

文廷刚, 文章荣, 蒋伟勤, 等. 外源植物生长调节剂对大豆玉米带状间作茎秆抗倒伏性状及产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(10): 1936-1945.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.10.007

## 外源植物生长调节剂对大豆玉米带状间作茎秆抗倒伏性状及产量的影响

文廷刚<sup>1</sup>, 文章荣<sup>1</sup>, 蒋伟勤<sup>1</sup>, 宋佳敏<sup>1</sup>, 何佳伟<sup>1</sup>, 崔亚坤<sup>2</sup>, 陈华涛<sup>2</sup>, 刘廷武<sup>3</sup>, 顾大路<sup>1</sup>

(1. 江苏徐淮地区淮阴农业科学研究所, 江苏 淮安 223001; 2. 江苏省农业科学院, 江苏 南京 210014; 3. 淮阴师范学院, 江苏 淮安 223300)

**摘要:** 为探索不同外源植物生长调节剂对大豆玉米带状复合种植模式下玉米和大豆茎秆抗倒伏性状及产量的影响, 以江玉 877 和齐黄 34 为试验材料, 采用玉米大豆“2+4”间作模式, 设置 3 个调节剂处理, 分别为喷施乙烯利 700 mg/L (A)、喷施多效唑 100 mg/L (B)、喷施乙烯利 700 mg/L+多效唑 100 mg/L (C), 以喷施清水为对照 (CK), 研究在大豆玉米带状复合种植条件下外源植物生长调节剂对玉米和大豆茎秆形态、抗折力和产量等的影响。结果表明, 乙烯利处理能显著降低玉米株高和穗位高、增加节间茎粗、提高基部节间抗折力, 但对大豆茎秆的抗倒伏形态无显著影响; 多效唑则相反, 仅对大豆植株茎秆抗倒伏形态增强效果显著, 对玉米植株抗倒伏形态无显著影响。乙烯利和多效唑复配处理兼具二者优点, 与对照相比, 乙烯利和多效唑复配处理能显著降低玉米和大豆株高, 显著增加大豆和玉米抗折力和茎秆密度, 显著提升玉米和大豆产量。综上, 在大豆玉米复合种植模式下, 乙烯利和多效唑复配剂对玉米和大豆抗倒伏能力的提升和产量的增加效果优于 2 种单剂, 有利于提高作物抗倒伏能力, 优化产量构成并增产。

**关键词:** 植物生长调节剂; 大豆玉米带状间作; 抗倒伏; 产量

中图分类号: S482.8 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2025)10-1936-10

## Effects of different exogenous plant growth regulators on stem lodging resistance and yield in a soybean-maize strip intercropping system

WEN Tinggang<sup>1</sup>, WEN Zhangrong<sup>1</sup>, JIANG Weiqin<sup>1</sup>, SONG Jiamin<sup>1</sup>, HE Jiawei<sup>1</sup>, CUI Yakun<sup>2</sup>, CHEN Huatao<sup>2</sup>, LIU Tingwu<sup>3</sup>, GU Dalu<sup>1</sup>

(1. Huaiyin Institute of Agricultural Sciences of the Xuhuai District of Jiangsu Province, Huai'an 223001, China; 2. Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 3. Huaiyin Normal University, Huai'an 223300, China)

**Abstract:** To explore the effects of different exogenous plant growth regulators on stem lodging resistance and yield in a maize-soybean strip intercropping system, a study was conducted using Jiangyu 877 (maize) and Qihuang 34 (soybean) under a “2+4” intercropping pattern. Three plant growth regulator treatments were set, namely ethephon at 700

mg/L (A), paclobutrazol at 100 mg/L (B), and a combination of ethephon at 700 mg/L + paclobutrazol at 100 mg/L (C), with water spraying as the control (CK), to study their effects on stem morphology, breaking resistance, and yield. The results showed that ethephon treatment significantly reduced maize plant height and ear

收稿日期: 2025-01-19

基金项目: 淮安市自然科学研究计划项目 (HAB202245); 淮安市农科院院长科研基金项目 (HNY202304)

作者简介: 文廷刚 (1983-), 男, 重庆人, 硕士, 副研究员, 主要从事作物栽培与调控研究。(E-mail) wentinggang@126.com

通讯作者: 顾大路, (E-mail) gudalu666@aliyun.com

height, increased internode stem diameter, and improved basal internode breaking resistance, but had no significant effect on the lodging resistance morphology of soybean stems. In contrast, paclobutrazol significantly enhanced soybean stem lodging-resistant morphology, but did not significantly impact maize lodging and related traits. The combined ethephon and paclobutrazol treatment integrated the advantages of both regulators. Compared to the control, the combined treatment significantly reduced plant height in maize and soybean, increased the breaking resistance and stem density of both crops, and improved their yields. In conclusion, in a maize-soybean intercropping system, the combined ethephon and paclobutrazol treatment is more effective than single-regulator treatments in enhancing lodging resistance and increasing yields for both crops, which enhances crop lodging resistance, optimizes yield components, and ultimately leads to higher yields of both crops.

**Key words:** plant growth regulator; soybean-maize strip intercropping; lodging resistance; yield

粮食安全是关系国家安全战略的大事<sup>[1]</sup>。大豆和玉米是中国重要的油料与粮食作物,拥有悠久的种植历史。在中国耕地面积有限的情况下,粮油争地的矛盾一直存在<sup>[2-4]</sup>。据统计,2022年中国大豆进口量约 $9.11 \times 10^7$  t,占当年全国大豆消费量的81.8%<sup>[5]</sup>,对外依存度极高,严重影响了中国的粮食安全。玉米作为中国主要粮食作物之一,在保障国家粮食安全中起着举足轻重的作用<sup>[6]</sup>。因此,如何提高大豆和玉米的产量,缓解粮食供需矛盾,减少中国粮食对外依存度,成为粮食生产中一个亟待解决的问题。大豆-玉米带状复合种植是一种在中国耕地资源有限的背景下提高土地复种指数,增加土地产出率、提高资源利用率,缓解地区粮食压力的一项有效举措,在缓解大豆供需矛盾、保障国家粮食安全方面具有重要意义<sup>[7-8]</sup>。

在大豆玉米带状间作模式下,大豆受高秆玉米遮荫导致苗期旺长,节间过长,主茎藤蔓化而易倒伏;同时,遮光还降低了植株光合效率和干物质积累,严重影响了大豆产量和品质的提升<sup>[9-10]</sup>。随着玉米种植密度的增加,其倒伏风险也显著升高。倒伏不仅降低了产量与品质,还制约着全程机械化的推进。因而,提高大豆玉米间作模式下茎秆强度,增强茎秆抗倒伏能力,是带状间作模式下促进大豆和玉米优质高产的关键。

