



小麦抗倒性评价方法的比较分析

胡卫国¹,张玉娥¹,赵虹¹,王西成¹,曹廷杰¹,曹颖妮²,陈渝¹,杨剑¹

(1.河南省农业科学院小麦研究所,河南省小麦生物学重点实验室,农业部黄淮中部小麦生物学与遗传育种重点实验室,国家小麦工程实验室,郑州 450002;2.河南省农业科学院农业质量标准与检测技术研究所,郑州 450002)

摘要 为寻找简便快捷的小麦品种抗倒性鉴定方法,以48个国家冬小麦黄淮南片水地组区域试验小麦新品系为试验材料,通过对小麦品系茎秆等特性的调查分析,结合多试点抗倒性验证,比较4种倒伏指数法在小麦品种抗倒性鉴定评价中的效果。相关性分析及主成分分析结果表明,倒伏与株高、基部茎节特性等密切相关。其中,倒伏与第1至第3节茎秆长度、株高、重心高度呈极显著正相关,与第2节茎秆的径长比、基部茎秆弹性呈极显著负相关,表明株高越矮,基部节间越短,特别是第2茎节短且粗,茎秆基部弹性越强,小麦品种抗倒性越好。4种倒伏指数均与第2、3茎节长度呈极显著正相关,与第2茎节机械强度呈极显著负相关,且分别与其他茎秆等特性呈显著或极显著相关,表明第2、3茎节长度和第2茎节的机械强度是上述4种倒伏指数法鉴定小麦品种抗倒性的共性基础,同时各倒伏指数又有其特定的关联性状。4种倒伏指数均可有效鉴定小麦品种抗倒性,但从便利性及相关性密切程度方面比较,倒伏指数2和倒伏指数3鉴定的评价效果更好。

关键词 小麦;倒伏指数;相关分析;主成分分析

中图分类号 S512.1;S330

文献标志码 A

文章编号 1004-1389(2018)12-1780-09

抗倒性是影响小麦品种能否大面积推广应用的主要限制因素。近年来极端天气频发,冬春季干旱少雨,小麦生长后期干热风及收获期降雨时有发生,2017年5月22至23日黄淮南片中北部地区大面积强降雨,导致部分地区小麦品种大面积倒伏,包括生产上大面积种植的抗倒伏品种也出现部分地块严重倒伏现象。随着中国经济的发展,农业机械化水平的普及,农村劳动力的减少,小麦品种抗倒性强弱在粮食安全生产中越发突显,抗倒伏能力的强弱已成为小麦生产者首要关注的性状,同时也是科研上的重要关注点^[1-3]。关于抗倒性方面的研究很多,主要分布于茎秆特性^[4-7]、生理生化组成^[8-10]、遗传组成^[11-13]、评价方法^[14-16]及栽培管理^[17-18]等方面。其中抗倒性评价方法的研究主要有王勇等^[19]、李金才等^[20]提出的基于第2节茎秆机械强度的倒伏指数法,蒲定福等^[21]提出的基于根量及茎秆特性的倒伏系数

法,肖世和等^[22]提出的预测后代抗倒伏能力的茎秆强度法,Berry等^[23]提出的用推力装置测量小麦茎秆倒伏过程中产生的最大示数表示抗倒伏能力的方法,Grafius等^[24]提出的基于穗重和株高的倒伏指数法,乔春贵等^[25]提出的基于倒伏面积和倒伏级别的倒伏指数法等。

上述方法均表明,倒伏指(系)数均能很好的衡量小麦品种的抗倒伏能力^[19-25],但结合品种实际倒伏情况的研究不多,本试验通过调查小麦品系的茎秆、株高、穗质量等特性,利用王勇等^[19]、李金才等^[20]、肖世和等^[22]、Grafius等^[24]提出的倒伏指数法或者茎秆强度法估测其抗倒伏性,利用多点试验倒伏鉴定结果对上述方法进行验证分析,初步比较这4种方法的应用效果,并期望找出这4种倒伏评价方法衡量小麦品种抗倒性的共性原因,为小麦品种抗倒性遗传改良及品种利用提供理论和应用基础。

收稿日期:2018-07-05 **修回日期:**2018-09-10

基金项目:河南省科技攻关计划项目(182102110121);河南省农业科学院科研发展专项资金[YNK20177501,豫财资(2015)131-01];河南省农业科学院自主创新项目(2013JC02,2015ZZ02,2016ZC03);河南省现代农业(小麦)产业技术体系项目(S2015-01-G03);国家科技支撑计划项目(2015BAD26B01)。

第一作者:胡卫国,男,博士研究生,研究方向为小麦遗传育种。E-mail:hnhuweiguo@163.com

通信作者:赵虹,女,研究员,研究方向为小麦品种利用。E-mail:xmszhong@126.com

1 材料与方 法

1.1 试验材料与田间种植

试验材料为 2016—2017 年度国家冬麦区黄淮南片水地第 1 至第 3 组区域试验的参试品系, 共计 48 个。调查种植在河南省农业科学院试验基地(原阳)试验田的各品系的茎秆特性、株高等性状, 并计算相应的抗倒伏指数。试验田土质为沙壤, 肥力中等。于 2016-10-11 播种供试材料, 完全随机区组设计, 重复 3 次, 小区面积 13 m², 6 行区, 基本苗 210 万株·hm⁻²。整地前晒施复合肥(N:P₂O₅:K₂O=28:15:5)750 kg·hm⁻², 返青期结合灌水追施尿素 150 kg·hm⁻², 其他管理同一般大田。各品系抗倒伏性的多点鉴定在黄淮南片的 22 个试验点进行, 采用完全随机区组设计, 重复 3 次。基本苗为 210~270 万株·hm⁻², 根据试验地肥力水平和当地生产情况可进行适当调整。试验田防虫不防病, 其他管理同一般大田。

