



基于主茎力学特性的大豆种质资源抗倒伏性分析

刘 明¹, 王贞杰¹, 孙亚男¹, 赵彩桐¹, 韩德志², 李文滨¹, 姜振峰¹

(1. 东北农业大学 大豆生物学教育部重点实验室/农业农村部东北大豆生物学与遗传育种重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江省农业科学院 黑河分院, 黑龙江 黑河 164300)

摘 要:为从力学角度分析栽培年份、种植密度及主要化学成分指标对大豆种质资源抗倒伏性的影响,为基于主茎力学特性进行大豆抗倒伏的资源鉴定和新品种选育提供理论依据,本研究于 2020 和 2021 年在田间种植 190 份大豆资源,在成熟期测量株高、直径、折断力 3 种主茎表型性状及木质素、纤维素含量两种化学成份指标,对不同种植年份不同大豆资源的主茎表型性状进行方差分析,对各大豆资源 3 种主茎表型性状进行相关性分析。同时,在 2020 年筛选抗倒伏特性差异明显的 20 份大豆材料,于 2021 年进行盆栽种植,设置两个种植密度处理(20 万和 30 万株·hm⁻²),在成熟期测定主茎表型性状和化学成份指标,并计算弹性模量和抗倒伏系数,分析种植密度及主茎力学相关指标与大豆抗倒伏性的关系。结果表明:年份与折断力互作、品种(系)与折断力互作显著。年际间环境条件差异对折断力有较大影响,折断力大的品种(系)抗倒伏系数也高。主茎折断力与直径呈正相关,而直径与株高之间无明显规律。大豆抗倒伏系数与折断力、弹性模量呈极显著正相关,相关系数分别为 0.90 和 0.42。两个种植密度下折断力较大的品种(系)植株抗倒伏系数和弹性模量均大于折断力较低品种(系)。抗倒伏系数与茎秆木质素含量和纤维素含量呈极显著正相关,相关系数分别为 0.68 和 0.72。综上表明大豆植株抗倒伏特性与主茎力学特性指标间关系密切,可以利用主茎折断力对大豆资源抗倒伏特性强弱进行区分,木质素和纤维素含量高的大豆资源抗倒伏能力强。综合考虑具体栽培条件可进一步提高大豆资源抗倒伏性分析结果的准确性。

关键词:大豆;种质资源;主茎力学特性;抗倒伏系数;种植密度

Analysis of Lodging Resistance of Soybean Germplasm Resources Based on Mechanical Properties of Main Stem

LIU Ming¹, WANG Zhen-jie¹, SUN Ya-nan¹, ZHAO Cai-tong¹, HAN De-zhi², LI Wen-bin¹, JIANG Zhen-feng¹

(1. Key Laboratory of Soybean Biology in Chinese Ministry of Education/Key Laboratory of Soybean Biology and Genetics Breeding of Chinese Agriculture Ministry, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Heihe Branch of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Heihe 164300, China)

Abstract: In order to analyze the effects of cultivation year, planting density and main chemical composition indexes on lodging resistance of soybean germplasm resources from the mechanical point of view, and to provide theoretical basis for identification of soybean lodging resistance resources and breeding of new varieties based on the mechanical characteristics of the main stem. In current study, 190 soybean germplasm resources were selected and were cultivated in the field in 2020 and 2021. The stem related traits and chemical composition indexes such as plant height, diameter, breaking force, lignin and cellulose content were measured at maturity stage. The relationship between these traits and lodging resistance was analyzed. Furthermore, twenty soybean varieties with stable characteristics selected from the year 2020 were planted in 2021 under two planting density treatments (200 and 300 thousand plants·ha⁻¹). We measured the plant height, stem diameter, breaking force, lignin content, and cellulose content at maturity stage. Moreover, the elastic modulus and lodging resistance coefficient, the relationship between planting density and mechanical properties of soybean main stem were calculated. Furthermore, the correlation between each index with plant lodging resistance was also got. The results were as follows: The interaction between year and breaking force, and the interaction between varieties and breaking force were significantly different. Environment differences between years played more effect on breaking force. With the breaking force increased, the lodging resistance improved. The diameter of the stem and breaking force was positive correlation. There was no significant correlation between the diameter and plant height. The lodging resistance coefficient of soybean showed a significantly positive correlation with breaking force and elastic modulus, and the correlation coefficients were 0.90 and 0.42 respectively. The lodging resistance coefficient and elastic modulus of the varieties (lines) with higher breaking force under two planting densities treatments were higher than those with lower breaking force. The lodging resistance coefficient was positively correlated with lignin content and cellulose content, the correlation coefficients were 0.68 and 0.72, respectively. The results showed that there was a close relationship between lodging resistance and main stem mechanical properties, and the main stem breaking force could be used to distinguish the lodging resistance of soybean resources, the soybean resources with high lignin

收稿日期:2022-08-02

基金项目:国家自然科学基金(31571693,32172072);黑龙江省自然科学基金(LH2021C025)。

第一作者:刘明(1998—),男,硕士研究生,主要从事大豆资源鉴定研究。E-mail:1164786683@qq.com。

通讯作者:姜振峰(1976—),男,博士,副教授,主要从事大豆株型及资源创新研究。E-mail:jzhf@neau.edu.cn。

and cellulose content had strong lodging resistance. Comprehensive consideration of specific cultivation conditions can further improve the accuracy of lodging resistance analysis of soybean resources.

