



6-BA 与 DA-6 复配喷施对不同密度下大豆产量的调控效应

林楠¹, 吴耀坤², 韩德志³, 任慧林¹, 陈训琦¹, 褚霏宇⁴, 金喜军^{1,5*}, 王孟雪^{1*}

(1. 黑龙江八一农垦大学 农学院, 黑龙江 大庆 163316; 2. 黑龙江省农业科学院 大庆分院, 黑龙江 大庆 163316; 3. 黑龙江省农业科学院 黑河分院, 黑龙江 黑河 164300; 4. 黑龙江省科学院 大庆分院, 黑龙江 大庆 163319; 5. 黑龙江省植物生长调节剂工程技术研究中心, 黑龙江 大庆 163319)

摘要:为探讨喷施复配化控剂对不同种植密度下大豆产量的调控作用和规律,于2022和2023年在黑龙江省鹤山农场,选用黑河43和黑河52为试验品种,设置低、中、高3个密度条件处理,黑河43相应保苗数分别为32万、40万和48万株·hm⁻²,黑河52相应保苗数分别为28.8万、36万和43.2万株·hm⁻²,进行6-BA与DA-6复配喷施处理,二者终浓度分别为2和60 mg·L⁻¹,以喷施自来水为对照,采取小区对比的方式研究了复配喷施处理对不同密度下大豆产量的影响。结果表明:与对照相比,复配喷施处理提高了两个供试大豆品种的株高,增加了茎粗和单位面积节数,提高并维持较高的叶面积指数水平;不同程度地改善了两个供试品种光合气体交换参数,其中显著提高了净光合速率和气孔导度;在提高株高的同时增加了茎粗,在一定程度上提高了两个供试大豆品种的抗倒伏系数;增加了收获期单位面积荚数和粒数,并在一定程度上提高了百粒重;最终提高了低、中、高密度下黑河43和黑河52的产量,两年平均产量提高幅度分别为10.05%、16.57%、8.80%和10.00%、14.94%、5.57%。综合分析表明,不同密度下6-BA与DA-6复配喷施不同程度地改善了大豆个体和群体形态特征,尤其增加了单位面积节数和茎粗,提高了R1~R5期地上部生长速率,在促进单位面积荚数和粒数增加的同时,一定程度上提高了百粒重,最终促进产量提升。研究结果可为实际生产中通过化控技术提高大豆产量提供理论基础和参考。

关键词:大豆;复配化控剂;6-BA;DA-6;种植密度;产量

The Regulation Effect of 6-BA and DA-6 Compound Spraying on Soybean Yield under Different Densities

LIN Nan¹, WU Yaokun², HAN Dezhi³, REN Huilin¹, CHEN Xunqi¹, CHU Peiyu⁴, JIN Xijun^{1,5*}, WANG Mengxue^{1*}

(1. College of Agriculture, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, Heilongjiang, China; 2. Daqing Branch of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Daqing 163316, Heilongjiang, China; 3. Heihe Branch of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Heihe 164300, Heilongjiang, China; 4. Daqing Branch of Heilongjiang Academy of Sciences, Daqing 163319, Heilongjiang, China; 5. Heilongjiang Provincial Plant Growth Regulator Engineering Technology Research Center, Daqing 163319, Heilongjiang, China)

Abstract: In order to explore the regulatory effects and laws of spraying compound chemical control agents on soybean yield at different planting densities, Heihe 43 and Heihe 52 were selected as experimental varieties in Heshan farm, Heilongjiang province in 2022 and 2023. Under low, medium, and high density conditions, a compound spraying treatment of 6-BA and DA-6 was set up (the final concentrations of 6-BA and DA-6 were 2 and 60 mg·L⁻¹, respectively), with tap water as the control. The corresponding number of seedlings preserved in Heihe 43 was 3.20 × 10⁵, 4.00 × 10⁵ and 4.80 × 10⁵ plants·ha⁻¹, respectively, and the corresponding number of seedlings preserved in Heihe 52 was 2.88 × 10⁵, 3.60 × 10⁵ and 4.32 × 10⁵ plants·ha⁻¹, respectively. The effect of compound spraying treatment on soybean yield under different densities was studied by comparing residential areas. The results showed that compared with the control, the compound spraying treatment increased the plant height, stem diameter, and number of nodes per unit area of the two tested soybean varieties, and improved and helped maintain a high level of leaf area index. The photosynthetic gas exchange parameters of the two tested varieties were changed to varying degrees, with a significant increase in net photosynthetic rate and stomatal conductance. At the same time as increasing plant height, stem thickness was also increased, which had a certain promoting effect on the lodging resistance coefficient of the two tested soybean varieties, increased the number of pods and seeds per unit area during the harvest period, and to some extent, increased the weight of 100-seed. Ultimately, the yield of Heihe 43 and Heihe 52 under low, medium, and high-density conditions increased by 10.05%, 16.57%, 8.80%, and 10.00%, 14.94%, 5.57%, respectively, on average over the past two years. Through comprehensive analysis, it is believed that the combination of 6-BA and DA-6 at different densities can alter the morphological characteristics of soybean individuals and populations to varying degrees, especially increasing the number of nodes and stem thickness per unit area, and improving the growth rate of aboveground

收稿日期:2024-11-28

基金项目:国家重点研发计划子课题三江平原白浆土改良快速培肥与产能提升协同模式(2022YFD1000105);黑龙江省“揭榜挂帅”科技攻关项目(2021ZXJ05B011);财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系(CARS-04-PS18)。

第一作者:林楠,男,硕士,主要从事大豆高产栽培研究。E-mail:15045738796@163.com。

通讯作者:金喜军,男,博士,副研究员,主要从事大豆高产栽培研究。E-mail:shaoxiang1979@163.com;

王孟雪,女,博士,副教授,主要从事农业生态节水研究。E-mail:Wangmenxue1978@163.com。

parts from R1 to R5 stage. This promotes an increase in the number of pods and seeds per unit area, while also increasing the weight of 100-seed to a certain extent, ultimately leading to an increase in yield. The research results can provide theoretical basis and reference for improving soybean yield through chemical control technology in practical production.

Keywords: soybeans; compound chemical control agent; 6-BA; DA-6; planting density; yield

大豆在农业生产体系和社会经济生活中起不可或缺的作用,是世界范围内维持农业生产可持续发展、满足人们营养和健康需要的重要的豆科作物之一。预计到 2080 年,世界人口将超过 100 亿^[1],在应对大量人口给土壤和粮食带来巨大压力方面,大豆将起到越来越重要的作用。传统栽培技术进一步挖掘大豆产量的潜力有限,化控技术与传统栽培技术配合可能是进一步提高大豆产量的有效手段。

