

分蘖期干旱胁迫对甘蔗分蘖幼苗和叶片生理指标的影响

李佳慧, 唐毓玮, 程 琴, 宋奇琦, 谭秦亮, 周全光*, 吕 平, 农泽梅

广西壮族自治区亚热带作物研究所, 广西南宁 530001

摘 要: 广西是我国甘蔗的主导产区, 85%以上甘蔗种植在无灌溉条件的旱地上, 每年受到不同程度的旱害, 干旱已成为制约我国甘蔗生产的主要限制因素。分蘖是影响甘蔗产量的重要性状之一, 在分蘖期探究干旱胁迫对甘蔗分蘖芽发育的影响, 对于甘蔗高产栽培具有重要意义。桂热 2 号是本团队选育的抗旱性好、分蘖性强的优良甘蔗新品种, 为了探究干旱胁迫对分蘖期甘蔗分蘖幼苗和叶片生理指标的影响, 本研究以桂热 2 号甘蔗品种为研究材料, 在甘蔗分蘖初期进行干旱胁迫试验, 试验设置对照(土壤绝对含水量 19%~25%)和干旱胁迫处理, 干旱胁迫处理组停止浇水, 分别在干旱胁迫初期(土壤绝对含水量 14%~15%)、干旱胁迫中期(土壤绝对含水量 10%~11%)、干旱胁迫后期(土壤绝对含水量 6%~7%)取样, 测定处理和对照干旱胁迫不同时期分蘖幼苗和叶片的抗氧化系统酶活性、丙二醛(MDA)、渗透调节物质和内源激素含量变化, 分析不同干旱胁迫下甘蔗分蘖幼苗和叶片生理指标的相关性, 并用隶属函数法对分蘖幼苗和叶片的抗旱性进行评价。结果表明: 干旱胁迫提高了甘蔗分蘖幼苗和叶片的过氧化物酶(POD)活性、超氧化物歧化酶(SOD)活性、脯氨酸(Pro)含量、可溶性蛋白(SP)含量、淀粉含量、蔗糖含量和 ABA 含量, 特别是在分蘖幼苗中, 处理组与对照组达到了显著差异, 而 MDA 含量在干旱胁迫过程中一直维持在相似的水平; 干旱胁迫对甘蔗分蘖幼苗和叶片生理指标的影响有所不同, 相比于叶片, 干旱胁迫更能显著提高分蘖幼苗中的 SOD 活性及 Pro、SP 和蔗糖的含量。相关性分析结果表明: 干旱胁迫下, 甘蔗分蘖幼苗和叶片显著相关的生理指标大多数呈正相关, 蔗糖含量、淀粉含量、Pro 含量、IAA 含量和 SOD 活性与其他指标呈显著或极显著相关; 对分蘖幼苗和叶片的抗旱性的综合评价结果表明, 甘蔗分蘖幼苗的抗旱能力强于甘蔗叶片。

关键词: 甘蔗; 分蘖期; 干旱胁迫; 生理

中图分类号: S566.1 文献标志码: A

Effects of Drought Stress on Physiological Indicators in Tiller Shoots and Leaves of Sugarcane at Tillering Stage

LI Jiahui, TANG Yuwei, CHENG Qin, SONG Qiqi, TAN Qinliang, ZHOU Quanguang*, LYU Ping, NONG Zemei

Guangxi Subtropical Crop Research Institute, Nanning, Guangxi 530001, China

Abstract: Guangxi is the leading sugarcane production area in China. over 85% of the sugarcane is planted on non-irrigated dry land, and varying degrees of drought damage occur every year. Drought is the main limiting factor for sugarcane production in China. Tillering is one of the important traits affecting the yield of sugarcane. It is of great significance to study the effect of drought stress on the development of tillering buds at tillering stage. Guire 2 is a new sugarcane variety bred by our team with good drought resistance and strong tillering ability. In order to investigate the effects of drought stress on physiological indicators of sugarcane tillering seedlings and leaves at tillering stage, Guire 2 was used to conduct drought stress experiments at the early stage of sugarcane tillering. The experiment was set up with control (19%–25% soil absolute water content) and drought stress treatment by stopping irrigation. Samples were taken

收稿日期 2024-11-11; 接受日期 2024-11-26

基金项目 广西科技重大专项子课题(桂科 AA22117002-7, 桂科 AA22117002-6); 广西农业科学院基本科研业务专项(桂农科 2021YT151)。

作者简介 李佳慧(1991—), 女, 硕士, 农艺师, 研究方向: 甘蔗生理生化与栽培育种。*通信作者(Corresponding author): 周全光(ZHOU Quanguang), E-mail: 503786772@qq.com。

from the control group and treatment group at early drought stress (14%–15% soil absolute water content), middle drought stress (10%–11% soil absolute water content), late drought stress (6%–7% soil absolute water content) stages. The changes of antioxidant enzyme activity, MDA, osmoregulatory substances and endogenous hormone contents were measured by subordination function method. The correlation of the physiological indicators in sugarcane tiller shoots and leaves was analyzed, and the drought resistance of tiller shoots and leaves was evaluated. The results showed that drought stress increased the activities of peroxidase (POD), and superoxidate dismutase (SOD), and contents of proline (Pro), soluble protein, starch, sucrose and abscisic acid (ABA), especially in tiller shoots, the treatment group and the control group reached a significant difference, while the malondialdehyde (MDA) content remained at a similar level in sugarcane tillering seedlings and leaves during drought stress. Compared with leaves, drought stress significantly increased the activity of SOD and the contents of Pro, soluble protein and sucrose in tiller shoots. Correlation analysis showed that most significant correlations between the physiological indicators in sugarcane tiller shoots and leaves under drought stress were positive, and sucrose content, starch content, Pro content, IAA content and SOD activity were more significantly or extremely significantly correlated with other indicators. According to the comprehensive drought resistance coefficient and the average of subordinate function values of each index, the drought resistance of tiller shoots was stronger than that of leaves in sugarcane.

Keywords: sugarcane; tillering stage; drought stress; physiology

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.04.013

干旱是限制作物增产最突出的非生物胁迫之一，一直是世界各国农业面临且普遍存在的自然灾害^[1]。我国干旱、半干旱地区的面积约占全国土地总面积的 50%，干旱是限制我国农业生产的重要因素之一^[2]。甘蔗是全球重要的糖料和工业原料作物，世界食糖约 86% 由甘蔗提供^[3]。广西是我国甘蔗的主导产区，蔗区 85% 以上为旱坡地^[4]，大部分甘蔗种植在灌溉条件缺乏的旱地上，每年均出现不同程度的旱害，严重影响甘蔗生长发育，可使甘蔗产量损失高达 60%^[5]。因此，研究甘蔗对于干旱胁迫的响应机制，提高甘蔗的抗旱性对确保广西甘蔗产量的稳定乃至全国食糖供给具有重要作用。

甘蔗在干旱条件下，自身会产生一系列生理生化变化以及保护性物质，以减轻干旱带来的伤害，主要体现在抗氧化调节、渗透调节以及质膜透性的调节等^[6-7]。植物细胞内的活性氧 ROS 在正常情况下处于动态平衡并且维持在较低的水平，缺水导致植物中产生过量的活性氧，破坏体内的氧化还原稳态，损伤植物组织^[8]。耐旱甘蔗品种能通过提高抗氧化酶的活性来减轻氧化损伤^[7]，这些抗氧化酶主要包括超氧化物歧化酶（SOD）、过氧化物酶（POD）等。李晓君等^[9]对不同品种的甘蔗进行耐旱性分析，结果表明，在干旱条件下，甘蔗叶片中的 POD 和 SOD 活性均呈上升趋势。渗透压的调节能有效降低植物细胞水势，防止细胞脱水，保证植物正常生长^[10]。可溶性糖（SS）、可溶性蛋白（SP）和脯氨酸（Pro）在渗透调节方

