

8 个籼型恢复系相关农艺性状的配合力分析

李 双^{1,2}, 唐显岩², 王春雷¹, 孙 玥¹, 周大虎¹, 贺晓鹏¹, 傅军如¹, 欧阳林娟¹, 贺浩华¹, 彭小松¹

(¹作物生理生态与遗传育种教育部重点实验室 / 江西省超级稻工程技术研究中心 / 双季稻现代化生产协同创新中心 /

江西农业大学农学院, 南昌 330045; ²江西天涯种业, 萍乡 337016)

摘要: 研究杂交组合的遗传特性, 挖掘优异的种质资源对于杂种优势利用具有重要意义。本试验以 8 个恢复系为父本、21 个不育系为母本, 按照不完全双列杂交 8×21 (NCII) 设计配制 168 个组合, 对 8 个农艺性状的配合力及遗传参数进行分析。结果表明: 有效穗数、穗长、千粒重主要受基因加性效应影响, 株高、实粒数、结实率主要受基因非加性效应交互影响; 杂交组合的株高、有效穗数、穗长、千粒重、单株产量的表现主要依赖于母本, 总粒数受父本影响更大, 实粒数、结实率取决于双亲的表现; 有效穗数、单株产量在后代遗传中的稳定性较差, 易受环境和基因非加性效应影响; 843A、宜香 1A、沪早 7A、昌恢 871、昌恢 T025、雅占为配合力好的亲本, 宜香 1A、昌恢 T025 具有最好的一般配合力 (GCA) 效应值; 宜香 1A/昌恢 1 号、千乡 059A/昌恢 121、广 8A/昌恢 881 为较优组合, 宜香 1A/昌恢 1 号特殊配合力 (SCA) 最优。对恢复系主要农艺性状进行配合力分析, 为杂交水稻恢复系的选育提供了一定的科学依据。

关键词: 恢复系; 不育系; GCA; SCA

Combining Ability Analysis of the Agronomic Characters in Eight Indica Restorer Lines

LI Shuang^{1,2}, TANG Xian-yan², WANG Chun-lei¹, SUN Yue¹, ZHOU Da-hu¹, HE Xiao-peng¹, FU Jun-ru¹,
OUYANG Lin-juan¹, HE Hao-hua¹, PENG Xiao-song¹

(¹Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding of the Education Ministry/Research Center for Super Rice Engineering and Technology of Jiangxi/Collaborative Innovation Center of Double-cropping Rice Production Modernization/College of Agriculture, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045; ²Jiangxi Tianya Seed Industry Co., LTD., Pingxiang 337016)

Abstract: In order to make use of the heterosis in hybridization breeding, it is of great significance to explore excellent germplasm resources and analyze the combining ability. By deployment of 8 restorer lines and 21 sterile lines, which served as male and female parent, respectively, this study generated 168 hybrids following the incomplete diallel hybridization 8×21 (NCII). These materials were analyzed for the combining ability and the genetic parameters of 8 agronomic traits. The results showed that the effective panicle number, panicle length and 1000-grain weight were mainly affected by the additive effect, and the plant height, filled grain number and the seed setting rate were mainly affected by the interaction of non-additive effect. The plant height, effective panicle number, spike length, 1000-grain weight and yield per plant of hybrid combination were largely female-dependent, while the total grain number was largely male-dependent. The grain number and seed setting rate were genetically contributed by both parents. The effective panicle number and yield per plant were depending on the interaction between genetic components and environment conditions. The parents with combining ability were

收稿日期: 2019-01-22 修回日期: 2019-02-08 网络出版日期: 2019-03-19

URL: <http://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20190122003>

第一作者研究方向为水稻遗传育种, E-mail: ls963992374@163.com

通信作者: 彭小松, 研究方向为水稻遗传育种研究, E-mail: pxs63@163.com

贺浩华, 研究方向为水稻育种研究, E-mail: hhhua64@163.com

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFD0101104); 江西省科技厅重大专项 (S2016NYZPF0256)

Foundation project: National Key Research and Development Program of China (2016YFD0101104), Major Project of Jiangxi Provincial Department of Science and Technology (S2016NYZPF0256)

843A, Yixiang 1A, Huhan7A, Changhui 871, Changhui T025 and Yazhan. Out of these genotypes, Yixiang 1A and Changhui T025 exhibited the best General Combining Ability (GCA) effect value. The hybrid combination Yixiang 1A/ Changxianghui 1 exhibited the excellence on Special Combining Ability (SCA), and the hybrids including Yixiang 1A/ Changxianghui 1, Qianxiang 059A/ Changhui 121, Guang8A/Changhui 881 were qualified. Thus, by investigating the combining ability of main agronomic characters in restorer lines, this study provided some scientific basis for the breeding of hybrid rice restorer lines.

