

10个玉米DH系主要农艺性状的配合力及应用潜力分析

李金凤¹, 尹兴福², 张兴洁¹, 王庭照³, 李霖卓¹, 刘美辰¹, 李绍雄¹, 孙家臣³, 番兴明²

(1. 云南大学资源植物研究院, 昆明 650500; 2. 云南省农业科学院粮食作物研究所, 昆明 650205;

3. 云南农业大学农学与生物技术学院, 昆明 650201)

摘要: 采用NC II遗传交配设计,以10个新选DH系和3个测验种配制30个杂交组合,以云瑞408为对照,分析7个产量性状的配合力和杂种优势,依据产量特殊配合力(SCA)划分杂种优势群。配合力分析表明,新选DH系材料中DHYML6-12、DH18SCX和YBQ11的多个穗部性状具有正向的一般配合力(GCA)效应值,且单株产量GCA效应值位于前3名,具有较高的育种利用潜力。根据产量SCA效应值,判定DH18SCX、DHYML6-12和YBQ11属Reid类群,DHYML023、X5和YML3249属Non-Reid类群,DHTML862、YML3924、YML3972和YML7939属Suwan1类群。新选DH系与测验种按照“三角形”杂优模式组配获得的组合具有较强的杂种优势。

关键词: 玉米;DH系;配合力;对照优势;杂种优势群

中图分类号: S513.032

文献标识码: A

Analysis of Main Traits Combining Ability and Application Potential of 10 Maize DH Lines

LI Jin-feng¹, YIN Xing-fu², ZHANG Xing-jie¹, WANG Ting-zhao³, LI Lin-zhuo¹, LIU Mei-chen¹,
LI Shao-xiong¹, SUN Jia-chen³, FAN Xing-ming²

(1. Resource Plant Research Institute, Yunnan University, Kunming 650500;

2. Institute of Food Crops, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205;

3. College of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: With three tester lines and ten freshly chosen DH lines—Yunrui408 serving as the control, an NCII genetic mating design was used to generate thirty hybrid pairings. The combining ability and heterosis of 7 yield traits were analyzed, and heterotic groups were classified based on specific combining ability(SCA) for yield. The newly chosen DH lines' ear traits of DHYML6-12, DH18SCX, and YBQ11 all demonstrated positive general combining ability(GCA) effects, according to combining ability analysis. The single-plant yield GCA effects ranked among the top three, suggesting their high breeding potential. Preliminary classifications of the Reid group included DH18SCX, DHYML6-12, and YBQ11; the Non-Reid group included DHYML023, X5, and YML3249; and the Suwan1 group included DHTML862, YML3924, YML3972, and YML7939. These classifications were based on the yield SCA effects. Strong heterosis was seen in the combinations that were created by combining the recently chosen DH lines with tester lines in accordance with the “TriHG” heterosis paradigm.

Key words: Maize; DH line; Combining ability; Relative heterosis; Heterotic group

录用日期: 2024-05-08

基金项目: 云南省科技人才与平台计划项目(202205AF150028)、云南省粮食安全种业支撑专项(530000210000000013809)、云南省“兴滇英才支持计划”项目

作者简介: 李金凤(2000-),女,广西桂平人,硕士,主要从事玉米遗传育种研究。Tel:18776167716

E-mail:jinfengli1020@163.com

番兴明为本文通信作者。E-mail:xingmingfan@163.com

培育玉米新品种的关键在于选育出基因型纯合的优良亲本。利用单倍体育种技术,通过诱导、鉴定和加倍处理,仅需2~3代就能获得纯合的DH系^[1]。通过测定新选DH系的配合力,可以了解其利用潜力,对筛选优良亲本DH系和指导亲本选配具有较大的实用价值。李艳华等^[2]采用NC II设计,研究玉米DH系在3个地点的配合力和杂种优势,发现

J1577和J1590的一般配合力较高,应用潜力大,组合J1590×J1881的产量稳定且高。周旭梅等^[3]通过分析8个玉米DH系主要性状的配合力,筛选出3个优良亲本和3个具有增产潜力的组合。配合力的研究为杂种优势群理论的发展奠定了基础^[4]。自20世纪80年代以来,我国育种学家对玉米种质杂种优势群划分和杂种优势模式构建进行了深入的研究,其核心目的是提高组配优势组合的概率^[5-7]。在不同玉米生态区,主要种质类群及其优势组合的组配方式会因地域差异而有所不同。前人对热带、亚热带玉米种质与温带种质的配合力和杂种优势进行研究,将自交系划分为Reid、Non-Reid和Suwan1杂种优势群,即“三群”杂种优势群,结合实际育种实践提出了适用于西南地区的“三角形”杂种优势模式(Reid×Suwan1、Non-Reid×Suwan1和Reid×Non-Reid),显著提高了育种效率^[8-11]。