1.2 抗倒伏相关性状表型测定

在原阳试验基地, 在小麦籽粒灌浆的中后期(5 月 17 日), 每处理随机取样 10 个长势基本一致的未倒伏单茎, 使用直尺、游标卡尺、电子天平、烘箱等设备分别测定其各茎节的长度、直径和质量及地上部鲜质量、穗的干鲜质量和茎秆重心高度等与茎秆倒伏有关的性状。地上部单茎鲜质量: 测定带穗、叶和鞘的完整单茎鲜质量。茎秆重心高度: 测定茎基部到该茎平衡点的距离。茎节充实度: 茎节干质量与长度之比。茎节径长比: 茎节外部直径与长度之比。基部茎秆弹性测定: 随机取 10 个小麦单茎, 在离地 20 cm 处, 用橡皮筋将茎秆固定在便携式植物抗倒伏测定仪(YYD-1A)的测头上, 保持测定仪与茎秆垂直, 缓慢施力推至茎秆与地面呈 45°后松开, 记录数据。茎秆机械强度测定: 采用压力法, 取茎秆基部第 2 节间(去叶鞘)、两端放于高 50 cm、间隔 5 cm 的支撑架的凹槽内, 利用便携式植物抗倒伏测定仪(YYD-1A)缓慢挤压茎秆中部, 记录茎秆折断时仪器的读数。

1.3 倒伏指数的计算

对原阳基地调查的各品系抗倒伏性相关性状, 按照如下公式计算 4 个倒伏指数。

王勇等^[19]的倒伏指数法: 倒伏指数 1=茎秆鲜质量(G)×茎秆重心高度(H)/第 2 节机械强

度(S)。

改良肖世和等^[22]的茎秆强度法: 倒伏指数 2=茎秆基部弹性。由于离地 20 cm 的茎秆强度活体测量能同时反映茎秆基部 3 节及根系等部位的机械强度, 因此, 本研究以离地 20 cm 处的茎秆弹性代替原方法中的第 2 节茎秆强度测量方法。

Grafius 等^[24]的倒伏指数法: 倒伏指数 3(λ)=穗部质量(F)/株高(b)。

李金才等^[20]的倒伏指数法: 倒伏指数 4=茎秆机械强度/茎秆重心高度。

1.4 各试点品系倒伏评价方法

试验品系多点抗倒性调查根据农作物品种(小麦)区域试验技术规程^[26]进行, 分 5 级记载倒伏严重程度及倒伏面积。严重倒伏点率: 根据主要农作物品种审定标准(2017)^[27], 倒伏程度≤3 级, 或倒伏面积≤40.0%判定为倒伏不严重, 相反即为严重倒伏, 统计严重倒伏点占汇总点的比例, 即严重倒伏点率=严重倒伏点数/汇总试点数。平均倒伏级别为汇总点倒伏级别的平均值, 即平均倒伏级别=∑各试点倒伏级别/汇总试点数; 平均倒伏面积为汇总点不同倒伏级别面积的平均值, 即平均倒伏面积=∑各试点倒伏面积/汇总试点数。根据倒伏程度和面积判断品系抗倒性强弱。

为方便统计分析, 本研究中将严重倒伏点率、全部倒伏点率、平均倒伏面积、平均倒伏级别 4 个参数命名为倒伏指标。

乔春贵等^[25]的倒伏指数法: 倒伏指数 5=平均倒伏级别×平均倒伏面积。本研究用倒伏指数 5 衡量多点试验下小麦新品种系的实际抗倒伏能力, 方便与上述 4 种倒伏指数进行验证比较分析。

1.5 数据处理

试验结果以平均值表示, 利用 Excel 2013 和 XLSTAT 2017 进行统计、简单相关及主成分分析。

2 结果与分析

2.1 小麦茎秆、穗质量及株高等性状的变异及抗倒性评价

由表 1 可以看出, 株高、重心高度、第 2 茎节直径的变异系数较小, 其他性状的变异系数均较大, 其中第 2 节茎秆机械强度的变异系数为 30.05%, 仅次于第 3 节径长比的变异系数值。降低株高可以有效减少倒伏风险, 但也会降低总生物量, 从而影响籽粒产量的提高。从倒伏指数 3

表 1 小麦茎秆特性、穗质量、株高和倒伏情况汇总

Table 1 Summary statistics of stem traits, spike mass, plant heights and lodging parameters in winter wheat

