

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

李淑敏, 武帆

(东北农业大学资源与环境学院, 黑龙江哈尔滨 150030)

摘要: 利用大豆和玉米之间根系不同分隔方式的盆栽试验,研究了在玉米/大豆间作体系中接种大豆根瘤菌、AM 真菌 *Glomus mosseae* 和双接种对间作体系氮素吸收的促进作用。结果表明,双接种处理显著提高了大豆及与其间作玉米的生物量、氮含量,双接种大豆/玉米间作体系总吸氮量比单接 AM 菌根、根瘤菌和不接种对照平均分别增加 22.6%、24.0% 和 54.9%。大豆促进了与其间作玉米对氮素的吸收作用,在接种 AM 真菌和双接种条件,间作玉米的 AM 真菌侵染率提高,大豆根瘤数增加;接种 AM 真菌处理,不分隔和尼龙网分隔比完全分隔玉米吸氮量的净增加量是未接种对照的 1.8、2.6 倍,双接种处理分别是对照的 1.3 和 1.7 倍。说明在间作体系中进行有效的根瘤菌和 AM 真菌接种,发挥两者的协同作用对提高间作体系土壤养分利用效率,进一步提高间作体系的生产力有重要的意义。

关键词: 大豆/玉米间作; 大豆根瘤菌; 吸氮量; AM 真菌

中图分类号: S144.3

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2011)01-0110-07

Nitrogen uptake facilitation in soybean/maize intercropping system inoculated with rhizobium and arbuscular mycorrhizal fungi

LI Shu-min, WU Fan

(Resource and Environmental College, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030, China)

Abstract: Pot experiments with different root barriers between maize and soybean were carried out to investigate the effects of rhizobium, arbuscular mycorrhizal fungi and interaction of rhizobium and arbuscular mycorrhizal fungi on nitrogen uptake in a soybean/maize intercropping system. The results show that under the dual inoculation with *Glomus mosseae* and soybean rhizobium SH212, biomasses, nitrogen contents of soybean and associated maize are significantly increased. On the average, the nitrogen uptakes by soybean/maize intercropping system inoculated with both microorganisms are increased 22.6%, 24.0% and 54.9% compared to those of the inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi, rhizobium and control respectively. Soybean facilitates nitrogen uptake of the intercropping maize. Arbuscular mycorrhizal colonization of the intercropping maize and nodule numbers of the intercropping soybean are increased significantly. These are the main reasons that net increases of nitrogen uptake by maize under the mesh barrier and no barrier treatments are 1.8 and 2.6 times than that of the control. And the net increases of N uptake by maize under the dual inoculation treatments are 1.3 and 1.7 times than that of the control respectively. These results suggest that the inoculation with both microorganisms in the intercropping system could improve soil nutrition efficiency and enhance productivity of the intercropping system by the synergy effects of rhizobium and arbuscular mycorrhizal fungi.

Key words: soybean/maize intercropping; soybean rhizobium; nitrogen uptake; arbuscular mycorrhizal fungi

收稿日期: 2009-11-06

接受日期: 2010-08-21

基金项目: 国家自然科学基金(30670382,31071867); 第二批中国博士后科学基金特别资助(200902367); 黑龙江省教育厅科学技术研究项目(11521035); “寒地黑土资源利用保护”重点实验室开放基金项目(GXS08-6)资助。

作者简介: 李淑敏(1971—),女,黑龙江省宁安人,副教授,主要从事植物养分高效利用研究。

Tel: 0451-55190753, E-mail: lishumin113@yahoo.com.cn

许多研究表明,豆科与禾本科作物间作具有明显养分利用优势^[1-4]。与单作相比,间作的禾本科作物能获得更多的土壤氮素,而且豆科作物固定的氮能向间作的禾本科作物转移,为禾本科作物提供一定量的氮素。大豆/玉米间作的田间试验表明,间作玉米的吸氮量和生物量比单作时增加了 55.7% 和 27.9%^[5];在其它一些豆科/禾本科作物间作系统中,也发现豆科作物体内 2%~17% 的氮素向与其间作的禾本科作物体内转移的现象^[6-12],使间作体系的氮素吸收量显著高于相应单作。

钟增涛等^[13]研究表明,在间作体系中接种根瘤菌不仅增加豆科作物固氮,而且能促进与其间作的禾本科作物生长。AM 真菌和根瘤菌双接种豆科植物可以强烈地刺激豆科植物的生长和根瘤的形成,使 AM 真菌侵染率增加,其优越性远远大于它们的单独接种^[14-16],说明 AM 真菌和根瘤菌对豆科作物的养分吸收具有协同的促进作用^[17]。AM 真菌在两作物之间可以通过菌丝传递营养^[18-19],然而,关于在间作体系中同时接种根瘤菌和 AM 真菌对间作体系中氮素吸收影响的研究还很少见报道。因此,本研究利用根系不同的分隔方式,研究 AM 真菌和根瘤菌相互作用对大豆/玉米间作体系种间氮素吸收的促进作用,为进一步探讨间作体系中养分利用优势,通过微生物的作用提高间作体系中养分利用效率提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试作物及菌种

