

DOI: 10.5846/stxb201809202058

贾全全, 龚斌, 李康琴, 夏诗琪, 邓绍勇, 胡小红, 朱培林. 桐-药复合经营模式下泡桐丛枝菌根真菌群落结构特征. 生态学报, 2019, 39(6):

Jia Q Q, Gong B, Li K Q, Xia S Q, Deng S Y, Hu X H, Zhu P L. Shift in arbuscular mycorrhizal fungal communities in *Paulownia fortunei* plantations with different medicinal plant species. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(6):

桐-药复合经营模式下泡桐丛枝菌根真菌群落结构特征

贾全全, 龚斌, 李康琴, 夏诗琪, 邓绍勇, 胡小红, 朱培林*

江西省林业科学院, 南昌 330032

摘要:本研究采用 Illumina MiSeq 高通量测序技术, 研究江西鄱阳湖周边平原岗地的泡桐纯林及桐-药复合经营模式(泡桐-玉竹、泡桐-麦冬和泡桐-射干)下泡桐丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizae fungi, AMF)群落结构特征。研究发现, 泡桐 AMF 群落主要由球囊霉科、巨孢囊霉科、无梗囊霉科和多孢囊霉科组成, 其中球囊霉科真菌占绝对优势, 但不同科的相对丰度在不同经营模式下仍存在差异。与泡桐纯林相比, 桐-药复合经营模式会降低泡桐菌根侵染率及 AMF 群落多样性。只有泡桐-射干经营模式中的泡桐含有多孢囊霉科真菌, 且相对多度占 2.73%。研究结果表明桐-药复合经营模式下中药材种类差异会不同程度地改变泡桐 AMF 的群落结构。这为进一步研究桐-药复合经营模式下泡桐 AMF 的生态功能和资源利用提供了科学依据。

关键词:泡桐; 丛枝菌根真菌; 中药材; 群落结构

Shift in arbuscular mycorrhizal fungal communities in *Paulownia fortunei* plantations with different medicinal plant species

JIA Quanquan, GONG Bin, LI Kangqin, XIA Shiqi, DENG Shaoyong, HU Xiaohong, ZHU Peilin*

Jiangxi Academy of Forestry, Nanchang 330032, China

Abstract: *Paulownia fortunei* is a fast-growing broadleaved tree with a long history of cultivation in China. The practice of artificially inoculating this species with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) began in the 1980s. Artificial inoculation with AMF can greatly improve the survival rate and shorten the lengthy seedling period of *P. fortunei*. It is an important measure in the cultivation of strong *P. fortunei* seedlings. To date, however, there have been no studies on the effect of AMF on the late growth period of *P. fortunei*. A pure forest plantation of *P. fortunei*, as with other pure forest plantations, has a fast growth rate and a short rotation cycle, but its low biodiversity results in a series of problems such as soil degradation, a decline in productivity, and degradation of the ecological environment. A forest-medicinal plant intercropping ecosystem can improve the community structure of forest plantations and bring economic benefits. The present research into *P. fortunei*-medicinal plant intercropping ecosystems mainly focuses on the yield and economic benefits of the medicinal plants. However, AMF diversity in *P. fortunei*-medicinal plant intercropping ecosystems is seldom studied. We studied the colonization rate and diversity of AMF in different forestry patterns of *P. fortunei* of pure forest plantations and *P. fortunei* with medicinal plants (*Polygonatum odoratum*, *Ophiopogon japonicus*, *Belamcanda chinensis*) on a plain beside Poyang Lake, Jiangxi Province, China. A total of 46 operational taxonomic units (OTU) of AMF from roots of *P. fortunei* in four

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0505500)子课题“低效用材林林药、林菌复合模式构建技术(2017YFC05055051)”;江西省财政林业专项(2018521202)

