

灌溉方式对玉米茎秆抗倒伏能力的影响

姚森崇^{1,2}, 张国强², 侯鹏², 明博², 王克如²,
谢瑞芝², 李少昆^{1,2}, 薛军^{1,2}

(1. 宁夏大学农学院, 银川 750021; 2. 中国农业科学院作物科学研究所/农业部作物生理生态重点实验室/
作物基因资源与育种全国重点实验室, 北京 100081)

摘要: 设置 $6.0 \times 10^4 \sim 13.5 \times 10^4$ 株/hm² 渐密的 6 个密度水平, 漫灌、沟灌、滴灌 3 种灌溉方式, 研究不同种植密度和灌溉方式对玉米植株形态、基部节间干物质积累、茎秆机械强度等变化趋势, 明确灌溉方式对玉米茎秆抗倒伏能力的影响。与漫灌和沟灌相比, 滴灌的茎秆抗折断力在吐丝期分别提高 11.1%~16.7% 和 8.7%~11.4%, 成熟期分别提高 14.3%~31.1% 和 8.2%~19.4%; 滴灌第 3 节间单位长度干重在吐丝期分别提高 7.6%~17.4% 和 6.6%~10.9%, 成熟期分别提高 15.0%~31.9% 和 8.4%~14.3%。滴灌可以通过提高茎秆基部节间直径和干物质积累以获得更高的茎秆强度来抵抗倒伏。

关键词: 玉米; 灌溉方式; 密度; 茎秆抗折断力

中图分类号: S513.01

文献标识码: A

Effect of Irrigation Pattern on Lodging Resistance of Maize Stalks

YAO Sen-chong^{1,2}, ZHANG Guo-qiang², HOU Peng², MING Bo², WANG Ke-ru²,
XIE Rui-zhi², LI Shao-kun^{1,2}, XUE Jun^{1,2}

(1. College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021;

2. Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences /

Key Laboratory of Crop Physiology and Ecology, Ministry of Agriculture /

National Key Laboratory of Crop Gene Resources and Breeding, Beijing 100081, China)

Abstract: Six density levels of $6.0 \times 10^4 \sim 13.5 \times 10^4$ plants/ha were set up, and three irrigation methods, including flood irrigation, furrow irrigation and drip irrigation, were used to study the changing trends of different planting densities and irrigation methods on maize plant morphology, dry matter accumulation at basal internodes, mechanical strength of stalks, and the effects of irrigation methods on lodging resistance of maize stalks were clarified. Compared with flood irrigation and furrow irrigation, the stem fracture resistance increased by 11.1%~16.7% and 8.7%~11.4% at silking stage, and increased by 14.3%~31.1% and 8.2%~19.4% at maturity stage, respectively. The dry weight per unit length of the third internode of drip irrigation increased by 7.6%~17.4% and 6.6%~10.9% at the silking stage, and increased by 15.0%~31.9% and 8.4%~14.3% at the maturity stage, respectively. Drip irrigation can resist lodging by increasing the diameter of the stem basal internodes and dry matter accumulation to obtain higher stem strength.

Key words: Maize; Irrigation method; Density; Stalk breaking force

倒伏是玉米常见的生产问题, 玉米在拔节期至

成熟期遇极端天气, 易出现茎折伏或根倒伏, 从而导致严重减产^[1-2]。东北春玉米在高温、多雨、大风等多重因素的作用下, 植株生长时更易发生倒伏^[3]。增加种植密度是提高玉米产量的重要途径^[4], 但高密度种植同时也会增加倒伏风险, 当种植密度过高, 玉米群体结构不合理, 通风透光性变差, 茎秆节间变长, 茎粗降低, 力学性状减弱, 容易发生倒伏^[5], 导致粮食产量和品质下降, 并增加收获成本^[6-7]。倒伏严

录用日期: 2024-05-07

基金项目: 中国农业科学院科技创新工程项目(CAAS-ZDRW202004)

作者简介: 姚森崇(1998-), 硕士, 主要从事作物高产生理生态研究。

E-mail: 1275237752@qq.com

薛军和李少昆为本文通信作者。

E-mail: xuejun5519@126.com

E-mail: lishaokun@caas.cn

重制约着密植玉米产量的增加。因此,提高密植玉米的抗倒伏能力是增密增产的关键。

玉米倒伏是品种、栽培措施和环境共同作用的结果^[8]。生产中通常结合水肥管理和化控来调控玉米的生长发育,增强密植条件下植株的抗倒伏能力。灌溉是提高和稳定作物产量的最有效方法之一。灌溉农田占农业总面积的16%,占农业总产量的40%^[9]。在中国,沟灌和漫灌具有成本低、不准确和灌溉用水效率低的特点,占灌溉总面积的97%,其中,东北平原是中国最重要的粮食产区,占玉米总产量的34%^[10]。灌溉方式也影响谷物倒伏,ROBINS和DOMINGO的一项研究报告称,在高等植物营养生长期早期采用喷灌灌水增加倒伏^[11]。目前,农户玉米灌溉还是以漫灌为主,玉米生产上还有沟灌、滴灌、膜下滴灌等灌溉方式。在补充灌溉区,不科学的灌溉管理是密植高产道路上的阻碍。因此,明确灌

溉方式对玉米抗倒伏能力的影响,对密植玉米增产具有重要意义。

本研究在两次施肥条件下,通过设置不同的密度和灌溉方式,研究增密群体下灌溉方式如何调控玉米抗倒伏能力,为玉米密植抗倒提供理论依据,从而促进玉米高产、稳产。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2022年和2023年在中国农业科学院作物科学研究所内蒙古自治区通辽市开鲁县基地开展,地处北纬43°37',东经121°23'。2022–2023年平均气温5.9℃,平均降雨量333.8 mm,无霜期148 d,日照时数为3 095 h,≥10℃积温为3 071℃·d。试验地前茬为玉米,土壤类型为沙壤土。

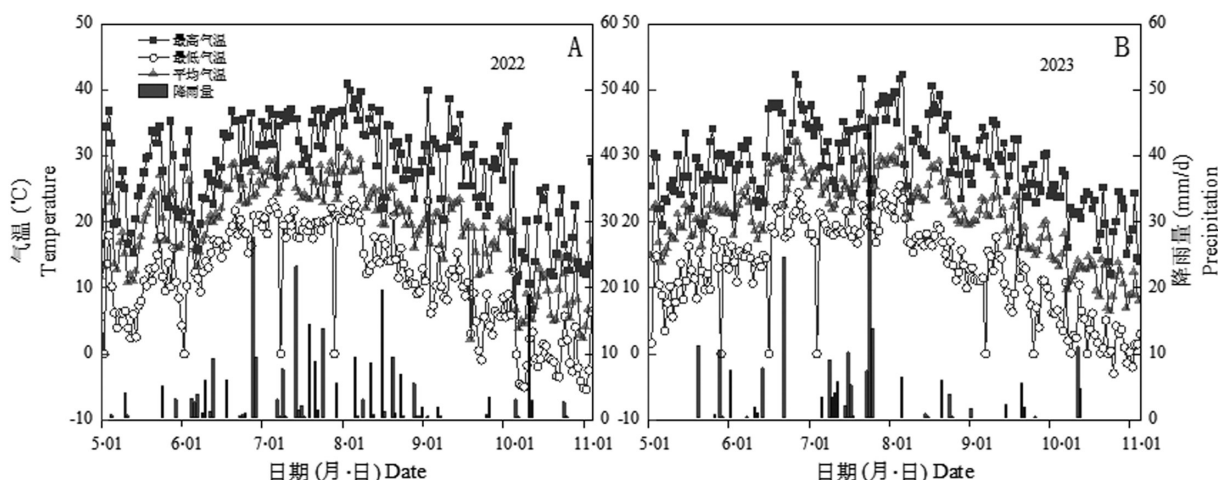


图1 2022年和2023年玉米生育期内的日降雨量和气温情况

Fig.1 Daily rainfall and temperature during the 2022 and 2023 maize growing season

