

## 籼型杂交稻叶绿素荧光参数的配合力分析

刘红梅<sup>a</sup>, 周新跃<sup>b</sup>, 王伟峰<sup>a</sup>, 陈杰<sup>a</sup>, 李先喆<sup>a</sup>, 刘建丰<sup>a</sup>, 徐庆国<sup>a\*</sup>

(湖南农业大学 a.农学院, b.图书馆, 湖南 长沙 410128)

**摘 要** 参考籼型杂交稻叶绿素荧光参数的配合力及遗传特性,以 6 个籼型杂交稻不育系和 5 个恢复系按 NC(II) 交配设计的 30 个杂交稻组合及其亲本品种为材料,对其功能叶片的叶绿素荧光参数进行测定和分析。结果表明: ①杂交稻组合的叶绿素荧光参数存在极显著的组合间遗传差异,杂交稻叶绿素荧光参数的最大荧光( $F_m$ )、实际光能利用率  $\Phi_{PSII}$ 、调节性能量耗散的量子产量  $\Phi_{NPQ}$  同时受基因的加性效应和非加性效应的影响,杂交稻其他叶绿素荧光参数主要受非加性效应的影响。②杂交稻不育系  $\Phi_{PSII}$  和  $\Phi_{NPQ}$  的一般配合力(GCA)方差大于杂交稻恢复系  $\Phi_{PSII}$  和  $\Phi_{NPQ}$  的 GCA 方差,表明这些叶绿素荧光参数受其不育系的影响大于受其恢复系的影响。③杂交稻叶绿素荧光参数的广义遗传力均大于其狭义遗传力,其中,  $F_m$ 、 $\Phi_{PSII}$ 、 $\Phi_{NPQ}$ 、非光化学淬灭 NPQ 等叶绿素荧光参数的狭义遗传力为 20%~50%,具有中等遗传力; $F_o$ 、原初光能利用率( $F_v/F_m$ )、非调节性能量耗散的量子产量( $\Phi_{NO}$ )、化学淬灭( $q_L$ )、叶绿素荧光参数的狭义遗传力在 20% 以下,遗传力较弱。④杂交稻  $\Phi_{PSII}$  的竞争优势与其母本 GCA 呈极显著水平的正相关,且具有较高的决定系数,表明杂交稻  $\Phi_{PSII}$  的母本 GCA 效应值较高,其杂交稻组合的竞争优势也强。在选配高光能利用效率的强优势杂交稻组合时,关键应优先选择  $\Phi_{PSII}$  的配合力和表型均优良的杂交稻不育系配组。

**关 键 词**: 籼型杂交稻; 叶绿素荧光; 配合力; 遗传力

中图分类号: S511.2<sup>+</sup>1

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2014)04-0337-07

## Analysis ability of chlorophyll fluorescence parameters in *Indica* hybrid rice

LIU Hong-mei<sup>a</sup>, ZHOU Xin-yue<sup>b</sup>, WANG Wei-feng<sup>a</sup>, CHEN Jie<sup>a</sup>, LI Xian-zhe<sup>a</sup>, LIU Jian-feng<sup>a</sup>, XU Qing-guo<sup>a\*</sup>

(a.College of Agronomy, b.Library, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

**Abstract:** To provide theoretical reference for breeding high-yield and high light utilization efficiency of hybrid rice, the combining ability and genetic characteristics of chlorophyll fluorescence of flag leaves were researched. Thirty different hybrid rice combinations from incomplete diallel crosses (between six sterile lines and five restorer lines of indica hybrid rice cultivars) were tested. Result showed that there were significant genetic differences ( $P < 0.01$ ) for chlorophyll fluorescence parameters among the hybrid rice combinations.  $F_m$ ,  $\Phi_{PSII}$  and  $\Phi_{NPQ}$  in hybrid rice combinations were affected by gene additive effects and non-additive effects but other chlorophyll fluorescence parameters ( $F_o$ ,  $F_v/F_m$ ,  $\Phi_{NO}$ , NPQ,  $q_L$ ) mainly affected by non-additive effects. The proportion of female parent GCA variance was much bigger than the proportion of male parent GCA variance of  $\Phi_{PSII}$  and  $\Phi_{NPQ}$ , indicating that the chlorophyll fluorescence parameters of hybrid rice combinations were more affected by the sterile lines than restorer lines. The broad-sense heritability was greater than the narrow-sense heritability in chlorophyll fluorescence parameters of indica hybrid rice combinations. Four chlorophyll fluorescence parameters such as  $F_m$ ,  $\Phi_{PSII}$ ,  $\Phi_{NPQ}$ , and NPQ with the narrow-sense heritability from 20% to 50% had moderate heritability. The others chlorophyll fluorescence parameters ( $F_o$ ,  $F_v/F_m$ ,  $\Phi_{NO}$ ,  $q_L$ ) with narrow-sense heritability below 20% had weak heritability. The competitive