变量 Variable	性状代号 Code	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数/% CV
第 1 节干质量/g Dry mass of first stem	X1	0.08	0.23	0.13	0.03	23.34
第 2 节干质量/g Dry mass of second stem	X2	0.12	0.23	0.16	0.03	15.44
第 3 节干质量/g Dry mass of third stem	X3	0.11	0.31	0.17	0.04	21.99
第 2 节直径/cm Diameter of second stem	X4	0.44	0.64	0.52	0.04	7.24
第 3 节直径/cm Diameter of third stem	X5	0	0.64	0.48	0.13	27.09
第 1 节长度/cm Length of first stem	X6	4.39	10.75	6.52	1.25	19.22
第 2 节长度/cm Length of second stem	X7	7.30	15.10	9.60	1.34	13.99
第 3 节长度/cm Length of third stem	X8	7.30	15.83	10.14	1.62	15.95
第 1 节充实度/(g · cm ⁻¹) Substantial degree of first stem	X9	0.01	0.03	0.02	0	15.54
第 2 节充实度/(g · cm ⁻¹) Substantial degree of second stem	X10	0.01	0.03	0.02	0	16.42
第 3 节充实度/(g · cm ⁻¹) Substantial degree of third stem	X11	0.01	0.03	0.02	0	21.92
第 2 节直径/长度/(cm · cm ⁻¹) Fineness ratio of second stem	X12	0.03	0.07	0.05	0.01	14.70
第 3 节直径/长度/(cm · cm ⁻¹) Fineness ratio of third stem	X13	0	0.07	0.05	0.01	30.36
穗鲜质量/g Fresh mass of ear	X14	3.09	5.95	4.72	0.66	14.05
穗干质量/g Dry mass of ear	X15	1.49	3.11	2.29	0.32	13.90
地上部鲜质量/g Fresh mass of above ground	X16	7.39	14.39	11.11	1.95	17.57
重心高度/cm Height of central gravity	X17	49.75	63.40	57.02	4.00	7.01
株高/cm Plant height	X18	75.80	95.70	86.60	4.47	5.16
茎秆机械强度/kPa Mechanical strength of second stem	X19	1.42	4.76	2.50	0.75	30.05
倒伏指数 1/(g · cm · kPa ⁻¹) No. 1 lodging index	X20	152.98	351.41	264.67	52.22	19.73
倒伏指数 2/kPa No. 2 lodging index	X21	26.97	75.65	43.60	9.70	22.25
倒伏指数 3/(g · cm ⁻¹) No. 3 lodging index	X22	0.03	0.07	0.05	0.01	14.98
倒伏指数 4/(kPa · cm ⁻¹) No. 4 lodging index	X23	0.02	0.09	0.04	0.01	32.12
严重倒伏点率/% Pilot rate of severe lodging	X24	4.55	63.64	23.80	13.80	57.97
倒伏点率/% Pilot rate of lodging	X25	9.09	68.18	34.06	16.86	49.49
倒伏程度 Lodging level	X26	1.27	3.23	2.02	0.55	27.13
倒伏面积/% Lodging area	X27	5.68	42.64	16.90	9.07	53.65
倒伏指数 5 No. 5 lodging index	X28	7.75	137.60	38.89	30.37	78.09

可知,减小穗质量可以降低倒伏风险,但合理群体下增加单穗质量是河南省及黄淮南片麦区小麦增产的主要途径之一,因此降低株高和减少穗质量均不是抗倒性改良的最有利途径。

通过分析试验品种系在多点试验中的倒伏情况,并由倒伏指数 5 的计算结果可知,倒伏指数 5 比对照品种‘周麦 18’小的品系有‘濮兴 0369’‘郑品麦 22 号’‘郑麦 16’‘西农 511’‘周麦 36’‘郑麦 583’‘禾丰 3 号’‘新麦 36’‘轮选 166’‘郑麦 136’‘泉麦 31’‘洲麦 66’‘丰德存麦 24’‘紫麦 19’‘泉麦 29’‘中农麦 4007’等,由于‘周麦 18’抗倒伏能力处于较好水平,因此推测上述新品系抗倒伏能

力较好。倒伏指数 5 大于 80 的品系有‘圣麦 101’‘泛育麦 17’‘阜麦 18’‘中麦 247’‘圣麦 108’等,推测上述品系抗倒性较差。

2.2 小麦茎秆等特性与倒伏性的关系

为了解品系茎秆等特性与倒伏性的关系,对 48 个品系的茎秆特性、穗质量、株高及其倒伏指标等进行了简单相关性分析。从表 2 可以看出,第 1 至第 3 节茎秆长度与各倒伏指标、株高、重心高度呈极显著正相关,表明基部茎节越长,株高越高,小麦抗倒伏能力越弱。倒伏指标与第 2 节径长比呈极显著负相关,表明第 2 茎节粗且短的小麦品种抗倒伏能力较强。严重倒伏点率不仅与上

表 2 小麦茎秆特性、穗质量、株高与倒伏情况的相关性分析

Table 2 Correlation analysis of stem traits, spike mass, plant heights and lodging parameters in winter wheat

变量 Variables	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17	X18	X19	X20	X21	X22	X23	X24	X25	X26	X27		
X2	0.684**																												
X3	0.675**	0.664**																											
X4	0.346**	0.378**	0.120																										
X5	0.011	-0.043	0.052	-0.036																									
X6	0.676**	0.272	0.344*	0.014																									
X7	0.214	0.260	0.168	-0.085	-0.012	0.417**																							
X8	0.230	0.093	0.289*	-0.138	0.110	0.461**	0.501**																						
X9	0.645**	0.624**	0.551**	0.212	-0.010	-0.112	-0.174	-0.182																					
X10	0.430**	0.690**	0.410**	0.420**	-0.032	-0.076	-0.487**	-0.343*	0.676**																				
X11	0.440**	0.536**	0.764**	0.179	-0.015	0.011	-0.202	-0.379**	0.596**	0.611**																			
X12	-0.016	-0.065	0.118	0.552**	-0.007	-0.243	-0.854**	-0.505**	0.261	0.601**	0.228																		
X13	-0.126	-0.096	-0.116	0.008	0.855**	-0.284	-0.268	-0.413**	0.069	0.136	0.169	0.237																	
X14	0.393**	0.492**	0.316*	0.285*	-0.009	-0.003	-0.314*	-0.432**	0.554**	0.678**	0.585**	0.382**	0.217																
X15	0.406**	0.339*	0.212	0.252	0.140	0.119	-0.218	-0.258	0.422**	0.475**	0.371**	0.302*	0.276	0.865**															
X16	0.350**	0.546**	0.351*	0.353*	0.041	-0.064	-0.273	-0.444**	0.561**	0.686**	0.622**	0.365*	0.256	0.822**	0.568**														
X17	0.265	0.115	0.195	-0.119	-0.143	0.333*	0.457**	0.575**	-0.009	-0.259	-0.210	-0.431**	-0.423**	-0.137	0.101	-0.391**													
X18	0.374**	0.324*	0.283	-0.050	-0.150	0.349*	0.423**	0.553**	0.114	-0.077	-0.125	-0.405**	-0.433**	-0.080	0.049	-0.118	0.799**												
X19	0.272	0.405**	0.204	0.133	-0.036	-0.182	-0.316*	-0.421**	0.609**	0.629**	0.489**	0.322*	0.178	0.628**	0.478**	0.713**	-0.259	-0.125											
X20	0.292*	0.172	0.320*	-0.190	-0.006	0.502**	0.607**	0.640**	0.127	-0.282	-0.110	-0.573**	-0.345*	-0.277	-0.170	-0.361*	0.605**	0.592**	-0.298**										
X21	0.347*	0.255	0.356*	-0.221	0.059	0.451**	0.524**	0.590**	-0.017	-0.172	-0.036	-0.547**	-0.261	-0.185	-0.117	-0.247	0.536**	0.572**	-0.167	0.922**									
X22	0.312*	0.218	0.328*	-0.187	0.079	0.472**	0.560**	0.622**	-0.080	-0.217	-0.085	-0.547**	-0.258	-0.217	-0.128	-0.284	0.567**	0.585**	-0.209	0.964**	0.981**								
X23	0.298*	0.207	0.329*	-0.155	0.044	0.546**	0.608**	0.594**	-0.176	-0.263	-0.064	-0.582**	-0.273	-0.203	-0.120	-0.276	0.535**	0.517**	-0.248	0.952**	0.930**	0.961**							
X24	0.318*	0.208	0.307*	-0.163	0.073	0.562**	0.610**	0.586**	-0.159	-0.258	-0.081	-0.581**	-0.239	-0.184	-0.088	-0.264	0.518**	0.496**	-0.223	0.951**	0.924**	0.957**	0.989**						

