



## 小麦茎秆典型弯曲形态模型致倒力分析

刘水利<sup>1</sup>, 宋瑜龙<sup>2</sup>, 高峰岗<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学 场站管理中心, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 农学院, 陕西杨凌 712100)

**摘要** 旨在探讨茎秆不同弯曲形态对致倒力矩大小的影响,以期提高小麦综合抗倒性能。利用风洞提供风源,设计制作穗不同倾斜度模型和茎秆不同弯曲形状模型等,并测试分析模型在不同风力作用下的致倒力矩差异,结果表明:风速为 13 m/s,穗倾斜度每减少 15° 风力矩差异显著,当穗倾斜度降至 0° 时,穗的风力矩最小,且不同穗长间的风力矩差异不显著。弯曲形态似  $x^2/302 + y^2/602 = 1 (x \leq 0, y \geq 0)$ , 茎秆长度 0.78 m) 的上部茎秆弯曲模型,综合致倒力矩最小,且不同弯曲形状处理对不同风速的致倒力矩差异均达极显著水平;该模型在风速为 9 m/s,茎秆相差 5 cm 时,综合致倒力矩差异不显著,株高差异对致倒力矩的影响小于其他模型,综合评价为最佳抗倒模型。弯曲形态似  $x^2 + y^2 = 502 (x \leq 0, y \geq 0)$ , 茎秆长度 0.78 m) 的圆弧茎秆弯曲型为次佳抗倒模型。

**关键词** 小麦; 穗; 茎秆; 弯曲模型; 致倒力

**中图分类号** S512.1

**文献标志码** A

**文章编号** 1004-1389(2018)12-1789-06

倒伏不仅是小麦高产的主要限制因素之一,也是小麦减产的重要原因,倒伏还影响小麦籽粒品质和机械收获。小麦因倒伏一般减产 20%~30%,倒伏越早减产幅度越大,最高减产可达 40% 左右<sup>[1-2]</sup>。据有关部门统计,中国每年因倒伏造成产量损失达 20 亿 kg。抗倒伏既是小麦育种的主要目标,也是高产稳产的重要保障。因此,深入研究小麦抗倒性能对于抗倒育种和抗倒栽培都具有重要意义。

在小麦高产进程中,特别是由低产到中产,中产到高产的跨越,矮秆抗倒新品种的应用起到显著作用<sup>[3]</sup>。在黄淮麦区的育种实践中,一般认为小麦株高在 75~85 cm 较为理想,茎秆过矮,会影响田间通风透光,病虫害加重,株高虽然与抗倒性高度负相关,但株高既不是越低越好<sup>[4-5]</sup>,也不是决定抗倒性的唯一因素,前人大量研究肯定茎秆基部强度也是小麦抗倒伏特性的一个重要指标<sup>[6-8]</sup>。一般情况下,随着茎秆强度的增加,其抗倒性能越强,但是茎秆强度也不是越大越好,茎秆强度过大则会出现分蘖力差和株型过于紧凑等问题。大穗是小麦的重要经济性状,穗子越大受风

面积越大,大穗与抗倒性具有显著负效应。总之,小麦倒伏的问题相当复杂,倒伏类型不但分为茎倒伏和根倒伏,倒伏的原因既有品种原因,也有栽培和土壤、气象等原因。因此,要实现小麦高产和超高产,必须提高小麦的综合抗倒性能。

小麦倒伏与否根本原因在于致倒力与抗倒性能的大小对比。小麦的抗倒性能主要包括株高、茎秆强度、穗子大小和茎秆弹性等。小麦的致倒力一般主要指质量重力和持风力。关于小麦倒伏性的研究,前人在茎秆高度<sup>[6-8]</sup>、机械强度<sup>[7-8]</sup>、解剖结构和生理特征<sup>[9-11]</sup>、以及抗倒评价<sup>[12-13]</sup>、抗倒遗传<sup>[14]</sup>等方面做了广泛深入研究,关于茎秆抗倒模型<sup>[15-17]</sup>方面也做了不少探讨,这些模型主要是为抗倒性评价建立的用于计算抗倒指数的数学方程。本文不同的是模型为茎秆弯曲形态模型,根据实际观察,分析不同茎秆弯曲形态模型中重力矩和风力矩大小及变化,依据综合致倒力矩大小,筛选最佳抗倒模型,探讨最佳抗倒模型弯曲特性,或可为小麦抗倒育种和抗倒栽培提供一定借鉴。