供试作物品种为大豆东农 42 (*Glycine max* L. Merr. cv. dongnong 42) 和玉米东农 148 (*Zea mays* L. cv. Dongnong 148)。供试大豆根瘤菌为 *Rhizobium leguminosarum* biovar viciae SH212 (东北农业大学资环学院菌根小组提供),用 SH212 表示;AM 菌种为 *Glomus mosseae* (BGCXJ01),分离自新疆昭苏新疆韭根际,用高粱扩繁(北京市农林科学院植物营养与资源研究所提供)用 *G. m.* 表示。

1.2 试验处理

采用大豆和玉米之间根系不同分隔方式的盆栽试验,即:大豆和玉米之间根系不分隔、尼龙网(30 μm)分隔和完全分隔 3 种方式。将塑料盆从中间分割开,用聚氯乙烯黏合剂将尼龙网或塑料膜粘在中间,并用密封胶密封使其不漏水,从而将盆分隔成两室,中间用塑料膜隔开时,认为根系之间无交互作用;用 30 μm 尼龙网隔开时,可将两作物根系分开,

但生理活性物质可在根间交换,从而使促进作用表现出来;中间无分隔,两根系完全交叉,使竞争和促进作用共存。

试验设接种根瘤菌 SH212,接种 AM 真菌 *G. m.*,及根瘤菌和 AM 真菌双接种(即 SH212 + *G. m.*) 3 种接种方式,以未接种(CK)为对照,随机区组排列,4 次重复。*G. m.* 真菌按 30 g/kg 的接种量装盆时铺在土室中间,对照组加入相同重量经灭菌处理的接种剂。根瘤菌于大豆出苗后,玉米和大豆每室同时接种 15 mL 根瘤菌菌液(根瘤菌数量为 $8.2 \times 10^8/\text{mL}$),不接种处理加等量的无菌液体培养基。大豆和玉米种子经 10% H_2O_2 消毒催芽后播种,每室出苗后大豆留 2 株,玉米留 2 株。作物生长期充分供水,以满足作物对水分的需求,生长 60 d 后收获。

供试土壤为黑土与砂子按 2:1 比例混匀,基础肥力为:有机质含量 6.82 g/kg、全氮 1.21 g/kg、碱解氮 30.4 mg/kg、速效磷 5.9 mg/kg、速效钾 167 mg/kg。土壤过 2 mm 筛,120℃ 灭菌 2 h,以消除土壤中的真菌孢子。每室装混好肥料的消毒土 1.4 kg,相当于每盆 2.8 kg。每盆施纯 P 80 mg/kg (KH_2PO_4)、纯 N 100 mg/kg (NH_4NO_3)、纯 K 150 mg/kg (K_2SO_4)、Mg 50 mg/kg ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$);另施 Fe($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)、Mn(MnCl_2)、Cu (CuCl_2)、Zn ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)、Mo[(NH_4) 4MoO_4] 各 5 mg/kg。

1.3 采样与分析

收获时将大豆和玉米的根系与地上部分分开,植株在 105℃ 下杀青 30 min 后继续在 70℃ 下烘干至恒重称重,粉碎后待用。根系清洗干净后,称取 1.0 g 鲜根,按照常规的步骤透明,用曲利苯蓝染色,乳酸甘油脱色^[20],然后选取 30 条根段,制片用“MY-COCALC”软件,计算菌根侵染频度 F%,侵染强度 M%,丛枝丰度 A% 参数^[21]。用 H_2SO_4 - H_2O_2 凯氏定氮法测定植株地上部和根系氮浓度。

数据采用 Microsoft Excel 2003 软件对数据进行处理,用 STATISTICA(6.0) 统计软件进行差异显著性检验。

2 结果分析

2.1 生物量

接种对大豆的生长有显著的促进作用,单接种根瘤菌和 AM 真菌,大豆总干生物量分别比对照增加 5.8% 和 6.1%,而双接种处理比对照平均增加 9.3%。不同接种处理条件下,3 种分隔方式对大豆

