

禾谷类作物抗倒伏性的研究方法与其抗倒伏性评价

田伯红

(沧州市农林科学院, 沧州 061001)

摘要: 倒伏是植株与其生长的环境条件相互作用的结果, 是禾谷类作物产量和品种的重要限制因素。诱发倒伏的自然条件不是年年发生, 但发生的程度差异很大, 难以在自然条件下重复评价作物的倒伏性, 因而人工诱发倒伏对于作物抗倒伏性的评价十分重要。谷子是非常容易发生倒伏的禾谷类作物, 抗倒伏的强弱是决定谷子高产、稳产的关键因素之一。由于谷子抗倒伏性的研究相对较少, 本文通过对禾谷类作物抗倒伏性研究方法和评价指标的述评, 为谷子抗倒伏性的研究提供借鉴, 并对谷子倒伏与植株和产量性状的关系、品种抗倒伏性评价的指标等相关研究的进展做一综述。

关键词: 谷子; 倒伏; 评价方法; 评价指标

The Methods of Lodging Resistance Assessment in Cereal Crops and Their Application in Foxtail Millet

TIAN Bo-hong

(Cangzhou Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Cangzhou 061001)

Abstract: Lodging is an important yield and quality limiting factor, which results from interactions between plants and the environmental conditions where they grow. It is difficult to assess crop lodging under natural conditions because of inconsistency of climates that are favorable for lodging every year, which makes artificially induced lodging play important role in evaluation of lodging resistance in crops. Foxtail millet (*Setaria italica* (L.) P. Beauv.) is prone of lodging and the lodging resistance is one of the crucial factors for high and stable yielding in this cereal crop. Because little information on lodging resistance is available in foxtail millet, this review outlines the methods and parameters for evaluation of lodging resistance in other cereal crops in order to provide a reference for lodging resistance in foxtail millet. This article also reviews the relationship between lodging and the traits associated with plant and yield and the parameters for assessing lodging resistance of foxtail millet cultivars.

Key words: *Setaria italica*; lodging; assessment method; parameter

谷子 (*Setaria italica* (L.) P. Beauv.) 一般播种密度大, 茎秆偏软, 容易发生倒伏, 无论春播还是夏播, 谷子生育期间常常会遇到风雨天气, 发生倒伏的可能性很大。谷子倒伏不但造成产量损失, 而且还降低营养品质和商品价值。俗话说“谷倒一把草”, 就形象地说明了倒伏对谷子的巨大影响。虽然倒伏是植株与其生长环境条件相互作用的结果, 但是引起倒伏的环境条件不是年年发生。因此, 如何准确地评价谷子抗倒伏性是培育抗倒伏品种的重要研究内容。由于谷子抗倒伏性的研究很少, 所以本文借鉴

其他禾谷类作物(包括小麦、大麦、水稻等软秆类作物)的研究结果, 对适用于谷子抗倒伏性的评价方法、评价指标做一综述, 以期对谷子抗倒伏性资源鉴定和育种提供参考。

1 影响作物倒伏的外界因素

农作物茎秆从相对于直立状态发生永久错位现象称为倒伏^[1]。谷子像其他禾谷类作物一样, 茎秆是由多个中空的伸长节间所构成。倒伏分为根倒伏和茎倒伏。根倒伏是由于根—土完整性受到破坏,

从而导致直立、未折断的茎秆从基部倾斜或倒下的现象^[2]。茎倒伏是指由于风力导致茎秆基部节间弯曲或折断,而根仍然被固定在土壤中。根倒伏和茎倒伏的发生取决于特定作物生长的环境条件^[3-4]。如果土壤湿度较大、松软,且作物气生根不发达,则容易发生根倒伏。土壤氮素水平高则容易发生茎倒伏。

倒伏是植株、风雨和土壤之间相互作用的结果。导致谷子倒伏的外界因素包括气候条件、土壤结构、不当栽培措施和病虫害侵害等。气候条件包括风、雨等。暴雨使土壤松软,降低植株的固着力。大风是拉倒植株或使茎秆弯曲的外力。谷子生育期间适逢一年中北方风雨较多的时间段,所以,在很多地区发生倒伏的可能性都较大。

品种、播期、播量、耕层深度、土壤肥力和化学生长调节剂施用等栽培管理条件都影响倒伏的发生^[5-7]。土壤耕层过浅、沙化、有机质含量较低会影响根系的健康发育,造成植株倒伏。虽然谷子为密植作物,但是过度密植,或氮肥使用过量,会造成个体间的生长竞争而影响植株的健康发育,使植株表现秆高、秆细、节间伸长,一旦遇到风雨等不利气候条件,就更容易发生倒伏。栽培管理实施不及时和生育期间病虫害对植株茎秆造成的损伤会加重倒伏。

