



东北大豆 RIL 群体不同生育时期倒伏的农艺性状多因子分析

孟凡凡,张云峰,孙星邈,王明亮,蒋洪蔚,郑宇宏,范旭红,王曙明

(吉林省农业科学院 大豆研究所/大豆国家工程研究中心,吉林 长春 130033)

摘要:茎秆强度、株高、主茎节数、节间长度、茎叶重、根重等是评价大豆倒伏的重要相关农艺性状,为综合分析这些性状,以便揭示大豆倒伏的遗传机理,本研究以地理远缘重组自交系(RIL)群体为试材,在发生倒伏的3个主要时期,调查倒伏相关农艺性状和家系倒伏情况,分析不同生育时期主要农艺性状与田间实际倒伏的关系。结果表明:RIL群体在R4期开始发生倒伏,不同发育时期各主要农艺性状与家系倒伏情况相关性不同,R4期至R8期影响倒伏的主要农艺性状经历了由茎重向株高、节间长度和茎秆强度等性状的演变。本研究使用多个农艺性状设计了8个大豆倒伏评价指数综合分析RIL群体田间倒伏情况,各倒伏指数在各生育时期均与家系倒伏情况呈极显著正相关,且相关性均高于其它单一性状与实际倒伏情况的相关性。其中,倒伏指数[(节间长度×茎重)/茎秆强度]与实际倒伏情况相关性最高,且仅用最少农艺性状代替直观观察到的倒伏情况,可作为倒伏研究的一个复合评价指标用于对RIL群体进行抗倒伏QTL定位,为将来大豆抗倒伏优异等位基因的挖掘提供技术手段。

关键词:大豆;倒伏;农艺性状;生育时期;多因子分析

Agronomic Trait Multi-factor Analysis of Lodging at Different Growth Periods in a Soybean RIL Population from the Northeast of China

MENG Fan-fan, ZHANG Yun-feng, SUN Xing-miao, WANG Ming-ling, JIANG Hong-wei, ZHENG Yu-hong, FAN Xu-hong, WANG Shu-ming

(Soybean Research Institute, Jilin Academy of Agricultural Sciences/National Engineering Research Center for Soybean, Changchun 130033, China)

Abstract: Stem strength, plant height, node number of main stem, internode length, shoot weight, and root weight are important agronomic traits relevant to soybean lodging. In order to comprehensively analysis these traits and reveal the lodging mechanism of soybean, this research used the geographic distant recombinant inbred lines population(RIL) to investigate the agronomic traits related to lodging and the lodging at the three main periods when lodging occurred. The relationship between main agronomic traits and the actual lodging at different development stages were analyzed. The results showed that the RIL population at R4 period began to lodging. The correlation at different development periods between each main agronomic trait and lodging situation of the family lines were different. The main agronomic traits affecting the lodging from R4 period to R8 period experienced an evolution from stem weight to plant height, internode length and stem strength. In this study, we designed eight lodging evaluation indexes using multiple agronomic characters to analyze comprehensively RIL field lodging situation. The lodging indexes at each growth period were extremely significantly positive relative with lodging situation of the family lines and the correlations were higher than that of any other single character. A lodging index [(inter-node length × stem weight)/stem strength] showed the highest correlation with actual lodging situation. It can replace the directly observation of the lodging situation with less agronomic traits and in the same time using a composite index in lodging resistance QTL mapping based on RIL population in order to provide a technological approach in the future to mine excellent alleles related to lodging resistance in soybean.

Keywords: Soybean; Lodging; Agronomic traits; Growth stage; Multi-factor analysis

倒伏是普遍存于大豆生产中的严重问题,一直限制着大豆的高产、稳产和优质。大豆倒伏是一个综合、复杂的现象,受气候、生态、栽培和遗传等因

素的共同制约,生产上难于防控。通过遗传改良选育抗倒伏品种是目前最为经济有效的方法。目前国内对大豆倒伏的鉴定和评价主要采用田间直

收稿日期:2020-03-03

基金项目:吉林省农业科技创新工程自由创新项目(CXGC2018JC006);现代农业产业技术体系建设专项(CARS-04-PS11)。

第一作者简介:孟凡凡(1983-),女,硕士,副研究员,主要从事大豆遗传育种研究。E-mail:mengfanfan0720@163.com。

通讯作者:王曙明(1963-),男,博士,研究员,主要从事大豆遗传育种研究。E-mail:shumingw@263.net。

观评价方法,依据茎秆的倾斜程度划分倒伏级别(1~5级法)^[1]。大豆倒伏进程中相关农艺性状多^[2],是相关基因在特定遗传背景和环境条件下协调有序表达的结果^[3],是连续动态的变化过程^[4],在一个时期下研究或是仅以直观倒伏情况和单一相关性状研究大豆倒伏情况均无法较好的阐释倒伏发生的机理和遗传作用。

