

玉米不同耐密植品种茎秆穿刺强度的变化特征

勾 玲^{1,2}, 黄建军², 孙 锐¹, 丁在松¹, 董志强¹, 赵 明^{1*}

(1. 中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081;

2. 石河子大学新疆兵团绿洲生态农业重点实验室, 石河子 832003)

摘 要:以耐密抗倒性不同的品种(稀植大穗品种 JK 518 和 JK 519、耐密抗倒品种 XY335 和 CS 1; 中等耐密品种 ND 108)为材料, 设 5 个密度处理, 研究玉米茎秆的穿刺强度(RPS)的变化特点及其对群体种植密度的响应。结果表明玉米茎秆穿刺强度随生育期递进而增强, 不同耐密性品种间随种植密度变化有较大差异。茎秆基部节间的穿刺强度随群体密度增加呈线性递减。茎秆节间 RPS 随着节位的上升而呈二次函数递减; 不同耐密性品种间 RPS 以抽雄-吐丝期差异明显, 以穗位以下节间, 尤其第 3~6 节间表现差异较大。玉米抽雄前茎壁增厚早、茎皮较厚, 则 RPS 高; 吐丝期茎秆基部节间充实良好、穗位以下节间较短的群体, 有利于提高品种茎秆抗倒伏能力。因此, 以玉米抽雄前 7 d 至吐丝期、基部第 3~6 节间作为茎秆抗倒鉴定的关键时期和敏感部位, 能够客观评价植株的抗倒伏能力, 有效提高抗倒品种筛选效率。

关键词:作物, 应力分析, 茎秆, 玉米, 穿刺强度, 抗倒伏

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.11.028

中图分类号: S513

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2010)-11-0156-07

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 Ling, Huang Jianjun, Sun Rui, et al. Variation characteristic of stalk penetration strength of maize with different density-tolerance varieties[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 156—162. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

倒伏问题已成为玉米大面积增密高产的主要障碍因素。玉米从拔节期至成熟期均有可能发生茎秆倒伏, 每年因倒伏造成的玉米产量损失在 5%~25% 左右, 甚至更高^[1-2]。因此, 农学家已把抗倒伏作为育种的三大主攻目标(高产、抗倒、抗病)之一。近年来, 关于作物抗倒伏能力与茎秆生物力学性质的研究越来越引起农学家和农业工程学领域的高度关注。多数学者从茎秆外皮穿刺强度、抗压碎和抗拉弯方面等对玉米抗倒伏生物力学特征展开研究^[3-10]。茎秆外皮穿刺强度(rind penetration strength, RPS)与田间倒伏率具有高度的相关性^[11-16], 而且其测定操作简单、快捷, 逐渐成为玉米茎秆抗倒伏鉴定的评价指标之一。由于玉米茎秆强度随生育期进程和外界环境条件是不不断变化的, 且各节间也存在差异。因此, 明确茎秆倒伏发生的敏感时期和敏感部位, 对玉米抗倒伏品种的筛选和鉴定是非常必要的。有关这方面

的研究还不多见。本试验以不同抗耐密倒伏性玉米品种为材料, 在不同群体密度条件下, 研究玉米茎秆 RPS 对密度的响应及其变异规律, 揭示 RPS 与茎秆结构和农艺性状的相互关系, 明确茎秆抗倒伏能力鉴定的最适时期和最佳部位及其评价指标, 为玉米抗倒品种选育和增密高产栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2005—2006 年在中国农业科学院昌平试验基地进行。土壤为褐潮土, pH 值为 7.6, 含有机质 18.8 g/kg、全氮 1.0 g/kg、碱解氮 89.22 mg/kg、速效磷 27.2 mg/kg、速效钾 94.0 mg/kg。试验采用裂区设计, 密度为主区, 品种为副区。设每公顷 3.0、5.25、7.5 (推广密度)、9.25 和 12 万株共 5 个密度处理。选用不同耐密抗倒性的品种: 稀植大穗型品种京科系列 JK 518 和 JK 519; 中等耐密品种农大 108 (ND 108); 耐密抗倒品种先玉 335 (XY 335) (2005 年) 和登海系列超试 1 号 (CS 1) (2006 年)。采用宽窄行 (80 cm×40 cm) 种植, 每小区面积 21.6 m², 4 次重复。两年分别于 5 月 9 日和 5 月 17 日点播。播前基施 P₂O₅ 36 kg/hm²、K₂O 90 kg/hm²、纯氮 103.5 kg/hm², 拔节期追施纯氮 69 kg/hm²。其他管理与当地高产玉米田相似。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 茎秆硬皮穿刺强度 (RPS, 简称穿刺强度)

分别于玉米抽雄期前期 (7 月 12—19 日)、吐丝期 (7 月 26 日—8 月 3 日)、乳熟期 (8 月 25—28 日) 和蜡熟期 (9 月 13—17 日) 取样, 每处理取生长一致的代

