

## ◆植物生理与生态响应◆

## 中蔗系列甘蔗新品种(系)的耐冷性评价\*

伍玉玲<sup>1,2,3</sup>, 曾力方<sup>2</sup>, 李火建<sup>1</sup>, 陈 珺<sup>2</sup>, 张 池<sup>1</sup>, 魏乙斌<sup>1</sup>, 蒋洪涛<sup>2\*\*</sup>, 张木清<sup>1,2,3\*\*</sup>,  
姚 伟<sup>1,2,3\*\*</sup>

(1. 亚热带农业生物资源保护与利用国家重点实验室, 广西南宁 530004; 2. 广西甘蔗生物学重点实验室, 广西南宁 530004;  
3. 广西大学农学院, 广西南宁 530004)

**摘要:**为评估不同甘蔗(*Saccharum officinarum* L.)品种在低温胁迫条件下的耐冷性能,并综合考量多个生理生化指标对低温胁迫的响应,本研究选用10个不同甘蔗品种,经过低温处理后对其生理生化特征进行测定,并通过主成分分析法进行综合评价。结果表明,在低温胁迫条件下,各品种之间存在显著差异,呈现出多样的生理生化响应。主成分分析成功解释了84.130%的表型变异,并确定其可溶性蛋白(Soluble Protein, SP)含量、超氧化物歧化酶(Superoxide Dismutase, SOD)活性和质膜透性(Plasma Membrane Permeability, PMP)等可作为主要的甘蔗耐冷性评价指标。综合分析的结果显示,在低温胁迫下,中蔗11号表现出的耐冷性最强,而中蔗13号的耐冷性最弱。研究结果可为耐冷品种优选和耐冷性育种提供重要的参考依据,同时深化对甘蔗耐冷生理生化机制的理论认识与实践应用基础。

**关键词:**甘蔗;耐冷性;生理响应;主成分分析;综合评价

中图分类号:S566.1 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2025)02-0276-09

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20250624.008

甘蔗(*Saccharum officinarum* L.)作为典型的C4作物,对生长环境有一定温度要求<sup>[1-2]</sup>。近年来,随着全球温室效应的不断加剧,北极放大效应与大气环流异常导致中纬度极端寒潮事件频发。由于甘蔗是冷敏感作物,我国甘蔗主产区在早春或冬季遭遇的

低温风险呈上升趋势,给甘蔗生产和制糖工业带来了诸多困扰,导致经济受损。由于耐冷种质资源有限,甘蔗耐冷育种进展较为缓慢。为了避免低温对我国甘蔗产业的不利影响,促进其可持续发展,迫切需要开发和推广耐冷甘蔗品种。因此,研究甘蔗耐冷机

收稿日期:2024-06-27

修回日期:2024-08-02

\* 广西重点研发计划项目(桂科 AB21238008)和国家现代农业糖料产业技术体系项目(CARS-170726)资助。

## 【第一作者简介】

伍玉玲(1999—),女,在读硕士研究生,主要从事甘蔗抗黑穗病育种研究,E-mail:15777188915@163.com。

## 【\*\*通信作者简介】

蒋洪涛(1985—),男,讲师,主要从事作物栽培与耕作研究,E-mail:jht3235550@163.com。

张木清(1966—),男,教授,博士研究生导师,主要从事甘蔗抗旱、抗病性育种研究,E-mail:zmuqing@163.com。

姚 伟(1977—),男,教授,博士研究生导师,主要从事甘蔗抗病新品种选育研究,E-mail:yaoweimail@163.com。

## 【引用本文】

伍玉玲,曾力方,李火建,等.中蔗系列甘蔗新品种(系)的耐冷性评价[J].广西科学,2025,32(2):276-284.

WU Y L, ZENG L F, LI H J, et al. Evaluation of Cold Tolerance in New Varieties (Lines) of Sugarcane of the Zhongzhe Series [J]. Guangxi Sciences, 2025, 32(2): 276-284.

理,合理评价甘蔗耐冷种质资源,对种质创新及提高甘蔗耐冷性具有重要意义<sup>[3]</sup>。

在遭受低温胁迫时,植物会调整自身形态和生理生化结构,产生多样的应激机制以维持生命活动,适应环境的变化。先前研究表明,植物的耐冷性与其形态结构,体内脯氨酸(Proline, Pro)、可溶性蛋白(Soluble Protein, SP)、可溶性糖(Soluble Solids, SS)等物质的含量,活性氧(Reactive Oxygen Species, ROS)浓度,以及抗氧化酶如过氧化氢酶(Catalase, CAT)等的活性密切相关。前人对水稻<sup>[4-5]</sup>、高粱<sup>[6]</sup>和小麦<sup>[7]</sup>等作物进行低温胁迫研究,发现耐冷品种在温度降低和低温处理时间延长的情况下,体内 Pro、SP 及 SS 的含量逐渐增加,且明显高于冷敏感品种;低温处理后,小麦和玉米的膜脂过氧化物丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含量与耐冷性呈负相关<sup>[7-8]</sup>;在一定低温条件下,植物为应对 ROS 积累,其体内清除 ROS 的抗氧化酶活性一般呈上升趋势。甘蔗遭受霜冻后,体内 Pro、SP、SS 含量增加,耐冷品种的增幅明显高于冷敏感品种<sup>[9]</sup>;随着胁迫温度加强和时间延长,超氧化物歧化酶(Superoxide Dismutase, SOD)、过氧化物酶(Peroxidase, POD)、CAT 的活性呈现先升后降趋势<sup>[10-11]</sup>。同时,甘蔗在低温胁迫下还表现出一些独特的生理响应,如出现叶片枯萎、生长点受损、侧芽坏死、蔗茎呈水渍状等症状<sup>[12]</sup>,这些症状可能与 Pro、SP、SS 含量的变化机制不同有关。此外,不同甘蔗品种对低温的抗性和受害程度存在差异<sup>[3,13-14]</sup>。王海玲等<sup>[15]</sup>以来自世界各地的 60 份甘蔗育种材料为研究对象,发现甘蔗育种材料的耐冷性与叶肉组织厚度、机械强度呈极显著线性正相关,叶片越厚越硬,能有效减少水分散失,有助于保护植物免

