈色和平囊霉

Fig. 2 The morphological characteristics of AM fungal spores in *Cinnamomum camphora* rhizosphere soil. A: *Acaulospora mellea*; B: *Ambispora callosa*; C: *Ambispora reticulata*; D: *Funneliformis geosporum*; E: *Glomus ambisporum*; F: *Glomus flavisporum*; G: *Glomus melanosporum*; H: *Glomus bagyarajii*; I: *Septoglomus constrictum*; J: *Rhizophagus fasciculatus*; K: *Septoglomus altomontanum*; L: *Acaulospora tsugae*; M: *Scutellospora calospora*; N: *Acaulospora lacunosa*; O: *Pacispora robigina*.

表 2 从香樟根际土壤中鉴定出的 AM 真菌种类  
Table 2 The AM fungal species identified from rhizosphere soil of *Cinnamomum camphora*

| 目                         | 科                     | 属                           | 种                             |
|---------------------------|-----------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Order                     | Family                | Genus                       | Species                       |
| 多样孢囊霉目<br>Diversisporales | 无梗囊霉科 Acaulosporaceae | 无梗囊霉属 <i>Acaulospora</i>    | 蜜色无梗囊霉 <i>Ac. mellea</i>      |
|                           |                       |                             | 铁杉无梗囊霉 <i>Ac. tsugae</i>      |
|                           |                       |                             | 浅窝无梗囊霉 <i>Ac. lacunosa</i>    |
|                           | 巨孢囊霉科 Gigasporaceae   | 盾巨孢囊霉属 <i>Scutellospora</i> | 美丽盾巨孢囊霉 <i>Sc. calospora</i>  |
| 原囊霉目<br>Archaeosporales   | 和平囊霉科 Pacisporaceae   | 和平囊霉属 <i>Pacispora</i>      | 锈色和平囊霉 <i>P. robigina</i>     |
|                           | 双型囊霉科 Ambisporaceae   | 双型囊霉属 <i>Ambispora</i>      | 厚皮双型囊霉 <i>Am. callosa</i>     |
|                           |                       |                             | 网纹双型囊霉 <i>Am. reticulata</i>  |
|                           |                       |                             |                               |
| 球囊霉目<br>Glomerales        | 球囊霉科 Glomeraceae      | 斗管囊霉属 <i>Funneliformis</i>  | 地斗管囊霉 <i>F. geosporum</i>     |
|                           |                       | 球囊霉属 <i>Glomus</i>          | 双型球囊霉 <i>G. ambisporum</i>    |
|                           |                       |                             | 黄孢球囊霉 <i>G. flavisporum</i>   |
|                           |                       |                             | 黑孢球囊霉 <i>G. melanosporum</i>  |
|                           |                       |                             | 巴氏球囊霉 <i>G. bagyarajii</i>    |
|                           |                       | 隔球囊霉属 <i>Septoglomus</i>    | 缩隔球囊霉 <i>S. constrictum</i>   |
|                           |                       |                             | 高山隔球囊霉 <i>S. altomontanum</i> |
|                           |                       |                             | 聚生根孢囊霉 <i>R. fasciculatus</i> |
|                           |                       | 根孢囊霉属 <i>Rhizophagus</i>    |                               |

孢球囊霉 *G. melanosporum* 及巴氏球囊霉 *G. bagyarajii*); 隔球囊霉属 *Septoglomus* 2 种(缩隔球囊霉 *S. constrictum* 和高山隔球囊霉 *S. altomontanum*); 根孢囊霉属 *Rhizophagus* 1 种(聚生根孢囊霉 *R. fasciculatus*)。

2.3 香樟根际土壤 AM 真菌多样性分析

2.3.1 AM 真菌分布及分离频度、相对多度及重要值

从江西省乐安古樟林香樟根际土壤中共分离和鉴定出 15 种 AM 真菌, 这些种类的 AM 真菌在不同树龄樟树根际土壤中的分布存在差异(表 3)。其中黄孢球囊霉 *Glomus flavisporum*、黑孢球囊霉 *G. melanosporum* 及巴氏球囊霉 *G. bagyarajii* 在 6 种不同树龄的香樟根际土壤中均有发现, 分布较广泛, 为广布种; 聚生根孢囊霉 *Rhizophagus fasciculatus* 仅在 100 年树龄的香樟根际土壤中有发现。

按 AM 真菌的优势度可划分为 4 个等级(表 4), 其中黄孢球囊霉 *G. flavisporum* 和黑孢球囊霉 *G. melanosporum* 为 A 级, 为樟树根际土壤 AM 真菌的优势种; 蜜色无梗囊霉 *Acaulospora mellea*、网纹双型囊霉 *Ambispora reticulata* 及巴