advantage of hybrid rice combinations for  $\Phi_{PSII}$  was positively correlated with female  $GCA$  ( $P < 0.01$ ) and with a higher determination coefficient, indicating that the hybrid rice combinations from female parents with higher  $GCA$  have higher competitive advantages. Selecting sterile lines with excellent combining ability and phenotypic value of  $\Phi_{PSII}$  was the key step while selecting good restorer lines can not be ignored during breeding hybrid rice combinations of high light utilization efficiency.

**Key words:** *Indica* hybrid rice; chlorophyll fluorescence; combining ability; heritability

影响作物净光合速率的因素很多,例如叶片的形态结构和叶片对光能的吸收、传递、光合碳循环等<sup>[1-4]</sup>。作物吸收的光能,一部分经光化学电子传递转换为化学能;另一部分剩余的光能以热和荧光的形式耗散掉,因此,作物叶绿素荧光参数与其光合特性的关系十分密切<sup>[5]</sup>。叶绿素荧光诱导动力学分析可通过测定叶片光合作用过程中光系统对光能的吸收、传递、耗散、分配等参数,得到较为丰富的植物光合作用信息<sup>[6]</sup>。前人研究 2 个杂交稻组合及其亲本的叶绿素荧光诱导动力学参数,发现其参数中的光系统 II (PSII) 的原初光能转化效率 ( $F_v/F_m$ )、最大荧光 ( $F_m$ )、可变荧光/初始荧光 ( $F_v/F_o$ ) 具有杂种优势<sup>[7]</sup>。杂交稻组合两优培九的 PS II 的光合活性和  $F_v/F_m$ 、化学淬灭系数 ( $q_L$ ) 和非光化学淬灭系数 ( $NPQ$ ) 等叶绿素荧光参数均优于双亲的叶绿素荧光参数,且其光系统 II 的光能利用率稳定,对光能的吸收利用能力较强<sup>[8]</sup>。粳稻和具有粳稻成分的籼粳亚种间杂交稻的 PS II 原初光能转化效率、PS II 的实际光能利用效率 ( $\Phi_{PSII}$ ) 和  $q_L$  下降较少,兼顾水稻亚种间杂种优势和抗早衰性能,籼粳亚种间杂交稻高产育种宜在其不育系中引入粳稻成分<sup>[5]</sup>。整体而言,关于作物叶绿素荧光的研究偏重于作物逆境生理条件的光合能力及叶绿素荧光参数的变化分析<sup>[9-11]</sup>,而且,作物不完全双列杂交交配设计可用于群体遗传参数的估算及配合力分析<sup>[12]</sup>,以往大多被用于水稻的农艺性状<sup>[13-14]</sup>和品质性状<sup>[15-16]</sup>等的遗传特性分析和评价。关于杂交稻组合及其亲本的叶绿素荧光参数的配合力分析及遗传研究鲜见报道。笔者分析籼型杂交稻叶绿素荧光参数的配合力,旨在为杂交稻优质高产及高光效生理育种提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材 料

以 6 个籼型三系杂交稻不育系(深 95A、389A、

中 3A、T98A、五丰 A 和炳 1A) 和 5 个粳型杂交稻恢复系(R031、湘恢 059、湘农恢 076、优恢 036 和 R342) 及其按不完全双列杂交交配设计的 30 个杂交稻组和天优华占为材料。

### 1.2 方 法

将上述杂交稻组合及其亲本和对照杂交稻组合,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替代种植。田间试验采用随机区组排列,每个小区种植 50 蔸,单本种植,小区间不留走道,株行距 16.7 cm×20.0 cm,3 次重复。试验田肥力中等偏上,地力均匀。整个水稻生育期管理与一般水稻大田管理相同。

为进一步探明杂交稻父母本叶绿素荧光参数及基因互作效应对杂交稻  $F_1$  组合的影响,估算杂交稻组合各叶绿素荧光参数的各亲本基因型的一般配合力方差和特殊配合力方差及父母本方差和互作方差的贡献率。根据杂交稻叶绿素荧光参数配合力方差分析结果进一步估算它们的广义遗传力和狭义遗传力。

