

接种 AMF 对间作大豆生长及有机磷利用的影响

付先恒¹, 岳献荣¹, 夏运生¹, 谷林静^{1,2}, 张乃明¹, 董萍¹, 刘大会³

(1. 云南农业大学 资源与环境学院/云南省土壤培肥与污染修复工程实验室, 云南 昆明 650201; 2. 四川省科学技术信息研究所, 四川 成都 610016; 3. 云南省农业科学院 药用植物研究所, 云南 昆明 650231)

摘要: 为了研究接种丛枝菌根真菌(AMF)与间作种植模式对红壤上间作大豆磷素吸收利用及生长的影响,通过三室隔网盆栽模拟试验研究了分室磷[不添加磷(P0)、有机磷(OP50)添加和根室不接种(NM)、根室接种丛枝菌根真菌 *Glomus mosseae*(GM)]对大豆生长及磷素利用的影响。结果表明:在OP50处理下,无论何种种植模式,不接种处理下根长均显著高于接种处理,无论接种与否,单作处理下大豆根长均高于间作处理。在OP50处理下,接种GM处理地上部分生物量均明显高于不接种处理,在P0处理下地上部分生物量具有相同趋势。间作处理下,分室添加磷与不添加磷时,GM处理的植株生物量较NM处理分别提高了27.52%和48.76%。单作处理下,分室添加磷与不添加磷时,GM处理的植株生物量较NM处理分别提高了28.49%和27.65%。大豆植株根系磷含量在单作-GM-OP50组合处理下最高。在接种GM处理下,无论是否添加磷,间作大豆根系磷吸收效率均显著高于单作处理。因此,综合菌根侵染率、生物量、磷含量以及磷吸收效率等指标,接种GM和分室添加50 mg·kg⁻¹有机磷处理能更有效地促进间作大豆的生长及磷素的吸收。

关键词: 丛枝菌根真菌(AMF); 间作; 红壤; 大豆(*Glycine max*); 有机磷

中图分类号: S565.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.11861/j.issn.1000-9841.2016.03.0442

Influence of *Glomus Mosseae* Inoculation on Plant Growth and Organic Phosphorus Utilization in Intercropping Soybeans

FU Xian-heng¹, YUE Xian-rong¹, XIA Yun-sheng¹, GU Lin-jing^{1,2}, ZHANG Nai-ming¹, DONG Ping¹, LIU Da-hui³

(1. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University/Yunnan Engineering Laboratory of Soil Fertility and Pollution Remediation, Kunming 650201, China; 2. Sichuan Institute of Scientific and Technical Information, Chengdu 610016, China; 3. Institute of Medicinal Plants, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650231, China)

Abstract: Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) could promote the soil properties, nutrients and growth of host plants. Intercropping is a typical planting pattern for agricultural production, could obtain higher yield than monoculture. Intercropping crops could increase the utilization efficiency of nutrients especially for phosphorus (P) in soil. The shortage of phosphate resources in the world is becoming more and more serious, researchers have paid more attention to intercropping or mycorrhizal technology to strengthen soil P utilization and increase crop yield. But little was known about the effects of combination of AMF inoculation and intercropping on plant growth and P utilization on red soil. The plant growth and P utilization of soybeans intercropped with maize (*Zea mays* L.) on red soil were investigated through pot experiment. Two different P treatment ways (none P [P0], organic P with 50 mg·kg⁻¹ soil [OP50]) to compartment chamber and two mycorrhizal treatments [no AMF (NM) and *Glomus. mosseae* inoculation (GM)] in root growth chamber were set up. Results showed that under OP50 treatment, regardless of planting modes, root length of GM treatment was significantly higher than NM treatment. For the intercropping treatment, comparing with NM treatment, biomass of GM plant was increased by 27.52% and 48.76% under OP50 and P0 treatment respectively, and for the mono-cropping treatment was 28.49% and 27.65% under OP50 and P0 treatment respectively. Under GM treatment, whether P addition or not, P SAR of intercropping soybean roots was significantly higher than the mono-cropping treatment. Thus the treatment of AMF inoculation and organic P of 50 mg·kg⁻¹ application could promote plant growth and P uptake by intercropped soybeans, which could effectively strengthen organic P use in red soil.

