

AMF 接种与作物根系分隔方式对紫色土上间作大豆生长及磷素吸收的影响

贾广军¹, 柳勇², 谷林静¹, 张乃明¹, 侯增龙¹, 段红平¹, 夏运生¹

(1. 云南农业大学 资源与环境学院, 云南 昆明 650201; 2. 广东省生态环境与土壤研究所, 广东 广州 510650)

摘要: 比较了不同丛枝菌根真菌 (Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF) 接种状况 [不接种 (NM)、接种 *Glomus mosseae* (GM)、接种 *Glomus etunicatum* (GE)] 和玉米/大豆间作体系不同根系分隔方式 (不分隔, 隔尼龙网, 隔塑料布) 对大豆植株生长及磷素吸收累积的影响。结果表明: 接种 GM 和 GE 处理下的间作大豆根系侵染率在不同根系分隔方式之间无显著差异, 接种 AMF 抑制了间作大豆根系的伸长, 其中接种 GM 处理能使大豆生物量显著提高, 并在根系不分隔处理下使大豆对磷素吸收较多而生长较好, 接种 GE 真菌则不能促进大豆对磷素的积累。间作体系不同根系分隔方式对大豆的影响也不同, 其中大豆的根系长度在隔塑料布处理下最短, 大豆生物量在根系分隔处理下均大于不分隔处理, 根系不分隔处理能够较好的促进大豆对磷素的积累。所有复合处理中, 以 GM - 不分隔处理组合对间作大豆的生长及磷素累积的促进作用最好。

关键词: 丛枝菌根真菌 (AMF); 紫色土; 间作大豆; 根系分隔; 磷

中图分类号: S529 文献标识码: A DOI: 10.11861/j.issn.1000-9841.2015.03.0436

Effect of AMF Inoculation and Root Separation on Plant Growth and Phosphorus Accumulation in Soybeans Growing on Purple Soil under Intercropping Conditions

JIA Guang-jun¹, LIU Yong², GU Lin-jing¹, ZHANG Nai-ming¹, HOU Zeng-long¹, DUAN Hong-ping¹, XIA Yun-sheng¹

(1. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Guangdong Institute of Eco-environment and Soil Sciences, Guangzhou 510650, China)

Abstract: Soybeans are often at a competitive disadvantage condition in the maize/soybean intercropping system. A pot experiment was conducted to study the possibility of enhancing phosphorus (P) uptake efficiency of intercropping soybeans through inoculating with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), and to provide scientific basis for the P management of soybean production in purple soil. The plant growth and P uptake by intercropped soybeans on purple soil were studied. The intercropping maize and soybean roots were separated by different conditions (not separated, nylon net separated, plastic cloth separated) and three different kinds of inoculation status (none-mycorrhizal (NM), *Glomus mosseae* (GM), *Glomus etunicatum* (GE)). The results showed that the mycorrhizal colonization rate of intercropping soybean roots under inoculation with GM or GE had no significant difference among different roots barriers. AMF inoculation inhibited the roots elongation of intercropping soybean, and GM inoculation could significantly improve the soybeans biomass, as well as make the soybeans uptake more P and grow better when the roots was not separated. While GE inoculation could not promote the P accumulation in soybeans. The effects of different roots separation on soybean was also different respectively. The soybean roots length under the plastic cloth treatment was the shortest, and soybean biomass under roots separation was greater than the treatment of the roots not separated. Without roots separated treatment, it could improve the P accumulation in soybeans. In all treatments, the treatment of GM inoculation and roots not separated was the best one for intercropping soybean plants growth and P accumulation.

Keywords: Arbuscular mycorrhizal fungi; Purple soil; Intercropping soybean; Roots separation; Phosphorus

丛枝菌根真菌 (Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF) 是土壤中与植物关系息息相关的微生物之一。据报道, AMF 可与地球上 90% 以上的植物种类形成共生体系^[1]。前人对 AMF 可促进植株对磷素的活化及吸收做了大量研究, 一方面认为 AMF 能分泌有机酸和磷酸酶活化难溶性磷和转化有机磷, 宋勇春等^[2]通过侵染三叶草发现 AMF 可以增强土壤

中能活化磷的磷酸酶的活性, 不过受土壤磷形态的影响, 冯固等^[3]利用³²P 标记的方法, 也证实了接种 AMF 可增加玉米对磷酸二钙、磷酸八钙、磷酸铁和磷酸铝的吸收。另一方面, AMF 可以通过扩大宿主植物根系的吸收面积, 酸化土壤 pH, 提高土壤磷的有效性, 并促进磷快速向根内运输等机制也被广泛报道^[1,4]。

