

种植密度对不同玉米品种茎秆力学特性及抗倒伏能力的影响

张盼, 卢道文, 孙海潮, 董文恒, 李永江, 张莹莹, 史丽丽, 牛永锋

(安阳市农业科学院, 河南 安阳 455000)

摘要: 以安玉706、郑单958等7个品种为材料, 设置6.75万(T_1)、7.5万(T_2)、8.25万(T_3)、9万株/ hm^2 (T_4)4个种植密度, 对抽雄散粉期和生理成熟期的玉米茎秆力学特性和倒伏倒折率进行测定, 并对两者之间的关系进行探讨。结果表明, 种植密度由 T_1 增加至 T_4 时, 倒伏率由12.6%增至33.9%, 倒折率由1.4%增至5.2%。在 T_4 密度时, 郑单958倒伏率为52.2%, 倒折率11.3%; 安玉107分别为11.8%和2.6%。随着种植密度的增加, 参试品种茎秆抗弯折力、穿刺强度和压碎强度呈降低趋势, 密度每增加0.75万株/ hm^2 , 分别降低1.7、2.9和8.2 N。相关分析表明, 成熟期抗弯折力、抽雄散粉期和成熟期茎秆第3节穿刺强度与倒伏率呈极显著负相关, 相关系数为-0.99。综合考虑密度、茎秆性状、抗倒性, 安玉107、安玉706为耐密、抗倒型品种, 适宜种植的最高密度为8.25万株/ hm^2 。

关键词: 玉米; 密度; 茎秆力学特性; 抗倒性

中图分类号: S513.01

文献标识码: A

Effects of Planting Density on Stem Mechanical Properties and Lodging Resistance of Different Maize Varieties

ZHANG Pan, LU Dao-wen, SUN Hai-chao, DONG Wen-heng, LI Yong-jiang,

ZHANG Ying-ying, SHI Li-li, NIU Yong-feng

(Anyang Academy of Agricultural Sciences, Anyang 455000, China)

Abstract: Seven varieties, including Anyu706, Zhengdan958, were used as experimental materials. The stem mechanical properties in tasseling and mature stages were measured under four planting densities of 6.75×10^4 (T_1), 7.5×10^4 (T_2), 8.25×10^4 (T_3), 9.0×10^4 (T_4) plants/ha. The results showed that with planting density increasing from T_1 to T_4 , the lodging rates increased from 12.6% to 33.9%, and folding rates increased from 1.4% to 5.2%. The lodging and folding rates of Zhengdan958 reached 52.2% and 11.3% under T_4 density, while those of Anyu107 were only 11.8% and 2.6%. The bending strength, puncture strength, and crushing strength of tested varieties decreased with the increase of planting density. The bending strength, puncture strength, and crushing strength decreased by 1.7 N, 2.9 N, and 8.2 N, respectively with the density increasing by 0.75×10^4 plants/ha. Correlation analysis showed that the bending strength at the mature stage and the third stem puncture strength at both the tasseling and mature stages were negatively correlated with the lodging rate, with a correlation coefficient $r = -0.99$. Considering planting density, stem traits, and lodging resistance, Anyu107 and Anyu706 were identified as high-density tolerant and lodging resistant varieties, with an optimal planting density of 8.25×10^4 plants/ha.

Key words: Maize; Density; Mechanical characteristic of stem; Lodging resistance

种植密度是影响玉米产量的重要因素, 合理密

植是玉米高产的关键环节之一^[1-2]。但种植密度增加后植株易发生倒伏, 进而影响玉米产量、品质及机械化收获作业^[3-4]。茎秆力学特性是影响玉米抗倒性状最重要的内部因素, 主要包括茎秆穿刺强度、压碎强度、抗弯折强度, 是可观察的最直观的植株抗倒伏能力指标, 研究茎秆力学特性有助于快速准确判断品种抗倒性大小^[5-7]。

录用日期: 2023-12-11

基金项目: 安阳市重点研发与推广专项(2023C01NY032)

