



烯效唑对不同施肥水平下大豆鼓粒期群体特征和产量调控效应研究

滕思远, 王晨, 梁昌志, 马嘉良, 金喜军, 李鑫, 张玉先, 王孟雪

(黑龙江八一农垦大学 农学院, 黑龙江 大庆 163319)

摘要:为探究烯效唑植物生长调节剂化控技术对大豆鼓粒期群体特征和产量的调控效果,以黑河 43 为试验材料,在 2022 和 2023 年进行两年的大田试验。试验设 3 个施肥水平分别为低肥力处理(F1),常规肥力(F2)和高肥力处理(F3)。初花期对不同施肥水平下大豆叶面喷施浓度分别为 0, 25, 50, 75 和 100 mg·L⁻¹烯效唑(CK, S1, S2, S3 和 S4)。分析不同施肥水平下,施用不同浓度烯效唑对鼓粒期大豆群体形态特征、光合参数、光衰减系数、产量及构成因素的影响。结果表明:初花期对大豆施用不同浓度烯效唑会在一定程度上抑制植株高度,但同时也能显著促进其茎粗增加、节数增多以及叶面积指数的提升。在低、中施肥水平下,100 mg·L⁻¹烯效唑能最有效地降低植株高度及增加茎粗,同时大部分烯效唑处理都显著增加了叶面积指数,其中 50 mg·L⁻¹烯效唑的增加效果最为显著。在高施肥水平下,100 mg·L⁻¹烯效唑处理仍然是抑制株高和增加茎粗的最有效浓度,而 75 mg·L⁻¹处理使叶面积指数提高最为显著。进一步增加施肥量可提升大豆在 R5 期的光合作用速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度和蒸腾速率,其中,低、中肥力水平下 50 mg·L⁻¹烯效唑效果依旧最为显著,而在高肥力土壤中则是 75 mg·L⁻¹烯效唑效果最显著。随着植物冠层高度的提升,冠层光衰减系数有所降低,在各种施肥水平条件下,烯效唑处理的影响具有显著性差异,在低肥力时 50 mg·L⁻¹烯效唑效果显著,在高肥力土壤中则是 75 mg·L⁻¹浓度表现最佳。同时,施肥水平和烯效唑浓度的增加也有助于促进大豆的理论产量和产量构成要素的改善,在低肥及中肥力条件下,烯效唑浓度为 50 mg·L⁻¹效果最明显。在高肥力条件下 75 mg·L⁻¹烯效唑的效果最明显。与对照相比分别实现了增产 2.98%、3.79% 和 4.12%。适宜浓度的烯效唑喷施可以有效改善大豆的生长状况和产量,提升光合作用效率,并优化冠层结构,从而促进大豆产量提高。
关键词:烯效唑;大豆;光合特性;形态特征;产量

Study on Regulation Effects of Uniconazole on Population Characteristics and Yield during Seed Filling Stage of Soybeans under Different Fertilization Levels

TENG Siyuan, WANG Chen, LIANG Changzhi, MA Jialiang, JIN Xijun, LI Xin, ZHANG Yuxian, WANG Mengxue

(Agricultural College, Heilongjiang Bayi Agricultural Reclamation University, Daqing 163319, China)

Abstract: To explore the effect of chemical control technology of uniconazole plant growth regulator on the population characteristics and yield of soybean at the seed-filling stage, a two-year field experiment was conducted in 2022 and 2023 using Heihe 43 as the experimental material. The experiment set three fertilization levels: low fertility treatment (F1), conventional fertility (F2), and high fertility treatment (F3). At the initial flowering stage, foliar application of uniconazole at concentrations of 0, 25, 50, 75, and 100 mg·L⁻¹ (CK, S1, S2, S3 and S4) was applied under different fertilization levels. The effects of applying different concentrations of uniconazole under different fertilization levels on the morphological characteristics of the soybean population during the pod-filling stage, photosynthetic parameters, light attenuation coefficient, yield, and yield components were analyzed. Applying different concentrations of uniconazole, a plant growth regulator, during the initial flowering stage can to some extent inhibit the plant height of soybeans but can also significantly promote the increase in stem thickness, node number, and leaf area index. Under low and medium fertilization levels, 100 mg·L⁻¹ uniconazole is most effective in reducing plant height and increasing stem thickness, while most uniconazole treatments significantly increase the leaf area index, with the 50 mg·L⁻¹ showing the most significant increase. At high fertilization levels, the treatment of 100 mg·L⁻¹ uniconazole remains the most effective in inhibiting plant height and increasing stem thickness, while the 75 mg·L⁻¹ treatment results in the most significant increase in leaf area index. Further increasing the fertilization can improve the photosynthetic rate, stomatal conductance, intercellular CO₂ concentration, and transpiration rate of soybeans at the R5 growth stage, where under low to medium fertility levels the 50 mg·L⁻¹ uniconazole effect is still the most significant, while in high-fertility soil, the 75 mg·L⁻¹ concentration is optimal. As the plant canopy height increases, the canopy light attenuation coefficient decreases, with significant differences in the effect of uniconazole treatment under various levels of fertilization; the effect of 50 mg·L⁻¹ uniconazole is significant in low fertility, while in high fertility soil, the 75 mg·L⁻¹ concentration performs the best. Also, the increase in fertilization level and uniconazole concentration also helps to improve the theoretical yield and yield

收稿日期: 2024-02-23

基金项目: 国家重点研发子课题(2022YFD1000105)。

第一作者: 滕思远(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事资源利用与植物保护研究。E-mail: 1836027025@qq.com。

通讯作者: 王孟雪(1978—), 女, 博士, 副教授, 主要从事农业水土工程研究。E-mail: wangmengxue1978@163.com。

composition elements of soybeans, with the $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ concentration of uniconazole showing the most obvious effect under low and medium fertility conditions. Under high fertility conditions, the effect of $75 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ uniconazole is the most significant, achieving respective yield increases of 2.98%, 3.79% and 4.12% compared to the control. Proper concentration spraying of uniconazole can effectively improve the growth condition and yield of soybeans, enhance photosynthesis efficiency, and optimize the canopy structure, thereby promoting an increase in soybean yield.

