

火龙果种质资源果实性状与裂果性相关分析

武志江, 黄凤珠, 韦朔瞳, 黄黎芳, 邓海燕, 叶小滢, 梁桂东, 李祯英, 刘朝安, 陆贵锋

(广西壮族自治区农业科学院园艺研究所/农业农村部南宁亚热带果树科学观测实验站, 南宁 530007)

摘要: 为探明火龙果裂果性相关的果实性状, 以 279 份火龙果种质资源为供试材料, 对单果重、果实纵径、果实横径、果形指数、果脐直径、果脐深度、果脐形状指数、果皮厚度、果脐果萼长度、果萼数量、可食率、果肉中心可溶性固形物含量 (SSC)、果肉边缘 SSC 等 13 个果实性状与裂果率进行遗传变异分析、相关性分析和多元回归分析。结果表明: 13 个果实性状和裂果率均存在丰富的遗传变异; 相关性分析发现裂果率与果脐形状指数的相关系数最大且呈极显著负相关; 裂果率与果形指数和果皮厚度存在显著负相关, 而与可食率和果肉边缘 SSC 呈现显著正相关; 进一步多元线性回归分析可知, 果脐直径和果脐深度是影响裂果率的最主要因素, 共解释裂果率 39.30% 的变异, 而其他果实性状均不能显著影响裂果率。综上所述, 果脐形态结构对火龙果的裂果性至关重要, 在耐裂果育种中果脐形状指数可作为一个关键指标。

关键词: 火龙果; 果实性状; 裂果; 相关性分析; 回归分析

Association Analysis of Fruit Traits with Fruit Cracking in Pitaya Germplasm Resources

WU Zhijiang, HUANG Fengzhu, WEI Shuotong, HUANG Lifang, DENG Haiyan, YE Xiaoying, LIANG Guidong, LI Zhenying, LIU Chaoan, LU Guifeng

(Horticultural Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences / Nanning Investigation Station of South Subtropical Fruit Trees, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanning 530007)

Abstract: In order to explore the fruit traits that associate to the fruit cracking in pitaya (*Hylocereus* spp.), 279 pitaya accessions were used as experimental materials in this study. Genetic variation analysis, correlation analysis and multiple regression analysis were performed at 13 fruit traits including individual fruit weight, fruit longitudinal diameter, fruit transversal diameter, fruit shape index, fruit navel diameter, fruit navel depth, fruit navel shape index, skin thickness, fruit bract length in fruit navel, number of fruit bracts, fruit edible rate, soluble solid content (SSC) of central pulp, and pulp margin SSC with fruit cracking rate. The results revealed abundant genetic variations at 13 fruit traits and fruit cracking rate. By the correlation analysis, the correlation coefficient between fruit cracking rate and fruit navel shape index was the largest, showing a highly significant negative correlation. Fruit cracking rate was negatively correlated with fruit shape index and skin thickness, but positively correlated with edible rate and pulp margin SSC. The multiple linear regression analysis showed that fruit navel diameter and navel depth were the two most important factors affecting fruit cracking rate, accounting for 39.30% of the variation. No significance was detected at other fruit traits to fruit cracking rate. Collectively, the morphological structure of the fruit navel is of importance to the fruit cracking of pitaya, and the fruit navel shape index can be used as a key index in breeding of cracking tolerance varieties.

Key words: pitaya; fruit traits; fruit cracking; correlation analysis; regression analysis

火龙果 (*Hylocereus* spp.) 是起源于中南美洲地区, 后传入我国的一种外来热带水果^[1], 近十几年才开始在我国普及并发展起来的一种新兴水果。截至目前, 全国火龙果种植面积已突破 120 万亩, 超过越南一跃成为世界种植面积最大的国家。然而, 在我国南方主产区露天种植过程中, 火龙果裂果一直是困扰种植者的一大生产问题, 尤其是在果实成熟期赶上雨天, 裂果更加严重。火龙果裂果极大降低了果实的外观品

收稿日期:

修回日期:

网络出版日期:

URL:

第一作者研究方向为火龙果种质资源与遗传育种, E-mail: wzj201688@163.com; 黄凤珠为共同第一作者

通信作者: 陆贵锋, 研究方向为火龙果遗传育种, E-mail: 122447160@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金 (31960578); 广西自然科学基金项目 (2022GXNSFAA035612)

Foundation projects: National Natural Science Foundation of China (31960578); Guangxi Natural Science Foundation (2022GXNSFAA035612)

质和商品价值，给广大生产者造成了极大的经济损失。因此，对火龙果裂果这一不良特性开展相关研究并解决裂果问题显得尤为迫切。

据文献报道，许多水果如苹果^[2]、甜樱桃^[3]、葡萄^[4]、李^[5]、石榴^[6]、柿^[7]、荔枝^[8]、梨^[9]、柑橘^[10]、香蕉^[11]等均存在裂果问题。影响水果果实开裂的因素有很多^[12]，果园管理（如灌溉和营养）和环境条件（如温度、风和光）均会影响水果开裂^[13]。除此之外，裂果性与果实性状之间也存在不同程度的相关性，包括果实形状、果实大小、果实硬度、果皮的结构和韧度、果皮气孔、渗透压、果肉含水量、果实发育期等性状；另有研究报道，果实开裂是一种数量性状，受多个基因控制^[2,14]。截至目前，有关火龙果裂果方面的研究尚较少。国内研究者韦兰洁等^[15,16]通过火龙果裂果与果实主要性状的相关性分析发现火龙果裂果与果实硬度、果皮硬度、果皮厚度和粗纤维含量呈负相关，与果实含酸量呈正相关。另有研究者发现裂果与火龙果品种、果实成熟期、挂果量、挂果位置、留树期等因素有关^[17]。课题组前期在火龙果种质资源的调查过程中发现，不同火龙果品种的裂果性存在不同程度的差异，根据田间观察推测这一特性与果脐形状、果实形状或果皮特性可能存在一定的相关性，发现果脐收口较宽且浅的品种易从果脐处呈纵向裂开形成顶裂；果形为球形或短椭圆形的品种比长椭圆形的品种裂果严重；果皮薄且脆、弹性差、质地柔软的品种易从果实腹部果皮裂开造成腹裂^[18]。

