

AMF对间套作体系中植物-土壤-微生物相互作用的影响及机制^{*}

贾琴宇^{1,2}, 刘 灵^{1,2**}, 黄庶识³

(1. 珍稀濒危动植物生态与环境保护教育部重点实验室, 广西桂林 541006; 2. 广西师范大学生命科学学院, 广西桂林 541006; 3. 广西科学院, 广西海洋天然产物与组合生物合成化学重点实验室, 广西南宁 530007)

摘要:丛枝菌根真菌(AMF)能与自然环境中的多数陆生植物互利共生。间套作种植作为增加农田生态系统生物多样性的措施,能显著提高植物对农田环境中多种资源的利用率。在间套作体系中,AMF通过对农作物和土壤环境的影响,提高农田生态系统的经济产量并促进其可持续发展。本文从AMF对宿主植物根系特征的影响、AMF对宿主植物根际微生物群落结构功能的影响、AMF在改善土壤结构提高土壤肥力方面的作用、菌根植物间共生菌丝网络的养分资源传递分配等方面,阐述AMF对间套作体系中植物-土壤-微生物相互作用的影响及其机制,为AMF在农业方面的进一步应用提供理论基础。

关键词:丛枝菌根真菌 间套作体系 土壤微生物 养分吸收 根系特征 共生菌丝网络

中图分类号:Q939.96 文献标识码:A 文章编号:1002-7378(2020)02-0193-07

DOI: 10.13657/j.cnki.gxkxyb.20200603.005

0 引言

进入21世纪以来,随着社会的飞速发展,人口过度增长、农耕面积不断缩小、土地退化等问题已然不可忽视。间套作种植作为缓解农业发展压力的一条生态型复合种植方式,通过错行种植两种及两种以上的作物,充分利用农田不同空间和时间的养分、水热、光照等资源,增加土地的复种指数,提高作物经济产量^[1-2]。据统计,20世纪90年代我国间套作种植面积达3300万hm²,间套作种植几乎遍布我国每一个

省份和地区^[3]。有研究表明,枣树、棉花间作增加35%的土地利用率,与枣树、棉花单作相比,经济产量均提高30%以上^[4]。作物、豆科间套作是广泛应用的种植模式,赵建华等^[5]研究表明,蚕豆、大豆和豌豆分别与玉米间作的土地当量比均大于1,其中大豆、玉米间作时玉米平均生长速率(采样期)、穗粒数和产量最高,且玉米相对大豆的资源竞争力随间作时间增加而逐渐升高。刘培等^[6]研究表明,甜玉米、大豆间作体系中持续4年减量施氮(300 kg·hm⁻²)不影响土壤有机质和全N、全P等养分含量,对甜玉米的产

* 国家自然科学基金(31860044)和广西自然科学基金面上项目(联合资助培育项目2018GXNSFAA138001)资助。

【作者简介】

贾琴宇(1995—),女,在读硕士研究生,主要从事微生物学研究。

【**通信作者】

刘 灵(1968—),女,副教授,主要从事植物生理与微生物生态学研究,E-mail:liuling@mailbox.gxnu.edu.cn。

【引用本文】

贾琴宇,刘灵,黄庶识. AMF对间套作体系中植物-土壤-微生物相互作用的影响及机制[J]. 广西科学院学报, 2020, 36(2): 193-199.

JIA Q Y, LIU L, HUANG S S. Effect of AMF on the Interaction between Plant Soil and Microbes in Intercropping System and Its Mechanism [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2020, 36(2): 193-199.

量稳定性没有显著影响。小麦、蚕豆(下文简称麦豆)间作体系中^[7],小麦感染全蚀病菌导致小麦地上部干重减少 31%,但补偿性地增加蚕豆地上部干重(增加 30.4%),体系生物量保持稳定。间套作可以减少土壤病虫害的发生与传播,有研究发现,玉米根组织中的门布和苯并噻唑能显著降低间作大豆疫霉孢子的萌发率和游动,使大豆疫霉根腐病的发生显著降低^[8]。可见间套作是提高产量、增加农民收入、降低化肥和农药使用量的重要措施。

