

网络出版时间:2024-07-31 09:58 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2025.02.013
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1390.S.20240730.1237.005

不同分根条件下魔芋根际土壤真菌群落组成及其功能预测

何斐,崔鸣,李川,阮佳,王梦,姜浩,马星光,王卓,丁龙飞,张诗婉,吕恋心

(安康学院 现代农业与生物科技学院,陕西 安康 725000)

【摘要】【目的】研究刺槐魔芋复合经营模式下,与刺槐根系不同程度分隔处理的魔芋根际土壤真菌群落组成及其功能,为刺槐与魔芋复合经营模式的可持续发展提供科学依据。【方法】以刺槐与魔芋间作为研究对象,采用两室根箱隔网装置,A室种植刺槐,B室种植魔芋,并应用盆栽根系分隔技术设置塑料膜分隔、尼龙网分隔和不分隔3个处理。每个处理采用抖根法采集魔芋根际土壤样品3份,共采集9份土壤样品。按照试剂盒操作步骤提取魔芋根际土壤DNA,紫外测定和电泳检测分析提取DNA的质量浓度和纯度,通过PCR扩增和ITS rDNA区域标记扩增子的Illumina NovaSeq 6000测序及Funguild预测,分析不同分隔处理的魔芋根际土壤的真菌群落组成和功能类群。【结果】高通量测序获得413个魔芋根际真菌OTU,分属9门25纲53目102科155属167种;获得163个丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi,AMF)OTU,分属1门3纲4目6科7属16种。尼龙网分隔和不分隔处理魔芋根际土壤真菌和AMF的Shannon指数和Chao1指数均显著高于塑料膜分隔处理。不同分隔处理下魔芋根际土壤真菌的优势门均为子囊菌门(*Ascomycota*),优势属均为瓶毛壳属(*Lophotrichus*)、镰刀菌属(*Fusarium*)、球囊霉属(*Glo-mus*)和类球囊霉属(*Paraglo-mus*)。与塑料膜分隔处理相比,不分隔处理魔芋根际轮状镰刀菌(*Fusarium nematophilum*)和热带念珠菌(*Candida tropicalis*)的相对丰度增加,而腐皮镰刀菌(*Fusarium solani*)、*Ceratobasidium ramicola*、*C. cornigerum*和大双孢土赤壳(*Ilyonectria macrodidyma*)的相对丰度降低。不同分隔处理下魔芋根际土壤真菌的营养类型均以腐生营养型为主(相对丰度为41.52%~63.66%),不分隔处理下魔芋根际土壤中共生营养型真菌的相对丰度为7.93%,显著高于其他处理,且主要以内生真菌和外生真菌为主;塑料膜分隔处理下魔芋根际土壤中植物病原菌(相对丰度为12.36%)、动物病原菌(相对丰度为1.95%)的相对丰度显著高于其他处理。【结论】在刺槐与魔芋间作体系中,种间根系互作越紧密,魔芋根际真菌和AMF多样性越高,根际有害真菌的相对丰度越低。

【关键词】 魔芋;刺槐;根际真菌;真菌功能类群;间作模式;分根处理

【中图分类号】 Q938.1

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2025)02-0118-12

Community composition and function prediction of fungi in the rhizosphere soils of *Amorphophallus konjac* under different root separation conditions

HE Fei, CUI Ming, LI Chuan, RUAN Jia, WANG Meng, JIANG Hao, MA Xingguang, WANG Zhuo, DING Longfei, ZHANG Shiwan, LÜ Lianxin

(School of Modern Agriculture & Biotechnology, Ankang University, Ankang, Shaanxi 725000, China)

Abstract: 【Objective】 In this study, we explored the effects of root barriers on community composition and functional groups of rhizosphere soil fungi of konjac (*Amorphophallus konjac*) in an black locust/kon-

【收稿日期】 2023-11-14

【基金项目】 国家自然科学基金项目(31901468);陕西省技术创新引导专项(2021QFY12-03);安康市科学技术研究发展计划项目(AK2022-NY-04, AK2020-CQ01-1);安康学院专项(2023AYKCYZ05)

【作者简介】 何斐(1988—),女,陕西南郑人,副教授,博士,主要从事农业微生物资源利用研究。E-mail:hefei6000@163.com

jac intercropping system, in order to provide a scientific basis for the sustainable development of the agroforestry system. 【Method】 The intercropping method of black locust and konjac was used as the research object. A two-compartment rhizobox was used to cultivate black locust in compartment A and konjac in compartment B. The root separation technique was applied to set up three treatments: complete separation using a plastic film (monocropping, without root exudate exchange or root interaction), semi-separation employing a nylon mesh (semi-cropping, with root exudate exchange but no root interaction), and non-separation (intercropping, with root exudate exchange and root interaction). For each treatment, three konjac rhizosphere soil samples were collected by shaking root method, and a total of nine soil samples were collected. The DNA of konjac rhizosphere soil was extracted according to the operation procedure of the kit, and the concentration and purity of the DNA were analyzed by UV spectroscopy and gel electrophoresis. PCR, Illumina NovaSeq 6000 sequencing of ITS rDNA region marker amplicons and Funguild were performed to investigate the community composition and function group of fungi in the rhizosphere soil of konjac, respectively. 【Result】 A total of 413 fungal OTUs were obtained, belonging to 9 phyla, 25 classes, 53 orders, 102 families, 155 genera and 167 species, including 163 arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) OTUs belonging to 1 phyla, 3 classes, 4 orders, 6 families, 7 genera and 16 species. The Shannon and Chao 1 indices of the AMF and fungi in the rhizosphere soil of konjac under mesh separation treatment and without root barrier were significantly higher than those of the plastic membrane separated treatment. The dominant phylum of fungi in konjac rhizosphere soil under different root separation modes was *Ascomycota*, and the dominant genera were *Lophotrichus*, *Fusarium*, *Glomus* and *Paraglomus*. The relative abundance of *Fusarium nematophilum* and *Candida tropicalis* was significantly increased in the rhizosphere soil of konjac with no root barrier treatment compared with the plastic membrane treatment, whereas the species with enhancement were *Fusarium solani*, *Ceratobasidium ramicola*, *C. cornigerum*, and *Ilyonectria macrodidyma*. Saprotroph was the main fungal functional group across all the three treatments (relative abundance was 41.52%–63.66%). A higher relative abundance of symbiotroph fungi was identified in rhizosphere soil (relative abundance was 7.93%) of konjac compared to other treatments. The main guilds with the increasing abundance were endophyte and ectomycorrhizal fungi. However, significantly higher abundances of plant pathogens (relative abundance was 12.36%), and animal pathogens (relative abundance was 1.95%) were detected in the rhizosphere soil of konjac under the plastic membrane treatment compared to others. 【Conclusion】 In the black locust/konjac intercropping system, the closer the interspecific root interaction, the higher the diversity of fungi and AMF in konjac roots, and the lower the relative abundance of harmful fungi in the rhizosphere.

Key words: *Amorphophallus konjac*; *Robinia pseudoacacia*; rhizosphere fungi; functional groups of fungi; intercropping pattern; root separation

魔芋 (*Amorphophallus konjac*) 是目前自然界唯一能大量提取葡甘聚糖的重要经济作物, 也是我国云南、贵州、四川和陕西南部等贫困山区乡村振兴的支柱产业^[1]。葡甘聚糖是一种高分子水溶性膳食纤维, 广泛应用于农业、医药、食品及化工等领域^[2]。近年来, 随着葡甘聚糖的深入研究及开发利用, 魔芋精粉原料需求急剧上升^[3], 继而魔芋种植面积不断扩大, 连作栽培面积也随之增加, 魔芋病虫害等连作障碍问题日趋严重^[4]。为了缓解连作障碍, 众多研究者采用魔芋与玉米^[5]、刺槐^[6]、橡胶树^[7]等农作物

或林木进行套作, 利用间套作物的高大株型为魔芋提供遮阴条件^[8], 以利于半阴性植物魔芋植株的生长和产量形成^[9]。

刺槐林下种植魔芋是我国陕南地区一种典型的种植方式, 刺槐与魔芋间作充分发挥了高矮作物的空间配置优势, 对魔芋具有防病促生功能^[10-11]。刺槐林下种植的魔芋具有发病轻、产量高、效益好等显著特点, 既缓解了农作物与魔芋争地的矛盾, 又提高了土地综合利用率, 增加了农民收入^[12]。在大田条件下, 玉米与魔芋间作也有明显的控病效果, 间作体

