

◆特邀专稿◆

中国甘蔗种业发展研究进展^{*}周慧文¹, 陆桂军^{2**}, 吴建明¹, 韦昌联^{2**}

(1. 广西农业科学院甘蔗研究所, 农业农村部广西甘蔗生物技术与遗传改良重点实验室, 广西甘蔗遗传改良重点实验室, 广西南宁 530007; 2. 广西科技情报研究所, 广西南宁 530022)

摘要:我国是世界第三大产糖国和食糖消费国, 甘蔗糖产量已占到了食糖的90%以上。甘蔗种业发展对我国糖业的发展至关重要, 良种是实现甘蔗高产高糖高效栽培的关键。尽管我国甘蔗种质资源保存数量位居世界第一, 甘蔗自育品种已经覆盖全国主要蔗区并建立了甘蔗品种繁育推广体系, 但也面临着育种方式单一, 种质资源收集不全, “育繁推”体系不畅等问题。为此, 整合育种方法和资源评价方法, 加大种质收集范围, 大力推广健康种苗有望成为中国甘蔗种业未来的发展大方向。本文总结了我国甘蔗种业的发展历史、现状和存在的问题, 并对甘蔗种业的发展前景作出展望。

关键词:甘蔗; 种业; 现状; 展望; 育繁推

中图分类号: S566.1 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2023)03-0421-13

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20230710.001

甘蔗是我国最重要的糖料作物, 甘蔗糖产量占食糖的90%以上。我国甘蔗年种植面积达 1.8×10^6 hm², 仅次于巴西、印度, 成为世界第三大甘蔗种植国和产糖国^[1]。甘蔗也是极具发展潜力的能源作物, 我国在甘蔗乙醇的开发利用上已经具备相当成熟的技术, 具有较好的应用前景^[2]。甘蔗的食用功能在我国也早有记载, 战国时期劳动人民靠原始手段对甘蔗进

行榨汁饮用^[3]; 甘蔗还可作为优质饲料、食用菌培养原料等^[4]。虽然我国甘蔗产业发展已颇具规模, 但是我国糖业生产成本高、国际竞争能力弱的现状仍未改变。优良的甘蔗品种是实现高产高糖高效栽培的关键。目前我国已拥有种质资源量位居世界第一的资源圃^[5], 甘蔗自育品种已经覆盖全国主要蔗区, 建立了“育繁推”三位一体的良种繁育推广体系, 同时也面

收稿日期: 2023-01-05

修回日期: 2023-04-29

^{*} 国家现代农业产业技术体系广西甘蔗创新团队建设(nycytxgxcxtd-2021-03), 广西科技基地和人才专项(桂科 AD19245080), 中国科学院专项研发与联合攻关项目(KFJ-STG-QYZD-199-2), 广西农业科学院基本科研业务专项(桂农科 2021YT012)和中国科学院华南植物园重点支持项目(E36101)资助。

【第一作者简介】

周慧文(1990-), 女, 助理研究员, 主要从事甘蔗生理生化研究, E-mail: windyrentmd@qq.com。

【通信作者】**

陆桂军(1982-), 男, 副研究员, 主要从事科技战略与产业创新发展研究, E-mail: 58773918@qq.com。

韦昌联(1972-), 男, 研究员, 主要从事农业产业发展研究, E-mail: 176472130@qq.com。

【引用本文】

周慧文, 陆桂军, 吴建明, 等. 中国甘蔗种业发展研究进展[J]. 广西科学, 2023, 30(3): 421-433.

ZHOU H W, LU G J, WU J M, et al. Research Progress of Sugarcane Seed Industry in China [J]. Guangxi Sciences, 2023, 30(3): 421-433.

面临着育种手段单一、种质资源全球覆盖面不广、“育繁推”体系运营不畅等问题。自进入 2000 年以来,我国修订和发布了《中华人民共和国种子法》《国务院关于加快推进现代农作物种业发展的意见》《国务院办公厅关于深化种业体制改革提高创新能力的意见》等一系列政策文件^[6],将包括甘蔗品种在内的种源关键核心技术攻关提升到前所未有的高度。笔者聚焦甘蔗种业的前景与发展,对我国甘蔗种业的发展进行回顾,对目前甘蔗种业存在的主要问题和对策进行逐一梳理,在此基础上对甘蔗种业未来的发展方向作出展望,以期为甘蔗种业工作者提供参考。

1 甘蔗种质资源保存及品种选育

1.1 甘蔗种质资源保存、评价与利用

1.1.1 甘蔗种质资源保存

我国大规模开展甘蔗种质资源搜集研究工作始于 20 世纪 70 年代^[7,8],经过半个世纪的渠道引进、全面搜集和科学保存,已建成国家级甘蔗种质资源库,构建了杂交品种、细茎野生种和斑茅(*Erianthus arundinaceus*)等核心种质库。其中以云南省农业科学院为依托单位的国家甘蔗种质资源圃保存的种质资源量位居世界第一,保存有涵盖 6 个属 16 个种的甘蔗资源材料 5 000 余份^[5];广西农业科学院甘蔗研究所在 1954 年已经开始甘蔗资源搜集工作^[9],甘蔗种质资源圃现保存资源材料 2 852 份,涵盖 11 个种和 200 份创新种质,且广西农业科学院甘蔗研究所 2015-2019 年连续 5 年从广西 14 个地级市 51 个县收集和抢救甘蔗种质材料,共收集到 1 014 份种质资源,鉴定评价 650 份,提交给国家甘蔗种质资源圃 350 份^[10];广东省科学院南繁种业研究所拥有全国大多数的甘蔗种质资源,并将种质资源信息全国公开共享,为国内甘蔗育种家提供技术支撑,协助筛选育种材料,根据育种目标进行杂交试验,为育种家节省大量田间试验时间,提高育种效率^[11]。此外,四川、福建和贵州等地的甘蔗研究企事业单位也在各省持续开展甘蔗种质的收集、保存和交换工作。

1.1.2 甘蔗种质资源的评价与利用

目前,甘蔗种质资源评价方法主要分为表型评价和分子标记评价^[12]。表型评价是利用主成分分析、聚类分析、相关性分析和共线性分析等手段对国内外的甘蔗、割手密(*Saccharum spontaneum*)、斑茅等栽培种、野生种和杂交组合进行表型或农艺性状的遗传多样性分析^[13-16],包括对甘蔗种质资源进行农艺性状

的快速分级^[17]和高通量的表型组学评价^[18]。分子标记评价是利用不断发展的分子标记手段进行评价,将 ISSR^[19]、AFLP^[20]、SSR 标记^[21]、TRAP、SRAP^[22]用于甘蔗种质的分子遗传背景分析,构建遗传图谱和核心种质库。

种质资源的保存、评价与利用可为甘蔗育种提供有价值的参考,是甘蔗育种程序的开端。利用资源最为典型的案例是 Jsewiet 提出的“高贵化”育种策略,即利用甘蔗野生种抗性强的特点,在甘蔗育种中将野生种优良的抗性基因遗传至后代的同时,选用热带种为母本,回交亲本和起始亲本选用能引起染色体加倍的材料,以便在育种连续的回交与杂交过程中降低野生种血缘,增加热带种血缘,加快甘蔗“高贵化”,选育出高产高糖高抗的优良品种^[23]。利用该方法选出的 POJ2878 不仅是全球的当家品种之一,也常被用作杂交亲本^[24]。我国大多数育成品种的血缘关系皆能追溯至 POJ2878。目前主栽品种血缘均与甘蔗野生种有关,如桂糖 42 号的亲本之一桂糖 92-66 含丰富的割手密血缘,粤糖 93-159 含爪哇割手密和印度割手密血缘,桂糖 11 号含高粱血缘^[25]。

创新种质的挖掘需要以丰富的资源保存量为基础。刘家勇等^[26]基于 292 份甘蔗种质资源的蔗糖分数据和遗传力挖掘出 32 份高糖种质;李欣茹^[27]根据 838 个不同基因型甘蔗的近红外光谱的连续变化情况挖掘出优质的生物质能源甘蔗品种;陆鑫等^[28]利用 27 份亲本材料杂交获得甘蔗“双腋芽”突变体,为减少甘蔗种植用种量、降低生产成本提供了新思路。

