

# 甘蔗幼苗根系形态结构及保护系统对低温胁迫的响应

孙波<sup>1</sup> 刘光玲<sup>1</sup> 杨丽涛<sup>1,2\*</sup> 李杨瑞<sup>1,2</sup>

(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/农业部广西甘蔗生物技术与遗传改良重点实验室/  
广西作物遗传改良生物技术重点实验室/广西甘蔗遗传改良重点实验室, 南宁 530007)

**摘要** 为探明低温对甘蔗根系的影响,本研究采取水培试验的方法,选用不抗寒品种 ROC22 和抗寒品种 GT28 的完整根系为供试材料,测定常温(25 ℃)与低温(4 ℃)条件下甘蔗幼苗根系的根长、根体积、根细胞排列、根系活力、丙二醛(MDA)、脯氨酸、可溶性糖与可溶性蛋白质含量以及过氧化物酶(POD)和超氧化物歧化酶(SOD)活性相关指标。结果表明:在低温胁迫下,GT28 根长、根体积均大于 ROC22,但都显著低于常温生长;低温胁迫 3 d 后,根系细胞膨大变形,细胞结构散乱,以 ROC22 更为明显;随着低温时间的延长,2 个品种根系活力均显著降低,而 ROC22 的降幅更大;在低温持续胁迫下,根系 MDA、脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白含量以及 POD 和 SOD 活性等指标均高于常温生长,呈先上升后降低趋势,抗寒品种 GT28 的可溶性糖含量、脯氨酸含量、POD 和 SOD 酶活性均高于不抗寒品种 ROC22。结论:在低温胁迫下根系生长和生理生化代谢的差异是不同品种抗寒能力的生理基础。

**关键词** 甘蔗;根;低温胁迫

中图分类号 S 566.1

文章编号 1007-4333(2014)06-0071-10

文献标志码 A

## Response of chilling stress on root morphology and protection systems of sugarcane seedlings

SUN Bo<sup>1</sup>, LIU Guang-ling<sup>1</sup>, YANG Li-tao<sup>1,2\*</sup>, LI Yang-rui<sup>1,2</sup>

(1. Agricultural College/State Key Laboratory of Conservation and Utilization of Subtropical

Agro-bioresources, Guangxi University, Nanning 530005, China;

2. Sugarcane Research Center/Key Laboratory of Sugarcane Biotechnology and Genetic Improvement (Guangxi), Ministry of Agriculture/Guangxi Crop Genetic Improvement and Biotechnology Laboratory/Guangxi Key Laboratory of Sugarcane Genetic Improvement, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China)

**Abstract** This experiment aimed to study the effect of low temperature on roots growth of different sugarcane varieties with varied cold resistance in order to provide theoretical references for future relevant researches. The complete roots of the young plants derived from water culture for both cold resistant sugarcane variety GT28 and the cold sensitive sugarcane variety ROC22 were used as the plant materials. The plants of the both varieties were treated with normal room temperature (25 ℃, control) and low temperature (4 ℃), respectively. Various parameters, including root length, root volume, root micro-structure, root vigor activities, malonaldehyde (MDA), contents of proline, soluble sugar, soluble protein, peroxidase (POD) and superoxide dismutase (SOD) were measured. As the cold stress duration prolonged, the average root length and root volume were decreased by the cold stress compared to the normal temperature, but the

收稿日期: 2014-02-28

基金项目: 广西自然科学基金创新团队项目(2011GXNSFF018002); 广西八桂学者和特聘专家专项经费; 广西科学研究与技术开发计划项目(桂科产 1123008-1); 广西科技基础条件平台(重点实验室)建设项目(11-031-31); 广西农科院团队项目(桂农科 2011YT01)

第一作者: 孙波, 博士研究生, E-mail: 377753641@qq.com

通讯作者: 杨丽涛, 教授, 博士, 主要从事甘蔗生理生化和分子生物学研究, E-mail: liyr@gxu.edu.cn

decreases were less in GT28 than in ROC22. After 3 days of cold stress, the root micro-structure were getting swelling and deforming, and disorder of cellular structures were observed in the roots of both tested varieties, but the deformation was much more significant in ROC22 than in GT28. Under the prolonged cold stress, the root activity was significantly weakened for both sugarcane varieties, but it was more serious for the variety ROC22. The contents of MDA, proline, soluble sugar, soluble protein, and the activities of POD and SOD in the roots were higher than those in the control and the pattern showed a progressive increasing and then decreasing. The contents of soluble sugar and proline and the activities of POD and SOD in cold resistant variety of GT28 were higher than those of cold susceptible variety of ROC22. The present results indicate that cold resistance/susceptibility is variety-dependence based on, root growth and metabolism of physiology and biochemistry.

