

中国常用水稻保持系及恢复系开花灌浆期耐热性评价

符冠富[#] 宋 健[#] 廖西元 章秀福 熊 杰 王 熹 乐明凯 陶龙兴^{*}

(中国水稻研究所 水稻生物学国家重点实验室, 浙江 杭州 310006; [#]共同第一作者; ^{*}通讯联系人, E-mail: lxtao@mail.hz.zj.cn)

Thermal Resistance of Common Rice Maintainer and Restorer Lines to High Temperature Stress During Flowering and Early Grain Filling Stages

FU Guan-fu[#], SONG Jian[#], LIAO Xi-yuan, ZHANG Xiu-fu, XIONG Jie, WANG Xi, LE Ming-kai, TAO Long-xing^{*}

(National Key Laboratory of Rice Biology, China National Rice Research Institute, Hangzhou 310006, China; [#] These authors contributed equally to this paper; ^{*} Corresponding author, E-mail: lxtao@mail.hz.zj.cn)

FU Guanfu, SONG Jian, LIAO Xiyuan, et al. Thermal resistance of common rice maintainer and restorer lines to high temperature stress during flowering and early grain filling stages. *Chin J Rice Sci*, 2011, 25(5): 495-500.

Abstract: Fifteen common rice maintainer lines and 26 high-yielding restorer lines were used to evaluate their thermal resistance and fertility during flowering and early grain filling stages. The rice plants were subjected to high temperature stress at 39-43 °C for 1-15 d from main stem flowering. Based on the high temperature stress index, they were divided into thermal resistant lines, semi-thermal resistant lines, semi-thermal sensitive lines and thermal sensitive lines. Therefore, the maintainer lines K22B, Bobai B and V20B belonged to thermal resistant lines, whereas II-32B, Zhongzhe B and Zhong 9B to thermal sensitive lines. The rice restorer line Minghui 63 had the highest thermal resistance, followed by R207, P929, and the lowest thermal-resistant P62-2-2, R8006 and P51. The correlation analysis indicated that the high temperature stress index was not significantly correlated with seed-setting rate, abortive grain rate, unfilled grain rate under natural conditions, but significantly correlated with seed-setting rate and unfilled grain rate under high temperature stress. This indicated that high temperature stress occurred during flowering-early grain filling stage mainly decreased the seed setting rate and significantly increased the unfilled grain rate in both rice maintainer and restorer lines.

Key words: rice; maintainer line; restorer line; high temperature stress; fertility

符冠富, 宋 健, 廖西元, 等. 中国常用水稻保持系及恢复系开花灌浆期耐热性评价. 中国水稻科学, 2011, 25(5): 495-500.

摘 要: 以我国常用的 15 个水稻保持系和 26 个丰产性较好的恢复系为材料, 于主茎见穗当天起连续 15 d 进行高温胁迫处理(9:00-15:00, 39~43 °C), 研究花期高温胁迫对水稻保持系和恢复系结实特性的影响。结果表明, 根据高温胁迫指数, 可把水稻品种分为热钝感型、耐热型、不耐热型和热敏感型等 4 个类型。其中, 水稻保持系 K22B、博白 B 和 V20B 为热钝感型材料, II-32B、中浙 B 和中 9B 为热敏感型材料; 水稻恢复系明恢 63 耐热性最强, 其次为 R207 和 P929, P62-2-2、R8006 和 P51 等耐热性最弱。进一步分析表明, 高温胁迫指数与水稻在自然条件下结实率、空壳率和秕谷率之间相关不显著, 但与胁迫环境下结实率和空壳率的相关性均达极显著水平。花期高温胁迫致使水稻保持系和恢复系结实率下降, 空壳率大幅度上升。

