

网络出版时间:2021-07-07 11:07

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2022.01.011

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20210706.1707.001.html

玉米气生根性状与抗倒性的关系

于大伟,朱 猛,员海燕

(西北农林科技大学 农学院,陕西 杨凌 712100)

【摘要】【目的】研究玉米气生根性状与抗倒性的关系,为玉米抗倒育种提供参考。【方法】以 190 个玉米自交系为材料,调查气生根角度和入土气生根条数,采用列联表分析方法对气生根角度、入土气生根条数与倒伏级别进行相关性分析;同时以 2 组不同抗倒型的玉米自交系为材料,在杨凌和三亚 2 个环境下,对两组自交系的入土气生根条数、气生根角度、气生根直径和气生根深度进行比较分析,探讨气生根性状与抗倒性的关系。【结果】玉米气生根角度和入土气生根条数与倒伏级别的列联表分析的 χ^2 值分别为 23.261 和 13.023,达到极显著和显著水平;气生根角度越大、气生根条数越多,玉米植株倒伏的几率越低。同一环境下,抗倒型玉米自交系气生根角度均大于易倒型玉米自交系,除自交系 R1 与 S3 外,2 组玉米自交系气生根角度差异均显著;抗倒型玉米自交系的第 1 层入土气生根条数和总条数均显著大于易倒型玉米自交系,说明玉米气生根角度和入土气生根条数可用于玉米抗倒伏品种选育。抗倒型玉米自交系的气生根直径平均值和气生根深度平均值较易倒型玉米自交系大,但不存在一致的显著性差异规律。【结论】气生根角度、入土气生根条数与玉米抗倒性显著正相关,在玉米育种中重点针对气生根角度、入土气生根条数加以筛选利用,同时参考气生根直径和气生根深度的表现,能达到有效选育抗倒伏品种的目的。

【关键词】 玉米育种;抗倒性;气生根

【中图分类号】 S513.032

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2022)01-0091-07

Relationship between brace root traits and lodging resistance of maize

YU Dawei,ZHU Meng,YUN Haiyan

(College of Agronomy,Northwest A&F University,Yangling,Shaanxi 712100,China)

Abstract: 【Objective】 This study analyzed the relationships between brace root traits and lodging resistance of maize to provide basis for lodging resistance breeding. 【Method】 A total of 190 maize inbred lines were used to investigate brace root angle and brace root number inserted soil and their correlation with lodging grades was analyzed by contingency analysis method. The brace root angle,brace root number inserted soil,brace root diameter and brace root depth of two groups with different lodging resistances were also compared. 【Result】 The Chi-square values of correlation test in contingency analysis of brace root angle and brace root number with lodging grades were $\chi^2=23.261$ and $\chi^2=13.023$,reaching extremely significant and significant levels,respectively. Wider brace root angle and more brace number led to stronger lodging resistance. In the same environment,brace root angles of all lodging-resistant inbred lines were wider than those of lodging-sensitive ones and the differences among the two groups were significant except for inbred lines R1 and S3. Both brace root number of the first layer and total of the lodging-resistant inbred lines were generally larger than the lodging-sensitive ones. The average diameter and depth of brace roots of lodging-resistant maize inbred lines were larger than lodging-sensitive ones without significant

〔收稿日期〕 2021-01-07

〔基金项目〕 陕西省农业攻关项目(2014K02-01-01)

〔作者简介〕 于大伟(1989—),男,内蒙古赤峰人,硕士,主要从事玉米遗传育种研究。E-mail:yudawei18haoren@126.com

〔通信作者〕 员海燕(1960—),女,陕西华阴人,教授,博士生导师,主要从事玉米遗传育种研究。E-mail:haiyan60@126.com

difference. 【Conclusion】 There were closely positive correlations of brace root angle and brace root number with lodging resistance. Thus, it is suggested to select maize inbred lines or crosses with wider brace root angle and more brace root number and consider brace root diameter and brace root depth for effective selection of breed lodging resistant varieties.