**Key words** sugarcane; roots; cold stress

甘蔗是热带和亚热带农作物<sup>[1]</sup>,在糖业及生物能源生产中具有重要地位<sup>[2]</sup>。温度是影响作物生长发育和产量、质量的主要限制因子之一。然而,近年来我国各地极端低温天气频发,低温冷害冻害日益严重。其中,广西是中国的甘蔗主产区<sup>[3]</sup>,每年由于低温影响给甘蔗生产和制糖工业造成巨大的经济损失<sup>[4]</sup>。尤其是2008年年初广西遭遇到长期冻雨低温天气,2010/2011甘蔗榨季又受到长时间的极端低温影响,使广西的甘蔗产量受到严重影响,造成巨大的经济损失<sup>[5]</sup>,因此对甘蔗抗寒的机理研究和抗寒新品种的选育、推广都十分重要。当环境温度变化时,植物对地温比气温更敏感<sup>[6]</sup>,而根是受低温影响最敏感的器官之一。所以,探讨低温对甘蔗根系形态、解剖和生理生化作用的影响及其相应机制,对培育抗寒甘蔗品种具有重要意义。根系是植物吸收水分和养分的主要器官,也是水分和养分在植物体内运输的重要通道<sup>[7]</sup>。研究表明,逆境胁迫条件下,作物根系形态构型特征会发生适应性变化以抵御逆境<sup>[8]</sup>,而这种适应性变化存在明显的基因型差异<sup>[9]</sup>。低温胁迫下,可溶性糖、丙二醛(Malonaldehyde, MDA)<sup>[10]</sup>、相对电导率、可溶性蛋白质、游离脯氨酸含量上升<sup>[11]</sup>,超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(Catalase, CAT)、过氧化物酶(Peroxidase, POD)活性呈上升趋势<sup>[12]</sup>。目前植物低温胁迫研究主要集中在生理生化方面,在不同的环境条件下会表现出不同的变化,有关低温胁迫对甘蔗和其他植物根系的影响已有一些研究报道<sup>[13]</sup>,但低温胁迫下甘蔗根系形态、解剖特性和生理生化特性相结合的系统研究报道较少。本试验从甘蔗根系的形态、解剖和生理生化特性方面,进一步阐明甘蔗抗寒的生理基础,并为甘蔗抗寒育种和栽培提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

依据本课题组前期研究结果<sup>[14]</sup>,选择抗寒性强的甘蔗品种GT28和抗寒性弱的甘蔗品种ROC22为试验材料,蔗种来自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。

### 1.2 种植及处理

将2个甘蔗品种单芽种茎脱毒处理后同时沙培,待出苗后长至2~3叶期时选取长势较均匀、大小一致健康的种苗,去掉一半种茎后移植至5L培养桶中,用1/2霍格兰营养液进行水培。每天用通气泵进行通气,每隔1h通气10min,营养液每3d更换1次,待生长1周适应水培环境后去掉剩余种茎。培养至5~6叶期时,选取地上长势均一的材料,先放置于25℃培养室培养2d,光强为200~300  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,相对湿度为60%~70%,然后将材料分别放置于人工气候室4℃和25℃培养,光强均为200~300  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。每个处理设3个重复,每个重复5株,处理时间为7d。取样时间为上午9:00—10:00。

取样一:低温处理0d 2个甘蔗品种各选取地上长势一致的5株,由于品种特性不同,根系存在差异。在不损害根系的情况下,用EPSON扫描仪进行根系扫描后,一组放置于25℃,另一组放于4℃条件下继续生长,到第7天再扫描,追踪低温下甘蔗的形态生长。

取样二:低温处理0d和第7天时,2个品种各采集5株,用蒸馏水洗净甘蔗叶片和根系,吸水纸吸干,分别剪取叶和根,进行生物量测定。

取样三:低温处理0、1、3、5和7d进行根系采集,用蒸馏水洗净根系,滤纸吸干,放进封口袋,经液氮冷冻后,放入-80℃超低温冰箱中保存备用。

### 1.3 测定项目及测定方法

对甘蔗幼苗形态进行观察并拍照,了解甘蔗幼苗根系生长和解剖结构的变化。对根长和根体积的测定,采用 EPSON 扫描仪扫描后,用 WinRHIZO 根系分析系统进行分析。采用称量法测生物量,取甘蔗的根、叶、茎,称鲜重(Fresh weight, FW)后在 105 °C 下杀青 10 min 后,再在 85 °C 恒温条件下烘 12 h 直至恒重,在室温下称其干重(Dried weight, DW),计算根冠比。其中增加量为生长 7 d 后的生物量与 0 d 的生物量的差值。采用石蜡切片法观察甘蔗根系的解剖结构,参照袁晓华等<sup>[15]</sup>介绍的 TTC 法测定根系活力;参照高俊凤<sup>[16]</sup>介绍的硫代巴比妥酸比色法测定 MDA 含量;参照杨丽涛等<sup>[17]</sup>介绍的愈创木酚法测定 POD 活性;参照李合生等<sup>[18]</sup>介绍的氮蓝四唑法测定 SOD 活性;参照汤章城<sup>[19]</sup>介绍的磺基水杨酸法测定脯氨酸含量;

参照李合生等<sup>[18]</sup>介绍的硫酸萘酚比色法测定可溶性糖含量,考马斯亮蓝 G-250 法测定可溶性蛋白含量。

### 1.4 数据处理及分析

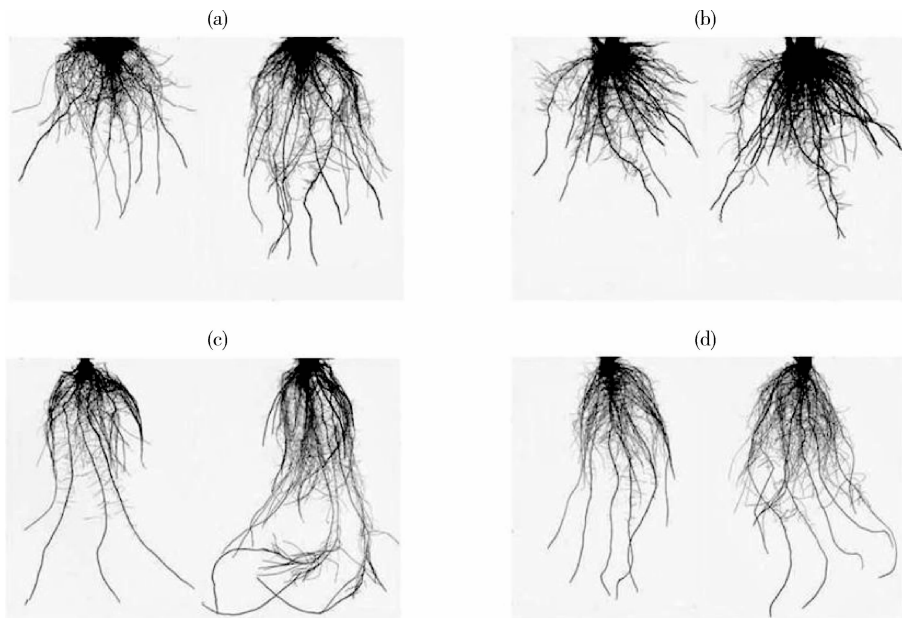
试验所有数据用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS15.0 进行统计分析。

