



大豆种质资源耐密性评价及鉴定指标筛选

李灿东

(黑龙江省农业科学院 佳木斯分院/国家大豆区域技术创新中心/国家大豆产业技术体系佳木斯综合试验站,黑龙江 佳木斯 154007)

摘要:为对大豆耐密性进行评价,分析不同资源材料耐密特性,建立大豆耐密性评价模型,以147份大豆资源群体为试验材料,以高密度与常规密度下各耐密性状比值的耐密指数为基础数据,通过主成分分析、隶属函数分析和逐步回归分析方法,对大豆耐密性进行综合评价及鉴定指标筛选。结果表明:通过主成分分析将9个耐密单项指标转换为4个独立综合指标,性状累计贡献率为85.24%,通过隶属函数法计算用于综合耐密评价的 D 值,筛选强耐密型大豆材料20份、弱耐密材料20份,通过逐步回归建立大豆耐密性评价数学模型, $D=0.223-0.110X_1-0.085X_2-0.053X_3-0.040X_4+0.116X_8+0.203X_9$, $R^2=0.9830$,估计精度在89.20%以上;筛选了6个核心耐密评价性状,分别为倒伏级别、植株重心高度、株高、底荚高、单株粒重及小区产量,可以作为大豆品种耐密性鉴定指标。

关键词:大豆;耐密性;主成分分析;隶属函数法;逐步回归

Evaluation of Density-Tolerance in Soybean Germplasm Resources and Screening of Its Identification Indexes

LI Can-dong

(Jiamusi Branch Academy of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences/National Soybean Regional Technology Innovation Center/Jiamusi Experiment Station of National Soybean Industrial Technology System, Jiamusi 154007, China)

Abstract: In order to research the methods of evaluating density-tolerance, analyze the density-tolerance of different soybean germplasm resources, and establish a mathematical evaluation model of density-tolerance, this research took 147 soybean germplasm resources as the test materials, and used the density tolerance coefficient, which were the ratio of different densification traits under high density and normal density as basic data. We took evaluation and determination of evaluation indicators of density-tolerance had been done by the analytical methods of the principal component analysis, membership function method, and stepwise regression analysis. The results showed that the 9 single density-tolerance indexes were transformed into 4 independent comprehensive components through principal component analysis, which represent 85.24% cumulative contribution rate. The membership function method was employed to calculate comprehensive density-tolerance value (D), and 20 high density-tolerance materials and 20 low density-tolerance materials were selected. A mathematical evaluation model for soybean density-tolerance was established by stepwise regression analysis, $D=0.223-0.110X_1-0.085X_2-0.053X_3-0.040X_4+0.116X_8+0.203X_9$ ($R^2=0.9830$), which accuracy was higher than 89.20%. Six indexes closely related to the density-tolerance were screened out, including the level of lodging, the height of plant gravity center, plant height, bottom pod height, the weight of seeds per plant and area yield. The research results laid a theoretical foundation for the breeding of density-tolerance soybean variety and germplasm resource evaluation.

Keywords: Soybean; Density-tolerance; Principal components analysis; Membership function method; Stepwise regression analysis method

大豆种植密度和单株产量共同决定了单产水平,生产上大豆高产创建一是要发挥个体优势,采用稀植栽培获得高产,如东农豆252稀植大粒高产栽培;二是发挥群体优势,采用窄行密植高产栽培,如矮秆耐密植品种合农91在新疆创造 $6\,356.55\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的全国高产纪录^[1-4]。随着生产机械化逐渐成熟,大豆密植栽培已逐步走向生产^[5]。大豆耐密性状

包括株高、底荚高、主茎节数、节间长度、有效分枝数、单株荚数、单株粒数及倒伏性等,在高密度下这些性状的充分表达有利于产量形成^[6-8]。

近年来,关于耐密大豆品种选育及栽培技术研究已有一些报道,王志新等^[9-10]选育了耐密植大豆品种合丰51和合农58,并介绍了耐密品种育种经验;邢宝龙等^[11]选育了早熟耐密大豆品种晋豆45;

