

减量施氮对玉米-大豆套作体系中大豆根瘤固氮及氮素吸收利用的影响

刘文钰, 雍太文, 刘小明, 陈鹏, 董茜, 徐婷, 杨文钰

(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)

摘要:通过田间试验,研究了种植模式(大豆单作、玉米-大豆套作)和施氮水平(0, 180, 240 kg·hm⁻²)对大豆根瘤固氮特性和氮素吸收利用的影响。结果表明:随生育时期的推移,大豆的单株根瘤数、根瘤干重在单作模式下呈先增加再降低的趋势,而套作模式下则呈持续增加的趋势,在R5期最高;单株根瘤固氮潜力在两种种植模式下均呈先增加再降低的趋势,在R2期最高。与单作比较,套作大豆的单株根瘤数、根瘤干重、根瘤固氮潜力和总吸氮量在V5、R2期降低,在R5期则提高,氮素收获指数、氮肥农学利用率和吸收利用率显著提高。适量施氮有利于提高大豆的根瘤固氮能力,增加植株对氮素的吸收利用。套作模式下,减量施氮处理R5期的单株根瘤数、根瘤干重、根瘤固氮潜力及R8期的总吸氮量比不施氮处理高26.9%、15.5%、14.3%和58.2%,比习惯施氮处理高19.7%、12.0%、23.1%和11.3%,氮肥农学利用率和吸收利用率比习惯施氮处理高73.5%和20.1%。玉米-大豆套作减量一体化施肥促进了大豆根瘤固氮,提高了套作大豆和整个玉米-大豆套作系统的氮肥吸收利用效率。

关键词:减量施氮;根瘤固氮;氮素吸收;大豆;玉米-大豆套作

中图分类号:S565.1

文献标识码:A

DOI:10.11861/j.issn.1000-9841.2014.05.0705

Effect of Reduced N Application on Nodule N Fixation, N Uptake and Utilization of Soybean in Maize-Soybean Relay Strip Intercropping System

LIU Wen-yu, YONG Tai-wen, LIU Xiao-ming, CHEN Peng, DONG Qian, XU Ting, YANG Wen-yu

(College of Agronomy, Sichuan Agricultural University/Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Cultivation in Southwest, Ministry of Agriculture, Chengdu 611130, China)

Abstract: To investigate the effects of cropping patterns and N application rates on nodule N fixation characteristics, N uptake and utilization of soybean, a field experiment was conducted with three N application rates (0, 180, 240 kg·hm⁻²) representing zero, reduced and conventional N application, respectively) and two planting patterns (soybean monoculture and maize-soybean relay strip intercropping). The results showed that, with the development of soybean growth stages, soybean nodules number, nodules dry weight per plant increased first and decreased afterwards in monoculture, but kept increasing in relay strip intercropping system, and got the highest value at R5 stage; Nodule N fixation potential per plant in both monoculture and relay strip intercropping system increased first and decreased afterwards, and got the highest value at R2 stage. Compared to monoculture soybean, nodules number, nodules dry weight, nodule N fixation potential per plant and total N uptake of intercropping soybean decreased at R2 stage, but increased at R5 stage, besides, N harvest index, N agronomy efficiency (AE_N), and N uptake efficiency (UE_N) of intercropping soybean increased significantly. Reduced N application was beneficial to improve the ability of soybean nodule N fixation, N uptake and utilization. In the reduced N application treatment, nodules number, nodules dry weight, nodule N fixation potential per plant at R5 stage and total N uptake at R8 stage of relay intercropping soybean increased by 26.9%, 15.5%, 14.3% and 58.3%, respectively, compared with the zero N application treatment, and increased by 19.7%, 12.0%, 23.1% and 11.3% respectively compared with the conventional N application treatment, furthermore, AE_N and UE_N were 73.5% and 20.1% higher than the conventional N application treatment. The reduced N application in maize-soybean relay strip intercropping system promoted nodule N fixation, improved N uptake and utilization efficiency of intercropping soybean and the whole maize-soybean relay strip intercropping system.

Key words: Reduced N application; Nodule N fixation; N uptake; Soybean; Maize-soybean relay strip intercropping

氮素是作物生产中的重要限制因子,大豆是需氮较高的作物,生产100 kg的大豆约需吸收6.5~8.5 kg氮^[1]。大豆的氮素来源主要为土壤氮、肥料氮及根瘤固氮。根瘤固定的氮素约占大豆一

生需氮量的50%~60%^[2],但仅靠根瘤固氮不能满足其生长发育对氮素的需求,还必须配合施用氮肥。前人研究发现,施用一定量氮肥有利于大豆根瘤的形成和固氮^[3],但过量施氮或在不适宜的阶段

收稿日期:2014-03-10

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

第一作者简介:刘文钰(1988-),女,硕士,主要从事作物高产技术与理论研究。

通讯作者: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;

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

施氮均会抑制根瘤和固氮活性,在一些情况下还会导致植物旺长产量降低^[4]、肥料的利用率降低,并造成环境污染。因此,协调大豆对共生固氮和土壤(肥料)供氮的比例,是充分发挥大豆固氮潜力和提高产量的关键。前人通过减氮加菌^[5]、施用不同比例的确态氮和氨态氮^[6]、掌握施氮的最佳时期^[7]等措施来兼顾根瘤固氮作用的发挥和氮肥利用率、产量的提高。

