

玉米抗倒伏能力评价方法研究进展

杨今胜¹ 张晓龙¹ 郑培峰¹ 徐文华² 吕艳杰² 王立春^{1,2*} 王永军^{1,2*}

(1. 吉林农业大学 农学院, 长春 130118;

2. 吉林省农业科学院 农业资源与环境研究所/玉米国家工程实验室, 长春 130033)

摘要 抗倒伏能力的合理评价在玉米生产中非常重要。为了解当前国内外玉米抗倒伏能力常用的评价方法(茎秆质量评价、根系评价、田间风洞测试和田间原位测试)及其相关仪器设备的研究进展,基于中国知识资源数据库(CNKI)和国家知识产权局专利检索数据库,以“玉米”、“抗倒伏”为关键词,检索了1990—2020年文献资料,进行归纳和总计,并比较分析了不同评价方法的相对优势和改进方向。结果表明:1)田间原位无损测试能够模拟不同风速下的植株受力情况,测试效率高且使用成本低,在玉米抗倒伏能力评价中具有较好的应用前景;2)明确单株与群体、生物力学与实际风速的关系,通过单株的抗倒伏力的实时动态变化去反映群体抗倒伏力,是未来玉米抗倒伏能力评价的发展方向;3)研制田间原位无损测试专用仪器,结合多年、多点、多生态区、多气候条件田间测试,建立原位无损定量评价指标体系,制定技术标准,是未来玉米抗倒伏能力无损评价的重要研究内容。本研究进展综述可为玉米抗倒伏能力的合理评价及为田间原位无损测试植株抗倒伏仪器的研制和应用提供依据。

关键词 玉米; 抗倒伏能力; 方法; 装置; 田间原位无损测试

中图分类号 S513

文章编号 1007-4333(2022)06-0021-09

文献标志码 A

Research progress on the evaluation methods of maize lodging resistance

YANG Jinsheng¹, ZHANG Xiaolong¹, ZHENG Peifeng¹, XU Wenhua², LV Yanjie²,
WANG Lichun^{1,2*}, WANG Yongjun^{1,2*}

(1. College of Agronomy, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China;

2. Institute of Agricultural Resources and Environment/State Engineering Laboratory of Maize,

Jilin Academy of Agriculture Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract A rational evaluation of lodging resistance is of great importance to maize production. The aim of this study was to understand the current research progress of evaluation methods (stem quality evaluation, root system evaluation, field wind tunnel test, and field *in-situ* test) and their related equipment to determine maize lodging resistance. We compiled existing available studies with “maize” and “lodging resistance” as keywords in China Knowledge Resource Database (CNKI) and patent search database of China National Intellectual Property Administration from 1990 to 2020. Data were summarized and analyzed to assess the relative advantages and improvement directions of different evaluation methods. The results show that 1) Field *in-situ* non-damage testing method does well in simulating the stress of maize plants under different wind speeds and should be widely used due to its higher efficiency and lower cost; 2) Relationships between individual plants and community and between

收稿日期: 2021-12-12

基金项目: 国家玉米产业技术体系项目(CARS-02-16);国家自然科学基金项目(31701349,U19A2035);吉林省创新工程人才基金(CXGC2021RCY007)

第一作者: 杨今胜, 研究员, 主要从事玉米高产栽培生理研究, E-mail: jsyang1@163.com

通讯作者: 王立春, 研究员, 主要从事玉米栽培生理生态研究, E-mail: wlc1960@163.com;

王永军, 研究员, 主要从事玉米栽培生理生态研究, E-mail: yjwang2004@126.com

biomechanics and actual winds should be clarified for better evaluation on the lodging resistance, and then the real-time changes in the lodging resistance of individual maize plants can reflect their substantial responses at the community level; 3) The development of specific instruments for *in-situ* nondestructive testing and the establishment on a quantitative evaluation index system based on data collection from field tests at different temporal and spatial scales are highlighted in the future. The observations in our review can provide technical support for the reasonable evaluation of lodging resistance in maize and for the development and application of *in-situ* non-damage testing in the field.

Keywords maize; lodging resistance; methods; equipment; field *in-situ* non-damage testing

1 研究意义

我国人多地少,提高单产是增加粮食产量的有效途径。玉米作为我国种植面积最大、总产量最高的农作物^[1],生育期内发生倒伏是大面积密植高产的主要限制因素。除了造成不同程度的减产外,还导致霉变等影响籽粒品质,也不利于机械化作业,从而大大增加了收获的劳动力成本^[2-5]。因此,预测作物倒伏的可能性并采取相应的措施进行处理,有利于选育优良品种,提高机械收割效率,增加玉米产量和质量,对保障国家粮食安全具有重要意义^[6]。

近几十年来,玉米抗倒伏能力越来越受到关注,其研究论文和专利申请文件数量逐年增加。以“玉米+抗倒伏”为关键词检索中国知网,截止2020年12月31日,共收录2 352篇研究论文,国家知识产权局公开490件专利申请,论文和专利年申请量均呈大幅增长趋势(图1)。

