

隔根与接种 FM 对红壤上玉米/大豆植株生长及氮素利用的影响

汪新月^{1,2}, 张仕颖^{1,2}, 岳献荣¹, 谷林静^{1,3}, 夏运生^{1,2*}, 张乃明^{1,2}, 岳志权¹

(1 云南农业大学, 云南昆明 650201; 2 云南省土壤培肥与污染修复工程实验室, 云南昆明 650201;

3 四川省科学技术信息研究所, 四川成都 610016)

摘要: 【目的】探讨接种摩西管柄囊霉 (*Funneliformis mosseae*, FM) 和不同隔根处理对红壤上间作植株生长、植株氮吸收量和土壤氮的影响。【方法】采用盆栽模拟试验, 设不同菌根处理[不接种 (NM)、接种 (FM)]与玉米/大豆不同隔根处理 (根系不分隔、部分分隔、完全分隔)。【结果】接种 FM 的玉米、大豆根系均有一定的侵染, 菌根侵染率在部分分隔处理下最低。间作根系的分隔处理对玉米和大豆的菌根依赖性产生了明显影响, 大豆的菌根依赖性随间作交互作用强度的加大而增加。无论何种隔根处理, 接种 FM 均显著增加了玉米植株生物量, 其地上部生物量高出 NM 处理 11.7%~81.4%, 根系生物量高出 NM 处理 18.8%~166.7%。根系分隔处理下, 接种 FM 均显著降低了大豆生物量。同一隔根方式下, 接种 FM 明显提高了玉米的植株氮吸收量和根系氮吸收效率。在不分隔处理下, 接种 FM 显著增加了大豆的地上部氮吸收量, 但在部分分隔和完全分隔处理下则反而有所下降; 在部分分隔处理下, 接种 FM 显著降低了大豆根系的氮吸收量, 在不分隔和完全分隔处理下亦呈下降趋势。在部分分隔处理下, 接种 FM 显著提高了大豆根系氮吸收效率, 在完全分隔处理下反而有明显下降, 且在 NM-不分隔处理下的大豆根系氮吸收效率最低。相关分析显示, 玉米、大豆植株氮吸收量与土壤碱解氮含量呈显著负相关。【结论】接种丛枝菌根真菌 (AMF) 和隔根方式的组合能不同程度地影响玉米和大豆对氮的吸收利用及间作植株的生长, 并能对土壤有效氮产生较大影响。所有的复合处理中, AMF 和间作根系部分分隔处理组合对玉米和大豆生长及氮素利用的促进作用较好, 并能有效降低土壤碱解氮的残留。

关键词: 丛枝菌根真菌; 玉米; 大豆; 隔根方式; 红壤; 氮

Effects of inoculating *Funneliformis mosseae* and intercropping under different roots separation methods on plant growth and nitrogen utilization of maize and soybean in red soils

WANG Xin-yue^{1,2}, ZHANG Shi-ying^{1,2}, YUE Xian-rong¹, GU Lin-jing^{1,3}, XIA Yun-sheng^{1,2*},
ZHANG Nai-ming^{1,2}, YUE Zhi-quan¹

(1 Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2 Laboratory of Soil Fertilizer and Pollution Repair in Yunnan Province, Kunming 650201, China; 3 Sichuan Institute of Scientific and Technical Information, Chengdu 610016, China)

Abstract: 【Objectives】This article explored effects of inoculating arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and different root separation methods on plant growth, nitrogen (N) uptake and available nitrogen content in soils. 【Methods】Two mycorrhizal treatments [without inoculation (NM) and with inoculation of *Funneliformis mosseae* (FM)] and three root separation methods (no separation, partial separation and full separation) were set up, and N uptakes by intercropping plants and available N contents in red soils were determined. 【Results】Results showed that the roots of maizes and soybeans were all infected by FM fungi, the mycorrhizal

收稿日期: 2016-06-28 接受日期: 2016-12-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41561057); 云南省教育厅科研基金课题 (2015Y201); 云南农业大学土壤资源利用与保护省创新团队开放基金 (2015HC018) 资助。