收稿日期:2018-09-20; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yczpl@126.com

plots were obtained using the Illumina MiSeq platform. *P. fortunei* in pure forest plantations, *P. fortunei* with *Polygonatum odoratum*, *P. fortunei* with *B. chinensis*, and *P. fortunei* with *O. japonicus* revealed 34, 26, 24, and 20 OTUs, respectively. Unique OTUs were also found in each plot type, and the pure forest plantation of *P. fortunei* had the most OTUs and the most unique OTUs. The dominant AMF families in *P. fortunei* were Glomeraceae, Gigasporaceae, Archaeosporaceae, and Diversisporaceae. Glomeraceae was the most dominant family. There was variation in the relative abundance of the AMF from different families. Compared with the pure plantation, *P. fortunei*-medicinal plant intercropping ecosystems greatly changed the AMF community structure and resulted in a decrease in AMF diversity and infection rate. The Ace index and Shannon index of AMF in *P. fortunei*-medicinal plant intercropping ecosystems were lower than those in pure *P. fortunei* forest plantations, except in plots of *P. fortunei* with *O. japonicus*. However, the Shannoneven index of AMF in pure *P. fortunei* forest plantations was the lowest. The AMF in the Diversisporaceae were only identified in the forest plantation of *P. fortunei* with *B. chinensis*, where their relative abundance was 2.73%. These results indicated that different species in *P. fortunei*-medicinal plant intercropping ecosystems can change the community structure of AMF to different degrees. The effects of plant community diversity and interspecies interaction on AMF diversity and infection rate were complex. The findings of our study provide a scientific basis for further studying the ecological function and resource use of AMF in *P. fortunei*-medicinal plant intercropping ecosystems.

Key Words: *Paulownia fortunei*; arbuscular mycorrhizal fungi; medicinal plant; community structure

泡桐 (*Paulownia fortunei*) 是我国特有的速生阔叶树种,栽培历史悠久,是重要的用材和绿化树种。泡桐生长速度快,轮伐周期短,对土壤养分消耗过大,导致林地质量下降,严重影响了泡桐林地的生态效益^[1]。研究表明,农桐间作能够有效的改善林地土壤质量,同时提高经济效益^[2]。目前对泡桐林间作模式的研究多集中在产量及土壤养分方面,对间作模式下丛枝真菌方面的相关研究尚未见报道^[3-4]。早在 80 年代我国就开始对泡桐组培苗进行人工接种丛枝真菌,接种后可以大大缩短缓苗期,提高幼苗的抵抗力,是培育泡桐壮苗的重要措施之一^[5]。但丛枝真菌在泡桐生长后期所发挥的功能及产生的作用尚未见报道。

丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizae fungi, AMF)是一类在土壤中广泛存在的功能微生物,能与绝大多数陆地植物共生形成丛枝菌根^[6-7]。丛枝菌根能够提高植物对水分和营养物质的利用率,增强植物的耐旱和抗逆能力^[8-10]。此外,AMF 能在植物根际形成庞大的菌丝网络系统,具有改善土壤生态环境的作用,能有效地缓解连作障碍,提高植物产量和品质^[11]。虽然 AMF 与植物的共生无专一性,但由于植物生理代谢、根系形态结构以及分泌物等方面的差异,AMF 对宿主植物的侵染也会具有选择性^[12],且间作后土壤环境的改变对菌根的形成和效应也会产生影响^[13-14]。而 AMF 群落组成是其功能的基础,为此,本研究采用 Illumina MiSeq 高通量测序技术,在江西鄱阳湖周边平原岗地研究泡桐-玉竹 (*Polygonatum odoratum*)、泡桐-麦冬 (*Ophiopogon japonicus*) 和泡桐-射干 (*Belamcanda chinensis*) 3 种常见的桐-药复合经营模式对泡桐 AMF 群落组成的影响,以期研究桐-药复合模式下泡桐 AMF 的功能及其对泡桐生长后期和土壤环境产生的作用方面提供理论支持。

1 材料方法

1.1 研究地概况

采样地点位于江西省共青城市江益镇跃进村泡桐种植基地(29°11'8.97"N, 115°47'20.47"E),该地属亚热带季风气候,四季分明,雨量充沛,年平均降雨量为 1350—1710 mm,日照时数为 2000 h,无霜期约 200 d。泡桐林于 2009 年用 1 年生根繁苗造林,株行距 4 m×6 m,2014 年间伐后株行距为 8 m×6 m,2015 年 4 月林下行间间作中药材麦冬和射干,2018 年 1 月间作玉竹。