面发挥着重要作用^[11]。对甘蔗耐旱性研究表明，耐旱品种能积累更多的 SS、SP 和 Pro，维持细胞的正常生长^[12]。丙二醛（MDA）含量是反映脂质过氧化作用强弱的一个重要指标，研究表明干旱胁迫会导致甘蔗植株体产生大量 MDA，使细胞膜透性增大^[13]，吴凯朝等^[14]的研究也表明了 MDA 含量可以直接反映出逆境胁迫下细胞膜系统的过氧化程度，在干旱胁迫下的甘蔗植株叶片中的 MDA 含量明显提高。干旱胁迫会导致甘蔗中内源激素平衡被打破，研究表明，在干旱胁迫下甘蔗叶片内源激素脱落酸（ABA）含量显著提高^[15]，对于干旱胁迫下甘薯的研究也表明，玉米素（ZR）和赤霉素（GA）含量下降，而 ABA 含量上升，地上部生长及块根分化和膨大受到抑制^[16]。

桂热 2 号是本团队自育的高产高糖优良甘蔗新品种，前期以苗期干旱胁迫桂热 2 号下甘蔗叶片为材料，对相关抗旱生理生化指标进行了研究，显示其具有较好的抗旱性^[15]。分蘖是甘蔗的重要生物学特性之一，分蘖的数量和质量直接影响作物群体的结构建成，并关联其他农艺性状的发展，最终影响甘蔗产量形成^[17]，团队前期通过对 3 个蔗区 5 个试验点 4 个不同甘蔗品种（系）的分蘖性状和产量构成因子进行相关研究，显示桂热 2 号属于强分蘖甘蔗品种（系）^[18]。目前甘蔗响应干旱胁迫过程主要集中在以甘蔗叶片为材料的生理机制研究上，而针对甘蔗分蘖苗响应干旱胁迫的生理机制报道较少。本研究以抗旱性好、分蘖性强的桂热 2 号甘蔗分蘖幼苗和叶片为研究材

料,采用温室大棚桶栽的方式,在甘蔗分蘖初期进行不同程度的干旱胁迫处理,探究干旱胁迫对甘蔗分蘖幼苗和叶片内源激素、渗透系统、保护酶系统及 MDA 含量的影响,同时开展干旱胁迫下甘蔗分蘖幼苗和叶片生理指标的相关性研究,对甘蔗分蘖幼苗和叶片进行抗旱性评价,以期为甘蔗抗旱性研究及改进甘蔗抗旱栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试材料为广西壮族自治区亚热带作物研究所自选育优良抗旱甘蔗品种桂热 2 号,种茎来源于广西壮族自治区亚热带作物研究所甘蔗种植基地。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 试验于 2022 年 3 月 2 日在广西壮族自治区亚热带作物研究所甘蔗资源圃温室大棚进行。选择健康无病虫害的桂热 2 号甘蔗种茎,砍成单芽段,用 1%多菌灵浸泡 0.5 h,种植于带底座桶中,每桶种植 2~3 个单芽段,待甘蔗成幼苗时根据长势每桶留 1 株甘蔗幼苗。提前将土壤混合均匀并进行暴晒。每桶装土后拌混 3 g 复合肥作为基肥,共种植 100 桶。甘蔗种植后立刻浇水,确保每桶浇入足够的水。甘蔗出苗后每隔 1 d 浇水 1 次,确保前期长势一致。

待甘蔗刚进入分蘖初期,分蘖幼苗出土 3~5 cm 时进行干旱胁迫试验。试验设置对照组和处理组,每天测定对照组及处理组土壤绝对含水量,对照组正常浇水,土壤绝对含水量保持在 19%~25%;处理组停止浇水,根据土壤含水量的不同设置 3 组不同程度的干旱胁迫时期,即干旱胁迫初期(土壤绝对含水量 14%~15%)、干旱胁迫中期(土壤绝对含水量 10%~11%)和干旱胁迫后期(土壤绝对含水量 6%~7%)。自干旱胁迫处理开始,每隔 1 d 测定对照组及处理组土壤绝对含水量及甘蔗分蘖幼苗农艺性状;在 3 个干旱胁迫时期分别对对照组和处理组的分蘖幼苗和甘蔗+1 叶进行取样,用液氮处理后冷冻保存,用于相关生理指标的测定。

1.2.2 项目测定 SOD、POD、SP、Pro 的测定参考李合生^[19]的方法;淀粉的测定参考刘萍等^[20]的方法;蔗糖的测定参照华东师范大学生物系植

物生理教研组主编的《植物生理实验指导》^[21]的方法;MDA 的测定参照 CHEN 等^[22]的方法;生长素(IAA)、独角金内酯(SLs)、反式玉米素(ZT)和脱落酸(ABA)含量的测定采用酶联免疫吸附分析法(enzyme-linked assay, ELISA),参照黄杏等^[23]的方法进行提取和测定,试剂盒购自深圳子科生物科技有限公司,每个样品重复测定 3 次。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 软件对数据进行处理和作图,采用 SPSS 23.0 统计分析软件对数据进行显著性分析和相关性分析。采用模糊数学中的隶属函数法,计算干旱胁迫后期甘蔗分蘖幼苗及叶片相关生理指标的抗旱系数、综合抗旱系数、隶属函数值和平均隶属度^[24]。公式如下:

$$\text{各指标抗旱系数 } PI = X_s / X_c \quad (1)$$

$$\text{隶属函数 } U(X) = (PI - PI_{\min}) / (PI_{\max} - PI_{\min}) \quad (2)$$

式中, X_s 和 X_c 分别为干旱和对照各指标的测定值, $U(X)$ 为隶属函数值, $PI_{\min}$ 和 $PI_{\max}$ 为各指标抗旱系数的最小值和最大值,综合抗旱系数为各指标抗旱系数平均值,平均隶属度为各指标的隶属函数平均值。

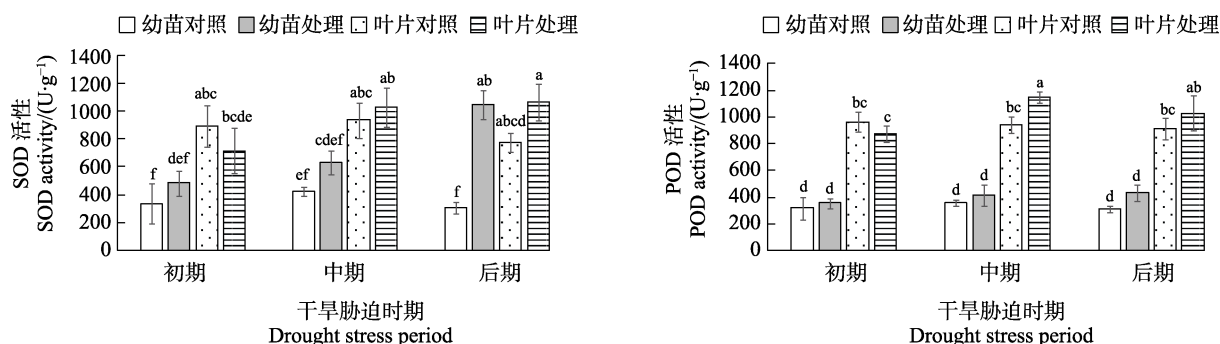
2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对甘蔗分蘖幼苗及叶片抗氧化系统酶活性的影响

