

玉米抗茎倒能力评价及理想株型

曹庆军¹, 杨粉团¹, 姜晓莉¹, 陈莫军¹, 李贺², 于洪浩², 鲁建华², 张兆琴²,
薄晓杰², 李刚^{1*}

(1. 吉林省农业科学院/农业部东北作物生理生态与耕作重点实验室, 长春 130033; 2. 梨树县蔡家镇农业站, 吉林 梨树 136503)

摘要: 倒伏是影响玉米产量与品质的重要因素, 是当前困扰农业机械化收获与农业集约化生产的重要障碍。本文对玉米倒伏影响因素进行了归纳, 梳理并总结了玉米倒伏的研究方法与品种抗茎倒能力评价指标, 并在此基础上提出了玉米抗茎倒品种的理想株型, 为抗倒伏品种的选育与玉米的抗倒伏栽培提供参考。

关键词: 玉米; 抗倒伏; 评价指标; 理想株型

中图分类号: S513.034

文献标识码: A

文章编号: 1003-8701(2017)02-0017-05

Evaluation of Stem Lodging Resistance and Ideal Plant Type of Lodging Resistant Maize Varieties

CAO Qingjun¹, YANG Fentuan¹, JIANG Xiaoli¹, CHEN Mojun¹, LI He², YU Honghao², LU Jianghua²,
ZHANG Zhaoqin², BO Xiaojie², LI Gang^{1*}

(1. Jilin Academy of Agricultural Science/Key Laboratory of Northeast Crop Physiology Ecology and Cultivation, Ministry of Agriculture, Changchun 130033; 2. Caijia Agricultural Technical Extension Station, Caijia 136503, China)

Abstract: Lodging is one of the important factors restricted maize yield and quality, and also is becoming great obstacle of modern intensive agricultural production due to restriction of mechanization harvesting. In this paper, factors which influenced maize stem lodging were analyzed, research methods of lodging and evaluation index of maize varieties with different lodging resistance summarized. Ideal plant type of stem lodging resistant varieties was put forward based on previous research. This will provide reference for higher lodging resistant maize breeding and cultivation.

Key words: Maize; Lodging resistance; Evaluation index; Ideal type

玉米作为重要的粮食作物、饲料作物和能源作物, 自2012年跃升为我国第一大作物。吉林省是春玉米的主要产区, 但近几年生产中倒伏问题发生严重^[1-2]。倒伏不仅影响玉米的产量、品质, 而且影响机械化收获, 成为制约农业集约化生产的严重障碍^[3]。本文就玉米倒伏的影响因素、品种抗倒伏评价以及倒伏研究方法进行归纳和总结, 同时结合近几年科研工作的实践, 提出了玉

米抗茎倒品种的理想株型, 以期能为抗倒伏品种的选育与玉米的抗倒伏栽培提供参考。

1 倒伏定义及分类

国内学者将倒伏定义为, 由外界因素引发的茎秆从直立状态到倒折的现象^[4]。而国外学者对倒伏的定义则是一个直立生长的作物植株, 在垂直方向上发生永久性的位移^[5]。

根据不同的划分标准, 倒伏划分不同类型。从直观上看, 国内学者将其分为茎倒、根倒和茎折3种类型^[6]; 但国外多数将倒伏分为根倒和茎倒两种类型^[7]。就大田作物而言, 根倒伏发生更为普遍, 但茎倒伏对子粒产量和品质的影响更大^[2, 8], 其减产损失、影响程度与倒伏发生时期、程

收稿日期: 2016-12-28

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(2015GJLS003NY、2013BAD07B02)

作者简介: 曹庆军(1986-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事作物质量安全生产与生理生态方面的研究。

通讯作者: 李刚, 男, 博士, 研究员, E-mail: ligang6@yeah.net

度均有很大关系^[1]。

2 玉米抗倒伏能力的影响因素

作物倒伏的发生主要取决于作物受外力作用(大风、暴雨等)大小以及作物植株本身对外界的抵抗力(茎的抗弯曲强度与根系锚固强度)^[9]。因此,凡是直接或间接影响这两个条件的因素都可能引起倒伏的发生。

