

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3142.2012.05.021

低温胁迫下不同甘蔗品种(系)光合特性的变化及其与耐寒性的关系

唐仕云^{1,2}, 杨丽涛^{1,2*}, 李杨瑞^{1,2,3}

(1. 广西大学 农学院/亚热带农业生物资源保护与利用国家重点实验室, 南宁 530005; 2. 中国农业科学院 甘蔗研究中心/广西农科院甘蔗研究所/农业部广西甘蔗生物技术与遗传改良重点实验室/广西甘蔗遗传改良重点实验室, 南宁 530007; 3. 广西作物遗传改良生物技术重点开放实验室, 南宁 530007)

摘要: 以广西农科院甘蔗研究所自育的7个新材料和2个生产上的主栽品种为研究对象,在甘蔗苗期进行低温胁迫处理,研究了各品种(系)甘蔗形态特征的冷害指数、叶绿素含量及光合特性相关指标的变化及其光合特性相关指标与甘蔗抗寒性间的相关性。结果表明:随着低温胁迫处理时间的延长,冷害指数不断增大,但变化的大小与快慢因品种(系)不同表现不一样。各甘蔗品种(系)叶片叶绿素含量均随时间延长而降低。叶片净光合速率、气孔导度在低温处理与常温处理间具有显著差异。低温胁迫处理显著降低了各甘蔗品种(系)最大光化学效率(F_v/F_m)、PS II 实际光能转化效率 $\Phi PS II$ 、光适应下 PS II 反应中心的最大光能转化效率 F_v'/F_m' 、光化学猝灭系数 qP 、电子传递速率 ETR ,而显著提高了初始荧光 F_o 、稳态荧光 F_s 、非光化学猝灭系数 qNP 。相关性分析表明整个测定时期各指标间相关显著, F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 、 $\Phi PS II$ 与冷害指数 I 之间的相关系数在 0.800 以上, F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 、 $\Phi PS II$ 可以作为甘蔗品种(系)抗寒性鉴定的重要参考指标。

关键词: 甘蔗; 品种; 抗寒性; 叶绿素荧光; 低温胁迫

中图分类号: Q945.78 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2012)05-0679-07

Correlation between changes of photosynthetic characteristics of different sugarcane varieties and their cold tolerance under low temperature

TANG Shi-Yun^{1,2}, YANG Li-Tao^{1,2*}, LI Yang-Rui^{1,2,3}

(1. Agricultural College, Guangxi University/State Key Laboratory of Conservation and Utilization of Subtropical Agro-Bioresources, Nanning 530005, China; 2. Sugarcane Research Center, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Sugarcane Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Sugarcane Biotechnology and Genetic Improvement (Guangxi), Ministry of Agriculture/Guangxi Key Laboratory of Sugarcane Genetic Improvement, Nanning 530007, China; 3. Guangxi Crop Genetic Improvement and Biotechnology Laboratory, Nanning 530007, China)

Abstract: In order to explore the correlations between changes of photosynthetic characteristics and cold tolerance in different sugarcane varieties, 7 newly bred sugarcane lines and 2 main cultivars from Sugarcane Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences were employed to examine the changes of chilling injury index, chlorophyll

* 收稿日期: 2012-03-22 修回日期: 2012-06-18

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2008BADB8B00); 广西甘蔗研究所基本科研业务专项(G2009012); 科技部国际合作项目(2008DFA30600, 2009DFA30820); 农业部“948”项目(2009-Z8(2)); 广西科学研究与技术开发计划项目(桂科产 1123008-1); 广西自然科学基金(2011GXNSFF018002) [Supported by the National Key Technology R & D Program(2008BADB8B00); the Basic Scientific Research Fund of GXRSRI(G2009012); International S & T Cooperative Project of the Ministry of Science and Technology(2008DFA30600, 2009DFA30820); the “948” Program of the Ministry of Agriculture(2009-Z8(2)); Guangxi Technology R & D Program(1123008-1); the Natural Science Foundation of Guangxi(2011GXNSFF018002)]

作者简介: 唐仕云(1978-),男,广西资源县人,博士研究生,从事甘蔗育种与栽培。(E-mail)tangshiyunok@163.com。

* 通讯作者: 杨丽涛,女,教授,博士生导师,主要从事植物学、植物生理、分子生物学。(E-mail)liyr@gxu.edu.cn。

content and photosynthetic parameters under low temperature stress at seedling stage. The chilling injury index was continually increased with the prolonging of low temperature treatment, but different sugarcane varieties showed different changes. The chlorophyll content in all the sugarcane varieties were continually decreased with the prolonging of low temperature treatment. There were significant differences in net photosynthetic rate and stomatal conductance between room temperature treatment and low-temperature treatment. The F_v/F_m , $\Phi PS II$, F_v'/F_m' , qP and ETR were decreased obviously, but F_o , F_s and qNP were increased after the low temperature treatment. There were significant correlations between chlorophyll content, various photosynthetic parameters and chilling injury indexes, and the correlation coefficients between F_v/F_m , F_v'/F_m' , $\Phi PS II$ and chilling injury indexes were higher than 0.800, which suggested that F_v/F_m , F_v'/F_m' , $\Phi PS II$ could be used as the indexes of cold tolerance identification in sugarcane.

