

斑茅割手密复合体杂交后代抗旱生理特性及抗旱种质筛选

周 珊, 黄玉新, 张革民, 段维兴, 杨翠芳, 周忠凤, 高轶静, 李傲梅,
李杨瑞, 张保青*

广西壮族自治区农业科学院甘蔗研究所/广西甘蔗遗传改良重点实验室/农业农村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: 探究干旱胁迫对苗期斑茅割手密复合体杂交后代生理特性的影响, 筛选与鉴定不同抗旱性的甘蔗新种质资源, 为甘蔗抗旱新品种选育及利用提供理论依据。以 13 份斑茅割手密复合体杂交后代和 ROC22 为试验材料, 通过桶栽试验, 在苗期进行轻度干旱胁迫、重度干旱胁迫和正常供水 (CK) 处理, 测定其苗期叶片丙二醛含量、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、脯氨酸含量及过氧化物酶和超氧化物歧化酶的活性。运用抗旱系数、隶属函数值、抗旱性综合评价值 (D) 对不同斑茅割手密复合体杂交后代进行抗旱性综合评价, 筛选和鉴定甘蔗抗旱种质。结果表明: 不同干旱胁迫处理后, 斑茅割手密复合体杂交后代苗期叶片的可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、脯氨酸含量、丙二醛含量、过氧化物酶活性和超氧化物歧化酶活性均有不同程度的增加。其中, 在重度干旱胁迫下, AS08-2-28 的各生理指标值均显著高于对照。根据抗旱性综合评价结果, 筛选出 7 个苗期抗旱性高于对照品种 ROC22 的杂交后代, 其抗旱性强弱排序为: AS08-2-28>AS11-1-101>AS11-4-44>AS11-75-1>AS12-A6-21>AS12-A6-5>AS12-176-5。本研究评价了斑茅割手密复合体杂交后代苗期的抗旱性, 筛选出 7 个抗旱性较强的甘蔗种质资源, 为后续抗旱相关基因挖掘提供材料基础, 为充分利用斑茅割手密复合体杂交后代培育抗旱新品种提供科学依据与实验指导。

关键词: 甘蔗; 斑茅割手密复合体; 抗旱性; 生理指标; 综合评价

中图分类号: S566.1 文献标志码: A

Screening of Drought-tolerant Germplasm of Intergeneric Hybrid *Erianthus arundinaceus*×*Saccharum spontaneum* L. Offspring Based on Dynamic Responses of Physiological Indicators

ZHOU Shan, HUANG Yuxin, ZHANG Gemin, DUAN Weixing, YANG Cuifang, ZHOU Zhongfeng, GAO Yijing, LI Aomei, LI Yangrui, ZHANG Baoqing*

Sugarcane Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences / Guangxi Key Laboratory of Sugarcane Genetic Improvement / Key Laboratory of Sugarcane Biotechnology and Genetic Improvement (Guangxi), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanning, Guangxi 530007, China

Abstract: The study aimed to investigate the physiological responses of intergeneric hybrid *Erianthus arundinaceus*×*Saccharum spontaneum* L offspring at the seedling stage under drought stress, to identify novel sugarcane germplasm resources with better drought stress tolerance. The results would provide a theoretical basis for breeding and utilizing drought-tolerant new sugarcane varieties. Thirteen hybrid progenies and the sugarcane variety ROC22 were used as the experimental materials in a barrel experiment. The contents of malondialdehyde (MDA), soluble sugars (SS), soluble protein (SP), proline (PRO), and the activities of peroxidase (POD) and superoxide dismutase (SOD), were measured in sugarcane seedling leaves under mild and severe drought stress, and control (normal watering). A comprehensive

收稿日期 2025-08-20; 接受日期 2025-10-09

基金项目 广西科技计划项目 (农业农村领域) (桂科农 AB24153007); 广西自然科学基金项目 (No. 2024GXNSFBA010435, No. 2023GXNSFAA026354)。

作者简介 周 珊 (1985—), 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 甘蔗种质资源创新及利用。*通信作者 (Corresponding author): 张保青 (ZHANG Baoqing), E-mail: zbqxsau@126.com。

evaluation of drought tolerance in thirteen progenies and ROC22 was conducted based on drought resistance coefficients, membership function values, and the comprehensive drought tolerance evaluation index (D value), to screen and identify drought-tolerant sugarcane germplasm resources. Under different drought treatments, the content of SS, SP, PRO, MDA, and the activities of SOD and POD were elevated in the seedling leaves of hybrid progenies. Notably, under severe drought stress, the physiological indicators of AS08-2-28 were significantly higher than those of ROC22. Based on the D value, seven progenies exhibiting greater drought tolerance than ROC22 at the seedling stage were identified, ranked as follows: AS08-2-28>AS11-1-101>AS11-4-44>AS11-75-1>AS12-A6-21>AS12-A6-5>AS12-176-5. This study evaluated the drought tolerance of the hybrid progenies at the seedling stage and successfully screened seven sugarcane germplasm resources with strong drought resistance. The findings would provide a foundational basis for the future mining of drought-related genes and offer scientific guidance and experimental support for the effective utilization of intergeneric hybrid complex offspring in breeding new sugarcane varieties with enhanced drought tolerance.

Keywords: sugarcane; intergeneric hybrid *Erianthus arundinaceus*×*Saccharum spontaneum* L.; drought resistance; physiological indicators; comprehensive evaluation

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2026.01.008

甘蔗作为重要的糖料作物和能源作物, 其生产稳定性直接关系到国家食糖安全和生物质能源的发展。在全球气候变化的大背景下, 极端气候事件频发, 干旱已成为甘蔗生长过程中所面临的主要非生物胁迫之一, 严重影响了甘蔗的生长和产量^[1]。因甘蔗育种亲本遗传基础狭窄且无性繁殖, 致使育种群体遗传变异严重不足, 制约着甘蔗抗旱育种的发展。因此, 从甘蔗野生种质资源中发掘抗旱资源, 开展甘蔗野生种质资源抗旱性生理指标评价研究, 对于揭示甘蔗野生种质资源抗旱机理、选育抗旱性较强的甘蔗品种、优化栽培管理措施以及提高甘蔗产业应对干旱胁迫的能力具有重要的意义。

