

西北地区水肥一体化密植春玉米 适宜化控时期研究

徐文倩^{1,2,3,4}, 翟娟^{1,2}, 张园梦^{3,4}, 张嬉云^{3,4}, 李少昆^{1,2,3,4}, 薛军^{3,4}
(1. 石河子大学农学院, 新疆 石河子 832003; 2. 新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室,
新疆 石河子 832003; 3. 中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081;
4. 农业农村部作物生理生态重点实验室, 北京 100081)

摘要: 倒伏是制约玉米产量的重要因素, 喷施化学调节物质可有效提升玉米茎秆机械强度, 预防倒伏现象的发生。为明确不同时期化控对玉米茎秆发育及产量的影响, 以 MC670、登海 618 2 个玉米品种为供试材料, 分别于不同的生育期(5 展叶、6 展叶、8 展叶、10 展叶、12 展叶、15 展叶、抽雄期)进行化控处理, 通过调查植株节间形态及机械强度、节间碳水化合物含量、产量及其构成因素的变化特征, 研究化控时期对玉米茎秆发育及产量形成的影响。结果显示, MC670 在 6 展叶化控处理下平均节间穿刺强度较对照不使用化控剂提高 10.8%, 基部节间(1~6)节直径增加 6.1%, 上、中、下部节间干重分别增加 5.4%、18.9%、19.0%; 纤维素、半纤维素、木质素含量分别增加 12.5%、14.8%、5.4%。登海 618 在 8 展叶化控处理下基部(1~5 节)平均节间穿刺强度较对照不使用化控剂提高 16.6%, 中部节间直径增加 14.6%, 下、中部节间长度分别缩短 11.9%、2.0%, 中、上部节间干重分别增加 33.1%、45.0%。15 展叶化控处理下 2 品种产量较对照不使用化控剂提高 5.5%~11.2%, 有效穗数与对照不使用化控剂无显著差异, 但穗粒数及百粒重均较高。

关键词: 春玉米; 水肥一体化; 密植; 化控时期; 西北地区

中图分类号: S513

文献标志码: A

文章编号: 2097-2172(2025)07-0633-011

doi:10.3969/j.issn.2097-2172.2025.07.008

Study on the Optimal Chemical Regulation Period for Densely Planted Spring Maize of Integrated Water and Fertilizer in Northwest China

XU Wenqian^{1,2,3,4}, ZHAI Juan^{1,2}, ZHANG Yuanmeng^{3,4}, ZHANG Xiyun^{3,4}, LI Shaokun^{1,2,3,4}, XUE Jun^{3,4}
(1. College of Agriculture, Shihezi University, Shihezi Xinjiang 832003, China; 2. Key Laboratory of Oasis Eco-Agriculture, Xinjiang Production and Construction Corps, Shihezi Xinjiang 832003, China; 3. Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 4. Key Laboratory of Crop Physiology and Ecology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China)

Abstract: Lodging is a major limiting factor for maize yield, and the application of chemical regulators can effectively enhance stalk mechanical strength and prevent lodging. To clarify the effects of chemical regulation at different growth stages on stalk development and yield, this study used two maize varieties, MC670 and Denghai 618, as materials, chemical regulation was applied at different growth stages(5-leaf stage, 6-leaf, 8-leaf, 10-leaf, 12-leaf, 15-leaf, and tasseling). Parameters such as internode morphology, mechanical strength, internode carbohydrate content, yield and its components were determined to investigate the effect of chemical regulation timing on stalk development and yield formation. Results showed that for MC670, the average internode puncture strength under the 6-leaf stage treatment increased by 10.8% over the control with no chemical regulation, the diameter of the basal 1 to 6 internodes increased by 6.1%, and internode dry matter at top, medium and bottom increased by 5.4%, 18.9% and 19.0%, respectively. The contents of cellulose, hemicellulose, and lignin increased by 12.5%, 14.8% and 5.4%. For Denghai 618, the average internode puncture strength of the basal 1 to 5 internodes under the 8-leaf treatment increased by 16.6% over the control with no chemical regulation, the diameter of medium internodes increased by 14.6%, internode length at bottom and medium were shortened by 11.9% and 2.0%, respectively, and internode dry matter at medium and top increased by 33.1% and 5.0%, respectively. Under 15-leaf treatment, yields of both varieties increased by 5.5%~11.2% compared to the control with no chemical regulation. The number of ears harvested did not significantly differ from the control, but the number of kernels per ear and 100-kernel weight were higher.

收稿日期: 2025-07-15

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2023B02040-2)。

作者简介: 徐文倩(1999—), 女, 河南许昌人, 硕士, 主要从事玉米栽培生理研究工作。Email: xuwenqian0430@163.com。

通信作者: 李少昆(1963—), 男, 甘肃张掖人, 研究员, 博导, 主要从事玉米栽培生理研究工作。Email: lishaokun@caas.cn。

共同通信作者: 薛军(1986—), 男, 陕西韩城人, 助理研究员, 主要从事玉米栽培生理研究工作。Email: xuejun@caas.cn。

Key words: Spring maize; Integration of water and fertilizer; Condensed planting; Chemical regulation period; Northwest region

玉米作为世界三大粮食作物之一,年产量超过 7 亿 t,占世界粮食总量的 1/3^[1]。由于具有广泛的用途以及较大的生产潜力,玉米产量的提升是保证全球粮食安全的重要议题^[2]。增加种植密度是现阶段提高玉米产量的主要途径^[3],然而随着种植密度的提高,会出现群体内部光热资源分配不均、植株间竞争加剧的问题,大大增加了玉米群体倒伏的风险^[4-6]。据统计,每年由于倒伏造成的玉米产量损失达 5%~25%^[7],目前倒伏问题已经成为制约玉米增密增产的主要因素^[8]。

化学调控技术是降低玉米倒伏风险的重要栽培手段,其主要通过外部喷施植物生长调节剂来调节植株内源激素水平,进而改善植株株型及群体内部环境,提高抗倒伏能力^[9-11]。适时施用植物生长调节剂能够缩短基部节间长度,降低株高和穗位高^[12],提高茎秆直径,增加茎秆木质素、纤维素、半纤维素含量^[13],直接或间接地增强茎秆机械强度^[14]。多数研究认为,在 6 展叶对植株进行化学调控,不仅能增加产量,还能使基部节间长度缩短、直径变大、穗下部节间单位长度干重增加、机械强度变大^[15-16]。然而在生产上有时会因为气候条件等因素造成化控提前或者延后。研究发现,8 展叶喷施植物生长调节剂可提高玉米木质素含量和木质素相关酶活性,从而提高茎秆机械强度^[17],对玉米抗倒伏具有积极作用。也有研究发现,9 展叶进行化控处理能显著提高叶片光合作用相关酶活性,提高光合效率,降低叶片内 ABA 含量,提高 IAA、GA 和 ZR 的含量,维持细胞活性,延缓叶片衰老^[18]。吴思等^[14]在 12 展叶使用胺鲜·乙烯利和国光抑灵 2 种植物生长调节剂对玉米植株进行处理,结果发现 2 种制剂均提高了植株的干物质积累,且对株高、穗位、抗折力的作用优于 6 展叶喷施处理。徐宇^[19]分别在玉米 7、9、11、13、15 展叶时喷施相同剂量的密高 2 号,发现随化控后移,茎秆纤维素、半纤维素、木质素含量逐渐增加,茎秆抗折力及表皮穿刺强度逐渐增强,叶片可溶性糖、氮素含量先增大后减小,最大值出现在 11 展叶。说明化控时期对玉米茎秆抗倒伏能力及物质积累有显著影响。