Key words: maize breeding; lodging resistance; brace root

倒伏是造成玉米减产和农民减收的主要因素之一,也是制约玉米机械化收割的主要限制因素。倒伏严重威胁玉米的产量和品质,使玉米生产遭受巨大损失。据统计,我国因极端天气而导致的玉米倒伏会引起减产 10%~24%,平均产量每年损失近 100 万 t^[1-3];美国和日本每年因玉米倒伏造成的减产达 5%~25%和 15%~28%^[4];倒伏率每增加 1%玉米减产约 108 kg/hm²^[5]。随着玉米生产的发展,不断增加种植密度已成为提高玉米产量的主要途径,因密植造成的倒伏问题也日趋严重^[6-7]。选育抗倒伏品种是解决玉米倒伏问题的重要途径^[8-9]。倒伏的形成决定于植株的受力状态和植株自身的支持能力,气生根形态和发育质量是决定植株自身支持能力的重要构成因素^[10]。因此对气生根性状与抗倒性关系的研究,有助于探索通过改良气生根性状进行抗倒育种的可能性,从而为玉米抗倒育种奠定理论基础。王永学等^[11]研究表明,入土气生根条数、茎秆强度和穗位高对抗倒性的直接效应最大。丰光等^[12]对玉米抗倒性的研究表明,抗倒性与入土气生根层数具有显著相关性。然而,迄今为止缺乏对气生根角度、入土气生根条数、气生根直径、气生根深度等气生根性状与抗倒性关系的系统性研究。为此,本研究采用列联表分析的方法,对 190 个玉米自交系的气生根角度、入土气生根条数与倒伏级的关系进行相关性分析;同时以 2 组不同抗倒性的玉米自交系为材料,比较 2 组自交系各气生根性状的差异。结合两组试验的结果,系统分析气生根性状与抗倒性的关系,并对各气生根性状与抗倒性的关系程度进行评价,探讨其在抗倒伏育种中的实际应用价值。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验设计

本研究由两部分试验共同论证。

1.1.1 试验 I 试验于 2012 年在西北农林科技大学教学试验农场进行。试验材料为本课题组经多年自选自育的 190 个玉米自交系(其血缘涵盖瑞德黄马牙、塘四平头、旅大红骨、兰卡斯特等主要类群,具有丰富的遗传多样性)。试验采用 2 行区,行长 1.5

m,行距 60 cm,留苗密度 80 000 株/hm²,田间管理同大田生产。在灌浆期以小区为单位调查和测量气生根角度和入土气生根条数,用于研究气生根角度、入土气生根条数与倒伏级别的关系。

1.1.2 试验 II 试验于 2013 年分别在陕西杨凌西北农林科技大学教学试验农场和海南三亚南繁育种基地两个环境下进行。试验材料为从试验 I 190 个自交系中经多年田间筛选出的 8 个抗倒性差异显著的玉米自交系,分为抗倒型和易倒型两个类组:抗倒型自交系 WN2366、WN2355、WN2353 和 WN2354,多年种植平均倒伏率低于 5%,以下分别用 R1、R2、R3、R4 代表;易倒型自交系 WN2339、WN2333、WN2334 和 WN2338,多年种植平均倒伏率在 50%以上,以下分别用 S1、S2、S3、S4 代表。试验采用完全随机区组设计,陕西杨凌环境下设 3 次重复,5 行区,每行 10 株,行长 1.8 m,行距 60 cm;三亚环境下设 3 次重复,2 行区,每行 15 株,行长 2.8 m,行距 60 cm。两个环境下田间管理措施均同大田种植。在灌浆期以小区为单位选取 10 株,调查和测量气生根角度、入土气生根条数、气生根直径和气生根深度,用于研究不同类型抗倒伏自交系气生根性状的差异。

1.2 测定项目及方法

气生根角度:用量角器分别测量地上第 1 层和第 2 层(自地面向上依次计为第 1 层、第 2 层)入土气生根与着生点以下茎秆所成夹角,取值范围 0~90°,每株测量 5 条气生根,取平均值。

入土气生根条数:分别调查地上第 1 层和第 2 层入土气生根条数。

气生根直径:用游标卡尺测量地上第 1 层入土气生根中间部位的直径,每株测量 5 条气生根,取平均值。

气生根深度:用铁铲挖出所选第 1 层气生根,用直尺量取气生根入土部分的长度,每株测量 5 条气生根,取平均值。

参照农作物倒伏分级方法^[13-14],按玉米植株偏离竖直方向角度不同分为 0 级(植株直立)、1 级(倾斜<30°)、2 级(30°~60°)和 3 级(倾斜>60°)4 个倒

伏级别,统计倒伏植株数。将气生根角度按 $<30^{\circ}$ 、 $30\sim60^{\circ}$ 和 $>60^{\circ}$ 分为3个级别,入土气生根条数由小到大均分为3个级别。