关键词: 水稻; 保持系; 恢复系; 高温胁迫; 育性分析

中图分类号: Q945.78; S511.01

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2011)05-0495-06

近年来, 由于温室效应的影响, 全球气温出现逐渐上升的趋势。据预测, 到 2100 年, 全球大气温度将上升 1.5~11.0 °C^[1]。与此同时, 水稻花期高温热害的发生呈现日益加剧的态势。我国长江流域是水稻花期高温热害的重灾区, 发生频率和受害程度都较高。以 2003 年为例, 当年在我国长江流域稻区水稻开花结实期出现的 38 °C 以上天气, 持续 20 余天, 最高气温达 40 °C 以上, 该地区当年水稻减产 30%~40%^[2-3]。据报道, 2003 年武汉市发生中稻特大高温危害时, 空壳率达 44% 以上的 7 个品种全为杂交稻, 而同期受害的常规水稻品种空壳率多在 30%~40%^[4]。同年江苏省多个杂交稻组合结实率

低于 60%, 处于高温下抽穗的 10 份杂交 F₁ 材料的结实率平均仅为 37%, 比正常条件下降低约 51 个百分点^[5]。由此看来, 水稻耐热性存在明显的品种间差异, 常规稻要比杂交组合耐热。然而, 杂交稻在我国水稻生产中的种植面积已达 60% 以上, 其耐热性对我国粮食安全影响重大。培育高产耐热水稻杂交组合是应对花期高温热害最为重要的对策。

笔者就浙江省“8812”育种项目获得的一批高

收稿日期: 2011-01-12; **修改稿收到日期:** 2011-03-30。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30871473, 31101116); 农业部农业结构调整重大技术研究专项(06-03-01B); 浙江省重点项目(2008C22073); 浙江省三农五方项目(SN200806)。

产、优质新组合进行了花期耐热性测评,筛选出国稻 6 号、国稻 1 号等耐热组合。这些组合遇高温胁迫时结实性相对稳定,尤其是小穗育性稳定^[2]。水稻保持系和恢复系是水稻育种的重要材料,筛选耐热性育种材料是培育具有耐热性杂交组合的关键。然而,水稻保持系及恢复系的耐热性研究目前还少有报道。本研究对我国一批常用的水稻保持系和丰产性较好的恢复系进行开花灌浆期耐热性测评及育性分析,旨在为选育耐热性杂交组合提供相关素材。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料包括我国常用水稻保持系 15 个,分别为春优 B、II-32B、中优 B、优 1B、中 9B(中国水稻研究所)、内香 85B、内香 II B(四川内江农业科学研究所)、902B(IR69902,国际水稻研究所)、K22B(四川省农业科学院)、菲改 B(四川省内江杂交水稻科技开发中心)、博白 B(广西博白县农业科学研究所)、珍汕 97B(浙江省温州市农业科学研究所)、协青早 B(安徽省广德县农业科学研究所)、金 23B(湖南省常德市农业科学研究所)、V20B(湖南省贺家山原种场);丰产性较好的水稻恢复系 26 个,分别为明恢 63、中恢 928、川农 527、明恢 86、R207、9308、P1、P3、P32、P38、P51、P53、P426、P62-2-2、P929、G97、L100、L110、制 4、明恢 725、天恢 988、密阳 46、R88、R8006、R9331 和 R527,均由中国水稻研究所育种组提供。

1.2 试验方法

盆栽试验所用盆半径 15 cm,高 30 cm。2009 年 5 月 25 日于中国水稻研究所网室内点(穴)直播。直播前用浸种灵(10%二硫氰基甲烷乳油)浸种 48 h,清洗后在 30 ℃下催芽,播种芽谷,每盆 20~25 粒,分次间苗至每盆 3 株。盆栽用土为稻田黏壤土,经晒干粉碎过筛后每盆定量装 15 kg,按 $m_{\text{土}}:m_{\text{肥}}=1\ 000:1$ 施入市售豆饼肥作基肥。为防止稻株徒长倒伏,全生育期不再施肥,手工除草并按需防病治虫。

水稻播种至抽穗前,盆栽种植于网室。网室顶棚采用透明塑料薄膜覆盖,四周通风。水稻主茎见穗当天搬至控温室(控温系统为中国水稻研究所和杭州兴新技术开发有限公司共同开发)进行高温胁迫处理,9:00—15:00 温度控制在 39~43 ℃,15:00 以后与大气环境一致,相对湿度在 70%左右,自然光照,连续处理 15 d。高温胁迫处理结束后,搬回网