氏球囊霉 *G. bagyarajii* 为 B 级, 为亚优势种; 铁杉无梗囊霉 *Acaulospora tsugae*、浅窝无梗囊霉 *Ac. lacunosa*、美丽盾巨孢囊霉 *Scutellospora calospora*、厚皮双型囊霉 *Am. callosa*、地斗管囊霉 *Funneliformis geosporum*、双型球囊霉 *G. ambisporum* 及缩隔球囊霉 *Septoglomus constrictum* 为 C 级, 为常见属; 锈色和平囊霉 *Pacispora robigina*、高山隔球囊霉 *S. altomontanum* 和聚生根孢囊霉 *R. fasciculatus* 为 D 级, 为偶见属。

2.3.2 不同树龄香樟根际土壤 AM 真菌多样性指数、孢子密度和物种数

通过对不同树龄香樟的根际土壤 AM 真菌的孢子密度(SD)和物种数(S)分析, 发现不同树龄香樟间存在差异(表 5), 它们的孢子密度介于 29–281 个(每 10 g 风干土壤), 物种数介于 3–15 种。各树龄香樟根际土壤 AM 真菌孢子密度从高到低依次为 100、200、400、600、800 及 1 200 年。其中, 树龄为 100 年的香樟根土壤 AM 真菌孢子密度和物种数最高, 树龄为 1 200 年的孢子密度和物种数最低。香樟根际土壤 AM 真菌孢子密度与树龄增长呈现负相关。

表 3 不同树龄香樟根际土壤 AM 真菌种类统计  
Table 3 Statistics of AM fungal species in the rhizosphere soil of different tree ages of *Cinnamomum camphora*

| AM 真菌种类<br>AM fungal species           | 100 years | 200 years | 400 years | 600 years | 800 years | 1 200 years |
|----------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|
| 蜜色无梗囊霉 <i>Acaulospora mellea</i>       | +         | +         | +         | +         | +         | —           |
| 铁杉无梗囊霉 <i>Ac. tsugae</i>               | +         | +         | +         | +         | —         | —           |
| 浅窝无梗囊霉 <i>Ac. lacunosa</i>             | +         | +         | +         | —         | —         | —           |
| 美丽盾巨孢囊霉 <i>Scutellospora calospora</i> | +         | +         | —         | +         | —         | —           |
| 锈色和平囊霉 <i>Pacispora robigina</i>       | +         | —         | +         | —         | —         | —           |
| 厚皮双型囊霉 <i>Ambispora callosa</i>        | +         | +         | +         | —         | +         | —           |
| 网纹双型囊霉 <i>Am. reticulata</i>           | +         | +         | +         | +         | +         | —           |
| 地斗管囊霉 <i>Funneliformis geosporum</i>   | +         | +         | —         | +         | —         | —           |
| 双型球囊霉 <i>Glomus ambisporum</i>         | +         | —         | +         | +         | —         | —           |
| 黄孢球囊霉 <i>G. flavisporum</i>            | +         | +         | +         | +         | +         | +           |
| 黑孢球囊霉 <i>G. melanosporum</i>           | +         | +         | +         | +         | +         | +           |
| 巴氏球囊霉 <i>G. bagyarajii</i>             | +         | +         | +         | +         | +         | +           |
| 缩隔球囊霉 <i>Septoglomus constrictum</i>   | +         | —         | —         | +         | +         | —           |
| 高山隔球囊霉 <i>S. altomontanum</i>          | +         | +         | —         | —         | —         | —           |
| 聚生根孢囊霉 <i>Rhizophagus fasciculatus</i> | +         | —         | —         | —         | —         | —           |

注：+表示有分布；—表示未发现  
Note: + means there is a distribution; — means not found.