表 1 参试甘蔗种质亲本及选育单位信息

Table 1 Information of parents and breeding institutions of sugarcane germplasm tested

序号 No.	品种 Variety	缩写 Abbreviation	母本 Female parent	父本 Male parent	育成单位 Breeding institution
1	Zhongzhe 9	ZZ9	ROC25	Yunzhe 89-7	Guangxi University
2	Zhongzhe 11	ZZ11	CP13-0624	CP13-1122	Guangxi University
3	Zhongzhe 12	ZZ12	CP13-0850	CP05-1616	Guangxi University
4	Zhongzhe 13	ZZ13	HoCP01-157	CP14-0969	Guangxi University
5	Zhongzhe 14	ZZ14	CP08-2506	CP97-1777	Guangxi University
6	Zhongzhe 15	ZZ15	ROC22	Neijiang 97-128	Guangxi University
7	Zhongzhe 20	ZZ20	YT00-319	CP84-1198	Guangxi University
8	Gui Tang 05-136	GT05-136	CP81-1254	ROC22	Sugarcane Research Center of Liucheng County
9	Gui Tang 42	GT42	ROC22	GT92-66	Sugarcane Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences
10	Xintaitang 22	ROC22	ROC5	69-463	Taiwan Sugar Research Institute

受低温伤害。黄杏等<sup>[16]</sup>研究发现低温胁迫提高了甘蔗幼苗的抗氧化酶活性。微管是细胞骨架的重要组成部分之一, $\alpha$ -微管蛋白(TUA)通过增强微管低温稳定性、协调 ROS 清除系统、介导 CBF(C-repeat Binding Factor)信号通路及保护光复合体,多维度提升甘蔗耐冷性。唐丽华等<sup>[17]</sup>对 4 个转 *SoTUA* 基因甘蔗和野生型 ROC22 对照甘蔗进行低温(4 °C)胁迫处理,结果表明 4 个转基因甘蔗和对照组甘蔗的 SP 含量总体变化趋势为先升后降,各转基因品系中 MDA 含量增加,POD 活性下降,且转基因甘蔗在生理生化指标上的表现均优于对照组。

总体而言,关于甘蔗耐冷性的研究已经有了较多的报道,研究内容从甘蔗生理生化方面的响应逐步扩展到探索基因调控的内在机制,并确定了一些简便实用的耐冷性评估指标,通过这些研究已培育出多个耐冷性优良的甘蔗品种<sup>[9-10]</sup>。培育并应用这些耐冷品种是应对低温危害最经济有效的途径,对甘蔗产业的发展至关重要。因此,本研究选取 10 个不同甘蔗品种作为研究对象,研究甘蔗对低温胁迫的生理响应,旨在为耐冷性强且综合性状优良的甘蔗栽培和育种提供理论参考和科学支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

供试甘蔗品种:中蔗 9 号、中蔗 11 号、中蔗 12 号、中蔗 13 号、中蔗 14 号、中蔗 15 号、中蔗 20 号、桂糖 42 号、桂糖 05-136、新台糖 22 号。其中有 7 个为广西大学自育品种(系),有 3 个为部分主栽品种(系),详细亲本和育成单位信息见表 1。

## 1.2 方法

### 1.2.1 样品处理

本研究采用桶栽土培的方式,于2022年4月12日选择蔗茎健康、芽型饱满的甘蔗单芽段作为种材。首先使用含有75%多菌灵的溶液浸泡甘蔗种材,消毒时间为5 min,然后按照5:1:2的质量比例混合土壤、复合肥和有机肥,并将混合物填充至统一规格(高51 cm、口径35 cm、底部带孔)的塑料桶中。每个桶内种植4段单芽苗,甘蔗芽埋入土壤深度为5-8 cm,充分浇水后覆盖薄膜。随后,按照正常的供水和除草管理程序进行操作。当80%的甘蔗生长至具有5片完全展开的叶片时,开始低温处理。每个甘蔗品种随机选择3桶作为低温处理组(LT)放入人工低温培养箱中,温度保持在3-5℃,选择3桶放置在正常环境中作为对照组(CK)进行培养。

