

覆膜滴灌条件下灌溉量和种植密度对玉米茎秆抗倒能力的影响

王 群^{1,2}, 薛 军², 张国强², 王 凤^{1,2}, 陈江鲁³, 谢瑞芝²,
明 博², 侯 鹏², 王克如², 李少昆^{1,2}

(1. 石河子大学农学院/新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室, 新疆 石河子 832000;

2. 中国农业科学院作物科学研究所/农业农村部作物生理生态重点实验室, 北京 100081;

3. 新疆生产建设兵团第六师农业科学研究所, 新疆 五家渠 831300)

摘 要: 设置两年灌溉量和种植密度互作试验, 研究不同密度下, 随灌溉量增加, 玉米茎秆抗折断力、植株高度、基部节间形态及机械强度等的变化趋势, 明确覆膜滴灌条件下灌溉量对密植玉米茎秆抗倒伏能力的影响。结果表明, 随密度增加, 茎秆抗倒能力呈下降趋势。不同密度下, 滴灌量变化对茎秆抗倒能力的影响不完全一致。密植条件下, 适当增加灌量(480 ~ 540 mm)可提高基部节间的物质积累和茎粗, 增强茎秆的机械强度; 继续增加滴灌量对茎秆的抗倒能力提升效果不显著。

关键词: 玉米; 滴灌量; 抗折断力; 机械强度; 种植密度

中图分类号: S513.047

文献标识码: A

Effect of Irrigation Amount and Plant Density on the Lodging Resistance of Maize Stalk under the Condition of Mulch Drip Irrigation

WANG Qun^{1,2}, XUE Jun², ZHANG Guo-qiang², WANG Feng^{1,2}, CHEN Jiang-lu³, XIE Rui-zhi²,
MING Bo², HOU Peng², WANG Ke-ru², LI Shao-kun^{1,2}

(1. Agricultural College, Shihezi University/Key Laboratory of Oasis Eco-Agriculture, Xinjiang Production and Construction Group, Shihezi 832003; 2. Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Crop Physiology and Ecology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081; 3. Research Institute of Agricultural Sciences, Division 6 of Xinjiang Production and Construction Group, Wujiaqu 831300, China)

Abstract: In order to clarify the effect of irrigation on the stalk lodging resistance of close planting maize under the conditions of mulch drip irrigation, two years experiments on the interaction between irrigation amount and planting density were tested, and the changes with the irrigation amount in maize stalks breaking force, plant height, basal internodes morphology and mechanical strength were studied under different planting densities. The results showed that the lodging resistance of stalks decreased with the increase of planting density. The effect of the change of drip irrigation amount under different densities on the stalk lodging resistance is not completely consistent. Under the condition of close planting, the appropriate increase in irrigation amount(480–540 mm) can improve the material accumulation of basal internodes and stalk diameter, and enhance the stalk mechanical strength; while increasing the irrigation amount continue, the effect of lodging resistance of stalk is not significant.

Key words: Maize; Drip irrigation; Breaking force; Mechanical strength; Planting density

录用日期: 2020-07-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0100206)、国家玉米产业技术体系项目(CARS-02-51)、中国农业科学院农业科技创新工程项目、新疆生产建设兵团第六师五家渠市科技项目(1703/1919)

作者简介: 王 群(1993-), 硕士, 主要从事作物高产生理生态研究。E-mail: wangqunsl@163.com

李少昆为本文通讯作者。E-mail: lishaokun@caas.cn

倒伏是玉米生产中普遍存在的问题。玉米倒伏限制了密度和产量的进一步提升,同时加大了机械收获难度,增加了收获损失,降低了收获效率。玉米倒伏是品种、环境和栽培措施共同作用的结果。生产中通常采用水肥和化学调节剂来调控玉米茎秆的发育,增强密植条件下植株的抗倒伏能力。在西北干旱地区,玉米种植主要以灌溉为主,膜下滴灌被广泛应用于缺水地区的作物生产中。随着水资源日益短缺与不断增加的粮食需求间的矛盾加深,探索提高作物产量与节约用水的相关研究越来越多^[1-4]。因此,通过增密增产来提高水分利用效率是该区玉米生产的发展方向。种植密度增加后玉米抗倒伏能力降低,田间倒伏风险加大。在密植条件下通过调整灌量来提高玉米茎秆的抗倒伏能力,有关结论尚不清楚。本研究在膜下滴灌条件下,通过设置不同的密度和灌溉量,研究不同处理下茎秆抗倒相关指标的变化,对密植滴灌条件下,提高玉米茎秆抗倒能

