

不同结瘤品种与根系分隔对大豆光合特性、生物量及产量的影响

杜青 陈平 付智丹 庞婷 杨欢 杨燕竹 雍太文

(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: 采用根系分隔盆栽试验, 研究了强结瘤 (NTS1007) 和弱结瘤 (南豆 12) 大豆品种在 3 种不同根系分隔方式 (B1, B2, B3) 下大豆的光合特性、农艺性状、生物量及产量的变化规律。结果表明: 相对于弱结瘤处理, 强结瘤品种可提高大豆的净光合速率, 且在 R1 期达到最大值, 比弱结瘤增加了 13.17%。随着生育时期的推移, 强结瘤品种较弱结瘤品种增加大豆生物量, 增幅呈先减少后增加的趋势, 从 V3 期 30.95% 减小到 R1 期 1.27%, 在 R4 期增长到 23.36%。相对于强结瘤品种, 弱结瘤品种可降低大豆株高, 在 V3、R1、R4 期下分别降低了 18.68%、40.90%、21.65%; 增加大豆单株粒数、百粒重与籽粒产量, 分别增加 87.03%、14.88%、55.94%。不同根系分隔方式下, 尼龙网分隔有利于改善大豆的农艺性状。在 V3、R1、R4 期, 尼龙网分隔较完全分隔株高分别降低了 17.05%、9.74%、5.51%; 在 R1、R4 期下, 尼龙网较不分隔处理茎粗分别增加了 4.85%、9.78%。大豆净光合速率在 V3、R1、R4 期均为尼龙网分隔最高, 在 V3、R1、R4 期较完全分隔高 14.67%、2.82%、24.00%。大豆根与茎的生物量在 V3 期尼龙网分隔最高, 较不分隔分别高 40.00%、6.06%。在 R1、R4 期下完全分隔最高, 较尼龙网分隔分别高 16.45%、8.59%。叶与荚的生物量在 V3 期以完全分隔最高, 较尼龙网高 17.14%; 在 R1、R4 期下均以不分隔最高, 与尼龙网分隔相比分别高 10.55%、11.01%。不同根系分隔方式对大豆的产量有显著影响, 大豆百粒重与籽粒产量均为不分隔 > 尼龙网分隔 > 完全分隔, 不分隔下大豆百粒重与产量较完全分隔分别高 11.22%、25.45%。

关键词: 玉米-大豆套作; 结瘤特性; 根系分隔; 光合特性; 产量

中图分类号: S565.1 文献标识码: A DOI: 10.11861/j.issn.1000-9841.2016.03.0428

Effects of Different Nodulation Varieties and Root Barriers on Photosynthetic Characteristics, Biomass and Yield of Soybean

DU Qing, CHEN Ping, FU Zhi-dan, PANG Ting, YANG Huan, YANG Yan-zhu, YONG Tai-wen

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

Abstract: To explore the effect of different soybean varieties nodulation ability and root barriers on soybean growth characteristics and yield, provided reference to development the mechanism of crops root interaction in intercropping system, the pot experiment was conducted with different root barriers (B1, B2, B3) to research on photosynthetic characteristics, agronomic variation characters, biomass and yield of strong nodulation (A1: NTS1007) and weak nodulation (A2: South beans 12) soybean cultivars. The results showed that: Compared with weak nodulation varieties, strong nodulation varieties increased net photosynthetic rate, which improved 13.17% at R1. With growth period passed, the biomass of strong nodulation varieties increased, compared with weak nodulation varieties, increased by 30.95% at V3, 1.27% at R1, 23.36% at R4, respectively. Compared with strong nodulation varieties, the height of weak nodulation varieties, at V3, R1, R4 decreased by 18.68%, 40.90%, 21.65% respectively; and grains per plant, 100-seed weight, grain yield increased by 87.03%, 14.88%, 55.94%, respectively. Under different root barriers, separate by nylon mesh was advantage to improve soybean agronomic traits. Compared with plastic barriers, the height of plant at V3, R1, R4 were decreased by 17.05%, 9.74%, 5.51%, respectively; the stem diameter at R1, R4 were increased by 4.85%, 9.78%, compared with nylon barriers, respectively. The net photosynthetic rate of soybean under nylon barriers were highest at V3, R1, R4, and 14.67%, 2.82%, 24.00% higher than that of no barriers. Biomass of soybean root and stem at V3 was the highest, and 40.00%, 6.06% higher than that of no barriers, respectively, plastic barriers were the highest at R1 and R4, 16.45% and 8.59% higher than that of nylon barriers. The biomass of leaf and pod under plastic barriers was the highest at V3, 17.14% higher than that of nylon barriers, and no barriers were highest at R1 and R4, 10.55% and 11.01% higher than nylon barriers, respectively. Different barriers pattern had significant effect on soybean yield, 100-seed weight and grain yield under different treatments were no barriers > nylon barriers > plastic barriers, and 100-seed weight and yield of soybean were 11.22%, 25.45% higher than that of plastic barriers, compared to no barriers.

