

种植密度和植物生长调节剂对玉米茎秆性状的影响及调控

徐田军, 吕天放, 陈传永, 刘月娥, 张译天, 刘秀芝, 赵久然, 王荣焕

(北京市农林科学院玉米研究中心/玉米 DNA 指纹及分子育种北京市重点实验室, 北京 100097)

摘要: 【目的】研究并明确种植密度和植物生长调节剂对玉米茎秆性状的影响, 可为合理密植、构建适宜群体结构、实现玉米高产抗逆栽培提供理论依据和技术支撑。【方法】以 JK968 为试验材料, 设置 6.0×10^4 株/hm² (D1)、 7.5×10^4 株/hm² (D2) 和 9.0×10^4 株/hm² (D3) 3 个密度水平, 以及乙烯利矮壮素复配剂 (EC) 和喷施清水为对照 (CK) 2 个处理, 研究种植密度对玉米茎秆性状的影响以及茎秆性状对化学调控的响应。【结果】(1) 倒伏率随种植密度增加呈升高趋势, 其中在 D1 密度条件下, JK968 的倒伏率分别比 D2 和 D3 低 69.1% 和 83.4%; EC 处理可显著降低倒伏率, 在 D1、D2 和 D3 密度条件下分别比对照降低了 5.0%、19.8% 和 41.0%。(2) 株高、穗位高、穗位系数和重心高度在不同种植密度和化控处理间均存在极显著差异, 具体表现为随种植密度增加呈升高趋势; EC 处理后显著降低了地上部第 6 节以下的节间长度, 增加了地上部第 7 节以上的节间长度, 株高和穗位系数略降低, 而穗位高和重心高度显著降低。(3) 茎秆抗折力和茎秆外皮穿刺强度在不同处理间均存在极显著差异。大喇叭口期至成熟期呈先升高后降低趋势, 在乳熟期达最大值。随种植密度增加, 地上部第 3、4 和 5 节茎秆抗折力和茎秆外皮穿刺强度呈降低趋势; 不同节间茎秆抗折力和茎秆外皮穿刺强度表现为地上部第 3 节 > 第 4 节 > 第 5 节; EC 处理后显著增加了地上部第 3、4 和 5 节茎秆抗折力和茎秆外皮穿刺强度。(4) 穗粒数和百粒重随种植密度增加呈降低趋势; EC 处理后, 穗粒数、百粒重和产量均较对照增加。在 D1、D2 和 D3 密度条件下, EC 处理后产量分别较对照高 438.8 kg·hm⁻²、1041.3 kg·hm⁻² 和 3376.5 kg·hm⁻², 增幅分别为 3.6%、8.2% 和 27.8%。【结论】随种植密度增加, 玉米株高增加、重心高度上移、基部节间伸长、基部节间充实度和抗折力下降。EC 处理显著降低了地上部第 6 节以下的节间长度, 显著增加了地上部第 7 节以上的节间长度, 株高略降低, 重心高度和穗位高显著降低, 基部节间长度缩短、基部节间充实度提高, 从而提高了茎秆的抗倒伏能力。由此可见, 在风灾倒伏频发地区以及种植密度过大等倒伏风险较大条件下, 喷施植物生长调节剂可显著增加玉米茎秆的抗折力和茎秆外皮穿刺强度, 显著降低穗位高、重心高度和倒伏率, 有利于玉米高产稳产。

关键词: 玉米; 茎秆性状; 种植密度; 植物生长调节剂

Effects of Plant Density and Plant Growth Regulator on Stalk Traits of Maize and Their Regulation

XU TianJun, LÜ TianFang, CHEN ChuanYong, LIU YueE, ZHANG YiTian, LIU XiuZhi,
ZHAO JiuRan, WANG RongHuan

(Maize Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences/Beijing Key Laboratory of Maize DNA Fingerprinting and Molecular Breeding, Beijing 100097)

Abstract: 【Objective】Studying and defining the effects of planting density and plant growth regulator on maize stalk traits can

收稿日期: 2018-11-06; 接受日期: 2018-12-29

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFD0300106)、北京市农林科学院青年科研基金 (QNJJ201728)、北京市农林科学院院级科技创新团队建设项目 (JNKYT201603)、现代农业产业技术体系专项 (CARS-02-11)

联系方式: 徐田军, Tel: 010-51502461; E-mail: xtjxtjbb@163.com。吕天放, Tel: 010-51503149; E-mail: 314565358@qq.com。徐田军和吕天放为同等贡献作者。通信作者赵久然, Tel: 010-51503936; E-mail: maizezhao@126.com。通信作者王荣焕, Tel: 010-51503703; E-mail: ronghuanwang@126.com

provide theoretical basis and technical support for rational close planting, optimizing suitable population structure and realizing high yield of maize. 【Method】 JK968 was used as material. The experiment was conducted to study the effects of planting density and plant growth regulator on maize stalk traits with three planting density treatments, 6.0×10^4 plant/hm² (D1), 7.5×10^4 plant/hm² (D2) and 9.0×10^4 plant/hm² (D3), and plant growth regulator treatment (ethylene and chloramphenicol compounds, CK). 【Result】 (1) With the increase of planting density, the lodging rate was increased. In the condition of D1 density, the lodging rate of JK968 was 69.1% and 83.4% lower than that of D2 and D3 treatments, respectively. Among them, the lodging rate in D3 was 22.6% and 47.8% higher than D2 and D1, respectively. The ethylene and chloramphenicol (EC) treatment significantly reduced the lodging rate, and the lodging rate D1, D2 and D3 after EC treatment decreased 5.0%, 19.8% and 41.0% than that of the control, respectively. (2) Plant height, ear height, ear position coefficient and center of gravity height were significant different among three plant densities and EC treatment, which showed an increasing trend with the increase of planting density. EC treatment significantly reduced the internodes length below the 6th node of the shoot, increased the internodes length above the 7th node of the shoot. Compared with the control, the height and the ear position coefficient were decreased slightly after EC treatment, while the ear height and gravity center height were significantly decreased. (3) There were significant differences in the bending strength and puncture strength of stem epidermis between different treatments. The stem bending force and rind penetration strength were first increased and then decreased from booting stage to mature stage and reached the maximum value in milk stage. The stem bending force and rind penetration strength of 3rd, 4th and 5th internodes aboveground were significantly different with the increase of planting density and significantly increased after EC treatment. The stem bending force and rind penetration strength of different internodes showed that 3rd > 4th > 5th. (4) The number of grains per panicle and 100-grain weight was significantly decreased with the increase of planting density. After EC treatment, the number of grains per panicle, 100-grain weight and yield increased compared with the control. Under the D1, D2 and D3, the yield of EC treated were 438.8 kg·hm⁻², 1 041.3 kg·hm⁻² and 3 376.5 kg·hm⁻² higher than those of CK, with an increase of 3.6%, 8.2% and 27.8%, respectively. 【Conclusion】 With the increase of planting density, the plant height and height of center of gravity were increased, the basal internodes were belonged, the basal internodes fullness and bending resistance were decreased. EC treatment significantly reduced the internodes length below the 6th node of shoot, significantly increased the internodes length above the 7th node of shoot, slightly reduced plant height, significantly reduced the height of center of gravity and ear height, shortened the length of base internodes and increased the filling degree of base internodes, thus improving the lodging resistance of stem. Therefore, spraying plant growth regulators can significantly increase the bending resistance of maize stalks and the puncture strength of stalk epidermis, significantly reduce ear height, height of center of gravity and lodging rate, which is beneficial to high and stable yield of maize under the conditions of high lodging risk such as frequent wind disasters and high planting density.