Keywords: uniconazole; soybeans; photosynthetic characteristics; morphological features; yield

大豆是一种具有广泛应用的农作物,其种子富含植物蛋白质和油脂,是全球重要的粮食和油料来源之一。在我国,大豆不仅是传统的食品原料,也是畜牧业的重要饲料来源。我国对大豆产量需求每年都在增长,但是在大豆生产中,仍然存在单产低、产量不稳定等现象^[1],提高大豆单产已成为我国农业发展的一项紧迫任务。

由于大豆产量与肥力水平密切相关,因此如何通过合理的肥力管理来提高大豆单产,是提升我国大豆产量的关键。同时,合理利用植物生长调节剂,也被证明可以优化大豆的群体结构,进而提高产量。在大豆高产栽培研究中研究者试图从各种角度,如不同群体密度^[2-7]、不同行距^[8-10]、不同品种^[11],探讨大豆群体结构^[12-15]。考虑到施肥水平与植物生长调节剂的应用可能存在协同效应,研究这两者的结合应用对大豆群体结构和产量的影响,具有重要的理论价值和实际意义。

烯效唑作为一种广泛使用的植物生长调节剂,能有效调节作物生长,优化作物的形态结构,从而影响其产量和品质。在大豆生产中,结合土壤肥力水平应用烯效唑,可以期望通过调控植株的生长,建立更加合理的群体结构,提高植株的光合效率,进而增加单产。然而,目前关于结合不同肥力水平应用烯效唑对大豆群体特征和产量影响的研究仍然较少。

基于以上背景,本研究将着眼于如何调整肥力水平,并结合合理的烯效唑使用策略,来优化大豆的群体结构,提高光合特性,最终提升产量。通过试验设计,我们将探索不同肥力水平结合烯效唑应用对大豆群体特征的影响,以及如何提高产量。研究旨在为大豆生产提供新的管理策略,促进大豆生产的优质高产发展。

1 材料与方法

1.1 材料

供试大豆品种为亚有限结荚习性品种黑河43。

供试的植物生长调节剂为延缓型植物生长调

节剂烯效唑(uniconazole,简称S3307),购买自阿拉丁公司。

1.2 试验地概况

试验于2022—2023年在黑龙江省黑河市鹤山农场($48^{\circ}43' \sim 49^{\circ}03' \text{N}$, $124^{\circ}56' \sim 126^{\circ}21' \text{E}$)进行,该地区属于寒温带大陆性季风气候,雨热同期,无霜期为117 d左右, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温为2000~2300 $^{\circ}\text{C}$ 左右,平均年降雨量为500~600 mm,土壤为黑土,弱酸性,0~20 cm基础肥力为:有机质含量 $24.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 $0.78 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $40.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $0.18 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、pH6.8。

1.3 试验设计

试验设3个施肥水平:高肥力处理(F1),在常规施肥的基础上上调50%;常规肥力(F2);低肥力处理(F3),在常规施肥量的基础上下调50%。常规施肥水平为 $240 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中磷酸二铵 $150 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,尿素 $60 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,硫酸钾 $30 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,两年的施肥水平保持一致。在初花期叶面喷施浓度分别为0, 25, 50, 75和 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的烯效唑(CK、S1、S2、S3和S4),喷施方式为机械喷施,喷施药液量为 $200 \text{ L}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。具体处理如表1所示。试验采取随机区组设计,3次重复,小区面积 36.3 m^2 (5.5 m垄长,1.1 m垄宽,6垄),氮磷钾肥均用作底肥施用于土壤。

表1 试验处理序号

Table 1 Experimental treatment code

序号 Number	处理 Treatment	序号 Number	处理 Treatment
1	F1S1	9	F2S4
2	F1S2	10	F2CK
3	F1S3	11	F3S1
4	F1S4	12	F3S2
5	F1CK	13	F3S3
6	F2S1	14	F3S4
7	F2S2	15	F3CK
8	F2S3		

1.4 测定项目及方法

1.4.1 形态指标 调节剂处理后分别于荚期(R5)测定大豆植株形态。每个小区取3株大豆,把叶、茎、柄、荚拆分后分别放置于白布上,并拍照。使用Image-ProPlus软件对照片进行分析。

1.4.2 大豆光合相关指标 于大豆鼓粒初期(R5)采用LI-COR公司生产的便携式光合作用测定仪(Li-6400,USA)测定叶片的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(Tr)和胞间 CO_2 浓度(C_i)。采用CCM公司生产的CCM-200PLUS叶绿素测定仪测定作物功能叶片SPAD值。

1.4.3 冠层特征 于大豆鼓粒初期(R5),采用Delta-T Devices公司生产的Sunscan冠层分析仪测定相关指标,计算冠层各部位的光衰减系数。光照辐射透过叶片冠层符合比尔定律,即: $I_i = I_0 e^{-K_L LA_i}$,式中, I_i 为冠层第*i*层高度的PAR($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$); I_0 为冠层顶部的PAR; LA_i 为第*i*层高度的叶面积, K_L 为光衰减系数。

1.4.4 产量及其构成因子 于大豆成熟期进行收获。选取具有代表性的植株10株测定产量及产量构成因素,测量单位面积荚数、单位面积粒数、百粒重和单位面积粒数。

1.5 数据分析

采用Excel 2013进行数据统计和作图,采用SPSS Statistics 26进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 对大豆植株形态性状的影响

如表2所示,综合比较2022年和2023年的数据表明两年大豆鼓粒期植株形态性状的趋势基本一致。2022年随着施肥水平的增加,大豆的株高、茎粗和主茎节数呈逐渐增加的趋势。

具体而言,与低肥力处理F1CK相比,中肥力处理F2CK使大豆的株高增加了9.35%,茎粗增加了6.66%,主茎节数增加了5.15%。高肥力处理F3CK的这些指标增加最明显,株高、茎粗和主茎节数分别增加了9.75%、15.00%和5.21%。中肥力处理F2CK使大豆的叶面积指数增加了2.46%,高