收稿日期: 2010-02-07 修订日期: 2010-06-02

基金项目: 国家点基础研究 (973 计划) 项目“主要粮食作物高产栽培与资源高效利用的基础研究” (2009CB118600); 国家“十一五”科技支撑计划粮食丰产科技项目“三大作物可持续超高产共性理论与技术模式研究” (2006BAD02A13); 博士后基金: 玉米密植超高产的抗倒伏力学及生物学机理的研究 (20090460418); 新疆玉米高密度超高产茎秆抗倒伏机理的研究 (RCZX200816)

作者简介: 勾 玲 (1966—), 女, 副教授, 博士, 主要从事作物高产栽培生理的研究。北京 中国农业科学院作物科学研究所, 100081。

Email: glxj8162@sina.com.cn

*通信作者: 赵 明, 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事作物超高产、高光效、抗逆生理等研究。北京 中国农业科学院作物科学研究所, 100081

表植株 3~5 株,对茎秆伸长第一节间自下而上测定 RPS。采用 3YJ-1 型玉米茎秆硬度计,将横断面积为 0.01 cm² 的测头垂直匀速插入茎秆节间中部,读取穿透茎秆表皮的最大值^[7]。

1.2.2 茎秆形态结构与农艺性状

测定茎秆强度同时,用钢尺和游标卡尺逐节测量节间的长度和直径;分别截取第 3 和第 6 节间中部横断面,在放大镜下量取茎皮厚度(mm)。称取各茎节新鲜质量(FW)后,经 105℃杀青后置 70℃下烘干至恒质量,称其干物质量(DW)。茎节含水率(%)=(鲜质量-干质量)/鲜质量×100%;单位茎长干物质量=茎节干质量/节间长度(g/cm),计算各项测定数据的变异系数。变异系数是衡量各观测值变异程度的统计量,即标准差对平均数的百分数,其计算公式为

$$CV = \frac{S}{\bar{x}} \times 100\%$$

式中, CV 为变异系数; S 为各观测值的标准差; \bar{x} 为各观测值的平均值。

1.3 数据分析

以 Microsoft Excel 处理数据,采用 SAS V8 软件包对数据进行差异显著性、相关性和多元回归分析。利用 Curve Expert1.38 软件进行回归模拟,筛选建立具有生物学意义的回归模型。

2 结果与分析

2.1 不同类型玉米品种年际间的茎秆穿刺强度方差分析

对 2 a 供试品种 4 个不同时期的茎秆平均穿刺强度数据的方差分析结果表明(表 1),不同的年份间、品种间、生育时期和不同密度间的穿刺强度存在显著差异;年份与生育时期、年份与种植密度、密度与生育期间存在极显著的互作效应。而年份与品种、品种与生育时期、种植密度与品种间的互作效应不显著。说明玉米茎秆强度不仅受种植年份、生育期和种植密度的影响,而与品种的固有抗倒特性密切相关。

表 1 茎秆穿刺强度的方差分析

Table 1 Analysis of variance for stalk rind penetration strength (F-value)

变异来源	F 值	Pr>F
年份(Y)	5.67*	0.0250
品种(V)	7.27**	0.0002
时期(S)	5.66**	0.0014
密度(D)	9.05**	<0.0001
年份×品种(Y×V)	1.63	0.1870
年份×时期(Y×S)	4.50**	0.0055
品种×时期(V×S)	1.86	0.0678
年份×品种×时期(Y×V×S)	0.65	0.7317
年份×密度(Y×D)	11.87**	<0.0001
密度×品种(D×V)	1.00	0.4522
密度×时期(D×S)	3.68**	0.0002

注: “*”、“**” 分别表示在 5%和 1%水平上差异显著。Pr>F: 表示其显著水平。

2.2 不同耐密性品种茎节穿刺强度的比较

玉米不同耐密性品种 4 个生育时期茎秆各节间平均 RPS 的变化(图 1)表明,随茎节部位的上升而 RPS 逐渐降低,呈非线性变化趋势,2 a 表现较为相似。经拟合较符合二次函数 $y=a+bx+cx^2$, 方程的 R^2 值均达到极显著水平。其中 a 值即穿刺强度的最大估计值,2005 年以 XY335 最高(63.31 N/mm²); 2006 年以 CS1 最高(70.25 N/mm²), 较最低 JK519 (57.86 N/mm²和 55.61 N/mm²) 高 9.4%和 26.3%; ND108 和 JK518 分居第二、第三位。还可看出,随节位的上升同一节间不同类型品种间的 RPS 差异逐渐减小,在穗位节(第 8、9 节间)以上的差异不显著。表明不同耐密性品种间茎秆强度差异主要集中在穗位以下节间,其中以第 2~6 节间差异最为显著。此结果与本研究田间调查发现的稀植大穗品种有 70%~80% 茎秆折断发生在第 3~6 节间较为吻合。因此,玉米伸长第 3~6 节间的 RPS 作为抗倒伏品种鉴定和筛选的敏感部位是可行的。