力,保证玉米高产抗倒和机械收获提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2017年和2019年在中国农业科学院作物科学研究所新疆生产建设兵团第六师奇台农场试验田(43°50' N, 89°46' E)开展,海拔高度为1 020 m, 1997~2017年生长季(4~10月份)内年平均降雨量为158.6 mm,日平均温度为18.8℃,日照时数为1 693.3 h,全年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温为3 499.5℃·d,年均无霜期为181.6 d。2017年和2019年4月17日至10月17日的降雨量和气温情况见图1。试验田土质为壤土,碱解氮含量为73.4 mg/kg,速效磷为59.1 mg/kg,速效钾为103.7 mg/kg,有机质含量为12.8 mg/kg, pH值为7.9。播前施用基肥N 69 kg/hm²、P₂O₅ 108 kg/hm²、K₂O 37.5 kg/hm²,生育期内随水滴灌施N肥276 kg/hm²。

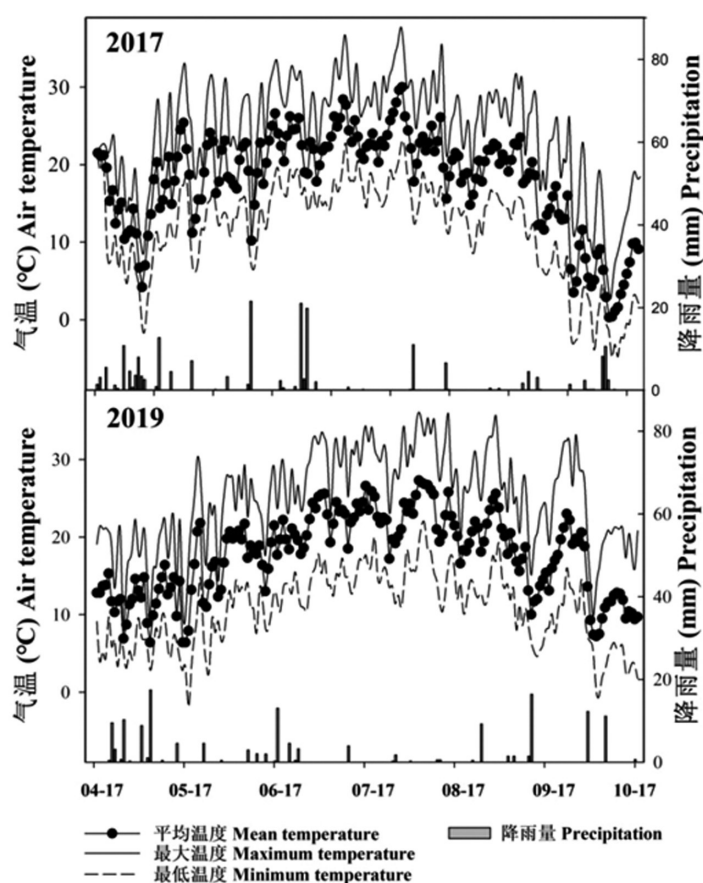


图1 试验地玉米生长季(4~10月)日降雨量和气温情况

Fig.1 Distribution of precipitation and air temperature at the experimental site during growth season of maize(Apr. to Oct.)

