

# 江西省早稻品种抽穗扬花期耐热性鉴定评价研究

黎毛毛<sup>1</sup>, 廖家槐<sup>1</sup>, 张晓宁<sup>1</sup>, 马小定<sup>2</sup>, 杜慧<sup>1</sup>, 韩龙植<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>江西省农业科学院水稻研究所/水稻国家工程实验室(南昌), 南昌 330200; <sup>2</sup>中国农业科学院作物科学研究所/国家农作物基因资源与基因改良重大科学工程/农业部作物种质资源与生物技术重点开放实验室, 北京 100081)

**摘要:**在自然条件和人工温室模拟极端高温胁迫下对江西省生产上推广种植的 37 份早稻品种进行抽穗扬花期耐热性鉴定评价。以高温胁迫下结实率和结实率降低率为评价指标, 对参试品种的耐热性进行综合评价。方差分析结果表明, 杂交水稻组合间在自然条件和高温胁迫下结实率及结实率降低率接近显著水平, 说明杂交水稻组合间耐热性存在一定的差异; 而常规水稻品种间在自然条件和高温胁迫下结实率及结实率降低率差异不显著, 说明常规水稻品种间耐热性的差异较小。2013 年高温胁迫下平均最高气温(41.3℃)比 2012 年高 0.9℃的情况下, 杂交水稻平均结实率比 2012 年降低 8.9%, 而常规水稻平均结实率仅降低 1.72%, 常规水稻平均结实率的降低幅度明显低于杂交水稻; 常规水稻品种的耐热性强于杂交水稻组合。2013 年自然条件下最高气温(36.8℃)比 2012 年高 1.3℃, 但杂交水稻和常规水稻的平均结实率反而比 2012 年分别高 5.6% 和 15.0%, 这可能是由于 2013 年自然条件下相对湿度(81.4%)比 2012 年高(高 14.4%)所致, 说明气温高于适宜的生育温度时, 相对湿度的增加有助于增强水稻品种的耐热性。五丰优 623、陵两优 611、株两优 819、株两优 312 等 4 个杂交水稻组合和湘早籼 7 号、嘉育 948、中早 35、中早 25 等 4 个常规稻品种在高温胁迫下表现为较高的结实率且结实率降低率较低, 认为可作为耐高温水稻品种在水稻生产和育种中加以利用。

**关键词:**江西早稻品种; 抽穗扬花期; 耐热性; 鉴定评价

## Evaluation of Heat Tolerance at the Heading-flowering Stages for Early-season Rice Varieties in Jiangxi Province

LI Mao-mao<sup>1</sup>, LIAO Jia-huai<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-ning<sup>1</sup>, MA Xiao-ding<sup>2</sup>, DU Hui<sup>1</sup>, HAN Long-zhi<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Rice Research Institute, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences/National Rice Engineering Laboratory(Nanchang), Nanchang 330200; <sup>2</sup>Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences/The National Key Facility for Crop Gene Resources and Genetic Improvement/Key Laboratory of Crop Germplasm Resources and Biotechnology, Ministry of Agriculture, Beijing 100081)

**Abstract:** Heat tolerance at the heading-flowering stages for 37 early-season rice varieties released in Jiangxi province, were evaluated under natural and high temperature conditions. Heat tolerance of rice varieties was evaluated using seed setting rate(SSR) and its reduced rate under high temperature. The result showed that the F values of variance analysis for SSR under nature and high temperature conditions and its reduced rate in hybrid rice combinations were close to significant level, which meant that there were definite difference of heat tolerances among hybrid rice combinations. While, the F values of variance analysis for SSR under nature and high temperature and its reduced rate in conventionality rice varieties were no significant, which meant that there were a very smaller difference of heat tolerances among conventionality rice varieties. The average of SSR for hybrid rice combinations in 2013 was reduced than 2012 for 8.9%, while the average of SSR for conventionality rice was only reduced 1.72%

收稿日期: 2014-01-23 修回日期: 2014-04-30 网络出版日期: 2014-08-07

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20140807.1022.021.html>

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2012BAD04B11, 2013BAD01B01-4, 2013BAD01B02-2); 作物种质资源保护项目(NB2013-2130135-25-01); 国家农作物种质资源平台(2012-001); 国际合作(PJ008685); 江西省农科院青年基金项目(2013CQN006)

