

生育进程相近的谷子杂交种两系亲本的选育及其杂种优势分析

李志华 穆婷婷 李爱军

(山西农业大学高粱研究所, 030600, 山西晋中)

摘要 利用“两系”进行谷子杂种优势制杂交种时, 不育系抽穗期和开花期常较恢复系早, 二者只有错期播种才可在花期相遇并杂交结实。通过改良现有不育系与抗除草剂恢复系抽穗期和开花期, 选育出符合谷子“两系”改良育种目标的优良高度雄性不育系 3 个(Y1A、Y2A 和 Y3A)及抗除草剂拿捕净恢复系 5 个(K17-1、K18-49、K18-54、K18-62 和 K18-70), 按 NCII 不完全双列杂交组配 15 个组合, 分析亲本和杂交组合配合力、超亲优势及超标优势, 预测其杂种优势。结果显示, 亲本的配合力各不相同, 有不同优良农艺性状选择方面利用价值; 杂交组合间各性状超亲优势和超标优势表现存在差异, 但杂种优势无关联、无规律性, 分析预测亲本存在杂种优势。同时, “两系”亲本各自性状表现优良, 选出的杂交组合 Y3A×K18-49 具有强杂种优势, 可作为苗头杂交种继续进行杂种优势育种。本研究结果为谷子杂交种制种提供了可同期播种的“两系”亲本及苗头优良杂交种, 简化了谷子杂交制种环节。

关键词 谷子; 不育系; 抗除草剂恢复系; 配合力; 杂种优势

谷子是我国的特色作物, 种植面积占世界的 80%, 具有营养丰富、耐旱耐瘠和粮草兼用的特点, 在农业种植结构调整和国际贸易中有重要的地位。目前我国中晚熟谷子种植区仍以常规种为主要品种, 品种较单一, 产量也偏低, 若想大幅度提高谷子产量, 选育、推广适宜简约化栽培的强优势高产、高效、优质杂交谷子迫在眉睫。为此, 就要有适合的谷子不育系与恢复系“两系”配套亲本材料。在研究生产实践中, 我们应用的不育系虽具有不育度高、长势整齐稳定和异交结实较高等优良性状, 但缺点都是抽穗过早, 不易与恢复系同期测配, 增大了制种难度, 增加了制种风险及制种成本, 还可能降低制种产量。因此, 创制选育性状优良、花期适宜的高度雄性不育系和抗除草剂恢复系“两系”材料很有必要。

谷子杂种优势利用的主要限制因素是不育系的选育与利用。为更好地通过杂种优势提高谷子产量, 育种家们围绕谷子不育系开展了大量研究, 先后经历了质核互作雄性不育^[1-3]、高度雄性核不育^[4-6]和光(温)敏核不育系^[7-9]3 个阶段的选育。目前, 生产上使用的谷子不育系主要是高度雄性核不育系和光(温)敏核不育系, 如利用高度雄

性不育系选育出长杂谷 2 号^[10]、晋谷 49 号^[11]和晋谷 50 号^[12]。张家口市农业科学院利用谷子光(温)敏型雄性不育系选育出“张杂谷”系列^[13-15]。

本研究注意到在利用谷子不育系进行“两系”杂种优势制种时, 不育系都较早抽穗, 与同期播种抗除草剂恢复系花期不遇, 需要错期播种才能“两系”异交结实, 提高结实率。针对这一问题, 利用测交、回交和自交等方法, 对现有早抽穗的谷子高度雄性不育系及现有抗除草剂恢复系进行抽穗期和盛花期过早性状的改良, 选育适宜谷子中晚熟区同期播种的谷子“两系”亲本材料, 进一步提高不育系与抗除草剂恢复系制种率, 选育优良的谷子杂交种, 进而推动谷子杂交种在生产上的大面积利用。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验选用材料是基础材料改良而来的, 母本不育系 Y1A、Y2A 和 Y3A; 父本抗除草剂拿捕净恢复系 K17-1、K18-49、K18-54、K18-62 和 K18-70。其中, 母本不育系与父本抗除草剂恢复系生育期相近, 可同期播种、杂交、授粉及结实, 提高谷子杂