Key words: sugarcane; variety; cold tolerance; chlorophyll fluorescence; low temperature stress

甘蔗是一种原产于热带和亚热带地区的糖料作物,整个生长发育过程中需要较高的温度,低温影响甘蔗的生长、发育、产量和品质,温度决定着甘蔗种植区域的分布。广西的甘蔗种植面积、原料蔗产量和产糖量均在全国排名第一,蔗糖产量约占全国70%,甘蔗糖业对广西的经济发展具有重要的意义(李杨瑞等,2009)。但广西的甘蔗生产经常受低温阴雨或霜冻雨雪天气的影响,给甘蔗生产带来了巨大的经济损失(杨荣仲等,2011;谭宏伟等,2010),在甘蔗抗寒技术中,选育抗寒性强的品种是最为有效的措施之一。然而,目前我国蔗区甘蔗品种单一化严重,广西种植的甘蔗品种主要是新台糖22号,大田生产实践证明,新台糖22号的抗寒性很差(邓展云等,2009;谭宏伟等,2010),选用适当的抗寒性指标对甘蔗新品种(系)的抗寒性鉴定是选育抗寒性强甘蔗品种的重要环节。

叶绿素荧光反映了光合作用原初反应过程的光能吸收、激发能传递和光化学反应,用叶绿素荧光技术可以获得多种反映不同阶段光合作用状况的参数,可用于描述植物光合作用机理和光合生理状况,反映了植物“内在性”的特点,被视为是研究植物光合作用与环境关系的内在探针(陈建明等,2006)。叶绿素荧光测定技术具有快速、灵敏、简便、准确和无损伤等优点,在鉴定作物的抗寒性方面也显示出良好的应用前景,在水稻(王国莉等,2005;李霞,2006)、玉米(高素华等,2007)、小麦(王晓楠等,2009)、香蕉(习岗等,2002)、辣椒(颌建明等,2011)、花椰菜(李光庆等,2010)、黄瓜(王永健等,2001)、甘蔗(张木清等,1999)、茄子(任国三等,2007)等多种作物上都有报道。

本研究选用广西农业科学院甘蔗研究所2008年的常规育种材料,结合室内人工低温胁迫处理,应

用形态学的冷害指数对不同品种(系)抗寒性进行了评价,并应用气体交换光合仪、叶绿素荧光仪测定不同基因型对低温胁迫的反应,研究低温胁迫条件下叶片叶绿素荧光参数的变化规律及与甘蔗冷害指数之间的相关性,旨在筛选鉴定不同品种(系)的抗寒性,探讨叶绿素荧光参数与甘蔗抗寒性的关系,为建立快速、准确、无损伤的甘蔗抗寒性鉴定技术与方法提供参考。

1 材料与方法

1.1 参试材料

参试的7个材料来自于广西农科院甘蔗研究所2008年的育种材料,品系代号分别为158、162、297、460、777、1092、1180,以新台糖22号(ROC22)和新台糖16号(ROC16)为对照。

1.2 试验设计及管理

从大田砍回蔗种,砍成单芽段,种植于上口直径、高度、底部直径分别为30、20、20 cm的塑料桶中。下种时每个桶种6个单芽,每品种(系)种6桶,每品种(系)种36芽。下种后116 d,甘蔗长至约12片叶时,放入温度设置为4℃的人工气候箱中,进行0、7、15、25、31、38 d的不同时间长度的低温胁迫处理,每品种(系)重复3次,完全随机设计。人工气候箱用2盏(150 w)高压灯补充光照,早上8:00~下午18:00照明,其它时间关闭。低温胁迫处理38 d后将所有植株搬出人工气候箱,结束胁迫处理。

1.3 测定项目

分别于低温处理0、7、15、25、31、38 d调查0叶冷害指数。按照0叶叶片的变化情况,对低温胁迫处理的各品种(系)进行叶片冷害指数分析(chilling injury indexes),分级标准如下。0级:0叶正常,叶

尖不卷曲,不见干枯,叶片边缘不卷曲,不萎蔫干枯。1级:0叶叶尖卷曲,叶片不卷曲。2级:0叶叶尖卷曲,叶片卷曲。3级:0叶叶尖卷曲,变干发白,叶片卷曲严重。4级:0叶叶尖卷曲,萎蔫变干发白,叶片卷曲,干枯发白,植株接近死亡。5级:0叶叶片干枯萎蔫,较老叶片也干枯发白,植株死亡。

