

主持人: 张洪亮, 徐 冉

Open Access

## 三种火龙果品种间的最佳授粉效率研究

杨欣<sup>1,2#</sup>, 刘会<sup>1</sup>, 张荣飞<sup>1</sup>, 陈垂日<sup>1</sup>, 路洁<sup>1</sup>, 王俏<sup>3</sup>, 黄怡顺<sup>3</sup>, 王华锋<sup>1,2\*</sup>

(1. 海南大学 三亚南繁研究院, 海南 三亚 572025 中国; 2. 海南大学 热带农林学院, 海南 海口 570228 中国; 3. 海南盛大现代农业开发有限公司, 海南 三亚 572025 中国)

**摘要:** 火龙果(*Hylocereus* spp.)作为高经济价值热带水果,其产业规模在中国海南、广东和广西等地持续扩大,但自交亲和性差异导致的产量限制问题亟待解决。本研究以‘大红’‘无刺黄龙’和‘燕窝果’这3个主栽品种为材料,通过系统授粉试验筛选最佳授粉组合。结果表明:1)品种间物候特征差异显著;‘大红’和‘无刺黄龙’花发育周期为18天,果实成熟期为30天;‘燕窝果’分别需50天和90天;2)生殖特性分析显示,‘无刺黄龙’表现为完全自交不亲和(坐果率0%),其余品种具有部分自交亲和性;3)杂交授粉存在显著基因型效应;‘无刺黄龙’花粉使‘大红’坐果率提升50%( $P<0.05$ ),单果增加21.5%;‘大红’花粉可使‘无刺黄龙’平均单果达322.1g;‘无刺黄龙’花粉使‘燕窝果’坐果率达90%,单果231.6g;4)果实性状相关性分析表明,单果与纵横径呈极显著正相关( $r=0.82-0.91$ ,  $P<0.01$ ),与可溶性固形物含量呈负相关。本研究首次建立‘大红’与‘无刺黄龙’的互作高效授粉体系,并确定‘无刺黄龙’为‘燕窝果’最佳授粉树,可为火龙果产业提质增效提供理论依据和技术支撑。

**关键词:** 火龙果; 自交; 杂交; 自交不亲和; 产量; 授粉效率

中图分类号: S669; Q945.5 文献标志码: A 文章编号: 1674-7054(2026)02-0198-09

杨欣, 刘会, 张荣飞, 等. 三种火龙果品种间的最佳授粉效率研究[J]. 热带生物学报(中英文), 2026, 17(2): 198–206. DOI: 10.15886/j.cnki.rdswwb.20230113 CSTR: 32425.14.j.cnki.rdswwb.20230113



火龙果, 隶属仙人掌科(Cactaceae)量天尺属(*Hylocereus*)或蛇鞭柱属(*Selenicereus*), 起源于墨西哥热带及中南美洲, 后传播至美洲和亚洲的热带及亚热带地区<sup>[1]</sup>。迄今为止, 火龙果的种植遍及全球数十个国家, 包括中国、哥斯达黎加、危地马拉、厄瓜多尔、古巴、越南、泰国、以色列等<sup>[2]</sup>。火龙果是营养价值最为丰富的热带水果之一, 富含多种人体所需的矿质元素, 如钾、钙、铁、镁、锌等; 含糖量较高, 糖酸比为16:0~26:1<sup>[3]</sup>; 膳食纤维的含量显著高于苹果、橙子、桃等常见水果<sup>[4]</sup>; 含有18种氨基酸, 其中8种为人体必需<sup>[5]</sup>; 不饱和脂肪酸占总脂肪酸的74.64%<sup>[6]</sup>; 还富含多种维生素, 如维生素A、B族、C与E等。因此, 火龙果广受消费者的欢迎, 已成为中国极具经济价值的优质热带保健水果之一<sup>[7,8]</sup>。

近年来, 为满足市场需求, 科研人员收集了大量的火龙果种质资源, 并采用传统杂交育种手段

来进行培育新品种。国际上火龙果种质资源收集较多的国家, 如以色列班固里昂大学引进82份火龙果种质, 其中蛇鞭柱属37份, 量天尺属45份<sup>[9]</sup>; 尼加拉瓜、越南、厄瓜多尔和缅甸分别保存了50份、24份、18份和3份火龙果种质资源, 共计134份<sup>[10]</sup>; 中国火龙果种质资源的收集与保存主要集中在南部热带及亚热带地区的农业科研机构。目前, 广西农业科学院园艺研究所保存152份<sup>[11]</sup>, 西双版纳热带作物研究所保存40多份<sup>[12]</sup>。此外, 台湾是中国最早引进并种植火龙果的地区, 目前仍在持续引进和种植一些新种, 保存多种种质材料。目前台湾所拥有的种质资源有红皮白肉品种(系)8份, 红皮红肉品种(系)50份, 黄皮白肉的黄龙品种2份, 以及仙人掌科做果树栽培的刺梨类品种3份和圆柱状仙人掌品种2份。目前, 火龙果被研究发现是配子体型自交不亲和<sup>[13]</sup>。因此, 自交不亲和或亲和性较低是阻碍火龙果新品种培育