Key words: restorer lines; sterile lines; GCA; SCA

水稻是世界上重要的粮食作物之一,以稻米为主食的人口占全世界一半以上^[1]。矮秆水稻、三系杂交稻、两系杂交稻的 3 次绿色革命,推动水稻产量发生了质的飞跃,为世界粮食生产作出了巨大的贡献^[2]。这些都得益于突破性种质资源的挖掘与利用,杂交水稻的突出表现主要取决于杂种优势的有效利用,即不同亲本杂交产生的 F_1 在一些性状表现上优于双亲^[3]。对于这一现象的机理研究有很多,但都不能单独解释所有杂种优势现象。经典数量遗传学中的显性、超显性和上位性三大假说是较被人们所认同的。对水稻杂种优势的初始研究认为,影响水稻产量形成的遗传基础是上位性。后续研究发现,水稻杂种优势可以通过上位性、显性互作来解释^[4],其中上位性和显性效应是影响水稻株高的主要因子^[5]。然而,有研究显示,超显性亦是引起产量杂种优势的重要原因^[6]。产量杂种优势是通过产量构成因素的杂种优势累积形成的,即 F_1 的超亲优势可能是大量显性位点共同作用的结果^[7]。为解析杂种优势形成的遗传基础,目前主要集中于从配合力分析、全基因关联分析、基因组结构变异、转录组学、蛋白质组学、表观遗传学等层面对其进行研究^[8]。

亲本一般配合力、组合特殊配合力效应值的综合评价是杂种优势利用的关键^[9]。配合力作为反映亲本对其后代性状影响大小的指标,可有效衡量亲本利用价值,对于优秀种质资源挖掘具有一定参考意义。昌恢系列恢复系是江西农业大学自主选育的材料,所配组合表现较好,尤其是昌恢 T025,与五丰 A 配组的五丰优 T025 获批为超级稻。华占作为近年来应用较广的恢复系,在其配合力表现上具有一定优势,雅占为华占与湛恢 15 杂交后经多代自交选育的恢复系,作为华占新出衍生系,近两年来配组组合也陆续通过审定。本研究以 8 个籼型恢复系和 21 个不育系配制 168 个组合,对 8 个产量相关性状配合力进行分析,比较 8 个恢复系的配合力情况,为亲本材料的合理组配提供理论依据,发掘具有高产潜力且遗传稳定的杂交稻组合,并通过初步探索产

量相关性状的遗传特点,为高产杂交稻的选育提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 恢复系 雅占、华占、湛恢 15、昌恢 T025、昌恢 121、昌恢 881、昌恢 871、昌香恢 1 号,试验材料由江西天涯种业有限公司、江西农业大学提供。

1.1.2 不育系 华丰 59A、株 1S、荃 9311A、广 8A、瑞 68A、乡泰 A、中泰 A、新泰 A、红莲 A、昌盛 843A、沪早 7A、宜香 1A、843A、乡 654A、野香 A、泰丰 A、千乡 059A、广和 A、珍野 A、泰乡 1209A、五乡 A,试验材料由江西农业大学提供。

1.2 试验方法

将 8 个恢复系及 21 个不育系按 NCII(8×21)设计,于 2017 年夏在江西农业大学试验田杂交配组,并于 2018 年春在海南三亚江西农业大学南繁试验基地补充配组至 168 个组合,同年 5 月将 F_1 播种于江西农业大学试验田,秧田为露地湿润育秧,6 月单株移栽。按照随机区组设计田间试验,各小区栽插 3 行,10 株 1 行,重复 3 次。

1.3 农艺性状考察

农艺性状考察主要包含株高、穗长、有效穗数、实粒数、总粒数、结实率、千粒重、单株产量 8 个农艺性状,在水稻完熟期调查株高,并收取中间行 3 株,留作实验室考种。

1.4 数据统计与分析

利用 WPS 表格和 SPSS Statistics 20 进行数据整理、方差分析、一般配合力(GCA)效应值、特殊配合力(SCA)效应值、基因型方差贡献率、广义遗传率、狭义遗传率的计算。统计方法参照不完全双列杂交的配合力分析^[10]。

2 结果与分析

2.1 配合力方差分析

通过对 168 个组合各性状的方差分析可知,

组合间的各性状方差均达到极显著水平,说明各性状均存在极显著的遗传差异。组合间的遗传差异来自母本、父本和父母本的互作效应(表1),根据方差分析结果可知,各性状的父、母本一般配合力方差和亲本的特殊配合力方差均存在极显著性

差异,说明基因加性效应及基因互作的非加性效应对性状表现具有重要影响,除株高性状的父本一般配合力方差小于组合特殊配合力方差外,其余父母本一般配合力方差均大于组合特殊配合力方差。

表1 8个农艺性状的方差分析

Table 1 Variance analysis of 8 agronomic traits

变异来源 Source of variation	株高 PH	穗长 PL	有效穗数 EPN	实粒数 FGN	总粒数 TGN	结实率 SS	千粒重 TGW	单株产量 YP
母本 Female	247.39**	58.11**	83.36**	13194.08**	16000.05**	0.080**	90.94**	1737.69**
父本 Male	49.46**	55.68**	34.08**	29239.05**	51770.22**	0.139**	151.00**	1213.50**
母本 × 父本 Female × Male	52.36**	6.97**	16.20**	6296.35**	5613.00**	0.031**	8.59**	476.89**
误差 Error	11.94	2.37	10.81	1363.58	1635.35	0.006	2.37	266.55

