

生殖生长期光富集及遮阴对大豆产量及其构成特性的影响

刘 兵^{1,2,3}, 王 程¹, 金 剑¹, 刘居东¹, 张秋英¹, 刘晓冰¹, Stephen J. Herbert⁴

(¹中国科学院东北地理与农业生态研究所黑土生态黑龙江省重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150081; ²中国科学院研究生院, 北京 100049; ³吉林师范大学生命科学学院, 吉林 四平 136000; ⁴美国麻省大学植物与土壤科学系, Amherst, MA, 01003, USA)

摘 要:大豆冠层截获的太阳辐射强度是其产量和产量构成要素的重要决定因素。通过对3个粒重不同的大豆品种(系)生殖生长期进行不同的光处理,研究了田间条件下,高密度(54株·m⁻²)、中密度(27株·m⁻²)和低密度(14株·m⁻²)群体光富集及遮阴对大豆植株产量及其构成特征的影响。结果表明:光富集处理显著增加大豆单株荚数和产量,在低、中和高密度条件下,不同品种(系)单株产量增加幅度分别为26.2%~57.2%、27.7%~71.7%和10.8%~61.4%。遮阴显著降低大豆荚数和产量,不同密度条件下,单株产量相应减少幅度分别为37.1%~46.1%、34.4%~49.7%和41.7%~55.0%。光富集显著增加大豆主茎中下部节位的荚数,在低密度群体下,3个品种大豆主茎1~6节位的荚数分别由7.5个增加到17.3个、5.6个增加到10.1个和6.9个增加到17.2个,并显著减少底部节位的空荚率。光富集和遮阴有增加和减少每荚粒数的趋势,在低密度群体下,光富集使海339每荚粒数显著上升,由2.17上升到2.36,在中密度和高密度有使其每荚粒数上升的趋势但差异不显著。在低密度和中密度下,黑农35每荚粒数显著上升,分别由1.93和1.78上升到2.26和2.13,在高密度下,光富集也使垦农18每荚粒数显著上升,由1.89上升到2.08。在低密度下,遮阴使垦农18每荚粒数由2.17减少到1.97。光富集和遮阴对粒重也有一定影响,在低密度群体下,遮阴增加垦农18和海339粒重8%~11%,而在高密度群体下,遮阴降低海339百粒重17%,百粒重的变化与种植密度及品种有关。单株荚数和粒数的改变是对产量贡献最大的因子。

关键词:大豆;光富集;遮阴;产量特征

中图分类号:S565.1

文献标识码:A

文章编号:1000-9841(2008)05-0764-09

Effects of Light Enrichment and Shade during Reproductive Stage on Yield and Yield Components in Soybean

LIU Bing^{1,2,3}, WANG Cheng¹, JIN Jian¹, LIU Ju-dong¹, ZHANG Qiu-ying¹, LIU Xiao-bing¹, Stephen J. Herbert⁴

(¹Northeast Institute of Geography and Agroecology, CAS, Harbin 150081, Heilongjiang; ²Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049; ³College of Life Science, Jilin Normal University, Siping 136000, Jilin China; ⁴美国麻省大学植物与土壤科学系, Amherst, MA, 01003, USA)

Abstract: Light intensity intercepted by soybean canopy during the reproductive period is an important environmental factor determining soybean yield and yield components. Responses of yield and yield components to light enrichment and shade under varied populations were investigated. The results showed that light enrichment increased pod number and seed yield per plant significantly. Under low, moderate and high density conditions, light enrichment increased seed yield per plant from 26.2% to 57.2%, 27.7% to 71.7% and 10.8% to 61.4% respectively. Shade decreased pod number and seed yield per plant significantly. Accordingly, under low, moderate and high density conditions, shade decreased seed yield per plant from 37.1% to 46.1%, 34.4% to 49.7% and 41.7% to 55.0%. Light enrichment increased pod number of main stem nodes in the central and lower region of soybean plants. Under low density condition, light enrichment increased pod number in H339 from 7.5 to 17.3 at main stem nodes 1 to 6, similarly, from 5.6 to 10.1 in HN35, from 6.9 to 17.2 in KN18. Light enrichment significantly decreased pod abscission ratio of main stem nodes in the lower region of soybean plants. Light enrichment and shade respectively increased or decreased seed number per pod. Under low density condition, light enrichment increased seed number per pod in H339 from 2.17 to 2.36. Under low and moderate density condition, light enrichment increased

收稿日期:2008-04-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30671315);黑龙江省杰出青年科学基金资助项目(JC200617);哈尔滨市留学回国基金资助项目(2005AFL-Y-J-003)。

作者简介:刘兵(1978-),男,博士,研究方向为作物生理生态学。E-mail:liubing3562@126.com。

通讯作者:刘晓冰,研究员,博士生导师。E-mail:xbxliu@yahoo.com。

seed number per pod in HN35 from 1.93 to 2.26, 1.78 to 2.13. Under high density condition, light enrichment increased seed number per pod in KN18 from 1.89 to 2.08. Under low density condition, shade decreased seed number per pod in KN18 from 2.17 to 1.97. Light enrichment and shade also influenced seed size under varied populations. Under low density condition, shade increased seed size at 8% - 11% in H339 and KN18. However, under high density condition, shade decreased seed size 17% in H339. Variation of seed size had closer relation with plant density and variety. Pod number and seed number per plant as the yield component contributed more to the final yield.

