

玉米选系群体遗传增益对种植密度的选择响应

张丰屹^{1,2}, 唐娟^{2,3}, 杨致远^{2,4}, 李一², 张宇星², 宋炜⁵,
王宝强⁵, 李明顺², 张德贵², 李新海², 雍洪军²

(1. 黑龙江省农业科学院大豆研究所, 哈尔滨 150086; 2. 中国农业科学院作物科学研究所/作物分子育种国家工程实验室, 北京 100081;

3. 四川省内江市威远县观英滩镇人民政府, 四川 内江 642456; 4. 河西学院, 甘肃 张掖 734000;

5. 河北省农林科学院粮食作物研究所, 石家庄 050070)

摘要: 以来自不同杂种优势类群的F₂选系基础群体郑58×LH196(SS类群)和昌7-2×MBUB(NSS类群)为试验材料, 在5个选系密度下, 采用混合选择方法, 分别获得选系群体C₁~C₄世代。2017年种植40个世代群体材料, 评价选系群体产量遗传增益及主要农艺性状变化特征。结果表明, 随着选系密度的增加, 不同类群的玉米选系群体产量遗传增益均先增加后降低, 郑58×LH196和昌7-2×MBUB分别在150 000株/hm²和120 000株/hm²选系密度下产量遗传增益最高。高密度循环育种过程中选系群体株型性状受选择影响较小, 产量与生育期及穗部性状相关性较高。为进一步提高遗传增益, 高密度循环育种应从C₁或更早世代开始加大密度选择压力, 在后代材料中应注重早开花和行粒数的选择以及穗长和百粒重等性状的协同改良。

关键词: 玉米; 密度; 群体; 世代; 循环育种

中图分类号: S513.031

文献标识码: A

Response of Genetic Gain in Maize Selection Population to Planting Density

ZHANG Feng-yi^{1,2}, TANG Juan^{2,3}, YANG Zhi-yuan^{2,4}, LI Yi², ZHANG Yu-xing², SONG Wei⁵,
WANG Bao-qiang⁵, LI Ming-shun², ZHANG De-gui², LI Xin-hai², YONG Hong-jun²

(1. Soybean Research Institute, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086; 2. Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences/National Engineering Laboratory of Crop Molecular Breeding, Beijing 100081; 3. People's Government of Guanyingtan Town, Weiyuan County, Neijiang in Sichuan Province, Neijiang 642456; 4. Hexi University, Zhangye 734000; 5. Institute of Cereal and Oil Crops, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050070, China)

Abstract: The F₂ selection base population Zheng 58×LH196(SS group) and Chang7-2×MBUB(NSS group) from different heterotic groups were selected as experimental materials. The mass selection was adopted to obtain C₁~C₄ generations under the five densities. In 2017, 40 generation populations obtained from the two groups under five different densities were planted to evaluate the genetic gain of yield and the change of main agronomic traits. The results showed that the genetic gain in grain yield for selected population groups first increased and then decreased as density increased. Zheng 58×LH196 and Chang 7-2×MBUB reached the highest genetic gain under the density of 150 000 and 120 000 plants/ha, respectively. In the process of high density cycle breeding, the plant type traits were less affected by selection, and the significant correlation between yield and growth and ear traits was found. In order to further improve genetic gain, maize cycle improvement should be carried out in a suitable high-density environment, and density selection pressure should be increased from C₁ or earlier generation. Additionally, emphasis should be placed on selecting for early flowering, row number, ear length, and 100-grain weight.

Key words: Maize; Density; Population; Generation

录用日期: 2024-02-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1200802)、国家玉米产业技术体系(CARS-02-02)

作者简介: 张丰屹(1994-), 男, 哈尔滨人, 硕士, 助理研究员, 研究方向为作物遗传育种。E-mail: ddszhangfy2019@163.com

唐娟为并列第一作者。E-mail: 137402231@qq.com

李新海和雍洪军为本文通信作者。E-mail: lixinhai@caas.cn E-mail: yonghongjun@caas.cn

近年来,我国玉米单产增长徘徊,原因之一是突破性新品种选育未有显著进展,育种改良效率有待进一步提高^[1]。玉米新品种选育“难在选系”^[2]。实践证明,循环育种是提高玉米种质有利等位基因频率、提升育种水平的重要途径。通过在群内多次回交、自交和杂交等,优中选优,从而提高一般配合力,积累更多的有利等位基因位点,选育出农艺性状优良且配合力高的育种材料,再在群间杂交,组配出强优势杂交种^[3-4]。因此循环育种是选育优良自交系和强优势杂交种的有效方法^[5]。