作者简介: 汪新月 (1992—), 女, 湖北襄阳人, 硕士研究生, 主要从事农业环境保护方面的研究。E-mail: xywangxinyue@163.com

* 通信作者 E-mail: yshengxia@163.com

colonization rates were the lowest under the partial separation treatment. The root separation methods had obvious influence on the mycorrhizal dependency of maize and soybean, and the mycorrhizal dependency of soybean was increased along with the increase of intercropping interaction strength. Compared to the NM treatment, the FM inoculation increased the shoot and root biomass significantly regardless of the roots separation methods, and the shoot biomass of maize inoculated with FM was 11.7% to 81.4% higher than the NM treatment and the root biomass of the FM treatment was 18.8% to 166.7 higher than the NM treatment. The biomass of soybean was significantly decreased by the FM inoculation under root separation conditions. Under the same root separation way, FM inoculation increased the N uptake of maize plants and N uptake efficiency of roots obviously. Under no-separation condition, the N uptake by soybean shoots was increased by the FM inoculation significantly, but those were decreased under the partial separation and full separation conditions. Under the partial separation way, the N uptake by soybean roots was significantly decreased by the FM inoculation, and those were also decreased under the no-separation and full separation conditions. The N uptake efficiency of soybean roots under FM inoculation was increased under the partial separation condition, but it was decreased obviously under the full separation condition. The N uptake efficiency of soybean roots was the lowest under the NM and no-separation condition in all complex treatments. The available N contents in soils were significantly and negatively correlated with the N uptakes by maize and soybean plants. 【 **Conclusions** 】 The interactions between AMF inoculation and root separation methods could affect the growth and N uptake of maize and soybean in different degrees, and could also influence the available N contents in soils. Among all compound treatments, the enhanced effect of the combination treatment of the AMF inoculation and partial separation on maize and soybean growth and N utilization was the largest, and it could also decrease the available N contents in soils.

Key words: arbuscular mycorrhizal fungi; maize; soybean; root separation method; red soil; nitrogen

丛枝菌根真菌 (arbuscular mycorrhizal fungi, AMF) 在自然界的分布极为广泛, 能与绝大多数陆生植物形成共生体系。研究表明, 共生体的存在有利于提高宿主植物对矿物养分如氮、磷等的吸收^[1-5]。近年来, 关于丛枝菌根与氮的研究重点在丛枝菌根和 AMF 菌丝对土壤氮的竞争吸收比较及氮形态研究上, 证实了 AMF 根外菌丝在氮素吸收利用中的贡献^[6-8]。间作是极具中国特色的一种种植制度, 能充分利用肥、水、温、光等资源。豆科与禾本科的间作优势很重要的一个方面体现在对土壤养分资源如氮、磷的高效利用, 提高作物的产量^[9-10], 其中间作处理中的根系分隔条件还能影响间作植物的氮素吸收及土壤氮的残留^[11]。

有关菌根与隔根方式的协同作用, 在玉米/大豆间作条件下, 李淑敏等^[12]研究了北方黑土上菌根对间作玉米和大豆氮素利用的影响, 贾广军等^[4]研究了南方紫色土上菌根对间作大豆生长及磷素累积的影响, 然而有关菌根和隔根方式的协同作用对南方红壤氮吸收利用影响尚缺乏研究。本文采用间作根系分隔盆栽模拟试验, 通过接种 AMF, 研究了红壤上菌根共生与隔根技术对玉米/大豆生长及氮素吸收利

用的影响, 可为菌根与隔根技术协同提高作物养分资源的高效利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试作物为玉米和大豆, 玉米品种为‘农大 108’, 大豆品种为‘滇豆 4 号’。挑选籽粒均匀饱满的玉米和大豆种子, 使用 10% H₂O₂ 浸泡消毒 10 min, 然后用蒸馏水冲洗几次后均匀铺放于有湿润定量滤纸的培养皿中, 于 25℃ 恒温培养箱中催芽 2 d, 种子发芽大约 1 cm 左右播种, 待长势稳定后以生长势为依据进行间苗, 留下比较整齐的 2 株玉米幼苗和 4 株大豆幼苗。

供试土壤为红壤, 采集于滇池流域晋宁县坡地, 其基本理化性质为 pH 6.21、有机质 23.59 g/kg、碱解氮 133.0 mg/kg、有效磷 2.1 mg/kg、速效钾 75.0 mg/kg。

供试菌剂为摩西管柄囊霉 (*Funneliformis mosseae*, FM), 试验所用 FM (BGG GZ01A, 1511C0001BGCAM0012) 购于北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 供试丛枝菌根菌剂经玉米和苜蓿扩繁后获得, 扩繁基质由灭菌后的土壤与河沙

(1:1) 混合而成。用玉米和苜蓿接种 FM 并生长 10 周后, 收获含有真菌孢子、菌丝、侵染根段等繁殖体及根际基质混合物作为供试菌剂。

1.2 试验设计

盆栽模拟试验于 2015 年 10~12 月在云南农业大学科研大棚内进行。试验设两个因素, 分别为隔根方式和菌根处理, 共 6 个处理: 不分隔-不接种 (NM)、部分分隔-NM、完全分隔-NM、不分隔-FM、部分分隔-FM、完全分隔-FM, 每处理重复 4 次。完全分隔采用塑料布进行分隔, 根系间无交互作用; 部分分隔采用尼龙网进行分隔, 可将两作物根系分开, 但生理活性物质可在根系间交换, 且菌根菌丝可以穿过; 不分隔时, 间作植物根系完全交叉, 竞争和促进作用共存。