种植密度通过改变作物个体可利用的光照、养分和水分等重要资源数量构建不同质量的群体,进而显著影响作物生长和产量^[2]。适宜的种植密度可以优化作物的生长条件,包括促进个体的生长发育、提高叶面积指数、控制植株高度以及提高光能利用效率,有利于提高作物产量^[3]。在农业生产实践中,选择适宜的种植密度是提高大豆单位面积产量的重要手段^[4]。自 20 世纪 50 年代起,人们开始利用植物生长调节剂来调控作物生长、产量和品质^[5]。当前,化学调控技术已经成为农业生产中不可或缺的新技术之一。传统的种植技术通过改善作物生长环境来提高生产,而化学调控技术则以作物本身为调控对象,促进作物生长发育和生理过程向人们期望的方向发展,更好地适应和利用环境^[6]。大量研究表明,细胞分裂素类化合物不仅可以加快作物生长速度^[7]、促进叶绿体发育以提高光合能力^[8]、延缓叶片衰老^[9]、促进侧枝发育^[10],还能够减少大豆花荚脱落、促进大豆籽粒发育^[11]。DA-6 作为促进型植物生长调节剂可显著促进作物生长,包括促进根系发育^[12]、提高作物干物质积累量^[13],究其原因,可能是其能够显著提高作物光合能

力^[14]、增强碳代谢强度^[15]等。DA-6 还可增强作物的抗旱^[16]、抗寒^[17]能力,并促进豆科作物与根瘤菌形成共生关系、提高生物固氮能力^[18]。然而,黑龙江省大豆生产过程中很少施行化控技术。究其原因,一方面可能与豆农对化控技术的认识不足有关,另一方面可能是由于栽培措施如种植密度限制了植物生长调节剂作用的发挥,也可能归因于单个植物生长调节剂的作用很难突破环境因素、生产条件或其他技术的影响而未表现出明显的增产效果。将复配化学生长调节剂应用于生产,有可能实现优势互补或叠加,其最终作用效果较单剂更加显著和稳定。

本课题组前期开展了生长素类与细胞分裂素类植物生长调节剂复配对大豆产量调控的筛选预试验,明确了适宜浓度的 6-BA 与 DA-6 复配喷施方案可显著促进大豆生长、提高大豆产量。本研究在黑龙江省鹤山农场采用当地大豆主要栽培模式—宽台大垄均匀密植栽培模式的基础上,选用耐密植能力不同的两个大豆品种黑河 43 和黑河 52,分别设置高、中、低 3 种密度,于初花期和结荚初期复配喷施 6-BA 与 DA-6 混合溶液,通过小区对比方式明确上述复配方案对不同密度下大豆生长和产量的影响,为进一步指导生产提供理论基础和依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2022—2023 年在中国黑龙江省鹤山农场进行,该地区年平均降雨量为 500~600 mm,无霜期约 117 d,≥10℃ 的活动积温 2 100~2 450℃。试验期间降雨量和气温变化如图 1 所示。

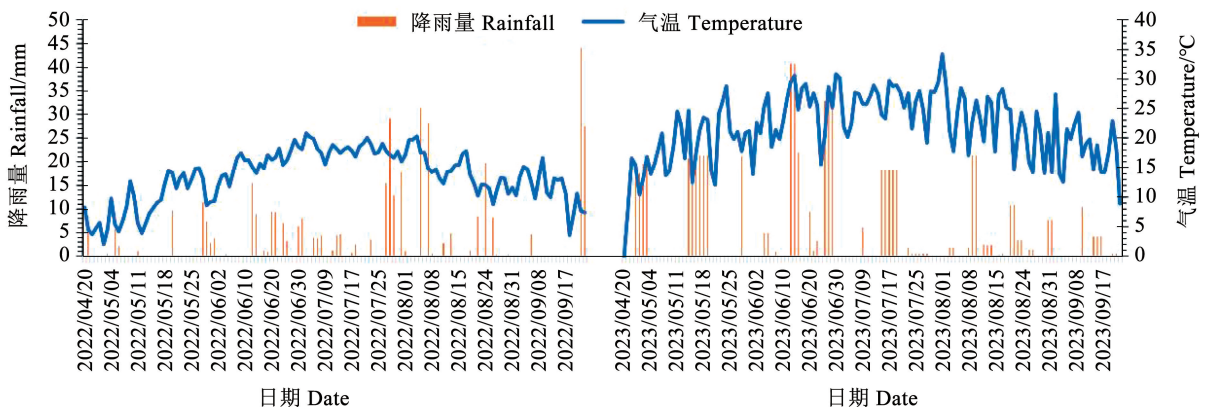


图 1 2022 和 2023 年试验期间实验地平均降雨量与气温情况

Fig. 1 Average rainfall and temperature in the experimental sites during the 2022 and 2023 experimental periods

供试土壤为黑土,前茬为玉米。2022年0~25 cm 耕层土壤 pH6.28,容重 $1.32 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,有机质 $29.15 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 $140.58 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $26.54 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $175.00 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;2023年0~25 cm 耕层土壤 pH6.31,容重 $1.28 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,有机质 $31.26 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 $143.62 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $28.96 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $182.00 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 材料

供试大豆品种分别为耐密植大豆品种黑河43(记为P1)和不耐密植大豆品种黑河52(记为P2)。

6-BA(纯度99%)和DA-6(纯度98%)均购自罗恩公司。

1.3 试验设计

黑河43和黑河52低(M1)、中(M2)、高(M3)密度对应的保苗株数分别为32万、40万、48万株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 和28.8万、36万、43.2万株 $\cdot\text{hm}^{-2}$,分别在初花期和结荚初期喷施6-BA与DA-6的复配混合药剂(T),根据前期预实验,二者的终浓度分别为2和60 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时效果最佳,所以本研究采用此浓度。以喷施等量自来水为对照(CK)。其中黑河43为耐密品种,黑河52为不耐密品种。

采用当地主要栽培模式“大垄匀密栽培模式”,垄距110 cm,垄上3行。小区行长8 m,8行区,3次重复。每公顷施用磷酸二铵150 kg($\text{N}\geq 18\%$, $\text{P}_2\text{O}_5\geq 46\%$)、尿素60 kg($\text{N}\geq 46\%$)、硫酸钾50 kg($\text{K}_2\text{O}\geq 50\%$),中耕管理同生产田。

分别于R1、R5和R6期取样,测定单株形态和群体长势相关指标,并于R8期测量产量构成因素和产量。对于每个处理,每次取样分别在3个小区内选择密度和长势具有代表性的20 cm长度范围的植株,并将3个取样点的植株混合后选择有代表性的8株进行相关指标的测量。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 形态指标 大豆株高采用直尺测量,自子叶痕至主茎顶端的距离即为株高;采用游标卡尺测量第2节中间位置直径,记为茎粗(子叶痕记为第0节);采用人工数数的方式记录主茎节数。叶面积的测定采用LI-300C(美国Li-COR公司)台式叶面积仪测定,而后根据王吉权等^[19]方法计算叶面积指数。具体计算公式为:叶面积指数(LAI)=单位土地上的总叶面积/单位土地面积。

1.4.2 干物质积累 将大豆植株地上部按照器官分解为叶、叶柄、茎、荚果,装入信封后转移至烘箱中,在105℃杀青30 min后继续在80℃烘干至恒重,利用天平称量干重,而后计算干物质积累速率。计算干物质积累量速率的公式为:干物质积累速率=(R5干物质积累量-R1干物质积累量)/生长天数。

