DOI: 10.3724/SP.J.1006.2021.04119

研究简报

甘蔗新品种及主栽品种对褐锈病抗性与 *Bru1* 基因分子检测

张荣跃 王晓燕 杨 昆 单红丽* 仓晓燕 李 婕 王长秘 尹 炯
罗志明 李文凤 黄应昆*

云南省农业科学院甘蔗研究所 / 云南省甘蔗遗传改良重点实验室, 云南开远 661699

摘 要: 为明确近年我国各甘蔗育种单位育成的新品种及各蔗区主栽品种对甘蔗褐锈病的抗性, 筛选抗褐锈病优良新品种供生产上推广应用, 本研究结合全国甘蔗新品种联合区域试验, 选择甘蔗褐锈病高发的云南临沧、云南普洱、云南玉溪和广西宜州蔗区, 在田间自然发病下, 对我国近年来选育的 60 个新品种和 34 个主栽品种进行抗性评价, 并对抗褐锈病基因 *Bru1* 进行分子检测。结果表明, 94 个新品种及主栽品种中, 66 个表现高抗到中抗, 占 70.21%; 28 个表现为感病到高感, 占 29.79%。分子检测结果显示, 共 54 个抗病新品种及主栽品种含有抗褐锈病基因 *Bru1*, 频率为 57.45%。目前大面积种植的桂糖 29 号、桂糖 44 号、德蔗 03-83、柳城 03-1137、粤糖 60 号、桂糖 46 号等主栽品种高度感病, 而粤甘 48 号、福农 09-2201、桂糖 08-120、柳城 09-15、中蔗 1 号、云蔗 08-1609、云瑞 10-187、中糖 1201 等 31 个新品种抗病性强。建议多雨湿润褐锈病高发蔗区, 应加大淘汰感病主栽品种和推广应用抗病新品种力度, 以期达到品种合理布局, 从根本上控制褐锈病暴发流行, 为甘蔗产业高质量发展提供安全保障。

关键词: 甘蔗; 主栽品种; 褐锈病; 抗褐锈病基因 *Bru1*; 抗性

Identification of brown rust resistance and molecular detection of *Bru1* gene in new and main cultivated sugarcane varieties

ZHANG Rong-Yue, WANG Xiao-Yan, YANG Kun, SHAN Hong-Li*, CANG Xiao-Yan, LI Jie, WANG Chang-Mi, YIN Jiong, LUO Zhi-Ming, LI Wen-Feng, and HUANG Ying-Kun*

Sugarcane Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences / Yunnan Key Laboratory of Sugarcane Genetic Improvement, Kaiyuan 661699, Yunnan, China

Abstract: The aim of this study was to assess brown rust resistance of new sugarcane varieties bred in China and main cultivated varieties in sugarcane planting area, and screen the elite new brown rust resistant varieties for popularization and application in production. In total, 60 new varieties in the national regional test of new sugarcane varieties were tested in Kaiyuan and Lincang, and 34 main cultivated varieties were studied in Lincang, Puer, and Yuxi, Yunnan province, and Yizhou, Guangxi province, China, where the incidence of brown rust was particularly high. The resistance of these sugarcane varieties to brown rust was investigated under natural inoculation and molecular marker-assisted identification was used to detect the brown rust resistance gene *Bru1*. The results of field survey showed that 66 (70.21%) of the 94 new and main cultivated varieties were highly resistant to moderately resistant, and 28 (29.79%) were susceptible to highly susceptible. Molecular detection indicated that *Bru1* gene was found among 54 (57.45%) of the 94 new and main cultivated varieties. Some main cultivated varieties that were currently planted across large areas such as Guitang 29, Guitang 44, Dezhe 03-83, Liucheng 03-1137, Yuetang 60, and Guitang 46 were highly susceptible to brown rust, and 31 new varieties such as Yuegan 48, Funong 09-2201, Guitang 08-120, Liucheng 09-15, Zhongzhe 1, Yunzhe 08-1609, Yunrui 10-187, and Zhongtang 1201 were resistant. Therefore, in the sugarcane planting areas with high incidence of

本研究由国家自然科学基金项目(31660419), 国家现代农业产业技术体系(糖料)建设专项(CARS-170303), 云岭产业技术领军人才培养项目(2018LJRC56), 云南省技术创新人才培养对象项目和云南省现代农业产业技术体系建设专项资金资助。

This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (31660419), the China Agriculture Research System (Sugar) (CARS-170303), the Yunling Industry and Technology Leading Talent Training Program “Prevention and Control of Sugarcane Pests” (2018LJRC56), the Yunnan Province Technology Innovation Talent Training Object Project, and the Yunnan Province Agriculture Research System.

* 通信作者(Corresponding authors): 黄应昆, E-mail: huangyk64@163.com; 单红丽, E-mail: shhldlw@163.com

第一作者联系方式: E-mail: rongyuezhang@hotmail.com

Received (收稿日期): 2020-06-01; Accepted (接受日期): 2020-08-19; Published online (网络出版日期): 2020-09-02.