间套作模式利用不同物种在空间分布和养分需求等方面的优势互补,尤其是禾本科作物与豆科作物的间套作,具有显著的优势。Nielsen等^[8]研究豌豆+大麦间作表明,间作下氮资源的利用效率比单作提高了30%~40%。Li等^[9]研究小麦/玉米套作发现,在纯氮施用量为200~400 kg·hm⁻²时,套作籽粒的吸氮量比单作高了37%。近年来,在我国西南地区广泛推广的玉米-大豆带状复种模式具有显著的节肥增产优势,提高了复种指数和耕地利用效率^[10-11]。前人研究表明,该体系中由于大豆的引入,拓宽了氮素营养的生态位,缓解了套作体系对氮素的竞争,促进了玉米对氮素的吸收,改变了系统的氮素循环^[12]。而在生产应用中作物施肥仍按传统玉米-甘薯套作模式,或以玉米、大豆单季作物独立施用,易导致氮肥损耗大、肥料利用率低等问题。尤其是玉米-大豆套作体系中常因施肥量或施肥方式不当,导致植株旺长、抑制根瘤生长和固氮。对此,雍太文等^[12-16]围绕玉米-大豆套作体系中作物对氮吸收特性及施肥技术进行了系列研究,但有关该模式下大豆的根瘤特性和生物固氮能力尚不清楚。本文在单作、套作模式下,研究了不同施氮水平对大豆根瘤固氮特性及氮素吸收利用效率的影响,旨在探明减量施氮条件下套作大豆的生物固氮能力及其与氮素吸收利用的关系,以期为该模式氮肥合理施用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

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。基础土壤肥力:有机质17.26 g·kg⁻¹,全氮0.90 g·kg⁻¹,全磷0.50 g·kg⁻¹,全钾14.28 g·kg⁻¹,碱解氮77.35 mg·kg⁻¹,速效磷22.83 mg·kg⁻¹,速效钾196.63 mg·kg⁻¹,pH6.8。供试玉米品种为川单418,由四川农业大学提供;大豆品种为南豆12,由南充市农业科学院提供。

1.2 试验设计

采用二因素裂区设计,主区为种植模式,分别为大豆单作(P1)、玉米-大豆套作(P2);副区为玉米、大豆总施氮量,分别为不施氮(N0,对照)、减量施氮(N1,180 kg·hm⁻²,根据当地玉米施氮量确定)、习惯施氮(N2,240 kg·hm⁻²,根据当地玉米和大豆的总施氮量确定),单套作模式下玉米大豆施氮比为3:1,共6个处理,重复3次。每个处理连续种3带,带长6 m、带宽2 m,小区面积36 m²。大豆单作(P1)采用等行距种植,行距50 cm,穴距19 cm,穴留1株;玉米-大豆套作(P2)采用宽窄行种植,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、大豆穴距均19 cm,玉米穴留1株,密度5.25万株·hm⁻²,大豆穴留2株,密度10.5万株·hm⁻²。各作物保证在单、套作方式下,单位土地面积的种植密度和施肥水平一致。玉米氮肥分2次施用,即底肥和大喇叭口期追肥,大豆氮肥一次性施用。大豆单作(P1)按传统株间穴施方式施肥;玉米-大豆套作(P2)体系按玉米、大豆一体化施肥方式施肥(在玉米、大豆之间,距玉米25 cm处开沟施肥),玉米底肥施氮统一按72 kg·hm⁻²实施,玉米大喇叭口期追肥则与大豆磷钾肥混合一起同时施用;套作玉米及单作大豆的磷钾肥随底肥施用,玉米施用量为P₂O₅ 105 kg·hm⁻²、K₂O 112.5 kg·hm⁻²,大豆施用量为P₂O₅ 63 kg·hm⁻²、K₂O 2.5 kg·hm⁻²。玉米4月5日播种,8月2日收获;大豆6月15日播种,10月26日收获。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 大豆植株生物量和吸氮量 在大豆五节期(V5)、盛花期(R2)、始粒期(R5)及成熟期(R8)取样,在各小区选长势一致的样段2段,每段取对称2行的连续2穴,将大豆植株按地上部秸秆、籽粒和地下部根系分开,于105℃杀青30 min,85℃烘干后称重,粉碎过60目筛,用凯氏定氮法测定植株全氮含量。

1.3.2 根瘤数量及根瘤干重 在大豆五节期(V5)、盛花期(R2)、始粒期(R5)取样,各处理连续取2穴大豆植株,将地上部分自子叶痕处取下后,掘取长38 cm×宽40 cm×深30 cm见方的土段,装入尼龙网袋,用水浸泡后快速洗净根系,泥水过钢筛,收集散落的根瘤,将洗净的大豆根系置于冰盘中,迅速剥落根瘤并计数,吸水纸吸干根瘤表面水分后用天平计根瘤重。根瘤保存用于测定固氮酶活性,测定结束后于80℃烘干至恒重称干重。

