



播期和密度对南疆春大豆光合特性及产量的影响

黄兴军,冉新月,吴 树,陈国栋,王德胜,吴全忠,翟云龙

(塔里木大学 农学院,新疆 阿拉尔 843300)

摘 要:为探究播期和种植密度对南疆春大豆光合特性和产量及其构成因素的影响,设置4个播期 B1(4月7日)、B2(4月17日)、B3(4月27日)和 B4(5月7日),3个密度 M1(51.02 万株·hm⁻²)、M2(30.86 万株·hm⁻²)和 M3(22.68 万株·hm⁻²),研究播期和种植密度对春大豆生育进程、叶面积指数、光合特性、干物质积累、产量及产量构成因素的影响。结果表明: B4 相较于 B1 延长生育期 6.3 d,但缩短了 R4~R6 阶段 10.7 d。B4 叶面积指数在 R6 期显著低于其他播期,并且各播期下增大种植密度均能显著增加叶面积指数。在 R4 期,B1 播期叶片净光合速率分别比 B2、B3 和 B4 高 29.75%、23.09% 和 39.40%,并在 R6 期仍保持较高的净光合速率和蒸腾速率。在 R4 期,M3 干物质积累量随播期推迟显著增大,R6 期则相反。晚播和增大种植密度会降低分枝荚数、分枝粒数及分枝粒重,从而降低产量。综上,在本研究处理范围内早播和降低种植密度能够保证大豆在 R4 和 R6 期有充足的阶段发育时间和较强的叶片光合能力,维持 R6 期有较高的叶面积指数、干物质积累量,并且增大分枝荚数、分枝粒数及分枝粒重,从而显著提升产量。

关键词:播期;种植密度;春大豆;光合特性;产量

Effects of Sowing Dates and Densities on Photosynthetic Characteristics and Yield of Spring Soybean in Southern Xinjiang

HUANG Xing-jun, RAN Xin-yue, WU Shu, CHEN Gou-dong, WANG De-sheng, WU Quan-zhong, ZHAI Yun-long

(College of Agriculture, Tarim University, Alar 843300, China)

Abstract: In order to investigate the effects of sowing date and planting density on photosynthetic characteristics, yield and its yield components of spring soybean in Southern Xinjiang, four sowing dates B1 (April 7), B2 (April 17), B3 (April 27) and B4 (May 7), and three densities M1 (510 200 plants ·ha⁻¹), M2 (308 600 plants ·ha⁻¹) and M3 (226 800 plants ·ha⁻¹) were adopted. The effects of sowing date and planting density on growth process, leaf area index, photosynthetic characteristics, dry matter accumulation, yield and yield components of spring soybean were determined. The results showed that compared with B1 treatment, B4 prolonged the growth period by 6.3 days, but shortened the R4-R6 stages by 10.7 days. The LAT of B4 at R6 stage was significantly lower than that at other sowing dates, and the increase of planting density at each sowing date could significantly increase the LAI. At R4 stage, the net photosynthetic rate (NPR) of B1 was 29.75%, 23.09% and 39.40% higher than that of B2, B3 and B4 respectively, and the NPR and transpiration rate were still higher at R6 stage. The dry matter accumulation in R4 stage increased gradually with the delay of sowing date, and the dry matter accumulation in M3 plant increased significantly, while the dry matter accumulation in R6 stage was contrary. Late sowing and increasing planting density would reduce the branches pods number, branch seeds number and branch seeds weight, thus reduce the yield. In conclusion, in the treatments of this study, early sowing and decreasing planting density could ensure sufficient development time and strong photosynthetic capacity of soybean leaves in R4 and R6 stages, maintain the R6 period had higher leaf area index, dry matter accumulation, and increase the branches pods number, branch seeds number and branch seeds weight, thus significantly improve yield.

Keywords: sowing date; planting density; spring soybean; photosynthetic characteristics; yield

大豆是我国重要的经济和油料作物,播期和种植密度是影响大豆产量的重要栽培因子^[1]。适期播种可以调节大豆的生育进程,增加大豆与区域生态气候的契合性,充分利用气候资源,避开低温、高温、干热风等不良气候^[2]。种植密度则会影响大豆群体对光照、水分和养分的利用效率,调节群体竞争^[3-4]。适宜的播期和种植密度可以促进春大豆充

分利用光热资源,发挥大豆光合潜力,提升干物质积累能力,从而提高产量。

叶面积指数(LAI)是影响群体光合能力的重要因素,合理的播期和种植密度组合可以保证春大豆各生育阶段的叶面积指数处于较高水平。徐婷等^[5]研究指出,较高的种植密度和推迟播期可以增加叶面积指数。较高的叶面积指数可以显著增强

收稿日期:2022-03-09

基金项目:新疆生产建设兵团重点领域科技攻关项目(2019AB022);塔里木大学研究生科研创新项目(TDGR1202021)。

第一作者:黄兴军(1998—),男,硕士研究生,主要从事作物高产理论与技术研究。E-mail:2422283783@qq.com。

通讯作者:翟云龙(1979—),男,博士,教授,主要从事作物高产理论与技术研究。E-mail:zylzky@163.com。

群体光合能力^[6]。前人研究发现,物质积累主要来源于光合产物,不同播期和种植密度能够影响干物质积累与转运,进而影响籽粒产量,所以选择与生态环境相适宜的播期与密度组合,有利于产量提高^[7-8]。较高的光合生理基础是大豆高产的基础,结合特定的生态环境选用适宜的播期和密度从而发挥大豆光合潜力具有重要意义^[9]。高永刚等^[10]研究指出,适期播种是保证大豆维持较高净光合速率(P_n)的关键。徐宗贵等^[11]在渭北的研究中指出,增大种植密度会降低净光合速率(P_n)和蒸腾速率(Tr)。张永强等^[12]在新疆伊犁的研究得出,随密度增加胞间 CO_2 浓度(C_i)先降后增,气孔导度(G_s)则先增后降。

不同生态环境区域下大豆适宜的播期与密度差异显著,而播期和种植密度是提升产量的重要栽培措施。新疆光热资源充足,日照时间长,昼夜温差大,适宜大豆生长^[13]。相关研究认为,南疆灌溉地区大豆生产多采用覆膜滴灌的水肥一体化栽培技术,也是非常适宜的大豆种植方式,因此根据新疆南疆特定生态环境与栽培模式进行播期和种植密度研究具有重要意义^[13]。本研究对不同播期和种植密度下春大豆的光合特性、物质积累与产量进行分析,探究不同播期和种植密度下大豆叶面积指数和叶片光合能力的变化规律,探讨如何通过调整播期及密度,充分利用新疆无霜期内丰富的光热资源,发挥大豆光合潜力,从而为南疆春大豆播期和种植密度选择提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试大豆品种为近年来在新疆地区推广的春播品种黑农 61。

1.2 试验地概况

试验于 2021 年 4—9 月在新疆阿拉尔市塔里木大学农学试验站进行,试验点属暖温大陆干旱荒漠气候,4—10 月的日平均日照长 9.5 h。田间管理按当地高产大田管理,出苗后严格按试验密度定苗。播前施入有机肥 750 kg·hm⁻²,复合肥(N、P、K 含量分别为 19%、20%、6%)200 kg·hm⁻²,取耕层 0~20 cm 土壤测定基础肥力,有机质含量为 8.12 g·kg⁻¹,碱解氮含量为 22.6 mg·kg⁻¹,速效磷含量为 16.4 mg·kg⁻¹,速效钾含量为 126 mg·kg⁻¹。

