

DOI:10.13432/j.cnki.jgsau.2023.05.006

不同基因型玉米自交系耐密性评价与筛选

郭海,庄泽龙,姬祥卓,白明兴,慕平,彭云玲

(甘肃农业大学农学院,甘肃省干旱生境作物学重点实验室,甘肃省作物遗传改良与种质创新重点实验室,甘肃 兰州 730070)

摘要:【目的】在不同种植密度下,通过对不同基因型玉米自交系材料农艺性状及产量的分析,筛选出耐密材料及耐密性评价指标,以为选育耐密高产玉米材料提供帮助。【方法】以68份不同基因型玉米自交系为材料,设置6.75和12.75万株/hm² 2个种植密度,研究密度对农艺性状及产量性状的影响。【结果】利用株高、穗位高、茎粗、叶夹角、雄穗分枝数等18个表型指标,通过模糊隶属函数法对68份材料进行耐密性综合性评价,筛选出强耐密性材料2份,中等耐密材料19份,耐密性较弱的材料46份,不耐密材料1份。通过主成分分析及逐步回归分析表明,单株产量、弯曲性能等5个指标与玉米的耐密性显著相关。【结论】筛选出强耐密材料2份,分别为GAU630、GAU810;不耐密材料1份,为GAU669。综合主成分分析及逐步回归分析结果表明,单株产量、弯曲性能、株高、穗轴重和叶夹角这5个指标可作为玉米耐密性的评价指标。

关键词:玉米;耐密性;模糊隶属函数法;回归分析

中图分类号: S513

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1003-4315(2023)05-0053-10



Evaluation and screening of density tolerance of inbred corn lines with different genotypes

GUO Hai, ZHUANG Zelong, JI Xiangzhuo, BAI Mingxing, MU Ping, PENG Yunling

(Agronomy College, Gansu Agricultural University, Gansu Key Laboratory of Arid Habitat Crop Science, Gansu Key Laboratory of Crop Genetic Improvement and Germplasm Innovation, Lanzhou 730070, China)

Abstract: 【Objective】 Under different planting densities, through the analysis of agronomic characteristics and yields of different genotypes of maize inbred line materials, the density-tolerant materials and evaluation indexes of density-tolerance were screened to provide help for breeding of density-tolerant and high-yield maize materials. 【Method】 Using 68 inbred maize lines of different genotypes as material, two planting densities of 67 500 and 127 500 plants/hm² were established to study the effect of density on agronomic and yield traits. 【Result】 Using 18 phenotypic indicators such as plant height, ear height, stem diameter, leaf angle, and number of tassel branches, the density tolerance of 68 materials was comprehensively evaluated by the fuzzy membership function method. 2 parts of strong density material, 19 parts of medium-density

第一作者:郭海,硕士研究生。E-mail:1284736504@qq.com

通信作者:彭云玲,教授,博士生导师,主要从事玉米抗逆生理及分子生物学研究。E-mail:pengyunlingply@163.com

基金项目:兰州市科技局项目(2020-RC-122);抗旱高产优质玉米新品种育种繁殖与推广委托项目(XZ20200810);科技创新服务平台建设(20JR10RA565);中央引导地方科技发展专项基金(ZCYD-2021);甘肃省教育厅产业支撑计划项目(2021CYZC-12)。

收稿日期:2022-03-08;修回日期:2022-06-22

material, 46 parts of weak-density material, and 1 part of non-density material were screened out. Then, principal component analysis and stepwise regression analysis showed that five indicators, such as yield per plant, bending performance, plant height, cob weight, and leaf angle were significantly correlated with the density tolerance of corn. 【Conclusion】 2 strong density materials were screened, namely GAU630 and GAU810, and 1 non-density material was GAU669. The results of comprehensive principal component analysis and stepwise regression analysis showed that five indexes of yield per plant, bending performance, plant height, cob weight, and leaf angle could be used as evaluation indexes of maize density tolerance.

Key words: maize; density-tolerance; fuzzy membership function method; regression analysis

玉米(*Zea mays*)是世界上重要的粮食兼经济作物^[1],由于工业、畜牧业的需求增加,提高玉米产量变得越来越重要^[2]。我国农田土地资源有限,因此,在不增加种植面积的前提下,提高单位面积的粮食产量是增产的重要途径。有研究表明,适当的提高种植密度不仅能提高产量,还可有效提高土地的利用效率^[3]。如Bastos等^[4]提出,适度的增加种植密度是实现高产最简单、最有效的方法。生产实践也表明提高种植密度是实现高产的重要因素。玉米自交系作为育种的基础,筛选出耐密性强的材料,对于培育耐密品种具有重要作用^[5]。

玉米耐密性是一个综合指标,不能由单一的某个性状来准确反映^[6]。樊景胜等^[7]研究表明,玉米耐密性与单株产量密切相关,是鉴定耐密性的重要指标。在玉米产量相关性状评价中,洪德峰等^[8]研究表明,玉米的穗部性状是玉米耐密性的重要指标。在高种植密度下,玉米植株会出现空秆率与秃尖长度增加,穗长、穗粗以及百粒质量减小^[9-10]。在田间表型性状评价中,鉴定玉米耐密性的重要指标是抗倒伏性^[11]。勾玲等^[12]研究表明,穿刺强度和弯曲性能是影响玉米倒伏性的主要因素。在高种植密度下,株高、穗位高、茎粗与倒伏率也增加^[10,13]。因此,通过产量相关性状与田间表型性状来了解和认识玉米耐密性可以更为准确地筛选出评价玉米耐密性的指标。本试验通过比较在两种密度下玉米自交系的产量相关性状及田间表型性状,分析不同性状在两种密度下的变化规律,探索高密度种植条件下玉米自交系以及耐密指标的筛选,对于选育耐密高产玉米自交系具有重要的理论意义和实践价值。

