

DOI: 10.3724/SP.J.1005.2013.00703

美洲地区主要玉米群体特征及其利用途径分析

雍洪军¹, 王建军^{1,2}, 张德贵¹, 张晓聪¹, 李明顺¹, 白丽¹, 张世煌¹, 李新海¹

1. 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;
2. 山西省农业科学院玉米研究所, 忻州 034000

摘要: 美洲地区是全球玉米起源和遗传多样性中心, 优良种质渗入是拓宽我国玉米种质基础的有效途径。通过整理和分析不同学者关于美国、国际玉米小麦改良中心(International Maize and Wheat Improvement Center, CIMMYT)和巴西玉米种质的配合力及杂种优势研究结果, 鉴定出在我国可能有应用潜力的 24 个优良玉米群体, 包括 8 个美国群体, 8 个 CIMMYT 群体和 8 个巴西玉米群体。建议在适应性改良的基础上, 以我国本土化的 A 群和 B 群为核心, 将群体 BSSS(R)C10、BS10(FR)C14、BS13(S)C9、BSK(HI)C8 Syn 3、BR106、Pop44(C8)、Pop45(C3)与 A 群种质, 群体 BS11(FR)C14、BS16(S)C3 Syn 2、BS29(R)C3、BSCB1(R)C14、BR105、Pop42(C4)与 B 群种质构建复合群体, 开展改良, 拓宽我国玉米种质类群的遗传基础。

关键词: 玉米; 美洲; 产量配合力; 杂种优势反应

Characterization and potential utilization of maize populations in America region

YONG Hong-Jun¹, WANG Jian-Jun^{1,2}, ZHANG De-Gui¹, ZHANG Xiao-Cong¹, LI Ming-Shun¹, BAI Li¹, ZHANG Shi-Huang¹, LI Xin-Hai¹

1. National Engineering Laboratory of Crop Molecular Breeding, Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;
2. Maize Research Institute, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Xinzhou 034000, China

Abstract: Introgression of exotic maize (*Zea mays* L.) germplasm is an effective approach to broadening the genetic base of Chinese germplasm. America is the center of maize origin and germplasm diversity. By analyzing general combining ability effects and heterosis responses among maize populations from the U.S., International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT), and Brazil studied by different authors, 24 elite maize populations from America region, including eight U.S. populations, eight CIMMYT populations, and eight Brazilian populations, were identified as having high potential in China. Based on adaptation improvement, we suggest to introgress BSSS(R)C10, BS10(FR)C14, BS13(S)C9, BSK(HI)C8 Syn 3, BR106, Pop44(C8), and Pop45(C3) into Chinese heterotic group A, and introgress

收稿日期: 2012-09-07; 修回日期: 2012-10-16

基金项目: 国家玉米产业技术体系项目(编号: CARS-02-02)资助

作者简介: 雍洪军, 博士, 研究方向: 玉米种质改良。Tel: 010-82108560; E-mail: caas06a231@yahoo.com.cn

通讯作者: 张世煌, 研究员, 研究方向: 玉米遗传育种。Tel: 010-82108566; E-mail: cshzhang@yahoo.com.cn;

李新海, 研究员, 研究方向: 玉米种质改良与分子育种。Tel: 010-82108598; E-mail: lixh2008caas@yahoo.cn

网络出版时间: 2013-2-4 11:39:36

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1913.R.20130204.1139.002.html>

BS11(FR)C14, BS16(S)C3 Syn 2, BS29(R)C3, BSCB1(R)C14, BR105, and Pop42(C4) into Chinese heterotic group B by forming semi-exotic populations or pools, respectively, in order to broaden the Chinese germplasm base.

Keywords: *Zea mays* L.; America; general combining ability for grain yield; heterosis response

目前,我国玉米(*Zea mays* L.)育种应用的种质类群可划分为 A 群(SS、PA)、B 群(NSS、PB)和 D 群(四平头、旅大红骨)^[1~3],其中 A 群种质主要来源于 BSSS 选系及美国杂交种选系, B 群种质主要来源于 Mo17(Lancaster)改良系及 78599 等美国杂交种选系, D 群种质主要源于我国地方品种唐四平头和旅大红骨选系及其改良系。近年来,国内利用的 A 群和 B 群种质主要集中于美国少数几个自交系和商业杂交种选系上,导致其遗传基础相对狭窄,而引进和利用外来优良种质能增加育种群体的遗传变异^[4]。美洲地区是全球玉米起源中心和种质多样性中心,其中美国拥有丰富的温带种质,表现出茎秆强韧、产量潜力大、出籽率高、农艺性状和籽粒商品性优良等特点^[5];墨西哥国际玉米小麦改良中心(International Maize and Wheat Improvement Center, CIMMYT)、巴西等拥有丰富的热带亚热带玉米种质,表现出抗逆性强、根系发达、叶片浓绿、持绿期长等优点^[6]。Li 等^[7]研究认为美国种质遗传贡献率每增加 1%,我国玉米单产将提高 0.01 t/ha;以 CIMMYT 为代表的 CGIAR(Consultative Group on International Agricultural Research)系统的种质遗传贡献率每增加 1%,我国玉米单产将提高 0.025 t/ha。因此,鉴定和利用美洲地区优良种质,有效增加种质类群内的遗传变异,是拓宽我国现有玉米种质基础的重要途径。本文系统整理和分析了 1988~2011 年美国、CIMMYT、巴西学者关于玉米种质配合力及杂种优势效应的文献^[8~24],依据株高、抽丝期、产量等性状一般配合力(General combining ability, GCA)效应评价群体适应性及产量潜力,利用特殊配合力(Specific combining ability, SCA)、超亲优势或中亲杂种优势效应值,评价群体之间的杂种优势关系。筛选出部分有应用潜力的外来种质,并探索如何以我国 A 群和 B 群种质为核心,外来种质在我国玉米育种中的利用途径,以期拓展我国玉米种质基础提供依据。

1 美国、CIMMYT 和巴西主要玉米群体特征分析

1.1 美国玉米群体

1.1.1 美国主要玉米群体及配合力效应

美国玉米商业育种应用的种质基础曾经主要源于 3 个杂种优势群 Stiff Stalk、Lancaster 和 Iodent,以及其他类群(Maiz Amargo 等)^[25,26]。一些公益性机构如艾奥瓦州立大学、北达科他州立大学等依据杂种优势模式,用不同来源的自交系或地方品种组建并改良了多个育种群体,如 SS 类群体(BS10(FR)C14、BS13(S)C9、BS28(R)C3、BS34(S)C4、BSK(HI)C11、BSSS(R)),NSS 类群体(BS11(FR)C14、BS16(S)C2、BS26、BS29(R)C3、BSCB1(R)C14、Lancaster、Learnring、Midland)^[8~14,27],以及 NDSAB 群体^[28]等。