系中玉米对魔芋病原菌具有一定的阻隔效应。张红曦等^[13]在云南省富源县的田间试验结果表明,单作魔芋的死亡率为 62.8%,而与玉米间作魔芋的死亡率为 49.3%;周兴炳^[14]在汉中市佛坪县的田间试验结果表明,单作处理魔芋的发病率最高,为 11.7%,比魔芋与玉米间作处理高 23.2%。

植物根际分布着各种功能类群的真菌,例如影响植物生长的病原真菌、腐生真菌和共生菌根真菌等^[15-17]。一些与植物根相关的真菌可以与宿主建立互惠共生关系,诱导并提高植物应对生物胁迫和非生物胁迫的耐受力^[18]。如丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)通过与植物建立互惠共生体系,其菌丝网络能够促进宿主对水分与养分的吸收^[19-21]。周贤玉等^[22]对甜玉米与菜用大豆间作研究发现,与玉米单作相比,间作显著提高了甜玉米 AMF 侵染率、氮磷积累和生物量。玉米与不同树木间作,均显著提高了玉米根系中 AMF 的丰富度^[23]。胡国彬等^[24]研究表明,间作显著提高了小麦和蚕豆根际真菌的多样性和丰富度,改变了根际真菌的群落结构,是一种有利于改善蚕豆连作栽培根际微生态环境的有效措施。由此可见,种间互作不仅改变作物的生长特性,同时也会对作物根际微生物的群落结构和功能产生影响^[25]。由于间作对作物根际微生物的影响具有不可复制性^[26],而目前关于刺槐与魔芋间作种植的研究多集中在土壤养分^[27]、病虫害^[10,12]、土壤可培养微生物区系^[11]等方面,有关刺槐与魔芋间作种植对魔芋根际真菌群落组成的影响尚未见报道。

为此,本研究采用根系分隔法^[28-29]模拟刺槐与魔芋间作条件下不同根系间的互作强度,利用 Illumina NovaSeq 6000 高通量测序技术研究塑料膜分隔、尼龙网分隔和不分隔处理魔芋根际土壤真菌的群落组成及其功能特性,以期深入探究刺槐与魔芋间作体系中种间互作的根际微生物机制,为刺槐与魔芋复合经营模式的可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计与取样

试验于 2021 年 5 月 3 日在安康学院农学大棚内进行。采用两室根箱隔网装置(图 1),按照根系不同分隔方式设置 3 个处理:(1)塑料膜分隔(film separation, F),魔芋与刺槐根系用塑料膜完全分隔,无相互作用;(2)尼龙网分隔(mesh separation, M),魔芋与刺槐根系用尼龙网(孔径 25 μm)分隔,但根

系间有水分、养分和信息等的交换;(3)不分隔(non-separation, N),魔芋与刺槐根系间未分隔,完全间作。A 室种植 5 株刺槐, B 室种植 3 株魔芋,每处理重复 3 次。

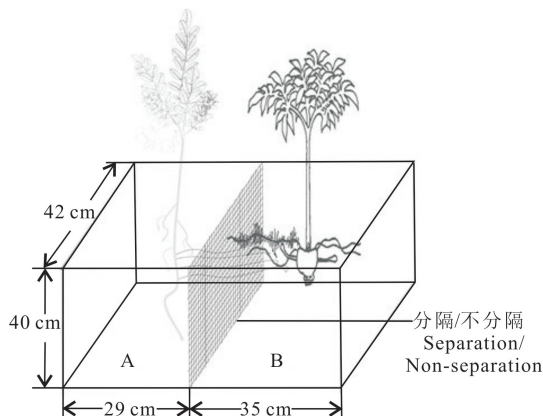


图 1 两室根箱隔网系统

Fig. 1 Two compartments system

2021 年 9 月 10 日于魔芋球茎膨大期,采用抖根法^[30]收集魔芋根际土壤。每个处理采集 3 个根际土壤样品,将采集的 9 个根际土壤样品于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 超低温冰箱中保存备用。

1.2 试验所用试剂与仪器

1.2.1 试剂 FastDNA[®] Spin Kit for Soil 试剂盒,购于北京毕特博生物技术有限责任公司;AxyPrep DNA 凝胶回收试剂盒,购于上海金畔生物科技有限公司;DL2000 DNA Marker、2 \times Rapid Taq Master Mix,购于生工生物工程(上海)股份有限公司。

1.2.2 仪器 9700 型 PCR 仪,美国 ABI 公司;Illumina NovaSeq 6000 高通量测序平台,美国 Illumina 公司;5810R 离心机,德国 Eppendorf 公司;Vortex-MULTI 多点旋涡混合仪,上海沪析实业有限公司;BG-270 型隔水式恒温培养箱,上海博迅医疗生物仪器股份有限公司;电泳仪、电泳槽、凝胶成像系统,美国 Bio-Rad 公司;移液器、NanoDrop 2000 超微量分光光度仪,美国 Thermo Scientific 公司。

1.3 魔芋根际土壤 DNA 提取及 PCR 扩增

按照 FastDNA[®] Spin Kit for Soil 试剂盒操作步骤说明书提取各根际土壤样品的总 DNA,用 NanoDrop 2000 超微量分光光度仪检测所提取 DNA 的纯度和浓度,使用 1% 琼脂糖凝胶电泳检测其完整性。

以特异性引物 ITS-1 (5'-GGAAGTAAAAGTCGTAACAAGG-3') 和 ITS-2 (5'-GCTGCGT-TCTTCATCGATGC-3') 对各根际土壤样品的

ITS_V1 区域进行 PCR 扩增。PCR 反应体系 (25 μL): 总 DNA 1 μL , 2 \times Rapid Taq Master Mix 12.5 μL , 上下游引物各 1 μL , ddH₂O 9.5 μL 。PCR 反应程序: 95 $^{\circ}\text{C}$ 预变性 3 min; 95 $^{\circ}\text{C}$ 变性 25 s, 58 $^{\circ}\text{C}$ 退火 20 s, 72 $^{\circ}\text{C}$ 延伸 40 s, 共 30 个循环; 72 $^{\circ}\text{C}$ 延伸 10 min; 4 $^{\circ}\text{C}$ 保存。以 AMF 18S SSU rRNA 特异性引物 AMV4, 5NF (5'-AAGCTCGTAGTTGAATTTTCG-3') 和 AMDGR (5'-CCCAACTATCCCTATTAATCA-T-3')^[31] 对根际土壤样品的 18S_V4V5 区域进行 PCR 扩增。PCR 反应体系 (25 μL): 5 \times 反应缓冲液 5 μL , 5 \times GC 缓冲液 5 μL , dNTP 2 μL , 上下游引物各 1 μL , 总 DNA 1 μL , Q5 DNA 聚合酶 (NEB 公司) 0.25 μL , ddH₂O 9.75 μL 。PCR 反应程序: 98 $^{\circ}\text{C}$ 预变性 2 min; 98 $^{\circ}\text{C}$ 变性 15 s, 56 $^{\circ}\text{C}$ 退火 30 s, 72 $^{\circ}\text{C}$ 延伸 30 s, 共 30 个循环; 72 $^{\circ}\text{C}$ 延伸 10 min; 4 $^{\circ}\text{C}$ 保存。扩增产物用 1% 琼脂糖凝胶电泳检测, 按照 AxyPrep DNA 凝胶回收试剂盒说明书进行纯化, 合格的 PCR 产物送上海派森诺生物科技股份有限公司, 利用 Illumina NovaSeq 6000 平台进行测序。

1.4 数据处理与分析

使用 DADA2 法^[32] 对测序获得的魔芋根际土壤样品原始序列进行质控, 使用 Vsearch^[33] 软件 (v2.13.4, linux_x86_64) 的 fastq_mergepairs 模块拼接序列, 对相似度在 97% 以上的有效序列进行操作分类单元 (OTU) 聚类; 聚类优化序列在不同分类学水平上进行生物信息统计和多样性分析。采用非度量多维尺度分析 (non-metric multidimensional scaling analysis, NMDS) 检验真菌和 AMF 群落间

