大豆科学 Soybean Science
http://ddkx.haasep.cn
2023,42(1):048-054
DOI:10.11861/j.issn.1000-9841.2023.01.0048

# 不同玉米大豆间作行比对大豆光合特性及产量的影响

曹曼君[1],王婧瑜[2],崔　悦[1],Deborah Joy Blessing[1],李　双[1],陈喜凤[1],谷　岩[1]

(1.吉林农业大学 农学院,吉林 长春 130118;2.吉林省农业科学院,吉林 长春 130033)

**摘　要**:为研究适合东北黑土区玉米大豆间作行比,促进玉米大豆间作模式推广应用,本研究以玉米大豆间作系统为主要研究对象,设置玉米单作(M)、大豆单作(S)、玉米大豆行比2:4间作(M2S4)、玉米大豆行比4:4间作(M4S4)和玉米大豆行比4:6间作($M^4S^6$)处理,分析不同间作行比对大豆株高及干物质积累、光合特性相关指标、产量及经济产值分析的影响。结果表明:间作显著增加了大豆株高,降低了干物质量,同时,随着玉米条带数的降低及大豆条带数的增加,光合参数 *Gs* 和 *Tr* 与单作处理之间呈显著性差异,而 *Ci* 则呈现相反的变化趋势。4:4间作行比(M4S4)处理具有较好的间作优势,土地当量比为1.26,在考虑了政府补贴后,间作复合经济产值显著高于各单作处理,其中,M4S4处理最具有增收潜力。综上,M4S4模式为东北黑土区最佳玉米大豆间作配置方式。

**关键词**:间作行比;玉米;大豆;光合特性;产量

# Effects of Different Maize and Soybean Intercropping Ratios on Photosynthetic Characteristics and Yield of Soybean

CAO Man-jun[1], WANG Jing-yu[2], CUI Yue[1], Deborah Joy Blessing[1], LI Shuang[1], CHEN Xi-feng[1], GU Yan[1]

(1. Institute of Agricultural Science, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130118, China; 2. Jilin Academy of Agricultural Science, Changchun 130033, China)

**Abstract**: In order to study the suitable row ratio of maize-soybean intercropping in the black soil region of northeast China and promote the extension of maize-soybean intercropping pattern, this study took the maize and soybean intercropping system as the main research object, and set the planting modes of maize monocropping (M), soybean monocropping (S), maize-soybean row ratio 2:4 intercropping (M2S4), maize-soybean row ratio 4:4 intercropping (M4S4) and maize-soybean row ratio 4:6 intercropping (M4S6). The effects of photosynthetic characteristics, dry matter accumulation, yield and economic value of soybean under different intercropping ratios were analyzed. The results showed that with the decrease of maize band number and the increase of soybean band number in intercropping, the *Gs* and *Tr* were significantly different from those in monoculture, while the *Ci* showed an opposite trend. The treatment with 4:4 intercropping ratio (M4S4) had better intercropping advantages, and the land equivalent ratio was 1.26. After considering the local government subsidies, the compound economic output value of intercropping was significantly higher than that of the single cropping treatments, among which M4S4 treatment had the most potential of increasing income. To sum up, M4S4 is the best corn-soybean intercropping pattern in the black soil region of northeast China.

**Keywords**: intercropping rotation; maize; soybean; the photosynthetic characteristics; yield

间作作为一种传统的种植模式,在农业系统中发挥着重要作用[1]。玉米大豆间作作为典型的间作模式,具有共生固氮[2]、防治杂草[3]和降低 $CO_2$ 当量排放量[4]等优势,但在大豆生长的中后期,也会出现光能分布不均匀,高位作物玉米对低位作物大豆产生荫蔽胁迫等问题[5],玉米的遮荫会造成大豆茎秆的伸长和茎中木质素含量降低[6-7],从而导致大豆倒伏进而影响产量的形成。光合作用是作物生长发育及产量形成的基础,作物通过光合作用转化的生物学产量能够达到90% ~95%。有研究表明,间作中玉米对于大豆的生长、光合特性的影响直接导致大豆产量及构成因素的下降[8];Chen 等[9]提出,随着条带宽度的增加,条带中玉米的光合能力逐渐降低,而大豆的光合能力逐渐恢复。目前已有一些针对不同玉米大豆间作行比的研究,由于气候、土壤特点等条件不同无法得到一致性结果。王俊等[10]认为玉米大豆4:2间作条件下,具有明显的土地优势和产量优势;Zhang 等[11]认为,在玉米大豆4:6间作条件下,玉米和大豆间作的生物量提高,进而提高了作物的全氮积累量和经济效益。

随着现代农业机械化程度的不断提高,对玉米大豆间作种植模式有了新的要求。潘利文等[12]通过增加玉米大豆间作带宽来适应现有农机生产的要求;屈哲[13]通过改进现有玉米收割机使其能够在行距30 ~60 cm,幅宽150 cm以内的间套种模式下进行玉米的机械化收获,从而实现了农机与农艺的

