

抽穗期和乳熟期高温对水稻剑叶理化特性以及产量和品质的影响

李健陵¹, 林育炯¹, 张晓艳¹, 杜尧东^{1,2}, 王华², 吴丽姬¹, 胡飞¹

(1. 华南农业大学农学院 广东 广州 510642; 2. 广东省气候中心 广东 广州 510080)

摘要:为了研究高温影响水稻剑叶的生理生化机制,给防御水稻高温危害提供参考,本研究以超级杂交稻组合天优998为材料,盆栽条件下用人工气候箱分别对处于抽穗期和乳熟期的水稻进行连续5d的高温处理,日最高气温分别为32℃、35℃、38℃、40℃和42℃,日较差为6℃,以自然条件下正常生长的水稻为对照。结果表明:经高温处理后水稻剑叶生理生化指标均发生了变化。随着日最高温度的升高,超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)酶活性逐渐降低,可溶性蛋白和脯氨酸含量升高;丙二醛(MDA)含量和相对离子渗透率上升。水稻结实率和千粒重下降;精米率和整精米率下降,而垩白米率和垩白度增大。除可溶性糖之外,不同高温处理后抽穗期和乳熟期剑叶生理生化指标与水稻产量和品质相关性均较好。抽穗期和乳熟期剑叶受38℃影响后显著受损,日最高温度为35℃时产量和品质已显著下降。

关键词:水稻;高温;剑叶理化特性;产量和品质;抽穗期;乳熟期

中图分类号:S511;Q945.78

文献标识码:A

文章编号:1000-0275(2013)01-0109-05

Effects of High Temperature on Physiological and Biochemical Characteristics of

Flag Leaves, Grain Yield and Quality of Rice in Heading and Milk Stage

LI Jian-ling¹, LIN Yu-jiong¹, ZHANG Xiao-yan¹, DU Yao-dong^{1,2}, WANG Hua², WU Li-ji¹, HU Fei¹

(1. College of Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China;

2. Climate Centre of Guangdong Province, Guangdong, Guangzhou 510080, China)

Abstract: In order to investigate the mechanism of flag leaves responded to high temperature, and to provide suggestions for early rice coping with climate warming, the super hybrid rice Tianyou 998 were subjected to high temperature in heading and milk stage respectively (daily highest temperature 32℃, 35℃, 38℃, 40℃, and 42℃ with 6℃ differences a day for 5 days, natural condition as CK) in climate chambers with pot-cultured. The results showed that the physiological and biochemical indexes of flag leaves were changed after heating treatment. Both superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) enzyme activities decreased. However, the content of soluble protein, proline, malondialdehyde (MDA) and the relative electrolyte leakage increased as the daily highest temperature increased. The yield components, such as the seed setting rate and weight of 1000-grains declined. The milled rice percentage and head rice percentage was also seriously impacted. On the contrary, both chalky grain percentage and chalkiness degree increased. The physiological and biochemical indexes of flag leaves correlated with yield and quality significantly, except the content of soluble sugar. Furthermore, the flag leaves could be affected seriously when the daily highest temperature was above 38℃ in heading and milk stage, but the yield and quality decreased when the daily highest temperature reached 35℃.

Key words: rice (*Oryza sativa* L.); high temperature; physiological and biochemical characteristics; yield and quality; heading stage; milk stage

在全球气候变暖的背景下,我国夏季炎热期将延长,极端高温事件和热浪愈发频繁^[1-2]。研究表明,华南地区的高温事件也呈现增长趋势^[3-5]。近年来,我国南方稻区水稻不仅遭遇高温的机率高、风险大^[6],而且持续时间长,例如,2003年夏季长江中下游大面积地区最高气温超过40℃,日平均温度30℃以上的天气持续半月之久^[7]。华南地区早稻抽穗至结实期在每年的6-7月上中旬,与华南高温出现的时段(6-8月)重叠,正处于生殖生长期的水稻易受高温的影响。因此,开展高温对水稻理化特性以及产量和品质影响的研究,可为建立相应的防御高温栽培措施提供参考。

抽穗至结实期是水稻产量和品质形成的关键时期^[8]。近年来,关于高温对水稻生理生化机制和产量品质影响的研究取得了不少成果,例如,郑建初等^[9]在大田用红外加热的方法