Key words: Soybean; Light enrichment; Shade; Yield components; Yield

大豆冠层截获的太阳辐射强度是其产量和产量构成要素的重要决定因素^[1-3]。Mathew 等^[4]研究表明,营养生长后期或开花初期光富集提高大豆产量 144% ~ 252%, 而结荚初期光富集增加产量 32% ~ 115%, 产量的增加主要来自于荚数的增多。Schou 等^[5]利用照明器或反光板处理大豆发现,增加大豆生育期间的光照可提高大豆荚数和产量,并使每荚籽粒数目有一定改变。Jiang 等^[6]证明,初花期至鼓粒初期遮阴减少花荚数,增加落花落荚率,导致荚数和产量下降。Jin Kakiuchi 等^[7]研究了在 11 株·m⁻² 的密度条件下,不同程度遮阴(减少光照 78%、47%、29%)对大豆的影响,研究表明与自然光照对比,随遮阴强度增加大豆荚数逐渐减少,每荚粒数在重度遮阴处理后显著下降,遮阴使得籽粒粒重略有增加,其中轻度遮阴使粒重增加为 15%。研究在 3 个密度条件下,通过对 3 个粒重不同的大豆品种进行光富集及遮阴处理,分析其产量和产量构成因素变化,旨在揭示大豆冠层群体光环境变化与密度协调关系,寻求适合种植密度或方式,最终为提高产量提供一定科学参考。

1 材料和方法

试验地点在中国科学院海伦农业生态实验站(N47°27', E126°56'), 该站冬季寒冷漫长,春季多风低温,夏季雨热同季,年平均气温 1.5℃,年平均降水量 530 mm 左右。选取 3 个大豆品种(系),海 339、黑农 35 和垦农 18; 在 14 万株·hm⁻²、27 万株·hm⁻²、54 万·hm⁻² 3 个种植密度下,随机区组排列,3 次重复。每个小区面积为 17.5 m², 垄作方式,垄宽 0.67 m。2007 年 5 月 7 日人工播种,播种前按尿素 50 kg·hm⁻² (N 46%)、二铵 50 kg·hm⁻² (N 18%、P₂O₅ 46%)、“三元素”150 kg·hm⁻² (N 18%、P₂O₅ 16%、K₂O 16%)施底肥,其他各项田间管理同大田。于始花期(R1)进行光富集和遮阴处理。光富集处

理是通过生育期间把每小区中间行利用 90 cm 宽的金属筛网向中间行外以 45°角放置,该方式不影响根系的竞争,但为中间行植株增加更多的光截获,该种方式与不处理的植株相比可增加中间行植株底部光截获 25% 以上^[4]。遮阴处理是在试验田里支撑起 2 m 高的棚,其上覆盖遮阳网进行遮光,可减少相当于自然光照的 25% 左右的光照。收获时,每小区随机选取 15 株进行考种,测定单株产量、荚数、粒数和单粒重,并分节位记录荚数、粒数、荚粒数及粒重。利用 SAS 系统进行统计分析,用 SigmaPlot 2000 作图。

2 结果与分析

2.1 光处理对大豆单株产量和产量构成的影响

与自然光照相比,光富集显著增加大豆单株产量(表 1、2、3)。在低、中、高密度群体下,光富集分别增加海 339 品系单株产量 57.2%、71.7%、18.0%;增加黑农 35 单株产量 48.0%、53.1%、10.8%;增加垦农 18 单株产量 26.2%、27.7%、61.4%。而遮阴显著降低大豆单株产量。在低、中、高密度群体下,遮阴处理分别降低海 339 品系单株产量 37.1%、45.3%、51.1%;降低黑农 35 单株产量 39.9%、34.4%、55.0%;降低垦农 18 单株产量分别为 46.1%、49.7%、41.7% (表 1、2、3)。

与自然光照相比,光富集处理显著增加大豆单株荚数和粒数。在低、中、高密度群体下,光富集分别增加海 339 品系单株荚数 50.9%、71.1%、19.5%;增加黑农 35 单株荚数 29.7%、41.3%、6.2%;增加垦农 18 单株荚数 20.4%、33.3%、43.6%。而遮阴则显著降低大豆单株荚数(表 1、2、3),分别减少海 339 品系单株荚数 45.3%、47.7%、41.9%;减少黑农 35 单株荚数 42.9%、43.0%、51.3%;减少垦农 18 单株荚数 47.6%、44.1%、40.7%。

表 1 光处理对不同种植密度海 339 大豆单株产量及其构成要素的影响

Table 1 Effects of light treatments on yield and yield components of Hai 339 at three densities

密度 Densities	处理 Treatment	单株产量 Yield per plant/g	单株荚数 Pods per plant	每荚粒数 Seed per pod	单株粒数 Seed No.	百粒重 Seed size/g
D ₁₄	光富集 LE	36.0a	59.3a	2.36a	141a	25.5a
	自然光 CK	22.9b	39.3b	2.17b	86b	27.3a
	遮荫 S	14.4c	21.5c	2.28b	49c	30.2b
D ₂₇	光富集 LE	21.8a	40.2a	2.05a	83a	26.3a
	自然光 CK	12.7b	23.5b	1.93a	45b	28.7b
	遮荫 S	6.95c	12.3c	1.98a	24c	29.2b
D ₅₄	光富集 LE	9.52a	15.9a	2.22a	35a	27.1a
	自然光 CK	8.07a	13.3b	2.14ab	28b	29.0a
	遮荫 S	3.95b	7.73c	2.01b	16c	23.9b

不同字母表示差异达 5% 显著水平,下同。 D₁₄、D₂₇ 和 D₅₄ 分别表示密度为 14 株·m⁻²、27 株·m⁻² 和 54 株·m⁻²,下同。
LE、CK 和 S 分别表示光富集、自然光和遮荫,下同。
D₁₄、D₂₇ and D₅₄ are 14 plants·m⁻²、27 plants·m⁻² and 54 plants·m⁻² respectively, same as follow.
Different letter mean significant at 5% level, same as follow. LE, CK and S are light enrichment, natural light and shade treatments respectively, same as follow.