收稿日期: 2023-09-24

修回日期: 2025-08-28

**基金项目:** 海南省科技专项基金项目(ZDYF2022XDNY190); 三亚崖州湾科技城项目(SCKJ-JYRC-2022-83); 海南大学南繁与高效热带农业协同创新中心资助项目(XTCX2022NYB09)

**\*第一作者:** 杨欣(2002—), 女, 海南大学热带农林学院2024级硕士研究生。E-mail: 18143710136@163.com

**\*通信作者:** 王华锋(1982—), 男, 教授, 博士生导师。研究方向: 生物资源鉴别与新品种培育。E-mail: hfwang@hainanu.edu.cn

的主要原因<sup>[14,15]</sup>。

有研究表明,以13个澳洲坚果品种为母本、10个为父本,设置了115个杂交组合,筛选出54个强杂交亲和组合(含9对可互为亲本组合)、28个中等亲和、33个弱亲和组合,解决了澳洲坚果中杂交不亲和的问题<sup>[16]</sup>。因此,在火龙果的农业生产中,寻找一些火龙果中亲和性比较高的品种是解决上述问题的有效手段,以此来打破自交不亲和的特性,来提高产量,助力火龙果产业的发展。本研究以自花授粉结实率低、果实品质不佳的蛇鞭柱属和量天尺属自然杂交产生的四倍体火龙果‘燕窝果’(*Hylocereus megalanthus*,又名麒麟果)为材料,筛选合适的授粉品种。以‘大红’(*Selenicereus undatus* (Haw.) D.R.Hunt)和‘无刺黄龙’(*S. undatus* 'Israeli Yellow')2个主栽品种为材料,通过系统授粉试验筛选出最佳授粉组合,建立互作高效授粉体系,有望为火龙果产业提质增效提供理论依据和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料、主要仪器设备

**1.1.1 供试材料** 本次实验所用材料均由海南盛大现代农业开发有限公司提供,其中‘燕窝果’‘无刺黄龙’‘大红’分别取自1号、2号、3号区试验田,均随机选取。在实验过程中,保证所有实验材料处于生长环境良好、植株健康强壮、花果发育正常的状态。

**1.1.2 仪器设备及用具** 实验仪器:手持式折光仪 LH-T90、万分之一电子天平、游标卡尺(精度0.01 mm)、钢卷尺(精度1 mm);

采样工具:园艺剪、镊子、无菌自封袋、标签牌、油性马克笔等。

### 1.2 试验方法

**1.2.1 花动态发育观察方法** 根据设置的采样观察时间节点,从田间选取发育状态一致的初开花蕾作为观察样本,有‘大红’‘无刺黄龙’‘燕窝果’三个品种。以初开花蕾为开始的时间,到开花结束为终止时间。各取10个样本。花朵观测:定期定时观察花朵的发育状态,测量其长度、宽度。花朵在初期时用游标卡尺测量,中后期花朵选用直尺测量。后期花朵开花时,观测其长度、宽度、萼片长度、萼片宽度、花瓣长度、花瓣宽度、花瓣

个数、柱头裂片个数、花药长度、花柱长度、花柱直径、雄蕊长度。最后用Excel软件对实验数据进行处理和统计分析。

**1.2.2 不同授粉处理的果实观察方法** 不同品种进入花期时,开始进行实验,在田间随机选取所需要的实验材料,进行处理、标号,然后进行授粉。各个试验组合取20个样本。授粉完成后计算其坐果率、果实外皮颜色、果肉颜色、果实质量、果实纵径、果实横径、果形指数(果形指数=纵径/横径)、可溶性固体物测定(折光仪测定法)。最后用Microsoft Excel 2019、SPSS 20.0软件对实验数据进行处理和统计分析。