1.2 试验设计

参试品种为先玉335,采用裂区试验设计,密度为主区,灌溉量为副区。2017年设置5个不同的密

度处理,分别为7.5万、9.0万、10.5万、12.0万和13.5万株/hm²,3个灌溉量分别为360、480和600 mm; 2019年设置2个密度处理,分别为9.0万和12.0万

株/hm², 5个灌溉量分别为360、450、540、630和720 mm。两年均在4月20日覆膜播种,宽窄行配置(70 cm+40 cm),播种结束后立即滴水30 mm保证出苗,其余灌溉定额从大喇叭口期(12展叶)开始,每隔9 d左右灌溉一次,共分9次等量灌溉。全田采用滴灌水肥一体化分期施肥技术,各小区间相互分隔,无窜水窜肥发生。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 茎秆抗折断力

分别于各处理灌浆期(吐丝后20 d左右),使用YYD-1型茎秆强度仪在穗位处垂直于茎秆方向将植株推断,茎秆折断时仪器显示的力学数值即为抗折断力,记录茎秆发生折断的节位和高度。测定前将根部土壤夯实,避免发生根倒。如果有根倒发生,数据不进行记录和处理。

1.3.2 植株和基部节间形态

从地面水平剪取上述推倒的玉米植株,测量植株高度和穗位高度。用直尺测量基部第3、4、5节间长度(Length, L),用数显游标卡尺测量各节间中部长轴直径d₁、短轴直径d₂(mm),根据 $D=(d_1+d_2)/2$ 计算基部节间平均直径(Diameter, D)。

1.3.3 基部节间机械强度

测量完基部节间直径后,用YYD-1型茎秆强度仪,采用横截面积为1 mm²的测头,垂直于茎秆基部第3节间中部椭圆长轴方向匀速缓慢插入,读取穿透茎秆表皮的力学值即穿刺强度(Rind penetration strength, RPS);采用横截面积为1 cm²的测头垂直于第4节间中部椭圆长直径方向,记录茎秆表面刚好被压碎时的最大值即压碎强度(Crushing strength, CS);采用U型测头垂直于第5节间中部椭圆长直径方向,测定茎秆弯折时的最大力学值即弯曲强度

(Bending strength, BS)。

1.3.4 基部节间单位长度干重和含水率

测量完基部节间形态后,称量基部第3、4、5节间鲜重,将测定完机械强度的节间切开,置于烘箱中105℃杀青30 min后,80℃烘干至恒重,称量干重。计算单位长度干重(DWUL)=DW/L×1 000;计算基部节间含水率=(鲜重-干重)/鲜重×100%。

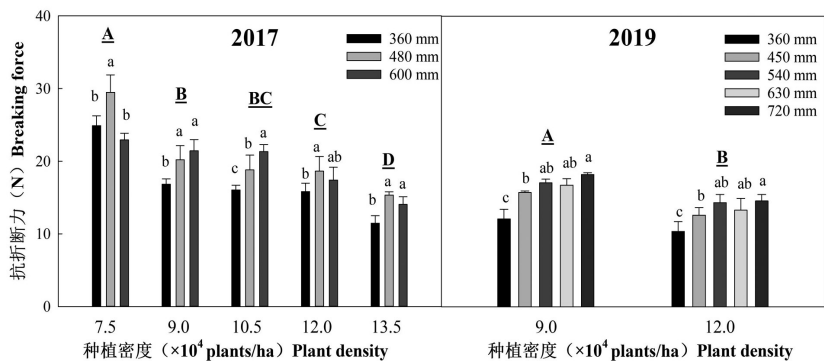
1.4 数据处理与分析

试验数据使用Excel 2010整理汇总,DPS进行统计分析,SigmaPlot 14.0绘图。

2 结果与分析

2.1 茎秆抗折断力

随种植密度增加,茎秆抗折断力呈下降趋势(图2)。2017年,7.5万株/hm²密度下,茎秆抗折断力在480 mm灌量下显著高于灌量为360 mm和600 mm的处理。9.0万~13.5万株/hm²范围内,随着灌溉量增加,茎秆抗折断力呈增加趋势,480 mm灌量下茎秆抗折断力显著高于360 mm处理,与600 mm处理无显著差异。2019年,两个密度下茎秆抗折断力均随灌量增加呈升高趋势。360 mm处理下茎秆抗折断力显著低于其他4个处理;450 mm处理显著低于630 mm和720 mm处理,与540 mm处理无显著差异;540、630和720 mm这3个处理的茎秆抗折力无显著差异。方差分析结果显示,两年的抗折断力在不同密度和不同滴灌量处理间的差异均达到显著或极显著水平,且2017年密度和灌量间的互作效应达到了极显著水平($F=6.1^{**}$),2019年互作效应未达到显著水平($F=0.8$)。相同处理下,2017年的茎秆抗折断力高于2019年。



注:不同小写字母代表相同种植密度下不同灌量下0.05水平差异显著;不同大写字母表示不同种植密度下0.05水平差异显著。

Note: Different lowercase letters indicate a significant difference in the 0.05 level among different irrigation amount of the same plant density; different capital letters with underline indicate a significant difference in the 0.05 level among different plant density.