1.2 根系样品采集

2018 年 5 月,分别在泡桐纯林、泡桐-玉竹、泡桐-麦冬和泡桐-射干复合种植地设立实验样地,每种样地间

隔 16 米。林分平均胸径 29.3 cm, 平均树高 15.6 m。林地土壤信息详见表 1。中药材根系采用全挖法获得, 泡桐根系采用挖土块法, 每个样地随机选 3—5 株, 在距树干 1—2 m 处, 用铁铲挖取 3—5 个体积 30 cm×30 cm×20 cm 大小的土块, 从与主根相连的侧根上判断泡桐根系的特征, 将采集的泡桐细根样品装入封口袋后置于冷藏箱中。带回实验室后, 挑选 10—20 条具有 1—2 级根的根枝放入装有酒精浓度 50% 的塑料瓶中, 用于菌根侵染率的测定; 挑选 50 条左右带有 1 级根的根枝, 洗净后放入硅胶中, 用于 AMF 多样性检测。

表 1 泡桐林地土壤养分情况

Table 1 Soil nutrients in *Paulownia fortunei* plantation

pH 值 pH value	有机质 Organic matter/ (g/kg)	全氮 Total nitrogen/ (g/kg)	全磷 Total phosphorus/ (g/kg)	全钾 Total potassium/ (g/kg)	碱解氮 Available nitrogen/ (mg/kg)	有效磷 Available phosphorus/ (mg/kg)	速效钾 Available potassium/ (mg/kg)
4.63	19.39	1.10	0.35	12.91	91.59	1.40	109.7

1.3 AMF 侵染率测定

采用碱解离-乳酸墨水染色法对根系样品进行染色^[15]。从染色完成的根段中随机挑选 10 个根段制片, 在显微镜下观测菌根侵染情况, 每个样品观测不少于 300 个视野。依据 McGonigle 等^[16]方法计算菌根侵染率, 并按照菌根侵染率将侵染等级分为 5 级: 0—5% 为 1 级; 6%—25% 为 2 级; 26%—50% 为 3 级; 51%—75% 为 4 级; 76%—100% 为 5 级。

1.4 根内 AMF 分子多样性测定

1.4.1 DNA 提取和 PCR 扩增

采用 E.Z.N.A.[®] soil 试剂盒并按照说明书进行总 DNA 提取, DNA 浓度和纯度利用 NanoDrop2000 进行检测, 利用 1% 琼脂糖凝胶电泳检测 DNA 提取质量; 用 AMV4-5NF (5'-AAGCTCGTAGTTGAATTTTCG-3') 和 AMDGR (5'-CCCAACTATCCCTATTAATCAT-3') 引物对丛枝真菌 18S rDNA 基因片段进行 PCR 扩增^[17], 扩增程序为: 95℃ 预变性 3min, 32 个循环 (95℃ 变性 30s, 55℃ 退火 30s, 72℃ 延伸 45s), 最后 72℃ 延伸 10min。扩增体系为 20ul, 4ul 5 * FastPfu 缓冲液, 2ul 2.5mM dNTPs, 0.8ul Forward Primer (5uM), 0.8ul Reverse Primer (5uM), 0.4ul FastPfu 聚合酶, 2ul BSA, 10ng DNA 模板。

1.4.2 Illumina Miseq 测序数据处理

利用 Illumina 公司的 Miseq PE300 平台进行测序。使用 UPARSE 7.1 软件, 根据 97% 的相似度对序列进行操作分类单元 (Operational taxonomic units, OTU) 聚类, 并在聚类的过程中去除单序列和嵌合体。利用 RDP classifier 对每条序列进行物种分类注释, 参考 MaarjAM 丛枝真菌数据库, 得到具有丰度和物种信息的 OTU 表用于后续分析。