1.3.3 根瘤固氮酶活性 采用乙炔还原法测定固氮酶活性。将收集到的根瘤充分混匀后称取 1 g 放入 10 mL 的青霉素瓶,从中抽出 2 mL 的空气并注入 2 mL 乙炔气体,于 30℃ 恒温水浴培养 30 min,用微量注射器抽取 0.1 mL 气体注入气相色谱仪进行测定。气相条件:柱温为 60℃;进样口温度为 120℃;FID 监测器温度为 120℃;气体流速: N_2 、 H_2 和空气分别设定为 50,60,和 50 $mL \cdot min^{-1}$ 。

1.4 数据分析

采用 Excel 2003 进行数据整理与作图。采用 DPS 7.05 进行数据统计分析,并用 LSD 法进行差异显著性测验,显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$ 。

根瘤固氮潜力 ($mL \cdot h^{-1} \cdot plant^{-1}$) = 根瘤固氮酶活性 ($mL \cdot h^{-1} \cdot g^{-1}$) \times 根瘤干重 ($g \cdot plant^{-1}$);

植株各器官吸氮量 ($kg \cdot hm^{-2}$) = 植株各器官生物量 ($kg \cdot hm^{-2}$) \times 植株各器官氮浓度 ($g \cdot g^{-1}$);

经济系数 = 籽粒产量/地上部植株生物量;

氮素收获指数 (NHI, %) = 籽粒中 N 积累量/成熟期总氮积累量 $\times 100$;

氮肥农学利用率 ($AE_N, kg \cdot kg^{-1}$) = (施氮区作物产量 - 不施氮区作物产量)/施氮量;

氮肥吸收利用率 ($UE_N, \%$) = (施氮区地上植株氮积累量 - 不施氮区地上植株氮积累量)/施氮量 $\times 100$ 。

文中玉米-大豆套作系统 (MSS) 的总籽粒产量 (总吸氮量) 为套作模式下玉米籽粒产量 (总吸氮

量) 与大豆籽粒产量 (总吸氮量) 之和;玉米-大豆套作体系下大豆的氮肥农学 (吸收) 利用率根据大豆的籽粒产量 (吸氮量) 与大豆的施氮量来计算。

2 结果与分析

2.1 减量施氮对大豆生物量的影响

2.1.1 植株生物量 种植方式和施氮水平对大豆生物量有显著影响 (图 1)。大豆的地下部、地上部及总生物量随着生育进程的推移呈先增加后下降的变化趋势, R5 期达到峰值。单作与套作处理间大豆的地下部、地上部及总生物量差异显著。与单作相比,套作模式下,大豆的地下部生物量、V5 ~ R5 期的地上部生物量和总生物量显著降低,但 R8 期的地上部生物量和总生物量增加。施氮提高了单作、套作大豆的生物量,单作模式下,大豆地下部生物量随施氮量的增加而增加,以习惯施氮处理最高, R8 期减量施氮处理的地下部、地上部和总生物量比不施氮处理分别高 14.4%、19.9% 和 19.6%;套作模式下, V5 期的地上部生物量和总生物量随施氮水平的增加而增加, R2 ~ R8 期则先增加后降低,以减量施氮最高,该施氮处理下 R5 期的大豆地下部、地上部和总生物量比不施氮处理分别高 41.1%、21.3% 和 23.3%, R8 期比不施氮处理分别高 27.1%、49.5% 和 48.4%, 与习惯施氮处理间的差异均不显著。

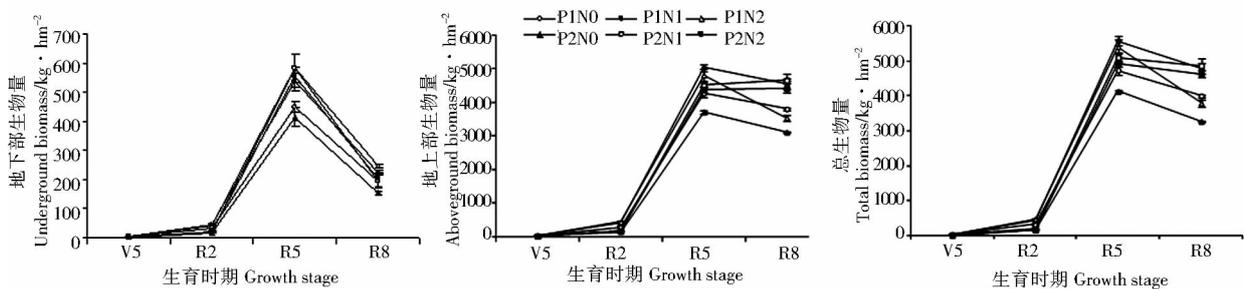


图 1 不同种植模式下大豆生物量

Fig. 1 Biomass of soybean under different planting patterns

2.1.2 籽粒产量及经济系数 由表 1 可知,与单作相比,大豆套作处理的籽粒产量显著增加,比单作处理的高 30.4%;单作、套作模式下各施氮水平间的大豆籽粒产量变化规律一致,均随施氮量的增加呈先增加后降低的趋势,单作模式下以习惯施氮处理最低,这可能与过量施氮造成单作大豆植株旺长有关,该模式下减量施氮处理比不施氮和习惯施氮的分别高 15.2% 和 33.3%,套作模式下以减量施氮