1.3 试验设计

采用裂区试验设计,主区为播期(B):播期 4 月 7 日(B1)、4 月 17 日(B2)、4 月 27 日(B3)、5 月 7 日(B4);副区为播种密度(M):行距×株距为 14 cm ×

14 cm(M1,51.02 万株·hm⁻²)、行距×株距为 18 cm × 18 cm(M2,30.86 万株·hm⁻²)、行距×株距为 22 cm × 22 cm(M3,22.68 万株·hm⁻²)。共 12 个处理,3 次重复,试验小区长 5 m,宽 2.4 m,小区面积 12 m²。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 生育期调查 采用 Fehr 等^[14]的大豆生育期划分标准,记载出苗期(VE)、四节期(V4)、盛花期(R2)、盛荚期(R4)、鼓粒期(R6)、和完熟期(R8),并计算生育期。

1.4.2 叶面积指数 在 V4、R2、R4、R6 期选择长势均匀且具有代表性的大豆 5 株,将叶片全部摘下平铺垂直拍照,使用 Image 软件^[15]进行数字图像处理,测定单株叶面积。依据单株叶面积计算叶面积指数(LAI),计算公式为 LAI = 单株叶面积 × 单位面积大豆株数/单位土地面积。

1.4.3 干物质积累 在 V4、R2、R4、R6 期,在小区内选取长势均匀且具有代表性的大豆 5 株,取植株地上部,烘箱 105 ℃杀青 30 min,80 ℃烘干至恒重,称重。

1.4.4 光合参数测定 在 V4、R2、R4、R6 期选择晴天的上午 12:00—14:00 时,采用 Li-6400XT 便携式光合仪,选取长势均匀的大豆 3 株,测定植株倒三叶的中间小叶的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和蒸腾速率(Tr)。

1.4.5 产量及产量构成因素 在 R8 期每个小区取中间 3 行 2 m 行长实收计产,同时取 10 株具有代表性的植株测定主茎荚数、主茎粒数、主茎粒重、单株荚数、单株粒数、单株粒重和百粒重。

1.5 数据分析

采用 Excel 2016 软件进行数据整理,用 DPS v7.05 对数据进行显著性差异分析,显著性水平为 $\alpha=0.05$,使用 Excel 2016 和 Origin Pro 2019b 制表及绘图。

2 结果与分析

2.1 播期和种植密度对春大豆生育进程的影响

播期推迟会延长春大豆生育期,种植密度对生育期影响较小,不同密度间生育进程差异小于 3 d(表 1)。具体表现为,推迟播期会缩短 VE~R2 期和 R4~R6 期的时间,延长 R2~R4 期和 R6~R8 期的时间,但总体表现为延长。B4 播期下的 R2~R4 期分别比 B1、B2 和 B3 长 19.3、15.3 和 8.3 d,而 B4 播期下的 R4~R6 期则分别比 B1、B2 和 B3 缩短了 10.7、11.3 和 5.7 d。

表 1 播期和种植密度对春大豆生育进程的影响

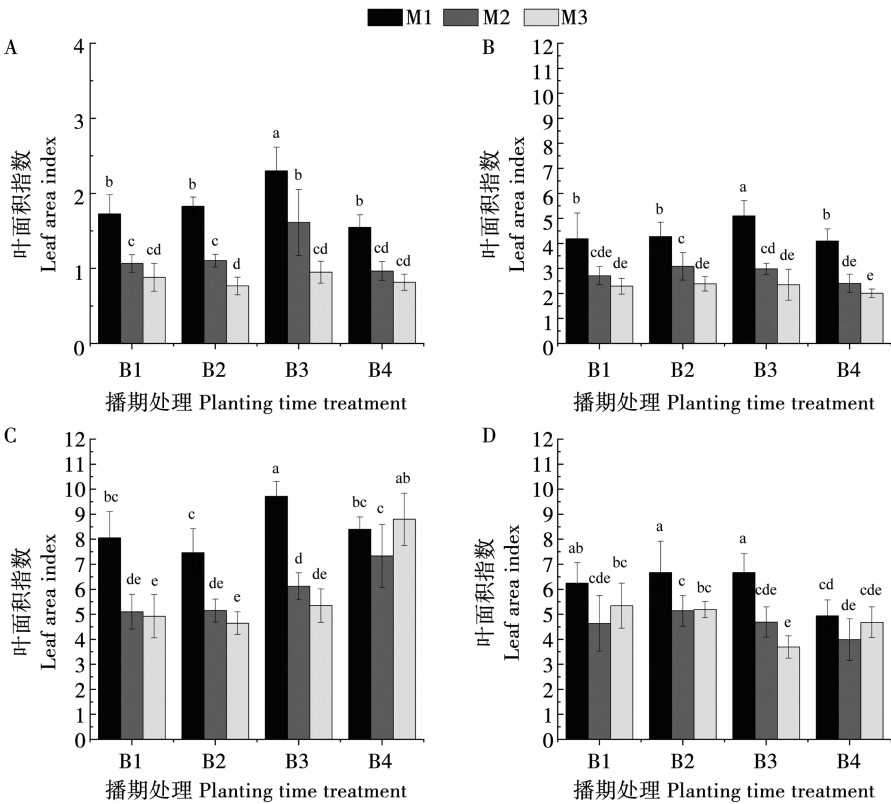
Table 1 Effects of sowing dates and planting densities on the growth process of spring soybean

播期 Sowing date	密度 Density	生育时期/(月-日) Growing stage/(month-day)						生育期 Growth period/d
		VE	V4	R2	R4	R6	R8	
B1	M1	4-15	5-14	5-25	6-2	7-4	7-15	91
	M2	4-15	5-14	5-26	6-2	7-4	7-16	92
	M3	4-15	5-14	5-26	6-4	7-4	7-16	92
B2	M1	4-25	5-22	6-1	6-13	7-15	7-26	92
	M2	4-25	5-22	6-1	6-13	7-15	7-26	92
	M3	4-25	5-22	6-1	6-13	7-15	7-26	92
B3	M1	5-3	5-31	6-8	6-27	7-22	8-8	97
	M2	5-3	5-31	6-8	6-27	7-24	8-8	97
	M3	5-3	5-31	6-8	6-27	7-24	8-8	97
B4	M1	5-13	6-7	6-13	7-9	7-31	8-19	98
	M2	5-13	6-7	6-13	7-11	7-31	8-19	98
	M3	5-13	6-7	6-13	7-11	7-31	8-19	98

2.2 播期和种植密度对春大豆叶面积指数的影响

如图 1 所示,播期和种植密度对春大豆叶面积指数(LAI)有显著影响。LAI 在全生育期先上升后下降,各处理的 LAI 均在 R4 期达到最大,在 R6 期略有下降。在 V4 和 R2 期,LAI 随着密度降低而逐渐减小,除 B3 播期 M1、M2 处理 LAI 显著高于其他播期的 M1、M2 处理外,同一种植密度不同播期间均无显著差异,说明播期对春大豆出苗至盛花期的 LAI 影响较小。但在同一播期下 LAI 随种植密度降低而减小,说明增加种植密度能够增加 LAI。随播期推迟,R4 期的 LAI 逐渐增大;随密度增大,B1、

B2、B3 播期 LAI 逐渐增大,B4 播期下 M1 种植密度不同生育时期的 LAI 小于 M3。在 R6 期,LAI 随播期推迟先上升后下降,B4 明显小于其他播期,说明过晚播种会降低大豆群体光合能力。各播期处理下均以 M1 种植密度的 LAI 最大,各播期下的 M2、M3 处理的 LAI 均无显著差异。根据总体表现来看,密度是影响 LAI 的重要因素,M1 种植密度的 LAI 显著高于其它密度处理,说明增大种植密度能够显著增加 LAI。播期影响则在各生育时期表现不一致,B4 处理的 LAI 在 R4 期较大,但在 R6 和 V4 期则均为最小。



注:A. V4;B. R2;C. R4;D. R6。不同字母表示处理间存在显著差异($P < 0.05$)。下同。
Note: A. V4;B. R2;C. R4;D. R6. Different lowercase indicate significant difference between treatments($P < 0.05$). The same below.

