

# 施氮方式对玉米-大豆套作体系下大豆根瘤固氮、光合特性及产量的影响

雍太文<sup>1</sup>,董 茜<sup>1</sup>,刘文钰<sup>1</sup>,刘小明<sup>1</sup>,徐 婷<sup>1</sup>,宋 春<sup>1,2</sup>,杨 峰<sup>1</sup>,王小春<sup>1</sup>,杨文钰<sup>1</sup>

(1. 四川农业大学 农学院/农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室,四川 成都 611130; 2. 四川农业大学 资源环境学院生态环境研究所,四川 成都 611130)

**摘要:**通过田间试验探讨了施氮方式对玉米-大豆套作体系下大豆根瘤固氮酶活性、物质积累、光合特性和产量的影响。结果表明:与不施氮相比,施氮促进了大豆根瘤生长和地上部物质积累,提高了大豆的根瘤固氮能力、光合生产能力和籽粒产量。玉米-大豆一体化施氮相对大豆穴施显著提高了大豆地下部根系和根瘤的干重、单株根瘤固氮潜力和地上部茎叶生物量、叶片净光合速率及籽粒产量,降低了叶片的蒸腾速率,以距窄行玉米 15~30 cm 施氮增产效果最佳,与大豆间的施氮距离过小和过大均不利于大豆根瘤固氮和籽粒增产。距窄行玉米 30 cm 施氮处理的大豆单株根瘤固氮潜力(R2期)、叶片净光合速率、籽粒产量及玉米、大豆周年总产量分别比大豆氮肥穴施处理增加 29.26%、7.43%、23.88%和 6.4%。

**关键词:**玉米-大豆套作;根瘤固氮酶活性;光合特性;产量;施氮方式

**中图分类号:**S147.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-9841(2013)06-0791-06

## Effect of N Application Methods on Nitrogenase, Photosynthesis and Yield of Soybean under Maize-Soybean Relay Strip Intercropping System

YONG Tai-wen<sup>1</sup>, DONG Qian<sup>1</sup>, LIU Wen-yu<sup>1</sup>, LIU Xiao-ming<sup>1</sup>, XU Ting<sup>1</sup>, SONG Chun<sup>1,2</sup>, YANG Feng<sup>1</sup>, WANG Xiao-chun<sup>1</sup>, YANG Wen-yu<sup>1</sup>

(1. College of Agronomy, Sichuan Agricultural University/Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Cultivation in Southwest, Ministry of Agriculture, Chengdu 611130, China; 2. Institute of Ecological and Environmental Sciences, College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

**Abstract:** To investigate the effect of N application methods on soybean nodule nitrogenase, dry matter accumulation, photosynthetic traits and seed yield, a field experiment was conducted with different N application methods, such as collaboration fertilization of maize and soybean with diversity distance of fertilization to narrow row maize, and fertilizing in soybean holes. Compared to no N treatment, applying N significantly promoted nodule growth and shoot dry weight accumulation, nitrogen-fixing ability of nodules, photosynthesis and seed yield of soybean. Collaboration fertilization significantly enhanced root and nodule dry weight, nitrogen-fixing potential, shoot dry weight, net photosynthetic rate and seed yield. Among which the crops yield was the highest when the distance between the fertilization dot and the narrow row maize was from 15 to 30 centimeters. When the distance was 30 centimeters, nitrogen-fixing potential at R2, net photosynthetic rate, soybean seed yield and the annual total production of maize and soybean increased by 29.26%, 7.43%, 23.88% and 6.4%, respectively, compared with fertilizing in soybean holes.

**Key words:** Maize-soybean relay strip intercropping; Nodule nitrogenase; Photosynthesis characteristic; Yield; N application method

氮是大豆生长发育和产量形成的主要元素之一。大豆有 3 种氮来源,即土壤、施肥和根瘤固定大气中的氮,其中,根瘤固氮量占总氮吸收量的 50%~60%。然而大豆自身的固氮作用,不能满足其高产对氮素营养的需求,还必须施用氮肥<sup>[1-2]</sup>。研究表明,施用氮肥可以促进植株生长,提高大豆产量<sup>[3-5]</sup>,但施肥过多,造成营养生长过分繁茂或倒伏,使生殖生长不良,不仅降低氮肥的利用率,而且

也对环境构成污染。而且根瘤的生长易受外源氮素的影响,过多或在不适宜的阶段施用氮肥,不仅降低大豆的共生固氮,也达不到增产的效果<sup>[6-9]</sup>。因此,施氮肥还必须考虑根瘤的固氮特点,使其能够促进固氮。对此,相关学者提出通过减氮加菌<sup>[10]</sup>、优化氮肥中硝态氮和氨态氮比例<sup>[8]</sup>、掌握最佳施氮时期<sup>[11]</sup>等措施来充分发挥固氮作用,提高氮肥利用率和大豆产量。

