

化控处理时期对玉米植株-根系形态及产量的影响

张 帅 宁芳芳 黄收兵 王 璞 廖树华*

(中国农业大学 农学院,北京 100193)

摘 要 为进一步明确化控处理时期对玉米冠层、根系形态及产量的影响,2017 和 2018 年在吉林省西部开展 2 年大田试验,供试品种为‘富民 985’,2 年均喷施乙烯利类型的化控试剂;其中 2017 年种植密度为 7 万和 9 万株/hm²,在 8 和 10 叶期(T(8+10))、8 和 16 叶期(T(8+16))分别进行化控处理;2018 年在 8 叶期(T(8))、8 和 16 叶期(T(8+16))、16 叶期(T(16))分别进行化控处理,种植密度为 6 和 9 万株/hm²。结果表明:1)玉米增密后,倒伏率增加;化控处理可缩短植株节间长,降低株高和穗位高,降低倒伏率,其中 T(8+16)处理最为显著;2)化控处理后穗位以上叶片叶面积呈现下降趋势,其中 T(8+16)处理能够降低 15 %以上,从而提高透光率,利于下层叶片进行光合作用;3)化控处理增加玉米根系投影面积和最大扩展宽度,降低顶部夹角,使根系更加平展,增强抗倒伏能力,其中 T(8+16)处理效果较为理想;4)T(8+16)处理能增加玉米产量,其中 2017 年 T(8+16)处理与 CK 相比增加 6.5 %的产量。所以在玉米群体结构建成的 8~9 和 15~16 叶期,运用乙烯利类型化控试剂 2 次,能够改善穗上群体结构,增强茎秆和根系的抗倒伏能力,维持后期群体结构物质生产能力,提高玉米产量。

关键词 玉米; 密度; 化控; 倒伏; 冠层; 根系形态

中图分类号 S513

文章编号 1007-4333(2020)02-0001-11

文献标志码 A

Effects of chemical regulation on timing on maize plant-root morphology and yield

ZHANG Shuai, NING Fangfang, HUANG Shoubing, WANG Pu, LIAO Shuhua*

(College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract In order to study the effects of chemical regulation timing on canopy, root morphology and yield, a field experiment was conducted in the western of Jilin Province in 2017 and 2018. ‘Fumin 985’ was selected as the experimental material and ethephon type reagent was sprayed for chemical regulation. In 2017, chemical regulation were sprayed at the 8 and 10 leaf stage (T(8+10)), 8 and 16 leaf stage (T(8+16)), with the planting densities of 70 000 and 90 000 plants/hm²; In 2018, chemical regulation were at 8 leaf stage (T(8)), 8 and 16 leaf stage (T(8+16)), 16 leaf stage (T(16)), with the planting densities of 60 000 and 90 000 plants/hm². The results showed: 1) The lodging rate increased with the increased planting density. Chemical regulation reduced the lodging rate by reducing plant height, ear height and the internode length of the plant, particularly for T(8+16). 2) The leaf area of the leaves above the ear was decreased by chemical regulation; T(8+16) can reduce the leaf area by more than 15% compared to CK, so the light transmittance increased. 3) Chemical regulation can effectively increase root projected area and maximum expansion width and reduce the horizontal angle. In particular, T(8+16) regulation enhanced the lodging resistance to a great extent. 4) T(8+16) regulation increased the yield of maize, by up to 6.5% compared with CK. Therefore, the application of ethephon type reagent in 8–9 and 15–16 leaf stages during the establishment period of maize population structure can improve the population structure on the ear position and above the ear, enhance the lodging resistance of stem and root, and maintain the production capacity of population structure in the later growth period.

Keywords corn; density; chemical regulation; lodging; canopy; root morphology

收稿日期: 2019-04-12

基金项目: “十三五”国家重点研发项目(2017YFD0300603)

第一作者: 张帅,硕士研究生, E-mail: zhang-shuai@cau.edu.cn

通讯作者: 廖树华,副教授,主要从事作物栽培信息技术与作物模型研究, E-mail: sergzzl@cau.edu.cn

目前,增加种植密度是提高玉米产量的有效途径^[1-3],但是当种植密度超过一定范围时,玉米群体结构发生改变,株高、穗位高和节间长增加,茎秆变细^[4-7];气生根与总根数明显减少,且根系显著变小、变细,地上节根与地面的角度显著增大,耕层根系干重比例增加,深土层根系干重比例降低^[8-10]。以上原因使得玉米根和茎倒伏增加^[11],籽粒品质下降,限制玉米产量提高^[12]。同时,密植条件下根系与冠层竞争加剧,导致源库不协调,阻碍根冠之间进行物质转运与能量传递。为此,王新兵等^[13]研究发现通过深松改善表层土壤环境,促进根系下扎,减少耕层根系拥挤;魏珊珊等^[14]研究发现通过宽窄行种植调节株行距,改善群体冠层的光分布。但是在诸多群体结构优化的手段中化控措施具有较大的优势。也有研究表明,在发生倒伏时,5~9叶期喷施化控试剂,可明显缩短玉米节间长,降低株高,同时增加基部节间茎粗,增强玉米抗倒伏能力^[15-18],从而显著提高产量。但是在不发生倒伏的年份喷施化控试剂,由于化控试剂不利于玉米果穗发育反而可能会造成减产^[19-20],所以是否存在既防止倒伏又能够增加产量的化控时期尚不清楚。此外,玉米作为高秆型作

物,健壮的根系不仅能为地上部提供充足的水分和养分,还能够有力的支撑其高大的地上部,防止倒伏^[21-24]。但目前关于化控的研究多数集中在地上部分如植株形态的研究,对根系研究比较薄弱,仅了解化控处理可以增加根系活力、根长密度和根干重等^[25]。所以,化控技术在影响地上部分的同时是否能改变根系构型从而达到防倒伏的研究鲜有报道。本研究以玉米品种‘富民985’为试验材料,在不同生育时期进行化控处理,对植株-根系形态及产量等指标进行分析,旨在优化化学控调时期,为我国东北春玉米进一步增加种植密度,降低倒伏,实现丰产提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验地情况