试验装置由 PVC 管 (直径 16 cm、高 25 cm) 和花盆底座 (直径 22 cm) 组成, 沿 PVC 圆管直径从顶部 2 cm 处向底部设置纵向卡槽, 将塑料布或尼龙网固定在卡槽内, 并用聚氯乙烯粘合剂粘合, 使 PVC 圆管隔成 2 个同等体积的栽培室。根系分隔处理 (部分分隔、完全分隔) 每个栽培室装入灭菌土壤 2.4 kg, 其中接种 FM 处理每栽培室添加 0.1 kg 菌剂 (每 10 g 供试菌剂约包含 120 个 FM 真菌孢子) 并与中间土壤 (0.9 kg) 混匀。根系不分隔处理装置内装入灭菌土壤 4.8 kg, 且接种 AMF 处理的菌剂加入量为 0.2 kg。对照处理加入等量的灭菌剂 (菌剂 0.1 MPa、120℃ 高压蒸汽间歇灭菌 2 h, 风干后获得)。

玉米、大豆生长约 90 d 后, 测量玉米和大豆的株高, 并将植株的地上部和根系分开收获, 根系用蒸馏水多次冲洗后晾干。取一半根系, 剪成 1 cm 根段, 取用部分根样采用曲利苯蓝-方格交叉法^[13]测定玉米根系的根长和菌根侵染率; 其他部分和地上部一

起经杀青后烘干 (70℃, 72 h)、称重、磨细用于生物量和氮的测定, 其中植株含氮量采用半微量开氏定氮法^[14]。

1.3 数据处理与分析

试验数据采用 Excel 2003 软件进行处理, 采用 SPSS 19.0 统计软件进行方差分析, 检验接种 AMF 处理和隔根方式间的交互作用, 在交互作用显著情况下对所有复合处理进行 Duncan 多重比较 ($P < 0.05$), 分析不同菌根-隔根方式复合处理间的差异显著性。

菌根依赖性是指在一定土壤肥力水平下植物通过形成菌根而能够达到的最大生物量或产量的程度^[9]。计算公式:

菌根依赖性 (%) = (接种处理干重 - 不接种处理干重) × 100 / 接种处理干重

植株氮吸收量 (mg/pot) = 植株氮含量 (%) × 植株干重 (g/pot);

根系氮吸收效率 (μg/mg) = 植株养分吸收量 (μg) / 对应根系生物量 (mg)。

2 结果与分析

2.1 接种 FM 和隔根处理对玉米和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, 接种 FM 处理和隔根处理对玉米、大豆的菌根侵染率、根长、地上部干重、根系干重和根冠比均有显著影响, 并存在显著交互作用。

2.1.1 根系 AMF 侵染率及根长 表 2 和表 3 表明, 不接种 (NM) 条件下, 玉米和大豆均没有侵染, 在接种 FM 后, 玉米和大豆均有一定比例的菌根侵染。除不分隔处理外, 玉米的侵染率均高于大豆; 3 种隔

表 1 不同隔根处理下接种 FM 玉米、大豆植株菌根侵染率和生长指标的方差分析

Table 1 Variance analysis of colonization rate and growth indices of maize and soybean plants under the FM inoculation and different root separation methods

处理 Treatment	菌根侵染率 Colonization rate		根长 Root length		地上部干重 Shoot biomass		根系干重 Root biomass		根冠比 Root/shoot ratio	
	玉米 Maize	大豆 Soybean	玉米 Maize	大豆 Soybean	玉米 Maize	大豆 Soybean	玉米 Maize	大豆 Soybean	玉米 Maize	大豆 Soybean
	接种处理 Inoculation	***	***	***	***	***	NS	***	*	*
隔根处理 Root separation	*	*	**	*	NS	**	**	***	***	NS
接种处理 × 隔根处理 Inoculation × root separation	*	*	**	***	**	***	***	***	**	*

注 (Note): ***— $P < 0.001$; **— $P < 0.01$; *— $P < 0.05$; NS—不显著 No significance.

表 2 不同隔根处理下接种 FM 对玉米菌根侵染率及植株生长状况的影响

Table 2 Effect of the FM inoculation on colonization rate and plant growth of maize under different root separation methods

因素 Factor		菌根侵染率 Colonization rate (%)	根长 Root length (m/pot)	生物量 Biomass (g/pot)		根冠比 Root/shoot ratio
隔根处理 Root separation	接种处理 Inoculation treatment			地上部 Shoot	根系 Root	
不分隔 No separation	NM	0 c	296 ± 76 c	5.2 ± 0.6 de	1.6 ± 0.1 bc	0.30 ± 0.05 b
	FM	45 ± 2 a	378 ± 36 ab	7.2 ± 0.4 ab	1.9 ± 0.2 b	0.26 ± 0.03 bc
部分分隔 Partial separation	NM	0 c	166 ± 16 d	6.0 ± 0.6 cd	1.3 ± 0.3 c	0.21 ± 0.03 c
	FM	41 ± 4 b	412 ± 52 a	6.7 ± 0.6 bc	1.7 ± 0.3 bc	0.26 ± 0.03 bc
完全分隔 Full separation	NM	0 c	321 ± 17 bc	4.3 ± 0.3 e	1.2 ± 0.2 c	0.29 ± 0.04 b
	FM	48 ± 3 a	444 ± 39 a	7.8 ± 1.0 a	3.2 ± 0.5 a	0.41 ± 0.05 a

注 (Note): NM—不接种 Without inoculation; FM—接种 With inoculation of FM. 同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)
Values followed by different letters are significantly different among treatments ($P < 0.05$).

