

WU X H, ZHANG J, JIANG Q S, et al. Agronomic Trait Combining Abilities and Correlation with Yield of New Male Sterile Rice Lines [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2023, 38 (4): 401–409.

邬相宏, 张 杰, 江青山, 廖宗永, 包灵丰,
陈家彬, 姜方洪, 韩 冬, 李恒进, 赵德明

(宜宾市农业科学院, 四川 宜宾 644000)

摘要:【目的】探究五良A、酒都A、Z1A和1281A 4个新选水稻不育系主要农艺性状的配合力,同时分析不同农艺性状对产量的影响。**【方法】**采用6×6 NC II 遗传设计,利用6个不育系(S)和6个恢复系(R)杂交配组36个组合,对杂交组合的8个农艺性状进行配合力分析、相关及通径分析。**【结果】**(1)8个农艺性状在不育系或恢复系或两者间的一般配合力方差均达到显著或极显著水平,除株高外其他7个农艺性状的特殊配合力方差均达到显著或极显著水平,说明多数农艺性状受到加性效应和非加性效应共同影响。(2)株高、穗长、千粒重和每穗颖花数等4个性状广义遗传率较高,主要受到遗传的影响,其中株高、穗长和千粒重的狭义遗传率也较高(>70%),三者主要受到基因加性效应的影响,结实率、单株有效穗数和单株产量的狭义遗传率相对较低(<50%),表明这些性状受到基因非加性效应和环境的影响较大。(3)相关分析结果表明,千粒重、穗长、单株有效穗数和结实率与单株产量呈显著或极显著正相关,通径分析结果表明,千粒重、单株有效穗数对单株产量的直接作用达到极显著正相关,农艺性状之间通过相互促进与制约来共同影响单株产量。**【结论】**4个新选不育系中,五良A、酒都A多数农艺性状的一般配合力和特殊配合力效应较高,具有较好的应用前景;在川南中籼稻区,千粒重和单株有效穗数是影响单株产量的关键因素。

关键词: 水稻不育系; 农艺性状; 配合力; 通径分析

中图分类号: S511

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2023) 04-0401-09

WU Xianghong, ZHANG Jie, JIANG Qingshan, LIAO Zongyong, BAO Lingfeng,
CHEN Jiabin, JIANG Fanghong, HAN Dong, LI Hengjin, ZHAO Deming*

(Yibin Academy of Agricultural Sciences of Sichuan Province, Yibin, Sichuan 644600, China)

Abstract: 【Objective】 Agronomic trait combining abilities and correlation with crop yield of 4 newly bred male sterile rice lines were studied. 【Method】 Based on the 6×6 NC II design, 36 hybrids were generated from 6 sterile and 6 restorer rice lines. Combining abilities and correlation with crop yield of 8 agronomic traits of the hybrids were analyzed. 【Result】 (1) The variance of general combining ability (GCA) on the traits of the sterile and restorer lines or between the two lines were significantly or extremely significantly different. Aside from plant height, the variance of special combining ability (SCA) on the traits also reached a significant or extremely significant level. It indicated that most of the agronomic traits were affected by both additive and non-additive factors. (2) The generalized heritability on plant height, panicle length, 1000-grain weight, and spikelet count per panicle were high. The narrow heritability on plant height, panicle length, and 1000-grain weight were also high (>70%) and largely controlled by the additive effect of the genes; whereas those on seed setting rate, effective panicle per plant, and yield per plant relatively low (< 50%) and basically shaped by the non-additive effects of the genes and environment. (3) The 1000-grain weight, panicle length, effective panicle per plant, and seed-setting rate significantly or

收稿日期: 2022-03-19 初稿: 2022-06-30 修改稿

作者简介: 邬相宏 (1994-), 男, 硕士, 研究方向: 水稻遗传育种 (E-mail: wuxh1994@163.com)

* 通信作者: 赵德明 (1965-), 男, 硕士, 研究员, 研究方向: 水稻遗传育种 (E-mail: yixiangseed@163.com)

基金项目：国家现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-01-96)；国家产业技术体系四川省水稻创新团队项目 (CXTD-2021-01)；四川省科技计划重点研发项目 (2021YFYZ0016)

extremely significantly correlated with the yield per plant. A path analysis indicated that it was the 1000-grain weight and effective panicle number per plant that directly governed the yield, whereas the intertwined promotional and restrictive actions of the various agronomic traits exerted their effect. 【Conclusion】 Among the 4 newly bred sterile rice lines, Wuliang A and Jiudu A had higher GCA and SCA on most agronomic traits and were preferable for breeding applications. The 1000-grain weight and effective panicle number per plant were the key agronomic traits that related to the rice crop production.

Key words: Male sterile rice line; agronomic traits; combining ability; path analysis