表 4 香樟根际土壤 AM 真菌多样性指数及优势度  
Table 4 The diversity indexes and dominance rank of AM fungi in the rhizosphere soil of *Cinnamomum camphora*

| AM 真菌种类<br>AM fungal species           | 频度/F<br>Frequency/F (%) | 相对多度/Ar<br>Relative abundance/Ar (%) | 重要值/I<br>Importance value/I (%) | 优势度<br>Dom |
|----------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|------------|
| 蜜色无梗囊霉 <i>Acaulospora mellea</i>       | 83.33                   | 6.63                                 | 44.98                           | B          |
| 铁杉无梗囊霉 <i>Ac. tsugae</i>               | 66.67                   | 3.99                                 | 35.33                           | C          |
| 浅窝无梗囊霉 <i>Ac. lacunosa</i>             | 50.00                   | 4.66                                 | 27.33                           | C          |
| 美丽盾巨孢囊霉 <i>Scutellospora calospora</i> | 50.00                   | 4.88                                 | 27.44                           | C          |
| 锈色和平囊霉 <i>Pacispora robigina</i>       | 33.33                   | 2.87                                 | 18.10                           | D          |
| 厚皮双型囊霉 <i>Ambispora callosa</i>        | 66.67                   | 5.56                                 | 36.12                           | C          |
| 网纹双型囊霉 <i>Am. reticulata</i>           | 83.33                   | 6.23                                 | 44.78                           | B          |
| 地斗管囊霉 <i>Funneliformis geosporum</i>   | 50.00                   | 2.15                                 | 26.08                           | C          |
| 双型球囊霉 <i>Glomus ambisporum</i>         | 50.00                   | 5.33                                 | 27.67                           | C          |
| 黄孢球囊霉 <i>G. flavisporum</i>            | 100.00                  | 21.51                                | 60.76                           | A          |
| 黑孢球囊霉 <i>G. melanosporum</i>           | 100.00                  | 21.23                                | 60.62                           | A          |
| 巴氏球囊霉 <i>G. bagyarajii</i>             | 100.00                  | 9.72                                 | 54.86                           | B          |
| 缩隔球囊霉 <i>Septoglomus constrictum</i>   | 50.00                   | 3.14                                 | 26.57                           | C          |
| 高山隔球囊霉 <i>S. altomontanum</i>          | 33.33                   | 1.79                                 | 17.56                           | D          |
| 聚生根孢囊霉 <i>Rhizophagus fasciculatus</i> | 16.67                   | 0.31                                 | 8.49                            | D          |



表 5 不同树龄香樟根际土壤 AM 真菌多样性指数  
Table 5 The diversity index of AM fungi in the rhizosphere soil of different tree ages of *Cinnamomum camphora*

| 树龄               | 香农-维纳指数     | 辛普森指数       | 均匀度指数      | 孢子密度               | 物种数                  |
|------------------|-------------|-------------|------------|--------------------|----------------------|
| Tree age (years) | Shannon (H) | Simpson (D) | Pielou (J) | Spore density (SD) | Species richness (S) |
| 100              | 2.53±0.02a  | 0.91a       | 0.94±0.01a | 281.33±14.57       | 14.67±0.58           |
| 200              | 2.29±0.02b  | 0.88±0.01ab | 0.92±0.01a | 176.67±5.77        | 12.00                |
| 400              | 2.12±0.07b  | 0.86±0.02ab | 0.92±0.03a | 115.33±1.53        | 10.00                |
| 600              | 1.93±0.06c  | 0.83±0.01b  | 0.89±0.02a | 80.33±20.03        | 8.67±0.58            |
| 800              | 1.88±0.20c  | 0.82±0.05b  | 0.92±0.06a | 61.33±13.79        | 7.67±0.58            |
| 1 200            | 1.03±0.12d  | 0.63±0.06c  | 0.94±0.11a | 29.00±3.46         | 3.00                 |

注：同一列不同小写字母表示差异显著(P<0.05)  
Note: Different lowercase letters in the same column indicated that there was significant difference (P<0.05).

3 讨论

本文采用酸性品红组织染色法和土壤过筛法对采自江西省乐安县牛田镇古樟林香樟的根系菌根真菌结构及根际土壤 AM 真菌孢子进行了形态学观察和鉴定，发现香樟根细胞中普遍存在 AM 真菌结构(丛枝和泡囊)。根系菌根真菌结构观察结果表明，AM 为香樟典型菌根类型。本研究从乐安古樟林香樟的根际土壤中共分离和鉴定出 5 科 8 属 15 种 AM 真菌，其中以黄孢球囊霉 *Glomus flavisporum* 和黑孢球囊霉 *G. melanosporum* 分布最广。AM 真菌是许多植物根系中最常见和最重要的菌根真菌类群，AM 真菌通过侵染植物根系与之建立起密切的联系通道，帮助宿主植物从土壤中获取矿质养分，而 AM 真菌从宿主植物中获得碳源，二者之间形成互利共生系统，尤其可使宿主植物成功定殖于不利或恶劣的环境条件(Dickson 2004；毛洁莹等 2024)。本研究结果表明，江西乐安古樟林香樟树根系及其土壤拥有丰富的 AM 真菌种类，并与香樟树根系形成互惠共生关系，对于古樟林众多古树历经千年的健康生长发挥了重要生理学和生态学作用。

