

籼型杂交稻光合特性的杂种优势分析

刘红梅¹, 周新跃², 陈杰¹, 李海林¹, 邱颖波¹, 刘建丰¹

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

摘要:为探明籼型杂交稻光合特性的杂种优势,以30个杂交稻组合及其亲本为材料,对其功能叶片的光合特性进行了测定和分析,结果表明:亲本间和杂交稻组合的光合性状均存在极显著的差异,其中亲本间变异系数最大的是净光合速率,组合间变异系数最大的是气孔导度,亲本和组合间的变异系数均以叶绿素a/b比值为最小;杂交稻组合净光合速率、气孔导度和蒸腾速率的平均数均大于亲本的平均数,有利于高光合速率杂交稻品种(组合)的选育;净光合速率、气孔导度和蒸腾速率具有正向平均中亲优势,其中净光合速率和气孔导度具有正向超高亲优势,胞间CO₂浓度具有负向超亲优势,蒸腾速率和叶绿素a/b比值具有正向竞争优势;杂交稻组合的蒸腾速率与其父本值和中亲值呈显著的正相关关系。

关键词:杂交稻;亲本;光合特性;杂种优势

中图分类号:S511.03 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-7091(2014)03-0122-06

Heterosis Analysis of Photosynthetic Characteristics in Indica Hybrid Rice

LIU Hong-mei¹, ZHOU Xin-yue², CHEN Jie¹, LI Hai-lin¹, QIU Ying-bo¹, LIU Jian-feng¹

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

2. Library of Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: To verify the heterosis of photosynthetic characteristics of flag leaves, thirty hybrid rice combinations and their parents' were tested. The result were as follows, there were significant differences ($P < 0.01$) for the photosynthetic characteristics in both the hybrid rice combinations and their parents. Among those parameters, photosynthetic rate had the biggest coefficient of variation in parents but stomatal conductance had the biggest in hybrid rice combinations. And the rate of chlorophyll content (a) and chlorophyll (b) had the smallest both in parent and hybrid rice combinations. The average of photosynthetic rate, stomatal conductance and transpiration rate of hybrid rice combinations were bigger than that of the parents. It indicated that it is conducive to breed high photosynthetic rate of hybrid rice combinations. Mid-parent heterosis were found in photosynthetic rate, stomatal conductance and transpiration rate, over high-parent heterosis were found in photosynthetic rate and stomatal conductance, below low-parent heterosis was found in intercellular CO₂ concentration, positive competitive advantages were found in transpiration rate and the rate of chlorophyll content (a) and chlorophyll (b). Transpiration rate of hybrid rice combinations were positively correlated with that parameters of male parent and mid-parents ($P < 0.05$).

Key words: Hybrid rice; Parents; Photosynthetic characteristic; Heterosis

水稻籽粒灌浆物质的积累主要来自其功能叶片的光合作用,光合作用是水稻同化作用的“源”,是水稻产量和品质形成的源泉及基础^[1-2]。光合特性是水稻重要的生理指标,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比值、叶绿素a+b含量、类胡萝卜

素含量等是水稻重要的光合性状,其中,净光合速率是评价水稻光合特性的重要指标^[3-5]。以往研究认为,水稻的光合效率与产量和品质紧密相联,不同水稻品种间的光合特性存在显著的品种(组合)间差异^[6];两优培九^[7]成熟剑叶及其他5个水稻杂种F₁的^[8]净光合速率具有超亲优势,两优培九剑叶全

收稿日期:2014-03-10

基金项目:湖南农业大学作物学开放基金项目(ZWK201310);国家“863”计划资助项目(2010AA101304)

作者简介:刘红梅(1979-),女,湖南涟源人,实验师,博士,主要从事作物遗传育种研究。

通讯作者:刘建丰(1962-),男,湖南新化人,教授,博士,主要从事水稻杂种优势利用研究。

展期的叶绿素含量超亲优势不明显,但类胡萝卜素含量的超亲优势显著^[7];作物光合速率是数量遗传性状,主要受核基因组的影响,也受胞质基因的影响^[9];杂交稻配组时,选择光合性能优良的母本是首先要考虑的条件^[10]。