## 2 试验结果

### 2.1 低温胁迫对甘蔗幼苗根系生长及解剖结构的影响

#### 2.1.1 低温胁迫下甘蔗根系形态的变化

图 1 为常温生长和低温胁迫 7 d 的甘蔗根系扫描图。从图 1 可以看出,在低温胁迫前后,2 个甘蔗品种的根系生长形态有区别,如在同一生长时期,GT28 成纵向生长趋势;ROC22 单根较短,呈横向扩展趋势。



(a)和(b)ROC22 甘蔗根系形态的变化;(c)和(d)GT28 甘蔗根系形态的变化;(a)和(c)常温下甘蔗根系形态的变化;(b)和(d)低温下 7 d 甘蔗根系形态的变化。

(a)and (b) show the changes in root morphology of ROC22;(c)and (d) show the changes in root morphology of GT28;(a)and (c) show the changes in root morphology of sugarcane under normal temperature;(b)and (d) show the changes in root morphology of sugarcane under low temperature stress for 7 d.

图 1 低温胁迫下甘蔗根系形态的变化

Fig. 1 Changes in root morphology of sugarcane under low temperature stress

#### 2.1.2 低温胁迫下甘蔗根长、根体积的变化

由表 1 可知,2 个甘蔗品种的根长和根体积均受到低温的抑制。在正常温度下生长 7 d,甘蔗根系体积显著增加;与 0 d 相比,低温胁迫处理

7 d 根系体积没有显著增长。与正常温度(对照)相比,低温胁迫使 ROC22 和 GT28 的根长分别降低 72.9% 和 69.7%,根体积降低 75.2% 和 71.2%。

表1 低温胁迫下甘蔗根长和根体积的变化

Table 1 Changes in root length and volume of sugarcane under low temperature stress

处理 Treatment	根长/cm Root length		根体积/cm <sup>3</sup> Root volume	
	ROC22	GT28	ROC22	GT28
常温 0 d CK	421.6±36.7 b	500.9±29.7 b	7.4±0.3 b	7.8±0.7 b
常温 7 d CK	567.8±45.3 a	759.7±41.9 a	11.9±0.9 a	14.0±0.7 a
低温 0 d Cold stress	306.3±94.6 b	624.9±6.9 b	6.4±0.2 b	10.6±0.5 b
低温 7 d Cold stress	347.4±85.6 b	703.4±9.1 b	7.5±0.3 b	12.5±0.7 b
常温效应 Increase in CK	34.7%	51.7%	60.8%	79.5%
低温胁迫效应 Increase in cold stress Trt	13.4%	12.6%	17.2%	17.0%

注:同一列内,标有不同字母的平均值在 0.05 水平上差异显著。

Note: Means labeled with different letters are significantly different at the 0.05 probability level at the same column.

### 2.1.3 低温胁迫下甘蔗根系生物量的变化

表2的数据显示,低温处理7d后,单株地上部鲜重、地上部干重、地下部鲜重、地下部干重和根冠比在2个品种间无明显变化;但单株地上部和地下

部的生物量均比常温生长低。低温处理后单株地下部干重与处理前相比,ROC22增长不显著,而GT28略高于常温。ROC22根冠比低于常温,而GT28没有变化。

表2 低温胁迫下甘蔗生物量的变化

Table 2 Changes of biomass in sugarcane under low temperature stress

项目 Item	ROC22		GT28	
	对照 CK	低温 7 d Cold stress	对照 CK	低温 7 d Cold stress
地上部鲜重/(g/株) FW of aboveground part	11.23±1.00 a	10.83±2.20 a	12.97±0.68 a	11.81±0.60 a
地上部干重/(g/株) DW of aboveground part	1.60±0.12 a	1.80±0.38 a	1.87±0.12 a	2.00±0.22 a
地下部鲜重/(g/株) FW of underground part	4.70±0.25 a	4.34±0.77 a	4.00±0.18 a	3.33±0.27 a
地下部干重/(g/株) DW of underground part	0.32±0.02 a	0.32±0.08 a	0.32±0.02 a	0.33±0.03 a
根冠比 Root/shoot ratio	0.20	0.18	0.17	0.17

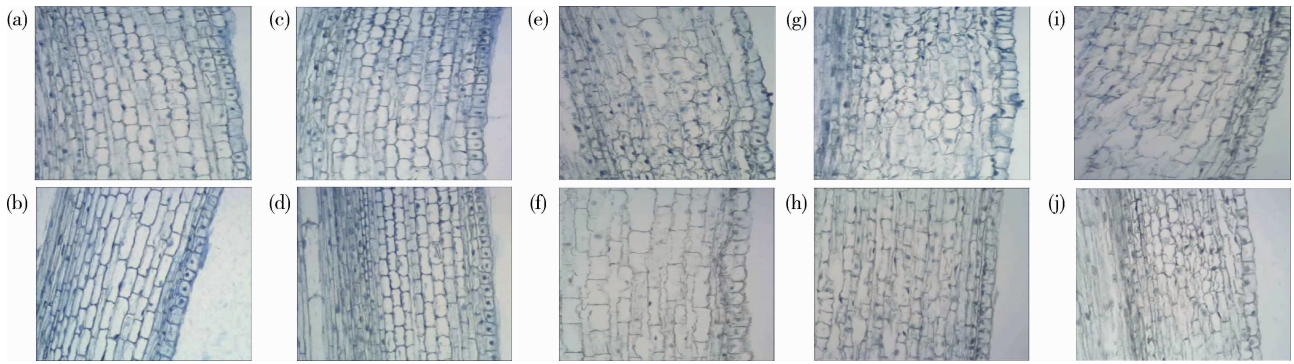
注:同一品种内,每项指标中标有不同字母的平均值在 0.05 水平上差异显著。

Note: Means labeled with different letters are significantly different at the 0.05 probability level for the same variety.