**1.3 实验操作步骤** (1)选品种:‘大红’‘无刺黄龙’‘燕窝果’。

#### (2)雄蕊处理

自花:自花授粉处理组在花即将开放的前两天给雄蕊套袋。

异花:异花授粉处理组仅留下一根细长雌蕊,然后将雌蕊套袋。

(3)授粉:‘大红’‘无刺黄龙’‘燕窝果’分别相互异花授粉并自花授粉。

(4)测量:果实成熟后,记录其长度、宽度、质量、果肉颜色、果皮颜色等。

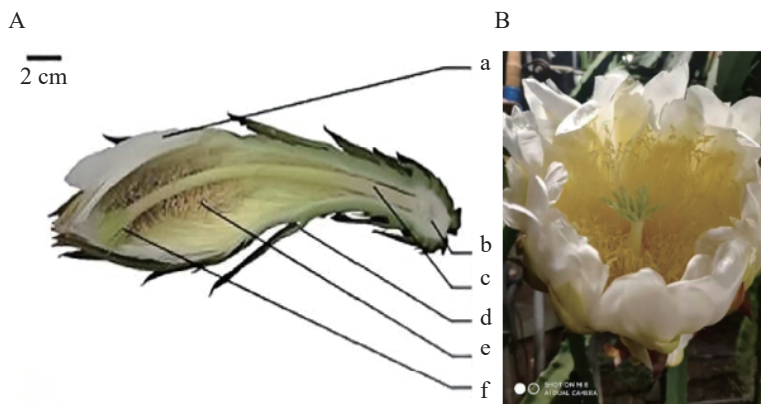
## 2 结果与分析

### 2.1 火龙果花与果动态发育过程

**2.1.1 火龙果花的形态特征** 火龙果成花是由花托、花柄、花萼、花瓣、雄蕊群和雌蕊组成的完全花(图1)。成花在没有开放时平均长度为34.9 cm,最大长度为38.0 cm。花盛开直径为10~20 cm。火龙果花是从它本身茎上的刺座开始发育而成,一个刺座只会长出一朵花。花托相对较短,花萼墨绿色,尖端边缘带一点紫红色,花瓣是白色。火龙果花朵通常于夜间盛开,呈现漏斗形花冠,由20片花瓣构成。花萼和花冠组成的花被呈覆瓦状。多达上千条单体雄蕊构成雄蕊群。花药上存在着两个黄色花粉囊。雄蕊着生在花冠上确认其为冠生雄蕊。雌蕊群由一个雌蕊组成,雌蕊柱头有许多裂片,可达20~25个。雌蕊如图1-A中所示分为柱头、花柱和子房,子房形态为下位子房,胚珠着生于侧膜胎座上。同时,不同火龙果品种的花部形态存在一定差异(表1)。测量结

果表明,‘无刺黄龙’的花长最大,平均为 36.14 cm,显著高于‘燕窝果’和‘大红’;而‘大红’的花宽相对较大,平均为 16.34 cm。在花被结构方面,各品种花被片长度和宽度也存在差异,其中‘无刺黄

龙’的外层花被片长度较大,而‘燕窝果’的花被片宽度相对较宽。总体来看,不同品种火龙果在花器官大小及花被片形态上表现出一定的品种间差异。



A. 火龙果花侧部解剖; B. 田间盛开的火龙果花。  
A. Pitaya flower's lateral anatomy; B. Pitaya flower in full bloom in the field.

图 1 火龙果花的形态观察

Fig. 1 Morphological observation of a pitaya flower

注: a. 花瓣; b. 子房; c. 花柱; d. 花萼; e. 花药; f. 柱头。

Note: a. petal; b. ovary; c. style; d. calyx; e. anther; f. stigma.

表 1 火龙果花部形态特征测量

Tab. 1 Morphological characteristics of pitaya flower

品种Variety	花长/cm Flower length	花宽/cm Flower width	萼片长/cm Petal length	萼片宽/cm Petal width	花瓣长/cm Petal length	花瓣宽/cm Petal width
‘燕窝果’ 'Yanwu'	31.22±1.49	12.42±2.00	12.34±0.52	1.74±0.11	12.28±0.58	5.12±0.29
‘无刺黄龙’ 'Spineless Huanglong'	36.14±0.49	15.26±0.42	18.76±0.55	1.22±0.04	16.24±0.53	2.60±0.14
‘大红’ 'Dahong'	28.72±0.38	16.34±0.72	14.52±0.81	1.06±0.15	13.52±0.50	4.00±0.31

由表 2 可知,自交不亲和型的‘无刺黄龙’品种与自交亲和型的‘大红’品种的生殖器官构造存在

一定差异。比如柱头上的裂片数,‘大红’柱头上的裂片数量比‘无刺黄龙’柱头上的裂片数量多,更能

表 2 火龙果花部形态特征测量

Tab. 2 Morphological characteristics of pitaya flower

品种 Variety	花瓣数/片 Number of petals	柱头裂片数/枚 Number of lobes on the staminal tip	花药长/cm Anther length	花柱长/cm The staminal column length	花柱直径/cm The staminal column diameter	雄蕊到柱头相对距离/cm Stamens to stigma distance
‘燕窝果’ 'Yanwu'	18.0±0.71	22.8±2.04	0.54±0.09	10.70±0.37	0.64±0.05	0.82±0.64
‘无刺黄龙’ 'Spineless Huanglong'	19.4±1.14	19.2±1.48	0.58±0.04	16.22±0.44	0.62±0.08	-1.30±0.48
‘大红’ 'Dahong'	18.8±1.64	25.6±1.34	0.54±0.05	14.36±1.01	0.58±0.04	0.28±0.44

注: 雄蕊到柱头的相对距离以柱头为0点, 雄蕊比柱头长为正值, 比柱头短为负值。

Note: Distance from stamens to stigma is measured using stigma as the reference point. Positive value indicates longer stamens, negative value means shorter.

接受花粉。‘无刺黄龙’雄蕊到花柱柱头相对距离为-1.30 cm, 自花授粉能力较低; 而‘大红’品种的花柱柱头处于被雄蕊群包围的状态, 利于自花授粉。

**2.1.2 火龙果开花结实过程观察** 黄皮白肉品种‘无刺黄龙’从现蕾开始到开花再到果实成熟(图 2), 历时 48 天。最初的花蕾是从刺座中长出, 在第 2 天可以明显看到小花蕾, 此时的花蕾像个球形, 呈绿色, 萼片层未有分化, 直径约 0.5 cm。现蕾第 5 天, 花蕾开始分化出萼片, 约 18 片, 萼片的顶部带一些墨绿色, 萼片层分为 5 层, 萼片长度约为 1 cm, 花蕾呈现近球形, 直径约 2 cm。现蕾后第 11 天, 萼片大量增加, 约 50 片, 底端几层萼片开始分开, 顶端萼片还处于聚拢状态, 此时花蕾长圆