收稿日期: 2014-07-05

基金项目: 国家自然科学基金 (41161041)。

第一作者简介: 贾广军 (1989-), 男, 硕士, 主要从事农业环境保护研究。E-mail: jiaguangjun1@163.com。

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

紫色土是我国南方重要的土壤资源,并且是云南省重要的耕地资源,而中性及石灰性紫色土壤普遍缺磷,土壤磷的缺乏已成为作物增产的限制因素之一^[5-6]。一方面,磷肥供应的增长必将受到磷酸盐贮量的限制,加之化学工业也远远不能满足农业生产对磷肥的需求,导致作物磷营养供给不足;另一方面,如大量的施用磷肥必将造成磷素的流失,加剧环境的污染。目前有关 AMF 的研究以北方石灰性土壤为对象的研究居多,针对南方紫色土的菌根研究少见报道,在这种背景下应用菌根技术活化紫色土有效磷含量,提高磷肥利用率,进而减少磷肥施用量,不仅可为农业生产带来经济效益,且可以减少土壤磷素的流失而减少农田磷素的非点源污染。

玉米/大豆间作作为一种常见的传统间作种植模式,前人对其群体的光、水、肥等资源利用进行了大量研究^[7-8],明确了间作种植模式的优势,如可以提高间作根际土壤磷酸酶活性、植株吸磷量及地上部生长等作用,此外,间作系统抑制农田杂草发生,减轻病虫害,提高土壤含水量,显著提高肥料利用率等优势也早已为人们所熟知。在玉米/大豆间作种植条件下,大豆对磷的吸收利用能力较弱,在间作体系中大豆表现为弱竞争能力^[7],而接种 AMF 却能促进大豆磷利用效率的提高。本研究采用盆栽方法探讨接种 AMF 提高间作大豆磷吸收效率的可能性,将间作根系的分隔方式与 AMF 在紫色土上进行交互研究,旨在探讨两因素对间作大豆的生长及磷素吸收与累积的影响差异,充分认识紫色土中菌根共生体对间作体系中大豆的有益影响,为大豆生产的磷素管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验大豆为市售大豆;供试丛枝菌根真菌 (AMF) 由北京市农林科学院植物营养与资源研究所提供,分别为 *Glomus mosseae* (BGC GZ01A、1511C0001BGCAM0012) (GM)、*Glomus etunicatum* (BGC GZ03C、1511C0001BGCAM0046) (GE),所用菌剂由玉米和苜蓿扩繁得到。

供试土壤:滇池流域宝象水库附近坡地紫色土, pH7.51, 有机质 24.81 g·kg⁻¹, 碱解氮 45.5 mg·kg⁻¹; 速效磷 5.94 mg·kg⁻¹; 速效钾 115 mg·kg⁻¹。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 采用盆栽模拟试验,于 2012 年 6~8 月在云南农业大学科研大棚里进行。试验包括 3 种菌根接种状况[不接种(NM)、接种 *Glomus*

mosseae (GM)、接种 *Glomus etunicatum* (GE)] 和间作玉米/大豆的 3 种根系分隔方式(不分隔,隔 200 目尼龙网,隔塑料布)两因素,9 个处理,每种处理 4 次重复。

试验所用盆栽装置为 PVC 管(直径 16 cm,高 25 cm)和花盆底座构成。装土前将 PVC 管从中间锯开,其中 12 盆用塑料布隔开,12 盆用 200 目尼龙网隔开,剩余 12 盆不做处理,最后将两瓣 PVC 管用铁丝固定在一起,然后分装灭菌土,不分隔处理装置加入底层土 2.8 kg、中间土 1.8 kg、覆盖土 200 g,其中接种处理每盆加入 200 g 菌剂与中间土混匀,对照加等量灭菌菌剂;分隔处理装置中两部分各层加入土壤量相应减半,其中接种处理每半盆加 100 g 菌剂与中间土混匀,对照加等量灭菌菌剂。以溶液的形式向土壤中加入基础肥料(N 60 mg·kg⁻¹, P 30 mg·kg⁻¹, K 67 mg·kg⁻¹, Ca 20 mg·kg⁻¹, Mg 4.5 mg·kg⁻¹, Mn 0.92 mg·kg⁻¹, Cu 0.54 mg·kg⁻¹, Zn 1.24 mg·kg⁻¹, Mo 0.06 mg·kg⁻¹), 分别以 NH₄NO₃、KH₂PO₄、K₂SO₄、CaCl₂·2H₂O、MgSO₄·7H₂O、MnSO₄·H₂O、CuSO₄·5H₂O、ZnSO₄·7H₂O、(NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O 的形式加入,最后将肥料混匀。