肥力处理F3CK使叶面积指数升高了2.66%。另外,不同浓度的烯效唑处理对生长指标也有影响。烯效唑处理导致了株高降低,但同时也促进了茎粗、主茎节数和叶面积指数增加,各处理之间除主茎节数外差异显著。在低、中施肥水平下,各处理相对于对照组株高均降低,其中 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理对株高的抑制及茎粗的促进效果最显著。并且在叶面积指数上,各处理均表现出了明显的促进效果,烯效唑浓度为 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理效果最为显著。在高施肥水平下, $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理对株高的抑制与茎粗的促进效果也最显著,而叶面积指数上则以 $75\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理效果最好。总体分析,施肥水平和烯效唑处理都对大豆的生长指标产生了影响,其中株高受到负面影响,而茎粗、主茎节数和叶面积指数受到正面影响。在2023年的数据中,这些趋势虽然有所变化,但整体的影响方向基本保持一致。

2.2 对大豆光合指标的影响

由表3可知,在不同施肥水平下,施用烯效唑对大豆植株的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率及胞间 CO_2 浓度有着不同程度的影响。在低、中施肥水平下,净光合速率随烯效唑浓度增加呈现先上升后下降趋势,其中 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度处理效果最佳,大豆植株的净光合速率显著提升;而在高施肥水平下, $75\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度的烯效唑处理使大豆净光合速率较对照组增加3.23%。气孔导度总体呈现出先升高后降低的趋势, $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 烯效唑处理在低、中施肥水平下分别使气孔导度增加7.57%和5.55%,在高施肥水平下 $75\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度的处理增加1.31%。蒸腾速率的影响呈现显著差异,主要呈先上升后下降的趋势,其中 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 烯效唑处理在低、中施肥水平下蒸腾速率显著提升,而 $75\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 烯效唑在高施肥水平下效果最佳。虽然喷施烯效唑后植株胞间 CO_2 浓度有所增加,但在大多数情况下并未达到显著差异水平。综上所述,喷施不同浓度的烯效唑能有效调节大豆在鼓粒期叶片的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率,对大豆的生长发育具有积极影响,但对胞间 CO_2 浓度的影响较小。

表2 烯效唑对不同施肥水平下大豆鼓粒期植株形态性状的影响
Table 2 Influence of uniconazole on the morphological characteristics of soybean plants during the seed filling stage under different fertilization levels

处理 Treatment	2022				2023			
	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem diameter/cm	主茎节数 Node number	叶面积指数 Leaf area index	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem diameter/cm	主茎节数 Node number	叶面积指数 Leaf area index
F1CK	76.68±2.03 a	0.60±0.06 b	10.67±0.71 a	4.87±0.44 a	76.87±1.77 a	0.61±0.06 a	11.16±0.75 a	4.73±0.35 a
F1S1	74.28±3.75 ab	0.63±0.05 ab	10.89±0.93 a	4.98±0.40 a	74.08±3.52 a	0.62±0.05 a	11.66±0.51 a	4.81±0.39 a
F1S2	73.92±2.39 ab	0.65±0.04 a	11.00±0.87 a	5.08±0.37 a	73.33±4.31 a	0.65±0.04 a	11.75±0.61 a	4.91±0.54 a
F1S3	72.70±3.30 b	0.66±0.03 a	10.33±0.50 a	5.04±0.38 a	72.09±4.38 a	0.66±0.03 a	10.93±1.03 a	4.86±0.36 a
F1S4	72.18±3.61 b	0.66±0.02 a	10.72±0.57 a	4.89±0.38 a	72.08±6.40 a	0.66±0.02 a	11.18±0.53 a	4.76±0.40 a
F2CK	83.85±6.02 a	0.64±0.04 a	11.22±0.83 a	5.00±0.33 a	82.13±4.77 a	0.66±0.03 a	11.75±0.41 a	4.88±0.45 a
F2S1	82.36±2.51 ab	0.66±0.05 a	11.33±0.87 a	5.00±0.41 a	81.20±4.03 ab	0.66±0.04 a	11.83±0.40 a	4.91±0.34 a
F2S2	79.63±4.43 ab	0.69±0.07 a	11.50±0.61 a	5.08±0.43 a	79.28±3.79 ab	0.68±0.05 a	12.16±0.40 a	5.20±0.29 a
F2S3	78.25±4.64 b	0.69±0.07 a	11.44±0.46 a	5.01±0.27 a	77.91±2.75 ab	0.69±0.04 a	12.08±0.66 a	4.81±0.66 a
F2S4	78.13±2.98 b	0.70±0.06 a	11.39±0.70 a	5.13±0.37 a	77.23±2.11 b	0.67±0.06 a	11.93±0.51 a	5.12±0.37 a
F3CK	4.16±1.71 a	0.69±0.08 a	11.23±1.00 a	5.00±0.34 a	83.40±2.42 a	0.70±0.04 b	11.83±0.26 a	4.97±0.33 a
F3S1	83.96±3.57 a	0.70±0.07 a	11.40±0.94 a	5.05±0.43 a	82.01±4.21 a	0.71±0.04 b	11.93±0.80 a	5.02±0.21 a
F3S2	83.07±3.92 a	0.72±0.08 a	11.52±1.09 a	5.10±0.28 a	79.04±5.62 ab	0.73±0.04 ab	12.08±0.49 a	5.15±0.0.36 a
F3S3	80.98±3.54 a	0.74±0.04 a	11.62±1.12 a	5.19±0.24 a	76.20±3.36 b	0.76±0.04 a	12.25±1.17 a	5.23±0.41 a
F3S4	80.95±2.72 a	0.74±0.05 a	11.58±1.17 a	5.13±0.31 a	76.00±6.04 b	0.76±0.03 a	12.13±0.43 a	5.19±0.16 a

注:纵向比较的不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase of vertical comparison revealed significant differences ($P < 0.05$). The same below.

