



株行配置对南疆复播大豆生长和产量的影响

吴 树^{1,2}, 冉新月¹, 黄兴军¹, 张 磊¹, 陈国栋¹, 吴全忠¹, 翟云龙¹

(1. 塔里木大学 农学院, 新疆 阿拉尔 843300; 2. 北大荒集团黑龙江泰来农场有限公司, 黑龙江 齐齐哈尔 162414)

摘 要:为研究适宜在南疆地区种植的复播大豆最佳株行配置, 采用不同株行配置对大豆品种绥农 35 进行田间试验, 设 3 种行距处理 15 cm (H1)、30 cm (H2)、45 cm (H3), 3 种密度处理 52.56 万株·hm⁻² (M1)、55 万株·hm⁻² (M2)、60 万株·hm⁻² (M3), 分析株行配置对复播大豆植株农艺性状、叶面积指数 (LAI)、光合势 (LAD) 和地上部干物质积累分配、产量构成因素及产量的影响。结果表明: 随着生育进程推进, 大豆株高、茎粗、主茎节数、叶形指数、LAI、LAD 和荚果干物质分配比例均逐渐增加, 茎干物质分配比例逐渐降低, 叶片干物质分配比例呈先上升后下降的趋势。H3 处理大豆株高与主茎节数最高, 分别达到 67.38 cm 和 12.7 节, M1 处理茎粗与叶形指数最高, 分别达到 0.64 cm 和 2.72。H1M3 处理在 R6~R8 期干物质积累最多, 且产量最高, 达到 6 155.8 kg·hm⁻², H3M2 处理产量最低, 达到 4 142.6 kg·hm⁻², H1M3 处理较 H3M2 处理产量高 48.6%, 说明 H1M3 处理对大豆产量促进效果最佳。结果说明在南疆地区复播种植绥农 35 适宜的株行配置为行距 15 cm、密度 60 万株·hm⁻²。

关键词:复播大豆; 南疆; 密度; 行距; 干物质积累量; 产量

Effects of Plant and Row Configuration on Growing and Yield of Multiple Planting Soybean in Southern Xinjiang

WU Shu^{1,2}, RAN Xin-yue¹, HUANG Xing-jun¹, ZHANG Lei¹, CHEN Guo-dong¹, WU Quan-zhong¹, ZHAI Yun-long¹

(1. College of Agriculture, Tarim University, Alar 843300, China; 2. Heilongjiang Tailai Farm Company Limiter of Beidahuang Group, Qiqihar 162414, China)

Abstract: In order to study the optimal plant and row arrangement of resowing soybean suitable for planting in southern Xinjiang, soybean cultivar Suinong 35, suitable for planting in southern Xinjiang, was tested in the field with three rows spacing treatments of 15 cm (H1), 30 cm (H2), and 45 cm (H3) and three density treatments of 525.6 thousand plants·ha⁻¹ (M1), 550 thousand plants·ha⁻¹ (M2), and 600 thousand plants·ha⁻¹ (M3) in order to study the best plant-row configuration of re-sowing soybean suitable for planting in southern Xinjiang. And we analyzed the effects of row and plant arrangement on agronomic characteristics of the plant, leaf area index (LAI), leaf area duration (LAD), accumulation and distribution of dry matter in shoot, yield components, and yield. The results showed that the plant height, stem diameter, main stem node number, leaf shape index, LAI, LAD, and dry matter distribution ratio of pod increased gradually, the dry matter distribution ratio of stem decreased gradually, while the dry matter distribution ratio of leaf increased firstly and then decreased. H3 treatment had the highest plant height and main stem nodes, reaching 67.38 cm and 12.7 nodes, respectively, while M1 treatment had the highest stem diameter and leaf shape index, reaching 0.64 cm and 2.72, respectively. The dry matter accumulation of H1M3 treatment was the highest at growing stage R6 to R8, and the yield was the highest, reaching 6 155.8 kg·ha⁻¹, while the yield of H3M2 treatment was the lowest, reaching 4 142.6 kg·ha⁻¹. The yield of H1M3 treatment was 48.6% higher than that of H3M2 treatment, indicating that H1M3 treatment had the best effect of improving soybean yield. The results showed that the suitable plant and row arrangement for replanting soybean in southern Xinjiang is plant space of 15 cm and 600 thousand plants·ha⁻¹.

Keywords: multiple planting soybean; southern Xinjiang; density; row space; dry matter accumulation; yield

大豆属于豆科一年生草本植物^[1], 是人们生活中重要植物油和植物蛋白原料, 同时也是食品、饲料等多种工业产品的优质原材料。目前我国种植的大豆为非转基因大豆, 与美国、阿根廷等国家种植的转基因大豆相比的优势是蛋白质含量高^[2]。但我国大豆产量远不及美洲大豆产量, 近年来, 据资料显示我国 2021 年进口大豆达到 9.65×10^7 t, 而

自给率不足 15%, 大豆缺口巨大, 进口量逐年提升。目前我国已成为世界上最大的大豆进口国, 我国大豆压榨企业大豆原料对外依存度超过 89%^[3-4]。因此, 提高大豆单产对满足我国工业生产与居民生活需求至关重要^[5]。

新疆地区日照时间长、平均温度高、光照强度大、昼夜温差大, 适宜大豆生长, 环境产量潜力高,

收稿日期: 2022-11-15

基金项目:新疆生产建设兵团重点领域科技攻关项目 (2019AB022); 新疆生产建设兵团南疆重点产业创新发展支撑计划项目 (2022DB015); 塔里木大学大学生创新创业项目 (202110757020)。

第一作者:吴树 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事作物高产理论与技术研究。E-mail: 1916835687@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。

具有很好的发展前景^[6-9]。目前新疆种植大豆主要以北疆的伊犁地区、喀什地区与南疆的和田地区、阿克苏地区为主,播种面积约为 7 万 hm²^[10-11]。但当地大豆种植技术相对落后,单产水平低、品质差、生产成本高,制约着大豆生产的发展。目前南疆地区多以平作耕种方式为主,主要大豆种植行距为 10~35 cm,密度为 20 万~25 万株·hm⁻²。适宜的株行距是作物获得高产的基础,在适宜密度下通过调整株行距改善群体结构,更好地协调个体、群体二者之间的关系,增强作物个体生产能力,使环境资源得到充足利用和转换,有利于充分发挥大豆品种的增产潜力,对提高群体产量有重要作用^[12-14]。前人对株行配置的研究较多,但在南疆地区关于大豆株行配置方面的研究进展鲜有报道。因此,基于新疆地区光温资源优势,研究株行距的变化对复播大豆生长和产量形成的影响,对提高新疆地区大豆产量具有重要实践意义。

