

不同甘蔗品种幼苗对干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价

谭秦亮¹ 程 琴¹ 李佳慧¹ 朱鹏锦¹ 宋奇琦¹ 周全光¹ 吕 平¹ 潘成列²

(¹广西壮族自冶区亚热带作物研究所, 530001, 广西南宁; ²广西田园生化股份有限公司, 530001, 广西南宁)

摘 要 为探究甘蔗品种对干旱胁迫的生理响应并评价其抗旱性, 以广西地区种植的 5 个甘蔗品种为供试材料, 采用人工盆栽控水法, 测定幼苗脯氨酸(Pro)、丙二醛(MDA)含量和抗氧化酶活性等关键指标, 结合隶属函数法综合评价其抗旱性。结果表明, 干旱胁迫下各品种的生理指标存在明显差异, Pro、可溶性蛋白(SP)、MDA 和超氧阴离子(O_2^-)含量均持续上升, 超氧化物歧化酶(SOD)活性下降, 过氧化物酶和过氧化氢酶活性呈先升后降趋势。甘蔗苗期抗旱性主要依赖于渗透调节与抗氧化酶协同作用, 其中桂热 4 号因 Pro 高效积累及 SOD 活性稳定而抗旱性最好。抗旱性综合评价排序为桂热 4 号>桂柳 05136>桂热 2 号>桂糖 44 号>桂糖 42 号。甘蔗的抗旱性不仅与品种遗传因素和生理特征有关, 还与大田生产管理水平密切相关, 后续可结合大田试验开展更全面的综合利用。

关键词 甘蔗; 干旱胁迫; 生理响应; 抗旱性评价

甘蔗(*Saccharum officinarum* L.)是世界上重要的糖料作物, 以甘蔗为原料生产的食糖占全球食糖产量的 80%以上, 也是我国约 90%食糖生产的重要来源^[1]。我国甘蔗主要种植在广西、云南、广东和海南等地区, 广西是我国最大的糖料蔗种植基地和食糖主产区, 种植面积连续多年占全国总面积的 60%以上^[2-3]。然而, 伴随着降雨减少、气温上升及雨水分布不均等因素, 干旱已成为影响广西甘蔗产业发展的主要环境因素, 尤其是广西蔗区 60%以上的甘蔗种植于旱坡地^[4], 灌溉设施和土壤保水性较差, 干旱频率的不断增加, 对甘蔗产量和品质构成了严峻挑战。因此, 选育抗旱性强的甘蔗品种, 改良甘蔗耐旱性已成为当前广西甘蔗产业的关键发展方向。

作物抗旱性是受多基因控制的复杂性状, 通常需要从形态性状、生理生化和基因型等方面鉴定, 是多个抗旱指标的综合反映^[5]。甘蔗苗期是对水分需求最为迫切和敏感的时期, 缺水会导致甘蔗出苗率及分蘖率降低, 甘蔗幼苗也会在干旱胁迫下营养不良, 导致生长缓慢。目前, 对于甘蔗苗期抗旱性的研究已在形态指标^[6]、生理响应^[7]、光合特性^[8]、激素响应^[9]、基因表达^[10]以及多指标评价^[11-12]等方面展开。当受到干旱胁迫时, 植物体内活性氧(ROS)如超氧阴离子(O_2^-)和过氧化氢(H_2O_2)

含量的增加会对植物的生长产生不利影响。抗氧化酶是有效清除 ROS 的系统, 是反映植物防御能力的关键指标, 其中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)是植物体内抗氧化酶系统的重要成员。研究不同甘蔗品种抗旱性与抗氧化酶活性的关系发现, 抗旱性强的品种在干旱胁迫下叶片抗氧化酶活性显著提高, 同时响应干旱胁迫的速度更灵敏^[13]。丙二醛(MDA)是反映脂质过氧化作用强弱的重要指标, 干旱胁迫下 MDA 的增幅与品种的抗旱性密切相关^[14], 随着干旱胁迫的不断加深, 植物体内还会发生膜透性增大、细胞内外物质失衡等一系列生理变化^[15-16]。通过分析鉴定 10 个甘蔗品种的抗旱能力发现, 干旱胁迫后叶片抗氧化酶活性增强, MDA、可溶性糖(soluble sugar, SS)、可溶性蛋白(soluble protein, SP)和脯氨酸(proline, Pro)含量等均会升高^[17]。对桂糖系列甘蔗新品种的抗旱性进行分析, 结果表明干旱条件下抗旱能力不同的品种 MDA 含量、SOD 和 POD 活性均呈现不同的变化, 利用主成分分析法与生产相结合来评价甘蔗品种抗旱性更客观^[18]。

目前, 虽有不少关于甘蔗抗旱性的研究报道, 但对于近几年选育的优良甘蔗新品种在干旱胁迫下苗期的生理特性及综合评价的研究鲜有报道。本试验选择当前 5 个优良新品种进行干旱胁迫处理,

作者简介: 谭秦亮, 主要从事甘蔗栽培与育种工作, E-mail: 469118251@qq.com

吕平为通信作者, 主要从事甘蔗育种研究工作, E-mail: 602337911@qq.com

基金项目: 广西科技重大专项子课题(桂科 AA22117002-7); 广西科技重大专项子课题(桂科 AA22117002-6); 南宁市武鸣区科学研究与技术开发计划重点研发项目(20220101)