收稿日期:2020-02-28

基金项目:黑龙江省自然科学基金优秀青年基金(YQ2019C021);国家重点研发计划(2016YFD0100201-08)。

第一作者简介:李灿东(1984-),男,博士,助理研究员,主要从事大豆遗传育种与栽培技术研究。E-mail:licandong@126.com。

郭泰等^[4]选育了窄行密植大豆品种合农 91 并介绍了高产创建的研究经验;李灿东等^[12]对耐密植品种合农 76 不同密度及施肥水平下的产量进行了研究;张茂明及赵桂范等^[13-14]比较了窄行密植大豆品种合农 60 的不同栽培方式,张敬涛等^[15-16]利用窄行耐密植大豆品种,采用两种栽培模式及多种处理研究其产量性状及超高产栽培模式;于颢等^[17]对大垄密植栽培技术进行了详细研究,宋英博等^[18]研究了不同栽培模式下品种性状变化规律;盖志佳等^[19]研究了轮作下窄行密植免耕与传统垄作栽培大豆主要农艺性状及产量的变化规律。在大豆耐密相关性状研究方面,李灿东等^[20-21]对耐密性相关性状及产量性状进行相关分析,元明浩等^[22]分析了不同密度下有限分枝类型品种不同农艺性状的变化规律^[22-23],郑伟等^[24]分析了黑龙江省不同年代育成大豆品种的耐密性。以上研究主要是针对耐密大豆品种选育、配套栽培技术以及耐密相关性状等方面的研究,初步探索了不同密度条件下大豆品种耐密相关性状及产量的变化规律,明确了与品种相配套的高产栽培技术模式,但缺乏对资源材料或品种的耐密性评价研究。近年来,关于玉米耐密评价机制的研究已有一些报道,王富贵等^[25]在高密度条件下对玉米杂交种进行了耐密性鉴定指标及评价方法研究,利用主成分分析及隶属函数分析综合评价对 28 个玉米杂交种的耐密性,杨锦越等^[26-27]基于主成分分析及聚类分析评价不同春玉米品种耐密性,鉴定筛选不同玉米品种耐密性指标,然而关于大豆耐密性评价分析目前尚无相关报道。李春红等^[28]对不同基因型大豆品种的耐荫性进行了主成分分析、隶属函数分析和逐步回归分析,鉴定了大豆耐荫性指标及评价机制,其思路和方法值得本研究借鉴。

本研究利用 147 份大豆种质资源材料,通过分析主要耐密相关性状及产量在不同密度下的变化趋势,鉴定不同材料的耐密能力,筛选评价资源材料耐密性的主要性状,阐明品种耐密评价机制,为耐密植大豆品种选育及高产生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

结合国家重点研发计划子课题“耐密植大豆种质资源鉴定与创新利用”项目研究内容,筛选了 147 份耐密性较好的大豆品种,分别由中国农业科学院作物科学研究所、黑龙江省农业科学院黑河分院、克山分院、大豆研究所、绥化分院及佳木斯分院提供。

1.2 试验设计

试验田位于黑龙江省佳木斯市安庆街 531 号黑龙江省农业科学院佳木斯分院 13 号试验地(46°47'48"N, 30°24'24"E)。田间试验设高密度和常规密度 2 个处理,分别为 42 万和 30 万株·hm⁻²,试验区设计高、低密度双列并行顺序排列,3 次重复,重复间采用随机区组排列。小区每份材料 3 行、行长 3 m、垄距 0.68 m、株距为高密度 0.035 m、常规密度 0.05 m。田间试验于 2019 年 5 月 3 日播种,采用机械开沟、人工精量双粒点播,苗期通过间苗保证试验要求密度,田间管理与大田生产一致。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 耐密相关性状调查 主要包括倒伏级别、植株重心高度、株高、底荚高、主茎节数、有效分枝数、单株粒数、单株粒重及小区产量。倒伏级别在田间 R₈ 期调查,其它性状为考种项目,具体为秋季在每小区中间行的中间位置连续取 5 株,用于室内考种调查。

倒伏级别:参照《大豆种质资源描述规范和数据标准》^[29]。

植株重心高度:考种时,去掉子叶痕以下的根部,测量子叶痕到重心长度,将植株放在一个手指上,找平衡点,测量子叶痕到重心的长度,单位为 cm。

株高、底荚高、主茎节数、有效分枝数、单株粒数及单株粒重等性状参照《大豆种质资源描述规范和数据标准》^[29]调查记载。

小区产量:秋季按小区全区收获测产称重,单位为 kg·hm⁻²。

1.3.2 综合耐密评价值 耐密指数(Density Tolerance Coefficient, DTC)计算公式为: $DTC(\%) = Hd / Md \times 100$,式中,Hd 为高密度条件下性状表型值;Md 为常规密度条件下性状表型值。

利用隶属函数将各耐密性状主成分得分值进行标准化,公式为: $F(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$,式中, $i = 1, 2, 3, \dots, n$; X_{\min} 和 X_{\max} 分别表示每个主成分指标得分最小值和最大值。

各综合指标的权重为: $W_i = p_i / \sum_{i=1}^n p_i$,式中, $i = 1, 2, 3, \dots, n$; W_i 表示提取第 i 个主成分的权重, p_i 表示提取主成分所对应的特征值。

各大豆资源材料的耐密性响应因子综合值 $D = \sum_{i=1}^n (Fxi \times Wi)$,式中: $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 。

1.4 数据分析

利用 Excel 2016 进行数据整理分析,利用 SPSS 17.0 进行性状主成分分析。

2 结果与分析

2.1 大豆耐密性状主成分分析

由表1可知,通过主成分特征值贡献率分析,4个主成分对耐密性的累计贡献率达到85.24%,具有相对较强的性状信息代表性。因此可将调查统计的9个耐密相关性状指标转化为4个新的独立的综合指标(Comprehensive Index,CI),从而对大豆耐密性进行综合评价。根据各耐密性状指标特征向量的绝对值大小,将各指标性状按绝对值最大原则划分到各主成分中,从而得出决定第1主成分的耐密相关性状,包括株高、主茎节数、有效分枝数及单