表 3 不同隔根处理下接种 FM 对大豆菌根侵染率及植株生长状况的影响

Table 3 Effect of the FM inoculation on colonization rate and growth conditions of soybean under different root separation methods

因素 Factor		菌根侵染率 Colonization rate (%)	根长 Root length (m/pot)	生物量 Dry biomass (g/pot)		根冠比 Root/shoot ratio
隔根处理 Root separation	接种处理 Inoculation treatment			地上部 Shoot	根系 Root	
不分隔 No separation	NM	0 d	119 ± 8 b	2.94 ± 0.24 cd	0.53 ± 0.01 b	0.18 ± 0.02 ab
	FM	48 ± 4 a	123 ± 22 b	3.95 ± 0.12 a	0.65 ± 0.02 a	0.16 ± 0.01 abc
部分分隔 Partial separation	NM	0 d	186 ± 23 a	3.61 ± 0.05 ab	0.67 ± 0.08 a	0.19 ± 0.02 a
	FM	33 ± 8 c	51 ± 11 c	3.16 ± 0.04 c	0.49 ± 0.02 b	0.16 ± 0.01 bc
完全分隔 Full separation	NM	0 d	174 ± 8 a	3.31 ± 0.41 bc	0.49 ± 0.03 b	0.15 ± 0.01 c
	FM	41 ± 6 b	109 ± 15 b	2.52 ± 0.34 d	0.41 ± 0.01 c	0.17 ± 0.02 abc

注 (Note): NM—不接种 Without inoculation; FM—接种 With inoculation of FM. 同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)
Values followed by different letters are significantly different among treatments ($P < 0.05$).

根处理中, 玉米和大豆的菌根侵染率均以部分分隔处理最低, 显著低于其他两种分隔处理。

就根长而言, 玉米的根系明显长于大豆。不论何种隔根方式, 接种 FM 均显著增加了玉米的根系长度, 其中部分分隔处理下 FM 处理的根长是 NM 处理的 2.48 倍。而大豆除不分隔处理外, 接种 FM 的根系均显著变短, 其中部分分隔处理下 NM 处理的根长是 FM 处理的 3.65 倍, 说明接种 AMF 和部分分隔组合对大豆根系伸长有明显抑制作用。

2.1.2 植株生物量、根冠比和菌根依赖性 从表 1 可以看出, 接种 FM 对玉米的地上部和根系生物量均有极显著影响, 对其根冠比也有显著影响; 而间作根系分隔处理对玉米和大豆的根系干重也存在显著影响。由表 2 可知, 无论何种隔根方式, 接种 FM 的玉米植株生物量均明显大于 NM 处理, 其中地上

部生物量 FM 处理平均高出 NM 处理 40%, 根系生物量平均高出 NM 处理 65.8%; 表 3 表明, 在接种 FM 后大豆的植株生物量均表现为间作根系不分隔 > 部分分隔 > 完全分隔; 且在分隔处理下, 接种 FM 显著降低了大豆的根系生物量, 平均下降 25.5% 左右, 说明接种处理和根系分隔组合抑制了大豆根系生物量的增加。在完全分隔处理下, 接种 FM 的玉米根冠比显著大于 NM 处理; 在不分隔处理下, 接种 FM 的玉米根冠反而较 NM 处理有所下降。FM 处理下, 3 种隔根方式中, 玉米的根冠比以完全分隔处理显著较高; NM 处理下, 3 种隔根方式中, 部分分隔处理的玉米根冠比明显较低, 大豆根冠比较高。

图 1 表明, 3 种隔根方式中, 玉米的菌根依赖性依次为间作根系完全分隔 > 不分隔 > 部分分隔, 可以看出根系在完全分隔时玉米的菌根依赖性最强,

而大豆的菌根依赖性则表现为间作根系不分离 > 部分分离 > 完全分离，其中部分分离和完全分离下菌根依赖性为负，说明间作大豆和玉米根系间的交互作用越大，大豆的菌根依赖性会受到玉米的影响而随之增加。

2.2 接种 FM 和不同隔根处理对植株氮吸收和土壤碱解氮的影响

由表 4 可知，经双因素方差分析，发现玉米和大豆的地上部氮吸收量、根系氮吸收量、根系氮吸收效率和土壤碱解氮含量均存在显著交互作用。

2.2.1 植株地上部氮吸收量 从表 4 可以看出，接种 FM 对玉米的地上部氮吸收量存在显著 ($P < 0.01$) 影响，间作根系分隔处理对玉米和大豆的地上部氮吸收量均存在显著 ($P < 0.01$) 影响。由图 2 可以看出，在不分隔和完全分隔处理下，接种 FM 均显著促进了玉米地上部对氮素的吸收；在部分分隔处理下，

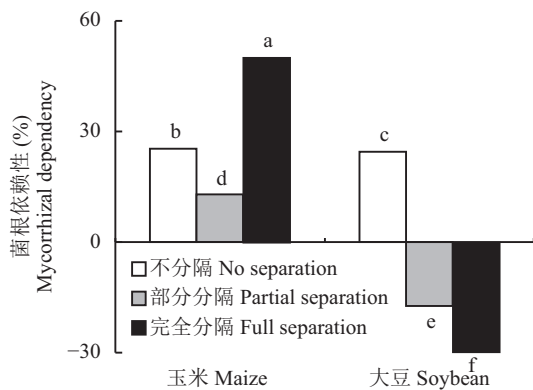


图 1 不同隔根处理下玉米和大豆的菌根依赖性

Fig. 1 Mycorrhizal dependency of maize and soybean under different root separation methods

[注 (Note): 柱上不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著 Different letters above the columns indicate significant differences at $P < 0.05$ level.]