室,直至成熟。对照处理在网室中盆栽种植,直至成熟收获。期间的大气平均温度为 28.84 ℃,相对湿度 70.5%,光照强度 5.51 klx。水稻成熟后,取样考种,测定项目为每穗粒数、结实率、空壳率、秕谷率及千粒重。

1.3 数据处理与统计分析

根据结实率计算高温胁迫指数,即高温胁迫指数(high temperature stress index)=(对照结实率-高温胁迫条件下结实率)/对照结实率,其中对照结实率为未进行高温处理的结实率,高温胁迫条件下结实率为高温处理后的结实率。数据均采用 SPSS 11.5 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 花期高温胁迫对水稻保持系结实的影响

由表 1 可知,花期高温胁迫显著降低水稻保持系的结实率,平均降幅约 57.01%,其中以中 9B 和中浙 B 降幅最大,K22B 和博白 B 最低,降幅依次为 89.90%、78.77%、19.84% 和 27.05%。高温胁迫显著增加水稻保持系空壳率,平均增幅为 175.21%,其中,优 I B 和中 9B 增幅最大,而春优 B 和菲改 B 最小,但也都显著高于对照。无一例外,各保持系的千粒重均因花期高温胁迫而显著下降,但降幅因材料而异,II-32B 和内香 II B 降幅最大,而博白 B 和协青早 B 最小,处理间的差异均不显著。以高温胁迫指数为指标,将水稻耐热性分成 4 类,第一类为钝感型,结实率降幅不超过 20%,如 K22B;第二类为耐热型,结实率降幅在 20%~50%,如菲改 B、博白 B、优 I B 和 V20B;第三类为不耐热型,结实率降幅在 51%~80%;第四类为热敏感型,结实率降幅在 80%以上,如中 9B。

2.2 花期高温胁迫对水稻恢复系结实特性的影响

从表 2 中可看出,供试恢复系的结实率受花期高温胁迫影响较大,有 19 个恢复系结实率的降幅超过 90%,P51 的结实率甚至为零。明恢 63 与 R207 结实率的降幅仅为 47.87% 和 53.59%,表现出较强的花期耐热性。供试恢复系的空壳率均因花期高温胁迫而大幅度上升,平均增幅达 435.84%,其中 P51 和 P62-2-2 的增幅最大,分别为 948.55% 和 1095.97%,其次为 R207 的 150.88%,而 P1 仅有 25.81%。水稻恢复系的千粒重同样也因花期高温胁迫而下降,但降幅存在品种间差异。和对照相比,高温胁迫致使千粒重平均下降 43.04%,半数以上供试恢复系千粒重的降幅为 30%~50%,最低仅

表 1 开花结实期高温胁迫对水稻保持系结实的影响

Table 1. Effects of high temperature stress on the seed setting traits of 15 rice maintainer lines during flowering to early grain filling stage.

保持系 Maintainer line	结实率		空壳率		千粒重		高温胁迫指数 Heat stress index
	Seed-setting rate / %		Abortive grain rate / %		1000-grain weight / g		
	对照 CK	高温胁迫 HS	对照 CK	高温胁迫 HS	对照 CK	高温胁迫 HS	
春优 B Chunyou B	57.69 a	20.23 b	35.43 a	61.71 b	23.31 a	18.53 b	0.6493
内香 85B Neixiang 85B	68.51 a	19.18 b	21.58 a	70.17 b	28.51 a	17.19 b	0.7200
902B	54.98 a	18.37 b	33.58 a	73.38 b	24.69 a	17.36 b	0.6659
Ⅱ-32B	62.50 a	14.98 b	28.22 a	74.15 b	24.05 a	13.40 b	0.7603
内香 Ⅱ B Neixiang Ⅱ B	44.87 a	10.93 b	38.86 a	74.85 b	31.76 a	19.31 b	0.7564
中浙 B Zhongzhe B	49.67 a	10.55 b	35.34 a	80.02 b	20.00 a	15.16 b	0.7877
K22B	53.30 a	42.73 b	29.69 a	47.62 b	26.62 a	19.91 b	0.1984
菲改 B Feigai B	65.61 a	35.67 b	22.36 a	53.32 b	26.07 a	16.47 b	0.4562
博白 B Bobai B	77.40 a	56.46 b	13.34 a	35.38 b	19.41 a	17.43 a	0.2705
珍汕 97B Zhenshan 97B	64.29 a	29.04 b	25.89 a	62.81 b	27.46 a	20.17 b	0.5483
协青早 B Xieqingzao B	72.16 a	33.13 b	17.77 a	58.25 b	26.77 a	23.81 a	0.5408
金 23B Jin 23B	66.55 a	33.17 b	23.76 a	52.91 b	24.17 a	16.76 b	0.5016
优 I B You I B	77.64 a	45.47 b	10.80 a	47.26 b	22.81 a	17.15 b	0.4144
中 9B Zhong 9B	73.60 a	7.43 b	17.39 a	79.97 b	22.64 a	14.46 b	0.8990
V20B	78.05 a	48.21 b	11.49 a	42.94 b	23.45 a	16.50 b	0.3823