高密度育种策略是人为创造逆境和选择压力、选育耐逆自交系和杂交种的重要技术选择。其原理是利用基因型与环境互作效应,通过扩大选系和筛选杂交组合群体的分离谱,增加遗传方差和选择强度提高育种效率^[6-10]。在高密度环境下,耐密性强的育种材料或杂交组合吐丝快而集中,雄穗分枝少而花粉量大,花期协调,抗倒伏,耐低氮,结实性好^[11-14]。玉米杂交种耐密性和产量紧密相关^[15-18],耐密性受多种因素的影响,产量、穗位高、穗长、穗粗、穗行数、行粒数、百粒重等产量相关性状可以作为评价玉米耐密性的指标^[19]。此外,植株叶夹角越小,冠层截光率越低,中、下部光照越强,株高/穗位高比越低,抗倒伏能力越强,玉米耐密性越好^[20-21]。因此,在适宜高密度循环育种是创制育种新材料、进一步

提高遗传增益的有效途径。目前尚未系统揭示不同种植密度下玉米循环育种各世代材料性状差异和遗传增益变化特征。为此,本文分别选用代表SS和NSS类群的2个选系基础群体为试验材料,设置5个种植密度,采用统一的选择标准,获得4个世代群体,在相同鉴定密度下,评价不同种植密度下获得的玉米选系群体遗传增益差异,为开展高密度循环育种策略提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 选系群体构建及其加代选育方法

如图1所示,2014年在北京顺义,按照同一杂种优势类群,构建2个杂交组合(郑58×LH196,以下简称为ZL群体;昌7-2×MBUB,以下简称为CM群体)。2014年在海南南滨,将每个杂交组合各种植2行,自交获得2个F₂选系群体(C₀世代)。2015年在北京顺义,在60 000、90 000、120 000、150 000、180 000株/hm²密度下,每个C₀群体各种植300株,通过模拟循环育种方法,在每种密度下各选择30个优良单株混粉,收获后再选择10个优良果穗混合脱粒,得到10个C₁世代选系群体。2015年在海南南滨,将10个C₁群体在对应种植密度下,按照相同标准获得10个C₂世代选系群体。2016年继续按照相同方法获得C₃和C₄世代选系群体。

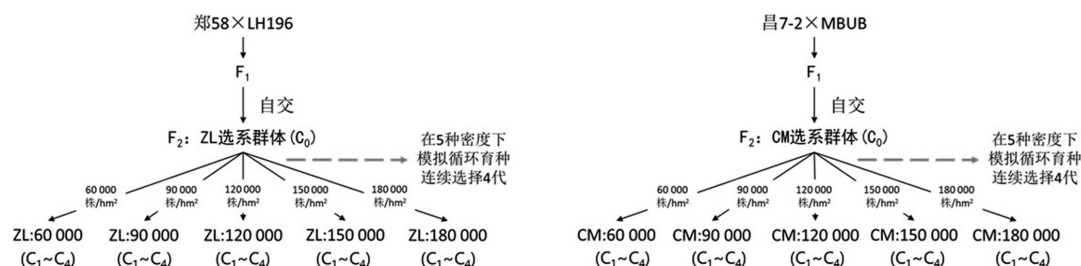


图1 SS类群(左)与NSS类群(右)选系群体系谱图

Fig.1 Genealogy of the selected lineages of SS group(left) and NSS group(right)

1.2 田间试验设计

2017年,将5个密度下获得的40个C₁~C₄世代选系群体,连同2份对照(郑单958、中单115),分别种植于河北石家庄和河南新乡,试验期间降雨量和有效积温见图2。试验采用不完全区组设计,2行区,2次重复,4 m行长,鉴定密度统一设置为60 000株/hm²。田间管理同大田管理。

