

水稻品种耐热性与相关生化指标的关联分析

陈秀晨^{1,2}, 王士梅², 朱启升², 汪婉琳², 杨前进², 张德文², 李万成³

(1.安徽省农业科学情报研究所, 合肥 230031; 2.安徽省农业科学院水稻研究所, 合肥 230031; 3.安徽农业大学生命科学学院, 合肥 230036)

摘 要:研究高温胁迫下水稻生化特性变化及其与品种耐热性的关系,可为水稻耐热性育种、耐热品种的鉴定和热害后补偿栽培技术研究提供依据。采用人工智能温室对水稻幼穗分化期到抽穗开花期进行高温处理,研究了高温胁迫对水稻叶片叶绿素、可溶性糖、脯氨酸、可溶性蛋白等 6 项生化指标含量变化的影响,对各品种生化指标变化与热敏感指数进行多元回归分析筛选水稻耐热性鉴定指标。结果表明,高温胁迫后,水稻叶片叶绿素、可溶性糖以及内源多胺含量在 3 个处理阶段均呈下降趋势,但耐热品种下降幅度明显小于热敏感品种;脯氨酸和丙二醛含量变化趋势与之相反,耐热品种脯氨酸含量上升幅度明显大于热敏感品种,而丙二醛含量上升幅度则明显小于热敏感品种;高温处理 7 d 后,叶片可溶性蛋白含量上升,处理 14 d 和 21 d 后呈逐渐下降趋势。高温胁迫后,叶绿素、可溶性糖、脯氨酸、可溶性蛋白、丙二醛以及内源多胺等含量变化与水稻耐热相关性存在较大差异。叶绿素、可溶性糖、脯氨酸、可溶性蛋白、丙二醛以及内源多胺含量可以作为水稻幼穗分化期到抽穗开花期耐热性鉴定的生化指标。

关键词:水稻;耐热性;生化指标;关联分析

中图分类号:Q745.78 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)09-1633-07

Correlation Analysis Between High Temperature Resistance and Pertinent Biochemical Indexes Among Different Rice Varieties

CHEN Xiu-chen^{1,2}, WANG Shi-mei², ZHU Qi-sheng², WANG Wan-lin², YANG Qian-jin², ZHANG De-wen², LI Wan-cheng³

(1.Institute of Scientific and Technical Information, Anhui Academy of Agriculture Sciences, Hefei 230031, China; 2. Institute of Rice Science, Anhui Academy of Agriculture Sciences, Hefei 230031, China; 3. School of Life Sciences, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: The aim of this study was to investigate the correlation between certain stress-related biochemical indexes and heat resistance in rice and provide guidelines for identifying heat resistance germplasms and for breeding heat resistance varieties as well as for cultivation practice. Different rice varieties were treated with high temperature in a temperature controllable greenhouse and the contents of chlorophyll, soluble sugar, proline, soluble protein and other indexes in leaves were measured. The effect of high temperature stress on those biochemical indexes was analyzed using multiple regression analysis to screen for useful biochemical indexes identifying heat resistance from young panicle differentiation stage to heading flowering period of rice. After high temperature stress, the contents of chlorophyll, soluble sugar and endogenous polyamines were all decreased in leaves of all varieties tested in all three heat treatments. However, the heat resistant varieties showed a lower decrease than heat sensitive varieties. Meanwhile, the contents of proline and malondialdehyde were increased. Higher proline levels were observed in heat resistant varieties than that in heat sensitive varieties while the malondialdehyde levels were lower in heat resistant varieties. The content of soluble protein was increased with high temperature stress after seven days, and decreased with high temperature stress after 14 days and 21 days. The relationships between content changes of chlorophyll, soluble sugar, proline, soluble protein, malondialdehyde

收稿日期:2010-04-15

基金项目:国家科技支撑计划粮食丰产工程项目“水稻减灾高效生产技术体系研究”(2006BAD02A06-18);国家“863”课题“水稻航天工程育种技术与品种创制”(2007AA100101)

作者简介:陈秀晨(1983—),女,安徽庐江人,硕士,主要从事农业信息研究工作。E-mail:achen312@163.com

通讯作者:朱启升 E-mail:zhuqisheng0551@163.com

and endogenous polyamines and heat resistance were significantly different. The change of chlorophyll, soluble sugar, proline, soluble protein, malondialdehyde and endogenous polyamines can be used as biochemical indexes to identify heat resistance of rice from young panicle differentiation stage to heading flowering period.

