



不同种植密度对四川大豆农艺性状及产量的影响

梁建秋, 安建刚, 王 嘉, 曾召琼, 杨文英, 吴海英, 张明荣, 于晓波

(南充市农业科学院/国家大豆产业技术体系南充综合试验站, 四川 南充 637000)

摘要:为确定不同大豆品种在四川的适宜种植密度, 以便为高产栽培技术提供理论依据, 本研究以油 6019、南夏豆 35、南夏豆 38、南农 99-6 大豆品种为试验材料, 设置 20 万、25 万、31.25 万株·hm⁻² 共 3 个种植密度, 研究不同种植密度对大豆主要农艺性状、产量和产量构成因素的影响。结果表明: 随着种植密度增加, 各品种的株高、底荚高、平均节间长和倒伏率逐渐升高, 成活植株率、有效分枝数、单株有效荚、单株粒数和单株粒重逐渐降低, 而主茎节数和百粒重变化不明显; 但随着种植密度增加, 各品种产量变化趋势及最高产量的适宜密度有所区别, 油 6019、南夏豆 35、南农 99-6 的产量随着密度增加而先增加后降低, 均在密度为 25 万株·hm⁻² 时产量最高, 分别为 3 049、2 754 和 3 182 kg·hm⁻², 而品种南夏豆 38 产量随着密度增加而逐渐降低, 在 20 万株·hm⁻² 时产量最高, 为 2 985 kg·hm⁻²。由此可见, 品种油 6019、南夏豆 35 和南农 99-6 在四川的适宜种植密度为 25 万株·hm⁻², 南夏豆 38 为 20 万株·hm⁻²。

关键词:大豆; 种植密度; 农艺性状; 倒伏率; 产量

Effects of Different Planting Densities on Agronomic Traits and Yield of Soybean in Sichuan

LIANG Jian-qiu, AN Jian-gang, WANG Jia, ZENG Zhao-qiong, YANG Wen-ying, WU Hai-ying, ZHANG Ming-rong, YU Xiao-bo

(Nanchong Academy of Agricultural Sciences/Nanchong Comprehensive Experimental Station of National Soybean Industry Technology System, Nanchong 637000, China)

Abstract: In order to determine the suitable planting density of different soybean varieties and provide theoretical basis for high-yield cultivation techniques in Sichuan, four soybean varieties including You 6019, Nanxiadou 35, Nanxiadou 38 and Nannong 99-6 were used as experimental materials, three planting densities (200, 250, 312.5 thousand plants·ha⁻¹) were set up to study its effects on the main agronomic traits, yield and yield components of soybean varieties. The results showed that with the increase of planting density, the plant height, bottom pod height, average internode length and lodging rate increased, the survival plant rate, effective branches, pods number, seeds and seed weight per plant decreased, while the number of main stem nodes and the 100-seed weight were not changed obviously. With the increase of planting density, the yield change trends of different varieties was different. The yield of You 6019, Nanxiadou 35, Nannong 99-6 increased firstly and then decreased and reached the highest yield 3 049, 2 754 and 3 182 kg·ha⁻¹ respectively under the planting density of 250 thousand plants·ha⁻¹. The yield of Nanxiadou 38 decreased all the time and reached the highest yield 2 985 kg·ha⁻¹ under the planting density of 200 thousand plants·ha⁻¹. The results indicated that the suitable planting density in Sichuan of You 6019, Nanxiadou 35 and Nannong 99-6 were all 250 thousand plants·ha⁻¹, and the suitable planting density of Nanxiadou 38 was 200 thousand plants·ha⁻¹.

Keywords: Soybean; Planting density; Agronomic characters; Lodging rate; Yield

大豆是我国重要的植物蛋白来源和主要的油料作物, 在日常生活中有不可替代的作用。但我国大豆的单产较国际先进水平仍有较大差距^[1], 近年来国内对大豆供需矛盾突出, 2017 年我国大豆进口额高达 9 554 万 t, 进口量创历史最高记录, 进口依存度超过 87%^[2]。为缓解供求矛盾, 提高国内大豆单产水平是重要的途径之一^[3]。

种植密度是决定作物产量的重要因子, 增加群体密度成为近年来提高作物群体产量的关键栽培

措施^[4-7]。大豆单位面积产量受群体密度和单株产量共同制约, 不同的群体密度对大豆个体的生长、发育和产量影响较大, 密度过高会限制个体的生长发育, 造成单株产量下降, 密度过低虽能提高单株生产力, 但群体产量受群体数量限制, 因此只有适宜密度才能获得高产^[8]。合理的种植密度有利于打造良好的群体冠层结构^[9], 协调个体与群体的关系, 实现大豆群体对环境资源的高效利用^[10-12], 充分发挥出品种的高产潜力, 从而充分提

收稿日期: 2021-04-06

基金项目: 四川省大豆育种攻关项目(2021YFYZ0018); 国家现代农业产业技术体系(CARS-04-CES25); 现代农业产业技术体系四川豆类杂粮创新团队(SCCXTD-2021-20); 国家重点研发计划(2017YFD0101500)。

第一作者: 梁建秋(1983—), 女, 硕士, 副研究员, 主要从事大豆遗传育种研究。E-mail: liangjianqiu142@163.com。

通讯作者: 于晓波(1985—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事大豆遗传育种与栽培研究。E-mail: bo0524@163.com。

高群体产量。大豆作为密播作物,对群体密度具有一定的自我调节能力,不同类型品种对地理环境及种植密度的响应存在差异^[13-16],因此探索特定品种在种植区域的适宜种植密度对提高群体产量具有重要意义。

四川地形复杂,东部以丘陵和盆地为主,常年雨水较多,光照弱。本研究选用生育期、株高、叶形及结荚习性等性状存在明显差异的代表性大豆品种为试验材料,通过比较其在四川不同种植密度下的农艺性状和产量,明确不同特性品种在各密度下的产量限制因素,筛选它们在四川丘陵地区的适宜种植密度,为四川丘陵地区大豆高产栽培提供理论