同一性状对照与高温处理数据后跟不同字母者表示差异达 0.05 显著水平。下表同。

For the same trait, data followed by different lowercase letters under CK and HS are significantly different at the 0.05 probability level. HS, High temperature stress. The same as in the tables below.

表 2 开花结实期高温胁迫对水稻恢复系结实特性的影响

Table 2. Effects of high temperature stress on the seed setting traits of rice restorer lines at the flowering stage.

恢复系 Restorer line	结实率		空壳率		千粒重		高温胁迫指数 Heat stress index
	Seed setting rate / %		Abortive grain rate / %		1000-grain weight / g		
	对照 CK	高温胁迫 HS	对照 CK	高温胁迫 HS	对照 CK	高温胁迫 HS	
明恢 63 Minghui 63	76.23 a	39.76 b	20.51 a	55.10 b	29.58 a	20.76 b	0.4784
中恢 928 Zhonghui 928	89.22 a	2.81 b	9.43 a	85.64 b	27.75 a	14.05 b	0.9685
川农 527 Chuannong 527	90.57 a	0.38 b	7.14 a	73.43 b	32.62 a	13.08 b	0.9958
明恢 86 Minghui 86	55.17 a	3.84 b	33.58 a	84.88 b	30.58 a	13.01 b	0.9303
R207	72.87 a	33.82 b	23.21 a	58.23 b	23.74 a	9.79 b	0.5359
9308	66.86 a	0.32 b	30.73 a	88.07 b	21.45 a	11.82 b	0.9953
P1	32.48 a	8.18 b	60.09 a	75.60 b	27.29 a	16.33 b	0.7482
P3	79.12 a	16.27 b	17.49 a	63.70 b	23.93 a	12.46 b	0.7944
P32	72.71 a	22.88 b	25.00 a	65.88 b	31.85 a	21.70 b	0.6853
P38	70.22 a	0.64 b	23.50 a	71.81 b	27.10 a	9.66 b	0.9909
P51	90.84 a	0.00 b	7.60 a	79.69 b	26.45 a	0.00 b	1.0000
P53	91.15 a	6.54 b	7.76 a	73.27 b	20.16 a	18.99 a	0.9282
P426	83.11 a	0.32 b	13.68 a	82.57 b	22.64 a	19.29 b	0.9962
P62-2-2	92.16 a	0.33 b	6.21 a	74.27 b	19.58 a	12.31 b	0.9965
P929	88.37 a	26.60 b	9.80 a	66.90 b	28.80 a	2.68 b	0.6990
G97	90.37 a	3.61 b	7.57 a	63.61 b	21.86 a	14.90 b	0.9601
L100	88.99 a	1.43 b	9.21 a	73.27 b	19.14 a	10.00 b	0.9839
L110	89.17 a	0.87 b	8.92 a	76.82 b	26.08 a	12.92 b	0.9903
制 4 Zhi 4	69.44 a	11.90 b	27.37 a	65.87 b	29.75 a	18.99 b	0.8286
明恢 725 Minghui 725	79.21 a	5.20 b	18.08 a	78.48 b	19.72 a	11.39 b	0.9344
天恢 988 Tianhui 988	88.44 a	1.89 b	10.15 a	78.77 b	32.21 a	21.48 b	0.9786
密阳 46 Milyang 46	78.77 a	5.82 b	19.28 a	74.76 b	28.21 a	16.24 b	0.9261
R88	62.74 a	1.56 b	32.13 a	81.20 b	33.30 a	20.00 b	0.9751
R8006	65.24 a	0.23 b	30.47 a	79.58 b	27.71 a	23.33 b	0.9965
R9331	64.77 a	0.53 b	30.32 a	81.54 b	28.83 a	14.00 b	0.9918
R527	73.47 a	3.56 b	23.47 a	66.62 b	27.10 a	15.94 b	0.9516