### 1.2.2 生理生化指标测定

在低温处理72 h后,采集甘蔗完全展开的第1片叶片,并对7个生理生化指标进行详细测量。MDA含量采用MDA含量检测试剂盒(分光光度法)测定,POD采用POD检测试剂盒(分光光度法)测定,CAT采用CAT检测试剂盒(微量法)测定,SOD采用SOD活性检测试剂盒(微量法)测定,试剂盒均购自北京索莱宝科技有限公司。质膜透性(Plasma Membrane Permeability, PMP)采用电导率法测定<sup>[18]</sup>,SP含量采用考马斯亮蓝G-250法测定<sup>[19]</sup>,株高(Plant Height, PH)参考杨荣仲等<sup>[20]</sup>的方法测定。实验中遵循标准的测定程序和条件,以确保结果的可

靠性和可比性。

### 1.3 统计分析

使用Excel 2021软件录入和处理10个甘蔗品种LT和CK的7个指标的实验数据,得到各指标的增幅数据,并通过Origin 2021软件分析绘制指标平均值差异比较结果图。利用SPSS 22.0软件对增幅数据(%)进行标准化处理和主成分分析,并通过以下公式计算不同甘蔗品种的综合得分(F):

$$F = (\text{第一主成分方差贡献率} / \text{第三主成分累计贡献率}) \times F1 + (\text{第二主成分方差贡献率} / \text{第三主成分累计贡献率}) \times F2 + (\text{第三主成分方差贡献率} / \text{第三主成分累计贡献率}) \times F3,$$

式中,F1为第一主成分得分,F2为第二主成分得分,F3为第三主成分得分。

## 2 结果与分析

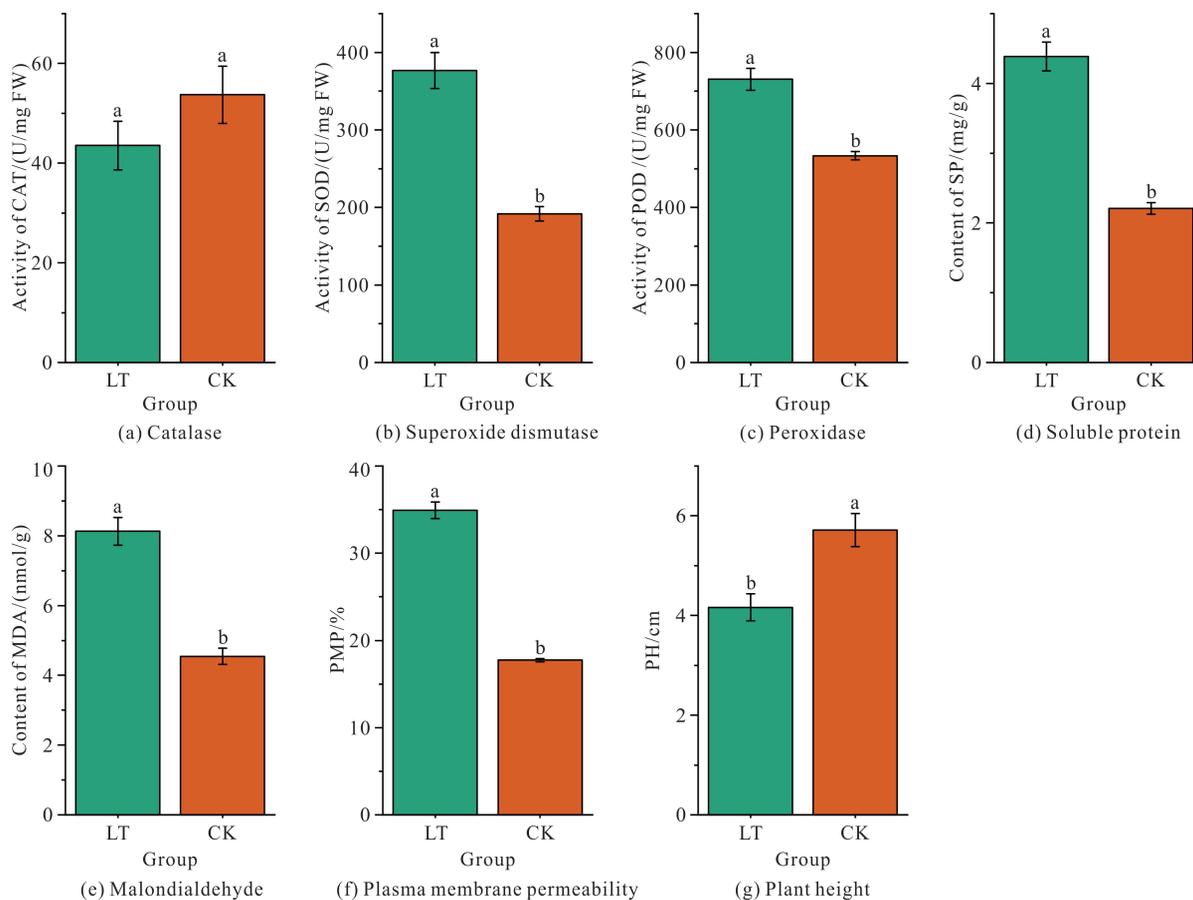
### 2.1 不同甘蔗品种受低温胁迫后的生理生化指标

本研究测定了7个生理生化指标用于评估10个甘蔗品种的耐冷性能,结果如表2和图1所示。在低温胁迫条件下,除CAT活性外,不同甘蔗品种之间的生理生化响应存在显著差异。10个甘蔗品种在受到低温胁迫后,SP含量、PMP以及SOD活性的增幅较大,GT42的PMP增幅最大,高达125.54%,ZZ11的PMP增幅最小,仅为73.39%;而ZZ11的SP含量增幅最大,为121.08%,ZZ13的SP含量增幅最小,为74.75%;ZZ12的SOD活性增幅最大,为115.06%,ZZ20的SOD活性增幅最小,为61.93%。