作者简介: 李志华, 主要从事谷子杂种优势利用及轻简化栽培技术研究, E-mail: lihubo0@163.com

穆婷婷为通信作者, 主要从事谷子杂种优势利用及轻简化栽培技术研究, E-mail: ting_ting2006@163.com

基金项目: 山西省农业科学院博士研究基金(YBSJJ2004); 2021 年国家谷子高粱登记品种展示与示范

收稿日期: 2021-06-09; 修回日期: 2021-10-09; 网络出版日期: 2022-09-20

交种制种成功率。

1.2 试验设计

按照 NCII 不完全双列杂交试验，2019 年在山西农业大学高粱研究所东白试验基地以新选不育系 Y1A、Y2A、Y3A 为母本与 5 个抗除草剂拿捕净恢复系 K17-1、K18-49、K18-54、K18-62、K18-70 为父本进行同期播种测配，组配 15 个杂交种组合。2020 年种植 3 个母本、5 个父本和 15 个杂交组合，并设生产对照长生 13（CK），共 24 组材料，随机区组设计。3 次重复，6 行区，行距 0.33m，行长 5.00m。收获时，每小区去边行，在中间随机选 10 株，调查株高、穗长、穗粗、穗重、穗粒重和千粒重，取平均值作为该小区材料农艺性状田间观察值。田间试验管理方法与措施同大田。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2013 和 DPS 7.5 软件对调查数据进行整理，按 NCII 不完全双列杂交试验进行农艺性状方差、配合力和杂种优势分析。确定谷子杂交种产量及与产量密切相关性状，株高、穗长、穗粗、穗重、穗粒重、千粒重的超亲优势≥20%、超标优势≥8%为强优势杂交种；超亲优势 20%~

5%、超标优势 8%~0%为中强优势杂交种；超亲优势≤5%、超标优势≤0%为无优势杂交种^[16-18]。具体用下式计算：

超亲优势（transgressive heterosis，TH）=（F₁-HP）/HP×100；超标优势（superstandard heterosis，SH）=（F₁-CK）/CK×100^[18]。

式中，HP 以父本（恢复系）的性状值为标准，CK 为长生 13 的性状值。

2 结果与分析

2.1 “两系”亲本创制

通过几代回交选择和自交选育，改良在中晚熟区种植熟性较早的谷子不育系张 A 系列的早熟性状，于 2014 年转育出 3 个新的高度雄性不育系，该不育系群体长势整齐一致，抽穗、开花较不育系张 A 晚 5~7d，柱头外露均较好，不育率均达 100%，不育度约为 95%，利用 5%左右的自交结实繁殖种子，植株均较矮，分蘖，易接受外来花粉。2015~2019 年，3 个新不育系田间穗行表现均稳定，无明显不良性状，综合农艺性状表现良好，生育期适合与抗除草剂拿捕净恢复系同期播种测交（表 1）。

表 1 3 个新选不育系主要性状
Table 1 Main characteristics of three newly selected sterile lines

不育系 Sterile line	播种期（月-日） Seeding stage (month-date)	抽穗期（月-日） Heading stage (month-date)	苗色 Seedling color	株高 Plant height (cm)	穗长 Ear length (cm)	穗粗 Ear diameter (cm)	千粒重 1000-Grain 1001-weight (g)
Y1A	05-20	08-03	绿	118.84	26.40	3.76	3.34
Y2A	05-20	08-01	绿	120.42	26.90	3.54	3.09
Y3A	05-20	08-01	绿	108.44	21.84	3.66	3.07

性状表现为种植地表现，下同
The characteristic is the performance of planting site, the same below

改良适宜谷子中晚熟区种植，表现优良的谷子常规种经过 4~5 代自交连续鉴定选择转育，选育出 5 个恢复系 K17-1、K18-49、K18-54、K18-62 和 K18-70（表 2），新恢复系田间表型整齐一致，无

不良表现，花期散粉较多，抗性表现稳定，且生育期较原恢复系早，具有抗拿捕净特性。与新选不育系同期播种，抽穗期和盛花期相近，授粉结实良好。

表 2 5 个新选抗除草剂拿捕净主要农艺性状
Table 2 Main agronomic characteristics of five newly selected herbicide-resistant sethoxymid restorers