近年来,随着玉米单倍体育种技术的成熟,生产DH系的效率大幅提高。因DH系未经自然选择,适应性不佳,如何从众多DH系中筛选出优良个体并加以利用是高效配制优良杂交种的关键。配合力是评估DH系利用价值及划分类群的关键指标,是杂交种亲本选择的重要依据。本研究以10份新选玉米DH系为被测系,与3个测验种按NC II遗传交配设计配制30个杂交组合,在3个不同生态环境下进行配合力和杂种优势分析,划分杂种优势群和杂种优势模式。综合评价10个新选DH系的利用价值并筛选表现优异的杂交组合,同时验证“三群”杂种优势群和“三角形”杂种优势模式在西南地区的实际育种价值,为后续的亲本选配提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验选取10份新选玉米DH系材料为被测系,与3个分别代表Reid、Non-Reid和Suwan1杂种优势群的测验种按照NC II遗传交配设计方法进行测配,配制30个杂交组合。参试玉米材料名称及来源见表1和表2。10份DH系材料均由基础材料经云诱二号诱导获得单倍体后,通过自然加倍、筛选后获取,所有试验材料均由云南省农业科学院粮食作物研究所提供。

1.2 田间试验设计

30个杂交组合材料于2023年在云南景洪勐罕镇、砚山县江那镇、芒市勐戛镇3个不同生态环境下进行鉴定,各试验点的基本生态条件及播种与收获日期如表3所示,以云瑞408为对照。试验采用完全

表1 10个被测系来源
Table 1 Sources of 10 tested lines

被测系名称 Tested line name	来源 Source	生态类型 Ecological type
DH18SCX	选自杂交种KN2	温带
DHTML862	选自杂交种WG3861	热带
DHYML6-12	选自杂交种MON2	温带
YML7939	Suwan1	热带
YBQ11	Reid杂选	温带
YML3924	Suwan/P147	热带
X5	选自Pioneer3105	温热改良系
YML3972	Suwan/CML172	热带
DHYML023	选自杂交种W023	温热改良系
YML3249	YML32/049	温热改良系

表2 3个测验种来源
Table 2 Sources of 3 test varieties

测验种名称 Tester name	来源/系谱 Source	代表类群 Heterotic group
TML108	改良掖107	Reid
DSTML418	选自CORN60	Non-Reid
DHTRL221	泰国热带玉米种质Nei408	Suwan1

随机区组设计,设置两次重复,单行区,行长5 m,行距70 cm,株距23 cm,密度约为62 115株/hm²。管理等同于当地大田生产。

1.3 性状调查

杂交组合及对照材料的果穗成熟后,取每行中间连续的5个果穗进行室内考种,测定包括穗长、穗粗、穗行数、行粒数、百粒重、出籽率和单株产量(14%水分)在内的7个产量性状的表型值。性状测定方法参照《玉米种质资源描述规范和数据标准》^[12]。

1.4 统计分析方法

利用软件Excel 2016整理表型原始数据及计算单株产量对照优势, $H=(F_1-CK)/CK\times 100\%$ 。式中, F_1 是杂交组合单株产量平均值;CK是对照品种(云瑞408)单株产量平均值。应用AGD-R^[13]数据处理软件对7个产量性状进行方差分析和配合力分析,用SPSS18.0进行相关性分析,小提琴图由软件R(<http://www.r-project.org/>)制作完成。

1.5 杂种优势群划分方法

依据30个玉米杂交组合的单株产量特殊配合力(specific combining ability, SCA)效应值高低进行玉米杂种优势群划分,在测验种固定的情况下,将组合

表3 2023年3个试验点的基本生态条件及播种日期与收获日期

Table 3 The basic ecological conditions, planting dates, and harvest dates of three experimental sites

地点 Site	海拔(m) Altitude	经、纬度 Longitude and latitude	气候情况 Ecological condition	播种日期 (月·日) Planting date	收获日期 (月·日) Harvest date
景洪	525	东经100°58′ 北纬21°54′	北热带和南亚热带湿润季风气候,年平均气温21℃, 2023年全年降水量627.5 mm,雨季为5-10月	03·15	07·07
砚山	1 540	东经104°10′ 北纬23°30′	亚热带季风气候,年均气温16.5℃,2023年全年降水 量884.2 mm,雨季为5-10月	04·26	09·12
芒市	1 370	东经98°40′ 北纬24°25′	亚热带季风气候,年平均气温19.6℃,2023年全年降 水量1 890.4 mm,雨季为5-10月	06·02	10·10

间SCA效应值较低的被测系与测验种划入同一杂种优势群,组合间SCA效应值较高的被测系与测验种划入不同的杂种优势群^[14-16]。

2 结果与分析

2.1 联合方差分析

对30个杂交组合在3个不同生态环境下的7个产量性状进行联合方差分析显示(表4),所测量的7

个性状在地点、杂交组合、地点×组合间差异均达极显著水平,表明这些性状受环境影响较大。7个产量性状在同一试验点的重复间存在显著或极显著差异,这可能是由于玉米生长过程中地块的水分和肥力分布不均等原因造成玉米长势不同,从而导致数据不够准确。各性状在被测系、测验种、被测系×测验种的差异也均达极显著水平,说明各性状均存在真实差异,可以进一步进行配合力分析。