由图 1 可知,随着干旱胁迫的持续,甘蔗幼苗及叶片处理组的 SOD 活性逐渐增加。在干旱胁迫中、后期,甘蔗幼苗、叶片处理的 SOD 活性均高于对照。其中,幼苗处理组的 SOD 活性在干旱胁迫后期显著高于对照($P < 0.05$),叶片处理组的 SOD 活性在整个胁迫时期与对照无显著差异,对照组之间无显著差异。分蘖幼苗处理组的 POD 活性随着胁迫时间的增加逐渐增加,但与对照无显著差异;叶片处理组的 POD 活性呈先增加后下降趋势,在干旱胁迫中期显著高于对照($P < 0.05$);对照组之间在整个胁迫时期无显著差异。以上结果说明,干旱胁迫提高了甘蔗分蘖幼苗和叶片的 SOD 和 POD 活性,分蘖幼苗的 SOD 活性和叶片的 POD 活性差异显著。

2.2 干旱胁迫对甘蔗分蘖幼苗及叶片 MDA、渗透调节物质含量的影响

由图 2 可知,干旱胁迫初、中、后期,甘蔗分蘖幼苗处理组的 MDA 含量均显著高于对照,



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 1 干旱胁迫对甘蔗分蘖幼苗、叶片 SOD 和 POD 活性的影响

Fig. 1 Effects of drought stress on antioxidant enzyme activity in sugarcane tiller shoots and leaves

且一直维持在相似的水平；叶片处理组的 MDA 含量均高于对照，但无显著差异，且一直维持在相似的水平。这说明干旱胁迫虽然提高了甘蔗分蘖幼苗和叶片的 MDA 含量，但在胁迫过程中无显著差异，且在干旱胁迫下分蘖幼苗处理组的 MDA 含量显著高于叶片的 MDA 含量。

随着干旱胁迫的持续，甘蔗分蘖幼苗和叶片处理组的 Pro 含量逐渐增加，在干旱胁迫后期，分蘖幼苗处理组的 Pro 含量显著高于对照，叶片处理组的 Pro 含量与对照无显著差异；在干旱胁迫初、中、后期，幼苗处理组的 Pro 含量均高于叶片处理组。这说明干旱胁迫能显著提高甘蔗分蘖幼苗的 Pro 含量，虽然也提高了叶片中的 Pro 含量，但和分蘖幼苗相比，未达到显著差异。

随着干旱胁迫的持续，甘蔗分蘖幼苗处理组的 SP 含量逐渐增加，在干旱胁迫后期达到最大值，显著高于对照；叶片处理组的 SP 含量随着干旱胁迫的持续呈先增加后下降的趋势，在干旱胁迫中期达到最大值，但与对照无显著差异。这说明干旱胁迫提高了甘蔗分蘖幼苗和叶片中的 SP 含量，分蘖幼苗与叶片的 SP 对干旱胁迫的响应有所不同，分蘖幼苗中的 SP 含量逐渐增加，叶片中的 SP 含量先增加后下降。

随着干旱胁迫的持续，甘蔗分蘖幼苗和叶片处理组的淀粉含量逐渐增加，分蘖幼苗处理组的淀粉含量在干旱胁迫后期显著高于对照，叶片处理组的淀粉含量在干旱胁迫中期和后期均显著高于对照。这说明干旱胁迫能显著提高甘蔗分蘖幼苗和叶片中的淀粉含量。

随着干旱胁迫的持续，甘蔗分蘖幼苗处理组的蔗糖含量逐渐增加，在干旱胁迫后期显著高于对照；甘蔗叶片处理组的蔗糖含量先增加后下降，

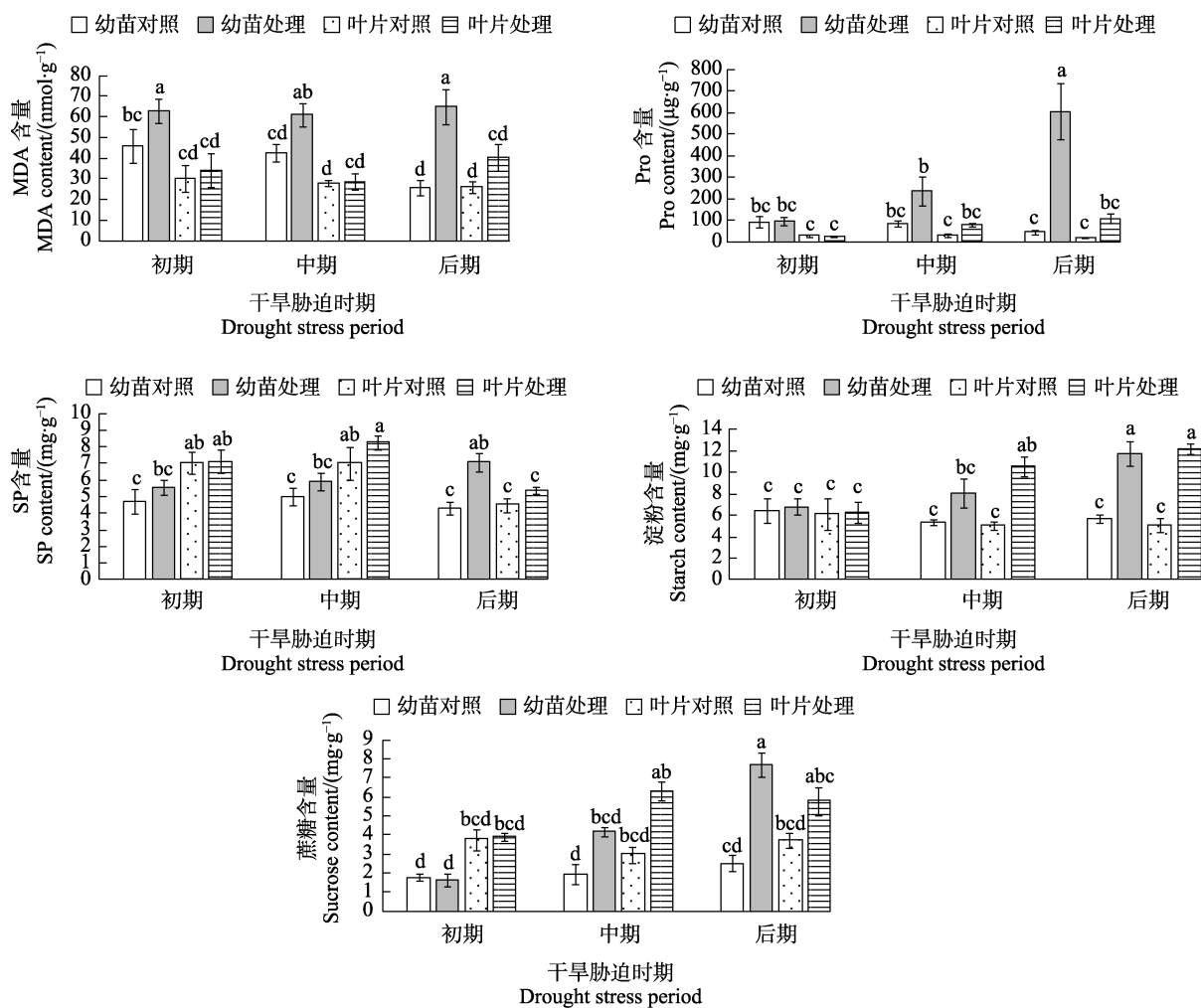
在干旱胁迫中、后期高于对照，但与对照无显著差异。这说明干旱胁迫提高了甘蔗分蘖幼苗和叶片中的蔗糖含量。

