

不同株行距配置对夏大豆群体结构及光截获的影响

周勋波, 杨国敏, 孙淑娟, 陈雨海*

(山东农业大学农学院/作物生物学国家重点实验室, 泰安 271018)

摘要:以田间试验(2006—2007年)为基础,分析了地上部干物质、叶面积指数(LAI)、光合有效辐射(PAR)、光能利用率和植株形态指标变化特征,夏大豆‘鲁豆4号’(*Glycine max* cv. Ludou 4)在同一密度(3.09×10^5 株/hm²)下设5种株行距配置方式,即行距×株距分别为18 cm×18 cm (A)、27 cm×12 cm (B)、36 cm×9 cm (C)、45 cm×7.2 cm (D)、54 cm×6 cm (E)。结果表明,大豆在生育期间干物质变化因株行距不同而产生差异,2006和2007生长季的各处理干物质分别在播种后第70天和90天达到最高,播种后第80天和100天时,A处理比E处理分别高21.6%和34.0%;不同层次干物质积累重心随行距加大有上移趋势。各处理LAI随行距扩大、株距减少有下降趋势,其中,A和B处理LAI表现较稳定,LAI相对较高且时间较长。光能利用率随行距加大有降低趋势,A和B处理显著高于E处理($P < 0.05$)。夏大豆在不同株行距配置下,株粒数、百粒重与产量相关系数分别为0.941*和0.926* (2006年),0.995*和0.892* (2007年),随行距变小PAR透射率降低、截获率和光能利用率上升而产量增加,A和B处理产量显著高于E处理($P < 0.05$)。说明夏大豆在雨养农业条件下,植株相对均匀分布可改善群体结构和增强光截获,进而提高群体光能利用率和产量。

关键词:夏大豆;群体结构;光截获;光能利用率

Effect of different plant-row spacing on population structure and PAR interception in summer soybean

ZHOU Xunbo, YANG Guomin, SUN Shujuan, CHEN Yuhai*

Agronomy College of Shandong Agricultural University/State Key Laboratory of Crop Biology, Taian 271018, China

Abstract: Changes in aboveground dry matter (DM), leaf area index (LAI), photosynthetically active radiation (PAR), solar energy utilization efficiency, and configuration of plant were investigated in field experiment during the growing seasons of summer soybean (*Glycine max* cv. Ludou 4) in 2006 and 2007. The summer soybean experiment consists of 5 planting patterns under the same plant population density (3.09×10^5 plant/hm²). Row spacing (cm) × plant spacing (cm) was 18 cm × 18 cm (A), 27 cm × 12 cm (B), 36 cm × 9 cm (C), 45 cm × 7.2 cm (D), and 54 cm × 6 cm (E), respectively. The differences in dry matter weight under different plant-row spacing were observed. The DM of all treatments reached maximum at 70 days after sowing (DAS) and 100 DAS, however, the DM of A treatment was 21.6% and 34.0% higher than that of E treatment at 80 DAS and 100 DAS, respectively. Accumulative priority of DM at different portions of the whole plant increased with widening of row spacing. The LAI of all treatments decreased with row spacing widened, and that of A and B treatment had higher value and longer time than the others. The solar energy utilization efficiency of different treatments generally increased with row spacing increased. For different plant-row spacing of the summer soybean population, number of grain per plant and 100 grain weight were positively correlated with yield, and correlation coefficients were 0.941* and 0.926* (in 2006), 0.995* and 0.892* (in 2007), respectively. PAR transmittance rate decreased, interception rate and solar energy utilization efficiency increased with a narrowing in row spacing, and thus yield increased. The yields of A and B treatments were significantly higher than that of E treatment ($P < 0.05$). The summer soybean population of relatively uniform distribution improves population structure, and increases the PAR interception, solar energy

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助项目(2005CB121106);山东省高等学校优秀青年教师国内访问学者资助项目

收稿日期:2008-11-03; **修订日期:**2008-12-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yhchen@sdaa.edu.cn

utilization efficiency and yield under rainfed agriculture.

