

施氮肥与隔根对间作大豆农艺性状和根际微生物数量及酶活性的影响*

张向前¹ 黄国勤^{2†} 卞新民¹ 赵其国³

(1 南京农业大学农学院, 南京 210095)

(2 江西农业大学生态科学研究中心, 南昌 330045)

(3 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要 采用盆栽试验及种间根系分隔技术研究了施氮肥和不施氮肥两种条件下根系互作在大豆玉米间作中所发挥的优势作用。结果表明, 无论在施氮肥和不施氮肥条件下相对于尼龙网分隔和完全分隔根系, 未分隔处理的大豆玉米间作能增加大豆各个生育时期的叶绿素含量。施氮肥在改善大豆株高、主茎节数、有效分枝数、单株荚数和百粒重农艺性状方面的效果要大于间作, 间作中根系互作只在改善大豆单株荚数和百粒重方面起到显著 ($p < 0.05$) 作用。通过地下部隔根处理同样证明了大豆玉米间作由于根系的互作能提高大豆的经济产量和生物产量, 但效果没有施氮肥明显。施氮肥和间作作物根系的互作不仅可以增加土壤中的细菌、真菌、放线菌和固氮菌的数量, 而且可以提高脲酶、磷酸酶、转化酶和蛋白酶的活性。经相关分析得出, 该试验中细菌、真菌、放线菌和固氮菌数量和脲酶、磷酸酶、转化酶和蛋白酶活性与大豆的叶绿素含量及大豆单株的经济产量和生物产量之间皆存在正相关关系, 且多数之间存在显著 ($p < 0.05$) 或极显著 ($p < 0.01$) 正相关。本研究认为间作系统中根系的互作在改善土壤微生态环境, 增加土壤微生物数量和酶活性, 提高作物经济产量和生物产量方面发挥着重要作用。

关键词 根系分隔; 间作; 农艺性状; 根际微生物; 酶活性

中图分类号 S154.3 **文献标识码** A

间作中由于两种作物所占据的地上部和地下部生态位发生了分离, 在时间生态位和空间生态位上互补扩大, 从而使地上部的光、热和地下部的营养资源在时间上前后分离在空间上互补扩大, 实现了资源最大限度的利用^[1]。目前间作研究的重点正由田间作物搭配模式、地上部光、热、水、肥利用及作物生理特性、产量、品质优势等方面向地下部根际环境微生物、酶活性的生理协调机制转移。土壤微生物和酶一起作用于土壤物质转化和能量流动, 并参与许多重要的生物化学反应过程^[2-4], 土壤中微生物数量的多少和酶活性的高低可以代表土壤中物质代谢的旺盛程度, 在一定程度上可以反应作物对氮素的吸收利用状况和生长发育情况等, 是评价土壤肥力的重要指标之一^[5-6]。

玉米大豆间作是中国北方地区常见的一种种植模式, 目前大豆玉米间作存在的主要问题仍是如何调控地上部的光、热和地下部的营养等资源来持续提高产量和增加间作优势^[7,11]。因此, 探索种间地上部和地下部相互作用对间作优势的贡献, 对于进一步了解间作系统增产的生理生态机制及间作种植体系的管理和持续发展具有重要意义。已有研究表明, 作物之间除了地上部之间的相互作用不可忽视外, 地下部分对水分和养分的竞争更为激烈^[8-9], 而有关间作对作物地下部分影响的研究则较少, 为此本文在地上部环境条件一致下通过根系分隔试验研究了大豆玉米间作两种作物根系的相互作用对大豆植株特性、产量及土壤微生物数量和酶活性的影响, 以期对豆科作物和禾本科作物间作的增产机制提供参考。

* 国家自然科学基金重点项目(U1033004)资助

† 通讯作者: 黄国勤, 教授, 博士生导师。E-mail: hgqjnc@sina.com

作者简介: 张向前(1984—), 男, 安徽阜阳人, 博士研究生, 主要从事作物间作方面的研究。E-mail: xiangqian111@163.com,

电话: 15979072176

收稿日期: 2011-10-08; 收到修改稿日期: 2012-01-05

1 材料与方 法

1.1 试验设计

该盆栽试验在江西农业大学红壤试验站露天进行,该试验站位于东经 115°36',北纬 28°46',海拔 22 m。年平均温度约为 17.7℃,日平均温度 $\geq 10^\circ\text{C}$ 的活动积温达 5 640℃,持续天数约为 256 d,年平均日照时数为 1 820 h,无霜期约 273 d,多年平均降水量 1 625 mm。供试塑料桶高 50 cm,下口直径 35 cm,上口直径 40 cm。用聚氯乙烯粘合剂将 50 μm 尼龙网或塑料膜夹于桶中间(并以防水胶涂抹使其不漏水)而分隔为两室。设未分隔(No separation)、尼龙网分隔(Partial separation with nylon net)和塑料膜完全分隔(Full separation with plastic film),并分别标记为 NS、PS 和 FS。由于 3 种处理地上部环境条件一致,且不像大田试验玉米密度会对大豆产生遮阴和通风透光影响,因此在完全隔根方式下大豆和玉米可以当作单作分析。

供试土壤来自江西农业大学红壤试验田,该土壤其成土母质为第四纪红色黏土,土壤含有机质 17.9 g kg^{-1} ,碱解氮 69.5 mg kg^{-1} ,有效磷 13.6 mg kg^{-1} ,速效钾 169.1 mg kg^{-1} ,pH 6.1。

施肥设为施氮肥 0.15 g kg^{-1} 土和不施氮肥(CK)两个水平。磷肥用量为 P0.10 g kg^{-1} 土,钾肥 K 0.10 g kg^{-1} 土。供试肥料分别为尿素、普通过磷酸钙、硫酸钾。