Keywords: Maize-soybean intercropping; Nodulation; Root barrier; Photosynthetic characteristics; Yield

收稿日期: 2015-12-03

基金项目: 农业部公益性行业(农业)科研专项(201203096)。

第一作者简介: 杜青(1992-), 女, 硕士, 主要从事作物栽培与生理生态研究。E-mail: duqing92066@163.com。

通讯作者: 雍太文(1976-), 男, 博士, 教授, 主要从事作物栽培与生理生态研究。E-mail: yongtaiwen@sicau.edu.cn。

农作物间套作是指在同一块土地上同时种植两种或两种以上的作物,在有效的生育期内尽量缩短作物的共生期,充分利用资源,增加复种指数和提高作物产量的一种集约化栽培方式^[1-3]。研究发现,豆科作物与禾本科作物间作时具有明显的间作优势,豆科作物能有效固定大气中的氮,这些被固定的氮素将通过各种转移途径被同茬的禾本科作物利用,从而提高氮素利用率,增加产量^[4-5],如小麦与大豆间作增加了小麦吸氮量与籽粒干重^[6-7],水稻与花生间作使其氮素吸收量增加 32.81%,水稻生物量增加 18%~30%^[8]。大豆植株的主要氮素来源是根瘤固氮,可以占总氮吸收量的 50%~60%^[9]。根瘤菌是豆科作物共生固氮细菌的总称,它在为豆科作物提供氮素营养的同时,还可以改善地力状况,提高作物品质和增加作物产量^[10-12]。

作物的间作优势很大程度上体现在其地下部分的根系互作^[13]。植物的根系是从土壤中吸收养分的重要器官。为适应生长环境,植物根系表现出明显的可塑性,在间作条件下作物会调整根系的构造以寻求更大的生长空间^[14]。在田间试验下,已有学者对作物根系空间分布进行了大量研究,如小麦/大豆、小麦/蚕豆、蚕豆/玉米、玉米/大豆、小麦/豌豆等,发现间作条件下的种间互作会使作物的根系形态与空间分布发生改变。如宋日等^[15]研究表明,玉米与大豆间作有利于两种作物的根系生长发育,提高空间有效性,在 0~80 cm 的土层中玉米、大豆的比根长增加,有利于吸收更多的养分与水分。李玉英等^[13]研究发现,蚕豆与玉米间作可以扩展这两种作物根系纵向和横向的空间生态位。前人对豆科与禾本科的种间相互关系研究多集中于间作的条件下,而对于在套作系统下大豆的根瘤固氮能力及根系的生长空间对作物产量与农艺性状的影响还涉及较少。玉米-大豆套作是中国西南地区近几年发展的一种旱地新型高效多熟套种模式,该模式集抗旱减灾、用养地结合、保护性耕作、轻型栽培于一体,是旱地增产增收的重要技术措施^[16-18]。雍太文等^[9]研究表明在套作模式下可以提高大豆的固氮能力。那么在玉米-大豆带状套作模式下不同的结瘤品种除了结瘤与固氮发生差异以外,结合该模式下作物的种间根系互作,二者是否会对作物的光合特性、农艺性状及产量发生影响尚不清楚。因此,本试验采用根系分隔盆栽的方法,在玉米-大豆套作体系下采用 3 种不同的根系分隔方式(即不分隔、尼龙网分隔和完全分隔),建立 2 种作

物的种间互作关系,进而研究不同大豆结瘤品种对玉米、大豆产量与农艺性状的影响差异,达到群体协调效果,实现增产增收。

1 材料与方法

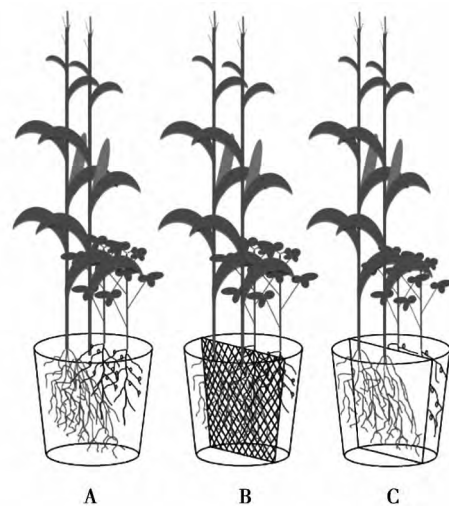
1.1 材料

试验使用的玉米品种为四川省主推的套作品种:川单 418(株型半紧凑,株高 2.69 m),由四川农业大学玉米研究所提供;大豆品种分别为强结瘤大豆(NTS1007)和弱结瘤大豆(南豆 12),其中 NTS1007 由 Queensland 大学 Peter M·Gresshoff 教授提供,南豆 12 由四川省南充市农业科学研究所提供。

试验采用的分隔材料分别为:高压聚乙烯材质、孔径为 30 μm 的尼龙网和 0.12 mm 厚度的优质农用棚膜。

1.2 试验设计

盆栽试验于 2013 年 3~10 月在四川农业大学雅安科研教学农场进行。采用二因素完全随机设计,A 因素为大豆品种,A1:强结瘤品种 NTS1007,A2:弱结瘤品种南豆 12;B 因素为根系分隔方式,B1:玉米/大豆套作不分隔(根、肥、水均可通过),B2:玉米/大豆套作尼龙网分隔(肥和水可通过),B3:玉米/大豆套作塑料膜分隔(根、肥、水均不可通过);用聚氯乙烯粘合剂将 30 μm 尼龙网或塑料膜固定于盆的中间位置(即直径最大处),分隔为两室,并在固定位置涂抹防水胶使其不漏水;3 次重复。



A: 根系不分隔; B: 尼龙网分隔; C: 塑料膜分隔。

A: No barrier; B: Nylon barrier; C: Plastic barrier.