2.1 遗传因素

不同基因型品种在株高、叶片空间分布以及与抗倒性有关的茎部性状(基部节间长度、茎抗弯强度)等表型性状上存在着显著的差异^[10-11],而这些典型性状与茎部抗倒伏能力存在显著的相关性,也是导致品种抗倒伏能力产生差异的重要原因。大量研究表明,与抗倒性有关的茎粗、穿刺强度等性状大多是受多基因控制的数量性状遗传^[10-11]。株高和茎秆横折强度受基因加性效应控制,茎粗主要受基因非加性效应控制^[12],玉米茎秆耐穿刺性遗传为多基因数量性状控制^[13-14]。刘洋^[15]利用SSR标记对290份来源不同的玉米自交系材料抗倒伏遗传多样性进行分析,表明五大类群中旅大红骨表现出相对较高的遗传多样性。正是由于不同抗倒伏性状遗传效应的复杂性及不同遗传背景的试验材料存在较高的遗传多样性,给玉米抗倒性的研究与利用带来一定的困难。因此,加强与抗倒伏能力有关的关键性状的遗传研究,发掘相关QTL位点,可为抗倒性材料的选育提供有效参考。

2.2 灾害性气象因素

玉米倒伏的发生,是基因型与环境条件综合作用的结果。大风等强对流气象条件是造成茎倒的重要原因。据报道,黄淮海夏玉米种植区抽雄期前后在大风条件下(瞬时风速达11.3 m/s),造成了大面积的茎倒伏发生,倒伏率超过30%;曹庆军等^[16]对春玉米灌浆期台风“布拉万”造成的倒伏损失进行评估,表明吉林省中部地区17个倒伏点最高减产为29.68%,平均减产14.75%。另外,2016年台风“狮子山”爆发,也造成多地大面积作物倒伏发生。在倒伏对产量损失影响方面,不同倒伏类型以茎折对产量影响最大,根倒对玉米的减产损失较小。

2.3 栽培措施

土壤是植物生长的介质。因此,土壤理化性状、肥水管理水平及种植密度等栽培措施都会影响作物的生长发育与茎秆质量,从而影响茎的抗

倒伏能力。其中,肥水管理不当是造成玉米倒伏的重要因素之一,特别在当前“一炮轰”施肥模式下,施用大量氮肥,会造成生育前期基部节间长度伸长过快,从而导致基部茎节茎秆的抗茎折能力下降,这是造成生育后期茎折的重要原因。

适当增施钾肥,可以提高茎秆的抗倒伏能力。研究表明,钾可以提高茎秆中硬皮组织厚度^[17]以及粗纤维的含量^[18],而纤维素是植物细胞壁的主要成分,钾素能通过稳定细胞结构,防止细胞间隙的扩大,加固细胞壁^[19],这是其提高茎秆抗倒伏能力的重要机制。此外,通过施用外源硅素,经植物吸收运输后可沉积在细胞壁和细胞间隙中,形成“角质-双硅层”结构,从而提高茎秆的抗倒伏能力^[20-21],采用喷施外源PGRs的方法也是提高玉米抗倒性的重要途径^[22]。

2.4 病虫害危害

在大田条件下,病虫害的发生是造成玉米茎倒伏发生的重要原因。其中玉米螟、茎腐病与鞘腐病是导致玉米倒伏发生最主要的生物胁迫因子。茎腐病浸染玉米茎秆后,会改变茎秆硬度与茎秆解剖学特征,造成茎秆脆弱易倒伏^[23]。王亮等利用东北、华北玉米主产区主推的4个试验材料进行研究,证明植株倒伏率与玉米螟危害程度呈显著正相关^[24]。据王宽等^[25]报道,玉米雌穗附近发生鞘腐病,可引发和加剧蚜虫、玉米螟等对雌穗的为害,不但影响玉米的产量,而且能造成品质的下降。