URL: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20200902.0932.006.html>

brown rust and wet and rainy climates, more effort should be eliminated the main susceptible varieties and promoted the application of new resistant varieties. This will help to achieve a reasonable distribution of varieties, fundamentally control the outbreak of disease in sugarcane planting areas, and provide security for the high-quality development of sugarcane industry in China in the future.

Keywords: sugarcane; main cultivated varieties; brown rust; brown rust resistance gene *Brul*; resistance

甘蔗锈病是世界性的甘蔗重要病害之一, 根据症状和病原特征, 甘蔗锈病分为 2 种类型, 即由黑顶柄锈菌(*Puccinia melanocephala* H. Sydow & P. Sydow.)引起的甘蔗褐锈病和由屈恩柄锈菌(*Puccinia kuehnii* Butler.)引起的甘蔗黄锈病^[1-3]。我国蔗区发生的甘蔗锈病以褐锈病为主, 黄锈病仅在局部蔗区的少数品种上零星发生^[4]。甘蔗褐锈病于 1890 年首次报道发生在印度尼西亚爪哇岛^[5], 目前在世界许多植蔗国家和地区均有分布, 时常发生流行、危害成灾, 经济损失巨大^[1,6-9]。甘蔗褐锈病于 1982 年在云南耿马蔗区发生流行^[10], 随后我国大陆各甘蔗种植区均有报道和分布^[11-14]。多年来, 甘蔗褐锈病在我国主产蔗区时有发生, 是危害甘蔗最为严重的真菌病害之一^[15-18]。2015—2019 年, 云南、广西甘蔗主产区因感病品种粤糖 60 号、德蔗 03-83、巴西 45 号、柳城 03-1137、桂糖 29 号等规模化连片种植, 加上连年雨季早、持续期长、多雨高湿诱发甘蔗褐锈病大面积暴发成灾, 减产减糖严重^[2,18], 褐锈病已成为蔗糖产业高质量发展的主要障碍因素之一。因此, 及时了解现有品种对褐锈病的抗病性和抗病基因分布状况, 对选育抗病品种、有效防控该病害具有重要意义。

国内外研究表明, 不同甘蔗品种对甘蔗褐锈病抗性不一, 选种抗病品种是控制甘蔗褐锈病最经济有效的措施, 一些国家通过培育和选用抗病品种, 加强田间水肥管理和早期监测与综合防控, 甘蔗褐锈病得到了有效控制^[19-22]。自 20 世纪 90 年代, 国外学者在甘蔗抗病基因发掘上取得实效, 利用与抗病基因紧密连锁的分子标记发现在甘蔗品种 R570 存在 1 个抗褐锈病基因 *Brul*^[23-24], 并开发出与 *Brul* 密切相关的 2 个分子标记 R12H16、9O20-F4 用于品种资源检测^[25-26], 这为充分发掘和利用品种抗性进行合理布局有效防控甘蔗褐锈病奠定了基础。而近年我国各甘蔗育种单位联合攻关选育的一批甘蔗优良新品种, 其对甘蔗褐锈病的抗性和 *Brul* 基因分布状况不清, 各蔗区在选用抗病新品种进行品种合理布局 and 有效防控甘蔗褐锈病缺乏依据。为此, 本研究结合甘蔗新品种区域化试验病情调查, 于 2016—2019 年对中国近年选育的 60 个优良新品种和 34 个主栽品种进行褐锈病抗性评价及 *Brul* 基因的 PCR 检测, 以期筛选抗褐锈病品种、发掘抗源种质, 为生产上品种合理布局 and 有效防控甘蔗褐锈病提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

国家糖料甘蔗区域试验的 60 个优良新品种(表 1)和云南、广西蔗区 34 个主栽品种见表 2, 区试对照品种新台糖

22 号, 含 *Brul* 基因抗病对照品种 R570^[23]和新台糖 1 号^[23], 感病对照品种粤糖 60 号。

1.2 新品种抗性鉴定

于 2016—2017 年和 2018—2019 年在云南开远区域化试验站进行优良新品种区域化试验, 以新台糖 22 号为区试对照种, 以含 *Brul* 基因新台糖 1 号及 R570 和粤糖 60 号分别作为抗病和感病对照品种, 采用随机区组排列, 各供试品种 3 次重复, 每小区种植 5 行, 行长 6 m, 种植行距 1 m, 每小区面积 30 m²。在试验田周围和每隔 2 个供试品种种植 2 行高感褐锈病品种粤糖 60 号, 尽可能为各供试品种感病提供侵染菌源。

结合区域试验, 分别于每年 9 月至 10 月感病对照品种充分发病时调查供试品种新植蔗和宿根蔗发病情况, 对各供试品种进行 1 年新植和 1 年宿根抗性评价。各供试品种每重复选定中间 3 行连续调查 100 株有效蔗株的发病情况, 3 个重复共调查 300 株, 目测完全展开的全部叶片感病状况及侵染面积百分率。参照 Costet 等^[26]的评价方法按 1~9 级分级标准进行褐锈病抗性评价。