通过分析这些群体的配合力和杂种优势效应^[8~14],发现在不同环境下除群体 BSK、BS16 不同改良轮次的表现有所差异外^[8,9,11],其余群体性状表现稳定。在 SS 类群中,BSSS(R)C10、BS10(FR)C14、BS13(S)C9、BSK(HI)C8 Syn3 等群体产量 GCA 效应为显著正值,BS28(R)C3、BS34(S)C4、BSK(HI)C11、BSK(S)C11 产量 GCA 效应为显著负值。NSS 类群中,BS11(FR)C14、BS29(R)C3、BSCB1(R)C14 产量 GCA 效应为显著正值,而 BS26(S)C4、BS16(S)C2、BS26(S)C4、Lancaster、Learnring、Midland 产量 GCA 效应为显著负值。因此,SS 类群体 BSSS(R)C10、BS10(FR)C14、BS13(S)C9、BSK(HI)C8 Syn 3, NSS 类群体 BS11(FR)C14、BS16(S)C3 Syn 2、BS29(R)C3、BSCB1(R)C14 可能作为外来温带优良种质,用于拓宽我国玉米种质基础(表 1)。

1.1.2 美国主要玉米群体的杂种优势关系

从种质构成分析,美国玉米群体分为 2 个类群,其中 BSSS(R)C14、BS10(FR)C14、BS13(S)C9、

BSK(HI)C8 Syn3 属于 SS 类群, BSCB1(R)C14、BS11(FR)C14、BS16(S)C3 Syn 2、BS29(R)C3 属于 NSS 类群。Rasmussen 等^[8]和 Scheffler 等^[9]通过分析 SS 群体与 NSS 群体间的产量杂种优势(图 1), 发现在美国艾奥瓦州 7 个地点, BSSS(R)C14 × BSCB1(R)C14 的产量最高(3.16 Mg/ha), 中亲杂种优势最强(72%), 且 BSSS(R)C14 与其他 NSS 群体杂交组合的平均产量均较高(2.46 Mg/ha), 平均中亲杂种优势也较强(50%)。BS10(FR)C14 × BS29(R)C3 产量 SCA 效应为显著正值, BSSS(R)C14 × BS11(FR)C14、BS10(FR)C14 × BS11(FR)C14 产量 SCA 效应为显著负值。BS16(S)C3 Syn 2 × BSSS(R)C10 具有较强的中亲杂种优势(40%)。

1.2 CIMMYT 玉米群体

1.2.1 CIMMYT 主要玉米群体及配合力效应

CIMMYT 玉米种质分属热带、亚热带和高原(含过渡带)3 大生态类型。文献中讨论的主要群体包括

热带群体(Pop21、Pop22、Pop25、Pop27、Pop28、Pop29、Pop32、Pop43、Pool 24)、亚热带群体(Pop33、Pop34、Pop42、Pop44、Pop45、Pop47、Pool 27、Pool 28、Pool 30、Pool 34、Pool 42)、含温带种质成分的群体(Pop 46、Pop 48、Pool 31、Pool 34、Pool 39、Pool 40、Pool 41)^[12,15-18]。仅仅把种质划分成热带、亚热带和温带, 还不能解决杂种优势利用的技术路线和育种策略问题。通过综合分析这些群体的配合力和杂种优势效应, 或许能够找到有用的线索。文献揭示热带群体 Pop28(C4)、Pop32(C5)在高原(Tlajomulco、Silao)环境下产量配合力效应为正值(分别为 0.11 Mg/ha、0.02 Mg/ha)。Pop43(C5)在墨西哥(Poza Rica)、哥伦比亚(Palmira)联合环境下产量配合力效应为显著正值(0.45* Mg/ha), 且抽丝期最短(58 d), 而在墨西哥亚热带(Tlaltizapan、Obregan)、高原(Tlajomulco、Silao)环境下抽丝期均延长(分别为 69.7 d 和 79 d)。亚热带群体 Pop42(C4)、Pop44(C8)、Pool 28(C14)、Pool 30(C15)在墨西哥、美国东部环境下

表 1 美国主要玉米群体表现

群体	种质基础	产量 GCA (Mg/ha)	株高 (cm)	抽丝期 (d)	鉴定地点	参考文献
BS10(FR)C14	SS 类群, 艾奥瓦双穗综合种, 由 10 个多穗型玉米自交系组成	0.38*	236	74	美国艾奥瓦州	[8,9]
BS13(S)C9	SS 类群, 由 16 个瑞德种质自交系组成的综合种	0.54*	229	74	美国艾奥瓦州	[8,9]
BSK(HI)C8 Syn3	SS 类群, 来自 Krug 黄马牙群体	0.68**	—	—	美国艾奥瓦州	[11]
BSSS(R)C10	SS 类群, 艾奥瓦竖杆综合种	1.49**	—	—	美国东部	[11]
BS11(FR)C14	NSS 类群, 来自先锋双穗综合种, 由加勒比南部多穗型和美国玉米带自交系组成	0.28*	235	74	美国艾奥瓦州	[8,9]
BS16(S)C3 Syn2	NSS 类群, 来自 ETO 种质	0.16	—	—	美国东部	[11]
BS29(R)C3	NSS 类群, 来自 Suwan 1 种质	0.18*	223	75	美国艾奥瓦州	[8,9]
BSCB1(R)C14	NSS 类群, 艾奥瓦抗螟综合种 1 号, 由 12 个抗第一代欧洲玉米螟自交系组成	0.19*	233	73	美国艾奥瓦州	[8,9]

注：*、**分别表示 0.05、0.01 显著性水平。

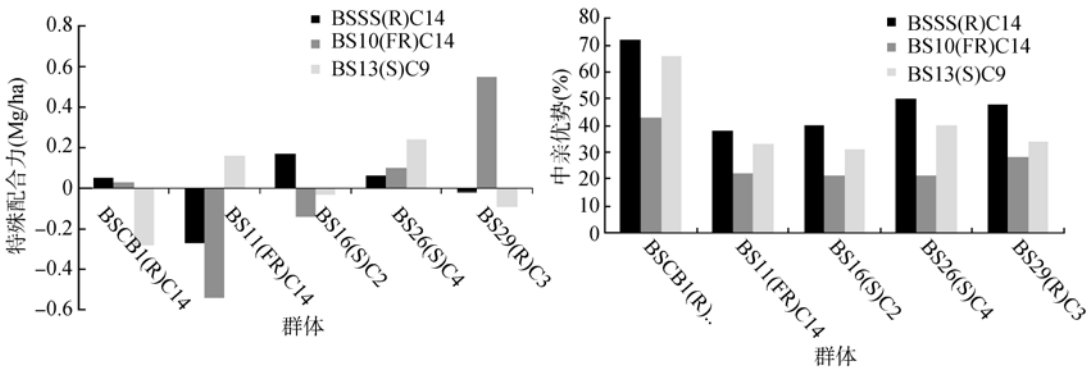


图 1 温带环境下美国主要玉米群体产量特殊配合力和杂种优势分析^[8,9]

产量配合力效应均为正值, Pop45(C3)产量 GCA 效应在墨西哥环境下较低, 而在美国东部较高(0.13 Mg/ha)。Pop34(C5)、Pop47(C2)、Pool 27(C20) 在墨西哥的产量 GCA 效应较高, 而在美国东部地区为负效应, 这些群体的株高和抽丝期在墨西哥和美国东部环境下的表现差异较大。含温带种质成分的群体 Pop48(C5)、Pool 39(C12)、Pool 41(C12) 在美国东部产量 GCA 效应较大, 且 Pool 41(C12)达极显著水平, Pool 31(C14)、Pool 34(C20)、Pool 39(C12)、Pool 40(C12)、Pool 41(C12)、Pool 42(C12)产量 GCA 效应为负值。在墨西哥环境下, 除 Pop46(C1)、Pop48(C5)的产量 GCA 效应较高外, 其余群体均为负值。综合以上分析, CIMMYT 玉米群体 Pop43(C5)、Pop42(C4)、Pop44(C8)、Pop45(C3)、Pop48(C5)、Pool 30(C15)、Pool 39(C12)、Pool 41(C12)表现优良(表 2), 可能作为外来热带、亚热带优良种质, 用于拓宽我国玉米种质基础。