冷害指数 = $\sum(\text{每级株数} \times \text{级别数}) / \text{总株数}$ 。

分别于低温处理 0、7、15、25 d 时,从人工气候箱中取出幼苗,常温下恢复 3 h,每处理选取 3 张+2 叶片,用 SPAD502 叶绿素仪测定叶绿素含量;用 LI-6400 便携式光合测定仪测定 P_n 、 G_s 等参数,测定时使用光强度为 $1\ 000\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的人工光源;用 FMS-2 型荧光仪测定各荧光参数,测定前先暗适应 30 min,用微弱的测量光测定初始荧光 F_0 ,接着用饱和脉冲光 ($9\ 000\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 测定 F_m ,用内源光化光 ($1\ 200\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 测定 F_s 、

F_m' 、 F_0' 。经转换计算 F_v 、 F_v' 、 F_v/F_m 、 $\Phi\text{PS II}$ 、 F_v'/F_m' 、 qP 、 qNP 、 ETR 等参数。

1.4 数据处理

用 DPS 软件进行方差分析和多重比较,对叶绿素含量、 P_n 、 G_s 、叶绿素荧光参数和冷害指数做相关性分析。

2 结果与分析

2.1 低温胁迫处理对不同甘蔗 0 叶耐冷性的影响

从表 1 看出,不同品种(系)甘蔗随低温处理时间的延长冷害指数均不断加大,品种(系)间的差异由小变大再变小,但不同品种(系)的冷害指数变化情况表现不一样。在低温处理 7 d 时,各品种(系)之间差异不大,只有部分品种叶尖出现少量卷曲;处理 15 d 时,各品种(系)在 0 叶形态学上仅表现为轻

表 1 低温胁迫下 9 个甘蔗品种(系)0 叶的冷害指数的比较

Table 1 Chilling injury index of 9 sugarcane varieties under low temperature stress

处理时间(d) Treatment time	品种(系) Varieties									平均 Mean	标准差 Standard deviation
	158	162	297	460	777	1092	1180	ROC22	ROC16		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0.5	0	0.5	0.5	0	0	0.5	0	0.2	0.2
15	0.5	1	0	1	1	0.5	0	1	0.5	0.6	0.4
25	1.5	3	0.5	3	3	1.5	0.5	3	1.5	1.9	1.0
31	3	3	3.5	3	3.5	4	3.3	3.5	3	3.3	0.3
38	4.3	5	5	4	4.8	4.5	4.8	4.7	4.5	4.6	0.3

度症状;到处理 25 d 时,部分品种(系)受冷害症状急剧加剧,且品种(系)相互之间的差异较大;处理 31 d 时,各品种(系)不断加剧,但各品种(系)间差异减小;处理 38 d 时,各品种(系)受害加剧,品种间的差异较小,所有植株接近死亡。

从各品种(系)的冷害指数的大小及变化快慢来看,162、777、ROC22 在处理 7 d 时就出现冷害症状,并且处理 38 d 时冷害指数较大,说明这类品种(系)对低温胁迫非常敏感且不耐寒。158、1092 受低温胁迫时,症状变化缓慢,且处理 38 d 时冷害指数较小,说明这类品种(系)对低温迟钝且抗寒。297、1180 受低温胁迫时,症状变化缓慢,但处理 38 d 时,冷害指数大,说明这类品种(系)能抵抗一定程度的低温胁迫,但一旦超过某个临界值时,就会受到严重的伤害。460 和 ROC16 受到低温胁迫时,较易出现受害症状,但到处理 38 d 时受害指数相对较小,说明这类品种(系)具有很强的耐低温性。

2.2 低温胁迫处理对不同甘蔗叶片叶绿素含量及光合速率的影响

由表 2 看出,所有品种(系)叶片叶绿素含量随着低温胁迫处理时间的延长而显著下降,经方差分析表明,所有品种(系)在处理 25 d 时与处理 0 d 时的差异均达到了显著水平。但不同品种在处理 0~25 d 时的大小及快慢变化情况表现并不一致,说明低温胁迫处理后叶绿素含量的变化受品种(系)的影响,处理 25 d 时与处理 0 d 时相比,降幅最大的是 158,降幅最小的是 777,其它从高到低依次为 460、ROC16、162、297、1180、1092、ROC22。

从净光合速率来看,所有品种在处理 0 d 时与处理后的 7、15、25 d 时的净光合速率差异均达显著水平,说明低温胁迫显著降低了甘蔗的光合速率。除 1092 在处理 7 d 时与处理 15、25 d 时净光合速率有显著差异外,其它各品种(系)在低温处理后,净光合速率没有显著差异。处理 25 d 时与处理 0 d 时相

比,所有品种下降幅度均很大,几乎停止光合的进行。下降幅度最大的是 162,最小的为 ROC16。

从气孔导度来看,受低温胁迫后的变化趋势与净光合速率的变化趋势完全一致,由表 6 也可以看出, P_n 与 G_s 之间有显著的正相关。所有品种在处理 0 d 时与处理 7、15、25 d 时的气孔导度均达显著差异,所有品种(系)在处理 25 d 时的降幅均在 90% 以上,说明受到低温胁迫时,气孔阻力增大,叶片的

