

籼型杂交稻光合特性的配合力分析

刘红梅¹, 周新跃², 刘建丰¹, 邱颖波¹, 范峰峰¹, 徐庆国¹

(¹湖南农业大学农学院, 长沙 410128; ²湖南农业大学图书馆, 长沙 410128)

摘要:以6个籼型杂交稻三系不育系和5个恢复系按不完全双列杂交设计配制的30个杂交稻组合及其亲本品种为材料, 对其光合性状进行了测定和分析, 结果表明: (1) 杂交稻组合的光合特性存在显著或极显著的组合间遗传差异, 光合特性的遗传变异主要来自基因的非加性效应; (2) 胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率、叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量受不育系的影响大于恢复系, 而气孔导度、叶绿素 a + b 含量受恢复系的影响大于不育系; (3) 杂交稻光合性状的广义遗传力均大于狭义遗传力, 各性状主要受基因互作及环境的影响。狭义遗传力的大小依次为叶绿素 b、叶绿素 a + b、叶绿素 a、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、类胡萝卜素和蒸腾速率, 这些性状具有中等遗传力; (4) 9个光合性状杂交稻 F₁ 表型值与父母本一般配合力效应值之和的相关系数均达极显著水平。因此, 可以根据父母本一般配合力效应值之和来预测杂交稻组合光合性状的表现, 有利于高效选育高光效杂交稻组合。

关键词: 籼型杂交稻; 光合特性; 配合力; 遗传力

Analysis of Combining Ability of Photosynthetic Characteristics in *Indica* Hybrid Rice

LIU Hong-mei¹, ZHOU Xin-yue², LIU Jian-feng¹, QIU Ying-bo¹, FAN Feng-feng¹, XU Qing-guo¹

(¹ College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha 410128;

² Library of Hunan Agricultural University, Changsha 410128)

Abstract: To verify the combining ability of photosynthetic characteristics of function leaves, thirty hybrid combinations were obtained from incomplete diallel cross between six sterile lines and five restorer lines of *indica* hybrid rice cultivars. The photosynthetic characteristics in hybrid combinations and their parents were measured and statistically analyzed. The results showed that there were significant genetic differences among hybrid rice combinations in photosynthetic characteristics. The genetic variations of photosynthetic characteristics mainly came from additive effect of genes. Inter-cellular CO₂ concentration, transpiration rate, chlorophyll content (a & b), and carotenoid content were influenced greater by sterile lines than the restorer lines but stomatal conductance, chlorophyll content (a + b) were influenced greater by restorer lines than the sterile lines. The broad genetic heritability was greater than narrow genetic heritability in photosynthetic characteristics of *indica* hybrid rice combinations. Each trait was mainly affected by gene interactions as well as environmental factors. The nine phenotypic values of photosynthetic traits of *indica* hybrid rice combinations were highly correlated ($P < 0.01$) with the sum of the general combining ability (GCA) of parents. Thus, it would be possible to predict the phenotypic values of photosynthetic traits in *indica* hybrid rice combinations according to the GCA of parents, which is helpful for efficiently breed higher photosynthetic efficiency *indica* hybrid rice combinations.

Key words: *Indica* hybrid rice; photosynthetic characteristics; combining ability; heritability

收稿日期: 2013-12-23 修回日期: 2014-02-19 网络出版日期: 2014-06-09

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20140609.1408.004.html>

基金项目: 国家“863”计划资助项目(2010AA101304); 湖南农业大学作物学开放基金项目(ZWKf201310)

第一作者研究方向为作物遗传育种。E-mail: 34873390@qq.com

通信作者: 徐庆国, 研究方向为作物遗传育种。E-mail: huxu0309@aliyun.com

植物的干物质积累主要来自其功能叶片的光合作用,光合作用是其产量和品质形成的源泉及基础^[1-2]。水稻净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率、叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、叶绿素 a + b 含量、叶绿素 a/b 比值及类胡萝卜素含量等光合性状是水稻重要的生理指标,其中,净光合速率是评价水稻光合特性的重要指标^[3-5]。在保持杂交稻良好株型和优化产量构成因素的基础上,利用遗传手段分析不同杂交稻组合及其亲本品种间光合特性的遗传变异规律,对提高杂交稻光能利用率、加快选育高光效杂交稻组合及其亲本品种具有重要的理论与实际应用价值。

