

63 份火龙果种质花粉形态观察及亲缘关系分析

王 好^{1,2,3,4}, 李洪立^{2,3,4}, 濮文辉^{2,3,4}, 何 云^{2,3,4}, 洪青梅^{2,3,4}, 李 琼^{2,3,4*},
胡文斌^{2,3,4*}

1. 海南大学热带农林学院, 海南海口 570228; 2. 中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所, 海南海口 571101; 3. 农业农村部华南作物基因资源与种质创制重点实验室, 海南海口 571101; 4. 海南省热带作物资源遗传改良与创新重点实验室, 海南海口 571101

摘 要: 为明确火龙果种质资源花粉形态的遗传多样性特征和种质间的亲缘关系, 以 63 份火龙果种质为研究材料, 采用扫描电子显微镜 (SEM) 观察花粉微观形态, 系统测定极轴长、赤道轴长、极赤比等 8 项性状, 通过相关性分析、主成分分析及聚类分析研究其多样性规律。结果表明: 63 份火龙果花粉均为 N3P4C3 型, 具三孔沟及刺状外壁纹饰, 花粉种质间差异主要表现在形状、大小、萌发沟和外壁纹饰等方面。花粉形状为长球形或近球形; 极轴长的变化范围为 58.82~101.00 μm , 赤道轴长的变化范围为 52.50~86.54 μm , 萌发沟长度变化范围为 37.03~82.25 μm , 萌发沟宽度变化范围为 1.31~8.53 μm , 沟间距的变化范围为 25.14~53.88 μm , 表面突刺密度的变化范围为 1.30~3.11 个/ μm^2 。数量性状中萌发沟宽度变异系数最大, 赤道轴长变异系数最小; 相关性分析表明, 极轴长与萌发沟长、极赤比均呈极显著正相关, 极赤比与沟间距呈极显著负相关; 聚类分析表明, 在欧氏距离 20 处将 63 份种质分为 3 大类, 第 1 大类包含御红龙等 30 份资源, 第 2 大类包含云南 5 号等 15 份资源, 第 3 大类包含巴马红肉等 18 份资源。本研究证实火龙果花粉形态具有丰富的遗传多样性, 建立了基于孢粉学的火龙果种质分类鉴定技术, 可为火龙果种质资源鉴定与遗传育种提供重要理论支撑。

关键词: 火龙果; 花粉形态; 扫描电子显微镜; 遗传多样性; 孢粉学

中图分类号: S326 文献标志码: A

Observation of Pollen Morphology and Analysis of Genetic Relationship Among 63 Pitaya Germplasms

WANG Hao^{1,2,3,4}, LI Hongli^{2,3,4}, PU Wenhui^{2,3,4}, HE Yun^{2,3,4}, HONG Qingmei^{2,3,4}, LI Qiong^{2,3,4*}, HU Wenbin^{2,3,4*}

1. School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 2. Tropical Crops Genetic Resources Institute, Chinese Academy of Tropical Agriculture Sciences, Haikou, Hainan 571101, China; 3. Key Laboratory of South China Crop Gene Resources and Germplasm Innovation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Haikou, Hainan 571101, China; 4. Hainan Key Laboratory of Genetic Improvement and Innovation of Tropical Crop Resources, Haikou, Hainan 571101, China

Abstract: To clarify the genetic diversity characteristics of pollen morphology and the genetic relationships among pitaya germplasm resources, 63 pitaya germplasm accessions were used as the research materials in this study. Scanning electron microscopy (SEM) was applied to observe pollen micromorphology, 8 traits including polar axis length, equatorial axis length, and polar-equatorial ratio were systematically measured, and the diversity patterns of these traits were investigated through correlation analysis, principal component analysis (PCA), and cluster analysis. The results showed that the pollen grains of all 63 pitaya germplasms were N3P4C3 type, with tricolporate apertures and spiny exine ornamentation. The differences in pollen among the germplasms were mainly reflected in subtle aspects such as shape, size,

收稿日期 2025-11-28; 接受日期 2025-12-18

基金项目 热带作物生物育种全国重点实验室科研项目 (No. NKLTCBCXTD14); 琼中黎族苗族自治县重点研发项目。

作者简介 王 好 (1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 种质资源。*通信作者 (Corresponding author): 李 琼 (LI Qiong), E-mail: liqiong4416@126.com; 胡文斌 (HU Wenbin), E-mail: huwb@catas.cn。

germinal furrow traits and exine ornamentation. The pollen grains were prolate or subspheroidal in shape. The polar axis length ranged from 58.82 to 101.00 μm , the equatorial axis length ranged from 52.50 to 86.54 μm , the germinal furrow length ranged from 37.03 to 82.25 μm , the germinal furrow width ranged from 1.31 to 8.53 μm , the furrow spacing ranged from 25.14 to 53.88 μm , and the surface spine density ranged from 1.30 to 3.11 per μm^2 . Among the quantitative traits, the coefficient of variation (CV) of germinal furrow width was the largest, while that of equatorial axis length was the smallest. Correlation analysis revealed that polar axis length had an extremely significant positive correlation with germinal furrow length and polar-equatorial ratio, and polar-equatorial ratio had an extremely significant negative correlation with furrow spacing. Cluster analysis showed that the 63 germplasms were divided into 3 major clusters at a Euclidean distance of 20. The first cluster contained 30 accessions including Yuhonglong, the second cluster contained 15 accessions including Yunnan No.5, and the third cluster contained 18 accessions including Bama Red Flesh. This study confirmed that pitaya pollen morphology presents abundant genetic diversity, and established a palynology-based technique for the classification and identification of pitaya germplasms, which can provide important theoretical support for the identification and genetic breeding of pitaya germplasm resources.

Keywords: pitaya; pollen morphology; scanning electron microscopy; genetic diversity; palynology

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2026.03.007

火龙果 (*Selenicereus* spp.) 隶属仙人掌科 (Cactaceae) 蛇鞭柱属 (*Selenicereus*), 起源于中南美洲地区, 后传入越南、泰国等东南亚国家, 如今已在全球热带地区广泛种植。20 世纪 90 年代初, 中国台湾率先引入火龙果进行栽植, 此后, 广西、广东、福建、云南、海南等地凭借其适宜的气候条件, 陆续引种并大规模推广种植^[1-2]。即便在中国北方地区, 借助温室大棚技术, 火龙果也得以成功栽植^[3]。火龙果产业在全球范围内呈现出蓬勃发展的态势, 种质资源也愈发丰富。火龙果现有品种资源外形特征较为相似, 品种混淆的问题也日益凸显, 为资源管理和品种保护带来挑战。