表 2 光处理对不同种植密度黑农 35 大豆单株产量及其构成要素的影响

Table 2 Effects of light treatments on yield and yield components of Heinong 35 at three densities

密度 Densities	处理 Treatment	单株产量 Yield per plant/g	单株荚数 Pods per plant	每荚粒数 Seed per pod	单株粒数 Seed No.	百粒重 Seed size/g
D ₁₄	光富集 LE	23.2a	58.1a	2.26a	132a	17.8a
	自然光 CK	15.7b	44.8b	1.93b	88b	18.4a
	遮荫 S	9.4c	25.6c	2.15b	55c	17.4a
D ₂₇	光富集 LE	15.4a	41.4a	2.13a	88a	17.7a
	自然光 CK	10.1b	29.3b	1.78b	53b	19.1a
	遮荫 S	6.6c	16.7c	2.07a	35c	18.5a
D ₅₄	光富集 LE	9.0a	24.0a	2.19a	52a	17.2a
	自然光 CK	8.1a	22.6a	2.00a	46a	17.9a
	遮荫 S	3.7b	11.0b	1.87b	21b	17.7a

与自然光照相比,在低、中、高密度群体下,光富集增加海 339 品系单株粒数分别为 63.5%、85.7%、26.1%;增加黑农 35 单株粒数为 49.9%、66.6%、13.0%;增加垦农 18 单株粒数分别为 19.1%、35.5%、57.3%。遮荫同样显著降低大豆单株粒数(表 1、2、3),遮荫处理降低海 339 品系单株粒数分别为 43.3%、46.3%、44.6%;减少黑农 35 单株粒数分别为 37.7%、33.4%、55.3%;减少垦农 18 单株粒数分别为 50.5%、52.6%、44.2%。

表 3 光处理对不同种植密度垦农 18 大豆单株产量及其构成要素的影响

Table 3 Effects of light treatments on yield and yield components of Kenning 18 at three densities

密度 Densities	处理 Treatment	单株产量 Yield per plant/g	单株荚数 Pods per plant	每荚粒数 Seed per pod	单株粒数 Seed No.	百粒重 Seed size/g
D ₁₄	光富集 LE	21.5a	63.7a	2.13a	136a	15.8ab
	自然光 CK	17.0b	52.9b	2.17a	114a	14.9a
	遮荫 S	9.2c	27.7c	1.97b	57b	16.1b
D ₂₇	光富集 LE	19.3a	60.5a	2.14a	130a	14.9a
	自然光 CK	15.1b	45.4b	2.11a	96b	15.9ab
	遮荫 S	7.6c	25.4c	1.78b	46c	16.6b
D ₅₄	光富集 LE	11.3a	34.6a	2.08a	72a	15.5a
	自然光 CK	7.0b	24.1b	1.89b	46b	15.4a
	遮荫 S	4.1c	14.3c	1.75b	26c	16.1a

光富集同时也有增加每荚粒数的趋势(表 1、2、3),但与品种和密度有关。在低密度群体下,海 339 的每荚粒数由 2.17 增加到 2.36,处理间差异显著,其他密度无显著差异;在低、中密度条件下,黑农 35 的每荚粒数由 1.93 和 1.78 分别增加到 2.26 和 2.13,处理间差异显著,而在高密度群体下无显著差

异;垦农 18 的每荚粒数只有在高密度群体下差异显著,由 1.89 增加到 2.08,其他密度没有差异。遮阴对品系海 339 每荚粒数没有影响,对黑农 35 的每荚粒数只在高密度群体下有影响,却明显减少垦农 18 的每荚粒数,在中、低密度群体下差异显著,由 2.11 和 2.17 分别下降到 1.78 和 1.97。

光富集降低大豆百粒重(垦农 18 低密度除外),而遮荫的作用表现出品种间的差异(表 1、2、3)。仅在中密度条件下,光富集显著降低海 339 品种大豆的百粒重,对比自然光照,百粒重由 28.71 g 下降到 26.30 g。遮阴对大豆百粒重的影响与种植密度关系密切。在低密度条件下,遮阴显著增加海 339 品种大豆的百粒重,对比自然光照,百粒重由

27.25 g 增加到 30.24 g;在高密度条件下,遮阴显著降低海 339 品种大豆的百粒重,对比自然光照,百粒重由 28.96 g 下降到 23.93 g。遮阴对黑农 35 品种大豆百粒重无显著影响。在低密度条件下,遮阴显著增加垦农 18 品种大豆的百粒重,对比自然光照,百粒重由 14.9 g 增加到 16.1 g。

2.2 光处理对大豆植株节间产量构成因子的影响

光富集总体上能增加不同节位的荚数,尤其显著增加大豆主茎下部节位(1~6)的荚数,减少空荚率,但品种间和群体间有所差异。如在低、中密度群体下经光富集处理后,海 339 大豆主茎 1~6 节位的荚数分别由 7.5 个和 2 个增加到 17.3 个和 4.9 个(图 1);在低、高密度群体下,黑农 35 大豆主茎 1