收稿日期:2013-08-04

基金项目:国家自然科学基金(31271669,31201169);现代农业产业技术体系建设专项(CARS-04-PS19)。

第一作者简介:雍太文(1976-),男,博士,副教授,主要从事大豆间套作高产栽培生理与氮营养生态研究。E-mail:yongtaiwen@sicau.edu.cn。

通讯作者:杨文钰(1958-),男,教授,博士生导师,主要从事作物高产优质高效栽培技术研究。E-mail:wenyu.yang@263.net。

玉米-大豆套作作为我国南方旱地农业的一种主体模式,近年来发展十分迅速,在当地农业增产、农民增收上发挥了十分重要的作用<sup>[12]</sup>。但在实际生产中,该模式的作物施肥仍按传统玉米-甘薯套作模式,或以玉米、大豆单季作物独立实施,施肥总量大、易流失,肥料利用率低、损耗大,造成大豆旺长、抑制大豆根瘤生长和根瘤固氮。大豆通常不施肥,造成生长后期脱肥,荚粒数减少、百粒重下降。针对此现象本研究提出了建立在减量施氮理论基础上的玉米-大豆带状套作一体化施肥方法,期望通过对施肥距离的优化调整,改善大豆的根瘤生长和固氮功能,提高玉米-大豆套作系统的作物产量和氮肥利用率。本文通过设计不同的施氮方式,对比其对大豆根瘤固氮、叶片光合作用及籽粒产量的影响,以期对玉米-大豆套作体系氮肥合理施用和完善大豆根瘤固氮理论提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验于2012年3~10月在四川省现代粮食产业(仁寿)示范基地进行。供试氮肥为尿素(N含量46%,四川泸天化股份有限公司),磷肥为过磷酸钙( $P_2O_5$ 含量12%,资阳市润丰化工有限公司),钾肥为氯化钾( $K_2O$ 含量60%,中国农业生产资料集团公司进口)。供试玉米品种为川单418(四川农业大学提供),4月6日播种,8月3日收获;大豆品种为南豆12(南充市农业科学院提供),6月16日播种,10月27日收获。

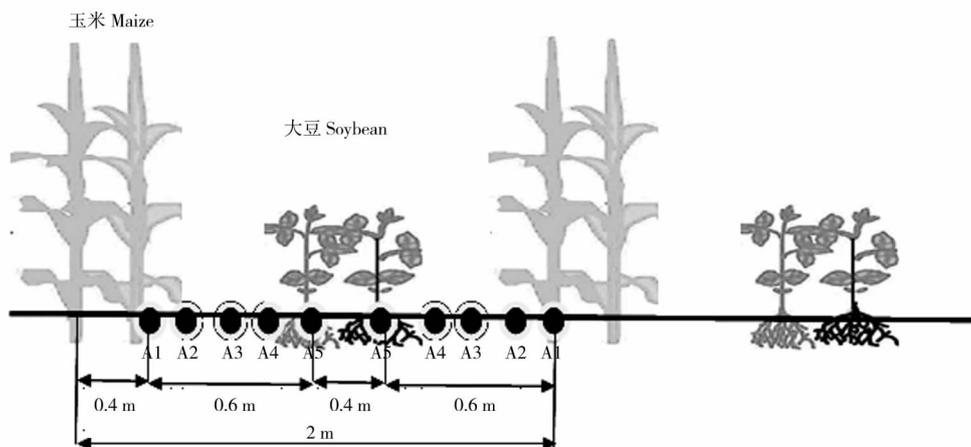
采用单因素随机区组设计,设玉米大豆一体化施氮、大豆氮肥穴施(A5)和不施氮(CK)3种施氮方式,其中玉米大豆一体化施氮包括距窄行玉米

0(A1),15(A2),30(A3)和45 cm(A4)施氮4个施肥距离,共6个处理,3次重复。每个处理连续种3带,带长6 m、带宽2 m,小区面积36 m<sup>2</sup>。玉米-大豆套作采用宽窄行种植方式(图1),玉米宽行160 cm,窄行40 cm,玉米宽行内种2行大豆,大豆行距40 cm,玉米与大豆间距60 cm,玉米、大豆穴距19 cm,玉米穴留1株,密度5.25万株·hm<sup>-2</sup>,大豆穴留2株,密度10.5万株·hm<sup>-2</sup>。