Keywords: soybean; germplasm resources; mechanical properties of main stem; lodging resistance coefficient; planting density

大豆是我国重要的油料及蛋白来源,但是国内产量严重不足,亟需提高国产大豆供应量。增加种植面积和提高单产能够提高大豆总产。但我国耕地面积有限,进一步扩大种植面积潜力较小。只能通过提高大豆单产这条途径缓解我国对进口大豆的依赖。实践已经证明,密植是提高大豆单产的有效途径,而生产上大豆种植密度过高会导致严重倒伏,影响产量和品质。植株倒伏减产程度受倒伏发生时期的影响^[1]。作物旺盛生长发育及产量形成时期发生倒伏会导致产量降低,甚至绝收^[2]。选用抗倒伏品种配合栽培技术可降低倒伏风险,提高作物产量^[3]。因此,研究大豆倒伏特性及如何提高大豆品种抗倒伏能力尤为重要。

随着作物生长过程中茎秆机械强度的逐渐增强,植株的抗倒伏能力也逐渐增加^[4]。作物茎秆强度与植株形态和茎秆力学特性密切相关。植株地上或地下部分重量、直径、株高等一系列形态指标与倒伏相关,可间接作为评价作物倒伏的指标^[5]。在直接影响抗倒伏的性状方面,已有研究表明茎秆强度与直径正相关,与株高和节间长度负相关^[1,6-7]。茎秆不同部位的茎秆强度不同,茎秆基部对倒伏影响最大^[1,8]。但各形态指标对倒伏的影响程度仍然无法定论,抗倒伏分析结果稳定性较低。此外,农作物茎秆力学的多个指标已被证明和抗倒伏性密切相关^[9-12]。大豆相关研究也取得显著进展。研究表明大豆的抗倒伏能力由茎秆的机械强度决定。其中,弹性模量(单向应力状态下应力除以该方向的应变)和抗倒伏系数等是衡量大豆抗倒伏性的主要指标。闫以勋等^[13]分析了成熟期大豆茎秆弯曲力学特性,结果表明茎秆基部有较多的维管束,基部较厚的机械组织(木质素、纤维素等)导致弹性模量、惯性矩和抗弯刚度最大,茎秆通过力学传递植株抗倒伏性。郭玉明等^[14]对大豆抗倒伏特性研究发现,力学特性指标中弯曲强度与抗倒伏系数相关性最大,其次是惯性矩、弹性模量。屈晓坤等^[15]研究表明茎秆直径与弹性模量、抗弯刚度和弯曲强度呈正相关,相关性最大,证明大豆抗倒伏系数与倒伏达到显著或极显著相关,并能够对大豆的抗倒伏性进行综合反映。但是,上述力学研究结果多是在不同栽培条件下获得的,还鲜有关于大豆种质资源茎秆力学的系统分析结果,无法评价大豆种质资源抗倒伏性和力学指标间关系,不能从力学角度筛选抗倒伏性强种质资源及选育抗倒伏新品

种。因此,评价大豆种质资源茎秆的力学特性有较强的实践应用需求,能够为抗倒伏大豆品种选育提供力学角度理论指导。

植株抗倒伏能力还受栽培措施影响,种植密度是大豆抗倒伏性的直接栽培影响因子。陈喜凤等^[16]对不同种植密度的大豆形态性状的分析结果表明,株高、重心和节间长度与茎秆强度呈极显著负相关,直径和单位长度的茎秆鲜重与茎秆强度呈极显著正相关,直径与节长的比值作为重要的抗倒伏形态性状与力学特性呈极显著负相关。密度和风力耦合显著影响大豆植株的抗倒伏性。大豆主产区秋季鼓粒成熟季节的台风带来大量降雨,给较高密度大豆的抗倒伏性带来压力。抗倒伏力强的品种对风雨带来的倒伏压力有较强的抵抗能力。同时,密度和栽培技术耦合也显著影响大豆植株的抗倒伏性。在大豆-玉米套作中,施用不同水平钾肥条件下,茎秆强度与基部直径呈显著正相关^[11]。套作栽培条件下的茎秆内部构造也会影响茎秆强度。玉米-大豆套作栽培条件下,对抗倒伏系数影响最为明显的抗倒伏指标是抗折力,其次是主茎长度、地上部干重、直径等抗倒伏性状,茎秆抗折力越大,越不容易倒伏^[17]。另外,杨锦等^[18]对套作和单作两种方式大豆茎秆弯曲特性研究表明,单作模式茎秆抗弯刚度和惯性矩大于套作模式,但弹性模量小于套作模式。上述分析表明,具体栽培条件结合分析茎秆的力学特性对于在生产中提高大豆抗倒伏性更有指导意义。

针对上述生产实际需求,本研究在田间种植190份大豆资源,在成熟期测量株高、直径、折断力、木质素含量、纤维素含量等主茎表型和化学成份指标,分析其与抗倒伏性的关系。筛选性状稳定的20份大豆品种并进行两种不同种植密度盆栽试验,在成熟期测定主茎表型和化学成份指标,较系统地研究各指标与植株抗倒伏性的相关性,为从力学角度评价大豆种质资源和筛选抗倒伏品种提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