为了系统研究果实性状与裂果性的关系，本研究利用 279 份火龙果种质资源，连续多年对单果重、果实纵径、果实横径、果形指数、果脐直径、果脐深度、果脐形状指数、果皮厚度、果脐果萼长度、果萼数量、可食率、果肉中心 SSC、果肉边缘 SSC 等 13 个果实性状和裂果率进行鉴定，分析果实性状和裂果率的遗传变异，并通过相关性分析和多元回归分析挖掘影响裂果性的果实性状，以筛选优良基因资源，为火龙果耐裂品种的选育提供参考依据，同时为开展火龙果耐裂果性状的 QTL 定位奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料共包括 279 份火龙果种质资源，其裂果率（表征裂果性）大小不同（详见附表 1），种植于农业农村南宁火龙果种质资源圃，其果实性状数据来源于课题组经多年（2016-2022 年）调查鉴定所创建的火龙果表型数据库。

1.2 测定指标及方法

1.2.1 果实性状

于果实成熟期裂果前进行果实性状测定，包括单果重、果实纵径、果实横径、果形指数、果脐直径、果脐深度、果脐形状指数、果皮厚度、果脐果萼长度、果萼数量、可食率、果肉中心可溶性固形物含量（SSC, soluble solid content）、果肉边缘 SSC 等 13 个果实性状，均参照地方标准《火龙果种质资源描述规范》（DB 45/T 1761-2018）和行业标准《植物品种特异性、一致性和稳定性测试指南 量天尺属》（NY/T 4212-2022）的要求进行测定。单果重采用精度为 0.1 g 的电子天平（常熟双杰，TC3K）称重；果实纵径、果实横径、果脐直径、果脐深度、果皮厚度、果脐果萼长度均采用数显游标卡尺（中国得力，DL91150）测量；果肉中心和边缘 SSC 均采用数显折射仪（日本爱拓，PAL-1）测定。果形指数=果实纵径/果实横径；果脐形状指数=果脐深度/果脐直径；可食率（%）=果肉重量/果实重量×100。每份种质资源取具有代表性的 3 个果实进行性状测量，数据取平均值。

1.2.2 裂果率

于果实成熟期，选择雨后天晴时测定裂果率，作为火龙果裂果性的表征指标。按照以下计算公式计算裂果率：

$$\text{裂果率}(\%) = \text{裂果数} / \text{调查果数} \times 100。$$

1.3 数据处理和分析

用 Excel 2019 进行数据统计分析，用 IBM SPSS Statistics 27.0 进行显著性检验、相关性分析及回归分析。

2 结果与分析

2.1 火龙果种质资源果实性状的遗传变异分析

火龙果种质资源的各个果实性状存在较大差异（表 1），其数据的连续变异，证明了这些性状均为数量性状。其中，裂果率的变异系数最大，为 150.22%，其次是果脐形状指数，为 41.27%，可食率的变异系数最小，为 8.85%（表 1）。总体上比较来看，果实内在品质性状的变异系数明显低于外在品质性状。果肉中心 SSC 变异范围为 10.7~22.9%，而果肉边缘 SSC 变异范围为 7.8~15.7%（表 1）。在调查的 279 份种质资源中，有 54.12% 发生裂果（图 1），其中‘云南红肉 4 号’的裂果率最大，为 35.36%，其果脐形状指数较小，为 0.67；‘大叶红水晶’的果形指数最小，为 0.92，裂果率为 8.22%；‘红麒麟’的果皮最厚，达 5.02 mm，而‘玉红龙 01’的果皮最薄，为 1.42 mm，可食率较高，为 72.32%，其裂果率较大，为 23.85%（附表 1）。

表 1 火龙果果实性状的变异分析

Table 1 Variation of fruit traits in 279 accessions of pitaya

果实性状 Fruit traits	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Average	标准差 SD	变异系数 (%) CV
单果重/g	89.6	506.3	277.47	99.81	35.97
果实纵径/mm	51.01	140.68	86.37	15.47	17.91
果实横径/mm	49.21	102.49	74.09	10.47	14.14
果形指数	0.92	1.56	1.17	0.14	11.58
果脐直径/mm	4.92	24.10	11.74	2.90	24.70
果脐深度/mm	1.16	23.68	10.89	3.66	33.59
果脐形状指数	0.18	2.58	0.98	0.39	41.27
果皮厚度/mm	1.42	5.02	2.47	0.58	23.35
果脐果萼长度/cm	2.32	55.07	32.50	9.84	30.28
果萼数量/片	13	53	29.55	6.53	22.10
可食率/%	42.36	82.05	69.58	6.16	8.85
果肉中心 SSC/%	10.7	22.9	18.12	1.67	9.22
果肉边缘 SSC/%	7.8	15.7	12.63	1.19	9.41
裂果率/%	0	35.36	4.78	7.18	150.22