1.2.2 CIMMYT 主要玉米群体的杂种优势关系

部分 CIMMYT 玉米群体产量杂种优势关系如图 2~图 7 所示。以热带群体 Pop43(C5)为亲本的测交组合中, Reif 等^[15]在墨西哥(Tlaltizapan、Poza Rica、Silao、Tlacomulco、Obregonin)、哥伦比亚(Palmira)和泰国(Nakornsawan)联合环境下, 鉴定出 Pop43(C5) × Pop21 和 Pop43(C5) × Pop32 组合产量较高(分别为 7.83 Mg/ha 和 7.40 Mg/ha), 中亲杂种优势较强(分别为 14.22%和 13.76%), 遗传距离较大(分别为 0.29 和 0.32)。Pop43(C5) × Pop22、Pop43(C5) × Pop25、Pop43(C5) × Pop29、Pop43(C5) × Pool 24 的组合产量和中亲杂种优势都较低(图 2)。Vasal 等^[16]在热带(墨西哥 Poza Rica、哥伦比亚 Palmira)、亚热带(墨西哥 Tlaltizapan、Obregonin)、过渡带及中纬度(墨西哥 Tlacomulco、Silao)等不同环境下, 鉴定出 Pop43(C5) × Pop42 组合产量最高(分别为 7.43 Mg/ha、8.03 Mg/ha、7.64 Mg/ha), 中亲杂种优势均较强(分别为 17.2%、15.8%、12.3%), 且在亚热带环境下产量 SCA 效应为显著正值, 而 Pop43(C5) × Pop47 组合产量和中亲杂种优势均最低(图 2)。从种质构成分析, Pop21 属于典型的 Tuxpeno 种质; Pop22 遗传基础混乱, 含 Tuxpeno、ETO、阿根廷、中美洲种质; Pop25 来源于 Pool 23, 属于热带晚熟硬粒型种

质; Pop29 是含 Tuxpeno、ETO、古巴硬粒种质的混合产物; Pop32、Pop42 属于典型的 ETO 种质; 按照 CIMMYT 的资料, Pop43 属于 La Posta 种质, 使用含有 Tuxpeno 种质的 16 个自交系合成的改良群体; Pop47 含有温带种质, 遗传基础复杂; Pool 24 主要含 Tuxpeno 种质, 与 Pop43 的遗传关系较近, 所以该群体与 Pop43 的杂种优势很弱。综合 Reif 等^[15]和 Vasal 等^[16]的研究结果, Pop43(C5)与 Pop21、Pop32、Pop42、Pop44、Pop45、Pool 34 的杂种优势都比较强, 与 Pop22、Pop25、Pop29、Pop47、Pool 24 的杂种优势较弱, 这在很大程度上反映了 Pop43 属于遗传基础复杂的群体(基因多样性 0.503)。但 Reif 等^[15]认为 Pop43 不属于杂种优势群 A 和 B, 这一结论还需要在中国玉米种质背景下进一步验证, 因为群体 Pop22、Pop25、Pop29 都属于种质基础复杂的群体, 以此评价 Pop43 可能对结论产生干扰。

Beck 等^[17]用含 ETO 种质的亚热带硬粒型群体 Pop42(C4)为亲本做的测交组合分析中(图 3), Pop42(C4) 与同属硬粒型种质的 Pool 31 杂交, 在美国东部环境下产量最低(2.94 Mg/ha)、杂种优势弱(-2.1%), 产量 SCA 效应较低(-0.36 Mg/ha)。而 Pop42(C4) × Pop47 超亲优势最强(16.0%), 但组合产量不高(3.53 Mg/ha), 产量 SCA 效应也较低(-0.07 Mg/ha)。Mickelson 等^[12]分析 Pop42(C4)与 SS 种质的 BSSS(R)和 Lancaster 种质的 BS26 都具有较强的超亲优势(分别为 15%、3%)和产量 SCA 正效应(分别为 0.01 Mg/ha、0.16 Mg/ha)。从种质构成分析, Pop42 群体含有 ETO 和美国 Illinois 种质, Pop47 群体含有 Tuxpeno 和美国玉米带种质, Pool 31 含有墨西哥、美国、巴西、阿根廷、中国、乌拉圭、南斯拉夫、巴基斯坦等国种质。综合分析表明, Pop42 属于含有温带种质的 ETO 种质^[16], 遗传基础复杂, 不同于美国的 BSSS 或 Lancaster 种质类群, 且与马齿型的 Pop47 杂种优势较强, 而与硬粒型的 Pool 31 杂种优势较弱。

Mickelson 等^[12]在美国东部环境下, 分析以亚热带马齿型群体 Pop44(C8)为亲本的测交组合中(图 4), Pop44(C8) × BSSS(R)、Pop44(C8) × BS26 的产量 SCA 效应均为极显著正值(分别为 0.57** Mg/ha、0.52** Mg/ha), 超亲优势较强(分别为 28%、7%), 且 Pop44(C8) × BSSS(R)产量较高(10.44 Mg/ha)。

表 2 CIMMYT 主要玉米群体表现

群体	种质基础	产量 GCA (Mg/ha)	株高 (cm)	抽丝期 (d)	鉴定地点	参考文献
Pop43(C5)	热带群体, 选自由 16 个自交系组成的 Tuxpeno 综合种	0.45*	237	58	热带	
		0.25	220	69	热带	[16]
		0.14	259	79	热带	
Pop42(C4)	亚热带群体, 由 ETO 和美国 Illinois 玉米带种质组成	0.32	215	65	热带	[16,17]
		0.12	266	77	美国东部	[17]
		0.18	247	76	热带	
Pop44(C8)	亚热带群体, 由美洲早熟马齿玉米(AED, American Early Dent)和 Tuxpeno 种质组成	0.40	262	72	热带	[12]
		0.27			美国东部	
Pop45(C3)	亚热带群体, 含美国 BSSS、Tuxpeno、古巴硬粒、Puerto Rico 综合种及多米尼加种质	-0.07	200	61	热带	[16,17]
		0.13	260	74	美国东部	[17]
		0.25	183	54	热带	
Pool 30(C15)	亚热带马齿型群体, 由欧洲、中国、黎巴嫩、墨西哥、南美洲和美国玉米带种质组成	0.33**	209	71	美国东部	[18]
		0.32**	-	61	美国东部	
		0.27	187	55	热带	[18]
Pop48(C5)	温带群体, 由美国玉米带、南欧和 Pool 30 的 54 个半同胞家系组成	0.43	203	73	美国东部	
		-0.71**	194	63	热带	[17]
Pool 39(C12)	温带种质库, 由墨西哥、巴基斯坦、美国、非洲、中美洲、加勒比海和玻利维亚地区的热带(低地、高低)、亚热带和温带种质组成	0.04	237	69	美国东部	
		-0.77**	192	63	热带	[17]
Pool 41(C12)	温带种质库, 由美国玉米带、中国、朝鲜和黎巴嫩种质组成	0.45**	240	68	美国东部	