190份大豆品种(系),均由东北农业大学大豆研究所提供,包括黑龙江省、吉林省、辽宁省和内蒙古自治区的地方品种和主栽品种。

表 1 参试大豆种质资源

Table 1 Soybean germplasm resources tested in the study

序号 Number	品种(系) Variety(line)	序号 Number	品种(系) Variety(line)	序号 Number	品种(系) Variety(line)	序号 Number	品种(系) Variety(line)
1	东农 59	49	12 区 7	97	东农 48	145	宾豆 6 号
2	金源 55	50	12 区 14	98	蒙豆 15	146	农庆豆 24
3	吉林 45	51	绥化轮回后代	99	黑河 34	147	PI602897/A08
4	辽鲜 1 号	52	绥 00-1052	100	东大 1 号	148	PI602896/A07
5	龙品 003-311	53	绥 13-6053	101	蒙豆 39	149	PI602060/A029
6	绥农 36	54	龙垦 315	102	九丰 3 号	150	PI592524/A024
7	垦农 31	55	黑农 54	103	北豆 36	151	PI587091/A017
8	黑科 56	56	绥 12-1143	104	垦农 2 号	152	PI562374/A023
9	黑河 53	57	绥农 30	105	中黄 901	153	PI562372/A010
10	黑河 43	58	绥 13-9954	106	蒙豆 5 号	154	PI548529/A030
11	合丰 50	59	绥 13-5547	107	九丰 4 号	155	PI542402/A018
12	公交 2010-1375	60	海 6055	108	北豆 19	156	PI542402/A011
13	公交 03342-9	61	绥农 26	109	嫩粮 7 号	157	PI542042/A021
14	东农 58	62	北 5294	110	丰收 11 号	158	NE1900
15	东农 56	63	绥农 4 号	111	登科 1 号	159	Holt
16	黑农 26	64	绥农 75	112	龙垦 336	160	2014 中区 2
17	垦丰 20	65	黑农 44	113	蒙豆 30	161	黑河 45
18	长农 50	66	黑河 43	114	龙垦 330	162	九丰 1 号
19	黑农 66	67	绥 02-423	115	九丰 5 号	163	蒙豆 26
20	黑农 76	68	垦丰 18	116	垦豆 40	164	北丰 16
21	黑农 38	69	黑河 38	117	北丰 11	165	蒙豆 34
22	黑农 501	70	宾豆 1 号	118	黑河 54	166	垦鉴豆 27
23	黑农 44	71	黑农 53	119	丰收 27	167	黑河 51
24	黑农 53	72	合丰 45	120	垦鉴豆 25	168	丰收 25
25	黑农 43	73	合丰 40	121	丰收 6 号	169	蒙豆 11
26	中黄 35	74	合丰 49	122	东农 23	170	蒙豆 31
27	黑农 31	75	华疆 17	123	丰收 20	171	黑河 5 号
28	黑龙江 41	76	金源 55	124	北豆 34 号	172	蒙豆 14
29	齐 09374-65	77	北豆 5 号	125	黑农 8 号	173	蒙豆 16
30	绥农 75	78	嫩奥 3 号	126	紫花 1 号	174	丰收 23
31	农大 86257	79	垦 08-806	127	合丰 43	175	内豆 4 号
32	齐 05032-4	80	佳试 D	128	Bell	176	东生 1 号
33	嫩丰 17	81	合丰 55	129	红丰 2 号	177	早丰 5 号
34	黑交 09-2145	82	合丰 50	130	合丰 14 号	178	绥无腥 1 号
35	克山 1 号	83	合丰 39	131	合交 11 号	179	东农 47
36	昊疆 11-1200	84	合丰 51	132	东农 24	180	东农 61
37	合 10-239	85	佳豆 19	133	紫花 4 号	181	东农 43
38	东农 48	86	合 11-188	134	合交 6 号	182	东农 42
39	抗线 8 号	87	垦豆 59	135	合丰 1 号	183	东农 60
40	龙品 10-29	88	加拿大蛋白豆	136	东农 1 号	184	东农 50
41	克 09-09	89	龙垦 332	137	东农 57 号	185	东农 52
42	顺豆 2	90	黑河 44	138	No. 12	186	品系 002
43	克 14-1739	91	黑河 38	139	NO. 4	187	黑科 58 号
44	黑河 45	92	丰收 24	140	NO. 3	188	金源 55
45	九三 09-4	93	登科 5	141	东农 68	189	黑科 60 号
46	黑农 35	94	黑河 29	142	东农 63 号	190	绥农 76 号
47	克 12-1404	95	垦鉴豆 26	143	东农 37 号		
48	丰豆 1 号	96	圣豆 168	144	紫花 1 号		

1.2 试验设计

采用随机区组设计,在东北农业大学本科生实验实习基地种植 190 份大豆品种。田间小区 3 m 行长,株距 5 cm,垄距 65 cm,田间管理和一般大田相同。在 R8 期进行株高、节间长度、节间数、节间直径以及茎秆折断力测量。经处理后测定基部节间的木质素、纤维素含量。

密度试验地点在东北农业大学盆栽场。试验选取盆栽场内阳光无遮挡地块作为试验用地,保证光照充足均匀。根据 2020 年结果选取 10 个折断力较大品种和 10 个折断力较小的大豆品种均匀点播在盆栽桶(直径 27 cm,高 24 cm)内,每个品种分别按照 20 万株·hm⁻²(D20)和 30 万株·hm⁻²(D30)两种密度播种,每个密度处理 3 次重复。苗期筛选长势一致的幼苗分别挂牌标记。成熟后 R8 期分别测量株高、直径、折断力,后续测定木质素和纤维素含量。

对大豆抗倒伏相关性状进行方差分析;选取折断力最大和最小的 10% 参试材料进行株高、直径和折断力相关性分析;分析种植密度和茎秆弹性模量及抗倒伏系数间的变化规律;计算各性状间的相关性,进而分析木质素含量和纤维素含量与折断力、抗倒伏系数和弹性模量的相关性。

1.3 方法

1.3.1 测定项目及方法 主茎表型性状:株高,用直尺量大豆植株子叶痕至生长点的高度;直径,用游标卡尺测定大豆茎秆基部五节中部位置的直径(重复 3 次),取平均值;折断力,将大豆茎秆截断成 15 cm 小段,利用 SMS 质构仪(TA. XT plus C,Stable Micro System,英国)测定茎基部 15 cm 节间的折断力。

化学成分:将不同品种(系)大豆茎秆各 5 株在晾晒棚内自然风干 30 d 以上,用剪刀剪取茎秆基部 2 个节间,用球磨仪(GT300,格瑞德曼,中国)研磨成粉末,在赛多利斯万分之一天平称取 0.15 g 样

品,采用 ABSL 法测定木质素含量^[19],采用蒽酮比色法测定纤维素含量^[20]。

1.3.2 力学指标计算 参考郭玉明等^[14]、梁莉等^[21]提出的品种抗倒伏系数衡量供试材料抗倒性的强弱。将大豆茎秆近似认为均匀材料、重心在茎秆中部,茎秆基部挫折扭矩为 1/2 F 与 1/2 L 的乘积(F 为茎秆挫折力,L 为两支点的距离),植株重力矩为 1/2 MgH(M 为植株质量,g 为 9.8 N·kg⁻¹,H 为大豆株高),抗倒伏系数 $Q = \frac{FL}{2MgH}$ 。品种的抗倒伏系数越大,即表示该品种抗倒伏能力越强,抗倒伏系数越小,田间越容易倒伏。

