

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2009.02085

三系杂交棉花粉育性对高温和低温胁迫的反应

倪密¹ 王学德^{1,*} 张昭伟¹ 朱云国² 张海平¹ 邵明彦¹ 袁淑娜¹
刘英新¹ 文国吉¹

¹ 浙江大学农业与生物技术学院, 浙江杭州 310029; ² 同济大学生命科学与技术学院, 上海 200092

摘要: 为研究在高温和低温胁迫条件下的三系杂交棉花粉育性稳定性问题, 利用棉花细胞质雄性不育系和恢复系, 配制 2 个三系杂交棉组合, 抗 A×浙大强恢(记作: 强恢 F₁)和抗 A×DES-HMF277(记作: 弱恢 F₁), 并以保持系(抗 B)为对照, 分别进行温室控温试验和田间自然温度试验, 分析三系杂交棉对高温和低温胁迫的反应和花粉育性转换(可育至不育)的临界温度。试验表明, 一般三系杂交棉的花粉育性对胁迫温度的反应比保持系敏感, 常常花粉散粉少和花粉活力较低。不同三系杂交棉组合对胁迫温度的抗性存在明显差异, 强恢 F₁ 明显高于弱恢 F₁, 与保持系的育性相似, 可育花粉率和自交结铃率较高, 不孕籽率较低。经可育花粉率(Y)与温度(T)的回归分析, 花粉育性转换的临界温度符合 $Y = a(T - T_{opt})^2 + b$ 模型。强恢 F₁ 育性转换的上限和下限温度分别为 38.0°C 和 13.0°C, 弱恢 F₁ 为 36.0°C 和 14.0°C, 保持系为 38.5°C 和 10.0°C。与低温胁迫比较, 高温胁迫在我国大部分棉区更普遍, 持续时间更长, 对产量影响更大。提高三系杂交棉在胁迫气温条件下的花粉育性的稳定性是近期育种的重要目标。

关键词: 棉花; 细胞质雄性不育; 气温胁迫; 育性; 临界温度

Reaction of Pollen Fertility to High or Low Temperature Stresses in CMS-Based Hybrid Cotton

NI Mi¹, WANG Xue-De^{1,*}, ZHANG Zhao-Wei¹, ZHU Yun-Guo², ZHANG Hai-Ping¹, SHAO Ming-Yan¹,
YUAN Shu-Na¹, LIU Ying-Xin¹, and WEN Guo-Ji¹

¹ College of Agriculture and Biotechnology, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China; ² School of Life Sciences and Technology, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: Planting CMS-based hybrid cotton is an important way to use cotton heterosis. Fertility of hybrid cotton pollens is influenced by cultivar, climatic conditions, management practices and pests. Among all the factors, temperature is the primary one affecting cotton growth, the following is air humidity. Stability of pollen fertility under high and low temperature stresses, associated with the heterosis expression of CMS-based hybrids, is the main point to elucidate in this study. The fertility differences between hybrids and the maintainer were compared by testing the percentage of fertile pollens in the greenhouse experiment with temperature controlled and the field experiment with natural temperature. In addition, percentage of setting bolls and percentage of aborted seeds were tested in the field experiment. Pollen fertility was checked by benzidine-Naphthol fluorescence microscopic method, while cross-pollination experiments were performed by dusting pollen obtained from corresponding restorers, then percentage of setting bolls and percentage of aborted seeds were determined by calculating the number of bolls or seeds, respectively. The critical temperatures for upper limit and lower limit were searched from different given consistent temperatures, which each temperature was kept for eight days in the greenhouse when cotton pollens turned from fertility to sterility. The results showed that the response of CMS-based hybrids to the extreme temperature stress was more sensitive than that of the maintainer, while the former usually had lower stability in pollen vitality under the stress. However, different CMS-based hybrids had various tolerances to temperature stress, for example, hybrids (F₁) restored by Zheda strong restorer showed higher pollen viability, more setting bolls and less aborted seeds under the stress than others. The response of pollen fertility to air temperature had a 5-day's delay in the field. Furthermore, the changes of maximum air temperature were more consistent with the curve of the percentage of pollen viability than those of average air temperature. It showed that the maximum air temperature for several days before anthesis

