

陈明辉, 程世平, 张志录, 等. 不同品种果蔗幼苗对低温的生理响应及耐寒性评价[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(2): 40-46.

不同品种果蔗幼苗对低温的生理响应及耐寒性评价

陈明辉¹, 程世平¹, 张志录¹, 张保青²
(1 平顶山学院 低山丘陵区生态修复重点实验室, 河南 平顶山 467000; 2 广西甘蔗遗传改良重点实验室/中国农业科学院 甘蔗研究中心/广西农业科学院 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 南宁 530007)

摘要:【目的】低温是影响北方果蔗 *Saccharum officinarum* L.栽培的主要限制因子, 探讨低温条件下果蔗的生理响应和适应低温的生理机制, 为果蔗抗寒种质资源筛选和品种改良提供理论依据。【方法】以 6 个果蔗品种幼苗为试材, 采用人工模拟低温环境的方法对其进行低温胁迫, 测定各品种叶片的相对电导率 (REC)、丙二醛 (MDA)、可溶性糖 (SS)、可溶性蛋白 (SP)、脯氨酸 (Pro) 含量以及超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT) 和抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性的变化。以果蔗幼苗叶片各项指标的抗寒系数作为衡量抗寒性的指标, 利用相关性分析、主成分分析和隶属函数分析对果蔗品种的抗寒性进行综合评价。【结果】6 个品种的 REC 以及 SS、SP 和 Pro 含量随着低温胁迫时间的延长而持续升高, MDA 含量以及 POD、SOD、CAT 和 APX 活性先升高后降低。隶属函数法综合评价结果表明, 6 个果蔗品种综合抗寒性由强到弱依次为 ‘桂果蔗 1 号’ > ‘拔地拉’、‘闽引黄皮果蔗’ > ‘白玉果蔗’ > ‘川蔗 26 号’ > ‘龙黑果蔗’。【结论】隶属函数法简便、准确, 可作为果蔗抗寒能力鉴定的一种有效方法。不同果蔗品种对长时间持续低温的适应能力不同, 果蔗的抗寒性不仅与自身的遗传因素和生理特征有关, 还与外界环境因素密切相关。

关键词: 果蔗; 抗寒性; 生理指标; 综合评价
中图分类号: S566.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-411X(2018)02-0040-07

Physiological response and cold resistance evaluation of seedlings of different chewing cane cultivars to low temperature

CHEN Minghui¹, CHENG Shiping¹, ZHANG Zhilu¹, ZHANG Baoqing²
(1 Key Laboratory of Ecological Restoration in Hilly Area, Pingdingshan University, Pingdingshan 467000, China;
2 Guangxi Key Laboratory of Sugarcane Genetic Improvement/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, Nanning 530007, China)

Abstract: 【Objective】Low temperature is the main limiting factor affecting cultivation of chewing cane (*Saccharum officinarum* L.) in north China. To investigate the physiological mechanisms of low temperature adaptation and physiological responses of chewing cane cultivars under low temperature stress, and provide a theoretical basis for chewing cane cold resistance germplasm screening and breed improvement. 【Method】Six chewing cane cultivars seedlings were used as test materials to determinate the effect of low temperature stress on the seedlings using the indexes such as relative conductivity(REC), malondialdehyde (MDA), soluble sugar (SS), soluble protein (SP) and proline (Pro) contents and superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD),

收稿日期: 2017-08-28 优先出版日期: 2018-01-17
优先出版网址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20180117.1559.002.html>
作者简介: 陈明辉 (1974—), 男, 讲师, 博士, E-mail: cmh_abc@126.com; 通信作者: 张保青 (1980—), 男, 助理研究员, 博士, E-mail: zbqsxau@126.com