Keywords: Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF); Intercropping; Red soil; Soybean (*Glycine max*); Organic phosphorus

丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)能与陆地上绝大部分植物的根系形成共生体^[1]。AMF侵染后会影 响宿主植物的根系生长、养分吸收及植物的抗逆性等。近年来,大量研究^[2-8]

收稿日期:2015-11-23

基金项目:国家自然科学基金(41161041,41561057);云南省教育厅科研基金重点项目(2014Z078)。

第一作者简介:付先恒(1990-),男,硕士,主要从事农业环境保护研究。E-mail: fuxianhengyiyang@163.com。

通讯作者:夏运生(1975-),男,博士,副教授,硕导,主要从事菌根生理生态及污染控制研究。E-mail: yshengxia@163.com。

表明, AMF 可以促进宿主植物的生长以及提高植物对氮、磷、钾、钙、镁等多种元素的吸收。在环境保护以及提高农作物产量中丛枝菌根真菌的运用越来越广泛, 具有极其重要的价值。

磷是植物生长发育所必需的营养元素之一, 以多种方式参与植物体内各种生理过程, 也是植物体内许多重要有机化合物的重要组成部分。据统计, 我国农田土壤约 2/3 严重缺磷, 其中红壤作为我国南方的主要耕作土壤, 也是云南省重要的耕地资源, 其独特的理化性质, 使磷素更容易被固定, 从而表现出严重缺磷^[9]。前人研究表明, 接种 AMF 能扩大植物根系对养分的吸收空间, 并活化土壤中的难溶性无机磷酸盐和有机磷^[10-12]。由此可见, 利用 AMF 可提高作物对土壤有效磷的利用, 给农业生产带来一定的经济效益和生态效益。

豆科作物与禾本科作物间作是一种非常有效的栽培方式。合理的玉米/豆科作物间作, 由于株型及生理生态方面的差异, 使时空与水肥利用产生互补, 可获得比单作更高的产量和经济效益^[13-14]。结合 AMF 对宿主磷的专性作用, 李淑敏等^[15]研究了接种 AMF 菌根对蚕豆/玉米间作后磷吸收的影响, 发现接种 AM 真菌均显著促进玉米和蚕豆吸收有机磷, 与对照相比吸 P 量分别增加 138.1% 和 82.3%。本研究以滇池流域红壤的玉米/大豆间作系统为研究对象, 采用三室隔网分室技术(植物根系无法穿过隔网吸收分室内的磷素营养, 但菌丝则可以), 在分室中添加有机磷和根室接种 GM, 研究 AMF 对间作大豆生长以及磷素吸收利用的影响, 进一步为间作体系下提高大豆的养分利用效率及促进作物生长提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试土壤为昆明市晋宁县红壤, 土壤化学性质为 pH6.22, 碱解氮 34.65 mg·kg⁻¹, 有机质 23.26 g·kg⁻¹, 速效磷 5.76 mg·kg⁻¹, 速效钾 75 mg·kg⁻¹。土壤自然风干后过 2 mm 筛。混合均匀后装入灭菌袋中进行高压蒸汽灭菌(120℃ 间歇灭菌共 2 h)。置于牛皮纸上晾置 2~3 d 后收入密封塑料袋, 避免其它途径的微生物污染。

供试宿主植物玉米为农大 108, 大豆为昆明本地品种。供试菌根真菌由北京市农林科学院植物营养与资源研究所王幼珊研究员提供, 为 *Glomus mosseae* (GM) (BGCGZ01A、1511C0001BGCAM0012),