使用 SMS 质构仪(TA. XT plus C,Stable Micro System,英国)测量并计算弯曲挠度, $y = vt$,式中, v 为质构仪下压速度, t 为时间。参考 Galedar 等^[22]的计算方法,根据三点试验原理计算弹性模量,弹性模量 $E = \frac{FL3}{48Iy}$,惯性 $I = \frac{\pi D^4}{64}$,式中, y 为弯曲挠度, D 为主茎直径。

1.4 数据分析

采用 Excel 2010 和 SPSS 24.0 软件进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同种植年份主茎表型性状方差分析

方差分析结果表明,2020 和 2021 年各性状间的年份与株高、年份与直径、年份与折断力的交互均呈极显著关系,品种与株高、品种与直径、品种与折断力的交互呈极显著关系,年份、品种与株高的交互呈极显著关系,年份、品种与直径的交互呈极显著关系,年份、品种与折断力的交互均呈极显著关系(表 2)。因此可以针对品种间株高、直径和折断力性状差异进行抗倒性分析。

表 2 2020 和 2021 年主茎表型性状方差分析

Table 2 Variance analysis on phenotypic traits of main stem in 2020 and 2021

项目 Item	主茎表型性状 Phenotypic trait of main stem	均方 Mean square	F
年份 Year	株高 Plant height/cm	43151.65	588.97 **
	直径 Diameter/mm	564.62	353.27 **
	折断力 Breaking force/g	7010176702.00	266.73 **
品种 Variety	株高 Plant height/cm	1249.45	17.05 **
	直径 Diameter/mm	5.84	3.65 **
	折断力 Breaking force/g	93305426.45	3.55 **
年份 × 品种 Year × Variety	株高 Plant height/cm	393.38	5.37 **
	直径 Diameter/mm	3.89	2.43 **
	折断力 Breaking force/g	71002475.04	2.70 **
误差 Error	株高 Plant height/cm	73.27	
	直径 Diameter/mm	1.60	
	折断力 Breaking force/g	26282152.57	

注: ** 表示存在显著性。
Note: ** indicates there is significance.

2.2 田间大豆主茎表型性状相关性分析

两年折断力排序前 10% 的大豆品种(系)的株高和直径分析结果如图 1 所示:2020 年,株高为 45.10 ~ 103.30 cm,直径为 7.53 ~ 13.60 mm,折断力为 14805.13 ~ 41591.47 g;2021 年,株高为 46.73 ~ 117 cm,直径为 7.73 ~ 10.53 mm,折断力为

20 320.87 ~ 33 702.41 g。结果表明,随着直径降低折断力呈现下降趋势,折断力与直径正相关,而直径和株高的关系无明显规律。年际间环境条件差异对折断力影响较高,两年折断力均排在前 10% 的品种(系)有 6 个,占群体的 30%。

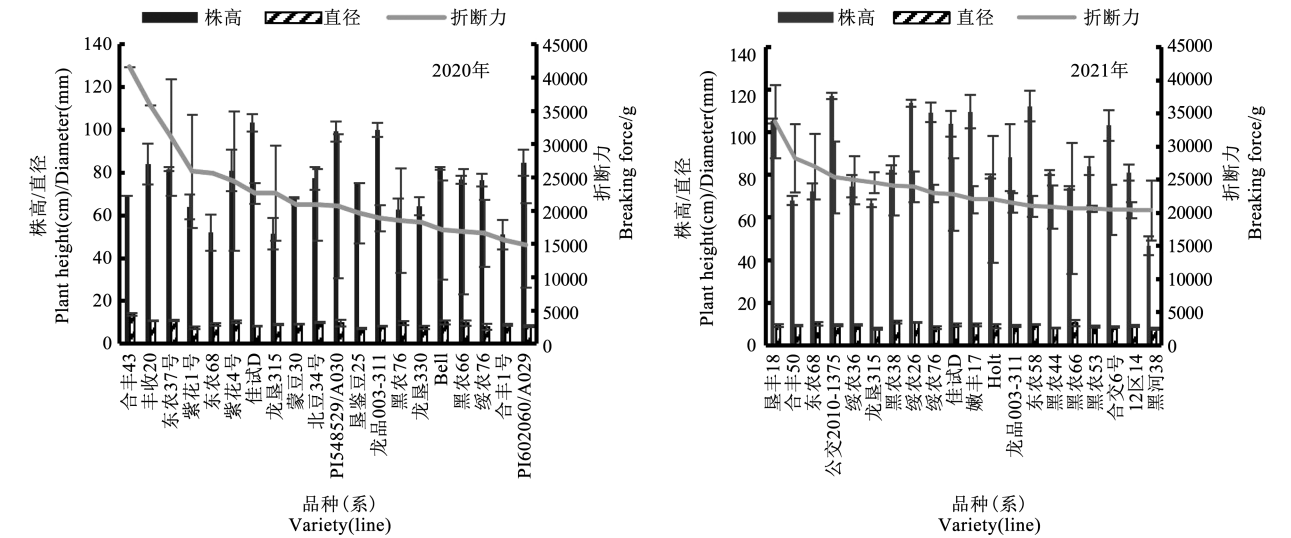


图 1 折断力前 10% 品种(系)的直径和株高分析

Fig.1 Analysis of diameter and plant height of the varieties with the top 10% breaking force

两年折断力排序后 10% 的大豆品种(系)的株高和直径分析结果如图 2 所示:2020 年,株高为 34.00 ~ 74.00 cm,直径为 2.63 ~ 6.28 mm,折断力为 527.69 ~ 3 039.28 g;2021 年,株高为 42.17 ~ 105.50 cm,直径为 5.13 ~ 9.25 mm,折断力为

3 331.05 ~ 7 394.64 g。结果表明,随着直径降低,折断力呈现下降趋势,折断力与直径呈正相关,而折断力与株高无明显关系。年际间环境条件差异对折断力影响较大,两年折断力均排在后 10% 的品种(系)有 3 个,占群体的 15%。

