

高温胁迫对水稻花粉粒性状及花药显微结构的影响

张桂莲, 陈立云*, 张顺堂, 刘国华, 唐文邦, 李梅华, 雷东阳, 陈信波

(湖南农业大学 水稻所, 长沙 410128)

摘要:对两个耐热性不同的水稻品系进行高温处理(8:00~17:00, 37℃, 17:00~8:00, 30℃), 测定了高温胁迫对水稻花粉粒性状及花药显微结构的影响。结果表明, 高温胁迫导致花药开裂、花粉活力、花粉萌发率和柱头上花粉粒数的显著下降, 花粉粒直径增大。高温下耐热品系 996 的花药开裂、花粉活力、花粉萌发率和柱头上花粉粒数明显高于热敏感品系 4628, 这表明耐热品系 996 在高温胁迫条件下能保持较好地花粉散落特性和花粉萌发特性, 是其耐热性的生理基础; 高温下耐热品系 996 的花药壁的表皮细胞排列较整齐, 细胞间隙小; 药隔维管束较大, 维管束鞘细胞排列整齐, 薄壁细胞多且排列整齐, 木质部和韧皮部清楚可见; 而热敏感品系 4628 花药壁的表皮细胞形状不规则, 排列疏松, 细胞间隙大, 药隔维管组织受到很大程度破坏, 维管束鞘细胞形状异常, 排列紊乱, 木质部和韧皮部界限不清。

关键词:高温胁迫; 水稻; 花粉粒性状; 花药显微结构

文章编号: 1000-0933(2008)03-1089-09 中图分类号: Q945, S512 文献标识码: A

Effects of high temperature stress on pollen characters and anther microstructure of rice

ZHANG Gui-Lian, CHEN Li-Yun*, ZHANG Shun-Tang, LIU Guo-Hua, TANG Wen-Bang, LI Mei-Hua, LEI Dong-Yang, CHEN Xin-Bo

Institute of Rice Research, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3): 1089 ~ 1097.

Abstract: With the quickening industrialization, the worsening environment and the global warming, heat injury is becoming a major disasterous factors that has an effect on crop growth, and is receiving increasing concern because of its limiting effect on rice production.

The experiments were carried out in growth chamber to investigate the effects of high temperature stress during heading and flowering period on pollen characters and anther microstructure using two rice lines including heat-tolerant line 996 and heat-sensitive line 4628. Seven day/night temperature (8:00—17:00, 37℃; 17:00—8:00, 30℃) after heading were established. The results showed that anther dehiscence coefficient and pollen grains on the stigma significantly decreased, pollen diameter significantly increased under high temperature stress, pollen vigor and pollen germination rate decreased during the stress period. Anther dehiscence coefficient, pollen diameter, pollen vigor, pollen germination rate and pollen grains on the stigma in heat-tolerant line 996 were significantly higher than that of heat-sensitive line 4628 under high

基金项目: 国家“863”计划现代农业技术资助项目(2001AA241023); 国家自然科学基金资助项目(3015004); 湖南省自然科学基金资助项目(03GGY3033)

收稿日期: 2006-12-14; 修订日期: 2007-09-17

作者简介: 张桂莲(1974~), 女, 湖南麻阳人, 博士, 主要从事水稻生理与遗传育种. E-mail: zhangguilian436@sohu.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenly996@yahoo.com.cn

Foundation item: The project was financially supported by Modern Agricultural Technological Foundation of National “863” (No. 2001AA241023) and National Natural Science Foundation of China (No. 3015004) and Natural Science Foundation of Hunan Province (No. 03GGY3033)

Received date: 2006-12-14; **Accepted date:** 2007-09-17

Biography: ZHANG Gui-Lian, Ph. D., mainly engaged in rice physiology and genetic breeding. E-mail: zhangguilian436@sohu.com

temperature stress, this indicated that heat-tolerant line 996 was able to keep better pollen grain pollination and germination character under high temperature stress, and was physiological basis of heat-tolerant line; Under high temperature stress, epiderm cell of anther wall in vascular bundle of connective tissue in heat-tolerant line 996 arranged regularly and tightly, vascular bundle sheath cell and parenchyma cells arranged regularly, xylem and phloem were clear. While epiderm cell of anther wall in heat-sensitive line 4628 arranged irregularly and untightly, vascular bundle of connective tissue was seriously destroyed, and vascular bundle sheath cell arranged irregularly, xylem and phloem were unclear.

Key Words: high temperature stress; rice; pollen characters; anther microstructure

水稻是世界上最重要的粮食作物之一,全世界约 1/2 的人口以之为主食。近年来,随着温室效应造成的全球变暖和全球气候的变化,热害已成为影响作物生长的主要因素之一。作物的开花期对高温非常敏感。开花期的高温,阻碍花粉成熟与花药开裂,并阻碍花粉在柱头上发芽、花粉管伸长,其结果引起不受精,导致不育^[1~6]。水稻开花阶段对高温胁迫的敏感程度高于营养生长阶段。据报道,水稻开花期遇高温将导致结实率下降,产量降低^[7,8]。在我国一些地区,近年来异常高温造成水稻减产的情况时有发生^[9]。大量研究证明,高温造成水稻减产的主要原因是花药的开裂度降低,造成花粉散出量减少,继而导致不育花的数量增加^[10~12]。研究发现,水稻每个花的柱头上至少需要接收 20 个以上的花粉粒才能保证正常受精及结实,授粉量低于这个数目就会造成小花不育^[12]。目前关于高温对水稻影响机理的系统研究报道不多,为此笔者以两个耐热性不同的水稻新品系为材料,研究高温胁迫对水稻花药开裂度和细胞组织结构及花粉粒性状的影响,目的是探讨高温胁迫对水稻花器官的影响机理,为高温下水稻的安全生产和耐热性水稻品种选育提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料和处理