注：*、**分别表示 0.05、0.01 显著性水平。热带环境鉴定地点包括墨西哥(Celaya、Cortazar、Tlacomulco、Tlaltizapan、Obregan、Tlajomulco、Silao、Poza Rica)、哥伦比亚(Palmira)、土耳其(Antalya)、危地马拉、菲律宾；美国东部鉴定地点包括 Chandler、West Lafayette、Bloomington、Savoy、Manhattan、Mississippi State、Kingdom City、Raleigh、Knoxville。

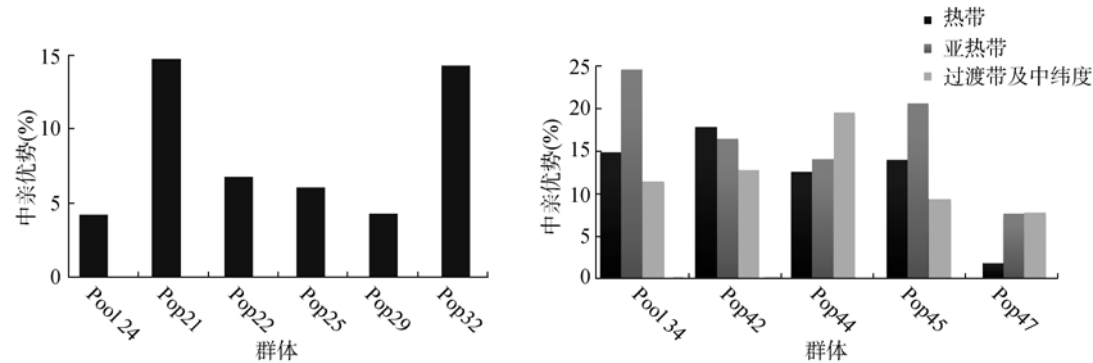


图 2 在墨西哥环境下玉米群体 Pop43 与 CIMMYT 群体产量杂种优势分析[15,16]

Pop44(C8)×Southern Cross 产量 SCA 效应为极显著负值(-0.65** Mg/ha), 超亲优势弱(-3%), 且产量较低(7.88 Mg/ha)。从种质构成分析, Pop44 由美洲早熟马齿玉米(American Early Dent)和 Tuxpeno 种质构成, 而 Southern Cross 属于非洲地方品种。综合分析表明, 群体 Pop44 含有热带和美国温带早熟马齿型种质, 基本属于 Tuxpeno 种质[16], 为不同于 BSSS 和

Lancaster 类群的特殊种质, 与 SS 种质 BSSS(R)和 Lancaster 种质 BS26 的杂种优势均较强, 但与非洲地方品种 Southern Cross 的杂种优势却较弱。

在以含 BSSS 种质的亚热带马齿型群体 Pop45 (C3)为亲本的测交组合中(图 5), Beck 等[17]在美国东部环境下鉴定出 Pop45(C3)与适应较高纬度的温带种质 Pool 41 的组合产量较高(4.03 Mg/ha)、超亲优

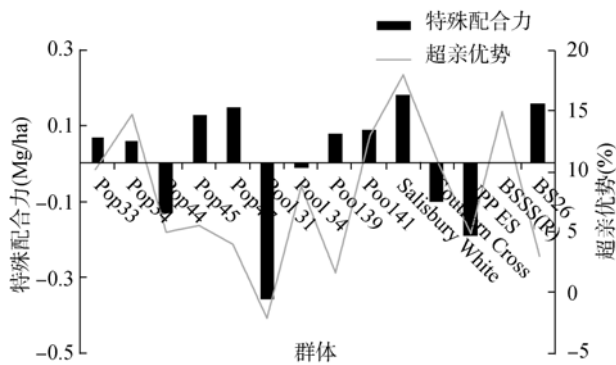


图 3 在美国东部环境下玉米群体 Pop42 与 14 个 CIMMYT、美国群体产量特殊配合力和杂种优势分析^[12,17]

势较强(8.1%), 但产量 SCA 效应为负值(-0.10 Mg/ha)。Pop42 × Pop45(C3)、Pop45(C3) × Pool 34、Pop45(C3) × Pool 39 的产量 SCA 效应和超亲优势均较强, 而 Pop45(C3) × Pop47、Pop45(C3) × Pool 31、Pop33 × Pop45(C3)、Pop34 × Pop45(C3)组合的产量低, 且超亲优势和产量 SCA 效应均为负值。从种质构成分析, Pop45 含有美国 BSSS、Tuxpeno、古巴硬粒、Puerto Rico 综合种及多米尼加种质。Pop33 最初来自 Pool 33(C8), 包含阿根廷硬粒 Cateto 种质, Pop34 含有古巴硬粒、ETO、Tuxpeno、美国玉米带、印度和尼泊尔种质, 遗传基础复杂, Pool 34 含有墨西哥低地和高原种质、美国玉米带、南美、南斯拉夫、匈牙利、中国、黎巴嫩等国的马齿型种质, Pool 39 由墨西哥、巴基斯坦、美国、非洲、中美洲、加勒比海和玻利维亚地区的热带(低地、高低)、亚热带和温带种质组成。综合分析表明, 群体 Pop45 含有热带和温带种质, 遗传基础广, 与 Pop42、Pool 34、Pool 39 的产量杂种优势较强, SCA 效应较强, 而与 Pop33、Pop34、Pop47、Pool 31 的产量 SCA 效应较弱。

在以亚热带马齿型种质 Pool 30(C15)为亲本的测交组合中(图 6), Vasal 等^[18]在美国东部环境下鉴定出温带硬粒型种质 Pop46 × Pool 30(C15)、Pool 30(C15) × 欧洲高纬度种质 Pool 40 的产量 SCA 效应为显著正值(分别为 0.24* Mg/ha、0.20* Mg/ha), 但超亲优势弱(分别为-1.3%、-5.2%)。欧美马齿型种质 Pop48(C5) × Pool 30(C15)的产量 SCA 效应为显著负值(-0.23* Mg/ha), 但组合产量较高(4.96 Mg/ha), 有弱的超亲优势(0.2%)。欧美和阿根廷种质的 Pool

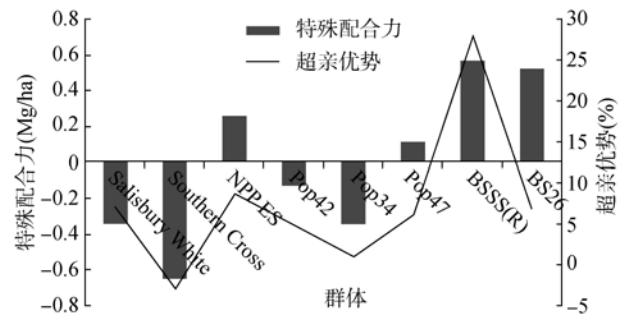


图 4 美国东部环境下玉米群体 Pop44 与 8 个 CIMMYT、美国群体间产量特殊配合力和杂种优势分析^[12]