1.2 试验设计

本试验以郑单958、龙星1号为试验材料,设置6个种植密度,分别为6.0万、7.5万、9.0万、10.5万、12.0万、13.5万株/hm²,设置漫灌(DR)、沟灌(FU)、滴灌(FL)3种灌溉方式。采用裂区试验设计,品种为主区,种植密度为副区,灌溉方式为副区。采用70+40 cm宽窄行种植模式,小区面积为88 m²,每个处理3次重复。所有处理的总施肥量和施肥方式均一致,N、P₂O₅、K₂O总量分别为360、180、180 kg/hm²,氮肥以尿素(含N 46%)为主,磷肥为过磷酸钙(含P₂O₅ 16%)为主,钾肥以硫酸钾(含K₂O 52%)为主。在播种期施入总肥量的50%,剩余肥料在6展叶期开沟追施。所有处理灌溉量和灌溉时期一致,播种后及时灌溉30 mm,9展叶灌溉量为45 mm,12展叶、吐丝期、吐

丝后10 d、吐丝后20 d的灌溉量均为60 mm,吐丝后30 d灌溉量为45 mm,总灌溉量为360 mm。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 茎秆抗折断力

在玉米吐丝期、灌浆期(吐丝后28 d)和生理成熟期,各小区随机选取代表性4株玉米。在玉米穗位处用YYD-1型茎强度仪(浙江托普仪器有限公司,中国杭州)持续增加垂直于茎秆的推力,直至茎秆折断,此时的力学值即茎秆抗折断力(Stalk breaking force, SBF)。测量前,将根部周围的土壤夯实,以避免根部倒伏。

1.3.2 植株形态

在玉米吐丝期、灌浆期(吐丝后28 d)和生理成熟期,各小区随机选取代表性4株玉米,测量株高、穗

位高、重心高度,同时测定取基部第3节间长度和直径,计算穗位系数、重心系数。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,测量支点到基部的距离为重心高度。

穗位系数=穗位高/株高 $\times 100\%$;

重心系数=重心/株高 $\times 100\%$ 。

1.3.3 基部节间穿刺强度

测量完基部节间形态后,用茎秆强度测定仪自带的横截面积为 1 mm^2 的探针测定基部第3节间的穿刺强度(Rind penetration strength, RPS),测定位于节间中部长轴面,测定时探针匀速缓慢插入,读取穿透茎秆皮层的力学值。

1.3.4 基部节间干物质

测量完RPS后,将基部第3节间切开,置于烘箱

中 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 杀青 30 min 后, $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒重,称量节间干重,计算单位长度干重。

单位长度干重(DWUL)=干重/长度 $\times 100\%$ 。

1.3.5 茎折率

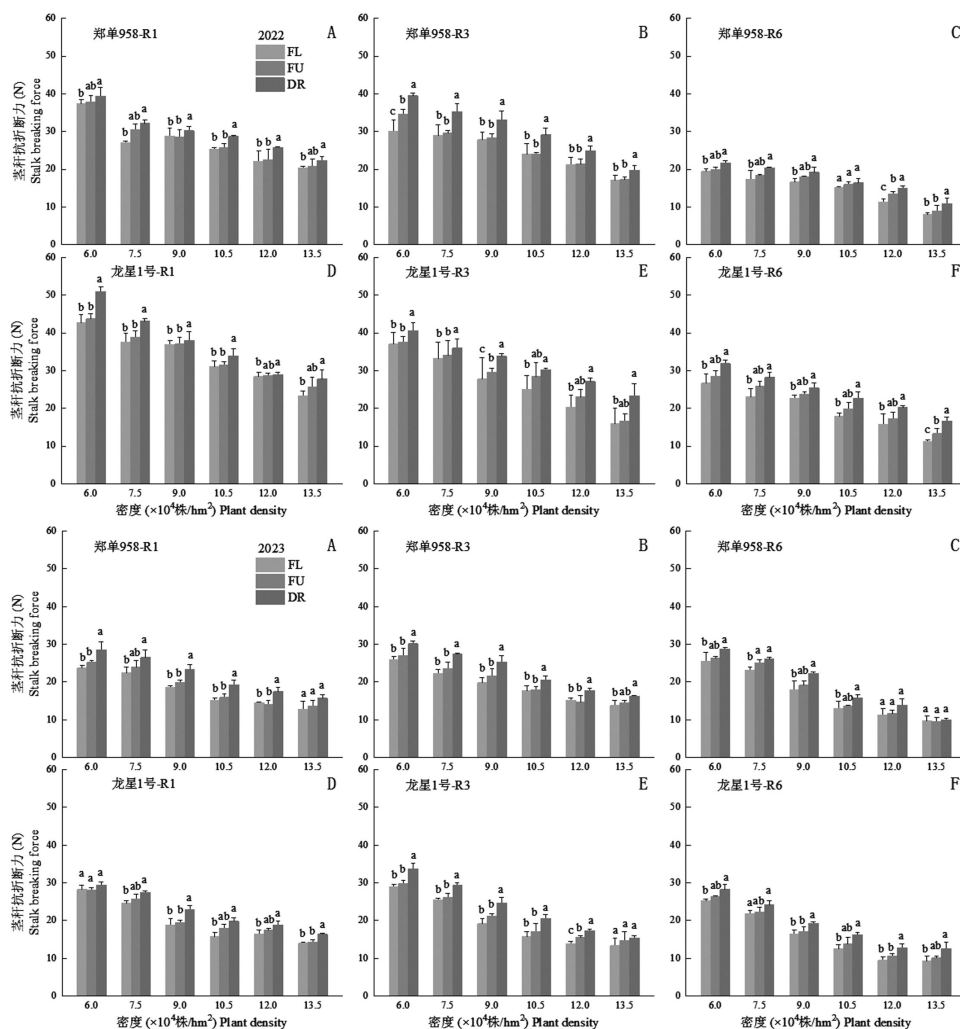
玉米生理成熟期,调查各小区内的总株数、穗下节间发生折断的株数,计算茎折率。田间茎折率=茎折株数/小区总株数 $\times 100\%$ 。2022年第1次发生大面积茎折的时期为吐丝后 10 d ,2023年第1次发生大面积茎折的时期为生理成熟前 25 d 。

1.4 数据统计与分析

试验数据使用Microsoft Excel 2019整理汇总,采用SPSS26.0进行统计分析,Origin2021绘图。

2 结果与分析

2.1 不同灌溉方式下玉米茎秆抗折断力比较



注:FL为漫灌;FU为沟灌;DR为滴灌。不同小写字母表示相同密度下不同灌溉方式之间0.05水平差异显著。下图同。

Note: FL, flood irrigation; FU, furrow irrigation; DR, drip irrigation. Different lowercase letters indicate significant differences at the 0.05 probability level under different irrigation methods in same plant density. The same below.