**表示在0.01水平显著,下同

** indicates significant at the level of 0.01, PH: Plant height, PL: Panicle length, EPN: Effective panicle number, FGN: Filled grain number, TGN: Total grain number, SS: Seed setting rate, TGW: 1000-grain weight, YP: Yield per plant, the same as below

2.2 亲本的一般配合力效应分析

农艺性状的一般配合力(GCA)是一系列杂交组合平均表现的反映,GCA高的亲本其农艺性状对配组后代的影响较大。根据各亲本农艺性状的一般配合力分析(表2)可知,相同性状的不同亲本和同一亲本不同性状间的一般配合力存在较大差异。在不育系中,新泰A、红莲A的株高GCA效应值较好,分别为-6.53、-4.77;穗长表现较好的为843A、宜香1A,GCA效应值为9.02、6.49;株1S、新泰A的有效穗数GCA效应值分别为3.81、3.14;乡泰A、广8A的总粒数GCA效应值分别为57.90、50.47;结实率较好的为红莲A、宜香1A,效应值均为0.07;千粒重较大的为宜香1A、沪早7A,效应值分别为3.91、2.84,可用于大粒型品种选育;实粒数较大的为广8A、乡泰A,对应的效应值为56.62、33.37;单株产量的GCA效应值较好的是株1S、宜香1A、乡泰A、中泰A和红莲A,分别为15.94、12.99、8.71、8.18和7.42。

在恢系中,昌恢881在株高上的GCA效应值最好,为-1.43,其次为华占、昌恢T025,雅占、湛恢15、昌香恢1号、昌恢871、昌恢121,均表现为由小到大的正效应值,株高的降低能有效增强植株的抗倒能力,可用于抗倒品种的选育;穗长与总粒数密切相关,昌恢871、昌恢T025的穗长GCA为正效应值,分别为1.19、1.00,湛恢15、昌香恢1号、雅占、昌恢881、华占、昌恢121依次为由小到大的负效应;有效穗数、总粒数、结实率、千粒重是构成产

量的4个要素,有效穗数的GCA效应值昌恢881表现最好,为0.84,其次为华占、昌香恢1号、湛恢15、雅占、昌恢T025、昌恢121、昌恢871,昌恢871总粒数的GCA效应值为46.83,其次为昌恢T025、雅占、华占、昌恢121、湛恢15、昌恢881、昌香恢1号。水稻抽穗扬花期易受高温影响,进而影响结实率,南昌作为中国四大火炉之一,具有筛选耐高温材料的地理优势。昌恢881、昌香恢1号、华占、雅占的结实率GCA为正效应值,依次为0.06%、0.04%、0.02%、0.01%,可作为耐高温的候选材料。昌香恢1号的千粒重效应值为3.19,昌恢871、昌恢881、昌恢121均为正效应值,分别为0.50、0.33、0.13;实粒数的GCA效应值昌恢T025最高,达到31.88,其次为昌恢871、华占、雅占、昌恢881、昌香恢1号、湛恢15、昌恢121;单株产量是反映产量的直观因素,昌香恢1号的效应值最高,达到6.16,主要是由于千粒重和结实率发挥了重要作用。由综合产量相关性状的GCA效应值可知,昌香恢1号表现最好,其次为昌恢871、昌恢T025,昌恢121表现最差。

2.3 组合的特殊配合力比较

特殊配合力是杂交组合与基于双亲平均表现预期结果的偏差,用于反映亲本基因型的非加性基因效应,是杂交组合选配的参考依据。对配组的168个组合各农艺性状进行SCA效应值分析(详见<http://doi.org.10.13430/j.cnki.jpgr.20190122003>,附表1)可知,不同亲本配组的组合在性状表现上