表4 杂交组合方差分析

Table 4 Variance analysis of hybrid combinations

变异来源 Source of variation	自由度 Df	均方 MS						
		穗长 Ear length	穗粗 Ear diameter	穗行数 Row ear number	行粒数 Kernel row number	百粒重 100- kernel weight	出籽率 Kernel rate	单株产量 Yield per plant
地点	2	152.43**	164.54**	26.55**	468.14**	583.02**	196.83**	50 705.52**
重复(地点)	6	1.06*	4.26**	0.16**	4.47*	9.78**	1.65**	753.68**
杂交组合	29	25.99**	51.51**	15.20**	79.40**	92.97**	22.98**	3 419.11**
测验种	2	97.78**	30.20**	67.94**	87.26**	372.46**	3.42**	880.47**
被测系	9	50.84**	118.46**	29.44**	148.15**	125.46**	66.40**	4 110.04**
被测系×测验种	18	5.58**	20.40**	2.23**	44.15**	45.67**	3.44**	3 355.72**
地点×组合	58	2.04**	5.27**	1.53**	11.76**	23.43**	4.59**	976.01**
地点×测验种	4	1.81**	17.71**	8.91**	16.46**	85.11**	5.89**	1 816.34**
地点×被测系	18	3.69**	7.11**	1.49**	22.50**	42.50**	5.90**	1 742.71**
地点×被测系×测验种	36	1.24**	2.96**	0.73**	5.87**	7.04**	3.80**	499.29**
误差	174	0.40	0.71	0.21	2.35	1.27	0.46	77.14

注:“*、**”分别表示在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 水平下差异显著。下表同。

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

2.2 配合力效应分析

2.2.1 一般配合力效应分析

穗长、穗粗、穗行数、行粒数、百粒重、出籽率等玉米的穗部性状,是重要的产量构成性状,也是重要的育种目标。玉米亲本穗部性状具有较高的一般配

合力(General combining ability, GCA)是获得高产杂交后代的重要保障。本试验所使用的10个被测系的GCA如表5所示,在6个穗部性状(穗长、穗粗、穗行数、行粒数、百粒重、出籽率)中,被测系材料DHYML6-12有5个性状GCA效应值为正值,

YBQ11、X5和DHYML023有4个,DH18SCX、YML7939有3个,且除YML7939外,这几个材料的单株产量GCA效应值也表现为正值,表明当亲本穗部性状的GCA相对效应为正值时,由这些亲本配制的组合得到的果穗有变长变粗、穗行数 and 行粒数变多、百粒重和出籽率变高的趋势,具有提高单株产量的潜力。

由被测系单株产量GCA柱状图(图1)可知,被测系中单株产量GCA效应值前3名分别为DHYML6-12(23.17)、DH18SCX(9.66)和YBQ11(7.40),表明由这3个DH系材料组配的杂交组合有较大概率获得高产品种。

表5 13个亲本的一般配合力效应估算值

Table 5 Estimates of GCA effects for the 13 parental lines

亲本 Parent	穗长 Ear length	穗粗 Ear diameter	穗行数 Row ear number	行粒数 Kernel row number	百粒重 100- kernel weight	出籽率 Kernel rate	单株产量 Yield per plant
DH18SCX	-0.96	3.73	2.08	-1.69	-0.68	0.36	9.66
DHTML862	1.74	-1.51	-0.03	-0.42	-1.08	-2.17	-7.02
DHYML6-12	2.17	0.37	-0.11	2.25	2.40	0.10	23.17
YML7939	-0.14	-1.84	-0.84	0.51	0.71	0.91	-3.19
YBQ11	0.63	0.34	0.85	2.24	-2.05	-1.10	7.40
YML3924	-1.83	1.36	1.03	-3.94	-1.85	-0.01	-15.66
X5	0.69	1.05	-0.59	2.83	-0.76	2.08	3.65
YML3972	-1.51	-3.21	-1.43	0.98	-1.53	-1.98	-19.13
DHYML023	0.46	-1.93	-0.24	0.59	0.02	2.54	0.95
YML3249	-1.24	1.64	-0.72	-3.35	4.83	-0.73	0.18
TML108	-0.40	-0.16	-0.19	0.91	-0.25	0.12	0.82
DSTML418	1.18	0.64	-0.76	0.13	2.15	0.10	2.63
DHTRL221	-0.79	-0.48	0.95	-1.04	-1.90	-0.22	-3.46