图2 不同灌溉方式下玉米茎秆抗折断力比较

Fig.2 Comparison of maize stalk breaking force under different irrigation methods

灌溉方式对玉米茎秆抗折断力(SBF)有显著影响(图2)。相同密度条件下,SBF趋势为滴灌(DR)>沟灌(FU)>漫灌(FL)。与漫灌相比,沟灌处理吐丝期、灌浆期、成熟期的SBF分别提高1.6%~6.8%、3.3%~6.8%、4.7%~10.8%,滴灌处理吐丝期、灌浆期、成熟期的SBF分别提高11.1%~16.7%、16.7%~24.5%、14.3%~31.1%。滴灌处理吐丝期、灌浆期、成熟期的SBF较沟灌处理分别提高8.7%~11.4%、11.5%~18.9%、8.2%~19.4%。灌浆期和成熟期的SBF均低于吐丝期,且随着生育期后移,滴灌SBF增幅越大。

随着种植密度的增加,SBF呈下降趋势。

2.2 不同灌溉方式下玉米植株农艺性状

与漫灌、沟灌相比,滴灌处理株高分别增加3.8、4.1 cm,穗位高降低0.7、0.7 cm,重心高降低0.9、0.7 cm,穗位系数分别降低0.8%、0.9%,重心系数分别降低0.7%、0.7%,滴灌处理穗位高、重心高、穗位系数与漫灌、沟灌相比无显著性差异(表1)。株高、穗位高和重心高随着种植密度的增加呈先升后降趋势,在10.5×10⁴株/hm²密度下达到峰值。

表1 不同灌溉方式下玉米植株农艺性状
Table 1 Agronomic traits of maize plants under different irrigation methods

品 种	密 度	处 理	株 高	穗位高	重心高(cm)	穗位系数(%)	重心系数(%)
Variety	(×10 ⁴ 株/hm ²)	Treatment	(cm)	(cm)	Height of gravity center	Panicle coefficient	Center of gravity coefficient
	Density		Plant height	Ear height			
郑单958	6.0	FL	289.2 b	135.7 a	99.8 a	46.9 a	34.5 a
		FU	290.0 ab	135.3 a	100.0 a	46.7 a	34.5 a
		DR	294.0 a	135.8 a	101.2 a	46.2 a	34.4 a
	7.5	FL	294.5 a	140.7 a	101.5 a	47.8 a	34.5 a
		FU	295.3 a	140.8 a	102.2 a	47.7 a	34.6 a
		DR	298.0 a	140.7 a	103.0 a	47.2 a	34.6 a
	9.0	FL	299.7 a	144.3 a	106.5 a	48.2 a	35.5 a
		FU	299.8 a	144.2 a	108.3 a	48.1 a	36.1 a
		DR	303.7 a	143.7 a	107.3 a	47.3 a	35.3 a
	10.5	FL	308.1 a	153.5 a	114.5 b	49.8 a	37.2 b
		FU	308.8 a	153.2 a	117.3 a	49.6 a	38.0 a
		DR	312.8 a	150.5 b	115.0 ab	48.1 b	36.8 b
	12.0	FL	303.3 b	149.5 a	111.0 a	49.3 a	36.6 a
		FU	304.8 ab	150.5 a	111.3 a	49.4 a	36.5 a
		DR	308.8 a	150.8 a	109.8 a	48.8 a	35.6 b
	13.5	FL	298.5 a	151.3 a	110.0 a	50.7 a	36.9 a
		FU	299.0 a	151.3 a	110.7 a	50.6 a	37.0 a
		DR	302.0 a	150.2 a	109.7 a	49.7 b	36.3 a
龙星1号	6.0	FL	299.2 ab	114.8 a	114.7 a	38.4 a	38.3 a
		FU	299.0 b	114.0 a	110.2 b	38.1 a	36.8 b
		DR	303.5 a	114.7 a	108.8 b	37.8 a	35.9 c
	7.5	FL	308.7 a	127.0 a	118.7 a	41.1 a	38.4 a
		FU	306.3 a	126.0 a	117.2 a	41.1 a	38.3 a
		DR	310.2 a	124.7 a	114.5 b	40.2 a	36.9 b
	9.0	FL	311.2 a	138.3 a	125.0 a	44.5 a	40.2 ab
		FU	309.8 a	136.7 a	125.5 a	44.1 ab	40.5 a
		DR	313.8 a	134.5 a	123.3 a	42.9 a	39.3 b
	10.5	FL	311.7 b	146.5 a	132.0 a	47.0 a	42.4 a
		FU	311.2 b	146.2 a	130.8 a	47.0 a	42.0 a
		DR	317.2 a	145.3 a	130.5 a	45.8 a	41.1 b
	12.0	FL	306.3 ab	141.1 a	125.2 a	46.1 a	40.9 a
		FU	304.2 b	142.0 a	123.8 a	46.7 a	40.7 a
		DR	309.0 a	140.7 a	125.2 a	45.5 a	40.5 a
	13.5	FL	297.8 ab	134.0 a	122.8 a	45.0 a	41.2 a
		FU	295.8 b	136.2 a	121.0 a	46.0 a	40.9 a
		DR	300.5 a	136.8 a	121.5 a	45.5 a	40.4 a

2.3 不同灌溉方式下基部节间形态比较

灌溉方式对玉米茎秆基部第3节间长度、直径有显著影响(图3),相同密度下,3种灌溉方式第3节间长度、直径趋势为DR>FU>FL。与漫灌相比,滴灌、沟灌处理第3节间长度分别提高4.8%~10.2%、1.4%~4.2%;滴灌较沟灌提高0.6%~7.2%。与漫灌

相比,滴灌、沟灌处理第3节间直径分别提高3.5%~6.9%、0.5%~2.2%;滴灌较沟灌提高2.6%~4.6%。随着密度的增加,第3节间长度呈先升高后降低趋势,在 10.5×10^4 株/hm²密度下达到最大;第3节间直径随着密度增加呈降低趋势。