1 材料和方法

1.1 试验材料

材料是甘肃农业大学玉米课题组提供的68份自交系材料(表1)。

1.2 试验地概况

试验于2021年4月~10月在甘肃省武威市凉州区黄羊镇进行,该区属中温带干旱区,属大陆性气候,干旱少雨,年平均降水量为154 mm,平均海拔1 780 m,年平均气温8℃,日照时数1 664~2 532 h。供试土壤有机质含量15.42 g/kg,全氮含量0.71 g/kg,全磷含量1.25 g/kg。

1.3 试验设计

试验采取二因素裂区设计,主处理为种植密度,即6.75万株/hm²、12.75万株/hm²,副处理为玉米自交系。小区面积28 m²,重复3次。试验采用平作全覆盖膜等行距种植,行距为30 cm,基肥施用尿素200 kg/hm²,磷肥(P₂O₅)210 kg/hm²,大喇叭口期追施氮肥260 kg/hm²。其他栽培措施同当地大田生产。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 田间表型指标测定 参照Zhao等^[14]的方法,在玉米散粉结束后,每个小区选取代表性植株3株测量株高、穗位高、茎粗、叶夹角和叶间距。

1.4.2 茎秆穿刺强度和茎秆弯曲性能测定 参照勾玲等^[12]的方法,在玉米散粉结束后,每个小区选取代表性植株3株测量茎秆穿刺强度与弯曲性能。

1.4.3 叶绿素SPAD值测定 参照金兵兵等^[15]的方法每小区选取代表性植株3株,在吐丝期使用SPAD-502plus测定玉米最上部果穗着生叶中部的叶绿素相对含量。

表1 材料编号及名称

Table 1 Material number and name

编号 Number	名称 Name	编号 Number	名称 Name	编号 Number	名称 Name
1	GAU182	24	GAU617	47	GAU702
2	GAU187	25	GUA618	48	GAU708
3	GAU195	26	GAU619	49	GAU712
4	GAU234	27	GAU623	50	GAU713
5	GAU241	28	GAU628	51	GAU715
6	GAU248	29	GAU630	52	GAU719
7	GAU250	30	GAU631	53	GAU725
8	GAU277	31	GAU633	54	GAU728
9	GAU280	32	GAU635	55	GAU730
10	GAU286	33	GAU640	56	GAU735
11	GAU289	34	GAU642	57	GAU764
12	GAU536	35	GAU648	58	GAU763
13	GAU538	36	GAU649	59	GAU764
14	GAU592	37	GAU651	60	GAU778
15	GAU593	38	GAU667	61	GAU779
16	GAU597	39	GAU668	62	GAU802
17	GAU599	40	GAU669	63	GAU805
18	GAU600	41	GAU671	64	GAU806
19	GAU601	42	GAU682	65	GAU807
20	GAU608	43	GAU683	66	GAU810
21	GAU611	44	GAU694	67	GAU813
22	GAU615	45	GAU695	68	GAU824
23	GAU616	46	GAU699		

1.4.4 棒三叶测定 参照洪德峰等^[13]的方法,在吐丝后期,选取长势相对一致的3株植株,测量其穗位叶、穗上叶和穗下叶的叶长和叶宽。

1.4.5 产量相关指标测定 玉米成熟后,每个小区随机收获中部3株果穗,晾晒至安全水分后进行室内拷种,统计测量单株产量、穗长、穗粗、百粒质量、穗轴质量、轴粗、行粒数和穗行数。

1.5 耐密性综合评价

1.5.1 耐密指数及综合耐密指数

$$\text{耐密指数}(\%) = \frac{\text{高密度各指标测定值}}{\text{低密度各指标测定值}} \times 100\%$$

$$\text{综合耐密指数} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{耐密指数}$$

1.5.2 隶属函数值

$$W(X_i) = \frac{(X - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})}, i=1, 2, 3, \dots, n$$

式中: $W(X_i)$ 表示第*i*个测量值标的隶属函数值; X 为某种质某一指标的测定值; X_{\max} 为所有待鉴定种质某

一指标测定值的最大值; X_{\min} 为该指标中的最小值。

1.5.3 权重

$$P_i = T_i / \sum_{i=1}^n |T_i|, i=1, 2, 3, \dots, n$$

式中:权重(P_i)表示第*i*个综合指标在所有综合指标中的重要程度; T_i 表示不同玉米品种各指标经过主成分分析后所得到的第*i*个综合指标的贡献率。

1.5.4 综合耐密强度

$$D = \sum_{i=1}^n [W(x_i) \times P_i], i=1, 2, 3, \dots, n$$

式中: D 为各品种耐密性强度综合评价值。 D 值越大耐密性越强,反之,耐密性越弱。

1.5.5 逐步回归分析 分别以*D*值,综合耐密指数为参考序列,对各性状的耐密指数进行逐步回归分析,求得回归方程。

1.6 统计分析

采用Excel 2016和SPSS 21进行方差分析、主成分分析、聚类分析等。

2 结果与分析

2.1 方差分析

通过对玉米 68 份自交系耐密性相关性状进行方差分析(表 2),发现不同材料间各个性状均达到了极显著水平,在 2 种密度的处理下,玉米的田间表型

性状叶间距、叶长、叶宽、叶夹角、株高、穗位高、茎粗、叶绿素均达到极显著水平,8 个产量相关性状除穗行数外均达到极显著水平,在密度和品种互作条件下,茎粗和穿刺强度达到显著水平,其余均达到极显著水平。综合方差分析发现,密度对不同自交系玉米的田间表型性状和产量相关性状有较大的影响,可以进行下一步分析。