图 1 根系分隔模式示意图

Fig. 1 Diagram of different root barrier patterns

试验用盆钵直径 34 cm,高 55 cm,共 72 盆。土壤风干过 2 mm 筛后每盆装土 25 kg。每盆玉米、大豆套作时,两种作物种植面积各占盆钵的 50%,大豆每盆播 2 穴,穴距 20 cm,穴留 2 株;玉米每盆播 2 穴,穴距 20 cm,穴留 1 株,与大豆行间距 24 cm。玉米于 4 月 10 日播种,7 月 28 日收获,大豆 6 月 8 日播种,10 月 25 日收获。施肥量为 N 100 mg·kg⁻¹、P₂O₅ 100 mg·kg⁻¹、K₂O 50 mg·kg⁻¹。并不定期向各处理浇灌自来水,以确保两个作物区的土壤湿度相同且在作物适宜范围内。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 光合特性 于大豆 V3、R1、R4 期,采用便携式光合系统测定仪 LI-6400(LI-COR Lincoln,USA),在晴天上午 9:00~11:00,测定每株大豆倒三叶的中间叶片的净光合速率(*P_n*)、气孔导度(*G_s*)、蒸腾速率(*T_r*)、胞间二氧化碳浓度(*C_i*)等光合参数。

1.3.2 生物量及农艺性状调查 在大豆 V3、R1、R4 期,每次选取 3 个重复共 18 盆进行大豆株高、茎粗与第一节间长等农艺性状的测定。同时采集大豆的植株样进行生物量的测定,大豆植株样采集时按根、茎、叶分开,最后在 105℃下杀青 30 min 后继续在 75℃烘干至恒重,测定干物质重。

1.3.3 测产及产量构成调查 于玉米成熟期和大豆成熟期,分别选取 3 个重复共 18 盆对玉米和大豆

进行考种。调查玉米产量构成指标穗粒数与千粒重,调查大豆产量构成指标单株粒数和百粒重。

1.4 数据分析

采用 Excel 2007 进行试验数据汇总,采用 DPS7.05 软件对试验数据进行方差分析和 LSD 显著性测验,显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 品种与根系分隔对大豆农艺性状的影响

不同结瘤品种与根系分隔对不同生育时期下大豆的农艺性状均有显著影响(表 1)。大豆株高在不同结瘤品种影响下,V3、R1、R4 期均表现为 A2 低于 A1,分别降低 18.68%、40.90%、21.65%;同一结瘤品种下,不同根系分隔间都以 B1 最低,在 V3、R1、R4 期较 B3 分别降低 21.12%、6.77%、19.20%。大豆茎粗在不同结瘤品种的影响下差异大,在 R4 期 A2 表现出明显的优势,比 A1 高 4.41%;在不同根系分隔方式下,各生育时期的茎粗都以 B3 最高,V3、R1、R4 期下较 B1 相比分别高 3.20%、8.16%、14.67%。大豆第一节间长在不同结瘤品种影响下均为 A1 最高,在 V3、R1、R4 时期下分别比 A2 高 18.42%、4.43%、7.26%;在不同根系分隔下,在 R1、R4 时期下均以 B3 最大,与 B2 相比分别高 15.58%、3.48%。

表 1 不同品种与根系分隔方式对大豆农艺性状的影响

Table 1 Effects of different varieties and root barriers on soybean agronomic characters

生育时期 Growth stage	处理 Treatment	株高 Plant height/cm			茎粗 Stem diameter/cm			第一节间长度 The length of first internode/cm		
		A1	A2	平均 Mean	A1	A2	平均 Mean	A1	A2	平均 Mean
		V3	B1	25.94 b	22.90 a	24.42 b	1.99 a	2.39 a	2.19 a	7.22 a
	B2	27.06 b	25.83 a	26.45 b	2.11 a	2.16 a	2.14 a	6.57 ab	5.21 c	5.89 a
	B3	35.81 a	26.11 a	30.96 a	2.37 a	2.15 a	2.26 a	6.47 abc	6.20 abc	6.34 a
	平均 Mean	29.61 a	24.95 b		2.15 a	2.23 a		6.75 a	5.70 b	
R1	B1	42.69 b	34.41 a	38.55 a	4.05 a	3.70 a	3.92 a	6.43 c	7.13 ab	6.78 b
	B2	43.99 b	31.37 a	37.68 a	4.06 a	4.17 a	4.11 a	6.64 c	5.67 d	6.16 c
	B3	50.68 a	31.83 a	41.35 a	4.18 a	4.30 a	4.24 a	7.43 a	6.81 bc	7.12 a
	平均 Mean	45.85 a	32.54 b		4.09 a	4.09 a		6.83 a	6.54 b	
R4	B1	36.36 c	35.70 a	36.03 b	4.22 a	4.77 a	4.50 a	6.71 bc	7.23 ab	6.97 a
	B2	45.34 b	39.19 a	42.26 a	4.71 a	5.16 a	4.94 a	7.28 a	6.49 c	6.89 a
	B3	53.18 a	36.00 a	44.59 a	5.35 a	5.97 c	5.16 b	7.73 a	6.52 c	7.13 a
	平均 Mean	44.96 a	36.96 b		4.76 a	4.97 ab		7.24 a	6.75 b	

表中数据为 3 次重复的平均值,同一列中标以不同字母的值差异达 0.05 显著水平,平均值行单独比较。下同。

Data in the table mean repeated three times, values in the same column with different letters were significantly different at 0.05 level, the average was single-line compared. The same below.