本研究以大豆品种绥农 35 为材料,采用田间试验方式,探索株行配置对复播大豆生长发育与干物质积累的影响,筛选出产量最佳的株行配置,旨在探究适宜在南疆地区种植的最佳株行配置,为南疆大豆栽培应用提供理论依据与技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2021 年 6—10 月在新疆维吾尔自治区阿拉尔市塔里木大学农学试验站(81°17'57"E, 40°32'20"N)进行,试验区位于塔里木盆地北缘,属暖温带大陆性干旱荒漠区,日照时间长,海拔 1 015 m,无霜期 220 d。前茬作物为冬小麦。试验地势平坦,土壤质地为壤土,土壤有机质含量为 8.06 g·kg⁻¹,速效磷 19.6 mg·kg⁻¹,速效钾 117.6 mg·kg⁻¹,碱解氮 34.7 mg·kg⁻¹,pH7.8。

1.2 试验设计

供试大豆品种选用绥农 35,采用裂区试验设计,主区为行距处理(H),副区为密度处理(M)。小区长 4 m,宽 3 m,共 12 m²。设 3 个行距处理,分别为 15 cm(H3)、30 cm(H2)、45 cm(H1);设 3 个密度处理,分别为 52.56 万株·hm⁻²(M1)、55 万株·hm⁻²(M2)、60 万株·hm⁻²(M3)。共 9 个处理组合,3 次重复。

种子经过人工精选,剔除大粒、小粒、病虫粒和不完整粒,做到种粒大小尽量一致。于 6 月 29 日播种,10 月 7 日收获。大豆种植采用等行距条播,底肥施加有机肥 750 kg·hm⁻²,盛花期追肥施用复合肥 120 kg·hm⁻²、尿素 10 kg·hm⁻²、磷酸二氢钾 1.5 kg·hm⁻²,其它管理措施同大田一致。

1.3 测量项目及方法

1.3.1 干物质积累与分配 分别于大豆 V4、R2、R4、R6、R8 期在每个处理随机取 6 株具有代表性的植株,将植株分为茎、叶、荚 3 部分(V4 和 R2 期仅分茎、叶两部分,R8 期仅分茎、荚两部分)。分别装入信封,105℃杀青 30 min,80℃烘干至恒重,测定各部分干重,并计算单株干物质积累量。

1.3.2 叶面积指数与光合势 分别于大豆 V4、R2、R4、R6 期取各处理大豆 10 株,使用 Image J 软件计算叶片叶面积,并计算大豆叶面积指数(LAI)和光合势(LAD)。LAI=单株叶面积×单位土地面积上的大豆的株数/单位土地面积;LAD(m²·d)=[(L₁+L₂)/2]×(t₂-t₁)。式中,L₁、L₂分别为 t₁、t₂时间的叶面积。

1.3.3 农艺性状与产量 于大豆 R6 期测定倒三叶叶片的叶长、叶宽,叶形指数=叶长/叶宽,R8 期各小区取中间 2 行 1 m 行长实收计产。同时取 10 株具有代表性的植株进行考种,考种指标为株高、茎粗、主茎节数、单株荚数、单株粒数、单株粒重、百粒重。

1.4 数据分析

采用 Excel 2016 进行数据整理与作图,采用 DPS 7.05 对数据进行显著性差异分析,显著性水平为 α=0.05。

2 结果与分析

2.1 株行配置对复播大豆农艺性状的影响

不同行距与密度对大豆农艺性状影响的分析如表 1 所示,随着种植密度的增加,株高和主茎节数逐渐增加,茎粗和叶形指数逐渐降低。在不同行距处理条件下,株高和主茎节数均随着种植密度的增加逐渐增加,具体表现为 M3>M2>M1,其中,H2M3 处理大豆株高最高,H1M3 处理主茎节数最多,分别达到 67.38 cm 和 12.7 节,说明高密度处理最有利于大豆株高增加,有利于植株个体形态的建成。茎粗和叶形指数均随着密度的增加逐渐降低,具体表现为 M1>M2>M3,H1M1 处理茎粗最大,H3M1 处理叶形指数最大,分别达到 0.64 cm 和 2.72。增加行距,减小密度有利于叶形指数的增加,促进大豆植物形态的建成。

进一步分析不同行距和密度处理指标均值可知,茎粗与主茎节数行距处理均值均为 H1 处理最高,H2 处理次之,具体表现为 H1>H2>H3,株高与叶形指数行距处理均值分别为 H2 与 H3 处理最高。株高与主茎节数密度处理均值随着密度的增加逐渐增加,具体表现均为 M3>M2>M1,茎粗与叶形指数密度处理均值随着密度的增加逐渐降低,具体表现均为 M1>M2>M3。

表1 各处理大豆农艺性状分析

Table 1 Analysis on agronomic traits of soybean under different treatments

行距	密度	株高	茎粗	主茎节数	叶形指数
Row space	Density	Plant height/cm	Stem diameter/cm	Nodes number of main stem/个	Leaf shape index
H1	M1	57.23 ± 1.49 b	0.639 ± 0.03 a	10.60 ± 0.92 b	2.49 ± 0.3 a
	M2	58.80 ± 1.31 b	0.597 ± 0.01 ab	10.70 ± 0.73 b	2.44 ± 0.2 b
	M3	62.93 ± 1.89 a	0.587 ± 0.07 b	12.70 ± 0.4 a	2.34 ± 0.1 c
H2	M1	59.33 ± 2.55 b	0.557 ± 0.08 a	9.20 ± 1.04 b	2.64 ± 0.1 a
	M2	60.64 ± 1.54 b	0.537 ± 0.01 b	11.10 ± 0.36 a	2.61 ± 0.3 ab
	M3	67.38 ± 1.98 a	0.525 ± 0.09 b	12.10 ± 0.31 a	2.56 ± 0.2 b
H3	M1	47.45 ± 1.75 c	0.502 ± 0.01 a	9.20 ± 1.04 b	2.72 ± 0.5 a
	M2	55.87 ± 1.52 b	0.464 ± 0.02 ab	10.70 ± 0.79 ab	2.68 ± 0.2 b
	M3	62.83 ± 1.96 a	0.457 ± 0.02 b	11.80 ± 0.72 a	2.63 ± 0.2 c
行距平均	H1	59.65 ± 1.12 b	0.608 ± 0.02 a	11.30 ± 0.36 a	2.43 ± 0.1 b
Mean of row space	H2	62.45 ± 1.71 a	0.539 ± 0.06 b	10.80 ± 0.45 ab	2.60 ± 0.1 a
	H3	55.38 ± 1.10 c	0.474 ± 0.02 c	10.60 ± 0.42 b	2.68 ± 0.6 a
密度平均	M1	54.67 ± 1.35 c	0.566 ± 0.05 a	9.67 ± 0.97 c	2.62 ± 0.4 a
	M2	58.44 ± 1.74 b	0.533 ± 0.04 b	10.80 ± 0.62 b	2.57 ± 0.1 ab
	M3	64.38 ± 1.94 a	0.523 ± 0.07 b	12.20 ± 0.25 a	2.52 ± 0.1 b
Mean of density					

注:同种行距条件下不同密度处理小写字母表示差异达显著水平($P<0.05$)。下同。

Note:The lowercase of the same row spacing condition and different densities indicates significant difference ($P<0.05$). The same below.