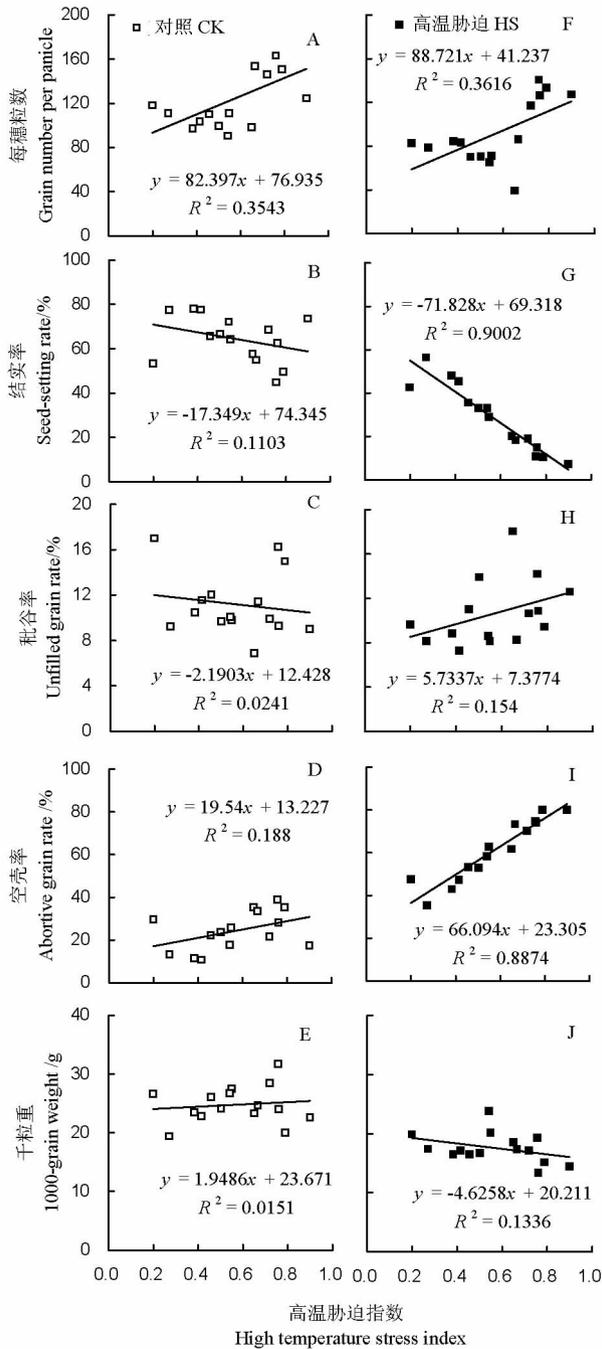


图1 花期高温胁迫指数与保持系结实性状的关系
Fig. 1. Correlations between the heat stress index and the seed-setting traits of rice maintainer lines.

5.80%(P53)。根据其高温胁迫指数,同样将供试恢复系分为4类,第一类为热钝感型,其结实率的降幅不超过20%;第二类为耐热型,结实率在21%~50%,如明恢63;第三类为不耐热型,结实率降幅在51%~80%,如R207、P1、P3、P32和P929;第四类为热敏感型,结实率降幅超过80%,有20个。

2.3 保持系花期高温胁迫与结实性状的关系

从图1可以看出,在对照处理下(图1-A~E),水稻保持系高温胁迫指数与结实率、秕谷率、空壳率和千粒重之间相关均不显著,但与每穗粒数呈显著正相关($r=0.595^*$);在高温胁迫处理下(图1-F~J),水稻保持系高温胁迫指数与每穗粒数、结实率和空壳率的相关达显著水平,相关系数分别为0.601、-0.949和0.942,而与秕谷率和千粒重之间相关不显著。