收稿日期: 2025-04-16; 修回日期: 2025-06-09; 网络出版日期: 2025-08-04

从与抗旱性状密切相关的渗透物质（Pro、SP、SS）含量、MDA、 O_2^- 、抗氧化酶（SOD、POD、CAT）活性等 8 个生理指标入手，研究新品种在干旱胁迫下的生理响应，并以 8 个生理指标抗旱系数（drought resistant index, DRI）作为抗旱性鉴定主要参数，结合隶属函数综合评价法对甘蔗品种抗旱性进行综合评价，筛选出耐旱性较好的优良品种，为抗旱甘蔗品种选育和生产应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2024 年 2 月在广西壮族自治区亚热带作物研究所甘蔗种质资源圃的智能温室大棚内（22.89° N, 108.35° E）进行。供试材料为桂糖 42 号、桂糖 44 号、桂柳 05136、桂热 2 号和桂热 4 号 5 个甘蔗品种，由广西壮族自治区亚热带作物研究所提供。

1.2 试验设计

采用桶栽土培（45 cm×40 cm）的方式，每桶栽培所需土壤（大田土：河沙：有机肥=5：4：1）。2024 年 2 月 15 日将甘蔗以单芽蔗茎的方式种植于泥沙混合基质中催芽育种。30 d 后选择长势一致的甘蔗幼苗移栽至桶中，每个桶种 4 株苗，按照常规生长需要管理，待甘蔗幼苗生长至 5~6 叶期时，对 5 个甘蔗品种进行人工控水干旱胁迫处理，设置对照（正常浇水，CK，土壤含水量占田间持水量的 80%以上）、轻度干旱（4 d，50%~60%）、中度干旱（8 d，40%~50%）和重度干旱（12 d，30%~40%）共 4 个处理，每个处理 3 次重复，每次重复取样 2 桶，分别取各处理幼苗+1 叶（甘蔗最高可见肥厚带叶片），进行各个生理指标的测定，所有指标均设置 3 个重复。

1.3 测定项目与方法

参考蔡庆生^[19]的方法测定甘蔗叶片 Pro 含量，参考张以顺等^[20]的方法测定 SP、SS 以及 MDA 含量，参考朱鹏锦等^[21]的方法测定 O_2^- 产生速率，参考 Parida 等^[22]的方法测定 SOD、POD 及 CAT 活性。

1.4 数据处理

抗旱系数为干旱胁迫处理 12 d 时的测定值，参照李晓君等^[23]的方法计算。

抗旱系数（%）=干旱胁迫处理指标测定值/CK 处理指标测定值×100

各综合指标隶属函数值 $R(V_i)$ 计算公式：

$$R(V_i) = (V_i - V_{\min}) / (V_{\max} - V_{\min}) \quad (2)$$

$$R(V_i) = 1 - (V_i - V_{\min}) / (V_{\max} - V_{\min}) \quad (3)$$

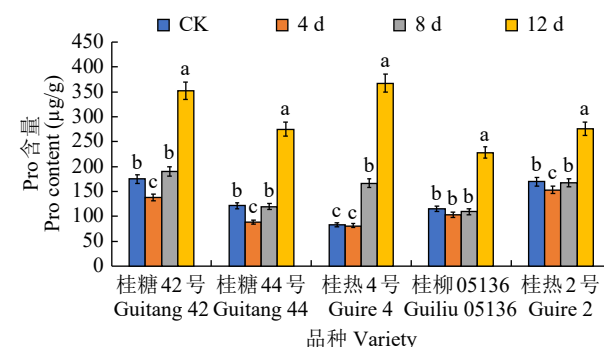
V_i 表示某一材料的某一指标测定值，而 $V_{\max}$ 为所测指标的最大值， $V_{\min}$ 为所测指标的最小值。当所测指标与抗旱性呈正相关时按公式(2)计算，呈负相关时则按反隶属函数即公式(3)计算。

采用 WPS 进行数据的整理、统计和作图，使用 SPSS 22.0 软件进行方差分析和聚类分析。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对甘蔗 Pro、SP 和 SS 含量的影响

2.1.1 对甘蔗 Pro 含量的影响 从图 1 可以看出，Pro 含量随着胁迫时间的延长变化趋势相似，5 个品种均是先降后增，在胁迫 12 d 时达到峰值。桂糖 42 号和桂糖 44 号在胁迫 4 d 时降幅较为明显，分别下降了 21.32%和 27.57%。在胁迫 12 d 时 5 个品种均达到最高值且显著高于 CK，增幅分别为 101.04%、126.21%、343.01%、97.89%和 62.69%，其中桂热 4 号增幅最大，桂热 2 号增幅最小。



不同小写字母表示同一品种不同处理下的差异显著（ $P < 0.05$ ），下同。Different lowercase letters indicate significant differences in the same variety under different treatments ($P < 0.05$), the same below.