前人针对火龙果种质资源的遗传多样性及亲缘关系开展了多方面研究。胡文斌等^[4]利用 20 对 SSR 核心引物对 58 个火龙果品种进行分析, 将其分为 3 大类群。DE LA TORRE-VELÁZQUEZ 等^[5]使用 *rbcL*、*matK* 和 *trnH-psbA* 位点作为单位点和多位点条形码, 识别不同颜色火龙果间的遗传差异, 为传统分类学方法提供了替代方案。ABIRAMI 等^[6]评估了 16 个 ISSR 引子, 产生了 178 个可重复的扩增带, 多态性带的范围和观察到的多态性百分比分别为 1~13 和 20%~93%。这些研究多聚焦于基因组层面的遗传多样性, 但对于火龙果花粉形态及多样性的系统性研究仍显不足, 尤其在整合多维度花粉形态指标进行全面的多样性分析上存在欠缺。

在植物遗传多样性研究中, 花粉作为关键材料具有诸多优势。花粉是植物的雄配子体, 携带

了父本的完整遗传信息, 能够直接反映植物的遗传特征。且相较于其他组织或器官, 花粉易于采集, 在不损伤植株的前提下, 便能获取大量样品。同时, 花粉形态相对稳定, 受环境因素影响较小, 其形状、纹饰以及萌发沟等特征, 在物种间往往存在明显差异, 这些独特的形态学特征为遗传多样性分析提供了丰富且可靠的依据。在果树遗传多样性研究中, 扫描电子显微镜 (SEM) 技术作为重要的孢粉学分析工具, 已被广泛应用于多种果树种质资源的微形态学研究, 例如杏^[7]、梨^[8]、樱桃^[9]、猕猴桃^[10]、苹果^[11]、柠檬^[12]、番荔枝^[13]、柚^[14]等。

本研究旨在深入剖析火龙果花粉形态, 系统开展多样性分析。通过对 63 个火龙果品种花粉样品的极轴长、赤道轴长、极赤比、花粉形状、萌发沟长、萌发沟宽、沟间距、突刺密度等维度指标测定与分析, 研究不同品种花粉形态特征。同时, 借助系统聚类分析等手段, 揭示火龙果花粉在形态层面的多样性特征及品种间亲缘关系, 为火龙果种质资源评价提供新视角, 进一步推动火龙果产业的可持续发展。

1 材料与方法

1.1 材料

本研究以位于中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所儋州两院试验场五队海南省级火龙果种质资源圃的 63 份火龙果种质资源为试验材料 (表 1)。

表 1 试验材料信息
Tab. 1 Information of tested materials

序号 No.	名称 Name	来源 Origin	序号 No.	名称 Name	来源 Origin
1	云南 1 号	中国云南	33	南宁红肉	中国广西
2	云南 6 号	中国云南	34	越南杂交种	中国广西
3	火龙 5 号	中国海南	35	GL-23	中国广西
4	云南 5 号	中国云南	36	GL-33	中国广西
5	云南 4 号	中国云南	37	GL-38	中国广西
6	云南 11 号	中国云南	38	琼海红肉 3 号	中国海南
7	光明红	中国海南	39	大红-L	中国海南
8	蜜宝	中国海南	40	皇冠	中国海南
9	自花授粉红肉	中国海南	41	明珠	中国海南
10	细翼水晶	中国广东	42	柠檬	中国云南
11	湛江白肉	中国广东	43	AU-1	澳大利亚
12	蛇鞭柱	中国广东	44	紫蜜龙	中国海南
13	高丰 1 号	中国广西	45	御红龙	中国上海
14	巨龙	中国海南	46	翠龙	中国广西
15	HD-5	中国广西	47	祥龙	中国广西
16	河源-3	中国广西	48	玫瑰红	中国海南
17	HD-1	中国广西	49	白花双色	中国海南
18	紫红龙 8	中国广西	50	无刺黄龙	中国广东
19	美龙 2 号	中国广西	51	普红 3	中国海南
20	柬埔寨红肉	中国广西	52	粉色之恋	中国海南
21	紫水晶	中国海南	53	黑刺	中国海南
22	景洪红肉	中国云南	54	台湾冠军双色	中国台湾
23	越南红肉	中国广西	55	BRA-pink	巴西
24	湛江 10 号	中国广东	56	阿莲娜	美国
25	国外种	中国广西	57	大路镇红肉	中国海南
26	红花青龙	中国广西	58	EL	美国
27	自粉帝龙	中国广西	59	L3-126	中国海南
28	青龙	中国广西	60	S4 蛇龙	中国福建
29	巴马红肉	中国广西	61	临家红韵	中国海南
30	红水晶 24 号	中国广东	62	青皮红肉	中国广东
31	实生红水晶	中国广东	63	白水晶	中国广东
32	玫瑰 2 号	中国广西			

1.2 方法

1.2.1 花粉采集 于火龙果盛花期 5 月份，选择植株生长健壮、无病虫害且当晚即将开放的花朵作为花粉采集对象。为避免昆虫传粉导致花粉污染，在花朵未开放前对目标花朵进行套袋处理，该方法与戴雪香等^[15]在火龙果花粉采集研究中采用的套袋方式一致。采集花粉时，取下套袋，用洁净的镊子轻轻拨开花瓣，每个品种选择 3 朵，将花粉抖落至硫酸纸袋中，充分混匀后，将装有花粉的硫酸纸袋放入装有硅胶颗粒并标注种质编号与采集日期的密封袋中，自然干燥保存。

1.2.2 扫描电镜观察 将自然干燥的花粉均匀散落在粘有导电双面胶的圆形金属载物台上，采用离子溅射仪使火龙果花粉粒表面喷金镀膜；在扫描电子显微镜（SEM，Σ IGM300，卡尔·蔡司股份公司）下，选择代表性视野观察花粉粒的形态特征(放大 300 倍)、单花粉颗粒的形态特征(放大 1100 倍)和花粉粒外壁表面（放大 3500 倍）分别拍照和记录。

1.3 数据处理

每个品种随机选取 20 粒花粉，使用 ImageJ 测量并记录花粉粒极轴长（polar axis length, P）、

赤道轴长 (equatorial axis length, E)、萌发沟长度 (germinal furrow length, GFL)、萌发沟宽度 (germinal furrow width, GFW)、萌发沟间距 (germinal furrow spacing, GFS)、表面突刺密度 (surface spine density, Ns)。利用 Excel 软件计算指标平均值,并以最小值~最大值范围表示花粉粒大小,以极赤比 (P/E) 表示花粉粒形状,观察并记录各花粉的赤道外观、极轴外观以及外壁纹饰的类型。用 SPSS 软件对所获得的数据进行相关性分析和主成分分析。数据标准化后,采用沃德法基于欧氏距离对 63 份火龙果种质进行聚类分析,构建孢粉形态学性状树状图,采用 Excel 软件和 Origin 2024 软件进行可视化分析。花粉的赤道外观、极轴外观以及表面纹饰等形态参考

《Handbook of palynology》^[16]、《孢粉学概论》^[17] 中的名词术语进行描述。

2 结果与分析

2.1 63 份火龙果种质花粉的形态特征

63 份火龙果种质花粉微观形态数量性状包括极轴长、赤道轴长、极赤比、萌发沟长度、萌发沟宽度、沟间距、突刺密度,质量性状包括花粉粒形状、表面纹饰 (表 2)。依据《Handbook of palynology》^[16]的分类标准,供试 63 份火龙果种质花粉属于 N3P4C3 型,即具 3 个萌发沟,萌发沟沿极轴方向延伸,外壁均为刺状纹饰 (图 1),刺状突起分布均匀,基部略宽,顶端尖锐,部分品种刺状突起表面可见细微纹理。