接种 FM 使玉米的地上部氮吸收量提高了 12.2%，说明对于菌根依赖性很强的玉米而言，接种 FM 均可以促进玉米植株地上部氮的累积。在不分隔处理下，接种 FM 也显著增加了大豆的地上部氮吸收量，但在部分分隔和完全分隔处理下则反而有所下降；从 3 种隔根方式内的比较来看，FM 接种条件下，以不分隔处理的大豆地上部氮吸收量高于部分分隔处理和完全分隔处理；NM 条件下，则以不分隔处理的大豆地上部氮吸收量低于部分分隔处理和完全分隔处理，说明间作根系不分离处理下由于玉米对氮的竞争吸收作用较强而不利于大豆地上部氮的累积。但与 NM 相比，不分离条件下接种 FM 的大豆地上部氮吸收量的增加，说明了接种 FM 可强化大豆地上部氮的累积。

2.2.2 植株根系氮吸收量 从表 4 可以看出，接种 FM 对玉米和大豆的根系氮吸收量均存在显著影响，间作根系分隔处理则只对大豆的根系氮吸收量存在极显著影响。由图 2 可知，不管接种与否，隔根处理对玉米的根系氮吸收量无显著影响，但在 NM 处理下，3 种隔根方式中，大豆的根系氮吸收量以部分分隔处理显著较高。在部分分隔处理下，接种 FM 显著降低了大豆根系的氮吸收量，在不分隔和完全分隔处理下亦呈下降趋势，其中不分隔处理下降 19.9%，完全分隔处理下降 22.7%，由此可见接种 FM 抑制了大豆根系对氮的吸收。

2.2.3 植株根系氮吸收效率 从表 4 可以看出，接种 FM 对玉米的根系氮吸收效率存在显著 ($P < 0.01$) 影响，间作根系分隔处理则对大豆根系氮吸收效率存在显著 ($P < 0.05$) 影响。由图 3 可知，在部分分隔和完全分隔处理下，接种 FM 显著增加了玉米的根系氮吸收效率，其中接种 FM 且部分分隔处理的根系氮吸收效率最高。大豆的根系氮吸收效率只有在部

表 4 不同隔根处理下接种 FM 玉米、大豆植株氮指标及土壤碱解氮的方差分析

Table 4 Variance analysis of nitrogen indexes of maize, soybean and soil available N under the FM inoculation and different root separation methods

处理 Treatment	地上部氮吸收量 N uptake of shoot		根系氮吸收量 N uptake of root		根系氮吸收效率 N uptake efficiency of root		土壤碱解氮 Soil available N	
	玉米 Maize	大豆 Soybean	玉米 Maize	大豆 Soybean	玉米 Maize	大豆 Soybean	玉米 Maize	大豆 Soybean
接种处理 Inoculation	**	NS	***	**	**	NS	***	***
隔根处理 Root separation	**	**	NS	***	NS	*	**	***
接种处理 + 隔根处理 Inoculation + root separation	**	***	*	*	*	*	***	***

注 (Note): ***— $P < 0.001$; **— $P < 0.01$; *— $P < 0.05$; NS—不显著 No significance.