图 1 不同处理下甘蔗 Pro 含量的分析
Fig.1 The analysis of the sugarcane Pro content under different treatments

2.1.2 对甘蔗 SS 含量的影响 从图 2 可以看出，随着干旱胁迫时间的延长，参试材料的 SS 含量总体呈上升趋势。然而不同品种又各有其变化特点，桂糖 42 号的 SS 含量呈先上升后下降趋势，桂糖 44 号和桂柳 05136 呈先下降后上升，桂热 4 号和桂热 2 号呈逐步上升的趋势。桂糖 42 号在胁迫前中期上升速度最快，且在胁迫 8 d 时上升到最高值，显著高于 CK，增幅达到 63.28%，桂糖 44 号和桂柳 05136 在胁迫前中期增长缓慢，后期增幅较大。在胁迫 12 d 时，桂糖 44 号、桂热 4 号、桂柳 05136

和桂热 2 号均上升到峰值,增幅分别达到 78.46%、122.32%、91.73%和 76.78%。

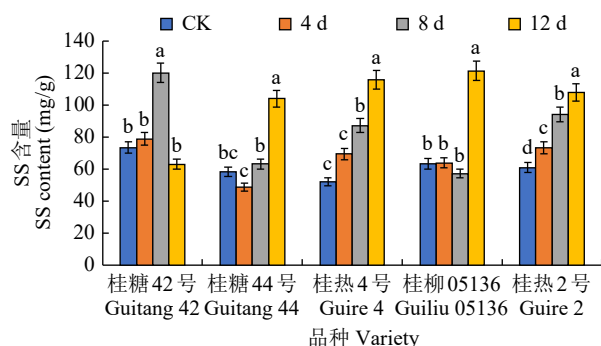


图 2 不同处理下甘蔗 SS 含量的分析

Fig.2 The analysis of the sugarcane SS content under different treatments

2.1.3 对甘蔗 SP 含量的影响 从图 3 可以看出,随着胁迫时间的延长,不同品种 SP 含量变化各异。桂糖 42 号、桂糖 44 号、桂热 4 号和桂柳 05136 的变化相似,均呈逐步上升的趋势,干旱胁迫 12 d 时达到峰值,增幅分别为 13.04%、20.23%、20.42%和 22.88%。各自增幅略有差异,可能与品种的特性及内在生理调节机制有关。桂热 2 号呈先降后升再降的趋势,虽有变化但幅度不大,其中胁迫 8 d 时出现峰值,增幅仅为 2.88%,反映出该品种在干旱胁迫下 SP 含量的调节较为稳定,受胁迫影响的波动程度不如其他品种。

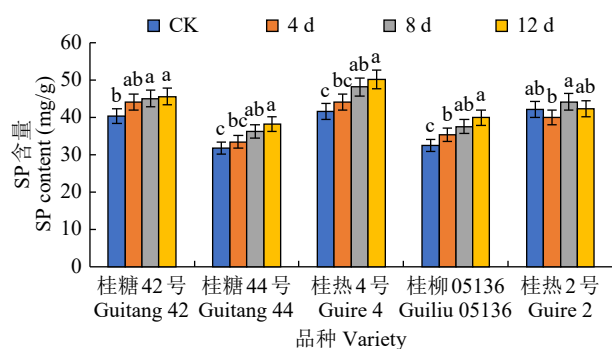


图 3 不同处理下甘蔗 SP 含量的分析

Fig.3 The analysis of the sugarcane SP content under different treatments

2.2 干旱胁迫对甘蔗 MDA 和 O_2^- 含量的影响

2.2.1 对甘蔗 MDA 含量的影响 从图 4 可以看出,5 个甘蔗品种随着干旱胁迫的增加,总体呈上升趋势,且峰值均出现在胁迫 12 d 后。具体变化趋势仍存在明显差异,桂糖 42 号、桂糖 44 号及桂热 2 号呈持续上升趋势,桂热 4 号呈先降后升的趋势,桂柳 05136 呈先升后降再升的趋势。在 4 d 时,

桂糖 42 号和桂热 2 号的 MDA 含量显著高于 CK,增幅分别为 30.17%和 29.30%。在 12 d 时,5 个品种的 MDA 含量均高于 CK,其中桂糖 42 号、桂糖 44 号、桂热 4 号及桂热 2 号达到显著水平,增幅分别为 60.34%、44.53%、40.04%和 83.51%,桂柳 05136 的 MDA 含量虽高于 CK 但不显著。

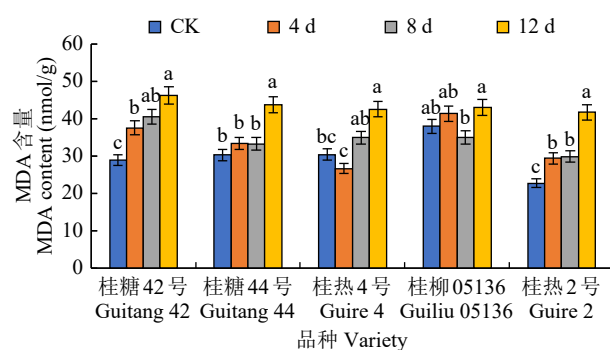


图 4 不同处理下甘蔗 MDA 含量的分析

Fig.4 The analysis of the sugarcane MDA content under different treatments

2.2.2 对甘蔗 O_2^- 含量的影响 从图 5 可以看出,随着干旱胁迫的增加,5 个甘蔗品种 O_2^- 含量的变化呈逐渐上升趋势。桂糖 42 号、桂糖 44 号、桂柳 05136 及桂热 2 号在 4 d 时 O_2^- 含量与 CK 存在显著差异,桂热 4 号的 O_2^- 含量在 8 d 时明显高于桂糖 42 号、桂糖 44 号和桂柳 05136。在 12 d 时,5 个品种的 O_2^- 含量均高于 CK 且差异显著,桂热 4 号的 O_2^- 含量最高,为 $0.2372 \mu\text{mol/g}$ 。