当前,生产中大豆、玉米倒伏的防控措施主要以选用抗倒型品种、加强肥料管理和合理密植等常规栽培管理措施为主。然而在带状间作模式下,种植密度和肥料管理均有严格标准,试图通过调控密度和肥效来提高植株抗倒性的效果极为有限。已有研究结果证明,多效唑和烯效唑等植物生长抑制剂均可有效降低大豆株高和节间长度,增加节粗,提高植株抗倒性<sup>[11-12]</sup>。此外,外施硅、钛、钾、胺鲜酯、氯化胆碱等均能提高大豆的抗倒伏能力<sup>[13-14]</sup>。在玉米

种植中,采用以乙烯利为主要成分的化控产品来降低株高和重心、增加茎秆机械强度、增强植株抗倒伏能力<sup>[15-17]</sup>。目前,大豆和玉米化控剂的类型、使用时期和浓度均不同,在田间防控时不仅会增加工作难度和成本,还不利于化控剂的机械化操作,使用不当还会产生严重副作用。因此,研究大豆玉米带状间作模式下,如何实现“一喷双控”式化控,即喷施同一化控剂配方同时增强带状间作模式下大豆和玉米的抗倒伏能力,达到抗倒增产、节本增效的双重作用,在生产实际中有着迫切的现实需求。

在以往研究中,前人对多效唑、乙烯利单剂在大豆和玉米上的调控效果研究较多,但将两者复配后同时施用在大豆玉米上的报道较少,调控效果还有待研究。本研究拟以大豆玉米带状间作模式为研究对象,分别研究多效唑、乙烯利的单剂及其复配剂对大豆和玉米植株的抗倒伏性状及产量的调控效应,为协同大豆玉米带状间作模式下植株抗倒伏形态建成与产量协调发展提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试玉米品种为江玉 877,供试大豆品种为齐黄 34。2种植物生长调节剂分别为乙烯利(ETH,乙烯释放剂,CAS 编号:16672-87-0)和多效唑(PP<sub>333</sub>,CAS 编号:76738-62-0),均购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

### 1.2 试验地概况

试验于2023年在江苏徐淮地区淮阴农业科学研究所现代农业高新科技园区(33°50'N,119°04'E)内进行。试验地前茬为小麦,播前0~20 cm 土层土壤 pH 为 6.82,土壤有机质含量为 20.68 g/kg、全氮含量为 1.62 g/kg、碱解氮含量为 98.61 mg/kg、速效

磷含量为 23.58 mg/kg、速效钾含量为 142.67 mg/kg,全田地力均匀、地面平整。

### 1.3 试验设计

试验采用单因素随机区组设计,设 3 个化控处理,分别为:ETH 700 mg/L(A),PP<sub>333</sub> 100 mg/L(B),ETH 700 mg/L+PP<sub>333</sub> 100 mg/L(C),以喷清水为对照(CK)。于玉米 8~10 展叶期/大豆分枝期—初花期喷施各种调节剂,用量为 450 L/hm<sup>2</sup>。采用叶面喷施,玉米和大豆同时喷药。种植方式采用大豆玉米带状间作种植,玉米和大豆的行比为 2:4,即玉米带种植

2 行玉米,行距 40 cm,株距 12 cm,种植密度为 1 hm<sup>2</sup> 6.17×10<sup>4</sup>株;大豆带种植 4 行大豆,行距 30 cm,株距 10 cm,种植密度为 1 hm<sup>2</sup> 15.39×10<sup>4</sup>株;玉米带与大豆带间距 70 cm,带宽 270 cm,详见图 1。每个小区种植 3 个生产单元,带长 8 m,面积为 64.8 m<sup>2</sup>,每个处理 3 次重复。玉米底肥施纯氮、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 K<sub>2</sub>O 各 120.0 kg/hm<sup>2</sup>,大喇叭口期再追施纯氮 120.0 kg/hm<sup>2</sup>,其他管理同一般高产田。间作大豆不施氮,底肥施用 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 63 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 52.5 kg/hm<sup>2</sup>。玉米和大豆于 6 月 18 日同时播种,10 月 16 日同时收获。

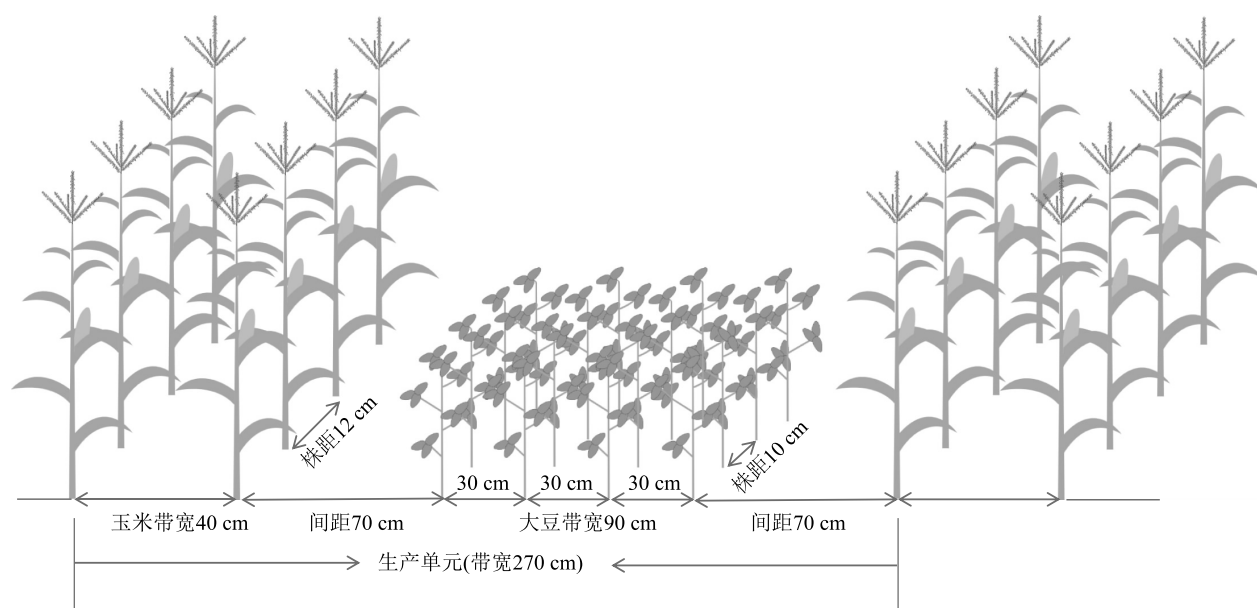


图 1 玉米大豆带状间作种植模式图

Fig.1 Schematic diagram of maize-soybean strip intercropping model

### 1.4 测定项目与方法

1.4.1 茎秆形态指标测定 取样:于大豆始粒期,在各小区边行、中行各选取 5 株代表性大豆植株,共 10 株样品,测定株高、茎粗、节数、节间长度和主茎分枝数。于同时期,每个小区选取长势一致的 10 株玉米用于株高、穗位高、节间长度和节粗的测定。