表 2 自交系方差分析

Table 2 Analysis of variance of inbred lines

性状 Character	材料 Material	处理 Treatment	材料×处理 Material×Treatment
R. P	5.25 **	7.24	3.15 **
N. P	6.81 **	21.74 **	4.42 **
S. L	10.22 **	19.11 **	4.07 **
E. D	6.83 **	20.12 **	3.87 **
S. P	11.78 **	23.19 **	8.65 **
X100	8.88 **	73.92 **	4.5 **
C. W	11.24 **	121.49 **	5.13 **
S. T	11.07 **	96.63 **	5.73 **
L. S	13.32 **	39.98 **	3.33 **
L. L	17.86 **	90.61 **	5.15 **
L. W	6.32 **	8.68 **	2.81 **
L. A	11 **	58.67 **	6.24 **
P. H	39.17 **	955.62 **	8.92 **
S. H	21.69 **	299.53 **	6.92 **
S. D	7.25 **	109.29 **	1.73 *
P. S	3.83 **	1.13	1.68 *
B. P	3.73 **	0.94	2.23 **
CII	8.9 **	39.05 **	3.96 **

**表示 0.01 水平差异显著($P < 0.01$); *表示 0.05 水平差异显著($P < 0.05$)。 ** Significantly difference at 0.01 level($P < 0.01$); * Significantly difference at 0.05 level($P < 0.05$). R. P: 穗行数 Rows per panicle; N. P: 行粒数 Number of grains per row; S. L: 穗长 Spike length; E. D: 穗粗 Ear diameter; S. P: 单株产量 Single panicle weight; X100: 百粒质量 X100 grain weight; C. W: 穗轴质量 Cob weight; S. T: 轴粗 Shaft thickness; L. S: 叶间距 Left spacing; L. L: 叶长 Leaf length; L. W: 叶宽 Leaf width; L. A: 叶夹角 Leaf angle; P. H: 株高 Plant height; S. H: 穗位高 Spike height; S. D: 茎粗 Stem diameter; P. S: 穿刺强度 Puncture strength; B. P: 弯曲性能 Bending properties; CII: 叶绿素 Chlorophyll II。

2.2 不同密度条件下的各表型值

通过对自交系不同密度下的田间表型值和穗部特征值进行分析(表 3),不同自交系的田间表型性状和产量相关性状的变异系数存在明显差异。低密度下变异系数最大的是弯曲性能、单株产量和穗轴质量,分别是 38.22%、32.81% 和 31.9%,说明弯曲性能、单株产量和穗轴质量在低密度下响应较大。变异系数最小的是穗粗、叶宽和叶绿素,分别是 10.05%、11.92% 和 12.93%。说明这些性状由品种本身的内在因素决定,对密度的敏感性较小。高密

度下变异系数最大的是单株产量、穗轴质量和弯曲性能,变异系数分别是 47.63%、45.33% 和 37.68%。变异系数最小的是叶绿素、穗粗和株高,分别是 10.39%、12.47% 和 12.77%。综合变异系数最大值和最小值发现:种植密度对弯曲性能、单株产量和穗轴质量的影响较大,对穗粗和叶绿素的影响较小。

