

中国小麦主推品种和育成品系的抗倒伏性评价

李嘉豪¹, 刘昊东¹, 王伟伟¹, 徐 渴¹, 张树华², 赵 勇¹, 杨学举²

(¹ 河北农业大学农学院, 保定 071000; ² 河北农业大学生命科学学院, 保定 071000)

摘要: 倒伏是影响小麦产量的主要因素之一, 选育抗倒伏性强的品种是育种研究的重点目标。本研究以 528 份我国主推的小麦品种和育成品系为材料, 对影响小麦倒伏的主要性状进行测定, 利用无偏线性估计值进行遗传变异分析、相关分析、主成分分析、线性回归分析和聚类分析, 综合评价不同小麦品种的抗倒伏性。研究表明, 6 个抗倒伏性状在品种间都存在着广泛的遗传变异。基部节间长度、株高与抗推力呈极显著负相关, 基部节间直径与抗推力呈极显著正相关, 节间长度与节间直径相关性不显著。主成分分析表明, 所有性状的信息可以用 3 个主成分代表, 其累计贡献率达 83.837%。回归分析结果表明, 第 1 节间直径、第 1 节间长度、第 2 节间直径、第 2 节间长度和株高等 5 个性状均对抗推力有显著影响。依据抗推力将 528 份材料聚类为 4 类, 其中第 I 类群有 66 份小麦品种(系), 其抗倒伏能力最强。研究结果为小麦抗倒伏品种利用、抗倒伏育种亲本的筛选以及育种后代品系的选育评价提供理论依据和技术支撑。

关键词: 小麦; 抗倒伏性; 聚类分析; 品种评价

Evaluation of Lodging Resistance in Main Wheat Varieties (Lines) in China

LI Jia-hao¹, LIU Hao-dong¹, WANG Wei-wei¹, XU Ke¹,
ZHANG Shu-hua², ZHAO Yong¹, YANG Xue-ju²

(¹ College of Agronomy, Hebei Agricultural University, Baoding 071000;

² College of Life Science, Hebei Agricultural University, Baoding 071000)

Abstract: Lodging is one of the main factors affecting the yield of common wheat (*Triticum aestivum* L.). Improvement of lodging resistance in varieties is a key goal in wheat breeding. In this study, 528 wheat varieties and lines from China were used to determine the phenotypic characteristics that affect lodging. Statistical analysis including genetic variation analysis, correlation analysis, principal component analysis, multiple linear regression analysis and cluster analysis were used to evaluate the lodging resistance. A wide range of genetic variation was observed at six characteristics reflecting lodging resistance. The basal internode length and plant height were negatively correlated with resistance to the thrust, while the basal internode diameter was positively correlated with the resistance to thrust, however, no significant correlation between the basal internode length and the internode diameter was observed. Principal component analysis showed that information about all characteristics could be represented by three principal components, with the cumulative contribution rate of 83.837%. Regression analysis revealed that the first internode diameter, first internode length, second internode diameter, second internode length, and plant height significantly affected the thrust of wheat. Cluster analysis based on the thrust

收稿日期: 2020-03-10 修回日期: 2020-07-09 网络出版日期: 2020-07-23

URL: <http://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20200310001>

第一作者研究方向为小麦抗倒伏相关性状的鉴定与 QTL 定位, E-mail: ljhlkms@163.com

通信作者: 杨学举, 研究方向为植物遗传资源和作物遗传育种, E-mail: shmyxj@126.com

赵勇, 研究方向为小麦分子育种, E-mail: zhaoyong_0423@163.com

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0101002); 河北省科技支撑计划项目(16226320D)

Foundation projects: National Key Research and Development Program of China (2017YFD0101002), Hebei Science and Technology Support Project (16226320D)

suggested four groups from the tested genotypes, among which 66 wheat varieties (lines) in the first group represented the strongest lodging resistance. Collectively, these results provided a theoretical basis for the use of lodging-resistant varieties in agriculture, and also the evaluation method of lodging resistance in parents and derived offsprings.

Key words: wheat; lodging resistance; cluster analysis; variety evaluation

倒伏是限制小麦产量和品质的重要因素^[1-2]。我国黄淮冬麦区和北部冬麦区等主要产区,都存在不同程度的倒伏风险,有的区域严重年份倒伏面积达 50% 以上^[3-6]。研究表明,小麦抗倒伏能力主要与株高、茎基部节间长、茎粗以及茎秆韧性等性状相关^[7-11]。株高作为影响小麦倒伏最主要的性状,株高越低,植株的抗倒伏性越好。但植株太低时,产量也会降低^[12],因此植株高度降低到一定程度,进一步通过矮化来提高小麦抗倒伏的效果是有限的。茎基部机械组织不发达或第 1、2 节间伸长变细也是导致倒伏的重要原因^[13],利用第 1、2 节的节间长度和节间直径鉴定小麦品种的抗倒伏性是有效的直观方法。另外, Murphy 等^[14]提出了根据垂直茎秆方向的拉力和回到原位置的速度确定作物抗倒伏的方法,对植株的损伤小,方便在田间对大量品种进行鉴定。

