

# 种植密度对北疆复播大豆 光合特性及产量的影响

张永强<sup>1</sup>, 张 娜<sup>1</sup>, 王 娜<sup>2</sup>, 唐江华<sup>1</sup>, 李亚杰<sup>1</sup>, 徐文修<sup>1\*</sup>

(1 新疆农业大学 农学院, 乌鲁木齐 830052; 2 新疆伊犁伊宁县农业技术推广中心, 新疆伊犁 835100)

**摘 要:** 以大豆品种‘黑河 43’为材料, 于 2012 和 2013 年连续 2 年进行 5 种不同种植密度——37.5(A)、45.0(B)、52.5(C)、60.0(D)和 67.5 万株·hm<sup>-2</sup>(E)的田间复播试验, 研究滴灌条件下密度对大豆功能叶叶绿素值(SPAD)、叶面积指数(LAI)、比叶面积(SLA)、大豆光合特性及产量构成因素的影响。结果显示: (1) 密度对复播大豆苗期叶片 SPAD 值影响较小, 苗期之后处理间差异显著, 且整个生育期 SPAD 值均随着密度的增加而增大。(2) LAI 在 2 年试验中均随着密度的增加而增大, 均在鼓粒期左右达到峰值, 处理 E 在 2012 年和 2013 年的最大值分别为 6.24 和 5.56, 较同期最低的处理 A 分别显著提高 18.41% 和 36.17%; SLA 随着密度的增加而增大, 且在生长发育前期和后期处理间差异明显, 中期差异相对较小。(3) 叶片的净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )及气孔导度( $G_s$ )均随着密度的增加而先增后降, 且均以 C 处理最高,  $P_n$ 、 $G_s$  在结荚期达到极值, 而  $T_r$  在开花期最大; 胞间 CO<sub>2</sub> 浓度( $C_i$ )随着密度的增加呈现出先降后增的趋势, 2012 年和 2013 年均以 C 处理最低, 分别为 185.70 和 179.61  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。(4) 各处理 2 年的籽粒产量均以中等密度的 C 处理达最高, 2012 年和 2013 年分别为 3 205.0 和 3 142.53 kg·hm<sup>-2</sup>, 并分别比同年的其余处理显著高出 1.42%~14.26% 和 1.08%~27.65%。研究表明, 适宜密度的复播大豆不仅有较高的叶绿素含量, 有利于群体对光能的利用, 同时具有适宜的叶面积指数而不致植株郁闭, 有效保证了群体内部与外界的气体交换, 提高了光合速率和籽粒产量。

**关键词:** 北疆; 种植密度; 复播大豆; 光合特性; 产量

中图分类号: Q945.79

文献标志码: A

## Effects of Planting Density on Photosynthetic Characteristics and Yield of Summer Soybean in North Xinjiang

ZHANG Yongqiang<sup>1</sup>, ZHANG Na<sup>1</sup>, WANG Na<sup>2</sup>, TANG Jianghua<sup>1</sup>, LI Yajie<sup>1</sup>, XU Wenxiu<sup>1\*</sup>

(1 College of Agronomy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, 830052, China; 2 Center of Spreading Agricultural Techniques of Yining County, the City of Yili, Yili, Xinjiang 835100, China)

**Abstract:** The field trial was conducted by setting five different planting densities 37.5×10<sup>4</sup> (Treatment A, TA), 45.0×10<sup>4</sup> (Treatment B, TB), 52.5×10<sup>4</sup> (Treatment C, TC), 60.0×10<sup>4</sup> (Treatment D, TD) and 67.5×10<sup>4</sup> (Treatment E, TE) plants·hm<sup>-2</sup>, under drip irrigation by using of randomized block experimental design in 2012 and 2013 summer soybean(‘Heihe 43’) growing seasons, and the leaf SPAD, leaf area index (LAI), specific leaf area (SLA), photosynthetic characteristics and yield components of summer soybean were observed. The result showed that: (1) The leaf SPAD value of summer soybean was less affected by density in seedling stage, but had significant differences among different treatments after seedling stage and

收稿日期: 2014-09-07; 修改稿收到日期: 2015-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(31260312); 农业部公益性行业专项(201103001)

作者简介: 张永强(1988—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事绿洲高效农作制度。E-mail: zyk988@yeah.net

\* 通信作者: 徐文修, 教授, 博士、博士生导师, 主要从事农作制度与农业生态研究。E-mail: xjxwx@sina.com

increased with higher density in the whole growth period of summer soybean. (2) The LAI was also improved along with higher density in the two trials, and reached the highest in the seed filling period, and the maximum value of 2012 and 2013 in TE were 6.24 and 5.56, which was Significantly higher 18.41% and 36.17% than that of the lowest treatment TA at the same period. SLA increased with higher density, too, and had significant differences in the early and late growth stages while the difference was relatively small in middle growth stage. (3) The net photosynthetic rate ( $P_n$ ), transpiration rate ( $T_r$ ) and stomatal conductance ( $G_s$ ) were increased firstly then decreased with density increase.  $P_n$  and  $G_s$  reached maximum in the pod-filling period, but  $T_r$  reached maximum in the flowering period; intercellular  $CO_2$  concentration ( $C_i$ ) was first decreased and then increased with density increase, TC was the lowest both in 2012 and 2013, 185.70  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  and 179.61  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ , respectively. (4) Treatment C obtained the highest yield of 3 205.04  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (2012) and 3 142.53  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (2013), which was higher 1.42%–14.26% and 1.08%–27.65% in 2012 and 2013, respectively. Therefore, the summer soybean with optimum density was beneficial to light utilization for the high chlorophyll content, and the optimum LAI without plant canopy closure of suitable density ensured the gas exchange between internal and external, which improved the photosynthetic rate and yield.