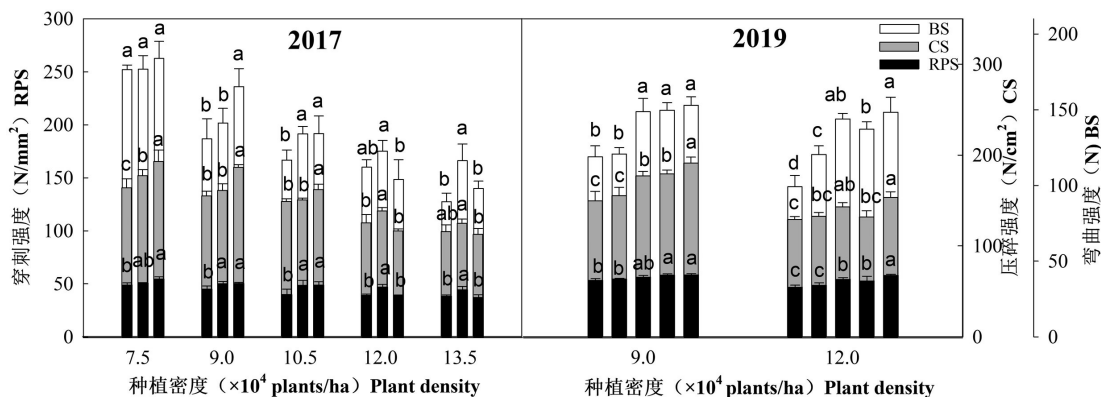
图2 不同种植密度下灌溉量对玉米茎秆抗折断力的影响

Fig.2 Effects of irrigation amount on stalk breaking force of maize under different planting densities

2.2 基部节间机械强度

随着种植密度增加,基部节间穿刺强度(RPS)、压碎强度(CS)和弯曲强度(BS)呈下降趋势(图3)。种植密度低于10.5万株/hm²时,茎秆基部节间RPS、CS

和BS随灌溉量增加逐渐升高;种植密度高于10.5万株/hm²时,灌溉量在360~630 mm范围内,随着灌溉量增加,节间RPS、CS和BS先升高后降低,灌溉量为720 mm时机械强度最高。



注:相同密度下,从左至右依次为不同灌量处理,2017年灌量依次为360、480和600 mm,2019年灌量依次为360、450、540、630和720 mm。不同小写字母表示相同密度不同灌量之间0.05水平差异显著。下同。

Note: At the same density, the irrigation amount from left to right is different, with 360 mm, 480 mm and 600 mm in 2017 and 360 mm, 450 mm, 540 mm, 630 mm and 720 mm in 2019. Different lowercase letters indicate a significant difference in the 0.05 level among different irrigation quantity of the same plant density. The same below.

图3 不同种植密度下灌溉量对玉米基部节间机械强度的影响

Fig.3 Effects of irrigation amount on mechanical strength of basal internodes of maize under different planting densities

2.3 玉米株高和穗位高

随滴灌量增加植株高度有升高趋势(图4),高滴灌量处理间差异未达到显著水平。2017年的9.0万株/hm²和13.5万株/hm²密度的株高在360 mm下显

著低于480和600 mm。穗位高度和植株高度的变化趋势基本一致,2017年的7.5万株/hm²密度下,480 mm的穗位显著低于其他灌量处理;12.0万株/hm²密度下,600 mm的穗位显著低于滴灌量处理。