注:“*”表示 0.01 显著水平;“*”表示 0.05 显著水平。下同。 Note:“*” mean 0.01 significant level;“*” mean 0.05 significant level. The same below.

表 3 小麦茎秆特性、穗质量、株高与倒伏指数相关性分析

Table 3 Correlation analysis of stem traits, spike mass, plant heights and lodging indexes in winter wheat

变量 Variables	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17	X18	X19	X20	X21	X22							
X2	0.684**																												
X3	0.675**	0.664**																											
X4	0.346**	0.378**	0.120																										
X5	0.011	-0.043	0.052	-0.036																									
X6	0.676**	0.272	0.344*	0.014																									
X7	0.214	0.260	0.168	-0.085	-0.012	0.417**																							
X8	0.230	0.093	0.289*	-0.138	0.110	0.461**	0.501**																						
X9	0.645**	0.624**	0.551**	0.212	-0.010	-0.112	-0.174	-0.182																					
X10	0.430**	0.690**	0.410**	0.420**	-0.032	-0.076	-0.487**	-0.343*	0.676**																				
X11	0.440**	0.536**	0.764**	0.179	-0.015	0.011	-0.202	-0.379**	0.596**	0.611**																			
X12	-0.016	-0.065	0.118	0.552**	-0.007	-0.243	-0.854**	-0.505**	0.261	0.601**	0.228																		
X13	-0.126	-0.096	-0.116	0.008	0.855**	-0.284	-0.268	-0.413**	0.069	0.136	0.169	0.237																	
X14	0.393**	0.492**	0.316*	0.285*	-0.009	-0.003	-0.314*	-0.432**	0.554**	0.678**	0.585**	0.382**	0.217																
X15	0.406**	0.339*	0.212	0.252	0.140	0.119	-0.218	-0.258	0.422**	0.475**	0.371**	0.302*	0.276	0.865**															
X16	0.350**	0.546**	0.351*	0.353*	0.041	-0.064	-0.273	-0.444**	0.561**	0.686**	0.622**	0.365*	0.256	0.822**	0.568**														
X17	0.265	0.115	0.195	-0.119	-0.143	0.333*	0.457**	0.575**	-0.009	-0.259	-0.210	-0.431**	-0.423**	-0.137	0.101	-0.391**													
X18	0.374**	0.324*	0.283	-0.050	-0.150	0.349*	0.423**	0.553**	0.114	-0.077	-0.125	-0.405**	-0.433**	-0.080	0.049	-0.118	0.799**												
X19	0.272	0.405**	0.204	0.133	-0.036	-0.182	-0.316*	-0.421**	0.609**	0.629**	0.489**	0.322*	0.178	0.628**	0.478**	0.713**	-0.259	-0.125											
X20	0.292*	0.172	0.320*	-0.190	-0.006	0.502**	0.607**	0.640**	0.127	-0.282	-0.110	-0.573**	-0.345*	-0.277	-0.170	-0.361*	0.605**	0.592**	-0.298**										
X21	0.347*	0.255	0.356*	-0.221	0.059	0.451**	0.524**	0.590**	-0.017	-0.172	-0.036	-0.547**	-0.261	-0.185	-0.117	-0.247	0.536**	0.572**	-0.167	0.922**									
X22	0.312*	0.218	0.328*	-0.187	0.079	0.472**	0.560**	0.622**	-0.080	-0.217	-0.085	-0.547**	-0.258	-0.217	-0.128	-0.284	0.567**	0.585**	-0.209	0.964**	0.981**								
X23	0.298*	0.207	0.329*	-0.155	0.044	0.546**	0.608**	0.594**	-0.176	-0.263	-0.064	-0.582**	-0.273	-0.203	-0.120	-0.276	0.535**	0.517**	-0.248	0.952**	0.930**	0.961**							
X24	0.318*	0.208	0.307*	-0.163	0.073	0.562**	0.610**	0.586**	-0.159	-0.258	-0.081	-0.581**	-0.239	-0.184	-0.088	-0.264	0.518**	0.496**	-0.223	0.951**	0.924**	0.957**	0.989**						