研究抽穗期高温对水稻产量构成要素和稻米品质的影响及其基因型差异,认为尽管各品种对高温的响应表现出显著的基因型差异,但是高温对所有品种的产量和品质均产生了严重影响。大量研究表明,抽穗至结实期高温不仅对水稻剑叶的生理功能有较大的影响^[10-13],而且降低了水稻的每穗总粒数、结实率和千粒重^[14],同时稻米的精米率、整精米率、可溶性糖和蛋白质含量也呈下降趋势^[15],而稻米的垩白率、垩白度明显增加^[16]。目前国内高温对水稻的研究在高温设置上等级较少,温度间隔大,多采用一个或二个温度作代表,在研究区域上多集中于长江中下游地区,对华南地区研究较少。由于水稻主栽品种的地区差异性较大,各区域气候条件不尽相同,不同水稻品种耐热性也存在差异,因此开展高温对华南地区种植面积较大的早稻品种影响的研究是必要的。本研究运用

基金项目:中国气象局公益性行业(气象)科研专项(编号:GYHY200906021);中国气象局气候变化专项(编号:CCSF2011-25);华南农业大学农学院金穗创新计划(2009)。

作者简介:李健陵(1987-),男,广东佛山人,在校硕士生,主要研究方向为作物生理生态和农业气象;**通讯作者:**胡飞,男,安徽霍山人,副教授,主要研究方向是作物生理生态和农业气象。

收稿日期:2012-09-07, **修回日期:**2012-12-11

人工气候箱增温方法对华南地区推广面积较大的超级杂交稻组合天优 998 在抽穗期和乳熟期分别进行不同等级的高温处理,分析抽穗期和乳熟期高温对其剑叶理化特性以及产量和品质的影响,旨在为建立华南地区早稻的高产和稳产的栽培措施以及为早稻高温预警指标的的建立提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

水稻(*Oryza sativa* L.)为超级杂交稻组合天优 998,为早、晚兼用型水稻。种子由广东省农业科学院提供。该水稻每穗总粒数 130-140 粒,结实率 85%左右,千粒重 25.5g-27.0g。精米率 75.3%,整精米率 56.7%,垩白粒率 27%,垩白度 2.5%。

1.2 水稻栽培与管理

试验采用盆栽处理,2011 年于华南农业大学农业气象观测站内空地进行。试验前每个塑料盆(H:33cm;Φ:25cm)装入取自华南农业大学实验农场水稻田风干的水稻土 10kg。土壤基本理化性质为:pH5.76,有机质 27.6g/kg,碱解 N、速效 P、速效 K 分别为 87.2mg/kg、72.48mg/kg 和 126.10mg/kg。按广州地区常规方法播种育秧,3 月 3 日播种,4 月 5 日水稻秧苗长至三叶一心期,选取发育进程与长势一致的秧苗移栽至塑料盆中,每盆栽植 3 穴,每穴 3 株秧苗。移栽前 5d 在盆中加水,用木棒充分拌匀土壤,加入水稻专用复合肥(有效成份含量大于 25%),每盆 6.0g,于移栽后 12d 施分蘖肥 6.0g,于抽穗前 25d 追施穗肥 4.0g。实验期间按广州地区早稻常规管理措施进行水分与病虫害管理。每个处理各 5 盆,其中每盆随机选取 1 穴用于剑叶理化特性的测定,另外 2 穴水稻用于产量和品质的测定。

1.3 高温处理方法

水稻生育阶段划分参照官春云方法^[8],选用的杂交水稻组合天优 998 于 2011 年 6 月 6 日开始抽穗。各生育阶段高温处理的时间分别为:抽穗期(6 月 6 日-10 日)和乳熟期(6 月 16 日-20 日)。在人工气候箱(Convion PGV-36)进行高温处理,5 个人工气候箱分别设定日最高温度分别为 32℃、35℃、38℃、40℃和 42℃,以自然条件下生长的水稻为对照。分析广州日均温 30℃以上时,日较差为 5℃-10℃^[17],本研究日较差均设为 6℃。人工气候箱温度、光照参数设定见图 1,箱内相对湿度为 60%-80%。处理结束后对剑叶取样,取样时间分别为 6 月 11 日和 6 月 21 日。

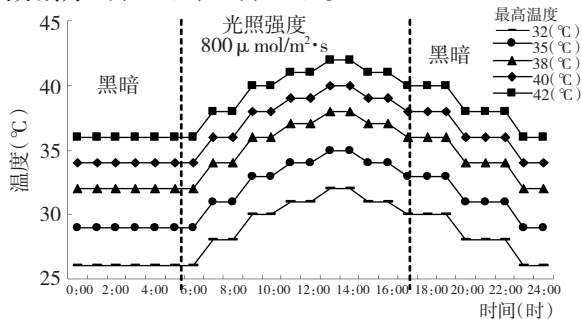


图 1 人工气候箱温度和光照设置

试验期间日最高温度如图 2,没有出现连续 2d 日最高气温 $\geq 35^\circ\text{C}$ 的状况,即在自然条件下试验材料在试验前后和试验期间均没有遇到高温热害,其处理效果全部来自人工处