**收稿日期**:2018-11-20 **修回日期**:2018-12-21

**基金项目**:国家自然科学基金(31701500);中国博士后科学基金(2017M613222);西北农林科技大学唐仲英育种基金(2016)。

**第一作者**:刘水利,男,农艺师,主要从事小麦育种和农机化研究。E-mail:sui87083081@163.com

## 1 材料与方 法

茎秆模型用树脂薄壁硬质空心管制作,主要由管体、穗下节间和穗 3 部分胶粘而成。

### 1.1 试验材料

体外径 4.0 mm,长度 400 mm,穗下节外径 2.5 mm,长度为 300 mm,穗子为蜡熟期‘小偃 22’麦穗,穗长 80 mm,质量 3.7 g,茎秆模型基本长度 780 mm。设计不同长度处理时,可根据需要在基部加减,用管体内填充实物的办法调整质量和质心高度,茎秆模型质量 15 g,质心高度 480 mm。制作茎秆弯曲形态模型时先在纸上按照曲线方程划好模型图形,对照所画的曲线形状加热定型。试验于 2017—2018 年在西北农林科技大学农作一站进行。

风源风速由风洞试验台模拟提供。测量时气象条件:风速为 2 m/s,风向偏东,气温为 29 ℃,空气相对湿度为 51%。力矩测量方法同文献[18]。将茎秆模型插入小麦持风力测量仪的插孔内,无风时测得为重力力矩,有风时测得为综合致倒力矩(以下简称致倒力矩)。

力矩计算公式:

风力矩=综合致倒力矩-质量重力矩

### 1.2 试验方法

1.2.1 穗不同倾斜度持风力矩 茎秆模型直立,穗倾斜度(与水平面夹角)处理设为 7 个,依次为:0°、15°、30°、45°、60°、75°和 90°。不同穗长处理依次为:6 cm、8 cm 和 10 cm,风速定为 13 m/s,取 3 次平均数为观测值。

1.2.2 茎秆不同弯曲形态模型致倒力矩 风速设 6 个处理,依次为:无风(0 m/s)、4 级和风(6 m/s)、5 级劲风(9 m/s)、6 级强风(12 m/s)、7 级疾风(15 m/s)、8 级大风(18 m/s)。以茎秆最大弯曲曲率的部位不同,茎秆弯曲形态模型设为 4 个处理,如图 1。模型长度均为 78 cm,茎秆弯曲形态模型处理 I:直立秆型;II:上部椭圆弧弯曲型,曲线方程为  $x^2/302 + y^2/602 = 1 (x \leq 0, y \geq 0)$ ,茎秆长度等于 1/4 椭圆弧长,焦点在 Y 轴上;III:圆弧弯曲型,曲线方程为  $x^2 + y^2 = 502 (x \leq 0, y \geq 0)$ ,茎秆长度等于 1/4 圆弧长;IV:下部椭圆弧弯曲型,曲线方程为  $x^2/602 + y^2/302 = 1 (x \leq 0, y \geq 0)$ ,茎秆长度等于 1/4 椭圆弧长,焦点在 X 轴上。取 3 次平均数为观测值。

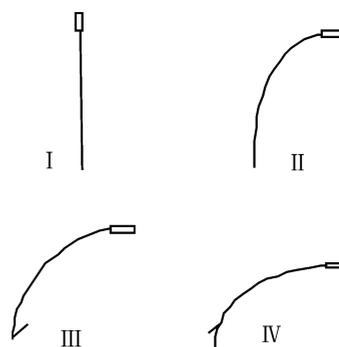


图 1 茎秆弯曲模型形态

Fig. 1 The form of stem bending models

1.2.3 小麦不同株高弯曲形态模型致倒力矩差异 不同株高处理设为 5 个,即:65 cm、70 cm、75 cm、80 cm 和 85 cm,每一长度分别制作 4 种弯曲形态模型,测定在风速为 9 m/s 和 15 m/s 时的致倒力矩。