述性状相关性显著,还与第3节径长比、地上部鲜质量、第2节茎秆机械强度呈显著负相关,表明第2节长度、径长比和株高是影响品种抗倒伏能力的主要因素,第2节茎秆机械强度越强、第3节越粗越短,品种抗倒性越好。分析表明,第2节茎秆机械强度、长度、充实度及径长比等茎秆特性与倒伏相关性较大,且变异系数较大,表明在合理的株高范围内,对茎秆特性,特别是第2节茎秆的机械强度、长度、充实度及径长比进行选择是可以选出抗倒性优良且丰产性好的品种。

2.3 小麦茎秆等特性与倒伏指数的关系

从表3可以看出,4种倒伏指数均与第2、3节长度及第2节机械强度呈显著或极显著相关,表明基部节间越短,茎秆机械强度越大,品种抗倒伏能力越强。除上述2个性状外,茎秆等特性与4种倒伏指数相关性又各有不同,其中倒伏指数1、3和4均与第1、2节茎秆充实度、地上部鲜质量及重心高度显著或极显著相关,倒伏指数2、3、4与第2节径长比、穗干鲜质量显著或极显著相关,倒伏指数1、2、3与株高显著或极显著相关。4种倒伏指数均与第2、3节直径相关性不明显,表

明基部茎节表观粗度不是影响品种抗倒性的主要原因,但基部茎秆粗且短的小麦品种抗倒伏能力更好。

2.4 倒伏指数与倒伏的关系

为了解4种倒伏指数鉴别小麦品种抗倒伏能力的效果,利用多点试验抗倒性鉴定结果对4种倒伏指数进行比较分析。从相关性分析表(表4)可以看出,除全部倒伏点率仅与倒伏指数2和3显著相关外,严重倒伏点率、倒伏程度、倒伏面积均与4种倒伏指数呈显著或极显著相关,表明这4种倒伏指数均可有效反映小麦品种抗倒伏能力。但倒伏指数与倒伏指标相关值大小各有差异,其中倒伏指数2与倒伏指标相关性最大且均达极显著水平,倒伏指数1和4与倒伏指标相关性最小。此结果表明,如果用区域试验标准判定品种抗倒伏能力,倒伏指数2鉴定品种抗倒伏能力的效果更好。倒伏指数5与各倒伏指标均呈极显著正相关,相关系数分别达0.951、0.924、0.957、0.989,表明应用倒伏指数5可以很好地定量品种抗倒性。

表4 小麦倒伏和倒伏指数的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of lodging indexes and lodging parameters in winter wheat

变量 Variables	X20	X21	X22	X23	X24	X25	X26	X27
X21	-0.423**							
X22	0.453**	-0.389**						
X23	0.397**	-0.835**	0.642**					
X24	-0.607**	0.367**	-0.455**	-0.395**				
X25	-0.609**	0.274	-0.364*	-0.256	0.922**			
X26	-0.623**	0.299*	-0.398**	-0.303*	0.964**	0.981**		
X27	-0.625**	0.340*	-0.365*	-0.337*	0.952**	0.930**	0.961**	
X28	-0.580**	0.316*	-0.340*	-0.309*	0.951**	0.924**	0.957**	0.989**

2.5 抗倒伏能力因子解析

对茎秆特性、穗质量、株高、倒伏指数和倒伏指标等28个性状及指标进行主成分分析,得到28个特征根及相应的特征向量(表3),其中前2个主成分累计贡献率分别为36.541%、22.577%,其他主成分所占比重均较小。第1主成分的特征向量中,倒伏指标、基部茎秆长度、株高、倒伏指数1的载荷值较大且依序次之,而其他3个倒伏指数、茎秆径长比、茎秆充实度的特征向量值较高且为负,说明基部茎秆长度越长、株高越高,品种抗倒伏能力越弱,增加基部茎节充实度及

选择粗且短的基部茎节对品种抗倒性有利,同时增加穗质量与提高品种抗倒性可以协同进行,据此称第1主成分为基部茎节长度因子。第1主成分中,5种倒伏指数的载荷绝对值均较高,再次表明本研究中的倒伏指数均能很好的反映品种的抗倒伏能力。第2主成分的特征向量中,基部茎秆干质量及充实度、穗质量及地上部鲜质量的载荷值较大且依序次之,主要反映了茎秆干质量及充实度对品种抗倒性的影响,据此称第2主成分为茎秆充实度因子。

表 5 小麦茎秆特性、穗质量、株高和倒伏情况的主成分载荷

Table 5 Load of principal components of stem traits, spike mass, plant heights and lodging parameters in winter wheat

变量 Variables	主成分 1 No. 1 principal component	主成分 2 No. 2 principal component
X1	0.039	0.836
X2	-0.117	0.835
X3	0.057	0.783
X4	-0.291	0.270
X5	-0.034	0.000
X6	0.457	0.468
X7	0.699	0.218
X8	0.768	0.176
X9	-0.451	0.649
X10	-0.644	0.574
X11	-0.455	0.617
X12	-0.721	-0.069
X13	-0.428	-0.105
X14	-0.642	0.592
X15	-0.471	0.518
X16	-0.679	0.543
X17	0.636	0.291
X18	0.572	0.434
X19	-0.660	0.468
X20	0.593	-0.055
X21	-0.665	-0.176
X22	-0.783	0.393
X23	-0.736	0.371
X24	0.833	0.418
X25	0.746	0.499
X26	0.786	0.471
X27	0.794	0.455
X28	0.776	0.462
特征值 Eigenvalue	10.231	6.322
贡献率/% Variability rate	36.541	22.577
累计贡献率/% Cumulative rate	36.541	59.118