前人在品种筛选的过程中大都使用表型值的平均值^[15-16],但这种方法易受到环境的影响。运用多种统计学方法评价大量小麦品种和品系的抗倒伏性未见报道。本研究以 528 份我国主要小麦品种和育种优良品系为供试材料,调查与抗倒伏性相关的 6 个性状(株高、第 1 节间直径、第 1 节间长度、第 2 节间直径、第 2 节间长度、抗推力),选择无偏线性估计计算表型值^[17],利用主成分分析、回归分析和聚类分析进行抗倒伏品种筛选评价,建立一套较为准确的鉴定小麦抗倒伏性的数学模型和评价指标,解析抗倒伏性的因果关系^[18-20]。研究结果为小麦品种的抗倒伏性筛选和育种提供理论依据和亲本材料。

1 材料与方法

1.1 供试材料

528 份来自中国黄淮冬麦区和北部冬麦区的小麦品种(系),其中河北省 141 份、北京市 44 份、天津市 2 份、山西省 30 份、陕西省 29 份、河南省 71 份、山东省 151 份、安徽省 11 份、江苏省 48 份、甘肃省 1 份(<http://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20200310001>, 附表 1)。这些供试材料来源分布广泛,抗倒伏能力

差异大。

1.2 田间试验设计

供试材料分别于 2017 年和 2018 年于保定市莲池区、沧州市青县和邢台市任县种植,播种期在当地适宜的播期范围内。采用随机区组设计,2 行区,行长 1.5 m,行距 25 cm,株距 2.5 cm,3 次重复。田间管理与当地生产管理方式相同。

1.3 抗倒伏相关性状的测定

参照金善宝^[21]的方法,在小麦开花期后 3 d 于田间调查小麦品种的第 1 节间直径,第 1 节间长度,第 2 节间直径,第 2 节间长度和株高等性状。每个品种的每个重复随机取 5 个单茎,取其平均数。参照任安然等^[22]的方法并稍加改进,将日本的 DIK-7401 型推力测定仪放于第 2 节中部,垂直用力,使小麦植株倾斜 45°,此时推力测定仪显示的数值即为抗推力,每个品种的每个重复随机取 5 个单茎,取平均值,测定时间与基部节间性状同时进行。

1.4 统计分析

1.4.1 数据记载 观测记录各性状表型值。第 1 节间直径记为 X1,第 1 节间长度记为 X2,第 2 节间直径记为 X3,第 2 节间长度记为 X4,株高记为 X5,推力记为 Y。利用 R 语言中的 lme4 包对原始表型数据进行无偏线性估计(BLUP, best linear unbiased prediction)用于后续统计分析。利用 Microsoft Excel 2016 对 BLUP 进行描述性统计。

1.4.2 性状间的相关性分析 利用 R 语言中的 Performance Analytics 包进行相关性分析,选取的模型为皮尔逊模型。

1.4.3 主成分分析 利用 IBM SPSS Statistics 25.0 软件对 6 个抗倒伏性相关性状进行主成分分析,计算各主成分的特征向量和贡献率。

1.4.4 回归分析 利用 IBM SPSS Statistics 25.0 软件对表型值进行线性回归分析,建立抗推力与其他 5 个性状的拟合方程。

1.4.5 聚类分析 利用 R 语言中的 dist 函数和 hclust 函数进行聚类分析,选择欧氏距离(euclidean)计算两点间的遗传距离,用离差平方和法进行聚类分析。

2 结果与分析

2.1 不同抗倒伏性状的遗传变异和相关性

6 个抗倒伏性状的遗传变异见表 1。不同小麦品种间的株高等性状均存在显著差异。其中抗

推力的差异最大,变幅为 0.19~0.51,变异系数达 18.75%。第 1 节间长度与第 2 节间长度的差异次之,表明了不同小麦品种间节间长度存在较大差异。分析可知,6 个表型性状在品种间均存在着广泛的遗传变异。

表 1 不同性状的遗传变异

Table 1 Genetic variation of different characters

性状 Trait	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数(%) CV
株高(cm) PH	130.74	50.35	73.07	8.27	11.32
第 1 节间直径(mm) FD	4.46	2.37	3.22	0.30	9.32
第 1 节间长度(cm) FL	7.73	2.06	4.12	0.72	17.48
第 2 节间直径(mm) SD	5.05	2.80	3.70	0.32	8.65
第 2 节间长度(cm) SL	12.25	4.68	7.38	1.10	14.91
抗推力 TH	0.51	0.19	0.32	0.06	18.75

PH: Plant height, FD: First internode diameter, FL: First internode length, SD: Second internode diameter, SL: Second internode length, TH: Thrust. The same as below

6 个表型性状间的相关性见图 1。其中,第 1 节间直径分别与第 2 节间直径、抗推力呈极显著正相关;与第 1 节间长度、第 2 节间长度相关性不显著;和株高呈显著负相关。第 1 节间长度分别与第 2 节间长度、株高呈极显著正相关;和抗推力呈极显著负相关;与第 2 节间直径相关性不显著。第 2 节间直径与抗推力呈极显著正相关;与株高、第 2 节间长度相关性不显著;第 2 节间长度与株高呈极显著正相关;与抗推力呈极显著负相关。株高与抗推力呈极显著负相关。分析可知,抗推力与株高、第 1 节间长度、第 2 节间长度均呈极显著负相关,与第 1 节间直径、第 2 节间直径均呈极显著正相关。由此推断,抗推力可作为小麦品种抗倒伏性的综合鉴定和筛选指标。