2.2 品种与根系分隔对大豆光合特性的影响

不同结瘤品种与根系分隔在不同时期下对大豆叶片的光合特性有显著影响(表2)。大豆 P_n 、 G_s 、 C_i 、 Tr 随着生育时期的推移呈先增加后降低的趋势,不同结瘤品种均在 R1 时期达到最大值,且 A1 较 A2 分别高 13.17%、12.28%、1.09%、6.12%。不同根系分隔方式下,大豆 P_n 、 G_s 、 C_i 、 Tr 在不同生育时期变化规律不一致。在 V3、R1、R4 期,大豆 P_n 在 A1 下均为 B1 最高,较 B3 分别高 36.62%、

2.92%、43.92%; A2 下为 B2 最高,较 B3 分别高 18.67%、3.61%、29.01%。大豆 G_s 在 V3、R4 期下为 B2 最高,较最低的 B3 高 20.00%、114.29%,在 R1 期为 B3 最高,较 B2 高 17.86%; 大豆 C_i 、 Tr 在 V3、R1 期均为 B1 最高,在 R4 期均为 B2 最高。B1 处理下, C_i 在 V3、R1 期较 B3 高 1.84%、2.60%, Tr 在 V3、R1 期较 B3 高 7.38%、5.64%; B2 下, C_i 在 R4 期较 B3 高 3.11%, Tr 在 R4 期较 B3 高 53.95%。

表2 不同品种与根系分隔方式对大豆叶片光合特性的影响

Table 2 Effects of different varieties and root barriers on soybean photosynthetic characters

生育时期 Growth stage	处理 Treatment	$P_n/\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$			$G_s/\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mol}^{-1}$			$C_i/\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$			$Tr/\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$		
		A1	A2	平均 Mean	A1	A2	平均 Mean	A1	A2	平均 Mean	A1	A2	平均 Mean
V3	B1	8.88 a	7.52 b	8.20 a	0.34 a	0.19 b	0.27 a	184.70 a	159.82 b	172.26 a	6.01 a	4.48 b	5.24 a
	B2	7.08 b	10.74 a	8.91 a	0.17 b	0.43 a	0.30 a	157.26 c	164.18 ab	160.72 b	3.84 b	6.46 a	5.15 a
	B3	6.50 b	9.05 ab	7.77 a	0.24 b	0.26 b	0.25 a	168.09 b	170.19 a	169.14 a	4.34 b	5.41 ab	4.88 a
	平均 Mean	7.49 b	9.10 a		0.25 a	0.30 a		170.02 a	164.73 b		4.73 a	5.45 a	
R1	B1	22.94 a	18.11 a	20.53 a	0.65 ab	0.56 a	0.61 ab	285.94 a	278.41 a	282.17 a	8.57 a	9.05 a	8.81 a
	B2	22.90 a	21.52 a	22.21 a	0.59 b	0.53 a	0.56 b	282.20 ab	280.76 a	281.48 a	8.83 a	8.24 a	8.53 a
	B3	22.47 a	20.72 b	21.60 a	0.70 a	0.63 a	0.66 a	275.07 b	274.96 a	275.01 a	9.04 a	7.63 a	8.34 a
	平均 Mean	22.77 a	20.12 b		0.64 a	0.57 b		281.07 a	278.04 a		8.81 a	8.31 a	
R4	B1	12.42 a	14.09 b	13.26 a	0.20 a	0.36 b	0.28 a	255.50 a	277.91 a	266.70 a	1.84 a	2.84 b	2.34 a
	B2	9.98 b	18.01 a	14.00 a	0.16 a	0.45 a	0.30 a	253.62 a	282.53 a	268.07 a	1.63 a	3.30 a	2.47 a
	B3	8.63 b	13.96 b	11.29 b	0.05 b	0.22 c	0.14 b	250.05 a	267.24 b	258.65 b	1.15 b	1.90 c	1.52 b
	平均 Mean	10.34 b	15.35 a		0.14 b	0.34 a		253.07 b	275.89 a		1.54 b	2.68 a	

2.3 品种与根系分隔对大豆生物量的影响

不同结瘤品种与根系分隔方式对不同时期下大豆生物量有显著影响(表3)。大豆根干重在不同结瘤强度下为 A1 大于 A2, V3、R1、R4 期下与 A2 相比, A1 增幅呈先减少后增加的趋势,从 V3 时期 30.95% 减小到 R1 期 1.27%, 到 R4 期增长到 23.36%; 不同的根系分隔下,大豆根干重的增幅随着生育时期的推进而逐渐减小, A1、A2 下均以 V3 期的 B2 最显著,与 B1 相比增加 31.94%、44.12%。大豆茎干重在不同结瘤品种下表现为 A1 大于 A2, 在 V3、R1、R4 期下分别高 8.82%、6.31%、8.28%; 不同根系分隔方式下,以 A1 下的 B2 在 V3 期最显著,较 B3 高 25.81%; A2 下均以 B1 最显著,较 B3 分别高 25.93%、6.99%、24.33%。叶与荚的干重在不同结瘤品种下均为 A1 最大,在 R1 期最为明显,较 A2 高 27.14%; 在不同的根系分隔下,随着生

育时期的推移, A1 下 B1 在 V3 期最显著,较 B3 高 21.21%; A2 下 B1 在 R1、R4 期最显著,较 B3 分别高 12.80%、51.97%。