**收稿日期**:2022-09-08
**基金项目**:国家重点研发计划(2017YFD0300607)。
**第一作者**:曹曼君(1997—),女,硕士,主要从事作物高产理论研究与实践研究。E-mail:ylcmj1997@163.com。
**通讯作者**:谷岩(1981—),女,博士,研究员,主要从事作物高产理论研究与实践研究。E-mail:283413608@qq.com。

结合。本研究在玉米-大豆间作系统中设置不同间作行比,对作物光合特性、产量、经济产值和土地当量比等进行系统分析,旨在为优化玉米大豆间作系统中栽培技术体系提供理论依据和实践经验。

## 1　材料与方法

### 1.1　材料

玉米品种为泽玉 501,为吉林省龙翔种业有限公司提供;大豆品种为九农 26,为吉林兴农大豆科技开发有限公司提供。

### 1.2　试验地概况

试验在吉林省长春市吉林农业大学试验田(43°79′N,125°40′E)进行,供试土壤为黑钙土,土壤层有机质 24.5 $g\cdot kg^{-1}$,全氮 1.548 $g\cdot kg^{-1}$,全磷 0.87 $g\cdot kg^{-1}$,碱解氮 114 $mg\cdot kg^{-1}$,速效磷 15.8 $mg\cdot kg^{-1}$,速效钾 116.0 $mg\cdot kg^{-1}$,pH6.5。

### 1.3　试验设计

本研究采用单因素小区试验,共设置 5 个处理:(1)M2S4 处理,行比为 2∶4(行长 50 m,带宽 3.9 m);(2)M4S4 处理,行比为 4∶4(行长 50 m,带宽 5.2 m);(3)M4S6 处理,行比为 4∶6(行长 50 m,带宽 6.5 m);(4)M 处理,玉米单作(行长 50 m,带宽 6.5 m);(5)S 处理,大豆单作(行长 50 m,带宽 6.5 m)(图 1)。共设置 3 次重复。

2021 年 5 月 6 日同期机械化播种玉米和大豆,玉米种植密度为 6 万株·$hm^{-2}$,大豆种植密度为 20.0 万株·$hm^{-2}$。玉米全生育期施肥量为:N,240 $kg\cdot hm^{-2}$;$P_2O_5$,130 $kg\cdot hm^{-2}$;$K_2O$,140 $kg\cdot hm^{-2}$。大豆全生育期施用大豆专用复合肥,播种时作为底肥一次施入。施肥量为:N,27 $kg\cdot hm^{-2}$;$P_2O_5$,60 $kg\cdot hm^{-2}$;$K_2O$,25 $kg\cdot hm^{-2}$。生育期内按常规进行田间管理。10 月 7 日同时机械化收获。

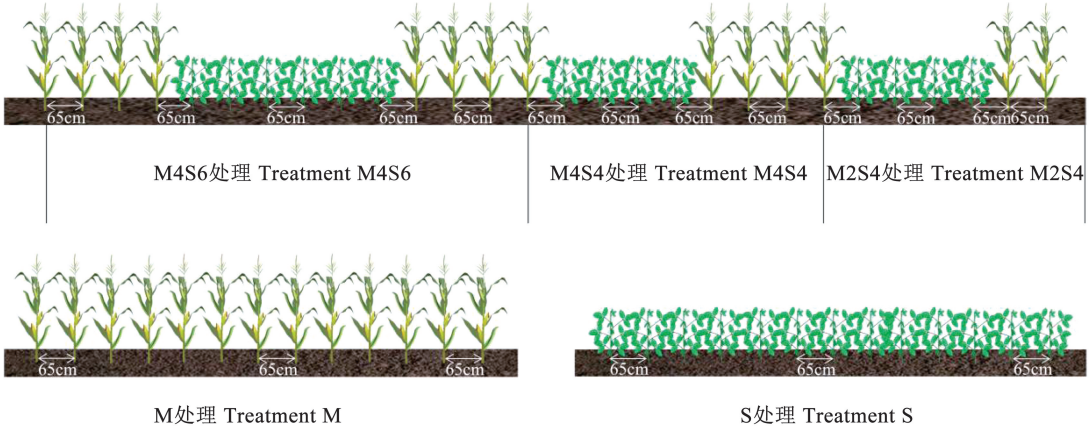



**图 1　各玉米-大豆间作行比田间配置示意图**

**Fig. 1　Schematic diagram of field allocation of different corn-soybean intercropping ratios**

### 1.4　测定项目与方法

1.4.1　*光合参数*　于大豆开花结荚期(R2)和鼓粒盛期(R6),各处理每行选取有代表性的植株 3 株,选择晴朗无风的天气,于上午 9:00—11:00 选取大豆倒数第 3 片复叶中间小叶进行测定,使用美国 Li-COR 公司生产的 Li-6400 光合仪,选择红蓝光源叶室,设定固定光照强度为 1 200 $\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$,设置开放式气路 $CO_2$ 浓度为 400 $\mu mol\cdot L^{-1}$,测定光合速率($Pn$)、气孔导度($Gs$)、胞间 $CO_2$ 浓度($Ci$)与蒸腾速率($Tr$)。