表 2 各亲本农艺性状的一般配合力(GCA)效应值

Table 2 GCA effect values of agronomic traits of each parent

亲本 Parents	株高 PH	穗长 PL	有效穗数 EPN	实粒数 FGN	总粒数 TGN	结实率 SS	千粒重 TGW	单株产量 YP
雅占 Yazhan	0.10	-0.29	-0.02	-0.11	-4.40	0.01	-0.07	-1.90
华占 Huazhan	-1.19	-0.64	0.66	2.26	-5.05	0.02	-1.64	-0.27
湛恢 15 Zhanhui 15	0.28	-0.03	0.29	-16.42	-16.70	-0.02	-0.73	-0.33
昌恢 T025 Changhui T025	-0.06	1.00	-0.37	31.88	41.53	0.00	-1.73	2.05
昌恢 121 Changhui 121	1.08	-0.64	-0.68	-30.75	-10.78	-0.01	0.13	-10.29
昌恢 881 Changhui 881	-1.43	-0.42	0.84	-0.14	-18.82	0.06	0.33	1.85
昌恢 871 Changhui 871	0.79	1.19	-1.28	28.18	46.83	-0.02	0.50	2.69
昌香恢 1 号 Changxianghui 1	0.41	-0.17	0.57	-14.90	-32.61	0.04	3.19	6.16
华丰 59A Huafeng 59A	0.64	0.31	2.29	-23.66	25.56	-0.15	-0.29	3.80
株 1S Zhu 1S	7.43	0.04	3.81	-13.88	-7.40	-0.04	0.02	15.94
荃 9311A Quan 9311A	-0.80	-0.35	-0.19	12.32	10.02	0.02	0.73	2.15
广 8A Guanghe A	-2.28	-0.46	2.85	56.62	50.47	0.06	-3.70	7.36
瑞 68A Rui 68A	-0.95	3.04	-0.88	2.27	9.53	-0.02	0.34	0.94
乡泰 A Xiangtai A	4.05	-0.07	2.00	33.37	57.90	-0.03	-3.04	8.71
中泰 A Zhongtai A	1.80	-0.47	-0.52	15.30	2.14	0.05	2.49	8.18
新泰 A Xintai A	-6.53	-3.66	3.14	-20.81	-36.03	0.02	0.35	3.06
红莲 A Honglian A	-4.77	-3.41	-0.31	21.43	1.48	0.07	-1.17	7.42
昌盛 843A Changsheng 843A	-1.63	-0.92	-2.23	-38.83	-19.91	-0.07	-0.81	-15.40
沪早 7A Huhan 7A	-3.88	-1.32	-2.44	-22.18	-47.43	0.04	2.84	-11.30
宜香 1A Yixiang 1A	1.10	6.49	0.69	5.14	-20.36	0.07	3.91	12.99
843A	1.99	9.02	0.91	-39.25	-18.99	-0.11	0.56	-7.17
乡 654A Xiang 654A	1.57	0.85	-0.81	24.05	37.62	-0.01	1.90	1.46
野香 A Yexiang A	3.52	-0.46	-0.11	-8.49	8.03	-0.05	-4.02	-5.73
泰丰 A Taifeng A	0.70	-0.31	1.27	11.37	16.12	-0.01	-1.05	2.33
千乡 059A Qianxiang 059A	2.22	0.92	-0.77	29.16	41.39	-0.01	0.69	5.50
广和 A Guanghe A	-0.11	-2.15	-2.02	-3.48	-8.30	0.01	1.35	-3.97
珍野 A Zhenye A	4.43	-1.12	-2.40	-6.05	-16.00	0.02	-1.87	-10.86
泰乡 1209A Taixiang 1209A	-3.32	-2.18	-2.27	-18.84	-34.46	0.03	-1.53	-13.68
五乡 A Wuxiang A	-1.33	-2.49	0.44	6.64	-3.97	0.04	-0.54	6.73

存在较大差异,组合性状表现受基因非加性效应、基因与环境互作影响。株高 SCA 效应值变异范围为 -12.77~10.99, 表现为负的共 80 个组合, 其中荃 9311A/ 昌香恢 1 号、宜香 1A/ 昌恢 121、昌盛 843A/ 昌恢 871 的株高效应值较好, 分别为 -12.77、-10.16、-9.32; 单株产量是衡量组合产量情况的重要依据, 168 个组合中宜香 1A/ 昌香恢 1 号表现最好, SCA 效应值达到 63.92, 其次为千乡 059A/ 昌恢 121(31.74)、华丰 59A/ 昌恢 T025(24.68)、红莲 A/ 昌恢 121(23.08)、广 8A/ 昌恢 881(20.25)、昌盛 843A/ 昌恢 871(19.53)、中泰 A/ 昌恢 881(17.69)、沪早 7A/ 昌恢 T025(17.20)、843A/ 昌恢

871(16.73)、中泰 A/ 昌恢 T025(15.95), 变异范围为 -27.67~63.92, 单株产量正效应值的组合共 80 个; 78 个组合在穗长上表现为正效应值, 中泰 A/ 昌恢 871(17.14)、瑞 68A/ 华占(14.74)、株 1S/ 昌恢 121(11.39)、泰乡 1209A/ 昌恢 121(10.80)、泰乡 1209A/ 昌恢 871(10.80) 表现较好; 有效穗数效应值为正的共 83 个组合, 宜香 1A/ 昌香恢 1 号(8.93)、千乡 059A/ 昌恢 121(5.97)、新泰 A/ 湛恢 15(5.75)、广 8A/ 昌恢 881(5.16)、株 1S/ 昌恢 871(4.66) 效应值较好; 千乡 059A/ 昌恢 121(109.69)、珍野 A/ 昌恢 871(94.70)、新泰 A/ 雅占(83.89)、泰丰 A/ 雅占(76.71)、瑞 68A/ 昌恢 T025(75.82)

实粒数 SCA 效应值较高,共 84 个组合为正效应值;珍野 A/昌恢 871(90.92)、千乡 059A/昌恢 121(89.08)、瑞 68A/昌恢 T025(83.62)、荃 9311A/雅占(79.67)、新泰 A/雅占(77.98)总粒数较高,正效应值组合为 77 个;843A/昌恢 871(0.23)、野香 A/湛恢 15(0.18)、五乡 A/昌恢 121(0.18)、乡泰 A/华占(0.16)、乡泰 A/湛恢 15(0.16)、千乡 059A/昌恢 121(0.16)结实率较高,正效应组合共 96 个,耐热性较好;宜香 1A/雅占(7.03)、广 8A/昌香恢 1 号(5.63)、乡 654A/昌恢 881(5.32)、中泰 A/雅占(4.54)、华丰 59A/雅占(4.30)千粒重较大,组合 SCA 中共 84 个表现为正效应值,168 个组合的变异范围为 -6.14~7.03。