3 讨论

小麦倒伏分为根倒和茎倒,由于根倒与根系、栽培管理、雨水、土壤等因素有关,各因素间相互影响,关系复杂,且根系的衡量难度较大,因此抗倒性的研究多集中于茎秆等地上部分性状,本研究中对地上部茎节、株高、生物量等的研究较多。相关性分析及主成分分析结果均显示,倒伏与基部茎节特性相关性密切,其中基部茎节长度、株高、重心高度与倒伏呈极显著正相关,第 2 节的径长比、基部茎秆弹性与倒伏呈极显著负相关,表明基部茎节越短、充实度越高,重心越低,基部茎秆弹性越好,品种越不容易倒伏,与前人研究结果相符^[4-5,7]。第 2 节的茎秆机械强度除与严重倒伏点率相关显著外,与其他倒伏指标相关性不明显,不

同于王勇等^[19]的研究结果,表明第 2 节茎秆机械强度可以较好的反映品种基部茎秆弯折情况下的倒伏严重程度,但在现行区域试验品种抗倒性鉴定标准^[26]中,未能全面反映品种的抗倒伏能力,特别是测试品种出现部分根倒或者中上部茎秆部分弯折等情况。胡昊等^[28]、李金才等^[29]认为第 2 节茎秆的粗度与品种抗倒伏能力相关密切,本研究表明,第 2 节、第 3 节茎秆的粗度与抗倒性相关性不密切,与董琦等^[6]、姚金保等^[7]的研究结果一致,但是与第 2 节茎秆充实度呈极显著负相关,表明基部茎节短、秆壁厚、密度高的品种抗倒性更好。

本研究结果显示,4 种倒伏指数均与第 2、3 节长度、第 2 节机械强度极显著相关,再次表明基部茎节特性,特别是第 2 茎节对小麦品种抗倒性具有关键作用,同时各倒伏指数与其他茎秆等特性密切相关,与前人研究结果不尽相同。其中倒伏指数 1 与第 2 茎节长度、地上部鲜质量相关性显著,与基部茎节干质量相关性不显著等结果与冯素伟等^[30]的结果不符,与于洋等^[31]的研究结果一致。基部茎节粗度与 4 种倒伏指数相关性均不显著,与李金才等^[29]、肖世和等^[22]、胡昊等^[28]的研究结果不符,与冯素伟等^[30,33]、吕厚波等^[32]的研究结果一致。各倒伏指数与茎秆特性的关系与前人研究结果有差异,分析原因可能因采用方法不同,或者研究对象不同,从而得出的结论有出入。前人研究多采用不同基因型、不同株高或者不同茎秆粗细等类型的品种进行分析比较,试验品种相对较少,得出的品种抗倒伏的原因不一。有的品种因为株高矮,重心低而表现抗倒性好,如‘百农 AK58’等;有的品种抗倒性好是因为基部茎秆强度高,如‘周麦 18’等;有的品种茎秆髓腔小,茎秆细长韧性好,如淮麦系列品种等。

本次研究所使用材料包含基因型较多,品种来源较广,类型较为丰富,应能较好的反映倒伏指数与品种(系)茎秆等特性的关系。但由于小麦品种倒伏除与自身特性有关外,还与气候、土壤、栽培管理措施等密切相关^[34]。在一定规范的栽培管理措施下,种植密度对小麦品种倒伏影响很大^[2,20,35-36]。本研究中茎秆等特性的调查未设置密度试验或多点试验,而各品系实际倒伏情况为多点试验,试点间种植密度差异较大,同时小麦品种抗倒伏能力随发育进程而发生变化,本研究仅选取灌浆中后期作为研究点,有较多不足之处。

因此在今后的研究中,茎秆等特性的调查需要设置不同种植密度,选取不同的时间节点,或者安排多点茎秆等特性调查试验,以排除群体或发育进程差异而导致的误差。

本试验比较了 4 种倒伏指数法在小麦品种抗倒性中的应用效果。从检测难易程度上看,改良的倒伏指数 2 检测最为便捷,不伤植株,可活体检测,并可通过手感获知,适用于不同时间点及不同育种世代的抗倒性快速预测。倒伏指数 3 仅需要测量穗质量和株高,相对也容易。倒伏指数 1 和倒伏指数 4 需要测量第 2 节茎秆机械强度和重心高度,工作相对繁重,操作难度相对较大,不太适用于大规模的育种后代检测,可应用于稳定品系多点抗倒性鉴定。且从现有的区域试验品种倒伏评价标准^[26]方面考虑,倒伏指数 2 和倒伏指数 3 衡量品种(系)抗倒伏能力相对更为准确,表明改良的倒伏指数 2 和倒伏指数 3 是评价品种抗倒性较好的方法。

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 (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2013, 14(2): 208-213.

[2] 孟令志,郭宪瑞,刘宏伟,等. 小麦抗倒性研究进展[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(12): 1720-1727.
MENG L ZH, GUO X R, LIU H W, *et al.* Research progress on lodging resistance of wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34(12): 1720-1727.

[3] 张志强,付 晶,王奉芝,等. 小麦抗倒性研究进展[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(5): 2020-2022.
ZHANG ZH Q, FU J, WANG F ZH, *et al.* Research progress in wheat lodging [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, 41(5): 2020-2022.

[4] 王 丹,丁位华,冯素伟,等. 不同小麦品种茎秆特性及其与抗倒性的关系[J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1496-1502.
WANG D, DING W H, FENG S W, *et al.* Stem characteristics of different wheat varieties and its relationship with lodging-resistance [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(5): 1496-1502.

[5] 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.

[6] 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, 2003, 23(3): 188-191.
DONG Q, WANG A P, LIANG S M, *et al.* Study on the architectural characteristics of wheat stalks [J]. *Journal of*

Shanxi Agricultural University, 2003, 23(3): 188-191.

[7] 姚金保,任丽娟,张平平,等. 小麦品种茎秆抗倒特性分析[J]. 江苏农业科学, 2011, 39(2): 140-142.
YAO J B, REN L J, ZHANG P P, *et al.* Analysis on stem lodging resistance of wheat varieties [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2011, 39(2): 140-142.