玉米氮肥分2次施用,分别为底肥(纯N 120 kg·hm<sup>-2</sup>)和大喇叭口期追肥(纯N 90 kg·hm<sup>-2</sup>);玉米磷钾肥随底肥施用,施用量为 $P_2O_5$  105 kg·hm<sup>-2</sup>、 $K_2O$  112.5 kg·hm<sup>-2</sup>。大豆氮肥施用量为纯N 60 kg·hm<sup>-2</sup>;大豆磷钾肥随大豆氮肥一同施用,施用量为 $P_2O_5$  63 kg·hm<sup>-2</sup>、 $K_2O$  52.5 kg·hm<sup>-2</sup>。A1~A4处理采用玉米、大豆一体化施氮方法,即玉米大喇叭口期追肥与大豆用肥按设计的施肥位点一同施用;A5、CK处理玉米、大豆采用传统株间穴施方法,单独施用;A1~A5处理的施肥距离如图1。

### 1.2 测定项目与方法

1.2.1 大豆植株生物量和根瘤干重 在五节期(V5)、盛花期(R2)、始粒期(R5)3个时期取样,各处理连续取长势一致植株6株(3穴),先将地上部分自子叶痕处取下,分茎、叶装袋,于105℃杀青,80℃烘至恒重后称重;再掘取长57 cm×宽40 cm×深30 cm见方的整段土体,装入尼龙网袋,用水浸泡后快速冲洗干净根系,泥水过钢筛,收集散落的根瘤,洗净的大豆根系浸入冰水,迅速剥落根瘤,计数,吸水纸吸干根瘤表面水分,用天平进行计重,根瘤保存用于固氮酶活性测定,待测定结束后,80℃烘干至恒重称取根瘤干重。



图中为A1~A5的5个施肥位点。

A1 - A5 indicate five fertilizer application sites.

图1 玉米-大豆带状套作模式示意图及施肥位点

Fig. 1 Diagrammatic sketch of maize-soybean relay strip intercropping and fertilizer application sites

1.2.2 根瘤固氮酶活性 采用乙炔还原法进行测定。将收集到的根瘤混匀,随机称取 1 g 放入 10 mL 的青霉素瓶,注入 2 mL 乙炔气体,30℃ 恒温水浴培养 30 min,用微量注射器取样 0.1 mL 注入气相色谱仪进行测定。气相条件:柱温 60℃;进样口温度 120℃;FID 监测器温度 120℃;气体流速: $N_2$  为 50 mL·min<sup>-1</sup>,  $H_2$  为 60 mL·min<sup>-1</sup>,空气为 50 mL·min<sup>-1</sup>。

1.2.3 光合特性 在 R2 期,每个小区选择长势一致的植株 4 株,选择晴天上午 10:00 ~ 12:00,采用美国 LI-COR 公司生产的 LI-6400 便携式光合仪测定大豆净光合速率  $P_n$ 、气孔导度  $G_s$ 、蒸腾速率  $T_r$  和胞间  $CO_2$  浓度  $C_i$ 。测定部位选取大豆顶部倒数第 3 片完全展开三出复叶的中间叶片,重复测定 3 次。

1.2.4 产量调查 玉米、大豆收获时,各小区取 2 行共 12 m<sup>2</sup> 计产,连续取 10 株考种,调查大豆产量构成。

### 1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 和 DPS 7.05 进行数据处理和统计分析,并用 LSD 法进行差异显著性测验,显著性水平设定为  $\alpha = 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 施氮方式对大豆根瘤干重、根干重的影响

2.1.1 根瘤干重 图 2 表明,在生育前期 (V5),施肥方式对大豆根瘤重影响不明显。R2 和 R5 期,相对不施氮,施氮可以提高根瘤干重,且各施氮处理间存在明显差异,相对大豆氮肥常规穴施 (A5),距窄行玉米 15 ~ 30 cm 处的玉豆一体化施氮处理更有利于增加根瘤干重,以 A2 处理最高,分别比 A5 处理增加了 38.76% 和 51.42%,比 CK 增加 27.86% 和 86.63%。

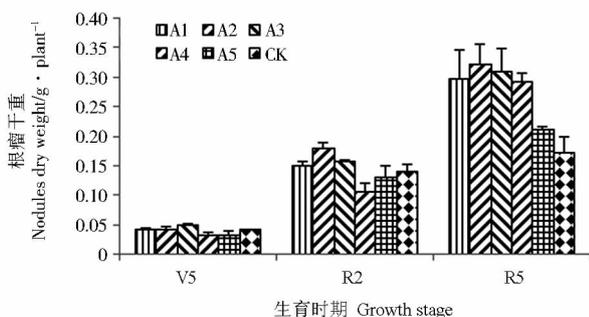


图 2 不同施氮方式下的大豆根瘤重比较

Fig. 2 Comparison on soybean nodules dry weight of different nitrogen application methods