Key words: maize; stem characters; planting density; plant growth regulator

0 引言

【研究意义】玉米是我国种植面积最大、总产量最高的第一大粮食作物,对保障国家粮食安全和满足市场需求发挥着主力军作用^[1]。合理密植是实现玉米高产的重要栽培技术措施之一。近年来,玉米生产中经常出现因种植密度偏大、遭遇暴风雨等极端天气,导致倒伏频发^[2-3],不利于机械收获且大幅减产,倒伏已成为影响玉米高产、稳产、优质和高效生产的重要因素之一。合理密植和喷施化控剂是提高植株抗倒能力、预防倒伏的有效栽培技术措施。研究种植密度对玉米茎秆性状的影响以及喷施外源植物生长调节剂对玉米茎秆性状和抗折力的调控效应,可为构建合理群体结构、指导生产合理密植、实现玉米高产抗逆栽培提供理论依据和技术支撑。【前人研究进展】玉米倒伏分为根倒和茎倒两种类型^[4]。据报道,每年我国因

玉米茎秆倒伏倒折造成的产量损失为 5%—25%,甚至更高^[5-7]。黄淮海地区玉米倒伏以茎倒折为主,倒折常发生在地上部第 3—5 节间^[8-9]。玉米茎倒折严重破坏了茎秆韧皮部养分和水分的输导通道,减产幅度比根倒更严重^[10-11]。种植密度过高、肥料施用不合理等,以及病虫害、极端天气频发、玉米自身遗传抗倒能力差异是影响玉米倒伏的主要因素^[12-15]。孙世贤等^[16]和高鑫等^[17]研究表明,玉米倒伏率与种植密度呈显著正相关;田再民等^[18]研究发现,随种植密度增加,玉米群体结构不合理、透光不良,导致玉米茎秆质量变差,易发生倒折;勾玲等^[19]研究表明,种植密度过大导致玉米茎秆中干物质积累和分配发生变化,茎秆质量变差,从而增加了倒伏率;PICKETT 等^[20]研究发现,玉米的抗倒性与株高、穗位高、茎粗、基部节间长度、节间粗度、茎壁厚度等茎秆形态性状密切相关;姚敏娜等^[21]研究表明,种植密度过大导致玉

米群体光照不足,株高、穗位高和重心高度明显升高,倒伏率增加。玉米生产中应用植物生长调节剂是降低倒伏的有效方法。植物生长调节剂可以通过内源植物激素信号和代谢调控优化植物结构,最终提高产量。卫晓轶等^[22]研究指出,乙烯利能显著降低株高和穗位高,抑制基部节间伸长,提高基部伸长节间和活性,显著降低 PAL 酶活性、节间生长素和赤霉素含量,提高脱落酸含量;董学会等^[23]研究表明,玉米拔节前喷施 30%己·乙水剂,可提高茎秆抗倒伏性能。矮壮素是一种生长延缓剂,对作物生长具有控制作用。喷施后可使植株矮化、茎秆粗壮,能防止倒伏,叶绿素含量增加,根系发达,阻碍内源赤霉素的生物合成,从而延缓细胞伸长,使植株矮化^[24]。【本研究切入点】前人对玉米品种抗倒伏能力与茎秆形态性状及力学性状的关系研究较多,而针对喷施植物生长调节复配剂对玉米抗倒伏能力的影响研究较少。【拟解决的关键问题】通过设置不同种植密度和化学调控处理,探讨种植密度对玉米茎秆性状的影响以及植物生长调节复配剂对茎秆性状的调控机理,旨在为玉米生产中合理密植和高产抗逆栽培提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2015—2016 年在北京市昌平区国家精准农业试验基地进行。试验田 pH 7.01、全氮含量 $6.78 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $24.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $141.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有机质 $10.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。供试玉米材料为 JK968,该品种属于大穗高产型品种,但在大喇叭口期易发生倒伏倒折。采用随机区组设计,设置 3 个密度水平,即 $6.0 \times 10^4 \text{ 株} / \text{hm}^2$ (D1)、 $7.5 \times 10^4 \text{ 株} / \text{hm}^2$ (D2) 和 $9.0 \times 10^4 \text{ 株} / \text{hm}^2$ (D3),于玉米第 7 展叶期喷施 $0.45 \text{ L} \cdot \text{hm}^{-2}$ 乙烯利和矮壮素复配剂(EC,由中国农业科学院作物科学研究所化学调控创新研究小组提供),每公顷兑水 225 L 进行叶面喷施,对照(CK)喷施等量清水。12 行区,行长 5 m,小区面积 36 m^2 ,3 次重复。管理同当地大田生产。

1.2 测定项目

1.2.1 农艺性状 分别于玉米吐丝期和生理成熟期,每小区取代表性植株 10 株,测定株高、穗位高和重心高度,并计算茎秆横截面积。其中,株高为测量地表到雄穗顶端的长度。穗位高为测量地表到第一果穗着生节的长度。测量重心高度时,取玉米植株全株,放在一个支点上,通过左右移动使茎秆达到平衡状态,测量

支点到茎秆基部节间末端的长度,并称取植株鲜重。

穗位系数=穗位高/株高;