理,不存在叠加效应。

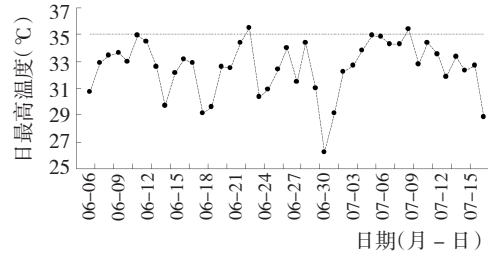


图 2 试验期间(在自然条件下)日最高气温的变化

1.4 剑叶理化特性测定

可溶性蛋白质采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定;可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定;脯氨酸含量测定采用茚三酮比色法;丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸比色法测定;超氧化物歧化酶(SOD)活性测定采用氮蓝四唑法;过氧化物酶(POD)活性测定采用愈创木酚法。上述指标的测定参照李合生^[18]的方法。剑叶相对离子渗透率参照张志良^[19]方法测定。

相对离子渗透率(%) = $\frac{R_1}{R_2} \times 100\%$ 。其中, R_1 为初电导值, R_2 为终电导值。

1.5 水稻产量的测定

水稻成熟后,对每盆用于产量和品质测定的余下 2 穴水稻稻穗进行考种,统计每穗总粒数、每穗实粒数,计算结实率、千粒重等指标,计算每盆理论产量和实际产量。

1.6 水稻品质的测定

水稻收获三个月后,待收获后水稻籽粒的含水量干燥到 12%-14%,去除籽粒中的青米、碎米和杂质,按照农业部 NY/T 593-2002 规定的方法,测定稻米的加工品质和外观品质,包括糙米率、精米率、整精米率、垩白米率和垩白度,其中垩白度 = 垩白面积 \times 垩白米率。

1.7 统计分析方法

数据的处理由 Excel 软件和 DPS 统计软件处理,采用多重比较法分析处理间差异。

2 结果与分析

2.1 高温对水稻剑叶渗透调节物质含量的影响

表 1 表明,自然条件下乳熟期剑叶可溶性蛋白含量要低于抽穗期。随着日最高温度的升高,抽穗期和乳熟期剑叶的可溶性蛋白含量逐渐上升,但不同生育阶段增加的幅度不同,抽穗期不同高温处理间的差异不显著,乳熟期经 38℃ 处理后显著上升($P < 0.05$)。在相同温度处理条件下,乳熟期剑叶可溶性蛋白含量的升幅大于抽穗期,如经 40℃ 和 42℃ 处理后,抽穗期的升幅分别为 7.75% 和 10.18%,乳熟期为 14.97% 和 22.20%,这表明 38℃ 以上的高温对乳熟期剑叶的可溶性蛋白含量影响较大。

随着日最高温度的升高,抽穗期剑叶可溶性糖含量的变化趋势表现为先降后升,在 35℃ 时最低。乳熟期剑叶可溶性糖含量随着日最高温度的升高而下降,经 32℃ 处理即显著下降($P < 0.05$)。与自然条件下的对照相比,乳熟期水稻经高温处理后剑叶的可溶性糖含量随着温度升高虽然降幅最大,但在 32℃ 至 40℃ 处理间的降幅范围为 23.04%-28.04%,处理

