

张娜, 蔡丽君, 刘婧琦, 等. 不同栽培方式和种植密度对大豆抗倒伏性能及产量的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2025, 56(5):000-000.

ZHANG N, CAI L J, LIU J Q, et al. Effects of different cultivation methods and planting density on lodging resistance and yield of soybean[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2025, 56(5):000-000.

## 不同栽培方式和种植密度对大豆抗倒伏性能及产量的影响

张娜<sup>1</sup>, 蔡丽君<sup>1</sup>, 刘婧琦<sup>1</sup>, 杨旭<sup>1</sup>, 郑伟<sup>1</sup>, 唐晓东<sup>2</sup>, 王智达<sup>3</sup>, 盖志佳<sup>1\*</sup>

(1. 黑龙江省农业科学院 佳木斯分院, 黑龙江 佳木斯 154007; 2. 黑龙江省农业科学院 大豆研究所, 哈尔滨 150086; 3. 山东农业大学 农学院, 山东 泰安 271018)

**摘要:**[目的]为探讨大垄密植和传统垄作与不同种植密度对大豆倒伏和产量的差异, 研究不同栽培方式和种植密度对大豆的植株形态指标、茎秆力学特性、抗倒伏性和产量的影响。[方法]分析栽培方式 65 cm 常规垄(CK)、130 cm 大垄内行(C<sub>1</sub>)、130 cm 大垄外行(C<sub>2</sub>)和 4 种植植密度(D<sub>1</sub>: 2.5×10<sup>5</sup>株·hm<sup>-2</sup>, D<sub>2</sub>: 3.5×10<sup>5</sup>株·hm<sup>-2</sup>, D<sub>3</sub>: 4.5×10<sup>5</sup>株·hm<sup>-2</sup>, D<sub>4</sub>: 5.5×10<sup>5</sup>株·hm<sup>-2</sup>)下大豆上部、中部和下部的相对叶绿素含量(SPAD)、干物质积累和籽粒性状, 茎秆形态特征、茎秆抗折力、倒伏率及产量。[结果]不同栽培方式下, 大豆不同部位的 SPAD 表现为: C<sub>2</sub>>CK>C<sub>1</sub>; 株高、底荚高、平衡点和节间长度表现为: C<sub>1</sub>>C<sub>2</sub>>CK, 有效分枝数表现为: CK>C<sub>2</sub>>C<sub>1</sub>, 主茎节数表现为 C<sub>1</sub>和 C<sub>2</sub>显著高于 CK, 茎粗和不同部位茎秆、叶片、荚粒干物质积累表现为: C<sub>2</sub>>CK>C<sub>1</sub>, 并且随种植密度增大, 株高、底荚高、平衡点和节间长度逐渐升高, 茎粗、有效分枝数、主茎节数、不同部位干物质积累及 SPAD 逐渐降低。茎秆抗折力和倒伏率表现为: CK>C<sub>2</sub>>C<sub>1</sub>, 大豆不同部位有效荚数、粒数和粒重及产量均表现为: C<sub>2</sub>>CK>C<sub>1</sub>并随着种植密度增大逐渐降低; 百粒重表现为: C<sub>1</sub>>C<sub>2</sub>>CK, 对密度无响应。[结论]无论高密度或低密度, 130 cm 大垄茎秆特性和抗倒伏能力虽低于 65 cm 常规垄, 但倒伏只发生在 5.5×10<sup>5</sup>株·hm<sup>-2</sup>密度条件下, 且 SPAD、干物质积累、籽粒性状、产量构成因素及产量均高于 65 cm 常规垄。

**关键词:**大豆; 茎秆抗折力; 干物质积累; 倒伏; 产量

中图分类号: S513

文献标识码: A

文章编号: 1000-1700(2025)05-0000-00

## Effects of Different Cultivation Methods and Planting Density on Lodging Resistance and Yield of Soybean

ZHANG Na<sup>1</sup>, CAI Lijun<sup>1</sup>, LIU Jingqi<sup>1</sup>, YANG Xu<sup>1</sup>, ZHENG Wei<sup>1</sup>, TANG Xiaodong<sup>2</sup>,  
WANG Zhida<sup>3</sup>, GAI Zhijia<sup>1\*</sup>

(1. Jiamusi Branch of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Jiamusi Heilongjiang 154007, China; 2. Soybean Institute of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China; 3. College of Agriculture, Shandong Agricultural University, Taian Shandong 271018, China)

**Abstract:** [Objective] In order to explore the differences of lodging and yield of soybean between large ridge close planting, traditional ridge planting and different planting densities, the effects of different cultivation methods and planting densities on plant morphological indexes, mechanical properties of stems, lodging resistance and yield of soybean were studied. [Method] This experiment analyzed the relative chlorophyll content (SPAD), dry matter accumulation and grain traits, stem morphological characteristics, stem breaking resistance, lodging rate and yield of soybean upper, middle and lower parts under 65 cm conventional ridge (CK), 130 cm large ridge inner row (C<sub>1</sub>), 130 cm large ridge outer row (C<sub>2</sub>) and four planting densities (D<sub>1</sub>: 2.5×10<sup>5</sup> plants·hm<sup>-2</sup>,

收稿日期: 2025-04-22 修回日期: 2025-07-30

项目基金: 政府购买服务项目(072503011); 黑龙江省省属科研院所科研业务费项目(CZKYF2023-1-B001), 黑龙江省“揭榜挂帅”科技攻关项目(2021ZXJ05B03-05); 国家大豆产业技术体系项目(CARS-04-CES04); 黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2024D019)

第一作者: 张娜(1995-), 女, 硕士, 研究实习员, 主要从事作物高产栽培和大豆抗倒性研究, E-mail: 15940517514@163.com

通信作者: 盖志佳(1985-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事大豆高产栽培和黑土保护研究, E-mail: gaizhijia@163.com

$D_2 : 3.5 \times 10^5 \text{ plants} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $D_3 : 4.5 \times 10^5 \text{ plants} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $D_4 : 5.5 \times 10^5 \text{ plants} \cdot \text{hm}^{-2}$  )。[Results] Under different cultivation methods, the SPAD of different parts of soybean showed:  $C_2 > CK > C_1$ ; the plant height, pod height, balance point and internode length showed:  $C_1 > C_2 > CK$ , the number of effective branches showed:  $CK > C_2 > C_1$ , the number of main stem nodes showed that  $C_1$  and  $C_2$  were significantly higher than CK, stem diameter and dry matter accumulation of stems, leaves and pods in different parts showed:  $C_2 > CK > C_1$ , and with the increase of planting density, plant height, bottom pod height, balance point and internode length increased gradually, stem diameter, effective branch number, main stem node number, dry matter accumulation in different parts and SPAD decreased gradually. The bending resistance and lodging rate of stem force were  $CK > C_2 > C_1$ , and the effective pod number, grain number, grain weight and yield of different parts of soybean were  $C_2 > CK > C_1$ , which decreased gradually with the increase of planting density. The 100-grain weight showed:  $C_1 > C_2 > CK$ , no response to density. [Conclusion] Regardless of high density or low density, the stem characteristics and lodging resistance of 130 cm large ridge were lower than those of 65 cm conventional ridge, but the lodging only occurred under the density of  $5.5 \times 10^5 \text{ plants} \cdot \text{hm}^{-2}$ , and SPAD, dry matter accumulation, grain traits, yield components and yield were higher than those of 65 cm conventional ridge.