### 1.3 测定项目及方法

测定项目:最大荧光  $F_m$ ;最小荧光  $F_o$ ;原初光能转化效率  $F_v/F_m$  (PSII 最大光化学效率);PSII 实际光能利用率  $\Phi_{PSII}$ ;调节性能量耗散的量子产量  $\Phi_{NPQ}$ ;非调节性能量耗散的量子产量  $\Phi_{NO}$ ;光化学淬灭  $NPQ$ ;非光化学淬灭  $q_L$ 。

测定方法:用 Imaging-PAM 叶绿素荧光成像系统(德国 walz, 蓝光版)测定供试材料始穗后 7 d 剑叶的各叶绿素荧光参数。于 7:00—8:00 选有代表性的稻株,暗适应 30 min 后,用双层黑色塑料袋套住仪器探头及样品,调用叶绿素荧光慢速动力学曲线程序测定剑叶中部的各叶绿素荧光参数。每小区 3 次重复。开启检测光(光照度 0.1  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ),得到叶绿素荧光参数初始荧光 ( $F_o$ ),再由饱和脉冲光

(光照度  $6\,000\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$  ,光照时间  $0.8\ \text{s}$ )测得最大荧光( $F_m$ )。

$$F_v/F_m=(F_m-F_o)/F_{m0}$$

根据  $F_o$ 、 $F_m$  和光化光计算以下荧光参数(光化光的光照度为  $133 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ),  $F$ 、 $F_o'$ 、 $F_m'$  分别为植物稳态下的光下实时荧光、光下最小荧光和光下最大荧光):

$$\Phi_{\text{PSII}} = (F_m' - F) / F_m' ;$$

$$\Phi_{\text{NPO}} = 1 - \Phi_{\text{PSII}} - 1 / (NPQ + 1 + q_L(F_m/F_o - 1)) ;$$

$$\Phi_{\text{NO}} = 1 / (NPQ + 1 + q_L(F_m/F_o - 1)) ;$$

$$NPQ = (F_m - F_m') / F_m' ;$$

$$q_L = (F_m' - F) / (F_m' - F_0') \times F_0' / F_0$$

## 1.4 数据分析

用 DPS 7.05v 对各供试材料叶绿素荧光参数进行方差分析、配合力分析及遗传力估算等, 具体参照文献[12]、[17]中的方法进行。另用 SPSS 10.0 进行相关性分析, 具体参照文献[18]中的方法进行。

亲本一般配合力( $GCA$ )的基因型方差按  $\sigma_1^2 = V_{p1} - V_{p12}$ ,  $\sigma_2^2 = V_{p2} - V_{p12}$  进行估算; 群体一般配合力方差按  $V_{lg} = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2) / (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_{12}^2)$  进行估算; 特殊配合力( $SCA$ )方差按  $V_S = (\sigma_{12}^2) / (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_{12}^2)$  进行估算。

亲本群体一般配合力方差按  $V_g=(\sigma_1^2)/(\sigma_1^2+\sigma_2^2+\sigma_{12}^2)$  和  $V_{gj}=(\sigma_2^2)/(\sigma_1^2+\sigma_2^2+\sigma_{12}^2)$  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  $h_N^2=(\sigma_1^2+\sigma_2^2)/(\sigma_1^2+\sigma_2^2+\sigma_{12}^2+\sigma_e^2)$  进行估算。

## 2 结果与分析

## 2.1 杂交稻叶绿素荧光参数的配合力方差

由表 1 可见, 供试杂交稻组合各叶绿素荧光参数间均存在极显著的遗传差异。进一步的配合力方差分析表明, 供试杂交稻各叶绿素荧光参数的特殊配合力方差差异均达极显著水平,  $F_m$  和  $\Phi_{PSII}$  及  $\Phi_{NPQ}$  母本配合力方差的差异均达显著或极显著水平。

表 1 供试杂交稻组合及其亲本叶绿素荧光参数的配合力方差分析结果

变异来源	自由度	配合力方差							
		$F_m$	$F_o$	$F_v/F_m$	$\Phi_{PSII}$	$\Phi_{NPQ}$	$\Phi_{NO}$	$NPQ$	$q_L$
组合间	29	18.034**	3.624**	31.563**	28.490**	21.611**	36.357**	25.258**	88.222**
母本 GCA	5	3.006*	1.188	1.792	6.072**	3.394*	0.151	1.681	0.155
父本 GCA	4	2.424	1.558	1.524	1.434	2.337	1.649	2.309	0.428
特殊 SCA	20	11.847**	3.229**	26.313**	14.729**	13.531**	38.550**	19.460**	113.761**