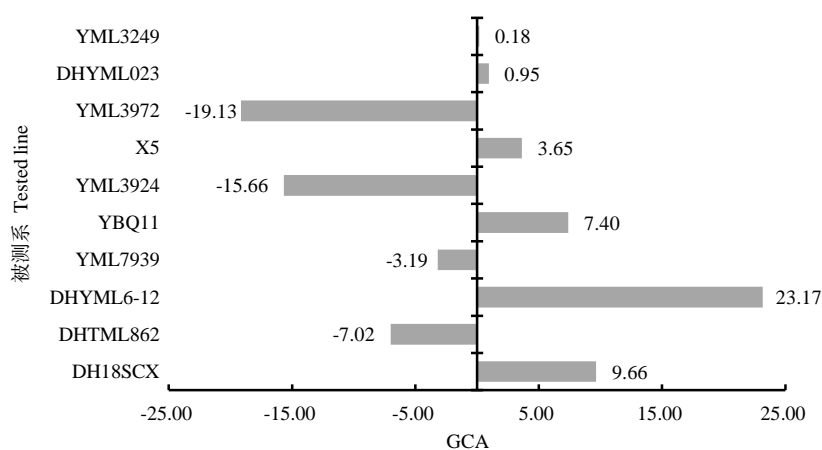


图1 10个被测系单株产量一般配合力效应值

Fig.1 Estimates of GCA effects among 10 tested lines for yield per plant

2.2.2 特殊配合力效应分析

目标性状SCA高低是筛选杂交组合的重要参考依据。由30个杂交组合在7个产量性状上的SCA效应值归类可知(表6),7个性状SCA效应值为正向和负向的杂交组合个数相差不大。效应值变幅最小的是穗行数,变幅最大的是单株产量。各性状SCA效应值最高的组合中,被测系DHTML862、DHYML023、DH18SCX、DHYML6-12、YML7939分

别出现3、2、1、1和1次,测验种DHTRL221、TML108、DSTML418分别出现4、2和2次。各性状SCA效应值最低的组合中,被测系YML7939、DHTML862、YML3249分别出现4、2和1次,测验种DHTRL221、DSTML418分别出现6次和1次。通过对比穗行数、行粒数、出籽率和单株产量的SCA正效应最大组合和SCA负效应最大组合的亲本可以发现,同一亲本与不同亲本杂交得到的组合在相同

表6 30个杂交组合各性状特殊配合力分析

Table 6 Thirty hybrid combinations analysis for SCA of each trait

性状 Trait	正效应个数 No. of positive combination	负效应个数 No. of negative combination	效应值变幅 Range of variation	正效应最大组合 Combination of positive max	负效应最大组合 Combination of negative max
穗长	17	13	-1.12 ~ 1.08	DHYML023×DHTRL221	YML3249×DSTML418
穗粗	14	16	-2.15 ~ 2.41	DHTML862×TML108	YML7939×DHTRL221
穗行数	18	12	-0.77 ~ 0.64	DH18SCX×DHTRL221	DHTML862×DHTRL221
行粒数	14	16	-3.40 ~ 3.02	DHYML023×DHTRL221	YML7939×DHTRL221
百粒重	12	18	-3.36 ~ 4.79	DHTML862×TML108	YML7939×DHTRL221
出籽率	14	16	-1.33 ~ 0.85	DHYML6-12×DHTRL221 DHTML862×DSTML418	DHTML862×DHTRL221
单株产量	15	15	-29.55 ~ 27.89	YML7939×DSTML418	YML7939×DHTRL221

性状上的SCA效应值大小有很大的差距,表明想要获得目标性状SCA效应值高的杂交组合,父本和母本的选择同样重要。

2.3 杂交组合各性状对照优势和配合力效应相关性分析

对30个杂交组合各产量性状的对照优势与双亲一般配合力效应值之和(GCA_{L+T})及组合SCA效应值进行相关性分析。表7结果表明,7个性状的对照

优势与GCA_{L+T}的相关性均呈极显著正相关,且与穗行数的相关性最大(0.954),与单株产量的相关性最小(0.625);除穗行数和出籽率外,其余性状的对照优势与SCA的相关性均呈显著或极显著正相关,且与单株产量的相关性最大(0.781),与穗行数的相关性最小(0.301);除单株产量外,其余6个性状的对照优势与双亲GCA_{L+T}的相关性均大于与组合SCA的相关性。

表7 玉米杂交组合各性状对照优势与配合力效应之间的相关性分析

Table 7 Correlation analysis between hybrid F₁ phenotypes and combining ability effect

项目 Item	穗长 Ear length	穗粗 Ear diameter	穗行数 Row ear number	行粒数 Kernel row number	百粒重 100- kernel weight	出籽率 Kernel rate	单株产量 Yield per plant
GCA _{L+T}	0.931**	0.868**	0.954**	0.809**	0.834**	0.953**	0.625**
SCA	0.365*	0.496**	0.301	0.587**	0.552**	0.304	0.781**