Table 2 Increases in physiological and biochemical indexes of different sugarcane varieties after low temperature treatment

Unit: %

品种 Variety	可溶性 蛋白含量 SP content	质膜透性 PMP	丙二醛含量 MDA content	超氧化物 歧化酶活性 SOD activity	过氧化 物酶活性 POD activity	过氧化 氢酶活性 CAT activity	株高 PH
ZZ9	109.43	87.48	83.80	105.84	36.55	-20.34	-20.89
ZZ11	121.08	73.39	88.94	120.31	44.96	-12.25	-21.76
ZZ12	101.41	110.50	74.96	115.06	35.00	-18.58	-36.68
ZZ13	74.75	113.89	59.30	66.20	37.69	-23.39	-31.45
ZZ14	111.98	81.67	87.96	109.64	49.55	-17.82	-22.64
ZZ15	102.87	90.79	80.31	97.48	4.63	-22.07	-33.24
ZZ20	88.63	102.42	66.87	61.93	37.54	-15.04	-32.74
GT42	79.13	125.54	91.90	75.63	41.67	-18.78	-24.41
GT05-136	97.86	99.94	76.91	103.50	37.67	-21.73	-24.14
ROC22	96.43	84.72	81.78	107.88	41.90	-22.18	-25.48



LT: low temperature treatment group; CK: control (normal treatment) group. The different letters indicate significant differences ( $P < 0.05$ ).

图1 低温处理组与对照组生理生化指标的比较

Fig. 1 Comparison of physiological and biochemical indexes between the low temperature treatment group and the control group

此外,其他指标如 MDA 含量和 POD 活性也均有不同程度的增幅,说明甘蔗受到低温胁迫时,其体内会产生相应的生理反应来对抗逆境胁迫。株高作为甘蔗整体生长状态的一个重要指标,为评估甘蔗耐冷性能提供直观的参考,LT 的株高与 CK 相比存在明显的生长差异。值得注意的是,LT 的 CAT 活性与 CK 相比呈现负向增幅,且无明显差异。

## 2.2 甘蔗耐冷生理生化指标的主成分分析

对不同生理生化指标的增幅进行主成分分析,第一主成分(PC1)、第二主成分(PC2)和第三主成分(PC3)共解释了甘蔗在受到低温胁迫处理后 84.130% 的表型变异(表 3)。PC1 的方差贡献率为 51.102%,因子权重为 60.74%,其中 SP 含量增幅和 SOD 活性增幅在 PC1 上有较大的正载荷,说明它们在低温胁迫下呈现一致的正向变化趋势,SP 含量以及 SOD 活性的升高表明两者在提高甘蔗对低温胁迫

的耐受性方面具有重要作用;PMP 增幅反映了甘蔗细胞膜的受损程度,PMP 增幅在 PC1 上有较大的负载荷,说明它与植物耐冷性的强弱呈负向相关。POD 活性增幅在 PC2 上有较大的正载荷,CAT 活性增幅在 PC3 上有较大的正载荷,说明 POD、CAT 指标是观测植物耐冷性的重要指标之一。POD 和 CAT 都是植物保护酶,两者和 SOD 共同组成植物的防御系统,能有效降低 ROS 自由基的积累。当植物受到逆境胁迫时,植物体内会产生多种 ROS 如  $O_2^- \cdot$ 、 $H_2O_2$  等,SOD、POD 和 CAT 的协同作用,可有效避免自由基对生物大分子的降解破坏及对生物膜的损害,以提高植物的抗逆性。以上分析说明 SP、SOD 可作为观测甘蔗耐冷性的首要指标,为减少单一指标的局限性,可同时结合多个指标如 POD、PMP、CAT 等进一步评价甘蔗耐冷性的强弱。

表 3 低温处理后甘蔗的生理生化指标增幅主成分分析

Table 3 Principal component analysis of physiological and biochemical indexes of sugarcane after low temperature treatment

主成分 Principal component	可溶性蛋白 含量增幅 SP content increase	超氧化物歧化 酶活性增幅 SOD activity increase	质膜透性 增幅 PMP increase	丙二醛 增幅 MDA increase	株高增幅 PH increase	过氧化物 酶活性增幅 POD activity increase
PC1	0.906	0.815	-0.812	0.757	0.699	0.342
PC2	-0.346	-0.367	0.319	0.128	0.452	0.838
PC3	0.185	-0.107	-0.094	-0.307	-0.456	0.053

主成分 Principal component	过氧化氢酶 活性增幅 CAT activity increase	特征值 Eigenvalue	方差贡献率/% Proportion of variance/%	累计贡献率/% Cumulative proportion/%	因子权重/% Sum of squares/%
PC1	0.503	3.577	51.102	51.102	60.74
PC2	0.343	1.396	19.942	71.044	23.70
PC3	0.746	0.916	13.087	84.130	15.56

