

甘蔗抗花叶病育种研究进展

沈林波¹, 潘继红¹, 王会敏^{1,2}, 冯小艳¹, 张树珍¹, 王文治^{1,3*}

1. 中国热带农业科学院热带生物技术研究所/海南热带农业资源研究院, 海南海口 571101; 2. 南京农业大学生命科学学院, 江苏南京 210095; 3. 南京农业大学农学院, 江苏南京 210095

摘要: 甘蔗花叶病是危害甘蔗生产的主要病毒性病害之一, 其病原主要包括甘蔗条纹花叶病毒 (Sugarcane streak mosaic virus, SCSMV)、高粱花叶病毒 (Sorghum mosaic virus, SrMV) 和甘蔗花叶病毒 (Sugarcane mosaic virus, SCMV) 3 大主要病原。甘蔗花叶病的发生严重影响甘蔗的品质和产量, 防治该病害最经济有效的方法是抗病品种的应用。本文综述了甘蔗花叶病的危害和防治途径、甘蔗种质资源的抗性评价、抗性遗传分析、分子标记、抗性基因的挖掘利用及抗病育种等方面的研究进展, 同时指出了甘蔗抗病育种方面存在的问题, 并对加强甘蔗抗花叶病育种的研究提出了一些建议。

关键词: 甘蔗; 甘蔗花叶病; 病害防治; 抗花叶病育种

中图分类号: S435.661

文献标志码: A

Advances in Sugarcane Breeding for Resistance to Sugarcane Mosaic Disease

SHEN Linbo¹, PAN Jihong¹, WANG Huimin^{1,2}, FENG Xiaoyan¹, ZHANG Shuzhen¹, WANG Wenzhi^{1,3*}

1. Institute of Tropical Bioscience and Biotechnology, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / Hainan Institute for Tropical Agricultural Resources, Haikou, Hainan 571101, China; 2. College of Life Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China; 3. College of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China

Abstract: Sugarcane mosaic disease is one of the main viral diseases threatening the production of sugarcane. Sugarcane streak mosaic virus (SCSMV), Sorghum mosaic virus (SrMV) and Sugarcane mosaic virus (SCMV) are the main pathogens. The occurrence of sugarcane mosaic disease seriously affects the quality and yield of sugarcane. The most economical and effective way to control the disease is the application of resistant varieties. In this paper, the damage and controlling ways of sugarcane mosaic disease were summarized. The recent research progress on identification of resistance germplasm resources, resistance inheritance, molecular markers, mining and application of the resistance gene, and breeding of disease-resistant varieties were reviewed. Moreover, the problems existing in sugarcane disease resistance breeding were pointed out, and some suggestions were put forward to strengthen the research on sugarcane mosaic disease resistance breeding.

Keywords: sugarcane; sugarcane mosaic disease; disease control; sugarcane mosaic disease resistance breeding

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.11.010

甘蔗 (*Saccharum officinarum* L.), 禾本科甘蔗属, 糖含量丰富, 以其为原料生产的蔗糖占世界食糖产量的 70%, 占中国食糖产量的 90%^[1],

是我国最重要的糖料作物, 同时在作为生物能源作物方面也具有广阔的应用前景^[2]。1892 年首次在爪哇发现甘蔗花叶病 (sugarcane mosaic disease,

收稿日期 2024-05-14; 修回日期 2024-05-30

基金项目 现代农业产业技术体系建设专项资金项目 (No. CARS-17); 海南省基础与应用基础研究计划项目 (No. 2019RC300); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (No. 1630052019019)。

作者简介 沈林波 (1986—), 男, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 甘蔗抗病分子育种。*通信作者 (Corresponding author): 王文治 (WANG Wenzhi), E-mail: wangwenzhi@itbb.org.cn。

SMD)^[3], 此后该病在全球各大蔗区广泛传播。甘蔗花叶病主要影响甘蔗的光合作用, 症状表现为叶部产生与叶脉平行的褪绿条纹, 长短不一, 布满叶片, 其中幼嫩叶片症状最为严重。甘蔗花叶病的发生造成甘蔗的矮化、叶片和茎的坏死以及严重的产量损失^[4]。近年来, 甘蔗花叶病在我国广西、云南和海南等主要蔗区普遍发生, 发病率高达 50%~100%, 发病严重时甘蔗产量减少 30%以上, 严重制约了我国甘蔗产业的发展^[5-7]。因此, 本文对甘蔗花叶病的主要病原及其鉴定检测、传播方式、主要防治途径、甘蔗抗病种质资源鉴定评价, 以及抗病品种选育等进行综述, 并对未来研究作出展望, 以期选育抗甘蔗花叶病品种提供借鉴。

1 甘蔗花叶病的主要病原

甘蔗花叶病主要由甘蔗线条花叶病毒(Sugarcane streak mosaic virus, SCSMV)、高粱花叶病毒(Sorghum mosaic virus, SrMV)和甘蔗花叶病毒(Sugarcane mosaic virus, SCMV)3 种主要病原物引起^[8-9], 三者同属于马铃薯 Y 病毒科(Potyviridae), 但 SCMV 和 SrMV 是马铃薯 Y 病毒属(Potyvirus)的成员, 而后来发现的 SCSMV 属于禾本科病毒属(Poacevirus)^[10]。SCSMV、SrMV 和 SCMV 均为由外壳蛋白(coat protein, CP)包裹着一条正义单链 RNA 的基因组组成, 病毒粒体呈弯曲线状, 大小约为 10 kb, 编码 11 个功能蛋白: P1、HC-Pro、P3、6K1、CI、6K2、N1a-Vpg、N1a-Pro、N1b、CP 和 P3N-PIPO^[11]。SrMV 和 SCMV 主要感染甘蔗、高粱和玉米^[12-13], 而 SCSMV 除了感染甘蔗和高粱外, 玉米和苏丹草等禾本科植物也可作为 SCSMV 的人工寄主, 其中对甘蔗的危害最为严重^[14-16]。

2 甘蔗花叶病的传播方式及主要防治途径

甘蔗花叶病主要由引种、机械摩擦和蚜虫感染等方式进行传播, 其中 SrMV 和 SCMV 可被玉米蚜(*Rhopalosiphum maidis*)、桃蚜(*Myzus persicae*)和黑豆蚜(*Aphis craccivora*)进行传播, 但目前未见 SCSMV 可被蚜虫传播的报道^[17-18]。甘蔗花叶病的防治主要以预防为主。目前, 常用的方法主要有 2 种: 一是通过对农具消毒及驱除或杀灭昆虫介体等切断病毒的感染途径, 该方法对防治病毒有一定效果, 但是费时费力, 而且使用化学药剂会造成环境污染^[19]。二是通过组织培

养脱毒法获得无毒的健康种苗。早在 1994 年许莉萍等^[20]分别利用茎尖组织培养和愈伤组织培养法对甘蔗进行花叶病病原脱毒, 结果在供体发病率为 100%的情况下, 利用茎尖组织培养的后代发病率减少至 4.6%, 而用愈伤组织培养的后代无一蔗株感病。杨本鹏等^[21]通过热处理、温热处理和茎尖分生组织培养, 有效去除了甘蔗花叶病病原体, 得到了健康的脱毒苗。甘蔗脱毒种苗的应用虽然减轻了病毒在甘蔗中造成的危害, 但由于病毒在田间条件下可通过蚜虫等传播, 使病毒在再生作物中的危害增加。

随着甘蔗生物技术的发展, 培育和利用抗病品种是目前最经济、安全且有效的防控病害途径。近年来, 甘蔗育种学家在甘蔗花叶病抗性种质资源鉴定评价、抗性基因的挖掘利用以及抗病品种培育等方面开展了大量的研究, 极大促进了甘蔗花叶病抗病育种的发展。

3 甘蔗花叶病抗性种质资源鉴定评价

目前, 对于甘蔗抗性种质资源的抗性评价, 其过程一般为对甘蔗种质进行接种病毒, 然后检测种质资源的发病情况, 根据发病情况评价甘蔗种质资源的抗性。

3.1 甘蔗花叶病病原接种方法

甘蔗花叶病的病原人工接种方法主要包括摩擦接种法、浸根接种法和甘蔗生长期切茎接种法等。摩擦接种法通常是指在甘蔗叶面轻轻摩擦, 使其表面产生微小创伤, 从而使病毒侵入甘蔗细胞内。一般情况下, 甘蔗花叶病的病毒粒子容易通过汁液接种进行侵染, 但在甘蔗叶面摩擦时, 由于摩擦力度不易掌握, 往往导致叶片表面的伤口不均匀, 使接种的病毒分布程度不同, 发病情况不稳定, 从而影响鉴定结果。摩擦接种法只适用于小批量材料接种, 如需要对大量植株进行接种, 则可选用浸根接种法, 浸根接种法主要用于移栽时的幼苗大量接种。自 2008 年李文凤等^[22]研究了甘蔗生长期切茎接种法这一新技术, 鉴于该方法接种后发病均匀、稳定性好, 可操作性强等优点, 一直沿用至今, 是目前甘蔗接种病毒最常用的一种方法。

3.2 甘蔗花叶病病原检测技术

快速、高效地检测病毒有助于及时阻断病毒的传播。早期甘蔗花叶病的病原检测主要通过生物学检测法、电镜检测法和血清学检测法等, 但

这些检测方法特异性差、灵敏度弱、操作不方便、容易造成误差^[23]。近年来,由于分子生物学的发展,以 PCR 扩增为原理的检测技术,如逆转录 PCR (reverse transcription PCR, RT-PCR)、荧光定量 PCR (quantitative real-time PCR, qRT-PCR)、一步法多重 RT-PCR (one step multiplex RT-PCR) 和环介导等温扩增技术 (loop-mediated isothermal amplification, LAMP) 等已广泛应用于甘蔗病毒检测^[24]。VISWANATHAN 等^[25]采集了 63 个甘蔗叶片样本,通过设计 SCSMV-CP 基因特异性引物进行 RT-PCR 检测,鉴定出 58 份甘蔗样本感染了 SCSMV。FU 等^[26]通过建立 SCSMV 实时荧光定量 PCR 检测技术,实现了对 SCSMV 的定性和定量检测,且灵敏度比普通 PCR 高 100 倍。FENG 等^[27]提出了一步五重 RT-PCR 方法同时检测 SCMV、SrMV、SCSMV、SCYLV、SCBV 5 种病毒,结果表明,5 对引物均能扩增出各自的目标病毒,具有较强的特异性,且检测灵敏度为单倍 RT-PCR 的 10~100 倍。CHEN 等^[28]以一个灵敏的 RT-LAMP 为基础,设计引物对 SCSMV 和 SCMV 外壳蛋白基因的 6 个不同区域进行扩增,均成功检测到病毒。