的差异^[34]。利用 Funguild^[35] 软件进行真菌功能分类, 为避免过度解读真菌功能类群, 去除置信度为“可能”(possible) 的等级, 保留“很可能”(probable) 和“极可能”(highly probable) 2 个等级。对于 Funguild (v1.0) 不能鉴定或鉴定为复合营养方式的群落统一归为“未定义”(undefined) 类群^[36]。

2 结果与分析

2.1 魔芋根际土壤真菌和 AMF 测序

魔芋根际土壤真菌和 AMF 测序结果表明, 9 个样品共获得 32 644 条真菌 ITS 基因有效序列 (NCBI SRA 数据库登录号: PRJNA907075, 各样本序列登录号: SAMN31952340—SAMN31952348), 序列平均长度 238 bp, 聚类得到 413 个真菌 OTU。9 个样品共获得 26 078 条 AMF 有效序列 (NCBI SRA 数据库登录号: PRJNA907072, 各样本序列登录号: SAMN31952272—SAMN31952280), 序列平均长度 227 bp, 聚类得到 163 个 AMF-OTU。

利用韦恩图统计多个样品中共有和特有的物种数目, 展现不同样品中物种组成的相似性和重叠情况^[15]。刺槐与魔芋间作模式下, 根系不同分隔处理魔芋根际土壤中真菌、AMF 丰富度的统计结果如表 1 所示。由表 1 可知, 塑料膜分隔、尼龙网分隔和不分隔处理的魔芋根际土壤真菌 OTU 分别有 141, 120 和 152 个, 3 个处理共有 OTU 为 54 个; 塑料膜分隔、尼龙网分隔和不分隔处理的魔芋根际土壤 AMF 的 OTU 分别有 50, 55 和 58 个, 3 个处理共有 OTU 为 19 个。

表 1 根系不同分隔处理魔芋根际土壤中真菌、AMF 丰富度和多样性指数

Table 1 Species richness and diversity indices of AMF and fungi in the rhizosphere of konjac under different root separation modes

分类 Type	处理 Treatment	OTU 数目 OTUs	香农指数 Shannon index	Simpson 指数 Simpson index	Chao 1 指数 Chao 1 index
真菌 Fungi	F	141	2.90 \pm 0.17 b	0.77 \pm 0.06 a	122.36 \pm 8.73 c
	M	120	3.23 \pm 0.14 a	0.72 \pm 0.02 a	142.39 \pm 5.79 b
	N	152	3.16 \pm 0.20 a	0.73 \pm 0.06 a	154.97 \pm 7.65 a
AMF	F	50	1.68 \pm 0.29 b	0.90 \pm 0.03 a	18.74 \pm 3.28 b
	M	55	2.27 \pm 0.10 a	0.94 \pm 0.06 a	27.67 \pm 2.22 a
	N	58	2.34 \pm 0.24 a	0.94 \pm 0.05 a	28.21 \pm 1.80 a

注: F. 塑料膜分隔; M. 尼龙网分隔; N. 不分隔。同列数据后标不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: F. Film separation; M. Mesh separation; N. Non-separation. Different lowercase letters after the same column of data indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$).

2.2 魔芋根际土壤真菌和 AMF 的 Alpha 多样性

从表 1 可以看出, 尼龙网分隔和不分隔处理下魔芋根际土壤中真菌和 AMF 的 Chao 1 指数及 Shannon 指数均显著高于塑料膜分隔处理; 3 个处

理魔芋根际土壤真菌和 AMF 的 Simpson 指数均差异不显著。

2.3 魔芋根际土壤真菌的群落组成

所有处理土壤样品聚类共得到 413 个魔芋根际

土壤真菌 OTU,经鉴定为 167 种真菌,隶属 9 门 25 纲 53 目 102 科 155 属。

2.3.1 门水平 根系不同分隔处理下,魔芋根际土壤真菌在门水平的相对丰度如图 2 所示。由图 2 可知,在门水平上,所有分隔处理下魔芋根际土壤中真菌的优势门均为子囊菌门(Ascomycota),其相对丰度在不同分隔处理间差异较小,在塑料膜分隔、尼龙

网分隔和不分隔处理下魔芋根际土壤中的相对丰度分别为 92.3%,92.9%和 93.9%。担子菌门(Basidiomycota)、被孢霉门(Mortierellomycota)、捕虫霉门(Zoopagomycota)、罗兹菌门(Rozellomycota)、毛霉菌门(Mucoromycota)和壶菌门(Chytridiomycota)等其他真菌的相对丰度均低于 1.0%。

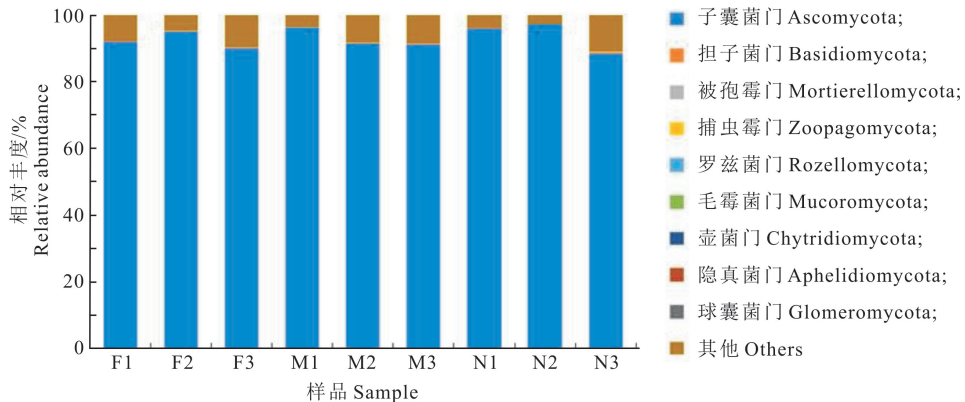


Fig. 2 Relative abundance of fungal phyla in konjac rhizosphere soil under different partition treatments

F. Film separation; M. Mesh separation; N. Non-separation. F1, F2, F3 are three soil samples obtained by film separation, and so on. Fig. 3-6 are the same.

图 2 不同分隔处理下魔芋根际土壤真菌在门水平的相对丰度

2.3.2 属水平 根系不同分隔处理下,魔芋根际土壤真菌在属水平的相对丰度如图 3 所示。由图 3 可知,在属水平上,塑料膜分隔处理下魔芋根际土壤中的真菌主要包括瓶毛壳属(*Lophotrichus*)、镰刀菌属(*Fusarium*)、*Chlamydomyces* 和枝葡萄孢属(*Botryotrichum*),其相对丰度分别为 72.02%,7.98%,5.21%和 1.92%;尼龙网分隔处理下魔芋根际土壤中的真菌主要包括瓶毛壳属、镰刀菌属、枝

葡萄孢属、*Chlamydomyces*、*Gymnostellatospora* 和 *Sodiomyces*,其相对丰度分别为 70.95%,4.37%,3.13%,3.26%,2.63%和 2.50%;不分隔处理下魔芋根际土壤中的真菌主要包括瓶毛壳属、镰刀菌属、枝葡萄孢属、*Gymnostellatospora*、节丛孢属和 *Chlamydomyces*,其相对丰度分别为 75.65%,5.65%,2.48%,1.65%,1.24%和 1.09%。