依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

国家大豆产业技术体系南充综合试验站于2017年对来自中国农业科学院油料作物研究所、南京农业大学以及南充市农业科学院的大豆品种(系)共计47份,在南充进行净作品比试验,根据田间观察及考种结果从中选取了生育期、叶形和株高等性状存在明显差异的品种油6019、南农99-6、南夏豆35和南夏豆38作为试验材料,各品种的特征及来源详见表1。

表1 参试材料

Table 1 Soybean varieties (lines) used in this experiment

品种(系)	株高	叶形	叶片大小	结荚习性	分枝数	全生育期	来源
Variety (line)	Plant height/cm	Leaf shape	Leaf size	Podding habit	Branch number	Whole growth period/d	Origin
油6019	48.8	椭圆	小	有限	3.6	98	中国农业科学院油料作物研究所
You 6019		Oval	Small	Determinate			Oil Crops Research Institute of Chinese Academy of Agriculture Science
南夏豆35	71.8	椭圆	大	有限	1.8	110	南充市农业科学院
Nanxiadou 35		Oval	Big	Determinate			Nanchong Academy of Agriculture Science
南夏豆38	82.9	椭圆	大	有限	2.4	126	南京农业大学
Nanxiadou 38		Oval	Big	Determinate			
南农99-6	90.1	披针	中等	亚有限	0.9	125	Nanjing Agricultural University
Nannong 99-6		Lanceolate	Medium	Sub-indeterminate			

1.2 试验地概况

试验于2018和2019年在西充区青狮镇试验示范基地(31°7'54"N,105°48'47"E)进行,海拔407 m。地势平坦、排灌条件好,紫色壤土,地力较均匀,土壤耕层基础肥力为:有机质16.5 g·kg⁻¹、全氮2.37 g·kg⁻¹、全磷0.98 g·kg⁻¹、全钾25.4 g·kg⁻¹、速效氮155.4 mg·kg⁻¹、速效磷71.6 mg·kg⁻¹和速效钾121.34 mg·kg⁻¹。试验地前茬作物为小麦,小麦收获后,机械灭茬、整地和开沟。

1.3 试验设计

试验采用二因素裂区设计,主区为品种(V),分别为油6019(V1)、南夏豆35(V2)、南夏豆38(V3)和南农99-6(V4);副区为种植密度(D),分别为低密度(D1):行距50 cm、株距10 cm、密度20万株·hm⁻²(此密度为四川生态区夏播大豆常规种植密度);中密度(D2):行距40 cm、株距10 cm、密

度25万株·hm⁻²;高密度(D3):行距40 cm、株距8 cm、密度31.25万株·hm⁻²。小区长4.4 m,宽4 m,面积17.6 m²,3次重复,随机排列。大豆均在6月中旬播种,三叶期按照试验设计进行间苗和补苗。其它田间管理按常规进行。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 田间记载 田间按Fehr等^[17]的大豆生育期分期标准详细记载大豆播种期、出苗期(VE)、始花期(R1)和完熟期(R8),成熟期统计各小区实际存活的植株数和倒伏植株数。计算各品种的营养生长期、生殖生长期、全生育期、成活植株率和倒伏率(参照国家区域试验标准)。

营养生长期:出苗到开花的天数;生殖生长期:开花到成熟的天数;全生育期:出苗到成熟的天数;成活植株率(%)=每小区存活植株数/田间设置株数×100;倒伏率(%)=小区倒伏植株数/小区总株

数 × 100。

1.4.2 室内考种 大豆成熟后从每小区连续取样 20 株,考察株高、底荚高、主茎节数和有效分枝等形态指标及单株有效荚数、单株粒数、单株粒重和百粒重等产量指标。

1.4.3 小区产量 大豆成熟后,分品种分小区单独全区收获、脱粒和晾晒,在大豆水分含量低于 13% 时称重。

1.5 数据分析

用 SPSS 22.0 及 Excel 2013 软件处理数据,用 Duncan's 新复极差 (SSR) 法检验显著性。

表 2 不同种植密度对大豆各生育期的影响

Table 2 The effects of different planting densities on each growth stage days of soybean

单位:d

品种 Variety	密度 Density	2018			2019		
		营养生长期 Vegetative period	生殖生长期 Reproductive period	全生育期 Whole growth period	营养生长期 Vegetative period	生殖生长期 Reproductive period	全生育期 Whole growth period
V1	D1	35	63	98	36	64	100
	D2	36	62	98	37	64	101
	D3	35	62	97	36	63	99
V2	D1	44	66	111	42	67	109
	D2	45	66	111	43	67	110
	D3	44	65	109	42	68	110
V3	D1	43	83	126	43	80	123
	D2	43	82	125	42	81	123
	D3	44	81	125	41	81	122
V4	D1	42	83	125	40	82	122
	D2	41	84	125	41	82	123
	D3	42	82	124	41	83	124

2.2 不同种植密度对大豆成活植株率的影响

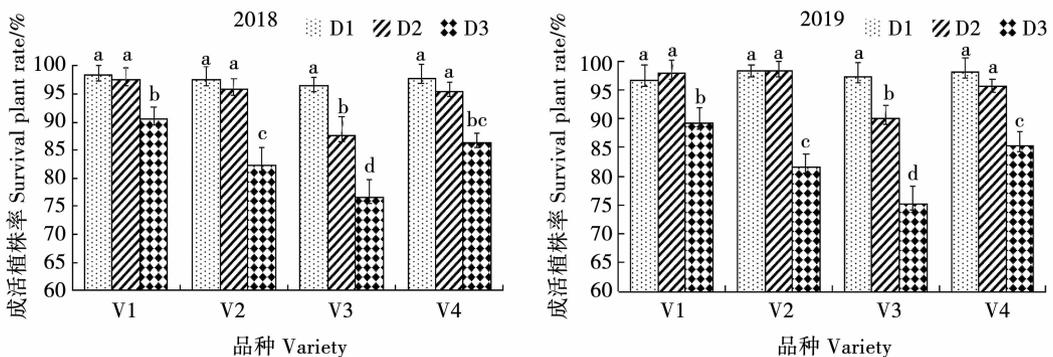
如图 1 所示,田间各小区的成活植株率两年结果基本一致。各品种在 D1 (低密度) 下的成活植株率均较高,达到 96.5% ~ 98.0%,且品种间差异不显著;从 D1 到 D2,品种 V1、V2 和 V4 的成活植株率变化幅度较小,均能保持在 95% 以上,与 D1 差异不