每桶装土 50 kg,每室为 25 kg,所有肥料与土混匀一次施入。试验采用随机区组设计,3 \times 2 双因素试验,四次重复。

供试玉米品种为“科糯 986”,大豆品种为“早 50”。玉米和大豆于 2011 年 4 月 10 日播种,并同时于 2011 年 7 月 20 日收获。玉米和大豆各播四粒,出苗后各留苗两棵,作物生长期充分供应水分以满足作物对水分的需求,并依据每天天气情况和作物不同生育期需水要求用 1 000 ml 烧杯使每室各次供水量一致,其他管理措施按照当地农业生产习惯进行,以充分保证作物生长发育需要为基础。

1.2 样品采集与测定

于成熟期取生长一致的 6 棵大豆样本,测定株高、主茎节数、有效分枝数、单株荚数和百粒重。

生物产量的测定:将大豆样本在 105℃ 下烘 45 min 杀青,再在 85℃ 下烘干至恒重后称取干物重。

叶绿素含量测定:用手持式叶绿素测定仪

(SPAD—502 叶绿素测定仪)测定,选 6 株大豆,每一时期选取大豆相同部位的叶片在上面均匀取 5 个点测定,测定时期分别为始花期(I期)、盛花期(II期)、始荚期(III期)、盛荚期(IV期)、鼓粒期(V期)和成熟期(VI期)。

于大豆成熟期采集大豆植株根部 10 ~ 15 cm 深的土壤,每室采两个点并混匀为一个样品,剔除样品石砾和植物残根等杂物,置阴凉处风干后过 1 mm 筛,并置于 4℃ 冰箱中保存。

细菌、真菌、放线菌和固氮菌计数采用平板稀释涂布法。细菌培养用牛肉膏蛋白胨培养基,真菌用马丁氏培养基,放线菌用高氏 1 号培养基,固氮菌用瓦克斯曼氏 77 号培养基。具体测定方法参考文献 [10]。土壤转化酶活性(以 glucose 计, $\text{mg g}^{-1} \text{h}^{-1}$)测定采用 3,5-二硝基水杨酸比色法^[3];脲酶活性(以 $\text{NH}_3\text{-N}$ 计, $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$)测定采用靛酚蓝比色法测定^[3];土壤磷酸酶活性(以 phenol 计, $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$)测定采用磷酸苯二钠比色法^[3];土壤蛋白酶活性(以 $\text{NH}_3\text{-N}$ 计, $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$)测定采用茚三酮比色法^[3]。

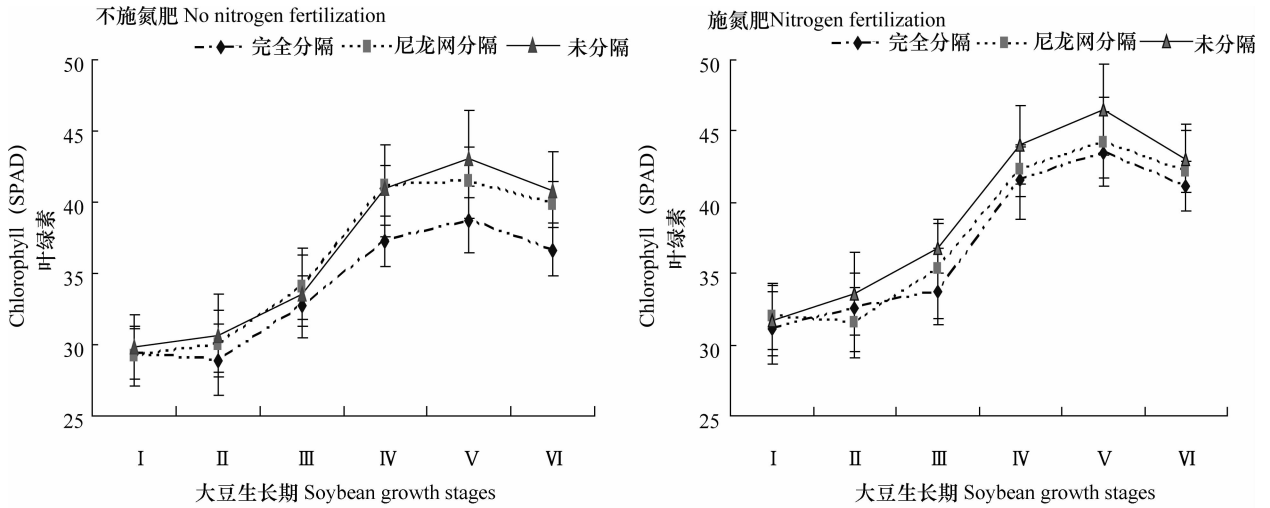
1.3 统计分析

采用 Microsoft Excel 2003 软件对数据进行处理和作图,采用 DPS7.05 软件和最小显著差数法(LSD)进行方差分析和相关分析。

2 结果与分析

2.1 施氮肥及隔根对间作大豆叶绿素含量的影响

叶绿素是植物进行光合作用的物质基础,叶绿素含量的高低在一定程度上决定着光合速率的大小,并与大豆产量密切相关。从图 1 中可以看出,无论在施肥和不施肥条件下,随着生育时期的进行,大豆叶片叶绿素含量皆呈现先增加后下降的趋势,即在始花期叶绿素含量最低,至鼓粒期达到最大值,成熟期叶绿素含量又逐渐降低。在隔根处理下,施肥的大豆叶绿素含量皆高于不施肥的大豆叶片叶绿素含量,说明施肥对提高大豆叶绿素含量具有重要作用。在相同施肥条件下,根系未分隔和尼龙网分隔的大豆叶绿素含量皆高于相同时期的根系完全分隔处理的大豆叶绿素含量,其中以根系未分隔处理的大豆叶绿素含量为最高,在不施肥条件下较同时期完全分隔处理的叶绿素含量分别增加了 1.4%、6.2%、2.6%、9.7%、11.1% 和 11.2%,在施肥条件下分别增加了 1.8%、3.2%、8.9%、5.7%、6.9% 和 4.6%,可见大豆玉米间作中根系的