丛枝菌根真菌(Arbuscular Mycorrhizal Fungi, AMF)可与陆地上 90%以上的开花植物建立共生关系,形成丛枝菌根^[9]。AMF 增强植物吸收土壤水分和 N、P 等养分的能力,且能提高植物的抗逆性及作物产量品质等^[10-11]。在干旱条件下小麦接种根内根孢囊霉(*Rhizophagus intraradices*, R. i),植株茎和籽粒的 N、P 含量显著增加,水分利用效率提高,小麦抗旱能力提高^[12]。棉花和异形根孢囊霉(*Rhizophagus irregularis*)共生时,植物体内的磷酸盐转运蛋白家族基因的表达量和 P 含量显著提高,促进棉花生长并大幅提高其产量^[13]。辣椒、菜豆间作并接种土著 AMF,两种农作物的生物量和 N 吸收量显著提高,且 N 吸收量与 AMF 的侵染率呈极显著正相关水平^[14]。AMF 侵染不同的植物根系形成共生菌丝网络(Common Mycorrhizal Network, CMN),可对养分等资源进行传递分配,调节植物间的竞争关系^[15]。玉米、大豆(下简称玉豆)间作并接种 AMF,一定程度上提高两种作物的 N 吸收量和含量,降低二者根际土壤的碱解 N 含量,其中对间作玉米 N 和 P 吸收能力的增强效应最大^[16-17]。可见,AMF 在农田生态系统(如间套作体系)中有很重要的作用。

1 AMF 在间套作体系中的作用

1.1 AMF 对植物根系特征的影响

根系是植物吸收水分和营养的重要器官,其形态特征影响植物地上部的生长发育。AMF 与植物共生改变根系特征,扩展根系吸收水分和养分的范围;AMF 菌丝比植物根系细长且菌丝内部无横隔,有助于植物摄取更多的水养分,促进植物生长发育^[18]。接种 AMF 可使麦豆间作体系中的小麦比根长和根密度显著增加^[19],玉米、绿豆间作体系中玉米的根长、直径、体积及面积显著增加并达到最大^[20]。玉豆间作系统中,大豆单接 AMF 处理的总根长、根表面积分别显著增加 68%、77%,玉米根系也有相似的增

加效应,两作物的根部 N、P 含量均显著增加^[21]。干旱环境中接种 AMF 能显著增加香蕉幼苗的根数、根干重,同时增加三叶橙的主根和一级、二级、三级侧根的根毛密度、长度(除主根外)和直径,扩大水分吸收范围,提高植物耐旱能力^[22-23]。可见,AMF 通过改变宿主植物根系特征,影响着植物的生长发育。

1.2 AMF 对植物根际微生物的影响

土壤微生物是土壤养分活化、传输、循环等的重要参与者,微生物数量、活性及群落结构的变化引起土壤肥力改变。AMF 侵染植物对其根际微生物群落结构及功能等产生影响;AMF 的菌丝及分泌物促进或抑制一些微生物生长,AMF 也能通过分泌球囊霉素、影响植物根系生长及形态等改变土壤微环境,间接影响植物根际微生物群落^[24-25]。同时,土壤微生物也影响 AMF 的繁殖,二者的相互作用影响植物的生长发育。

1.2.1 AMF 与土壤细菌

AMF 能与一些微生物如根际促生细菌(Plant Grow Promoting Rhizobacteria, PGPR)等相互促进,改变土壤环境,有利于宿主生长发育。其中能够与 AMF 产生协同增效作用的 PGPR 多为假单胞菌属和芽孢杆菌属^[26-27]。在模拟干旱条件下,双接种 AMF 和荧光假单胞菌并通过菌丝网络向小米(间作豌豆)传输水分,增加其茎和根的 N、P 含量,提高小米抗旱能力^[28]。根瘤菌(*Rhizobium*)是一类在土壤中常见的革兰氏阴性菌,能够与豆科植物和极少数非豆科植物共生。麦豆间作双接种 AMF 和根瘤菌处理的根瘤数明显大于单接根瘤菌或不接种处理,植物 P 吸收量显著提高^[29]。玉米、紫花苜蓿间作系统中,AMF、根瘤菌双接种处理的紫花苜蓿结瘤数和玉米根系 AMF 的侵染率最高,玉米生物量和 P 含量相比玉米单作均显著增加 30%以上^[30]。玉豆间作体系中,双接种处理的大豆的 AMF 的侵染率和根瘤数均达到最大,大豆固 N 效率提高,且向玉米的 N 转移量增加,最终表现出间作的产量优势^[31]。蚕豆双接种根瘤菌和 AMF 处理,与不接种处理对比,其叶面积比、豆荚和籽粒的重量等生产力参数显著提高^[32]。可见双接种 AMF 和根瘤菌能够协同促进作物生长,提高间作体系的产量。