第一作者主要从事水稻遗传育种研究。E-mail: lmm3056@163.com

通信作者: 韩龙植, 主要从事水稻遗传育种研究。E-mail: hanlongzhi@caas.cn

than 2012, when the average of maximum temperature ( $41.3^{\circ}\text{C}$ ) under high temperature stress was more than 2012 for  $0.9^{\circ}\text{C}$ , the reduced rate of SSR for conventionality rice was obviously lower than hybrid rice combinations. Therefore, the heat tolerance of conventionality rice were stronger than hybrid rice combinations. In natural condition, the average maximum air temperature of 2013 was  $36.8^{\circ}\text{C}$ , higher than 2012 for  $1.3^{\circ}\text{C}$ , but the average SSR of hybrid rice combinations and conventionality rice were more than 2012 for 5.6% and 15.0%, respectively. This results were caused by the relative humidity (81.4%) of 2013 in nature condition, which was higher than 2012 for 14.4%. It indicated that the high tolerance of rice varieties would become stronger with the increase of relative humidity, when the air temperature was higher than suitable growth temperature. Four hybrid rice combinations of Wufengyou 623, Lingliangyou 611, Zhuliangyou 819, Zhuliangyou 312, and four conventionality rice of Xiangzaoxian 7, Jiayu 948, Zhongzao 35, Zhongzao 25 were showed more SSR and smaller reduced rate under high temperature stress, which could be used in rice production and breeding with heat tolerance.

**Key words:** Jiangxi early-season rice; heading and flowering stages; heat tolerance; evaluation

全球气候变暖已经成为不争的事实,来自深海沉淀物的分析、高原雪线监测、极地深层钻探、全球气候监测和模型模拟等众多领域的研究显示,20 世纪全球平均气温已经上升  $0.6^{\circ}\text{C}$ , 预计到本世纪末将上升  $1.4 \sim 5.8^{\circ}\text{C}$ ; 在全球平均气温上升的同时,极端性气候如夏季高温等也在全球许多区域更频繁地出现,且持续时间更长<sup>[1-3]</sup>。据江西省气象资料统计,南昌县 2011–2013 年期间 6、7、8 月的月平均气温分别为  $26.4^{\circ}\text{C}$ 、 $30.9^{\circ}\text{C}$  和  $30.1^{\circ}\text{C}$ , 比 2001–2010 年同期分别升高  $0^{\circ}\text{C}$ 、 $0.5^{\circ}\text{C}$  和  $1.0^{\circ}\text{C}$ ; 东乡县 2001–2010 年期间 6、7、8 月的月平均气温分别为  $26.3^{\circ}\text{C}$ 、 $30.2^{\circ}\text{C}$  和  $29.0^{\circ}\text{C}$ , 比 1991–2001 年同期分别升高  $0.4^{\circ}\text{C}$ 、 $0.4^{\circ}\text{C}$  和  $1.1^{\circ}\text{C}$ 。IRRI (International Rice Research Institute) 对近 26 年的温度升高与世界稻米产量的分析认为,平均温度每升高  $1^{\circ}\text{C}$ , 世界稻米产量将降低 10%<sup>[4]</sup>。2003 年 7 月下旬至 8 月上旬,我国南方稻区出现罕见的高温天气,部分稻区  $38^{\circ}\text{C}$  以上的高温天气持续了 20d,最高气温达  $41.3^{\circ}\text{C}$ 。此期正值中稻抽穗扬花期,造成水稻产量极大损失。据初步统计,湖北省中稻有 50 万  $\text{hm}^2$  结实率出现不同程度的下降,其中结实率在 30% 以下的达 7 万  $\text{hm}^2$  以上<sup>[5]</sup>。同期安徽省受灾面积达 33 万  $\text{hm}^2$  以上,涉及 10 多个市 30 多个重点县,损失产量在 10 亿 kg 以上<sup>[6]</sup>。未来气候对全球作物生产和粮食安全将形成巨大的潜在威胁,因此开展水稻耐热性评价研究是当务之急。

汤日圣等<sup>[7]</sup>研究表明,  $35^{\circ}\text{C}$  胁迫 1d, 供试品种的花粉活力、花粉萌发率和结实率均下降; 随着胁迫温度的升高和时间的延长, 供试品种花粉活力、花粉萌发率和结实率都急剧降低。高温阈值和持续时间因品种而异, 一般  $33 \sim 35^{\circ}\text{C}$  高温下持续 3d 就会造