Keywords: rice; heat resistance; biochemical indexes; correlation analysis

水稻是世界上最重要的粮食作物之一,尤其在发展中国家,是社会稳定和经济发展的的重要因素。然而,随着工业化的加快和温室效应的加剧,短期异常高温发生频繁,高温已成为影响水稻生长发育和产量的主要因素之一^[1]。2003年7月下旬—8月上旬,我国南方稻区出现了历史罕见的高温,日平均38℃以上高温持续了20d,日最高值达到41.3℃,持续高温对正处在幼穗分化和抽穗开花期水稻造成了严重危害,致使长江流域稻作区大面积水稻的结实率大幅度降低,部分杂交中籼稻结实率降低到35%,产量损失严重^[2-3]。国内外曾较早地相继在小麦、玉米等作物上开展了耐热性研究,对水稻耐热性研究起步相对较晚,且主要侧重高温对水稻产量和品质的影响或以结实率为指标进行耐热性品种筛选及耐热性的数量遗传分析^[4],而以水稻生理指标结合耐热性的研究较少。笔者用人工智能温室对水稻幼穗分化期到抽穗开花期进行高温处理,测定水稻叶片生理指标,分析了水稻生理特性与品种耐热性的关系,筛选出可作为水稻耐热性鉴定的生化指标。为水稻品种的耐热性鉴定、水稻耐热育种及热害后补偿栽培技术的研究提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选择经过2004—2007年大田耐热性自然鉴定筛选出的耐热程度不同的水稻品种,分别为绿优1号(耐热品种)、丰两优1号(中间状态)、新两优6号和Ⅲ优98(不同生育期表现不同)、天协1号(热敏感品种)共5个杂交中稻品种^[5]。

1.2 试验设计与处理

试验于2008年在安徽省农科院绿色食品工程研究所网室和中国科学技术大学人工智能温室内进行。绿优1号、天协1号、Ⅲ优98于4月15日播种,其余2个品种于4月22日播种,为使参试组合生育期保持基本一致,秧龄30d时,每个品种选40株素质一致的秧苗移栽到网室内,栽插规格为20cm×26.4cm。待品种处于幼穗分化期时,选择20株生长一致的单株挂牌,并将其中10株带泥移栽到花盆里,搬进高温人工智能温室内,进行高温处理,其余10株为对照。

温室内的温度控制在8:00—17:00为38~40℃,17:00—8:00为30℃,相对湿度为80%,白天光照强度为800~1000lx,在晴天可以运用排气、遮阳、湿帘、开顶窗等设施达到试验设计标准。分别在高温处理后7、14、21d取温室内每个品种倒1叶、倒2叶和倒3叶的叶片,测定叶绿素、可溶性糖、脯氨酸、可溶性蛋白、丙二醛和多胺6项指标的含量,3次重复,并同时采集网室内对应品种的叶片进行测定,做对照。处理完毕后从温室移出,让其正常生长,待品种成熟后分别对处理品种和网室对应品种进行单株考种,每个品种考3株。

1.3 测定项目与方法

高温处理结束后,立即测定自然条件和高温处理条件下水稻3片功能叶各生化指标的含量变化。其中叶绿素、可溶性糖与脯氨酸含量参照李合生^[6]方法测定。可溶性蛋白参照Bradford^[7]方法,用考马斯亮蓝G-250染色,以牛血清作标准曲线,测定在595nm处光吸收值。丙二醛含量参照李合生^[6]方法,采用巴比妥酸比色法测定。多胺含量按Flores等^[8]方法提取内源多胺,参照王富民等^[9]方法,用Agilent1100型高效液相色谱仪,反相C₁₈柱,进行测定。

1.4 数据处理

采用Excel 2003以及SPSS 13.0进行相关性分析以及多元回归分析。

2 结果与分析

2.1 高温胁迫对水稻农艺性状及产量的影响

2.1.1 高温胁迫对水稻农艺性状的影响

高温胁迫下,水稻株高、穗长均明显下降。图1和图2中的结果显示,在自然条件下,各品种间株高及穗长差异不显著。高温处理后,耐热品种绿优1号的株高及穗长较对照变化幅度较小,而热敏感品种天协1号下降幅度较明显。

2.1.2 高温胁迫对水稻产量的影响

表1中的结果表明,在高温胁迫下,产量性状均不同程度地降低,但降幅在品种间区别较大。总的趋势为耐热品种降幅小,热敏感品种降幅大。耐热品种绿优1号的结实率仍达70.00%以上,热敏感品种天