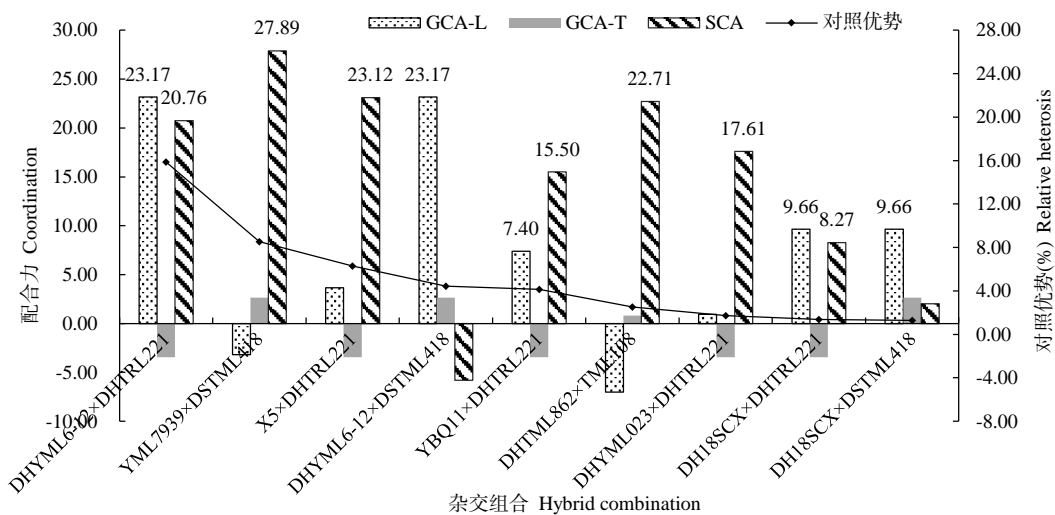


图2 杂交组合的单株产量对照优势、一般配合力及特殊配合力效应值

Fig.2 The relative heterosis, GCA and SCA effect of hybrid combinations on the yield per plant

为进一步了解杂种优势与配合力的关系,将单株产量对照优势为正向的9个组合的SCA及其双亲的GCA进行分析(图2)。从图2可以看出,这些组合至少有1个亲本具有正向GCA效应值,且其中5个杂交组合的被测系GCA位于前3名($GCA_i \geq 7.40$),有7个杂交组合SCA较高,说明组成优良组合的双亲之中至少有1个亲本的GCA较高,或组合有高SCA,或者GCA和SCA表现均较高。但亲本GCA高不一定能组配出SCA高的组合,如组合DHYML6-12×DSTML418和DH18SCX×DSTML418;SCA高的组合其亲本GCA也可能比较低,如组合DHTML862×TML108和DHYML023×DHTRL221,说明GCA和SCA具有相对独立性。因此,在杂交种培育过程中,

必须同时注重GCA、SCA和杂种优势的选择。综合来看,杂交组合DHYML6-12×DHTRL221、YML7939×DSTML418、X5×DHTRL221和YBQ11×DHTRL221的单株产量SCA和对照优势均较高。

2.4 杂种优势群划分

30个杂交组合的单株产量SCA效应值如表8所示。将组合间SCA效应值较低的被测系与测验种划入同一杂种优势群,新选DH系材料被划分为3类,结果见表9。第一类为包括DH18SCX、DHYML6-12和YBQ11的Reid群;第二类为包括DHYML023、X5和YML3249的Non-Reid群;第三类为包括DHTML862、YML7939、YML3924和YML3972的Suwan1群。

表8 30个杂交组合的单株产量特殊配合力效应值

Table 8 SCA effect on the yield per plant of 30 cross combinations

亲本 Parent	TML108	DSTML418	DHTRL221
DH18SCX	-10.30	2.03	8.27
DHTML862	22.71	-4.18	-18.53
DHYML6-12	-14.95	-5.81	20.76
YML7939	1.66	27.89	-29.55
YBQ11	-9.86	-5.64	15.50
YML3924	9.63	14.92	-24.56
X5	-9.32	-13.80	23.12
YML3972	9.11	8.61	-17.72
DHYML023	-6.93	-10.68	17.61
YML3249	8.24	-13.35	5.10

表9 10个DH系的杂种优势群划分结果

Table 9 The classification results of heterosis groups for 10 DH lines

杂种优势群 Heterotic group	代表系 Tester	被测系 Tested line
Reid	TML108	DH18SCX、DHYML6-12、YBQ11
Non-Reid	DSTML418	DHYML023、X5、YML3249
Suwan1	DHTRL221	DHTML862、YML7939、YML3924、YML3972