### 2.1.4 低温胁迫下甘蔗根系解剖结构的变化

图2为甘蔗根尖纵向切片图,随着低温处理时间的延长,2个品种根尖细胞结构都发生了变化。在低温胁迫1d时,2个甘蔗品种根尖细胞排列整齐,结构紧密,有规则,结构完好,清晰可见,没有发现细胞损伤现象。胁迫3d时,甘蔗根尖细胞逐渐膨大变形,细胞壁开始破裂,结构开始紊乱,其中

ROC22细胞破裂达到80%,而GT28为30%,说明在同等的胁迫程度下,GT28抵抗低温的能力较强,ROC22较弱。胁迫3d后,2个品种根系均表现出伤害加重的现象,细胞结构紊乱程度加剧,部分细胞的细胞壁开始解体,结构模糊不清晰,表明经过长时间低温胁迫后,根尖细胞发生死亡、不可逆冷害的现象。



(a)、(c)、(e)、(g)和(i)分别是 ROC22 在低温胁迫 0、1、3、5、7 d 根系解剖结构；(b)、(d)、(f)、(h)和(j)分别是 GT28 在低温胁迫 0、1、3、5、7 d 的根系解剖结构。  
 (a), (c), (e), (g) and (i) show the root anatomical structure of ROC22 root at 0, 1, 3, 5 and 7 d, respectively, under low temperature stress; (b), (d), (f), (h) and (j) show the anatomical structure of GT28 root at 0, 1, 3, 5 and 7 d, respectively, under low temperature stress.

图 2 低温胁迫下甘蔗根系解剖结构的变化

Fig. 2 Changes of root structure in sugarcane under low temperature stress

## 2.2 低温胁迫对甘蔗幼苗根系生理特性的影响

### 2.2.1 低温胁迫下甘蔗根系活力的变化

如图 3 所示,随着低温胁迫时间的延长,2 个品种的根系活力都呈下降的趋势。在处理的第 1 天,与对照相比,GT28 降低 15.4%,而 ROC22 降低 48.5%。随着胁迫时间的延长,在处理的第 7 天,

ROC22 和 GT28 的根系活力与对照相比分别降低 79.2%和 64.1%,差异均显著;其中降幅大小顺序为 ROC22>GT28,说明低温胁迫 7 d 后,2 个品种的根系均受到不同程度的伤害,其中 ROC22 受低温伤害的程度更大,并且 ROC22 对低温敏感度高于 GT28。

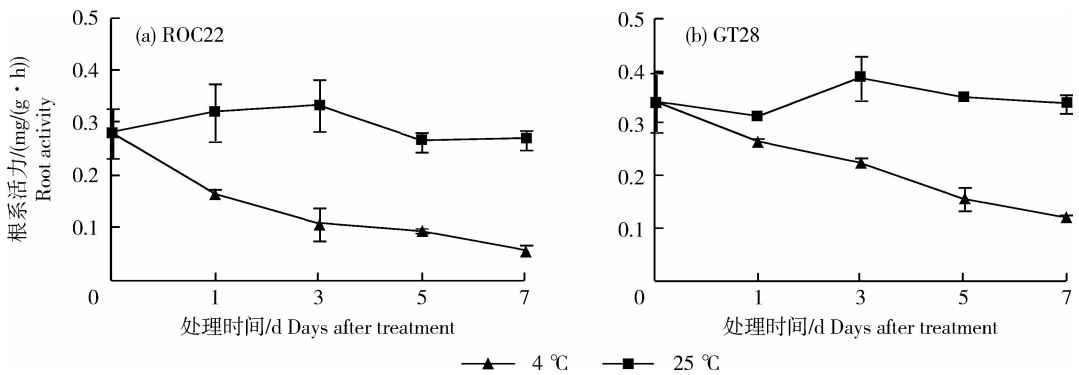


图 3 低温胁迫下甘蔗根系活力的变化

Fig. 3 Changes of root activity of sugarcane under low temperature stress

### 2.2.2 低温胁迫下甘蔗根系 MDA 含量的变化

由图 4 可看出,低温胁迫下,2 个甘蔗品种根系的 MDA 含量呈现先升高后降低的趋势。不同的是在 0 d 时 ROC22 的体内含量略高于 GT28,并且随着低温时间的延长,ROC22 和 GT28 呈现单峰趋势。在处理的第 3 天,2 个品种 MDA 含量都达到

最高,ROC22 比对照增加 46.6%;GT28 比对照增加 30.0%。在低温处理的第 7 天,2 个甘蔗品种根系内的 MDA 含量都低于对照,表明甘蔗根系已发生严重的不可逆冷害现象,部分细胞壁解体,细胞膜受到损伤导致细胞内物质渗漏。