1.4.3 抗倒伏系数 于大豆R6时期,采用茎秆强

度仪(YD-1型,浙江托普云农科技股份有限公司)测定大豆基部第3节和第6节茎秆弯折力。每个小区随机选取有代表性的植株6株,共3个重复。测定时,将第3节和第6节置于凹槽内,两支支撑点的距离为13.5 cm,缓慢下压至茎秆折断,获得节间抗折力。将大豆茎秆视为均匀材料、重心在茎秆中部,则茎秆重力矩为 $1/2 \text{ MgH}$ 。参考徐瑶等^[20]的方法计算抗倒伏系数(Q), $Q = \frac{2FL}{MgH}$,式中,F为茎秆抗弯折力,L为两支点间距,H为株高,M为整株鲜重,g为重力加速度,取9.8。

1.4.4 光合气体交换参数 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(T_r)和胞间 CO_2 浓度(C_i)。

1.4.5 产量构成因素和产量 收获期在每个小区收获1 m^2 大豆,选取具有代表性的8株大豆测量荚数、每荚粒数和百粒重,实收1 m^2 获得实际产量。

1.5 数据分析

采用Excel 2021进行数据录入和整理,用R语言进行数据分析和作图。

2 结果与分析

2.1 6-BA与DA-6复配喷施对不同密度下大豆形态特征的影响

如表1所示,随种植密度的增加,株高和单位面积节数逐渐提高,茎粗则逐渐降低。与CK相比,复配喷施处理显著提高了2022年黑河43和黑河52大豆品种株高,低、中、高密度下黑河43株高提高幅度分别为18.16%、14.46%和10.03%,黑河52提高幅度分别为12.54%、12.51%和6.97%;复配喷施处理显著提高了2022年黑河43和黑河52大豆品种茎粗,低、中、高密度下黑河43茎粗提高幅度分别为17.35%、25.24%和13.34%,黑河52提升幅度分别为15.00%、17.53%和10.42%。复配喷施处理显著提高了2022年黑河43和黑河52大豆品种的单位面积节数,低、中、高密度下黑河43的单位面积节数提高幅度分别为14.89%、16.95%和16.67%,黑河52提高幅度分别为17.23%、10.06%和12.42%。2023年两个供试品种的上述指标也表现出相似规律。

复配喷施处理不同程度地提高了两年两个供试大豆品种的R5期叶面积指数,但2022年仅低密度下黑河43复配喷施处理叶面积指数显著高于对照,2023年所有密度下两个品种复配喷施处理叶面积指数均显著高于对照;两年内所有处理R6叶面积指数均较R5有所下降,且降低幅度顺序与R5时期相同。

表 1 6-BA 与 DA-6 复配喷施对不同密度下大豆形态特征的影响

Table 1 Effects of 6-BA and DA-6 combined spraying on morphological characteristics of soybean under different densities

年份 Year	处理 Treatment	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem diameter/mm	单位面积节数 Nodes number of unit area/ ($1.0 \times 10^4 \text{ node} \cdot \text{hm}^{-2}$)	叶面积指数 LAI	
					R5	R6
2022	P1M1T	89.08 ± 5.73 a	9.13 ± 0.57 a	520.88 ± 31.17 a	4.17 ± 0.27 a	3.82 ± 0.37 a
	P1M1CK	75.39 ± 2.78 b	7.78 ± 1.09 b	453.38 ± 71.51 b	3.58 ± 0.32 b	3.13 ± 0.40 b
	P1M2T	94.29 ± 3.39 a	9.13 ± 1.11 a	613.13 ± 66.67 a	4.84 ± 0.40 a	4.29 ± 0.43 a
	P1M2CK	82.38 ± 5.55 b	7.29 ± 0.85 b	524.25 ± 37.83 b	4.46 ± 0.36 a	3.81 ± 0.57 a
	P1M3T	92.49 ± 3.96 a	7.56 ± 1.10 a	617.38 ± 56.82 a	5.29 ± 0.55 a	4.82 ± 0.49 a
	P1M3CK	84.06 ± 4.59 b	6.67 ± 0.74 b	529.13 ± 75.82 b	4.76 ± 0.58 a	4.10 ± 0.50 b
	P2M1T	100.42 ± 7.80 a	8.51 ± 1.07 a	502.38 ± 33.66 a	4.35 ± 0.33 a	3.19 ± 0.28 a
	P2M1CK	89.23 ± 5.26 b	7.40 ± 0.70 b	454.13 ± 31.4 b	4.07 ± 0.34 a	3.12 ± 0.30 a
	P2M2T	105.17 ± 6.73 a	8.30 ± 1.18 a	567.38 ± 36.68 a	4.45 ± 0.36 a	4.09 ± 0.44 a
	P2M2CK	93.48 ± 6.11 b	7.08 ± 0.73 b	506.50 ± 67.79 b	4.36 ± 0.39 a	3.36 ± 0.25 b
	P2M3T	104.94 ± 6.35 a	6.78 ± 1.06 a	571.25 ± 39.03 a	5.33 ± 0.36 a	4.26 ± 0.30 a
	P2M3CK	98.10 ± 5.47 b	6.14 ± 0.96 b	508.13 ± 27.3 b	5.29 ± 0.40 a	4.00 ± 0.30 a
2023	P1M1T	86.09 ± 8.61 a	8.53 ± 0.70 a	472.38 ± 39.35 a	4.05 ± 0.27 a	3.69 ± 0.50 a
	P1M1CK	73.62 ± 4.58 b	8.03 ± 0.79 b	427.88 ± 71.51 a	3.60 ± 0.47 b	3.08 ± 0.59 b
	P1M2T	91.17 ± 10.66 a	8.59 ± 0.75 a	569.50 ± 63.93 a	4.66 ± 0.45 a	4.20 ± 0.49 a
	P1M2CK	79.46 ± 9.25 b	7.41 ± 0.45 b	490.88 ± 30.71 b	4.17 ± 0.39 b	3.58 ± 0.59 b
	P1M3T	91.19 ± 10.15 a	6.96 ± 0.79 a	579.13 ± 54.57 a	5.14 ± 0.31 a	4.50 ± 0.50 a
	P1M3CK	83.14 ± 5.53 a	6.99 ± 0.61 a	494.50 ± 27.13 b	4.65 ± 0.30 b	4.18 ± 0.44 a
	P2M1T	98.57 ± 6.65 a	7.91 ± 0.79 a	435.75 ± 32.50 a	3.67 ± 0.27 a	3.35 ± 0.37 a
	P2M1CK	88.23 ± 7.60 b	7.21 ± 0.72 b	389.00 ± 48.13 b	3.08 ± 0.32 b	2.66 ± 0.40 b
	P2M2T	104.70 ± 6.48 a	8.12 ± 0.70 a	496.75 ± 42.18 a	4.26 ± 0.29 a	3.46 ± 0.38 a
	P2M2CK	93.79 ± 5.26 b	7.02 ± 0.52 b	436.63 ± 49.57 b	3.51 ± 0.28 b	3.08 ± 0.45 a
	P2M3T	102.19 ± 7.83 a	6.63 ± 0.64 a	500.13 ± 30.48 a	4.30 ± 0.23 a	3.90 ± 0.53 a
	P2M3CK	95.77 ± 9.90 a	6.03 ± 0.70 a	440.13 ± 63.17 b	3.86 ± 0.33 b	3.26 ± 0.28 b

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$).