3 玉米抗倒伏能力的研究方法

随着科学技术的进步,玉米抗茎倒能力的评价方法从田间观察、人工模拟倒伏,逐渐过渡到利用分子生物学、生物信息学、力学及倒伏模型等手段进行综合的研究和评价。

3.1 田间观察

田间观察主要是结合品种区域试验,对与品种抗倒性有关的株高、穗位高度以及不同生境下倒伏发生情况直接进行统计调查。此方法操作简单、易行,是目前抗倒性鉴定最常用的方法,但是由于该方法受气候及土壤条件等因素的影响较大,重复性差^[26]。

3.2 人工模拟

人工模拟主要借助人力推倒法、风洞试验法进行,此方法的优点是能较好地模拟田间植株倒伏实际发生情况,缺点是操作费事,工作量大。倒伏模拟与挖掘法的结合应用,已成为大田作物

倒伏研究与根系研究的常用方法。另外,采用力学传感器或计量器,如茎秆强度分析仪、穿刺强度测定仪、万能力学对撞机来直接测定植株被拔起或折断时的临界力值,是目前衡量茎秆抗倒折能力最常用的手段^[26]。

3.3 模型评价

倒伏模型,主要是综合考虑作物自身的株型结构特征,外部生长环境因子等,运用数理逻辑方法和数学语言建构的分析,判断倒伏发生风险的重要工具。作物本身在外力作用下,茎秆会发生弯曲,根据力学有关原理,对田间植株受力情况进行分析,使植株发生倒伏的作用力除了外力(如风力)等因素外,还有作物自身的重力在水平方向上的分力,这种作物冠层本身自重产生的作用效果,称之为“作物自重力矩”^[27],有学者利用此方法对品种的抗倒伏风险进行了分析^[28]。

在此基础上,Ennos结合力学分析和株型特征提出了判断作物倒伏发生风险的“Slef-weight safety factor”模型,并在小麦^[27]、水稻^[28]等作物上得以验证和应用。Baker在1995年提出了作物的倒伏临界模型^[29],用于判断作物发生倒伏时的临界力学参数。倒伏的发生是植株、土壤与环境条件等三者相互作用的结果,Baker在综合三者因素的基础上,2014年提出了“Generalised model”模型^[30],该模型可以更加系统深入地评价倒伏发生与各影响因子的关系,但是该模型涉及土壤物理性状、株型结构以及空气力学在内的几十个参数,不但操作复杂,而且需要一定的物力和财力做支撑,适于育种和科研部门进行。

3.4 分子标记

由于玉米茎秆的抗倒性是由多基因控制的极为复杂的数量性状,且难以测定。而DNA分子标记技术的产生为相关性状遗传图谱的构建提供了解决方法,从而为当前玉米抗倒性的研究提供了新的途径。

近年来国内外学者利用分子标记技术对与玉米茎秆抗倒伏能力有关的重要性状,如穗位高度、株高、茎粗、茎秆强度、纤维素含量等进行了复杂数量性状的QTL定位与研究。刘洋利用201对SSR标记对290份玉米自交系材料进行抗倒伏性状的关联分析,共检测到24个与抗倒伏性状关联的位点,相关结果可应用于分子标记辅助育种中^[15]。王涛^[10]以IBMsyn 10 DH群体为实验材料,在3个不同生态环境下对茎秆穿刺强度、拉弯强度以及茎粗进行表型鉴定,并利用高密度遗传图

谱挖掘抗倒伏相关QTL位点。因此,尽可能多地发掘与玉米抗倒伏能力相关的等位基因,提供标记辅助选择并应用于玉米育种实践,对提高玉米抗倒伏育种具有重要意义。

4 玉米抗倒伏能力的评价

4.1 植株形态与茎秆结构特征

大量研究表明,玉米基部节间长度、单位茎节长度干重、茎秆硬皮强度以及茎秆初生细胞壁中碳水化合物的含量是与抗茎倒能力密切相关的重要性状指标^[31],可作为玉米抗茎倒能力的评价指标。因此,具有穗位高系数低,基部茎节短、节间直径大、单位节间干质量较大,气生根系统发达等^[32]典型性状的品种往往具有较强的抗倒伏能力。