1.3 主栽品种抗性鉴定

2016—2019 年对云南临沧、云南普洱、云南玉溪和广西宜州蔗区代表性主栽品种、新植蔗与宿根蔗进行抗性评价, 分别于每年 9 月至 10 月感病品种粤糖 60 号或桂糖 46 号充分发病时调查主栽品种新植蔗和宿根蔗发病情况。各主栽品种、新植蔗与宿根蔗选择代表性田块采用 3 点取样, 每点连续调查 100 株有效蔗株的发病情况, 目测完全展开的全部叶片感病状况及侵染面积百分率。按 1.2 的方法进行抗性评价。

1.4 *Brul* 基因的 PCR 检测

分别采集各品种充分展开的第 1 片新叶提取其总 DNA, 参照 Costet 等^[26]和李文凤等^[28]的方法进行 *Brul* 基因的 PCR 检测。

2 结果与分析

2.1 新品种对褐锈病抗性鉴定结果

田间自然发病下抗性鉴定结果表明, 开远区试点新植、宿根、抗病对照品种新台糖 1 号和 R570 均表现高抗, 感病粤糖 60 号表现高感 2, 抗性稳定、一致。60 个供试新品种新植、宿根病情一致, 高抗至中抗的有 41 个, 占 68.33%; 中感到高感 2 的有 19 个, 占 31.67%。其中粤甘 48、福农 09-2201、桂糖 08-120、柳城 09-15、中蔗 1 号、云蔗 08-1609、云瑞 10-187、德蔗 12-88 等 15 个新品种表现高抗, 占 25%; 粤甘 50、福农 08-3214、桂糖 06-1492、柳城 09-19、中蔗

6 号、云蔗 11-1074、云瑞 10-701、德蔗 09-78、中糖 1201 等 16 个新品种表现抗病, 占 26.67%; 粤甘 53、福农 07-3206、桂糖 06-2081、中蔗 10 号、云瑞 11-450、中糖 1202 等 10 个新品种表现中抗, 占 16.67%; 粤甘 47、福农 10-14405、海

蔗 22 号、中糖 1301 四个新品种表现中感, 占 6.67%; 粤甘 52、闽糖 07-2005、柳城 07-150、云瑞 12-263 等 11 个新品种表现感病, 占 18.33%; 桂糖 13-386、粤甘 43、粤甘 49、云蔗 09-1601 四个新品种表现高感, 占 6.67% (表 1)。

表 1 甘蔗新品种对褐锈病菌的抗性与 *Bru1* 基因 PCR 检测结果

Table 1 PCR detection of *Bru1* and evaluation of field resistance to *Puccinia melanocephala* in new sugarcane varieties

品种 Variety	病级 Disease grade	抗性反应 Resistance response	<i>Bru1</i> 的 PCR 检测结果 PCR detection of <i>Bru1</i>
粤甘 48 号 Yuegan 48	1	高抗 HR	+
福农 09-2201 Funong 09-2201	1	高抗 HR	+
福农 09-7111 Funong 09-7111	1	高抗 HR	-
福农 11-2907 Funong 11-2907	1	高抗 HR	-
桂糖 08-120 Guitang 08-120	1	高抗 HR	+
桂糖 08-1533 Guitang 08-1533	1	高抗 HR	+
桂糖 11-1076 Guitang 11-1076	1	高抗 HR	+
柳城 09-15 Liucheng 09-15	1	高抗 HR	+
中蔗 1 号 Zhongzhe 1	1	高抗 HR	+
云蔗 08-1095 Yunzhe 08-1095	1	高抗 HR	+
云蔗 08-1609 Yunzhe 08-1609	1	高抗 HR	+
云蔗 11-1204 Yunzhe 11-1204	1	高抗 HR	+
云蔗 11-3898 Yunzhe 11-3898	1	高抗 HR	+
云瑞 10-187 Yunrui 10-187	1	高抗 HR	+
德蔗 12-88 Dezhe 12-88	1	高抗 HR	+
粤甘 50 号 Yuegan 50	2	抗病 R	+
粤甘 51 号 Yuegan 51	2	抗病 R	+
福农 08-3214 Funong 08-3214	2	抗病 R	+
福农 09-6201 Funong 09-6201	2	抗病 R	+
福农 09-12206 Funong 09-12206	2	抗病 R	+
闽糖 12-1404 Mintang 12-1404	2	抗病 R	+
桂糖 06-1492 Guitang 06-1492	2	抗病 R	+
桂糖 08-1180 Guitang 08-1180	2	抗病 R	+
柳城 09-19 Liucheng 09-19	2	抗病 R	+
中蔗 6 号 Zhongzhe 6	2	抗病 R	+
中蔗 13 号 Zhongzhe 13	2	抗病 R	+
云蔗 11-1074 Yunzhe 11-1074	2	抗病 R	+
云蔗 11-3208 Yunzhe 11-3208	2	抗病 R	+
云瑞 10-701 Yunrui 10-701	2	抗病 R	+
德蔗 09-78 Dezhe 09-78	2	抗病 R	+
中糖 1201 Zhongtang 1201	2	抗病 R	+
粤甘 53 号 Yuegan 53	3	中抗 MR	+
福农 07-3206 Funong 07-3206	3	中抗 MR	+
福农 09-4095 Funong 09-4095	3	中抗 MR	+
福农 10-0574 Funong 10-0574	3	中抗 MR	+
闽糖 06-1405 Mintang 06-1405	3	中抗 MR	+
桂糖 06-2081 Guitang 06-2081	3	中抗 MR	+
桂糖 08-1589 Guitang 08-1589	3	中抗 MR	+
中蔗 10 号 Zhongzhe 10	3	中抗 MR	-