## 2 结果与分析

### 2.1 穗不同倾斜度持风力矩试验结果

测得不同穗长及不同倾斜度的模型在风速为 13 m/s 情况下的持风力矩(表 1)。结果表明,穗的持风力矩大小与其长度呈正相关,同时与倾斜度也呈正相关。穗倾斜度每差 15°,其中 10 cm 穗长的持风力矩差异达极显著水平;8 cm 穗长的持风力矩差异达显著水平;6 cm 穗长的持风力矩除穗倾斜度 75°与穗倾斜度 90°差异不显著外,其他倾斜度处理间均达到显著水平。风速为 13 m/s,穗倾斜度为 0°时,穗持风力矩最小,且不同穗长之间持风力矩差异不显著。此外,风速为 13 m/s,除 0°倾角外,不同穗长之间持风力矩差异均达极显著水平。不同穗长与穗倾斜角持风力矩变化研究表明,穗倾斜度从 0~60°,随着穗倾斜度增加其持风力矩增速较快;穗倾角从 60°~90°,随着穗倾角增加而持风力矩增速变缓(图 2)。

### 2.2 小麦茎秆不同弯曲形态模型致倒力矩试验结果

小麦茎秆弯曲形态模型致倒力矩试验结果(表 2)表明,同一风速小麦不同模型处理间综合致倒力矩差异均达极显著水平,处理 II 致倒力矩在不同风速时均最小。风速为 6 m/s 和 9 m/s 时处理 IV 致倒力矩最大,处理 I 次之;风速为 12 m/s、15 m/s 和 18 m/s 时处理 I 致倒力矩最大,处理 IV 次之;小麦不同茎秆弯曲形态模型各处理间重力力矩差异也均达到极显著水平,处理 IV 重

表 1 小麦穗弯曲度致倒力矩检测

Table 1 The lodging moment tested in different bending degree of wheat spike

穗倾角/(°) Spike angle to stem	穗长力矩/(N·m) Moment		
	6 cm	8 cm	10 cm
0	0.015 6 f	0.016 2 g	0.016 9 G
15	0.031 6 e	0.036 6 f	0.042 9 F
30	0.045 5 d	0.056 0 e	0.067 5 E
45	0.055 7 c	0.070 5 d	0.086 3 D
60	0.062 5 b	0.080 6 c	0.098 8 C
75	0.064 9 a	0.085 0 b	0.105 8 B
90	0.066 1 a	0.089 1 a	0.110 1 A

注:小写字母不同表示差异显著(P<0.05),大写字母不同表示差异极显著(P<0.01)。下表同。风速 13 m/s。

Note: Different lowercase letters showd significant difference (P<0.05), meanwhile different uppercase letters indicated a extremely significant difference (P<0.01). The same below. At a wind speed of 13 m/s.

表 2 小麦茎秆弯曲形态模型致倒力矩检测

Table 2 The lodging moment tested in different wheat stalk bending models

处理 Treatment	N·m											
	无风 (0 m/s) No wind		4 级风 (6 m/s) Four level		5 级风 (9 m/s) Five level		6 级风 (12 m/s) Six level		7 级风 (15 m/s) Seven level		8 级风 (18 m/s) Eight level	
	风力矩 WM	合力矩 RM	风力矩 WM	合力矩 RM	风力矩 WM	合力矩 RM	风力矩 WM	合力矩 RM	风力矩 WM	合力矩 RM	风力矩 WM	合力矩 RM
I	0	0.000 6 D	0.019 2 aA	0.019 8 C	0.042 8 aA	0.043 4 B	0.075 6 aA	0.076 2 A	0.118 4 A	0.119 0 A	0.170 5 A	0.171 1 A
II	0	0.009 1 C	0.003 2 bB	0.012 3 D	0.007 0 bB	0.016 1 D	0.012 4 bB	0.021 5 D	0.019 3 B	0.028 4 D	0.027 9 B	0.037 0 D
III	0	0.021 3 B	0.002 6 bB	0.023 9 B	0.005 7 bcB	0.027 0 C	0.010 2 cBC	0.031 5 C	0.015 9 C	0.037 2 C	0.022 9 C	0.044 2 C
IV	0	0.045 1 A	0.001 8 bB	0.046 9 A	0.003 4 cB	0.048 5 A	0.006 1 dC	0.051 2 B	0.009 5 D	0.054 6 B	0.013 7 D	0.058 8 B