作者简介: 张盼(1990-), 女, 河北邯郸人, 硕士, 助理研究员, 主要从事玉米育种与栽培研究。Tel: 18623727793

E-mail: 674497512@qq.com

牛永锋为本文通信作者。E-mail: nyf952@126.com

关于玉米茎秆力学特性和倒伏倒折率关系,马延华等研究结果认为,基部第3节压碎强度与茎秆倒伏率相关性最密切^[8]。李得孝等研究发现,茎秆倒伏主要受茎粗、茎秆穿刺强度和茎秆抗弯折强度的影响,其中茎秆抗弯折强度影响最大^[9]。勾玲等研究表明,抽雄前玉米茎秆压碎强度和外皮穿刺强度与收获期玉米最终倒折率呈高度负相关^[10]。茎秆节数方面,多数学者认为,茎秆第3至4节的力学特性与抗倒性相关最显著^[11-13]。密度对玉米茎秆力学特性也有显著影响,随着种植密度的增加,玉米茎秆抗弯折强度、穿刺强度降低,增加倒伏倒折风险^[14-15]。玉米茎秆力学特性和抗倒能力还受品种等因素影响,不同品种对密度反应差异较大,相同密度下不同品种茎秆力学特性、抗倒能力差异显著。本研究以安玉706、郑单958等7个品种为材料,研究

种植密度对不同品种、不同生育时期玉米茎秆力学特性和倒伏倒折率的影响,探讨茎秆力学特性和倒伏倒折率之间的关系,为密植、抗倒夏玉米品种的选育和种植提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2022年在河南省安阳市农业科学院永和试验基地进行,供试品种共7个,分别为郑单958、安玉706、安玉308、安玉707、安玉107、安玉116、安玉878,6月9号播种。设置4个种植密度,分别为 T_1 (6.75万株/hm²)、 T_2 (7.5万株/hm²)、 T_3 (8.25万株/hm²)、 T_4 (9万株/hm²)。试验采取随机区组排列,8行区,行长5 m,3次重复,栽培管理措施同大田。玉米生育期内气温、降雨量、日照时数见图1。

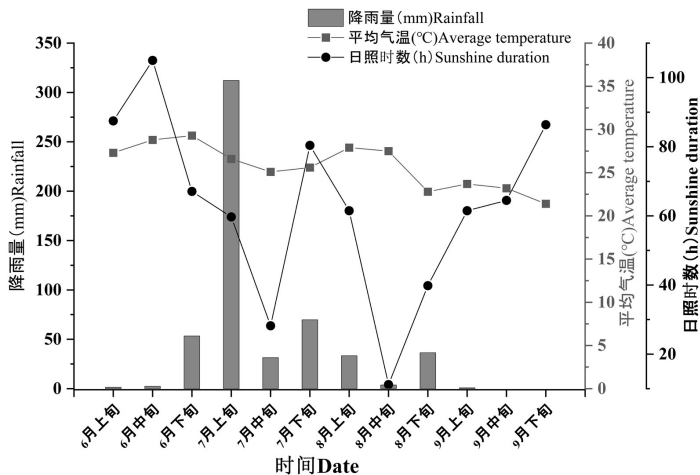


图1 玉米生育期内气象条件

Fig.1 Meteorological condition during the growth stage of the maize

1.2 项目测定与方法

1.2.1 茎秆穿刺强度和压碎强度

在抽雄散粉期和生理成熟期选择生长一致的植株3株,取茎秆第3节,使用YYD-1茎秆强度测定仪(浙江托普云农科技有限公司,中国),用1 mm²穿刺测头在每节茎秆中部,垂直于茎秆方向匀速缓慢插入,读取最大数值,取3株平均值,即为茎秆穿刺强度。压碎强度采用相同测定方法,换1 cm²压碎测头,垂直于茎秆方向匀速下压,读取茎秆破碎时的数值,连续测定3株,取平均值。

1.2.2 茎秆整株弯折强度

每个品种选取抽雄散粉期和生理成熟期长势一致的植株3株,在穗位节,用推拉力计水平均匀拉至茎秆折断或倒伏,读取推拉力计上显示的最大拉力,3株取平均值。

1.2.3 倒伏倒折情况调查

收获前,调查田间的倒伏倒折情况,计算倒伏倒折率。

倒伏率=小区倒伏植株数/小区总植株数×100%;

