王炜,崔清亮,邱述金.风载荷对单株谷子茎秆变形的影响[J].山西农业大学学报(自然科学版),2024,44(6):99-106.
Wang W, Cui Q L, Qiu S J.Effect of wind load on the deformation of single millet stems[J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2024,44(6):99-106.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202401075

风载荷对单株谷子茎秆变形的影响

王炜[1,2,3],崔清亮[2,3*],邱述金[2,3]

(1.山西农业大学 城乡建设学院,山西 晋中 030801;2.山西农业大学 农业工程学院,山西 晋中 030801;
3.山西农业大学 旱作农业机械关键技术与装备山西省重点实验室,山西 晋中 030801)

摘　要:[目的]风载荷是影响谷子倒伏的重要因素之一,该研究旨在通过分析风载荷对不同品种谷子茎秆的力学特性关系,研究风速、谷子品种对茎秆变形量、倒伏角度的影响。[方法]于2023年开展室内风载试验,研究了'张杂谷16号''长杂谷466号'和'晋谷21号'单株茎秆在不同风速下的变形规律。[结果]风速、品种对谷子茎秆水平变形量的影响均显著,且风速的影响大于品种;同一品种谷子茎秆的水平变形量随着风速的增加而增加,随谷子茎秆高度的增加而增加,最大变形量出现在茎秆顶端;同一风速作用下,不同品种谷子茎秆的变形量不同,晋谷21号变形量最大,最大值在风速为6 m·s^{-1}时达到26.45 cm,张杂谷16号变形量最小,最小值在风速为2 m·s^{-1}时达到1.64 cm。风荷载作用下茎秆的力学模型简化为一端固定一端约束,一端自由的等截面弹性杆在轴向压力、侧向均布载荷及杆自由端弯矩作用下的纵横弯曲模型,茎秆水平变形量可用二次多项式拟合。根据倒伏角度与风速之间的关系,预测不同品种的茎秆抗倒伏风速,张杂谷16号发生倒伏的临界风速为8.51 m·s^{-1},长杂谷466号发生倒伏的临界风速为9.34 m·s^{-1},晋谷21号发生倒伏的临界风速为6.96 m·s^{-1}。[结论]谷子茎秆在风载荷作用下变形受风速与品种影响,不同品种谷子倒伏的临界风速不同。该研究为不同品种谷子的抗风载荷性能提供理论依据。

关键词:谷子茎秆; 茎秆高度; 水平变形; 风载荷
中图分类号:S515　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2024)06-0099-08

谷子在我国有悠久的栽培历史,是我国传统的杂粮作物,具有抗旱耐瘠、适应性强、富含营养的特点。我国作为世界上最大的谷子产地,主要种植于山西、内蒙古、河北等北方区域[1]。谷子茎秆细且高,成熟期谷穗较重,遇到较大的风雨易产生倒伏[2]。倒伏会降低谷子产量、影响产品品质及营养,甚至会影响通风,加重病虫害,增加收获的成本及难度,影响机械化收获的展开。因此研究风载荷作用下谷子倒伏问题,提高不同品种谷子的抗倒性,对提高谷子产量和收获质量具有重要意义。

倒伏分为茎倒(折)、根倒和根茎复合倒伏3种类型[3]。李树岩等[4]指出同一生育期,茎倒伏的影响远大于根倒伏。国内外学者对禾谷类作物如水稻、玉米、燕麦、小麦等进行了抗倒伏研究,刘佳欣等[5]指出水稻根系、茎秆形态及结构均影响水稻的抗倒伏性能;Kashiwagi[6]对水稻下部强度进行研究,发现染色体PRL4与茎秆的韧性和强度有关联;苑雅俊等[7]以不同生育期的夏玉米为研究对象,研究灌浆期不同熟性夏玉米的抗倒伏能力,结果为夏玉米植株抗拉力与穗高系数呈负相关;杨志雪等[8]对裸燕麦进行抗倒伏研究,发现株高与穗位高对其倒伏影响明显;Wen等[9]研究了风速对玉米变形的影响,玉米的失稳风速为16~30 m·s^{-1};李宏等[10]指出播种前施全部肥料,小麦茎秆强度最强,倒伏机率最小,此种施肥方式是最佳的施肥方式。对谷子抗倒伏性能的研究,多集中在选育品种、植株选型、农艺栽培等方面。张路瑶等[11]以