植株的地上部和根系的干重无显著性影响(表1)。

无论单接种 AM 真菌和根瘤菌还是双接种都对玉米的生长有显著的促进作用,与大豆表现有相同的趋势。接种根瘤菌、AM 真菌和双接种处理分别比不接种处理玉米植株总干重分别增加 15.9%、16.7% 和 36.4%,说明接种 AM 真菌除能促进大豆生长外,对玉米的生长也有一定的促进作用。3 种分隔方式比较,玉米地上部和根系干重的大小顺序依次为不分隔 > 尼龙网分隔 > 完全分隔。无论接种还是不接种,玉米干重与大豆不分隔处理最高;双接种处理不分隔和尼龙网分隔显著高于完全分隔

处理玉米的地上部干重和根系干重;在不接种的情况下,不分隔处理的玉米生物量也显著高于完全分隔处理。可见,大豆对于玉米的生长有促进作用,在双接种的条件下促进作用更为明显。这可能是由于接种 AM 真菌促进大豆对于营养元素的吸收,提高了大豆的固氮能力,进一步改善了与其间作玉米的氮营养,所以与大豆根系完全相互作用的玉米生物量最高;且以双接种处理最显著,表现与大豆相同的接种效应。说明大豆/玉米间作体系中同时接种 AM 真菌和根瘤菌对大豆和玉米生长均有促进作用。

表 1 不同分隔方式和接种对大豆和玉米植株地上部和根系干重的影响(g/pot)

Table 1 Effect of different root barriers and inoculation on root and shoot dry weights of soybean and maize

处理		大豆 Soybean		玉米 Maize	
Treatments		地上部 Shoot	根系 Root	地上部 Shoot	根系 Root
CK	完全分隔 Solid barriers	5.97 ± 0.56 a	2.38 ± 0.24 a	8.22 ± 0.39 a	4.72 ± 0.39 a
	尼龙网分隔 Mesh barriers	5.88 ± 0.53 a	2.35 ± 0.12 a	8.42 ± 0.45 a	4.98 ± 0.77 a
	不分隔 No barriers	5.89 ± 0.46 ab	2.32 ± 0.16 a	8.57 ± 0.55 a	5.12 ± 0.31 ab
SH212	完全分隔 Solid barriers	6.32 ± 0.41 ab	2.49 ± 0.24 a	9.31 ± 0.83 ab	5.89 ± 0.67 c
	尼龙网分隔 Mesh barriers	6.37 ± 0.50 ab	2.46 ± 0.27 a	9.42 ± 0.04 abc	6.01 ± 0.44 c
	不分隔 No barriers	6.31 ± 0.46 a	2.42 ± 0.29 a	9.76 ± 0.24 abc	6.03 ± 0.57 c
<i>G. m.</i>	完全分隔 Solid barriers	6.36 ± 0.73 abc	2.50 ± 0.29 a	9.33 ± 0.50 ab	5.84 ± 0.45 bc
	尼龙网分隔 Mesh barriers	6.32 ± 0.60 abc	2.52 ± 0.28 a	9.47 ± 0.54 abc	6.06 ± 0.57 c
	不分隔 No barriers	6.28 ± 0.45 abc	2.44 ± 0.26 a	9.71 ± 0.81 abc	6.28 ± 0.37 c
SH212 + <i>G. m.</i>	完全分隔 Solid barriers	6.34 ± 0.20 abc	2.57 ± 0.26 a	10.65 ± 0.87 bc	7.17 ± 0.54 d
	尼龙网分隔 Mesh barriers	6.50 ± 0.47 bc	2.54 ± 0.16 a	10.81 ± 0.77 bc	7.33 ± 0.59 d
	不分隔 No barriers	6.56 ± 0.98 c	2.53 ± 0.13 a	11.00 ± 0.80 c	7.58 ± 0.61 d
接种 Inoculation		*	ns	* *	* *
分隔方式 Root separation		ns	ns	ns	ns
接种 × 分隔方式 Inoculation × Root separation		ns	ns	ns	ns

注(Note): 同列数据后不同字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant at 5% level. ns 表示未达显著水平 No significant difference; * and * * 分别表示 5% 和 1% 显著水平 Mean significant at 5% and 1% levels, respectively.