1.5 统计分析

采用 SPSS 20.0 和 Microsoft Excel 2010 对数据进行统计分析。数据符合正态分布且方差齐性, 采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和 Duncan 法分析不同样品侵染率差异是否显著 ($\alpha = 0.05$)。并利用 I-Sanger 云平台进行 Alpha 多样性分析。文中作图由 Microsoft Excel 2010 和 I-Sanger 云平台完成。

2 结果

2.1 菌根侵染率

在不同经营模式下泡桐菌根侵染率存在较大差异, 其中泡桐-射干复合模式 (PB) 下泡桐菌根侵染率最低 (19.33%), 其次是泡桐-麦冬复合模式 (PO), 二者与泡桐纯林 (PCK) 的菌根侵染率存在显著差异 ($P < 0.05$); 而 PCK 和泡桐-玉竹复合模式 (PP) 的泡桐菌根率差异不显著 ($P > 0.05$), 且侵染程度较高, 侵染等级均为 4 级, PO, PB 的泡桐菌根侵染等级分别为 3 级和 2 级 (图 1)。林下中药材玉竹的菌根侵染率为 0, 中药材射干和麦冬菌根侵染率分别为 2 级和 1 级 (图 1)。

2.2 测序结果

对 4 类泡桐根系样品 (PCK、PP、PB 和 PO 模式下的泡桐菌根) 进行高通量测序, 共获得 159183 条有效的高质量序列, 采用 97% 的相似性聚类分析, 共获得 46 条 AMF 的 OTU。在 PCK、PP、PB 和 PO 等 4 种样地类型中, 泡桐分别有 34、26、24 和 20 条 OTUs。此外, 每种样地类型中泡桐都有其独有的 OTUs, 且泡桐纯林中, 独有的 OTUs (6 条) 和 OTUs 总数最多。

2.3 Alpha 多样性分析

所有样地的泡桐菌根真菌群落覆盖率均为 100%; 除 PO 的泡桐 Ace 指数 (物种丰富度) 最高以外, 与 PCK 相比, 3 种桐-药复合样地的泡桐菌根真菌的 Ace 指数和 Shannon 指数 (物种多样性) 均有所降低, 其中 PP 和 PO 的泡桐 Ace 指数和 Shannon 指数略高于 PB; 而 PCK 的 Shannoneven 指数 (物种均匀度) 最低 (表 2)。

2.4 AMF 群落结构分析

在不同经营模式的样地中, 泡桐 AMF 群落主要由球囊霉科 (Glomeraceae)、巨孢囊霉科 (Gigasporaceae)、无梗囊霉科 (Acaulosporaceae) 和多孢囊霉科 (Diversisporaceae) 组成 (图 3)。其中球囊霉科的丰度最大, 除 PO 外 (相对丰度为 73.97%), 其他类型样地泡桐的球囊霉科相对丰度均在 90% 以上 (图 3)。除 PP 的泡桐外, 其他物种的 AMF 群落都存在巨孢囊霉科真菌, 但丰度差异较大, 其中 PO 中泡桐的巨孢囊霉科 AMF 丰度最大 (18.13%), 其次为中药材射干和麦冬, 另外两种样地泡桐的巨孢囊霉科 AMF 丰度均小于 1%。除麦冬外, 其他五个物种均含有无梗囊霉科 AMF。只有 PB 的泡桐含有多孢囊霉科 AMF, 且相对丰度为 2.73% (图 3)。

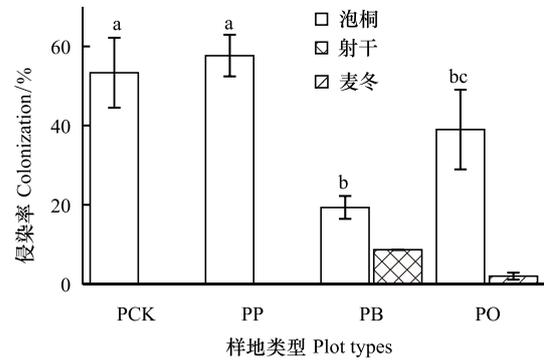


图 1 不同样地类型物种的丛枝菌根真菌感染率

Fig.1 Arbuscular mycorrhizal infection rate of different species in different plots