**Key words:** soybean; stem breaking resistance; dry matter accumulation; lodging; production

大豆单产与栽培方式密切相关,现阶段通过改善栽培方式提高大豆耐密性是提高我国大豆单产提升要攻克重大难点之一<sup>[1]</sup>。大垄窄行密植栽培是在美国平作密植栽培技术基础上结合我国传统垄作技术发展出的一项大豆种植技术<sup>[2]</sup>。相较于传统垄作,大垄窄行密植通过调整行距与株距<sup>[3]</sup>,可改善田间通风透光能力,提高群体光能利用率<sup>[4]</sup>,促进产量形成<sup>[5]</sup>,是目前黑龙江省使用面积广泛的一种先进栽培方式<sup>[6]</sup>。目前关于大豆大垄窄行密植的研究主要集中在其应用,对田间大豆植株的生长发育、形态特征及产量等的研究较少报道,这为该技术的大面积推广及我国大豆产业振兴的稳步实施带来困难。

植株倒伏是影响大豆产量的重要因素,种植密度增加会引起倒伏率显著上升<sup>[7]</sup>。倒伏发生后,大豆茎秆弯曲或折断<sup>[8]</sup>,群体结构发生改变,使得叶绿素含量下降,光能利用率降低,阻碍了营养物质的积累和转运,致使产量下降<sup>[9-10]</sup>。同时大豆抗倒伏能力与茎秆的形态特征密切相关<sup>[11]</sup>。株高较矮、茎粗较大、节间较短的品种其抗倒伏能力强<sup>[12]</sup>,有效分枝数、底荚高、平衡点和干物质积累与植株抗倒伏性呈显著正相关<sup>[13]</sup>。茎秆力学特性也是衡量作物抗倒伏能力的一个重要指标<sup>[14]</sup>。现有研究发现,茎秆抗折力越大,倒伏率越低,则大豆产量越高<sup>[15]</sup>。

因此,本研究分析大豆在不同栽培方式和种植密度条件下的茎秆形态特征与力学特性,同时比较叶绿素含量、籽粒性状和产量等多个指标的变化趋势,旨在揭示大垄窄行密植技术与传统垄作条件下大豆抗倒伏性能和产量差异的影响机制,以期为大豆单产提升与大豆窄行密植技术应用提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料及设计

试验材料选用大豆品种佳密豆 13。试验地点为黑龙江省农业科学院佳木斯分院。试验采用 2 种栽培方式(主区),4 个密度(副区)二因素裂区设计。栽培方式设置对照组 65 cm 常规垄(CK)、试验组 130 cm 大垄种 4 行(C),全生育期 130 cm 大垄分为内行( $C_1$ )和外行( $C_2$ )测定取样(图 1)。密度处理设置为保苗  $2.5 \times 10^5 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ ( $D_1$ )、 $3.5 \times 10^5 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ ( $D_2$ )、 $4.5 \times 10^5 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ ( $D_3$ )和  $5.5 \times 10^5 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ ( $D_4$ )。每个小区 4 行,行长 15 m,3 次重复。2024 年 5 月 9 日播种,于大豆的始花期( $R_2$ )、鼓粒期( $R_5$ )和成熟期( $R_8$ )进行地上部取样,2024 年 9 月 30 日收获。

### 1.2 测定指标及方法

叶绿素含量:在大豆  $R_2$ 、 $R_5$  和  $R_8$  时期,使用叶绿素仪测定植株上部(11 节以上)、中部(6~10 节)和下部(子叶节以上 1~5 节)的叶绿素含量,每个处理 3 次重复。茎秆形态特征:在  $R_2$ 、 $R_5$  和  $R_8$  时期选取长势一致的 5 株植株,测量株高、茎粗、主茎节数、有效分枝数、底荚高、平衡点和节间长度,每个处理重复 3 次。干物质积累:在  $R_2$ 、 $R_5$  和  $R_8$  时期,按照上部、中部和下部 3 部分,按照茎秆、叶片和荚粒进行拆分,放入烘箱  $105^\circ\text{C}$  杀青 0.5 h,随后  $80^\circ\text{C}$  下烘干至恒重,称量干物质重量。茎秆强度和倒伏:在  $R_2$  和  $R_5$  时期,用茎秆强度仪进行测定,测量植株茎秆第 2 节、第 3 节和第 4 节的茎秆抗折力。 $R_8$  时期,选取小区内未取样区域调查倒伏率。倒伏率(%)=(单位面积倒伏植株数/单位面积总株数)×100。分层籽粒性状: $R_5$  和  $R_8$  时期采集荚,统计上部、中部和下部有效荚数、粒

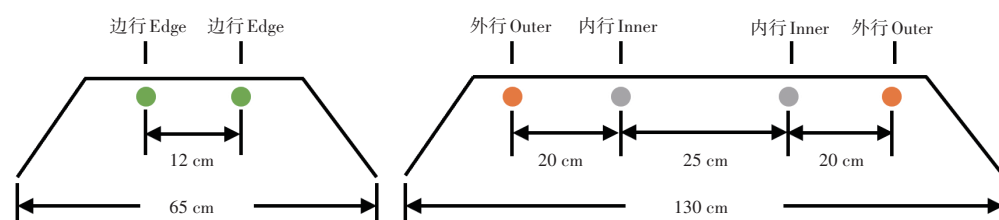


图1 65 cm传统垄作和130 cm大垄4行示意图

Figure 1 Schematic diagram of 65 cm traditional ridge cultivation and 130 cm large ridge with 4 rows

数和粒重。产量及产量构成因素:在 $R_8$ 时期每个小区选取5株植株进行考种,同时每个小区选取 $2\text{ m}^2$ 脱粒,计算公顷产量,每个处理重复3次。

### 1.3 数据分析

采用Microsoft Excel 2023 进行数据处理,IBM SPSS Statistics 26 软件进行显著性分析,Origin 2024 SR1 软件进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同栽培方式和种植密度对大豆茎秆形态特征的影响

由图2可知,不同栽培方式和种植密度对大豆的株高、茎粗、底荚高、平衡点、有效分枝数和主茎节数有显著影响( $P<0.05$ ),且互作效应极显著( $P<0.01$ )。随着生育进程推进,株高和底荚高逐渐升高,有效分枝数减少,主茎节数无显著差异,茎粗和平衡点表现出先升高后降低趋势,最大值出现在 $R_5$ 时期。 $R_2$ 、 $R_5$ 和 $R_8$ 时期,不同栽培方式下株高(图2A)、底荚高(图2C)和平衡点(图2D)表现为: $C_1>C_2>CK$ ,茎粗(图2B)表现为: $C_2>CK>C_1$ ,有效分枝数(图2E)表现为: $CK>C_2>C_1$ ;不同种植密度下株高、底荚高和平衡点表现为: $D_4>D_3>D_2>D_1$ ,茎粗和有效分枝数表现为: $D_1>D_2>D_3>D_4$ 。不同栽培方式下的主茎节数(图2F)表现为 $C_2$ 和 $C_1$ 显著高于 $CK$ ;不同种植密度下的主茎节数表现为 $D_1$ 和 $D_2$ 显著高于 $D_3$ 和 $D_4$ 。综合比较, $C_1$ 的株高、底荚高、平衡点最高,茎粗和有效分枝数最少, $C_2$ 的茎粗最大, $CK$ 的株高、底荚高和平衡点最低,有效分枝数最多,主茎节数最少,并且种植密度越大,株高、底荚高和平衡点越高,茎粗、有效分枝数和主茎节数越少。

### 2.2 不同栽培方式和种植密度对大豆不同部位节间长度的影响

由图3可知,不同栽培方式和种植密度对大豆不同部位节间长度有显著影响( $P<0.05$ ),且互作效应极显著( $P<0.01$ )。大豆植株不同部位的节间长度表现为中部>上部>下部。在相同种植密度下,不同栽培方式对大豆植株下部(第1~5节间)节间长度无显著影响;中部(第6~10节间)表现为 $C_1>CK>C_2$ ,主要对第6节间、第9节间和第10节间产生影响;上部(第11节间及以上)表现为 $C_1>C_2>CK$ ,主要对第12节间和第13节间产生影响。不同种植密度对大豆植株上部、中部和下部各个节间长度的影响表现为 $D_4>D_3>D_2>D_1$ 。