**Key words:** North Xinjiang; planting density; summer soybean; photosynthetic characteristics; yield

光合作用是绿色植物通过叶绿体利用光能把二氧化碳和水转化成有机物,并释放出氧气的过程,它是直接决定作物产量高低的最重要因素<sup>[1-3]</sup>,而种植密度对大豆叶片光合特性具有重要影响。随着密度的增加,春大豆最大叶面积指数及光合势呈现增加的趋势<sup>[4]</sup>;合理密植大豆具有较好的冠层结构,较高的群体光能利用率和生产能力,从而获得较高产量<sup>[5]</sup>。同时,合理的种植密度对大豆叶片有效光截获具有重要影响<sup>[6-8]</sup>;大豆群体内光合有效辐射强度随着密度的增加呈递减的趋势,且高密度与低密度群体之间差异显著<sup>[9]</sup>;随着密度的增加,大豆叶面积指数呈上升趋势<sup>[10]</sup>,且叶面积指数在 3.5~4.0 之间有利于光能的截获和产量的提高<sup>[11]</sup>。张伟等<sup>[12]</sup>指出适宜的大豆种植密度不仅能协调好个体与群体之间生长的关系,而且还能充分发挥个体生产潜力,增加单位面积荚数、粒数和粒重,提高大豆产量。然而这些研究多集中在春大豆上,迄今对生育期较短的复播大豆的相关研究鲜有报道。

北疆小麦常年播种面积在  $6.51 \times 10^5 \text{ hm}^2$  左右,占全疆的 56.61%<sup>[13]</sup>,加之全球气温变暖,北疆地区秋季气温增高、初霜期有所推迟,使得小麦在 6 月底至 7 月初收获后仍有较为充足的光热资源<sup>[14]</sup>,这为复播大豆提供了广阔的空间。近年来,北疆复播大豆的栽培面积在  $3.33 \times 10^4 \text{ hm}^2$  左右<sup>[15]</sup>,麦后复播大豆不仅可以充分利用小麦收获后剩余的光、热、水、土资源,还能提高大豆总产,增加农民收入。另外,大豆秸秆还是优质的饲料来源,有利于当地畜牧养殖业的发展。虽然北疆麦-豆两熟种植模式已有不断扩大趋势,但目前对其相应的高产栽培的理

论研究尚显不足,仅限于栽培技术、生长发育及产量空间分布方面<sup>[15-18]</sup>,而有关复播大豆生理特性方面的研究较少。为此,本研究在滴灌条件下,设置 5 种植植密度,对复播大豆关键生育时期的叶绿素含量、光合特性及最终产量进行考察,以期为北疆地区麦收后复播大豆的推广筛选出适宜的种植密度,探讨北疆复播大豆获得高产的理论依据,为该地区复播大豆生产提供理论指导。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2012 年和 2013 年连续 2 年在新疆伊犁哈萨克自治州伊宁县农业科技示范园进行。该区位于天山西段,伊犁河谷中部,有喀什河、博尔博松河、布力开河、吉尔格朗河等河流。地理坐标为  $E81^\circ 13'40'' \sim 82^\circ 42'20''$ ,  $N43^\circ 35'10'' \sim 44^\circ 29'30''$  之间,属温带大陆性半干旱气候,冬春温暖湿润,夏秋干燥较热,昼夜温差明显,日照年平均可达 2 800~3 000 h,年平均气温 8.9  $^\circ\text{C}$ ,年均降水量 257 mm。全年无霜期 169~175 d。土壤耕层(0~20 cm)主要养分状况为:有机质 2.35  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,碱解氮 85.2  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效磷 21.8  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效钾 116  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,pH 值 8.4。

### 1.2 试验设计

试验采取单因素随机区组试验设计,共设置 37.5(A)、45.0(B)、52.5(C)、60.0(D)和 67.5(E)万株  $\cdot \text{hm}^{-2}$  5 种植植密度。每年均以小麦收获后及时播种(2012 年播期为 6 月 30 日,2013 年为 7 月 10 日),南北行向人工点播,30 cm 等行距,供试大豆

品种为‘黑河 43’。灌水方式为滴灌,滴灌带采用 1 管 2(一条滴灌带管 2 行大豆)的铺设方式。小区面积 28 m<sup>2</sup>(4 m×7 m),每个处理重复 3 次。各处理均基施尿素 225 kg·hm<sup>-2</sup>,磷酸二胺 150 kg·hm<sup>-2</sup>,开花期随水追施尿素 150 kg·hm<sup>-2</sup>,全生育期共滴水 5 次,共计 4 500 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>。其它田间管理措施同当地常规方式。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 叶绿素相对含量(SPAD 值) 从大豆的苗期开始,选择晴好无风天气,在 11:00~15:00 之间,用日本产手持便携式 SPAD-502 型叶绿素仪,在每个小区选 3 株代表性样株,夹取主茎上的倒 3 叶中间小叶片,测其 SPAD 值,每 15 d 测定 1 次,共测定 6 次。测量时避开叶脉,取叶片的底部、中部与顶部记录其平均值。

