

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.21696

丛枝菌根真菌和根瘤菌对连作花生养分吸收及土壤微生物特性的影响

索炎炎¹, 张翔^{1*}, 司贤宗¹, 李亮¹, 程培军¹, 余辉², 刘娟³

(1. 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 河南 郑州 450002; 2. 正阳县花生研究所, 河南 正阳 463600; 3. 河南省农业科学院经济作物研究所, 河南 郑州 450002)

摘要: 探讨接种丛枝菌根 (AM) 真菌和根瘤菌对连作花生作用效果及可能机制, 有益于缓解花生连作障碍, 促进花生养分高效和持续高产。在花生典型种植区, 选择有代表性的酸性砂姜黑土, 设置不接种 (CK)、接种 AM 真菌 (AM)、接种根瘤菌 (Rb)、双接种 (AM+Rb) 4 个处理, 采用微区试验, 研究 AM 真菌与根瘤菌对花生生长、根系形态、养分吸收及土壤微生物特性的影响。结果表明: 接种处理增加了花生第一侧枝长和分枝数, 显著提高了花生根和地上部生物量、荚果重和根瘤数, 其中 AM+Rb 处理提高效果最显著。同时 AM+Rb 处理的花生根系总根长、总表面积、总体积分别显著提高 30.1%、20.2% 和 59.7%, 土壤微生物总量、细菌/真菌、放线菌/真菌明显提高, 不同部位氮、磷、钾、钙、镁积累量显著增加, 效果优于单接种。比较 AM 真菌和根瘤菌 2 种接种方式, Rb 处理的花生不同部位氮积累量较高, 而 AM 处理的根系形态状况较好, 且花生不同部位磷、钾、钙、镁吸收量较高。可见, 在酸性砂姜黑土区, 接种 AM 真菌和根瘤菌尤其是双接种有益于改善根系形态状况和根际微生物环境, 增强花生养分吸收能力, 从而促进花生的生长及产量的提高。

关键词: 丛枝菌根真菌; 根瘤菌; 花生; 根系形态; 养分吸收; 土壤微生物

丛枝菌根 (AM) 真菌是自然界中普遍存在的一类土壤微生物, 能与 80% 以上的陆生高等植物形成 AM 真菌共生体, 通过提高养分吸收和碳循环促进植物的生长发育, 提高植物耐旱、耐盐碱、耐酸和抗病能力^[1-2]。根瘤菌可与豆科作物共生形成根瘤, 通过共生固氮为豆科植物提供氮素营养, 同时能分泌植物生长激素, 促进豆科作物和自身生长发育^[3-4]。前人关于紫云英^[5] (*Astragalus sinicus*)、紫花苜蓿^[6-7] (*Medicago sativa*)、大豆^[8-9] (*Glycine max*)、菜豆^[10] (*Phaseolus vulgaris*) 等豆科作物的研究证实, 双接种 AM 真菌与根瘤菌具有明显的协同效应, 能更加有效地改善豆科作物磷营养, 显著提高土壤磷素利用率和根瘤菌的结瘤固氮能力, 促进豆科植物的生长发育, 增强抗病性和抗逆性, 提高产量和品质。因此, 利用 AM 真菌和根瘤菌双接种以提高豆科作物抗胁迫和养分利用能力已成为当

前研究的热点。

花生 (*Arachis hypogaea* L.) 是我国重要的豆科油料作物, 近年来, 在花生生产规模化和集约化发展的背景下, 连作花生面积越来越大, 加之氮磷肥料施用量过大, 造成病虫害加重、养分利用率低下、土壤酸化等一系列问题, 不仅制约了花生产量和品质进一步提升, 还对生态环境构成潜在威胁^[11-12]。单独或双接种 AM 真菌和根瘤菌均可提高花生养分利用率, 增加花生产量^[13], 有利于化肥减量增效, 对实现花生绿色高效生产具有重要意义。然而, 双接种效应受到 AM 真菌、根瘤菌和豆科植物之间不同组合的匹配关系及土壤环境条件的影响, 二者之间相互作用存在不确定性^[4, 14]。河南省是花生第一种植大省, 花生种植面积和总产居全国首位。砂姜黑土为河南省花生生长的主要土壤类型, 这种土壤类型上 AM 真菌和根瘤菌介导的共生体对花生生产何种效应及其可能机制尚不明确。为此, 本研究拟通过微区试验, 探究砂姜黑土区接种 AM 真菌和根瘤菌对花生生长、根系形态、养分吸收及土壤微生物特性的影响, 为进一步认识 AM 真菌-花生-根瘤菌共生体系的互作效应及其作用机制提供直接的依据, 旨在为该区花生绿色高产生提供技术支撑。