1.2 甘蔗品种选育

1.2.1 甘蔗主栽培品种更新换代历程和种植现状

甘蔗育种历史悠久,1887 年 Soltwedel、Harrison 和 Bovell 分别在印度尼西亚爪哇岛和巴巴多斯发现甘蔗可以通过杂交产生种子这一现象^[7],揭开了甘蔗有性杂交育种史的序幕。我国自 1953 年起,以海南甘蔗杂交育种场为先,多家科研单位开始了对甘蔗进行选育和推广的研究。近 70 年来,我国虽然育成品种 250 余个^[29-33](主栽品种如表 1 所示),但只有少数综合性状优良的品种被广泛种植。1953 年以前,中国大陆主栽甘蔗品种主要来源于印度和中国台湾。例如,1947 年之前广东省主要种植的甘蔗商业品种来源于印度尼西亚爪哇岛的 POJ2878 和 POJ2725,1947 年之后引进台糖 134 后覆盖全省种植。1953-1970 年,我国大陆选育出桂糖 1 号、粤蔗 3 号、川蔗 63 号等品种,虽然它们的种植面积仍低于来自中国

台湾、印度尼西亚爪哇岛、印度和澳大利亚等国家和地区的品种,但是这也意味着我国大陆开始逐渐种植自育品种。随后广西农业科学院甘蔗研究所选育出的“明星”品种——桂糖 11 号,取代台糖 134 在大陆的统治地位,成为 1970-1990 年大陆推广面积最大、持续种植时间最长的优良品种^[29],为我国蔗糖业和甘蔗种业的可持续发展做出了重大贡献。除桂糖 11 号外,粤糖 63/237 在各地蔗区也得到了广泛推广,占当时全国种植品种面积的第 3 位,仅次于台糖 134。1990-2010 年,我国甘蔗种植以台湾糖业股份有限公司育成的新台糖系列品种为主,该系列品种的种植面积达到全国甘蔗种植面积的 85%,个别蔗区高达 98%,尤其是新台糖 22 号已在多个蔗区种植 20 余年,成为名副其实的“当家”品种^[34]。

表 1 1953 年至今中国大陆主栽品种换代历程

Table 1 Replacement process of main varieties in the mainland of China from 1953 to present

时期 Periods	主要种植品种 Main planting varieties
Before 1953	POJ2878、POJ2725、竹蔗、罗汉蔗
1953-1970	台糖 134、POJ2878、Co419、Co290、选蔗 3 号
1971-1990	F134、桂糖 11、选蔗 3 号、粤糖 63/237
1991-2010	桂糖 11、新台糖 1 号、新台糖 16 号、新台糖 22 号
From 2011 to present	桂糖 42 号、新台糖 22 号、桂柳 05136、云蔗 05-51、粤糖 93-159

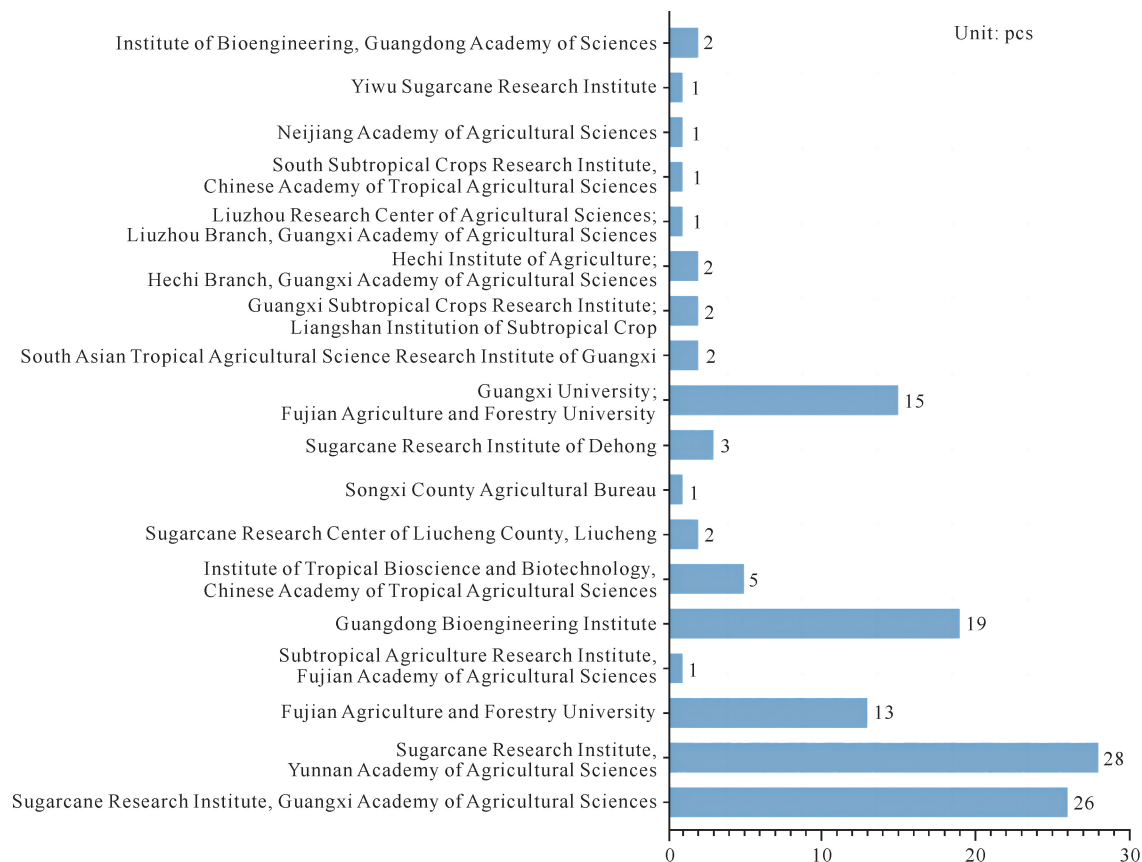
表 2 2022/2023 年榨季中国大陆种植面积占比超 1% 糖料蔗品种

Table 2 Planting area accounted for more than 1% of sugar cane varieties in the mainland of China in 2022/2023 crushing season

序号 No.	上年排名 Last year's ranking	品种 Variety	种植面积/万亩 Planting area/ ten thousand mu	本年占比/% Proportion of current year/%	上年占比/% Proportion of last year/%
1	2	桂糖 42 号	443.01	28.66	27.13
2	1	桂柳 05136	440.27	28.48	27.94
3	3	新台糖 22 号	84.73	5.48	8.03
4	4	粤糖 93-159	71.28	4.61	6.62
5	7	桂糖 49 号	51.83	3.35	2.09
6	6	云蔗 05-51	50.13	3.24	2.44
7	25	桂糖 44 号	44.20	2.86	0.31
8	5	粤糖 00-236	43.37	2.81	3.29
9	18	云蔗 08-1609	37.84	2.45	3.06
10	8	粤糖 55 号	32.98	2.13	1.72
11	24	桂糖 55 号	26.30	1.70	0.33
12	11	川糖 79-15	15.43	1.00	1.39
Total			1 341.38	90.67	81.90

Note: 1 mu is approximately 666.67 square meters.