由此可知，干旱胁迫能提高甘蔗分蘖幼苗和叶片的 Pro、SP、淀粉、蔗糖含量，特别是在分蘖幼苗中，处理组与对照组达到了显著差异。分蘖幼苗处理组的 Pro、SP、淀粉和蔗糖含量均随着干旱胁迫的持续逐渐增加；叶片处理组的 Pro 和淀粉含量均随着干旱胁迫的持续逐渐增加，SP 和蔗糖含量呈先增加后降低。另外，甘蔗分蘖幼苗和叶片处理组的 MDA 含量在干旱胁迫过程中一直维持在相似的水平，说明甘蔗植株可能通过提高渗透调节物质含量来减轻细胞膜系统过氧化对细胞的损伤。

2.3 干旱胁迫对甘蔗分蘖幼苗及叶片内源激素的影响

由图 3 可知，随着干旱胁迫的持续，甘蔗分蘖幼苗处理组的 IAA 含量在干旱胁迫初、中期无显著差异，在后期显著增加；叶片处理组的 IAA 含量则呈先增加后下降。甘蔗分蘖幼苗处理组的 IAA 含量在干旱胁迫初、后期显著高于对照组，叶片处理组的 IAA 含量在干旱胁迫中期显著高于对照，说明干旱胁迫对甘蔗分蘖幼苗和叶片中 IAA 含量的影响不同。

随着干旱胁迫的持续，甘蔗分蘖幼苗及叶片处理组的 ZT 含量均逐渐增加，分蘖幼苗处理组的 ZT 含量在干旱胁迫初、中期显著高于对照，叶片处理组的 ZT 含量在干旱胁迫后期显著高于对照；分蘖幼苗对照组的 ZT 含量在干旱胁迫后期显著增加。说明干旱胁迫提高了甘蔗分蘖幼苗和叶片的 ZT 含量，同时随着分蘖幼苗的生长，对照组分蘖幼苗的 ZT 含量也增加。



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 2 干旱胁迫对甘蔗分蘖幼苗及叶片渗透调节物质含量的影响

Fig. 2 Effects of drought stress on contents of osmoregulatory substances in sugarcane tiller shoots and leaves

随着干旱胁迫的持续,甘蔗分蘖幼苗处理组的 ABA 含量不同时期均显著高于对照;叶片处理组的 ABA 含量逐渐增加,在干旱胁迫后期显著高于对照。这说明干旱胁迫能显著提高甘蔗分蘖幼苗和叶片中的 ABA 含量。

随着干旱胁迫的持续,甘蔗分蘖幼苗处理组的 GA₃ 含量降低,在干旱胁迫初期显著高于对照;叶片处理组的 GA₃ 含量逐渐增加,在干旱胁迫中、后期显著高于对照。这说明干旱胁迫增加了甘蔗叶片中的 GA₃ 含量,降低了甘蔗分蘖幼苗中的 GA₃ 含量。

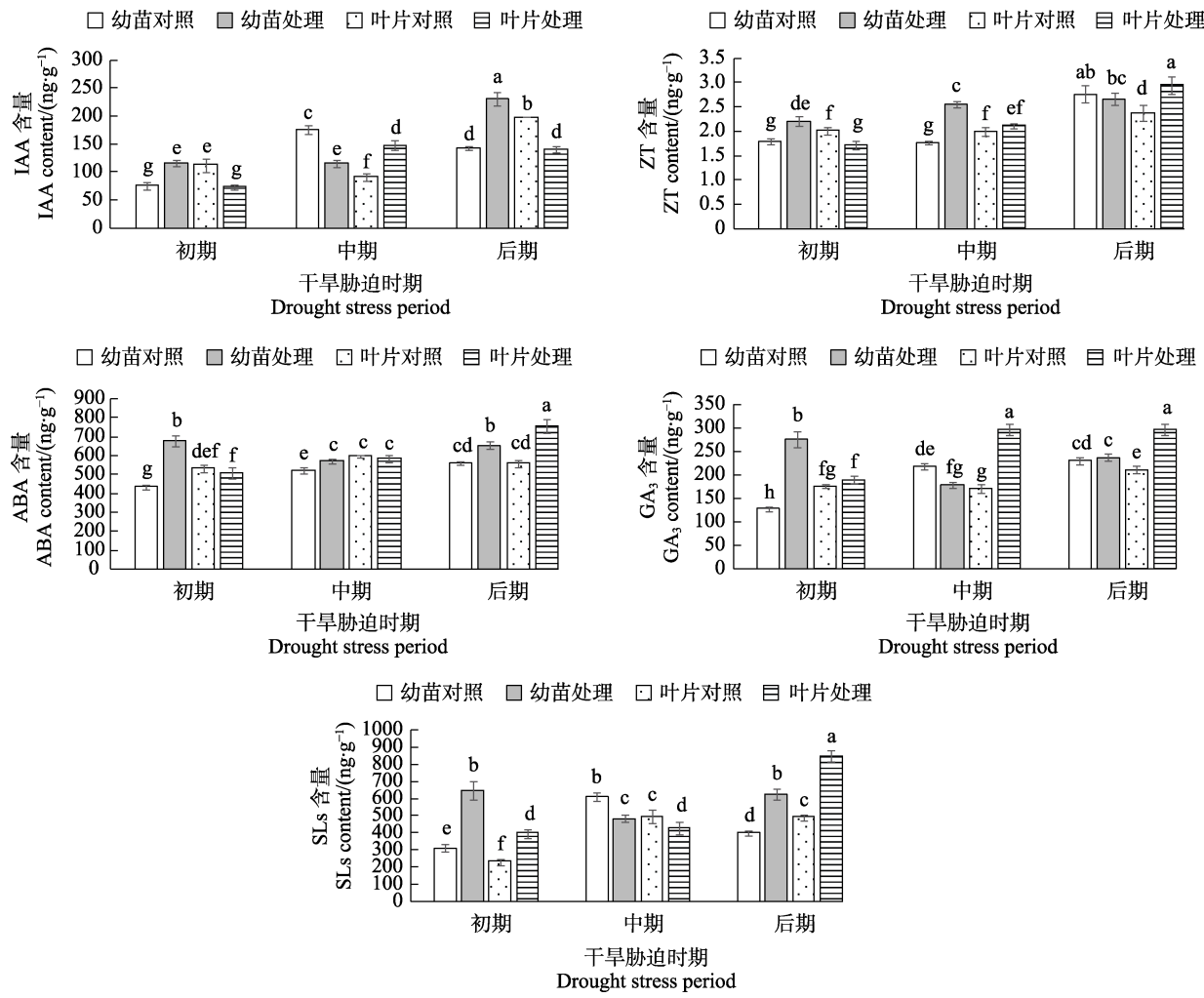
随着干旱胁迫的持续,甘蔗分蘖幼苗处理组的 SLs 含量先降低后增加,在干旱胁迫初、后期显著高于对照;叶片处理组的 SLs 含量逐渐增加,在干旱胁迫后期显著高于对照。这说明干旱胁迫

增加了甘蔗叶片中的 SLs 含量。

综上所述,干旱胁迫能显著提高甘蔗分蘖芽和叶片的 ABA 含量;甘蔗分蘖幼苗处理组的 IAA 和 ZT 含量随着干旱胁迫的持续而逐渐增加,在干旱后期达到最大值;GA₃ 和 SLs 含量则下降,在干旱胁迫初期达到最大值。甘蔗叶片处理组的 ZT、GA₃ 和 SLs 含量随着干旱胁迫的持续逐渐增加,在干旱胁迫后期显著高于对照;IAA 含量先增加后下降。可见,干旱胁迫对甘蔗分蘖幼苗和叶片中的各种内源激素的影响有所不同。