2.4 品种与根系分隔对玉米、大豆产量及其构成的影响

2.4.1 对大豆产量及其构成的影响 由表4可知,大豆单株粒数、百粒重和产量在不同的品种结瘤能力下差异显著,均为 A2 高于 A1,分别高 87.03%、14.88%、55.94%。同一结瘤品种下,大豆单株粒数均以 B1 最高, A1 下较最低的 B3 高 55.13%, A2 下较 B3 高 36.38%。不同的根系分隔下,大豆百粒重在 A1、A2 下均为 B1 最高, A1 下较 B3 高 16.40%, A2 下较 B3 高 12.47%。不同的根系分隔方式对大豆产量有着显著的影响,其变化趋势为 B1 > B2 > B3, A1 下 B1 较最低的 B2 高 59.92%, A2 下 B1 的大豆产量较最低的 B3 高 34.24%。

表3 不同品种与根系分隔方式对大豆生物量的影响

Table 3 Effects of different varieties and root barriers on soybean biomass

生育时期 Growth stage	处理 Treatment	根 Root			茎 Stem			叶 + 荚 Leaf + Pod		
		A1	A2	平均 Mean	A1	A2	平均 Mean	A1	A2	平均 Mean
V3	B1	0.47 b	0.34 b	0.40 b	0.33 ab	0.34 ab	0.33 ab	0.40 b	0.25 c	0.33 bc
	B2	0.62 a	0.49 a	0.56 a	0.39 a	0.31 b	0.35 a	0.36 b	0.34 b	0.35 ab
	B3	0.56 ab	0.43 ab	0.50 a	0.31 b	0.27 b	0.29 b	0.33 bc	0.49 a	0.41 a
	平均 Mean	0.55 a	0.42 b		0.34 ab	0.31 a		0.36 a	0.36 a	
R1	B1	1.42 b	1.47 ab	1.45 b	2.29 c	2.91 b	2.60 b	4.68 a	3.70 bc	4.19 a
	B2	1.47 ab	1.57 ab	1.52 ab	2.74 bc	2.82 b	2.78 b	4.07 ab	3.52 bc	3.79 a
	B3	1.88 a	1.66 ab	1.77 a	4.01 a	2.72 bc	3.37 a	4.6 a	3.28 c	3.94 a
	平均 Mean	1.59 a	1.57 ab		3.01 a	2.82 a		4.45 a	3.50 b	
R4	B1	4.70 b	3.97 c	4.34 b	6.32 c	7.46 ab	6.89 a	6.81 bc	7.72 b	7.26 a
	B2	4.81 b	3.80 c	4.30 b	6.83 bc	6.10 c	6.49 a	7.08 b	6.00 cd	6.54 b
	B3	5.70 a	4.57 b	5.14 a	8.20 a	6.00 c	7.10 a	8.85 a	5.08 d	6.96 ab
	平均 Mean	5.07 a	4.11 b		7.12 a	6.53 b		7.58 a	6.26 b	

表4 不同品种与根系分隔方式对大豆产量及其构成的影响

Table 4 Effects of different varieties and root barriers on yield and composition of soybean

处理 Treatment	单株粒数 Seeds per plant			百粒重 100-seed weight/g			产量 Yield per pot/g		
	A1	A2	平均 Mean	A1	A2	平均 Mean	A1	A2	平均 Mean
B1	30.08 a	49.33 a	39.71 a	12.35 b	14.16 a	13.25 a	19.19 a	28.03 a	23.61 a
B2	22.72 a	47.75 a	33.57 a	11.71 bc	13.10 ab	12.40 ab	12.00 b	25.86 ab	18.93 b
B3	19.39 a	36.17 a	29.44 a	10.61 c	12.59 b	11.60 b	16.76 b	20.88 a	18.82 b
平均 Mean	24.06 b	45.00 a		11.56 b	13.28 a		15.98 b	24.92 a	

2.4.2 对玉米产量及其构成的影响 由表5可知,在不同结瘤强度的影响下,玉米的穗粒数、千粒重和产量与大豆的产量变化趋势一样,均表现为A2高于A1,且分别高8.36%、8.09%、32.41%。在同一结瘤品种下,不同的根系分隔对玉米的产量构成有显著影响。A1下玉米穗粒数与产量在B2处最

高,与最低的B3相比高49.59%、65.33%;玉米千粒重在B3处理最高,比最低的B1高17.88%。A2下玉米穗粒数、千粒重与产量都以B2最大,较B1分别高3.52%、12.88%、9.80%,较B3分别高1.92%、9.29%、16.02%。

表5 不同品种与根系分隔方式对玉米产量及其构成的影响

Table 5 Effects of different varieties and root barriers on maize yield and its components

处理 Treatment	穗粒数 Kernels per ear			千粒重 1000-grain weight			产量 Yield/kg·hm ⁻²		
	A1	A2	平均 Mean	A1	A2	平均 Mean	A1	A2	平均 Mean
B1	2642 ab	2560 b	2601 b	166.43 a	186.31 a	176.37 a	400.00 b	491.33 ab	445.67 b
B2	2736 a	2650 ab	2693 a	182.35 a	210.31 a	196.33 a	454.67 a	539.50 a	497.08 a
B3	1829 c	2600 b	2214 c	196.19 a	192.43 a	194.31 a	275.00 c	465.00 b	370.00 c
平均 Mean	2402 b	2603 a		181.66 a	196.35 a		376.56 b	498.61 a	