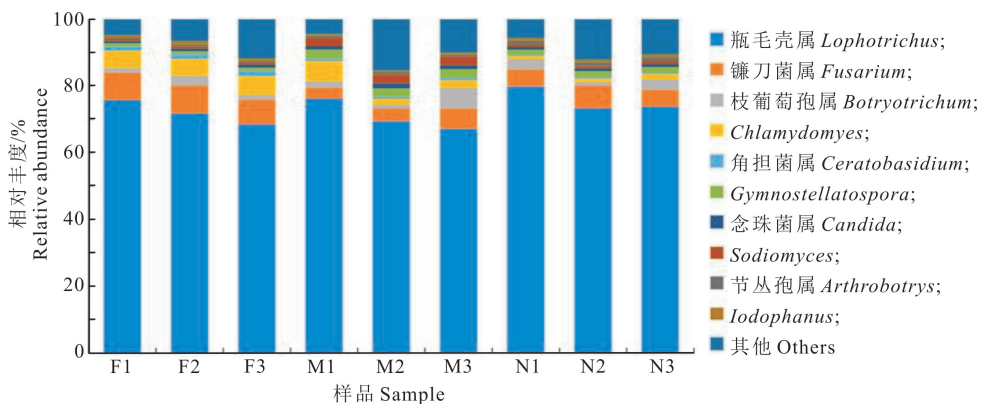


图 3 不同分隔处理下魔芋根际土壤真菌在属水平的相对丰度

Fig. 3 Relative abundance at fungal genus level in konjac rhizosphere soil under different partition treatments

2.3.3 种水平 由图 4 可知,在种水平上,塑料膜分隔处理下魔芋根际土壤真菌中的优势种有 *Loph-*

otrichus fimeti、腐皮镰刀菌(*Fusarium solani*)、*Ceratobasidium cornigerum*、大双孢土赤壳(*Ily-*

onectria macrodidyma)、*Botryotrichum atrogriseum*、热带念珠菌(*Candida tropicalis*)和 *Ceratobasidium ramicola*, 其相对丰度分别为 63.15%, 7.25%, 5.72%, 4.74%, 3.92%, 3.09% 和 0.77%; 尼龙网分隔处理下魔芋根际土壤真菌中的优势种为 *Lophotrichus fimeti*、轮状镰刀菌(*Fusarium nematophilum*)、热带念珠菌、腐皮镰刀菌、*Botryotrichum atrogriseum* 和 *Sodiomyces magadii*, 其相对

丰度分别为 65.62%, 7.68%, 5.74%, 3.14%, 3.12% 和 2.50%; 不分隔处理下魔芋根际土壤真菌中的优势种为 *Lophotrichus fimeti*、轮状镰刀菌、热带念珠菌、*Botryotrichum atrogriseum*、腐皮镰刀菌和 *Gymnostellatospora japonica*, 其相对丰度分别为 64.65%, 11.67%, 5.72%, 2.48%, 2.08% 和 1.65%。

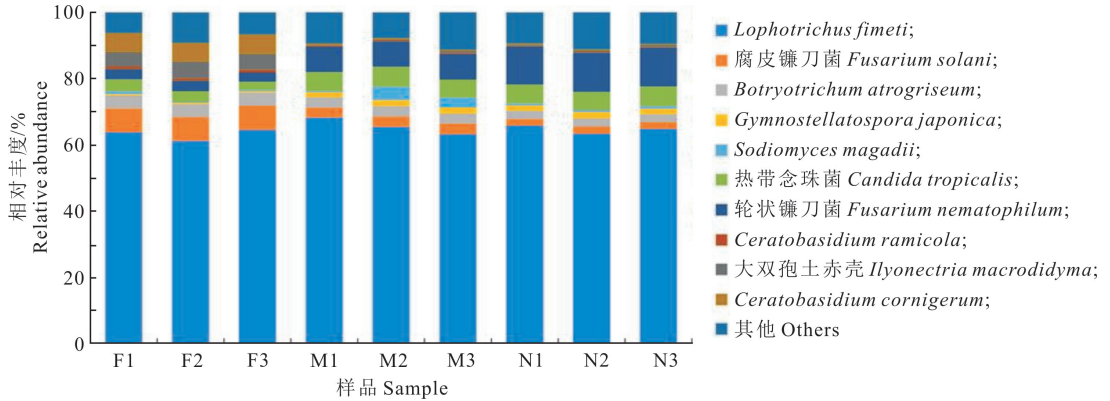


图 4 不同分隔处理下魔芋根际土壤真菌在种水平的相对丰度

Fig. 4 Relative abundance at fungal species level in konjac rhizosphere soil under different partition treatments

2.4 魔芋根际土壤 AMF 的群落组成

所有处理土壤样品聚类共得到 AMF-OTU 163 个, 经鉴定为 16 种 AMF, 隶属 1 门 3 纲 4 目 6 科 7 属。

2.4.1 属水平 由图 5 可知, 在属水平上, 不同分隔处理下魔芋根际土壤中 AMF 的优势属均为球囊霉属(*Glomus*)和类球囊霉属(*Paraglomus*)。但不

同样品间 AMF 的种群分布也存在差异, 其中类球囊霉属在塑料膜分隔、尼龙网分隔和不分隔处理魔芋根际土壤中的相对丰度分别为 6.99%, 3.78% 和 9.72%; 球囊霉属在塑料膜分隔、尼龙网分隔和不分隔处理魔芋根际土壤中的相对丰度分别为 32.97%, 32.23% 和 18.57%。

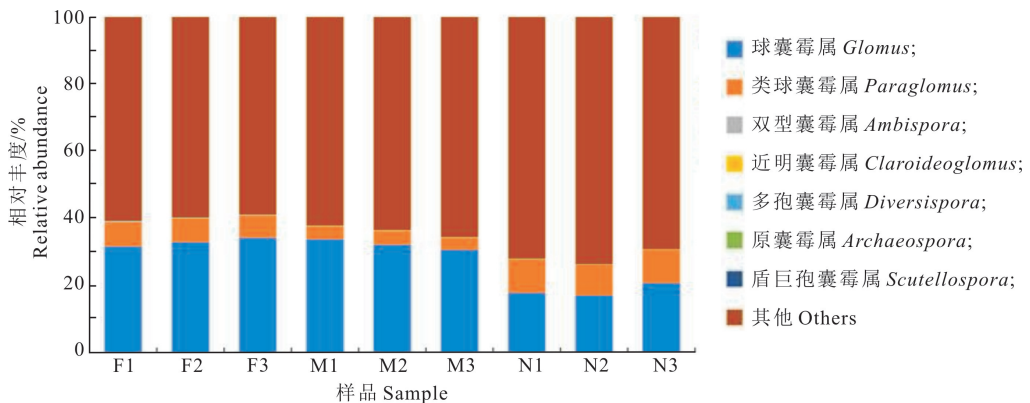


图 5 不同分隔处理下魔芋根际土壤 AMF 在属水平的相对丰度

Fig. 5 Relative abundance at AMF genus level in konjac rhizosphere soil under different partition treatments

2.4.2 种水平 由图 6 可知, 在种水平上, 不同分隔处理下魔芋根际土壤中 AMF 优势种分别为类球囊霉 *Paraglomus_Alguacil_12a_Para_1_VTX00348* 和 *Paraglomus_Glom_1B.13_VTX00308*, 均为 MAARJAM 数据库中收录的 AMF 虚拟种(virtual

taxa, VT)。其中类球囊霉 *Paraglomus_Alguacil_12a_Para_1_VTX00348* 在塑料膜分隔、尼龙网分隔和不分隔处理魔芋根际土壤中的相对丰度分别是 1.79%, 0.99% 和 0.99%; 类球囊霉 *Paraglomus_Glom_1B.13_VTX00308* 在塑料膜分隔、尼龙网分隔和不分