近年来, 国内外学者在植物抗旱性领域开展了广泛深入的研究, 并取得了显著进展。这些研究不仅揭示了植物在干旱胁迫下的生理响应, 还提出了一系列用于评价植物抗旱性的指标。研究表明, 斑茅、割手密等甘蔗野生种质资源受到干旱胁迫后, 其保护酶类和渗透调节物质含量会受损, 并破坏细胞膜透性等生理过程, 通过调控基因表达及蛋白质合成, 进而引发生理与代谢变化以响应干旱胁迫。许文花等^[2]、姚艳丽等^[3]、经艳芬等^[4]、边芯等^[5-6]、王天菊等^[7]、田春艳等^[8]通过对割手密形态、生理及产量性状的研究, 表明割手密普遍具有较强抗旱性, 且不同基因型割手密的抗旱性差异显著。研究表明, 主栽品种 ROC22 抗旱性较强, 目前对甘蔗种质资源的抗旱性评价主要集中于斑茅、斑茅后代以及蔗茅。例如, 常丹等^[9]在干旱胁迫下, 测定了 53 份斑茅材料的 6 个叶片生理指标, 采用相关分析与模糊隶

属函数法初步筛选出强抗旱和弱抗旱材料, 用于后续转录组分析。肖芙蓉等^[10]、黄忠兴等^[11]利用模糊隶属函数法评价了不同水分胁迫下斑茅及其杂交后代的多个生理指标, 结果表明抗旱性受多因素的影响, 不同的评价方法得出的抗旱性结果不同, 综合 2 种及以上评价方法可使结果更可靠。吴嘉云等^[12]在干旱胁迫条件下, 采用抗旱系数法和隶属函数法测定了 11 个斑茅杂交后代的 4 个叶片生理指标。结果表明斑茅杂交后代的抗旱性差异与杂交世代有关。张婷^[13]对甘蔗与蔗茅杂交后代的 7 个生理指标进行了抗旱性研究, 表明染色体数目越少的材料抗旱性越强。沈先岳等^[14]利用极点排序法对 12 份蔗茅杂交后代苗期与抗旱相关的 8 项生理生化指标进行了抗旱性综合评价, 说明蔗茅优质抗旱性状可以通过基因渗透方式传递给后代。

目前, 对斑茅割手密复合体杂交后代种质资源抗旱性评价研究较少。因此, 分析甘蔗与斑茅割手密复合体杂交后代在干旱胁迫下生理指标的变化及其与抗旱性的关系, 探讨不同胁迫时间对各生理指标的影响, 对筛选抗旱种质资源具有重要的参考价值。广西甘蔗种质资源圃保存有丰富的甘蔗种质资源, 但多数研究围绕其表型鉴定和图谱构建, 而针对其创新种质抗旱性生理研究鲜有报道。因此, 本研究以 13 份农艺性状优良的斑茅割手密复合体杂交后代为试验材料, 通过比较其在正常供水和干旱胁迫条件下渗透调节物质、抗氧化酶活性等生理指标的变化, 筛选出具有抗旱潜力的材料, 为后期筛选抗旱候选基因提供材料基础, 也为充分利用甘蔗创新种质培育和甘蔗抗

旱育种提供理论依据和指导。

1 材料与方法

1.1 材料

供试材料为斑茅割手密复合体杂交后代选育出来的高利用率的 13 个材料,分别是 AS12-A14-3、AS11-4-44、AS12-176-5、AS11-4-52、AS08-2-28、AS12-A11-4、AS12-A7-4、AS12-A6-5、AS11-75-1、AS12-81-13A、AS12-A6-21、AS12-A14-2、AS11-1-101。以新台糖 22 号 (ROC22) 作为对照 (CK)。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 试验于广西农业科学院甘蔗研究所育种温室中进行。将试验材料沙培育苗,将生长一致的材料移栽至桶中,每个材料 12 桶,每桶 3 株,待生长至 5~8 叶时进行处理,将每个材料的 12 桶均分为 3 组,1 组正常供水作为对照,另 2 组分别进行轻度与重度干旱胁迫处理,待分别出现明显轻度和重度干旱胁迫症状后采样分析 (轻度与重度干旱胁迫标准参考 HSIAO^[15]的方法),采样于早晨 7:00—8:00 进行,每个材料采集 3 片+1 叶,擦净表面后,液氮速冻,并于-80℃保存备用。用于测定可溶性蛋白、丙二醛含量、过氧化物酶及超氧化物歧化酶活性等生理指标。

1.2.2 指标测定 可溶性糖 (SS) 含量采用蒽酮比色法测定^[16];可溶性蛋白 (SP)、丙二醛 (MDA) 含量及超氧化物歧化酶 (SOD) 活性分别参照李合生^[17]的考马斯亮蓝法、硫代巴比妥酸比色法、氮蓝四唑法测定;脯氨酸 (Pro) 含量参照刘祖祺和张石城的茚三酮比色法测定^[18];过氧化物酶 (POD) 活性参照朱理环等^[19]的方法,采用愈创木酚氧化法测定。

1.3 数据处理

计算斑茅割手密复合体杂交后代各抗旱指标的抗旱系数 (V_i)、隶属函数值 (R) 和综合评价值 (D)^[20], D 值越大表明抗旱性越强。

抗旱系数计算公式如下:

$$V_i = V_i / CK_i \quad (1)$$

式中, CK_i 和 V_i 表示某一材料的对照和干旱处理的性状测定值。

隶属函数值参照李海碧等^[20]的方法计算,当所测指标与抗旱性呈正相关时按公式 (2) 计算,呈负相关时按公式 (3) 计算。

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

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

式中, 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。

综合指标的权重计算公式为:

$$E_j = H_j / \sum_{j=1}^n H_j, \quad j=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中, H_j 是指某一综合指标的贡献率。