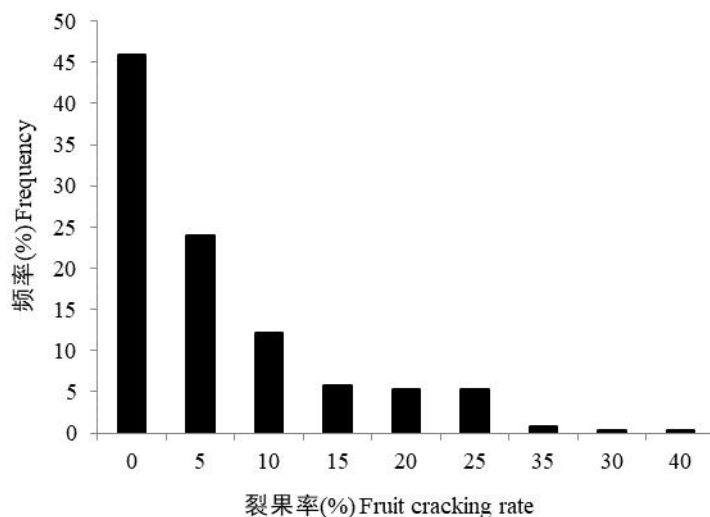


图 1 火龙果种质资源的裂果率频率分布

Figure 1 Distribution of frequency of fruit cracking rate in pitaya germplasm resources

2.2 火龙果裂果率与果实性状的相关性分析

火龙果裂果率与果形指数、果脐形状指数和可食率的相关性达到极显著水平 ($P<0.01$)，与果实纵径、果实横径、果皮厚度和果肉边缘 SSC 的相关性呈显著水平 ($P<0.05$)，而与单果重、果脐果萼长度、果萼数量和果肉中心 SSC 不存在显著相关性 ($P>0.05$)。从相关系数大小来看，裂果率与果脐形状指数的相关系数最大，且呈极显著负相关 (表 2)；相比其他性状，裂果率与果形指数的相关系数也较高。裂果率与果形指数和果皮厚度存在显著负相关，而与可食率和果肉边缘 SSC 呈现显著正相关 (表 2)。

除了果实横径、果萼数量、可食率和果肉边缘 SSC，果脐形状指数与其他性状均存在显著或极显著相关性 (表 2)。果脐形状指数与单果重、果实纵径、果脐深度、果形指数、果皮厚度和果脐果萼长度均呈显著或极显著正相关；果形指数与单果重、果实纵径、果脐深度、果皮厚度均存在极显著正相关 ($P<0.01$)，而与果脐直径、果萼数量和果肉边缘 SSC 存在显著或极显著负相关 (表 2)。

表 2 火龙果裂果率与果实性状的相关性分析

Table 2 Correlation analysis of fruit cracking rate and fruit traits in pitaya

果实性状 Fruit traits	单果重 Individual fruit weight	果实纵径 Fruit longitudinal diameter	果实横径 Fruit transversal diameter	果形指数 Fruit shape index	果脐直径 Fruit navel diameter	果脐深度 Fruit navel depth	果脐形状 指数 Fruit navel shape index	果皮厚度 Fruit skin thickness	果脐果萼 长度 Fruit bract length in fruit navel	果萼数量 Number of fruit bracts	可食率 Fruit edible rate	果肉中心 SSC Soluble solid content (SSC) of central pulp	果肉边缘 SSC Pulp margin SSC	裂果率 Fruit cracking rate
单果重 Individual fruit weight	1													
果实纵径 Fruit longitudinal diameter	0.854**	1												
果实横径 Fruit transversal diameter	0.870**	0.773**	1											
果形指数 Fruit shape index	0.233**	0.579**	-0.060	1										
果脐直径 Fruit navel diameter	0.146*	0.030	0.235**	-0.262**	1									
果脐深度 Fruit navel depth	0.364**	0.383**	0.242**	0.268**	0.014	1								
果脐形状指数 Fruit navel shape index	0.199**	0.297**	0.053	0.385**	-0.526**	0.778**	1							
果皮厚度 Fruit skin thickness	-0.044	0.017	-0.127*	0.204**	-0.075	0.102	0.123*	1						
果脐果萼长度 Fruit bract length in fruit navel	0.374**	0.400**	0.267**	0.272**	0.124*	0.355**	0.214**	-0.134*	1					
果萼数量 Number of fruit bracts	-0.177**	-0.199**	-0.093	-0.166**	0.011	-0.031	-0.043	0.156*	-0.245**	1				
可食率 Fruit edible rate	0.632**	0.548**	0.647**	0.036	0.193**	-0.011	-0.102	-0.355**	0.250**	-0.173**	1			
果肉中心 SSC Soluble solid content (SSC) of central pulp	0.398**	0.263**	0.405**	-0.088	0.088	0.217**	0.139*	-0.099	0.121	0.052	0.225**	1		
果肉边缘 SSC Pulp margin SSC	0.107	0.063	0.191**	-0.125*	-0.010	-0.050	0.022	-0.111	-0.203**	0.122*	0.165**	0.550**	1	
裂果率 Fruit cracking rate	-0.034	-0.151*	0.119*	-0.383**	0.435**	-0.403**	-0.529**	-0.155*	-0.097	0.077	0.175**	0.068	0.146*	1

*表示相关性显著 ($P<0.05$)；**表示相关性极显著 ($P<0.01$)

* indicates significant correlation at 0.05 probability level; ** indicates highly significant correlation at 0.01 probability level

2.3 火龙果裂果率的多元线性回归分析

根据裂果率与果实性状的相关性分析结果，分别以裂果率（Y）为因变量，以果实纵径（X1）、果实横径（X2）、果形指数（X3）、果脐直径（X4）、果脐深度（X5）、果脐形状指数（X6）、果皮厚度（X7）、可食率（X8）、果肉边缘 SSC（X9）等 9 个果实性状为自变量进行多元线性回归分析。分析结果显示，回归方程极显著， $F=20.637$ ， $P<0.001$ 。果脐直径和果脐深度极显著影响裂果率。其中，果脐直径（ $B=1.195$ ， $\beta=0.484$ ， $P<0.001$ ）显著正向预测裂果率，而果脐深度（ $B=-1.050$ ， $\beta=-0.536$ ， $P<0.001$ ）显著负向预测裂果率。这 2 个果实性状共解释裂果率 39.30% 的变异，成为影响裂果率的最主要因素。其他果实性状均不能显著影响裂果率（表 3）。