AMF 的接种影响植物根际细菌数量和群落结构,提高土壤质量,促进作物生长。川梨三叶草间作体系中,川梨接种 AMF 后其根际土壤细菌和固氮菌数量增加,土壤有机质、全 K 和碱解 N 含量显著提

高,且这3种养分含量与细菌、固氮菌数量呈显著或极显著相关^[33]。金橘、大豆(下简称金豆)间作并接种AMF处理中,金橘根际土壤的细菌群落物种数大幅提高,土壤有机C含量和植株鲜重显著增加^[34]。Cd污染土壤中萝卜套种黑麦草并外施纳米氢氧化镁条件下,黑麦草接种摩西管柄囊霉(*Funneliformis mosseae*, F. m)处理的土壤细菌数量显著增加,土壤Cd含量下降,土壤环境得以改善^[35]。研究发现AMF孢子周围能富集一些特定的微生物群落(称孢子相关细菌),如放线菌属、芽孢杆菌属和根瘤菌属等。这些微生物可提高植物对土壤N、P养分利用率,并通过产生抗生素、铁载体等提高植物抗病性,与AMF共同促进植物生长^[36]。

1.2.2 AMF与土壤真菌

AMF侵染植物根系,能与一些有益真菌相互促进或抑制某些病原真菌的生长^[37]。如麦豆间作和水稻、西瓜间作体系中,接种AMF显著降低蚕豆和西瓜根际土壤的尖孢镰刀菌数量和真菌数量,使植物枯萎病的发病率减少^[38-39]。在番茄、黄瓜间作体系中,双接种AMF和尖孢镰刀菌处理降低尖孢镰刀菌的孢子发芽率,这可能由于双接种增加番茄根系分泌物中的柠檬酸和绿原酸含量所导致^[40]。在番茄分别与韭菜、罗勒间作体系中也发现,接种AMF抑制番茄根际的尖孢镰刀菌生长,使番茄枯萎病的病情严重程度分别下降70%和63%^[41]。接种AMF能通过改变土壤真菌数量来影响土壤环境,如在干旱条件下的金豆间作体系^[42]和西瓜连作土壤中间作胡椒的处理^[43]中,接种AMF使土壤真菌的数量减少,细菌和放线菌数量增加,土壤质量得以改善,促进植物生长。

1.2.3 AMF与土壤放线菌

AMF与土壤放线菌互作的研究相对较少。接种AMF能够通过改变土壤放线菌等微生物组成来改善土壤环境。如采煤沉陷区中间作种植向日葵和蚕豆,接种AMF处理增加0-20 cm土层的放线菌和真菌数量,其中对放线菌数量的增加效应最大,比不接种处理增加826%^[44]。马铃薯连作土壤中间作蚕豆或玉米,接种AMF处理均使马铃薯根际土壤放线菌比例上升^[45]。此外,接种AMF可与辣椒和茄子根际的共生放线菌(浑圆链霉菌、珊瑚链霉菌等)相互促进侵染,提高植物根系活力、光合性能,降低植株灰霉病的病情指数^[46]。