2.4 恢复系花期高温胁迫与结实特性的关系

如图2所示,在对照处理下,恢复系高温胁迫指数与每穗粒数、结实率、空壳率、秕谷率和千粒重之间均没有显著相关性(图2-A~E),但与高温胁迫下的结实率、秕谷率和空壳率之间的相关性均达极显著水平,相关系数分别为-0.978、0.741和0.636(图2-G、H和I)。此外,高温胁迫下高温胁迫指数与每穗粒数、千粒重相关不显著(图2-F、I)。

3 讨论

水稻花期高温热害指水稻在抽穗前后一段时期内遭遇35℃以上高温,引起花器官发育不良和授粉行为障碍,导致结实率严重下降而造成水稻大幅度减产的一种灾害现象^[6]。有学者认为,水稻花期35℃高温,连续3~5d,可影响水稻产量的形成^[7]。但也有学者认为,高温38℃以上,连续15d以上,才能真正造成水稻高温热害^[2]。对于极值高温及持续时间对水稻的伤害历来争议较大,这可能与水稻品种和高温发生的时期不同有关。我国长江中下游稻区,7~8月份,连续3~5d平均气温 $\geq 30^{\circ}\text{C}$ 或最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 的天气出现的频率较高,每年都有关于水稻因高温热害导致减产的报道^[8],但减产程度较低,或者仅局限于某些水稻品种。而1971年和2003年长江中下游稻区发生的连续15d以上,极值高温超过40℃或平均温度达38℃的高温天气,造成水稻大面积减产,甚至绝收^[4-5, 9-11]。本研究设计的39~43℃高温,花期高温胁迫15d,使水稻材料均处于“严酷”的高温胁迫环境。

本研究结果表明,高温胁迫显著降低水稻保持系和恢复系的结实率,致使空壳率大幅上升。但这种花期高温热害存在品种间差异,比如水稻保持系K22、博白和V20结实率降幅较小,而保持系II-32、中浙B和中9B降幅就很大,这与前人的研究结果相似。研究表明水稻耐热品种与敏感品种对高温的反应差异较大,在籼稻品种间约有5℃的差异,粳