收稿日期: 2021-12-22; 录用日期: 2022-02-28

基金项目: 国家现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-13); 河南省农科院自主创新项目 (2021ZC29); 河南省花生产业技术体系项目 (S2012-05-G02)。

作者简介: 索炎炎 (1985-), 助理研究员, 博士, 主要从事花生营养与施肥技术研究。E-mail: suoyanyan2006@163.com。

通讯作者: 张翔, E-mail: zxtf203@163.com。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于2020年6~10月在正阳县兰青乡大余村(32° 27' 34" N, 114° 20' 29" E)进行,供试土壤类型为砂姜黑土,0~20 cm耕层土壤理化性质为:pH值4.69,全氮1.01 g/kg,有效磷33.74 mg/kg,速效钾66.80 mg/kg,有机质13.64 g/kg。

花生品种为高油酸花生新品种豫花37,属珍珠豆型品种,目前在河南省大面积种植,由河南省农业科学院经济作物研究所提供。

供试AM真菌为根内球囊菌(*Glomus mosseae*),购买于北京市农林科学院植物营养与资源研究所AM真菌种质资源库(BGC),编号为BGC BJ04A,用三叶草扩繁成含有AM真菌孢子、菌丝以及三叶草根段的砂土混合物作为接种菌剂,每克菌剂含有20~30个孢子;供试根瘤菌(*Rhizobium* sp.),编号为CCBAU15710,浓度为0.3~0.5亿cfu/g。

1.2 试验设计

采用微区试验(直径30 cm×高度45 cm的无底聚氯乙烯圆桶),设置4个处理,分别为:1)不接种,CK;2)接种AM真菌,AM;3)接种根瘤菌,Rb;4)接种AM真菌+根瘤菌,AM+Rb,每个处理重复10次,每桶装土15 kg。首先选取大小一致饱满的花生种子,用10%的H₂O₂进行消毒,无菌水洗净。菌剂接种与播种同步进行,每桶播种2穴的花生种子,每穴2粒。AM真菌和根瘤菌菌剂的接种方法为:穴施,种子下方2~3 cm处,撒施菌剂,上面覆盖2 cm左右的土,然后把种子放入穴内,最后再覆土封盖,每穴用量为15 g;AM+Rb处理,依次施用AM真菌和根瘤菌,用量及使用方法同AM处理和Rb处理;不接种和单独接种AM真菌或根瘤菌处理施入等量灭活菌剂。

1.3 测定项目与方法

成熟收获时,每个处理分别选取3桶生长一致有代表性的花生植株,分根、地上部、果壳、籽粒等部位进行烘干,测定各部位干物质重量,然后进行粉碎,用于测定不同部位氮、磷、钾、钙和镁含量。同时,选取3桶生长一致的花生植株,将根系从桶内取出,并捡拾散落的根系,用流水冲洗干净,下方放置0.15 mm的筛子,防止根系被水冲走。用EPSON Perfection V800/V850扫描仪对根系

样品进行扫描获取数字化图像,用WinRHIZO根系分析系统(Regent公司,加拿大)解析图像,获得花生根系总根长、平均直径、表面积和体积;根系扫描后,测定每株根瘤数;采用脱色-酸性品红染色法^[15]测定菌根真菌感染率。

于结荚期和成熟期,利用“抖土法”采集花生根际土壤,冰袋冷藏带回室内,去杂后保存于4℃冰箱,用于测定土壤微生物区系和微生物量碳、氮含量。其中土壤微生物区系用稀释平板分离测数法^[16]测定;土壤微生物量碳、氮含量用氯仿熏蒸-K₂SO₄浸提法^[17]测定。