1.4.2　*各器官及单株干物质量与根冠比*　将以上用于测定光合参数的植株分为地上和地下两个部分,于 105 ℃烘箱中杀青 30 min,80 ℃烘干至恒重,称重得到各部分干重。同时计算根冠比,即地下部根系总干重与地上部各器官总干重的比值。

1.4.3　*产量及产量构成因素*　于玉米和大豆成熟期,在各处理区域内随机选取 4 m 行长植株,全部收获并进行测产,每个处理 3 次重复并计算平均值。每行选取 5 株具有代表性的大豆植株进行考种,测定相关形态指标,包括单株节数、单株荚数、单株粒数、单株粒重及百粒重。根据不同处理间玉米大豆所占比例和各自小区测产产量计算各间作处理的作物复合产量。

1.4.4　*土地当量比与经济产值*　土地当量比(LER)是评价间作优势的重要指标,计算间作系统的 LER 公式为,$LER = Y_{mi}/Y_m + Y_{si}/Y_s$,式中,$Y_m$、$Y_s$ 分别表示玉米和大豆在单作中的产量,$Y_{mi}$、$Y_{si}$ 分别表示玉米和大豆在间作中的产量。

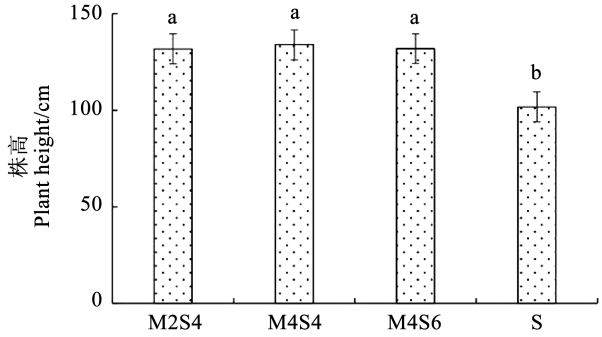
### 1.5　数据分析

使用 Excel 2019 统计数据和图表制作,使用 SPSS 26.0 分析数据,各指标进行单因素(ANOVA)检验,采用 Duncan 法进行各处理间数据差异显著分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同间作行比对大豆株高的影响

由图 2 可知,不同间作处理大豆株高有所不同,但均显著高于单作大豆处理。各处理下的株高由高到低排列顺序为:M4S4 > M4S6 > M2S4 > S。其中,各间作处理较单作大豆株高分别高 31.77%、29.69% 和 29.60%,可见,间作对于大豆株高增加具有显著促进作用。




注:不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different letter mean significant difference between treatments($P<0.05$). The same below.

图 2 间作和单作大豆株高分析

**Fig. 2 Analysis on plant height of soybean in intercropping and monocropping**

### 2.2 不同间作行比对大豆干物质量的影响

如图 3 和图 4 所示,间作使大豆地上部和地下部干物重降低,具体表现为 S > M2S4 > M4S4 > M4S6。如图 5 所示,间作使大豆根冠比不同程度降低,各间作处理较单作处理 R2 期根冠比分别降低 0.02,0.04 和 0.04,R6 期根冠比分别降低 0.01,0.02 和 0.02。