处理最高,比不施氮和习惯施氮的分别高 50.8% 和 8.6%。进一步分析大豆经济系数可知,套作处理的经济系数显著高于单作;施氮处理间以减量施氮处理最高。说明套作更有利于大豆干物质向籽粒转运,而单作大豆的干物质则更多地向根茎叶转运,减量施氮有利于提高大豆的籽粒产量和套作大豆的经济系数。

表1 不同种植模式下大豆籽粒产量及经济系数

Table 1 Grain yield and economic coefficient of soybean under different planting patterns

施氮水平 N application level	大豆籽粒产量 Soybean grain yield/kg·hm ⁻²		大豆经济系数 Economic coefficient of soybean	
	P1	P2	P1	P2
N0	1552.1 b	1567.3 c	0.39 a	0.48 ab
N1	1788.7 a	2364.1 a	0.37 a	0.49 a
N2	1341.9 c	2176.8 b	0.35 b	0.47 b
平均 Mean	1560.9 b	2036.1 a	0.37 b	0.48 a

同列不同小写字母表示不同氮处理间差异显著($P < 0.05$),平均值行单独比较。下同。

Different lowercase letters in the same column mean significant difference among different N treatments at 0.05 level. Different letters within the mean column indicate a significant different at 0.05 level. The same below.

2.2 减量施氮对大豆氮素吸收利用的影响

2.2.1 植株吸氮量 由图2可知,大豆的地下部、地上部及总吸氮量随着生育进程的推移呈先增加后下降的变化趋势,R5期达到峰值。单作与套作处理间的大豆地下部、地上部及总吸氮量的差异显著。与单作相比,套作模式下,大豆的地下部吸氮量、V5~R5期的地上部吸氮量和总吸氮量显著降低,但R8期的地上部吸氮量和总吸氮量显著增加,比单作分别高18.5%和17.9%,说明套作更有利于大豆生育后期的氮素积累。大豆地下部、地上部和

总吸氮量在单作、套作模式下各施氮水平间的变化规律一致,V5期随施氮量的增加而增加,R2~R8期则呈先增加后降低,以减量施氮处理最高。其中,单作模式下,R5期减量施氮处理的总吸氮量比不施氮高20.4%,与习惯施氮处理间的差异不显著,R8期比不施氮和习惯施氮处理分别高26.7%和32.3%;套作模式下,R5期总吸氮量比不施氮和习惯施氮处理分别高27.7%和6.9%,R8期分别高58.2%和11.3%。说明减量施氮处理有利于提高氮素吸收量,不施氮或施氮过多则会使其降低。

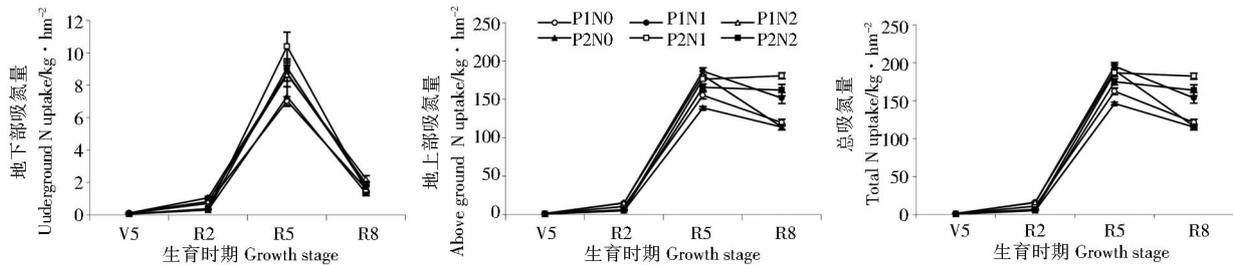


图2 不同种植模式下大豆吸氮量

Fig. 2 Nitrogen uptake of soybean under different planting patterns

2.2.2 籽粒吸氮量及氮素收获指数 施氮与种植方式对大豆籽粒吸氮量的影响显著(表2)。大豆套作处理的籽粒吸氮量比单作的高29.8%;施氮可以显著提高大豆籽粒吸氮量,以减量施氮处理最高,该施氮水平下单作和套作的籽粒吸氮量分别比不施氮的高24.8%和58.9%,比习惯施氮的高

34.9%和10.9%。进一步分析氮素收获指数可知,大豆套作处理的氮素收获指数显著高于单作9.5%;与不施氮相比,施氮降低了单作大豆的氮素收获指数,提高了套作大豆的氮素收获指数,但各施氮处理间差异不显著。

表2 不同种植模式下大豆籽粒吸氮量及氮素收获指数

Table 2 Grain nitrogen uptake and harvest index of soybean under different planting patterns

施氮水平 N application rate/kg·hm ⁻²	籽粒吸氮量 Grain N uptake/kg·hm ⁻²		氮素收获指数 N harvest index/%	
	P1	P2	P1	P2
N0	98.9 b	101.1 c	82.65 a	88.78 a
N1	123.3 a	160.6 a	81.19 a	88.90 a
N2	91.4 b	144.8 b	80.20 a	89.43 a
平均 Mean	104.5 b	135.5 a	81.34 b	89.04 a