隔处理魔芋根际土壤中的相对丰度分别是 0.84%，1.24%和 1.54%。此外还有大量未鉴定的 AMF。

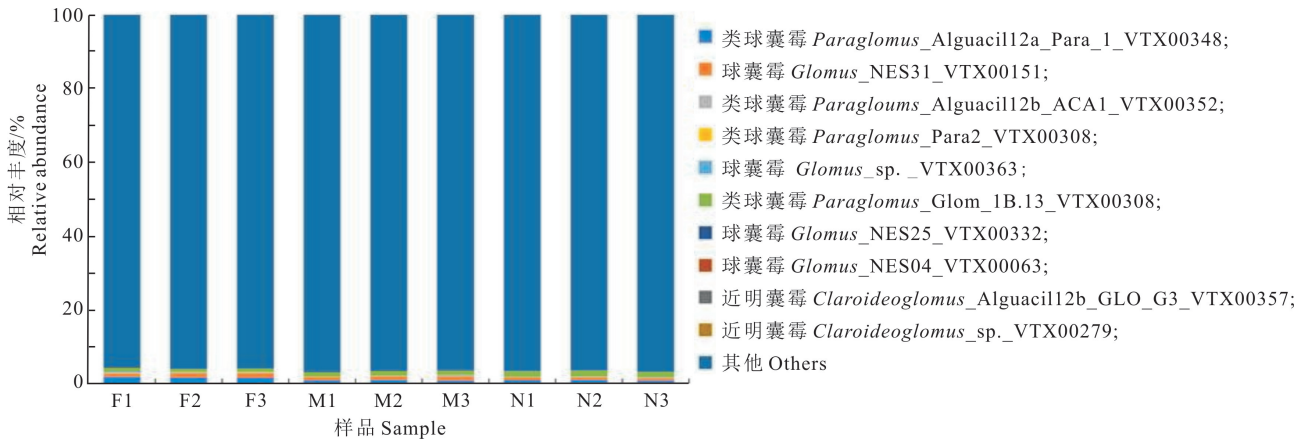


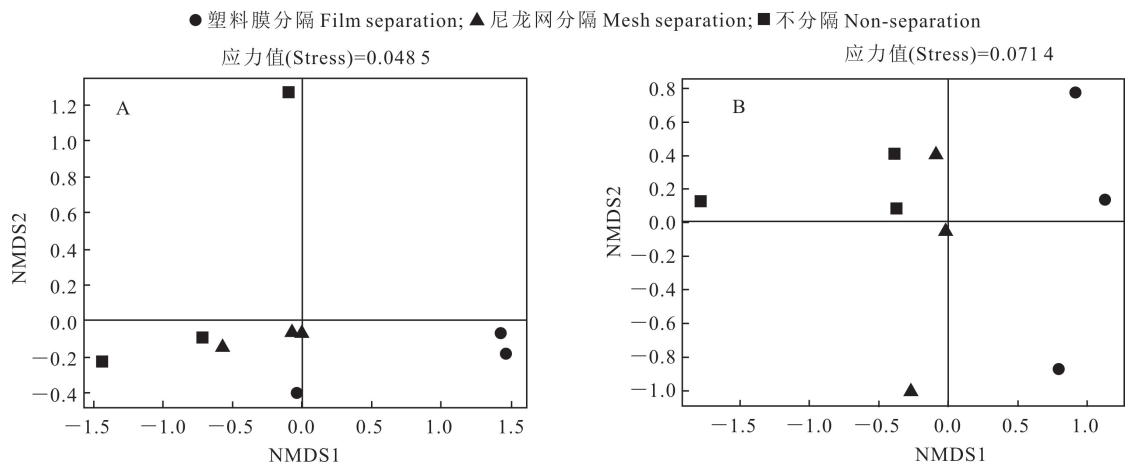
图 6 不同分隔处理下魔芋根际土壤 AMF 在种水平的相对丰度

Fig. 6 Relative abundance at AMF species level in konjac rhizosphere soil under different partition treatments

2.5 魔芋根际土壤真菌和 AMF 的 Beta 多样性

采用非度量多维尺度分析(NMDS)进一步探究不同分隔处理对魔芋根际土壤真菌和 AMF 群落结构的影响。结果(图 7)表明,在塑料膜分隔、尼龙网

分隔和不分隔处理下,魔芋根际土壤中的真菌和 AMF 群落组成均存在差异,且 NMDS 结果的应力值(Stress)分别为 0.048 5 和 0.071 4,均小于 0.2,表明该分析结果具有可靠性。



当应力值(Stress) < 0.2 时,表示 NMDS 分析具有可靠性。坐标图中各样本间的距离越近,说明样本间的相似性越高;距离越远,说明样本间的差异越大。

When Stress < 0.2 , it indicates that the NMDS analysis is reliable. The closer the distance between samples in the coordinate graph, the higher the similarity between the samples. The farther the distance, the greater the difference between the samples.

图 7 基于 Bray-Curtis 距离的魔芋根际土壤真菌(A)和 AMF (B)群落的非度量多维尺度分析

Fig. 7 Result of non-metric multidimensional scaling ordination biplots based on Bray-Curtis similarities of fungal (A) and AMF (B) communities in the rhizosphere soil of konjac

2.6 魔芋根际土壤真菌的功能预测

由表 2 可知,不同分隔处理下魔芋根际土壤真菌的营养类型分为共生营养型、腐生营养型和病理营养型等类群。从不同营养型真菌的相对丰度来看,不同分隔处理下魔芋根际真菌均以腐生营养型为主,其相对丰度为 41.52%~63.66%,且不分隔处理和尼龙网分隔处理下魔芋根际腐生营养型真菌

的相对丰度显著高于塑料膜分隔处理;不分隔处理和尼龙网分隔处理下魔芋根际土壤共生营养型真菌的相对丰度也显著高于塑料膜分隔处理,说明刺槐与魔芋根系交互有利于共生营养型真菌的生长;病理营养型真菌在塑料膜分隔处理下的相对丰度(14.31%)显著高于其他处理,说明单作容易造成病理营养型真菌在魔芋根际富集。

表 2 根系不同分隔处理下魔芋根际真菌功能分类与相对丰度

Table 2 Functional groups and relative abundance of fungi in the rhizosphere of konjac under different root separation modes

营养类型 Trophic mode	功能群 Guild	相对丰度/% Relative abundance		
		F	M	N
共生营养型 Symbiotroph	内生真菌 Endophyte fungi	1.53±0.08 c	2.46±0.11 b	3.01±0.01 a
	外生真菌 Ectomycorrhizal fungi	1.62±0.06 c	3.44±0.17 b	4.92±0.06 a
	小计 Total	3.14±0.02 c	5.90±0.24 b	7.93±0.06 a
腐生营养型 Saprotroph	木质腐生真菌 Wood saprotroph	1.24±0.05 c	2.84±0.01 b	6.63±0.01 a
	土壤腐生真菌 Soil saprotroph	1.41±0.12 c	2.06±0.02 b	3.85±0.03 a
	粪腐生真菌 Dung saprotroph	0.43±0.03 c	1.33±0.14 b	2.13±0.02 a
	未定义腐生真菌 Undefined saprotroph	38.45±2.01 b	50.30±2.12 a	51.05±1.61 a
	小计 Total	41.52±1.88 c	56.52±2.21 b	63.66±1.61 a
病理营养型 Pathotroph	植物病原菌 Plant pathogen	12.36±0.39 a	3.30±0.16 b	0.94±0.02 c
	动物病原菌 Animal pathogen	1.95±0.01 a	0.65±0.05 b	0.23±0.05 c
	小计 Total	14.31±0.40 a	3.95±0.14 b	1.17±0.04 c
其他 Other	未鉴定真菌 Unidentified fungi	41.03±1.63 a	33.63±2.18 b	27.24±1.58 c

注:同行数据后标不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters after peer data indicate significant differences between treatments ($P<0.05$).

从表 2 还可知,不同分隔处理下魔芋根际土壤真菌共有 8 个主要功能群,分别为内生真菌、外生真菌、木质腐生真菌、土壤腐生真菌、粪腐生真菌、未定义腐生真菌、植物病原菌和动物病原菌,其中未定义腐生真菌的相对丰度最大,为 38.45%~51.05%。不同分隔处理下魔芋根际土壤中的内生真菌、外生真菌、木质腐生真菌、土壤腐生真菌、粪腐生真菌的相对丰度均依次表现为不分隔处理>尼龙网分隔处理>塑料膜分隔处理,说明共生营养型和腐生营养型真菌更容易在不分隔的完全间作魔芋根际生长,其次为有水分、养分和信息等的交换的尼龙网分隔间作魔芋根际;塑料膜分隔处理下魔芋根际土壤中植物病原菌(相对丰度为 12.36%)、动物病原菌(相对丰度为 1.95%)的相对丰度显著高于其他处理,说明植物病原菌和动物病原菌更容易在单作魔芋根际富集。