[8] 安呈峰,王延训,毕建杰,等. 高产小麦生育后期影响茎秆生长的生理因素与抗倒性的关系[J]. 山东农业科学, 2008 (7): 1-4, 8.
AN CH F, WANG Y X, BI J J, *et al.* Relationship between lodging resistance and physiological factors about stem growth of high-yielding wheat in late growth period [J]. *Shandong Agricultural Science*, 2008(7): 1-4, 8.

[9] 王 健,朱锦懋,林青青,等. 小麦茎秆结构和细胞壁化学成分对抗压强度的影响[J]. 科学通报, 2006, 51(6): 679-685.
WANG J, ZHU J M, LIN Q Q, *et al.* Effects of stem structure and cell wall components on bending strength in wheat [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(6): 679-685.

[10] 徐 磊,王大伟,时荣盛,等. 小麦基部节间茎秆密度与抗倒性关系的研究[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(4): 673-679.
XU L, WANG D W, SHI R SH, *et al.* Relationship between lodging-resistance and the density of the bottom elongate stem in wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2009, 29(4): 673-679.

[11] 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.* Gene effects and heterosis of lodging resistance traits in wheat [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 1998, 18(4): 514-520.

[12] MARZA F, BAI G H, CARVER B F, *et al.* Quantitative trait loci for yield and related traits in the wheat population Ning7840 × Clark [J]. *Theoretical Applied Genetics*, 2006, 112: 688-698.

[13] HUANG X Q, CLOUTIER S, LYCAR L, *et al.* Molecular detection of qtls for agronomic and quality traits in a doubled haploid population derived from two canadian wheats (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Theoretical Applied Genetics*, 2006, 113: 753-766.

[14] 冯素伟,姜小苓,丁位华,等. 基于一种新方法的小麦茎秆抗倒性研究[J]. 华北农学报, 2015, 30(3): 69-72.
FENG S W, JIANG X L, DING W H, *et al.* Studies of wheat lodging resistance on the basis of a new method [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2015, 30(3): 69-72.

[15] 于润清. 小麦茎抗倒伏的力学分析及综合评价探讨[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(13): 7663-7664.
YU R Q. Mechanical analysis and comprehensive evaluation of the lodging resistance of wheat stem [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(13): 7663-7664.

[16] 胡世高,卜荣丽,李 明. 小麦抗倒伏的力学分析[J]. 北京联合大学学报(自然科学版), 2012, 26(1): 73-76.
HU SH G, BU R L, LI M. A mechanical analysis of the wheat lodging-resistance [J]. *Journal of Beijing Union University (Natural Sciences)*, 2012, 26(1): 73-76.

[17] 陈晓光,石玉华,王成雨,等. 氮肥和多效唑对小麦茎秆木质素合成的影响及其与抗倒伏性的关系[J]. 中国农业科学, 2011, 44(17): 3529-3536.

- CHEN X G, SHI Y H, WANG CH Y, *et al.* Effects of nitrogen and pp333 application on the lignin synthesis of stem in relation to lodging resistance of wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(17): 3529-3536.
- [18] 王成雨, 代兴龙, 石玉华, 等. 氮肥水平和种植密度对冬小麦茎秆抗倒性能的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(1): 121-128.
- WANG CH Y, DAI X L, SHI Y H, *et al.* Effects of nitrogen application rate and plant density on lodging resistance in winter wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(1): 121-128.
- [19] 王 勇, 李朝恒, 李安飞, 等. 小麦品种茎秆质量的初步研究[J]. 麦类作物, 1997, 17(3): 28-31.
- WANG Y, LI CH H, LI A F, *et al.* The preliminary research on the quality of wheat stalk[J]. *Triticeae Crops*, 1997, 17(3): 28-31.
- [20] 李金才, 尹 钧, 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.
- LI J C, YIN J, WEI F ZH. Effects of planting density on characters of culm and culm lodging resistant index in winter wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(5): 662-666.
- [21] 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, ZHOU J R, LI B F, *et al.* Evaluation method of root lodging resistance in wheat [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2000, 9(1): 58-61.
- [22] 肖世和, 张秀英, 闫长生, 等. 小麦茎秆强度的鉴定方法研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(1): 7-11.
- XIAO SH H, ZHANG X Y, YAN CH SH, *et al.* Determination of resistance to lodging by stem strength in wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(1): 7-11.
- [23] BERRY P M, SPINK J, STERLING M, *et al.* Methods for rapidly measuring the lodging resistance of wheat cultivars [J]. *Journal Agronomy & Crop Science*, 2003, 189: 390-401.
- [24] GRAFIUS J E, BROWN H M. Lodging resistance in oats [J]. *Agronomy Journal*, 1954, 9: 414-418.
- [25] 乔春贵. 作物抗倒伏性的综合指标-倒伏指数[J]. 吉林农业大学学报, 1988, 10(1): 7-10, 100-101.
- QIAO CH G. Lodging index-a synthetic indication of lodging resistance[J]. *Acta Agriculture Universitatis Liliensis*, 1988, 10(1): 7-10, 100-101.
- [26] 中华人民共和国农业部. 中华人民共和国农业行业标准: NY/T 1301-2007 农作物品种(小麦)区域试验技术规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Agricultural Industry Standard of the People's Republic of China: NY/T 1301-2007 Technical Procedures for Wheat Variety Regional Trials [S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [27] 国家农作物品种审定委员会. 主要农作物品种审定标准(国家级)[Z]. 2017-07-20.
- National Crop Variety Approval Committee. Certification Criteria for Major Crop Varieties[Z]. 2017-07-20.
- [28] 胡 昊, 李莎莎, 华 慧, 等. 不同小麦品种主茎秆形态结构特征及其与倒伏的关系[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(10): 1343-1348.
- HU H, LI SH SH, HUA H. *et al.* Research on stralk morphological structure characteristics and its relationship between with the lodging of different wheat varieties[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(10): 1343-1348.
- [29] 李金才, 尹 钧, 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.
- LI J C, YIN J, WEI F ZH. Effects of planting density on characters of culm and culm lodging resistant index in winter wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(5): 662-666.
- [30] 冯素伟, 李 淦, 胡铁柱, 等. 不同小麦品种茎秆抗倒性的研究[J]. 麦类作物学报, 2012, 32(6): 1055-1059.
- FENG S W, LI G, HU T ZH, *et al.* Study on the stem lodging resistance of different wheat varieties[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2012, 32(6): 1055-1059.
- [31] 于 洋, 高 爽, 王光禄, 等. 三个小麦主推品种的抗倒性能分析[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(22): 33-35, 39.
- YU Y, GAO SH, WANG G L, *et al.* Analysis of lodging resistance of three mainly promoted wheat varieties[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43(22): 33-35, 39.
- [32] 吕厚波, 冯安荣, 董 瑞, 等. 不同基因型小麦灌浆和抗倒伏性能与籽粒产量的关系[J]. 西北农业学报, 2015, 24(6): 27-33.
- LÜ H B, FENG A R, DONG R, *et al.* Grain-filling characteristics and stem lodging resistance and their relationships with grain yields of different genotypic wheat [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2015, 24(6): 27-33.
- [33] 冯素伟, 李小军, 丁位华, 等. 不同小麦品种开花后植株抗倒性变化规律[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(3): 334-338.
- FENG S W, LI X J, DING W H, *et al.* Variation in lodging resistance of different wheat varieties after anthesis [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(3): 334-338.
- [34] 刘丽平, 欧阳竹. 灌溉模式对不同群体小麦茎秆特征和倒伏指数的影响[J]. 华北农学报, 2011, 26(6): 174-180.
- LIU L P, OUYANG ZH. Effect of irrigation schedules on stem traits and lodging index of in winter wheat [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2011, 26(6): 174-180.
- [35] 韩金玲, 杨 晴, 周印富, 等. 冀东地区种植密度对小麦京冬8号抗倒伏能力和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(5): 667-673.
- HAN J L, YANG Q, ZHOU Y F, *et al.* Effect of planting density on lodging resistance and grain yield of winter wheat in the east of Hebei province [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(5): 667-673.
- [36] 刘慧婷, 李瑞奇, 王红光, 等. 密度和施氮量对强筋小麦冀优2018产量和抗倒性的影响[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(12): 1619-1626.
- LIU H T, LI R Q, WANG H G, *et al.* Effect of planting density and nitrogen fertilization rate on lodging resistance and grain yield of strong gluten wheat Gaoyou 2018 [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(12): 1619-1626.