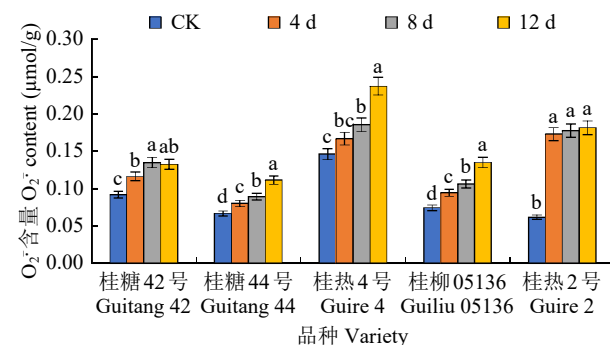


图 5 不同处理下甘蔗 O_2^- 含量的分析

Fig.5 The analysis of the sugarcane O_2^- content under different treatments

2.3 干旱胁迫对甘蔗抗氧化酶活性的影响

2.3.1 对 SOD 活性的影响 图 6 表明,随着干旱胁迫的不断延长,5 个品种的 SOD 活性呈现出不同的变化趋势。桂糖 42 号的 SOD 活性先下降再略有上升,在胁迫 8 d 时降到最低值,相较于 CK 降幅达到了 23.76%。桂糖 44 号、桂热 4 号和桂柳 05136

的 SOD 活性均是逐步下降，且下降幅度达到显著差异的水平。桂热 2 号的 SOD 活性变化较为复杂，呈先下降后上升再下降的趋势，在胁迫 8 d 时达到最高值，相比 CK 增幅为 22.18%，随后逐渐下降，12 d 时下降到最低值。

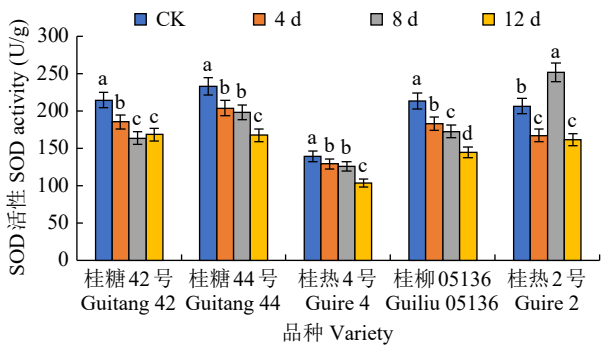


图 6 不同处理下甘蔗抗氧化酶 SOD 活性的分析
Fig.6 The analysis of the sugarcane antioxidant enzyme SOD activity under different treatments

2.3.2 对 POD 活性的影响 图 7 表明，随着干旱胁迫时间的延长，不同甘蔗品种的 POD 活性变化各有特点。桂糖 42 号、桂热 4 号、桂柳 05136 和桂热 2 号的变化规律基本一致，均为先上升后下降。在干旱胁迫 8 d 时，这 4 个品种均出现峰值，增幅分别为 107.50%、41.40%、115.40%和 77.90%，其中桂柳 05136 的增幅最大。桂糖 44 号的 POD 活性变化趋势为逐步上升，12 d 时达到最高值，增幅高

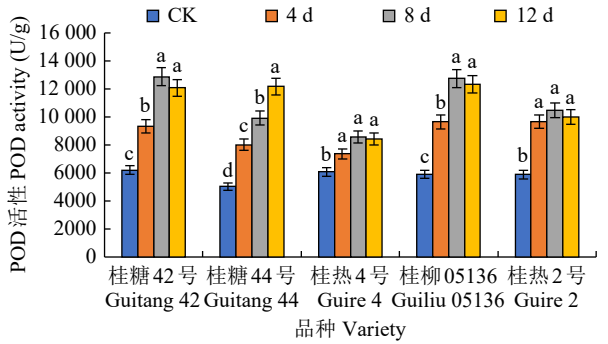


图 7 不同处理下甘蔗抗氧化酶 POD 的分析
Fig.7 The analysis of the sugarcane antioxidant enzyme POD activity under different treatments

达 142.30%。相较于 CK，5 个品种的最高峰值均达到显著差异水平。

2.3.3 对 CAT 活性的影响 图 8 表明，伴随着干旱胁迫的不断加深，不同甘蔗品种的 CAT 活性展现出截然不同的变化特征。桂糖 42 号、桂柳 05136 和桂热 2 号的变化规律基本相似，均呈先上升后下降的趋势，然而，各品种达到峰值的时间不同。在干旱胁迫 4 d 时，桂糖 42 号达到峰值，与 CK 相比增幅为 139.40%。桂柳 05136 和桂热 2 号的峰值出现在干旱胁迫 8 d 时，其中桂热 2 号的增幅显著，高达 227.08%，桂柳 05136 的增幅次之，达到 154.77%。相较于 CK，5 个品种的峰值均达到显著差异水平。