2.1.2 根干重 在各生育时期,施氮处理的根干重高于不施氮处理 (图 3)。施氮处理间根干重的变化规律在各生育时期不一致, V5、R2 期,玉豆一体

化施氮处理高于大豆氮肥常规穴施,且随施肥距离的增加而增加,以靠近大豆施肥的 A4 处理最高,分别比 A5 处理增加了 46.43% 和 39.67%; R5 期,远离大豆施肥可以提高根系干重,以 A3 处理最高,但离大豆距离过远 (距窄行玉米 30 cm 以下) 根系干重明显降低。

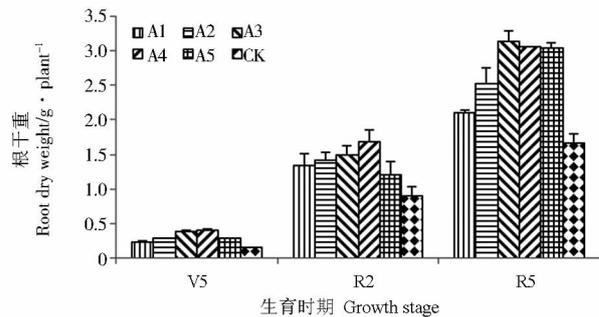


图 3 不同施氮方式下的大豆根干重比较

Fig. 3 Comparison on soybean root dry weight of different nitrogen application methods

### 2.2 施氮方式对大豆根瘤固氮的影响

2.2.1 根瘤固氮酶活性 各生育时期大豆根瘤固氮酶活性呈先增加后降低趋势,以 R2 期最高, R5 期各处理的根瘤固氮酶已接近失活,处理间差异不明显 (图 4)。V5、R2 期,玉豆一体化施氮处理的根瘤固氮酶活性与大豆氮肥常规穴施和不施氮处理存在明显差异,其中, V5 期,以靠近大豆施肥的 A4 处理最高,比 A5 和 CK 增加了 39.1% 和 122%; R2 期,以玉米、大豆中间位点施肥的 A3 处理最高,比 A5 和 CK 增加了 80.63% 和 130%。

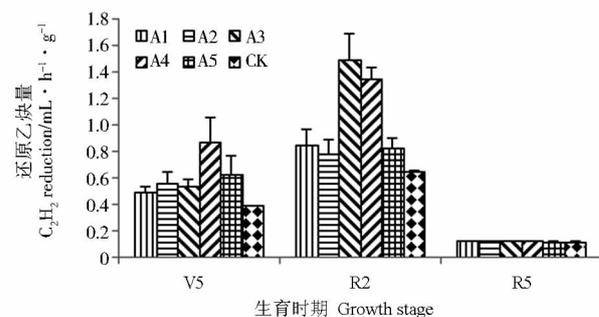


图 4 不同施氮方式的大豆根瘤固氮酶活性比较

Fig. 4 Comparison on soybean nodule nitrogenase activity of different nitrogen application methods

2.2.2 根瘤固氮潜力 大豆根瘤固氮酶活性、根瘤重量均为根瘤固氮的基础。本试验以两者乘积作为大豆单株根瘤固氮潜力,更能反映大豆根瘤固氮能力。从图 5 可以看出,大豆根瘤固氮潜力变化规律与根瘤固氮酶活性基本一致,各生育时期以 R2 期最高。从施氮方式来看,距离玉米 15 ~ 30 cm 的玉豆一体化施氮处理明显高于大豆氮肥常规穴施和不施氮处理,其中, V5 期,以 A2 处理最高; R2、R5

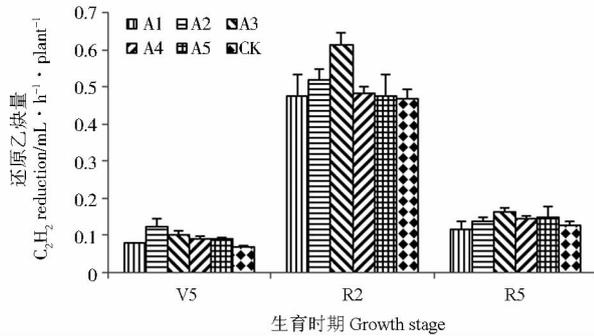


图5 不同施氮方式下的大豆单株根瘤固氮潜力比较

Fig.5 Comparison on nitrogen fixation potential of soybean nodule under different N application methods

期以 A3 处理最高, 分别比 A5 增加了 29.26% 和 10.2%, 比 CK 增加了 30.92% 和 28.57%。由此说明, 基于施肥距离优化后的玉豆一体化施氮有利于