西北灌溉玉米区采用的水肥一体化措施,在玉米茎秆发育阶段采用前控后促的方式提高了茎秆抗倒伏能力,使种植密度和单产均高于其他玉米产区,但密植水肥一体化条件下的化控时期仍不明确,生产中存在化控过早效果不明显或化控过晚影响产量的问题。因此,本研究在密植水肥一体化条件下,通过不同时期喷施化控剂,明确化控喷施时期对玉米茎秆形态、物质积累、机械强度形成及产量的影响,旨在为西北密植水肥一体化玉米选择适宜化控时期提供参考,并为玉米密植精准调控高产技术体系的建立提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试玉米品种为 MC670 和登海 618(DH618),MC670 为北京市农林科学院玉米研究所选育,登海 618 为山东登海种业股份有限公司选育。化控剂(3%胺鲜酯+27%乙烯利)购自德州祥龙生化有限公司。

1.2 试验设计

试验于 2022—2023 年在新疆奇台农场进行,试验地土质为砂壤土,耕层土壤含有机质 17.3 g/kg、速效氮 73.4 mg/kg、速效磷 66.0 mg/kg、速效钾 313.8 mg/kg。2 a 间玉米生育期内试验地日平均温度及降水变化见图 1。采用膜下滴灌、40 cm+70 cm

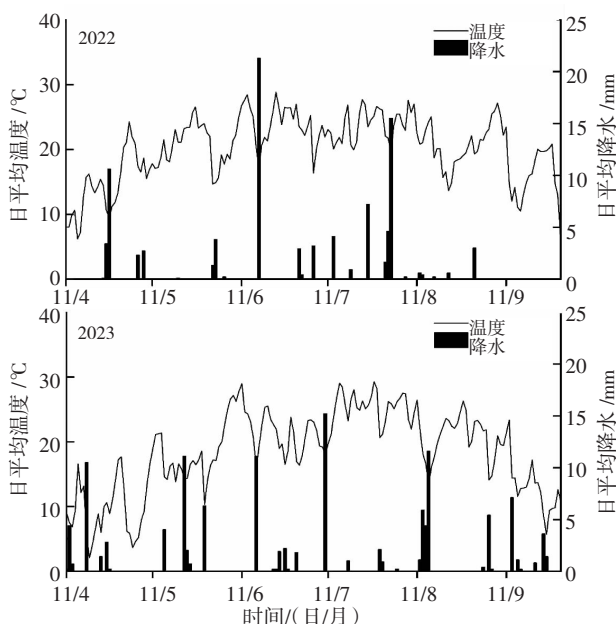


图 1 2022—2023 年玉米生育期内日平均温度和降水

宽窄行种植方式,地膜铺设在窄行,滴灌带铺设在窄行中间的地膜下面。种植密度为 120 000 株/hm²。共设 8 个处理,分别为不使用化控剂(CK)、5 展叶化控(V5)、6 展叶化控(V6)、8 展叶化控(V8)、10 展叶化控(V10)、12 展叶化控(V12)、15 展叶化控(V15)、抽雄期化控(VT)。化控剂选用 3%胺鲜酯和 27%乙烯利的复配剂,喷施剂量均为 600 mL/hm²。其他管理措施同当地大田。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 植株形态指标的测定 玉米进入吐丝期后,各小区分别挑选 5 株生长均匀、具有代表性的玉米植株,测定其株高、穗位、重心。株高为植株雄穗顶端到地表的垂直高度;穗位高是玉米第 1 果穗着生节位到地表的垂直高度;重心是将植株水平放置后,能使其左右平衡的平衡点到植株基部的距离。

1.3.2 节间形态及单位长度干重(DWUL) 从茎秆茎节处将各节间单独截取出来,用 1st、2nd、3th…13th 表示,用直尺测量各节间的长度,用游标卡尺测量各节间长轴及短轴的直径。将各节间分开装进牛皮纸袋中,105 ℃杀青 30 min,80 ℃烘干至恒重,称重。

节间直径=(长轴+短轴)/2

DWUL=节间干重/节间长度

1.3.3 茎秆节间穿刺强度 使用 YYD-1 型玉米茎秆强度测定仪分别测定各节间的茎秆穿刺强度(RPS)。测量时,使用横截面积 1 mm²的测头垂直向下匀速插入节间短轴中部,峰值即为节间 RPS。

1.3.4 茎秆节间碳水化合物积累 将烘干后的玉

米茎秆第 4 节间粉碎,过直径 1 mm 的网筛,采用范氏洗涤法测定样品中中性洗涤纤维(NDF)、酸性洗涤纤维(ADF)和酸性洗涤木质素(ADL)的百分比^[20]。将测定完酸性洗涤木质素的样品放入 600 ℃的马弗炉灰化 3 h 称重,获得灰分的百分比。纤维素、半纤维素、木质素含量的计算方法如下。

纤维素含量=ADF含量-ADL含量

半纤维素含量=NDF含量-ADF含量

木质素含量=ADL含量-灰分含量

单位节长纤维素含量=单位节长干重×纤维素百分率

单位节长半纤维素含量=单位节长干重×半纤维素百分率

单位节长木质素含量=单位节长干重×木质素百分率

1.3.5 产量及产量构成 玉米成熟后,各处理分别划出 3.3 m×5.0 m 的小区进行人工收获,记录有效穗数及重量,使用 PM-8188 谷物水分测定仪测定收获时的籽粒含水率,折算出 14%含水率下的籽粒产量。从中选出 10 个具代表性的果穗进行考种,测定穗粒数、百粒重等。

1.4 数据分析

采用 Excel 2016 进行数据汇总和处理,采用 SPSS 26.0 软件进行方差分析和多重比较(Duncan'法),指标间的相关关系采用 Pearson 相关系数确定,采用 Origin 2024 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 玉米植株形态

由表 1 可以看出,不同处理对玉米株高、穗

表 1 不同时期化控对玉米植株形态的影响 cm

品种	处理	2022年			2023年		
		株高	穗位	重心	株高	穗位	重心
MC670	CK	288.9±3.3 de	123.8±5.9 abc	111.3±3.1 b	337.5±2.3 ab	137.3±11.1 a	110.4±5.1 a
	V5	305.2±2.4 abc	122.8±1.6 bc	114.0±2.0 b	334.0±4.5 ab	126.5±7.1 ab	108.4±4.3 ab
	V6	314.6±3.4 a	130.8±6.2 ab	118.8±4.6 a	344.1±4.8 a	121.3±4.5 b	110.5±2.6 a
	V8	311.1±9.1 ab	132.4±8.0 a	114.0±3.7 b	330.6±5.6 b	121.3±3.6 b	107.8±4.3 ab
	V10	302.2±4.8 bc	120.0±5.4 c	109.8±3.2 b	318.5±2.5 c	118.8±7.5 bc	100.1±2.2 c
	V12	260.2±5.3 f	99.5±6.4 d	98.0±3.6 c	319.9±4.0 c	109.3±4.7 c	98.0±0.8 c
	V15	285.5±7.6 e	127.8±1.7 abc	113.8±2.0 b	279.3±9.8 d	115.0±3.5 bc	102.5±2.6 bc
	VT	295.8±9.8 cd	128.1±6.8 abc	113.6±2.0 b	336.8±8.8 ab	134.0±6.2 a	111.3±5.0 a
DH618	CK	265.6±7.3 b	102.1±3.8 ab	97.0±2.4 abc	295.5±8.4 ab	109.0±6.4 a	98.5±5.2 a
	V5	259.1±6.8 b	86.2±8.9 c	91.6±4.0 cd	301.7±1.9 ab	96.6±8.3 bc	96.4±3.8 a
	V6	273.6±5.0 a	102.4±4.8 ab	98.3±1.5 ab	303.8±6.8 a	102.0±11.2 ab	100.4±4.9 a
	V8	262.4±4.9 b	87.4±2.9 c	89.2±6.4 d	300.3±5.3 ab	100.0±6.7 ab	94.8±1.8 a
	V10	242.3±5.4 c	64.8±8.5 d	78.2±4.7 e	281.3±6.1 cd	86.4±1.6 cd	86.4±2.1 b
	V12	243.1±9.4 c	89.8±3.4 c	90.8±1.3 d	275.5±4.6 de	84.5±2.7 d	87.9±2.9 b
	V15	248.7±5.5 c	92.6±2.2 bc	92.8±2.5 bcd	266.0±9.3 e	101.8±6.3 ab	95.1±1.2 a
	VT	261.6±3.9 b	106.0±3.5 a	100.9±2.6 a	290.8±9.4 bc	112.0±3.2 a	99.4±2.4 a