本研究由国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目[2004CB11730502(1)], 国家自然科学基金项目(30800694), 浙江省重点科技项目(2008C22087), 浙江省自然科学基金项目(Y306093)资助。

* 通讯作者(Corresponding author): 王学德, E-mail: xdwang@zju.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: fannimi2001@zju.edu.cn

Received(收稿日期): 2009-03-23; Accepted(接受日期): 2009-06-25.

affected the viability of pollen more salient. The Quadratic model [$Y = a(T - T_{opt})^2 + b$], applied to analysis the relationship between pollen viability (Y) and temperature (T), was best described as the temperature response functions of pollen fertility. According to actual observation, combined with the predicted value from the model above, the upper and lower critical temperatures for shift of fertility were 38.0°C and 13.0°C for hybrids restored by Zheda strong restorer, 36.0°C and 14.0°C for hybrids restored by DES-HMF277, and 38.5°C and 10.0°C for their maintainer. Compared with the low temperature stress, in the major cotton-growing areas of China, high temperature stress was more widespread, with longer duration and greater impact on yield. Improving the pollen fertility stability of CMS-based hybrid cotton under extreme temperature stress is an important goal in recent breeding program.

Keywords: Cotton; Cytoplasmic male sterility (CMS); Temperature stress; Pollen fertility; Critical temperatures

棉花是喜温作物,在适温条件下,其生理代谢随温度的升高而增强,生育进程加快和生育期缩短;但在生殖生长期对气温十分敏感,过高或过低气温常使花粉生活力下降,导致大量蕾铃脱落。Reddy等^[1]控温试验表明,昼夜温度 35°C/27°C 条件下有 10% 的棉铃和花蕾脱落,在 40°C/32°C 高温条件下,植株上所有花芽全部脱落。余新隆等^[2]报道,高温天气致使湖北种植的抗虫棉花药不同程度地不开裂,花粉发育受阻,生活力下降。洪继仁^[3]在高温年份测定花粉的萌发率,指出高温对花粉育性的影响显著。张小全等^[4]观察到海岛棉花粉对高温更敏感,持续 35°C 左右数日,育性迅速下降,导致蕾铃脱落严重。

三系杂交棉是利用细胞质雄性不育的“三系法”制种的棉花杂种第一代,具有制种效率高和成本低的优点,受到广泛重视。但是,在生产实践中发现,三系杂交棉与常规棉比较,其花粉育性对气温敏感性更为突出,尤其在持续数天的低温或高温天气下,花药开裂不充分,不能很好地散出花粉,且含有较多的弱生活力乃至不育的花粉粒。这一方面降低三系杂交棉的结铃率,导致减产;另一方面不孕籽率的上升,影响纤维品质。虽然三系杂交棉是棉花杂种优势利用的重要途径,但对上述存在的问题尚缺乏深入研究。如何提高三系杂交棉耐高、低温胁迫的能力,已成为三系杂交棉育种的重要目标之一。

为此,我们研究了三系杂交棉花粉育性的变化规律,以及对高温和低温胁迫的反应,旨在明确其育性转换的上限温度和下限温度,以及育性良好的适宜温度范围,为三系杂交棉的育种与栽培提供理论论据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

以哈克尼西棉细胞质雄性不育系抗 A 为母本,分别与恢复系浙大强恢和 DES-HMF277 杂交配制 2 个三系杂交棉组合(强恢 F₁ 和弱恢 F₁),保持系为抗 B(对照)。3 个材料均为陆地棉(*G. hirsutum* L.)类型,

其中强恢 F₁ 的恢复系浙大强恢是以哈克尼西棉细胞质雄性不育的传统恢复系 DES-HMF277 为受体,用根癌农杆菌介导法,将 GST 基因导入受体中选育而成的对不育系具有强恢复力的转基因恢复系^[5]。

1.2 试验方法

在浙江大学实验农场分别进行温室试验和田间试验,观察和统计各材料可育花粉率、自交结铃率和不孕籽率的变化,研究三系杂交棉在不同温度下育性变化规律及其对胁迫温度的反应。