分样测定:将植株分为茎、叶、豆荚/棒穗,装袋,于 105 °C 下杀青 30 min,随后 80 °C 烘干至恒重并称量,得到各器官干物质重。茎秆密度为茎秆单位长度的干重,即茎秆干重与长度的比值。大豆第 1 节间长度为子叶痕与真叶之间的长度,株高为子叶痕至生长点的距离。

1.4.2 茎秆抗折力测定 使用茎秆强度仪(YXD-1 型,浙江托普云农科技股份有限公司产品)进行抗折力测定,将植株茎秆的第 2 至第 4 节的节间置于

凹槽内,两支撑点的距离 5 cm,缓慢下压至茎秆折断,此时的读数为第 2 至第 4 节节间抗折力。

1.4.3 产量及其构成因素测定 于大豆成熟期,在各小区边行和中行连续取 10 株,共 20 株,进行考种,分别测定每株大豆的分枝数、粒荚数、粒数、百粒重等指标。同时,在各小区选取长 6 m 的未取样大豆带,全部脱粒晒干至籽粒含水量约为 13.0%时,测定籽粒产量。玉米带收取 20 株,测定玉米果穗长、秃尖长、穗行数、行粒数和百粒重等数据,另在各小区选取长 6 m 的未取样玉米带,全部脱粒晒干至籽粒含水量约为 13.0%时,测定籽粒产量。

### 1.5 数据分析

采用 Excel 2016 对数据进行整理,采用 Origin-Pro2019 作图。用 SPSS 18.0 软件对数据进行统计分析,采用最小显著差异法(LSD)法进行多重比较。

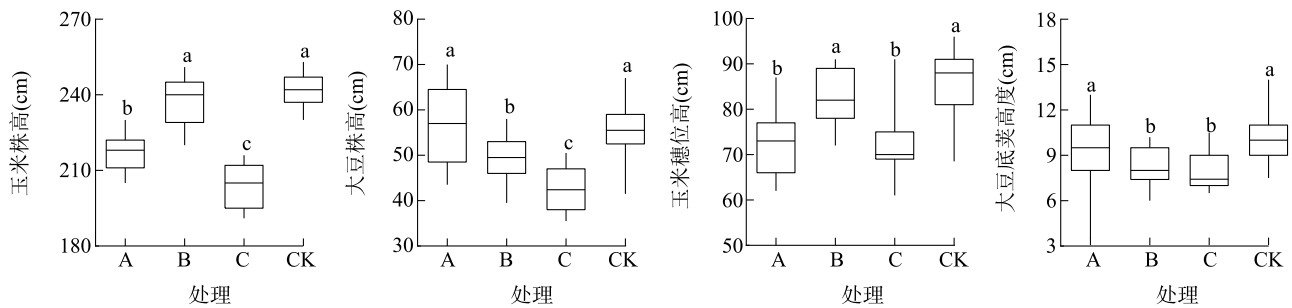
用 R 软件进行 Mantel test 分析并作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 外源植物生长调节剂对大豆和玉米株高的影响

外源植物生长调节剂显著影响植株株高、玉米穗位高以及大豆底荚高度。图 2 显示,不同处理下,玉米株高表现为 CK>B 处理>A 处理>C 处理。A 处理和 C 处理株高较对照显著降低 ( $P<0.05$ ),分别降低了 10.2% 和 15.5%;玉米穗位高与玉米株高表现一致,A 处理和 C 处理穗位高均较对照显著降低 ( $P<0.05$ ),分别较对照降低 14.5% 和 16.0%。大豆

株高表现为 A 处理>CK>B 处理>C 处理。B 处理和 C 处理大豆株高显著降低 ( $P<0.05$ ),分别较对照降低了 10.1% 和 22.9%;底荚高度与大豆株高表现基本一致,B 处理和 C 处理底荚高度较对照显著降低 ( $P<0.05$ ),分别降低了 18.8% 和 20.6%。结果表明,A 处理、C 处理对玉米株高和穗位高有显著降低作用 ( $P<0.05$ ),B 处理、C 处理对大豆株高和底荚高度有显著降低作用 ( $P<0.05$ ),C 处理对玉米和大豆的株高及玉米穗位高、大豆底荚高度均有显著降低作用 ( $P<0.05$ )。



A: 喷施 700 mg/L 烯利; B: 喷施 100 mg/L 多效唑; C: 喷施 700 mg/L 烯利+100 mg/L 多效唑; CK: 对照, 喷施清水。不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

图 2 外源植物生长调节剂对大豆和玉米株高的影响

Fig.2 Effects of exogenous plant growth regulators on plant height in soybean and maize

### 2.2 外源植物生长调节剂对大豆和玉米节间长度的影响

由表 1 可知,间作玉米在第 8 展叶期喷施植物生长调节剂对玉米基部 1~4 节的节间长度无显著影响 ( $P>0.05$ );对基部第 5~11 节的节间长度均有显著影响 ( $P<0.05$ ),A 处理和 C 处理节间长度较对照显著缩短 ( $P<0.05$ ),B 处理与对照无显著差异,表明 B 处理对玉米节间长度无显著调控作用,A 处理和 C 处理能显著缩短玉米节间长度,其中 C 处理效果整体更好。各植物生长调节剂处理对间作大豆基部第 1~4 节的节间长度无显著影响 ( $P>0.05$ );A 处理对大豆其余节间长度(除第 10 节的节间长度外)无显著影响 ( $P>0.05$ ),B 处理对大豆基部第 6、7、8、10 节的节间长度有显著的降低作用 ( $P<0.05$ ),C 处理从基部第 6 节往上各节间(除第 9 节外)的长度均较对照显著缩短 ( $P<0.05$ ),表明 A 处理对大豆节间长度的调控作用有限,B 处理主要缩短大豆中部节间的长度,C 处理主要缩短大豆中部及上部节间的长度。

### 2.3 外源植物生长调节剂对大豆和玉米节间茎粗的影响

由图 3 可见,各处理对玉米茎粗和 大豆茎粗影响各异。从玉米茎粗看,A 处理和 C 处理显著增加了基部第 7~13 节的茎粗 ( $P<0.05$ ),二者较对照的增幅分别达 9.7%~21.4% 和 5.5%~33.8%,B 处理对玉米节间茎粗无显著影响 ( $P>0.05$ )。从大豆茎粗看,A 处理、B 处理、C 处理对茎粗均有增效作用,但 A 处理增效不显著 ( $P>0.05$ )。B 处理较对照显著增加了基部第 10~13 节茎粗 ( $P<0.05$ ),增幅为 8.3%~21.6%。C 处理较对照显著增加了基部第 1~7 节茎粗 ( $P<0.05$ ),增幅为 6.7%~14.9%。