随着台湾糖业由盛转衰,台糖系列甘蔗新品种的选育工作几乎进入停滞状态^[35],亟需大陆甘蔗育种单位选育适宜各地蔗区种植的甘蔗新品种。尽管我国甘蔗育种长期面临人才不足、经费短缺、工作环境艰苦等不利条件,但培育新品种的脚步从未停歇^[30]。2010 年至今,大陆甘蔗自育品种呈现出“遍地开花”的新局面,主要种植品种数日益增多(表 1),各地蔗区均培育出特色当家品种,如广西农业科学院甘蔗研究所选育出桂糖 42 号和桂糖 49 号;柳城县甘蔗研究中心选育出桂柳 05136;广东省生物工程研究所(广州甘蔗糖业研究所)选育出粤糖 93-159;云南省农业科学院甘蔗研究所选育出云蔗 05-51。2022-2023 年榨季,广西育成的 3 个品种——桂糖 42 号、桂柳 05136、桂糖 49 号种植面积分别占我国糖料蔗品种种植面积的 27.13%、27.94% 和 2.09%。粤糖系列和云蔗系列品种种植面积也分别达到 6.62% 和 3.06% (表 2)^[36]。从 2017 年 5 月 1 日《非主要农作物品种登记办法》颁布实施,实行非主要农作物品种登记制度以来,至今完成全国非主要农作物品种登记的甘蔗品种共 125 个;登记品种数量前三的育种单位为云南省农业科学院甘蔗研究所、广西农业科学院甘蔗研究所、广东省生物工程研究所(广州甘蔗糖业研究所),品种数量分别为 28、26、19 个(图 1)^[37]。

图1 我国育种单位甘蔗品种登记数量^[36]Fig. 1 Number of registered sugarcane varieties of breeding units in China^[36]

1.2.2 遗传修饰技术育种

甘蔗为转基因安全风险等级最低(Ⅰ级)的作物之一。自然条件下甘蔗商业栽培品种极难开花,外源基因漂移概率极低,是转基因遗传改良育种的优势作物^[38]。转基因抗虫改良育种主要为抗螟虫改良, *Cry1Ab*、*Cry2Ab* 和 *Cry1Ac* 蛋白的转基因甘蔗材料能有效控制甘蔗螟虫危害^[39]。我国在一系列转 *Cry1Ab* 和 *Cry2Ab* 基因的研究中获得了多个抗虫甘蔗株系,但只有少数株系鉴定出抗虫性,兼具抗虫性和经济性状的株系更为稀少^[40-44]。

转基因的抗病性改良主要为花叶病和黄叶病的抗性改良,这二者的共同点皆为病毒病,可试图通过干扰病毒蛋白基因来增强甘蔗抗病性^[37]。目前,甘蔗抗花叶病遗传改良面临的主要问题在于抗甘蔗花叶病的阳性株系无法避免同一抗原下的不同病毒株系侵染。黄叶病的抗性改良研究进展较慢,在国内虽有转基因阳性株系,但未对阳性株系进行系统的抗病毒鉴定^[45-48]。甘蔗最常见的真菌病害有黑穗病、赤腐病、梢腐病和锈病等。绝大多数真菌细胞壁的主要成分为几丁质和 β -1,3-葡聚糖,故将编码这两类酶的基

因导入甘蔗植株,在植株种内合成酶后可水解病原真菌细胞壁,达到抗黑穗病的目的^[49]。周宇明等^[50]利用基因枪介导的遗传转化方法获得干扰梢腐病菌 *CYP51* 基因表达的甘蔗受体材料。但对于其他的甘蔗真菌病害研究,仅停留在抗病基因挖掘层面。如李文凤等^[51]和王恒波等^[52]用分子标记检测了抗褐锈病和黄锈病的 *BRU1* 和 *WAK* 基因。对甘蔗其他性状的转基因研究取得积极进展,譬如转海藻糖合酶基因能增强甘蔗抗旱能力^[53];过表达 *ScPIP2-1* 基因可显著增强甘蔗植株耐盐性^[54];将 α -微管蛋白基因导入感冷品种‘ROC22’能增强甘蔗植株抗低温胁迫能力^[55];通过修饰关键性调控转录产物达到增加甘蔗蔗糖含量的目的^[56,57]等。但转基因甘蔗存在的共同问题是即使获得含有目标基因的甘蔗转基因材料,也常出现转基因沉默和转化率低等问题,这需要针对不同基因型甘蔗建立高效稳定的转化体系^[58,59]。

基因编辑是利用基因工具对生物体基因组及转录产物进行特异性精准修饰的新兴技术^[60]。王俊刚等^[61]首次构建针对甘蔗的 CRISPR/Cas9 载体,合成特异性靶向甘蔗 sgRNA 敲除甘蔗 *ShPDS* 基因,获

得生长缓慢、植株矮小的转基因甘蔗植株,为我国甘蔗基因编辑系统的开发和应用奠定了基础。

分子设计育种是将基于遗传图谱和高分辨率的染色体基因型鉴定技术与品种改良结合的新技术^[62]。伴随着甘蔗割手密全基因组的公布^[63],高质量且精细的全基因组序列图谱精准挖掘性状关联标记候选基因^[64]的现代分子设计育种策略得以应用于甘蔗育种。

2 甘蔗繁殖技术

2.1 常规繁殖技术

甘蔗是无性繁殖作物,常规的繁殖技术相对简单,将甘蔗砍成10-40 cm长的单、双芽段,利用甘蔗侧芽便可进行繁殖和种植。但目前常规繁殖技术无法规避同一品种经多年自留种繁殖后,土地和种茎内都会积累多种病原物,反复侵染植株,导致种性退化的问题^[65]。

2.2 脱毒健康种苗技术

甘蔗脱毒健康种苗技术是将甘蔗种苗进行脱毒恢复甘蔗品种优良种性的生物技术。该技术主要的脱毒方式有化学脱毒、物理脱毒和茎尖脱毒,其中茎尖脱毒是目前生产上最常用的脱毒方式,即利用甘蔗尖端不易受病毒侵染的特点,在无菌环境下采用组织培养技术生产出无菌甘蔗健康组培苗^[66,67]。使用健康组培苗种植的甘蔗分蘖率高,成茎率高,经种植一季后砍收的种茎完全可以作为生产用种,供蔗农使用。虽然健康组培苗生产成本较高,但是健康组培苗能产出无毒种茎,且产量、糖分均比自留种高。研究表明,采用甘蔗脱毒组培苗健康种茎种植,辅以配套机械精量种植技术,可使甘蔗增产20%-40%,蔗糖分增加0.5%以上(绝对值)^[1,68]。按甘蔗平均产量75 t/hm²计,糖价按6 400元/t计,蔗农可增收7 800元/hm²^[69],因此,脱毒健康种苗在我国甘蔗主产区得到规模化推广扶持^[68]。

2.3 繁育新技术

甘蔗繁育新技术是围绕如何高效生产和推广甘蔗健康种苗技术这一问题研发出的技术方法。利用间歇浸没式生物反应器(TIBs)培养甘蔗健康组培苗能增强组培苗的光合作用能力,使增殖率高达20-40倍^[70,71],缺点是存在褐化和污染的风险,培养体系还未成熟,因此目前该技术的应用仍处于起步阶段^[72]。“甘蔗健康种子”包衣技术是目前推广的成熟繁育新技术。健康种茎被切成长度约4 cm的茎段,

用含有营养物质和杀虫剂的保护膜对其包衣,保证种茎在富含营养的健康环境中生长。健康种苗移栽时间研究结果显示,在保证水分供应充足的前提下,在种苗4叶期移栽的蔗种产量高于正常时间移栽(8叶期移栽)^[73]。还有研究者进行甘蔗主茎重复扦插的可行性探索,剪下健康种苗原苗主茎,利用主茎进行两次或两次以上的扦插,显著降低了生产成本^[74]。

3 糖料蔗良种繁育和推广

3.1 糖料蔗生产保护区的建立

建立糖料蔗生产保护区是甘蔗良种繁育和推广的重要举措。2015年,国家发展和改革委员会联合农业部(现为农业农村部)颁布《糖料蔗主产区生产发展规划(2015-2020年)》;2017年,国务院发布《国务院关于建立粮食生产功能区和重要农产品生产保护区的指导意见》,明确广西和云南为我国糖料蔗主产区,划定广西和云南的糖料蔗面积必须分别稳定在 7.667×10^5 hm²和 2.333×10^5 hm²。广西等地也出台了一系列发展糖料蔗产业的政策制度,如《广西壮族自治区人民政府关于促进我区糖业可持续发展的意见》《广西优质高产高糖糖料蔗示范基地建设试点实施方案》等系列文件,明确提出要推广健康种苗的实施方案和对良种良法进行持续性补贴的惠农政策。在国家和地方政府的大力支持和推动下,我国糖料蔗生产保护区建设取得明显成效。截至2021年,广西和云南完成划定糖料蔗生产保护区 1.00×10^6 hm²,其中糖料蔗“双高”基地建设 4.667×10^5 hm²。广东蔗区建成 1.0×10^5 hm²的糖料蔗生产基地^[75]。