株粒数等4个性状分量,主成分1相当于2.586个原始指标的作用,可反映原始数据信息量的37.48%;决定第2主成分的耐密相关性状只有倒伏级别1个性状分量,特征向量的绝对值较高(0.730),相当于1.201个原始指标的作用,可反映原始数据信息量的17.41%;决定第3主成分的耐密相关性状为底荚高和小区产量2个性状分量,相当于1.076个原始指标的作用,可反映原始数据信息量的15.59%;决定第4主成分的相关性状为植株重心高度和单株粒重2个性状分量,相当于1.018个原始指标的作用,可反映14.76%的原始数据信息量。

表1 各性状主成分的特征向量及贡献率

Table 1 Eigenvectors and percentage of accumulated contribution of principal components

项目 Item	主成分 Principle factor				
		CI1	CI2	CI3	CI4
特征值 Eigen value		2. 586	1. 201	1. 076	1. 018
贡献率 Contribution ratio/%		37. 48	17. 41	15. 59	14. 76
累计贡献率 Cumulative contribution ratio/%		37. 48	54. 89	70. 48	85. 24
特征向量 Eigen vector	X_1	0. 032	0. 730 *	0. 339	0. 029
	X_2	0. 165	0. 241	0. 316	0. 745 *
	X_3	0. 523 *	0. 024	-0. 153	0. 039
	X_4	0. 342	0. 024	-0. 418 *	-0. 172
	X_5	0. 534 *	-0. 163	0. 024	0. 036
	X_6	0. 384 *	-0. 292	0. 253	-0. 106
	X_7	0. 342 *	0. 133	0. 212	-0. 115
	X_8	0. 114	0. 293	0. 354	-0. 620 *
	X_9	0. 131	0. 552	-0. 593 *	0. 124

* 表示某指标在各因子中的最大绝对值。 X_1 :倒伏级别; X_2 :植株重心高度; X_3 :株高; X_4 :底荚高; X_5 :主茎节数; X_6 :有效分枝数; X_7 :单株粒数; X_8 :单株粒重; X_9 :小区产量。

* means the biggest absolute value of each index in all factors. X_1 : Level of lodging; X_2 : The height of plant gravity center; X_3 : Plant height; X_4 : Bottom pod height; X_5 : The number of main stem nodes; X_6 : The number of effective branches; X_7 : The number of seeds per plant; X_8 : The seeds weight per plant; X_9 : The area yield.

2.2 大豆耐密性综合评价分析

2.2.1 主成分值标准化及权重分析 计算各资源材料的D值,将主成分得分值标准化,对资源材料耐密性进行综合评价的结果如表2所示,对于同一主成分类型,F值越高表明这一主成分下参试材料耐密性越强,如Hobbit在CI1主成分中F值最大,为1.00,因此耐密性最强,佳密豆6号在CI4主成分中F值最小,为0.00,耐密性最弱。根据各耐密性状指标贡献率的大小计算各主成分权重,4个综合

指标主成分权重分别为0.440,0.204,0.183和0.173。

2.2.2 综合评价 将147份大豆品种D值降序排序,筛选耐密能力强的资源材料20个、耐密弱的材料20个,其中耐密性强的材料有十胜长叶、Hobbit、Sprite87、Hobbit87、合农91、合农60、合丰42、丰收24、佳密豆6号和克09-95等,耐密性弱的材料有Suzuhime、Flint、Jim、合丰26、黑农48、哈13-2958、垦丰16、TBD、A2396和Dunn等资源材料(表2)。

表 2 各资源材料耐密综合指标值、权重、 $F(X_i)$ 、 D 值及综合评价
Table 2 The value of Chi , index weight, $F(X_i)$, D value and comprehensive valuation of the materials