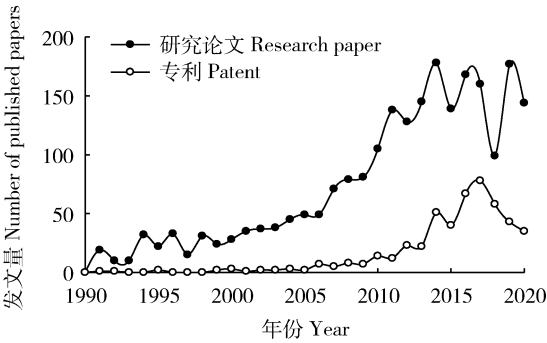


图1 玉米抗倒伏研究论文和专利数量(截至2020-12-31)
Fig. 1 Number of research papers and patents on maize lodging resistance (as of December 31 st, 2020)

已有国内外学者总结了玉米抗倒伏的试验方法和研究进展^[7-13],但是对玉米抗倒伏能力评价方法和仪器设备进行分类评述的文献相对较少。因此,本研究基于田间实际倒伏情况对玉米抗倒伏力的评价方法进行了系统梳理,分析了目前玉米抗倒伏研

究常用仪器设备的相对优势和缺陷,展望玉米抗倒伏能力评价的未来研究方向,以期为相关领域的研究者提供参考。

2 玉米抗倒伏能力评价方法

玉米在遭遇台风降雨后会出现倒伏现象,根据倒伏发生的部位可将倒伏分为茎倒伏和根倒伏^[14]。对于玉米倒伏,现有多种方法进行测定,玉米抗倒伏能力评价方法比较见表1。主要包括:1)茎秆质量评价,包括外皮穿刺强度、弯曲强度和横向折断强度。茎秆外皮穿刺强度是用探针垂直刺穿茎秆表皮所得到的最大力;茎秆弯曲强度,用三点折弯法测试玉米不同节间的弯曲力,获取茎秆被拉(压)断时的力值^[15-20]。2)根系评价,包括根系构型与根拔力测定两个方面。根系构型指根系在土壤中的三维空间分布和根系沿根轴的二维平面分布,包括根系的长度、直径、数量、表面积、体积等直接测定指标和通过X光照射等技术得到的空间三维构型。根拔力是指将玉米根茬从土壤中垂直拔出所需的力,可以反映抗根倒情况^[17-18,21-27]。3)田间风洞测试,利用大型风洞制造不同级别的大风,在大田环境下实时进行倒伏测试分析^[24,28-32]。4)田间原位测试,是指在田间通过推力或拉力使玉米茎秆倾斜,与地面呈不同大小的夹角,用不同角度模拟风力的大小,此时测得推力或拉力值来判断玉米抗倒伏性^[33-34]。

早期研究主要是田间调查台风过后的玉米倒伏情况,多为育种者评价品种抗倒伏性能的指标,玉米品种审定中的玉米抗倒伏能力一票否决制也采用此种方法。对于茎倒伏研究,大多应用茎秆质量评价方法进行研究,由于设备价格便宜、简单易行、评价效果突出而成为主流的研究方法,后来加入茎秆成分分析,评价茎秆中纤维素、木质素等茎秆质量的影响,两者结合进行玉米抗倒伏能力评价^[35-40]。对于根倒伏研究,多采用根系评价方法^[41],由于根系位于地下,需要挖根、冲根等步骤,根拔力测试的仪器较少,操作复杂、测试效率低而没有得到广泛应用。

表 1 玉米抗倒伏能力评价方法比较

Table 1 Comparison for evaluating lodging resistance of maize

测试方法 Test method	测试指标 Test index	优势 Advantage	缺陷 Disadvantage	
茎秆质量评价 Stem quality evaluation	外皮穿刺强度	1)仪器便携,价格便宜,测试过程中无	1)测试过程需要将植株砍断离体测试,	
	弯曲强度	额外费用	植株不能继续生长	
	横向折断强度	2)测试玉米茎秆强度指标,结合田间	2)玉米抗倒伏能力是一种综合能力,茎	
		调查可以间接反映玉米茎倒、茎折情	秆质量仅仅是其中的一个指标,不能反	
	况	3)测试结果重复性好	3)需要与田间调查和其他指标结合起来	
			分析评价	
			4)测试过程环节多,测试效率低	
根系评价 Root evaluation	根系构型	根系构型评价根系发育情况,结合根	1)测试过程需要将植株砍断离体测试,	
	根拔力		拔力可以间接评价根倒情况	植株不能继续生长
			2)专用测试仪器少	
			3)田间操作过于复杂,测试效率低	
风洞试验 Wind tunnel test	不同风速下的 倒伏率,包括 茎倒、茎折、根 倒等情况	1)利用人为制造大风模拟台风造成倒	1)测试成本高,制造高速风需要非常大	
		伏现象,与田间倒伏实际情况最相符	的动力,需要有专门的设备	
		2)可以结合土壤含水率进行茎倒、茎	2)场地受限,固定式风洞需要留出一定	
		折和根倒评价	的操作空间	
			3)测试后倒损率高,对植株造成影响	
田间原位测试 Field <i>in-situ</i> testing	弯曲角度	1)不同倾斜角度下的力能够反映不同 风速下田间倒伏的情况	1)应用时间较短,研究相对较浅,没有形	
	弯曲强度		成研究体系	
	弯曲刚度		2)大多以单株为测试样品,不能有效反	
				映群体抗倒伏性
				3)没有形成定量评价指标体系
		2)在同一次测试中获得弯曲强度和刚		
		度,实现了茎秆质量的田间评价		
		3)部分仪器可以实现无损测试		
		4)操作简单,测试效率高		