表 3 烯效唑对不同施肥水平下大豆鼓粒期光合特性的影响

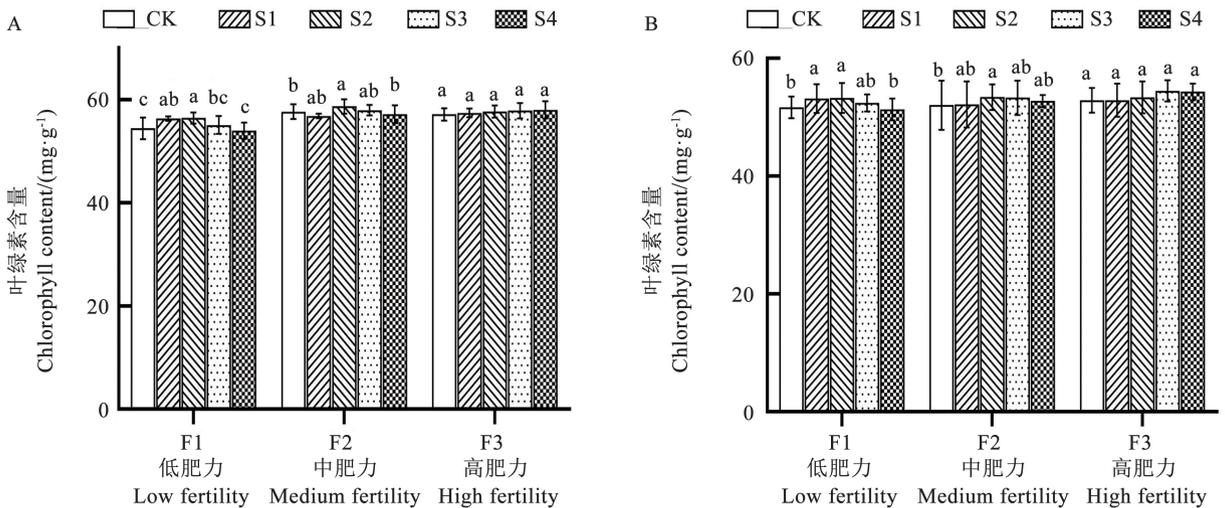
Table 3 Effects of uniconazole on the photosynthetic characteristics of soybeans during the seed filling stage under different fertilizer levels

处理 Treatment	净光合速率 $P_n/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	气孔导度 $G_s/(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	蒸腾速率 $Tr/(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	胞间 CO_2 浓度 $C_i/(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$
F1CK	20.01 ± 0.48 bc	0.66 ± 0.02 b	1.66 ± 0.14 c	179.63 ± 13.18 a
F1S1	20.54 ± 0.66 ab	0.64 ± 0.03 b	1.76 ± 0.03 ab	180.83 ± 13.57 a
F1S2	20.70 ± 0.38 a	0.71 ± 0.03 a	1.85 ± 0.06 a	185.67 ± 4.81 a
F1S3	19.56 ± 0.70 c	0.66 ± 0.02 b	1.71 ± 0.02 bc	175.54 ± 3.33 a
F1S4	19.93 ± 0.52 c	0.64 ± 0.02 b	1.73 ± 0.02 bc	179.52 ± 4.45 a
F2CK	20.62 ± 0.36 b	0.72 ± 0.01 a	1.83 ± 0.08 c	187.75 ± 14.69 a
F2S1	20.66 ± 0.32 b	0.73 ± 0.05 a	1.84 ± 0.04 c	189.53 ± 11.61 a
F2S2	21.26 ± 0.34 a	0.76 ± 0.02 a	2.00 ± 0.07 a	193.61 ± 10.02 a
F2S3	21.21 ± 0.50 a	0.75 ± 0.02 a	1.96 ± 0.13 ab	191.66 ± 3.49 a
F2S4	21.23 ± 1.01 a	0.73 ± 0.04 a	1.86 ± 0.08 bc	189.49 ± 5.73 a
F3CK	20.73 ± 0.84 b	0.76 ± 0.05 ab	1.92 ± 0.16 b	187.64 ± 6.15 a
F3S1	20.79 ± 0.69 ab	0.73 ± 0.02 b	1.94 ± 0.12 b	190.60 ± 5.56 a
F3S2	21.15 ± 0.59 ab	0.76 ± 0.03 ab	2.06 ± 0.20 ab	192.12 ± 12.90 a
F3S3	21.40 ± 0.32 a	0.77 ± 0.01 ab	2.23 ± 0.14 a	194.53 ± 2.94 a
F3S4	21.38 ± 0.22 ab	0.76 ± 0.04 ab	2.20 ± 0.06 a	193.55 ± 6.85 a

2.3 对大豆叶绿素含量的影响

如图 1 所示,经过两年的数据对比,发现不同施肥水平下,施用烯效唑对大豆植株的叶绿素含量的影响趋势保持一致,但结果均未达到显著水平。在低、中施肥水平下,随着烯效唑浓度的增加,大豆植株的叶绿素含量先是增加然后降低,表现出先上升后下降的趋势,其中 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 烯效唑处理效果最为显著。相比于未经处理的对照组,该浓度下大豆

植株的叶绿素含量在 2022 年分别提升了 3.09% 和 2.59%,此趋势在 2023 年也得到了相似的体现。在高施肥条件下,经过两年的研究表明,施加 $75\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 烯效唑处理能够有效提升大豆叶片的叶绿素含量,2022 年的数据显示,其叶绿素含量相比对照组增加了大约 3.02%。结果表明,不同浓度的烯效唑喷施,可以有效地调控大豆在鼓粒期叶片的叶绿素含量,进而可能影响其生长表现。



注: A. 2022; B. 2023。

图 1 烯效唑对不同施肥水平下大豆鼓粒期叶片叶绿素含量的影响

Fig. 1 Effects of uniconazole on the chlorophyll content in soybean leaves during the seed filling stage under different fertilizer levels