1.3 AMF对土壤结构和肥力的影响

AMF菌丝分泌的球囊霉素相关土壤蛋白(Glo-

malin-Related Soil Protein, GRSP)具有“超级胶水”功效,能增加土壤团聚体的数量并提高其结构稳定性,使土壤保持良好的通气性和保水能力^[47]。玉米与蚕豆、鹰嘴豆、大豆或油菜间作,通过增加AMF生物量间接促进土壤团聚体(>2 mm)形成^[48]。玉豆间作接种AMF增加作物根系土壤的菌丝密度和GRSP含量,有利于土壤水稳性团聚体形成,显著降低土壤渗漏、地表径流水中各形态N浓度,提高土壤保肥能力^[49]。GRSP是土壤C固定及循环的重要参与者,土壤总C、N含量的4%到5%由GRSP的C、N含量贡献;GRSP有利于土壤结构稳定,可减少土壤CO₂排放和C损失^[50]。在农田、半干旱生态系统或采煤沉陷区退化生态系统中,植物和AMF共生均可显著提高土壤有机C含量,促进土壤C固定^[51-52]。有研究表明,AMF在低P和中性pH土壤中对土壤酶活性的增加效应最强,能间接提高土壤养分的可利用性^[53]。在玉米-番薯间作体系中接种AMF处理,能显著增加土壤蛋白酶、脲酶、纤维二糖水解酶等活性,显著降低土壤铵态N含量^[54]。

1.4 AMF对植物养分吸收的影响

AMF通过改变根系特征、土壤养分及土壤微环境等影响植物养分吸收及生长发育。玉豆间作-施无机氮-接种AMF处理,大豆地上部及根部N吸收量均显著提高54%以上^[55]。玉米与大麦或箭筈豌豆间作体系中,特定的AMF分类群能提高玉米地上部Mn、Fe和Zn浓度,起主要作用的是虚拟种(Virtual taxa, VT)VTX00113, VT与具许多编码转运蛋白基因的AMF(*R. irregularis/intraradices*)类群相关^[56]。苜蓿、菜豆间作接种F. m处理,苜蓿的P、K、Fe和Zn浓度分别提高40, 524, 57和1.0 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{DW}$ ^[57]。

菌根植物间形成的共生菌丝网络(CMN),影响植物生长发育和植物种内、种间关系。玉豆间作体系中,玉米相对大豆具有竞争优势,接种幼套近明球囊霉(*Claroideoglossum etunicatum*, C. e)后,玉米相对大豆的种间竞争和N素营养竞争能力达到最大^[58]。骏枣、小麦间作体系中,CMN能明显提高小麦P含量和吸收P素能力^[59]。有学者采用量子点追踪技术研究证明,AMF可增加胡萝卜根系中P的分配量,降低自身贮藏的分配量,并通过CMN将P从丰富区转移到匮乏区^[60]。在玉米、狗尾草间作体系中接种AMF显著增强玉米生长和养分摄取能力,表明AMF可能抑制狗尾草(杂草)生长,对间作系统杂草

控制具有生态意义^[61]。有研究表明,间作体系中 AMF 也能通过降低优势植物的竞争力,调节种间关系,维持植物群落的相对平衡^[62]。

1.5 AMF 对植物抗逆性的影响

与 AMF 共生增加植物对土壤水分、养分等的利用率,改善土壤环境,提高植物对逆境的抵抗能力。在干旱条件下,木豆通过液压方式将底层水提升至干燥的表土,表层的小米通过 CMN 利用液压水,存活率提高^[63]。重金属污染环境,向日葵、香葱间作并接种 AMF 处理,可显著增强向日葵吸收重金属(Cu、Pb 和 Ni 等)能力,改善土壤环境,明显提高香葱的吸 P 水平和平均产量^[64]。有研究表明,在盐胁迫条件下,接种 AMF 可以促进宿主植物对 N、P、Zn 等矿质养分的吸收,减少植物体内 Na⁺ 和 Cl⁻ 的积累,阻止了由于盐离子含量过高而影响植物生长的代谢途径^[65-66]。在 Cd 污染土壤中间作番茄和黑麦草^[67],混合接种 AMF(F. m、C. e、R. i)处理,可降低番茄根、茎、叶和果实中的 Cd 浓度,通过透射电镜观察到其根尖细胞及液泡均较为完好,能观察到细胞核,且无任何杂质,说明该处理减轻重金属对番茄根尖细胞的伤害。