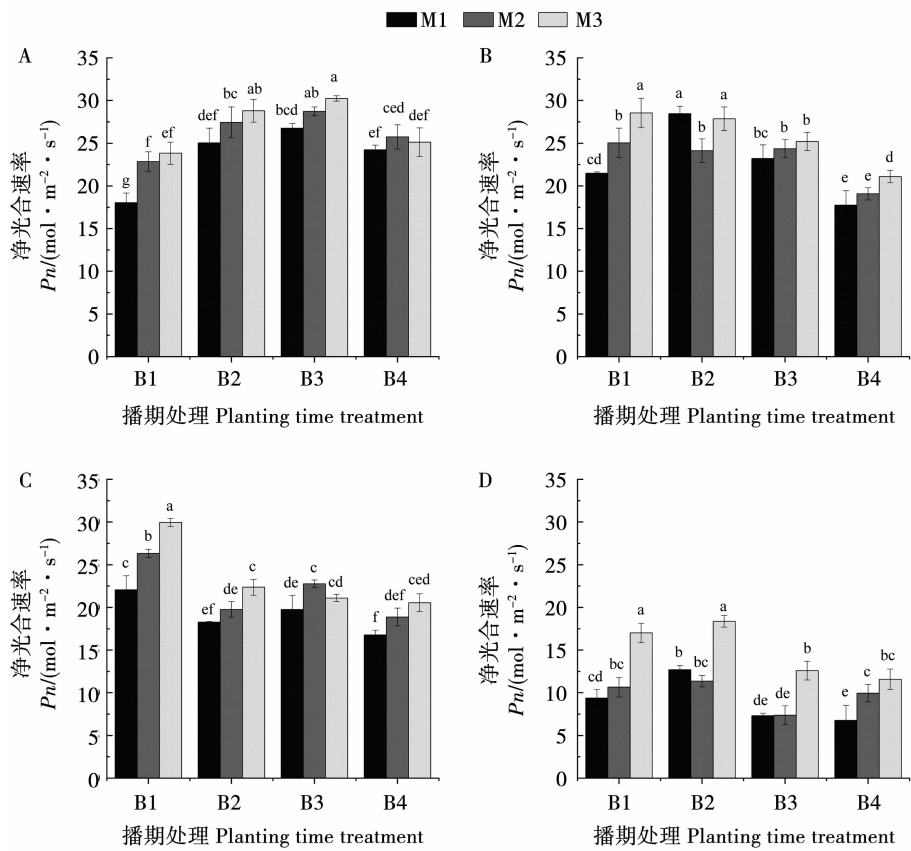
图 1 播期和种植密度对春大豆不同生长时期叶面积指数的影响

Fig. 1 Effects of sowing dates and planting densities on leaf area index at different growing stages of spring soybean

2.3 播期和种植密度对春大豆叶片光合参数的影响

2.3.1 净光合速率 如图 2 所示,播期和种植密度对春大豆净光合速率 (P_n) 有显著影响。随着播期推迟,在 V4 和 R2 期, P_n 值呈先上升后下降的趋势,在 R2 期,B4 处理所有密度均显著低于其他处理,说明过晚播种会降低 R2 期的 P_n 值,这可能与播期过晚导致 R2 期发育阶段所处环境气温较高有关。在 R4 期, P_n 最大的播期密度组合为 B1M3, P_n 值为 $29.95 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,播期处理间 P_n 大小顺序为 B1 > B3 > B2 > B4,B1 分别比 B2、B3 和 B4 分别高 29.75%、23.09% 和 39.40%,B1 播期处理 P_n 显著高于其他播期处理,说明早播能够使低密度种植群体的叶片光合能力充分发挥。各播期下不

同密度间 P_n 均表现为 M3 > M2 > M1,说明降低种植密度也可以提升 P_n 值。在 R6 期, P_n 值最大播期密度组合为 B2M3, P_n 值为 $18.38 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,播期处理间 P_n 大小顺序为 B2 > B1 > B4 > B3,B2 比 B1、B4 和 B3 分别高 14.52%、49.87% 和 55.52%,B1、B2 和 B3 分别高 14.52%、49.87% 和 55.52%,B1、B2 和 B3 可以保持更高的 P_n 值。综合各生育阶段分析,晚播不利于春大豆叶片发挥净光合潜力,B4 播期处理各生育时期的 P_n 均低于其他播期处理,晚播会降低春大豆在 R4 和 R6 期的叶片 P_n 。在各播期下,种植密度间基本以 M3 密度的 P_n 值最高,说明降低密度会增加大豆叶片净光合速率,提升叶片光合能力。早播结合降低种植密度可以保证大豆在 R2、R4 和 R6 期都保持较高的光合速率,B4 播期处理在 R2、R4 和 R6 期的 P_n 则均低于其他播期处理。



注: A. V4; B. R2; C. R4; D. R6。
Note: A. V4; B. R2; C. R4; D. R6。

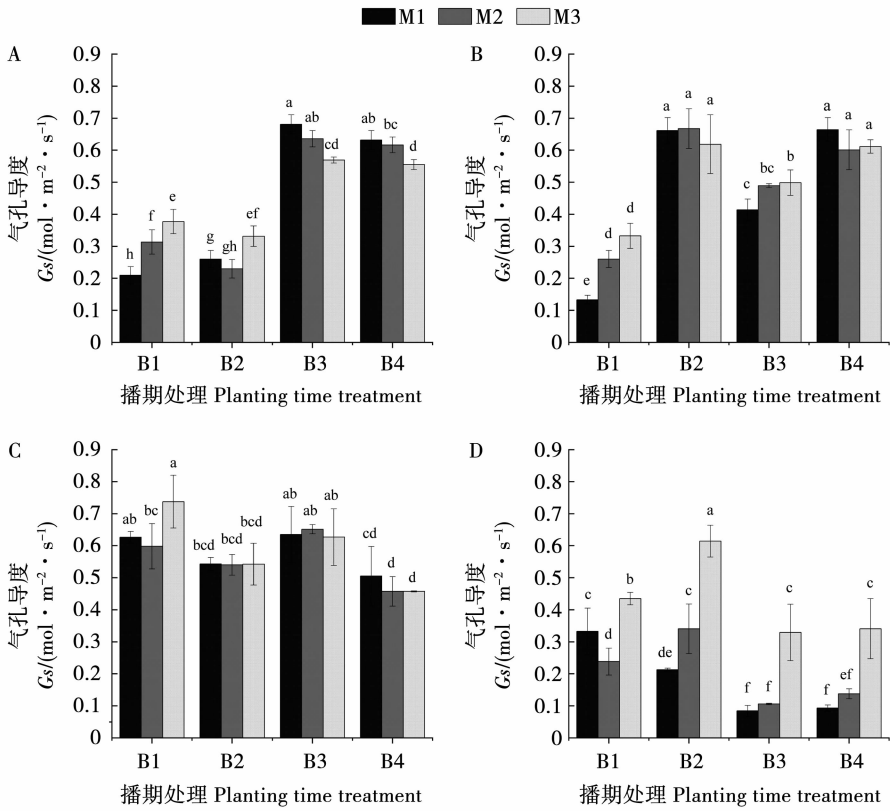
图 2 播期和种植密度对春大豆叶片不同生长时期净光合速率的影响
Fig. 2 Effects of sowing dates and planting densities on net photosynthetic rate at different growing stages of spring soybean leaves