### 2.3 不同栽培方式和种植密度对大豆不同部位相对叶绿素含量的影响

由图4可知,大豆不同部位的相对叶绿素含量(SPAD)在不同栽培方式和种植密度下存在显著差异( $P<0.05$ ),且互作效应极显著( $P<0.01$ )。大豆植株SPAD在 $R_5$ 时期显著高于 $R_2$ 时期,两个时期不同部位SPAD均表现为:上部>中部>下部。 $R_2$ (图4A)和 $R_5$ (图4B)时期,不同栽培方式上部、中部和下部SPAD表现为: $C_2>CK>C_1$ ,随种植密度增大植株各部位的SPAD逐渐降低。

### 2.4 不同栽培方式和种植密度对大豆不同部位干物质积累的影响

由图5可知,不同部位大豆干物质积累在不同栽培方式和种植密度下存在显著差异( $P<0.05$ ),且互作效应极显著( $P<0.01$ )。干物质积累量表现为上部>中部>下部,随着生育进程推进,不同部位茎秆干物质积累量呈现先升高后降低趋势,最大量出现在 $R_5$ 时期,不同部位叶片和荚粒干物质积累量呈现逐渐上升趋势。 $R_2$ (图5A)、 $R_5$ (图5B)和 $R_8$ (图5C)时期,不同栽培方式下上部茎秆干物质积累表现为 $C_2$ 和 $C_1$ 显著高于 $CK$ ,中部和下部表现为: $C_2>CK>C_1$ ;上部和下部叶片干物质积累表现为: $C_2>CK>C_1$ ,中部表现为: $CK>C_2>C_1$ ;上部、中部和下部荚粒干物质积累表现为: $C_2>CK>C_1$ 。不同种植密度下茎秆、叶片和荚粒干物质积累表现为: $D_1>D_2>D_3>D_4$ 。综合分析, $C_2$ 方式下大豆不同部位茎秆、叶片和荚粒干物质积累最高, $C_1$ 最低,并随种植密度升高而降低。

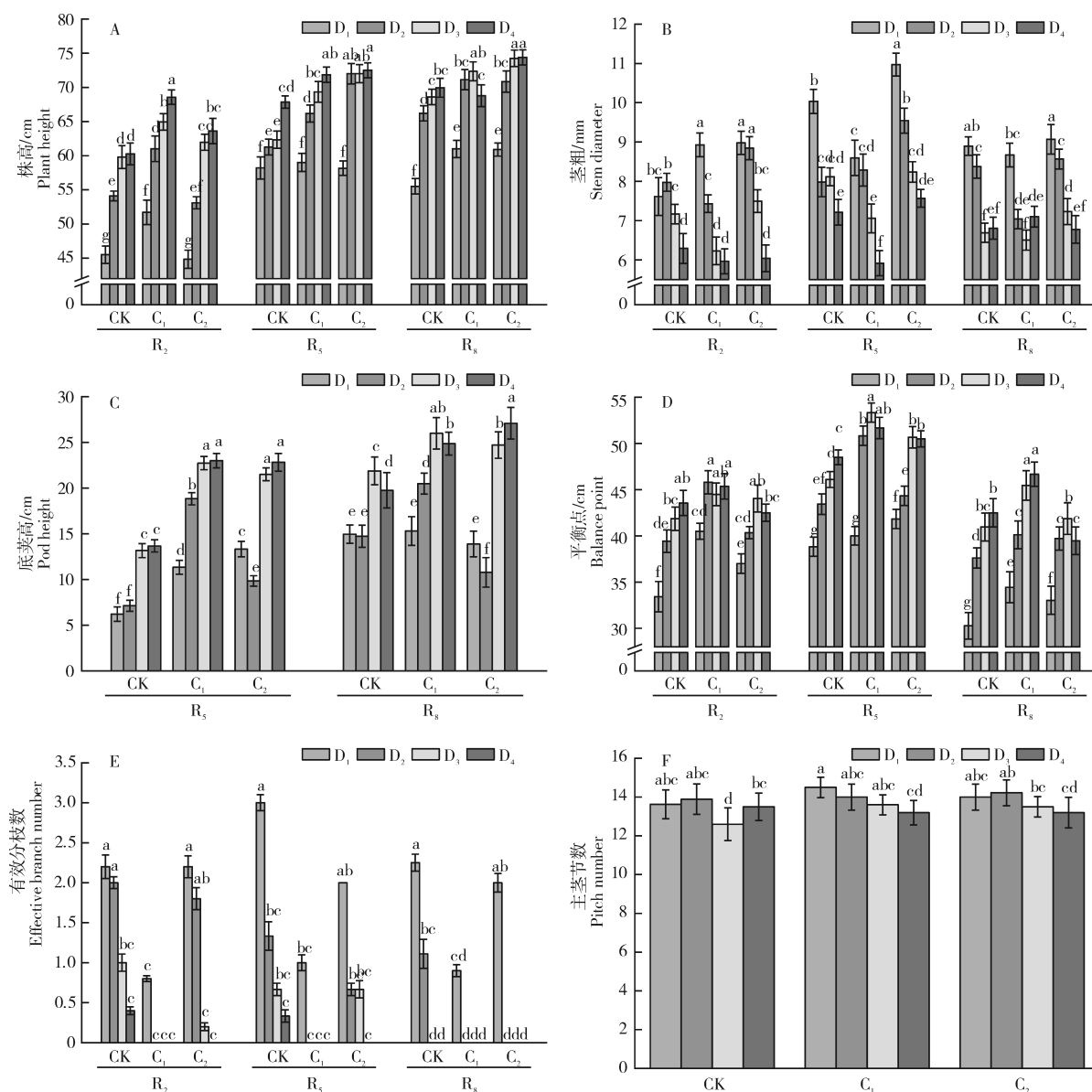


图2 不同栽培方式和种植密度下大豆的茎秆形态特征

Figure 2 Morphological characteristics of soybean stems under different cultivation methods and planting densities

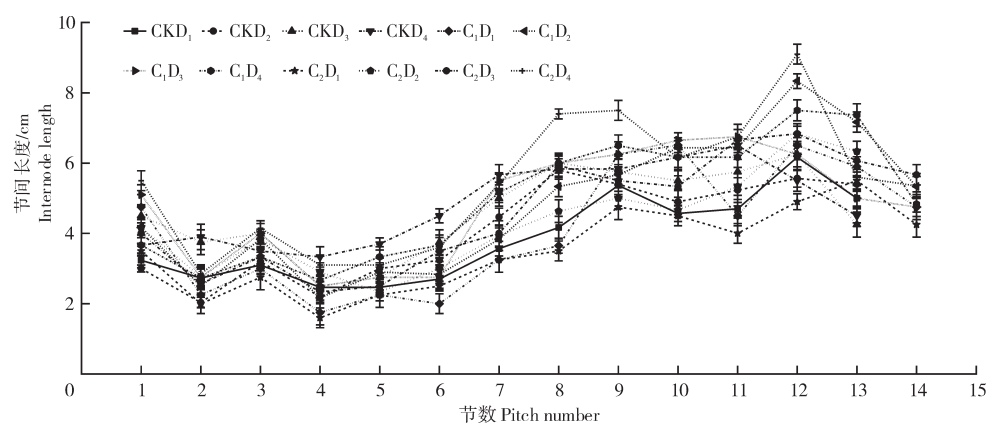


图3 不同栽培方式和种植密度下大豆的节间长度

Figure 3 Internode length of soybean under different cultivation methods and planting densities