PCK 代表泡桐纯林, PP 代表泡桐-玉竹林, PB 代表泡桐-射干林, PO 代表泡桐-麦冬林; 不同小写字母表示不同样地泡桐菌根感染率差异显著 ($P < 0.05$); 误差线代表标准差

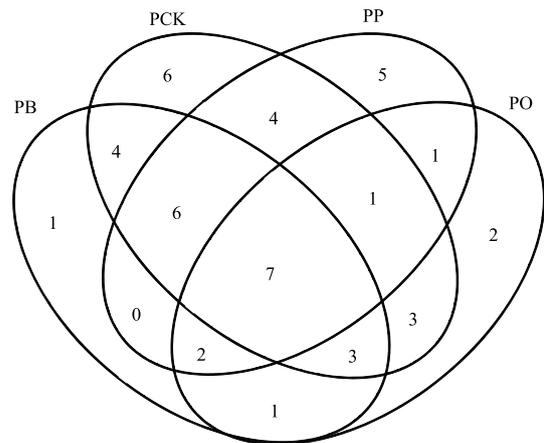


图 2 不同样地类型的泡桐独有和共有 OTU 数

Fig.2 The unique and common OTU numbers of *Paulownia fortunei* from different plots

PCK 代表泡桐纯林中泡桐, PP 代表泡桐-玉竹林中泡桐, PB 代表泡桐-射干林中泡桐, PO 代表泡桐-麦冬林中泡桐

表 2 不同样地类型的泡桐丛枝菌根真菌群落 Alpha 多样性指数

Table 2 Alpha diversity indices of arbuscular mycorrhizal fungal community of *Paulownia fortunei* from different plots

样品 Samples	Ace 指数 Ace Index	Shannon 指数 Shannon Index	Shannoneven 指数 Shannoneven Index	覆盖率 coverage/%
泡桐纯林 <i>Paulownia fortunei</i> of pure forest	38.97	2.20	0.61	100
泡桐-玉竹 <i>P. fortunei</i> - <i>Polygonatum odoratum</i>	28.45	2.17	0.65	100
泡桐-射干 <i>P. fortunei</i> - <i>Belamcanda chinensis</i>	26.49	2.14	0.66	100
泡桐-麦冬 <i>P. fortunei</i> - <i>Ophiopogon japonicus</i>	39.13	2.16	0.69	100

3 讨论

泡桐是 AMF 共生树种,其组培苗接种球囊霉科真菌可以显著提高其对养分的吸收效率^[7]。本研究采用 Illumina MiSeq 高通量测序技术,测定了泡桐纯林、泡桐-玉竹林、泡桐-麦冬林和泡桐-射干林不同经营模式下泡桐 AMF 的群落组成,从中获得了 46 个可操作分类单元,分属于 4 个科(图 3)。吴铁航等^[18]调查发现,球囊霉科是江西红壤地区林地和耕地土壤中最常见的丛枝真菌类型,这与我们调查的泡桐样地的优势科结果一致。同时,也说明这些球囊霉科 AMF 与泡桐具有极强的亲和性,这为筛选泡桐高效共生 AMF 菌种提供了依据。

AMF 作为联系宿主植物根系与土壤环境之间的桥梁,其分布必然受到宿主植物和根际土壤环境的直接影响^[19]。研究结果显示,泡桐-麦冬和泡桐-射干林的泡桐菌根侵染率显著低于泡桐纯林(图 1),这可能与间作中药材后土壤的理化性质的改变有关^[20],也可能是中药材根系及其 AMF 产生的分泌物影响了泡桐根系 AMF 的侵染能力^[12]。然而,泡桐-玉竹复合模式的泡桐菌根侵染率与纯林差异并不显著,这可能与玉竹间作的时间较短有关。多年生玉竹菌根侵染率可达 60% 以上^[21],但由于本研究样地中玉竹的间作时间较短,还没有 AMF 侵染,因此对泡桐根系的 AMF 也没有产生显著影响。所以,我们推测泡桐林内长期间作中药材会影响 AMF 对泡桐根系的侵染水平。