试验于2017和2018年在吉林省农业科学院乾安实验站进行,试验站位于吉林省乾安县父字村(44°50′N,123°53′E,海拔146 m),属温带大陆性季风气候,种植制度为一年一熟,供试土壤质地为沙土。2017和2018年气象数据及0~40 cm基础地力,见表1和表2。

表1 2017和2018年气象数据

Table 1 The meteorological data for 2017 and 2018

年份 Year	全年积温/℃ Accumulated temperature	年平均气温/℃ Average temperature	年均降水量/mm Average rainfall	年日照时间/h Sunshine time
2017	3 488.2	7.1	472.2	2 774
2018	3 678.2	7.0	433.5	2 672

表2 2017和2018年试验地基础地力

Table 2 The soil basic fertility of the experiment field for 2017 and 2018

年份 Year	深度/cm Soil depth	有机质/(g/kg) Organic matter	全氮/(g/kg) Total N	速效磷/(mg/kg) Olsen-P	速效钾/(mg/kg) Availabe K
2017	0~20	46.04	1.14	12.26	220.75
	20~40	44.98	0.53	12.43	171.51
2018	0~20	17.75	1.01	11.55	135.87
	20~40	17.84	0.86	5.74	76.14

1.2 试验设计

试验品种为‘富民985’,宽窄行种植,宽行为60 cm,窄行为50 cm。采取裂区设计,化控处理

为主区,密度为副区。2017年种植密度为7万和9万株/hm²;2018年密度为6万和9万株/hm²。

化控试剂由乙烯利、芸苔素和萘乙酸钠等复

配而成,其中乙烯利为主要成分。2017 年化控处理设置为:CK,喷施清水为对照;T(8+10),8 叶期和 10 叶期各喷施 1.5 L/hm² 化控试剂;T(8+16),8 叶期和 16 叶期各喷施 1.5 L/hm² 化控试剂;2018 年化控处理设置为:CK,喷施清水为对照;T(8),8 叶期喷施 1.5 L/hm² 化控试剂;T(8+16),8 叶期和 16 叶期各喷施 1.5 L/hm² 化控试剂;T(16),16 叶期喷施 1.5 L/hm² 化控试剂。2017 年底肥施用量为 180 kg/hm² N, 75 kg/hm² P₂O₅, 90 kg/hm² K₂O,大口期用滴灌方式进行补施 100 kg/hm² N;2018 年底肥施用量为 107.36 kg/hm² N,161.04 kg/hm² P₂O₅, 134.20 kg/hm² K₂O,不补施肥料。2017 年 5 月 10 日播种,收获期为 9 月 27 日;2018 年 5 月 15

日播种,10 月 1 日收获。2 年试验播种后均在行间铺设滴灌带,后覆塑料薄膜。

1.3 测定项目及方法

形态指标测定:吐丝期每组处理随机取 3 株植株,测定株高、叶片叶面积、节间长。

灌浆中期根系性状:2018 年,在玉米灌浆中期每个处理选取 4 株位置不靠边行的植株,以玉米茎基部为中心,挖出一个直径为 30 cm,深度为 25 cm 的土块,用清水冲洗泥土,晾晒干后放置于 80 cm 正方形摄影棚(DEEP 牌,北京白光摄影器材公司)正中,然后用 SONY ILCE5100 相机对根系宽面与窄面分别拍照,后用 DIRT (Digital Image of Root Traits)软件对根系进行分析,最终获得根系构型性状^[26]。根系构型,见表 3。

表 3 根系构型性状介绍
Table 3 Introduction of root structure traits

根系构型性状 Root structure trait	定义 Defination	单位 Unit
根系投影面积	扫描后根系所有像素点的集合	m ²
根系最大扩展宽度	扫描后根系计算的最大宽度	cm
根系顶部夹角	根系在挖掘深度 10%处与水平面的夹角	(°)

产量、穗位高及倒伏率测定:在成熟期随机选取每个小区除保护行外 3 行,每行 5 m 内的所有植株进行测产,同时对穗位高以及倒伏率进行测量计算。

1.4 数据处理与分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2013 进行数据整理和作图,采用 IBM SPSS Statistics 24 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 化控处理时期对玉米冠层形态的影响

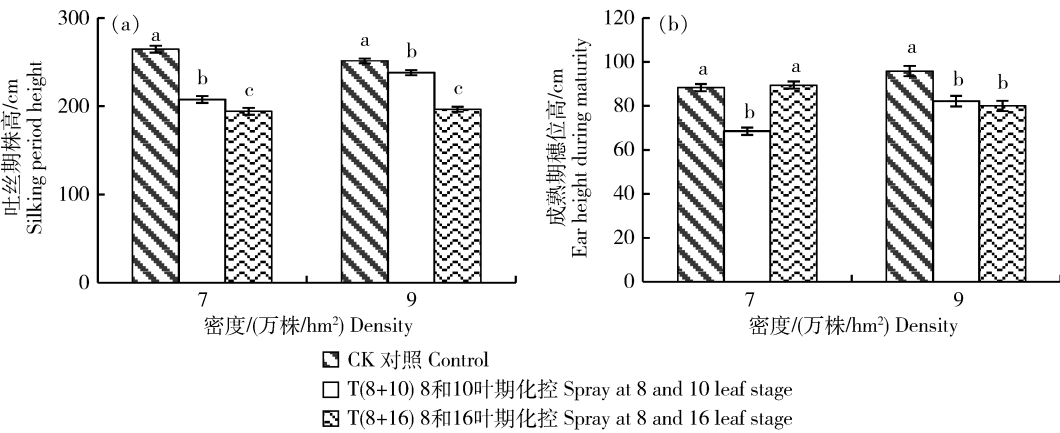
2.1.1 化控处理时期对玉米株高、穗位高的影响

图 1 和图 2 可知,除 2017 年 T(8+16)处理对 7 万株/hm² 穗位高和 2018 年 T(16)处理对株高、穗位高无显著影响外,其余化控处理均能显著降低株高、穗位高。2017 年,化控处理对密度为 7 万株/hm² 玉米株高影响程度大于 9 万株/hm²,最大降幅为 T(8+16)处理,与 CK 相比降幅为 26.56%。T(8+10)处理对 7 万株/hm² 的穗位高影响最大,降低了 22.5%。2018 年,T(8+16)处理能显著降