2.2 影响小麦抗倒伏性的主成分

通过对 6 个性状进行主成分分析,各主成分的特征向量和贡献率见表 2。3 个主成分的累计贡献率已达 83.837%。第 1 主成分贡献率是 38.929%,相当于 2.336 个原始性状的作用,其特征向量主要与第 1 节间直径、第 2 节间直径和抗推力相关;第 2 主成分的贡献率是 31.466%,相当于 1.888 个原始性状的作用,其特征向量主要与第 1 节间长度和第 2 节间长度相关;第 3 主成分的贡献率是 13.442%,相当于 0.807 个原始性状的作用,其特征向量主要与株高相关。综合来看,株高、第 1 节间长度、第 1 节间直径、第 2 节间长度、第 2 节间直径和抗推力均

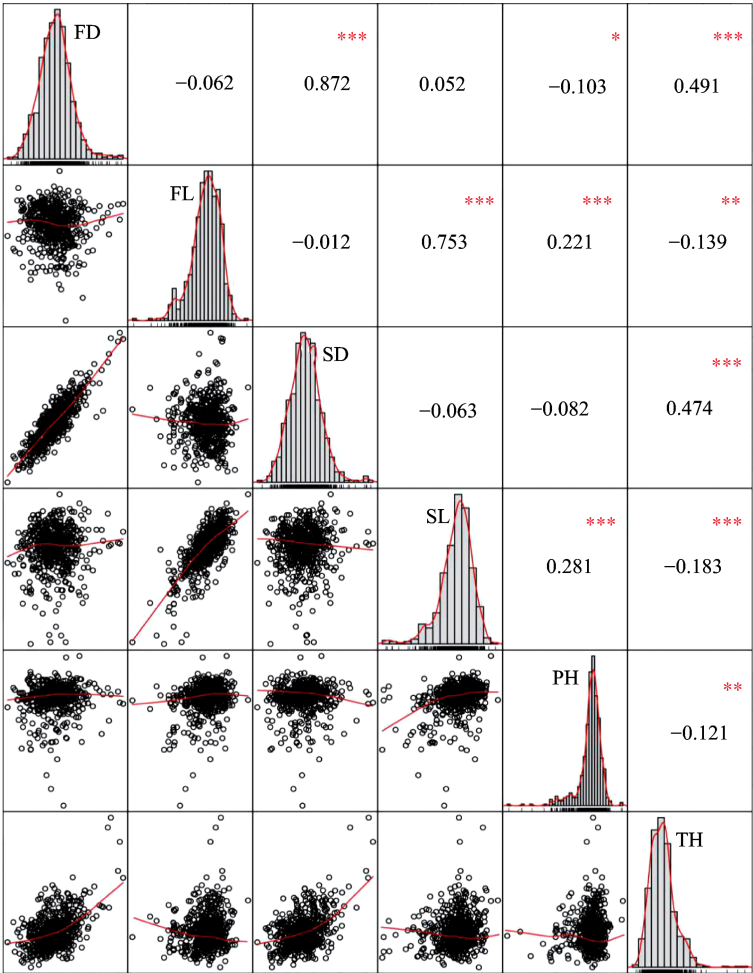
可作为不同品种小麦抗倒伏能力的鉴定指标。

2.3 抗倒伏性状与抗推力的回归方程

将抗推力作为因变量(Y),建立与第 1 节间直径(X1)、第 1 节间长度(X2)、第 2 节间直径(X3)、第 2 节间长度(X4)、株高(X5)5 个性状之间的多元线性回归方程,得 $R=0.658$, 方程为 $Y=0.318X1-0.061X2+0.125X3-0.097X4-0.011X5+0.094$,且各回归系数均通过显著性检验,其中第 1 节间直径,第 2 节间直径的显著性更高,对抗推力的影响更显著。由此得出第 1 节间直径、第 1 节间长度、第 2 节间直径、第 2 节间长度和株高均对抗倒伏有显著影响。

2.4 小麦品种抗倒伏性的聚类分群

利用抗推力对供试材料进行聚类分析,将 528 份材料分成 4 类详见(<http://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20200310001>,附表 1)。第 I 类群有 66 份小麦品种(系),分别是周 8425B、河农 6425、济麦 22 等,这些小麦材料表现出的抗倒伏能力最强,属于高度抗倒类型;第 II 类群有 174 份小麦品种(系),分别是石麦 15、衡观 35、冀麦 325 等,表现出较强的抗倒伏能力,属于抗倒伏类型;第 III 类群有 266 份小麦品种(系),分别是远丰 175、京冬 8 号、河农 06(159)等,抗倒伏能力较弱,属于较易倒伏类型;第 IV 类群有 22 份小麦品种,分别是河农 06(143)6-10-15-5、宝麦 8 号、孟县 201 等,抗倒伏能力弱,属于易倒类型。



图中数值为各性状的相关性系数值, 左下角散点图为各性状间的相关性散点图, 对角线的柱状图为群体在各性状的频率分布。
* 在 0.05 水平相关性显著; ** 在 0.01 水平相关性显著; *** 在 0.001 水平相关性显著。FD: 第 1 节间直径; FL: 第 1 节间长度;
SD: 第 2 节间直径; FL: 第 2 节间长度; PH: 株高; TH: 抗推力

