

春播早熟区高粱骨干亲本主要性状配合力及杂种优势分析

刘晓涵^{1,2} 唐玉劼² 刘新宇³ 乔钰岩⁴ 石贵山²
于淼² 李扬² 王甯² 祁宏英¹ 陈冰孺²

(¹齐齐哈尔大学生命科学与农林学院, 161006, 黑龙江齐齐哈尔; ²吉林省农业科学院, 136199, 吉林公主岭;
³吉林省松原市宁江区黑土地保护监测中心, 138000, 吉林松原; ⁴吉林农业大学农学院, 130118, 吉林长春)

摘要 通过对春播早熟区高粱不育系和恢复系的配合力以及杂种优势的研究, 为高粱杂交组合亲本选配提供理论依据。以 31 份高粱为亲本材料, 采用不完全双列杂交设计配制 206 个杂交组合, 分析亲本及其杂交种 F₁ 代株高、穗长等 13 个主要性状配合力及杂种优势。结果显示高粱不育系和恢复系各性状存在显著差异, 不同材料间的配合力差异较大。在 31 份材料中, 冀 64A、SX44A、吉 5535A、吉 5575A、HLS×125×2999、HLS 早和吉 R4334 这 6 个亲本在株高、穗长、穗粒重、产量、倒 2 叶夹角、倒 2 叶宽和倒 3 叶夹角等方面更具优势, 且其他性状的一般配合力也表现较为优异, 是较为理想的亲本材料。在杂交组合中存在较大的杂种优势利用潜力, 但中亲优势不突出, 与此同时, 杂交组合的产量既受加性效应影响又受非加性效应影响。选育优良亲本不仅需重视亲本综合性状和一般配合力, 还应关注其组合的特殊配合力和双亲的优势互补效应。

关键词 高粱; 农艺性状; 一般配合力; 特殊配合力

高粱 [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] 是世界上最古老的禾谷类作物之一^[1], 具有抗旱、耐涝和耐盐碱等特性^[2], 对促进干旱、盐碱等边际土地的利用和保障干旱半干旱地区的粮食、饲料安全具有举足轻重的地位^[3]。第一个高粱不育系 TX3197A 问世以来, 高粱不育系、保持系和恢复系的选育成为高粱育种的关键环节^[4], 而亲本系配合力的高低是评价其利用价值的重要指标之一, 也是组配优良杂交种的基础^[5-6]。配合力分为一般配合力 (general combining ability, GCA) 和特殊配合力 (specific combining ability, SCA)^[7]。GCA 是指一个亲本与其他多个亲本材料进行杂交在后代性状表现中所起到的平均作用, 若表现优良则说明该亲本 GCA 高, 由基因的加性效应决定, 属于可遗传部分^[8]。SCA 是指一亲本与另一亲本杂交所产生后代的性状表现偏离 2 个亲本平均效应的特殊现象, 说明 2 个特定亲本之间的 SCA 高, 是由基因的非加性效应决定的, 属于不可遗传部分^[9]。特定组合的特殊配合力效应值大, 有利于筛选出在该性状表现优异的杂交组合, 是杂交组合选配的重要参考依

据^[10]。张俊珍等^[11]和张阳等^[12]认为, 亲本的利用价值取决于一般配合力与特殊配合力的大小, 且两者效应值越高其亲本利用价值越大。高士杰^[13]提出在选择亲本时, 应同时考虑亲本的 GCA 和杂交组合 SCA 效应值大小以及双亲性状的互补性等因素。配合力高的亲本通常能组配出优异的杂交组合^[14], 在育种实践中如何精准计算亲本的配合力是有效组配高粱杂交组合的关键因素之一。

本试验以近年来高粱春播早熟区应用较广泛的 31 份高粱骨干亲本为试验材料, 按照不完全双列杂交设计配制 206 个杂交组合, 对亲本及其杂交组合 F₁ 代主要性状的一般配合力和特殊配合力进行估算与评价, 鉴定出一般配合力高的亲本以及特殊配合力强的杂交组合, 为今后亲本改良和组配强优势组合提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试高粱亲本材料共 31 份, 生育期 115~120 d。其中, 包含 16 个不育系和 15 个恢复系 (表 1)。

作者简介: 刘晓涵, 研究方向为高粱遗传育种, E-mail: 15004548374@163.com; 唐玉劼为共同第一作者, 研究方向为高粱抗逆育种及栽培, E-mail: tangyujie0420@163.com

祁宏英为通信作者, 研究方向为园艺植物遗传育种, E-mail: qihongying1976@163.com; 陈冰孺为共同通信作者, 研究方向为高粱种质资源与遗传育种, E-mail: chenbingru1979@163.com

基金项目: 吉林省农业科技创新工程项目 (CXGC2024ZD002); 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-06)