1.4 数据处理

试验数据采用Excel 2013和DPS 7.5进行统计分析,采用最小显著差异法(LSD)进行多重比较;利用Originpro 8.5作图。

2 结果与分析

2.1 AM真菌和根瘤菌对连作花生菌根真菌感染及生长的影响

由表1可见,接种比未接种AM真菌处理显著提高了花生根系菌根真菌感染率,且AM真菌+根瘤菌双接种比AM真菌单独接种更有利于菌根真菌感染。与CK相比,AM、Rb和AM+Rb处理均显著提高了花生根部和地上部生物量及荚果产量,其中根生物量增幅分别为18.4%、26.2%、33.3%,地上部生物量增幅分别为7.9%、7.4%、19.0%,荚果产量增幅分别为15.1%、19.7%、36.5%。与CK相比,AM、Rb和AM+Rb处理也不同程度地提高了花生根冠比,其中AM和AM+Rb处理的提高达显著水平。AM、Rb和AM+Rb处理增加了根瘤数量,尤其是AM+Rb处理,比CK显著增加39.9%,表明双接种AM真菌和根瘤菌促进了根瘤的形成。

2.2 AM真菌和根瘤菌对连作花生根系形态的影响

由图1可见,与CK相比,AM真菌和根瘤菌单独或双接种不同程度地提高了花生根系的根长、表面积和根体积,Rb、AM、AM+Rb处理根长分别提高11.9%、17.9%、30.1%,根表面积分别提高4.9%、11.2%、20.2%,根体积分别提高29.2%、44.6%、59.7%;但根系直径分别降低11.6%、26.1%、29.5%。与CK相比,AM和AM+Rb处理的根长、根表面积和根体积显著提高,平均直径却显著降低;Rb处理的根体积提高显著,但对根长、表面积和平均直径的影响不显著。

表 1 AM 真菌和根瘤菌对连作花生根系菌根真菌感染及生长的影响

处理	菌根真菌感染率 (%)	生物量 (g/株)		根冠比	荚果重 (g/株)	根瘤数 (个/株)
		根部	地上部			
CK	5.6c	1.16c	14.21c	8.2b	14.73c	372.60c
AM	61.7b	1.46ab	15.34b	9.5a	18.30b	426.62bc
Rb	6.2c	1.37b	15.26b	9.0ab	17.66b	452.83b
AM+Rb	69.3a	1.55a	16.91a	9.1a	20.11a	521.30a