形, 顶部尖锐, 长约 22 cm, 宽约为 7 cm。出现花蕾后第 14 天开花, 花长约 35 cm, 宽约 15 cm, 萼片大部分为青黄色, 白色花瓣约 20 片, 具有大量的单体雄蕊组成的雄蕊群。花柱从底部向上张开, 花柱长约 16 cm, 柱头由大约 20 枚裂片构成。开花后第 2 天, 授粉结束后花朵迅速萎焉。开花后第 4 天, 花朵开始腐败发霉, 可人为将其花冠部位去掉, 此时子房部位开始慢慢膨大。开花后第 24 天, 子房膨大发育成果实坐落在刺座上, 果实是青绿色, 约 15 片鳞片包裹。开花后第 34 天, 果实成熟, 外皮开始由绿色转变为黄色, 鳞片开始减少变短, 果实饱满, 长约 15 cm, 宽约 7 cm, 质量约 350 g。



A. 现蕾后第 2 天; B. 现蕾后第 5 天; C. 现蕾后第 11 天; D. 现蕾后第 14 天正在开花;  
E. 开花后第 2 天; F. 开花后第 4 天; G. 开花后第 24 天; H. 开花后第 34 天果实成熟。  
A. Day 2 after bud emergence; B. Day 5 after bud emergence; C. Day 11 after bud emergence;  
D. Flowering on day 14 after bud emergence; E. Day 2 after flowering; F. Day 4 after  
flowering; G. Day 24 after flowering; H. Fruit ripening on the 34th day after flowering.

图 2 ‘无刺黄龙’开花到结果的过程观察图

Fig. 2 Observation diagram of the process from flowering to fruiting of pitaya 'Spineless Huanglong'

**2.1.3 三个品种火龙果花果发育时间** 根据田间调查发现, 如表 3 可知, 不同品种火龙果花果发育时长有所不同。其中, ‘无刺黄龙’与‘大红’品种火龙果花果生长发育时间相接近, 花朵生长发育时间约 18 天, 果实生长发育时间约 30 天。‘燕窝果’花朵生长发育时间约 50 天, 果实生长发育时间约 90 天。

**2.2 田间授粉试验与果实相关性状的调查** 对三个品种火龙果进行自花授粉及不同组合的异花授粉的坐果率进行调查。

在田间对火龙果进行自交授粉以此检测火龙

果自交不亲和程度。由表 4 可知, 调查所得‘大红’

表 3 三个品种火龙果花果发育时长

Tab. 3 Duration of flower and fruit development in three pitaya cultivars

品种 Variety	花生长 发育时间/d Flower development time	果实生长 发育时间/d Fruit development time
‘大红’ Dahong	18.3±1.2	31.4±1.5
‘无刺黄龙’ ‘Spineless Huanglong’	17.1±1.4	29.9±2.0
‘燕窝果’ ‘Yanwuo’	53.7±3.0	88.1±3.4

‘燕窝果’这两种品种的自交坐果率相同,都是30%,这两个品种的火龙果自交亲和程度不高,为中等强度。‘无刺黄龙’属于完全自交不亲和型。为了解三个品种的异花授粉坐果率与结出果实品质和形状的情况,对其进行交叉授粉。

表 4 三个品种火龙果自交坐果率

Tab. 4 Self-fertilization rate of pitaya in three cultivars

品种 Variety	调查数/个 Survey	坐果数/个 Fruit set quantity	坐果率/% Fruit setting rate
‘大红’ 'Dahong'	20	6	30
‘无刺黄龙’ 'Spineless Huanglong'	20	0	0
‘燕窝果’ 'Yanwuo'	20	6	30

由表 5 可知,以‘大红’为母本进行异花授粉实验,其中‘大红×无刺黄龙’的组合坐果率要高于‘大红×燕窝果’组合。‘无刺黄龙’较好的花粉来源。

以‘无刺黄龙’为母本进行异花授粉实验,其中‘无刺黄龙×大红’的组合坐果率要远高于‘无刺黄龙×燕窝果’组合,‘大红’是较好的花粉来源。

以‘燕窝果’为母本进行异花授粉实验,其中‘燕窝果×无刺黄龙’的组合坐果率要远高于‘燕窝果×大红’组合。‘无刺黄龙’是较好的花粉来源。这表明在母本一样的情况下,火龙果对不同父本品种的花粉亲和性不同。

**2.2.1 果实性状与品质测定** ‘大红’‘无刺黄龙’‘燕窝果’三个品种互相配套授粉,共 6 个组合,分

别是:‘大红×无刺黄龙’‘大红×燕窝果’‘无刺黄龙×大红’‘无刺黄龙×燕窝果’‘燕窝果×大红’‘燕窝果×无刺黄龙’。由表 6 可知,以‘大红’为母本时,其中‘大红×无刺黄龙’授粉组合平均单果质量为 222.7 g,最大单果质量为 286.3 g,远高于‘大红×燕窝果’组合。以‘无刺黄龙’为母本时,‘无刺黄龙×大红’授粉组合平均单果质量达到 322.1 g,最大单果质量为 434.9 g,远远比‘无刺黄龙×燕窝果’授粉组合要好。以‘燕窝果’为母本时,‘燕窝果×无刺黄龙’授粉组合平均单果质量为 231.1 g,最大单果质量为 270.7 g,远高于‘窝果×大红’授粉组合。表 6 表明,火龙果的单果质量与可溶性固形物含量是呈负相关。