2.2 株行配置对复播大豆叶面积指数的影响

如图1所示,各处理大豆 LAI 大致呈“倒 V”型曲线变化,可以看出随着生育进程的推进,LAI 逐渐增高,至 R6 期达到最大,在 R8 期 LAI 为 0,相应地大豆在 R8 期叶片变黄脱落。

不同行距处理条件下,各密度处理 LAI 均为 M2 > M3 > M1,说明 M2 处理对大豆 LAI 促进效果最好,在一定密度范围内,密度过高或过低对大豆 LAI 促进效果均不是最佳。在 H3 处理条件下,M1 处理为所有处理中 LAI 最低,M2 和 M3 处理均显著高于 M1 处理,分别达到 6.34 和 5.47,较 M1 处理分别高 56.08% 和 34.76%。说明 M1 处理大豆叶片较为肥硕,可能会不利于后期大豆产量的快速积累。

不同密度处理条件下,各行距处理表现均为 H2 > H3 > H1,其中在 M2 和 M3 处理条件下,H2 和 H3 处理均显著高于 H1 处理。在 M1 处理条件下,H2 处理最高,达到 5.51,并显著高于 H1 和 H3 处理,较 H1 和 H3 处理分别高 40.00% 和 35.65%。

进一步分析不同行距和密度处理 LAI 均值可知,各行距处理 LAI 均值表现为 H2 > H3 > H1,各密度处理 LAI 均值表现为 M2 > M3 > M1。其中行距处理条件下 H2 处理均值 LAI 最大,达到 5.94,密度处理条件下 M2 处理均值 LAI 最大,达到 5.78,H2 处理较 M2 处理高 0.16,说明不同行距处理较密度处理对大豆 LAI 的影响更大。

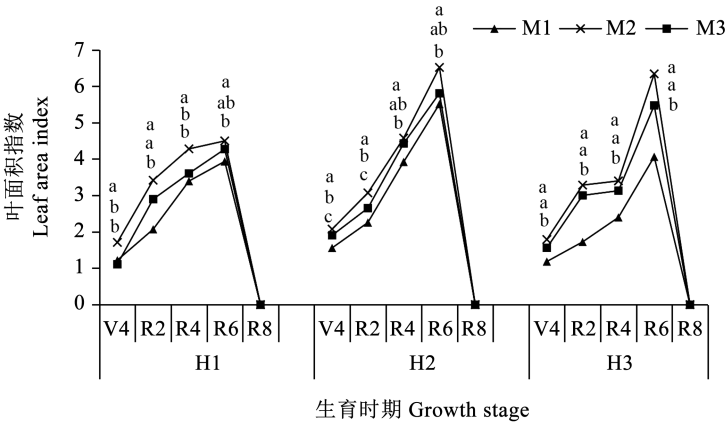


图1 各生育阶段不同处理大豆叶面积指数分析

Fig. 1 Analysis on LAI of soybean under different treatments at different growth stages

综上所述,不同的行距与密度处理对大豆叶片生长的促进效果不同,各处理大豆的 LAI 均存在差异,说明各处理大豆叶片的光合效率各有不同,其中 H2M2 处理大豆 LAI 最高,达到 6.52。一般来说 LAI 越高,作物对光能的利用效率就越好,但较高的 LAI 并不一定能够增加籽粒产量,还需要对其他各项指标进行综合分析。

2.3 株行配置对复播大豆光合势的影响

不同行距与密度处理各生育时期大豆 LAD 差异如图 2 所示,随着生育进程的推进,各处理大豆 LAD 变化速度呈上升趋势,R2~R4 期大豆 LAD 上升速率最快,R4~R6 期达到最大值。

在不同行距处理条件下,3 种密度处理在 V4 期、V4~R2 期的表现无较大差异,R2~R4 期各密度处理 LAD 显著增长,R4 期之后增长速度减慢,在 R4~R6 期时达到最大,且 3 种密度处理均为 M2 >

M3 > M1。其中,H2 处理条件下,M2 处理 LAD 达到最大值,为 83.19 m²·d,M2 与 M1 处理表现出显著差异,与 M3 处理差异不显著。在 H1 和 H3 处理条件下,M2 处理与 M1、M3 处理均达到显著差异。表明在 3 种处理条件下,M2 处理对促进大豆 LAD 保持较高水平效果最好,但在 H2 处理条件下,M3 处理下大豆也可以保持较高的 LAD。

在不同密度处理条件下,3 种行距处理在 V4 期、V4~R2 期表现基本一致,在 R2~R4 期各处理出现明显差异并快速增长,说明行距处理在 R2 期之前对夏大豆 LAD 影响效果不强,在 R2 期之后作用效果明显,R4~R6 期达到最大值。其中,3 种行距处理 LAD 均为 M2 最高。在 M1 处理条件下,3 种行距处理 LAD 表现为 H2 > H1 > H3,H2 处理分别较 H1 和 H3 处理分别高 28.68% 和 46.02%;在 M2 和 M3 处理条件下,3 种行距处理 LAD 表现为 H2 > H3 > H1。

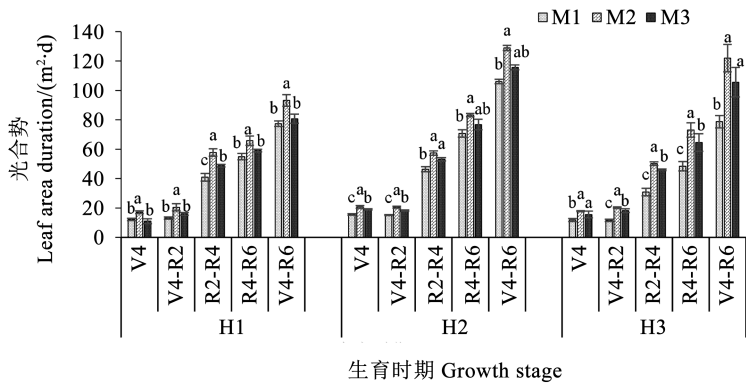


图2 各生育阶段不同处理大豆光合势分析

Fig.2 Analysis on LAD of soybean under different treatments at different growth stages

从整个生育时期阶段分析来看,在不同行距处理条件下,各密度处理大豆 LAD 表现均为 M2 > M3 > M1;在不同密度处理条件下,各行距处理大豆 LAD 表现均为 H2 > M3 > M1,其中 H2M2 处理大豆 LAD 最高,达到 128.86 m²·d,且 LAI 最高,说明 H2M2 处理大豆植株个体叶片空间分布最佳,光合作用最强。H1M1 处理大豆 LAD 最低,为 77.34 m²·d,可能因为行距缩小,大豆行间通风透光能力减弱,导致大豆生育后期叶片衰老加快。

2.4 株行配置对大豆干物质积累及分配的影响

2.4.1 大豆干物质积累 作物高产的基础是有较高的干物质积累量,大豆的干物质积累量及籽粒在其中的分配量直接决定着大豆产量的多少。对大豆不同行距与密度处理干物质积累量分析如图 3 所示,各处理大豆干物质积累量趋势基本一致,随着生育进程的推进,大豆干物质积累量逐渐增加,在 V4~R2 期大豆干物质增长缓慢,R2 期开始各处理大豆干物质积累量迅速增加,至 R8 期时达到峰值,