表 1 不同施氮方式下的大豆地上部生物量

Table 1 Above-ground plant biomass of soybean under different N application methods ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )

处理 Treatment	V5			R2			R5		
	茎 Stem	叶 Leaf	总计 Total	茎 Stem	叶 Leaf	总计 Total	茎 Stem	叶 Leaf	总计 Total
A1	40.56 bc	39.99 cd	80.56 cd	293.0 bc	311.4 ab	604.4 bc	888.29 ab	658.20 b	1546.49 b
A2	42.12 bc	44.74 bcd	86.86 bcd	296.7 bc	314.2 ab	610.9 b	910.04 ab	663.72 b	1573.77 b
A3	53.79 ab	54.12 abc	107.91 abc	386.1 a	393.7 a	779.8 a	1155.41 a	919.11 a	2074.52 a
A4	58.00 ab	56.68 ab	114.68 ab	344.9 ab	383.3 a	728.2 ab	882.37 ab	710.78 ab	1593.15 b
A5	64.32 a	64.31 a	128.62 a	289.8 bc	361.6 a	651.4 ab	879.99 ab	582.88 b	1462.86 b
CK	28.96 c	32.45 d	61.41 d	237.2 c	235.6 b	472.8 c	703.31 b	479.97 b	1183.28 c

各处理 3 次重复的平均值进行比较; 同一列中标以不同字母的值差异达 5% 显著水平。下同。

Data are the averages of three replicates; Values followed by different letters within each column are significantly different at 0.05 probability level.

The same below.

#### 2.4 施氮方式对大豆叶片光合特性的影响

如表 2 所示, 施氮相对不施氮显著提高了大豆叶片的  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$  和  $Tr$ ; 相对大豆氮肥常规穴施, 玉豆一体化施氮显著改善了大豆的光合作用。对净光合速率而言, 随施肥距离的增大,  $P_n$  值先增加再降低, 以 A3 处理最高, 比 A5 处理增加了 7.43%, 而 A1 处理的  $P_n$  值相对 A5 则显著降低。对气孔导度, 玉豆一体化施氮相对大豆氮肥常规穴施呈增加趋势, 但离大豆施肥距离过远时,  $G_s$  值显著降低, A1

促进大豆根瘤固氮。

#### 2.3 施氮方式对大豆地上部生物量的影响

各生育时期下, 相对不施氮处理, 施氮处理的大豆茎、叶及地上部总生物量显著增加, 且各施氮处理间的植株生物量也存在显著差异 (表 1)。V5 期, 随施肥距离的增大, 大豆茎、叶及地上部总生物量呈增加趋势, 以 A5 处理的最高。R2、R5 期的生物量变化规律与根瘤固氮潜力变化规律一致, 均随施肥距离的增大, 茎、叶生物量先增加再降低, 以 A3 处理最高, 其地上部总生物量分别比 A5 处理增加了 19.71% 和 41.81%。说明玉豆一体化施氮通过施肥距离的优化在改善大豆根瘤生长的同时, 有效促进了大豆植株地上部干物质的积累, 为大豆高产奠定了物质基础。

处理比 A5 降低了 36.51%。 $C_i$  与  $G_s$  的变化规律一致, 除 A1 处理的  $C_i$  值低于 A5 处理外, 其他一体化施氮处理的  $C_i$  值均高于 A5 处理, 但差异不显著。各施氮处理间的  $Tr$  值差异不显著, 相对大豆氮肥常规穴施, 玉豆一体化施氮后的  $Tr$  值呈降低趋势, 随施肥距离的减小而降低。由此说明, 玉豆一体化施氮可以通过施肥距离的优化提高大豆叶片的光合速率, 抑制水分蒸腾。

表 2 施氮方式对大豆叶片光合参数的影响

Table 2 Effect of N application methods on photosynthetic parameters in leaf of soybean

处理 Treatment	净光合速率 $P_n / \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	气孔导度 $G_s / \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	胞间二氧化碳浓度 $C_i / \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$	蒸腾速率 $Tr / \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
A1	17.51 c	0.40 c	234.02 b	6.94 ab
A2	23.67 ab	0.74 ab	260.28 a	6.99 ab
A3	25.30 a	0.72 ab	253.02 ab	7.16 ab
A4	22.35 b	0.85 a	262.57 a	7.56 a
A5	23.55 ab	0.63 b	245.20 ab	7.54 ab
CK	15.47 c	0.25 c	194.42 c	6.05 b