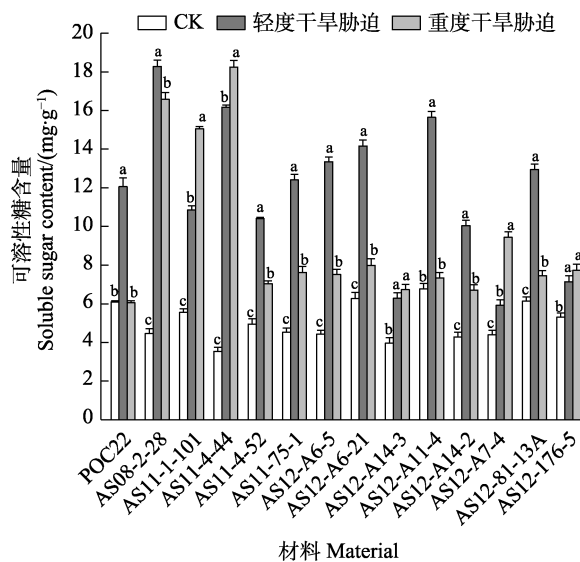
参试材料的综合评价值计算公式为:

$$D = \sum_{j=1}^n [R(V_i) \times E_j], \quad j=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对斑茅割手密复合体杂交后代苗期叶片生理指标的影响

2.1.1 渗透调节物质对干旱胁迫的响应特征 如图 1、图 2 所示,斑茅割手密复合体杂交后代苗期叶片在干旱胁迫下表现出显著的渗透调节响应。与 CK 相比,所有供试材料可溶性糖和可溶性蛋白含量均有所增加,且表现出相似的动态变化规律,即随着胁迫程度加剧,其含量均呈现先升高后降低的趋势。在轻度干旱胁迫下,7 个材料的可溶性糖和可溶性蛋白含量较 CK 显著升高;在重度干旱胁迫下,8 个材料的可溶性糖含量出现

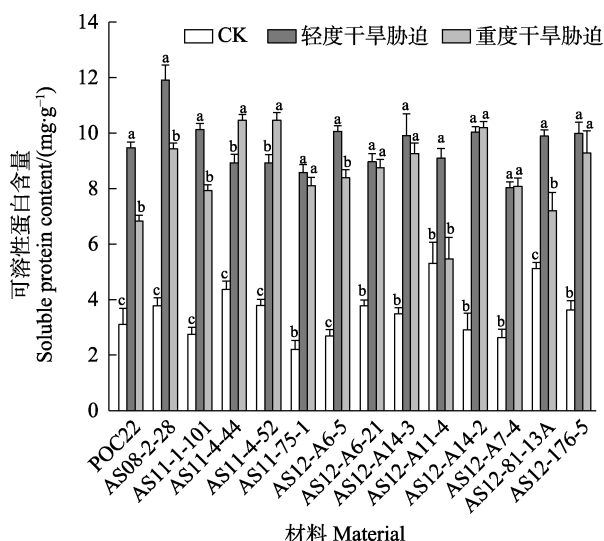


不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

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

图 1 不同干旱胁迫斑茅割手密复合体杂交后代叶片可溶性糖含量变化

Fig. 1 Changes in soluble sugar content in leaves of test material under different intensities of drought stress



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 ($P<0.05$).

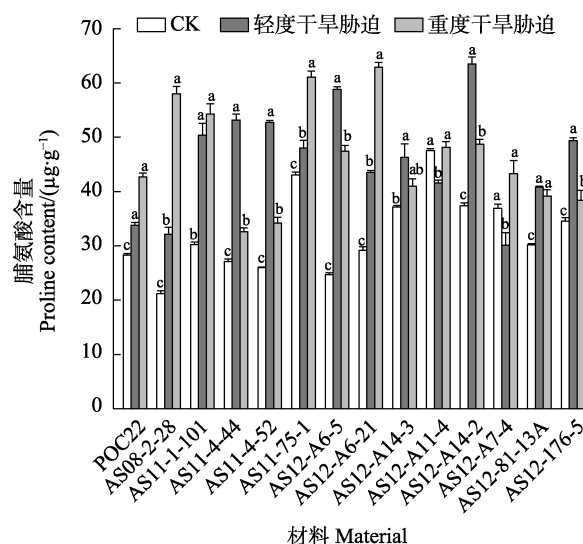
图 2 不同干旱胁迫斑茅割手密复合体杂交后代叶片可溶性蛋白含量变化

Fig. 2 Changes in soluble protein content in leaves of test materials under different intensity drought stress

回落,而可溶性蛋白含量除 AS12-A7-4、AS12-A14-2、AS11-4-52 三个材料外,其余 10 个材料均呈小幅下降趋势。这表明供试材料对轻度干旱胁迫具有较强耐受性,但在重度干旱胁迫下蛋白质合成可能受到抑制,导致其含量下降。值得注意的是,不同材料对可溶性糖的差异响应模式可能是其抗旱性分化的关键因素之一。

脯氨酸积累的动态特征见图 3,脯氨酸积累对干旱胁迫表现出显著的剂量效应,与 CK 相比,轻度干旱胁迫下,10 个材料的脯氨酸含量较对照显著上升;随着胁迫加剧,不同材料呈现分化响应,6 个材料呈先下降后上升的趋势,7 个材料则表现为先上升后下降的趋势。这种动态变化表明,脯氨酸作为渗透调节的关键物质,其积累不仅能降低细胞渗透势,还可能通过清除活性氧自由基来增强细胞膜稳定性。

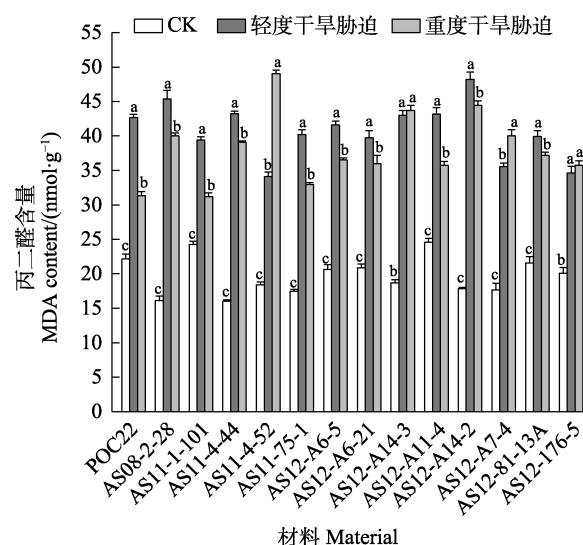
2.1.2 不同干旱胁迫对苗期膜脂过氧化的影响
如图 4 所示,在不同干旱胁迫下,斑茅割手密复合体杂交后代叶片的丙二醛含量呈先升后降的变化趋势。在轻度干旱胁迫初期,供试材料的丙二醛含量较 CK 升高。随着干旱胁迫时间的延长,各供试材料丙二醛含量的变化趋势出现明显分化,除材料 AS11-4-52、AS12-A14-3、AS12-A7-4 外,其余材料的丙二醛含量均低于轻度干旱胁迫。这一现象表明,在干旱胁迫初期,植物细胞失水,