恢复系 Restorer	株高 Plant height (cm)	穗长 Ear length (cm)	穗粗 Ear diameter (cm)	穗重 Ear weight (g)	穗粒重 Spike grain weight (g)	千粒重 1000-grain weight (g)
K17-1	161.77	23.25	3.40	30.09	23.21	3.18
K18-49	159.11	28.13	2.24	31.61	23.59	3.22
K18-54	159.26	27.56	2.56	29.07	21.93	3.37
K18-62	154.01	26.94	1.73	32.63	26.31	2.95
K18-70	155.63	29.79	1.96	29.34	22.55	2.94

2.2 谷子“两系”杂种优势利用

2.2.1 配合力分析 谷子“两系”主要农艺性状配合力方差分析（表 3）显示，重复区组间各农艺性状均无显著差异，而组合间各农艺性状均达到极显著差异水平，说明这些差异主要来自于遗传差异。恢复系（P1）和不育系（P2）各性状一般配合

力（GCA）方差均达到极显著水平，说明恢复系和不育系各性状存在遗传差异，特殊配合力（P2×P1，SCA）间的相互作用各性状也均呈极显著差异水平，说明性状除受双亲的影响，还受二者互作的影响，组合间存在真实的遗传差异，可进行一般配合力和特殊配合力效应值分析。

表 3 主要农艺性状配合力方差分析
Table 3 Variance analysis of combining ability of main agronomic characteristics

变异来源 Source of variation	株高 Plant height	穗长 Ear length	穗粗 Ear diameter	穗重 Ear weight	穗粒重 Spike grain weight	千粒重 1000-grain weight
区组 Block	0.17	0.52	0.47	0.28	0.49	0.03
组合 Combination	88.77**	73.20**	1.80**	6.35**	95.34**	123.20**
P1	18.00**	12.23**	7.36**	2.53**	1.29**	4.01**
P2	55.38**	1.10**	3.63**	0.58**	4.05**	1.17**
P1×P2	6.52**	17.34**	0.56**	4.61**	62.73**	65.36**

“**”表示在 0.01 水平差异显著
“**” indicates significant difference at 0.01 level

一般配合力分析（表 4）显示，3 个不育系中，Y1A 株高、穗粗和千粒重为正向值，表明这个不育系所配组合可能植株偏高，谷穗偏粗，籽粒偏大；Y2A 株高、穗长、穗粗和千粒重均为负向值，但穗重和穗粒重却为正向值，表明这个不育系所配组合可能株高偏矮，穗长偏短，籽粒偏小，但结实率较高，且灌浆饱满；Y3A 株高为负向值，穗长却为正向值，表明这个不育系所配组合可能株高较矮，但穗较长，千粒重虽也为正向值，但数值较小，结实

籽粒一般。5 个新选抗除草剂恢复系中，K18-49 几乎均为正向值，但数值均较小，表明这个恢复系有一定的组配潜力；K18-54 几乎均为负向值，表明这个恢复系组配潜力较差；K18-70 千粒重为最大正向值，其余性状均为负向值，说明有组配较大籽粒的潜力；K17-1 和 K18-62 有正有负，表明这 2 个恢复系可能组配出某些目标性状较好的组合，尤其 K18-62 的穗重和穗粒重均为最大正向值，有组配较高产量的潜力。

表 4 一般配合力效应值
Table 4 General combining ability effect values

不育系（恢复系） Sterile line (restorer)	株高 Plant height	穗长 Ear length	穗粗 Ear diameter	穗重 Ear weight	穗粒重 Spike grain weight	千粒重 1000-grain weight
Y1A	4.83	-1.35	5.71	-1.62	-8.50	2.62
Y2A	-1.84	-0.60	-3.55	4.07	13.21	-2.64
Y3A	-2.99	1.96	-2.16	-2.45	-4.71	0.03
K17-1	-3.20	-6.66	12.90	-3.00	3.74	0.52
K18-49	0.95	12.77	-1.69	3.23	2.95	0.22
K18-54	4.73	-3.23	-5.12	-7.64	-10.68	-5.98
K18-62	-0.27	-2.34	4.80	15.18	10.42	-4.72
K18-70	-2.22	-0.55	-10.89	-7.78	-6.43	9.96