序号 No.	材料 Material	CI1	CI2	CI3	CI4	$F(X_1)$	$F(X_2)$	$F(X_3)$	$F(X_4)$	D	综合评价 Comprehensive evaluation
1	十胜长叶	3.20	3.14	2.42	1.86	0.74	1.00	0.92	0.78	0.83	强耐密
2	Hobbit	5.32	1.13	1.42	1.55	1.00	0.62	0.72	0.73	0.82	强耐密
3	Sprite 87	4.30	1.40	1.74	0.09	0.88	0.67	0.78	0.45	0.74	强耐密
4	Hobbit 87	4.95	-0.01	1.21	0.76	0.95	0.40	0.68	0.58	0.73	强耐密
5	合农 91	3.85	0	0.13	1.61	0.82	0.40	0.46	0.74	0.66	强耐密
6	合农 60	0.84	1.26	1.50	2.23	0.45	0.64	0.74	0.85	0.61	强耐密
7	合丰 42	1.78	0.13	0.58	2.88	0.57	0.43	0.55	0.98	0.61	强耐密
8	丰收 24	2.82	0.61	1.74	-0.84	0.69	0.52	0.78	0.27	0.60	强耐密
9	佳密豆 6 号	4.65	0.31	0.61	-2.28	0.92	0.46	0.56	0.00	0.60	强耐密
10	克 09-95	2.31	0.39	1.78	-0.06	0.63	0.48	0.79	0.42	0.59	强耐密
11	金源 55	-0.22	2.33	2.83	0.59	0.32	0.85	1.00	0.54	0.59	强耐密
12	黑河 21	2.63	0.11	1.09	0.42	0.67	0.43	0.65	0.51	0.59	强耐密
13	合农 76	1.68	1.49	1.01	0.21	0.56	0.69	0.64	0.47	0.58	强耐密
14	克交 09-343	2.49	0.55	1.05	-0.86	0.65	0.51	0.65	0.27	0.56	强耐密
15	中科毛豆 2 号	0.34	1.33	1.85	0.84	0.39	0.66	0.80	0.59	0.56	强耐密
16	合 N13-333	2.67	0.53	-0.23	-0.31	0.68	0.50	0.39	0.37	0.54	强耐密
17	黑科 77	3.94	-0.95	-0.21	-0.94	0.83	0.22	0.39	0.25	0.53	强耐密
18	吉密豆 3 号	-0.05	0.75	1.15	2.00	0.34	0.55	0.67	0.81	0.53	强耐密
19	北疆 1 号	0.45	0.49	1.66	0.87	0.41	0.50	0.77	0.60	0.52	强耐密
20	合 N13-498	2.70	-0.67	-0.37	0.72	0.68	0.28	0.36	0.57	0.52	强耐密
21	HLT3	-0.85	-1.71	-0.22	-0.27	0.25	0.08	0.39	0.38	0.26	弱耐密
22	绥农 1 号	-0.56	-1.32	-1.58	0.11	0.28	0.15	0.12	0.45	0.26	弱耐密
23	黑农 39	-0.33	-1.37	-1.54	-0.38	0.31	0.14	0.13	0.36	0.25	弱耐密
24	G. max-46	-0.98	-1.08	-0.73	-0.64	0.23	0.20	0.29	0.31	0.25	弱耐密
25	东农 50	-1.40	-0.91	-0.69	-0.26	0.18	0.23	0.30	0.38	0.25	弱耐密
26	CΠ1271	-1.71	-0.49	-0.38	-0.75	0.14	0.31	0.36	0.29	0.24	弱耐密
27	Holt	-0.77	-0.86	-1.87	-0.22	0.26	0.24	0.06	0.39	0.24	弱耐密
28	L84-2157	-0.81	-1.76	-1.85	0.70	0.25	0.07	0.07	0.56	0.24	弱耐密
29	哈 14-2146	-1.19	-0.74	-1.28	-0.58	0.21	0.26	0.18	0.32	0.23	弱耐密
30	Titan	-1.01	-0.59	-1.58	-0.80	0.23	0.29	0.12	0.28	0.23	弱耐密
31	Suzuhime	-0.70	-2.00	-0.12	-1.35	0.26	0.02	0.41	0.18	0.23	弱耐密
32	Flint	-1.24	-0.62	-1.38	-0.75	0.20	0.29	0.16	0.29	0.23	弱耐密
33	Jim	-1.14	-1.65	-1.56	0.43	0.21	0.09	0.13	0.51	0.22	弱耐密
34	合丰 26	-1.04	-1.07	-2.15	0.12	0.22	0.20	0.01	0.45	0.22	弱耐密
35	黑农 48	-1.44	-1.20	-2.04	0.80	0.17	0.18	0.03	0.58	0.22	弱耐密
36	哈 13-2958	-1.40	-1.34	-1.51	0.10	0.18	0.15	0.14	0.45	0.21	弱耐密
37	垦丰 16	-0.84	-1.25	-1.27	-1.42	0.25	0.17	0.18	0.16	0.20	弱耐密
38	TBD	-2.81	-0.58	-0.06	-0.41	0.01	0.29	0.42	0.35	0.20	弱耐密
39	A2396	-1.35	-1.67	-1.11	-0.41	0.19	0.09	0.22	0.35	0.20	弱耐密
40	Dunn	-1.89	-1.81	-1.39	0.09	0.12	0.06	0.16	0.45	0.17	弱耐密
权重 Index weight						0.440	0.204	0.183	0.173		

2.3 耐密指数回归分析及鉴定指标选择

大豆耐密性评价是通过耐密相关性状在不同密度条件下的表现来实现的,不同耐密性状的综合表现共同决定了耐密性,因此耐密性是复杂的综合评价性状。通过分解研究各耐密性状单项指标,研究大豆耐密性,构建耐密性评价数学模型,以耐密综合评价 D 值为因变量,以各耐密相关性状耐密指数为自变量,采用逐步回归分析方法构建回归方程: $D = 0.223 - 0.110X_1 - 0.085X_2 - 0.053X_3 -$

$0.040X_4 + 0.116X_8 + 0.203X_9$ ($F = 1\,353.56, P = 0.000\,0, R^2 = 0.983\,0$),对回归方程进行精度估计评价(表3)。结果表明,耐密性最强及最弱的40份资源材料中,估计精度均在89.20%以上,可见方程中的6个耐密相关性状对大豆耐密性具有很大影响,利用该方程可对大豆耐密性进行综合评价,同时该方程也适用于其它资源材料的耐密性评价,可根据此6个耐密性状的耐密指数计算耐密综合评价 D 值,预测品种耐密性。