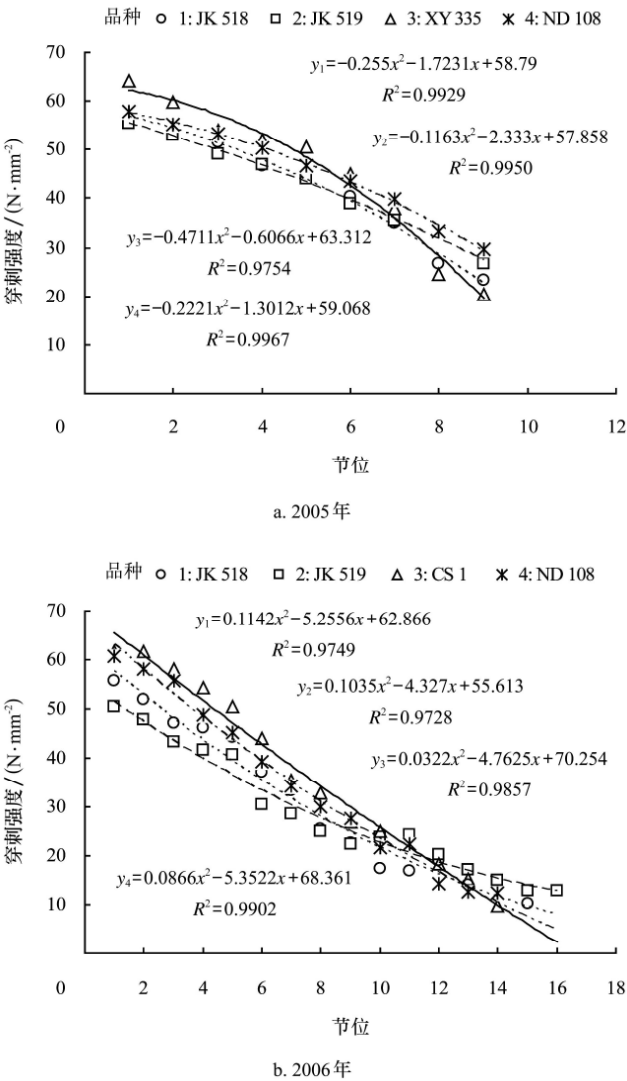


图 1 玉米不同类型品种茎节穿刺强度的变化(每公顷 7.5 万株)
Fig.1 Changes of the stalk rind penetration strength for four maize varieties at two years (7.5 × 10⁴ plant/hm²)

2.3 不同生育时期玉米茎节穿刺强度的变化

不同耐密性品种间的茎节 RPS 随生育期的变化也不同(图2)。从2006年不同玉米品种4个生育期比较可看出,在玉米抽雄前期品种间的茎秆强度差异最大,随生育期推后差异逐渐缩小,到蜡熟期品种间差异不显著。如在抽雄前期 CS1 的茎节平均 RPS 最高,其第2~6节间平均 RPS 为 47.1 N/mm^2 ,比稀植大穗品种 JK 519 (28.4 N/mm^2)高65.6%,比 JK 518 和 ND 108 分别高44.3%

和34.0%,且各品种间差异极显著($P<0.01$)。进入吐丝期后 CS1 与 JK518、ND108 茎秆强度差异逐渐缩小,差异不显著;而 JK 519 仍然较低,显著低于 CS1。不同抗倒伏性品种茎秆 RPS 差异主要表现在抽雄前至乳熟期,其中以抽雄前后最为明显。由此,玉米抽雄前到吐丝期可作为是茎秆抗倒性能鉴定和选择的最佳时期。并且第3~6茎节抽雄前平均 RPS 达 30.0 N/mm^2 、吐丝期达 45.0 N/mm^2 以上,可作为抗倒伏品种筛选和评价的参考指标。