注 Note: WM. Wind moment abbreviated; RM. Resultant moment abbreviated.

差异均达极显著水平;风速为 12 m/s 时达显著水平,风速为 9 m/s 和 6 m/s 时,处理 I 与 II、III、IV 差异极显著,II、III、IV 间差异不显著。

2.3 小麦不同株高模型致倒力矩差异

由表 3 可知,在风速 9 m/s 和 15 m/s 时,弯曲形态模型 I 和 IV 不同株高处理间致倒力矩差异均极显著;弯曲形态模型 III 不同株高处理间致倒力矩差异均显著;弯曲形态模型 II,在风速 9 m/s 时,株高相差 5 cm 致倒力矩差异不显著,株高相差 10 cm 致倒力矩差异显著。模型 I 在风速 9 m/s 和 15 m/s 时不同株高处理间致倒力矩差异显著。根据茎秆弯曲形态模型曲线方程计算,茎秆长度每增加 5 cm,不同弯曲形态模型处理重力臂有效长增加值不同,处理 II 增加 0.3 cm,处理 III 增加 2.1 cm,处理 IV 增加 3.4 cm。

力矩最大,处理 III 次之,处理 II 重力力矩大于处理 I,小于处理 III 和 IV。此外,小麦不同茎秆弯曲模型处理间风力矩差异结果表明,风速为 18 m/s 和 15 m/s 时小麦不同茎秆弯曲模型处理间风力矩

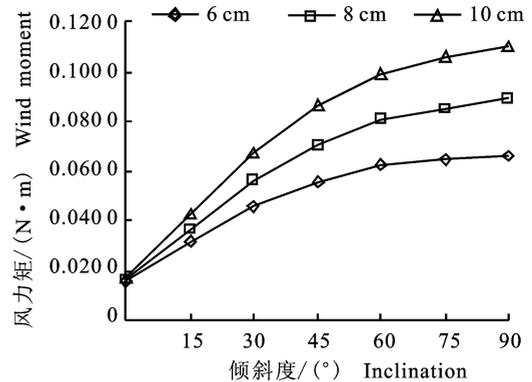


图 2 3 种穗长下不同倾斜度风力矩变化趋势  
Fig. 2 Variation trend of wind torque at differnt inclinations in wheat spike

3 结论与讨论

小麦穗不同倾斜度和长度持风力差异显著。小麦穗具有较大的受风面积和较长的作用力臂,是风力矩的主要来源。大穗是小麦的重要经济性状,一般大穗与单穗产量呈正相关,是育种的选择目标。尽可能地降低穗的倾斜度,减小穗的受风面积是提高小麦抗倒性的有效方法,特别是穗倾角在 60° 之前的控制对于减小持风力效果更佳。

本研究中,曲线方程为  $x^2/302 + y^2/602 = 1$  ( $x \leq 0, y \geq 0$ ) 的上部椭圆弧弯曲型在不同风速和不同茎秆长度中与其他模型比较持风力矩和重力矩差异显著,综合致倒力矩最小,为最佳抗倒模型。小麦倒伏与否,根本在于致倒力与抗倒力的大小对比,有效降低致倒力与提高抗倒性具有同