对于风洞的研究,国外以杜邦先锋公司 (DuPont Pioneer)为代表的种业公司应用大型移动风机在田间测试评价筛选抗倒伏玉米品种,由于设备价格高昂,最近才在我国科研单位应用。田间原位测定方法 2010 年开始有测试装置申请专利。采用风洞、田间原位测定仪器在田间测定抗倒伏力,能够更加真实反映玉米抗倒伏情况。

3 玉米抗倒伏力测试仪器

3.1 茎秆质量测试仪器

茎秆强度是玉米抗倒伏能力的一个评价指标,常采用室内实验仪器进行茎秆力学特性参数测定^[27]。主要方法是取茎秆的局部试样在室内测定茎秆的弯折性、抗压强度和穿刺强度,其中对于三点

弯曲原理下的抗折力测定较多,例如浙江托普云农公司生产的 YYD-1 茎秆强度仪,AWOS-SL04 茎秆强度仪和万能实验机等^[33-34]。在采用茎秆外皮穿刺强度测试方面,检索到 4 个专利^[7]。山东省农业科学院玉米研究所在专利申请文件 CN201310130512.5 中设计了钢针护环,用于消除了惯性力对力传感器的影响,保证了测量结果的可靠性和重复性。CN201820153705.0 发明了测量玉米茎秆弯曲强度和弹性模量的两参数抗倒伏力测试仪。CN202020491065.1 公开了一种电机驱动的玉米抗倒伏力测试装置,自动化程度高,大大降低了劳动强度,节省了人力,提高了测试效率。CN202010213802.6 公开了一种便捷操作的针刺式玉米茎秆倒伏强度快速测定仪,包括直接接触玉米茎秆的夹持操作机构、

与夹持操作机构相连接的压力测试机构和封装在压力测定机构中的控制机构,能够控制探针刺入深度,满足不同直径及品种的玉米茎秆倒伏强度评价。

国外科研工作者亦开发了专用仪器进行玉米茎秆穿刺强度的研究。Cook等^[42]研究了探针几何形状对玉米茎秆抗穿刺性的影响,在这项研究中使用了两种直径不同的探针。倒角的探头直径为2 mm,而尖头探头直径为1.5 mm。直径2 mm的倒角探头优于直径1.5 mm的尖头探头。Seegmiller等^[43]使用专用设备测试玉米茎秆样品的外皮厚度和直径,发现茎秆外皮穿刺测量与卡尺测量($R^2 > 0.97$)和摄影图像分析测量($R^2 > 0.84$)密切相关,使用外皮穿刺技术进行高通量测量的能力要超过卡尺测量和图像分析技术的能力。Sibale等^[17]应用两种外皮渗透仪测量玉米茎秆强度。

3.2 玉米根拔力测试仪器

由于操作复杂、效率低,根拔力测试仪报道较少。根拔力测试仪的核心测试部件为S型拉力计,根据研究需要,可配套制作固定和垂直排出根系的辅助工具用于提取根拔力。CN201911111215.X公开了一种测量玉米茎秆抗根倒伏强度的测量装置,包括支撑架、驱动装置、数据采集显示装置和旋转推动装置,可采集速度、角度信号,测量精度高。李伟等^[44]研究了玉米抗根倒伏强度检测方法,设计了玉米抗根倒伏强度检测仪,包括螺旋机构、便携式三角架平台、自适应夹具和数显仪等组成部分。李景安等^[45]研制了3YC-1型玉米根茬拔出测力仪,并应用于玉米根拔力测试^[46-48]。

3.3 玉米抗倒伏力测试风洞

玉米抗倒伏力测试风洞分为固定式测试风机和移动式测试风机两种类型。国内风洞多为固定测试型风机,北京农林科学院信息中心应用大型风力机对不同玉米品种的茎秆抗倒伏性进行原位评估^[49],中国农业科学院作物科学研究所应用小型风机进行玉米单株抗倒伏力测试^[50]。国外多为大功率移动式风机,能在田间移动进行评价玉米品种的抗倒伏能力。杜邦先锋公司自主创新的Boreas Mobile Wind Machine移动风机拥有专利权,最新款产品具有持续稳定输出80英里/小时大风的能力。Boreas Mobile Wind Machine可以在不同生育时期对玉米抗倒性进行人工测试,已成为杜邦先锋公司产量速增技术体系(Accelerated Yield Technology™ System)的重要组成部分^[51-52]。