2.4 对大豆冠层光衰减系数的影响

在不同肥力水平下,大豆冠层顶部光衰减系数显示出一定趋势和稳定性。具体而言,在低肥力水平(F1CK)下,光衰减系数保持在较低水平,意味着在这一施肥条件下,光线穿过冠层的能力较强。中肥力水平(F2CK)的光衰减系数位居中等,而高肥力水平(F3CK)的光衰减系数则最高,这表明在高肥力条件下,光线透过冠层的能力减弱。

在冠层中部,在低肥和中肥水平下,光衰减系数随着肥力水平的提升而增加,但在高肥水平下,光衰减系数出现下降。冠层底部的情形也类似,即光衰减系数在低肥和中肥水平下随肥力的增加而增长,而在高肥力水平下,光衰减系数的下降更加

显著,两年的趋势一致。

此外,两年的数据均显示,在不同浓度烯效唑处理对大豆冠层不同部位的光衰减系数产生了不同的影响。在低中肥力水平下,烯效唑处理对光衰减系数并非均呈现出显著的影响。 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度处理下,冠层底部的光衰减系数先增加后降低,与对照组相比,分别增加了2.03%和2.37%。冠层中部和顶部的光衰减系数变化趋势与底部相似。在高施肥水平下,光衰减系数普遍较低,这可能是由于高肥力水平下的大豆营养供给过量,引起生长过旺盛,可能导致叶片早衰,从而使得更多光线得以穿透到底部,降低了光衰减系数。烯效唑浓度为 $75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的处理在高肥力下效果最显著。

表4 烯效唑对不同施肥水平下大豆鼓粒期冠层光衰减系数的影响

Table 4 Effects of etheboxam on canopy light extinction coefficients during pod filling stage of soybean under different fertilization levels

处理 Treatment	2022年冠层部位 Canopy position in 2022			2023年冠层部位 Canopy position in 2023		
	低 Low	中 Middle	高 High	低 Low	中 Middle	高 High
F1CK	19.19 ± 0.70 ab	7.28 ± 0.19 b	0.32 ± 0.02 a	19.21 ± 1.25 a	7.22 ± 0.66 a	0.29 ± 0.02 a
F1S1	19.38 ± 0.08 a	7.57 ± 0.33 ab	0.33 ± 0.02 a	18.70 ± 0.96 a	7.37 ± 0.47 a	0.29 ± 0.03 a
F1S2	19.58 ± 0.07 a	7.71 ± 0.14 a	0.33 ± 0.02 a	20.04 ± 0.88 a	7.08 ± 0.25 a	0.30 ± 0.02 a
F1S3	18.77 ± 0.41 b	7.44 ± 0.44 ab	0.31 ± 0.01 a	19.28 ± 0.65 a	7.41 ± 0.65 a	0.29 ± 0.03 a
F1S4	19.17 ± 0.54 ab	7.46 ± 0.31 ab	0.33 ± 0.01 a	19.68 ± 1.30 a	7.20 ± 0.51 a	0.30 ± 0.02 a
F2CK	20.23 ± 1.06 a	8.14 ± 0.34 a	0.41 ± 0.02 a	20.24 ± 1.04 a	8.17 ± 0.68 a	0.37 ± 0.02 b
F2S1	20.35 ± 0.57 a	8.18 ± 0.39 a	0.44 ± 0.02 a	20.31 ± 1.15 a	8.28 ± 0.75 a	0.39 ± 0.02 ab
F2S2	20.71 ± 0.15 a	8.44 ± 0.25 a	0.43 ± 0.03 a	21.26 ± 0.95 a	8.27 ± 0.59 a	0.41 ± 0.01 a
F2S3	20.18 ± 0.12 a	8.28 ± 0.44 a	0.44 ± 0.02 a	21.04 ± 0.33 a	8.08 ± 0.62 a	0.41 ± 0.02 a
F2S4	20.53 ± 0.36 a	8.06 ± 0.46 a	0.42 ± 0.03 a	20.69 ± 1.32 a	8.10 ± 0.51 a	0.38 ± 0.01 b
F3CK	14.69 ± 0.50 c	6.39 ± 0.19 b	0.42 ± 0.07 b	14.16 ± 1.17 b	6.51 ± 0.78 a	0.39 ± 0.01 b
F3S1	14.91 ± 0.70 bc	6.56 ± 0.39 b	0.42 ± 0.01 b	15.26 ± 0.43 ab	6.60 ± 0.57 a	0.40 ± 0.02 ab
F3S2	15.33 ± 0.48 ab	6.62 ± 0.18 ab	0.43 ± 0.02 ab	14.89 ± 0.83 ab	6.65 ± 0.59 a	0.39 ± 0.09 b
F3S3	15.58 ± 0.14 a	6.41 ± 0.28 b	0.44 ± 0.01 ab	15.74 ± 1.35 a	6.97 ± 0.56 a	0.41 ± 0.02 a
F3S4	15.88 ± 0.45 a	6.97 ± 0.44 a	0.45 ± 0.02 a	15.68 ± 1.49 a	6.87 ± 0.63 a	0.42 ± 0.01 a

2.5 对大豆产量及产量构成因素的影响

大豆的高产与多个因素有着密切的关系。在同一基因型条件下,如施肥量、种植密度以及播种日期等栽培操作对大豆的产量都起着至关重要的作用。2022年的数据显示,固定种植密度时,大豆产量随施肥量增加而增加,达到峰值后显著下降。相较于F1CK处理,F2CK和F3CK的产量分别提升了4.40%和1.49%。在低施肥水平下,不同烯效唑浓度处理明显影响大豆产量和构成因素,尤其是 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度,产量增幅最大,达2.98%,同时该

处理也显著提升单位面积荚数和粒数,分别增加4.86%和12.52%,百粒重增加2.77%。在中等施肥水平下, $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理的大豆产量增幅最大,达3.79%,并提高单位面积荚数和粒数,分别增加4.45%和6.23%,百粒重提升3.33%。高施肥水平下, $75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理显著提升大豆产量4.12%,并提升单位面积荚数和粒数,分别为4.12%和1.99%,百粒重增加4.62%。2022年研究结果表明施肥和烯效唑处理提升大豆产量及构成因子,且2023年与2022年大致相同,但略微降低。