低玉米的株高且降幅最大,同 CK 相比,密度为 6 万和 9 万株/hm² 玉米的株高降低 8.0%和 7.3%;T(8)处理对玉米穗位高的影响程度最大,降低程度分别为 13%和 10%;T(16)处理对玉米株高、穗位高影响不显著。所以,T(8)或 T(8+10)处理能更好的降低穗位高度,T(8+16)处理对降低株高具有更显著的效果。

2.1.2 化控处理时期对单株叶面积的影响

‘富民 985’的穗位叶为第 12 片叶。由图 3 和图 4 可知,化控处理能显著减小穗位以上叶片的叶面积。2017 年化控处理后叶片叶面积呈现下降趋势。在 7 万和 9 万株/hm² 的密度下,与 CK 相比,T(8+10)处理降幅分别为 17.8%和 22.6%,T(8+16)处理降幅为 6.5%和 23.5%。与 2017 年表现相似,2018 年 3 种化控处理后均降低穗位叶以上叶片叶面积,最小降低幅度是 6 万株/hm² 的 T(16)处理,降幅为 3.2%,最大降幅是 9 万株/hm² 的 T(8)处理,为 17.5%。与低密度相比,可以看出在 9 万株/hm² 的种植密度下与化控试剂的协同使用能够更好的降低穗位叶以上叶片叶面积,提高透光率。



同一处理中标以不同小写字母表示在 0.05 水平上有显著差异。下同。
In the same treatment, different lowercase letters indicate significant differences at the 0.05 level. The same below.

图 1 2017 年化控处理时期对玉米株高(a)和穗位高(b)的影响

Fig. 1 Effect of chemical regulation timing on plant (a) and ear height (b) of maize in 2017

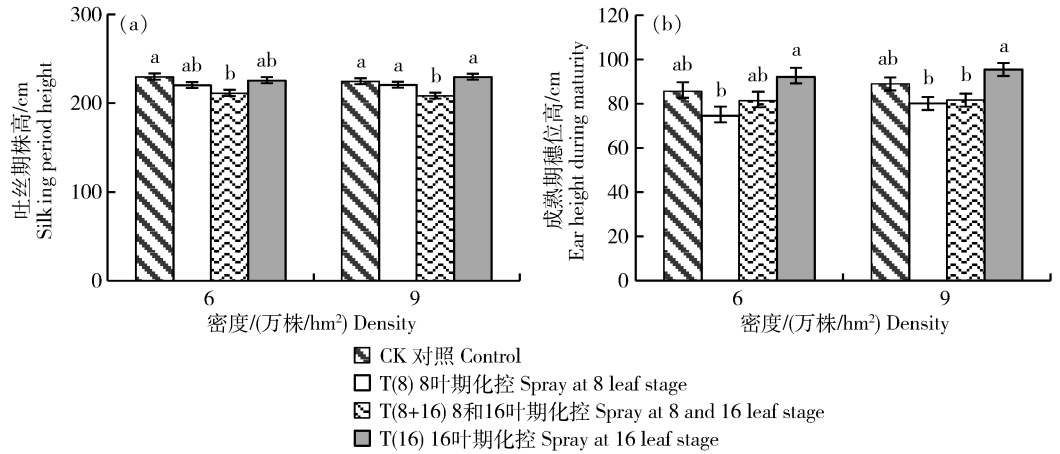


图 2 2018 年化控处理时期对玉米株高(a)和穗位高(b)的影响

Fig. 2 Effect of chemical regulation timing on plant (a) and ear height (b) of maize in 2018

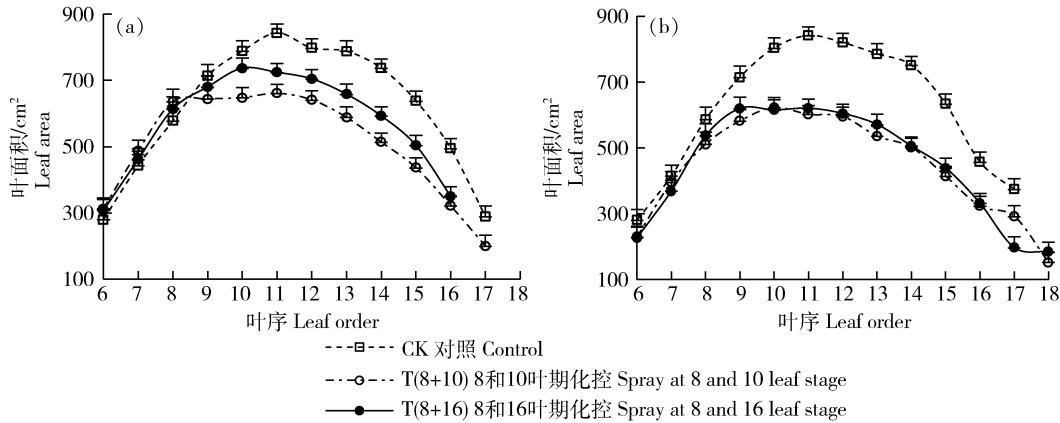


图 3 2017 年化控处理时期对密度 7 万株/hm² (a)和 9 万株/hm² (b)的单株玉米叶面积的影响

Fig. 3 Effect of chemical regulation timing on single leaf area of maize for 70 000 (a) and 90 000 (b) plants/hm² in 2017