另外,减小叶片生物量能够减少地上部分的重量,可以降低冠层受外力作用时的力矩,从而减小风的阻力,降低发生倒伏的风险。除此之外,作物茎秆的弯曲强度、茎秆穿刺力、株高和穗位与抗倒伏能力具有极显著相关性,是影响茎秆抗倒伏能力的直接因素,可以作为衡量玉米抗倒伏能力的指标^[33-34]。

4.2 茎秆组织结构与化学成分含量

玉米茎秆横切面的结构由外向内由表皮、机械组织、薄壁组织以及维管束等组成,并且各自在抗倒性方面均发挥一定的作用^[35]。茎秆的强度主要来源于细胞壁。从细胞学分析,植物细胞壁分为初生细胞壁和次生细胞壁,而纤维素与半纤维素是玉米初生细胞壁主要组成成分,木质素是次生细胞壁的重要组分^[36],因此,玉米茎秆中纤维素、半纤维素及木质素的含量对保持茎秆的机械性能有极为重要的作用。大量研究表明,抗倒性强的品种,茎秆化学成分中纤维素、灰分、木质素、碳水化合物、硅以及钾元素含量往往高于不抗倒品种^[37]。据刘佳丽等研究证明,利用种衣剂处理的方法可以促进茎秆内部维管束和机械组织发育,提高植株的抗倒能力^[38]。

4.3 综合评价

综合评价主要是利用一些模型或数学统计的原理,建立了农作物茎秆力学模型。如袁志华^[39]与李峰^[40]分别提出采用临界力与抗倒强度值作为农作物抗倒伏能力的评价指标。随着科学技术的进步,当前玉米抗茎倒能力的评价方法从田间观察、人工模拟倒伏,逐渐过渡到利用分子生物学、生物信息学、力学及倒伏模型等手段的综合运用

与评价,但在操作步骤、实用性方面还有待进一步的验证与完善。

5 我国玉米品种抗倒伏能力演变与抗茎倒品种的理想株型

5.1 不同年代品种抗倒伏能力演变

从不同年代主推品种演变分析,每个品种都体现出与当时生产力水平相对应的时代特征。当前,随着农民专业合作社等规模化经营的蓬勃发展,我国玉米机械化收获比例逐年增加。因此,对玉米品种的抗倒伏能力提出了更高的要求。

品种的抗倒伏能力是衡量玉米品种优劣的重要指标。通过对不同年代育成典型玉米品种的抗倒伏能力进行研究,表明近代育成品种的抗倒伏能力显著优于早期玉米品种^[41],并且在高密度条件下这种趋势更加明显。通过对东北地区不同年代玉米生产主推品种抗倒伏性能进行分析,穗高系数下降,茎秆穿刺强度和压碎强度提高是现代品种抗倒伏能力提升的主要原因^[42]。此外研究还表明,现代玉米品种茎秆中酸性洗涤纤维、酸性洗涤木质素、纤维素、半纤维素以及中性洗涤纤维等组分含量均高于早期品种^[43],通过对水稻^[44]、小麦^[45]等作物的研究也证明了这一点。

5.2 抗茎倒品种的理想株型

理想株型结构作为株型育种中的重要目标,历来备受育种家关注和重视^[46],并且成为现代育种技术体系中的重要方向。高士杰等^[47]提出了基于提高玉米群体光合效率和物质生产能力的理想株型,具有叶片直、立、厚,茎秆粗的特点;20世纪初,李登海提出了紧凑型玉米的概念并培育出“掖单”号系列品种;近年来,佟屏亚提出了耐密型品种的概念,其株型具有雄穗小、茎秆坚、开叶距、穗位低和根系发达的特点^[48]。结合前期工作及前人研究,从株型高度上分析,适当降低株高,增加茎粗,有利于提高玉米的抗倒伏能力,是高产抗倒品种的重要特征。笔者认为抗茎倒玉米品种理想株型具备以下特点:(1)株高和穗位高度适中、基部茎节短、横切面积大;茎秆纤维素、半纤维及木质素等结构性碳水化合物含量高;(2)单株生物量不宜过大,果穗大小适中,子粒灌浆速度平稳,灌浆持续时间适中;(3)生育后期茎秆持绿性好。