收稿日期:2024-01-01　　**修回日期**:2024-07-02
基金项目:山西省研究生教育创新项目(2022Y318);国家重点研发计划项目(2016YFD0701801)
作者简介:王炜(ORCID:0009-0002-1460-2291),博士研究生,讲师,研究方向:农业生物力学
*通信作者:崔清亮(ORCID:0000-0001-8175-3925),教授,博士生导师,E-mail:cuiqingliang@sxau.edu.cn

晋谷21号为研究对象,发现21个参与谷子木质化的基因,为提高茎秆抗逆性提供理论依据。刁现民等[12]研究了谷子矮秆遗传,梳理了定位和复制谷子矮秆的基因;何妙玲等[13]研究了谷子株型与产量性状之间的关系,筛选出综合性状好的骨干亲本。代小冬等[14]研究了施肥对12个品种的谷子抗倒伏能力的影响,发现施肥处理的茎秆弯曲应力低于不施肥处理,即施肥处理后谷子抗倒伏性能变差。郭永新等[15]以张杂谷10号为研究对象,分析不同种植方式对其抗倒伏性能的影响,发现为了提高张杂谷10号的抗倒伏性能,定襄县和太谷县宜采用膜侧条播,泽州县宜采用裸地条播。武翠卿等[16]研究了不同栽培条件对谷子抗倒伏性能的影响,发现种植密度对田间倒伏率影响最大,品种、施肥影响最小。

除以上因素的影响,谷子一般种植密度大、茎秆偏软,灌浆期大风伴随降雨时会发生倒伏现象[17],遇风雨倒伏的现象在我国北方种植区经常发生。但由于气象环境条件的不确定性,并不是每年都会出现。国内外由人工方法模拟自然风进行倒伏研究主要集中在小麦[18]和玉米[19-20]上,而针对谷子受风载荷变形导致倒伏问题的研究鲜有报道。本文以张杂谷16号、长杂谷466号、晋谷21号为研究对象,研究不同等级风载荷作用下不同品种单株谷子茎秆水平变形量的变化规律,对影响因素进行相关性分析,构建单株谷子茎秆的风载荷力学模型,旨在为风载荷下的群体谷子抗倒伏研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设备

本试验于2023年10月在山西省忻州市繁峙县海丰农牧场试验基地进行,选用主要种植的张杂谷16号、长杂谷466号和晋谷21号3个品种,种植时间为2023年5月下旬,采用统一种植管理模式,采集时间为2023年10月7日,对应生长期为成熟期。为了减少田间风速和土壤等条件的影响,将谷子植株随根土移植到盆中压实,置于室内无风环境中,背景设置黑色幕布以便观测。选用湘潭盛利来通风设备有限公司生产的SLL-1380轴流式工业风机作为风力输出设备,尺寸为1530 mm×1530 mm×400 mm,可供风量为55 700 $m^3 \cdot s^{-1}$,经过风量与风速的关系换算,确定最大风速为8.41 $m \cdot s^{-1}$,由于风速随着距风机出口距离的增加而衰减,试验风速通过调整进风量实现作用到谷子茎秆处的风速为2、4、6 $m \cdot s^{-1}$。由希玛AS8336手持式数字风速计进行复核,产生的风速误差小于5%,处于空间和时间的有效范围内。

1.2 试验方法

选取风速和谷子品种为试验因素,以茎秆变形量为指标,采用完全试验设计方法进行风载荷试验,试验因素水平设置如表1所示,每一品种取5株株高茎粗相近的谷子。

表1 风载荷试验因素水平表

Table 1 Level of wind load experimental factors

因素 Factors	水平 Levels		
	1	2	3
风速/($m \cdot s^{-1}$)	2	4	6
品种	张杂谷16号	长杂谷466号	晋谷21号

试验时,将谷子试样置于黑色幕布前,调定风速稳定后开始风载试验,用静置于谷子植株前的SONY索尼HDR-CX405高清数码摄像机记录谷子的形体特征,风载作用时长30 s,每个因素5个重复。风载荷作用下谷子茎秆的变形情况如图1所示。



图1 谷子茎秆风载试验

Fig.1 Wind load test of millet stem

1.3　指标测定方法

对于单株谷子倒伏的试验研究,茎秆的抗倒伏能力取决于株高、茎断裂强度和穗质量等性状[21]。风对植株地上部位施加水平载荷并使茎杆变形,故对茎秆在水平方向的变形量及倾斜角度进行记录。

(1)株高:在大田中随机选取同一品种谷子未倒伏茎秆15株,测量地上部分的株高,取平均值作为该品种的株高。

(2)变形量:将同一处理的试验视频逐帧导出为图片保存,用软件getdata获取以茎基部为坐标原点的茎秆横纵坐标值,茎秆在无风状态时水平坐标计为初始值,风载荷作用下茎秆水平坐标与初始值之间的差值记为水平变形量,5次重复的均值记为该处理下茎秆的水平变形量。