倒折率=小区倒折植株数/小区总植株数×100%。

1.3 数据处理与分析

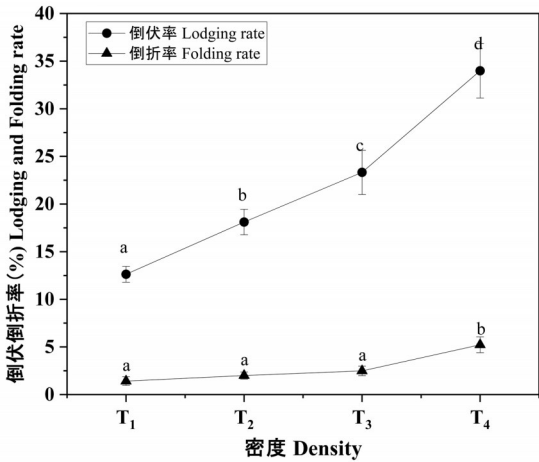
采用Excel 2010进行数据整理和计算,利用DPS7.05进行统计和方差分析,利用Origin2021进行作图。

2 结果与分析

2.1 种植密度对倒伏倒折率的影响

综合所有品种分析,随着种植密度的增加,倒伏率、倒折率都呈增加趋势,倒伏率分别为12.6%、18.1%、23.3%、34.0%,倒折率分别为1.4%、2.0%、

2.5%、5.2%。4个密度间倒伏率变化差异显著,倒折率仅在T₄密度下显著增加。倒伏率、倒折率在T₄密度下显著上升。本研究种植条件下,T₃密度为不同品种在本地区的种植密度上限(图2)。



注:不同小写字母表示在0.05水平下差异显著($P<0.05$)。下图同。
Note: Different lowercase letters represented significant difference($P<0.05$). The same below.

图2 种植密度对玉米倒伏倒折率的影响

Fig.2 Effect of planting density on lodging and folding rates of maize

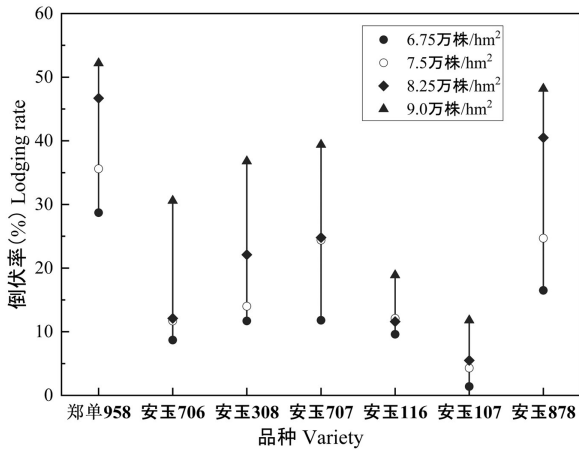


图3 不同密度下7个玉米品种的倒伏率

Fig.3 Lodging rate of 7 maize varieties at different densities

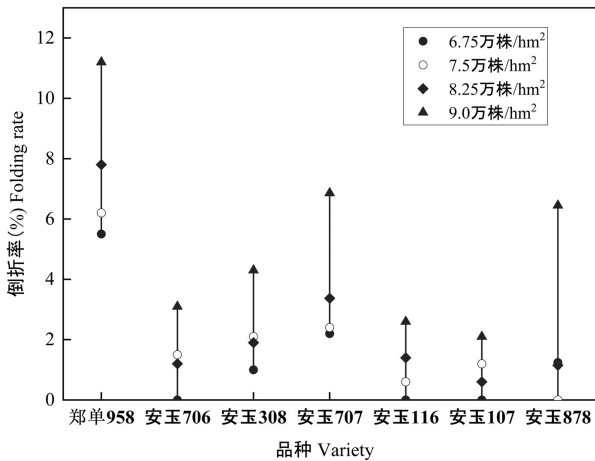


图4 不同密度下7个玉米品种的倒折率

Fig.4 Folding rate of 7 maize varieties at different densities

品种间进行比较,倒伏倒折率最高的均为郑单 958, T_4 密度时,倒伏率为 52.2%、倒折率为 11.25%。倒伏倒折率表现最好的品种为安玉 107,倒伏率最低仅为 1.4%、最高 11.8%;倒折率最低 0、最高 2.6%。其余抗倒性好的品种有安玉 116、安玉 706,倒伏率最高分别为 18.9%、30.6%,最低分别为 9.6%、8.7%。综合分析,郑单 958、安玉 878 抗倒性较差,安玉 107、安玉 116、安玉 706 抗倒性较好,安玉 707、安玉 308 抗倒能力中等(图 3、图 4)。