参考文献:

[1] 刘武仁,郑金玉,罗洋,等.自然倒伏对玉米根系和产量

的影响[J].吉林农业科学,2014,39(1):6-9.

- [2] 曹庆军,曹铁华,杨粉团,等.灌浆期风灾倒伏对玉米子粒灌浆特性及品质的影响[J].中国生态农业学报,2013(9):1107-1113.
- [3] 曹庆军,杨粉团,陈喜凤,等.播期对吉林省中部春玉米生长发育、产量及品质的影响[J].玉米科学,2013,21(5):71-75.
- [4] 丰光,黄长玲,邢锦丰.玉米抗倒伏的研究进展[J].作物杂志,2008(4):12-14.
- [5] Pinthus M J. Lodging in wheat, barley, and oats: the phenomenon, its causes, and preventive measures [J]. *Advances in Agronomy*, 1974, 25: 209-213.
- [6] 宋朝玉,张继余,张清霞,等.玉米倒伏的类型、原因及预防、治理措施[J].作物杂志,2006(1):36-38.
- [7] Beck D L, Darrah L L, Zuber M S. An improvement technique for measuring resistance to root pulling in maize[J]. *Crop science*, 1987, 27(2): 356-358.
- [8] 卜俊周,岳海旺,谢俊良,等.倒伏对玉米子粒灌浆进度及产量的影响[J].河北农业科学,2010(6):1-2.
- [9] 曹庆军,杨粉团,王一鸣,等.植物生长调节剂及其在大田作物上的应用分析[J].吉林农业科学,2015,40(5):26-30.
- [10] 王涛.玉米IBM群体抗倒伏相关性状的QTL分析[D].雅安:四川农业大学,2015.
- [11] Peiffer J A, Flint-Garcia S A, Natalia D L, et al. The genetic architecture of maize stalk strength[J]. *Plos One*, 2013, 8(6): e67066.
- [12] 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.
- [13] Stojsin R, Ivanovic M, Kojic L, et al. Inheritance of grain yield and several stalk characteristics significant in resistance to stalk lodging maize (*Zea mays* L.)[J]. *Maydica*. 1991,36: 75-81.
- [14] 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(11):2133-2138.
- [15] 刘洋.玉米自交系抗倒伏性状的关联分析[D].保定:河北农业大学,2014.
- [16] 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.
- [17] 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(1):143-149.
- [18] 孙世贤,戴俊英,顾慰连.氮、磷、钾肥对玉米倒伏及其产量的影响[J].中国农业科学,1989(3):28-33.
- [19] 李文娟,何萍,金继运.钾素对玉米茎髓和幼根超微结构的影响及其与茎腐病抗性的关系[J].中国农业科学,2010(4):729-736.
- [20] 张玉秀,刘金光,柴团耀,等.植物对硅的吸收转运机制研究进展[J].生物化学与生物物理进展,2011(5):400-407.
- [21] Ma J F, Yamaji N. Functions and transport of silicon in plants [J]. *Cellular and Molecular Life Sciences Cmls*, 2008, 65(19): 3049-3057.
- [22] Cao Q, Gang L, Diallo L, et al. Effect of Plant Growth Regulators on Maize Agronomic Characteristics, stalk lodging and yield (*Zea mays* L.) under high planting density in Northeast China [J]. *Romanian Agricultural Research*, 2016, 33: 217-226.