成结实率的显著下降<sup>[8]</sup>。热害导致水稻不结实的关键时期是开花前 1d 及随后的 5d, 同时在灌浆期高温也导致千粒重明显下降<sup>[8-10]</sup>。郭晶心等<sup>[11]</sup>研究表明, 不同水稻品种对高温的敏感度明显不同, 黄华占在高温处理 4d 后的花粉萌发率达到 70% 以上, 在高温处理 7d 后小穗结实率仍保持 50% 左右。方先文等<sup>[12]</sup>对来源于不同国家和地区的 58 份水稻种质进行孕穗期耐热性鉴定评价表明, 种质间的耐热性存在显著差异, 认为 IRAT118 和冷水白具有较强的耐热性。申时全等<sup>[13]</sup>利用云南稻种核心种质研究明确了云南不同生态群间耐热性的差异, 其强弱依次为爪哇群 > 晚粳群 > 早中粳群 > 冬粳群 > 普通群 > 光亮群。江西是我国水稻生产中热害发生较严重的省份之一, 早稻抽穗扬花期和灌浆成熟期、中稻孕穗期和抽穗扬花期、晚稻秧苗返青期受高温影响较大。但至今对江西早稻生产上大面积推广种植品种抽穗扬花期耐热性鉴定评价研究报道较少。本研究针对当前在江西省水稻生产中广泛种植的粳型早稻品种为研究对象, 在高温胁迫条件下开展水稻耐热性的鉴定评价, 旨在为今后水稻耐热性育种和生产提供有效的科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

以 2012 年在江西省水稻生产上大面积推广种植的粳型早稻品种 37 份为试验材料, 其中杂交水稻组合 29 份、常规水稻品种 8 份。

### 1.2 方法

**1.2.1 播种期** 为了使不同生育期的试验材料能够在同时期抽穗, 并便于同时进行高温胁迫处理, 每次试验时, 各试验材料均采取分 3 期播种。2012 年

作中稻种植,试验材料分别于 5 月 10 日、5 月 15 日和 5 月 20 日播种;2013 年作早稻正季种植,试验材料分别于 3 月 20 日、3 月 25 日和 3 月 30 日播种。

**1.2.2 试验方法** 用塑料农膜制作高 2.5 m、占地面积 20 m<sup>2</sup>的人工温室,温室顶部封闭、四周封闭至离地面 20 cm。温室利用自然光增温,白天温室内的温度随温室外气温的变化而改变,一般比大田自然条件下高 3~5℃。晚上温室内的温度与自然条件基本相同。用自动温湿度记录仪每隔 30 min 记录一次温度和湿度。温室与大田自然条件的光照时数相同。

根据当地天气预报,在水稻始穗期选择连续 5 d 以上晴朗天气为高温胁迫处理期。在高温处理前 2 天的下午,选择预计 2 d 后即将见穗、且生长一致的植株装入钵钵,每盆栽 3 株,每份材料设 2 个重复,采取常规肥水管理。在常温下恢复生长 36 h 后,第 3 天早上移入温室进行高温处理,连续处理 5 d 后移到常温下,直至成熟。以田间自然条件下生长的各参试品种作为对照。种子成熟后,调查各个参试品

种的结实率。以对照结实率、高温胁迫处理结实率和结实率降低率为指标,对参试品种的耐热性进行综合评价。结实率降低率(%)=(对照结实率-处理结实率)/对照结实率×100。

## 2 结果与分析

### 2.1 自然条件与人工温室的气温和湿度比较

2012 年作中稻种植时,抽穗扬花期高温处理时间为 7 月 26~30 日。高温处理期间,温室内日平均最高气温为 40.4℃,比自然条件高 4.9℃;日平均最低气温与自然条件相同,均为 26.7℃;温室内和大田自然条件 14:00 时平均相对湿度分别为 45.0%和 67.0%,温室内湿度明显小于自然条件。2013 年作早稻种植时,抽穗扬花期处理时间为 6 月 16~20 日。高温处理期间,温室内日平均最高气温为 41.3℃,比大田自然条件高 4.5℃;日平均最低气温与自然条件相同,均为 28.0℃;温室和大田自然条件 14:00 时平均相对湿度分别为 38.9%和 81.4%(表 1),温室内的湿度明显小于自然条件。

表 1 大田自然条件与人工温室气温和湿度的比较

Table1 Comparison of the air temperature and humidity between natural condition and greenhouse experiments

年份 Year	日期 (月·日) Date	自然条件 Natural condition			高温胁迫 High temperature stress		
		最高气温(℃)	最低气温(℃)	14:00 时相对	最高气温(℃)	最低气温(℃)	14:00 时相对
		MAT	MIT	湿度(%)RH	MAT	MIT	湿度(%)RH
2012	7.26	35.2	27.5	58	40.6	27.5	50.4
	7.27	35.7	25.7	61	39.9	25.7	43.4
	7.28	34.4	25.9	71	39.4	25.9	54.1
	7.29	36.2	26.6	78	41.3	26.6	38.5
	7.30	35.9	27.9	67	40.6	27.9	38.6
	平均值 Mean	35.5	26.7	67.0	40.4	26.7	45.0
2013	6.16	36.1	26.4	68	41.1	26.4	41.6
	6.17	36.1	28.2	94	40.1	28.2	41.6
	6.18	37.2	29.1	92	41.4	29.1	37.7
	6.19	38.4	27.8	81	42.5	27.8	34.9
	6.20	36.3	28.6	72	41.5	28.6	38.5
	平均值 Mean	36.8	28.0	81.4	41.3	28.0	38.9