Key Words: *Glycine max*; population structure; *PAR* interception; solar energy utilization efficiency

夏大豆是山东省主要夏播作物之一,较春大豆生长期短、植株相对较小,整地、施肥、播种时间紧,其生长发育及管理措施与其它作物不同。有关栽培因子的作用虽有研究,但结论不一致^[1-2];不同株行距配置改变了个体的局部生境,进而使植株个体形态发生变化。作物生产是一个群体过程,一般以单一农作物为主^[3],具有自我组织、自动调节的能力,但受制于生境的影响;生境恶化将使群体内个体间竞争加剧,如个体间争夺水分、养分和空气,排泄物的积累以及相互间病虫害传染,同时,整个群体的光合强度、光合产物、呼吸强度和生物产量等都会产生不同程度的变化。不同生长类型大豆对行距有不同反应^[4-5],各地区灌溉、降雨量及种植密度不同使实验结果产生较大差异^[6-9],由于群体中个体受群体内生境的影响较大^[10-11],个体生长不良导致对地面覆盖程度差,从而影响光截获而最终减产^[12-14]。有关大豆群体结构的平作试验多是围绕不同密度进行^[15-16],而对于一个特定的品种,在特定地区其适宜密度一般比较稳定。山东省夏大豆生长季主要在6—9月份,且以雨养农业为主,根据山东省自然降水及夏大豆生长发育特点,在适宜密度条件下对株行距进行调节,从栽培生态角度探讨夏大豆群体结构、光截获、光能利用率等的变化,充分发挥个体潜力,优化群体结构,初步明确该地区最佳的株行距配置模式,使夏大豆群体对环境资源的利用达到最佳,为实现夏大豆的高产高效、资源的合理配置及指导田间种植的结构设计等提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况与试验设计

试验于2006—2007年在山东农业大学农学实验站进行。试验地位于泰安市南邻(36°10'N, 117°09'E),属于温带半湿润大陆性气候,1971—2007年间,平均年日照2610 h,年气温12.8℃,年降雨量698.5 mm;土壤耕层(0—20 cm)含有机质16.31 g/kg、全氮1.12 g/kg、碱解氮92.98 mg/kg、速效磷34.77 mg/kg、速效钾95.45 mg/kg;试验地土壤的物理性状见表1。

试验地前茬作物为冬小麦,供试夏大豆品种为鲁豆4号,于2006年6月12日和2007年6月13日按 3.09×10^5 株/hm²、南北行向进行人工点播,在同一密度下设5种不同行距,即行距×株距分别为18 cm×18 cm(A), 27 cm×12 cm(B), 36 cm×9 cm(C), 45 cm×7.2 cm(D), 54 cm×6 cm(E)。小区面积为4 m×2.5 m, 3次重复,随机排列。生育期间不灌水,2006年和2007年6、7、8、9月份的降雨量分别为130.5、142.1、152.0、15.3 mm和203.4、120.4、186.0、29.3 mm。

表1 试验地土壤的物理性状

Table 1 Soil physical properties of the experimental site

土层深度 Soil depth (cm)	容重 Bulk density /(g/cm ³)	田间持水量 Field capacity /%	萎蔫系数 Wilting coefficient /%	有效水量 Available water /mm
0—20	1.48	36.4	7.2	34.80
20—40	1.49	38.3	7.5	36.44
40—60	1.53	41.2	8.2	37.22
平均 Average	1.50	38.6	7.7	36.15

1.2 测定项目

(1) 干物质积累与叶面积指数(LAI),播种后20 d开始取样,生育期间每10 d取1次,并于鼓粒期从子叶节向上每10 cm为1层次,上述测定每处理均取3株,3次重复,在105℃下杀青,85℃下烘干至恒重,测定干物质动态变化和不同高度的干物质质量;测定干物质动态变化的同时采用称重法测定LAI^[17]。

(2) 光合有效辐射(PAR),结荚期选择典型的晴天(8:00—17:00),用Sunscan(美国WESCOR公司,线性

探头)分别在夏大豆行间接对角线形式测定冠层上方、株高 1/2 和基部的 *PAR* 入射量和反射量,每 1 h 测定 1 次,计算 2 d 的 *PAR* 截获率、透射率和反射率平均值。

(3) 光能利用率由公式 $E(\%) = \frac{\Delta W \cdot H}{\Sigma S}$ 求得^[18],式中 ΔW 为作物产热率(kJ/kg), H 为作物籽粒产量(kg/hm²), ΣS 为夏大豆生育期间投入到单位面积上的总辐射量(MJ/hm²),由泰安市农业气象站(距试验地 500 m)提供。

(4) 测产与考种,分别于 2006 年 9 月 26 日和 2007 年 9 月 25 日收获,每小区取 2 m² 进行测产,连续取 10 株考种,测产与考种均 3 次重复。