3.4 玉米抗倒伏力田间原位测试仪器

对于原位测定茎秆在不同倒伏角度下的推力,包括浙江托普云农公司生产的YYD-B型植物茎秆强度仪,以及一些茎秆抗倒伏鉴定辅助器等^[53]。

近年来,基于研究的需要,国内外科研单位研制了田间测定的仪器,检索到5个中国专利^[7]。此类仪器多以推力或拉力提取为研究焦点,这些关于抗倒伏强度测定装置除了结构组成上有差异,其核心重点也有不同。CN200620135138.3发明了一种农作物茎秆强度测试仪,将探头、传感器集成到一起,用单片机系统控制电路获取茎秆承受的最大压力;CN201310076963.5设计了一种群体作物茎秆强度测量装置,解决了单株测量难以代表群体抗倒伏特征的难题;CN201410417667.1立足于快速空间定位和测力姿态的维持,重点解决玉米抗倒伏强度测定过程中测力装置固定的问题;CN201510711172.4设计了一种固定拉力方向的抗倒伏仪,有利于消除拉力方向对测试结果的影响;CN201820505617.2设计了一种玉米茎秆原位穿刺和弯折力测试两参数测量装置,保证了测试结果准确可靠。美国科学家Cook等^[54]发明了一种评估谷物玉米抗倒伏能力的设备,已经应用于科研工作。上述产品采用的方法大多是将玉米茎秆折断得到的最大抗倒伏力,据此评价玉米抗倒伏能力。这种破坏性测试对玉米有损伤,测试后植株不能继续生长,而玉米不同的生育时期均可能倒伏,破坏性测试难以解决这个问题。

对同一植株在不同生育时期进行抗倒伏能力评价需要进行无损检测,目前已有相关产品申请专利。北京农业智能装备技术研究中心发明了田间活体植株茎秆测量仪,CN201010237712.7专利申请文件显示,它提出了倾斜角度和力的同步测量方法,通过倾角传感器和悬臂梁传感器分别获取玉米茎秆不同角度下的受力情况或同一标准作用力下的不同倾斜角度,结合抗倒伏强度决策模型实现抗倒伏力的原位无损测试^[15]。Guo等^[29]使用应变传感器和两个单轴角度传感器的无损方向性检测方法,用于评估玉米茎秆的抗倒性。Cook等^[54]发明的谷物玉米抗倒伏能力的设备“Darling”也可用于玉米茎秆的无损评估。韩东等^[55]建立了基于Sentinel-1雷达图像的玉米倒伏监测模型。现有技术大多应用推力模拟玉米倒伏情况,由于推杆与玉米茎秆接触面积小,难以固定,并且不能较好的模拟自然风力对玉米茎秆的吹压过程,杨双源在CN201510176119.9专利申

请中应用拉力代替推力解决了这个问题。该发明专利采用索套套在玉米重心位置(茎秆或玉米果穗偏上位置),通过人力拉动竖杆带动玉米植株倾斜实现玉米茎秆抗倒伏力测试。在此发明专利的基础上开

展的后续研究先后获得中国和德国实用新型专利(CN201720355104. 3、Nr. 202017106298),制作了田间原位抗倒伏力测试仪,实现了玉米抗倒伏力的田间原位评价(表 2)。

表 2 部分田间原位抗倒伏力测试仪性能比较

Table 2 Instrument performances of different field in-situ lodging resistance testers

仪器 Equipment	测试项目 Test item	优点 Advantage	缺点 Disadvantage
Darling ^[54]	破坏强度 弯曲刚度	简单便携;交互人机界面;连续测定力和位移;测定速度快	破坏性测定;推杆角度在 20 °后,测定精度下降;测定高度固定
Guo ^[29] 的仪器 Guo's ^[29] instrument	拉力等效力	无损测定;数字显示;数据存取便捷;拉动方向灵活	测试时拉力方向不固定,只能测试 0~45 °拉力
田间原位倒伏力测定仪 Field <i>in-situ</i> measuring tester	弯曲强度 拉力等效力	无损测定;测定位置可调节;交互人机界面;连续测定力和位移;测试速度快	测定时受田间环境影响,如土壤质地松紧程度

田间原位抗倒伏力测试仪主要由测试主机、竖杆、转动轴、踏板和叉头 5 部分组成,主机集成角度仪、测距仪和拉力计,可以实时采集不同角度下的拉力和位移(图 2)。测试时将仪器与待测植株呈平行状态,踩下踏板将叉头插入地面固定,移动主机,将拉力计固定到玉米穗上位置(玉米植株的重心),一只手放到仪器竖杆的上端,一只手按下测试键,然后用手拉动仪器带动竖杆缓慢转动,设备带动玉米植株倾斜,同时仪器会实时采集角度、拉力和位移数据并自动记录(图 3)。测试过程中,根据倾斜角度 θ 采