表3 回归方程的估计精度分析
Table 3 Analysis of evaluation accuracy of equation

序号 No.	材料 Material	原始值 Primary value	回归值 Regression	拟合误差 Fitting error	估计精度 Evaluation accuracy/%
1	十胜长叶	0.8339	0.8537	0.0199	0.9767
2	Hobbit	0.8232	0.8454	0.0222	0.9738
3	Sprite 87	0.7427	0.7394	-0.0032	0.9956
4	Hobbit 87	0.7256	0.7357	0.0101	0.9863
5	合农 91	0.6554	0.6715	0.0160	0.9761
6	合农 60	0.6129	0.6140	0.0011	0.9982
7	合丰 42	0.6074	0.6277	0.0203	0.9676
8	丰收 24	0.6021	0.5546	-0.0475	0.9211
9	佳密豆 6 号	0.6003	0.5977	-0.0027	0.9955
10	克 09-95	0.5932	0.5715	-0.0217	0.9634
11	金源 55	0.5921	0.5722	-0.0199	0.9663
12	黑河 21	0.5902	0.5728	-0.0174	0.9705
13	合农 76	0.5828	0.5940	0.0112	0.9812
14	克交 09-343	0.5563	0.5463	-0.0100	0.9821
15	中科毛豆 2 号	0.5559	0.5466	-0.0094	0.9831
16	合交 N13-333	0.5365	0.5312	-0.0053	0.9900
17	黑科 77	0.5275	0.5313	0.0038	0.9928
18	吉密豆 3 号	0.5251	0.5150	-0.0100	0.9809
19	北疆 1 号	0.5234	0.5234	0.0000	0.9999
20	合交 N13-498	0.5203	0.5177	-0.0026	0.9950
21	HLT3	0.2624	0.2386	-0.0239	0.9091
22	绥农 1 号	0.2560	0.2659	0.0099	0.9627
23	黑农 39	0.2518	0.2612	0.0094	0.9642
24	G. max-46	0.2491	0.2530	0.0039	0.9847
25	东农 50	0.2471	0.2548	0.0077	0.9696
26	CΠ1271	0.2420	0.2395	-0.0024	0.9901
27	Holt	0.2412	0.2584	0.0172	0.9334
28	L84-2157	0.2350	0.2527	0.0177	0.9301
29	哈 14-2146	0.2330	0.2385	0.0055	0.9769
30	Titan	0.2303	0.2389	0.0086	0.9639
31	Suzuhime	0.2275	0.2876	0.0210	0.9270
32	Flint	0.2257	0.2320	0.0063	0.9728

续表 3

序号	材料	原始值	回归值	拟合误差	估计精度
No.	Material	Primary value	Regression	Fitting error	Evaluation accuracy/%
33	Jim	0. 2233	0. 2330	0. 0096	0. 9586
34	合丰 26	0. 2195	0. 2461	0. 0266	0. 8920
35	黑农 48	0. 2193	0. 2455	0. 0262	0. 8932
36	哈 13-2958	0. 2124	0. 2313	0. 0189	0. 9182
37	垦丰 16	0. 2048	0. 2001	-0. 0048	0. 9768
38	TBD	0. 2022	0. 1982	-0. 0041	0. 9799
39	A2396	0. 2001	0. 2069	0. 0068	0. 9671
40	Dunn	0. 1719	0. 1832	0. 0114	0. 9380

2.4 耐密类型性状特征分析

根据大豆耐密相关性状逐步回归分析结果,对强耐密及弱耐密类型的 6 个主要耐密评价性状进行分析,比较不同类型材料各性状指标在常规密度及高密度下的差异,解析不同类型材料或品种在不同密度下的性状表现及变化规律。其中强耐密类型材料在高密度下较常规密度表现为倒伏级别略有

增加、株高及植株重心高度增加、底荚高增加、单株粒重及小区产量均有增加,可见耐密性强的材料在高密度下产量较高;弱耐密类型材料在高密度下较常规密度表现为倒伏级别、株高、底荚高及植株重心高度均明显增加,单株粒重及小区产量呈降低趋势,可见弱耐密材料在高密度下产量降低(表 4)。

表 4 不同耐密类型材料相关性状表现特征

Table 4 Description of different material types to density tolerance

性状	类型	常规密度	高密度
Trait	Type	Check density	High density
倒伏级别 Level of lodging	强耐密	0. 45 ±0. 50 a	1. 15 ±0. 73 ab
	弱耐密	1. 55 ±0. 59 a	2. 60 ±0. 58 b
重心高度 The height of center gravity/cm	强耐密	25. 16 ±11. 24 a	45. 70 ±11. 41 b
	弱耐密	40. 54 ±11. 22 a	48. 19 ±11. 04 b
株高 Plant height/cm	强耐密	61. 54 ±16. 54 a	84. 33 ±13. 27 b
	弱耐密	76. 19 ±13. 37 a	93. 96 ±17. 54 ab
底荚高 Bottom pod height/cm	强耐密	7. 84 ±2. 14 a	9. 06 ±1. 12 b
	弱耐密	11. 17 ±1. 16 a	14. 16 ±0. 61 b
单株粒重 The weight of seeds per plant/g	强耐密	15. 32 ±2. 36 a	17. 27 ±8. 24 ab
	弱耐密	18. 73 ±5. 32 ab	16. 23 ±6. 74 a
小区产量 Area yield/(kg·hm ⁻²)	强耐密	2646. 75 ±1. 50 a	2976. 45 ±5. 40 ab
	弱耐密	2831. 7 ±1. 35 ab	2685. 75 ±8. 55 a

同行不同小写字母代表置信区间 $P < 0.05$ 差异显著性。
The different lowercase in the same line represented significant difference at $P < 0.05$ level.