收稿日期: 2024-08-10; 修回日期: 2024-10-11; 网络出版日期: 2024-11-14

表 1 供试亲本材料及系谱
Table 1 Parent materials and pedigree for this test

编号 Number	种质名称 Germplasm name	种质类型 Germplasm type	系谱 Genealogy
1	吉 H129A	不育系	B35×吉 1230B
2	吉 1230A	不育系	(TX3197B×矮 1B)×黑 30B
3	314A	不育系	TX3197B×库班红
4	吉 303A	不育系	97101B×2055B
5	吉 115A	不育系	哲 15B×2055B
6	63A	不育系	铁 97101B×外引材料
7	Y324A	不育系	晋长早 B×外引材料
8	QL33A	不育系	澳大利亚引进
9	冀 64A	不育系	407B×1243B
10	吉 245A	不育系	哲 15B×2055B
11	吉 5522A	不育系	MS22B×2055B
12	吉 2055A	不育系	314B×A2V4B
13	吉 5535A	不育系	406B×ICS-34B
14	吉 5575A	不育系	2055B×7050B
15	463A	不育系	2055B×晋长早 B
16	SX44A	不育系	(V4B×F4B)×V4B
17	HLS×125×2999	恢复系	HLSZ×(10125×2999)
18	HLS 早	恢复系	外引材料
19	吉 R2115	恢复系	南 133×10125
20	5933	恢复系	5903×三尺三
21	10125	恢复系	南 133×吉 R105×9060
22	吉 R107	恢复系	亨加利高粱后代 319-4×304-4
23	吉 R109	恢复系	HM65 (晋梁 5/三尺三/沈 409× 八 52×渤 1×晋 2)×1105B
24	吉 R117	恢复系	LR9198 天然变异株
25	吉 R127	恢复系	吉 R117×吉 R5062
26	南 133	恢复系	忻梁 52×V1494
27	南 133×125	恢复系	南 133×125
28	吉 R2483	恢复系	吉 R107×2999
29	吉 R4334	恢复系	(吉 R123×南 133)×9060
30	吉 R4392	恢复系	吉 R2115×10125
31	吉 K1781R	恢复系	Y304×吉 R2115

1.2 试验方法

于 2022 年 7-8 月高粱授粉期间,以 16 个不育系为母本,15 个恢复系为父本,按照不完全双列杂交设计 (incomplete diallel cross, NC II) 配制 206 个杂交组合,待籽粒成熟后,收获 F₁ 代种子。2023 年 5 月,将收获的 31 个亲本及 206 个杂交组合的 F₁ 代种子种植于吉林省农业科学院公主岭市试验基地 (43.57° N, 126.28° E),该试验田属于大陆性季风气候,试验地用地平整,土壤为黑色壤土。试验采用随机区组法进行种植,行长 3 m,行距 65 cm,株距 20 cm,3 次重复。试验田管理同常规田间管理。

1.3 测定项目与方法

按照《高粱种质资源描述规范和数据标准》^[15],调查株高、穗长、穗柄长、穗柄伸出长度、千粒重、穗粒重、产量、倒 2 叶夹角、倒 2 叶长、倒 2 叶宽、倒 3 叶夹角、倒 3 叶长和倒 3 叶宽 13 个性状。

1.4 数据分析

利用 Microsoft Excel 2016 进行数据整理,参照孔繁玲^[16]的方法运用 R 4.3.1 计算一般配合力和特殊配合力,并对 206 份杂交组合各性状的中亲优势和超亲优势进行分析:中亲优势 (mid-parent heterosis, %) = $[F_1 - (A+B)/2] / (A+B) \times 100$;超亲优势 (heterobeltiosis, %) = $(F_1 - H_p) / H_p \times 100$,式中, F₁ 为杂交后代平均值, A 为母本平均值, B 为父本平均值, H_p 为高亲值。

2 结果与分析

2.1 亲本材料配合力分析

2.1.1 方差分析 对 206 份杂交组合 F₁ 代的 13 个性状的方差分析结果 (表 2) 显示,所有性状在区组内均未达到显著水平,而在组合间均达到极显著水平,说明各性状差异主要是遗传差异造成的,可以进行配合力分析。不育系和恢复系中各性状的方差均达到极显著水平,不育系×恢复系的各性状特殊配合力达到极显著水平,说明各性状的表现受加性效应和非加性效应的共同作用,可以进行 GCA 和 SCA 效应值分析。其中,杂交种在株高、穗长、穗柄长、穗粒重、倒 2 叶夹角、倒 2 叶宽、倒 3 叶夹角、倒 3 叶长和倒 3 叶宽等性状中受不育系基因型影响较大,在穗柄伸出长度、千粒重和产量等性状中受恢复系基因型影响较大,而倒 2 叶长受不育系和恢复系基因型共同作用。

2.1.2 一般配合力效应分析 对 31 份亲本 13 个性状的一般配合力效应值 (表 3) 分析可知,株高一般配合力效应值变幅为-31.18~30.40,负向效应值越低说明对降低杂交种株高效果越明显,负效应值最低的 3 个亲本为冀 64A、吉 H129A 和吉 5522A。穗长一般配合力效应值变幅为-3.59~3.52,正向效应值高有利于增加杂交后代的产量,效应值最高的 3 个亲本为 63A、SX44A 和吉 245A。穗柄长一般配合力效应值变幅为-3.64~3.92,穗柄过长势必导致单株产量下降^[17],负向效应值越低对杂交后代增加产量作用越明显,负向效应值最高的 3 个亲本是