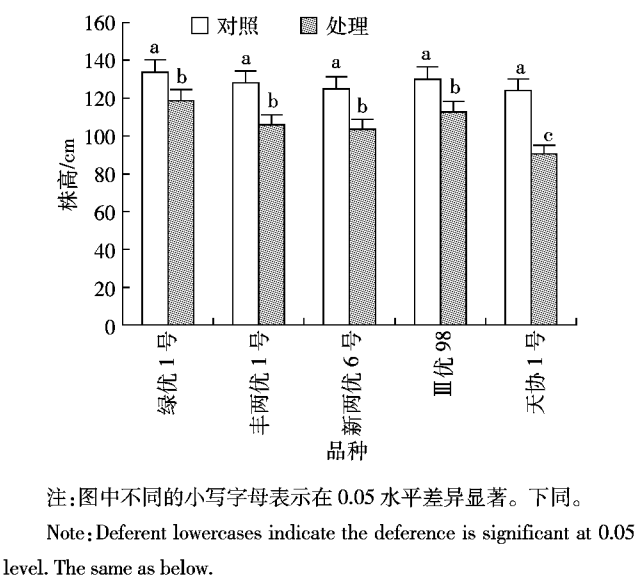


图 1 高温胁迫对水稻株高的影响
Figure 1 The effect of high temperature stress on plant height

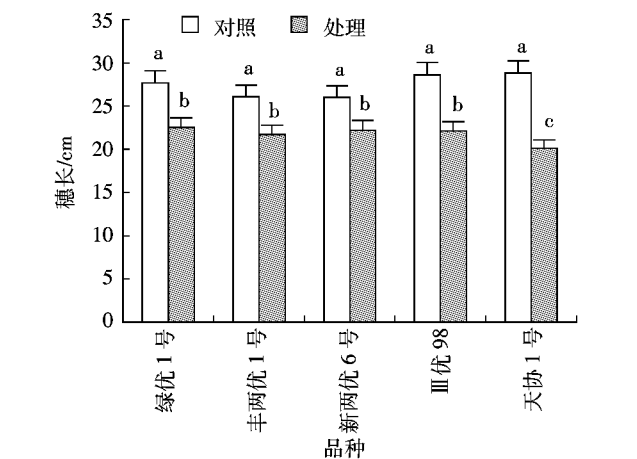


图 2 高温胁迫对水稻穗长的影响
Figure 2 The effect of high temperature stress on ear length

协 1 号仅为 44.62%, 丰两优 1 号、新两优 6 号和Ⅲ优 98

分别为 62.4%、50.9%和 46.7%。热敏感指数是反映品种耐热性的重要指标,热敏感指数越大,耐热性越差,根据该指数的大小,5 个品种的耐热性依次为绿优 1 号>新两优 6 号>丰两优 1 号>Ⅲ优 98>天协 1 号。

2.2 高温胁迫对水稻各生化指标的影响

水稻的生长与发育在不同时期都要求一定的适宜温度范围,该试验在水稻幼穗分化期到抽穗开花期采用人工高温胁迫处理后,不仅在外部农艺性状上发生较大变化,而且在植株生理生化活性上也均发生变化,主要表现在叶绿素、可溶性糖、可溶性蛋白质、脯氨酸、丙二醛以及多胺含量指标上发生了不同的生理反应。由表 2 可知,参试品种经高温胁迫处理后,3 个处理的叶片叶绿素含量比对照均有所下降,但品种间存在明显差异。表明高温胁迫加速了叶绿素的衰减,耐热性强的品种,其叶绿素含量下降幅度较小,水稻光合作用受到抑制,光合速率明显降低;可溶性糖含量也表现了相同的趋势;可溶性蛋白的含量则在处理 7 d 后上升,而处理 14 d 和 21 d 后明显下降;脯氨酸和丙二醛含量在各处理阶段均明显上升,但不同品种间的升、降幅度有差异。如耐热品种绿优 1 号可溶性糖、可溶性蛋白含量的下降幅度以及丙二醛含量的上升明显小于热敏感品种天协 1 号,而脯氨酸的上升幅度则明显高于热敏感品种天协 1 号。由图 3 可知,高温胁迫后,所有参试品种内源多胺含量均显著下降,不同品种间差异显著,热敏感品种下降幅度较大,且明显高于耐热品种。

方差分析表明,高温胁迫 7 d 后供试品种叶片内可溶性糖含量、脯氨酸含量、可溶性蛋白含量和丙二醛含量与对照的差异都达到了极显著水平,而叶绿素类含量变化与对照间差异不显著;高温胁迫 14 d 后,供试品种叶片内叶绿素含量、丙二醛含量与对照达到

表 1 高温胁迫对水稻产量的影响											
Table 1 The effect of high temperature stress on the yield of rice											
品种 Varieties	单株有效穗数/个 The number of effective panicles per plant		每穗实粒数/粒 Filled grains		千粒重/g 1000-grain weight		结实率/% Seed setting rate		单株产量/g Yield of single plant		热敏感指数/%Heat susceptibility index
	对照 CK	处理 Treatment	对照 CK	处理 Treatment	对照 CK	处理 Treatment	对照 CK	处理 Treatment	对照 CK	处理 Treatment	
绿优 1 号	7.5	4.0	178.5	104.8	26.1	24.5	85.9	72.6	34.8	10.3	15.5
丰两优 1 号	7.5	3.7	180.8	99.5	25.4	23.5	90.8	62.36	34.4	8.8	31.3
新两优 6 号	8.0	3.5	202.2	115.6	24.4	23.5	71.2	50.9	38.9	9.6	28.5
Ⅲ优 98	7.0	3.0	186.3	109.9	24.8	21.3	70	46.7	34.1	7.1	33.0
天协 1 号	7.0	2.8	175.4	92.4	24.7	20.9	76	44.6	30.9	5.5	41.3

注:热敏感指数^[10]=(常温结实率-高温结实率)/常温结实率×100。
Note: Heat susceptibility index(HIS)=(seed setting ratio of control – seed setting ratio of high temperature)/seed setting ratio of control ×100.