0 引言

【研究意义】高产是水稻选育的首要目标, 研究表明, 水稻的产量是由每穗粒数、千粒重等多个产量因子构成的复杂农艺性状, 同时水稻的农艺性状多为数量性状, 各性状间相互影响, 导致难以量化不同农艺性状对单株产量的贡献大小^[1-2]。此外, 不同的杂交组合、气候和栽培条件下, 其产量构成因子对产量的贡献以及相关程度也不同^[3-5]。因此, 结合地区实际情况, 探明不同农艺性状和产量的关系, 可为高产杂交水稻品种选育提供理论依据。水稻种质资源是育种的物质基础, 水稻育种工作对种质资源的利用最终归结为对性状配合力的选择^[6-7]。杂交亲本配合力的高低直接影响杂交品种的产量, 利用水稻杂种优势的育种实质上是配合力育种^[8]。因此, 了解和掌握水稻三系不育系主要农艺性状的配合力, 能够有效评价不育系的育种潜力, 对强优势杂交水稻组合选配具有重要意义。【前人研究进展】水稻配合力指一般配合力和特殊配合力, 两者在当今水稻杂交育种是首要考虑的因素。一般配合力与杂交组合的竞争优势存在着显著正相关, 且特殊配合力大小能够充分反映杂种优势的大小^[9-10]。一般配合力高的亲本基础上需再重组特殊配合力高的亲本才能获得优良杂交品种^[11-12]。但一般配合力低的双亲同样能配出特殊配合力高的组合^[7]。由此可见, 亲本的配合力在水稻杂交育种中起到决定性作用, 如何利用亲本的一般配合力和特殊配合力是利用杂种优势的关键。研究表明, 农艺性状对水稻产量影响很大, 有效穗数、穗长、每穗粒数、千粒重是影响水稻产量的重要因素^[13-14]。结实率是影响大穗杂交稻产量的主要因素^[15]。总粒数对早籼产量影响最大, 总粒数越多产量越高^[16]。综上所述, 由于品种、栽培方式、地理环境等因素的差异, 水稻主要农艺性状与产量的遗传关系表现出多样性。【本研究切入点】前人研究均是基于特定区域应用特定的品种, 对各自区域的育种以及生产实践具有一定的指导意义。因此, 掌握川南中籼稻区不育系配合力及遗传力的规律, 有助于正确选择亲本, 组配强

优品种。此外, 川南水稻农艺性状与产量间关系的研究鲜有报道, 明确影响水稻产量的关键农艺性状, 有助于指导本地区的亲本改良。【拟解决的关键问题】通过对 6 个不育系的主要农艺性状进行配合力分析及遗传率估算, 评价新不育系的育种潜力, 为新不育系的利用和强优组合的组配提供依据; 同时, 通过对不同水稻组合的多个农艺性状与产量的相关及通径分析, 探讨各性状和单株产量间的关系, 以明确影响单株产量的关键农艺性状。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试的 6 个不育系: 宜香 1A (1A, 本单位选育)、神 9A (9A, 重庆市农业科学院引进), 4 个新选不育系分别是五良 A (A1)、酒都 A (A2)、Z1A (A3) 和 1281A (A4); 供试的 6 个恢复系: 蜀恢 527 (R527, 四川农业大学引进)、成恢 727 (R727, 四川省农业科学院引进)、雅恢 2115 (R2115, 四川农业大学引进)、绵恢 6139 (R6139, 绵阳市农业科学研究院引进)、中种恢 2877 (R2877, 中国种子集团有限公司引进)、宜恢 3003 (R3003, 本单位选育)。

1.2 试验方法

1.2.1 杂交组合制备与种植 2020 年夏, 在宜宾市农业科学院大观镇试验基地, 按照 NC II 不完全双列杂交组配组合 36 个; 2021 年 5 月 28 日对 36 个试验组合进行种植。采用随机区组设计, 3 次重复, 行株距 33.3 cm×16.7 cm, 每行栽 8 株, 每份材料栽 3 行, 单株栽插。田间农事管理同当地大田生产, 施肥水平较低。

1.2.2 性状调查 水稻成熟后, 每个小区随机选取 5 株测量株高 (Plant height, PH), 随机选取 5 株风干考种, 调查穗长 (Panicle length, PL)、千粒重 (1000-grain weight, TGW)、每穗实粒数 (Filled Spikelets per panicle, FSP)、每穗颖花数 (Spikelets per panicle, SP)、结实率 (Seed setting rate, SSR)、单株有效穗数 (Tillers per plant, TP) 和单株产量 (Grain weight per plant, GWP) 等农艺性状。

1.3 统计分析

利用 Excel 2013 软件和 DPS 数据分析软件进行各农艺性状的方差分析和配合力分析、相关性分析及通径分析^[17]。

2 结果与分析

2.1 主要农艺性状的配合力方差分析

表 1 列出了各个性状的配合力方差（*F* 值）。从表 1 可知，各性状在组合间的方差均达到极显著水平，说明各个性状在组合间存在明显的遗传差异，

可以进行配合力方差分析。组合间的遗传差异来源于不育系、恢复系以及不育系和恢复系的互作效应。参试不育系除每穗颖花数外，其余 7 个性状一般配合力方差均达到显著或极显著水平；恢复系除单株产量外，其余 7 个性状一般配合力方差均达到显著或极显著水平；除株高外其余 7 个性状的特殊配合力均达到显著或极显著差异水平，以上结果说明基因加性效应和基因互作的非加性效应对研究的 8 个农艺性状有着重要影响，具体可以进行一般配合力（GCA）和特殊配合力（SCA）的效应分析。

表 1 主要农艺性状的配合力方差分析
Table 1 Analysis of variance on combining ability of main agronomic traits

变异来源 Source of variation	自由度 <i>df</i>	株高 PH	穗长 PL	千粒重 TGW	每穗实粒数 FSP	每穗颖花数 SP	结实率 SSR	单株有效穗数 TP	单株产量 GWP
组合 Combination	35	18.1665**	22.4393**	398.3065**	10.3568**	13.9383**	4.5617**	5.4225**	3.8326**
恢复系 R	5	18.5998**	4.015**	82.6418**	9.7716**	12.6394**	4.9701**	3.01*	2.4425
不育系 S	5	58.4764**	19.0802**	31.5235**	2.7176*	1.6981	7.6693**	5.2619**	3.9612**
恢复系×不育系 R×S	25	1.5494	5.5908**	23.3973**	4.1453**	5.0455**	1.8103*	2.86**	2.3526**

“*”和“**”分别表示显著差异（*P*＜0.05）和极显著差异（*P*＜0.01）。*df*: 自由度。
* and ** represent significant difference (*P* < 0.05) and extremely significant difference (*P* < 0.01), respectively. *df*: degrees of freedom.