3 讨论

3.1 根系分隔方式对魔芋根际土壤真菌多样性与优势菌类群的影响

本研究利用高通量测序技术探究了与刺槐不同程度分隔处理下魔芋根际土壤真菌的群落组成及其功能特性,为深入认识刺槐与魔芋种间互作的根际微生物机制提供理论依据。试验结果表明,与塑料膜分隔处理相比,尼龙网分隔和不分隔处理下魔芋根际土壤真菌和 AMF 物种的多样性更高。该结果与大多数作物间作提高根际微生物多样性的研究结论^[37]吻合。一方面,间作作物归还土壤的有机底物数量和多样性增加,从而需要更多的微生物物种来

降解不同的有机底物;另一方面,尼龙网分隔处理虽导致不同作物根系之间无交互作用,但水分、养分和小分子根系分泌物可以交互流动,菌根菌丝也可以通过;不分隔时,魔芋与刺槐根系交互重叠,菌根感染率升高,二者根系互作可能改变根际微环境,从而提高真菌的多样性^[38]。

优势菌影响微生物群落的组成及结构,是决定微生物群落平衡的重要因素^[39]。在种水平上,不同分隔方式下魔芋根际土壤真菌在优势种的组成上具有一定差异性。其中,塑料膜分隔处理下,魔芋根际真菌优势种腐皮镰刀菌、*Ceratobasidium ramicola*、*Ceratobasidium cornigerum* 和大双孢土赤壳的相对丰度明显高于其他处理。已有研究表明,在自然界广泛分布的致病真菌——腐皮镰刀菌能够引起根腐、茎基腐、茎腐、穗腐和花腐等一系列植物腐烂病害^[40]。本课题组前期研究发现,从魔芋软腐病株根际分离的腐皮镰刀菌具有致病性和化感抑制活性,是魔芋软腐病发生时的复合侵染有害菌之一^[41]。本研究表明,间作降低了魔芋根际土壤中腐皮镰刀菌的丰度,这与间作刺槐可以改善魔芋生态环境及功能密切相关^[4]。塑料膜分隔处理下魔芋根际还存在优势菌 *Ceratobasidium ramicola*,该致病性真菌对林木和园艺作物会造成不同程度的为害^[42-43]。大量研究表明,*Ceratobasidium cornigerum* 是世界性土传病害——小麦纹枯病的病原菌^[44-45];大双孢土赤壳是草莓^[46]、鳄梨^[47]根腐病的病原菌,尤其土赤壳属 (*Ilyonectria* spp.) 真菌会导致苹果茎腐病^[48]、高丽参锈腐病^[49]、猕猴桃根腐病^[50]等多种作物病害的发生。目前尚无上述 3 种致病菌引起魔芋

病害的相关报道,其对魔芋生长的影响尚待进一步研究。

在不分隔间作条件下,魔芋根际土壤中的优势真菌为轮状镰刀菌和热带念珠菌。闫思远等^[51]研究发现,轮状镰刀菌可促进枸杞植株生长,该菌株产生的挥发性物质对枸杞胶孢炭疽菌(*Colletotrichum gloeosporioides*)具有较强的抑制作用^[52]。AM-PRAYN 等^[53]研究表明,施用热带念珠菌商业生物肥料可以促进水稻生长,提高水稻的产量与营养品质。轮状镰刀菌和热带念珠菌是间作魔芋根际的优势菌,推测这两种菌的富集对维持间作魔芋健康生长发挥了重要作用。

3.2 根系分隔方式对魔芋根际真菌功能的影响

利用 Funguild 软件对魔芋根际真菌进行功能预测,结果表明尼龙网分隔和不分隔处理下魔芋根际共生营养型真菌的相对丰度显著高于塑料膜分隔处理,说明间作更有利于共生营养型真菌的生长。本课题组前期研究发现,与根系共生的丛枝菌根真菌丰富度、多样性指数与魔芋软腐病发生率和病情指数呈显著负相关^[54]。接种丛枝菌根真菌的根内根生囊霉(*Rhizophagus irregularis*)菌剂可以促进魔芋生长,并能增强魔芋软腐病的防治效果^[55]。大量研究也表明,共生营养型真菌可能在改善作物营养,提高作物抵御生物和非生物胁迫方面发挥着重要作用^[56-57]。由此可见,与单作相比,魔芋与刺槐间作更有益于魔芋及其共生营养型真菌的生长。与此同时,塑料膜分隔处理下魔芋根际土壤中病理营养型真菌(植物病原菌和动物病原菌)的相对丰度显著高于其他处理。病理营养型真菌从宿主植物获取养分,表明植物根际的病理营养型真菌对宿主生长有负面影响^[58-59]。塑料膜分隔的单作处理会导致魔芋根际富集更多的植物病原菌和动物病原菌,对魔芋生长存在潜在的危害。此外,腐生营养型真菌的相对丰度在不同分隔处理下也不同,在不分隔的魔芋根际土壤中木质腐生真菌、土壤腐生真菌和粪腐生真菌较多。但绝大多数腐生真菌的功能目前未得到解析,还有待后续进一步深入研究。

4 结 论

采用高通量测序技术,分析了与刺槐根系不同分隔方式下魔芋根际土壤真菌的群落组成及其功能,主要得到以下结论:

1) 与塑料膜分隔处理相比,尼龙网分隔和不分隔处理明显提高了魔芋根际土壤中真菌和 AMF 的

多样性。

2) 根系不同分隔方式下魔芋根际土壤中的优势真菌门为子囊菌门,优势属为瓶毛壳属、镰刀菌属、球囊霉属和类球囊霉属。不分隔处理的间作魔芋根际潜在的有害真菌腐皮镰刀菌、*Ceratobasidium ramicola*、*Ceratobasidium cornigerum* 和大双孢土赤壳的相对丰度较低,潜在的有益真菌轮状镰刀菌和热带念珠菌的富集可能对维持间作魔芋健康生长发挥了重要作用。

3) 与塑料膜分隔处理相比,尼龙网分隔和不分隔处理显著提高了魔芋根际土壤中共生营养型和腐生营养型真菌的相对丰度,显著降低了病理型真菌的相对丰度。

[参考文献]

- [1] GAO Y, ZHANG Y N, FENG C, et al. A chromosome-level genome assembly of *Amorphophallus konjac* provides insights into konjac glucomannan biosynthesis [J]. Computational and Structural Biotechnology Journal, 2022, 20: 1002-1011.
- [2] BEHERA S S, RAY R C. Konjac glucomannan, a promising polysaccharide of *Amorphophallus konjac* K. Koch in health care [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 92: 942-956.
- [3] DU Q W, LIU J H, DING Y T. Recent progress in biological activities and health benefits of konjac glucomannan and its derivatives [J]. Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre, 2021, 26: 100270.
- [4] 何斐, 张忠良, 崔鸣, 等. 生防放线菌剂对魔芋根域微生物区系的影响 [J]. 应用与环境生物学报, 2015, 21(2): 221-227.
HE F, ZHANG Z L, CUI M, et al. Effect of biocontrol actinomycetes agents on microflora in the root-zone of *Amorphophallus konjac* K. Koch ex N. E. Br [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2015, 21(2): 221-227.
- [5] 邵梅, 杜魏甫, 许永超, 等. 魔芋玉米间作魔芋根际土壤尖孢镰孢菌和芽孢杆菌种群变化研究 [J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2014, 29(6): 828-833.
SHAO M, DU W F, XU Y C, et al. The population change of konjac's rhizosphere soil *Fusarium oxysporum* and *Bacillus* spp. in intercropping of konjac and maize system [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science Edition), 2014, 29(6): 828-833.
- [6] HE F. Response of root-associated bacterial communities to different degrees of soft rot damage in *Amorphophallus konjac* under a *Robinia pseudoacacia* plantation [J]. Frontiers in Microbiology, 2021, 12: 652758.
- [7] 袁淑娜, 潘剑, 黄坚雄, 等. 播期对胶园林下种植疣柄魔芋产量和品质的影响 [J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(11): 124-132.
YUAN S N, PAN J, HUANG J X, et al. Influence of sowing