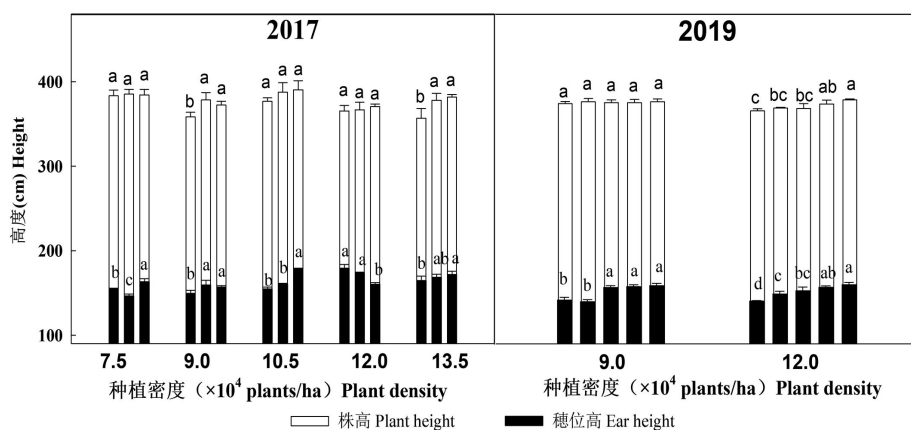


图4 不同种植密度下滴灌量对玉米株高和穗位高的影响

Fig.4 Effects of irrigation amount on plant height and ear height of maize under different planting densities

2.4 基部节间长度和直径

基部节间直径随密度增加呈降低趋势(图5)。2017年的9.0万株/hm²密度下随滴灌量增加基部节间直径有升高趋势,13.5万株/hm²密度下基部节间直径随滴灌量增加先升后降,480 mm的直径最大。2019年的360 mm和450 mm的基部节间直径显著

小于其他处理。7.5万株/hm²密度的360 mm节间长度显著小于480 mm,且与600 mm处理的差异未达到显著水平;9.0万株/hm²的360 mm处理的节间长度显著低于其他处理。12.0万株/hm²密度下,随着滴灌量增加,节间长度有增加趋势。

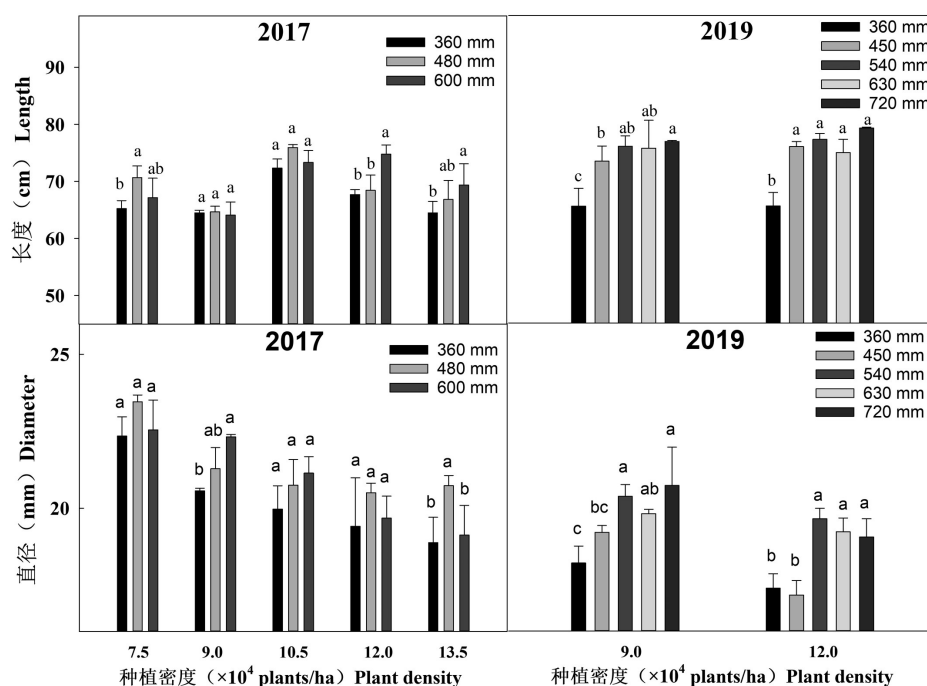


图5 不同种植密度下灌溉量对玉米基部节间长度和直径的影响

Fig.5 Effects of irrigation amount on length and diameter of basal internodes of maize under different planting densities