表 2 13 个性状的方差分析结果
Table 2 Variance analysis result of 13 traits

变异来源 Sources of variation	区组 Block	组合 Combination	不育系一般配合力 General combining ability of sterile line	恢复系一般配合力 General combining ability of restorer line	杂交组合特殊配合力 Special combining ability of hybrid combination
自由度 <i>df</i>	2	205	15	14	205
株高 PH	60.45	1886.82**	1065.97**	467.80**	47.52**
穗长 PL	6.35	28.79**	13.86**	5.01**	0.35**
穗柄长 PSL	18.91	46.93**	13.52**	11.36**	4.21**
穗柄伸出长度 PSE	25.85	52.66**	8.94**	17.94**	6.31**
千粒重 TGW	66.25	1102.20**	355.04**	428.17**	303.22**
穗粒重 GWPP	14.90	53.63**	21.21**	8.76**	8.51**
产量 Y	3 385 813	8 555 216**	23.22**	17 859.80**	4965.10**
倒 2 叶夹角 I2LA	4.69	78.16**	21.57**	5.56**	7.00**
倒 2 叶长 I2LL	26.61	6.92**	10.67**	7.05**	12.16**
倒 2 叶宽 I2LW	0.72	2.48**	0.76**	0.40**	0.11**
倒 3 叶夹角 I3LA	0.99	47.68**	14.39**	3.31**	2.49**
倒 3 叶长 I3LL	7.91	100.41**	18.85**	6.34**	6.16**
倒 3 叶宽 I3LW	0.36	3.36**	1.01**	0.66**	0.12**

“**” 代表在 $P < 0.01$ 水平差异极显著。PH: 株高; SL: 穗长; SSL: 穗柄长; SSE: 穗柄伸出长度; TGW: 千粒重; GWPE: 穗粒重; Y: 产量; I2LA: 倒 2 叶夹角; I2LL: 倒 2 叶长; I2LW: 倒 2 叶宽; I3LA: 倒 3 叶夹角; I3LL: 倒 3 叶长; T3LW: 倒 3 叶宽。下同。

“***” indicates extremely significant at $P < 0.01$ level. PH: plant height; PL: panicle length; PSL: panicle stem length; PSE: panicle stem extension length; TGW: 1000-grain weigh; GWPP: grain weight per panicle; Y: yield; I2LA: inverted two leaf angle; I2LL: inverted two leaf length; I2LW: inverted two leaf width; I3LA: inverted three leaf angle; I3LL: inverted three leaf length; T3LW: inverted three leaf width. The same below.

表 3 亲本主要农艺性状的一般配合力效应值
Table 3 General combining ability effect values of main agronomic traits of parents