3.3 甘蔗抗花叶病种质资源的筛选

甘蔗抗病种质资源,即抗源,是指甘蔗属主要包括栽培种(栽培原种和杂交商业种)、野生种(细茎野生种和大茎野生种)和中间材料(杂交后代)及其近缘属植物在内的所有可利用的遗传资源。甘蔗抗病种质资源是选育优良抗病品种的遗传物质基础,因此,从甘蔗种质资源中找出抗病来源对于甘蔗抗花叶病育种具有重要意义。目前,甘蔗育种学家已在甘蔗野生种和栽培种中筛选出一大批抗病种质资源。

3.3.1 甘蔗野生种抗花叶病种质资源的筛选 甘蔗不同种质间抗、感病程度各不相同。甘蔗野生种主要有细茎野生种(又称割手密, *Saccharum spontaneum* L.) 和大茎野生种。与栽培种相比,甘蔗野生种遗传多样性丰富,具有很多适应自然逆境的优良性状,如分蘖多、生势强、宿根性好、耐旱、耐寒、抗病虫等,能够适应一系列复杂环境,是抵抗生物胁迫和非生物胁迫的重要基因来源^[29]。黄忠兴等^[30]通过对国内外不同地理来源的 456 份割手密资源进行农艺性状表型遗传多样性分析,结果表明割手密对甘蔗花叶病表现高抗。SILVA 等^[31]为寻找新的抗性种质,对野生甘蔗种

质资源进行了抗性筛选,结果表明割手密和大茎野生种具有很好的抗性,其中 IS76-155、IJ76-418 red、NG57-50、Ceram red、Badilla、Sac.off 8276、Fiji19、IJ76-313、US57-141-5、Krakatau、IN84-58、IN84-88、IN84-82、Gandacheni、Chin 可能是抗花叶病的良好种质。LI 等^[32]对 70 份野生甘蔗种质资源(包括 37 份割手密和 33 份斑茅)进行抗 SrMV 鉴定评价,39 份野生种(55.7%)表现为从一级高抗到三级中抗,具有优良的抗 SrMV 基因,其中云南 82-1、云南 83-157 和四川 79-I-15 等 7 份割手密表现为一级高抗。海南甘蔗育种场以 Badilla、Lethers 和 Fiji 等热带种与不同类型的割手密进行高贵化育种,获得含有割手密血缘后代的崖城系列材料,利用这批材料育成粤糖 64-395 等多个优良抗花叶病品种^[33]。

3.3.2 甘蔗栽培种抗花叶病种质的筛选 近年来,国内外甘蔗育种学家致力于甘蔗抗花叶病资源的筛选与创制,已筛选出一批优良的抗花叶病育种材料,并且大部分已应用于育种中。周仲驹等^[34]利用摩擦法对 9 个供试品种进行人工接种 SCMV-A 株系,其中桂糖 11 和闽糖 70/611 表现为高抗。李文凤等^[35]对 32 份优良甘蔗品种人工接种强致病性 SrMV-HH1,筛选到云蔗 89-351、云瑞 99-155 和赣蔗 95-108 等 11 份免疫品种和 1 份高抗品种 Q170。付瑜华等^[36]通过人工接种和 RT-PCR 技术对黔糖 5 号的抗病性进行了系统鉴定与评价,结果表明黔糖 5 号免疫 SCSMV,高抗 SrMV 和 SCMV。2017 年美国佛罗里达州甘蔗品种委员会 (Florida Sugarcane League) 发布了产糖量较高的甘蔗杂交品种 CP 06-2425、CP 06-2495、CP 06-2964、CP 06-3103 和 CP 07-1313,这些品种对 SCMV-E 株系具有一定抗性^[37]。LI 等^[38]通过对 71 个优良甘蔗新品种同时接种 SCSMV-JP1 和 SrMV-HH,筛选出粤甘 34 号、云蔗 06-80、云蔗 03-258 等 5 个优良双抗品种。韦金菊等^[39]对引进的 41 份甘蔗材料进行病害检测,其中 CPCL97-2730、CPCL02-6848 和 CPCL02-1295 等 8 个美国甘蔗种质与 VN66-03、VN09-213 和 VN66-06 等 4 个越南甘蔗种质对花叶病表现为一定的抗性。LI 等^[40]通过对 41 份甘蔗优良创新种质及其亲本人工接种 SrMV 和 SCSMV 对其进行双重抗性鉴定评价,综合分析得出,对 SCSMV 和 SrMV 均具有一级高抗性的种质资源有 6 份(云 09-604、云 09-607、云 09-619、云 09-633、云 09-656、云滇

95-19)。杨荣仲等^[41]对 102 份国内外甘蔗亲本对花叶病的抗性进行鉴定评价,结果表明,ROC26、LC03-1137 和 GT02-761 等 8 份亲本表现高抗,LC03-296、GT03-557 和 GT03-713 等 47 份亲本表现抗病。通过我国甘蔗育种学家的不懈努力,大量甘蔗抗花叶病种质资源得到了精准挖掘与评价,这些抗性材料的获得为甘蔗花叶病抗病基因的挖掘和抗病品种的培育奠定了基础。

4 甘蔗花叶病的抗性遗传、QTL 定位及分子标记

4.1 甘蔗花叶病的抗性遗传

甘蔗是一种无性繁殖作物,具有高度杂合性的异源多倍体或非整倍体,遗传背景十分复杂。2005 年薛志平^[19]通过研究表明甘蔗抗花叶病遗传是受微效多基因控制的数量性状。近年来,有关甘蔗对花叶病的抗性遗传研究仍存在不足,甘蔗抗花叶病的遗传机制尚未明确,但可以借鉴玉米和高粱的甘蔗花叶病抗性遗传研究。CONDE 等^[42]研究表明,高粱对 SCMV 的抗性受单基因控制,抗性为显性,并且 *Krish* 基因对澳大利亚和一些国外甘蔗花叶病毒株系均具有一定抗性。KOVACS 等^[43]通过用 SCMV-MB 和 SCMV-A 机械接种 11 个玉米自交系及其杂交种,综合考虑了病株数和病征发展速度,结果表明多数自交系的病毒抗性遗传在很大程度上或一定程度上是显性的。WU 等^[44]研究发现 2 个显性互补基因共同控制玉米对 SCMV 的抗性,并利用微卫星标记将这 2 个基因分别定位在 3 号和 6 号染色体上。

4.2 甘蔗花叶病的 QTL 定位及分子标记

近年来,陆续筛选和鉴定出甘蔗花叶病的 QTL 及分子标记,早期主要以 AFLP 分子标记和 SSR 分子标记为主。MEDEIROS 等^[45]通过 cDNA-AFLP 分析,研究了 2 个抗病性较强的甘蔗品种在受到 SCMV 病毒株系攻击后其转录谱的变化,结果表明,在测序的 23 个 TDF 中,有 10 个 TDF (抗病品种独有)与植物对病原体的防御机制有关。目前,有关甘蔗抗花叶病的分子标记研究还存在不足,大多为玉米对花叶病抗性的分子标记,如 DUBLE 等^[46]鉴定了位于 6 号染色体上的主基因 *Scmv1* 和位于 3 号染色体上的主基因 *Scmv2*,通过靶向分离分析 (targeted bulked segregant analysis, tBSA) 在 2 个染色体区域进一步

富集了 SSR 和 AFLP 标记,将 14 个 SSR 标记和 6 个 AFLP 标记定位到 *Scmv1* 区域,11 个 SSR 标记和 18 个 AFLP 标记位于 *Scmv2* 区域。DUBLE 等^[47]以 2 个欧洲玉米自交系 D32 (抗性) × D145 (易感) 的 219 个 F₂ 后代为材料,定位并鉴定影响 SCMV 抗性的 QTL 位点,共鉴定出 5 个 SCMV 抗性 QTL,分别位于 1、3、5、6 和 10 号染色体上。LÜ 等^[48]通过编译现有的 81 个 QTL 位点,构建了玉米抗甘蔗花叶病毒 (SCMV) 的 QTL 综合图谱,在 3 号染色体的“共识 QTL”中鉴定出 4 个抗性候选基因。

4.3 甘蔗与花叶病病原互作关系分析及抗性基因挖掘

植物病毒基因组过于简单,如果不与寄主因子相互作用,就无法在寄主植物上建立系统性感感染^[49]。近年来,随着分子生物学和基因组学的发展,甘蔗育种学家揭示了甘蔗花叶病病原与寄主互作的分子机制。董萌^[50]通过研究表明,SCMV 基因组连接蛋白 VPg 与真核细胞翻译起始因子 4E (eIF4E) 的互作在病毒成功侵染甘蔗的过程中起关键作用。朱海龙等^[51]从甘蔗中筛选到与 SCSMV-P3 互作的基因 *ScRbcL*,研究表明二者的互作可能是 SCSMV 侵染甘蔗导致花叶病症状发生的分子基础。ZHAI 等^[52]研究表明,ScELC 基因表达的蛋白与 SCSMV-VPg 相互作用,并且其互作是甘蔗花叶病病原侵染甘蔗所必需的。袁军涛等^[53]从甘蔗品种 ROC22 中克隆到 *ScPCaP1* 基因,研究表明该基因可能在 SCSMV、SrMV 和 SCMV 侵染寄主的过程中协助病毒粒子在植物胞间连丝中运动。ZHANG 等^[54]通过 Y2H 分析发现,与 SCMV-6K2 相互作用的 RNS4、ULP5 和 VAMP727 等 7 个甘蔗蛋白可能参与病毒的胁迫和防御反应。张海等^[55]从热带种 Badila 中克隆了 *ScCRT1* 基因,研究表明该基因编码的蛋白与 SCMV-6K2 蛋白互作,并在 SCMV 侵染过程中起着积极作用。

由于甘蔗是异源多倍体作物,具有庞大的基因组,其后代性状遗传非常复杂,所以较少甘蔗抗性基因挖掘和利用的研究。凌辉^[56]通过对甘蔗响应 SrMV 侵染的转录组分析表明, *Pan1*、*ScSGS3*、*ScX1*、*WRKY*、*WRKY53* 和 *MAP3K* 等基因是甘蔗中潜在的甘蔗抗 SrMV 侵染相关基因。PENG 等^[57]研究表明,甘蔗病程相关蛋白 ScPR 10 在 SrMV 的防御中起着积极作用,参与 SrMV 胁