位、重心具有不同影响。2023 年 MC670 平均株高较 2022 年提高 10.0%；DH618 平均株高较 2022 年提高 12.6%，穗位和重心分别升高 8.3%、2.7%。与 CK 相比，MC670 在 V12、V15 处理下株高显著下降，分别降低 7.4%、9.8%，穗位降低 20.0%、7.0%，重心降低 11.6%、2.4%；DH618 在 V10、V12、V15 处理下株高、穗位、重心均显著降低，株高下降 6.7%、7.6%、8.3%，穗位下降 28.4%、17.4%、7.9%，重心下降 15.8%、8.6%、3.9%。

2.2 玉米节间长度

不同品种玉米植株茎秆节间长度均表现出从基部往上先增大后减小的规律（图1）。MC670 在 V5 处理的穗下节间（1~6节间）长度较 CK 缩短 4.2%，中部节间（7~9节间）变化不明显，上部节间（10~14节间）较 CK 增加 9.2%；V8 处理作用效果与 V5 处理表现一致，但对下部节间的缩短效果低于 V5 处理，中、上部长度增长较 V5 处理长；V12、V15、VT 处理缩短了中部节间，分别较 CK 缩短 27.1%、2.6%、4.2%；此外，V15 处理上部节间较 CK 缩短 7.0%。DH618 在 V5 处理的穗下节间、中部节间分别较 CK 缩短 12.8%、5.2%，上部节间变化不明显；与 CK 相比，V8、V10 处理分

别使 DH618 下部节间长度缩短 11.9%、12.9%，中部节间长度缩短 2.0%、7.7%，V8 处理上部节间长度呈增加趋势，V10 处理上部节间长度呈缩短趋势；V12、V15 处理对中部节间长度影响较大，分别较 CK 缩短 12.7%、15.4%；V15、VT 处理对上部节间长度的影响较大，分别较 CK 缩短 12.5%、11.8%。

2.3 玉米节间直径

由图 2 可以看出，MC670 在 V5 处理的下部节间（1~6节间）较 CK 增粗 2.5%，中部节间（7~9节间）增粗 6.1%；V6 处理的下部节间较 CK 增粗 6.1%，中部节间增粗 7.5%；V5、V6 处理对上部节间（10~14节间）直径的影响较小。V10、V12 处理降低了 MC670 各节间直径，V10 处理下、中、上部节间直径较 CK 分别降低 1.2%、5.1%、10.2%，V12 处理分别降低 7.5%、3.4%、1.0%。DH618 在 V5 处理的下、中、上部节间直径较 CK 分别增加 15.2%、11.2%、14.8%；V8 处理对中部节间直径影响最大，较 CK 增加 14.6%。V12 处理下部节间直径缩小；V15 处理使上部节间直径增加 12.6%。

2.4 节间单位长度干重(DWUL)

玉米茎秆 DWUL 从基部到顶部逐渐减小，相

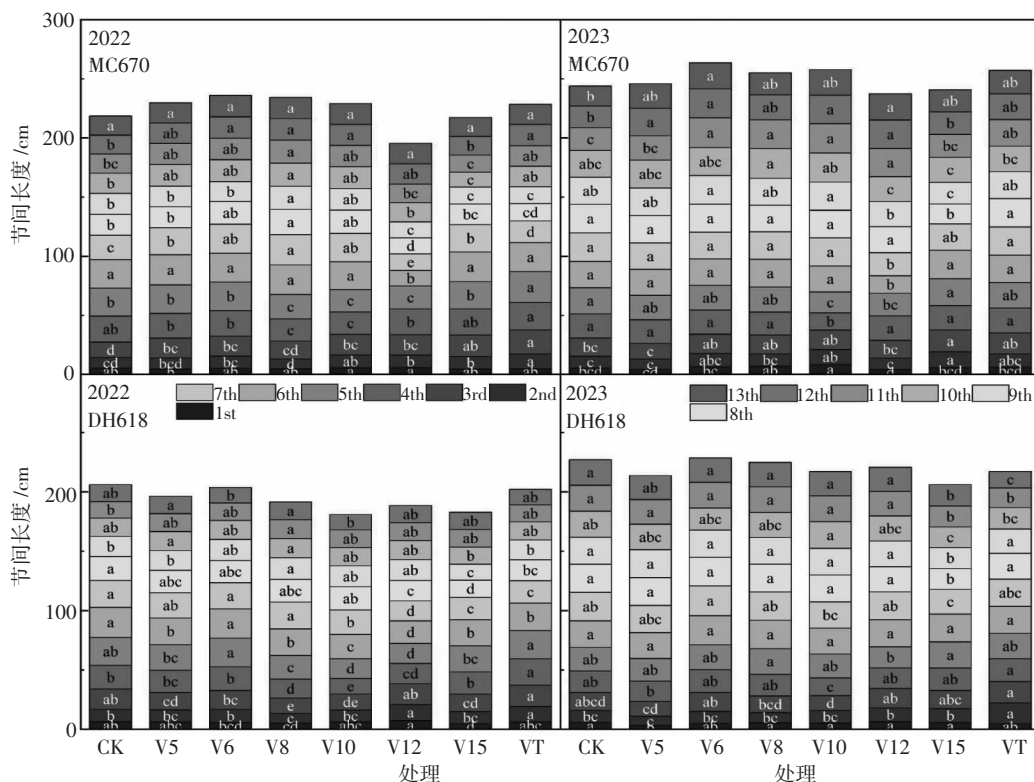


图 1 化控时期对玉米节间长度的影响

同品种不同年份间茎秆 DWUL 随处理的变化规律大致相同(图3)。同一节位茎秆 DWUL 随处理时间后移呈波动式变化, 在前期和后期各出现 1 个峰值。对于 MC670 品种, 2022 年前期化控最佳处理

为 V5, 其上、中、下部节间 DWUL 分别较 CK 提高 22.6%、25.0%、15.0%, 后期化控最佳处理为 V15, 中、上部节间茎秆 DWUL 较 CK 分别提高 19.2%、25.8%; 2023 年前期化控最佳处理为 V6,