亲本编号 Parent number	株高 PH	穗长 PL	穗柄长 PSL	穗柄伸出长度 PSE	千粒重 TGW	穗粒重 GWPP	产量 Y	倒 2 叶夹角 I2LA	倒 2 叶长 I2LL	倒 2 叶宽 I2LW	倒 3 叶夹角 I3LA	倒 3 叶长 I3LL	倒 3 叶宽 I3LW
1	-28.47	-3.59	0.54	-1.49	-0.69	-23.46	-3.31	-2.29	-0.48	-0.60	-1.46	-1.62	-0.77
2	-12.23	-0.65	1.25	0.76	-2.06	-3.39	-1.31	-4.99	2.25	-0.31	-2.45	3.83	-0.76
3	14.27	-2.11	-1.96	-2.87	2.81	-10.00	-2.25	5.24	-3.06	-0.32	5.88	-2.53	-0.72
4	9.45	-0.45	-0.22	-0.28	1.90	15.26	7.01	1.36	-0.45	0.25	1.30	-0.40	-0.12
5	-8.53	-0.40	1.00	1.77	0.72	10.40	1.38	1.96	-1.47	-0.10	0.93	-1.36	-0.25
6	-3.90	3.48	-3.62	-2.70	-1.41	12.05	-0.58	2.79	1.87	0.16	2.30	3.57	0.21
7	10.51	2.17	-1.48	-0.10	-4.18	5.02	-1.00	-0.81	-0.93	-0.29	-0.42	-1.51	0.59
8	-11.00	-0.19	1.74	1.36	-2.48	7.86	-1.16	0.30	-0.55	0.07	1.44	2.00	0.29
9	-31.18	-3.29	-1.18	-3.69	-3.53	-16.54	-2.04	-2.12	2.43	0.09	-1.72	1.62	0.16
10	-6.35	2.45	1.85	3.66	0.50	5.33	3.44	3.23	1.57	0.03	0.20	2.77	-0.10
11	-26.44	-0.83	-0.44	-0.49	-3.92	4.97	4.58	0.44	-1.86	0.47	0.30	-3.05	0.35
12	11.13	-0.80	0.07	-0.10	1.41	-0.77	-0.06	-0.40	-0.47	0.15	-1.53	-1.42	0.31
13	9.99	1.54	-1.33	-0.58	3.82	5.15	-2.20	1.51	1.20	0.09	0.87	0.07	0.25
14	19.96	0.32	-0.45	0.15	1.89	3.90	-0.19	-0.39	-1.27	-0.26	-0.62	-2.63	0.16
15	22.36	-1.17	0.77	0.56	3.55	-3.09	-1.05	-2.08	-2.21	0.04	-2.36	-2.90	0.03
16	30.40	3.52	3.47	4.02	1.67	-12.70	-1.26	-3.75	3.42	0.53	-2.65	3.55	0.36
17	-23.36	-1.06	1.44	1.80	-2.43	-11.10	-53.40	-0.35	1.49	0.08	-0.78	2.18	-0.09
18	-23.27	-1.97	1.48	1.39	-3.01	5.27	14.33	0.53	0.23	-0.58	1.37	-0.91	-0.63
19	-11.57	0.38	0.68	0.57	1.99	2.32	10.76	0.74	-0.16	0.24	1.69	0.42	0.28
20	17.13	-1.80	-0.62	-0.66	-2.11	6.60	62.33	0.12	-0.48	-0.22	0.00	-0.03	-0.25
21	3.93	1.15	0.73	0.28	0.35	16.06	130.25	-1.01	0.10	-0.07	-0.60	0.60	-0.07
22	4.86	2.03	-2.61	-1.16	-0.40	7.06	35.41	-0.68	-1.61	-0.15	-1.63	-1.85	-0.06
23	-11.43	-0.98	3.92	3.00	-2.01	3.80	16.55	0.13	0.15	-0.89	-0.03	-1.10	-1.19
24	9.32	0.49	1.55	0.73	1.65	-21.45	-143.21	1.77	0.92	0.50	0.38	0.40	0.62
25	4.53	0.71	0.06	-0.01	0.61	-1.61	-6.47	2.67	0.64	0.22	0.96	0.53	0.45
26	10.42	-0.85	-1.98	-1.97	0.70	-0.70	-29.78	1.18	-0.76	-0.01	1.19	0.23	-0.06
27	5.76	-0.74	2.92	2.49	1.52	5.27	29.38	-0.11	-0.38	0.16	-0.27	-0.13	0.12
28	2.99	2.13	-3.22	-2.58	-0.83	9.27	63.50	-3.17	0.18	0.38	-1.95	-0.41	0.55
29	14.57	1.30	-3.28	-2.59	0.40	-29.33	-173.58	-1.09	0.84	0.34	-0.77	0.83	0.44
30	1.27	-0.46	2.57	1.79	1.98	3.34	8.37	-0.75	-0.08	0.06	0.03	0.63	-0.01
31	-5.16	-0.32	-3.64	-3.07	1.58	5.20	35.55	0.02	-1.11	-0.08	0.41	-1.39	-0.09

吉 K1781R、63A 和吉 R4334。穗柄伸出长度一般配合力效应值变幅为-3.69~4.02，正效应值越高有利于机械收割，效应值最高的 3 个亲本为 SX44A、吉 245A 和吉 R109。千粒重一般配合力效应值变幅为-4.18~3.82，正向效应值高说明籽粒越大，效应值最高的 3 个亲本为吉 5535A、463A 和 314A。穗粒重一般配合力效应值变幅为-29.33~16.06，正效应最高的 3 个亲本是吉 R4334、吉 2055A 和吉 5575A。产量一般配合力效应值变幅为-173.58~130.25，正向效应值越高说明对杂交组合增加产量的效果更明显，效应值最高的 3 个亲本为吉 R4334、吉 R107 和吉 R2483。对于株型而言，应当尽量选择夹角小、叶片窄的材料，综合比较倒 2 叶夹角、倒 2 叶长、倒 2 叶宽、倒 3 叶夹角、倒 3 叶长和倒 3 叶宽等性状，亲本可以选择吉 H129A、Y324A、463A、10125、吉 R107 和吉 R4392 等材料。

2.1.3 特殊配合力效应分析 对 206 个组合 F₁ 代的特殊配合力效应值（表 4）比较可得，在 13 个农艺性状上的特殊配合力正向及负向效应值的个数相差不大，效应值变幅由大到小依次是产量>穗粒重>株高>倒 2 叶长>千粒重>倒 2 叶夹角>穗柄长>倒 3 叶长>穗柄伸出长度>倒 3 叶夹角>穗长>倒 2 叶宽>倒 3 叶宽。在各农艺性状的特殊配合力效应值表现最优组合中，不育系亲本主要为冀 64A、SX44A、吉 5535A 和吉 5575A；恢复系主要为 HLS×125×2999、HLS 早和吉 R4334，且 HLS×125×2999 在倒 3 叶夹角的特殊配合力中出现在最高和最低组合中，反映出该品种具有较强的特殊配合力效应。杂交组合冀 64A×吉 K1781R（吉糯杂 8）、吉 303A×吉 R4334（吉杂 236）、314A×（HLS×125×2999）和 QL33A×10125 在株高和产量等 13 个性状中表现优良，具有较好的利用前景。