结合株高及单株产量分析,各不育系配组的 8 个恢复系中表现较好的 21 个组合分别为华丰 59A/昌恢 T025(0.26, 24.68)、株 1S/昌恢 871(-1.38, 15.23)、荃 9311A/湛恢 15(-2.30, 13.07)、广 8A/昌恢 881(-3.45, 20.25)、瑞 68A/昌恢 121(0.05, 8.33)、乡泰 A/湛恢 15(-5.16, 1.97)、中泰 A/昌恢 881(-1.20, 17.69)、新泰 A/雅占(2.27, 18.02)、红莲 A/昌恢 881(2.04, 15.51)、昌盛 843A/昌恢 871(-9.32, 19.53)沪早 7A/昌恢 T025(-1.39, 17.20)、

宜香 1A/昌香恢 1 号(-9.42, 63.92)、843A/华占(-0.62, 15.49)、乡 654A/湛恢 15(-3.35, 7.72)、野香 A/华占(-0.35, 13.66)、泰丰 A/昌恢 121(-6.60, 14.17)、千乡 059A/昌恢 121(1.88, 31.74)、广和 A/昌恢 881(1.72, 13.01)、珍野 A/昌香恢 1 号(-2.66, 15.02)、泰乡 1209A/昌恢 881(1.59, 12.26)、五乡 A/昌恢 871(-5.72, 12.77)。

2.4 产量构成因素分析

为了深入解析高产的影响因素,将单株产量特殊配合力为正效应的组合及 168 个组合的产量构成因素进行相关性分析(表 3),综合两组数据可知,有效穗数、总粒数、结实率与单株产量均呈极显著或显著性的正相关。千粒重与单株产量没有直接相关性,与总粒数却呈极显著负相关,此外,168 个组合的千粒重与有效穗数亦呈极显著负相关,进而间接影响单株产量。四要素对单株产量影响大小为:总粒数 > 结实率 > 有效穗数 > 千粒重。相比较 168 个组合的相关性系数,正效应组合的千粒重对有效穗数不再具有显著性关系,结实率对单株产量的影响也有所降低。因此,千粒重与总粒数是影响产量的动态平衡因子,而有效穗数与千粒重的关系是决定水稻高产的重要调节因子。

表 3 产量构成因素的相关性系数

Table 3 The correlation coefficient of yield components

性状 Traits	有效穗数 EPN	总粒数 TGN	结实率 SS	千粒重 TGW	单株产量 YP
有效穗数 EPN	1.00	-0.255**	0.005	-0.119	0.082**
总粒数 TGN	-0.241**	1.00	0.07	-0.255**	0.316**
结实率 SS	0.108*	0.06	1.00	0.01	0.164*
千粒重 TGW	-0.119**	-0.241**	0.02	1.00	0.08
单株产量 YP	0.035**	0.304**	0.276**	0.04	1.00

*表示 0.05 水平的显著性。上三角为 80 个组合的相关性系数,下三角为 168 个组合的相关性系数

*represent the significant level of 0.05. The correlation coefficient of 80 combinations were in the upper triangle and 168 combinations were in the lower triangle

2.5 杂交组合遗传参数分析

为了解亲本对子代杂种优势的影响,利用固定模型算式对 8 个农艺性状的基因型方差遗传分量进行估算。结果(表 4)表明,有效穗数、穗长、千粒重的 GCA 基因型方差贡献率在 60% 以上,表明这些性状主要受基因加性效应影响。株高、实粒数、结实率的 SCA 基因型方差贡献率达 60% 以上,表明这些性状主要受基因非加性效应互作影响,要更多的注重组合特殊配合力的筛选。总粒数、单株产量的 GCA、SCA 基因型方差贡献率相差不大,表明在这

两个性状上主要受基因加性效应和基因非加性效应互作的共同影响。

从表 4 可知,母本在株高、有效穗数、穗长、千粒重、单株产量的基因型方差远高于父本,而在总粒数上远低于父本,双亲在实粒数、结实率上的基因型方差相近,表明杂交组合的株高、有效穗数、穗长、千粒重、单株产量的表现更多地依赖于不育系,总粒数主要取决于恢复系,实粒数、结实率要综合双亲的表现。

表 4 遗传参数结果

Table 4 Results of genetic parameters

性状 Traits	基因型方差 Genotype variance				方差贡献率 (%) Variance contributing rate		遗传率 (%) Heritability	
	母本 Female	父本 Male	母本 × 父本 Female × Male	误差 Error	GCA	SCA	广义遗传率 Broad heritability	狭义遗传率 Narrow heritability
	株高 PH	8.13	-0.05	13.48	11.94	37.49	62.52	64.36
有效穗数 EPN	2.80	0.28	1.80	10.81	63.16	36.84	31.11	19.65
穗长 PL	2.13	0.77	1.53	2.37	65.47	34.53	65.16	42.66
实粒数 FGN	287.41	364.17	1644.26	1363.58	28.38	71.62	62.74	17.81
总粒数 TGN	432.79	732.66	1325.88	1635.35	46.78	53.22	60.37	28.24
结实率 SS	0.20	0.17	0.83	0.60	31.07	68.93	66.83	20.76
千粒重 TGW	3.43	2.26	2.07	2.37	73.29	26.71	76.61	56.15
单株产量 YP	52.53	11.69	70.11	266.55	47.81	52.19	33.51	16.02