2 展望

AMF 能够与大多数植物建立共生关系。本文阐述 AMF 对间套作体系中植物-土壤-微生物相互作用的影响及其机制,即 AMF 能够通过改变宿主植物根系特征(扩大根系吸收水、养分范围等),影响宿主根际微生物组成及群落结构(如抑制一些植物病原菌的生长,或与一些根际有益微生物协同促进植物生长等);也能通过分泌球囊霉素、影响根际土壤酶活性等改善土壤结构,提高土壤肥力,最终增强植物养分吸收、生长发育及抗逆性。此外,菌根植物间通过共生菌丝网络传递分配养分等资源,调节了植物种间关系。不过,AMF 影响农作物生长的机制还需进一步探索和完善,合理利用 AMF 将对作物的生长和产量产生重大影响。

目前关于 AMF 对间套作体系作物生长的研究以室内(如盆栽)试验居多,而田间试验相比室内研究其环境因素更加复杂,研究成果也更具有实际意义和应用价值。考虑到 AMF 对植物生长的作用受到诸多环境因素影响,应结合室内试验的成果,大力开展 AMF 对间套作农田生态系统的研究,开发优良 AMF 种质资源,量化和深入研究 AMF 对作物种间

关系的调控,筛选出高效高产的 AMF-间套作体系。此外,应继续研究探索 AMF 的纯培养技术,早日实现 AMF 在农业中的大范围应用。

农田生态系统中养分的流动和循环对作物的生长和产量具有重要意义,而土壤微生物是土壤养分转化、传输过程中的重要一环。今后应将传统生物学手段和现代分子技术相结合,更深入地探究 AMF 对农田土壤中微生物群落结构的影响及其机制,全面掌握植物-土壤-微生物间养分的动态平衡等互作机理。此外,自然环境中 AMF 与多种土壤微生物共存并协同作用,故应开展 AMF 与有益微生物如根瘤菌、解磷真菌、土著 AMF 或多种 AMF 混合接种等更加综合全面的农田间套作试验研究,以期为进一步发挥 AMF 对农田生态系统的生态效应提供依据。

参考文献

- [1] 间套作体系豆科作物固氮生态学原理与应用[M]. 北京:中国农业大学出版社,2013.
- [2] 高阳,段爱旺,刘祖贵,等. 单作和间作对玉米和大豆群体辐射利用率及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009,17(1):7-12.
- [3] 李隆. 间套作强化农田生态系统服务功能的研究进展与应用展望[J]. 中国生态农业学报,2016,24(4):403-415.
- [4] 杨涛,段志平,石岩松,等. 新疆枣棉间作下棉花光合特性及产量变化[J]. 干旱地区农业研究,2019,37(1):89-94.
- [5] 赵建华,孙建好,李隆,等. 玉米行距变化对间作系统生产力及玉米生长的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2017,34(2):189-196.
- [6] 刘培,邵宇婷,王志国,等. 减氮对华南地区甜玉米//大豆间作系统产量稳定性的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文),2019,27(9):1332-1343.
- [7] 王光州. 土壤微生物调节植物种间互作和多样性—生产力关系的机制[D]. 北京:中国农业大学,2018.
- [8] 张贺,何依依,吴家庆,等. 玉米根系分泌物中关键抑菌物质对大豆疫霉的抑菌活性[J]. 植物保护,2019,45(6):124-130.
- [9] 陈保冬,于萌,郝志鹏,等. 丛枝菌根真菌应用技术研究进展[J]. 应用生态学报,2019,30(3):1035-1046.
- [10] 韦莉莉,卢昌熠,丁晶,等. 丛枝菌根真菌参与下植物-土壤系统的养分交流及调控[J]. 生态学报,2016,36(14):4233-4243.
- [11] 王桂君,夏霜,崔亚男,等. AM 真菌对植物抗逆性的影响及机制探讨[J]. 长春师范大学学报,2019,38(12):79-83.
- [12] 张蓓蓓,张辉,景琦,等. 两种水分条件下真菌接种及氮