基金项目: 国家自然科学基金 (31760415); 河南省科技厅科技攻关计划项目 (152102110007); 河南省教育厅重点科研项目 (16A220004); 广西农业科学院科技发展基金 (2015JZ01); 广西重点实验室建设项目 (16-A-01-01)

catalase (CAT) and ascorbate peroxidase(APX) activities in artificial simulation low temperature environment. Taking cold resistant coefficient of each physiological index of chewing cane leaves as the index to measure cold resistance capacity, and cold resistance of chewing cane cultivars were comprehensively evaluated using correlation analysis, principal component analysis and membership function analysis based on cold resistant coefficients of these indexes. Evaluations of cold tolerance of six chewing cane cultivars seedlings were made through fuzzy membership function analysis. 【Result】 With the extension of low temperature stress time, the REC, SS, SP and Pro contents of six chewing cane cultivar seedling leaves kept the overall rising trend, and the MDA content, the activities of SOD, POD, CAT and APX showed the trend of increasing at first and then decreasing. The cold tolerance order of comprehensive evaluation was ‘Guiguozhe1’>‘Badila’= ‘Minyinhuangpiguozhe’>‘Baiyuguozhe’>‘Chuanzhe26’>‘Longheiguozhe’. 【Conclusion】 Membership function analysis is simple and accurate, which can be used as an effective method to identify cold hardiness of chewing cane. The adaptabilities of different chewing cane cultivars to long lasting low temperature are different. The cold resistance of chewing cane is not only related to its own genetic factors and physiological characteristics, but also closely related to the external environmental factors.

Key words: chewing cane; cold resistance; physiological index; comprehensive evaluation

果蔗 *Saccharum officinarum* L.是热带亚热带地区最重要的经济作物之一^[1]。我国种植果蔗历史悠久, 种植范围广, 主要产区为广东、广西、海南和福建等省区。近几年来, 随着南凉北热的逆差、品种引进驯化和栽培技术的改进等, 果蔗蔗区逐年北移, 现已扩大至河北、河南、山东等省^[2]。果蔗各品种间的耐寒性差异较大, 有些耐寒性较差的品种无法适应北方的气候条件, 温度特别是早春低温是果蔗引种和生产的重要限制因素之一, 因此, 研究果蔗的抗寒性, 选育抗寒品种已成为果蔗南种北引亟待解决的关键问题。在各种环境胁迫中, 低温对植物的影响尤为突出, 植物在低温胁迫下, 膜脂过氧化产物丙二醛含量升高, 细胞膜透性增大^[3], 可溶性糖、可溶性蛋白和游离脯氨酸等渗透调节物质积累, 保护酶活性升高^[4]。在植物抗寒性研究和评价中, 上述指标常被用作指示植物抗寒性的指标, 隶属函数法是目前普遍采用的抗性综合评价方法^[5]。

在甘蔗耐寒性研究方面, 前人对糖蔗的耐寒性研究较多。丘立杭^[6]研究表明, 不同甘蔗品种受低温胁迫后, 叶片可溶性糖含量均上升, 耐寒性强的品种可溶性糖含量最高且增幅最大。黄杏等^[7]研究表明, 甘蔗受到低温胁迫后叶片脯氨酸含量上升, 不同冷敏感型品种间存在较大差异。孙波等^[8]和李素丽等^[9]研究发现, 甘蔗在受到持续低温胁迫后, 不同耐寒性的品种根系中可溶性糖含量均呈现上升趋势, 但品种之间可溶性糖含量存在差异。有关果蔗耐寒性研究鲜有系统的研究报道。本研究选取在广西、福建、四川生长良好、种植面积较广的 6 个果

蔗品种作为试验材料, 采用人工模拟低温环境的方法, 对果蔗幼苗进行低温胁迫, 测定幼苗抗寒性相关的生理生化指标, 研究不同果蔗品种对低温胁迫的生理响应, 并对其抗寒性进行综合评价, 筛选出抗寒性强的品种, 为果蔗抗寒育种、引种及栽培区划分提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于 2016 年 4 月在平顶山学院低山丘陵区生态修复重点实验室进行。供试的果蔗品种为 ‘桂果蔗 1 号’、‘拔地拉’、‘闽引黄皮果蔗’、‘龙黑果蔗’、‘白玉果蔗’ 和 ‘川蔗 26 号’。其中, ‘桂果蔗 1 号’ 和 ‘拔地拉’ 由广西农业科学院甘蔗研究所提供, ‘闽引黄皮果蔗’、‘白玉果蔗’ 和 ‘龙黑果蔗’ 由福建省农业科学院甘蔗研究所提供, ‘川蔗 26 号’ 由四川省植物工程研究院提供。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 将 6 个果蔗品种单芽种茎温汤脱毒处理后放进沙盘中沙培, 待果蔗长出 2~3 片叶时, 将蔗苗从沙中移出, 选取长势一致的果蔗苗移栽至 25 cm×30 cm 的营养桶中土培, 每桶种植 2 株, 按日常管理生长 50 d, 果蔗约为 5~6 叶期时, 分组进行处理, 每个品种为 1 个处理, 重复 3 次。将果蔗幼苗置于低温培养室内 (温度 0 ℃), 光照度为 300~400 μmol·m⁻²·s⁻¹, 12 h 光:12 h 暗, 相对湿度 65%~75%, 连续胁迫 14 d, 处理期间土壤含水量