表 2 63 份火龙果种质花粉性状
Tab. 2 Pollen morphological characteristics of 63 pitaya germplasms

序号 No.	名称 Name	极轴长 P/ μm	赤道轴长 E/ μm	极赤比 P/E	萌发沟长 度 GFL/ μm	萌发沟宽度 GFW/ μm	萌发沟间距 GFS/ μm	突刺密度 Ns/(个· μm^{-2})	花粉形状 Shape	表面纹饰 Sculpturing
1	云南 1 号	85.13	65.18	1.31	74.21	8.53	33.01	2.59	长球形	刺状纹饰
2	云南 6 号	94.77	63.33	1.50	75.50	6.16	26.61	1.99	长球形	刺状纹饰
3	火龙 5 号	63.63	64.06	0.99	45.56	3.76	43.49	3.11	近球形	刺状纹饰
4	云南 5 号	71.08	61.64	1.15	57.27	4.83	40.32	2.12	长球形	刺状纹饰
5	云南 4 号	79.91	57.43	1.39	68.64	3.95	33.15	2.49	长球形	刺状纹饰
6	云南 11 号	88.40	86.54	1.02	50.31	4.12	48.52	2.03	近球形	刺状纹饰
7	光明红	60.968	62.23	0.98	45.19	5.98	40.19	2.00	近球形	刺状纹饰
8	蜜宝	78.59	59.13	1.33	60.03	7.14	32.97	1.57	长球形	刺状纹饰
9	自花授粉红肉	61.84	52.50	1.18	37.03	6.37	37.03	1.61	长球形	刺状纹饰
10	细翼水晶	64.68	65.30	0.99	45.72	2.42	45.53	2.24	近球形	刺状纹饰
11	湛江白肉	62.02	62.15	1.00	38.42	7.02	37.32	2.32	近球形	刺状纹饰
12	蛇鞭柱	84.88	62.62	1.36	71.79	3.70	38.41	1.95	长球形	刺状纹饰
13	高丰 1 号	70.23	64.05	1.10	52.08	4.87	44.98	2.03	近球形	刺状纹饰
14	巨龙	72.87	63.96	1.14	51.11	3.58	38.69	1.86	近球形	刺状纹饰
15	HD-5	88.55	61.53	1.44	74.09	3.91	29.25	1.53	长球形	刺状纹饰
16	河源-3	90.55	63.62	1.42	71.06	4.30	31.41	2.20	长球形	刺状纹饰
17	HD-1	73.98	65.56	1.13	52.38	4.35	39.81	1.46	近球形	刺状纹饰
18	紫红龙 8	70.33	59.73	1.18	55.67	4.15	37.15	1.31	长球形	刺状纹饰
19	美龙 2 号	62.68	65.94	0.95	48.53	3.19	45.03	2.16	近球形	刺状纹饰
20	柬埔寨红肉	94.35	60.33	1.56	78.98	3.73	25.14	1.80	长球形	刺状纹饰
21	紫水晶	101.00	63.12	1.60	80.09	3.59	30.21	2.21	长球形	刺状纹饰
22	景洪红肉	98.79	67.90	1.45	82.25	3.77	29.53	2.19	长球形	刺状纹饰
23	越南红肉	68.16	61.91	1.10	46.69	3.44	37.44	1.79	近球形	刺状纹饰
24	湛江 10 号	73.88	62.83	1.18	57.38	3.69	36.55	2.29	长球形	刺状纹饰
25	国外种	61.41	61.58	1.00	43.41	3.15	33.99	1.99	近球形	刺状纹饰

续表 2 63 份火龙果种质花粉性状
Tab. 2 Pollen morphological characteristics of 63 pitaya germplasms (continued)

序号 No.	名称 Name	极轴长 P/ μm	赤道轴长 E/ μm	极赤比 P/E	萌发沟长 度 GFL/ μm	萌发沟宽度 GFW/ μm	萌发沟间距 GFS/ μm	突刺密度 Ns/(个· μm^{-2})	花粉形状 Shape	表面纹饰 Sculpturing
26	红花青龙	74.37	59.38	1.25	52.88	3.49	30.18	2.17	长球形	刺状纹饰
27	自粉帝龙	91.34	57.47	1.59	75.42	2.91	28.93	1.91	长球形	刺状纹饰
28	青龙	69.46	60.05	1.16	51.84	2.63	33.19	1.97	长球形	刺状纹饰
29	巴马红肉	85.13	61.38	1.39	66.83	2.78	28.86	1.81	长球形	刺状纹饰
30	红水晶 24 号	95.78	62.52	1.53	77.25	3.14	26.27	1.95	长球形	刺状纹饰
31	实生红水晶	91.15	63.85	1.43	74.85	1.31	27.59	1.97	长球形	刺状纹饰
32	玫瑰 2 号	71.99	62.15	1.16	53.66	3.34	37.69	1.60	长球形	刺状纹饰
33	南宁红肉	96.40	63.41	1.52	79.32	3.52	28.53	1.51	长球形	刺状纹饰
34	越南杂交种	75.09	63.54	1.18	49.94	2.18	31.73	1.30	长球形	刺状纹饰
35	GL-23	92.30	64.09	1.44	77.95	2.59	27.98	1.90	长球形	刺状纹饰
36	GL-33	82.96	66.71	1.24	55.15	2.81	29.18	1.73	长球形	刺状纹饰
37	GL-38	71.83	62.92	1.14	61.46	3.68	29.03	1.69	长球形	刺状纹饰
38	琼海红肉 3 号	65.84	63.30	1.04	49.96	2.83	32.76	1.86	近球形	刺状纹饰
39	大红-L	61.92	61.36	1.01	44.79	2.45	39.74	2.35	近球形	刺状纹饰
40	皇冠	80.81	58.85	1.37	61.43	3.83	29.10	1.90	长球形	刺状纹饰
41	明珠	84.37	63.11	1.34	67.75	3.55	33.49	2.13	长球形	刺状纹饰
42	柠檬	67.90	65.19	1.04	49.33	3.24	41.81	2.22	近球形	刺状纹饰
43	AU-1	75.13	62.29	1.21	54.35	2.86	34.86	1.46	长球形	刺状纹饰
44	紫蜜龙	69.32	60.69	1.14	50.56	2.69	39.30	1.81	长球形	刺状纹饰
45	御红龙	62.92	61.80	1.02	43.33	2.12	43.23	2.00	近球形	刺状纹饰
46	翠龙	68.77	61.99	1.11	50.10	2.29	42.86	1.79	近球形	刺状纹饰
47	祥龙	93.81	59.11	1.59	77.43	2.29	36.27	1.80	长球形	刺状纹饰
48	玫瑰红	68.24	63.79	1.07	44.99	2.57	39.09	2.41	近球形	刺状纹饰
49	白花双色	64.48	62.88	1.03	45.67	2.45	53.88	1.77	近球形	刺状纹饰
50	无刺黄龙	66.18	64.11	1.03	46.86	2.21	43.64	2.17	近球形	刺状纹饰
51	普红 3	61.52	64.63	0.95	43.62	2.49	48.23	1.76	近球形	刺状纹饰
52	粉色之恋	73.06	62.65	1.17	53.77	3.16	36.23	1.30	长球形	刺状纹饰
53	黑刺	66.48	65.46	1.02	50.19	2.28	40.07	1.76	近球形	刺状纹饰
54	台湾冠军双色	63.22	59.70	1.06	45.25	3.11	39.90	2.11	近球形	刺状纹饰
55	BRA-pink	68.73	57.27	1.20	41.86	2.91	33.39	1.78	长球形	刺状纹饰
56	阿莲娜	65.31	62.52	1.04	49.26	2.48	35.85	1.88	近球形	刺状纹饰
57	大路镇红肉	62.96	63.75	0.99	51.88	2.72	34.12	1.73	近球形	刺状纹饰
58	EL	68.87	60.94	1.13	46.63	1.81	45.26	1.96	近球形	刺状纹饰
59	L3-126	68.56	61.30	1.12	51.16	2.05	31.60	1.66	近球形	刺状纹饰
60	S4 蛇龙	62.30	60.94	1.02	43.16	2.11	46.09	1.76	近球形	刺状纹饰
61	临家红韵	63.02	53.70	1.17	46.26	1.88	47.67	2.00	长球形	刺状纹饰
62	青皮红肉	58.82	62.05	0.95	41.00	2.29	44.04	1.96	近球形	刺状纹饰
63	白水晶	66.97	66.38	1.01	45.22	2.12	42.52	1.59	近球形	刺状纹饰