1.3 统计分析

采用列联表分析的方法^[15]对气生根角度、入土气生根条数与倒伏级别进行相关性 χ^2 检验。

采用SPSS 19.0软件分别完成对气生根角度、入土气生根条数与倒伏级别的列联表分析的相关性 χ^2 检验,以及对8个不同自交系间气生根角度、入土

气生根条数、气生根直径、气生根深度的Duncan’s差异显著性测验。用Excel 2007软件和Sigmaplot 14.0软件绘图。

2 结果与分析

2.1 玉米气生根角度与抗倒性的关系

2.1.1 气生根角度与抗倒性的相关性 190个玉米自交系的气生根角度分级与抗倒性的相关性结果见表1。

表1 玉米气生根角度与抗倒性的相关性

Table 1 Correlation between brace root angle and lodging grade in maize

气生根角度分级 Brace root angle grade		指标 Index	倒伏级别 Lodging grade				合计 Total
			0	1	2	3	
<30°	观察株数	Observed number	12.0	8.0	23.0	11.0	54.0
	理论株数	Theoretical number	15.3	14.8	19.6	4.3	54.0
	株数比例/%	The ratio of number	22.2	14.8	42.6	20.4	100.0
30°~60°	观察株数	Observed number	29.0	35.0	36.0	4.0	104.0
	理论株数	Theoretical number	29.6	28.5	37.8	8.2	104.0
	株数比例/%	The ratio of number	27.9	33.7	34.6	3.8	100.0
>60°	观察株数	Observed number	13.0	9.0	10.0	0.0	32.0
	理论株数	Theoretical number	9.1	8.8	11.6	2.5	32.0
	株数比例/%	The ratio of number	40.6	28.1	31.2	0.0	100.0

注:观察株数指实际观察的株数;理论株数指采用列联表分析获得的期望株数;株数比例指各倒伏级别的观察株数占该气生根角度分级株数的比例。表3同。

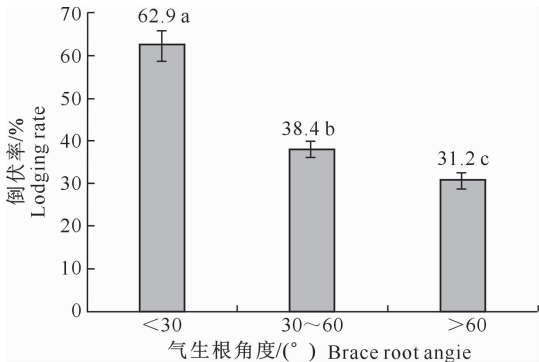
Note:Observed number refers to the actual number of observed plants,theoretical number refers to the expected number obtained by contingency analysis,and the ratio of number refers to the proportion of observed number of each lodging grade in different brace root angle grade. The same table 3.

气生根角度与倒伏级别的 χ^2 值为23.261, P 值=0.000 <0.01 ,表明气生根角度分级与倒伏级别显著相关。由表1可以看出,3个气生根角度分级中,各倒伏级别植株占比不同。气生根角度分级越高,低倒伏级别植株占比越大。说明气生根角度越大,植株倒伏的机率越低。

分别计算气生根角度在 $<30^{\circ}$ 、 $30^{\circ}\sim60^{\circ}$ 和 $>60^{\circ}$ 3个级别玉米植株的群体倒伏率(倒伏率为偏离垂直方向大于 30° 的植株数占群体总株数的比例^[16]),结果见图1。由图1可以看出,玉米的气生根角度越大,群体倒伏率越低。气生根角度 $30^{\circ}\sim60^{\circ}$ 时玉米植株的群体倒伏率较气生根角度 $<30^{\circ}$ 时显著降低24.5%;气生根角度 $>60^{\circ}$ 时植株的群体倒伏率较 $30^{\circ}\sim60^{\circ}$ 时显著降低7.2%。由此可见,气生根角度与抗倒性显著正相关,气生根角度越大,植株抗倒伏能力越强。

2.1.2 不同抗倒型玉米自交系气生根角度性状的比较 由表2可以看出,在杨凌和三亚,抗倒型玉米自交系的气生根角度为 $46.0^{\circ}\sim69.0^{\circ}$,易倒型玉米自交系气生根角度为 $26.7^{\circ}\sim46.2^{\circ}$ 。同一环境下,抗倒型玉自交系气生根角度均大于易倒型自交系,

并且除R1与S3外,2组自交系间气生根角度差异均显著。抗倒型自交系气生根角度均在 45° 以上,表明较大的气生根角度对玉米抗倒性有显著提升作用,可将气生根角度性状应用于玉米抗倒伏品种选育。