2 结果与分析

2.1 不同种植密度对大豆各生育期的影响

由表 2 可知,不同品种间的生育期相差较大,品种 V1 生育期最短,V2 次之,V3 和 V4 生育期最长,V2 的营养生长期与 V3、V4 接近,但生殖生长期明显短于二者,表明 V2 的生育期明显短于 V3 和 V4 主要是由于其生殖生长期较短所致。同一品种在不同密度间的营养生长期、生殖生长期及全生育期几乎一致,表明品种各生长阶段的时长主要由自身遗传因素决定,受密度影响较小。

显著,而 V3 在 D2 下的成活植株率与 D1 相比显著降低,仅 88.8%,显著低于 V1、V2 和 V4;各品种在密度 D3 下的成活植株率均显著低于 D1 和 D2,表明品种 V1、V2 和 V4 在密度 D1 和 D2 下均能维持较高的成活植株率,而 V3 只有在 D1 下才能有较高的成活植株率。



各处理间不同小写字母表示不同处理间差异达 0.05 显著水平,下同

The treatments followed by different lowercase are significantly different at 0.05 probability level. The same below.

图 1 不同种植密度对大豆成活植株率的影响

Fig. 1 The effects of different planting densities on survival plant rate of soybean

2.3 不同种植密度对大豆农艺性状的影响

由表3可知,通过对品种各密度下的生长性状考查发现两年试验结果基本一致。从品种来看,各品种之间的株高、底荚高、主茎节数、平均节间长和有效分枝数等性状均存在极显著差异,在相同密度下,株高和主茎节数均表现为V1 < V2 < V3 < V4;底荚高和平均节间长表现为V1显著低于V2、V3和V4,有效分枝为V1显著高于V2、V3和V4;4个材料综合比较,V1的株高、底荚高、平均节间长最低,主茎节数最少,但有效分枝数最多,V4株高最高,主茎节数最多,但有效分枝最少。从种植密度看,各

品种(系)在D3下的株高、底荚高和平均节间长均显著高于D1和D2,而在D3下的有效分枝数则低于D1和D2,密度间主茎节数变化较小,差异不显著。各品种密度间变化幅度存在差异,品种V1、V2和V4的各生长性状在密度D1和D2间差异均不显著,和D3差异达到显著水平;V3的各生长性状在密度D1、D2和D3间差异均达到显著水平,表明不同品种对相同密度范围的响应不同。品种和密度对株高、底荚高、主茎节数、平均节间长等性状有极显著的互作效应。

表3 不同种植密度对大豆农艺性状的影响

Table 3 The effects of different planting densities on agronomic traits of soybean

年份 Year	品种 Variety	密度 Density	株高 Plant height/cm	底荚高 Bottom pod height/cm	主茎节数 Node number	平均节间长 Internode length/cm	有效分枝 Effective branch number
2018	V1	D1	48.8 ± 1.7 g	13.8 ± 0.5 i	12.9 ± 0.5 g	3.79 ± 0.03 g	3.5 ± 0.5 a
		D2	51.3 ± 1.9 g	14.2 ± 1.0 i	12.7 ± 0.3 g	4.05 ± 0.06 f	3.4 ± 0.4 a
		D3	57.6 ± 1.5 f	16.5 ± 1.5 hi	13.2 ± 0.3 g	4.36 ± 0.04 e	2.1 ± 0.3 bc
	V2	D1	72.7 ± 1.4 e	25.7 ± 1.8 e	15.7 ± 0.3 e	4.63 ± 0.04 cd	2.1 ± 0.1 bc
		D2	73.9 ± 1.8 e	31.8 ± 1.8 bc	15.5 ± 0.4 ef	4.77 ± 0.09 c	2.0 ± 0.3 c
		D3	86.5 ± 2.1 c	37.2 ± 2.0 a	14.9 ± 0.4 f	5.8 ± 0.04 a	0.7 ± 0.2 ef
	V3	D1	79.4 ± 2.1 d	22.6 ± 1.8 f	18.1 ± 0.4 cd	4.39 ± 0.14 e	2.4 ± 0.3 bc
		D2	84.5 ± 1.7 c	27.2 ± 1.5 de	18.4 ± 0.4 c	4.59 ± 0.05 d	2.6 ± 0.5 b
		D3	98.7 ± 1.8 b	33.1 ± 2.4 b	17.5 ± 0.5 d	5.65 ± 0.22 ab	1.4 ± 0.3 d
	V4	D1	85.5 ± 1.3 c	18.7 ± 2.0 gh	20.9 ± 0.2 a	4.09 ± 0.05 f	1.2 ± 0.2 de
		D2	87.3 ± 2.1 c	21.3 ± 1.6 fg	20.5 ± 0.4 a	4.26 ± 0.09 e	0.9 ± 0.2 def
		D3	108.8 ± 1.6 a	29.8 ± 2.5 cd	19.7 ± 0.3 b	5.53 ± 0.14 b	0.5 ± 0.2 f
	V	1 440.37 **	88.81 **	761.52 **	159.53 **	73.90 **	
	D	253.82 **	114.96 **	8.06 **	465.49 **	52.27 **	
	V × D	11.38 **	7.08 **	3.33 *	17.25 **	1.92	
2019	V1	D1	52.9 ± 1.2 h	14.3 ± 0.9 g	14.0 ± 0.3 f	3.78 ± 0.03 g	3.1 ± 0.4 a
		D2	51.8 ± 1.1 h	14.1 ± 0.8 g	13.8 ± 0.2 f	3.75 ± 0.02 g	2.9 ± 0.2 a
		D3	58.8 ± 1.6 g	17.5 ± 1.4 f	14.2 ± 0.4 f	4.14 ± 0.08 f	2.2 ± 0.3 bc
	V2	D1	72.0 ± 1.6 f	26.8 ± 0.9 bc	14.7 ± 0.3 e	4.90 ± 0.03 c	1.9 ± 0.2 cd
		D2	71.8 ± 1.2 f	29.1 ± 1.9 b	14.9 ± 0.2 e	4.82 ± 0.03 cd	1.5 ± 0.3 de
		D3	81.2 ± 1.7 d	33.1 ± 2.2 a	12.9 ± 0.2 g	6.29 ± 0.21 a	0.4 ± 0.2 g