注：I：始花期；II：盛花期；III：始荚期；IV：盛荚期；V：鼓粒期；VI：成熟期。Note: I: Initial flowering stage; II: Full flowering stage; III: Initial podding stage; IV: Full podding stage; V: Filling stage; VI: Maturing stage

图1 施氮与不施氮条件下隔根对大豆叶绿素含量的影响

Fig. 1 Effects of root separation on chlorophyll content of soybean under nitrogen and no nitrogen fertilization conditions

互作有利于提高大豆的叶绿素含量。

2.2 施氮肥及隔根对间作大豆农艺性状的影响

从表1中可以看出,施氮肥处理对大豆株高、主茎节数、有效分枝数、单株荚数和百粒重的影响都达到显著水平($p < 0.05$),而隔根方式只对大豆单株荚数和百粒重的影响达到显著水平,隔根方式和施肥处理的交互作用对上述大豆农艺性状的影响都不显著($p > 0.05$)。无论在施肥和不施肥条件下,大豆株高、主茎节数、有效分枝数、单株荚

数和百粒重呈现相同的变化趋势即未分隔 > 尼龙网分隔 > 完全分隔,其中根系未分隔处理的大豆株高、主茎节数、有效分枝数、单株荚数和百粒重在施肥条件下分别较完全分隔处理的增加了17.0%、16.5%、10.7%、16.5%和11.2%,在不施肥条件下分别较完全分隔处理的增加了3.7%、7.5%、13.0%、20.9%和15.1%,说明了大豆玉米间作中根系的互作有利于改善大豆的农艺性状。

表1 不同施肥条件下隔根对大豆农艺性状的影响

Table 1 Effects of root separation on agronomic traits of soybean under different fertilization conditions

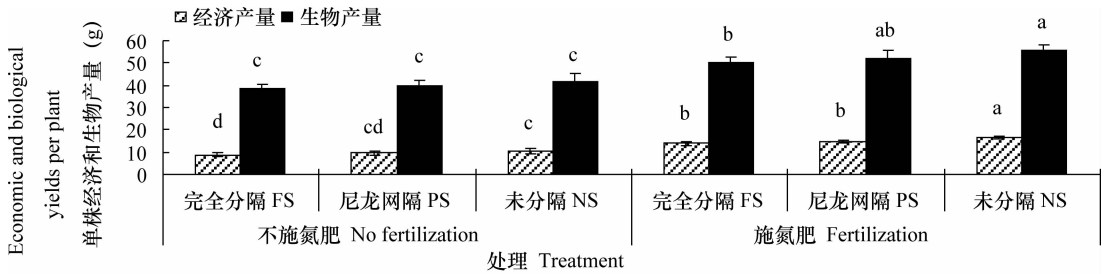
隔根处理 Root separation		株高 Plant height (cm)	主茎节数 Node number (个)	有效分支数 Effective branches(个)	单株荚数 Pods per plant (个)	百粒重 100-seed weight(g)
不施氮肥 CK	塑料膜完全分隔 FS	62.6 ± 8.91c	8.0 ± 0.40c	2.3 ± 0.24d	27.3 ± 1.71c	12.6 ± 1.39d
	尼龙网分隔 PS	64.2 ± 9.91c	8.0 ± 0.40c	2.4 ± 0.29cd	31.3 ± 3.30c	13.6 ± 0.87cd
	未分隔 NS	64.9 ± 7.59c	8.6 ± 0.43bc	2.6 ± 0.22bcd	33.0 ± 3.56c	14.5 ± 1.62c
施氮肥 Nitrogen fertilization	塑料膜完全分隔 FS	77.6 ± 4.97b	9.1 ± 0.67abc	2.8 ± 0.29abc	42.3 ± 5.56b	17.0 ± 0.76b
	尼龙网分隔 PS	85.9 ± 4.04ab	10.2 ± 1.37ab	3.0 ± 0.30ab	46.8 ± 3.50ab	17.8 ± 1.04ab
	未分隔 NS	90.8 ± 5.51a	10.6 ± 1.46a	3.1 ± 0.44a	49.3 ± 4.86a	18.9 ± 0.94a

注:表中数据为平均数 ± 标准差。同一列比较不同小写字母表示在0.05水平上差异显著($p < 0.05$) Note: Values are means ± SD. Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($p < 0.05$)

2.3 施氮肥及隔根对间作大豆单株经济产量和生物产量的影响

从图2中可以看出,施肥条件下的大豆单株经济产量(籽粒产量)和生物产量(地上部干物重)皆高于不施肥条件下的大豆单株经济产量和生物产量,并且皆存在显著差异($p < 0.05$)。无论在施肥和不施肥条件下,三种隔根方式对大豆经济产量和生物产量的影响皆表现为未分隔 > 尼龙网分

隔 > 完全分隔,其中未分隔处理的经济产量在不施肥和施肥条件下分别比完全分隔处理增加了21.3%和20.5%,生物产量在不施肥和施肥条件下分别较完全分隔处理增加了8.2%和11.2%,说明了大豆玉米间作中根系的互作可以提高大豆经济产量和生物产量,但施肥的效果要大于大豆玉米间作根系互作的优势。



注:柱状图上不同字母代表不同处理间差异达到显著水平($p < 0.05$) Note: Histograms capped with different letters indicate significant difference ($p < 0.05$) between different treatments

图2 不同施肥条件下隔根对大豆单株经济产量和生物产量的影响

Fig. 2 Effects of root separation on economic yield and biological yield per plant of soybean under different fertilization conditions