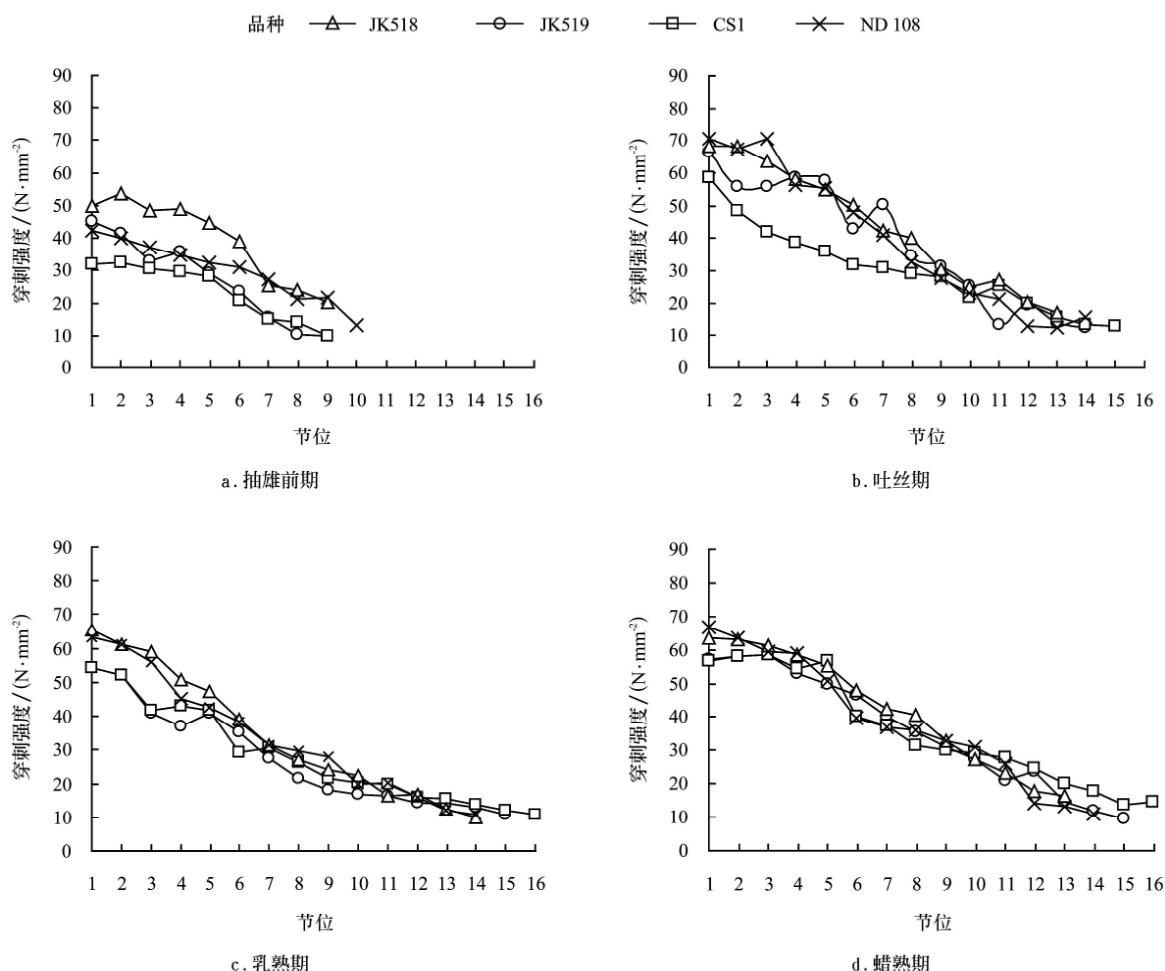


图2 玉米不同生育期茎秆穿刺强度的比较(2006年,每公顷7.5万株)

Fig.2 Comparison of stalk rind penetration strength of maize at four growth stages (2006, 7.5×10^4 plant/hm²)

2.4 玉米茎秆穿刺强度对密度的响应

不同类型品种在4个生育时期穿刺强度对密度增加响应差异较大。比较2006年茎秆第3节间的穿刺强度可见(图3),在相同密度下,稀植大穗品种 JK518 和 JK519 的第3节间 RPS 随生育期变化幅度较大, CV 在7.5%~43.6%之间;而耐密抗倒品种 CS1 CV 仅为9.9%~14.2%。不同类型品种茎节穿刺强度均随种植密度增加而下降,其下降幅度也不相同,经回归模拟较符合线性函数 $y=a+bx$, R^2 均达显著。由图3中方程得出,以 JK 519 穿刺强度的最大估计值 a 最高,较 CS1 的 70.2 N/mm^2 高15.9%;而随密度变化的递减速率 b 值,也以 JK 519 最大为 5.19 N/mm^2 ,是 CS1 b 值的3.4倍。由此推出,玉米

在生育中期茎秆基部穿刺强度不一定很高,但其随种植密度增加和生育期推移其 RPS 变化幅度较小的品种耐密抗倒性能较好。

2.5 茎秆穿刺强度与茎节横截面特征的相关性分析

玉米茎秆穿刺强度(RPS)与茎横截面的结构密切相关。以茎秆反应较脆弱时期——抽雄-吐丝期,对4个供试玉米品种各个密度茎秆的敏感部位第3和第6节间穿刺强度与其茎截面结构性状进行 Person 相关分析(表2)表明,在抽雄前期茎节强度与其截面各个性状参数均达到显著或极显著相关;而吐丝期第3节间和第6节间穿刺强度仅与厚壁组织厚度(x_2)和厚壁面积(x_5)呈极显著或显著正相关,但二者均与茎节直径(x_1)无显著相关性。