间差异不显著,经 42℃处理后降幅为 36.52%。

自然条件下乳熟期剑叶脯氨酸含量较抽穗期要低。经高温危害后,抽穗期和乳熟期水稻剑叶脯氨酸含量均随着日最

高温度的升高而增加,温度越高升幅越大。抽穗期经 40℃、乳熟期经 38℃处理后剑叶脯氨酸含量与自然条件下的对照相比显著增加($P<0.05$)。

表 1 高温对水稻剑叶可溶性蛋白、可溶性糖和脯氨酸含量的影响

日最高温度(°C)	可溶性蛋白含量(mg/g)		可溶性糖含量(mg/g)		脯氨酸含量(ug/g)	
	抽穗期	乳熟期	抽穗期	乳熟期	抽穗期	乳熟期
NC*	4.51 ± 0.19a	4.09 ± 0.12d	34.17 ± 0.74b	33.33 ± 1.16a	19.51 ± 1.39b	10.48 ± 0.45c
32	4.61 ± 0.33a	4.23 ± 0.13cd	29.43 ± 0.45c	25.65 ± 0.89b	21.60 ± 1.88ab	10.76 ± 0.69c
35	4.68 ± 0.10a	4.27 ± 0.13bcd	27.33 ± 0.42d	24.11 ± 0.86b	22.66 ± 0.63ab	12.09 ± 0.73c
38	4.76 ± 0.20a	4.60 ± 0.17abc	32.88 ± 0.57b	24.73 ± 0.77b	23.24 ± 1.26ab	16.74 ± 0.41b
40	4.86 ± 0.17a	4.70 ± 0.18ab	33.37 ± 0.46b	23.98 ± 0.78b	23.80 ± 1.58a	18.24 ± 0.27ab
42	4.97 ± 0.12a	4.99 ± 0.13a	37.51 ± 0.91a	21.16 ± 0.76c	24.42 ± 0.65a	20.58 ± 1.82a

注:不同小写字母表示同一生育阶段不同高温处理间差异显著($P<0.05$)。NC*表示自然条件下的对照。以下各表相同。

2.2 高温对水稻剑叶 SOD 和 POD 酶活性的影响

表 2 表明,随着日最高温度的升高,抽穗期和乳熟期水稻剑叶 SOD 酶活性逐渐下降,自然条件下、日最高温度 32℃和 35℃三种条件下 SOD 酶活性差异不显著。当日最高温度大于 38℃时,水稻剑叶 SOD 酶活性显著下降($P<0.05$)。表明 38℃以上高温对抽穗期和乳熟期剑叶 SOD 酶活性影响较大。经高温处理后,POD 酶活性变化趋势与 SOD 酶活性相似,即表现为随着日最高温度的升高,抽穗期和乳熟期水稻剑叶 POD 酶活性逐渐下降。经日最高温度 38℃处理后,剑叶 POD 酶活性与对照相比下降幅度增加,差异达到显著水平($P<0.05$)。

表 2 高温对水稻剑叶 SOD 酶和 POD 酶活性的影响

日最高温度(°C)	SOD 酶活性(U/g)		POD 酶活性($\times 10^3$ u/g·min)	
	抽穗期	乳熟期	抽穗期	乳熟期
NC	162.22 ± 9.86a	153.03 ± 5.86a	24.72 ± 1.98a	22.48 ± 0.71a
32	152.42 ± 9.07a	142.16 ± 5.72a	23.38 ± 0.57a	20.08 ± 1.33a
35	147.58 ± 2.37a	139.87 ± 4.05a	21.88 ± 0.91a	19.66 ± 0.70a
38	121.03 ± 4.93b	123.54 ± 5.68b	16.38 ± 0.66b	15.88 ± 0.69b
40	116.02 ± 3.13b	113.78 ± 1.88b	16.08 ± 0.64b	15.82 ± 0.99b
42	114.91 ± 5.02b	111.20 ± 2.77b	14.28 ± 0.56b	15.96 ± 1.10b

2.3 高温对水稻剑叶 MDA 含量和质膜透性的影响

表 3 表明,经高温处理后,抽穗期和乳熟期剑叶 MDA 含量随着日最高温度的升高而逐渐上升,并且升幅基本一致。经 38℃以上高温处理后,抽穗期和乳熟期剑叶 MDA 含量均显著升高($P<0.05$)。

表 3 高温对水稻剑叶 MDA 含量和相对离子渗透率的影响

日最高温度(°C)	MDA 含量($\times 10^{-3}$ μmol/g)		相对离子渗透率(%)	
	抽穗期	乳熟期	抽穗期	乳熟期
NC	43.81 ± 1.64c	44.88 ± 1.51b	24.02 ± 2.16c	26.54 ± 2.20c
32	45.68 ± 2.15c	46.33 ± 1.53b	28.26 ± 1.53c	28.86 ± 2.08c
35	47.68 ± 4.04bc	48.90 ± 2.46b	27.17 ± 1.22c	30.82 ± 2.43c
38	52.64 ± 0.79ab	54.61 ± 2.35a	34.64 ± 1.81b	38.18 ± 1.06b
40	53.64 ± 1.73ab	57.38 ± 1.08a	40.71 ± 1.43a	45.11 ± 3.50a
42	54.89 ± 1.75a	56.90 ± 2.08a	42.50 ± 1.72a	47.72 ± 1.04a