1.3.2 叶面积、叶面积指数和比叶面积 从大豆的苗期开始,各小区选取具有代表性的植株 3 株,用国产 WY-2000 叶面积仪测其单株叶面积(LA),并折算成叶面积指数(LAI),每 15 d 测定 1 次,共测定 6 次。在测定单株叶面积之后,将 3 株大豆的绿色叶片全部取下,装入纸袋,于 105 ℃杀青 30 min,80 ℃下烘干至恒重,称干重,并计算单株叶片生物量干重(m)。比叶面积(SLA)计算公式为:

$$SLA(\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}) = LA/m$$

式中,LA 为单株叶面积(cm<sup>2</sup>),m 为单株叶片生物量干重(g)。

1.3.3 光合气体交换参数 采用英国 PP Systems 公司产 CARIS-2 型便携式光合仪,分别在大豆的苗期、开花期、结荚期和鼓粒期选择晴天的 11:00~15:00 之间,在自然光条件下进行测定。各小区选

取大豆样本 3 株,测其主茎上的倒 3 叶中间小叶片的净光合速率(P<sub>n</sub>)、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度(C<sub>i</sub>)、蒸腾速率(T<sub>r</sub>)和气孔导度(G<sub>s</sub>)净光合速率。各生育时期的具体测定时间在 2012 年分别为 7 月 10 日、7 月 30 日、8 月 11 日、9 月 8 日,在 2013 年分别为 7 月 21 日、8 月 10 日、8 月 23 日、9 月 17 日。

1.3.4 籽粒产量 大豆成熟后实收小区产量,同时每处理每重复各选取有代表性植株 10 株进行考种,调查单株有效荚数、单株粒数、单株粒重和百粒重。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 作图,用 DPS 软件统计分析实验数据(LSD 法)。

2 结果与分析

2.1 种植密度对复播大豆主茎功能叶 SPAD 值的影响

叶绿素是作物吸收太阳光能进行光合作用的重要物质,在一定范围内,叶绿素含量越高,叶片光合作用就越强。叶片叶绿素含量与叶绿素仪所测定的 SPAD 值相关性非常高<sup>[19]</sup>,因此叶绿素仪读数可以直接反映叶绿素含量的高低。由图 1 可看出,不同种植密度复播大豆 2012 年和 2013 年全生育期的 SPAD 值变化趋势一致,均表现出随生育进程的推进呈“升-降-升-降”的波动上升变化趋势;各处理间每个生育时期内的 SPAD 值均基本表现为随密度增加而增大的规律,且均在鼓粒期左右达到峰值。进一步分析可知,随着生育进程的推进,处理间 SPAD 值差异幅度不同,2 年均在见花期(2012 年 7 月 25 日,2013 年 8 月 4 日)以前处理间差异较小,之后处理间差异逐渐增大;整个生育期高密度的 D、

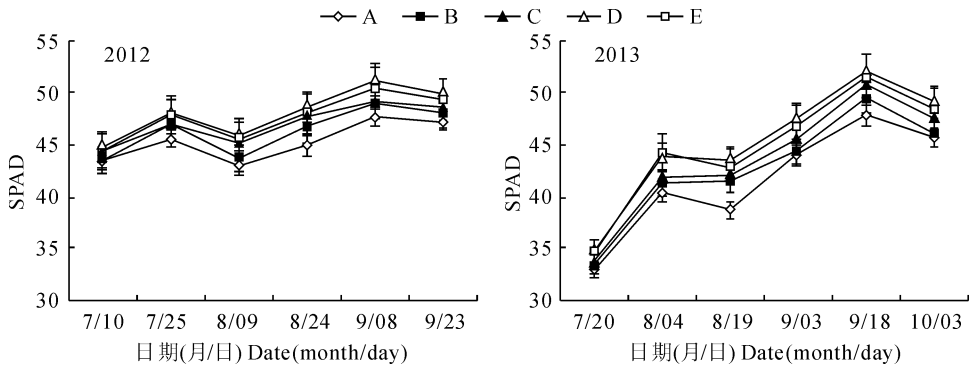


图 1 不同种植密度下复播大豆功能叶片 SPAD 值随生育期的变化

A~E 处理的密度分别为 37.5(A)、45.0(B)、52.5(C)、60.0(D)和 67.5(E)万株·hm<sup>-2</sup>;下同

Fig. 1 The leaf SPAD value of summer soybean with different planting densities during growth stages

The planting density of treatment A—E are 37.5(A), 45.0(B), 52.5(C), 60.0(D) and 67.5(E) plant(×10<sup>4</sup>) hm<sup>-2</sup>, respectively; The same as below

E 2 个处理的 SPAD 值均保持较高水平,尤其是在复播大豆生长后期 2 个处理均显著高于 A、B、C 3 个处理。说明在实际生产中,可以通过合理密植,有效控制大豆叶绿素含量,使之保持在合理的范围之内,从而增强其光合作用效率,达到增产的目的。