(3)茎秆与地面之间的夹角:将风载荷作用后茎秆与水平地面之间的夹角进行测量,5次重复的均值记为该处理下茎秆与地面之间的夹角。

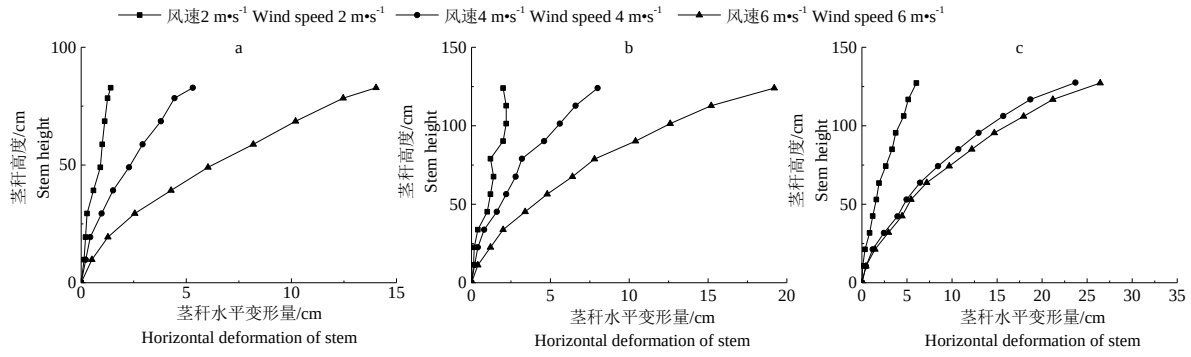
1.4　数据统计分析

利用SPSS软件对风速和品种2种因素下的茎秆变形量等指标进行方差分析和回归分析,利用Origin 9.0软件绘图。

2　结果与分析

2.1　风速对谷子茎秆变形的影响

以茎基部为坐标原点,水平变形量为横坐标,茎秆高度为纵坐标,不同风速下茎秆与水平变形量的关系曲线如图2所示。



a. 张杂谷16号 b. 长杂谷466号 c. 晋谷21号

a. Zhangza 16 b. Changza 466 c. Jingu 21

图2　不同品种茎秆风载试验变形曲线

Fig.2　Deformation curves of different varieties of millet stems under wind load tests

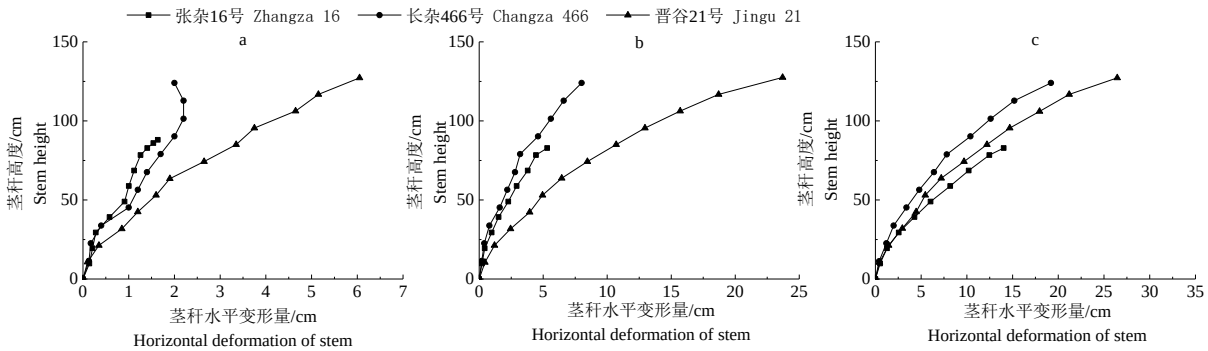
同一品种相同高度位置处的谷子茎秆水平变形量随风速增加而变大,风速为2 m·s^{-1}时,茎秆的水平变形量最小,风速为6 m·s^{-1}时,水平变形量达到最大。风速小时水平变形量增加缓慢,风速大时水平变形量增加速率较大,当水平变形量达到一定值后,水平变形量增加速率趋于稳定。随着茎秆高度的增加,水平变形量出现累计效应。