作物光合速率是数量遗传性状,主要受核基因的影响,也受胞质基因的影响^[6];杂交稻孕穗期^[7]的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率主要受基因加性效应的影响;而杂交稻剑叶全展期^[8]的光合速率和气孔导度主要受基因非加性效应的影响。杂交稻孕穗期^[7]的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度均主要受不育系的影响;而杂交稻剑叶全展期^[8]的光合速率受不育系影响较大,蒸腾速率和气孔导度却受恢复系的影响较大。水稻叶片的叶绿素含量主要受核遗传影响,且低叶绿素含量为显性,叶绿素 a 和 b 含量各受不同的单个主效基因控制^[9];杂交稻孕穗期^[7]的光合色素含量主要受非加性效应影响;杂交稻叶绿素含量的高低及叶绿素 a/b 比值均与杂交稻的光合性能相关;不同水稻品种间的光合特性存在显著的品种间差异,水稻光合速率在始穗期或齐穗期达到最大,并且在此阶段变化不大^[10]。

综上所述,以往国内外关于杂交稻光合生理性状的表现及变化研究较多^[11-13],而对杂交稻组合及其亲本光合特性的配合力与遗传规律研究相对较少。并且不同的研究结果也不完全相同,是否与不同研究材料、不同取样生育时期有关?亟待进一步研究证实。而且全面系统分析多个杂交稻组合及其亲本多个重要光合性状指标配合力和遗传规律的研究也鲜见报道。为此,本研究测定并分析了多个杂交稻组合及其亲本始穗后 7 d 其功能叶片多个重要光合生理性状的配合力和遗传规律,旨在明确杂交稻功能叶片各光合性状的遗传特性,试图为今后杂交稻优质高光效生理育种提供理论依据与参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料与田间种植方法

本研究选用了 6 个籼型三系杂交稻不育系:深

95A、389A、中 3A、T98A、五丰 A 和炳 1A; 5 个粳型杂交稻恢复系: R031、湘恢 059、湘农恢 076、优恢 036 和 R342; 按不完全双列杂交设计配制了 30 个杂交稻组合。将所配杂交稻组合及其亲本品种于 2012 年 5 月 28 日在湖南农业大学教学科研试验基地播种, 6 月 20 日移栽, 其中三系杂交稻不育系亲本品种以其同型保持系品种代替种植。田间试验采用随机区组排列, 每小区种植 50 蔸, 单本种植, 小区间不留走道, 株行距 16.7 cm × 20 cm, 3 次重复。试验田肥力中等偏上, 地力均匀, 供试材料整个生育期田间管理与一般水稻大田管理相同。

1.2 测定项目及方法

测定了供试杂交稻组合及其亲本的净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率、叶绿素 a、叶绿素 b 及类胡萝卜素的含量等光合特性指标。净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率的测定采用美国 LI-6400 便携式光合仪, 于供试材料始穗后 7 d 测定。具体操作时注意: 于晴天 8:30 ~ 11:30 测定有代表性的稻株剑叶中部的的光合特性, 每处理重复测定 4 次, 结果取其平均值。根据当天阳光强度设置仪器自带的红蓝光源固定光强, 使所有稻株叶片的光合指标在同一光强下测定。叶绿素 a、叶绿素 b 及类胡萝卜素含量的测定参照萧浪涛等^[14]的方法进行。

1.3 数据处理与统计分析

用 DPS 7.05v 进行方差分析、配合力分析及遗传力估算等, 具体参照周开达等^[15]的方法进行。用 SPSS10.0 软件进行相关性分析, 具体参照莫惠栋^[16]的方法进行。

亲本一般配合力 (GCA, general combining ability) 的基因型方差按 $\sigma_1^2 = V_{p1} - V_{p12}$, $\sigma_2^2 = V_{p2} - V_{p12}$ 来进行估算; 群体一般配合力方差按 $V_{g_i}(\%) = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2) / (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_{12}^2) \times 100\%$ 来进行估算; 特殊配合力方差按 $V_s(\%) = (\sigma_{12}^2) / (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_{12}^2) \times 100\%$ 来进行估算。

亲本群体一般配合力方差按 $V_{g_i}(\%) = (\sigma_1^2) / (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_{12}^2) \times 100\%$ 和 $V_{g_j}(\%) = (\sigma_2^2) / (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_{12}^2) \times 100\%$ 分别进行估算; 广义遗传力和狭义遗传力分别按 $h_b^2(\%) = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_{12}^2) / (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_{12}^2 + \sigma_e^2)$ 和 $h_N^2(\%) = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2) / (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_{12}^2 + \sigma_e^2)$ 来进行估算。