迫的防御反应，在抗病甘蔗品种中可被 SrMV 诱导表达。SILVA 等^[58]通过研究表明，抗 SCMV 甘蔗品种中天冬氨酸蛋白酶和 VQ 蛋白（VQ protein）基因获得显著上调，在甘蔗花叶病遗传抗性中发挥作用，并表明胞嘧啶甲基化的变化可能调控基因对甘蔗花叶病的抗性。杨宗桃等^[59]从甘蔗品种 ROC22 中分离、鉴定了与 SCMV-6K2 互作的类泛素蛋白 ScUBL5，研究表明 ScUBL5 可能介导甘蔗对 SCMV 的抗性，在甘蔗抗花叶病育种上具有潜在的应用价值。这些甘蔗寄主与病毒互作关系的分析以及抗性基因的挖掘为甘蔗抗花叶病育种提供了依据，今后可通过常规杂交、抗性基因转化、感病基因沉默等方法提高甘蔗品种对 SCSMV、SrMV 和 SCMV 的抗性。

5 甘蔗抗花叶病育种

5.1 杂交育种

甘蔗杂交育种是通过对不同亲本进行有性杂交获得杂交种子再进行培育、选择以育成新品种的方法。甘蔗育种学家很早就致力于通过该方法

培育甘蔗新品种。20 世纪前期甘蔗育种学家相继在爪哇和巴巴多斯发现的甘蔗热带种和甘蔗野生种割手密自然杂交的实生苗是甘蔗杂交育种的一次“飞跃式”进展^[60]。澳大利亚育种学家 BERDING 等^[61]通过以热带种为母本与缅甸割手密无性系 Mandalay 杂交，通过高贵化育种培育出对甘蔗花叶病具有较强抗性的 Q 系列品种。20 世纪中后期，我国学者开始重视通过杂交育种获得具有甘蔗花叶病抗性的后代，在甘蔗育种学家的努力下，育成了对甘蔗花叶病不同抗性的甘蔗新品种（表 1）。

5.2 分子育种

由于甘蔗是高度杂合的异源多倍体或非整倍体无性繁殖作物，遗传背景复杂且传统育种具有长期性，使得通过常规手段去改变现有甘蔗品种的抗性比较困难。分子育种可直接从基因层面改变甘蔗品种的抗性，为甘蔗抗病育种开辟了新途径。目前，常见的分子育种方法主要包括蛋白质介导的抗性育种和利用 RNA 干扰培育抗病毒的转基因植物。

表 1 我国甘蔗抗花叶病杂交新品种
Tab. 1 New hybrid varieties of sugarcane resistant to mosaic disease in China

品种名称 Variety name	抗病等级 Disease resistance level	亲本 Parents	选育单位 Breeding institution
云蔗 05-51	中抗	崖城 90-56 × ROC 23	云南省农业科学院甘蔗研究所 ^[62]
云蔗 072178	中抗	桂糖 92-66 × Ho CP93-750	云南省农业科学院甘蔗研究所 ^[63]
云蔗 072800	中抗	湛蔗 92-126 × CP88-1762	云南省农业科学院甘蔗研究所 ^[64]
云蔗 08-1095	中抗	CP84-1198 × 科 5	云南省农业科学院甘蔗研究所 ^[65]
云蔗 081609	高抗	云蔗 94-343 × 粤糖 00-236	云南省农业科学院甘蔗研究所 ^[66]
云蔗 94-375	免疫	Cp72-1210 × 崖城 73-512	云南省农业科学院甘蔗研究所 ^[67]
云蔗 99-91	高抗	新台糖 10 × 崖城 84-153	云南省农业科学院甘蔗研究所 ^[68]
福农 15 号	高抗	CP72-1210 × 科 5	福建农林大学甘蔗综合研究所 ^[69]
福农 38 号	高抗	粤糖 83-257 × 粤糖 83-271	福建农林大学甘蔗综合研究所 ^[70]
福农 39 号	中抗	粤糖 91-976 × CP84-1198	福建农林大学甘蔗综合研究所 ^[71]
福农 41 号	中抗	ROC20 × 粤糖 91-976	福建农林大学甘蔗综合研究所 ^[72]
福农 81 - 745	抗	粤糖 59-65 × CP36-105	福建农林大学甘蔗综合研究所 ^[73]
福农 83-36	高抗	CP49- 50 × 福农 57-18	福建农林大学甘蔗综合研究所 ^[74]
福农 91-3623	免疫	CP72-1210 × 桂 73-167	福建农林大学甘蔗综合研究所 ^[75]
福农 91-4621	高抗	CP72-1210 × 湛 74-141	福建农林大学甘蔗综合研究所 ^[76]
福农 94-0403	中抗	CP72-1210 × 闽糖 69-263	福建农林大学甘蔗综合研究所 ^[77]
福农 95-1702	高抗	CP72-1210 × 粤农 73-204	福建农林大学甘蔗综合研究所 ^[78]
福农 98-1103	高抗	CP72-1210 × 湛蔗 74-141	福建农林大学甘蔗综合研究所 ^[79]
桂糖 16 号	抗	粤糖 59/65 × 崖城 72/399	广西农业科学院甘蔗研究所 ^[80]

续表 1 我国甘蔗抗花叶病杂交新品种
Tab. 1 New hybrid varieties of sugarcane resistant to mosaic disease in China (continued)

品种名称 Variety name	抗病等级 Disease resistance level	亲本 Parents	选育单位 Breeding institution
桂糖 23 号	高抗	ROC 1 号×崖城 71-374	广西农业科学院甘蔗研究所 ^[81]
桂糖 24 号	高抗	桂糖 71-5×崖城 84-153	广西农业科学院甘蔗研究所 ^[82]
桂糖 25 号	高抗	CP72- 1210×崖城 71- 374	广西农业科学院甘蔗研究所 ^[83]
桂糖 42 号	高抗	ROC 22×桂糖 92-66	广西农业科学院甘蔗研究所 ^[84]
桂糖 54 号	中抗	桂糖 00-122×崖城 97-47	广西农业科学院甘蔗研究所 ^[85]
粤糖 00-236	高抗	粤农 73-204×CP72-1210	广州甘蔗糖业研究所 ^[86]
粤糖 07913	高抗	HOCp 95-988×粤糖 97-76	广州甘蔗糖业研究所 ^[87]
粤糖 89-240	抗	CP72-1210×桂糖 73-167	广州甘蔗糖业研究所 ^[88]
粤糖 95-618	免疫	ROC10×CP72-1210	广州甘蔗糖业研究所 ^[89]
粤糖 96-835	高抗	Co419×新台糖 10 号	广州甘蔗糖业研究所 ^[90]
闽糖 88-103	高抗	闽选 703×崖城 82-96	福建省农业科学院甘蔗研究所 ^[91]
闽糖 92-649	高抗	ROC1 号×闽选 703	福建省农业科学院甘蔗研究所 ^[92]
闽糖 95-261	高抗	(ROC1×CP72-1210)×CP72-1210	福建省农业科学院甘蔗研究所 ^[93]
桂柳 2 号	免疫	ROC22×HoCP93-746	柳城县甘蔗研究中心 ^[94]
赣南 02-70	高抗	桂糖 69-435×CP84-1198	江西省甘蔗研究所 ^[95]
川蔗 27 号	高抗	CP72-1210×崖城 90-3	四川省植物工程研究院 ^[96]

5.2.1 蛋白质介导的抗性 已有研究表明,利用病毒本身的蛋白基因转化植物体后,病毒表达的蛋白积累在寄主细胞中,阻碍了病毒的复制,使转化植物对该病毒产生抗性,病毒蛋白基因的表达量决定了植物体的抗性程度^[97]。自 1986 年 POWELL 等首次将烟草花叶病毒(Tobacco mosaic virus, TMV) CP 基因导入烟草获得抗 TMV 植株,该策略开始广泛应用于其他植物的抗病育种中^[98]。目前,这种病毒抗性育种技术已相当成熟,在甘蔗花叶病的抗性育种中得到广泛应用。INGELBRECHT 等^[99]和 BUTTERFIELD 等^[100]将 *SrMV-CP* 基因转入甘蔗中,获得的转基因甘蔗在大田中对 *SrMV* 表现出抗性。APRIASTI 等^[101]将 *SCMV-CP* cDNA 插入双载体 pRI101-ON 中,然后将其导入甘蔗,结果表明经病毒人工感染后,CP 基因的全序列破坏了病毒的组装和包装,从而产生对 *SCMV* 的抗性。GILBERT 等^[102]将含有 *SCMV-CP* 基因的质粒导入甘蔗品种 CP80-1827 和 CP84-1198 中,通过对转基因甘蔗进行田间抗病性评价,发现转基因品系 CP80-1827 的花叶病发生率显著降低。福建农林大学甘蔗研究所利用受体品种 Badila 转入 *SCMV-CP* 基因培育抗花叶病甘蔗品种,获得转 *SCMV-CP* 基因品种福果系列,

使甘蔗花叶病发病率大大降低^[103]。杨川毓等^[104]对转 *SrMV-P1* 基因甘蔗无性系 TF50、TF37、TF63、TF53、TF67 和 TF64 的抗病性进行了分析,结果表明转 *SrMV-P1* 基因甘蔗对花叶病的抗病性显著提高。BUTTERFIELD 等^[100]通过研究证明了甘蔗转基因植株的遗传稳定性,表明转基因甘蔗亲本可用于甘蔗育种。

5.2.2 RNA 干扰 RNA 干扰(RNA interference, RNAi)是目前培育抗病毒转基因植物的常用方法。通过 RNA 介导的序列特异性相互作用抑制病毒基因表达被认为是控制植物病毒感染的有效途径。肖淑惠等^[105]利用 RNAi 技术构建了能同时诱导 *SrMV*、*SCMV* 和 *SCYLV* 沉默的多价基因,并导入甘蔗胚性愈伤组织,获得了具有广谱抗性的转基因甘蔗。董萌^[50]研究发现,利用 RNAi 技术沉默与 *Potyvirus* 互作的真核细胞翻译起始因子 *eIF4* 或 *eIF(iso)4E* 基因可以阻断病毒的复制,转基因植物不仅可以正常生长而且对多种病毒产生抗性。徐景升等^[106]从热带种 Badila 中克隆到甘蔗转录起始因子基因 *SceIF4E1*,并以其作为 RNAi 的靶序列,经遗传转化后获得抗病性广、抗性持久的抗 *SCSMV* 转基因甘蔗。GUO 等^[107]以 *SrMV-CP* 基因高度保守的序列为沉默靶点构建