(5) 气象资料与统计分析,降水等气象资料由泰安市农业气象站提供,试验数据采用 SPSS11.0 软件统计分析(Duncan's 法)。

2 结果与分析

2.1 不同株行距下干物质积累动态变化

在生育期间,大豆干物质均呈现“S”型变化(图 1),两年中,不同处理下的干物质重,A、B、C 处理处于相对较高的水平,成熟期 A 处理干物质重最大,E 处理干物质重最低。播种后第 80 天(2006 年)和 100 天(2007 年),A 处理干物质分别比 E 处理高 21.6% 和 34.0%。相关性分析表明,行距与干物质积累量呈负相关, r 值分别为 -0.8417(2006 年)和 -0.9432*(2007 年)。结果表明,不同株行距种植方式影响了干物质积累,E 处理干物质重较低可能和截获的光能较少有关。2007 年各处理单株干物质重明显高于 2006 年各处理的相应值,主要是因为 2007 年生长季内降雨量较 2006 年高 99.2 mm;播种后第 40 天干物质重快速增长,并于播种后第 70 天(2006 年)和 90 天(2007 年)达到峰值后下降,表明充足的降雨可延缓植株早衰,延长光合产物积累时间,后期干物质质量下降主要是因为部分叶片、叶柄脱落所致。

不同高度干物质积累结果表明(图 2),各处理均呈现“Λ”型变化,且干物质主要集中在 20—60 cm 处,其中,2006 年主要集中在 20—50 cm 处,而 2007 年则主要集中在 30—60 cm 处,两者均处于株高的 1/3 的位置上,表明干物质积累重心相对稳定,且营养物质更多的分配于中下部;各处理高峰值出现的高度不一致,A 处理出现在 20—30 cm,B、C、D 处理峰值则向上延伸 10 cm,E 处理峰值出现在 40—50 cm,表明行距加大、株距减少后,个体间竞争激烈,导致营养分配失衡,干物质积累重心随株距减小而有上移趋势。

2.2 不同株行距下叶面积指数变化

2007 年各处理的叶面积指数(*LAI*)明显高于 2006 年,并在播种后 20—50 d 快速上升;2006 年生长季节,各处理在播种后第 50—60 天出现高峰值,其中,A 和 B 处理表现较稳定,高峰值持续约 20 d 后开始下降,而 C、D、E 处理在播种后 60 d 有不同程度的下降,可能与该时期较干旱有关,E 处理在播种后第 80 天比第 70 天下降了 40.5%,说明该处理生育后期衰老严重,在整个生育期间,A、B 和 C 处理的平均 *LAI* 为 3.5,而 D、E 处理平均值为 3.0;2007 年生长季节,各处理 *LAI* 均呈现“∩”型曲线变化,生育期内平均 *LAI* 顺序为 A > B > C > D > E,A 处理在播种后第 50 天、B 处理在播种后第 60 天、其他处理在播种后第 70 天达到峰值,A 处理 *LAI* 除播种后第 20 天、70 天和 100 天外,其他时间均显著高于 C、D、E 处理($P < 0.05$),B 处理 *LAI* 除播种后第 20 天、40 天外,其他时间均显著高于 E 处理($P < 0.05$)(图 3);可见 A 和 B 处理在 2006—2007 年均保持了相对较高的 *LAI*,在降雨较多时处理间 *LAI* 差异扩大,且各处理随行距扩大、株距减少,*LAI* 有下降趋势。

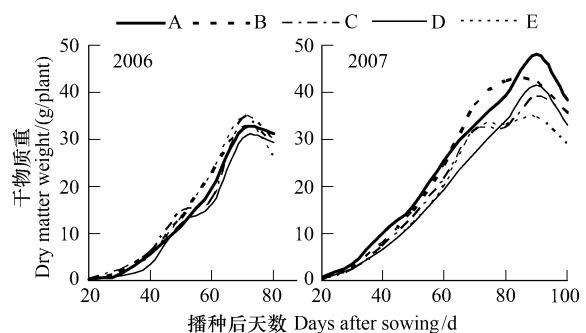


图 1 2006—2007 年生长季夏大豆不同株行距下干物质积累动态
Fig. 1 Dynamics of DM accumulation with different plant-row spacing for summer soybean in 2006—2007