(续表 1)

品种 Variety	病级 Disease grade	抗性反应 Resistance response	<i>Bru1</i> 的 PCR 检测结果 PCR detection of <i>Bru1</i>
云瑞 11-450 Yunrui 11-450	3	中抗 MR	—
中糖 1202 Zhongtang 1202	3	中抗 MR	—
粤甘 47 号 Yuegan 47	4	中感 MS	—
福农 10-14405 Funong 10-14405	4	中感 MS	—
海蔗 22 号 Haizhe 22	4	中感 MS	—
中糖 1301 Zhongtang 1301	4	中感 MS	—
粤甘 52 号 Yuegan 52	5	感病 1 S1	—
闽糖 07-2005 Mintang 07-2005	5	感病 1 S1	—
柳城 07-150 Liucheng 07-150	5	感病 1 S1	—
云瑞 12-263 Yunrui 12-263	5	感病 1 S1	—
海蔗 28 号 Haizhe 28	5	感病 1 S1	—
桂糖 44 号 Guitang 44	6	感病 2 S2	—
柳城 07-506 Liucheng 07-506	6	感病 2 S2	—
粤甘 46 号 Yuegan 46	7	感病 3 S3	—
闽糖 11-610 Mintang 11-610	7	感病 3 S3	—
桂糖 40 号 Guitang 40	7	感病 3 S3	—
德蔗 07-36 Dezhe 07-36	7	感病 3 S3	—
桂糖 13-386 Guitang 13-386	8	高感 1 HS1	—
粤甘 43 号 Yuegan 43	9	高感 2 HS2	—
粤甘 49 号 Yuegan 49	9	高感 2 HS2	—
云蔗 09-1601 Yunzhe 09-1601	9	高感 2 HS2	—

+: *Bru1* 检测阳性; -: *Bru1* 检测阴性。
+: *Bru1* positive; -: *Bru1* negative. HR: highly resistant; R: resistant; MR: moderately resistant; MS: moderately susceptible; S1: susceptible 1; S2: susceptible 2; S3: susceptible 3; HS1: highly susceptible 1; HS2: highly susceptible 2.

2.2 主栽品种抗褐锈病鉴定结果

34 个主栽品种不同蔗区新植、宿根病级一致, 高抗至中抗的有 25 个, 占 73.53%; 中感到高感 2 的有 9 个, 占 26.47%。其中新台糖 1 号、新台糖 22 号、粤糖 86-368、盈育 91-59 等 16 个主栽品种表现高抗, 占 47.06%; 5 个主栽品种粤糖 93-159、粤糖 00-236、云蔗 03-258、云蔗 05-49 和川糖 79-15 表现抗病, 占 14.71%; 4 个主栽品种云蔗 05-51、云引 10 号、桂糖 11 号和桂糖 36 号表现中抗, 占 11.76%; 2 个主栽品种柳城 05-136 和桂糖 42 号表现中感, 占 5.88%; 3 个主栽品种桂糖 29 号、桂糖 44 号、德蔗 03-83 表现感病, 占 8.82%; 4 个主栽品种柳城 03-1137、粤糖 60 号、巴西 45 号和桂糖 46 号表现高感, 占 11.76% (表 2)。

2.3 *Bru1* 基因的 PCR 检测

PCR 检测结果表明, 含 *Bru1* 的抗病对照品种新台糖 1 号和 R570 均分别稳定扩增出 2 个目的条带, 而感病对照品种粤糖 60 号未能扩出 2 个目的条带; 60 个供试新品种中有 36 个抗病新品种扩增出 2 个目的条带, 表明含有 *Bru1* 基因, 频率为 60%, 其余 5 个抗病和 19 个感病新品种未能扩出 2 个目的条带(表 1); 34 个供试主栽品种中有 18 个抗病主栽品种扩增出 2 个目的条带, 证明含有 *Bru1* 基因, 频率为 52.94%, 其余 7 个抗病和 9 个感病主栽品种