## 2.2 种植密度对复播大豆叶片特征的影响

**2.2.1 叶面积指数** 叶面积指数(LAI)是植物群体结构的重要量化指标<sup>[8]</sup>,能直接反映群体冠层的大小及郁闭程度,合理的 LAI 是植株充分利用光能、获得高产的重要条件。由图 2 可知,不同种植密度处理下的大豆 LAI 2 年的变化趋势一致,在各个生育时期始终表现为:处理 E>处理 D>处理 C>处理 B>处理 A,并均在鼓粒期左右达到峰值,2012 年和 2013 年的最大值分别为 6.24 和 5.56,均出现在最大密度处理 E( $67.5 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$ ),较同期最低处理 A 分别高出 18.41%和 36.17%。进一步对 2 年各处理大豆生长盛期的 LAI 累积并求平均值,均表现出随着密度的增加而增大的趋势。其中,2012 年和 2013 年的中等密度处理 C 的 LAI 分别为 4.98

和 4.35,比同年低密度的处理 A、处理 B 相应高出了 11.56%、6.47%和 23.91%、12.77%;比同年高密度的处理 D、处理 E 相应降低了 1.93%、5.32%和 5.95%、12.65%。LAI 越高,群体冠层郁闭程度越大,导致中下部的透光性越差,使中下部叶片处于光饱和点以下而呈半饥饿状态,不利于干物质及产量的形成;虽然低密度可有效避免因 LAI 过高而对群体中下部带来的不利,但密度过低将导致收获株数少也不利于高产。因此,协调个体与群体的以及群体之间的矛盾是提高大豆产量的关键,确定适合的种植密度是获得高产的有力保证。

**2.2.2 比叶面积** 比叶面积(SLA)表示单位干重的叶片面积,在一定程度上反映着叶片的厚度,其受光照、营养状况及叶龄等因素的影响。由图 3 知,2012 年和 2013 年不同种植密度条件下复播大豆的 SLA 变化趋势基本一致,均表现为随着密度的增加而增大。进一步分析可知,随着生育进程的推进处理间差异不同,在生长发育前期和生长发育后期处理间差异明显,在中期差异相对较小,尤其是低密度

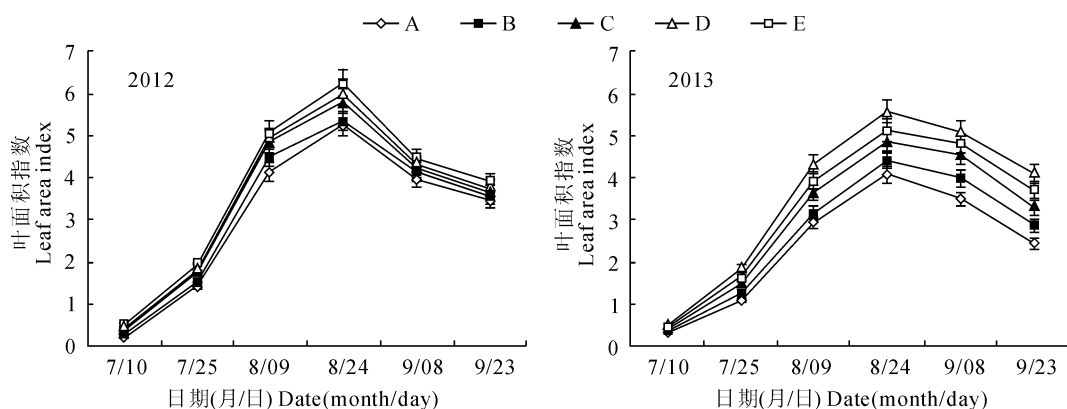


图 2 不同种植密度下复播大豆叶面积指数随生育期的变化

Fig. 2 The LAI of summer soybean with different planting densities during growth stages

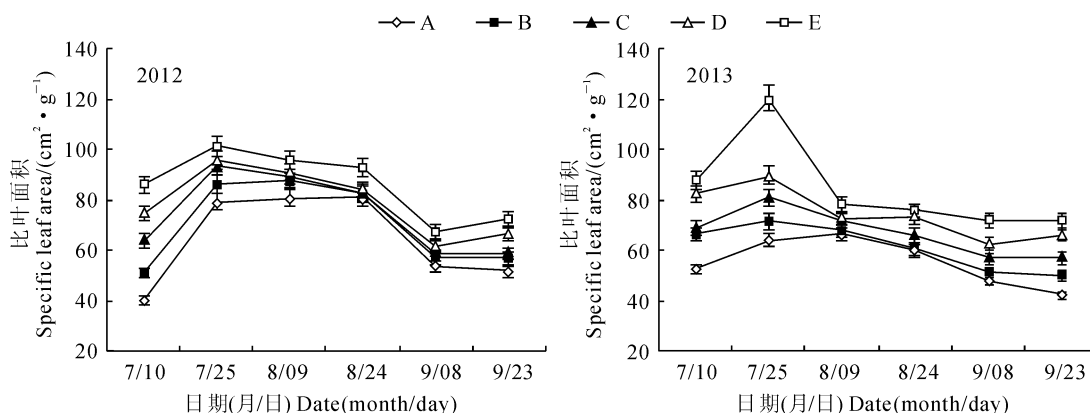


图 3 不同种植密度下复播大豆比叶面积随生育的变化

Fig. 3 The SLA of summer soybean with different planting densities during growth stages

处理间差异更小;但整个生育期内高密度处理的SLA一直保持较高水平,并与其他处理差异显著;整个生育期内SLA的累积平均值以E处理最高(2012年、2013年分别为85.73、84.05 cm<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>),分别比其余处理高出9.31%~33.56%和13.22%~51.34%,且均达到显著水平( $P<0.05$ )。由此可见,密度对复播大豆SLA的影响显著,密度越大单位干重的叶片面积越大、叶片越薄;说明密度越大,叶片间遮荫程度越大,导致叶片进行光合作用效率较弱、营养状况较差,不利于干物质的积累,进而影响SLA。