试验于 2005 年在湖南农业大学水稻所试验田进行。供试材料为耐热品系 996 和热敏感品系 4628,为玉米、大豆等外源 DNA 导入早稻中熟品种 264-7,经多代选择,遗传背景已经纯合、在耐热性方面具有显著差异,且二者生育期完全相同,在异常高温条件下种植,前者的结实性和产量未受明显影响,而后者影响很大,两品系差异明显。两品系均由湖南农业大学水稻所提供。试验于 2005 年 4 月 16 日播种,5 月 11 日移栽。高温处理前 15d 选择发育进程与长势基本一致的植株移栽于钵钵中,每钵 3 株,共 20 盆,始穗当天将 10 盆移入人工气候室进行高温处理(8:00~19:00, 37℃, 19:00~8:00, 30℃, 日平均气温为 33.5℃),连续处理 7d 后,将水稻材料移到室外让其自然生长。另外 10 盆放入大田中作为对照,处理期间,同期大田自然日平均气温为 27.3℃(日均温用本试点每天 2:00, 8:00, 14:00 和 20:00 的百叶箱气温的平均值)。将处理后的稻穗进行整穗,成熟后考查结实率。

1.2 测定项目及方法

(1)花药开裂测定 于高温处理第 5 天 10:00~12:00,每个处理取 60 朵已开放的小花,用镊子将颖壳剥掉,在显微镜下直接观察花药开裂情况,计算花药开裂系数。

(2)花粉粒大小测定 于高温处理第 1,3,5 天和第 7 天,每品系任选 20 个花药,在显微镜下测量花粉的直径,每花药测量 10 个花粉。

(3)花粉活力的测定采用过氧化物酶测定法^[13] 于高温处理第 1,3,5 天和第 7 天上午收集花粉于干净载玻片上,加试剂 I (0.5% 联苯胺, 0.5% α -萘酚, 0.25% 碳酸钠各 10ml 混合均匀)和 0.3% 过氧化氢各 1 滴,摇匀后盖上盖玻片,30℃ 下经 10min 后在低倍显微镜下观察 3 个制片,每片取 5 个视野,统计其花粉活力。

(4)花粉萌发率的测定 9ml 水中琼脂含 0.1g, 蔗糖 2g,加热搅匀至 90℃,冷却后补加 1ml 硼酸(浓度为 0.2g/L),于处理第 1,3,5 天和第 7 天上午收集花粉进行涂片,把载玻片放入含有水滴的培养皿中,置于 30℃ 温度下保湿培养 15min 后,在显微镜下检测花粉萌发率。

(5)柱头上花粉数的观察 于处理第 5 天,取 10 朵当天已经开放的小花在 FAA 液中固定,而后用苯胺蓝

染色,借助荧光显微镜观察柱头上花粉粒的数目^[3]。

花药石蜡切片制样:于处理第4天取花药,FAA固定液固定,按《生物显微技术》^[14]的方法进行系列乙醇脱水,二甲苯透明,石蜡包埋,切片厚度为10 μ m,经铁矾-苏木精染色制成永久制片,在ECLIPSE-E600(日本)型显微镜下观察、拍照。

2 结果与分析

2.1 高温胁迫对水稻结实率的影响

抽穗开花期是水稻生殖生长最敏感的时期,温度等环境因素可能会导致花粉败育和子房受精受阻,结实率下降。表1显示,高温下水稻结实率下降,空秕率增加。与对照相比,高温下耐热品系996和热敏感品系4628的结实率分别比对照下降18.6%和54.2%,差异达显著水平,耐热品系996的热害指数也显著低于热敏感品系4628,这表明耐热性品种对高温反应不敏感。

表1 高温胁迫对水稻结实率的影响

Table 1 Effects of high temperature stress on rice seed set rate

品系 Lines	处理 Treatment	穗粒数 No. of grains per panicle	结实率 Seed set rate(%)	空秕率 Unfilled grains(%)	热害指数 Heat injury index
耐热品系 996	对照(CK)	208 $\pm$ 7.28a	81.73 $\pm$ 3.27a	18.27 $\pm$ 0.55c	0.19 $\pm$ 0.01b
Heat-tolerant line 996	高温 High temperature	206 $\pm$ 6.18a	66.50 $\pm$ 1.20b	33.50 $\pm$ 1.01b	
热敏感品系 4628	对照(CK)	124 $\pm$ 5.58b	79.03 $\pm$ 3.16a	20.97 $\pm$ 0.52c	0.54 $\pm$ 0.02a
Heat-sensitive line 4628	高温 High temperature	127 $\pm$ 6.35b	36.22 $\pm$ 1.45c	63.78 $\pm$ 2.55a	