RNAi 表达载体, 将其导入到甘蔗品种福农 15 号的愈伤组织中, 经鉴定表明转基因株系对 SrMV 具有一定抗性。陈利平等^[108]将 SrMV 和 ScYLV 的双价 RNAi 结构构建干扰表达载体, 并将其导入甘蔗品种福农 15 号, 获得双抗 SrMV 和 SCYLV 的转基因甘蔗。徐景升等^[109]克隆了与 P3N-PIPO 互作的甘蔗基因 *ScPCaP*, 并将其作为 RNAi 干扰靶序列, 通过遗传转化获得了同时抗 SCSMV、SrMV 和 SCMV 的转基因植株。ASLAM 等^[110]选择 *SCMV-CP* 基因的保守区作为目的基因构建 RNAi 载体, 将 RNAi 载体导入 2 个甘蔗品种 SPF-234 和 NSG-311, 获得抗 SCMV 的转基因甘蔗植株。WIDYANINGRUM 等^[111]将 *SCMV-CP* 基因插入 pGreen-0179 质粒中, 利用 RNAi 技术靶向沉默 *CP* 基因, 获得转基因甘蔗, 通过人工接种病毒后观察花叶症状和免疫印迹分析, 发现转基因株系不受 SCMV 侵染。

6 问题与展望

甘蔗是我国重要的糖料作物之一, 在糖料供给方面发挥重要作用。甘蔗花叶病的发生严重影响甘蔗的品质和产量, 花叶病的防治已成为甘蔗生产过程中的主要任务之一。在分子育种时代, 运用分子标记技术可以有效定位抗性基因、聚合多个抗性基因从而缩短育种年限, 分子标记技术是甘蔗育种的一个重要方向。甘蔗育种学家应致力于全面阐明甘蔗抗花叶病的遗传机制, 利用分子生物学技术培育高抗花叶病的甘蔗新品种。

目前, 有关甘蔗花叶病的抗病机理和分子育种研究还存在不足。如, 甘蔗花叶病的抗病机理仍不清楚; 甘蔗抗花叶病的分子标记技术仍未在品种选育中发挥真正作用; 传统的杂交育种仍是甘蔗抗花叶病育种的主要方式, 大多数育成的抗病品种还依赖栽培种之间的杂交选育, 很多野生种质资源如割手密中含有丰富的抗逆性基因, 对多种病害高抗甚至免疫, 但由于不同种质间的倍性差异和杂交亲和力低等因素, 甘蔗野生种质资源的利用还非常有限。因此, 目前甘蔗抗花叶病育种应着重以下几个方面: (1) 结合甘蔗栽培种和野生种的全基因组测序结果, 通过转录组学分析挖掘花叶病抗性关键基因, 深入研究甘蔗抗花叶病的分子机理, 阐明甘蔗抗花叶病的遗传机制; (2) 充分挖掘甘蔗抗病种质资源的遗传多样性, 利用分子标记技术聚合多个抗性基因进行综

合性能良好和高抗花叶病甘蔗新品种的选育; (3) 利用常规杂交育种、抗性基因转化、RNAi 基因沉默等方法, 将抗病基因导入甘蔗栽培种或沉默甘蔗种质中与病毒互作的基因, 使甘蔗种质对病毒产生一定抗性。

参考文献

- [1] 王文治, 胡天娇, 杨本鹏, 王俊刚, 冯小艳, 熊国如, 冯翠莲, 赵婷婷, 沈林波, 林拥军, 张树珍. 转 *Cry2A* 基因抗虫甘蔗植株的培育[J]. 分子植物育种, 2020, 18(9): 2893-2898.
- [2] WANG W Z, HU T J, YANG B P, WANG J G, FENG X Y, XIONG G R, FENG C L, ZHAO T T, SHEN L B, LIN Y J, ZHANG S Z. Nurture of pest resistant sugarcane by genetic transformation of *Cry2A* gene[J]. Molecular Plant Breeding, 2020, 18(9): 2893-2898. (in Chinese)
- [2] 李杨瑞, 谭裕模, 李松, 杨荣仲. 甘蔗作为生物能源作物的潜力分析[J]. 西南农业学报, 2006(4): 742-746.
- [2] LI Y R, TAN Y M, LI S, YANG R Z. Potential analysis of sugarcane as bioenergy crop[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2006(4): 742-746. (in Chinese)
- [3] ARTSCHWAGER E, BRANDES E W. Sugarcane (*Saccharum officinarum* L.): origin, characteristics and descriptions of representative clones[J]. USDA Agriculture Handbook, 1958, 122: 307.
- [4] VISWANATHAN R, BALAMURALIKRISHNAN M. Impact of mosaic infection on growth and yield of sugarcane[J]. Sugar Tech, 2005, 7(1): 61-65.
- [5] 周丰静, 黄诚华, 李正文, 商显坤, 黄伟华, 潘雪红, 魏吉利, 林善海. 广西蔗区甘蔗花叶病病毒种群分析[J]. 南方农业学报, 2015(4): 609-613.
- [5] ZHOU F J, HUANG C H, LI Z W, SHANG X K, HUANG W H, PAN X H, WEI J L, LIN S H. Analysis of the virus population causing sugarcane mosaic virus disease in sugarcane growing area of Guangxi[J]. Journal of Southern Agriculture, 2015(4): 609-613. (in Chinese)
- [6] 周娅. 云南甘蔗花叶病病原分子鉴定及遗传多样性分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- [6] ZHOU Y. Molecular identification and genetic diversity analysis of sugarcane mosaic pathogen in Yunnan province[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014. (in Chinese)
- [7] 熊国如, 李增平, 赵婷婷, 蔡文伟, 王俊刚, 王文治, 冯翠莲, 张雨良, 张树珍. 海南蔗区甘蔗病害种类及发生情况[J]. 热带作物学报, 2010, 31(9): 1588-1595.
- [7] XIONG G R, LI Z P, ZHAO T T, CAI W W, WANG J G, WANG W Z, FENG C L, ZHANG Y L, ZHANG S Z. Spe-

- cies and occurrence of sugarcane diseases in Hainan province[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2010, 31(9): 1588-1595. (in Chinese)
- [8] 贺尔奇. 中国蔗区甘蔗花叶病病毒的发生分布及其群体遗传进化分析[D]. 福建: 福建农林大学, 2022.
- HE E Q. Occurrence, distribution, and population genetic evolution analysis of viruses causing sugarcane mosaic diseases in China[D]. Fujian: Fujian Agriculture and Forestry University, 2022. (in Chinese)
- [9] CHATENET M, MAZARIN C, GIRARD J C, FERNANDEZ E, GARGANI D, RAO G P, ROTT P. Detection of Sugarcane streak mosaic virus in sugarcane from several Asian countries[J]. Sugar Cane International, 2005, 23(4): 656-662.
- [10] LI W F, HE Z, LI S F, HUANG Y K, ZHANG Z X, JIANG D M, WANG X Y, LUO Z M. Molecular characterization of a new strain of Sugarcane streak mosaic virus (SCSMV)[J]. Archives of Virology, 2011, 156(11): 2101-2104.
- [11] KING A M, LEFKOWITZ E, ADAMS M J, CARSTENS E B. Virus taxonomy: ninth report of the international committee on taxonomy of viruses[M]. San Diego: Academic Press, 2012: 1069-1089.
- [12] SRINIVAS K P, SUBBA REDDY C H V, RAMESH B, LAVA KUMAR P, SREENIVASULU P. Identification of a virus naturally infecting sorghum in India as Sugarcane streak mosaic virus[J]. European Journal of Plant Pathology, 2010, 127(1): 13-19.
- [13] 邹程, 商贺阳, 段真珍, 张木青, 姚伟. 甘蔗花叶病及其防控策略研究进展[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(5): 5-7, 11.
- ZOU C, SHANG H Y, DUAN Z Z, ZHANG M Q, YAO W. Research progress of sugarcane mosaic disease and its control strategy[J]. Anhui Agricultural Sciences, 2022, 50(5): 5-7, 11. (in Chinese)
- [14] SINGH M, SINGH A, UPADHYAYA P P, RAO G P. Transmission studies on an Indian isolate of Sugarcane mosaic potyvirus[J]. Sugar Tech, 2005, 7(2): 32-38.
- [15] LIANG S S, ALABI O J, DAMAJ M B, FU W L, SUN S R, FU H Y, CHEN R K, MIRKOV T E, GAO S J. Genomic variability and molecular evolution of Asian isolates of Sugarcane streak mosaic virus[J]. Archives of Virology, 2016, 161(6): 1493-1503.
- [16] XU D L, ZHOU G H, XIE Y J, MOCK R, LI R. Complete nucleotide sequence and taxonomy of Sugarcane streak mosaic virus, member of a novel genus in the family *Potyviridae*[J]. Virus Genes, 2010, 40(3): 432-439.
- [17] GILLASPIE A G, MOCK R G, SMITH F F. Identification of Sugarcane mosaic virus and characterization of strains of virus from Pakistan, Iran, and Camaroon[C]. Proceedings of International Society of Sugar Cane Technologists, Amsterdam: Elsevier, 1978, 16: 347-355.
- [18] HEMA M, SAVITHRI H S, SREENIVASULU P. Sugarcane streak mosaic virus: occurrence, purification, characterization and detection[J]. Sugarcane Pathology, 2001, 2: 37-70.
- [19] 薛志平. 基因枪介导的 *SCMV-CP* 基因遗传转化甘蔗研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2005.
- XUE Z P. Study on genetic transformation of Sugarcane mosaic virus coat protein gene via microprojectile bombardment[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2005. (in Chinese)
- [20] 许莉萍, 陈如凯, 李跃平. 利用愈伤组织培养和茎尖培养去除甘蔗花叶病毒[J]. 福建农业大学学报, 1994, 4(3): 253-256.
- XU L P, CHEN R K, LI Y P. Removal of Sugarcane mosaic virus by callus culture and shoot tip culture[J]. Journal of Fujian Agricultural University, 1994, 4(3): 253-256. (in Chinese)
- [21] 杨本鹏, 张树珍, 杨学, 王业桥, 顾丽红, 冯翠莲, 蔡文伟, 张显勇. 甘蔗健康种苗培育体系的建立[J]. 热带作物学报, 2006, 27(4): 74-77.
- YANG B P, ZHANG S Z, YANG X, WANG Y Q, GU L H, FENG C L, CAI W W, ZHANG X Y. Establishment of a cultivation system for sugarcane healthy seedlings[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2006, 27(4): 74-77. (in Chinese)
- [22] 李文凤, 黄应昆, 卢文洁, 罗志明. 甘蔗花叶病抗病性鉴定接种新技术研究[J]. 植物保护, 2008, 34(1): 127-130.
- LI W F, HUANG Y K, LU W J, LUO Z M. Study on new inoculation techniques for identification of sugarcane mosaic resistance[J]. Plant Protection, 2008, 34(1): 127-130. (in Chinese)
- [23] 梁姗姗, 罗群, 陈如凯, 高三基. 引起甘蔗花叶病的病原分子生物学进展[J]. 植物保护学报, 2017, 44(3): 363-370.
- LIANG S S, LUO Q, CHEN R K, GAO S J. Advances in researches on molecular biology of viruses causing sugarcane mosaic[J]. Journal of Plant Protection, 2017, 44(3): 363-370. (in Chinese)
- [24] 罗群. 侵染甘蔗的高粱花叶病毒的遗传多样性及群体遗传结构分析[D]. 福州: 福建农林大学, 2018.
- LUO Q. Genetic diversity and population structure of Sorghum mosaic virus infecting *Saccharum* spp. hybrids[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2018. (in Chinese)
- [25] VISWANATHAN R, BALAMURALIKRISHNAN M, KARUPPAIAH R. Characterization and genetic diversity of sugarcane streak mosaic virus causing mosaic in sugarcane[J]. Virus Genes, 2008, 36(3): 553-564.