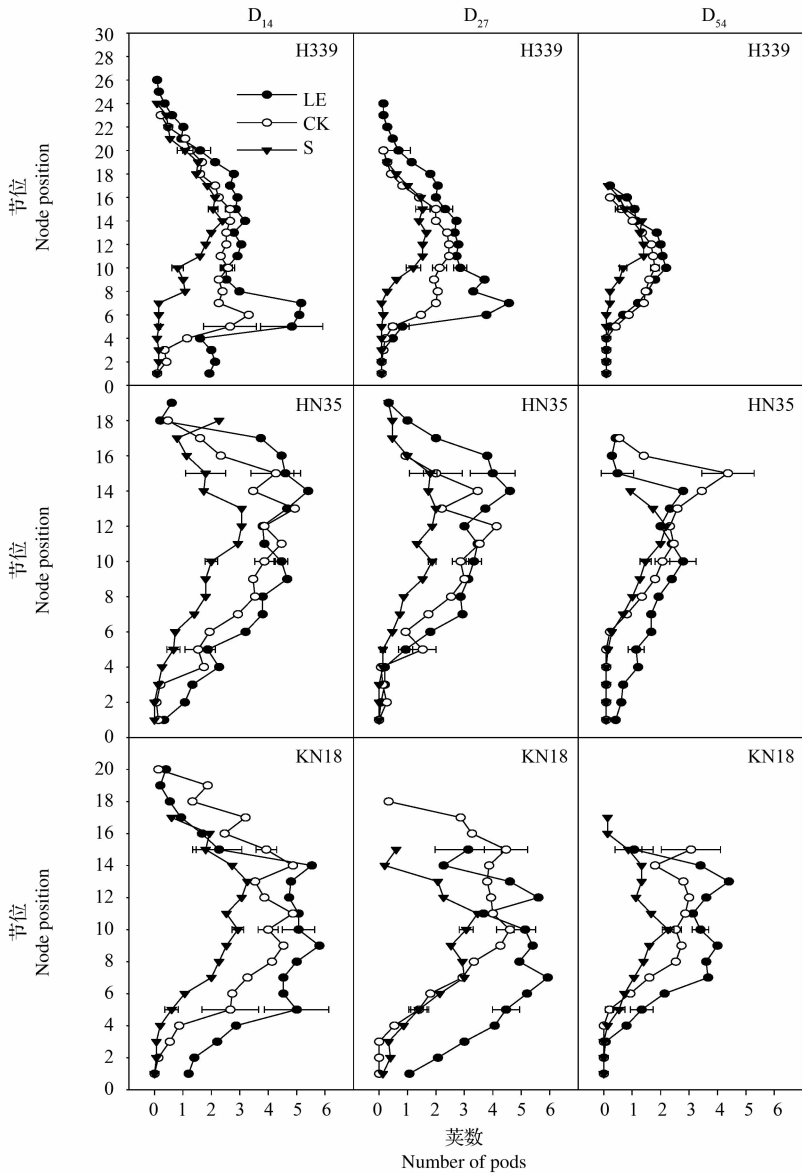


图 1 光处理对 3 个种植密度下各品种大豆植株节间荚数的影响
Fig. 1 Effects of light treatments on pod number at each main stem node of three cultivars at three densities

~6 节位的荚数分别由 5.6 个和 0.3 个增加到 10.1 个和 5.3 个(图 1);而在低、高密度群体下,垦农 18 大豆相应荚数分别由 6.9 个和 1.2 个增加到 17.2 个和 4.3 个(图 1)。这表明光富集处理能显著减少低节位上的花荚败育,最大程度发挥大豆生产潜力。遮阴能显著减少大豆主茎中下部节位的荚数,如在低密度群体下,海 339 大豆,经遮阴处理后,主茎 1~6 节位的荚数由 7.5 个减少到 0.3 个,黑农 35 品种大豆主茎 1~6 节位的荚数由 5.6 个减少到 1.8 个,垦农 18 品种大豆,相应荚数由 6.9 个减少到

2.0 个。

从图 1~3 中可以看出,在低密度条件下,H339 大豆经光富集处理后显著增加了植株全部节位的每节荚数、粒数和粒重,其中下部节位(1~7)增加幅度最大,遮阴显著降低植株全部节位的每节荚数、粒数和粒重;在中、高密度群体下,由于本身群体对下层的遮蔽效应,使得不同光处理的植株 1~4 节位的有效荚数均为零。从图 4 可以看出,在低密度群体下,光富集处理增加了每荚粒数,在最下层(1~4)节位上尤为显著。