2.5 基部节间单位长度干重和含水率

随着种植密度增加,基部节间含水率升高,单位长度干重(DWUL)呈下降趋势(图6)。除2019年9.0万株/hm²的360 mm处理含水率显著低于其他4个灌量外,其余密度条件下不同灌量之间茎秆含水率无

显著差异。2017年相同密度下各灌量处理间DWUL差异未达到显著水平;2019年的9.0万株/hm²下720 mm处理的DWUL显著高于其他4个灌量处理,12.0万株/hm²下360 mm和450 mm处理的DWUL显著低于其他3个处理。

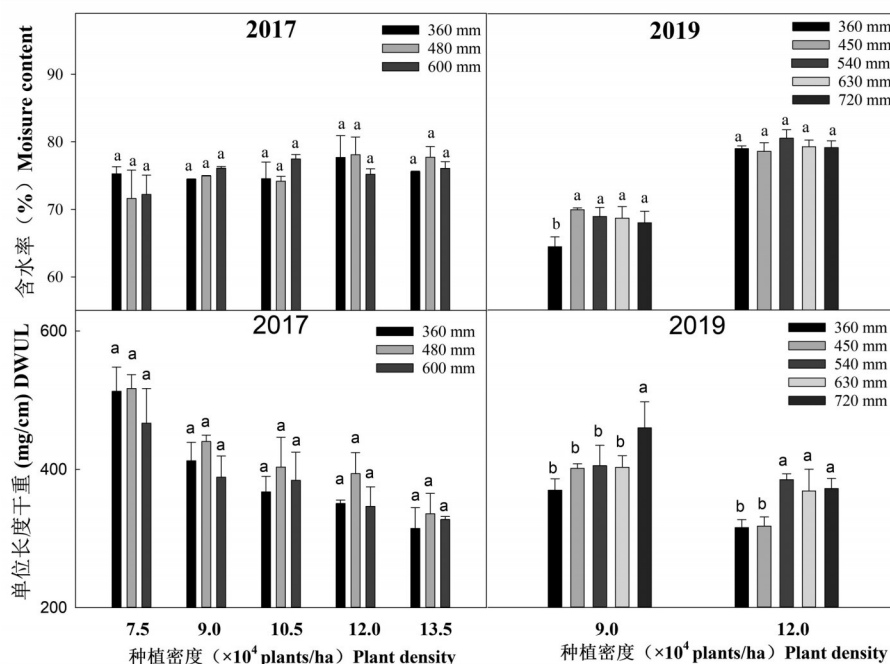


图6 不同种植密度下灌溉量对玉米基部节间含水率和单位长度干重(DWUL)的影响

Fig.6 Effects of irrigation amount on dry weight unit length(DWUL) and moisture content of basal internodes of maize under different planting densities

2.6 相关分析

茎秆抗折断力与株高、基部节间直径、第4节CS、第5节间BS和基部节间DWUL均呈显著正相关,其中基部节间的平均直径和基部节间DWUL与抗折断力的相关性均较高,其次是第5节间BS和第

4节间CS。穗位高度、第3节间RPS、基部节间长度和含水率与茎秆抗折断力的相关性均未达到显著水平。基部节间DWUL与直径、RPS、CS、BS的相关性均达到极显著水平。

表 1 各指标间相关系数
Table 1 Correlation coefficients between all indexes

指 标 Index	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
X1	1									
X2	0.573**	1								
X3	0.133	0.127	1							
X4	0.180	0.236	0.173	1						
X5	0.932**	0.499*	0.225	0.336	1					
X6	0.188	0.327	-0.389	0.157	0.167	1				
X7	0.632**	0.434*	-0.209	0.193	0.636**	0.733**	1			
X8	0.766**	0.511**	-0.120	0.146	0.756**	0.668**	0.856**	1		
X9	0.282	0.007	0.514**	-0.085	0.351	-0.618**	-0.319	-0.054	1	
X10	0.852**	0.487*	-0.154	0.265	0.805**	0.490*	0.765**	0.854**	-0.084	1

注: X1 表示抗折断力; X2 表示株高; X3 表示穗位高; X4 表示基部节间长度; X5 表示基部节间直径; X6 表示第3节间穿刺强度; X7 表示第4节间压碎强度; X8 表示第5节间弯曲强度; X9 表示基部节间含水率; X10 表示基部节间单位长度干重。*和**分别表示在0.05和0.01水平差异显著, n = 25。

Note: X1, breaking force; X2, plant height; X3, ear height; X4, length of basal internodes; X5, diameter of basal internodes; X6, RPS of third internode; X7, CS of fourth internode; X8, BS of fifth internode; X9, moisture content of basal internodes; X10, DWUL of basal internodes. * and ** indicate significance at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively, n = 25.