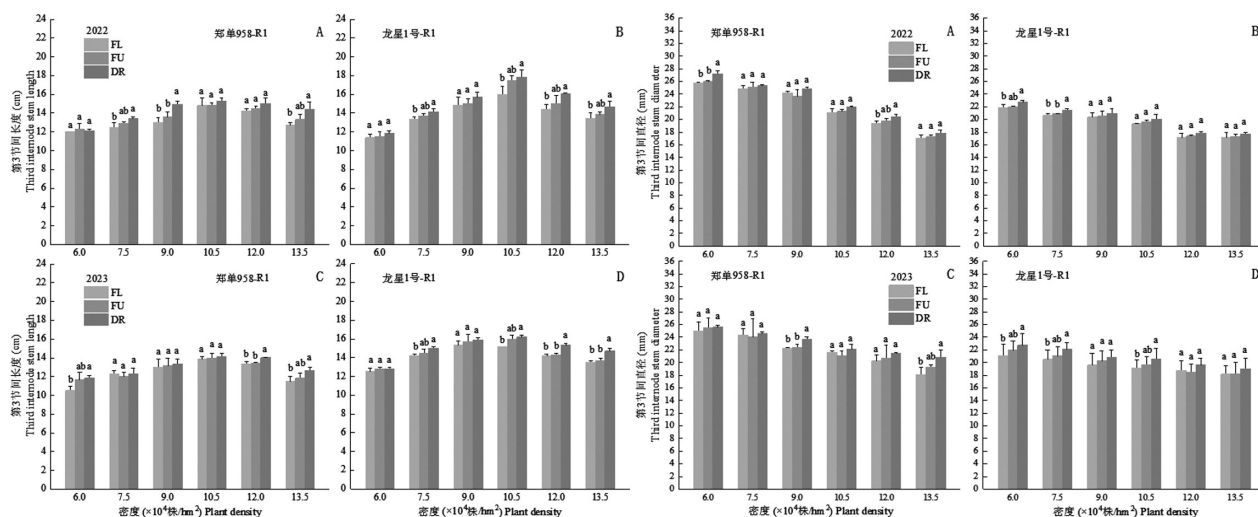


图3 不同灌溉方式下基部节间形态比较

Fig.3 Comparison of basal internode morphology under different irrigation methods

2.4 不同灌溉方式下基部节间穿刺强度比较

灌溉方式显著影响玉米茎秆基部第3节间穿刺强度(RPS)。相同密度下,RPS趋势为DR>FU>FL(图4、图5)。与漫灌相比,沟灌在吐丝期、灌浆期和成熟期的RPS分别提高0.9%~2.8%、2.2%~5.6%、

2.9%~12.9%,滴灌在吐丝期、灌浆期和成熟期的RPS分别提高8.5%~9.8%、7.2%~13.5%、9.0%~30.4%。滴灌在吐丝期、灌浆期和成熟期的RPS较沟灌分别提高6.2%~8.3%、4.9%~7.6%、5.4%~15.5%。灌浆期的RPS高于吐丝期和成熟期,且随

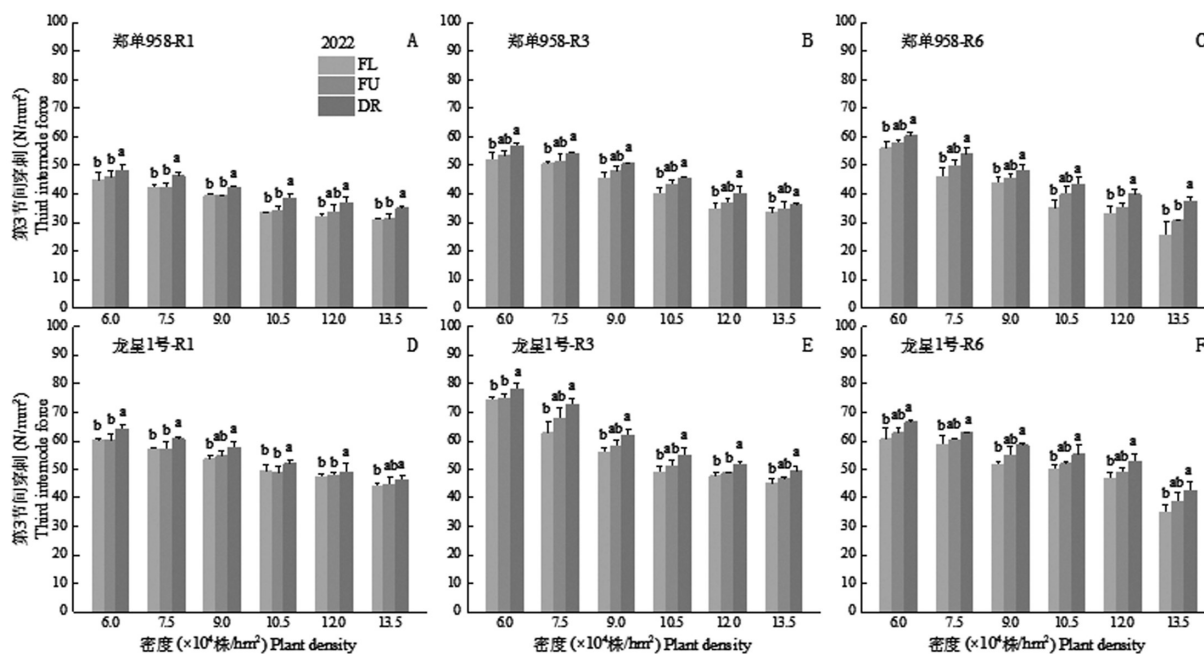


图4 2022年不同灌溉方式下基部节间穿刺强度比较

Fig.4 Comparison of basal internode rind penetration strength under different irrigation methods in 2022

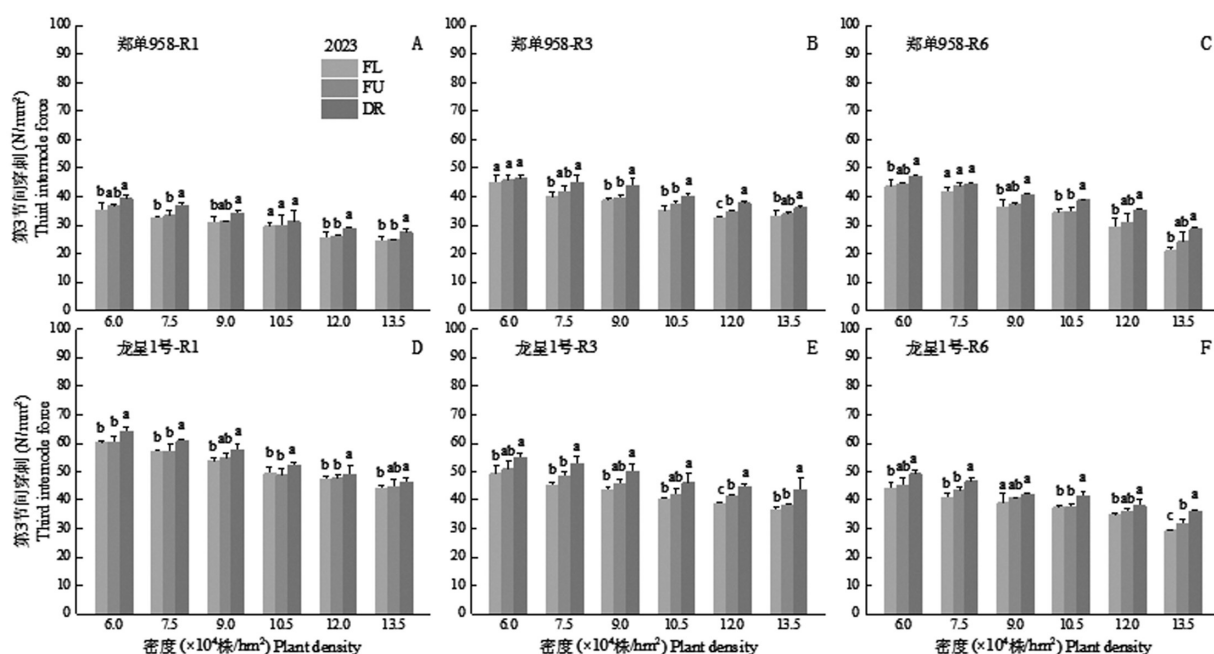


图5 2023年不同灌溉方式下基部节间穿刺强度比较

Fig.4 Comparison of basal internode rind penetration strength under different irrigation methods in 2023