2.2　品种对茎秆变形的影响

同一风速下不同品种谷子茎秆的变形曲线如图3所示。风速为2 m·s^{-1}时,茎秆水平变形量最小的品种为张杂谷16号,随着风速的增加,张杂谷16号茎秆水平变形量增加量超过另外2种谷子茎秆,风速达到6 m·s^{-1}时,茎秆水平变形量最大的品种为张杂谷16号。同一风速作用下,长杂谷466号谷子茎秆的水平变形量小于晋谷21号。第一个原因与茎秆自身的结构强度,如抗弯强度、弹性模量有关,李红波[22]对晋谷21号及张杂谷10号进行拉伸试验,指出不同品种的谷子茎秆,其弹性模量不同。第二个原因为不同品种的谷子在成熟期谷穗的重量不同,谷穗对茎秆作用力与风力耦合作用下,导致变形不仅与风力有关,还与谷穗重有关[23]。

图2(b)、3(a)中,长杂谷466号在茎秆高度为90～125 cm时,水平变形量呈现折回现象,原因是谷子茎秆不是一种简单的各向同性的弹性材料,在风载荷的作用下,茎秆出现摇摆现象。

3个品种的谷子茎秆在不同风速下的最大变形量的方差分析如表2所示,F值与P值分别是方差分析的一个统计量与概率值,如果F值较大且P值小于0.05,则认为该因素越显著。则风速、品种对茎秆最大变形量的影响大小是:风速的影响大



a. 风速 2 m•s^{-1} b. 风速 4 m•s^{-1} c. 风速 6 m•s^{-1}

a. Wind speed 2 m•s^{-1} b. Wind speed 4 m•s^{-1} c. Wind speed 6 m•s^{-1}

图3 不同品种谷子在不同风速下的水平变形曲线

Fig.3 Horizontal deformation curves of different millet under different wind speeds

于谷子品种的影响,且风速、品种对茎秆变形具有极显著影响($P<0.05$)。

表2 谷子茎秆风载试验结果方差分析

Table 2 Variance analysis for wind load test results on millet stem

方差来源 Source of variance	自由度 Degree of freedom	平方和 Sum of square	均方 Mean square	F值 F value	P值 P value
品种	2	210.985	105.493	7.316	0.046
风速	2	441.612	220.806	15.314	0.013
总和	9	2 007.065			
	R^2=0.919				

将风速和品种对茎秆水平变形量的影响进行单因素方差分析,结果见表3。由表3可见,风速对茎秆水平最大变形量的影响顺序为6 m•s^{-1}>4 m•s^{-1}>2 m•s^{-1}。品种对茎秆水平最大变形量的影响顺序为:晋谷21号>长杂谷466号>张杂谷16号。晋谷21号(平均株高为139.25 cm)在6 m•s^{-1}的风载荷下,水平变形达到最大值,平均株高为88.00 cm的张杂谷16号在2 m•s^{-1}的风载荷下,水平变形量最小。即同一风载荷下,茎秆高度越低,其水平变形量越小,故为减小风载荷作用下的茎秆水平变形量,可以选育矮杆谷子品种。

表3 风速与品种对水平最大变形量的影响

Table 3 Effect of wind speed and variety on horizontal maximum deformation

因素 Factors	水平 Levels	变形/cm Deformation
风速	2 m•s^{-1}	3.23b
	4 m•s^{-1}	12.41ab
	6 m•s^{-1}	20.37a
品种	张杂谷16号	7.54a
	长杂谷466号	9.73a
	晋谷21号	18.73a

注:不同字母表示差异显著($P<0.05$)

Note: Different letters indicated significant difference at the 0.05 level

2.3 风载荷下谷子茎秆水平变形力学模型

茎基部由土壤固定及支撑,约束模型可简化为茎基部固定端约束、茎穗端无约束。茎秆简化为等截面的弹性杆,并认为茎秆自重在其轴线方向;忽略成熟期容重较小的叶片,只考虑谷子茎秆重与穗重,且穗重与茎秆重有一定距离,由力的平移定理[24]将谷穗重平移到茎秆轴线方向并附加一力偶,风载荷沿水平方向。茎秆的弯曲刚度较小[25],故其变形由轴向重力与侧向风力共同引起,属于纵横弯曲[26]。茎秆在风力均布载荷、自重和谷穗重力作用下发生变形的力学模型为一端固定端约束,一端自由的等截面弹性杆在轴向压力、侧向均布载荷及杆自由端弯矩作用下的变形。其力学简图如图4所示。