2.2 AM 真菌侵染率

无论是大豆还是玉米,未接种的处理均未发现有菌根的侵染,各参数均为 0,玉米的 AM 真菌侵染率高于大豆(表 2)。双接种处理大豆根系侵染强度 M% 和根系的丛枝丰度 A% 明显高于单接 AM 真菌处理,说明接种根瘤菌提高了大豆的 AM 真菌侵染率。根系不同的分隔方式对玉米的菌根侵染率有显著影响,不论是单接种 AM 真菌还是双接种条件下,不分隔和尼龙网分隔玉米根系侵染强度 M% 显著高

于完全分隔,但分隔方式之间根系丛枝丰度 A% 无差异。这可能是由于根系之间不分隔和尼龙网分隔时,大豆和玉米根系之间可进行物质交换,大豆固定的氮可被玉米吸收,改善玉米菌根的氮营养从而提高了玉米的菌根侵染率。而大豆根系的菌根侵染率与玉米的变化趋势相反,完全分隔处理大豆的 M% 和 A% 显著高于尼龙网分隔处理。这可能是由于玉米的 AM 真菌侵染率高于大豆,使其竞争能力强于大豆,导致不分隔处理大豆的 AM 真菌侵染率下降。

表 2 不同分隔方式接种菌根真菌和根瘤菌对玉米和大豆 AM 真菌侵染率的影响

Table 2 Effect of different root barriers and inoculation on arbuscular mycorrhizal fungi colonization of soybean and maize

处理 Treatments		大豆 Soybean			玉米 Maize		
		侵染频度	侵染强度	丛枝丰度	侵染频度	侵染强度	丛枝丰度
		Infection frequency	Infection intensity	Arbuscular abundance	Infection frequency	Infection intensity	Arbuscular abundance
		(F %)	(M %)	(A %)	(F %)	(M %)	(A %)
CK	完全分隔 Solid barriers	0	0	0	0	0	0
	尼龙网分隔 Mesh barriers	0	0	0	0	0	0
	不分隔 No barriers	0	0	0	0	0	0
SH212	完全分隔 Solid barriers	0	0	0	0	0	0
	尼龙网分隔 Mesh barriers	0	0	0	0	0	0
	不分隔 No barriers	0	0	0	0	0	0
<i>G. m.</i>	完全分隔 Solid barriers	100 b	51.0 ± 2.7 d	17.7 ± 1.9 c	100 b	58.0 ± 2.2 b	41.0 ± 3.8 bc
	尼龙网分隔 Mesh barriers	98.3 ± 0.8 b	44.9 ± 2.1 c	13.4 ± 1.3 b	100 b	62.3 ± 3.1 bc	39.3 ± 3.4 b
	不分隔 No barriers	99.6 ± 0.5 b	35.1 ± 3.9 b	16.5 ± 1.6 bc	100 b	63.8 ± 3.2 c	45.7 ± 2.5 cd
SH212 + <i>G. m.</i>	完全分隔 Solid barriers	100 b	59.6 ± 3.4 e	37.5 ± 3.9 d	100 b	63.8 ± 1.8 c	43.8 ± 3.8 bed
	尼龙网分隔 Mesh barriers	100 b	53.7 ± 1.9 de	16.5 ± 1.4 bc	100 b	62.3 ± 1.3 bc	49.6 ± 2.0 d
	不分隔 No barriers	100 b	49.0 ± 3.7 cd	16.3 ± 1.7 bc	100 b	64.2 ± 1.5 d	46.1 ± 2.4 cd
接种 Inoculation		* *	* *	* *	* *	* *	* *
分隔方式 Root separation		ns	ns	*	* *	ns	*
接种 × 分隔方式 Inoculation × Root separation		ns	ns	ns	* *	ns	ns

注 (Note): 同列数据后不同字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant at 5% level. ns 表示未达显著水平 No significant difference; * and * * 分别表示 5% 和 1% 显著水平 Mean significant at 5% and 1% levels, respectively.

2.3 大豆根瘤数

接种 AM 真菌和根瘤菌对大豆根瘤数的影响 (图 1) 看出,单接种根瘤菌和 AM 真菌均提高了大豆的根瘤数,尤其是双接种处理对大豆的根瘤数影响最显著。3 种分隔方式对大豆的根瘤数也有显著的影响,其大小顺序为不分隔 > 尼龙网分隔 > 完全分隔。可能是由于玉米的竞争作用降低了土壤的氮素,促进了大豆结瘤固氮,使得与玉米根系不分隔和尼龙网分隔的大豆根瘤数显著增加。

2.4 植株氮含量

大豆植株地上部和根部的氮含量变化基本呈现相同的趋势 (表 3),即双接种处理显著高于单接 AM 真菌和根瘤菌处理,单接 AM 真菌处理显著高于不接种处理。除双接种处理,不同分隔方式对大豆植株和根系氮含量无显著影响,在双接种处理,完全分隔处理的大豆根系氮含量显著高于尼龙网分隔和不分隔处理;接种处理对玉米植株和根系氮含量的影响与大豆的变化趋势一致;但不同的分隔方式对玉米植株和根系的氮含量有显著的影响,在双接种、单接 AM 真菌和不接种处理,不分隔和尼龙网