杂种优势是农业科学研究的一个重要方向,而光合特性参数存在不同程度的杂种优势^[11]。因此,在保持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水稻品种间光合特性的遗传变异规律,是选择高光合速率的水稻品种的一条行之有效的途径。分析光合特性参数的杂种优势,对提高水稻光能利用率并最终选育优质高产水稻品种具有重要的理论与实际应用价值^[12]。以往国内外水稻光合特性的研究,对光合生理的表现及变化研究较多^[13-15],对杂交稻组合及其亲本光合特性的杂种优势研究相对较少。

因此,本研究选用 6 个籼型三系杂交稻不育系和 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,以天优华占为对照杂交稻组合,对其始穗后 7 d 的净光合速率、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 9 个光合生理性状进行了测定,分析了杂交稻功能叶片各光合性状的杂种优势,试图为杂交稻优质高产育种和高光效生理育种提供理论参考。

1 材料和方法

1.1 试验材料

选用 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 个籼型杂交稻恢复系: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的 30 个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,整个水稻生育期同一般大田管理。于始穗后 7 d 测定供试材料功能叶片的光合生理特性指标。

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^[16]介绍的方法进行。

1.3 数据处理与统计分析

采用 Excel 2003 进行原始数据整理及杂种优势分析、SPSS 10.0 进行相关分析,按参考文献[17]所介绍的方法进行。各杂交稻组合叶绿素荧光参数的杂种优势按下列公式计算:中亲优势(%) = (F₁ - MP)/MP × 100%;正向超亲优势(%) = (F₁ - HP)/HP × 100%;负向超亲优势(%) = (F₁ - LP)/LP × 100%;竞争优势(%) = (F₁ - CK)/CK × 100%。其中,MP 为中亲值;HP 为高值亲本值;LP 为低值亲本值;CK 为对照杂交稻组合值。

2 结果与分析

2.1 不同杂交稻亲本光合特性的差异

由表 1 可知,供试杂交稻亲本的各光合特性均存在极显著水平的品种间差异。其中,不同杂交稻亲本净光合速率的变异系数最大,为 24.003%;最大值为 26.756 μmol/(m²·s);最小值为 13.238 μmol/(m²·s);变幅为 13.518 μmol/(m²·s)。不同杂交稻亲本叶绿素 a/b 比值的变异系数最小,仅为 4.140%,其变幅为 0.453。

2.2 不同杂交稻组合光合特性的差异

不同杂交稻组合光合特性的平均值及其差异见表 2。如表 2 所示,供试杂交稻组合的各光合特性均存在极显著水平的组合间差异。其中以气孔导度的变异系数最大,为 21.066%;其次为净光合速率,变异系数为 12.227%;而叶绿素 a/b 的变异系数最小,仅 2.341%。

2.3 杂交稻组合光合特性的杂种优势分析

如表 3 所示,30 个供试杂交稻组合光合特性的杂种优势分析结果表明,各光合特性中,净光合速率、气孔导度和蒸腾速率的中亲优势组合数较多,分别达 24,21,18 个;而气孔导度和净光合速率的超高亲组合数分别达 18,16 个;各光合特性表现出不同程度的超低亲优势,其中类胡萝卜素含量和胞间 CO₂ 浓度的负向超低亲组合数分别为 16,14 个;竞争优势只有叶绿素 a/b 的正向组合数达 23 个,其他