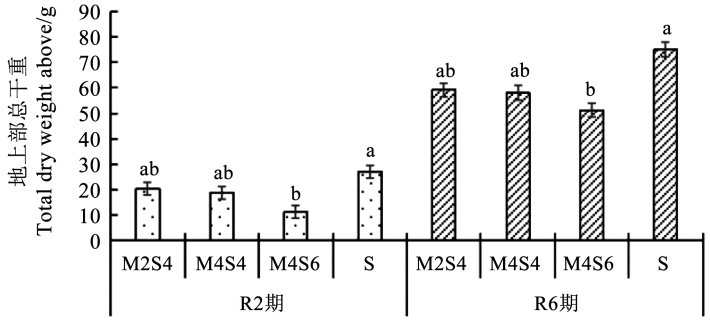



图 3 间作和单作大豆地上部干重分析

**Fig. 3 Analysis on aboveground dry weight of soybean in intercropping and monocropping**

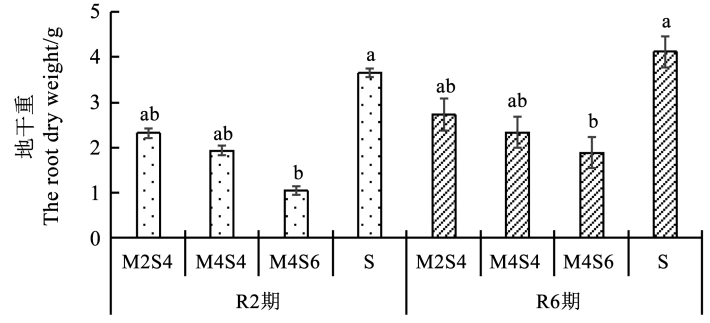



图 4 间作和单作大豆地下部干重分析

**Fig. 4 Analysis on underground dry weight of soybean in intercropping and monocropping**

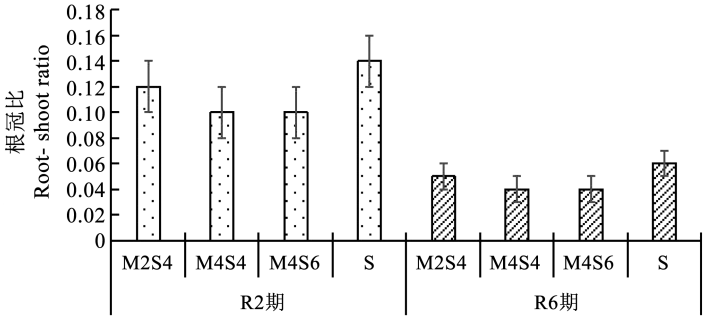



图 5 间作和单作大豆根冠比分析

**Fig. 5 Analysis on root shoot ratio of soybean in intercropping and monocropping**

### 2.3　不同间作行比对大豆光合特性的影响

随着大豆生育时期的推进,M4S4 和 M4S6 处理大豆叶片的 *Pn*、*Gs* 和 *Tr* 均显著低于单作大豆处理 S,且呈现出相同的变化趋势,由高到低排列顺序为:S > M2S4 > M4S4 > M4S6。*Ci* 则表现出相反的变化趋势,具体表现为:M4S4 > M4S6 > M2S4 > S。间作处理在 R2 期较单作大豆处理(S)分别增加 62.62%、29.58% 和 1.91%;间作处理在 R6 时期相较 S 处理分别增加了 7.04%、5.52% 和 5.31%。R2 期 M4S4 处理与 M2S4 和 S 处理均达到差异显著水平(图 6)。

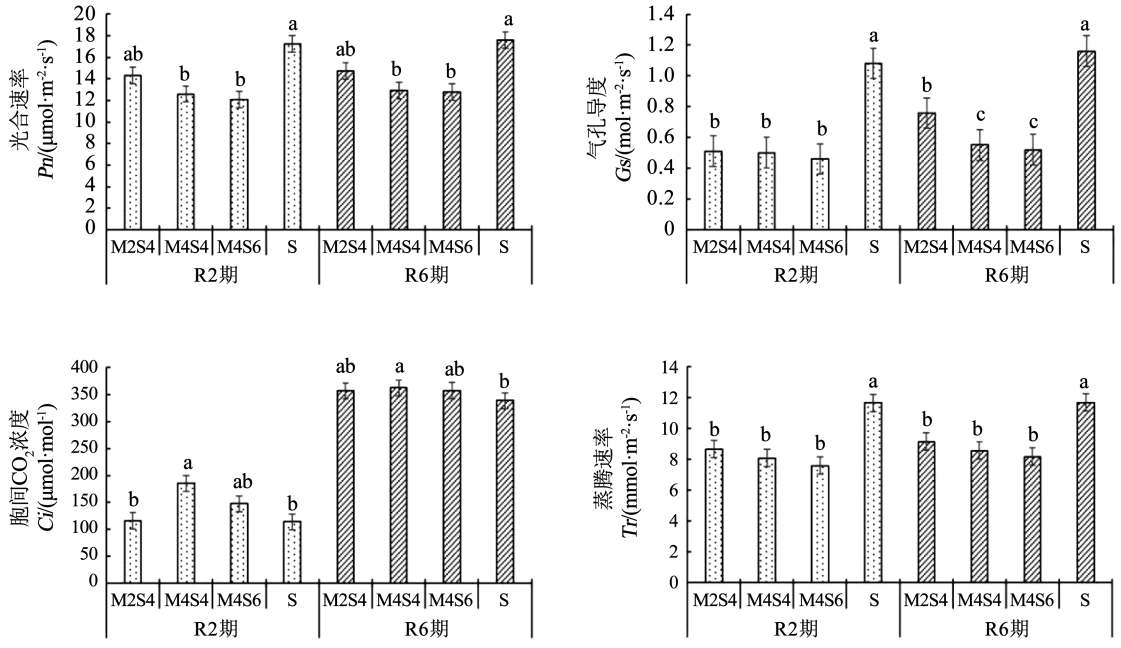



图 6　间作和单作大豆光合参数分析

**Fig. 6　Analysis on photosynthetic parameters of soybean in intercropping and monocropping**

### 2.4　不同间作行比对产量构成因素的影响

如表 1 所示,间作条件下主茎节数增加,各处理由高到低表现为 M4S4 > M4S6 > M2S4 > S。其中,M4S4 和 M4S6 大豆主茎节数与单作大豆处理(S)差异显著,分别较单作增加 12.13% 和 11.53%。间作处理的单株荚数、单株粒数较 S 处理不同程度增加,但间作使大豆单株粒重和百粒重降低,其中,单株粒重差异并不显著。

表 1　间作与单作大豆产量构成因素分析

**Table 1　Analysis on plant yield components of soybean in intercropping and monocropping**

| 处理 Treatment | 主茎节数 Nodes number of main stem | 单株荚数 Pods number per plant | 单株粒数 Seeds number per plant | 单株粒重 Seeds weight per plant/g | 百粒重 100-seed weight/g |
|---|---|---|---|---|---|
| M2S4 | 19.25 ab | 49.44 a | 111.53 a | 23.13 a | 21.23 b |
| M4S4 | 20.33 a | 47.48 a | 108.83 a | 21.26 a | 19.61 bc |
| M4S6 | 20.22 a | 47.31 a | 105.74 a | 19.59 a | 18.77 b |
| S | 18.13 b | 46.87 a | 103.47 a | 24.52 a | 23.49 a |