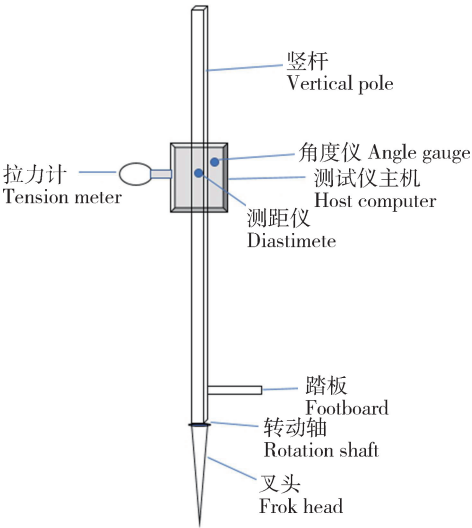


图 2 抗倒伏力测定仪结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of lodging resistance tester

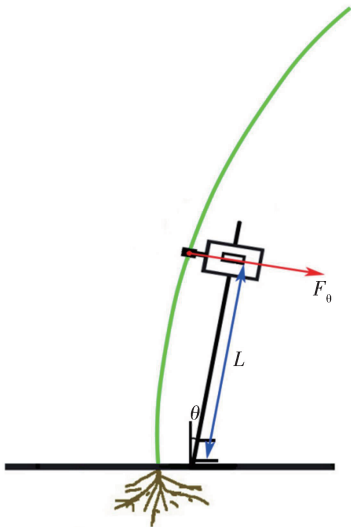


图 3 抗倒伏力测定仪测试过程受力情况

Fig. 3 Stress analysis of lodging resistance tester

集拉力 F_{θ} 和拉力计离转动轴的位移 L ,通过计算 F_{θ} 和 L 得到弯矩 M_{θ} ,用 F_{θ} 和 M_{θ} 可以评价植株的抗倒伏能力和茎秆强度。

4 玉米抗倒伏测试存在的问题

目前,各种检测方法在技术上均已成熟,且在生产上广泛应用,但都存在需要改进之处。

对于茎秆质量测试仪器而言,茎秆强度只是玉米抗倒伏能力的一个评价指标,玉米倒伏还受植株形态结构、茎秆韧性等因素的影响。根拔力测试仪

器只能反映根系的抓地力,玉米根倒伏还受土壤条件、根系构型等因素影响。风洞的主要问题是难以精准模拟自然风,主要原因在于:第一,风速不恒定,农田的大风多为阵风,时疾时缓;第二,农田的风多为湍流,风速瞬间变化大;第三,玉米的迎风面积难以确定,不便于计算风压。田间测试仪器能够模拟田间情况,问题在于大多采用单株测试且具有破坏性,测试后植株不能继续生长。虽然此类型的测试仪能够获取茎秆在折断极限状态下所承受的最大压力,并通过单片机编程实现了数据的自动获取,但是这种方式获取的最大抗倒伏力会造成茎秆折断,破坏茎秆的正常生长状态。这种破坏性测试试验不具有可重复性,不符合非破坏性测量趋势。

玉米倒伏是受外界风力与植株自身重力的综合影响而发生的。鉴于前期定性和粗略的定量分析中发现的问题,茎秆质量评价和根拔力测试反映的是植株自身的特性,其测定结果可作为评价玉米植株抗倒伏能力的参考依据,不能系统评价玉米植株抗倒伏能力。移动风机可以较为系统评价田间玉米植株抗倒伏能力,美国杜邦先锋公司已经将 Boreas Mobile Wind Machine 移动风机应用于玉米抗倒伏育种,但由于其造价高昂、专利所有权受限等原因,短期内难以在我国玉米生产中应用。

5 未来发展

玉米抗倒伏能力评价贯穿于玉米整个生育期,在玉米生产由人工收获、机收果穗向机收籽粒转变的过程中,抗倒伏性评价期则会由此延长至玉米生理成熟之后。现有的大多数方法基于离体植株进行测试和分析评价,难以与田间实际倒伏情况吻合。因此,在田间实现对玉米品种抗倒伏性的定量评价,田间原位无损玉米抗倒伏能力评价将会成为未来的发展方向。要实现田间原位无损玉米抗倒伏能力评价,需要将力学指标与风速指标相关联,单株与群体抗倒伏相结合,通过单株的抗倒伏力的实时动态变化去反映群体抗倒伏力。在多点、多生态区、多气候条件田间测试,结合现有的测试技术,研制田间无损抗倒伏力测试仪,确定定量评价指标体系,制定技术规程,形成技术标准。

参考文献 References

[1] 李少昆,赵久然,董树亭,赵明,李潮海,崔彦宏,刘永红,高

聚林,薛吉全,王立春,王璞,陆卫平,王俊河,杨祁峰,王子明. 中国玉米栽培研究进展与展望[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 1941-1959

Li S K, Zhao J R, Dong S T, Zhao M, Li C H, Cui Y H, Liu Y H, Gao J L, Xue J Q, Wang L C, Wang P, Lu W P, Wang J H, Yang Q F, Wang Z M. Advances and prospects of maize cultivation in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(11): 1941-1959 (in Chinese)

[2] 李树岩,马玮,彭记永,陈忠民. 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, Chen Z M. 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)