2.3.2 气孔导度 如图 3 所示,气孔导度 (G_s) 在不同生育阶段对播期和种植密度的响应存在差异。在 V4 期,B1、B2 处理的 G_s 显著低于 B3、B4 处理,说明播期推迟能提升 V4 期的叶片气体交换能力,并且不同种植密度 G_s 对不同播期的响应不一致。在 R2 期,B1 处理的 G_s 显著低于其他播期处理,表明过早播种会降低 R2 期叶片气体交换能力,在 B1、B3 播期处理下,增大种植密度可以增大叶片 G_s 。

在 R4 期,气孔导度最高的处理组合为 B1M3 处理, G_s 值为 $0.74 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,B4 播期处理的 G_s 显著低于其他播期处理,B4 比 B1、B2 和 B3 处理的 G_s 分别低 27.61%、12.65% 和 25.78%,说明播期太晚会显著降低叶片 R4 期气体交换能力。同一播期条件下不同种植密度间 G_s 差异相对较小,B2、B3、B4 处理不同种植密度间 G_s 均无显著差异。在 R6 期,B2M3 处理 G_s 最高,为 $0.61 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,播期处理

间以 B2 最高,表现为 B2 > B1 > B4 > B3,B2 比 B1、B3 和 B4 分别高 16.17%、124.87% 和 104.27%。4 个播期下 M3 均显著高于 M1 和 M2,说明降低种植密度可以有效地提升鼓粒期大豆叶片 G_s 。综合各生育

阶段来看,晚播可以提升 V4 期叶片气孔交换能力,早播和降低种植密度可以保证鼓粒期大豆植株叶片维持较高气体交换能力。

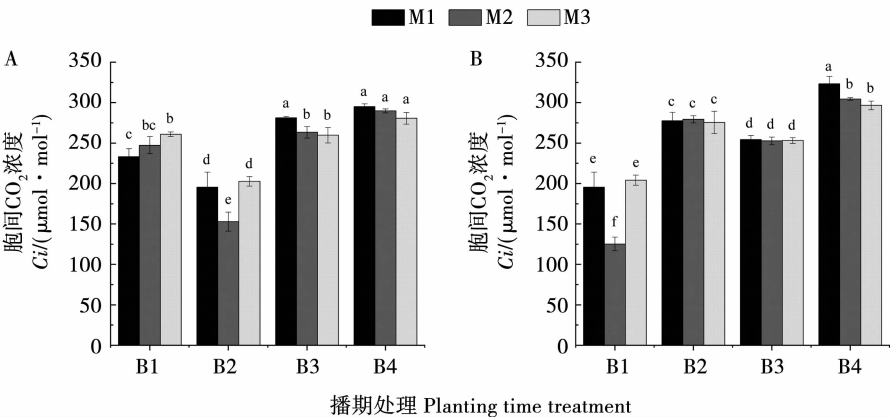


注:A. V4;B. R2;C. R4;D. R6。
Note:A. V4;B. R2;C. R4;D. R6。

图3 播期和种植密度对春大豆不同生育时期叶片气孔导度的影响
Fig.3 Effects of sowing dates and planting densities on leaves stomatal conductance at different growing stages of spring soybean

2.3.3 胞间 CO_2 浓度 不同播期和种植密度春大豆叶片 C_i 差异如图4所示,在 V4 和 R2 期,B4M1 处理的 C_i 均最高,分别为 295.13 和 323.26 $\mu mol \cdot mol^{-1}$,播期处理间均以 B4 播期处理最高,说明在 5 月后播种能促使大豆 V4 和 R2 期叶片有较大 C_i 。在 B2、B3 播期处理的 R2 和 R4 期,不同密度间差异均小于 5%,说明 C_i 值受密度影响较小。在 R6 期,播期处理

间 C_i 表现为 B1 > B2 > B3 > B4,B1 分别比 B2、B3 和 B4 高 2.83%、17.56% 和 33.85%,说明推迟播期会降低 R6 期的 C_i 。不同种植密度下 C_i 随播期推迟的变化规律不一致,M1 处理的 C_i 随播期推迟逐渐降低,M2 处理的 C_i 先上升后下,M3 处理的 C_i 在不同播期处理间无显著差异,但各播期下 M3 处理的 C_i 均大于 M1、M2,说明降低种植密度使 C_i 增大。



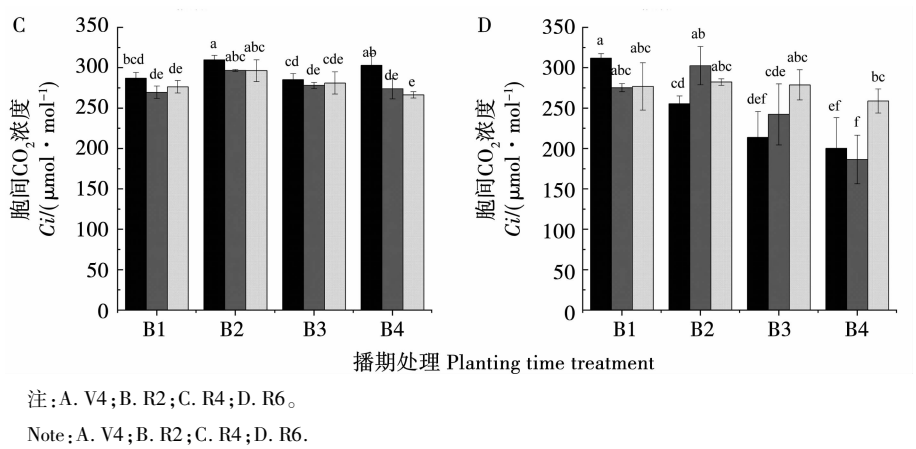


图 4 播期及种植密度对春大豆不同生育时期叶片胞间 CO₂ 浓度的影响

Fig. 4 Effects of sowing dates and planting densities on leaves intercellular CO₂ concentration at different growing stages of spring soybean

2.3.4 蒸腾速率 播期和种植密度对春大豆叶片蒸腾速率(*Tr*)的影响如图 5 所示,在 V4 期,B4M3 处理的 *Tr* 最高,为 14.14 mmol·m⁻²·s⁻¹,播期处理间大小依次为 B4 > B2 > B3 > B1,B4 比 B2、B3 和 B1 分别高 35.10%、36.61% 和 100.22%,不同种植密度 B1、B2 和 B3 处理均表现为 M3 > M2 > M1,说明降低种植密度和推迟播期能显著提升 V4 期叶片蒸腾速率。在 R2 和 R4 期,B3 处理 *Tr* 最高,*Tr* 随播期推迟先上升后下降;在 R4 期,B1 和 B3 播期处理下