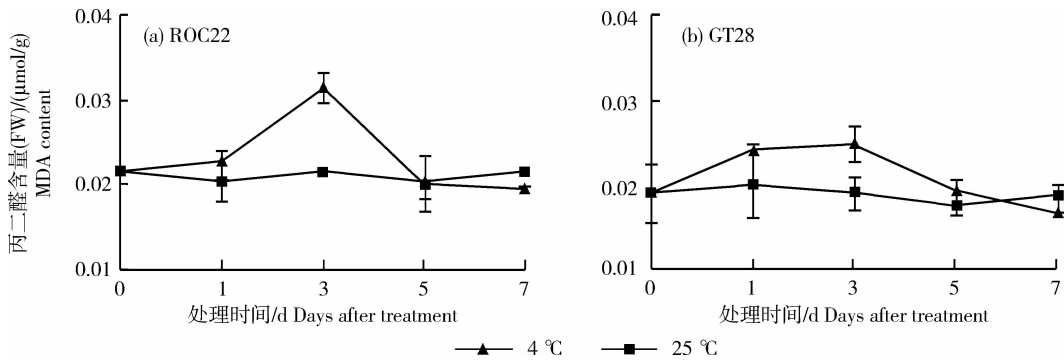


图4 低温胁迫下甘蔗根系MDA含量的变化

Fig. 4 Changes of MDA content in root of sugarcane under low temperature stress

### 2.2.3 低温胁迫下甘蔗根系POD活性的变化

如图5所示,低温胁迫后甘蔗根系内的POD活性变化表现为ROC22激增和激降的趋势,GT28呈先缓慢增加后缓慢下降的趋势。在处理的第3天,ROC22和GT28POD活性最强,与对照相比分别

提高45.2%和91.1%,达到差异显著水平。但随着处理时间的延长,ROC22的POD酶活性下降到对照水平,并在第7天时低于对照水平;而GT28在第5天和第7天的POD酶活性均比对照强,分别比对照提高72.2%和31.1%,亦达差异显著水平。

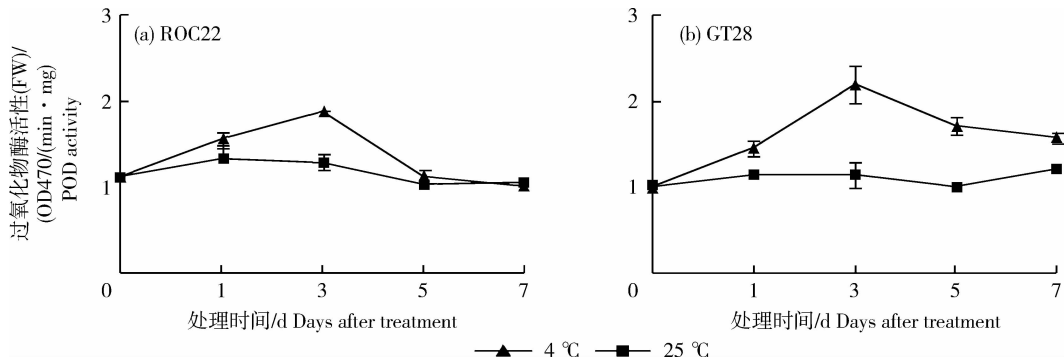


图5 低温胁迫下甘蔗根系POD活性的变化

Fig. 5 Changes of POD activity in root of sugarcane under low temperature stress

### 2.2.4 低温胁迫下甘蔗根系SOD活性的变化

在低温胁迫下,2个甘蔗品种根系内的SOD活性如图6所示。ROC22的SOD活性在低温处理的第1天达到最高,比对照增加20.0%。GT28在低

温处理下SOD活性呈现逐渐升高缓慢下降的趋势,在低温处理的第1、3和5天,比对照分别提高27.8%、32.3%和32.8%。

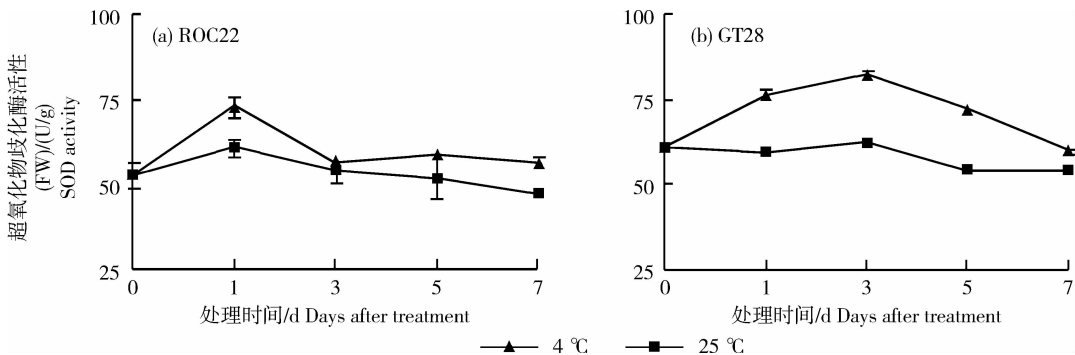


图6 低温胁迫下甘蔗根系SOD活性的变化

Fig. 6 Changes of SOD activity in root of sugarcane under low temperature stress

### 2.2.5 低温胁迫下甘蔗根系脯氨酸含量的变化

在低温胁迫下,2 个甘蔗品种根系内脯氨酸变化如图 7 所示,脯氨酸的含量均呈先上升后下降的趋势。在低温处理的第 1 天,GT28 比对照增加 9.4%,而 ROC22 增加 28.3%。2 个甘蔗品种脯氨酸含量在处理的第 3 天达到峰值,ROC22 和 GT28 与对照相比,分别增加 35.5%和 38.8%,均达显著

差异水平;但在处理 3 d 后,根系内脯氨酸含量均呈下降趋势。ROC22 在处理的第 7 天根系内脯氨酸含量降至对照水平,GT28 仍高于对照。可见,低温胁迫在一定时间内可提高甘蔗根系体内的脯氨酸含量,但不同品种对低温的响应程度不同,抗寒性强的品种可以在较长的时间内维持相对较高的脯氨酸水平。