如果方差膨胀因子（VIF）大于 10，说明数据存在多重共线性。在本研究中，果脐直径和深度的 VIF 均小于 10，说明这 2 个性状不存在多重共线性，结果准确可靠。基于以上分析可得出裂果率的线性回归方程： $Y=-7.779+1.195X_4-1.050X_5$ 。说明果脐直径每增加一个单位，裂果率增加 1.195%；果脐深度每增加一个单位，裂果率减少 1.050%。

表 3 裂果率对果实性状的多元线性回归分析

Table 3 Multiple linear regression analysis of fruit cracking rate on fruit traits

果实性状 Fruit traits	非标准化系数B Unstandardized Coefficients	标准化系数β Standardized Coefficients	t	显著性P Significance	方差膨胀因子 VIF Variance inflation factor	F	调整后R ² Adjusted R ²
(常量) Constant	-7.779		-0.380	0.704			
果实纵径 Fruit longitudinal diameter	-0.067	-0.145	-0.294	0.769	109.372	20.637***	0.393
果实横径 Fruit transversal diameter	0.133	0.193	0.484	0.629	71.704		
果形指数 Fruit shape index	-4.579	-0.086	-0.277	0.782	43.694		
果脐直径 Fruit navel diameter	1.195	0.484	5.263	0.000	3.800		
果脐深度 Fruit navel depth	-1.050	-0.536	-4.195	0.000	7.347		
果脐形状指数 Fruit navel shape index	3.884	0.212	1.440	0.151	9.795		
果皮厚度 Fruit skin thickness	-0.320	-0.026	-0.483	0.630	1.262		
可食率 Fruit edible rate	0.040	0.034	0.482	0.630	2.228		
果肉边缘SSC Pulp margin SSC	0.438	0.072	1.436	0.152	1.134		

***表示回归方程线性关系极显著（ $P<0.001$ ）

*** indicates highly significant regression equation linear relationship at 0.001 probability level

3 讨论与结论

裂果是果实发育过程中发生的一种生理性病害，多发生于果实成熟期^[19]。果实开裂的诱发因素有很多，涉及品种、水分、营养、病虫害、果实熟期、栽培管理等多个方面^[20]。课题组在大量的火龙果种植基地走访调研中发现，火龙果果实成熟期间久旱遇雨或下雨时间持续较长均易造成裂果，尤其在 7~8 月份成熟时，由于温度高且雨水多而造成的裂果数量急剧增加。此外，火龙果裂果与果园土壤质地黏重、栽培管理措施不到位等也有关系^[18]。裂果诱发因素中除外部环境因素外，品种的裂果特性是内在因素，是由自身遗传决定的^[14]，成熟后发生裂果可能是为了适应环境、传播种子的一种内在机制。据文献报道，与火龙果近缘的野生种仙人掌（*Cereus peruvianus*），其果实在成熟期极易裂果^[21]。本研究中不同的火龙果品种资源具有不同的裂果率，其果实形态特征存在显著差异，具有丰富的遗传变异。通过 13 个果实性状与裂果率的相关性分析发现，裂果率与果脐形状指数的相关系数最大且呈显著负相关，而与果形指数和果皮厚度存在显著负相关，这与黄凤珠等^[18]对田间火龙果裂果调查分析的结论一致，其发现抗裂品种果脐收口较窄且深，而易裂品种果脐收口较宽且浅，裂果率最高可达 19.4%，而在本研究中‘云南红肉 4 号’的裂果率更高，达到了 35.36%。本研究进一步通过多元线性回归分析发现，果脐直径和果脐深度是极显著影响裂果率的最主要因素，共解释裂果率 39.30% 的变异，而其他果实性状均不能显著影响裂果率，这一证据进一步表明火龙果裂果尤其是顶裂的果实（果实开裂以顶裂为主），果脐的形态结构可能起决定性作用，这一特点与其他作物裂果的方式明显不同，例如番茄^[22]、西瓜^[23]、葡萄^[24]、番荔枝^[25]、甜樱桃^[26]、枣^[27]等，这些果实均呈现出

不同规则的腹裂，其开裂程度与果皮的组织结构和力学机械性能直接相关。另外，本研究还发现火龙果裂果率与果肉边缘 SSC 呈现显著正相关，这表明火龙果裂果可能与糖有关，这可能是糖作为一个内源信号物质^[28]，调节火龙果裂果的一种内在机制。下一步将继续对果脐的组织生化特性、力学机械性能以及控制果脐大小相关的功能基因进行研究和挖掘。