2.5 不同品种与根系分隔下大豆农艺性状、净光合速率与生物量的相关性分析

不同结瘤品种与大豆茎粗、净光合速率呈正相关;与第一节间长、株高和根、茎、叶的生物量都呈负相关关系,其中株高(-0.505^*)与第一节间长(-0.485^*)均达到显著水平。不同的根系分隔与大豆株高、茎粗、第一节间长、根和茎的生物量呈正相关关系,与叶的生物量和净光合速率呈负相关。大豆的生物量与农艺性状之间均呈正相关,其中根、茎、叶的生物量与株高和茎粗极显著相关,与株

高的相关系数分别为 0.628^{**} 、 0.683^{**} 、 0.764^{**} ,与茎粗的相关系数分别为 0.828^{**} 、 0.900^{**} 、 0.932^{**} ;与第一节间长显著相关,其相关系数为 0.520^* 、 0.568^* 、 0.582^* 。大豆净光合速率与农艺性状、生物量都呈正相关,且与茎粗显著相关(0.537^*)。说明玉米-大豆带状套作模式下,强结瘤品种有利于增加大豆的干物质积累,大豆地下部与地上部干物质积累及农艺性状之间均呈正相关;根系不完全分隔可提高大豆地上部植株的净光合速率与干物质积累。

表6 相关性分析

Table 6 Correlation analysis

R	品种 Varieties	根系分隔 Root barriers	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	株高 Plant height	茎粗 Stem diameter	第一节间长 Length of first internode	净光合速率 <i>Pn</i>
品种 Varieties	1								
根系分隔 Root barriers	0	1							
根 Root	-0.104	0.093	1						
茎 Stem	-0.051	0.046	0.972 ^{**}	1					
叶 Leaf	-0.135	-0.023	0.920 ^{**}	0.971 ^{**}	1				
株高 Plant height	-0.505 [*]	0.284	0.628 ^{**}	0.683 ^{**}	0.764 ^{**}	1			
茎粗 Stem diameter	0.005	0.113	0.828 ^{**}	0.900 ^{**}	0.932 ^{**}	0.737 ^{**}	1		
第一节间长 Length of first internode	-0.485 [*]	0.086	0.520 [*]	0.568 [*]	0.582 [*]	0.639 ^{**}	0.508 [*]	1	
净光合速率 <i>Pn</i>	0.113	-0.030	0.022	0.176	0.316	0.391	0.537 [*]	0.035	1

* 在 0.05 水平(双侧) 上显著相关; ** 在 0.01 水平(双侧) 上显著相关。

* means the 0.05 level (bilateral) significant correlation, ** means the 0.01 level (bilateral) significant correlation.

3 讨论

间套作可以优化作物根系生长空间及提高氮素吸收利用率,进而提高作物产量。对小麦/大豆间作研究发现,产量的间作优势主要源于作物种间的地下部根系互作^[19]。水稻和花生间作后两种作物表现出明显的种间竞争促进作用,有效促进作物根系的生长改善根系分布,有利于土壤养分利用^[20]。同样蚕豆与玉米间作可改善作物的根系生长空间,改变作物的根系形态以吸取更多的养分与水分^[13]。在玉米/大豆间作下,与地下部根系分隔相比,不分隔可显著提高玉米抽雄期、灌浆期的净光合速率,降低大豆花期、结荚期的净光合速率^[21]。光合速率的大小决定了光合能力的强弱,作物的光合速率是其产量大小的关键^[22]。大豆光合特性与根瘤固氮的作用是相互的,大豆叶片的光合作用可

以提供能量、还原剂及碳架给根瘤固氮,同时根瘤固氮可以为地上部植株的生长提供含氮的有机物,提高作物的光合速率及增加光合产物^[23]。在本试验中,对大豆叶片光合特性的分析发现,相对于弱结瘤品种,强结瘤品种可以提高大豆的净光合速率 11.64%,增加地上部分生物量的积累,尤其器官叶的部分增加了 21.35%。在不同的根系分隔模式中,大豆的 *Pn* 在尼龙网分隔下表现最为显著,较完全分隔增加 19.36%,同时尼龙网下大豆生物量与不分隔相比增加了 28.57%,这与前人研究一致。从相关性分析可以看出,大豆农艺性状与不同固氮能力品种呈负相关关系,而与不同根系分隔模式呈正相关关系(表 6)。说明强结瘤大豆品种有利于降低株高,增加茎粗。随着根系生长空间与根系分泌物的变化,大豆根系受到玉米根系抑制,且越是靠近玉米抑制越是强烈。根系分隔可以降低大豆株

高、增加茎粗、降低第一节间长。

大豆产量构成因素单株粒数与百粒重均属于遗传性状,受环境因素影响相对较大。陈怀株等^[24]研究表明套作下单株荚数、粒数与百粒重的变化与荫蔽呈极显著正相关。张正翼等^[25]研究发现套作下单株荚数对大豆产量影响最大,其次为百粒重和单荚粒数。本研究结果表明,套作下大豆强结瘤品种在营养生长期出现旺长趋势以应对来自玉米的荫蔽作用,使得生殖生长期间的单株粒数与百粒重均较弱结瘤品种分别降低 87.03%、14.88%,导致最终两个品种间的产量差异显著,与前人研究一致。在玉米/大豆套作下,不分隔较地下部根系分隔相比,通过降低大豆产量的同时增加玉米产量,进而提高土地当量比及增加系统产量。玉米在麦/玉/豆中表现出套作优势且不完全分隔的籽粒产量高于完全分隔,大豆则表现出竞争劣势,但差异不显著^[26]。套作下大豆通过地下部互作影响玉米产量,地下部空间的扩展有效促进养分的吸收利用^[27],同时大豆根系分泌物能促进玉米增产^[28-29]。本研究结果表明玉米产量在尼龙网分隔处最高为 65.33%,而大豆产量在尼龙网分隔降低 19.82%。这与前人研究一致。