气孔导度严重降低,是引起 P_n 下降的主要原因之一。
2.3 低温胁迫处理对不同甘蔗叶片叶绿素荧光参数的影响

从表 3 看出,初始荧光 F_o 随着处理时间延长而升高,原初光能转换效率 F_v/F_m 随着处理时间延长而降低,所有品种(系)在处理 0 d 时与处理 25 d 时的 F_o 和 F_v/F_m 差异均达到显著水平。处理 25 d 时 F_o 与初始 0 d 处理时 F_o 相比,增幅最大的

表 2 低温胁迫下 9 个甘蔗品种(系)叶片叶绿素含量、净光合速率(P_n)及气孔导度(G_s)的变化

Table 2 Changes of chlorophyll content, photosynthetic rate and stomatal conductance in leaves of 9 sugarcane varieties under low temperature stress

品种 (系) Varieties	叶绿素含量 Chlorophyll content					P_n ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)					G_s ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)				
	0 d	7 d	15 d	25 d	降幅(%)	0 d	7 d	15 d	25 d	降幅(%)	0 d	7 d	15 d	25 d	降幅(%)
					Decreasing range					Decreasing range					Decreasing range
158	40.8a	40.7a	31.1b	22.0c	46.2	14.7a	2.3b	1.4b	2.6b	82.4	0	7	15	25	95.3
162	34.1a	29.8ab	26.9b	26.1b	23.6	24.3a	3.0b	1.5b	0.9b	96.4	0.122a	0.006b	0.005b	0.006b	94.9
297	42.2a	39.9a	37.3ab	32.8b	22.2	24.1a	4.6b	3.7b	1.7b	93.2	0.283a	0.020b	0.010b	0.014b	96.1
460	38.5ab	40.2a	34.1b	24.5c	36.3	23.2a	3.5b	2.9b	2.3b	90.2	0.324a	0.027b	0.030b	0.013b	95.0
777	43.7a	41.7ab	40.3ab	35.8b	18.3	18.9a	4.3b	1.8b	3.2b	83.1	0.247a	0.008b	0.018b	0.012b	97.8
1092	41.9a	39.2ab	36.2ab	33.5b	19.9	21.6a	11.0b	3.0c	2.1c	90.1	0.186a	0.042b	0.004b	0.004b	94.8
1180	45.1a	43.8a	40.1ab	35.9b	20.4	16.1a	2.5b	2.7b	2.2b	86.3	0.211a	0.079b	0.020c	0.011c	93.3
ROC22	42.0a	36.2ab	32.6b	34.0b	19.2	20.5a	2.0b	1.0b	2.8b	86.2	0.161a	0.005b	0.005b	0.011b	92.9
ROC16	41.0a	40.6a	36.7a	27.0b	34.1	21.9a	6.2b	4.3b	4.7b	78.7	0.189a	0.013b	0.001b	0.013b	94.4

注:同行中数字后标有不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同。

Notes: Data with different letters are significantly different at $P < 0.05$. The same below.

表 3 低温胁迫下 9 个甘蔗品种(系)甘蔗叶片 F_o 和 F_v/F_m 的变化

Table 3 Changes of F_o and F_v/F_m in leaves of 9 sugarcane varieties under low temperature stress

品种 (系) Varieties	F_o					F_v/F_m				
	0 d	7 d	15 d	25 d	增幅(%)	0 d	7 d	15 d	25 d	降幅(%)
					Increasing range					Decreasing range
158	121c	145bc	168b	296a	144	0.824a	0.746b	0.613c	0.511d	37.9
162	106c	142b	161b	346a	225.7	0.818a	0.695b	0.442c	0.338d	58.6
297	110b	126b	122b	251a	127.9	0.818a	0.774a	0.679b	0.492c	39.9
460	71c	103b	140b	197a	177.5	0.831a	0.789a	0.636b	0.521c	37.3
777	101c	139b	161b	247a	144.6	0.813a	0.774a	0.669b	0.463c	43.1
1092	122c	142bc	168b	213a	74.6	0.814a	0.765a	0.630b	0.559c	31.4
1180	114c	124c	200b	253a	121	0.816a	0.751b	0.560c	0.513c	37.1
ROC22	77c	147b	175b	273a	254.1	0.833a	0.775b	0.544c	0.500c	40.0
ROC16	105c	128c	162b	211a	100.6	0.820a	0.782a	0.615b	0.559c	31.9

是 ROC22,其次是 162,增幅最小的是 1092。 F_v/F_m 在处理 25 d 时与初始 0 d 处理时相比,降幅最大的是 162,其次是 ROC22,降幅最小的是 1092。

从表 4 看出,作用光下叶片 PS II 反应中心实际量子效率 $\Phi_{PS II}$ 的变化均随低温胁迫处理时间延长而降低。所有品种在处理 25 d 时的 $\Phi_{PS II}$ 与处

理 0 d 时的 $\Phi_{PS II}$ 之间差异均达到了显著差异,其中下降幅度最大的是 162,下降最小的是 1092。

光适应状态下叶片 PS II 反应中心的最大光能转化效率 F_v'/F_m' 的变化趋势与暗适应后原初光能转化效率 F_v/F_m 变化趋势一致,均随胁迫处理时间延长而降低,所有品种的 F_v'/F_m' 在处理 25 d 时与处