The values in the figure are the correlation coefficient values of each trait, the scatter diagram in the lower left corner is the scatter diagram of correlation among the traits, and the histogram of diagonal line is the frequency distribution of population in each trait.* the correlation was significant at 0.05 level,** the correlation was significant at 0.01 level,*** the correlation was significant at 0.001 level

图 1 不同性状间的相关性分析
Fig.1 Correlation coefficients between different traits

表 2 各性状主成分的特征向量及贡献率
Table 2 Eigenvectors and percentages of accumulated contribution of principal components

性状 Trait	主成分 Principal component		
	1	2	3
株高 PH	0.339	0.461	0.817
第 1 节间直径 FD	0.829	-0.435	0.028
第 1 节间长度 FL	0.346	0.826	-0.278
第 2 节间直径 SD	0.834	-0.408	-0.018
第 2 节间长度 SL	0.445	0.788	-0.202
抗推力 TH	0.721	-0.127	-0.137
特征值 Eigen value	2.336	1.888	0.807
贡献率(%) Contribution rate	38.929	31.466	13.442
累计贡献率(%) Cumulative contribution rate	38.929	70.395	83.837

3 讨论

3.1 抗推力作为小麦抗倒伏性综合评价指标的可靠性

小麦抗倒伏性是一个复杂的数量性状^[23],与多种因素有关。Verma 等^[24]的研究表明,小麦的抗倒伏能力大小与株高和节间长度高度相关,植株越低矮,节间长度越小,小麦的抗倒伏性越好。本研究利用 528 份小麦品种(系)的 5 个性状,分析其与抗推力间的关系,发现株高、第 1 节间长度和第 2 节间长度与抗推力呈极显著负相关,第 1、2 节间直径与抗推力呈极显著正相关,证明了抗推力这一直观性状可作为筛选小麦品种抗倒伏能力的综合指标,既准确又简便。根据抗推力与 5 个性状的逻辑关系,建立了线性回归方程,进一步量化了株高等 5 个性状对抗推力的贡献。

3.2 多元统计分析对抗倒性状的遗传解析

表型数据的真实性和准确性是保障分析结果可靠性的前提。前人研究大多为 1 年 1 点试验,利用不同品种重复间的平均值进行统计分析^[11,25]。本研究利用 2 年 3 点的表型数据,通过计算不同性状的无偏线性估计(BLUP)值,消除了环境对表型值的影响。评价作物品种的方法多种多样,其中所运用的数学原理也不尽相同。主成分分析是在损失较少信息的前提下,利用几个综合因子代表原来众多的变量,使这些综合因子提供 80% 以上的信息^[26]。利用主成分分析进行小麦品种抗倒伏性的鉴定和筛选,既能把握其综合性状的表现,又可以简化分析流程^[27]。利用回归分析建立不同变量间的线性方程,量化不同性状对同一性状的影响,筛选主要性状进行后续分析^[28]。利用 528 份品种进行主成分分析,分为 3 个主成分,对性状进行有效的降维,包含了 6 个性状的主要信息。

3.3 小麦品种抗倒性评价结果的育种价值

聚类分析在研究作物种质资源分类上具有较为突出的优点,是一种切实可行的方法^[29-30]。本研究依据抗推力的聚类分析,将 528 份小麦品种(系)分为 4 个类群,筛选出周 8425B、济麦 22、河农 6425 等 66 份抗倒伏能力强的小麦材料,既可以作为倒伏严重麦区的主推品种,也可以在育种的亲本选择中作为骨干种质使用。同时,评价和筛选方法也可用于育种后代的品系鉴定。第 1、2 节间直径、第 1、2 节间长度、株高等性状,均对小麦倒伏能力有明显的影响^[11]。Zheng 等^[31]的研究结果表明,种植密

度对小麦抗倒伏性有显著影响,降低种植密度可以提高小麦茎秆质量,增加抗倒伏能力。抗推力作为直接测定作物抗倒伏能力的直观性状,是不同品种小麦抗倒伏能力大小的直接体现。

3.4 小麦抗倒伏的性状评价指标

针对评价小麦抗倒伏能力的性状指标,已有大量研究,多集中株高、基部节间长度和粗度,也有研究认为茎秆质量如壁的厚度、组织结构等对小麦抗倒伏性有较大影响^[32-34]。魏凤珍等^[35]研究表明,抗倒伏性好的小麦品种茎秆机械组织发达,细胞壁厚,木质化程度高,导管壁厚度、维管束鞘厚度大,导管内径小。Kelbert 等^[7]研究表明,抗倒伏性好的小麦品种具有短而宽的基部节间和较厚的秆壁。李召锋等^[36]研究证明了小麦倒伏与小麦第 2 节间长、茎粗、茎秆壁厚及机械强度显著相关。由此可见,基部茎秆形态学和解剖学特性都是影响小麦抗倒伏能力的重要因素,茎秆壁厚、茎秆壁质量等指标在本研究中未被纳入,今后应加强研究。