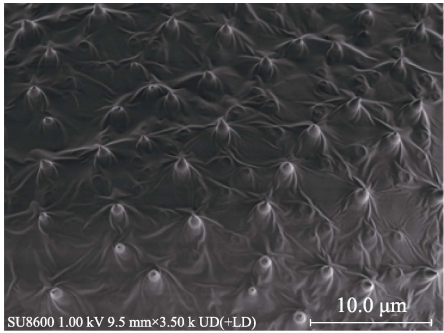


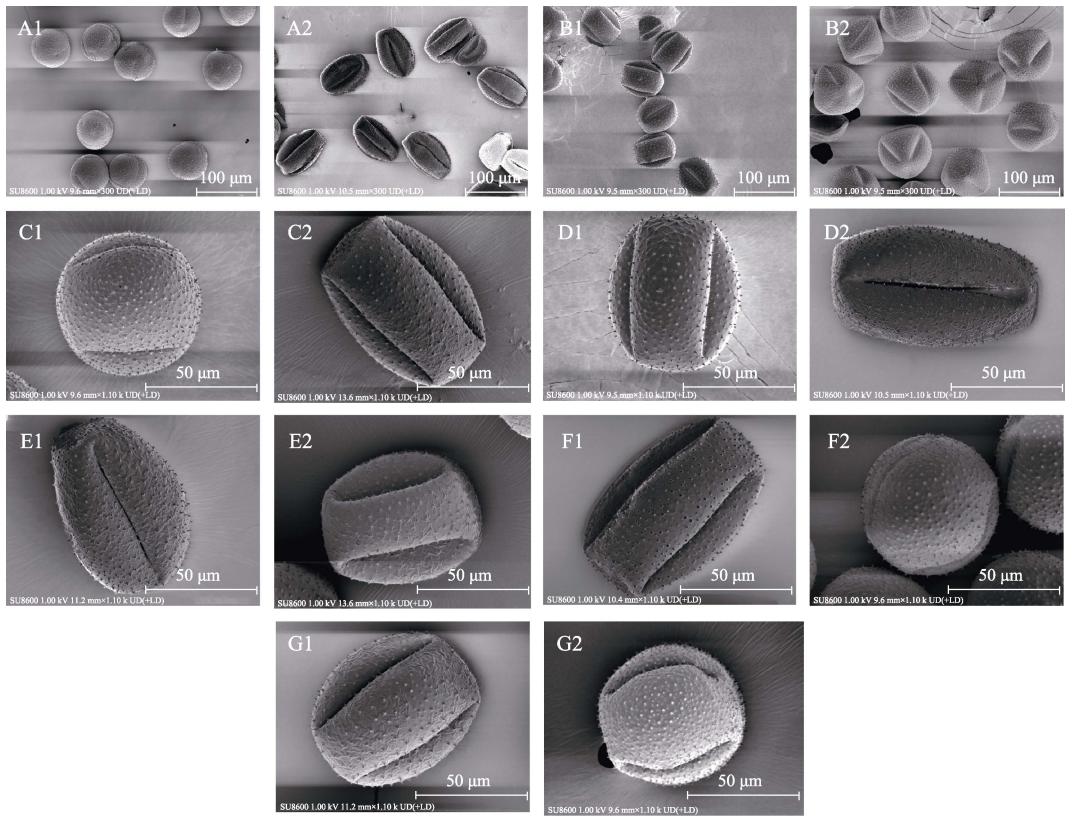
图 1 火龙果花粉表面刺状纹饰
Fig. 1 Spinulate exine pattern of pitaya pollen

依据《孢粉学概论》^[17]对花粉大小的形态学描述,极轴长 10~25 μm 为小型花粉,25~50 μm 为中型花粉,50~100 μm 为大型花粉粒,100~200 μm 为特大花粉粒。63 份种质中除紫水晶为特大花粉粒其他均属于大型花粉粒。极轴长在 75 μm 以下的有青皮红肉、光明红、国外种、普红 3、自花授粉红肉等 40 份种质,极轴长在 75 μm 及以上的紫水晶、景洪红肉、南宁红肉、红水晶

24 号、云南 6 号等 23 份种质,仅有云南 11 号一份种质赤道轴长超过 70 μm (表 2、图 2)。

依据王伏雄^[18]对于花粉形状的形态学描述,0.88<P/E<0.816 为扁球形;1.14<P/E<0.88 为近球形;2.00<P/E<1.14 为长球形。63 份种质中 P/E 范围为 0.95~1.60,分为长球形和近球形 2 类,近球形花粉有青皮红肉、美龙 2 号,白水晶等 29 份种质,长球形花粉有紫水晶、自粉帝龙、祥龙等 34 份种质 (表 2、图 2)。

63 份火龙果花粉均具 3 条萌发沟,长而窄,呈不规则形状,沿极轴方向延伸至沟的三端,辐射对称,分布均匀且三沟在极面不相交。萌发沟长度在 60 μm 以下的有自花授粉红肉、湛江白肉、青皮红肉、BRA-pink、大路镇红肉等 43 份种质,60 μm 以上的有景洪红肉、紫水晶、南宁红肉、柬埔寨红肉、GL-23 等 20 份种质。萌发沟宽度在 3 μm 以下的有实生红水晶、S4 蛇龙、临家红韵、白水晶、大路镇红肉等 29 份种质,3 μm 以上的