2.4 施氮肥及隔根对间作大豆根际微生物数量的影响

从表2中可以看出,施肥处理和隔根方式对土壤中的细菌、真菌、放线菌和固氮菌数量的影响皆达到显著水平($p < 0.05$),但二者的交互作用只对固氮菌的影响达到显著水平,固氮菌和细菌的比值只受到隔根方式的显著影响($p < 0.05$)。在不施肥条件下,大豆根际四种菌的数量皆以根系完全分隔处理下的最低,其中根系未分隔处理的细菌、真菌、放线菌和固氮

菌的数量分别比完全隔根处理的增加了117.5%、184.6%、89.2%和8.5%。在施肥条件下,土壤中大豆根际细菌、真菌、放线菌和固氮菌的数量变化趋势为未分隔 > 尼龙网分隔 > 完全分隔,其中未分隔处理与完全分隔处理的差异达到显著水平($p < 0.05$),未分隔处理较完全分隔处理的分别增加了69.8%、51.9%、100.0%和46.5%。因此可以得出施氮肥和间作作物的根系互作对增加土壤中的细菌、真菌、放线菌和固氮菌数量具有显著作用。

表2 不同施肥条件下隔根对大豆根际微生物数量的影响

Table 2 Effects of root separation on quantity of microorganisms in soybean rhizosphere under different fertilization conditions

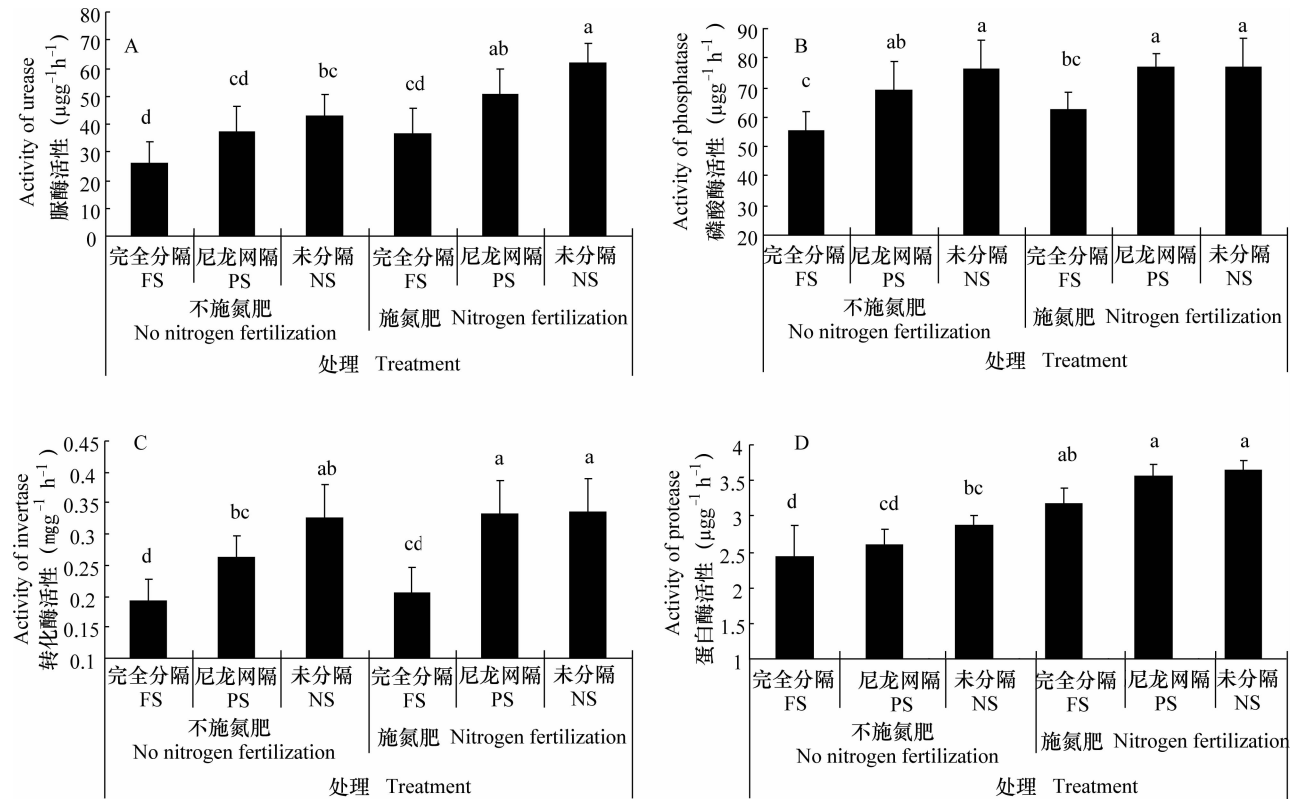
隔根处理 Root separation		细菌 Bacteria ($\times 10^6$ CFU g^{-1} dry soil)	真菌 Fungi ($\times 10^4$ CFU g^{-1} dry soil)	放线菌 Actinomycetes ($\times 10^5$ CFU g^{-1} dry soil)	固氮菌 Nitrogen- fixing bacteria ($\times 10^4$ CFU g^{-1} dry soil)	固氮菌/细菌 Nitrogen-fixing bacteria/Bacteria (%)
不施氮肥 CK	塑料膜完全分隔 FS	5.7 \pm 0.87d	2.6 \pm 1.10d	6.5 \pm 1.76e	7.1 \pm 2.27e	1.26 \pm 0.41a
	尼龙网分隔 PS	10.4 \pm 1.16c	5.4 \pm 0.62cd	10.4 \pm 0.80cd	7.8 \pm 1.61d	0.75 \pm 0.18bc
	未分隔 NS	12.4 \pm 3.20c	7.4 \pm 1.10c	12.3 \pm 0.79bc	7.7 \pm 1.73de	0.54 \pm 0.05c
施氮肥 Nitrogen fertilization	塑料膜完全分隔 FS	12.6 \pm 1.64c	7.9 \pm 2.15bc	8.8 \pm 1.38de	12.9 \pm 1.62c	1.04 \pm 0.22ab
	尼龙网分隔 PS	16.9 \pm 2.15b	10.3 \pm 0.91ab	14.6 \pm 1.11b	16.0 \pm 2.51b	0.97 \pm 0.22ab
	未分隔 NS	21.4 \pm 3.13a	12.0 \pm 2.07a	17.6 \pm 2.58a	18.9 \pm 1.98a	0.89 \pm 0.09b