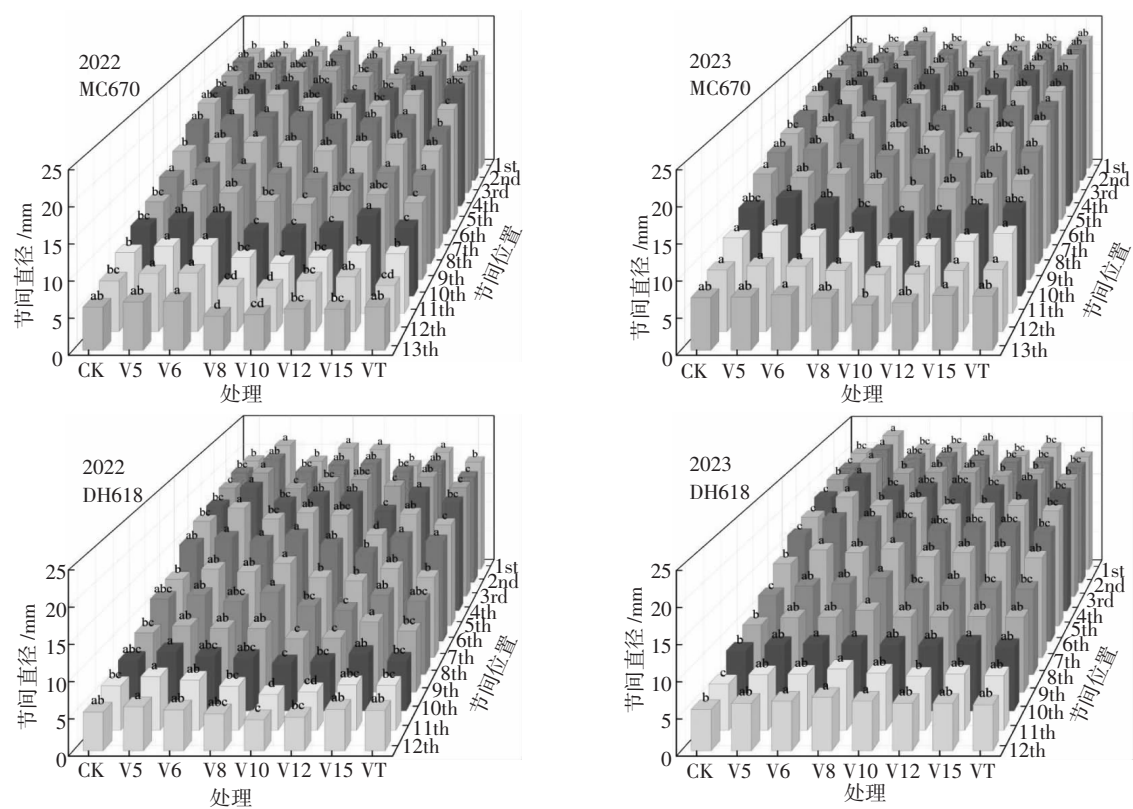


图 2 化控时期对玉米节间直径的影响

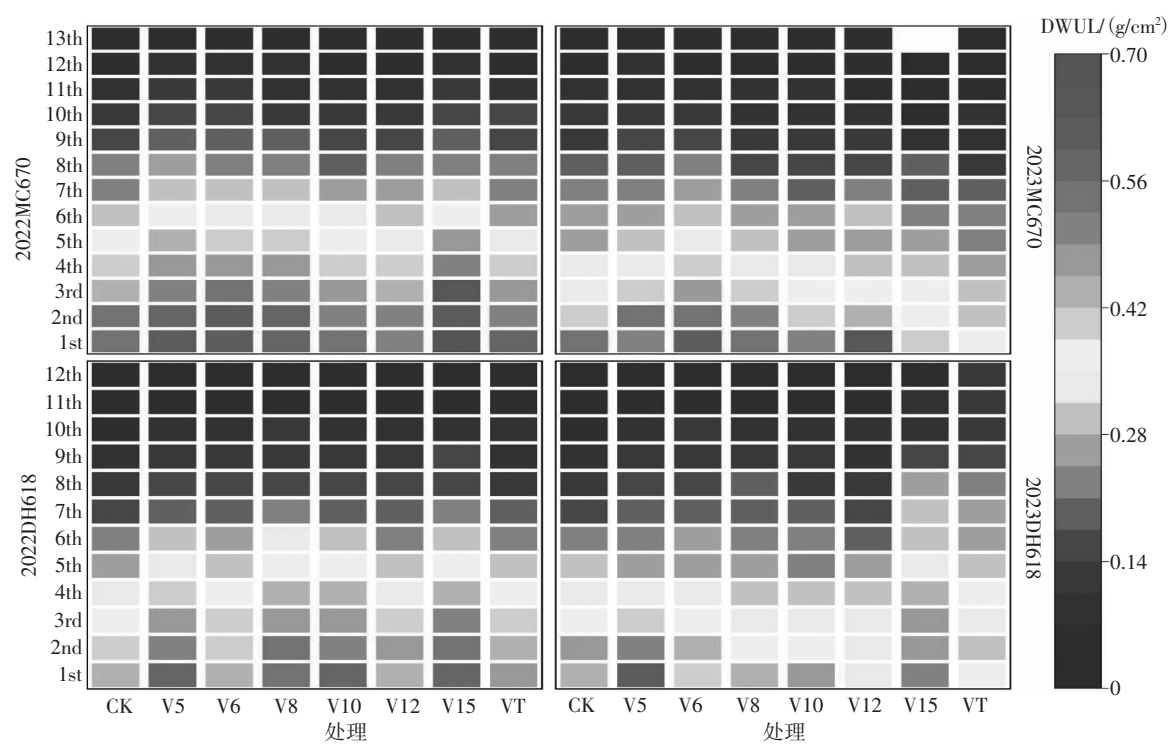


图3 化控时期对玉米节间单位长度干重(DWUL)的影响

中、下部节间茎秆 DWUL 较 CK 分别提高 22.7%、23.3%，后期化控最佳处理为 V12。整体来看，V6 时期进行化控处理对 MC670 品种茎秆 DWUL 的提高效果最好，上、中、下部节间茎秆 DWUL 2 a 平均分别提升 5.4%、18.9%、19.0%。对于 DH618 品种，2 a 间茎秆 DWUL 在 V5、V8、V15 处理均出现峰值，V5 处理对下部节间茎秆 DWUL 作用效果较好，较 CK 提高 19.0%；V8、V15 处理对中、上部节间茎秆 DWUL 作用效果较好，V8 处理较 CK 分别提高 33.1%、45.0%，V15 处理较 CK 分别提高 53.8%、46.6%。

2.5 节间穿刺强度

玉米不同节位的茎秆穿刺强度自下而上逐渐减小，MC670 和 DH618 品种均表现出 2022 年下部节间茎秆穿刺强度高于 2023 年，上部节间穿刺强度小于 2023 年(图4)。对于 MC670 品种，V5、V6、V8 处理均能使节间平均茎秆穿刺强度增大，较 CK 分别提升 7.9%、10.8%、6.7%。其中 V5 处理对基部第 2、3 节间茎秆穿刺强度表现较好，较 CK 分别提高 17.6%、10.6%；V6 处理整体的茎秆穿刺强度呈现最佳的表现，基部(1~6节)节间、中部(穗位及其上下节，7~9 节)节间、上部节间(10~14 节)的茎秆穿刺强度分别较 CK 提高

10.8%、8.2%、12.3%；V8 处理下整体茎秆穿刺强度低于 V5、V6 处理，但其对 10~14 节的穿刺强度提升较大，较 CK 提高 10.3%。V15 处理也可以提高植株整体的穿刺强度，但对于 9、10 节茎秆穿刺强度会造成较大程度的下降，分别较 CK 下降 14.5%、25.0%。DH618 在 V6、V8、V15 处理各部分茎秆穿刺强度均高于 CK，其中 V8 处理效果最佳，其对基部(1~5 节)、穗位节及其上下节位(6~8 节)茎秆穿刺强度提升效果最好，分别较 CK 提升 16.6%、17.3%；V15 处理对于中部节间(穗位及其上下节，6~8 节)穿刺强度提升效果较好，相较 CK 提升 20.9%。此外，对于 DH618 品种，V8、V10 处理下对于基部第 5 节间作用效果最大，V12 处理对于基部第 6 节间作用效果最大、V15 处理对于第 7 节作用效果最大、VT 处理对于第 8 节作用效果最大，随化控后移，主要作用节间部位上升。