- date on yield and quality of konjac (*Amorphophallus virosus*) intercropping in rubber plantation [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020, 22(11): 124-132.
- [8] 李珍,谢世清,徐文果,等. 套种于不同树龄橡胶林下谢君魔芋 (*Amorphophallus xiei*) 的光合特性研究 [J]. 热带作物学报, 2016, 37(2): 241-246.
LI Z, XIE S Q, XU W G, et al. Photosynthetic characteristics of *Amorphophallus xiei* intercropped to rubber plantation with different ages [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2016, 37(2): 241-246.
- [9] 李南林. 光照对魔芋生长的影响研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2015.
LI N L. Effects of light on growth of *Amorphophallus virosus* [D]. Chongqing: Southwest University, 2015.
- [10] 张忠良,刘列平,郑敏. 刺槐林下魔芋抗病栽培技术 [J]. 北方园艺, 2012(13): 148-150.
ZHANG Z L, LIU L P, ZHENG M. Cultivation techniques of *Amorphophallus rivieri* under *Robinia pseudoacacia* forest [J]. Northern Horticulture, 2012(13): 148-150.
- [11] 何斐,张忠良,刘列平,等. 刺槐林魔芋健康高产的土壤微生态机制 [J]. 西北植物学报, 2015, 35(2): 364-372.
HE F, ZHANG Z L, LIU L P, et al. Microecological mechanism for healthy growth and higher yield of *Amorphophallus konjac* under acacia forest [J]. Acta Botanica Sinica-Occidentalia Sinica, 2015, 35(2): 364-372.
- [12] 和军,魏凌云,周立军. 间作方式与林地类型对魔芋病害及产量的影响 [J]. 陕西林业科技, 2012(3): 37-38, 41.
HE J, WEI L Y, ZHOU L J. Effect of intercropping pattern and woodland type on konjac disease and yield [J]. Shaanxi Forest Science and Technology, 2012(3): 37-38, 41.
- [13] 张红骥,邵梅,杜鹏,等. 云南省魔芋与玉米多样性栽培控制魔芋软腐病 [J]. 生态学杂志, 2012, 31(2): 332-336.
ZHANG H J, SHAO M, DU P, et al. Effects of diversity cultivation of konjac and maize in controlling konjac's soft rot disease in Yunnan Province, Southwest China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(2): 332-336.
- [14] 周兴炳. 不同种植模式对佛坪县魔芋产量、品质及其综合效益的影响 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
ZHOU X B. Effects of different planting patterns on the yield, quality and comprehensive benefits of *Amorphophallus konjac* in Foping County [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2019.
- [15] ZACHOW C, BERG C, MÜLLER H, et al. Fungal diversity in the rhizosphere of endemic plant species of Tenerife (Canary Islands): relationship to vegetation zones and environmental factors [J]. The ISME Journal, 2009, 3(1): 79-92.
- [16] 蒙盼盼,冯欢,陈伟,等. 椴树实生苗和嫁接苗根相关真菌群落结构和多样性 [J]. 菌物学报, 2021, 40(8): 1965-1979.
MENG P P, FENG H, CHEN W, et al. Community structure and diversity of root-associated fungi of *Catalpa bungei* seedlings and grafted seedlings [J]. Mycosystema, 2021, 40(8): 1965-1979.
- [17] ZUBEK S, KAPUSTA P, ROŽEK K, et al. Fungal root colonization and arbuscular mycorrhizal fungi diversity in soils of grasslands with different mowing intensities [J]. Applied Soil Ecology, 2022, 172: 104358.
- [18] WU Q S, LI G H, ZOU Y N. Roles of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and nutrient acquisition of peach (*Prunus persica* L. Batsch) seedlings [J]. The Journal of Animal & Plant Sciences, 2011, 21(4): 746-750.
- [19] SCHÜTZ L, SAHARAN K, MÄDER P, et al. Rate of hyphal spread of arbuscular mycorrhizal fungi from pigeon pea to finger millet and their contribution to plant growth and nutrient uptake in experimental microcosms [J]. Applied Soil Ecology, 2022, 169: 104156.
- [20] SHAO Y D, ZHANG D J, HU X C, et al. Mycorrhiza-induced changes in root growth and nutrient absorption of tea plants [J]. Plant, Soil and Environment, 2018, 64(6): 283-289.
- [21] HAMEDANI N G, GHOLAMHOSEINI M, BAZRAFSHAN F, et al. Yield, irrigation water productivity and nutrient uptake of arbuscular mycorrhiza inoculated sesame under drought stress conditions [J]. Agricultural Water Management, 2022, 266: 107569.
- [22] 周贤玉,唐艺玲,王志国,等. 减量施氮与间作模式对甜玉米 AMF 侵染和大豆结瘤及作物氮磷吸收的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(8): 1139-1146.
ZHOU X Y, TANG Y L, WANG Z G, et al. Effects of reduced nitrogen application and intercropping on sweet corn AMF colonization, soybean nodulation and nitrogen and phosphorus absorption [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(8): 1139-1146.
- [23] BAINARD L D, KOCH A M, GORDON A M, et al. Temporal and compositional differences of arbuscular mycorrhizal fungal communities in conventional monocropping and tree-based intercropping systems [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 45: 172-180.
- [24] 胡国彬,董坤,董艳,等. 小麦与蚕豆间作对根际真菌代谢功能多样性的影响 [J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 926-933.
HU G B, DONG K, DONG Y, et al. Effects of intercropping of wheat and broad bean on diversity of metabolic function of rhizosphere fungal community [J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(4): 926-933.
- [25] 常换换,苏友波,范茂攀,等. 玉米间作大豆对根际微生物群落功能和结构的影响 [J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2022, 37(2): 336-343.
CHANG H H, SU Y B, FAN M P, et al. Effects of maize and soybean intercropping on the function and structure of rhizosphere microbial community [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science Edition), 2022, 37(2): 336-343.
- [26] 陈智裕,马静,赖华燕,等. 植物根系对根际微环境扰动机制研究进展 [J]. 生态学杂志, 2017, 36(2): 524-529.
CHEN Z Y, MA J, LAI H Y, et al. Research advances in the mechanisms of plant root systems disturbance in rhizosphere micro-environment [J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36