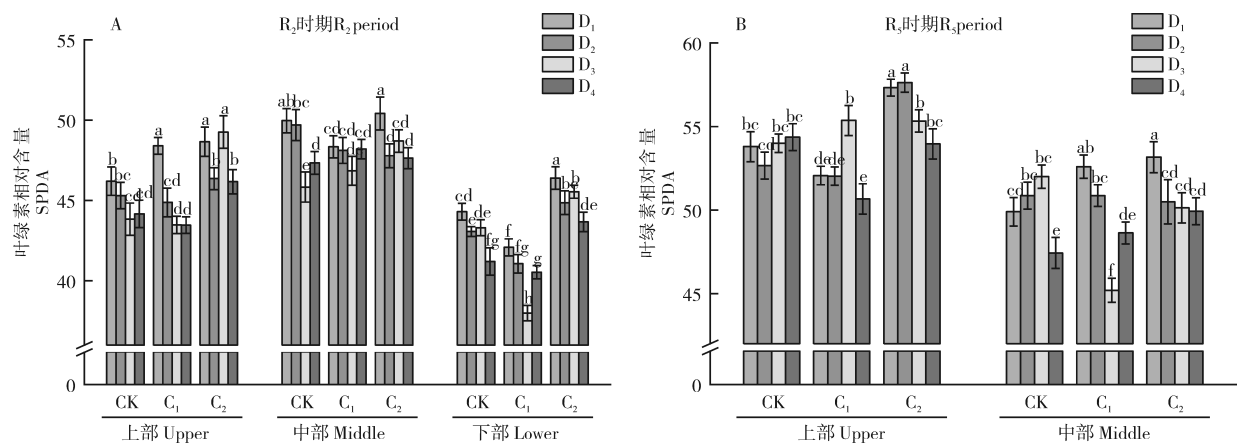


图4 不同栽培方式和种植密度下大豆不同部位的相对叶绿素含量

Figure 4 Relative chlorophyll content of different parts of soybean under different cultivation methods and planting densities

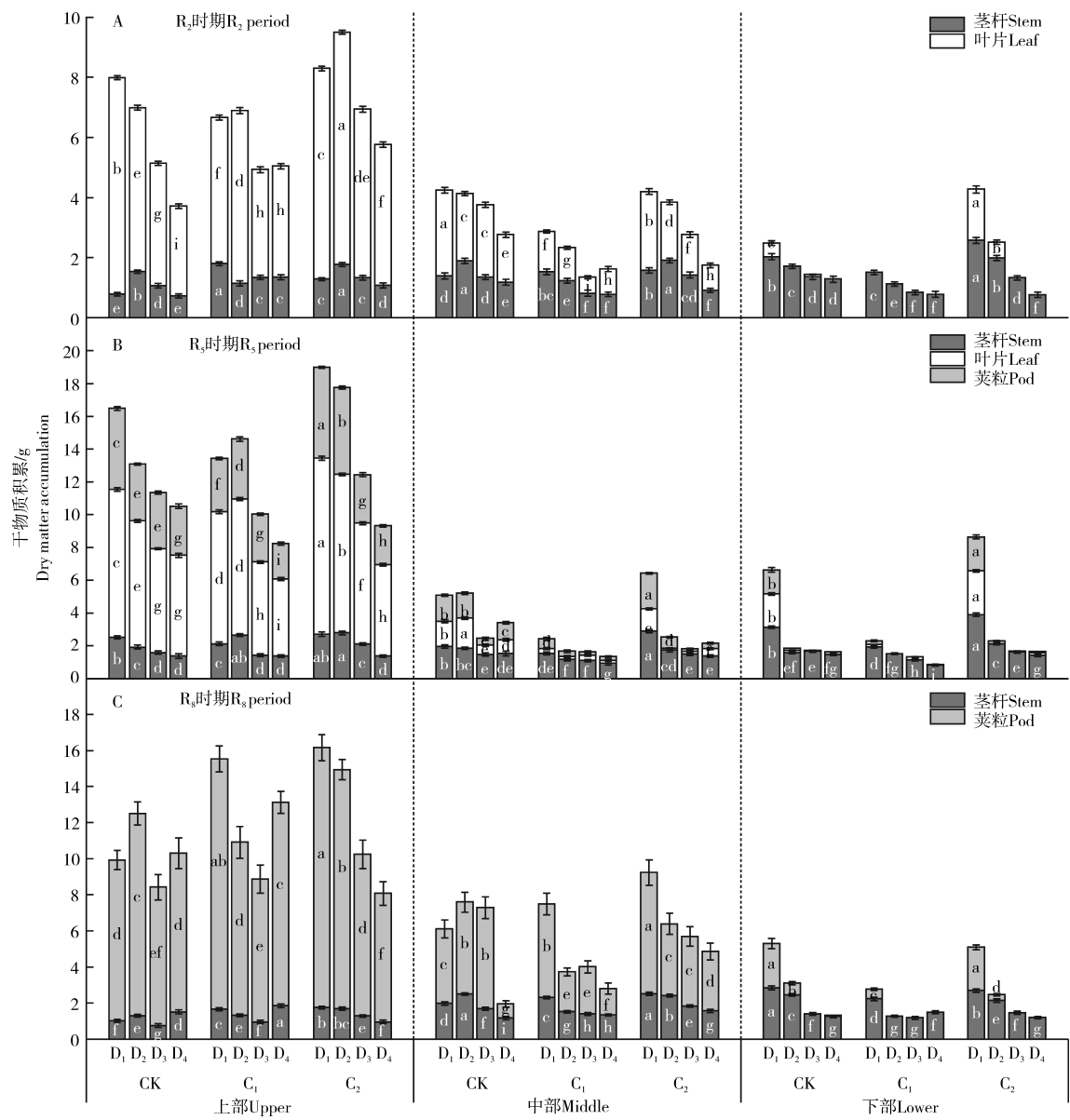


图5 不同栽培方式和种植密度下大豆不同部位的干物质积累

Figure 5 Dry matter accumulation in different parts of soybean under different cultivation methods and planting densities



2.5 不同栽培方式和种植密度对大豆茎秆抗折力的影响

由图 6 可知,不同栽培方式和种植密度下大豆茎秆第 2 节、第 3 节、第 4 节的茎秆抗折力存在显著差异( $P<0.05$ ),且互作效应极显著( $P<0.01$ )。随着生育进程推进茎秆抗折力逐渐增强,不同节间表现为第 2 节间>第 3 节间>第 4 节间。在不同栽培方式和种植密度下茎秆第 2 节间、第 3 节间、第 4 节间茎秆抗折力表现出相同规律。 $R_2$ (图 6A)和  $R_3$ (图 6B)时期,不同栽培方式下茎秆抗折力表现为:CK> $C_2$ > $C_1$ ,不同种植密度下茎秆抗折力均表现为: $D_1>D_2>D_3>D_4$ 。综合比较,CK 的大豆茎秆抗折力最强, $C_1$ 最弱,并且茎秆抗折力随种植密度增大而减弱。

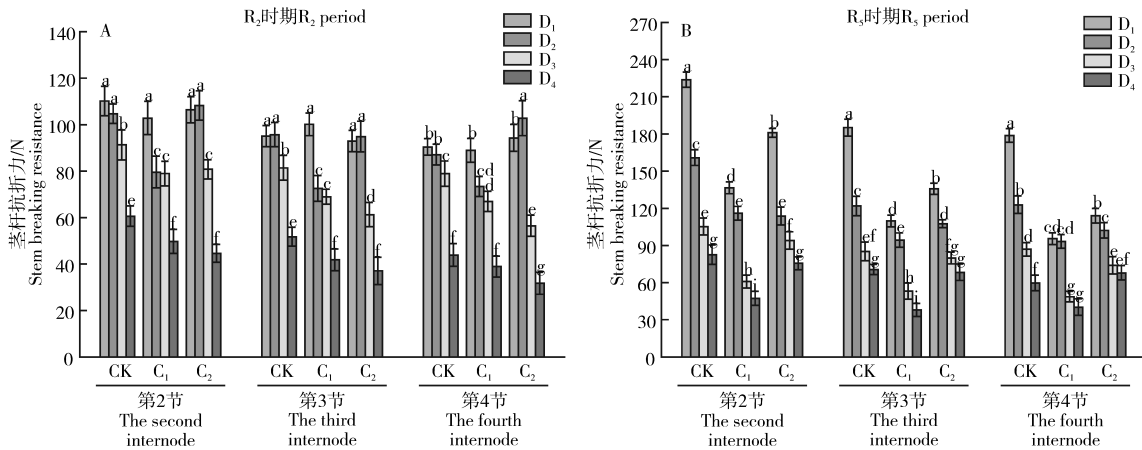


图 6 不同栽培方式和种植密度下大豆的茎秆抗折力

Figure 6 Bending resistance of soybean stems under different cultivation methods and planting densities