2.6 基部节间茎秆结构性碳水化合物

茎秆中纤维素、半纤维素、木质素等结构性碳水化合物的含量与茎秆的机械强度紧密相关。由图 5 可知，纤维素、半纤维素、木质素随化控时期的后移呈不同变化趋势。总体来说，MC670 品种在 V6 处理下对茎秆结构性碳水化合物的影响最大，纤维素、半纤维素、木质素含量较 CK 分别

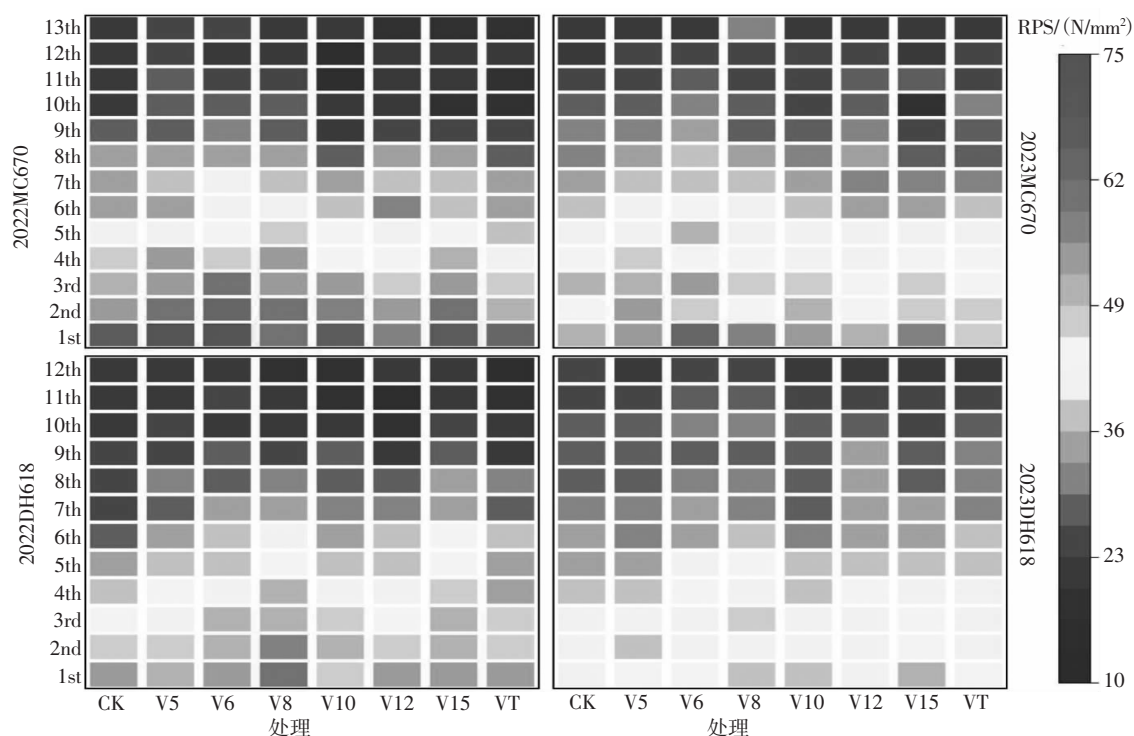


图4 化控时期对玉米节间穿刺强度的影响

上升 12.5%、14.8%、5.4%, 且纤维素、半纤维素含量在 2 a 间较 CK 均达到差异显著水平。DH618 品种在 V15 处理下对茎秆结构性碳水化合物的影响最大, 纤维素、半纤维素、木质素含量较 CK 分别上升 30.3%、30.6%、36.5%, 达差异显著水平。

V15 处理整体表现优于其他处理, 其 2 a 间 DH618 品种、2022 年 MC670 品种各化合物均较 CK 显著提高。

2.7 茎秆形态结构与茎秆强度、茎秆组分的关系
玉米植株茎秆穿刺强度与茎粗、单位长度干重、

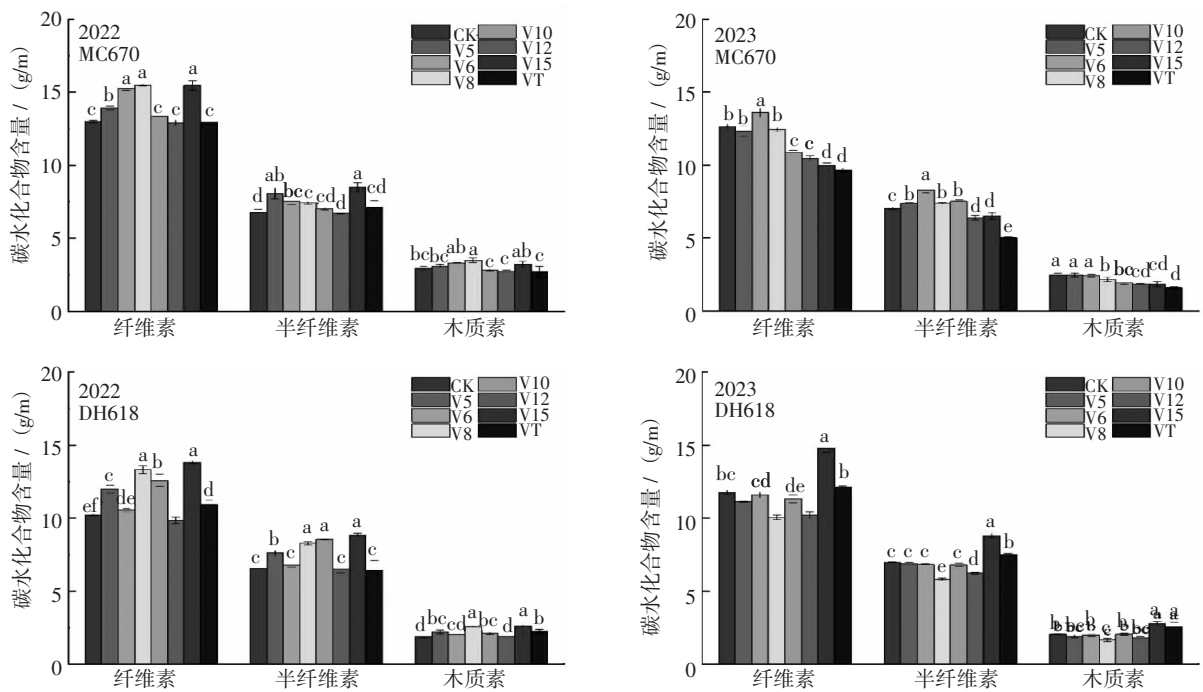
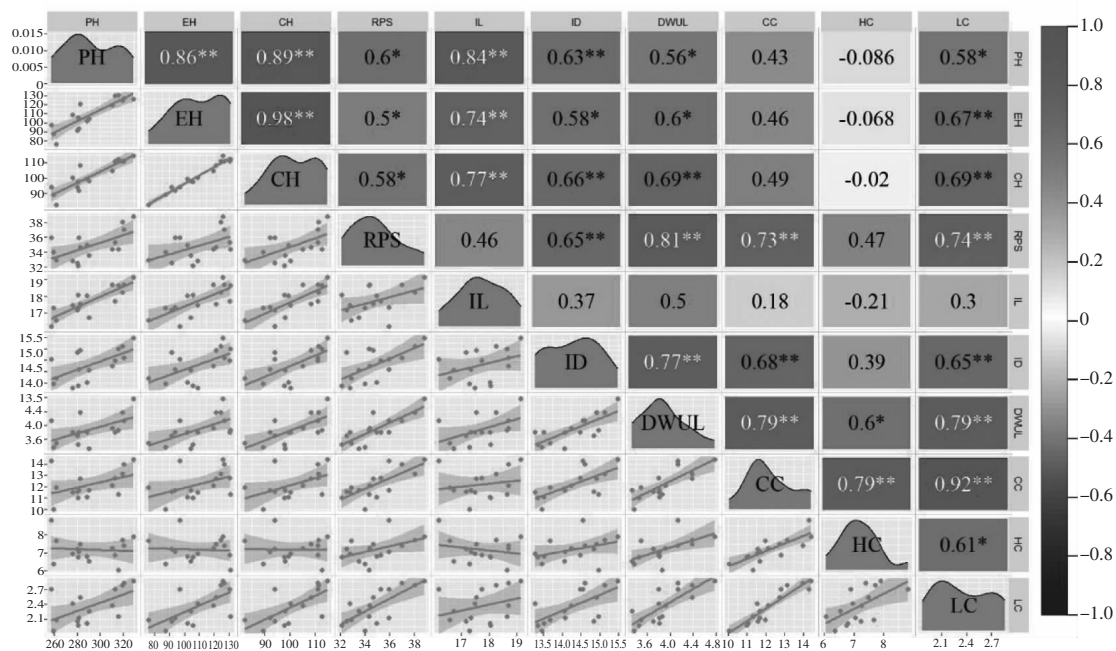