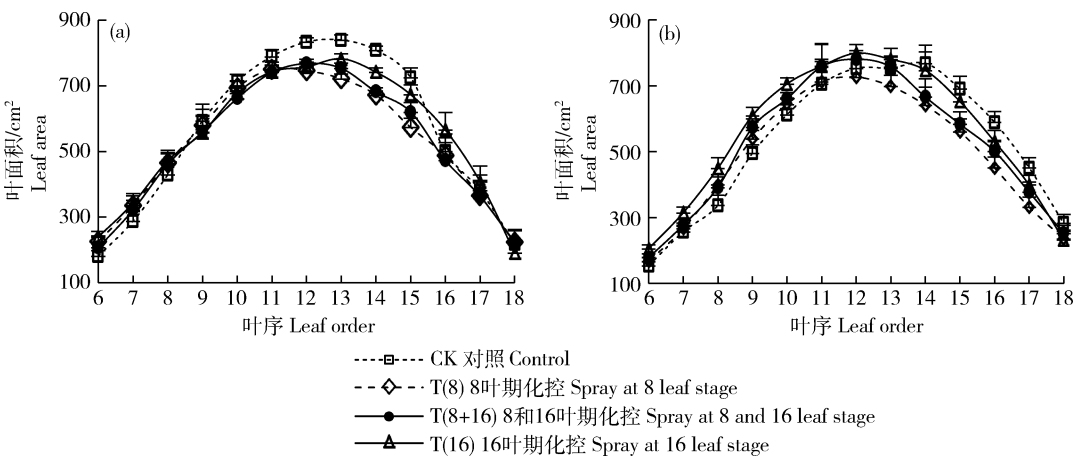


图 4 2018 年化控处理时期对密度 6 万株/hm² (a) 和 9 万株/hm² (b) 的单株玉米叶面积的影响

Fig. 4 Effect of chemical regulation timing on single leaf area of maize for 60 000 (a) and 90 000 (b) plants/hm² in 2018

2.1.3 化控处理时期对节间长的影响

‘富民 985’穗位节为第 12 节。由图 5 和图 6 可知,‘富民 985’的第 6~8 节节间长缓慢增加,第 9 和 10 节的节间长较小,第 10 节以上节间长稍有增加并趋于稳定不变。但 2 年的化控处理对节间长的影响不太一致。其中 2017 年 2 种化控处理均能缩短各个节间长度,显著降低玉米基部节间和穗位三节的节间长,第 6~11 节经 T(8+10)处理后节间长降幅大于 T(8+16)处理,第 12 节以上经

T(8+16)处理节间长降幅大于 T(8+10)处理。所以与 T(8+10)处理相比,T(8+16)处理对于穗位以下节间影响较小,对穗位以上节间影响更大。2018 年,T(8)和 T(8+16)2 个化控处理均能降低第 7~10 节的节间长,T(16)与 CK 比能增加穗位以下节间长度。2 个密度下,除 T(8)处理能增加顶端三节的节间长,T(8+16)和 T(16)均能显著降低该三节节间长,平均降低程度分别为 19.4% 和 24.2%。

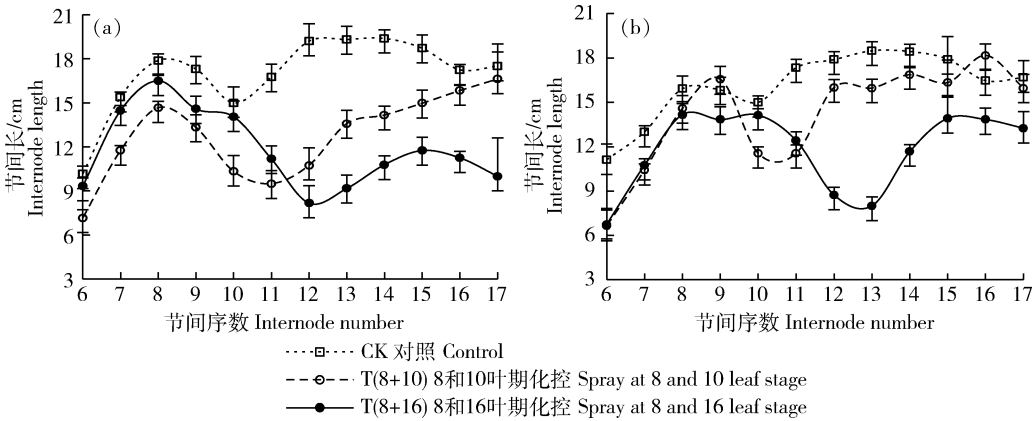


图 5 2017 年化控处理时期对 7 万株/hm² (a) 和 9 万株/hm² (b) 节间长的影响

Fig. 5 Effect of chemical regulation timing on internode length of maize for 70 000 (a) and 90 000 (b) plants/hm² in 2017

2.2 化控处理时期对玉米地上气生根形态的影响

2.2.1 化控处理时期对根系投影面积的影响

表 4 可知,随着密度的增加,根系平均投影面积显著降低。但是化控处理可以有效增加玉米根系宽面与窄面的投影面积,从而提高根系平均投影面积。

其中 T(8+16)处理能够将两密度下宽、窄面投影面积间显著差异变为不显著。在 6 万株/hm² 下,T(16)处理能最大程度增加根系平均投影面积,与 CK 相比高达 23.0%。且 3 种化控处理均对宽、窄面投影面积产生影响。在 9 万株/hm² 下,3 种化控