2.3 种植密度对复播大豆主茎功能叶片光合特性的影响

2.3.1 净光合速率和蒸腾速率 2012年和2013年试验数据(表1)显示,各密度处理复播大豆叶片净光合速率( $P_n$ )随生育期的推进均表现出先增加后降低的趋势,各处理均在结荚期达到最高值,然后有所降低;各生育时期内处理间比较而言,2年均以C处理最高。同时,各处理叶片 $P_n$ 平均值也以C处理最高,2012年和2013年分别达23.53和23.44  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,分别比当年处理A、B、D、E提高了9.37%、1.25%、4.94%、13.25%和11.62%、4.82%、7.17%、13.24%,且除处理B外均达显著性水平( $P<0.05$ )。说明只有在适宜种植密度条件下才能保证叶片具有较高的 $P_n$ ,为高产奠定基础。

同时,2年各种植密度复播大豆叶片蒸腾速率( $T_r$ )变化趋势与相应 $P_n$ 相似,但叶片 $T_r$ 于开花期达到最大值,比 $P_n$ 更早达到峰值。进一步分析可

知,各处理叶片 $T_r$ 随着密度增大而表现出先增后降的趋势;在整个测量期内,叶片 $T_r$ 平均值仍在C处理下最高,2012年和2013年分别为8.35和8.50  $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,分别较处理A、B、D、E显著增大了21.02%、15.16%、6.89%、25.26%和19.30%、14.35%、16.44%、26.39%( $P<0.05$ )。表明合理的种植密度可有效提高复播大豆叶片 $T_r$ ,这样不仅可促进大豆植株体内的物质循环与运输,同时也有利于CO<sub>2</sub>进入叶片中,从而提高了叶片光合速率。

2.3.2 气孔导度和胞间CO<sub>2</sub>浓度 气孔是叶片和外界环境进行CO<sub>2</sub>和水分交换的重要通道<sup>[20]</sup>,其行为与叶片的光合作用和蒸腾作用密切相关,是影响光合速率和物质生产能力的重要因素<sup>[21]</sup>。表2中2年试验数据显示,复播大豆叶片气孔导度( $G_s$ )均随着生育进程呈先增大后减小的趋势,各处理均在结荚期达到最大值。在整个测量期内,各处理 $G_s$ 累积平均值均以C处理最大,2012年和2013年分别为0.899和0.820  $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,分别较同年的处理A、B、D、E显著提高了24.30%、17.10%、4.80%、28.00%和31.33%、14.69%、7.89%、21.03%( $P<0.05$ )。在同一生育期内,复播大豆叶片 $G_s$ 均随着密度的增加而先升高后降低,且各时期均以C处理最高,充分说明种植密度对复播大豆的气孔导度影响显著,在实际生产中可合理控制种植密度来有效增大叶片气孔导度,增强气体交换能力。

另外,各种植密度下复播大豆叶片胞间CO<sub>2</sub>浓度( $C_i$ )均随着生育进程的推进表现出先降低后增加的趋势,于结荚期达到最低,且2年趋势相同;在各

表1 种植密度对复播大豆叶片净光合速率和蒸腾速率的影响  
Table 1 Effects of planting density on  $P_n$  and  $T_r$  of summer soybean

年份 Year	处理 Treatment	净光合速率 $P_n/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$				蒸腾速率 $T_r/(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$			
		苗期 Seedling stage	开花期 Flowering stage	结荚期 Podding stage	鼓粒期 Graining stage	苗期 Seedling stage	开花期 Flowering stage	结荚期 Podding stage	鼓粒期 Graining stage
2012	A	18.30b	23.30bc	24.01ab	20.40ab	7.10b	8.20bc	7.40a	6.80b
	B	20.10a	25.30ab	26.07ab	21.50a	7.60ab	8.40bc	7.90ab	7.10b
	C	20.30a	25.70a	26.50a	21.63a	8.40a	9.80a	9.20ab	8.30a
	D	19.70a	24.0abc	24.23ab	21.20a	7.8ab	9.40ab	8.60b	7.60ab
	E	17.89b	23.00c	22.93b	19.30b	6.90b	7.80c	7.20b	6.60b
2013	A	18.74c	22.37ab	23.45bc	19.42cd	6.80b	7.90b	7.20b	6.60bc
	B	19.33bc	23.16ab	24.63ab	22.31ab	7.40ab	8.20ab	7.90ab	7.00b
	C	20.87a	24.28a	25.44a	23.15a	8.00a	9.30a	8.80a	7.90a
	D	20.29ab	22.68ab	23.03c	21.47bc	7.60ab	8.00b	7.40b	6.20bc
	E	18.72c	21.29b	22.59c	20.18cd	6.70b	7.50b	6.80b	5.90c

注:同列不同字母表示处理间差异达到0.05显著水平;下同。  
Note: Different letters in the same column represented significant difference among treatments at the 0.05 level. The same as below.