对 15 个组合 F₁ 代 6 个农艺性状特殊配合力分析（表 5）发现，株高、穗粗和穗重特殊配合力正负向值组合数几乎相等，株高数值为-1.47~1.96，区间范围较小，配合力高低差别不明显；穗粗数值为-7.06~7.66，区间范围一般，配合力高低差别居中；穗重数值为-16.55~14.42，区间范围较大，配合力高低差别明显。穗长、穗粒重和千粒重特殊配

合力的正向组合数均为 9 个，负向 6 个，其中穗长最高配合力组合 Y1A×K18-49 为 3.87，最低配合力组合 Y3A×K18-54 为-4.37；穗粒重最高配合力组合 Y3A×K18-54 为 15.45，最低配合力组合 Y1A×K18-49 为-14.53；千粒重最高配合力组合 Y1A×K18-70 为 6.45，最低配合力组合 Y2A×K18-70 为-10.13。此外，各组合中，组合 Y2A×K17-1 及 Y2A×

K18-62 的 6 个性状特殊配合力几乎全部为正值，但数值均较小；组合 Y3A×K18-49 的穗粗、穗重和穗粒重特殊配合力均较高，但株高、穗长和千粒重特殊配合力却为负向，配合力较小，表明组合可能植株偏矮，穗长较短，籽粒较小，正符合当前谷子现代化机械栽培育种目标，综合估计有利用潜力。

表 5 特殊配合力效应值
Table 5 Effect value of special combining ability

组合 Combination	株高 Plant height	穗长 Ear length	穗粗 Ear diameter	穗重 Ear weight	穗粒重 Spike grain weight	千粒重 1000-grain weight
Y1A×K17-1	1.09	-3.47	-2.10	9.94	9.57	-5.18
Y1A×K18-49	1.01	3.87	0.27	-6.02	-14.53	0.58
Y1A×K18-54	-0.86	2.32	6.04	-5.86	-1.94	0.21
Y1A×K18-62	-0.73	-3.57	-1.45	2.59	1.88	-2.06
Y1A×K18-70	-0.51	0.84	-2.75	-0.64	5.02	6.45
Y2A×K17-1	0.38	1.73	2.25	6.61	1.44	3.31
Y2A×K18-49	-0.13	-0.98	-5.72	-8.40	0.33	2.72
Y2A×K18-54	0.73	2.05	-7.06	6.34	-13.51	0.90
Y2A×K18-62	-1.22	0.27	7.66	0.26	7.40	3.20
Y2A×K18-70	0.24	-3.07	2.87	-4.81	4.33	-10.13
Y3A×K17-1	-1.47	1.73	-0.14	-16.55	-11.01	1.86
Y3A×K18-49	-0.89	-2.89	5.45	14.42	14.19	-3.30
Y3A×K18-54	0.13	-4.37	1.02	-0.47	15.45	-1.11
Y3A×K18-62	1.96	3.30	-6.21	-2.85	-9.29	-1.14
Y3A×K18-70	0.27	2.23	-0.12	5.45	-9.35	3.69

从育种观点看，试验群体各性状遗传上的重要性可以由配合力方差估算^[19]。由表 6 可知，株高、穗长和穗粗为一般配合力更重要一些，穗重和穗粒重为特殊配合力更重要一些，千粒重为二者的重要

表 6 群体配合力方差
Table 6 Variance of population combining ability %

配合力 Combining ability	株高 Plant height	穗长 Ear length	穗粗 Ear diameter	穗重 Ear weight	穗粒重 Spike grain weight	千粒重 1000-grain weight
一般配合力 GCA	95.13	79.97	100	39.47	41.85	51.32
特殊配合力 SCA	4.87	20.03	0	60.53	58.15	48.68