3 讨 论

关于特性鉴定及指标筛选的研究已有一些报道,李春红等^[28]对不同基因型大豆品种进行常规与遮光处理,综合评价大豆耐荫性,建立了耐荫性评价回归方程,确定了评价大豆耐荫性的主要相关性状。孙艳等^[30]对菊花近缘种属植物幼苗耐阴特性进行逐步回归分析,建立了性状评价数学模型及评价指标。郑云霄等^[31]对玉米种质资源的抗倒伏性进行综合评价,并筛选了鉴定指标;王秋兰等^[32]对

玉米苗期抗旱性进行指标鉴定及综合评价分析;王玉斌等^[33]对粒用高粱种质中后期抗旱性进行了鉴定筛选及分类指标评价。以上研究报道为本研究提供了理论方法指导,为建立大豆耐密性综合评价标准及确定鉴定性状指标奠定理论基础。目前关于大豆耐密性综合评价方面的研究尚鲜有相关报道,本研究结合国家重点研发计划项目任务,在筛选耐密植种质资源的基础上,通过主成分及隶属函数分析筛选了大豆耐密鉴定主要农艺性状指标,建立了耐密性评价回归方程,目的在于对大豆种质资

源进行综合耐密性评价及鉴定。本研究筛选的强耐密资源材料与生产表现的一致性较高,尤其是Hobbit、十胜长叶、合农60、合农91等品种或材料均是生产上知名矮秆耐密植品种。本研究得出的回归方程需要在后续研究中进一步验证及修正,对于不同类型特异材料可能存在一些差异,需要进一步补充和完善。

大豆耐密性是复杂的综合性状,涉及多个耐密相关性状,主要包括倒伏级别、植株重心高度、株高、底荚高、主茎节数、有效分枝数、单株粒数、单株粒重及小区产量等性状。同一材料或品种耐密性状在不同密度条件下发生变化,根据性状变化趋势可以对材料或品种的耐密性进行综合评价,从而判定其耐密性。在这些耐密性状中,产量是重要的评价性状,因为一份材料或品种耐密性强则在高密度条件下能够获得高产。倒伏级别是大豆耐密性评价的重要指标,但并不是高密度下秆强不倒伏即是耐密性强,而是指秆强的材料或品种往往在高密度下保持较高的产量,倒伏对大豆产量的影响是极显著的,因此高密度下倒伏级别与产量存在较强的负相关性。植株重心高度与耐密性密切相关,是决定倒伏级别的重要因素之一,理论上重心高度越高则越容易倒伏,反之则不易倒伏,因此植株重心高度是重要的耐密性单项评价指标。单株粒数对耐密性的影响主要是通过产量实现的,还受到材料或品种百粒重的影响,相同产量下百粒重越小则单株粒数越多,反之则越少,因此单株粒数是大豆耐密性评价的参考性状。大豆是群体产量作物,不同基因型品种适宜不同的种植密度,近年来大豆生产及高产创建逐渐向密植栽培方向发展,耐密品种选育及配套技术研究,可能成为大豆高产的突破口。因此,对大豆中间材料和品系或品种的耐密性综合评价是十分有意义的。

4 结 论

本研究通过比较147份耐密性较好的大豆品种的耐密性响应因子综合值,筛选出大豆强耐密类型资源材料20个,弱耐密资源材料20个,建立耐密评价回归方程: $D = 0.223 - 0.110X_1 - 0.085X_2 - 0.053X_3 - 0.040X_4 + 0.116X_8 + 0.203X_9$,筛选出6个核心耐密评价性状,分别为倒伏级别、植株重心高度、株高、底荚高、单株粒重和小区产量,可以作为大豆品种耐密性鉴定的评价指标。

参考文献

[1] Kabelka E A, Diers B W, Fehr W R, et al. Putative alleles for increased yield from soybean plant introductions [J]. Crop

Science, 2004,44: 784-791.

[2] Teng W, Han Y, Du Y, et al. QTL analyses of seed weight during the development of soybean (*Glycine max* L. Merr.) [J]. Heredity, 2009, 102: 372-380.

[3] Sun D, Li W, Zhang Z, et al. Quantitative trait loci analysis for the developmental behavior of soybean (*Glycine max* L. Merr.) [J]. Theoretical and Applied Genetics, 2006, 112: 665-673.

[4] 郭泰, 郭美玲, 冯宪忠, 等. 矮秆耐密植大豆新品种合农91选育与高产创建[J]. 大豆科学, 2019,38(4):664-667. (Guo T, Guo M L, Feng X Z, et al. Breeding and high yield establishment of dwarf stalks resistant to dense planting new soybean variety Henong 91 [J]. Soybean Science, 2019,38(4): 664-667.)