同列数字后跟有不同小写字母者表示差异达5%显著水平,以下表相同;热害指数=(自然结实率-高温结实率)/自然结实率 Different small letters in the same column indicate significant difference at 5% level. The same as in tables below; Heat injury index = (seed set rate under natural condition - seed set rate under high temperature) / seed set rate under natural condition

2.2 高温胁迫对花药开裂的影响

花药两端均开裂为完全开裂,花药只有一端开裂为部分开裂,两端均未开裂为未开裂,据此定义花药开裂系数(K)^[15]为: $K = (\text{完全开裂花药数} + \text{部分开裂花药数}) / \text{镜检花药总数}$,K值的生物学意义在于表示花药散落花粉的效率,K值大,散落花粉的效率高,柱头上易着粉,K值小,散落花粉的效率低,柱头上不易着粉。K值的变幅为(0,1)。从表2可看出,高温下,耐热品系996的K值为0.8,而热敏感品系4628的K值为0.563,二者相差0.237,差异达显著水平($F = 720.12 > F_{0.05} = 7.71$),且两品系都比大田自然条件下的K值小,表明在高温处理下耐热品系996仍能维持较高K值,使花药散落花粉的效率保持较高,因此使柱头上有较多的花粉着落机会。

表2 高温胁迫下水稻花药开裂状况

Table 2 Anther dehiscence of rice under high temperature stress

品系 Line	处理 Treatment	完全开裂 Full dehiscence	部分开裂 Part dehiscence	未开裂 Full indehiscence	花药开裂系数 Anther dehiscence coefficient
耐热品系 996	对照 CK	53 $\pm$ 2.12a	2 $\pm$ 0.05d	5 $\pm$ 0.15d	0.917 $\pm$ 0.04a
Heat-tolerant Line 996	高温 High temperature	35 $\pm$ 1.93c	13 $\pm$ 0.39b	12 $\pm$ 0.66b	0.800 $\pm$ 0.03b
热敏感品系 4628	对照 CK	46 $\pm$ 2.30b	7 $\pm$ 0.18c	7 $\pm$ 0.28c	0.883 $\pm$ 0.02a
Heat-sensitive Line 4628	高温 High temperature	21 $\pm$ 0.63d	14 $\pm$ 0.49a	25 $\pm$ 1.5a	0.563 $\pm$ 0.02c

2.3 高温胁迫对水稻花粉粒大小的影响

在花药的开裂过程中,花粉粒的膨大是花药开裂的原初动力之一^[3,16]。图1示高温处理过程中水稻花粉粒直径的变化。高温下水稻花粉粒发生膨胀,花粉粒直径增大,处理第1天耐热品系996花粉直径比对照增加3.2 μ m,热敏感品系4628则比对照增加1.5 μ m;但随高温胁迫时间的延长,两品系花粉粒直径呈下降趋势,至处理第7天,耐热品系996花粉直径比对照增加1.7 μ m,热敏感品系4628则比对照增加0.1 μ m,这表明

高温导致水稻花粉粒膨胀,但随高温胁迫时间延长,花粉粒的膨胀受到影响。对花药开裂与花粉粒膨胀幅度进行分析,结果表明,高温下耐热品系 996 花粉粒膨胀幅度大于热敏感品系 4628,这与高温下耐热品系 996 的花药开裂系数大于热敏感品系 4628 的趋势相一致,这进一步证明了花粉粒膨胀对花药开裂的驱动作用。

2.4 高温胁迫对水稻花粉活力的影响

具有生活力的花粉含有活跃的过氧化物酶,此酶能利用过氧化氢使各种多酚及芳香族胺发生氧化而产生颜色,如花粉粒为红色,则表示有过氧化物酶存在,花粉有活力,能发芽;如无色,则表示已失去活力,不能发芽。根据花粉颜色可知花粉活性的强弱。以自然正常气候条件下水稻开花为对照,研究高温对水稻花粉活力及结实率的影响(见图 2),在高温下,花粉活力有所下降,处理第 1 天,耐热品系 996 和热敏感品系 4628 的花粉活力分别比对照下降 7.8% 和 13.8%,差异达显著水平,且随着高温胁迫时间延长,两品系的花粉活力持续下降,至处理末,耐热品系 996 和热敏感品系 4628 的花粉活力比对照下降 19.6% 和 32.88%,差异达显著水平。在整个处理期间,耐热品系 996 的花粉活力高于热敏感品系 4628 的。