茎秆横截面积= $(R_1/2) \times (R_2/2) \times 3.14$ 。

式中, R_1 、 R_2 分别代表不同节位长短轴直径。

1.2.2 茎秆节间抗折力 分别于吐丝期和成熟期取未倒伏的代表性植株 5 株,取基部第 3、4、5 节间,剥除叶鞘,用茎秆强度仪(YYD-1,浙江托普仪器有限公司,中国)测定节间抗折力。

1.2.3 茎秆外皮穿刺强度 采用 3YJ-1 型玉米茎秆硬度计,将一定横截面积的测头在茎秆节间中部垂直于茎秆方向均匀插入,读取穿透茎秆外皮的极大值。

1.2.4 倒伏率 调查记载田间倒伏情况,倒伏后立即调查各处理的倒伏株数和总株数,并计算倒伏率。根据主茎与地面夹角度数将倒伏程度分为 0—5 级^[24],其中,0 级为 75° — 90° 、1 级为 60° — 75° 、2 级为 45° — 60° 、3 级为 30° — 45° 、4 级为 15° — 30° 、5 级为 0° — 15° 。

倒伏率(%)=倒伏株数/总株数 $\times 100$

1.2.5 产量及产量构成要素 每小区收获中间 4 行,进行考种和测产。实测产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)=鲜穗重($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) \times 出籽率($\%$) $\times [1 - \text{籽粒含水率}(\%)] / (1 - 14\%)$ 。

1.3 数据分析

用 Microsoft Excel 2007 软件进行数据整理和作图,用 SPSS 19.0 软件进行方差分析,其中处理间差异显著性采用 LSD 法进行检验。

2 结果

2.1 试验期间的气象条件

2015—2016 年试验过程中,降雨量集中在 6 月和 7 月,分别占玉米生长季总降雨量的 21.7%和 34.4% (表 1)。玉米生长季月平均气温变幅为 19.7°C — 26.7°C 。2015 和 2016 年玉米倒伏发生在大喇叭口期,此时正值 7 月中下旬,风灾和雨灾等极端天气频发,最大瞬时风速高。

2.2 不同处理条件下的倒伏情况

由表 2 可知,2015 年参试品种于 V14 期倒伏,2016 年于 V12 期倒伏。倒伏率随种植密度增加呈升高趋势;EC 处理显著降低了植株倒伏率,在 D1、D2 和 D3 密度条件下分别比对照低 5.0%、19.8%和 41.0%。

2.3 植株和茎秆形态性状

2.3.1 株高、穗位高、重心高度和节间长度 由表 3 可知,株高、穗位高、穗位系数和重心高度在不

表 1 玉米生育期内的气象条件

Table 1 Meteorological condition during maize growth stage

月份 Month	降水量 Precipitation (mm)		平均气温 Average temperature (°C)		最大瞬时风速 Maximum instantaneous wind speed (m·s ⁻¹)	
	2015	2016	2015	2016	2015	2016
5	68.4	89.6	20.7	20.3	7.9	7.5
6	150.6	69.8	24.1	24.7	9.2	8.6
7	126.2	222.2	25.8	26.7	10.3	9.5
8	81.2	45.6	25.3	26.2	7.3	6.4
9	83.1	76.8	19.7	20.4	8.4	8.1

表 2 不同处理条件下的倒伏情况

Table 2 The lodging conditions under different treatments

密度 Planting density (×10 ⁴ plant/hm ²)	处理 Treatment	倒伏发生时期 Lodging stage		倒伏分级 Lodging degree		倒伏率 Lodging percentage (%)	
		2015	2016	2015	2016	2015	2016
6.0 (D1)	CK	V14	V12	2	2	8.9	8.7
	TR	V14	V12	0	0	5.6	2.1
7.5 (D2)	CK	V14	V12	3	3	23.3	33.7
	TR	V14	V12	1	0	8.9	8.5
9.0 (D3)	CK	V14	V12	4	4	51.2	54.9
	TR	V14	V12	1	1	11.6	12.5

CK、TR 分别表示清水对照、EC 处理；V14 和 V12 分别表示 14 全展叶和 12 全展叶期
CK, TR refers to clear water group for contrast, EC treatment; V14 and V12 refer to 14 and 12 full blade stage

表 3 不同处理条件下玉米株高、穗位高、重心高度和节间长度的变化

Table 3 The change of plant height, ear height, culms gravity height and internodes length under different treatments

年际 Year	密度 Planting density (×10 ⁴ plant/hm ²)	处理 Treatment	株高 Plant height (cm)	穗位高 Ear height (cm)	穗位系数 Ear position coefficients	重心高度 Culm gravity height (cm)	1-6 节间长度 Internodes length between one to six node (cm)	7 节以上节间长度 Internodes length above seven (cm)
2015	6.0 (D1)	CK	311.0c	110.2c	0.35b	77.5d	95.3bc	181.1f
		TR	306.2d	104.3e	0.34b	72.2e	85.4d	196.7c
	7.5 (D2)	CK	314.5b	116.6b	0.37a	86.3b	103.8a	187.2e
		TR	306.3d	106.2d	0.35b	79.8c	93.0c	202.5b
	9.0 (D3)	CK	325.8a	124.4a	0.38a	90.3a	109.5a	193.6d
		TR	317.0b	109.3e	0.32c	84.7b	96.4b	209.4a
2016	6.0 (D1)	CK	276.7bc	112.1bc	0.37a	95.7c	83.6c	172.7e
		TR	272.7c	94.0d	0.35ab	87.0d	76.2e	183.2cd
	7.5 (D2)	CK	281.7b	118.3ab	0.38a	100.7b	88.8 b	179.9d
		TR	278.7bc	96.7cd	0.36ab	90.5d	78.0e	190.4b
	9.0 (D3)	CK	287.7a	124.0a	0.39a	106.0a	91.5a	186.6bc
		TR	284.7a	103.0ab	0.37a	93.7c	82.0d	198.1a
变异来源 Source of variation	密度 Planting density		**	**	**	**	**	**
	年际 Year		**	**	**	**	**	**
	EC		**	**	**	**	**	**
	密度×EC Plant density× EC		NS	NS	NS	NS	NS	NS
	EC×年际 EC×Year		NS	**	NS	*	NS	NS
	密度×年际 Plant density×Year		NS	NS	NS	NS	NS	NS
	密度×EC×年际 Planting density×EC×Year		NS	NS	NS	NS	NS	NS