2.2 不育系主要农艺性状一般配合力效应分析

由表 2 可知，不同不育系同一性状或相同不育系不同性状的 GCA 效应值存在明显差异，表明 6 个不育系在各性状上的加性效应大小不同，不育系间的同一性状及同一性状在不同不育系间存在明显的遗传差异。在参试的 6 个不育系中，株高、穗长、千粒重、每穗实粒数、每穗颖花数、结实率、单株有效穗、单株产量 GCA 效应值从大到小分别为 A3

（4.4103）、1A（4.2823）、1A（7.457）、9A（4.0523）、A3（2.6181）、9A（2.4747）、A1（7.6541）、1A（4.9982）；4 个新不育系中，A1 除千粒重的 GCA 呈现负效应外，其余性状的 GCA 均呈现为正效应；A2 在株高、穗长、千粒重、单株有效穗数、单株产量等性状的 GCA 呈现为正效应；A3 在株高、穗长、每穗实粒数、每穗颖花数等性状的 GCA 呈现为正效应；A4 在多个农艺性状上的 GCA 均呈现负效应。

表 2 不育系农艺性状一般配合力效应值
Table 2 GCA of agronomic traits in male sterile rice

不育系 S	株高 PH	穗长 PL	千粒重 TGW	每穗实粒数 FSP	每穗颖花数 SP	结实率 SSR	单株有效穗数 TP	单株产量 GWP
1A	3.4508	4.2823	7.457	-2.0734	-1.6291	-0.4184	-0.3976	4.9982
9A	-3.0294	-8.9093	-3.4697	4.0523	1.5552	2.4747	-5.169	-4.6277
A1	0.6664	3.1679	-4.9266	1.7651	1.2399	0.5676	7.6541	4.5002
A2	0.4749	1.1578	5.425	-4.2365	-3.7746	-0.5896	2.4354	3.3596
A3	4.4103	1.8677	-1.8978	2.41	2.6181	-0.1243	-3.5288	-2.7706
A4	-5.9731	-1.5664	-2.5879	-1.9176	-0.0096	-1.9099	-0.994	-5.4598

2.3 杂交组合特殊配合力效应分析

由表 3 可知，36 个组合中，株高 SCA 效应值为负值的组合有 17 个，负效应较高的组合是 A3×

R3003 和 A2×R727，效应值均在 -1.7 以下；穗长 SCA 效应值为正值的有 19 个，较高的是 A2×R6139、9A×R727 和 A1×R727，效应值均在 3.7 以上；千粒

重 SCA 效应值为正值的有 18 个, 较高的是 A1×R2115、9A×R2877, 效应值均在 3.8 以上; 每穗实粒数 SCA 效应值为正值的有 23 个, 较高的是 A2×R2877、9A×R3003, 效应值均在 6.3 以上; 每穗颖花数 SCA 效应值为正值的有 20 个, 较高的为 9A×R3003 和 1A×R2877, 效应值均在 5.19 以上; 结实率 SCA 效应值为正值的有 18 个, 较高的是 A2×R2877、A3×R527, 效应值均在 1.5 以上; 单株