MAT:Maximum air temperature,MIT:Minimum air temperature,RH:Relative humidity

### 2.2 高温胁迫下杂交水稻组合结实率的表型差异

表 2 试验数据显示,2012 年作中稻种植时,在自然条件下(对照)29 个杂交水稻组合的结实率变幅为 67.3%~90.9%,而高温胁迫下结实率变幅为 27.4%~68.8%,结实率降低率变幅为 17.6%~

65.0%。2013 年作早稻种植时,29 个杂交水稻组合自然条件下结实率变幅为 69.6%~93.0%,高温胁迫下结实率变幅为 20.7%~56.3%,结实率降低率变幅为 30.2%~76.3%。统计分析表明(表 3),杂交水稻组合间在自然条件和高温胁迫下结实率及结

表 2 高温胁迫和自然条件下参试品种结实率的表型变异  
Table 2 Phynotypic variance of seed setting rates for rice varieties under natural and high temperature condition

品种类型 Variety type	品种名称 Variety name	2012 年结实率(%) Seed setting rate in 2012			2013 年结实率(%) Seed setting rate in 2013			2 年结实率平均值(%) Mean value of seeding setting rate for two years		
		自然	高温	降低率	自然	高温	降低率	自然	高温	降低率
		NC	HT	RD	NC	HT	RD	NC	HT	RD
杂交稻组合 Hybrid rices combination	五丰优 623	74.3	57.7	22.4	78.2	54.5	30.2	76.2	56.1	26.3
	先农 29 号	78.3	47.3	39.5	69.6	47.3	32.0	73.9	47.3	35.8
	优 I402	81.3	43.2	46.9	84.7	56.3	33.5	83.0	49.7	40.2
	陵两优 611	81.8	62.4	23.7	80.3	50.5	37.1	81.0	56.5	30.4
	株两优 819	79.8	65.7	17.6	80.5	50.0	37.8	80.1	57.9	27.7
	株两优 312	78.9	63.3	19.8	76.4	47.3	38.1	77.6	55.3	28.9
	株两优 1 号	80.2	58.2	27.4	81.7	48.8	40.2	80.9	53.5	33.8
	荣优 9 号	72.6	43.1	40.7	80.8	48.0	40.6	76.7	45.5	40.6
	株两优 505	84.8	58.5	31.1	84.0	49.6	41.0	84.4	54.0	36.0
	菲优 98	71.3	44.0	38.3	79.2	46.7	41.1	75.3	45.3	39.7
	优 I156	72.8	33.6	53.9	83.0	48.8	41.2	77.9	41.2	47.6
	株两优 16	83.7	58.6	29.9	85.6	48.2	43.7	84.6	53.4	36.8
	先农 25 号	67.3	43.9	34.8	81.1	44.9	44.6	74.2	44.4	39.7
	株两优 606	81.8	57.4	29.9	91.6	50.3	45.0	86.7	53.8	37.4
	淦鑫 206	68.7	40.5	41.1	78.5	41.4	47.2	73.6	41.0	44.1
	03 优 66	85.6	55.5	35.1	93.0	46.8	49.7	89.3	51.1	42.4
	陵两优 211	90.9	55.0	39.5	88.0	44.2	49.8	89.5	49.6	44.7
	株两优 02	83.5	68.8	17.6	83.5	39.8	52.4	83.5	54.3	35.0
	陵两优 104	76.9	56.4	26.6	91.6	43.1	53.0	84.3	49.7	39.8
	金优 1506	80.2	56.6	29.4	82.8	37.1	55.2	81.5	46.8	42.3
	金优 313	77.7	59.2	23.7	91.8	40.7	55.7	84.7	50.0	39.7
	两优 287	74.4	44.9	39.7	90.9	37.3	59.0	82.7	41.1	49.4
	优 I974	78.3	27.4	65.0	90.0	35.6	60.5	84.1	31.5	62.8
	金优 458	79.0	58.3	26.2	79.5	31.3	60.7	79.3	44.8	43.4
	株两优 4024	82.9	49.4	40.4	87.3	34.2	61.0	85.1	41.7	50.7
	先农 37	74.3	34.0	54.2	85.4	30.9	63.8	79.9	32.5	59.0
	株两优 09	81.0	58.8	27.4	82.1	29.6	64.0	81.5	44.2	45.7
	金优 899	80.6	55.4	31.3	83.6	26.7	68.0	82.1	41.1	49.7
	春光 1 号	67.8	31.9	53.0	87.4	20.7	76.3	77.6	26.3	64.7
常规水稻 品种 Conventional rices	变异范围(%)RV	67.3~90.9	27.4~68.8	17.6~65.0	69.6~93.0	20.7~56.3	30.2~76.3	73.6~89.5	26.3~57.9	26.3~64.7
	平均值(X±SD)	78.3±5.6	51.3±10.8	34.7±11.8	83.9±5.4	42.4±8.7	49.0±11.7	81.1±4.3	46.9±7.8	41.9±9.5
	嘉育 948	72.4	45.7	36.9	87.4	58.1	33.5	79.9	51.9	35.2
	中早 35	72.0	45.7	36.5	87.7	56.8	35.3	79.9	51.3	35.9
	湘早籼 7 号	80.5	62.4	22.5	90.1	51.7	42.6	85.3	57.0	32.6
	中嘉早 17 号	70.9	52.2	26.4	78.5	44.1	43.8	74.7	48.2	35.1
	中早 25	69.4	55.5	20.0	82.5	45.7	44.7	75.9	50.6	32.3
	嘉早 312	63.2	46.8	26.0	94.9	52.5	44.7	79.1	49.6	35.3
	嘉育 253	74.8	49.4	34.0	90.6	43.7	51.8	82.7	46.5	42.9
	中早 33	72.6	46.3	36.2	84.5	37.6	55.6	78.5	41.9	45.9
总体 Total	变异范围(%)RV	63.2~80.5	45.7~62.4	20.0~36.9	78.5~94.9	37.6~58.1	33.5~55.6	74.7~85.3	41.9~57.0	32.3~45.9
	平均值 X±SD	72.0±4.9	50.5±6.0	29.8±6.9	87.0±5.1	48.8±7.1	44.0±7.4	79.5±3.4	49.6±4.4	36.9±4.9
	变异范围(%)RV	63.2~90.9	27.4~68.8	17.6~65.0	69.6~94.9	20.7~58.1	30.2~76.3	73.6~89.5	26.3~57.9	26.3~64.7
Total	平均值 X±SD	76.9±6.0	51.2±9.9	33.6±11.0	84.5±5.4	43.8±8.7	48.0±11.0	80.7±4.2	47.5±7.2	40.8±8.9