均表现为种植密度越小 *Tr* 越大。在 R6 期,B2M3 处理 *Tr* 最高,为 15.09 mmol·m⁻²·s⁻¹,播期处理间叶片 *Tr* 大小变化依次为 B2 > B1 > B4 > B3,B2 比 B1、B4 和 B3 分别高 13.51%、90.79% 和 106.57%,*Tr* 随播期推迟先上升后下降;在 B2、B3 和 B4 播期下均以 M3 密度叶片 *Tr* 最高,说明降低种植密度可以使生育后期大豆叶片的 *Tr* 增大。综上,推迟播期和降低种植密度可以提升春大豆 V4 期的叶片 *Tr*,但 B4 播期处理在 R4 和 R6 期的叶片 *Tr* 较低。

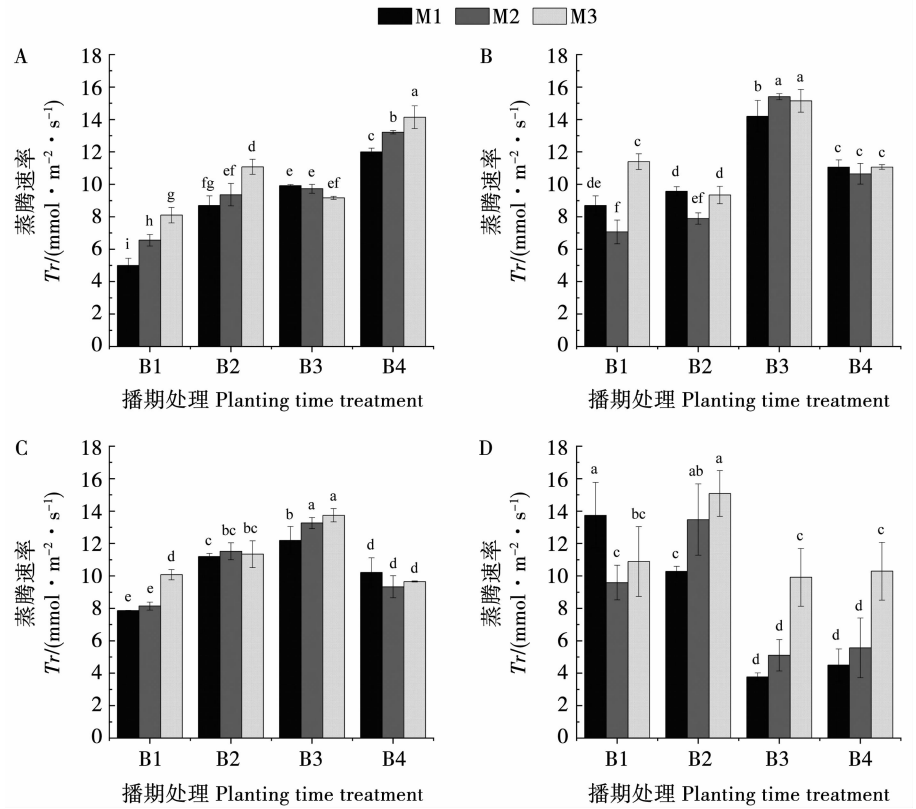


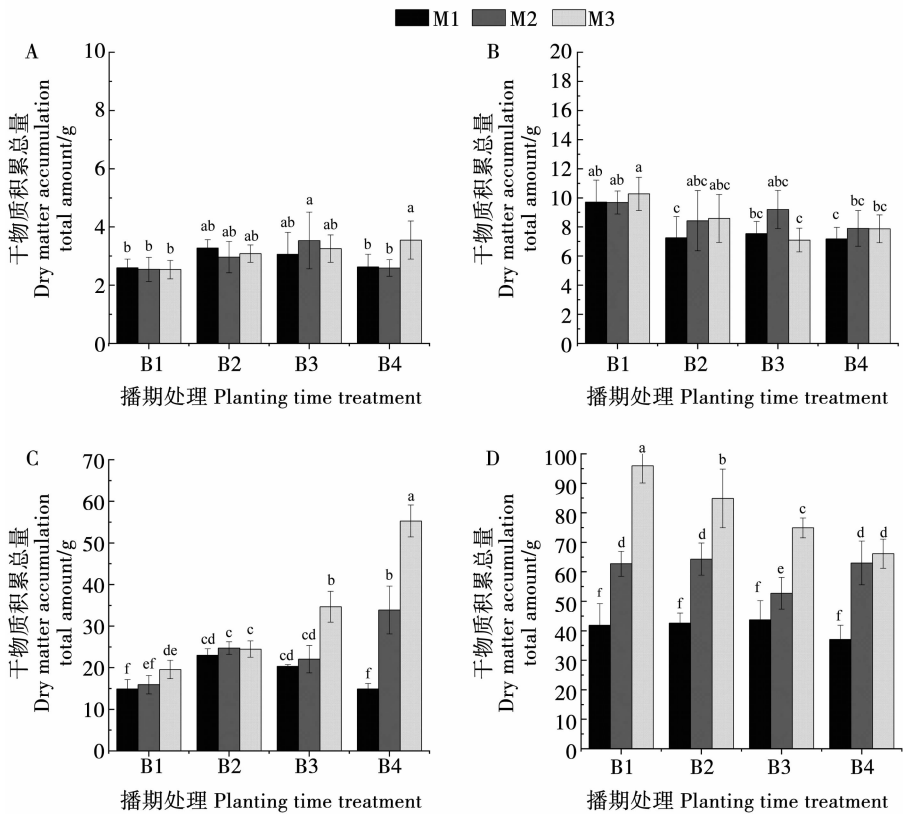
图 5 播期及种植密度对春大豆不同生育时期叶片蒸腾速率的影响

Fig. 5 Effects of sowing dates and planting densities on leaf transpiration rate at different growing stages of spring soybean

2.4 播期及密度对春大豆干物质质量与产量的影响

2.4.1 单株干物质积累 如图6所示,播期和种植密度对大豆干物质积累有显著影响,并随着生育进程的推进差异逐渐增大。在V4和R2期,各处理间大豆单株干物质积累量差异较小,说明播期和种植密度处理对V4期至R2干物质积累影响较小。但到R4期,播期和种植密度对干物质积累量影响显著,播期推迟能显著增加干物质积累量,这可能与播期推迟导致R2~R4期生长发育时间增加有关(表1)。在R4期,降低种植密度会显著增加大豆单株干物质积累量,但不同播期下不同密度处理表现不一致。随着播期推迟不同密度处理间干物质积

累量差异逐渐增大,M1处理随播期推迟而先上升后下降,M2、M3处理则随播期推迟而逐渐上升。在R6期,干物质积累量随播期推迟逐渐降低,随种植密度降低而逐渐减小。播期对M1处理的干物质积累量无显著影响,说明高密度群体受播期影响较小。但不同播期处理间M3处理的干物质积累量B1分别比B2、B3、B4高12.96%、28.07%、44.97%,说明低密度群体播期推迟会减小生长后期的干物质积累量。综合分析各生育期结果,早播和降低种植密度能保证籽粒形成的关键时期R6期有较高的干物质积累总量。



注: A. V4; B. R2; C. R4; D. R6。
Note: A. V4; B. R2; C. R4; D. R6。

图6 播期及种植密度对春大豆不同生育时期干物质积累的影响
Fig.6 Effects of sowing dates and planting densities on total dry matter accumulation at different growing stages of spring soybean

2.4.2 产量及其构成因素 如表2所示,播期和种植密度对大豆主茎荚数、粒数、粒重和分枝荚数、粒数、粒重及籽粒产量影响显著。在M1种植密度下,各播期间主茎粒重无显著差异,说明播期变化对高种植密度的主茎粒重影响较小。但在M3种植密度下,播期推迟主茎粒重显著降低,说明晚播会导致低密度处理主茎粒重下降。播期推迟和种植密度增加会显著降低分枝荚数、分枝粒数和分枝粒重。而 from 相关性分析结果中可以发现,分枝荚数和分枝粒数与产量呈极显著正相关,分枝粒重也与产