**2.2.2 部分性状相关性分析** 从火龙果中选择单果质量、可溶性固形物含量、纵径、横径这四个性状,利用 SPSS 软件进行相关性分析,它们存在的关系如下表 7 所示。

由表 7 可知,火龙果单果质量与纵径、横径之间呈极显著的正相关,而与可溶性固体物呈极显著的负相关。

**2.2.3 不同组合对火龙果性状的影响** 由表 8 可知,以‘大红’为母本的试验组合中,单果质量差异显著。又由表 4 可知,‘大红’自交坐果率较低,因此结合坐果率与单果质量考虑,‘无刺黄龙’为‘大红’最佳父本。

由表 4、表 5 与表 9 可知,‘无刺黄龙’自交坐果率为 0;‘无刺黄龙×燕窝果’处理组中坐果率为 15%。而‘无刺黄龙×大红’单果质量远超‘无刺黄

表 5 不同授粉组合坐果率

Tab. 5 Fruitsetting rate of different pollination combinations

授粉组合 Pollination combination	调查数/个 Survey quantity	坐果数/个 Fruit set quantity	坐果率/% Fruit setting rate
‘大红×无刺黄龙’ 'Dahong × Spineless Huanglong'	20	20	100
‘大红×燕窝果’ 'Dahong × Yanwuo'	20	17	85
‘无刺黄龙×大红’ 'Spineless Huanglong' × Dahong'	20	17	80
‘无刺黄龙×燕窝果’ 'Spineless Huanglong × Yanwuo'	20	3	15
‘燕窝果×大红’ 'Yanwuo × Dahong'	20	12	60
‘燕窝果×无刺黄龙’ 'Yanwuo × Spineless Huanglong'	20	18	90

注:前面的为母本,后面的为父本。下同。

Note: The one in front is the maternal parent and the one at the back is the paternal parent. Similarly hereinafter.

表 6 不同授粉组合果实性状与果实品质

Tab. 6 Fruit traits and fruit quality of different pollination combinations

授粉组合 Pollination combination	平均单果质量/g Fruit average weight	可溶性固形物含量/% Soluble solid content	纵径/cm Girth	横径/cm Diameter	果形指数 Shape
‘大红×无刺黄龙’ 'Dahong × Spineless Huanglong'	222.7±57.0	11.0±1.5	9.2±1.6	7.6±1.4	1.17±0.07
‘大红×燕窝果’ 'Dahong × 'Yanwuo'	154.8±33.4	12.7±1.0	7.3±0.7	5.8±0.6	1.25±0.08
‘无刺黄龙×大红’ 'Spineless Huanglong × Dahong'	322.1±88.9	10.1±1.9	12.2±1.5	7.0±1.1	1.77±0.23
‘无刺黄龙×燕窝果’ 'Spineless Huanglong × Yanwuo'	112.4±5.8	12.1±1.8	8.7±0.4	4.5±0.3	1.92±0.05
‘燕窝果×大红’ 'Yanwuo × Dahong'	73.2±13.0	20.6±1.1	6.3±0.6	4.4±0.3	1.45±0.12
‘燕窝果×无刺黄龙’ 'Yanwuo × Spineless Huanglong'	231.6±21.1	18.2±1.3	8.5±0.5	6.5±0.2	1.32±0.09

表 7 火龙果部分观测性状之间的相关系数分析

Tab. 7 Correlation coefficient analysis between some observed traits of pitaya fruit

相关性 Correlation	单果质量/g Single fruit weight	可溶性固体物含量/% Soluble solid	纵径/cm Girth	横径/cm Diameter
单果质量	1			
可溶性固形物含量	-0.440**	1		
纵径	0.875**	-0.409**	1	
横径	0.808**	-0.313**	0.762**	1

注: \*表示 $P < 0.05$ ; \*\*表示 $P < 0.01$ ; \*\*\*表示 $P < 0.001$ 。

Note: \* indicates  $P < 0.05$ ; \*\* indicates  $P < 0.01$ ; \*\*\* indicates  $P < 0.001$ .

表 8 不同组合对‘大红’果实性状的影响

Tab. 8 Effects of different pollination combinations on fruit traits of pitaya 'Dahong'

处理 Treatment	单果质量/g Single fruit weight	可溶性固形物含量/% Soluble solid content	纵径/cm Girth	横径/cm Diameter
‘大红×大红’ 'Dahong × Dahong'	236.1 <sup>a</sup>	13.0 <sup>a</sup>	8.6 <sup>a</sup>	6.7 <sup>ab</sup>
‘大红×无刺黄龙’ 'Dahong × Spineless Huanglong'	222.7 <sup>a</sup>	11.0 <sup>b</sup>	9.2 <sup>a</sup>	7.6 <sup>a</sup>
‘大红×燕窝果’ 'Dahong × Yanwuo'	154.8 <sup>b</sup>	12.7 <sup>a</sup>	7.3 <sup>b</sup>	5.8 <sup>b</sup>

注: 不同小写字母代表差异达到显著水准( $P < 0.05$ )。下同。

Note: Different lowercase letters represent significant differences ( $P < 0.05$ ). Similarly hereinafter.