3 结论与讨论

玉米产量随种植密度增加而增加,达到一定密度后产量下降^[5-7]。种植密度增加后,穗位高和穗高系数增加,使玉米倒伏风险升高;高密度下的根倒率和茎折率均高于中低密度^[8];同时,茎秆机械强度和抗倒伏能力下降^[9,10],从而增加了机械收获难度,导致玉米产量降低。本试验以茎秆抗折断力作为评价不同处理下茎秆抗倒的综合指标,结果发现,随着种植密度增加,玉米茎秆抗折断力逐渐降低。增加种植密度后,适当增加滴灌量可以提高茎秆的抗倒能力。本研究表明,密度和灌量互作条件下茎粗对植株的抗倒伏能力影响最大,基部节间平均直径越大,茎秆抗折断力越大。本研究发现,种植密度高于12.0万株/hm²时,随滴灌量增加,基部节间直径、DWUL和机械强度呈先升后降的变化趋势;当滴灌量增加到480~540 mm时,以上各指标均达到最大值。李光辉^[11]研究发现,茎秆的穿刺强度也随着灌水量的增加呈先增加后减小的趋势。由此可推断,种植密度增加会导致玉米植株源库关系的改变。在

12.0万~13.5万株/hm²时,低灌量的植株雌穗发育较差,玉米产量增加表现为库限制型。李叶蓓等^[12]研究也指出,玉米灌浆期前干旱导致玉米产量降低的主要原因是穗粒数降低导致的库强不足。密度增加到12.0万~13.5万株/hm²时,480~540 mm的灌量处理下,植株干重达到相对较高水平;继续增加灌水后干物质累加效果不明显,基部节间DWUL无显著增加,抗倒能力无显著提高。株高和植株干重均随灌溉量增加呈升高趋势,滴灌量越大,株高越高,干重越大。在普通大田生产密度条件下,适当增加滴灌量有利于提高茎秆抗倒能力,过量灌溉对茎秆抗倒无积极作用。

参考文献:

[1] 熊黑钢,付金花,王凯龙. 基于熵权法的新疆奇台绿洲水资源承载力评价研究[J]. 中国生态农业学报,2012,20(10):1382-1387. Xiong H G, Fu J H, Wang K L. Evaluation of water resource carrying capacity of Qitai Oasis in Xinjiang by entropy method[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(10): 1382-1387. (in Chinese)

[2] 王 浩,马滇珍,张象明,等. 我国的用水效率与节水潜力[J]. 水利规划与设计,1998(Z1):37-45. Wang H, Ma D Z, Zhang X M, et al. Water efficiency and water sav-