2.2 种植密度对茎秆力学特性的影响

2.2.1 弯折强度分析

随着群体密度的增加,抽雄散粉期和生理成熟期茎秆弯折强度都呈下降趋势,密度每增加 0.75 万株/hm²,两个时期茎秆弯折力分别减小 1.5 N(7.4%)和 1.9 N(7.3%)。生理成熟期的茎秆弯折强度在 T_4 密度下下降趋势增大,这与品种倒伏倒折率 T_4 密度下增高一致。两个时期进行比较,安玉 878 弯折强度变化不明显,其余 6 个品种生理成熟期的弯折强度显著高于抽雄散粉期(表 1)。

表 1 不同密度下 7 个玉米品种的茎秆弯折强度
Table 1 Stem bending strength of 7 maize varieties at different densities N

时 期 Stage	品 种 Variety	T_1	T_2	T_3	T_4
抽雄散粉期	郑单 958	12.49±0.53 d	11.47±0.97 e	11.15±0.52 e	10.33±0.29 d
	安玉 706	20.21±0.89 c	20.25±0.62 b	17.36±0.55 bc	17.05±0.77 ab
	安玉 308	22.11±0.38 bc	19.81±0.10 b	16.80±0.41 bc	14.90±0.95 bc
	安玉 707	13.98±0.93 d	13.80±1.12 d	12.43±0.41 de	12.06±0.52 d
	安玉 107	26.58±0.93 a	24.19±0.39 a	21.81±1.12 a	18.22±1.20 a
	安玉 116	24.42±0.69 ab	20.89±0.65 b	18.96±1.29 b	18.24±1.12 a
	安玉 878	22.71±1.21 bc	17.60±0.35 c	14.93±1.26 cd	12.63±0.65 cd
生理成熟期	郑单 958	23.31±0.09 de	20.27±0.31 e	17.69±0.68 e	15.45±0.67 b
	安玉 706	28.11±0.38 b	28.29±0.57 b	25.45±0.71 b	23.26±0.16 a
	安玉 308	26.22±0.38 bc	23.05±0.13 d	21.44±0.49 cd	17.51±0.62 b
	安玉 707	22.40±0.44 be	18.86±0.31 ef	20.75±0.73 cde	15.22±0.31 b
	安玉 107	30.85±0.33 a	30.60±0.53 a	30.35±0.79 a	24.67±0.60 a
	安玉 116	25.30±0.96 cd	25.30±0.41 c	23.76±0.41 bc	16.11±0.29 b
	安玉 878	25.18±0.45 cd	17.87±0.19 f	18.88±0.43 de	15.68±0.50 b

注:同列数据不同小写字母表示差异达显著水平($P<0.05$)。下表同。
Note: Different lowercase letters in the same column represented significant difference($P<0.05$). The same below.

抽雄散粉期,各品种除郑单 958 和安玉 707 外,茎秆弯折强度随着密度的增加均发生显著变化。郑单 958 茎秆弯折强度显著低于其他品种,平均为 11.36 N;安玉 107 弯折强度最大,平均为 22.58 N。生理成熟期,密度对不同品种的茎秆抗弯折强度影响均达到显著水平。安玉 107 茎秆抗弯折强度最大,平均为 29.12 N,较抽雄散粉期下降了 28.9%。其他茎秆抗弯折力比较高的品种有安玉 706、安玉 107,郑单 958 最低。

2.2.2 穿刺强度分析

综合所有品种分析,玉米茎秆穿刺强度在抽雄散粉期和生理成熟期都呈下降趋势,密度每增加 0.75 万株/hm²,两个时期茎秆穿刺强度分别减小 2.3 N(3.9%)和 3.4 N(5.8%)。抽雄散粉期茎秆穿刺强度下降速率比较平缓,生理成熟期下降速率出现波动,其中 T_4 密度下显著增高,与茎秆弯折强度变化趋势相