2.4 干旱胁迫下甘蔗分蘖幼苗及叶片各指标间的相关性分析

干旱胁迫下甘蔗分蘖幼苗和叶片处理组各指标的相关性,如表 1 所示,干旱胁迫下甘蔗分蘖幼苗各指标间呈显著相关的有 3 对,呈极显著相关的



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 3 干旱胁迫对甘蔗分蘖幼苗及叶片内源激素的影响

Fig. 3 Effects of drought stress on endogenous hormones in sugarcane tiller shoots and leaves

有 17 对，且均是正相关关系；呈显著相关关系的有 ZT 含量与淀粉含量、Pro 含量、SOD 活性之间，呈极显著相关的主要在 SOD 活性、SP 含量、淀粉含量、Pro 含量、蔗糖含量和 IAA 含量之间，如蔗糖含量与 SOD 活性、SP 含量、淀粉含量、Pro 含量、IAA 含量、ZT 含量均呈极显著正相关关系。如表 2 所示，干旱胁迫下甘蔗叶片各指标间呈显著相关的有 7 对，正相关 6 对，负相关 1 对；呈极显著相关的有 16 对，正相关 15 对，负相关 1 对。呈负相关的是 SP 含量和 SLs 含量 (-0.818^{**})，SP 含量和 ZT 含量 (-0.705^{*})。呈极显著正相关主要在 SOD、POD、Pro、淀粉、蔗糖、IAA、ZT、ABA 和 SLs 之间，如 SOD 活性和 Pro 含量呈极显著正相关关系，POD 活性与蔗糖含量、IAA 含量呈极显著正相关关系。

由此可见，干旱胁迫下甘蔗分蘖幼苗显著相关的生理指标间均呈正相关关系，叶片显著相关的生理指标间除 SP 含量与 SLs 含量、ZT 含量呈负相关关系外，其他生理指标间也均呈正相关关系；蔗糖含量、淀粉含量、Pro 含量、IAA 含量和 SOD 活性与其他指标呈显著或极显著相关关系较多，而 MDA 含量在分蘖幼苗或叶片中与其他指标均无显著性相关关系。

2.5 甘蔗分蘖幼苗和叶片的抗旱性评价

为了能够比较全面地反映甘蔗分蘖幼苗和叶片的抗旱性，本研究采用模糊数学中隶属函数法，选用干旱胁迫后期与甘蔗抗旱性关系密切的 SOD 活性、POD 活性、MDA 含量、SP 含量、淀粉含量、Pro 含量和蔗糖含量这 7 个生理指标，对甘蔗分蘖幼苗和叶片抗旱性进行综合评价。结

表 1 干旱胁迫下甘蔗分蘖幼苗各指标之间的相关系数

Tab. 1 Correlation coefficients between indexes in sugarcane tiller shoots under drought stress

指标 Index	SOD 活性 SOD activity	POD 活性 POD activity	MDA 含量 MDA content	SP 含量 SP content	淀粉 含量 Starch content	Pro 含量 Pro content	蔗糖 含量 Sucrose content	IAA 含量 IAA content	ZT 含量 ZT content	ABA 含量 ABA content	SLs 含量 SLs content
SOD 活性	1										
POD 活性	0.498	1									
MDA 含量	0.339	0.554	1								
SP 含量	0.874**	0.370	0.545	1							
淀粉含量	0.858**	0.523	0.483	0.909**	1						
Pro 含量	0.884**	0.380	0.314	0.914**	0.958**	1					
蔗糖含量	0.915**	0.434	0.139	0.846**	0.901**	0.944**	1				
IAA 含量	0.936**	0.406	0.341	0.866**	0.899**	0.902**	0.890**	1			
ZT 含量	0.672*	0.220	-0.151	0.620	0.698*	0.760*	0.873**	0.594	1		
ABA 含量	-0.020	-0.374	0.006	0.028	0.075	0.106	-0.071	0.276	-0.322	1	
SLs 含量	0.063	-0.290	0.180	0.137	0.208	0.191	-0.016	0.349	-0.265	0.963**	1

注：*表示显著相关（ $P<0.05$ ），**表示极显著相关（ $P<0.01$ ）。

Note: * indicates significant correlation ($P<0.05$), ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

表 2 干旱胁迫下甘蔗叶片各指标的相关性分析

Tab. 2 Correlation coefficients between indexes in sugarcane leaves under drought stress

指标 Index	SOD 活性 SOD activity	POD 活性 POD activity	MDA 含量 MDA content	Pro 含量 Pro con- tent	SP 含量 SP content	淀粉含量 Starch content	蔗糖含量 Sucrose content	IAA 含量 IAA content	ZT 含量 ZT content	ABA 含量 ABA content	SLs 含量 SLs content
SOD 活性	1										
POD 活性	0.547	1									
MDA 含量	0.133	0.091	1								
Pro 含量	0.804**	0.436	0.152	1							
SP 含量	-0.141	0.243	-0.475	-0.357	1						
淀粉含量	0.704*	0.720*	0.224	0.844**	-0.332	1					
蔗糖含量	0.651	0.883**	-0.077	0.699*	0.023	0.842**	1				
IAA 含量	0.796*	0.809**	-0.046	0.846**	-0.035	0.913**	0.947**	1			
ZT 含量	0.652	0.262	0.354	0.887**	-0.705*	0.823**	0.513	0.653	1		
ABA 含量	0.634	0.251	0.406	0.894**	-0.655	0.829**	0.477	0.647	0.977**	1	
SLs 含量	0.460	0.107	0.538	0.767*	-0.818**	0.710*	0.328	0.464	0.939**	0.956**	1

注：*表示显著相关（ $P<0.05$ ），**表示极显著相关（ $P<0.01$ ）。

Note: * indicates significant correlation ($P<0.05$), ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

果如表 3、表 4 所示，甘蔗分蘖幼苗各指标的综合抗旱系数（3.89）高于甘蔗叶片（2.06），分蘖幼苗的平均隶属度（0.857）也高于甘蔗叶片（0.143），表明甘蔗分蘖幼苗的抗旱能力强于叶片。

3 讨论

干旱胁迫下植物体内会产生活性氧 ROS，并且随着胁迫程度的增加而加快产生，对细胞造成伤害^[25]。为了防止这些物质对光合作用器官造成

永久性损害，植物进化出了高效而复杂的保护机制，其中酶是抗氧化系统中的重要角色，参与 ROS 的调节^[26]。研究表明干旱胁迫下甘蔗叶片抗氧化保护酶系统中 POD、CAT 和 SOD 等酶的活力均不同程度增加^[27-28]，在所有水平的水分胁迫下，耐旱型甘蔗的 SOD 活性均高于敏感型，说明耐旱甘蔗品种清除 ROS 的能力优于敏感品种得益于 SOD 活性的升高^[29]。在本研究中，随着干旱胁迫的持续，甘蔗分蘖幼苗及叶片处理组的 SOD 活性

表 3 甘蔗分蘖幼苗和叶片各指标的抗旱系数

Tab. 3 Drought resistance coefficients for indicators in tiller shoots and leaves of sugarcane

部位 Part	SOD 活性 SOD activity	POD 活性 POD activity	MDA 含量 MDA content	Pro 含量 Pro content	蔗糖 含量 Sucrose content	SP 含量 SP con- tent	淀粉含 量 Starch content	总和 Total	综合抗旱系数 Comprehensive drought resistance coefficient
分蘖幼苗	3.43	1.39	2.51	13.17	3.07	1.65	2.05	27.26	3.89
叶片	1.37	1.12	1.55	4.91	1.55	1.19	2.39	14.10	2.06

表 4 甘蔗分蘖幼苗和叶片各指标的隶属函数值

Tab. 4 Subordinate function values for indicators in tiller shoots and leaves of sugarcane

