

柚和葡萄柚花粉直感对东试早柚果实生长及品质的影响

徐祥增, 邓乐晔, 张小娇, 王勇方, 高世德*

(云南省热带作物科学研究所, 云南景洪 666100)

摘要:【目的】针对东试早柚果实个体差异大、品质不稳定等问题,通过异花授粉探究花粉直感对东试早柚果实品质的影响,并对各项指标进行综合评价,旨在筛选出能够有效改善东试早柚果实品质的授粉品种,为生产上授粉品种配置和品质提升提供理论依据。【方法】以23年生东试早柚为母本,柚和葡萄柚不同品种为父本,进行人工授粉,比较不同授粉组合的坐果率、果实生长、果实品质差异,并采用隶属函数法进行综合评价。【结果】通过比较分析发现果实横径和纵径生长动态呈“S”形;异花授粉显著提高东试早柚坐果率,坐果率均高于60%。在果实外在品质方面,Flame授粉对果实单果质量提升效果不明显,但其他授粉组合果实单果质量比自然授粉显著提升27.77%~85.08%;在所有授粉组合中,自然授粉果实横径和纵径最小,Sarawak授粉果实横径和纵径显著高于自然授粉和其余品种授粉果实。异花授粉能够降低果实裂瓣数,增加种子数,且不同品种授粉种子直感存在差异。在果实内在品质方面,Oroblanco授粉能提高可溶性固形物含量,但Sarawak、Tahition、泰国红宝石柚、越南青柚授粉显著降低果实可溶性固形物含量,显著提高总酸含量;不同授粉组合间果实可溶性蛋白含量无显著差异,但可溶性糖、维生素C以及木质素、柚皮苷含量存在差异,表现出明显花粉直感效应。果实种子数与果实横径呈显著正相关,裂瓣数与果实横径和种子数呈显著负相关;外在品质与内在品质主要指标间呈显著负相关。通过主成分分析法和隶属函数法综合评价结果显示,Genetic Dwarf、Oroblanco授粉果实综合得分为0.68、0.67,高于自然授粉0.66。【结论】异花授粉能够提高坐果率,同时对果实生长发育和果实品质有显著影响。Genetic Dwarf和Oroblanco授粉在一定程度上能够改善东试早柚果实综合品质,可为生产上授粉品种配置、提高果实品质提供参考依据。

关键词: 东试早柚; 花粉直感; 异花授粉; 果实品质; 综合评价

中图分类号: S666.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-9980(2024)04-0665-14

Effects of grapefruit and pummelo pollens on fruit growth and quality of Dongshizao pummelo

XU Xiangzeng, DENG Yueye, ZHANG Xiaojiao, WANG Yongfang, GAO Shide*

(Yunnan Institute of Tropical Crops, Jinghong 666100, Yunnan, China)

Abstract: 【Objective】 Cross-pollination was used to investigate and evaluate the xenia effect on the fruit growth and quality of Dongshizao pummelo in order to screen the optimum pollination parents for improving fruit quality of Dongshizao pummelo. 【Methods】 23-year-old Dongshizao pummelo trees were used as the female parents. Different cultivars of pummelo and grapefruit were used as pollen parents. The fruit setting rate was investigated at 40 d after flowering. The longitudinal and transverse diameters of the fruit were measured in field at regular intervals after full bloom. After fruit ripened, the hybrid fruits were harvested and taken back to the laboratory to measure their conventional fruit quality indexes. Correlation analysis and comprehensive evaluation were then performed. 【Results】 During fruit development of Dongshizao pummelo, the longitudinal and transverse diameters both showed a single S trend. The results showed that pollinizer varieties had some effects on the fruit setting rate,

收稿日期: 2023-12-13

接受日期: 2024-02-17

基金项目: 云南省热带作物科学研究所青年人才培养基金(QNCZ2021-5); 云南省重大科技专项计划(202102AE090048、202102AE090054、202102AE090020)

作者简介: 徐祥增, 助理研究员, 研究方向为柚类果树栽培与品种选育。E-mail: xxz351966214@163.com

*通信作者 Author for correspondence. E-mail: gaoshide228@126.com

growth, development and quality of Dongshizao pummelo, and therefore phenomenon of xenia was obvious. The fruit setting rate after cross-pollination was above 60%, while that of natural pollination was only 10.19%. The average single fruit weight had not significant difference between pollination with Flame pollen and natural pollination, while the average single fruit weight of another pollination combination was significantly higher than that of natural pollination. Cross pollination could increase fruit weight by 27.77% to 85.08%. The fruit diameter in natural pollination was the lowest. Among them, the fruit longitudinal and transverse diameters in pollination with Sarawak pollen were significantly higher than the other cross-pollination combinations and natural pollination. Cross-pollination had a marked influence on the numbers of cracked segments and greatly increased the number of seeds, and thus had an obvious phenomenon of seed-xenia. The total soluble solid content in pollination with Oroblanco pollen was also higher than that in the other pollination combinations. The total soluble solid content in pollination with Sarawak, Tahitian, Hongbaoshi pummelo, and Vietnam green pummelo was significantly lower and the titratable acidity content was significantly higher than that in natural pollination. Cross-pollination did not show a significant impact on the soluble protein content but had an important influence on the contents of soluble sugars, vitamin C, lignin, and naringin, with a distinguished xenia effect. The correlation analysis indicated that the number of seeds had a significant positive correlation with fruit transverse diameter; the number of cracked segments had a significant negative correlation with the number of seeds and fruit transverse diameter. The main index of fruit external quality had a significant negative correlation with the internal quality. Comprehensive evaluation the fruit quality of the ten pollination combinations were performed using the membership function method and principal component analysis. Genetic Dwarf was chosen as the best pollen parent, which had total a score of 0.68, followed by Oroblanco with a total score of 0.67; while natural pollination had a score of 0.66. 【Conclusion】 Cross-pollination could significantly increase the fruit setting rate of Dongshizao pummelo. Xenia significantly influenced fruit growth and fruit quality. The comprehensive evaluation results showed that Genetic Dwarf and Oroblanco could be chosen as the pollen parents for Dongshizao pummelo.