2.5 杂种优势模式分析

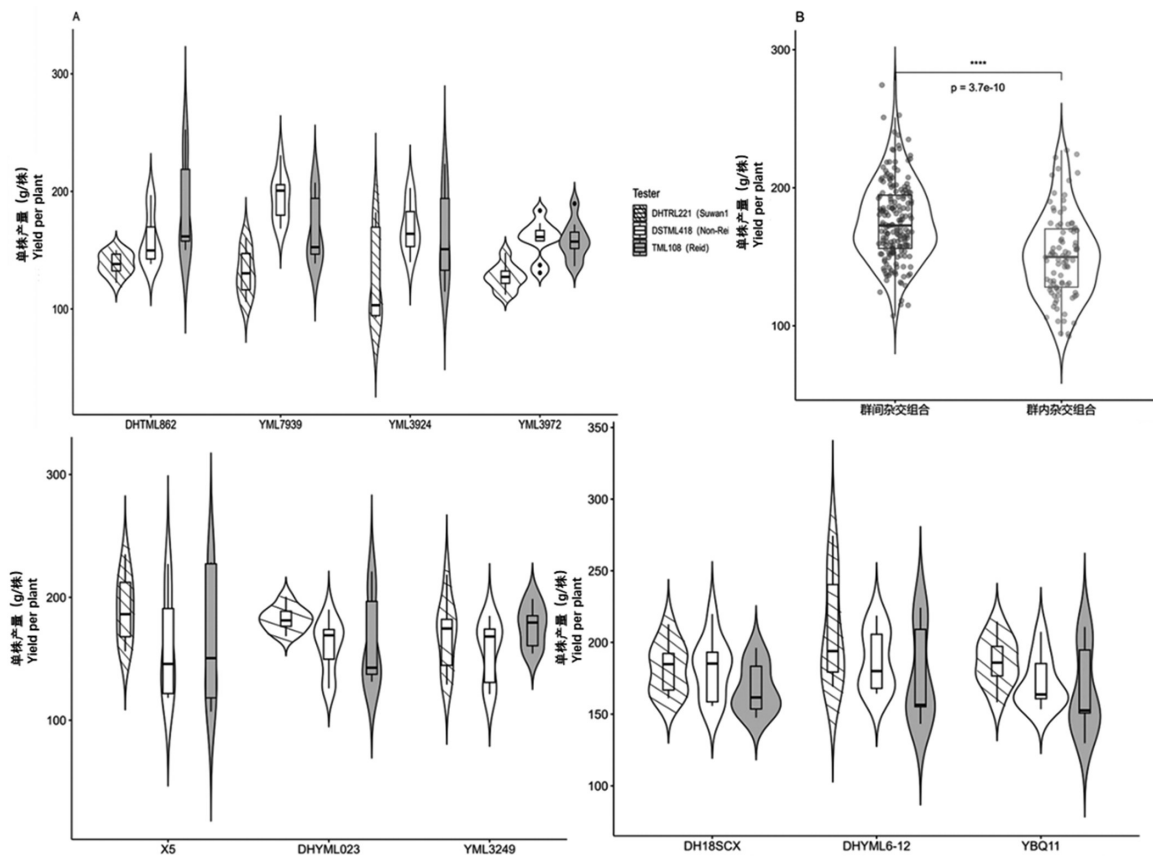
结合单株产量SCA划群结果,使用小提琴图展示了不同杂交组合单株产量的分布情况(图3)。图3A显示了30个杂交组合在3个试验点的单株产量,图3B比较了群间杂交组合(双亲来自不同杂种优势群)及群内杂交组合(双亲来自相同杂种优势群)在3个试验点的单株产量分布情况。由图3可以看出,除组合DHYML023×DHTML418外,在被测系相同的情况下,被测系与相同类群测验种杂交得到组合的

平均单株产量低于其与不同类群测验种杂交得到组合的平均单株产量。在3个试验点中,30个组合中全部群间杂交组合的平均单株产量显著高于全部群内杂交组合的平均单株产量。

表10列出了30个杂交组合的单株产量、排名和杂优模式。按照单株产量从高到低对这30个组合进行排序,并均匀地划分为高产组(单株产量范围为176.63~207.86 g)、中产组(单株产量范围为162.18~176.44 g)、低产组(单株产量范围为

123.71 ~ 160.29 g),每一组包含 10 个杂交组合。由表 10 可知,高产组的 10 个组合均是群间杂交组合;中产组的 10 个组合中有 7 个是群间杂交组合,3 个是群内杂交组合;低产组的 10 个组合中有 3 个是群间杂交组合,7 个是群内杂交组合。说明相比于群内杂交,群间杂交更容易获得高产组合。分析高产

组的 10 个组合的杂优模式发现,Reid×Suwan1 占 40%, Non-Reid×Suwan1 占 30%, Reid×Non-Reid 占 30%。表明根据“三群”杂种优势群理论对新选 DH 系进行杂种优势群划分,结合“三角形”杂种优势模式进行组配,更容易培育出高产杂交种。



注:****表示在 $P < 0.0001$ 水平下显著差异。

Note: **** indicated significant difference at $P < 0.0001$ level.

图3 不同杂交组合单株产量分布情况的小提琴图

Fig.3 Violin plots of the distribution of monoculture yields of different hybrid combinations

表 10 30 个杂交组合的单株产量、排名及杂优模式

Table 10 Yield per plant, rank and combining patterns of 30 hybrid combinations

类别 Category	杂交组合 Hybrid combination	单株产量(g/株) Yield per plant	排名(位) Rank	杂优模式 Combining pattern
高产组	DHYML6-12×DHTRL221	207.86	1	Reid×Suwan1
	YML7939×DSTML418	194.72	2	Suwan1×Non-Reid
	X5×DHTRL221	190.69	3	Non-Reid×Suwan1
	DHYML6-12×DSTML418	187.39	4	Reid×Non-Reid
	YBQ11×DHTRL221	186.83	5	Reid×Suwan1
	DHTML862×TML108	183.91	6	Suwan1×Reid
	DHYML023×DHTRL221	182.49	7	Non-Reid×Suwan1
	DH18SCX×DHTRL221	181.86	8	Reid×Suwan1
	DH18SCX×DSTML418	181.71	9	Reid×Non-Reid
	YML3249×TML108	176.63	10	Non-Reid×Reid