试验菌剂为玉米、三叶草扩繁后获得。

1.2 试验设计

试验采用三室隔网分室装置, 根室设大豆单作、玉米/大豆间作处理, 且对于大豆单作处理和玉米/大豆间作处理均设有不接种(NM)和接种 GM 两种处理。在分室中分别设不添加磷、添加有机磷(大豆卵磷脂), 施磷量(P)为 50 mg·kg⁻¹(分别以 P0、OP50 来表示)。不接种处理重复 4 次, 接种处理重复 3 次。

试验所用容器为 5 L 白色塑料花盆, 盆高 19 cm, 底部外径 16 cm, 上部外径 26 cm, 装土前将与盆同大的塑料袋整个衬在内壁, 作为根室。供试土壤共分 3 层装入塑料袋内: 底层土装入 2.5 kg 土壤; 中间层土壤在接种处理下每盆加菌剂 75 g, 对照加入等量的灭菌菌剂, 与 900 g 土壤充分混匀后装盆; 覆盖土为 350 g, 表层再均匀覆盖 25 g 细沙, 共装土约 4 kg。作为分室的两个塑料小瓶为底部封闭的白色圆柱形状, 普通塑料材质, 小瓶高 8.5 cm, 瓶口直径约 3.5 cm, 底部直径约 5 cm, 瓶口用胶水粘有 400 目尼龙网(菌根菌丝可以穿过尼龙网到分室土壤中吸收养分, 而根系不能穿过), 装土量共约 300 g, 按所设定的磷添加比例加入磷, 混匀后装瓶, 且均匀加入所需水分, 使土壤含水量达 13%。然后把两小瓶横向斜对着埋入塑料袋内靠近底层土壤中间的水平位置上。

选出芽 0.5~1 cm 颗粒饱满的玉米和大豆种子, 间作处理每盆播种玉米 4 粒, 大豆 6 粒, 玉米和大豆各占半盆, 出苗 4 d 后间苗, 玉米留苗 2 株, 大豆 4 株; 单作大豆均匀播种 6 粒, 出苗后间苗至 4 株。

试验在云南农业大学科研大棚里进行, 大棚内白天和晚上气温分别为(25±3)℃和(16±2)℃, 采用自然光照, 期间采用称重法每天根据失水量决定蒸馏水的浇水量。为了保证植物生长期间不受 N、K 营养缺乏的胁迫, 在植物生长至 40 d 时进行一次追肥(N 30 mg·kg⁻¹, K 20 mg·kg⁻¹)。植物生长 70 d 后收获, 将玉米地上部和地下部分开, 先用自来水冲洗, 之后用蒸馏水漂洗干净, 晾干, 根样剪成 1 cm 根段。大豆根系的根长计算和菌根侵染率测定方法、土壤基础化学属性与植株磷含量测定方法、磷吸收量与磷吸收效率的计算公式等均同贾广军等^[16]采用的方法。

1.3 数据分析

数据采用 SPSS 19.0 统计分析软件进行方差分

析 检验分室磷处理、菌根处理及种植模式处理间的交互作用,在交互作用显著的情况下对数据进行整体 Duncan 多重比较 ($P < 0.05$)。对于分室磷处理、种植模式处理和菌根处理交互作用不显著的情况,则在同一分室磷添加水平处理内进行多重比较,分析不同菌根处理-种植模式处理之间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 分室磷添加和接种 AMF 对间作大豆生长的影响

2.1.1 根系菌根侵染率及根长 表1表明,未接种处理根系无菌根侵染,以间作-GM-OP50 组合处理

表1 分室磷添加与接种 GM 对间作大豆生长及菌根侵染的影响

Table 1 Plant growth of intercropping soybean and mycorrhizal colonization rate under AMF colonization and P addition