理 0 d 时的差异均达显著水平, 其中降幅最大的是 162, 下降最小的是 1092。

光下稳态荧光 F_s 总体变化趋势是随着低温胁迫处理时间的延长而升高, 所有品种的 F_s 在处理 25 d 时与处理 0 d 时的差异均达显著水平, 其中升幅最大的是 162, 其次是 ROC22, 升幅最小的是 1092。

从表 5 看出, 光化学猝灭系数 qP 随低温胁迫处理时间的延长而降低, 所有品种的 qP 在处理 25 d 时与处理 0 d 时的差异均达显著水平, 其中降幅最大

是 162, 下降最小的是 ROC16。

非光化学猝灭系数 qNP 随低温胁迫处理时间的延长而升高, 处理 25 d 时的 qP 与处理 0 d 时的 qP 之间差异因品种(系)不一样而表现有差异, 297、460、777、1092、1180、ROC16 在处理 25 d 时的 qP 与处理 0 d 时的 qP 之间的差异均达到了显著水平, 而 158、162、ROC22 在处理 25 d 时的 qP 与处理 0 d 时的 qP 之间的差异不显著, 其中增幅最大的是 777, 增幅最小的是 ROC16。

表 4 不同时间低温胁迫下 9 个甘蔗品种(系)甘蔗叶片 $\Phi PS II$ 、 F_v'/F_m' 和 F_s 的变化

Table 4 Changes of $\Phi PS II$, F_v'/F_m' and F_s in leaves of 9 sugarcane varieties under low temperature stress

品种 (系) Varieties	$\Phi PS II$				F_v'/F_m'				F_s								
	0 d	7 d	15 d	25 d	降幅(%)		0 d	7 d	15 d	25 d	降幅(%)		0 d	7 d	15 d	25 d	升幅(%)
					Decreasing range	0 d					Decreasing range	Increasing range					
158	0.741a	0.657b	0.502c	0.427d	42.4	0.782a	0.695b	0.579c	0.494d	36.8	150b	167b	183b	293a	94.9		
162	0.716a	0.534b	0.313c	0.222d	69.0	0.766a	0.608b	0.399c	0.277d	63.8	140c	183b	175bc	372a	165.1		
297	0.733a	0.622b	0.596b	0.408c	44.3	0.786a	0.677b	0.649b	0.461c	41.3	140b	160b	134b	241a	72.7		
460	0.780a	0.708a	0.542b	0.438c	43.9	0.817a	0.751a	0.592b	0.506c	38.1	86c	120bc	153ab	188a	118.9		
777	0.731a	0.664a	0.574b	0.410c	43.9	0.774a	0.712a	0.622b	0.469c	39.4	127b	165ab	180a	200a	56.8		
1092	0.729a	0.675a	0.559b	0.467c	35.8	0.772a	0.716a	0.599b	0.524c	32.1	159b	163b	178ab	213a	34.0		
1180	0.722a	0.633b	0.436c	0.413c	42.8	0.775a	0.691b	0.506c	0.469c	39.5	149bc	139c	186b	240a	60.6		
ROC22	0.746a	0.676a	0.461b	0.424b	43.3	0.787a	0.722a	0.517b	0.476b	39.5	109c	161b	179b	264a	141.6		
ROC16	0.755a	0.645b	0.504c	0.476c	36.9	0.788a	0.691b	0.568c	0.520c	34.0	124c	145bc	174b	216a	74.2		

表 5 不同时间低温胁迫下 9 个甘蔗品种(系)叶片 qP 、 qNP 和 ETR 的变化

Table 5 Changes of qP , qNP and ETR in leaves of 9 sugarcane varieties under low temperature stress

品种 (系) Varieties	qP				qNP				ETR								
	0 d	7 d	15 d	25 d	降幅(%)		0 d	7 d	15 d	25 d	升幅(%)		0 d	7 d	15 d	25 d	降幅(%)
					Decreasing range	0 d					Increasing range	Decreasing range					
158	0.948a	0.946a	0.867b	0.865b	8.8	0.191a	0.192a	0.235a	0.267a	39.8	4.485ab	3.968b	4.512a	3.430c	23.5		
162	0.935a	0.874b	0.785c	0.799c	14.5	0.185a	0.231a	0.277a	0.251a	35.5	6.699a	2.880c	3.926b	2.450c	63.4		
297	0.933a	0.919ab	0.918ab	0.884b	5.2	0.163c	0.355ab	0.185bc	0.316a	94.6	6.854a	5.287b	3.459c	3.608c	47.4		
460	0.955a	0.942a	0.916a	0.866b	9.4	0.108b	0.193ab	0.219ab	0.310a	187.0	5.235a	4.611b	5.181a	3.104c	40.7		
777	0.945a	0.931a	0.922a	0.864b	8.6	0.133c	0.254b	0.195bc	0.392a	193.9	6.698a	4.218c	4.745b	3.741c	44.1		
1092	0.945a	0.942a	0.933ab	0.891b	5.7	0.140b	0.215ab	0.167ab	0.282a	102.0	6.417a	2.731c	4.513b	4.560b	28.9		
1180	0.933a	0.915ab	0.861bc	0.879c	5.7	0.170b	0.300ab	0.416a	0.359a	111.3	7.009a	2.751c	4.406b	4.342b	38.1		
ROC22	0.949a	0.935ab	0.892b	0.889b	6.3	0.170a	0.280a	0.229a	0.277a	62.7	7.463a	4.266b	3.137c	3.631c	51.3		
ROC16	0.958a	0.931ab	0.885ab	0.914b	4.6	0.170b	0.373a	0.257ab	0.222b	30.5	5.541a	3.433c	4.045b	4.357b	21.4		