[3] 岳海旺,谢俊良,彭海成,卜俊周,盖淑巧. 倒伏玉米灌浆进度和病虫危害的比较分析[J]. 黑龙江农业科学, 2010(10): 31-33

Yue H W, Xie J L, Peng H C, Bu J Z, Gai S Q. Comparison and analysis on grain filling and diseases and insect pests of lodging maize [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2010(10): 31-33 (in Chinese)

[4] 薛军,李璐璐,谢瑞芝,王克如,侯鹏,明博,张万旭,张国强,高尚,白氏杰,初振东,李少昆. 倒伏对玉米机械粒收田间损失和收获效率的影响[J]. 作物学报, 2018, 44(12): 1774-1781

Xue J, Li L L, Xie R Z, Wang K R, Hou P, Ming B, Zhang W X, Zhang G Q, Gao S, Bai S J, Chu Z D, Li S K. Effect of lodging on maize grain losing and harvest efficiency in mechanical grain harvest[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(12): 1774-1781 (in Chinese)

[5] 刘青松,肖宇,徐玉鹏,阎旭东. 玉米生理成熟后田间生长性状随站秆时间变化的研究[J]. 内蒙古农业大学学报:自然科学版, 2019, 40(2): 19-25

Liu Q S, Xiao Y, Xu Y P, Yan X D. Study on traits of spring maize with standing time in field after physiological ripening [J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition*, 2019, 40(2): 19-25 (in Chinese)

[6] 黄文辉,王会,梅德圣. 农作物抗倒性研究进展[J]. 作物杂志, 2018(4): 13-19

Huang W H, Wang H, Mei D S. Research progress on lodging resistance of crops[J]. *Crops*, 2018(4): 13-19 (in Chinese)

[7] 杨德光,马德志,于乔乔,孙玉珺,顾万荣,柴孟竹,张倩. 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, Sun Y J, Gu W R, Chai M Z, Zhang Q. Research progress on influencing factors of lodging and lodging resistance in maize [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(7): 28-38 (in Chinese)
- [8] 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 the relationship between stalk characters and lodging resistance in maize[J]. *Crops*, 2012(2): 10-15 (in Chinese)
- [9] 高珊. 玉米抗倒伏性的研究进展[J]. 种子科技, 2020, 38(16): 14-15
- Gao S. Research progress on lodging resistance of maize[J]. *Seed Science & Technology*, 2020, 38(16): 14-15 (in Chinese)
- [10] 徐天成, 周富亮, 黄联润, 谢沛丰, 管悦, 蓝翠珍, 刘鹏飞. 玉米抗倒伏性相关研究进展[J]. 安徽农学通报, 2019, 25(11): 29-32
- Xu T C, Zhou F L, Huang L R, Xie P F, Guan Y, Lan C Z, Liu P F. Research progress on lodging resistance of maize[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2019, 25(11): 29-32 (in Chinese)
- [11] 薛军, 王克如, 谢瑞芝, 勾玲, 张旺锋, 明博, 侯鹏, 李少昆. 玉米生长后期倒伏研究进展[J]. 中国农业科学, 2018, 51(10): 1845-1854
- Xue J, Wang K R, Xie R Z, Gou L, Zhang W F, Ming B, Hou P, Li S K. Research progress of maize lodging during late stage [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(10): 1845-1854 (in Chinese)
- [12] 靳英杰, 李鸿萍, 安盼盼, 程思贤, 赵向阳, 余天雨, 李潮海. 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, Cheng S X, Zhao X Y, Yu T Y, Li C H. Research progress on the lodging resistance of maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2019, 27(2): 94-98, 105 (in Chinese)
- [13] 曹庆军, 杨粉团, 姜晓莉, 陈莫军, 李贺, 于洪浩, 鲁建华, 张兆琴, 薄晓杰, 李刚. 玉米抗茎倒能力评价及理想株型[J]. 东北农业科学, 2017, 42(2): 17-21
- Cao Q J, Yang F T, Jiang X L, Chen M J, Li H, Yu H H, Lu J H, Zhang Z Q, Bao X J, Li G. Evaluation of stem lodging resistance and ideal plant type of lodging resistant maize varieties [J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2017, 42(2): 17-21 (in Chinese)
- [14] Berry P M, Sterling M, Spink J H, Baker C J, Ennos A R. Understanding and reducing lodging in cereals[J]. *Advances in Agronomy*, 2004, 84(4): 217-271
- [15] 刘京徽. 作物抗倒伏检测专利技术综述[J]. 科技创新导报, 2019, 16(11): 238-239
- Liu J H. Overview of patent technology for crop lodging resistance detection [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2019, 16(11): 238-239 (in Chinese)
- [16] Zuber M S, Grogan C O. A new technique for measuring stalk strength in corn[J]. *Crop Science*, 1961, 1(5): 378-380
- [17] 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: 111-114
- [18] Robertson D J, Julias M, Lee S Y, Cook D D. Maize stalk lodging: morphological determinants of stalk strength [J]. *Crop Science*, 2017, 57(2): 926-934
- [19] Robertson D, Smith S, Gardunia B, Cook D. An improved method for accurate phenotyping of corn stalk strength[J]. *Crop Science*, 2014, 54(5): 2038-2044
- [20] 沈学善, 李金才, 屈会娟. 不同麦秸还田方式对夏玉米性状及水分利用效率的影响[J]. 中国农业大学学报, 2010, 15(3): 35-40
- Shen X S, Li J C, Qu H J. Effects of different treatments of wheat straw on characteristics and water use efficiency of summer maize[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2010, 15(3): 35-40 (in Chinese)
- [21] Liu S Q, Song F B, Liu F L, Zhu X C, Xu H B. Effect of planting density on root lodging resistance and its relationship to nodal root growth characteristics in maize (*Zea Mays* L) [J]. *Journal of Agricultural Science*, 2012, 4(12): 182-189
- [22] Fincher R R, Darrah L L, Zuber M S. Root development in maize as measured by vertical root-pulling resistance [J]. *Maydica*, 1985, 30: 383-394
- [23] Kamara A Y, Kling J G, Menkir A, Ibikunle O. Association of vertical root-pulling resistance with root lodging and grain yield in selected S1 maize lines derived from a tropical low nitrogen population [J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2003, 189(3): 129-135
- [24] Baker C J, Sterling M, Berry P. A generalised model of crop lodging[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2014, 363: 1-12
- [25] Zuber M S, Grogan C O. A new technique for measuring stalk strength in corn[J]. *Crop Science*, 1961, 1(5): 378-380
- [26] Robertson D J, Lee S Y, Julias M, Cook D D. Maize stalk lodging: flexural stiffness predicts strength[J]. *Crop Science*, 2016, 56(4): 1711-1718
- [27] 刘艳丽, 田伯红, 徐玉鹏, 张立新, 周璐璐, 纪明妹. 玉米抗倒伏性评价方法的研究[J]. 玉米科学, 2019, 27(5): 116-122