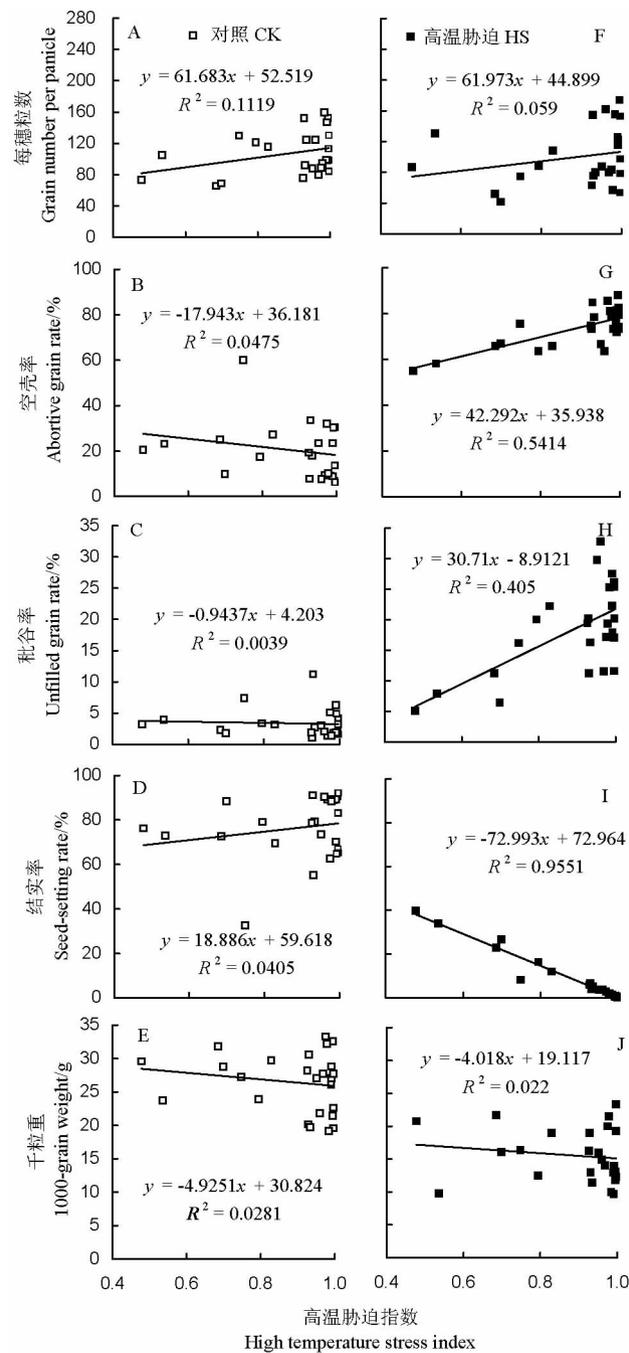


图2 花期高温胁迫指数与恢复系结实性状的关系

Fig. 2. Correlations between the heat stress index and seed setting traits of rice restorer lines.

稻品种间约有 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的差异^[12-13]。此外,本研究结果还表明,水稻花期高温胁迫指数与对照结实率、空壳率、秕谷率及千粒重之间的相关不显著,但与高温处理后的空壳率和结实率的相关性达极显著水平(图1~2)。类似的结果也出现在水稻保持系穗期耐旱性测评的试验中^[14]。由此可见,水稻花期耐热性与

其本身的结实特性没有明显的关系。与保持系穗期耐旱性测评结果不同,在本研究中,水稻保持系每穗粒数与高温胁迫指数之间均显著相关,相关系数分别为0.595(对照)和0.601(高温胁迫)。然而,类似的现象在水稻恢复系测评结果中并没有出现,其高温胁迫指数与每穗粒数之间的相关性均没有达到显著水平,但与高温处理后的秕谷率显著相关($r = 0.636$),而水稻保持系高温胁迫指数与高温处理后的秕谷率之间的相关系数仅为0.392,相关不显著。由于类似的研究还未见报道,这个现象还有待进一步研究。

目前,普遍采用高温胁迫指数作为水稻耐热性等级划分的依据,然而由于还没有统一标准,往往出现针对不同材料划分标准不一致的现象。在本研究中,由于涉及到水稻三系杂交育种中的水稻保持系和恢复系两种重要素材,划分标准不统一将会无法给水稻耐热性育种提供准确的信息。为了确保水稻育种的一致性,其耐热性等级划分应采用统一标准。根据高温胁迫指数,可将15个我国常用的水稻保持系和26个丰产性较好的恢复系分为4个类型,即热钝感型($0 \sim 0.20$)、耐热型($>0.20 \sim 0.50$)、不耐热型($>0.50 \sim 0.80$)及热敏感型(>0.8)。从表1和表2中还可看出,水稻保持系高温胁迫指数在0.9以上的仅有1个,恢复系高温胁迫指数0.9以上的有19个。此外,水稻恢复系多属于不耐热性品种,有25个恢复系的高温胁迫指数在0.5以上。由此看出,在本研究条件下,保持系的耐热性明显高于恢复系。由于这批恢复系具有较好丰产性,在培育水稻杂交组合中应用甚广,但是由于大多数属于热敏感型,相应的杂交组合也可能存在这一隐患,即在高温环境下有可能导致水稻大幅度减产。解决这一问题,需要对更多的水稻育种材料进行花期耐热性测评,为培育高产耐热水稻杂交组合提供相关的资源。

以往研究中,人工模拟高温胁迫条件时,高温总伴随着高湿,尤其在人工气候箱中,空间较小,高湿的问题尤为严重。此外,人工气候箱的容量过小,难以大规模进行水稻耐热性测评。也有学者根据当地气候采用分期播种的方式进行水稻耐热性筛选,但此方法最为致命的缺点是气温难以控制,并且自然环境也很难达到高温胁迫的条件^[15-17]。对此,笔者早期也采用温室控温的方法,利用夏季高温在温室中对水稻花期进行高温处理。此方法较好解决了胁迫温度的问题,因为夏季高温天气温室的温度很容易控制在 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,但同时也存在了高湿、温度过