图柱数据后标不同小写字母表示不同分级的群体倒伏率差异显著($P<0.05$)。图3同

Different lowercase letters indicate significant differences among lodging rates of populations with different brace root angle grades($P<0.05$). The same Fig. 3

图1 不同玉米气生根角度级别的群体倒伏率
Fig.1 Lodging rate of maize in different brace root angle grades

表 2 不同玉米自交系气生根性状的差异

Table 2 Differences in characteristics of brace roots among different maize inbred lines

区域 Region	玉米自交系 Inbred line	气生根角度/(°) Brace root angle	气生根条数 Brace root number			气生根直径/mm Brace root diameter	气生根深度/cm Brace root depth
			第 1 层 First layer	第 2 层 Second layer	合计 Total		
杨凌 Yangling	S1	35.0±1.4 c	7.0±0.4 d	6.6±0.4 c	13.6±0.7 c	3.6±0.2 cd	18.9±0.8 c
	S2	26.7±1.7 d	7.3±0.9 d	—	7.3±0.9 d	2.9±0.1 d	20.5±0.8 c
	S3	46.2±2.4 b	12.5±0.5 bc	—	12.5±0.5 c	4.2±0.1 bc	13.1±0.5 d
	S4	32.7±0.9 cd	10.8±0.5 c	—	10.8±0.5 c	5.4±0.2 a	19.8±3.6 c
	R1	51.7±2.1 b	14.0±0.5 b	16.2±0.9 a	30.2±0.7 a	4.6±0.2 ab	23.6±0.7 ab
	R2	69.0±1.9 a	14.2±0.9 b	15.0±0.7 a	29.2±0.9 ab	4.3±0.1 bc	24.7±1.0 a
	R3	61.7±1.7 a	14.2±0.9 b	15.0±0.7 a	29.2±0.9 ab	5.3±0.2 a	21.6±1.0 bc
	R4	68.3±1.7 a	19.3±1.3 a	14.3±0.3 a	33.7±1.2 a	4.2±0.1 bc	20.0±0.4 c
三亚 Sanya	S1	27.8±1.2 d	9.3±1.3 c	6.0±0.5 b	15.3±0.8 b	3.8±0.2 d	20.1±0.5 cd
	S2	40.3±1.5 c	9.8±0.5 bc	—	9.8±0.5 c	3.9±0.1 d	21.7±0.8 bc
	S3	43.7±1.0 bc	11.4±0.6 b	—	11.4±0.6 c	5.0±0.1 ab	13.2±0.5 e
	S4	30.8±0.7 d	11.6±0.6 b	—	11.6±0.6 c	4.8±0.2 bc	18.8±0.6 d
	R1	46.0±1.2 b	14.1±0.6 a	15.3±0.4 a	29.4±0.9 a	5.1±0.2 ab	23.0±0.5 ab
	R2	59.0±1.6 a	14.6±0.5 a	14.8±0.6 a	29.4±0.8 a	4.5±0.2 cd	25.3±0.9 a
	R3	60.6±1.1 a	14.5±0.5 a	13.1±0.8 a	27.6±1.0 a	5.6±0.1 a	22.2±0.7 bc
	R4	56.1±1.3 a	15.6±0.5 a	14.2±1.1 a	29.8±1.3 a	5.0±0.1 bc	19.0±0.6 d

注:1. 表中所列各气生根性状均指入土气生根;2. 同列数据后标不同小写字母表示不同玉米自交系之间差异显著($P<0.05$);3. —表示该层气生根条数为 0;4. 气生根角度、气生根直径和气生根深度均指第 1 层气生根的值。
Note:1. All the traits of brace roots listed in the table refer to brace root inserted soil;2. Different lowercase letters indicate significant difference among different inbred lines ($P<0.05$);3. — indicates that the number of brace roots is 0;4. Brace root angle, brace root diameter and brace root depth refer to the values of the first layer.