了显著水平,叶片内的可溶性糖含量、脯氨酸含量、可溶性蛋白含量以及精胺含量与对照都达到了极显著水平,腐胺含量与对照间差异不显著;高温胁迫 21 d 后,供试品种叶片内脯氨酸含量、可溶性蛋白含量和丙二醛含量与对照都达到了极显著水平,叶片内精胺含量与对照达到显著水平,叶绿素类含量、可溶性糖含量、腐胺以及亚精胺含量与对照间差异不显著。

2.3 水稻各生化指标间相关性分析

对水稻各生理指标含量的变化幅度进行相关性分析,结果如表 3~表 5 所示。高温胁迫下,除脯氨酸、丙二醛以及高温处理 7 d 后可溶性蛋白含量较对照有所增加外,水稻叶片叶绿素、可溶性糖、高温处理 14 d 和 21 d 后的可溶性蛋白以及内源多胺含量均下降。因此,如果仅根据单一指标得出耐热性大小的结论,必然有一定的片面性。由表 3~表 5 可知,所有单项指标间都存在或大或小的相关性,有的存在显著或极显著的相关性,使它们所提供的信息发生重叠^[11-12]。同时,由于不同品种耐热机制上的差异,各单项指标在耐热性中起的作用不尽相同。所以,直接利用这些单项指标很难对水稻各品种耐热性做出准确的评价。

2.4 水稻耐热性鉴定指标的筛选

对各品种的热敏感指数(y)与 6 项生理指标变化

幅度进行多元回归分析,分别建立以下最优回归方程:

$$y=8.984\ 4+0.966\ 0x_1+0.418\ 7x_2+0.001\ 2x_3-0.784\ 1x_5$$

(高温处理 7 d,方程决定系数 $R^2=1$, $F=350.85$)

$$y=9.803\ 9+0.058\ 00x_2-0.068\ 1x_3+0.139\ 0x_4+0.637\ 7x_6$$

(高温处理 14 d,方程决定系数 $R^2=0.997$, $F=415.26$)

$$y=27.969\ 2+0.345\ 2x_1-0.362\ 2x_2-0.198\ 8x_3+0.385\ 8x_6$$

(高温处理 21 d,方程决定系数 $R^2=1$, $F=350.85$)

式中, x_1,x_2,x_3,x_4,x_5,x_6 分别表示叶绿素、可溶性糖、脯氨酸、可溶性蛋白、丙二醛、腐胺及精胺含量的变化幅度。

3 个处理阶段的最优回归方程均极显著。由方程可知,高温处理 7 d 后,叶绿素、可溶性糖、脯氨酸以及丙二醛含量对水稻耐热性有显著影响;高温处理 14 d 后,可溶性糖、脯氨酸、可溶性蛋白以及腐胺含量对水稻耐热性有显著影响;高温处理 21 d 后,叶绿素、可溶性糖、脯氨酸以及腐胺含量对水稻耐热性有显著影响。因此,在水稻从幼穗分化期到抽穗期的耐热性鉴定可以测定叶绿素、可溶性糖、脯氨酸、可溶性蛋白、丙二醛以及内源多胺含量,使工作简单化。