2.2 6-BA 与 DA-6 复配喷施对不同密度大豆干物质积累的影响

如表 2 所示,单位面积叶干重随密度增加而增加,茎、荚、地上部干重随种植密度的增加先增加后减少,2022 年黑河 52 品种柄干重随密度的增加而减少,2023 年黑河 43 和黑河 52 品种柄干重均随密度的增加而增加。2022 年,与 CK 相比,复配喷施处理未显著提高不同密度下黑河 43 和黑河 52 叶干重,但显著提高了中、高密度下黑河 43 茎干重,提高幅度分别为 8.66% 和 17.02%;同时显著提高了低、中、高密度下黑河 43 和黑河 52 的荚干重,提高幅度分别为 17.36%、12.88%、11.08% 和 11.70%、8.28%、16.83%;最终,复配喷施处理不同程度地提高了不同密度下黑河 43 和黑河 52 地上部干重。2023 年数据趋势与 2022 年大致相同。

2.3 6-BA 与 DA-6 复配喷施对不同密度大豆 R1 至 R5 期大豆植株地上部生长速率的影响

如图 2 所示,R1 至 R5 大豆植株地上部生长速率随种植密度增加呈先增加后减小趋势。与对照相比,2022 年复配喷施显著提高了低、中、高密度下黑河 43 地上部生长速率,提高幅度分别为 7.15%、7.48% 和 13.50%;黑河 52 相应生长速率提高幅度为 9.56%、2.90% 和 4.67%。2023 年,黑河 43 和黑河 52 的生长速率变化趋势与 2022 年一致。

2.4 6-BA 与 DA-6 复配喷施对不同密度大豆抗倒伏系数的影响

如图 3 所示,两个品种抗倒伏系数随密度增加而下降,并且黑河 52 的抗倒伏系数小于黑河 43。与 CK 相比,复配喷施显著提高了 2022 和 2023 年高密度下黑河 43 和黑河 52 的抗倒伏系数,黑河 43

两年提高幅度分别为 23.88% 和 23.33%，黑河 52 两年提高幅度分别为 29.59% 和 30.97%；但复配喷施在中、低密度下并未显著提高两个供试品种抗倒伏系数。

2.5 6-BA 与 DA-6 复配喷施对不同密度大豆光合作用交换参数的影响

如表 3 所示,净光合速率、气孔导度、蒸腾速率和胞间 CO₂ 浓度随密度的增加而减小。与 CK 相比,复配喷施处理显著提高了 2022 年低、中、高密度下黑河 43 的净光合速率,提高幅度为 11.23%、

12.63% 和 19.04%；同时显著提高了中、低密度下黑河 52 的净光合速率;还显著提高了中、高密度下黑河 52 的气孔导度,提高幅度分别为 12.90% 和 15.38%；最后显著提高了中、低密度下黑河 43 的蒸腾速率,提高幅度分别为 13.26% 和 22.55%。与 CK 相比,复配喷施处理显著提高了 2023 年低、中、高密度下黑河 52 的气孔导度,提高幅度分别为 18.97%、11.76% 和 13.64%；同时显著提高了中密度下黑河 52 的蒸腾速率,提高幅度为 11.97%。复配喷施未能显著提高两个品种的胞间 CO₂ 浓度。

表 2 6-BA 与 DA-6 复配喷施对不同密度大豆干物质积累的影响

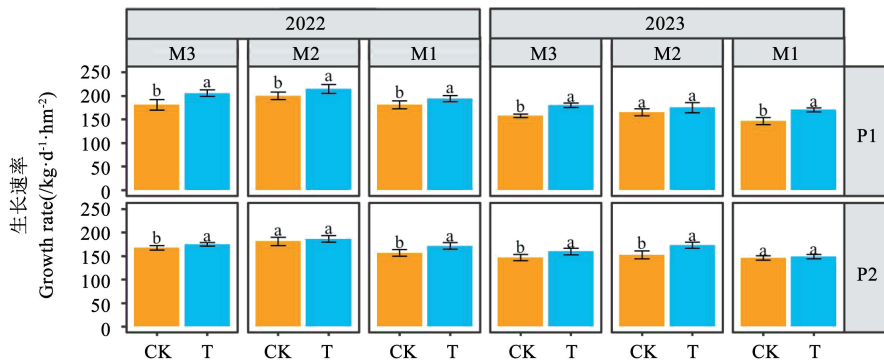
Table 2 Effect of 6-BA and DA-6 combined spraying on dry matter accumulation of soybean under different densities

单位: kg·hm⁻²

年份 Year	处理 Treatment	叶 Leaf	茎 Stem	柄 Petiole	荚 Pod	地上部分 Overground	
2022	P1M1T	2641.63 ± 231.07 a	3021.62 ± 152.65 a	1263.28 ± 70.92 a	1889.88 ± 112.38 a	8768.91 ± 305.41 a	
	P1M1CK	2428.09 ± 207.99 a	2748.83 ± 316.31 a	1175.97 ± 80.18 b	1610.33 ± 82.08 b	8167.12 ± 370.26 b	
	P1M2T	2706.29 ± 235.67 a	3449.57 ± 276.88 a	1202.84 ± 111.67 a	2038.66 ± 219.27 a	9392.76 ± 359.57 a	
	P1M2CK	2656.29 ± 240.01 a	3174.61 ± 213.16 b	1202.48 ± 101.52 a	1806.09 ± 142.32 b	8824.62 ± 305.27 b	
	P1M3T	2953.65 ± 259.91 a	3127.97 ± 239.05 a	1295.14 ± 95.09 a	1649.59 ± 78.65 a	9178.45 ± 312.42 a	
	P1M3CK	2816.50 ± 221.29 a	2673.05 ± 325.41 b	1227.13 ± 118.77 a	1484.99 ± 50.00 b	8112.62 ± 522.60 b	
	P2M1T	2357.25 ± 195.72 a	2670.03 ± 190.07 a	1153.41 ± 38.42 a	1499.63 ± 111.02 a	7727.82 ± 305.85 a	
	P2M1CK	2303.52 ± 218.27 a	2491.00 ± 214.02 a	1175.41 ± 66.89 a	1324.11 ± 36.14 b	7090.14 ± 313.29 b	
	P2M2T	2469.41 ± 184.69 a	3172.49 ± 297.10 a	1256.63 ± 58.79 a	1521.91 ± 118.41 a	8425.04 ± 331.49 a	
	P2M2CK	2327.82 ± 188.09 a	3067.99 ± 314.25 a	1246.16 ± 146.19 a	1405.5 ± 189.21 a	8062.32 ± 478.59 a	
	P2M3T	2721.37 ± 204.13 a	2631.64 ± 240.12 a	1290.88 ± 57.69 a	1331.81 ± 76.68 a	7823.60 ± 171.07 a	
	P2M3CK	2502.88 ± 212.00 a	2407.63 ± 100.51 b	1052.76 ± 58.56 b	1139.93 ± 59.52 b	7192.25 ± 255.04 b	
	2023	P1M1T	2661.36 ± 158.61 a	3108.12 ± 202.35 a	1257.66 ± 47.97 a	1426.56 ± 147.48 a	8369.64 ± 199.69 a
		P1M1CK	2428.33 ± 181.62 b	2759.72 ± 353.31 b	1106.85 ± 61.98 b	1117.70 ± 70.41 b	7215.31 ± 365.36 b
		P1M2T	2709.88 ± 179.30 a	3337.84 ± 342.58 a	1195.19 ± 81.47 a	1689.04 ± 211.42 a	8517.30 ± 381.22 a
P1M2CK		2395.11 ± 197.42 b	3028.61 ± 202.56 b	1127.10 ± 121.06 a	1536.72 ± 140.51 a	8068.68 ± 304.73 b	
P1M3T		2801.69 ± 112.55 a	2899.90 ± 304.53 a	1271.49 ± 68.18 a	1473.54 ± 50.16 a	8678.31 ± 228.68 a	
P1M3CK		2582.38 ± 226.31 b	2630.61 ± 378.36 a	1218.59 ± 117.22 a	1328.92 ± 47.57 b	7696.64 ± 193.90 b	
P2M1T		2194.11 ± 145.60 a	2694.33 ± 222.54 a	1068.35 ± 21.99 a	1308.43 ± 77.42 a	7262.28 ± 235.79 a	
P2M1CK		979.19 ± 62.40 a	2623.02 ± 242.23 a	1089.07 ± 52.78 a	1208.93 ± 26.46 b	7097.50 ± 229.13 a	
P2M2T		2139.68 ± 109.01 a	3071.10 ± 376.25 a	1256.94 ± 39.57 a	1539.28 ± 140.51 a	8421.65 ± 242.50 a	
P2M2CK		2043.25 ± 117.56 a	2918.86 ± 332.88 a	1208.41 ± 147.96 a	1413.90 ± 66.48 b	7603.28 ± 351.98 b	
P2M3T		2646.13 ± 205.51 a	2877.51 ± 316.04 a	1276.68 ± 22.57 a	1186.97 ± 119.08 a	7755.60 ± 353.75 a	
P2M3CK		2249.38 ± 224.21 b	2519.56 ± 189.71 b	1253.76 ± 105.08 a	1056.20 ± 62.62 b	7142.76 ± 319.34 b	