1.2.1 温室试验 温室内的控温装置为 2 台艾美特牌暖风机(最大功率 1 800 W,额定功率 1 200 W,最小功率 800 W),以温度感应电源开关(LX-008 型温控导电表,或称电接点温度计)控温。导电表对温度变化反应灵敏,精确到 0.1°C。通过其启动或停止加热装置使温室温度在指定温度上下 0.3°C 范围内浮动。

2004 年 12 月 10 日在温室播种各材料,使温室温度保持在 24~30°C,确保棉花正常出苗和生长发育。2005 年 2 月 10 日开始现蕾,3 月 10 日起陆续开花,取每个材料生长正常的棉株 10 株,用于观察记载。为适应 2 月至 8 月气温由低向高的变化,配合室外气温进行低温至高温处理,2 月 15 日至 4 月 14 日进行低温(10~16°C)处理,4 月 15 日至 5 月 30 日进行适温(20~30°C)处理,6 月 1 日至 8 月 15 日进行高温(33~40°C)处理。观察不同温度条件下花粉育性的变化,研究其下限温度、适宜温度和上限温度。

为使花粉发育处于一个恒定的处理温度,每个处理温度恒定时期平均为 8 d。在这 8 d 的恒温条件下各个材料的花粉育性差异明显。取持续恒温处理的第 8 天的花朵用于花粉育性测定。

1.2.2 田间试验 2005 年 4 月 30 日在田间播种 3 个材料,小区面积 20 m²,种植密度每公顷 42 000 株,常规田间管理。在田间放置最高气温计和最低气温计,从 2005 年 6 月 10 日至同年 11 月 20 日,逐日记录每天的最高温和最低温度。试验以每 5 d 一个气温处理,统计每 5 d 的平均气温和平均最高气温。在

棉花开花期, 每 5 d 取各个材料的花药用于可育花粉率的测定, 每天对开花前一天的花蕾进行人工自交和挂牌(记上自交日期)用于测定自交结铃率和不孕籽率。

1.3 花粉育性的测定

1.3.1 可育花粉率^[6] 取次日开花的花药于载玻片上, 先加 1~2 滴联苯胺-甲萘酚试剂, 再加 1 滴 3% 过氧化氢, 用镊子压碎花药使其花粉散出, 染色 3 min 后, 显微镜下观察。每个材料观察 3 次, 每次观察 10 个视野, 共 700 个以上花粉粒。染色深的形态正常的花粉为可育花粉, 可育花粉率(%) = (可育花粉粒数/总观察花粉粒数) × 100%。

1.3.2 自交结铃率 2005 年 6 月 10 日至 11 月 20 日, 每天对 3 个材料进行自交, 记录每次所做自交的花朵数, 挂牌并标明自交日期。在 11 月底, 以每 5 d 为一个处理, 统计自交成铃数和总自交花朵数。自交结铃率(%) = (自交成铃数/总自交花朵数) × 100%。

1.3.3 不孕籽率 与正常的棉花种子相比, 不孕籽实际上是退化的未受精的胚珠, 颜色较浅呈褐色或黄褐色, 其表面纤维少而短。收花后, 各材料每次处理(5 d)分别取 20 个挂牌的自交铃。不孕籽率(%) = (不孕籽数/自交铃的胚珠数) × 100%。

1.4 数据分析

分别采用二次^[7]、三次或更高次方程^[8]和双线性方程^[9]对每个处理温度(T)的可育花粉率(Y)进行非线性回归分析, 获得拟合度最高的育性模拟方程 $Y = a(T - T_{opt})^2 + b$ 。通过 SAS 软件(9.1 ver.) PROC MODEL 程序确定该方程中的常数项 a 和 b , 以及花粉发育的最适温度(T_{opt})。然后, 根据 $T_{max} = T_{opt} + \sqrt{-b/a}$ 方程和 $T_{min} = T_{opt} - \sqrt{-b/a}$ 方程, 获得花粉育性的上限温度(T_{max})和下限温度(T_{min})。各参数的方差分析和相关分析也是在 SAS 中完成。