一致。不同品种间进行比较,两个时期,在 4 个密度下穿刺强度较高的品种为安玉 107、安玉 116、安玉 706,较低品种为郑单 958、安玉 878。抽雄散粉期和生理成熟期,综合表现最好的品种安玉 107,穿刺强度相比郑单 958 分别增加了 19.2%、41.9%,差异显著(表 2)。

2.2.3 压碎强度分析

综合所有品种分析,在抽雄散粉期,玉米茎秆压碎强度随密度变化差异不显著。生理成熟期在密度 T_1 和 T_2 条件下压碎强度分别为 445.2 N 和 434.2 N,呈显著下降趋势; T_2 到 T_4 密度,下降速率减缓,差异不显著。不同品种间,茎秆压碎强度由高到低分别为安玉 107、安玉 116、安玉 706、安玉 308、安玉 707、安玉 878、郑单 958(表 3)。抽雄散粉期,不同种植密度茎秆压碎强度最高的品种为安玉 107,较最低品种郑单 958 增加了 3.1%。

表2 不同密度下7个玉米品种的茎秆穿刺强度
Table 2 Stem puncture strength of 7 maize varieties at different densities N

时 期 Stage	品 种 Variety	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄
抽雄散粉期	郑单958	52.17±0.74 d	50.96±0.61 b	48.86±0.60 c	43.93±0.81 d
	安玉706	64.20±0.26 ab	59.99±1.36 a	55.26±0.86 ab	51.70±0.44 ab
	安玉308	55.43±0.77 c	52.53±0.73 b	51.09±0.92 bc	47.70±0.41 cd
	安玉707	54.50±0.96 cd	51.36±0.25 b	49.33±0.73 c	48.40±0.73 bc
	安玉107	65.73±0.64 a	61.63±1.01 a	57.73±1.24 a	49.00±1.39 bc
	安玉116	62.10±0.38 b	60.33±0.80 a	59.39±0.61 a	54.06±0.52 a
	安玉878	53.80±0.50 cd	52.49±1.00 b	47.43±1.65 c	47.46±1.36 cd
生理成熟期	郑单958	45.53±0.62 d	41.23±0.58 e	40.33±1.08 d	38.37±1.00 c
	安玉706	65.37±0.52 a	56.70±0.92 b	52.47±0.72 b	49.13±2.12 a
	安玉308	55.13±0.98 c	49.10±1.33 d	49.87±0.86 bc	44.57±0.86 abc
	安玉707	56.60±1.94 bc	51.30±1.06 cd	47.77±1.32 c	41.60±1.54 bc
	安玉107	62.37±0.69 ab	61.80±0.45 a	60.70±0.36 a	50.00±1.90 a
	安玉116	66.97±0.74 a	64.30±0.42 a	59.53±0.88 a	47.70±0.95 ab
	安玉878	62.53±1.63 a	55.13±0.75 bc	49.30±0.82 bc	46.40±0.65 ab

表3 不同密度下7个玉米品种的茎秆压碎强度
Table 3 Stem crushing strength of 7 maize varieties at different densities N