在不同行距处理下各处理干物质积累量表现均为 M1 > M3 > M2,表明 M1 处理大豆植株生长情况最佳。

在不同行距处理条件下,各密度处理在 V4 期大豆干物质基本一致,在 R2 期开始出现显著差异,在 R4 期 H1、H2 处理下,大豆干物质最高密度处理分别为 M2 与 M1 处理,分别达到 12.57 和 13.65 g。H3 处理条件下 3 种密度处理差异不大,可能因为 H3 处理行距最大,密度对其影响效果还不显著。在 R6 期各处理干物质积累量均显著增加,H1 处理条件下,3 种密度处理干物质积累量随着密度的增加大豆干物质积累量逐渐增加,具体表现为 M3 > M2 > M1。在 H2 处理条件下,M1 和 M3 处理均显著高于 M2 处理,且 M1 和 M3 处理均与 M2 处理达到显著差异水平。在 H3 处理条件下,M1 处理干物质积累量显著高于 M2 和 M3 处理,且与 M2 和 M3 处理均达到显著差异水平,达到 25.82 g,分别较 M2 和 M3 处理高 11.97% 和 10.45%。在 R8 期大豆干物

质积累量达到峰值,且各处理均达到显著差异水平,各处理均为 $M1 > M3 > M2$ 。其中 $H3M1$ 处理干物质积累量达到最高为 29.34 g, $H1M2$ 处理达到最低为 21.95 g, $H3M1$ 处理较 $H1M2$ 处理多 7.39 g,说明 $H3M1$ 处理对大豆生长效果最佳。

在不同密度处理条件下,在 V4 期各处理均无明显差异。在 R2 期各处理逐渐出现差异。在 R4 期, $M1$ 处理条件下,各行距处理大小表现为 $H2 > H1 > H3$ 。 $M2$ 处理条件下,随着行距的增加大豆干物质逐渐降低,具体表现为 $H1 > H2 > H3$ 。在 $M3$ 处理条件下,3 种行距处理之间均未达到显著差异

水平。在 R6 期,大豆干物质积累量快速增加,各密度处理条件下, $H2$ 和 $H3$ 处理均显著高于 $H1$ 处理,并 $H2$ 、 $H3$ 处理与 $H1$ 处理均达到显著差异水平。在 $M1$ 和 $M2$ 处理条件下,3 种行距处理随着行距的增加干物质积累量逐渐增加,具体表现为 $H3 > H2 > H1$,在 $M3$ 处理条件下,具体表现为 $H2 > H1 > H3$, $H2$ 和 $H3$ 处理分别达到 24.54 和 23.38 g,分别较 $H1$ 处理高 56.19% 和 48.82%。在 R8 期,各处理干物质积累量达到峰值,在不同密度处理条件下,随着行距的增加大豆干物质积累量逐渐增加,具体表现为 $H3 > H2 > H1$ 。

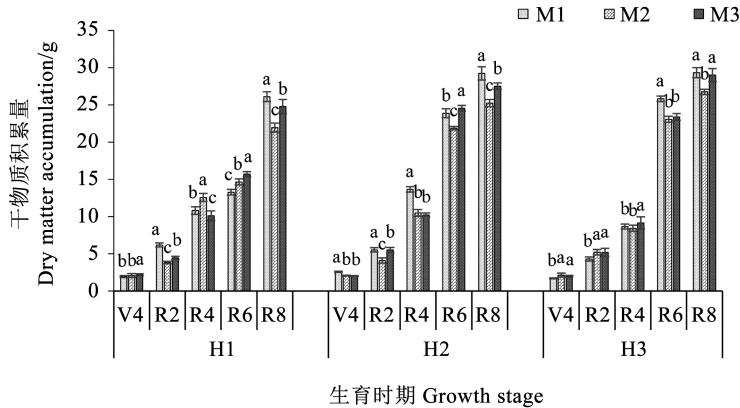


图3 各生育阶段不同处理大豆干物质积累分析

Fig.3 Analysis on dry matter accumulation of soybean under different treatments at different growth stages

进一步分析不同行距和密度处理 R8 期干物质积累量均值可知,随着行距的增加大豆干物质积累量逐渐增加,具体表现为 $H3 > H2 > H1$, $H3$ 处理分别达到 28.37,27.33 和 24.28 g。密度处理平均为 $M1$ 处理最高,达到 28.23 g, $M3$ 处理次之,达到 27.1 g, $H2$ 处理最低,具体表现为 $M1 > M3 > M2$, $M1$ 和 $M3$ 处理分别较 $M2$ 处理高 14.50% 和 9.93%。 $H3M1$ 、 $H2M1$ 和 $H3M3$ 处理为干物质积累量最高的 3 个处理组合,分别达到 29.34,29.24 和 29.02 g。说明 $H3M1$ 、 $H2M1$ 和 $H3M3$ 处理能显著增加干物质积累量,有助于大豆产量的增加。

2.4.2 大豆地上干物质器官分配 不同行距与密度处理大豆地上部各器官干物质分配如表 2 所示,随着生育进程的推进,大豆茎秆干物质分配占比逐渐降低,叶干物质分配占比呈先增高后降低的趋势,在 R2 期达到峰值,豆荚干物质分配占比呈持续上升趋势,在 R8 期达到峰值。在 V4 ~ R4 期,大豆干物质主要集中在叶片中,在 R2 期各处理叶片干物质占比均达到 50% 以上。R6 ~ R8 期大豆干物质主要集中在荚中,且 R8 期处理荚干物质占比达到 85% 以上。

分析茎秆干物质分配可知,在不同行距处理条件下,R8 期各密度处理均为 $M2$ 处理茎秆干物质分配占比最大。在 $H1$ 处理条件下, $M3$ 处理在 V4 ~ R4 期干物质占比最高,在 R6 ~ R8 期 $M2$ 处理干物质占比最高。在 $H2$ 处理条件下,在 V4 期 $M1$ 处理干物质占比最高,在 R2 ~ R8 期 $M2$ 处理干物质占比最高,说明 $M2$ 处理大豆茎秆生长最佳。在 $H3$ 处理条件下,V4 ~ R2 期 $M1$ 处理干物质占比最高,在 R4 期、R8 期大豆茎秆干物质占比为 $M2$ 处理最高。

分析叶片干物质分配可知,在 $H1$ 处理条件下,R2 ~ R4 期为 $M2$ 处理大豆叶片干物质分配占比最高,在 R6 期, $M1$ 处理叶片干物质分配占比最高,达到 30.93%。在 $H2$ 处理条件下,R6 期 $M2$ 处理叶片干物质分配占比最高,达到 23.83%,较 $M1$ 和 $M3$ 处理分别高 18.97% 和 24.11%。在 $H3$ 处理条件下,在 R4 期, $M3$ 处理叶片干物质分配占比最高,R2 期、R6 期均为 $M1$ 处理大豆叶片干物质分配占比最高。