许多研究试图找到与倒伏相关的形态指标作为对抗倒性进行深入的科学评价。在大豆倒伏研究中,已有研究表明株高^[2-3,5]、主茎节数^[2-3,5-6]、分枝数^[2-3,5-6]、茎粗^[5,7]、茎叶重^[7]、根重^[7]和节间长度^[8]等都与倒伏相关。在作物倒伏研究中一些力学测定指标如茎秆强度^[3,9]、弯曲强度^[10-11]、茎秆挫折力^[12-13]、弹性模量^[14]等也常用于抗倒性鉴定。由于单项指标涉及因素少,局限性较大,也有研究者^[15]采用2~3个性状数据形成1个指标来反映大豆的倒伏情况,从中遴选出鲜重力矩(株高×鲜重)与倒伏程度的相关系数高、环境稳定性高,可考虑用于大豆茎倒伏的综合评价。但因不同研究者选用的材料不同,每个研究者观察到的形态指标与倒伏的显著相关程度也不同,对于这些性状参数与实际倒伏之间关系的密切程度也没有一个确切的结论,因此尚没有利用单个指标对大豆进行大规模抗倒性鉴定和评价的例子。

多指标倒伏综合评价中具代表性和实用性的方法是建立倒伏系数^[16],根据作物倒伏力学原理,崛内久满^[17]提出用倒伏指数来评价水稻品种的抗倒伏能力。用公式表述,根倒伏系数=(株高×地上部重量)/(根重×茎秆机械强度),茎倒伏系数=(株高×茎秆重量)/抗折力矩。这一设计将与倒伏程度呈正相关的性状作为分子,将与倒伏程度呈负相关的性状作为分母,综合考虑了与倒伏相关的多个性状。周蓉等^[5]在参考了水稻倒伏研究^[18]的基础上,验证了根重、茎秆强度、株高、茎重、分枝数等性状与所用自然群体的倒伏呈显著相关,并设计了4种抗倒指数以求建立大豆倒伏抗性评价方法,总结出结荚期的多因子抗倒指数=(根重×茎秆强度)/(株高×茎重×分枝数)/100,与实际倒伏程度的相关性最为密切($r = -0.680^{**}$)。在4种抗倒指数设计中着重考虑了分枝数的作用,而没有考虑主茎节数的作用。但在实际生产中,许多作物的节间长度,即株高与主茎节数的比值,也与作物的抗倒性有显著的相关关系,在水稻^[19]、小麦^[20]、玉

米^[21-22]和大豆^[23]研究中均有报道。

本研究以地理远缘重组自交系群体为试材,分析不同生育时期主要农艺性状与田间实际倒伏的关系,重新考虑节间长度、分枝数和根重对倒伏的影响,设计出适宜东北大豆研究的多因子倒伏指数。一方面明确主要农艺性状对东北大豆倒伏的影响在各生育时期的变化过程,为培育抗倒伏品种积累筛选经验;另一方面也为进一步深入开展大豆抗倒伏QTL定位和优异等位基因挖掘等研究提供技术手段。

1 材料与方法

1.1 材料

RIL群体的母本为美国大豆高产品种Skalla,棕毛,种皮黄色,子叶黄色,黑脐,抗倒性强;父本为吉林地方品种吉林棕毛黑豆(编号GD0518),棕毛,种皮黑色,子叶绿色,抗倒性弱。2014年RIL群体为F_{5,8}代(171个家系),2017年RIL群体为F_{5,11}代(171个家系)。供试群体及亲本共173份材料。

1.2 试验设计

试验在吉林省农科院公主岭试验基地进行,采用随机区组设计,4次重复,4行区,行长4.5m,行距0.65m,栽培管理同一般试验田。2014年在盛荚期(R4)和盛粒期(R6),2017年在盛荚期(R4)、盛粒期(R6)和完熟期(R8),于各小区选取中间行连续5株进行性状调查。评价家系整体倒伏级别、家系中单株级别、主要倒伏相关农艺性状,并进行相关性分析。进行多因子倒伏评价,筛选可用于抗倒伏研究的复合评价指标。

1.3 方法

1.3.1 倒伏田间直观评价 家系整体倒伏评价:1级,不倒伏(小区植株直立无倒伏);2级,轻倒(0<倒伏植株比率≤25%);3级,中倒(25%<倒伏植株比率≤50%);4级,重倒(50%<倒伏植株比率≤75%);5级,严重倒伏(倒伏植株比率>75%)^[24]。