续表 3

年份 Year	品种 Variety	密度 Density	株高 Plant height/cm	底荚高 Bottom pod height/cm	主茎节数 Node number	平均节间长 Internode length/cm	有效分枝 Effective branch number
2018	V3	D1	75.5 ± 1.2 e	23.5 ± 1.0 de	18.1 ± 0.3 c	4.17 ± 0.02 f	2.4 ± 0.4 b
		D2	80.5 ± 1.4 d	24.8 ± 1.7 cd	17.4 ± 0.3 d	4.63 ± 0.14 de	2.0 ± 0.2 bc
		D3	91.1 ± 1.4 b	29.5 ± 1.8 b	17.5 ± 0.1 d	5.21 ± 0.09 b	1.5 ± 0.2 de
	V4	D1	84.5 ± 2.1 bc	21.8 ± 2.0 e	19.1 ± 0.4 a	4.42 ± 0.02 e	1.1 ± 0.2 ef
		D2	88.6 ± 2.2 b	22.4 ± 1.5 de	18.8 ± 0.3 ab	4.71 ± 0.23 d	0.7 ± 0.2 fg
		D3	100.1 ± 2.1 a	26.8 ± 1.8 bc	18.5 ± 0.4 bc	5.41 ± 0.23 b	0.7 ± 0.3 fg
	V		762.71 **	102.88 **	766.23 **	322.93 **	102.53 **
	D		224.58 **	45.22 **	15.24 **	171.23 **	41.29 **
V × D		8.89 **	0.87	11.67 **	12.87 **	3.14	

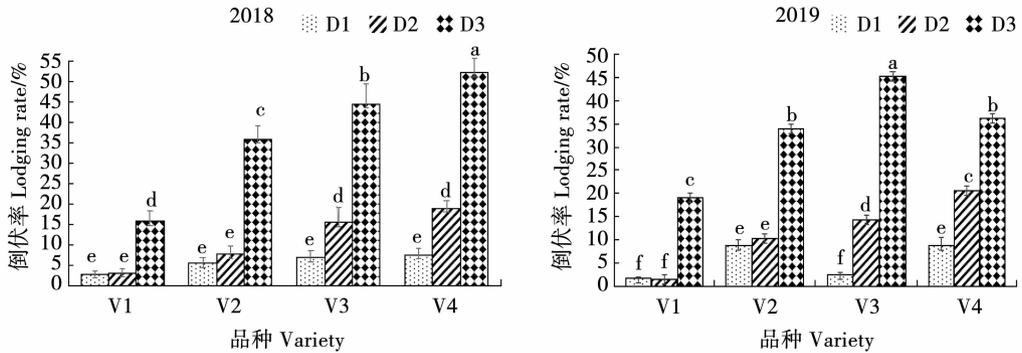
同一列数字后不同字母表示 0.05 水平差异显著; * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平差异显著,下同。

The values within a column followed by different letters are significantly different at 0.05 probability level; * and ** indicate significantly different at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively. The same below.

2.4 不同种植密度对大豆倒伏率的影响

如图 2 所示,成熟期田间倒伏情况两年结果基本一致,不同品种间的倒伏率差异显著($P < 0.05$),表现为 $V1 < V2 < V3 < V4$;不同密度间的倒伏率差异显著($P < 0.05$),随着密度增加,各品种的倒伏率均有不同程度的增加(除 V1 的 D2 处理外),各品种在 D1(低密度)下的倒伏率均较低,仅 2.8% ~

7.5% 且品种间差异不显著;从 D1 到 D2, V1 和 V2 的倒伏率变化幅度较小,与 D1 差异不显著,而 V3、V4 在 D2 下的倒伏率与 D1 相比却显著升高,分别达到 14.9% 和 19.8%,从 D2 到 D3,所有品种倒伏率均显著升高;品种和密度互作对倒伏率有显著影响。



各处理间不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。

The treatments followed by different lowercase are significantly different at 0.05 probability level.

图 2 不同种植密度对大豆倒伏率的影响

Fig. 2 The effects of different planting densities on lodging rate of soybean

2.5 不同种植密度对大豆产量及其构成因素的影响

由表 4 可知,产量性状两年结果基本一致,不同品种的产量及单株有效荚、单株粒数、百粒重和单株产量等产量构成因素间差异均极显著($P < 0.01$);不同密度间的产量及其构成因素间差异也达到极显著水平($P < 0.01$),各品种的单株有效荚数、单株

粒数和单株产量均在 D1 下最高;各品种的小区产量从 D1 到 D3 变化趋势不尽相同, V1、V2 和 V4 的小区产量从密度 D1 到 D3 先增加后降低,在 D2 下达到最高,而 V3 的小区产量度 D1 到 D3 显著降低,在 D1 下最高。品种和密度对小区产量有极限著的互作效应。

表4 不同种植密度对大豆的产量及产量构成因素的影响

Table 4 The effects of different planting densities on yield and its components of soybean