倒伏发生的时期和严重程度对产量的影响大不相同^[8-9]。谷子抽穗前发生倒伏,植株通过自身的调节能力可恢复直立,对植株的生长和产量影响不大。谷子抽穗后,特别是到灌浆中后期发生倒伏,由于穗部已经有一定的重量,茎秆自身的调节能力很难再使植株恢复直立生长,造成田间通风透光差、光合作用降低、病虫害加重,对谷子生产的危害更大。成熟期发生倒伏,产量损失较小,但造成收获(尤其是机械收获)等操作困难,增加了收获成本。

2 控制作物倒伏的遗传因素

不同谷子品种之间的抗倒伏性存在差异^[10]。在小麦、大豆等其他作物上的研究结果也证明基因型与抗倒性密切相关^[11-17],显然这种差异是由于品种本身的遗传因素造成的。谷子植株的形态建成与倒伏具有密切的关系。倒伏不仅与根系性状(包括地下初生根、次生根以及地上的支持根)有关,而且还关系到植株地上部分的形态性状(如株高、节间长度等)和穗部性状(穗长、穗弯曲度和穗柄)。袁立新^[18]指出,谷子的抗倒伏性与株高、节间长度、穗

长、穗弯曲度、植株拉倒力和茎秆干重呈负相关,与茎粗和根量呈正相关。实际上,小麦抗倒伏能力的提高主要是由于矮秆基因发现和利用^[19]。最近的研究表明,谷子育成品种倒伏指数与茎秆抗折力和机械强度等茎秆的质量性状相关性更高,而与株高和基部节间长度没有显著相关,农家种则与株高显著负相关^[10]。因此,现代抗倒伏的谷子品种应该具有如下特征:株高适中,茎基部节间粗壮,叶片生长紧凑,成熟时穗下垂角度不太大。由于品种间植株的特征特性存在很大差异,这就为增强抗倒性提供了选择改良的空间。

在小麦上,茎倒伏与根倒伏的关系不是很密切,这可能是由于决定茎和气生根强度的植株性状存在差异的原因^[20]。所以,有些品种可能抗根倒伏的能力较强,而有些品种抗茎倒伏的能力较强。在改良品种的抗倒伏能力时应分别予以考虑。

3 作物抗倒性的研究方法

通常,抗倒性评价只能在倒伏真实发生的情况下才能进行。由于年度之间诱发倒伏的气候因素是不可预测的,所以,田间自然鉴定抗倒性常常是不可重复的。这样,人工诱导倒伏技术对于抗倒性的评价是十分必要的。为了达到人工诱发倒伏的效果,人们尝试了各种各样的方法。早年间,有人工弯曲或用手指挤压茎秆的^[21],有用飞机螺旋桨对准试验小区吹风的^[22]。F. Bauer^[23]设计了一种评价小麦抗倒性的风道装置。M. Sterling等^[3]详细介绍了一种可移动的风道装置,并用于评价小麦的抗倒伏性。该风道是一个截面积为 2.7 m^2 ,长 10 m 的长方形装置。为了方便拆装和移动,风道设计成4节 2.5 m 长,可用螺栓连接到一起的箱体,其中3节采用船用胶合板制作,另一节用透明的聚碳酸酯板制作,这样可以从外面观察风道内供试的植株。利用6个电扇鼓风,扇叶直径 710 mm ,3个1排,装到一个农用拖车一侧,风扇的底部大致位于风道内作物的最高处。为了防止形成旋风和小气流,在风扇的前面装上一个镶有铁网($10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$)的木框($250\text{ mm} \times 250\text{ mm}$)。风扇的风速设定为 $1 \sim 6\text{ m/s}$,瞬时风速可达 8.5 m/s 。这种风道装置比较好地模拟了自然风力对小麦的作用,但还不能完全代表气流的精确结构。

1990年,K. G. Briggs^[24]设计了一种简单的装置,采用一块装有滑轮的胶合板将小区中间几行完全压倒,人工模拟倒伏试验。P. M. Berry等^[25]详细

介绍了这种装置的构造和作用方式。该装置能够从一个方向压倒作物,并尽量不折断茎秆。这种方法设计简单、省时、省事,已经被用于大麦(*Hordeum vulgare* L.)和小麦的抗倒伏性育种^[9,24,26]。