注:表中数据为平均数 \pm 标准差。同一列比较不同小写字母表示在0.05水平上差异显著($p < 0.05$) Note: Values are means \pm SD. Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($p < 0.05$)

2.5 施氮肥及隔根对间作大豆根际土壤酶活性的影响

2.5.1 根际脲酶活性 脲酶是一种酰胺酶,直接参与尿素形态的转化,能酶促有机质分子中肽键的水解,是尿素分解必不可少的一种酶。试验结果表明(如图3A),无论在施肥和不施肥条件下,隔根方式对大豆根际脲酶活性影响的变化趋势为未分隔 >

尼龙网分隔 > 完全分隔。在施肥条件下未分隔和尼龙网分隔处理的脲酶活性分别比完全分隔处理增加了68.6%和39.4%,在不施肥条件下分别增加了63.2%和42.0%。在相同隔根方式下,施肥处理的脲酶活性较不施肥处理的分别增加了40.0%、37.5%和44.6%,可见间作和施肥可以增加土壤中脲酶的活性。



注:柱状图上的不同字母代表不同处理间差异达到显著水平 ($p < 0.05$) Note: Histograms capped with different letters indicate significant difference ($p < 0.05$) between different treatments

图3 不同施肥条件下隔根对土壤酶活性的影响

Fig. 3 Effects of root separation on soil enzyme activity under different fertilization conditions

2.5.2 根际磷酸酶活性 磷酸酶的酶促作用能够加速有机磷的脱磷速度,提高土壤磷素的有效性。试验结果表明(如图3B),无论在施肥和不施肥条件下,未分隔和尼龙网分隔处理的磷酸酶活性皆高于完全分隔处理,并分别与之存在显著差异 ($p < 0.05$),在施肥条件下分别增加了23.3%和23.7%,在不施肥条件下分别增加了36.8%和24.6%。在相同的隔根处理下,施肥条件下的磷酸酶活性分别较不施肥条件的增加了1.3%、12.1%和12.8%,但效果未达到显著水平 ($p > 0.05$)。在相同施肥处理下,未分隔和尼龙网分隔处理的磷酸酶活性分别与完全分隔处理的达到显著差异 ($p <$

0.05),说明在提高土壤磷酸酶活性方面,大豆玉米间作的根系互作和施氮肥都发挥着一定作用。

2.5.3 根际转化酶活性 转化酶是土壤中参与C循环的一种重要的酶,对增加土壤中易溶性营养物质起着重要作用,常用来表征土壤的熟化程度和肥力水平。从图3C中可以得出,土壤转化酶活性变化范围为0.19~0.34 $\text{mg g}^{-1} \text{h}^{-1}$ 之间,以不施肥条件下的完全分隔处理为最低。在不施肥条件下未分隔和尼龙网分隔处理的转化酶活性分别较完全分隔处理的增加了69.7%和36.4%,在施肥条件下分别增加了64.6%和59.5%,充分说明了大豆玉米间作由于根系的相互作用显著提高了土壤中转

化酶活性。此外施肥也明显提高了土壤中的转化酶活性,其中未分隔、尼龙网分隔和完全分隔处理分别较不施肥条件下相应的隔根处理增加了 3.3%、27.8% 和 6.3%。

2.5.4 根际蛋白酶活性 蛋白酶可以水解蛋白质为短肽,短肽进一步水解为氨基酸,这些水解产物是植物的氮源之一,土壤蛋白酶活性高低在一定程度上反映了土壤氮素营养状况。从图 3D 中可以看出,土壤中蛋白酶的活性变化范围为 2.45 ~ 3.65 $\mu\text{g g}^{-1}\text{h}^{-1}$ 之间,以施肥条件下的未分隔处理为最高。在不施肥条件下未分隔和尼龙网分隔处理分别较完全分隔处理增加了 17.0% 和 6.1%,在施肥条件下分别增加了 15.1% 和 12.1%,说明大豆玉米间作根系的相互作用能提高土壤中蛋白酶活性。

施肥也显著提高了土壤蛋白酶活性,在相同隔根处理下,施肥条件下的未分隔、尼龙网分隔和完全分隔处理的蛋白酶活性分别较不施肥条件下增加了 27.5%, 36.9% 和 29.7%,并存在显著差异($p < 0.05$)。

2.6 根际微生物数量、酶活性与大豆叶绿素含量、单株经济产量和单株生物产量之间的相关性

从表 3 中可以得出,大豆的经济产量和生物产量除与土壤中的放线菌、磷酸酶及转化酶相关不显著外($p > 0.05$),与该试验中其他菌种数量和酶活性及叶绿素含量之间皆呈显著($p < 0.05$)或极显著($p < 0.01$)正相关。大豆的经济产量与生物产量的相关性达到极显著水平,说明生物产量和经济产量关系极为密切,证明了大豆生物产量是经济产量的基础。大豆植株叶绿素含量除与土壤中的转化酶相

表 3 土壤微生物数量、酶活性与大豆叶绿素含量、单株经济产量和单株生物产量之间的相关性

Table 3 Correlation matrix among quantity of microorganisms, enzyme activity, chlorophyll content, economic yield and biological yield per plant of soybean