分析荚干物质分配可知,在 R8 期均为 $M3$ 处理荚干物质分配占比最高,且均达到 88% 以上,说明 $M3$ 处理对大豆产量影响最大,对产量的提升最佳。

表 2 各生育阶段不同处理大豆地上部各器官干物质分配比率

Table 2 Dry matter distribution ratio in different organs above ground of soybean under different treatments at different growth stages

单位:%

行距 Row space	密度 Density	茎 Stem					叶 Leaf				荚 Pod		
		V4	R2	R4	R6	R8	V4	R2	R4	R6	R4	R6	R8
H1	M1	42.02	41.12	38.08	27.12	11.83	57.98	58.88	45.41	30.93	16.51	41.96	88.17
	M2	39.60	38.43	35.86	27.27	12.10	60.40	61.57	45.90	30.29	18.24	42.44	87.90
	M3	42.43	41.77	39.07	23.16	11.63	57.57	58.23	42.95	27.66	17.98	49.18	88.37
H2	M1	44.70	41.50	42.47	20.99	11.53	55.30	58.50	47.02	20.03	10.52	58.98	88.47
	M2	44.24	43.61	42.66	23.57	13.03	55.76	56.39	44.56	23.83	12.78	52.60	86.97
	M3	43.39	43.44	42.93	18.85	10.74	56.61	56.56	47.33	19.20	9.75	61.95	89.26
H3	M1	40.89	39.14	35.70	20.72	12.35	59.11	60.86	44.46	26.37	19.84	52.91	87.65
	M2	42.40	41.16	40.59	20.19	13.90	57.60	58.84	41.95	20.24	17.46	59.57	86.10
	M3	43.38	41.77	38.84	19.53	11.95	56.62	58.23	46.08	20.09	15.08	60.38	88.05
行距平均	H1	41.35	40.44	37.67	25.85	11.85	58.65	59.56	44.75	29.63	17.58	44.53	88.15
Mean of row space	H2	44.11	42.85	42.69	21.14	11.77	55.89	57.15	46.30	21.02	11.01	57.84	88.23
	H3	42.22	40.69	38.38	20.14	12.73	57.78	59.31	44.17	22.24	17.46	57.62	87.27
密度平均	M1	42.54	40.59	38.75	22.94	11.90	57.46	59.41	45.63	25.77	15.62	51.28	88.10
Mean of density	M2	42.08	41.06	39.71	23.68	13.01	57.92	58.94	44.14	24.79	16.16	51.53	86.99
	M3	43.07	42.33	40.28	20.51	11.44	56.93	57.67	45.45	22.32	14.27	57.17	88.56

进一步分析不同行距和密度处理荚果干物质分配量均值可知,行距处理在 R4 期 H1 处理平均荚果干物质分配占比最高,达到 17.58%,在 R6 期、R8 期 H2 处理平均荚干物质分配占比最高,说明 H2 处理更有利于提高各关键时期籽粒干重。不同密度处理,R4 期 M2 处理平均荚干物质分配占比最高,达到 16.16%,R6、R8 期 M3 处理均荚干物质分配占

比最高,分别达到 57.17% 和 88.56%。

2.5 株行配置对复播大豆产量及其构成的影响

由表 3 可知,不同行距与密度处理对大豆产量及其构成因素均产生不同程度的影响。不同行距和密度主要通过影响产量构成因素进而影响大豆产量,由于受大豆品种和生态环境等因素的影响,大豆产量不尽相同。

表 3 不同处理大豆的产量及其构成因素分析

Table 3 Analysis on yield and its components of soybean under different treatments

行距 Row space	密度 Density	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	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)
H1	M1	34.7 ± 0.2 b	80.0 ± 0.6 a	15.4 ± 0.8 a	18.6 ± 0.3 b	5650.0 ± 104.9 a
	M2	33.1 ± 0.4 c	67.0 ± 1.0 b	13.2 ± 0.4 b	18.1 ± 0.3 c	5074.3 ± 83.0 b
	M3	36.3 ± 0.5 a	81.2 ± 1.5 a	14.7 ± 0.5 a	19.7 ± 0.1 a	6155.8 ± 70.0 a
H2	M1	36.8 ± 0.3 b	81.4 ± 1.3 b	14.8 ± 0.3 a	19.2 ± 0.1 b	5440.1 ± 74.6 b
	M2	26.4 ± 0.3 c	59.3 ± 1.0 c	11.3 ± 0.5 b	18.7 ± 0.2 c	4350.5 ± 38.1 c
	M3	40.0 ± 0.6 a	85.0 ± 1.0 a	13.9 ± 0.7 a	19.7 ± 0.2 a	5850.6 ± 26.7 a
H3	M1	29.3 ± 0.5 a	68.6 ± 1.0 a	13.3 ± 0.1 a	19.7 ± 0.1 a	4886.0 ± 35.8 b
	M2	20.3 ± 0.4 b	55.7 ± 0.8 b	10.8 ± 0.4 b	19.4 ± 0.1 b	4142.6 ± 41.7 c
	M3	30.0 ± 0.7 a	70.0 ± 0.8 a	12.6 ± 0.6 a	19.9 ± 0.1 a	5283.6 ± 47.5 a
行距平均	H1	34.7 ± 0.4 a	76.0 ± 1.0 a	14.4 ± 0.7 a	18.8 ± 0.2 c	5626.7 ± 51.8 a
Mean of row space	H2	34.4 ± 0.5 a	75.3 ± 1.0 a	13.4 ± 0.6 ab	19.2 ± 0.2 b	5217.7 ± 65.7 b
	H3	26.6 ± 0.7 b	74.7 ± 0.8 b	12.2 ± 0.4 b	19.7 ± 0.1 a	4756.1 ± 62.2 c
密度平均	M1	33.6 ± 0.4 b	76.7 ± 0.9 b	14.5 ± 0.5 a	19.2 ± 0.2 b	5323.7 ± 34.6 b
Mean of density	M2	26.6 ± 0.5 c	60.6 ± 0.8 c	11.8 ± 0.5 b	18.7 ± 0.2 c	4522.5 ± 31.9 c
	M3	35.4 ± 0.7 a	78.7 ± 1.0 a	13.7 ± 0.7 a	19.7 ± 0.1 a	5763.3 ± 35.9 a
F	H	7.36 *	9.72 *	28.11 **	5.12	40.78 **
	M	7.68 *	23.90 **	45.94 **	7.54 *	82.25 **
	H × M	300.29 **	248.73 **	5.42 **	23.92 **	1.55 *

注:同行距条件下不同密度处理小写字母表示差异达显著水平($P < 0.05$)。* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平差异显著。

Note:The lowercase in the table under the same row spacing condition and different density treatments indicate the level of significant difference ($P < 0.05$). * and ** mean significant difference at 0.05 and 0.01 level, respectively.