研究表明,随着种植密度的增加,发生倒伏的可能性也随之提高。因此,增加播种量,提高种植密度也可以作为一种人工诱发倒伏的方法^[26-28]。

众所周知,气候条件、品种和栽培条件之间的互作对倒伏过程的影响是非常复杂的,因此,要想准确了解这种互作是很困难的。C. J. Baker 等^[4]提出一种评价小麦倒伏风险性的模型,可以供谷子抗倒性的研究借鉴。该模型包括小麦冠层、根和土壤系统,可以利用作物参数和土壤性质计算茎倒伏和根倒伏的风险。通过风诱发茎秆基部弯曲力矩(bending moment)与茎秆基部的破坏力矩(failure moment)确定是否发生茎倒伏。通过比较整个植株的弯曲力矩与植株根破坏力矩确定是否发生根倒伏。估计茎倒伏和根倒伏风险的原则是:(1)当风使茎基部弯曲力矩大于茎破坏力矩时发生茎倒伏;(2)当风使茎基部弯曲力矩大于支持根破坏力矩时则发生根倒伏^[25]。

4 抗倒伏的评价指标

谷子不同基因型之间的抗倒性存在差异,这就为通过遗传改良提高抗倒性提供了可能。改良谷子抗倒性的前提是必须有一个适合操作的抗倒性选择指标。抗倒性的表型鉴定只有在环境条件适合的情况才能进行。由于引起植株倒伏的环境条件无法准确预测,所以,抗倒性的选择指标必须独立于环境条件。目前关于禾谷类作物抗倒性的研究信息多是在小麦、大麦和水稻上获得的^[20,29-30],并且产生了多种反映作物抗倒性的指标和评价方法^[12,25,31-34]。由于谷子抗倒性评价的研究比较少,而谷子的茎秆结构与这些作物相似,所以小麦等作物的抗倒性评价指标也可以供谷子抗倒性评价借鉴。倒伏性可以在田间按照倒伏级别直接进行目测观察,不需经过任何测量。利用这类标准考察倒伏性只有在自然条件或人工诱导条件下的田间作物真实发生倒伏的情况下才能实施。另外,倒伏性还可通过测定一些植株性状,然后计算出一个反映倒伏性的指标(例如倒伏指数和倒伏系数)来评价。这类方法可不依赖于气候条件,通过植株本身的物理和生理生化性质来反映植株发生倒伏的潜力。

4.1 倒伏级别

倒伏级别是根据植株从直立状态到倒伏状态而划分的等级。通常,谷子品种国家区域试验倒伏级别的记载一般采用0~4级标准,其中,0级:无倒伏症状或稍微倾斜,但能很快恢复直立,对产量无影响;1级:倾斜角度 $\leq 30^\circ$ 、倒伏面积15%以下,对产量有轻微影响;2级: $30^\circ < \text{倾角} \leq 45^\circ$ 、倒伏面积为30%以下,对产量有影响;3级: $45^\circ < \text{倾角} \leq 60^\circ$ 、倒伏面积为50%以下,对产量影响较大;4级:倾角 60° 以上、倒伏面积为50%以上,并严重减产。

4.2 倒伏指数

作物茎秆的机械强度反映了茎秆的硬度和弹性。由于一般倒伏多发生于茎秆的基部节间,所以茎秆基部节间的机械强度对茎秆的抗倒伏性具有很大的影响。根据茎秆机械强度(S)以及植株重心高度(H)和地上部鲜重(G)计算出的倒伏指数,可以反映品种的抗倒性,倒伏指数的计算公式为:倒伏指数 $= (H \times G) / S$ 。倒伏指数越小,品种的抗倒伏能力越强;倒伏指数越大,品种的倒伏可能性越高^[35]。在构成倒伏指数的3个因素中,茎秆机械强度对倒伏指数的直接贡献最大。根据倒伏指数分析,抗倒伏能力强的小麦品种其特征是植株较矮,重心较低,茎基部节间粗壮,且干重大,更重要的是茎秆机械强度较高^[27]。因此,提高茎秆的机械强度和茎秆质量,对于提高作物的抗倒性作用更大。

倒伏指数可能不是由简单遗传因素控制的质量性状,而是属于多基因控制的数量性状。小麦抗倒性属于加性和非加性效应共同控制,以加性效应为主^[36],或者以非加性效应为主^[37]。也有研究认为,小麦的倒伏指数可能受3~4对隐性主效基因控制,符合加性-显性遗传模型^[38]。倒伏指数与基部节间长度、粗细和干重,以及茎秆机械强度等性状显著相关,可以通过对这些性状的选择间接选择品种的抗倒伏性。