种植模式 Planting modes	因素 Factor		菌根侵染率 Colonization rate/%	生物量 Dry biomass/g·pot ⁻¹		根长 Root length /m	株高 Plant height /cm	根冠比 Roots/shoots ratio
	分室磷添加 P addition to chamber	菌根处理 AMF treatment		地上部分 Shoots	根系 Roots			
单作 Mono-cropping	P0	NM	0	2.16 ± 0.16 β	0.19 ± 0.01 de	11.63 ± 0.72 x	49.99 ± 1.07 b	0.09 ± 0.01 b
		GM	59.58 ± 2.64 b	2.59 ± 0.07 α	0.41 ± 0.01 a	8.39 ± 0.19 y	46.00 ± 1.32 c	0.16 ± 0.01 a
间作 Intercropping	OP50	NM	0	1.72 ± 0.12 c	0.14 ± 0.00 f	15.58 ± 0.63 a	42.88 ± 1.34 cd	0.08 ± 0.01 b
		GM	46.83 ± 0.90 c	2.21 ± 0.05 b	0.18 ± 0.01 e	10.19 ± 0.29 b	61.37 ± 0.58 a	0.08 ± 0.00 bc
	P0	NM	0	1.42 ± 0.05 γ	0.20 ± 0.01 de	11.77 ± 1.11 x	41.66 ± 1.26 d	0.05 ± 0.01 bc
		GM	49.76 ± 1.81 c	2.17 ± 0.07 β	0.24 ± 0.01 c	8.95 ± 0.82 xy	53.25 ± 1.75 b	0.06 ± 0.01 bc
	OP50	NM	0	1.96 ± 0.06 bc	0.22 ± 0.01 cd	8.28 ± 0.95 bc	44.48 ± 1.10 cd	0.04 ± 0.01 c
		GM	67.94 ± 1.42 a	2.49 ± 0.07 a	0.29 ± 0.01 b	6.37 ± 0.30 c	49.83 ± 0.16 b	0.07 ± 0.01 bc

同列不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平存在显著差异,若因素间没有显著交互作用则采用不同字母体系(abc、xyz、αβγ)。下同。

Different lowercase letters in the same column show significant differences at $P < 0.05$ level. Different letter systems (abc, xyz, αβγ) indicate not significant interaction between P addition to chamber and AMF inoculation. The same below.

2.1.2 大豆生物量及根冠比 经双因素方差分析,大豆地上部分生物量在种植模式、分室磷添加与菌根处理之间交互作用不显著,但在种植模式、分室磷添加及菌根处理之间差异显著($P < 0.05$)。地上部生物量在单作-P0-GM 组合处理下最大。在 OP50 处理下,接种 GM 处理地上部分生物量均明显高于不接种处理,在 P0 处理下地上部分生物量具有相同趋势。根系生物量在单作-P0-GM 组合处理下最大,除单作-P0-GM 组合外,无论是否接种及何种磷添加,间作种植模式根系生物量均显著高于单作。在 OP50 处理下,无论何种种植模式,接种 GM 处理根系生物量均高于不接种处理。P0 处理下,无论种

下侵染率最高。在单作条件下 P0 处理菌根侵染率显著高于 OP50 处理。在 P0 处理下,单作侵染率显著高于间作。

经双因素方差分析,根长在种植模式、分室磷添加与菌根处理之间交互作用不显著,但在种植模式、分室磷添加、接种处理之间差异显著($P < 0.05$)。在 OP50 处理下,无论何种种植模式,不接种处理下根长均显著高于接种处理,无论接种与否,单作模式处理下大豆根长均高于间作。单作模式下,无论磷添加与否,不接种处理根长均明显高于接种,且间作模式种植下具有相同趋势。间作模式下,无论是否接种,不添加磷处理下根长均显著高于添加处理。

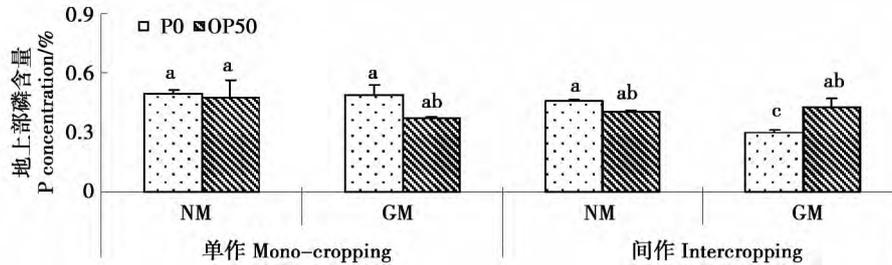
植模式如何,接种 GM 处理根系生物量均明显高于不接种。不接种处理下,无论是否添加磷,间作根系生物量均显著高于单作,接种 GM 处理下趋势相同。在单作模式下,无论是否接种,P0 处理下根系生物量均高于 OP50 处理,而间作模式下,OP50 处理根系生物量更具优势。在 P0 处理下,无论是否接种,单作处理下根冠比显著高于间作,且 OP50 处理下趋势相同。除单作-OP50 组合处理外,接种 GM 处理下根冠比均高于不接种处理。