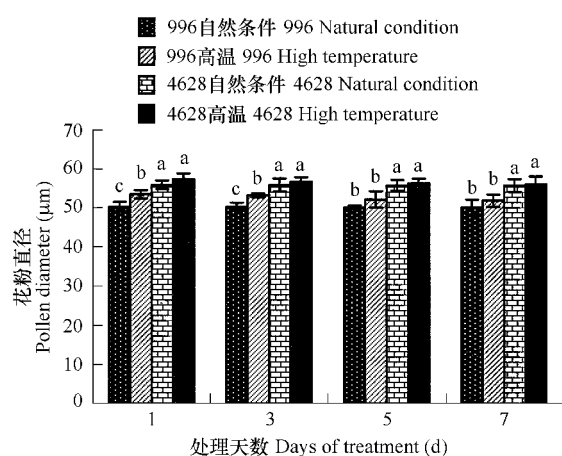


图 1 高温胁迫对水稻花粉直径的影响

Fig. 1 Effects of high temperature stress on rice pollen diameter

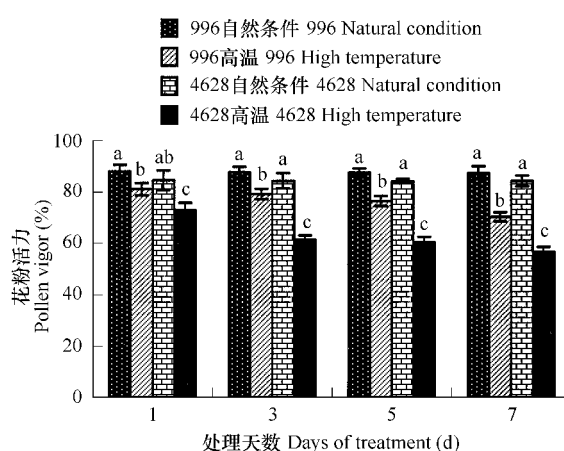


图 2 高温胁迫对水稻花粉活力的影响

Fig. 2 Effects of high temperature stress on rice pollen vigor

2.5 高温胁迫对水稻花粉萌发率的影响

具有生活力的水稻花粉能在离体培养基上很好地萌发,因此花粉萌发率也可作为反映水稻花粉活力强弱的一个指标。从图 3 可看出,高温对水稻花粉萌发有一定的影响,品种间存在差异。处理第 1 天,耐热品系 996 和热敏感品系 4628 花粉萌发率分别比对照下降 5.8% 和 23.39%,随着高温胁迫时间延长,两品系花粉萌发率持续下降,差异达显著水平,至处理第 7 天,耐热品系 996 和热敏感品系 4628 的花粉萌发率比对照分别下降 15.37% 和 31.89%,差异达显著水平,在整个处理期间,耐热品系 996 的花粉萌发率高于热敏感品系 4628 的。

2.6 高温胁迫对水稻柱头上花粉粒数的影响

水稻结实率取决于受精率,而要正常受精首先取决于柱头上的花粉粒数,如果不能保证足够的花粉粒数,就不能正常受精结实^[17]。从图 4 可看出,高温处理条件下,耐热品系 996 柱头上的平均花粉粒数为 35,而热

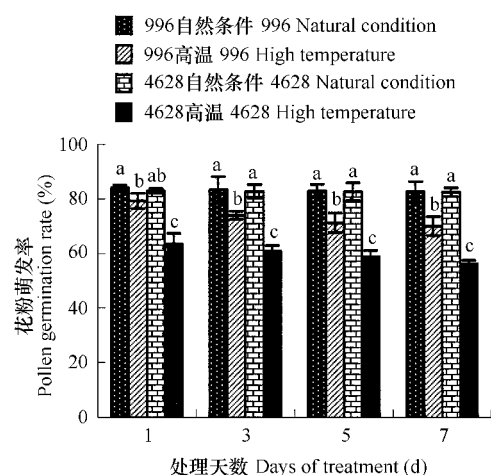


图 3 高温胁迫对水稻花粉萌发率的影响

Fig. 3 Effects of high temperature stress on rice pollen germination

敏感品系 4628 平均花粉粒数为 19,二者差异显著($F = 30.72 > F_{0.05} = 7.71$);在大田自然条件下,耐热品系 996 柱头上平均花粉数为 125,热敏感品系 4628 则为 132,二者没有显著差异。进一步分析表明,柱头上花粉数是由花药的开裂状况决定,二者呈显著正相关,相关系数为 0.8476*。

2.7 高温胁迫对水稻花药解剖结构的影响

水稻花药是由药隔(包括药隔基本组织和药隔微管束两部分)和 4 个花粉囊组成的^[18]。水稻成熟花药壁只有表皮和药室内壁细胞保持完整,中层已解体,只留下一些原生质体的残迹,腺质型绒毡层细胞完全自溶。高温下两品系花药都受到了不同程度的影响,但品系间存在着差异,在药壁的显微结构上,耐热品系 996

在高温下花药壁的表皮细胞排列较整齐,细胞间隙小(图 5-4),而热敏感品系 4628 花药壁的表皮细胞形状不规则,排列疏松,细胞间隙大(图 5-8);在花药药隔的显微结构上,在自然条件下,可以看到花药药隔由药隔基本组织、维管束鞘细胞、木质部和韧皮部组成,木质部有 2~3 条导管,韧皮部有 5~6 条筛管(图 6-1,3),而在高温下,药隔结构受到了不同程度的影响,耐热品系 996 药隔维管束较大,维管束鞘细胞体积增大,但仍排列整齐,鞘细胞内的薄壁细胞数量多,排列整齐,木质部和韧皮部清晰可见(图 6-2),而在热敏感品系 4628 药隔中,维管束相对较小,维管束鞘细胞形状不规则,排列紊乱,维管束无完整的木质部和韧皮部,且薄壁细胞严重退化(图 6-4)。