[5] 尹阳阳, 徐彩龙, 宋雯雯, 等. 密植是挖掘大豆产量潜力的重要栽培途径[J]. 土壤与作物, 2019,8(4):361-367. (Yin Y Y, Xu C L, Song W W, et al. Increasing planting density is an important approach to achieve the potential of soybean yield [J]. Soils and Crops, 2019,8(4):361-367.)

[6] 郑伟, 谢甫锦, 郭泰, 等. 种植密度对不同耐密性大豆品种特性的影响[J]. 大豆科学, 2015, 34(2):255-259. (Zheng W, Xie P T, Guo T, et al. Effect of planting density on characteristics of soybean cultivars with different density tolerance [J]. Soybean Science, 2015, 34(2):255-259.)

[7] 郑伟. 矮秆半矮秆耐密植超高产大豆种质资源创新研究[J]. 中国种业, 2012(12):15-16. (Zheng W. Innovative research on super high yield soybean germplasm resources of dwarf and semi-dwarf planting [J]. China Seed Industry, 2012(12):15-16.)

[8] 李灿东, 郭泰, 王志新, 等. 大豆耐密性状与产量的相关分析 [J]. 大豆科学, 2019,38(6):862-867. (Li C D, Guo T, Wang Z X, et al. Correlation analysis of density tolerance traits and yield on soybean [J]. Soybean Science, 2019,38(6):862-867.)

[9] 王志新, 郭泰, 吴秀红, 等. 早熟高产抗病耐密大豆合丰51号选育[J]. 中国种业, 2012(2):42-43. (Wang Z X, Guo T, Wu X H, et al. Breeding of Hefeng 51 soybean with early maturity, high yield, disease resistance and density tolerance [J]. China Seed Industry, 2012(2):42-43.)

[10] 王志新, 郭泰, 吴秀红, 等. 高产优质耐密植栽培特用小粒大豆品种合农58的选育[J]. 中国种业, 2010(6):55-56. (Wang Z X, Guo T, Wu X H, et al. The breeding of the high yield, high quality and high density-tolerance small grain soybean variety HeNong 58 [J]. China Seed Industry, 2010(6):55-56.)

[11] 邢宝龙, 冯高, 郭新文, 等. 早熟耐密型大豆新品种晋豆45的选育[J]. 作物杂志, 2014(3):148-149. (Xing B L, Feng G, Guo X W, et al. The breeding of new early-ripening and density resistant new variety of Jindou 45 [J]. Crop Science, 2014(3):148-149.)

[12] 李灿东, 郭泰, 郑伟, 等. 播种密度及施肥水平对耐密植大豆合农76产量性状的影响[J]. 大豆科学, 2017,37(5):727-732. (Li C D, Guo T, Zheng W, et al. Effect of sowing density and fertilizer levels on the yield traits of high dense planting soybean cultivar Henong 76 [J]. Soybean Science, 2017,37(5): 727-732.)

[13] 张茂明. 大豆合农60窄行密植不同种植方式的比较研究[J]. 中国种业, 2012(2):36-37. (Zhang M M. Comparative study on different planting methods of narrow row and dense planting in Henong 60 [J]. China Seed Industry, 2012(2):36-37.)

[14] 赵桂范. 窄行密植专用大豆新品种合农 60 及配套栽培技术[J]. 作物杂志, 2011(2):128. (Zhao G F. A new soybean variety of Henong 60 for narrow and close planting and corresponding cultivation techniques[J]. Crop Science, 2011(2):128.)

[15] 张敬涛, 郑殿峰, 申晓慧, 等. 半矮秆大豆窄行密植超高产生长发育动态研究[J]. 大豆科学, 2009, 28(5):842-845. (Zhang J T, Zheng D F, Shen X H, et al. Soybean population growth dynamic under the super-high yield cultivation mode with narrow row and dense seeded semi-dwarf cultivar[J]. Soybean Science, 2009, 28(5):842-845.)

[16] 张敬涛, 宋英博, 申晓慧, 等. 半矮秆大豆窄行密植超高产栽培产量性状及产量结构研究[J]. 大豆科学, 2009, 28(4):636-640. (Zhang J T, Song Y B, Shen X H, et al. Soybean yield structure under the super-high yield cultivation mode with narrow row and dense seeded semi-dwarf cultivar[J]. Soybean Science, 2009, 28(4):636-640.)

[17] 于颢, 姜海澄. 大豆 90 cm 垄上 4 行大垄窄行密植栽培技术[J]. 大豆科技, 2014(1):29-30. (Yu P, Jiang H C. Techniques for soybean cultivation in 4 rows of narrow and narrow rows on 90cm ridge[J]. Soybean Science and Technology, 2014(1):29-30.)

[18] 宋英博, 张敬涛, 王囡囡, 等. 大豆窄行密植与垄三栽培主要性状的关联度分析[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(7):135-139. (Song Y B, Zhang J T, Wang N N, et al. Grey correlation degree analysis on major traits of narrow row and dense growth and three lines of ridge cultivation in soybean[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2010, 41(7):135-139.)