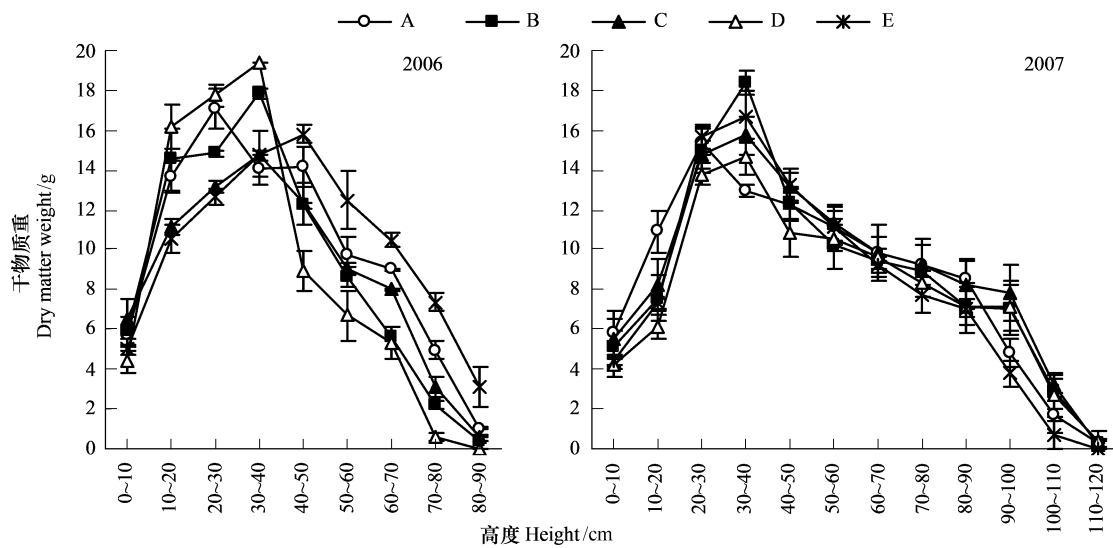


图2 2006—2007 年不同株行距下夏大豆干物质积累随高度的变化

Fig. 2 Change in DM accumulation with height differing in plant-row spacing for summer soybean in 2006—2007

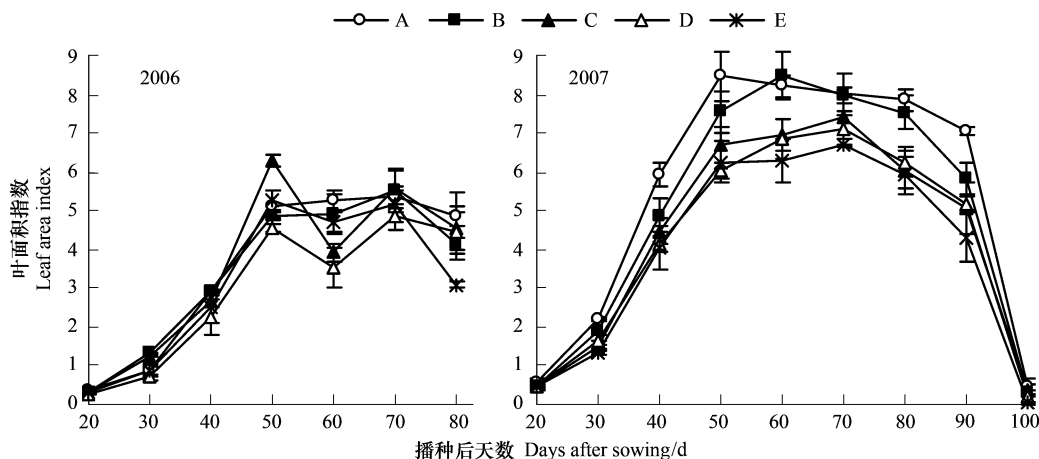


图3 2006—2007 年夏大豆叶面积指数随株行距的变化

Fig. 3 Change in LAI with different plant-row spacing for summer soybean in 2006—2007