2.3 不同品种耐密指数的简单相关分析

在相关性热力图中,颜色越深,表明两性状间的相关性越强。蓝色表示两性状间呈正相关,红色则表示两性状间呈负相关。由图 1 可知,单株产量与行

表3 不同密度下自交系特征值分析

Table 3 Eigenvalue analysis of inbred lines under different densities

性状 Character	低密度 Low-density					高密度 High-density				
	极小值 Minimum	极大值 Maximum	变异系数 Coefficient of variation	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	极小值 Minimum	极大值 Maximum	变异系数 Coefficient of variation	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis
R. P	6	20	13.87	0.12	1.39	6	20	18.39	-0.08	0.40
N. P	6	34	29.10	0.33	-0.11	4	40	35.31	0.27	-0.28
S. L	6	19	18.44	0.11	-0.03	5.5	22	23.05	0.46	0.65
E. D	3	5	10.05	0.34	0.10	2.5	5	12.47	0.38	0.62
S. P	29.25	206.85	32.81	0.74	1.34	14.64	260	47.63	1.21	2.87
X100	13.5	45.15	19.46	0.11	0.32	12	40.85	20.17	0.20	-0.20
C. W	6.27	40.97	31.90	0.67	0.15	4.51	51.24	45.33	1.20	3.16
S. T	1.8	3.6	13.30	-0.15	0.20	1.6	3.6	13.98	0.30	0.20
L. S	5.8	19	19.25	0.24	0.40	6.7	18.7	16.27	-0.11	0.06
L. L	42	88.7	15.52	0.61	-0.07	42.7	88.7	15.71	0.17	-0.60
L. W	5.3	11.7	11.92	0.10	0.30	4.5	12.5	15.02	0.33	1.09
L. A	15.48	50.26	25.44	0.98	0.91	15.65	43.24	19.55	0.50	-0.22
P. H	97	197	14.47	-0.17	-0.26	123	242	12.77	0.45	0.73
S. H	24	92	23.07	0.02	-0.09	22	103	22.91	-0.14	-0.22
S. D	12.71	30.5	15.33	0.01	0.03	12.86	28.83	14.67	0.10	-0.14
P. S	15.1	92.9	26.57	0.30	0.11	22.9	84.6	23.17	0.37	-0.11
B. P	21.2	159.4	38.22	0.60	-0.05	19.8	144.9	37.68	0.36	-0.41
CII	33.2	68	12.93	-0.35	0.50	37.5	66.8	10.39	-0.54	0.42

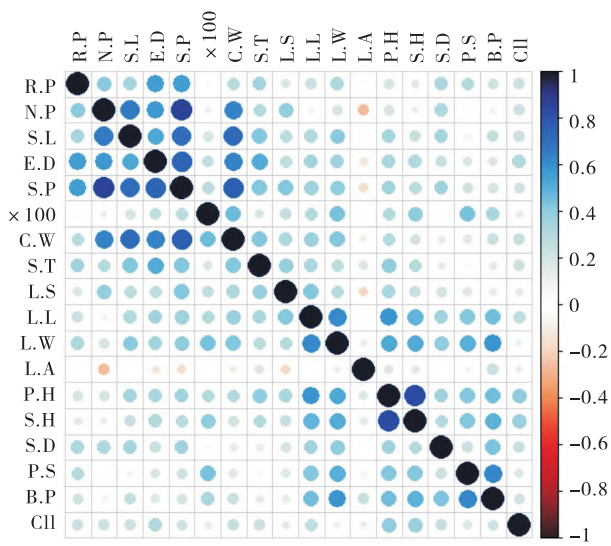
**表示0.01水平差异显著($P<0.01$);*表示0.05水平差异显著($P<0.05$)。 ** Significantly difference at 0.01 level($P<0.01$);* Significantly difference at 0.05 level($P<0.05$). R. P:穗行数 Rows per panicle;N. P:行粒数 Number of grains per row;S. L:穗长 Spike length;E. D:穗粗 Ear diameter;S. P:单株产量 Single panicle weight;X100:百粒质量 X100 grain weight;;C. W:穗轴质量 Cob weight;S. T:轴粗 Shaft thickness;L. S:叶间距 Left spacing;L. L:叶长 Leaf length;L. W:叶宽 Leaf width;L. A:叶夹角 Leaf angle;P. H:株高 Plant height;S. H:穗位高 Spike height;S. D:茎粗 Stem diameter;P. S:穿刺强度 Puncture strength;B. P:弯曲性能 Bending properties;CII:叶绿素 Chlorophyll II.

粒数、穗轴质量、穗粗、穗长、穗行数、轴粗、叶间距、叶宽、叶长、株高、茎粗呈极显著正相关,相关系数分别为0.861、0.767、0.746、0.717、0.553、0.428、0.423、0.405、0.366、0.358、0.352;与叶夹角呈负相关,相关系数为-0.169;与百粒质量、穗位高呈显著正相关;与其余性状正相关。叶夹角与行粒数呈显著负相关,相关系数为-0.267;与弯曲性能呈显著正相关,相关系数为0.241;与叶间距、单穗质量、穗粗、穗轴质量、百粒质量、穗长、穗行数呈负相关;与其余指标呈正相关。

2.4 主成分分析

对68份玉米自交系的18个农艺性状进行主成

分分析(表4和图2)。根据特征值大于1,满足主成分分析的原则,选取5个主成分,累计贡献率70.776%。这5个主成分覆盖了大部分农艺性状。其中,主成分1(PC1)的初始特征值为6.576,贡献率为36.534%,为主要贡献者。在主成分中,单株产量、穗轴质量、穗粗、叶宽、穗长和株高受影响最大,载荷值分别是0.809、0.733、0.725、0.711、0.707和0.7,其中,单株产量负荷最大。主成分2(PC2)的初始特征值为2.629,贡献率为14.604%。弯曲性能、叶绿素和行粒数对该成分有贡献,载荷值分别为0.54、0.53和-0.64,其中弯曲性能的负荷最大。主成分3(PC3)的初始特征值为1.302,贡献率为



R. P.: 穗行数 Rows per panicle; N. P.: 行粒数 Number of grains per row; S. L.: 穗长 Spike length; E. D.: 穗粗 Ear diameter; S. P.: 单株产量 Single panicle weight; X100: 百粒质量 X100 grain weight; C. W.: 穗轴质量 Cob weight; S. T.: 轴粗 Shaft thickness; L. S.: 叶间距 Left spacing; L. L.: 叶长 Leaf length; L. W.: 叶宽 Leaf width; L. A.: 叶夹角 Leaf angle; P. H.: 株高 Plant height; S. H.: 穗位高 Spike height; S. D.: 茎粗 Stem diameter; P. S.: 穿刺强度 Puncture strength; B. P.: 弯曲性能 Bending properties; CII: 叶绿素 Chlorophyll II.