[19] 盖志佳, 蔡丽君, 刘婧琦, 等. 轮作体系下窄行密植免耕对大豆农艺性状及产量的影响[J]. 中国种业, 2017(6):63-65. (Gai Z J, Cai L J, Liu J Q, et al. Effects of narrow row close planting and no-tillage on the agronomic characters and yield of soybean under rotation system[J]. China Seed Industry, 2017(6):63-65.)

[20] 李灿东, 郭泰, 王志新, 等. 大豆倒伏性对耐密性及产量的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2019(8):1-3. (Li C D, Guo T, Wang Z X, et al. Effects of lodging on densification and yield on soybean[J]. Heilongjiang Agricultural Science, 2019(8):1-3.)

[21] 李灿东, 赵建有, 郭泰, 等. 不同密度下主茎亚有限型大豆株型及产量的变化规律[J]. 中国农学通报, 2014, 30(30):164-167. (Li C D, Zhao J Y, Guo T, et al. Effects of planting density on plant type and yield of main semi-determinate soybean[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(30):164-167.)

[22] 元明浩, 杨翠莲. 不同密度下有限分枝型矮秆耐密大豆产量因素变化规律[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(18):8408-8410. (Yuan M H, Yang C L. Changing law of limited branching type dwarf and dense-resistant soybean under different densities[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(8):8408-8410.)

[23] 元明浩, 刘玉兰, 杨翠莲. 不同密度下有限结荚习性分枝型矮秆耐密大豆的株型变化规律[J]. 大豆科学, 2009, 28(3):552-556. (Yuan M H, Liu Y L, Yang C L. Effect of planting density on plant type of determinate soybean with short stature and dense-resistant traits[J]. Soybean Science, 2009, 28(3):552-556.)

[24] 郑伟, 韩旭东, 郭泰, 等. 种植密度对黑龙江省不同年代育成大豆品种产量和品质的影响[J]. 种子, 2015, 34(2):77-80. (Zheng W, Han X D, Guo T, et al. Effect of plant density on grain yield and quality of soybean cultivars released in different years in Heilongjiang[J]. Seed, 2015, 34(2):77-80.)

[25] 王富贵, 于晓芳, 高聚林, 等. 高种植密度条件下玉米杂交种耐密性鉴定指标及评价方法[J]. 玉米科学, 2017, 25(6):119-126. (Wang F G, Yu X F, Gao J L, et al. Indexes screening and comprehensive evaluation of density tolerance of maize hybrid under higher planting density[J]. Journal of Maize Sciences, 2017, 25(6):119-126.)

[26] 杨锦越, 宋碧, 罗英舰, 等. 基于主成分分析及聚类分析对不同春玉米品种耐密性评价[J]. 中国种业, 2018(8):51-55. (Yang J Y, Song B, Luo Y J, et al. The denseness of different spring maize varieties was evaluated based on principal component analysis and cluster analysis[J]. China Seed Industry, 2018(8):51-55.)

[27] 杨锦越, 罗英舰, 宋碧, 等. 不同玉米品种耐密性分析及其鉴定指标的筛选[J]. 种子, 2019, 38(5):80-85. (Yang J Y, Luo Y J, Song B, et al. Analysis of density tolerance and screening of identification indexes of different maize varieties[J]. Seed, 2019, 38(5):80-85.)

[28] 李春红, 姚兴东, 鞠宝韬, 等. 不同基因型大豆耐荫性分析及其鉴定指标的筛选[J]. 中国农业科学, 2014, 47(15):2927-2939. (Li C H, Yao X D, Ju B T, et al. Analysis of shade-tolerance and determination of shade-tolerance evaluation indicators in different soybean genotypes[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(15):2927-2939.)

[29] 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: Agricultural Press, 2006.)

[30] 孙艳, 高海顺, 管志勇, 等. 菊花近缘种属植物幼苗耐阴特性分析及其评价指标的确定[J]. 生态学报, 2012, 32(6):1908-1916. (Sun Y, Gao H S, Guan Z Y, et al. Analysis of shade-tolerance and determination of evaluation indicators of shade-tolerance in seedlings of Chrysanthemum grandiflorum and its closely related genera[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(6):1908-1916.)

[31] 郑云霄, 刘文斯, 赵永锋, 等. 玉米种质资源的抗倒伏性评价及鉴定指标筛选[J]. 植物遗传资源学报, 2019, 20(6):1588-1596. (Zheng Y X, Liu W S, Zhao Y F, et al. Evaluation of lodging resistance and selection of identification indexes of maize germplasm resources[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2019, 20(6):1588-1596.)

[32] 王秋兰, 靳鲲鹏, 刘永忠, 等. 玉米苗期抗旱性鉴定指标及综合评价[J]. 山西农业科学, 2019, 47(3):319-322, 365. (Wang Q L, Jin K P, Liu Y Z, et al. Identification index and comprehensive evaluation of drought resistance in maize seedling stage[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2019, 47(3):319-322, 365.)

[33] 王玉斌, 平俊爱, 牛皓, 等. 粒用高粱种质中后期抗旱性鉴定筛选与分类指标评价[J]. 中国农业科学, 2019, 52(22):4039-4052. (Wang Y B, Ping J A, Niu H, et al. Evaluation of identification and classification index for drought resistance at middle and late growth stage in grain sorghum germplasms[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(22):4039-4052.)