### 2.3 甘蔗品种的耐冷性综合分析

在低温胁迫条件下,不同甘蔗品种的生理生化指标的变化程度不同。为能更全面地了解不同甘蔗品种的耐冷性,基于上述主成分分析对7个指标的增幅分析(表3),计算10个品种的耐冷性综合得分来评价其耐冷性,结果如表4所示。甘蔗的耐冷性由强到弱依次为 ZZ11 > ZZ14 > ZZ9 > ROC22 > GT42 > ZZ20 > GT05-136 > ZZ12 > Z15 > ZZ13。这表明在低温胁迫条件下,ZZ11表现出的耐冷性最强,而ZZ13的耐冷性最弱。结合表2的结果进行综合分析,ZZ11、ZZ14和ZZ9响应逆境胁迫的生理反应较大,如SP含量、SOD活性和POD活性等增幅更大,PMP和PH的增幅较小,逆境综合影响较小,因此这表4 不同甘蔗品种的耐冷性综合得分

Table 4 Comprehensive evaluation of cold tolerance across different sugarcane varieties

排序 Sorting	品种 Variety	综合得分 F	PC1得分 F1	PC2得分 F2	PC3得分 F3
1	ZZ11	1.301	1.730	0.281	1.180
2	ZZ14	0.762	1.099	0.466	-0.102
3	ZZ9	0.272	0.703	-0.118	-0.819
4	ROC22	0.014	0.302	-0.106	-0.927
5	GT42	-0.097	-0.540	1.549	-0.878
6	ZZ20	-0.110	-0.893	0.588	1.884
7	GT05-136	-0.135	-0.002	-0.006	-0.850
8	ZZ12	-0.222	-0.331	-0.717	0.959
9	ZZ15	-0.807	-0.372	-2.299	-0.232
10	ZZ13	-0.978	-1.696	0.362	-0.215

些品种属于耐冷性品种;而ZZ15和ZZ13的MDA含量、POD活性及PH增幅较小,仅有少数指标如PMP、SP含量增幅较大,逆境综合影响较大,属于冷敏感型品种。

## 3 讨论

### 3.1 耐冷性指标的确定

本研究借助主成分分析法,精准筛选出SP、SOD和PMP这三大关键生理生化指标,它们在甘蔗耐冷性评价体系中占据主要地位,该方法为育种者提供了一套科学、高效的筛选工具,使其能够有针对性地评价新品种的耐冷性。在植物生理过程中,SP作为渗透调节物质,能够有效保护植株免受冰冻损伤。有研究表明植物受到低温胁迫时会发生多种SP富集,如防御蛋白、保护蛋白<sup>[21-22]</sup>。本研究中,甘蔗在遭受低温胁迫后,SP含量呈现出显著升高的趋势,这一结果与唐丽华等<sup>[17]</sup>的研究结果一致,充分证实了SP在甘蔗耐冷性中的关键作用,其含量变化可作为衡量甘蔗耐冷能力的重要参考指标。PMP是反映细胞膜稳定性和完整性的重要指标,在植物抗逆过程中发挥着关键作用。本研究中,在低温胁迫条件下,甘蔗的PMP呈现出逐渐升高的变化趋势,与孙富等<sup>[23]</sup>的研究结果吻合。这一变化表明,低温胁迫对细胞膜结构造成了损伤,导致其通透性增加。PMP的变化不仅能够直观地反映出细胞膜的受损程度,还能间接反映植物在低温胁迫下的生理响应状态,可作为评估甘蔗耐冷性的重要生理生化指标。在低温胁迫下,植物体内会积累ROS,而膜脂作为ROS的主要作用靶点,极易受到攻击。MDA是膜脂过氧化的产物,其与蛋白质

中的氨基结合会导致膜蛋白变性,进而降低膜的流动性。因此,MDA 含量的高低可以作为判断膜脂损伤程度的重要指标。本研究中,随着低温胁迫的温度降低和时间延长,10 个甘蔗品种中的 MDA 含量增幅均有不同程度的增加,与黄有总等<sup>[24]</sup>和庞新华等<sup>[25]</sup>报道的结果一致,进一步验证了 MDA 在甘蔗耐冷性评价中的重要性。

植物体内具有能够清除自由基的抗氧化酶系统,主要包括 SOD、POD 和 CAT。全怡吉等<sup>[3]</sup>在研究不同甘蔗品种对低温的生理响应时发现,蔗茎的 CAT 活性在低温胁迫下呈上升趋势,而 SOD、POD 活性则有所下降。孙波等<sup>[26]</sup>发现经低温胁迫后,甘蔗根系中的 POD、SOD 活性呈现先上升后下降的动态变化趋势。饶席兵等<sup>[14]</sup>发现在低温持续胁迫条件下,不同甘蔗品种的 CAT 活性与 CK 相比大多存在显著差异。朱鹏锦等<sup>[27]</sup>的研究进一步揭示,随着低温胁迫时间的延长,甘蔗幼苗叶片的抗氧化酶活性在一定时间范围内会以较快速率提高,从而有效清除低温胁迫下产生的 ROS,且酶活性出现降—升—降的响应过程。本研究中,经低温胁迫后,10 个甘蔗品种的 SOD 活性和 POD 活性较 CK 均有显著增长,而 CAT 活性较 CK 降低,且无显著差异。这一结果与部分前人研究存在一定的差异,初步猜测可能是由于不同甘蔗品种存在差异,导致其抗氧化酶系统在响应低温胁迫时表现出不同的活性变化规律。此外,测定时间点的不同也可能对实验结果产生影响。不同时间点的测定可能会捕捉到不同阶段的抗氧化酶活性变化,从而导致结果产生差异。因此,在后续研究中,需要进一步深入探讨不同甘蔗品种与抗氧化酶活性变化之间的内在联系,并优化测定时间点的选择,以更准确地揭示甘蔗抗氧化酶系统在低温胁迫下的响应机制。