	细菌 Bacteria	真菌 Fungi	放线菌 Actinomy- cetes	固氮菌 Nitrogen- fixing bacteria	脲酶 Urease	磷酸酶 Phosphatase	转化酶 Invertase	蛋白酶 Protease	叶绿素 Chlorop hyll	经济产量 economic yield	生物产量 biological yield
细菌 Bacteria		0.99**	0.95**	0.91**	0.98**	0.80*	0.78*	0.92**	0.97**	0.87*	0.88**
真菌 Fungi			0.91**	0.91**	0.95**	0.80*	0.75	0.96**	0.99**	0.89**	0.90**
放线菌 Actinomycetes				0.75	0.99**	0.91**	0.92**	0.81*	0.89**	0.72	0.71
固氮菌 Nitrogen- fixing bacteria					0.85*	0.53	0.51	0.95**	0.86*	0.99**	0.99**
脲酶 Urease						0.86*	0.86*	0.86*	0.94**	0.80*	0.80*
磷酸酶 Phosphatase							0.98**	0.67	0.79*	0.49	0.48
转化酶 Invertase								0.63	0.73	0.48	0.43
蛋白酶 Protease									0.92**	0.97**	0.95**
叶绿素 Chlorophyll										0.84*	0.86*
经济产量 Economic yield											0.98**
生物产量 Biological yield											

注: * 为显著相关($p < 0.05$), ** 为极显著相关($p < 0.01$) Note: * Correlation is significant($p < 0.05$); ** Correlation is markedly significant($p < 0.01$)

关不显著外,与大豆植株的经济产量、生物产量及上述土壤的四种菌数量和三种酶活性皆达到显著或极显著正相关。土壤中上述四种菌之间、四种酶之间及四种菌和四种酶之间除真菌与转化酶、放线菌与固氮菌、固氮菌与磷酸酶、固氮菌与转化酶、磷酸酶与蛋白酶、转化酶与蛋白酶相关不显著外($p > 0.05$),其余皆达到显著或极显著正相关。从表中亦得出,大豆的经济产量和生物产量及叶绿素含量与土壤中的上述微生物数量和酶活性之间的关系极为密切,且皆存在正相关关系,因此通过采取一定的措施来提高土壤中的微生物数量和酶活性可以有助于增加大豆叶绿素含量和提高大豆的生物产量和经济产量。

3 结果与讨论

叶绿素含量高低会直接影响光合作用的生产,张建华等^[11]在研究中发现大豆玉米间作,可以使大豆叶绿素含量在各个生育时期略高于大豆单作;李植等^[12]在研究中同样发现,大豆玉米间作增加了大豆叶绿素含量,使光合速率增大,光合产物的合成与积累不断增加;本研究通过地下部隔根处理发现无论在施肥和不施肥条件下,大豆玉米间作根系未分隔处理的大豆叶绿素含量在各个生育时期皆高于根系完全分隔处理,并使大豆生育后期能保持较高的叶绿素含量(相对于根系完全分隔处理)。这可能是由于根系未分隔处理的大豆根系与玉米根系之间相对于完全分隔处理有更多的信息和营养物质交流,使作物处于较佳的营养状态,从而使作物生长健壮,有利于叶绿素的提高^[13]。此外玉米根系分泌的一些有机酸(如麦根酸类植物铁载体)不仅能改善大豆根系的微生态环境而且能改善豆科作物缺铁黄化症状,有利于豆科作物的生长和发育,在一定程度上提高了大豆叶绿素含量^[14]。由于本试验各处理地上部环境条件一致,因此证明了间作作物根系的互作(根系未分隔)相对于单作(根系完全分隔)能增加作物叶绿素含量。

以往的大量研究已经证明间作能明显改善植物特性,提高作物的经济产量和生物产量。如李隆等^[15]研究得出小麦与玉米、小麦与大豆和蚕豆与玉米3种间作方式都有明显的产量优势;李文学^[16]在研究中亦发现小麦蚕豆间作可以使小麦、蚕豆的产量明显增加;本研究排除了大豆玉米间作的地上部环境差异,经过分析得出,无论在施肥和不施肥条

件下根系未分隔处理的大豆株高、主茎节数、有效分枝数、单株荚数和百粒重都得到一定改善进而提高了大豆的经济产量和生物产量(相对于根系完全分隔处理),其中施肥条件下的间作效果要略微好于不施肥条件下的。可见根系互作在间作体系中对改善作物农艺性状提高作物经济产量和生物产量方面发挥着重要作用。

土壤微生物是土壤生态系统的重要组成部分,目前通过间作栽培改善土壤微生物环境已有较多报告,如小麦与蚕豆、玉米与蚕豆和小麦与玉米间作能够改变根际细菌群落结构组成,提高根际细菌群落多样性^[17-18]。吴凤芝等^[19]在研究中也发现,不同作物与黄瓜间作均能提高黄瓜根际的细菌,真菌和防线菌的数量,增加土壤微生物群落多样性。本研究亦发现,无论在施肥和不施肥条件下未隔根和尼龙网隔根处理相对于完全隔根处理明显增加了土壤中的细菌、真菌、放线菌和固氮菌数量,且上述四种菌的数量皆以施肥条件下未隔根处理的为最多,说明了施肥和间作有利于提高土壤中的微生物数量。这可能是由于施氮肥增加了土壤中的氮素,可以为微生物提供更多的氮源^[20-21],而间作中作物根系的互作可以使根系土壤中含有更多的维生素、碳水化合物、氨基酸和有机酸等,从而提高了微生物数量^[17,22]。土壤酶来自植物、动物和微生物的活体或残体,通过催化土壤中的生化反应发挥着重要作用。刘均霞等^[23]通过盆栽试验表明间作体系中玉米、大豆根际土壤中的脲酶和磷酸酶活性均显著高于相应单作;Ghosh等^[24]发现大豆高粱间作使土壤中脱氢酶及硝酸还原酶活性均得到提高。本研究亦得出施肥和间作都能提高土壤中的脲酶、磷酸酶、转化酶和蛋白酶的活性,通过隔根处理可发现,未隔根处理的大豆根际的酶活性皆高于完全隔根处理,这可能是由于在间作系统中由于两种作物根系的互作不仅使有机物转化速度加快,生物氧化代谢活动加强,而且改变了根际土壤的生境增加了微生物数量,使作物根系和微生物向土壤中释放酶的数量增加^[1,5]。因此可以得出间作作物之间根系的交互作用在提高土壤酶活性方面发挥着重要作用。