着生育期后移,滴灌穿刺强度提升幅度越大。随着种植密度的增加,RPS呈下降趋势。

2.5 不同灌溉方式下玉米茎折率比较

相同密度下,茎折率趋势为FL>FU>DR(图6)。在两个研究年份中,与漫灌相比,滴灌、沟灌处理茎

折率分别降低14.3%~35.2%、3.7%~25.6%,滴灌茎折率较沟灌降低0~15.7%。2023年R6时期郑单958茎折率高于2022年R3时期。随着种植密度的增加,茎折率逐渐增加。

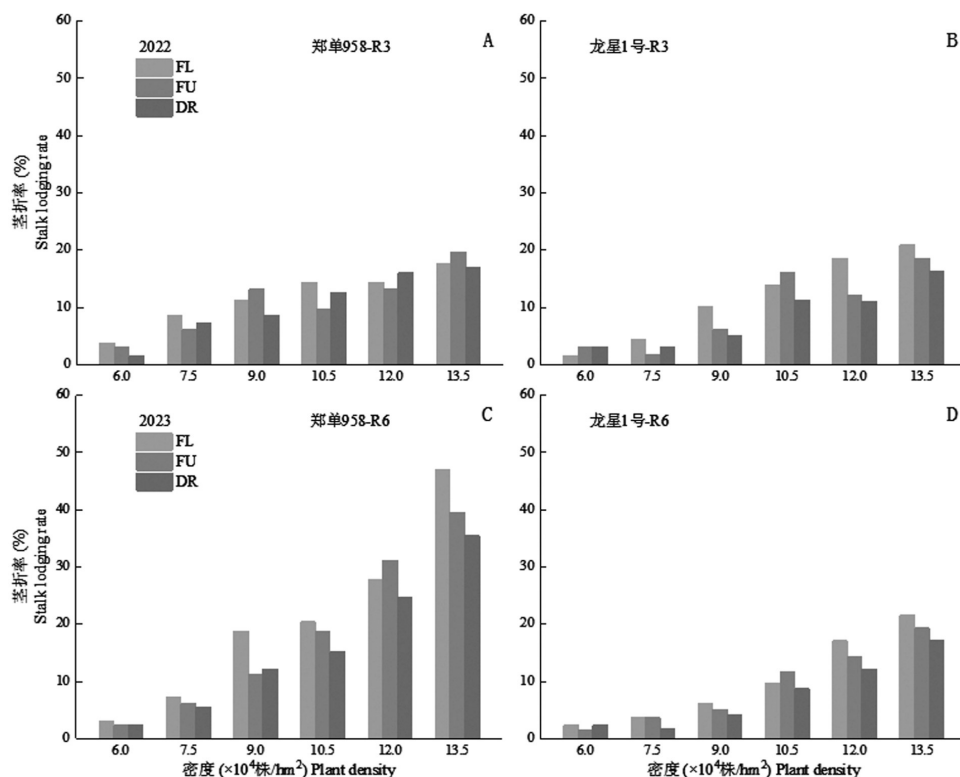


图6 不同灌溉方式下玉米茎折率比较

Fig.6 Comparison of maize stalk lodging rate under different irrigation methods

2.6 不同灌溉方式下基部节间单位长度干重比较

灌溉方式对玉米茎秆基部第3节间单位长度干重(DWUL)有显著影响,相同密度下,DWUL趋势为DR>FU>FL(图7)。与漫灌相比,沟灌在吐丝期、灌浆期和成熟期的DWUL分别提高0.9%~5.9%、2.0%~10.2%、4.2%~15.4%,滴灌在吐丝期、灌浆期和成熟期的DWUL分别提高7.6%~17.4%、7.6%~21.0%、15.0%~31.9%。滴灌在吐丝期、灌浆期和成熟期的DWUL较沟灌分别提高6.6%~10.9%、4.9%~17.7%、8.4%~14.3%。灌浆期的DWUL高于吐丝期和成熟期,且随着生育期后移,滴灌处理的DWUL

提升幅度越大。随着种植密度的增加,DWUL逐渐降低。

2.7 相关分析

相关分析表明,SBF与基部第3节间直径、DWUL、穿刺强度均呈极显著正相关,与穗位高、重心高、穗位系数、重心系数呈极显著负相关(表2)。基部第3节间DWUL与RPS呈极显著正相关,与基部节间茎长呈极显著负相关,穗位高与重心高无显著相关。茎折率与SBF、穗位高、穗位系数、直径、RPS、DWUL的相关性均达到极显著水平,与株高、重心高、重心系数、第3节间长度均未达到显著水平。