甘蔗作为原产于热带和亚热带地区的喜温作物,其生长发育对温度条件具有较高的要求<sup>[28]</sup>。低温胁迫不仅会导致甘蔗内部生理生化指标出现显著差异,还会使其在田间表现出一系列明显的农艺性状变化,这些变化为甘蔗耐冷性评估提供了直观的参考依据。株高是评估甘蔗整体生长状态的一个重要指标,本研究中 10 个甘蔗品种在低温胁迫下的株高变化结果表明,低温胁迫对甘蔗生长具有明显的抑制作用,且不同品种间受抑制的程度存在差异,这一结果与唐仕云等<sup>[29-30]</sup>的研究结果一致。株高的变化不仅反映了甘蔗在低温胁迫下的生长动态,还能够间接反映出品种

之间的耐冷性差异。除株高外,低温胁迫也会使甘蔗蔗芽、叶片和蔗茎受到明显伤害。轻霜条件下甘蔗叶片可能出现颜色变黄,边缘焦枯或水浸状,尾部枯死等异常;受害的成熟甘蔗,蔗茎很快变红;霜冻严重时蔗芽和生长点出现冻伤或冻死现象,影响发芽率和生长;而蔗芽重霜冻后受到的伤害介于叶片和蔗茎之间<sup>[31-33]</sup>。因此,株高、节间长度、枯叶数和蔗芽形态也常被作为甘蔗耐冷性评估的重要田间观测指标。

低温胁迫对甘蔗的产量和品质造成的不良影响是不可逆的,即使甘蔗受到低温胁迫后能够恢复正常生长,这些影响也依然存在。在春季播种期,低温霜冻可能导致种芽冻死,从而降低出苗率;而在甘蔗成熟期,低温胁迫会引起“上水”现象,导致甘蔗减产<sup>[34]</sup>。有效茎数、株高、茎粗是体现甘蔗产量的 3 个关键要素,在甘蔗产量研究中常被用作评价指标。受冻的甘蔗通常会减产 15%—30%<sup>[35]</sup>,这一显著的产量损失凸显了低温胁迫对甘蔗生产的严重威胁,进一步强调了开展甘蔗耐冷性研究、培育耐冷品种的紧迫性和重要性。甘蔗在生长后期主要以积累蔗糖分为主,然而低温胁迫会显著影响蔗糖分的积累过程。低温胁迫下甘蔗积累蔗糖分的速度减缓,产糖量下降 10.66%<sup>[12,36]</sup>,蔗糖分损失可达 2%<sup>[35]</sup>,因此,蔗糖分的积累变化可作为甘蔗后期耐冷性的重要评价性状。此外,甘蔗蔗糖分、蔗汁锤度、重力纯度等指标也可作为低温胁迫下糖分检测的有效指标,为评估甘蔗品质受损程度提供科学依据。

尽管本研究在甘蔗耐冷性生理生化机制及田间表现方面取得了一定的研究成果,但仍存在一些不足之处,需要在后续研究中加以完善。本研究未对甘蔗的最终产量进行系统评估,这在一定程度上限制了对甘蔗耐冷性综合评价的全面性。产量作为衡量甘蔗生产效益的关键指标,其评估对于耐冷品种的筛选和推广具有重要意义。因此,在后续研究中,应将甘蔗最终产量纳入评估体系,通过长期的田间试验,准确测定不同耐冷品种在低温胁迫条件下的产量表现,为甘蔗耐冷育种提供更全面、准确的参考依据。此外,本研究缺少对叶片机械强度以及叶绿素等相关光合指标的进一步分析,叶绿素含量和光合效率是植物生长和发育的关键因素,期望今后可设置相关实验来探究甘蔗经低温胁迫后叶片的内部结构,从而完善其生理生化机制。