1.2.2 盆栽管理及收获 挑选籽粒均匀饱满的玉米和 4 株大豆种子,使用 10% H₂O₂ 进行表面消毒 10 min,然后用蒸馏水冲洗多次,最后置于放有湿润定量滤纸的培养皿中,于 25℃ 恒温培养箱中催芽 2 d,种子露白大约 1 cm 左右播种。植株生长期间平均每隔 3 d 浇 1 次水,每次 250 mL。待长势稳定后,留下比较整齐的 2 株玉米幼苗和 4 株大豆幼苗。玉米、大豆生长约 90 d 后,测量大豆株高并将植株及根系分开收获,用蒸馏水多次冲洗,之后晾干,取出部分根系用于菌根侵染率和根长测定,其余部分和地上部一起经杀青后烘干,磨细待测。收获的大豆根系晾干后,根样剪成 1 cm 根段,取用部分根样采用曲利苯蓝-方格交叉法测定大豆根长和菌根侵染率^[9-10];其它部分经烘干(70℃,72 h)、称重、粉碎后贮存待用。参考《土壤农化分析》测定植株含磷量及磷吸收量^[11],根系磷吸收效率(specific absorption rate, SAR)指标根据单位根系生物量所对应的植株养分吸收量来计算^[12]。

1.3 数据处理

试验数据采用 Excel 2003 和 SPSS 11.5 进行基本统计、方差分析和多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同 AMF 接种与根系分隔方式对间作大豆根系侵染及植株生长的影响

由表 1 可知,经双因素方差分析,间作大豆植株

根长、地上部生物量、根系生物量、根冠比在不同菌根处理与分隔处理间有显著的交互作用,而其菌根

侵染率在菌根处理与分隔处理间交互作用不显著,但其菌根侵染率在不同菌根处理内差异显著。

表1 大豆植株 AMF 侵染率及生长指标在不同菌根接种和根系分隔方式下的方差分析

Table 1 Variance analysis of AMF colonization rate and growth indices of soybean plants under different AMF inoculation and roots separation ways

因素 Factor	菌根侵染率 Colonization rate	根长 Root length	生物量 Dry biomass		根冠比 Roots/shoots ratio
			地上部 Shoots	根系 Roots	
菌根接种 AMF inoculation	***	***	***	NS	**
根系分隔方式 Roots separation way	NS	NS	NS	**	NS
菌根接种 × 根系分隔方式 AMF inoculation × roots separation way	NS	**	*	**	*

***, ** 和 * 分别表示 $P < 0.001$ 、 $P < 0.01$ 和 $P < 0.05$ 水平显著; NS 表示不显著; 下同。

***: $P < 0.001$; **: $P < 0.01$; *: $P < 0.05$; NS: not significant. The same below.

2.1.1 不同处理对大豆根系侵染率及根长的影响

由表2 试验数据可知,未接种处理中无菌根侵染,而接种 AMF 的大豆植株无论何种根系分隔方式均有较大比例的侵染。

从玉米/大豆根系不分隔处理来看, NM 处理的大豆根系显著长于接种处理,接种 GM 和 GE 处理之间无显著差异。而在根系隔尼龙网处理中, NM 处理和 GE 处理的大豆根长显著大于 GM 处理,根系隔塑料布处理下不接种处理的大豆根长显著高于 GE 处理,但与 GM 处理无显著差异。NM 处理下,不分隔处理和隔尼龙网的大豆根长无显著差异,隔塑料布处理的大豆根长显著小于不分隔处理。GM 处理下,不分隔处理与分隔处理间无显著差异。GE 处理下,根系隔尼龙网处理的大豆根长显著高于不分隔处理和隔塑料布处理,不分隔和隔塑料布处理之间并没有显著差异。这说明在接种 GE 真菌条件下,根系隔尼龙网处理有助于大豆根系的伸长。

2.1.2 不同处理对间作大豆植株生物量的影响

表2 数据表明,不分隔处理下,接种 GM 真菌的大豆地上部生物量显著大于 GE 处理,而接种 GE 真菌的大豆地下部生物量最大。而在根系隔尼龙网处理下,不接种和 GM 处理的大豆地上部生物量均显著大于 GE 处理,不接种处理的大豆根系生物量显著大于接种处理。根系隔尼龙网处理下, GM 处理的大豆地上部和根系生物量较大。其中,接种 GM 真菌且隔塑料布处理的大豆整体生物量最大。NM 处理下,根系分隔处理的大豆地上部生物量稍高于不分隔处理,而其根系生物量显著高于不分隔处理,其中隔尼龙网处理的大豆根系生物量最大。说明根系分隔处理能够促进不接种的大豆地上部生物量的积累和大豆根系生物量的积累。GM 处理下,根系分隔处理的大豆地上部生物量与不分隔处理

没有显著差异,但根系隔塑料布处理的大豆根系生物量显著高与不分隔处理,说明隔塑料布处理对大豆根系生物量的积累效果明显。GE 处理下,不分隔与分隔处理间的大豆地上部和根系生物量并没有显著差异。