4.3 倒伏系数

倒伏系数是在小麦上提出的,是植株重量(G)、株高(H)、茎秆机械强度(M)和根量(W)的综合体现,计算公式为:倒伏系数 $= H \times G / W \times M$ ^[12]。倒伏系数越大,表示该品种的抗倒伏能力越弱,反之,倒伏系数越小,品种的抗倒伏能力越强。倒伏系数在评价小麦和大麦品种抗倒性上得到很好的利用^[12,33]。最近,笔者利用倒伏系数研究了谷子品种的抗倒性,发现倒伏系数可以较好地地区分不同谷子品种的倒伏情况^[10]。

利用倒伏指数和倒伏系数来评价作物品种的抗倒性,可以综合地反映植株地上部分和地下部分对倒伏的影响。这些指标是通过测定植株的特定性状计算出来的,不依赖于倒伏是否真实发生,具有可操作性 and 可重复性,可以反映作物倒伏的情况,作为抗倒性改良的选择指标。

5 谷子抗倒伏性的评价研究

虽然倒伏是谷子的一个重要的产量限制因素,但是限于没有可靠的研究方法,关于谷子抗倒性的报道非常少。1998年,袁立新^[18]在对谷子株型性状与茎秆倒伏关系的研究中,发现了地上部分性状和地下部分根系的发育对倒伏的影响。该研究以植株的拉倒力作为反映谷子倒伏的主要指标,发现株高与植株拉倒力密切相关,特别是基部节间的长度与植株拉倒力显著相关,而上部节间的长度与植株的拉倒力相关性不显著。在产量性状方面,穗长和穗柄长,以及穗与茎干重的比值与植株拉倒力显著相关。这些显著相关的性状都呈负相关。与植株拉倒力呈正相关的性状包括茎粗,以及气生根根数和地下部根量。

笔者考察了不同类型谷子品种(农家种和育成品种)的倒伏程度,同时考察了根量、茎秆机械强度、株高、单茎鲜重、抗折力和基部3~5节长度等性状,计算了倒伏系数^[10]。倒伏系数与田间实际倒伏程度显著相关,说明利用倒伏系数评价谷子品种抗倒伏性是可行的。谷子育成品种的倒伏系数与茎秆的机械强度密切相关,而与株高和基部节间的长度关系不大。不同类型的品种中影响倒伏性的性状也不相同。对于农家种,对倒伏影响最大的性状为茎秆机械强度和株高。对于育成品种,地上组织重量、根量和茎秆机械强度对倒伏系数影响最大。在谷子蜡熟期,茎秆和叶片中储存的养分大部分已经输送到穗部,使穗重增加,重心升高,产生倒伏的潜在危险增大。如果茎秆机械强度大,根系发达,那么就消除了因穗子增重产生的倒伏因素,使谷子的抗倒性增强。因此,在谷子抗倒伏育种中,应选择根系发达,茎秆机械强度大,单株鲜重高,特别是经济系数高的材料,植株的高矮不是决定因素,一般以中秆为好,植株过高使得重心升高,倒伏的潜力也相应增大;株高或重心过低,容易发生早衰,产量也不会高。

由于缺乏操作性强的评价方法,所以谷子抗倒性育种工作开展的比较少。虽然早在20世纪80年代“六十日”的抗倒伏性受到了关注,并利用该材料

培育出了多个抗倒伏品种^[39],但是,迄今为止我国仍没有系统地开展谷子抗倒性的研究。刘玉贵等^[40]采用三圃定向培育提高张杂谷5号的抗倒伏能力研究。做法是:选取100个典型穗种植穗行圃,优选10个穗行,播种于10畦株区圃,从中选择1畦优穗在原种圃扩繁。通过这种方法可使倒伏、倒折率逐年下降,平均倒伏率从22.12%降至5.36%,平均倒折率从5.28%降至1.72%。这种方法的有效性还需在更多的基因型上进行验证。