### 3.2 甘蔗品种的耐冷性评价

在全球气候变化的大背景下,低温胁迫已成为限

制甘蔗生长、产量及品质的关键环境因素之一。本研究对多个生理生化指标进行调查分析,计算各个品种在低温条件下的综合得分,揭示了甘蔗种质资源耐冷性的显著差异。在10个供试甘蔗品种中,ZZ11被判定为在低温胁迫条件下表现最佳的品种,为今后的耐冷育种工作提供了亲本材料。在甘蔗耐冷性相关研究中,不少学者运用主成分分析及综合得分计算,剖析不同甘蔗品种的耐冷特性。饶席兵等<sup>[14]</sup>以8份不同甘蔗品种及1份甘蔗近缘野生种(蔗茅99-1无性系)为试验材料,通过主成分分析、模糊隶属函数法和聚类分析对9份材料的耐冷性进行综合评价,获得3份强耐冷材料、4份中度耐冷材料及2份弱耐冷材料。李素丽等<sup>[37]</sup>以多个甘蔗品种为研究对象,监测持续自然降温过程中,甘蔗形态变化及相对电导率、MDA含量、渗透调节物质含量、抗氧化酶活性等生理指标。因此借助主成分分析,可对大量数据进行整合分析,并计算各品种综合得分,以此评估不同甘蔗品种在低温胁迫下的适应能力,为甘蔗生产实践中的品种选择提供理论支撑。除了甘蔗研究,主成分分析及综合得分计算也被广泛应用在其他植物耐冷性研究领域。王树刚等<sup>[38]</sup>测定济麦19、济麦21等15个冬小麦品种在低温处理下的光合参数、抗氧化酶活性、渗透调节物质等指标,利用主成分分析筛选关键指标并计算综合得分,鉴别出耐冷性不同的小麦品种,对小麦耐冷品种选育和种植区域规划意义重大。上述研究成果均反映出主成分分析及综合得分计算在植物耐冷性研究中的通用性和有效性,为甘蔗耐冷性研究提供了借鉴方法和拓展思路。

#### 4 结论

本研究选取广西大学自育品种(系)及部分主栽品种(系)共10个甘蔗品种进行耐冷性研究,通过系统测定多项生理生化指标及农艺性状指标,揭示了SP含量、SOD活性和PMP等关键生理生化指标在甘蔗耐冷性评价中的核心地位。在低温胁迫环境下,甘蔗体内SP含量显著升高,发挥调节渗透的作用,从而保护细胞免受冰冻损伤;SOD活性提升,增强甘蔗抗氧化防御能力,可清除其体内积累的ROS,减轻氧化损伤;PMP的变化直观反映了细胞膜稳定性和完整性的受损程度。基于上述关键指标的综合分析,本研究成功筛选出若干耐冷性能优异的甘蔗品种,如中蔗11号和中蔗14号,这些品种在低温胁迫下展现出更强的生理调节能力和更稳定的农艺性状。本研

究为从生理生化层面精准评估甘蔗耐冷性提供了科学依据,有助于深入理解甘蔗耐冷的内在机制,并为甘蔗耐冷品种选育工作提供了明确的方向和优质的遗传资源。育种者可依据这些关键指标,更有针对性地开展选育工作,加速耐冷甘蔗品种的培育进程。

#### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 肖祎,刘军,周英明,等.云引甘蔗品种抗寒性试验[J].中国糖料,2015,37(6):33-35,38.
- [3] 全怡吉,樊仙,李如丹,等.不同甘蔗品种对低温胁迫的生理响应及耐寒性综合评价[J].热带作物学报,2020,41(1):63-68.
- [4] 宋广树,孙忠富,孙蕾,等.东北中部地区水稻不同生育时期低温处理下生理变化及耐冷性比较[J].生态学报,2011,31(13):3788-3795.
- [5] 李文广.低温冷害对水稻生长过程的影响及应对措施[J].农技服务,2016,33(1):67.
- [6] 史红梅,张桂香,张海燕,等.低温胁迫对高粱幼苗脯氨酸积累的影响[J].山西农业科学,2014,42(9):945-947.
- [7] 李杨洋.5种小麦主要性状相关分析与抗寒能力初探[D].郑州:郑州大学,2018.
- [8] 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.
- [9] 全怡吉,张跃彬,邓军,等.甘蔗霜冻研究进展[J].中国糖料,2018,40(4):74-77,80.
- [10] 陆思思,李素丽,李琼,等.低温胁迫对不同抗寒性甘蔗品种节间几种酶活性的影响[J].西南农业学报,2013,26(3):968-972.
- [11] 陈荣发,刘文娟,张保青,等.低温胁迫对甘蔗幼苗根线粒体生理生化作用的影响[J].南方农业学报,2015,46(8):1385-1390.
- [12] 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.
- [13] ZHANG B Q, YANG L T, LI Y R. Physiological and biochemical characteristics related to cold resistance in sugarcane [J]. Sugar Tech, 2015, 17(1): 49-58.
- [14] 饶席兵,钱祺锋,曾丹,等.低温胁迫下不同甘蔗品种的生理响应及耐寒性评价[J].热带作物学报,2024,45(4):742-751.
- [15] 王海玲,项伟,朱师丹,等.甘蔗叶片结构性状与抗寒性的关联[J].植物科学学报,2021,39(6):672-680.
- [16] 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.