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$).

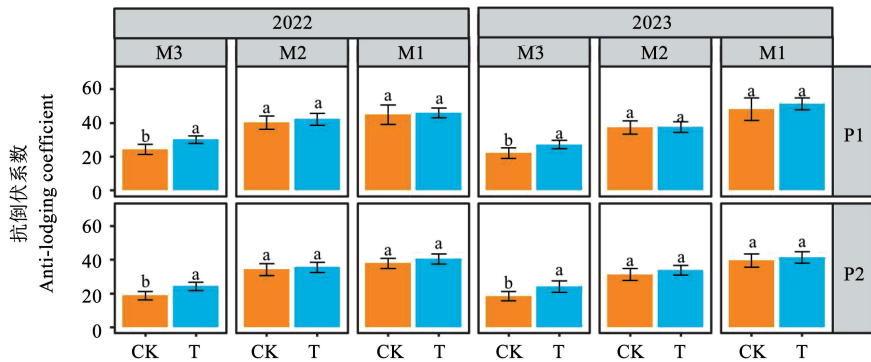


注:不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$).

图2 6-BA 与 DA-6 复配喷施对不同密度 R1 至 R5 期大豆植株地上部生长速率的影响

Fig.2 Effects of 6-BA and DA-6 combined spraying on the aboveground growth rate of soybean plants under different densities from R1 to R5 stages



注:不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$).

图3 6-BA 与 DA-6 复配喷施对不同密度大豆抗倒伏系数的影响

Fig.3 Effect of 6-BA and DA-6 combined spraying on lodging resistance coefficient of soybean under different densities

表3 6-BA 与 DA-6 复配喷施对不同密度大豆光合气体交换参数的影响

Table 3 Effects of 6-BA and DA-6 combined spraying on photosynthetic gas exchange parameters of soybean under different densities

年份 Year	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 $T_r / (\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	胞间 CO_2 浓度 $C_i / (\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$
2022	P1M1T	25.06 ± 2.11 a	0.81 ± 0.09 a	2.50 ± 0.37 a	223.59 ± 14.00 a
	P1M1CK	22.53 ± 1.16 b	0.76 ± 0.07 a	2.04 ± 0.24 b	227.43 ± 14.82 a
	P1M2T	22.56 ± 2.43 a	0.70 ± 0.08 a	2.05 ± 0.22 a	184.50 ± 3.34 a
	P1M2CK	20.03 ± 1.38 b	0.62 ± 0.04 b	1.81 ± 0.13 b	185.50 ± 3.16 a
	P1M3T	18.19 ± 2.99 a	0.60 ± 0.08 a	1.72 ± 0.25 a	161.48 ± 9.72 a
	P1M3CK	15.28 ± 2.02 b	0.52 ± 0.05 b	1.54 ± 0.11 a	153.08 ± 9.71 a
	P2M1T	22.32 ± 1.87 a	0.71 ± 0.06 a	2.19 ± 0.19 a	217.23 ± 17.11 a
	P2M1CK	20.57 ± 3.99 a	0.60 ± 0.07 b	2.08 ± 0.39 a	203.43 ± 9.63 a
	P2M2T	19.69 ± 1.53 a	0.62 ± 0.05 a	1.77 ± 0.14 a	175.50 ± 3.16 a
	P2M2CK	18.86 ± 2.54 a	0.59 ± 0.08 a	1.69 ± 0.22 a	175.00 ± 3.51 a
	P2M3T	17.46 ± 1.52 a	0.57 ± 0.06 a	1.55 ± 0.13 a	149.06 ± 7.55 a
	P2M3CK	16.79 ± 2.20 a	0.45 ± 0.06 b	1.58 ± 0.48 a	163.76 ± 31.80 a
2023	P1M1T	15.89 ± 1.56 a	0.77 ± 0.11 a	2.20 ± 0.31 a	218.96 ± 13.19 a
	P1M1CK	15.25 ± 1.28 a	0.73 ± 0.08 a	1.99 ± 0.12 a	217.09 ± 16.61 a
	P1M2T	20.02 ± 2.40 a	0.63 ± 0.07 a	1.85 ± 0.22 a	182.50 ± 1.41 a
	P1M2CK	18.58 ± 1.13 a	0.59 ± 0.04 a	1.71 ± 0.11 a	182.75 ± 2.12 a
	P1M3T	20.07 ± 2.38 a	0.55 ± 0.07 a	1.57 ± 0.19 a	159.71 ± 9.02 a

表3(续)

年份 Year	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 $T_r/(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	胞间 CO_2 浓度 $C_i/(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$
	P1M3CK	18.62 ± 1.16 a	0.49 ± 0.04 a	1.48 ± 0.12 a	153.05 ± 9.57 a
	P2MIT	18.18 ± 1.62 a	0.69 ± 0.07 a	1.91 ± 0.20 a	218.30 ± 11.36 a
	P2M1CK	16.29 ± 1.83 b	0.58 ± 0.04 b	1.71 ± 0.28 a	209.68 ± 14.23 a
	P2M2T	22.01 ± 2.47 a	0.57 ± 0.05 a	1.59 ± 0.15 a	172.88 ± 4.05 a
	P2M2CK	19.05 ± 1.93 b	0.51 ± 0.06 b	1.42 ± 0.16 b	172.88 ± 5.28 a
	P2M3T	18.16 ± 1.66 a	0.50 ± 0.04 a	1.31 ± 0.12 a	149.20 ± 11.12 a
	P2M3CK	16.32 ± 1.81 a	0.44 ± 0.04 b	1.21 ± 0.16 a	149.10 ± 9.96 a