部位 Part	SOD 活性 SOD activity	POD 活性 POD activity	MDA 含量 MDA con- tent	Pro 含量 Pro con- tent	蔗糖含量 Sucrose content	SP 含量 SP content	淀粉含量 Starch content	总和 Total	平均隶属度 Average of SF
分蘖幼苗	1	1	1	1	1	1	0	6	0.857
叶片	0	0	0	0	0	0	1	1	0.143

逐渐增加,甘蔗分蘖幼苗处理组的 SOD 活性在干旱胁迫后期显著高于对照,甘蔗叶片处理组的 SOD 活性与对照均无显著差异;甘蔗分蘖幼苗处理组的 POD 活性随着胁迫时间的增加逐渐增加,但与对照无显著差异;甘蔗叶片处理组的 POD 活性先增加后下降,在干旱胁迫中期显著高于对照。可见,干旱胁迫时甘蔗能通过提高分蘖幼苗和叶片的 SOD 和 POD 活性来降低胁迫产生过量的 ROS 对自身的损伤,这与前人的研究结果相符;同时甘蔗分蘖幼苗和叶片 SOD 和 POD 活性对于干旱胁迫的响应存在差异。

在逆境条件下,如高温、盐碱、干旱以及强光等,植物体内的自由基常会导致代谢失调,往往发生膜脂过氧化作用。MDA 是膜脂过氧化的产物,可以损伤生物膜结构,主要是细胞质膜,MDA 含量的多少可作为脂质过氧化的指标,用于表示细胞膜过氧化程度和植物对于干旱胁迫下反应的强弱^[30]。本研究中,甘蔗分蘖幼苗处理组 MDA 的含量在干旱胁迫初、中、后期均显著高于对照;甘蔗叶片处理组的 MDA 含量在干旱胁迫过程中也呈高于对照的趋势,但未达到统计学显著差异。另外,甘蔗分蘖幼苗和叶片处理组的 MDA 含量在干旱胁迫初、中、后期一直维持在相似的水平,无显著差异,说明在干旱胁迫过程中甘蔗细胞膜过氧化程度没有持续增加,这可能和甘蔗具有较好的抗旱性有关。

渗透调节指植物体内主动积累各种有机或无机物质来提高细胞液浓度,降低渗透势,提高细胞吸水或保水能力,是作物应对干旱胁迫的重要

响应机制^[31]。植物有两大类渗透调节物质参与调节:一是有机溶质,是由细胞合成的小分子化合物,主要包括甘露醇、脯氨酸、甘氨酸、甜菜碱、可溶性糖等;二是 K⁺和其他无机离子,由外界进入植物细胞,主要作用是调节液泡的渗透势^[32]。脯氨酸积累已被证明是甘蔗抵御干旱胁迫保护性措施之一,可以减轻氧化作用对膜透性的破坏^[33]。逆境下 SP 含量积累可以防止生物膜遭到破坏,进一步提高植物自身的抗旱能力^[34]。LIU 等^[35]研究表明,费菜干旱胁迫后期 SP 和可溶性糖含量均增加。本研究结果表明干旱胁迫提高了甘蔗分蘖幼苗和叶片 Pro、SP、淀粉、蔗糖等渗透调节物质的含量,特别是在甘蔗分蘖幼苗中,处理组与对照组达到了显著差异,这与前人的研究结果相符。结合对 MDA 的研究结果,即处理组 MDA 含量在干旱胁迫初、中、后期无显著差异,说明在干旱胁迫下甘蔗可能通过提高渗透调节物质含量调控 MDA 含量,减轻细胞膜系统过氧化对细胞的损伤,提高甘蔗的抗旱性。与甘蔗叶片相比,干旱胁迫更能显著地提高甘蔗分蘖幼苗的 Pro、SP 和蔗糖的含量,表明在干旱胁迫下甘蔗分蘖幼苗能够持续产生更多的渗透调节物质缓解干旱对甘蔗的损伤,较甘蔗叶片有更高的抗旱性。

植物内源激素在分蘖的发生与衰亡过程中起着关键的作用,对作物分蘖数量及最后产量形成都有显著影响。近年来,关于激素调控植物分蘖的研究已经取得重大进展,其中 IAA、CK 和 SL 是作用明确和清晰的 3 种激素,其中 IAA 和 SL 抑制分蘖幼苗生长,CK 则促进分蘖幼苗生长^[36]。

在植物分蘖过程中,环境因子可改变植物内源激素含量,促使其达到动态平衡,进而激发相关基因表达来影响分蘖^[37-38]。ABA 是植物细胞适应干旱的关键因子,在植物抗逆反应中起着重要作用。有研究证实在甘蔗^[39]、玉米^[40]、小麦^[41]等作物中,干旱胁迫时植物体内 ABA 含量会明显增加,外施 ABA 能有效促进内源 ABA 的合成,提高植物激素的代谢活动。在本研究中,甘蔗分蘖幼苗处理组的 ABA 含量在干旱胁迫不同时期均显著高于对照,甘蔗叶片处理组的 ABA 含量在干旱后期显著高于对照,说明干旱胁迫能显著提高甘蔗分蘖幼苗和叶片中的 ABA 含量,这与前人的研究结果相符。另外在干旱胁迫下甘蔗分蘖幼苗处理组的 IAA 含量和 SLs 含量均是在初、后期显著高于对照,在中期显著低于对照,这可能跟 IAA 和 SLs 抑制分蘖苗的生长有关,干旱胁迫可能通过改变植物内源激素来调控分蘖幼苗的生长。在本研究中甘蔗分蘖幼苗对照组的 ZT 含量逐渐增加,可能是由于 ZT 是促进分蘖幼苗生长的激素,对照组甘蔗分蘖幼苗一直正常生长。干旱胁迫下甘蔗叶片处理组的 ZT、GA₃ 和 SLs 含量均逐渐增加,在干旱胁迫后期显著高于对照,可见干旱胁迫对甘蔗分蘖幼苗和叶片中内源激素含量的影响有所不同。甘蔗的分蘖和抗逆性都是由多基因控制的数量性状,激素调控甘蔗分蘖幼苗响应干旱胁迫是多种内源激素多途径共同协作的结果,需要进一步系统研究。

相关分析是指对 2 个或 2 个以上具有相关性的变量进行分析,以衡量 2 个变量之间的相关程度^[42]。本研究对干旱胁迫下甘蔗分蘖幼苗和叶片处理组各指标进行相关性分析发现,干旱胁迫下分蘖幼苗和叶片显著相关的生理指标大多数呈正相关关系,蔗糖含量、淀粉含量、Pro 含量、IAA 含量和 SOD 活性与其他指标呈显著或极显著相关关系较多,说明干旱胁迫对甘蔗分蘖幼苗和叶片内生理指标的影响较为一致,蔗糖含量、淀粉含量、Pro 含量、IAA 含量和 SOD 活性可能在抵御干旱胁迫中发挥了重要作用。干旱对甘蔗的影响是复杂的,不同部位中的形态变化和生理变化也有所不同,为了更好地分析甘蔗的抗旱性,本研究选取多个生理指标,用隶属函数法对甘蔗分蘖幼苗和叶片的抗旱性进行综合评价,发现甘蔗分蘖幼苗各指标的综合抗旱系数和平均隶属度均