A1: 极轴长<75 μm; A2: 极轴长>75 μm; B1: 赤道轴长<70 μm; B2: 赤道轴长>70 μm; C1: 近球形; C2: 长球形; D1: 萌发沟长<60 μm; D2: 萌发沟长>60 μm; E1: 萌发沟宽<3 μm; E2: 萌发沟宽>3 μm; F1: 沟间距<40 μm; F2: 沟间距>40 μm; G1: 表面突刺密度<2 个/μm²; G2: 表面突刺密度 2 个/μm²。
A1: P<75 μm; A2: P>75 μm; B1: E<70 μm; B2: E>70 μm; C1: Prolate; C2: Subspheroidal; D1: GFL<60 μm; D2: GFL>60 μm; E1: GFW<3 μm; E2: GFW>3 μm; F1: GFS<40 μm; F2: GFS>40 μm; G1: Ns<2/μm²; G2: Ns>2/μm²。

图 2 火龙果花粉形态特征
Fig. 2 Morphological characteristics of pitaya pollen

有云南 1 号、蜜宝、湛江白肉、自花授粉红肉、云南 6 号等 34 份种质。沟间距在 40 μm 以下的有柬埔寨红肉、红水晶 24 号、云南 6 号、实生红水晶、GL-23 等 44 份种质，40 μm 以上的有白花双色、云南 11 号、普红 3、临家红韵、大路镇红肉等 19 份种质（表 2、图 2）。

供试火龙果花粉外壁纹饰均为刺状纹饰，表面由具有尖端的圆锥状突起物组成，轮线上呈现明显的刺状，且分布不规律，密度不一。表面突刺密度在 2 个/ μm^2 以下的有粉色之恋、越南杂交种、紫红龙 8 等 40 份种质，2 个/ μm^2 以上的有火龙 5 号、云南 1 号、云南 4 号等 23 份种质（表 2、图 2）。

2.2 基于 63 份火龙果种质花粉的形态特征的遗传多样性分析

对 63 份火龙果种质花粉性状的多样性进行系统分析，统计结果见表 3。数据显示，所测量的 7 项花粉性状均表现出丰富的遗传变异。在花粉粒大小方面，花粉极轴长的变化范围为 58.82 μm ~101.00 μm ，平均值为 74.60 μm ，标准

差为 11.79，变异系数（CV）为 15.80%；赤道轴长的变化范围为 52.50 μm （自花授粉红肉）~86.54 μm ，平均值为 62.56 μm ，标准差为 4.14，变异系数为 6.62%。极赤比值介于 0.95~1.60 之间，平均值为 1.20，标准差为 0.19，变异系数为 15.84%，表明花粉形态在整体上保持了相对稳定的比例关系。花粉表面微形态特征的变异更为显著，其中萌发沟长的极差为 45.22 μm ，最小值为 37.03 μm ，最大值为 82.25 μm ，平均值为 56.12 μm ，变异系数为 22.58%；萌发沟宽的变异程度最高，其范围为 1.31 μm ~8.53 μm ，平均值为 3.41 μm ，变异系数为 40.51%；沟间距的平均值为 36.67 μm^2 ，最窄为 25.14 μm ，最宽为 53.88 μm ，变异系数为 17.94%。此外，表面突刺密度最低为 1.30 个/ μm^2 ，密度最高为 3.11 个/ μm^2 ，平均值为 1.92 个/ μm^2 ，变异系数为 16.67%，同样显示出较高水平的多样性。综合来看，各项性状的变异系数分布在 6.62%~40.51%之间，表明不同火龙果种质在花粉性状上具有多样性，其中以 GFW 的相对变异最为剧烈，而花粉粒的基本尺寸（P、E、P/E）则相对稳定。

表 3 火龙果种质花粉性状多样性
Tab. 3 Pollen character diversity of pitaya germplasms

性状 Trait	最大值 Max	最小值 Min	极差 Range	平均值 Mean value	标准差 SD	变异系数 CV/%
P/ μm	101.00	58.82	42.18	74.60	11.79	15.80
E/ μm	86.54	52.50	34.04	62.56	4.14	6.62
P/E	1.60	0.95	0.65	1.20	0.19	15.84
GFL/ μm	82.25	37.03	45.22	56.12	12.67	22.58
GFW/ μm	8.53	1.31	6.32	3.41	1.38	40.51
GFS/ μm	53.88	25.14	28.74	36.67	6.58	17.94
Ns/(个· μm^{-2})	3.11	1.30	1.81	1.92	0.32	16.67

2.3 火龙果花粉性状相关性分析

相关性分析结果表明，3 组呈极显著正相关，3 组呈极显著负相关。极轴长与萌发沟长和极赤比呈极显著正相关，相关性系数分别为 0.943 和 0.922，极赤比与萌发沟长呈极显著正相关，相关性系数为 0.920。沟间距与极赤比、萌发沟长和极轴长呈极显著负相关，相关性系数分别为-0.750、-0.695 和-0.685（图 3）。

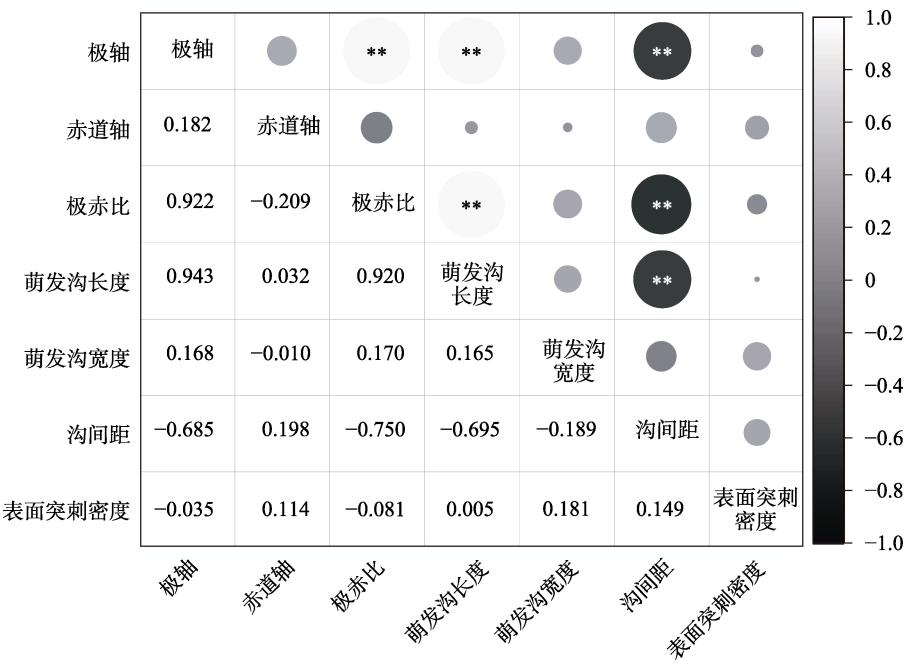
2.4 火龙果花粉性状主成分分析

经过主成分分析，以特征值大于 1 为标准，筛选出 3 个主成分，累计贡献率为 82.048%，可解释火龙果花粉形态性状的大部分遗传信息。主成分 1 贡献率为 52.125%，起主要作用的是极赤