参考文献

- [1] Pinthus M J. Lodging in wheat, barley and oats: the phenomenon, its causes, and preventive measures. *Advances in Agronomy*, 1973, 25: 209-263
- [2] Berry P M, Spink J, Sterling M, Agarwal U P, Atalla R H. Methods for rapidly measuring the lodging resistance of wheat cultivars. *Journal of Agronomy & Crop Ence*, 2003, 189: 390-401
- [3] 冯晓科. 2014 年温县小麦倒伏损耗研究. *农业与技术*, 2015, 35(8): 25, 30
Feng X K. Study on wheat lodging loss in Wenxian County in 2014. *Agriculture and Technology*, 2015, 35(8): 25, 30
- [4] 蒋向, 王策. 浅析 2017 年河南小麦倒伏原因及防倒补救减灾措施. *中国农技推广*, 2017, 33(8): 9-10
Jiang X, Wang C. Brief analysis on the causes of wheat lodging in Henan Province in 2017 and the technical measures of preventing, remedying and reducing losses. *China Agricultural Technology Extension*, 2017, 33(8): 9-10
- [5] 李斌, 吴昌智, 吴文花, 金宇. 小麦倒伏情况调查及防抗倒伏措施研究. *基层农技推广*, 2019(6): 18-20
Li B, Wu C Z, Wu W H, Jin Y. Investigation on lodging of wheat and study on measures against lodging. *Primary Agricultural Technology Extension*, 2019(6): 18-20
- [6] 吕金仓, 任雅琴, 杜文军, 王宝梅. 陕西省小麦倒伏原因及应对措施. *农业科技通讯*, 2019(5): 236-238
Lv J C, Ren Y Q, Du W J, Wang B M. The reasons and countermeasures of wheat lodging in Shaanxi Province. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2019(5): 236-238
- [7] Kelbert A J, Spaner D, Briggs K G, King J R. The association of culm anatomy with lodging susceptibility in modern spring wheat genotypes. *Euphytica*, 2004, 36(2): 211
- [8] 郭翠花, 高志强, 苗果园. 不同产量水平下小麦倒伏与茎秆力