在本研究中,泡桐-玉竹和泡桐-射干林中泡桐 AMF 的物种丰富度、多样性和均匀度均低于纯林(图 1,表 2),且泡桐纯林中,独有的 OTUs 和 OTUs 总数最多(图 2),但在泡桐-麦冬样地中,泡桐 AMF 的物种多样性和均匀度略高于纯林,这可能是由于泡桐-麦冬样地中泡桐的 AMF 中巨孢囊霉科和无梗囊霉科的相对丰度较高,而优势科球囊霉科的相对丰度明显低于其他模式,造成了群落结构格局的变化。泡桐-麦冬林中泡桐 AMF 中巨孢囊霉科的相对丰度高达 18.13%,这可能与中药材麦冬根系中巨孢囊霉科相对丰度较高有关。所以泡桐林下间作中药材,会因间作的物种不同而影响 AMF 对泡桐的侵染能力,也就是说,植物群落的物种多样性改变及群落内种间的相互作用,会对不同物种的 AMF 群落结构产生不同程度地影响^[22]。

另外,在所有调查的泡桐样地中,只有泡桐-射干林中的泡桐 AMF 中含有多孢囊霉科真菌(图 3),在射干根系中也没有发现多孢囊霉科真菌,而且多孢囊霉科并不是红壤地区常见的真菌类型,因此,多孢囊霉科真菌出现的原因及其对泡桐生长的影响还有待进一步研究。

4 结论

AMF 是陆地生态系统中重要的微生物资源之一,本研究通过对泡桐纯林、泡桐-玉竹林、泡桐-麦冬林和泡桐-射干林中泡桐 AMF 群落特征的研究发现,桐-药间作模式会降低泡桐根系 AMF 的侵染率,改变其群落结构组成,但这些群落结构的差异是否影响了其生态功能目前尚不明确,另外,不同复合经营模式下 AMF 群落结构的差异,对泡桐的生长以及保持土壤健康与可持续经营方面的影响还有待进一步研究。

参考文献 (References):

- [1] 涂佳,付宇佳,朱志文,黄卫华,唐菲菲,吴立潮. 施肥对泡桐人工林土壤微生物活性的影响. 西南林业大学学报, 2017, 37(2): 109-115.
- [2] 万福绪,陈平. 桐粮间作人工生态系统的研究进展. 南京林业大学学报:自然科学版, 2003, 27(5): 88-92.

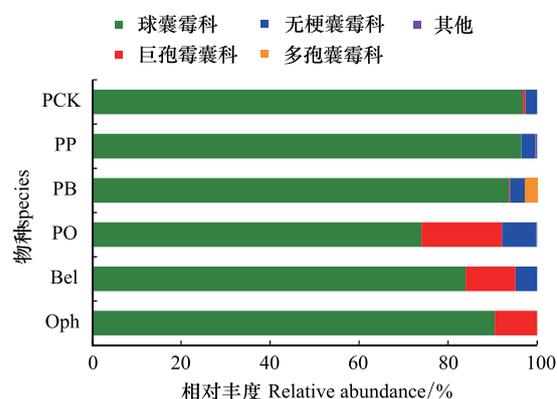


图 3 不同样地类型物种的 AMF 科的相对丰度

Fig. 3 Relative abundance of arbuscular mycorrhizal fungal families of different species in different plots

PCK 代表泡桐纯林中泡桐, PP 代表泡桐-玉竹林中泡桐, PB 代表泡桐-射干林中泡桐, PO 代表泡桐-麦冬林中泡桐, Bel 代表射干, Oph 代表麦冬