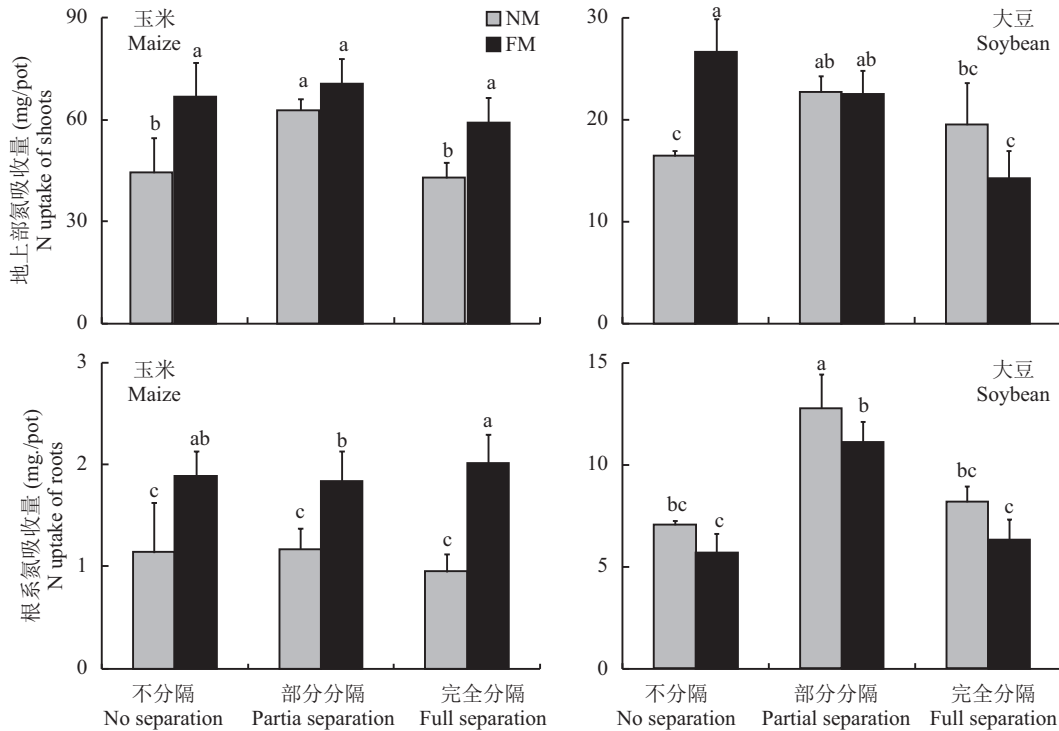


图 2 接种 FM 和分隔处理下玉米和大豆植株氮吸收量

Fig. 2 N uptakes of maize and soybean under different FM treatments and root separation methods

[注 (Note): 柱上不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著 Different letters above the columns indicate significant differences at $P < 0.05$ level.]

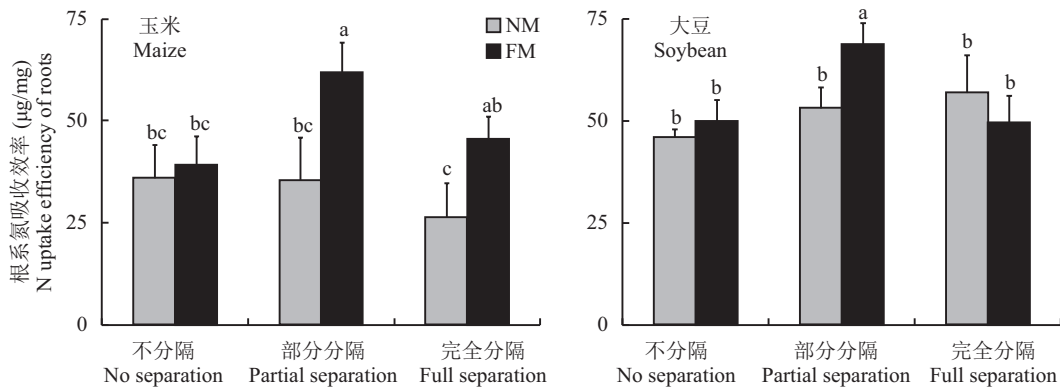


图 3 接种 FM 和隔根处理下玉米和大豆根系氮吸收效率

Fig. 3 N uptake efficiencies of roots of maize and soybean under different FM treatments and root separation methods

[注 (Note): 柱上不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著 Different letters above the columns indicate significant differences at $P < 0.05$ level.]

分分隔处理下, 接种 FM 才显著提高了根系氮吸收效率, 在完全分隔处理下反而有明显下降, 且在不接种和不分隔处理下的大豆根系氮吸收效率最低。FM 处理下, 3 种隔根方式中, 玉米和大豆的根系氮吸收效率均以部分分隔处理最高。

2.2.4 土壤碱解氮含量 从表 4 可以看出, 接种 FM 对玉米和大豆的土壤碱解氮含量存在显著的影响 ($P < 0.01$), 隔根处理对大豆的土壤碱解氮含量存在显著影响 ($P < 0.001$)。由图 4 可知无论何种隔根处

理, 接种 FM 均显著降低了玉米的土壤碱解氮含量, 大豆的土壤碱解氮含量在不分隔和部分分隔处理下显著降低, 但在完全分隔处理下则显著升高, 这可能是因为在不分隔和部分分隔处理下玉米和大豆根系存在一定的相互作用, 玉米通过根系或菌根菌丝吸收了大豆土壤碱解氮, 而在完全分隔处理下玉米和大豆根系间无交互作用, 大豆可以依靠自身的根瘤菌固氮或从空气中固氮即可满足自身生长的需求, 故土壤碱解氮有所升高。