注：同列不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。表 4 同。

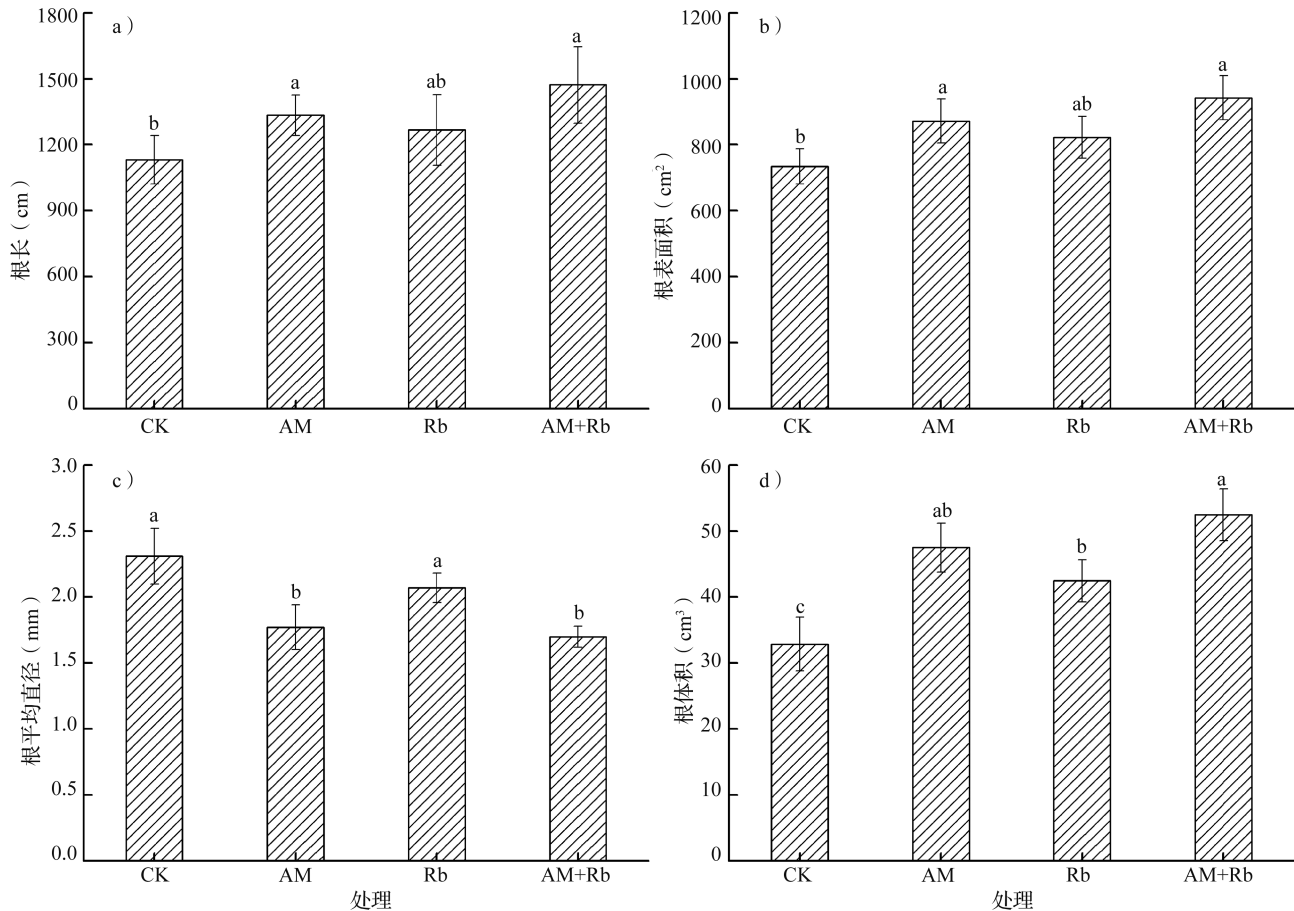


图 1 AM 真菌和根瘤菌对花生根系形态的影响

注：柱上不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

2.3 AM 真菌和根瘤菌对连作花生不同部位养分吸收量的影响

由表 2 可见，与 CK 相比，AM 真菌和根瘤菌单独或双接种均显著提高了花生根、地上部、果壳和籽粒中氮、磷、钾、钙和镁吸收量，在 AM+Rb 处理达到最大值。与 CK 相比，AM+Rb 处理根、地上部、果壳和籽粒中氮含量分别增加 98.4%、69.5%、61.9% 和 78.1%，磷吸收量分别增加 89.9%、47.4%、68.4% 和 75.3%，钾吸收量分别增加 99.4%、47.6%、25.5% 和 56.8%，钙吸收量分

别增加 91.4%、47.7%、34.1% 和 94.3%，镁吸收量分别增加 69.3%、45.1%、29.6% 和 80.2%。AM 处理和 Rb 处理相比，花生不同部位中磷、钾、钙和镁含量表现为 AM 处理较高，而氮含量却表现为 Rb 处理较高。

2.4 AM 真菌和根瘤菌对连作花生根际土壤微生物数量的影响

由表 3 可见，结荚期根际土壤细菌、真菌和放线菌的数量高于成熟期。结荚期和成熟期不同处理间细菌、真菌和放线菌的变化规律一致，细菌数量

大小表现为 AM+Rb>Rb ≈ AM>CK，放线菌数量大小表现为 AM+Rb ≈ AM>Rb>CK；不同于细菌和放线菌，真菌数量大小表现为 CK>Rb ≈ AM>AM+Rb。单独或双接种 AM 真菌和根瘤菌处理相对于 CK 明显提高了微生物总量、细菌 / 真菌、细菌 / 放线菌、放线菌 / 真菌，以 AM+Rb 处理最高，说明 AM 真菌与根瘤菌双接种协同增加了微生物数量，改善了土壤微生物结构。

表 2 AM 真菌和根瘤菌对连作花生不同部位养分积累量的影响 (mg/株)