### 2.4 外源植物生长调节剂对大豆和玉米节间抗折力的影响

抗折力是衡量茎秆抗倒伏能力的一个关键指标。由图 4 可知,A 处理、C 处理均显著增加了玉米茎秆基部节间抗折力 ( $P<0.05$ ),分别较对照增加了 19.4% 和 21.9%。同时,各处理对大豆基部节间抗折力也存在不同影响,B 处理和 C 处理显著增加了基部

节间抗折力( $P<0.05$ ),分别较对照提高了 38.1%和 57.6%;而 A 处理则与对照无显著差异( $P>0.05$ )。

表 1 外源植物生长调节剂对大豆和玉米节间长度的影响

Table 1 Effects of exogenous plant growth regulators on internode length in soybean and maize

| 节间       | 玉米              |                 |                             |              | 大豆              |                 |                             |             |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-------------|
|          | 喷施 700 mg/L 乙烯利 | 喷施 100 mg/L 多效唑 | 喷施 700 mg/L 乙烯利+100 mg/L多效唑 | 喷施 清水        | 喷施 700 mg/L 乙烯利 | 喷施 100 mg/L 多效唑 | 喷施 700 mg/L 乙烯利+100 mg/L多效唑 | 喷施 清水       |
| N1 (cm)  | 2.99±0.41a      | 2.61±0.19a      | 2.85±0.47a                  | 2.33±0.20a   | 3.80±0.30a      | 3.64±0.15a      | 3.78±0.26a                  | 3.99±0.17a  |
| N2 (cm)  | 5.57±0.42a      | 5.37±0.39a      | 6.31±0.53a                  | 5.33±0.28a   | 1.75±0.10a      | 1.81±0.06a      | 1.73±0.12a                  | 1.73±0.07a  |
| N3 (cm)  | 7.38±0.38a      | 7.20±0.30a      | 8.19±0.44a                  | 7.63±0.24a   | 1.63±0.10a      | 1.53±0.06a      | 1.44±0.08a                  | 1.52±0.08a  |
| N4 (cm)  | 9.97±0.24a      | 10.09±0.28a     | 10.07±0.23a                 | 10.10±0.15a  | 1.71±0.08a      | 1.76±0.09a      | 1.65±0.09a                  | 1.73±0.08a  |
| N5 (cm)  | 9.31±0.22b      | 12.37±0.25a     | 10.24±0.25b                 | 12.47±0.22a  | 2.54±0.14a      | 2.13±0.10b      | 2.07±0.11b                  | 2.36±0.07ab |
| N6 (cm)  | 10.36±0.30b     | 14.21±0.21a     | 10.91±0.23b                 | 14.90±0.20a  | 3.18±0.09a      | 2.63±0.15b      | 2.50±0.09b                  | 3.12±0.09a  |
| N7 (cm)  | 12.53±0.38b     | 16.33±0.30a     | 10.97±0.29c                 | 16.67±0.26a  | 3.46±0.11a      | 3.02±0.12b      | 2.96±0.11b                  | 3.41±0.09a  |
| N8 (cm)  | 13.85±0.40b     | 17.01±0.23a     | 11.07±0.33c                 | 17.05±0.30a  | 4.08±0.14a      | 3.12±0.22b      | 3.09±0.16b                  | 3.85±0.10a  |
| N9 (cm)  | 14.11±0.46b     | 16.52±0.18a     | 11.93±0.33c                 | 16.52±0.49a  | 4.58±0.20a      | 3.82±0.19b      | 3.79±0.10b                  | 4.19±0.11ab |
| N10 (cm) | 14.71±0.37b     | 17.20±0.19a     | 12.33±0.40c                 | 16.60±0.52a  | 5.32±0.14a      | 3.91±0.26c      | 3.79±0.13c                  | 4.39±0.13b  |
| N11 (cm) | 15.46±0.37b     | 17.45±0.12a     | 13.58±0.37c                 | 16.81±0.51a  | 5.14±0.26a      | 4.51±0.27a      | 3.13±0.12b                  | 4.58±0.15a  |
| N12 (cm) | 16.43±0.33b     | 17.53±0.20a     | 16.21±0.47b                 | 16.70±0.39b  | 4.73±0.22a      | 4.66±0.15a      | 2.81±0.12b                  | 5.01±0.13a  |
| N13 (cm) | 16.03±0.24b     | 17.19±0.25a     | 15.95±0.37b                 | 16.71±0.26ab | 4.79±0.31a      | 4.54±0.13a      | 2.35±0.16b                  | 4.76±0.22a  |
| N14 (cm) | 17.07±0.22a     | 17.49±0.32a     | 16.03±0.32b                 | 16.92±0.19a  | 4.72±0.34a      | 4.58±0.16a      | 2.50±0.14b                  | 4.93±0.21a  |

不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。N+数字表示玉米和大豆的基部第几节。

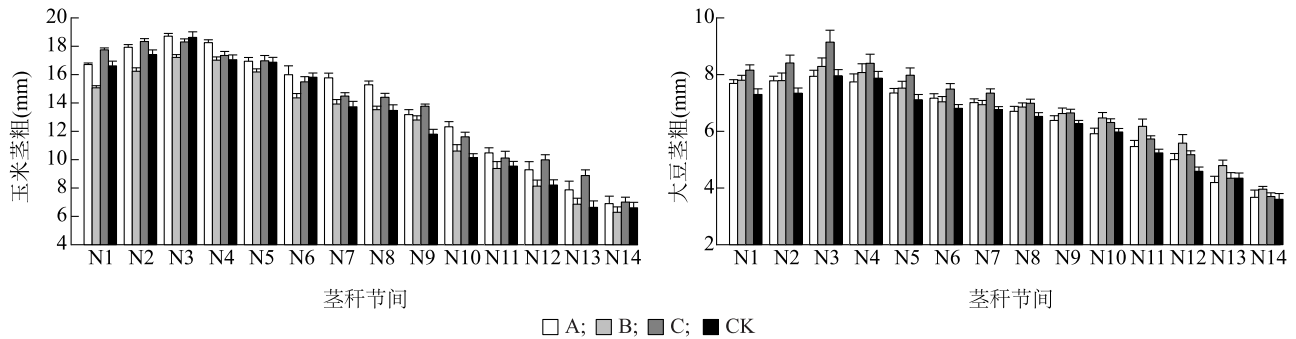


图 3 外源植物生长调节剂对大豆和玉米节间茎粗的影响  
A:喷施 700 mg/L 乙烯利; B:喷施 100 mg/L 多效唑; C:喷施 700 mg/L 乙烯利+100 mg/L 多效唑; CK:对照,喷施清水。N+数字表示玉米和大豆的基部第几节。