2 结果与分析

2.1 三系杂交棉花花粉育性的上限温度、适宜温度和下限温度

植物生长发育对温度的响应与植物体内的酶促反应对温度的响应具有相似性, 都呈非线性关系^[10]。如图 1 所示, 在温室控温条件下, 强恢 F_1 、弱恢 F_1 和保持系的可育花粉率与温度(10~40℃)间呈非线性关系。根据温室种植的 3 个材料在不同处理温度(T)条件下观察到的可育花粉率(Y)数据, 经曲线拟合分析, 得到的最高拟合度方程为 $Y = a(T - T_{opt})^2 + b$, 依

该育性模拟方程可估算出最高可育花粉率、上限温度、适宜温度和下限温度的期望值(表 1), 以研究三系杂交棉花花粉育性对高温和低温胁迫的敏感性。

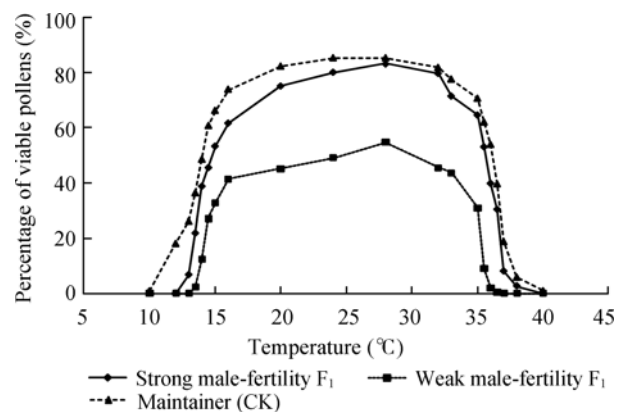


图 1 温室控温条件下可育花粉率的动态变化(2005 年)
Fig. 1 Changes of percentage of viable pollens under different temperatures in greenhouse (2005)

Strong male-fertility F_1 : 抗 A × 浙大强恢; Weak male-fertility F_1 : 抗 A × DES-HMF277; Maintainer(CK): 抗 B。

Strong male-fertility F_1 : Kang A × Zheda strong restorer; Weak male-fertility F_1 : Kang A × DES-HMF277; Maintainer(CK): Kang B, respectively.

2.1.1 花粉育性的适宜温度 从表 1 可以看出, 3 个材料的最高可育花粉率所需的适宜温度基本相近, 均在 25℃左右。其中, 强恢 F_1 为 25.2℃, 弱恢 F_1 为 24.8, 保持系为 25.0℃。但是, 在这适宜温度时, 不同材料的可育花粉率间存在十分明显差异, 强恢 F_1 的可育花粉率为 88.54%, 与保持系(89.12%)相当, 但比弱恢 F_1 (42.93%)高出 45.61 个百分点。

2.1.2 育性转换的上限温度 在高温胁迫处理时, 花粉育性随着温度的升高不断下降, 直至不育, 常称此时的温度为育性转换的上限温度。从表 2 可看出, 当温室恒定在 35.5℃高温时, 弱恢 F_1 育性急剧降低, 可育花粉率从 30.74%下降到 9.01%, 36.5℃时降到 0.56%, 结合育性模拟方程所估计的期望值 36.8℃(表 1), 记 36.0℃为弱恢 F_1 育性转换的上限温度; 而强恢 F_1 的可育花粉率在 37.0℃时, 降到 8.03%, 40.0℃时已为零, 再根据表 1 的期望值(39.2℃), 记 38.0℃为强恢 F_1 的育性转换上限温度, 表现出比弱恢 F_1 有更好的耐高温特性; 同理, 对照保持系抗 B 育性转换的上限温度为 38.5℃, 与强恢 F_1 相近。

2.1.3 育性转换的下限温度 在低温胁迫处理时, 花粉育性随着温度的下降而下降, 如表 2 所示, 温度低于 14℃极大部分的花粉趋向不育。综合表 2 的实际观察值和表 1 的理论期望值, 3 个材料的花粉育性

表 1 各材料的最高可育花粉率、模型参数和关键温度
Table 1 Maximum pollen viability percentage, equation constants, and cardinal temperatures in three materials