本文采用酸性品红、苯胺蓝及台盼蓝 3 种染色剂对香樟根系 AM 真菌结构进行了观察，发现这 3 种染色剂均可用于香樟根系 AM 真菌结构的观察，但采用酸性品红和苯胺蓝染色较台盼蓝更能清晰地观察到香樟根系 DSE 真

菌及其微菌核结构。对比不同染色方法的观察结果表明，不同染料染色可用于香樟根系中不同菌根真菌结构的观察。

AM 真菌与植物互惠共生，可以显著改善植物矿质营养(Oldroyd 2013)，增强植物抗逆性(Abdalla *et al.* 2023)，还可以延迟土壤中腐生真菌和细菌群落的发生，同时促进凋落物分解(Sabaiporn *et al.* 2021；Mei *et al.* 2022)，在生态系统养分循环中起重要的调节作用(Johnson *et al.* 2013)。尤其对于单子叶植物和南方或热带植物而言，可与多种 AM 真菌共生形成互惠共生关系(Oldroyd 2013；汪茜等 2016；王玉丹和杨春雪 2020；吴佳海等 2022)。江西省乐安县牛田镇古樟林地处亚热带湿润气候区，绝大多数植物具有 AM 类型的菌根。本研究发现不同树龄香樟根系 AM 真菌的定殖率在 64.2%–98.5% 之间，尤其树龄相对低(如 100 年)的香樟根系 AM 真菌定殖率高达 90% 以上，而且根际土壤 AM 真菌的孢子数量和种类均较多，表明 AM 真菌对香樟健康生长发挥了重要作用。本研究还发现，对于 100 年以上树龄的香樟古树而言，随着树龄的增加，AM 真菌的定殖率和根际土壤 AM 真菌孢子数量均呈下降趋势，这与 AM 真菌的产生和侵染以及植物根系发育情况存在密切关系(毛洁莹等 2024)。

包括 AM 真菌在内的各种类型的菌根真菌对于幼树定植，特别是在逆境环境条件下，发挥了关键或不可替代的作用(李雪静等 2017；

汪志琴等 2019)。对于宿主植物来讲,尤其在种苗萌发和土壤定殖初级阶段,与土壤中相关微生物早日建立起菌根关系是宿主植物适应不同环境或不同气候条件的土壤,并获得更多 P、N 等元素营养或有关抗逆性的适应性进化的关键策略之一(Wu *et al.* 2010; 陈良华等 2015)。AM 真菌在幼嫩根系(如须根)中形成丛枝和泡囊等菌根结构,但随着根系成熟老化,这些丛枝和泡囊结构则被植物组织吸收,继而消失,菌根菌在二者最初建立共生关系时所发挥的关键生理学和生态学功能逐渐被植物发育成熟的根系所取代。

本文从江西省乐安县牛田镇古樟林香樟根际土壤中分离和鉴定出的 AM 真菌在不同树龄香樟根际土壤中分布优势度存在一定差异。按 4 级优势度划分方法(钟凯等 2010; 董怡然等 2018),以球囊霉属 *Glomus* 分布最广泛。作者未发现专门针对香樟 AM 真菌多样性的研究报道,多数报道从抗逆角度研究 AM 真菌对樟树城市绿化或适应喀斯特土壤环境等的作用,并揭示 AM 真菌对樟树生长的生物学或生态学意义。本文从江西省乐安县牛田镇古樟林香樟根际土壤中分离鉴定出的球囊霉属 *Glomus* 为世界广布种,其中黄孢球囊霉 *G. flavisporum* 和黑孢球囊霉 *G. melanosporum* 在江西乐安古香樟中为首次报道。

化石真菌研究表明,以球囊霉属 *Glomus* 为代表的球囊菌类真菌(Glomalean fungi)在陆生植物诞生时就已与相关植物形成了 AM 菌根关系,表明菌根菌与植物通过建立共生关系而实现协同进化(Redecker *et al.* 2000)。本文从江西乐安古樟林香樟树根系及根际土壤中研究发现大量球囊菌门 Glomeromycota 真菌,表明这些 AM 真菌在几百年甚至千年前就已经与当时还幼小的香樟树建立起了互惠共生关系,并在这些古香樟树历经百年至千年的茁壮成长中发挥了关键作用。从基因组学的角度来看,菌根的生活方式存在适应性进化(Strullu-Derrien *et al.* 2018),植物和真菌之间的菌根共生对土壤结构、养分循环、植物多样性和生态系统的