2.1.3 株高 经双因素方差分析,株高在分室磷添加、种植模式及菌根接种处理之间的交互作用显著($P < 0.05$)。由表1可知,株高在单作-OP50-GM 组

合处理下达到最大。除单作-P0 组合处理外,接种 GM 处理下株高均明显大于不接种处理。在单作条件下,除 OP50-GM 组合处理外,无论是否接种,P0 处理下株高较高。

2.2 分室磷添加和接种 AMF 对间作大豆植株磷素积累的影响

2.2.1 地上部分磷含量 经双因素方差分析,大豆



图中不同处理标注的不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Different letters above the columns indicate significant differences at $P < 0.05$ level. The same below.

图 1 分室磷添加与 AMF 处理下间作大豆植株的磷含量

Fig. 1 P concentrations in intercropping soybean plants under different P addition and AMF treatments

2.2.2 根系磷含量 经双因素方差分析,大豆植株根系磷含量在种植模式、分室磷添加与菌根处理之间交互作用显著 ($P < 0.05$)。由图 2 可知,大豆植株根系磷含量在单作-GM-OP50 组合处理下达到最大。在 P0 处理下,单作-NM 组合处理显著高于其它处理。在 OP50 组合处理下,除单作-GM 组合处

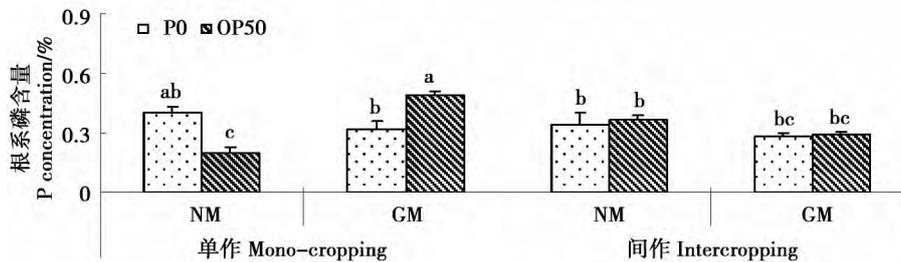


图 2 分室磷添加与 AMF 处理下间作大豆植株的磷含量

Fig. 2 P concentrations in intercropping soybean plants under different P addition and AMF treatments

2.2.3 根系磷吸收效率 经双因素方差分析,大豆根系磷吸收效率在种植模式、分室磷添加与菌根处理之间交互作用显著 ($P < 0.05$)。由图 3 可知,在 P0 处理下,除单作-NM 处理外,间作大豆根系磷吸收效率均明显高于单作。在 OP50 处理下,无论是否接种,间作种植模式下大豆根系磷吸收效率均显

植株磷含量在种植模式、分室磷添加与菌根处理之间交互作用显著 ($P < 0.05$)。由图 1 可知,地上部分磷含量在 P0 处理下,除间作-P0-NM 处理外,单作均明显高于间作。在接种 GM 处理下,单作-P0 组合处理显著高于单作-OP50 组合处理,而间作却与之相反。在 OP50 处理下,单作-NM 组合处理磷含量显著高于其它处理。

理外,间作大豆根系磷含量均明显高于单作。在接种 GM 处理下,无论是否添加磷,单作根系磷含量显著高于间作。在单作种植模式下,不接种处理下 P0 处理下根系磷含量明显高于 OP50 处理,而接种 GM 处理下呈相反趋势。