表 4 亲本主要性状的特殊配合力效应值
Table 4 Specific combining ability effect values of main traits of parents

性状 Trait	效应值变幅 Effect value range	最高组合 Highest combination	最低组合 Lowest combination
株高 PH	-16.29~11.15	Y324A×5933	冀 64A×HLS 早
穗长 PL	-0.92~2.23	SX44A×吉 R2483	冀 64A×HLS 早
穗柄长 PSL	-3.29~4.79	吉 245A×10125	冀 64A×南 133
穗柄伸出长度 PSE	-3.28~3.51	SX44A×（HLS×125×2999）	63A×吉 R2483
千粒重 TGW	-4.98~4.89	吉 5535A×吉 R4392	吉 5522A×HLS 早
穗粒重 GWPP	-31.03~25.54	吉 5575A×吉 R4334	吉 H129A×吉 R109
产量 Y	-93.29~122.62	吉 5575A×吉 R4334	吉 H129A×吉 R109
倒 2 叶夹角 I2LA	-4.30~4.59	314A×吉 R127	吉 H129A×HLS 早
倒 2 叶长 I2LL	-4.74~5.83	吉 5535A×（HLS×125×2999）	314A×HLS 早
倒 2 叶宽 I2LW	-0.65~0.51	QL33A×南 133×125	吉 H129A×HLS 早
倒 3 叶夹角 I3LA	-2.17~3.31	314A×（HLS×125×2999）	吉 1230A×（HLS×125×2999）
倒 3 叶长 I3LL	-2.98~4.26	463A×吉 R2115	314A×HLS 早
倒 3 叶宽 I3LW	-0.66~0.46	63A×吉 R117	314A×吉 R109

2.2 杂交组合 F₁ 代的杂种优势分析

对 206 份杂交组合 F₁ 代的 13 个主要农艺性状杂种优势进行分析，结果（表 5）显示，各性状均存在不同程度的中亲优势和超亲优势，并且在不同性状间存在较大的优势差异。除穗柄伸出长度外，其他性状的平均中亲优势均为正值，说明多数性状的杂种优势表现为正向优势。所有性状中，穗柄伸出长度的正向杂种优势均值最大，为 483.32%，变化范围在-5529.85%~8204.68%，说明穗柄伸出长度的变化范围较大，在育种实践中要注意通过组合配制来控制杂交种的穗柄伸出长度。其次，产量和穗粒重的正向杂种优势均值也较高，分别为 63.84% 和 52.17%，其组合大部分也表现为正向优势，穗

粒重作为产量构成因素，会对高粱的产量有较大的贡献。千粒重和穗长的杂种优势值较低，分别为 11.71% 和 11.59%，但也有比较突出的组合，穗粒重的最大中亲优势值为 38.14%，穗长的最大中亲优势值为 27.39%，说明通过亲本选配可以提高这 2 个性状的中亲优势。各性状的超亲优势也均不相同，仅穗柄伸出长度、倒 2 叶长和倒 3 叶夹角为负向优势，其他性状均为正向优势，其中穗柄伸出长度的超亲优势值较大。另外，倒 2 叶长等 3 个性状的平均超亲优势虽为负值，但也有正向超亲优势值较高的组合。结果表明，高粱产量相关性状中超亲优势均值比中亲优势均值高，且因为亲本组合不同导致 F₁ 代中亲优势和超亲优势差异较大。

表 5 F₁ 代产量相关性状杂种优势分析
Table 5 Analysis of yield related heterosis in F₁ generation

性状 Trait	中亲优势 Mid-parent heterosis				超亲优势 Heterobeltiosis			
	变幅 Range	均值 Mean	正向组合率 Positive combination rate	正向杂种 优势均值 Positive heterosis mean	变幅 Range	均值 Mean	正向组合率 Positive combination rate	正向杂种 优势均值 Positive heterosis mean
株高 PH	-13.81~61.68	15.91	89.32	18.34	-36.16~113.34	17.17	73.30	27.97
穗长 PL	-5.28~27.39	11.02	96.12	11.59	-19.32~45.02	14.52	83.01	18.88
穗柄长 PSL	-3.36~32.18	13.27	98.54	13.49	-11.15~57.54	19.57	91.75	21.67
穗柄伸出长度 PSE	-5529.85~8204.68	-0.87	46.60	483.32	-2668.13~1256.39	-84.54	47.57	211.75
千粒重 TGW	-11.39~38.14	9.73	86.89	11.71	-30.40~59.76	10.67	73.79	18.31
穗粒重 GWPP	-17.51~128.94	51.57	99.03	52.17	-50.49~256.41	71.68	94.17	76.99
产量 Y	2.50~187.77	63.84	100.00	63.84	-27.12~287.81	87.97	97.09	90.83
倒 2 叶夹角 I2LA	-8.20~36.69	10.19	89.32	11.70	-17.32~71.18	14.62	82.04	19.18
倒 2 叶长 I2LL	-11.90~14.94	1.28	58.25	4.69	-23.85~24.97	-1.98	42.23	7.10
倒 2 叶宽 I2LW	-8.63~20.19	6.78	91.75	7.79	-28.86~34.89	5.84	70.87	11.95
倒 3 叶夹角 I3LA	-12.41~32.07	1.71	57.77	6.21	-33.67~46.97	-2.88	37.86	11.11
倒 3 叶长 I3LL	-10.22~14.43	2.67	70.39	5.10	-21.77~25.19	1.33	59.71	7.68
倒 3 叶宽 I3LW	-12.32~18.84	6.15	87.38	7.70	129.90~30.08	4.36	68.45	10.76