\*和\*\* 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上的差异显著性;  $F_m$  最大荧光;  $F_o$  最小荧光;  $F_v/F_m$  原初光能利用率;  $\Phi_{PSII}$  实际光能利用率;  $\Phi_{NPO}$  调节性能量耗散的量子产量;  $\Phi_{NO}$  非调节性能量耗散的量子产量;  $NPO$  光化学淬灭;  $q_L$  非光化学淬灭。表 2~6 同。

## 2.2 杂交稻叶绿素荧光参数的一般配合力和特殊配合力效应

由表 2 可见,供试杂交稻相同亲本不同叶绿素荧光参数与不同亲本相同叶绿素荧光参数的一般配合力的基因型效应值均不相同,说明不同杂交稻亲本的各叶绿素荧光参数的加性效应大小亦不相

同,如杂交稻不育系深 95A 的  $F_m$ 、 $F_v/F_m$ 、 $\Phi_{PSII}$  等叶绿素荧光参数和 T98A 的  $F_o$ 、 $\Phi_{NPQ}$ 、 $NPQ$  等叶绿素荧光参数的一般配合力效应值较大;杂交稻恢复系优恢 036 的  $F_m$ 、 $F_o$ 、 $\Phi_{PSII}$  等叶绿素荧光参数和湘恢 059 的  $\Phi_{NPQ}$ 、 $NPQ$  和  $q_L$  等叶绿素荧光参数具有较大的一般配合力效应值。

表 2 杂交稻亲本叶绿素荧光参数的一般配合力效应值

亲本		一般配合力							
		$F_m$	$F_o$	$F_v/F_m$	$\Phi_{PSII}$	$\Phi_{NPQ}$	$\Phi_{NO}$	$NPQ$	$q_L$
母本	深 95A	6.825 4	1.124 2	2.000 4	3.744 7	-14.486 4	1.074 7	-16.703 1	-2.467 2
	389A	6.020 4	2.553 6	1.241 5	-0.637 4	5.804 9	-1.843 4	9.090 4	-1.039 3
	中 3A	-5.132 3	-1.037 6	-1.343 0	-0.824 6	-0.598 2	1.649 6	-3.917 0	-0.202 2
	T98A	-0.094 7	3.333 2	-1.302 4	-5.887 6	22.791 9	-1.727 1	23.309 5	1.694 9
	五丰 A	-3.877 9	-2.963 1	-0.466 7	4.216 6	-12.473 6	-0.654 1	-12.483 2	4.232 3
	炳 1A	-3.740 9	-3.010 3	-0.129 8	-0.611 7	-1.038 5	1.500 2	0.703 3	-2.218 5

续 表

亲本		一般配合力							
		$F_m$	$F_o$	$F_v/F_m$	$\Phi_{PSII}$	$\Phi_{NPQ}$	$\Phi_{NO}$	$NPQ$	$q_L$
父本	R031	-4.940 2	-0.259 9	-1.561 2	-0.315 7	0.977 7	0.024 9	-0.732 3	2.693 7
	湘恢 059	-1.539 9	-1.830 0	0.238 8	-0.206 7	16.608 2	-7.889 5	26.899 9	4.907 6
	湘农恢 076	1.977 1	-0.638 9	1.047 3	0.281 7	-2.743 8	0.932 9	-4.551 8	-3.526 8
	优恢 036	8.312 0	3.781 1	1.487 7	2.405 2	-11.158 3	1.612 6	-12.739 6	0.024 2
	R342	-3.808 9	-1.052 3	-1.212 6	-2.164 5	-3.683 8	5.319 0	-8.876 2	-4.098 7

由表 3 可见,相同杂交稻亲本所配不同杂交稻组合与相同杂交稻组合的不同叶绿素荧光参数的特殊配合力差异较大,表明杂交稻叶绿素荧光参数的基因间互作效应具有多样性。进一步对杂交稻亲本叶绿素荧光参数  $GCA$  和杂交稻组合的  $SCA$  进行比较,发现杂交稻组合的叶绿素荧光参数  $SCA$  效应值与亲本的  $GCA$  效应值并无直接的关联。以叶绿素荧光参数  $\Phi_{PSII}$  为例,其  $SCA$  效应值最高的 3 个杂交稻组合,其亲本的  $GCA$  效应值组合有高/低、中/低、低/低等不同类型;杂交稻亲本  $GCA$  效应值最高的杂交稻不育系五丰 A 和杂交稻恢复系优恢 036 所配杂交稻组合的  $SCA$  值仅为中等偏下; $GCA$  效应值较低的杂交稻亲本不育系与恢复系所配的杂交稻组合 389A×R342、炳 1A×湘农恢 076、中 3A×湘恢 059 和 T98A×R031 的  $SCA$  效应值较大。