著高于单作。在接种 GM 处理下,无论是否添加磷,间作大豆根系磷吸收效率均显著高于单作。在单作模式下,不接种及 P0 处理下磷吸收效率明显高于 OP50 处理,而在接种 GM 处理下,呈相反趋势。在间作模式下,无论何种磷添加,接种 GM 处理下根系磷吸收效率比不接种处理更具优势。

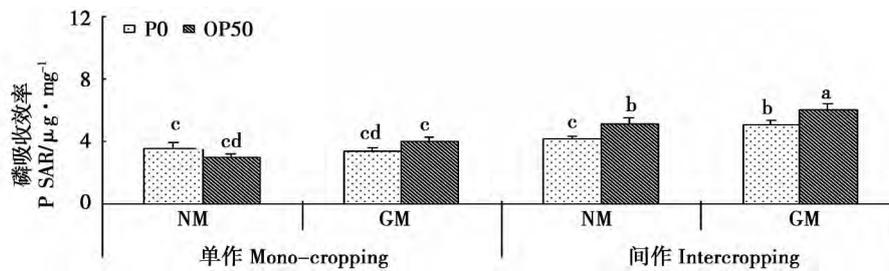


图3 分室磷添加与 AMF 处理下间作大豆根系的磷吸收效率

Fig. 3 P specific absorption rate (SAR) of intercropping soybean roots under different P addition and AMF treatments

3 结论与讨论

3.1 间作对大豆生长及磷素积累的影响

由于株型及生理生态方面的差异,间作可获得比单作更高的产量,选择合适作物种类进行间作,可提高作物对氮磷的利用效率。唐劲驰等^[17]研究表明,玉米/大豆间作具有明显的间作优势,间作作物的生物量、氮磷含量都显著好于单作。同时也有研究表明^[18],在玉米/大豆间作体系中,玉米竞争能力明显比大豆强,种间效应对玉米是促进作用,而对大豆是抑制作用。在本研究中,间作条件下的根系生物量均显著高于单作,说明间作条件下大豆根系生物较单作更具优势。间作对大豆地上部分生物量、株高、地上部分磷含量贡献不显著,可能受间作条件下玉米较强的种间竞争能力影响,但并未对大豆产生明显抑制作用,且根系磷吸收效率在间作条件下显著高于单作,极有可能是接种菌根真菌改善了大豆根际环境,提高了大豆的种间竞争能力所致。

3.2 菌根对大豆生长及磷素利用的影响

接种丛枝菌根真菌能促进作物对有机磷的吸收利用,改善土壤磷素营养状况。宋福强等^[19]研究表明,接种 AMF 可显著提高大豆植株的生物量,大豆产量与对照相比提高了 7.38%。佟丽娜等^[20]研究发现,接种 AMF 真菌,大豆鲜重和干重显著增加,与不接种对比,植株吸磷量比对照增加了 34.96% 和 33.78%。不同有机磷肥处理植株干重比对照增加了 9.4%、7.28%、5.84%。郑红丽等^[21]研究表明,接种菌根真菌显著地促进了大豆的生长,提高大豆叶绿素含量,进而增加叶片光合速率,提高其生物量。本研究中,无论是间作还是单作,大豆地上部分生物量均表现为接种 GM 处理高于不接种处理,根系生物量具有同样趋势。株高除单作-P0 组合处理外,均表现为接种 GM 处理明显高于不接种

处理。根系磷吸收效率,除单作-NM 组合处理外,接种 GM 处理下均显著高于不接种处理。这与以上研究结果相一致,接种菌根真菌提高大豆生物量及磷素营养的利用进一步得到了印证。