续表 10 Continued 10

类别	杂交组合	单株产量(g/株)	排名(位)	杂优模式
Category	Hybrid combination	Yield per plant	Rank	Combining pattern
中产组	DHYML6-12×TML108	176.44	11	Reid×Reid
	YBQ11×DSTML418	171.78	12	Reid×Non-Reid
	YML3924×DSTML418	169.28	13	Suwan1×Non-Reid
	YML3249×DHTRL221	169.21	14	Non-Reid×Suwan1
	DH18SCX×TML108	167.56	15	Reid×Reid
	YML7939×TML108	166.69	16	Suwan1×Reid
	YBQ11×TML108	165.75	17	Reid×Reid
	X5×TML108	162.54	18	Non-Reid×Reid
	DHYML023×TML108	162.23	19	Non-Reid×Reid
	YML3924×TML108	162.18	20	Suwan1×Reid
低产组	DHYML023×DSTML418	160.29	21	Non-Reid×Non-Reid
	X5×DSTML418	159.87	22	Non-Reid×Non-Reid
	YML3972×DSTML418	159.50	23	Suwan1×Non-Reid
	DHTML862×DSTML418	158.83	24	Suwan1 × Non-Reid
	YML3972×TML108	158.19	25	Suwan1×Reid
	YML3249×DSTML418	156.85	26	Non-Reid×Non-Reid
	DHTML862×DHTRL221	138.39	27	Suwan1×Suwan1
	YML7939×DHTRL221	131.19	28	Suwan1×Suwan1
	YML3972×DHTRL221	127.08	29	Suwan1×Suwan1
	YML3924×DHTRL221	123.71	30	Suwan1×Suwan1

3 结论与讨论

3.1 新选DH系的育种潜力综合评价

玉米的产量很大程度上取决于穗部性状的表现,穗部性状的GCA效应值越大,越容易组配出高产杂交种^[17-18]。本研究中供试的新选DH系中的DHYML6-12、YBQ11、X5、DHYML023、DH18SCX和YML7939在穗长、穗粗、穗行数、行粒数、百粒重和出籽率这6个穗部性状上具有3个及以上的正向GCA效应值,且除YML7939外,其余5个DH系的单株产量GCA效应值也表现为正值。用这些DH系组配得到的杂交组合大多具有较高的产量,高产组的10个组合中有8个是由这几个DH系与测验种组配获得的,而且这些组合大部分具有较高的单株产量SCA。说明这些DH系材料育种潜力较大,选用其作为亲本更容易选配出优良组合,如杂交组合DHYML6-12×DHTRL221、YML7939×DSTML418、X5×DHTRL221和YBQ11×DHTRL221,其单株产量SCA和对照优势均较高,可进一步研究其丰产性、稳产性和适应性。

3.2 配合力与杂种优势相关性分析

配合力作为预测杂种优势的重要方法,已被广泛应用和研究^[19]。本研究通过分析7个产量性状杂

种优势与配合力之间的关系,发现多个性状的杂种优势与亲本GCA_{L+T}、组合SCA均呈显著或极显著正相关,表明通过配合力进行杂种优势预测具有可行性。本研究亦发现,组成优良组合的两个亲本之中至少有1个亲本的GCA较高,或组合有高SCA,或者GCA和SCA表现均较高。但GCA效应值高的亲本可能会组配出SCA效应值低的组合,GCA效应值低的亲本也可能组配出SCA效应值高的组合,表明GCA与SCA之间没有表现出较强的一致性。因此,在杂交种培育过程中,应结合育种目标综合考虑GCA、SCA和杂种优势的表现。

3.3 杂种优势群和杂种优势模式分析

通过产量SCA法划分杂种优势群已被玉米界普遍接受和应用。把育种材料按照合理的杂种优势模式进行杂种优势群的划分,可以提高育种效率。本研究依据“三群”杂种优势群和“三角形”杂种优势模式理论选择3个分别代表Reid、Non-Reid和Suwan1类群测验种,采用NC II设计与10个新选玉米DH系配制30个杂交组合,通过分析30个组合的单株产量SCA效应值,初步判定新选的10个DH系中的DH18SCX、DHYML6-12和YBQ11为Reid类群,DHYML023、X5和YML3249为Non-Reid类群,DHTML862、YML3924、YML3972和YML7939为Su-

wan1类群。进一步分析30个组合的杂种优势模式发现,低产组的10个组合大多是群内杂交组合,而高产组的10个组合均是群间杂交组合,其组配方式Reid×Suwan1占40%,Non-Reid×Suwan1和Reid×Non-Reid各占30%。相较于群内杂交组合,大多数群间杂交组合的单株产量更高,全部群间杂交组合的平均单株产量显著高于全部群内杂交组合的平均单株产量。依据“三群”杂种优势群和“三角形”杂种优势模式理论对西南地区新选玉米DH系材料进行分类群和选配亲本,可以更高效利用新选材料,帮助改良种质和选配杂交种。

参考文献:

- [1] GEIGER H H, GORDILLO G A. Doubled haploids in hybrid maize breeding[J]. *Maydica*, 2009, 54(4): 485-499.
- [2] 李艳华,王鹏飞,周婷,等.不同环境下玉米DH系遗传分析及其杂交组合丰产性及稳产性分析[J]. *玉米科学*, 2019, 27(3): 23-29.
LI Y H, WANG Y F, ZHOU T, et al. Genetic analysis of maize DH lines in different environments & analysis of high yield and stability of their hybrid combinations[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2019, 27(3): 23-29. (in Chinese)
- [3] 周旭梅,高旭东,高洪敏,等.同一基础材料的玉米DH系主要农艺性状配合力分析及应用潜力评价[J]. *玉米科学*, 2020, 28(3): 31-36.
ZHOU X M, GAO X D, GAO H M, et al. Analysis on combining ability and application potential of maize DH lines from the same foundation material[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2020, 28(3): 31-36. (in Chinese)
- [4] 杨超明.不同比例热带种质对3个温带玉米自交系的改良效应[D].雅安:四川农业大学,2022.
- [5] 张培风,任帅,孙佩,等.利用SNP标记划分玉米地方种质杂种优势类群[J]. *中国种业*, 2023(2): 70-75.
ZHANG P F, REN S, SUN P, et al. Heterotic grouping of 100 local maize germplasm by SNP markers[J]. *China Seed Industry*, 2023(2): 70-75. (in Chinese)
- [6] 连晓荣,周文期,杨彦忠,等.16个新选玉米自交系主要性状配合力及应用潜力分析[J]. *分子植物育种*, 2024, 22(5): 1521-1531.
LIAN X R, ZHOU W Q, YANG Y Z, et al. Analysis of main traits combining ability and application potential of 16 maize inbred lines [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2024, 22(5): 1521-1531. (in Chinese)
- [7] 潘光堂,杨克诚,李晚忱,等.我国西南玉米杂种优势群及其杂种优势模式研究与应用的回顾[J]. *玉米科学*, 2020, 28(1): 1-8.
PAN G T, YANG K C, LI W C, et al. A review of the research and application of heterotic groups and patterns of maize breeding in Southwest China[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2020, 28(1): 1-8. (in Chinese)
- [8] FAN X M, YIN X F, ZHANG Y D, et al. Combining ability estimation for grain yield of maize exotic germplasm using testers from three heterotic groups[J]. *Crop Science*, 2016, 56(5): 2527-2535.
- [9] FAN X M, ZHANG Y D, YAO W H, et al. Reciprocal diallel crosses impact combining ability, variance estimation, and heterotic group classification[J]. *Crop Science*, 2014, 54(1): 89-97.
- [10] FAN X M, ZHANG Y M, YAO W H, et al. Classifying maize inbred lines into heterotic groups using a factorial mating design[J]. *Agronomy Journal*, 2009, 101(1): 106-112.
- [11] FAN M X, CHEN M H, TAN J, et al. A new maize heterotic pattern between temperate and tropical germplasms[J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100(4): 917-923.
- [12] 石云素,黎裕,王天宇,等.玉米种质资源描述规范和数据标准[M].北京:中国农业出版社,2006:27-36.
- [13] PHAM Q T, NGUYEN T D, NGUYEN T N A, et al. Heterosis, combining ability on yield, yield components and quality traits of purple sweet corn[J]. *Journal of Southern Agriculture* 2022, 53(5): 1193-1206.
- [14] 李佩瑶,王震,张先宇,等.41份中晚熟欧洲玉米选系的配合力及杂种优势分析[J]. *玉米科学*, 2018, 26(3): 28-31.
LI P Y, WANG Z, ZHANG X Y, et al. Analysis of main characters and heterosis of 41 species of European maize germplasm[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2018, 26(3): 28-31. (in Chinese)
- [15] 江禹奉,Phongdara Bounsavath,程伟东,等.老挝玉米自交系配合力分析及杂种优势群划分[J]. *西南农业学报*, 2020, 33(11): 2417-2425.
JIANG Y F, PHONGDARA B, CHENG W D, et al. Analysis on combining ability and heterotic grouping of maize inbred lines from Laos[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 33(11): 2417-2425. (in Chinese)
- [16] 姚文华,毕亚琪,陈洪梅,等.导入高VA原玉米种质产量配合力及杂种优势群分析[J]. *西南农业学报*, 2021, 34(5): 932-939.
YAO W H, BI Y Q, CHEN H M, et al. Yield combining ability and heterotic groups for maize germplasm with introducing provitamin [J]. *China Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 34(5): 932-939. (in Chinese)
- [17] 张时军,施吉嵘,罗开勇,等.玉米联合体昭通试点45个参试品种产量和穗部性状表现及相关通径分析[J]. *安徽农业科学*, 2023, 51(24): 38-40, 44.
ZHANG S J, SHI J R, LUO K Y, et al. Performance and correlation path analysis of yield and ear characters of 45 maize varieties in Zhaotong maize regional trials[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2023, 51(24): 38-40, 44. (in Chinese)
- [18] LI S J, DONG X, FU Z J, et al. Combining ability and correlation of ear characteristics of twenty maize inbred lines[J]. *Agricultural Science Technology*, 2017, 18(9): 1601-1606.
- [19] SOLOMON K F, ZEPPA A, MULUGETA S D. Combining ability, genetic diversity and heterosis in relation to F₁ performance of tropically adapted shrunken(*sh2*) sweet corn lines[J]. *Plant Breed*, 2012, 131(3): 430-436.

(责任编辑:朴红梅)