### 2.5　不同间作行比对产量和 LER 值的影响

由表 2 可知,间作玉米带内玉米产量显著高于单作玉米 S,从高到低排列顺序为 M2S4 > M4S4 > M4S6 > S,间作处理较单作玉米(M)分别增产 68.47%、66.52% 和 61.82%。间作大豆带内大豆产量低于单作大豆(S),从高到低排列顺序为 S > M2S4 > M4S4 > M4S6。复合总产量大体表现为:M > M4S4 > M4S6 > M2S4 > S。从 LER 值来看,各间作处理的 LER 值均大于 1,表现出间作优势,其中间作 M4S4 处理的 LER 值最大,为 1.26,最具间作优势,其次为 M2S4 和 M4S6,分别为 1.18 和 1.11。

表 2 玉米大豆间作与单作产量及土地当量比分析

Table 2 Analysis on yield and LER of maize and soybean in intercropping and monocropping

| 处理 Treatment | 玉米产量 Yield of maize strip/(kg·hm$^{-2}$) | 大豆产量 Yield of soybean strip/(kg·hm$^{-2}$) | 复合玉米产量 Maize composite yield/(kg·hm$^{-2}$) | 复合大豆产量 Soybean composite yield/(kg·hm$^{-2}$) | 复合总产量 Composite yield/(kg·hm$^{-2}$) | LER |
|---|---|---|---|---|---|---|
| M2S4 | 17173.91 a | 2407.05 ab | 5724.64 a | 1604.70 b | 7329.34 d | 1.18 ab |
| M4S4 | 16975.82 a | 2219.87 ab | 8487.91 b | 1109.94 c | 9597.85 b | 1.26 a |
| M4S6 | 16495.87 a | 2032.05 b | 6598.35 c | 1219.23 c | 7817.58 c | 1.11 b |
| M | 10194.12 b | - | 10194.12 a | - | 10194.12 a | 1.00 c |
| S | - | 2614.95 a | - | 2614.95 a | 2614.95 e | 1.00 c |

## 2.6 不同间作行比对复合经济产值影响

从表 3 可知,不同间作处理的玉米复合产值显著低于单作玉米(M),从高到低排列顺序依次为 M > M4S4 > M4S6 > M2S4,分别低 16.73%、35.27% 和 43.84%。不同间作处理的大豆复合产值显著低于单作大豆(S),从高到低排列顺序为 S > M2S4 > M4S6 > M4S4,分别低 38.63%、53.37% 和 57.56%。由于当地玉米大豆生产者补贴对经济产值影响较大,故综合考虑当地政府补贴因素,2021 年玉米补贴为 1 083 元·hm$^{-2}$,大豆补贴为 6 000 元·hm$^{-2}$,因此,间作 M4S4 处理的复合经济产值与各处理均表现为显著性差异,各处理从高到低经济产值排列顺序为 M4S4 > M2S4 > M4S6 > M > S,相较 M 处理分别增收 15.09%、1.95% 和 1.17%,较 S 处理分别增收 55.04%、37.34% 和 36.29%。

表 3 玉米大豆间作与单作复合经济产值分析

Table 3 Analysis of compound economic output value between intercropping and monocropping

单位:元·hm$^{-2}$

| 处理 Treatment | 复合玉米产值 Maize composite economic output | 复合大豆产值 Soybean composite economic output | 玉米补贴 Maize subsidy | 大豆补贴 Soybean subsidy | 复合经济产值 Maize and soybean economic output |
|---|---|---|---|---|---|
| M2S4 | 15799.99 d | 9628.20 b | 361.0 | 4000 | 29789.20 b |
| M4S4 | 23426.63 b | 6659.62 c | 541.5 | 3000 | 33627.75 a |
| M4S6 | 18211.45 c | 7315.39 c | 433.2 | 3600 | 29560.04 b |
| M | 28135.78 a | - | 1083.0 | - | 29218.78 b |
| S | - | 15689.72 a | - | 6000 | 21689.72 c |

注:2021 年当地玉米补贴为 1 083 元·hm$^{-2}$,大豆补贴为 6 000 元·hm$^{-2}$。2021 年玉米售价为 2.76 元·kg$^{-1}$,大豆售价为 6.00 元·kg$^{-1}$。

Note: Maize subsidy was 1 083 yuan·ha$^{-1}$, soybean subsidy was 6 000 yuan·ha$^{-1}$ locally in 2021. Maize sell for 2.76 yuan·kg$^{-1}$ and soybean sell for 6.00 yuan·kg$^{-1}$ in 2021.