- 肥施加对小麦生长、生理及氮磷吸收的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(1): 214-220.
- [13] GAO X P, GUO H H, ZHANG Q, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) enhanced the growth, yield, fiber quality and phosphorus regulation in upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.) [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 2084.
- [14] 刘圆圆, 赵乾旭, 邓曦, 等. 土著 AMF 与氮形态对辣椒 || 菜豆间作系统植株氮利用及其影响因素研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(2): 245-254.
- [15] MANUELA G, LUCIANO A, PAOLA F, et al. At the root of the wood wide web: Self recognition and non-self incompatibility in mycorrhizal networks [J]. Plant Signaling & Behavior, 2006, 1(1): 1-5.
- [16] 汪新月, 史静, 岳献荣, 等. 接种 AMF 与间作对红壤上玉米和大豆间作氮素竞争的影响[J]. 菌物学报, 2017, 36(7): 972-982.
- [17] 张丽, 张乃明, 张仕颖, 等. AMF 和间作对作物产量和坡耕地土壤径流氮磷流失的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(22): 216-224.
- [18] 悦飞雪, 李继伟, 王艳芳, 等. 生物炭和 AM 真菌提高矿区土壤养分有效性的机理[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(8): 1325-1334.
- [19] ROSOLINO I, GAETANO A, SALVATORE F A, et al. Impacts of arbuscular mycorrhizal fungi on nutrient uptake, N₂ fixation, N transfer, and growth in a wheat/faba bean intercropping system [J]. Plos One, 2019, 14(3): e0213672.
- [20] MARZBAN Z, FARYABI E, TORABIAN S. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and *Rhizobium* on ion content and root characteristics of green bean and maize under intercropping [J]. Acta Agriculturae Slovenica, 2017, 109(1): 79-88.
- [21] 王桂花. 大豆-玉米间作中双接种 AM 真菌和根瘤菌对氮、碳分配的影响[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- [22] SRIVASTAVA V, SINGH A K. Mycorrhization alters root morphology, leaf starch and nutrient content of micropropagated banana under water stress [J]. Indian Journal of Horticulture, 2019, 76(1): 44-49.
- [23] ZHANG F, WANG P, ZOU Y N, et al. Effects of mycorrhizal fungi on root-hair growth and hormone levels of taproot and lateral roots in trifoliate orange under drought stress [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2019, 65(9): 1316-1330.
- [24] GAO Y Z, ZHONG J, QUE H, et al. Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi increases glomalin-related soil protein content and PAH removal in soils planted with *Medicago sativa* L. [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 115: 148-151.
- [25] 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.
- [26] 李文彬, 宁楚涵, 李伟, 等. 菲和芘胁迫下 AMF 和 PG-PR 对高羊茅生理生态的响应[J]. 草业学报, 2019, 28(8): 84-94.
- [27] 谭树朋, 孙文献, 刘润进. 球囊霉属真菌与芽孢杆菌 M3-4 协同作用降低马铃薯青枯病的发生及其机制初探[J]. 植物病理学报, 2015, 45(6): 661-669.
- [28] HERNANDEZAB R R, DEBENPORTC S J, LEEW- ISD M-C C E, et al. The native shrub, *Piliostigma reticulatum*, as an ecological "resource island" for mango trees in the Sahel [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2015, 204: 51-61.
- [29] 乔旭. 丛枝菌根真菌在植物种间互作中的调节机制[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
- [30] 格格. 双接种对紫花苜蓿-玉米间作体系 C、N、P 营养元素运移的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2015.
- [31] MENG L B, ZHANG A Y, WANG F, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobium facilitate nitrogen uptake and transfer in soybean/maize intercropping system [J]. Frontiers in Plant Science, 2015, 6: 339.
- [32] PEREIRA S, MUCHA N, GONALVES B, et al. Improvement of some growth and yield parameters of faba bean (*Vicia faba*) by inoculation with *Rhizobium laguerreae* and arbuscular mycorrhizal fungi [J]. Crop and Pasture Science, 2019, 70(7): 595-605.
- [33] 杨雅婷. 三叶草根瘤菌与 AMF 互作效应及其对梨生理代谢的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2016.
- [34] 朱国政. AMF 对金橘大豆间作体系中金橘生长及根际土壤微生物多样性的影响[D]. 桂林: 广西师范大学, 2015.
- [35] 杨聪, 陈胜伦, 刘豫, 等. 纳米氢氧化镁、黑麦草套种和丛枝菌根对萝卜 Cd 含量和土壤 Cd 化学形态及微生物数量的影响[J]. 农学学报, 2019, 9(7): 37-43.
- [36] AGNOLUCCI M, TURRINI A, GIOVANNETTI M. Molecular and functional characterization of beneficial bacteria associated with AMF spores [M]//REINHARDT D, SHARMA A. Methods in rhizosphere biology research. [S. l.]: Springer, 2019: 61-79.
- [37] 侯劭炜, 胡君利, 吴福勇, 等. 丛枝菌根真菌的抑病功能及其应用[J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24(5): 941-951.
- [38] 董艳, 赵骞, 吕家兴, 等. 间作小麦和接种 AM 真菌协同提高蚕豆抗枯萎病能力和根际微生物碳代谢活性[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(10): 1646-1656.