3 讨论

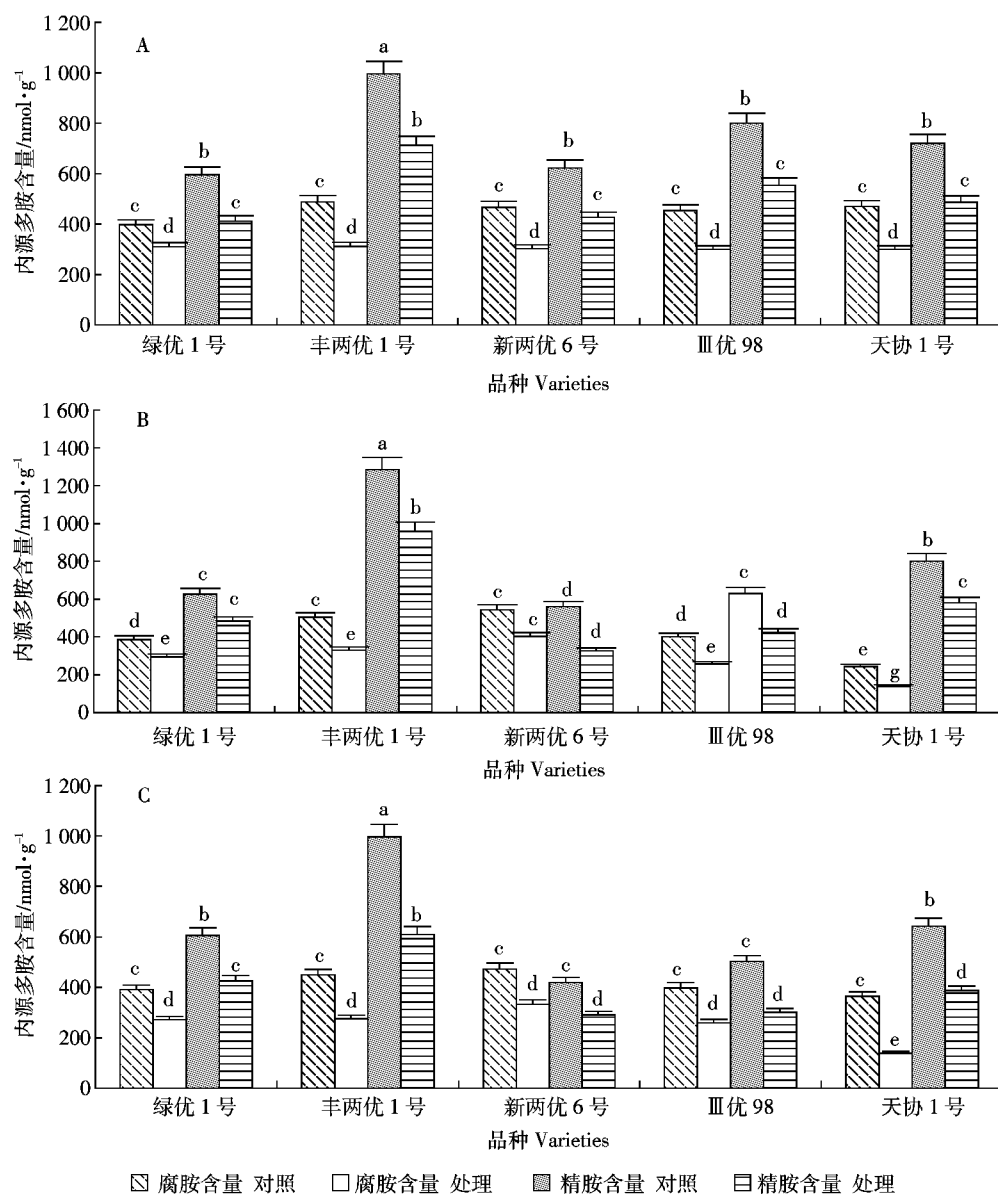
水稻的生长发育需要一定的适应温度,当温度超

表 2 高温胁迫对水稻叶片叶绿素、可溶性糖、脯氨酸、可溶性蛋白以及丙二醛含量的影响

Table 2 The effect of high temperature stress on chlorophyll, soluble sugar, proline, soluble protein and malondialdehyde contents