同一列数字后不同小写字母表示不同处理间差异达 0.05 显著水平。 **表示在 $P<0.01$ 水平差异显著， *表示在 $P<0.05$ 水平差异显著， NS 表示差异不显著。下同

Values within a column followed by different letters are significantly different at 0.05 probability level among different treatments. **, significantly different at $P<0.01$, *, significantly different at $P<0.05$, NS, the difference was not significant. The same as below

同密度和 EC 处理条件下均存在极显著差异, 随种植密度增加呈升高趋势。与对照相比, EC 处理显著降低了 JK968 地上部第 6 节以下的节间长度, 显著增加了地上部第 7 节以上的节间长度, 从而导致株高和穗位系数略降低; 穗位高和重心高度显著降低且差异显著, 其中, 在 D1、D2、D3 密度条件下 EC 处理后穗位高和重心高度分别比对照降低 6.6%、9.8%、13.4%和 8.1%、11.6%、1.0%。

2.3.2 茎秆横截面积 由图 1 可知, 随种植密度增加, 茎秆横截面积呈降低趋势, 且 D2 和 D3 处理间差异显著。EC 处理后茎秆横截面积呈增加趋势, 其中 2015 年在 D1、D2 和 D3 条件下, EC 处理后地上部第 3 节茎秆横截面积较对照分别增加 12.0%、26.4%和 32.5%; 第 4 节增加 13.5%、21.8%和 27.0%; 第 5 节增加 9.8%、27.1%和 24.7%。2016 年 EC 处理后地上部第 3 节茎秆横截面积较对照分别增加 13.6%、35.9%和 48.2%; 第 4 节增加 15.6%、28.0%和 37.0%; 第 5 节增加 10.8%、37.2%和 32.8%。

2.4 茎秆抗倒力学指标

2.4.1 茎秆节间抗折力 由表 4 可知, 茎秆抗折力从大喇叭口期至成熟期呈先升高后降低的趋势, 在乳熟

期达最大值。不同处理间茎秆抗折力均存在极显著差异, 随种植密度的增加, 地上部 3、4 和 5 节的茎秆抗折力呈降低趋势; 不同节间茎秆抗折力表现为地上部第 3 节>第 4 节>第 5 节; EC 处理后显著增加了各密度处理下地上部第 3、4 和 5 节的茎秆抗折力。在 D1、D2 和 D3 密度条件下, 乳熟期 EC 处理后 JK968 地上部第 3 节的茎秆抗折力比对照分别增加 16.9%、12.0%和 23.1%; 第 4 节增加 13.1%、16.2%和 25.0%; 第 5 节增加 21.3%、18.4%和 39.6%。

2.4.2 茎秆外皮穿刺强度 由表 5 可知, 茎秆外皮穿刺强度变化趋势同茎秆抗折力。EC 处理后显著增加了地上部第 3、4 和 5 节的茎秆外皮穿刺强度。在 D1、D2 和 D3 密度条件下, 乳熟期经 EC 处理后地上部第 3 节茎秆外皮穿刺强度比对照分别增加 9.8%、5.2%和 25.2%; 第 4 节增加 19.1%、7.2%和 19.6%; 第 5 节增加 21.9%、7.9%和 21.3%。

2.5 不同种植密度条件下玉米产量及其化学调控效应

随种植密度增加, 穗粒数和百粒重呈降低趋势。EC 处理后穗粒数和百粒重较对照提高, 其中在 D1、D2、D3 密度条件下, EC 处理后穗粒数和百粒重较对照分别高 2.4%、6.7%、2.5%和 2.0%、2.6%、2.9%。EC 处理后产量较对照增加, 在 D3 处理下的产量差异

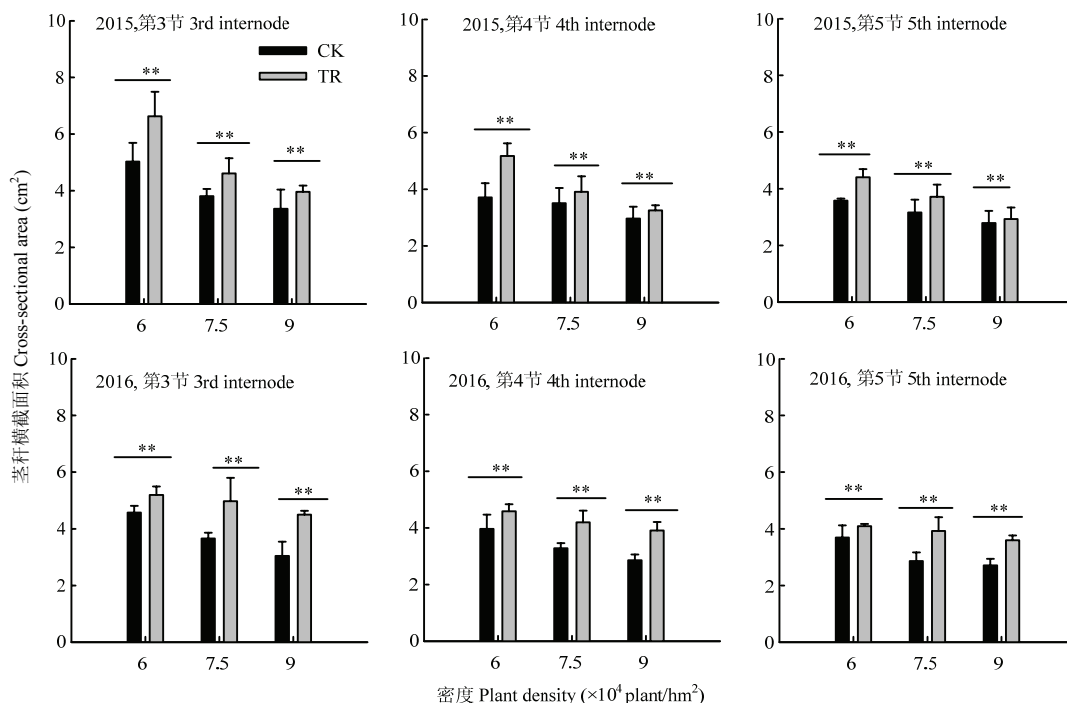


图 1 不同处理条件下玉米茎秆横截面积的变化

Fig. 1 The change of maize stems cross-sectional area under different treatments

表 4 不同处理水平下玉米茎秆抗折力的变化

Table 4 The change of snapping resistance of maize basal culm under different treatments (N·mm⁻²)