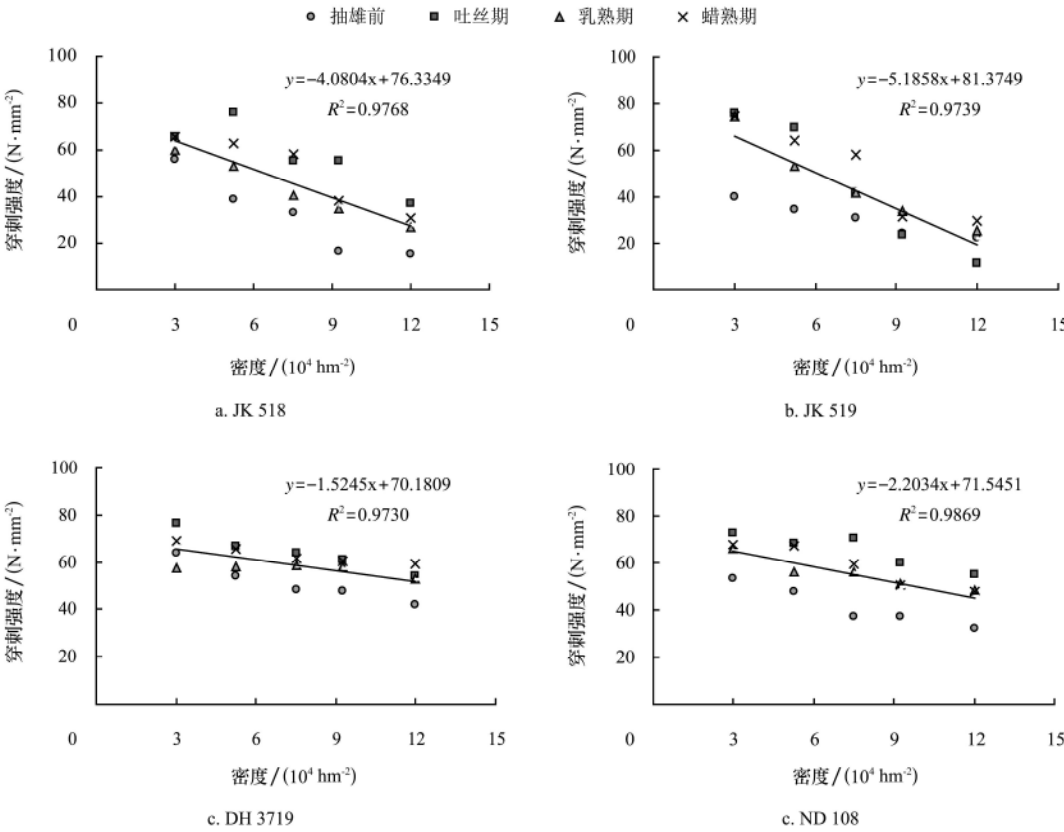


图 3 玉米茎秆穿刺强度对密度的响应（2006 年）
Fig.3 Response of maize stalk rind penetration strength with the planting densities in 2006

表 2 玉米茎节穿刺强度与茎截面性状的相关性（2006）

Table 2 Correlation analysis between rind penetration strength and the rind traits of 3rd and 6th internodes in 2006

部位	生育期	节间直径 (x ₁)/mm	厚壁组织厚度 (x ₂)/mm	厚壁组织厚度/直径 (x ₃)/%	茎截面积 (x ₄)/mm ²	厚壁面积 (x ₅)/mm ²	壁面积/茎截面积 (x ₆)/%
3 节间	抽雄前	<i>r</i>	0.5217*	0.6617**	0.5528*	0.5360*	0.6372**
		<i>P</i> 值	0.0183	0.0015	0.0115	0.0149	0.0025
	吐丝	<i>r</i>	0.3378	0.6622**	0.4329	0.3421	0.5679**
		<i>P</i> 值	0.1452	0.0015	0.0566	0.1399	0.0090
6 节间	抽雄前	<i>r</i>	0.6098**	0.7621**	0.6303**	0.6064**	0.7399**
		<i>P</i> 值	0.0043	<0.0001	0.0029	0.0046	0.0002
	吐丝	<i>r</i>	0.3684	0.5466*	0.4949*	0.3609	0.4700*
		<i>P</i> 值	0.1100	0.0126	0.0265	0.1180	0.0365

注：“*”、“**” 分别表示在 5%和 1%水平上显著。下同。

经逐步回归分析（表 3）表明，在玉米吐丝期以前玉米基部茎节厚壁组织厚度（x₂）对茎秆穿刺强度的贡献较大。表明进入籽粒灌浆期之前，茎秆机械组织的发达成

表 3 茎秆穿刺强度与茎截面性状的逐步回归模型（2006 年）
Table 3 Equation of stepwise regression between rind penetration strength and rind section traits in 2006

部位	生育期	回归方程模型	决定系数 R ²
3 节间	抽雄前期	$y = -15.1634 + 45.0861x_2$	0.4378**
	吐丝期	$y = -18.683 + 62.5159x_2$	0.4385**
6 节间	抽雄前期	$y = -6.1617 + 36.8299x_2$	0.5808**
	吐丝期	$y = 4.1633 + 43.2827x_2$	0.2987

注：x₂ 为厚壁组织厚度，mm；y 为茎秆穿刺强度，N/mm²。

度对品种茎秆强度和抗倒伏能力起着决定性的作用。由此推出，玉米在生育中期茎秆基部穿刺强度不一定很高，但其随种植密度增加和生育期推移其 RPS 变化幅度较小的品种耐密抗倒性能较好。