处理	部位	氮	磷	钾	钙	镁
CK	根	21.66d	1.55d	4.26d	6.13d	6.79c
AM		32.65c	2.45b	6.69b	9.19b	10.46a
Rb		34.26b	2.09c	5.78c	7.77c	8.22b
AM+Rb		42.99a	2.94a	8.49a	11.73a	11.49a
CK	地上部	307.41c	25.07c	105.35c	201.38c	118.81c
AM		396.03b	30.77b	134.74b	259.69b	150.05b
Rb		419.96b	29.58b	127.77b	249.51b	130.29bc
AM+Rb		521.14a	36.96a	155.45a	297.42a	172.45a
CK	果壳	72.46b	5.33c	32.03c	16.24c	12.73c
AM		115.15a	8.73a	39.26a	22.22a	17.43a
Rb		116.37a	7.33b	36.27b	18.91b	14.91b
AM+Rb		117.32a	8.98a	40.21a	21.77a	16.49a
CK	籽粒	385.27c	47.53d	47.39c	5.83d	18.26d
AM		536.16b	67.77b	61.61b	9.10b	27.83b
Rb		548.87b	62.89c	59.43b	7.72c	23.49c
AM+Rb		686.01a	83.30a	74.30a	11.32a	32.90a

注：同列不同字母表示同一部位处理间差异显著 (P<0.05)。

表 3 AM 真菌和根瘤菌对连作花生根际土壤微生物数量的影响

处理	采样期	细菌 (× 10 ⁵ cfu/g)	真菌 (× 10 ³ cfu/g)	放线菌 (× 10 ⁴ cfu/g)	微生物总量 (× 10 ⁵ cfu/g)	细菌 / 真菌	细菌 / 放线菌	放线菌 / 真菌
CK	结荚期	2.78c	3.54a	4.20c	3.24	78.53	6.62	11.86
AM		6.92b	2.48b	7.40a	7.68	279.03	9.35	29.84
Rb		6.52b	2.50b	5.20b	7.07	260.80	12.54	20.80
AM+Rb		8.60a	1.12c	7.00a	9.31	767.86	12.29	62.50
CK	成熟期	1.46c	1.36a	3.58c	1.83	107.35	4.08	26.32
AM		5.27ab	0.98b	6.29b	5.91	537.76	8.38	64.18
Rb		4.82b	1.02b	5.60b	5.39	472.55	8.61	54.90
AM+Rb		5.78a	0.82c	6.60a	6.45	704.88	8.76	80.49

注：同列不同字母表示同一采样期处理间差异显著 (P<0.05)。

2.5 AM 真菌和根瘤菌对连作花生根际土壤微生物量碳、氮含量及其比值的影响

由表 4 可见，相同处理下，结荚期根际土壤微生物碳和微生物氮含量均高于成熟期。结荚期和成熟期，不同处理间根际土壤微生物碳和微生物氮含量的变化规律一致，均表现为 AM+Rb

处理最高，Rb 和 AM 处理次之，CK 最低。微生物碳与微生物氮比值可反映土壤微生物群落组成，结荚期该比值为 2.89 ~ 4.02，成熟期该比值为 2.58 ~ 3.88，单独或双接种 AM 真菌和根瘤菌后，花生根际土壤微生物碳与微生物氮比值显著增加。

表 4 AM 真菌和根瘤菌对连作花生根际土壤微生物碳、氮含量及其比值的影响

处理	结荚期			成熟期		
	MBC (mg/kg)	MBN (mg/kg)	MBC/MBN	MBC (mg/kg)	MBN (mg/kg)	MBC/MBN
CK	117.21c	40.64c	2.89c	96.59c	37.50c	2.58c
AM	203.45b	50.63b	4.02a	184.25b	47.50b	3.88a
Rb	212.76b	57.50ab	3.70b	179.06b	55.63ab	3.22b
AM+Rb	227.35a	61.25a	3.71b	195.01a	59.38a	3.28b

注: MBC—微生物量碳含量; MBN—微生物量氮含量。

3 讨论

大量无菌土或砂培控制试验研究表明, AM 真菌与根瘤菌双接种可以强烈刺激豆科植物的生长和根瘤的形成, 增加 AM 真菌侵染率 (表 1), 从而达到对豆科植物的协同增效作用, 其优越性远远大于它们单独接种^[6, 8, 18-19]。但也有研究发现, AM 真菌与根瘤菌竞争宿主植物的光合产物, 二者可能存在不匹配关系, 根瘤菌对植株生长发育的促进效应明显被不匹配的 AM 真菌削弱^[20-21]。本研究发现, 在未灭菌的自然土壤中, 花生双接种 AM 真菌和根瘤菌有效地提高了花生根和地上部的生物量, 促进了花生生长, 增产效果显著优于单独接种, 说明花生双接种 AM 真菌和根瘤菌对改善花生营养带来的益处大于其对光合产物的消耗, 二者之间具有协同作用, 证实了 Wang 等^[22]外源双接种 AM 真菌和根瘤菌比土著 AM 真菌和根瘤菌更能促进大豆生长的研究结果。