## 2.5 施氮方式对大豆及玉米产量的影响

相对不施氮,施氮显著提高了大豆与玉米的单产及周年总产,且各施氮处理间差异显著(表3)。从大豆产量来看,各处理间的变化规律与生物量及净光合速率一致,玉豆一体化施氮有助于提高大豆产量,但离大豆的施肥距离过远时,其产量降低,以生物量和净光合速率最高的 A3 处理产量最高,分别比 A5 和 CK 增加了 23.88% 和 72.96%,其次为 A2 处理;进一步分析大豆产量构成可知,产量较高

的 A2、A3 处理的单株荚数和单荚粒数显著高于 A5 和 CK,但百粒重显著降低。从玉米产量和玉米、大豆周年总产来看,玉豆一体化施氮后,除远离玉米施肥的 A4 处理外,其他一体化施氮处理的玉米产量和玉米、大豆总产均高于 A5 处理,以 A2 处理最高,比 A5 处理分别增加了 15.67% 和 13.89%;其次为大豆产量最高的 A3 处理,其玉米、大豆周年总产分别比 A5 和 CK 增加了 6.4% 和 35.71%。

表 3 施氮方式对大豆与玉米产量的影响

Table 3 Effect of N application methods on yield of soybean and maize

处理 Treatment	大豆 Soybean				玉米产量 Maize yield/kg·hm <sup>-2</sup>	玉米大豆总产 Total yield/kg·hm <sup>-2</sup>
	单株荚数 Pods per plant	单荚粒数 Seeds per pod	百粒重 100-seed weight/g	产量 Yield/kg·hm <sup>-2</sup>		
A1	58 b	1.56 a	20.57 a	1646.1 b	7548.0 b	9194.1 b
A2	67 ab	1.60 a	19.85 ab	1804.1 ab	8646.0 a	10450.1 a
A3	84 a	1.51 a	19.41 bc	2107.3 a	7655.3 b	9762.5 ab
A4	71 ab	1.43 a	20.40 ab	1753.8 ab	7105.5 b	8859.3 b
A5	73 ab	1.38 a	20.08 ab	1701.1 ab	7474.5 b	9175.6 b
CK	76 ab	1.04 b	18.64 c	1218.4 c	5975.3 c	7193.7 c

## 3 讨论

### 3.1 玉豆一体化施氮对大豆根瘤固氮的调控作用

氮肥的施用对大豆根系生长、固氮酶活性有极大的影响<sup>[13-15]</sup>。王树起等<sup>[6-7]</sup>研究发现,施用氮肥对根瘤固氮有明显的抑制作用,不论何种供氮方式均降低了根瘤数量、根瘤固氮酶活性和豆血红蛋白含量,且随施氮量的增加抑制作用加重,生长前期施氮抑制力强于生长后期施氮;但是,低浓度的“启动氮”能促进植物生长并提高单株植物结瘤数。甘银波等<sup>[11]</sup>研究表明,大豆仅施 25 kg·hm<sup>-2</sup>的启动氮获得了最高的根瘤干重和固氮率。本研究中,施氮均提高了大豆的单株根瘤重和根瘤固氮潜力,且玉豆一体化施氮相对大豆氮肥常规穴施能显著改善大豆根瘤固氮能力,表现为常规施氮水平下距窄行玉米 15~30 cm 施氮显著提高了大豆单株根瘤重、根瘤固氮酶活性及单株根瘤固氮潜力,距离大豆过近和过远均不利于大豆根瘤固氮。这或许与玉米-大豆套作体系下玉米对氮素的竞争吸收<sup>[16]</sup>和大豆的氮素转移作用<sup>[17]</sup>有关,该体系下玉米对氮素吸收处于优势地位,在氮肥远离玉米施肥(相对传统株间穴施)时,玉米会竞争吸收肥料中的氮以及大豆根瘤固定的氮,造成大豆根区土壤氮含量下降,继而刺激根瘤固氮,解除大豆根瘤固氮的“氮阻遏”效应,提高固氮能力。由此说明,玉米-大豆套作体系通过施肥距离的优化,不仅能提高大豆的根瘤固氮能力,还有助于系统氮肥利用率的提高<sup>[18]</sup>,但有关