家系中单株的倒伏评价:1级,植株直立无倒伏;2级,植株与地面垂直方向倾斜≤15°;3级,植株与地面垂直方向倾斜15~45°;4级,植株与地面垂直方向倾斜45~85°;5级,植株与地面垂直方向倾斜>85°^[1]。

1.3.2 主要倒伏相关农艺性状评价和测定 在各时期分别测定株高、分枝数、主茎节数和节间长度(株高/主茎节数),以子叶节为界将植株分解为地上部和地下部。

茎秆强度测定:采用日本产秆强测定器(DIK-7401)测定,在茎秆距地面 20 cm 处用力缓慢推动茎秆,使茎秆倾斜并与地面呈 30°角,记录此时测定器上显示的测定值。茎秆强度 = (测定值/40) × 1 000。

根重:地下部根系称鲜重。

茎叶重:地上部植株称鲜重。

1.3.3 多因子倒伏指数计算 参考周蓉等^[5,17]方法和前期研究基础^[4],设计以下 8 种类型的倒伏指数:Q1 = (株高 × 茎叶重 × 分枝数)/(根重 × 茎秆强度);Q2 = (节间长度 × 茎叶重 × 分枝数)/(根重 × 茎秆强度);Q3 = (株高 × 节间长度 × 茎叶重 × 分枝数)/(根重 × 茎秆强度);Q4 = (株高 × 节间长度 × 茎叶重)/(根重 × 茎秆强度);Q5 = (株高 × 节间长度 × 分枝数 × 茎叶重 × 根重)/茎秆强度;Q6 = (株高 × 节间长度 × 茎叶重 × 根重)/茎秆强度;Q7 = (节间长度 × 茎叶重)/茎秆强度;Q8 = (株高 ×

节间长度 × 茎叶重)/茎秆强度。

1.4 数据分析

数据采用 Excel 2007 分析,使用 DPS 9.01 软件对试验测定的各种农艺性状数据和各类倒伏指数进行方差分析并与田间倒伏直观评价数据进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 RIL 群体各时期倒伏性表现

2014 和 2017 年分别对 RIL 群体 F_{5:8} 代家系 R4 和 R6 期及该群体 F_{5:11} 代家系 R4、R6 和 R8 期倒伏性进行初步田间直观分级评价,结果表明:随生长发育,群体各家系倒伏情况发生变化,变化较为明显的时期为 R4、R6 和 R8,家系间变化程度有明显差异。RIL 群体倒伏从 R4 期开始发生,最严重的时期为 R6 期(表 1)。

表 1 两年大豆 RIL 群体各时期倒伏级别
Table 1 The lodging level of soybean RIL population in different periods in the two years

性状 Trait	年份 Year	生育时期 Growth stage	均值 Mean ± SD	极差 Range	中位数 Median	变异系数 Variable coefficient	最大值 Max.	最小值 Min.
单株倒伏平均值 Mean value of lodging per plant	2014	R4	2.58 ± 0.70	2.83	2.67	0.2728	3.83	1.00
		R6	2.69 ± 0.58	3.00	2.67	0.2175	4.33	1.33
	2017	R4	2.86 ± 0.47	2.56	2.89	0.1645	4.00	1.44
		R6	3.34 ± 0.56	3.22	3.33	0.1679	4.78	1.56
整体倒伏 The overall lodging	2014	R8	3.07 ± 0.72	3.67	3.00	0.2348	5.00	1.33
		R4	2.60 ± 0.71	3.00	2.67	0.2752	4.00	1.00
		R6	2.68 ± 0.60	3.00	2.67	0.2223	4.33	1.33
		R8	3.42 ± 0.70	3.67	3.33	0.2035	5.00	1.33
	2017	R4	2.98 ± 0.54	2.67	3.00	0.1799	4.00	1.33
		R6	3.32 ± 0.60	3.67	3.33	0.1796	5.00	1.33

2.2 RIL 群体各时期倒伏相关农艺性状表现

2014 和 2017 年对 R4 和 R6 期株高、主茎节数、分枝数、节间长度(株高/主茎节数)、茎叶重、根重和茎秆强度等农艺性状的调查结果表明:各倒伏性状在群体各家系间存在明显差异,在不同发育时期,各倒伏性状变化也不相同。R4、R6 和 R8 期群体的株高、主茎节数、分枝数、节间长度(株高/主茎节数)均值和中位数差异不大,但各时期极值和变异系数不尽相同;R6 期群体各家系 2 年茎秆强度的

均值、极差、中位数和变异系数有所下降,低于 R4 和 R8 期;茎叶重在 R6 期最重,R8 期显著降低;R6 期群体各家系两年根重的均值和极差下降,低于 R4 和 R8 期,各时期的中位数和变异系数变化不大(表 2)。可见 RIL 群体各家系在各个时期的倒伏是复杂变化的,单一主要农艺性状与倒伏相关,但各时期变化也不尽相同,无法用单一农艺性状直接反应家系和群体的倒伏情况。