气生根调查时发现,第 2 层气生根性状容易观察,而第 1 层气生根性状不易观察,个别植株观察第 1 层气生根需要破坏上层根系结构。对第 1、2 层气生根角度的相关性分析结果(图 2)显示,第 1 层气生根角度与第 2 层气生根角度呈极显著正相关,相关系数 $r=0.947^{**}$ 。说明将第 2 层气生根角度作为筛选鉴定指标可以提高工作效率。

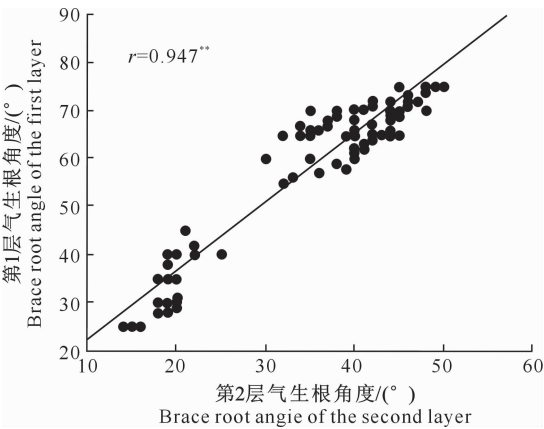


图 2 玉米不同层次气生根角度的相关性
Fig. 2 Relevance of brace root angle in different layers of maize

2.2 玉米气生根条数与抗倒性的关系

2.2.1 气生根条数与抗倒性的相关性 入土气生根条数与倒伏级别的相关性结果见表 3。入土气生

根条数与倒伏级别的 χ^2 值为 13.023, $P=0.043<0.05$,表明玉米气生根条数分级与倒伏级别显著相关。由表 3 可以看出,气生根条数分级越高,低倒伏级别植株占比越大,说明气生根条数越多,植株倒伏几率越低。抗倒性随入土气生根条数的增多而增强。说明在玉米育种中可将气生根条数作为抗倒性的筛选指标。

不同玉米气生根条数级别的群体倒伏率见图 3。由图 3 可以看出,气生根条数越多,群体倒伏率越低。气生根条数 11~16 植株的群体倒伏率较气生根条数 4~10 植株显著降低 21.9%;气生根条数 17~22 植株的群体倒伏率较 11~16 植株显著降低 14.0%。由此可见,气生根条数与抗倒性显著正相关,气生根条数越多,植株抗倒伏能力越强。

2.2.2 不同抗倒型玉米自交系气生根条数的比较

由表 2 可以看出,抗倒型玉米自交系均有 2 层气生根,而易倒型玉米自交系除自交系 S1 外,均只有 1 层气生根。杨凌和三亚环境下,抗倒型玉米自交系的第 1 层气生根条数为 14.0~19.3,易倒型玉米自交系第 1 层气生根条数为 7.0~12.5,所有抗倒型玉米自交系第 1 层气生根条数均大于易倒型玉米自交系,除杨凌环境下的 S3 与 R1、R2、R3 外,2 组玉米自交系差异均显著。在杨凌和三亚,抗倒型玉

米自交系入土气生根总条数均显著大于易倒型玉米自交系。易倒型玉米自交系气生根层次少、每层气生根条数少,综合表现为入土气生根总条数较抗倒型玉米自交系少。可见,入土气生根条数与抗倒性关系紧密,可用于玉米抗倒伏育种。入土气生根总

条数评价抗倒性最准确,但是第 2 层入土气生根条数最易观察。相关性分析结果(图 4)表明,第 2 层入土气生根条数与气生根总条数极显著正相关,相关系数 $r=0.924$ 。因此,可以将第 2 层入土气生根条数作为评价指标用于玉米抗倒伏育种。

表 3 玉米气生根条数与抗倒性的相关性

Table 3 Correlation between brace root number and lodging grade in maize

气生根条数分级 Brace root number grade	指标 Index	倒伏级别 Lodging grade				合计 Total
		0	1	2	3	
4~10	观察株数 Observed number	7.0	5.0	15.0	6.0	33.0
	理论株数 Theoretical number	8.5	9.9	12.0	2.6	33.0
	株数比例/% The ratio of number	21.2	15.2	45.5	18.2	100.0
11~16	观察株数 Observed number	34.0	47.0	50.0	8.0	139.0
	理论株数 Theoretical number	35.8	41.7	50.5	11.0	139.0
	株数比例/% The ratio of number	24.5	33.8	36.0	5.8	100.0
17~22	观察株数 Observed number	8.0	5.0	4.0	1.0	18.0
	理论株数 Theoretical number	4.6	5.4	6.5	1.4	18.0
	株数比例/% The ratio of number	44.4	27.8	22.2	5.6	100.0