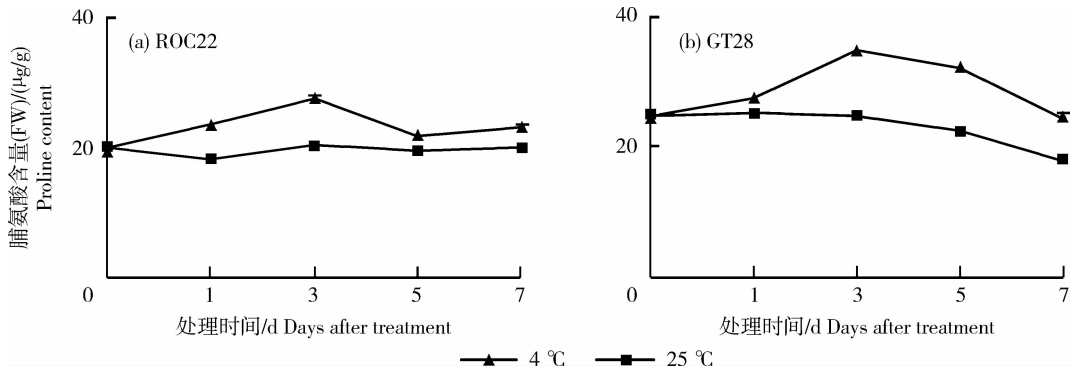


图 7 低温胁迫下甘蔗根系脯氨酸含量的变化

Fig. 7 Changes of proline content in root of sugarcane under low temperature stress

### 2.2.6 低温胁迫下甘蔗根系可溶性糖含量的变化

如图 8 所示,在处理的第 1 天,ROC22 和 GT28 根系内的可溶性糖含量与对照接近;2 个品种的可溶性糖含量在处理的第 3 天达到最高峰,ROC22 增加 58.4%,而 GT28 增加 99.7%,均达到差异显著

水平;从最高值增加的幅度比较,增幅为 GT28 > ROC22;经过高峰期后,2 个品种根系内的可溶性糖含量均开始下降,但都高于对照,表明抗寒性强的甘蔗品种根系内可溶性糖积累量高于抗寒性弱的品种。

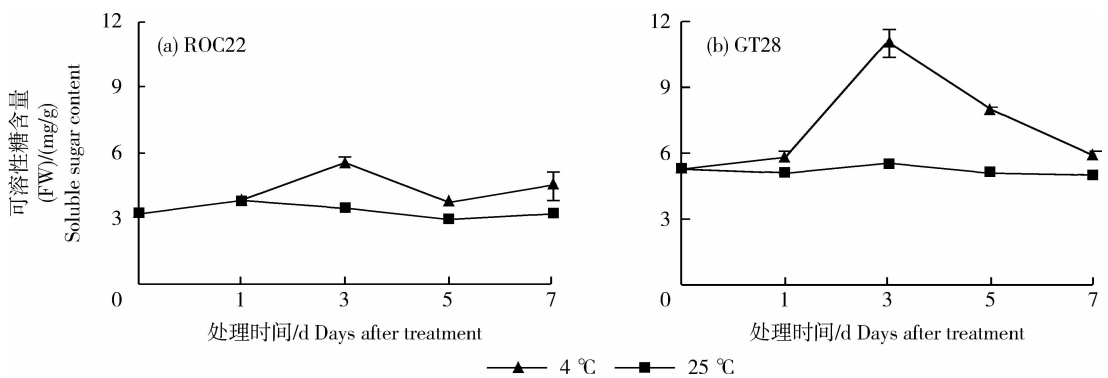


图 8 低温胁迫下甘蔗根系可溶性糖含量的变化

Fig. 8 Changes of soluble sugar content in root of sugarcane under low temperature stress

### 2.2.7 低温胁迫下甘蔗根系可溶性蛋白含量的变化

从图 9 可看出,低温处理下,可溶性蛋白含量在 2 个甘蔗品种根系内先增高后逐渐下降。不同的是 ROC22 表现为激增和激降趋势,而 GT28 表现为梯度上升和梯度下降。在处理的第 1、3 和 5 天

ROC22 与对照相比分别增加 12.5%、50.6%和 15.4%;而 GT28 分别比对照增加 33.2%、50.6%和 47.2%。2 个品种的可溶性蛋白含量在处理的第 3 天最高,高低顺序为 GT28 > ROC22,说明低温胁迫会显著增加根系内可溶性蛋白的含量。

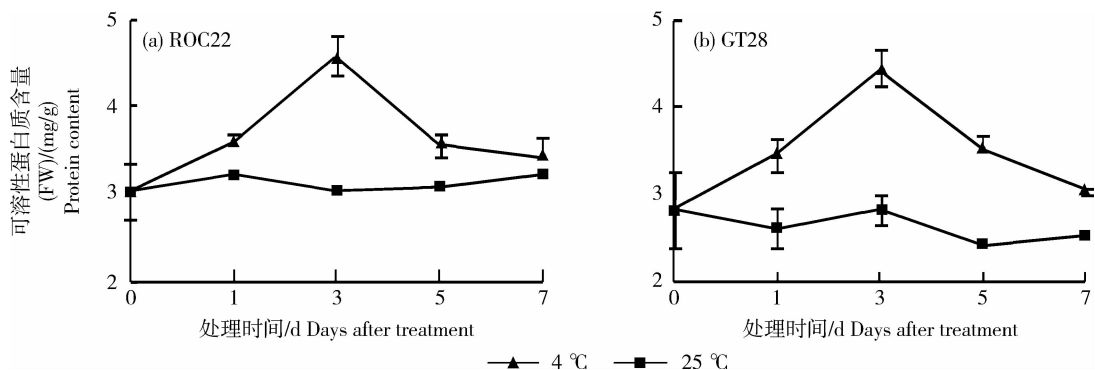


图9 低温胁迫下甘蔗根系可溶性蛋白含量的变化

Fig.9 Changes of soluble protein content in root of sugarcane under low temperature stress