图1 各农艺性状间的相关性分析

Figure 1 Correlation analysis among agronomic characters 7.232%。叶夹角负荷最大, 载荷值为0.57。主成分4(PC4)初始特征值为1.182, 贡献率为6.587%。轴粗负荷最大, 载荷值为0.43。主成分5(PC5)初始特征值为1.047, 贡献率为5.819%。叶夹角负荷最大, 载荷值为0.48。综上所述, 5个主成分对玉米产量均有影响, 单株产量、穗轴质量、穗粗、叶宽、穗长、株高、弯曲性能、叶夹角、叶绿素和轴粗可以作为评价玉米耐密性的特征指标。

2.5 自交系耐密性综合分析

计算出5个综合指标的隶属函数值, 在5个综合指标中隶属函数值最大的材料是GAU630。根据表4中5个综合指标的贡献率计算权重, 分别为0.516、0.206、0.102、0.093和0.082。 D 值表示每个玉米材料的综合耐密性大小, 根据 D 值的综合排名可知, 材料GAU630的 D 值最大, 为0.704, 表明该材料的耐密性最强, 材料GAU669的 D 值最小, 为0.261, 表明该材料的耐密性最弱。对 D 值进行系统聚类(图3), 在欧式距离8处将68份自交系分为4类(表5), 其中强耐密性的材料有2份, 分别是GAU630和

表4 自交系各指标主成分分析

Table 4 Principal component analysis of inbred lines

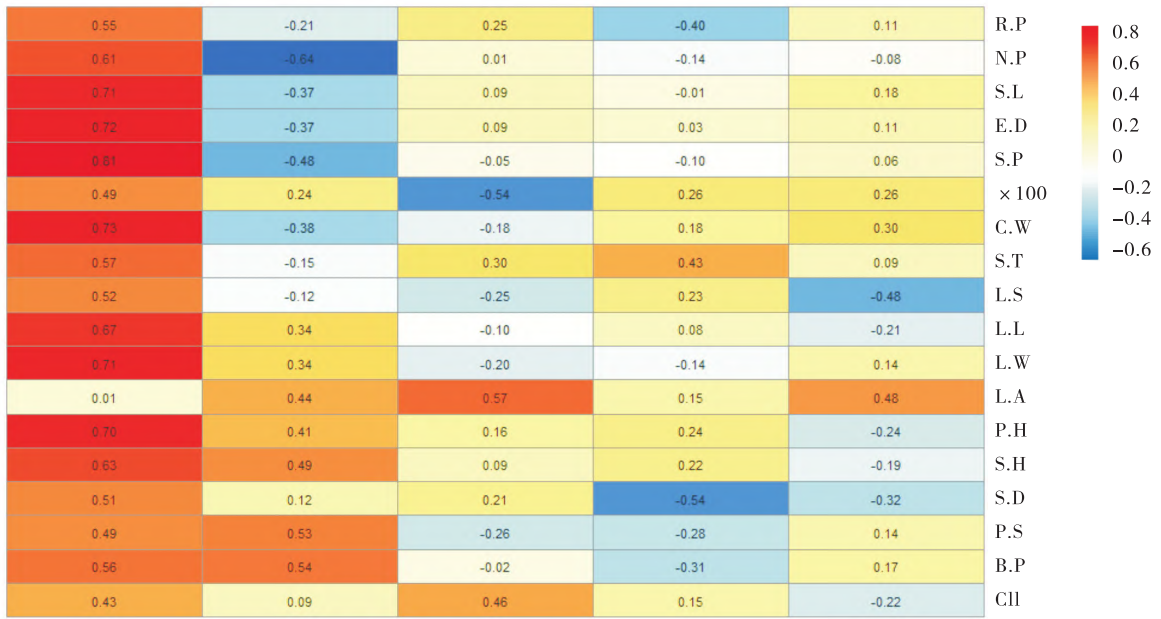
成分 Ingredients	合计 Total	方差的百分比/% Percentage of variance	累积贡献率/% Cumulative contribution rate
1	6.576	36.534	36.534
2	2.629	14.604	51.138
3	1.302	7.232	58.370
4	1.186	6.587	64.957
5	1.047	5.819	70.776
6	0.893	4.961	75.737
7	0.874	4.858	80.595
8	0.639	3.551	84.146
9	0.572	3.175	87.321
10	0.489	2.715	90.037
11	0.408	2.265	92.302
12	0.327	1.817	94.119
13	0.301	1.674	95.793
14	0.242	1.343	97.136
15	0.204	1.131	98.267
16	0.160	0.887	99.155
17	0.104	0.577	99.731
18	0.048	0.269	100.000

GAU810; 中等耐密性的材料有19份, 分别是GAU694、GAU715、GAU683等; 耐密性较弱的材料有46份, 分别是GAU617、GAU702、GAU615等; 不耐密的材料有1份, 为GAU669。

2.6 逐步回归分析及筛选耐密指标

利用玉米自交系的综合耐密指数和 D 值对所有性状的耐密指数进行逐步回归分析, 得到回归方程(表6), 其中综合耐密值和其预测值, D 值和其预测值均达到极显著水平。由回归方程可知, 单株产量、弯曲性能、株高、穗轴质量、叶夹角和穗位高这6个指标与玉米耐密性显著相关。