性几乎均等。

2.2.2 “两系”杂交杂种优势潜力分析 由表 7 可知，15 个杂交组合 F₁ 代中，各农艺性状超亲优势和超标优势各不相同，结合杂种优势划分标准，各组合杂种优势强弱表现存在很大差异。其中，株高的超亲优势和超标优势全部为负向值，表现为负向优势。穗长中组合 Y1A×K18-49 超亲优势为 20.57%，超标优势为 28.37%，达到强优势组合要求，为强优势组合；组合 Y2A×K18-49、Y3A×K17-1 和 Y3A×K18-49 超亲优势范围为 10.62%~13.67%，超标优势范围为 17.78%~1.28%，均在中优势杂交种范围内，为中优势组合；其余组合超亲优势和超标优势表现或没有同时达到强、中优势范围值，或全部为负向优势值，均为无优势组合。穗粗表现无强优势组合，组合 Y1A×K18-49、Y1A×K18-62、Y2A×K18-62 和 Y3A×K18-49 超亲优势范围为 12.57%~56.45%，超标优势范围为 0.46%~7.84%，达到中优势组合要求值；其余为无优势组合。穗重中组合 Y2A×K18-62 超亲优势为 22.12%，超标优势为 28.83%，Y3A×K18-49 超亲优势为 21.50%，超标优势为 24.17%，达到强优势组合要求，为强优势杂交组合；组合 Y1A×K17-1、Y1A×K18-62、Y2A×K17-1、Y2A×K18-54、Y2A×K18-62 和 Y3A×K18-70 超亲优势范围为 8.20%~19.31%，超标优势范围为 2.63%~28.83%，属中优势杂交组合；其余为无优势组合。组合 Y2A×K17-1、Y2A×K18-49 和 Y3A×K18-49 的穗粒重超亲优势范围为 20.86%~29.34%，超标范围为 8.65%~14.41%，为强优势组合；组合 Y1A×K17-1、Y2A×K18-62 和 Y2A×K18-70 超亲优势范围为 5.33%~24.94%，超标优势范围为

5.20%~26.62%，为中优势组合；其余为无优势组合； 超标优势为 17.88%，为强优势组合；组合 Y3A×
千粒重中组合 Y1A×K18-70 超亲优势为 21.09%， K18-70 超亲优势为 15.65%，超标优势为 12.58%，

表 7 各组合平均值、超亲优势和超标优势
Table 7 Average value, transgressive heterosis and superstandard heterosis of each combination

组合 Combination	株高 Plant height			穗长 Ear length			穗粗 Ear diameter			穗重 Ear weight			穗粒重 Spike grain weight			千粒重 1000-grain weight		
	平均 Mean (cm)	TH (%)	SH (%)	平均 Mean (cm)	TH (%)	SH (%)	平均 Mean (cm)	TH (%)	SH (%)	平均 Mean (g)	TH (%)	SH (%)	平均 Mean (g)	TH (%)	SH (%)	平均 Mean (g)	TH (%)	SH (%)
Y1A×K17-1	148.18	-8.40	-3.59	24.27	4.37	-8.15	2.89	-14.95	15.21	35.11	16.68	13.51	26.57	14.49	5.20	2.93	-7.86	-2.98
Y1A×K18-49	154.58	-2.84	0.57	33.92	20.57	28.37	2.59	15.55	3.12	31.87	0.81	3.02	20.26	-14.10	-22.78	3.09	-3.93	2.43
Y1A×K18-54	156.17	-1.94	1.60	26.86	-2.55	1.66	2.65	3.39	5.44	28.30	-2.65	-8.51	20.00	-8.79	-23.77	2.90	-14.05	-4.08
Y1A×K18-62	149.82	-2.72	-2.53	25.94	-3.71	-1.81	2.71	56.45	7.84	38.72	18.67	25.20	26.32	0.04	0.30	2.87	-2.82	-5.08
Y1A×K18-70	147.85	-5.00	-3.81	28.04	-5.87	6.14	2.29	16.58	-8.96	30.00	2.23	-3.02	22.84	1.29	-12.95	3.56	21.09	17.88
Y2A×K17-1	137.12	-15.24	-10.79	25.70	10.54	-2.73	2.77	-18.53	10.36	35.90	19.31	16.07	30.02	29.34	14.41	3.03	-4.82	0.22
Y2A×K18-49	143.18	-10.01	-6.84	31.98	13.67	21.03	2.21	-1.34	-11.95	32.98	4.32	6.61	29.54	25.24	12.59	3.00	-6.83	-0.66
Y2A×K18-54	148.00	-8.18	-3.71	27.71	-1.45	4.88	2.09	56.26	-16.67	34.27	17.87	10.78	22.57	2.93	-13.98	2.76	-2.82	-8.61
Y2A×K18-62	141.42	-7.07	-7.99	26.55	0.54	0.49	2.70	-18.29	7.70	39.85	22.12	28.83	33.23	5.33	26.62	2.87	-18.10	-5.08
Y2A×K18-70	138.50	-11.01	-9.89	26.83	-9.93	1.56	2.20	11.99	-12.55	30.50	3.95	-1.40	28.18	24.94	7.37	2.91	-1.13	-3.75
Y3A×K17-1	131.37	-18.79	-14.53	26.76	15.09	1.28	2.75	-19.26	9.36	26.01	-13.58	-15.92	22.32	-3.83	-14.94	3.06	-3.67	1.43
Y3A×K18-49	141.88	-10.83	-7.69	31.12	10.62	17.78	2.52	12.57	0.46	38.41	21.50	24.17	28.51	20.86	8.65	2.90	-9.94	-3.97
Y3A×K18-54	146.93	-7.74	-4.40	26.30	-4.57	-0.45	2.33	-9.11	-7.30	29.82	2.57	-3.60	25.37	15.70	-3.30	2.78	-17.51	-7.95
Y3A×K18-62	142.05	-7.77	-7.58	28.00	3.93	5.98	2.39	38.34	-4.65	36.63	12.26	18.43	24.45	-7.07	-6.82	2.82	-4.52	-6.73
Y3A×K18-70	137.80	-11.46	-10.34	29.05	-2.48	9.95	2.16	9.95	-14.14	31.75	8.20	2.63	20.16	-10.59	-23.16	3.40	15.65	12.58
长生 13 Changsheng 13 (CK)	153.73			26.42			2.51			30.93			25.26			3.02		