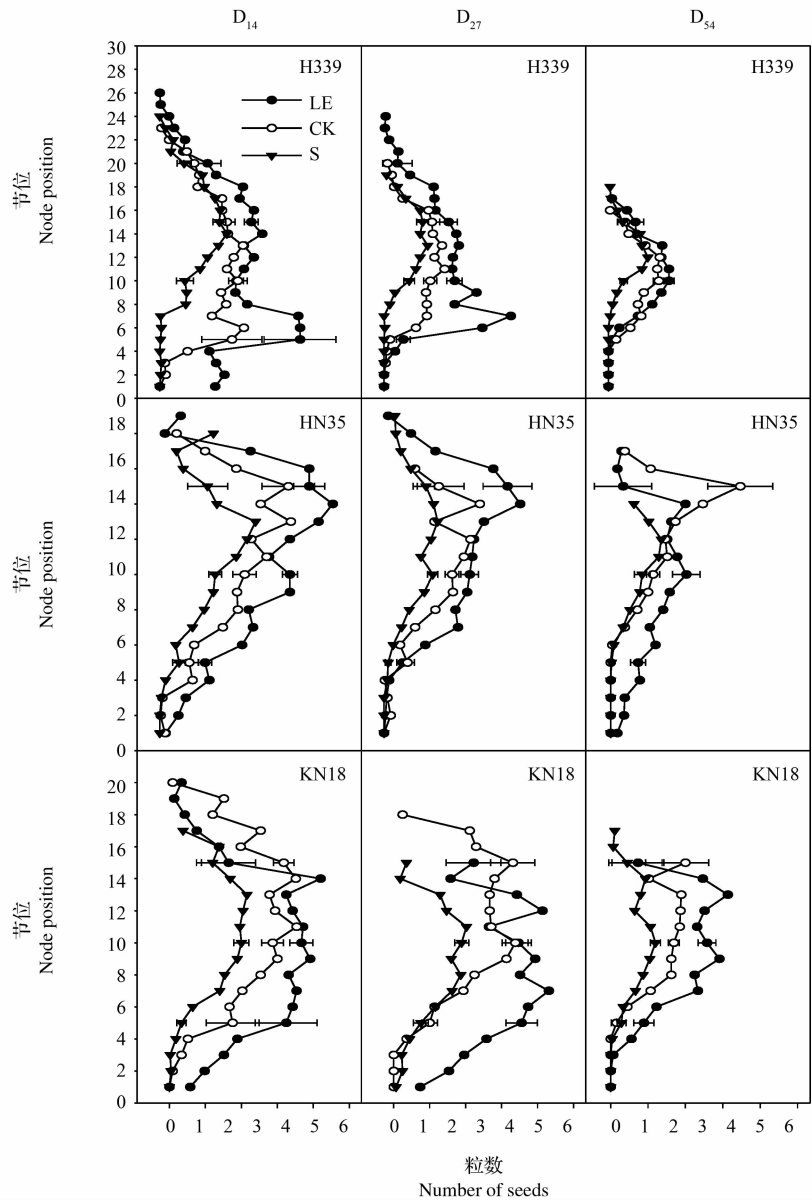


图 2 光处理对 3 个种植密度下各品种大豆植株节间粒数的影响

Fig. 2 Effects of light treatments on seed number at each main stem node of three cultivars at three densities

从图 5 可看出,在低、中密度条件下,在大多数节位上,光富集处理在增加每节荚数的同时,有降低每粒粒重的趋势,而遮阴处理有增加每粒粒重的趋势;但在高密度条件下,在大多数节位上,遮阴处理有降低每粒粒重的趋势。

从图 1~3 可看出,在不同密度条件下,黑农 35 和垦农 18 经光富集处理后显著增加了植株大多数节位的每节荚数、粒数和粒重;遮阴处理显著降低了

植株大多数节位的每节荚数、粒数和粒重。从图 4 可看出,在低、中密度条件下,黑农 35 光富集和遮阴处理均有增加中下部节位上每荚粒数的趋势,遮阴处理有降低垦农 18 植株大多数节位上每荚粒数的趋势(图 4)。从图 5 可看出,除去底部瘪荚外,光富集和遮阴处理对黑农 35 全部节位上的籽粒粒重的影响较弱。在低、中密度条件下,遮阴处理有增加垦农 18 植株大多数节位上籽粒粒重的趋势(图 5)。

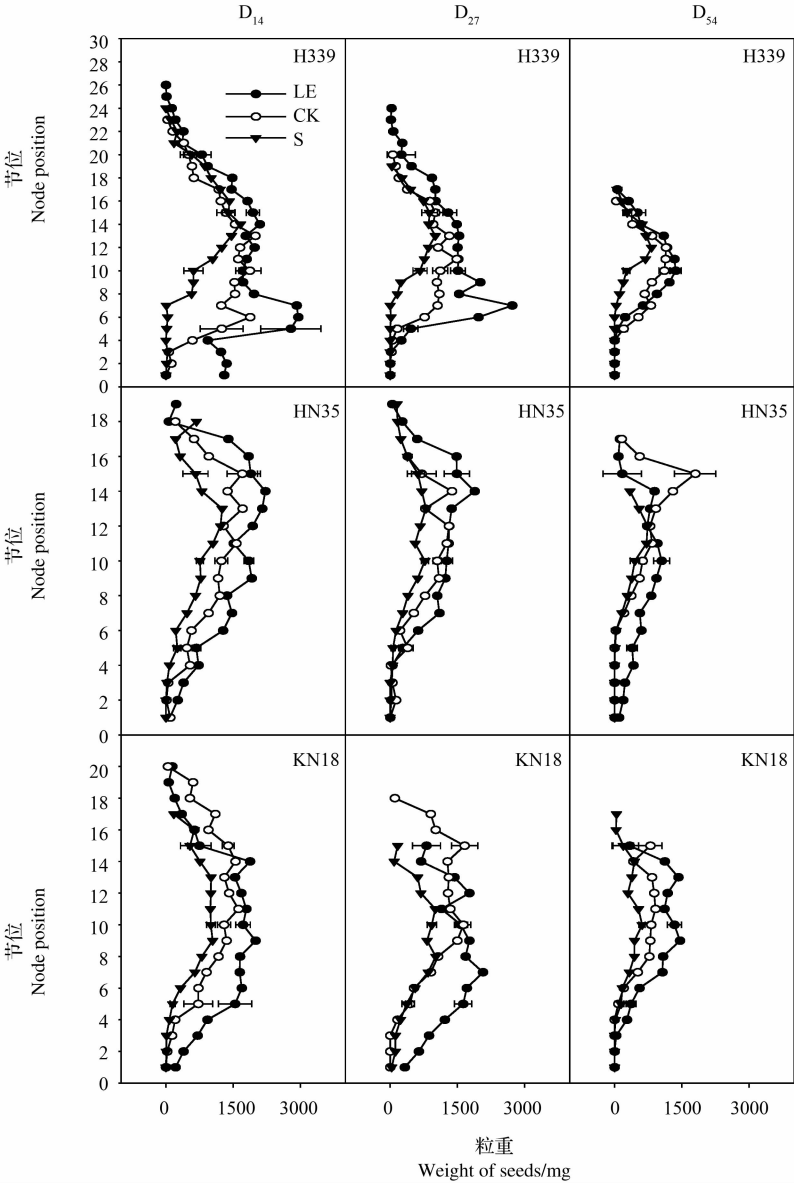


图 3 光处理对 3 个种植密度下各品种大豆植株节间粒重的影响

Fig. 3 Effects of light treatments on seed weight at each main stem node of three cultivars at three densities