NC; Natural condition, HT; High temperature condition, RD; Reduced rate, RV; The range of variation

表 3 参试品种间结实率的方差分析

Table 3 Variance analysis for seed setting rates of rice varieties

类型		变异来源	自由度	平方和	MS 值	F 值	$F_{0.05}$	$F_{0.01}$
Variety type		Variance source	df	SS				
杂交稻组合 Hybrid rice combination	自然条件 Natural condition	年度内品种间	28	1051.8	37.6	1.7	1.9	2.4
		年度间	1	449.1	449.1	19.8 **	4.2	7.6
		误差	28	633.5	22.6			
	高温处理 High temperature stress	年度内品种间	28	3423.2	122.3	1.8	1.9	2.4
		年度间	1	1151.2	1151.2	17.2 **	4.2	7.6
		误差	28	1871.5	66.8			
	结实率降低率 Seed setting reduce rate	年度内品种间	28	4997.7	178.5	1.8	1.9	2.4
		年度间	1	2988.0	2988.0	30.6 **	4.2	7.6
		误差	28	2735.8	97.7			
常规水稻品种 Conventional rice	自然条件 Natural condition	年度内品种间	7	161.8	23.1	0.9	3.8	7.0
		年度间	1	906.0	906.0	33.5 **	5.6	12.3
		误差	7	189.2	27.0			
	高温处理 High temperature stress	年度内品种间	7	268.9	38.4	0.8	3.8	7.0
		年度间	1	11.9	11.9	0.2	5.6	12.3
		误差	7	335.0	47.9			
	结实率降低率 Seed setting reduce rate	年度内品种间	7	332.4	47.5	0.9	3.8	7.0
		年度间	1	805.2	805.2	14.8 **	5.6	12.3
		误差	7	381.1	54.4			
总体 Total	自然条件 Natural condition	年度内品种间	36	1245.0	34.6	1.1	1.7	2.2
		年度间	1	1073.1	1073.1	35.0 **	4.1	7.4
		误差	36	1104.1	30.7			
	高温处理 High temperature stress	年度内品种间	36	3786.8	105.2	1.5	1.7	2.2
		年度间	1	1001.3	1001.3	14.6 **	4.1	7.4
		误差	36	2468.3	68.6			
	结实率降低率 Seed setting reduce rate	年度内品种间	36	5639.2	156.6	1.8 *	1.7	2.2
		年度间	1	3793.1	3793.1	43.8 **	4.1	7.4
		误差	36	3117.06	86.6			