时 期 Stage	品 种 Variety	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄
抽雄散粉期	郑单958	449.00±5.30 a	443.67±2.96 a	456.67±1.67 a	454.67±3.48 c
	安玉706	462.67±5.84 a	470.33±0.88 a	460.00±2.89 a	451.00±2.08 ab
	安玉308	455.67±11.86 a	452.33±10.74 a	456.00±4.93 a	444.67±5.81 bc
	安玉707	443.67±13.78 a	450.33±12.44 a	455.00±7.64 a	452.67±5.78 b
	安玉107	473.33±2.67 a	469.00±3.06 a	460.00±7.64 a	458.00±3.51 b
	安玉116	465.67±3.84 a	460.00±2.00 a	462.33±3.71 a	455.00±0.58 a
	安玉878	460.00±14.01 a	462.67±2.33 a	454.00±2.08 a	451.67±3.33 bc
生理成熟期	郑单958	446.67±3.33 abc	420.00±0.00 b	427.67±2.33 ab	415.33±2.91 b
	安玉706	458.33±1.67 ab	439.33±10.97 ab	423.33±6.67 b	428.67±5.21 ab
	安玉308	440.00±5.77 bed	430.00±5.77 ab	429.33±5.21 ab	434.67±6.67 ab
	安玉707	432.33±3.93 cd	428.33±6.01 ab	428.33±1.67 ab	434.33±6.84 ab
	安玉107	463.00±2.52 a	455.00±2.89 a	445.00±2.89 a	430.05±7.64 a
	安玉116	452.67±2.67 abc	446.67±4.41 ab	436.67±3.33 ab	432.67±3.71 ab
	安玉878	423.33±6.67 d	420.00±0.00 b	430.00±0.00 ab	406.67±3.33 b

2.3 倒伏倒折率与茎秆力学性状相关性分析

相关分析表明,不同时期的倒伏倒折率与茎秆力学特性指标均呈负相关,表明在不同时期提高茎秆力学特性值均可减少倒伏倒折现象的发生。成熟期抗弯折力、抽雄散粉期穿刺强度、成熟期穿刺强度与倒伏率都存在极显著负相关,相关系数均达到-0.99,这些性状可以作为品种倒伏率检测的重点关注指标。成熟期弯折强度、抽雄散粉期压碎强度与倒折率呈显著负相关(表4)。

3 结论与讨论

耐密、抗倒、宜机收是当前黄淮海玉米品种选育的主要目标^[16]。随着种植密度的增加,影响植株对水、肥、光等资源的获得,导致植株茎秆细弱,增加了倒伏倒折风险,因此,耐密、抗倒、宜机收是3个互相制约的性状^[17-19]。本研究表明,随着种植密度的增加,植株倒伏率、倒折率均有所增加,在密度达到9万株/hm²时,倒伏倒折率增高趋势显著上升,因此

表4 不同茎秆力学性状与倒伏倒折率的相关分析
Table 4 Correlation analysis of lodging rate and the stem mechanical characteristics

性 状 Character	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	c ₆	c ₇	c ₈
c ₁	1							
c ₂	0.95	1						
c ₃	0.99**	0.98*	1					
c ₄	0.98*	0.99*	0.99**	1				
c ₅	0.82	0.94	0.89	0.89	1			
c ₆	0.96*	0.92	0.94	0.95*	0.73	1		
c ₇	-0.97*	-0.99**	-0.99**	-0.99**	-0.93	-0.92	1	
c ₈	-0.89	-0.98*	-0.94	-0.95	-0.99*	-0.82	0.97*	1

注：“*”表示在0.05水平上显著相关，“**”表示在0.01水平上显著相关。c₁为抽雄散粉期弯折强度；c₂为成熟期弯折强度；c₃为抽雄散粉期穿刺强度；c₄为成熟期穿刺强度；c₅为抽雄散粉期压碎强度；c₆为成熟期压碎强度；c₇为倒伏率；c₈为倒折率。
Note: * and ** indicated significant difference at 5% and 1% probabilities, respectively. c₁, bending strength of tasseling and bloom stage; c₂, bending strength of mature stage; c₃, puncture strength of tasseling and bloom stage; c₄, puncture strength of mature stage; c₅, crushing strength of tasseling and bloom stage; c₆, crushing strength of mature stage; c₇, lodging rate; c₈, folding rate.

在现有品种水平下,8.25万株/hm²是本地玉米品种栽培密度上限,还需结合产量性状深入研究。生理成熟期抗弯折强度和穿刺强度在9万株/hm²下降程度显著高于其他密度,与倒伏倒折率一致,表明这两个性状可能是影响倒伏的主要因素。