在不同行距处理条件下,M2 处理产量及其构成因素均与 M1 和 M3 处理达到显著差异,且均为 3 种行距处理中最低。在 H1 处理条件下,M3 处理单株荚数、单株粒数、百粒重及产量均为最高,M1 处理次之,M1 处理单株粒重较 M3 处理高。在 H2 和 H3 处理条件下,3 种密度处理产量及其构成因素均为 M3 处理最高,M1 处理次之,具体表现为 $M3 > M1 > M2$ 。

H2M3 处理组合单株荚数和单株粒数为各处理最高,分别为 40 个和 85 粒,其中 H2M2 单株荚数最低,为 26.4 个,较 H2M3 少 13.6 个。H3M2 处理组合单株粒数最低,为 55.7 粒,较 H2M3 少 29.3 粒。H1M1 处理组合单株粒重最大,达到 15.4 g,H3M2 单株粒重最低,为 10.8 g。H3M3 处理组合百粒重最大,H1M2 百粒重最低,分别为 19.9 和 18.1 g。

各密度处理大豆产量均为 $M3 > M1 > M2$,说明高密度能够增加大豆产量。其中 H1M3 处理大豆产量最佳,达到 $6\,155.8\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。H2M3 次之,达到 $5\,850.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。说明 H1M3 和 H2M3 处理组合能显著增加大豆籽粒产量。

进一步分析不同行距和密度处理对大豆产量及其构成因素均值可知,随着行距的增加,大豆平均单株荚数、单株粒数、单株粒重及产量均值均逐渐降低,百粒重均值逐渐增加。H1 处理大豆产量为 $5\,626.7\text{ g}$,较 H2 和 H3 处理分别高 7.84% 和 18.30%。M3 处理大豆单株荚数、单株粒数、百粒重及产量均值最高,M1 处理次之,M2 处理最低,具体表现为 $M3 > M1 > M2$ 。M1 处理单株粒重均值最大,M3 处理次之,具体表现为 $M1 > M3 > M2$ 。M3 处理大豆产量均值为 $5\,763.3\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$,分别较 M1 和 M2 处理高 8.26% 和 27.44%。

根据差异显著性检测可以看出,不同行距处理单株荚数、单株粒数差异达到显著水平,单株粒重及产量差异达到极显著水平。不同密度处理单株荚数、百粒重差异达到显著水平,单株粒数、单株粒重及产量差异达到极显著水平。行距与密度互作条件下大豆各产量构成因素及产量的差异均达到极显著水平,说明行距与密度互作对大豆各产量构成因素均有显著影响。

3 讨论

合理的株行距配置对个体的良好发育和单产提高具有重要作用^[15]。在种植过程中株行距发生改变,群体结构也随之发生改变,植物个体间的相

互作用局限在一定的空间范围内^[16]。进行合理的株行距种植可以确保个体与群体协调发展,充分发挥群体优势,是提高植株产量的有效种植举措^[17]。研究表明不同株行配置对大豆农艺性状、光合特性、干物质积累产量均具有不同的影响^[18-21]。因此,选择适宜本地区大豆种植的最佳的株行配置是提高大豆产量的最佳栽培手段。

不同株行配置影响大豆的农艺性状,增加种植密度、缩小行距、扩大株距,构建合理的群体结构对于保证大豆群体产量有重要意义^[22,15]。张伟等^[23]和王文斌等^[24]研究表明,随着密度的增加,大豆株高逐渐增加,茎粗逐渐变小。本研究中各处理株高、主茎节数均随着种植密度的增加逐渐增加,具体表现为 $M3 > M2 > M1$,茎粗、叶形指数均随着密度的增加逐渐降低,具体表现为 $M1 > M2 > M3$,这与前人试验研究结果基本一致。结果说明高密度有利于大豆株高的生长,低密度有利于茎粗的生长,且降低密度叶片趋于狭长。

LAI 是反映冠层结构的叶片特征之一,适宜叶面积指数与生物产量和经济产量呈显著正相关^[25-26]。王海泉等^[26]和田艺心等^[27]研究表明,适当增大 LAI 与 LAD 有利于促进作物干物质的积累,增加大豆产量。本研究表明,各处理大豆 LAI 大致呈“倒 V”型曲线变化,随着生育进程的推进,LAI 逐渐增高,至 R6 期达到最大,在 R8 期 LAI 为 0,是由于大豆在 R8 期叶片变黄脱落所致。陈传信等^[28]研究表明,各处理均在结荚期至鼓粒期达到最大。本试验研究结果与上述结论基本一致,随着生育进程的推进,各处理大豆 LAD 变化呈上升趋势,R2 ~ R4 期大豆 LAD 上升速率最快,R4 ~ R6 期达到最大值。

干物质作为光合作用最终积累形成的产物,其积累与分配直接影响作物的经济产量^[29-30]。不同密度和行距配置对作物关键生育时期的地上生物量及各器官干物质分配均有显著影响^[31-32]。本研究表明,随着生育进程的推进,大豆干物质积累量逐渐增加,在 V4 ~ R2 期大豆干物质增长缓慢,R2 期开始各处理大豆干物质积累量迅速增加,至 R8 期时达到峰值。史云云等^[32]研究表明,R6 (鼓粒期)是大豆积累干物质最多的时期,大豆生长至成熟期时各营养器官干物质累积量逐渐减少,以叶片干物质减少最快,营养物质流向结实器官。任建锐^[33]研究表明,随着生育进程的推进,干物质的分配重心不断发生改变,在 V5 期前干物质集中分配

到叶进行光合作用,而 R2 期后大豆干物质分配重心向茎偏移,使茎的干物质占比在 R6 期之前一直保持领先,R6 期后大豆干物质分配重心开始向荚偏移,并持续到大豆完全成熟时。本研究也表明随着生育进程的推进,大豆茎秆干物质分配占比逐渐降低,叶干物质分配占比呈先增高后降低的趋势,在 R2 期达到峰值,豆荚干物质分配占比呈持续上升趋势,在 R8 期达到峰值。在 V4 ~ R4 期,大豆干物质主要集中在叶片中,R6 ~ R8 期大豆干物质主要集中在荚果中,且 R8 期处理荚果干物质占比达到 85% 以上。

在大豆生产过程中,合理的种植密度是大豆高产高质的有效栽培措施^[34]。作物产量的高低取决于种植密度、单株有效荚数、荚粒数及百粒重等因素,提高种植密度有利于提升大豆产量^[35-36]。盖志佳等^[37]通过大豆密植试验得出,15 cm 行距下密度为 37.18 万株·hm⁻²和 45 cm 行距下密度为 38 万株·hm²的大豆群体均可获得较高产量。本研究表明在不同密度处理条件下,M3 处理单株荚数、单株粒数、百粒重及产量均为最高,各密度处理大豆产量表现均为 M3 > M1 > M2。陈传信等^[38]研究表明,宽窄行种植大豆的各处理产量均高于等行距种植大豆的各处理产量,差异显著。本研究也表明行距平均处理随着行距的增加,大豆平均单株荚数、单株粒数、单株粒重及产量均逐渐降低,百粒重逐渐增加。H1M3 处理产量最高,达到 6 155.8 kg·hm⁻²,H2M3 次之,达到 5 850.6 kg·hm⁻²,说明 H1M3、H2M3 处理能显著增加大豆籽粒产量。