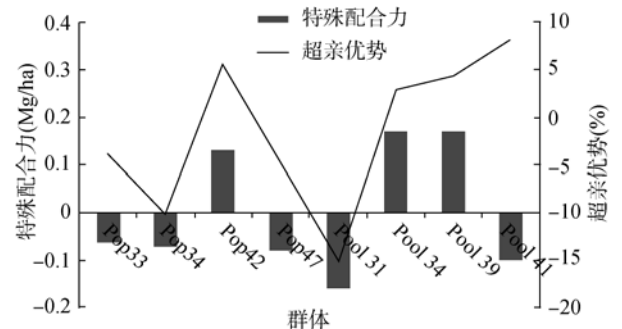


图 5 在美国东部环境下玉米群体 Pop45 与 8 个 CIMMYT 群体产量特殊配合力和杂种优势分析^[17]

27 × Pool 30(C15)、含美国玉米带种质的 Pool 28 × Pool 30(C15)、Pool 30(C15) × 种质基础复杂的亚热带温带早熟基因库 Pool 42 的产量 SCA 效应和超亲优势均为负值, 且 Pool 30(C15) × Pool 42 的超亲优势特别低(-16.7%)。从种质构成分析, Pool 30 含有欧洲、美国玉米带、中国、黎巴嫩、墨西哥和南美洲种质, Pool 27 含有美国、阿根廷硬粒、中国、黎巴嫩及欧洲种质, Pool 28 来自 Pool 27 × 美国玉米带、Pool 30 和巴基斯坦等国种质, Pool 42 属于北温带早熟基因库, 含墨西哥、秘鲁、玻利维亚、巴基斯坦、中国、匈牙利、美国也门等国种质。综合分析表明, Pool 30 含有温带和亚热带种质, 遗传基础丰富, 与含温带种质的早熟基因库 Pool 27、Pool 28、Pool 42 之间的杂种优势较弱。

在以温带早熟马齿型群体 Pop48(C5)为亲本的测交组合中(图 6), Vasal 等^[18]在美国东部环境下鉴定出温带早熟硬粒型群体 Pop46 × Pop48(C5)产量 SCA 效应为显著正值(0.24* Mg/ha), 组合产量较高(4.98 Mg/ha), 有一定的超亲优势(1.1%)。Pop48(C5) × Pool 40、Pop48(C5) × Pool 42 产量 SCA 效应和超亲

优势均为负值。从种质构成分析, Pop48 含有美国玉米带、南欧等温带马齿型种质, Pop46 含有欧洲、美国、中国、巴基斯坦、印尼和南美的硬粒型种质, 两者之间有较强的杂种优势。Pool 40 含有保加利亚、西班牙、匈牙利、法国、土耳其、南斯拉夫、巴基斯坦、波兰和德国种质。综合分析表明, Pop48 与 Pool 40、Pool 42 杂种优势较弱。

在以含较多温带种质的 Pool 39(C12)为亲本的测交组合中(图 7), Beck 等^[17]在美国东部环境下鉴定出组合 Pop42 × Pool 39(C12)、Pop45 × Pool 39(C12)产量超亲优势为正值(分别为 1.6%、4.3%), 其余组合的杂种优势均较弱, 且 Pop34 × Pool 39(C12)、Pool 31 × Pool 39(C12)最低(分别为 -11.5%、-10.9%)。产量 SCA 效应除组合 Pop34 × Pool 39(C12)、Pool 34 × Pool 39(C12)为负值(分别为 -0.02 Mg/ha、-0.13 Mg/ha)外, 其余组合均为正值, 且 Pop45 × Pool 39(C12)、Pop47 × Pool 39(C12)最高(分别为 0.17 Mg/ha、0.18 Mg/ha)。从种质构成分析, Pool 39 由墨西哥、巴基斯坦、美国、非洲、中美洲、加勒比海和玻利维亚热带(低地、高地)、亚热带和温带种质组成。综合分析表明, Pool 39 与马齿型的

Pop42、Pop45 杂种优势较强, 而与硬粒型的 Pop34、Pool 31 杂种优势较弱。

在以适应高纬度的温带种质 Pool 41(C12)为亲本的测交组合中(图 7), Beck 等^[17]在美国东部环境下鉴定出 Pop34 × Pool 41(C12)、Pop42 × Pool 41(C12)、Pop47 × Pool 41(C12)产量超亲优势较强(分别为 11.4%、12.8%、11.8%), 且 Pop34 × Pool 41(C12)的产量 SCA 效应为显著正值(0.43* Mg/ha)。Pool 34 × Pool 41(C12)的产量 SCA 效应和超亲优势均为负值(分别为 -0.29 Mg/ha、-1.3%)。此外, Pool 39(C12) × Pool 41(C12)产量低(3.57 Mg/ha), 产量 SCA 效应为显著负值(-0.46* Mg/ha), 且中亲优势较弱(-4.1%)。从种质构成分析, Pool 41 含有美国、中国、朝鲜和黎巴嫩种质, 为适应高纬度的温带种质, 遗传基础复杂, 与 Pop34、Pop42、Pop47 杂种优势较强, 而与 Pool 34 杂种优势较弱。

1.3 巴西玉米群体

1.3.1 巴西主要玉米群体及其配合力表现

巴西大部分地区玉米具有热带、亚热带种质特点。1974 年以来, 巴西玉米高粱研究中心(CNPMS/

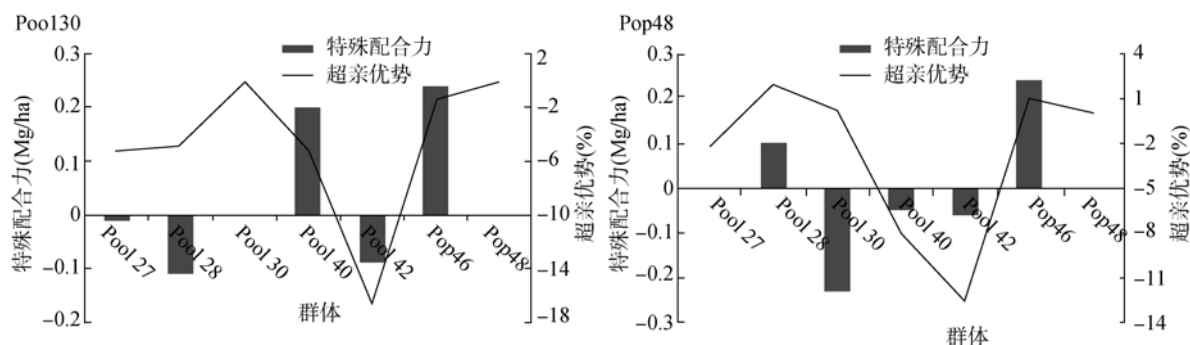


图 6 在美国东部环境下玉米群体 Pop48、Pool 30 与 6 个 CIMMYT 群体产量特殊配合力和杂种优势分析^[18]

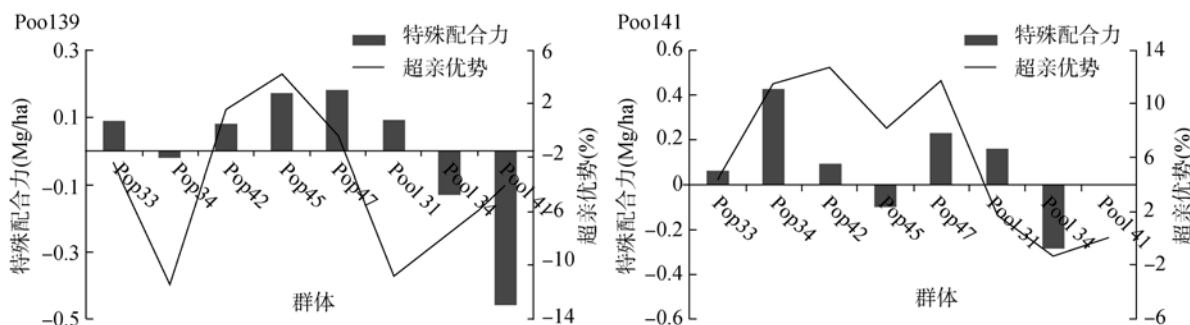


图 7 在美国东部环境下玉米群体 Pool 39、Pool 41 与 8 个 CIMMYT 产量特殊配合力和杂种优势分析^[17]