3.2 良种繁育基地的建立

建立甘蔗良种繁育基地可为糖料蔗生产保护区提供优质高产高糖甘蔗新品种及健康种苗。自2000年以来,全国主要蔗区如广西的南宁、北海,广东的湛江和云南的开远等地相继建立了甘蔗良种繁育基地^[75,76]。但当时全国蔗区主要依赖台糖系列品种,甘蔗良种繁育基地并未选育出有突破性的甘蔗新品种^[30],加之良种繁育体系不完善,导致大部分良种繁育基地未能高效运转,难以实现培育和推广新品种的目的^[76,77]。为加强甘蔗良种繁育基地建设,提升基地甘蔗良种的繁育推广能力,各级政府出台了系列政策措施,如广西陆续出台《广西甘蔗良种繁育推广体系建设实施方案》《广西甘蔗种业产业化发展规划(2018-2035年)》《关于加快广西甘蔗良种繁育推广的实施意见》等政策文件,大力推进了甘蔗良种繁育基

地建设。目前广西良种繁育基地按照功能大致分为一级、二级、三级。一级基地建设主体为科研单位或育种企业,主要应用茎尖脱毒技术生产健康种苗,为二级基地提供原原种,并负责选育、扩繁甘蔗新品种和指导二级基地的建设;二级基地建设主体为制糖企业、繁种企业,主要负责扩繁一级基地提供的原原种,将原原种变为原种,向三级基地提供原种以及对甘蔗新品种进行宣传 and 推介等;三级基地主要负责对原种进行扩繁,生产出健康种茎后提供给糖企和蔗农使用,并对品种栽培技术进行指导。目前广西已批准建设总面积达 7.36 万亩的良种繁育基地 42 个,其中一级基地 5 个、二级 15 个、三级 22 个,年供种量超过 3.7×10^5 t,有效满足了广西 2.67×10^4 hm²“双高”糖料蔗基地的用种需求^[77]。

3.3 “育繁推”体系建设

甘蔗“育繁推”一体化是加快推进甘蔗种业高质量发展的有效模式。近年来,广西通过大力推进甘蔗“育繁推”一体化体系建设,选育了一批综合性状优良的甘蔗新品种,改变了台糖系列在广西蔗区垄断的局面。2013–2020 年,伴随着桂糖、桂柳等自育品种系列占广西种植面积的比例逐渐上升,新台糖 22 号在广西主要蔗区的种植面积占种植总面积的比例从 71.17% 降至 30.42%^[78,79]。除主栽品种外,通过甘蔗“育繁推”一体化建设,广西选育出一批特色的品种或品系,如适宜补种的桂辐 98-296^[80],适宜机械化种植的桂糖 44 号和桂糖 49 号^[81],抗黑穗病品系桂糖 12-765 和桂糖 12-2262 等^[82]。“育繁推”一体化体系模式也带动了种业企业的发展。广西来宾市金凤凰农业投资有限公司不仅建立了甘蔗健康种茎加工厂^[83],而且通过“公司+合作社+群众”的方式建立了与农户利益联结机制,大力开展甘蔗新品种的繁育和推广。

4 存在问题

4.1 甘蔗种质资源缺乏,利用率低,遗传背景狭窄

虽然我国甘蔗种质资源规模全球第一,但仍然存在以下问题。一是甘蔗种质资源缺乏。资源的来源地仍以国内为主,5 000 余份资源中仅有 700 余份来自其他国家和地区^[84];而发达国家早已在全球范围完成了甘蔗种质资源的广泛收集和整理,在 2013 年美国收集甘蔗种质资源 2 863 份,这些种质资源来自 61 个国家和地区,涵盖 21 个甘蔗属或其近缘属^[85]。发达国家的种业公司充分挖掘甘蔗种质资源后申请

了知识产权保护,这意味着我国诸多的甘蔗优异性状资源被发达国家掌握,这也是我国种业普遍面临的“卡脖子”问题^[86]。二是甘蔗主栽品种遗传背景狭隘。少量亲本培育了大部分甘蔗商业品种。张琼等^[25]研究显示,大陆育成的 186 个甘蔗品种由 93 个亲本培育,但其中的 21 个亲本培育了 163 个品种,186 个甘蔗品种均可追溯至 POJ2878 或 POJ2725 的血缘。遗传背景狭窄造成我国高产高糖的亲本数目不足,抗病性不佳。目前全国主栽品种桂糖 42 号和桂柳 05-136 对黑穗病抗性不佳,并存在流行病害严重的问题^[82]。三是种质资源利用率低。从国外资源利用方面来看,我国保存了涵盖 20 个国家和地区的 5 000 余份种质资源,来自澳大利亚、法国、巴西等国家的种质资源挖掘不够深入,利用率低^[87];从野生种质资源利用方面来看,虽然我国保存有割手密、斑茅、河八王(*Narenga porphyrocoma*)等野生种质,却仅有少部分野生种质得到开发利用。如广西配置了斑割复合体组合 74 个,配置河八王 GXSNF1、GXSNBC1、GXSNBC2 组合 47 个,广东和云南也获得了一批含有野生种血缘的“崖城”系列和“滇蔗”系列材料,但至今仍未有含斑茅和河八王血缘的甘蔗品种问世^[12,88]。我国在割手密上的开发程度较好,但只对印度和印度尼西亚爪哇岛以及我国台湾、崖城的割手密小部分资源进行利用,开发利用程度远远不够^[89]。

4.2 甘蔗育种手段保守,仍以常规杂交为主

当前,国外种业已进入“生物技术+信息化”育种的 4.0 时代,与之相比,我国仍处在以杂交选育为主和以分子标记育种为辅的 2.0–3.0 时代。我国甘蔗育种手段略显保守,甘蔗育种周期从挑选亲本至品种释放长达 10 年(图 2)^[64],投入大、时间长、效率低是甘蔗杂交育种的常态。尽管国内已挖掘出甘蔗抗病抗逆基因,如甘蔗 *SoP5CS* 基因、海藻糖合成酶途径基因、甘蔗抗旱 *DREB* 基因^[90-92],以及通过分子标记手段筛选出抗黑穗病、梢腐病和黄锈病有关的分子标记^[93-95],但至今仍未有转基因甘蔗品种在我国商业化种植。在国外,2013 年,印度尼西亚已经批准转入甜菜碱合成酶基因改良甘蔗抗旱性的转基因甘蔗商业化种植,这也是世界上第一例转基因甘蔗商业化种植事件^[96];2018 年,巴西的转基因甘蔗已商业化种植 400 hm²^[97]。

近几年甘蔗栽培种 R570 的基因组测序陆续完成^[63],为遗传修饰技术在甘蔗育种中的应用提供了方便,但我国在蔗基因编辑领域的研究尚需继续加

强^[98], 目前仅发现王俊刚等^[61]构建 CRISPR/Cas9 载体获得转基因甘蔗植株的研究。国外关于甘蔗基因编辑的研究报道相对较多。美国研究者利用 TALEN 诱变甘蔗咖啡酸 O-甲基转移酶高度保守区域多等位基因, 修饰甘蔗木质素生物合成, 使木质纤维素生物物质更多地向乙醇转化^[99]; 利用 CRISPR/

Cas9 介导 49 个镁整合酶拷贝/等位基因靶向共突变, 在甘蔗中实现高效多等位基因编辑^[100]。还有国外学者基于基因组选择 (Genomic Selection, GS) 预测甘蔗抗病种质的基因组估计值, 为甘蔗抗病种质的选择提供依据^[101]。

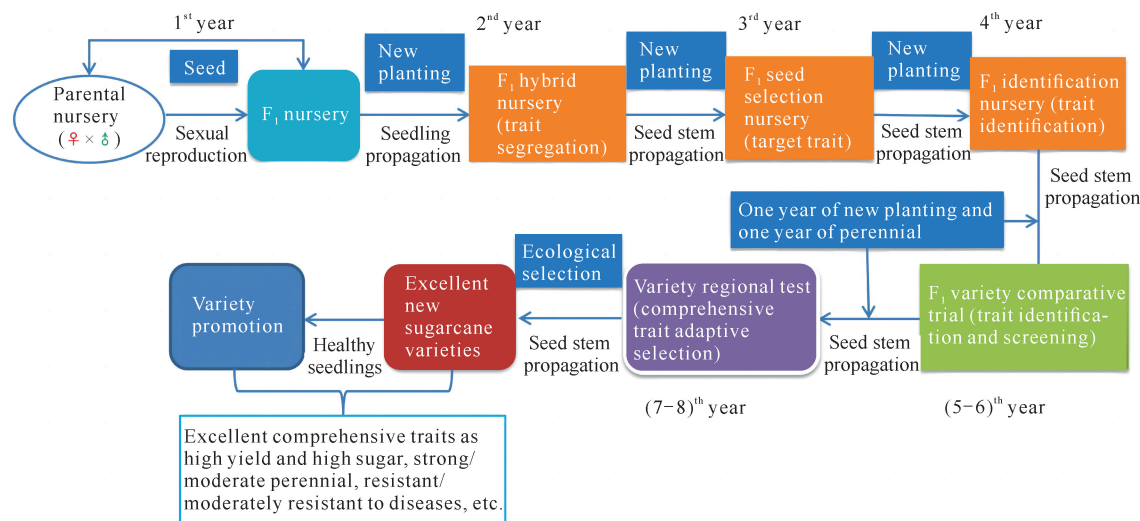


图2 甘蔗新品种的常规杂交选育流程^[64]