2.3 不同株行距下结荚期 PAR 透射率、反射率和截获率日变化

夏大豆 PAR 冠层透射和反射是影响光能截获的两个重要方面。由图 4 可以看出,在 2006 生长季,夏大豆 PAR 冠层反射率与透射率日变化趋势相反,PAR 透射率在 0.9%—46.3% 之间变化,总水平为 $E > C > D > B > A$,反射率在 2.4%—5.7% 之间变化,总水平为 $C > A > D > B > E$;各处理间透射率与截获率呈极显著负相关($r = -0.9971^{**}$);PAR 截获率总水平为 $A > B > C > D > E$,数值分别为 93.9%、92.4%、89.9%、89.5% 和 82.9%,其中,A 处理显著高于 D 和 E 处理,B、C、D 处理间无显著差异,E 处理显著低于其它处理($P < 0.05$);PAR 截获率日变化呈“V”型曲线,差异较大值出现在日光照最充足的 11:00—14:00,A 处理最低值出现在 13:00,有滞后趋势,且下降幅度很低,仅为 4.0%,其它处理最低值均出现在 12:00,此时 E 处理急速下降,最大降幅达 38.5%,可见,随着行距加大,PAR 截获率降低,因光分布不合理而导致光浪费加剧。

2.4 不同株行距对光能利用率的影响

2006—2007 年研究结果表明,在种植密度相同的情况下,籽粒光能利用率随行距加大而降低,其线性方程的相关系数 R 值分别为 0.5806 和 0.7293,说明在降雨较多时相关性提高;2006 年,A、B、C 处理的光能利用率接近,三者平均值比 D 和 E 处理分别高 17.2% 和 36.4%,A、B、C 处理显著高于 E 处理($P < 0.05$);2007

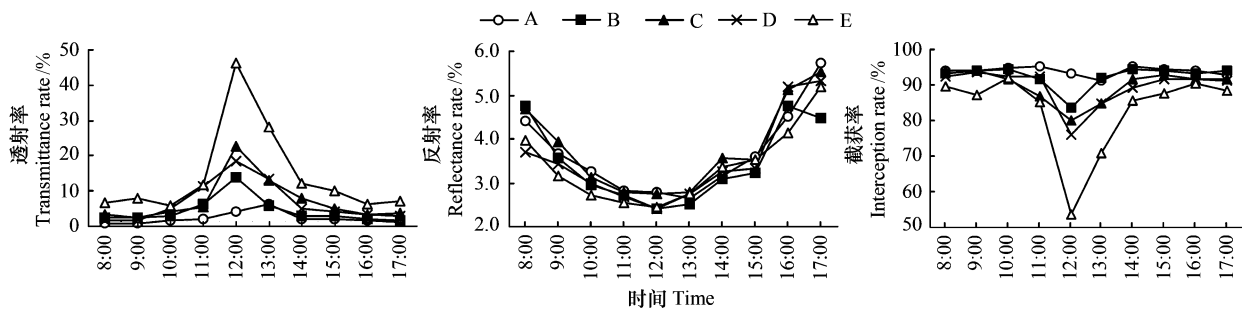


图4 2006年不同株行距下夏大豆结荚期 PAR 透射率、反射率和截获率日变化

Fig. 4 Diurnal change in rates of PAR transmittance, reflectance and interception with different plant-row spacing during pod-setting stage of summer soybean in 2006

年, A 和 B 处理显著高于 C、D、E 处理 ($P < 0.05$), A 和 B 处理平均值比 C、D、E 处理平均值高 16.5% (图 5); 说明植株趋于均匀分布的 A 和 B 处理能有效提高光能利用率。

2.5 不同株行距配置对产量构成因素的影响

试验结果表明 (表 2), 2006 年, A—D 处理的株高随行距加大而降低, E 处理显著高于 D 处理, 2007 年, A—E 处理的株高随行距加大而降低, 其中, E 处理显著低于 A 处理 ($P < 0.05$), 说明株高与行株距关系较复杂; 茎粗、有效荚数、株粒数、百粒重随行距加大、株距缩小而有下降趋势, 分枝数无明显变化规律, 上述指标经方差分析各处理间无显著差异 ($P < 0.05$); 各处理间的生物量不同, 2006 年 A 与 E 处理、2007 年 A、B 与 D、E 处理间达到显著差异, 其它处理间无显著差异 ($P <$

0.05); 在各形态指标中, 除 2006 年株高外, 其他指标均与产量呈正相关, 其中, 株粒数、百粒重、生物量与产量呈显著正相关, 表明这些指标的改良对提高产量有重要作用; 2006—2007 年, A 和 B 处理产量均显著高于 E 处理 ($P < 0.05$); 说明随株距减小、行距加大单株形态指标恶化, 光能利用率降低进而导致产量下降。