材料 Material	最高可育花粉率 Maximum pollen viability (%)	方程参数 Equation constants		关键温度 Cardinal temperatures (°C)		
		$Y = a(T - T_{opt})^2 + b$	R^2	上限温度 T_{min}	最适温度 T_{opt}	下限温度 T_{max}
强恢 F ₁ Strong male-fertility F ₁	88.54	$Y = -0.45(T - T_{opt})^2 + 88.54$	88.30	39.2	25.2	11.2
弱恢 F ₁ Weak male-fertility F ₁	42.93	$Y = -0.30(T - T_{opt})^2 + 42.93$	80.46	36.8	24.8	12.7
保持系 Maintainer (CK)	89.12	$Y = -0.44(T - T_{opt})^2 + 89.12$	88.81	39.1	25.0	10.8
LSD	2.27**		—	0.45**	0.54 ^{NS}	0.49**

强恢 F₁: 抗 A×浙大强恢; 弱恢 F₁: 抗 A×DES-HMF277; 保持系(对照): 抗 B; **: 0.01 水平的显著性; ^{NS}: 未达到 0.05 水平的显著性。

Strong male-fertility F₁: KangA×Zheda strong restorer; Weak male-fertility F₁: KangA×DES-HMF277; Maintainer (CK): Kang B; ** Indicate significant at 0.01 level; ^{NS}: no-significance ($P > 0.05$).

表 2 温室高温和低温处理下各材料可育花粉率的变化
Table 2 Changes of the percentages of viable pollens of three materials under the high or low temperature stress conditions in the greenhouse (%)

材料 Material	高温处理 High temperature treatment							
	33°C	35°C	35.5°C	36°C	36.5°C	37°C	38°C	40°C
强恢 F ₁ Strong male-fertility F ₁	71.36	64.43	52.91	39.63	30.20	8.03	2.65	0
弱恢 F ₁ Weak male-fertility F ₁	43.50	30.74	9.01	2.03	0.56	0	0	0
保持系 Maintainer (CK)	77.32	70.40	61.80	53.72	39.50	18.87	6.02	1.12
材料 Material	低温处理 Low temperature treatment							
	10°C	12°C	13°C	13.5°C	14°C	14.5°C	15°C	16°C
强恢 F ₁ Strong male-fertility F ₁	0	0	6.72	21.80	38.58	45.36	53.13	61.50
弱恢 F ₁ Weak male-fertility F ₁	0	0	0	2.34	12.30	27.00	32.60	41.20
保持系 Maintainer (CK)	1.03	18.17	26.2	36.23	48.37	60.54	66.02	73.65

注解同表 1。The annotations are the same as given in Table 1.

转换的下限温度, 弱恢 F₁ 为 14.0°C, 强恢 F₁ 为 13.0°C, 保持系为 10.0°C, 与 Kakani 等^[11]结果基本一致, 他们认为棉花花粉发育的最低温度应在 11.1°C 以上。

2.2 田间气温条件下三系杂交棉育性的变化

2.2.1 气温与 F₁ 可育花粉率的关系 从图 2-B 看出, 在 2005 年 6 月 15 日至 11 月 7 日期间, 弱恢 F₁ 可育花粉率明显低于强恢 F₁ 和保持系, 且受气温影响变幅较大, 显示出对温度具有较强敏感性。在 6 月上旬, 3 个材料的可育花粉率随气温上升而提高; 6 月下旬至 8 月中旬进入盛夏高温天气, 此时平均气温和平均最高气温分别在 33.0°C 和 35.0°C 以上, 可育花粉率随气温上升明显下降, 尤其弱恢 F₁ 的可育花粉率受高温影响更大; 8 月下旬开始, 气温有所回落, 平均气温和平均最高气温分别在 26.0°C 和 30.0°C 左右, 强恢 F₁ 和保持系的可育花粉率保持在高的水平, 均在 80% 以上, 而弱恢 F₁ 的可育花粉率只为 50% 左右; 之后气温继续下降, 此时 3 个材料