表2 数据表明,根系不分隔处理下, GE 处理的大豆根冠比显著大于 NM 和 GM 处理。根系隔尼龙网处理下, NM 处理和 GE 处理的大豆根冠比皆显著大于 GM 处理。根系隔塑料布处理下, 3 种不同处理间的大豆根冠比没有显著差异。NM 处理下,根系隔尼龙网处理的大豆根冠比显著大于不分隔处理,但与根系隔塑料布处理无显著差异。GM 处理下,根系不分隔与分隔处理之间的大豆根冠比无显著差异。GE 处理下,根系不分隔和隔尼龙网处理的大豆根冠比均显著大于根系隔塑料布处理,但两者之间差异并不显著。

2.2 不同 AMF 接种与根系分隔方式对大豆植株磷指标的影响

由表3 可知,经双因素方差分析,间作大豆植株的地上部磷含量、磷吸收量,根系磷含量、磷吸收量,根系磷吸收效率在不同菌根处理与分隔处理间均有显著的交互作用。

2.2.1 不同处理对间作大豆植株磷含量的影响

由表4 可知,根系不分隔处理下,不接种和 GM 处理的大豆地上部磷含量显著高于 GE 处理;根系分隔处理情况下,不接种处理与接种处理的大豆地上部磷含量无显著差异。说明根系分隔状况下接种 GE 和 GM 真菌并不能促进磷素向大豆地上部迁移。

NM 处理和 GE 处理下,根系不分隔处理与分隔处理的大豆地上部磷含量无显著差异,根系隔尼龙网与根系隔塑料布处理之间也无显著差异。GM 处理下,不分隔处理的大豆地上部磷含量最大,且显著高于两种分隔处理。说明接种 GM 时,不分隔处

理能有效增加大豆地上部磷量,而分隔处理却不利于磷素向大豆地上部迁移。

表 2 不同菌根接种和根系分隔方式下间作大豆根系侵染率及生长指标

Table 2 Colonization rate and growth indices of intercropping soybean under different AMF inoculation and roots separation ways

处理 Treatment		侵染率 Colonization rate/%	根长 Root length /m	生物量 Dry biomass/g·pot ⁻¹		根冠比 Roots/shoots ratio
根系分隔方式 Roots separation way	菌根接种 AMF inoculation			地上部 Shoots	根系 Roots	
不分隔 No separation	NM	0 b	205.3 ± 10.8 a	4.16 ± 0.33 bcd	0.58 ± 0.04 d	0.14 ± 0.02 cd
	GM	45.0 ± 7.0 a	106.4 ± 12.5 e	4.95 ± 0.06 ab	0.68 ± 0.08 cd	0.14 ± 0.02 d
	GE	40.2 ± 3.3 a	121.9 ± 10.0 de	3.79 ± 0.37 cd	0.99 ± 0.06 ab	0.27 ± 0.03 a
尼龙网分隔 Nylon net separation	NM	0 y	191.5 ± 16.5 ab	4.87 ± 0.13 ab	1.21 ± 0.05 a	0.25 ± 0.02 ab
	GM	38.2 ± 7.2 x	105.9 ± 10.2 e	4.83 ± 0.02 ab	0.81 ± 0.09 bcd	0.17 ± 0.02 cd
	GE	46.6 ± 5.7 x	166.4 ± 14.8 abc	3.50 ± 0.23 d	0.93 ± 0.09 bc	0.27 ± 0.04 a
塑料膜分隔 Plastic-film separation	NM	0 β	157.2 ± 10.9 bed	4.25 ± 0.23 bcd	0.90 ± 0.09 bc	0.21 ± 0.01 abc
	GM	47.8 ± 1.3 α	142.6 ± 11.8 cde	5.39 ± 0.50 a	0.96 ± 0.16 ab	0.18 ± 0.03 bcd
	GE	39.8 ± 5.0 α	116.8 ± 8.3 e	4.37 ± 0.07 bc	0.83 ± 0.04 bc	0.19 ± 0.01 bcd

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 small letters in same column show significant differences at $P < 0.05$ level. Different letter systems (abc, xyz, αβγ) indicate not significant interaction between roots separation way and AFM inoculation. The same below.

表 3 间作大豆植株磷指标在不同菌根接种和根系分隔方式下的方差分析

Table 3 Variance analysis of phosphorus indexes of intercropping soybean plants under different AMF inoculation and roots separation ways

因素 Factor	地上部 Shoots		根系 Roots		根系磷吸收效率 P uptake efficiency of roots
	磷含量	磷吸收量	磷含量	磷吸收量	
	P content	P uptake	Pcontent	P uptake	
菌根接种 AMF inoculation	*	**	**	NS	**
根系分隔方式 Roots separation way	*	*	NS	NS	***
菌根接种 × 根系分隔方式 AMF inoculation × roots separation way	*	*	*	**	**