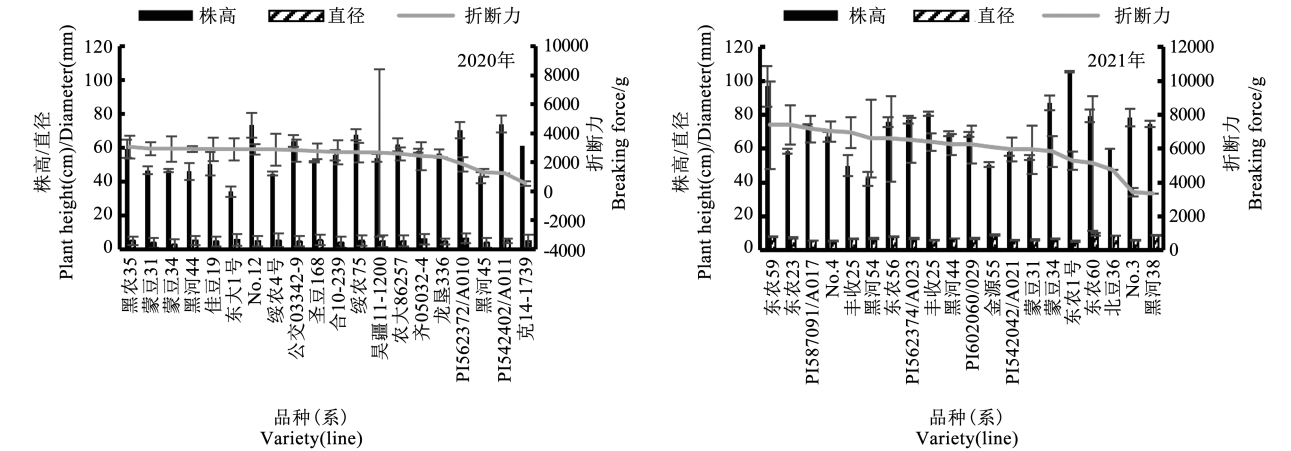


图 2 折断力后 10% 品种(系)的直径和株高分析

Fig.2 Analysis of diameter and plant height of the varieties with last 10% of breaking force

2.3 不同种植密度大豆主茎力学性状分析

2.3.1 种植密度与弹性模量关系分析 10 份折断力较大品种(系)在 D30 处理下弹性模量为 3.99 ~ 27.19,在 D20 处理下为 10.68 ~ 36.62。D30 处理下的弹性模量均大于 D20 处理下的弹性模量,Holt 品种增加量最大,为 341.63%,龙垦 330 增加量最

小,为 -7.2%。10 份折断力较小品种(系)在 D30 处理下弹性模量为 1.00 ~ 15.90,在 D20 处理下为 3.30 ~ 31.03,D20 处理弹性模量平均值较 D30 处理增加 87.67% (表 3)。两种种植密度下折断力较大的品种(系)植株弹性模量均大于折断力较低的品种(系)。

表 3 不同密度处理下折断力前十位和后十位品种(系)弹性模量

Table 3 Elastic modulus of varieties with top ten and bottom ten breaking force under different densities					
前十位品种(系) Top ten varieties(lines)			后十位品种(系) Bottom ten varieties(lines)		
名称 Name	D30	D20	名称 Name	D30	D20
东农 68 Dongnong 68	4.77	16.13	东农 59 Dongnong 59	5.83	10.33
东农 24 Dongnong 24	10.03	15.05	东农 56 Dongnong 56	9.43	16.19
龙垦 330 Longken 330	18.32	17.00	黑河 38 Heihe 38	3.60	7.24
蒙豆 30 Mengdou 30	7.81	10.68	垦鉴豆 27 Kenjiandou 27	15.90	31.03
九丰 4 号 Jiufeng 4	10.95	13.29	蒙豆 11 Mengdou 11	1.00	4.00
合丰 50 Hefeng 50	10.56	12.95	垦豆 40 Kendou 40	6.49	12.78
绥 13-5547 Sui 13-5547	11.95	13.88	北豆 34 号 Beidou 34	1.10	3.60
龙垦 315 Longken 315	27.19	36.62	Bell	1.10	3.30
Holt	3.99	17.62	东农 60 Dongnong 60	1.00	8.00
黑农 44 Heinong 44	16.27	20.52	金源 55 Jinyuan 55	6.14	9.49

注;D30 和 D20 分别表示密度为 30 万和 20 万株·hm⁻²,下同。
Note;D30 and D20 indicates 300 and 200 thousand plants per hectare respectively, the same below.

2.3.2 种植密度与抗倒伏系数关系分析 10 份折断力较大品种(系)在 D30 处理下的抗倒伏系数为 2.81~6.61,在 D20 处理下为 6.50~18.77。D20 处理下的抗倒伏系数均大于 D30 处理下,九丰 4 号增加 216.77%,东农 24 增加量最小,为 12.40%。

10 份折断力较小的品种(系)在 D30 处理下的抗倒伏系数范围为 1.45~3.24,在 D20 处理下范围为 1.78~6.98(表 4)。两种种植密度下折断力较大的品种(系)植株抗倒伏系数均大于折断力较低

表 4 不同密度处理下折断力前十位和后十位品种(系)抗倒伏系数

Table 4 Lodging resistance coefficient of varieties with top ten and bottom ten breaking force under different densities					
前十位品种(系) Top ten varieties(lines)			后十位品种(系) Bottom ten varieties(lines)		
名称 Name	D30	D20	名称 Name	D30	D20
东农 68 Dongnong 68	4.74	12.48	东农 59 Dongnong 59	1.91	4.10
东农 24 Dongnong 24	6.61	7.43	东农 56 Dongnong 56	2.93	5.59
龙垦 330 Longken 330	2.81	7.80	黑河 38 Heihe 38	2.18	3.52
蒙豆 30 Mengdou 30	5.28	6.50	垦鉴豆 27 Kenjiandou 27	2.56	3.82
九丰 4 号 Jiufeng 4	4.83	15.30	蒙豆 11 Mengdou 11	2.73	3.20
合丰 50 Hefeng 50	6.10	12.91	垦豆 40 Kendou 40	2.12	2.82
绥 13-5547 Sui 13-5547	5.72	8.83	北豆 34 号 Beidou 34	1.92	3.93
龙垦 315 Longken 315	4.30	11.39	Bell	1.78	2.86
Holt	6.02	18.77	东农 60 Dongnong 60	1.45	1.78
黑农 44 Heinong 44	4.79	8.65	金源 55 Jinyuan 55	3.24	6.98