(w) 保持 25% 左右。分别于低温处理后 0、7、14 d 取各处理幼苗+1 叶(甘蔗最高可见肥厚带叶片), 分别进行各种生理指标的测定, 所有指标均设置 3 个重复。

1.2.2 生理指标测定方法 相对电导率(Relative conductivity, REC) 以及丙二醛(Malondialdehyde, MDA)、可溶性糖(Soluble sugar, SS)、可溶性蛋白(Soluble protein, SP) 和脯氨酸(Proline, Pro) 含量测定参照张以顺等^[10]的方法; 超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)、过氧化物酶(Peroxidase, POD)、过氧化氢酶(Catalase, CAT) 和抗坏血酸过氧化物酶(Ascorbate peroxidase, APX) 活性的测定参照 Parida 等^[11]的方法。在 25 ℃ 条件下, 每分钟内转化 1 μmol 底物所需的酶量定为一个酶活力单位(U)。

1.2.3 果蔗品种耐寒性综合评价方法 本研究中的抗寒系数为低温胁迫处理 14 d 时的测定值与常温处理的测定值的百分比, 即

抗寒系数 = $\frac{\text{低温胁迫后指标测定值}}{\text{对照指标测定值}} \times 100\%$ 。

采用模糊综合评判方法中的隶属度公式, 对试验原始数据进行定量转换, 以综合评价不同果蔗品

种的耐寒性。参照何雪银等^[12]的方法, 计算隶属函数值和平均隶属度, 分析评价不同果蔗品种的抗寒性。其中, 与抗寒性呈正相关的指标用公式 (1) 计算, 与抗寒性呈负相关的指标用公式 (2) 计算; 隶属函数法评定时, 隶属函数平均值越大, 则耐寒性越强。

隶属函数 = $(X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$, (1)

反隶属函数 = $1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$, (2)

式中, X_i 为指标测定值, $X_{\min}$ 和 $X_{\max}$ 分别为所有参试材料某一指标的最小值和最大值。

1.2.4 数据统计与分析 采用 SPSS19.0 软件进行数据相关性分析和主成分分析, 采用 LSD 法进行显著性分析, 用 Excel 2007 进行数据计算和制表。

2 结果与分析

2.1 低温胁迫对果蔗叶片 REC、MDA 和渗透调节物质含量的影响

由表 1 可以看出, 不同果蔗品种幼苗叶片经 7 和 14 d 低温胁迫后与对照(0 d) 相比, 叶片 REC 以及 SS、SP 和 Pro 含量均上升, 但上升幅度不同, 经 7 d 低温胁迫后的指标均高于常温处理(0 d), 差异达显著水平($P<0.05$); 除 MDA 含量外, 经 14 d 低温

表 1 低温胁迫对果蔗叶片 REC、MDA 和渗透调节物质含量的影响¹⁾

Tab. 1 Effect of low temperature stress on REC, MDA and osmotic regulation substances contents of chewing cane leaves						
品种	$t_{\text{处理}}/\text{d}$	REC	$b(\text{MDA})/(\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1})$	$w/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$		
				SS	SP	Pro
桂果蔗1号	0	15.69a	22.35a	12.49a	15.49a	21.49a
	7	25.66b	31.89b	27.47b	25.68b	44.68b
	14	37.14c	23.21b	41.44c	43.37c	46.37b
拔地拉	0	16.79a	21.15a	12.58a	14.88a	20.32a
	7	28.82b	34.49c	24.40b	25.40b	37.40b
	14	48.66c	22.93b	32.14c	34.88c	45.88b
闽引黄皮果蔗	0	16.46a	21.31a	13.23a	16.29a	19.79a
	7	29.81b	34.02b	23.84b	29.42b	39.84b
	14	47.46c	25.97a	35.11c	45.15c	43.15b
龙黑果蔗	0	15.74a	21.15a	11.82a	16.82a	21.99a
	7	29.97b	37.93c	22.99b	27.99b	31.99b
	14	50.22c	28.09b	29.99c	33.88c	33.88b
白玉果蔗	0	17.61a	22.95a	12.91a	17.91a	22.06a
	7	28.06b	35.43b	24.41b	28.18b	30.41b
	14	48.59c	26.68a	34.22c	46.52c	33.52b
川蔗26号	0	16.44a	20.64a	12.92a	15.17a	20.31a
	7	27.19b	38.32b	23.91b	29.09b	33.21b
	14	51.19c	29.34a	30.93c	36.93c	34.21b