根据表 4 可知,根系不分隔处理下,GM 处理的大豆根系磷的含量显著高于 GE 处理,但与不接种处理无显著差异。根系隔尼龙网处理下,大豆根系磷含量表现出随 NM、GM、GE 处理相应降低的趋势,其中 NM 处理的大豆根系磷含量显著大于 GE 处理。根系隔塑料布处理下,GM 处理的大豆根系磷含量最高,而 NM 处理与 GE 处理间无显著差异。说明 GM 真菌可能能够较好地促进大豆根系对磷素的吸收。

不接种处理下,根系不分隔和根系隔尼龙网处理的大豆根系磷含量显著大于根系隔塑料布处理。无论接种 GM 或 GE 真菌,其大豆根系磷含量在 3 种分隔方式下均无显著差异。说明分隔处理并不能显著提高间作大豆根系的磷含量。

2.2.2 不同处理对间作大豆植株磷吸收量的影响

由表 4 可知,根系隔尼龙网和隔塑料布处理下,3 种不同接种处理的大豆地上部磷吸收量之间差异

不显著。根系不分隔处理下,GM 处理的大豆地上部磷吸收量显著大于 NM 处理与 GE 处理。

NM 处理和 GE 处理下,大豆地上部磷的吸收量在不同根系分隔方式间无显著差异。GM 处理下,根系不分隔处理的大豆地上部磷吸收量显著大于根系分隔处理,并以隔尼龙网处理较低,这与对磷含量的影响基本一致,再一次说明分隔处理可能减少了磷素向大豆地上部的迁移。且所有处理中以 GM-不分隔处理下的大豆地上部磷吸收量最高,说明 GM-不分隔处理可能会使大豆将磷素最多的向地上部迁移。

由表 4 不难看出,根系不分隔处理下,大豆根系磷吸收量表现出随 GE、GM、NM 处理相应降低的趋势,但三者之间并无显著差异。根系隔尼龙网处理下,不接种处理的大豆根系磷吸收量显著大于接种处理。根系隔塑料布处理下,GM 处理的大豆根系磷吸收量与 GE 处理之间无显著差异,但显著大于

NM 处理。说明间作大豆根系在隔塑料布状态下接种 GM 真菌对其根系磷吸收量有一定提升作用。

NM 处理下,根系隔尼龙网处理的大豆根系磷吸收量显著高于不分隔和隔塑料布处理。GM 处理和 GE 下,3 种根系分隔方式下的大豆根系磷吸收量无显著差异。说明不接种处理下的间作大豆根系磷吸收量在根系隔尼龙网状态下有显著的提升作用,但接种处理下并没有促进作用。

2.2.3 不同 AMF 接种与根系分隔方式对大豆根系

表 4 不同菌根接种和根系分隔方式下间作大豆地上部和根系的磷指标

Table 4 Phosphorus indexes of shoots and roots of intercropping soybean under different treatments under different AMF inoculation and roots separation ways

处理 Treatment		地上部 Shoots		根系 Roots		根系磷吸收效率
根系分隔方式 Roots separation way	菌根接种 AMF inoculation	磷含量 P content/%	磷吸收量 P uptake/mg·pot ⁻¹	磷含量 P content/%	磷吸收量 P uptake/mg·pot ⁻¹	P uptake efficiency of roots/ $\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$
不分隔 No separation	NM	0.39 ± 0.04 a	15.92 ± 0.57 b	0.24 ± 0.01 ab	1.36 ± 0.09 c	30.29 ± 2.06 a
	GM	0.46 ± 0.05 ab	22.69 ± 2.63 a	0.24 ± 0.03 a	1.67 ± 0.31 bc	36.89 ± 6.01 a
	GE	0.27 ± 0.03 c	10.41 ± 2.25 b	0.18 ± 0.02 bcd	1.83 ± 0.28 bc	12.43 ± 2.51 b
尼龙网分隔 Nylon net separation	NM	0.32 ± 0.04 bc	15.68 ± 2.41 b	0.25 ± 0.02 a	2.97 ± 0.29 a	15.69 ± 2.53 b
	GM	0.23 ± 0.02 c	11.25 ± 1.16 b	0.22 ± 0.02 abc	1.75 ± 0.01 bc	16.04 ± 0.49 b
	GE	0.31 ± 0.03 bc	10.87 ± 1.71 b	0.17 ± 0.02 cd	1.57 ± 0.01 c	13.95 ± 3.38 b
塑料膜分隔 Plastic-film separation	NM	0.38 ± 0.01 ab	16.15 ± 1.09 b	0.15 ± 0.01 d	1.38 ± 0.19 c	19.60 ± 0.55 b
	GM	0.28 ± 0.04 bc	14.96 ± 0.46 b	0.25 ± 0.02 a	2.49 ± 0.63 ab	18.94 ± 2.29 b
	GE	0.28 ± 0.01 bc	12.24 ± 0.46 b	0.20 ± 0.01 bcd	1.66 ± 0.15 bc	16.68 ± 0.13 b