梁的任意x截面上的弯矩$M(x)$为

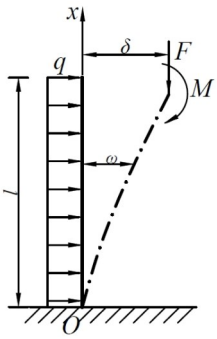


图4　风荷载下茎秆力学模型简图

Fig.4　The mechanical model of the stem under wind loading

$$M(x)=-F(\delta-\omega)-\frac{q}{2}(l-x)^2-M \quad (1)$$

式中F表示包含茎秆重及穗重的轴向力;q为均布风载荷;M为附加力偶;x为距离茎基部的任意位置;l为茎秆总高;δ为茎秆顶端的最大变形量。

挠曲线(水平变形量)的近似微分方程为

$$\mathrm{EI}\omega''=-M(x)=F(\delta-\omega)+\frac{q}{2}(l-x)^2+M \quad (2)$$

即

$$\omega''+\frac{F}{\mathrm{EI}}\omega=\frac{M-F\delta}{\mathrm{EI}}+\frac{q}{2\mathrm{EI}}(l-x)^2 \quad (3)$$

梁的挠曲线方程为

$$\omega=Ax^2+\left(Bx-\sqrt{\frac{\mathrm{EI}}{F}}B\sin\left(\sqrt{\frac{F}{\mathrm{EI}}}x\right)-C\cos\left(\sqrt{\frac{F}{\mathrm{EI}}}x\right)\right)+C \quad (4)$$

式中

$$A=\frac{q}{2F},B=-\frac{ql}{F},C=\left(\frac{2M+ql^2-2F\delta}{2\mathrm{EI}}-\frac{q}{F}\right)\frac{\mathrm{EI}}{F}$$

且当$x=l$时,$\omega=\delta$,可解得δ是与茎秆尺寸及所受载荷有关的一个常量。

以型如$\omega=ax^2+bx+c$的方程式对茎秆挠曲线进行拟合,各对试验数据进行回归分析,获得了不同品种谷子茎秆在不同风速下的拟合方程,方程各项及拟合系数结果如表4所示。

表4　茎秆在不同风速下水平变形量二次方拟合方程式系数表

Table 4　Coefficient table of quadratic fitting equation for horizontal deformation of stems under different wind speeds

品种 Varieties	风速/(m·s^{-1}) Wind speed	系数 Coefficient			相关系数 Correlation coefficient
		a	b	c	
张杂谷16号	2	5e−05	0.013 4	−0.026 8	0.982 8
	4	0.000 5	0.021 8	−0.057 9	0.997 3
	6	0.000 13	0.060 6	−0.178 4	0.999 0
长杂谷466号	2	−5e−05	0.025 8	−0.181 3	0.935 3
	4	0.000 4	0.012 8	−0.009 0	0.996 7
	6	0.001 0	0.019 7	0.133 6	0.997 9
晋谷21号	2	0.000 2	0.019 5	−0.073 8	0.997 7
	4	0.001 2	0.019 4	0.283 1	0.996 4
	6	0.001 4	0.025 1	0.277 9	0.997 4

由拟合结果来看,系数a值均较小,符合均布载荷q与轴向力F比值较小的实际情况,长杂谷466号在风速为2 m·s^{-1}情况下系数a为负值,其余茎秆变形方程中系数a均为正值,与理论推导结果相吻合。系数b数量级比a大,且均为正值,理论推导的x一次方有3项,三者计算结果导致实际的系数b为正值。系数c与茎秆尺寸及所受载荷有关,没有明显规律。附加力偶M的效应包含在系数C中,谷穗越重或者谷穗与茎秆轴线距离越远,附加力偶M越大,导致茎秆水平变形量ω越大,故穗重越小,茎秆水平变形量越小。总体来看,模型拟合效果R^2均在0.90以上,效果较好。

3 讨论

Niu等[27]统计了2007-2014年间中国52起小麦大规模倒伏原因,其中由强风或强风强雨造成的倒伏占比81%。本研究发现,风速、品种均对谷子茎秆变形量有显著影响。在风载荷对农作物的作用研究中,袁志华等[28]在研究水稻在风载荷作用下的倒伏模型时,将风载荷简化为集中力作用在茎秆顶端;于雪等[29]将小麦受风载荷按实际情况简化为均布载荷模型,得出茎秆的高度越小、穗重越小,茎秆水平变形量越小,与本文的结论一致。本文提出谷子茎秆在自重及风荷载作用下的力学模型为一端固定端约束,一端自由的等截面弹性杆在轴向压力、侧向均布载荷及杆自由端弯矩作用下的纵横弯曲力学模型,谷子茎秆的变形量可用二次多项式拟合,拟合效果较好。