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 不同干旱胁迫斑茅割手密复合体杂交后代叶片脯氨酸含量变化

Fig. 3 Changes in proline content in leaves of test materials under drought stress with different intensities



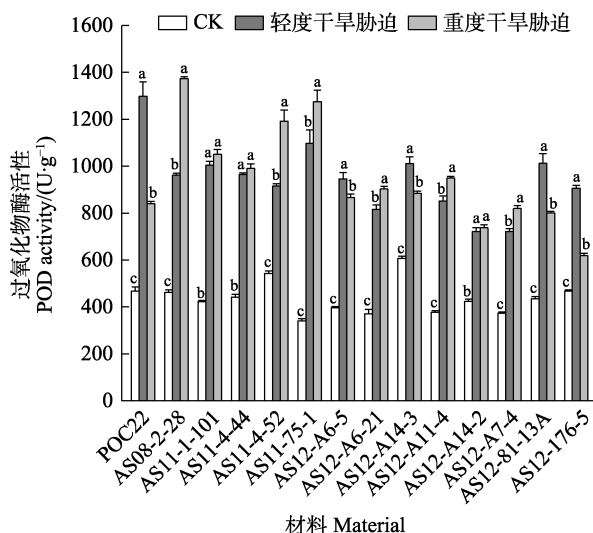
不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

图 4 不同干旱胁迫斑茅割手密复合体杂交后代叶片丙二醛含量变化

Fig. 4 Changes in malondialdehyde content in leaves of test materials under different intensity of drought stress

细胞膜的流动性降低,膜结构稳定性下降。这种结构的改变使得膜脂更容易受到活性氧的攻击,加速了膜脂过氧化反应,进而导致丙二醛含量上升。随着干旱胁迫时间的延长,植物细胞具备一定的适应与修复能力。这些修复过程有助于降低丙二醛的含量,使细胞逐渐恢复到相对稳定的状态。

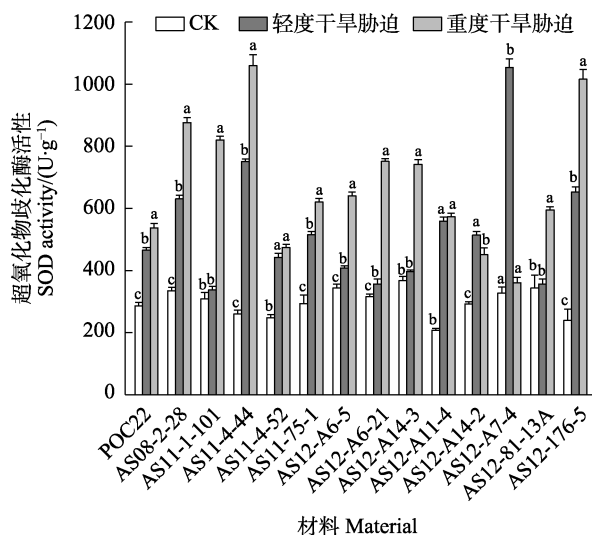
2.1.3 不同干旱胁迫对保护酶活性的影响 POD 和 SOD 是植物清除超氧自由基最重要的保护酶, 干旱逆境能诱导保护酶活性提高, 不同程度的干旱胁迫对 POD 和 SOD 保护酶活性的影响较大。如图 5、图 6 所示, POD 和 SOD 活性在不同干旱胁迫下均有所增加。其中, POD 活性在轻度干旱



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 5 不同干旱胁迫斑茅割手密复合体杂交后代叶片过氧化物酶活性变化

Fig. 5 Changes in peroxidase activity in leaves of test materials under drought stress with different intensities



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 6 不同干旱胁迫斑茅割手密复合体杂交后代叶片超氧化物歧化酶活性变化

Fig. 6 Changes in superoxide dismutase activity in leaves of test materials under drought stress with different intensities

胁迫下较 CK 大幅度升高, ROC22 的 POD 活性最高;但随着干旱胁迫时间延长,除 AS12-A6-5 等 4 个材料的 POD 活性下降外,其余供试材料的 POD 活性均高于轻度干旱胁迫。

与 CK 相比,轻度干旱胁迫下的 SOD 活性均出现升高;在重度干旱胁迫下,除材料 AS12-A7-4、AS12-A14-2 外,其余供试材料的 SOD 活性明显高于轻度干旱胁迫,显示出更强的氧化应激响应能力。这一结果说明,不同材料对于干旱胁迫的抗氧化防御机制存在明显差异,且胁迫强度与持续时间共同影响着保护酶系统的应答模式。

2.2 不同干旱胁迫下生理指标的变异分析

13 份材料的苗期叶片中,可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸、丙二醛、过氧化物酶和超氧化物歧化酶指标在不同干旱胁迫下表现不一。由表 1 可知,不同干旱胁迫下参试材料的变异系数为 18.97%~24.33%。其中,重度干旱胁迫下各指标的平均变异系数值最大。因此,重度干旱胁迫下的 6 个相关指标可以较好地反映材料抗旱性差异,具有较好代表性。

2.3 抗旱生理指标的相关性分析

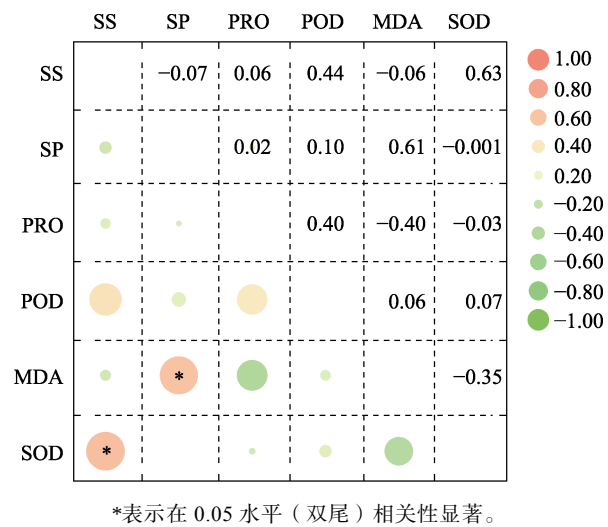
在重度干旱胁迫下,对参试材料苗期的 6 项抗旱指标的抗旱系数进行相关性分析,由图 7 可知,在重度干旱胁迫下,SS 和 SOD 之间呈显著正相关 ($P<0.05$),SP 和 MDA 之间呈显著正相关 ($P<0.05$);其他指标之间无显著相关性。SS 与 SP、PRO 和 MDA 呈一定负相关,与 POD 呈一定正相关;SP 与 SS、SOD 呈负相关;MDA 与 SS、PRO、SOD 呈负相关。由此可见,在干旱胁迫下,不同参试材料的抗旱性与多种指标相关,且各生理指标既相互制约又相互依赖。