表 2 两年大豆 RIL 群体各时期主要倒伏相关农艺性状

Table 2 The lodging related traits of soybean RIL population of different periods in the two years

性状 Trait	年份 Year	生育时期 Growth stage	均值 Mean ± SD	极差 Range	中位数 Median	变异系数 Variable coefficient	最大值 Max.	最小值 Min.
株高 Plant height/cm	2014	R4	103.56 ± 12.61	55.72	104.00	0.1217	131.83	76.11
		R6	104.32 ± 13.43	67.22	101.50	0.1287	145.44	78.22
	2017	R4	124.12 ± 19.03	98.50	119.50	0.1533	182.17	83.67
		R6	121.16 ± 19.13	102.67	119.22	0.1579	188.67	86.00
		R8	122.79 ± 17.68	82.78	120.61	0.1440	165.56	82.78
主茎节数 Node number of main stem	2014	R4	21.93 ± 1.43	6.44	21.67	0.0652	25.33	18.89
		R6	22.35 ± 2.18	10.44	21.89	0.0977	28.00	17.56
	2017	R4	22.04 ± 1.94	11.11	22.00	0.0878	28.22	17.11
		R6	21.79 ± 2.10	10.33	21.78	0.0966	26.67	16.33
节间长度 Internode length/cm	2014	R4	4.72 ± 0.48	2.01	4.65	0.1021	5.95	3.94
		R6	4.67 ± 0.42	2.62	4.63	0.0907	6.08	3.45
	2017	R4	5.65 ± 0.65	3.74	5.54	0.1146	8.35	4.61
		R6	5.58 ± 0.67	3.99	5.53	0.1197	8.21	4.22
		R8	5.40 ± 0.57	4.35	5.40	0.1058	7.20	2.85
分枝数 Branch number	2014	R4	3.09 ± 0.95	4.00	3.06	0.3059	5.33	1.33
		R6	3.28 ± 0.81	4.33	3.33	0.2456	5.67	1.33
	2017	R4	5.64 ± 2.14	9.89	5.44	0.3787	11.56	1.67
		R6	3.66 ± 1.07	6.00	3.67	0.2934	6.67	0.67
		R8	3.17 ± 1.28	10.56	3.00	0.4039	11.33	0.78
茎秆强度 Stem intension/g	2014	R4	459.09 ± 100.87	397.22	445.83	0.2197	663.89	266.67
		R6	280.56 ± 59.33	402.78	283.33	0.2115	519.44	116.67
	2017	R4	515.77 ± 86.86	494.72	514.03	0.1684	779.72	285.00
		R6	429.20 ± 68.22	312.50	427.78	0.1590	595.00	282.50
		R8	627.86 ± 131.91	643.33	632.36	0.2101	947.22	303.89
茎叶重 Shoot weight/g	2014	R4	244.97 ± 54.67	243.71	232.72	0.2232	383.74	140.03
		R6	236.58 ± 56.28	284.93	224.68	0.2379	433.07	148.13
	2017	R4	238.3 ± 47.92	247.88	234.41	0.2011	356.22	108.34
		R6	237.75 ± 43.49	227.11	236.73	0.1829	362.00	134.89
根重 Root weight/g	2014	R4	131.89 ± 32.29	156.82	126.69	0.2449	228.63	71.81
		R6	12.17 ± 3.23	23.32	11.56	0.2652	31.69	8.37
	2017	R6	11.15 ± 2.94	13.62	10.52	0.2640	20.12	6.50
		R4	15.91 ± 3.60	17.68	15.46	0.2265	25.57	7.89
		R6	15.3 ± 2.96	14.02	15.19	0.1932	23.73	9.72
		R8	16.52 ± 3.29	20.26	16.56	0.1990	29.49	9.23

2.3 主要农艺性状对大豆不同生长时期倒伏的影响

2.3.1 主要农艺性状对大豆 R4 期倒伏的影响

对家系各时期主要农艺性状与整体倒伏情况进行的相关性分析结果显示:各时期各性状与实际倒伏的相关性不同。R4 是 RIL 群体开始发生倒伏的时

期。2014 年 R4 期,仅茎叶重与直观观察的整体倒伏情况呈极显著正相关,其它单一性状与实际倒伏情况均无显著或极显著相关性。2017 年 R4 期,除株高外,仅茎叶重与直观观察的整体倒伏情况呈极显著正相关,与 2014 年结果基本吻合(表 3)。表明在 R4 期,茎叶重是影响大豆倒伏的最重要因素。

表 3 两年 R4 期主要农艺性状与整体倒伏级别的相关性

Table 3 Correlation between major agronomic characters and the overall lodging score at R4 stage in the two years