根系是植物最活跃的养分吸收器官, 根系的形态直接影响植物的固土能力和养分吸收空间的大小, 良好的根系形态有利于植物根系吸收更多的养分和水分, 促进植物生长和产量提高^[23]。有研究认为, AM 真菌侵染作物根系过程中, 会刺激根系产生更多的内源生长素、细胞分裂素和乙烯等激素, 促进细胞伸长生长、细胞分裂和发根, 有效改善作物根系形态状况^[24]; 同时有研究指出, 接种根瘤菌可为 AM 真菌提供良好的氮素营养, 增加植株根系 AM 真菌侵染率^[4], 本研究也发现类似结论 (表 1), 表明 AM 真菌与根瘤菌双接种有利于改善作物根系形态状况。本研究发现, 双接种 AM 真菌和根瘤菌显著增加了花生根系的总根长、根表面积和根体积, 表明双接种 AM 真菌和根瘤菌明显促进了花生根系生长, 增加了花生根系的分布范围, 扩大了植株对营养物质和水分吸收面积, 与王宏信

等^[25]在降香黄檀幼苗上的研究结论一致。

AM 真菌侵染植物后, 可分泌氢离子和草酸、柠檬酸、苹果酸、琥珀酸等有机酸, 还可释放纤维素酶、蛋白酶和磷酸酶, 促进土壤矿物溶解和有机质矿化, 提高土壤中磷、钾、钙、镁的生物有效性^[26]。另外, AM 真菌根外菌丝表面可定殖多种具备固氮、解磷和促生能力的细菌, 可有效扩展菌根获取土壤养分的能力^[27]。有研究指出, AM 真菌与根瘤菌双接种后, 不仅可增强豆科植物根瘤的形成和固氮能力, 还可提高植物侧根 AM 真菌侵染率^[8], 从而达到对养分吸收的协同促进作用。本研究发现, 双接种根瘤菌和 AM 真菌后, 花生不同部位氮、磷、钾、钙、镁吸收量增加 (表 2), 进一步证实了以往的研究结论。双接种 AM 真菌与根瘤菌后, 除通过调控一系列生理生化过程外, 根系形态改善、养分吸收面积扩大也是花生氮、磷、钾、钙、镁元素高效利用的主要原因 (图 1)。

土壤微生物的数量和组成影响土壤肥力及植物的生长。有研究表明, 苜蓿接种 AM 真菌和根瘤菌后, 增加了土壤真菌和细菌群落的丰富度与多样性, 其中支顶孢属 (*Acremonium*)、青霉菌属 (*Penicillium*) 及毛壳菌属 (*Chaetomium*) 等生防菌, 以及拟杆菌纲 (*Bacteroidia*)、木霉属 (*Trichoderma*) 及曲霉菌属 (*Aspergillus*) 等与氮、磷循环有关有益菌的相对丰度显著增加, 帚枝霉属 (*Sarocladium*)、镰刀菌属 (*Fusarium*) 等病原有害菌的相对丰度显著降低, 优化了原有的微生物生态环境, 从而更有利于土壤和植株氮、磷的循环^[28-29]。本研究中花生单独或双接种 AM 真菌和根瘤菌后改变了土壤微生物群落结构, 表现为根际土壤细菌、放线菌数量显著增加, 真菌数量显著下降, 细菌/真菌、细菌/放线菌、放线菌/真菌及微生物总量明显提高的趋势。表明花生接种 AM 真菌和根瘤菌后, 使土壤微生物区系从“真菌型”土壤向“细菌型”土壤

转化,有助于促进花生植株对土壤养分的转化与吸收。但双接种 AM 真菌和根瘤菌影响了花生土壤哪些关键菌群及对花生生长发挥的作用还不清楚,未来将结合高通量测序等技术对花生根际土壤真菌和细菌群落结构及功能进行深入的研究。