Fig. 2 Conventional hybrid breeding process of new sugarcane varieties^[64]

4.3 “育繁推”体系衔接不畅, 良种繁育基地的供种量无法满足用种需求

我国甘蔗“育繁推”体系尽管已规模化建成 10 余年, 但仍然有以下问题制约着该体系的推广。一是“育繁推”体系存在各级基地衔接不畅、联系不紧密的问题。一般情况下, 不同级别的基地中, 种植蔗种的种类已有明确规定, 但由于对规定执行落实不到位等原因, 导致同个基地中种植了多个类型的蔗种; 衔接不畅的问题还体现在各级基地供种脱节上, 二级和三级基地由所在县统一管辖, 对甘蔗新品种有限制种茎往外调出的保护政策, 导致各地基地的种茎量出现“早的早死, 涝的涝死”的局面。在同一片区的良种繁育基地也出现了供应不畅的问题。当前优质甘蔗商业品种数目繁多, 上下级基地却无法明确供需数量进行定量繁育, 导致本级基地所供种茎并非为下级基地所需品种^[75]。二是良种繁育基地的供种量无法满足用种需求。广西已建成 50 余个甘蔗良种繁育基地, 年供种量为 2×10^5 t, 仅能基本满足广西 2.67×10^5 hm² “双高”糖料蔗基地用种量需求。现今广西甘蔗的种植面积达 8×10^5 hm², 按照“一新两宿”的种植方法, 每年需要翻复用种的甘蔗地超 2×10^5 hm², 按照健康种茎用种量每亩 0.5 t 计算, 年需用种 2×10^6

t, 而甘蔗良种繁育基地的供种量为 3.7×10^5 t/a, 远远无法满足广西蔗区的用种需求^[76,77]。

4.4 良种覆盖不全, 健康种苗使用率低

2021 年至今, 我国已经登记了 40 个甘蔗优良品种^[37], 但仍然存在以下问题。一是国内近几年选育的优良商业品种尚未得到广泛推广。如广西较多蔗区依旧种植着 20 年前选育出的新台糖 22 号; 广东部分蔗区对优良品种的宣传和试验工作不到位, 仅对国家甘蔗体系提供的粤糖、桂糖、云蔗、福农 4 个系列品种进行区域适应性试验, 易造成蔗区主栽品种种性退化后无备选品种可用的窘境^[102]。二是健康种苗使用率低。众多研究已经明确采用健康种茎能带来更高的产量和糖分, 进而使甘蔗生产节本增效, 蔗农收益得到提高。但健康种苗的配套高效标准栽培方法推广不到位, 许多蔗农的甘蔗栽培方法较为粗放, 无法充分发挥健康种苗的优势, 因此, 许多蔗农仍在使用老旧品种和自留种。相关数据显示, 广西仅有 18.55% 的农户使用过健康种苗, 其中全价购买健康种苗的农户约占 45.45%, 政府补贴和糖厂、公司提供或补贴的分别占 21.82% 和 30.91%^[103]。健康种苗使用率低的原因众多, 除了囿于传统观念束缚外, 还有未意识到更新品种的重要性的商品化蔗种的优

良种性,健康种苗成本居高不下、政府补贴不到位、市场宣传力度不够、培训不充分等诸多方面的原因。

4.5 甘蔗生产全程机械化水平低下

近年来农村人口流失严重,农药、肥料等农资费用上涨,甘蔗生产成本逐年升高,不仅导致蔗农收益空间不断被挤压,而且过高的生产成本也造成我国甘蔗价格远超国外,甘蔗产业竞争力长期处于弱势地位^[89,104],迫切需要大力发展甘蔗生产全程机械化。在甘蔗机械化的“耕、种、管、收”4个环节中,“收”是制约全程机械化的短板,解决机械化收获这一关键环节的问题就能全面提升甘蔗生产全程机械化水平。目前我国机械化水平远落后于国外。世界上生产甘蔗最多的国家——巴西的甘蔗综合生产机械化水平在85%以上^[105],甘蔗机械化收获率在60%左右;泰国的甘蔗机械化收获率在40%以上^[106];澳大利亚则实现了全程机械化作业生产^[104]。广西柳城县“双高”基地机械化收获的推广水平是27%,但全国的机械化收获率在2019-2020年榨季平均仅为4.6%,仍有大幅提升空间^[104]。有诸多因素制约着全国机械化收获率的提升,主要因素之一是目前主栽甘蔗品种耐贮性不佳。研究表明机械化收获后甘蔗的切面和伤口数量增加,在12h内蔗糖损失率高达30.87%,真菌数量显著增加,采用机械化收获的甘蔗其生理恶化程度大于人工整杆砍收^[107]。此外,机械化收获甘蔗有较高的含杂率和损失率,因此糖厂也限制了机械化收获甘蔗进厂数量,一定程度上限制了甘蔗机械化的推广^[104]。

5 展望

中国甘蔗种业发展应加大种质资源挖掘与利用、全方位优化甘蔗良种“育繁推”体系建设,多角度扩大健康种苗的宣传和推广力度,全力保障种业、科研、产业的一体化生态融合进度,锻造高质量种子优势龙头企业。

5.1 选育和推广适宜全程机械化的甘蔗新品种

研究表明,不倒伏、易脱叶的甘蔗品种留茬高度低,可以保证较高的机械化收获质量^[108]。李毅杰等^[109]认为宿根性强的品种可降低机械化收获碾压对来年甘蔗发株数的影响,因此宿根性强的品种更适宜机械化收获;实践证明,比起大茎甘蔗品种,中小茎品种更适宜机械化收获^[110]。目前选育出适合机械化收获的优良新品种有桂糖29号、桂糖42号、桂糖44号、桂糖47号、中蔗6号和中蔗9号等^[88,111,112]。

在对已选育出的品种进行推广的同时,应对其机械化生产的适宜性进行有针对性的评价,选拔苗头品种进行区试和大田测试,并制订和推广甘蔗生产全程机械化标准,以广西机械化程度高的“双高”基地为模板,规范、科学地进行“耕、种、管、收”每一个环节的操作,确保将全程机械化的高效优势充分发挥出来,从而提高农户的盈利率,提高我国甘蔗生产全程机械化水平^[104]。

5.2 拓宽育种方式,加大种质资源挖掘利用

利用分子生物学技术对种质资源进行评价和创新利用,既是有效解决我国甘蔗种质资源缺乏、利用率低的手段,也是把我国从种业大国提升到种业强国的关键。随着我国在2020年将生物育种这一新兴产业写进“十四五”规划纲要,以及2021年农业农村部先后发布《2021年农业转基因生物监管工作方案》和《关于鼓励农业转基因生物原始创新和规范生物材料转移转让转育的通知》等政策,我国种业生物育种发展前景可期。因此,要持续推进甘蔗分子生物学研究,加强甘蔗抗逆基因的挖掘利用,加强分子标记辅助育种、转基因育种为主的分子设计育种和基因编辑育种,针对甘蔗高倍性多倍体的特性,加大对多个等位基因进行有效编辑的研究投入^[38],促进以转基因和基因编辑为代表的遗传修饰技术在甘蔗育种中的有效应用;加大甘蔗精准育种等技术的创新应用。与常规育种技术相比,基于多组学信息的甘蔗精准育种(全基因组选择和基因编辑)具有目标精准和效率高的特点,有助于在育种早期阶段鉴定出性状优良的甘蔗材料,并能有效减少群体种植规模,缩短育种周期^[113-115]。在甘蔗资源的收集、保育和引进工作等方面,要积极引进国外资源,收集利用率高、易脱叶、抗胁迫、适宜机械化和轻简栽培的种质材料,丰富种质资源基因型,拓宽甘蔗亲本选择范围;联合高通量表型组学与基因组学进行资源规模化精准评价鉴定,不断加强对国内外各类种质资源的挖掘和利用。