1.3 测定指标

本试验以产量(小区产量折14%水分)为主要依据计算遗传增益,测定与种植密度相关的性状,包括生育期性状(抽丝期)和穗部性状(穗长、穗粗、行粒

数、百粒重),用于分析产量与其他农艺性状的相关关系。

1.4 统计与分析

利用Excel 2016软件汇总与校对数据,以小区为单位,计算各小区农艺性状均值,绘制不同种植密度下农艺性状的变化趋势图。利用R 4.1.2软件进行方差分析,SPSS 26.0软件进行相关性分析。根据遗传增益均值评价选系群体在不同种植密度下的改良效果。遗传增益计算公式^[19]: $\Delta G = (\bar{X}_{si} - \bar{X}_i) / \bar{X}_i$, 式中, $\bar{X}_{si}$ 为选择后群体第*i*性状的平均数; $\bar{X}_i$ 为选系群体第*i*性状的平均数。

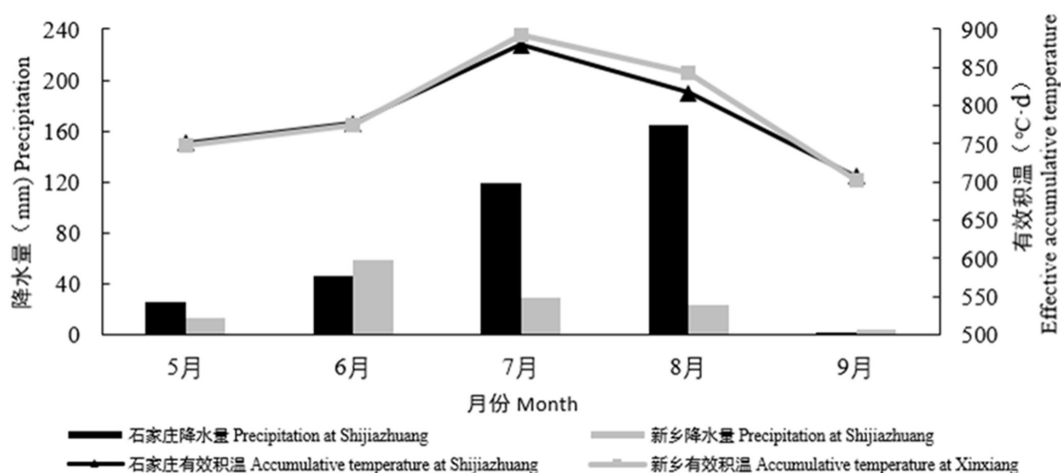


图2 2017年试验点玉米生育期降水量及有效积温分布

Fig.2 Precipitation distribution and effective accumulated temperature during maize growth period at experimental sites in 2017

2 结果与分析

2.1 方差分析

由表1所示,行粒数、穗粗、穗长、百粒重、产量在不同基因型间均存在极显著差异。抽丝期、穗粗、百粒重等性状地点间均呈显著或极显著差异,说明此类性状受环境影响较大。抽丝期、行粒数、穗长、百粒重、产量等性状等在不同世代间均存在极显著差异,说明循环改良过程中这些性状的响应较高,具有显著的遗传效应。行粒数、穗粗、穗长在不同选系密度间存在显著或极显著差异,说明这些性状受选系密度影响较大,更容易在不同选系密度下被选择。行粒数、穗粗、穗长、百粒重在世代与密度互作

条件下均存在极显著差异,结合基因型方差分析结果,产量未达显著水平可能是由于两类群体对世代与密度互作条件响应存在差异导致的。分析各差异来源与地点互作效应,只有产量在世代与地点互作、基因型与地点互作存在显著差异,抽丝期在基因型和地点达极显著差异,说明在不同地点间,各性状对不同差异来源响应一致,数据整齐度高,结果真实可信。

2.2 不同密度下SS类群选系群体产量及其遗传增益表现

由图3所示,在60 000株/hm²鉴定密度下,对于相同改良轮次群体,随着选系密度的增加,C_i世代产量呈降低趋势,其中,最大产量在60 000株/hm²密度

表1 5种选系密度下不同世代选系群体农艺性状方差分析

Table 1 Analysis of variance for agronomic traits of maize populations derived from different generations under five planting densities