表 9 不同组合对‘无刺黄龙’果实性状的影响

Tab. 9 Effect of different combinations on fruit traits of pitaya 'spineless Huanglong'

处理 Treatment	单果质量/g Single fruit weight	可溶性固体含量/% Soluble solid content	纵径/cm Girth	横径/cm Diameter
‘无刺黄龙’自交 'Spineless Huanglong' S. poll.	0 <sup>c</sup>	0 <sup>b</sup>	0 <sup>c</sup>	0 <sup>c</sup>
‘无刺黄龙×大红’ 'Spineless Huanglong × Dahong'	322.1 <sup>a</sup>	10.1 <sup>a</sup>	12.2 <sup>b</sup>	7.0 <sup>a</sup>
‘无刺黄龙×燕窝果’ 'Spineless Huanglong × Yanwuo'	112.4 <sup>b</sup>	12.1 <sup>a</sup>	8.7 <sup>a</sup>	4.5 <sup>b</sup>

龙×燕窝果’。‘大红’为‘无刺黄龙’最佳父本。

由表 4、表 10 可知,‘燕窝果’自花授粉坐果率为 30%;处理组中‘燕窝果’自交与‘燕窝果×大红’的

单果质量没有存在显著性差异。而‘燕窝果×无刺黄龙’单果质量明显提升,结合表 5 坐果率判断,‘无刺黄龙’为‘燕窝果’最佳父本。

表 10 不同组合对‘燕窝果’果实性状的影响

Tab. 10 Effects of different combinations on fruit traits of pitaya 'Yanwuo'

处理 Treatment	单果质量/g Single fruit weight	可溶性固体物含量/% Soluble solid content	纵径/cm Girth	横径/cm Diameter
‘燕窝果’自交 'Yanwuo' S. poll.	70.6 <sup>b</sup>	20.5 <sup>a</sup>	6.2 <sup>b</sup>	4.3 <sup>b</sup>
‘燕窝果×大红’ 'Yanwuo × Dahong'	73.2 <sup>b</sup>	20.6 <sup>a</sup>	6.3 <sup>b</sup>	4.4 <sup>b</sup>
‘燕窝果×无刺黄龙’ 'Yanwuo × Spineless Huanglong'	231.6 <sup>a</sup>	18.2 <sup>b</sup>	8.5 <sup>a</sup>	6.5 <sup>a</sup>

### 3 讨论

**3.1 三种火龙果花朵动态发育的差异** 本研究对于‘大红’‘无刺黄龙’‘燕窝果’三个品种火龙果花朵进行动态发育的全程观察,确定了品种不一样,其花朵的生长周期也有所差异。‘大红’‘无刺黄龙’2个品种的花朵生长周期约 18 天,现蕾后第 10~16 天为花朵快速生长期;‘燕窝果’品种的花朵生长周期约 54 天,现蕾后第 44~53 天为花朵快速生长期。火龙果花朵从现蕾到开花,其形态、大小变化极大。在其发育过程中,需要给予足够水分及营养物质,以供其正常生长。因其发育好坏与果实的产量密切相关,在火龙果开花结果期可以补充钾肥与镁肥等<sup>[17]</sup>。通过对火龙果花朵发育的研究,‘大红’‘无刺黄龙’可以选择在花朵发育第 10 天前给它施加肥料;‘燕窝果’可以选择在花朵发育第 44 天前施加肥料,确保花朵与枝条得到足够的养分供应。火龙果花还是一种食材<sup>[18]</sup>,本研究可以为火龙果花朵的采摘时间提供参考价值。

**3.2 火龙果花的部分差异与自交不亲和反应的联系** 开花是植物重要的生殖过程,是果实形成的第一个步骤,也是关键步骤。植物自交亲和性的强弱,会影响授粉成功率以及果实的产量、品质。

观察可得,自交不亲和型的‘无刺黄龙’品种的花柱柱头明显高于雄蕊,意味着接受外来花粉较易。自交亲和型的‘大红’‘燕窝果’品种花柱的柱头明显低于或近乎持平雄蕊,自花授粉优势明显。花柱柱头上的裂片是用来接受花粉的部位,裂片数越多意味着可以接收到更多的花粉。‘无刺黄龙’花柱柱头上的裂片数量要少于‘大红’‘燕窝

果’。这些生理结构特征是植物长期进化而来的,是种群基因多样性的重要原因。

**3.3 火龙果部分性状的相关性讨论分析** 火龙果果实的生长曲线呈双“S”形:快速生长—缓慢生长—快速生长。火龙果从开花授粉到果实成熟,会经历两个生长高峰,其间,果实内的细胞会加速膨大、单果质量会快速增加,此时也是果实的品质和质量形成的重要时期<sup>[19]</sup>。