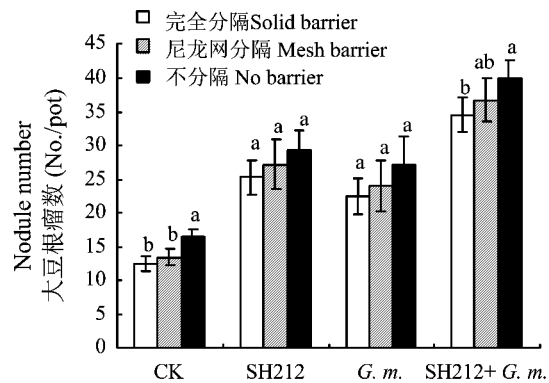


图 1 接种和分隔方式对大豆/玉米间作体系中大豆根瘤菌数的影响

Fig. 1 Effect of inoculation and different root barriers on nodules of soybean in maize/soybean intercropping system

[注 (Note): 柱上不同字母表示差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars mean significant at 5% level.]

分隔处理玉米的氮含量显著高于完全分隔处理,尤其在双接种处理,不分隔处理玉米根系的氮含量是完全分隔的 1.06 倍,说明双接种后,玉米与大豆间作,大豆促进了玉米对氮素的吸收,改变了玉米植株体内的氮含量,从而促进了与其间作玉米的生长。

表3 不同分隔方式和接种对大豆和玉米地上部和根系氮含量的影响(mg/g)

Table 3 Effect of different root barriers and inoculation on N contents in roots and shoots of soybean and maize

处理 Treatments		大豆 Soybean		玉米 Maize	
		地上部 Shoot	根系 Root	地上部 Shoot	根系 Root
CK	完全分隔 Solid barrier	19.8 ± 1.1 a	18.9 ± 1.4 ab	11.6 ± 0.99 a	14.2 ± 1.0 a
	尼龙网分隔 Mesh barrier	19.6 ± 1.1 a	19.6 ± 0.8 ab	12.1 ± 0.7 ab	14.3 ± 0.7 a
	不分隔 No barrier	19.5 ± 0.8 a	18.7 ± 0.9 a	13.2 ± 0.9 abc	14.5 ± 0.7 a
SH212	完全分隔 Solid barrier	20.7 ± 2.2 ab	19.9 ± 0.9 abc	14.1 ± 0.6 bcd	15.5 ± 1.2 abc
	尼龙网分隔 Mesh barrier	20.5 ± 1.1 ab	20.3 ± 1.1 abc	15.2 ± 2.0 cde	15.8 ± 1.0 abcd
	不分隔 No barrier	20.4 ± 1.4 a	19.5 ± 1.5 ab	16.0 ± 0.8 de	15.4 ± 2.0 ab
<i>G. m.</i>	完全分隔 Solid barrier	20.1 ± 1.0 a	20.4 ± 1.1 abc	13.6 ± 1.4 bc	15.8 ± 1.0 abcd
	尼龙网分隔 Mesh barrier	20.2 ± 1.2 a	20.5 ± 1.0 abc	16.0 ± 0.8 de	15.5 ± 1.1 abc
	不分隔 No barrier	19.8 ± 0.03 a	19.9 ± 1.2 abc	16.6 ± 2.0 d	16.3 ± 1.2 bcd
SH212 + <i>G. m.</i>	完全分隔 Solid barrier	22.9 ± 1.3 c	23.4 ± 2.2 d	15.8 ± 1.8 de	17.3 ± 1.2 cde
	尼龙网分隔 Mesh barrier	22.7 ± 1.5 c	21.7 ± 1.1 cd	16.9 ± 1.0 d	17.5 ± 1.1 de
	不分隔 No barrier	22.4 ± 0.7 bc	20.8 ± 1.1 bc	16.8 ± 0.8 d	18.5 ± 1.0 e
接种 Inoculation		* *	* *	* *	* *
分隔方式 Root separation		ns	*	* *	ns
接种 × 分隔方式 Inoculation × Root separation		ns	ns	ns	ns

注(Note): 同列数据后不同字母表示差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant at 5% level. ns 表示未达显著水平 No significant difference; * and * * 分别表示5%和1%显著水平 Mean significant at 5% and 1% levels, respectively.