4 结 论

本研究表明在玉米-大豆套作模式下采用根系不完全分隔处理,大豆农艺性状表现较好,且有利于玉米和大豆根系的生长,充分利用地下部分的根系生长空间,使玉米产量增加而又不影响大豆植株的生长,同时通过大豆的生物固氮作用,能有效提高该套作模式中的氮素利用率,提高作物产量。

参考文献

[1] 索朝合,曲文祥,刘庆鹏. 向日葵、西瓜套种高产栽培模式[J]. 内蒙古农业科技 2008(2):88. (Suo C H, Qu W X, Liu Q P. Sunflowers, watermelon intercropping high yield cultivation model [J]. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 2008(2):88.)

[2] 苏本营,陈圣宾,李永康,等. 间套作种植提升农田生态系统服务功能[J]. 生态学报 2013,33(14):4505-4514. (Su B Y, Chen S B, Li Y K, et al. Intercropping enhance the farmland ecosystem services [J]. Acta Ecologica Sinica 2013,33(14):4505-4514.)

[3] 于晓波,张明荣,吴海英,等. 净套作下不同耐荫性大豆品种农艺性状及产量分布的研究[J]. 大豆科学 2012,31(5):757-761. (Yu X B, Zhang M R, Wu H Y, et al. Agronomic character and yield distribution of different shade tolerance soybean under

monoculture and relay strip intercropping systems [J]. Soybean Science 2012,31(5):757-761.)

[4] 苗锐,李玉英,张福锁,等. 施氮与种间根系分隔方式对蚕豆/玉米间作体系作物根系形态的影响[J]. 农业科学与技术, 2008,2(12):17-24. (Miao R, Li Y Y, Zhang F S, et al. Effects of nitrogen fertilizer and interspecific root separation on effect of crop root morphology of maize/faba bean intercropping system [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2008,2(12):17-24.)

[5] 陈远学,刘静,陈新平,等. 四川轮作体系的干物质积累、产量及氮素利用效率研究[J]. 中国农业大学学报,2013,18(6):68-79. (Chen X Y, Liu J, Chen X P, et al. Dry matter accumulation, yield and nitrogen use efficiency of crops rotation and intercropping systems in Sichuan [J]. Journal of China Agriculture University 2013,18(6):68-79.)

[6] Li L, Sun J H, Zhang F S, et al. Wheat / maize or wheat / soybean strip intercropping I: Yield advantage and interspecific interactions on nutrients [J]. Field Crops Research, 2001,71:123-137.

[7] 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 faba bean [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005,38(5):965-973.)

[8] 褚贵新,沈其荣,李奕林,等. 用¹⁵N叶片标记法研究旱作水稻/花生间作系统中氮素的双向转移[J]. 生态学报,2004,24(2):278-284. (Cu G X, Sheng Q R, Li Y L et al. Researches on Bi-directional N transfer between the intercropping system of groundnut with rice cultivated in aerobic soil using ¹⁵N foliar labelling method [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004,24(2):278-284.)

[9] 雍太文,董茜,刘文钰,等. 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[J]. 大豆科学,2013,32(6):791-796. (Yong T W, Dong Q, Liu W Y, et al. Effect of N application methods on nitrogenase, photosynthesis and yield of soybean under maize-soybean relay strip intercropping system [J]. Soybean Science 2013,32(6):791-796.)

[10] 赵宇枢,段玉玺,王媛媛,等. 辽宁省大豆根瘤菌资源抗逆性及生防潜力研究[J]. 大豆科学,2009,28(1):113-117. (Zhao Y Y, Duan Y X, Wang Y Y, et al. Stress resistance and biocontrol potential of soybean rhizobia resources isolated from Liaoning province [J]. Soybean Science 2009,28(1):113-117.)

[11] 江木兰,张学江,徐巧珍,等. 大豆根瘤菌的固氮作用[J]. 中国油料作物学报,2003,25(1):50-54. (Jiang M L, Zhang X J, Xu Q Z, et al. Nodulation and nitrogen-fixation in soybean-rhizobium [J]. Chinese journal of oil crop sciences, 2003,25(1):50-54.)