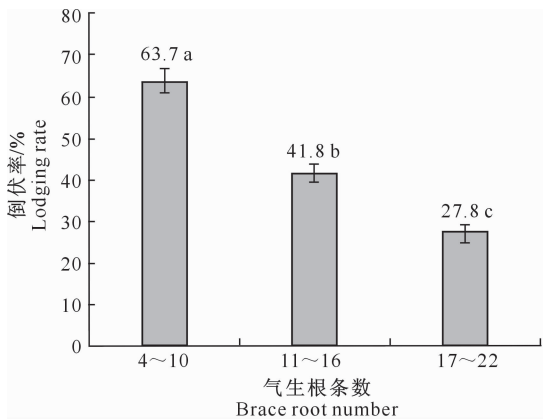


图 3 不同玉米气生根条数级别的群体倒伏率
Fig. 3 Lodging rate of maize with different brace root numbers

2.3 玉米气生根直径与抗倒性的关系

由表 2 可以看出,杨凌和三亚环境下,抗倒型玉米自交系气生根直径 4.2~5.6 mm,平均为 4.8 mm;易倒型玉米自交系气生根直径 2.9~5.4 mm,平均为 4.2 mm。抗倒型玉米自交系的气生根直径平均值较易倒型玉米自交系大,但自交系间比较不存在一致的显著性差异规律,说明入土气生根直径对评价玉米抗倒性有一定的参考价值。

2.4 玉米气生根深度与抗倒性的关系

由表 2 可以看出,杨凌和三亚环境下,抗倒型玉米自交系气生根深度 19.0~25.3 cm,平均为 22.46 cm;易倒型玉米自交系气生根直径 13.1~21.7 cm,平均为 18.26 cm。抗倒型玉米自交系的气生根深度平均值较易倒型玉米自交系大,但自交系间比较不存在一致的显著性差异规律,说明气生根深度对评价玉米抗倒性有一定的参考价值。

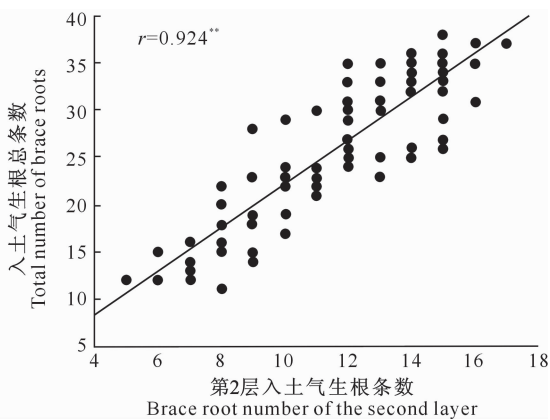


图 4 玉米入土气生根条数的相关性
Fig. 4 Relevance of brace root number

3 结论与讨论

国内外学者将玉米的抗倒伏特性分为植株形态、茎秆特性和根系特征 3 个主要方向进行研究,目前已筛选出与玉米抗倒性有关的茎粗、株高、穗位高、穗上节间数、基部节间长度、茎秆穿刺强度、茎秆解剖结构、茎秆化学成分、气生根解剖结构等诸多指标和性状^[17-23]。有学者指出,在影响玉米抗倒性诸多因素中,根系性状是主要的影响因素^[24-25]。玉米气生根为植株提供固着力和侧向支撑力,其形态、数量与抗倒性的关系密切。但目前有关玉米气生根性状与抗倒性关系的研究不多。丰光等^[12]研究表明,玉米的倒伏率与其气生根层数呈显著正相关,增加气生根层数能提高玉米的抗倒伏能力;王永学等^[11]研究表明,玉米的倒伏率与茎秆强度、茎粗、入土气生根条数呈负相关,进一步通径分析表明,入土气生

根条数对倒伏率影响最大,其后依次为穗位高、茎秆强度和株高。本研究结果表明,玉米入土气生根条数与抗倒性显著正相关,即抗倒性随入土气生根层数和条数的增多而增强;抗倒型玉米自交系气生根均有 2 层,且气生根条数显著多于易倒型玉米自交系。本研究结果还表明,玉米气生根角度与抗倒性显著正相关,气生根角度越大,群体倒伏率越低,植株抗倒伏能力越强;抗倒性强的玉米自交系一致表现出气生根角度大的特征,且显著大于易倒型自交系。气生根角度开张大能为植株提供更强的侧向支撑和固着能力,进而提高玉米植株整体抗倒性,这与长期田间育种的实践经验相符。本研究结果表明,抗倒型玉米自交系的气生根直径平均值和气生根深度平均值较易倒型玉米自交系大,但不存在一致的显著性差异规律,说明玉米气生根直径和气生根深度对抗倒性的影响相对较小。综上表明,气生根角度和入土气生根条数对玉米抗倒性有重要影响,气生根角度越大,入土气生根条数越多,玉米植株的抗倒性就越强。因此在玉米育种中将气生根角度和入土气生根条数作为抗倒性的评价指标加以利用,可以作为玉米抗倒品种改良和选育的可行途径之一。