2.4 各单项指标抗旱隶属函数值综合分析

通过计算参试材料 6 项抗旱相关生理指标(可溶性糖、丙二醛、脯氨酸、可溶性蛋白、过氧化物酶活性、超氧化物歧化酶活性)的隶属函数值,得到综合抗旱能力 D 值,结合表 1 的变异系数分析,对重度胁迫下参试材料的隶属函数值进行综合抗旱能力评价,由表 2 可知, D 值范围为 0.212~0.617,均值为 0.362。其中, D 值超过 CK 的有 7 个,其抗旱性强弱顺序为: AS08-2-28>AS11-1-101>AS11-4-44>AS11-75-1>AS12-A6-21>AS12-A6-5>AS12-176-5。 D 值小于对照 ROC22 的参试材料有 6 个,其中 AS12-A14-3 的抗旱性最弱。

表 1 不同干旱胁迫生理指标的变异分析
Tab. 1 Variation analysis of physiological indicators under different degrees of drought stress

处理 Treatment	指标 Index	SS /(mg·g ⁻¹)	SP /(mg·g ⁻¹)	PRO /(μg·g ⁻¹)	MDA /(nmol·g ⁻¹)	POD /(U·g ⁻¹)	SOD /(U·g ⁻¹)	平均值 Average
CK	最大值	6.77	5.30	47.54	24.58	606.90	367.38	18.97
	最小值	3.54	2.21	21.17	16.02	337.20	207.53	
	平均值	5.05	3.54	32.40	19.74	437.23	297.57	
	标准差 (SD)	0.98	0.92	7.38	2.75	71.57	45.78	
	变异系数 (CV)	19.46	25.94	22.77	13.91	16.37	15.38	
轻度干旱胁迫	最大值	18.28	11.91	63.51	48.22	1297.80	1053.37	20.77
	最小值	5.93	8.03	30.12	34.11	721.70	337.07	
	平均值	11.83	9.56	46.02	40.78	944.80	531.14	
	标准差 (SD)	3.70	0.94	9.80	4.03	148.86	194.34	
	变异系数 (CV)	31.28	9.84	21.29	9.88	15.76	36.59	
重度干旱胁迫	最大值	18.25	10.46	62.93	49.06	1347.20	1059.17	24.33
	最小值	6.06	5.46	32.60	31.20	618.90	360.52	
	平均值	9.40	8.33	46.57	38.08	948.29	679.59	
	标准差 (SD)	4.04	1.37	9.62	5.10	206.35	208.59	
	变异系数 (CV)	43.01	16.45	20.67	13.40	21.76	30.69	



*表示在 0.05 水平 (双尾) 相关性显著。
* indicates correlation is significant at the 0.05 (2-tailed).
图 7 重度干旱胁迫不同抗旱指标的相关性分析
Fig. 7 Correlation analysis of different drought resistance indicators under severe stress

3 讨论

甘蔗的抗旱性受多种因素影响, 包括品种基因型、形态特征及生理生化反应, 同时也与干旱发生的时间、强度和持续时间密切相关^[21]。已有研究表明, 可溶性糖、丙二醛、脯氨酸、可溶性蛋白、超氧化物歧化酶活性及过氧化物酶活性等生理指标能有效评估甘蔗的抗旱能力^[22-24]。基于此, 本研究在正常浇水和不同强度的干旱胁迫条

件下, 对供试材料的上述生理指标进行了系统测定与分析, 并采用抗旱系数、隶属函数值及抗旱性 *D* 值等方法, 综合评价了斑茅割手密复合体杂交后代的抗旱能力。结果显示, 有 7 个供试材料的 *D* 值超过对照品种。根据综合抗旱能力排名, 将 13 个供试材料划分为 2 类: 前 7 个 *D* 值高于 ROC22 的材料为抗旱性强群体, 后 6 个 *D* 值低于 ROC22 的材料为抗旱性弱群体。

植物在干旱环境中可通过调节自身生理代谢来减轻伤害。其中, 渗透调节物质 (如可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸) 在维持细胞渗透平衡中发挥关键作用。此外, 丙二醛作为膜脂氧化的终产物, 其含量变化可反映细胞膜受损程度^[25]。前人对割手密、斑茅及不同甘蔗品种这 4 个生理指标的研究表明^[14, 26-28], 在干旱胁迫下, 参试甘蔗种质资源的脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白和丙二醛含量与对照相比均有不同程度增加, 本研究结果与前人关于干旱胁迫会诱导这 4 生理指标产物增加的观点一致。但随着干旱胁迫时间的延长, 多数材料的可溶性糖含量、可溶性蛋白含量和丙二醛含量呈现出先升高后降低的趋势, 这一结果与 DO 等^[24]、张海燕等^[29]的研究结果一致。本研究揭示了杂交后代材料渗透调节物质对干旱胁迫的阶梯式响应机制: 在轻度干旱胁迫阶段, 主要

表 2 各参试材料隶属函数值及抗旱性综合评价
Tab. 2 Membership function values and comprehensive evaluation of drought resistance for test material