在主成分分析中, 筛选出单株产量、穗轴质量、穗粗等10个指标作为玉米耐密性的评价指标。在逐步回归分析中, 筛选出单株产量、弯曲性能、株高、穗轴质量、叶夹角和穗位高6个指标与玉米耐密性显著相关, 与主成分分析中所筛选出的评价指标一致。综上, 单株产量、弯曲性能、株高、穗轴质量和叶夹角这5个指标可以作为评价玉米耐密性的指标。



R. P: 穗行数 Rows per panicle; N. P: 行粒数 Number of grains per row; S. L: 穗长 Spike length; E. D: 穗粗 Ear diameter; S. P: 单株产量 Single panicle weight; X100: 百粒质量 X100 grain weight; C. W: 穗轴质量 Cob weight; S. T: 轴粗 Shaft thickness; L. S: 叶间距 Left spacing; L. L: 叶长 Leaf length; L. W: 叶宽 Leaf width; L. A: 叶夹角 Leaf angle; P. H: 株高 Plant height; S. H: 穗位高 Spike height; S. D: 茎粗 Stem diameter; P. S: 穿刺强度 Puncture strength; B. P: 弯曲性能 Bending properties; CII: 叶绿素 Chlorophyll II.

图 2 主成分载荷值

Table 2 Principal component load value

表 5 自交系耐密分类表

Table 5 Classification of inbred lines

类型 Type	材料编号 Material number
强耐密性 Strong tightness	GAU630、GAU810
中等耐密性 Medium tightness	GAU694、GAU715、GAU683、GAU289、GAU280、GAU597、GAU187、GAU699、GAU536、GAU241、GAU277、GAU600、GAU601、GAU286、GAU623、GAU248、GAU250、GAU538、GAU593
耐密性较弱 Weak tightness	GAU617、GAU702、GAU615、GAU182、GAU824、GAU635、GAU728、GAU668、GAU725、GAU234、GAU642、GAU807、GAU631、GAU695、GAU633、GAU712、GAU719、GAU592、GAU735、GAU682、GAU708、GAU599、GAU640、GAU611、GAU713、GAU806、GAU763、GAU667、GAU779、GAU671、GAU764、GAU619、GAU802、GAU618、GAU628、GAU730、GAU651、GAU744、GAU813、GAU608、GAU649、GAU195、GAU778、GAU616、GAU648、GAU805
不耐密 Not resistant	GAU669

3 讨论

随着农业技术的不断进步,玉米单株产量也不断提高,但仅提高玉米单株产量已经很难实现玉米总产量的较大幅度提高。因此,适当提高种植密度是我国玉米增产的重要途径^[16]。有研究表明,随着

种植密度的增加,穗粒数及百粒重减少^[17],但由于种植株数的增加,玉米单株间的竞争随之增加,植株倾向于较高的株高和较细的茎粗^[18]。也有研究结果表明,玉米植株的产量相关性状均随密度的增大而减小,单株产量降低^[19]。选用耐密性较好的玉米材料,通过密植来提高玉米单位面积产量,是玉米增产的重要途径^[20-21]。本试验通过模糊隶属函数法对玉米