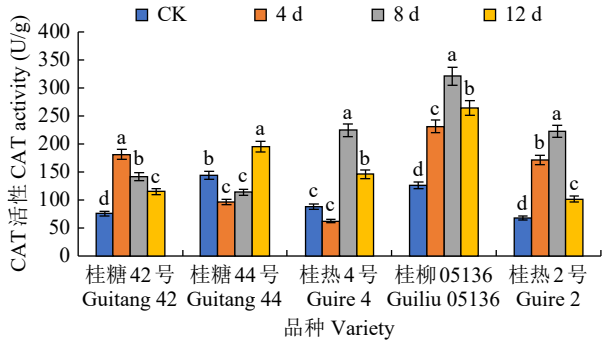


图 8 不同处理下甘蔗抗氧化酶 CAT 的分析
Fig.8 The analysis of the sugarcane antioxidant enzyme CAT activity under different treatments

2.4 各生理指标的耐旱性综合评价

2.4.1 各生理指标的抗旱系数 表 1 为 5 个甘蔗品种在干旱胁迫下生理指标的抗旱系数，抗旱系数越大，说明该品种对干旱胁迫的抵抗能力越强。由表 1 可以看出，经干旱胁迫后，各品种的生理指标表现出明显差异。Pro 含量抗旱系数最大的是桂热 4 号（443.01%），最小的是桂热 2 号（162.69%），桂热 4 号极高的抗旱系数说明其在干旱胁迫下能够大量积累 Pro，从而有效增强自身的抗旱能力。SS 含量抗旱系数最大的是桂热 4 号（222.32%），最小的是桂糖 42 号（85.76%）。除桂糖 42 号外，其

表 1 不同甘蔗品种干旱胁迫下生理指标的抗旱系数								
Table 1 Drought resistance index of physiological indicators under drought stress in different sugarcane varieties %								
品种 Variety	Pro	SS	SP	MDA	O ₂ ⁻	SOD	POD	CAT
桂糖 42 号 Guitang 42	201.04	85.76	113.04	160.34	144.29	78.38	194.76	151.81
桂糖 44 号 Guitang 44	226.21	178.46	120.23	144.53	167.02	72.02	242.30	135.20
桂热 4 号 Guire 4	443.01	222.32	120.42	140.04	162.23	74.38	138.62	165.65
桂柳 05136 Guilui 05136	197.89	191.73	122.88	113.46	181.45	67.77	208.45	209.57
桂热 2 号 Guire 2	162.69	176.78	100.37	183.51	293.85	78.35	169.76	149.40

余 4 个品种 SS 含量抗旱系数均在 176.78%以上，说明这 4 个品种均具有一定的抗旱能力。SP 含量抗旱系数最大的是桂柳 05136（122.88%），最小的是桂热 2 号（100.37%），表明桂柳 05136 可能通过调节 SP 含量来维持干旱胁迫下细胞的正常生理功能。

MDA 含量抗旱系数最大的是桂热 2 号（183.51%），桂糖 42 号（160.34%）次之，最小的是桂柳 05136（113.46%）。MDA 作为膜脂过氧化的产物，其含量变化反映了植物细胞膜受损伤的程度，由此说明桂热 2 号受干旱胁迫后细胞膜能较好地保持稳定，具有较强的抗旱性。O₂⁻含量抗旱系数最大的是桂热 2 号（293.85%），最小的是桂糖 42 号（144.29%）。桂热 2 号在此指标上抗旱系数最大，揭示其可能具有较强的清除 O₂⁻自由基的能力。

SOD 活性抗旱系数最大的是桂糖 42 号（78.38%），桂热 2 号（78.35%）次之，桂柳 05136（67.77%）最小。桂糖 42 号和桂热 2 号在 SOD 活性上的抗旱系数较高，说明这 2 个品种的 SOD 活性受干旱胁迫影响较小，能够较好地保护细胞免受氧化损伤。POD 活性抗旱系数最大的是桂糖 44 号（242.30%），桂柳 05136（208.45%）次之，

桂热 4 号（138.62%）最小。桂糖 44 号在 POD 活性上的抗旱系数明显高于其他品种，说明其在干旱胁迫时 POD 能更有效地发挥作用，清除细胞中过多的 H₂O₂，增强自身的抗旱能力。CAT 活性抗旱系数最大的是桂柳 05136（209.57%），桂热 4 号（165.65%）次之，桂糖 44 号（135.20%）最小。CAT 的主要功能是催化 H₂O₂ 分解为水和 O₂，桂柳 05136 在 CAT 活性方面的抗旱系数最高，表明其能够高效清除细胞内积累的 H₂O₂，降低氧化胁迫对植物的伤害。

2.4.2 各生理指标的隶属函数值及耐旱性综合评价 在评价甘蔗抗旱性时，单一指标往往存在局限性与片面性，难以全面反映出不同甘蔗品种的耐旱能力。为实现对甘蔗品种耐旱性的全方位精准评价，采用模糊数学中隶属函数法，选取与抗旱性密切相关的 8 个生理指标开展综合评价分析，综合评价值越大，说明其耐旱能力越强。由表 2 可见，5 个甘蔗新品种的耐旱性综合评价值存在明显差异，介于 0.480~0.605。经综合分析得出，干旱胁迫下 5 个甘蔗品种耐旱性排序为桂热 4 号>桂柳 05136>桂热 2 号>桂糖 44 号>桂糖 42 号。桂热 4 号综合评价值最大，高达 0.605，耐旱性最好；桂柳 05136 的综合评价值为 0.563，耐旱性次之；桂糖 42 号综