电子传递速率 ETR 随着低温胁迫处理时间的延长总体上表现为下降趋势。所有品种的 ETR 在处理 25 d 时与处理 0 d 时的差异均达显著水平, 其中降幅最大的是 162, 下降最小的是 ROC16。

2.4 低温胁迫下甘蔗叶片叶绿素含量、光合及叶绿素荧光参数与 0 叶冷害指数的相关系数

由表 6 看出, 低温胁迫下, 整个处理期间叶绿素

含量 $SPAD$ 、净光合速率 P_n 、气孔导度 G_s 及相关叶绿素荧光参数与 0 叶冷害指数 I 之间均达到了显著相关。 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 、 $\Phi PS II$ 与 0 叶冷害指数 I 之间的相关系数达到了 0.800, 说明低温胁迫下, 暗适应及光适应下 $PS II$ 的光能转换效率和 $PS II$ 量子效率的变化所反映的甘蔗抗寒性强弱与形态学冷害指数的变化所反映的抗寒性强弱较为一致。

3 结论与讨论

低温胁迫对甘蔗多方面、多层次影响,不仅表现在不同生长发育阶段的形态差异上,也表现在各种生理生化过程中。低温胁迫条件下,叶绿素合成受抑制,叶绿体超微结构受到破坏,引起光合色素降

解,导致叶绿素含量下降,使叶绿素含量值降低,本研究相关性分析结果表明,叶绿素含量与冻害指数具有显著负相关,这与李光庆等(2010)的报道一致。

光合作用是绿色植物合成有机物质和获得能量的一系列复杂的代谢反应的总和,低温胁迫可导致光合作用显著降低(王国莉等,2005;习岗等,2002;任国三等,2007)。在本研究中,所有品种在低温胁迫

表 6 低温胁迫下甘蔗叶片叶绿素含量、光合及叶绿素荧光参数与 0 叶冷害指数的相关系数

Table 6 The correlation coefficients between chlorophyll content, photosynthetic traits and chilling injury indexes

叶绿素含量	P_n	G_s	F_o	F_v/F_m	F_s	F_v'/F_m'	$\Phi PS II$	qP	qNP	ETR	I	
叶绿素含量	1.000											
P_n	0.479	1.000										
G_s	0.437	0.983	1.000									
F_o	-0.667	-0.601	-0.567	1.000								
F_v/F_m	0.757	0.689	0.646	-0.893	1.000							
F_s	-0.661	-0.539	-0.498	0.965	-0.819	1.000						
F_v'/F_m'	0.748	0.728	0.684	-0.889	0.989	-0.836	1.000					
$\Phi PS II$	0.755	0.730	0.684	-0.873	0.986	-0.821	0.998	1.000				
qP	0.721	0.589	0.530	-0.720	0.878	-0.700	0.898	0.920	1.000			
qNP	-0.254	-0.619	-0.614	0.534	-0.536	0.416	-0.585	-0.596	-0.545	1.000		
ETR	0.505	0.763	0.758	-0.558	0.588	-0.512	0.617	0.614	0.520	-0.502	1.000	
I	-0.700	-0.655	-0.619	0.792	-0.872	0.703	-0.846	-0.833	-0.649	0.419	-0.471	1.000

相关系数临界值: $a=0.05$ 时, $r=0.3291$; $a=0.01$ 时, $r=0.4238$; $P<0.05$ ($r=0.3291$); $P<0.01$ ($r=0.4238$)。