- [39] 赵第锬. 丛枝菌根对旱作水稻/西瓜间作系统中西瓜枯萎病的影响[D]. 南京:南京农业大学,2011.
- [40] KARIN H A, ANNA M, ANDREAS V, et al. Alterations in root exudation of intercropped tomato mediated by the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* and the soilborne pathogen *Fusarium oxysporum* f. sp. *Lycopersici* [J]. Journal of Phytopathology, 2013, 161(11/12):763-773.
- [41] HAGE-AHMED K, KRAMMER J, STEINKELLNER S. The intercropping partner affects arbuscular mycorrhizal fungi and *Fusarium oxysporum* f. sp. *Lycopersici* interactions in tomato [J]. Mycorrhiza, 2013, 23(7):543-550.
- [42] 康福丽. 干旱胁迫下 AMF 和间作大豆对金橘根际微生物生态特征的影响[D]. 桂林:广西师范大学,2016.
- [43] SHENG P P, LIU R J, LI M. Inoculation with an arbuscular mycorrhizal fungus and intercropping with pepper can improve soil quality and watermelon crop performance in a system previously managed by monoculture [J]. American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences, 2012, 12(11):219-240.
- [44] 于森. 采煤沉陷区生态演替规律及菌根修复作用与后效研究[D]. 北京:中国矿业大学,2014.
- [45] 马玲, 马琨, 汤梦洁, 等. 间作与接种 AMF 对连作土壤微生物群落结构与功能的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(8):1341-1347.
- [46] 宁楚涵, 李文彬, 张晨, 等. 丛枝菌根真菌与放线菌对辣椒和茄子的促生防病效应[J]. 应用生态学报, 2019, 30(9):3195-3202.
- [47] 朱兴菲, 刘小芳, 赵勇钢, 等. 晋西黄土区典型人工植被对土壤球囊霉素和团聚体稳定性的影响[J]. 水土保持通报, 2018, 38(6):80-87.
- [48] TIAN X L, WANG C B, BAO X G, et al. Crop diversity facilitates soil aggregation in relation to soil microbial community composition driven by intercropping [J]. Plant and Soil, 2019, 436(1/2):173-192.
- [49] 尹宝海. 间作与土著 AMF 对坡耕地紫色土氮流失阻控效应与机制研究[D]. 昆明:云南农业大学,2017.
- [50] 王建, 周紫燕, 凌婉婷. 球囊霉素相关土壤蛋白的分布及环境功能研究进展[J]. 应用生态学报, 2016, 27(2):634-642.
- [51] 禄兴丽. 保护性耕作措施下西北旱作麦玉两熟体系碳平衡及经济效益分析[D]. 咸阳:西北农林科技大学, 2017.
- [52] QIU L, BI Y L, JIANG B. Arbuscular mycorrhizal fungi ameliorate the chemical properties and enzyme activities of rhizosphere soil in reclaimed mining subsidence in northwestern China [J]. Journal of Arid Land, 2019, 11(1):135-147.
- [53] QIN M S, ZHANG Q, PAN J B, et al. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on soil enzyme activity is coupled with increased plant biomass [J]. European Journal of Soil Science, 2020, 71(1):84-92.
- [54] 陶晶, 邬奇峰, 石江, 等. 间作与接种丛枝菌根真菌对新垦山地玉米产量和土壤肥力的影响[J]. 浙江农业学报, 2019, 32(1):115-123.
- [55] 赵乾旭, 史静, 张仕颖, 等. 土著丛枝菌根真菌(AMF)与不同形态氮对紫色土间作大豆生长及氮利用的影响[J]. 菌物学报, 2017, 36(7):983-995.
- [56] HONTORIA C, GARCÍA-GONZÁLEZ I, QUEMADA M, et al. The cover crop determines the AMF community composition in soil and in roots of maize after a ten-year continuous crop rotation [J]. Science of the Total Environment, 2019, 660:913-922.
- [57] WEISANY W, ZEHTAB-SALMASI S, RAEI Y, et al. Can arbuscular mycorrhizal fungi improve competitive ability of dill plus common bean intercrops against weeds? [J]. European Journal of Agronomy, 2016, 75:60-71.
- [58] 赵乾旭, 史静, 夏运生, 等. AMF 与隔根对紫色土上玉米-大豆种间氮竞争的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(14):2696-2705.
- [59] 乔旭, 薛丽华, 陈兴武. 枣麦间作条件下菌丝网络对间作小麦生长的影响[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(3):23-28.
- [60] WHITESIDE M D, WERNER G D A, CALDAS V E A, et al. Mycorrhizal fungi respond to resource inequality by moving phosphorus from rich to poor patches across networks [J]. Current Biology, 2019, 29(12):2043-2050.
- [61] QIAO X, BEI S K, LI H G, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi contribute to overyielding by enhancing crop biomass while suppressing weed biomass in intercropping systems [J]. Plant and Soil, 2016, 406(1/2):173-185.
- [62] 龙显莉. 氮施肥条件下丛枝菌根真菌对植物种间相互作用影响的研究[D]. 兰州:兰州大学,2017.
- [63] DEVESH S, NATARAJAN M, THOMAS B. Bioirrigation: A common mycorrhizal network facilitates the water transfer from deep-rooted pigeon pea to shallow-rooted finger millet under drought [J]. Plant & Soil, 2019, 440(1/2):277-292.
- [64] ZHANG Y, HU J L, BAI J F, et al. Intercropping with sunflower and inoculation with arbuscular mycorrhizal