倒伏发生的机理较为复杂,是外界环境与植株相互作用的结果,当外界环境破坏力超出植株的抵御能力极限时导致倒伏。在玉米育种实践中,难以育成各部分抗倒性状均理想的株型。因此当前最有效可行的抗倒育种方法是在诸多抗倒伏指标中选出抗倒性评价最准确、育种中易于改良的性状作为鉴定指标来选育抗倒品种。目前,玉米育种仍然主要依靠常规育种,抗倒伏品种评价和选育工作的主要途径是降低株高和穗位高,而过分降低作物株高和穗位高不利于作物产量的积累^[26]。本研究结果表明,气生根角度、入土气生根条数与抗倒性显著正相关。因此在玉米育种中重点针对气生根角度、入土气生根条数加以筛选利用,同时参考气生根直径和气生根深度的表现,能达到有效选育抗倒伏品种的目的。

[参考文献]

[1] 汪黎明,姚国旗,穆春华,等. 玉米抗倒性的遗传研究进展 [J]. 玉米科学,2011,19(4):1-4.
Wang L M, Yao G Q, Mu C H, et al. Genetic research on the lodging resistance of maize [J]. Journal of Maize Science, 2011, 19(4):1-4.
[2] 曹铁华,梁烜赫,李 刚,等. 玉米倒伏和扶直的产量效应研究 [J]. 玉米科学,2013,21(6):81-83.

Cao T H, Liang X H, Li G, et al. Yield effect of lodging and lifting up in maize after being attacked in Jilin province [J]. Journal of Maize Science, 2013, 21(6):81-83.
[3] 丰 光,黄长玲,那锦丰. 玉米抗倒伏的研究进展 [J]. 作物杂志,2008(4):12-14.
Feng G, Huang C L, Xing J F. The research progress in lodging [J]. Crops, 2008(4):12-14.
[4] 杨德光,马德志,于乔乔,等. 玉米倒伏的影响因素及抗倒伏性研究进展 [J]. 中国农业大学学报,2020,25(7):28-38.
Yang D G, Ma D Z, Yu Q Q, et al. Research progress on influencing factors of lodging and lodging resistance in maize [J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(7):28-38.
[5] 孙世贤,顾慰连,戴俊英. 密度对玉米倒伏及其产量的影响 [J]. 沈阳农业大学学报,1989,20(4):413-416.
Sun S X, Gu W L, Dai J Y. Effect of density on lodging and yield of maize [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 1989, 20(4):413-416.
[6] 张春雨,白 晶,丁相鹏,等. 错株增密种植对夏玉米光合特性及产量的影响 [J]. 中国农业科学,2020,53(19):3928-3941.
Zhang C Y, Bai J, Ding X P, et al. Effects of staggered planting with increased density on the photosynthetic characteristics and yield of summer maize [J]. Sci Agric Sin, 2020, 53(19):3928-3941.
[7] 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.
Xu T J, Lü T F, Chen C Y, et al. Effects of plant density and plant growth regulator on stalk traits of maize and their regulation [J]. Sci Agric Sin, 2019, 52(4):629-638.
[8] 蒋傲男,闫静琦,卢海博,等. 不同春玉米品种茎秆显微结构对抗折强度的响应 [J]. 玉米科学,2020,28(5):53-59.
Jiang A N, Yan J Q, Lu H B, et al. Response of stem microstructure of different spring maize varieties to bending strength [J]. Journal of Maize Sciences, 2020, 28(5):53-59.
[9] 李浩川,张朝林,曲彦志,等. 玉米抗倒伏相关性状的遗传特性研究 [J]. 河南农业大学学报,2019,53(1):15-21.
Li H C, Zhang C L, Qu Y Z, et al. Study on the genetic characteristic of the traits related to lodging resistance in maize [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2019, 53(1):15-21.
[10] 朱延姝,孔馨樱,李 涵,等. 中国骨干玉米自交系气生根发生时间和抗穿刺强度差异分析 [J]. 新疆农业大学学报,2017,40(6):397-402.
Zhu Y S, Kong X Y, Li H, et al. Analysis on the difference of aerial root occurrence time and penetrometer resistance in the key Chinese maize inbred lines [J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2017, 40(6):397-402.
[11] 王永学,张成辉,刘宗华. 玉米抗倒伏性状的配合力效应及通径分析 [J]. 河南农业大学学报,2011,45(1):1-6.
Wang Y X, Zhang Z H, Liu Z H. Path analysis and combining ability analysis of lodging resistance traits in maize [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2011, 45(1):1-6.
[12] 丰 光,景希强,李妍妍,等. 玉米茎秆性状与倒伏性的相关和