根据田间观测法[30],参照小麦倒伏分级标准[31],将茎秆受风载荷之后与地面之间的夹角记录,用线性模型模拟风速与夹角之间的关系(图5),预测阈值为茎秆发生轻度倒伏以上,茎秆与地面之间的夹角大于75°,张杂谷16号发生倒伏的临界风速为8.51 m·s^{-1},长杂谷466号发生倒伏的临界风速为9.34 m·s^{-1},晋谷21号发生倒伏的临界风速为6.96 m·s^{-1}。

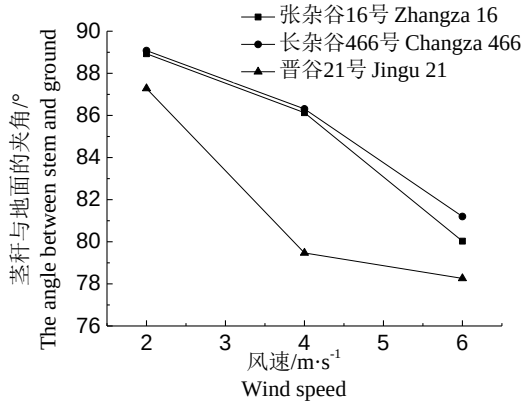


图5 风速和谷子茎秆与地面的夹角关系

Fig.5 Relationship between wind speed and angle of millet stem and ground

4 结论

本文以张杂谷16号、长杂谷466号、晋谷21号谷子为研究对象,研究了不同风速载荷对谷子茎秆变形的影响规律,得出以下结论:

(1)风速、品种对谷子茎秆水平变形量的影响均显著,且风速的影响大于品种。

(2)同一品种的谷子茎秆的水平变形量随着风速的增加而增加,随谷子茎秆高度的增加而增加,最大变形量出现在茎秆顶端;不同品种的谷子茎秆的变形量不同,晋谷21号变形量最大,最大值在风速为6 m·s^{-1}时达到26.45 cm,张杂谷16号变形量最小,最小值在风速为2 m·s^{-1}时达到1.64 cm。

(3)建立了谷子茎秆在风荷载作用下的力学模型,谷子茎秆的变形量可用二次多项式拟合。

(4)根据倒伏角度与风速之间的关系,预测不同品种的茎秆抗倒伏风速,张杂谷16号发生倒伏的临界风速为8.51 m·s^{-1},长杂谷466号发生倒伏的临界风速为9.34 m·s^{-1},晋谷21号发生倒伏的临界风速为6.96 m·s^{-1}。

参考文献

[1]李顺国,刘斐,刘猛,等.中国谷子产业和种业发展现状与未来展望[J].中国农业科学,2021,54(3):459-470.
Li S G, Liu F, Liu M, et al. Current status and future prospective of foxtail millet production and seed industry in China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(3): 459-470.

[2]杜艳伟,赵晋锋,王高鸿,等.春播谷子成熟期抗倒伏性研究[J].作物杂志,2019,34(1):141-145.
Du Y W, Zhao J F, Wang G H, et al. Study of lodging resistance of spring-sowing foxtail millet in maturity stages [J]. Crops, 2019, 35(1): 141-145.

[3]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. The performance of lodging and developing a standard test for lodging resistance in crops [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(7): 111-114.

[4]李树岩,马玮,彭记永,等.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, et al. 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.

[5]刘佳欣,吴周周,周婵婵,等.水稻倒伏性状与抗倒途径研究进展[J].中国稻米,2023,29(6):44-48,55.
Liu J X, Wu Z Z, Zhou C C, et al. Research progress of lodging characters and lodging resistance pathways in rice [J]. China Rice, 2023, 29(6): 44-48, 55.

[6]Kashiwagi T. Novel QTL for lodging resistance, PRL4, improves physical properties with high non-structural carbohydrate accumulation of basal culms in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Euphytica, 2022, 218(6): 1-12.

[7]苑雅俊,冯家兴,杨启帆,等.黄淮海平原北部不同熟性夏玉米品种抗倒伏能力研究[J].中国农业科技导报,2023,25(7):

21-28.
Yuan Y J, Feng J X, Yang Q F, et al. Lodging-resistance comparison among summer maize varieties with different growth period in North of Huang-Huai-Hai Plain [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2023, 25(7): 21-28.

[8]杨志雪, 米俊珍, 刘景辉, 等.不同裸燕麦品种抗倒能力及产量差异分析[J].麦类作物学报, 2024, 44(5): 605-613.
Yang Z X, Mi J Z, Liu J H, et al. Analysis of toppling resistance and yield difference of different naked oat varieties [J]. Journal of Triticeae Crops, 2024, 44(5): 605-613.