为中优势组合；其余无优势。

3 讨论

本研究改良转育谷子“两系”的目的是在保证谷子“两系”材料具有优良品质及性状前提下，为实现在谷子利用这些优良材料进行杂种优势制种时“两系”能同期播种，提高谷子异交结实率，增加谷子制种的成功率，有效降低制种时的风险及减少制种成本。本研究结果显示，转育的 3 个不育系除具有作为优良谷子不育系必备的基本性状外，最大优点是解决了谷子中晚熟区杂种优势利用中“两系”测配制种不可同期播种的难题。通过生育期目标性状的改良，延长了谷子不育系出苗到抽穗、开花和盛花期的时间，使得不育系抽穗、开花、盛花期与 5 个新转育的抗除草剂恢复系及其他未参加试验的现有抗除草剂恢复系相近，即不再需要通过错期播种来调整“两系”开花和散粉，同期播种即可使母本不育系正好接受父本恢复系的花粉，很好地

完成二者的授粉结实过程，简化了谷子杂交制种步骤，减少了制种风险，提高制种的成功率。

王黎明等^[20]发现，利用亲本的配合力预测杂种优势效果优于遗传距离；Amelework 等^[21]和 Jordan 等^[22]研究认为，在杂种优势的预测上，基于 GCA 的预测方法比基于分子标记的预测方法更有效；贾秀苹等^[23]认为，双亲或亲本之一具有较高的 GCA 效应或 SCA 效应，是杂交种强优势组合特点。总结前人研究发现，配合力与杂种优势有着密切的联系。本研究表明，在进行株型性状选择时，要注重 GCA 的选择，但在进行产量性状选择时，GCA 及 SCA 都要注重，尤其更要注重 SCA 的选择。由于亲本配合力存在差异，其性状的 GCA 和 SCA 效应各不相同，在进行目标性状选择利用时，可通过配合力的高低进行选择。同时也认为，高 GCA 的亲本组合，其 SCA 不一定都高，但出现高 SCA 的几率较大；而 GCA 都低时，组合 SCA 一定较小。在选择高产组合时，至少要有 1 个高 GCA 亲本，同

时兼顾 SCA 的选择,才可能选出强优势杂交种。这与李志华等^[24]研究谷子不育系农艺性状配合力及育种者^[25-27]在其他作物上研究配合力结果相同。亲本配合力是选择优良杂交种的重要依据,亲本有良好配合力才能组配出强优势杂交种。