遗传率是反映该性状的遗传变异占总变异的百分比,表 4 中的遗传率结果表明,株高、穗长、实粒数、总粒数、结实率、千粒重的广义遗传率较大,这些性状主要受基因遗传作用影响,在早代可以直接选择。有效穗数、单株产量的狭义遗传率都较低,说明在后代遗传中这些性状的稳定性较差,易受环境和基因非加性效应影响,在这些性状上表现好的亲本配组后,将这些性状表现直接传递给杂种后代的能力较差,要在晚代或间接选择才有效。

3 讨论

前人对籼型水稻恢复系相关农艺性状研究大多为少数材料组合,且近年来对新育成育种材料的配合力相关研究较少。本研究通过对 29 个亲本、168 个组合分析可知,基因加性效应及基因互作的非加性效应对性状表现具有重要影响。不同亲本的不同性状、同一亲本的不同性状间的 GCA 效应不同,同一组合的不同性状、不同组合的同一性状间的 SCA 效应值存在明显差异。杂种优势主要得益于亲本间的遗传基础互补及基因互作的共同影响。这些结论已经得到了前人研究的广泛验证^[11-15]。同时,由于材料、组合大小、种植环境等差异,对各性状遗传特性的研究结果也略有不同。前人研究表明有效穗数、结实率、千粒重受不育系的影响较大^[16-17]。有效穗数、实粒数、总粒数、单株产量上不育系效应高于恢复系^[14]。李云等^[18]结果表明实粒数、总粒数、千粒重受恢复系影响较大。就相关性状表现而言,恢复系对性状的影响大于不育系^[19]。欧阳林娟等^[20]结果表明株高、实粒数、总粒数、有效穗数、结

实率、单株产量不育系影响高于恢复系,恢复系对穗长、千粒重影响更大。本试验中实粒数、结实率受双亲性状的共同影响,有效穗数、千粒重、单株产量、株高、穗长受不育系影响较大,总粒数主要受恢复系影响。综合以上可知,有效穗数主要受不育系影响的研究结果是最为一致的。李志华等^[21]研究表明株高、穗长、千粒重主要受基因遗传作用影响。蒋钰东等^[22]试验表明实粒数、千粒重受基因非加性效应影响较大,而游书梅等^[19]试验表明受基因非加性效应影响较大的为实粒数、结实率、单株产量。本试验遗传分析结果表明,株高、实粒数、结实率主要受基因非加性效应影响,千粒重、穗长、有效穗数主要受基因加性效应影响。

4 结论

本试验方差分析表明,对性状表现具有重要影响的是基因加性效应及基因互作的非加性效应。分析 29 个亲本间的配合力效应和遗传特点,可得出以下结论:恢复系中,昌恢 881 在株高上的 GCA 效应值最好,为 -1.43,其次为华占 (-1.19)、昌恢 T025 (-0.06)、雅占 (0.10);单株产量效应值排在前三的为昌香恢 1 号、昌恢 871、昌恢 T025,效应值分别为 6.16、2.69、2.05;不育系中,新泰 A、红莲 A、沪早 7A 的株高 GCA 效应值优于其他不育系,分别为 -6.53、-4.77、-3.88;株 1S、宜香 1A、乡泰 A 的单株产量效应值在所有不育系中位列前三,分别达到 15.94、12.99、8.71。荃 9311A/昌香恢 1 号、宜香 1A/昌恢 121、昌盛 843A/昌恢 871 的株高 SCA 效应值优于其他组合,分别为 -12.77、-10.16、-9.32;

组合单株产量排在前五的为宜香 1A/ 昌香恢 1 号、千乡 059A/ 昌恢 121、华丰 59A/ 昌恢 T025、红莲 A/ 昌恢 121、广 8A/ 昌恢 881, 效应值分别为 63.92、31.74、24.68、23.08、20.25。有效穗数、穗长、千粒重主要受基因加性效应影响, 株高、实粒数、结实率主要受基因非加性效应互作影响。本试验中杂交组合的株高、有效穗数、穗长、千粒重、单株产量的表现更多的依赖于母本, 总粒数主要受父本影响, 实粒数、结实率要综合双亲的表现。株高、穗长、实粒数、总粒数、结实率、千粒重主要受基因遗传作用影响, 有效穗数、单株产量在后代遗传中的稳定性较差, 易受环境和基因非加性效应影响。组合的 SCA 是不育系、恢复系及二者基因互作的共同作用结果。