EMBRAPA, Brazilian Maize and Sorghum Research Center)通过与 LAMP(Latin American Maize Project)项目合作, 引进、评价和选择适应巴西环境的热带种质。目前, 该中心已经收集并释放了 28 个开放授粉品种, 包括 CMS 01、CMS02、CMS 03、CMS 4N、CMS 4C、BR 105、BR 106、BR 107、BR 111、BR 112、CMS 14C、CMS 15、CMS 22、CMS 23、BR 126、CMS 28、CMS 29、CMS 30、BR-136、CMS 39、CMS 50、Sintetico Elite、Cunha、PH4、BAIII-Tuson、Saracura、Nitroflint、Nitrodent, 代表了巴西正在使用的玉米种质^[23]。通过综合分析这些群体的配合力和杂种优势效应^[19-24], 发现马齿型群体 CMS 06、CMS 51、CMS 52、CMS 55、CMS 56、CMS 476、Amarillo del Bajio、Composto Amarelo Dentado、Población 62、Tuxpeño Amarelo、ZQP/B 101、ZQP/B 103、CMS 39 的产量 GCA 效应较高, 且 CMS 52、CMS 55、CMS 56 的产量 GCA 效应为显著正值, 群体 Amarillo del Bajio、Población 62、Tuxpeño Amarelo 在降低杂种后代株高、提早开花, CMS 476 在提高杂种后代抗倒伏、提早开花等方面有一定的潜力。

在巴西环境下, 半马齿型群体 CMS 4N、CMS 4C、BR 106、CMS 28、CMS 50、Nitrodent 的产量 GCA 效应表现为正值, 其中 BR 106 属于 Tuxpeno 种质。硬粒型群体 CMS 07、CMS 37、CMS 460、CMS 461、Cone Sur、Sintético34、ZQP/B 102、ZQP/B 104、Composto superprecoce canaforte、BR 105、BR 111、Saracura 的产量 GCA 效应表现为正值, 其中 BR 105 是由泰国 Suwan 1 群体改良而来。CMS 461 在提早开花, Sintético34、ZQP/B 104 在降低杂种后

代株高、穗位高, ZQP/B 102 在降低杂种后代株高、提前开花等方面有一定的潜力。半硬粒型群体 CMS 14C 的产量 GCA 效应为正值。综合分析, 认为从巴西引进多个性状 GCA 效应较高的玉米群体 BR 105、BR 106、CMS 28、CMS 39、CMS 50、Saracura、Nitrodent、Sintético34, 可用于拓宽我国玉米种质基础(表 3)。

1.3.2 巴西主要玉米群体的杂种优势关系

巴西玉米群体的杂种优势关系如图 8 和图 9 所示。在以遗传基础较窄的硬粒型群体 Sintético34 为亲本的测交组合中(图 8), Vacaro 等^[22]在巴西两个环境下 (Eldorado do Sul、Xanxere, SC) 鉴定出 Caribe-Mexico × Sintético34 的产量 SCA 效应均为负值, 而 Sintético34 与马齿型的 Pool 25、半硬粒型 Población 26、Amarillo del Bajio、Sintético Elite 的产量 SCA 效应较高。

由于 BR 105 是典型的硬粒型 Suwan 1 类群种质, BR 106 代表马齿型 Tuxpeno 类群种质, 参考 Parentoni 等^[23]研究结果重点分析 CMS 28、CMS 39、CMS 50、Saracura、Nitrodent 群体与 BR 105、BR 106 的产量 SCA 效应(图 9), 发现 CMS 28、CMS 39 与 BR 105、BR 106 产量 SCA 效应均为负值。CMS 50 × BR 105、Nitrodent × BR 105 产量 SCA 效应为负值, 而 CMS 50 × BR 106、Nitrodent × BR 106 产量 SCA 效应较高, 且 CMS 50 × BR 106 的中亲杂种优势较强(20%)。Saracura × BR 105 产量 SCA 效应为正值, Saracura × BR 106 产量 SCA 效应为负值。从种质构成分析(表 3), 8 个巴西玉米群体除 BR 105 代表

表 3 巴西主要玉米群体表现

群体	种质基础	产量 GCA (Mg/ha)	株高 (cm)	抽丝期 (d)	鉴定地点	参考文献
CMS 39	马齿群体, 来自巴西综合杂交种	0.24	—	—		
BR 106	半马齿群体, 来自 Tuxpeno 综合种	0.86	—	—		
CMS 28	半马齿群体, 来自于 Tuxpeno 综合种	0.22	—	—	巴西(Aracaju、Goiania、	
CMS 50	半马齿群体, 来自巴西综合杂交种	0.34	—	—	Sete Lagoas、Ponta	[23]
Nitrodent	半马齿群体, 来自氮高效综合种	0.47	—	—	Grossa、Londrina)	
BR 105	硬粒群体, 来自泰国 Suwan 1 群体	0.53	—	—		
Saracura	硬粒群体, 来自耐渍综合种	0.33	—	—		
Sintético34	硬粒群体, 由巴西和阿根廷优良自交系组成	0.27	177	—	巴西(Xanxerê, SC)	[22]
		0.05	—	—	巴西(Eldorado do Sul)	

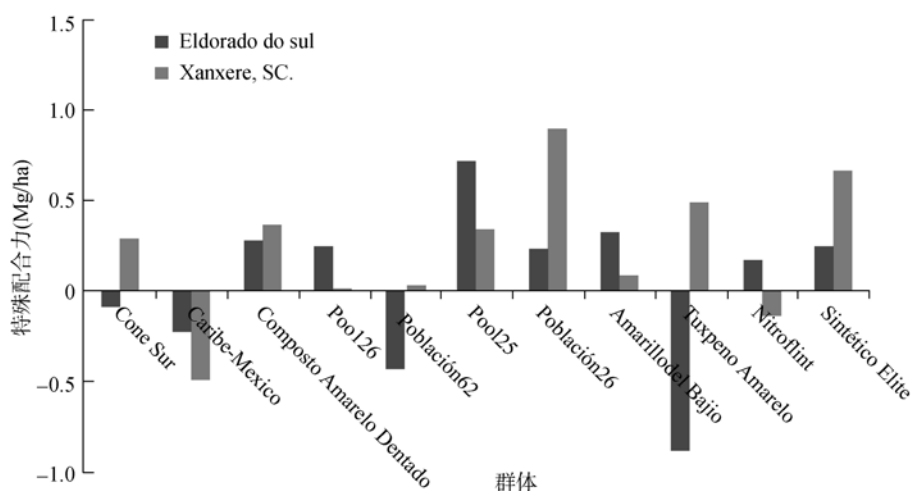


图 8 在不同环境下 Sintético34 与 11 个巴西玉米群体产量特殊配合力效应分析(Mg/ha)^[22]