- Liu Y L, Tian B H, Xu Y P, Zhang L X, Zhou L L, Ji M M. Assessment method of resistance to lodging in corn [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2019, 27 (5): 116-122 (in Chinese)
- [28] Baker C J. The development of a theoretical model for the windthrow of plants [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1995, 175:355-372
- [29] Guo Q Q, Chen R P, Sun X Q, Jiang M, Sun H F, Wang S, Ma L Z, Yang Y T, Hu J D. A non-destructive and direction-insensitive method using a strain sensor and two single axis angle sensors for evaluating corn stalk lodging resistance [J]. *Sensors*, 2018, 18(6): 1852
- [30] Sterling M, Baker C J, Berry P M, Wade A. An experimental investigation of the lodging of wheat [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, 119(3-4): 149-165
- [31] Barreiro R, Carrigan L, Ghaffarzadeh M, Goldman D M, Hartman M E, Johnson D L, Steenhoek L. Device and method for screening a plant population for wind damage resistance traits. United States, No. 7412880[P]. 2008
- [32] Shrestha S, Laza M R C, Mendez K V, Bhosale S, Dingkuhn, M. The Blaster: A methodology to induce rice lodging at plot scale to study lodging resistance [J]. *Field Crops Research*, 2020, 245: 107663
- [33] 勾玲, 黄建军, 张宾, 李涛, 孙锐, 赵明. 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 L, Huang J J, Zhang B, Li T, Sun R, Zhao M. 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)
- [34] 刘志铭, 盖旭东, 李宝玉, 兰天娇, 孙宝龙, 吕艳杰. 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, Lan T J, Sun B L, Lyu Y J. 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)
- [35] Xu C L, Gao Y B, Tian B J, Ren J H, Meng Q F, Wang P. Effects of EDAH, a novel plant growth regulator, on mechanical strength, stalk vascular bundles and grain yield of summer maize at high densities [J]. *Field Crops Research*, 2017, 200: 71-79
- [36] Xue J, Gou L, Zhao Y S, Yao M N, Yao H S, Tian J S, Zhang W F. Effects of light intensity within the canopy on maize lodging [J]. *Field Crops Research*, 2016, 188: 133-141
- [37] Wang X Q, Shi Z, Zhang R Y, Sun X, Wang J D, Wang S, Zhang Y, Zhao Y X, Su A G, Li C H, Wang R H, Zhang Y X, Wang S S, Wang Y D, Song W, Zhao J R. Stalk architecture, cell wall composition, and QTL underlying high stalk flexibility for improved lodging resistance in maize [J]. *BMC Plant Biology*, 2020, 20(1): 515
- [38] Wang Q, Xue J, Chen J L, Fan Y H, Zhang G Q, Xie R Z, Ming B, Hou P, Wang K R, Li S K. Key indicators affecting maize stalk lodging resistance of different growth periods under different sowing dates [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2020, 19(10): 2419-2428
- [39] Xue J, Gao S, Li L L, Xu H G, Ming B, Wang K R, Hou P, Xie R Z, Li S K. Synergistic development of maize stalk as a strategy to reduce lodging risk [J]. *Agronomy Journal*, 2020, 112(6): 4962-4975
- [40] Zhang Y L, Liu P, Zhang X X, Zheng Q, Chen M, Ge F, Li Z L, Sun W T, Guan Z R, Liang T H, Zheng Y, Tan X L, Zou C Y, Peng H W, Pan G T, Shen Y O. Multi-locus genome-wide association study reveals the genetic architecture of stalk lodging resistance-related traits in maize [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 611
- [41] Bian D H, Jia G P, Cai L J, Ma Z Y, Eneji A E, Cui Y H. Effects of tillage practices on root characteristics and root lodging resistance of maize [J]. *Field Crops Research*, 2016, 185: 89-96
- [42] Cook D D, Meehan K, Asatiani L, Robertson D J. The effect of probe geometry on rind puncture resistance testing of maize stalks [J]. *Plant Methods*, 2020, 16(16): 65
- [43] Seegmiller W H, Graves J, Robertson D J. A novel rind puncture technique to measure rind thickness and diameter in plant stalks [J]. *Plant Methods*, 2020, 16(1): 44
- [44] 李伟, 吴科斌, 陈艳军, 张俊雄, 李建生. 玉米秸秆抗根倒伏强度检测方法 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 66-69
- Li W, Wu K B, Chen Y J, Zhang J X, Li J S. Strength evaluation of root lodging resistance in maize stalk [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(2): 66-69 (in Chinese)
- [45] 李景安, 冯芬芬. 3yc-1 型玉米根茬拔出测力仪、3yj-1 型玉米茎秆硬度计研究报告 [J]. 玉米科学, 1994(4): 76-78
- Li J A, Feng F F. Research report of 3yc-1 corn stubble puller and 3yj-1 corn stalk hardness tester [J]. *Journal of Maize Sciences*, 1994(4): 76-78 (in Chinese)
- [46] 蔡红光, 闫孝贡, 刘剑钊, 张秀芝, 张洪喜, 袁静超, 魏雯雯, 任军. 不同种植密度下玉米基因型产量及根拔拉力的关系