- ing potential in China[J]. Water conservancy planning, 1998(Z1): 37-45. (in Chinese)
- [3] 鹿新高, 庞清江, 王伟锋, 等. 节水灌溉发展中存在的问题及应对策略探索[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(5): 98-100, 120.
- Lu X G, Pang Q J, Wang W F, et al. Development of water-saving irrigation problems and coping strategies[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(5): 98-100, 120. (in Chinese)
- [4] 程 帅, 豆明珠, 刘 照, 等. 三维GIS在灌区管理中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(6): 230-235.
- Cheng S, Dou M Z, Liu Z, et al. Application of 3D GIS in management of irrigation area[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2015, 26(6): 230-235. (in Chinese)
- [5] 张 新, 王振华, 张前进, 等. 种植密度对郑单21玉米产量及品质的影响[J]. 玉米科学, 2007, 15(Z1): 104-106.
- Zhang X, Wang Z H, Zhang Q J, et al. Effects of plant population on the grain yield and quality of Zhengdan 21 maize variety[J]. Journal of Maize Sciences, 2007, 15(Z1): 104-106. (in Chinese)
- [6] 王 楷, 王克如, 王永宏, 等. 密度对玉米产量($>15\ 000\ \text{kg}/\text{hm}^2$)及其产量构成因子的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(16): 3437-3445.
- Wang K, Wang K R, Wang Y H, et al. Effects of density on maize yield and yield components[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(16): 3437-3445. (in Chinese)
- [7] 马兴林, 关义新, 逢焕成, 等. 种植密度对3个玉米杂交种产量及品质的影响[J]. 玉米科学, 2005, 13(3): 84-86.
- Ma X L, Guan Y X, Pang H C, et al. Effects of plant population on the grain yield and quality of three maize hybrids[J]. Journal of Maize Sciences, 2005, 13(3): 84-86. (in Chinese)
- [8] Jia Q, Xu Y, Ali S, et al. Strategies of supplemental irrigation and modified planting densities to improve the root growth and lodging resistance of maize (*Zea mays* L.) under the ridge-furrow rainfall harvesting system[J]. Field Crops Research, 2018, 224: 48-59.
- [9] 程富丽, 杜 雄, 刘梦星, 等. 玉米倒伏及其对产量的影响[J]. 玉米科学, 2011, 19(1): 105-108.
- Cheng F L, Du X, Liu M X, et al. Lodging of summer maize and the effects on grain yield[J]. Journal of Maize Sciences, 2011, 19(1): 105-108. (in Chinese)
- [10] Albrecht K A, Martin M J, Russell W A, et al. Chemical and in vitro digestible dry matter composition of maize stalks after selection for stalk strength and stalk-rot resistance[J]. Crop Science, 1986, 26(5): 1051-1055.
- [11] 李光辉. 四川丘陵区玉米拔节期灌水对其生长发育、抗倒能力和产量的影响[D]. 四川农业大学硕士学位论文, 2012.
- [12] 李叶蓓, 陶洪斌, 王若男, 等. 干旱对玉米穗发育及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(4): 383-391.
- Li Y B, Tao H B, Wang R N, et al. Effect of drought on ear development and yield of maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(4): 383-391. (in Chinese)
- [13] 郭艳青, 朱玉玲, 刘 凯, 等. 水钾互作对高产夏玉米茎秆结构和功能的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(1): 143-149.
- Guo Y Q, Zhu Y L, Liu K, et al. Effects of water-potassium interaction on stalk structure and function of high-yield summer maize[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(1): 143-149. (in Chinese)

(责任编辑: 栾天宇)

(上接第123页)

- [10] 张 岩. 宏育236高产栽培配套技术研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2016.
- [11] 王云福, 杨 林, 贾维东, 等. 适宜子粒机收玉米新品种翔玉998的选育与推广[J]. 中国种业, 2017(10): 75-76.
- Wang Y F, Yang L, Jia W D, et al. Breeding and popularization of Xiangyu998, a new corn variety suitable for grain harvest[J]. Journal of Chinese Seed Industry, 2017(10): 75-76. (in Chinese)
- [12] 高 鑫, 高聚林, 于晓芳, 等. 高密植对不同玉米品种茎秆抗倒特性及产量的影响[J]. 玉米科学, 2012, 20(4): 69-73.
- Gao X, Gao J L, Yu X F, et al. Stalks lodging-resistance characteristics and yield traits among different maize varieties under high close planting[J]. Journal of Maize Sciences, 2012, 20(4): 69-73. (in Chinese)
- [13] 刘仲发. 群体光分布与玉米茎秆强度及抗倒伏能力的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
- [14] 王 昆. 施氮量和密度对玉米抗倒伏性和产量的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2016.
- [15] 叶德练, 王庆燕, 张珏石, 等. 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[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(6): 1-8.
- Ye D L, Wang Q Y, Zhang Y S, et al. Study of ethephon and nitrogen rate in regulating the basal internode characteristics and breaking resistance of maize[J]. Journal of China Agricultural University, 2015, 20(6): 1-8. (in Chinese)
- [16] Martin G C, Russell W A. Response of a maize synthetic to recurrent selection for stalk quality[J]. Crop Science, 1984, 24: 331-337.

(责任编辑: 姜媛媛)