综上所述, 矮秆杂交稻的选育应以选择低表型值的亲本为主, 高产杂交稻应侧重于穗长、千粒重较高的母本, 总粒数较高的父本, 结实率、实粒数为高表型值的亲本为主, 在选择高有效穗数、单株产量的亲本选育高产杂交稻时, 要注重 F_1 特殊配合力及栽培环境的影响, 筛选出优良组合。因此, 本试验中可作为配组高产组合的最佳不育系为宜香 1A, 穗长及千粒重 GCA 效应值较好, 分别为 9.02、3.91, 恢复系为昌恢 T025, 总粒数 GCA 效应值为 41.53, 二者株高 GCA 效应值分别为 1.10、-0.06, 结实率 GCA 效应值分别为 0.07、0.00, 实粒数 GCA 效应值分别为 5.14、31.88。具有高产潜力的组合为宜香 1A/ 昌香恢 1 号, 单株产量及有效穗数均为组合最优, 分别达到 63.92、8.93, 且株高效应值为 -9.42。此外, 千乡 059A/ 昌恢 121 在株高、有效穗数及单株产量上表现也较好。

参考文献

- [1] Goff S A, Ricke D, Lan T H, Presting G, Wang R, Dunn M, Glazebrook J, Sessions A, Oeller P, Varma H, Hadley D, Hutchison D, Martin C, Katagiri F, Lange B M, Moughamer T, Xia Y, Budworth P, Zhong J P, Miguel T, Paszkowski U, Zhang S P, Colbert M, Sun W L, Chen L L, Cooper B, Park S, Wood T C, Mao L, Quail P, Wing R, Dean R, Yu Y, Zharkikh A, Shen R, Sahasrabudhe S, Thomas A, Cannings R, Gutin A, Pruss D, Reid J, Tavtigian S, Mitchell J, Eldredge G, Scholl T, Miller R M, Bhatnagar S, Adey N, Rubano T, Tusneem N, Robinson R, Feldhaus J, Macalima T, Oliphant A, Briggs S. A draft sequence of the rice genome (*Oryza sativa* L. ssp. *japonica*). *Science*, 2002, 296 (5565): 92-100
- [2] 朱英国. 杂交水稻研究 50 年. *科学通报*, 2016, 61 (35): 18-25
Zhu Y G. Fifty years of hybrid rice research in China. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61 (35): 18-25
- [3] Shull G H. The composition of a field of maize. *Journal of Heredity*, 1908, os-4 (1): 296-301
- [4] Hua J P, Xing Y Z, Wu W R, Xu C G, Sun X L, Yu S B, Zhang Q F. Single-locus heterotic effects and dominance by dominance interactions can adequately explain the genetic basis of heterosis in an elite rice hybrid. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2003, 100 (5): 2574-2579
- [5] Shen G J, Zhan W, Chen H X, Xing Y Z. Dominance and epistasis are the main contributors to heterosis for plant height in rice. *Plant Science*, 2014, 215-216: 11-18
- [6] Luo X J, Fu Y C, Zhang P J, Wu S, Tian F, Liu J Y, Zhu Z F, Yang J S, Sun C Q. Additive and over-dominant effects resulting from epistatic loci are the primary genetic basis of heterosis in rice. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2009, 51 (4): 393-408
- [7] Dan Z W, Hu J, Zhou W, Yao G X, Zhu R S, Huang W C, Zhu Y G. Hierarchical additive effects on heterosis in rice (*Oryza sativa* L.). *Frontiers in Plant Science*, 2015, 6: 738
- [8] 张书芹, 韩雪松, 胡恺宁. 植物杂种优势遗传基础研究进展. *分子植物育种*, 2017, 15 (11): 4734-4740
Zhang S Q, Han X S, Hu K N. Research progress on genetic basis of heterosis in plants. *Molecular Plant Breeding*, 2017, 15 (11): 4734-4740
- [9] Nadali B, Babaeian J N. Heterosis and combining ability analysis for yield and related-yield traits in hybrid rice. *International Journal of Biology*, 2010, 2 (2): 222
- [10] 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): 45-48
Huang Y Z, Liu L F. Crop quantitative genetics—Six, Combining ability: Incomplete diallel hybridization. *Hereditas*, 1980, 2 (2): 45-48
- [11] 王绍林, 李振宇, 王志兴, 陈广红, 夏明, 郑英杰. 北方粳型两系杂交稻产量性状的配合力分析. *北方水稻*, 2005 (5): 3-6
Wang S L, Li Z Y, Wang Z X, Chen G H, Xia M, Zheng Y J. The analysis of combining ability on yield characters of northern two-lines cross-japonica-rice. *Reclaim and Rice Cultivation*, 2005 (5): 3-6
- [12] 余传元, 江玲, 肖应辉, 翟虎渠, 万建民. 籼型染色体置换片段在杂交粳稻中的配合力分析. *作物学报*, 2008, 26 (8): 1308-1316
Yu C Y, Jiang L, Xiao Y H, Zhai H Q, Wan J M. Combining ability of yield-component traits for indica chromosome substituted segments in japonica hybrids. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 26 (8): 1308-1316
- [13] 王和寿, 陈健勇. 若干杂交稻亲本的配合力分析. *亚热带农业研究*, 2008, 4 (1): 1-5
Wang H S, Chen J Y. Analysis of the combining ability of several rice varieties. *Subtropical Agriculture Research*, 2008, 4 (1): 1-5
- [14] 游年顺, 雷捷成. 杂交稻数量性状配合力分析. *福建稻麦科技*, 1994 (2): 16-19
You N S, Lei J C. Analysis of combining ability of quantitative characters in hybrid rice. *Fujian Science and Technology of Rice and Wheat*, 1994 (2): 16-19
- [15] 包灵丰, 林纲, 赵德明, 李云武, 曾健, 贺兵. 宜恢 1577 的籼粳特性鉴别和产量配合力分析. *植物遗传资源学报*, 2006, 7 (2): 231-233