- [26] FU W L, SUN S R, FU H Y, CHEN R K, SU J W, GAO S J. A one-step real-time RT-PCR assay for the detection and quantitation of Sugarcane streak mosaic virus[J]. BioMed Research International, 2015, 35(5): 577-584.
- [27] FENG X Y, WANG W Z, SHEN L B, WANG J G, ZHANG S Z. Multiplex RT-PCR assay for the simultaneous detection and identification of five sugarcane viruses[J]. Sugar Tech, 2020, 22(4): 662-670.
- [28] CHEN J S, LIANG S S, SUN S R, MONA B D, FU H Y, GAO S J. Diverse conserved domains and a positively selected site in the Sugarcane streak mosaic virus P1 protein are essential for RNA silencing suppression and protein stability[J]. Plant Pathology, 2020, 69(7): 1390-1400.
- [29] 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 resources in *Saccharum spontaneum* L.[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2020, 21(2): 287-295. (in Chinese)
- [30] 黄忠兴, 周峰, 王勤南, 金玉峰, 符成, 胡后祥, 张垂明, 常海龙, 吉家乐, 吴其卫, 齐永文, 刘少谋. 国内外割手密资源农艺性状表型遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报, 2012, 13(5): 825-829.
- HUANG Z X, ZHOU F, WANG Q N, JIN Y F, FU C, HU H X, ZHANG C M, CHANG H L, JI J L, WU Q W, QI Y W, LIU S M. Genetic diversity assessment of *Saccharum spontaneum* L. native of domestic and overseas with phenotype agronomic traits[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2012, 13(5): 825-829. (in Chinese).
- [31] SILVA M F, GONÇALVES M C, MELLONI M N G, PERECIN D, LANDELL M G A, XAVIER M A, PINTO L R. Screening sugarcane wild accessions for resistance to Sugarcane mosaic virus (SCMV)[J]. Sugar Tech, 2015, 17(3): 252-257.
- [32] LI W F, WANG X Y, HUANG Y K, SHAN H L, LUO Z M, YING X M, ZHANG R Y, SHEN K, YIN J. Screening sugarcane germplasm resistant to Sorghum mosaic virus[J]. Crop Protection, 2013, 43: 27-30.
- [33] 邓海华, 李奇伟, 陈子云. 甘蔗亲本的创新与利用[J]. 甘蔗, 2004, 11(3): 7-12.
- DENG H H, LI Q W, CHEN Z Y. Innovation and utilization of new sugarcane parents[J]. Sugarcane, 2004, 11(3): 7-12. (in Chinese)
- [34] 周仲驹, 黄如娟, 林奇英, 谢联辉, 陈宇航. 甘蔗花叶病的发生及甘蔗品种的抗性[J]. 福建农学院学报, 1989, 18(4): 520-525.
- ZHOU Z J, HUANG R J, LIN Y Y, XIE L H, CHEN Y H. Occurrence of sugarcane mosaic and resistance of sugarcane varieties[J]. Journal of Fujian Agricultural College, 1989, 18(4): 520-525. (in Chinese)
- [35] 李文凤, 黄应昆, 罗志明, 刘家勇, 卢文洁. 甘蔗优良品种材料对花叶病的抗性鉴定性评价[J]. 西南农业学报, 2009, 22(1): 92-94.
- LI W F, HUANG Y K, LUO Z M, LIU J Y, LU W J. Identification and evaluation of fine sugarcane varieties and samples resistant to SrMV-HH1[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2009, 22(1): 92-94. (in Chinese)
- [36] 付瑜华, 雷石富, 卢加举, 李文凤, 黄应昆, 雷朝云. 甘蔗新品种黔糖5号抗病性分子鉴定与综合评价[J]. 分子植物育种, 2014, 12(6): 1243-1250.
- FU Y H, LEI S F, LU J J, LI W F, HUANG Y K, LEI C Y. Molecular identification and comprehensive evaluation of disease resistance in new released sugarcane variety, Qiantang 5[J]. Molecular Plant Breeding, 2014, 12(6): 1243-1250. (in Chinese)
- [37] SINGH M P, COMSTOCK J C, DAVIDSON W, GORDON V, MCCORKLE K. Registration of 'CP 06-2425', 'CP 06-2495', 'CP 06-2964', 'CP 06-3103' and 'CP 07-1313' sugarcane for sand soils in Florida[J]. Science Letter, 2017, 11(2): 1-9.
- [38] LI W F, SHAN H L, ZHANG R Y, WANG X Y, YANG K, LUO Z M, YIN J, CANG X Y, LI J, HUANG Y K. Identification of resistance to Sugarcane streak mosaic virus (SCSMV) and Sorghum mosaic virus (SrMV) in new elite sugarcane varieties/clones in China[J]. Crop Protection, 2018, 110: 77-82.
- [39] 韦金菊, 宋修鹏, 张荣华, 张小秋, 覃振强, 魏春燕, 桂意云, 周会, 谭宏伟, 黄东亮, 李海碧, 吴杨, 李杨瑞, 刘昔辉. 美国和越南引进甘蔗新种质隔离检疫及农艺性状评价[J]. 分子植物育种, 2019, 17(14): 4708-4716.
- WEI J J, SONG X P, ZHANG R H, ZHANG X Q, QIN Z Q, WEI C Y, GUI Y Y, ZHOU H, TAN H W, HUANG D L, LI H B, WU Y, LI Y R, LIU X H. Assessment of agronomic traits and quarantine disease of newly introduced sugarcane germplasm from USA and Vietnam[J]. Molecular Plant Breeding, 2019, 17(14): 4708-4716. (in Chinese)
- [40] LI W F, SHAN H L, CANG X Y, LU X, ZHANG R Y, WANG X Y, YIN J, LUO Z M, HUANG Y K. Identification and evaluation of resistance to Sugarcane streak mosaic virus (SCSMV) and Sorghum mosaic virus (SrMV) in excellent sugarcane innovation germplasms in China[J]. Sugar Tech, 2019, 21(3): 481-485.
- [41] 杨荣仲, 周会, 肖祎, 吕达, 廖红香, 陈道德, 刘昔辉, 雷敬超, 林垠孚. 甘蔗主要亲本自然条件下抗甘蔗花叶病测定[J]. 中国糖料, 2020, 42(2): 47-52.