4 结论

连作花生单独接种根瘤菌或 AM 真菌之后,改善了根系形态状况,增加了根际土壤微生物数量,优化了土壤微生物种群结构,从而提高了花生对土壤中氮、磷、钾、钙、镁的吸收,最终促进了花生的生长及产量的提高。同时,花生接种根瘤菌与 AM 真菌具有协同增效作用,与单独接种根瘤菌或 AM 真菌相比,花生双接种 AM 真菌 + 根瘤菌更好地改善了根系形态状况及根际微生态环境,增强了花生养分吸收能力,从而更有利于花生的生长及高产。

参考文献:

- [1] 冯欢,蒙盼盼,豆青,等. 菌根真菌与植物共生营养交换机制研究进展 [J]. 应用生态学报, 2019, 30 (10): 3596–3604.
- [2] 李元敬,刘智蕾,何兴元,等. 丛枝菌根共生体中碳、氮代谢及其相互关系 [J]. 应用生态学报, 2014, 25 (3): 903–910.
- [3] 何树斌,郭理想,李菁,等. 丛枝菌根真菌与豆科植物共生体研究进展 [J]. 草业学报, 2017, 26 (1): 187–194.
- [4] 赵丹丹,李涛,赵之伟. 丛枝菌根真菌 – 豆科植物 – 根瘤菌共生体系的研究进展 [J]. 生态学杂志, 2006, 25 (3): 327–333.
- [5] 董昌金,赵斌. 丛枝菌根真菌与根瘤菌互作及类黄酮对互作效果的影响 [J]. 应用生态学报, 2004, 15 (9): 1585–1588.
- [6] 刘忆,袁玲. 根瘤菌和 AM 真菌对紫花苜蓿结瘤和产质量的影响 [J]. 土壤学报, 2020, 57 (5): 1292–1298.
- [7] 魏勇,吴茜茜,李应德,等. AM 真菌和根瘤菌对紫花苜蓿生长及其营养价值的影响 [J]. 草业科学, 2020, 37 (6): 1115–1123.
- [8] 丁效东,张林,李淑仪,等. 丛枝菌根真菌与根瘤菌接种对大豆根瘤分布及磷素吸收的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18 (3): 662–669.
- [9] 吴艳芬,刘秋鸣,刘卫欢,等. AMF 与根瘤菌对间作大豆光合与呼吸代谢的影响 [J]. 广西师范大学学报 (自然科学版), 2022, 40 (2): 231–241.
- [10] 刘小光,李雅慧,李志芳. 间作和双接种对玉米和菜豆生长的影响 [J]. 中国农学通报, 2014, 30 (28): 182–188.
- [11] 孙虎,王月福,王铭伦,等. 施氮量对不同类型花生品种衰老特性和产量的影响 [J]. 生态学报, 2010, 30 (10): 2671–2677.
- [12] 李孝刚,张桃林,王兴祥. 花生连作土壤障碍机制研究进展 [J]. 土壤, 2015, 47 (2): 266–271.
- [13] 徐开未,张小平,陈远学,等. “根瘤菌 + Mo” 菌剂和 AM 菌剂对花生生长和产量的影响 [J]. 中国油料作物学报, 2009, 31 (2): 228–232.
- [14] Larimer A L, Clay K, Bever J D. Synergism and context dependency of interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobia with a prairie legume [J]. Ecology, 2016, 95 (4): 1045–1054.
- [15] 张学林,李晓立,何堂庆,等. 丛枝菌根真菌对玉米籽粒产量和氮素吸收的影响 [J]. 作物学报, 2021, 47 (8): 1603–1615.
- [16] 李振高,骆永明,滕应. 土壤与环境微生物研究法 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [17] 吴金水,林启美,黄巧云,等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用 [M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [18] Kafle A, Garcia K, Wang X, et al. Nutrient demand and fungal access to resources control the carbon allocation to the symbiotic partners in tripartite interactions of medicago truncatula [J]. Plant, Cell & Environment, 2019, 42: 270–284.
- [19] Kavadia A, Omirou M, Fasoula D A, et al. Co-inoculations with rhizobia and arbuscular mycorrhizal fungi alters mycorrhizal composition and lead to synergistic growth effects in cowpea that are fungal combination-dependent [J]. Applied Soil Ecology, 2021, 167: 104013.
- [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: 79–88.
- [21] Xavier L, Germida J J. Selective interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* enhance pea yield and nutrition [J]. Biology & Fertility of Soils, 2003, 37: 261–267.
- [22] Wang Q, Sheng J, Wang Y, et al. The relative contribution of indigenous and introduced arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobia to plant nutrient acquisition in soybean/maize intercropping in unsterilized soils [J]. Applied Soil Ecology, 2021, 168: 104124.
- [23] 杨建昌. 水稻根系形态生理与产量、品质形成及养分吸收利用的关系 [J]. 中国农业科学, 2011, 44 (1): 36–46.
- [24] 薛英龙,李春越,王苾蓉,等. 丛枝菌根真菌促进植物摄取土壤磷的作用机制 [J]. 水土保持学报, 2019, 33 (6): 10–20.
- [25] 王宏信,冷凝,剧春晖,等. 菌根真菌与根瘤菌联合作用对降香黄檀幼苗根系构型及养分吸收的影响 [J]. 江苏农业科学, 2018, 46 (13): 120–124.
- [26] 郭艳娥,李芳,李应德,等. AM 真菌促进植物吸收利用磷元素的机制 [J]. 草业科学, 2016, 33 (12): 2379–2390.
- [27] 石晶晶,张林,江飞焰,等. AM 真菌菌丝际细菌具有固氮解磷双重功能 [J]. 土壤学报, 2021, 58 (5): 1289–1298.