可持续性至关重要(Martin & van der Heijden 2024)。不仅如此,某些特殊的陆生植物可以与真菌细胞形成物质交换场所,随着植物年龄的增长,植物开始消化细胞内较老的真菌结构,为自身提供所需的营养物质,同时使一些新的真菌菌丝进入寄主细胞,延长植物自身的寿命(Brundrett 2002)。

江西乐安古樟林拥有大量古香樟树,已被列为国家生态公益林加以保护,是我国难得的生物多样性遗产。因此,深入研究菌根真菌多样性对于评估古树生长健康状况和建设古树生态公益林具有重要理论研究和实际指导意义。

## 致谢

感谢江西省乐安县政府办公室有关负责同志对开展本项研究提供必要的交通便利。

## 作者贡献

苏丹:论文构思、撰写和修改;张春明:调查取样及试验、论文撰写及修改;许榕凡:协助调查采样、菌根结构观察;姚吉祥:软件应用及多样性分析;张妍:部分 AM 真菌鉴定;李琳琳:仪器使用指导及数据分析;吕国忠:选题、采样、论文修改;杨红:试验总体方案设计、论文撰写及修改。

## 利益冲突

作者声明,该研究不存在任何潜在利益冲突的商业或财务关系。

## [REFERENCES]

- Abdalla M, Bitterlich M, Jansa J, Püschel D, Ahmed MA, 2023. The role of arbuscular mycorrhizal symbiosis in improving plant water status under drought. *Journal of Experimental Botany*, 74(16): 4808-4824
- Brundrett MC, 2002. Coevolution of roots and mycorrhizas of land plants. *New Phytologist*, 154: 275-3004
- Chen LH, Xu RY, Wan Q, Zhang J, Hu XW, Zhang MJ, Gao S, 2015. Specific differences between *Cinnamomum camphora* and *C. longepaniculatum* in Cd absorption and