的可育花粉率随气温下降而降低; 10 月 3 日至 5 日连续阴雨, 对棉花散粉影响大, 可育花粉率都很低。

结合图 2-A 气温变化情况, 可育花粉率变化随气温变化有 5 d 左右的滞后现象, 且最高气温曲线与可育花粉率曲线的平行趋向比平均气温曲线更趋一致。因此, 可以认为开花前数天田间最高气温对棉花可育花粉率影响更大。与低温胁迫比较, 高温胁迫对三系杂交棉花育性的影响更明显。

2.2.2 气温与 F₁ 自交结铃率的关系 图 2-C 横坐标的日期是花朵自交(挂牌)的日期。与可育花粉率的情形稍有不同, 在多数时期强恢 F₁ 的自交结铃率比保持系略高, 比弱恢 F₁ 高出 40% 以上。2005 年 7 月和 8 月两个高温时期, 3 个材料的自交结铃率随气温的升高而降低; 随后气温下降, 它们的自交结铃率提高, 9 月气温较适宜(均温 24~30°C), 自交结铃率较高, 为 28%~30%; 随着气温继续下降, 自交结铃率有所下降。10 月 3 日至 5 日杭州大雨天气, 气温从 28°C 突降到 16.0°C, 最低气温仅 13.0°C, 3 个材料自

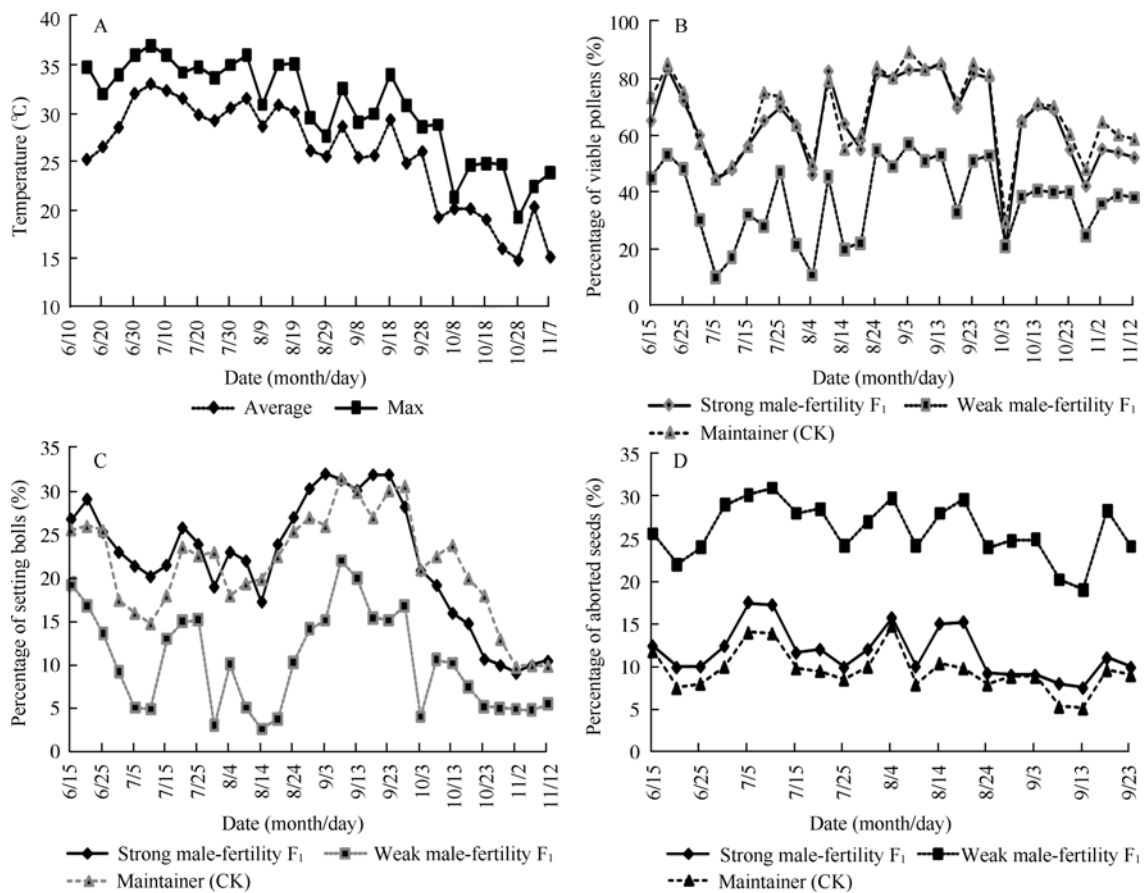


图 2 田间平均气温和最高气温以及 3 个材料育性动态变化
 Fig. 2 Changes of the average and maximum temperatures, and traits associated with fertility of three materials
 注解同图 1。The annotations are the same as given in Fig 1.