图 3 外源植物生长调节剂对大豆和玉米节间茎粗的影响

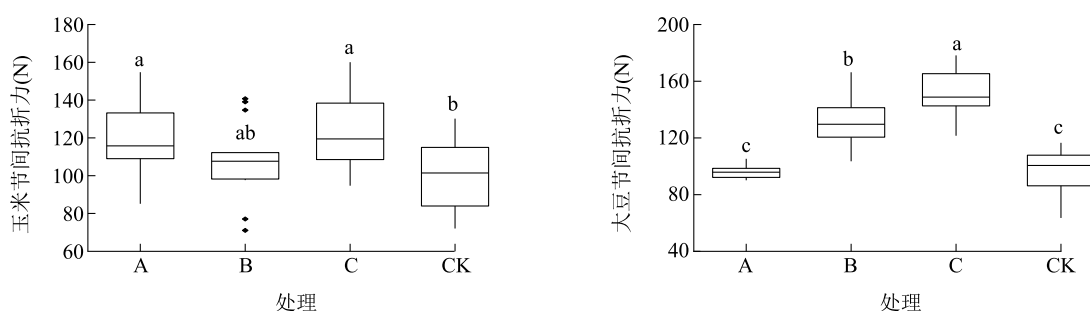
Fig.3 Effects of exogenous plant growth regulators on stem diameter in soybean and maize

### 2.5 外源植物生长调节剂对大豆和玉米器官干重的影响

由表 2 可知,各植物生长调节剂处理对玉米和大豆器官干重的影响不同。与对照相比,A 处理显著降低了玉米茎秆的干重( $P<0.05$ )。A 处理显著增加了玉米叶的干重( $P<0.05$ ),较对照增加了 13.9%。A 处理、B 处理和 C 处理均较对照提高了玉米籽粒干重,其中 B 处理和 C 处理达到显著水平( $P<0.05$ ),分别增加了 22.2%和 43.7%。B 处理和 C 处理还显著增加了玉米植株的生物量( $P<0.05$ ),分别增加了 9.9%和 12.2%,A

处理与对照差异不显著。B 处理和 C 处理显著增加了玉米的茎秆密度( $P<0.05$ )。

对于大豆而言,3 个处理均显著增加了大豆茎秆和叶的干重,A、B、C 处理分别较对照增加了 43.5%、34.7%、42.7%和 52.7%、60.2%、47.6%。A 处理显著降低了大豆籽粒干重,较对照减少了 31.8%,C 处理则显著增加大豆的籽粒干重。3 个处理均显著增加了大豆的生物量和茎秆密度,其中 C 处理对生物量增效最好,达 46.4%;C 处理对茎秆密度增加最显著,达 85.1%。



A: 喷施 700 mg/L 乙稀利; B: 喷施 100 mg/L 多效唑; C: 喷施 700 mg/L 乙稀利+100 mg/L 多效唑; CK: 对照, 喷施清水。不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。图中的点表示离群值。

图 4 外源植物生长调节剂对大豆和玉米节间抗折力的影响

Fig.4 Effects of exogenous plant growth regulators on breaking resistance in soybean and maize

表 2 外源植物生长调节剂对大豆和玉米器官干重的影响

Table 2 Effects of exogenous plant growth regulators on dry matter in soybean and maize organs

| 作物 | 处理 | 茎秆干重 (g)    | 叶干重 (g)      | 籽粒干重 (g)     | 生物量 (g, 1 株) | 茎秆密度 (g/cm)   |
|----|----|-------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| 玉米 | A  | 60.51±2.34b | 37.07±0.35a  | 47.64±0.54c  | 145.22±2.07b | 0.373±0.014bc |
|    | B  | 70.16±1.56a | 34.93±2.57ab | 55.12±2.06b  | 160.86±2.33a | 0.388±0.009b  |
|    | C  | 67.02±1.10a | 32.46±1.01b  | 64.81±1.82a  | 164.29±3.20a | 0.440±0.007a  |
|    | CK | 66.41±2.23a | 32.56±0.79b  | 45.11±3.95c  | 146.42±1.63b | 0.356±0.012c  |
| 大豆 | A  | 36.18±1.16a | 17.33±0.67a  | 10.24±0.47c  | 63.76±0.80b  | 0.710±0.023b  |
|    | B  | 33.97±0.67a | 18.18±0.85a  | 18.92±1.03ab | 71.07±1.68a  | 0.754±0.015b  |
|    | C  | 35.98±0.04a | 16.75±0.13a  | 20.09±1.46a  | 72.82±1.55a  | 0.942±0.001a  |
|    | CK | 25.21±1.94b | 11.35±0.96b  | 15.01±0.41b  | 49.73±1.62c  | 0.509±0.039c  |

A: 喷施 700 mg/L 乙稀利; B: 喷施 100 mg/L 多效唑; C: 喷施 700 mg/L 乙稀利+100 mg/L 多效唑; CK: 对照, 喷施清水。同一列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

## 2.6 外源植物生长调节剂对大豆和玉米产量及其构成因素的影响

由表 3 可知, B 处理显著降低了玉米果穗长、行粒数和总粒数 ( $P < 0.05$ ), 分别较对照降低了 2.9%、5.2% 和 7.0%; 增加了秃尖长 ( $P < 0.05$ ), 较对照增

加了 140.0%; 产量较对照显著降低了 4.0% ( $P < 0.05$ )。C 处理的百粒重较对照增加了 8.2% ( $P < 0.05$ ), 达显著水平; 产量较对照显著增加了 6.0% ( $P < 0.05$ )。

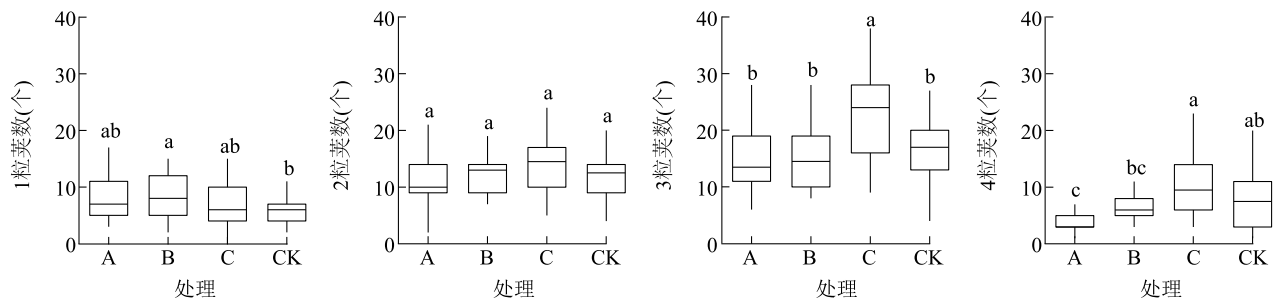
表 3 外源植物生长调节剂对玉米产量及其构成因素的影响

Table 3 Effects of exogenous plant growth regulators on grain yield and its components in maize

| 处理 | 果穗长 (cm)  | 秃尖长 (cm) | 果穗粗 (mm)  | 穗行数 (行)   | 行粒数 (粒)   | 总粒数 (粒)    | 百粒重 (g)   | 产量 (kg/hm <sup>2</sup> ) |
|----|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|--------------------------|
| A  | 17.5±0.3a | 1.1±0.1b | 48.6±0.2a | 15.9±0.4a | 32.2±0.2a | 510.7±1.1a | 26.8±0.1b | 9 341.6±0.8b             |
| B  | 16.9±0.1b | 2.4±0.2a | 48.0±0.2a | 15.3±0.1a | 30.9±0.4b | 473.3±7.4b | 25.8±0.6b | 8 981.5±1.1c             |
| C  | 17.4±0.1a | 1.0±0.2b | 48.4±0.1a | 16.0±0.2a | 32.3±0.1a | 517.4±7.8a | 28.9±0.3a | 9 922.1±3.0a             |
| CK | 17.4±0.1a | 1.0±0.1b | 48.5±0.6a | 15.1±0.4a | 32.6±0.2a | 508.7±2.2a | 26.7±0.6b | 9 358.0±8.1b             |