2.3.3 各性状与抗倒伏系数相关性分析 如表 5 所示;株高与茎秆抗倒伏系数呈显著负相关,相关系数为-0.47,即株高越高抗倒伏系数越小;直径与茎秆抗倒伏系数呈极显著正相关,相关系数为 0.88,即直径越大抗倒伏系数越大;茎秆折断力、茎秆弯曲挠度、茎秆弹性模量与抗倒伏系数之间呈极

显著正相关,相关系数分别为 0.90,0.64 和 0.42,即茎秆折断力、茎秆弯曲挠度和茎秆弹性模量越大抗倒伏系数越大;茎秆木质素含量和纤维素含量与抗倒伏系数呈极显著正相关,相关系数分别为 0.68 和 0.72,即木质素含量、纤维素含量越高抗倒伏系数越大。

表 5 各性状相关性分析
Table 5 Correlation analysis of traits

性状 Character	折断力 Breaking force	直径 Diameter	株高 Plant height	抗倒伏系数 Lodging resistance coefficient	弯曲挠度 Bending deflection	弹性模量 Modulus of elasticity	木质素 Lignin	纤维素 Fibrin
折断力 Breaking force	1	0.88 **	0.13	0.90 **	0.50 *	-0.49 *	0.77 **	0.90 **
直径 Diameter		1	0.30	0.83 **	0.26	-0.78 **	0.91 **	0.72 **
株高 Plant height			1	-0.47 *	0.32	0.36	-0.13	-0.02
抗倒伏系数 Lodging resistance coefficient				1	0.64 **	0.42 **	0.68 **	0.72 **
弯曲挠度 Bending deflection					1	-0.13	0.26	0.63 **
弹性模量 Modulus of elasticity						1	-0.72 **	-0.36
木质素 Lignin content							1	0.62 **
纤维素 Fibrin content								1

注: ** 在 0.01 水平相关性显著; * 在 0.05 水平相关性显著。
Note: ** indicates the correlation was significant at 0.01 level; * indicates the correlation was significant at 0.05 level.

3 讨论

3.1 大豆植株形态变化对倒伏性的影响

植株形态特征直接影响植株受力情况,进而影响植株倒伏性。植株形态特征和植株茎秆的机械强度、抗折力、组成成分、内部组织结构、组成成分等因素共同影响倒伏系数。已有研究结果表明茎秆强度与主茎直径呈正相关关系,与株高和节间长度呈负相关关系^[6]。Shi 等^[11]和 Robertson 等^[12]证明茎秆弹性模量与株高惯性矩呈负相关关系,从而可适当减低株高来增强茎秆抗倒伏能力。另外,Shi 等^[11]、钟开珍等^[23]通过试验得出重心高度与大豆抗倒伏系数呈负相关。本研究密度试验中,两种密度下折断力和株高间无显著相关关系,但是株高和抗倒伏系数间呈负相关关系,说明株高不宜过高,以免抗倒伏系数降低产生倒伏,影响产量,栽培上应该选用合适株高品种来增强茎秆抗倒伏能力。大田试验中,随着折断力的增加,株高整体变化没有规律,折断力与株高之间也没有明显规律,未得到与前人随着株高上升,折断力下降一样的结论,原因可能是因为大田环境条件复杂,影响植株生长,进而影响折断力大小。

直径是衡量植株茎秆抗倒伏性的一个重要指标。Tian 等^[7]通过对谷子的地方品种和改良品种的抗倒伏性研究分析,表明谷子植株基部的直径和茎秆单位长度的干重与倒伏呈现显著负相关。周蓉等^[24]与 Chen 等^[25]通过对大豆根系的倒伏相关性状的 QTL 和茎秆检测,表明株高和根重与茎秆强度呈极显著正相关。本研究密度试验结果表明折断力和直径密切相关,随着折断力的降低,植株直径呈下降趋势。而折断力与倒伏之间呈现正相关

关系,即折断力越大,抗倒伏性越好。故植株直径与抗倒伏性呈正相关关系,即直径越大抗倒伏性越好。大田试验中,根据折断力筛选的前 10% 和后 10% 大豆品种直径数据中,随着折断力增加,直径也随之增加,与前人试验结果基本一致。表明植株的较大基部直径有利于抗倒伏性提高。

3.2 大豆茎秆生化指标变化对倒伏性的影响

作物茎秆的细胞壁包括木质素、纤维素等多糖成分。诸多学者对倒伏与茎秆化学成分的相关性进行分析,表明木质素和纤维素是影响茎秆强度的决定性因素^[19-20]。Shah 等^[26]综述了不同作物品种茎秆强度分析方法,明确茎秆最大弯曲力是区别农作物茎秆脆性的重要指标。农作物脆性茎秆的最大弯曲力仅为非脆性茎秆的一半左右,导致此差异的主要原因是茎秆薄壁组织细胞的厚度、茎秆薄壁组织细胞的厚度与最大弯曲力显著相关,纤维素含量与最大弯曲力显著相关。不同栽培措施对农作物茎秆成分影响明显。Peng 等^[27]通过喷施赤霉素和多效唑,通过调节木质素含量改变植株倒伏性,说明茎秆强度受木质素含量直接影响。Zhang 等^[28]通过施用不同水平氮肥影响水稻倒伏性,结果表明过量施用氮肥会导致木质素合成下降,致使茎秆机械强度降低。本研究密度试验中,不同品种的纤维素、木质素含量差异明显。纤维素、木质素与抗倒伏系数之间极显著正相关,说明随着茎秆中木质素、纤维素含量的增加,植株抗倒伏性增强,与前人研究结果一致。本研究相较于前人研究从力学角度分析抗倒伏资源鉴定,结合茎秆形态特征和生化性状,使试验筛选结果更符合现实规律。表明抗倒伏特性影响因素较多,应从多方面考虑分析。