3 讨论

大豆的产量是其遗传产量潜力和环境条件互

作的结果。在所有环境条件中,与温度、水分和土壤肥力相比,光是影响大豆和其他许多作物产量的最显著因素。研究表明,大豆冠层截获的太阳

辐射强度是其产量和产量构成要素的重要决定因素。Mathew 等^[4]研究表明,开花初期光富集能提高大豆产量 144%~252%。在研究中,光富集产量增加幅度最高仅达 71.7%。导致这种产量增加差异的可能原因是,前者所用大豆品种是多分枝

型的,在初花期开始光富集处理增加了较低节位上的分枝数目,分枝的增加极大增加了荚的数目。另外,其种植的行距是 25 cm,而本试验种植的行距是 67 cm。显然在窄行条件下,光富集的效果更加明显。

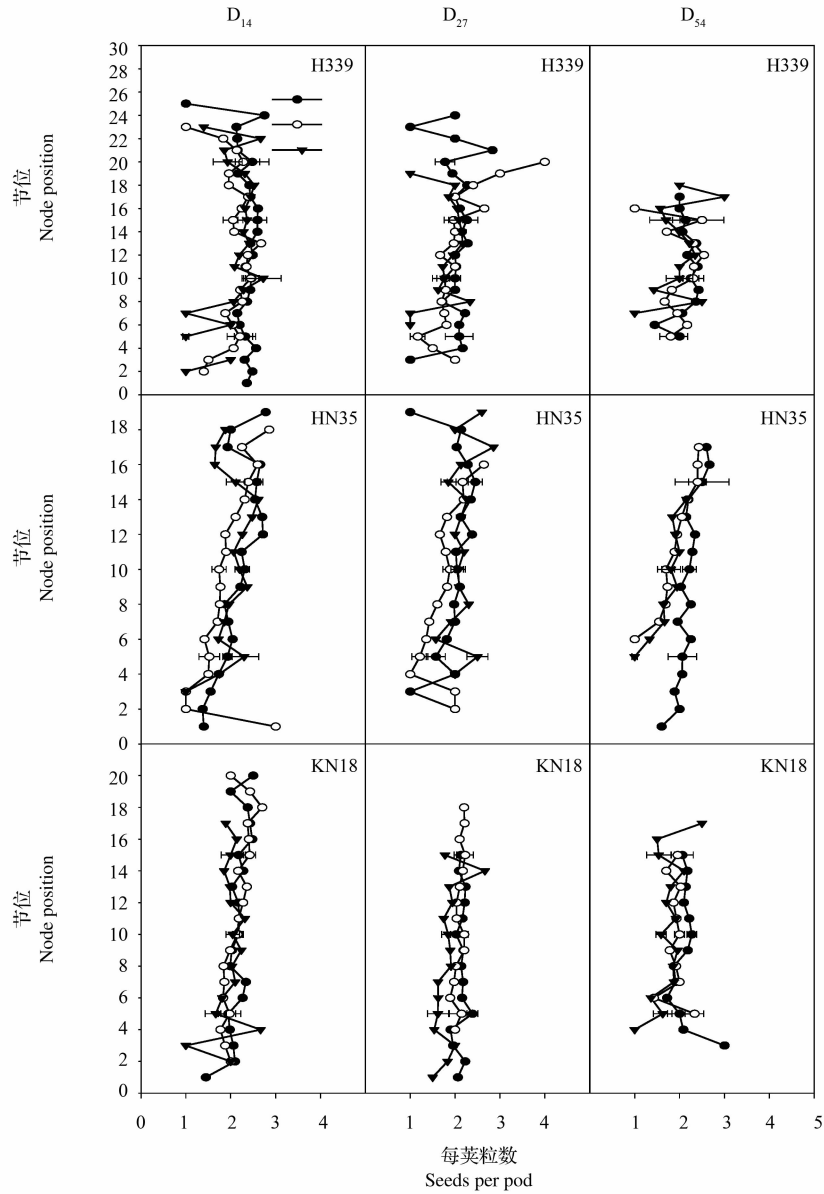


图4 光处理对3个种植密度下各品种大豆植株节间每荚粒数的影响

Fig. 4 Effects of light treatments on seed number per pod at each main stem node of three cultivars at three densities

光富集和遮阴增加或减少了3个大豆的单株荚数、粒数和产量。但在不同密度条件下,品种间对光照处理的响应不同。对于黑农35,在54株·m⁻²密度条件下,光富集仅分别增加荚数和产量6.2%和10.8%,这表明增加光照不是影响产量的主要因素,这可能与土壤的水分养分因子有关,株距过密,导致

植株对土壤水分、养分等竞争激烈,进而成为主要的产量限制因子;而对于垦农18,光照仍是增加产量的主要因素,光富集后单株荚数增加43.6%,单株产量增加61.4%;对于黑农35,低密度条件下光富集处理单株产量和粒数增加48.0%和49.9%;而高密度条件下光富集处理单株产量和粒数增加