均在 50% 以下。综上所述,不同杂交稻组合的不同 光合特性并不普遍存在杂种优势。

表 1 杂交稻亲本光合特性的差异

Tab. 1 Difference of photosynthetic characters in hybrid rice parents

亲本 Parents	净光合速率/ ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) Pn	气孔导度 /(cm/s) Gs	胞间 CO_2 浓度/ ($\mu\text{mol}/\text{mol}$) Ci	蒸腾速率/ ($\mu\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$) Tr	叶绿素 a /(mg/g) Chl. a	叶绿素 b /(mg/g) Chl. b	叶绿素 a + b /(mg/g) Chl. a + b	叶绿素 a/b Chl a/b	类胡萝卜素 /(mg/g) Carotenoids
母本 深 95A Shen 95A	26.756	0.847	285.204	12.318	3.652	1.319	4.971	2.768	0.638
Female 389A	13.238	0.686	318.102	9.493	2.735	1.028	3.763	2.661	0.577
中 3A Zhong 3A	14.869	0.548	302.480	9.765	2.670	0.945	3.616	2.825	0.573
T98A	14.076	0.719	318.796	12.407	3.152	1.237	4.388	2.547	0.588
五丰 A Wufeng A	19.221	0.516	277.193	9.898	3.526	1.235	4.761	2.856	0.686
炳 1A Bing 1A	17.195	0.611	304.487	10.495	2.919	1.027	3.947	2.842	0.578
父本 R031	20.345	0.827	287.129	11.217	4.581	1.643	6.224	2.791	0.814
Male 湘恢 059 Xianghui 059	25.027	0.850	270.949	12.792	3.110	1.037	4.147	3.000	0.596
湘农恢 076 Xiangnonghui 076	22.851	0.729	282.724	11.431	3.715	1.301	5.016	2.854	0.659
优恢 036 Youhui 036	15.306	0.585	297.980	10.241	3.275	1.153	4.428	2.839	0.585
R342	18.435	0.707	294.908	10.935	3.394	1.216	4.610	2.792	0.596
平均数 Average	18.847	0.693	294.541	10.999	3.339	1.195	4.534	2.798	0.626
标准差 Std	4.524	0.118	15.674	1.140	0.538	0.194	0.728	0.116	0.073
变幅极差 Range	13.518	0.334	47.847	3.299	1.911	0.697	2.608	0.453	0.241
变异系数/% CV	24.003	17.054	5.321	10.367	16.127	16.230	16.059	4.140	11.579
亲本间差异 F Difference in parents	215.640 **	29.663 **	136.519 **	98.796 **	45.858 **	36.019 **	55.403 **	23.822 **	43.874 **

注: * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上的差异显著性。表 2~4 同。

Note: * and ** represent significantly different at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively. The same as Tab. 2~4.

表 2 不同杂交稻组合光合特性的差异

Tab. 2 Difference of photosynthetic characters in hybrid rice combinations

组合 Cross	净光合速率/ ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) Pn	气孔导度/ (cm/s) Gs	胞间 CO_2 浓度/ ($\mu\text{mol}/\text{mol}$) Ci	蒸腾速率/ ($\mu\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$) Tr	叶绿素 a /(mg/g) Chl. a	叶绿素 b /(mg/g) Chl. b	叶绿素 a + b /(mg/g) Chl. a + b	叶绿素 a/b Chl a/b	类胡萝卜素 /(mg/g) Carotenoids
深 95A \times R031 Shen 95A \times R031	24.365	1.102	296.519	13.339	3.297	1.161	4.458	2.840	0.638
389A \times R031	21.316	0.590	264.431	11.119	3.136	1.116	4.251	2.811	0.605
中 3A \times R031 Zhong 3A \times R031	19.619	0.661	279.677	10.593	3.101	1.110	4.211	2.795	0.621
T98A \times R031	23.585	0.778	272.675	11.946	2.901	1.041	3.943	2.786	0.549
五丰 A \times R031 Wufeng A \times R031	19.533	0.585	272.132	11.259	3.093	1.098	4.191	2.816	0.597
炳 1A \times R031 Bing 1A \times R031	20.534	0.535	261.248	10.634	3.096	1.120	4.216	2.763	0.582
深 95A \times 湘恢 059 Shen 95A \times Xianghui 059	27.642	1.192	276.269	13.879	3.280	1.152	4.432	2.847	0.581
389A \times 湘恢 059 389 A \times Xianghui 059	19.274	0.527	269.290	10.029	2.895	1.043	3.938	2.775	0.527
中 3A \times 湘恢 059 Zhong 3A \times Xianghui 059	21.999	0.779	276.607	13.839	2.885	1.106	3.991	2.607	0.500
T98A \times 湘恢 059 T 98A \times Xianghui 059	22.086	0.760	277.446	12.435	3.085	1.093	4.179	2.821	0.570
五丰 A \times 湘恢 059 Wufeng A \times Xianghui 059	22.234	0.940	287.196	12.949	3.123	1.092	4.215	2.860	0.553
炳 1A \times 湘恢 059 Bing 1A \times Xianghui 059	19.683	0.819	300.481	10.899	3.449	1.215	4.663	2.839	0.614
深 95A \times 湘农恢 076 Shen 95A \times Xiangnonghui 076	22.283	0.855	292.176	11.165	3.388	1.287	4.675	2.631	0.601
389A \times 湘农恢 076 389 A \times Xiangnonghui 076	24.021	0.917	288.652	10.756	4.139	1.469	5.608	2.817	0.709
中 3A \times 湘农恢 076 Zhong 3A \times Xiangnonghui 076	18.218	0.859	303.841	10.550	3.261	1.201	4.462	2.715	0.584
T98A \times 湘农恢 076 T 98A \times Xiangnonghui 076	19.907	0.655	280.558	10.110	4.273	1.478	5.752	2.891	0.772
五丰 A \times 湘农恢 076 Wufeng A \times Xiangnonghui 076	25.150	1.045	285.310	11.215	3.985	1.426	5.411	2.795	0.692