综合相关性和回归分析结果可知，果脐形态结构对火龙果的裂果性至关重要，在耐裂果育种中果脐形状指数可作为一个关键指标。

参考文献

- [1] Ortiz-Hernández Y D, Carrillo-Salazar J A. Pitahaya (*Hylocereus* spp.): a short review. *Comunicata Scientiae*, 2012, 3(4): 220-237
- [2] Wang Y Y, Guo L H, Zhao X Q, Zhao Y J, Hao Z X, Luo H, Yuan Z H. Advances in mechanisms and omics pertaining to fruit cracking in horticultural plants. *Agronomy*, 2021, 11(6): 1045
- [3] Quero-García J, Letourmy P, Campoy J A, Branchereau C, Malchev S, Barreneche T, Dirlewanger E. Multi-year analyses on three populations reveal the first stable QTLs for tolerance to rain-induced fruit cracking in sweet cherry (*Prunus avium* L.). *Horticulture Research*, 2021, 8: 136
- [4] Zhu M T, Yu J, Zhao M, Wang M J, Yang G S. Transcriptome analysis of metabolisms related to fruit cracking during ripening of a cracking-susceptible grape berry cv. Xiangfei (*Vitis vinifera* L.). *Genes & Genomics*, 2020, 42(6): 639-650
- [5] 孙国超, 邱霞, 熊博, 汪志辉. 青脆李裂果机理研究. *湖北农业科学*, 2019, 58(18): 74-77
Sun G C, Qiu X, Xiong B, Wang Z H. Mechanism of fruit cracking in Qingcui plum. *Hubei Agricultural Sciences*, 2019, 58(18): 74-77
- [6] Singh A, Shukla A K, Meghwal P R. Fruit cracking in pomegranate: extent, cause, and management - A review. *International Journal of Fruit Science*, 2020, 20(S3): S1234-S1253
- [7] Yadav A, Kagneton R, Kochanek B, Cohen B, Fennec A, Israel D, Izhaki A, Zilka S, Friedman H. Development of cracks in early-harvested persimmon cultivar and their reduction by preharvest treatments. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 2021, 96(5): 646-652.
- [8] Wang J, Wu X F, Tang Y, Li J G, Zhao M L. RNA-Seq provides new insights into the molecular events involved in “Ball-Skin versus Bladder Effect” on fruit cracking in litchi. *International Journal of Molecular Sciences*, 2021, 22(1): 454
- [9] Seo H J, Sawant S S, Song J. Fruit cracking in pears: its cause and management—A review. *Agronomy*, 2022, 12(10): 2437
- [10] Hardiyanto, Nirmala F D. Application of K, Ca, and Mg on peel thickness and fruit cracking incidence of citrus. *Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences*, 2019, 87(3): 45-56
- [11] Khanal B P, Pudasaini K, Sangroula B, Knoche M. Factors determining the mechanical properties of banana fruit skin during induced ripening. *Postharvest Biology and Technology*, 2023, 198: 112252
- [12] Fischer G, Balaguera-López H E, Álvarez-Herrera J. Causes of fruit cracking in the era of climate change. A review. *Agronomía Colombiana*, 2021, 39(2): 196-207
- [13] Khadivi-Khub A. Physiological and genetic factors influencing fruit cracking. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2015, 37(1): 1718
- [14] Santos M, Egea-Cortines M, Gonçalves B, Matos M. Molecular mechanisms involved in fruit cracking: A review. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1130857
- [15] 韦兰洁, 陈依丽, 李昌杰, 黎俊辰, 黄馨芸. 火龙果裂果与果实主要性状的相关性分析. *南方农业*, 2022, 16(5): 46-49
Wei L J, Chen Y L, Li C J, Li J C, Huang X Y. Correlation analysis between fruit split and main characters of pitaya fruit. *South China Agriculture*, 2022, 16(5): 46-49
- [16] 韦兰洁, 李昌杰, 黄馨芸, 陈依丽, 张建恒, 黄丽芳. 火龙果果皮组织结构与裂果关系研究. *种子科技*, 2022, 40(4): 4-6+12
Wei L J, Li C J, Huang X Y, Chen Y L, Zhang J H, Huang L F. Study on the relationship between fruit peel structure and fruit split of pitaya fruit. *Seed Science & Technology*, 2022, 40(4): 4-6+12
- [17] 杨运良, 李建勋. 火龙果裂果观察及栽培措施对裂果的影响. *中国南方果树*, 2021, 50(3): 91-94
Yang Y L, Li J X. Observation of fruit split and effect of cultivation measures on fruit split of pitaya. *South China Fruits*, 2021, 50(3): 91-94
- [18] 黄凤珠, 陆贵锋, 姜建初. 广西火龙果裂果调查分析及综合防止措施. *南方农业学报*, 2016, 47(4): 599-603
Huang F Z, Lu G F, Jiang J C. Investigation and analysis of pitaya fruit cracking and comprehensive anti-cracking measures. *Journal of Southern Agriculture*, 2016, 47(4): 599-603
- [19] 马雯彦, 庞晓明, 续九如, 李颖岳. 果实裂果影响因子研究进展. *华中农业大学学报*, 2010, 29(6): 798-804
Ma W Y, Pang X M, Xu J R, Li Y Y. Advances in research on the factors influencing fruit cracking. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2010,

- [20] 任国慧, 陶然, 文习成, 李玉, 王晨, 房经贵. 重要果树果实裂果现象及防治措施的研究进展. 植物生理学报, 2013, 49(4): 324-330
Ren G H, Tao R, Wen X W, Li Y, Wang C, Fang J G. Advances on fruit cracking and prevention measures of some important fruit trees. Plant Physiology Journal, 2013, 49(4): 324-330
- [21] Mizrahi Y. Cereus peruvianus (Koubo) new cactus fruit for the world. Revista Brasileira de Fruticultura, 2014, 36: 68-78
- [22] Diouf I A, Derivot L, Bitton F, Pascual L, Causse M. Water deficit and salinity stress reveal many specific QTL for plant growth and fruit quality traits in tomato. Frontiers in Plant Science, 2018, 9: 279
- [23] Li B B, Lu X Q, Dou J L, Aslam A, Gao L, Zhao S J, He N, Liu W. Construction of a high-density genetic map and mapping of fruit traits in watermelon (*Citrullus lanatus* L.) based on whole-genome resequencing. International Journal of Molecular Sciences, 2018, 19(10): 3268
- [24] 王旭旭, 樊秀彩, 李傲, 张超博, 房经贵, 刘崇怀, 上官凌飞. 葡萄品种资源裂果性状调查与分析. 园艺学报, 2016, 43(11): 2099-2108
Wang X X, Fan X C, Li A, Zhang C B, Fang J G, Liu C H, Shanguan L F. Acta Horticulturae Sinica, 2016, 43(11): 2099-2108
- [25] 陈晶晶, 段雅婕, 莫亿伟, 胡玉林, 胡会刚, 谢江辉. 裂果性不同的番荔枝品种果皮中细胞壁代谢相关基因的表达分析. 果树学报, 2015, 32(5): 769-776+998
Chen J J, Duan Y J, Mo Y W, Hu Y L, Hu H G, Xie J H. Expression analysis of cell wall metabolism gene in pericarp of custard apple cultivars with different fruit cracking characters. Journal of Fruit Science, 2015, 32(5): 769-776+998
- [26] 张琪静, 谷大军. 甜樱桃果实裂果机理研究进展. 果树学报, 2014, 31(4): 704-709
Zhang Q J, Gu D J. A review of the mechanisms of fruit cracking in sweet cherries. Journal of Fruit Science, 2014, 31(4): 704-709
- [27] 刘志国, 卢艳清, 赵锦, 刘孟军. 枣果吸水动力学和果皮特征对裂果的影响. 植物遗传资源学报, 2015, 16(1): 192-198
Liu Z G, Lu Y Q, Zhao J, Liu M J. The effects of water absorbing dynamics and pericarp structure on fruit cracking in chinese jujube. Journal of Plant Genetic Resources, 2015, 16(1): 192-198
- [28] Durán-Soria S, Pott D M, Osorio S, Vallarino J G. Sugar signaling during fruit ripening. Frontiers in Plant Science, 2020, 11: 564917