3 讨论

在种植密度相同的情况下, 缩小作物行距, 加大株距的正方形种植, 可使植株分布合理, 有效土壤面积可得到充分利用^[19], 夏大豆随株距减小个体间竞争加剧, 无效土壤面积和光损失扩大, 营养物质分配失调, 可能是干物质积累重心上移的重要原因。生育期间 A 和 B 处理的平均 LAI 明显高于 D、E 处理, 其中, 2006 年 C、D、E 处理在播种后第 60 天下降, 表明 C、D、E 处理在较干旱 (测定前连续 1 周没有降雨) 条件下 LAI 受到了较大影响。夏大豆结荚期是大豆生长发育最旺盛时期, 也是 LAI 较高阶段, 该阶段 PAR 截获情况对产量形成有重要影响, 本研究结荚期 PAR 截获率 A 处理明显高于 D 和 E 处理, E 处理 PAR 截获率最低, 因此, 行距过大、株距过小使群体 LAI 下降、光分布不合理, 生育中后期衰老严重, 从而影响了夏大豆群体的光合能力, 与相关报道一致^[20]。

本研究初步表明, 随行距变小株距增加 LAI 和 PAR 截获率上升, 而 LAI 是群体截获光能的重要因子, 较大的光截获率又是增加产量的决定因素^[21-23]; 茎粗和冠重是判断根系是否发达的主要指标^[24], 试验中随行距加大、株距缩小, 茎粗和冠重 (生物量) 也相应下降, 表明根系生长已经受到抑制, 大豆根系干重 85% 分布在水平方向的 0—12.7 cm^[25], 即随株距缩小根系的竞争也就越加激烈, 地下与地上部分的协同作用使株粒数、百粒

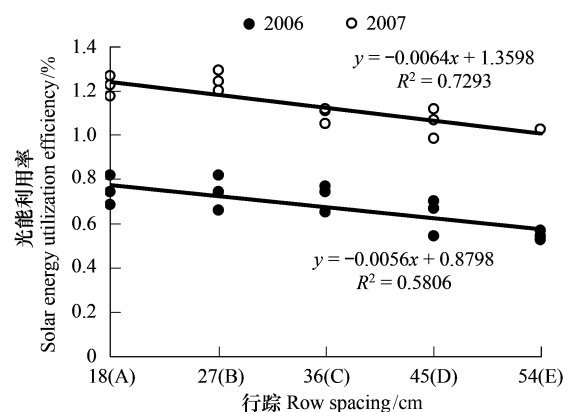


图5 2006—2007年夏大豆不同株行距下光能利用率变化

Fig. 5 Change in solar energy utilization efficiency with different plant-row spacing for summer soybean in 2006—2007

重、生物量等形态指标出现恶化,尤其是光能利用率下降,光能利用率与产量呈极显著正相关($r = 0.9994^{**}$),最终导致在同一密度下产量随行距加大、株距缩小而下降,其中,E 处理籽粒产量比 A、B 处理低 26.9%、26.2% (2006 年)和 16.0%、17.7% (2007 年)。在水资源相对充分的条件下,较高的作物个体竞争能力则具有较高的生产能力^[26],大豆窄行密植主要是通过增加株间距,改善植株通风透光性,有利于叶面积扩展、提高根干重和吸收能力,充分发挥个体和群体生产潜力而实现增产的^[20,27],山东省夏大豆生长季的降雨量为 450—480 mm,是冬小麦生长季的 2 倍以上,因此,在适宜密度下通过调整株行距改善群体结构,有利于增强作物个体生产能力,对提高群体产量有重要作用。

表 2 不同株行距配置对形态性状及产量构成因素的影响

Table 2 Effect of different plant-row spacing of soybean on configuration and yield components

处理 Treatment	株高 Height /cm	茎粗 Thickness of stem/cm	分枝数 Branch number per plant	有效荚数 Productive pod number per plant	粒数 Seed number per plant	百粒重 100 seed weight /g	生物量 Biomass /(g/plant)	产量 Yield /(kg/hm ²)	
2006	A	49.2ab	0.72	3.5	28.6	51.2a	18.2	24.4a	1600a
	B	47.1ab	0.68	3.1	28.2	49.2a	18.5	23.1ab	1583a
	C	44.4ab	0.62	1.8	24.5	44.5ab	17.9	20.7ab	1551ab
	D	42.9b	0.62	3.1	25.9	43.8ab	17.7	19.3ab	1362ab
	E	50.9a	0.62	2.4	21.3	34.1b	17.2	17.8b	1169b
	r	-0.266	0.661	0.261	0.846	0.941 *	0.926 *	0.904 *	-
2007	A	71.4a	0.75	4.2	37.5	69.5ab	18.4	25.1a	2615a
	B	71.1ab	0.76	3.8	38.2	70.5a	18.3	25.1a	2668a
	C	69.8ab	0.73	4.3	35.1	64.3bc	18.2	23.2ab	2340ab
	D	69.6ab	0.72	3.7	33.8	62.1c	17.8	23.0b	2265b
	E	69.1b	0.68	4.0	33.5	60.0c	17.7	22.4b	2196b
	r	0.979 *	0.910 *	0.055	0.995 *	0.995 *	0.892 *	0.994 *	-