3 讨论

花器官是与水稻产量关系最密切的器官,它的正常发育是水稻获得高产的关键。而花器官也是水稻抽穗开花期对高温影响最敏感、最易受损伤的器官。据报道,将水稻放在 35℃ 以上高温条件下处理 2h,水稻花粉育性会显著降低^[19],并认为导致花粉育性降低的原因是由于水稻的雄性器官受到高温危害,使花药不开裂或开裂受阻,散发到柱头上的花粉粒数不足,扰乱了正常授粉;同时使代谢过程遭到破坏,降低了花粉活力与萌发力,阻碍了花粉管延长^[1,2,4,20~23]。本研究结果表明,在高温胁迫条件下,水稻的花器官(花药和花粉粒)受到一定程度的影响,表现在花药开裂受阻,花粉活力与萌发率降低,结实率下降,但耐热性不同的品种间存在着显著的差异。在 37℃ 高温处理条件下,耐热品系 996 的花药开裂系数、花粉粒直径膨胀幅度、花粉活力、花粉萌发力和柱头上花粉粒数明显高于热敏感品系 4628。这表明耐热品系 996 的花器官对高温有较强的适应性,在高温下,花粉粒直径增大,驱动花药开裂,有利于花粉散落,使柱头上能接受更多花粉粒,而且花粉粒在高温下仍能保持较高的活性,从而保持较高的花粉萌发率,使花粉粒正常授粉,结实率仍能维持较高水平。因此在高温胁迫条件下保持较好地花粉散落特性和花粉萌发特性,从而使其结实率在高温胁迫下变化不大,这可能是两品系在耐热性方面存在显著差异的生理机制。因此,在生产上选育具有良好的花粉散落特性和萌发特性的耐热性品种将是水稻耐热性育种的一个方向,也是战胜这一自然灾害的根本性措施。

维管束是植物的输导组织,担负着运输有机物、水分、矿物质及无机离子的功能。另外,有些植物激素如细胞分裂素和赤霉素也可通过维管束运输。维管束细胞代谢活性也直接影响物质的交换和运转。药隔维管束是营养物质输入花药的通道,它的发育状况直接影响输入花药的物质的种类和数量。关于花药维管束变化的研究,在番茄、小麦、玉米、水稻等作物上均有报道^[24~27],认为花药药隔维管束发育不良会导致雄性不育。本研究表明,耐热品系 996 在高温胁迫条件下仍能维持较好地维管组织,从而保证营养物质的正常供给。而热敏感品系 4628 在高温胁迫下药隔维管组织受到很大程度破坏,维管束细胞形状异常,排列紊乱,木质部和韧皮部界限不清,从而引起输导功能障碍,使花粉粒得不到充足的物质供应,导致花粉败育,这也从花药解

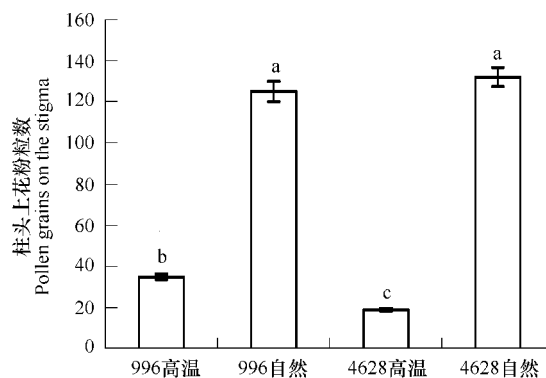


图 4 高温胁迫对水稻柱头上花粉粒数的影响

Fig. 4 Effects of high temperature stress on rice pollen grains on the stigma of rice

接图版 1

接图版 2

剖结构上证实了耐热品系 996 在高温下仍能保持较好地花粉散落特性和花粉萌发特性,是由于其在高温下仍能维持较好地维管组织的输导功能,保证营养物质的正常供应。绒毡层是花粉囊壁的最里面的一层细胞,含有较多的 RNA、蛋白质和丰富的油脂及类胡萝卜素等物质,对花粉粒的发育或形成起着重要的营养和调节作用。因此有关高温下绒毡层超微结构值得进一步研究。

References:

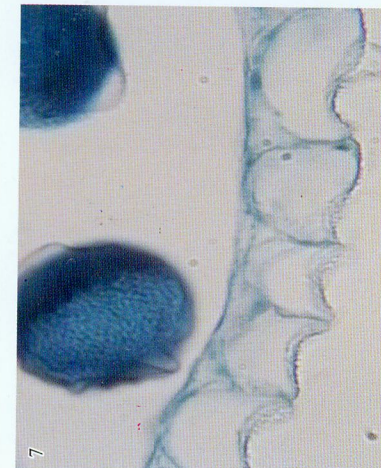
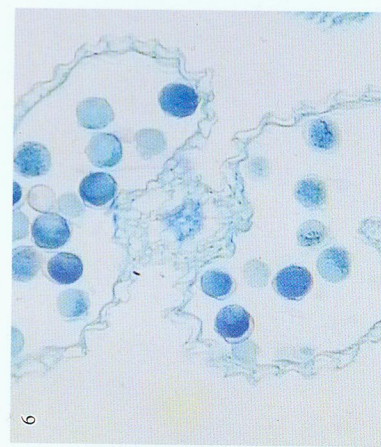
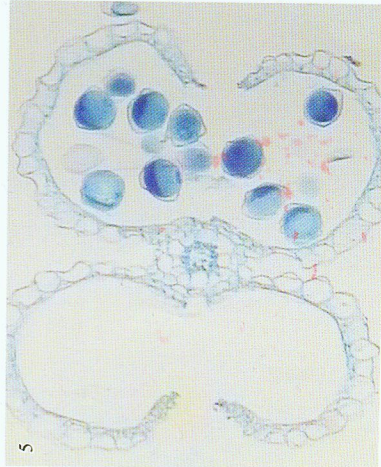
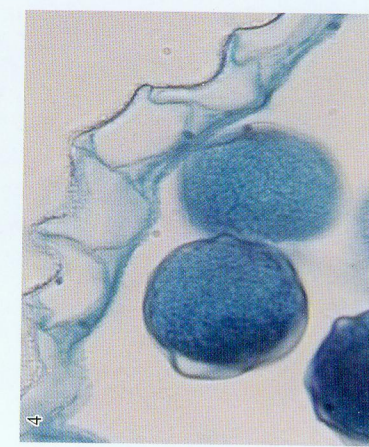
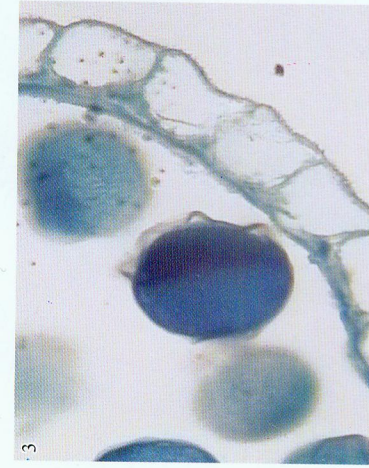
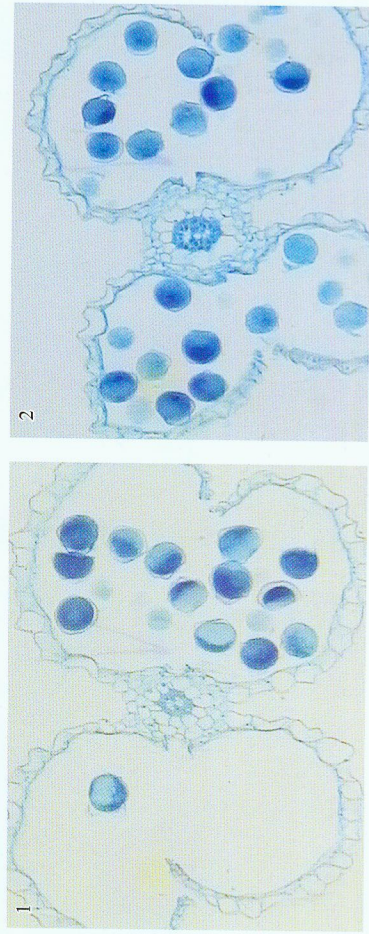
- [1] Matsui T, Omasa K, Horie T. Comparison between anthers of two rice (*Oryza sativa* L.) cultivars with tolerance to high temperatures at flowering or susceptibility. *Plant Prod Sci*, 2001, (4): 36—40.
- [2] Matsui T, Omasa K. Rice (*Oryza sativa* L.) cultivars tolerant to high temperature at flowering: anther characteristics. *Annals of Botany*, 2002, 89: 683—687.
- [3] Matsui T, Omasa K, Horie T. High temperature at flowering inhibits swelling of pollen grains, a driving force for thecae dehiscence in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Prod Sci*, 2000, (3): 430—434.
- [4] Prasad P V V, Boote K J, Allen I h, Jr, Sheehy J E, Thomas J M G. Species, ecotype and cultivar differences in spikelet fertility and harvest index of rice in response to high temperature stress. *Field Crops Research*, 2006, 95: 398—411.
- [5] Matsui T, Kobayasi Km, Hasegawa T. Stability of rice pollination in the field under hot and dry conditions in the Riverina region of New South Wales, Australia. *Plant Prod. Sci.*, 2007, 10: 57—64.
- [6] Koti S, Reddy K R, Reddy V, Kakani V, Zhao D. Interactive effects of carbon dioxide, temperature, and ultraviolet-b radiation on soybean (*Glycine max* L.) flower and pollen morphology, pollen production, germination, and tube lengths. *Journal of Experimental Botany*, 2005, 56: 725—736.
- [7] Morita S, Yonemaru J I, Takanashi J I. Grain growth and endosperm cell size under high night temperatures in rice (*Oryza sativa* L.). *Annals of Botany*, 2005, 95: 695—701.
- [8] Peng S B, Huang J L, Sheehy J E, Laza R C, Visperas R M, Zhong X H, Centeno G S, Khush G S, Cassman K G. Rice yields decline with high temperature from global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2004, 101(27): 9971—9975.
- [9] Laboratory of phytotron, Shanghai institute of plant physiology. The influence of high temperature on the flowering and fruiting of early rice and its control II. The influence of high temperature on the the flowering - fruiting of early rice during the flowering stage. *Acta Botanica Sinica*, 1976, 18(4): 321—329.
- [10] Zhu X M, Zeng Q X, Ning Q L. Effect of natural high temperature on flowering and fertilization in hybrid rice. *Scientia Agricultura Sinica*, 1983, (2): 37—43.
- [11] Matsui, T., K. Kobayasi, H. Kagata and T. Horie. 2005. Correlation between viability of pollination and length of basal dehiscence of the theca in rice under a hot and humid condition. *Plant Prod*, 2005, *Sci.*, (8): 109—114.
- [12] Li W B, Wang H, Zhang F S, *et al.* Effects of silicon on anther dehiscence and pollen shedding in rice under high temperature stress. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(1): 134—136.
- [13] Zhang Z L. Experimental guide of plant physiology. Beijing: Higher Education Press, 2000. 224—225.
- [14] Zheng G C. Microstructure technology of biology. Beijing: People Education Press, 1979, 23.
- [15] Wei M, Wang G M, Chen G H, *et al.* Effect of high temperature at full flowering stage on seed setting percentage of two-line hybrid rice liangyoupeiiju. *Hybrid Rice*, 2002, 17(1): 51—53.
- [16] Matsui T, Omasa K, Horie T. Mechanism of anther dehiscence in rice (*Oryza sativa* L.). *Annals of Botany*, 1999, 84: 501—506.
- [17] Yoshida S T. Satake, Mackill D J. High temperature stress in rice. IRRI Research Papers 67. International Rice Research Institute, Manila, Philippines, 1981.
- [18] Xu S X. Morphology and anatomy of rice. Beijing: Agriculture Press, 1984. 14.
- [19] Satake T, Yoshida S. High temperature induced sterility in indica rices at flowering. *Japanese Journal of Crop Science*, 1978, 47: 6—17.
- [20] Matsui T, Namuco O S, Ziska L H, *et al.* Effect of high temperature and CO₂ concentration on spikelet sterility in Indica rice. *Field Crop Res*, 1997, 51: 213—219.
- [21] Mackill D J. Rice pollination characteristics related to high temperature tolerance. *IRRI Research Newsletter*, 1981, 6(5): 11—12.
- [22] Li X Z, liang M Z, Zhou G Q, *et al.* Effect of environment condition on pollen vigor and seed set during flowering time of rice. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(3): 417—420.
- [23] Luo L H, Liu G H, Xiao Y H, *et al.* Influences of high temperature stress on the fertility of pollen, spikelet and grain-weight in rice. *Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences)*, 2005, 31(6): 593—596.
- [24] Hu S Y, Wang M S, Xu L Y, *et al.* Electron-microscope observations on the microsporogenesis in male-sterile and its maintainer-lines of wheat. *Acta*