2.6 不同栽培方式和种植密度对大豆倒伏率的影响

由表 1 可知,不同栽培方式和种植密度下大豆植株倒伏率存在显著差异( $P<0.05$ )。 $D_1$ 、 $D_2$ 和  $D_3$ 密度下大豆植株未出现倒伏现象, $D_4$ 密度大豆植株开始出现倒伏现象,具体表现为  $C_1>C_2>CK$ 。

2.7 不同栽培方式和种植密度对大豆不同部位有效荚数、粒数和粒重的影响

由表 2 可知,不同栽培方式和种植密度下大豆植株上部、中部和下部的有效荚数、粒数和粒重存在显著差异( $P<0.05$ ),且互作效应极显著( $P<0.01$ )。大豆植株有效荚数、粒数和粒重的分布表现为:上部>中部>下部。大豆植株上部有效荚数、粒数和粒重在不同栽培方式下表现为  $C_2$ 和  $C_1$ 显著高于 CK,密度表现为: $D_1>D_2>D_4>D_3$ ;植株中部在不同栽培方式下表现为: $C_2>CK>C_1$ ,密度表现为: $D_1>D_3>D_2>D_4$ ;植株下部在不同栽培方式下的有效荚数、粒数表现为:CK> $C_2>C_1$ ,粒重表现为: $C_2>CK>C_1$ ,不同种植密度下的有效荚数、粒数和粒重表现为  $D_1$ 显著高于  $D_2$ , $D_2$ 显著高于  $D_3$ 和  $D_4$ 。综合比较,大豆单株有效荚数、粒数和粒重为  $C_2$ 最高, $C_1$ 最低,并随着种植密度增大逐渐减少。

2.8 不同栽培方式和种植密度对大豆百粒重和产量的影响

由图 7 可知,不同栽培方式和种植密度下大豆百粒重和产量存在显著差异( $P<0.05$ ),且互作效应极显著( $P<0.01$ )。 $C_1D_4$ 百粒重最大,为 17.83 g,CKD<sub>1</sub>百粒重最小,为 13.59 g; $C_2D_4$ 产量最高,为 4036.60 kg·hm<sup>-2</sup>, $C_1D_1$ 产量最低,

表 1 不同栽培方式和种植密度下大豆的倒伏率

Table 1 Lodging rate of soybean under different cultivation methods and planting densities

| 栽培方式(C)<br>Cultivation method | 种植密度(D)<br>Planting density | 倒伏率/%<br>Lodging rate   |
|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| CK                            | $D_1$                       | 0±0 <sup>d</sup>        |
|                               | $D_2$                       | 0±0 <sup>d</sup>        |
|                               | $D_3$                       | 0±0 <sup>d</sup>        |
|                               | $D_4$                       | 2.52±0.86 <sup>c</sup>  |
| $C_1$                         | $D_1$                       | 0±0 <sup>d</sup>        |
|                               | $D_2$                       | 0±0 <sup>d</sup>        |
|                               | $D_3$                       | 0±0 <sup>d</sup>        |
|                               | $D_4$                       | 24.24±1.04 <sup>a</sup> |
| $C_2$                         | $D_1$                       | 0±0 <sup>d</sup>        |
|                               | $D_2$                       | 0±0 <sup>d</sup>        |
|                               | $D_3$                       | 0±0 <sup>d</sup>        |
|                               | $D_4$                       | 13.40±0.79 <sup>b</sup> |
| C                             |                             | 428.30 <sup>**</sup>    |
| D                             |                             | 1 952.12 <sup>**</sup>  |
| C×D                           |                             | 428.30 <sup>**</sup>    |

注:同一列数字后的不同字母表示显著性差异( $P<0.05$ )。\*、\*\*分别代表在 0.05 和 0.01 水平差异显著。下同。

Note: Different letters after the numbers in the same column indicate significant differences ( $P<0.05$ ). \* and \*\* represent significant differences at 0.05 and 0.01 levels respectively. The same below.

表2 不同栽培方式和种植密度下大豆不同部位的有效荚数、粒数和粒重

Table 2 Effective pod number, grain number and grain weight of different parts of soybean under different cultivation methods and planting densities