r 为各形态性状与产量相关系数,同列数据中不同小写字母表示 5% 的显著差异

4 结论

改变株行距使生境发生变化,随株距减小个体间竞争激烈,营养分配失调,干物质积累中心上移,*LAI* 下降,而窄行距(A、B 处理)具有较高的 *LAI*,尤其在降雨较少时 *LAI* 值仍然较稳定,表现了明显的耐旱能力。随行距加大 *PAR* 透射率增加、截获率降低,光分布不合理而导致光浪费加剧,光能利用率下降。随行距加大、株距缩小,各处理的茎粗、分枝数、有效荚数、株粒数、百粒重和生物量等植株形态指标恶化,产量降低,其中,提高株粒数、百粒重和生物量是增加产量的关键因子。在 2006 和 2007 年两种降水年型中,行距 ≤ 27 cm 时产量构成因素较合理,但均匀分布(行距 $\times$ 株距 = 18 cm $\times$ 18 cm)在生产中不易操作,因此,适宜的种植方式是行距 $\times$ 株距 = 27 cm $\times$ 12 cm。

References:

- [1] Song Q J, Wu T X, Qiu J X, Gai J Y. Effect of soybean population and space on yield and other agronomic traits of different types of variety. *Soybean Science*, 1995, 14(1):40-46.
- [2] Li Y X. *Shandong Soybean*. Jinan: Shandong Science Technology Press, 1999: 497-554.
- [3] Zhao S L, Li F M, Zhang D Y, Duan S S. Crop production is a population process. *Acta Ecologica Sinica*, 1997: 17(1):100-104.
- [4] Robinson S L, Wilcox J R. Comparison of determinate and indeterminate soybean near-isolines and their response to row spacing and planting date. *Crop Science*, 1998, 38(6):1554-1557.
- [5] Holshouser D L, Whittaker J P. Plant population and row-spacing effects on early soybean production systems in the Mid-Atlantic USA. *Agronomy Journal*, 2002, 94(3):603-611.
- [6] Taylor H M. Soybean growth and yield as affected by row spacing and by seasonal water supply. *Agronomy Journal*, 1980, 72(3):543-547.
- [7] Lambert D M, Lowenberg-DeBoer J. Economic analysis of row spacing for corn and soybean. *Agronomy Journal*, 2003, 95(3):564-573.