- YANG R Z, ZHOU H, XIAO Y, LYU D, LIAO H X, CHEN D D, LIU X H, LEI J C, LIN Y F. Testing on sugarcane mosaic resistance of sugarcane major parents under field conditions[J]. Sugar Crops of China, 2020, 42(2): 47-52. (in Chinese)
- [42] CONDE B D, MOORE R F, FLETCHER D S, TEAKLE D S. Inheritance of the resistance of *Krish sorghum* to Sugarcane mosaic virus[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1976, 27(1): 45-52.
- [43] KOVACS G, GABORJANYI R, TOLDI E. Inheritance of resistance to Maize dwarf mosaic virus and Sugarcane mosaic virus in maize[J]. Cereal Research Communications, 1994, 22(4): 361-368.
- [44] WU J Y, DING J Q, DU Y X, XU Y B, ZHANG X C. Genetic analysis and molecular mapping of two dominant complementary genes determining resistance to Sugarcane mosaic virus in maize[J]. Euphytica, 2007, 156(3): 355-364.
- [45] MEDEIROS C, GONÇALVES M C, HAKAKAVA R, CRESTE S, NÓBILE P M, PINTO L R, PERECIN D, LANDELL M G A. Sugarcane transcript profiling assessed by cDNA-AFLP analysis during the interaction with Sugarcane mosaic virus[J]. Advances in Microbiology, 2014, 4(9): 511-520.
- [46] DUBLE C, QUINT M, MELCHINGER A, XU M, LÜBBERSTEDT T. Saturation of two chromosome regions conferring resistance to SCMV with SSR and AFLP markers by targeted BSA[J]. Theoretical and Applied Genetics, 2003, 106(3): 485-493.
- [47] DUBLE C M, MELCHINGER A E, KUNTZE L, STORK A, LÜBBERSTEDT T. Molecular mapping and gene action of Scm1 and Scm2, two major QTL contributing to SCMV resistance in maize[J]. Plant Breeding, 2010, 119(4): 299-303.
- [48] LÜ X L, LI X H, XIE C X, HAO Z F, JI H L, SHI L Y, ZHANG S H. Comparative QTL mapping of resistance to Sugarcane mosaic virus in maize based on bioinformatics[J]. Frontiers of Agriculture in China, 2008, 2(4): 365-371.
- [49] CSORBA T, BURGYÁN J. Antiviral silencing and suppression of gene silencing in plants[M]//WANG A, ZHOU X. Current research topics in plant virology. Cham: Springer, 2016: 1-33.
- [50] 董萌. 甘蔗 *eIF4E* 基因克隆与功能初探[D]. 福州: 福建农林大学, 2013.
- DONG M. Cloning and functional identification of *eIF4E* genes from sugarcane[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2013. (in Chinese)
- [51] 朱海龙, 程光远, 彭磊, 柴哲, 郭晋隆, 许莉萍, 徐景升. 甘蔗条纹花叶病毒 P3 蛋白与甘蔗 Rubisco 大亚基互作研究[J]. 西北植物学报, 2014, 34(4): 676-681.
- ZHU H L, CHENG G Y, PENG L, CHAI Z, GUO J L, XU L P, XU J S. Interaction between Sugarcane streak mosaic virus P3 and Rubisco large subunit from sugarcane[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2014, 34(4): 676-681. (in Chinese)
- [52] ZHAI Y S, DENG Y Q, CHENG G Y, PENG L, ZHENG Y R, YANG Y Q, XU J S. Sugarcane Elongin C is involved in infection by sugarcane mosaic disease pathogens[J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2015, 466(3): 312-318.
- [53] 袁军涛, 桂超亚, 白如梦, 温荣辉. 甘蔗 *ScPCaP1* 基因 cDNA 的克隆及 RNAi 载体的构建[J]. 分子植物育种, 2016, 14(11): 3073-3078.
- YUAN J T, GUI C Y, BAI R M, WEN R H. cDNA cloning of sugarcane *ScPCaP1* gene and the construction of RNA interference vector for ScPCaP1[J]. Molecular Plant Breeding, 2016, 14(11): 3073-3078. (in Chinese)
- [54] ZHANG H, CHENG G Y, YANG Z T, WANG T, XU J S. Identification of sugarcane host factors interacting with the 6K2 protein of the Sugarcane mosaic virus[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(16): 1-19.
- [55] 张海, 程光远, 杨宗桃, 王彤, 刘淑娴, 商贺阳, 赵贺, 徐景升. 甘蔗 *ScCRT1* 基因克隆及其应答 SCMV 侵染分子机制的研究[J]. 作物学报, 2021, 47(1): 94-103.
- ZHANG H, CHENG G Y, YANG Z T, WANG T, LIU S X, SHANG H Y, ZHAO H, XU J S. Cloning of sugarcane *ScCRT1* gene and its response to SCMV infection[J]. Acta Agronomica Sinica, 2021, 47(1): 94-103. (in Chinese)
- [56] 凌辉. 甘蔗响应 SrMV 侵染的转录组研究与病程相关基因挖掘[D]. 福州: 福建农林大学, 2016.
- LING H. Transcriptome analysis of sugarcane response to Sorghum mosaic virus infection and mining of pathogenesis related genes[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2016. (in Chinese)
- [57] PENG Q, SU Y C, LING H, WAQAR A, GAO S W, GUO J L, QUE Y X, XU L P. A sugarcane pathogenesis-related protein, ScPR10, plays a positive role in defense responses under *Sporisorium scitamineum*, SrMV, SA and MeJA stresses[J]. Plant Cell Reports, 2017, 36(9): 1427-1440.
- [58] SILVA M F D, GONALVES M C, BRITO M D S, MEDEIROS C N, HAKAKAVA R, LANDELL M G D A, PINTO L R. Sugarcane mosaic virus mediated changes in cytosine methylation pattern and differentially transcribed fragments in resistance-contrasting sugarcane genotypes[J]. PLoS One, 2020, 15(11): 1-24.
- [59] 杨宗桃, 刘淑娴, 程光远, 张海, 周营栓, 商贺阳, 黄国强, 徐景升. 甘蔗类泛素蛋白 UBL5 应答 SCMV 侵染及其与 SCMV-6K2 的互作[J]. 作物学报, 2022, 48(2): 332-341.

- YANG Z T, LIU S X, CHENG G Y, ZHANG H, ZHOU Y Q, SHANG H Y, HUANG G Q, XU J S. Sugarcane ubiquitin-like protein UBL5 responses to SCMV infection and interacts with SCMV-6K2[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(2): 332-341. (in Chinese)
- [60] 刘家勇, 邓祖湖, 吴才文, 桃联安, 陆鑫, 赵培方, 张跃彬. 甘蔗属野生种割手密的育种利用进展与探讨[J]. *植物遗传资源学报*, 2021, 22(6): 1491-1497.
- LIU J Y, DENG Z H, WU C W, TAO L A, LU X, ZHAO P F, ZHANG Y B. Progress and discussion of sugarcane breeding using *Saccharum spontaneum* L.[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2021, 22(6): 1491-1497. (in Chinese)
- [61] BERDING N, MCINTYRE R K. Evaluation of commercial performance and attributes of Q200 in north Queensland[J]. *Conference of the Australian Society of Sugar Cane Technologists*, 2010, 32: 262-277.
- [62] 刘家勇, 赵培方, 杨昆, 夏红明, 吴才文, 陈学宽, 赵俊, 杨洪昌, 咎逢刚, 姚丽, 吴转娣, 赵丽萍, 覃伟. 甘蔗新品种云蔗 05-51 的选育[J]. *中国糖料*, 2016, 38(1): 8-10.
- LIU J Y, ZHAO P F, YANG K, XIA H M, WU C W, CHEN X K, ZHAO J, YANG H C, ZAN F G, YAO L, WU Z D, ZHAO L P, QIN W. Breeding of new sugarcane variety, Yunzhe 05-51[J]. *Sugar Crops of China*, 2016, 38(1): 8-10. (in Chinese)
- [63] 姚丽, 覃伟, 吴转娣, 安汝东, 吴才文, 赵俊, 夏红明, 赵培方, 陈学宽, 咎逢刚, 赵丽萍, 杨昆, 李俊, 朱建荣, 刘家勇, 赵勇. 甘蔗新品种云蔗 072178 的选育及评价[J]. *中国糖料*, 2017, 39(6): 1-4.
- YAO L, QIN W, WU Z D, AN R D, WU C W, ZHAO J, XIA H M, ZHAO P F, CHEN X K, ZAN F G, ZHAO L P, YANG K, LI J, ZHU J R, LIU J Y, ZHAO Y. Breeding and evaluation of a new sugarcane cultivar Yunzhe 072178[J]. *Sugar Crops of China*, 2017, 39(6): 1-4. (in Chinese)
- [64] 赵俊, 吴才文, 赵培方, 杨昆, 咎逢刚, 杨洪昌, 刘家勇, 陈学宽, 吴转娣, 夏红明, 姚丽, 覃伟, 赵丽萍. 抗旱甘蔗新品种云蔗 072800 的选育[J]. *中国糖料*, 2017, 39(6): 5-7.
- ZHAO J, WU C W, ZHAO P F, YANG K, ZAN F G, YANG H C, LIU J Y, CHEN X K, WU Z D, XIA H M, YAO L, QIN W, ZHAO L P. Breeding of new sugarcane variety Yunzhe 072800 with strong drought resistance[J]. *Sugar Crops of China*, 2017, 39(6): 5-7. (in Chinese)
- [65] 夏红明, 赵培方, 陈学宽, 赵俊, 咎逢刚, 杨昆, 刘家勇, 吴才文, 杨洪昌, 姚丽, 赵丽萍, 覃伟, 李复琴, 吴转娣. 甘蔗新品种云蔗 08-1095 的选育[J]. *中国糖料*, 2018, 40(6): 1-3, 7.
- XIA H M, ZHAO P F, CHEN X K, ZHAO J, ZAN F G, YANG K, LIU J Y, WU C W, YANG H C, YAO L, ZHAO L P, QIN W, LI F Q, WU Z D. Breeding of new sugarcane variety Yunzhe 08-1095[J]. *Sugar Crops of China*, 2018, 40(6): 1-3, 7. (in Chinese)
- [66] 夏红明, 赵培方, 刘家勇, 赵俊, 咎逢刚, 陈学宽, 杨昆, 杨洪昌, 姚丽, 赵丽萍, 吴转娣, 覃伟, 吴才文. 早熟高糖甘蔗新品种云蔗 081609 的选育[J]. *中国糖料*, 2018, 40(5): 6-9.
- XIA H M, ZHAO P F, LIU J Y, ZHAO J, ZAN F G, CHEN X K, YANG K, YANG H C, YAO L, ZHAO L P, WU C D, QIN W, WU C W. Breeding of new sugarcane variety Yunzhe 081609 with early maturing and high sucrose content[J]. *Sugar Crops of China*, 2018, 40(5): 6-9. (in Chinese)
- [67] 陈学宽, 刘家勇, 吴才文, 赵俊, 赵培方. 甘蔗新品种云蔗 94-375 的选育[J]. *中国糖料*, 2009(2): 1-3.
- CHEN X K, LIU J Y, WU C W, ZHAO J, ZHAO P F. Breeding of the new sugarcane variety Yunzhe 94-375[J]. *Sugar Crops of China*, 2009(2): 1-3. (in Chinese)
- [68] 陈学宽, 刘家勇, 杨洪昌, 赵俊, 赵培方. 甘蔗新品种云蔗 99-91 的选育[J]. *种子*, 2012, 31(2): 111-113.
- CHEN X K, LIU J Y, YANG C H, ZHAO J, ZHAO P F. Breeding of the new variety Yunzhe 99-91[J]. *Seed*, 2012, 31(2): 111-113. (in Chinese)
- [69] 罗翠萍. 甘蔗新品种—福农 15 号[J]. *农村百事通*, 2013(5): 35, 81.
- LUO C P. A new sugarcane variety: Funong 15[J]. *Nongcun Baishitong*, 2013(5): 35, 81. (in Chinese)
- [70] 徐良年, 邓祖湖, 林彦铨, 林兆里, 林炜乐, 罗俊, 陈如凯, 袁照年, 张华, 许莉萍. 甘蔗新品种福农 38 号的选育与评价[J]. *中国糖料*, 2014(2): 4-6.
- XU L N, DENG Z H, LIN Y Q, LIN Z L, LIN W L, LUO J, CHEN R K, YUAN Z N, ZHANG H, XU L P. Evaluation and breeding of a new sugarcane variety Funong 38[J]. *Sugar Crops of China*, 2014(2): 4-6. (in Chinese)
- [71] 邓祖湖, 徐良年, 林彦铨, 林兆里, 罗俊, 林炜乐, 陈如凯. 甘蔗新品种福农 39 号的选育与评价[J]. *甘蔗糖业*, 2014(1): 1-7.
- DENG Z H, XU L N, LIN Y Q, LIN Z L, LUO J, LI W L, CHEN R K. Evaluation and breeding of a new sugarcane variety Funong 39[J]. *Sugarcane and Canesugar*, 2014(1): 1-7. (in Chinese)
- [72] 邓祖湖, 徐良年, 林彦铨, 罗俊, 林兆里, 林炜乐, 陈如凯. 甘蔗新品种福农 41 号的选育与评价[J]. *甘蔗糖业*, 2014(6): 1-6.
- DENG Z H, XU L N, LIN Y Q, LUO J, LIN Z L, LIN W L, CHEN R K. Evaluation and breeding of a new sugarcane variety Funong 41[J]. *Sugarcane and Canesugar*, 2014(6): 1-6. (in Chinese)
- [73] 福建农业大学甘蔗综合研究所. 甘蔗抗旱高糖新品种福