年份 Year	品种 Variety	密度 Density	单株有效荚数 Pods number per plant	单株粒数 Seeds number per plant	百粒重 100-seed weight/g	单株产量 Yield per plant/g	小区产量 Yield per plot /g	产量 Yield /(kg·hm ⁻²)	
2018	V1	D1	30.5 ± 1.6 c	63.7 ± 2.4 b	23.7 ± 0.3 c	14.6 ± 0.8 bc	4971 ± 149 c	2825 ± 85 c	
		D2	27.0 ± 2.0 d	56.5 ± 3.2 cd	24.0 ± 0.4 c	13.0 ± 0.9 de	5684 ± 171 b	3230 ± 97 b	
		D3	20.4 ± 2.0 e	42.6 ± 3.2 f	23.6 ± 0.3 c	9.7 ± 0.7 f	4947 ± 149 c	2811 ± 85 c	
	V2	D1	30.9 ± 1.9 c	55.7 ± 2.6 cd	25.9 ± 0.5 a	13.7 ± 0.6 cd	4633 ± 139 d	2633 ± 79 e	
		D2	28.7 ± 2.1 cd	51.6 ± 3.0 de	25.0 ± 0.5 b	12.4 ± 0.7 e	5003 ± 150 c	2843 ± 85 c	
		D3	21.0 ± 1.6 e	37.8 ± 1.9 g	25.9 ± 0.4 a	9.3 ± 0.4 f	4337 ± 130 e	2464 ± 74 e	
	V3	D1	43.9 ± 1.9 a	72.4 ± 3.4 a	23.8 ± 0.4 c	16.6 ± 0.6 a	5536 ± 166 b	3146 ± 95 b	
		D2	35.4 ± 1.6 b	58.4 ± 1.5 c	23.5 ± 0.5 c	13.1 ± 0.6 de	5169 ± 155 c	2937 ± 88 c	
		D3	28.5 ± 1.7 cd	47.1 ± 3.3 ef	22.8 ± 0.4 d	10.2 ± 0.7 f	4229 ± 127 e	2403 ± 72 d	
	V4	D1	30.1 ± 1.1 cd	70.2 ± 2.5 a	21.8 ± 0.5 e	15.0 ± 0.3 b	5216 ± 157 c	2964 ± 89 c	
		D2	29.2 ± 2.1 cd	68.1 ± 2.7 ab	21.4 ± 0.3 e	14.5 ± 0.7 bc	6003 ± 180 a	3411 ± 102 a	
		D3	22.4 ± 1.8 e	52.3 ± 3.4 d	19.2 ± 0.4 f	9.6 ± 0.6 f	4659 ± 140 d	2647 ± 80 d	
		V	56.83 **	48.88 **	173.84 **	8.84 **	86.42 **	86.62 **	
		D	114.71 **	166.51 **	17.33 **	231.14 **	84.88 **	85.01 **	
		V × D	3.52 *	2.71	10.86 **	4.00 *	11.13 **	11.14 **	
	2019	V1	D1	33.2 ± 1.8 b	63.4 ± 2.6 cd	22.6 ± 0.4 c	13.6 ± 0.8 bc	4525 ± 173 ef	2571 ± 99 ef
			D2	29.8 ± 1.8 cde	56.9 ± 1.6 e	21.9 ± 0.5 c	11.9 ± 0.5 de	5047 ± 202 ab	2868 ± 115 ab
			D3	23.9 ± 1.8 gh	45.7 ± 2.2 f	22.3 ± 0.3 c	9.8 ± 0.6 fg	4638 ± 139 de	2635 ± 79 de
V2		D1	31.8 ± 1.7 bc	55.7 ± 1.9 e	24.1 ± 0.4 b	12.7 ± 0.7 cd	4319 ± 134 fg	2454 ± 76 fg	
		D2	26.8 ± 1.2 efg	46.7 ± 1.5 f	23.9 ± 0.5 b	10.8 ± 0.4 ef	4691 ± 141 cde	2665 ± 81 cde	
		D3	22.2 ± 2.1 h	38.9 ± 3.6 g	25.5 ± 0.5 a	9.2 ± 0.7 g	4219 ± 126 gh	2397 ± 72 gh	
V3		D1	38.2 ± 1.7 a	70.3 ± 2.4 b	22.4 ± 0.7 c	15.1 ± 0.6 a	4968 ± 169 abc	2823 ± 96 abc	
		D2	31.7 ± 2.7 bc	59.6 ± 6.5 de	22.1 ± 0.2 c	12.5 ± 1.5 cd	4905 ± 148 bcd	2787 ± 84 bcd	
		D3	25.9 ± 1.7 fg	47.6 ± 2.5 f	22.6 ± 0.5 c	10.1 ± 0.7 fg	3962 ± 119 h	2251 ± 68 h	
V4		D1	32.7 ± 1.0 bc	75.9 ± 3.3 a	19.2 ± 0.4 e	14.1 ± 0.6 ab	4760 ± 143 cde	2704 ± 81 cde	
		D2	28.7 ± 1.0 def	66.6 ± 2.0 bc	19.3 ± 0.5 de	12.4 ± 0.7 cd	5195 ± 193 a	2952 ± 110 a	
		D3	21.7 ± 1.2 h	50.3 ± 2.9 f	20.1 ± 0.6 d	9.7 ± 0.7 fg	4527 ± 134 ef	2573 ± 76 ef	
		V	11.65 **	51.30 **	135.18 **	9.39 **	15.30 **	15.28 **	
		D	132.11 **	140.66 **	9.48 **	89.80 **	45.20 **	45.08 **	
		V × D	0.93	1.74	2.17	0.68	7.05 **	7.03 **	

2.6 相关性分析

通过大豆各性状相关性分析(表5)可以看出,产量与成活植株率、单株粒数和单株粒重呈极显著正相关(相关系数分别为0.662, 0.678和0.636; $P < 0.01$),表明较高的植株成活率、单株粒数和单株粒重是保证产量的前提;产量与倒伏率、始荚高、平均节间长呈极显著负相关(相关系数分别为-0.547, -0.604和-0.717; $P < 0.01$);表明倒伏