A: 喷施 700 mg/L 乙稀利; B: 喷施 100 mg/L 多效唑; C: 喷施 700 mg/L 乙稀利+100 mg/L 多效唑; CK: 对照, 喷施清水。同一列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

由表 4 可知, C 处理大豆总粒数较对照显著提高 29.3% ( $P < 0.05$ ); C 处理大豆总荚数显著增加 ( $P < 0.05$ ); B 处理和 C 处理的大豆产量分别较对照增加 24.3% 和 56.0%, 均达到显著水平 ( $P < 0.05$ )。A 处理总粒数、总荚数、百粒重和产量较对照降低, 但未达到显著水平 ( $P > 0.05$ )。进一步分析发现, C 处理主要增加了大豆的 3 粒荚数 ( $P < 0.05$ ), 较对照增加了 37.3% (图 5)。



A: 喷施 700 mg/L 乙烯利; B: 喷施 100 mg/L 多效唑; C: 喷施 700 mg/L 乙烯利+100 mg/L 多效唑; CK: 对照, 喷施清水。不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 5 外源植物生长调节剂对大豆粒荚数的影响

Fig.5 Effects of exogenous plant growth regulators on pod number in soybean

## 2.7 玉米和大豆形态特征与产量特征的相关性分析

图 6a 显示, 玉米籽粒产量与总粒数、行粒数呈显著或极显著正相关, 相关系数分别为 0.821、0.604; 与秃尖长呈负相关 (-0.448)。秃尖长与果穗长呈显著负相关 (-0.578)。总粒数与果穗长、行粒数呈极显著正相关 (0.783、0.778)。果穗粗和穗行数呈显著正相关 (0.638)。Mantel 相关性分析结果表明, 玉米植株形态与百粒重呈显著相关, 抗折力特征与穗行数呈极显著相关。

由图 6b 可知, 大豆产量与 2 粒荚数、3 粒荚数、总粒数、总荚数和百粒重呈显著或极显著正相关, 相关系数分别为 0.799、0.899、0.974、0.965、0.667。百粒重与 2 粒荚数、3 粒荚数、总粒数和总荚数呈显著正相关 (0.591、0.608、0.638、0.624)。总荚数与 2 粒荚数、3 粒荚数、总粒数呈极显著正相关 (0.852、0.880、0.918)。总粒数与 2 粒荚数、3 粒荚数和 4 粒荚数呈显著或极显著相关 (0.756、0.869、0.600)。2 粒荚数和 3 粒荚数也呈极显著相关 (0.840)。经 Mantel 相关性分析结果表明, 大豆植株形态与 3 粒荚数、总粒数、总荚数和产量均呈极显

表 4 外源植物生长调节剂对大豆产量及其构成因素的影响

Table 4 Effects of exogenous plant growth regulators on grain yield and its components in soybean

| 处理 | 总粒数(粒)     | 总荚数(个)    | 百粒重(g)     | 产量(kg/hm <sup>2</sup> ) |
|----|------------|-----------|------------|-------------------------|
| A  | 92.7±0.8b  | 39.3±0.8b | 25.9±0.5b  | 2 219.3±1.3c            |
| B  | 107.9±1.7b | 44.2±0.3b | 27.3±0.7ab | 2 896.3±4.2b            |
| C  | 146.2±0.7a | 54.7±0.5a | 27.9±0.6a  | 3 636.0±2.1a            |
| CK | 113.1±1.3b | 43.5±0.6b | 26.0±0.2b  | 2 330.1±2.2c            |

A: 喷施 700 mg/L 乙烯利; B: 喷施 100 mg/L 多效唑; C: 喷施 700 mg/L 乙烯利+100 mg/L 多效唑; CK: 对照, 喷施清水。同一列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

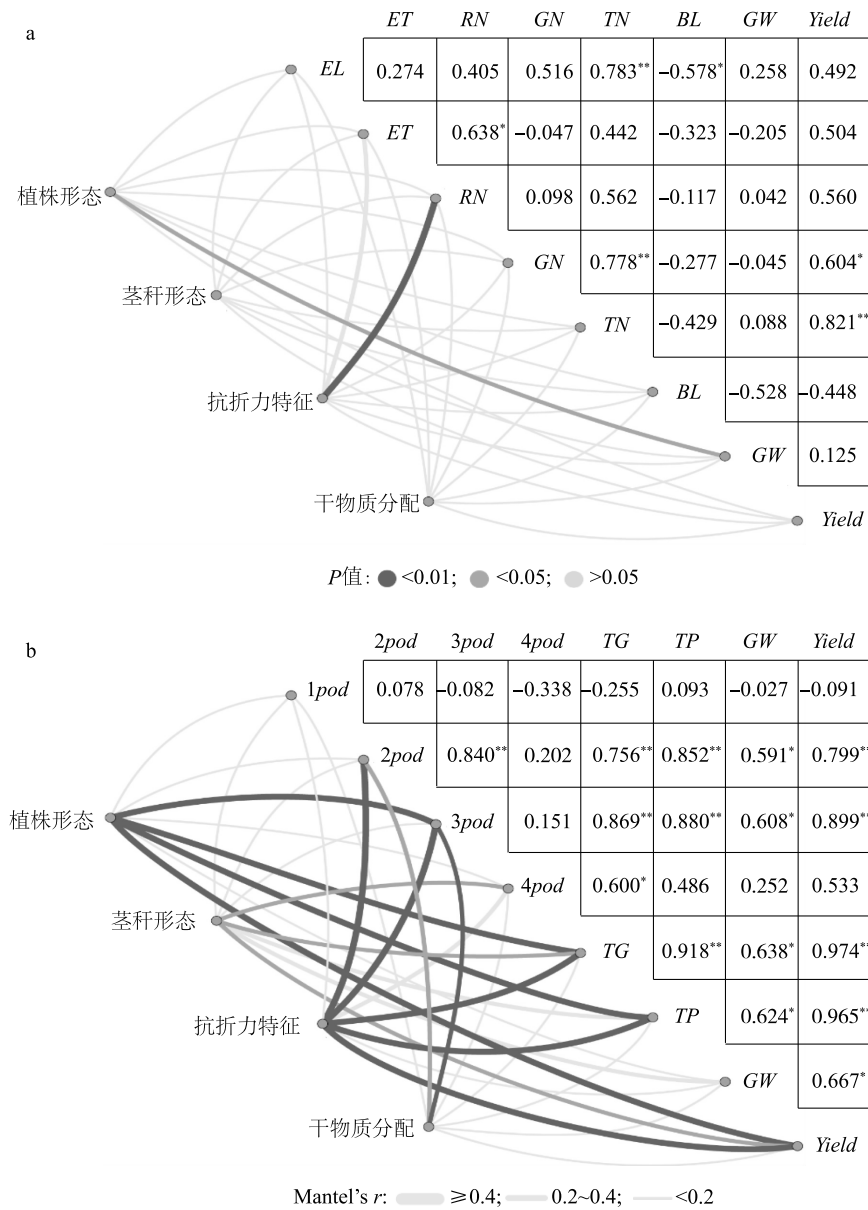
著相关; 茎秆形态与 4 粒荚数、总粒数和产量呈显著相关; 抗折力特征与 2 粒荚数、3 粒荚数、总粒数、总荚数和产量均呈极显著相关; 干物质分配与 2 粒荚数和 3 粒荚数呈显著或极显著相关。