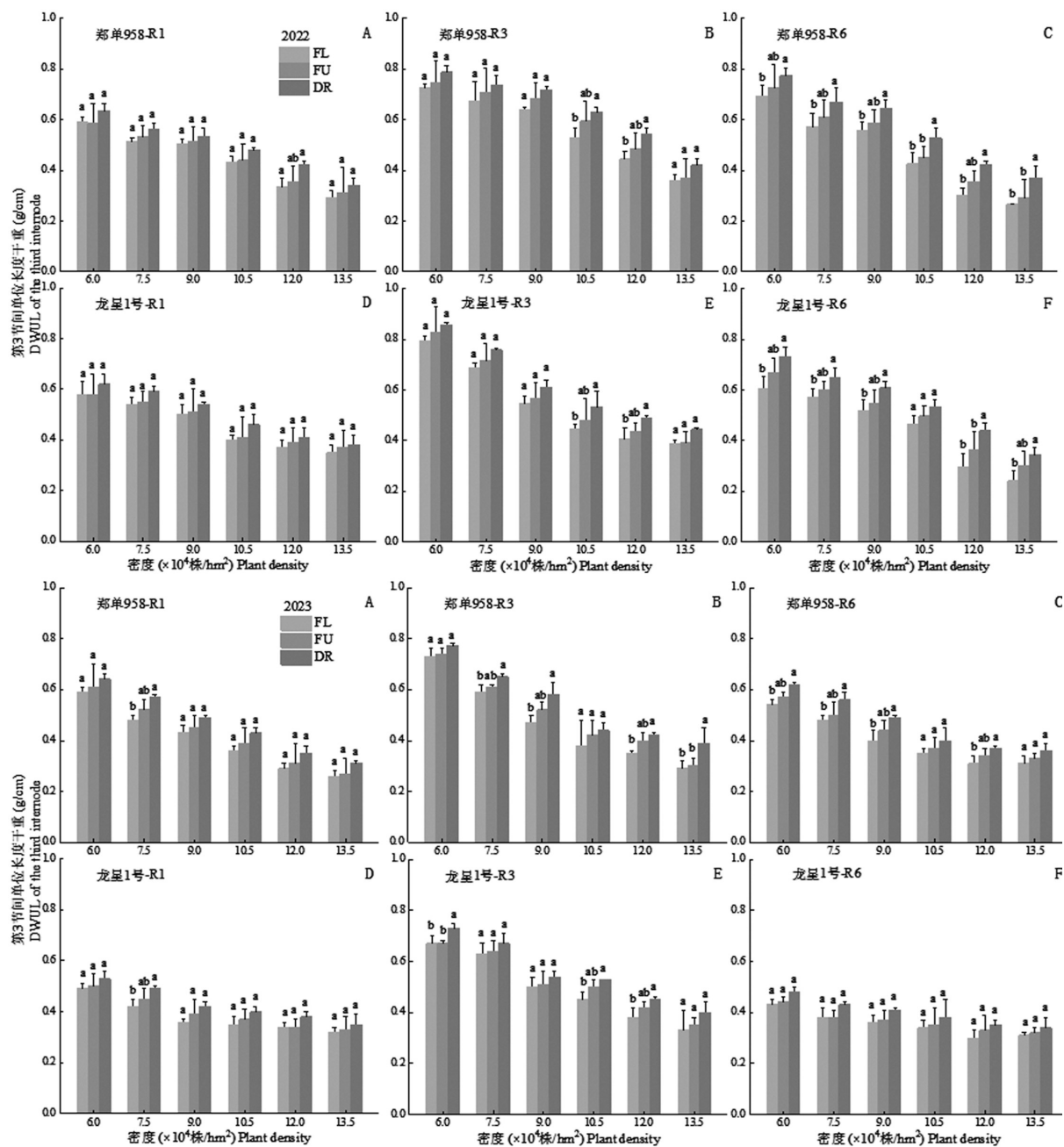


图7 不同灌溉方式下基部节间单位长度干重比较

Fig.7 Comparison of dry weight per unit length of basal internodes under different irrigation methods

表2 各指标间相关分析
Table 2 Correlation analysis between indicators

指 标 Index	茎折率 Lodging rate	茎秆抗折 断力(SBF) Stalk breaking force	株高 Plant height	穗位高 Ear height	重心高 Height of gravity center	穗位系数 Panicle coefficient	重心系数 Center of gravity coefficient	第3节间 长度 Third length	第3节间 直径 Third diameter	第3节间穿刺 强度(RPS) Third rind penetration strength
SBF	-0.751**									
株 高	-0.035	0.296*								
穗位高	0.499**	-0.396**	0.401**							
重心高	0.135	-0.356**	0.341**	-0.009						
穗位系数	0.561**	-0.553**	0.013	0.920**	-0.165					
重心系数	0.159	-0.489**	-0.021	-0.172	0.933**	-0.190				
第3节间长度	0.004	-0.156	0.577**	0.292*	0.686**	0.060	0.502**			
第3节间直径	-0.506**	0.541**	-0.245*	-0.179	-0.567**	-0.086	-0.514**	-0.469**		
第3节间RPS	-0.661**	0.926**	0.492**	-0.347**	-0.138	-0.580**	-0.331**	0.006	0.303**	
第3节间DWUL	-0.729**	0.888**	0.113	-0.299*	-0.451**	-0.367**	-0.522**	-0.319**	0.780**	0.760**

注:*和**分别表示在0.05和0.01水平下差异显著,n=72。
Note: * and ** indicate significance at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively, n=72.

2.8 不同灌溉方式下玉米产量比较

相同密度下,产量趋势为DR>FU>FL(图8)。在两个研究年份中,与漫灌处理相比,滴灌产量增加了7.8%~10.7%,沟灌产量在7.5×10⁴和12.0×10⁴株/hm²两个密度下分别降低0.2%和1.1%,在其他密度下,

沟灌产量增加1.3%~4.5%。滴灌处理产量较沟灌增加5.9%~9.6%。玉米产量随着种植密度的增加呈先上升后下降趋势,滴灌处理在10.5×10⁴株/hm²密度下达到最高产量17.3 t/hm²。

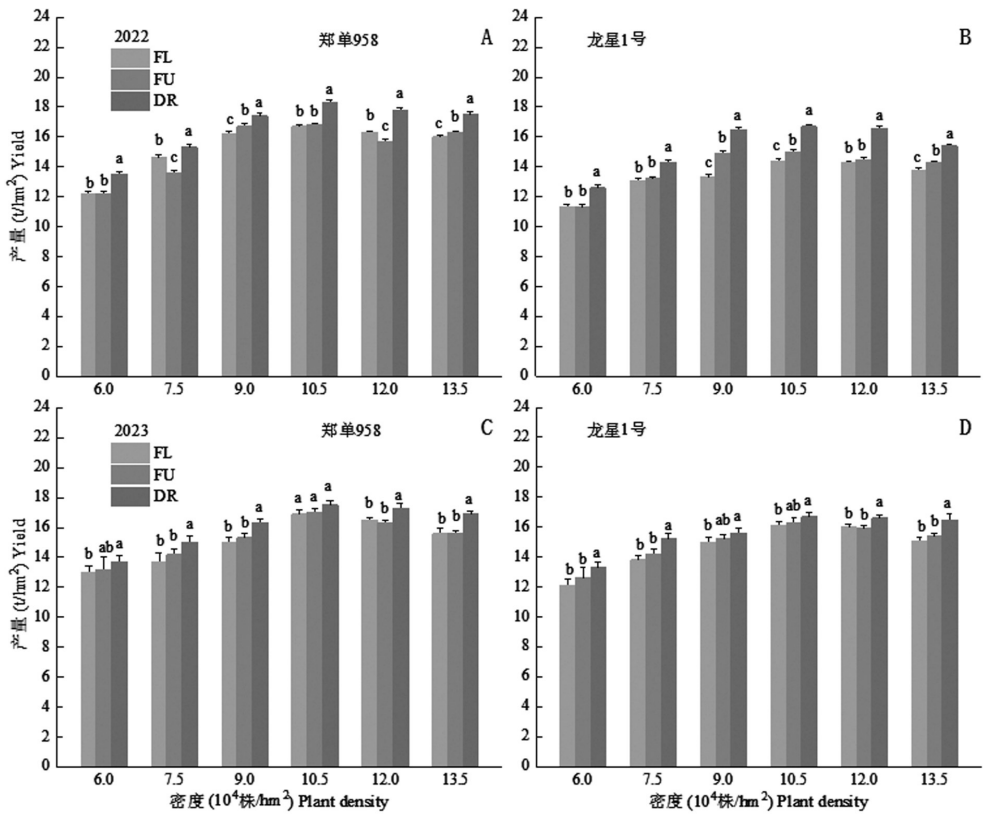


图8 不同灌溉方式下玉米产量比较

Fig.8 Comparison of maize yield under different irrigation methods

3 结论与讨论

增加种植密度是提高玉米产量的重要途径^[12],提高种植密度玉米倒伏风险增大。种植密度通过影响玉米品种的株高、穗位高、节间长度、茎粗、穿刺强度和抗折力等茎秆性状来影响其抗倒伏特性^[13-14]。茎秆抗折断力是综合了植株形态和茎秆力学强度来评价植株抗倒伏能力的综合指标^[15]。本研究表明,随着种植密度的增加,茎秆抗折断力下降。相较于漫灌和沟灌,滴灌处理茎秆抗折断力提高8.2%~31.1%;滴灌处理较漫灌、沟灌茎折率降低0~35.2%。