表 2 不同甘蔗品种干旱胁迫下生理指标隶属函数值
Table 2 The membership function values of physiological indicators under drought stress in different sugarcane varieties

品种 Variety	隶属函数值 Membership function value								平均值 Average	排序 Ranking
	MDA	SS	SP	Pro	O ₂ ⁻	SOD	POD	CAT		
桂糖 42 号 Guitang 42	0.000	0.198	0.755	0.946	0.404	0.436	0.899	0.204	0.480	5
桂糖 44 号 Guitang 44	0.107	0.762	0.351	0.677	0.283	0.432	0.911	0.513	0.504	4
桂热 4 号 Guire 4	0.156	0.925	1.000	1.000	1.000	0.000	0.434	0.324	0.605	1
桂柳 05136 Guiliu 05136	0.136	1.000	0.444	0.513	0.417	0.278	0.933	0.780	0.563	2
桂热 2 号 Guire 2	0.193	0.814	0.572	0.680	0.683	0.391	0.635	0.153	0.515	3

合评价值仅为 0.480，耐旱性最差。

3 讨论

3.1 甘蔗干旱胁迫的生理特性

甘蔗抗旱性是一个复杂的生物学性状，与品种基因型、形态特征及生理生化反应关系密切，是多个因素共同作用的结果。甘蔗苗期是生长最为敏感的时期，对其后续生长发育起关键作用，是甘蔗品种抗旱评价与鉴定的最佳时期^[24-25]。Pro、SS 和 SP 等渗透调节物质的积累是植物响应干旱胁迫的一种方式，有助于降低细胞渗透势，维持细胞的膨压，增强植物细胞对脱水的耐受性，从而提高其抗

旱性^[26]。本研究发现，干旱胁迫后，所有品种幼苗叶片中的 Pro、SS 和 SP 含量均有显著增加，且耐旱品种桂热 4 号的 Pro 含量增幅明显高于其他品种，这与吴凯朝等^[27]和 Kishor 等^[28]的研究结果相似。SS 和 SP 的积累同样也反映了甘蔗对干旱的适应策略，桂柳 05136 的 SP 含量在胁迫 12 d 时增幅达 22.88%，与陈迪文等^[29]的研究结果相符，即耐旱品种通过增强蛋白质稳定性维持细胞功能，而敏感品种则因蛋白质降解导致渗透失衡。

干旱胁迫下 ROS 的积累是导致植物膜脂过氧化的关键因素，MDA 和 O₂⁻的积累可以反映细胞膜脂过氧化的损伤程度，而抗氧化酶保护系统则

通过清除 ROS 来减轻对细胞的损伤^[30-32]。本研究中，桂热 2 号的 O_2^- 含量在重度干旱时增幅最大（293.85%），但其 CAT 活性在胁迫中期显著升高（227.08%），表明其通过阶段性激活抗氧化酶缓解氧化损伤。类似地，陈迪文等^[33]发现，海藻提取物可提升甘蔗根系 SOD 和 CAT 活性，降低 MDA 含量，从而增强膜系统稳定性。这一机制与桂热 4 号的表现一致，其 MDA 增幅仅为 40.04%，而 SOD 活性降幅最小，说明耐旱品种能更高效地协调抗氧化酶活性以应对 ROS 爆发。抗氧化酶（SOD、POD、CAT）的协同作用是抵御氧化损伤的关键。桂热 4 号在重度干旱时 SOD 活性降幅最小，而桂柳 05136 的 CAT 活性抗旱系数达 209.57%，表明不同品种依赖的抗氧化途径存在差异。类似地，张木清等^[5]和方自豪等^[34]指出，耐旱品种可快速启动 SOD-POD-CAT 抗氧化级联反应，维持 SOD、POD、APX 等抗氧化酶的高活性，而敏感品种则因酶活性下降导致氧化损伤加剧。

3.2 甘蔗种质耐旱性的鉴定

隶属函数法作为多指标综合评价体系，在作物抗旱性研究中展现了广泛适用性。目前，该方法已被应用于水稻^[35]、玉米^[36]和马铃薯^[37]等作物的抗旱鉴定与筛选中。针对野生甘蔗种质资源，王天菊等^[38]利用相关分析和隶属函数法对 26 份割手密的抗旱性进行差异评价，建立了种质筛选与基因挖掘的技术路径；田春艳等^[39]整合抗旱系数、隶属函数及聚类分析方法综合分析云南甘蔗创新亲本，确立质膜透性、MDA 含量、Pro 含量和自由水/束缚水等 4 项关键评价指标，成功构建适用于 36 份甘蔗创新亲本的多维度抗旱评价模型。本研究采用隶属函数法结合 8 项生理指标，避免了单一指标的片面性。桂热 4 号以 0.605 的综合评价居首位，其优势源于 Pro 积累量、SS 调节能力及抗氧化酶系统的协同增效作用，该结论与樊仙等^[12]基于主成分分析建立的甘蔗苗期抗旱评价体系形成方法学互补，共同验证多指标综合评价的科学性。桂热 2 号虽在 MDA 和 O_2^- 含量上表现欠佳，但其 CAT 活性在胁迫中期的显著升高（227.08%），最终综合耐旱性仍优于桂糖 44 号。研究结果揭示短期胁迫响应与长期抗旱表型可能存在解耦现象，某些快速应答机制（如 CAT 活性瞬时激增）可能部分抵消氧化损伤的累积效应，但同时凸显出现有实验室评价体系的局限性。本研究为盆栽试验，与大田实际生产