- tolerance under two levels of Cd pollution. *Ecology and Environmental Sciences*, 24(2): 316-322 (in Chinese)
- Dickson S, 2004. The *Arum-Paris* continuum of mycorrhizal symbioses. *New Phytologist*, 163: 187-200
- Dong YR, Zhang XY, Chen X, Zhang Y, Guo HZ, Cai BP, 2018. Analysis on diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in rhizosphere soil of *Euscaphis japonica* naturally distributed in Fujian Province. *Journal of Plant Resources and Environment*, 27(3): 79-86 (in Chinese)
- Gomez E, Ferreras L, Toresani S, 2006. Soil bacterial functional diversity as influenced by organic amendment application. *Bioresource Technology*, 97(13): 1484-1489
- Grace C, Stribley DP, 1991. A safer procedure for routine staining of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *Mycological Research*, 95(10): 1160-1162
- He JY, 2019. Study on the relationship between AM fungi community and soil lead content in *Cinnamomum bodinieri* soil in Nanchang city. MS Thesis, Jiangxi Agricultural University, Nanchang. 1-53 (in Chinese)
- He YJ, Zhong ZC, 2011. Drought resistance of *Cinnamomum camphora* seedlings inoculated with different AM fungi in Karst soil. *Bulletin of Botanical Research*, 31(5): 597-602, 622 (in Chinese)
- He YJ, Zhong ZC, 2012. Effects of water stress and AM inoculation on root morphological characteristics in *Cinnamomum camphora* seedlings. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 34(4): 33-39 (in Chinese)
- Hu XY, Wu HY, Zhu CS, Li W, Guo X, Li M, Guo SX, 2023. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and their dominant species on *Flaveria bidentis* plant growth and development. *Mycosystema*, 42(3): 692-706 (in Chinese)
- Johnson NC, Angelard C, Sanders IR, Kiers ET, 2013. Predicting community and ecosystem outcomes of mycorrhizal responses to global change. *Ecology Letters*, 1: 140-153
- Lee HJ, Hyun EA, Yoon WJ, Kim BH, Rhee MH, Kang HK, Cho GY, Yoo ES, 2006. *In vitro* antiinflammatory and anti-oxidative effects of *Cinnamomum camphora* extracts. *Journal of Ethnopharmacology*, 103(2): 208-216
- Li T, Zhou P, Li TH, Wang M, Deng WQ, 2023. Community structures and influencing factors of soil fungi associated with typical vegetations in Nanling Mountains. *Mycosystema*, 42(2): 456-467 (in Chinese)
- Li XJ, Xu TL, Chen BD, Xu LJ, Zhao AH, 2017. Diversity and community structure of arbuscular mycorrhizal fungi in desert and steppe ecosystems. *Chinese Journal of Ecology*, 36(10): 2734-2743 (in Chinese)
- Li XW, 1984. *Flora of China* (Vol. 31). Science Press, Beijing. 1-509 (in Chinese)
- Liu RJ, Chen YL, 2007. *Mycorrhizology*. Science Press, Beijing. 1-404 (in Chinese)
- Man XW, Yu J, Yuan Y, 2022. The fungal community structure in the rhizosphere soil and root of *Populus tomentosa* in different plantations. *Mycosystema*, 41(10): 1531-1545 (in Chinese)
- Mao JY, Liu W, Yang YY, Chen BD, Su XN, Zou ZW, Tang YH, 2024. Diversity and dominant species identification of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi in the rhizosphere of ancient in Shanghai. *Chinese Journal of Ecology*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20240820.1421.012.html> (in Chinese)
- Martin FM, van der Heijden MGA, 2024. The mycorrhizal symbiosis: research frontiers in genomics, ecology and agricultural application. *New Phytologist*, 242(4): 1486-1506
- Mei LL, Zhang P, Cui GW, Yang X, Zhang T, Guo JX, 2022. Arbuscular mycorrhizal fungi promote litter decomposition and alleviate nutrient limitations of soil microbes under warming and nitrogen application. *Applied Soil Ecology*, 171: 104318
- Meng ZY, Li M, Yang XJ, Su Y, Wang XQ, 2023. Composition of fungal community in rhizosphere soil of *Picea crassifolia* and its response to altitude change. *Mycosystema*, 42(7): 1635-1650 (in Chinese)
- Oldroyd G, 2013. Speak, friend, and enter: signaling systems that promote beneficial symbiotic associations in plants. *Nature Reviews Microbiology*, 11: 252-263
- Pan Y, 2004. Research on the architectural culture of traditional settlements in Jiangxi. PhD Dissertation, South China University of Technology, Guangzhou. 1-460 (in Chinese)
- Redecker D, Kodner R, Graham LE, 2000. Glomacean fungi from the Ordovician. *Science*, 289: 1920-1921
- Roszaini K, Norazah MA, Mailina J, Zaini S, Faridzet ZM, 2013. Toxicity and antitermite activity of the essential oils from *Cinnamomum camphora*, *Cymbopogon nardus*, *Melaleuca cajuputi* and *Dipterocarpus* sp. against *Coptotermes curvignathus*. *Wood Science and Technology*, 47(6): 1273-1284
- Sabaiporn N, Jindarat E, Nuntavun R, Wiyada M, Sanun J, Nimitr V, Julia C, Sophon B, 2021. Growth enhancement of sunchoke by arbuscular mycorrhizal fungi under drought condition. *Rhizosphere*, 17: 100308
- Shi JM, Wang C, Zheng Y, Gao C, 2023. Research progress on the responses of morphological structure, species