火龙果花朵授粉结束后,花朵顶部会在一天后萎蔫腐烂,留下基部,基部迅速膨大发育成果实。在对果实的观测过程中,发现果实的色泽会由未成熟时的浅色转变成深色,‘大红’品种果实由未成熟时的粉红色到成熟时的深红色;‘无刺黄龙’品种果实由青绿色转变为黄色;‘燕窝果’品种果实由青绿色转变成黄色,同时身上硬实刺的底部开始软化,用手从侧面可以轻推开。

本试验通过对观测的数据分析发现,火龙果的单果质量与纵径、横径之间呈极显著的正相关。可溶性固体物含量与单果质量、纵径、横径呈极显著的负相关,说明火龙果越大,可溶性固体物含量会降低。根据这些性状特征,可以选择在合适的时间进行采摘。

**3.4 不同品种火龙果授粉树的搭配** 火龙果花粉呈圆形,属三孔沟类型,比较大。自然界中绝大多数花粉粒的大小在 20~80 μm,而火龙果的花粉粒直径可达到 80 μm 以上<sup>[20]</sup>。不同火龙果品种花粉大小和数量不同。火龙果花粉萌发具有群体效应,适当的花粉密度有助于提高花粉萌发率<sup>[13]</sup>。一般花粉的活力变化随时间推移而逐渐降低,陈石等<sup>[21]</sup>测得随贮藏时间延长(48 h 内),火龙果花粉

活力逐渐下降。火龙果花粉活性与光照强度有关,而火龙果大部分开花时间都位于夜间,夜间属于无光照环境,气温也较白天有所降低,湿度比白天高,使得火龙果夜间花粉活力比白天活力高。

通过授粉实验结果显示,‘无刺黄龙’品种自花授粉几乎不能坐果,利用‘大红’的花粉对其进行授粉能显著提高其坐果率。自花授粉花粉管长缓慢,可能是导致火龙果自交不亲和的一个重要原因<sup>[13]</sup>。而‘大红’‘燕窝果’不同父本坐果率差异明显,说明了火龙果对不同品种的花粉亲和性不同。

#### 4 结论

火龙果自交不亲和性极大地限制了火龙果产业的发展。通过田间授粉试验调查了‘大红’‘无刺黄龙’‘燕窝果’三个品种的火龙果,从而得出以下4个结论:

1. ‘大红’‘无刺黄龙’品种火龙果花朵发育时间约18天,‘燕窝果’品种火龙果花朵发育时间约50天。‘大红’‘无刺黄龙’品种火龙果果实生长发育的时间约30天,‘燕窝果’品种火龙果果实生长发育的时间约90天。说明了不同品种火龙果之间花果生长发育时间存在极大差异。

2. ‘大红’‘燕窝果’品种火龙果雄蕊低于柱头,‘无刺黄龙’柱头低于雄蕊。实验结果表明‘无刺黄龙’属于自交不亲和型的品种,‘燕窝果’‘大红’属于自交亲和型的品种,这说明花朵生理结构差异是造成火龙果自交亲和性差异的重要因素。

3. 火龙果果实在未成熟到成熟过程中色泽会发生变化,由浅变深。火龙果的不同授粉组合与果实品质存在显著性差异,不同花粉导致火龙果果实平均质量差异较大,可溶性固体含量与果实大小呈负相关。

4. ‘大红×无刺黄龙(父本)’‘无刺黄龙×大红(父本)’‘燕窝果×无刺黄龙(父本)’三种授粉组合在生产上可同时提升火龙果的坐果率和产量,从而解决二者无法兼顾的难题。

#### 参考文献:

[1] Le Bellec F, Vaillant F, Imbert E. Pitahaya (*Hylocereus* spp.): a new fruit crop, a market with a future [J]. *Fruits*, 2006, 61(4): 237–250. <https://doi.org/10.1051/fruits:2006021>

[2] 韦晓霞,林旗华,吴如健,等. “银龙”“白玉龙”火龙果在

福建引种初报[J]. *中国南方果树*, 2013, 42(6): 103–104. <https://doi.org/10.13938/j.issn.1007-1431.2013.06.036>

[3] 蔡永强,向青云,陈家龙,等. 火龙果的营养成分分析[J]. *经济林研究*, 2008, 26(4): 53–56. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-8981.2008.04.012>

[4] 邓仁菊,范建新,蔡永强. 国内外火龙果研究进展及产业发展现状[J]. *贵州农业科学*, 2011, 39(6): 188–192. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-3601.2011.06.052>

[5] 齐格勒 E E, 小法勒 L J. 现代营养学[M]. 闻芝梅,陈君石,译. 7版. 北京:人民卫生出版社,1998:158.