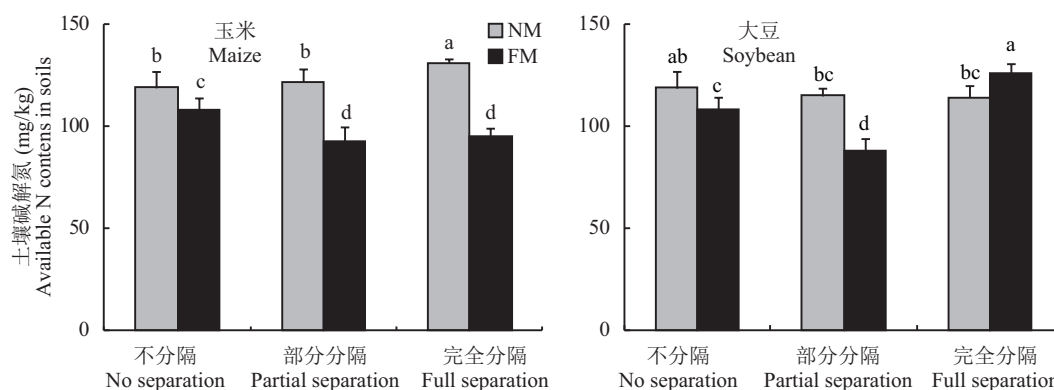


图4 接种 AMF 和隔根处理下玉米和大豆土壤碱解氮含量

Fig. 4 Available N contents in soil of maize and soybean planting under different AMF treatments and root separation methods

[注 (Note): 柱上不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著 Different letters above the columns indicate significant differences at $P < 0.05$ level.]

3 讨论

菌根真菌能与绝大多数植物形成共生体系,并能促进宿主植物对氮等矿质元素的吸收及其生长发育^[1,5]。利用菌根真菌的侵染而改善植物生长的根际环境,达到使作物增产、增效的目的,可成为农业增产的一条经济、高效的途径^[15]。本研究中,接种 FM 后玉米和大豆根系均有较高的菌根侵染,而不同隔根处理下侵染率和植株生物量的差异,说明不同竞争能力的间作作物不仅受到了菌根真菌侵染的影响,还受到了不同根系分隔处理的影响。大量研究^[6,8,16-17]表明,AMF 共生体具有从复杂有机氮中获取氮素的能力,并能通过根外菌丝直接吸收有机氮和无机氮。因此本研究中,接种 AMF 也明显促进了玉米植株对氮的吸收,却明显降低了大豆根系的氮吸收,这可能与完全分隔处理下的玉米和大豆的菌根依赖性分别最大和最小有关^[7],也可能与接种菌根玉米的氮吸收效率普遍得到提高,而菌根接种大豆的氮吸收效率在完全分隔处理下反而下降有关。

缺氮会限制植物生长,降低产量和产品品质。研究表明,接种 AMF 可促进植物对氮的吸收利用,改善植物的氮素营养,最终表现为促进植物生长发育,提高产量^[8]。一般的豆科/禾本科间作系统中,豆科植物会帮助禾本科植物吸收更多的氮素,因此禾本科处于优势,而豆科植物处于劣势^[12,18]。但本研究中接种 AMF 与间作根系部分分隔组合,可同时提高玉米和大豆对土壤氮的吸收,这是因为部分分隔条件下接种 AMF,一方面可能是由于菌根玉米和大豆的根外菌丝能穿过尼龙网到达根系到不了的区域吸取氮素等营养,例如玉米能通过该途径获得大豆固

定的氮而促进了氮的吸收;另一方面是 AMF 共生体的分泌物可能增强大豆根际有机氮的矿化效率^[16-17],同时间作根系的部分分隔处理又制约了玉米根系对大豆区的氮素竞争,同时菌根大豆的根外菌丝也可以穿过尼龙网获取玉米区的氮素,因此促进了玉米和大豆对氮的吸收。

由相关分析可知,不同 AMF 处理与隔根方式组合下,玉米和大豆的植株氮吸收量越高,相对应的土壤碱解氮含量也越低 ($n=24$, 相关系数 r 分别为 -0.532^* 和 -0.526^* , $P < 0.05$),其中玉米和大豆地上部氮吸收量与相应土壤碱解氮含量也呈显著负相关 ($n=24$, $r = -0.507^*$ 和 -0.446^* , $P < 0.05$),但是玉米根系氮吸收量与相应土壤碱解氮含量呈更显著的负相关关系 ($n=24$, $r = -0.755^{**}$, $P < 0.05$),而大豆根系氮吸收量与相应土壤碱解氮含量虽也呈负相关,但不显著 ($n=24$, $r = -0.357$, $P > 0.05$)。不难看出,不管 AMF 处理、隔根处理的不同与否,间作植株氮累积量的增加会不同程度地降低土壤有效氮的残留。因此,接种 AMF 和隔根方式的组合在提高玉米和大豆对氮吸收的基础上,会减少根际土壤有效氮含量,这在提高土壤养分资源吸收利用的同时可望减少氮肥的施用,或间接减少养分的流失。但从玉米和大豆根系氮吸收量与相应土壤碱解氮含量相关性的显著程度差异,结合大豆根系氮吸收量受 AMF 的影响反而呈下降的趋势来看,说明与菌根真菌共生的玉米/大豆间作体系中,大豆根系对氮的吸收可能受到了玉米、AMF 等的影响而处于竞争劣势,但间作根系部分分隔处理的组合则可能通过提高大豆的根系氮吸收效率而使其竞争能力增强,因此菌根技术的介入与隔根方式的合理选择在强化农业资源