量呈显著正相关(表3),说明播期推迟会降低分枝产量构成从而降低产量。M1、M2种植密度处理的百粒重均随播期的推迟呈先上升后下降的趋势,M3密度处理表现为随播期推迟逐渐降低,说明百粒重受播期和密度双重因素影响。在同一播期不同种植密度间,降低种植密度可以显著增加百粒重。不同播期产量差异显著,B4播期处理产量显著低于其他播期,说明播种太晚会显著降低产量。各种植密度随播期推迟产量变化规律不一致,不同播期下的M1的B1播期处理产量最高,但B1、B2和B4播期处理

间无显著差异,说明在较高的种植密度下产量受播期影响较小。M2 处理的 B3 播期处理产量最高,且随播期推迟先上升后下降。M3 处理的 B1 播期处理产量最高,为 6 436.99 kg·hm⁻²。综合来看,播期推迟会降低产量,适期早播及降低种植密度可以提高产量,晚播时可以通过增加种植密度来提高产量。

表 2 播期及密度对春大豆产量及构成因素的影响

Table 2 Effects of sowing date and density on yield and components of spring soybean									
播期 Sowing date	密度 Density	主茎 Main stem			分枝 Branch			百粒重 100-seed weight/g	产量 Yield/ (kg·hm ⁻²)
		荚数 Pods number	粒数 Seeds number	粒重 Seeds weight/g	荚数 Pods number	粒数 Seeds number	粒重 Seeds weight/g		
B1	M1	28.70 abcd	71.40 bcd	12.08 e	3.40 fg	7.60 fg	1.32 d	18.07 g	4630.32 cd
	M2	32.00 abc	77.70 abc	16.42 bc	7.30 efg	16.40 efg	3.46 cd	20.99 e	4163.23 de
	M3	33.50 ab	89.20 a	18.63 a	44.70 a	120.00 a	29.03 a	24.03 a	6436.99 a
B2	M1	23.70 d	50.30 e	12.12 e	2.00 fg	3.60 g	0.75 d	24.21 a	4395.20 de
	M2	26.40 bcd	66.20 cd	15.23 cd	13.00 def	32.00 def	6.30 cd	22.39 bc	4653.43 cd
	M3	29.10 abcd	65.20 cd	16.94 b	29.50 bc	68.81 bc	16.10 b	22.93 b	4659.58 cd
B3	M1	24.10 cd	58.70 de	11.61 e	0.20 g	0.30 g	0.05 d	19.63 f	4084.79 e
	M2	28.70 abcd	70.60 bcd	15.58 bcd	17.80 de	45.20 cd	8.53 c	21.23 de	5058.47 bc
	M3	36.20 a	82.70 ab	19.72 a	35.10 ab	81.20 b	18.99 b	22.54 bc	5414.87 b
B4	M1	29.80 abcd	68.90 cd	11.94 e	0.00 g	0.00 g	0.00 d	18.03 g	4242.23 de
	M2	32.90 ab	76.80 abc	14.38 d	4.30 fg	7.60 fg	5.31 cd	18.47 g	3447.92 f
	M3	31.70 abc	66.70 cd	15.23 cd	23.00 cd	37.60 de	8.40 c	22.01 cd	3377.25 f

表 3 产量构成因素相关性分析

Table 3 Correlation analysis of yield component factors								
指标 Indicator	主茎荚数 Main stem pods number	主茎粒数 Main stem seeds number	主茎粒重 Main stem seeds weight	分枝荚数 Branches pods number	分枝粒数 Branch seeds number	分枝粒重 Branch seeds weight	百粒重 100-seed weight	产量 Yield
主茎荚数 Main stem pods number	1							
主茎粒数 Main stem seeds number	0.8824 * *	1						
主茎粒重 Main stem seeds weight	0.7386 * *	0.7112 *	1					
分枝荚数 Branches pods number	0.5975 *	0.5952 *	0.8901 * *	1				
分枝粒数 Branch seeds number	0.5601 *	0.6287 *	0.8741 * *	0.9851 * *	1			
分枝粒重 Branch seeds weight	0.6101 *	0.6676 *	0.8701 * *	0.9728	0.9889 * *	1		
百粒重 100-seed weight	0.0039	-0.0272	0.5696	0.6524 *	0.6437 *	0.6042 *	1	
产量 Yield	0.2602	0.5284	0.5690	0.6936 *	0.7951 * *	0.7624 *	0.4942	1

注: R_{0.05} = 0.5760, R_{0.01} = 0.7079; * 和 ** 分别代表 0.05 和 0.01 水平显著相关。

Note: * and ** indicate significant correlation at 0.05 and 0.01 level, respectively.

3 讨论

大豆是一种典型短日照作物和喜温性作物,播期与大豆的生育期密切相关^[5]。前人研究表明,温度与光照长度在出苗至初花阶段表现为延长生育期,日照程度表现为缩短^[16]。而播期不同则大豆各生育阶段光温效应不同,从而导致大豆生育进程产生差别。本研究中,推迟播期会延长春大豆的生育期,但会缩短出苗至盛花及盛荚至鼓粒的天数,这与杜亚敏等^[17]在新疆伊犁地区的研究结果一致,但

却与刘玉兰等^[18]在吉林的研究结论相反,说明不同生态区域气候环境不同,播期对生育进程影响也不尽一致。

相关研究认为,保证叶片的高光合能力是作物高产的基础^[18-20]。播期和种植密度不同使大豆植株发育接收到的光、温、水等自然环境因素存在差异^[21]。而低温与高温天气均会使大豆叶片光合能力降低^[22]。新疆早春气候多变,春季有寒潮,而夏季则高温炎热^[23]。适宜的播期可以避开早春寒潮与七八月的高温天气。本研究中,播期推迟使春

大豆在 V4 期叶片净光合速率与蒸腾速率提高,鼓粒期表现为下降,与杨继芝等^[24]和郑盛华等^[25]的研究结果一致,可能是由于播期推迟避开了南疆地区早春低温对 V4 期的不良影响,但也会使鼓粒期大豆遭遇南疆伏天高温从而导致叶片光合能力下降。本研究也证明降低种植密度能增大叶片的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率^[20],随播期推迟和种植密度的增大鼓粒期气孔导度降低,相关研究认为这与播期推迟和密度增加导致生长期外部气候高温、群体内部环境恶化和群体荫蔽性增大有关^[26]。综合来看,新疆伏天高温,适期早播和降低种植密度有利于提升春大豆鼓粒期叶片光合能力,从而提升产量。

作物的生长发育受到区域生态气候和群体内部竞争造成的双重影响^[27-28]。不同播期可以调节作物与当地气候环境的契合性,而不同种植密度则可以调节作物群体结构,改善群体竞争力。叶面积指数是群体光合能力的重要指标^[21]。程彬等^[20]认为在合理范围内维持较高的叶面积指数是保持群体较高光合能力的基础。本研究结果也表明增加种植密度会提高叶面积指数^[24],而播期对叶面积指数的影响在各生育阶段表现不一致。综合来看,适期早播和降低种植密度,可以保证鼓粒期大豆群体依然拥有较高叶面积指数,更有利于籽粒形成。