交结铃率大幅降低, 之后气温虽有所回升但结铃率不升反降, 这可能是棉花生育期结束和衰老造成的。

结合图 2-A 的温度曲线, 3 个材料的自交结铃率变化与气温的变化趋势关系密切。高温时期气温升高, 自交结铃率降低; 气温较低时, 随气温上升自交结铃率提高; 气温适宜时, 自交结铃率相对较高。

2.2.3 气温与 F_1 不孕籽率的关系 从图 2-D 可以看到, 各时期自交铃中的不孕籽率为保持系 < 强恢 F_1 < 弱恢 F_1 。三者不孕籽率随气温的变化趋势相似, 6 月下旬至 8 月上旬高温时期, 不孕籽率较高, 且随气温的上升而提高, 不孕籽率受气温影响变化明显; 温度适宜的 9 月和 10 月, 不孕籽率较低; 10 月之后, 与自交结铃率的变化一样, 由于棉株衰老, 缺乏营养, 不孕籽率开始升高。

3 讨论

利用细胞质雄性不育的“三系法”制种的三系杂交棉, 近年来在我国受到育种家的广泛重视, 育成的组合已开始在生产上试种和应用。但也发现三系

杂交棉的花粉育性易受环境影响而结铃性较差, 产量降低。国内外大量研究结果表明, 影响棉花花粉发育的可能因素有很多, 温度、光周期^[12]、土温、空气湿度^[13-14]等都会对花粉的育性产生一定影响, 但气温的影响最大, 这也在我们多年的三系杂交棉育种过程中得到证实。然而温度对三系杂交棉花花粉育性的影响一直停留在感性水平, 缺乏系统、深入的研究。本研究明确了温室控温条件下, 温度对三系杂交棉育性的确切影响, 并提出了适于分析三系杂交棉花粉对不同温度反应的二次模型。该模型方程将为今后三系杂交棉抗高温亲本材料的选择提供方便。田间试验测定的自交结铃率和不孕籽率(2 个间接反映花粉育性的指标)的结果也很好验证了温室试验的准确性。

本研究认为, 三系杂交棉结铃性差这一缺陷, 主要是由其对高温和低温胁迫反应较敏感引起的, 具体表现为胁迫条件下花粉育性较低引起结铃率下降和不孕籽率提高。但同时也发现, 不同的三系杂交棉组合对高温和低温的抗性也存在明显差异, 选

配适当双亲的组合可克服其缺陷。

在我国主要棉区,棉花开花期一般在 6 月初至 9 月中旬,低温胁迫天气主要发生在开花的初期(6 月初)和末期(9 月下旬),而这两个时期对于棉花的产量或质量的贡献很小;高温胁迫天气则主要出现在 7~8 月,其间长江流域棉区常有 35.0℃ 以上高温天气的出现。与低温胁迫比较,高温胁迫在我国主要棉区更普遍,持续时间更长,而且 7~8 月正是棉花生殖生长的关键时期,对棉花产量的影响更大。三系杂交棉的生产应用,以及不同省的棉花区试和多点试验表明,长江以北、黄河流域和新疆棉区,因 7~8 月高温胁迫出现的年份相对较少,三系杂交棉更适合种植。

提高三系杂交棉在胁迫气温条件下花粉育性的稳定性,是近期育种的重要目标。扩大不育系和恢复系亲本资源,开展新材料的研究,培育高产、优质、多抗的新亲本,对于培育优良三系杂交棉组合具有深远意义。赵丽芬等^[15]引进巴基斯坦特有的抗旱、抗高温品种,通过连续杂交、选择得到表现较好的耐高温材料,具有较高的利用价值。这启示我们,三系杂交棉抗高温育种同样可以引入野生型或国外抗高温品种的遗传背景来提高三系材料在极端高温天气下的稳定性。另外,育种实践中选择耐高、低温胁迫材料的同时,综合考虑其他各种环境因子,可获得育性更加稳定的优良材料。