表 5 烯效唑对不同施肥水平下大豆产量及产量构成因素的影响
 Table 5 Effects of ethaboxam on soybean yield and yield components under different fertilization levels

肥力 Fertility	处理 Treatment	2022		2023		理论产量 Theoretical yield/ (kg·hm ⁻²)	百粒重 100-seed weight/g	单位面积荚数 Pods number per unit area/m ²	单位面积粒数 Seeds number per unit area/m ²	理论产量 Theoretical yield/ (kg·hm ⁻²)	百粒重 100-seed weight/g	理论产量 Theoretical yield/ (kg·hm ⁻²)
		单位面积荚数 Pods number per unit area/m ²	单位面积粒数 Seeds number per unit area/m ²	单位面积荚数 Pods number per unit area/m ²	单位面积粒数 Seeds number per unit area/m ²							
低 Low	F1CK	608.11 ± 37.32 ab	1429.38 ± 127.22 b	18.35 ± 0.49 b	3079.15 ± 55.05 b	558.05 ± 107.04 a	1399.82 ± 78.63 ab	17.72 ± 0.67 ab	2891.72 ± 76.54 a			
	F1S1	630.00 ± 15.71 ab	1577.60 ± 83.42 a	18.61 ± 0.51 ab	3159.39 ± 45.54 ab	598.95 ± 41.74 a	1457.75 ± 67.45 a	17.98 ± 0.62 ab	2961.22 ± 115.47 a			
	F1S2	637.71 ± 24.91 a	1608.40 ± 91.26 a	18.86 ± 0.40 a	3171.47 ± 148.92 a	604.03 ± 81.36 a	1463.76 ± 93.30 a	18.19 ± 0.57 a	2971.92 ± 34.06 a			
	F1S3	612.91 ± 39.23 ab	1495.60 ± 166.26 ab	18.40 ± 0.54 ab	3117.54 ± 91.34 ab	559.08 ± 42.77 a	1374.25 ± 74.73 b	17.81 ± 0.15 ab	2899.39 ± 115.80 a			
中 Middle	F1S4	601.44 ± 33.54 b	1453.20 ± 154.29 b	18.30 ± 0.48 b	3073.28 ± 52.89 b	570.65 ± 50.78 a	1420.30 ± 87.17 ab	17.63 ± 0.33 b	2873.38 ± 124.70 a			
	F2CK	726.40 ± 26.27 a	1765.30 ± 97.12 a	19.19 ± 0.48 b	3214.90 ± 130.99 c	674.97 ± 28.63 ab	1628.18 ± 116.60 b	18.82 ± 0.76 b	3018.69 ± 47.15 b			
	F2S1	728.00 ± 16.10 a	1775.50 ± 220.80 a	19.21 ± 0.51 b	3235.72 ± 31.30 c	699.04 ± 44.79 ab	1623.09 ± 121.17 b	18.89 ± 0.49 b	3041.72 ± 67.59 b			
	F2S2	758.75 ± 31.77 a	1875.20 ± 49.70 a	19.84 ± 0.47 a	3336.54 ± 80.59 a	710.03 ± 47.57 a	1734.09 ± 39.04 a	19.51 ± 0.29 a	3113.49 ± 85.03 a			
高 High	F2S3	750.75 ± 31.25 a	1909.40 ± 70.42 a	19.76 ± 0.43 a	3318.90 ± 46.71 ab	656.69 ± 35.57 b	1721.95 ± 80.46 a	19.04 ± 0.34 ab	3083.77 ± 78.27 ab			
	F2S4	729.45 ± 48.59 a	1785.80 ± 189.27 a	19.23 ± 0.34 b	3250.03 ± 34.62 bc	681.96 ± 61.62 ab	1647.52 ± 83.52 ab	19.19 ± 0.70 ab	3052.34 ± 27.82 ab			
	F1CK	633.11 ± 18.87 b	1551.60 ± 99.73 a	18.81 ± 0.33 b	3125.63 ± 62.00 c	585.85 ± 41.49 b	1456.65 ± 129.12 b	18.19 ± 0.93 b	2934.64 ± 15.20 c			
	F1S1	635.89 ± 16.97 ab	1488.70 ± 150.13 a	19.17 ± 0.60 ab	3154.46 ± 23.14 c	606.13 ± 22.93 ab	1515.66 ± 68.55 ab	18.32 ± 0.51 ab	2942.90 ± 59.99 c			
高 High	F1S2	642.98 ± 30.85 ab	1540.80 ± 136.12 a	19.65 ± 0.37 a	3208.92 ± 30.54 b	596.84 ± 42.28 b	1491.21 ± 69.52 ab	18.52 ± 0.71 ab	2973.65 ± 36.61 bc			
	F1S3	659.20 ± 24.36 a	1582.50 ± 186.64 a	19.68 ± 0.87 a	3291.61 ± 63.42 a	646.00 ± 50.45 a	1586.83 ± 90.61 a	18.94 ± 0.58 a	3020.75 ± 53.86 a			
高 High	F1S4	658.47 ± 19.03 a	1580.37 ± 82.10 a	18.74 ± 0.67 b	3287.53 ± 48.66 a	641.11 ± 50.47 a	1571.47 ± 112.54 a	18.88 ± 0.63 ab	3012.43 ± 51.30 ab			

3 讨论

作物生长发育的状态可以通过诸如株高、茎粗等形态指标来反映。本研究中,各处理的大豆株高和茎粗均随施肥水平增加而升高。前人的研究表明,烯效唑可以通过矮化大豆植株节间长度起到降低株高的作用,同时增加茎粗,提高植株紧实度,增强抗倒伏能力从而提高大豆单产^[16-17]。本研究结果显示,低、中、高3种肥力下初花期喷施烯效唑,提高了大豆的茎粗和节数,并且对株高起到显著的抑制作用,这与前人研究结果一致。在低、中施肥水平下,各处理相对于对照组株高均降低,其中 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理对株高的抑制和茎粗的增加效果最显著。而在主茎节数和叶面积指数上,各处理都表现出了明显的增加效果,烯效唑浓度为 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理效果最为显著。在高施肥水平下, $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理对株高的抑制和茎粗的增加效果也最显著。在高施肥水平下, $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理对株高的抑制和茎粗的增加效果也最显著。而在主茎节数和叶面积指数上则以 $75\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理效果最好。这表明了烯效唑在促进大豆植株发育方面具有积极的调控作用。通过精准施用生长调节剂,可以显著提升作物的生长品质和农艺性状,为大豆的高效栽培提供有力的技术支撑。