茎秆力学强度指标的测定时间从苗期到成熟期,测定部位从茎基部多选择茎秆第3节,在乳熟期至蜡熟期进行测定^[20-22]。抽雄散粉期玉米发生倒伏,影响授粉和出穗率,产量损失最大,成熟期发生大面积倒伏,严重影响玉米机械化收获,因此,本研究选取玉米抽雄散粉期和生理成熟期进行测定。不同生育时期茎秆力学特性差异方面,勾玲等研究认为,茎秆穿刺强度从抽雄期到吐丝期增加,至蜡熟期保持不变或小幅增加^[23]。玉米生理成熟后,茎秆干物质减少,含水率降低,病原菌侵染增多等多种原因致使茎秆压碎强度降低,增加倒伏倒折风险^[24]。本研究表明,茎秆抗弯折强度在生理成熟期高于抽雄散粉期,可能与生长前期玉米茎秆木质素积累不充分有关。穿刺强度在两个时期差异不显著,压碎强度生理成熟期低于抽雄散粉期。

关于茎秆力学特性和倒伏倒折相关性方面,前人研究发现,茎秆压碎强度和外皮穿刺强度对玉米抗倒伏能力影响最显著^[25]。也有人认为,茎秆外皮穿刺强度对倒伏的直接作用最大,抗弯折强度和压碎强度通过影响穿刺力而间接影响玉米倒伏^[26]。本研究结果表明,成熟期抗弯折力、抽雄散粉期和成熟期第3节穿刺强度与倒伏率呈极显著负相关,相关系数达到-0.99,说明可以通过这些指标来评价玉米

品种的抗倒能力。在实际生产中,茎秆力学性状是决定倒伏发生的直接原因,气候环境、栽培措施、病虫害、根部性状等都会通过影响茎秆力学性状对植株抗倒性造成影响,因此还需要进行系统分析和深入研究。

参考文献:

[1] 阎晓光,杜艳伟,李 洪,等. 种植密度对春玉米产量和茎秆力学性状的影响[J]. 上海农业学报,2021,37(5):52-56.
YAN X G, DU Y W, LI H, et al. Effects of planting density of spring maize on yield and stem mechanical properties[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2021, 37(5): 52-56. (in Chinese)

[2] 李文莹. 密度对玉米倒伏相关性状及产量的影响[D]. 长春:吉林大学,2018.

[3] 许莹莹,马青美,宋希云,等. 不同玉米品种倒伏抗性与产量相关性状的聚类和相关分析[J]. 玉米科学,2019,27(5):15-21.
XU Y Y, MA Q M, SONG X Y, et al. Cluster and correlation analysis of lodging-resistance and yield related traits in different maize varieties[J]. Journal of Maize Sciences, 2019, 27(5): 15-21. (in Chinese)

[4] 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)

[5] 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,2019.

[6] 靳英杰,李鸿萍,安盼盼,等. 玉米抗倒性研究进展[J]. 玉米科学,2019,27(2):94-98,105.
JIN Y J, LI H P, AN P P, et al. Research progress on the lodging resistance of maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2019, 27(2): 94-98, 105. (in Chinese)