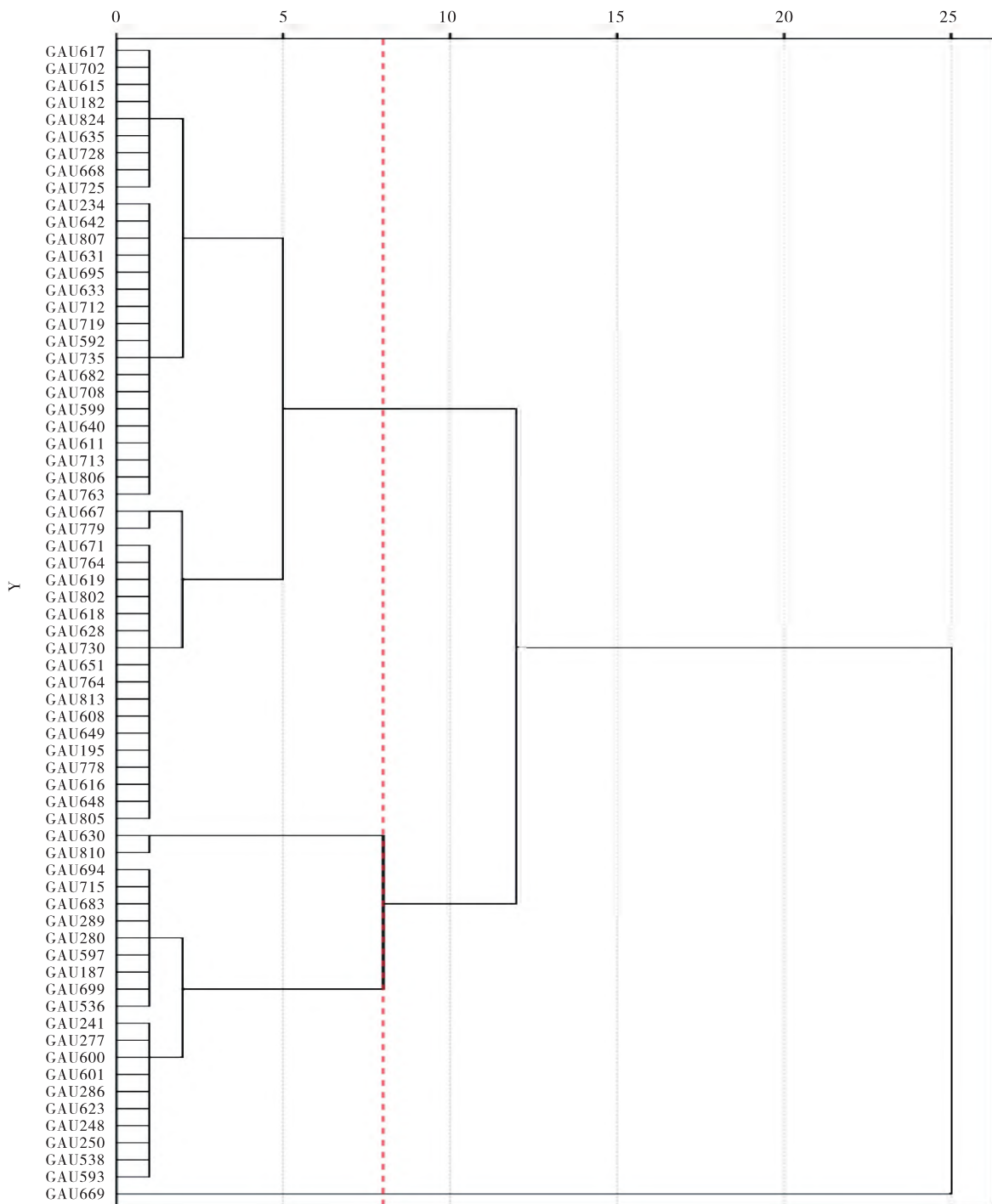


图3 基于R值的玉米耐密性聚类分析

Figure 3 Cluster analysis of maize density tolerance based on R value

自交系材料的产量相关性状和田间表型性状进行综合评价,筛选出强耐密材料2份,不耐密材料1份。

对多个耐密指标进行综合评价可判定材料的耐密性。玉米耐密性受到多性状作用,将多个指标转化为几个综合指标来对自交系的耐密性进行评价,获得对自交系耐密性影响较大的指标,使得结果更加准确可靠。朱志明等^[22]研究表明,干旱胁迫下玉

米幼苗的6个单项指标转化为3个综合指标可以较为准确地评价玉米幼苗的耐旱性。目前对耐旱性和耐盐性评价的研究已有较多的报道,而鲜有对玉米耐密性综合评价的报道。边丽梅等^[23]研究表明,株高、穗位高、茎秆压折强度、平均穗质量、茎粗、倒伏率、行粒数和产量等8个指标可以作为耐密性评价指标。王富贵等^[24]研究表明,相对茎粗、相对SPAD

表6 不同自交系品种的耐密性预测模型及预测值的相关性分析

Table 6 Prediction model of density tolerance of different inbred lines and correlation analysis of predicted values

因变量 Dependent variable	逐步回归方程 Stepwise regression equation	R^2	相关系数 Correlation coefficient		
			耐密预测值 Density prediction value	D 预测值 D predicted value	单株产量 Yield per plant
综合耐密值 Comprehensive tightness value	$y=0.409+0.138$ 单株产量 $+0.108$ 弯曲性能 $+0.262$ 株高 $+0.073$ 穗轴质量	0.960	1	0.820 **	0.850 **
综合耐密度量值 Comprehensive density resistance Value	$y=-0.05+0.122$ 株高 $+0.101$ 穗轴质量 $+0.119$ 叶夹角 $+0.043$ 弯曲性能 $+0.096$ 穗位高	0.953		1	0.489 **

值、相对净光合速率、相对干物质质量、相对秃尖长、相对行粒数和相对单株产量等7个指标作为玉米杂交种耐密性强弱的评价指标。杨锦越等^[25]在10个农艺性状中筛选出3个耐密性评价指标,即茎秆压折强度、穗位高系数和倒伏率。吴琼等^[26]将10个相互关联的单项指标转换成为4个相互独立的综合指标作为植株抗倒伏能力的鉴定指标,分别是干物质积累、节间长、全钾含量和株高。由于试验地点,试验材料和密度设置不同,试验结果也不尽相同。

本试验利用主成分分析、聚类分析、隶属函数分析和逐步回归分析等分析方法,综合评价了68份玉米自交系材料的18项指标,玉米材料的耐密性主要由5个综合指标共同决定。根据5个综合指标值的贡献率求出隶属函数值,并对各综合指标进行加权,得到不同玉米材料耐密植能力的综合评价值(D 值),利用 D 值与综合耐密指数得出逐步回归方程,综合主成分分析与逐步回归方程筛选出鉴定玉米耐密性的5个单项指标,分别为单株产量、弯曲性能、株高、穗轴重和叶夹角。

4 结论

通过隶属函数法和聚类分析,将68份不同基因型的玉米自交系材料分为4类,强耐密性的材料2份,中等耐密性的材料19份,耐密性较弱的材料46份,不耐密材料1份。综合主成分分析与逐步回归分析,单株产量、弯曲性能、株高、穗轴重和叶夹角这5个指标可以作为玉米耐密性的鉴定指标。

参考文献

[1] Tollenaar M, Lee E A. Yield potential, yield stability

and stress tolerance in maize [J]. Field Crops Research, 2002, 75(2-3):161-169.