材料 Material	隶属函数值 Subordinate function value						D 值 D value	排序 Order
	SS	SP	PRO	MDA	POD	SOD		
AS08-2-28	0.655	0.556	1.000	0.132	0.649	0.484	0.617	1
AS11-1-101	0.411	0.704	0.452	1.000	0.473	0.496	0.555	2
AS11-4-44	1.000	0.239	0.110	0.163	0.373	0.948	0.515	3
AS11-75-1	0.167	1.000	0.235	0.562	1.000	0.323	0.471	4
AS12-A6-21	0.067	0.492	0.662	0.682	0.453	0.408	0.431	5
AS12-A6-5	0.168	0.798	0.526	0.649	0.347	0.243	0.415	6
AS12-176-5	0.111	0.583	0.057	0.640	0.000	1.000	0.341	7
ROC22 (CK)	0.000	0.443	0.287	0.907	0.192	0.247	0.300	8
AS12-A11-4	0.021	0.000	0.000	0.878	0.485	0.528	0.279	9
AS12-A7-4	0.276	0.772	0.092	0.238	0.356	0.000	0.256	10
AS12-A14-2	0.137	0.938	0.167	0.128	0.169	0.140	0.233	11
AS11-4-52	0.103	0.658	0.174	0.000	0.355	0.259	0.223	12
AS12-81-13A	0.053	0.142	0.165	0.681	0.211	0.201	0.219	13
AS12-A14-3	0.170	0.620	0.052	0.290	0.053	0.292	0.212	14
权重	0.247	0.107	0.209	0.140	0.147	0.150		

通过可溶性糖和脯氨酸积累维持渗透平衡；进入重度干旱胁迫阶段，则转向以脯氨酸为主导的应急保护机制，此过程中可溶性蛋白合成可能因能量分配调整而受到抑制。同时，这些渗透调节物质还可以作为抗氧化剂，清除活性氧，保护细胞膜免受氧化损伤，这可能是膜脂过氧化产物丙二醛含量降低的重要原因。这种动态可塑的响应策略及其调控机制的差异，为解析不同材料抗旱性差异的生理基础提供依据。

甘蔗种质资源的抗旱机理是一个非常复杂的生理过程，不同材料对干旱胁迫的响应模式存在显著差异。因此，在评价甘蔗种质资源的抗旱特性时不能只参考单个指标，需结合渗透调节、膜稳定性、抗氧化酶活性等多个指标进行综合评估才能得出可靠的评价结果。在应对氧化胁迫时，植物会激活超氧化物歧化酶和过氧化物酶等抗氧化酶系统，以清除活性氧、抑制膜脂过氧化，从而提高抗旱性。前人研究表明，超氧化物歧化酶、过氧化物酶可以较好地用于甘蔗品种抗旱性的综合评价^[30-31]。本研究结果表明，在干旱胁迫下，超氧化物歧化酶、过氧化物酶的活性随着干旱程度的升高而呈上升趋势，与前人研究结果一致^[8, 26, 30]。樊仙等^[32]研究认为超氧化物歧化酶、过氧化物酶活性在反复干旱处理后均有降低，与本研究结果不一致，这可能与试验材料、胁迫强度或测定

时间不同有关。

甘蔗在干旱胁迫下的抗旱响应机制涉及一系列复杂的生理机制，仅使用单一指标难以全面反映其抗旱响应的特征，且无法全面评估甘蔗在干旱环境中的整体抗旱变化趋势。只有从多维度审视、综合分析和评价甘蔗的抗旱特性，才能更全面地得出可靠的结论。例如，抗旱系数能够反映材料在干旱胁迫下的相对生长状况，隶属函数值可以消除不同指标间量纲差异的影响，而抗旱性综合评价值则通过整合各指标的贡献度，为材料的抗旱性评估提供更为客观、全面的依据^[33]。本研究采用抗旱系数、隶属函数值、抗旱性综合评价值等方法综合评价了斑茅割手密复合体杂交后代的抗旱性。根据抗旱性综合评价值，筛选出 7 个苗期抗旱性高于对照品种 ROC22 的材料，分别为 AS08-2-28>AS11-1-101>AS11-4-44>AS11-75-1>AS12-A6-21>AS12-A6-5>AS12-176-5。这些材料在干旱胁迫下表现出较强的渗透调节能力和抗氧化能力，减轻膜脂过氧化程度，保持细胞膜系统的稳定性，是开展甘蔗抗旱育种的优良种质资源。

4 结论

本研究通过对斑茅割手密复合体杂交后代苗期抗旱性评价，初步筛选出 7 个抗旱性较强的种

质资源, 为后期筛选抗旱候选基因提供材料基础, 也为充分利用斑茅割手密复合体杂交后代培育及进行甘蔗抗旱育种提供理论依据和指导。

未来研究将进一步利用这些抗旱材料探讨甘蔗的抗旱机制, 挖掘其抗旱相关基因, 并通过分子标记辅助选择等技术将其优良抗旱基因导入甘蔗栽培品种中, 培育出抗旱性强、产量高、品质优的甘蔗新品种, 为保障我国甘蔗产业可持续发展做出贡献。