1)相同品种、同列数据后凡是有一个相同小写字母者,表示处理间差异不显著($P>0.05$, LSD 法)

处理后的指标也均高于 7 d 低温处理, 差异达显著水平 ($P<0.05$)。而 MDA 含量在处理 7 d 时, 达最大值, 与对照的差异达显著水平 ($P<0.05$); 处理 14 d 时, 反而有所下降, 但仍高于常温处理 (0 d)。

2.2 低温胁迫对果蔗叶片保护酶活性的影响

如表 2 所示, 随着低温胁迫时间的延长, 各供试材料的 SOD、POD、CAT 和 APX 活性均表现出先上升后下降的趋势, 但变化幅度不同。在低温胁迫 7 d 时均达峰值, 与常温处理 (0 d) 差异达显著水

平 ($P<0.05$); 随着低温胁迫时间的进一步延长, 14 d 时的酶活性均呈下降趋势。各供试材料的 SOD 活性的下降幅度最小, 略低于低温胁迫 7 d 时的 SOD 活性, 差异不显著, 远高于常温处理 (0 d) 材料的 SOD 活性, 差异达显著水平 ($P<0.05$)。低温胁迫 14 d 时, 各供试材料的 POD、CAT 和 APX 活性下降幅度均较大, 远低于低温胁迫 7 d 时的酶活性, 差异达显著水平 ($P<0.05$), 但与常温处理 (0 d) 的酶活性差异不显著。

表 2 低温胁迫对果蔗叶片保护酶活性的影响¹⁾

Tab. 2 Effect of low temperature stress on defensive enzyme activities of chewing cane leaves					U·g ⁻¹
品种	<i>t</i> _{处理} /d	SOD活性	POD活性	CAT活性	APX活性
桂果蔗1号	0	23.08a	246.56a	67.50a	81.43a
	7	92.54b	515.92b	114.67b	255.46b
	14	88.76b	274.31a	85.47a	92.93a
拔地拉	0	18.66a	256.34a	64.67a	76.36a
	7	69.74b	483.47b	98.83b	210.29b
	14	64.55b	263.18a	72.73a	83.10a
闽引黄皮果蔗	0	22.03a	248.43a	66.33a	78.73a
	7	60.08b	404.70b	108.67b	251.32b
	14	57.54b	257.40a	68.37a	70.91a
龙黑果蔗	0	19.21a	236.32a	65.00a	75.93a
	7	79.74b	429.08b	96.67b	227.24b
	14	65.71b	220.71a	70.67a	82.89a
白玉果蔗	0	23.26a	237.93a	65.27a	80.31a
	7	61.77b	411.16b	98.55b	221.23b
	14	55.06b	232.03a	67.35a	79.11a
川蔗26号	0	18.08a	256.18a	64.75a	80.34a
	7	77.41b	423.83b	94.36b	207.43b
	14	62.11b	228.10a	69.44a	86.89a

1)相同品种、同列数据后凡是有一个相同小写字母者,表示处理间差异不显著($P>0.05$, LSD 法)

2.3 不同品种果蔗叶片各单项指标的抗寒系数

表 3 为 6 个品种果蔗各单项指标的抗寒系数, 抗寒系数越大, 表明该品种对低温的抵抗能力越弱。由表 3 可看出, 经低温胁迫后, REC 抗寒系数最大的是‘龙黑果蔗’ (319.06%), 最小的是‘桂果蔗 1 号’ (236.71%); MDA 含量抗寒系数最大的是‘川蔗 26 号’ (142.15%), 最小的是‘桂果蔗 1 号’ (103.84%); SS 含量抗寒系数最大的是‘桂果蔗 1 号’ (329.38%), 最小的是‘川蔗 26 号’ (239.40%)。除‘川蔗 26 号’、‘拔地拉’和‘龙黑果蔗’外, 其余 3 个品种 SS 含量抗寒系数均在 265% 以上, 说明‘桂果蔗 1 号’、‘闽引黄皮果蔗’