差异来源 Source	自由度 DF	抽丝期 Silking period	行粒数 Kernel number per row	穗粗 Ear diameter	穗长 Ear length	百粒重 100-kernel weight	产量 Yield
基因型(G)	39	9.92	42.02**	0.12**	10.49**	34.77**	27 666.89**
地点(E)	1	478.40**	11.41	0.28 *	0.01	67.74 *	18 492.17
世代(G)	3	40.15**	117.60**	0.12	19.62**	44.53**	311 506.80**
选系密度(D)	4	2.99	78.73**	0.13*	10.82**	14.80	5 301.52
世代×密度 G×D	12	7.30	33.75**	0.01**	6.13**	19.73**	2 553.46
世代×地点 G×E	3	3.94	0.70	0.05	0.50	3.74	9 167.87*
选系密度×地点 D×E	4	1.71	4.81	0.03	0.24	4.68	5 054.81
基因型×地点 G×E	39	4.40**	5.21	0.03	0.68	3.58*	3 871.50*
世代×选系密度×地点 G×D×E	12	2.71	2.07	0.01	0.39	2.53	3 914.51

注:*,**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平达显著。下表同。

Note: * and ** mean significant at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively. The same below.

下获得(4 114.12 kg/hm²),其次在 150 000 株/hm²密度下 获得 (3 904.66 kg/hm²), 90 000、120 000、180 000 株/hm²密度下产量接近。随着选系密度的增加,C₂世代产量整体呈升高趋势,最大产量在 150 000 株/hm²密度下获得(6 259.26 kg/hm²),90 000、120 000、180 000 株/hm²密度下产量表现依然相近,本世代中 60 000 株/hm² 密度下产量最低 (3 987.81 kg/hm²),且较 C₁世代略有下降。随着选系密度的增加,C₃世代产量呈先升高后降低趋势,其

中,在 90 000 株/hm²密度下产量最大(6 895.60 kg/hm²),之后随密度增加产量逐渐降低,在 60 000 株/hm²密度下产量最低(5 538.37 kg/hm²)。随着选系密度的增加,C₄世代产量整体变化不大,最大产量在 150 000 株/hm²密度下获得(7 244.69 kg/hm²),其次是 60 000 株/hm² 密度下 获得 (7 153.80 kg/hm²), 90 000 株/hm²密度下产量最低。整体来看,经过 4 轮改良后,ZL 选系群体最大产量在 150 000 株/hm²密度下 C₄世代获得。

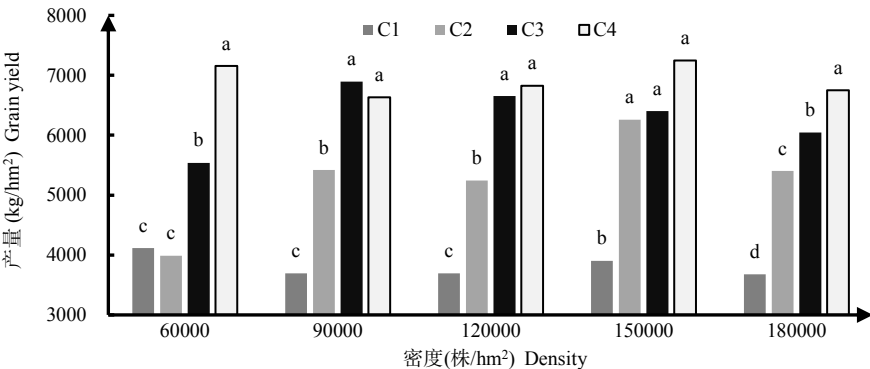


图3 5种选系密度下不同世代ZL选系群体在60 000株/hm²鉴定密度下产量

Fig.3 Grain yield of ZL population derived from different generations under five planting densities at an identification density of 60 000 plants/ha

表2 5种选系密度下不同世代ZL选系群体在60 000株/hm²鉴定密度下产量遗传增益

Table 2 Genetic gain for grain yield of ZL populations derived from different generations under five planting densities at an identification density of 60 000 plants/ha

密度(株/hm ²) Density	遗传增益 Genetic gain			
	ΔC ₁ ~ C ₂	ΔC ₂ ~ C ₃	ΔC ₃ ~ C ₄	累计遗传增益 Cumulative genetic gain
60 000	-3.07	38.88	29.17	64.98
90 000	46.73	27.24	-3.79	70.18
120 000	42.02	26.88	2.52	71.42
150 000	60.30	2.31	13.13	75.74
180 000	46.85	11.84	11.69	70.38