生育时期内,各处理叶片  $C_i$  表现出随着密度的增加而先降低后增加的趋势,正好与上述  $G_s$  表现相反(表2)。在整个测量期内,2年各处理叶片  $C_i$  平均值均以C处理最低,分别为217.09(2012年)和219.323  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ (2013年),分别较处理A、B、D、E显著降低了16.80%、8.70%、6.50%、17.70%和17.67%、9.42%、7.51%、13.24%( $P < 0.05$ )。说明适宜密度条件下能够提高复播大豆叶片同化 $\text{CO}_2$ 的能力,可有效增加复播大豆植株生物量积累。

## 2.4 种植密度对复播大豆产量及产量构成的影响

表3显示,随着植密度增加,2年复播大豆籽粒产量表现出先升高后降低的趋势,并均以C处理(52.5万株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ )最高,且与其他各处理差异显著( $P < 0.05$ );2012年C处理产量分别较A、B、D、E处理显著提高了14.26%、4.09%、1.42%和

8.50%,2013年则分别显著提高了27.65%、12.71%、1.08%和6.36%;同时,2012年和2013年复播大豆产量( $y$ )对密度( $x$ )模拟方程分别为: $y = -1.2509x^2 + 138.353x - 619.55$ ( $R^2 = 0.9947$ , 2012)和 $y = -1.7137x^2 + 197.353x - 2553.57$ ( $R^2 = 0.9713$ , 2013),均为开口向下的抛物线;据此回归方程预测,当复播大豆密度分别为55.30万株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ (2012年)和57.58万株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ (2013年)时,籽粒产量分别达到最大值3206.00  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (2012年)和3128.32  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (2013年),与实际结果比较吻合(表3)。

另外,随着植密度增加,复播大豆产量构成因素单株荚数、单株粒数、百粒重均逐渐减小。其中,单株荚数、单株粒数均与密度呈显著负相关关系,2012和2013年相关系数分别为-0.98、-0.99和-0.97、-0.97,即密度增大能显著减少复播大豆的

表2 种植密度对复播大豆叶片气孔导度和胞间 $\text{CO}_2$ 浓度的影响

Table 2 Effects of planting density on  $G_s$  and  $C_i$  of summer soybean

年份 Year	处理 Treatment	气孔导度 $G_s / (\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$				胞间 $\text{CO}_2$ 浓度 $C_i / (\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$			
		苗期 Seeding stage	开花期 Flowering stage	结荚期 Podding stage	鼓粒期 Graining stage	苗期 Seeding stage	开花期 Flowering stage	结荚期 Podding stage	鼓粒期 Graining stage
2012	A	0.54b	0.73c	0.84c	0.75c	267.00ab	234.40a	214.00a	328.70a
	B	0.56ab	0.74bc	0.91bc	0.82bc	226.67b	206.60bc	208.83ab	309.20ab
	C	0.69a	0.88a	1.04ab	0.93a	210.67b	196.20c	185.70b	275.80bc
	D	0.64ab	0.84ab	1.01ab	0.89ab	233.17ab	213.10abc	197.17ab	285.40c
	E	0.53b	0.72c	0.80cl	0.73c	245.00ab	231.60ab	221.30a	356.90c
2013	A	0.46b	0.64c	0.73c	0.66b	254.18a	242.11a	204.74ab	331.29ab
	B	0.51ab	0.71bc	0.85bc	0.79a	237.22ab	213.82b	196.37abc	312.54bc
	C	0.63a	0.83a	0.98a	0.84a	209.13c	199.35b	179.61c	289.20c
	D	0.57ab	0.76ab	0.91ab	0.80a	230.60bc	209.88b	191.31bc	311.40bc
	E	0.49b	0.68bc	0.82bc	0.72ab	248.38ab	239.97a	218.45a	349.91a

表3 不同密度条件下复播大豆产量及产量构成因素

Table 3 Effects of planting density on yield and yield components of summer soybean

年份 Year	处理 Treatment	实际收获株数 Harvest number $/(10^4 \text{ plants} \cdot \text{hm}^{-2})$	单株荚数 Pods per plant	单株粒数 Seeds per plant	百粒重 100-seed weight/g	产量 Yield $/( \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} )$
2012	A	35.13	25.76a	48.13a	16.59a	2805.05e
	B	41.92	24.80a	45.68b	16.08a	3079.17c
	C	48.83	21.96b	41.10c	15.97a	3205.04a
	D	54.32	21.42b	36.66d	15.87ab	3160.32b
	E	60.82	19.60b	32.51e	15.31b	3027.18d
2013	A	35.23	22.27a	41.82a	16.71a	2461.92d
	B	42.15	21.25a	40.14a	16.48a	2788.25c
	C	49.87	20.15a	38.40b	16.41a	3142.53a
	D	55.12	18.97b	35.10c	16.07a	3109.08b
	E	61.03	16.09b	30.20d	16.03a	2954.50b

单株荚数、单株粒数,进而影响产量。百粒重虽然是大豆品种固有性质,但 2012 年复播大豆百粒重仍随着密度的增加而显著降低,究其原因可能是在大豆鼓粒至成熟期各处理发生了倒伏现象,而且倒伏程度随密度的增加而加重,大豆植株倒伏导致叶片间重叠而降低透光率,影响叶片正常进行光合作用,进而抑制了大豆籽粒形成,是导致百粒重降低的重要原因。虽然 2013 年百粒重仍随着密度的增加而降低,但处理间差异不显著。