增密使玉米株高和穗位高增加^[16],穗下茎节增长、变细,茎粗系数和茎节干物质积累量下降,导致玉米茎秆中干物质积累和分配发生变化,茎秆发育质量变差,倒伏率增加^[17-18]。郑迎霞等^[19]研究表明,种植密度增大后,单位茎长、茎粗、干重和横截面积大幅度下降。本研究发现,随着密度的增加,玉米株高和穗位高先升高后降低^[20]。相关分析表明,株高与SBF呈显著正相关,穗位高、重心高、穗位系数、重心系数与SBF呈极显著负相关。本研究中滴灌玉米植株形态与漫灌、沟灌穗位高、重心高、穗位系数无显著性差异,说明滴灌并不是通过影响植株形态来影响茎秆抗倒伏能力。

以往研究穗下节间增长将不利于抗倒伏。有研究表明,茎粗对玉米抗倒伏能力影响最大,株高、穗位较高的品种可通过增加茎粗来增强其自身抗倒伏能力。基部节间单位长度干重较高的植株,节间穿刺强度也较强,玉米的抗倒伏能力越强^[21]。穿刺强度是判断茎秆强度的重要指标^[22]。随着种植密度的增加,茎秆穿刺强度减弱^[23-24]。进一步分析影响滴灌玉米茎秆抗折断力增强的因素可知,滴灌增加了基部第3节间长度和株高,但同时也增加了基部节间直径、DWUL、RPS。相关分析表明,基部第3节间长度与SBF、RPS均无显著相关性,基部第3节间直径、DWUL与SBF、RPS均呈极显著正相关。因此,滴灌通过增加基部节间直径和DWUL促进了基部节间的强化和茎秆的整体发育。滴灌显著增强了茎秆的穿刺强度,相较于漫灌和沟灌,滴灌玉米穿刺强度提高了4.9%~30.4%。穗位较高的植株通常有更高的茎秆强度^[25-26]。相较于漫灌、沟灌,滴灌处理在生育后期(灌浆期和成熟期)茎秆抗折断力、基部第3节间单位长度干重、穿刺强度较生育中期(吐丝期)提升幅度较大。这表明滴灌处理玉米中后期茎秆衰老较漫灌、沟灌缓慢。相关研究中干湿交替灌溉使土壤微生物活性得以提高,从而使土壤酶活性也相

对增强^[27-28]。与漫灌和沟灌不同,滴灌玉米窄行较宽行有更多的水分供应和聚集,宽窄行之间的干湿交替灌溉增强土壤微生物和酶活性的同时,增加了土壤通气性和含氧量^[29]。也有研究表明,局部灌溉造成土壤水分的时空变异,进而影响根系生长和分布,导致根系在水分有效区域大量增殖^[30-31],从而促使玉米根系捕获吸收养分的能力增强,这些可能是滴灌处理基部节间干物质积累增多、茎秆衰老缓慢的原因。综上,相同灌溉量条件下滴灌处理玉米在养分吸收和茎秆生长发育方面更占优势,所以茎秆强度也越强。合理灌溉是促进作物生长发育、增产增效的重要措施^[32]。滴灌处理玉米植株形态较漫灌、沟灌无显著性差异,主要通过基部节间茎粗和单位长度干物质积累的增加来抵消基部节间茎长增长等因素带来的负效应,从而显著提高穿刺强度和茎秆抗折断力来降低茎折率。因此,采用滴灌方式可以有效增强玉米茎秆力学特征,提高茎秆抗倒伏性能,从而在玉米密植条件下达到最高产量。

参考文献:

- [1] 勾玲,赵明,黄建军,等.玉米茎秆弯曲性能与抗倒能力的研究[J].作物学报,2008(4):653-661.
GOU L, ZHAO M, HUANG J J, et al. Bending mechanical properties of stalk and lodging-resistance of maize(*Zea mays* L.)[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(4): 653-661. (in Chinese)
- [2] XUE J, XIE R Z, ZHANG W F, et al. Research progress on reduced lodging of high-yield and-density maize[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(12): 2717-2725.
- [3] 张能,王春莲,黄雅妮,等.化控剂对不同耐密基因型玉米品种农艺性状的影响[J].种子,2019,38(8):141-144.
ZHANG N, WANG C L, HUANG Y N, et al. Effects of chemical control agents on agronomic characters of maize varieties with different density-tolerant genotypes[J]. Seed, 2019, 38(8): 141-144. (in Chinese)
- [4] ZHENG Z, WANG B, ZHOU C, et al. Local auxin biosynthesis regulates brace root angle and lodging resistance in maize[J]. The New Phytologist, 2023, 238(1): 142-154.
- [5] 孙宁,孟祥盟,边少锋,等.化学调控对春玉米茎秆形态特征和力学性状的影响[J].现代农业科技,2020(23):7-9.
SUN N, MENG X M, BIAN S F, et al. Effects of chemical regulator on morphological and mechanical properties of spring maize stalk[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2020(23): 7-9. (in Chinese)
- [6] ZUBER M S, KANG M S. Corn lodging slowed by sturdier stalks[J]. Crops and Soils, 1978, 18(1): 13-15.
- [7] 李树岩,马玮,彭记永,等.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, et al. 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)
- [8] BERRY P, GRIFFIN J, SYLVESTER-BRADLEY R, et al. Control-