比、萌发沟长度和极轴长，反映花粉的大小与形状；主成分 2 贡献率为 16.333%，起主要作用的是赤道轴长、表面突刺密度和萌发沟宽度，反映花粉的横向尺寸和表面纹饰特征。主成分 3 贡献率为 13.591%，起主要作用的是萌发沟宽、表面突刺密度和极赤比。综合来看，极赤比、极轴长、萌发沟长是影响火龙果花粉形态多样性的主要指标，可作为火龙果种质花粉形态评价的核心参数（表 4、表 5）

2.5 火龙果花粉性状聚类分析

以花粉极轴长、赤道轴长、P/E 值、花粉大小、萌发沟长、萌发沟宽、沟间距 8 项参数为指标，通过测量欧氏距离进行聚类分析，由结果（图 4）



**表示极显著相关 ($P<0.01$)。
** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

图 3 火龙果花粉性状相关性

Fig. 3 Correlation analysis of pollen traits in pitaya

表 4 主成分特征值、贡献率及累计贡献率
Tab. 4 Latent root, contribution ratio and accumulative contribution ratio of the principal component

主成分 Principal component	特征值 Latent	贡献率 Contribution ratio/%	累积贡献率 Accumulative contribution ratio/%
PC1	4.170	52.125	52.125
PC2	1.307	16.333	68.458
PC3	1.087	13.591	82.048

表 5 火龙果花粉性状主成分分析
Tab. 5 Principal component analysis of pollen traits in pitaya

性状 Character	主成分 Principal component		
	PC1	PC2	PC3
极轴长	0.45	0.24	-0.22
赤道轴长	-0.07	0.66	-0.53
极赤比	0.48	-0.02	-0.01
花粉形状	-0.41	0.22	-0.13
萌发沟长度	0.46	0.17	-0.13
萌发沟宽度	0.12	0.3	0.67
沟间距	-0.41	0.11	-0.04
突刺密度	-0.06	0.58	0.44

可知, 在欧氏距离为 20 时, 63 份火龙果种质被分为 3 个大类。第 1 大类包含御红龙、普红 3、

光明红、大红-L、临家红韵等 30 份种质, 此类花粉的尺寸较小, 平均极轴长为 66.11 μm , 赤道轴长为 60.23 μm , 极赤比均值为 1.10, 均为近球形。其萌发沟长度较短, 沟间距较大, 表面突刺密度最高。

第 2 大类包含云南 5 号、红花青龙、AU-1、紫红龙 8、自花授粉红肉的等 15 份种质。此类花粉尺寸中等, 平均极轴长为 72.51 μm , 赤道轴长为 62.46 μm , 极赤比 1.16, 均为长球形。萌发沟长度和宽度介于其他两组之间, 沟间距较小, 表面突刺密度最低。

第 3 大类包含巴马红肉、皇冠、紫水晶、红水晶 24 号、云南 1 号等 18 份种质。此类的花粉尺寸最大, 平均极轴长为 90.50 μm , 赤道轴长为 66.21 μm , 极赤比为 1.37, 均为长球形。其萌发沟最长, 沟间距最小, 表面突刺密度中等。

3 讨论

花粉形态主要用于种属间遗传多样性分析和鉴定, 但在花粉形态能否用于种内 (品种) 亲缘关系分析和品种鉴定上有不同的观点。火龙果的花粉形态研究表明, 不同火龙果种质在花粉形状、大小、表面纹饰密度等形态指标上已形成明显分

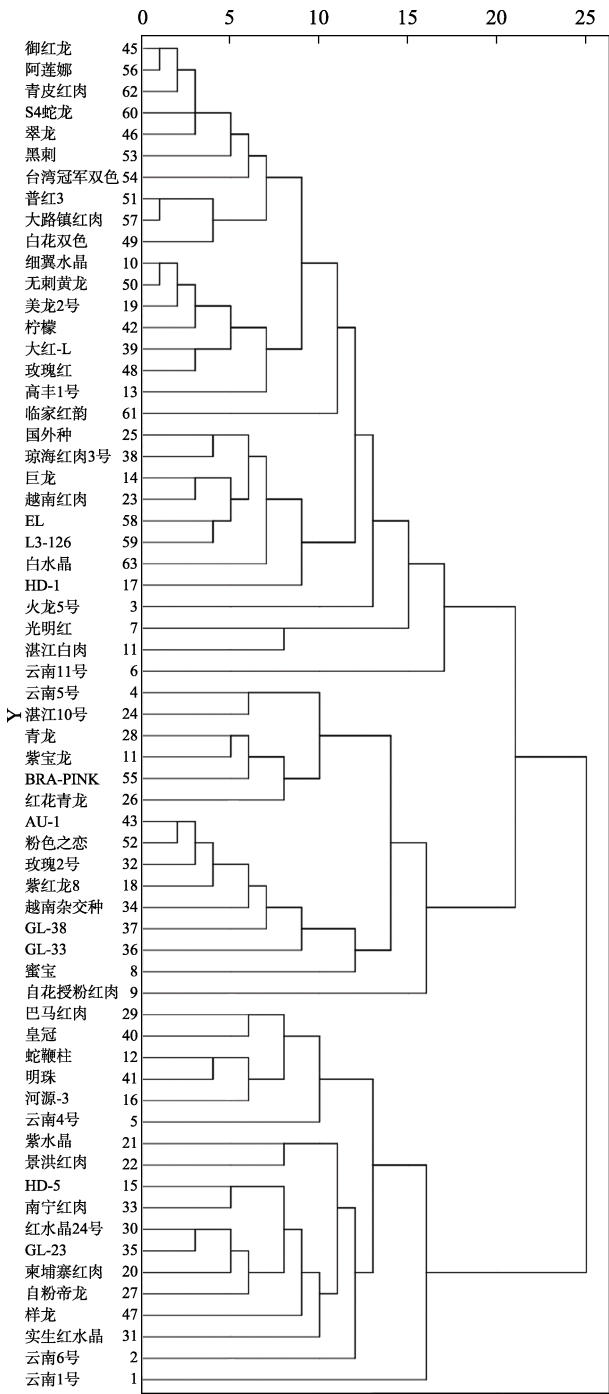


图 4 基于平均链接法的聚类分析结果
Fig. 4 Clustering analysis results based on average linkage method