参考文献

- [1] LI Y R, XIU P S, WU J M, LI C N, LIANG Q, LIU X H, WANG W Z, TAN H W, YANG L T. Sugar industry and improved sugarcane farming technologies in China[J]. Sugar Tech, 2016, 18: 603-611.
- [2] 许文花, 杨清辉. 甘蔗割手密无性系抗旱性鉴定[J]. 亚热带农业研究, 2005(1): 22-26.
XU W H, YANG Q H. Drought resistance of *S. spontaneum* L. clones[J]. Subtropical Agriculture Research, 2005(1): 22-26. (in Chinese)
- [3] 姚艳丽, 邢淑莲, 徐磊, 胡小文, 刘洋. 水分胁迫对甘蔗、割手密和斑茅抗氧化酶活性的影响[J]. 甘蔗糖业, 2013(6): 1-4.
YAO Y L, XING S L, XU L, HU X W, LIU Y. The Effect of water stress on activity of antioxidant system in *Saccharum* L., *S. spontaneum* and *E. arundinaceus* (Retz.) Jeswiet[J]. Sugarcane and Canesugar, 2013(6): 1-4. (in Chinese)
- [4] 经艳芬, 董立华, 孙有芳, 桃联安, 朱建荣, 周清明, 杨李和, 安汝东. 云南不同生态型割手密及其血缘 F_1 代种质的抗旱性遗传分析[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2013, 39(增刊 1): 1-6.
JING Y F, DONG L H, SUN Y F, TAO L A, ZHU J R, ZHOU Q M, YANG L H, AN R D. Genetic analysis of drought resistance in different ecotypes of *Saccharum spontaneum* and its bloodline F_1 generation in Yunnan[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2013, 39(Suppl. 1): 1-6. (in Chinese)
- [5] 边芯, 董立华, 孙有芳, 桃联安, 朱建荣, 周清明, 杨李和, 安汝东, 郎荣斌, 俞华先, 冯蔚, 经艳芬. 云南割手密及其血缘 F_1 代材料抗旱相关性状的主成分分析[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(3): 56-61.
BIAN X, DONG L H, SUN Y F, TAO L A, ZHU J R, ZHOU Q M, YANG L H, AN R D, LANG R B, YU H X, FENG W, JING Y F. Principal component analysis of drought resistance related traits of *Saccharum spontaneum* L. and its F_1 hybrids[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(3): 56-61. (in Chinese)
- [6] 边芯, 郎荣斌, 经艳芬, 董立华, 桃联安, 孙有芳, 安汝东, 周清明, 俞华先, 田春艳. 干旱胁迫对持绿型割手密叶片生理特性的影响及抗旱性评价[J]. 西南农业学报, 2018, 31(10): 2075-2080.
BIAN X, LANG R B, JING Y F, DONG L H, TAO L A, SUN Y F, AN R D, ZHOU Q M, YU H X, TIAN C Y. Effect of drought stress on physiological traits of *Saccharum spontaneum* L. leaf[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2018, 31(10): 2075-2080. (in Chinese)
- [7] 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[J]. 热带作物学报, 2017, 38(9): 1645-1652.
WANG T J, WANG X H, YANG Q H. Comprehensive evaluation on drought resistance difference of twenty-six *Saccharum spontaneum* L. accessions[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2017, 38(9): 1645-1652. (in Chinese)
- [8] 田春艳, 桃联安, 俞华先, 董立华, 经艳芬, 边芯, 郎荣斌, 周清明, 安汝东, 孙有芳, 杨李和. 5 种气候生态型割手密 F_1 和 F_2 杂种的抗旱性评价[J]. 中国农业科学, 2017, 50(22): 4408-4421.
TIAN C Y, TAO L A, YU H X, DONG L H, JING Y F, BIAN X, LANG R B, ZHOU Q M, AN R D, SUN Y F, YANG L H. Drought resistance evolution of F_1 and F_2 hybrids from five climatic ecotypes *Saccharum spontaneum* L.[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(22): 4408-4421. (in Chinese)
- [9] 常丹, 张建波, 鄢家俊, 安金婵, 李达旭, 白史旦. 斑茅抗旱种质资源筛选与评价[J]. 草学, 2019(6): 26-38.
CHANG D, ZHANG J B, YAN J J, AN J C, LI D X, BAI S Q. Screening and evaluation for drought tolerance of *Erianthus Arundinaceum* germplasm resources[J]. Journal of Grassland and Forage Science, 2019(6): 26-38. (in Chinese)
- [10] 肖芙蓉, 曹哲群, 徐荣, 尹以龙, 王先宏, 陈疏影, 刘鲁峰, 何丽莲, 李富生. 斑茅野生种抗旱性鉴定[J]. 西南农业学报, 2018, 31(8): 1611-1616.
XIAO F R, CAO Z Q, XU R, YIN Y L, WANG X H, CHEN S Y, LIU L F, HE L L, LI F S. Identification of drought resistance of several wild species of *Erianthus arundinaceum*[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2018, 31(8): 1611-1616. (in Chinese)
- [11] 黄忠兴, 符成, 黄锦福, 陈西文, 周峰, 吉家乐, 刘少谋. 含斑茅血缘甘蔗亲本的抗旱性研究[J]. 广东农业科学, 2016, 43(6): 49-57.
HUANG Z X, FU C, HUANG J F, CHEN X W, ZHOU F, JI

- J L, LIU S M. Drought resistance of sugarcane parents with *Erianthus arundinaceus* bloodline[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2016, 43(6): 49-57. (in Chinese)
- [12] 吴嘉云, 刘少谋, 邓祖湖, 杨川毓, 廖振阳, 符成, 黄忠兴, 黄永吉, 林彦铨, 陈如凯. 甘蔗与斑茅若干杂交后代抗性初步评价[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2013, 42(6): 565-569.
- WU J Y, LIU S M, DENG Z H, YANG C Y, LIAO Z Y, FU C, HUANG Z X, HUANG Y J, LIN Y Q, CHEN R K. Preliminary evaluation for resistance of some progenies from *Saccharum* and *Erianthus arundinaceus*[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2013, 42(6): 565-569. (in Chinese)
- [13] 张婷. 甘蔗×蔗茅 BC₁F₁ 子代的耐旱性差异分析[D]. 昆明: 云南农业大学, 2023.
- ZHANG T. Analysis of drought tolerance of BC₁F₁ progenies derived from sugarcane and *Erianthus fulvus*[D]. Kunming: Yunnan Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [14] 沈先岳, 徐荣, 吴清莲, 谢林艳, 孟玉, 狄义宁, 王先宏, 何丽莲, 李富生. 甘蔗与蔗茅杂交亲本及后代材料的抗旱性鉴定[J]. 中国农学通报, 2020, 36(20): 7-13.
- SHEN X Y, XU R, WU Q L, XIE L Y, MENG Y, DI Y N, WANG X H, HE L L, LI F S. *Saccharum* spp. × *Erianthus fulvus* and their hybrid offspring: identification of drought resistance[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(20): 7-13. (in Chinese)
- [15] HSIAO T C. Plant response to water stress[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1973, 24(5): 519-570.
- [16] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. (in Chinese)
- ZHOU Q. Plant physiology experiment guide[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. (in Chinese)
- [17] 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 experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. (in Chinese)
- [18] 刘祖祺, 张石城. 植物抗逆生理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994: 87-111.
- LIU Z Q, ZHANG S C. Plant stress physiology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1994: 87-111. (in Chinese)
- [19] 朱理环, 邢永秀, 杨丽涛, 李杨瑞, 杨荣仲, 莫磊兴. 干旱胁迫对苗期甘蔗叶片水分和叶绿素荧光参数的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(23): 12 570-12 573.
- ZHU L H, XING Y X, YANG L T, LI Y R, YANG R Z, MO L X. Effects of water stress on leaf water and chlorophyll fluorescence parameters of sugarcane seedling[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(23): 12 570-12 573. (in Chinese)
- [20] 李海碧, 周会, 韦金菊, 桂意云, 祝开, 张荣华, 杨荣仲, 刘昔辉. 甘蔗常用亲本的田间抗旱指标筛选及抗旱性评价[J]. 南方农业学报, 2023, 54(1): 46-55.
- LI H B, ZHOU H, WEI J J, GUI Y Y, ZHU K, ZHANG R H, YANG R Z, LIU X H. Drought resistance index screening and drought resistance evaluation of commonly-used sugarcane parents in field[J]. Journal of Southern Agriculture, 2023, 54(1): 46-55. (in Chinese)
- [21] 赵小坤, 毛钧, 字秋艳, 徐超华, 李旭娟, 刘洪博, 陆鑫, 刘新龙. 割手密野生资源抗逆性研究进展[J]. 植物遗传资源学报, 2020, 21(2): 287-295.
- ZHAO X K, MAO J, ZI Q Y, XU C H, LI X J, LIU H B, LU X, LIU X L. Research progress on stress resistance of wild germplasms *Saccharum spontaneum* L.[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2020, 21(2): 287-295. (in Chinese)
- [22] 杨建波, 诸葛少军, 黎海涛, 杨丽涛, 李杨瑞. 干旱胁迫对甘蔗生长生理的影响及品种抗旱性评价[J]. 南方农业学报, 2012, 43(8): 1114-1120.
- YANG J B, ZHUGE S J, LI H T, YANG L T, LI Y R. Impact of drought stress on sugarcane growth physiology and evaluation on drought resistance of sugarcane cultivars[J]. Journal of Southern Agriculture, 2012, 43(8): 1114-1120. (in Chinese)
- [23] 金伟, 杨丽涛, 英潘, 杨建波, 罗超有, 李杨瑞. 不同甘蔗品种对干旱和复水的生态生理响应[J]. 南方农业学报, 2012, 43(12): 1945-1951.
- JIN W, YANG L T, YING P, YANG J B, LUO C Y, LI Y R. Eco-physiological responses of different sugarcane varieties to drought and re-watering[J]. Journal of Southern Agriculture, 2012, 43(12): 1945-1951. (in Chinese)
- [24] 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)
- [25] 陈少裕. 膜脂过氧化与植物逆境胁迫[J]. 植物学通报,