高效利用的同时, 还可能减少间作系统中作物间的竞争, 进而促进间作作物的高产。

4 结论

1) 接种 AMF 促进了玉米植株生长及氮素积累, 抑制了分隔处理下大豆植株生长及氮的吸收, 但提高了部分分隔处理下大豆根系氮吸收效率。

2) 玉米/大豆不同间作根系分隔处理对玉米和大豆的生长和氮素利用的影响较大, 其中部分分隔处理明显改善了两间作物的生长状况。

3) 接种 AMF 和间作根系部分分隔复合处理, 能强化对土壤氮的吸收利用, 对玉米和大豆的促生效果均最为明显。

参 考 文 献:

- [1] Smith S E, Read D J. Mycorrhizal symbiosis [M]. London: Academic Press, 1997.
- [2] Tao G, Zhang J, Christie P, Li X. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and ammonium nitrate ratios on growth and pungency of onion seedlings[J]. Journal of Plant Nutrition, 2006, 29(6): 1047-1059.
- [3] 谷林静, 白来汉, 张乃明, 等. 菌根技术对磷石膏农用的强化效应[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 152-159.
Gu L J, Bai L H, Zhang N M, *et al.* Strengthening effect of mycorrhizal technology on application of phosphogypsum in agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(17): 152-159.
- [4] 贾广军, 张仕颖, 谷林静, 等. 菌根对紫色土上间作玉米生长及磷素累积的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(5): 516-524.
Jia G J, Zhang S Y, Gu L J, *et al.* Effect of mycorrhizal inoculation on growth and phosphorus accumulation of intercropped maize on purple soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(5): 516-524.
- [5] 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 physiology [M]. Beijing: Sino-Culture Press, 2011.
- [6] 李侠, 张俊伶. 丛枝菌根根外菌丝对不同形态氮素的吸收能力[J]. 核农学报, 2007, 21(2): 195-200.
Li X, Zhang J L. Uptake of different nitrogen by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2007, 21(2): 195-200.
- [7] 张宇亭, 王文华, 申鸿, 等. 接种AMF对菌根植物和非菌根植物竞争的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(5): 1428-1435.
Zhang Y T, Wang W H, Shen H, *et al.* Influence of arbuscular mycorrhizal associations on the interspecific competition between mycorrhizal and nonmycorrhizal plants[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(5): 1428-1435.
- [8] 彭思利, 邓胤, 张宇亭. 丛枝菌根真菌根外菌丝对紫色土中的氮素利用状况[J]. 中国农学通报, 2010, 26(6): 269-274.
Peng S L, Deng Y, Zhang Y T. Research on nitrogen utilization in the neutral purple soil by the external hyphae of arbuscular mycorrhiza[J]. , 2010, 26(6): 269-274.
- [9] 刘均霞, 陆引罡, 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 and Biology, 2007, 26(4): 288-291.
- [10] 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 interaction on crop grow and nutrition accumulation[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(1): 1-8.
- [11] 叶优良, 李隆, 孙建好, 等. 地下部分隔对蚕豆/玉米间作氮素吸收和土壤硝态氮残留影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 13-16, 53.
Ye Y L, Li L, Sun J H, *et al.* Effect of root separation on plant nitrogen uptake and soil nitrate nitrogen residual in faba bean/maize intercropping[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(3): 13-16, 53.
- [12] 李淑敏, 武帆. 大豆/玉米间作体系中接种AM真菌和根瘤菌对氮素吸收的促进作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 110-116.
Li S M, Wu F. Nitrogen uptake facilitation in soybean/maize intercropping system inoculated with rhizobium and arbuscular mycorrhizal fungi[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(1): 110-116.
- [13] 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]. Transaction of the British Mycological Society, 1970, 55: 158-161.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007: 268-270, 389-391.
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (3rd Edition) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2007: 268-270, 389-391.
- [15] 冯固, 张福锁, 李晓林, 等. 丛枝菌根真菌在农业生产中的作用与调控[J]. 土壤学报, 2010, 47(5): 995-1004.
Feng G, Zhang F S, Li X L, *et al.* Functions of arbuscular mycorrhizal fungi in agriculture and the micromanipulation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(5): 995-1004.
- [16] Atul-Nayyar A, Hamel C, Hanson K, Germida J. The arbuscular mycorrhizal symbiosis links N mineralization to plant demand[J]. Mycorrhiza, 2009, 19(4): 239-246.
- [17] Leigh J, Hodge A, Fitter A H. Arbuscular mycorrhizal fungi can transfer substantial amounts of nitrogen to their host plant from organic material[J]. New Phytologist, 2009, 181(1): 199-207.
- [18] 李秋祝, 余常兵, 胡汉升, 等. 不同竞争强度间作体系氮素利用和土壤剖面无机氮分布差异[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 777-785.
Li Q Z, Yu C B, Hu H S, *et al.* Difference of nitrogen utilization and distribution of mineral nitrogen in soil profile by competitive abilities of intercropping systems[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(4): 777-785.