3 结论与讨论

3.1 不同 AMF 对间作大豆生长及磷素累积的影响

本研究结果显示,两种菌根真菌 GM、GE 均可侵染大豆根系,但侵染率不同,可能与 GM 和 GE 分离地和宿主植物不同有关。虽然两种真菌对大豆的侵染能力不同,但对大豆生长指标有着类似的影响,接种 AMF 无论根系分隔状况如何,均降低了大豆根长,这可能由于间作大豆未接种 AMF 时当前根系吸收的养分满足不了植株需要,大豆根系需继续伸长满足生长需要,而接种处理则可以通过菌丝延伸帮助植株吸收营养物质,减少对根系长度的依赖^[4],故接种处理的大豆根系较不接种处理要短。另外,无论何种根系分隔处理,接种 GM 处理的大豆地上部生物量较 GE 处理高,这说明 GM 真菌与大豆的共生效果更好,从而促进植株地上部的生长。前人的研究^[1,4,13]表明利用 AMF 的生长、繁殖、侵染可以改善植物生长的根际环境,并能促进宿主植物对磷等矿质元素的吸收及其生长发育,达到使作物增产、增效的目的。本研究中接种处理对于大豆地上部及根系磷含量贡献并不明显,这一方面可能由

磷吸收效率的影响。由表 4 可知,根系不分隔处理下,不接种处理和 GM 处理的大豆根系磷吸收效率显著大于 GE 处理。根系隔尼龙网和隔塑料布处理下,3 种不同接种处理之间的根系磷吸收效率无显著差异。

NM 和 GM 处理下,根系不分隔的大豆根系磷吸收效率显著高于分隔处理。GE 处理下,根系不分隔和分隔处理间无显著差异。其中 GM-不分隔处理对大豆根系的吸收效率的促进效果最好。

于间作根系分隔状况影响了根系分泌物及根际微生物活性而阻碍磷的吸收及向地上部的运输,另一方面可能因为间作玉米对磷营养需求大且对磷的竞争力明显比大豆强的缘故^[7]。宋勇春等^[2]与李淑敏等^[14]研究表明接种 AMF 可以促进三叶草、玉米和蚕豆对磷的吸收,而本研究中大豆地上部磷吸收量及根系磷吸收效率只有在接种 GM 处理下表现出较高水平,而接种 GE 处理下则较低,说明 AMF 对宿主植物磷吸收的影响与作物类型及 AMF 种类有关,其中 GM 真菌可有效改善间作大豆的磷营养状况。

3.2 根系分隔方式对间作大豆生长及磷素累积的影响

大豆间作比单作更能充分利用养分资源,其中根系对矿质养分的吸收贡献明显^[15]。本研究生长指标中大豆根长在根系隔塑料布处理下有所降低,这与郝艳茹等^[16]采用隔根技术对小麦和大豆的研究结论基本一致。而大豆的地上部和根系生物量在隔塑料布处理下表现出一定的优势,这可能因为间作大豆植株在根系隔塑料布处理下可以避免和玉米竞争矿质营养,故能更好的生长。磷素指标中除大豆根系磷含量、磷吸收量外,大豆地上部磷含

量、地上部磷吸收量、根系磷吸收效率 3 个指标的最大值均出现在根系不分隔处理中,其中大豆根系磷含量与磷吸收量在 GM-隔尼龙网处理下显著大于另外两种处理,这可能是由于根系无分隔处理使间作体系发挥了其提高根际微生物群落多样性、改变群落构成的优势,提高了矿质资源利用效率^[17]。总体上根系不分隔处理对大豆磷营养的吸收表现出一定优势。

3.3 菌根与根系分隔方式对间作大豆生长及磷素累积的影响

前人研究表明,接种 AMF 与间作模式均能增加植株根系对土壤磷的吸收并促进其生长^[1,4],一方面由于菌根菌丝可以伸展到根系达不到的区域内吸取磷素等矿物营养,另一方面土壤中的有机磷必须经各种磷酸酶的转化才能被植株和真菌利用,而接种 AMF 可以增强活化有机磷的效率。此外,间作模式通过改良根系微环境,也可以提高土壤养分有效性而增加作物产量^[18-19]。本研究中,根系不分隔时,由于大豆处于竞争劣势地位^[7],根系不能充分吸收 N、P 等营养,接种 AMF 则有效促进对根系微环境中养分的吸收,减轻植株对根系长度的依赖,通过菌丝延伸帮助植株吸收营养物质,在根系分隔处理中,由于没有和玉米的直接竞争,大豆根系吸收的养分已满足植株需要,而接种处理使真菌消耗光合产物而导致抑制大豆根系的伸长,故不接种处理的大豆根长要大于接种处理。大豆总生物量最大值均出现在根系隔塑料布并接种 GM 真菌处理下,这说明根系隔塑料布并接种 GM 真菌能显著提高大豆产量。根系不分隔处理下,接种 GM 处理的大豆地上部磷含量、地上部磷吸收量、根系磷含量、根系磷吸收效率均占据优势。这证实接种 AMF 对根系的磷含量和磷吸收量确实具有促进作用并可发挥更高的吸磷潜力,但根系分隔处理则一定程度上影响了根系磷素向地上部的运输,这是否是缘于分隔处理对间作大豆根系创造的微环境和大豆根系分泌物 AMF 的共同作用,将间作大豆吸收的磷素固定在根系中,还有待进一步研究。但总体上间作大豆在 GM-不分隔处理下生长最佳,对磷素吸收量最高。