表 3 杂交组合主要农艺性状的特殊配合力效应值
Table 3 SCA of agronomic traits in hybrids

组合 Combination	株高 PH	穗长 PL	千粒重 TGW	每穗实粒数 FSP	每穗颖花数 SP	结实率 SSR	单株有效穗数 TP	单株产量 GWP
1A×R527	-0.4269	1.4426	-0.0192	1.9138	3.2788	-1.383	1.8887	3.9176
1A×R727	1.6077	-2.4621	1.3994	-4.9336	-5.6306	0.7786	3.3797	-0.3813
1A×R2115	0.918	1.2032	-1.5144	5.4748	4.6071	0.8519	2.9324	7.4165
1A×R6139	-0.5877	-0.8812	1.0543	0.023	-1.0591	1.1414	-1.839	-0.7411
1A×R2877	-1.5482	-1.0711	-3.3547	4.568	5.1956	-0.512	-3.9264	-2.3636
1A×R3003	0.0372	1.7687	2.4345	-7.046	-6.3918	-0.8768	-2.4354	-7.8481
9A×R527	0.4865	0.4685	1.016	0.0192	-0.9609	1.0925	-4.9702	-4.2303
9A×R727	-0.5546	3.7457	-1.4761	1.3816	2.5558	-1.2264	-7.0577	-7.4304
9A×R2115	0.3885	-1.133	-1.6294	2.3229	3.4048	-1.1412	-5.7157	-5.6665
9A×R6139	-0.6333	-1.1124	-0.901	-1.4146	-1.0669	-0.3164	4.7217	2.5039
9A×R2877	0.2292	-2.0452	3.8914	-8.6839	-9.2064	0.2585	4.4235	0.3224
9A×R3003	0.0838	0.0764	-0.901	6.3747	5.2736	1.333	8.5984	14.501
A1×R527	-1.4814	-4.1791	-2.8179	4.3785	3.2229	1.0409	1.8887	3.9722
A1×R727	-0.2186	3.7045	-1.8594	0.7344	0.1362	0.5618	6.9583	5.8807
A1×R2115	0.1486	2.8872	5.3483	-6.0131	-6.1936	0.2506	-1.5408	-2.0713
A1×R6139	-0.5853	-2.2433	-2.2045	2.0803	1.4112	0.5598	2.6342	1.8774
A1×R2877	0.4673	-0.3777	1.2077	-3.5822	-1.8479	-1.7042	-3.0318	-5.9717
A1×R3003	1.6696	0.2084	0.3259	2.4022	3.2713	-0.709	-6.9085	-3.6874
A2×R527	0.3401	0.357	1.3227	-3.5353	-1.9702	-1.5489	0.8449	-1.8464
A2×R727	-1.755	-4.241	-2.0895	1.0801	1.6282	-0.442	5.0199	4.6309
A2×R2115	1.2069	1.9503	1.2077	-1.5377	-1.9771	0.69	2.7833	2.3272
A2×R6139	-0.2038	3.9026	0.786	4.5353	4.1638	0.4997	-5.5666	-0.0086
A2×R2877	0.0857	0.5923	-2.0128	7.2398	4.4098	2.6686	-0.497	5.2124
A2×R3003	0.3261	-2.5611	0.786	-7.7822	-6.2545	-1.8674	-2.5845	-10.3156
A3×R527	-0.2345	0.1424	-0.0958	-1.5232	-3.0896	1.5742	0.5467	-1.0367
A3×R727	-0.6996	-0.5675	1.7828	0.0502	0.3402	-0.368	0.2485	2.0091
A3×R2115	-1.0984	-0.8647	-1.131	2.7596	2.7697	-0.1519	1.5905	3.0212
A3×R6139	1.6206	-2.9739	0.2875	-6.0238	-5.315	-0.8061	1.2922	-4.2689
A3×R2877	2.1981	1.5912	-0.2109	0.1322	1.8264	-1.496	-1.6899	-2.4022
A3×R3003	-1.7862	2.6726	-0.6326	4.6049	3.4683	1.2478	-1.9881	2.6774
A4×R527	1.3163	1.7687	0.5943	-1.253	-0.481	-0.7757	-0.1988	-0.7765
A4×R727	1.6202	-0.1795	2.2428	1.6873	0.9702	0.696	-8.5487	-4.7091
A4×R2115	-1.5635	-4.0429	-2.2812	-3.0066	-2.6109	-0.4995	-0.0497	-5.0271
A4×R6139	0.3895	3.3082	0.9776	0.7998	1.8661	-1.0784	-1.2425	0.6372
A4×R2877	-1.432	1.3105	0.4792	0.3259	-0.3776	0.7852	4.7217	5.2028
A4×R3003	-0.3305	-2.1649	-2.0128	1.4464	0.6332	0.8724	5.3181	4.6727

有效穗数 SCA 效应值为正值的有 18 个，较高的是 9A×R3003、A1×R727，效应值均在 6.9 以上；单株产量 SCA 效应值为正值的有 17 个，较高的是 1A×R2115、A1×R727，效应值均在 5.8 以上。

2.4 双亲在农艺性状上的方差贡献率及遗传力比较分析

为研究不育系、恢复系及其互作对 F1 代 8 个性状的影响，根据随机模型估算各个性状的基因型方差遗传分量、一般配合力和特殊配合力基因型遗传方差，以及一般配合力和特殊配合力基因型遗传方差在总遗传方差中的比重，一般配合力遗传方差中

不育系、恢复系所占比重。从表 4 可知，8 个农艺性状的 V_G 均大于 50%，其中株高、千粒重的 V_G 达到了 95% 以上，表明双亲的加性效应对 F1 的 8 个农艺性状起主导作用。在一般配合力基因型遗传方差中，不育系和恢复系所占比重因性状而异，在株高、穗长、单株有效穗、结实率和单株产量等 5 个性状上不育系占比更高，说明不育系对 F1 相应性状起主导作用；而在千粒重、每穗实粒数和每穗颖花数 3 个性状上恢复系占比更高，说明恢复系对相应性状起主导作用。

表 4 主要农艺性状的基因型方差、父母本及其基因互作对 F1 各性状方差的贡献率和遗传力
Table 4 Contributions of genotypic variance of agronomic traits, parents, and gene interactions to trait variance and heritability of F1 hybrids

	项目 Project	株高 PH	穗长 PL	千粒重 TGW	每穗实粒数 FSP	每穗颖花数 SP	结实率 SSR	单株有效穗数 TP	单株产量 GWP
基因型方差 Genotypic variance	恢复系 R lines	6.2001	0.2634	5.7272	85.9889	139.6384	0.778	0.0445	1.0054
	不育系 S lines	20.248	1.5798	2.1412	16.8379	8.3752	1.3069	0.0943	2.0639
	互作 R×S	0.7495	0.4305	0.4029	44.6293	57.7158	0.5263	0.0863	2.4042
贡献率 Contribution	$V_G/\%$	97.24	81.07	95.13	69.73	71.95	79.85	61.65	56.07
	$V_{g1}/\%$	22.79	11.59	69.24	58.31	67.88	29.8	19.76	18.37
	$V_{g2}/\%$	74.45	69.48	25.89	11.42	4.07	50.05	41.89	37.7
	$V_s/\%$	2.76	18.93	4.87	30.27	28.05	20.15	38.35	43.93
	广义遗传率 (h_B^2)/%	86.92	88.99	99.35	77.6	82.78	57.27	61.78	50.65
遗传力 Heritability	狭义遗传率 (h_N^2)/%	84.52	72.14	94.51	54.11	59.56	45.72	38.09	28.4

V_G 为双亲一般配合力基因型方差占总方差的比重， V_{g1} 为恢复系一般配合力基因型方差占总方差的比重， V_{g2} 为不育系一般配合力基因型方差占总方差的比重， V_s 为特殊配合力基因型方差占总方差的比重。

V_G : Proportion of genotype variance of GCA in total variance; V_{g1} : genotype variance of GCA of restorer lines in total variance; V_{g2} : genotype variance of GCA of male sterile lines in total variance; V_s : proportion of genotype variance of SCA in total variance.