### 3 讨 论

众所周知,密度是作物栽培试验的基础和起点,也是农业生产和相关学者研究的热点<sup>[18]</sup>,但不同的学者研究结果不尽不同。在密度对大豆叶绿素含量的影响方面,有随着密度的增加而降低的<sup>[22-23]</sup>,也有升高的<sup>[24]</sup>。而本研究结果表明,随着种植密度的增加,复播大豆的叶绿素含量表现出上升趋势。因此,密度对大豆叶绿素含量的影响还需进一步深究。叶绿素是光合作用中最重要的色素,与光合特性密切相关<sup>[25]</sup>,在一定范围内叶绿素含量越高,其光合作用越强<sup>[24]</sup>。本研究中 2012 年和 2013 年结果均表明,随着密度的增加,复播大豆的净光合速率、蒸腾速率及气孔导度均表现出先增后降的变化趋势,且均以中等密度的 C 处理表现最好;胞间 CO<sub>2</sub> 浓度则随着密度的增加呈现出先降后增的趋势。程伟燕等<sup>[22]</sup>认为大豆冠层光合速率随着密度的增加而降低;王昱等<sup>[26]</sup>报道,大豆生育前期光合速率、蒸腾速率随着密度的增大而降低,胞间 CO<sub>2</sub> 浓度随着密度的增加而降低,进入成熟期时光合速率、蒸腾速率则随着密度的增加而增大,气孔导度随着种植密度的增加而逐渐变小。然而于洪久<sup>[24]</sup>却认为,在中密度条件下大豆叶片净光合速率和蒸腾速率均表现最高。本研究结果与程伟燕等<sup>[22]</sup>、王昱等<sup>[26]</sup>结果均不

一致,而与于洪久<sup>[24]</sup>研究结果一致。

不同的种植密度对大豆群体结构的影响不同。本研究 2 年结果均表明,复播大豆随着种植密度增加,其全生育期的 LAI 也增大,这与前人研究结论一致<sup>[4,10]</sup>;但本研究中适宜密度下的 LAI 均比前人的 3.5~4.0 的结果高出很多<sup>[11]</sup>,这可能是由于复播大豆适宜密度远高于春大豆的所致。同时,种植密度对复播大豆的比叶面积(SLA)也影响显著,整个生育期内高密处理下 SLA 一直保持较高水平,并与其他处理差异显著;SLA 在生长发育前期和生长发育后期的处理间差异明显,而在中期差异较小。这也进一步反映出密度较大条件下,群体内部通风透光性能降低,导致复播大豆中下部光照强度不足,光合作用减弱,使得中下部叶片的光合产物降低,不利于产量提高。

高产一直是栽培工作者追求的目标,前人研究颇多,但种植密度主要通过影响产量构成因素而影响产量<sup>[27-29]</sup>,由于受地域以及品种的影响,不同的研究者得出的结论不同。本研究 2 年试验结果均表明,种植密度在 37.5~67.5 万株·hm<sup>-2</sup>之间时,复播大豆籽粒产量随着密度的增加呈现先增后降的趋势,并以中等密度(52.5 万株·hm<sup>-2</sup>)产量最高。

综上所述,种植密度对北疆复播大豆光合特性及产量均存在显著影响。北疆复播大豆的 SPAD、LAI 均随着其种植密度的增大而增加,但过高密度也降低了作物群体内部的通风透光性,从而减弱植株的光合作用效率,从而影响产量。本试验条件下,中密度处理(52.5 万株·hm<sup>-2</sup>)大豆不仅保持有较高的叶绿素含量,有利于大豆群体对光能的利用,同时适宜的 LAI 也不致植株郁闭,有效保证了大豆群体内部与外界的气体交换,提高了光合速率。因此,适宜的种植密度是提高复播大豆的籽粒产量的重要原因。

### 参考文献:

- [1] MORRISON M J, VOLDGEN H D, COBBER E R. Physiological changes from 58 years of genetics improvement of short-season soybean cultivars in Canada[J]. *Agronomy Journal*, 1999, 91: 685-689.
- [2] DU W G(杜维广), ZHANG G R(张桂茹), MAN W Q(满为群), et al. Study on relationship between soybean photosynthesis and yield [J]. *Soybean Science* (大豆科学), 1999, 18(2): 154-159 (in Chinese).
- [3] ZHU B G(朱保葛), BAI H X(柏惠侠), ZHANG Y(张艳), et al. Relationship between net photosynthetic rate, invertase activity of leaf and seed weight per plant of soybean strains[J]. *Soybean Science* (大豆科学), 2000, 19(4): 346-350 (in Chinese).
- [4] ZHANG J X(章建新), ZHAI Y L(翟云龙), XUE L H(薛丽华). Effect of planting density on growth tendency, dry matter accumulation and distribution in high yield spring soybean[J]. *Soybean Science* (大豆科学), 2006, 25(1): 1-5 (in Chinese).