Botanica Sinica, 1977, 19(3): 167—171.

- [25] Xia T, Liu J L. The cytological study of cytoplasmic male sterility in maize. Acta Agronomica Sinica, 1989, 15(2): 97—102.
- [26] Xu S H. Comparative observations on the floral vascular tissue of the male-sterile lines and its maintainer in rice. Scientia Agricultura Sinica, 1984, 8(2): 14—18.
- [27] Wang T, Tong Z. Changes in anther microstructure of the photoperiod-sensitive genic male sterile rice. Acta Agronomica Sinica, 1992, 18(2): 132—135.

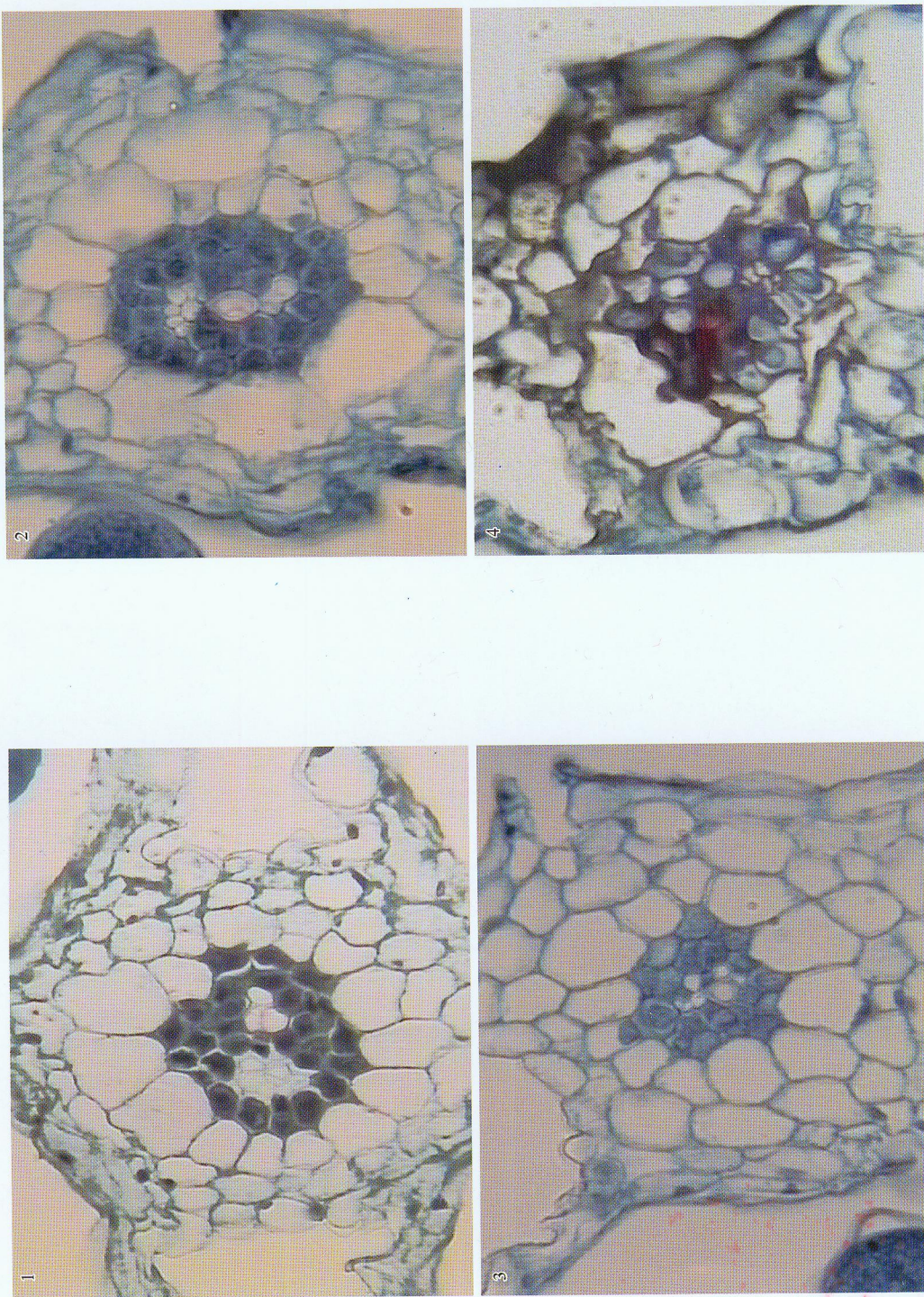
参考文献:

- [9] 上海植物生理研究所人工气候室. 高温对早稻开花结实的影响及其防治 II. 早稻开花期高温对开花结实的影响. 植物学报, 1976, 18(4): 321~329.
- [10] 朱兴明, 曾庆曦, 李清利. 自然高温对杂交稻开花受精的影响. 中国农业科学, 1983, (2): 37~43.
- [12] 李文彬, 王贺, 张福锁. 高温胁迫条件下硅对水稻花药开裂及授粉量的影响. 作物学报, 2005, 31(1): 134~136.
- [13] 张志良, 瞿伟菁主编. 植物生理学实验指导. 北京: 高等教育出版社, 2000. 224~225.
- [14] 郑国珥主编. 生物显微技术. 北京: 人民教育出版社, 1979.
- [15] 限溟, 王光明, 陈国惠, 等. 盛花期高温对两系杂交稻两优培九结实率的影响. 杂交水稻, 2002, 17(1): 51~53.
- [19] 徐是雄主编. 稻的形态与解剖. 北京: 农业出版社, 1984. 14.
- [22] 李训贞, 梁满中, 周广治, 等. 水稻开花时的环境条件对花粉活力和结实的影响. 作物学报, 2002, 28(3): 417~420.
- [23] 罗丽华, 刘国华, 肖应辉, 等. 高温胁迫对水稻花粉和小穗育性及稻谷粒重的影响. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2005, 31(6): 593~596.
- [24] 胡适宜, 王模善, 徐丽云, 等. 小麦雄性不育系和保持系的小孢子发育电子显微镜研究. 植物学报, 1977, 19(3): 167~171.
- [25] 夏涛, 刘纪麟. 玉米细胞质雄性不育的细胞学研究. 作物学报, 1989, 15(2): 97~102.
- [26] 徐树华. 水稻雄性不育系及保持系颖花输导组织的比较观察. 中国农业科学, 1984, 8(2): 14~18.
- [27] 王台, 童哲. 光周期敏感核不育水稻农垦 58S 不育花药的显微结构变化. 作物学报, 1992, 18(2): 132~135.



1. 自然条件下耐热品系 996 的花药结构(10 × 10) The anther structure of heat-tolerant line 996 under high temperature stress(10 × 10); 2. 高温胁迫下耐热品系 996 的花药结构(10 × 10) The anther structure of heat-tolerant line 996 under natural condition(10 × 40); 3. 自然条件下耐热品系 996 的花药壁结构(10 × 40) The anther wall structure of heat-tolerant line 996 under high temperature stress(10 × 40); 4. 高温胁迫下耐热品系 996 的花药壁结构(10 × 40) The anther wall structure of heat-tolerant line 996 under natural condition(10 × 10); 5. 自然条件下热敏感品系 4628 的花药结构(10 × 10) The anther structure of heat-sensitive line 4628 under high temperature stress(10 × 10); 6. 高温胁迫下热敏感品系 4628 的花药结构(10 × 10) The anther structure of heat-sensitive line 4628 under natural condition(10 × 40); 7. 自然条件下热敏感品系 4628 的花药壁结构(10 × 40) The anther wall structure of heat-sensitive line 4628 under high temperature stress(10 × 40); 8. 高温胁迫下热敏感品系 4628 的花药壁结构(10 × 40) The anther wall structure of heat-sensitive line 4628 under high temperature stress(10 × 40)

图 5 高温与自然条件下水稻花药壁的显微结构
Fig. 5 The microstructure of anther wall of rice under high temperature and natural condition



1. 自然条件下耐热品系 996 的花药药隔结构(10×40) 2. 高温胁迫下耐热品系 996 的花药药隔结构(10×40) 3. 自然条件下热敏感品系 4628 的花药药隔结构(10×40) 4. 高温胁迫下热敏感品系 4628 的花药药隔结构(10×40)

图 6 高温与自然条件下水稻花药药隔的显微结构

Fig.6 The microstructure of anther connective of rice under high temperature and natural condition