续表 2:

组合 Cross	净光合速率/ ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) Pn	气孔导度/ (cm^2/s) Gs	胞间 CO_2 浓度/ ($\mu\text{mol}/\text{mol}$) Ci	蒸腾速率/ ($\mu\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$) Tr	叶绿素 a /(mg/g) Chl. a	叶绿素 b /(mg/g) Chl. b	叶绿素 a + b /(mg/g) Chl. a + b	叶绿素 a/b Chl a/b	类胡萝卜素 /(mg/g) Carotenoids
炳 1A \times 湘农恢 076	25.334	0.928	281.522	11.943	3.165	1.155	4.320	2.739	0.557
Bing 1A \times Xiangnonghui 076									
深 95A \times 优恢 036 Shen 95A \times Youhui 036	18.866	0.897	301.425	11.658	3.425	1.225	4.650	2.797	0.619
389A \times 优恢 036 389A \times Youhui 036	26.513	0.794	266.582	12.513	3.968	1.375	5.343	2.885	0.684
中 3A \times 优恢 036 Zhong 3A \times Youhui 036	17.999	0.529	280.853	9.542	3.608	1.270	4.878	2.842	0.651
T98A \times 优恢 036 T 98A \times Youhui 036	24.951	0.821	276.291	10.826	3.110	1.147	4.257	2.713	0.559
五丰 A \times 优恢 036 Wufeng A \times Youhui 036	24.458	1.007	287.454	11.450	3.678	1.289	4.967	2.854	0.645
炳 1A \times 优恢 036 Bing 1A \times Youhui 036	24.148	0.808	276.447	10.641	2.980	1.064	4.044	2.802	0.539
深 95A \times R342 Shen 95A \times R342	20.680	0.997	302.215	10.997	3.762	1.333	5.095	2.822	0.672
389A \times R342	18.091	0.760	303.510	11.085	2.956	1.074	4.029	2.752	0.520
中 3A \times R342 Zhong 3A \times R342	21.803	0.870	294.060	11.032	3.016	1.109	4.125	2.720	0.548
T98A \times R342	25.175	0.632	268.410	9.634	2.866	1.031	3.897	2.779	0.530
五丰 A \times R342 Wufeng A \times R342	24.688	0.794	282.949	11.084	3.229	1.165	4.394	2.771	0.588
炳 1A \times R342 Bing 1A \times R342	20.429	0.778	295.940	10.265	2.883	1.036	3.919	2.782	0.514
平均数 Average	22.153	0.807	283.405	11.313	3.301	1.183	4.484	2.789	0.597
标准差 Std	2.709	0.170	12.370	1.124	0.394	0.129	0.522	0.065	0.064
变幅极差 Range	9.643	0.665	42.593	4.337	1.407	0.447	1.854	0.283	0.272
变异系数/% CV	12.227	21.066	4.365	9.934	11.947	10.914	11.635	2.341	10.759
组合间差异 F Difference in combinations	401.955 **	89.869 **	1557.409 **	125.360 **	62.119 **	52.723 **	64.093 **	6.692 **	36.834 **