2. 6 玉米茎秆穿刺强度与其农艺性状的相关性比较

玉米茎秆形态特征和干物质积累是茎秆强度形成的物质基础。对玉米供试品种各个密度条件下抽雄前和吐丝期第 3 和 6 节间的茎秆穿刺强度与其农艺性状进行相关分析（表 4）表明，玉米基部茎节的 RPS 与节间长度、长/径比呈显著负相关；与单位节长干质量呈极显著正相关；茎秆含水率对茎秆强度产生负作用，尤其在吐丝期茎节含水率与强度呈极显著负相关。因此在吐丝期前茎节间较短、干物质积累多、含水率低，则有利于茎秆强

度提高。

表 4 茎节穿刺强度与其农艺性状的相关性 (2006 年)

Table 4 Correlation analysis between rind penetration strength and agronomic traits of 3rd and 6th internodes (2006)

部位	生育期		长/径(z_1)	节长(z_2)/cm	鲜质量(z_3) /g	干质量(z_4)/g	含水率(z_5) /%	单位节长干质量(z_6)/(g · cm ⁻¹)
3 节间	抽雄前	相关系数 r	-0.5007 [*]	-0.4495 [*]	0.2097	0.4010	-0.3361	0.6585 ^{**}
		P 值	0.0208	0.0409	0.3616	0.0716	0.1364	0.0012
	吐丝	相关系数 r	-0.5043 [*]	-0.3382	0.4515 [*]	0.5625 ^{**}	-0.5704 ^{**}	0.6461 ^{**}
		P 值	0.0234	0.1447	0.0457	0.0098	0.0086	0.0021
6 节间	抽雄前	相关系数 r	-0.5597 [*]	-0.6233 ^{**}	0.0360	0.3054	-0.3529	0.5402 [*]
		P 值	0.0103	0.0033	0.8803	0.1904	0.1270	0.0139
	吐丝	相关系数 r	-0.6891 ^{**}	-0.4986 [*]	-0.1332	0.3071	-0.5721 ^{**}	0.5954 ^{**}
		P 值	0.0008	0.0252	0.5757	0.1878	0.0084	0.0056

逐步回归分析显示 (表 5), 在吐丝期前玉米基部第 3 节的节长干质量比 (z_6) 对茎秆穿刺强度的贡献较大, 即茎秆内干物质积累多, 强度大。而第 6 节则以节间较短, 节长/径比低, 则茎秆强度增加。因此, 在品种选育中, 应筛选吐丝期前茎秆基部节间充实较好, 穗下节间较短的品种, 植株的抗倒伏能力增强。

表 5 穿刺强度与农艺性状的逐步回归模型 (2006 年)

Table 5 Equation of stepwise regression between rind penetration strength and agronomic traits of internodes in 2006

部位	生育期	回归方程模型	R^2
3 节间	抽雄前期	$y = 17.4109 - 0.4408z_3 + 135.9671z_6$	0.5239**
	吐丝期	$y = 27.9899 + 61.7185z_6$	0.4174**
6 节间	抽雄前期	$y = 73.8444 - 3.10423z_2 + 4.2211z_4$	0.5521**
	吐丝期	$y = 60.6734 - 3.6151z_1 + 1.4316z_5$	0.5463**

注: y 为茎秆穿刺强度, N/mm^2 ; z_1 为长/径; z_2 为节长, cm ; z_3 为鲜质量, g ; z_4 为干质量, g ; z_5 为含水率, $%$; z_6 为单位节长干质量, g/cm 。

3 讨 论

1) 茎秆穿刺强度是评价茎秆表皮抗穿透能力的综合指标。由于其与茎秆抗倒伏能力具有高度的相关性^[12-16], 且具有测定方法便捷、破坏性较小、易于田间操作等优点, 已成为玉米田间抗倒伏品种选择和鉴定的重要手段。但关于玉米抗倒伏鉴定和选择的关键测定时期、最佳部位尚未取得没有一致的观点。国外研究茎秆强度力学指标测定时间从乳熟期、蜡熟期至成熟期均有^[6,13], 也有人尝试在开花期和抽雄前期测定^[12,14-15]。测定部位多取植株茎秆地上第 1~3 伸长节间, 也有在穗位节。国内多选茎基部第 3 伸长节间中部, 在乳熟至蜡熟期测定较多^[8,10]。本研究通过 2 a 试验表明, 玉米穿刺强度的峰值出现在吐丝期或乳熟期, 品种间外皮穿刺强度 (RPS) 差异最明显的时期在抽雄前 7 d 至吐丝期。而且玉米抽雄前期茎秆 RPS 与田间总倒折率的具有高度的相关性 ($r = -0.9376$)^[12]。品种间穿刺强度差异主要集中于穗位以下节间, 尤以基部第 3~6 节间更为突出。因此把玉米抽雄期前后作为抗倒伏品种选择和鉴定的最佳时期, 以基部第 3~6 节间作