2 结果与分析

2.1 杂交稻光合特性的配合力方差分析

由表 1 可知,30 个供试杂交稻组合各光合特性均存在极显著的组间差异。进一步的配合力方差

分析表明,杂交稻各光合特性的特殊配合力方差差异均达极显著水平;杂交稻各母本气孔导度和叶绿素 a + b 的一般配合力方差差异均达显著水平;杂交稻各父本叶绿素 a 含量与叶绿素 b 含量的一般配合力方差差异也分别达到了显著或极显著水平。

表 1 杂交稻光合特性的配合力方差分析(F 值)

Table 1 Variance analysis of photosynthetic characters in hybrid rice(F value)

变异来源 Source of variation	自由度 df	净光合速率 Pn	气孔导度 Cond	胞间 CO_2 浓度 C_i	蒸腾速率 Trm	叶绿素 a Chl a	叶绿素 b Chl b	叶绿素 a + b Chl a + b	叶绿素 a/b Chl a/b	类胡萝卜素 Carotenoids
组合间 Cross	29	401.608 **	89.842 **	1557.595 **	125.586 **	62.116 **	52.751 **	64.093 **	6.688 **	36.852 **
母本一般配合力 GCA of female	5	0.896	3.081 *	1.845	1.232	0.871	0.977	4.292 *	0.913	0.777
父本一般配合力 GCA of male	4	0.198	1.097	2.297	2.417	3.852 *	5.824 **	0.893	0.586	2.703
特殊配合力 SCA	20	460.855 **	65.470 **	1176.006 **	101.657 **	45.305 **	31.750 **	44.646 **	7.208 **	30.806 **

* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上的差异显著性,下同

* and ** represent significantly difference at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively. Pn: Photosynthetic rate, Cond: Stomatal conductance, C_i : Inter-cellular CO_2 concentration, Trm: Transpiration rate, Chl a: Chlorophyll (a) content, Chl b: Chlorophyll (b) content, GCA: General combining ability, SCA: Special combining ability. The same as below

2.2 杂交稻光合特性一般配合力和特殊配合力效应

如表 2 所示,不同杂交稻亲本的相同光合性状或相同杂交稻亲本的不同光合性状的一般配合力的基因型效应均不相同,说明不同杂交稻亲本的不同

光合特性的加性效应大小不相同。如杂交稻不育系五丰 A、T98A 和恢复系优恢 036 等具有较大的净光合速率一般配合力效应值,是净光合速率一般配合力表现较好的杂交稻亲本品种。

表 2 杂交稻亲本光合特性的一般配合力效应

Table 2 GCA effects of the photosynthetic characters in hybrid rice parents

亲本 Parents	净光合速率 Pn	气孔导度 Cond	胞间 CO_2 浓度 C_i	蒸腾速率 Trm	叶绿素 a Chl a	叶绿素 b Chl b	叶绿素 a + b Chl a + b	叶绿素 a/b Chl a/b	类胡萝卜素 Carotenoids
母本									
深 95A	2.773	24.973	3.640	7.910	3.915	4.141	3.975	-0.052	4.213
389A	-1.398	-11.109	-1.734	-1.879	3.562	2.756	3.349	0.687	1.977
中 3A	-10.046	-8.362	1.271	-1.782	-3.839	-1.996	-3.353	-1.903	-2.792
T98A	4.460	-9.665	-2.939	-2.854	-1.631	-2.074	-1.747	0.328	-0.249
五丰 A	4.785	8.307	-0.140	2.463	3.646	2.649	3.383	1.082	2.934
炳 1A	-0.574	-4.144	-0.098	-3.858	-5.653	-5.476	-5.607	-0.143	-6.084
父本									
R031	-2.982	-12.225	-3.161	1.492	-5.880	-6.349	-6.069	0.465	0.206
湘恢 059	0.001	3.592	-0.773	9.065	-4.686	-5.563	-5.518	0.098	-6.655
湘农恢 076	1.502	8.603	1.860	-3.151	10.362	12.968	12.354	-0.877	9.229
优恢 036	3.023	0.291	-0.669	-1.836	5.790	3.854	4.598	0.952	3.136
R342	-1.543	-0.261	2.743	-5.570	-5.586	-4.910	-5.365	-0.638	-5.916