- fungi promotes growth of garlic chive in metal-contaminated soil at a WEEE - recycling site [J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2019, 167: 376-384.
- [65] 李少朋, 陈咄圳, 刘惠芬, 等. 丛枝菌根提高滨海盐碱地植物耐盐性的作用机制及其生态效应[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(2): 411-418.
- [66] WANG G Z, LI X, CHRISTIE P, et al. Response of arbuscular mycorrhizal fungi to soil phosphorus patches depends on context [J]. *Crop and Pasture Science*, 2016, 67(10): 1116-1125.
- [67] 秦余丽, 江玲, 徐卫红, 等. 黑麦草与丛枝菌根对大田番茄抗性及Cd吸收的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(6): 1053-1061.

Effect of AMF on the Interaction between Plant Soil and Microbes in Intercropping System and Its Mechanism

JIA Qinyu^{1,2}, LIU Ling^{1,2}, HUANG Shushi³

(1. Key Laboratory of Ecology of Rare and Endangered Species and Environmental Protection, Ministry of Education, Guilin, Guangxi, 541006, China; 2. College of Life Science, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi, 541006, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Marine Natural Products and Combined Biosynthetic Chemistry, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China)

Abstract: Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) can interact with most terrestrial plants in the natural environment. Intercropping as an important measure to increase the biodiversity of farmland ecosystems can significantly increase the utilization of plants to multiple resources in the farmland environment. In the intercropping system, AMF improves the economic output of farmland ecosystems and promotes their sustainable development through the impact on crops and soil environment. In this paper, the effects and mechanisms of AMF on plant-soil-microbes interactions in intercropping systems are described in terms of the effects of AMF on root characteristics of host plants and on microbial community structure and function in rhizosphere of host plants, the role of AMF in improving soil structure and soil fertility, nutrient resources transmission and distribution in the symbiotic mycelium network between mycorrhizal plants, etc, providing a theoretical basis for the further application of AMF in agriculture.

Key words: arbuscular mycorrhizal fungi, intercropping system, soil microbes, nutrient absorption, root characteristics, common mycorrhizal network

责任编辑:米慧芝



微信公众号投稿更便捷

联系电话:0771-2503923

邮箱:gxxkxyxb@gxas.cn

投稿系统网址: <http://gxxk.ijournal.cn/gxxkxyxb/ch>