年际 Year	密度 Planting density (×10 ⁴ plant/hm ²)	处理 Treatment	节位 Node											
			12 展叶期 V12			吐丝期 Silking stage			乳熟期 Milk stage			收获期 Harvest stage		
			3	4	5	3	4	5	3	4	5	3	4	5
2015	6.0 (D1)	CK	358.7bc	250.9b	244.7ab	500.9b	350.8b	275.8b	648.1b	605.7b	431.7b	523.4b	468.9b	403.3b
		TR	542.9a	384.6a	278.2a	639.2a	421.3a	388.0a	779.2a	670.1a	589.4a	634.6a	568.9a	521.6a
	7.5 (D2)	CK	270.9d	244.3bc	164.1cd	366.0c	286.5c	193.6d	555.8c	479.6d	381.2c	419.7d	309.9d	251.2e
		TR	385.0b	288.6b	222.5b	538.5ab	329.1b	290.3b	627.7b	539.8c	458.1b	489.7c	386.6c	348.9c
	9.0 (D3)	CK	247.2d	189.9c	122.6d	326.9c	204.9d	176.5d	436.7d	403.5e	281.1d	333.4e	287.7e	204.6f
		TR	304.8cd	236.1bc	170.0c	487.5b	268.4c	234.6c	526.2c	495.0d	381.7c	402.3d	312.3d	283.6d
2016	6.0 (D1)	CK	330.5c	290.9b	231.2b	505.3b	401.4b	374.9b	654.8b	522.6c	477.0b	546.5b	365.5c	302.4c
		TR	527.4a	343.4a	253.3a	619.9a	510.6a	437.8a	744.1a	606.4a	513.2a	615.4a	470.6a	380.6a
	7.5 (D2)	CK	255.2f	232.5d	148.2d	362.5d	280.1d	294.9d	568.9d	445.2e	362.9e	504.1d	332.5d	267.1d
		TR	349.2 b	268.5c	208.5c	458.8c	350.3c	238.9c	632.3c	535.2b	422.7c	534.4c	399.3b	318.5b
	9.0 (D3)	CK	202.9e	176.0e	109.7e	276.5f	217.3f	176.1f	467.9f	367.0f	272.4f	396.8f	238.2f	192.2e
		TR	297.0d	223.2d	148.5d	302.1e	255.4e	194.4e	587.5e	468.4d	391.0d	452.3e	297.7e	274.7d
变异来源 Source of variation	密度 Plant density		**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
	年际 Year		*	NS	*	**	**	**	NS	**	*	**	**	**
	EC		**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
	密度×EC Plant density×EC		*	NS	NS	NS	*	*	NS	NS	NS	**	**	*
	EC×年际 EC×Year		NS	NS	NS	NS	NS	**	NS	NS	*	**	NS	**
	密度×年际 Plant density× Year		NS	NS	NS	NS	NS	**	NS	NS	NS	**	NS	**
	密度×EC×年际 Plant density× EC× Year		NS	NS	NS	NS	*	**	NS	NS	**	*	**	**

显著。其中，在 D1、D2 和 D3 密度条件下，EC 处理后产量较对照分别高 438.8 kg·hm⁻²、1 041.3 kg·hm⁻²和 3 376.5 kg·hm⁻²，增幅为 3.6%、8.2%和 27.8%。

3 讨论

倒伏是影响玉米产量和品质的重要因素之一。前人研究表明，适当提高种植密度已成为玉米高产挖潜的关键栽培技术措施^[25-26]，但在地力肥沃、极端天气频发和种植密度偏高条件下，茎秆质量变差，增加了玉米倒伏的风险。随种植密度增加，玉米的形态和茎秆抗倒伏能力发生变化，株高增加、茎秆变细和茎

秆抗折力下降^[27-28]。前人研究发现，乙烯利等激素可提高基部节间横截面积和机械强度，能降低 85%—93%的倒伏率，但产量减产约 2%—6%^[29]。本研究表明，玉米常发生倒伏的时期为大喇叭口期，随种植密度的增加，玉米倒伏率呈升高趋势。EC 处理显著降低了植株倒伏率，在 D1、D2 和 D3 密度条件下分别比对照降低了 5.0%、19.8%和 41.0%。随种植密度增加，穗粒数和百粒重呈降低趋势，EC 处理后穗粒数和百粒重较对照高。EC 处理后产量较对照增加，在 D1、D2 和 D3 密度条件下，EC 处理后产量较对照增加 3.6%、8.2%和 27.8%，在 D1 条件下差异不显著，而在 D3 的

表 5 不同处理条件下玉米茎秆外皮穿刺强度变化

Table 5 The change of rind penetration strength of maize basal culm under different treatments (N·mm⁻²)

年际 Year	密度 Plant density (×10 ⁴ plant/hm ²)	处理 Treatment	节位 Node											
			12 展叶期 V12			吐丝期 Silking stage			乳熟期 Milk stage			收获期 Harvest stage		
			3	4	5	3	4	5	3	4	5	3	4	5
2015	6.0 (D1)	CK	27.9bc	20.9c	17.8c	50.4b	43.6bc	38.4b	60.1b	54.0b	48.2b	56.3b	50.2b	43.6b
		TR	42.6a	37.5a	27.1a	56.6a	52.9a	48.7a	65.1a	63.3a	58.5a	60.9a	57.8a	53.1a
	7.5 (D2)	CK	24.2cd	17.2d	14.1d	43.5c	39.6cd	35.5c	55.6c	50.0bc	43.5c	52.3d	45.9cd	38.9d
		TR	31.2b	29.0b	24.2a	48.1b	44.6b	38.7b	58.5b	53.1b	47.7b	54.8cd	49.3b	42.7bc
	9.0 (D3)	CK	21.8d	15.0d	13.0d	34.9e	31.5e	25.4d	42.2d	39.5d	35.4d	40.6e	36.5e	32.1e
		TR	29.7b	25.5b	21.0b	40.0d	37.1d	32.7c	53.3c	47.5c	43.7c	52.2d	45.5cd	40.8c
2016	6.0 (D1)	CK	26.4c	18.8d	16.6d	48.5b	42.0b	36.5b	56.8b	49.9b	45.8b	54.4b	48.6b	40.5b
		TR	39.3a	36.2a	25.8a	53.4 a	51.2a	45.6a	63.3a	60.4a	56.1a	58.2a	55.3a	51.4a
	7.5 (D2)	CK	22.6d	16.0e	13.2e	41.3d	37.7c	33.4c	52.3c	47.4c	41.2d	49.0d	43.3d	36.5d
		TR	29.6b	26.7b	23.2b	46.9c	42.9b	35.5b	55.0b	51.3b	43.7bc	50.7c	46.0c	40.9b
	9.0 (D3)	CK	20.1e	14.3f	12.7e	33.5f	30.0e	23.6e	40.7d	37.7e	34.7e	37.7e	34.6e	30.4e
		TR	27.0c	23.5c	19.8c	37.6e	36.0d	30.8d	50.5c	44.8d	41.3cd	48.9d	42.5d	38.0c
变异来源	密度 Plant density		**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
Source of variation	年际 Year		**	**	*	**	*	**	*	**	**	**	**	**
	EC		**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
	密度×EC Plant density× EC		*	**	NS	NS	NS	**	NS	*	*	**	*	**
	EC×年际 EC×Year		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
	密度×年际 Plant density×Year		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
	密度×EC×年际		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
	Plant density× EC× Year													