经高温处理后,抽穗期和乳熟期剑叶相对离子渗透率均随着日最高温度的升高而逐渐上升。经 38℃以上高温处理后,剑叶相对离子渗透率显著上升($P<0.05$)。综合高温对水稻剑叶 MDA 含量和相对离子渗透率的影响表明,38℃以上高温对细胞膜危害较大。

2.4 高温对水稻产量的影响

表 4 表明,抽穗期和乳熟期水稻经日最高温度 32℃处理后的结实率没有显著变化,但当日最高温度 ≥ 35 ℃时结实率

显著下降($P<0.05$),温度越高降幅越大。在相同温度处理条件下,抽穗期高温引起结实率的下降比乳熟期更严重,经 38℃、40℃和 42℃处理后,抽穗期结实率降幅分别为 27.10%、39.28%和 53.90%,乳熟期为 18.38%、29.27%和 39.48%。

表 4 高温对水稻产量构成因素的影响(结实率和千粒重)

日最高温度(°C)	结实率(%)		千粒重(g)	
	抽穗期	乳熟期	抽穗期	乳熟期
NC	89.38 ± 0.54a	89.38 ± 0.58a	24.12 ± 0.30a	24.12 ± 0.30a
32	85.90 ± 0.39a	87.69 ± 0.76a	23.75 ± 0.25ab	23.94 ± 0.21a
35	80.80 ± 0.71b	83.22 ± 0.71b	23.50 ± 0.38ab	23.62 ± 0.13ab
38	65.18 ± 2.08c	72.95 ± 1.14c	23.05 ± 0.23b	23.47 ± 0.22ab
40	54.29 ± 1.19d	63.22 ± 1.09d	22.12 ± 0.12c	23.01 ± 0.27b
42	41.24 ± 2.24e	54.09 ± 1.86e	21.83 ± 0.36c	22.27 ± 0.20c

经高温处理后,抽穗期和乳熟期水稻千粒重均下降,经日最高温度 32℃和 35℃处理后千粒重下降不显著。当抽穗期经日最高温度 38℃处理后千粒重下降显著($P<0.05$),下降幅度随日最高温度的升高而增大。乳熟期水稻经 40℃处理后千粒重才显著下降。综合表 4 和表 5 表明:抽穗期和乳熟期水稻经高温处理后,其理论产量、实际产量、结实率三者下降趋势一致。抽穗期经 32℃处理,乳熟期经 35℃高温处理后实际产量显著下降($P<0.05$)。在相同温度处理下,与乳熟期相比高温对抽穗期的产量影响更严重。

表 5 高温对水稻每穴理论产量和实际产量的影响

(单位:g/hill)

日最高温度(°C)	理论产量		实际产量	
	抽穗期	乳熟期	抽穗期	乳熟期
NC	40.24 ± 1.63a	40.24 ± 1.63a	38.04 ± 0.95a	38.04 ± 0.95a
32	36.91 ± 1.09ab	38.54 ± 1.50ab	34.72 ± 1.28b	35.94 ± 1.25ab
35	34.22 ± 1.41b	34.94 ± 0.49bc	31.15 ± 0.95c	32.81 ± 1.12b
38	28.34 ± 1.60c	31.50 ± 1.55c	24.85 ± 1.03d	28.79 ± 1.01c
40	22.34 ± 0.58d	26.63 ± 0.76d	19.86 ± 1.46e	24.06 ± 1.41d
42	16.01 ± 1.18e	22.57 ± 1.08e	14.12 ± 0.55f	20.99 ± 0.91d

2.5 高温对水稻加工品质和外观品质的影响

表 6 显示抽穗期和乳熟期水稻经高温处理后糙米率没有发生显著的变化。精米率随着日最高温度升高而下降,经 35℃高温处理后,精米率下降幅度显著下降($P<0.05$)。抽穗期和乳熟期经相同高温处理后稻米精米率下降幅度前者较大。经高温处理后整精米率变化趋势与高温对精米率的影响一致。与乳熟期相比高温对抽穗期精米率和整精米率影响更大。

表 7 表明,高温处理后稻米的垩白米率和垩白度增加。

表 6 高温对水稻糙米率、精米率和整精米率的影响

(单位:%)