- 学特性的关系. 农业工程学报, 2010, 26(3): 151-155
- Guo C H, Gao Z Q, Miao G Y. The relationship between lodging and stem mechanical properties of wheat at different yield levels. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(3): 151-155
- [9] 陈亚兰, 张健, 王会蓉. 干旱半干旱地区春小麦抗倒伏性状遗传参数的分析及其应用. 陕西农业科学, 2014, 60(8): 11-13, 96
- Chen Y L, Zhang J, Wang H R. Analysis and application of genetic parameters of lodging resistance in spring wheat in arid and semi-arid area. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2014, 60(8): 11-13, 96
- [10] 胡昊. 小麦茎秆特性与抗倒伏关系及其调控研究. 郑州: 河南农业大学, 2013
- Hu H. Relationship between stem characteristics and lodging resistance and its regulation study in wheat. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2013
- [11] Wang J, Zhu J M, Un Q Q. Effects of stem structure and cell wall components on bending strength in wheat. Chinese Ence Bulletin, 2006, 51(7): 815-823
- [12] Zhang G P, Chen J X, David A B. The effects of timing of N application and plant growth regulators on morphogenesis and yield formation in wheat. Plant Growth Regulation, 2001, 35(3): 239-245
- [13] 冯素伟, 李淦, 胡铁柱, 姜小苓, 李小军, 董娜, 茹振钢. 不同小麦品种茎秆抗倒性的研究. 麦类作物学报, 2012, 32(6): 1055-1059
- Feng S W, Li G, Hu T Z, Jiang X L, Li X J, Dong N, Ru Z G. Study on the lodging resistance of different wheat Varieties. Journal of Triticeae Crops, 2012, 32(6): 1055-1059
- [14] Murphy H C, Petr F, Frey K J. Lodging resistance studies in oats comparing methods of testing and sources for straw strength. Agronomy Journal, 1958, 10: 609-611
- [15] 刘翔宇, 赵龙, 巴哈尔古丽·先木西, 彭华, 阿不都热衣木·玉拉音. 新疆陆地棉种质资源的综合评价. 中国农业科学, 2017, 50(24): 4679-4691
- Liu X Y, Zhao L, Bahargul·X M X, Peng H, Abolureyim·Y L Y. Comprehensive evaluation of germplasm resources upland cotton in Xinjiang. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(24): 4679-4691
- [16] 周丽艳, 郭振清, 马玉玲, 东方阳, 林小虎. 春小麦品种农艺性状的主成分分析与聚类分析. 麦类作物学报, 2011, 31(6): 1057-1062
- Zhou L Y, Guo Z Q, Ma Y L, Dongfang Y, Lin X H. Principal component analysis and cluster analysis of agronomic characters of Spring Wheat Varieties. Journal of Triticeae Crops, 2011, 31(6): 1057-1062
- [17] Piepho H P, Möhring J, Melchinger A E, Büchse A. BLUP for phenotypic selection in plant breeding and variety testing. Euphytica, 2008, 161: 209-228
- [18] 李培富, 杨淑琴, 马宏伟. 宁夏水稻主要农艺性状的主成分及聚类分析. 中国农学通报, 2006, 22(12): 162-166
- Li P F, Yang S Q, Ma H W. Principal components and cluster analysis of main agronomic characters of rice in Ningxia. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(12): 162-166
- [19] 罗珊, 康玉凡, 濮绍京, 张丽, 李振华, 肖伶俐, 李永华. 黑河地区 55 份大豆品种资源农艺性状和营养成分的聚类分析. 大豆科学, 2009, 28(3): 421-425
- Luo S, Kang Y F, Pu S J, Zhang L, Li Z H, Xiao L L, Li Y H. Cluster analysis of agronomic characters and nutritional components of 55 soybean varieties in Heihe. Soybean Science, 2009, 28(3): 421-425
- [20] 宋江峰, 李大婧, 刘春泉, 刘玉花. 甜糯玉米软罐头主要挥发性物质主成分分析和聚类分析. 中国农业科学, 2010, 43(10): 2122-2131
- Song J F, Li D J, Liu C Q, Liu Y H. Principal component analysis and cluster analysis of flavor compositions in waxy corn soft can. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(10): 2122-2131
- [21] 金善宝. 中国小麦生态. 北京: 科学出版社, 1997: 421-433
- Jin S B. Wheat ecology in China. Beijing: Science Press, 1997: 421-433
- [22] 任安然, 武丽芬, 关红辉, 杨莎, 监立强, 刘元峰, 杜宇茜, 王姣, 郭晋杰, 陈景堂. 不同种植密度下玉米茎秆纤维性状和抗倒性相关分析. 植物遗传资源学报, 2017, 18(4): 653-664
- Ren A R, Wu L F, Guan H H, Yang S, Jian L Q, Liu Y F, Du Y Q, Wang J, Guo J J, Chen J T. Correlation analysis of fiber properties and lodging resistance of corn stalk under different planting densities. Journal of Plant Genetic Resources, 2017, 18(4): 653-664
- [23] 车照海. 关于小麦倒伏的调查与分析. 现代农业科技, 2009(24): 89, 92
- Che Z H. Investigation and analysis of wheat lodging. Modern Agricultural Science and Technology, 2009(24): 89, 92
- [24] Verma V, Worland A J, Sayers E J, Snape J W. Identification and characterization of quantitative trait loci related to lodging resistance and associated traits in bread wheat. Plant Breeding, 2005, 124: 234-241
- [25] 王勇, 李晴棋. 小麦品种抗倒性评价方法的研究. 华北农学报, 1995, 10(3): 54-55
- Wang Y, Li Q Q. Study on evaluation method of lodging resistance of Wheat Varieties. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 1995, 10(3): 54-55
- [26] 薛香, 邵庆炉, 杨忠强. 小麦品质性状的主成分分析. 中国农学通报, 2011, 27(7): 38-41
- Xue X, Gao Q L, Yang Z Q. Principal component analysis of wheat quality characters. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(7): 38-41
- [27] 周树峰, 潘光堂, 杨婉身, 荣廷昭. 玉米耐旱系数的多元回归分析. 作物学报, 2003, 29(3): 468-472
- Zhou S F, Pan G T, Yang W S, Rong T Z. Multiple regression analysis of drought tolerance coefficients in maize. Acta Agronomica Sinica, 2003, 29(3): 468-472
- [28] 庄萍萍, 李伟, 魏育明, 颜泽洪, 郑有良. 波斯小麦农艺性状相关性主成分分析. 麦类作物学报, 2006, 26(4): 11-14
- Zhuang P P, Li W, Wei Y M, Yan Z H, Zheng Y L. Correlation and principal component analysis of agronomic characters of Persian wheat. Journal of Triticeae Crops, 2006, 26(4): 11-14
- [29] 王亚娟, 张秋芳, 任志龙, 张宏, 王秋英, 王长有, 吉万全, 王雪梅, 马润莲. 小麦优异种质资源农艺性状综合鉴定与评价. 麦类作物学报, 2004, 24(4): 119-122