- [23] 王良发,徐国举,张守林,等.对25个玉米品种的茎腐病抗性分析和产量损失评估[J].玉米科学,2015,23(6):12-17.
- [24] 王亮,丰光,李妍妍,等.玉米倒伏与植株农艺性状和病虫害发生关系的研究[J].作物杂志,2016(2):83-88.
- [25] 王宽,曹志艳,李朋朋,等.鞘腐病发生程度与玉米倒伏及产量损失间的相关性分析[J].植物保护学报,2015,42(6):949-956.
- [26] 李峰,赵东华,杨立全,等.玉米抗倒强度及其与植株性状相关性的初步研究[J].山东农业科学,2013(10):24-28.
- [27] Crook M J, Ennos A R. Stem and root characteristics associated with lodging resistance in four winter wheat cultivars[J]. Journal of Agricultural Science, 1994, 123(2): 167-174.
- [28] Oladokun M. Structural development and stability of rice *Oryza sativa* L. var. Nerica 1[J]. Journal of Experimental Botany, 2006, 57(12): 3123-3130.
- [29] Baker C J. The development of a theoretical model for the windthrow of plants[J]. Journal of Theoretical Biology, 1995, 175(3): 355-372.
- [30] Baker C J, Sterling M, Berry P. A generalised model of crop lodging [J]. Journal of Theoretical Biology, 2014, 363: 1-12.
- [31] 李宁,李建民,翟志席,等.化控技术对玉米植株抗倒伏性状、农艺性状及产量的影响[J].玉米科学,2010,18(6):38-42.
- [32] 高欣.玉米秸秆力学特性试验研究[D].武汉:华中农业大学,2013.
- [33] 黄海,陈德龙,常莹,等.玉米品种抗倒能力差异及其机制研究[J].南京农业大学学报,2014(4):22-30.
- [34] 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(Z1):72-74.
- [35] Ma D, Xie R, Liu X, et al. Lodging-Related Stalk Characteristics of Maize Varieties in China since the 1950s[J]. Crop Science, 2014, 54(6): 2805.
- [36] 陈晓光,史春余,尹燕桦,等.小麦茎秆木质素代谢及其与抗倒性的关系[J].作物学报,2011(9):1616-1622.
- [37] 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.
- [38] 刘佳丽,杜雄,边大红,等.种子包衣处理对夏玉米抗倒伏能力的影响[J].玉米科学,2013,21(1):85-89.
- [39] 袁志华,冯宝萍,赵安庆,等.作物茎秆抗倒伏的力学分析及综合评价探讨[J].农业工程学报,2002(6):30-31.
- [40] 李峰,赵东华,杨立全,等.玉米抗倒强度及其与植株性状相关性的初步研究[J].山东农业科学,2013(10):24-28.
- [41] 刘鑫,谢瑞芝,牛兴奎,等.种植密度对东北地区不同年代玉米生产主推品种抗倒伏性能的影响[J].作物杂志,2012(5):126-130.
- [42] 刘鑫.不同玉米品种在不同密度下抗倒伏性能的研究[D].保定:河北农业大学,2012.
- [43] 徐丁一.我国不同年代玉米单交种及其自交系秸秆纤维品质分析[D].北京:中国农业科学院,2011.
- [44] 张忠旭,陈温福,杨振玉,等.水稻抗倒伏能力与茎秆物理性状的关系及其对产量的影响[J].沈阳农业大学学报,1999(2):81-85.
- [45] 陈晓光.小麦茎秆特征与倒伏的关系及调控研究[D].泰安:山东农业大学,2011.
- [46] 米国华,陈范骏,吴秋平,等.玉米高效吸收氮素的理想根构型[J].中国科学:生命科学,2010(12):1112-1116.
- [47] 高士杰,李树强,刁玉先,等.作物株型育种研究与进展[J].吉林农业科学,1997,22(2):21-24.
- [48] 佟屏亚.从植株形态指标评价玉米育种方向[J].玉米科学,2006,14(6):1-3.

(责任编辑:范杰英)