\* 表示 0.05 水平上差异显著; \*\* 表示 0.01 水平上差异显著

\* means the significant difference at 0.05 level, \*\* means the significant difference at 0.01 level

实率降低率的  $F$  值为 1.7 ~ 1.8, 均接近显著水平 ( $F_{0.05} = 1.9$ ), 说明杂交水稻组合间耐热性存在一定的差异。

从 2 年参试材料高温胁迫下结实率及其降低率的鉴定结果 (表 2) 可以看出, 五丰优 623、陵两优 611、株两优 819、株两优 312 等 4 个杂交水稻组合的结实率较高, 结实率降低率相对较小。在高温胁迫下其 2 年结实率的平均值分别为 56.1%、56.5%、57.9% 和 55.3%, 2 年结实率降低率平均值分别为 26.3%、30.4%、27.7% 和 28.9%。认为这些种质

对高温的反应比较迟钝, 耐热性较强, 可作为耐高温水稻品种在水稻生产和育种中加以利用。株两优 02、株两优 505、株两优 606、株两优 1 号、株两优 16、03 优 66 和金优 313 等 7 个杂交水稻组合在高温胁迫下结实率的 2 年平均值表现相对较高, 分别为 54.3%、54.0%、53.8%、53.5%、53.4%、51.1% 和 50.0%, 但这些杂交水稻组合的结实率降低率 2 年平均值也相对较高, 变异在 35.0% ~ 42.4%, 说明这些材料对高温的反应相对较敏感。其余杂交水稻组合在高温胁迫下结实率 2 年平均值变异在



26.3%~49.7%,且结实率降低率变异在35.8%~64.7%,表现为较弱的耐热性。

### 2.3 高温胁迫下常规水稻品种结实率的表型差异

表2试验数据显示,2012年作中稻种植时,在自然条件下8个常规水稻品种结实率的变幅为63.2%~80.5%,高温胁迫下结实率变幅为45.7%~62.4%,结实率降低率变幅为20.0%~36.9%。2013年作早稻种植时,在自然条件下8个常规水稻品种结实率变幅为78.5%~94.9%,高温胁迫下结实率变幅为37.6%~58.1%,结实率降低率变幅33.5%~55.6%。统计分析表明(表3),常规水稻品种间在自然条件和高温胁迫下结实率及结实率降低率的 $F$ 值为0.8~0.9,差异不显著( $F_{0.05}=3.8$ ),说明常规水稻品种间耐热性的差异较小。

2年参试材料高温胁迫下结实率及其降低率的鉴定结果表明(表2),湘早籼7号、嘉育948、中早35、中早25等4个品种结实率2年平均值为57.0%、51.9%、51.3%和50.6%,结实率降低率2年平均值分别为32.6%、35.2%、35.9%和32.3%,表现为相对较高的耐热性,认为在水稻生产和育种中可作为耐高温常规水稻品种加以利用。而其余4个品种高温胁迫下结实率2年平均值变异在41.9%~49.6%,结实率降低率2年平均值变异在35.1%~45.9%,表现为较弱的耐热性。

### 2.4 杂交水稻与常规水稻耐热性差异

在自然条件下,2013年杂交水稻平均结实率比2012年增加5.6%,常规水稻的平均结实率比2012年增加15.0%。从气温条件来看,2013年自然条件下平均最高气温为36.8℃,比2012年高1.3℃,2013年自然条件下的高温胁迫强度高于2012年,但2013年杂交水稻和常规水稻的结实率反而高于2012年,这说明水稻品种的耐热性可能受到其他条件的影响。本试验湿度记录表明,2013年自然条件下平均相对湿度为81.4%,比2012年高14.4%,说明在气温高于生育适宜温度的情况下,相对湿度的增加有助于增强水稻品种的耐热性,以提高结实率。从结实率的年度间变化看,常规水稻结实率的增加幅度明显大于杂交水稻,说明常规水稻对湿度的反应较敏感,对温度的反应较迟钝。

在高温胁迫处理下,2013年杂交水稻平均结实率比2012年降低8.9%,而常规水稻平均结实率仅降低1.7%,常规水稻平均结实率的降低幅度明显低于杂交水稻。2013年高温胁迫平均最高气温为41.3℃,比2012年高0.9℃,2013年的高温胁迫强

度高于2012年,统计分析表明(表3),杂交水稻组合年度间自然条件和高温胁迫下结实率及结实率降低率的 $F$ 值分别为19.8、17.2和30.6,均达到极显著水平( $F_{0.01}=7.6$ );常规水稻品种年度间自然条件下的结实率及结实率降低率的 $F$ 值分别为33.5和14.8,均达到极显著水平( $F_{0.01}=12.3$ ),而在高温胁迫下的结实率的 $F$ 值为0.2,差异不显著。