品种 Varieties	处理时 间/d Treat- ment days	叶绿素含量 Chlorophyll content			可溶性糖含量 Soluble sugar content			脯氨酸含量 Proline content			可溶性蛋白含量 Soluble protein content			丙二醛含量 Malondialdehyde content		
		对照	处理	变化幅度	对照	处理	变化幅度	对照	处理	变化幅度	对照	处理	变化幅度	对照	处理	变化幅度
		CK/ μg·g ⁻¹	Treat- ment/ μg·g ⁻¹	Change amplitude/ %	CK/ %	Treat- ment/ %	Change amplitude/ %	CK/ %	Treat- ment/ %	Change amplitude/ %	CK/ μg·g ⁻¹	Treat- ment/ μg·g ⁻¹	Change amplitude/ %	CK/ μmol·g ⁻¹	Treat- ment/ μmol·g ⁻¹	Change amplitude/ %
		μg·g ⁻¹	μg·g ⁻¹	%	%	%	tude/%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
绿优 1 号	7	519.94	461.17	11.30	31.76	28.24	11.08	2.19	4.93	125.11	7.32	8.49	15.98	4.40	4.92	11.82
	14	398.29	310.38	22.07	29.46	23.63	19.79	1.98	5.38	171.72	7.98	7.42	7.02	4.69	5.10	8.742
	21	328.40	248.29	24.39	25.48	19.97	21.62	3.55	7.99	125.07	7.57	6.62	12.55	4.86	5.86	20.58
丰两优 1 号	7	399.12	303.83	23.88	34.77	25.25	27.38	8.02	11.00	37.12	6.58	7.15	8.66	2.76	3.19	15.58
	14	366.49	233.48	36.29	21.56	15.46	28.29	8.98	14.39	60.24	6.11	5.30	13.26	3.94	4.88	23.86
	21	331.26	199.88	39.66	20.12	14.91	25.89	9.77	17.6	80.14	6.45	4.90	24.03	4.91	6.17	25.66
新两优 6 号	7	679.87	496.06	27.04	46.81	33.05	29.40	3.20	4.44	38.75	9.56	10.40	8.79	2.11	2.63	24.64
	14	470.70	262.55	44.22	48.24	27.20	43.62	3.85	6.00	55.84	8.81	6.63	24.74	4.11	4.91	19.46
	21	358.00	198.37	44.59	31.70	19.17	39.53	4.08	6.54	60.29	8.37	6.34	24.25	5.44	6.70	23.16
Ⅲ优 98	7	500.48	323.64	35.33	64.23	53.59	16.57	3.15	3.81	20.95	8.32	8.98	7.93	4.63	5.64	21.81
	14	463.56	285.39	38.44	54.61	42.33	22.49	2.86	4.27	49.30	8.44	6.99	17.18	4.97	6.16	23.94
	21	286.29	199.61	30.28	32.47	21.91	32.52	3.99	5.41	35.59	7.40	6.04	18.38	5.11	6.95	36.01
天协 1 号	7	419.71	234.57	44.11	31.61	20.58	34.89	2.87	3.36	17.07	8.01	8.37	4.49	3.22	4.13	28.26
	14	314.44	124.19	60.50	46.42	18.81	59.48	2.66	3.70	39.10	7.99	5.87	26.53	3.61	4.63	28.254
	21	244.37	136.92	43.97	20.46	7.10	65.30	3.87	4.26	10.08	6.34	3.85	39.27	4.10	5.91	44.15

注:各生化指标变化幅度=(高温胁迫值-常温胁迫值)/常温胁迫值×100。



注: A. 高温处理 7 d 内源多胺含量; B. 高温处理 14 d 内源多胺含量; C. 高温处理 21 d 内源多胺含量。

Note: A. Endogenous polyamine contents with high temperature stress after 7 days; B. Endogenous polyamine contents with high temperature stress after 14 days; C. Endogenous polyamine contents with high temperature stress after 21 days.

图 3 高温胁迫对水稻叶片内源多胺含量的影响

Figure 3 The effect of high temperature stress on endogenous polyamine contents of rice leaves

过其生长发育最适温度范围时,农艺性状、品质性状以及生理活性均会发生一些变化。

叶片叶绿素含量与光合速率密切相关,通常把叶绿素含量作为叶片功能的一个重要指标。光合作用是对高温最敏感的过程之一,在其他胁迫症状出现前,可以完全被抑制。任昌福等^[13]和 Tewari A K 等^[14]研究表明,高温胁迫下光合作用的关键酶 Rubisco 活化酶失活, RuBP 羧化酶活性降低,叶绿素含量和光合速率显著下降,耐热强的品种叶绿素含量下降幅度小于热

敏感的品种。

植物体内可溶性蛋白、可溶性糖和游离脯氨酸对细胞具有渗透调节及保护细胞膜结构稳定的作用。丙二醛是膜脂过氧化作用的最终产物,其含量的高低是膜脂过氧化程度的重要标志。欧志英等^[15]对 2 个超级杂交水稻的高温耐受性研究发现,高温引起光合效率降低,加重了光合光抑制,热稳定蛋白含量高的品种有较强的耐高温能力。可溶性蛋白在高温胁迫初期含量上升,随着胁迫时间的延长,可溶性蛋白含量逐渐

表 3 高温处理 7 d 水稻叶片各生化指标相关系数矩阵

Table 3 The correlation coefficient matrix of different biochemical indexes of rice leaves after 7 d high temperature treatment							
项目 Items	叶绿素 Chlorophyll	可溶性糖 Soluble sugar	脯氨酸 Proline	可溶性蛋白 Soluble protein	丙二醛 Malondialdehyde	腐胺 Putrescine	精胺 Spermine
叶绿素	1						
可溶性糖	0.639 679	1					
脯氨酸	-0.907 67*	-0.705 43	1				
可溶性蛋白	-0.948 97*	-0.816 51	0.960 455*	1			
丙二醛	0.904 488*	0.740 372	-0.794 72	-0.869 533 2	1		
腐胺	0.780 584	0.822 059	-0.955 75*	-0.922 038 1*	0.716 134	1	
精胺	0.881 377*	0.714 711	-0.786 08	-0.843 635 6	0.995 985**	0.708 276	1

注:*表示 $P<0.05$ 的显著水平,**表示 $P<0.01$ 的显著水平。下表同。
Note:* significant at $P<0.05$ levels,** significant at $P<0.01$ levels. The same below.