玉豆套作体系下一体化施氮对根瘤形成发育的调控机制及与土壤环境变化的相互关系还有待进一步研究。

### 3.2 玉豆一体化施氮对大豆光合产物积累及产量的影响

光合作用是决定作物产量的最重要因素,是籽粒形成的物质基础,在形成作物产量的干物质中,90%~95%的有机物来自叶片的光合作用<sup>[19]</sup>。叶片是作物光合作用的主要器官,大豆叶片光合速率与产量间存在显著的相关性。叶绿素含量是衡量光合作用特性的重要指标,植株氮的吸收、同化与积累对叶绿素含量有显著影响。因此,氮素将直接或间接地影响植株光合作用<sup>[20]</sup>,谷秋荣等<sup>[21]</sup>研究表明,酰胺态氮肥、铵态氮肥及二者等比例混合 3 种施肥处理均能提高大豆叶片光合速率、气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度、叶绿素含量及成熟期产量,以铵态氮肥效果最佳。吉利巴<sup>[22]</sup>等利用腐植酸钠、钼酸铵、根瘤菌剂进行拌种和生育期间叶面喷施腐植酸钠,结果表明,腐植酸钠处理增加了大豆叶面积和光合势,提高了根瘤数量、根瘤干物质积累量和固氮效率,最终使产量提高 22%。本研究中,施氮相对不施氮显著提高了大豆的茎、叶生物量及叶片光合速率,抑制了水分蒸腾速率。与大豆地下根瘤生长规律一样,玉豆一体化施氮有效调节了植株地上部生长,表现为距窄行玉米 15~30 cm 施氮显著提高了各生育时期大豆的茎、叶生物量和开花期大豆叶片净光合速率,为大豆物质积累奠定了坚实基础,最终确保在玉米产量提高 15.67% 的同时,大豆产量

提高23.88%。由此说明,玉豆一体化施氮通过对大豆地下根瘤生长及固氮能力的改善,促进地上部植株对氮素的吸收,为地上部植株生长提供充足的营养,以促进叶片更好地生产和积累光合物质,最终形成较高的单株荚数和荚粒数,实现增产;另一方面,大豆地上部叶片较高的光合效率为地下根瘤生长提供充足的能量,实现地上与地下的相互调节和相互促进。