高及温度不稳定情况。据观察,中午 11:30—15:00 温室内温度有时会达 60 °C 以上,遇到阴天时温度低于 30 °C,这些问题会影响水稻高温测评结果的准确性。因此,本研究采用了中国水稻研究所和杭州兴新技术开发有限公司共同开发的温度控制系统,其温度测定值为 41 °C,补偿温度为 -1 °C,调节参数为 ±2 °C,即温度在 39~43 °C 波动。利用温室内放置的 4 个探头自动测定温室内温度,并通过风机和致冷压缩机降温,阴雨天气可通过加热器加热。夏季晴天温度较高,温室顶棚、门和窗均有一定程度的打开,使得温室处于西周通风、半开放的环境,此外,加上鼓风机的气流交换,湿度一般维持在 70% 左右,温度在 39~43 °C 波动,平均温度为 41 °C 左右。如遇到阴雨天气,仅依靠自然温度很难达到高温胁迫条件,通过加热器进行加热同时利用除湿机降低温室内的湿度。经测定,阴雨条件下室内温度 41 °C 左右时的相对湿度在 70%~75%。此外,温室空间较大,可同时进行大量材料筛选。此设计较好解决了目前人工模拟水稻花期高温平台存在的问题。

参考文献:

- [1] Stainforth D, Aina T, Christensen C, et al. Uncertainty in predictions of the climate response to rising levels of greenhouse gases. *Nature*, 2005, 433: 403-406.
- [2] 陶龙兴,谈惠娟,王 熹,等. 高温胁迫对国稻 6 号开花结实习性的影响. *作物学报*, 2007, 34(4): 669-674.
- [3] 陶龙兴,谈惠娟,王 熹,等. 超级杂交稻国稻 6 号对开花结实期高温热害的反应. *中国水稻科学*, 2007, 21(5): 518-524.
- [4] 王前和,潘俊辉,李晏斌. 武汉地区中稻大面积空壳形成的原因及防止途径. *湖北农业科学*, 2004(1): 27-30.
- [5] 王才林,仲维功. 高温对水稻结实率的影响及其防御对策. *江苏农业科学*, 2004(1): 15-18.
- [6] 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. *应用生态学报*, 2007, 18(11): 2632-2636.
- [7] 张桂莲,陈立云,雷东阳,等. 水稻耐热性研究进展. *杂交水稻*, 2005, 20(1): 1-5.
- [8] 谢晓金,李秉柏,李映雪,等. 长江流域近 55 年水稻花期高温热害初探. *江苏农业学报*, 2009, 25(1): 28-32.
- [9] 李成德. 高温导致水稻出现大量空壳分析. *陕西农业科学*, 2003(5): 45-47.
- [10] 李金军,刘明放,陆金根,等. 粳稻穗期耐高温鉴定技术的研究. *上海农业学报*, 2003, 19(4): 25-27.
- [11] 谭中和,蓝泰源,任昌福,等. 杂交籼稻开花期高温危害及其对策的研究. *作物学报*, 1985, 11(2): 103-108.
- [12] Satake T, Yoshida S. High temperature induced sterility in indica rice at flowering. *Jpn J Crop Sci*, 1978, 47: 6-17.
- [13] Matsui T, Omasa K, Horie T. The difference in sterility due to high temperatures during the flowering period among japonica rice varieties. *Plant Prod Sci*, 2001, 4: 90-93.
- [14] 陶龙兴,符冠富,宋 建,等. 我国水稻常用保持系穗期耐旱性测评及育性分析. *作物学报*, 2009, 35(12): 2296-2303.
- [15] 沈 波,李太贵. 水稻新品种(组合)对高温热害的抗性评价. *种子*, 1996, 86(6): 19-20.
- [16] 罗筱平,黎世龄. 水稻品种高温下结实能力鉴定技术研究初报. *种子*, 2007, 26(10): 74-77.
- [17] 童志婷,李守华,段维新,等. 中稻花期致害高温主导的田间气象特征及其对不同杂交组合水稻结实的影响. *中国生态农业学报*, 2008, 16(5): 1163-1166.