3.3 菌根与间作对大豆有机磷利用的影响分析

AMF 可以促进宿主植物的生长以及提高植物对氮、磷、钾、钙、镁等多种元素的吸收^[6-8]。合理的玉米/豆科作物间作,由于株型及生理生态方面的差异,使时空与水肥利用产生互补^[14]。张宇亭等^[22]的研究表明接种 AM 真菌在间作体系中使玉米的磷营养竞争比率显著提高了 45.0% ~ 104.1%,增强了菌根植物的竞争优势。本研究中,间作处理下,分室添加磷与不添加磷时,GM 处理的植株生物量较 NM 处理分别提高了 27.52% 和 48.76%。单作处理下,分室添加磷与不添加磷时,GM 处理的植株生物量较 NM 处理分别提高了 28.49% 和 27.65%。在间作模式下,无论何种磷添加,接种 GM 处理下根系磷吸收效率比不接种处理更具优势。在 OP50 组合处理下,除单作-GM 组合处理外,间作大豆根系磷含量均明显高于单作。以上结果表明间作与接种 AMF 的协同作用不仅提高了大豆植株生物量,同时对磷素的吸收利用效率也得到相应的改善,接种 AMF 与间作对大豆生长及磷素吸收利用的促进作用得到进一步的印证。

参考文献

- [1] 梁倩倩,李敏,刘润进,等. 全球变化下菌根真菌的作用及其作用机制[J]. 生态学报, 2014, 34(21): 6039-6048. (Liang Q Q, Li M, Liu R J, Guo S X. Function and functioning mechanisms of mycorrhizal fungi under global changes [J]. Acta Ecologica Sinica 2014, 34(21): 6039-6048.)
- [2] 徐丽娟,刁志凯,李岩,等. 菌根真菌的生理生态功能[J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 285-292. (Xu L J, Diao Z K, Li Y, et al. Eco-physiological functions of mycorrhizal fungi [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(1): 285-292.)