化，体现出丰富的多样性。另外，火龙果定义宽泛，品种资源包含来自仙人掌科多个属多个物种的材料，品种间差异明显，很多花粉形态差异就体现了种间甚至属间差异。

本研究系统分析 63 份火龙果种质的花粉形态多样性，所有供试种质花粉极面观均具 3 条环状萌发沟，外壁呈刺状纹饰，为 N3P4C3 型，这

与 CATALINA 等^[19]的研究结果相符，同类型花粉还有西番莲^[20]、番茄^[21]、黄皮^[22]等。研究发现 63 份火龙果种质花粉中萌发沟宽度、突刺密度等指标的变异显著，其中萌发沟宽度变异系数最大。这些变异体现了火龙果种质间的遗传分化，而萌发沟作为花粉萌发的关键结构，在长期进化过程中受自然选择与人工选育的多重影响，形成了丰富的变异类型，这与王艾岚等^[23]在 16 种兰科植物花粉研究中的观点相似。在欧式距离为 20 时，63 份火龙果资源可分为 3 个大类。聚类 1 中花粉为小体型近球形，性状稳定，适合作为品种检测的标准样本，聚类 3 中花粉为大体型长球形，萌发沟更长，推测授粉效率更高，可优先作为杂交育种的父本。

LIU 等^[24]采用戊二醛固定花粉后，经过清洗和逐步脱水，进行扫描电镜观察花粉形态，研究发现，由于火龙果花粉壁较薄，多重操作后很可能导致花粉发生形变。胡春辉等^[25]通过对老鹳草花粉的形态状态的观察，得出直接喷金法具有简单便捷、费时短、能保持花粉的活体状态等优点的观点。本研究采用当天收集的新鲜花粉，自然干燥后进行直接喷金处理，然后在扫描电镜下进行花粉形态观察，以保持花粉的真实状态。但收集过程要保证用具洁净，动作轻柔，避免杂质混入。并把握好干燥时长，过短或过长都会导致花粉成像效果不佳。

与胡文斌等^[26]基于 MITE 分子标记的分类结果相比，本研究的聚类结果在大类群划分上具有一定一致性，均将大部分亲缘关系较近的种质归为一类，例如第一类中柠檬、大红、越南红肉、EL 等火龙果主栽品种及地方品种分为一类，在 MITE 标记分析中也被划分为同一类群，反映出遗传背景与花粉形态特征的关联性。但在部分细分类群上存在差异，如 MITE 标记中独立成组的野生资源如蛇鞭柱，在本研究与其他品种聚为同一类群，这可能是由于花粉形态性状属于表型性状，受外界因素和遗传背景的共同影响，而分子标记直接反映基因组水平的差异。总体而言，花粉形态聚类结果能够在一定程度上反映火龙果种质的形态学分类和遗传亲缘关系，但仍需结合分子标记等多维度数据进行综合验证。

火龙果花粉粒的形态特征在长期演化历程中承载了大量遗传信息，是追溯其亲缘关系、解析种质间遗传多样性的重要表型载体。但仅依靠花

粉形态学分析存在局限性,为实现更可靠的分类学结论,未来研究需进一步扩大花粉样本的覆盖范围,以提升样本的遗传代表性与地理完整性,同时,需整合多学科技术手段,将孢粉学数据与分子生物学、遗传学及果实农艺性状进行综合分析,通过多维度数据的交叉验证与系统整合,更客观、全面地阐明火龙果种质的遗传多样性与亲缘关系,为其种质资源评价、核心亲本筛选及遗传育种实践提供更坚实的科学依据。

参考文献

- [1] 朱润华, 阳圣莹, 白胜, 梁秋屏, 李铁骥, 曾值, 夏武奇, 邓先平, 苏仕林. 四川火龙果产业发展现状思考及建议[J]. 四川农业科技, 2023(9): 87-89.
ZHU R H, YANG S Y, BAI S, LIANG Q P, LI Y J, ZENG Z, XIA W Q, DENG X P, SU S L. Thoughts and suggestions on the development status of pitaya industry in Sichuan[J]. Sichuan Agricultural Science and Technology, 2023(9): 87-89. (in Chinese)
- [2] PAN L M, FU J X, ZHANG R, QIN Y H, LU F, JIA L L, HU Q L, LIU C M, HUANG L F, LIANG G D. Genetic diversity among germplasms of pitaya based on SSR markers[J]. Scientia Horticulturae, 2017, 225: 171-176.
- [3] 韩伟. 火龙果在山东临沂引种表现及优质高产栽培技术[J]. 中国农业文摘-农业工程, 2024, 36(1): 92-96.
HAN W. Introduction performance and high quality and high yield cultivation techniques of pitaya in Linyi, Shandong[J]. Agricultural Science and Engineering in China, 2024, 36(1): 92-96. (in Chinese)
- [4] 胡文斌, 洪青梅, 李婧, 濮文辉, 何云, 李洪立, 李琼. 火龙果主要商业品种 SSR 指纹图谱构建和遗传多样性分析[J]. 热带作物学报, 2021, 42(5): 1310-1317.
HU W B, HONG Q M, LI J, PU W H, HE Y, LI H L, LI Q. Genetic diversity analysis and SSR fingerprint construction of pitaya cultivars[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(5): 1310-1317. (in Chinese)
- [5] DE LA TORRE-VELÁZQUEZ V A, OROZCO-AVITIA J A, OJEDA-CONTRERAS Á J, OVANDO-MARTÍNEZ M, HAYANO-KANASHIRO C, HERNÁNDEZ-OÑATE M Á. Chemical and molecular identification of sweet pitaya (*Stenocereus thurberi*) fruit variants with different pulp coloration[J]. Biochemical Systematics and Ecology, 2025, 120: 104970.
- [6] ABIRAMI K, SWAIN S, BASKARAN V, VENKATESAN K, SAKTHIVEL K, BOMMAYASAMY N. Distinguishing three dragon fruit (*Hylocereus* spp.) species grown in Andaman and Nicobar Islands of India using morphological, biochemical and molecular traits[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 2894.
- [7] ARZANI K, NEJATIAN M A, KARIMZADEH G. Apricot (*Prunus armeniaca*) pollen morphological characterization through scanning electron microscopy, using multivariate analysis[J]. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 2005, 33: 381-388.
- [8] VAHEDI F, ARZANI K. The study on the pollen morphology and the effect of temperature and storage period on pollen germination of the early and mid-maturing Asian pear (*Pyrus serotina* Rehd.) and European pear (*Pyrus communis* L.) cv. 'Shahmiveh'[J]. Iranian Journal of Horticultural Science and Technology, 2024, 25(4): 487-500.
- [9] 周君蔓, 段续伟, 张开春, 张晓明, 闫国华, 周宇, 王晶, 冯琛, 王未, 王乃玉, 袁晖, 吴传宝. 17 份樱桃种质资源花粉扫描电镜观察[J]. 果树学报, 2025, 42(6): 1181-1189.
ZHOU J M, DUAN X W, ZHANG K C, ZHANG X M, YAN G H, ZHOU Y, WANG J, FENG C, WANG W, WANG N Y, YUAN H, WU C B. SEM observation of pollen in 17 cherry germplasm resources[J]. Journal of Fruit Science, 2025, 42(6): 1181-1189. (in Chinese)
- [10] 何利钦, 王丽华, 庄启国, 张瑶, 王凤琪, 张茜. 猕猴桃 9 个种 41 份种质花粉形态观察与分析[J]. 中国南方果树, 2024, 53(4): 132-139.
HE L Q, WANG L H, ZHUANG Q G, ZHANG Y, WANG F Q, ZHANG Q. Observation and analysis of pollen morphology of 41 germplasm of 9 species of kiwifruit[J]. South China Fruits, 2024, 53(4): 132-139. (in Chinese)
- [11] 刘畅, 杨悦, 胡颖慧, 于晨萧, 郭劲鹏, 丛琳, 顾广军, 于文全. 14 份寒地苹果资源花形态结构观察[J]. 中国果树, 2023(1): 11-16, 21.
LIU C, YANG Y, HU Y H, YU C X, GUO J P, CONG L, GU G J, YU W Q. Observation on flower morphology and structure of 14 apple resources in cold region[J]. China Fruits, 2023(1): 11-16, 21. (in Chinese)
- [12] 林秋金, 王龙平, 谢晓清, 王美盛, 林秀香. 10 份柠檬种质花粉形态观察[J]. 热带作物学报, 2022, 43(5): 971-977.
LIN Q J, WANG L P, XIE X Q, WANG M S, LIN X X. Observation on pollen morphology of 10 lemon germplasms[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2022, 43(5): 971-977. (in Chinese)
- [13] 方仁, 安振宇, 黄伟雄, 白先进, 尧金燕, 龙兴, 周双云, 张继. 8 个番荔枝栽培品种的花粉形态扫描电镜观察[J]. 南方农业学报, 2020, 51(7): 1553-1559.
FANG R, AN Z Y, HUANG W X, BAI X J, YAO J Y, LONG X, ZHOU S Y, ZHANG J. Morphology of pollens of eight *Annona squamosa* L. varieties by scanning electron microscope[J]. Journal of Southern Agriculture, 2020, 51(7): 1553-1559. (in Chinese)