3.3 大豆茎秆力学特性变化对倒伏性的影响

植株是否倒伏的决定性因素取决于茎秆的力学特性,即力学特性决定了农作物是否发生倒伏^[14, 20]。何晓莉等^[29]认为弹性模量、折断力与倒伏呈负相关,即弹性模量、折断力的增大会抑制倒伏。吴晓强等^[8]也认为弹性模量越大,抗倒伏性越强。Gomez 等^[30]分析倒伏与力学特性的关系表明高粱抗折断力越大,倒伏现象越难发生。上述研究结果说明植株倒伏性和植株的力学特性密切相关。植株倒伏与否还和植株茎秆的弹性关系密切。植株弯曲特性作为重要的抗倒伏的力学指标被学者们广泛研究^[31-34]。以禾本科作物叶鞘作为研究对象的结果证实叶鞘可以支撑茎秆,提高茎秆的弯曲刚性^[27-28]。小麦研究结果表明抗倒伏性与茎秆弯曲强度和弹性模量相关性最大,茎秆弯曲强度和弹性模量越大,倒伏程度越小^[27],茎秆弯曲强度和抗弯刚度与倒伏级别呈负相关^[28]。Tian 等^[7]通过对谷子倒伏系数的研究,发现倒伏系数茎秆的机械强度与倒伏系数密切相关。而本研究密度试验结果也表明大豆抗倒伏能力与茎秆折断力、弹性模量呈极显著正相关,与前人的结果一致,说明随着茎秆折断力和弹性模量的增加,植株抗倒伏性增强,在分析植株抗倒伏性时应该结合折断力和茎秆弹性模量才能得到最佳结果。

4 结论

年份与折断力互作、品种与折断力互作显著。随主茎折断力的降低,直径呈现下降趋势,直径与折断力呈正向相关,而直径和株高无明显规律。大豆抗倒伏系数随着株高增加而降低,与株高呈显著负相关。大豆抗倒伏系数随着茎粗的增加而增加,与直径呈极显著正相关,相关系数为 0.83。低密度种植条件下(20 万株·hm⁻²)的大豆品种抗倒伏系数大于高密度种植条件下(30 万株·hm⁻²)的抗倒伏系数。大豆抗倒伏系数随着折断力、弹性模量增加而升高,与折断力和弹性模量分别呈极显著正相关,相关系数分别为 0.90 和 0.42。可以利用主茎基部折断力和弹性模量对大豆品种抗倒伏性强弱进行区分。

参考文献

[1] 袁新捷,刘潇,陈国兴. 水稻核心种质资源茎秆抗倒伏性研究[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(1): 147-153. (YUAN X J, LIU X, CHEN G X. Stem lodging resistance of rice core germplasm[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(1): 147-153.)

[2] 赵新勇,邵在胜,吴艳珍,等. 花后人为模拟倒伏对超级稻生长、产量和品质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(7): 980-989. (ZHAO X Y, SHAO Z S, WU Y Z, et al. Influence of artificial lodging at grain-filling stage on plant growth, yield and quality of super rice[J]. Chinese Journal of eco-agricultural, 2018, 26(7): 980-989.)

[3] CHEN L, YI Y, WANG W, et al. Innovative furrow ridging fertilization under a mechanical direct seeding system improves the grain yield and lodging resistance of early indica rice in South China[J]. Field Crops Research, 2021, 270: 108184.

[4] 刘卫国,邓榆川,方萍,等. 套作大豆苗期抗倒伏性评价方法研究[J]. 分子植物育种, 2016, 14(3): 773-779. (LIU W G, DENG Y C, FANG P, et al. Study on evaluation method for lodging resistance of the intercropping soybean at seedling stage[J]. Molecular Plant Breeding, 2016, 14(3): 773-779.)

[5] 周蓉,王贤智,张晓娟,等. 大豆种质倒伏抗性评价方法研究[J]. 大豆科学, 2007, 26(4): 484-489. (ZHOU R, WANG X Z, ZHANG X J, et al. Evaluation method of lodging resistance in soybean germplasm[J]. Soybean Science, 2007, 26(4): 484-489.)

[6] ZHOU F, HUANG J L, LIU W Y, et al. Multiscale simulation of elastic modulus of rice stem[J]. Biosystems Engineering, 2019, 187: 96-113.

[7] TIAN B, WANG J, ZHANG L, et al. Assessment of resistance to lodging of landrace and improved cultivars in *foxtail millet*[J]. Euphytica, 2010, 172(3): 295-302.

[8] 吴晓强,何晓莉,吕桦,等. 大豆茎秆压缩力学特性随株高的变化规律[J]. 安徽农业科学, 2011(2): 103-107, 121. (WU X Q, HE X L, LYU H, et al. Compressive mechanical property of soybean stem with the variation of its plant height[J]. Journal of Anhui Agriculture Science, 2011, 39(2): 721-725, 739.)

[9] XUE J, ZHAO Y, GOU L, et al. How high plant density of maize affects basal internode development and strength formation[J]. Crop Science, 2016, 56(6): 3295.

[10] 杨锦,杨欢,涂娅欣,等. 套作大豆共生后期弯曲力学特性的研究[J]. 上海农业学报, 2018, 34(1): 25-29. (YANG J, YANG H, TU Y X, et al. Study on the bending mechanical properties of intercropped soybean in the late stage of symbiosis[J]. Acta Agricultural Shanghai, 2018, 34(1): 25-29.)

[11] SHI Z, ZHENG Q, SUN X, et al. Assessment of differences in morphological and physiological leaf lodging characteristics between two cultivars of *Hippeastrum rutilum*[J]. BMC Plant Biology, 2020, 20(1): 565.