附表 1 火龙果种质资源信息表

Table S1 List of attributes of pitaya accessions

序号 No.	统一编号 Unified code	种质名称 Germplasm name	裂果率 (%) Fruit cracking rate
1	NYBGXHLG00001	广东普通红肉	5.13
2	NYBGXHLG00002	越南白肉	2.56
3	NYBGXHLG00003	华农粉枝	0.66
4	NYBGXHLG00004	深圳粉枝	2.53
5	NYBGXHLG00005	越南杂交种	0
6	NYBGXHLG00006	红水晶	4.71
7	NYBGXHLG00007	白水晶	0
8	NYBGXHLG00008	紫红龙 1	1.87
9	NYBGXHLG00009	美龙 1 号	1.97
10	NYBGXHLG00010	南宁白肉-1	0
11	NYBGXHLG00011	南宁白肉-2	0
12	NYBGXHLG00012	紫红龙 5	16.71
13	NYBGXHLG00013	紫红龙 6	29.36
14	NYBGXHLG00014	紫红龙 7	7.1
15	NYBGXHLG00015	紫红龙 8	11.45
16	NYBGXHLG00016	南宁白肉-3	3.57
17	NYBGXHLG00017	南宁红肉-1	15.45
18	NYBGXHLG00018	隆安野外种	1.39
19	NYBGXHLG00019	南宁红肉-2	0
20	NYBGXHLG00020	武鸣-2	4.76
21	NYBGXHLG00021	武鸣-4	1.27
22	NYBGXHLG00022	武鸣-6	2.25
23	NYBGXHLG00023	武鸣-7	11.36
24	NYBGXHLG00024	武鸣-8	6.89
25	NYBGXHLG00025	武鸣-9	9.62
26	NYBGXHLG00026	武鸣-10	5.63
27	NYBGXHLG00027	武鸣-11	1.39
28	NYBGXHLG00028	武鸣白肉	0
29	NYBGXHLG00029	武鸣-3	1.52
30	NYBGXHLG00030	武鸣野外种	0
31	NYBGXHLG00032	平果野外种	0
32	NYBGXHLG00033	大嘴红肉	17.37
33	NYBGXHLG00034	长红	0
34	NYBGXHLG00035	仙居红肉 3 号	0
35	NYBGXHLG00037	紫皮红肉 5 号	15.82
36	NYBGXHLG00038	厚皮红肉 6 号	20.83
37	NYBGXHLG00039	仙居红肉 7 号	0
38	NYBGXHLG00040	红皮砧木	15.45
39	NYBGXHLG00041	仙居红肉 9 号	11.84
40	NYBGXHLG00042	从化白肉	1.16
41	NYBGXHLG00043	长红 2 号	0
42	NYBGXHLG00044	红叶	1.79
43	NYBGXHLG00045	授粉树	30.99

44	NYBGXHLG00046	柬埔寨红肉	20.72
45	NYBGXHLG00047	景洪红肉	31.25
46	NYBGXHLG00048	河源-1	8.8
47	NYBGXHLG00049	红肉优株 1	23.08
48	NYBGXHLG00050	河源-2	22.71
49	NYBGXHLG00051	红肉优株 2	0
50	NYBGXHLG00052	河源-3	8.96
51	NYBGXHLG00053	河源-4	2.29
52	NYBGXHLG00054	白肉优株 3	0
53	NYBGXHLG00055	红肉优株 4	20.65
54	NYBGXHLG00056	红肉优株 5	7.76
55	NYBGXHLG00057	河源-6	3.9
56	NYBGXHLG00058	河源-7	8.69
57	NYBGXHLG00059	HD-1	0
58	NYBGXHLG00060	粉红龙 3 号	0
59	NYBGXHLG00061	云龙	8.46
60	NYBGXHLG00062	玉红龙 26	20.55
61	NYBGXHLG00063	红绣球	0
62	NYBGXHLG00064	无刺红肉	0
63	NYBGXHLG00065	长龙	0
64	NYBGXHLG00066	巨龙	1.67
65	NYBGXHLG00067	福龙	6.67
66	NYBGXHLG00068	地龙	1.19
67	NYBGXHLG00069	云龙 2	0
68	NYBGXHLG00070	卵形云龙	21.19
69	NYBGXHLG00071	珠龙	12.27
70	NYBGXHLG00072	玉红龙 01	23.85
71	NYBGXHLG00073	玉红龙 02	3.13
72	NYBGXHLG00074	白玉龙 2 号	0
73	NYBGXHLG00075	白玉龙 3 号	0
74	NYBGXHLG00076	白玉龙 4 号	0
75	NYBGXHLG00077	白玉龙 5 号	0
76	NYBGXHLG00078	白玉龙 6 号	0
77	NYBGXHLG00079	白玉龙 7 号	1.76
78	NYBGXHLG00080	湛江白肉 1	0
79	NYBGXHLG00081	湛江白肉 2	0
80	NYBGXHLG00082	白玉龙 9 号	0
81	NYBGXHLG00083	白肉淘汰种	0
82	NYBGXHLG00084	以色列白肉	0
83	NYBGXHLG00085	红肉优株 6	0
84	NYBGXHLG00086	红肉优株 7	18.56
85	NYBGXHLG00087	红肉优株 8	15.96
86	NYBGXHLG00088	白肉优株	0
87	NYBGXHLG00089	黑龙	0
88	NYBGXHLG00090	橘龙 1	0
89	NYBGXHLG00091	玉红龙 11	6.31