表 6 不同处理条件下的产量及构成因素

Table 6 The yield and yield components under different treatments

密度 Planting density (×10 ⁴ plant/hm ²)	处理 Treatment	穗粒数 Ear grain		百粒重		产量	
				100-grain weight (g)		Yield (kg·hm ⁻²)	
		2015	2016	2015	2016	2015	2016
6.0 (D1)	CK	679.5a	613.5b	39.2ab	33.7ab	12831.5d	11433.0e
	TR	687.8a	636.7 a	40.2a	34.6a	13401.6cd	11740.4d
7.5 (D2)	CK	646.0c	576.3cd	38.8b	32.1d	13540.5c	11970.0c
	TR	659.7b	586.5c	39.7a	33.0c	14903.0b	12690.0b
9.0 (D3)	CK	580.9e	546.0e	36.1d	32.0d	13283.4e	11018.3f
	TR	626.3d	575.6d	37.4c	32.7cd	16372.0a	14682.5a
变异来源	密度 Plant density		**		**		**
Source of variation	年际 Year		**		**		**
	EC		**		**		**
	密度×EC Plant density× EC		**		NS		**
	EC×年际 EC×Year		NS		NS		NS
	密度×年际 Plant density×Year		**		NS		**
	密度×EC×年际		*		NS		**
	Plant density× EC× Year						

高密度下的产量差异显著。表明乙烯利和矮壮素复配剂能降低玉米的倒伏率和增加玉米产量,这与乙烯利和矮壮素协同作用降低了地上部节间中生长素和赤霉素含量,降低了基部节间长度有关^[22,30]。

玉米植株的抗倒伏能力与株高和茎秆物理性状密切相关。降低株高是解决倒伏问题的重要途径,但株高过低导致玉米整株生物产量不足,从而导致产量的降低^[31]。茎秆抗倒伏能力与株高、重心高度、基部节间长度、节间横截面积(茎粗)等形态性状密切相关^[32]。马延华等^[33]研究结果表明,茎粗对植株抗倒伏的影响最大,其次为株高,穗位高影响较小。王永学等^[34]研究发现,玉米倒伏率与茎粗呈负相关,与株高、穗位高、节间长、叶夹角呈正相关。丰光等^[35]研究得出,玉米穗位以下茎秆粗细与茎秆强度显著相关,其中第3节间与倒伏关系最密切,倒伏率与第3节间粗度呈显著负相关。本研究发现,随种植密度的增加,株高、穗位高、穗位系数和重心高度呈升高趋势。与对照相比,EC处理后JK968株高和穗位系数略降低,但差异不显著;穗位高和重心高度显著降低且差异显著。在D1、D2、D3密度条件下,EC处理后JK968的穗位高和重心高度分别比对照降低6.6%、9.8%、13.4%和8.1%、11.6%、11.0%。EC处理降低了玉米穗位高和重心高度,增强了玉米抗倒伏的能力。

茎秆抗折力是反映茎秆强度的重要力学指标。种植密度过大,玉米基部节间茎秆强度显著降低^[36]。本研究发现,茎秆抗折力和茎秆外皮穿刺强度从大喇叭口期至成熟期呈先升高后降低的趋势,在乳熟期达最大值。不同处理间茎秆抗折力和茎秆外皮穿刺强度均存在极显著差异,随种植密度的增加,地上部3、4和5节的茎秆抗折力和茎秆外皮穿刺强度呈降低趋势;不同节间茎秆抗折力和茎秆外皮穿刺强度表现为地上部第3节>第4节>第5节;EC处理后显著增加了各密度处理下地上部第3、4和5节的茎秆抗折力和茎秆外皮穿刺强度。这可能是由于EC处理在降低玉米基部节间茎粗的同时,增加了茎秆木质素、纤维素和可溶性糖等的积累,这有待进一步研究。

4 结论

随种植密度增大,玉米株高增加,重心高度上移,基部节间伸长,基部节间充实度和抗折力下降。乙烯利和矮壮素复配剂(EC)处理显著降低了地上部第6

节以下的节间长度,显著增加了地上部第7节以上的节间长度,从而使株高略降低,而重心高度和穗位高显著降低,基部节间长度缩短、茎秆抗折力、茎秆外皮穿刺强度、基部节间充实度提高,从而提高了茎秆的抗倒伏能力。因此,在种植密度偏大、极端天气频发、氮肥施用过度等易导致玉米倒伏发生的情况下,适期喷施玉米抗倒调节剂可降低倒伏率,增加穗粒数和百粒重,进而保障玉米产量潜力的发挥。