- diversity and community composition of arbuscular mycorrhizal fungi to nitrogen deposition. *Mycosystema*, 42(1): 118-129 (in Chinese)
- Strullu-Derrien C, Selosse M, Kenrick P, Martin FM, 2018. The origin and evolution of mycorrhizal symbioses: from palaeomycology to phylogenomics. *New Phytologist*, 220(4): 1012-1030
- Tao GY, Yuan T, Jiang L, 2017. Preliminary study of arbuscular mycorrhizal fungi in the Mount Fanjing. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 36(5): 22-30 (in Chinese)
- Wang Q, Zhang JL, Long YY, Li DP, Chen YS, Che JL, 2016. Resources of arbuscular mycorrhizal fungi in ginger fields of Liujiang, Guangxi. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 29(1): 115-119 (in Chinese)
- Wang YD, Yang CX, 2020. Infection characteristics and diversity of AM fungi in rhizosphere of *Potentilla anserina*. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 29(2): 254-265 (in Chinese)
- Wang YS, Zhang SB, Zhang MQ, 2012. Arbuscular mycorrhizal fungi resources and germplasm resources in China. China Agriculture Press, Beijing. 1-258 (in Chinese)
- Wang ZQ, Ma K, Wang XL, Li Y, Wei CH, 2019. Effect of no-tillage and mulching management on soil arbuscular mycorrhizal fungal diversity. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 33(5): 969-977 (in Chinese)
- Wu CB, He YJ, 2011. Effect of arbuscular mycorrhizal inoculum on growth of *Cinnamomum camphora* seedlings. *Guizhou Agricultural Sciences*, 39(6): 161-165 (in Chinese)
- Wu F, Yang W, Zhang J, Zhou LQ, 2010. Cadmium accumulation and growth responses of a poplar (*Populus deltoids*×*Populus nigra*) in cadmium contaminated purple soil and alluvial soil. *Journal of Hazardous Materials*, 177: 268-273
- Wu JH, Zou Q, Du Q, Zhang T, Li JM, Xiao B, Liu W, 2022. Distribution characteristics of rhizosphere AM fungi of four common plants of evergreen broad-leaved forests of Lushan Mountain in summer. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 38(36): 48-55 (in Chinese)
- Xie Y, Yan XP, 2016. Le'an ancient camphor group: the first ancient camphor forest in China. *Forest and Humankind*, 12: 178-179 (in Chinese)
- Yao LM, 2021. Study on the diversity of common bamboo arbuscular mycorrhizal fungi in Fanjing Mountain. MS Thesis, Guizhou University, Guiyang. 1-89 (in Chinese)
- You C, 2022. Research on the health evaluation and directional cultivation of cultivated land in acidic red soil area—taking Niutian Town, Jiangxi Province as an example. MS Thesis, Capital University of Economics and Business, Beijing. 1-89 (in Chinese)
- Zhang CM, Man XW, Wu F, Yuan Y, Bian LS, 2023. A comparison of soil-plant continuum microbial communities in plantations of *Pinus tabulaeformis* and *P. sylvestris* var. *mongolica* in West Mountain of Beijing. *Mycosystema*, 42(10): 2041-2062 (in Chinese)
- Zhang J, Wang P, Yang MX, Gu Q, Ji BM, 2021. Plant-soil feedbacks and succession dynamics of plant community in grassland: the roles of mycorrhizal fungi and soil pathogens. *Acta Ecologica Sinica*, 41(24): 9878-9885 (in Chinese)
- Zhang Y, 2023. Fungal diversity in roots and rhizosphere soil of *Cinnamomum camphora* in ancient camphor forest of Le'an county, Jiangxi Province and screening of beneficial strains. MS Thesis, Liaoning Normal University, Dalian. 1-74 (in Chinese)
- Zhang YZ, Liang K, Liu MX, Chen H, 2024. Effect of nitrogen and phosphorus addition on litter production and nutrient dynamics of *Cinnamomum camphora* at different developmental stages. *Guizhou Forestry Science and Technology*, <https://doi.org/10.16709/j.cnki.gzlykj.20240806.002> (in Chinese)
- Zhong K, Yuan YQ, Zhao HH, Wang MY, Liu RJ, 2010. Arbuscular mycorrhizal fungal community structure in rhizospheric soil of Taishan vegetation. *Mycosystema*, 29(1): 44-50 (in Chinese)

#### [附中文参考文献]

- 陈良华, 徐睿杨, 万勤, 张健, 胡相伟, 张明锦, 高顺, 2015. 镉污染条件下香樟和油樟对镉的吸收能力和耐性差异. *生态环境学报*, 24(2): 316-322
- 董怡然, 张秀英, 陈熙, 张艳, 郭惠珠, 蔡邦平, 2018. 福建省自然分布的野鸦椿根围土壤中丛枝菌根真菌多样性分析. *植物资源与环境学报*, 27(3): 79-86
- 贺佳勇, 2019. 南昌樟树地下 AM 真菌群落特征及其与铅含量相关研究. 江西农业大学硕士论文, 南昌. 1-53
- 何跃军, 钟章成, 2011. 喀斯特土壤上香樟幼苗接种不同 AM 真菌后的耐旱性效应. *植物研究*, 31(5): 597-602, 622
- 何跃军, 钟章成, 2012. 水分胁迫和接种丛枝菌根对香樟幼苗根系形态特征的影响. *西南大学学报(自然科学版)*, 34(4): 33-39
- 胡学意, 吴海英, 祝诚尚, 李伟, 郭霄, 李敏, 郭绍霞, 2023. 黄顶菊 AM 真菌多样性及其优势种对植株生长的影响. *菌物学报*, 42(3): 692-706
- 李挺, 周平, 李泰辉, 旺姆, 邓旺秋, 2023. 南岭典型植被土壤真菌群落结构与影响因素. *菌物学报*, 42(2):