- [14] 肖远辉, 傅翠娜, 区善汉, 张社南, 梅正敏. 6 个柚类品种花粉形态观察[J]. 南方农业学报, 2014, 45(9): 1616-1620. XIAO Y H, FU C N, OU S H, ZHANG S N, MEI Z M. Pollen morphology of 6 kinds of pummelo (*Citrus grandis* L.)[J]. Journal of Southern Agriculture, 2014, 45(9): 1616-1620. (in Chinese)
- [15] 戴雪香, 樊莹, 范文穗, 董霞. 不同授粉方式对火龙果果实发育及坐果率的影响[J]. 中国蜂业, 2016, 67(8): 18-21. DAI X X, FAN Y, FAN W S, DONG X. Effects of different pollination methods on fruit development and fruit set of pitaya[J]. Apiculture of China, 2016, 67(8): 18-21. (in Chinese)
- [16] ERDTMAN G. Handbook of palynology[M]. New York: Hafner Publishing, 1978.
- [17] 王开发, 王宪曾. 孢粉学概论[M]. 北京: 北京大学出版社, 1983: 21-25. WANG K F, WANG X Z. Palynology introduction[M]. Beijing: Peking University Press, 1983: 21-25. (in Chinese)
- [18] 王伏雄, 钱南芬, 张玉龙, 张惠秋. 中国植物花粉形态[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 1995: 305-308. WANG F X, QIAN N F, ZHANG Y L, ZHANG H Q. Pollen morphology of Chinese plants[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 1995: 305-308. (in Chinese)
- [19] CATALINA R D, ANDREW P V, VICTORIA S. Systematic relevance of pollen morphology in tribe Hylocereeae (Cactaceae)[J]. PhytoKeys, 2019, 128: 121-140.
- [20] 杜路森, 邓彪, 王小媚, 张丹, 安昌, 秦源, 蔡昭艳, 陆宇明, 董龙, 郑平, 王路路, 齐金岗, 苏伟强, 胡泊, 王露儒, 黄华彬, 王金都. 8 个西番莲品种的开花特性与花粉柱头形态观察[J]. 分子植物育种, 2024, 22(1): 213-221. DU L M, DENG B, WANG X M, ZHANG D, AN C, QIN Y, CAI Z Y, LU Y M, DONG L, ZHENG P, WANG L L, QI J G, SU W Q, HU B, WANG L R, HUANG H B, WANG J D. Observations on flowering habits and floral organ morphology of eight germplasm materials in the genus passion[J]. Molecular Plant Breeding, 2024, 22(1): 213-221. (in Chinese)
- [21] 王誉璋, 王楷朋, 李翊嘉, 冀思萌, 邢慧颖, 王旌晶, 张馨萍, 王建立, 王绍辉, 杨瑞. 大型连栋温室内盛果期不同番茄品种花器官生物学性状研究[J]. 北京农学院学报, 2024, 39(3): 69-78. WANG Y Z, WANG K P, LI Y J, JI S M, XING H Y, WANG J J, ZHANG X P, WANG J L, WANG S H, YANG R. On biological characteristics of flower organs of different tomato varieties in multi-span greenhouse at full fruit stage[J]. Journal of Beijing University of Agriculture, 2024, 39(3): 69-78. (in Chinese)
- [22] 刘友接, 王建超, 熊月明. 黄皮 33 份种质资源花粉形态观察[J]. 中国南方果树, 2022, 51(5): 91-98. LIU Y J, WANG J C, XIONG Y M. Observation of the morphology of pollen in thirty-three wampee germplasm[J]. South China Fruits, 2022, 51(5): 91-98. (in Chinese)
- [23] 王艾岚, 郝秀东, 欧阳绪红, 薛美玲, 劳月英, 秦琳娟, 韦嘉胜, 陆雅娴. 16 种兰科植物的花粉形态特征研究[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2025, 45(6): 31-42. WANG A L, HAO X D, OUYANG X H, XUE M L, LAO Y Y, QIN L J, WEI J S, LU Y L. Comparative analysis of pollen morphological characteristics in 16 selected Orchidaceae species[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2025, 45(6): 31-42. (in Chinese)
- [24] LIU Y J, WANG J C, XIONG Y M, LIU R Z, HUANG X F, YANG L, SHEN C G. Morphological characteristics of pollen grains from 16 germplasms of pitaya[J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2020, 29(3): 1522-1533.
- [25] 胡春辉, 卢婉佩, 刘鹏起, 刘庆华, 袁玉清. 青岛老鸛草花粉和花芽扫描电镜制样条件探讨[J]. 黑龙江农业科学, 2013(12): 82-85. HU C H, LU W P, LIU P Q, LIU Q H, YUAN Y Q. Study on sampling methods of scanning electron microscope on pollen and bud of *Geranium tsingtauense* Yabe[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2013(12): 82-85. (in Chinese)
- [26] 胡文斌, 王好, 周新城, 濮文辉, 冯艳丽, 李洪立, 李琼. 火龙果 hAT-MITE 转座子插入多态性分子标记开发与品种鉴别[J]. 热带作物学报, 2025, 46(9): 2076-2085. HU W B, WANG H, ZHOU X C, PU W H, FENG Y L, LI H L, LI Q. Development of hAT-MITE transposon insertion polymorphism molecular markers and cultivars identification in pitaya[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2025, 46(9): 2076-2085. (in Chinese)