2.5 植株吸氮量

无论是单接种 AM 真菌和根瘤菌,还是双接种处理,大豆植株体的吸氮量显著高于未接种处理。双接种处理,大豆总吸氮量比未接种处理、单接根瘤菌、单接 AM 真菌处理分别高 28.3%、16.7% 和 15.7%,说明双接种后促进了大豆对氮素的吸收。与玉米根系完全分隔和尼龙网分隔处理大豆的吸氮量要略高于不分隔处理,但差异不显著(图2),这是由于玉米的竞争作用导致不分隔情况下大豆吸氮量

下降。双接种处理同样增加了玉米对土壤氮素的吸收。根系不分隔玉米的氮素吸收量双接种比相应单接种 AM 真菌增加 23.2%。分隔方式对玉米吸氮量有显著影响,不分隔处理玉米的吸氮量显著高于完全分隔及尼龙网分隔处理,表现出与氮含量相同的变化趋势。在未接种处理,不分隔和尼龙网分隔处理玉米总吸氮量比完全分隔处理净增加 25.0 和 11.2 mg,占总吸氮量的 15.4% 和 6.9%,说明在没有 AM 真菌的作用下,玉米与大豆间作后,大豆仍能

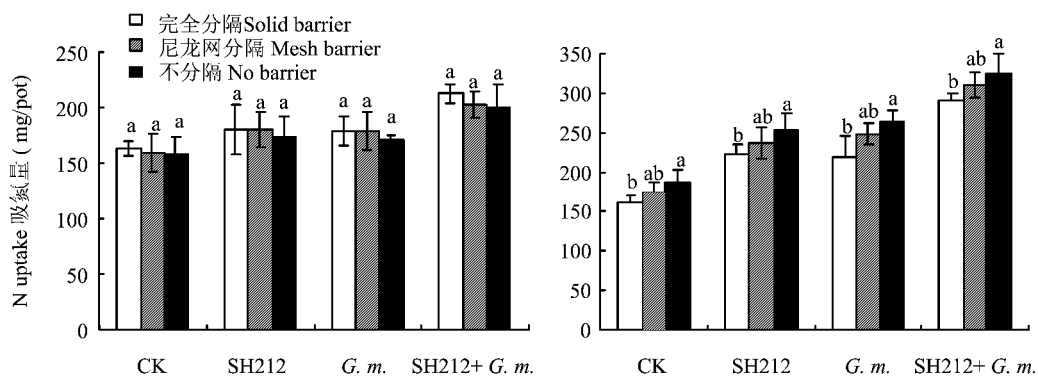


图2 接种和分隔方式对大豆(左)和玉米(右)植株吸氮量的影响

Fig. 2 Effect of inoculation and different root barriers on N uptake of soybean (left) and maize (right)

[注(Note): 柱上不同字母表示差异达5%显著水平 Different letters above the bars mean significant at 5% level.]

促进玉米对氮素的吸收。接种 AM 真菌处理,不分隔和尼龙网分隔处理玉米总吸氮量比完全分隔分别净增加 43.8 和 29.3 mg,是未接种处理的 1.8 和 2.6 倍;在双接种处理分别净增加 32.9 和 18.9 mg,是未接种处理的 1.3 和 1.7 倍。可见接种 AM 真菌大豆的固氮效率增加,大豆促进了与其间作玉米对土壤氮素的吸收,根系相互作用越强,促进作用越显著。另外,双接种处理大豆/玉米间作体系总吸氮量平均比单接菌根、根瘤菌和不接种处理分别增加 22.6%、24.0% 和 54.0%,说明在玉米/大豆间作体系中接种根瘤菌和 AM 真菌能显著提高间作体系氮素的利用效率和间作体系的生产力。

3 讨论

根瘤菌通过生物固氮为豆科植物生长提供有效的氮源,使豆科植物的生物量明显增加。植物体为 AM 真菌生长提供充足的氮素,提高了豆科植株的 AM 真菌感染率;而 AM 真菌又为植物的生长提供有效的磷营养,使豆科植物的生物量明显增加。因此,接种根瘤菌和 AM 真菌能够促进根瘤形成及其固氮作用,最终促进宿主植物的生长,其优越性明显大于二者的单独接种^[14]。本研究表明,同时接种 AM 真菌和大豆根瘤菌能显著促进大豆和玉米的生长。已有的研究表明,根瘤菌能够在水稻和小麦等一些非豆科植物的根围定殖及固氮^[13,22],具有植物根围促生(PGPR)作用^[23]。它能促进植物根系有效地吸收土壤中的水分和养分,从而促进植物的生长发育,这可能是本试验接种根瘤菌促进玉米生长的原因。可见,根瘤菌对植株生长的促进是多方面的,而且混作可以克服根瘤菌宿主专一性强的困难,这对进一步扩大根瘤菌的应用范围提供了很好的理论依据。