高于甘蔗叶片,说明甘蔗分蘖幼苗的抗旱能力强于叶片。

综上所述,本研究测定了分蘖期不同干旱胁迫时期甘蔗分蘖幼苗和叶片抗氧化酶活性、渗透调节物质含量及内源激素含量的变化,同时开展干旱胁迫下甘蔗分蘖幼苗和叶片生理指标的相关性研究,结果表明干旱胁迫提高了甘蔗分蘖幼苗和叶片的 POD 活性、SOD 活性、Pro 含量、SP 含量、淀粉含量、蔗糖含量和 ABA 含量,特别是在甘蔗分蘖幼苗中,处理组与对照组达到了显著差异,而 MDA 含量在干旱胁迫过程中一直维持在相似的水平;干旱胁迫对甘蔗分蘖幼苗和叶片生理指标的影响有所不同,相比于叶片,干旱胁迫更能显著提高甘蔗分蘖幼苗中的 SOD 活性及 Pro、SP 和蔗糖含量。相关性分析结果表明干旱胁迫下分蘖幼苗和叶片显著相关的生理指标大多数呈正相关关系,用隶属函数法对甘蔗分蘖幼苗和叶片的抗旱性进行综合评价,从各指标的综合抗旱系数和平均隶属度看,甘蔗分蘖幼苗的抗旱能力强于甘蔗叶片。

参考文献

- [1] BASNAYAKE J, JACKSON P, BAMBER N I, LAKSHMANAN P. Sugarcane for water-limited environments. genetic variation in cane yield and sugar content in response to water stress[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2012, 63(16): 6023-6033.
- [2] 孔祥彬, 白星焕, 王同芹, 张世和, 邱玉宾. 玉米抗(耐)旱性的分子遗传研究进展[J]. *玉米科学*, 2009, 17(5): 58-60. KONG X B, BAI X H, WANG T Q, ZHANG S H, QIU Y B. Advances in molecule genetic research on drought resistance of maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2009, 17(5): 58-60. (in Chinese)
- [3] DALBIANCO M, CARNEIRO M S, HOTTA C T, CHAPOLA R G, HOFFMANN H P, GARCIA A A, SOUZA G M. Sugarcane improvement: how far can we go?[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2012, 23(2): 265-270.
- [4] 徐荣, 李富生, 何丽莲. 甘蔗对干旱胁迫的响应及抗旱基因遗传转化研究进展[J]. *中国糖料*, 2018, 40(5): 66-69, 72. XU R, LI F S, HE L L. Research progress on response to drought stress in sugarcane and genetic transformation of drought resistance genes[J]. *Sugar Crops of China*, 2018, 40(5): 66-69, 72. (in Chinese)
- [5] GENTILE A, DIAS L I, MATTO R S, FERREIRA T H, MENOSSI M. MicroRNAs and drought responses in sugarcane[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2015, 6: 58.

- [6] DO T T, 李健, 张凤娟, 邢永秀, 杨丽涛, 李杨瑞, NGUYEN T H. 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[J]. 热带作物学报, 2018, 39(5): 858-866.
- DO T T, LI J, ZHANG F J, XING Y X, YANG L T, LI Y R, NGUYEN T H. Changes of antioxidant enzyme activities and contents of osmotic regulation substances in leaves of different sugarcane varieties under drought stress[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2018, 39(5): 858-866. (in Chinese)
- [7] 李鸿博, 蔡伟俊, 谢雨彤, 邓权清, 陈健文, 沈万宽. 甘蔗新品系对干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(6): 51-58.
- LI H B, CAI W J, XIE Y T, DENG Q Q, CHEN J W, SHEN W K. Physiological responses of new sugarcane lines to drought stress and evaluation of their drought resistances[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(6): 51-58. (in Chinese)
- [8] GILL S S, TUTEJA N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants[J]. Plant Physiol Biochem, 2010, 48(12): 909-930.
- [9] 李晓君, 罗正清, 陆昌强, 唐吉昌, 周中, 曹琦. 20个甘蔗品种系的抗旱性比较[J]. 热带作物学报, 2020, 41(9): 2482-2491.
- LI X J, LUO Z Q, LU C Q, TANG J C, ZHOU Z, CAO Q. Evaluation of drought resistance on twenty sugarcane varieties (strains)[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2020, 41(9): 2482-2491. (in Chinese)
- [10] OZTURK M, TURKYILMAZ U B, GARCIA-CAPARROS P, KHURSHEED A, GUL A, HASANUZZAMAN M. Osmoregulation and its actions during the drought stress in plants[J]. Plant Physiology, 2021, 172(2): 1321-1335.
- [11] DONG S K, JIANG Y G, DONG Y C, WANG L B, WANG A J, MA Z Z, YAN C, MA C M, LIU L J. A study on soybean responses to drought stress and rehydration[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2019, 26(8): 2006-2017.
- [12] ZHANG Y B, YANG S L, DAO J M, DENG J, SHAHZAD A N, FAN X, LI R D, QUAN Y J, BUKHARI S A H, ZENG Z H. Drought-induced alterations in photosynthetic, ultrastructural and biochemical traits of contrasting sugarcane genotypes[J]. Public Library of Science One, 2020, 15(7): e0235845.
- [13] 杨平飞. 分根区交替灌溉对甘蔗生长和生理生化特性影响的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2014.
- YANG P F. Research on the effects of alternate partial root-zone irrigation on the growth and physiological and biochemical characteristics of sugarcane[D]. Nanning: Guangxi University, 2014. (in Chinese)
- [14] 吴凯朝, 黄诚梅, 邓智年, 曹辉庆, 魏源文, 徐林, 李杨瑞, 杨丽涛. 干旱后复水对甘蔗伸长期生理生化特性的影响[J]. 南方农业学报, 2015, 46(7): 1166-1172.
- WU K C, HUANG C M, DENG Z N, CAO H Q, WEI Y W, XU L, LI Y R, YANG L T. Effects of drought stress and re-watering on physiological biochemical characteristics in sugarcane at elongation stage[J]. Journal of Southern Agriculture, 2015, 46(7): 1166-1172. (in Chinese)
- [15] 谭秦亮, 程琴, 潘成列, 朱鹏锦, 李佳慧, 宋奇琦, 农泽梅, 周全光, 庞新华, 吕平. 干旱胁迫对甘蔗新品种‘桂热2号’生理指标的影响[J]. 作物杂志, 2022(3): 161-167.
- TAN Q L, CHENG Q, PAN C L, ZHU P J, LI J H, SONG Q Q, NONG Z M, ZHOU Q G, PANG X H, LYU P. Effects of drought stress on physiological indexes of new sugarcane variety Guire 2[J]. Crops, 2022(3): 161-167. (in Chinese)
- [16] DUAN W, WANG Q, ZHANG H, XIE B, LI A, HOU F, DONG S, WANG B, QIN Z, ZHANG L. Comparative study on carbon-nitrogen metabolism and endogenous hormone contents in normal and overgrown sweetpotato[J]. South African Journal of Botany, 2018, 115: 199-207.
- [17] 范业赓, 丘立杭, 陈荣发, 周慧文, 李燕娇, 闫海锋, 罗含敏, 周忠凤, 邓宇驰, 吴建明. 不同分蘖特性甘蔗品种生产力差异和相关性研究[J]. 中国农业科技导报, 2023, 25(12): 35-43.
- FAN Y G, QIU L H, CHEN R F, ZHOU H W, LI Y J, YAN H F, LUO H M, ZHOU Z F, DENG Y C, WU J M. Study on productivity differences and correlation of sugarcane varieties with different tillering characteristics[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2023, 25(12): 35-43. (in Chinese)
- [18] 李佳慧, 程琴, 欧克纬, 谭秦亮, 庞新华, 周全光, 吕平, 宋奇琦, 唐毓玮, 朱鹏锦. 不同蔗区甘蔗品种(系)分蘖性状比较及其对产量和产量构成因子的影响[J]. 作物杂志, 2021(5): 79-86.
- LI J H, CHENG Q, OU K W, TAN Q L, PANG X H, ZHOU Q G, LYU P, SONG Q Q, TANG Y W, ZHU P J. Comparison of tiller characters of sugarcane varieties (lines) in different sugarcane regions and their effects on yield and yield components[J]. Crops, 2021(5): 79-86. (in Chinese)
- [19] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- LI H S. Principles and techniques of plant physiology and biochemistry experiments[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. (in Chinese)
- [20] 刘萍, 李明军. 植物生理学试验[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- LIU P, LI M J. Plant physiology experiment[M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)