遗传力是反映该性状的遗传变异占总变异的百分比。从表 4 可知，株高、穗长、千粒重和每穗颖花数等 4 个性状的广义遗传力均大于 80%，表明这些性状主要受到遗传的影响，其中千粒重、株高、穗长的狭义遗传率也较高，均大于 70%，说明三者遗传主要受到基因加性效应的影响，其性状易于稳定遗传给后代。结实率、单株有效穗数和单株产量的广义遗传率和狭义遗传率都相对较低，表明这些性状易受环境影响，在后代遗传中的稳定性较差。8 个性状的狭义遗传率大小为：千粒重>株高>穗长>每穗颖花数>每穗实粒数>结实率>单株有效穗数>单株产量。

2.5 供试不育系测交组合的主要农艺性状平均表现

测交组合 F1 代的主要农艺性状平均表现是衡量亲本优秀与否的重要指标之一。从表 5 可知，株高

较高的是 A3、1A 组配的组合，平均值分别达 120.85 cm、119.74 cm；穗长较高的是 1A 和 A1 组配的组合，平均值分别达 28.07 cm、27.77 cm；千粒重较高的是 1A 和 A2 组配的组合，平均值分别达 31.14 g、30.55 g；每穗实粒数较高的是 9A 和 A3 组配的组合，平均值分别达 167.72 粒、165.07 粒；每穗颖花数较高的是 A3 和 9A 组配的组合，平均值分别达 196.74 粒、194.70 粒；结实率较高的是 9A 和 A1 组配的组合，平均值分别达 86.15%、84.55%；单株有效穗数较高的是 A1 和 A2 组配的组合，平均值达 8.02 个、7.63 个；单株产量较高的是 1A 和 A2 组配的组合，平均值分别达 36.31 g、36.14 g。在新不育系中，A1 在株高、穗长、每穗实粒数、每穗颖花数、结实率、单株有效穗数、单株产量等性状上平均表现高于试验均值，千粒重低于试验均值；A2 在

株高、穗长、千粒重、单株有效穗数、单株产量等性状平均表现高于均值；A3 在株高、穗长、每穗实粒数、每穗颖花数等性状平均表现高于均值。

表 5 供试不育系测交组合 F1 代主要农艺性状的平均表现
Table 5 Average performance of agronomic traits in F1 hybrids of male sterile rice

组合 Combination	株高 PH/cm	穗长 PL/cm	千粒重 TGW/g	每穗实粒数 FSP	每穗颖花数 SP	结实率 SSR/%	单株有效穗数 TP	单株产量 GWP/g
1A/***	119.74	28.07	31.14	157.85	188.60	83.72	7.42	36.31
9A/***	112.24	24.52	27.98	167.72	194.70	86.15	7.07	32.98
A1/***	116.52	27.77	27.55	164.03	194.10	84.55	8.02	36.14
A2/***	116.30	27.23	30.55	154.36	184.48	83.57	7.63	35.74
A3/***	120.85	27.42	28.43	165.07	196.74	83.96	7.19	33.62
A4/***	108.83	26.50	28.23	158.10	191.70	82.46	7.38	32.69
均值Average	115.75	26.92	28.98	161.19	191.72	84.07	7.45	34.58

***代表6个恢复系。
*** represents 6 restorer lines.

2.6 主要农艺性状相关性及通径分析

相关系数是反映各农艺性状和产量间的线性关系，可以预测各农艺性状对产量的影响。从表 6 可见，单株产量与其他 7 个农艺性状的相关程度是千粒重>穗长>单株有效穗数>结实率>株高>每穗实粒数>每穗颖花数，其中千粒重、穗长、单株有

效穗数和结实率与单株产量呈显著或极显著的正相关，株高和每穗实粒数与单株产量正相关但不显著，每穗颖花数与单株产量负相关且不显著。以上结果说明千粒重、穗长、单株有效穗和结实率对单株产量有着重要的影响，对任一性状的改良都会促进产量的提高。

表 6 组合农艺性状间的相关系数
Table 6 Correlation coefficients between agronomic traits of hybrids

农艺性状 Traits	株高 PH	穗长 PL	千粒重 TGW	每穗实粒数 FSP	每穗颖花数 SP	结实率 SSR	单株有效穗数 TP	单株产量 GWP
株高 PH	1							
穗长 PL	0.6243**	1						
千粒重 TGW	0.47**	0.4346**	1					
每穗实粒数 FSP	-0.3671*	-0.2986	-0.6192**	1				
每穗颖花数 SP	-0.3988*	-0.2438	-0.7011**	0.963**	1			
结实率 SSR	0.0714	-0.2154	0.2148	0.2781	0.0094	1		
单株有效穗数 TP	0.0955	0.2235	-0.1924	-0.2365	-0.1906	-0.2029	1	
单株产量 GWP	0.315	0.4493**	0.4733**	0.0179	-0.09	0.4007*	0.4111*	1

*和**分别表示显著差异 ($P<0.05$) 和极显著差异 ($P<0.01$)。
* and ** represent significant difference ($P<0.05$) and extremely significant difference ($P<0.01$), respectively.