- Bao L F, Lin G, Zhao D M, Li Y W, Zeng J, He B. Identification of indicial-japonica character and analysis on the yield combination ability for the new germplasm Yihui1577. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2006, 7(5): 231-233
- [16] 刘龙钦, 江文清, 梁康迳, 周仕全, 谢冬容, 邱慧明, 饶溶晖, 马妙明, 彭吕清. 若干籼型杂交稻亲本的农艺性状配合力分析. *福建稻麦科技*, 2018, 36(1): 1-6
- Liu L Q, Jiang W Q, Liang K J, Zhou S Q, Xie D R, Qiu H M, Rao R H, Ma M M, Peng L Q. Combining ability analysis of agronomic traits of several indica hybrid rice parents. *Fujian Science and Technology of Rice and Wheat*, 2018, 36(1): 1-6
- [17] 宋宇, 邹小云, 贺浩华, 傅军如, 李海波, 徐亮, 辛晓云. 籼型三系杂交水稻产量及其相关性状的配合力分析. *江西农业大学学报*, 2004, 26(5): 719-725
- Song Y, Zou X Y, He H H, Fu J R, Li H B, Xu L, Xin X Y. Analysis on combining ability of yield characters and related characters in three-line indica hybrid rice. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2004, 26(5): 719-725
- [18] 李云, 钟珺, 肖林长, 席建才, 谢建萍, 连垚, 周卫营, 黎为兵. 杂交水稻亲本产量相关性状的配合力分析. *安徽农业科学*, 2018, 46(11): 24-26, 87
- Li Y, Zhong J, Xiao L C, Xi J C, Xie J P, Lian Y, Zhou W Y, Li W B. Combining ability analysis of yield-related traits on parents of hybrid rice. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46(11): 24-26, 87
- [19] 游书梅, 曹应江, 郑家奎, 蒋开锋, 张涛, 杨莉, 杨乾华, 万先齐, 郭小蛟, 秦俭, 罗婧, 李昭祥, 高磊. 中国与南亚水稻恢复系资源产量性状的配合力分析. *植物遗传资源学报*, 2016, 17(5): 861-865
- You S M, Cao Y J, Zheng J K, Jiang K F, Zhang T, Yang L, Yang Q H, Wan X Q, Guo X J, Qin J, Luo J, Li Z X, Gao L. Analysis on combining ability of yield traits between China and South Asia in rice restorer lines. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2016, 17(5): 861-865
- [20] 欧阳林娟, 孙玥, 彭东华, 王春雷, 周大虎, 傅军如, 贺晓鹏, 贺浩华, 彭小松. 5 个新育成转 *Bt* 基因抗虫恢复系配合力分析. *江西农业大学学报*, 2018, 40(4): 663-670
- Ouyang L J, Sun Y, Peng D H, Wang C L, Zhou D H, Fu J R, He X P, He H H, Peng X S. An analysis of the combining ability of five new bred trans-*Bt* gene restorer lines with pest resistance. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2018, 40(4): 663-670
- [21] 李志华, 穆婷婷, 刘鑫, 李会霞, 田岗. 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
- Li Z H, Mu T T, Liu X, Li H X, Tian G. Combining ability analysis of main agronomic characters of four millet sterile lines. *Crops*, 2018(3): 61-67
- [22] 蒋钰东, 况浩池, 罗俊涛, 何兴材, 杨扬, 付均, 郑军, 陈光珍, 曾正明. 三系杂交稻优质不育系德 66A 主要经济性状的配合力分析. *中国稻米*, 2018, 24(6): 118-121
- Jiang Y D, Kuang H C, Luo J T, He X C, Yang Y, Fu J, Zheng J, Chen G Z, Zeng Z M. Analysis on combining ability of main economic characters of three-line sterile line De66A. *China Rice*, 2018, 24(6): 118-121

欢迎订阅 2020 年《中国粮油学报》

《中国粮油学报》是中国科学技术协会主管、中国粮油学会主办的全国食品工业类中文核心期刊。主要刊载谷物、油脂化学、工艺学等方面的研究成果。栏目包括: 稻谷、小麦、玉米、大豆、杂粮、淀粉、蛋白、油脂、饲料、储藏、加工工艺、粮物流、信息自动化、标准与检测方法及综述。

国内外公开发行的一级刊物, 邮发代号: 80-720, 国内统一连续出版物号: CN 11-2864/TS, 国际标准连续出版物号: ISSN 1003-0174。月刊, 每月 25 日出版, 铜版印刷, 大 16 开 146 页, 每期定价 69.00 元, 全年定价 828.00 元(含平刷邮费)。

地址: 北京市西城区百万庄大街 11 号粮科大厦

邮编: 100037

银行汇款开户行: 交通银行北京百万庄支行

户名: 中国粮油学会

账号: 110060774018010013416

电话: 010-68357510, 68357810

网址: www.lyxuebao.net

E-mail: lyxb@ccoaonline.com