6 结语

由于田间倒伏的发生受气候条件的左右,因此,自然条件下倒伏的发生是不能控制的。人工诱发倒伏是研究作物抗倒伏性必要、可重复的手段。当前,关于禾谷类作物倒伏的研究多是从小麦、大麦、水稻等作物上获得的资料,对于谷子的抗倒性研究开展的不够深入。谷子与其他禾谷类作物的茎秆结构类似,因此,从这些禾谷类作物上获得的一些结果对于谷子抗倒性研究具有非常好的参考价值,例如倒伏系数可以比较准确地反映谷子品种的倒伏性。研究表明,倒伏与植株的纤维素和木质素代谢密切相关^[41-42],倒伏还与茎秆的结构有关^[34,43],这些茎秆化学成分指标和茎秆结构性状对谷子倒伏性的作用尚不得知。虽然关于小麦、水稻等作物抗倒性的遗传特性和QTL定位有了一些研究^[36-38,44],但是谷子抗倒性的遗传控制、基因行为和QTL定位研究还没有开展。针对谷子抗倒性的研究,解析茎秆化学成分和茎秆结构与谷子倒伏的关系,揭示谷子抗倒性的遗传规律和基因定位,是选育抗倒性强的谷子新品种的必要前提。由于谷子抗倒伏性的基础研究比较滞后,所以抗倒性的遗传改良工作亟待加强。

参考文献

- [1] Pinthus M J. Lodging in wheat, barley and oats, the phenomenon-its causes and preventative measures[J]. *Adv Agron*, 1973, 25: 209-263
- [2] Graham J. Crop lodging in British wheats and barleys[D]. England: Reading University, 1983
- [3] Sterling M, Baker C J, Berry P M, et al. An experimental investigation of the lodging of wheat[J]. *Agr Forest Meteorol*, 2003, 119: 149-165
- [4] Baker C J, Berry P M, Spink J H, et al. A method for the assessment of the risk of wheat lodging[J]. *J Theor Biol*, 1998, 194: 587-603
- [5] 陈新宝, 刘会喜, 徐顺文, 等. 水稻倒伏的危害程度及应对措施[J]. *中国种业*, 2010(4): 56
- [6] 赵国庆, 高飞. 小麦倒伏的预防预测及补救技术措施[J]. *中国种业*, 2009(7): 63
- [7] Berry P M, Griffin J M, Sylvester-Bradley R, et al. Controlling