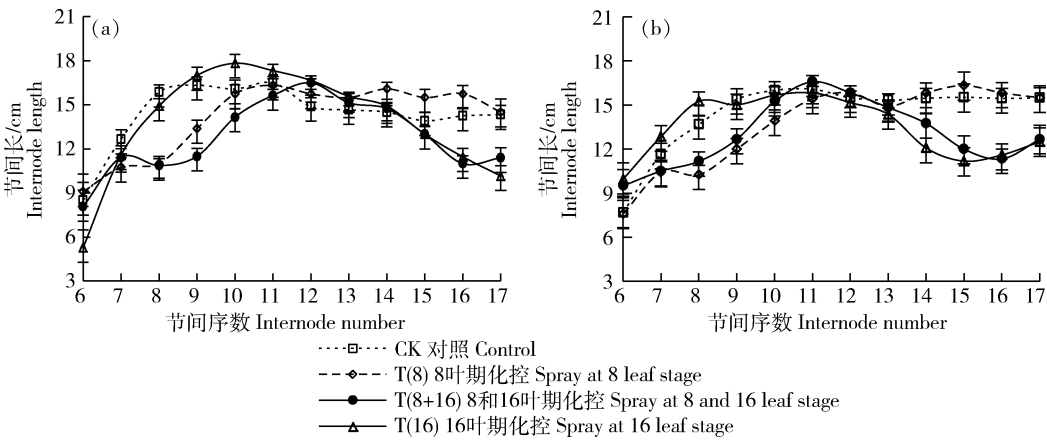


图 6 2018 年化控处理时期对 6 万株/hm² (a)和 9 万株/hm² (b)节间长的影响

Fig. 6 Effect of chemical regulation timing on internode length of maize for 60 000 (a) and 90 000 (b) plants/hm² in 2018

表 4 2018 年不同种植密度根系投影面积

Table 4 Projection area of roots of different densities in 2018 m²

根系投影面积 Projection area of roots	密度/ (万株/hm ²) Density	处理 Treatment				均值 Mean
		CK	T(8)	T(8+16)	T(16)	
宽窄面平均投影面积	6	3.12 b	3.19 b	3.48 ab	3.84 a	3.41
	9	2.01 b	2.37 a	2.40 a	2.45 a	2.31
均值		2.56*	2.78*	2.94*	3.14*	2.86
宽面投影面积	6	3.11 a	3.32 a	3.45 a	3.79 a	3.42
	9	2.08 a	2.42 a	2.46 a	2.51 a	2.35
均值		2.60*	2.87*	2.96	3.15*	2.89
窄面投影面积	6	3.13 a	3.06 a	3.51 a	3.89 a	3.41
	9	1.94 b	2.33 a	2.34 a	2.40 a	2.24
均值		2.53*	2.64*	2.93	3.25	2.82

注:CK,对照;T(8),8 叶期化控处理;T(8+16),8 和 16 叶期化控处理;T(16),16 叶期化控处理。小写字母表示同一密度不同化控处理间在 0.05 水平上有显著差异,*表示同一化控处理不同密度间在 0.05 水平上有显著差异。下同。

Note: CK, Control; T(8), Spray at 8 leaf stage; T(8+16), Spray at 8 and 16 leaf stage;T(16), Spray at 16 leaf stage. Lowercase letters indicate significant differences in the 0.05 level between different chemical regulation at the same density, and * indicates significant differences in the 0.05 level between different density at the same chemical regulation. The same below.

处理均能显著增加根系平均投影面积,同样 T(16)处理增加幅度最大,达到 22.1%。此时化控处理主要是通过增加窄面的根系投影面积来达到根系平均投影面积的增加。

2.2.2 化控处理时期对根系最大扩展宽度的影响

表 5 可知,在 6 万株/hm²,化控处理对根系平

均最大扩展宽度影响不显著,但是 T(8)与 T(8+16)处理均降低了根系平均最大扩展宽,降低幅度与 CK 相比为 1.9%和 1.8%。通过对宽、窄面的根系扩展宽度分析,T(8)处理对宽面与窄面均有影响,T(8+16)只是降低了窄面的最大扩展宽度。在 9 万株/hm²下 T(8)处理能显著降低根系平均最大扩

展宽度,降幅为 2.1%。但是 T(8+16)与 T(16)处理均增加根系的平均最大扩展宽度。同样对宽、窄面分析发现,T(8)处理均能降低宽面与窄面的最大扩展宽度,T(8+16)与 T(16)处理均增加宽面与窄面的最大扩展宽度。同时 T(8+16)处理能够将两密

度下宽、窄面根系最大扩展宽度显著差异变为不显著,说明 T(8+16)处理能够有效增加高密度下根系最大扩展宽度。因此 T(8)处理降低根系平均最大扩展宽,T(8+16)增加 9 万株/hm² 下的平均最大扩展宽度,T(16)处理能增加根系平均最大扩展宽。

表 5 2018 年不同种植密度根系最大扩展宽度
Table 5 Root maximum expansion width of different densities in 2018 cm

根系最大扩展宽度 Root maximum expansion width	密度/ (万株/hm ²) Density	处理 Treatment				均值 Mean
		CK	T(8)	T(8+16)	T(16)	
宽窄面平均最大扩展宽度	6	25.52 a	25.03 a	25.07 a	27.24 a	25.72
	9	20.30 ab	19.88 b	21.00 ab	22.57 a	20.94
均值		22.91*	22.46*	23.04	24.91*	23.33
宽面最大扩展宽度	6	26.64 a	26.61 a	29.30 a	28.32 a	27.72
	9	21.63 a	20.92 a	22.31 a	23.95 a	22.20
均值		24.14*	23.76*	25.81	26.14*	24.96
窄面最大扩展宽度	6	24.39 ab	23.46 ab	20.84 b	26.15 a	23.71
	9	18.98 a	18.85 a	19.69 a	21.19 a	19.68
均值		21.69*	21.15*	20.27	23.67*	21.70

2.2.3 化控处理时期对根系顶部夹角的影响

表 6 可知,化控处理均能降低根系平均顶部夹角,使根系平展。在低密度条件下,与 CK 相比,最大降幅为 T(8+16)。在高密度条件下,降低水平可达显著,T

(8)、T(8+16)与 T(16)与 CK 相比分别降低 36.1%、56.0%和 54.6%。可以看出 T(8+16)处理在 2 个密度下对根系影响程度均最大。并且 3 个化控处理均是对宽面与窄面产生影响来达到降低根系平均顶部夹角。

表 6 2018 年不同种植密度根系顶部夹角
Table 6 The root top angle of different densities in 2018 (°)