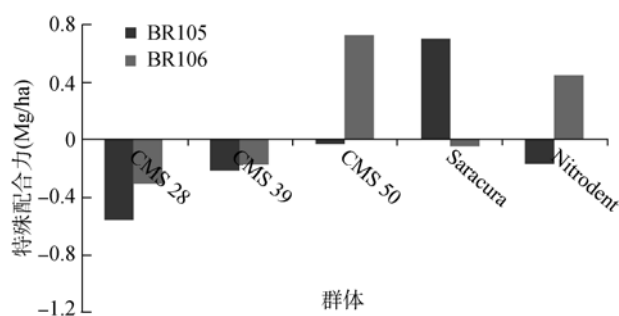


图 9 5 个巴西玉米群体与 BR105、BR106 群体产量特殊配合力效应分析(Mg/ha)^[23]

Suwan 1 类群、BR 106 代表 Tuxpeno 类群外, 其余群体的杂种优势关系不清晰, 需要进一步分析。从文献来分析, CMS 50、Sintético34、Nitrodent 有可能是改良温带 NSS 杂种优势群的优良种质, 而 Saracura 则可能用于改良 SS 类种群质。

2 美国、CIMMYT 和巴西玉米群体在我国玉米育种中的利用途径分析

利用美国、CIMMYT 和巴西群体扩展我国玉米种质基础, 建议依据中国 A 和 B 类种群种质为核心, 将外来种质导入相应种质类群^[29-32]。美国玉米种质遗传基础清晰, 明确地分成 SS 和 NSS 两个类群, 并构成稳定的杂种优势模式, 这对简化玉米商业育种有指导意义。通过综合分析, 发现美国 SS 类群体 (BSSS(R)C10、BS10(FR)C14、BS13(S)C9、BSK(HI)C8 Syn 3) 和 NSS 类群体 (BS11(FR)C14、BS16(S)C3 Syn 2、BS29(R)C3、BSCB1(R)C14) 的产量 GCA 效

应较高, 表现优良, 且群体 BSK(HI)C8 Syn 3 表现出降低杂种后代穗位高、提早开花和提高抗根倒能力, BS16(S)C3 Syn 2 表现抗茎倒伏。针对美国群体穗位低、早熟、脱水快、经济系数高等特点, 建议用 SS 类种群质 BSSS(R)C10、BS10(FR)C14、BS13(S)C9、BSK(HI)C8 Syn 3 改良我国 A 群, 用 NSS 类群 BS11(FR)C14、BS16(S)C3 Syn 2、BS29(R)C3、BSCB1(R)C14 改良我国 B 种群质, 提高我国玉米种质类群内的遗传方差, 丰富种质基础。目前, 我国已引进 8 个美国群体, 并在中国种质背景下鉴定了其在我国北方玉米区(北京、吉林等地)的育种潜力, 发现除群体 BSK(HI)C8、BS16(S)C3 Syn 2 外, 其余 6 个群体均具有较高的产量一般配合力效应, 可作为拓宽我国玉米种质基础的优良外来种质^[33]。

CIMMYT、巴西玉米群体具有遗传基础广、产量潜力大、抗病耐逆等特点, 可以作为外来种质克服我国玉米种质基础狭窄、杂种优势不强、抗源少的难题。综合文献结果, CIMMYT 群体 Pop42(C4)、Pop43(C5)、Pop44(C8)、Pop45(C3)、Pop 48(C5)、Pool 30(C15)、Pool 39(C12)、Pool 41(C12) 产量 GCA 效应较高, 利用潜力较大。巴西群体 BR 105、BR 106、CMS 28、CMS 39、CMS 50、Saracura、Nitrodent、Sintético34 的产量 GCA 效应较高, 且具有降低杂种后代株高、穗位高的潜力。进一步分析 CIMMYT、巴西玉米群体间的杂种优势关系, 发现 Pop 48(C5)、Pool 30(C15)、Pool 39(C12)、Pool 41(C12)、CMS 28、CMS 39、CMS 50、Saracura、Nitrodent、Sintético34

遗传构成较复杂,难以准确判断杂种优势类群,而 BR 105、BR 106、Pop42(C4)、Pop43(C5)、Pop44(C8)、Pop45(C3)群体的杂种优势效应和配合力表现较清楚。

实践证明,种质基础过于复杂和杂种优势类群不清晰的热带、亚热带群体或基因库与遗传基础简单明确的骨干种质杂交,产量杂种优势通常不高,施行改良和育种利用的难度会很大,需要长时期改良。因此,将这些种质导入我国玉米种质前,建议先采用混合选择法进行适应性改良。其中 Pop48(C5)、Pool 39(C12) 和 Pool 41(C12) 群体含有美国、欧洲、中国等种质成分,经过 1~2 轮混合选择后可直接进行一环选系,美国已成功利用 Pool 41 选出多个自交系(B103、B107、B108、B114 等)^[34]。同时应在我国玉米遗传背景下,深入研究这些群体与我国骨干种质类群的杂种优势关系,建议采用骨干自交系(例如郑 58 和昌 7-2,或 PH06W 和 PH4CV)测验外来种质的特殊配合力,合理划分外来种质的杂种优势类群或方向,然后确定改良利用途径。

对于未适应温带环境但杂种优势类群方向清晰的外来群体,建议以我国 A 和 B 类群为核心,将 BR 106、Pop43(C5)、Pop44(C8)、Pop45(C3)与我国 A 群种质,或利用 BR105、Pop42(C4)与我国 B 群种质创建(含热带 12.5%或 25%)回交群体,以增加群内有效变异。例如美国已利用(25%)热带种质与优良温带群体建立回交群体,合成了 BS35、BS36、BS37、BS38 等群体^[35]。我国已引进 CIMMYT 群体 Pop43(C5)和 Pop45(C3),通过控制双亲混合选择改良,两个群体已基本适应北京和黑龙江生态环境。在中国种质背景下,研究发现 Pop43 在黄淮海和东北玉米区具有较高的产量配合力效应。

参考文献(References):