30 个供试杂交稻组合各光合特性的特殊配合力效应分析如表 3 所示,相同杂交稻组合的不同光合特性或不同杂交稻亲本所配组合的光合特性的

SCA 差异较大,表明杂交稻光合特性的基因间互作具有多样性。如杂交稻组合深 95A × 湘恢 059 净光合速率的 SCA 效应值最高,为 22.005;而杂交稻组

合深 95A × 优恢 036 净光合速率的 SCA 效应值最低,为 -20.632。杂交稻组合深 95A × 湘恢 059 的气孔导度、蒸腾速率及叶绿素 a/b 等光合特性均具

有较高的 SCA 效应值;而杂交稻组合 T98A × 湘农恢 076 具有较高的光合色素含量 SCA 效应值和较低的净光合速率 SCA 效应值。

表 3 杂交稻组合光合特性的特殊配合力效应

Table 3 SCA effects of photosynthetic characters in hybrid rice combinations

组合 Cross	净光合速率 Pn	气孔导度 Cond	胞间 CO ₂ 浓度 Ci	蒸腾速率 Trm	叶绿素 a Chl a	叶绿素 b Chl b	叶绿素 a + b Chl a + b	叶绿素 a/b Chl a/b	类胡萝卜素 Carotenoids
深 95A × R031	10.195	23.774	4.148	8.511	1.925	0.356	1.511	1.413	2.441
389A × R031	0.603	-3.542	-1.801	-1.327	-2.600	-2.096	-2.467	-0.353	-0.865
中 3A × R031	1.591	2.482	0.574	-6.077	3.763	2.164	3.341	1.653	6.478
T98A × R031	4.989	18.232	2.314	6.956	-4.505	-3.539	-4.250	-0.883	-8.104
五丰 A × R031	-13.627	-23.652	-0.677	-4.428	-3.983	-3.429	-3.837	-0.589	-3.250
炳 1A × R031	-3.752	-17.294	-4.559	-3.636	5.401	6.544	5.702	-1.241	3.299
深 95A × 湘恢 059	22.005	19.138	-5.385	5.710	0.960	-1.182	0.395	2.056	-0.231
389A × 湘恢 059	-11.597	-27.194	-2.474	-18.538	-10.360	-8.978	-9.996	-1.297	-7.084
中 3A × 湘恢 059	9.349	1.304	-2.897	15.049	-3.274	1.106	-2.118	-4.707	-6.870
T98A × 湘恢 059	-4.764	0.222	1.609	3.707	0.593	0.079	0.457	0.744	2.350
五丰 A × 湘恢 059	-4.418	4.564	2.251	2.937	-3.543	-4.774	-3.868	1.376	-3.621
炳 1A × 湘恢 059	-10.574	1.966	6.896	-8.866	15.623	13.749	15.129	1.828	15.456
深 95A × 湘农恢 076	-3.688	-27.661	-2.405	-6.068	-13.428	-8.260	-12.065	-4.715	-12.777
389A × 湘农恢 076	8.330	16.102	1.725	0.105	9.680	8.470	9.360	1.187	7.553
中 3A × 湘农恢 076	-9.220	6.138	4.080	-1.811	-9.519	-9.413	-9.491	0.117	-8.684
T98A × 湘农恢 076	-16.100	-17.760	0.075	-4.629	18.947	14.092	17.667	4.195	20.203
五丰 A × 湘农恢 076	7.245	12.619	-1.048	-0.179	4.931	4.933	4.931	-0.002	3.606
炳 1A × 湘农恢 076	13.433	10.563	-2.426	12.582	-10.611	-9.822	-10.403	-0.782	-9.902
深 95A × 优恢 036	-20.632	-14.095	3.388	-3.021	-5.024	-4.398	-4.859	-0.617	-3.716
389A × 优恢 036	18.057	9.137	-3.534	14.326	11.779	9.669	11.223	1.816	9.341
中 3A × 优恢 036	-11.728	-26.343	-1.502	-12.031	8.289	5.502	7.553	2.848	8.669
T98A × 优恢 036	5.148	11.099	1.098	0.384	-9.015	-4.807	-7.904	-4.016	-9.286
五丰 A × 优恢 036	2.598	16.191	2.238	0.586	2.898	2.483	2.788	0.310	1.831
炳 1A × 优恢 036	6.555	4.012	-1.688	-0.243	-8.927	-8.449	-8.801	-0.341	-6.840
深 95A × R342	-7.880	-1.156	0.254	-5.131	15.568	13.484	15.018	1.864	14.283
389A × R342	-15.393	5.497	6.084	5.434	-8.500	-7.064	-8.121	-1.353	-8.946
中 3A × R342	10.008	16.419	-0.255	4.869	0.741	0.641	0.714	0.090	0.407
T98A × R342	10.727	-11.793	-5.096	-6.419	-6.021	-5.825	-5.969	-0.041	-5.163
五丰 A × R342	8.202	-9.721	-2.764	1.083	-0.303	0.787	-0.015	-1.096	1.433
炳 1A × R342	-5.663	0.754	1.777	0.163	-1.486	-2.023	-1.627	0.535	-2.013