以上分析表明,高温胁迫对水稻品种的结实率影响较大,杂交水稻组合和常规水稻品种年度间的结实率降低率均达到极显著水平;在极端高温条件下,杂交水稻组合结实率年度间差异极显著,而常规水稻品种年度间差异不显著。综上所述,常规水稻对高温的反应较迟钝,杂交水稻对高温的反应较敏感,常规水稻的耐热性强于杂交水稻。

## 3 讨论

### 3.1 温度和相对湿度对水稻结实率的影响

水稻孕穗至抽穗扬花期最适温度为25~30℃,如遇日均温度高于32℃,日最高温度高于35℃时,将造成水稻花器官发育不全,花粉发育不良、活力下降,花药不开裂及花粉萌发困难,从而造成结实率下降。任义方等<sup>[14]</sup>研究认为,日相对湿度 $\leq 70\%$ 的日数对水稻千粒重影响最为直接,且影响程度最大,日最高温度 $\geq 35^\circ\text{C}$ 的日数主要起间接作用。田小海等<sup>[15]</sup>分析表明,我国江汉平原水稻发生高温危害时,一方面伴随着相对湿度的降低,一般降低15%~20%;另一方面还伴随着夜温的升高,往往升到接近30℃。王尚明等<sup>[16]</sup>研究表明,日平均湿度为58.2%~90.4%范围内、日最低湿度为38.6%~82.6%范围内,湿度对水稻的灌浆速度没有显著影响;灌浆期气温的升高对水稻灌浆速度的增加有显著影响;孕穗期至抽穗开花期日最高温度 $\geq 30^\circ\text{C}$ 的日数对水稻结实率的影响极显著。因此,在研究高温胁迫对水稻结实率和稻米品质的影响时应同时考虑相对湿度这一重要因素。

本研究表明,在自然条件和高温胁迫下2年参试品种的平均结实率分别为80.7%和47.5%,高温胁迫下参试品种的结实率比自然条件降低了33.2%,说明高温对水稻品种的结实率影响很大。2013年自然条件下最高气温(36.8℃)比2012年高1.3℃的情况下,杂交水稻和常规水稻的平均结实率分别比2012年高5.6%、15.0%,说明除高温之外还有其他条件会影响结实率。本试验湿度记录结果表明,2013年自然条件下相对湿度明显高于2012

年,说明在气温高于生育适宜温度的情况下,相对湿度的增加有助于增强水稻品种的耐热性。2013 年高温胁迫处理平均最高气温(41.3℃)比 2012 年高 0.9℃、相对湿度(38.9%)比 2012 年低 6.1% 的情况下,2013 年杂交水稻和常规水稻平均结实率分别为 42.4% 和 48.8%,比 2012 年分别降低 8.9% 和 1.7%,说明最高气温的增加导致了结实率的降低。分析认为,在日平均气温高于 32℃,日最高温度低于 38℃ 的情况下,相对湿度较高时,水稻开花时间会比正常情况提前 30~60min,开花早且集中,避开了中午前后高温时段对水稻结实率的影响。在日平均气温高于 32℃,日最高温度高于 38℃ 的情况下,相对湿度较高时,虽然水稻开花时间会比正常情况提前 60~90 min,但中午前后的极端高温造成花粉活力下降、花粉不萌发,从而使水稻的结实率急剧下降。

### 3.2 水稻品种间耐热性差异

池忠志等<sup>[17]</sup>研究表明,不同杂交水稻品种的结实率对温度的响应不同,Ⅱ优 7 号和 D 优 527 在开花期处于日均温度 35℃ 的短期高温环境下依然可以保持较高的结实率,而Ⅱ优 802 开花期所处环境的日均温度超过 30℃,其结实率就迅速下降。穰中文等<sup>[18]</sup>研究表明,高温胁迫下水稻感热品种 Moroberekan 花药开裂显著受阻,柱头上萌发的花粉数显著减少;花粉萌发数与花药开裂状况呈极显著的相关关系,进而表现出主穗结实率与柱头上花粉萌发数呈显著的相关关系;主穗结实率在高温下呈递减趋势,且 Moroberekan 的下降速率较 N22 显著加快,表明耐热品种在高温胁迫下对结实率存在累积效应,而且高温胁迫效应发生在开花授粉之前。T. Matsui 等<sup>[19]</sup>研究表明,水稻耐热品种与敏热品种对高温的反应差异较大,致害温度在籼稻品种间约有 5℃ 的差异,粳稻品种间约有 3℃ 的差异。徐云碧等<sup>[20]</sup>研究表明,抽穗后 3 d 平均最高温度 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 可作为早籼稻品种热害的临界温度。