性状 Trait	年份 Year	
	2014	2017
株高 Plant height	0. 20	0. 24 * *
主茎节数 Node number of main stem	0. 19	0. 13
节间长度 Intemode length	0. 12	0. 18
分枝 Branch number	0. 12	0. 09
茎秆强度 Stem intension	-0. 03	-0. 05
茎叶重 Shoot weight	0. 32 * *	0. 28 * *
根重 Root weight	0. 22	0. 05
单株倒伏平均值		
Mean value of lodging per plant	0. 95 * *	0. 86 * *

* 和 * * 分别表示在 0. 05 和 0. 01 水平存在显著和极显著相关性。下同。

* and * * indicate significant and extremely significant relation at the 0. 05 and 0. 01 probability levels, respectively. The same below.

2. 3. 2 主要农艺性状对大豆 R6 期倒伏的影响

R6 期是大豆倒伏发生最严重的时期。2014 年 R6 期大豆株高、节间长度与直观观察的倒伏情况呈极显著正相关,茎秆强度与直观观察的倒伏情况呈极显著负相关;主茎节数、分枝数、茎叶重和根重与倒伏无显著相关关系。2017 年 R6 期大豆株高、主茎节数和节间长度均与直观观察的倒伏情况呈极显著正相关,分枝数与直观观察的倒伏情况呈显著正

相关,茎秆强度与直观观察的倒伏情况呈极显著负相关;茎叶重和根重与倒伏相关性不显著(表 4)。

表 4 两年 R6 期主要农艺性状与整体倒伏级别的相关性

Table 4 Correlation between major agronomic characters and the overall lodging score at R6 stage in the two years

性状 Trait	年份 Year	
	2014	2017
株高 Plant height	0. 25 * *	0. 35 * *
主茎节数 Node number of main stem	0. 10	0. 28 * *
节间长度 Intemode length	0. 24 * *	0. 22 * *
分枝数 Branch Number	0. 12	0. 16 *
茎秆强度 Stem intension	-0. 29 * *	-0. 68 * *
茎叶重 Shoot weight	0. 14	-0. 02
根重 Root weight	-0. 07	0. 03
单株倒伏平均值		
Mean value of lodging per plant	0. 98 * *	0. 88 * *

2. 3. 3 主要农艺性状对大豆 R8 期倒伏的影响

R8 期是大豆完熟期,植株落叶,个别早熟家系倒伏情况有所减轻。2017 年家系生育期、株高、主茎节数、节间长度、茎叶重和单株荚数均与单株倒伏平均值和直观观察到的实际倒伏情况呈显著或极显著正相关。茎秆强度与倒伏成极显著负相关,且相关系数高于 R6 期。根重、单株粒数、单株粒重和百粒重与倒伏无显著相关性(表 5)。

表 5 两年 R8 期主要农艺性状与整体倒伏级别的相关性

Table 5 Correlation between major agronomic characters and the overall lodging score at R8 stage in the two years

性状 Trait	倒伏数据 Lodging data	
	单株倒伏平均值 Mean value of lodging score per plant	整体倒伏 The overall lodging score
生育期 Duration of growth period	0. 47 * *	0. 27 * *
株高 Plant height	0. 44 * *	0. 28 * *
主茎节数 Node number of main stem	0. 28 * *	0. 18 *
节间长度 Intemode length	0. 34 * *	0. 21 * *
分枝数 Branch Number	0. 38 * *	0. 33 * *
茎秆强度 Stem intension	-0. 87 * *	-0. 76 * *
茎叶重 Shoot weight	0. 40 * *	0. 35 * *
根重 Root weight	0. 05	0. 02
单株荚数 Pod number per plant	0. 18 *	0. 19 *
单株粒数 Seed number per plant	0. 07	-0. 01
单株粒重 Seed weight per plant	-0. 18 *	-0. 14
百粒重 100-seed weight	-0. 18 *	-0. 04

可见生育期、株高、主茎节数、节间长度、茎秆强度和茎叶重等主要农艺性状是影响 R8 期倒伏发生的主因,籽粒性状与倒伏关系不大。其中茎秆强度与 R8 倒伏关系密切,但根重对 R8 期大豆倒伏无显著影响。

2.4 多因子倒伏评价

因前期无法确定根重与田间实际倒伏的相关关系,本研究设计了 8 个倒伏指数,分别将根重作为倒伏指数的分子或分母。结果表明,株高、节间长度、茎叶重和茎秆强度对倒伏影响较大;在 RIL 群体各生育时期根重与倒伏均无显著相关关系;且分枝数虽在 R6 和 R8 期与实际倒伏相关显著,但相关系数不高,作为倒伏指数参数时影响对实际倒伏的判断。