在 60 000 株/hm²鉴定密度下,随着改良的进行,产量均呈上升趋势,但变化幅度差异较大。由表 2 可知,在 60 000 株/hm²选系密度下,C₁ ~ C₂世代遗传增益为负值,表明随着改良进行,选系群体产量反而降低;但 C₂ ~ C₃和 C₃ ~ C₄遗传增益逐渐提高。在 90 000 株/hm²选系密度下,C₁ ~ C₂和 C₂ ~ C₃遗传增益较高,C₃ ~ C₄世代遗传增益较低,表明随着改良进行产量逐渐提高,但到第 4 轮产量有所下降。在 120 000 株/hm²选系密度下,所有世代间遗传增益均呈正向,表明在此选系密度下,产量逐渐提高。在 150 000 株/hm²选系密度下,各世代也均产生正向的

遗传增益,其中 C₂ ~ C₃世代遗传增益较低,表明在此选系密度下,选系群体产量也逐渐提高。在 180 000 株/hm²选系密度下,各世代间均表现较高的正向遗传增益,表明在此选系密度下,选系群体产量也逐渐提高。从不同世代角度分析,C₁ ~ C₂世代产量最大遗传增益是在 150 000 株/hm²密度下获得,C₂ ~ C₃和 C₃ ~ C₄世代产量最大遗传增益均在 60 000 株/hm²密度下获得。各世代累计遗传增益随选系密度的变化趋势为先增加后降低,选系密度 150 000 株/hm²时达到最高。综上可知,连续改良 4 代后,选系密度在 150 000 株/hm²下,ZL 群体产量及累

计遗传增益均最高,表明SS类群选系群体此密度改良效果最好。

2.3 不同密度下NSS类群选系群体产量及其遗传增益表现

由图4所示,在60 000株/hm²鉴定密度下,随着选系密度的增加,CM选系群体C₁世代产量整体呈降低趋势,其中,最高产量在60 000株/hm²密度下获得(4 388.56 kg/hm²),其次是在150 000株/hm²密度下获得(3 863.07 kg/hm²),90 000和180 000株/hm²密度下产量接近,120 000株/hm²密度下产量最低。随着选系密度的增加,CM选系群体C₂世代产量整体呈降低趋势,其中,最高产量在60 000株/hm²密度下获

得(5 157.70 kg/hm²),其次是在150 000株/hm²密度下获得(4 940.92 kg/hm²),120 000株/hm²密度下产量最低(4 157.13 kg/hm²)。随着选系密度的增加,CM选系群体C₃世代产量整体呈升高趋势,其中,在150 000株/hm²密度下产量最大(6 467.61 kg/hm²),90 000株/hm²密度下产量最低(5 267.73 kg/hm²)。随着选系密度的增加,CM选系群体C₄世代产量呈先升高后降低趋势,在120 000株/hm²密度下获得最高产量(7 124.84 kg/hm²),180 000株/hm²密度下产量最低(6 677.83 kg/hm²)。总的来看,连续改良4代后选系密度在120 000株/hm²密度时,CM选系群体产量最高。

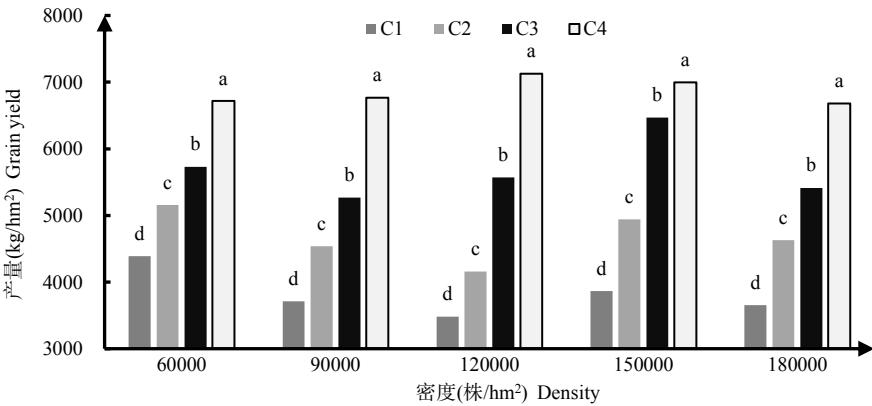


图4 5种选系密度下不同世代CM选系群体在60 000株/hm²鉴定密度下产量

Fig.4 Grain yield of CM population derived from different generations under five planting densities at an identification density of 60 000 plants/ha