为进一步明确本试验中 7 个农艺性状对单株产量的相对重要性，对相关系数进行了通径分析，结果见表 7。除株高外其余性状对单株产量的直接通径系数为正值，表明这 6 个性状对单株产量都有直接的正效应，在保持其他条件不变下，通过提高 6 个农艺性状中任意一个性状，均能提高单株产量。7 个

农艺性状直接通径系数从大到小为千粒重>单株有效穗数>每穗实粒数>每穗颖花数>结实率>穗长>株高，其中千粒重、单株有效穗数对单株产量的直接作用达到极显著水平，其余性状对单产的直接作用均不显著，表明千粒重和单株有效穗数是影响单株产量的关键因素。根据间接通径系数结果，

千粒重通过对穗长和结实率的正调控，对每穗实粒数、每穗颖花数和单株有效穗数的负调控来间接影响单株产量；单株有效穗数通过对穗长的正调控，对株高、千粒重、每穗颖花数和每穗实粒数的负调控来间接影响单株产量，表明农艺性状间存在相互促进与制约的关系，最终共同影响单株产量。

表 7 各性状与单株产量的直接和间接通径系数
Table 7 Direct and indirect path coefficients on traits to yield per plant

因素 Factors	直接系数 Direct coefficient	与产量的相关系数 Correlation coefficient with yield	间接系数 Indirect coefficient						
			株高 PH	穗长 PL	千粒重 TGW	每穗实粒数 FSP	每穗颖花数 SP	结实率 SSR	单株有效穗数 TP
株高 PH	-0.005 5	0.315		0.011 2	0.582 6	-0.271 2	-0.095	0.008	0.084 9
穗长 PL	0.018	0.449 3**	-0.003 4		0.538 8	-0.220 6	-0.058 1	-0.024	0.198 7
千粒重 TGW	1.239 8**	0.473 3**	-0.002 6	0.007 8		-0.457 5	-0.167 1	0.023 9	-0.171 1
每穗实粒数 FSP	0.738 8	0.017 9	0.002	-0.005 4	-0.767 7		0.229 5	0.031	-0.210 3
每穗颖花数 SP	0.238 3	-0.09	0.002 2	-0.004 4	-0.869 2	0.711 5		0.001	-0.169 4
结实率 SSR	0.111 4	0.400 7*	-0.000 4	-0.003 9	0.266 3	0.205 4	0.002 2		-0.180 3
单株有效穗数 TP	0.889 **	0.411 1*	-0.000 5	0.004	-0.238 6	-0.174 8	-0.045 4	-0.022 6	

决定系数 $R^2=0.994\,966$ ，剩余通径系数=0.070 952。
Coefficient of determination, $R^2=0.994\,966$; residual path coefficient=0.070 952.

3 讨论

3.1 杂交组合 8 个主要农艺性状的遗传特点

本研究中 8 个农艺性状在不育系或恢复系或两者间的一般配合力方差均达到显著或极显著水平，除株高外其他 7 个农艺性状的特殊配合力方差均达到显著或极显著水平，说明多数农艺性状是受到加性效应和非加性效应的共同影响。基因型方差及贡献率的估算结果表明，8 个农艺性状均是基因的加性效应主导，且亲本的一般配合力与特殊配合力相互独立，无明显对应关系，这与前人研究^[11,18-20]基本一致。遗传力估算结果表明株高、穗长、千粒重的遗传力较高，说明三者受到环境的影响较小，容易通过亲本的选择获得期望的后代，这与刘金波^[7]、潘清洁^[11]等研究结果相似。

刘龙钦等研究认为有效穗、结实率、千粒重受不育系影响较大^[21]。李双等研究认为有效穗数、千粒重、单株产量、株高和穗长受不育系影响较大^[22]。陈锋等研究认为株高、穗长和千粒重受不育系影响较大，穗长、每穗粒数和千粒重受恢复系影响更大^[23]。而本研究结果表明，在株高、穗长、单株有效穗、结实率和单株产量等性状主要受到不育系的影响，而千粒重、每穗实粒数和每穗颖花数主要受到恢复系的影响。可见，农艺性状遗传具有复杂性、多样性的特点，不同学者针对不同材料研究会得出不同的结论，因此在实际育种工作中应考虑到所用材料

的遗传特点，不能一概而论。

3.2 水稻农艺性状和单株产量的关系

水稻的产量形成是个系统工程，而影响水稻产量的各个性状间又存在复杂的相关关系，对任何个性状进行变动，都将不同程度地影响其他性状^[3,24]。本研究中的相关分析结果表明，千粒重、穗长、单株有效穗数和结实率与单株产量均呈显著或极显著正相关，说明四者对单株产量有着重要的影响，优化任一性状均能明显提升产量，这与育种经验相吻合。通径分析结果表明，千粒重、单株有效穗数对单株产量的直接作用达到极显著水平，这与相关分析结果不完全相同，但结合两者我们不难发现千粒重和单株有效穗数是影响单株产量的关键因素，这与杨久^[25]，李雪梅^[26]等的研究结果相似。通径分析结果还揭示了水稻农艺性状间的复杂关系，水稻农艺性状间通过相互促进与制约共同影响单株产量。因此，对关键农艺性状进行选择时，应考虑各农艺性状之间的关联性，兼顾其他性状，如在本地区进行高产育种时，在注重千粒重和单株有效穗数选择的同时，也应兼顾穗长、结实率等农艺性状考察。

3.3 不育系表现及评价

从几个新不育系的一般配合力来看，五良 A 多个性状的一般配合力均较好，易组配出分蘖能力强、结实率高、穗粒数多、产量高的组合，但其千粒重的一般配合力较差，组配时应选大粒父本进行