8 个倒伏指数中,使用最少性状参数的倒伏指数 $Q7 = (\text{节间长度} \times \text{茎叶重}) / \text{茎秆强度}$ 在各生育时期与实际倒伏相关性均最高(表 6),R4 期相关系数两年均值为 0.43,R6 期相关系数两年均值为 0.56,2017 年 R8 期相关系数为 0.62。该指数可以以最少农艺性状做参数,较好地代表家系的实际倒伏情况。

表 6 各时期各倒伏指数与整体倒伏级别的相关系数
Table 6 Correlation coefficients between each lodging index and the overall lodging score at each period

倒伏指数 Lodging index	R4		R6		R8
	2014	2017	2014	2017	2017
Q1	0.30 *	0.32 **	0.44 **	0.48 **	0.52 **
Q2	0.28 *	0.26 **	0.39 **	0.46 **	0.52 **
Q3	0.32 **	0.20 **	0.49 **	0.50 **	0.51 **
Q4	0.31 *	0.34 **	0.56 **	0.57 **	0.61 **
Q5	0.34 **	0.31 **	0.30 **	0.37 **	0.50 **
Q6	0.40 **	0.42 **	0.38 **	0.38 **	0.51 **
Q7	0.44 **	0.42 **	0.56 **	0.55 **	0.62 **
Q8	0.43 **	0.41 **	0.55 **	0.53 **	0.58 **

3 讨论

大豆 RIL 群体自盛荚期(R4 期)开始陆续发生倒伏,至成熟期,家系的倒伏情况不断变化,R6 期倒伏情况最严重,R8 期个别家系倒伏程度有所减轻。在 R4 期茎叶重与倒伏相关最为密切;发育至 R6 期,籽粒形成,但茎秆强度减弱,与倒伏相关最密切

的性状变为茎秆强度和株高,主茎节数与倒伏相关性不高,但由于株高和主茎节数的共同作用,节间长度对倒伏级别有显著性影响;发育至 R8 期,植株成熟、叶片脱落、茎秆脱水、维管束中木质部导管管壁增厚并木质化^[25]。本研究结果也表明 R8 期茎秆强度增大且与实际倒伏相关系数升高,在此时期,茎秆强度最能反映植株的倒伏情况;同时,与倒伏相关的农艺性状更为增多,株高、节间长度、主茎节数和茎叶重均与倒伏级别呈极显著正相关关系,但家系株高、节间长度和主茎节数与 R6 期相比变化不大,因此地上部植株重量即茎叶重也是影响 R8 期倒伏的最重要因素之一。在大豆倒伏以往研究中,多针对 R6 或 R8 期单一时期进行分析,株高、茎粗、根系、地上部干物重、分枝数、节间长度,茎秆强度等多个农艺性状都与倒伏显著相关。但本研究结果表明,针对整个 RIL 群体,并非所有农艺性状在各个时期对倒伏均有显著性影响。除大豆倒伏情况随生长发育不断变化外,倒伏相关农艺性状对倒伏的影响在各生育时期也不断变化,随植株生长影响倒伏的性状增加且相关性增强。

本研究所用群体多为无限和亚有限结荚习性,分枝数较多。研究结果表明在 R4 和 R6 期分枝数与倒伏级别无显著性相关关系,R8 期分枝数与倒伏级别呈极显著正相关。茎叶重显著影响 R8 期倒伏,单株的籽粒性状如单株荚数、单株粒数、单株粒重和百粒重等却均与倒伏级别无极显著相关关系,分枝数对倒伏的影响可能并不仅是因增加重量而改变了倒伏状态,在分枝数较多时,分枝的分布位置和株型也会影响大豆的倒伏,具体影响机制需要进一步研究。

倒伏田间分级评价虽然方法简便,但人为主观影响较大,无法准确量化评价倒伏性,在进行 QTL 定位时需进行数据转换^[13],仅适用于对倒伏性状的初步判断。而在大豆倒伏的 QTL 定位研究中,也多以单一农艺性状代替倒伏进行定位^[26-29]。基于倒伏评价的复杂性,为综合考虑与倒伏相关的多个性状,以便进行 QTL 定位和基因发掘等深入研究,众多的研究设计各种倒伏系数表示倒伏程度^[4,8,10,16]。周蓉等^[5]总结 R6 期多因子抗倒指数 = (根重 × 茎秆强度) / (株高 × 茎重 × 分枝数) / 100,其与实际倒伏程度的相关性最为密切,但该研究选用的材料均为南方大豆,多为有限生长习性,主茎节数差异较小,着重考虑了分枝数的作用,而没有考虑主茎节