- 通径分析 [J]. 华北农学报, 2010, 25(增刊): 72-74.
- Feng G, Jing X Q, Li Y Y, et al. Correlation and path analysis of stem characters and lodging resistance of maize [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2010, 25(S): 72-74.
- [13] 刘后利. 实用油菜栽培学 [M]. 上海: 上海科技出版社, 1987: 538-539.
- Liu H L. Practical rapeseed cultivation [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1987: 538-539.
- [14] 田保明, 杨光圣. 农作物倒伏及其评价方法 [J]. 中国农学通报, 2005, 21(7): 111-114.
- Tian B M, Yang G S. Evaluation methods of lodging resistance in crops [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(7): 111-114.
- [15] 陈雪东. 列联表分析及在 SPSS 中的实现 [J]. 数理统计与管理, 2002, 21(1): 14-19.
- Chen X D. Contingency table analysis and realization in SPSS [J]. Application of Statistics and Management, 2002, 21(1): 14-19.
- [16] Zuber M S. Evaluation of corn root systems under various environments [C]//Chicago: Proceedings of 23rd Annual Corn and Sorghum Research Conference, 1968: 67-75.
- [17] Chang H S, Loesch P J, Zuber M S. Effects of recurrent selection for crushing strength on morphological and anatomical stalk traits in corn [J]. Crop Science, 1976, 16(5): 621-625.
- [18] Esehie H A, Rodriguez V, Al-Asmi H. Comparison of local and exotic maize varieties for stalk lodging components in a desert climate [J]. European Journal of Agronomy, 2004, 21: 21-30.
- [19] Zuber M S, Loesch P J. Total ash and potassium content of stalks as related to stalk strength in corn (*Zea mays* L.) [J]. Agronomy Journal, 1966, 58(4): 426-428.
- [20] Leng E R. Selection reversal in strains of corn previously long-term selected for chemical composition [J]. Crop Science, 1962, 2(2): 167-170.
- [21] 李晓阳. 玉米气生根后生木质部导管数量的全基因组关联分析 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
- Li X Y. GWAS analysis on the number of vessels in metaxylem of aerial roots in maize [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2018.
- [22] 郑云霄, 刘文斯, 赵永锋, 等. 玉米种质资源的抗倒伏性评价及鉴定指标筛选 [J]. 植物遗传资源学报, 2019, 20(6): 1588-1596.
- Zheng Y X, Liu W S, Zhao Y F, et al. Evaluation of lodging resistance and selection of identification indexes of maize germplasm resources [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2019, 20(6): 1588-1596.
- [23] 朱丽斌, 祁炳琴, 李碧霞, 等. 玉米茎秆强度形成与木质素积累关系的研究 [J]. 西北植物学报, 2020, 40(8): 1389-1395.
- Zhu L B, Qi B Q, Li B X, et al. Study on the relationship between stalk strength formation and lignin accumulation in maize [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2020, 40(8): 1389-1395.
- [24] 杨秀玲, 张东银. 选育高抗倒玉米杂交种有关问题的探讨 [J]. 玉米科学, 2000, 8(S): 19-20.
- Yang X L, Zhang D Y. Study on the breeding of hybrid lines with high resistance in maize [J]. Journal of Maize Science, 2000, 8(S): 19-20.
- [25] 杨延玲, 芦连勇. 玉米抗倒性影响因素的遗传研究 [J]. 安徽农业科学, 2012, 40(8): 4506-4508.
- Yang Y L, Lu L Y. Study on the heredity of influencing factors of lodging resistance of corn [J]. Journal of Anhui Agriculture and Science, 2012, 40(8): 4506-4508.
- [26] 孙彩霞. 玉米抗旱性鉴定指标体系及抗旱鉴定指标遗传特性的研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2001: 10-12.
- Sun C X. Study on maize drought-resistance index and genetic analysis of drought-resistance index [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2001: 10-12.