- [3] 谢莉. 苏北地区主要林粮间作模式的土壤性状及林木对农作物影响状况的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2005.
- [4] 朱志文, 李鹏, 黄卫华, 吴立潮, 涂佳. 间作类型对新造泡桐林生长及其土壤养分含量的影响. 湖南林业科技, 2017, 44(2): 15-19, 25-25.
- [5] 郭秀珍, 赵志鹏, 毕国昌. 泡桐组培苗 VA 菌根的研究. 林业科学研究, 1990, 3(1): 9-14.
- [6] Songachan L S, Kayang H. Diversity and distribution of arbuscular mycorrhizal fungi in *Solanum* species growing in natural condition. Agricultural Research, 2012, 1(3): 258-264.
- [7] Sun J, Miller J B, Granqvist E, Wiley-Kalil A, Gobbato E, Maillet F, Cottaz S, Samain E, Venkateshwaran M, Fort S, Morris R J, Ané J M, Dénarié J, Oldroyd G E D. Activation of symbiosis signaling by arbuscular mycorrhizal fungi in legumes and rice. Plant Cell, 2015, 27(3): 823-838.
- [8] Hiiesalu I, Pärtel M, Davison J, Gerhold P, Metsis M, Moora M, Öpik M, Vasar M, Zobel M, Wilson S D. Species richness of arbuscular mycorrhizal fungi: associations with grassland plant richness and biomass. New Phytologist, 2014, 203(1): 233-244.
- [9] 李元敬, 刘智蕾, 何兴元, 田春杰. 丛枝菌根共生体中碳、氮代谢及其相互关系. 应用生态学报, 2014, 25(3): 903-910.
- [10] 刘丽丽, 刘仁道, 黄仁华. 丛枝菌根真菌(AMF)对红阳猕猴桃叶片富硒能力及光合特性的影响. 食品工业科技, 2014, 35(10): 234-237, 242-242.
- [11] Tahiri-Alaoui A, Lingua G, Avrova A, Sampò S, Fusconi A, Antoniw J, Berta G. A cullin gene is induced in tomato roots forming arbuscular mycorrhizae. Canadian Journal of Botany, 2002, 80(6): 607-616.
- [12] Lugo M A, Reinhart K O, Menoyo E, Crespo E M, Urcelay C. Plant functional traits and phylogenetic relatedness explain variation in associations with root fungal endophytes in an extreme arid environment. Mycorrhiza, 2014, 25(2): 85-95.
- [13] Gazey C, Abbott L K, Robson A D. Indigenous and introduced arbuscular mycorrhizal fungi contribute to plant growth in two agricultural soils from south-western Australia. Mycorrhiza, 2004, 14(6): 355-362.
- [14] Jansa J, Mozafar A, Anken T, Ruh R, Sanders I R, Frossard E. Diversity and structure of AMF communities as affected by tillage in a temperate soil. Mycorrhiza, 2002, 12(5): 225-234.
- [15] Vierheilig H, Coughlan A P, Wyss U, Piché Y. Ink and vinegar, a simple staining technique for arbuscular-mycorrhizal fungi. Applied and Environmental Microbiology, 1998, 64(12): 5004-5007.
- [16] McGonigle T P, Miller M H, Evans D G, Fairchild G L, Swan J A. A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular—arbuscular mycorrhizal fungi. New Phytologist, 1990, 115(3): 495-501.
- [17] Van Geel M, Busschaert P, Honnay O, Lievens B. Evaluation of six primer pairs targeting the nuclear rRNA operon for characterization of arbuscular mycorrhizal fungal (AMF) communities using 454 pyrosequencing. Journal of Microbiological Methods, 2014, 106: 93-100.
- [18] 吴铁航, 郝文英, 林先贵, 施亚琴. 红壤中 VA 菌根真菌(球囊霉目)的种类和生态分布. 真菌学报, 1995, 14(2): 81-85.
- [19] 刘海跃, 李欣玫, 张琳琳, 王姣姣, 贺学礼. 西北荒漠带花棒根际丛枝菌根真菌生态地理分布. 植物生态学报, 2018, 42(2): 252-260.
- [20] 李晨晨, 周再知, 梁坤南, 黄桂华, 杨光. 不同林药复合经营模式对杉木生态公益林土壤理化性质的改良效果. 浙江农林大学学报, 2018, 35(1): 51-59.
- [21] 李伟, 孙龙燕, 张翠萍, 徐萌, 郭绍霞. 濒危植物崂山百合根围 AM 真菌分布特征. 东北农业大学学报, 2016, 47(1): 30-37.
- [22] 职桂叶. 不同土壤环境下植物多样性对泡囊丛枝状菌根真菌侵染的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.