5.3 规范甘蔗“育繁推”体系,加大健康种苗的宣传推广力度

针对“育繁推”体系不健全、衔接不畅的问题,必须加强甘蔗良种“育繁推”体系的顶层设计,包括完善育繁基地的申报制度、专家评估、可行性分析,以及基地使用过程中的蔗农和糖企的满意度、成效验收等,全面构建以企业为主体、产学研协同的甘蔗良种“育繁推”体系。针对市场上健康种苗使用率低的问题,建立种苗工厂化生产平台和标准化健康种苗生产工

厂,通过对种茎进行杀毒和包衣预处理,以低成本批量生产优质健康种茎提供给繁育基地。同时加大对健康种苗的宣传和培训力度,除了向购买健康种苗的农户和对农户提供健康种苗的企业进行补贴外,还应对其进行高产栽培技术、土地整治、选用良种等方面的培训。政府搭建甘蔗种业信息发布平台,及时在网上更新甘蔗生产的相关信息,取消种茎只在县内调运的限制,各级基地利用互联网对种茎种类和数量进行推介。采用线上线下相结合的方式,通过抖音、快手等进行直播或者邀请媒体现场展示,更为直观地展示商业化品种的优良种性。

5.4 加大种业、科研、产业的融合,打造种子优势企业

针对传统甘蔗种业品种开发与市场脱节、成果转化和产业化不足、科研与产业存在“两张皮”的状况,积极探索联合育种模式。加强种业科研单位与相关企业的协同创新,推进甘蔗科研机构与种子企业合作,充分发挥甘蔗科研单位的研发优势,带动种业公司发展,逐步培育和打造一批种子优势企业;通过建立创新联合体和“产学研”深度融合的方式,助力企业加快品种的“育繁推”一体化进程;政府部门应对联合育种方式进行政策化引导,建立以自主创新为内核、市场和政策为导向、企业为中坚力量的“育繁推”体系,加大优良新品种的成果转化力度和奖励力度,使科研人员和企业都能享受培育优良新品种带来的红利,推进我国甘蔗种业高质量发展。

参考文献

- [1] 李杨瑞. 现代甘蔗学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [2] 谢志鸿. 利用现代农业新技术开启原料生产新模式[J]. 中国糖料, 2015, 37(4): 61-63, 65.
- [3] 张蓓蓓. 我国生物质原料资源及能源潜力评估[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [4] 杨翠凤, 杨丽涛, 李杨瑞. 甘蔗的起源和进化[J]. 南方农业学报, 2014, 45(10): 1744-1750.
- [5] 陈云芬. 资源数量世界第一[N]. 云南日报, 2022-10-20(1).
- [6] 贾冠清, 刁现民. 中国谷子种业创新现状与未来展望[J]. 中国农业科学, 2022, 55(4): 653-665.
- [7] 林彦铨, 陈如凯. 甘蔗育种发展和今后研究方向[J]. 甘蔗, 1999(4): 39-45.
- [8] 何顺长, 杨清辉, 肖风迥, 等. 全国甘蔗野生种质资源的采集和考察[J]. 甘蔗, 1994(1): 11-17.
- [9] 诸葛莹, 李荫榆, 黄吉森. 广西甘蔗种质资源的搜集与利用[J]. 广西农业科学, 1989(5): 13-16.
- [10] 吴建明, 段维兴, 张保青. 广西农作物种质资源·甘蔗卷[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [11] 常力强. 海南三亚市崖州区国家现代农业产业园探索CRO合同育种模式: 为专业高效育种播下“种子”[N]. 农民日报, 2022-07-09(6).
- [12] 赵勇, 赵培方, 胡鑫, 等. 基于农艺性状分级对317份甘蔗种质资源的评价[J]. 中国农业科学, 2019, 52(4): 602-615.
- [13] 吴建涛, 许环映, 谢静, 等. 粤糖系列甘蔗亲本表型性状遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报, 2018, 19(4): 748-759.
- [14] 赵俊, 吴才文, 赵培方, 等. 引进甘蔗种质工艺与农艺性状的相关性及聚类分析[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2012, 38(5): 476-481.
- [15] 徐超华, 陆鑫, 马丽, 等. 斑茅种质资源的表型性状及遗传多样性[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2014, 40(2): 117-121.
- [16] 谭秦亮, 朱鹏锦, 李穆, 等. 基于主成分与聚类分析的甘蔗新品种(系)主要农艺及产量性状的评价[J]. 热带农业科学, 2022, 42(3): 32-38.
- [17] 田春艳, 边芯, 董立华, 等. 甘蔗野生种割手密杂交F1代SSR鉴定和遗传分析[J]. 热带作物学报, 2022, 43(10): 2021-2029.
- [18] 王茂瑶. 甘蔗品质性状高通量表型评价体系的建立及初步应用[D]. 南宁: 广西大学, 2021.
- [19] 赵理贤, 肖雪, 陈悦佳, 等. 33份甘蔗种质资源的ISSR标记和遗传多样性[J/OL]. 分子植物育种, 2022: 1-20 (2022-07-28) [2023-04-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20220728.1128.006.html>.
- [20] 咎逢刚, 吴才文, 陈学宽, 等. 118份甘蔗种质资源遗传多样性的AFLP分析[J]. 作物学报, 2014, 40(10): 1877-1883.
- [21] 刘家勇, 咎逢刚, 赵培方, 等. 甘蔗种质资源蔗糖分性状遗传变异分析及高糖种质发掘[J]. 植物遗传资源学报, 2022, 23(3): 746-756.
- [22] 宋弦弦. 甘蔗及其近缘植物遗传多样性的SRAP和TRAP标记分析[D]. 福州: 福建农林大学, 2009.
- [23] 柴进, 余凡, 谢树伟, 等. 甘蔗割手密高贵化育种中分子细胞遗传学研究进展[J]. 华北农学报, 2019, 34(S1): 386-393.
- [24] 陈如凯, 林彦铨, 张木清, 等. 现代甘蔗育种的理论与实践[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [25] 张琼, 齐永文, 张垂明, 等. 我国大陆甘蔗骨干亲本亲缘关系分析[J]. 广东农业科学, 2009(10): 44-48.
- [26] 刘家勇, 咎逢刚, 赵培方, 等. 甘蔗种质资源蔗糖分性状遗传变异分析及高糖种质发掘[J]. 植物遗传资源学报, 2022, 23(3): 746-756.