- [8] Purcell L C, Ball R A, Reaper J D, Vories E D. Radiation use efficiency and biomass production in soybean at different plant population densities. *Crop Science*, 2002, 42(1):172-177.
- [9] Hugie W V, Orf J H. Genotypic interaction of early maturity soybean with row spacings. *Crop Science*, 1989, 29(6):1447-1451.
- [10] Liu X B, Jin J, Wang G H, Herbert S J, Hashemi M. Influences of row-spacing on competing limited resources in soybean (*Glycine max* L. Merrill). *Soybean Science*, 2004, 23(3):215-221.
- [11] Wang B Y, Yu S X. Multi-scale analyses of population distribution patterns. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2005, 29(2):235-241.
- [12] Eberbach P, Pala M. Crop row spacing and its influence on the partitioning of evapotranspiration by winter-grown wheat in Northern Syria. *Plant and Soil*, 2005, 268(1/2):195-208.
- [13] Mathew J P, Herbert S J, Zhang S H, Rautenranz A A F, Litchfield G V. Differential response of soybean yield components to the timing of light enrichment. *Agronomy Journal*, 2000, 92(6):1156-1161.
- [14] Li S X, Wei J J, Liu J G, Gao Z J. Effects of planting with narrow line and proper density on canopy structure light penetration of soybean. *Xinjiang Agricultural Science*, 2005, 42(6):412-414.
- [15] Bowers G R, Rabb J L, Ashlock L O, Santini J B. Row spacing in the early soybean production system. *Agronomy Journal*, 2000, 92(3):524-531.
- [16] Zhao S J, Zhang M C, Yang C Y, Wang W X. Effect of culture factors on growth and yield of soybean. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2002, 24(4):29-32.
- [17] Zhang X Z. *Methods of Crop Physiology Analysis*. Beijing: Agricultural Press, 1992: 50-51.
- [18] Wang X Q, Wang F H, Ren D C, CAO H X, Dong Y H. Micro-climatic effect of raised-bed planting of wheat and its influence on plant development and yield. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2003, 24(2):5-8.
- [19] Han B J, Chen Y, Meng K, Zhao D C. Study on crop's effective nutrient soil areas. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(5):711-716.
- [20] Liu Z T. Study on technology for high yield of solid-seeded soybean. *Soybean Science*, 2002, 21(2):117-122.
- [21] Board J E, Kamal M, Harville B G. Temporal importance of greater light interception to increase yield in narrow-row soybean. *Agronomy Journal*, 1992, 84(4):575-579.
- [22] Ethredge W Jr, Ashley D A, Woodruff J M. Row spacing and plant population effects on yield components of soybean. *Agronomy Journal*, 1989, 81(6):947-951.
- [23] Singer J W. Soybean light interception and yield response to row spacing and biomass removal. *Crop Sciences*, 2001, 41(2):424-429.
- [24] Yang X H, Wu Z P, Zhang G D. Correlations between characteristics of roots and those of aerial parts of soybean varieties. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(1):72-75.
- [25] Sun G Y, Zhang R H, Huang Z W. Soybean root distributions in meadow-blackland and albic soil. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2002, 24(1):45-47.
- [26] Wang Z Y, Lv J Y, Li F M, Xu B C. Effect of root excision on competitive ability and yield of winter wheat. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(2):300-304.
- [27] Zhang J X, Li J S. The effect of solid seeding on the growth of soybean root in high yield spring soybean. *Soybean Science*, 2007, 26(4):500-505.

参考文献:

- [1] 宋启健,吴天侠,邱家驹,盖钧铭. 夏大豆群体结构对不同类型品种产量及农业性状的影响. *大豆科学*, 1995, 14(1):40-46.
- [2] 李永孝. 山东大豆. 济南:山东科学技术出版社, 1999: 497-554.
- [3] 赵松岭,李凤民,张大勇,段舜山. 作物生产是一个群体过程. *生态学报*, 1997, 17(1):100-104.
- [10] 刘晓冰,金剑,王光华,Herbert S J, Hashemi M. 行距对大豆竞争有限资源的影响. *大豆科学*, 2004, 23(8):215-221.
- [14] 李生秀,魏建军,刘建国,高振江. 窄行密植对大豆群体冠层结构及光分布的影响. *新疆农业科学*, 2005, 42(6):412-414.
- [16] 赵双进,张孟臣,杨春燕,王文秀. 栽培因子对大豆生长发育及群体产量的影响. *中国油料作物学报*, 2002, 24(4):29-32.
- [17] 张宪政. *作物生理研究法*. 北京:农业出版社, 1992: 50-51.
- [18] 王旭清,王法宏,任德昌,曹宏鑫,董玉红. 小麦垄作栽培的田间小气候效应及对植株发育和产量的影响. *中国农业气象*, 2003, 24(2):5-8.
- [19] 韩秉进,陈渊,孟凯,赵殿臣. 作物有效土壤营养面积研究. *土壤学报*, 2003, 40(5):711-716.
- [20] 刘忠堂. 大豆窄行密植高产栽培技术的研究. *大豆科学*, 2002, 21(2):117-122.
- [24] 杨秀红,吴宗璞,张国栋. 大豆品种根系性状与地上部性状的相关性研究. *作物学报*, 2002, 28(1):72-75.
- [25] 孙广玉,张荣华,黄忠文. 大豆根系在土层中分布特点的研究. *中国油料作物学报*, 2002, 24(1):45-47.
- [26] 王振宇,吕金印,李凤民,徐炳成. 断根对冬小麦竞争能力与产量的影响. *植物生态学报*, 2007, 31(2):300-304.
- [27] 章建新,李劲松. 窄行密植对高产春大豆根系生长的影响. *大豆科学*, 2007, 26(4):500-505.