从表 3 还可看出,30 个供试杂交稻组合的各光合特性指标中,净光合速率、气孔导度和蒸腾速率的中亲优势平均值为正值,因此,较易利用净光合速率、气孔导度和蒸腾速率等光合特性优异的双亲杂种优势选配出这些光合特性优良的杂交稻组合。而杂交稻组合的其他光合特性的中亲优势平均值为负值,表现超低亲遗传,表明杂交稻的其他光合特性难以利用杂种优势,只有选择其他光合特性均极其优良的父母本品种配组,才有可能配组出其他光合特性优异的优良杂交稻组合。

表 3 杂交稻光合特性的杂种优势表现

Tab.3 Performance of heterosis for photosynthetic characters in hybrid rice

性状 Traits	超高亲优势/% Over high-parent heterosis			中亲优势/% Over mid-parent heterosis			超低亲优势/% Below low-parent heterosis			竞争优势/% Competitive advantage		
	正向组			正向组			负向组			正向组		
	合数			合数			合数			合数		
	HPH > 0	AH	范围 Range	MPH > 0	AH	范围 Range	LPH < 0	AH	范围 Range	CA > 0	AH	范围 Range
净光合速率/($\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) Pn	16	5.560	-29.480 ~ 73.2239	24	19.239	-10.293 ~ 85.769	1	39.331	-2.487 ~ 100.275	12	-1.200	-19.725 ~ 23.281
气孔导度/(cm^2/s) Gs	18	6.487	-37.985 ~ 72.182	21	16.820	-31.355 ~ 83.045	6	30.831	-23.137 ~ 102.781	12	-4.038	-37.341 ~ 41.738
胞间 CO_2 浓度/($\mu\text{mol}/\text{mol}$) Ci	7	-6.452	-16.872 ~ 3.609	8	-3.444	-13.459 ~ 4.789	14	-0.146	-10.537 ~ 10.900	9	-2.062	-9.719 ~ 5.000
蒸腾速率/($\mu\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$) Tr	12	-3.066	-22.349 ~ 22.183	18	2.813	-17.454 ~ 26.816	5	9.749	-11.900 ~ 41.729	13	1.457	-14.420 ~ 24.472
叶绿素 a/(mg/g) Chl. a	8	-8.909	-36.663 ~ 21.170	9	-1.034	-24.954 ~ 32.055	9	9.391	-12.288 ~ 51.330	0	-32.619	-41.499 ~ -12.775
叶绿素 b/(mg/g) Chl. b	10	-7.898	-36.613 ~ 19.233	12	-0.568	-27.674 ~ 26.124	7	9.101	-15.799 ~ 42.891	0	-33.335	-41.874 ~ -16.679
叶绿素 a + b/(mg/g) Chl. a + b	8	-8.581	-36.650 ~ 20.666	11	-0.923	-25.692 ~ 30.467	8	9.187	-11.964 ~ 49.024	0	-32.810	-41.599 ~ -13.813
叶绿素 a/b/Chl. a/b	6	-2.627	-13.096 ~ 1.749	13	-0.426	-10.485 ~ 7.022	11	1.971	-7.714 ~ 13.467	23	0.978	-5.597 ~ 4.660
类胡萝卜素/(mg/g) Carotenoids	7	-9.151	-32.608 ~ 17.065	9	-4.590	-21.745 ~ 23.733	16	1.025	-12.979 ~ 31.207	0	-24.774	-37.048 ~ -2.820

注: HPH. 超高亲优势; MPH. 中亲优势; LPH. 低亲优势; CA. 竞争优势; AH. 杂种优势平均值。
Note: HPH. High-parent heterosis; MPH. Mid-parent heterosis; LPH. Low-parent heterosis; CA. Competitive advantage; AH. Value of average heterosis.