[9]Wen W L, Gu S H, Xiao B X, et al. 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): 96-111.

[10]李宏, 陈卫国, 杨进文, 等.不同施肥方式对小麦倒伏性状的影响[J].山西农业大学学报(自然科学版), 2021, 41(5): 35-42.
Li H, Chen W G, Yang J W, et al. Effects of different fertilization methods on lodging characters of wheat [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2021, 41(5): 35-42.

[11]张路瑶, 李瑞淼, 张晓霞, 等.谷子木质素单体生物合成基因的筛选及低氮胁迫分析[J].山西农业大学学报(自然科学版), 2023, 43(3): 9-22.
Zhang L Y, Li R M, Zhang X X, et al. Screening of genes involved in monolignol biosynthesis and analysis of low nitrogen stress in foxtail millet [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2023, 43(3): 9-22.

[12]刁现民, 王立伟, 智慧, 等.谷子中矮秆资源创制、遗传解析和育种利用[J].作物学报, 2024, 50(2):265-279.
Diao X M, Wang L W, Zhi H, et al. Development, genetic deciphering, and breeding utilization of dwarf lines in foxtail Millet [J]. Acta Agronomica Sinica, 2024, 50(2): 265-279.

[13]何妙玲, 王智兰, 杜晓芬, 等.谷子重组自交系群体株型和产量性状分析[J].华北农学报, 2023, 38(4):91-100.
He M L, Wang Z L, Du X F, et al. Analysis of plant architecture and yield traits of recombination inbred lines in foxtail millet [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2023, 38(4): 91-100.

[14]代小冬,杨育峰,陈煜,等.施肥对谷子农艺性状、产量及抗倒伏能力的影响[J].河南农业科学,2014,43(10):47-52.
Dai X D, Yang Y F, Chen Y, et al. Effects of fertilization on agronomic traits, yield and lodging resistance ability of foxtail millet [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2014, 43(10): 47-52.

[15]郭永新,周浩,孙鹏,等.种植方式对不同地区张杂谷10号抗倒伏特性及产量的影响[J].作物杂志, 2022, 37(2):195-202.
Guo Y X, Zhou H, Sun P, et al. Effects of planting patterns on lodging resistance and yield of Zhangza 10 in different ecological areas [J]. Crops, 2022, 37(2):195-202.

[16]武翠卿,孙静鑫,郭平毅,等.农艺措施对谷子产量及抗倒伏力学性能的影响[J].中国农业科学, 2021, 54(6):1127-1142.
Wu C Q, Sun J X, Guo P Y, et al. Effects of agronomic managements on yield and lodging resistance of millet [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(6): 1127-1142.

[17]陈路路.不同行距和密度对谷子茎秆抗倒伏性能及产量的影响[D].山西农业大学,2022.
Chen L L. Different row spacing and densities on the stalk lodging resistance and yield of foxtail millet [D]. Shanxi Agricultural University, 2022.

[18]Finnigan J J, Mulhearn P J. Modelling waving crops in a wind tunnel [J]. Boundary-Layer Meteorology, 1978, 14(2): 253-277.

[19]Charlotte P Y, Emmanuel D L, Bruno M. A frequency lock-in mechanism in the interaction between wind and crop canopies [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2006, 50(568): 425-449.

[20]李民华, 易永, 黄晚华, 等.玉米灌浆中后期倒伏风灾指标及对产量的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(1):9-16.
Li M H, Yi Y, Huang W H, et al. The lodging index of wind disaster in the middle and late grouting stages of maize and the effects on grain yield [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2021, 47(1): 9-16.

[21]Esechie 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(1): 21-30.

[22]李红波, 薛晋霞, 王炳轩, 等.谷子茎秆叶鞘叶片及其结合部位的拉伸力学性能[J].农业工程学报, 2020, 36(18):11-17.
Li H B, Xue J X, Wang B X, et al. Tensile properties of foxtail millet leaf sheath, leaf and leaf collar [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(18): 11-17.

[23]张丽华, 武捷春, 包玉海, 等.基于力学模型的小麦腊熟期倒伏的风速研究[J].广东农业科学,2014,41(15):158-161.
Zhang L H, Wu J C, Bao Y H, et al. Study on lodging resistance wind speed of wheat based on mechanics model [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014, 41(15): 158-161.