- [1] 李新海,袁力行,李晓辉,张世煌,李明顺,李文华. 利用 SSR 标记划分 70 份我国玉米自交系的杂种优势群. 中国农业科学, 2003, 36(6): 622-627. DOI
- [2] 袁力行,傅骏骅,张世煌,刘新芝,彭泽斌,李新海, Warburton M, Khairallah M. 利用 RFLP 和 SSR 标记划分玉米自交系杂种优势群的研究. 作物学报, 2001, 27(2): 149-156. DOI
- [3] Zhang SH, Li XH, Yuan LX, Li MS, Peng ZB. Heterotic groups and exploitation of heterosis- methodology, strategy, and use in hybrid maize breeding in China. In: Srinivasan G, Zaidi PH, Prasanna BM, Gonzalez F, Lesnick K, eds. Proceedings of the 8th Asian Regional Maize Workshop. Bangkok, Thailand. CIMMYT, Mexico D. F., Mexico. 2002: 64-68. DOI
- [4] Zhang SH. Maize germplasm enhancement, improvement and development. In: Srinivasan G, Zaidi PH, Prasanna BM, Gonzalez F, Lesnick K, eds. Proceedings of the 8th Asian Regional Maize Workshop. Bangkok, Thailand. CIMMYT, Mexico D. F., Mexico. 2002: 554-560. DOI
- [5] Hallauer AR, Carena MJ. Maize breeding. In: Carena MJ, eds. Handbook of plant breeding: cereals. New York: Springer New York, 2009: 3-98. DOI
- [6] Tallury SP, Goodman MM. Experimental evaluation of the potential of tropical germplasm for temperate maize improvement. *Theor Appl Genet*, 1999, 98(1): 54-61. DOI
- [7] Li HM, Hu RF, Zhang SH. The impact of US and CGIAR germplasm on maize production in China. *Agric Sci China*, 2006, 5(8): 563-571. DOI
- [8] Rasmussen CC, Hallauer AR. Evaluation of heterotic patterns of Iowa Stiff Stalk Synthetic and Non-Stiff Stalk Synthetic maize populations [*Zea mays* L.]. *Maydica*, 2006, 51(2): 177-186. DOI
- [9] Scheffler TA, Hallauer AR, Lamkey KR, White PR. Estimates of heterosis and inbreeding depression for crosses of IOWA maize populations. *Maydica*, 2008, 53(3-4): 189-198. DOI
- [10] Moreno-Gonzalez J, Ramos-Gourcy F, Losada E. Breeding potential of European flint and earliness-selected U.S. Corn Belt dent maize populations. *Crop Sci*, 1997, 37(5): 1475-1481. DOI
- [11] Mungoma C, Pollak LM. Heterotic patterns among ten Corn Belt and exotic maize populations. *Crop Sci*, 1988, 28(3): 500-504. DOI
- [12] Mickelson HR, Cordova H, Pixley KV, Bjarnason MS. Heterotic relationships among nine temperate and subtropical maize populations. *Crop Sci*, 2001, 41(4): 1012-1020. DOI
- [13] Mišević D. Genetic analysis of crosses among maize populations representing different heterotic patterns. *Crop Sci*, 1990, 30(5): 997-1001. DOI
- [14] Ordás A. Heterosis in crosses between American and Spanish populations of maize. *Crop Sci*, 1991, 31(4): 931-935. DOI
- [15] Reif JC, Melchinger AE, Xia XC, Warburton ML, Hoisington DA, Vasal SK, Srinivasan G, Bohn M, Frisch M. Genetic distance based on simple sequence repeats and heterosis in tropical maize populations. *Crop Sci*, 2003,

- 43(4): 1275–1282. [DOI](#)
- [16] Vasal SK, Srinivasan G, Gonzalez F, Han GC, Pandey S, Beck DL, Crossa J. Heterosis and combining ability of CIMMYT's tropical \times subtropical maize germplasm. *Crop Sci*, 1992, 32(6): 1483–1489. [DOI](#)
- [17] Beck DL, Vasal SK, Crossa J. Heterosis and combining ability among subtropical and temperate intermediate-maturity maize germplasm. *Crop Sci*, 1991, 31(1): 68–73. [DOI](#)
- [18] Vasal SK, Srinivasan G, Crossa J, Beck DL. Heterosis and combining ability of CIMMYT's subtropical and temperate early-maturity maize germplasm. *Crop Sci*, 1992, 32(4): 884–890. [DOI](#)
- [19] Napolini FV, Gama EEG, Vianna RT, Moro JR. General and specific combining ability for yield in a diallel cross among 18 maize populations (*Zea mays* L.). *Rev Brasil Genet*, 1981, 4(4): 571–577. [DOI](#)
- [20] Gama EEG, Hallauer AR, Lopes MA, Parentoni SN, Santos MX, Guimaraes PEO. Combining ability among fifteen early cycle maize populations in Brazil. *Brazil J Genet*, 1995, 18(4): 569–577. [DOI](#)
- [21] Rodrigues MC, Chaves LJ, Pacheco CAP. Heterosis in crosses among white grain maize populations with high quality protein. *Pesq Agropec Bras*, 2006, 41(1): 59–66. [DOI](#)
- [22] Vacaro E, Neto JFB, Pegoraro DG, Nuss CN, Conceição LDH. Combining ability of twelve maize populations. *Pesq Agropec Bras*, 2002, 37(1): 67–72. [DOI](#)
- [23] Parentoni SN, Magalhães JV, Pacheco CAP, Santos MX, Abadie T, Gama EEG, Guimarães PEO, Meirelles WF, Lopes MA, Vasconcelos MJV, Paiva E. Heterotic groups based on yield-specific combining ability data and phylogenetic relationship determined by RAPD markers for 28 tropical maize open pollinated varieties. *Euphytica*, 2001, 121(2): 197–208. [DOI](#)
- [24] De Oliveira JP, Chaves LJ, Duarte JB, de Ribeiro KO, Brasil EM. Heterosis for oil content in maize populations and hybrids of high quality protein. *Crop Breed Appl Biotechnol*, 2006, 6(2): 113–120. [DOI](#)
- [25] Mikel MA, Dudley JW. Evolution of North American dent corn from public to proprietary germplasm. *Crop Sci*, 2006, 46(3): 1193–1205. [DOI](#)
- [26] 石雷. 现代美国马齿型玉米商业育种的种质基础. *玉米科学*, 2011, 19(5): 1–5. [DOI](#)
- [27] Carena MJ, Hallauer AR. Response to inbred progeny selection in Leaming and Midland Yellow Dent maize populations. *Maydica*, 2001, 46(1): 1–10. [DOI](#)
- [28] Carena MJ, Wanner DD. Registration of NDSAB (MER-FS)C13 maize germplasm. *Crop Sci*, 2005, 45(4): 1670–1671. [DOI](#)
- [29] 张世煌, 彭泽斌, 李新海. 玉米杂种优势与种质扩增、改良和创新. *中国农业科学*, 2000, 33(增刊): 34–39. [DOI](#)
- [30] 李新海, 徐尚忠, 李建生, 刘纪麟. CIMMYT 群体与中国骨干玉米自交系杂种优势关系的研究. *作物学报*, 2001, 27(5): 575–581. [DOI](#)
- [31] 杨爱国, 张世煌, 李明顺, 荣廷昭, 潘光堂. CIMMYT 和我国玉米种质群体的配合力及杂种优势分析. *作物学报*, 2006, 32(9): 1329–1337. [DOI](#)
- [32] Yong HJ, Wang JJ, Liu ZP, Li MS, Zhang DG, Li XH, Zhang SH. Potential of tropical maize populations for improving an elite maize hybrid. *Maydica*, 2011, 56(4): 359–366. [DOI](#)
- [33] Yong HJ, Zhang XC, Zhang DG, Wang JJ, Zhang HY, Li MS, Liu WG, Weng JF, Hao ZF, Ci XK, Bai L, Li XH, Zhang SH. Breeding potential of U.S. maize germplasm for utilization in Chinese temperate conditions. *Euphytica*, 2013. DOI 10.1007/s10681-013-0877-3.
- [34] Lee EA, Tracy WF. Modern maize breeding. In: Bennetzen J, Hake S, eds. *Handbook of Maize: Genetics and Genomics*, New York: Springer, 2009: 141–162. [DOI](#)
- [35] Whitehead FC, Caton HG, Hallauer AR, Vasal SK, Cordova H. Incorporation of elite subtropical and tropical maize germplasm into elite temperate germplasm. *Maydica*, 2006, 51(1): 43–56. [DOI](#)