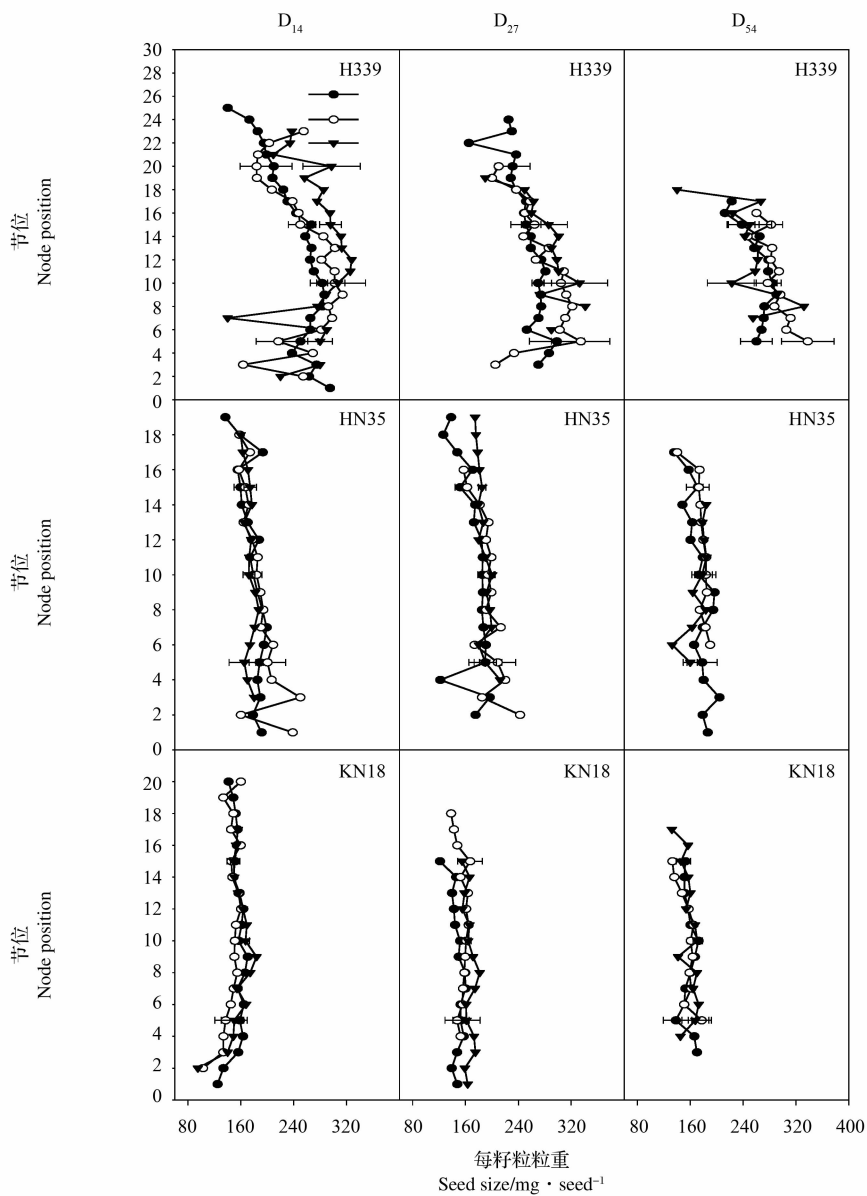


图5 光处理对三个种植密度下各品种大豆植株节间每籽粒粒重的影响

Fig 5 Effects of light treatments on seed size at each mainstem node of three cultivars at three densities

10.8%和13.0%。对于垦农18品种低密度条件下光富集处理单株产量和粒数增加26.2%和19.1%；而高密度条件下光富集处理单株产量和粒数增加61.4%和57.3%。这种品种间对光照需求的差异可能与品种自身的生理特性及群体结构有关。说明不同大豆群体对光照改变的敏感程度不一样。

光富集有增加每荚粒数的趋势,但在不同品种和不同密度间有一定差异。海339在低密度条件下进行光富集增加了每荚粒数;黑农35在低、中密度条件下进行光富集增加了每荚粒数;而垦农18在高密度条件下进行光富集增加了每荚粒数。这说明不同品种对光富集的响应随密度不同而有差异。遮阴

有降低每荚粒数的趋势,如在高密度条件下,黑农35的每荚粒数由2.00下降到1.87,在中、低密度条件下,垦农18的每荚粒数由2.11和2.17分别下降到1.78和1.97。但在中密度条件下,对黑农35进行遮阴处理,每荚粒数比自然光照略有上升。遮阴使得单株荚数大量减少,每荚粒数的增加可能是对产量减少的一种内在补偿效应。Mathew等研究表明:每荚籽粒数目在决定大豆产量的所有因子中是影响效果较弱的因素。在其他研究者的试验中,也得到相似的结果,即每荚籽粒数目有较小的或没有显著性差异^[8-9]。然而,这里有这样的小趋势,光富集处理使得每荚籽粒数目得到增加。大豆的每荚粒

数强烈受大豆内在遗传机制的控制,但试验表明其仍然会被环境条件所影响。

光富集对大豆百粒重有一定影响,但多数未达到显著水平。仅在中密度条件下,光富集显著降低海 339 品种大豆的百粒重,对比自然光照,百粒重由 28.71 g 下降到 26.30 g。这可能是光富集极大增加了单株荚数和粒数(分别增加了 71.1% 和 85.7%),即库容增大导致相对源弱,从而导致同化物在单个籽粒内的积累有所减少,使得百粒重下降。