4 结论

随着生育进程的推进,大豆株高、茎粗、主茎节数、叶形指数、LAI、LAD、荚干物质分配比例均逐渐增加,茎干物质分配比例逐渐降低,叶片干物质分配比例先上升后下降。H2M2 处理大豆 LAI 和 LAD 均最高,分别达到 6.52 和 128.86 m²·d,H3M1 处理总干物质积累量达到最高为 29.34 g,在 R6 ~ R8 期,荚干物质在营养器官中最高,且 R8 期处理荚干物质占比达到 85% 以上,H1M1 和 H1M3 处理干物质积累量最多,分别达到 12.83 和 9.06 g。

随着密度的增加,大豆单株荚数、单株粒数、单株粒重、百粒重及产量均呈先降低后增加的趋势,其中

M3 处理单株荚数、单株粒数、百粒重及产量均为最高。在南疆地区复播种植大豆采用 52.56 万株·hm⁻²密度有利于干物质积累量的增加;55 万株·hm⁻²密度对大豆植株个体叶片空间分布最佳,对大豆光合作用效果最佳;60 万株·hm⁻²对大豆产量构成因素及产量提升效果最好。在 15 cm 行距下 60 万株·hm⁻²密度处理产量最高,达到 6 155.8 kg·hm⁻²,30 cm 行距下 60 万株·hm⁻²密度处理次之,达到 5 850.6 kg·hm⁻²,因此南疆地区种植复播大豆最适宜的株行配置为行距 15 cm、密度 60 万株·hm⁻²。

参考文献

[1] 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.)

[2] 翟涛,吴玲. 开放视角下中国大豆产业发展态势与振兴策略研究[J]. 大豆科学,2020,39(3): 472-478. (ZHAI T, WU L. Study on development situation and revitalization strategy of soybean industry in China from an open perspective[J]. Soybean Science, 2020, 39(3): 472-478.)

[3] 李奕聪,王新刚,司伟. 2022 年大豆产业发展趋势与政策建议[J]. 大豆科技,2022(1): 6-8. (LI Y C, WANG X G, SI W. Development trend and policy suggestions of soybean industry in 2022[J]. Soybean Science & Technology, 2022(1): 6-8.)

[4] 顾强,乙小娟,丁萍,等. 不同原产国大豆质量指标差异的研究[J]. 食品安全质量检测学报,2021,12(6): 2068-2072. (GU Q, YI X J, DING P, et al. Study on the differences of quality items of soybeans imported from different countries[J]. Journal of Food Safety and Quality,2021,12(6): 2068-2072.)

[5] 张玉梅,盛芳芳,陈志钢,等. 中美经贸协议对世界大豆产业的潜在影响分析—基于双边贸易模块的全球农产品局部均衡模型[J]. 农业技术经济,2021(4): 4-16. (ZHANG Y M, SHENG F F, CHEN Z G, et al. Potential impacts of Sino-US trade agreements on the world soybean [J]. Journal of Agrotechnical Economics,2021(4): 4-16.)

[6] 娄善伟,董合忠,田晓莉,等. 新疆棉花“矮、密、早”栽培历史、现状和展望[J]. 中国农业科学,2021,54(4): 720-732. (LOU S W, DONG H Z, TIAN X L, et al. The "short, dense and early" cultivation of cotton in Xinjiang: History, current situation and prospect [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(4): 720-732.)

[7] 袁辉,王建玲,远辉. 基于主成分分析和聚类分析对新疆红枣

的品质评价[J]. 食品工业,2020,41(9): 305-309. (YUAN H, WANG J L, YUAN H. Quality evaluation of Xinjiang jujube based on principal component analysis and cluster analysis [J]. The Food Industry,2020,41(9): 305-309.)

[8] 胥雅馨,徐玥,李玲,等. 接种根瘤菌对南疆春大豆结瘤和生长的影响[J]. 大豆科学,2021,40(1): 98-105. (XU Y X, XU Y, LI L, et al. Effects of rhizobia inoculation on nodulation and growth of spring soybean in Southern Xinjiang [J]. Soybean Science,2021,40(1): 98-105.)

[9] 张晓艳,郑殿峰,冯乃杰,等. 密度对大豆群体碳氮代谢相关指标及产量、品质的影响[J]. 干旱地区农业研究,2011,29(3): 128-132. (ZHANG X Y, ZHENG D F, FENG N J, et al. Effect of plant density on soybean carbon and nitrogen metabolism, yield and quality[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2011,29(3): 128-132.)

[10] 曾凯,张恒斌,陈李森,等. 68 份大豆品种资源在新疆灌区的农艺性状分析[J]. 中国油料作物学报,2017,39(5): 615-622. (ZENG K, ZHANG H B, CHEN L M, et al. Agronomic traits analysis of 68 soybean variety resources in Xinjiang irrigation area [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2017, 39 (5): 615-622.)

[11] 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.)

[12] ETHREDGE W J, ASHLEY D A, WOODRUFF J M. Row spacing and plant population effects on yield components of soybean[J]. Agronomy Journal,1989,81(6): 947-951.

[13] 周勋波,杨国敏,孙淑娟,等. 不同株行距配置对夏大豆群体结构及光截获的影响[J]. 生态学报,2010,30(3): 691-697. (ZHOU X B, YANG G M, SUN S J, et al. Effect of different plant-row spacing on population structure and PAR interception in summer soybean [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30 (3): 691-697.)

[14] 张旭丽,邢宝龙,王桂梅,等. 密度对晋北区大豆农艺性状、经济性状及产量的影响[J]. 作物杂志,2017(3): 127-131. (ZHANG X L, XING B L, WANG G M, et al. Effects of planting density on agronomic traits, economic traits and yield of soybean in North of Shanxi Province[J]. Crops,2017(3): 127-131.)

[15] 杨梦平,潘丽丽,张勇,等. 株距对不同株型大豆农艺性状及产量的影响[J]. 大豆科学,2017,36(3): 377-384. (YANG M P, PAN L L, ZHANG Y, et al. Effect of plant spacing on agronomic trait and yield of different plant type soybean [J]. Soybean Science,2017,36(3): 377-384.)

[16] BERGER U, PIOUS C, SCHIFFERS K, et al. Competition among plants: Concepts, individual-based modelling approaches, and a proposal for a future research strategy[J]. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics,2007,9(3): 121-135.

[17] 杨超,张民,赵团结,等. 不同施肥与密度对菜用大豆苏鲜豆 20 产量及相关农艺性状的影响[J]. 大豆科学,2012,31(5): 762-765, 770. (YANG C, ZHANG M, ZHAO T J, et al. Effect of different cultural factors on yield and agronomic traits of vegetable soybean [J]. Soybean Science, 2012, 31 (5): 762-765, 770.)

[18] 张永强,张娜,唐江华,等. 密度对北疆复播大豆荚粒时空分布及产量形成的影响[J]. 大豆科学, 2014,33(2): 179-183. (ZHANG Y Q, ZHANG N, TANG J H, 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, 2014,33(2): 179-183.)