3 讨论

3.1 高粱主要性状的配合力

杂交种的优劣并不取决于亲本农艺性状的好坏，而取决于配合力的高低^[18]。GCA 是源于高遗传性状的累加效应^[19]，SCA 则是在实际育种中反应特定组合在某一性状上的表现，由非加性基因作用，被考虑用于鉴定优良杂交组合的重要指标之一^[20-21]。通过对高粱^[22]、水稻^[23]和陆地棉^[24]等作物研究表明，配合力的遗传效应较为复杂，往往优良的亲本并不能配制出好的杂交种，杂种优势强的组合其双亲不一定都有较高的 GCA，因此，亲本及组合的配合力分析在杂种优势利用及杂交组合配制过程中具有重要意义。本试验对亲本一般配合力分析发现，所有性状均获得显著的 GCA 方差，并且株高、穗长、穗柄长、穗粒重、倒 2 叶长、倒 2 叶宽、倒 3 叶夹角、倒 3 叶长和倒 3 叶宽 9 个性状受双亲基因加性效应影响。杂交组合的 SCA 在 13 个性状中均存在显著差异，多个 GCA 效应值高的亲本所组配杂交组合的 SCA 效应值并不一定高，特殊配合力最高的组合其亲本一般配合力效应值却可能为负值，表明一般配合力和特殊配合力具有相对独立性，这与孙远涛等^[25]的研究结果一致。目前，我国高粱育种正处在选育矮秆耐密适宜机械收割的杂交种的培育阶段^[3]，株高 1.3~1.5 m 为最佳，本试验与之对应的杂交组合是吉 5522A×吉 R4334 (130.14 cm) 和 QL33A×5933 (149.97 cm)，

2 个杂交组合的 SCA 分别是-1.61 和-8.77，其亲本 GCA 分别是-26.44 (5522A)、15.07 (吉 R4334)、-11.00 (QL33A) 和 17.13 (5933)。在针对株高培育杂交种时，不育系可以选择 GCA 在-11.00~-26.44 的材料，恢复系可以选择 GCA 在 15.07~17.13 的材料，应重点关注不育系的选择。此外，产量较高的杂交组合是 QL33A×(南 133×125)、吉 5522A×5933 和吉 5535A×吉 R4392，但上述亲本的 GCA 并非都高。配合力方差显示杂交组合的产量受恢复系影响更大。控制高粱主要性状的遗传机制非常复杂，产生差异的原因可能是地理条件和材料遗传背景不同^[26-28]。产量、株高以及千粒重等性状容易受到环境和栽培条件的影响^[29-30]。产量、株高及穗长具有高 GCA 及高 SCA，表明加性基因占主导地位，并且从亲本到后代的遗传更强，从而允许在早期世代中选择精英品系^[31]。总体来说，提高亲本系的 GCA 是高粱种质创新的关键，在高 GCA 的基础上，选择高 SCA 的优势组合，有可能实现更大的突破。

3.2 高粱 F₁ 代的杂种优势

高粱杂种优势的利用一直受到育种者的关注。刘阳等^[32]通过对甜高粱农艺性状杂种优势的研究，发现甜高粱杂种 F₁ 代的农艺性状普遍存在较强的超亲优势，但中亲优势不强，这一点在本试验中得到证实。本试验对 31 份高粱亲本组配的 206 个杂交组合 F₁ 代主要性状的杂种优势分析表明，各杂交组合穗柄伸出长度的杂种优势变幅较大。除了穗

柄伸出长度、倒 2 叶长和倒 3 叶夹角等 3 个性状的超亲优势平均值为负值以外,其余性状的超亲优势平均值皆为正值,其中,产量、穗粒重、穗柄长、穗长和倒 2 叶宽的正向组合几率较高。上述结果表明,该 31 份高粱亲本间的遗传距离可能较远,杂交组合在各性状上表现出明显的杂种优势,具有很好的应用前景。在此基础上,应进一步强化种质创新,以指导后续杂交组合的亲本选配,并为后续常规育种杂交组合提供理论指导。