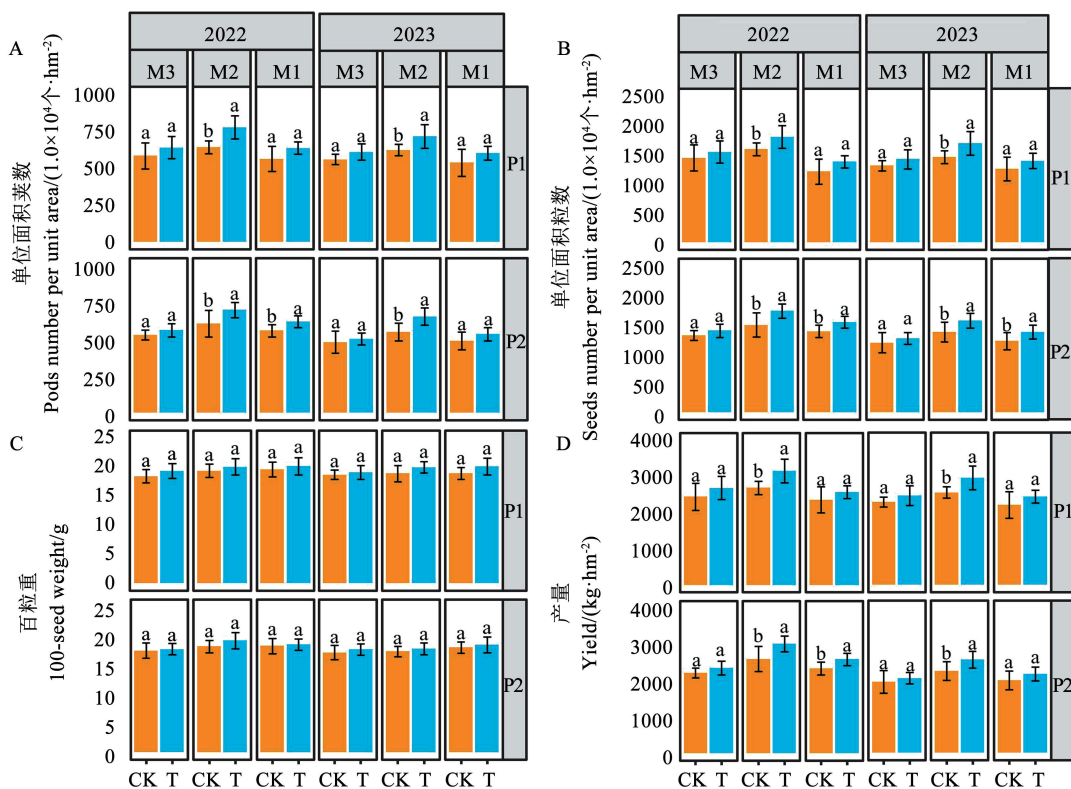
注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$).

2.6 6-BA 与 DA-6 复配喷施对不同密度大豆产量和产量构成的影响

如图4所示,单位面积荚数、粒数、产量随密度的增加先增加后减少,百粒重随密度的增加而减小。与CK相比,两年内6-BA与DA-6复配喷施显著提高了中密度下黑河43单位面积荚数;对黑河52而言,2022年复配喷施处理在中密度下影响显著,其提高幅度顺序与黑河43一致。复配喷施对不同密度大豆单位面积粒数有提高作用,且两年内提高幅度顺序与复配喷施对单位面积荚数影响一致。复配喷施对不同密度大豆百粒重有提高作用,但均

未达到显著水平。对产量而言,高密度下黑河43产量高于低密度下的产量,而黑河52在低密度下的产量低于低密度下的产量。与CK相比,复配喷施处理显著提高了2022和2023年中密度下黑河43的产量,低、中、高密度下提高幅度分别为9.30%、17.44%、9.85%和10.75%、15.70%、7.75%。2022年,复配喷施对中密度下黑河52产量的提高达到了显著性水平,低、中、高密度下黑河52产量的提高幅度分别为10.98%、15.94%和6.17%。2023年,复配喷施显著提高了中密度下黑河52的产量,低、中、高密度下提高幅度分别为9.02%、13.94%和4.97%。



注:A.单位面积荚数;B.单位面积粒数;C.百粒重;D.产量。不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

Note: A. Pods number per unit area; B. Seeds number per unit area; C. 100-seed weight; D. Yield. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$).

图4 6-BA 与 DA-6 复配喷施对不同密度大豆产量和产量构成

Fig. 4 Effects of compound spraying of 6-BA and DA-6 on the yield and yield composition of soybeans under different densities

3 讨论

种植密度通过协调个体与群体之间的关系,实现土地、光热等资源的充分利用^[21],达到高产目标。在本研究设置的密度梯度下,两个供试大豆品种株高、茎粗、单位面积节数和叶面积指数随密度增加分别表现出逐渐提高、逐渐减小、逐渐增加趋势,与王程等^[22]研究结果相一致。究其原因,密度的增加加剧了群体中个体之间的竞争,大豆植株个体通过提高株高争夺光照^[23],同时削弱了茎的横向生长,必然造成茎粗减小^[24];与低密度相比,中密度对个体节数的限制可以通过密度的增加得以补偿,表现为单位面积节数增加;但与中密度相比,高密度对个体节数的限制并不能通过增加密度的方式补偿,导致单位面积节数减少^[25]。对于叶面积指数,虽然密度增加抑制了个体叶面积,但群体叶面积仍增加^[26]。6-BA 和 DA-6 均属于生长促进型植物生长调节剂,具有促进细胞分裂^[27]和扩大^[28]、提高光合效率^[29]、提高碳氮代谢活性^[30]等作用,不同密度下二者复配喷施处理均对两个供试品种株高、茎粗、单位面积节数和叶面积有促进作用,但随密度增加,上述指标的提高幅度变小。当然,密度对上述指标的影响,以及复配喷施处理的改善作用也可能与个体之间的营养竞争加剧、营养的高效吸收和利用有关。

本研究数据显示,密度的增加抑制了个体光合气体交换参数,与 Burgess 等^[31]研究结果相一致。不同密度下 6-BA 和 DA-6 复配处理能够改善大豆光合气体交换参数,这与众多单独喷施 6-BA 和 DA-6 的研究结果一致^[32-35]。有研究指出,6-BA 通过促进叶绿素合成、增强光合速率、改善气孔功能、提高光系统效率和抗氧化能力,以及调节内源激素水平,从而提高植物的光合能力^[36]。DA-6 通过提高过氧化物酶及硝酸还原酶的活性,促进植株的碳、氮代谢,增强植株对水肥的吸收和干物质的积累,进而提高植物的光合能力^[37]。光合效率的提高必然促进生物量的积累,两年的数据显示,不同密度下两个供试品种单位面积地上部各器官和全部干物质积累显著增加,同时也提高了 R1 至 R5 大豆植株地上部生长速率。有研究指出 R1 至 R5 干物质积累速率与大豆产量呈极显著正相关关系^[38],因此光合效率和生长速率的提高可能是复配喷施处理能够提高大豆产量的重要原因。另外,生育后期维持较大叶