在60 000株/hm²鉴定密度下,随着改良的进行,产量均呈上升趋势,但变化幅度差异也较大。由表3可知,在不同选系密度下,随着改良的进行,各世代产量稳步升高,在120 000株/hm²密度下遗传增益相对较高。从不同世代角度来看,在150 000株/hm²密度下C₁~C₂世代产量遗传增益最大,60 000株/hm²密度下遗传增益最小。在120 000株/hm²密度下

C₂~C₃世代产量遗传增益最大,60 000株/hm²密度下遗传增益最低。C₃~C₄世代最大遗传增益在90 000株/hm²密度下获得,150 000株/hm²密度下遗传增益最小。随选系密度的增加,各世代产量累计遗传增益呈先增加后降低,选系密度为120 000株/hm²最大,选系密度为60 000株/hm²最小,表明在120 000株/hm²密度下选系改良最好。

表3 5种选系密度下不同世代CM选系群体在60 000株/hm²鉴定密度下产量遗传增益

Table 3 Genetic gain for grain yield of CM populations derived from different generations under five planting densities at an identification density of 60 000 plants/ha %

密度(株/hm ²) Density	遗传增益 Genetic gain			
	ΔC ₁ ~ C ₂	ΔC ₂ ~ C ₃	ΔC ₃ ~ C ₄	累计遗传增益 Cumulative genetic gain
60 000	17.53	11.07	17.26	45.86
90 000	22.25	16.08	28.42	66.75
120 000	19.45	33.96	27.94	81.35
150 000	27.90	30.90	8.21	67.01
180 000	26.62	17.00	23.34	66.96

2.4 选系群体产量与其他农艺性状相关性

选择世代间和世代与选系密度间均呈显著的性状进行相关分析。由表4可知,在不同选系密度下群体产量与生育期、穗部性状之间均呈不同程度的相关关系。产量与抽丝期呈极显著负相关关系,与

行粒数呈极显著正相关关系,与穗长、百粒重呈显著正相关关系,与穗粗呈正相关关系,未达显著水平。行粒数与穗粗、穗长呈极显著正相关关系;穗粗与穗长呈极显著正相关关系;穗长与百粒重呈极显著正相关关系。

表4 5种选系密度下4个不同世代选系群体农艺性状间相关系数

Table 4 Correlation coefficient between agronomic traits of 4 different generations of line populations under five planting densities

性状 Trait	产量 Yield	抽丝期 Silking period	行粒数 Kernels per row	穗粗 Ear diameter	穗长 Ear length	百粒重 100-kernel weight
产量	1.00					
抽丝期	-0.44**	1.00				
行粒数	0.49**	-0.26	1.00			
穗粗	0.14	-0.09	0.55**	1.00		
穗长	0.34*	-0.23	0.77**	0.53**	1.00	
百粒重	0.35*	-0.18	0.24	0.30	0.59**	1.00

3 结论与讨论

3.1 选系群体不同世代产量及遗传增益对种植密度的响应

通过分析两类选系群体产量及其遗传增益,发现不同类群对种植密度的响应不同。SS选系群体C₁~C₂世代在高密度下改良效果较理想,在低密度下改良效果不佳;随选系密度的增加,C₂~C₃世代和C₃~C₄世代改良效果变差,中、低密度下改良效果显著优于高密度。NSS选系群体C₁~C₂世代在较高密度下改良效果最为理想,C₂~C₃世代在中高密度下改良效果最为理想,C₃~C₄世代在中低密度下改良效果最为理想;随着改良世代的增加,最适改良密度在逐渐降低。高密度育种策略的理论基础是利用基因型与环境的互作效应,通过极端压力条件,使材料缺点更容易暴露出来,以此施行抗逆育种。高密度育种的目的和本质是筛选抗逆自交系和杂交种,提高育种效率。本文以2个类群的选系群体为试验材料,也认为从C₁或更早世代开始可增加密度压力,实施高密度育种,后续还将根据最适密度在改良的同时,开展自交系选育。本文只设置1个鉴定密度(60 000株/hm²),得出的结论有一定的局限,下一步将设置鉴定密度梯度,系统评估选系群体的农艺性状和配合力变化特征,为高密度循环育种策略提供更为完整的理论参考。