未能扩出 2 个目的条带(表 2)。

3 讨论

甘蔗褐锈病是为害甘蔗叶部的重要流行性真菌病害, 不同甘蔗品种对甘蔗褐锈病抗性不一, 筛选抗病品种合理布局可有效防控甘蔗褐锈病流行危害^[2,21]。鉴于褐锈病是当前严重影响中国甘蔗产业高质量发展的重要病害, 今后应调整甘蔗抗病育种策略, 将抗甘蔗褐锈病新品种选育作为主要经济指标之一, 加强抗褐锈病甘蔗种质资源的评价筛选, 切实提高抗褐锈病甘蔗新品种选育效率。云南是世界野生甘蔗起源中心之一, 也是中国甘蔗野生资源重要分布中心^[28-29], 甘蔗野生资源是现代甘蔗育种中抗病基因的重要来源, 已有研究显示, 中国甘蔗种质资源圃保存的野生种质资源中蕴藏着优良的抗病基因, 是抗病甘蔗品种选育的重要抗源^[27,30-33]。本研究结果显示, 中国近年选育的新品种及主栽品种中也蕴藏有优良的 *Bru1* 基因, 在因地制宜择优推广抗褐锈病新品种及主栽品种的同时, 可与野生种质资源杂交扩宽遗传基础, 充分发挥其应用潜力, 为抗褐锈病甘蔗新品种培育充实抗性基因源, 这与本课题组前期研究结果^[27]一致。

表 2 甘蔗主栽品种对褐锈病菌的抗性与 *Bru1* 基因 PCR 检测结果
Table 2 PCR detection of *Bru1* and evaluation of field resistance to *Puccinia melanocephala* in major sugarcane varieties

品种 Variety	云南临沧 Lincang, Yunnan		云南普洱 Puer, Yunnan		云南玉溪 Yuxi, Yunnan		广西宜州 Yizhou, Guangxi		<i>Bru1</i> 的 PCR 检测结果
	病级 DG	抗性反应 RR	病级 DG	抗性反应 RR	病级 DG	抗性反应 RR	病级 DG	抗性反应 RR	PCR detection of <i>Bru1</i>
新台糖 1 号 ROC 1					1	HR			+
新台糖 10 号 ROC 10			1	HR	1	HR			+
新台糖 16 号 ROC 16			1	HR	1	HR	1	HR	+
新台糖 20 号 ROC 20	1	HR	1	HR			1	HR	+
新台糖 22 号 ROC 22	1	HR	1	HR	1	HR	1	HR	+
新台糖 25 号 ROC 25	1	HR							+
川糖 61-408 Chuantang 61-408	1	HR							—
桂糖 21 号 Guitang 21		HR	1	HR			1	HR	+
柳城 03-182 Liucheng 03-182	1	HR							+
闽糖 69-421 Mintang 69-421		HR			1	HR			+
盈育 91-59 Yingyu 91-59	1	HR							—
粤糖 79-177 Yuetang 79-177	1	HR							—
粤糖 83-88 Yuetang 83-88	1	HR							—
粤糖 86-368 Yuetang 86-368	1	HR	1	HR					+
云引 3 号 Yunyin 3					1	HR			+
云引 58 Yunyin 58			1	HR					—
川糖 79-15 Chuantang 79-15			2	R					+
粤糖 00-236 Yuetang 00-236	2	R	2	R	2	R			—
粤糖 93-159 Yuetang 93-159	2	R	2	R	2	R			—
云蔗 03-258 Yunzhe 03-258			2	R					+
云蔗 05-49 Yunzhe 05-49			2	R					+
桂糖 11 号 Guitang 11					3	中抗 MR			+
桂糖 36 号 Guitang 36							3	MR	+
云引 10 号 Yunyin 10			3	MR					+
云蔗 05-51 Yunzhe 05-51			3	MR					+
桂糖 42 号 Guitang 42							4	MS	—
柳城 05-136 Liucheng 05-136	4	MS					4	MS	—
桂糖 29 号 Guitang 29							5	S1	—
桂糖 44 号 Guitang 44							5	S1	—
德蔗 03-83 Dezhe 03-83			7	S3					—
柳城 03-1137 Liucheng 03-1137	8	HS1					8	HS1	—
巴西 45 号 Baxi 45	9	HS2							—
桂糖 46 号 Guitang 46					9	HS 2	9	HS2	—
粤糖 60 号 Yuetang 60	9	HS2	9	HS2					—

+: *Bru1* 检测阳性; -: *Bru1* 检测阴性。HR: 高抗; R: 抗病; MR: 中抗; MS: 中感; S1: 感病 1; S2: 感病 2; S3: 感病 3; HS1: 高感 1; HS2: 高感 2。

+: *Bru1* positive; -: *Bru1* negative. DG: disease grade; RR: resistance response. HR: highly resistant; R: resistant; MR: moderately resistant; MS: moderately susceptible; S1: susceptible 1; S2: susceptible 2; S3: susceptible 3; HS1: highly susceptible 1; HS2: highly susceptible 2.