接种 GM 真菌能补偿间作大豆因处竞争劣势地位而丧失的磷营养;间作玉米/大豆根系不分隔明显改善大豆生长状况;GM-不分隔处理是提高间作大豆磷吸收效率的最佳组合。

参考文献

[1] Smith S E, Read D J. Mycorrhizal symbiosis[M]. London: Academic Press, 1997:379-383.

- [2] 宋勇春,冯固,李晓林. 不同磷源对红三叶草根际和菌根际磷酸酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(5):781-784. (Song Y C, Feng G, Li X L. Effects of different P sources on phosphatase activity of mycorrhizosphere of red clover inoculated with AMF [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(5):781-784.)
- [3] 冯固,杨茂秋,白灯莎,等. 土壤磷、肥料磷和 VA 菌根真菌对植物磷营养的贡献[J]. 核农学报, 1997, 11(4):237-242. (Feng G, Yang M Q, Bai D S, et al. Contribution of soil-³²P, fertilizer-³²P and VA mycorrhizal fungi to phosphorus nutrition of corn plant[J]. 1997, 11(4):237-242.)
- [4] 李晓林,冯固. 丛枝菌根生态生理[M]. 北京: 华文出版社, 2001. (Li X L, Feng G. Arbuscular mycorrhizal ecological physiological[M]. Beijing: Sino-Culture Press, 2001.)
- [5] 张国盛,李中杰,艾锐,等. 滇中本地和外来植物群落对紫色土理化性质的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(4):852-858. (Zhang G S, Li Z J, Ai R, et al. Impacts of native and exotic vegetation types on cambisols properties in the mid-Yunnan Plateau[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(4):852-858.)
- [6] 花可可,朱波,王小国. 紫色土坡耕地可溶性有机碳径流迁移特征[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5):81-88. (Hua K K, Zhu B, Wang X G. Characteristics of dissolved organic carbon transport via overland flow and interflow on sloping cropland of purple soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(5):81-88.)
- [7] 刘均霞,陆引翌,远红伟,等. 玉米大豆间作条件下磷素的吸收利用[J]. 山地农业生物学报, 2007, 26(4):288-291. (Liu J X, Lu Y G, Yuan H W, et al. Study on phosphorus being absorbed and utilized under the condition of soybean and maize intercropping[J]. Journal of Mountain Agriculture & Biology, 2007, 26(4):288-291.)
- [8] 徐强,程智慧,卢涛,等. 间作对植株生长及养分吸收和根际环境的影响[J]. 西北植物学报, 2010(2):350-356. (Xu Q, Cheng Z H, Lu T, et al. Effects of intercropping on growth, nutrient uptake and rhizosphere environment in plants[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2010(2):350-356.)
- [9] Phillips J M, Hayman D S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection [J]. Transactions of the British Mycological Society, 1970, 55:158-161.
- [10] Giovannetti M, Mosse B. Evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots [J]. New Phytologist, 1980, 84:489-500.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析(第 3 版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007:268-270, 389-391. (Bao S D. Soil Agro-chemical Analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2007:268-270, 389-391.)
- [12] Azcón R, Ambrosano E, Charest C. Nutrient acquisition in mycorrhizal lettuce plants under different phosphorus and nitrogen concentration [J]. Plant Science, 2003, 165:1137-1145.
- [13] Satter M, Hanafi M, Mahmud T, et al. Influence of arbuscular mycorrhiza and phosphate rock on uptake of major nutrients by *Acacia mangium* seedlings on degraded soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 2006, 42: 345-349.