## 参考文献

- [1] 丁洪,郭庆元. 氮肥对不同品种大豆氮积累和产量品质的影响[J]. 土壤通报,1995,26(1):18-21. (Ding H, Guo Q Y. Effect of N fertilizer on N accumulation, yield and quality of different soybean varieties[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1995, 26(1): 18-21.)
- [2] Pantalone V J, Rebeck G J, Buort J W. Phenotypic contention of root trait in soybean and applicability to plant breeding[J]. Crop Science, 1996, 36(2): 456-459.
- [3] 董守坤, 龚振平, 祖伟. 氮素营养水平对大豆氮素积累及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 65-70. (Dong S K, Gong Z P, Zu W. Effects of nitrogen nutrition levels on N-accumulation and yields of soybean[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(1): 65-70.)
- [4] Boroomandan P, Khoramivafa M, Haghi Y, et al. The effects of nitrogen starter fertilizer and plant density on yield, yield components and oil and protein content of soybean(*Glycine max* L. Merr)[J]. Pakistan Journal of Biological Sciences, 2009, 12(4): 378-382.
- [5] Osborne S L, Riedell W E. Starter nitrogen fertilizer impact on soybean yield and quality in the Northern Great Plains[J]. Agronomy Journal, 2006, 98: 1569-1574.
- [6] 王树起, 韩晓增, 乔云发, 等. 不同供N方式对大豆生长和结瘤固氮的影响[J]. 大豆科学, 2009, 28(5): 859-862. (Wang S Q, Han X Z, Qiao Y F, et al. Soybean(*Glycine max* L.) growth and nitrogen fixation as affected by different N supplying modes[J]. Soybean Science, 2009, 28(5): 859-862.)
- [7] 王树起, 韩晓增, 乔云发, 等. 施氮对大豆根瘤生长和结瘤固氮的影响[J]. 华北农学报, 2009, 24(2): 176-179. (Wang S Q, Han X Z, Qiao Y F, et al. Nodule growth, nodulation and nitrogen fixation in soybean(*Glycine max* L.) as affected by nitrogen application[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2009, 24(2): 176-179.)
- [8] 严君, 韩晓增, 王守宇, 等. 不同形态氮对大豆根瘤生长及固氮的影响[J]. 大豆科学, 2009, 28(4): 674-677. (Yan J, Han X Z, Wang S Y, et al. Effect of different forms nitrogen on nodule growth and nitrogen fixation in soybean(*Glycine max* L.)[J]. Soybean Science, 2009, 28(4): 674-677.)
- [9] 田艳洪, 刘元英, 张文钊, 等. 不同时期施用氮肥对大豆根瘤固氮酶活性及产量的影响[J]. 东北农业大学学报, 2008, 39(5): 15-19. (Tian Y H, Liu Y Y, Zhang W Z, et al. Effect of N fertilization at different stage on nitrogenase activity and yield of soybean[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2008, 39(5): 15-19.)
- [10] 韩晓增, 邹文秀, 尤梦阳. 减氮、加菌、改善土壤物理性状提高大豆固氮能力[J]. 大豆科技, 2011(1): 14-16. (Han X Z, Zou W X, You M Y. Advance soybean nitrogen fixation by decreasing nitrogen, adding rhizobium and improving soil physical properties[J]. Soybean Science and Technology, 2011(1): 14-16.)
- [11] 甘银波, 陈静. 大豆不同生长阶段施用氮肥对生长、结瘤及产量的影响[J]. 大豆科学, 1997, 16(2): 125-130. (Gan Y B, Chen J. Effects of N application at different growth stages on growth, nodulation and yield of soybeans[J]. Soybean Science, 1997, 16(2): 125-130.)
- [12] 杨文钰, 雍太文, 任万军, 等. 发展套作大豆, 振兴大豆产业[J]. 大豆科学, 2008, 27(1): 1-7. (Yang W Y, Yong T W, Ren W J, et al. Develop relay-sowing soybean, revitalize soybean industry[J]. Soybean Science, 2008, 27(1): 1-7.)
- [13] 刘丽君, 孙聪姝, 刘艳, 等. 氮肥对大豆结瘤及叶片氮素积累的影响[J]. 东北农业大学学报, 2005, 36(2): 133-137. (Liu L J, Sun C S, Liu Y, et al. Effects of nitrogen on nodule-forming and nitrogen concentration in soybean leaves[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2005, 36(2): 133-137.)
- [14] 董守坤, 刘丽君, 孙聪姝, 等. 利用<sup>15</sup>N标记研究氮素水平对大豆根瘤生长的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 985-988. (Dong S K, Liu L J, Sun C S, et al. Effects of nitrogen levels on nodule growth of soybean using <sup>15</sup>N tracing method[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(4): 985-988.)
- [15] 闫春娟, 王文斌, 孙旭刚, 等. 水肥互作对大豆生理特性、根瘤固氮及产量的影响[J]. 大豆科学, 2011, 30(2): 229-233. (Yan C J, Wang W B, Sun X G, et al. Effect of water-fertilizer interaction on physiological characteristics, nitrogen fixation and yield of soybean[J]. Soybean Science, 2011, 30(2): 229-233.)
- [16] 雍太文, 杨文钰, 向达兵, 等. 小麦/玉米/大豆套作的产量、氮营养表现及其种间竞争力的评定[J]. 草业学报, 2012, 21(1): 50-58. (Yong T W, Yang W Y, Xiang D B, et al. Production and N nutrient performance of wheat-maize-soybean relay strip intercropping system and evaluation of interspecies competition[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2012, 21(1): 50-58.)
- [17] 雍太文, 杨文钰, 向达兵, 等. 小麦/玉米/大豆和小麦/玉米/甘薯套作对土壤氮素含量及氮素转移的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(1): 148-158. (Yong T W, Yang W Y, Xiang D B, et al. Effect of wheat/maize/soybean and wheat/maize/sweet potato relay strip intercropping on soil nitrogen content and nitrogen transfer[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(1): 148-158.)
- [18] 雍太文, 杨文钰, 任万军, 等. 两种三熟套作体系中的氮素转移及吸收利用[J]. 中国农业科学, 2009, 42(9): 3170-3178. (Yong T W, Yang W Y, Reng W J, et al. Analysis of the nitrogen transfer, nitrogen uptake and utilization in the two relay-planting systems[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(9): 3170-3178.)
- [19] Specht J E, Hume D J, Kumudini S V. Soybean yield potent genetic and physiological perspective[J]. Crop Science, 1999, 39: 1560-1570.
- [20] 王忠. 植物生理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 131-169. (Wang Z. Plant physiology[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 131-169.)
- [21] 谷秋荣, 薛晓娅, 郭鹏旭, 等. 不同氮肥类型对大豆叶片光合特性及产量的影响[J]. 大豆科学, 2010, 29(5): 900-905. (Gu Q R, Xue X Y, Guo P X, et al. Effects of different nitrogen forms on leaves photosynthesis characteristics and yields of soybean[J]. Soybean Science, 2010, 29(5): 900-905.)
- [22] 吉利巴 B A, 西涅果夫斯卡娅 B T, 沃洛赫 И П, 等. 腐植酸钠对大豆共生固氮及光合作用的影响[J]. 大豆科学, 2012, 31(3): 440-442. (Tilba V A, Sinegovskaya V T, Voloh I P, et al. Effect of sodium humate on symbiotic nitrogen fixing and photosynthetic activity of soybean[J]. Soybean Science, 2012, 31(3): 440-442.)