先前的研究表明, 许多抗褐锈病的甘蔗野生种质资源和主要育种亲本未检测到抗病基因 *Bru1*^[27,35], 而本研究中高抗褐锈病的 2 个新品种福农 09-7111 和福农 11-2907, 中抗褐锈病的 3 个新品种中蔗 10 号、云瑞 11-450

和中糖 1202 未检测到抗褐锈病基因 *Bru1*, 这表明除了 *Bru1* 基因外, 可能还存在其他抗褐锈病基因, 有待于进一步深入研究。*Bru1* 基因目前已在甘蔗抗褐锈病评价中广泛使用^[27,35-36], 还未发现含有 *Bru1* 基因的品种出现感

褐锈病的情况, 虽然目前还未发现 *Brul* 基因抗性衰退的报道, 但仍存在长期使用导致其抗病性下降、发生抗性丢失的危险, 所以应加强其他抗褐锈病基因在抗病育种中的引入与利用, 避免因病原变异引起 *Brul* 抗性丧失的潜在威胁。

感病品种大面积种植加上多雨高湿是甘蔗褐锈病暴流行的主要诱因, 不同甘蔗品种对甘蔗褐锈病抗性不一, 防治甘蔗褐锈病最为经济有效的措施是选种抗病品种^[2,13]。本研究结果显示, 目前大面积种植的桂糖 29 号、桂糖 44 号、德蔗 03-83、柳城 03-1137、粤糖 60 号、巴西 45 号、桂糖 46 号 7 个主栽品种高度感病, 而近年选育的粤甘 48、福农 09-2201、柳城 09-15、中蔗 1 号、云蔗 08-1609、云瑞 10-187、德蔗 12-88、中糖 1201 等 31 个优良新品种抗病力强。建议多雨湿润甘蔗褐锈病高发蔗区, 应加大淘汰感病主栽品种和推广应用抗病优良新品种力度, 以期达到品种合理布局, 从根本上控制蔗区病害的暴流行, 为中国甘蔗产业高质量发展提供安全保障。

References

- [1] Rott P, Bailey R A, Comstock J C, Croft B J. A Guide to Sugarcane Diseases. Montpellier: CIRAD Publication Services, 2000. pp 85–89.
- [2] Huang Y K, Li W F, Zhang R Y, Wang X Y. Color Illustration of Diagnosis and Control for Modern Sugarcane Diseases, Pests, and Weeds. Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2018. pp 18–20.
- [3] Chaulagain B, Dufault N, Raid R N, Rott P. Sensitivity of two sugarcane rust fungi to fungicides in urediniospore germination and detached leaf bioassays. *Crop Prot*, 2019, 117: 86–93.
- [4] 王晓燕, 李文凤, 黄应昆, 张荣跃, 单红丽, 罗志明, 尹炯. 云南蔗区首次发现由屈柄锈菌引起的甘蔗黄锈病. *中国农学通报*, 2015, 31(18): 282–286.
Wang X Y, Li W F, Huang Y K, Zhang R Y, Shan H L, Luo Z M, Yin J. First report of orange rust of sugarcane caused by *Puccinia kuehnii* in Yunnan sugarcane field. *Chin Agric Sci Bull*, 2015, 31(18): 282–286 (in Chinese with English abstract).
- [5] Purdy L H, Liu L J, Dean J L. Sugarcane rust: a newly important disease. *Plant Dis*, 1983, 67: 1292–1296.
- [6] Garcés F F, Fiallos F F, Silva E, Martinez F, Aime M C, Comstock J C, Glynn N C, Castlebury L A. First report of orange rust of sugarcane caused by *Puccinia kuehnii* in Ecuador. *Plant Dis*, 2014, 98: 842.
- [7] Hoy J W, Hollier C A. Effect of brown rust on yield of sugarcane in Louisiana. *Plant Dis*, 2009, 93: 1171–1174.
- [8] Comstock J C, Shine J M, Raid R N. Effect of early rust infection on subsequent sugarcane growth. *Sugar Cane*, 1992, 4: 7–9.
- [9] 马利. 泰国甘蔗生产及科研现状. *世界农业*, 1995, (9): 23.
Ma L. The production and research actuality of sugarcane in Thailand. *World Agric*, 1995, (9): 23 (in Chinese).
- [10] 阮兴业, 杨雾, 孙楚坚. 云南省发现甘蔗茅柄锈菌. *真菌学报*, 1983, 2(4): 260–261.
Ruan X Y, Yang W, Sun C J. Occurrence of *Puccinia erianthi* on sugarcane in Yunnan province. *Acta Mycol Sin*, 1983, 2(4): 260–261 (in Chinese with English abstract).