数的作用。本研究在此基础上,针对东北无限结荚和亚有限结荚习性大豆根系庞大、主茎节数差异明显和分枝多等特点,重新进行了倒伏的多因子评价,认为以最少农艺性状做参数的抗倒指数 = (节间长度 × 茎叶重)/茎秆强度,在各生育时期可以较好地表征大豆的实际倒伏情况。

4 结 论

本试验以 RIL 群体为试材在东北生态条件下开展大豆倒伏性研究,结果显示,大豆农艺性状在不同时期对倒伏的影响不同,倒伏从 R4 期开始发生,R4 期茎叶重是影响大豆倒伏的最重要因素。倒伏发生最严重的时期为 R6 期,R6 期茎秆强度与直观观察的倒伏情况呈极显著负相关;而株高、节间长度与直观观察的倒伏情况呈极显著正相关。R8 期个别早熟家系倒伏情况有所减轻,茎秆强度与直观观察的倒伏情况呈极显著负相关,而生育期、株高、茎叶重、分枝数、节间长度、主茎节数均与直观观察到的实际倒伏情况呈显著或极显著正相关。在建立多因子倒伏系数时,不必将全部农艺性状列入倒伏系数中,可以采用尽量少的性状最大限度代表实际倒伏,简化倒伏评价操作。本研究得出倒伏系数 = (节间长度 × 茎叶重)/茎秆强度,在 R4(盛荚期)、R6(盛粒期)和 R8(完熟期)与田间实际倒伏相关最密切,且随植株生长发育该倒伏系数与实际倒伏的相关性不断增大,可以以此系数对东北大豆品种或 RIL 群体进行抗倒伏评价,以便为进一步开展大豆抗倒伏 QTL 定位和优异等位基因挖掘等研究提供技术手段。

参考文献

[1] Orf J H, Chase K, Jarvik T, et al. Genetics of soybean agronomic traits: Comparison of three related recombinant inbred populations [J]. Crop Science, 1999, 39: 1642-1651.

[2] Kabelka E A, Carlson S R, Diers B W, et al. *Glycine soja* PI468916 SCN resistance loci's associated effects on soybean seed yield and other agronomic traits [J]. Crop Science, 2006, 46: 622-629.

[3] 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.)

[4] 孟凡凡. 东北大豆不同时期倒伏多因子影响分析及其评价体系建立 [C]. 中国作物学会大豆专业委员会. 第十届全国大

豆学术讨论会论文摘要集, 2017: 131. (Meng F F. Multi-factor analysis and the establishment of index assessment system for soybean lodging at the different developmental stages in northeast China [C]. Soybean Professional Committee of China Crop Society. Abstracts of the Tenth National Soybean Academic Symposium, 2017: 131.)

[5] 周蓉,王贤智,陈海峰,等. 大豆倒伏性及其相关性状的 QTL 分析 [J]. 作物学报, 2009, 35(1): 57-65. (Zhou R, Wang X Z, Chen H F, et al. QTL analysis of lodging and related traits in soybean [J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(1): 57-65.)

[6] 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.)

[7] 张东来,徐瑶,王家睿,等. 大豆生育期间抗倒伏性状变化规律的研究 [J]. 作物杂志, 2016(2): 112-117. (Zhang D L, Xu Y, Wang J R, et al. Studies on the regulation of lodging traits variation during soybean growth stages [J]. Crops, 2016(2): 112-117.)

[8] 刘卫国,蒋涛,余跃辉,等. 大豆苗期茎秆对荫蔽胁迫响应的生理机制初探 [J]. 中国油料作物学报, 2011, 33(2): 141-146. (Liu W G, Jiang T, She Y H, et al. Preliminary study on physiological response mechanism of soybean (*Glycine max*) stem to shade stress at seedling stage [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2011, 33(2): 141-146.)

[9] 勾玲,赵明,黄建军,等. 玉米茎秆弯曲性能与抗倒能力的研究 [J]. 作物学报, 2008, 34(4): 653-661. (Gou L, Zhao M, Huang J J, et al. Bending mechanical properties of stalk and lodging-resistance of maize (*Zea mays* L.) [J]. Acta Agronomica Sinica, 34(4): 653-661.)

[10] 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 gray relational analysis of lodging resistance of stalk crops [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(7): 14-18.)

[11] 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.)

[12] 徐瑶,张锐,董守坤,等. 不同大豆品种鼓粒期茎秆力学特性与抗倒伏性差异研究 [J]. 大豆科学, 2017, 36(6): 905-912. (Xu Y, Zhang R, Dong S K, et al. Study on the differences of mechanical properties and lodging resistance among different soybean varieties in seed-filling period [J]. Soybean Science, 2017, 36(6): 905-912.)