还存在一定误差，未来研究需结合动态监测技术和田间表型学验证，以完善作物抗旱性评价的时空维度解析。

4 结论

不同品种在干旱胁迫时生理指标变化明显不同，苗期甘蔗抗旱性主要依赖渗透调节与抗氧化酶协同机制。其中桂热 4 号抗旱性最优，归因于 Pro 积累及 SOD 稳定性；桂热 2 号和桂柳 05136 则通过 POD 和 CAT 活性激增缓解氧化损伤。隶属函数法分级显示，桂热 4 号属于强抗旱品种，其余 4 个品种属于一般抗旱品种，这些品种今后可在甘蔗抗旱性育种中多加利用。

参考文献

- [1] Li Y R, Yang L T. Sugarcane agriculture and sugar industry in China. Sugar Tech, 2015, 17(1): 1-8.
- [2] 吴才文, 赵俊, 刘家勇, 等. 现代甘蔗种业. 北京: 中国农业出版社, 2014: 3-4.
- [3] 张跃彬, 邓军, 胡朝晖. “十三五”我国蔗糖产业现状及“十四五”发展趋势. 中国糖料, 2022, 44(1): 71-76.
- [4] 杨海霞, 李恒锐, 何文, 等. 广西甘蔗品种抗旱性研究. 中国糖料, 2019, 41(1): 28-32.
- [5] 张木清, 陈如凯. 作物抗旱分子生理与遗传改良. 北京: 科学出版社, 2005.
- [6] 刘三梅, 杨清辉, 李秀年, 等. 不同生育时期干旱胁迫对甘蔗形态指标及生理特性的影响. 南方农业学报, 2016, 47(8): 1273-1278.
- [7] 刘硕, 樊仙, 李如丹, 等. 14 个甘蔗主栽品种对干旱胁迫的生理响应. 热带作物学报, 2022, 43(9): 1812-1823.
- [8] 刘硕, 樊仙, 全怡吉, 等. 干旱胁迫对甘蔗光合生理特性的影响. 西南农业学报, 2022, 35(8): 1776-1785.
- [9] 谭秦亮, 程琴, 潘成列, 等. 干旱胁迫对甘蔗新品种桂热 2 号生理指标的影响. 作物杂志, 2022(3): 161-167.
- [10] 农倩, 谢金兰, 林丽, 等. 干旱胁迫下外源 ABA 对甘蔗幼苗生理特性和基因表达的影响. 热带作物学报, 2023, 44(3): 553-561.
- [11] 谭秦亮, 朱鹏锦, 李穆, 等. 基于主成分与聚类分析的甘蔗新品种(系)主要农艺及产量性状的评价. 热带农业科学, 2022, 42(3): 32-38.
- [12] 樊仙, 全怡吉, 杨绍林, 等. 甘蔗苗期抗旱性鉴定评价研究. 中国农学通报, 2022, 38(3): 17-24.
- [13] Do T T, 李健, 张凤娟, 等. 干旱胁迫下不同甘蔗品种叶片抗氧化酶活性和渗透调节物质含量的变化. 热带作物学报, 2018, 39(5): 858-866.
- [14] 桂意云, 杨荣仲, 周会. 干旱及复水条件下甘蔗的生理响应与抗旱性简易鉴定. 广东农业科学, 2009(9): 19-21.
- [15] Shah S H. Screening of drought tolerant genotypes of sugarcane through biochemical markers against polyethyleneglycole. International Journal of Scientific and Engineer Research, 2013, 4(7): 980-988.
- [16] Abbas S R, Ahmad S D, Sabir S M, et al. Detection of drought tolerant sugarcane genotypes (*Saccharum officinarum*) using lipid peroxidation, antioxidant activity, glycine-betaine and proline contents. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2014, 14