Comparison and Analysis of the Methods for Evaluating Wheat Lodging Resistance

HU Weiguo¹, ZHANG Yu'e¹, ZHAO Hong¹, WANG Xicheng¹,
CAO Tingjie¹, CAO Yingni², CHEN Yu¹ and YANG Jian¹

(1. Institute of Wheat, Henan Academy of Agricultural Sciences, Henan Key Laboratory of Wheat Biology, Key Laboratory of Wheat Biology and Genetic Breeding in Central Huang-huai Region, Ministry of Agriculture, National Laboratory of Wheat Engineering, Zhengzhou 450002, China; 2. Research Institute of Agricultural Quality Standards and Testing Techniques, Henan Academy and Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China)

Abstract One of the main concerns of wheat breeders was how to judge the lodging resistance of varieties quickly and effectively. In order to find a simple and quick method for lodging resistance identification of wheat varieties, we compared with 4 kinds of lodging index methods in evaluating the lodging resistance, and 48 new wheat lines tested in regional trial of irrigation group in annual 2016—2017 of Yellow and Huai River Valley Winter Wheat Zone were analyzed using correlation analysis and principal component analysis by stalk characteristics analysis and multi pilot lodging resistance validation. The result showed that correlation coefficients of lodging index among length of first to third stem, height of central gravity and plant height were in significant at the 0.01 level with positive correlation, substantial degree of second stem and basal stem elasticity were in significant at the 0.01 level with negative correlation, indicated that wheat varieties or lines which owned the traits such as lower plant height, shorter basal internode, stronger elasticity of the basal stem, shorter and thicker second stem especially would be good in lodging resistance. The correlation coefficients of 4 types of lodging index among the length of second, third stem were in significant at the 0.01 level with positive correlation, and negative correlation with mechanical strength of second stem at 0.01 level. Different types of lodging index were significantly related to the other characteristics of stem or other traits at 0.05 level or 0.01 level. It indicated that the second, third stem length and mechanical strength of second stem were the common related traits for the above 4 lodging index methods to identify the lodging resistance of wheat varieties, and each lodging index had its specific correlation traits. 4 kinds of lodging indexes could identify the lodging resistance of wheat varieties effectively, but the lodging index No. 2 and lodging index No. 3 would be better compared with convenience and the value of correlation coefficients.

Key words Bread wheat; Lodging index; Correlation analysis; Principal component analysis

Received 2018-07-05

Returned 2018-09-10

Foundation item Scientific and Technological in Henan Province(No. 182102110121); Special Funds for Scientific Research and Development in HAAS[No. YNK20177501, Yucaimao(2015)131-01]; Independent Innovation Project in HAAS(No. 2013JC02, No. 2015ZZ02, No. 2016ZC03); Technical System of Modern Agriculture(Wheat) Industry in Henan(No. S2015-01-G03); National Science and Technology Support Program(No. 2015BAD26B01).

First author HU Weiguo, male, doctor student. Research area: crop genetic and breeding. E-mail: hnhuweiguo@163.com

Corresponding author ZHAO Hong, female, research fellow. Research area: wheat variety utilization. E-mail: xmszhong@126.com

(责任编辑:成敏 Responsible editor: CHENG Min)