2.4 杂交稻组合与亲本光合特性的关系

表 4 列出了 30 个供试杂交稻组合与亲本光合特性的亲子相关系数,可知,除杂交稻组合的蒸腾速率与父本值及双亲的中亲值均分别达到了显著水平

的正相关外,杂交稻组合其他光合特性与父本值及双亲的中亲值的相关均未达显著水平。此外,杂交稻组合各光合特性与母本的相关也均未达到显著水平。

表 4 杂交稻组合与亲本光合特性的相关系数

Tab. 4 Correlation coefficients between hybrid rice combinations and their parents of photosynthetic characters

性状 Traits	净光合速率 /($\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) Pn	气孔导度 /(cm/s) Gs	胞间 CO_2 浓度 /($\mu\text{mol}/\text{mol}$) Ci	蒸腾速率 /($\mu\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$) Trm	叶绿素 a /(mg/g) Chl. a	叶绿素 b /(mg/g) Chl. b	叶绿素 a + b /(mg/g) Chl. a + b	叶绿素 a/b Chl. a/b	类胡萝卜素 /(mg/g) Carotenoids
杂交稻组合与母本值 HMC	0.155	0.271	-0.337	0.153	-0.072	-0.077	0.189	0.011	0.131
杂交稻组合与父本值 HRC	-0.042	-0.081	0.089	0.415 *	0.190	0.168	-0.074	-0.111	0.218
杂交稻组合与中亲值 HMPC	0.100	0.153	-0.240	0.363 *	0.052	0.030	0.047	-0.085	0.213

注: HMC、HRC、HMPC 分别表示杂交稻组合母本值、父本值、中亲值的相关系数。

Note: HMC represents correlation coefficients between hybrid rice combinations and sterile lines; HRC represents correlation coefficients between hybrid rice combinations and restorer lines; HMPC represents correlation coefficients between hybrid rice combinations and value of mid-parent.

3 讨论

杂交稻物质的形成主要来自叶片的光合作用, 水稻叶片对光能的吸收、转化和利用率及光合效率的高低对水稻产量起决定性的作用。大部分研究者认为, 光合速率与作物产量呈正相关关系^[18]。作物杂种优势的形成取决于父母本间的遗传差异^[19], 而环境因子等其他因素可能也起很重要的作用^[20]。张其德^[10]认为, 杂交稻组合的光合性能的杂种优势取决于父母本的光合能力。本研究结果表明, 杂交稻组合的光合特性有多种形式的杂种优势表现, 如具有明显的超亲优势、中亲优势和负向低亲优势等。因此, 杂交稻光合特性的杂种优势指标是杂交稻高光效育种的重要参考依据。并且, 因为叶绿素是植物光能吸收、传递与转化的重要色素, 而类胡萝卜素则吸收剩余光能, 消除活性氧, 从而防止细胞膜脂过氧化, 保护光合机能。杂交稻光合速率的杂种优势与叶绿素含量、类胡萝卜素含量等色素含量也密切相关。因此, 本研究将叶绿素含量、类胡萝卜素含量等色素含量作为杂交稻光合特性进行研究, 有助于更完整地研究杂交稻光合作用系统的杂种优势形成机制。

本研究结果表明, 杂交稻组合及其亲本的光合特性均存在极显著水平的组合或品种间差异, 与刘怀年^[6]的研究结果一致。因此, 有利于今后可利用杂交稻亲本光合特性的广泛遗传变异配组, 选配高光效杂交稻组合。本研究结果还表明, 杂交稻 F_1 的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率表现出正向中亲优势。因此, 较容易利用杂交稻的这些光合特性的杂种优势特点, 通过杂交稻亲本这些光合特性的合理配组, 完全有可能选配出优良的高光效杂交稻组合。而杂交稻的其他光合特性的杂种优势表现偏向于低值亲本, 表明杂交稻的其他光合特性难以利用杂种优势。因此, 应选择其他光合特性优良的不育系和恢复系配组, 才有可能获得理想的其他光合特性优良的杂交稻组合。这与翟虎渠等^[21]研究认为, 杂交稻剑叶全展期的光合速率、气孔导度和蒸腾速

率主要受基因加性效应的影响的结果相一致。而张玲研究认为, 孕穗期杂交稻 F_1 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。表明杂交稻不同品种间及杂交稻不同生育时期, 其光合性状的杂种优势表现不同。