- Wang Y J, Zhang Q F, Ren Z L, Zhang H, Wang Q Y, Wang C Y, Ji W Q, Wang X M, Ma R L. Comprehensive identification and evaluation of agronomic characters of wheat germplasm resources. *Journal of Triticeae Crops*, 2004, 24 (4): 119-122
- [30] 徐黎黎, 李伟, 郑有良. 东方小麦主要农艺性状分析. *麦类作物学报*, 2006, 26 (6): 15-20
- Xu L L, Li W, Zheng Y L. Analysis of main agronomic characters of Oriental wheat. *Journal of Triticeae Crops*, 2006, 26 (6): 15-20
- [31] Zheng M, Chen J, Shi Y, Li Y, Yin Y, Yang D, Luo Y, Pang D, Xu X, Li W, Ni J, Wang Y, Wang Z, Li Y. Manipulation of lignin metabolism by plant densities and its relationship with lodging resistance in wheat. *Scientific Reports*, 2017, 7: 41805
- [32] 姚金保, 马鸿翔, 姚国才, 杨学明, 周森平, 张平平, 张鹏. 小麦抗倒性研究进展. *植物遗传资源学报*, 2013, 14 (2): 208-213
- Yao J B, Ma H X, Yao G C, Yang X M, Zhou M P, Zhang P P, Zhang P. Research progress on lodging resistance of wheat. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2013, 14 (2): 208-213
- [33] 李志波, 王睿辉, 张茶, 梁虹, 马峙英, 赵玉欣, 王静华. 河北省小麦品种基于农艺性状的遗传多样性分析. *植物遗传资源学报*, 2009, 10 (3): 436-442
- Li Z B, Wang R H, Zhang C, Liang H, Ma Z Y, Zhao Y X, Wang J H. Genetic diversity analysis of wheat varieties based on agronomic characters in Hebei province. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2009, 10 (3): 436-442
- [34] 陈贵菊, 靳义荣, 刘彩云, 贾德新, 樊庆琦, 刘金栋, 刘鹏. 普通小麦根系建成相关性状的全基因组关联分析. *植物遗传资源学报*, 2020, 21 (4): 975-983
- Chen G J, Jin Y R, Liu C Y, Jia D X, Fan Q Q, Liu J D, Liu P. Genome wide association analysis of traits related to root formation in common wheat. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2020, 21 (4): 975-983
- [35] 魏凤珍, 李金才, 王成雨, 屈会娟, 沈学善. 氮肥运筹模式对小麦茎秆抗倒性能的影响. *作物学报*, 2008, 34 (6): 1080-1085
- Wei F Z, Li J C, Wang C Y, Qu H J, Shen X S. Effects of nitrogenous fertilizer application model on culm lodging resistance in winter wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34 (6): 1080-1085
- [36] 李召锋, 杨茂深, 周英, 柴亚茹, 王立成, 李卫华. 滴灌春小麦蜡熟期抗倒性综合评价. *分子植物育种*, 2017, 15 (8): 3199-3209
- Li Z F, Yang M S, Zhou Y, Chai Y R, Wang L C, Li W H. Comprehensive evaluation on lodging resistance of spring wheat at dough stage under drip irrigation. *Molecular Plant Breeding*, 2017, 15 (8): 3199-3209

附表 1 528 份小麦材料倒伏性材料分类

Supplementary Table 1 Classification of lodging resistance in 528 wheat cultivars

类群	份数	抗推力	材料名称
Group	Number	Thrust	Cultivar name
I	66	0.395~0.503	周 8425B、省 135、山农小、山农大 5-6-8、山农大 5-6-5、山农大 6-8-6、山农鉴 14-20、山农大 4-3-1、矮抗 58、开麦 21、三颗寸、徐州 25、省 43、济麦 22、05CA349、河农 6425、西农 889、兰考 906、省 79、省 90、西农 509、河农 2552、山农大 3-2-1、RS804、山农大 5-5-5、徐 9169、冀麦 585、连麦 2 号、邯麦 13、省 125、陕 160、山农 17、省 85、许科 316、山农大 5-5-8、淮核 0308、天禾 3 号、师栗 02-1、新麦 23、济宁 16、武农 148、洛麦 05095、郑引 4 号、山农小 5-22、石 4185、淮麦 33、石新 828、西农 2000、省 87、山农大 5-5-1、淮麦 23、百农 160、花培 3 号、山农 20-1（矮）、河农 6119、新山农 11、河农 6049、博北 4、陕 627、皖麦 52、陕 253、婴泊 700、陕农 138、山农 19、中新 78、山农鉴 25-229
II	174	0.313~0.385	石麦 15、山 15、山农鉴 36-459、石 00-7221、石 05-6678、偃展 4110、新麦 26、鲁原 205、淮麦 0882、西农 979、11CA26、宿 552、省 59、山农大 5-6-4、徐麦 30、徐麦 31、陕 354、陕农 757、小偃 597、衡观 35、河农 7069、保丰 1082、鲁麦 14、省 119、7DL-7Ag、石新 811、中育 01089、河农 6331、徐麦 2103、连 0756、鹤麦 076、西农 2208、山农小 5-23、冀优 9908、河农 9206、秋乐 2122、河农 5290、鑫麦 296、山农大 4-3-6、农大 1108、淮麦 17、石新 653、保丰 702、山农 08-29、西农 1376、山农大 6-8-2、温麦 6 号、圣田 69、冀辐 85012、保 6834、徐州 24、新麦 0208、郑麦 7698、泰山 21、省 76、西农 9871、省 232、淮麦 0226、科育 11、徐 8133、郑麦 101、冀麦 325、山农 W080176、淮麦 18、泛 7030、齐丰 2 号、济宁 6058、莱州 9361、山农鉴 6E-1-17、W110095、淮核 0516、省 86、科农 3106、淮麦 26、山农 0919、山农大 6-8-7、济麦 19、石新 616、徐州 856、山农大 5-6-3、衡 05 观 33、丰收 60、冀糯 200、淮麦 20、驻 0263-541、泛麦 5、徐 9158、科遗 11-6072、徐麦 2170、省 140、汶农 17、衡观 76、洛麦 24、山农大 6-7-8、石新 618、淮麦 29、邯 05-093、山农优麦 3 号、衡 4422、邯 06-5170、陕农 33、漯 86036、鲁麦 23 号、矮丰 3 号、徐麦 2023、众信 5199、科农 199、省 157、山农大 5-6-2、许科 718、山农大 7-9-3、周麦 16、轮选 901、连 5152、徐 11108、鲁原 502、俊达 104、保丰 2018、石家庄 8 号、淮麦 22、陕麦 150、省 284、周麦 22、连 0809、10X21、轮选 926、郑麦 583、衡 4371、轮选 103、邯麦 9 号、邯麦 12 号、百农 207、D08-6、河农 822、周麦 24、衡 6632、河农 826、冀麦 403、冀麦 38、邯 09-41344、石 4366、衡 7228、轮选 987、石 03-5285、金博士 731、山农 20、邢麦 3、邯 5092、邢麦 11、石 06-6136、石 02-6207、邯麦 10 号、冀麦 518、周麦 28、河农 7106、衡 4399、邢麦 6、邢麦 13、远大 1 号、科农 9204、科农 1006、周麦 26、邯 5316、周麦 25、衡 05-4444、衡杂 4 号、河农 825、周 99233、博单 30、邯 6172、农大 399、冀 5265、周麦 18、金禾 9123
III	266	0.230~0.312	远丰 175、郑资 8780-2-5、太 13606、省 82、豫农 4023、国麦 301、泰农 9236、良星 99、临汾 7061、温 0418、省 171、山农 11、临 4、保 5067、省 37、W110149、郑麦 0856、省 141、洛 22、省 68、豫麦 52 资、山农鉴 38-498、课 11、河农 07（215）5-3-4、省 213、山农鉴 41-560、新麦 21、淮 0705、衡 71-3、省 115、西农 928、烟农 19、陕麦 159、豫麦 57、临资 217、邯农 351、H6756、阜 84111、秦农 142、荷麦 17、豫麦 34 号、徐麦 29、山农 22、沧麦 119、荷麦 13、轮选 061、保 6818、淮麦 21、10ELT040、皖 50、CA1092、淮麦 28、金丰 7183、衡 5364、淮麦 8 号、课 16、晋麦 30、烟 2070、明天 0402、省 172、10H4-14、邯农 1412、D209、徐 9074、存麦 8 号、省 131、09CA034、津农 6 号、新麦 9、长旱 58、邢 051241、徐 10054、科育 16、许科 168、永 4896、漯 88079、中麦 9、豫展 10、明天 07292、晋麦 59、山农 10-2、长 4640、山农 12 号、泰农 18、镇 8906、长武 134、省 183、淮麦 30、小偃 22、陕 225、BN12、沧麦 6005、荷 9946、冀麦 30、晋麦 47、省 93、省 231、农大 3432、豫教 5 号、西农 9718、衡 562、新麦 18、法 0356、农大 5181、博 8、天民 198、W110144、平安 8 号、冀优 5766、科石 B05-6508、津 07214、山农 23、京麦 989、ST、山东 W080126、新麦 19、保 5113、荷麦 0302、淮核 0615、轮早 3 号、冀 7369、济麦 21、河农 05（9）7-11-4-15、山农大 6-8-4、皖麦 53、冀麦 26、利福 05、课 15、W110163、未来 0818、淄麦 12、河农 05（206）3-10-4-9、吕早 1608、晋麦 57、邯早 1 号、轮选 1690、运旱 618、山农 06-278、藁城 8901、邯 00-7050、晋麦 54、农大 212、京核