- (1): 233-243.
- [17] 李鸿博, 蔡伟俊, 谢雨彤, 等. 甘蔗新品种对于干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价. 华南农业大学学报, 2019, 40(6): 51-58.
- [18] 刘璐, 蒋洪涛, 张革民, 等. 桂糖 03 系列新品种 (系) 抗旱性综合分析. 热带作物学报, 2017, 38(7): 1267-1273.
- [19] 蔡庆生. 植物生理学实验. 北京: 中国农业大学出版社, 2013.
- [20] 张以顺, 黄霞, 陈云凤. 植物生理学实验教程. 北京: 高等教育出版社, 2009: 128-129.
- [21] 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. 作物杂志, 2018(4): 131-137.
- [22] 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. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2004, 161(5): 531-542.
- [23] 李晓君, 罗正清, 陆昌强, 等. 20 个甘蔗品种 (系) 的抗旱性比较. 热带作物学报, 2020, 41(12): 2482-2491.
- [24] 毛钧, 王靖, 黄明霞, 等. 云南蔗区播期与水氮耦合对甘蔗产量和糖分影响. 农业工程学报, 2019, 35(16): 134-144.
- [25] 吕绍芝, 沈庆庆, 饶席兵, 等. 30 份割手密种质资源苗期抗旱性综合评价. 西南农业学报, 2024, 37(2): 233-241.
- [26] 罗明珠, 梁计南. 苗期甘蔗对于旱胁迫的反应. 热带作物学报, 2005, 26(4): 38-42.
- [27] 吴凯朝, 黄诚梅, 邓智年, 等. 干旱后复水对甘蔗伸长期生理生化特性的影响. 南方农业学报, 2015, 46(7): 1166-1172.
- [28] Kishor P B K, Sangam S, Amrutha R N, et al. Regulation of proline biosynthesis, degradation, uptake and transport in higher plants: its implications in plant growth and abiotic stress tolerance. Current Science, 2005, 88(3): 424-438.
- [29] 陈迪文, 周文灵, 吴启华, 等. 海藻提取物对不同品种甘蔗抗旱性的影响. 甘蔗糖业, 2023, 52(5): 17-24.
- [30] Wang H W, Qin F. Genome-wide association study reveals natural variations contributing to drought resistance in crop. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 1110.
- [31] Shinozaki K, Yamaguchi-Shinozaki K. Gene networks involved in drought stress response and tolerance. Journal of Experimental Botany, 2007, 58(2): 221-227.
- [32] Srivastava A K, Penna S, Van N D, et al. Multifaceted roles of aquaporins as molecular conduits in plant responses to abiotic stresses. Critical Reviews in Biotechnology, 2016, 36(3): 389-398.
- [33] 陈迪文, 周文灵, 敖俊华. 叶面喷施海藻提取物对甘蔗干旱胁迫的缓解效应. 热带作物学报, 2021, 42(5): 1348-1354.
- [34] 方自豪, 王衍坤, 韩金磊, 等. 中蔗系列品种 (系) 苗期抗旱性综合评价及抗旱指标筛选. 南通大学学报 (自然科学版), 2023, 22(1): 54-66.
- [35] 蒋京桂, 黄世炎, 黄成志, 等. 水稻种质苗期耐旱性评价及相关酶活性研究. 种子, 2025, 44(1): 79-88.
- [36] 徐奕琳, 徐东东, 张盼盼, 等. PEG 模拟干旱胁迫下不同玉米品种萌芽期及苗期抗旱性鉴定. 中国农学通报, 2025, 41(1): 13-18.
- [37] 陈杰盼, 马奔驰, 苏晨晨, 等. 20 份马铃薯材料的抗旱性评价与筛选. 中国马铃薯, 2023, 37(2): 118-124.
- [38] 王天菊, 王先宏, 杨清辉. 26 份割手密种质材料的抗旱性差异评价. 热带作物学报, 2017, 38(9): 1645-1652.
- [39] 田春艳, 边芯, 俞华先, 等. 云瑞甘蔗创新亲本抗旱性综合评价. 植物遗传资源学报, 2019, 20(3): 610-623.

Physiological Response and Drought Resistance Evaluation of Seedlings of Different Sugarcane Varieties under Drought Stress

Tan Qinliang¹, Cheng Qin¹, Li Jiahui¹, Zhu Pengjin¹, Song Qiqi¹,
Zhou Quanguang¹, Lü Ping¹, Pan Chenglie²

(¹Guangxi Institute of Subtropical Crops, Nanning 530001, Guangxi, China;

²Guangxi Tianyuan Biological Chemistry Limited Liability Company, Nanning 530001, Guangxi, China)

Abstract In order to investigate the physiological response of sugarcane varieties to drought stress and evaluate their drought resistance, five sugarcane varieties widely cultivated in Guangxi were used as experimental materials. An artificial pot experiment with controlled water was conducted, key indicators including proline (Pro), malondialdehyde (MDA), and antioxidant enzyme activities in seedlings were measured, and the membership function method was used to comprehensively evaluate their drought resistance. The results showed that there were significant differences in physiological indicators among different varieties under drought stress. The contents of Pro, soluble protein, MDA, and superoxide anion (O_2^-) continued to increase, while the activity of superoxide dismutase (SOD) decreased. The activities of peroxidase and catalase demonstrated initial elevation followed by subsequent reduction. The drought resistance of sugarcane during the seedling stage mainly relies on the synergistic effect of osmoregulation and antioxidant enzymes. Among them, Guire 4 had the best drought resistance due to the efficient accumulation of Pro and stable SOD activity phenotype. The comprehensive evaluation of drought resistance is ranked as follows: Guire 4 > Guiliu 05136 > Guire 2 > Guitang 44 > Guitang 42. The drought resistance of sugarcane is not only related to genetic factors and physiological characteristics of the variety, but also closely related to the level of field production management. In the future, more comprehensive utilization can be carried out in combination with field experiments.

Key words Sugarcane; Drought stress; Physiological response; Drought resistance evaluation