- [3] 崔站利, 杨会青, 李萍, 等. 不同大豆品种苗期与土著根瘤菌、丛枝菌根真菌双共生相关指标的分析[J]. 大豆科学, 2014, 33(1): 83-86. (Cui Z L, Yang H Q, Li P, et al. Related indexes of dual symbiotic of different soybean varieties with indigenous *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* and *Rhizobia* in seeding[J]. Soybean Science, 2014, 33(1): 83-86.)
- [4] 蔡柏岩, 接伟光. 大豆根围丛枝菌根真菌鉴定[J]. 大豆科学, 2009, 28(3): 483-486. (Cai B Y, Jie W G. Detection of the *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* in the rhizosphere of soybean[J]. Soybean Science, 2009, 28(3): 483-486.)
- [5] Li X L, George E, Marschner H. Extension of the phosphorus depletion zone in VA-mycorrhizal white clover in a calcareous soil [J]. Plant and Soil, 1991, 136(1): 41-48.
- [6] Smith S E, Read D J. Mycorrhizal symbiosis [M]. 3rd ed. London: Academic Press, 2008: 118-122.
- [7] Cozzolino V, Meo V D, Piccolo A, et al. Impact of arbuscular mycorrhizal fungi applications on maize production and soil phosphorus availability [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2013, 129: 40-44.
- [8] Muchane M N, Jama B, Othieno C, et al. Influence of improved fallow systems and phosphorus application on arbuscular mycorrhizal fungi symbiosis in maize grown in western Kenya [J]. Agroforestry Systems, 2010, 78(2): 139-150.
- [9] 李杰, 石元亮, 陈智文. 我国南方红壤磷素研究概况[J]. 土壤通报, 2011, 42(3): 763-768. (Li J, Shi Y L, Chen Z W. Research on phosphorus in Southern red soils of China [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(3): 763-768.)
- [10] 宋勇春, 冯固, 李晓林. 接种不同 VA 菌根真菌对红三叶草利用不同磷源的影响[J]. 生态学报, 2001, 21(9): 1506-1511. (Song Y C, Feng G, Li X L. Effect of different VAMF on red clover (*Trifolium pratense* L.) in utilizing organic phosphorus [J]. Acta Ecologica Sinica 2001, 21(9): 1506-1511.)
- [11] 宋勇春, 冯固, 李晓林. 接种 VA 菌根真菌对红三叶草利用土壤有机磷的影响[J]. 草业学报, 2000, 9(2): 38-44. (Song Y C, Feng G, Li X L. Effect of VA mycorrhiza inoculation on clover in utilizing soil organic phosphorus [J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 9(2): 38-44.)
- [12] 张立花, 张辉, 黄玉芳, 等. 施磷对玉米吸磷量、产量和土壤磷含量的影响及其相关性[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(7): 801-809. (Zhang L H, Zhang H, Huang Y F, et al. Effect of phosphorus application on soil available phosphorus and maize phosphorus uptake and yield [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(7): 801-809.)
- [13] 张向前, 黄国勤, 赵其国, 等. 红壤旱地玉米对间作大豆和花生边行效应影响的研究[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(8): 1010-1017. (Zhang X Q, Huang G Q, Bian X M, et al. Marginal effect of soybean and peanut intercropped with maize in upland red soils [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(8): 1010-1017.)
- [14] 余常兵, 孙建好, 李隆. 种间相互作用对作物生长及养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1): 1-8. (Yu C B, Sun J H, Li L. Effect of interspecific interaction on crop growth and nutrition accumulation [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(1): 1-8.)
- [15] 李淑敏, 李隆, 张福锁. 蚕豆/玉米间作接种 AM 真菌与根瘤菌对其吸磷量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(3): 136-139. (Li S M, Li L, Zhang F S. Effect of inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi and *Rhizobium* on the P uptake in faba bean/maize intercropping system [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2005, 13(3): 136-139.)
- [16] 贾广军, 柳勇, 谷林静, 等. AMF 接种与作物根系分隔方式对紫色土间作大豆生长及磷素吸收的影响[J]. 大豆科学, 2015, 34(3): 431-448. (Jia G J, Liu Y, Gu L J, et al. Effect of AMF inoculation and root separation on plant growth and phosphorus accumulation in soybean growing on purple soil under intercropping conditions [J]. Soybean Science, 2015, 34(3): 431-448.)
- [17] 唐劲驰, 余丽娜, 廖红, 等. 大豆根构型在玉米/大豆间作系统中的营养作用[J]. 中国农业科学, 2005, 38(6): 1196-1203. (Tang J C, She L N, Liao H, et al. Nutritional effects of soybean root architecture in a maize/soybean intercropping system [J]. Scientia Agricultura Sinica 2005, 38(6): 1196-1203.)
- [18] 吕越. 玉米/大豆种内与种间作物的资源竞争[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014. (Lyu Y. Maize/soybean intraspecific and interspecific competition for resources [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014.)
- [19] 宋福强, 程蛟, 常伟, 等. 田间施加 AM 菌剂对大豆生长效应的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(6): 69-74. (Song F Q, Chen J, Chang W, et al. The impact of AM fungi on soybean growth with AM inoculum addition in field [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin 2013, 29(6): 69-74.)
- [20] 佟丽娜, 李淑敏, 孟令波. 双接种对大豆利用不同有机磷源的影响[J]. 东北农业大学学报, 2009, 40(10): 37-42. (Tong L N, Li S M, Meng L B. Effect of inoculating arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobium on soybean by utilizing organic phosphorus source [J]. Journal of Northeast Agricultural University 2009, 40(10): 37-42.)
- [21] 郑红丽, 邢杰, 胡俊, 等. 两种丛枝菌根真菌对小麦和大豆生长的影响[J]. 内蒙古农业大学学报, 2002, 23(1): 104-106. (Zheng H L, Xin J, Hu J, et al. Effects of AMF on the growth of wheat and soybean [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University 2002, 23(1): 104-106.)
- [22] 张宇亭, 朱敏, 钱岩相, 等. 接种 AM 真菌对玉米和油菜间作竞争及土壤无机磷组分的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(22): 7091-7101. (Zhang Y T, Zhu M, Xian Y X W, et al. Influence of mycorrhizal inoculation on competition between plant species and inorganic phosphate forms [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(22): 7091-7101.)