[6] 谌金吾,杨占南,张显强,等. 2种不同肉色火龙果种籽脂肪酸分析[J]. *种子*, 2014, 33(10): 32–36. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-4705.2014.10.009>

[7] 王彬,郑伟,韦茜,等. 火龙果的保健价值及发展前景[J]. *广西热带农业*, 2004(3): 19–21. <https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-0764.2004.03.009>

[8] 徐慧,王秋玲,韦刚,等. 火龙果的保健功效及其研究进展[J]. *广西科学院学报*, 2010, 26(3): 383–385. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-7378.2010.03.060>

[9] 李洪立,胡文斌,洪青梅,等. 火龙果种质资源果实特性的遗传多样性分析[J]. *热带亚热带植物学报*, 2019, 27(4): 432–438. <https://doi.org/10.11926/jtsb.4007>

[10] Dwivedi S, Sahrawat K, Puppala N, et al. Plant prebiotics and human health: biotechnology to breed prebiotic-rich nutritious food crops [J]. *Electronic Journal of Biotechnology*, 2014, 17(5): 238–245. <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2014.07.004>

[11] 黄凤珠,陆贵锋,黄黎芳,等. 火龙果种质资源收集保存与初步评价[J]. *西南农业学报*, 2016, 29(4): 920–924. <https://doi.org/10.16213/j.cnki.scjas.2016.04.035>

[12] 田新民,李洪立,何云,等. 火龙果研究现状[J]. *北方园艺*, 2015(18): 188–193. <https://doi.org/10.11937/bfy.201518051>

[13] 王玉林. 红肉火龙果传粉生物学研究及自交不亲和和相關基因初步克隆分析[D]. 广州:广州大学,2017.

[14] 郑文武,刘永华. 我国火龙果生产现状及发展前景[J]. *中国热带农业*, 2008(3): 17. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-0658.2008.03.006>

[15] 申世辉,马玉华,蔡永强. 火龙果研究进展[J]. *中国热带农业*, 2015(1): 48–52. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-0658.2015.01.014>

[16] 孔广红,余文才,柳颀. 自花授粉花柱提取物对澳洲坚果品种间杂交亲和性的影响[J]. *果树学报*, 2023, 40(4): 615–629. <https://d.wanfangdata.com.cn/periodical/gskx202304002>

[17] 梁家康. 火龙果高效栽培的技术及措施[J]. *农业与技术*, 2019, 39(8): 115–116. <https://doi.org/10.19754/j.nyyjs.20190430054>

[18] 张德纯. 量天尺(霸王花)[J]. *中国蔬菜*, 2017(1): 68. <https://doi.org/10.19928/j.cnki.1000-6346.2017.01.016>

[19] 胡子有,梁桂东,黄海生,等. 红肉火龙果果实生长动态规律研究[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(1): 218–222. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6850.2012.01.042>

[20] Dai, Xuexiang, et al. Preliminary research in flower bloom and pollen shed of pitaya [J]. *China Apiculture*, 2016, 67(03): 14–18.

[21] 陈石, 陈丽娜, 李润唐, 等. 红肉火龙果与白肉火龙果花特性比较 [J]. *中国南方果树*, 2011, 40(2): 43–45. <https://doi.org/10.13938/j.issn.1007-1431.2011.02.020>

## Optimal pollination efficiency among three pitaya cultivars

Yang Xin<sup>1,2#</sup>, Liu Hui<sup>1</sup>, Zhang Rongfei<sup>1</sup>, Chen Chuiri<sup>1</sup>, Lu Jie<sup>1</sup>,  
Wang Qiao<sup>3</sup>, Huang Yishun<sup>3</sup>, Wang Huafeng<sup>1,2\*</sup>

(1. Sanya Nanfan Research Institute, Hainan University, Sanya, Hainan 572025, China; 2. School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 3. Hainan Shengda Modern Agricultural Development Co., Ltd., Sanya, Hainan 572025, China)

**Abstract:** Pitaya (*Hylocereus* spp.), a high-value tropical fruit crop, has seen continuous expansion in pitaya producing areas across Hainan, Guangdong, and Guangxi in China. However, yield limitations caused by differential self-compatibility among cultivars remain a critical challenge. Optimal pollination strategies for three major pitaya cultivars ('Dahong', 'Spineless Huanglong', and 'Yanwuo') were systematically evaluated through controlled pollination experiments. Significant phenological variations were observed in these experiments. Pitaya 'Dahong' and 'Spineless Huanglong' required 18 days for floral development and 30 days for fruit maturation, while pitaya 'Yanwuo' needed 50 days and 90 days, respectively. Reproductive analysis revealed complete self-incompatibility in 'Spineless Huanglong' (0% fruit set) and partial self-compatibility in other cultivars. Cross-pollination exhibited genotype-specific effects. 'Spineless Huanglong' pollen increased 'Dahong' fruit set by 37% ( $P < 0.05$ ) and single fruit weight by 21.5%, while 'Dahong' pollen enabled 'Spineless Huanglong' to achieve an average fruit weight of 322.1 g. 'Spineless Huanglong' pollen also optimized 'Yanwuo' performance (90% fruit set; 231.6 g/fruit). Fruit trait correlations showed significant positive relationships between fruit weight and diameter ( $r = 0.82-0.91$ ,  $P < 0.01$ ), but negative correlations with soluble solids content. It is the first time that a reciprocal high-efficiency pollination system between pitaya 'Dahong' and 'Spineless Huanglong' was established, and 'Spineless Huanglong' was identified as the optimal pollinizer for 'Yanwuo'. These findings provide both theoretical and practical foundations for enhancing yield and quality in commercial pitaya production.

**Keywords:** pitaya; self-pollination; cross-pollination; self-incompatibility; output; pollination efficiency

(责任编辑:张 瑁)