## 3 讨论

玉米和大豆作为重要的粮食作物, 对满足中国粮食需求具有非常重大的意义<sup>[18-19]</sup>。玉米大豆带状复合种植能实现有限耕地空间内玉米和大豆的产量提升, 但种植密度的增加会诱发玉米和大豆倒伏, 导致产量下降。喷施化控剂是降低田间玉米和大豆倒伏风险的一种有效手段<sup>[20-21]</sup>。王春鹏<sup>[22]</sup>系统研究了化控对夏玉米茎秆发育的影响, 发现化控可显著降低玉米穗位高和基部节间长度, 增加节间抗折力和硬皮组织穿刺强度, 显著提高玉米茎秆的抗倒伏能力。耿文杰等<sup>[23]</sup>研究指出, 乙烯利处理能显著降低中密度和高密度下玉米的株高和重心高度, 显著增加茎粗和穿刺强度, 从而提高茎秆强度, 降低倒伏率。王美玲等<sup>[24]</sup>研究认为, 多效唑处理能降低大豆株高、缩短节间长度、增加茎粗, 对大豆的抗倒伏

能力有显著提升。本研究中,A 处理显著降低了玉米株高和穗位高,B 处理显著降低了大豆株高和底荚高度。A 处理主要降低了玉米基部第5~11 节间长度,B 处理则主要降低了大豆基部第 6、7、8、10 节的节间长度。C 处理能显著降低玉米和大豆株高,显著降低玉米穗位高和大豆底荚高度。可见,外源植物生长调节剂对玉米和大豆株高、穗位高和底荚高度有显著的调控作用,对玉米和大豆抗倒伏植株

形态的塑造作用明显。此外,A 处理和 C 处理显著增加了玉米基部茎粗和抗折力,B 处理和 C 处理显著增加了大豆基部茎粗和抗折力。由此可知,C 处理综合了 A 处理和 B 处理的特点,显著增加了玉米和大豆的基部节间茎粗和抗折力。因此,C 处理能显著提升大豆玉米复合种植中玉米和大豆植株茎秆抗倒伏能力。



EL:果穗长;ET:果穗粗;RN:穗行数;GN:行粒数;TN:玉米总粒数;BL:秃尖长;GW:百粒重;Yield:产量;1pod:1粒荚数;2pod:2粒荚数;3pod:3粒荚数;4pod:4粒荚数;TG:大豆总粒数;TP:总荚数。\*表示显著相关( $P < 0.05$ );\*\*表示极显著相关( $P < 0.01$ )。图中P值表示曼特尔检验(Mantel's r)的显著性;线条的粗细表示曼特尔检验(Mantel's r)的相关系数。

图6 玉米(a)和大豆(b)形态特征与产量特征的相关性分析

Fig.6 Correlation analysis between morphological characteristics and yield characteristics of maize (a) and soybean (b)

作物化控技术是指通过喷施外源植物生长调节剂,影响作物内源激素系统来控制作物生长发育过程,达到高产、优质、高效的技术手段<sup>[14,25]</sup>。外源植物生长调节剂可调控植物生长发育的全过程,如根茎伸长、花果发育、籽粒灌浆等,对作物的增产提质效果显著<sup>[26-27]</sup>。单一植物生长调节剂在实际使用中优点和缺点都很明显,通过植物生长调节剂的复配,可使其具有多效性,如乙矮合剂<sup>[28]</sup>(乙烯利和矮壮素的复配剂)、玉黄金<sup>[29-30]</sup>(胺鲜酯和乙烯利的复配剂)等复配剂兼具单剂的优点,在实际应用中可起到协同增效的作用。本研究中,通过乙烯利和多效唑复配,可以达到大豆玉米复合种植“一喷双控”的效果,即喷施一次复配剂可以同时调控大豆和玉米的植株形态,提高二者抗倒伏能力,促进产量改善。本研究中,C处理较A处理和B处理对玉米和大豆的茎秆密度具有显著的增效。深入分析发现,C处理对玉米和大豆茎秆密度的增强主要是由单株生物量的增加和节间长度缩短所致。由此可见,乙烯利和多效唑的复配对玉米和大豆茎秆抗倒伏性能的提升效果显著优于乙烯利和多效唑2种单剂,且乙烯利和多效唑复配对单株生物量的显著提升为玉米和大豆植株抗倒伏和增产的协同发展奠定了物质基础。王娟<sup>[31]</sup>研究指出,在玉米第9展叶期,喷施2g/L的多效唑溶液,可提高玉米抗倒伏能力并增产;但同时也指出多效唑喷施含量过高或过低、时期过早或过晚均不会对玉米株高和穗位高起到抑制作用。本研究中,B处理对玉米株高、茎粗和基部抗折力均无显著影响,很可能与其喷施含量和时间有关系。朱文雪等<sup>[32]</sup>的研究结果显示,多效唑和烯效唑单剂在大豆初花期喷施,对大豆玉米带状间作中玉米的株高无显著降低作用,而多效唑和甲哌镱复配则能显著降低大豆和玉米株高。

在本研究中,C处理对玉米和大豆产量均有显著增效,而B处理对玉米产量无显著提高作用,A处理对大豆产量及其构成因素也无显著促进作用。可见,通过乙烯利和多效唑的复配可以弥补二者在玉米和大豆上作用的不足,二者复配可以协同增效。相关性分析结果表明,玉米抗倒伏植株形态的塑造与大豆抗倒伏植株形态的塑造不尽相同,玉米植株形态与百粒重显著相关,抗折力特征与穗行数呈极显著相关,而大豆的抗折力特征则与2粒荚数、3粒荚数、总粒数和总荚数相关。因此,在玉米和大豆的