率增加、始荚高和平均节间长增长都会削弱产量的形成;大豆的成活植株率与倒伏率呈极显著负相关(相关系数为-0.844; $P < 0.01$),而倒伏率又与株高、主茎节数、平均节间长呈极显著正相关(相关系数分别为0.767, 0.647和0.853; $P < 0.01$),表明相同环境下株高较高、主茎节数较多、平均节间长较长的品种或同一品种随着株高增加,平均节间长增长,更容易发生倒伏现象。

表 5 大豆各性状间相关性分析

Table 5 The correlation analysis of plant agronomic and yield traits of soybean

性状 Trait	成活植 株率 SPR	倒伏率 LR	株高 PL	始荚高 BPH	主茎节数 NN	平均节 间长 AIL	有效分枝 EB	单株有效 荚数 APP	单株粒数 SNP	百粒重 100-SW	单株粒重 SWP
倒伏率 LR	-0.778 **										
株高 PL	-0.575 **	0.767 **									
始荚高 BPH	-0.740 **	0.647 **	0.697 **								
主茎节数 NN	-0.09	0.324	0.799 **	0.248							
平均节间长 AIL	-0.844 **	0.853 **	0.716 **	0.894 **	0.162						
有效分枝 EB	0.436 **	-0.694 **	-0.799 **	-0.579 **	-0.610 **	-0.641 **					
单株有效荚 APP	0.345 *	-0.452 **	-0.021	-0.134	0.291	-0.370 *	0.418 *				
单株粒数 SNP	0.653 **	-0.502 **	-0.061	-0.486 **	0.466 **	-0.655 **	0.265	0.762 **			
百粒重 100-SW	0.058	0.459 **	-0.502 **	0.131	-0.620 **	-0.029	0.401 *	0.096	-0.309		
单株粒重 SWP	0.720 **	-0.716 **	-0.279	-0.484 **	0.234	-0.718 **	0.453 **	0.832 **	0.930 **	0.057	
产量 Y	0.662 **	-0.547 **	-0.313	-0.604 **	0.176	-0.717 **	0.275	0.398 *	0.678 **	-0.226	0.636 **

* 表示在 0.05 水平差异显著; ** 表示在 0.01 水平差异显著。

SPR. Survival plant rate; LR. Lodging rate; PL. Plant height; BPH. Bottom pod height; NN. Node number; AIL. Average internode length; EB. Effective branch number; APP. Available pods number per plant; SNP. Seeds number per plant; 100-SW. 100-seed weight; SWP. Seeds weight per plant; Y. Yield; * and ** indicate significantly different at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

3 讨论

合理密度是作物利用生态环境中的光热资源、构建良好群体结构、优化群体生理指标的基础^[18-19]。随着种植密度的增加,单位面积内个体数量增加,个体间对光、温、水、肥资源竞争力度加强,生长较弱的植株个体因为竞争力弱而长期得不到足够的光、热、肥、水等资源,长势更弱甚至死亡。本研究中随着种植密度增加,植株存活率逐渐降低,与以往研究结果相似^[20]。本研究结果还发现,不同品种在相同密度下的植株存活率存在较大差异,油 6019、南夏豆 35、南农 99-6 在低密度和中密度下均能维持较高的植株存活率(超过 95%),而南夏豆 38 从 D1 到 D2,植株存活率显著降低。这可能与品种自身特性有关,油 6019 生育期短、植株株高很低、叶片较小,南夏豆 35 株高较低、分枝较少,南农 99-6 分枝很少、叶片披针形、亚有限结荚习性,它们的这些特征使其在较高密度 D2 下的群体依然具有较好的通风透光性,植株存活率较高。而南夏豆 38 同时具备分枝较多、株高较高、叶形椭圆且叶片肥大、有限结荚习性等特征,在较高密度下通风透光率低,放大了壮苗和弱苗间的生长差异,造成弱勢植株死亡率高,植株存活率较低。

种植密度对大豆的农艺性状和产量指标有较大影响。前人研究结果表明随着大豆种植密度增

加,株高和底荚高增加^[15-16,21-22]、茎粗逐渐降低^[23-24],主茎节数和有效分枝减少^[15-16,22,24],倒伏率增加^[20,23],本研究结果与前人的报道基本一致,但本研究发现不同品种随密度变化性状的变化有所区别,如油 6019 和南夏豆 35 在 D1(低密度)和 D2(中密度)下的株高、底荚高、有效分枝及倒伏率差异均不显著,但从 D2(中密度)到 D3(高密度)株高、底荚高、平均节间长和倒伏率均显著增加,有效分枝数显著降低;而南夏豆 38 和南农 99-6 从 D1(低密度)到 D3(高密度)株高、底荚高、平均节间长及植株均表现为逐渐增加、有效分枝数逐渐降低,植株倒伏率逐步上升。种植密度对荚数、粒数和粒重均有显著影响^[25],前人研究表明随着种植密度增加,大豆单株荚数、单株粒数和单株粒重均下降^[15,26-29],本研究中随着种植密度的增加各品种的单株荚数、单株粒数和单株粒重均逐渐下降。

大豆单位面积产量由单株产量和群体数量共同决定。合理的种植密度既有助于大豆充分发挥单株生产潜力,同时也可增加植株群体的单位面积产量,实现个体生长与群体产量之间矛盾的统一^[30-32]。本研究发现不同品种达到最高产量的适宜密度存在差异,从 D1 到 D3,油 6019、南夏豆 35 和南农 99-6 产量均表现为先增加后降低,在 D2 时达到最高,而南夏豆 38 在 D1 时产量最高,从 D1 到 D3 产量表现为逐渐降低。表明油 6019、南夏豆 35

和南农 99-6 在较高密度 D2 下能够协调个体与群体的关系,通过保持较高的有效植株率和单株生产力获得较高的产量。而品种南夏豆 38 从 D1 到 D3 植株成活率显著降低,单株生产力下降,单位面积增加的植株数量较少,不能弥补单株产量下降,从而导致总产量逐渐下降。表明不同类型品种协调个体和群体关系的能力不同,实现最高产量的密度存在差异。