本研究关于杂交水稻组合间和常规水稻品种间在自然条件下结实率、高温胁迫下结实率和结实率降低率方差分析结果表明,杂交水稻组合间的耐热性存在较大的差异,而常规水稻品种间的耐热性差异较小。在自然条件下杂交水稻组合的结实率高于常规水稻品种,而在高温胁迫下常规水稻品种的结

实率高于杂交水稻组合,常规水稻品种的耐热性强于杂交水稻组合。对 37 份杂交水稻组合或常规水稻品种进行耐热性鉴定结果表明,五丰优 623、陵两优 611、株两优 819、株两优 312 等 4 个杂交水稻组合和湘早籼 7 号、嘉育 948、中早 35、中早 25 等 4 个常规稻品种在高温胁迫下表现为较高的结实率和结实率降低率,认为可作为耐高温水稻品种在水稻生产和育种中加以利用。

### 参考文献

- [1] Houghton J T, Meira L G, Bruce J, et al. Climate change 1994-radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios[M]. Cambridge UK: Cambridge university, 1995: 1-49
- [2] IPCC. Climate change 2001-the scientific basis[M]. Cambridge UK: Cambridge university, 2001: 101-125
- [3] 张桂莲, 陈立云, 雷东阳, 等. 水稻耐热性研究进展[J]. 杂交水稻, 2005, 20(1): 1-5
- [4] 蒋开锋. 水稻产量和品质性状的遗传与相关研究、耐热 QTL 定位及直链淀粉含量分子标记辅助选择[D]. 成都: 四川农业大学, 2007: 18-20
- [5] 夏明元, 戚华雄. 高温热害对四个不育系配制的杂交组合结实率的影响[J]. 湖北农业科学, 2004(2): 21-22
- [6] 杨惠成, 黄仲青, 蒋之坝, 等. 2003 年安徽早中稻花期热害及防御技术[J]. 安徽农业科学, 2003, 32(1): 3-4
- [7] 汤日圣, 郑建初, 张大栋, 等. 高温对不同水稻品种花粉活力及籽粒结实的影响[J]. 江苏农业学报, 2006, 22(4): 369-373
- [8] 唐永红, 张篙午, 高如篙, 等. 温度对稻米品质的时段效应分析[J]. 中国农业气象, 1997, 18(1): 9-12
- [9] 程方民, 胡东维, 丁元树. 人工控温条件下稻米垩白形成变化及胚乳扫描结构观察[J]. 中国水稻科学, 2000, 14(2): 83-87
- [10] 盛婧, 陶红娟, 陈留根. 灌浆结实期不同时段温度对水稻结实与稻米品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(4): 396-402
- [11] 郭晶心, 曾文智, 周宝津, 等. 开花期高温胁迫对不同水稻品种花粉萌发和结实的影响[J]. 华南农业大学学报, 2010, 4(2): 50-53
- [12] 方先文, 汤陵华, 王艳平. 水稻孕穗期耐热种质资源的初步筛选[J]. 植物遗传资源学报, 2006, 7(3): 342-344
- [13] 申时全, 曾亚文, 李自超, 等. 云南稻种核心种质不同生态群间分蘖初期耐热性鉴定[J]. 植物遗传资源科学, 2001, 2(1): 28-21
- [14] 任义方, 高苹, 王春乙. 江苏高温热害对水稻的影响及成因分析[J]. 自然灾害学报, 2010, 10(5): 101-107
- [15] 田小海, 松井勤, 李守华, 等. 水稻花期高温胁迫研究进展与展望[J]. 应用生态学, 2007, 18(11): 2632-2636
- [16] 王尚明, 胡逢喜, 张崇华, 等. 空气温湿度对水稻灌浆及空壳率的影响研究[J]. 中国农学通报, 2006, 9(22): 158-162
- [17] 池忠志, 姜心禄, 郑家国. 杂交水稻结实率的高温响应研究初报[J]. 西南农业学报, 2008, 21(1): 235-237
- [18] 穰中文, 周清明. 耐热水稻品种 Nagina 22 高温胁迫下的生理响应[J]. 植物遗传资源学报, 2012, 13(6): 1045-1049
- [19] Matsui T, Omasa K, Horie T. The difference in sterility due to high temperature during the flowering period among japonica rice varieties[J]. Plant Prod Sci, 2001, 4: 90-93
- [20] 徐云碧, 石春海, 申宗坦. 热害对早稻结实率的影响[J]. 浙江农业科学, 1989(2): 14-18