干物质积累总量的大小可以直接反映作物光合产物生产力,而光合产物的积累则是产量形成的基础^[29]。播期与种植密度均能通过影响作物群体的光合能力来影响物质积累^[30-31]。本研究结果表明,在 R4 期,大豆植株地上部干物质积累量随播期的延迟和密度的降低逐渐增加,相关研究认为,播期间差异与发育阶段持续时间与阶段积温差异有关^[32]。在鼓粒期,播期推迟会降低干物质积累量,但不同密度随播期推迟表现不一致,高密度群体在不同播期间无显著差异,但低密度群体随播期推迟鼓粒期干物质积累量显著降低,这可能是由于物质分配不同和叶片早衰脱落的原因。因此,为保证春大豆籽粒灌浆阶段具有充足的“库”,在南疆地区适期早播和降低种植密度更有利于大豆植株在鼓粒期保持较高的物质积累量。

前人研究表明,晚播和密度过高容易造成竞争激烈,从而导致徒长,不利于获得高产^[27]。根据生态区域选择适宜播期,并搭配合理的种植密度是高产的重要前提^[32-33]。本研究中发现,分枝荚数、粒数与产量呈极显著正相关,分枝粒重与产量呈显著正相关,随着密度增大分枝荚数、分枝粒数、分枝粒重均显著降低,这与孙国伟等研究结果一致^[1,34]。

百粒重随播期推迟和密度增大而降低,这与许竹激等^[34-35]研究结果一致。本研究表明,M1 产量在不同播期间差异较小,但 M3 在 B1 播期产量最高。因此早播和降低种植密度是增加产量的关键,在晚播情况下可以通过增加种植密度提升产量。

4 结论

在南疆地区,推迟播期会延长大豆生育期。增大种植密度可以提升大豆群体叶面积指数。早播会促使大豆在盛荚期及鼓粒期叶片保持较高的光合参数,晚播则与早播作用相反。降低种植密度均能提升叶片净光合速率与蒸腾速率。播期推迟和增加种植密度会降低鼓粒期干物质积累量。本研究中所有播期处理均能正常成熟,早播结合低种植密度可以充分发挥分枝产量优势,从而提升产量,晚播结合高种植密度可以增加收获株数,从而提升产量,在播期 4 月 7 日、密度 20.68 万株·hm⁻²时产量最高,达到 6 436.99 kg·hm⁻²。

参考文献

[1] 孙国伟,付连舜,张凤路,等. 播期及密度对不同大豆品种农艺性状及产量的影响[J]. 大豆科学, 2016, 35(3): 423-427. (SUN G W, FU L S, ZHANG F L, et al. Effects of sowing date and plant density on agronomic traits and yield for different soybeans[J]. Soybean Science, 2016, 35(3): 423-427.)

[2] 王乐政, 华方静, 曹鹏鹏, 等. 不同播期夏大豆的产量、光合特性和气象因子效应研究[J]. 中国油料作物学报, 2019, 41(5): 750-757. (WANG L Z, HUA F J, CAO P P, et al. Effect of sowing date and climatic factor on yield and photosynthetic characteristics summer soybean [J]. Chinese Journal of Oil Sciences, 2019, 41(5): 750-757.)

[3] 张永强, 张娜, 王娜, 等. 种植密度对夏大豆光合特性及产量构成的影响[J]. 核农学报, 2015, 29(7): 1386-1391. (ZHANG Y Q, ZHANG N, WANG N, et al. Effects of planting density on photosynthetic characteristics and yield components of summer soybean [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2015, 29(7): 1386-1391.)

[4] 张晓艳, 杜吉到, 郑殿峰. 密度对大豆群体冠层结构及光合特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(4): 75-80. (ZHANG X Y, DU J D, ZHENG D F. Effects of density on canopy structure and photosynthetic characteristics of soybean population[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(4): 75-80.)

[5] 徐婷, 雍太文, 刘文钰, 等. 播期和密度对玉米-大豆套作模式下大豆植株、干物质积累及产量的影响[J]. 中国油料作物学报, 2014, 36(5): 593-601. (XU T, YONG T W, LIU W Y, et al. Effects of sowing time and density on soybean agronomic traits, dry matter accumulation and yield in maize-soybean relay strip intercropping system [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2014, 36(5): 593-601.)

[6] TAGLIAPIETRA E L, STRECK N A, ROCHA T S M, et al. Optimum leaf area index to reach soybean yield potential in subtropical environment[J]. Agronomy Journal, 2018, 110(3): 932-938.

[7] 田艺心, 高凤菊, 曹鹏鹏, 等. 播期对高蛋白大豆新品种(系)农艺性状、品质及产量的影响[J]. 核农学报, 2021, 35(8): 1900-1907. (TIAN Y X, GAO F J, CAO P P, et al. Effects of sowing date on agronomic characters, quality and yield of new high-protein soybean varieties (lines) [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2021, 35(8): 1900-1907.)

[8] 马尚宇, 王艳艳, 刘雅男, 等. 播期、播量和施氮量对小麦干物质积累、转运和分配及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2020, 28(3): 375-385. (MA S Y, WANG Y Y, LIU Y N, et al. Effect of sowing date, planting density, and nitrogen application on dry matter accumulation, transfer, distribution, and yield of wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(3): 375-385.)

[9] 李宁, 翟志席, 李建民, 等. 播期与密度组合对夏玉米群体源库关系及冠层透光率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(5): 959-964. (LI N, ZHAI Z X, LI J M, et al. Effect of sowing date and density on sink/source relationship and canopy light transmission of summer maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(5): 959-964.)

[10] 高永刚, 高明, 杨晓强, 等. 播期对大豆开花期和鼓粒期叶片光合特性及产量的影响[J]. 大豆科学, 2020, 39(2): 227-234. (GAO Y G, GAO M, YANG X Q, et al. Effects of sowing date on photosynthetic characteristics of leaves in flowering and bulking stage and yield of soybean[J]. Soybean Science, 2020, 39(2): 227-234.)

[11] 徐宗贵, 孙磊, 王浩, 等. 种植密度对旱地不同株型春玉米品种光合特性与产量的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(13): 2463-2475. (XU Z G, SUN L, WANG H, et al. Effects of different planting densities on photosynthetic characteristics and yield of different variety types of spring maize on dryland[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(13): 2463-2475.)

[12] 张永强, 张娜, 王娜, 等. 种植密度对北疆复播大豆光合特性及产量的影响[J]. 西北植物学报, 2015, 35(3): 571-578. (ZHANG Y Q, ZHANG N, WANG N, et al. Effects of planting density on photosynthetic characteristics and yield of summer soybean in North Xinjiang[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2015, 35(3): 571-578.)

[13] 冯锋, 战勇, 田志喜. 新疆地区发展大豆生产的可行性和初步建议[J]. 植物学报, 2020, 55(2): 199-204. (FENG F, ZHAN Y, TIAN Z X. The feasibility and recommendation for improving soybean production in Xinjiang[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2020, 55(2): 199-204.)

[14] FEHR W R, Caviness C E. Stage of soybean development[M]. Iowa: Iowa State University, 1977: 1-11.

[15] 苏本营, 宋艳霞, 陈圣宾, 等. 大豆幼苗对套作玉米遮荫环境的光合生理生态响应[J]. 生态学报, 2015, 35(10): 3298-3308. (SU B Y, SONG Y X, CHENG S B, et al. Photosynthetic responses of soybean (*Glycine max*) seedlings to shading caused by maize in an intercropping system[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(10): 3298-3308.)