本研究结果还表明, 供试杂交稻组合中, 杂交稻组合深 95A \times 湘恢 059 和 0389A \times 优恢 036 的净光合速率最高, 但其超亲优势分别为 3.31% 和 73.22%, 两者超亲优势差别较大; 同理, 中 3A \times 优恢 036 和 389A \times R342 的净光合速率最低, 其超亲优势也分别为 17.60% 和 -1.87%, 两者的超亲优势差别也较大。并且, 杂交稻组合深 95A \times 湘恢 059 组合的母本不育系和父本恢复系均有较高的净光合速率, 但其双亲配组的杂交稻组合的净光合速率却具有较低的杂种优势为 6.76%; 而组合深 398A \times 优恢 036 的母本不育系和父本恢复系的净光合速率均较低, 但其双亲配组的杂交稻组合的净光合速率却具有较高的杂种优势, 为 85.77%。说明高光效杂交稻组合的选配不仅与母本不育系和父本恢复系的光合特性表现有关, 同时也与其所配杂交稻组合的杂种优势的发挥程度相关。如组合深 95A \times 湘恢 059 具有较高的净光合速率和高的蒸腾速率; 而组合 389A \times R342 具有最低的净光合速率和蒸腾速率, 这是因为净光合速率和蒸腾速率等光合特性的表现与气孔导度密切相关, 由于气孔导度较弱, 可导致光合速率和蒸腾速率低。因此, 杂交稻气孔导度的改善可以明显提高其光合速率和蒸腾速率, 但又导致需要更多的水分消耗。由此可见, 杂交稻光合特性的改良, 不是仅仅只要改良净光合速率等个别光合特性指标就能达到改良效果, 而是由于杂交稻各光合特性相互联系, 相互制约, 必须综合考虑进行杂交稻各光合特性的整体协调统一, 才可能达到提高杂交稻光合效率的目标。

参考文献:

- [1] Wang G L, Kang M S, Moreno O. Genetic analyses of

- grain-filling rate duration in maize [J]. *Field Crops Research*, 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] Chen S, Zeng F, Pao Z Z, *et al.* Characterization of high-yield performance as affected by genotype and environment in rice [J]. *Journal of Zhejiang University-Science B*, 2008, 9(5): 363 – 370.
- [4] Panda D, Sharma S G, Sarkar R K. 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 Botany*, 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]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2009, 132 (3/4): 203 – 211.
- [6] 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.
- [7] 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, 59.
- [8] 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.
- [9] Bhardwaj L H, Weaver J J. Combining-ability analysis in cotton for agronomic characters, fruiting efficiency, photosynthesis and bollworm resistance [J]. *The Journal of Agricultural Science*, 1984, 103(3): 511 – 518.
- [10] 张其德, 卢从明, 张世平, 等. 几组有优和无优杂交组合中杂交稻及其亲本光合功能的比较 [J]. *植物学通报*, 1998, 15(1): 51 – 56.
- [11] Sinha S K, Khanna R. Physiological biochemical and genetic basis of heterosis [J]. *Advance in Agromony*, 1975, 27: 123 – 174.
- [12] 林建丽, 朱正歌, 高建伟. 植物杂种优势研究进展 [J]. *华北农学报*, 2009, 24(22): 46 – 56.
- [13] 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.
- [14] Niu X D, Li G R, Kang Z H, *et al.* Photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme system in high-chlorophyll rice Gc mutant [J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2012, 59(5): 691 – 695.
- [15] Kang Z H, Li G, Huang J, *et al.* Photosynthetic and physiological analysis of the rice high-chlorophyll mutant (Gc) [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2012, 60 (11): 81 – 87.
- [16] 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.
- [17] 莫惠栋. 农业试验统计 [M]. 2 版. 上海: 上海科学技术出版社, 1984: 347 – 354.
- [18] 邹学校, 马艳青, 张竹青, 等. 辣椒净光合速率杂种优势与农艺性状的相关分析 [J]. *中国农学通报*, 2009, 25(7): 188 – 192.
- [19] Hochholdinger F, Hoeckera N. Towards the molecular basis of heterosis [J]. *Trends in Plant Science*, 2007, 12 (9): 427 – 432.
- [20] Stupar R M, Springer N M. Cis-transcriptional variation in maize inbred lines B73 and Mo17 leads to additive expression patterns in the F-1 hybrid [J]. *Genetics*, 2006, 173(4): 2199 – 2210.
- [21] 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.