根系顶部夹角 Root top angle	密度/ (万株/hm ²) Density	处理 Treatment				均值 Mean
		CK	T(8)	T(8+16)	T(16)	
宽窄面平均根系顶部夹角	6	48.5 a	46.4 a	34.9 a	41.8 a	42.9
	9	49.3 a	31.5 b	21.7 b	22.4 b	31.2
均值		48.9	38.9	28.4	32.1	37.1
宽面根系顶部夹角	6	46.7 a	37.3 a	36.9 a	42.3 a	40.8
	9	54.8 a	29.2 b	16.5 b	18.0 b	29.6
均值		50.8	33.2	26.7	30.2	35.2
窄面根系顶部夹角	6	50.2 a	55.6 a	32.9 a	41.3 a	45.0
	9	43.7 a	33.8 a	26.8 a	26.8 a	32.8
均值		47.0	44.7	29.9	34.1	38.9

2.3 化控处理时期对倒伏率的影响

表 7 和表 8 可知,2 年试验倒伏率均随密度的升高而增加。化控处理后,除 2017 年 9 万株/hm² 的 T(8+10)处理,其余化控处理均能不同程度降低倒伏率。2017 年,在 7 万株/hm² 下无倒伏,9 万

株/hm²下 T(8+16)处理能将倒伏率降为 0。2018 年,在 6 万株/hm² 下,T(16)效果最好。在 9 万株/hm²下,T(8+16)处理同样能将倒伏率降为 0。因此,从 2 年试验结果可以看出,T(8+16)处理对于抗倒伏的作用更加显著。

表 7 2017 年化控处理时期对玉米倒伏率的影响

Table 7 Effects of chemical regulation timing on lodging rate of maize in 2017 %

密度/ (万株/hm ²) Density	处理 Treatment			均值 Mean
	CK	T(8+10)	T(8+16)	
7	0.00	0.0	0.0	0.00
9	2.10	2.4	0.0	1.50
均值	1.05	1.2	0.0	0.75

表 8 2018 年化控处理时期对玉米倒伏率的影响

Table 8 Effects of chemical regulation timing on lodging rate of maize in 2018 %

密度 (万株/hm ²) Density	处理 Treatment				均值 Mean
	CK	T(8)	T(8+16)	T(16)	
6	0.040	0.020	0.030	0.010	0.025
9	0.050	0.030	0.000	0.020	0.025
均值	0.045	0.025	0.015	0.015	0.025

2.4 化控处理时期对产量的影响

由表 9 和表 10 可知,化控处理后玉米产量虽然较 CK 没有达到显著水平,但是均有不同程度增加。2017 年密度为 9 万株/hm² 时,CK 处理产量低于 7 万株/hm²,这可能是由于高密度打破了最优的群体结构,倒伏率增加,造成一定程度的减产。2017 年 2 个密度下产量最高均为 T(8+16)。

与 CK 相比,T(8+16)处理在 7 万和 9 万株/hm² 时产量增幅分别为 5.7%和 7.3%。2018 年各化控处理下高密度产量均大于低密度。在密度 6 万株/hm² 下,经过 T(16)化控处理,产量增加幅度最大,是同等密度对照产量的 105.2%;在密度 9 万株/hm² 下,采用 T(8)化控处理时产量增幅最大,相对于 CK 增产 1.8%。

表 9 2017 年化控处理时期对玉米产量的影响

Table 9 The yield of maize under chemical regulation timing in 2017 t

密度/ (万株/hm ²) Density	处理 Treatment			均值 Mean
	CK	T(8+10)	T(8+16)	
7	14.67 a	14.68 a	15.50 a	14.95 a
9	14.09 a	15.02 a	15.12 a	14.74 a
均值	14.38 a	14.85 a	15.31 a	14.85

表 10 2018 年化控处理时期对玉米产量的影响

Table 10 The yield of maize under chemical regulation timing in 2018 t

密度/ (万株/hm ²) Density	处理 Treatment				均值 Mean
	CK	T(8)	T(8+16)	T(16)	
6	11.37 a	11.75 a	11.82 a	11.97 a	11.73 b
9	12.40 a	12.63 a	12.50 a	12.59 a	12.53 a
均值	11.89 a	12.19 a	12.16 a	12.28 a	12.13

3 讨论与结论

本研究表明不同化控处理时期在玉米生产中具有不同的效果,其中 T(8+16)处理能更好地优化群体结构,强源增库、既增加抗倒伏能力又能提高产量。

通过两年化控处理试验,发现前期化控 T(8)处理对玉米株高的降低效果不显著,对穗位高度影响却十分显著。这是因为前期化控处理能显著降低穗位节以下各节的长度,但是穗位节以上的节间会发生“补偿性”生长,最终导致株高没有显著变化,这与前人研究结果一致^[27]。所以前期化控 T(8)处理后玉米植株抗倒伏能力并不理想。前期与后期化控 T(8+10)、T(8+16)处理相结合的双重化控处理,均能显著降低株高、穗位高。这是因为前、后两次化控处理对各个节间均会产生影响,通过降低每个节间的长度最终达到株高、穗位高的降低。但经过 T(8+16)处理后,2017 和 2018 年节间长变化不一致,主要是因为 2017 年化控处理时较为干旱,生长缓慢,化控效果更为明显^[29],2018 年化控处理以后降雨较多、温度较高生长加速,降低了化控的抑制作用。2017 年试验结果表明,T(8+16)处理后倒伏、产量效果均优于 T(8+10)处理。这可能因为前者穗位节以上节间降低总和大于后者。这种形态的变化即茎秆库容减小,可改变同化物的转运方向,促进同化物向穗部转运,同时降低倒伏,提高产量^[28]。在后期进行化控 T(16)处理,虽然穗位节以上节间的长度会显著降低,但是玉米穗位节以下节间影响较小,与 CK 差异不显著,倒伏风险仍然存在。所以,T(8+16)处理对玉米的株高,穗位高以及节间长的影响效果较好,能够有效的降低倒伏发生^[30]。