为穿刺强度鉴定的关键部位, 可有效提高抗倒性品种选育和抗倒伏鉴定的可靠性。

2) 近年来增加种植密度成为提高玉米产量的有效途径, 但增密造成的倒伏问题日益突出。不同类型的品种耐密抗倒伏能力有较大差别。本试验结果表明, 玉米茎秆基部节间的 RPS 随群体密度增加呈线性递减。耐密抗倒品种 CS1 随种植密度增加和生育期推移的变异幅度较小; 而稀植大穗品种 JK518、JK519 虽在稀植条件下 RPS 较高, 但随年份和生育期推进的变异幅度加大, 其随密度增加的递减幅度 b 值是 CS1 的 3.4 倍。因此表明, 玉米生长前期茎秆发育早、机械组织发达、对外界环境变化适应性强的品种耐密抗倒伏能力强。同时生育前期较早形成强壮的支持系统, 也可为后期有效的光合产物的生产和籽粒灌浆, 最终实现玉米高产打下良好的物质基础。

3) 玉米茎秆强度与茎秆外部形态特征、组织结构以及干物质积累关系密切。本试验结果表明, 玉米抽雄-吐丝期前茎秆基部节间穿刺强度与厚壁组织 (外皮) 厚度及其面积和所占的比例以及单位节长干质量呈显著正相关; 与节间长度、长/径比、茎节含水率呈显著负相关。玉米吐丝后穿刺强度与茎节直径没有显著相关性。回归分析也显示在玉米吐丝期前基部茎节厚壁组织厚度对茎秆穿刺强度的起决定性作用。因此, 在品种筛选过程中, 选择玉米茎壁增厚早、机械组织发达, 吐丝期茎秆基部节间充实良好、穗下节间较短的群体, 可有效提高茎秆强度和品种抗倒伏能力。

4 结 论

1) 玉米茎秆穿刺强度是一种便捷、有效的检测和鉴别茎秆抗倒能力的重要的指标, 明确适宜测定时间和测定部位是保证选择正确、可靠的必要环节;

2) 在玉米抽雄前 7 d 至吐丝期是茎秆穿刺强度检测的关键时期, 植株基部第 3~6 节间是鉴定的关键部位;

3) 在玉米抽雄前茎节穿刺强度 $30.0 N/mm^2$ 以上、吐丝期在 $45.0 N/mm^2$ 以上可作为抗倒伏品种筛选和评价的参考指标。

[参 考 文 献]