化学调控上要有相应的调整,例如,玉米抗折力和产量的协同提升可以考虑依靠提高玉米的粒数而非粒重,而提高2粒荚数、3粒荚数是提升大豆抗倒能力和改善产量的途径。

综上,在大豆玉米复合种植模式下,乙烯利和多效唑复配剂对2种作物的抗倒伏能力的提升和产量的增加效果优于2种单剂,这可能与复配剂前期通过协调茎叶生长,后期调控物质分配,改善了植株形态、优化了产量构成有关,后续可继续深入研究乙烯利和多效唑复配剂的调控机理。

### 参考文献:

- [1] 高芸,钟钰.再论“藏粮于技”战略:内涵辨识、理论支撑与未来取向[J].中国农业大学学报,2024,29(3):311-322.
- [2] 翟涛,吴玲.开放视角下中国大豆产业发展态势与振兴策略研究[J].大豆科学,2020,39(3):472-478.
- [3] 李美霞,陈骋,汪健,等.不同带状复合种植模式对大豆玉米农艺性状及产量的影响[J].甘肃农业大学学报,2024,59(5):1-13.
- [4] 杨立达,任俊波,彭新月,等.施氮与种间距离下大豆/玉米带状套作作物生长特性及其对产量形成的影响[J].作物学报,2024,50(1):251-264.
- [5] 袁晓婷,王甜,罗凯,等.带宽和株距对带状间作大豆物质积累分配及产量形成的影响[J].作物学报,2024,50(1):161-171.
- [6] 刘忠贤,张琪,杨再强,等.不同应对措施对高温胁迫下夏玉米生长的影响[J].玉米科学,2024,32(3):67-73.
- [7] XU Z, LI C J, ZHANG C C, et al. Intercropping maize and soybean increases efficiency of land and fertilizer nitrogen use; A meta-analysis[J]. Field Crops Research, 2020, 246: 107661.
- [8] ZHANG R Z, MENG L B, LI Y, et al. Yield and nutrient uptake dissected through complementarity and selection effects in the maize/soybean intercropping[J]. Food and Energy Security, 2021, 10(2): 379-393.
- [9] 刘婷,刘卫国,任梦露,等.遮荫程度对不同耐荫性大豆品种光合及抗倒程度的影响[J].中国农业科学,2016,49(8):1466-1475.
- [10] 王竹,杨文钰,吴其林.玉/豆套作荫蔽对大豆光合特性与产量的影响[J].作物学报,2007,33(9):1502-1507.
- [11] 王美玲,阚文亮,宋喜清,等.不同时期喷施多效唑对垦鉴豆28生长发育的影响[J].现代化农业,2016(5):35-36.
- [12] 梁建秋,于晓波,吴海英,等.密度及烯效唑喷施对套作大豆南夏豆25抗倒性及产量的影响[J].大豆科学,2017,36(1):33-40.
- [13] HUSSAIN S, LI S X, MUMTAZ M, et al. Foliar application of silicon improves stem strength under low light stress by regulating lignin biosynthesis genes in soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 401: 123256.

- [14] 韩冬,张代平,王平,等. 化控技术在大豆种植中的应用[J]. 黑龙江农业科学,2020(12):134-138.
- [15] 何立锋,李敏,李岩,等. 化学调控剂对玉米自交系株高及穗上各节间长度的影响[J]. 玉米科学,2018,26(4):99-104.
- [16] 李宁,李建民,翟志席,等. 化控技术对玉米植株抗倒伏性状、农艺性状及产量的影响[J]. 玉米科学,2010,18(6):38-42.
- [17] 张子学,朱仕燕,李文阳,等. 化控剂-乙烯利对玉米植株主要性状和产量的影响[J]. 中国农学通报,2014,30(3):209-213.
- [18] 刘金,韩涛. 我国玉米产业发展存在的问题及对策[J]. 现代农业科技,2021(1):50-51,54.
- [19] 张璟,王若男,吴天龙. 大豆玉米带状复合种植:生产实效、影响因素与困难挑战—基于黄淮海地区农户样本的分析[J]. 干旱区资源与环境,2024,38(7):96-105.
- [20] GONG L S, QU S J, HUANG G M, et al. Improving maize grain yield by formulating plant growth regulator strategies in North China[J]. Journal of Integrative Agriculture,2021,20(2):622-632.
- [21] 严旖旎,单海勇,刘旭杰,等. 生长调节剂对大豆-玉米间作模式中玉米产量和抗倒性的影响[J]. 核农学报,2024,38(9):1805-1813.
- [22] 王春鹏. 化控对夏玉米茎秆发育、产量形成及养分积累的影响[D]. 保定:河北农业大学,2023.
- [23] 耿文杰,李宾,任佰朝,等. 种植密度和喷施乙烯利对夏玉米木质素代谢和抗倒伏性能的调控[J]. 中国农业科学,2022,55(2):307-319.
- [24] 王美玲,阚文亮,宋喜清,等. 不同用量多效唑对垦鉴豆28生长的影响[J]. 黑龙江农业科学,2015(1):32-35.
- [25] 王文浩,王丹,宋贤鹏,等. 植物生长调节剂复配对棉花生长及内源激素的影响[J]. 农药学报,2023,25(5):1093-1103.
- [26] AHMAD I, KAMRAN M, ALI S, et al. Seed filling in maize and hormones crosstalk regulated by exogenous application of uniconazole in semiarid regions[J]. Environmental Science and Pollution Research International,2018,25(33):33225-33239.
- [27] 袁晓婷,罗凯,刘姗姗,等. 化控对玉米带状间作大豆主茎分枝光合特性、物质积累及产量的影响[J]. 核农学报,2024,38(4):776-784.
- [28] 房孟颖,卢霖,王庆燕,等. 乙矮合剂对不同施氮量夏玉米根系形态构建和产量的影响[J]. 中国农业科学,2022,55(24):4808-4822.
- [29] 吴思,陶明德,周迎鑫,等. 化控对夏玉米产量与茎秆抗倒伏性状的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(1):91-98.
- [30] 王明杰,张佳琪,武敏桦,等. 30%胺鲜酯·乙烯利水剂(玉黄金)对密植春玉米茎折强度及生理特性的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(20):101-107.
- [31] 王娟. 多效唑处理对玉米农艺性状的影响[J]. 吉林农业,2014(8):19.
- [32] 朱文雪,杨立达,漆信同,等. 植物生长调节剂对大豆-玉米带状间作农艺性状及产量的影响[J]. 四川农业大学学报,2023,41(5):773-780,800.

(责任编辑:陈海霞)