- (2);524-529.
- [27] 李博,高钰琪,李艳,等.不同林下魔芋土壤养分差异比较研究[J].安康学院学报,2019,31(2):90-93.
LI B,GAO Y Q,LI Y,et al.Comparative study on soil nutrient differences of konjac under different forests [J].Journal of Ankang University,2019,31(2):90-93.
- [28] 赵秀芬,房增国,吕世华,等.根系不同分隔方式下油菜和鹰嘴豆对小麦锰营养的影响[J].华北农学报,2009,24(6):133-137.
ZHAO X F,FANG Z G,LÜ S H,et al.Effects of rapeseed and chickpea on Mn nutrition of wheat under different root barrier patterns [J].Acta Agriculturae Boreali-Sinica,2009,24(6):133-137.
- [29] 刘英超,肖靖秀,汤利,等.施氮对不同分隔方式间作蚕豆根系分泌柚皮素的影响[J].植物生理学报,2017,53(6):1097-1103.
LIU Y C,XIAO J X,TANG L,et al.Effects of nitrogen application rate on the naringenin exudation from intercropped broad bean's roots in different separation patterns [J].Plant Physiology Journal,2017,53(6):1097-1103.
- [30] 李颖,陈敬龙,段华泰,等.工业和农业污染稻田土壤重金属的赋存形态及水稻吸收运移比较[J].土壤通报,2022,53(1):204-212.
LI H,CHEN J L,DUAN H T,et al.Comparison of the forms of heavy metals and the absorption and transport by rice between industrial and agricultural contaminated paddy soils [J].Chinese Journal of Soil Science,2022,53(1):204-212.
- [31] VAN GEEL M,BUSSCHAERT P,HONNAY O,et al.Evaluation of six primer pairs targeting the nuclear rRNA operon for characterization of arbuscular mycorrhizal fungal (AMF) communities using 454 pyrosequencing [J].Journal of Microbiological Methods,2014,106:93-100.
- [32] CALLAHAN B J,MCMURDIE P J,ROSEN M J,et al.DADA2:high-resolution sample inference from Illumina amplicon data [J].Nature Methods,2016,13(7):581-583.
- [33] ROGNES T,FLOURI T,NICHOLS B,et al.VSEARCH: a versatile open source tool for metagenomics [J].Peer J,2016,4(10):e2584.
- [34] DRAY S,DUFOUR A B.The ade4 package:implementing the duality diagram for ecologists [J].Journal of Statistical Software,2007,22(4):1-20.
- [35] NGUYEN N H,SONG Z W,BATES S T,et al.Funguild:an open annotation tool for parsing fungal community datasets by ecological guild [J].Fungal Ecology,2016,20(1):241-248.
- [36] 聂三安,王祎,雷秀美,等.黄泥田土壤真菌群落结构和功能类群组成对施肥的响应[J].应用生态学报,2018,29(8):2721-2729.
NIE S A,WANG Y,LEI X M,et al.Responses of fungal community structure and functional group to fertilization in yellow clayey soil [J].Chinese Journal of Applied Ecology,2018,29(8):2721-2729.
- [37] 郑亚强,杜广祖,李亦菲,等.间作甘蔗对玉米根际微生物功能多样性的影响[J].生态学杂志,2018,37(7):2013-2019.
ZHENG Y Q,DU G Z,LI Y F,et al.Effects of intercropping sugarcane on functional diversity of maize rhizosphere microorganisms [J].Chinese Journal of Ecology,2018,37(7):2013-2019.
- [38] 汪雪,刘晓静,赵雅姣,等.根系分隔方式下紫花苜蓿/燕麦间作氮素利用及种间互馈特征研究[J].草业学报,2021,30(8):73-85.
WANG X,LIU X J,ZHAO Y J,et al.Nitrogen utilization and interspecific feedback characteristics of intercropped alfalfa/oat with different root barriers [J].Acta Prataculturae Sinica,2021,30(8):73-85.
- [39] WICAKSONO W A,MORAUF C,MÜLLER H,et al.The mature phyllosphere microbiome of grapevine is associated with resistance against *Plasmopara viticola* [J].Frontiers in Microbiology,2023,14:1149307.
- [40] 王江来,张锦锋,马金秀,等.香芹酚和丁香酚对腐皮镰刀菌的抑菌活性及抑菌机理[J].微生物学通报,2022,49(5):1638-1650.
WANG J L,ZHANG J F,MA J X,et al.Antagonistic activity and defense mechanism of carvacrol and eugenol against *Fusarium solani* [J].Microbiology China,2022,49(5):1638-1650.
- [41] 何斐,张忠良,崔鸣,等.魔芋根域优势真菌鉴定和化感作用及其生防放线菌的筛选[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(4):157-167.
HE F,ZHANG Z L,CUI M,et al.Identification and allelopathic effect of dominant fungi in root-zone of *Amorphophallus konjac* and screening of the bio-control actinomycetes [J].Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition),2016,44(4):157-167.
- [42] SAMUELS G J,ISMAIEL A,ROSMANA A,et al.Vascular streak dieback of cacao in Southeast Asia and Melanesia:in planta detection of the pathogen and a new taxonomy [J].Fungal Biology,2012,116(1):11-23.
- [43] FIRMANSYAH M A,ERFIANI E,JAYANEGARA A,et al.*In vitro* biological control of *Ceratobasidium ramicola* by using tannin extracts from *Acacia villosa*,*Myristica fragrans*,*Acacia mangium*, and *Calliandra calothyrsus* leaves [J].Brazilian Journal of Biology,2020,80(2):235-239.
- [44] 许贤,王永宏,刘霞,等.昆虫病原线虫共生菌筛选及其发酵液抑菌活性初步研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2006,34(7):50-54,60.
XU X,WANG Y H,LIU X,et al.Preliminary study on the inhibition activity of fermented liquid and screening of entomopathogenic nematodes symbiotic bacterium [J].Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition),2006,34(7):50-54,60.
- [45] 杨运华,石明旺,原丽,等.四株虫生真菌代谢产物对植物真菌性病害的抑制作用[J].湖北农业科学,2014,53(1):76-78.
YANG Y H,SHI M W,YUAN L,et al.Inhibitory effect of four entomogenous fungal metabolites against fungal diseases of plant [J].Hubei Agricultural Sciences,2014,53(1):76-78.

- [46] 申光辉,薛泉宏,赵娟.草莓土赤壳菌根腐病原鉴定及生物学特性 [J].西北农业学报,2018,27(7):1032-1040.
SHEN G H,XUE Q H,ZHAO J. Identification and biological characteristics of *Pathogeni ilyonectria* causing strawberry root rot (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2018, 27(7): 1032-1040.
- [47] VITALE A, AIELLO D, GUARNACCIA V, et al. First report of root rot caused by *Ilyonectria* (*Neonectria*) *macrodidyma* on avocado (*Persea americana*) in Italy [J]. Journal of Phytopathology, 2012, 160(3): 156-159.
- [48] TEWOLDEMEDHIN Y T, MAZZOLA M, MOSTERT L, et al. *Cylindrocarpum* species associated with apple tree roots in South Africa and their quantification using real-time PCR [J]. European Journal of Plant Pathology, 2011, 129(4): 637-651.
- [49] LEE C Y, KIM K Y, LEE J E, et al. Enzymes hydrolyzing structural components and ferrous ion cause rusty-root symptom on ginseng (*Panax ginseng*) [J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2011, 21(2): 192-196.
- [50] TÜRKKAN M. Evaluation of inhibitory effect of organic and inorganic salts against *Ilyonectria liriodendri*, the causal agent of root rot disease of kiwifruit [J]. Journal of Phytopathology, 2015, 163: 567-577.
- [51] 闫思远,杜娟,杨富龙,等. PEG 介导枸杞内生真菌 NQ8G II 4 遗传转化及转化子评价 [J]. 园艺学报, 2020, 47(12): 2385-2396.
YAN S Y, DU J, YANG F L, et al. Establishment of genetic transformation system of *Lycium barbarum* endophytic fungus *Fusarium nematophilum* NQ8G II 4 using PEG-mediated method and transformants evaluation [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2020, 47(12): 2385-2396.
- [52] 胡丽杰.宁夏枸杞深色有隔内生真菌的多样性及生防作用研究 [D]. 银川:宁夏大学,2019.
HU L J. Diversity and biological control of dark septate endophytic fungi from *Lycium barbarum* in Ningxia [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2019.
- [53] AMPRAYN K O, ROSE M T, KECSKÉS M, et al. Plant growth promoting characteristics of soil yeast (*Candida tropicalis* HY) and its effectiveness for promoting rice growth [J]. Applied Soil Ecology, 2012, 61: 295-299.
- [54] 何斐,田孝威,雷雨俊,等.连作花魔芋软腐病株与健株根域丛枝菌根真菌群落多样性 [J].微生物学报,2022,62(8):3092-3108.
HE F, TIAN S W, LEI Y J, et al. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in the root zone of *Amorphophallus konjac* with and without soft rot under continuous cropping [J]. Acta Microbiologica Sinica, 2022, 62(8): 3092-3108.
- [55] 何斐,雷雨俊,段园鹏,等.宿主和培养基质对根内根生囊霉菌剂扩繁的影响及菌根化魔芋栽培 [J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2023,51(3):84-92.
HE F, LEI Y J, DUAN Y P, et al. Effects of host and cultivating substrates on propagation of *Rhizophagus irregularis* and cultivation of *Amorphophallus konjac* with mycorrhization [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2023, 51(3): 84-92.
- [56] MOHAMED A H, ABD EL-Megeed F H, HASSANEIN N M, et al. Native rhizospheric and endophytic fungi as sustainable sources of plant growth promoting traits to improve wheat growth under low nitrogen input [J]. Journal of Fungi, 2022, 8(2): 94.
- [57] RADIC T, LIKAR M, HANCEVIC K, et al. Root-associated community composition and co-occurrence patterns of fungi in wild grapevine [J]. Fungal Ecology, 2021, 50(3): 101034.
- [58] KAUSHIK A, ROBERTS D P, RAMAPRASAD A, et al. Pangenome analysis of the soilborne fungal phytopathogen *Rhizoctonia solani* and development of a comprehensive web resource: RsolaniDB [J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 839524.
- [59] RAFIEL V, VÉLÉZ H, TZELEPIS G. The role of glycoside hydrolases in phytopathogenic fungi and oomycetes virulence [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22(17): 9359.

(责任编辑:陈丽)