# 3 讨论

株高是作物重要的农艺性状,也是影响作物产量的重要指标。干物质积累则是籽粒形成的物质基础,产量的形成与其在各器官间的积累、分配和转移密切相关[14]。有学者分别进行了玉米大豆2∶2间作和1∶1间作同单作的对照研究,发现两种间作行比均不同程度上降低了间作大豆的干物质量,分别为单作的78%和56%[15]。封亮等[16]认为,玉米大豆间作行比为2∶4且带宽为2.4 m模式下大豆株高、茎粗、百粒重的表现最佳。王甜等[17]的研究表明,增加间作玉米大豆条带宽度及选择适宜的种植密度可显著改善大豆生长受到的不利影响,因为条带加宽会使大豆处于较好的光环境,因此间作大豆干物质积累量增加,株高降低,更有利于间作群体中大豆的生长。本研究结果表明,不同间作行比均使大豆株高增加,各间作处理同单作大豆差异显著,且随着遮阴程度增加,大豆株高不同程度上升,但同时间作大豆在 R2 和 R6 期的地上和地下部干物质积累量显著降低,大豆根冠比也不同程度降低,这与前人研究结果一致。玉米大豆间作导致大豆干物质量的减少,弱光条件下地上部生物量及根冠比显著降低[18-21],分析原因可能是大豆处于玉米大豆间作中的低生态位,受高位作物玉米在生育后期的遮阴影响所导致。且有研究表明,在大豆开花期后进行遮阴会显著降低大豆的光合速率,进而影响单株粒重[22]、干物质积累量及产量形成[23]。

光是影响作物生长的重要非生物因子[24]。在

禾豆间作系统中,种植模式与栽培环境共同影响光能的分布和利用,环境通风透光性的优劣是决定作物生长发育及产量形成的关键[25]。玉米大豆间作系统中,大豆冠层光合有效辐射、光合速率、气孔导度和蒸腾速率降低,胞间 $CO_2$ 浓度增加,进而导致大豆群体的光合作用降低;不同的间作行比对大豆的光合特性影响不同[26-27]。袁嘉磊[28]研究表明,玉米大豆 2∶3间作模式对大豆叶片光合能力有显著促进作用。本试验结果表明大豆在间作下的光合参数 *Pn*、*Gs* 和 *Tr* 均低于单作处理,随着玉米条带数的降低及大豆条带数的增加,*Gs* 和 *Tr* 与单作处理之间呈显著性差异,而 *Ci* 则呈现出相反的变化趋势,随着遮阴程度的增加,*Ci* 增大,这与李植等[27-29]的研究结果一致,间作生育后期,受高位作物玉米对大豆的遮阴及大豆群体自荫性的影响,间作大豆的 *Pn* 降低,光合能力减弱,需要的 $CO_2$ 量减少,因此 *Ci* 增加[30-31]。

土地当量比和产量是评价间套作系统是否具有土地产量优势的重要指标[32],而经济产值则决定着间作模式能否在实际生产中具有应用前景[33-36]。郑亚杰[37]研究发现,玉米和大豆在 2∶3间作模式下总产量最高,比单作大豆产量提高 195.30% ~ 247.72%,综合效益相较单作处理的玉米和大豆均显著提升。罗万宇等[38]分析了鲜食玉米和鲜食大豆间作模式,指出带宽为 200 cm,玉米与大豆的行比为2∶3时 LER 值达到最大,为 1.31,经济效益也达到最大,有利于两种作物产量潜力的发挥。本研究中,间作复合产量显著高于大豆单作,具有间作优势,其中,M4S4 处理下的 LER 值最大,可达 1.26。在考虑了政府补贴后,间作复合经济产值显著高于各单作处理,其中,M4S4 处理最具有增收潜力。

## 4　结论

本研究结果表明,不同间作行比条件对大豆株高、光合特性及产量等的影响程度存在差异,其中,在玉米大豆行比为 2∶4时,大豆株高最小、更有利于间作大豆地上、地下干物质的积累及复合产量的增加,其次为 4∶4间作模式,但 4∶4间作模式的经济产值最大,更适宜于机械化操作。

## 参考文献


[1] WANG Q Q, SHENG J D, WANG Y J, et al. The relative contribution of indigenous and introduced arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobia to plant nutrient acquisition in soybean/maize intercropping in unsterilized soils[J]. Applied Soil Ecology, 2021, 168(1): 104124.

[2] 张晓娜, 陈平, 杜青, 等. 玉米/大豆、玉米/花生间作对作物氮素吸收及结瘤固氮的影响[J]. 中国生态农业学报, 2019,27(8): 1183-1194. (ZHANG X N, CHEN P, DU Q, et al. Effects of maize/soybean and maize/peanut intercropping on nitrogen uptake and nitrogen fixation in crops[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2019, 27(8): 1183-1194.)

[3] WEERARATHNE L V Y, MARAMBE B, CHAUHAN B S. Intercropping as an effective component of integrated weed management in tropical root and tuber crops: A review[J]. Crop Protection, 2017, 95: 89-100.

[4] SHEN Y W, SUI P, HUANG J X, et al. Global warming potential from maize and maize-soybean as affffected by nitrogen fertilizer and cropping practices in the North China Plain[J]. Field Crops Research, 2018, 225: 117-127.