[7] 翁萌萌. 不同玉米品种茎秆特性及其与抗倒性关系研究[D]. 郑

- 州:河南农业大学,2016.
- [8] 马延华,孙德全,李绥艳,等.玉米茎皮抗穿刺强度与形态性状和化学成分含量间的相关分析[J].黑龙江农业科学,2012(4):1-4.
MA Y H, SUN D Q, LI S Y, et al. Correlation analysis between rind penetration resistance and morphological characters and chemical components in maize stalk[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2012(4): 1-4. (in Chinese)
- [9] 李得孝.玉米抗倒性指标及其遗传研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2001.
- [10] 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,2007,33:1688-1695.
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 Agron Sin., 2007, 33: 1688-1695. (in Chinese)
- [11] 黄海.群体密度对玉米茎秆及根系抗倒伏特性的影响[D].长春:吉林农业大学,2013.
- [12] MARTÍN M, ARCACHE, SLAFER G A. Lodging yield penalties as affected by breeding in mediterranean wheats[J]. Field Crops Research, 2011, 122(1): 40-48.
- [13] 杨锦越,宋碧,罗英舰,等.种植密度对不同玉米品种抗倒力学特性的影响[J].西南农业学报,2018,31(8):1584-1590.
YANG J Y, SONG B, LUO Y J, et al. Effects of planting density on resistance mechanical properties of different maize varieties[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2018, 31(8): 1584-1590. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] 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. Effect 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)
- [16] 李少昆,王克如,谢瑞芝,等.实施密植高产机械化生产实现高产高效协同[J].作物杂志,2016(4):1-6.
LI S K, WANG K R, XIE R Z, et al. Implementing higher population and full mechanization technologies to achieve high yield and high efficiency in maize production[J]. Crops, 2016(4): 1-6. (in Chinese)
- [17] 马晓君,路明远,邢春景,等.群体密度对夏玉米穗下茎秆性状及抗倒伏力学特性的影响[J].玉米科学,2018,26(4):118-125.
MA X J, LU M Y, XING C J, et al. Effects of planting density on stalk and lodging-resistance in summer maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2018, 26(4): 118-125. (in Chinese)
- [18] 蒋帆,徐开未,胡月秋,等.种植密度对川中丘陵春玉米茎秆性状及力学特性的影响[J].云南农业大学学报(自然科学), 2020,35(3):377-385.
JIANG F, XU K W, HU Y Q, et al. Effect of planting density on the stalk characteristics and mechanical properties of spring maize in hilly region of central Sichuan[J]. Journal of Yunnan Agricultural University(Natural Science), 2020, 35(3): 377-385. (in Chinese)
- [19] 邓妍,王创云,赵丽,等.群体密度对玉米茎秆性状、土壤水分的影响及其与产量、倒伏率的关系[J].华北农学报,2017,32(5):216-223.
DENG Y, WANG C Y, ZHAO L, et al. Effects of population density on the stem traits and soil moisture in maize and their correlation with yield and lodging rate[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2017, 32(5): 216-223. (in Chinese)
- [20] 谢刘勇.玉米茎秆强度相关性状全基因组关联分析与重要基因挖掘[D].泰安:山东农业大学,2021.
- [21] 董怀玉,刘可杰,刘晶,等.机收玉米品种收获期田间茎腐病抗性表型和植株倒伏状况调查[J].玉米科学,2021,29(1):170-176.
DONG H Y, LIU K J, LIU J, et al. Investigation of the phenotypic resistance to stalk rot and lodging resistance of maize varieties for mechanical grain-harvest at harvest stage[J]. Journal of Maize Sciences, 2021, 29(1): 170-176. (in Chinese)
- [22] 徐国平,王爱方,李婷,等.玉米杂交种灌浆期和收获期抗倒性差异及其与茎秆性状的相关性分析[J].玉米科学,2019,27(5):52-61.
XU G P, WANG A F, LI T, et al. Comparing the lodging resistance performance at grain-filling and harvesting and its correlation with stalk traits in corn hybrids[J]. Journal of Maize Sciences, 2019, 27(5): 52-61. (in Chinese)
- [23] 勾玲,黄建军,孙锐,等.玉米不同耐密植品种茎秆穿刺强度的变化特征[J].农业工程学报,2010,26(11):156-162.
GOU L, HUANG J J, SUN R, et al. Variation characteristic of stalk penetration strength of maize with different density-tolerance varieties[J]. Trans. CSAE, 2010, 26(11): 156-162. (in Chinese)
- [24] 薛军,王群,李璐璐,等.玉米生理成熟后倒伏变化及其影响因素[J].作物学报,2018,44:1782-1792.
XUE J, WANG Q, LI L L, et al. Changes of maize lodging after physiological maturity and its influencing factors[J]. Acta Agronomica Sinica, 2018, 44: 1782-1792. (in Chinese)
- [25] 丰光,刘志芳,李妍妍,等.玉米茎秆耐穿刺强度的倒伏遗传研究[J].作物学报,2009,35(11):2133-2138.
FENG G, LIU Z F, LI Y Y, et al. Genetics of lodging in tolerance to maize stem puncture[J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(11): 2133-2138. (in Chinese)
- [26] 马延华,王庆祥.玉米茎秆性状与抗倒伏关系研究进展[J].作物杂志,2012(2):10-15.
MA Y H, WANG Q X. Research progress on relationship between stalk traits and lodging resistance of maize[J]. Crops, 2012(2): 10-15. (in Chinese)

(责任编辑:栗天宇)