[13] 杨光,张惠君,宋书宏,等. 超高产大豆根系相关性状的比较研究 [J]. 大豆科学, 2013, 32(2): 176-181. (Yang G, Zhang H J, Song S H, et al. Comparison on some root related traits of super-high-yielding soybean [J]. Soybean Science, 2013, 32

(2): 176-181.)

[14] Lee S H, Bailey M A, Mian M A R, et al. Molecular markers associated with soybean plant height, lodging, and maturity across locations[J]. Crop Science, 1996, 36: 728-735.

[15] 黄中文, 王伟, 徐新娟, 等. 大豆重组自交家系群体动态株高及其相对生长速率与产量的关系[J]. 作物学报, 2011, 37(3): 559-562. (Huang Z W, Wang W, Xu X J, et al. Relationship of dynamic plant height and its relative growth rate with yield using recombinant inbred lines of soybean [J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(3): 559-562.)

[16] 莱利, 庄巧生, 杨作民. 小麦育种理论与实践[M]. 北京: 中国农业出版社, 1982: 111-123. (Riley J, Zhuang Q S, Yang Z M. Theory and practice of wheat breeding [M]. Beijing: Agricultural Press, 1982: 111-123.)

[17] 崛内久满, 古贺义昭. 水稻抗倒伏性与育种[J]. 农业技术, 1989, 44(9): 41-45. (Diuuchi H, Koga Y. Lodging resistance and breeding of rice [J]. Journal of Agricultural Technology, 1989, 44(9): 41-45.)

[18] 肖应辉, 罗丽华, 闫晓燕, 等. 水稻品种倒伏指数 QTL 分析[J]. 作物学报, 2005, 31(3): 348-354. (Xiao Y H, Luo L H, Yan X Y, et al. Quantitative trait locus analysis of lodging index in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Acta Agronomica Sinica, 2005, 31(3): 348-354.)

[19] 张秋英, 欧阳由男, 戴伟民. 水稻基部伸长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. (Zhang Q Y, Ouyang Y N, Dai W M. Relationship between traits of basal elongating internodes and lodging and QTL mapping in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Acta Agronomica Sinica, 2005, 31(6): 712-717.)

[20] 姚瑞亮, 朱文祥. 小麦形态性状与倒伏的相关分析[J]. 广西农业生物科学, 1998(S1): 16-18. (Yao R L, Zhu W X. The correlation analysis of the stem traits and lodging in wheat [J]. Journal of Guangxi Agricultural Unvercity, 1998(S1): 16-18.)

[21] Fournier C, Andrieu B. Dynamics of the elongation of internodes in maize (*Zea mays* L.): Analysis of phases of elongation and their relationships to phytomer development [J]. Annals of Botany, 2000, 86(3): 551-563.

[22] 刘胜群, 宋凤斌, 朱先灿, 等. 玉米穗下节间与抗倒性相关的某些性状对增加密度的响应[J]. 土壤与作物, 2013, 2(4): 145-149. (Liu S Q, Song F B, Zhu X C, et al. Responses of internodes below ear and lodging-related traits to increased planting density in maize [J]. Soil and Crop, 2013, 2(4): 145-149.)

[23] Jones R S, Mithcell C A, Mitchell C A. Effects of physical agitation on yield of greenhouse-grown soybean[J]. Crop Science, 1992, 32(2): 404-408.

[24] 邱丽娟, 常汝镇. 大豆种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006. (Qiu L J, Chang R Z. Descriptors and data standard for soybean(*Glycine* spp.) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006.)

[25] 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. (Yan Y X, 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.)

[26] 范冬梅, 杨振, 马占洲, 等. 多环境条件下大豆倒伏性相关形态性状的 QTL 分析[J]. 中国农业科学, 2012, 45(15): 3029-3039. (Fan D M, Yang Z, Ma Z Z, et al. QTL analysis of lodging-resistance related traits in soybean in different environments [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(15): 3029-3039.)

[27] 刘硕, 郭勇, 罗玲, 等. 大豆倒伏性相关 QTL 的整合及 Overview 分析[J]. 植物遗传资源学报, 2014, 15(1): 137-143. (Liu S, Guo Y, Luo L, et al. Integration and overview analysis of QTLs related to lodging in soybean (*Glycine max*) [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2014, 15(1): 137-143.)

[28] 尹振功, 王强, 孟宪欣, 等. 基于物理图谱的大豆倒伏性状 QTL 整合及元分析[J]. 黑龙江农业科学, 2018(9): 1-5. (Yin Z G, Wang Q, Meng X X, et al. Integration and overview analysis of QTLs related to lodging in soybean based on physical map [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2018(9): 1-5.)

[29] 董全中. 大豆倒伏相关性状的 QTL 定位[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019: 60-126. (Dong Q Z. Mapping QTL for lodging related traits in soybean [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019: 60-126.)