日最高温度(°C)	糙米率		精米率		整精米率	
	抽穗期	乳熟期	抽穗期	乳熟期	抽穗期	乳熟期
NC	82.06 ± 0.74a	82.06 ± 0.74a	62.87 ± 1.08a	62.87 ± 1.08a	57.36 ± 0.90a	57.36 ± 0.90a
32	81.25 ± 0.31a	81.00 ± 0.73a	60.66 ± 1.01ab	61.92 ± 0.32ab	55.42 ± 1.00a	55.88 ± 0.54a
35	81.29 ± 0.33a	81.63 ± 0.47a	59.08 ± 0.71bc	59.78 ± 0.27b	49.63 ± 1.13b	48.28 ± 1.24b
38	81.29 ± 0.52a	81.19 ± 0.79a	55.89 ± 1.03c	54.16 ± 0.58c	18.53 ± 0.59c	25.28 ± 1.52c
40	81.18 ± 0.23a	81.35 ± 0.68a	48.32 ± 1.23d	51.78 ± 0.41cd	16.49 ± 0.23c	19.55 ± 0.79d
42	81.73 ± 1.64a	80.91 ± 0.19a	39.47 ± 1.50e	49.83 ± 1.50d	17.86 ± 0.58c	16.76 ± 0.41d

抽穗期经日最高温度 32℃处理,乳熟期经 35℃处理后垩白米率显著上升($P<0.05$)。日最高温度越高稻米的垩白度上升幅度越大,两个阶段经 32℃处理后垩白度显著上升($P<0.05$)。

表 7 高温对水稻籽粒垩白米率和垩白度的影响(单位:%)

日最高温度(°C)	垩白米率		垩白度	
	抽穗期	乳熟期	抽穗期	乳熟期
NC	28.20 ± 1.24e	28.20 ± 1.24d	2.39 ± 0.19e	2.39 ± 0.19e
32	32.00 ± 0.45d	30.20 ± 1.56cd	6.05 ± 0.34d	4.03 ± 0.27d
35	38.60 ± 1.17c	34.40 ± 1.75bc	9.18 ± 0.46c	6.97 ± 0.35c
38	39.80 ± 0.66c	37.60 ± 1.54b	17.48 ± 0.60b	9.24 ± 0.56b
40	80.00 ± 1.00b	75.80 ± 2.89a	18.60 ± 0.42b	13.84 ± 0.57a
42	86.20 ± 1.11a	77.80 ± 1.43a	20.47 ± 0.39a	14.08 ± 0.71a

2.6 不同高温处理后水稻剑叶生理生化指标与产量和品质的关系

表 8 表明,抽穗期和乳熟期水稻经高温处理后剑叶生理生化指标与理论产量的相关性均较好。除了可溶性糖含量与理论产量之间的相关性不显著外,其余生理生化指标与水稻理论产量均达到显著相关($P<0.05$)。抽穗期和乳熟期剑叶的 SOD 酶活性、POD 酶活性与垩白度呈极显著负相关($P<0.01$),可溶性蛋白、脯氨酸、MDA 含量、相对离子渗透率与水稻垩白度呈极显著正相关($P<0.01$),可溶性糖与垩白度相关性不显著。乳熟期剑叶 SOD 酶活性和 POD 酶活性与水稻整精米率达到极显著正相关($P<0.01$),可溶性蛋白、脯氨酸、MDA 含量和相对离子渗透率与水稻整精米率呈极显著负相关($P<0.01$),可溶性糖与整精米率呈极显著负相关($P<0.01$),可溶性蛋白、脯氨酸则呈显著负相关($P<0.05$)。

表 8 水稻剑叶生理生化指标与水稻理论产量、整精米率和垩白度的相关性

生理生化指标	理论产量		整精米率		垩白度	
	抽穗期	乳熟期	抽穗期	乳熟期	抽穗期	乳熟期
可溶性蛋白	-0.994**	-0.983**	-0.893*	-0.958**	0.956**	0.950**
可溶性糖	-0.621	0.782	-0.575	0.700	0.498	-0.786
脯氨酸	-0.906*	-0.980**	-0.852*	-0.987**	0.942**	0.962**
SOD	0.941**	0.970**	0.988**	0.978**	-0.995**	-0.981**
POD	0.958**	0.891*	0.982**	0.957**	-0.995**	-0.920**
MDA	-0.960**	-0.954**	-0.977**	-0.993**	0.999**	0.978**
相对离子渗透率	-0.979**	-0.988**	-0.932**	-0.975**	0.953**	0.984**

注:* 和 ** 分别为 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上的显著差异。

2.7 水稻剑叶各生理生化指标以及产量和品质的显著变化温度

表 9 显示,除了可溶性糖以外,剑叶大部分生理生化指标的显著变化温度在 38℃,表明当日最高温度达到 38℃时,水稻剑叶受到高温明显的损害。表 10 显示,水稻产量和品质显著变化的温度为 35℃,低于剑叶明显受损的温度。