表 3 小麦不同株高弯曲形态模型致倒力矩检测

Table 3 The lodging moment tested in different plant height stalk bending models

株高/cm Plant height	I/(N·m)		II/(N·m)		III/(N·m)		IV/(N·m)	
	9 m/s	15 m/s	9 m/s	15 m/s	9 m/s	15 m/s	9 m/s	15 m/s
65	0.040 4 e	0.101 6 E	0.014 0 d	0.025 2 e	0.022 2 e	0.031 0 e	0.039 7 E	0.045 0 E
70	0.043 6 d	0.110 0 D	0.015 1 cd	0.027 2 d	0.025 1 d	0.034 2 d	0.044 3 D	0.050 1 D
75	0.046 5 c	0.118 1 C	0.016 2 bc	0.031 1 c	0.027 9 c	0.037 8 c	0.048 9 C	0.055 0 C
80	0.049 6 b	0.126 3 B	0.017 5 ab	0.033 1 b	0.030 8 b	0.040 2 b	0.055 6 B	0.060 2 B
85	0.052 4 a	0.134 4 A	0.018 2 a	0.035 2 a	0.033 9 a	0.043 5 a	0.061 2 A	0.065 3 A

等效用。当穗的倾斜度为 0° 时,不同穗长的有效受风面积等于其横截面积。上部椭圆弧弯曲型最大限度地控制了穗的倾斜度,穗的持风力最小,又较好地控制了重力力臂有效长度,重力力矩较小,所以综合致倒力矩最小。曲线方程  $x^2 + y^2 = 492$  ( $x \leq 0, y \geq 0$ ) 的圆弧弯曲型虽然综合致倒力矩大于上部椭圆弧弯曲型,却小于下部椭圆弧弯曲型和直立秆型,且致倒力矩差异极显著。综上分析比较:上部椭圆弧弯曲型为最佳抗倒模型,圆弧弯曲模型为次佳抗倒模型。

以最佳抗倒模型或次佳抗倒模型的茎秆弯曲形状作参照,在小麦抗倒育种中,田间选择相似于本模型的植株产生的综合致倒力矩较小,既有利于抗茎倒伏,也有利于抗根倒伏。作为抗倒评价与数学方程模型比较虽然不够具体,却具有综合的性质和简单实用的特点。每年 5 月份气温上升较快,气压不稳定,5、6 级风力的强对流天气时有发生,局部还可能出现 7、8 级风力的雷暴天气。本研究在陕西省杨凌区进行(E: 108° 4', N: 34° 16'),据近 10 a 气象资料统计,5 月份 5 级以上风 3 a 发生 4 次,其中雷暴天气 2 次。本试验风源风速设计为 4~8 级 5 个有效处理,对于黄淮麦区和北部冬麦区都具有一定参考价值,但未考虑雨水重力的致倒作用。

本研究中的茎秆弯曲形态模型来自于一个匀质弹性圆环的变形,茎秆长度为圆环周长的 1/4。将圆环从左右两侧同时向内挤压,当长半轴 2 倍于短半轴时,得上部椭圆弧弯曲模型;将圆环从左右两侧同时向外拉至长半轴 2 倍于短半轴时,得下部椭圆弧弯曲模型;当长半轴等于短半轴时为圆弧弯曲模型。受多因素影响,小麦茎秆在风中实际弯曲形态不但多姿多样,而且并不很规则,但总会与其中一种模型相似。小麦茎秆在风中实际弯曲形态可视为该模型的过渡形态,也可视为茎秆倒伏前临界形态。因此,该模型虽然具有典型

性,但也具有一定代表性。小麦弯曲形态与其强度和弹性有关,根据不同模型的最大曲率部位初步推测:上部椭圆弧弯曲型茎秆上部强度较小,茎秆下部强度较大;圆弧弯曲型从上至下茎秆强度均匀减小;下部椭圆弧弯曲型茎秆强度上部与下部比较,差异应该较小。各模型处理的茎秆应该都具有较好弹性。本研究再次验证茎秆下部强度与抗倒性呈正相关,茎秆上部弯曲度也与抗倒性呈正相关。至于不同节间强度和弹性大小对弯曲形态的影响,问题比较复杂,有待以后进一步研究。

参考文献 Reference:

[1] 姚金保,马鸿翔,姚国才,等. 小麦抗倒性研究进展[J]. 植物遗传资源学报,2013,14(2):208-213.  
YAO J B, MA H X, YAO G C, et al. Research progress on lodging resistance in wheat [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2013, 14(2): 208-213.