表 3 30 个杂交稻组合的 8 个叶绿素荧光参数的特殊配合力效应值

Table 3 SCA effects of eight chlorophyll fluorescence parameters in thirty hybrid rice combinations

组合	特殊配合力							
	$F_m$	$F_o$	$F_v/F_m$	$\Phi_{PSII}$	$\Phi_{NPQ}$	$\Phi_{NO}$	$NPQ$	$q_L$
深 95A×R031	1.484 8	4.093 2	-0.814 7	-1.988 8	8.402 6	-0.927 7	9.972 9	-0.460 2
389A×R031	-0.280 6	4.819 7	-1.695 5	-0.344 8	8.889 1	-3.852 0	11.495 4	7.901 2
中 3A×R031	-1.541 2	-8.511 2	2.375 1	1.939 2	-9.720 7	1.683 2	-9.477 6	-5.898 3
T98A×R031	5.603 6	2.917 8	1.155 6	3.539 7	-10.488 1	-0.440 0	-9.756 9	-1.449 3
五丰 A×R031	0.151 9	2.362 6	-0.800 2	-3.935 6	1.651 5	5.470 9	-2.254 8	-4.172 3
炳 1A×R031	-5.418 4	-5.682 0	-0.220 3	0.790 2	1.265 7	-1.934 3	0.021 1	4.078 9
深 95A×湘恢 059	0.339 4	0.436 1	-0.076 2	-2.354 3	-3.223 2	5.440 5	-11.864 2	-10.944 3
389A×湘恢 059	-7.944 4	-2.588 0	-1.896 5	-0.620 5	18.355 4	-8.079 1	31.462 2	14.300 8
中 3A×湘恢 059	3.400 8	-2.599 8	2.088 3	3.516 6	-11.387 6	-0.053 3	-13.507 9	-2.418 6
T98A×湘恢 059	-4.923 0	2.154 9	-2.604 7	-0.224 2	-5.361 8	2.981 0	-9.809 6	4.905 3
五丰 A×湘恢 059	0.668 8	-1.826 1	1.171 4	-0.242 2	-24.546 1	12.555 1	-39.791 4	-15.826 6
炳 1A×湘恢 059	8.458 5	4.422 9	1.317 7	-0.075 4	26.163 3	-12.844 3	43.510 8	9.983 4
深 95A×湘农恢 076	-12.943 6	-6.691 0	-2.032 0	-2.182 3	-1.000 8	4.017 0	-3.039 8	-4.383 4
389A×湘农恢 076	3.483 9	3.249 5	-0.076 2	-2.077 1	-10.452 5	8.491 7	-20.430 4	3.713 6
中 3A×湘农恢 076	3.162 2	5.039 2	-0.712 2	2.092 1	-1.805 9	-2.472 9	1.375 0	5.987 6
T98A×湘农恢 076	4.312 0	1.229 5	1.212 0	-2.232 3	-12.553 3	9.786 8	-22.242 7	-18.841 2
五丰 A×湘农恢 076	9.565 1	2.180 5	2.598 7	-1.070 4	30.679 5	-13.452 1	47.240 7	1.333 7
炳 1A×湘农恢 076	-7.579 6	-5.007 7	-0.990 4	5.470 0	-4.867 0	-6.370 6	-2.902 8	12.189 7
深 95A×优恢 036	7.718 4	5.397 5	0.314 5	2.811 7	-12.231 8	1.427 9	-11.789 5	16.505 1
389A×优恢 036	-3.274 3	-7.0474	1.213 4	-0.051 9	-21.117 4	10.510 1	-31.024 1	-22.493 4
中 3A×优恢 036	-6.689 7	2.066 3	-3.004 5	-2.102 5	13.443 7	-3.297 9	15.674 0	7.652 0
T98A×优恢 036	5.957 6	-2.038 7	2.817 8	0.799 6	20.601 6	-11.471 0	35.335 3	10.553 9
五丰 A×优恢 036	0.175 0	-3.420 8	1.607 3	0.134 0	-1.790 5	0.780 4	-3.286 5	-12.400 3
炳 1A×优恢 036	-3.886 9	5.043 1	-2.948 5	-1.590 9	1.094 4	2.050 6	-4.909 2	0.182 8
深 95A×R342	3.401 0	-3.235 7	2.608 4	3.713 7	8.053 2	-9.957 7	16.720 7	-0.717 1
389A×R342	8.015 4	1.566 2	2.454 8	3.094 3	4.325 4	-7.070 7	8.496 9	-3.422 1
中 3A×R342	1.667 9	4.005 6	-0.746 8	-5.445 4	9.470 5	4.140 9	5.936 5	-5.322 6
T98A×R342	-10.950 1	-4.263 5	-2.580 6	-1.882 8	7.801 6	-0.856 8	6.473 8	4.831 3
五丰 A×R342	-10.560 7	0.703 9	-4.577 1	5.114 1	-5.994 3	-5.354 3	-1.908 0	31.065 4
炳 1A×R342	8.426 4	1.223 6	2.841 4	-4.593 9	-23.656 4	19.098 7	-35.719 9	-26.434 8