比较杂交稻亲本光合特性的 GCA 效应与组合的 SCA 效应值后发现,两者之间似乎并没有相关性。以光合特性净光合速率为例,其 SCA 值最高的 3 个杂交稻组合分别为深 95A × 湘恢 059、389A × 优恢 036 和炳 1A × 湘农恢 076;但是该 3 个杂交稻组

合净光合速率的亲本 GCA 效应值分别为低/中、低/高、中/中。而净光合速率 GCA 效应值最高的杂交稻不育系五丰 A 和恢复系优恢 036 两个亲本所配的杂交稻组合的 SCA 效应值仅为中等,并且,杂交稻组合五丰 A × R031 的净光合速率 SCA 效应值为

最低;净光合速率 GCA 效应值中等的杂交稻亲本所配的杂交稻组合深 95A × 湘恢 059 的 SCA 效应值却为最高。

2.3 杂交稻光合特性群体配合力方差和遗传参数的估算

杂交稻光合特性的父、母本一般配合力基因型方差及其互作效应、一般配合力方差和特殊配合力方差及其在杂交稻组合基因型总方差中的百分比如表 4 所示。从表 4 可知,杂交稻各光合特性的基因

型方差中,特殊配合力方差所占基因型总方差的比重均大于一般配合力方差所占的比重。并且一般配合力方差所占的比重均小于 50%,而特殊配合力方差所占的比重均大于 50%。说明杂交稻各光合特性的遗传主要来自于基因的非加性效应。杂交稻各光合特性的一般配合力方差中父本和母本所占的比重,以气孔导度的父本的一般配合力方差所占的比重较大;胞间 CO₂ 浓度,蒸腾速率,叶绿素 a、b 及类胡萝卜素含量的母本的一般配合力方差所占的比重较大。

表 4 杂交稻光合特性的基因型方差与父母本及其互作对 F₁ 各性状方差的贡献率

Table 4 Genotypical variance of photosynthetic characters and the contribution ratio of the male, female and their interaction to the total variance of the photosynthetic characters in F₁ hybrid rice

性状 Trait	基因型方差 Variance of genotype			贡献率(%) Contribution ratio			
	P ₁ GCA	P ₂ GCA	P ₁₂ GCA	V _G	V _{G1}	V _{G2}	V _S
净光合速率 Pn	0	0	8.400	0	0	0	100.00
气孔导度 Cond	0	0.009	0.021	30.52	1.01	29.53	69.48
胞间 CO ₂ 浓度 Ci	24.965	19.520	115.436	27.82	15.61	12.21	72.18
蒸腾速率 Trm	0.241	0.047	1.012	22.20	18.56	3.64	77.80
叶绿素 a Chl a	0.054	0	0.111	32.71	32.71	0	67.29
叶绿素 b Chl b	0.008	0	0.010	45.36	45.51	0	54.64
叶绿素 a + b Chl a + b	0	0.104	0.185	35.95	0.00	35.95	64.05
叶绿素 a/b Chl a/b	0	0	0.004	0	0	0	100.00
类胡萝卜素 Carotenoids	0.001	0	0.003	22.68	23.26	0	77.32

P₁GCA、P₂GCA、P₁₂GCA 分别表示母本一般配合力方差、父本一般配合力方差、父母本互作方差。V_G(%)、V_{G1}(%)、V_{G2}(%)、V_S(%) 分别表示父母本、母本、父本、父母本互作方差占总的基因型方差的百分率