土壤中酶活性的高低和微生物数量的多少可以代表土壤中物质代谢的旺盛程度,是土壤肥力的一个重要指标^[25],而土壤肥力与作物叶绿素含量及经济产量和生物产量关系又极为密切。本文通过相关分析得出,该试验中的四种菌数量和四种酶活性与大豆植株的叶绿素含量及经济产量和生物产

量之间皆呈正相关关系,且大多数达到显著($p < 0.05$)或极显著($p < 0.01$)水平,证明了通过提高土壤微生物数量和酶活性可以增加作物的经济产量和生物产量。尽管目前国内外在玉米大豆间作方面已经开展了不少研究,但整体认识还比较肤浅,而且通常没有将间作系统地上部和地下部环境各自分离出来进行单独研究,因此长期以来关于间作的理论研究一直不够深入、系统,存在着一定的欠缺。为此,在今后的研究中按照生态位互补原则,深入开展作物间作系统中根系互作的研究,探讨如何通过采取合理的间作模式充分发挥间作系统中作物根系的互作来增加土壤中微生物数量和酶活性、改善土壤微生态环境,不仅对于充分挖掘间作作物地下部根系互惠的潜力,提高土壤肥力和资源利用效率,增加作物的经济产量和生物产量具有重要意义,而且对间作理论研究的深入、完善和系统化及其关键技术的研发、推广和应用具有重要意义。

参考文献

- [1] 李隆. 间作作物种间促进与竞争作用研究. 北京: 中国农业大学, 1999. Li L. Interspecific facilitative and competitive interactions between intercropped species (In Chinese). Beijing: China Agricultural University, Beijing, 1999
- [2] 苗琳, 王立, 黄高宝, 等. 保护性耕作对旱地麦田土壤酶活性的影响. 干旱地区农业研究, 2009, 27(1): 6—11. Miao L, Wang L, Huang G B, et al. Effects of conservation tillage on soil enzymatic activities in rained wheat field (In Chinese). Agriculture Research in the Arid Areas, 2009, 27(1): 6—11
- [3] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1983. Guan S Y. Soil enzymes and the research methods (In Chinese). Beijing: Agriculture Press, 1983
- [4] Ge C R, Zhang Q C. Microbial community structure and enzyme activities in a sequence of copper-polluted soils. Pedosphere, 2011, 21(2): 164—169
- [5] 姜莉, 陈源泉, 高旺盛, 等. 不同间作形式对玉米根际土壤酶活性的影响. 中国农学通报, 2010, 26(9): 326—330. Jiang L, Chen Y Q, Gao W S, et al. The rhizosphere soil enzyme activities of different corn intercropping system (In Chinese). Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(9): 326—330
- [6] 张信娣, 曹慧, 徐冬青, 等. 光合细菌和有机肥对土壤主要微生物类群和土壤酶活性的影响. 土壤, 2008, 40(3): 443—447. Zhang X D, Cao H, Xu D Q, et al. Effects of photosynthetic bacteria and organic fertilizer on soil microorganisms and soil enzyme activities (In Chinese). Soils, 2008, 40(3): 443—447
- [7] Lesoing G W, Francis C A. Strip intercropping effects on yield and yield components of corn, grain sorghum and soybean. Agronomy Journal, 1999, 91: 807—813
- [8] Caldwell M M. Competition between root systems in natural communities//In: Caldwell M M. Root development. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 167—185
- [9] 王树起, 沈其荣, 褚新贵, 等. 种间竞争对旱作水稻与花生间作系统根系分布和氮素吸收积累的影响. 土壤学报, 2006, 43(5): 860—863. Wang S Q, Shen Q R, Chu X G, et al. Effect of interspecies competition on root distribution and nitrogen uptake of peanut and rice in intercropping in aerobic soil (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(5): 860—863
- [10] 中国科学院南京土壤所微生物室. 土壤微生物研究法. 北京: 科学出版社, 1985. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Methods for studying soil microbial (In Chinese). Beijing: Science Press, 1985
- [11] 张建华, 马义勇, 王振南, 等. 间作系统中玉米光合作用指标改善的研究. 玉米科学, 2006, 14(4): 104—106. Zhang J H, Ma Y Y, Wang Z N, et al. Research on the improvement of photosynthesis indices of maize in the intercropping system (In Chinese). Journal of Maize Sciences, 2006, 14(4): 104—106
- [12] 李植, 秦向阳, 曹敏建, 等. 大豆/玉米间作对大豆叶片光合特性和叶绿素荧光动力学参数的影响. 大豆科学, 2010, 29(5): 808—811. Li Z, Qin X Y, Cao M J, et al. Effect of intercropping with maize on photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of soybean (In Chinese). Soybean Science, 2010, 29(5): 808—811
- [13] 李勇杰, 陈远学, 汤利, 等. 地下部分隔对间作小麦养分吸收和白粉病发生的影响. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5): 929—934. Li Y J, Chen Y X, Tang L, et al. Effects of root separation on nutrient uptake of wheat and occurrence of powdery mildew under wheat-fababean intercropping (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilization Science, 2007, 13(5): 929—934
- [14] 左元梅, 张福锁. 不同间作组合和间作方式对花生铁营养状况的影响. 中国农业科学, 2003, 36(3): 300—306. Zuo Y M, Zhang F S. Effects of peanut intercropping with different graminous species and their intercropping model on iron nutrition of peanut (In Chinese). Scientia Agricultural Sinica, 2003, 36(3): 300—306
- [15] Li L, Sun J H, Zhang F S, et al. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping I. Yield advantage and inter-specific interaction on nutrients. Field Crop Research, 2001, 71: 123—137
- [16] 李文学. 小麦/玉米/蚕豆间作系统中氮、磷吸收利用特点及其环境效应. 北京: 中国农业大学, 2001. Li W X. Nitrate accumulation in soil nutrient acquisition by intercropped wheat, maize and fababean (In Chinese). Beijing: China Agricultural University, 2001
- [17] 宋亚娜, 张福锁, 包兴国, 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. 生态学报, 2006, 26(7): 2268—2274. Song Y N, Zhang F S, Bao X G, et al. Effect of intercropping on bacterial community composition in rhizosphere of wheat (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(7): 2268—2274
- [18] 柴强, 黄鹏, 黄高宝. 间作对根际土壤微生物和酶活性的影响研究. 草业学报, 2005, 14(5): 105—110. Chai Q, Huang P, Huang G B. Effect of intercropping on soil microbial and enzyme activity in the rhizosphere (In Chinese). Acta Prataculturae Sinica, 2005, 14(5): 105—110