### 3 讨论

根系是植物吸收水分和养分的主要器官,也是水分和养分在植物体内运输的重要通道<sup>[7]</sup>。根的生长受温度的影响,土壤温度过低或过高都可能抑制根系的生长。低温会对甘蔗幼苗根系代谢、形态和结构产生影响<sup>[20]</sup>。有研究<sup>[21]</sup>表明低温直接影响根系活力,使得作物根系吸收代谢等功能发生异常,影响其对矿质元素和水分的吸收,进一步影响到植株的正常生长和发育。本研究结果表明,在低温逆境下,随着处理时间的延长,2个品种的根系活力呈逐渐降低的趋势,尤以低温敏感品种 ROC22 降低幅度较大,接近为零水平,表明低温对抗寒性弱的甘蔗品种根系影响强于抗寒性强的品种。低温下最直观的影响就是根系生长缓慢,根长、根体积的增加受到抑制<sup>[22]</sup>,低温处理明显抑制根系发育,根长、根体积、根系生物量、叶面积、地上部生物量、养分积累量均比常温处理显著降低<sup>[23]</sup>。在本研究中,在低温胁迫下,2个甘蔗品种的根长和根体积与对照相比均显著降低,与前人<sup>[13]</sup>研究结果相一致。从根的生长特性看,抗寒性强的品种根系呈往下生长趋势,而抗寒性弱的品种呈平周生长趋势。所以低温处理导致甘蔗根系活力、伤害程度的品种间差异反映了不同品种抗寒性强弱,可以作为耐寒甘蔗品种选育的重要参考指标。

植物处于逆境中,细胞形态会发生改变,如李氏木根系受到水分胁迫时细胞内组织出现解体现象<sup>[24]</sup>;低温逆境中的绿豆幼苗根尖细胞呈明显剥脱状态,表皮细胞排列极其不规则<sup>[25]</sup>。本试验结果表明,随着低温胁迫时间的延长,2个甘蔗品种的根细胞均发生了结构性变化,其中尤以抗寒性弱的

ROC22 细胞结构受害严重,表现散乱无序。

在低温胁迫条件下,植物体内的 POD 和 SOD 作为一种保护酶,在植物发生膜脂过氧化的酶促防御体系中发挥作用。在本研究中,低温胁迫下 2 个品种的 POD、SOD 在处理前期均是升高的,到后期降低,但抗寒性强的品种后期也保持一定的活性,这表明根系对低温伤害已经产生防御,有利于减缓逆境伤害,因此具有一定的保护功能<sup>[26]</sup>。本研究的结果表明,甘蔗根系 SOD 受低温诱导比 POD 要早,与前人<sup>[27]</sup>报道 SOD 主要在抗冷前期发挥抵抗低温胁迫的作用相吻合。第 3 天后这 2 种酶的活性均降低,可能是因为低温伤害产生的活性氧积累过多,超出了 SOD 和 POD 等膜保护酶的清除能力,氧化能力超强的活性氧开始直接伤害这 2 种酶,导致其活性下降<sup>[28]</sup>。活性氧引起的膜脂过氧化,可使 MDA 含量显著增加,导致膜的完整性被破坏。在本研究中,2 个品种在低温逆境中根系 MDA 含量随着低温时间的延长呈增长趋势,尤以 ROC22 更为显著,这说明低温伤害了甘蔗根系的细胞膜,抗寒性弱的 ROC22 积累 MDA 较多,其细胞膜受损也更严重。随着低温处理延长,2 个甘蔗品种的 MDA 含量均下降,这可能是因为 MDA 与细胞膜中的蛋白质发生聚合和交联反应,破坏了细胞膜结构<sup>[29]</sup>,引起细胞膜通透性增大,导致细胞内容物渗漏,而此时已引发甘蔗根系低温伤害。本研究的甘蔗根系细胞解剖结构分析表明,在低温胁迫的第 3 天后,部分细胞已受到破坏,细胞结构开始解体。

脯氨酸是植物体内重要的渗透调节物质,具有较强的水溶性和高水势,在细胞内的积累不具有毒性,因此当植物受到低温、干旱等逆境胁迫时,体内脯氨酸的大量积累能够调节细胞的渗透压和维持细



胞结构等,以抵御不良环境的胁迫<sup>[30]</sup>。本研究中,随着甘蔗体内MDA含量的显著增加,膜脂过氧化作用增强,2个甘蔗品种体内的脯氨酸含量也显著增加,在处理的第3天达到峰值,表明低温会促进脯氨酸在甘蔗根系内的积累。在低温胁迫后第5天,ROC22根系内的脯氨酸含量开始下降,且下降至对照水平,但GT28体内脯氨酸含量仍比对照高。抗寒性强的GT28体内脯氨酸变化有所不同,这可能与品种本身应对低温胁迫的机制不同有关,抗寒性强的甘蔗品种在低温胁迫期间除了通过根系积累脯氨酸外还可通过叶片积累大量的脯氨酸来抵御低温胁迫<sup>[14]</sup>。

可溶性糖与可溶性蛋白、脯氨酸一样,均是植物细胞内重要的渗透调节物质。可溶性蛋白和可溶性糖的含量与抗寒性呈正相关已在许多作物上得到证实<sup>[31]</sup>。在本研究中,在低温胁迫下,2个甘蔗品种根系内的可溶性糖和可溶性蛋白的含量变化趋势相似,均表现为先升高后下降,和高青海等<sup>[32]</sup>报道的茄子嫁接苗根系在低温下的变化趋势一致。在低温处理的前3d,2个甘蔗品种根系内的可溶性糖和可溶性蛋白含量均显著升高,其中抗寒性弱的ROC22增幅较小,抗寒性强的GT28增加幅度较大,表明可溶性糖和可溶性蛋白积累量和品种自身的抗性有关。随着处理时间延长,3d后,这2种物质含量均呈下降的趋势,其中ROC22根系内可溶性糖和可溶性蛋白在其体内均表现剧降,可能与该品种对低温反应敏感,抗低温的应对系统不够协调有关。本研究结果和前人<sup>[33]</sup>研究的在低温下这2种物质均是升高的趋势有所不同,这可能和植株器官、处理时间等试验条件有关。