光合作用是植物生长发育过程中的关键能量转化代谢系统,据统计,它可以贡献作物生物产量的90%至95%^[18]。有研究指出,不同的施肥水平可以促进大豆相应生长中心器官对养分的吸收^[19],从而提升光合速率等光合指标。本研究中,大豆的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO_2 浓度均随肥力的增大而升高。有研究表明,喷施植物生长调节剂可显著提高叶片的光合性能^[20];Wan等^[21]指出烯效唑能够促进大豆生长,提高光能利用率,促进产量提高。本研究中不同肥力及不同肥力下不同浓度烯效唑对大豆鼓粒期的光合指标产生了影响。在低、中肥力下各处理的净光合速率随烯效唑浓度的升高而升高,并在 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理达到峰值,在高肥力处理下也随烯效唑浓度的升高而升高并在 $75\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理达到峰值,且在不同肥力条件下,与对照相比部分差异达到了显著水平。气孔导度和蒸腾速率也出现了相似的变化。但胞间 CO_2 浓度并未达到显著水平,可能是胞间 CO_2 浓度一直维持在较高水平,即便在植株气孔导度升高时,植株细胞内的 CO_2 浓度足够叶片进行光合作用所需。

大豆高产的形成是由多种因素共同作用的结果。在相同基因型下,施肥水平、种植密度及播种日期等栽培措施对大豆产量的形成十分重要^[22-24]。在相同品种、相同栽培密度的条件下,随着施肥量的增加,大豆产量逐渐提高。然而,当施肥量达到

一定程度后,产量却会显著下降。过量施肥不仅会增加生产成本,还会导致大豆植株过分生长而晚熟,反而降低产量和收益。本研究中,低、中肥力条件下,单位面积内的荚数、粒数以及百粒重均呈现上升趋势。这表明适宜的营养供给能够促进大豆产量的增加。然而,在高肥力的条件下,大豆单位面积荚数、粒数和百粒重反而有所下降。喷施调节剂可以改善大豆个体株型,构建合理群体,进而增加籽粒的充实与物质积累^[25]。本研究中,初花期喷施 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的烯效唑可在低、中、肥力下显著增加单位面积荚数、单位面积粒数、单位面积粒重及百粒重。在高肥力下,喷施 $75\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的烯效唑也显著增加单位面积荚数、单位面积粒数、单位面积粒重及百粒重。且这些效果都与对照组呈现显著性差异。这与针对芸豆^[26]和绿豆^[27]的研究结果相一致。

4 结论

在大豆初花期叶面喷施烯效唑能显著促进大豆鼓粒期的光合相关指标升高、限制了大豆的株高,促进了茎粗、节数和叶面积指数的增加;降低了冠层各部位的光衰减系数;不同程度地提升了不同肥力下大豆产量及构成因素。说明初花期喷施适宜浓度的烯效唑可改善不同肥力下大豆形态特征、提高光合能力,改善冠层结构,进而促进大豆产量提高。

参考文献

- [1] 王禹,李干琼,喻闻,等. 中国大豆生产现状与前景展望[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(21): 201-207. (WANG Y, LI G Q, YU W, et al. Present situation and prospect of soybean production in China [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2020, 59(21): 201-207.)
- [2] 李远明,刘丽君,祖伟,等. 不同基因型大豆品种干物质积累与产量形成的关系[J]. 东北农业大学学报, 1999, 30(4): 324-328. (LI Y M, LIU L J, ZU W, et al. The relationship between dry matter accumulation and yield among different genotypes of soybean [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 1999, 30(4): 324-328.)
- [3] 唐善德,盖钧镒,马育华. 中国南方大豆干物质积累、分配等生理性状与产量的关系[J]. 大豆科学, 1990, 9(4): 278-284. (TANG S D, GAI J Y, MA Y H. A study on correlation between yield and dry matter accumulation, partition and other physiological traits in soybeans [J]. Soybean Science, 1990, 9(4): 278-284.)
- [4] 张性坦,赵存,柏惠侠,等. 夏大豆诱处4号公顷产4500kg生理指标研究[J]. 中国农业科学, 1996, 29(6): 46-54. (ZHANG X T, ZHAO C, BAI H X, et al. Study on physiological indexes of summer soybean variety Youchu 4 yielding 4500 kg·hm⁻² [J]. Scientia Agricultura Sinica, 1996, 29(6): 46-54.)
- [5] 闫晓艳,刘凯,李立波. 窄行密植条件下大豆合理行距与密