- [27] 李欣茹. 甘蔗细胞壁特征高通量评价及种质资源挖掘[D]. 南宁: 广西大学, 2021.
- [28] 陆鑫, 毛钧, 刘新龙, 等. 甘蔗双腋芽突变体表型鉴定及应用潜力评估[J]. 植物遗传资源学报, 2020, 21(2): 314-320.
- [29] 李杨瑞, 杨丽涛. 20世纪90年代以来我国甘蔗产业和科技的新发展[J]. 西南农业学报, 2009, 22(5): 1469-1476.
- [30] 李杨瑞. 现代甘蔗学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [31] 彭绍光. 我国各省甘蔗主栽品种考[J]. 甘蔗糖业, 1990(3): 7-14.
- [32] 韦金菊, 周会, 李海碧, 等. 广西近40年甘蔗种质资源引进及利用[J]. 南方农业学报, 2021, 52(2): 280-287.
- [33] 李远潭, 王贵华, 陈道德, 等. 四川甘蔗品种选育[J]. 中国糖料, 2015, 37(5): 63-67, 71.
- [34] 李杨瑞. 广西甘蔗创新与展望[J]. 广西农学报, 2019, 34(4): 1-7.
- [35] 李杨瑞. 对加入WTO后广西蔗糖业发展的几点意见[J]. 广西农业科学, 2003(1): 1-4.
- [36] 广西壮族自治区糖业发展局, 广西糖业协会. 广西2021/2022年榨季基本情况[J]. 广西糖业年报(2021/2022年制糖期): 1-2.
- [37] 中国种业大数据平台[DB/OL]. [2023-04-28]. <http://202.127.42.47:6010/index.aspx>.
- [38] 许孚, 汪洲涛, 路贵龙, 等. 甘蔗遗传改良中的基因工程: 适用、成就、局限和展望[J]. 农业生物技术学报, 2022, 30(3): 580-593.
- [39] CRISTOFOLETTI P T, KEMPER E L, CAPELLA A N, et al. Development of transgenic sugarcane resistant to sugarcane borer [J]. Tropical Plant Biology, 2018, 11: 17-30.
- [40] 冯翠莲, 沈林波, 赵婷婷, 等. *CryIAb* 基因转化甘蔗及转基因抗虫植株的获得[J]. 热带农业科学, 2011, 31(9): 21-26.
- [41] 胡天娇. *Cry2A* 基因转化甘蔗及其抗虫性应用的初步研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2020.
- [42] 王文治, 胡天娇, 杨本鹏, 等. 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.
- [43] 周定港. 转 *CryIAC* 基因甘蔗的分子特征及生物学研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2016.
- [44] 陈勇生, 齐永文, 吴嘉云, 等. *Cry2A* 基因导入甘蔗品种 ROC22 的抗虫性评价[J]. 甘蔗糖业, 2018(5): 7-10.
- [45] 陈利平, 陈平华, 陈忠伟, 等. 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.
- [46] 董丽莎. 甘蔗黄叶病毒 CP 基因 RNAi 载体构建及转化甘蔗研究[D]. 海口: 海南大学, 2012.
- [47] 姚伟, 余爱丽, 徐景升, 等. 转 *ScMV-CP* 基因甘蔗的分子生物学分析与鉴定[J]. 分子植物育种, 2004, 2: 13-18.
- [48] YAO W, RUAN M H, QIN L F, et al. Field performance of transgenic sugarcane lines resistant to sugarcane mosaic virus [J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 104.
- [49] WESSELS J G H. Developmental regulation of fungal cell wall formation [J]. Annual Review of Phytopathology, 1994, 32: 413-437.
- [50] 周宇明, 黄振, 段真珍, 等. 甘蔗梢腐病菌 *Fusarium sacchari* CYP51 基因克隆及遗传转化[J]. 热带作物学报, 2021, 42(12): 3462-3470.
- [51] 李文凤, 单红丽, 张荣跃, 等. 甘蔗优良新品种(系)抗褐锈病基因 *Bru1* 的分子检测及自然抗性评价[J]. 植物病理学报, 2017, 47(5): 667-674.
- [52] 王恒波, 陈姝琦, 郭晋隆, 等. 甘蔗抗黄锈病 G1 标记的分子检测及候选抗病基因 WAK 的分析[J]. 作物学报, 2021, 47(4): 577-586.
- [53] ZHANG S Z, YANG B P, FENG C L, et al. Expression of the *Grifolia frondosa* trehalose synthase gene enhances the drought-tolerance in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2006, 48(4): 453-459.
- [54] TANG H C, YU Q, LI Z. A PIP-mediated osmotic stress signaling cascade plays a positive role in the salt tolerance of sugarcane [J]. BMC Plant Biology, 2021, 21(1): 589.
- [55] CHEN J Y, KHAN Q, SUN B, et al. Overexpression of sugarcane *SoTUA* gene enhances cold tolerance in transgenic sugarcane [J]. Agronomy Journal, 2021, 113(6): 4993-5005.
- [56] 何炜, 周平, 张建福, 等. 甘蔗果糖-6-磷酸-2-激酶/果糖-2,6-二磷酸酯酶基因(*F2KP*)的克隆及其功能研究[J]. 农业生物技术学报, 2012, 20(4): 347-355.
- [57] 连玲, 叶冰莹, 陈如凯, 等. 甘蔗尿苷二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶基因(*UGPase*)转化拟南芥及转基因植株的生理特性分析[J]. 农业生物技术学报, 2012, 20(5): 481-488.
- [58] 李娇, 王震, 杨本鹏, 等. 转基因甘蔗抗黑穗病鉴定研究[J]. 广西农业科学, 2009, 40(9): 1150-1155.
- [59] 申明明. 割手密醛脱氢酶 *ScALDH* 基因克隆与表达分析[D]. 昆明: 云南农业大学, 2016.
- [60] ZHAN X Q, LU Y M, ZHU J K, et al. Genome editing for plant research and crop improvement [J]. Journal

- of Integrative Plant Biology, 2021, 63(1): 5-35.
- [61] 王俊刚, 王文治, 赵婷婷, 等. 一种针对甘蔗的 CRISPR/Cas9 载体及其构建方法和应用: 202010439028.0 [P]. 2022-02-22.
- [62] 王建康, 李慧慧, 张学才, 等. 中国作物分子设计育种[J]. 作物学报, 2011, 37(2): 191-201.
- [63] ZHANG J S, ZHANG X T, TANG H B, et al. Allele-defined genome of the autopolyploid sugarcane *Saccharum spontaneum* L. [J]. Nature Genetics, 2018, 50: 1565-1573.
- [64] 罗含敏, 熊发前, 丘立杭, 等. 性状相关的分子标记在甘蔗分子育种中的应用研究[J]. 作物杂志, 2022(2): 35-43.
- [65] 范业赓, 闫海锋, 陈荣发, 等. 甘蔗脱毒种苗第三代种茎不同体积单芽育苗差异及其移栽效果[J]. 作物杂志, 2020(2): 194-199.
- [66] 吴建明, 范业赓. 甘蔗健康种苗生产和应用技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2021.
- [67] 杨本鹏, 张树珍, 蔡文伟, 等. 甘蔗健康种苗田间栽培主要农艺性状比较[J]. 热带作物学报, 2010, 31(2): 171-175.
- [68] 李恒锐. 甘蔗脱毒与非脱毒种苗田间比较试验[J]. 中国糖料, 2014(1): 42-43.
- [69] 吴凯朝, 何远兰, 卢庆伟, 等. 甘蔗健康种茎工厂化制种配套机械精量种植技术效益分析[J]. 广西糖业, 2022, 42(6): 5-7.
- [70] 梁永检, 张小秋, 杨柳, 等. 甘蔗健康种苗繁育技术研究进展[J]. 生物技术通报, 2014(11): 91-96.
- [71] LORENZO J C, GONZÁLEZ B L, ESCALONA M, et al. Sugarcane shoot formation in an improved temporary immersion system [J]. Plant Cell Tissue and Organ Culture, 1998, 54(3): 197-200.
- [72] MORDOCCO A M, BRUMBLEY J A, LAKSHMANAN P. Development of a temporary immersion system (RITA[®]) for mass production of sugarcane (*Saccharum* spp. interspecific hybrids) [J]. In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant, 2009, 45: 450-457.
- [73] 周慧文, 范业赓, 黄杏, 等. 甘蔗健康种苗原苗提前移栽对田间繁育的影响[J]. 中国糖料, 2019, 41(3): 23-27.
- [74] 陈荣发, 丘立杭, 周慧文, 等. 甘蔗脱毒健康种苗原苗主茎重复扦插快繁技术[J]. 广西植物, 2021, 41(4): 614-621.
- [75] 吴建明. 中国糖料蔗基地建设与发展[M]. 北京: 中国农业出版社, 2021.
- [76] 邓军, 张跃彬. 云南“十三五”甘蔗产业发展优势及思路[J]. 中国糖料, 2016, 38(2): 66-69.
- [77] 卢星高, 甘崇琨, 范业赓, 等. 广西甘蔗良种繁育推广体系建设与发展[J]. 中国糖料, 2019, 41(1): 76-80.
- [78] 广西壮族自治区糖业发展局, 广西糖业协会. 广西 2012/2013 年榨季基本情况[J]. 广西糖业年报(2012/2013 年制糖期): 1-2.
- [79] 胡朝晖, 凌婉阳, 伍苏然, 等. 基于 2014 - 2019 年监测数据对我国糖料蔗种植品种结构与趋势分析[J]. 甘蔗糖业, 2020(2): 1-14.
- [80] 樊保宁, 游建华, 谭宏伟, 等. 桂辐 98-296 种茎补种新台糖 22 号宿根蔗对甘蔗产量和品质的影响[J]. 南方农业学报, 2018, 49(8): 1512-1516.
- [81] 罗亚伟, 王维赞, 梁阔, 等. 全程机械化不同桂糖品种新植蔗和宿根蔗的生长表现[J]. 广西糖业, 2019(5): 3-8.
- [82] 经艳, 周会, 刘昔辉, 等. 桂糖甘蔗新品系黑穗病抗性鉴定及结果分析[J]. 热带作物学报, 2020, 41(2): 333-338.
- [83] 吴建明, 李燕娇, 邓宇驰, 等. 中国甘蔗栽培的研究进展[J]. 广西科学, 2022, 29(4): 613-626.
- [84] 苏火生, 应雄美, 刘洪博, 等. 国外引进甘蔗品种鉴定及多样性分析[J]. 中国糖料, 2017, 39(6): 29-31.
- [85] 陆鑫, 朱建荣, 周会, 等. 美国农业部甘蔗研究所科研动向与甘蔗种质资源保存概况[J]. 中国糖料, 2013(1): 78-80.
- [86] 黄世明. 构建区内-国内-国际三循环的广西糖业发展新格局研究[J]. 甘蔗糖业, 2021, 50(2): 23-28.
- [87] 黄忠兴, 符成, 黄锦福, 等. 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.
- [88] 李杨瑞. 关于广西的甘蔗育种[J]. 广西糖业, 2019(3): 3-9.
- [89] 刘家勇, 邓祖湖, 吴才文, 等. 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.
- [90] 张树珍, 郑学勤, 林俊芳, 等. 海藻糖合酶基因的克隆及转化甘蔗的研究[J]. 农业生物技术学报, 2000, 8(4): 385-388.
- [91] 施肖堃. 转 DREB 基因甘蔗的抗旱性评价及其遗传稳定性分析[D]. 福州: 福建农林大学, 2010.
- [92] 李健. 甘蔗 Δ^1 -吡咯啉-5-羧酸合成酶基因(*SoP5CS*)的抗旱功能分析[D]. 南宁: 广西大学, 2017.
- [93] 高轶静, 张荣华, 张革民, 等. 与甘蔗抗黑穗病基因连锁的 SSR 标记筛选[J]. 热带作物学报, 2013, 34(11): 2222-2226.
- [94] 王泽平, 宋修鹏, 颜梅新, 等. 甘蔗 NBS-LRR 类抗梢腐病基因的筛选及定量表达分析[J]. 植物保护, 2021, 47(5): 254-258, 281.
- [95] YANG X P, SOOD S, GLYNN N, et al. Constructing high-density genetic maps for polyploidy sugarcane (*Saccharum* spp.) and identifying quantitative trait loci