4 结论

三系杂交棉对高温或低温胁迫的反应更敏感,表现为花粉育性下降;但不同三系杂交棉组合对抗胁迫的性能有明显差异,通过亲本选配提高其花粉育性的稳定性是可能的。可育花粉率和自交结铃率的变化基本一致,提高花粉育性可明显促进棉花结铃率的提高和不孕籽率的降低,关系到棉花产量和品质。

References

- [1] Reddy K R, Reddy V R, Hodges H F. Temperature effects on early season cotton growth and development. *Agron J*, 1992, 84: 229–237
- [2] Yu X-L(余新隆), Yi X-D(易先达). Observation of high-temperature effects on cotton anther cracking. *Hubei Agric Sci* (湖北农业科学), 2004, 43(2): 39 (in Chinese)
- [3] Hong J-R(洪继仁). The effect of high temperature on floral organ development and growth of bolls in cotton. *China Cotton* (中国棉花), 1982, 9(5): 36–37 (in Chinese)
- [4] Zhang X-Q(张小全), Wang X-D(王学德), Zhu Y-G(朱云国), Zhu W(朱伟), Jiang P-D(蒋培东). Breeding of cytoplasmic male sterile line in *G. barbadense* and microsporogenesis cytological observation. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2007, 40(1): 34–40 (in Chinese with English abstract)
- [5] Wang X-D(王学德), Li Y-Y(李悦有). Development of transgenic restorer of cytoplasmic male sterility in upland cotton. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2002, 35(2): 137–141 (in Chinese with English abstract)
- [6] Zhang Z-L(张志良). The Instruction of Experiment about Plant Physiology (2nd edn)(植物生理学实验指导·第 2 版). Beijing: Higher Education Press, 1990 (in Chinese)
- [7] Yan W K, Wallace D H. Simulation and prediction of plant phenology for five crops based on photoperiod by temperature interaction. *Anal Bot*, 1998, 81: 705–716
- [8] Tollenaar M, Daynard T B, Hunter R B. Effect of temperature on rate of leaf appearance and flowering date in maize. *Crop Sci*, 1979, 19: 363–366
- [9] Omanga P A, Summerfield R J, Qi A. Flowering of pigeonpea (*Cajanus cajan* L.) in Kenya: Responses of early maturing genotypes to location and date of sowing. *Field Crops Res*, 1995, 41: 25–34
- [10] Li Z-B(李泽炳). Studies on the Photoperiod Sensitive Genic Male Sterility in Rice and Its Utilization in Breeding (光敏感核不育水稻育性转换机理与应用研究). Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 1995 (in Chinese)
- [11] Kakani V G, Reddy K R, Koti S, Wallace T P, Prasad P V V, Reddy V R, Zhao D. Differences in *in vitro* pollen germination and pollen tube growth of cotton cultivars in response to high temperature. *Ann Bot*, 2005, 96: 59–67
- [12] Marshall D R, Thomson N J, Nicholls G H, Patrick C M. Effects of temperature and day length on cytoplasmic male sterility in cotton (*Gossypium*). *Aust J Agric Res*, 1974, 25: 443–447
- [13] Sawan Z M, Hannaw L I, Gad-El-Karim Gh A, McCuiston W L. Relationships between climatic factors and flower and boll production in Egyptian cotton (*Gossypium barbadense*). *J Arid Environ*, 2002, 52: 499–516
- [14] Sarvella P. Environmental influences on sterility in cytoplasmic male-sterile cottons. *Crop Sci*, 1966, 6: 361–364
- [15] Zhao L-F(赵丽芬), Li Z-S(李增书), Sui S-X(睢书祥), Zhao G-Z(赵国忠), Li A-G(李爱国). Selection and utilization of cotton germplasms resources introduced from Pakistan. *J Hebei Agric Sci* (河北农业科学), 2008, 12(2): 88–89 (in Chinese with English abstract)