本研究中产量与成活植株率呈极显著正相关,与倒伏率呈极显著负相关,表明保证较高的成活植株率是保证产量的前提,倒伏率增加会影响产量的形成。倒伏率又与株高、平均节间长呈极显著正相关,表明相同环境下株高较高、平均节间长较长的品种,或同一品种随着株高增加,平均节间长增长,更容易发生倒伏现象。生产上可以通过肥水控制、中耕培土和化控等栽培措施来缓解倒伏的发生,从而提高产量。

4 结 论

品种的适宜种植密度因其性状而不同。在较高的种植密度下,生育期短、株高低、叶片小、分枝少、结荚分散的品种比生育期长、株高高、分枝多、叶片大、结荚集中的品种群体通风透光性好,能够更好地协调个体与群体的关系,保持较高的单株生产力而实现高产。本研究中,品种油 6019 生育期短、株高很低、叶片小,南夏豆 35 生育期较短、株高较低、分枝较少,南农 99-6 分枝少、结荚分散(亚有限结荚习性),它们与同时具备分枝多、株高高、叶形椭圆且叶片肥大、结荚集中和有限结荚习等特征的南夏豆 38 相比能够适应更高的密度。在四川生态地区,由于雨水较多、光照条件弱,对于叶片肥大,株高较高、分枝较多的夏大豆品种(如南夏豆 38)适宜的夏播密度为 20 万株·hm⁻²;对于分枝少、叶片披针形、亚有限结荚(如南农 99-6)或生育期较短、分枝较少的品种(如南夏豆 35)适宜的夏播种植密度为 25 万株·hm⁻²;对于分枝较多、生育期短、株高低、叶片小的品种(如油 6019)适宜的夏播密度为 25 万株·hm⁻²。

参考文献

[1] 郭天宝. 中国大豆生产困境与出路研究[D]. 长春:吉林农业大学, 2017. (Guo T B. Study on dilemma and way out of China's soybean production[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2017.)

[2] 中国产业信息网. 2018 年中国大豆进口量及进口来源国家分

析图[EB/OL]. [2018-8-15]. <https://www.chyxx.com/industry/201808/667449.html>. (China Industrial Information Network. Analysis chart of Chinese soybean imports and import origin country In 2018[EB/OL]. [2018-8-15]. <https://www.chyxx.com/industry/201808/667449.html>.)

[3] 尹宗伦. 担起重振我国大豆产业的任务[J]. 中国食品学报, 2006, 6(4): 1-5. (Yin Z L. Undertaking the task for revitalization of our soybean[J]. Journal of Chinese Institute of Science and Technology, 2006, 6(4): 1-5.)

[4] Tollenaar M, Lee E A. Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize[J]. Field Crops Research, 2002, 88: 161-169.

[5] 李敏, 罗德强, 江学海, 等. 控水增密模式对杂交籼稻减氮后产量形成的调控效应[J]. 作物学报, 2020, 46(9): 1430-1447. (Li M, Luo D Q, Jiang X H, et al. Regulations of controlled irrigation and increased densities on yield formation of hybrid indica rice under nitrogen-reduction conditions [J]. Acta Agronomica Sinica, 2020, 46(9): 1430-1447.)

[6] 胡月秋, 徐开未, 龙玲, 等. 玉米“正红 6 号”的密植效应[J]. 草业学报, 2020, 29(7): 154-162. (Hu Y Q, Xu K W, Long L, et al. Effect of high plant density on yield of maize variety 'Zhenghong No. 6' [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(7): 154-162.)

[7] 郑飞娜, 初金鹏, 张秀, 等. 播种方式与种植密度互动对大穗型小麦品种产量和氮素利用率的调控效应[J]. 作物学报, 2020, 46(3): 423-431. (Zheng F N, Chu J P, Zhang X, et al. Interactive effects of sowing pattern and planting density on grain yield and nitrogen use efficiency in large spike wheat cultivar [J]. Acta Agronomica Sinica, 2020, 46(3): 423-431.)

[8] 杜长玉, 胡兴国, 何忠仁, 等. 不同密度对大豆产量和生理指标影响的研究[J]. 内蒙古农业科技, 2006(2): 35-36. (Du C Y, Hu X G, He Z R, et al. Effects of different densities on yield and physiological indicators of soybean[J]. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 2006(2): 35-36.)

[9] 陈圣伦. 玉/豆套作模式的群体配置技术及其对大豆的效应研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2008. (Chen S L. Research on techniques of plant population configuration under maize/soybean relay-cropping system and their effects on soybean [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2008.)

[10] 董钻. 大豆产量生理[M]. 第 2 版. 北京: 中国农业出版社, 2012: 125-132, 148-155. (Dong Z. Soybean yield physiology[M]. 2nd edition. Beijing: Agricultural Press, 2012: 125-132, 148-155.)

[11] 吕书财, 徐瑶, 陈国兴, 等. 大豆冠层光合有效辐射、叶面积指数及产量对种植密度的响应[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(18): 68-72. (Lyu S C, Xu Y, Chen G X, et al. Effects of plant densities on canopy photosynthetic radiation, leaf area index and yield of soybean [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(18): 68-72.)

[12] 田艺心, 高凤菊, 王乐政, 等. 密度对高蛋白大豆生长动态及产量的影响[J]. 大豆科学, 2017, 36(3): 385-390. (Tian Y X, Gao F J, Wang L Z, et al. Effect of plant density on growth tendency and yield of high protein soybean [J]. Soybean Science, 2017, 36(3): 385-390.)