- [11] 全国甘蔗重要病害研究协作组. 我国大陆蔗省(区)(部分)甘蔗病害种类调查初报. *甘蔗糖业*, 1991, (1): 1–8.
The important sugarcane diseases research cooperation group. The preliminary report of sugarcane diseases investigation in the sugarcane planting provinces (partly), mainland China. *Sugarcane Canesugar*, 1991, (1): 1–8 (in Chinese).
- [12] 刘晓妹, 刘文波, 施焕焕. 海南儋州甘蔗锈病原菌的鉴定及其生物学特性的测定. *中国糖料*, 2008, (2): 30–32.
Liu X M, Liu W B, Shi H H. Pathogen identification and biological characteristics of sugarcane rust in Danzhou. *Sugar Crops China*, 2008, (2): 30–32 (in Chinese with English abstract).
- [13] 韦金菊, 邓展云, 黄伟华, 潘雪红, 王伯辉, 刘晓静. 广西北海甘蔗锈病生物学特性研究及防治对策. *安徽农业科学*, 2010, 38: 14997–14999.
Wei J J, Deng Z Y, Huang W H, Pan X H, Wang B H, Liu X J. Control methods and pathogen biological characteristics of sugarcane rust in Beihai. *J Anhui Agric Sci*, 2010, 38: 14997–14999 (in Chinese with English abstract).
- [14] 黄应昆, 李文凤. 云南蔗区甘蔗锈病流行原因及防治对策. *植保技术与推广*, 1998, 18(5): 22–23.
Huang Y K, Li W F. Epidemic and control strategies of sugarcane rust disease in Yunnan sugarcane field. *Plant Prot Technol Ext*, 1998, 18(5): 22–23 (in Chinese with English abstract).
- [15] 黄应昆, 李文凤. 现代甘蔗病虫害防治彩色图说. 北京: 中国农业出版社, 2016. pp 113–114.
Huang Y K, Li W F. Colored Atlas of Control on Diseases, Insect Pests and Weeds of Modern Sugarcane. Beijing: China Agriculture Press, 2016. pp 113–114 (in Chinese).
- [16] 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. *热带作物学报*, 2010, 31: 1588–1595.
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 H. Primary investigation to sugarcane on the diseases in Hainan province. *Chin J Trop Crops*, 2010, 31: 1588–1595 (in Chinese with English abstract).
- [17] 韦金菊, 邓展云, 黄诚华, 黄伟华, 颜梅新, 刘海斌, 唐红琴. 广西甘蔗主要真菌病害调查初报. *南方农业学报*, 2012, 43: 1316–1319.
Wei J J, Deng Z Y, Huang C H, Huang W H, Yan M X, Liu H B, Tang H Q. Epidemic preliminary report on investigating major sugarcane fungal diseases in Guangxi. *J South Agric*, 2012, 43: 1316–1319 (in Chinese with English abstract).
- [18] 李文凤, 单红丽, 黄应昆, 张荣跃, 仓晓燕, 尹炯, 王晓燕, 罗志明. 多雨高湿季甘蔗重要病害发生流行动态与防控策略. *中国糖料*, 2017, 39(2): 75–77.
Li W F, Shan H L, Huang Y K, Zhang R Y, Cang X Y, Yin J, Wang X Y, Luo Z M. The occurrence epidemic dynamics, control thoughts and countermeasures of important sugarcane diseases in raininess and high humidity season. *Sugar Crops China*, 2017, 39(2): 75–77 (in Chinese with English abstract).
- [19] Comstock J C, Wu K K, Schnell R J. Heritability of resistance to sugar cane rust. *Sugar Cane* (United Kingdom), 1992, 6: 7–10.
- [20] Hogarth D M, Ryan C C, Taylor P W J. Quantitative inheritance of rust resistance in sugarcane. *Field Crops Res*, 1993, 34: 187–193.