- 度的研究[J]. 耕作与栽培, 2000(1): 13-16, 26.
- [6] 刘丽君, 祖伟, 张瑞忠. 大豆窄行平播密植条件下的干物质积累规律[J]. 东北农业大学学报, 2000, 31(1): 26-31. (LIU L J, ZU W, ZHANG R Z. Dry matter accumulation of soybean under the condition of warrow row solid-seeding[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2000, 31(1): 26-31.)
- [7] 张敬涛, 郑殿峰, 申晓慧, 等. 半矮秆大豆窄行密植超高产生长发育动态研究[J]. 大豆科学, 2009, 28(5): 842-845. (ZHANG J T, ZHENG D F, SHEN X H, et al. Soybean population growth dynamic under the super-high yield cultivation mode with narrow row and dense seeded semi-dwarf cultivar[J]. Soybean Science, 2009, 28(5): 842-845.)
- [8] 李瑞平, 李志刚, 王贵平, 等. 不同栽培模式对大豆生长动态及干物质积累分配的影响[J]. 大豆科学, 2008, 27(6): 979-982, 987. (LI R P, LI Z G, WANG G P, et al. Effect of different cultivation patterns on growth tendency, dry matter accumulation and distribution of soybean[J]. Soybean Science, 2008, 27(6): 979-982, 987.)
- [9] 张敬涛, 王成, 王谦玉, 等. 不同栽培模式对大豆产量及生长发育的影响[J]. 中国农学通报, 2002, 18(5): 8-10. (ZHANG J T, WANG C, WANG Q Y, et al. Effects of different cultivation patterns on soybean yield and growth and development [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2002, 18(5): 8-10.)
- [10] 林浩, 刘丽君, 吴俊江, 等. 不同栽培模式对大豆同化物积累和光合生理特性与产量形成的影响[J]. 大豆科学, 2009, 28(3): 456-460. (LIN H, LIU L J, WU J J, et al. Effects of different cultivation patterns on assimilate accumulation, photosynthetic characteristics and yield formation in soybean[J]. Soybean Science, 2009, 28(3): 456-460.)
- [11] 董钻, 祁明楣, 罗文春, 等. 大豆亩产 450 斤的生理参数及栽培措施初探[J]. 大豆科学, 1982, 1(2): 131-140. (DONG Z, QI M M, LUO W C, et al. Preliminary studies on the physiological parameters and cultivation measures for soybeans plants production a yield of 450 jin per mu[J]. Soybean Science, 1982, 1(2): 131-140.)
- [12] 金剑, 刘晓冰, 王光华, 等. 大豆高产群体的生态生理特征[J]. 中国油料作物学报, 2003, 25(3): 109-114. (JIN J, LIU X B, WANG G H, et al. Eco-physiological characters of high yielding population in soybean[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2003, 25(3): 109-114.)
- [13] COOPER R L. High-yield-system-in-place (HYSIP) concept for soybean production[J]. Journal of Production Agriculture, 1989, 2(4): 321-324.
- [14] COOPER R L. Influence of early lodging on yield of soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] [J]. Agronomy Journal, 1971, 63(3): 449-450.
- [15] COOPER R L. Influence of soybean production practices on lodging and seed yield in highly productive environments [J]. Agronomy Journal, 1971, 63(3): 490-493.
- [16] 曾荣耀, 童小兰, 邓学东, 等. 不同时期施用烯效唑对玉米: 大豆带状复合种植模式下大豆植株形态及产量的影响[J]. 四川农业科技, 2018(6): 23-24. (ZENG R Y, TONG X L, DENG X D, et al. Effects of uniconazole application at different stages on soybean plant morphology and yield under maize-soybean strip compound planting mode[J]. Sichuan Agricultural Science and Technology, 2018(6): 23-24.)
- [17] 孟娜, 魏胜华. 喷施烯效唑调控大豆根部解剖结构缓解盐逆境伤害[J]. 生态学杂志, 2018, 37(12): 3605-3609. (MENG N, WEI S H. Uniconazole spraying ameliorates salt injury to soybean seedlings by regulating anatomical structure in roots[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(12): 3605-3609.)
- [18] 张向前, 赵秀玲, 王钰乔, 等. 耕作方式对冬小麦灌浆期光合性能日变化和籽粒产量的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(3): 885-893. (ZHANG X Q, ZHAO X L, WANG Y Q, et al. Effects of tillage practices on photosynthetic performance diurnal variation during filling stage and grain yield of winter wheat[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(3): 885-893.)
- [19] 赵双进, 张孟臣, 杨春燕, 等. 栽培因子对大豆生长发育及群体产量的影响 II. 肥水、生长调控措施对产量的影响[J]. 中国油料作物学报, 2003, 25(2): 48-51. (ZHAO S J, ZHANG M C, YANG C Y, et al. Effect of culture factors on growth and yield of soybean II. Effect of fertilizer application, watering, growth regulate measures on yield[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2003, 25(2): 48-51.)
- [20] WANG Q Y, GUAN D H, PAN H B, et al. Effect of brassinolide on leaf photosynthetic function and yield in spring maize filling stage[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(10): 1557.
- [21] WAN Y, LUO Q M, YAN Y H, et al. Response of morphological characters of soybean to application of growth retardant (uniconazole) at third trifoliolate stage [J]. Research on Crops, 2013, 14(3): 792-797.
- [22] 刘金印, 张恒善, 王大秋. 大豆种植密度和群体结构指标的研究[J]. 大豆科学, 1987, 6(1): 1-10. (LIU J Y, ZHANG H S, WANG D Q. Studies on soybean planting density and its index of population structure [J]. Soybean Science, 1987, 6(1): 1-10.)
- [23] 李文龙, 李喜焕, 王瑞霞, 等. 河北省夏播早熟区不同施肥水平和种植密度对大豆产量及品质的影响[J]. 河南农业科学, 2015, 44(3): 40-44. (LI W L, LI X H, WANG R X, et al. Effects of different fertilizer levels and planting densities on yield and quality of soybean in early mature soybean region of Hebei [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2015, 44(3): 40-44.)
- [24] 黄洪明, 吴美娟. 氮肥用量与密度对菜用大豆浙鲜豆 4 号性状的影响[J]. 浙江农业科学, 2012, 53(3): 328-329. (HUANG H M, WU M J. Effects of nitrogen fertilizer amount and density on characters of vegetable soybean Zhexiandou No. 4 [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2012, 53(3): 328-329.)
- [25] LARISSA P B, HILTON D T, DE FREITAS SANTOS PRISCILLA G. Does benzyladenine application increase soybean productivity? [J]. African Journal of Agricultural Research, 2014, 9(37): 2799-2804.
- [26] 丁凯鑫. DTA-6 和 S3307 对三种豆类作物生长和碳氮代谢及产量的影响[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2021. (DING K X. Effects of DTA-6 and S3307 on the growth, carbon and nitrogen metabolism and yield of three legumes [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2021.)
- [27] 王娜. S3307 和 DTA-6 对绿豆源库生理特性及产量和品质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021. (WANG N. Effects of S3307 and DTA-6 on physiological characteristics, yield and quality of mung bean source and sink [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021.)