面积指数是获得高产的必要条件之一^[39]。本研究数据显示,复配喷施处理有助于 R6 期大豆叶面积指数维持较高水平,这对于维持大豆较高光合效率、促进籽粒发育有利^[40]。值得注意的是,复配喷施处理在提高株高的同时显著增加了茎粗,可在一定程度上抵消由于株高提高造成的抗倒伏能力的下降,抗倒伏系数在一定程度上有所提高,佐证了这一判断。同时,茎粗的增加意味着输导组织更加发达,有利于水分、矿质营养和碳水化合物运输的通畅,可以在一定程度上削弱反馈抑制对光合效率的影响^[41],同时促进籽粒的充分发育。

不同密度下收获期复配喷施处理,单位面积荚数和粒数均显著高于对照,这可能是因为 6-BA 在保花保荚方面具有积极作用^[42],同时 6-BA 和 DA-6 均能促进光能效率提高,增加同化物对花荚的供应能力,进而减少了花荚脱落。光合效率的提高和叶面积指数维持时间的延长必然增加鼓粒期的源供应能力,进而在一定程度上提高百粒重,最终荚果数量的增加和百粒重的提高必然提高大豆产量。

4 结论

不同密度下 6-BA 与 DA-6 复配喷施能够不同程度地改变大豆个体和群体形态特征,尤其增加单位面积节数和茎粗,并提高了 R1 到 R5 期地上部生长速率,在促进单位面积荚数和粒数增加的同时,在一定程度上提高百粒重,最终提高产量。此外,调节剂复配喷施对两个供试品种产量的提高幅度表现为中密度大于低和高密度,同时对耐密品种的产量提高幅度大于不耐密品种。

参考文献

- [1] Businessline. In just 8 years, India will overtake China as world's most populous country: UN report [EB/OL]. (2019-07-17) [2024-08-25]. <https://www.thehindubusinessline.com/economy/india-will-overtake-china-as-worlds-most-populous-country-in-2027-un-report/article28021947.ece>.
- [2] MORRIS R A, GARRITY D P. Resource capture and utilization in intercropping: water[J]. *Field Crops Research*, 1993, 34(3-4): 303-317.
- [3] DERESSEGN F, TELELE T. Review on effects of inter and intra row spacing on yield and yield components of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) in Ethiopia [J]. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, 2017, 7(7): 53-59.
- [4] BOQUET D J. Plant population density and row spacing effects on soybean at post-optimal planting dates [J]. *Agronomy Journal*,

- 1990, 82(1): 59-64.
- [5] 裴海荣, 李伟, 张蕾, 等. 植物生长调节剂的研究与应用[J]. 山东农业科学, 2015, 47(7): 142-146.
- PEI H R, LI W, ZHANG L, et al. Research and application of plant growth regulators [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2015, 47(7): 142-146.
- [6] 赵敏, 邵凤赞, 周淑新, 等. 植物生长调节剂对农作物和环境的安全性[J]. 环境与健康杂志, 2007, 24(5): 370-372.
- ZHAO M, SHAO F Y, ZHOU S X, et al. Safety of plant growth regulators to crops and environment [J]. Journal of Environment and Health, 2007, 24(5): 370-372.
- [7] PONTES C V S, DOS SANTOS A H A, LOPES L K C, et al. Exogenous serotonin and 24-epibrassinolide boost root protection and suppress oxidative damages occasioned by severe water deficit in soybean seedlings [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2024, 43(6): 1833-1843.
- [8] FLORES S, TOBIN E M. Benzyladenine modulation of the expression of two genes for nuclear-encoded chloroplast proteins in *Lemma gibba*: Apparent post-transcriptional regulation [J]. Planta, 1986, 168(3): 340-349.
- [9] ZWACK P J, ROBINSON B R, RISLEY M G, et al. Cytokinin response factor 6 negatively regulates leaf senescence and is induced in response to cytokinin and numerous abiotic stresses [J]. Plant & Cell Physiology, 2013, 54(6): 971-981.
- [10] CURTIS I S, NAM H G, SAKAMOTO K. Optimized shoot regeneration system for the commercial Korean radish 'Jin ju Dae pyong' [J]. Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 2004, 77(1): 81-87.
- [11] 郑殿峰, 赵黎明, 于洋, 等. 植物生长调节剂对大豆花荚脱落及产量的影响[J]. 大豆科学, 2008, 27(5): 783-786.
- ZHENG D F, ZHAO L M, YU Y, et al. Effects of plant growth regulators(PGRs) on the abscission of flower and pod of soybean [J]. Soybean Science, 2008, 27(5): 783-786.
- [12] ZHOU W, CHEN F, ZHAO S, et al. DA-6 promotes germination and seedling establishment from aged soybean seeds by mediating fatty acid metabolism and glycometabolism [J]. Journal of Experimental Botany, 2019, 70(1): 101-114.
- [13] 李颖, 万冰, 余朝阁, 等. DA-6 对番茄秧苗生长的影响[J]. 农业工程技术, 2022, 42(1): 74-76.
- LI Y, WAN B, YU C G, et al. Effect of DA-6 on the growth of tomato seedlings [J]. Agricultural Engineering Technology, 2022, 42(1): 74-76.
- [14] 于俊红, 彭智平, 杨少海, 等. DA-6 对于旱胁迫下花生生理及生长指标的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(1): 168-172.
- YU J H, PENG Z P, YANG S H, et al. Influence of DA-6 on physiological and growth targets of peanut under drought stress [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(1): 168-172.
- [15] 许晨, 王文静, 曹珊, 等. 花后 DA-6 处理调控小麦种子活力的机理[J]. 中国农业科学, 2021, 54(9): 1821-1834.
- XU C, WANG W J, CAO S, et al. Mechanism of DA-6 treatment regulating wheat seed vigor after anthesis [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(9): 1821-1834.
- [16] 邵玲, 梁广坚, 蔡惠丽. 喷施己酸二乙氨基乙醇酯对几种与番茄幼苗抗冷性相关生理指标的影响[J]. 植物生理学通讯, 2007, 43(6): 1105-1108.
- SHAO L, LIANG G J, CAI H L. Influence of hexanoic acid 2-(diethylamino) ethyl ester on some physiological indexes related to cold resistance of tomato (*Lycopersicon esculentum* mill.) seedlings [J]. Plant Physiology Communications, 2007, 43(6): 1105-1108.
- [17] 娄慧, 朱金成, 杨若欢, 等. 外源 DA-6 调控干旱胁迫下棉花种子萌发的生理机制 [J]. 江苏农业科学, 2023, 51(7): 91-96.
- LOU H, ZHU J C, YANG R H, et al. Physiological mechanism of exogenous DA-6 regulating cotton seed germination under drought stress [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(7): 91-96.
- [18] 张明才, 何钟佩, 田晓莉, 等. 植物生长调节剂 DTA-6 对花生产量、品质及其根系生理调控研究 [J]. 农药学学报, 2003, 5(4): 47-52.
- ZHANG Mi C, HE Z P, TIAN X L, et al. Study on the physiological regulation of peanut yield, quality and root system of plant growth regulator DTA-6 [J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2003, 5(4): 47-52.
- [19] 王吉权, 钱昌, 王福林, 等. 大西江农场种植模式对黑河 43 农艺性状和产量的影响 [J]. 大豆科学, 2023, 42(3): 316-325.
- WANG J Q, QIAN C, WANG F L, et al. The effect of planting mode in Daxijiang Farm on agronomic traits and yield of Heihe 43 [J]. Soybean Science, 2023, 42(3): 316-325.
- [20] 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 differences in stem mechanical properties and lodging resistance of different soybean varieties at grain drum stage [J]. Soybean Science, 2017, 36(6): 905-912.
- [21] GURMU S. Plant population density effects on yield and yield components of soybean (*Glycine max* L.) varieties in Ethiopia-A Review [J]. Global Journal of Multidisciplinary Studies, 2023, 2: 26-30.
- [22] 王程, 刘兵, 金剑, 等. 密度对大豆农艺性状及产量构成因素空间分布特征的影响 [J]. 大豆科学, 2008, 27(6): 936-942, 948.
- WANG C, LIU B, JIN J, et al. Influences of planting density on agronomic traits and spatial distribution of yield components across main stem in soybean [J]. Soybean Science, 2008, 27(6): 936-942, 948.
- [23] KAI X. Effects of planting density on population growth and grain yield of hybrid wheat C6-38/Py85-1 [J]. Journal of Triticeae Crops, 2008, 28(1): 113-117.
- [24] 张晓艳, 杜吉到, 郑殿峰. 密度对大豆群体冠层结构及光合