利用超亲优势和超标优势分析谷子杂种优势,李素英等^[18]发现,除千粒重外,穗长、穗粗、穗重、穗粒重及产量的杂种优势程度分类有一定的规律性,谷子穗粒重和出谷率杂种优势与产量杂种优势高度吻合,呈极显著相关,在强优势谷子杂交种选育中,更要注重对这 2 个性状的选育。本研究发现,新选育的 8 个谷子“两系”亲本杂交,各组合主要农艺性状杂种优势分析显示,株高超亲优势和超标优势几乎均为负向优势,说明各组合比父本及对照株高均有所降低,这有利于谷子抗倒伏及现代化收割;穗重和穗粒重的杂种优势程度分类明显,强、中、弱 3 个优势等级均有,但穗长、穗粗和千粒重的杂种优势程度分类表现不明显,且大多为弱杂种优势,说明各性状杂种优势表现差异较大,杂种优势程度分类无关联、无规律性,这与李素英等^[18]的研究结果不同,主要原因可能是本研究中利用新选育 3 个不育系与 5 个恢复系为亲本进行测配杂交,组合较少,同时用于研究的农艺性状项目较少。对这些材料还需进行大量有代表性的、系统性的测配杂交,以选育具有强优势的杂交种。

4 结论

本研究通过改良现有不育系张 A 等的早熟性,转育出 3 个生育期较晚的中晚熟不育系,与现有大多抗除草剂恢复系同期播种,具有相近的抽穗期和盛花期,杂交测配制种成本降低,成功率加大,减少了谷子杂种优势制种风险。同时通过转育,选育出 5 个适合谷子杂交的中晚熟抗除草剂拿捕净恢复系,分析配合力、超亲优势及超标优势,选育出组合 Y3A×K18-49 具有较高的穗粗、穗重和穗粒重 SCA,且穗重和穗粒重达到强杂种优势,穗长和穗粗也达到中等优势,综合预测该组合有较强杂种优势,为苗头杂交种,可明年继续进行测配杂交制种,鉴定其杂种优势。