2.2.3 氮肥利用率 由表 3 可知,与单作相比,大豆套作在各施氮处理下的氮肥农学利用率和吸收利用率均显著提高;习惯施氮处理下,单作大豆由于过量施氮加剧了植株旺长和抑制了根瘤固氮,导致吸氮量低于不施氮处理,氮肥农学利用率和吸收利用率接近 0,显著低于减量施氮处理。在减量施

氮处理下,氮肥农学利用率表现为大豆套作处理 > 玉米-大豆套作系统 > 大豆单作处理,吸收利用率则为大豆套作处理 > 大豆单作处理 > 玉米-大豆套作系统,说明减量一体化施氮提高了套作大豆的氮肥农学利用率和吸收利用率,从而使玉米-大豆套作系统的氮肥利用率整体得到提高。

表 3 玉米-大豆套作系统的氮肥利用率

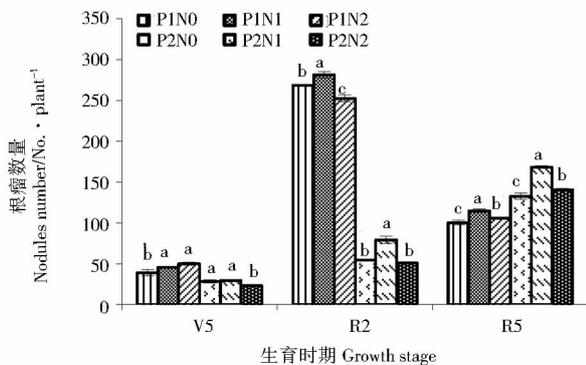
Table 3 N utilization efficiency in maize-soybean relay strip intercropping system

施氮水平 N application rate/kg·hm ⁻²	氮肥农学利用率 AE _N /kg·kg ⁻¹			氮肥吸收利用率 UE _N /%		
	大豆 Soybean		玉米-大豆 系统 MSS	大豆 Soybean		玉米-大豆 系统 MSS
	P1	P2		P1	P2	
N1	5.3 a	17.7 a	8.3 a	71.3 a	100.0 a	49.6 a
N2	0 a	10.2 a	3.6 b	0 b	83.3 b	22.2 b
平均 Mean	2.6 b	13.9 a		35.7 b	91.7 a	

AE_N: N agronomy efficiency; UE_N: N uptake efficiency; MSS: Maize-soybean system.

2.3 减量施氮对大豆根瘤特性及固氮的影响

2.3.1 根瘤数量 施氮水平与种植方式对根瘤数量有显著影响(图 3)。随生育时期的推进,不同种植方式下的根瘤数量规律不一致,单作大豆根瘤数量呈先增加再降低的趋势,以 R2 期的最高;套作大豆根瘤数量呈持续增加的趋势,以 R5 期的最高。V5、R2 期下套作大豆根瘤数量显著低于单作大豆, R5 期下则显著高于单作,比单作处理的高 37.7%。V5 期时,单作、套作方式下各施氮水平之间的变化规律不一致, R2、R5 期,单作、套作模式下的根瘤数均随施氮量的增加而先增加后降低,以减量施氮处理的最高,其中, R5 期单作处理下减量施氮处理的比不施氮处理和习惯施氮处理分别高 14.5% 和 8.6%,套作模式下减量施氮处理的分别高 26.9% 和 19.7%。



不同小写字母表示不同处理间差异显著(P < 0.05),下同。

Different lowercase letters meant significant difference among different treatments at 0.05 level. The same below.

图 3 不同种植模式下的大豆根瘤数量
Fig.3 Soybean nodules number under different planting patterns

2.3.2 根瘤干重 从图 4 可以看出,大豆根瘤干重变化规律与根瘤数量基本一致。随生育时期的推进,单作大豆根瘤干重呈先增加再降低的趋势,以 R2 期的最高;套作大豆的则呈持续增加的趋势,以 R5 期的最高。V5、R2 期套作大豆根瘤干重显著低于单作大豆, R5 期则显著高于单作 22.0%。根瘤干重在单作、套作模式下各施氮水平之间的变化规律一致,随施氮量的增加呈先增加后降低,均以减量施氮处理的为最高,显著高于其他 2 种施氮水平。其中, R2 期的单、套作模式及 R5 期的单作模式下不施氮处理的根瘤干重与习惯施氮处理间的差异不显著, R5 期套作模式下两者间差异显著。

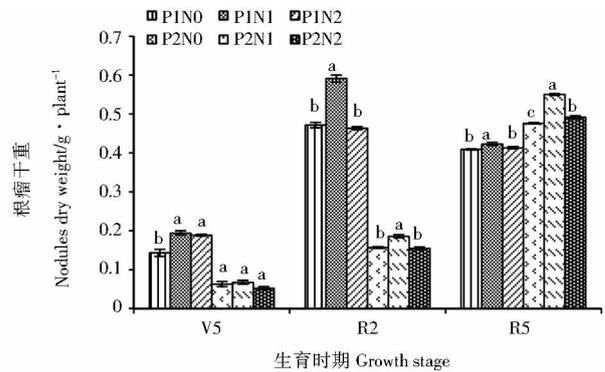


图 4 不同种植模式下的大豆根瘤干重
Fig.4 Dry weight of soybean nodules under different planting patterns