- [21] Ramdoyal K, Sullivan S, Chong L C Y L S, Badaloo G H, Saumtally S, Domaingue R. The genetics of rust resistance in sugar cane seedling populations. *Theor Appl Genet*, 2000, 100: 557–563.
- [22] 单红丽, 李文凤, 黄应昆, 罗志明, 王晓燕, 申科, 张荣跃, 尹炯. 国家甘蔗体系繁殖和示范新品种(系)病虫害调查. 中国糖料, 2014, (2): 50–53.
Shan H L, Li W F, Huang Y K, Luo Z M, Wang X Y, Shen K, Zhang R Y, Yin J. Investigation of diseases and insect pests on new propagation and demonstration varieties/lines in National Sugarcane System. *Sugar Crops China*, 2014, (2): 50–53 (in Chinese with English abstract).
- [23] Daugrois J H, Grivet L, Roques D. A putative major gene for rust resistance linked with a RFLP marker in sugarcane cultivar ‘R570’. *Theor Appl Genet*, 1996, 92: 1059–1064.
- [24] Asnaghi C, Roques D, Ruffel S, Kaye C, Hoarau J Y, Télismart H, Girard J C, Roboin L M, Risterucci A M, Grivet L, D’Hont A. Targeted mapping of a sugarcane rust resistance gene (*Brul*) using bulked segregant analysis and AFLP markers. *Theor Appl Genet*, 2004, 108: 759–764.
- [25] Asnaghi C, D’Hont A, Glaszmann J, Rott P. Resistance of sugarcane cultivar R570 to *Puccinia melanocephala* isolates from different geographic locations. *Plant Dis*, 2001, 85: 282–286.
- [26] Costet L, Le Cunff L, Royaert S, Raboin L M, Hervouet C, Toubi L, Telismart H, Garsmeur O, Rousselle Y, Pauquet J, Nibouche S, Glaszmann J C, Hoarau J Y, D’Hont A. Haplotype structure around *Brul* reveals a narrow genetic basis for brown rust resistance in modern sugarcane cultivars. *Theor Appl Genet*, 2012, 125: 825–836.
- [27] 李文凤, 黄应昆. 现代甘蔗病害诊断检测与防控技术. 北京: 中国农业出版社, 2012. p 94.
Li W F, Huang Y K. Diagnosis Detection and Control Technique of Modern Sugarcane Diseases. Beijing: China Agriculture Press, 2012. p 94 (in Chinese).
- [28] 李文凤, 王晓燕, 黄应昆, 张荣跃, 单红丽, 尹炯, 罗志明. 31 份甘蔗野生核心种质资源褐锈病抗性鉴定及 *Brul* 基因的分子检测. 作物学报, 2015, 41: 806–812.
Li W F, Wang X Y, Huang Y K, Zhang R Y, Shan H L, Yin J, Luo Z M. Identification of resistance to brown rust and molecular detection of *Brul* gene in 31 wild core sugarcane germplasms. *Acta Agron Sin*, 2015, 41: 806–812 (in Chinese with English abstract).
- [29] 陈辉, 范源洪, 史宪伟, 蔡青, 张明, 张亚平. 甘蔗细茎野生种(*Saccharum spontaneum* L.)的遗传多样性与系统演化研究. 作物学报, 2001, 27: 645–652.
Chen H, Fan Y H, Shi X W, Cai Q, Zhang M, Zhang Y P. Research on genetic diversity and systemic evolution in *Saccharum spontaneum* L. *Acta Agron Sin*, 2001, 27: 645–652 (in Chinese with English abstract).
- [30] 范源洪, 陈辉, 史宪伟, 蔡青, 张明, 张亚平. 甘蔗细茎野生种云南不同生态类型的 RAPD 分析. 云南植物研究, 2001, 23(3): 298–308.
Fan Y H, Chen H, Shi X W, Cai Q, Zhang M, Zhang Y P. RAPD analysis of *Saccharum spontaneum* from different ecospesific colonies in Yunnan. *Acta Bot Yunnanica*, 2001, 23(3): 298–308 (in Chinese with English abstract).
- [31] 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. 植物遗传资源学报, 2012, 13: 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 Plant Genet Resour*, 2012, 13: 825–829 (in Chinese with English abstract).
- [32] 徐超华, 陆鑫, 刘洪博, 林秀琴, 刘新龙, 苏火生, 马丽, 毛钧, 李旭娟, 蔡青. 甘蔗近缘种滇蔗茅(*Erianthus rockii*)表型性状遗传多样性研究. 植物遗传资源学报, 2014, 15: 1369–1373.
Xu C H, Lu X, Liu H B, Lin X Q, Liu X L, Su H S, Ma L, Mao J, Li X J, Cai Q. Genetic diversity analysis of phenotypic traits in *Erianthus rockii* wild species. *J Plant Genet Resour*, 2014, 15: 1369–1373 (in Chinese with English abstract).
- [33] 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*. *Crop Prot*, 2013, 43: 27–30.
- [34] 李文凤, 单红丽, 王晓燕, 陆鑫, 张荣跃, 仓晓燕, 尹炯, 罗志明, 黄应昆. 滇蔗茅杂交 F₁ 双抗 SCSMV 和 SrMV 鉴定与评价. 植物遗传资源学报, 2017, 18: 886–890.
Li W F, Shan H L, Wang X Y, Lu X, Zhang R Y, Cang X Y, Yin J, Luo Z M, Huang Y K. Identification and evaluation of *Erianthus rockii* F₁ hybrids resistant to SCSMV and SrMV. *J Plant Genet Resour*, 2017, 18: 886–890 (in Chinese with English abstract).
- [35] 李文凤, 王晓燕, 黄应昆, 张荣跃, 单红丽, 罗志明, 尹炯. 101 份中国甘蔗主要育种亲本褐锈病抗性鉴定及 *Brul* 基因的分子检测. 作物学报, 2016, 42: 1411–1416.
Li W F, Wang X Y, Huang Y K, Zhang R Y, Shan H L, Luo Z M, Yin J. Identification of resistance to brown rust and molecular detection of *Brul* gene in 101 main sugarcane breeding parents in China. *Acta Agron Sin*, 2016, 42: 1411–1416 (in Chinese with English abstract).
- [36] 李竹, 许莉萍, 苏亚春, 吴期滨, 成伟, 孙婷婷, 高世武. 基于田间表型和 *Brul* 基因检测分析甘蔗褐锈病抗性遗传. 作物学报, 2018, 44: 306–312.
Li Z, Xu L P, Su Y C, Wu Q B, Cheng W, Sun T T, Gao S W. Analysis of brown rust resistance inheritance based on field phenotypes and detection of *Brul* gene in sugarcane. *Acta Agron Sin*, 2018, 44: 306–312 (in Chinese with English abstract).