- [5] DAI O H(戴函和). A correlation analysis on seed yield and its main formed factors of soybean[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*(安徽农业科学), 1981, (2): 58—61(in Chinese).
- [6] PURCELL L C, BALL R A, REAPER J D, *et al.* Radiation use and bio-mass production in soybean at different plant population densities[J]. *Crop Science*, 2002, 42: 172—177.
- [7] BOARD J E, HARVILLE B G. Growth dynamice during the vegetative period affects yield of narrow-row, late-planted soybean[J]. *Agronomy Journal*, 1996, 88: 575—579.
- [8] HAILE F J, HIGLEY L G, SPECHT J E. Soybean leaf morphology and defoliation tolerance[J]. *Agronomy Journal*, 1998, 90: 353—362.
- [9] DU J D(杜吉到), ZHANG X Y(张晓艳), LI J Y(李建英), *et al.* Density effect on microclimate characteristics of soybean population canopy and yield[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*(中国油料作物学报), 2010, 32(2): 245—251(in Chinese).
- [10] CHEN X H(陈新红), ZHANG J X(章建新), YAN X H(闫晓红), *et al.* Density experiment of soybean in the cold north region of Xinjiang[J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*(新疆农业大学学报), 2002, 25(1): 5—8(in Chinese).
- [11] WESTGATE M E. Managing soybeans for photosynthetic efficiency[C]//KAUFFMAN H E. World soybean research Proc. Chicago: Superior Print Champaign, IL, 1999: 223—228.
- [12] ZHANG W(张伟), ZHANG H J(张惠君), WANG H Y(王海英), *et al.* Effect of spacings and planting densities on agronomic traits yield in high-oil soybean[J]. *Soybean Science*(大豆科学), 2006, 25(3): 283—287(in Chinese).
- [13] Xinjiang Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2010.
- [14] 徐娇媚. Climate change in Ili River basin and its influence on agriculture[D]. Xinjiang Agricultural University, 2013.
- [15] ZHAN Y(战勇), LUO G T(罗康彤), LIU SH L(刘胜利), *et al.* Status and high efficiency culture techniques of summer soybean in North Xinjiang[J]. *Xinjiang Agricultural Science*(新疆农业科学), 2006, 43(5): 426—428(in Chinese).
- [16] WANG X Q(王秀琴). 麦茬复播大豆高产栽培技术[J]. *Xinjiang Agricultural Science and Technology*(新疆农业科技), 2009, (2): 20(in Chinese).
- [17] ZHANG Y Q(张永强), ZHANG N(张娜), TANG J H(唐江华), *et al.* Effects of planting density on yield and growth tendency of summer soybean in North Xinjiang[J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*(新疆农业大学学报), 2014, 37(1): 7—11(in Chinese).
- [18] ZHANG Y Q(张永强), ZHANG N(张娜), TANG J H(唐江华), *et al.* Effects of planting density on yield formation and tempo-spatial distribution of pod and seed of summer soybean in North Xinjiang[J]. *Soybean Science*(大豆科学), 2014, 33(2): 179—184(in Chinese).
- [19] AI T CH(艾天成), LI F M(李方敏), ZHOU ZH A(周治安), *et al.* Relationship between chlorophyll meter readings (SPAD readings) and chlorophyll content of crop leaves[J]. *Journal of Hubei Agricultural College*(湖北农学院学报), 2000, 20(1): 6—8(in Chinese).
- [20] WANG H X(王会肖), LIU G CH(刘昌明). Experimental study on crop photosynthesis, transpiration and high efficient water use[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2003, 14(10): 1 633—1 636(in Chinese).
- [21] DUAN R J(段瑞君), REN Y CH(任永成), XIONG H Y(熊辉岩). Study on the stomatal characteristics of flag leaves of high land barley at filling stage in Qinghai Province[J]. *Journal of Qinghai University*(Nat. Sci. Edi.)(青海大学学报·自然科学版), 2010, (4): 1—3(in Chinese).
- [22] CHENG W Y(程伟燕), LI ZH G(李志刚), LI R P(李瑞平). Effect of densities on photosynthetic characteristic and yield in soybean[J]. *Crops*(作物杂志), 2010, 4: 69—72(in Chinese).
- [23] ZHU H D(朱洪德), FENG L J(冯丽娟), YU H J(于洪久), *et al.* Effect of cultivation practice on photosynthetic and yield of high-oil soybean[J]. *Soybean Science*(大豆科学), 2008, 27(6): 966—972(in Chinese).
- [24] YU H J(于洪久). Effects of plant density on photosynthetic characteristics and yield of soybean[J]. *Soybean Science*(大豆科学), 2009, 28(6): 1 115—1 118(in Chinese).
- [25] LIU G J(刘广军), LI H N(李河南), CHENG L G(程利国), *et al.* QTL analysis for dynamic expression of chlorophyll content in soybean[J]. *Acta Agron Sin.*(作物学报), 2010, 36(2): 242—248(in Chinese).
- [26] WANG Y(王昱), FAN J Y(范杰英), WANG W(王玮), *et al.* Effect different density on the soybean physiological characteristics[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*(黑龙江农业科学), 2012, (8): 38—40(in Chinese).
- [27] JIAO H(焦浩), JI Y M(纪永民), ZHANG C L(张存岭). Effect of planting pattern and density on soybean yield and other traits[J]. *Crops*(作物杂志), 2008, (5): 56—59(in Chinese).
- [28] DONG Z(董钻). Studies on relationship of soybean stature, population structure and yield[J]. *Soybean Science*(大豆科学), 1986, 3(2): 110—120(in Chinese).
- [29] HE SH W(何世伟), CHANG SH H(常生华), WU D L(武得礼), *et al.* The effect of Glycine max sowing density on seeds yield and plant morphology[J]. *Acta Prataculturae Sinica*(草业科学), 2005, (5): 45—49(in Chinese).

(编辑:裴阿卫)