- plant form through husbandry to minimize lodging in wheat[J]. *Field Crop Res*, 2000, 67: 59-81
- [8] Jedel P E, Helm J H. Lodging effects on a semidwarf and two standard barley cultivars[J]. *Agron J*, 1991, 83: 158-161
- [9] Fischer R A, Stapper M. Lodging effects on high yielding crops of irrigated semidwarf wheat[J]. *Field Crop Res*, 1987, 17: 245-258
- [10] Tian B H, Wang J G, Zhang L X, et al. Assessment of resistance to lodging of landrace and improved cultivars in foxtail millet[J]. *Euphytica*, 2010, 172: 295-302
- [11] 黄中文, 赵团结, 喻德跃, 等. 大豆抗倒伏性的评价指标及其 QTL 分析[J]. *作物学报*, 2008, 34(4): 605-611
- [12] 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
- [13] Inoue M, Gao Z S, Cai H W. QTL analysis on lodging resistance and related traits in Italian ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) [J]. *Theor Appl Genet*, 2004, 109: 1576-1585
- [14] Crook M J, Ennos A R. Stem and root characteristics associated with lodging resistance in four winter wheat cultivars[J]. *J Agr Sci*, 1994, 123: 167-174
- [15] Ibrahim M, Erskine W, Hanti G, et al. Lodging in lentil as affected by plant population, soil moisture, and genotype[J]. *Exp Agr*, 1993, 29: 201-206
- [16] Easson D L, White E M, Pickles S J. The effects of weather, seed rate and cultivar on lodging and yield in winter wheat[J]. *J Agric Sci Cambridge*, 1993, 121: 145-156
- [17] 张丽伟, 齐照明, 刘春燕, 等. 基于 Meta 分析的大豆倒伏性相关 QTL 的整合[J]. *植物遗传资源学报*, 2010, 11(6): 755-759
- [18] 袁立新. 谷子株型对茎秆倒伏影响的研究[J]. *吉林农业科学*, 1998(4): 36-37
- [19] Worland T, Snape J W. Genetic control of plant stature [M]// Bonjean A P, Angus W J. *The world wheat book: A history of wheat breeding*. Paris: Lavoisier Publishing, 2001: 67-71
- [20] Berry P M, Spink J H, Sterling M, et al. A comparison of root and stem lodging risks among winter wheat cultivars[J]. *J Agr Sci*, 2003, 141: 191-202
- [21] Laude H H, Pauli A W. Influence of lodging on yield and other characters in winter wheat[J]. *Agron J*, 1956, 48: 452-455
- [22] Harrington J B, Waywell C G. Testing resistance to shattering and lodging in cereals[J]. *Sci Agr*, 1950, 30: 51-60
- [23] Bauer F. Some indirect methods of determining the standing ability of wheat[J]. *Z Acker und Pflanzenbau*, 1964, 119: 70-80
- [24] Briggs K G. Studies of recovery from artificially induced lodging in several six-row barley cultivars[J]. *Can J Plant Sci*, 1990, 70: 173-181
- [25] Berry P M, Spink J H, Sterling M, et al. Methods for rapidly measuring the lodging resistance of wheat cultivars[J]. *J Agron Crop Sci*, 2003, 189: 390-401
- [26] Kelbert A J, Spaner D, Briggs K G, et al. Screening for lodging resistance in spring wheat breeding programmes[J]. *Plant Breeding*, 2004, 123: 349-354
- [27] 李金才, 尹均, 魏凤珍. 播种密度对冬小麦茎秆形态特征和抗倒指数的影响[J]. *作物学报*, 2005, 31(5): 662-666
- [28] Stapper M, Fischer R A. Genotype, sowing date and plant spacing influence on high-yielding irrigated wheat in Southern New South Wales. II Growth, yield and nitrogen use [J]. *Aust J Agr Res*, 1990, 41: 1021-1041
- [29] Berry P M, Sterling M, Spink J H, et al. Understanding and reducing lodging in cereals [M]// Sparks D L. *Advance in agronomy*. Salt Lake: Academic Press, 2005: 218-263
- [30] Terashima K, Sakai K, Kabaki N. Relationship between biomass of an individual hill and root lodging tolerance in direct seeded rice [J]. *Jpn J Crop Sci*, 2002, 71: 161-168
- [31] Sakata I, Sakai M, Imbe T. The correlation of the resistance to root lodging with growth angle, diameter and pulling strength of grown roots in rice seedlings[J]. *Jpn J Crop Sci*, 2003, 72: 56-61
- [32] Jezowski S. Variation, correlation and heritability of characters determining lodging of spring barley (*Hordeum vulgare* L.). II. Analysis of relationship between lodging grade and some morphological characters of spring barley varieties[J]. *Genet Pol*, 1981, 22: 45-61
- [33] 王莹, 杜建林. 大麦根倒伏抗倒性评价方法及其倒伏系数的通径分析[J]. *作物学报*, 2001, 27(6): 941-945
- [34] Crook M J, Ennos A R. The effect of nitrogen and growth regulators on stem and root characteristics associated with lodging in two cultivars of winter wheat[J]. *J Exp Bot*, 1995, 46: 931-938
- [35] 王勇, 李斯深, 李安飞, 等. 小麦种质抗倒性评价和抗倒性状的相关与通径分析[J]. *西北植物学报*, 2000, 20(1): 79-85
- [36] Mavi G S, Nanda G S, Sohu V S, et al. Gene action and combining ability estimates for lodging resistance in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Crop Improv*, 2003, 30: 58-64
- [37] 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
- [38] 姚金保, 张平平, 任丽娟, 等. 小麦抗倒指数遗传及其与茎秆特性的相关分析[J]. *作物学报*, 2011, 37(3): 452-458
- [39] 陈家驹, 王雅儒, 王升文, 等. 抗倒伏谷子种质“六十日”及其衍生系统的应用[J]. *作物品种资源*, 1984(3): 30-32
- [40] 刘玉贵, 许建铭, 任全军. 三圃定向培育对谷子倒伏倒折的影响[J]. *现代农业科技*, 2011(6): 65-66
- [41] Kokubo A, Sakurai N, Kuraishi S. Culm brittleness of barley (*Hordeum vulgare* L.) mutants is caused by smaller number of cellulose molecules in cell wall[J]. *Plant Physiol*, 1991, 97: 509-514
- [42] Kokubo A, Kuraishi S, Sakurai N. Culm strength of barley: Correlation among maximum bending stress, cell wall dimensions, and cellulose content[J]. *Plant Physiol*, 1989, 91: 876-882
- [43] Tripathi S C, Sayre K D, Kaul J N, et al. Growth and morphology of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) culms and their association with lodging: effects of genotypes, N levels and ethephon[J]. *Field Crop Res*, 2003, 84: 271-290
- [44] 张秋英, 欧阳由男, 戴伟民, 等. 水稻基部节间性状与倒伏相关性分析及 QTL 定位[J]. *作物学报*, 2005, 31(6): 712-717