[5] FAN Y F, CHEN J X, CHENG Y J, et al. Effect of shading and light recovery on the growth, leaf structure, and photosynthetic performance of soybean in a maize-soybean relay-strip intercropping system[J]. PLoS One, 2018, 13(5): e0198159.

[6] LIU W G, DENG Y C, SAJAD HUSSAIN, et al. Relationship between cellulose accumulation and lodging resistance in the stem of relay intercropped soybean [*Glycine max* (L.) Merr.][J]. Field Crops Research, 2016, 196: 261-267.

[7] SU B Y, SONG Y X, SONG C, et al. Growth and photosynthetic responses of soybean seedlings to maize shading in relay intercropping system in Southwest China[J]. Photosynthetica, 2014, 52(3): 332-340.

[8] 范元芳,刘沁林,王锐,等. 玉米-大豆带状间作对大豆生长、光合荧光特性及产量的影响[J]. 核农学报,2017,31(5): 972-978. (FAN Y F, LIU Q L, WANG R, et al. Effects of maize and soybean strip intercropping on growth, photosynthetic fluorescence characteristics and yield of soybean[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2017,31(5): 972-978.)

[9] CHEN X F, SUN N, GU Y, et al. Photosynthetic and chlorophyll fluorescence responses in maize and soybean strip intercropping system[J]. International Journal of Agriculture & Biology, 2020, 24(4): 799-811.

[10] 王俊,隋标,王鸿斌,等. 吉林省玉米带玉米与大豆不同间作模式对作物产量及水分利用率的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2021,43(1): 22-27. (WANG J, SUI B, WANG H B, et al. Effects of maize and soybean intercropping patterns on crop yield and water use efficiency in maize belt of Jilin Province[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 201,43(1): 22-27.)

[11] ZHANG Y T, LIU J, ZHANG J Z, et al. Row ratios of intercropping maize and soybean can affect agronomic efficiency of the system and subsequent wheat[J]. PLoS One, 2015, 10(6): e0129245.

[12] 潘利文, 朱暖暖, 杨豫龙, 等. 适宜机械化玉米-大豆间作生产模式研究[J]. 玉米科学,2021,29(1): 104-111. (PAN L W, ZHU N N, YANG Y L, et al. Study on suitable production mode of mechanized maize-soybean intercropping[J]. Maize science,2021,29(1): 104-111.)

[13] 屈哲. 间作套种模式下玉米机械化收获技术与装备的研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2014. (QU Z. Research on mechanization harvesting technology and equipment of maize under intercropping mode[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2014.)

[14] 刘浩, 左青松, 刘婧怡, 等. 盐分浓度对油菜干物质积累分配、农艺性状及品质的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(22): 19-23. (LIU H, ZUO Q S, LIU Q Y, et al. Effects of salt concentration on dry matter accumulation and distribution, agronomic traits and quality of rapeseed[J]. Chinese Agricultural