[2] 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 Y M, YUAN H M, YIN Y, et al. Biomechanical evaluation and grey relational analysis of lodging resistance of stalk crops [J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23 (7): 14-18.

[3] 何中虎,庄巧生,程顺和,等. 中国小麦产业发展与科技进步[J]. 农学学报,2018,8(1):99-106.  
HE ZH H, ZHUANG Q SH, CHENG SH H, et al. Wheat production and technology improvement in China [J]. *Journal of Agriculture*, 2018, 8(1): 99-106.

[4] 陈士强,陈秀兰,张容,等. 小麦赤霉病抗性与株高的相关性研究[J]. 江苏农业科学,2015,43(12):144-147.  
CHEN SH Q, CHEN X L, ZHANG R, et al. Correlation between *Fusarium* head blight resistance and plant height in wheat [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, 43 (12): 144-147.

[5] 吴同彦,刘会,谢令琴,等. 小麦白粉病与主要农艺性状相关性的研究[J]. 中国农学通报,2008,24(5):339-342.  
WU T Y, LIU H, XIE L Q, et al. Correlated analysis on wheat powdery mildew and some main wheat agronomic

- traits[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(5):339-342.
- [6] 闵东红,王 辉,孟超敏,等.不同株高小麦品种抗倒伏性与其亚性状及产量相关性研究[J]. *麦类作物学报*, 2001, 21(4):76-79.  
MIN D H, WANG H, MENG CH M, *et al.* Studies on the lodging resistance with its subtraits of different height wheat varieties and correlation between plant height and yield[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2001, 21(4):76-79.
- [7] 董 琦,王爱萍,梁素明.小麦基部茎节形态结构特征与抗倒性的研究[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2003, 23(3):188-191.  
DONG Q, WANG A P, LIANG S M. Study on the architectural characteristics of wheat stalks[J]. *Journal of Shanxi Agriculral University (Natural Science Edition)*, 2003, 23(3):188-191.
- [8] 朱新开,王祥菊,郭凯泉,等.小麦倒伏的茎秆特征及对产量与品质的影响[J]. *麦类作物学报*, 2006, 26(1):87-92.  
ZHU X K, WANG X J, GUO K Q, *et al.* Stem characteristics of wheat with stem lodging and effects of lodging on grain yield and quality[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2006, 26(1):87-92.
- [9] 王法宏,赵君实,刘和平.冬小麦不同产量潜力品种茎秆和旗叶表皮组织结构的比较研究[J]. *作物学报*, 1995, 21(2):243-246.  
WANG F H, ZHAO J SH, LIU H P. The histological study on winter wheat varieties with different yield potential[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1995, 21(2):243-246.
- [10] 王 勇,李晴祺,李朝恒,等.小麦品种茎秆的质量及解剖学研究[J]. *作物学报*, 1998, 24(4):452-458.  
WANG Y, LI Q Q, LI CH H, *et al.* Studies on the culm quality and anatomy of wheat varieties[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1998, 24(4):452-458.
- [11] 魏凤珍,李金才,王成雨,等.氮肥运筹模式对小麦抗倒性能的影响[J]. *作物学报*, 2008, 34(6):1080-1085.  
WEI F ZH, LI J C, WANG CH Y, *et al.* Effects of nitrogenous fertilizer application model on culm lodging resistance in winter wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(6):1080-1085.
- [12] 王 勇,李晴祺.小麦品种抗倒性评价方法的研究[J]. *华北农学报*, 1995, 10(3):84-88.  
WANG Y, LI Q Q. Evaluation method of stem lodging resistance in wheat[J]. *Acta Agriculturae Boreal-Sinica*, 1995, 10(3):84-88.
- [13] 蒲定福,周俊儒,李邦发,等.根倒伏小麦抗倒性评价方法研究[J]. *西北农业学报*, 2000, 9(1):58-61.  
PU D F, ZHU J R, LI B F, *et al.* Evaluation method of rood lodging resistance in wheat[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2000, 9(1):58-61.
- [14] 王 勇,李斯深,亓增军,等.小麦抗倒性状的基因效应及杂种优势分析[J]. *西北植物学报*, 1998, 18(4):514-520.  
WANG Y, LI S SH, QI Z J, *et al.* Chne effects and heterosis of lodging resistance traits in wheat[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 1998, 18(4):514-520.
- [15] 袁志华,郑桂梅,苏宗伟.典型风荷载对小麦茎秆倒伏的影响[J]. *河南科学*, 2005, 23(1):54-55.  
YUAN ZH H, ZHENG G M, SU Z W. The effect of special wind load on wheat stem lodger[J]. *Henan Science*, 2005, 23(1):54-55.
- [16] 叶三星,徐 敏,黄芳芳,等.小麦茎秆抗倒性的数学模型研究[J]. *数学的实践与认识*, 2012, 42(15):76-86.  
YE S X, XU M, HUANG F F, *et al.* Study on mathematical model of wheat stalk's lodging resistance[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2012, 42(15):76-86.
- [17] 钱 兵,张海龙,李静波.小麦蜡熟期茎秆抗倒伏数学模型的建立[J]. *数学的实践与认识*, 2012, 42(15):20-35.  
QIAN B, ZHANG H L, LI J B. Mathematical model of the wheat stem lodging at dough stage[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2012, 42(15):20-35.
- [18] 刘水利,宋瑜龙,李够霞,等.小麦持风力及风力缓冲作用的研究[J]. *西北农业学报*, 2016, 25(12):1787-1791.  
LIU SH L, SONG Y L, LI G X, *et al.* Upright-keeping and wind cushioned abilites of wheat [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2016, 25(12):1787-1791.