3.3 高粱不育系、恢复系利用价值的评价

本试验一般配合力的分析中,恢复系 HLS×125×2999 在株高、倒 2 叶长和倒 3 叶长 3 个性状中具有最大的一般配合力,恢复系吉 R2483 在穗长、倒 2 叶夹角和倒 2 叶宽 3 个性状中具有最大的一般配合力,恢复系吉 R4334 在产量和穗粒重 2 个性状中具有最大的一般配合力,SX44A、冀 64A、吉 1230A 和 Y324A 中均有多个性状的一般配合力表现最优。在产量性状方面,一般配合力效应值大于 10 的恢复系有南 133、南 133×125、吉 R2483、吉 R4334、吉 R4392、吉 K1781R、10125、吉 R107 和吉 R117,与这些恢复系进行组配可能得到产量优势强的高粱杂交组合。在 16 个不育系当中,吉 245A 除倒 3 叶宽性状之外,其余 12 个性状的一般配合力均表现优异。高粱育种处于矮化绿色革命中^[33],冀 64A 株高的 GCA 负向效应值最低(-31.18),表明冀 64A 可以作为降秆育种亲本在高粱杂交选育中利用。想要培育出高产优良的高粱杂交种关键在于培育优良的亲本材料,然而,部分材料经过多年多代杂交后遗传背景模糊不清导致突破性新品种育成较少或推广面积较小等问题。高粱育种家应从现有亲本创制角度出发,通过引进、收集、利用优良的保持系、恢复系和不育系等亲本资源,结合区域特点和生产条件的需求,培育出抗旱、耐冷、耐盐碱、早熟且优质高产的高粱品种,以满足日益多元化的市场需要。

4 结论

在高粱杂交种选育实践中,选择优良亲本时,除了要注意亲本的综合性状与一般配合力外,还要关注其组合的特殊配合力以及双亲的优势互补原则。最终筛选出冀 64A×吉 K1781R、吉 303A×吉 R4392、314A×(HLS×125×2999)和 QL33A×10125 等优良杂交组合。冀 64A、SX44A、吉 5535A、吉

5575A、HLS×125×2999、HLS 早和吉 R4334 共 6 个亲本在株高、穗长、穗粒重、产量、倒 2 夹角、倒 2 叶宽和倒 3 叶夹角等方面更具优势。因此,在改良春播早熟区品种时可考虑用冀 64A、SX44A、吉 5535A、吉 5575A 作为母本,HLS×125×2999、HLS 早和吉 R4334 作为父本开展选育研究。

参考文献

- [1] 张福耀. 高粱的起源、驯化与传播. 陕西农业科学, 2022, 68(4): 82-87.
- [2] 朱振兴, 张丽霞, 李金红, 等. 高粱生物育种进展与展望. 中国基础科学, 2022, 24(4): 42-52.
- [3] 陈冰嫄, 李继洪, 王阳, 等. 高粱[Sorghum bicolor (L.) Moench]种质资源研究进展. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(1): 67-72, 77.
- [4] Stephens J C, Holland R F. Cytoplasmic male sterility for hybrid sorghum seed production. Agronomy, 1954, 46: 20-23.
- [5] Rahman M M, Sarker U, Swapan M A H, et al. Combining ability analysis and marker-based prediction of heterosis in yield reveal prominent heterotic combinations from diallel population of rice. Agronomy, 2022, 12(8): 1797.
- [6] Bhusal T, Lal G M. Relationship among heterosis, combining ability and SSR based genetic distance in single cross hybrids of maize (*Zea mays* L.). Vegetos, 2017, 30(2): 1000226.
- [7] 周开达, 黎汉云, 李仁端, 等. 杂交水稻主要性状配合力、遗传力的初步研究. 作物学报, 1982, 8(3): 145-152.
- [8] Sprague G F, Tatum L A. General vs. specific combining ability in single crosses of corn. Agronomy Journal, 1942, 34(10): 923-932.
- [9] Wu H X, Matheson A C. General and specific combining ability from partial diallels of radiata pine: implications for utility of SCA in breeding and deployment populations. Theoretical and Applied Genetics, 2004, 108(8): 1503-1512.
- [10] 孙伟豪, 刘亨, 桑祎楠, 等. 宁夏引黄灌区春小麦品种(系)抗倒伏相关性状杂种优势及配合力分析. 中国农业科学, 2024, 57(13): 2497-2508.
- [11] 张俊珍, 程庆军, 田承华, 等. 几个高粱新选育亲本配合力分析. 山西农业科学, 2016, 44(4): 440-443, 455.
- [12] 张阳, 赵威军, 张福耀, 等. 新选甜高粱不育系和恢复系的配合力分析. 作物杂志, 2010(5): 102-105.
- [13] 高士杰. 高粱配合力的研究. 中国农业科学, 1984(4): 26-32.
- [14] 高明尉. 雄性不育与杂种优势育种. 作物学报, 1979(4): 51-56.
- [15] 陆平. 高粱种质资源描述规范和数据标准. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [16] 孔繁玲. 植物数量遗传学. 北京: 中国农业大学出版社, 2006.
- [17] 孙贵荒. 高粱穗柄长的细胞质效应分析. 辽宁农业科学, 1987(5): 15-17.
- [18] 张军刚, 郭海斌, 冯晓曦, 等. 20 份玉米自交系主要性状配合力及杂种优势分析. 种子, 2023, 42(8): 126-133.
- [19] 李周帅, 董远, 李婷, 等. 基于杂交种群体的玉米产量及其配合力的全基因组关联分析. 中国农业科学, 2022, 55(9): 1695-1710.
- [20] 王晖. 玉米全基因组关联分析多杂种群体的构建及其杂种优势和配合力的遗传分析. 北京: 中国农业科学院, 2017.
- [21] 朱红艳, 赵兴俊, 张永久. 作物遗传育种. 重庆: 重庆大学出版社, 2016.
- [22] 孙远涛, 龙文靖, 刘天朋, 等. 12 个糯高粱亲本的主要性状配