2.3.3 根瘤固氮潜力 施氮与种植方式对根瘤固氮潜力的影响显著(图 5)。随生育时期的推进,根瘤固氮潜力呈先增加再降低的趋势,以 R2 期的根瘤固氮潜力最高。从种植方式来看, V5、R2 期大豆套作固氮酶潜力显著低于单作大豆, R5 期则显著高于单作大豆 49.3%,这与 R2 期后单作大豆根瘤干

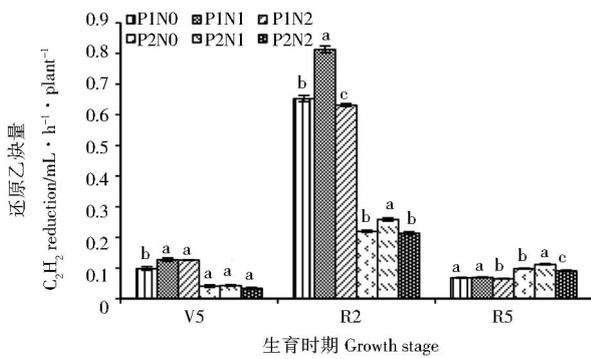


图5 不同种植模式下的大豆单株根瘤固氮潜力

Fig. 5 The nitrogen fixation potential of soybean nodule under different planting patterns

重降低而套作大豆根瘤重量大幅增加有关。从施氮水平来看,根瘤固氮酶潜力随施氮量的增加呈先增加后降低的趋势,以减量施氮处理的最高。其中,

表4 大豆根瘤固氮及氮素吸收利用的主要性状间简单相关分析

Table 4 Simple correlation coefficients among main characteristics of soybean nodule N fixation, N uptake and utilization

性状 Characteristics	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
X ₁	1				
X ₂	0.82 **	1			
X ₃	0.87 **	0.48 *	1		
X ₄	0.12	0.61 **	-0.33	1	
X ₅	0.12	0.61 **	-0.33	1.00 **	1

X₁:根瘤数量;X₂:根瘤干重;X₃:根瘤固氮潜力;X₄:总生物量;X₅:总吸氮量。*表示显著水平为0.05;**表示极显著水平为0.01。

X₁:Nodules number;X₂:Nodules dry weight;X₃:Nodule nitrogen fixation;X₄:Total biomass;X₅:Total nitrogen uptake. * Significant at 0.05 level, ** Significant at 0.01 level.

3 讨论

3.1 玉米-大豆套作减量施氮对大豆生物量及吸氮量的影响

施氮能够显著提高作物产量,但其增产效果随施氮量的增加而降低^[15],邸伟^[17]研究表明,随着施氮水平的提高,大豆全株氮素积累量呈现先增加后下降的变化趋势,高氮降低了大豆全株和籽粒中根瘤固氮量及其所占比例以及肥料氮和根瘤氮的收获指数。前人从减量施氮方面开展了大量试验,杨文亭等^[18]在对甘蔗/大豆间作体系的减量施氮研究中发现,甘蔗鲜重产量在减量施氮条件下和常规施氮条件下没有显著差异。战秀梅等^[19]研究发现春玉米氮肥减量后移处理比农民习惯施氮处理的氮肥利用率提高了20.7%,氮的吸收效率也显著提高。雍太文等^[12]在前期的研究中发现,在“麦/玉/豆”体系中大豆的氮肥利用率较单作降低了51.5%,不利于玉米-大豆套作系统整体的氮肥吸收利用效率的提高。本研究中,与单作相比,在成熟

R2期单作处理下减量施氮处理比不施氮处理和习惯施氮处理分别高24.5%和28.8%,达到显著差异水平;R2和R5期套作模式下减量施氮处理显著高于不施氮处理和习惯施氮处理,分别高17.5%和20.7%、14.3%和23.1%。

2.4 根瘤固氮与氮素吸收利用的相关性

根瘤数量与根瘤干重之间相关系数为0.82,达极显著水平(表4);根瘤固氮潜力与根瘤数量极显著相关,与根瘤干重显著相关;总生物量和总吸氮量之间相关系数最大,为1.00,达极显著水平;总生物量、总吸氮量均与根瘤干重极显著相关。说明大豆根瘤固氮特性对氮素吸收利用的影响较大,根瘤数量、根瘤干重的增加促使干物质和氮素更多地向经济器官转运,从而提高大豆植株的总生物量、总吸氮量,进而提高大豆的氮肥利用率。