迫处理后净光合速率显著低于常温状态下的净光合速率,且与品种的冷害指数相关性显著。

叶绿素荧光技术是以植物体内叶绿素为内在探针,叶绿素荧光与光合作用中各个反应过程紧密相关,任何逆境对光合作用各过程产生的影响都可通过体内叶绿素荧光诱导动力学变化反映出来,因此,叶绿素荧光参数可用来评价光合系统功能以及环境胁迫的影响(Rizza 等,2001;赖齐贤,2007),并有助于探明光合结构中逆境胁迫受伤害的部位和程度(Van Kooten & Snel,1990)。低温胁迫下 F_o 上升,表明 PS II 反应中心失活,结合 ETR 、 F_v/F_o 和 F_v/F_m 降低,则反映出 PS II 的潜在活性和原初光能转换效率的减弱(冯建灿等,2002)。 F_v/F_m 是植物抗寒性的主要敏感指标,已经用于玉米(Ying 等,2000)、花旗松(Perks 等,2004)、长豇豆(李国景等,2005)、水稻(李霞等,2006)等许多种植物的抗寒性鉴定中,许多研究也表明,环境胁迫的程度与植物体内 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、 $\Phi PS II$ 、 Rfd 、 qP 、 qN 、Yield 等参数的受抑制程度呈显著相关,可作为植物抗逆的指标,但不同植物的抗逆指标差异大(陈建明等,2006)。李光庆等(2010)报道 F_v/F_m 与花椰菜耐寒性呈显著正相关,顾建明等(2011)报道 $\Phi PS II$ 和

F_v' 与辣椒的冷害指数呈极显著负相关。在本研究中,各品种(系) F_o 均随低温胁迫处理时间延长而上升, F_v/F_m 、 $\Phi PS II$ 、 F_v'/F_m' 随低温胁迫处理时间延长而下降,且与品种的冷害指数相关显著,因此可用于甘蔗抗寒性鉴定。

张木清等(1999)应用叶绿素荧光技术研究甘蔗幼苗受低温胁迫后的响应认为,低温胁迫使甘蔗 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、DCPIP 光还原活性、量子产量(Y)、 Rfd 值、光化学猝灭系数(qP)和非光化学猝灭系数(qN)值降低,抗寒性差的品种 PS II 原初光能转换效率和潜在光合作用活力均受到抑制,明显高于抗寒品种,并认为可以考虑利用叶绿素荧光参数来评价甘蔗品种的抗寒性。在本研究中, F_v/F_m 随低温胁迫处理延长而下降,且与品种的冷害指数相关显著,这与张木清等(1999)报道一致。本研究中 F_o 、 F_s 、 qNP 随低温胁迫处理延长而升高,非光化学猝灭系数 qNP 的升高,表明非光化学耗散加强,暗示植株启动了光保护反应以避免过量光伤害,但与张木清等(1999)报道的不一致,可能与本研究的甘蔗品种类型、采样时期及低温胁迫处理的条件不同有关,有待进一步验证。

不同甘蔗品种(系)甘蔗对低温胁迫的响应具有

显著的差异。低温胁迫降低了甘蔗叶片叶绿素含量、净光合速率、气孔导度、叶绿素荧光参数的 F_v/F_m 、 $\Phi PS II$ 、 F_v'/F_m' 、 qP 、电子传递速率 ETR 、 F_o 、 F_s 、 qNP 升高。相关性分析表明各指标间均有显著的相关,尤其以 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 、 $\Phi PS II$ 与 0 叶冷害指数 I 之间的相关系数大,相关性紧密, F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 、 $\Phi PS II$ 可用于甘蔗品种抗寒性的鉴定。叶绿素荧光技术具有无损伤和反应较形态学指标灵敏快速的特点,在甘蔗抗寒性鉴定中具有较好的应用前景,有助于对甘蔗抗寒性品种的选择鉴定,以加速甘蔗抗寒育种进程,提高甘蔗育种效率。

参考文献:

- 邓展云,刘海斌,张革民,等. 2009. 2007—2008 年榨季广西甘蔗霜冻发生危害规律的调查[J]. 中国糖料, (1): 47—50
- Chen JM(陈建明), Yu XP(俞晓平), Cheng JA(程家安). 2006. The application of chlorophyll fluorescence kinetics in the study of physiological responses of plants to environmental stresses(叶绿素荧光动力学及其在植物抗逆生理研究中的应用)[J]. *Acta Agric Zhejiang* (浙江农业学报), **18**(1): 51—55
- Feng JC(冯建灿), Hu XL(胡秀丽), Mao XJ(毛训甲). 2002. Application of chlorophyll fluorescence dynamics to plant physiology in adverse circumstance(叶绿素荧光动力学在研究植物逆境生理中的应用)[J]. *Nonwood Fore Res* (经济林研究), **20**(4): 14—18, 30
- Lai QX(赖齐贤), Bao ZY(包志毅), Zhu ZJ(朱祝军), et al. 2007. Effects of drought stress on photosynthesis of gerbera modified by PSAG12-ip(干旱胁迫对转基因(PSAG12-ipt)非洲菊光合作用的影响)[J]. *Acta Hortic Sin* (园艺学报), **34**(1): 157—162
- Li GJ(李国景), Liu YH(刘永华), Wu XH(吴晓花), et al. 2005. Relationship between the tolerant ability to low temperature and low light intensity and chlorophyll fluorescence in seedlings of asparagus bean(长豇豆品种耐低温弱光性和叶绿素荧光参数等的关系)[J]. *Acta Agric Zhejiang* (浙江农业学报), **17**(6): 359—362
- Li GQ(李光庆), Xie ZJ(谢祝捷), Yao XQ(姚雪琴), et al. 2010. Studies on the relationship between chlorophyll fluorescence parameters and cold tolerance of cauliflower(花椰菜叶绿素荧光参数与耐寒性的关系研究)[J]. *Acta Hortic Sin* (园艺学报), **37**(12): 2 001—2 006
- Li X(李霞), Dai CC(戴传超), Cheng R(程睿), et al. 2006. Identification for cold tolerance at different growth stages in rice (*Oryza sativa*) and physiological mechanism of differential cold tolerance(不同生育期水稻耐冷性的鉴定及耐冷性差异的生理机制)[J]. *Acta Agron Sin* (作物学报), **32**(1): 76—83
- Li YR(李杨瑞), Yang LT(杨丽涛). 2009. New developments in sugarcane industry and technologies in China since 1990s(20 世纪 90 年代以来我国甘蔗产业和科技的新发展)[J]. *Southwest Chin J Agric Sci* (西南农业学报), **22**(5): 1 469—1 476
- Perks MP, Osborne BA, Mitchell DT. 2004. Rapid predictions of cold tolerance in Douglas-fir seedlings using chlorophyll fluorescence after freezing[J]. *New Fore*, **28**(1): 49—62
- Ren GS(任国三), Cheng JX(程加祥), Wang HD(王红对), et al. 2007. Study on the physiological response and the comparison of chilling tolerance of different eggplant varieties under the low temperature stress(茄子对低温胁迫的生理响应及不同品种耐冷性比较)[J]. *Chin Veget* (中国蔬菜), (4): 12—15
- Rizza F, Pagani D, Stanca AM, et al. 2001. Use of chlorophyll fluorescence to evaluate the cold acclimation and freezing tolerance of winter and spring oats[J]. *Plant Breed*, **10**: 389—396
- Tan HW(谭宏伟), Li YR(李杨瑞), Zhou LQ(周柳强), et al. 2010. Influences of frosty weather on sucrose content and growth of main sugarcane varieties in the central areas of Guangxi. (霜冻天气对桂中地区主栽甘蔗品种生长及蔗糖分的影响)[J]. *Guangxi Agric Sci* (广西农业科学), **41**(4): 326—328
- Van Kooten O, Snel JFH. 1990. The use of chlorophyll fluorescence nomenclature in plant stress physiology[J]. *Photosynth Res*, **25**: 147—150
- Wang GL(王国莉), Guo ZF(郭振飞). 2005. Effects of chilling stress on photosynthetic rate and the parameters of chlorophyll fluorescence in two rice varieties differing in sensitivity(低温对水稻不同耐冷品种幼苗光合速率和叶绿素荧光参数的影响)[J]. *Chin J Rice Sci* (中国水稻科学), **19**(4): 381—383
- Wang XN(王晓楠), Fu LS(付连双), Li ZF(李卓夫), et al. 2009. Comparison of chlorophyll fluorescence parameters between two winter wheat cultivars during cold acclimation and frozen period(温驯化及封冻阶段不同冬小麦品种叶绿素荧光参数的比较)[J]. *J Tritic Crop* (麦类作物学报), **29**(1): 83—88
- Wang YJ(王永健), Zhang HY(张海英), Zhang F(张峰), et al. 2001. Effects of low temperature and low light intensity stress on photosynthesis in seedlings of different cucumber varieties(低温弱光对不同黄瓜品种幼苗光合作用的影响)[J]. *Acta Hortic Sin* (园艺学报), **28**(3): 230—234
- Xie JM(颀建明), Yu JH(郁继华), Huang GB(黄高宝), et al. 2011. Correlations between changes of absorption and transformation of light energy by PSII in pepper leaves and the variety tolerance under low temperature and weak light(低温弱光下辣椒叶片 PSII 光能吸收和转换变化及与品种耐性的关系)[J]. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), **44**(9): 1 855—1 862
- Xi G(习岗), Yang CP(杨初平), Song Q(宋清), et al. 2002. The changes of chlorophyll fluorescence dynamic parameters of banana and the difference of varieties under low temperature stress(低温胁迫下香蕉叶片 Chla 荧光动力学参数的变化及其品种差异性)[J]. *Acta Photon Sin* (光子学报), **31**(12): 1 236—1 239
- Yang RZ(杨荣仲), Li YR(李杨瑞), Wang WZ(王维赞), et al. 2011. Evaluation for cold tolerance of sugarcane under rain frost condition(阴雨霜冻条件下的甘蔗耐寒评价分析)[J]. *Southwest Chin J Agric Sci* (西南农业学报), **24**(3): 1 065—1 071
- Ying J, Lee EA, Tollenaar M. 2000. Response of maize leaf photosynthesis to low temperature during the grain-filling period[J]. *Field Crops Res*, **68**(2): 87—96
- Zhang MQ(张木清), Chen RK(陈如凯), Lü JL(吕建林), et al. 1999. Effects of low temperature stress on the chlorophyll a fluorescence induction kinetics in the seedling of sugarcane(甘蔗低温胁迫对叶绿素 a 荧光诱导动力学的影响)[J]. *J Fujian Agric Univ* (福建农业大学学报), **28**(1): 1—7