- 1989(4): 211-217.
- CHEN S Y. Membrane-lipid peroxidation and plant stress[J]. Chinese Bulletin of Botany, 1989(4): 211-217. (in Chinese)
- [26] 吕绍芝, 沈庆庆, 饶席兵, 钱祺锋, 张蓉琼, 何丽莲, 李富生. 30 份割手密种质资源苗期抗旱性综合评价[J]. 西南农业学报, 2024, 37(2): 233-241.
- LYU S Z, SHEN Q Q, RAO X B, QIAN Z F, ZHANG R Q, HE L L, LI F S. Comprehensive evaluation on drought resistance of thirty *Saccharum spontaneum* L. accessions in seedling stage[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2024, 37(2): 233-241. (in Chinese)
- [27] 俞华先, 周清明, 安汝东, 董立华, 桃联安, 孙有芳, 郎荣斌, 边芯, 田春艳, 经艳芬. 基于主成分与聚类分析的云南甘蔗细茎野生种 F₂ 代的抗旱性综合评价[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(21): 88-93.
- YU H X, ZHOU Q M, AN R D, DONG L H, TAO L A, SUN Y F, LANG R B, BIAN X, TIAN C Y, JING Y F. Comprehensive evaluation on drought resistance of *Saccharum spontaneum* L. blood F₂ progeny innovated in Yunnan based on principal component and cluster analysis[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(21): 88-93. (in Chinese)
- [28] 杨善, 方欣, 张倩倩, 龚茂健, 周鸿凯, 莫俊杰. 干旱对甘蔗及其近缘植物蔗糖代谢的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(18): 94-100.
- YANG S, FANG X, ZHANG Q Q, GONG M J, ZHOU H K, MO J J. The effect of drought on sucrose metabolism in sugarcane and its related genera[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(18): 94-100. (in Chinese)
- [29] 张海燕, 汪宝卿, 冯向阳, 李广亮, 解备涛, 董顺旭, 段文学, 张立明. 不同时期干旱胁迫对甘薯生长和渗透调节能力的影响[J]. 作物学报, 2020, 46(11): 1760-1770.
- ZHANG H Y, WANG B Q, FENG X Y, LI G L, XIE B T, DONG S X, DUAN W X, ZHANG L M. Effects of drought treatments at different growth stages on growth and the activity of osmotic adjustment in sweet potato [*Ipomoea batatas* (L.) Lam.][J]. Acta Agronomica Sinica, 2020, 46(11): 1760-1770. (in Chinese)
- [30] 李鸿博, 蔡伟俊, 谢雨彤, 邓权清, 陈健文, 沈万宽. 甘蔗新品系对于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)
- [31] 李春情, 刘翔宇, 闫鹏, 周六千, 卢霖, 董志强, 徐江. 不同玉米品种抗旱性的生理鉴定与综合评价[J]. 作物杂志, 2024(4): 253-262.
- LI C Q, LIU X Y, YAN P, ZHOU L Q, LU L, DONG Z Q, XU J. Physiological identification and comprehensive evaluation of drought resistance of different maize varieties[J]. Crops, 2024(4): 253-262. (in Chinese)
- [32] 樊仙, 全怡吉, 杨绍林, 李如丹, 邓军, 张跃彬. 甘蔗苗期抗旱性鉴定评价研究[J]. 中国农学通报, 2022, 38(3): 17-24.
- FAN X, QUAN Y J, YANG S L, LI R D, DENG J, ZHANG Y B. Identification and evaluation of drought resistance in sugarcane seedling stage[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(3): 17-24. (in Chinese)
- [33] 桃联安, 杨李和, 经艳芬, 段慧芬, 董立华, 安汝东, 周清明, 朱建荣. 云南割手密血缘 F₂ 代抗旱性隶属函数法综合评价[J]. 西南农业学报, 2011, 24(5): 1676-1680.
- TAO L A, YANG L H, JING Y F, DUAN H F, DONG L H, AN R D, ZHOU Q M, ZHU J R. Comprehensive evaluation of drought resistance for descendant F₂ of *Saccharum spontaneum* in Yunnan by subjection function[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2011, 24(5): 1676-1680. (in Chinese)