P₁GCA, P₂GCA, and P₁₂GCA represent GCA variance of female parent, GCA variance of male parent, and SCA variance of the among teraction in parents, respectively. V_G(%), V_{G1}(%), V_{G2}(%), and V_S(%) represent the variance percentage of parents, female, male, the interaction among parents accounting for the total genotype variance, respectively

从表 5 可知,杂交稻各光合特性指标的广义遗传力均大于其狭义遗传力,表明杂交稻各光合特性主要受非加性遗传作用。杂交稻各光合特性指标的狭义遗传力的大小依次为叶绿素 b、叶绿素 a + b、叶

绿素 a、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、类胡萝卜素和蒸腾速率,这些性状的狭义遗传力均为 20% ~ 50%,具有中等遗传力。

表 5 杂交稻主要光合特性的遗传力

Table 5 Heritability of main photosynthetic characters in hybrid rice

遗传力 Heritability	净光合速率 Pn	气孔导度 Cond	胞间 CO ₂ 浓度 Ci	蒸腾速率 Trm	叶绿素 a Chl a	叶绿素 b Chl b	叶绿素 a + b Chl a + b	叶绿素 a/b Chl a/b	类胡萝卜素 Carotenoids
狭义遗传力 H _N ²	0	29.87	27.78	21.86	31.74	43.81	34.92	0	21.56
广义遗传力 H _B ²	99.57	97.89	99.88	98.48	97.05	96.57	97.15	75.63	95.07

H_N², Narrow genetic ability, H_B², Broad genetic ability

2.4 杂交稻光合特性表型值的预测

杂交稻组合 F₁ 各光合特性表型值与双亲一般配合力之和、母本一般配合力、父本一般配合力和特

殊配合力的相关系数见表 6。从表 6 可知,杂交稻组合 F₁ 各光合特性的表型值与双亲一般配合力效应值之和均呈极显著正相关。杂交稻组合 F₁ 各光

合特性的表型值与母本一般配合力的正相关,除叶绿素 a、b 和类胡萝卜素含量外,其他光合特性的两两正相关均达显著或极显著水平;杂交稻组合 F_1 的胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率、叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量等光合特性的表型值与父本一般配合力的正相关均达极显著水平。因此,可根据杂交稻双亲光合特性的一般配合力之和来推测其杂种 F_1 光

合特性的表型值。而且,由于杂交稻组合 F_1 各光合特性表型值特殊配合力效应需要配组之后才能观测记载。因此,利用杂交稻各光合特性的父母本的一般配合力效应之和来预测杂交稻组合的光合特性表型值,对于今后有效筛选高光效杂交稻组合具有重要的理论意义。

表 6 杂交稻 F_1 光合特性的表型值与配合力效应值间的关系

Table 6 Correlation coefficients between the phenotypic value of F_1 hybrid rice and combining ability effects in photosynthetic characters

配合力效应 Effects of combining ability	净光合速率 Pn	气孔导度 Cond	胞间 CO_2 浓度 Ci	蒸腾速率 Trm	叶绿素 a Chl a	叶绿素 b Chl b	叶绿素 a+b Chl a+b	叶绿素 a/b Chl a/b	类胡 萝 卜 素 Carotenoids
亲本一般配合力 GCA of parents	0.457 *	0.705 **	0.692 **	0.665 **	0.705 **	0.765 **	0.721 **	0.507 **	0.651 **
母本一般配合力 GCA of female	0.421 *	0.622 **	0.490 **	0.415 *	0.331	0.318	0.642 **	0.412 *	0.335
父本一般配合力 GCA of male	0.177	0.332	0.489 **	0.520 **	0.622 **	0.695 **	0.327	0.295	0.558 **
特殊配合力 SCA	0.890 **	0.709 **	0.722 **	0.747 **	0.709 **	0.644 **	0.693 **	0.862 **	0.759 **

3 讨论

3.1 杂交稻亲本光合特性的选育

优质高产是当前水稻育种的重要目标,以往关于杂交稻组合及其亲本的农艺性状^[17]和品质性状^[18-19]的配合力与遗传规律研究较多。光合作用是杂交稻产量形成的基础,水稻灌浆期是其子粒淀粉形成的关键时期,在这一时期,水稻植株的碳氮代谢均处于旺盛时期。因此,研究该时期杂交稻光合性状的遗传规律,对于选育高光合及其高产优质杂交稻组合及其亲本品种具有重要的指导作用。