遮阴对大豆百粒重的影响与种植密度关系密切。在低密度条件下,遮阴显著增加海 339 和垦农 18 品种大豆的百粒重。这可能是在生殖生长期,遮阴极大减少了单株荚数(分别减少了 45.3% 和 47.6%),导致相对源强使得籽粒粒重有上升趋势,也是大豆补偿产量损失的一个方式。McAlister 和 Schonbeck 等提出:籽粒大小的增加可能是对去荚操作荚数目减少的一种补偿机制^[10-11]。试验认为生殖生长期轻度遮阴(减少 25% 的光照)可以看作是源库调节中的去荚作用。在高密度条件下,除遮阴胁迫,株距过密导致土壤水分、养分竞争激烈使得海 339 籽粒粒重显著下降达 17%。

关于光富集和遮阴对每荚粒数和粒重也有不同的研究结果。Liu 等^[12]研究发现,大豆以行距为 25 cm 的方式种植时,生殖生长期光富集有使籽粒粒重增加的趋势;遮阴(减少光照 52%)有使籽粒粒重减少的趋势。Liu 和 Herbet 研究认为,不同的行距引起大豆生长竞争激烈程度不同,不同大豆品种对行距变化的反映不同^[13]。可以看出,光富集及遮阴影响籽粒粒重的效果,与大豆品种、遮阴强度、种植密度及大豆行距有密切关系。可以认为,大豆产量构成要素(荚数、粒数、每荚粒数、籽粒粒重)的改变就是大豆群体激烈竞争的最终反应结果。单株荚数和粒数是对产量变动贡献最大的因子。通过研究来评价不同粒重大豆基因型对不同群体或光环境的响应,将为确立合理的田间配置,增加株行间的光照,探讨适合的种植密度或方式,最终为提高产量提供

一定科学参考。

参考文献

- [1] Board J E, Harville B G. Explanations for greater light interception in narrow- vs- wide- row soybean [J]. *Crop Science*, 1992, 32: 198-202.
- [2] Purcell L C, Ball R A, Reaper J D, et al. Radiation use efficiency and biomass production in soybean at different population densities [J]. *Crop Science*, 2002, 42: 172-177.
- [3] 董钻. 大豆产量生理 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 20-25. (Dong Z. Soybean yield physiology [M]. Beijing: Agricultural Press, 2000: 20-25.)
- [4] Mathew J P, Herbert S J, Zhang S H. Differential response of soybean yield components to the timing of light enrichment [J]. *Agronomy Journal*, 2000, 92: 1156-1161.
- [5] Schou J B, Jeffers D L, Streeter J G. Effects of reflectors, black boards, or shades applied at different stages of plant development on yield of soybeans [J]. *Crop Science*, 1978, 18: 29-34.
- [6] Jiang H, Egli D B. Shade induced changes in flower and pod number and flower and fruit abscission in soybean [J]. *Agronomy Journal*, 1993, 52: 84-86.
- [7] Kakiuchi J, Kobata T. Shading and thinning effects on seed and shoot dry matter increase in determinate soybean during the seed-filling period [J]. *Agronomy Journal*, 2004, 96: 398-405.
- [8] Dominguez C, Hume D J. Flowering, abortion, and yield of early-maturing soybeans at three densities [J]. *Agronomy Journal*, 1978, 70: 801-805.
- [9] Herbert S J, Litchfield G V. Partitioning soybean yield components [J]. *Crop Science*, 1982, 22: 1074-1079.
- [10] McAlister D F, Krober O A. Response of soybean to leaf and pod removal [J]. *Agronomy Journal*, 1958, 50: 674-677.
- [11] Schonbeck M W, Hsu F C, Carlsen T M. Effect of pod number on dry matter and nitrogen accumulation and distribution in soybean [J]. *Crop Science*, 1986, 26: 783-788.
- [12] Liu X B, Herbert S J, Hashemi A M. Yield-density relation of glyphosate-resistant soybeans and their responses to light enrichment in northeastern USA [J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2006, 192: 140-146.
- [13] 刘晓冰, 金剑, S. J. Herbert. 行距对大豆竞争有限资源的影响 [J]. *大豆科学*, 2004, 23(3): 215-221. (Liu X B, Jin J, Herbert S J. Influences of row-spacing on competing limited resources in soybean [J]. *Soybean Science*, 2004, 23(3): 215-221.)

(上接第 763 页)

- [10] 黄承运, 满为群, 陈怡, 等. 东北大豆丰产种质的拓宽与改良 I. 品种间杂交 F₁ 代杂种优势与配合力分析 [J]. *大豆科学*, 1993, 12(3): 190-195. (Huang C Y, Man W Q, Chen Y, et al. Improvement of soybean high yield germplasm in northeast I. Analysis heterosis and combining ability of F₁ intervarietal cross [J]. *Soybean Science*, 1993, 12(3): 190-195.)
- [11] 谢甫锦, 丑晓奇, 张惠君, 等. 大豆品种远缘杂交 F₁ 代的杂种优势分析 [J]. *大豆科学*, 2007, 26(6): 857-861. (Xie F T,

Chou X Q, Zhang H J, et al. F₁ Heterosis of soybean crossed from varieties released in different geographic places and decades [J]. *Soybean Science*, 2007, 26(6): 857-861.)

- [12] 李磊, 李智, 王敏, 等. 大豆杂种优势及其与双亲遗传关系的研究 [J]. *安徽农业科学*, 1998, 26(4): 293-295. (Li L, Li Z, Wang M, et al. Studies of heterosis and genetics relations of parents in soybean [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 1998, 26(4): 293-295.)