化控处理对穗位及穗下叶片叶面积影响较小,但是能显著降低穗位叶以上叶片叶面积。根据已有

研究表明,穗位叶以上叶片叶面积减小,能够提高透光率,改善群体光分布,有利于下层叶片进行光合作用,同时降低上层叶片的生物量,优化物质分配比例,增强后期群体结构维持能力^[31]。

与地上部分相对,化控对根系的影响同样显著。2018 年结果表明,化控处理在不同密度下均能增加玉米根系投影面积。T(8+16)与 T(16)处理还能增加根系最大扩展宽度,从而扩大根系吸收面积^[21]。T(8+16)处理后顶部夹角最小,根型平展,倒伏最低,这与他人在玉米根系方面的研究结果相同,即玉米根系与地面夹角越小,植株的抗根倒伏能力越强^[32]。因此,T(8+16)处理可改善根系结构,增强抗倒伏能力,有效缓解了吉林省西部春玉米生育倒伏的问题。

研究表明,增加密度能提高产量。但 2017 年 7 万株/hm² 的产量大于 9 万株/hm² 的种植密度。这可能因为高密度种植打破了最优的群体结构,倒伏率增加,造成一定程度的减产。但是经过化控处理后产量均有不同程度增加。虽然 2018 年 T(16)处理产量大于 T(8+16)处理,这在很大程度上是因为 2018 年倒伏发生较轻微。所以,在生产中为了确保倒伏不发生,稳定产量,应选取 T(8+16)处理。

综上所述,高密度栽培条件下,通过 T(8+16)双重化控处理可以有效优化植株冠层、根系大小与结构,构造优良的株型结构以适应对光能的利用以及土壤养分水分资源的利用能力,提高群体耐密能力,改善作物的抗倒伏能力,进一步提高玉米产量。

参考文献 References

[1] Tokatlidis I S, Koutroubas S D. A review of maize hybrids' dependence on high plant populations and its implications for crop yield stability[J]. *Field Crops Research*, 2004, 88(2-3): 103-114

- [2] Tollenaar M T, Lee E A. Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize[J]. *Field Crops Research*, 2002, 75(2): 161-169
- [3] 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[J]. 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[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(17): 3562-3570 (in Chinese)
- [4] 李姝彤, 边大红, 何璐, 王东梅, 郑晓萌, 崔彦宏. 黄淮海夏玉米倒伏及化控抗倒技术研究进展[J]. 玉米科学, 2018, 26(3): 95-101
- Li S T, Bian D H, He L, Wang D M, Zheng X M, Cui Y H. Lodging characteristics of summer maize and chemical regulation research progresses preventing lodging in the north China plain[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2018, 26(3): 95-101 (in Chinese)
- [5] 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[J]. 作物学报, 2007(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[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007(10): 1688-1695 (in Chinese)
- [6] Boomsma C R, Santini J B, Tollenaar M, Vyn T J. Maize morphophysiological responses to intense crowding and low nitrogen availability: An analysis and review[J]. *Agronomy Journal*, 2009, 101(6): 1426
- [7] Liu T N, Gu L M, Dong S T, Zhang J W, Liu P, Zhao B. Optimum leaf removal increases canopy apparent photosynthesis, ^{13}C -photosynthate distribution and grain yield of maize crops grown at high density[J]. *Field Crops Research*, 2015, 170: 32-39
- [8] 陈延玲, 吴秋平, 陈晓超, 陈范骏, 张永杰, 李前, 袁力行, 米国华. 不同耐密性玉米品种的根系生长及其对种植密度的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1): 52-59
- Chen Y L, Wu Q P, Chen X C, Chen F J, Zhang Y J, Li Q, Yuan L X, Mi G H. Root growth and its response to increasing planting density in different maize hybrids[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(1): 52-59 (in Chinese)
- [9] 李宁, 翟志席, 李建民, 吴沛波, 段留生, 李召虎. 密度对不同株型的玉米农艺、根系性状及产量的影响[J]. 玉米科学, 2008, 16(5): 98-102
- Li N, Zhai Z X, Li J M, Wu P B, Duan L S, Li Z H. Effects of planting density on agricultural characters, root system characters and yield of different maize plant types[J]. *Maize Science*, 2008, 16(5): 98-102 (in Chinese)
- [10] Shao H, Xia T T, Wu D L, Chen F J, Mi G H. Root growth and root system architecture of field-grown maize in response to high planting density[J]. *Plant and Soil*, 2018, 430(1-2): 395-411
- [11] 郭书磊, 陈娜娜, 齐建双, 岳润清, 韩小花, 燕树锋, 卢彩霞, 傅晓雷, 郭新海, 铁双贵. 不同密度下玉米倒伏相关性状与产量的研究[J]. 玉米科学, 2018, 26(5): 71-77
- Guo S L, Chen N N, Qi J S, Yue R Q, Han X H, Yan S F, Lu C X, Fu X L, Guo X H, Tie S G. Study on the relationship between yield and lodging traits of maize under different planting densities[J]. *Maize Science*, 2018, 26(5): 71-77 (in Chinese)
- [12] 李树岩, 马玮, 彭记永, 陈忠民. 大喇叭口及灌浆期倒伏对夏玉米产量损失的研究[J]. 中国农业科学, 2015, 48(19): 3952-3964
- Li S Y, Ma W, Peng J Y, Chen Z M. Study on yield loss of summer maize due to lodging at the big flare stage and grain filling stage[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(19): 3952-3964 (in Chinese)
- [13] 王新兵, 侯海鹏, 周宝元, 孙雪芳, 马玮, 赵明. 条带深松对不同密度玉米群体根系空间分布的调节效应[J]. 作物学报, 2014, 40(12): 2136-2148
- Wang X B, Hou H P, Zhou B Y, Sun X F, Ma W, Zhao M. Effect of strip subsoiling on population root spatial distribution of maize under different planting densities[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(12): 2136-2148 (in Chinese)
- [14] 魏珊珊, 王祥宇, 董树亭. 株距配置对高产夏玉米冠层结构及籽粒灌浆特性的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 441-450
- Wei S S, Wang X Y, Dong S T. Effects of row spacing on canopy structure and grain-filling characteristics of high-yield summer maize[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(2): 441-450 (in Chinese)
- [15] 朴琳. 综合栽培措施对春玉米密植群体冠-根调节机制研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016
- Po L. Effects of integrated cultivation measures on shoot-root regulatory mechanisms in intensive spring maize[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016 (in Chinese)
- [16] Zhang Q, Zhang L Z, Evers J, Werf W V D, Zhang W Q, Duan L S. 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
- [17] 樊海潮, 顾万荣, 杨德光, 尉菊萍, 朴琳, 张倩, 张立国, 杨秀红. 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
- Fan H C, Gu W R, Yang D G, Yu J P, Po L, Zhang Q, Zhang L G, Yang X H. Effect of chemical regulators on physical and chemical properties and lodging resistance of spring maize stem in Northeast China[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(6): 909-919 (in Chinese)
- [18] 李军虎, 张翠锦, 杜义英, 霍立勇, 滕慧颖, 赵会薇. 化控条件下密度对夏玉米产量及产量性状的影响[J]. 玉米科学, 2014, 22(3): 72-76