[13] 张建新, 翟云龙, 薛丽华. 密度对高产春大豆生长动态及干物质积累分配的影响[J]. 大豆科学, 2006, 25(1): 1-5. (Zhang J X, Zhai Y L, Xue L H, et al. Effect of plant density on growth

- tendency, dry matter accumulation and distribution in high yield spring soybean[J]. *Soybean Science*, 2006, 25(1):1-5.)
- [14] 谢甫缙, 王贺, 张惠君, 等. 不同肥密处理对超高产大豆辽豆 14 的影响[J]. *大豆科学*, 2008, 27(1):61-68. (Xie F T, Wang H, Zhang H J, et al. Effects of different fertilizer levels and planting density on super high-yield soybean Liaodou 14 [J]. *Soybean Science*, 2008, 27(1):61-68.)
- [15] 樊海潮, 张继雨, 王俊涛, 等. 种植密度对大豆新品种产量及农艺性状的影响[J]. *山东农业科学*, 2020, 52(2):38-42. (Fan H C, Zhang J Y, Wang J T, et al. Effect of different planting densities on yield and agronomic characters of new soybean varieties [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2020, 52(2):38-42.)
- [16] 王文斌, 张力军, 王昌陵. 种植密度对辽宁省主栽大豆品种主要性状及产量的影响[J]. *杂粮作物*, 2009, 9(3):212-215. (Wang W B, Zhang L J, Wang C L. Effect of different planting densities on main characters and yield of major cultivated soybean varieties in Liaoning Province [J]. *Rain Fed Crops*, 2009, 29(3):212-215.)
- [17] Fehr W R, Caviness C E. Stages of soybean development. Special Report 80[R]. Iowa: Iowa State University, 1977.
- [18] 马国胜, 薛吉全, 路海东, 等. 播种时期与密度对关中灌区夏玉米群体生理指标的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(6):1247-1253. (Ma G S, Xue J Q, Lu H D, et al. Effects of planting date and density on population physiological indices of summer corn (*Zea mays* L.) in central Shaanxi irrigation area [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(6):1247-1253.)
- [19] 朱元刚, 高凤菊, 曹鹏鹏. 种植密度对玉米-大豆间作群体产量和经济产值的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(6):1751-1758. (Zhu Y G, Gao F J, Cao P P. Effect of plant density on population yield and economic output value in maize-soybean inter-cropping [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(6):1751-1758.)
- [20] 梁建秋, 于晓波, 吴海英, 等. 密度及烯唑啉施对套作大豆南夏豆 25 抗倒性及产量的影响[J]. *大豆科学*, 2017, 36(1):33-40. (Liang J Q, Yu X B, Wu H Y, et al. Impact of density and uniconazole on stem lodging resistance and yield of inter-planting soybean cultivar Nanxiadou 25 [J]. *Soybean Science*, 2017, 36(1):33-40.)
- [21] 史宏. 种植密度对机械化收获大豆底荚高度的影响[J]. *农学报*, 2017, 7(9):62-67. (Shi H. Effect of planting density on the bottom pod height of soybean under mechanized harvesting [J]. *Journal of Agriculture*, 2017, 7(9):62-67.)
- [22] 刘卫国. 不同种植密度对夏大豆农艺性状的影响[J]. *现代农业科技*, 2011(5):51-52. (Liu W G. Effects of different planting densities on agronomic characters of summer soybean [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2011(5):51-52.)
- [23] 陈喜凤, 孙宁, 谷岩, 等. 不同群体结构下大豆植株抗倒性状的比较[J]. *华南农业大学学报*, 2015, 36(1):33-41. (Chen X F, Sun N, Gu Y, et al. Comparison on lodging-resistance characters of soybean in different population structures [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2015, 36(1):33-41.)
- [24] 杨旭, 赵云, 周静, 等. 播期和种植密度对大豆新品种山宁 15 号产量及构成因子的影响[J]. *农业科技通讯*, 2016(4):31-34. (Yang X, Zhao Y, Zhou J. Effects of sowing date and planting densities on yield and yield components of new soybean varieties Sanning 15 [J]. *Agricultural Science & Technology Newsletter*, 2016(4):31-34.)
- [25] Herbert S J, Litchfield G V. Growth response of short-season soybean to variations in row spacing and density [J]. *Field Crops Research*, 1984, 9(3):163-171.
- [26] 武新艳, 张振晓, 张小虎. 种植密度对大豆产量及农艺性状的影响[J]. *农业科技通讯*, 2014(4):103-104. (Wu X Y, Zhang Z X, Zhang X H. Effects of planting densities on yield and agronomic characters of soybean [J]. *Agricultural Science & Technology Newsletter*, 2014(4):103-104.)
- [27] 任小俊, 吕新云, 马俊奎. 种植密度与施肥水平对山西早熟夏大豆产量与主要农艺性状的影响[J]. *大豆科学*, 2019, 38(6):921-927. (Ren X J, Lyu X Y, Ma J K. Effects of different planting densities and fertilization levels on yield and main agronomic characters of early-maturing summer soybean in Shanxi Province [J]. *Soybean Science*, 2019, 38(6):921-927.)
- [28] 李灿东, 郭泰, 郑伟, 等. 播种密度及施肥水平对耐密植大豆合农 76 产量性状的影响[J]. *大豆科学*, 2017, 36(5):727-732. (Li C D, Guo T, Zheng W, et al. Effect of sowing density and fertilizer levels on the yield traits of high dense planting soybean cultivar Henong 76 [J]. *Soybean Science*, 2017, 36(5):727-732.)
- [29] 李文龙, 李喜焕, 常文锁, 等. 不同播期、密度和施肥量对保豆 3 号农艺性状影响[J]. *西北农业学报*, 2014, 23(2):107-113. (Li W L, Li X H, Chang W S, et al. Effects of sowing date, planting densities and fertilizer levels on agronomic traits of Baodou 3 [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2014, 23(2):107-113.)
- [30] Ren Y, Liu J, Wang Z. Planting density and sowing proportions of maize-soybean intercrops affected competitive interactions and water-use efficiencies on the Loess Plateau, China [J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 72:70-79.
- [31] Echarte L, Maggiora A D, Cerrudo D. Yield response to plant density of maize and sunflower intercropped with soybean [J]. *Field Crops Research*, 2011, 121(3):423-429.
- [32] 于洪久. 种植密度对大豆光合生理及产量的影响[J]. *大豆科学*, 2009, 28(6):1115-1118. (Yu H J. Effects of plant density on photosynthetic characteristics and yield of soybean [J]. *Soybean Science*, 2009, 28(6):1115-1118.)