| 栽培方式(C) 种植密度(D)    |                  | 上部Upper                  |                         |                         | 中部Middle                |                          |                        | 下部Lower                 |                         |                         |
|--------------------|------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Cultivation method | Planting density | 有效荚数                     | 粒数                      | 粒重/g                    | 有效荚数                    | 粒数                       | 粒重/g                   | 有效荚数                    | 粒数                      | 粒重/g                    |
|                    |                  | Effective pods number    | Grains number           | Grains weight           | Effective pods number   | Grains number            | Grains weight          | Effective pods number   | Grains number           | Grains weight           |
| CK                 | D <sub>1</sub>   | 17.37±0.91 <sup>de</sup> | 45.25±1.48 <sup>f</sup> | 6.41±0.48 <sup>f</sup>  | 11.25±1.16 <sup>e</sup> | 22.12±1.35 <sup>cd</sup> | 2.91±0.25 <sup>e</sup> | 7.63±0.74 <sup>a</sup>  | 13.50±1.41 <sup>a</sup> | 1.66±0.06 <sup>b</sup>  |
|                    | D <sub>2</sub>   | 19.11±0.92 <sup>e</sup>  | 50.88±1.05 <sup>d</sup> | 8.48±0.31 <sup>d</sup>  | 13.22±1.09 <sup>b</sup> | 24.44±1.13 <sup>bc</sup> | 3.77±0.25 <sup>d</sup> | 2.22±0.83 <sup>c</sup>  | 3.33±0.86 <sup>c</sup>  | 0.46±0.02 <sup>e</sup>  |
|                    | D <sub>3</sub>   | 13.60±1.26 <sup>f</sup>  | 34.00±1.15 <sup>f</sup> | 5.85±0.40 <sup>e</sup>  | 13.30±1.33 <sup>b</sup> | 26.30±1.41 <sup>b</sup>  | 4.24±0.16 <sup>b</sup> | 0±0 <sup>e</sup>        | 0±0 <sup>e</sup>        | 0±0 <sup>e</sup>        |
|                    | D <sub>4</sub>   | 19.40±1.50 <sup>e</sup>  | 43.20±1.75 <sup>e</sup> | 6.54±0.25 <sup>f</sup>  | 2.30±0.94 <sup>e</sup>  | 3.90±0.87 <sup>i</sup>   | 0.58±0.12 <sup>i</sup> | 0.40±0.84 <sup>e</sup>  | 0.40±0.51 <sup>e</sup>  | 0.04±0.01 <sup>f</sup>  |
| C <sub>1</sub>     | D <sub>1</sub>   | 23.70±0.94 <sup>a</sup>  | 64.90±1.79 <sup>a</sup> | 10.5±0.32 <sup>b</sup>  | 13.50±1.50 <sup>b</sup> | 26.40±1.26 <sup>b</sup>  | 4.01±0.17 <sup>c</sup> | 1.90±0.73 <sup>cd</sup> | 2.70±0.82 <sup>c</sup>  | 0.38±0.01 <sup>d</sup>  |
|                    | D <sub>2</sub>   | 18.30±1.05 <sup>cd</sup> | 44.40±1.07 <sup>e</sup> | 7.03±0.39 <sup>e</sup>  | 5.70±1.15 <sup>e</sup>  | 10.50±0.97 <sup>e</sup>  | 1.65±0.19 <sup>e</sup> | 0±0 <sup>e</sup>        | 0±0 <sup>e</sup>        | 0±0 <sup>e</sup>        |
|                    | D <sub>3</sub>   | 14.10±1.37 <sup>f</sup>  | 37.10±1.72 <sup>h</sup> | 6.01±0.48 <sup>e</sup>  | 6.60±1.07 <sup>e</sup>  | 12.10±1.19 <sup>e</sup>  | 2.39±0.14 <sup>f</sup> | 0±0 <sup>e</sup>        | 0±0 <sup>e</sup>        | 0±0 <sup>e</sup>        |
|                    | D <sub>4</sub>   | 20.90±1.52 <sup>b</sup>  | 47.90±1.19 <sup>e</sup> | 8.60±0.46 <sup>d</sup>  | 4.50±1.35 <sup>f</sup>  | 7.10±0.87 <sup>h</sup>   | 1.06±0.17 <sup>h</sup> | 0±0 <sup>e</sup>        | 0±0 <sup>e</sup>        | 0±0 <sup>e</sup>        |
| C <sub>2</sub>     | D <sub>1</sub>   | 23.00±1.24 <sup>a</sup>  | 62.30±1.82 <sup>b</sup> | 10.90±0.45 <sup>a</sup> | 14.90±1.72 <sup>a</sup> | 31.80±1.22 <sup>a</sup>  | 5.00±0.19 <sup>a</sup> | 6.30±1.25 <sup>b</sup>  | 11.80±1.61 <sup>b</sup> | 1.78±0.07 <sup>a</sup>  |
|                    | D <sub>2</sub>   | 21.77±1.48 <sup>b</sup>  | 59.66±1.73 <sup>c</sup> | 10.00±0.47 <sup>c</sup> | 10.22±1.48 <sup>c</sup> | 20.44±1.23 <sup>de</sup> | 2.92±0.18 <sup>c</sup> | 1.33±1.00 <sup>d</sup>  | 1.89±1.36 <sup>d</sup>  | 0.22±0.01 <sup>e</sup>  |
|                    | D <sub>3</sub>   | 16.60±1.17 <sup>e</sup>  | 43.10±1.10 <sup>e</sup> | 6.74±0.50 <sup>e</sup>  | 10.00±1.15 <sup>c</sup> | 18.60±1.07 <sup>c</sup>  | 2.88±0.19 <sup>c</sup> | 0±0 <sup>e</sup>        | 0±0 <sup>e</sup>        | 0±0 <sup>e</sup>        |
|                    | D <sub>4</sub>   | 14.70±1.63 <sup>f</sup>  | 32.90±1.52 <sup>i</sup> | 5.00±0.37 <sup>h</sup>  | 8.70±1.05 <sup>d</sup>  | 16.10±1.28 <sup>f</sup>  | 2.47±0.15 <sup>f</sup> | 0±0 <sup>e</sup>        | 0±0 <sup>e</sup>        | 0±0 <sup>e</sup>        |
| C                  |                  | 23.95 <sup>**</sup>      | 188.05 <sup>**</sup>    | 120.21 <sup>**</sup>    | 73.87 <sup>**</sup>     | 446.86 <sup>**</sup>     | 309.07 <sup>**</sup>   | 107.11 <sup>**</sup>    | 216.50 <sup>**</sup>    | 2 620.75 <sup>**</sup>  |
| D                  |                  | 138.84 <sup>**</sup>     | 1 060.12 <sup>**</sup>  | 354.03 <sup>**</sup>    | 195.18 <sup>**</sup>    | 1 118.24 <sup>**</sup>   | 992.01 <sup>**</sup>   | 420.98 <sup>**</sup>    | 859.32 <sup>**</sup>    | 11 335.12 <sup>**</sup> |
| C×D                |                  | 46.77 <sup>**</sup>      | 300.73 <sup>**</sup>    | 176.42 <sup>**</sup>    | 53.61 <sup>**</sup>     | 242.11 <sup>**</sup>     | 271.14 <sup>**</sup>   | 44.49 <sup>**</sup>     | 110.81 <sup>**</sup>    | 1 475.60 <sup>**</sup>  |

为 2695.43 kg·hm<sup>-2</sup>。不同栽培方式下百粒重表现为:C<sub>1</sub>>C<sub>2</sub>>CK,产量表现为:C<sub>2</sub>>C>CK>C<sub>1</sub>,其中C<sub>2</sub>占C产量的57.86%~59.32%,C<sub>1</sub>占C产量的42.14%~40.68%,不同种植密度对百粒重无显著影响,产量表现为:D<sub>4</sub>>D<sub>3</sub>>D<sub>2</sub>>D<sub>1</sub>。

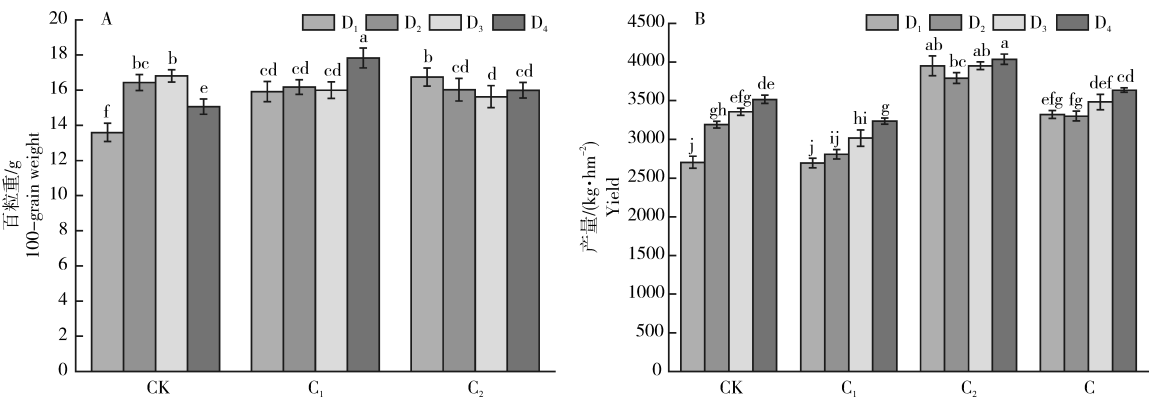


图7 不同栽培方式和种植密度下大豆的百粒重和产量

Figure 7 100-grain weight and yield of soybean under different cultivation methods and planting densities

3 讨论与结论

3.1 不同栽培方式和种植密度下大豆茎秆形态特征差异对抗倒性的影响

作物的抗倒伏能力与自身茎秆的形态特征密切相关<sup>[16]</sup>。茎秆作为植物重要的组成部分,其形态特征也是影响作物倒伏的关键因素,株高、茎粗、主茎节数、有效分枝数、底荚高、平衡点、节间长是影响力学特征的主要指标<sup>[17]</sup>。研究认为,大豆茎秆的抗倒伏性能与大豆株高、底荚高、平衡点<sup>[18]</sup>、节间长、有效分枝数<sup>[17]</sup>和主茎节数<sup>[19]</sup>呈极显著负相关,与茎粗<sup>[20]</sup>呈显著正相关。本研究结果表明,在整个生育时期,CK条件下株高、底荚高、平衡点、节间长、有效分枝数和主茎节数显著低于C<sub>1</sub>和C<sub>2</sub>(*P*<0.05),C<sub>2</sub>条件下茎粗显著高于C<sub>1</sub>和CK(*P*<0.05),同时CK条件下茎秆抗折力最高,倒伏率最低,与种植密度呈显著负相关关系。这表明无论在高密度或低密度种植条件下,CK条件下大豆茎秆形态特征整体上更有利于茎秆抗折力的增强和倒伏率的降低,C<sub>2</sub>次之,C<sub>1</sub>表现最差。但有研究者认为,大豆抗倒伏能力与产量只在一定范围内呈现正相关关系,过度强化植株抗倒性反而影响产量构成。