本研究看出,在大豆/玉米间作体系中同时接种 AM 真菌和根瘤菌,对间作体系氮素吸收促进作用显著高于单接 AM 真菌和根瘤菌;而且与大豆根系尼龙网分隔和不分隔的玉米氮吸收量显著高于完全分隔处理。大多数研究表明,豆科/禾本科作物间作,豆科作物能促进与其间作禾本科作物氮素吸收^[7],其原因之一是间作体系中存在着豆科作物向禾本科作物的氮素转移的现象^[6,8]。本试验也得到大豆促进了与其间作的玉米对土壤氮素的吸收的结果,但是本试验结果还看出,在间作体系中双接种,大豆对玉米氮素吸收的促进作用显著高于未接种和单接 AM 真菌处理。褚贵新等^[11]利用¹⁵N 标记研究

表明,在水稻/花生间作中,花生根系的腐解是氮素转移的主要途径,导致间作氮素吸收总量高于单作。本试验结果表明,双接种和间作后大豆的根瘤数显著增加,使大豆的固氮能力提高,可能会使大豆固定的氮素向与其间作玉米转移的数量增加,间接促进与其间作玉米对氮素的吸收。蚕豆/玉米间作的田间试验表明,由于玉米竞争土壤氮素会提高蚕豆的单株根瘤数量和根瘤干重^[24],使蚕豆的固氮效率提高。本试验中,与大豆根系不分隔处理的玉米,AM 真菌感染率显著高于完全分隔处理,玉米菌根感染率提高增加其对土壤养分的吸收能力,这是双接种后大豆促进间作玉米氮素吸收量显著增加的另一个原因。

在本试验中,玉米的 AM 真菌感染率显著高于大豆的 AM 真菌感染率,玉米的竞争能力强于大豆^[25]。AM 真菌和根瘤菌双接种后,玉米/大豆间作体系的总吸氮量显著高于单接 AM 真菌和根瘤菌处理,表现明显的间作养分利用优势,说明在有效的接种条件下,发挥两者的协同作用更有利于间作优势的发挥。

参考文献:

- [1] Ghoshl P K, Tripathi A K, Bandyopadhyay K K. Assessment of nutrient competition and nutrient requirement in soybean/sorghum intercropping system[J]. *Eur. J. Agron.*, 2009, 31: 43–50.
- [2] Dessougi H E I, zu Dreele A, Claassen N. Growth and phosphorus uptake of maize cultivated alone, in mixed culture with other crops or after incorporation of their residues[J]. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 2003, 166: 254–261.
- [3] Li L, Li S M, Sun J H, Zhou L L *et al.* Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils[J]. *PNAS*, 2007, 104: 1192–1196.
- [4] Fragstein A, Pristeri M, Monti E S. Pea-barley intercropping for efficient symbiotic N₂-fixation, soil N acquisition and use of other nutrients in European organic cropping systems[J]. *Field Crops Res.*, 2009, 113: 64–71.
- [5] 刘均霞,陆引罡,远红伟,等. 玉米/大豆间作条件下作物根系对氮素的吸收利用[J]. *华北农学报*, 2008, 23 (1): 173–175. Liu J X, Lu Y G, Yuan H W *et al.* The roots of the crop usually absorb and utilize studying to nitrogen under the maize/soybean intercropping condition[J]. *Acta Agric. Bor. Sin.*, 2008, 23(1): 173–175.
- [6] Ta T C, Faris M A, Macdowall F D H. Evaluation of ¹⁵N methods to measure nitrogen transfer from alfalfa to companion timothy[J]. *Plant Soil*, 1989, 114: 243–247.
- [7] Stern W R. Nitrogen fixation and transfer in intercropping system [J]. *Field Crops Res.*, 1993, 34: 335–356.
- [8] Ofosubudu K G, Noumura K, Fujita K. N₂ fixation, N transfer