和‘白玉果蔗’ 3 个品种均具有一定的抗寒能力。SP 含量抗寒系数最大的是‘桂果蔗 1 号’ (280.05%), 最小的是‘龙黑果蔗’ (201.43%), 说明‘桂果蔗 1 号’的抗寒能力最弱, ‘龙黑果蔗’最强。Pro 含量抗寒系数最大的是‘拔地拉’ (225.79%), 最小的是‘白玉果蔗’ (151.95%), 不同品种果蔗经低温胁迫处理后 Pro 含量提高幅度差异较大, 说明不同品种通过增加体内 Pro 含量来提高其抗寒适应性的能力存在较大差异。SOD 活性抗寒系数最大的是‘桂果蔗 1 号’ (384.58%), 最小的是‘白玉果蔗’ (236.72%), 除‘闽引黄皮果蔗’、‘白玉果蔗’外, 其余品种 SOD 活性抗寒系数均

表 3 不同品种果蔗叶片各单项指标的抗寒系数

Tab. 3 Cold-resistant coefficient of each single index of chewing cane leaves of different cultivars %

品种	REC	MDA含量	SS含量	SP含量	Pro活性	SOD活性	POD活性	CAT活性	APX活性
桂果蔗1号	236.71	103.84	329.38	280.05	215.77	384.58	113.26	126.62	114.12
拔地拉	289.82	108.41	255.48	241.13	225.79	345.93	102.67	112.46	108.83
闽引黄皮果蔗	288.34	121.87	265.38	277.16	218.04	261.19	103.61	103.08	90.07
龙黑果蔗	319.06	132.81	253.72	201.43	154.07	342.06	93.39	108.72	109.17
白玉果蔗	275.92	116.25	265.07	259.74	151.95	236.72	97.51	103.19	98.51
川蔗26号	311.37	142.15	239.40	243.44	168.44	343.53	89.04	107.24	108.15

在 340% 以上;POD 活性抗寒系数最大的是‘桂果蔗 1 号’(113.26%),最小的是‘川蔗 26 号’(89.04%);CAT 和 APX 活性抗寒系数最大的都是‘桂果蔗 1 号’(分别为 126.62% 和 114.12%),二者抗寒系数最小的均为‘闽引黄皮果蔗’(分别为 103.08% 和 90.07%)。低温胁迫下,不同品种果蔗 SOD、POD、CAT 和 APX 活性出现不同程度的提高或降低,说明不同品种果蔗对低温的抵抗能力存在差异。

2.4 果蔗幼苗耐寒性指标的相关性分析

果蔗幼苗抗寒生理生化指标的相关性分析结果见表 4。从表 4 可以看出,REC 与 SS 含量呈极显

著负相关 ($P<0.01$),与 MDA 含量呈显著正相关 ($P<0.05$),与 SP 含量、POD 活性呈显著负相关 ($P<0.05$);MDA 含量与 POD 活性呈极显著负相关 ($P<0.01$);SS 含量与 POD、CAT 活性呈显著正相关 ($P<0.05$);SOD 活性与 CAT、APX 活性分别呈显著正相关 ($P<0.05$) 和极显著正相关 ($P<0.01$)。REC 和 MDA 含量对果蔗抗寒性起负向作用,其值越高,抗寒性越低;SS、Pro 含量以及 SOD、POD、CAT 和 APX 活性对果蔗抗寒性起正向作用,其值越高,果蔗抗寒性越强。可见,低温胁迫对果蔗的影响是多方面的,故在果蔗抗寒鉴定中,不能单独依赖上述某个或某 2 个指标对果蔗抗寒性进行评价。

表 4 果蔗幼苗抗寒指标的相关性分析¹⁾

Tab. 4 Correlation analyses between cold-resistance indices of chewing cane seedlings