期(R8)前,套作大豆的总生物量及总吸氮量都显著降低,但由于成熟期时大豆籽粒产量和籽粒吸氮量显著提高,分别比单作高30.4%和29.7%,其经济系数和氮素收获指数也显著提高,分别比单作高29.7%和9.5%,致使该时期下总生物量、总吸氮量、氮肥农学利用率和吸收利用率显著提高。相对于不施氮处理,施氮降低了单作大豆的经济系数和氮素收获指数,但提高了套作处理的经济系数和氮素收获指数及单作、套作处理的总生物量、总吸氮量、氮肥农学利用率及吸收利用率,均以减量施氮处理最高,而增施氮肥后作物上述指标呈降低趋势。

3.2 玉米-大豆套作减量施氮对大豆根瘤固氮的影响

禾本科/豆科间作是一种广泛的种植方式,由于其中禾本科作物对土壤氮素竞争性的吸收,促进了豆科固氮^[20]。Jensen等^[21]在对豌豆-大麦间作系统的研究中发现,大麦的竞争作用使蚕豆的固氮量增加。施用氮肥对根侵染、根瘤发育、固氮作用等均有影响^[22-24],王树起等^[25]研究表明,根瘤数量、固

氮酶活性和豆血红蛋白含量随施氮量的增加均显著降低。然而早期施用一定量的氮可能产生“启动效应”,有利于大豆根瘤的形成和固氮,甘银波等^[7]研究表明当启动施氮量为 $25 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,大豆的根瘤干重和固氮率最高,但当外界氮源供应充足时,施氮大豆的根瘤固氮能力将受到抑制^[26]。本研究中,单作大豆的根瘤数、根瘤干重及根瘤固氮潜力在 R2 期及其以前高于套作大豆,以 R2 期为转折点,在 R5 期时三者均大幅下降,而套作大豆的根瘤数及根瘤干重从 V5 至 R5 期为持续增加,在 R5 期时显著高于单作大豆。其原因在于玉米-大豆套作系统中存在共生期间玉米对氮素的竞争优势,以及玉米收获后大豆植株快速恢复生长对氮素的需求^[13-14],刺激根瘤数和根瘤干重在其后的生育时期内快速增长,加强了根瘤固氮能力,为后期大豆的生殖生长提供了碳水化合物和能量,促使大豆的干物质和氮素更多地向经济器官上转运^[27],从而提高了套作大豆的籽粒吸氮量、氮素收获系数、氮肥农学利用率及吸收利用率;而单作大豆在无竞争条件下,营养生长期更多地将物质能量用于满足根系和茎叶的生长,导致后期落花落荚严重,产量降低^[4],而同时由于根瘤数和根瘤干重降低,影响了根瘤固氮作用,籽粒吸氮量及总吸氮量均低于套作,氮肥利用率低下。与不施氮和习惯施氮处理相比,减量施氮条件下单作和套作处理的大豆根瘤数、根瘤干重和根瘤固氮潜力都得到了显著提高,而习惯施氮处理的低于不施氮处理。这可能与施用一定量氮肥改善了土壤供氮性能,促进植株生长,从而为根瘤的形成和固氮作用的发挥提供了所需能量和碳水化合物有关^[28]。大豆的生育前期,根瘤还处在构建自身的阶段,很少或不能向植株供氮,主要靠施氮促进大豆植株根、茎、叶的生长,进而促进根系对土壤和肥料氮的吸收^[29];随着生育时期的推进,根瘤数和根瘤干重逐渐增加,根瘤固氮作用增强,提供给大豆生殖生长所需的氮营养随之增加,同时也促进了根瘤自身的生长发育。习惯施氮处理显著降低了根瘤数、根瘤干重及根瘤固氮潜力,抑制了大豆的根瘤固氮,而不施氮处理仅靠根瘤固氮不能满足大豆对氮素的需要,优化了施肥时间、施肥距离和施肥量之后,玉米-大豆套作减量一体化施肥使根瘤数、根瘤干重及固氮在生殖生长期持续增加,既能充分发挥大豆的共生固氮能力,又能补充其生育后期根瘤固氮和土壤供肥的不足,满足生殖生长对氮的高需求,提高了大豆的产量和吸氮量,进而提高了整个系统对氮肥的利用率。