- ci controlling brown rust resistance [J]. *Molecular Breeding*, 2017, 37:116.
- [96] CHEAVEGATTI-GIANOTTO A, DE ABREU H M C, ARRUDA P, et al. Sugarcane (*Saccharum × officinarum*): a reference study for the regulation of genetically modified cultivars in Brazil [J]. *Tropical Plant Biology*, 2011, 4(1):62-89.
- [97] 国际农业生物技术应用服务组织. 2018年全球生物技术/转基因作物商业化发展态势[J]. *中国生物工程杂志*, 2019, 39(8):1-6.
- [98] 董刚刚, 王颖, 韩成贵. 遗传修饰技术在甘蔗优质品种选育中的研究进展[J]. *农业生物技术学报*, 2022, 30(5):999-1013.
- [99] KANNAN B, JUNG J H, MOXLEY G W, et al. TALEN-mediated targeted mutagenesis of more than 100 COMT copies/alleles in highly polyploid sugarcane improves saccharification efficiency without compromising biomass yield [J]. *Plant Biotechnology Journal*, 2018, 16(4):856-866.
- [100] EID A, MOHAN C, SANCHEZ S, et al. Multiallelic, targeted mutagenesis of magnesium chelatase with CRISPR/Cas9 provides a rapidly scorable phenotype in highly polyploid sugarcane [J]. *Frontier in Genome Editing*, 2021, 3:654-996.
- [101] ISLAM M S, MCCORD P H, OLATOYE M O, et al. Experimental evaluation of genomic selection prediction for rust resistance in sugarcane [J]. *The Plant Genome*, 2021, 14(3):e20148.
- [102] 黄香武, 陈士伟, 陈海燕, 等. 全面提升湛江农垦现代甘蔗产业化发展水平的思路与对策[J]. *广东农工商职业技术学院学报*, 2018, 34(1):1-5.
- [103] 刘晓雪, 闫彩云, 李延化. 广西甘蔗种植行为影响因素及成本收益调查分析[J]. *中国糖料*, 2020, 42(3):59-66.
- [104] 陆盼. 广西甘蔗机械化收获发展现状调查及影响因素研究[D]. 南宁:广西大学, 2022.
- [105] 徐超华, 邓玉龙, 刘新龙, 等. 巴西蔗糖产业特点及对我国蔗糖业的借鉴[J]. *中国糖料*, 2020, 42(2):70-74.
- [106] 胡文卓. 广西甘蔗收获机械化对策研究[D]. 南宁:广西大学, 2019.
- [107] 彭娜, 姚姿婷, 黄江峰, 等. 甘蔗机械收获后糖损失的影响因素分析[J]. *中国糖料*, 2020, 42(1):22-26.
- [108] 陈超君, 梁和, 何章飞, 等. 甘蔗机械收获对蔗莖质量和宿根蔗生长影响初探[J]. *广东农业科学*, 2011, 38(23):26-30.
- [109] 李毅杰, 刘晓燕, 王维赞, 等. 机械收获对不同甘蔗品种收获质量及宿根蔗生长的影响[J]. *西南农业学报*, 2020, 33(8):1645-1652.
- [110] 杨荣仲, 周会, 唐仕云, 等. 广西甘蔗育种思考[J]. *中国糖料*, 2021, 43(3):18-27.
- [111] WANG L W, LIAO J X, TAN F, et al. Selection of new sugarcane variety Guitang 42 with high yield and high sugar content and suitable for mechanized production [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2016, 17(3):609-614, 632.
- [112] 黑炳述. 中蔗系列新品种的机械收获适应性研究[D]. 南宁:广西大学, 2022.
- [113] 林敏. 农业生物育种技术的发展历程及产业化对策[J]. *生物技术进展*, 2021, 11(4):405-417.
- [114] MEENA M R, APPUNU C, KUMAR R A, et al. Recent advances in sugarcane genomics, physiology, and phenomics for superior agronomic traits [J]. *Frontiers in Genetics*, 2022, 13:854936.
- [115] 张木清, 杨本鹏. 关于加快甘蔗源头创新、保障国家食糖安全的建议[J]. *中国农学通报*, 2023, 39(5):6-8.

Research Progress of Sugarcane Seed Industry in China

ZHOU Huiwen¹, LU Guijun^{2* * *}, WU Jianming¹, WEI Changlian^{2* * *}

(1. Guangxi Key Laboratory of Sugarcane Biotechnology and Genetic Improvement, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangxi Key Laboratory of Guangxi Sugarcane Genetic Improvement, Sugarcane Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China; 2. Guangxi Institute of Science and Technology Information, Nanning, Guangxi, 530022, China)

Abstract: China is the third largest sugar producing country and sugar consuming country in the world, and sucrose production has accounted for more than 90% of sugar. The development of sugarcane seed industry is very important to the development of China's sugar industry, and superior varieties are the key to realize high yield, high sugar and high efficiency cultivation of sugarcane. Although the number of preserved sugarcane germplasm resources in China ranks first in the world, and the self-bred varieties of sugarcane have covered the main sugarcane areas in the country and established the sugarcane variety breeding and promotion system, it also faces the problems of simple breeding method, incomplete collection of germplasm resources and poor operation of sugarcane variety breeding and promotion system. Therefore, integrating breeding methods and resource evaluation methods, increasing the scope of germplasm collection, and vigorously promoting healthy seedlings are expected to become the future development direction of China's sugarcane seed industry. This article summarizes the development history, current situation and existing problems of sugarcane seed industry in China, and looks forward to the development prospect of sugarcane seed industry.

Key words: sugarcane; seed industry; current situation; future perspectives; integration of breeding and promotion

责任编辑: 陆媛峰



微信公众号投稿更便捷

联系电话: 0771-2503923

邮箱: gxxk@gxas.cn

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