[J]. 玉米科学, 2014, 22(2): 76-80

Cai H G, Yan X G, Liu J Z, Zhang X Z, Zhang H X, Yuan J C, Wei W W, Ren J. Vertical root pulling resistance and grain yield of spring maize in different planting density treatments [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2014, 22(2): 76-80 (in Chinese)

[47] 贾桂平. 土壤耕作方式对夏玉米抗根倒伏能力的研究[D]. 保定:河北农业大学, 2013

Jia G P. Soil tillage methods on root lodging resistance of summer maize[D]. Baoding: *Hebei Agricultural University*, 2013 (in Chinese)

[48] 刘志刚, 陈范骏. 两个氮水平下不同玉米基因型产量与根拔拉力的关系[J]. 玉米科学, 2013, 21(6): 107-110

Liu Z G, Chen F J. Relationship between yield and root-pulling resistance in response to nitrogen supply in different maize genotypes[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2013, 21(6): 107-110 (in Chinese)

[49] Wen W L, Gu S H, Xiao B X, Wang C Y, Wang J L, Ma L M, Wang Y J, Lu X J, Yu Z T, Zhang Y, Du J J, Guo X Y. In situ evaluation of stalk lodging resistance for different maize (*Zea mays* L.) cultivars using a mobile wind machine[J]. *Plant Methods*, 2019, 15(1): 96-112

[50] Xue J, Ming B, Xie R Z, Wang K R, Hou P, Li S K. Evaluation of maize lodging resistance based on the critical wind speed of stalk breaking during the late growth stage[J]. *Plant Methods*, 2020, 16(1): 148

[51] Liu Z, Zhang F, Ma Q, An D, Li L, Zhang X D, Zhu D H, Li S M. Advances in crop phenotyping and multi-environment trials[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2015, 2(1): 28-37

[52] Jay S, Rabatel G, Hadoux X, Moura D, Gorretta N. In-field crop row phenotyping from 3D modeling performed using Structure from Motion [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, 110: 70-77

[53] 白永新, 张润生, 魏振飞, 李鹏, 白宇皓, 张建华, 郭盛. 一种玉米抗倒伏鉴定辅助器. 中国, CN206270176U[P]. 2017-06-20

Bai Y X, Zhang R S, Wei Z F, Li P, Bai Y H, Zhang J H, Guo S. An assistant for lodging resistance identification of maize. China, CN206270176U[P]. 2017-06-20 (in Chinese)

[54] Cook D D, Chapelle W D L, Lin T. C, Lee S Y, Robertson D J. Darling: a device for assessing resistance to lodging in grain crops[J]. *Plant Methods*, 2019, 15(1): 102

[55] 韩东, 杨浩, 杨贵军, 邱春霞. 基于 Sentinel-1 雷达影像的玉米倒伏监测模型. 农业工程学报, 2018, 34(3): 166-172

Han D, Yang H, Yang G J, Qiu C X. Monitoring model of maize lodging based on Sentinel-1 radar image[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(3): 166-172 (in Chinese)

责任编辑：袁文业