- [17] 唐丽华,黄婵,陈教云,等. 低温胁迫对转 *SoTUA* 基因甘蔗生理生化特性的影响[J]. 南方农业学报, 2019, 50(5):950-956.
- [18] XU Y Z, CHEN Z X, HUANG Z, et al. Field evaluation of new promising sugarcane cultivars for cold tolerance in Guangxi, China [J]. Sugar Tech, 2020, 22(6): 1007-1017.
- [19] YANG H L, YU X H, WANG C F, et al. Evaluation of the cold tolerance of *Saccharum spontaneum* L. clones with different ploidy levels on the basis of morphological and physiological indices [J]. Plant Biology, 2020, 22(4):623-633.
- [20] 杨荣仲,吕达,周会,等. 甘蔗常用亲本的田间自然耐寒性测定及评价[J]. 西南农业学报, 2022, 35(5):991-999.
- [21] 李文翔,王舰,王芳. 马铃薯响应低温胁迫的蛋白质组学分析[J]. 西北农业学报, 2023, 32(4):551-565.
- [22] ZHANG A M, LI Z H, ZHOU Q R, et al. An integrated physiology and proteomics analysis reveals the response of wheat grain to low temperature stress during booting [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2025, 24(1):114-131.
- [23] 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.
- [24] 黄有总,徐建云,陈超君,等. 几个甘蔗新品种的抗旱性和抗寒性比较研究[J]. 广西农业生物科学, 2002, 21(2):101-104.
- [25] 庞新华,朱鹏锦,周全光,等. 甘蔗对低温胁迫响应的研究进展[J]. 贵州农业科学, 2015, 43(6):31-35.
- [26] 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.
- [27] 朱鹏锦,庞新华,梁春,等. 低温胁迫对甘蔗幼苗活性氧代谢和抗氧化酶的影响[J]. 作物杂志, 2018(4):131-137.
- [28] 黄晓照,叶靖平. 广西主要气象灾害对甘蔗生产的影响[J]. 广西农学报, 2006, 21(3):16-18.
- [29] 唐仕云,杨丽涛,李杨瑞. 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[J]. 广西植物, 2012, 32(5):679-685.
- [30] 唐仕云,杨丽涛,李杨瑞. 低温胁迫下不同甘蔗品种的转录组比较分析[J]. 生物技术通报, 2018, 34(12):116-124.
- [31] 江永. 霜冻害对甘蔗生产的危害及灾后技术处理措施[J]. 甘蔗糖业, 2000, 29(1):21-24.
- [32] 钟坤,张丹,孙玉勇,等. 甘蔗新品种桂林区域试验及抗寒性评价[J]. 南方园艺, 2021, 32(5):18-23.
- [33] 杨荣仲,李杨瑞,王维赞,等. 干旱霜冻条件下甘蔗耐寒性评价分析[J]. 西南农业学报, 2011, 24(1):52-57.
- [34] 吴才文,赵俊,肖祎,等. 云蔗型甘蔗品种(系)在北缘蔗区的表现及抗寒性评价[J]. 中国糖料, 2017, 39(6):8-12.
- [35] 黄晓照,叶靖平,欧丽萍. 广西主要气象灾害对甘蔗生产的影响及对策[J]. 甘蔗糖业, 2005, 34(6):12-15.
- [36] 杨荣仲,梁强,周会,等. 轻霜后的甘蔗品质变化与耐寒性评价[J]. 南方农业学报, 2012, 43(10):1495-1500.
- [37] 李素丽,史晓朋,李志刚,等. 持续自然降温对不同甘蔗品种形态及生理指标的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(20):98-103.
- [38] 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.

## Evaluation of Cold Tolerance in New Varieties (Lines) of Sugarcane of the Zhongzhe Series

WU Yuling<sup>1,2,3</sup>, ZENG Lifang<sup>2</sup>, LI Huojian<sup>1</sup>, CHEN Jun<sup>2</sup>, ZHANG Chi<sup>1</sup>, WEI Yibin<sup>1</sup>,  
JIANG Hongtao<sup>2\*\*</sup>, ZHANG Muqing<sup>1,2,3\*\*\*</sup>, YAO Wei<sup>1,2,3\*\*</sup>

(1. State Key Laboratory for Conservation and Utilization of Subtropical Agro-Bioresources, Nanning, Guangxi, 530004, China; 2. Guangxi Key Laboratory for Sugarcane Biology, Nanning, Guangxi, 530004, China; 3. College of Agriculture, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China)

**Abstract:** This study aims to evaluate the cold tolerance of different sugarcane varieties under low-temperature stress and comprehensively assess multiple physiological and biochemical indexes via Principal Component Analysis (PCA). Ten sugarcane varieties were selected for the experiment, and their physiological and biochemical characteristics were measured after low-temperature treatment. The results demonstrated significant variations among varieties, which exhibited diverse physiological and biochemical responses to low-temperature stress. PCA explained 84.130% of the phenotypic variation, identifying key physiological and biochemical indexes, including Soluble Protein (SP) content, Superoxide Dismutase (SOD) activity, and Plasma Membrane Permeability (PMP). Comprehensive analysis revealed that Zhongzhe 11 showed the strongest cold tolerance, while Zhongzhe 13 exhibited relatively weak cold tolerance under low-temperature stress. These findings provide important references for the screening and breeding of cold-tolerant varieties and deepen the theoretical understanding and practical application foundation of the physiological and biochemical mechanisms underlying the cold tolerance of sugarcane.

**Key words:** sugarcane; cold tolerance; physiological response; principal component analysis; comprehensive evaluation

责任编辑:梁 晓,于子涵



微信公众号投稿更便捷

联系电话:0771-2503923

邮箱:gxxk@gxas.cn

投稿系统网址:<http://gxxk.ijournal.cn/gxxk/ch>