3.2 高密度循环育种中选系群体农艺性状间的相关性

本研究发现,选系群体产量变化与行粒数、百粒

重、穗长等性状有较高的相关性。前人研究表明,当种植密度过大时,穗粒数和粒重的降低幅度远大于单位面积穗数的增幅,最终表现为增密不增产,甚至减产的现象^[22-23]。在高密度循环育种策略中,高密度压力下,穗粒数和粒重成为限制产量的关键因素,通过选择行粒数多、子粒重、长穗型的材料可有效提高选系群体产量。除穗部性状外,群体产量变化与抽丝期呈极显著负相关。李春奇等^[24]对不同密度下玉米雌雄穗分化的研究表明,随着密度增加,玉米雄穗的分化相应推迟。资料表明,以30 000~35 000株/hm²作为基数,每增加15 000株/hm²,抽丝期延迟1.5~3.0 d^[25]。说明在高密度压力下,群体抽丝期可从一定程度上反映群体的耐密等级,抽丝期越早,耐密性越强,产量潜力越大。有研究表明,随着种植密度的增加,植株内部的竞争促使植株快速生长以吸收更多光照^[26],表现为植株穗位高均较高^[27],雄穗分枝数降低。但株型性状在本文鉴定密度(60 000株/hm²)下未见显著性差异,可能是由于在低密度条件下,环境资源充足,群体株型性状趋于一致。下一步将在不同密度梯度下,系统评估高密度循环育种中选系群体株型性状的选择效果,为高密度循环育种中优良单株的选择提供参考。

随种植密度的增加,不同类群的选系群体产量遗传增益均呈先增加后降低,其中SS选系群体在150 000株/hm²密度条件下改良效果最佳,NSS选系群体在120 000株/hm²密度条件下改良效果最佳,此密度下连续改良4代后产量及累计遗传增益均最高。建议选系群体从C₁或更早世代开始增加密度,

进一步提高遗传增益。同时,在高密度循环选系中,除注重选择行粒数多、生育期较早的材料外,还应注重穗长、百粒重的选择。

参考文献:

- [1] 刘纪麟. 玉米育种学[M]. 北京:中国农业出版社,2002.
- [2] 徐田军,张 勇,赵久然,等. 不同杂种优势群玉米自交系子粒灌浆和脱水速率评价[J]. 植物遗传资源学,2021,22(6): 1595–1605.
XU T J, ZHANG Y, ZHAO J R, et al. Evaluation of grain filling and dehydration rate of maize inbred lines in different heterosis groups [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2021, 22(6): 1595–1605. (in Chinese)
- [3] HALLAUER A R, RUSSELL W A, LAMKEY K R. Corn breeding [M]. Corn and Corn Improvement, Madison, WI, 1988: 469–565.
- [4] HALLAUER A R. Methods used in developing maize inbreds[J]. Maydica, 1990, 35(1): 1–16.
- [5] 李晨燕. 基于循环选系技术改良玉米大斑病研究[D]. 长春:吉林农业大学,2021.
- [6] 彭泽斌,张世煌. 玉米群体改良的问题与对策[J]. 中国农业科学,2000,33(增刊): 16–20.
PENG Z B, ZHANG S H. The problems and countermeasures of maize population improvement[J]. Agricultural Sciences in China, 2000, 33(S): 16–20. (in Chinese)
- [7] 戴景瑞,鄂立柱. 我国玉米育种科技创新问题的几点思考[J]. 玉米科学,2010,18(1): 1–5.
DAI J R, E L Z. Scientific and technological innovation of maize breeding in China[J]. Journal of Maize Sciences, 2010, 18(1): 1–5. (in Chinese)
- [8] 李芦江. 不同轮回选择方法对玉米窄基群体的改良效果[D]. 雅安:四川农业大学,2010.
- [9] 张世煌,田清震,李新海,等. 玉米种质改良与相关理论研究进展[J]. 玉米科学,2006,14(1): 7–11.
ZHANG S H, TIAN Q Z, LI X H, et al. Advancement of maize germplasm improvement and relevant research[J]. Journal of Maize Sciences, 2006, 14(1): 7–11. (in Chinese)
- [10] 毛建昌,张世煌,李向拓. 选育高产、高配合力玉米自交系的途径与方法[J]. 中国农业科学,2006(5): 872–878.
MAO J C, ZHANG S H, LI X T. The methodology for maize inbred line with high yield selection of and high combining ability[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006(5): 872–878. (in Chinese)
- [11] TROYER A F, ROSENBROOK R W. Utility of higher plant densities for corn performance testing[J]. Crop Science, 1983, 23(5): 863–867.
- [12] CARLONE M R, RUSSELL W A. Response to plant densities and nitrogen levels for four maize cultivars from different eras of breeding[J]. Crop Science, 1987, 27(3): 465–470.
- [13] TOLLENAAR M. Genetic improvement in grain yield of commercial maize hybrids grown in Ontario from 1959 to 1988[J]. Crop Science, 1989, 29(6): 1365–1371.
- [14] EDMEADES G O, BANZIGER M, MICKELSON H R, et al. Developing drought- and low N- tolerant maize[J]. CIMMYT, 1996: 557–563.
- [15] 李继竹. 不同密度选择压力下玉米耐密性鉴定及遗传性研究[D]. 长春:吉林农业大学,2013.
- [16] 张世煌. 中美两国玉米育种思路和技术水平的比较[J]. 北京农业,2007(14): 13–16.
ZHANG S H. Comparison of maize breeding ideas and technical levels between China and the United States[J]. Beijing Agriculture, 2007, 14: 13–16. (in Chinese)
- [17] 张世煌. 论玉米高密度育种和生产上的密植[J]. 北京农业,2009(29): 1–2.
ZHANG S H. On dense planting in high density breeding and production of corn[J]. Beijing Agriculture, 2009(29): 1–2. (in Chinese)
- [18] 张世煌. 商业育种弱化了杂种优势[J]. 种子科技,2014,32(9): 15–16.
ZHANG S H. Commercial breeding weakens heterosis[J]. Seed Technology, 2014, 32(9): 15–16. (in Chinese)
- [19] 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.
HONG D F, MA J F, MA Y, et al. Study on the property of density tolerance in maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2019, 27(3): 41–47. (in Chinese)
- [20] 任 军,张志军,张建新. 玉米理想株型育种与超级玉米育种[J]. 农业与技术,2006,26(2): 51–52.
REN J, ZHANG Z J, ZHANG J X. Ideal plant type breeding of corn and super corn breeding[J]. Agriculture and Technology, 2006, 26(2): 51–52. (in Chinese)
- [21] MOCK J J, PEARCE R B. An ideotype of maize[J]. Euphytica, 1975, 24(3): 613–623.
- [22] ZHANG D S, SUN Z X, FENG L S, et al. Maize plant density affects yield, growth and source – sink relationship of crops in maize/peanut intercropping[J]. Field Crops Research, 2020, 257: 107926.
- [23] 王利青,于晓芳,高聚林,等. 不同年代玉米品种子粒产量形成对种植密度的响应[J]. 作物学报,2022,48(10): 2625–2637.
WANG L Q, YU X F, GAO J L, et al. Response of grain yield formation to planting density of maize varieties in different eras[J]. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(10): 2625–2637. (in Chinese)
- [24] 李春奇,郑慧敏,李 芸,等. 种植密度对夏玉米雌穗发育和产量的影响[J]. 中国农业科学,2010,43(12): 2435–2442.
LI C Q, ZHEN H M, LI Y, et al. Effect of planting density on the yield and development of maize ear[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(12): 2435–2442. (in Chinese)
- [25] 孟佳佳. 种植密度对玉米雌雄穗分化及子粒发育的影响[D]. 泰安:山东农业大学,2013.
- [26] LAFITTE H R, EDMEADES G O. Stress tolerance in tropical maize is linked to constitutive changes in ear growth characteristics [J]. Crop Science, 1995, 35(3): 820–826.
- [27] 刘培利,林 琪,隋方功,等. 紧凑型玉米根系高产特性的研究[J]. 玉米科学,1994,2(1): 59–63.
LIU P L, LIN Q, SUI F G, et al. Study on the characteristics of root system in high-yield upright-leaf maize[J]. Journal of Maize Sciences, 1994, 2(1): 59–63. (in Chinese)

(责任编辑:朴红梅)