- 456-467
- 李锡文, 1984. 中国植物志(第 31 卷). 北京: 科学出版社. 1-509
- 李雪静, 徐天乐, 陈保冬, 徐丽娇, 赵爱花, 2017. 荒漠和草原生态系统丛枝菌根真菌多样性和群落结构. 生态学杂志, 36(10): 2734-2743
- 刘润进, 陈应龙, 2007. 菌根学. 北京: 科学出版社. 1-404
- 满孝武, 于健, 员瑗, 2022. 城乡不同绿地中毛白杨土壤及根系真菌群落结构研究. 菌物学报, 41(10): 1531-1545
- 毛洁莹, 刘玮, 阳雅荧, 陈保冬, 苏晓娜, 邹紫薇, 汤珏华, 2024. 上海古银杏树根际土著 AM 真菌多样性及优势种鉴定. 生态学杂志, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20240820.1421.012.html>
- 孟兆云, 李敏, 杨勋爵, 苏云, 王晓勤, 2023. 青海云杉根围土壤真菌群落组成及对海拔变化的响应. 菌物学报, 42(7): 1635-1650
- 潘莹, 2004. 江西传统聚落建筑文化研究. 华南理工大学博士学位论文, 广州. 1-460
- 史加勉, 王聪, 郑勇, 高程, 2023. 丛枝菌根真菌形态结构、物种多样性和群落组成对氮沉降响应研究进展. 菌物学报, 42(1): 118-129
- 陶光耀, 袁腾, 江龙, 2017. 梵净山丛枝菌根真菌的初步鉴定. 山地农业生物学报, 36(5): 22-30
- 汪茜, 张金莲, 龙艳艳, 李冬萍, 陈廷速, 车江旅, 2016. 广西柳江生姜根际土壤丛枝菌根真菌资源研究. 西南农业学报, 29(1): 115-119
- 王幼珊, 张淑彬, 张美庆, 2012. 中国丛枝菌根真菌资源与种质资源. 北京: 中国农业出版社. 1-258
- 王玉丹, 杨春雪, 2020. 鹅绒委陵菜根际 AM 真菌侵染特性及物种多样性. 西北农业学报, 29(2): 254-265
- 汪志琴, 马琨, 王小玲, 李越, 魏常慧, 2019. 冬麦免耕覆盖栽培对土壤丛枝菌根真菌多样性的影响. 核农学报, 33(5): 969-977
- 吴长榜, 何跃军, 2011. 接种 AM 菌剂对樟树幼苗生长效应的影响. 贵州农业科学, 39(6): 161-165
- 吴佳海, 邹芹, 杜曲, 张涛, 李金苗, 肖斌, 刘玮, 2022. 夏季庐山常绿阔叶林 4 种常见植物根际 AM 真菌分布特征. 中国农学通报, 38(36): 48-55
- 谢艺, 严小平, 2016. 乐安古樟群: 中国第一古樟林. 森林与人类, 2016(12): 178-179
- 姚莉梅, 2021. 梵净山常见竹类丛枝菌根真菌多样性研究. 贵州大学硕士论文, 贵阳. 1-89
- 刘畅, 2022. 酸性红壤地区耕地健康评价及定向培育研究——以江西省牛田镇为例. 首都经济贸易大学硕士论文, 北京. 1-89
- 张从明, 满孝武, 吴芳, 员瑗, 边禄森, 2023. 北京西山油松 *Pinus tabulaeformis* 和樟子松 *P. sylvestris* var. *mongolica* 人工林土壤-林木连续体微生物群落比较. 菌物学报, 42(10): 2041-2062
- 张静, 王平, 杨明新, 谷强, 纪宝明, 2021. 植物-土壤反馈与草地群落演替: 菌根真菌和土壤病原菌的调控作用. 生态学报, 41(24): 9878-9885
- 张妍, 2023. 江西乐安古樟林香樟根系和根际土壤真菌多样性及有益菌株筛选. 辽宁师范大学硕士论文, 大连. 1-74
- 张廷忠, 梁康, 刘明泉, 陈荟, 2024. 氮磷添加对不同发育阶段香樟树林凋落物生产量及其养分含量的影响. 贵州林业科技, <https://doi.org/10.16709/j.cnki.gzlykj.20240806.002>
- 钟凯, 袁玉清, 赵洪海, 王淼焱, 刘润进, 2010. 泰山丛枝菌根真菌群落结构特征. 菌物学报, 29(1): 44-50

更正:本刊 2025 年第 4 期 240214-2 前言部分第一行“中华包革耳(金耳菌) *Naematelia sinensis* (Bandoni & M. Zang) Millanes & Wedin.....”正确表述应为“中华包革耳(金耳菌) *Naematelia sinensis* Zhu L. Yang & J.Y. Tang ....., 特此更正!