References

- [1] 赵久然, 王荣焕. 中国玉米生产发展历程、存在问题及对策. 中国农业科技导报, 2013, 15(3): 1-6.
ZHAO J R, WANG R H. Development process, problem and countermeasure of maize production in China. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2013, 15(3): 1-6. (in Chinese)
- [2] 白永新, 张润生, 李鹏, 魏振飞, 白宇皓, 张建华, 郭盛. 玉米品种抗倒伏关联特性的鉴定. 山西农业科学, 2016, 44(11): 1592-1596.
BAI Y X, ZHANG R S, LI P, WEI Z F, BAI Y H, ZHANG J H, GUO S. Identification of traits associated with lodging resistance in maize. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2016, 44(11): 1592-1596. (in Chinese)
- [3] FLINT-GARCIA S A, DARRAH L L, MCMULLEN M D, HIBBARD B E. Phenotypic versus marker-assisted selection for stalk strength and second-generation European corn borer resistance in maize. *Theoretical and Applied Genetics*, 2003, 107(7): 1331-1336.
- [4] 田保明, 杨光圣. 农作物倒伏及其评价方法. 中国农学通报, 2005, 21(7): 111-114.
TIAN B M, YANG G S. The performance of lodging and developing a standard test for lodging resistance in crops. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(7): 111-114. (in Chinese)
- [5] TOLLENAAR M, LEE E A. Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize. *Field Crops Research*, 2002, 88: 161-169.
- [6] KHOSRAVI G R, ANDERSON I C. Growth, yield, and yield components of ethephon-treated corn. *Plant Growth Regulation*, 1991, 10(1): 27-36.
- [7] 王群英, 胡昌浩. 玉米茎秆抗倒特性的解剖研究. 作物学报, 1991, 17(1): 70-75.
WANG Q Y, HU C H. Studies on the anatomical structures of the stalks of maize with different resistance to lodging. *Acta Agronomica Sinica*, 1991, 17(1): 70-75. (in Chinese)
- [8] 程富丽, 杜雄, 刘梦星, 靳小利, 崔彦宏. 玉米倒伏及其对产量的影响. 玉米科学, 2011, 19(1): 105-108.
CHENG F L, DU X, LIU M X, JIN X L, CUI Y H. Lodging of

- summer maize and the effects on grain yield. *Journal of Maize Sciences*, 2011, 19(1): 105-108. (in Chinese)
- [9] PEIFFER J A, FLINT-GARCIA S A, DE LEON N, MCMULLEN M D, KAEPLER S M, BUCKLER E S. The genetic architecture of maize stalk strength. *PLoS ONE*, 2013, 8(6): e67066.
- [10] WILKINSON S, DAVIES W J. ABA-based chemical signaling: The co-ordination of responses to stress implants. *Plant Cell and Environment*, 2002, 25(2): 195-210.
- [11] PENG S B, BURESH R J, HUANG J L, ZHONG X H, ZOU Y B, YANG J C, WANG G H, LIU Y Y, TANG Q Y, CUI K H, ZHANG F S, DOBERMANN A. Improving nitrogen fertilization in rice by site-specific N management. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2010, 30(3): 649-656.
- [12] 任佰朝, 李利利, 董树亭, 刘鹏, 赵斌, 杨今胜, 王丁波, 张吉旺. 种植密度对不同株高夏玉米品种茎秆性状与抗倒伏能力的影响. 作物学报, 2016, 42(12): 1864-1872.
- REN B C, LI L L, DONG S T, LIU P, ZHAO B, YANG J S, WANG D B, ZHANG J W. Effects of plant density on stem traits and lodging resistance of summer maize hybrids with different plant heights. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(12): 1864-1872. (in Chinese)
- [13] 刘明, 齐华, 张卫建, 张振平, 李雪霏, 宋振伟, 于吉琳, 吴亚男. 深松方式与施氮量对玉米茎秆解剖结构及倒伏的影响. 玉米科学, 2013, 21(1): 57-63.
- LIU M, QI H, ZHANG W J, ZHANG Z P, LI X F, SONG Z W, YU J L, WU Y N. Effects of deep loosening and nitrogen application on anatomical structures of stalk and lodging in maize. *Journal of Maize Science*, 2013, 21(1): 57-63. (in Chinese)
- [14] 宋朝玉, 张继余, 张清霞, 陈希群, 李祥云, 王圣健. 玉米倒伏的类型、原因及预防、治理措施. 作物杂志, 2006(1): 36-38.
- SONG C Y, ZHANG J Y, ZHANG Q X, CHEN X Q, LI X Y, WANG S J. Corn lodging types, causes and prevention and treatment measures. *Crops*, 2006(1): 36-38. (in Chinese)
- [15] 汪黎明, 姚国旗, 穆春华, 李建生, 戴景瑞. 玉米抗倒性的遗传研究进展. 玉米科学, 2011, 19(4): 1-4.
- WANG L M, YAO G Q, MU C H, LI J S, DAI J R. Advances in genetic research of maize lodging resistance. *Journal of Maize Sciences*, 2011, 19(4): 1-4. (in Chinese)
- [16] 孙世贤, 顾慰连, 戴俊英. 密度对玉米倒伏及其产量的影响. 沈阳农业大学学报, 1989, 20(4): 413-416.
- SUN S X, GU W L, DAI J Y. The effect of density on lodging of crop. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 1989, 20(4): 413-416. (in Chinese)
- [17] 高鑫, 高聚林, 于晓芳, 王志刚, 孙继颖, 苏治军, 胡树平, 叶君, 王海燕, 崔超, 李维敏. 高密植对不同玉米品种茎秆抗倒特性及产量的影响. 玉米科学, 2012, 20(4): 69-73.
- GAO X, GAO J L, YU X F, WANG Z G, SUN J Y, SU Z J, HU S P, YE J, WANG H Y, CUI C, LI W M. Stalks lodging-resistance characteristics and yield traits among different maize varieties under high close planting. *Journal of Maize Sciences*, 2012, 20(4): 69-73. (in Chinese)
- [18] 田再民, 黄智鸿, 陈建新, 史宝林, 魏东, 瞿文洁, 李环. 种植密度对 3 个紧凑型玉米品种抗倒伏性和产量的影响. 玉米科学, 2016, 24(5): 83-88.
- TIAN Z M, HUANG Z H, CHEN J X, SHI B L, WEI D, QU W J, LI H. Effects of planting density on lodging resistance and yield of three erectophile maize varieties. *Journal of Maize Sciences*, 2016, 24(5): 83-88. (in Chinese)
- [19] 勾玲, 黄建军, 张宾, 李涛, 孙锐, 赵明. 群体密度对玉米茎秆抗倒力学和农艺性状的影响. 作物学报, 2007, 33(10): 1688-1695.
- GOU L, HUANG J J, ZHANG B, LI T, SUN R, ZHAO M. Effects of population density on stalk lodging resistant mechanism and agronomic characteristics of maize. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(10): 1688-1695. (in Chinese)
- [20] PICKETT L K, LILJEDAHN J B, HAUGH G G, ULLSTRUP A J. Rheological properties of corn stalk subjected to transverse loading. *Transactions of the American Society Agricultural Engineers*, 49(157): 53-58.
- [21] 姚敏娜, 施志国, 薛军, 杨再文, 勾玲, 张旺锋. 种植密度对玉米茎秆皮层结构及抗倒伏能力的影响. 新疆农业科学, 2013, 12(5): 56-60.
- YAO M N, SHI Z G, XUE J, YANG Z W, GOU L, ZHANG W F. The effects of different planting densities on the cortex structure of stem and lodging resistance in maize. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2013, 12(5): 56-60. (in Chinese)
- [22] 卫晓轶, 张明才, 李召虎, 段留生. 不同基因型玉米对乙烯利调控反应敏感性的差异. 作物学报, 2011, 37(10): 1819-1827.
- WEI X Y, ZHANG M C, LI Z H, DUAN L S. Differences in responding sensitivity to ethephon among different maize genotypes. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(10): 1819-1827. (in Chinese)
- [23] 董学会, 段留生, 孟繁林, 何钟佩, 李召虎. 30%已·乙水剂对玉米产量和茎秆质量的影响. 玉米科学, 2006, 14(1): 138-140.
- DONG X H, DUAN L S, MENG F L, HE Z P, LI Z H. Effects of spraying 30% DTA-6 ethephon solution on yield and straw quality of maize. *Journal of Maize Sciences*, 2006, 14(1): 138-140. (in Chinese)
- [24] 张倩, 张海燕, 谭伟明, 段留生. 30%矮壮素·烯效唑微乳剂对水稻抗倒伏性状及产量的影响. 农药学报, 2011, 13(2): 144-148.