指标	REC	MDA含量	SS含量	SP含量	Pro含量	SOD活性	POD活性	CAT活性	APX活性
REC	1.000								
MDA含量	0.846*	1.000							
SS含量	-0.896*	-0.722	1.000						
SP含量	-0.801*	-0.538	0.598	1.000					
Pro含量	-0.481	-0.625	0.424	0.548	1.000				
SOD活性	-0.067	-0.080	0.339	-0.232	0.286	1.000			
POD活性	-0.878*	-0.892**	0.880*	0.678	0.751	0.212	1.000		
CAT活性	-0.632	-0.567	0.813*	0.238	0.455	0.806*	0.686	1.000	
APX活性	-0.093	-0.110	0.302	-0.352	-0.012	0.902**	0.083	0.760	1.000

1) “*”、“**” 分别表示达 0.05、0.01 水平的显著相关

2.5 果蔗幼苗各单项指标主成分分析

为了简化指标,分析指标之间的相互关系,对果蔗幼苗 9 个单项指标的抗寒系数进行主成分分析,将 9 个单项指标转化成 9 个相互独立的综合指标。主成分分析结果(表 5)表明,第 1 主成分(A1)主要描述抗寒指标中的 REC、MDA 含量、SS 含量、Pro 含量、POD 活性和 CAT 活性等,各指标具有绝对值较大的特征向量,贡献率达 57.831%;第 2 主成分(A2)主要包括 SP 含量、SOD 活性和

APX 活性,各指标具有绝对值较大的特征向量,贡献率达 27.630%。第 1、2 主成分累积贡献率达 85.460%。理论上,大于 85% 的累积贡献率即认为具有较强的信息代表性,这 2 个相互独立的综合指标基本上包括了 9 个生理指标所代表的全部信息,可用于果蔗品种的抗寒性分析。

2.6 利用隶属函数综合评价果蔗的耐寒性

为了能够比较全面地反映甘蔗的抗寒性,避免单一指标的局限性与片面性,采用模糊数学中隶属

表 5 各综合指标的系数及贡献率

Tab. 5 Coefficients of comprehensive indexes and their contribution rates

主成分	REC	MDA 含量	SS 含量	SP 含量	Pro 含量	SOD 活性	POD 活性	CAT 活性	APX 活性	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
A1	-0.910	-0.860	0.922	0.661	0.698	0.389	0.959	0.831	0.304	5.205	57.831	57.831
A2	0.260	0.207	0.030	-0.641	-0.154	0.883	-0.187	0.548	0.927	2.487	27.630	85.460

函数法, 选用与果蔗抗寒性相关的生理指标对 6 个果蔗品种抗寒性进行综合评价, 综合评价值越大, 表明其耐寒能力越强。各果蔗品种的平均隶属度见表 6。由表 6 可见, 6 个供试材料间的综合评价值差异较大, 介于 0.355~0.648 之间, 表现为‘桂果蔗 1 号’>‘拔地拉’、‘闽引黄皮果蔗’>‘白玉果

蔗’>‘川蔗 26 号’>‘龙黑果蔗’。‘桂果蔗 1 号’的综合评价值高达 0.648, 耐寒性最强; ‘拔地拉’和‘闽引黄皮果蔗’的综合评价值都为 0.464, 耐寒性次之; ‘龙黑果蔗’的综合评价值仅为 0.355, 耐寒性最差。

表 6 不同果蔗品种的隶属函数值

Tab. 6 Subordinate function values of different chewing cane cultivars

品种	REC	MDA含量	SS含量	SP含量	Pro含量	SOD活性	POD活性	CAT活性	APX活性	隶属度	排序
桂果蔗1号	0.402	0.852	1.000	0.904	1.000	0.952	0.182	0.420	0.119	0.648	1
拔地拉	0.073	0.874	0.707	0.634	0.982	0.623	0.053	0.160	0.066	0.464	2
闽引黄皮果蔗	0.115	0.693	0.791	0.962	0.883	0.535	0.121	0.074	0.000	0.464	2
龙黑果蔗	0.033	0.584	0.614	0.603	0.534	0.643	0.000	0.120	0.065	0.355	5
白玉果蔗	0.071	0.662	0.771	1.000	0.521	0.504	0.043	0.054	0.023	0.405	3
川蔗26号	0.000	0.517	0.653	0.702	0.543	0.591	0.084	0.095	0.087	0.364	4