- ling plant form through husbandry to minimise lodging in wheat[J]. Field Crops Research, 2000, 67(1): 59–81.
- [9] KANG S Z, HAO X M, DU T S, et al. Improving agricultural water productivity to ensure food security in China under changing environment: from research to practice[J]. Agricultural Water Management, 2017, 1795–1799.
- [10] YANG W U, BIAN S F, LIU Z M, et al. Drip irrigation incorporating water conservation measures: Effects on soil water – nitrogen utilization, root traits and grain production of spring maize in semi-arid areas[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2021, 20(12): 3127–3142.
- [11] ROBINS J S, DOMINGO C E. Moisture and nitrogen effects on irrigated spring wheat[J]. Agronomy Journal, 1962(54): 135–138.
- [12] 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.
- FAN H C, GU W R, YANG D G, et al. 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)
- [13] 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)
- [14] 豆 攀, 黄科程, 王兴龙, 等. 川中丘区不同玉米品种春、夏播茎秆抗倒特性研究[J]. 华北农学报, 2017, 32(4): 162–168.
- DOU P, HUANG K C, WANG X L, et al. Study on stalk lodging resistant of different maize varieties in spring and summer[J]. Acta Agriculturae Boreali-sinica, 2017, 32(4): 162–168. (in Chinese)
- [15] 边大红, 刘梦星, 牛海峰, 等. 施氮时期对黄淮海平原夏玉米茎秆发育及倒伏的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(12): 2294–2304.
- BIAN D H, LIU M X, NIU H F, et al. Effects of nitrogen application times on stem traits and lodging of summer maize (*Zea mays* L.) in the Huang-Huai-Hai Plain[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(12): 2294–2304. (in Chinese)
- [16] 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.
- GU L M, QIAO J F, ZHANG M W, et al. Effect of planting density on stalk characteristics and lodging-resistant capacity of different density-resistant summer maize varieties[J]. Journal of Maize Sciences, 2017, 25(5): 91–97. (in Chinese)
- [17] 勾 玲, 黄建军, 张 宾, 等. 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, et al. Effects of population density on stalk lodging resistant mechanism and agronomic characteristics of maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007(10): 1688–1695. (in Chinese)
- [18] 刘胜群, 宋凤斌, 朱先灿, 等. 玉米穗下节间与抗倒性相关的某些性状对增加密度的响应[J]. 土壤与作物, 2013, 2(4): 145–149.
- LIU S Q, SONG F B, ZHU X C, et al. Responses of internodes below ear and lodging-related traits to increased planting density in maize[J]. Soil and Crop, 2013, 2(4): 145–149. (in Chinese)
- [19] 郑迎霞, 陈 杜, 魏鹏程, 等. 种植密度对贵州春玉米茎秆抗倒伏性能及籽粒产量的影响[J]. 作物学报, 2021, 47(4): 738–751.
- ZHENG Y X, CHEN D, WEI P C, et al. Effects of planting density on lodging resistance and grain yield of spring maize stalks in Guizhou province[J]. Acta Agronomica Sinica, 2021, 47(4): 738–751. (in Chinese)
- [20] 徐 幸. 种植密度对不同株高玉米品种茎秆抗倒伏性能及产量的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2020.
- [21] 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.
- [22] 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.
- LIU Z M, GAI X D, LI B Y, et al. Effect of chemical regulators on lodging resistance and yield of spring maize under high density conditions[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2019, 44(6): 1–5. (in Chinese)
- [23] 张 勇, 徐田军, 吕天放, 等. 种植密度对夏播玉米茎秆质量和根系表型性状的影响[J]. 生物技术通报, 2023, 39(8): 70–79.
- ZHANG Y, XU T J, LÜ T F, et al. Effects of planting density on the stem quality and root phenotypic characters of summer sowing maize[J]. Biotechnology Bulletin, 2023, 39(8): 70–79. (in Chinese)
- [24] 尚 赏, 胡启国, 郭书亚, 等. 种植密度对黄淮海夏玉米品种茎折率与茎秆抗倒特性的影响[J]. 山西农业科学, 2018, 46(8): 1282–1285, 1290.
- SHANG S, HU Q G, GUO S Y, et al. Effect of planting density on lodging rate and stalk mechanics characteristic of summer maize varieties in the Huang-Huai-Hai region[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2018, 46(8): 1282–1285, 1290. (in Chinese)
- [25] MARTIN M J, RUSSELL W A. Correlated responses of yield and other agronomic traits to recurrent selection for stalk quality in a maize synthetic[J]. Crop Science, 1984, 24: 746–750.
- [26] BROTSALW D J, DARRSH L L, ZUBER M S, et al. Effect of proflificacy on grain yield and root and stalk strength in maize[J]. Crop Science, 1988, 28: 750–755.
- [27] 刘 艳, 孙文涛, 宫 亮, 等. 水分调控对水稻根际土壤及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(2): 98–100.
- LIU Y, SUN W T, GONG L, et al. Effects of water regulation on rhizosphere soils and yield of rice[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(2): 98–100. (in Chinese)
- [28] 徐国伟, 陆大克, 孙会忠, 等. 干湿交替灌溉与施氮耦合对水稻根际环境的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(4): 186–194.
- XU G W, LU D K, SUN H Z, et al. Effect of alternative wetting and drying irrigation and nitrogen coupling on rhizosphere environment of rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(4): 186–194. (in Chinese)
- [29] 陈 云, 刘 昆, 李婷婷, 等. 结实期干湿交替灌溉对水稻根系、产量和土壤的影响[J]. 中国水稻科学, 2022, 36(3): 269–277.
- CHEN Y, LIU K, LI T T, et al. Effects of alternate wetting and mod-

- erate soil drying irrigation on root traits, grain yield and soil properties in rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2022, 36(3): 269–277. (in Chinese)
- [30] BENJAMIN J G, NIELSEN D C. Water deficit effects on root distribution of soybean, field pea and chickpea[J]. *Field Crops Research*, 2005, 97(2): 248–253.
- [31] SONGSRI P, JOGLOY S, VORASOOT N, et al. Root distribution of drought-resistant peanut genotypes in response to drought[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2008, 194(2): 92–103.
- [32] 董娟,邢立文,崔宁博,等.膜下滴灌条件下土壤水势对糯玉米生长及灌溉水利用效率的影响[J].*河南农业大学学报*,2020,54(1):19–23.
- DONG J, XING L W, CUI N B, et al. Effects of soil water potential under drip irrigation with mulch on maize growth and use efficiency of irrigation water[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2020, 54(1): 19–23. (in Chinese)
- (责任编辑:栾天宇)

(上接第65页)

- [27] 赵永长,宋文静,董建新,等.黄腐酸钾对干旱胁迫下烤烟幼苗活性氧代谢的影响[J].*中国烟草科学*,2017,38(4):29–36.
- ZHAO Y C, SONG W J, DONG J X, et al. The effect of potassium fulvic acid on the metabolism of reactive oxygen species in flue-cured tobacco seedlings under drought stress[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2017, 38(4): 29–36. (in Chinese)
- [28] 李鹏辉,向金友,王林,等.干旱胁迫下外源褪黑素对烟草幼苗生理特性的影响[J].*中国农业科技导报*,2019,21(5):41–48.
- LI P H, XIANG J Y, WANG L, et al. The effect of exogenous melatonin on the physiological characteristics of tobacco seedlings under drought stress[J]. *Chinese Journal of Agricultural Science and Technology*, 2019, 21(5): 41–48. (in Chinese)
- [29] 杨小龙,须晖,李天来,等.外源褪黑素对干旱胁迫下番茄叶片光合作用的影响[J].*中国农业科学*,2017,50(16):3186–3195.
- YANG X L, XU H, LI T L, et al. Effects of exogenous melatonin on photosynthesis of tomato leaves under drought stress[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(16): 3186–3195. (in Chinese)
- [30] 潘晓迪,张颖,邵萌,等.作物根系结构对干旱胁迫的适应性研究进展[J].*中国农业科技导报*,2017,19(2):51–58.
- PAN X D, ZHANG Y, SHAO M, et al. Research progress on the adaptability of crop root structure to drought stress[J]. *China Journal of Agricultural Science and Technology*, 2017, 19(2): 51–58. (in Chinese)
- [31] KRISHNAMURTHY P, RANATHUNGE K, FRANKE R, et al. The role of root apoplastic transport barriers in salt tolerance of rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Planta*, 2009, 230: 119–134.
- [32] 杨朝东,张霞,刘国锋,等.植物根中质外体屏障结构和生理功能研究进展植物研究[J].2013,33(1):114–119.
- YANG C D, ZHANG X, LIU G F, et al. Progress in the study of plant root extracellular barrier structure and physiological function [J]. *Plant Research*, 2013, 33(1): 114–119. (in Chinese)
- [33] 朱桂才,杨中艺.水分胁迫下李氏禾营养器官的解剖结构研究[J].*长江大学学报(自然科学版)农学卷*,2008(3):17–20,109.
- ZHU G C, YANG Z Y. Anatomical structure study of the vegetative organs of Li Shihe under water stress[J]. *Journal of Changjiang University: Agronomy Volume*, 2008(3): 17–20, 109. (in Chinese)
- (责任编辑:姜媛媛)