- and land use history on the bacterial diversity in black soil [J]. *Soybean Science*, 2008, 27(3):480-486.)
- [13] 孟庆杰,许艳丽,李春杰,等. 不同植被覆盖对黑土微生物功能多样性的影响[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(7):1134-1140. (Meng Q J, Xu Y L, Li C J, et al. Effects of different vegetation coverage on microbial functional diversity in black soil [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(7):1134-1140.)
- [14] Bossio D A, Scow K M. Impacts of carbon and flooding on soil microbial communities: Phospholipid fatty acid profiles and substrate utilization patterns [J]. *Microbial Ecology*, 1998, 35:265-278.
- [15] 毕明丽,宇万太,姜子绍,等. 利用 PLFA 方法研究不同土地利用方式对潮棕壤微生物群落结构的影响[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(9):1834-1842. (Bi M L, Yu W T, Jiang Z S, et al. Study on the effects of different land use patterns on microbial community structure in aquatic brown soil by utilizing PLFA method [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(9):1834-1842.)
- [16] Gladys L M, Laure B, Alexandra G, et al. Rapid effects of plant species diversity and identity on soil microbial communities in experimental grassland ecosystems [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38: 2336-2343.
- [17] 台莲梅,张红梅,闫风云,等. 重迎茬对大豆根际土壤微生物数量的影响[J]. *土壤肥料*, 2003(6):41-42. (Tai L M, Zhang H M, Yan F Y, et al. Effect of the amount of soil microbe in soybean rhizosphere under the condition of soybean continuous or companion cropping [J]. *Soils and Fertilizers*, 2003(6):41-42.)
- [18] 李坤,郭修武,孙英妮,等. 葡萄连作对土壤细菌和真菌种群的影响[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(12):3109-3114. (Li K, Guo X W, Sun Y N, et al. Effect of grape-replanting on soil bacterial and fungal populations [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(12):3109-3114.)
- [19] 马宁宁,李天来. 设施番茄长期连作土壤微生物群落结构及多样性分析[J]. *园艺学报*, 2013, 40(2):255-264. (Ma N N, Li T L. Effect of long-term continuous cropping of protected tomato on soil microbial community structure and diversity [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2013, 40(2):255-264.)
- [20] 许艳丽,韩晓增,王光华. 大豆重迎茬研究[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,1995:57-66 (Xu Y L, Han X Z, Wang G H. *Research of alternate-year and continuous-cropping on soybean* [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 1995:57-66)
- [21] 魏巍. 大豆长期连作土壤对根腐病原微生物的抑制作用[D]. 北京:中国科学院,2012. (Wei W. *The suppressiveness caused by long-term continuous cropping of soybean on the root rot and pathogens* [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2012.)
- [22] 谷岩,邱强,王振民. 连作大豆根际微生物群落结构及土壤酶活性[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(19):3955-3964. (Gu Y, Qiu Q, Wang Z M. Effects of soybean continuous cropping on microbial and soil enzymes in soybean rhizosphere [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(19):3955-3964.)
- [23] 刘素慧,刘世琦,张自坤,等. 大蒜连作对其根际土壤微生物和酶活性的影响[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(5):1000-1006. (Liu S H, Liu S Q, Zhang Z K, et al. Influence of garlic continuous cropping on rhizosphere soil microorganisms and enzyme activities [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(5):1000-1006.)
- [24] 段玉琪,晋艳,陈泽斌,等. 烤烟轮作与连作土壤细菌群落多样性比较[J]. *中国烟草学报*, 2012, 18(6):53-59. (Duan Y Q, Jin Y, Chen Z B, et al. Comparison of bacteria diversity between tobacco plantation soils of rotational cropping and continuous cropping [J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2012, 18(6):53-59.)
- [25] 时鹏,高强,王淑平,等. 玉米连作及其施肥对土壤微生物群落功能多样性影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(22):6173-6182. (Shi P, Gao Q, Wang S P, et al. Effect of continuous cropping of corn and fertilization on soil microbial community functional diversity [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(22):6173-6182.)
- [26] Smalla K, Wachtendorf U, Heuer H. Analysis of BIOLOG GN substrate utilization patterns by microbial communities [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1998, 64(4):1220-1225.
- (上接第 441 页)
- [14] 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.)
- [15] 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.)
- [16] 郝艳如,劳秀荣,赵秉强,等. 隔根对小麦/玉米间套种植生长特性的影响[J]. *麦类作物学报*, 2003, 23(1):71-74. (Hao Y R, Lao X R, Zhao B Q, et al. Effect of separating root method on wheat and corn intercropping system [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2003, 23(1):71-74.)
- [17] 宋亚娜, Marschner P, 张福锁, 等. 小麦/蚕豆, 玉米/蚕豆和小麦/玉米间作对根际细菌群落结构的影响[J]. *生态学报*, 2006, 26(7):2268-2274. (Song Y N, Marschner P, Zhang F S, et al. Effect of intercropping on bacterial community composition in rhizosphere of wheat (*Triticum aestivum* L.), maize (*Zea mays* L.) and faba bean (*Vicia faba* L.) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(7):2268-2274.)
- [18] He Y, Ding N, Shi J C, et al. Profiling of microbial PLFAs: Implications for interspecific interactions due to intercropping which increase phosphorus uptake in phosphorus limited acidic soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 57:625-634.
- [19] Betencourt E, Duputel M, Colomb B, et al. Intercropping promotes the ability of durum wheat and chickpea to increase rhizosphere phosphorus availability in a low P soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 46:181-190.