2.3 杂交稻叶绿素荧光参数的配合力与竞争优势的关系

由表 4 可见，杂交稻母本叶绿素荧光参数  $F_m$ 、 $F_o$ 、 $F_v/F_m$ 、 $\Phi_{PSII}$ 、 $\Phi_{NPQ}$  和  $NPQ$  的一般配合力及特殊配合力与杂交稻组合竞争优势的两两相关关系均达显著或极显著水平；杂交稻父本  $F_m$ 、 $F_o$ 、 $F_v/F_m$ 、

$\Phi_{NPQ}$ 、 $\Phi_{NO}$  和  $NPQ$  等叶绿素荧光参数的一般配合力与杂交稻组合竞争优势的两两正相关分别达显著或极显著水平；杂交稻组合各叶绿素荧光参数的特殊配合力与杂交稻组合竞争优势的两两相关均达极显著水平，其中  $q_L$  的决定系数最高，达 0.889。

表 4 杂交稻叶绿素荧光参数的配合力与竞争优势的关系

Table 4 Correlation coefficients between combining ability and competitive advantage of chlorophyll fluorescence parameters in hybrid rice

参数	相关系数			决定系数		
	母本GCA与竞争优势	父本GCA与竞争优势	SCA与竞争优势	母本GCA与竞争优势	父本GCA与竞争优势	SCA与竞争优势
$F_m$	0.524**	0.522**	0.673**	0.275	0.272	0.453
$F_o$	0.489**	0.382*	0.784**	0.239	0.146	0.615
$F_v/F_m$	0.468**	0.454*	0.758**	0.219	0.206	0.575
$\Phi_{PSII}$	0.736**	0.320	0.597**	0.542	0.102	0.356
$\Phi_{NPQ}$	0.605**	0.449*	0.657**	0.366	0.202	0.432
$\Phi_{NO}$	0.166	0.491**	0.855**	0.028	0.241	0.731
$NPQ$	0.472**	0.495**	0.729**	0.223	0.245	0.531
$q_L$	0.186	0.276	0.943**	0.035	0.076	0.889

“\*\*”和“\*”分别表示在 0.01 和 0.05 水平上的差异显著性。

2.4 杂交稻叶绿素荧光参数的基因型方差和遗传参数估算

由表 5 可见，杂交稻各叶绿素荧光参数的  $F_1$  基因型总方差中，除  $\Phi_{PSII}$  外，其他叶绿素荧光参数的特殊配合力方差所占的比重均在 50% 以上，表明这些叶绿素荧光参数的亲本基因互作效应对其杂

交稻  $F_1$  组合的相应叶绿素荧光参数具有主导作用，杂交稻组合的这些叶绿素荧光参数的遗传变异主要来自于基因的非加性效应。杂交稻叶绿素荧光参数  $\Phi_{PSII}$  的一般配合力方差中的母本所占的比重较大，说明杂交稻母本不育系对杂交稻组合叶绿素荧光参数  $\Phi_{PSII}$  的影响较大。

表 5 杂交稻叶绿素荧光参数的基因型方差和父母本及其互作对  $F_1$  各性状方差的贡献率

Table 5 Genotypical variance of chlorophyll fluorescence parameters and the contribution ratio of the male, female and their interaction to the total variance of the characters in  $F_1$  hybrid rice