3 讨论与结论

植物细胞膜是一种选择透过性生物膜, 逆境条件下细胞膜相对透性反映了膜系统稳定性^[13]。在评价植物耐寒性的生理生化指标中, 质膜电解质渗出率(即 REC)的大小是植物抗寒性强弱的重要指标, 可用来判断植物受低温伤害程度和植物的抗寒能力^[14]。本研究表明, 随着低温胁迫时间的延长, 6 个果蔗品种叶片 REC 均不断提高, 但提高的幅度不同, 说明低温胁迫对果蔗叶片细胞膜系统造成伤害, 不同果蔗品种间抗寒性存在差异, 这和黄杏等^[15]在甘蔗上的研究结果一致。MDA 是膜脂氧化的最终产物, 对质膜有毒害作用, 其含量可以反映植物遭受逆境伤害的程度^[16]。植物的抗寒性与 MDA 含量呈负相关, 即抗寒性越强, MDA 含量越小, 低温处理后, 植物体内 MDA 含量会增加^[17]。本研究结果表明, 随着低温胁迫时间的延长, 6 个果蔗品种叶片 MDA 含量呈先增加后降低的趋势, 但均高于对照。

在逆境条件下, SS、SP 和 Pro 等渗透调节物质的含量发生变化, 植物体内各种渗透调节物质大量积累并导致细胞渗透势下降, 从而增加其抗寒性^[18]。

本研究表明, 低温胁迫后, 不同果蔗品种 SP、SS 和 Pro 含量均升高, 这与唐仕云等^[19]的研究结果相似。低温胁迫下果蔗可通过增加体内主要渗透物质的含量来提高其对低温的适应性, 抗寒性强的品种渗透物质含量增加的幅度大, 反之, 抗寒性弱的品种渗透物质含量增加的幅度较小。

低温胁迫下, 植物体内产生大量的活性氧自由基, 引发膜脂过氧化, 同时植物体内还存在着 SOD、POD、CAT 和 APX 等抗氧化酶系统以清除活性氧、降低逆境损伤, 酶活性的提高或降低与植物抗寒性的强弱有一定相关性^[20]。本研究表明, 低温胁迫使果蔗 SOD、POD、CAT 和 APX 活性提高, 有助于清除细胞内积累的自由基, 从而减轻膜脂过氧化伤害, 说明果蔗对低温产生了一定的抗性。但随着低温时间的延长, 保护酶活性又有所降低, 说明其清除自由基的能力下降, 出现冻害症状。

植物的抗逆性是受多种因素影响的复杂的数量性状, 不仅表现在形态上, 同时也表现在生理生化过程中。用单一指标评价植物的抗逆性具有片面性, 只有采用多个指标同时根据各自贡献率的大小进行综合评价才能准确反映植物的抗逆性^[21]。因此, 在进行果蔗品种抗寒性鉴定时, 不宜使用单一

的生理生化指标,应采用多个指标综合评价。主成分分析可将原来个数较多的指标转换为新的、个数较少且彼此独立的综合指标,适用于对植物抗寒性的综合评价分析^[22]。隶属函数法已经成功应用于甘蔗^[18]、小麦^[23]等作物的抗逆性评价,并证明其对抗性筛选的可靠性,可用于果蔗抗逆性的综合评价。本研究选择低温胁迫条件下与抗寒性密切相关的9项指标,利用主成分分析和隶属函数法对果蔗的抗寒性进行了综合评价,提高了抗寒性评价的准确性,该评价方法简便、准确,可作为果蔗抗寒能力鉴定的一种有效方法。

果蔗的抗寒性不仅与自身的遗传因素和生理特征有关,还与外界环境因素密切相关。选育抗寒性强的品种、建立良种良法配套的高产栽培技术,提高果蔗的抗寒综合能力,是目前果蔗在北方高效栽培生产中亟待解决的问题。本研究以生产上推广的6个果蔗品种为试材,综合分析结果表明,不同果蔗品种对长时间持续低温的适应能力各异,6个果蔗品种抗寒能力大小依次为:‘桂果蔗1号’>‘拔地拉’、‘闽引黄皮果蔗’>‘白玉果蔗’>‘川蔗26号’>‘龙黑果蔗’。

参考文献:

- [1] 王子琳,郭陈福,王水琦,等. 果蔗品种的产量和品质的初步研究[J]. 甘蔗, 1995(1): 46-49.
- [2] 王继华,曹干,张剑亮,等. 我国果蔗产业的现状与可持续发展[J]. 甘蔗糖业, 2013(5): 56-60.
- [3] 姜丽娜,张黛静,宋飞,等. 不同品种小麦叶片对拔节期低温的生理响应及抗寒性评价[J]. 生态学报, 2014, 34(15): 4251-4261.
- [4] 杨慧菊,郭华春. 马铃薯幼苗低温胁迫的生理响应及品种耐寒性综合评价[J]. 西南农业学报, 2016, 29(11): 2560-2566.
- [5] 刘杜玲,张博勇,孙红梅,等. 早实核桃不同品种抗寒性综合评价[J]. 园艺学报, 2015, 42(3): 545-553.
- [6] 丘立杭. 不同甘蔗品种低温胁迫下的生理生化特性及其蛋白质表达分析[D]. 南宁: 广西大学, 2010.
- [7] 黄杏,梁勇生,杨丽涛,等. 低温胁迫下脱落酸及合成抑制剂对甘蔗幼苗抗氧化系统的影响[J]. 华南农业大学学报, 2013, 34(3): 356-361.
- [8] 孙波,刘光玲,杨丽涛,等. 甘蔗幼苗根系形态结构及保护系统对低温胁迫的响应[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(6): 71-80.
- [9] 李素丽,李志刚,杨丽涛,等. 低温对不同冷敏感型甘蔗品种根系一些生理指标的影响[J]. 华南农业大学学报, 2012, 33(2): 178-182.
- [10] 张以顺,黄霞,陈云凤. 植物生理学实验教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 128-129.
- [11] PARIDA A K, DAS A B, MOHANTY P. Defense potentials to NaCl in a mangrove, *Bruguiera parviflora*: Differential changes of isoforms of some antioxidative enzymes[J]. J Plant Physiol, 2004, 161(5): 531-542.
- [12] 何雪银,文仁来,吴翠荣,等. 模糊隶属函数法对玉米苗期抗旱性的分析[J]. 西南农业学报, 2008, 21(1): 52-56.
- [13] PALTA J P, LEE P H. Cell membrane properties in relation to freezing injury[J]. HortScience, 1996, 31(1): 51-57.
- [14] 陈禹兴,付连双,王晓楠,等. 低温胁迫对冬小麦恢复生长后植株细胞膜透性和丙二醛含量的影响[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(10): 10-16.
- [15] 黄杏,陈明辉,杨丽涛,等. 低温胁迫下外源ABA对甘蔗幼苗抗寒性及内源激素的影响[J]. 华中农业大学学报, 2013, 32(4): 6-11.
- [16] 高述民,程朋军,郭惠红,等. 日本桃叶珊瑚的冷驯化及抗寒机制研究[J]. 西北植物学报, 2003, 23(12): 2113-2119.
- [17] 王腾飞,裴玉贺,郭新梅,等. 3个玉米品种苗期耐寒性鉴定[J]. 核农学报, 2017, 31(4): 803-808.
- [18] 张保青,杨丽涛,李杨瑞. 自然条件下甘蔗品种抗寒生理生化特性的比较[J]. 作物学报, 2011, 37(3): 496-505.
- [19] 唐仕云,杨丽涛,李杨瑞. 不同甘蔗基因型对低温胁迫的响应及其耐寒性评价[J]. 热带作物学报, 2012, 33(4): 635-641.
- [20] 王树刚,王振林,王平,等. 不同小麦品种对低温胁迫的反应及抗冻性评价[J]. 生态学报, 2011, 31(4): 1064-1072.
- [21] 南丽丽,师尚礼,陈建纲,等. 同根型苜蓿根系对低温胁迫的响应及其抗寒性评价[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(3): 619-625.
- [22] 李铁冰,杨顺强,任广鑫,等. 低温处理下不同禾本科牧草的生理变化及其抗寒性比较[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1341-1347.
- [23] 陈荣敏,杨学举,梁凤山,等. 利用隶属函数法综合评价冬小麦的抗旱性[J]. 河北农业大学学报, 2002, 25(2): 7-9.

【责任编辑 周志红】