参考文献

- [1] Marschner H, Kirkby E A, Cakmak T. Effect of mineral nutritional status on shoot-root partitioning of photoassimilates and cycling of mineral nutrients [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1996, 47: 1255-1263.
- [2] Ohwaki Y, Sugahara P. Active extrusion of protons and exudation of carboxylic acids in response to iron deficiency by roots of chick-pea (*Cicer arietinum* L.) [J]. *Plant Soil*, 1997, 189: 49-55.
- [3] 沈润平, 王中孚, 郭进耀, 等. 氮磷钾营养对春大豆产量品质效应的影响 [J]. *江西农业大学学报*, 1998, 20(1): 51-55. (Shen R P, Wang Z F, Guo J Y, et al. Studies of the effect of NPK nutrients on the yield and quality of spring soybean [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 1998, 20(1): 51-55.)
- [4] 万燕, 闫艳红, 杨文钰. 不同氮肥水平下叶面喷施烯效唑对套作大豆生长和氮代谢的影响 [J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2012, 38(2): 185-196. (Wan Y, Yan Y H, Yang W Y. Effects of foliar spraying uniconazole on growth and nitrogen metabolism of relay strip intercropping soybean under different nitrogen levels [J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Science)*, 2012, 38(2): 185-196.)
- [5] 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.)
- [6] 宋海星, 申斯乐, 马淑英, 等. 硝态氮和氨态氮对大豆根瘤固氮的影响 [J]. *大豆科学*, 1997, 16(4): 283-287. (Song H X, Shen S L, Ma S Y, et al. Effect of NO_3^- -N and NH_4^+ -N on the nitrogen fixation of soybean nodules [J]. *Soybean Science*, 1997, 16(4): 283-287.)
- [7] 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.)
- [8] Nielsen H H, Gooding M, Ambus P. Pea-barley intercropping for efficient symbiotic N_2 -fixation, soil N acquisition and use of other nutrients in European organic cropping systems [J]. *Field Crops Research*, 2009, 113: 64-71.
- [9] Li W X, Li L, Sun J H, et al. Effects of intercropping and nitrogen application on nitrate present in the profile of an Orthic Anthrosol in Northwest China [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2005, 105: 483-491.
- [10] 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.)
- [11] Wang Z, Yang W Y. New soybean planting system in South China hilly ground [J]. *Crop Research*, 2007, 34(1): 35-38.
- [12] 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, Ren 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.)
- [13] 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.)
- [14] 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.)
- [15] 雍太文, 刘小明, 刘文钰, 等. 减量施氮对玉米-大豆套作体系中作物产量及养分吸收利用的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(2): 474-482. (Yong T W, Liu X M, Liu W Y, et al. Effects of reduced N application rate on yield and nutrient uptake and utilization in maize-soybean relay strip intercropping system [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(2): 474-482.)
- [16] 雍太文, 董茜, 刘小明, 等. 施肥方式对玉米-大豆套作体系氮素吸收利用效率的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2014, 36(1): 84-91. (Yong T W, Dong Q, Liu X M, et al. Effect of N application methods on N uptake and utilization efficiency in maize-soybean relay strip intercropping system [J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2014, 36(1): 84-91.)
- [17] 邸伟. 大豆根瘤固氮酶活性与固氮量的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2006: 28-29. (Di W. Study on nodule nitrogenous activities and amount of nitrogen fixation of soybean [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2006: 28-29.)
- [18] 杨文亭, 李志贤, 舒磊, 等. 甘蔗//大豆间作和减量施氮对甘蔗产量、植株及土壤氮素的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(20): 6108-6115. (Yang W T, Li Z X, Shu L, et al. Effect of sugarcane//soybean intercropping and reduced nitrogen rates on sugarcane yield, plant and soil nitrogen [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(20): 6108-6115.)
- [19] 战秀梅, 李亭亭, 韩晓日, 等. 不同施氮方式对春玉米产量、效益及氮素吸收和利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(4): 861-868. (Zhan X M, Li T T, Han X R, et al. Effects of nitrogen fertilization methods on yield, profit and nitrogen absorption and utilization of spring maize [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(4): 861-868.)
- [20] Xiao Y B, Li L, Zhang F S. Effect of root contact on interspecific competition and N transfer between wheat and fababean using direct and indirect ^{15}N techniques [J]. *Plant and Soil*, 2004, 262 (1): 45-54.
- [21] Jensen E S. Grain yield, symbiotic N_2 fixation and interspecific competition for inorganic N in pea-barley intercrops [J]. *Plant Soil*, 1996, 182: 25-38.
- [22] Setiyono. Environment conditions and nitrogen metabolism of soybean [J]. *Journal of Agronomy and Horticulture*, 1986, 61(5): 590-598.
- [23] 董守坤, 刘丽君, 孙聪姝, 等. 利用 ^{15}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 ^{15}N tracing method [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(4): 985-988.)
- [24] 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.)
- [25] 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 Y, et al. Nodule growth, nodulation and nitrogen fixation in soybean (*Glycine max* L.) as affected by nitrogen application [J]. *Agriculturae Oreali Sinica*, 2009, 24(2): 176-179.)
- [26] 杨子文, 沈禹颖, 谢田玲, 等. 外源供氮水平对大豆生物固氮效率的影响[J]. *西北植物学报*, 2009, 29(3): 574-579. (Yang Z W, Shen Y Y, Xie T L, et al. Biological nitrogen fixation efficiency in soybean under different levels of nitrogen supply [J]. *Acta Botanica Boreali Occidentalia Sinica*, 2009, 29(3): 574-579.)
- [27] 章建新, 倪丽, 翟云龙. 施氮对高产春大豆氮素吸收分配的影响[J]. *大豆科学*, 2005, 24(1): 38-42. (Effect on nitrogen fertilizer application to the absorption and distribution of nitrogen in spring soybean [J]. *Soybean Science*, 2005, 24(1): 38-42.)
- [28] Afza R, Hardarson G, Zapata F, et al. Effects of delayed soil and foliar fertilization on yield and N_2 fixation of soybean [J]. *Plant and Soil*, 1897, 97(3): 361-368.
- [29] Hardy R W F, Knight E J. Biochemistry and postulated mechanisms of nitrogen fixation [J]. *Progress in Phytochemistry*, 1968: 407-489.