## 4 结论

低温胁迫下,甘蔗根长、根体积均都显著低于对照,但以抗寒性强的甘蔗品种降低较小。在低温胁迫3d后,甘蔗根系细胞膨大变形,细胞结构散乱,以抗寒性弱的甘蔗品种最为明显。随着低温时间延长,2个甘蔗品种根系活力均显著降低,但抗寒性弱的品种降幅较大。在低温胁迫下,甘蔗根系内MDA、脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白含量以及POD和SOD活性等指标均呈先上升后降低趋势,尤以抗寒性弱的甘蔗品种最为显著。因此,这些参数与甘蔗品种抗寒性密切相关。

## 参 考 文 献

- [1] 李杨瑞. 现代甘蔗学[M]. 北京:中国农业出版社,2010
- [2] 孙富,杨丽涛,谢晓娜,等. 低温胁迫对不同抗寒性甘蔗品种幼苗叶绿体生理代谢的影响[J]. 作物学报,2012,38(4):732-739
- [3] 李杨瑞,杨丽涛. 20世纪90年代以来我国甘蔗产业和科技的新发展[J]. 西南农业学报,2009,22(5):1469-1476
- [4] 谭宏伟,李杨瑞,周柳强,等. 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]. 广西农业科学,2010,41(4):326-328
- [5] 李杨瑞,方锋学,吴建明,等. 2010/2011榨季广西甘蔗生产冻害调查及防御对策[J]. 南方农业学报,2011,42(1):37-42
- [6] Russell T E. Planting and seeding shortleaf pine [C]// Proceedings, symposium for the management of pines of the interior south. USDA Forest Service,1978:7-13
- [7] 冯玉龙,刘恩举,孟庆超. 根系温度对植物的影响[J]. 东北林业大学学报,1995,23(4):94-99
- [8] Lynch J P. Root architecture and plant productivity[J]. Plant Physiol,1995,109(1):7-13
- [9] Chassot A, Richner W. Root characteristics and phosphorus uptake of maize seedlings in a bilayered soil[J]. Agron J,2002,94(1):118-127
- [10] 南丽丽,师尚礼,陈建纲,等. 不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
- [11] 杨加伟,黄天带,华玉伟,等. 巴西橡胶树自根动态无性系耐低温分析[J]. 热带作物学报,2012,33(7):1235-1238
- [12] 李慧,张昕欣,彭立新,等. 低温胁迫对胡芦巴幼苗抗氧化酶活性和膜脂过氧化的影响[J]. 安徽农业科学,2010,38(26):14258-14259,14271
- [13] 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
- [14] 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
- [15] 袁晓华,杨中汉. 植物生理生化实验[M]. 北京:高等教育出版社,1983:128-133
- [16] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2006:210-211
- [17] 杨丽涛,李杨瑞,莫家让,等. 喷施“多效好”对甘蔗叶片几个生理生化特性的效应研究初报[J]. 广西农学院学报,1990,9(1):79-83
- [18] 李合生,孙群,赵世杰,等. 植物生理生化试验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,2000:195-261
- [19] 汤章城. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京:科学出版社,1999:303-305
- [20] Neumann G, Römheld V. The rhizosphere. Biochemistry and organic substances at the soil-plant interface. The release of root exudates as affected by the plant physiological status [M]. Boca Raton: Taylor and Francis Group,2007:23-72

- [21] Choi K J, Chung G C, Ahn S J. Effect of root zone temperature on the mineral composition of xylem sap and plasma membrane  $K^+ - Mg^{2+} - ATPase$  activity of grafted-cucumber and figleaf gourd root systems [J]. *Plant Cell Physiol*, 1995, 36(1): 639-643
- [22] 任旭琴, 缪珉, 陈晓明, 等. 低温逆境下辣椒根系生长及生理特性的响应[J]. *中国蔬菜*, 2007(3): 12-14
- [23] 刘炜, 杨君林, 许安民, 等. 不同根区温度对冬小麦生长发育及养分吸收的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(4): 197-201
- [24] 朱桂才, 杨中艺. 水分胁迫下李氏禾营养器官的解剖结构研究[J]. *长江大学学报: 自然科学版*, 2008, 5(3): 17-21
- [25] 黄真池, 张保恩, 黄霞. 低温胁迫对绿豆幼苗的影响[J]. *中山大学研究生学刊: 自然科学版*, 1997, 18(4): 22-25
- [26] 李美茹, 刘鸿先, 王以柔. 植物抗冷分子生物学研究进展[J]. *热带植物学报*, 2000, 8(1): 70-80
- [27] 冯妍, 于贤昌, 郭恒俊, 等. 低温胁迫对黄瓜嫁接苗和自根苗保护酶活性的影响[J]. *山东农业大学学报: 自然科学版*, 2002, 33(3): 302-304
- [28] 胡文海, 李晓红. 低温弱光对番茄叶片和根系中抗氧化酶系统的影响[J]. *井冈山师范学院学报: 自然科学版*, 2003, 24(5): 19-22
- [29] 蒋安, 郭彦军, 范彦, 等. 低温胁迫对墨西哥玉米幼苗抗寒性的影响[J]. *草业科学*, 2010, 27(3): 89-92
- [30] 白宝璋, 任永信, 白嵩. 植物生理生化[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2003: 257-279
- [31] 严寒静, 谈锋. 椴子叶片生理特性与抗寒性的关系[J]. *植物资源与环境学报*, 2005, 14(4): 21-24
- [32] 高青海, 吴燕, 徐坤, 等. 茄子嫁接苗根系对低温环境胁迫的响应[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(3): 390-394
- [33] 胡春霞, 王丽, 汤杰. 低温对南果梨的生理生化指标的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2009, 40(3): 349-352

责任编辑: 袁文业