参考文献

- [1] 朱光琴,李续中,师公贤.谷子不育系同源四倍体秋水仙碱引变试验.陕西农业科学,1987(6):33.
- [2] 胡洪凯,石艳华,王朝斌,等.“Ch 型”谷子显性核不育的遗传及其应用研究.作物学报,1993,19(3):208-217.
- [3] 智慧,王永强,李伟,等.利用野生青狗尾草的细胞质培育谷子质核互作雄性不育材料.植物遗传资源学报,2007,8(3):261-264.
- [4] 崔文生,马烘锡,张德勇.谷子雄性不育系“蒜系 28”的选育与利用.中国农业科学,1979(1):43-46.
- [5] 王玉文,李会霞,王高鸿,等.谷子高度雄性不育系长 10A 的选育.甘肃农业科技,1998(12):12-13.
- [6] Wang R Q, Gao J H, Mao L P, et al. Chromosome location of the male sterility and yellow seedling gene in line 1066A of foxtail millet. Acta Botanica Sinica, 2002, 44(10): 1209-1212.
- [7] 赵治海,崔文生,杜贵,等.谷子光(温)敏型不育系 821 选育及其不育性与光温关系的研究.中国农业科学,1996,29(5):23-31.
- [8] 王玉文,王随保,李会霞,等.谷子光敏雄性不育系选育及应用研究.中国农业科学,2003,36(6):714-717.
- [9] 崔贵梅,牛天堂,张福耀,等.谷子(*Setaria italica* Beauv.)高异交结实雄性不育系“81-16”的柱头性状观察.作物学报,2007,33(1):149-153.
- [10] 田岗,王玉文,李会霞,等.抗除草剂谷子杂交种长杂谷 2 号选育研究.中国农业科技导报,2009(增):138-141.
- [11] 史关燕,杨成元,史根生,等.谷子杂交新品种晋谷 49 号的选育及制种技术.作物杂志,2012(5):112-113,163.
- [12] 张福耀,常雪华,常玉卉,等.高产、优质、抗除草剂谷子杂交种晋谷 50 号.作物杂志,2012(5):124.
- [13] 闫凤岐,张雅丽,姚瑞.杂交谷子亩产创世界之最.河北农业科技,2008(1):56.
- [14] 邱风仓.光温敏两系杂交谷子的推广及应用.河北农业科技,2008(18):8-9.
- [15] 宋国亮,赵治海.优质谷子新杂交种张杂谷 16 号.种子,2018,37(5):116-117.
- [16] 刘正理.谷子杂种优势群的构建方法及研究进展.河北农业科学,2010,14(11):102-104.
- [17] Liu Z L, Bai G H, Zhang D D, et al. Heterotic classes and utilization patterns in chinese foxtail millet [*Setaria italica* (L.) P. Beauv]. Agricultural Sciences, 2014, 5(14): 1392-1406.
- [18] 李素英,刘丹,李强,等.谷子杂交种产量及产量性状杂种优势的表现型鉴定.河南农业科学,2018,47(8):28-34.
- [19] 黄远樟,刘来福.作物数量遗传学基础六-配合力:不完全双列杂交.遗传,1980,2(2):43-46.
- [20] 王黎明,严洪冬,焦少杰,等.基于配合力和遗传距离的甜高粱杂种优势预测.中国农业科学,2020,53(14):2786-2794.
- [21] Amelework B, Shimelis H, Laing M. Genetic variation in sorghum as revealed by phenotypic and SSR markers: Implications for combining ability and heterosis for grain yield. Plant Genetic Resources, 2016(3): 1-13.
- [22] Jordan R, Tao Y, Godwin I D, et al. Prediction of hybrid performance in grain sorghum using RFLP markers. Theoretical and Applied Genetics, 2003(106): 559-567.
- [23] 贾秀苹,卯旭辉,岳云,等.向日葵主要农艺与品质性状配合力及杂种优势分析.西北农业学报,2017,26(9):1334-1344.
- [24] 李志华,穆婷婷,刘鑫,等.4 个谷子不育系主要农艺性状的配合力分析.作物杂志,2018(3):61-67.
- [25] 张征,张雪丽,莫博程,等.籼型杂交水稻农艺性状的配合力研究.作物学报,2017,43(10):1448-1457.
- [26] 吴立东,刘亚婷,钟金仙,等.苦瓜亲本配合力、遗传距离与杂种优势的相关性分析.上海农业学报,2020,36(3):30-35.
- [27] 陈俊孝,游艾青,刘凯.杂交水稻表型、杂种优势和配合力的关系.湖北农业科学,2020,59(24):24-29.

Breeding and Heterosis Analysis of Two Line Parents of Foxtail Millet Hybrids with Similar Growth Process

Li Zhihua, Mu Tingting, Li Aijun

(Sorghum Research Institute of Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030600, Shanxi, China)

Abstract When using “two lines” to make hybrids with foxtail millet heterosis, the heading and flowering stages of sterile lines are often earlier than those of restorer lines, and they can meet and cross at flowering stage only in different sowing periods. In this study, the heading and flowering periods of existing sterile lines and herbicide-resistant restorers were improved, three high-quality male sterile lines (Y1A, Y2A and Y3A) and five herbicide resistant Napujing restorers (K17-1, K18-49, K18-54, K18-62 and K18-70) were selected and bred in line with the improved breeding goal of “two lines” of millet. The 15 combinations were made by NCII incomplete diallel crossing with three sterile lines and five restorer lines. Combining ability, transgressive heterosis and superstandard heterosis of parents and cross combinations were analyzed, and their heterosis were predicted. It was concluded that the combining ability of parents were different and had different utilization value in the selection of excellent agronomic characteristics. There were differences in transgressive heterosis and superstandard heterosis among hybrid combinations, but the heterosis was unrelated and irregular. It was predicted that parents have heterosis. The parents of the “two lines” performed well in their respective characteristics, the hybrid combination Y3A×K18-49 had strong heterosis and heterosis breeding could be continued in the coming year. The results provide available parents and good hybrids for simultaneous sowing and hybridization of foxtail millet “two lines” and simplify the process of foxtail millet hybrid seed production.

Key words Foxtail millet; Sterile lines; Herbicide-resistant restorer line; Combining ability; Heterosis