- 农 81-745 的选育[EB/OL].(2005-01-01)[2024-04-12]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=YK1b_MowDz8n9h4WJb2aBmlYDWbEKFI-prtJa1mj_4JDDGgnHWLQ9U8x4s3L92kTce-8QvEh5R9GtmVDa9wUM-VgQfSoW8fCHFbcDC4q92rYfAzKCvtk6g==&uniplatform=NZKPT&language=gb.
- Fujian Agricultural University Sugarcane Comprehensive Research Institute. Breeding of a drought-resistant sugarcane variety Funong 81-745 with high sugar content[EB/OL]. (2005-01-01)[2024-04-12]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=YK1b_MowDz8n9h4WJb2aBmlYDWbEKFI-prtJa1mj_4JDDGgnHWLQ9U8x4s3L92kTce-8QvEh5R9GtmVDa9wUM-VgQfSoW8fCHFbcDC4q92rYfAzKCvtk6g==&uniplatform=NZKPT&language=gb. (in Chinese)
- [74] 邓祖湖, 林彦铨, 陈如凯, 薛其清, 许莉萍. 多抗高产优质甘蔗新品种福农 83-36[J]. 甘蔗, 2000(2): 49-51.
- DENG Z H, LIN Y Q, CHEN R K, XUE Q Q, XU L P. An outstanding multi-resistant sugarcane variety, Funong 83-36[J]. Sugarcane, 2000(2): 49-51. (in Chinese)
- [75] 福建农林大学. 甘蔗新品种-福农 91-3623[EB/OL]. (2009-01-01)[2024-04-12]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=YK1b_MowDz_vm4P_N90byTtLAReQgF-Gevxu7duf11SYgzoO0OaI1pOp_b-z5LKZ-6tZ0HPZeH5vj99d49PdTGt2RJKtlu-44iVHqH62aEzZLVpVQjd4w==&uniplatform=NZKPT&language=gb.
- Fujian Agriculture and Forestry University. A new sugarcane variety with high energy and sugar content: Funong 91-3623 [EB/OL].(2009-01-01)[2024-04-12]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=YK1b_MowDz_vm4P_N90byTtLAReQgF-Gevxu7duf11SYgzoO0OaI1pOp_b-z5LKZ-6tZ0HPZeH5vj99d49PdTGt2RJKtlu-44iVHqH62aEzZLVpVQjd4w==&uniplatform=NZKPT&language=gb. (in Chinese)
- [76] 邓祖湖, 陈如凯, 高三基, 林彦铨, 徐良年. 高产多抗优质糖能兼用甘蔗新品种福农 91-4621[J]. 甘蔗, 2004(1): 40-44.
- DENG Z H, CHEN R K, GAO S J, LIN Y Q, XU L N. An outstanding multi-resistant sugarcane variety for sugar and energy: Funong 91-4621[J]. Sugarcane, 2004(1): 40-44. (in Chinese)
- [77] 福建农林大学. 能糖兼用甘蔗新品种: 福农 94-0403 [EB/OL].(2011-01-01)[2024-04-12]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=YK1b_MowDz9GbJWD5jgKCOGq5iq0QIDIpR3__qHwQXUe6efBoXgdRw5yIdiaDuob73oc5J-G1JTdwnG6B4G309_UjT0gjFqU5FKvx6gDCzVS3k6qbTPRaww==&uniplatform=NZKPT&language=gb.
- Fujian Agriculture and Forestry University. A new sugarcane variety with high energy and sugar content: Funong 94-0403 [EB/OL].(2011-01-01)[2024-04-12]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=YK1b_MowDz9GbJWD5jgKCOGq5iq0QIDIpR3__qHwQXUe6efBoXgdRw5yIdiaDuob73oc5J-G1JTdwnG6B4G309_UjT0gjFqU5FKvx6gDCzVS3k6qbTPRaww==&uniplatform=NZKPT&language=gb. (in Chinese)
- [78] 福建农林大学. 早熟高糖甘蔗新品种福农 95-1702[EB/OL].(2011-01-01)[2024-04-12]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=YK1b_MowDz9ceF_mMLb_Ti1HVFlaN-rdzmC-8s0rQqskBG64FMj0PscY0osLKh0ii5BfwAmUPePt-aM8o8XqjhQGuT2SsgnDCMjS3TXkSEJ-NNEUkKZ-hkm-Q==&uniplatform=NZKPT&language=gb.
- Fujian Agriculture and Forestry University. A new early-maturing sugarcane variety Funong 95-1702 with high sugar content[EB/OL].(2011-01-01)[2024-04-12]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=YK1b_MowDz9ceF_mMLb_Ti1HVFlaN-rdzmC-8s0rQqskBG64FMj0PscY0osLKh0ii5BfwAmUPePt-aM8o8XqjhQGuT2SsgnDCMjS3TXkSEJ-NNEUkKZ-hkm-Q==&uniplatform=NZKPT&language=gb. (in Chinese)
- [79] 徐良年, 陈如凯, 罗俊, 邓祖湖. 甘蔗新品种福农 98-1103 的选育[J]. 中国糖料, 2011(1): 5-7, 10.
- XU L N, CHEN R K, LUO J, DENG Z H. Breeding of the new sugarcane variety Funong 98-1103[J]. Sugar Crops of China, 2011(1): 5-7, 10. (in Chinese)
- [80] 广西甘蔗研究所. 早熟、高糖、丰产、抗逆性强甘蔗新品种桂糖 16 号(桂糖 86-267)选育[EB/OL].(2005-01-01)[2024-04-12]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=YK1b_MowDz_I03N0ySeNaCJySIYXBCYFJBERFCsmhuKL1IQQEglUJ1IUsvO0NFxEiyqhyvZ_dVfvy41b9ix2j10gp3SYybri89iyNrnJgct2vN7OT3QWJQ==&uniplatform=NZKPT&language=gb.
- Guangxi Sugarcane Research Institute. Breeding of a new sugarcane variety Guitang 16 (Guitang 86-267) with early maturity, high sugar content, high yield and high stress resistance[EB/OL].(2005-01-01)[2024-04-12]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=YK1b_MowDz_I03N0ySeNaCJySIYXBCYFJBERFCsmhuKL1IQQEglUJ1IUsvO0NFxEiyqhyvZ_dVfvy41b9ix2j10gp3SYybri89iyNrnJgct2vN7OT3QWJQ==&uniplatform=NZKPT&language=gb. (in Chinese)
- [81] 黄吉森, 韦明珠. 甘蔗优良品种桂糖 23 号的选育与特性研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(20): 10603-10605.
- HUANG J S, WEI M Z. Study on the breeding and characteristics of recommended variety Guitang No.23 of sugarcane[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(20): 10603-10605. (in Chinese)
- [82] 黄家雍, 刘海斌, 闭少玲, 张革民, 梁丽琼, 谭裕模. 早熟特高糖甘蔗新品种桂糖 24 号的选育[J]. 广西农业科学, 2005(6): 575-576.