图 5 化控时期对玉米基部节间结构性碳水化合物组分的影响



(PH: 株高; EH: 穗位高; CH: 重心高; RPS: 穿刺强度; IL: 节间长; ID: 茎粗; DWUL: 单位长度干重; CC: 纤维素含量; HC: 半纤维素含量; LC: 木质素含量。** 表示在 0.01 水平上差异显著; * 表示在 0.05 水平上差异显著。)

图 6 植株茎秆形态结构与机械强度、碳水化合物组分的相关性

纤维素含量、木质素含量极显著正相关($P<0.01$),与株高、穗位、重心显著正相关($P<0.05$);节间长度与株高、穗位、重心极显著正相关($P<0.01$);茎粗与株高、重心、单位长度干重、纤维素、木质素含量极显著正相关($P<0.01$);单位长度干重与重心、纤维素、木质素含量极显著正相关($P<0.01$),与株高、穗位、半纤维素含量显著正相关($P<0.05$)。

2.8 不同时期化控对玉米产量及产量构成的影响

由表 2 可知,品种和不同时期化控处理显著影响玉米果穗的穗粒数和百粒重,不同处理对有效穗数和产量的影响不显著。综合来看,随化控时间后移玉米产量呈现先增加后减小,再增加再减小的波动式变化,穗粒数和百粒重的变化趋势与产量大致相同。MC670 和 DH618 的产量、百粒重均以 V15 处理最高。与 CK 相比,V15 处理产量提高 5.5%~11.2%、穗粒数提高 9.4%~11.3%、百粒重提高 4.4%~4.5%。V6 处理产量较高,与 CK 相比,产量提高 5.0%~10.6%、穗粒数提高 5.5%~14.3%、百粒重提高 3.6%~3.9%。V10 处理产量较 CK 降低 1.1%~3.9%,穗粒数较 CK 降低 3.2%~3.8%,百粒重较 CK 降低 4.8%~5.4%。

3 讨论与结论

增加种植密度是我国玉米产量提升的主要途径之一^[21]。然而,密度过高容易造成群体内部通风不良、透光率下降、株间竞争加大,植株个体

形态、生理特征也会随之发生变化,最终导致群体产量、抗逆抗倒伏能力降低^[22-23]。施用化控调节物质能有效改善玉米株型结构,调节其生长发育,从而增强玉米的光合作用、提高产量及抗倒伏能力^[24]。研究表明,在玉米营养生长阶段喷施化控调节物质,可以降低植株的株高、重心及穗位,进而减少植株倒伏风险^[25]。本研究中,前期化控处理对玉米株高、重心和穗位的影响不显著,与不使用化控剂相比未出现明显的抑制作用,甚至出现上升的趋势;而 12 展叶化控、15 展叶化控处理使玉米植株的株高、重心、穗位与不使用化控剂相比分别下降了 7.4%~9.8%、2.4%~11.6%、7.0%~20.0%。许海涛等^[26]研究发现,12 展叶喷施化学调节剂物质的处理对株高的降低效果优于前期处理,与本试验研究结果相一致,说明后期化控对株高的调节效果优于前期化控。徐彤等^[27]研究发现,在 10 展叶喷施化控调节物质的处理株高高于 15 展叶喷施的处理,而穗位低于 15 展叶的处理,这与本试验中登海 618 品种的表现结果相一致。

玉米植株基部节间的形态结构与其抗倒伏能力紧密相关,基部节间较短、直径粗的植株抗倒伏能力相对较强^[28]。许海涛等^[26]研究发现,6 展叶喷施化控调节物质处理的玉米基部节间长度、节间直径均优于 8、10、12 展叶喷施的处理,这与本研究结果中 5 展叶化控处理对 2 个玉米品种

表 2 不同时期化控对玉米产量及产量构成的影响

品种	处理	产量 /(t/hm ²)	有效穗数 /(10 ⁴ /hm ²)	穗粒数 /粒	百粒重 /g
MC670	CK	17.9±0.4 a	10.7±1.0 a	492.4±65.7 bc	33.3±1.4 ab
	V5	19.1±2.0 a	10.6±1.0 a	500.2±68.4 abc	32.6±1.3 ab
	V6	19.8±1.2 a	10.8±0.8 a	563.0±77.1 a	34.6±2.3 a
	V8	18.9±1.9 a	10.8±0.9 a	526.4±51.2 abc	32.5±0.9 ab
	V10	17.7±2.4 a	10.4±1.0 a	473.6±58.9 c	31.7±0.4 b
	V12	19.0±1.1 a	10.5±0.8 a	504.4±70.5 abc	33.7±1.7 ab
	V15	19.9±0.7 a	10.4±0.7 a	548.2±51.9 ab	34.8±2.2 a
	VT	18.6±1.3 a	10.4±0.9 a	541.4±67.1 abc	32.7±2.3 ab
DH618	CK	18.1±1.7 a	10.5±1.0 a	479.6±42.4 bc	38.6±2.1 bc
	V5	18.4±2.0 a	10.6±1.1 a	467.8±55.5 bc	36.8±1.2 de
	V6	19.0±1.3 a	10.4±0.6 a	506.2±79.0 ab	40.0±0.5 ab
	V8	17.9±1.9 a	10.2±1.0 a	481.8±83.2 bc	37.9±1.5 cde
	V10	17.4±3.1 a	9.7±1.1 a	464.0±53.9 c	36.5±0.8 e
	V12	18.5±1.1 a	10.1±0.7 a	497.8±32.8 abc	38.3±1.1 cd
	V15	19.1±2.1 a	10.6±0.9 a	524.6±36.1 a	40.3±0.8 ab
	VT	18.6±1.3 a	10.5±1.0 a	496.6±55.9 abc	37.0±1.3 cde
ANOVE	品种(V)	ns	ns	*	**
	处理(T)	ns	ns	**	**