- and biomass production of soybean *cv.* Bragg or its supernodulating nts1007 and sorghum mixture-cropping at two rates of N fertilizer [J]. *Soil Biol. Biochem.*, 1995, 27: 311–317.
- [9] Jorge S, Pekka N, Transfer of N fixed by a legume tree to the associated grass in a tropical silvopastoral system[J]. *Soil Biol. Biochem.*, 2006, 38: 1893–1903.
- [10] Sierra J, Daudin D, Domenach A M *et al.* Nitrogen transfer from a legume tree to the associated grass estimated by the isotopic signature of tree root exudates: A comparison of the ^{15}N leaf feeding and natural ^{15}N abundance methods[J]. *Eur. J. Agron.*, 2007, 27: 178–186.
- [11] 褚贵新, 沈其荣, 李奕林, 等. 用 ^{15}N 叶片标记法研究旱作水稻与花生间作系统中氮素的双向转移[J]. *生态学报*, 2004, 24(2): 278–284.
- Chu G X, Shen Q R, Li Y L *et al.* Researches on bi-directional N transfer between the in tercropping system of groundnut with rice cultivated in aerobic soil using ^{15}N foliar labelling method [J]. *Acta Ecol. Sin.*, 2004, 24(2): 278–284.
- [12] 肖焱波, 李隆, 张福锁. 小麦/蚕豆间作体系中的种间相互作用及氮转移研究[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(5): 965–973.
- Xiao Y B, Li L, Zhang F S. The interspecific nitrogen facilitation and the subsequent nitrogen transfer between the intercropped wheat and fababean[J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2005, 38(5): 965–973.
- [13] 钟增涛, 沈其荣, 冉炜, 等. 旱作水稻与花生混作体系中接种根瘤菌对植株生长的促进作用[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(3): 303–308.
- Zhong Z T, Shen Q R, Ran W *et al.* The promotion of plant growth by rhizobium inoculation in mixed cropping of rice and peanut cultivated on upland condition [J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2002, 35(3): 303–308.
- [14] Varennes A, Gossb M J. The tripartite symbiosis between legumes, rhizobia and indigenous mycorrhizal fungi is more efficient in undisturbed soil[J]. *Soil Biol. Biochem.*, 2007, 39: 2603–2607.
- [15] Pedro M. Antunes A, Amarilis de V. Accumulation of specific flavonoids in soybean (*Glycine max* L. Merr.) as a function of the early tripartite symbiosis with arbuscular mycorrhizal fungi and Bradyrhizobium Japonicum (Kirchner) Jordan[J]. *Soil Biol. Biochem.*, 2006 38: 1234–1242.
- [16] Lekberg Y, Koide R T. Arbuscular mycorrhizal fungi, rhizobia, available soil P and nodulation of groundnut (*Arachis hypogaea*) in Zimbabwe[J]. *Agric. Ecosys. Environ.*, 2005, 110: 143–148.
- [17] Benbrahim K F, Ismaili M. Interactions in the symbiosis of *acacia saligna* with *glomus mosseae* and rhizobium in a fumigated and unfumigated soil[J]. *Arid land Res. Manag.*, 2002, 16(4): 365–376.
- [18] Chiariello N C, Hickman J. Endomycorrhizal role for interspecific transfer of phosphorus in a community of annual plants[J]. *Science*, 1982, 217: 941–943.
- [19] 艾为党, 张俊玲, 李隆, 等. 三叶草内磷通过菌丝桥向黑麦草的传递的研究[J]. *应用生态学报*, 1999, 10(5): 615–618.
- Ai W D, Zhang J L, Li L *et al.* Phosphorus transfer via mycorrhizal hyphal links from red clover to rye grass[J]. *Chin. J. Appl. Ecol. Sin.*, 1999, 10(5): 615–618.
- [20] Phillips J, Hayman D. Improved procedures for clearing and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection[J]. *Trans. Br. Mycol. Soc.*, 1970, 55: 158–161.
- [21] Trouvelot A, Kough J L, Gianiazzi-Pearson V. Physiological and genetical aspects of mycorrhizae[M]. Paris: INRA Press, 1986. 217–221.
- [22] Schlöter M, Wiehe W, Assmus B *et al.* Root colonization of different plants by plant growth-promoting rhizobacterium *leguminosarum* bv. *trifolii* R39 studied with monospecific polyclonal antisera[J]. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1997, 63(5): 2038–2046.
- [23] 杜寒春, 郑会明, 周晶, 等. 紫云英-小麦混作体系中氮素转移对小麦生长的促进作用[J]. *土壤学报*, 2006, 43(6): 1043–1046.
- Du C H, Zheng H M, Zhou J *et al.* Effect of nitrogen transfer on growth of wheat in milkvetch-wheat mixed cropping after inoculation of rhizobium[J]. *Acta Pedol. Sin.*, 2006, 43(6): 1043–1046.
- [24] 房增国, 赵秀芬, 孙建好, 等. 接种根瘤菌对蚕豆/玉米间作系统产量及结瘤作用的影响[J]. *土壤学报*, 2009, 46(5): 887–893.
- Fang Z G, Zhao X F, Sun J H *et al.* Effects of rhizobium inoculation on yield and nodulation in fababean/maize intercropping system[J]. *Acta Pedol. Sin.*, 2009, 46(5): 887–893.
- [25] 雍太文, 杨文钰, 任万军, 等. “小麦/玉米/大豆”套作体系中不同作物间的相互作用[J]. *核农学报*, 2009, 23(2): 320–326.
- Yong T W, Yang W Y, Ren W J *et al.* The reciprocity and nitrogen transfer in intercropping and inter-planting system of “wheat/maize/soybean” [J]. *J. Nucl. Agric. Sci.*, 2009, 23(2): 320–326.