- [21] 华东师范大学生物系植物生理教研组. 植物生理实验指导[M]. 上海: 人民教育出版社, 1980.
Plant Physiology Teaching Group, Department of Biology, East China Normal University. Guidelines for plant physiology experiments[M]. Shanghai: People's Education Press, 1980. (in Chinese)
- [22] CHEN Y L, LI R K, GE J F, LIU J G, WANG W B, XU M F, ZHANG R, HUSSAIN S, WEI H H, DAI Q G. Exogenous melatonin confers enhanced salinity tolerance in rice by blocking the ROS burst and improving Na^+/K^+ homeostasis[J]. Environmental and Experimental Botany, 2021, 189: 104530.
- [23] 黄杏, 陈明辉, 杨丽涛, 张保青, 李杨瑞. 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.
HUANG X, CHEN M H, YANG L T, ZHANG B Q, LI Y R. Effects of exogenous abscisic acid on cell membrane and endogenous hormones contents in leaves of sugarcane seedling under cold stress[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2013, 32(4): 6-11. (in Chinese)
- [24] 郑清岭, 杨冬艳, 刘建文, 张凤兰, 杨忠仁, 郝丽珍. 干旱胁迫对沙芥和斧形沙芥幼苗生长及抗氧化系统的影响[J]. 植物生理学报, 2017, 53(4): 600-608.
ZHENG Q L, YANG D Y, LIU J W, ZHANG F L, YANG Z R, HAO L Z. Effects of drought stress on growth and antioxidant system of *Pugionium cornutum* and *P. dolabratum* seedlings[J]. Plant Physiology Journal, 2017, 53(4): 600-608. (in Chinese)
- [25] MOLLER I M, JENSEN P E, HANSSON A. Oxidative modifications to cellular components in plants[J]. Annual Review of Plant Biology, 2007, 58: 459-481.
- [26] DAS K, ROYCH O U, DHURY A. Reactive oxygen species (ROS) and response of antioxidants as ROS scavengers during environmental stress in plants[J]. Frontiers in Environmental Science, 2014, 2: 53.
- [27] SHINOZAKI, YAMAGUCHI S K, SEKI M. Regulatory network of gene expression in the drought and cold stress responses[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2003, 6(5): 410-417.
- [28] 吴凯朝. 干旱和复水条件下甘蔗特异基因诱导表达及其克隆的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2013.
WU K C. Cloning and expression of specific genes induced under drought and re-watering in sugarcane (*Saccharum* spp. L.)(D). Nanning: Guangxi University, 2013. (in Chinese)
- [29] 陆珍, 杨丽涛, 邢永秀, 李杨瑞. 甘蔗响应干旱胁迫研究进展[J]. 分子植物育种, 2023, 21(6): 2051-2060.
LU Z, YANG L T, XING Y X, LI Y R. Research advances on sugarcane response to drought stress[J]. Molecular Plant Breeding, 2023, 21(6): 2051-2060. (in Chinese)
- [30] 李健, 农艳丰, 陆艾樱. 甜菜碱对甘蔗抗旱生理的调控效应[J]. 农业与技术, 2022, 42(15): 31-34.
LI J, NONG Y F, LU A Y. Regulation effect of betaine on drought resistance physiology of sugarcane[J]. Agriculture and Technology, 2022, 42(15): 31-34. (in Chinese)
- [31] 蔡庆生. 植物生理学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2011.
CAI Q S. Plant physiology[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2011. (in Chinese)
- [32] 毕黎明, 刘伟丽, 李杨瑞. 甘蔗抗旱性研究进展与展望[J]. 广西农业科学, 2006(5): 522-527.
BI L M, LIU W L, LI Y R. Advances and prospects in study on sugarcane drought resistance[J]. Journal of Southern Agriculture, 2006(5): 522-527. (in Chinese)
- [33] 杨善, 周鸿凯, 谢平, 陈翰文, 秦海龙, 叶昌辉. 保水措施对旱坡地甘蔗产量与品质的影响[J]. 热带作物学报, 2016, 37(4): 647-652.
YANG S, ZHOU H K, XIE P, CHEN H W, QIN H L, YE C H. Effects of water saving measures on yield and quality of sugarcane in dry sloping land[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2016, 37(4): 647-652. (in Chinese)
- [34] 高昆, 石义妃. 干旱胁迫对粉葛幼苗生长及生理特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(8): 153-157.
GAO K, SHI Y F. Effects of drought stress on growth and physiological characteristics of *Pueraria lobata* seedlings[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(8): 153-157. (in Chinese)
- [35] LIU Y, HE Z, XIE Y, SU L, ZHANG R, WANG H, LI C, LONG S. Drought resistance mechanisms of *Phedimus aizoon* L.[J]. Scientific reports, 2021, 11(1): 13600.
- [36] XIA X J, DONG H, YIN Y L, SONG X W, GU X H, SANG K Q, ZHOU J, SHI K, ZHOU Y H, FOYER C H, YU J Q. Brassinosteroid signaling integrates multiple pathways to release apical dominance in tomato[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2021, 118(11): e2004384118.
- [37] SEALE M, BENNETT T, LEYSER O. BRC1 expression regulates bud activation potential but is not necessary or sufficient for bud growth inhibition in *Arabidopsis*[J]. Development, 2017, 144(9): 1661-1673.
- [38] GONZALEZ G E, PAJORO A, FRANCO-ZORRILLA J M, TARANCON C, HIMMINK R G, CUBAS P. Abscisic acid signaling is controlled by a BRANCHED1/HD-ZIP I cascade in *Arabidopsis* axillary buds[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2017, 114(2): 245-254.
- [39] 李长宁, 谢金兰, 王维赞, 梁强, 李毅杰, 董文斌, 刘晓燕, 杨丽涛, 李杨瑞. 水分胁迫下甘蔗差异表达基因筛选及激素相关基因分析[J]. 作物学报, 2015, 41(7): 1127-1135.

- LI C N, XIE J L, WANG W Z, LIANG Q, LI Y J, DONG W B, LIU X Y, YANG L T, LI Y R. Screening of differentially expressed genes and analysis of plant hormones related genes under water stress in sugarcane[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(7): 1127-1135. (in Chinese)
- [40] LIU J, JIANG M Y, ZHOU Y F, LIU Y L. Production of polyamines is enhanced by endogenous abscisic acid in maize seedlings subjected to salt stress[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2005, 47: 1326-1334.
- [41] IQBAL M, ASHRAF M, REHMAN S U, RHA E S. Does polyamine seed pretreatment modulate growth and levels of some plant growth regulators in hexaploid wheat (*Triticum aestivum* L.) plants under salt stress?[J]. *Botanical Studies*, 2006, 47(3): 239-250.
- [42] 顾永丽, 胡勇, 周建云, 黄宁, 王艺焜, 艾复清. 烟叶成熟过程主要生理生化指标鉴定及相关性分析[J]. *分子植物育种*, 2021, 19(15): 5137-5142.
- GU Y L, HU Y, ZHOU J Y, HUANG N, WANG Y K, AI F Q. Identification and correlation analysis of primary physiological and biochemical indexes during tobacco leaf maturation[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2021, 19(15): 5137-5142. (in Chinese)