本研究结果表明,杂交稻各光合特性的广义遗传力均高于其狭义遗传力,各光合性状的狭义遗传力均低于 50%,说明杂交稻各光合特性主要受基因的非加性效应影响,受基因互作及环境的影响较大。因此,对杂交稻亲本各光合性状指标的改良应注意进行多代连续选择或采用轮回选择,才有可能获得较好的选育效果。

选育各光合性状指标优良的杂交稻亲本品种与选配优良杂交稻组合时,对有些光合性状指标要求量值愈高愈好,如净光合速率、光合色素含量等;对有些光合性状指标要求量值愈低愈好,如蒸腾速率、

叶绿素 a/b 比值等。本研究结果表明,供试杂交稻亲本中,杂交稻不育系深 95A、五丰 A 和恢复系湘农恢 076、优恢 036 等均表现为相对较高的净光合速率和光合色素含量的 GCA 效应值;刘红梅等^[19]研究表明,杂交稻不育系五丰 A 和恢复系优恢 036 表现出优良的 RVA 谱淀粉特征值,因此,利用这些具有优良光合性状的杂交稻亲本品种配组,有可能选配到既高光效又可能高产优质的杂交稻组合。此外,本研究表明,杂交稻恢复系湘农恢 076 具有较高的光合色素含量 GCA 效应值和较低的叶绿 a/b 比值 GCA 效应值,因此,利用杂交稻恢复系湘农恢 076 配组有望获得耐阴性强的优良杂交稻组合。

本研究结果表明,杂交稻不育系的气孔导度、叶绿素 a+b 含量的基因型方差大于其恢复系的基因型方差,杂交稻恢复系的叶绿素 a 含量和叶绿素 b 含量的基因型方差大于其不育系的基因型方差。因此,选配气孔导度和叶绿素 a+b 含量等光合性状优良的杂交稻组合时,应优先选择该两个性状表现及配合力效应值均优良的杂交稻不育系配组;而选择叶绿素 a 含量和叶绿素 b 含量等光合性状优良的杂交稻组合时,应优先选择该两个性状表现及配合力效应值均优良的杂交稻恢复系配组,有望选配出这

些光合性状优良的杂交稻组合。

3.2 杂交稻组合光合特性的配组

研究作物光合性状的遗传规律对指导作物高光效育种具有重要意义。本研究结果表明, 杂交稻组合各光合性状的组合间遗传差异均达极显著水平, 表明杂交稻新本及其组合光合性状的选育与配组, 对改良杂交稻的光合特性极其有效。

本研究结果表明, 杂交稻组合各光合性状主要受基因的非加性效应影响, 表现出较强的互作效应, 而杂种优势主要来自于基因的非加性效应, 说明杂交稻各光合性状存在杂种优势, 这与王娜等^[20]、李季航等^[21]研究水稻光合速率具有杂种优势的结果相一致; 与 G. H. Yu 等^[11]研究杂交稻剑叶全展期的光合速率和气孔导度的遗传变异主要受基因的非加性效应影响的结果也相一致; 与刘怀年^[10]研究杂交稻孕穗期的光合色素含量的结果相一致, 但与其杂交稻孕穗期的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率主要受基因加性效应影响的结果不相一致。表明杂交稻不同亲本品种不同生育时期的不同光合性状可能表现出不同的遗传特性。

本研究结果表明, 杂交稻各光合特性的 GCA 效应值与 SCA 效应值间并没有明显的对应关系, 杂交稻不育系和恢复系光合特性的一般配合力均较高的亲本所配的杂交稻组合, 其特殊配合力不一定高; 杂交稻不育系和恢复系一般配合力均较低的低亲本所配的杂交稻组合, 其特殊配合力不一定低。如深 95A、五丰 A 和湘农恢 076、优恢 036 具有较高的净光合速率、光合色素含量 GCA 效应值, 但其所配杂交稻组合深 95A × 湘农恢 076、深 95A × 优恢 036 具有较低的净光合速率、光合色素含量 SCA 效应值, 而五丰 A × 湘农恢 076、五丰 A × 优恢 036 具有较高的净光合速率、光合色素含量 SCA 效应值。因此, 在高光效杂交稻组合配组中, 应选择光合性状的 GCA 效应值与表型值均优良的杂交稻亲本配组, 同时还需通过杂交稻广泛测交配组, 才有可能筛选出高光效杂交稻组合。