- [1] Norberg O S, Mason S C, Lowry S R. Ethephon influence on harvestable yield, grain quality, and lodging of corn[J]. *Agronomy Journal*, 1988, 80(5): 768—772.
- [2] 王文颇, 李彦生, 周印富. 玉米倒伏及其影响因素[J]. 河北农业技术师范学院学报, 1998, 12(3): 59—63.
Wang Wenpo, Li Yansheng, Zhou Yinfu. Lodging and its effectiv e factors in ma ize (summary), *Journal of Hebei Agro technical Teachers College*, 1998, 12(3): 59—63
- [3] 胡婷, 付志一, 焦群英. 小麦茎秆抗弯性能研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 31—35.
Hu Ting, Fu Zhiyi, Jiao Qunying. Experimental study on the bending mechanical properties of wheat stalk[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(10): 31—35. (in Chinese with English abstract)
- [4] 郭玉明, 袁红梅, 阴妍, 等. 茎秆作物抗倒伏生物力学评价研究及关联分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(7): 14—18.
Guo Yuming, Yuan Hongmei, Yin Yan, et al. Biomechanical evaluation and grey relational analysis of lodging resistance of stalk crops[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(7): 14—18. (in Chinese with English abstract)
- [5] 刘庆庭, 区颖刚, 卿上乐, 等. 甘蔗茎秆在扭转、压缩、拉伸荷载下的破坏试验[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 201—204.
Liu Qingting, Ou Yinggang, Qing Shangle, et al. Failure tests of sugarcane stalks under torsion,compression and tension load[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(1): 201—204. (in Chinese with English abstract)
- [6] Sibale E M, Darrah L L, Zuber M S. Comparison of two rind penetrometers for measurement of stalk strength in maize[J]. *Maydica*, 1992, 37(2): 111—114.
- [7] 李景安, 冯芬芬. 3yc-1 型玉米根茬拔出测力仪、3yJ-1 型玉米茎秆硬度计的研究报告[J]. 玉米科学, 1994, 2(4): 76—78.
Li Jingan, Feng Fenfen. Report of 3yc-1 root pulling dynamometer and 3yJ-1 maize rind penetrometer[J]. *Journal of Maize Sciences*, 1994, 2(4): 76—78 (in Chinese with English abstract)
- [8] 李得孝, 员海燕, 武玉华, 等. 玉米抗倒伏性状的遗传分析[J]. 西北农业学报, 2004, 13(2): 43—46.
Li Dexiao, Yuan Haiyan, Wu Yuhua, et al. Analysis of heredity in maize for lodging resistancer[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2004, 13(2): 43—46. (in Chinese with English abstract)
- [9] 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, 34(4): 653—661.
Gou Ling, Zhao Ming, Huang Jianjun, et al. Bending mechanical properties of stalk and lodging-resistance of maize[J]. *ACTA Agronomica Sinica*, 2008, 34(4): 653—661. (in Chinese with English abstract)
- [10] 高梦祥, 郭康权, 杨中平, 等. 玉米秸秆的力学特性测试研究[J]. 农业机械学报, 2003, 34(4): 48—51.
Gao Mengxiang, Guo Kangquan, Yang Zhongping, et al. Study on mechanical properties of corn stalk[J]. *Transactions of the CSAM*, 2003, 34(4): 48—51. (in Chinese with English abstract)
- [11] 张芳魁, 霍仕平, 张健, 等. 玉米茎秆性状与抗折断力的相关和通径分析[J]. 玉米科学, 2006, 14(6): 46—49.
Zhang Fankui, Huo Shiping, Zhang Jian, et al. Correlation and path analysis between stalk characters and power of stalk resisting breaking in maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2006, 14(6): 46—49. (in Chinese with English abstract)
- [12] 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(10): 1688—1695.
Gou Ling, Huang Jianjun, Zhang Bin, et al. Effects of population density on stalk lodging resistant mechanism and agronomic characteristics of maize[J]. *ACTA Agronomica Sinica*, 2007, 33(10): 1688—1695. (in Chinese with English abstract)
- [13] Anderson B, White D G. Evaluation of methods for identification of corn genotype with stalk rot and lodging resistance[J]. *Plant disease*, 1994, 78(6): 590—593.
- [14] Dudley J W. Selection for rind puncture resistance in two maize population[J]. *Crop Science*, 1994, 34(6): 1458—1460.
- [15] Kang M S, Din A K, Zhang Y D, Magari R. Combining ability for rind puncture resistance in maize[J]. *Crop Science*, 1999, 39(2): 368—371.
- [16] Sheri A Martin, Darrah L L, Hibbard B E. Divergent selection for rind penetrometer resistance and its effects on european corn borer damage and stalk traits in corn[J]. *Crop Science*, 2004, 44(3): 711—717.
- [17] Trenton F Stanger, Joseph G Lauer. Corn stalk response to plant population and the Bt-European Corn Borer Trait[J]. *Agronomy Journal*, 2007, 99(3): 657—664.
- [18] Sherry A. Flint Garcia, McMullen M D, Darrah L L. Genetic relationship of stalk strength and ear height in maize[J]. *Crop Sci*, 2003, 43(1): 23—31.
- [19] Flint Garcia S A, Darrah L L, McMullen M D, et al. Phenotypic versus marker-assisted selection for stalk strength and second-generation European corn borer resistance in maize[J]. *Theor Appl Genet*, 2003, 107(7): 1331—1336.

Variation characteristic of stalk penetration strength of maize with different density-tolerance varieties

Gou Ling^{1,2}, Huang Jianjun², Sun Rui¹, Ding Zaisong¹, Dong Zhiqiang¹, Zhao Ming^{1※}

(1. Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

2. Key Laboratory of Oasis Ecology Agriculture of Xinjiang Construction Corps, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

Abstract: Enhancement of biomechanical stalk strength is a key pathway to improve lodging resistance in modern maize (*Zea mays* L.) production. Four maize varieties were used to investigate the effects of planting density on stalk penetration strength as well as agronomic traits of maize stalk. The four maize varieties were differing in lodging resistance, i. e. JK 518 and JK 519 (low density-tolerance and lodging resistant), CS 1 (high density-tolerance and lodging resistant) and ND 108 (moderate density-tolerance). Five levels of density treatment were imposed, 3.00, 5.25, 7.50, 9.25, and 12.00×10⁴ plants/hm², respectively). The results indicated that the stalk rind penetration strength (RPS) was enhanced with growing of maize. There was difference of stalk RPS in years, and planting densities, respectively, between maize varieties differing in density-tolerance. With the rising of internodes position, stalk RPS were decreased significantly, which fitted a quadratic function curve ($y=a+bx+cx^2$). Furthermore, the difference of stalk RPS between varieties differing in density-tolerance was present at internodes below ear, particularly at 3rd to 6th, in the tasselling–silking stag. With increasing planting densities, stalk RPS of base internodes decreased linearly significantly. Therefore, in the pre-tasselling stage, developed early and thicken in stalk wall indicates that stalk RPS was higher. In the silking stage, both shorter internodes below ear and well developed stalk base had the benefit for improving the stalk lodging resistance. In conclusion, that the 7 days before tasselling–silking stag and 3rd to 6th of the base internodes can be used as the suitable test time and sensitive internodes of the stalk of rind penetration strength in lodging resistance identification. This method can evaluate the stalk strength objectively and improve the breeding efficiency of selection varieties with lodging resistance.

Key words: crops, stress analysis, stalk, maize (*Zea mays* L.), puncture strength, lodging resistance