互补;酒都 A 千粒重、结实率、单株有效穗数和单株产量的一般配合力较好,但每穗颖花数、每穗实粒数和结实率的一般配合力表现一般;Z1A 穗长、每穗实粒数和每穗颖花数的一般配合力较好;1281A 株高具有优势,有待进一步发掘利用。从特殊配合力来看,五良 A×成恢 727 组合多个性状的特殊配合力均较好,综合表现最好,其次是酒都 A×中种恢 2877、1281A×中种恢 2877。综上可知,未发现不育系 8 个农艺性状的一般配合力均表现优秀,因此,育种时应根据育种目标进行合理的亲本组配从而获得优良组合。

4 结论

不育系五良 A 和酒都 A 的一般配合力和特殊配合力都较高,两者分别在单株有效穗数、千粒重方面具有较强优势,在本地区具有良好的应用前景。川南地区生态条件区域间差异大、垂直分布明显、农业立体性强、旱涝灾害频繁,加之光能不足,阴雨和雾日多,因此对培育高产作物组合提出了更高的要求^[27]。在川南中籼稻区进行高产育种时,应重点考察千粒重和单株有效穗数两个性状,同时兼顾每穗实粒数、每穗颖花数、穗长等性状进行选育。在大田生产实践中,合理使用提高千粒重、有效穗数的栽培方法,将有效提高水稻产量。

参考文献:

- [1] 崔莹莹,王晓玲.水稻产量相关性状QTL的遗传研究进展[J].江苏农业科学,2017,45(13):1-7.
CUI Y Y, WANG X L. Genetic research progress of QTL for yield-related traits in rice [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45 (13): 1-7. (in Chinese)
- [2] 李树杏,徐娅,郝东方,等.杂交水稻‘成优489’主要农艺性状与产量的相关和通径分析[J].天津农业科学,2019,25(7):83-86,90.
LI S X, XU Y, HAO D F, et al. Correlation and path analysis of main agronomic traits and yield of hybrid rice ‘chengyou 489’ [J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2019, 25 (7): 83-86,90. (in Chinese)
- [3] 李树杏,向关伦,杨占烈,等.杂交水稻‘协优385’主要产量构成因子与产量的相关分析和通径分析[J].中国农学通报,2015,31(18):15-19.
LI S X, XIANG G L, YANG Z L, et al. Correlation and path analysis of yield components of hybrid rice combinations ‘xieyou 385’ [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31 (18): 15-19. (in Chinese)
- [4] 胡蓉.杂交中稻产量构成因素与产量相关性的分析[J].福建农业学报,2011,26(2):211-214.
HU R. Correlation between yield and yield components of hybrid mid-season rice [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2011,

- 26 (2): 211-214. (in Chinese)
- [5] 于海天,王丽萍,吕梅媛,等.早熟鲜食秋蚕豆主要农艺性状与鲜食产量相关及通径分析[J].西南农业学报,2020,33(4):711-717.
YU H T, WANG L P, LÜ M Y, et al. Correlation and path analysis of major agronomic traits to fresh yield of early-mature and autumn-sowing faba bean (*Vicia faba* L.) [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 33 (4): 711-717. (in Chinese)
- [6] 廖长见,林建新,王颖姮,等.16个青贮玉米自交系主要性状的配合力分析及通径分析[J].福建农业学报,2010,25(4):432-437.
LIAO C J, LIN J X, WANG Y H, et al. Combining ability, correlation and path analysis on characteristics of 16 silage maize inbred lines [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2010, 25 (4): 432-437. (in Chinese)
- [7] 刘金波,宋兆强,王宝祥,等.几个新选杂交水稻不育系和恢复系的主要农艺性状的配合力分析[J].西南农业学报,2016,29(2):209-213.
LIU J B, SONG Z Q, WANG B X, et al. Analysis of combining ability of main agronomic characteristics of several new bred male sterile lines and restorer lines in hybrid rice (*Oryza sativa* L. subsp. indica) [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 29 (2): 209-213. (in Chinese)
- [8] 郑轶.新育成的晚籼杂交水稻重要性状配合力及遗传力分析[D].福州:福建农林大学,2013.
ZHENG Y. Analysis on combining ability and heritability of important characters of newly bred late indica hybrid rice [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2013. (in Chinese)
- [9] 谭美林,冯明友,张家洪,等.杂交水稻亲本主要农艺性状配合力及遗传力分析[J].贵州农业科学,2009,37(3):6-8,11.
TAN M L, FENG M Y, ZHANG J H, et al. Analysis on combining ability and heritability of major agronomic characters in hybrid rice parents [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2009, 37 (3): 6-8,11. (in Chinese)
- [10] 倪先林,张涛,蒋开锋,等.杂交稻特殊配合力与杂种优势、亲本间遗传距离的相关性[J].遗传,2009,31(8):849-854.
NI X L, ZHANG T, JIANG K F, et al. Correlations between specific combining ability, heterosis and genetic distance in hybrid rice [J]. *Heredity*, 2009, 31 (8): 849-854. (in Chinese)
- [11] 潘清洁,赵福胜,罗洪发,等.5个新选水稻三系不育系主要农艺性状配合力分析[J].南方农业学报,2020,51(1):36-41.
PAN Q J, ZHAO F S, LUO H F, et al. Analysis of combining ability of main agronomic traits of five three-line sterile lines of rice bred newly [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2020, 51 (1): 36-41. (in Chinese)
- [12] 粟学俊,韦鹏霄,吕志仁.杂交水稻产量性状配合力研究[J].广西植物,2004,24(1):91-96.
SU X J, WEI P X, LÜ Z R. Study on the combining ability of the yield-traits in hybrid rice [J]. *Guihaia*, 2004, 24 (1): 91-96. (in Chinese)
- [13] 杜志喧,王建平,黄州,等.水稻重组自交系群体农艺性状遗传变异及产量分析[J].江西农业大学学报,2019,41(3):413-422.
DU Z X, WANG J P, HUANG Z, et al. An analysis of genetic