[24]哈尔滨工业大学理论力学教研室,理论力学第9版Ⅰ[M].北京:高等教育出版社, 2023,43-44.
Department of Theoretical Mechanics of Harbin Institute of Technology, Theoretical Mechanics 9th edition Ⅰ [M]. Beijing: Higher Education Press, 2016, 43-44.

[25]武翠卿.不同栽培条件对谷子生物学特性及产量性状的影响[D].晋中:山西农业大学, 2012.
Wu C Q. The effect of millet (*Setaria italica* L.) biological characteristics and the yield based on the different cultivation conditions [D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2012.

[26]孙训方, 方孝淑, 关来泰, 等.材料力学第6版Ⅱ[M].北京:高等教育出版社, 2019,109-113.
Sun X F, Fang X S, Guan L T, et al. Mechanics of materials 6th edition Ⅱ [M]. Beijing: Higher Education Press: 2019, 109-113.

[27]Niu L Y, Feng S W, Ding W H, et al. Influence of speed and

rainfall on large-scale wheat lodging from 2007 to 2014 in China [J]. PLoS ONE, 2016, 11(7): e0157677.

[28]袁志华, 赵安庆, 苏宗伟, 等.水稻茎秆抗倒伏的力学分析[J].生物数学学报,2003,18(2):234-237.
Yuan Z H, Zhao A Q, Su Z W, et al. Dynamic analysis of rice stem lodger resistance [J]. Journal of Biomathematics, 2003, 18(2): 234-237.

[29]于雪, 张万琴, 陆博, 等.小麦茎秆抗倒伏的模型分析[J].河南科技学院学报(自然科学版), 2013, 41(6): 33-36.
Yu X, Zhang W Q, Lu B, et al. Model analysis for wheat stem lodging resistance [J]. Journal of Henan Institute of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 41(6): 33-36.

[30]张靓, 梁小玉, 胡远彬, 等.燕麦抗倒伏性研究进展[J].麦类作物学报, 2024, 44(1):74-81.
Zhang J, Liang X Y, Hu Y B, et al. Research progress on lodging resistance in oat [J]. Journal of Triticeae Crops, 2024, 44(1): 74-81.

[31]中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会.GB/T 17317-2011,小麦原种生产技术操作规程[S].北京:中国标准出版社,2011:6.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB/T 17317-2011, Rules of the production technology for wheat basic seed [S]. Beijing: China Standards Press, 2011:6.

Effect of wind load on the deformation of single millet stems

Wang Wei[1,2,3], Cui Qingliang[2,3*], Qiu Shujing[2,3]

(*1.College of Urban and Rural Construction, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China; 2.College of Agricultural Engineering, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China; 3.Dryland Farm Machinery Key Technology and Equipment Key Laboratory of Shanxi Province, Jinzhong 030801, China*)

Abstract: [Objective] Wind load is an important factor influencing millet lodging. The purpose of this study was to analyze the mechanical properties of millet stems under different wind loads and examine the effects of wind speed and millet varieties on stem deformation and lodging angle. [Methods] Indoor wind load tests were carried out in 2023 to investigate the deformation patterns of individual stems from three millet varieties: Zhangza 16, Changza 466, and Jingu 21, under different wind speeds. [Results] The results showed that both wind speed and variety significantly affected the horizontal deformation of millet stems, and the wind speed showed a greater influence than varieties. The horizontal deformation of millet stems within the same variety increased with higher wind speeds, and the maximum deformation occurred at the top of the stem as stem height increased. Under the same wind speed, different varieties exhibited varying deformation patterns, and Jingu 21 showed the highest deformation reaching a maximum of 26.45 cm at wind speed of 6 $m \cdot s^{-1}$ and a minimum of 1.64 cm at 2 $m \cdot s^{-1}$. The deformation behavior of millet stems under wind loading could be modeled by a quadratic polynomial. The mechanical model described the stem as an isotropic elastic rod with one end fixed and the other end free, subjected to axial pressure, lateral uniform load, and a bending moment at the free end. Based on the relationship between lodging angle and wind speed, the critical wind speed for lodging resistance of different cultivars was determined to be 8.51 $m \cdot s^{-1}$ for Zhangza 16, 9.34 $m \cdot s^{-1}$ for Changza 466, and 6.96 $m \cdot s^{-1}$ for Jingu 21. [Conclusion] Millet- stem deformation under wind load is influenced by wind speed and varieties, with each variety having a distinct critical wind speed for lodging resistance. The study provided a theoretical basis for improving the wind resistance of different millet varieties.

Keywords: Millet stem, Stem height, Horizontal deformation, Wind speed

(编辑:韩志强)