[12] 马中雨,李俊,张永芳,等. 大豆根瘤菌与大豆品种共生匹配性研究[J]. 大豆科学,2008,27(2):221-227. (Ma Z Y, Li J, Zhang Y F, et al. Symbiotic matching between soybean rhizobium and soybean cultivars [J]. Soybean Science, 2008,27(2):

- 221-227.)
- [13] 李玉英, 庞发虎, 孙建好, 等. 根系分隔与施氮对蚕豆/玉米间作体系根系分布与形态的影响[J]. 中国农业大学学报, 2010, 15(4): 13-19. (Li Y Y, Pang F H, Sun J H, et al. Effects of root barrier between intercropped maize and faba bean and nitrogen (N) application on the spatial distributions and morphology of crops' roots[J]. Journal of China Agricultural University 2010, 15(4): 13-19.)
- [14] 韦柳佳, 黄莉, 张雅琼, 等. 玉米/大豆间作模式及效应分析[J]. 西南农业学报, 2013, 26(1): 67-72. (Wei L J, Huang L, Zhang Y Q, et al. Analysis on intercropped patterns and effect in maize /soybean intercropping system[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences 2013, 26(1): 67-72.)
- [15] 宋日, 牟瑛, 王玉兰, 等. 玉米、大豆间作对两种作物根系形态特征的影响[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2002, 34(3): 83-86. (Song R, Mou Y, Wang Y L, et al. Corn and soybean intercropping on effect of two kinds of crop root system morphology [J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition) 2002, 34(3): 83-86.)
- [16] Umezaki T, Yoshida T. Effect of shading on the internode elongation of late maturing soybean[J]. Journal of the Faculty of Agriculture Kyushu University, 1992, 36: 262-272.
- [17] Sharma K, Walia N. Growth and yield of soybean *Glycine max* (L) Merrill as influenced by light intensity and cytokinin [J]. Environment and Ecology, 1996, 14(2): 307-310.
- [18] 雍太文, 任万军, 杨文钰, 等. 旱地新三熟“麦/玉/豆”模式内涵、特点及栽培技术[J]. 耕作与栽培, 2006(6): 48-50. (Yong T W, Ren W J, Yang W Y, et al. Dryland new three ripe "wheat / maize / bean" mode connotation, characteristics and cultivation techniques[J]. Tillage and Cultivation 2006(6): 48-50.)
- [19] 孟凡凡, 王博, 刘宝泉, 等. 玉米-大豆带状间作下玉米品种产量和主要农艺性状比较[J]. 作物杂志, 2014(3): 101-104. (Meng F F, Wang B, Liu B Q, et al. Strip intercropping maize-soybean yield and main agronomic characters of maize varieties in comparison [J]. Crops 2014(3): 101-104.)
- [20] 王树起, 沈其荣, 褚贵新, 等. 种间竞争对旱作水稻于花生间作系统根系分布与氮素吸收积累的影响[J]. 土壤学报, 2006, 45(3): 860-863. (Wang S Q, Shen Q R, Chu G X, et al. Effect of interspecies competition on root distribution and nitrogen uptake of peanut and rice intercropping in aerobic soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 45(3): 860-863.)
- [21] Lyu Y, Francis C, Wu P, et al. Maize-soybean intercropping interactions above and below ground [J]. Crop Science, 2014, 54(3): 914-922.
- [22] 徐克章, 武志海, 王珍. 玉米群体冠层光合 CO₂ 分布特性的初研究[J]. 吉林农业大学学报, 2011, 23(3): 9-12. (Xu K Z, Wu H Z, Wang Z. The primary study on the distribution character of irradiance and CO₂ of maize canopies [J]. Journal of Jilin Agricultural University 2011, 23(3): 9-12.)
- [23] 于晓波. 净套作下不同基因型大豆光合、固氮特性及产量品质的比较研究 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2009: 14-15. (Yu X B. The study on character of photosynthetic add fixing nitrogen, yield and quality of different genotype in sole-cropping and relay-cropping system [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2009: 14-15.)
- [24] 陈怀珠, 孙祖东, 杨守臻, 等. 荫蔽对大豆主要形状的影响及大豆耐荫性鉴定方法研究初报[J]. 中国油料作物学报, 2003, 25(4): 78-82. (Chen H Z, Su Z D, Yang S Z, et al. Effect of shading on characters of soybean and preliminary study on the identification method of soybean shade endurance [J]. Chinese Journal of Oil Crop Science, 2003, 25(4): 78-82.)
- [25] 张正翼. 不同密度与田间配置对套作大豆产量和品质的影响 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2008: 31-35. (Zhang Z Y. Effects of different density and field distribution on yield and quality of relay-cropping soybean [D]. Ya'an: Sichuan Agriculture University, 2008: 31-35.)
- [26] 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 tilization in the two relay-planting systems [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(9): 3170-3178.)
- [27] 苗锐, 张福锁, 李隆. 玉米/蚕豆、小麦/蚕豆和大麦/蚕豆地上部、地下部生物量及作物含氮量分析[J]. 中国农学通报, 2008, 24(7): 148-152. (Miao R, Zhang F S, Li L. Shoot/root biomass and crops N-content analysis of maize/faba bean, wheat/faba bean and barley/faba bean intercropping systems [J]. Chinese Agriculture Science Bulletin 2008, 24(7): 148-152.)
- [28] 刘小明, 雍太文, 廖敦平, 等. 不同种植模式下根系分泌物对玉米生物量及氮素吸收的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(33): 151-155. (Liu X M, Yong T W, Liao D P, et al. Effect of root exudates on biomass and nitrogen uptake of maize under different cropping patterns [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(33): 151-155.)
- [29] 刘小明, 雍太文, 廖敦平, 等. 不同种植模式下根系分泌物对玉米生长及产量的影响[J]. 作物杂志, 2012(2): 84-88. (Liu X M, Yong T W, Liao D P, et al. The effect of root exudates under different planting patterns on growth and yield of maize [J]. Crops, 2012(2): 84-88.)