- ZHANG Q, ZHANG H Y, TIAN W M, DUAN L S. Effects of chlormequat-uniconazole 300 micro-emulsion on lodging resistance and yield of rice. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2011, 13(2): 144-148. (in Chinese)
- [25] 杨锦忠, 陈明利, 张洪生. 中国 1950s 到 2000s 玉米产量-密度关系的 Meta 分析. *中国农业科学*, 2013, 46(17): 3562-3570.
- YANG J Z, CHEN M L, ZHANG H S. Meta-analysis of the relationship between maize crop yield and plant density from 1950s to 2000s in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(17): 3562-3570. (in Chinese)
- [26] 王楷, 王克如, 王永宏, 赵健, 赵如浪, 王喜梅, 李健, 梁明晰, 李少昆. 密度对玉米产量($>15000\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)及其产量构成因子的影响. *中国农业科学*, 2012, 45(16): 3437-3445.
- WANG K, WANG K R, WANG Y H, ZHAO J, ZHAO R L, WANG X M, LI J, LIANG M X, LI S K. Effects of density on maize yield and yield components. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(16): 3437-3445. (in Chinese)
- [27] 卢霖, 董志强, 董学瑞, 焦浏, 李光彦, 高娇. 乙矮合剂对不同密度夏玉米茎秆抗倒伏能力及产量的影响. *作物杂志*, 2015(2): 70-77.
- LU L, DONG Z Q, DONG X R, JIAO L, LI G Y, GAO J. Effects of ethylene-chlormequat-potassium on stem lodging resistance and yield of summer maize under different sowing densities. *Crops*, 2015(2): 70-77. (in Chinese)
- [28] 张洪生, 赵明, 吴沛波, 翟延举, 姜雯. 种植密度对玉米茎秆和穗部性状的影响. *玉米科学*, 2009, 17(5): 130-133.
- ZHANG H S, ZHAO M, WU P B, ZHAI Y J, JIANG W. Effects of the plant density on the characteristics of maize stem and ear. *Journal of Maize Sciences*, 2009, 17(5): 130-133. (in Chinese)
- [29] 叶德练, 王庆燕, 张钰石, 李建民, 段留生, 张明才, 李召虎. 乙烯利和氮肥对玉米基部节间性状和抗折断力的调控研究. *中国农业大学学报*, 2015, 20(6): 1-8.
- YE D L, WANG Q Y, ZHANG Y S, LI J S, DUAN L S, ZHANG M C, LI Z H. Study of ethephon and nitrogen rate in regulating the basal internode characteristics and breaking resistance of maize. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20(6): 1-8. (in Chinese)
- [30] 张子学, 朱仕燕, 李文阳, 刘正. 化控剂-乙烯利对玉米植株主要性状和产量的影响. *中国农学通报*, 2014, 30(3): 209-213.
- ZHANG Z X, ZHU S Y, LI W Y, LIU Z. Effect of chemical control agent-ethephon on main characters and yield of maize. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(3): 209-213. (in Chinese)
- [31] 薛珠政, 卢和顶, 林建新, 杨人震. 种植密度对玉米单株和群体效应的影响. *玉米科学*, 1999, 7(2): 52-54.
- XUE Z Z, LU H D, LIN J X, YANG R Z. Effect on single plant and population efficiency by different density on maize. *Journal of Maize Sciences*, 1999, 7(2): 52-54. (in Chinese)
- [32] 李宁, 李建民, 翟志席, 李召虎, 段留生. 化控技术对玉米植株抗倒伏性状农艺性状及产量的影响. *玉米科学*, 2010, 18(6): 38-42.
- LI N, LI J M, ZHAI Z X, LI Z H, DUAN L S. Effects of chemical regulator on the lodging resistance traits, agricultural characters and yield of maize. *Journal of Maize Sciences*, 2010, 18(6): 38-42. (in Chinese)
- [33] 马延华, 孙德全, 李绥艳, 林红, 潘丽艳, 李东林, 陈绍江. 玉米乳熟期茎秆木质素含量的遗传分析. *玉米科学*, 2016, 21(1): 19-23.
- MA Y H, SUN D Q, LI S Y, LIN H, PAN L Y, LI D L, CHEN S J. Genetic analysis of lignin content in maize stalk at milk stage. *Journal of Maize Sciences*, 2016, 21(1): 19-23. (in Chinese)
- [34] 王永学, 张战辉, 刘宗华. 玉米抗倒伏性状的配合力效应及通径分析. *河南农业大学学报*, 2011, 45(1): 1-6.
- WANG Y X, ZHANG Z H, LIU Z H. Combining ability and path analysis of lodging resistance traits in maize. *Journal of Henan Agricultural University*, 2011, 45(1): 1-6. (in Chinese)
- [35] 丰光, 黄长玲, 邢锦丰. 玉米抗倒伏的研究进展. *作物杂志*, 2008(4): 12-14.
- FENG G, HUANG C L, XING J F. The research progress in lodging resistance of maize. *Crops*, 2008(4): 12-14. (in Chinese)

(责任编辑 杨鑫浩)