### 3.2 不同栽培方式和种植密度下大豆不同部位相对叶绿素含量差异对干物质积累的影响

叶片相对叶绿素含量 (SPAD) 是反映植株光合能力的一项重要指标<sup>[21]</sup>。前人研究表明大垄栽培条件下, 叶片 SPAD 高于常规垄作模式, 对荚粒的干物质分配比率增加<sup>[22-23]</sup>。本研究结果表明, 在相同生育时期, 130 cm 大垄外行 ( $C_2$ ) 不同部位的叶片 SPAD 显著高于 65 cm 垄作 (CK) ( $P < 0.05$ ), 说明与 CK 相比,  $C_2$  种植条件下更有利于大豆植株进行光合作用, 而 130 cm 大垄内行 ( $C_1$ ) 低于 CK。相关研究表明, 密度是影响大豆群体光合生产的重要因素之一<sup>[24]</sup>, 高密度条件下会使植株叶片 SPAD 下降<sup>[25]</sup>。本研究表明, 密度对不同栽培方式下 SPAD 的影响一致,  $C_1$ 、 $C_2$  和 CK 随着种植密度的增加, SPAD 呈现出显著下降趋势。宋英博<sup>[26]</sup>研究均指出栽培方式对植株干物质积累量具有显著影响。高超等<sup>[27-29]</sup>研究证明, 种植密度和栽培方式的改变均能影响大豆植株干物质积累、分配、运输与转化。陈晓光等<sup>[30-32]</sup>研究均认为开花至成熟阶段的干物质积累量与植株抗倒性密切相关, 并严重影响产量。本研究结果表明,  $R_2$ – $R_8$  生育进程中, 整体表现为  $C_2$  条件下大豆茎秆、叶片和荚粒的干物质积累量显著高于  $C_1$  ( $P < 0.05$ ), CK 介于二者之间, 并随种植密度增加而显著降低。但 CK 上部茎秆干物质积累量显著低于  $C_1$  和  $C_2$ , 中部叶片干物质积累量显著高于二者, 这是由于 CK 主茎节数为 13.38,  $C_1$  和  $C_2$  分别为 13.82 和 13.72, 因此上部茎秆的干物质积累量显著低于二者, 而较少的主茎节数使得植株叶片分布依次下移, 所以中部叶片的干物质积累量显著增大。综合比较, 无论何种密度条件下, 相较于 CK, 大垄栽培条件下  $C_2$  较高的叶绿素含量更利于光合产物积累与分配,  $C_1$  较差的茎秆形态特征及叶绿素含量加剧倒伏发生和产量降低。

### 3.3 不同栽培方式和种植密度对大豆不同部位的籽粒性状及产量的影响

前人研究表明, 大豆不同部位籽粒性状对栽培方式的响应不同<sup>[33]</sup>, 大垄栽培模式下, 大豆植株上部的有效荚数、粒数和粒重较传统栽培方式显著增加, 植株下部显著降低<sup>[22]</sup>。随着密度的增加, 大豆有效荚数、粒数和粒重均呈下降的趋势, 百粒重无显著变化<sup>[34-35]</sup>。本研究中, 相较于 CK,  $C_2$  可提高大豆植株上部和中部有效荚数、粒数和粒重, 降低下部有效荚数和粒数, 但由于百粒重  $C_1 > C_2 > CK$ , 因此  $C_2$  下部粒重高于 CK;  $C_1$  条件 71.41%~89.32% 的荚粒集中于植株上部, 中部和下部在 29.59% 以下, 因此,  $C_1$  上部的有效荚数、粒数和粒重高于  $C_2$ , 但单株的籽粒性状在三者中表现最差。同时, 本试验中密度对百粒重无显著影响, 但 4 种密度条件下, 130 cm 大垄外行 ( $C_2$ ) 较高的叶绿素含量利于大豆干物质积累, 因此  $C_2$  产量高于 CK, 而  $C_1$  产量低于 CK, 整体分析 C 产量高于 CK, 表明无论何种密度条件, 130 cm 大垄的大豆产量高于 65 cm 常规垄。

在不同密度条件下, 相较于 65 cm 传统垄, 130 cm 大垄栽培的茎粗更粗, 株高、底荚高、平衡点、有效分枝数、主茎节数和节间长度的茎秆形态特征和茎秆力学特征均弱于 65 cm 传统垄, 因此 130 cm 大垄栽培的抗倒伏性能较差, 倒伏率高于 65 cm 传统垄, 但也只在  $5.5 \times 10^5$  株·hm<sup>-2</sup> 密度下出现倒伏。而 SPAD 表明 130 cm 大垄栽培的大豆群体较高的叶绿素含量更有利于茎秆、叶片和荚粒干物质积累。因此, 虽然 130 cm 大垄栽培的抗倒伏能力低于 65 cm 传统垄, 但干物质积累和产量特性均高于 65 cm 传统垄。

### 参考文献:

- [1] 黄俊霞, 冀宝璐, 赵伟, 等. 大豆种质鼓粒期源库关系及籽粒皱缩性鉴定指标筛选[J]. 沈阳农业大学学报, 2025, 56(3): 14–22.  
HUANG J X, JI B L, ZHAO W, et al. Source-sink relationship of soybean germplasm at bulging stage and screening of identification indexes of grain wrinkles[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2025, 56(3): 14–22.
- [2] 齐思远, 王福林, 兰佳伟. 宽窄行种植模式对大豆生长发育和产量的影响[J]. 大豆科学, 2022, 41(5): 557–563.  
QI S Y, WANG F L, LAN J W. Effects of wide and narrow planting patterns on growth and yield of soybean[J]. Soybean Science, 2022, 41(5): 557–563.
- [3] 韩利萍, 孙磊, 田静霞, 等. 养分调控与栽培模式对大豆干物质积累及产量的影响[J]. 大豆科学, 2016, 35(4): 593–598.  
HAN L P, SUN L, TIAN J X, et al. Effects of cultivation patterns and nutrient regulation on dry matter accumulation and yield in soybean[J]. Soybean Science, 2016, 35(4): 593–598.
- [4] 郭泰, 郭美玲, 冯宪忠, 等. 矮秆耐密植大豆新品种合农 91 选育与高产创建[J]. 大豆科学, 2019, 38(4): 664–667.  
GUO T, GUO M L, FENG W Z, et al. Breeding and high yield establishment of dwarf stalks resistant to dense planting new soybean variety Henong 91[J]. Soybean Science, 2019, 38(4): 664–667.
- [5] 梁子聪, 赵伟, 李佳宜, 等. 辽宁省不同年代大豆品种农艺性状和产量的遗传改良[J]. 沈阳农业大学学报, 2024, 55(3): 267–275.  
LIANG Z C, ZHAO W, LI J Y, et al. Genetic improvement of agronomic traits and yield of soybean varieties of different ag-