- HUANG J Y, LIU H B, BI S L, ZHANG G M, LIANG L Q, TAN Y M. Breeding of a new sugarcane variety, GT24, with early maturation and high cane sugar[J]. *Journal of Guangxi Agricultural*, 2005(6): 575-576. (in Chinese)
- [83] 刘海斌, 何红, 闭少铃. 甘蔗新品种桂糖 25 号的选育[J]. *中国糖料*, 2006(1): 12-15.
- LIU H B, HE H, BI S L. Breeding of a new sugar cane variety Guitang 25 (Guitang 96-44)[J]. *Sugar Crops of China*, 2006(1): 12-15. (in Chinese)
- [84] 王伦旺, 廖江雄, 谭芳, 唐仕云, 黄家雍, 李翔, 杨荣仲, 李杨瑞, 黄海荣, 经艳, 邓宇驰. 高产高糖抗倒伏甘蔗新品种桂糖 42 号的选育及高产栽培技术[J]. *南方农业学报*, 2015, 46(8): 1361-1366.
- WANG L W, LIAO J X, TAN F, TANG S Y, HUANG J Y, LI X, YANG R Z, LI Y R, HUANG H R, JING Y, DENG Y C. Breeding of new high-yield, high-sugar and lodging-resistant sugarcane variety Guitang 42 and its high-yield cultivation technique[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2015, 46(8): 1361-1366. (in Chinese)
- [85] 王伦旺, 杨荣仲, 王宇萍, 黄赞斌, 唐仕云, 经艳, 黄海荣, 贤武, 邓宇驰. 甘蔗新品种桂糖 54 号的选育[J]. *广西糖业*, 2021(5): 11-16.
- WANG L W, YANG R Z, WANG Y P, HUANG Z B, TANG S Y, JING Y, HUANG H R, XIAN W, DENG Y C. Breeding of a new sugarcane variety Guitang 54[J]. *Guangxi Sugar Industry*, 2021(5): 11-16. (in Chinese)
- [86] 张允演, 刘福业, 杨俊贤, 吴文龙, 黄振豪, 潘方胤, 陈月桂. 特早熟高糖甘蔗新品种粤糖 00-236 的选育[J]. *中国糖料*, 2007(1): 5-7, 12.
- ZHANG Y Y, LIU F Y, YANG J X, WU W L, HUANG Z H, PAN F Y, CHEN Y G. Breeding of very precocious and high sugar content sugarcane variety YT00-236[J]. *Sugar Crops of China*, 2007(1): 5-7, 12. (in Chinese)
- [87] 潘方胤, 文明富, 吴文龙, 彭立冲, 梁启如, 彭冬永, 罗青文. 甘蔗新品种粤糖 07913 的选育[J]. *种子*, 2020, 39(7): 125-127, 141, 168.
- PAN F Y, WEN M F, WU W L, PENG L C, LIANG Q R, PENG D Y, LUO Q W. Breeding of a new sugarcane variety Yuetang 07913[J]. *Seed*, 2020, 39(7): 125-127, 141, 168. (in Chinese)
- [88] 沈万宽, 邓海华, 黄振豪, 刘福业. 早熟高糖甘蔗新品种粤糖 89-240 的选育[J]. *中国糖料*, 2006(1): 20-22.
- SHEN W K, DENG H H, HUANG Z H, LIU F Y. Breeding of a new sugar cane variety (YT89- 240) with early maturity and high sucrose content[J]. *Sugar Crops of China*, 2006(1): 20-22. (in Chinese)
- [89] 沈万宽, 邓海华, 陈仲华. 糖能两用型甘蔗新品种粤糖 91-1102 的选育[J]. *作物杂志*, 2007(4): 75-77.
- SHEN W K, DENG H H, CHEN Z H. Breeding of a new sugarcane and energy cane variety Yuetang 91-1102[J]. *Crops*, 2007(4): 75-77. (in Chinese)
- [90] 沈万宽, 邓海华, 刘福业. 糖能两用型甘蔗新品种粤糖 96-835 的选育[J]. *种子*, 2007(7): 89-91.
- SHEN W K, DENG H H, LIU F Y. Breeding of a new sugarcane and energy cane variety Yuetang 96-835[J]. *Seed*, 2007(7): 89-91. (in Chinese)
- [91] 杨焜正, 林一心, 李瑞美, 谢木水. 甘蔗新品种闽糖 88-103 的选育研究[J]. *福建农业学报*, 2000(3): 16-22.
- YANG K Z, LIN Y X, LI M R, XIE M S. Selection and breeding of new sugarcane variety Mintang 88-103[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2000(3): 16-22. (in Chinese)
- [92] 杨焜正, 林一心, 李瑞美, 李海明. 甘蔗新品种闽糖 92-649 的选育研究[J]. *甘蔗糖业*, 2002(5): 7-11, 43.
- YANG K Z, LIN Y X, LI M R, LI H M. Selection and breeding of new sugarcane variety Mintang 92-649[J]. *Sugarcane and Canesugar*, 2002(5): 7-11, 43. (in Chinese)
- [93] 潘世明, 李瑞美, 李海明, 吴水金, 林一心. 甘蔗新品种闽糖 95-261 的选育研究[J]. *福建农业学报*, 2010, 25(4): 414-417.
- PAN S M, LI R M, LI H M, WU S J, LIN Y X. Breeding of new sugarcane variety, Mintang 95-261[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2010, 25(4): 414-417. (in Chinese)
- [94] 卢李威, 卢文祥, 韦小强, 韦勤丽, 黄育松. 甘蔗新品种桂柳二号选育报告[J]. *甘蔗糖业*, 2014(6): 7-11.
- LU L W, LU W X, WEI X Q, WEI Q L, HUANG Y S. Selection and breeding of new sugarcane variety Guilou 2[J]. *Sugarcane and Canesugar*, 2014(6): 7-11. (in Chinese)
- [95] 幸新妹, 张远福, 刘春平, 黎榕, 贺登登. 甘蔗新品种赣南 02-70 的选育研究[J]. *甘蔗糖业*, 2012(3): 1-4.
- XING X M, ZHANG Y F, LIU C P, LI R, HE D D. The breeding of a new sugarcane variety: Gannan 02-70[J]. *Sugarcane and Canesugar*, 2012(3): 1-4. (in Chinese)
- [96] 谭显平, 吕达, 陈道德, 王贵华, 谢显丽, 周英明, 王果, 陈政, 汪小川, 刘军, 李红梅, 张军, 李可刚, 李刚, 肖祎, 叶昌华. 优质高产早熟多抗糖能兼用甘蔗新品种川蔗 27 号 (川糖 99-8602) 选育研究报告[J]. *甘蔗糖业*, 2013(4): 4-19.
- TAN X P, LYU D, CHEN D D, WANG G H, XIE X L, ZHOU Y M, WANG G, CHEN Z, WANG X C, LIU J, LI H M, ZHANG J, LI K G, LI G, XIAO Y, YE C H. Selection of sugar-energy variety CZ27 (CT99-8602) for high yield, high quality, early maturing and multi-resistances[J]. *Sugarcane and Canesugar*, 2013(4): 4-19. (in Chinese)
- [97] 陈利平. 甘蔗花叶病与黄叶病 RNAi 双价抗病毒表达载体构建与遗传转化研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2013.
- CHEN L P. Studies on construction of RNAi bivalent antiviral expression vectors with consensus sequences of SCMV

- and ScYLV and genetic transformation[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2013. (in Chinese)
- [98] 于凤丽. 马铃薯 A 病毒外壳蛋白(PVA CP)基因的遗传转化研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2005.
- YU F L. Study on transferring of coat protein gene of Potato virus a (PVA CP) into potato (*Solanum tuberosum* L.)[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- [99] INGELBRECHT I L, IRVINE J E, MIRKOV T E. Posttranscriptional gene silencing in transgenic sugarcane. Dissection of homology-dependent virus resistance in a monocot that has a complex polyploid genome[J]. Plant Physiology, 1999, 119(4): 1187-1197.
- [100] BUTTERFIELD K, IRVINE E, VALDEZ G M, MIRKOV E. Inheritance and segregation of virus and herbicide resistance transgenes in sugarcane[J]. Theoretical and Applied Genetics, 2002, 104(5): 797-803.
- [101] APRIASTI R, WIDYANINGRUM S, HIDAYATI W N, SAWITRI W D, DARSONO N, HASE T, SUGIHARTO B. Full sequence of the coat protein gene is required for the induction of pathogen-derived resistance against Sugarcane mosaic virus in transgenic sugarcane[J]. Molecular Biology Reports, 2018, 45(6): 2749-2758.
- [102] GILBERT R A, GALLO-MEAGHER M, COMSTOCK J C, MILLER J D, JAIN M, ABOUZID A. Agronomic evaluation of sugarcane lines transformed for resistance to Sugarcane mosaic virus strain E[J]. Crop Science, 2005, 45(5): 2060-2067.
- [103] 张木清, 陈如凯, 姚伟, 阮妙鸿, 邓祖湖. 利用 SCMV-CP 基因培育抗花叶病甘蔗品种的方法: CN200710009227.2[P]. 2007-07-19.
- ZHANG M Q, CHEN R K, YAO W, RUAN M H, DENG Z H. The method for breeding sugarcane varieties resistant to sugarcane mosaic disease with SCMV-CP gene: CN200710-009227.2[P]. 2007-07-19. (in Chinese)
- [104] 杨川毓, 张铃, 郭莺, 郑碧霞, 阮妙鸿, 施肖堃, 陈如凯, 张木清. 抗花叶病转 *SrMV-P1* 基因甘蔗的产量和糖分分析[J]. 热带作物学报, 2012, 33(5): 843-847.
- YANG C Y, ZHANG L, GUO Y, ZHENG B X, RUAN M H, SHI X K, CHEN R K, ZHANG M Q. Evaluation on yield and sugar characteristics in transgenic sugarcane mediated with *SrMV-P1* gene from Sugarcane mosaic virus[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2012, 33(5): 843-847. (in Chinese)
- [105] 肖淑惠, 周国辉. 基于基因沉默的甘蔗三种主要病毒复合抗病基因构建及其转基因甘蔗研究[C]. 2010 全国甘蔗植保技术研讨会论文集, 2010: 35-37.
- XIAO S H, ZHOU G H. Construction of three main virus complex resistance genes based on gene silencing in sugarcane and research on transgenic sugarcane[C]. Proceedings of the 2010 National Symposium on Sugarcane Plant Protection Technology, 2010: 35-37. (in Chinese)
- [106] 徐景升, 程光远, 徐倩, 董萌, 彭磊, 杨永庆, 邓宇晴, 高世武, 郭晋隆, 许莉萍. 利用 RNAi 阻断病毒胞间移动培育抗花叶病转基因甘蔗的方法: CN201610217153.0[P]. 2016-04-08.
- XU J S, CHENG G Y, XU Q, DONG M, PENG L, YANG Y Q, DENG Y Q, GAO S W, GUO J L, XU L P. The method for transgenic sugarcane resistant to sugarcane mosaic disease using RNAi to block cell migration of virus: CN20161-0217153.0[P]. 2016-04-08. (in Chinese)
- [107] GUO J L, GAO S W, LIN Q L, WANG H B, QUE Y X, XU L P. Transgenic sugarcane resistant to Sorghum mosaic virus based on coat protein gene silencing by RNA interference[J]. BioMed Research International, 2015(2015): 861907.
- [108] 陈利平, 陈平华, 陈忠伟, 王恒波, 许莉萍, 刘迪, 高三基, 郭晋隆, 陈如凯. 甘蔗黄叶病毒与花叶病毒 CP 基因 RNAi 载体构建与转化甘蔗研究[J]. 热带作物学报, 2016, 37(1): 99-106.
- CHEN L P, CHEN P H, CHEN Z W, WANG H B, XU L P, LIU D, GAO S J, GUO J L, CHEN R K. Construction of ihpRNA expression vector of CP genes of SCYLV and SCMV and genetic transformation in sugarcane[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2016, 37(1): 99-106. (in Chinese)
- [109] 徐景升, 杨永庆, 程光远, 高世武, 郭晋隆, 翟玉山, 彭磊, 邓宇晴, 郑艳茹, 许莉萍. 利用 RNAi 沉默 *ScEIF4E1* 基因培育抗条纹花叶病甘蔗的方法: CN201510570284.2[P]. 2015-09-09.
- XU J S, YANG Y Q, CHENG G Y, GAO S W, GUO J L, ZHAI Y S, PENG L, DENG Y Q, ZHENG Y R, XU L P. The method for gene silencing *ScEIF4E1* gene by RNAi in sugarcane resistant to stripe sugarcane mosaic disease: CN201510570284.2[P]. 2015-09-09. (in Chinese)
- [110] ASLAM U, TABASSUM B, NASIR I A, KHAN A, HUSNAIN T. A virus-derived short hairpin RNA confers resistance against Sugarcane mosaic virus in transgenic sugarcane[J]. Transgenic Research, 2018, 27(2): 203-210.
- [111] WIDYANINGRUM S, PUJIASIH D R, SHOLEHA W, HARMOKO R, SUGIHARTO B. Induction of resistance to Sugarcane mosaic virus by RNA interference targeting coat protein gene silencing in transgenic sugarcane[J]. Molecular Biology Reports, 2021, 48: 3047-3054.