- variation of agronomic traits of rice recombinant inbred lines and its impact on yield [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2019, 41 (3): 413–422. (in Chinese)
- [14] 韩锋, 徐娟. 水稻种质资源主要农艺性状遗传多样性及多元分析[J]. *北方水稻*, 2017, 47 (4): 6–8, 16.
- HAN F, XU J. The genetic diversity and multi-analysis on the main agronomic traits of rice germplasm resources [J]. *North Rice*, 2017, 47 (4): 6–8, 16. (in Chinese)
- [15] 袁伟玲, 曹凑贵, 程建平. 水稻产量性状相关性分析及通径分析[J]. *垦殖与稻作*, 2005, 35 (4): 6–8.
- YUAN W L, CAO C G, CHENG J P. Correlation and path analysis on the yield characters of rice [J]. *Reclaim and Rice Cultivation*, 2005, 35 (4): 6–8. (in Chinese)
- [16] 吕锐玲, 金红梅, 周强, 等. 南方稻区早籼产量与主要经济性状的遗传分析[J]. *中国农学通报*, 2014, 30 (15): 168–172.
- LV R L, JIN H M, ZHOU Q, et al. Analysis of the yield and major economic traits of early indica rice [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30 (15): 168–172. (in Chinese)
- [17] 唐启义. DPS数据处理系统: 实验设计、统计分析及数据挖掘[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2010.
- [18] 杨春华, 李仕贵. 籼型三系杂交水稻不育系主要农艺性状配合力及遗传力分析[J]. *西南农业学报*, 2005, 18 (3): 234–239.
- YANG C H, LI S G. Analysis of combining ability and heritability of major agronomic characters in three-line CMS lines Indica hybrid rice [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2005, 18 (3): 234–239. (in Chinese)
- [19] 何霏如, 郭建夫, 李国鹏, 等. 华南籼型三系杂交水稻农艺性状的配合力分析[J]. *湖北农业科学*, 2008, 47 (10): 1128–1132.
- HE A R, GUO J F, LI G P, et al. Analysis on combining ability of agronomic characteristics in three-line indica hybrid rice of South China [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2008, 47 (10): 1128–1132. (in Chinese)
- [20] 沈村义, 蔡开炯, 蒋素, 等. 杂交水稻主要经济性状配合力的研究[J]. *湖南农业科学*, 2016 (9): 17–20.
- SHEN C Y, CAI K J, JIANG S, et al. Study on combining ability of main economic characters of hybrid rice [J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2016 (9): 17–20. (in Chinese)
- [21] 刘龙钦, 江文清, 梁康迺, 等. 若干籼型杂交稻亲本的农艺性状配合力分析[J]. *福建稻麦科技*, 2018, 36 (1): 1–6.
- LIU L Q, JIANG W Q, LIANG K J, et al. Combining ability analysis of agronomic traits of several indica hybrid rice parents [J]. *Fujian Science and Technology of Rice and Wheat*, 2018, 36 (1): 1–6. (in Chinese)
- [22] 李双, 唐显岩, 王春雷, 等. 8个籼型恢复系相关农艺性状的配合力分析[J]. *植物遗传资源学报*, 2019, 20 (5): 1178–1185.
- LI S, TANG X Y, WANG C L, et al. Combining ability analysis of the agronomic characters in eight indica restorer lines [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2019, 20 (5): 1178–1185. (in Chinese)
- [23] 陈锋, 陈能刚, 鄢小青, 等. 几个新选育水稻恢复系的主要农艺性状配合力分析及食味评价[J]. *种子*, 2020, 39 (10): 42–47.
- CHEN F, CHEN N G, YAN X Q, et al. Combining ability analysis of main agronomic traits and taste evaluation of several new rice restorer lines [J]. *Seed*, 2020, 39 (10): 42–47. (in Chinese)
- [24] 曹应江, 游书梅, 蒋开锋, 等. 香型杂交水稻产量构成要素杂种优势表现及通径分析[J]. *中国农学通报*, 2011, 27 (7): 22–25.
- CAO Y J, YOU S M, JIANG K F, et al. Heterosis and path analysis for yield component factor of aromatic hybrid rice [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27 (7): 22–25. (in Chinese)
- [25] 杨久, 丁鲲, 卢义宣, 等. 云南籼粳交错区水稻农艺性状与产量相关性及通径分析[J]. *西南农业学报*, 2011, 24 (2): 391–395.
- YANG J, DING K, LU Y X, et al. Correlation and path analysis of yield and agronomic characters of rice in Yunnan indica and Japonica rice interlace area [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 24 (2): 391–395. (in Chinese)
- [26] 李学梅, 李翱, 陈以相, 等. 云南德宏杂交籼稻品种农艺性状与产量的相关性[J]. *热带生物学报*, 2021, 12 (4): 456–465.
- LI X M, LI A, CHEN Y X, et al. Correlation between agronomic traits and yield of indica hybrid rice varieties in Dehong, Yunnan [J]. *Journal of Tropical Biology*, 2021, 12 (4): 456–465. (in Chinese)
- [27] 苟才明, 黄宁, 余世权, 等. 17个玉米地方种质选系的杂优类群分析[J]. *核农学报*, 2015, 29 (5): 821–829.
- GOU C M, HUANG N, YU S Q, et al. Analysis on heterotic groups of 17 inbred lines derived maize landraces [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2015, 29 (5): 821–829. (in Chinese)

(责任编辑：于洪杰)