Science Bulletin, 2017,33(22): 19-23.)
[15] LIU X, RAHMAN T, SONG C, et al. Changes in light environment, morphology, growth and yield of soybean in maize-soybean intercropping systems[J]. Field Crops Research, 2017, 200: 38-46.
[16] 封亮,黄国勤,杨文亭,等. 江西红壤旱地玉米‖大豆间作模式对作物产量及种间关系的影响[J]. 中国生态农业学报, 2021,29(7): 1127-1137. (FENG L, HUANG G Q, YANG W T, et al. Jiangxi red soil upland maize‖soybean interplanting mode on crop yield and the impact of interspecific relationship[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 201,29(7): 1127-1137.)
[17] 王甜, 庞婷, 杜青, 等. 田间配置对间作大豆光合特性、干物质积累及产量的影响[J]. 华北农学报, 2020, 35(2): 107-116. (WANG T, PANG T, DU Q, et al. Effects of field configuration on photosynthetic characteristics, dry matter accumulation and yield of soybean[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica,2020,35(2): 107-116.
[18] 张晓娜, 陈平, 庞婷, 等. 玉米/豆科间作种植模式对作物干物质积累、分配及产量的影响[J]. 四川农业大学学报, 2017, 35(4): 484-490. (ZHANG X N, CHEN P, PANG T, et al. Effects of maize/legume intercropping patterns on crop dry matter accumulation, distribution and yield[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2017, 35(4): 484-490.)
[19] RAZA M A, FENG L Y, IQBAL N, et al. Growth and development of soybean under changing light environments in relay intercropping system[J]. PeerJ, 2019, 7: e7262.
[20] 范元芳, 杨峰, 王锐, 等. 弱光对大豆生长、光合特性及产量的影响[J]. 中国油料作物学报, 2016, 38(1): 71-76. (FAN Y F, YANG F, WANG R, et al. Effects of low light intensity on growth, photosynthetic characteristics and yield of soybean[J]. Chinese Journal of Oil Crops, 2016, 38(1): 71-76.)
[21] RAZA M A, FENG L Y, IQBAL N, et al. Growth and development of soybean under changing light environments in relay intercropping system[J]. PeerJ, 2019, 7: e7262.
[22] 王一, 张霞 ,杨文钰, 等. 不同生育时期遮阴对大豆叶片光合和叶绿素荧光特性的影响[J]. 中国农业科学,2016, 49(11): 2072-2081. (WANG Y, ZHANG X, YANG W Y, et al. Effects of shading on photosynthetic and chlorophyll fluorescence characteristics of soybean leaves at different growth stages[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(11): 2072-2081.)
[23] 赵德强,李彤,侯玉婷,等. 玉米大豆间作模式下干物质积累和产量的边际效应及其系统效益[J]. 中国农业科学, 2020, 53(10): 1971-1985. (ZHAO D Q, LI T, HOU Y T, et al. Marginal effects and system benefits of dry matter accumulation and yield in maize and soybean intercropping system[J]. Scientia Agricultura Sinica,2020,53(10): 1971-1985.)
[24] GAJU O, DESILVA J, CARVALHO P, et al. Leaf photosynthesis and associations with grain yield, biomass and nitrogen-use efficiency in landraces, synthetic-derived lines and cultivars in wheat[J]. Field Crops Research, 2016,193: 1-15.
[25] 党科. 糜子/绿豆间作下氮对绿豆生长发育和根际土壤特性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学,2021. (DANG K. Effects of nitrogen on growth and rhizosphere soil characteristics of mung bean under broomcorn millet/Mung bean intercropping[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021.)
[26] YANG F, HUANG S, GAO R C, et al. Growth of soybean seedlings in relay strip intercropping systems in relation to light quantity and red: Far-red ratio[J]. Field Crops Research, 2014, 155: 245-253.
[27] 李植,秦向阳,王晓光,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[J]. 大豆科学,2010,29(5): 808-811. (LI Z, QIN X Y, WANG X G, et al. Effects of soybean/maize intercropping on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence kinetic parameters of soybean leaves[J]. Soybean Science,2010,29(5): 808-811.)
[28] 袁嘉磊. 玉米大豆不同间作模式群体生理基础及适宜性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学,2021. (YUAN J L. Study on population physiological basis and suitability of maize and soybean intercropping patterns[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University,2021.)
[29] 程亚娇,范元芳,谌俊旭,等. 光照强度对大豆叶片光合特性及同化物的影响[J]. 作物学报,2018,44(12): 1867-1874. (CHENG Y J, FAN Y F, SHEN J X, et al. Effects of light intensity on photosynthetic characteristics and compounds in soybean leaves[J]. Acta Agronomica Sinica, 2018, 44(12): 1867-1874.)
[30] 强森. 玉米大豆间作条件下大豆冠层特性和养分积累规律研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018. (QIANG S. Research on canopy characteristics and nutrient accumulation of soybean under maize and soybean intercropping[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2018.
[31] 刘明,吴迪,来永才,等. 遮光对野生大豆叶片形态及功能的影响[J]. 大豆科学,2021,40(4): 510-516. (LIU M, WU D, LAI Y C, et al. Effects of shading on leaf morphology and function of wild soybean[J]. Soybean Science, 2021, 40(4): 510-516.)
[32] 杨峰, 娄莹, 廖敦平, 等. 玉米-大豆带状套作行距配置对作物生物量、根系形态及产量的影响[J]. 作物学报, 2015,41(4): 642-650. (YANG F, LOU Y, LIAO D P, et al. Effects of row spacing on crop biomass, root morphology and yield in maize and soybean strip intercropping system[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(4): 642-650.)
[33] CHI B, ZHANG Y, ZHANG D, et al. Wide-strip intercropping of cotton and peanut combined with strip rotation increases crop productivity and economic returns[J]. Field Crops Research, 2019, 243: 107617.
[34] CHAPAGAIN T, PUDASAINI R, GHIMIRE B, et al. Intercropping of maize, millet, mustard, wheat and ginger increased land productivity and potential economic returns for smallholder terrace farmers in Nepal[J]. Field Crops Research, 2018, 227: 91-101.
[35] SHAH M A, FAROOQ M, HUSSAIN M. Productivity and profitability of cotton-wheat system as influenced by relay intercropping of insect resistant transgenic cotton in bed planted wheat[J]. European Journal of Agronomy, 2016, 75: 33-41.
[36] ZHANG X, WANG H, YU X, et al. The study on the effect of potato and beans intercropping with whole field plastics mulching and ridge-furrow planting on soil thermal-moisture status and crop yield on semi-arid area[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(3): 468-481.
[37] 郑亚杰. 适于辽宁中南部地区的玉米-大豆间作模式及大豆生育特性研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019. (ZHENG Y J. Study on maize and soybean intercropping pattern and soybean growth characteristics in central and southern Liaoning Province[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019.)
[38] 罗万宇, 唐庄峻, 任永福, 等. 带宽、行比对鲜食玉米间作鲜食大豆群体产量效益的影响[J]. 四川农业大学学报,2019,37(4): 442-451. (LUO W Y, TANG Z J, REN Y F, et al. Effects of bandwidth and row ratio on yield benefit of fresh maize intercropping fresh soybean population[J]. Journal of Sichuan Agricultural University,2019,37(4): 442-451.)