参数	基因型方差			贡献率/%			
	$P_1GCA$	$P_2GCA$	$P_{12}GCA$	$V_G$	$V_{G1}$	$V_{G2}$	$V_S$
$F_m$	0.000 3	0.000 4	0.001 0	40.34	17.65	23.53	59.66
$F_o$	0.000 0	0.000 0	0.000 0	17.17	0.00	0.00	82.86
$F_v/F_m$	0.000 0	0.000 0	0.000 3	19.75	0.00	0.00	80.25
$\Phi_{PSII}$	0.000 3	0.000 0	0.000 3	53.83	50.00	0.00	46.17
$\Phi_{NPQ}$	0.000 3	0.000 2	0.000 6	43.10	27.27	18.18	56.90
$\Phi_{NO}$	0.000 0	0.000 1	0.000 9	9.99	0.00	10.00	90.01
$NPQ$	0.000 1	0.000 2	0.001 0	27.20	7.69	15.38	72.80
$q_L$	0.000 0	0.000 0	0.007 4	0.00	0.00	0.00	100.00

$P_1GCA$ 、 $P_2GCA$ 、 $P_{12}GCA$  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比例。

如表 6 所示，杂交稻各叶绿素荧光参数中， $F_m$ 、 $\Phi_{PSII}$ 、 $\Phi_{NPQ}$  和  $NPQ$  等具有中等狭义遗传力，为

20%~50%，其余叶绿素荧光参数的狭义遗传力均小于 20%，遗传力较弱。从表 6 还可以看出，杂交稻

各叶绿素荧光参数的广义遗传力远远大于其狭义遗传力,表明杂交稻叶绿素荧光参数非加性遗传的

效果更为突出。

表 6 杂交稻叶绿素荧光参数的遗传力

Table 6 Heritability of chlorophyll fluorescence parameters in hybrid rice								%
类别	遗传力							
	$F_m$	$F_o$	$F_v/F_m$	$\Phi_{PSII}$	$\Phi_{NPQ}$	$\Phi_{NO}$	$NPQ$	$q_L$
狭义	34.63	8.11	18.03	48.90	37.94	9.32	24.32	0.00
广义	85.84	47.28	91.31	90.84	88.01	93.29	89.42	97.41

### 3 结论与讨论

叶绿素荧光参数能反应植物对光能的吸收、传递和利用的效率,作物光合特性的遗传规律研究对指导作物高光效组合的选配具有重要意义<sup>[19-20]</sup>。棉花的叶绿素荧光参数 PSII 量子产量的遗传主要为细胞核遗传<sup>[21]</sup>,因此,有可能在棉花育种中,将棉花品种或组合的  $F_v/F_m$ 、 $F_v/F_o$  等叶绿素荧光诱导动力学参数作为棉花杂种优势预测的参考指标<sup>[22]</sup>。

本研究结果表明,杂交稻组合及其亲本的叶绿素荧光参数的组合间配合力和特殊配合力差异均达极显著水平;杂交稻不育系叶绿素荧光参数  $F_m$ 、 $\Phi_{PSII}$ 、 $\Phi_{NPQ}$  的一般配合力方差差异也均达显著或极显著水平,表明该 3 个叶绿素荧光参数的遗传是由加性和非加性效应共同作用的结果。杂交稻叶绿素荧光参数  $\Phi_{PSII}$  的一般配合力基因型方差的贡献率比其特殊配合力基因型方差的贡献率高,说明杂交稻亲本  $\Phi_{PSII}$  的基因加性效应对其杂交稻组合的  $\Phi_{PSII}$  形成起主导作用,因此,在选配高光效杂交稻组合中,为了防止盲目配组和提高杂交稻育种效率,应选择  $\Phi_{PSII}$  一般配合力效应值和表型值均较高的杂交稻亲本品种配组。本研究结果还表明,杂交稻的其他叶绿素荧光参数均以特殊配合力基因型方差的贡献率高于其一般配合力基因型方差的贡献率,说明这些叶绿素荧光参数的遗传变异主要来自基因的非加性效应,也表明杂交稻光合特性的杂种优势主要来自于基因的非加性效应。这与翟虎渠等<sup>[23]</sup>研究净光合速率等一般光合性状的结果一致。

作物性状的广义遗传力能反映作物性状遗传变异和环境变异的影响;作物性状的狭义遗传力仅仅反映作物性状控制基因的加性效应大小。本研究结果表明,杂交稻叶绿素荧光参数的广义遗传力均高于其狭义遗传力,且两者之间相差较大,说明杂交稻组合  $F_1$  的叶绿素荧光参数受基因非加性效应