[16] 刘剑丽, 宁海龙, 孙培乐, 等. 春大豆播期光温效应的研究[J]. 大豆科学, 2011, 30(3): 428-433. (LIU J L, NING H L, SUN P L, et al. Effect of light and temperature under different sowing date on spring soybean[J]. Soybean Science, 2011, 30(3): 428-433.)

[17] 杜亚敏, 高阳, 章建新. 播期对新疆高产春大豆产量和品质的影响[J]. 大豆科学, 2018, 37(1): 87-91. (DU Y M, GAO Y, ZHANG J X, et al. Effect of sowing date on yield and quality of high-yield spring soybean in Xinjiang[J]. Soybean Science, 2018, 37(1): 87-91.)

[18] 刘玉兰, 元明浩, 范文忠, 等. 播种期对吉林小粒大豆生育进程、产量及品质的影响[J]. 大豆科学, 2019, 38(4): 542-547. (LIU Y L, YUAN M H, FAN W Z, et al. Effects of sowing date on development process, yield and quality of *Glycine gracilis* in Jilin[J]. Soybean Science, 2019, 38(4): 542-547.)

[19] 崔亮, 苏本营, 杨峰, 等. 不同玉米-大豆带状套作组合条件下光合有效辐射强度分布特征对大豆光合特性和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(8): 1489-1501. (CUI L, SU B Y, YANG F, et al. Effects of photo-synthetically active radiation on photosynthetic characteristics and yield of soybean in different maize/soybean relay strip intercropping systems [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(8): 1489-1501.)

[20] 程彬, 刘卫国, 王莉, 等. 种植密度对玉米-大豆带状间作下大豆光合、产量及茎秆抗倒的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(19): 4084-4096. (CHENG B, LIU W G, WANG L, et al. Effects of planting density on photosynthetic characteristics, yield and stem lodging resistance of soybean in maize-soybean strip intercropping system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(19): 4084-4096.)

[21] 谢瑞娟, 张小晶, 刘金平, 等. 遮阴和干旱对苳草光合特性影响的协同作用[J]. 草业学报, 2017, 26(10): 64-76. (XIE R J, ZHANG X J, LIU J P, et al. Synergistic effects of shade and drought on the photosynthetic characteristics of *Arthraxon hispidus* [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(10): 64-76.)

[22] 刘昭霖, 宗毓铮, 张东升, 等. 大气 CO₂ 浓度和气温升高对大豆叶片光合特性及氮代谢的影响[J]. 中国农业气象, 2021, 42(5): 426-437. (LIU Z L, ZONG Y Z, ZHANG D S, et al. Effects of elevated atmospheric CO₂ concentration and increased air temperature on photosynthetic characteristics and nitrogen metabolism of soybean leaves [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2021, 42(5): 426-437.)

[23] 罗继, 代君梅, 杨虎, 等. 1971—2014 年新疆区域寒潮气候特征[J]. 干旱区研究, 2017, 34(2): 309-315. (LUO J, DAI J M, YANG H, et al. Climatic characteristics of regional cold wave in Xinjiang from 1971 to 2014[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(2): 309-315.)

[24] 杨继芝, 文涛, 王竹, 等. 播期对套作大豆幼苗生长与叶片光合性能的影响[J]. 作物杂志, 2008(5): 54-58. (YANG J Z, WENG T, WANG Z, et al. Effects of sowing date on seedling growth and leaf photosynthetic performance of intercropping soybean[J]. Crops, 2008(5): 54-58.)

[25] 郑盛华, 陈红琳, 朱孟琦, 等. 播期对川西平原直播稻光合特性和产量的影响[J]. 核农学报, 2019, 33(3): 574-582. (ZHENG S H, CHENG H L, ZHU M Q, et al. Effects of sowing date on photosynthetic characteristics and yield of direct seeding rice in western Sichuan plain[J]. Journal of Nuclear Agricultural

Sciences, 2019, 33(3): 574-582.)

[26] 李盛蓝, 谭婷婷, 范元芳, 等. 玉米荫蔽对大豆光合特性与叶脉、气孔特征的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(21): 3782-3793. (LI S L, TAN T T, FAN Y F, et al. Effects of maize shading on photosynthetic characteristics, vein and stomatal characteristics of soybean[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(21): 3782-3793.)

[27] 赵建华, 孙建好, 李伟绮. 玉米播期对大豆/玉米间作产量及种间竞争力的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(11): 1634-1642. (ZHAO J H, SUN J H, LI W Q, et al. Effects of maize sowing date on yield and interspecific competitiveness of soybean/maize intercropping [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(11): 1634-1642.)

[28] BIANCHI J S, QUIJANO A, GOSPARINI C O, et al. Changes in leaflet shape and seeds per pod modify crop growth parameters, canopy light environment, and yield components in soybean[J]. The Crop Journal, 2020, 8(2): 351-364.

[29] LIU E K, MEI X R, YAN C R, et al. Effects of water stress on photosynthetic characteristics, dry matter translocation and WUE in two winter wheat genotypes[J]. Agricultural Water Management, 2016, 167: 75-85.

[30] 邢志鹏, 曹伟伟, 钱海军, 等. 播期对不同类型机插稻产量及光合物质生产特性的影响[J]. 核农学报, 2015, 29(3): 528-537. (XING Z P, CAO W W, QIAN H J, et al. Effects of sowing date on yield and photosynthetic material production characteristics of different types of mechanical transplanting rice[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2015, 29(3): 528-537.)

[31] 李瑞东, 尹阳阳, 宋雯雯, 等. 增密对不同分枝类型大豆品种同化物积累和产量的影响[J]. 作物学报, 2022, 48(4): 942-951. (LI R D, YI Y Y, SONG W W, et al. Effects of close planting densities on assimilate accumulation and yield of soybean with different plant branching types[J]. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(4): 942-951.)

[32] 王畅, 赵海东, 冯乃杰, 等. 两个生态区大豆光热资源利用率和产量的差异及对化控剂的响应[J]. 应用生态学报, 2018, 29(11): 3615-3624. (WANG C, ZHAO H D, FENG N J, et al. Differences in light and heat utilization efficiency and yield of soybean in two ecological zones and their response to chemical control regulators[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(11): 3615-3624.)

[33] 王新兵, 侯海鹏, 马玮, 等. 不同生态区种植密度对大豆产量及产量构成的影响[J]. 作物杂志, 2013(5): 114-120. (WANG X B, HOU H P, MA W, et al. Effects of planting density on soybean yield and yield composition in different ecological zones[J]. Crops, 2013(5): 114-120.)

[34] 张素梅, 刘玉芹, 徐冉. 播种期和密度对大豆品种齐黄 34 产量的影响[J]. 作物杂志, 2016(2): 100-104. (ZHANG S M, LIU Y Q, XU R, et al. Effects of sowing date and density on yield of soybean Qihuang 34[J]. Crops, 2016(2): 100-104.)

[35] 许竹激, 雷俊, 邵晓伟, 等. 播期对鲜食春大豆衢春豆 1 号农艺性状和可溶性糖含量的影响[J]. 大豆科学, 2021, 40(4): 490-496. (XU Z W, LEI J, SHAO X W, et al. Effects of sowing date on agronomic traits and soluble sugar content of fresh spring soybean cultivar Quchundou 1[J]. Soybean Science, 2021, 40(4): 490-496.)

协 办 单 位

中国作物学会大豆专业委员会
东北农业大学大豆研究所
吉林省农业科学院大豆研究所
南京农业大学大豆研究所
辽宁省农业科学院作物研究所
河北省农林科学院粮油作物研究所