3 讨论

表 9 水稻剑叶各生理生化指标显著变化的温度

生理生化指标	显著变化温度(°C)	
	抽穗期	乳熟期
可溶性蛋白	None*	38
可溶性糖	32	32
脯氨酸	40	38
SOD	38	38
POD	38	38
MDA	38	38
相对离子渗透率	38	38

注:*None:经高温处理后,该指标无显著变化($P<0.05$),下表同。

表 10 水稻产量和品质显著变化的温度

产量和品质	显著变化温度(°C)	
	抽穗期	乳熟期
结实率	35	35
千粒重	38	40
理论产量	35	35
实际产量	32	35
糙米率	None	None
精米率	35	35
整精米率	35	35
垩白米率	32	35
垩白度	32	32

3.1 水稻剑叶生理生化指标对高温处理的响应

逆境胁迫下,水稻植株体内生理生化反应会发生相应的变化,保护系统会激发以应对外界干扰,这些变化被认为是水稻植株对逆境胁迫的响应。渗透调节物质、活性氧清除系统和胞膜透性等生理生化特性可很好地评价水稻受到胁迫后的受损程度^[9]。本研究结果显示:经高温处理后 SOD 和 POD 酶活性、可溶性蛋白、脯氨酸、可溶性糖、MDA 含量和相对离子渗透率等变化趋势与前人研究结果一致^[10-14],表明高温使剑叶受损,影响其进行光合作用。本研究进一步表明:受高温影响后乳熟期比抽穗期剑叶生理生化指标变化幅度更大,显示乳熟期比抽穗期剑叶对高温影响更敏感。

3.2 高温处理后水稻产量的变化

与高温对剑叶生理生化指标的影响相一致,抽穗期和乳熟期水稻经高温处理后理论和实际产量均下降,抽穗期受高温导致产量下降的程度更加严重。与张桂莲等^[16]的结果相似,抽穗期和乳熟期水稻经高温处理后结实率和千粒重影响显著下降。与郑建初^[9]和谢晓金^[15]的结果相似,抽穗期高温影响产量下降的主要因素是结实率下降,其次是千粒重下降。本研究进一步表明,乳熟期高温影响产量下降主要因素是结实率下降,其次是千粒重下降。抽穗期和乳熟期受 35℃处理后的结实率、理论产量和实际产量开始显著下降。

3.3 高温处理后水稻加工品质和外观品质的变化

水稻品质受水稻品种遗传因素和外部因素控制,温度是

影响水稻品质的重要因素。水稻的加工品质和外观品质的高低决定于灌浆结实期籽粒的发育状况^[9]。与郑建初^[9]和谢晓金^[15]的结果相似,抽穗期和乳熟期高温对稻米的糙米率基本没有影响。本研究进一步表明,抽穗期和乳熟期经 35℃高温处理后精米率显著下降,并且高温对整精米率的影响十分显著,尤其是抽穗期和乳熟期经日最高温度 38℃处理后,整精米率下降幅度大。同样,高温对稻米垩白影响较大,垩白度则随着日最高温度的增加而升高;在相同温度处理条件下,抽穗期高温引起的垩白米率和垩白度的升幅大于乳熟期,表明抽穗期水稻经高温危害后,稻米外观品质更容易降低。

3.3 水稻剑叶生理生化指标与水稻产量和品质的相关性分析

崔娜等^[14]研究发现,花期高温胁迫下水稻功能叶的脯氨酸等生理指标与产量呈极显著相关,本研究对抽穗期和乳熟期高温处理后剑叶生理生化指标与水稻产量和品质相关分析结果进一步显示,除可溶性糖外,其余大部分生理生化指标与产量和品质呈显著或极显著相关。这表明高温对水稻产量和品质的影响与水稻剑叶受损的程度相联系,剑叶受损越严重,导致光合产物减少,致使产量减少和品质下降。

3.4 水稻剑叶生理生化指标与水稻产量和品质的显著变化温度的差异性

抽穗期和乳熟期经过 38℃高温处理后所测的水稻剑叶生理生化指标均发生较大幅度的变化,各生理生化指标与对照相比呈现显著差异,表明 38℃以上的高温对水稻剑叶生理机能危害严重,而抽穗期和乳熟期经 35℃高温处理后,产量和品质的构成因素均出现显著的变化。对于这种现象,笔者认为这是由于水稻籽粒等生殖器官与剑叶相比更容易受高温影响。抽穗期和乳熟期水稻经 35℃高温处理,尽管对剑叶的功能影响较小,但已使水稻籽粒内部生理生化反应紊乱,籽粒受精和灌浆出现异常,或者剑叶与籽粒之间的物质运送发生障碍,产量和品质出现下降,高温主要对库和流产生影响;而当最高气温大于 38℃后水稻剑叶也损伤严重,光合产物供应不足,光合源产物也受到了影响,因此,产量和品质下降的幅度更大。