90	NYBGXHLG00092	玉红龙 12	15.16
91	NYBGXHLG00093	玉红龙 13	8.16
92	NYBGXHLG00094	玉红龙 14	3.83
93	NYBGXHLG00095	玉红龙 15	0
94	NYBGXHLG00096	玉红龙 16	11.27
95	NYBGXHLG00097	双色	0
96	NYBGXHLG00098	玉红龙 18	18.36
97	NYBGXHLG00099	红肉 9 号	2.97
98	NYBGXHLG00100	湛江 10 号	0
99	NYBGXHLG00101	湛江 11 号	14.68
100	NYBGXHLG00102	湛江 12 号	23.92
101	NYBGXHLG00103	蜜龙	0
102	NYBGXHLG00105	红玫瑰 1 号	1.76
103	NYBGXHLG00106	白肉-4	0
104	NYBGXHLG00107	紫水晶	8.06
105	NYBGXHLG00108	红玫瑰 2 号	18.75
106	NYBGXHLG00109	红玫瑰 4 号	20.35
107	NYBGXHLG00110	红玫瑰 5 号	15.59
108	NYBGXHLG00111	美龙 2 号	1.58
109	NYBGXHLG00112	美龙 3 号	3.97
110	NYBGXHLG00113	紫龙	3.55
111	NYBGXHLG00114	南宁蜜龙	2.05
112	NYBGXHLG00115	粉红龙 2 号	0
113	NYBGXHLG00116	红肉 1 号	5.42
114	NYBGXHLG00117	红肉 4 号	14.58
115	NYBGXHLG00118	白肉 2 号	2.32
116	NYBGXHLG00119	红肉 2 号	2.34
117	NYBGXHLG00120	红肉 3 号	22.03
118	NYBGXHLG00121	玉红龙 03	22.34
119	NYBGXHLG00122	长红 1 号	0
120	NYBGXHLG00123	玉红龙 04	0
121	NYBGXHLG00124	巨红 2 号	0
122	NYBGXHLG00125	玉红龙 05	0
123	NYBGXHLG00126	早花红龙 1	0
124	NYBGXHLG00127	玉红龙 07	0
125	NYBGXHLG00128	玉红龙 08	0
126	NYBGXHLG00129	遂溪 3 号	8.4
127	NYBGXHLG00130	巨红 1 号	0
128	NYBGXHLG00131	玫瑰红	3.46
129	NYBGXHLG00132	玉红龙 27	0
130	NYBGXHLG00133	玉红龙 20	3.1
131	NYBGXHLG00134	尊龙	0
132	NYBGXHLG00135	祥龙	0
133	NYBGXHLG00136	玉红龙 09	0
134	NYBGXHLG00137	麒麟红 1 号	0
135	NYBGXHLG00138	巨龙果	0

136	NYBGXHLG00139	粉红龙 1 号	1.59
137	NYBGXHLG00140	云南红肉 1 号	0
138	NYBGXHLG00141	云南粉肉	3.17
139	NYBGXHLG00142	云南红肉 4 号	35.36
140	NYBGXHLG00143	云南红肉 5 号	14.29
141	NYBGXHLG00144	云南红肉 6 号	7.26
142	NYBGXHLG00145	玉红龙 19	19.05
143	NYBGXHLG00146	玉红龙 21	2.66
144	NYBGXHLG00147	玉红龙 22	5.71
145	NYBGXHLG00148	玉红龙 23	2.51
146	NYBGXHLG00150	玉红龙 31	23.21
147	NYBGXHLG00151	玉红龙 28	1.59
148	NYBGXHLG00152	玉红龙 29	3.5
149	NYBGXHLG00153	玉红龙 30	0
150	NYBGXHLG00154	玉红龙 25	0
151	NYBGXHLG00155	玉红龙 10	20.24
152	NYBGXHLG00156	海红 1	19.41
153	NYBGXHLG00157	海红 2	6.38
154	NYBGXHLG00158	玉红龙 32	23.33
155	NYBGXHLG00159	紫衫 1 号	0
156	NYBGXHLG00160	仙居白肉	0
157	NYBGXHLG00161	粗薇	1.79
158	NYBGXHLG00162	玫瑰 2 号	1.11
159	NYBGXHLG00163	玫瑰 1 号	5.56
160	NYBGXHLG00164	美龙 5 号	7.78
161	NYBGXHLG00165	白花红肉 1	3.85
162	NYBGXHLG00166	灵山霸王花	0
163	NYBGXHLG00167	田东野外种	0
164	NYBGXHLG00168	晶红龙	1.71
165	NYBGXHLG00169	罗甸 3 号	12.12
166	NYBGXHLG00170	罗甸野外种	0
167	NYBGXHLG00171	罗甸 2 号	11.7
168	NYBGXHLG00172	呈祥 1 号	0
169	NYBGXHLG00173	软枝大红	0
170	NYBGXHLG00174	蜜红	0
171	NYBGXHLG00175	良丽 6 号	7.05
172	NYBGXHLG00176	红玫瑰 9 号	2.28
173	NYBGXHLG00177	良丽 2 号	10.32
174	NYBGXHLG00178	桂红龙 1 号	0
175	NYBGXHLG00179	富贵红 (福建)	7.85
176	NYBGXHLG00180	博白 2 号	0
177	NYBGXHLG00181	大红 (福建)	3.69
178	NYBGXHLG00182	台湾白肉	0
179	NYBGXHLG00183	橘龙 2	1.26
180	NYBGXHLG00184	福建红肉	0
181	NYBGXHLG00185	紫红小果	0