[19] 张伟龙,张伟,张井勇,等. 父母本行比、行距配置对洮南地区杂交大豆制种产量的影响[J]. 大豆科学, 2013,32(2): 182-184. (ZHANG W L, ZHANG W, ZHANG J Y, et al. Effects of ratio between parental lines and spacing on seed yield of hybrid soybean in Taonan [J]. Soybean Science, 2013, 32 (2): 182-184.)

[20] 李洪杰,张小燕,赵晋铭,等. 不同密度与肥水处理对鲁黄 1 号大豆产量及农艺性状的影响[J]. 大豆科学, 2012,31(5): 753-756. (LI H J, ZHANG X Y, ZHAO J M, et al. Effects of planting density, fertilization and irrigation on yield and agronomic performance of soybean cv. Luhuang No. 1[J]. Soybean Science, 2012, 31(5): 753-756.)

[21] 张晓艳,李建英,郑殿峰,等. 不同密度下大豆单株和群体的光合特性[J]. 大豆科学, 2010, 29(4): 638-640, 644. (ZHANG X Y, LI J Y, ZHENG D F, et al. Photosynthetic characteristics of individual and population of soybean under different densities[J]. Soybean Science,2010,29(4): 638-640, 644.)

[22] 王程,刘兵,金剑,等. 密度对大豆农艺性状及产量构成因素空间分布特征的影响[J]. 大豆科学, 2008, 27(6): 936-942, 948. (WANG C, LIU B, JIN J, et al. Influences of planting density on agronomic traits and spatial distribution of yield components across main stem in soybean[J]. Soybean Science, 2008, 27(6): 936-942, 948.)

[23] 张伟,张惠君,王海英,等. 株行距和种植密度对高油大豆农艺性状及产量的影响[J]. 大豆科学, 2006, 25(3): 283-287. (ZHANG W, ZHANG H J, WANG H Y, et al. Effects of spacings and planting densities on agronomic traits and yield in high-oil soybeans [J]. Soybean Science, 2006, 25 (3): 283-287.)

[24] 王文斌,曹永强,闫春娟,等. 密度和植株配置对大豆主要农艺及生理性状的影响[J]. 大豆科学, 2014, 33(4): 502-506. (WANG W B, CAO Y Q, YAN C J, et al. Effects of plant density and distribution pattern on main agronomic and physiological characters in soybean[J]. Soybean Science, 2014, 33(4): 502-506.)

[25] 邵云,张杰,李春喜,等. 限氮条件下玉米、大豆、花生光能截获和干物质积累分析[J]. 大豆科学, 2021,40(3): 370-378. (SHAO Y, ZHANG J, LI C X, et al. Analysis of light interception and dry matter accumulation of maize, soybean and peanut under nitrogen restriction[J]. Soybean Science, 2021, 40(3): 370-378.)

[26] 王海泉, 陈怡, 满为群, 等. 大豆行间覆膜栽培技术增产效果及群体生理研究[J]. 大豆科学, 2007, 26(4): 538-543. (WANG H Q, CHEN Y, MAN W Q, et al. Effect of covering plastic film technique in furrow on yield and population physiology in soybean[J]. Soybean Science, 2007, 26(4): 538-543.)

[27] 田艺心,高凤菊,曹鹏鹏,等. 大豆叶面积指数、干物质积累分配与产量的关系[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2018,49(5): 750-754, 758. (TIAN Y X, GAO F J, CAO P P, et al. Relationship between leaf area index, dry matter accumulation distribution and yield of soybean[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2018, 49(5): 750-754, 758.)

[28] 陈传信,唐江华,王娜,等. 种植方式对北疆滴灌复播大豆植株生长及产量的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2016,39(6): 431-436. (CHAN C X, TANG J H, WANG N, et al. Effects of planting patterns on plant growth and yield of summer soybean in Northern Xinjiang[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2016, 39(6): 431-436.)

[29] 宋微微,杜吉到,郑殿峰,等. 大豆干物质积累、分配规律的研究进展[J]. 大豆科学, 2008,27(6): 1062-1066. (SONG W W, DU J D, ZHENG D F, et al. Research progress on dry matter accumulation and distribution rules of soybean population[J]. Soybean Science, 2008,27(6): 1062-1066.)

[30] 蒯婕,李真,汪波,等. 密度和行距配置对油菜苗期性状及产量形成的影响[J]. 中国农业科学, 2021,54(11): 2319-2332. (KUAI J, LI Z, WANG B, et al. Effects of density and row spacing on seedling traits of rapeseed and seed yield[J]. Scientia Agricultura Sinica,2021,54(11): 2319-2332.)

[31] 索荣臻,王明玖,王娜,等. 不同种植密度对饲用大豆品系 15 农艺性状及产量的影响[J]. 大豆科学, 2020, 39(1): 62-67. (SUO R Z, WANG M J, WANG N, et al. Effects of different planting densities on agronomic traits and yield of feeding soybean strain 15[J]. Soybean Science, 2020, 39(1): 62-67.)

[32] 史云云,张峰举,许兴,等. 增温对宁夏引黄灌区大豆氮磷钾养分吸收利用和产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2021,49(11): 32-37, 45. (SHI Y Y, ZHANG F J, XU X, et al. Effects of temperature increase on nitrogen, phosphorus and potassium nutrient uptake and yield of soybean in the Ningxia Yellow river irrigation area[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2021, 49(11): 32-37, 45.)

[33] 任建锐. 氮磷施肥对间作大豆物质积累及氮磷吸收利用的影响[D]. 成都: 四川农业大学,2019. (REN J R. Effects of combined application of nitrogen and phosphorus on material accumulation and absorption and utilization of nitrogen and phosphorus in intercropping soybean [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2019.)

[34] CARPENTER A C, BOARD J E. Growth dynamic factors controlling soybean yield stability across plant populations[J]. Crop Science,1997,37(5): 1520-1526.

[35] 刘铁东. 不同种植方式对玉米光截获及光合特性的影响[D]. 北京: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2012. (LIU T D. Light interception and photosynthesis of two cultivars maize response to three planting patterns [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences(Northeast Institute of Geography), 2012.)

[36] 李挺,牛春丽,杨超,等. 密度对大豆中黄 13 性状及产量的影响[J]. 安徽农业科学,2005,33(4): 573-574. (LI T, NIU C L, YANG C, et al. Effects of density on characters and yield of soybean Zhonghuang 13 [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2005,33(4): 573-574.)

[37] 盖志佳,赵文军,杜佳兴,等. 行距和密度对半矮秆大豆‘合农 76’产量及品质的影响[J]. 农学学报,2017,7(11): 1-5. (GAI Z J, ZHAO W J, DU J X, et al. Row spacing and density: Effects on yield and quality of semi-dwarf soybean variety ‘Henong 76’ [J]. Journal of Agriculture, 2017, 7(11): 1-5.)

[38] 陈传信,唐江华,陈佳君,等. 种植方式对夏大豆鼓粒期叶片光合能力及籽粒灌浆特性的影响[J]. 干旱地区农业研究,2018, 36(3): 101-105. (CHEN C X, TANG J H, CHEN J J, et al. Effect of planting patterns on photosynthetic capacity and grain filling characteristics of summer soybean at seed-filling stage[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2018,36(3): 101-105.)