- [19] 吴凤芝,周新刚.不同作物间作对黄瓜病害及土壤微生物群落多样性的影响.土壤学报,2009,46(5):899—906. Wu F Z, Zhou X G. Effect of intercropping of cucumber with different crops on cucumber diseases and soil microbial community diversity (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*,2009,46(5):899—906
- [20] 马冬云,郭天财,宋晓,等.尿素施用量对小麦根际土壤微生物数量及土壤酶活性的影响.生态学报,2007,27(12):5 222—5 228. Ma D Y, Guo T C, Song X, et al. Effects of urea application rate on the quantity of microorganisms and activity of enzymes in wheat rhizosphere (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*,2007,27(12):5 222—5 228
- [21] 姬兴杰,熊淑萍,李春明,等.不同肥料类型对土壤酶活性与微生物数量时空变化的影响.水土保持学报,2008,22(1):123—133. Ji X J, Xiong S P, Li C M, et al. Studies on spatial-temporal variations of soil enzyme activities and microorganism's number under different fertilizer types (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*,2008,22(1):123—133
- [22] 刘广才.不同间套作系统种间营养竞争的差异性及其机理研究.兰州:甘肃农业大学,2005. Liu G C. Difference and its mechanism of interspecific nutrition competition in different intercropping system (In Chinese). Lanzhou: Gansu Agricultural University,2005
- [23] 刘均霞,陆引罡,远红伟,等.玉米大豆间作对根际土壤微生物数量和酶活性的影响.贵州农业科学,2007,35(2):60—61. Liu J X, Lu Y G, Yuan H W, et al. The effects of maize || soybean intercropping on the quantity of microorganisms and activity of enzymes in soils (In Chinese). *Guizhou Agricultural Sciences*,2007,35(2):60—61
- [24] Ghosh PK, Manna MC, Bandyopadhyay KK, et al. Intercropping interaction and nutrient use in soybean/sorghum intercropping system. *Agronomy Journal*,2006,98:1 097—1 108
- [25] 邱现奎,董元杰,万勇善,等.不同施肥处理对土壤养分含量土壤酶活性的影响.土壤,2010,42(2):249—255. Qiu X K, Dong Y J, Wan Y S, et al. Effects of different fertilizing treatment on contents of soil nutrients and soil enzyme activity (In Chinese). *Soils*,2010,42(2):249—255

EFFECTS OF NITROGEN FERTILIZATION AND ROOT SEPARATION ON AGRONOMIC TRAITS OF INTERCROPPING SOYBEAN, QUANTITY OF MICRO ORGANISMS AND ACTIVITY OF ENZYMES IN SOYBEAN RHIZOSPHERE

Zhang Xiangqian¹ Huang Guoqin^{2†} Bian Xinmin¹ Zhao Qiguo³

(1 Agricultural College, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

(2 Research Centre on Ecological Sciences, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

(3 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract A pot experiment using the root separation technique was carried out to study effect of root interaction in soybean maize intercropping with or without N fertilization. Results of the experiment show that the chlorophyll content of soybean was higher in Treatment NS(No separation) than in Treatment PS(partially separated with nylon net) and Treatment FS(fully separated) at all the growth stages with or without N fertilization. N fertilization was better at improving agronomic traits of the soybean, such as plant height, node number of the main stem, effective branches, pods per plant and 100-seed weight, than mere intercropping(without N fertilization), and root interaction between the two interplanted crops played a significant($p < 0.05$) role only in improving pods per plant and 100-seed weight of the soybean. The treatments of root separation underground also demonstrated that the root interaction improved economic and biological yields of the soybean, but the effect was not significant than that of N fertilization. Intercropping and N fertilization could not only increase the populations of bacteria, fungi, actinobacteria and nitrogen-fixing bacteria, but also enhanced the activities of urease, phosphatase, invertase and protease. Correlation analysis revealed that the populations of bacteria, fungi, actinobacteria, and nitrogen-fixing bacteria and the activities of urease, phosphatase, invertase and protease, were all significant($p < 0.05$) and markedly significant($p < 0.01$) related to chlorophyll content of soybean and economic and biological yields of soybean per plant. All the findings demonstrate that root interaction between interplanted crops plays an important role in improving soil micro-environment, increasing the population of microorganisms and the activity of enzymes in the soil, and raising economic and biological yields of the crops.

Key words Root separation; Intercropping; Agronomic traits; Rhizosphere microorganisms; Enzyme activity