- 合力及相关性分析. 作物杂志, 2024(6): 84-90.
- [23] 谢芳腾, 刘海平, 张红林, 等. 新质源两系杂交早稻 10 个性状的配合力及遗传力分析. 种子, 2022, 41(2): 82-86, 92.
- [24] 桑晓慧, 陈伟, 赵云雷, 等. 陆地棉 16 份材料配组的产量和纤维品质性状配合力分析. 棉花科学, 2021, 43(4): 24-31.
- [25] 孙远涛, 刘天朋, 龙文靖, 等. 11 个糯高粱亲本主要农艺性状的配合力及遗传力分析. 分子植物育种. (2023-07-10)[2024-08-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.s.20230707.1125.012.html>.
- [26] Medraoui L, Rabeh K, Ater M, et al. Genetic diversity analysis of sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] landraces from northwestern Morocco using ISSR and AFLP markers. Genetic Resources and Crop Evolution, 2024, 71(2): 835-850.
- [27] Degu E, Debello A, Belete K. Combining ability study for grain yield and yield-related traits of grain sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] in Ethiopia. Acta Agronomica Hungarica, 2009, 57: 175-184.
- [28] Toure A, Miller F R, Rosenow D T. Heterosis and combining ability for grain yield and yield components in guinea sorghums. African Crop Science Journal, 1996, 4(4): 383-391.
- [29] 孙贵荒, 陈悦, 杨晓光, 等. 高粱产量、株高和穗长的遗传研究. 辽宁农业科学, 1995(3): 16-20.
- [30] 肖继兵, 刘志, 孔凡信, 等. 基于 GGE 双标图的高粱品种农艺性状和稳产性分析. 作物杂志, 2023(2): 36-45.
- [31] 宋天月. 四个糯玉米自交系配合力的测定及其遗传力分析. 天津: 天津农学院, 2014.
- [32] 刘阳, 周伟, 王振国, 等. 甜高粱农艺性状杂种优势分析. 分子植物育种, 2021, 19(20): 6809-6816.
- [33] 柳青山. 山西杂交高粱育种的研究历程及展望. 山西农业科学, 2023, 51(10): 1115-1120.

Analysis of Combining Ability and Heterosis of Main Traits in Core Parents of Sorghum for Spring-Sown Early-Maturing Regions

Liu Xiaohan^{1,2}, Tang Yujie², Liu Xinyu³, Qiao Zhengyan⁴, Shi Guishan²
Yu Miao², Li Yang², Wang Nai², Qi Hongying¹, Chen Bingru²

¹College of Life Science, Agriculture and Forestry, Qiqihar University, Qiqihar 161006, Heilongjiang, China;

²Jilin Academy of Agricultural Sciences, Gongzhuling 136199, Jilin, China;

³Ningjiang District Black Soil Conservation and Monitoring Center, Songyuan 138000, Jilin, China;

⁴College of Agronomy, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, Jilin, China)

Abstract The combining ability and heterosis of sorghum sterile line and restorer line in spring-sown early maturing regions were studied to provide theoretical basis for the parent selection of sorghum hybrid combinations in the future. Using 31 sorghum as parent materials, 206 hybrid combinations were prepared by incomplete diallel cross design, and 13 main traits including plant height, panicle length and combining ability and heterosis of parents and their hybrid F₁ were analyzed. The results showed that there were significant differences in various traits between the sterile and restorer lines of sorghum, and the combining ability of different materials was significantly different. Among the 31 materials, Ji 64A, SX44A, Ji 5535A, Ji 5575A, HLS×125×2999, HLS Zao and Ji R4334 had more advantages in plant height, panicle length, grain weight per panicle, yield, penultimate leaf angle, penultimate width, and antepenultimate leaf angle, etc. The general combining ability of other traits was also excellent, so the six materials were ideal parents. There was a large heterosis utilization potential in the hybrid combination, but the mid-parent heterosis was not prominent. Meanwhile, the yield of the hybrid combination was affected by both additive and non-additive effects. To select excellent parents attention should be paid to the comprehensive traits and general combining ability of the parents, as well as the special combining ability and the complementary effect of the parents.

Key words Sorghum; Agronomic traits; General combining ability; Special combining ability