- Li J H, Zhang C M, Du Y Y, Hu L Y, Teng H Y, Zhao H W. Effect of density on summer maize yield and yield traits under chemical regulation[J]. *Maize Science*, 2014, 22(3): 72-76 (in Chinese)
- [19] Ahmad I, Kamran M, Ali S, Bilegjargal B, Cai T, Ahmad S, Meng X P, Su W N, Liu T N, Han Q F. Uniconazole application strategies to improve lignin biosynthesis, lodging resistance and production of maize in semiarid regions[J]. *Field Crops Research*, 2018, 222: 66-77
- [20] 赵敏, 周淑新, 崔彦宏. 我国玉米生产中植物生长调节剂的应用研究[J]. 玉米科学, 2006(1): 127-131
- Zhao M, Zhou S X, Cui Y H. Research and application of plant growth regulators on maize in China[J]. *Maize Science*, 2006(1): 127-131 (in Chinese)
- [21] 齐文增, 刘惠惠, 李耕, 邵立杰, 王飞飞, 刘鹏, 董树亭, 张吉旺, 赵斌. 超高产夏玉米根系时空分布特性[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1): 69-76
- Qi W Z, Liu H H, Li G, Shao L J, Wang F F, Liu P, Dong S T, Zhang J W, Zhao B. Temporal and spatial distribution characteristics of super-high-yield summer maize root [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(1): 69-76 (in Chinese)
- [22] Herder G D, Isterdael G V, Beeckman T, Smet I D. The roots of a new green revolution[J]. *Trends in Plant Science*, 2010, 15(11): 600-607
- [23] Garnett T, Conn V, Kaiser B N. Root based approaches to improving nitrogen use efficiency in plants[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2009, 32(9): 1272-1283
- [24] Lynch J P. Steep, Cheap and deep: An ideotype to optimize water and N acquisition by maize root systems[J]. *Annals of Botany*, 2013, 112(2): 347-357
- [25] Kamran M, Su W N, Ahmad I, Meng X P, Cui W W, Zhang X D, Mou S W, Khan A, Han Q F, Liu T N. Application of paclobutrazol affect maize grain yield by regulating root morphological and physiological characteristics under a semi-arid region[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 4818
- [26] 赵龙飞. 耕层玉米根系构型遗传分析及其与氮效率性状的关系[D]. 北京: 中国农业大学, 2016
- Zhao L F. Genetic analysis of maize root system architecture in top soil and the relation with nitrogen use efficiency [D]. Beijing: China Agricultural University, 2016 (in Chinese)
- [27] 焦浏, 董志强, 高娇, 陈传晓, 卢霖, 董学瑞, 李光彦, 许艳丽. 双重化控对春玉米不同密度群体冠层结构的影响[J]. 玉米科学, 2014, 22(6): 51-58
- Jiao L, Dong Z Q, Gao J, Chen C X, Lu L, Dong X R, Li G Y, Xu Y L. Effect of plant growth regulators on canopy structure in spring maize under different plant densities[J]. *Maize Science*, 2014, 22(6): 51-58 (in Chinese)
- [28] 张超. 化控剂“密高”对玉米生长及产量性状的影响[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2012
- Zhang C. The effect of chemical regulation agent “MiGao” on the growth and yield traits of maize[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2012
- [29] 李亮, 孙宝成, 刘成, 唐怀君, 王天宇, 黎裕, 石云素, 宋燕春. 水分胁迫后玉米茎节变化与产量和抗旱性的关系研究[J]. 新疆农业科学, 2012, 49(1): 16-21
- Li L, Sun B C, Liu C, Tang H J, Wang T Y, Li Y, Shi Y S, Song Y C. Correlations between internode and yield in maize under drought stress [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2012, 49(1): 16-21 (in Chinese)
- [30] 袁园, 张怡明, 赵江, 郭丽, 张凤路. 喷施生长调节剂对夏玉米生长发育的影响[J]. 玉米科学, 2011, 19(3): 110-112
- Yuan Y, Zhang Y M, Zhao J, Guo L, Zhang F L. Effects of plant growth regulator on the growth and development of summer maize[J]. *Maize Science*, 2011, 19(3): 110-112 (in Chinese)
- [31] 徐田军, 吕天放, 陈传永, 刘月娥, 张译天, 刘秀芝, 赵久然, 王荣焕. 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
- Xu T J, Lv T F, Chen C Y, Liu Y E, Zhang Y T, Liu X Z, Zhao J R, Wang R H. Effects of plant density and plant growth regulator on stalk traits of maize and their regulation [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(4): 629-638 (in Chinese)
- [32] Mi G H, Chen F J, Yuan L X, Zhang F S. Chapter two: Ide type root system architecture for maize to achieve high yield and resource use efficiency in intensive cropping systems[J]. *Advances in Agronomy*, 2016, 139: 73

责任编辑: 吕晓梅