的影响大。杂交稻  $F_m$ 、 $\Phi_{PSII}$ 、 $\Phi_{NPQ}$ 、 $NPQ$  等叶绿素荧光参数的狭义遗传力为 20%~50%,具有中等遗传力; $F_o$ 、 $F_v/F_m$ 、 $\Phi_{NO}$  和  $q_L$  等叶绿素荧光参数的狭义遗传力在 20% 以下,具有较弱的遗传力,说明杂交稻亲本不育系和恢复系的这 5 个叶绿素荧光参数对其所配杂交稻组合杂种  $F_1$  的遗传力较弱,受其基因互作及环境的影响较大。

### 参考文献:

- [1] Jeon W M, Ali B M, Hahn J E, et al. Photosynthetic pigments, morphology and leaf gas exchange during ex vitro acclimatization of micropropagated CAM *Doritaenopsis* plantlets under relative humidity and air temperature[J]. Environmental and Experimental Botany, 2006, 55(1/2): 183-194.
- [2] Dumlao R M, Darehshouri A, Cohu M C, et al. Low temperature acclimation of photosynthetic capacity and leaf morphology in the context of phloem loading type[J]. Photosynthesis Research, 2012, 113(1/3): 181-189.
- [3] Delagrang S. Light- and seasonal-induced plasticity in leaf morphology, N partitioning and photosynthetic capacity of two temperate deciduous species[J]. Environmental and Experimental Botany, 2011, 70(1): 1-10.
- [4] Bubier L J, Smith R, Juutinen S, et al. Effects of nutrient addition on leaf chemistry, morphology, and photosynthetic capacity of three bog shrubs[J]. Oecologia, 2011, 167(2): 355-368.
- [5] Huang X Q, Jiao D M, Li X. Characteristics of chlorophyll fluorescence and Membrane-lipid peroxidation of various High-yield rice under photooxidation conditions[J]. ACTA Botanica Sinica, 2002, 44(3): 279-286.
- [6] Li X, Jiao M D, Liu L Y, et al. Chlorophyll fluorescence and membrane lipid peroxidation in the flag leaves of different high yield rice variety at late stage of development under natural condition[J]. ACTA Botanica Sinica, 2002, 44(4): 413-421.
- [7] 郭培国, 李明启. 杂交水稻及其亲本光合特性的研究

- I. 功能叶片叶绿素含量、叶绿素-蛋白复合物及诱导荧光动力学[J]. 热带亚热带植物学报, 1996, 4(4): 60-65.
- [8] 王荣富, 黄正来, 王建华, 等. 两系杂交稻两优培九苗期若干光合特性初探[J]. 安徽农业大学学报, 2003, 30(2): 113-116.
- [9] 管铭, 郭水良, 裴立, 等. 基于光合和叶绿素荧光参数评判两个假稻种群对草甘膦的敏感性[J]. 上海师范大学学报: 自然科学版, 2012, 41(2): 171-178.
- [10] 丁在松, 王春艳, 关东明, 等. 旱稻×稗草杂交后代 YF2-1 光合作用气体交换、叶绿素荧光和抗氧化酶系统对渗透胁迫的响应[J]. 作物学报, 2011, 37(5): 876-881.
- [11] 龙继锐, 马国辉, 万宜珍, 等. 施氮量对超级杂交中稻生育后期剑叶叶绿素荧光特性的影响[J]. 中国水稻科学, 2011, 25(5): 501-507.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 李金泉, 卢永根, 冯九焕, 等. 栽培稻与普通野稻杂交杂种优势和农艺性状的遗传分析[J]. 中国农学通报, 2004, 20(6): 136-139.
- [15] 刘红梅, 刘建丰, 范峰峰, 等. 杂交稻淀粉 RVA 谱特征值的配合力及杂种优势研究[J]. 中国水稻科学, 2013, 27(2): 203-208.
- [16] 游晴如, 黄庭旭, 杨东, 等. 籼型三系杂交稻品质性状的配合力及遗传力分析[J]. 中国农学通报, 2007, 23(4): 204-208.
- [17] 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[J]. 遗传, 1980, 2(2): 43-46.
- [18] 莫惠栋. 农业试验统计[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1992.
- [19] 周艳敏, 张春庆. 玉米生育后期光合特性的遗传分析[J]. 中国农业科学, 2008, 41(7): 1900-1907.
- [20] 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.
- [21] 魏亦农, 孔广超, 曹连莆. 棉花叶绿素荧光诱导动力学参数遗传特性的初步研究[J]. 种子, 2003(6): 43-44.
- [22] 张春梅, 王笑言, 杨飞, 等. 叶绿素荧光特性在棉花杂种优势预测中的应用研究[J]. 新疆农业科学, 2006(3): 171-174.
- [23] 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.

责任编辑: 王赛群

英文编辑: 王 库