			91-P39、省 207、CA1004、CA0045、丰德存 1 号、省 160、中育 01095、轮选 24、藁优 2018、保 5168、临 优 145、保丰 0601、泰农 19、课 23、烟农 21、潍 60182、省 62、乐 639、藁优 9618、晋麦 70、省 46、W120134、 西农 529、衡 05-6607、烟 99102、山农 06-27、陕麦 139、衡 95 观 26、邯 4589、山农 55843、中优 9507、烟 农 999、陕农 65、晋麦 63、保麦 12-6、科农 2009、济麦 17、西农 157、临麦 2 号、博农 6 号、长 6154、宁 麦资 22、新 9535、洛麦 21、华成 3366、郑麦 103、莱农 8621、长 6878、小偃 10-6060、正早 36、省 116、 省 174、衡辐 9103、省 88、华麦 1 号、农大 211、舜麦 1718、科遗 10-6014、长 4738、科遗 10-6140、山农 055849、冀麦 36、北农 9549、小偃 81、京冬 17 号、W120283、涡 85、皖 38、石新 633、众麦 1 号、衡水 4、 新麦 2119、省 194、科遗 10-6089、淮麦 27、徐 10189、中麦 175、安农 0807、藁优 9409、省 39、晋麦 33、 鲲鹏 1 号、河农 4198、长 4853、京冬 8 号、晋春 13、河农 06（159）19-22-5-6、宝麦 3 号、长 6135、富麦 5 号、复合多倍体、高优 503、长 6452、宿 553、省 58、省 57、荔高 6 号、博北 3、潍阴 84137、保 5108、分 支 1 号、长 6359、临抗 1 号、原始 AI 败、保麦品 8、师栾 08-2、山农大 5-6-6、临丰 615、三属麦、W11031、 运早 20410、河农 583、省 154、豫 70-36、武农 986、省 126、保 5036、汶航 1 号、石 05-7388、镇麦 18、鹤 0927、分 17、京 411、百农 4330
IV	22	0.191~0.217	宝麦 8 号、孟县 201、石 08-534、D45、晋麦 66、德麦 1201、W110143、9903322、河农 06（143）6-10-15-5、 河农 130-12、科 0801、衡 136、新麦 3 号、省 219、中种麦 17、D180、大满 77、河农 05（97）11-12-6-5、 省 217、长 5222、DH155、河农 06（132）4-11-7