- es in Liaoning Province[J].Journal of Shenyang Agricultural University,2024,55(3):267-275.
- [6] 翟喜海.黑龙江省大豆主要栽培模式及关键技术[J].中国农学通报,2009,25(12):85-90.  
ZHAI X H.Main type and key technology of soybean cultivation in Heilongjiang province[J].Chinese Agricultural Science Bulletin,2009,25(12):85-90.
- [7] 吕书财.密度对大豆冠层光合有效辐射和抗倒伏特性的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2017.  
LV S C.Study on the changes of photosynthetically active radiation and lodging resistance of soybean canopy[D].Harbin: Northeast Agricultural University,2017.
- [8] 程彬,刘卫国,王莉,等.种植密度对玉米-大豆带状间作下大豆光合、产量及茎秆抗倒的影响[J].中国农业科学,2021,54(19):4084-4096.  
CHENG S,LIU W G,WANG L,et al.Effects of planting density on photosynthetic characteristics,yield and stem lodging resistance of soybean in maize-soybean strip intercropping system[J].Scientia Agricultura Sinica,2021,54(19):4084-4096.
- [9] 白雪.播期对玉米茎秆发育及抗倒伏能力的影响[D].保定:河北农业大学,2021.  
BAI X.Effects of sowing date on stalk development and lodging resistance of maize[D].Baoding:Hebei Agricultural University,2021.
- [10] 王甜,庞婷,杜青,等.田间配置对间作大豆光合特性、干物质积累及产量的影响[J].华北农学报,2020,35(2):107-116.  
WANG T,PANG T,DU Q,et al.Effects of different field collocation patterns on photosynthetic characteristics and dry matter accumulation and yield in intercropping soybean[J].Acta Agriculturae Boreali-Sinica,2020,35(2):107-116.
- [11] 高超.播期和密度对夏播带状间作大豆株型、干物质积累和产量的影响[D].雅安:四川农业大学,2023.  
GAO C.Effect of sowing period and density on soybean plant architecture,dry matter accumulation and yield in summer-sown strip intercropping[D].Yaan:Sichuan Agricultural University,2023.
- [12] WANG L,CHENG B,ZHOU T,et al.Quantifying the effects of plant density on soybean lodging resistance and growth dynamics in maize-soybean strip intercropping[J].Frontiers in Plant Science,2023,14:1264378.
- [13] 张中华.不同大豆品种间茎秆特性与抗倒伏性关系研究[D].贵阳:贵州大学,2022.  
ZHANG Z H.Study on the relationship between stalk characteristics and lodging resistance among different soybean varieties[D].Guiyang:Guizhou University,2022.001765.
- [14] 辛添玉.烯效唑对大豆抗倒伏力学性状及产量的调控效应[D].哈尔滨:东北农业大学,2022.  
XIN T Y.Regulatory effects of uniconazole on lodging resistance and yield of soybean[D].Harbin:Northeast Agricultural University,2022.
- [15] 刘明,王贞杰,孙亚男,等.基于主茎力学特性的大豆种质资源抗倒伏性分析[J].大豆科学,2023,42(1):23-31.  
LIU M,WANG Z J,SUN Y N,et al.Analysis of lodging resistance of soybean germplasm resources based on mechanical properties of main stem[J].Soybean Science,2023,42(1):23-31.
- [16] 李珊珊.基于大豆主茎抗倒伏性的根系发育特性解析[D].哈尔滨:东北农业大学,2022.  
LI S S.Developmental characteristics of root based on the lodging resistance of stemin soybean[D].Harbin:Northeast Agricultural University,2022.
- [17] RAZA A,ASGHAR M A,AHMAD B,et al.Agro-techniques for lodging stress management in maize-soybean intercropping system-a review[J].Plants (Basel,Switzerland),2020,9(11):1592.
- [18] 徐瑶,张锐,董守坤,等.不同大豆品种鼓粒期茎秆力学特性与抗倒伏性差异研究[J].大豆科学,2017,36(6):905-912.  
XU Y,ZHANG R,DONG S K,et al.Study on the differences of mechanical properties and lodging resistance among different soybean varieties in seed-filling period[J].Soybean Science,2017,36(6):905-912.
- [19] RAZA A,YIN C Y,ASGHAR M A,et al.Foliar application of  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  ratios enhance the lodging resistance of soybean stem by regulating the physiological and biochemical mechanisms under shade conditions[J].Frontiers in Plant Science,2022,13:906537.
- [20] 刘畅.田间配置对大豆抗倒伏力学特性及产量的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2022.  
XU C.Effects of field collocation patterns on lodging resistance and yield of soybean[D].Harbin:Northeast Agricultural University,2022.
- [21] 朱文雪,杨立达,王珺斓,等.烯胺复配剂与密度对带状间作大豆茎叶生长及产量形成的影响[J].中国油料作物学报,2025,47(4):959-969.  
ZHU W X,YANG L D,WANG J L,et al.Effects of uniconazole and diethyl aminoethyl hexanoate compound and density on

- stem and leaf growth and yield formation in strip intercropping soybean[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2025, 47(4): 959-969.
- [22] 廉 博, 王雪娇, 苏二虎, 等. 大兴安岭南麓不同栽培模式对大豆生长发育的影响[J]. 北方农业学报, 2021, 49(1): 40-46.  
LIAN B, WANG X J, SU E H, et al. Effects of different cultivation patterns on soybean growth and development in the southern foothills of Daxing' Anling[J]. Journal of Northern Agriculture, 2021, 49(1): 40-46.
- [23] 郑皓远. 种植模式对间作大豆冠层光合、茎秆质量及产量的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2023.  
ZHENG H Y. Effects of planting pattern on photosynthesis, stem quality and yield of intercropping soybean[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2023.
- [24] HWANG S, LEE T G. Integration of lodging resistance QTL in soybean[J]. Scientific reports, 2019, 9(1): 6540.
- [25] WU L, ZHENG Y, JIAO F, et al. Identification of quantitative trait loci for related traits of stalk lodging resistance using genome-wide association studies in maize (*Zea mays* L.)[J]. BMC Genomic Data, 2022, 23(1): 76.
- [26] 宋英博. 窄行密植对半矮秆大豆产量及性状的影响[J]. 杂粮作物, 2010, 30(3): 233-235.  
SONG Y B. Effect of narrow row and close planting cultivation on yield and traits of semi-dwarf soybean variety[J]. Horticulture & Seed, 2010, 30(3): 233-235.
- [27] 高 超, 陈 平, 杜 青, 等. 播期、密度对带状间作大豆茎叶生长及产量形成的影响[J]. 作物学报, 2023, 49(11): 3090-3099.  
GAO C, CHEN P, DU Q, et al. Effects of sowing date and density on stem, leaf growth, and yield formation in strip intercropping soybean[J]. Acta Agronomica Sinica, 2023, 49(11): 3090-3099.
- [28] 白 磊. 施氮量与密度对高油大豆光合生产及产质量的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.  
BAI L. Effects of nitrogen application rate and density on photosynthetic production, yield and quality of high oil soybean[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019.
- [29] ZHAO W, ZENG D, ZHAO C, et al. Identification of QTLs and key genes enhancing lodging resistance in soybean through chemical and physical trait analysis[J]. Plants, 2024, 13(24): 3470.
- [30] 陈晓光. 小麦茎秆特征与倒伏的关系及调控研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2011.  
CHEN X G. Relationship between stem characteristics and lodging and its regulation study in wheat[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2011.
- [31] 林青樵, 程 萌, 郝玉波, 等. 玉米大豆间作种植密度对玉米光合特性及产量的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2024(11): 1-6.  
LIN Q Q, CHENG M, HAO Y B, et al. Effects of intercropping density of maize and soybean on photosynthetic characteristics and yield of maize[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2024(11): 1-6.
- [32] CHENG B, RAZA A, WANG L, et al. Effects of multiple planting densities on lignin metabolism and lodging resistance of the strip intercropped soybean stem[J]. Agronomy, 2020, 10(8): 1177.
- [33] 陈喜凤, 孙 宁, 谷 岩, 等. 不同群体结构下大豆植株抗倒性能的比较[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.
- [34] CHENG B, WANG L, LIU R, et al. Shade-tolerant soybean reduces yield loss by regulating its canopy structure and stem characteristics in the maize-soybean strip intercropping system[J]. Frontiers in Plant Science, 2022(13): 848893.
- [35] GU Y, ZHENG H, LI S, et al. Effects of narrow-wide row planting patterns on canopy photosynthetic characteristics, bending resistance and yield of soybean in maize-soybean intercropping systems[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 9361.