182	NYBGXHLG00186	福建红肉	0
183	NYBGXHLG00187	厦门白肉	0
184	NYBGXHLG00188	白花红肉 2	6.06
185	NYBGXHLG00189	福建白肉	0
186	NYBGXHLG00190	云南野外种	0
187	NYBGXHLG00191	中石农	0
188	NYBGXHLG00192	良丽 1 号	14.54
189	NYBGXHLG00193	冠强红肉	13.33
190	NYBGXHLG00194	光明红	5.56
191	NYBGXHLG00195	云南双色	0
192	NYBGXHLG00196	云南优株	2.15
193	NYBGXHLG00197	云南红肉	4.55
194	NYBGXHLG00198	大叶红水晶	8.22
195	NYBGXHLG00199	红麒麟	0
196	NYBGXHLG00200	双色果	9.68
197	NYBGXHLG00201	粉肉果	0
198	NYBGXHLG00202	上海蜜宝	0
199	NYBGXHLG00203	红玫瑰 8 号	18.18
200	NYBGXHLG00204	长龙（上海）	0
201	NYBGXHLG00205	黄麒麟	0
202	NYBGXHLG00206	玫瑰香	9.23
203	NYBGXHLG00207	御红龙	2.29
204	NYBGXHLG00208	紫罗兰	0
205	NYBGXHLG00209	玉红龙 1 号	9.55
206	NYBGXHLG00210	玉红龙 2 号	8.75
207	NYBGXHLG00211	紫蜜龙(平果)	0
208	NYBGXHLG00212	灵山红肉 1	1.6
209	NYBGXHLG00215	无刺红龙	0
210	NYBGXHLG00216	台 1 号	0
211	NYBGXHLG00217	台 2 号	0
212	NYBGXHLG00218	台 3 号	0
213	NYBGXHLG00219	台 4 号	0
214	NYBGXHLG00220	台 5 号	3.4
215	NYBGXHLG00221	台 11 号	0
216	NYBGXHLG00223	越引 1 号	13.16
217	NYBGXHLG00224	越引 2 号	16.17
218	NYBGXHLG00226	台农（海口）	0
219	NYBGXHLG00227	蜜味水晶白	0
220	NYBGXHLG00228	紫蜜龙（海口）	0
221	NYBGXHLG00229	帝龙	0
222	NYBGXHLG00231	贵妃红	2.42
223	NYBGXHLG00232	实生株	0
224	NYBGXHLG00233	金良	5.24
225	NYBGXHLG00235	杨柑白肉	2.15
226	NYBGXHLG00236	杨柑红肉	13.33
227	NYBGXHLG00238	450（湛江）	3.15

228	NYBGXHLG00239	木兰果	1.67
229	NYBGXHLG00240	白水晶实生株	0
230	NYBGXHLG00241	紫丁香	1.39
231	NYBGXHLG00242	双色（巴马）	0
232	NYBGXHLG00243	紫蜜龙（巴马）	0
233	NYBGXHLG00244	台农 4 号（巴马）	5.77
234	NYBGXHLG00245	大红（巴马）	2.86
235	NYBGXHLG00246	粤红	0
236	NYBGXHLG00247	泰国大红	1.45
237	NYBGXHLG00248	巴马野外种	0
238	NYBGXHLG00249	台农 3 号（巴马）	0
239	NYBGXHLG00250	台农（巴马）	0
240	NYBGXHLG00251	宁明白肉	0
241	NYBGXHLG00252	粉水晶	0
242	NYBGXHLG00253	红冠 1 号	2.56
243	NYBGXHLG00254	莞华红	1.46
244	NYBGXHLG00255	红花青龙	0
245	NYBGXHLG00256	莞华白	0
246	NYBGXHLG00259	双色 1 号	0
247	NYBGXHLG00260	富贵红（云南）	3.51
248	NYBGXHLG00261	香蜜龙	0.87
249	NYBGXHLG00262	蜜宝（云南）	1.54
250	NYBGXHLG00263	石火泉	3.65
251	NYBGXHLG00264	金钻	0
252	NYBGXHLG00265	燕窝果	0
253	NYBGXHLG00266	金都 1 号	0
254	NYBGXHLG00267	桂红 2 号	0
255	NYBGXHLG00268	台农 3 号（龙州）	0
256	NYBGXHLG00270	龙州 02	8.41
257	NYBGXHLG00271	龙州 03	0
258	NYBGXHLG00272	龙州 04	0
259	NYBGXHLG00273	龙州 05	0
260	NYBGXHLG00274	龙州 06	9.38
261	NYBGXHLG00276	龙州 08	0
262	NYBGXHLG00277	龙州 09	0
263	NYBGXHLG00278	安吉房顶	0
264	NYBGXHLG00279	红金宝	0
265	NYBGXHLG00280	红玫瑰	11.63
266	NYBGXHLG00281	蜜玄龙	0
267	NYBGXHLG00282	红宝龙（隆安）	0
268	NYBGXHLG00283	隆安双色	0
269	NYBGXHLG00285	北海 01	0
270	NYBGXHLG00286	贵台 1	0
271	NYBGXHLG00287	贵台 2	0
272	NYBGXHLG00288	灿红	4.44
273	NYBGXHLG00289	美龙 6 号	0

274	NYBGXHLG00290	美龙 7 号	3.02
275	NYBGXHLG00291	嫦娥 1 号	3.7
276	NYBGXHLG00293	大宅白肉	0
277	NYBGXHLG00294	夏威夷	0
278	NYBGXHLG00298	青玉龙	0
279	NYBGXHLG00303	珍珠红	3.58