此外, 本研究结果还表明, 杂交稻组合 F_1 的光合性状表型值与其亲本的一般配合力效应之和的相关性分别达显著或极显著水平, 因此, 可通过杂交稻亲本光合性状的一般配合力效应值之和来预测杂交稻组合 F_1 的表型值, 有助于防止杂交稻高光效组合

选配的盲目配组, 从而有可能提高杂交稻高光效育种的效率。

参考文献

- [1] Wang G L, Kang S M, Moreno O. Genetic analyses of grain-filling rate duration in maize[J]. Field Crop Res, 1999, 61(3): 211-222
- [2] Hagarth M D, Kingston G. The inheritance of ash in juice from sugarcane[J]. Sugar Cane, 1984(5): 21-27
- [3] Song C, Zeng F, Pao Z, et al. Characterization of high-yield performance as affected by genotype and environment in rice[J]. J Zhejiang Univ Sci B, 2008, 9(5): 363-370
- [4] Panda D, Sharma G S, Sarkar K R. Chlorophyll fluorescence parameters, CO₂ photosynthetic rate and regeneration capacity as a result of complete submergence and subsequent re-emergence in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Aquatic Bot, 2008, 88(2): 127-133
- [5] Pang J, Kobayashi K, Zhu J G. Yield and photosynthetic characteristics of flag leaves in Chinese rice (*Oryza sativa* L.) varieties subjected to free-air release of ozone[J]. Agr Eco Env, 2009, 132(3/4): 203-211
- [6] Bhardwaj L H, Weaver J J. Combining-ability analysis in cotton for agronomic characters, fruiting efficiency, photosynthesis and bollworm resistance[J]. J Agr Sci, 1984, 103(3): 511-518
- [7] 张玲, 杨国涛, 谢崇华, 等. 几个籼型杂交水稻光合特性的配合力研究[J]. 南京农业大学学报, 2009, 32(2): 5-9
- [8] 翟虎渠, 曹树青, 唐运来, 等. 籼型杂交水稻光合性状的配合力及遗传力分析[J]. 作物学报, 2002, 28(2): 154-160
- [9] 梁镇林. 水稻不同品种叶绿素含量的变异及遗传表现[J]. 贵州农学院学报, 1982(1): 11-24
- [10] 刘怀年. 稻种资源光合速率研究及杂交稻亲本配合力分析[D]. 雅安: 四川农业大学, 2006
- [11] Yu G H, Li W, Yuan Z Y, et al. The effects of enhanced UV-B radiation on photosynthetic and biochemical activities in super-high-yield hybrid rice Liangyoupeijiu at the reproductive stage[J]. Photosynthetica, 2013, 51(1): 33-44
- [12] Niu X D, Li G R, Kang Z H, et al. Photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme system in high-chlorophyll rice *Gc* mutant[J]. Russ J Plant Physiol, 2012, 59(5): 691-695
- [13] Kang Z H, Li G R, Huang J L, et al. Photosynthetic and physiological analysis of the rice high-chlorophyll mutant (*Gc*) [J]. Plant Physiol Biochem, 2012, 60(11): 81-87
- [14] 萧浪涛, 王三根. 植物生理学实验技术[M], 1版. 北京: 中国农业出版社, 2005: 110-114
- [15] 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[J]. 作物学报, 1982, 8(3): 145-152
- [16] 莫惠栋. 农业试验统计[M], 2版. 上海: 科学技术出版社, 1992: 347-354
- [17] 陈小龙, 邓启云, 吴丹, 等. 两系超级杂交稻主要农艺性状的配合力遗传分析[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2013, 39(4): 331-337
- [18] 戴正元, 李爱宏, 刘广青, 等. 几个优良籼稻亲本质性状的配合力和杂种优势分析[J]. 植物遗传资源学报, 2006, 7(2): 234-238
- [19] 刘红梅, 刘建丰, 邱颖波, 等. 籼型杂交稻淀粉 RVA 谱特征值的杂种优势分析[J]. 植物遗传资源学报, 2013, 14(3): 434-439
- [20] 王娜, 陈国祥, 吕川根. 两优培九与其亲本剑叶光合特性的比较研究[J]. 杂交水稻, 2004, 19(1): 53-55
- [21] 李季航, 向珣朝, 何立斌, 等. 水稻亚种间杂种 F_1 光合特性研究[J]. 植物学通报, 2005, 22(4): 432-438