[12] ROBERTSON D J, LEE S Y, JULIAS M, et al. Maize stalk lodging: Flexural stiffness predicts strength[J]. Crop Science, 2016, 56(4): 1711-1718.

[13] 闫以勋,赵淑红,杨悦乾,等. 成熟期大豆茎秆力学特性研究[J]. 东北农业大学学报, 2012, 43(5): 46-49. (YANG Y Q, ZHAO S H, YANG Y Q, et al. Study on mechanics properties of soybean stems in mature stage[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2012, 43(5): 46-49.)

[14] 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.)

[15] 屈晓坤,陈海涛,邱丽娟,等. 基于综合评价法的大豆抗倒伏性研究[J]. 大豆科学, 2012, 31(6): 899-902, 906. (QU X S, CHEN H T, QIU L J, et al. Lodging resistance of soybean based on comprehensive evaluation method[J]. Soybean Science, 2012, 31(6): 899-902, 906.)

[16] 陈喜凤,孙宁,谷岩,等. 不同群体结构下大豆植株抗倒伏性能的比较[J]. 华南农业大学学报, 2015(1): 33-41. (CHEN X F, SUN N, GU Y, et al. Comparison on lodging-resistance characters of soybean in different population structures [J]. Journal of South China Agricultural University, 2015 (1): 33-41.)

[17] 刘卫国,邓榆川,方萍,等. 套作大豆苗期抗倒伏性评价方法研究[J]. 分子植物育种, 2016, 14(3): 773-779. (LIU W G, DENG Y C, FANG P, et al. Study on evaluation method for lodging resistance of the intercropping soybean at seedling stage [J]. Molecular Plant Breeding, 2016, 14(3): 773-779.)

[18] 杨锦,杨欢,涂娅欣,等. 套作大豆共生后期弯曲力学特性的研究[J]. 上海农业学报, 2018, 34(1): 25-29. (YANG J, YANG H, TU Y X, et al. Study on the bending mechanical properties of intercropped of soybean in the late stage of symbiosis [J]. Journal of Shanghai Agriculture, 2018, 34(1): 25-29.)

[19] FOSTER C E, MARTIN T M, PAULY M. Comprehensive compositional analysis of plant cell walls (lignocellulosic biomass) part I: lignin [J]. Journal of Visualized Experiments, 2010, 37: 1745.

[20] FOSTER C E, MARTIN T M, PAULY M. Comprehensive compositional analysis of plant cell walls (lignocellulosic biomass) part II: carbohydrates [J]. Journal of Visualized Experiments, 2010,37: 1837.

[21] 梁莉,郭玉明. 作物茎秆生物力学性质与形态特性相关性研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 1-6. (LIANG L, GUO Y M. Correlation study of biomechanical properties and morphological characteristics of crop stalks[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(7): 1-6.)

[22] GALENDAR N M, JAFARI A, MOHTASEBI S S, et al. Effects of moisture content and level in the crop on the engineering properties of alfalfa stems [J]. Biosystems Engineering, 2008, 101: 199-208.

[23] 钟开珍,梁江,韦清源,等. 大豆种质倒伏性遗传及其与主要农艺性状的相关分析[J]. 大豆科学, 2012, 31(5): 703-706. (ZHONG K Z, LIANG J, WEI Q Y, et al. Heredity of lodging and its correlation with agronomic traits in soybean germplasm[J]. Soybean Science, 2012, 31(5): 703-706.)

[24] 周蓉,涂赣英,沙爱华,等. 大豆种质的倒伏性调查及其相关农艺性状分析[J]. 大豆科学, 2007, 26(1): 41-44. (ZHOU R, TU G Y, SHA A H, et al. Analysis of lodging and some related agronomic traits characters in soybean germplasm [J]. Soybean Science, 2007, 26(1): 41-44.)

[25] CHEN H, YANG Z, CHEN L, et al. Combining QTL and candidate gene analysis with phenotypic model to unravel the relationship between lodging and related traits in soybean [J]. Molecular Breeding, 2017, 37(4): 43.

[26] SHAH D U, REYNOLDS T P S, RAMAGE M H. The strength of plants: Theory and experimental methods to measure the mechanical properties of stems [J]. Journal of Experimental Botany, 2017, 68(16): 4497-4516.

[27] PENG D, CHEN X, YIN Y, et al. Lodging resistance of winter wheat (*Triticum aestivum* L.): Lignin accumulation and its related enzymes activities due to the application of paclobutrazol or gibberellin acid[J]. Field Crops Research, 2014, 157: 1-7.

[28] ZHANG W, WU L, DING Y, et al. Nitrogen fertilizer application affects lodging resistance by altering secondary cell wall synthesis in japonica rice (*Oryza sativa*) [J]. Journal of Plant Research, 2017, 130(5): 859-871.

[29] 何晓莉,吴晓强,张立峰,等. 大豆茎秆压缩力学特性的研究[J]. 农机化研究, 2010, 32(11): 164-169. (HE X L, WU X Q, ZHANG L F, et al. Research of mechanics characteristics for soybean stalks compression [J]. Agriculturally Mechanized Research, 2010, 32(11): 164-169.)

[30] GOMEZ F E, MULIANA A H, NIKLAS K J, et al. Identifying morphological and mechanical traits associated with stem lodging in bioenergy sorghum (*Sorghum bicolor*) [J]. BioEnergy Research, 2017, 10: 635-647.

[31] WU W, MA B L. The mechanical roles of the clasping leaf sheath in cereals: Two case studies from oat and wheat plants [J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2020, 206(1): 118-129.

[32] CORNWALL J, STUBBS C J, MCMAHAN C S, et al. Theoverlooked biomechanical role of the clasping leaf sheath in wheat stalk lodging [J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 617880.

[33] XIANG D B, SONG Y, WU Q, et al. Relationship between stem characteristics and lodging resistance of Tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum*) [J]. Plant Production Science, 2019, 22(2): 202-210.

[34] NILSEN K T, CLARKE J M, BERES B L, et al. Sowing density and cultivar effects on pith expression in solid-stemmed durum wheat[J]. Agronomy Journal, 2016, 108(1): 219-228.