基部节间长度的缩短效果最佳相一致。本研究还发现, 化控时期不同, 受抑制的具体节位也存在差异, 随化控时期的后移, 受抑制的节位逐渐上移, 这一现象与孟祥盟等^[29]的研究结果一致。同时, 有学者研究发现, 早期化控会造成穗上部节间“补偿性生长”, 且这种现象会随着化控时期后移越晚出现^[15, 29]。在本试验中, 10 展叶前化控处理均出现了“补偿性生长”现象, 并最终呈现出整体株高高于不使用化控剂的处理。也有说法认为这种现象是由于早期喷施矮壮素类植物生长调节剂促进了细胞分裂和伸长, 从而增加了茎秆的生长速度和节间长度。另外, 在本试验中值得注意的是, 12 叶展叶控处理的植株其第 5~8 节节间长度均处于较低水平, 这其中的原因有待进一步地深入探究。

茎秆的穿刺强度是评价玉米茎秆强度的重要指标, 基部节间的力学性状与玉米的抗倒伏能力紧密相关^[30]。多数研究表明, 在玉米生长前期进行化控处理, 可显著提高穗下各节间的弯曲强度和压碎强度, 同时增加各节间直径, 进而提高植株的抗倒伏性^[15]。此外, 也有学者对不同生育期玉米进行化控处理, 发现玉米茎秆穿刺力随着生育进程的推进呈现逐渐上升的趋势^[25, 30]。刘文彬等^[31]研究发现, 在前期化控的处理中, 7 展叶的喷施效果最佳, 对基部节间茎秆强度的调控效果最高。本研究中, 前期化控茎对 MC670 和登海 618 品种秆穿刺强度的作用效果均最佳, 最优处理时期分别为 6 展叶、8 展叶。与对照不使用化控剂相比, MC670 在 6 展叶化控处理下平均节间穿刺强度提高 10.8%, 基部节间(1~6 节)直径增加 6.1%, 上、中、下部节间干重分别增加 5.4%、18.9%、19.0%, 纤维素、半纤维素、木质素含量分别增加 12.5%、14.8%、5.4%; 登海 618 在 8 展叶处理下基部(1~5 节)平均节间穿刺强度提高 16.6%, 中部节间直径增加 14.6%, 下、中部节间长度分别缩短 11.9%、2.0%, 节间干重分别增加 33.1%、45.0%。

茎秆基部节间单位长度干重是评价玉米抗倒伏性能的重要指标^[32]。通常认为玉米基部节间长度越短、干重越大, 其茎秆强度越大、抗倒伏性越好^[12]。有研究认为, 化控时期后移可以改善植株上层群体结构, 保持群体后期的物质生产能力,

从而增加玉米干物质积累量^[33-34]。王媛媛等^[33]研究发现, 13 展叶喷施化控调节物质茎秆干物质积累量高于 8 展叶喷施。本试验结果表明, 前期化控一方面促进了基部节间的干物质积累, 另一方面缩短了基部节间长度, 从而使得基部节间单位长度干物质质量高于不使用化控剂; 而中、后期化控则主要影响到植株的中、上部位节间。

纤维素、半纤维素、木质素等结构性碳水化合物作为植物细胞壁的主要成分, 不仅直接参与植物的生命活动过程, 并为细胞提供支撑力抵御外界压力, 其含量直接影响到茎秆的力学强度^[35-36]。有学者认为, 单位节长纤维素含量、木质素含量与茎秆强度呈显著正相关^[37-38]。此外, 施用化学调节剂可增加玉米茎秆中纤维素、半纤维素、木质素的含量, 进而增加茎秆强度, 提高茎秆抗折断力^[39]。徐宇^[19]研究发现, 不同时期施用密高 2 号均能提高茎秆纤维素、半纤维素、木质素的含量, 其中 15 展叶喷施效果最佳。本试验中大部分处理均能使茎秆碳水化合物组分增加, 其中 15 展叶化控效果最佳, 这与徐宇^[19]的研究结果相一致。

有观点认为, 株型结构的变化会影响植株的物质积累和分配^[40], 而喷施化控调节物质后, 玉米株高降低, 会对产量产生负面影响^[41]。也有观点认为, 小喇叭口期是玉米雌穗分化关键时期、大喇叭口期是小花分化期, 此时施用化学生长调节物质, 会影响果穗发育, 造成籽粒败育^[42-43]。研究表明, 在一定的密度范围内, 如果发生倒伏现象, 喷洒植物生长调节剂可以提高玉米产量^[44-45]; 然而在未发生倒伏时, 植物生长调节剂的使用反而可能造成产量的降低^[46-47]。在本研究中, 8 展叶到 10 展叶化控会造成玉米产量一定程度的降低。MC670 和登海 618 品种的最佳产量均为 15 展叶化控处理, 产量较对照不使用化控剂提高 5.5%~11.2%, 此时植株穗粒数、百粒重也处于较高水平, 有效穗数与对照不使用化控剂无显著差异。这可能是由于后期化控能够避免对小花数(每穗潜在籽粒数)的破坏, 同时减少特定节间茎秆伸长, 减少茎生长与小花生长的竞争, 加快叶片向果穗的分配, 为籽粒的形成和生长提供足够的同化物^[48]。也可能是由于中后期化控能改善上部叶片排布, 使冠层结构更加合理, 穗位层光截获量增加, 穗

粒数、百粒重提高,进而使产量得到了提升^[27,49]。

在玉米植株生长发育前期施用生长调节剂,能够改善基部节间结构、增强基部节间茎秆机械强度,增强植株抗倒伏性;但前期化控易造成植株生长后期出现“补偿性生长”现象。而在玉米生长发育后期施用生长调节剂,虽不利于构建良好的基部节间形态和足够的茎秆强度,对提升植株抗倒伏性作用有限,但由于其对穗位上下节间的调控作用,有助于促进干物质向果穗转移,对提高产量具有一定积极作用。

参考文献:

- [1] ERENSTEIN O, JALETA M, SONDER K, et al. Global maize production, consumption and trade: trends and R&D implications[J]. *Food Security*, 2022, 14(5): 1295–1319.
- [2] 李少昆, 赵久然, 董树亭, 等. 中国玉米栽培研究进展与展望[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(11): 1941–1959.
- [3] 郭晓峰, 史 堂, 施 斐, 等. 种植密度对不同饲用玉米产量与品质的影响[J]. *寒旱农业科学*, 2025, 4(1): 67–72.
- [4] ZHANG D, SUN Z, FENG L, et al. Maize plant density affects yield, growth and source–sink relationship of crops in maize/peanut intercropping[J]. *Field Crops Research*, 2020, 257: 107926.
- [5] 柏延文, 杨永红, 朱亚利, 等. 种植密度对不同株型玉米冠层光能截获和产量的影响[J]. *作物学报*, 2019, 45(12): 1868–1879.
- [6] 陈传永, 侯玉虹, 孙 锐, 等. 密植对不同玉米品种产量性能的影响及其耐密性分析[J]. *作物学报*, 2010, 36(7): 1153–1160.
- [7] KANG M S, DIN A K, ZHANG Y D, et al. Combining ability for rind puncture resistance in maize[J]. *Crop Science*, 1999, 39(2): 368–371.
- [8] KAMARA A Y, KLING J G, MENKIR A, et al. Association of vertical root–pulling resistance with root lodging and grain yield in selected S-1 maize lines derived from a tropical low–nitrogen population[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2003, 189(3): 129–135.
- [9] QUN W, JUN X, JIANG L C, et al. Key indicators affecting maize stalk lodging resistance of different growth periods under different sowing dates[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2020, 19(10): 2419–2428.
- [10] NIU Y N, CHEN T X, ZHAO C C, et al. Lodging prevention in cereals: Morphological, biochemical, anatomical traits and their molecular mechanisms, management and breeding strategies[J]. *Field Crops Research*, 2022, 289: 108733.
- [11] 王海永, 张明才, 陈小文, 等. 乙烯利对夏玉米子粒干物质积累的影响及生理机制探究[J]. *玉米科学*, 2013, 21(5): 57–61.
- [12] 徐田军, 吕天放, 陈传永, 等. 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[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(4): 629–638.
- [13] 樊海潮, 顾万荣, 杨德光, 等. 化控剂对东北春玉米茎秆理化特性及抗倒伏的影响[J]. *作物学报*, 2018, 44(6): 909–919.
- [14] 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.
- [15] 董学会, 段留生, 孟繁林, 等. 30%已·乙水剂对玉米产量和茎秆质量的影响[J]. *玉米科学*, 2006(1): 138–140; 143.
- [16] 于玮淇. 化控剂对不同密度下春玉米农艺性状及生理代谢的影响[D]. 延吉: 延边大学, 2022.
- [17] AHMAD I, KAMRAN M, ALI S, et al. Uniconazole application strategies to improve lignin biosynthesis, lodging resistance and production of maize in semiarid regions[J]. *Field Crops Research*, 2018, 222: 66–77.
- [18] 杨可攀, 顾万荣, 王悦力, 等. 化控剂对玉米光合、激素及茎秆力学特性的影响[J]. *玉米科学*, 2017, 25(4): 75–83.
- [19] 徐 宇. 化控剂密高2号对玉米抗倒伏性能及生理生化指标的影响[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2015.
- [20] 韦文华, 李 盼, 邵冠贵, 等. 西北灌区青贮玉米产量及品质对减量灌水与有机无机肥配施的响应[J]. *中国农业科学*, 2025, 58(8): 1521–1534.
- [21] 唐文雪, 马忠明, 连彩云. 高密度栽培条件下灌水量对河西灌区玉米群体质量及水分利用效率的影响[J]. *寒旱农业科学*, 2024, 3(4): 330–336.
- [22] 严建兵, 赵久然. 密植高产——我国玉米育种的最核心目标[J]. *生物技术通报*, 2023, 39(8): 1–3.
- [23] 宣丽霞. 种植密度对绿洲灌区不同品种青贮玉米生长和产量的影响[J]. *寒旱农业科学*, 2024, 3(1): 63–68.
- [24] 徐 宇, 孔祥清, 付 迪, 等. 化控剂密高对玉米抗倒伏性的影响[J]. *黑龙江八一农垦大学学报*, 2015, 27(6): 10–14.

- [25] 刘晓庆,詹延廷,王月,等.植物调节剂分期施用对玉米籽粒胚乳及淀粉粒发育的影响[J].华北农学报,2018,33(6):137-144.
- [26] 许海涛,潘正茂,陈宏,等.不同生育时期喷施植物生长调节剂对夏玉米形态特征、抗倒能力和生理效应的影响[J].农业科技通讯,2017(11):112-116.
- [27] 徐彤,吕艳杰,邵玺文,等.不同时期化控对密植玉米冠层结构及籽粒灌浆特性的影响[J].作物学报,2023,49(2):472-484.
- [28] 谷利敏,乔江方,张美微,等.种植密度对不同耐密夏玉米品种茎秆性状与抗倒伏能力的影响[J].玉米科学,2017,25(5):91-97.
- [29] 孟祥盟,孙宁,边少锋,等.植物生长调节剂对春玉米茎秆农艺性状及产量的影响[J].东北农业科学,2016,41(6):16-20.
- [30] 赵英善.玉米茎秆结构性化合物变化与抗倒伏强度关系的研究[D].石河子:石河子大学,2015.
- [31] 刘文彬,冯乃杰,张盼盼,等.乙烯利和激动素对玉米茎秆抗倒伏和产量的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(9):1326-1334.
- [32] ROBERTSON D, SMITH S, GARDUNIA B, et al. An improved method for accurate phenotyping of corn stalk strength[J]. Crop Science, 2014, 54(5): 2038-2044.
- [33] 王媛媛,田北京,徐彩龙,等.新型化控剂 Opera 对密植夏玉米生长及子粒灌浆的影响[J].玉米科学,2017,25(2):74-80.
- [34] 张帅,宁芳芳,黄收兵,等.化控处理时期对玉米植株-根系形态及产量的影响[J].中国农业大学学报,2020,25(2):1-11.
- [35] LI Y H, QIAN O, ZHOU Y H, et al. BRITTLE CULM1, which encodes a COBRA-like protein, affects the mechanical properties of rice plants[J]. Plant Cell, 2003, 15(9): 2020-2031.
- [36] WANG J, ZHU J M, LIN Q Q, et al. Effects of stem structure and cell wall components on bending strength in wheat[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(7): 815-823.
- [37] APPENZELLER L, DOBLIN M, BARREIRO R, et al. Cellulose synthesis in maize: isolation and expression analysis of the cellulose synthase (CesA) gene family[J]. Cellulose, 2004, 11: 287-299.
- [38] XUE J, ZHAO Y S, GOU L, et al. How high plant density of maize affects basal internode development and strength formation[J]. Crop Science, 2016, 56(6): 3295-3306.
- [39] 刘志铭,盖旭东,李宝玉,等.化控对高密度春玉米抗倒伏能力及产量的影响[J].东北农业科学,2019,44(6):1-5.
- [40] 吕艳杰,包岩,于海燕.不同株型玉米品种冠层结构特性及产量的比较[J].安徽农业科学,2009,37(29):14087-14088;14127.
- [41] ZHOU X M, MACKENZIE A F, MADRAMOOTOO C A, et al. Effects of stem-injected plant growth regulators, with or without sucrose, on grain production, biomass and photosynthetic activity of field-grown corn plants[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 1999, 183(2): 103-110.
- [42] 张凤路,赵明,王志敏,等.玉米籽粒发育与乙烯的释放[J].中国农业大学学报,1997(3):85-89.
- [43] 赵久然,郭景伦,郭强,等.乙烯类药剂处理对玉米果穗发育及穗粒数的影响[J].北京农业科学,1998(4):2-4.
- [44] XU C L, GAO Y B, TIAN B J, et al. Effects of EDAH, a novel plant growth regulator, on mechanical strength, stalk vascular bundles and grain yield of summer maize at high densities[J]. Field Crops Research, 2017, 200: 71-79.
- [45] ZHANG Q, ZHANG L Z, EVERS J C, et al. Maize yield and quality in response to plant density and application of a novel plant growth regulator[J]. Field Crops Research, 2014, 164: 82-89.
- [46] GAO Z, LIANG X G, ZHANG L, et al. Spraying exogenous 6-benzyladenine and brassinolide at maize yield by enhancing source and sink capacity tasseling increases[J]. Field Crops Research, 2017, 211: 1-9.
- [47] ZHAO Y T, LV Y J, ZHANG S, et al. Shortening internodes near ear: an alternative to raise maize yield[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2022, 41: 628-638.
- [48] 黄收兵,徐丽娜,陶洪斌,等.华北地区夏玉米理想株型研究[J].玉米科学,2012,20(5):147-152.
- [49] 杨文飞,贾艳艳,文廷刚,等.新型调节剂稀施保对玉米植株性状的影响和增产效果[J].江苏农业科学,2020,48(17):100-103.