4 结论

随着日最高温度的升高,抽穗期和乳熟期剑叶内物质动态平衡被打破,可溶性蛋白和脯氨酸含量逐渐上升,抽穗期可溶性糖含量先升后降,乳熟期则逐渐下降;活性氧清除系统中的 SOD 酶和 POD 酶活性逐渐下降;MDA 含量和相对离子渗透率逐渐升高,说明高温造成细胞膜损伤增加。当日最高温度 $\geq 38^\circ\text{C}$ 时,抽穗期和乳熟期剑叶受损更为严重,表现为各生理生化指标发生明显的变化。相关性分析表明高温下剑叶生理生化特性的变化是造成水稻产量和品质下降的原因之一。本研究进一步发现剑叶生理生化指标与水稻产量和

品质的显著变化温度不一致,因此造成水稻产量和品质下降的因素是多样的,推测高温引起水稻产量减产和品质下降除了剑叶的源功能受到影响外,还与水稻籽粒在高温下不能正常发育有关。

参考文献:

- [1] 高荣,王凌,高歌. 1956-2006年中国高温日数的变化趋势[J]. 气候变化研究进展, 2008, 3(3): 177-182.
- [2] 刘颖杰,林而达. 气候变暖对中国不同地区农业的影响[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(4): 229-233.
- [3] 刘桃菊,殷新佑,戚昌瀚,等. 气候变化与水稻生长发育及产量形成关系的模拟研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(3): 486-490.
- [4] 王成,吴善材,邓明,等. 开平市近 50 年气候变化特征[J]. 广东气象, 2011, 33(2): 35-44.
- [5] 伍红雨,杜尧东. 近 49 年广东高温的气候特征及其变化规律[J]. 热带气象学报, 2011, 27(3): 427-432.
- [6] 葛道润,金之庆,石春林,等. 气候变化对中国南方水稻生产的阶段性影响及适应性对策[J]. 江苏农业学报, 2002, 18(1): 1-8.
- [7] 张桂莲,陈立云,张顺堂,等. 高温胁迫对水稻剑叶氮代谢的影响[J]. 杂交水稻, 2007, 22(4): 57-61.
- [8] 官春云. 现代作物栽培学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011: 239.
- [9] 郑建初,张彬,陈留根,等. 抽穗期高温对水稻产量构成要素和稻米品质的影响及其基因型差异[J]. 江苏农业学报, 2005(21): 249-254.
- [10] 李萍萍,程高峰,张佳华,等. 高温对水稻抽穗扬花期生理特性的影响[J]. 江苏大学学报, 2010, 31(2): 125-130.
- [11] 滕中华,智丽,宗学风,等. 高温胁迫对水稻灌浆结实期叶绿素荧光、抗活性氧活力和稻米品质的影响. 作物学报[J], 2008, 34(9): 1622-1666.
- [12] 汤日圣,郑建初,陈留根,等. 高温对杂交水稻籽粒灌浆和剑叶某些生理特性的影响[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2005, 31(6): 657-662.
- [13] 谢晓金,李秉柏,程高峰,等. 高温对不同水稻品种剑叶生理特性的影响[J]. 农业现代化研究, 2009, 30(4): 483-486.
- [14] 崔娜,吴文革,许有尊,等. 花期高温胁迫对杂交中籼水稻功能叶生理特性及产量的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2011, 38(4): 611-616.
- [15] 谢晓金,李秉柏,李映雪,等. 抽穗期高温胁迫对水稻产量构成要素和品质的影响[J]. 中国农业气象, 2010, 31(3): 411-415.
- [16] 张桂莲,陈立云,张顺堂,等. 高温胁迫对水稻花器官和产量构成要素及米质的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2007, 33(2): 132-136.
- [17] 陈新光,潘蔚娟,张江勇,等. 气候显著变暖使广州极端气候事件增多[J]. 广东气象, 2007, 29(2): 24-25.
- [18] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [19] 张志良,瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [20] 武维华. 植物生理[M]. 北京: 科学出版社, 2003, 429-430.