- 特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(4): 75-80.
- ZHANG X Y, DU J D, ZHENG D F. Effect of density on canopy structure and photosynthetic characteristics in soybean population [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(4): 75-80.
- [25] 张伟, 张惠君, 王海英, 等. 株行距和种植密度对高油大豆农艺性状及产量的影响[J]. 大豆科学, 2006, 25(3): 283-287.
- ZHANG W, ZHANG H J, WANG H Y, et al. Effects of spacings and planting densities on agronomic traits and yield in high-oil soybeans[J]. Soybean Science, 2006, 25(3): 283-287.
- [26] 刘春晓, 董瑞, 张秀芝, 等. 不同种植密度对玉米叶面积指数、干物质积累及产量的影响[J]. 山东农业科学, 2017, 49(2): 36-39.
- LIU C X, DONG R, ZHANG X Z, et al. Effects of different planting densities on leaf area index, dry matter accumulation and yield of maize [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2017, 49(2): 36-39.
- [27] MARTINS J P R, SANTOS E R, RODRIGUES L C A, et al. Effects of 6-benzylaminopurine on photosystem II functionality and leaf anatomy of *in vitro* cultivated *Aechmea blanchetiana* [J]. Biologia Plantarum, 2018, 62(4): 793-800.
- [28] 董龙英, 颜季琼. 6-BA, 甘露醇对黄瓜子叶细胞扩大生长和细胞壁酶活性的影响(简报)[J]. 植物生理学报, 1992, 28(1): 47-50.
- DONG L Y, YAN J Q. 6-BA, Effect of mannitol on the enlarged growth and cell wall enzyme activity of cucumber cotyledon cells (Briefing) [J]. Chinese Journal of Plant Physiology, 1992, 28(1): 47-50.
- [29] GAO Z, LIANG X G, ZHANG L, et al. Spraying exogenous 6-benzyladenine and brassinolide at tasseling increases maize yield by enhancing source and sink capacity[J]. Field Crops Research, 2017, 211: 1-9.
- [30] GURMANI A R, BANO A, KHAN S U, et al. Alleviation of salt stress by seed treatment with abscisic acid (ABA), 6-benzylaminopurine (BA) and chlormequat chloride (CCC) optimizes ion and organic matter accumulation and increases yield of rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Australian Journal of Crop Science, 2011, 5(10): 1278-1285.
- [31] BURGESS A J, CARDOSO A A. Throwing shade: Limitations to photosynthesis at high planting densities and how to overcome them [J]. Plant Physiology, 2022, 191(2): 825-827.
- [32] LU J, GUAN P, GU J, et al. Exogenous DA-6 improves the low night temperature tolerance of tomato through regulating cytokinin [J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 11: 599111.
- [33] HÖNIG M, PLÍHALOVÁ L, HUSI Č KOVÁ A, et al. Role of cytokinins in senescence, antioxidant defence and photosynthesis [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2018, 19(12): 4045.
- [34] LUO K, YUAN X, XIE C, et al. Diethyl aminoethyl hexanoate increase relay strip intercropping soybean grain by optimizing photosynthesis area and delaying leaf senescence[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 12: 818327.
- [35] LIU C, FENG N, ZHENG D, et al. Uniconazole and diethyl aminoethyl hexanoate increase soybean pod setting and yield by regulating sucrose and starch content[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(2): 748-758.
- [36] HU J, REN B, DONG S, et al. 6-Benzyladenine increasing subsequent waterlogging-induced waterlogging tolerance of summer maize by increasing hormone signal transduction[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2022, 1509(1): 89-112.
- [37] CAI S, WU L, WANG G, et al. DA-6 improves sunflower seed vigor under Al stress by regulating Al balance and ethylene metabolic [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2022, 229: 113048.
- [38] 王艳杰, 杜吉到, 郑殿峰, 等. 大豆不同群体几种主要性状与产量关系的研究[J]. 大豆科学, 2007, 26(2): 185-189.
- WANG Y J, DU J D, ZHENG D F, et al. Study on the relationship between several main traits and yield in different populations of soybean [J]. Soybean Science, 2007, 26(2): 185-189.
- [39] 谢甫绶, 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): 61-66.
- XIE F, WANG H, ZHANG H J, et al. Effects of different fertilizer and density treatments on super-high-yield soybean Liaodou 14 [J]. Soybean Science, 2008, 27(1): 61-66.
- [40] 陈文杰, 郭小红, 汤复跃, 等. 不同生育时期大豆叶片光合特性变化及相关性研究[J]. 中国油料作物学报, 2017, 39(3): 360-365.
- CHEN W J, GUO X H, TANG F Y, et al. Study on changes and correlation of photosynthetic characteristics of soybean leaves at different growth stages [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2017, 39(3): 360-365.
- [41] 葛才林, 罗时石, 龚荐, 等. 光合产物在作物茎鞘中输送速度差异与流量的示踪研究[J]. 核农学报, 1994, 8(1): 46-50.
- GE C L, LUO S S, GONG J, et al. Tracer study on the difference of transportation speed and flow rate of photosynthetic products in crop stem sheath [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 1994, 8(1): 46-50.
- [42] NAGEL L, BREWSTER R, RIEDELL W E, et al. Cytokinin regulation of flower and pod set in soybeans (*Glycine max* (L.) merr.) [J]. Annals of Botany, 2001, 88(1): 27-31.