表 4 高温处理 14 d 水稻叶片各生化指标相关系数矩阵

Table 4 The correlation coefficient matrix of different biochemical indexes of rice leaves after 14 d high temperature treatment							
项目 Items	叶绿素 Chlorophyll	可溶性糖 Soluble sugar	脯氨酸 Proline	可溶性蛋白 Soluble protein	丙二醛 Malondialdehyde	腐胺 Putrescine	精胺 Spermine
叶绿素	1						
可溶性糖	0.924 316*	1					
脯氨酸	-0.809 07	-0.577 99	1				
可溶性蛋白	0.932 088*	0.885 655*	-0.795 92	1			
丙二醛	0.832 694	0.589 005	-0.943 33*	0.699 749 45	1		
腐胺	0.745 73	0.513 697	-0.711	0.494 172 85	0.899 486*	1	
精胺	0.744 284	0.799 827	-0.670 36	0.899 670 78*	0.486 7	0.164 64	1

表 5 高温处理 21 d 水稻叶片各生化指标相关系数矩阵

Table 5 The correlation coefficient matrix of different biochemical indexes of rice leaves after 21 d high temperature treatment							
项目 Items	叶绿素 Chlorophyll	可溶性糖 Soluble sugar	脯氨酸 Proline	可溶性蛋白 Soluble protein	丙二醛 Malondialdehyde	腐胺 Putrescine	精胺 Spermine
叶绿素	1						
可溶性糖	0.670 429	1					
脯氨酸	-0.604 35	-0.835 51	1				
可溶性蛋白	0.818 932	0.923 465*	-0.781	1			
丙二醛	0.310 438	0.803 133	-0.891 76*	0.725 354 3	1		
腐胺	0.472 778	0.849 698	-0.687 99	0.889 109 33*	0.845 246	1	
精胺	0.245 97	0.392 791	-0.706 54	0.512 248 63	0.784 948	0.625 671	1

降低,这可能由于 Rubisco 等表达增强引起可溶性蛋白含量增加,随着高温程度的加剧,Rubisco 羧化酶活性下降,净光合速率减少,导致可溶性蛋白含量下降^[16]。胁迫条件下脯氨酸积累代表了植物细胞对胁迫特别是水分亏缺的反应之一,脯氨酸的积累主要是从头合成的活化和氧化降解的受限,催化脯氨酸合成的关键酶 p5cS 在转录水平上受到胁迫诱导因子的激活,而氧化降解关键酶 ProDH 则从转录水平上受到抑制。此外,尚有人认为胁迫导致线粒体膜对脯氨酸选择透性下降也是造成胞质内脯氨酸积累的重要原因,表明脯氨酸主要不是高温胁迫下蛋白质分解加强造成的,而是植物体在高温胁迫下通过脯氨酸代谢加强来实现自我保护^[17];可溶性糖和内源多胺含量的下降和丙二醛含量的上升,意味着高温胁迫破坏了稻叶内自由基产生与清除的动态平衡关系,稻叶自身清除活性氧、防止膜脂过氧化作用、保护膜结构与功能等能力下降,使膜脂过氧化作用加剧,最终导致膜结构和功能破坏,质膜透性显著增加,从而影响到叶片的生理机能,这可能是高温胁迫导致水稻叶片伤害及光合能力下降的主要原因。

各生理指标间均存在或大或小的相关性,这就为从生理学角度进行水稻耐热性的鉴定奠定了理论基础。如 RuBP 加氧酶/羧化酶、ABA 和热激蛋白等含量变化也与植物的耐热性密切相关,在将来研究中可以测定更多指标,进一步进行生理指标的筛选。亲本的遗传物质对杂交后代有着重要影响,不同品种受父母本的影响不同,耐热的遗传物质主要受细胞核影响还是受细胞质影响,有待进一步研究。

4 结论

(1)不同杂交水稻品种对高温的敏感程度不同。耐热性好的品种,产量的降低幅度明显比热敏感品种低。

(2)高温胁迫后,叶绿素、可溶性糖、内源多胺含量呈下降趋势,且耐热性好的品种各生化指标的含量下降幅度明显小于热敏感品种;可溶性蛋白在高温胁迫初期含量上升,随着胁迫时间的延长,可溶性糖含量逐渐降低;脯氨酸和丙二醛含量呈逐渐上升趋势,且耐热性好的品种脯氨酸含量上升幅度明显大于热敏感品种,而丙二醛含量上升幅度明显低于热敏感品种。

(3)从水稻幼穗分化期到抽穗开花期热敏感指数与各生理指标含量变化最优回归方程表明,在水稻从幼穗分化期到抽穗期的耐热性鉴定可以测定叶绿素、可溶性糖、脯氨酸、可溶性蛋白、丙二醛以及内源多胺含量。

参考文献:

- [1] 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.
ZHANG Gui-lian, CHEN Li-yun, LEI Dong-yang, et al. Progresses in research on heat tolerance in rice[J]. *Hybrid Rice*, 2005, 20(1): 1-5.
- [2] 王才林, 仲维功. 高温对水稻结实率的影响及其防御对策[J]. 江苏农业科学, 2004, 20(1): 15-18.
WANG Cai-lin, ZHONG Wei-gong. Effect of high temperature on seed setting rate and defense countermeasures[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2004, 20(1): 15-18.
- [3] 陈秀晨, 朱启升, 王士梅. 水稻耐热性研究进展[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(30): 13068-13070.
CHEN Xiu-chen, ZHU Qi-sheng, WANG Shi-mei. Research progress of rice heat tolerance[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(30): 13068-13070.
- [4] Yoshida S, Satake T, Machill D S. High temperature stress in rice[C]// IRRI Research Paper series No. 67. Manila: IRRI, 1981.
- [5] 王士梅, 张德文, 杨前进, 等. 安徽省杂交中稻主导品种丰产性及耐高温特性研究[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(5): 1317-1318, 1330.
WANG Shi-mei, ZHANG De-wen, YANG Qian-jin, et al. Research on high yield and high-temperature tolerance of dominant hybrid mid-rice varieties in Anhui Province[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35(5): 1317-1318, 1330.
- [6] 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, 2000.
LI He-sheng. Plant physiology and biochemistry experimental principle and technology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [7] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. *Analytical Biochemistry*, 1976, 72: 248-254.
- [8] Flores H E, Galston A W. Analysis of polyamines in plants by high performance liquid chromatography[J]. *Plant Physiol*, 1982, 69: 701-706.
- [9] 王富民, 薛应龙. 植物组织内多胺含量的测定[J]. 植物生理学通讯, 1988(1): 39-41.
WANG Fu-min, XUE Ying-long. Determination of polyamines content in plant tissues[J]. *Plant Physiology Communications*, 1988(1): 39-41.
- [10] 李敏, 马均, 王贺正, 等. 水稻开花期高温胁迫条件下生理生化特性的变化及其与品种耐热性的关系[J]. 杂交水稻, 2007, 22(6): 62-66.
LI Min, MA Jun, WANG He-zheng, et al. Relationship between some physiological and biochemical characteristics and heat tolerance at flowering stage in rice[J]. *Hybrid Rice*, 2007, 22(6): 62-66.
- [11] 周广生, 梅方竹, 周竹青, 等. 小麦不同品种耐湿性生理指标综合评价及预测[J]. 中国农业科学, 2003, 36(11): 1378-1382.
ZHOU Guang-sheng, MEI Fang-zhu, ZHOU Zhu-qing, et al. Comprehensive evaluation and forecast on physiological indices of waterlogging resistance of different wheat varieties[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(11): 1378-1382.
- [12] Jacob T, et al. Abscisic acid signal transduction in guard cells is mediated by phospholipase D activity[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1999, 96(21): 12192-12197.
- [13] 任昌福, 陈安和, 刘保国. 高温影响杂交水稻开花结实的生理生化基础[J]. 西南农业大学学报, 1990, 12(5): 440-443.
REN Chang-fu, CHEN An-he, LIU Bao-guo. Physiological and biochemical basis of high temperature effect on flowering and fruiting of hybrid rice[J]. *Journal of Southwest Agricultural University*, 1990, 12(5): 440-443.
- [14] Tewari A K, Tripathy B C. Temperature-stress-induced impairment of chlorophyll biosynthetic reactions in cucumber and wheat[J]. *Plant Physiology*, 1998, 117: 851-858.
- [15] 欧志英, 林桂珠. 超高产杂交水稻培矮 63S/E32 和两优培九剑叶对高温的响应[J]. 中国水稻科学, 2005, 19(3): 249-254.
OU Zhi-ying, LIN Gui-zhu, PENG Chang-lian. Response of leaves of super high-yielding rice Pei'ai 64S/E32 and Liangyoupeijiu to high temperature[J]. *Chinese J Rice Sci*, 2005, 19(3): 249-254.
- [16] 张桂莲, 陈立云, 张顺堂, 等. 抽穗开花期高温对水稻剑叶理化特性的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(7): 1345-1352.
ZHANG Gui-lian, CHEN Li-yun, ZHANG Shun-tang, et al. Effects of high temperature on physiological and biochemical characteristics in flag leaf of rice during heading and flowering period[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(7): 1345-1352.
- [17] 赵福庚, 刘友良. 胁迫条件下高等植物体内脯氨酸代谢及调节的研究进展[J]. 植物学通报, 1999, 16(5): 540-546.
ZHAO Fu-geng, LIU You-liang. Advances in study on metabolism and regulation of proline in higher plants under stress[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1999, 16(5): 540-546.