[2] Yi Q, Hou X, Liu Y, et al. QTL analysis for plant architecture-related traits in maize under two different plant density conditions [J]. Euphytica, 2019, 215(9).

[3] 陈传永,侯玉虹,孙锐,等. 密植对不同玉米品种产量性能的影响及其耐密性分析[J]. 作物学报, 2010, 36(7):1153-1160.

[4] Bastos L M, Carciochi W, Lollato R P, et al. Winter wheat yield response to plant density as a function of yield environment and tillering potential: A review and field studies [J]. Frontiers in Plant Science, 2020, 11.

[5] 马兴林,徐安波,杨久臣,等. 关于玉米种植密度的思考与讨论[J]. 玉米科学, 2020, 28(2):96-99.

[6] 金明华,矫树凯,刘兴武,等. 玉米自交系的耐密性及其与株型和配合力关系的研究[J]. 玉米科学, 1995(1):22-27.

[7] 樊景胜,阎淑琴,马宝新,李德新,连永利. 对玉米的耐密性及选育耐密品种的探讨[J]. 玉米科学, 2002(3):50-51.

[8] 洪德峰,卫晓轶,马俊峰,等. 高密度对不同基因型夏玉米农艺特性、产量性状及耐密性的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(28):13-21.

[9] 邵红雨,梁晓玲,布来提·阿布拉,等. 新疆主要玉米品种密植条件下农艺性状及耐密性研究[J]. 玉米科学, 2013, 21(5):18-23.

[10] 张丽宏,李新,罗湘宁,等. 不同类型玉米耐密性分析及对主要性状的影响[J]. 西北农业学报, 2014, 23(3):36-39.

[11] 齐建双,郭书磊,谷利敏,等. 密度对不同玉米自交系生物学性状的影响及其耐密性分析[J]. 河南农业科

- 学. 2018,47(7):43-47.
- [12] 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(4):653-661.
- [13] 洪德峰,马俊峰,马毅,等. 高密度条件下不同基因型玉米高产特性及耐密性研究[J]. 玉米科学,2019,27(3):41-47.
- [14] Zhao X, Fang P, Zhang J, et al. QTL mapping for six ear leaf architecture traits under water-stressed and well-watered conditions in maize (*Zea mays* L.) [J]. Plant Breeding. 2018,137(1):60-72.
- [15] 金兵兵,姬祥卓,庄泽龙,等. 种植密度对不同玉米品种农艺性状及产量的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2021,56(3):73-85.
- [16] 刘伟,张吉旺,吕鹏,等. 种植密度对高产夏玉米登海661产量及干物质积累与分配的影响[J]. 作物学报, 2011,37(7):1301-1307.
- [17] 丰光,李妍妍,景希强,等. 玉米不同种植密度对主要农艺性状和产量的影响[J]. 玉米科学,2011,19(1): 109-111.
- [18] Liu T, Gu L, Dong S, et al. Optimum leaf removal increases canopy apparent photosynthesis, 13C-photosynthate distribution and grain yield of maize crops grown at high density [J]. Field Crops Research,2015,170:32-39.
- [19] 李宁,翟志席,李建民,等. 密度对不同株型的玉米农艺、根系性状及产量的影响[J]. 玉米科学,2008(5): 98-102.
- [20] 赵如浪,王永宏,赵健,等. 春玉米高产不同基因型品种耐密性比较及特征研究[J]. 种子. 2014,33(9): 71-75.
- [21] 苏义臣,苏桂华,金明华. 吉林省玉米主推品种耐密性评价[J]. 安徽农学通报,2014,20(21):27-28.
- [22] 朱志明,许兴,毛桂莲. 不同玉米自交系幼苗对水分胁迫的响应及其耐旱性评价[J]. 干旱地区农业研究,2018,36(2):176-185.
- [23] 边丽梅,孙峰成,董喆,等. 燕山北部丘陵区春玉米品种耐密性评价及鉴定指标筛选[J]. 作物研究,2021, 35(1):72-79.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 吴琼,杨克军,张翼飞,等. 不同基因型玉米耐密植抗倒性分析及其鉴定指标的筛选[J]. 玉米科学,2017, 25(4):40-47.

(责任编辑 胡文忠)

(上接第52页)

- [36] Li Z, Ding N, Guo L Y, et al. Effects of different ratios of organic manure and chemical fertilizer on growth, yield and quality of winter wheat and summer maize [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2013,45(7):71-77.
- [37] Vick B A, Jan C C, Miller J F. Two-year study on the inheritance of reduced saturated fatty acid content in sunflower seed [J]. Helia, 2004, 27 (41) : 25-40.
- [38] Zheljzkov V D, Vick B A, Baldwin B S, et al. Oil content and saturated fatty acids in sunflower as a function of planting date, nitrogen rate, and hybrid [J]. Agronomy Journal,2009,101(4):1003-1011.
- [39] 吴兵,赵利,谢亚萍,等. 不同有机肥对油用亚麻品质的影响[J]. 土壤与作物,2015,4(2):77.
- [40] 崔红艳,许维成,孙毓民,等. 施用有机肥对土壤水分、胡麻产量和品质的影响[J]. 水土保持学报, 2014,28(3):307-312.

(责任编辑 李辛)