- [28] 杨盼, 翟亚萍, 赵祥, 等. AM 真菌和根瘤菌互作对苜蓿根际土壤真菌群落结构的影响及功能预测 [J]. 草业科学, 2020, 37 (9): 1669–1680.
- [29] 杨盼, 翟亚萍, 赵祥, 等. 丛枝菌根真菌和根瘤菌互作对苜蓿根际土壤细菌群落结构的影响及 PICRUST 功能预测分析 [J]. 微生物学通报, 2020, 47 (11): 3868–3879.

Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobia on nutrient uptake and soil microbial characteristics of continuous cropping peanut

SUO Yan-yan¹, ZHANG Xiang^{1*}, SI Xian-zong¹, LI Liang¹, CHENG Pei-jun¹, YU Hui², LIU Juan³ (1. Institute of Plant Nutrient, Resources and Environment, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou Henan 450002; 2. Institute of Peanut of Zhengyang County, Zhengyang Henan 463600; 3. Industrial Crops Research Institute, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou Henan 450002)

Abstract: The aim was to investigate the effects of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi and rhizobia on the growth of peanut and underlying mechanism, which was beneficial to alleviate continuous cropping obstacle and promote nutrient efficiency and sustainable high yield of peanut. Four treatments (CK, AM, Rb and AM+Rb) were conducted to study the effects of AM fungi and rhizobia on growth, root morphology, nutrient absorption and soil biological characteristics of peanut by the micro-zone experiment. The results showed that the inoculation treatment increased the first branch length, number of branches, and significantly increased the root biomass, aboveground biomass, pod weight and root nodule numbers of peanut, with the AM+Rb treatment showing the strongest effect. Compared to the control, the total length, total surface area and total volume of roots were significantly increased by 30.1%, 20.2% and 59.7%, respectively, under the AM+Rb treatment. The total amount of soil microorganisms, the ratio of bacteria and fungi, the ratio of actinomycetes and fungi, the accumulation of nitrogen, phosphorus, potassium, calcium and magnesium in different parts of peanut were significantly enhanced, and its effect was better than that of single AM fungi or rhizobia. Compared with two inoculation methods of AM fungi and rhizobia, the nitrogen accumulation in different parts of peanut under the Rb treatment was higher, while the root morphology was better and the accumulation of phosphorus, potassium, calcium and magnesium in different parts of peanut was higher under the AM treatment. In conclusion, inoculation with AM fungi and rhizobia, especially double inoculation, is more beneficial to improve the root morphology and microbial environment in rhizosphere, and enhance the nutrient uptake capacity of peanuts, so as to promote the growth and yield of peanut.

Key words: arbuscular mycorrhizal fungi; rhizobia; peanuts; root morphology; nutrient uptake; soil microorganism