## Analysis of the Lodging Ability of Wind in Typical Wheat Stalk Bending Models

LIU Shuili<sup>1</sup>, SONG Yulong<sup>2</sup> and GAO Fenggang<sup>1</sup>

(1. Station Management Center, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi 712100, China;

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

**Abstract** To study lodging moment in typical wheat stalk bending models for improving the capacity for resistance to lodging in wheat, different models involving wheat spikelet angle to rachis and stalk bending were designed and tested in a wind tunnel. The variances in the lodging moment in different models under different wind speeds were analysed. The experimental results indicated that wind-induced bending moment showed a significant difference with every 15° decrease in wheat spikelet angle at a wind speed of 13 m/s. Wind moment was the smallest and the values showed no significant difference for different spike lengths when the spike slope of wheat ear was decreased to 0°. The model of stalk bending expressed as the curve equation of  $x^2/302 + y^2/602 = 1 (x \leq 0, y \geq 0, \text{length of stalk} = 0.78 \text{ m})$ , showed a highly significant difference in the lodging moment, which was influenced by the different bending shapes. Meanwhile, the capacity for resistance to lodging in wheat was the minimum in this model. There was no significant difference in the capacity for resistance to lodging at a wind speed of 9 m/s, when the difference in culm length was 5 cm. Compared with other models, in this model, lodging moment was influenced very minimally by plant height. This model was found to be the best in terms of lodging resistance. Furthermore, the model of stalk bending with the curve equation expressed as  $x^2 + y^2 = 502 (x \leq 0, y \geq 0, \text{length of stalk} = 0.78 \text{ m})$  is a sub-optimal model and showed a relatively lower possibility of lodging.

**Key words** Wheat; Spike; Stem; Bending model ; The lodging ability of wind

**Received** 2018-11-20

**Returned** 2018-12-21

**Foundation item** The National Science Foundation of China (No. 31701500); Postdoctoral Science Foundation of China(No. 2017M613222); Tangzhongying Breeding Foundation of Northwest Agriculture and Forestry University(No. 2016).

**First author** LIU Shuili, male, agronomist. Research area: wheat breeding and agricultural mechanization research. E-mail: sui87083081@163.com

(责任编辑:郭柏寿 Responsible editor: GUO Baishou)