Key words: Dongshizao pummelo; Xenia; Cross-pollination; Fruit quality; Comprehensive evaluation

东试早柚(Dongshizao pummelo)是云南西双版纳州国营东风农场试验站选育的特早熟柚品种,与云南德宏地区水晶柚为同一品种^[1]。该品种树势强,具有周年开花的特性。在西双版纳地区,花期集中在当年10月下旬和翌年2月下旬,以3月上旬开花坐果为主;果实最早于7月上旬成熟,8月下旬开始大量上市。成熟果实果皮黄绿色,果肉淡黄绿色,可溶性固形物含量(w,后同)为10.3%~12.6%,固酸比(13~31):1,果肉细腻化渣,果味纯正,酸甜适中。目前,该品种在云南省种植面积已超1万hm²,是云南热区主要柚栽培品种。虽然东试早柚产业已形成一定规模,但该品种存在单性结实能力弱、畸形果率高(34.33%~36.19%)、果实个体差异大、品质不稳定、囊瓣开裂等问题,严重制约着产业的发展。

花粉直感(xenia)为不同基因型花粉授粉直接影响果实或种子(包括胚和胚乳)表型特征产生差异的

现象^[2],可分为花粉果实直感和花粉种子直感。大量研究结果证明,花粉直感广泛存在于园艺植物、经济林木、果蔬等作物中,其不仅影响作物种子大小、形状、颜色等性状^[3],还对果树坐果率、果实大小、果实形状、果实品质^[4-7]以及果实成熟期^[7-9]、次生代谢物质^[10-12]等产生影响。柚[*Citrus maxima* (Burm.) Merr.]果形硕大、风味独特、维生素C含量高、耐贮藏运输,号称天然罐头。中国是柚类的原产地,栽培历史悠久,品种资源丰富,但优良品种较少^[13]。近年来,利用花粉直感效应改善柚果实品质、筛选授粉树等方面的研究均有报道。通过异花授粉,不仅能够提高柚坐果率和产量^[14],还能够改善果实形状、果皮厚度等外观性状及可溶性固形物含量、有机酸含量、香气等^[11,14]内在品质,降低裂果率、粒化指数,延长贮藏期等^[15-17]。异花授粉能够提升果实综合品质,同时也会有不良性状出现,如柚果实可溶性固形物含量降低^[18]、种子数

增多、风味下降等^[15]。因此,对授粉后果实性状指标进行综合评价,是筛选适宜授粉品种的重要环节。

笔者在本研究中针对东试早柚品种存在的问题,利用柚[*C. maxima* (Burm.) Merr.]和葡萄柚(*C. paradisi* Macf.)不同品种与东试早柚进行异花授粉,探究花粉直感对果实生长和果实品质的影响,同时对主要性状指标进行综合评价,旨在筛选出能够改善果实品质的授粉品种,为生产上授粉树品种配置和品种改良提供指导和理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

授粉试验于2022年3月9—10日,在云南省热带作物科学研究所早熟柚关键技术核心示范园(100°78'E,22°01'N;海拔540 m)进行,示范园面积4.67 hm²,示范品种为东试早柚,砧木为酸柚,树龄

为23 a(年);果园配备水肥一体化设施。供试品种共9个,分别为东试早柚(Dongshizao pummelo)、泰国红宝石柚(Hongbaoshi pummelo)、越南青柚(Vietnam green pummelo),以及引自美国农业部柑橘种质资源圃的柚Sarawak、Tahition和葡萄柚Cocktail、Oroblanco、Flame、Genetic Dwarf。

1.2 试验设计

试验共设1个对照组和9个授粉组,共10个处理。以自然授粉为对照组(CK),授粉当天选取东试早柚50个健康花序,剪去已完全开放和未开放的花朵,每个花序保留1朵当日即将开放的花朵,并挂牌标记;10个花序为1次重复,共5次。异花授粉组以东试早柚为母本(♀),上述8个品种以及泰国红宝石柚:越南青柚花粉1:1混合花粉作为父本(♂),进行人工授粉,每组设5次重复,10个花朵为1次重复。详细授粉组合见表1。

表1 东试早柚杂交授粉组合

Table 1 Pollination combinations of Dongshizao pummelo

品种 Cultivar	特征 Characteristics	授粉组合 Pollination combinations	简称 Abbreviation
东试早柚 Dongshizao pummelo	特早熟,果实倒卵形或锥形,果皮黄绿色,果肉黄白色。 An extremely early-maturing cultivar of pummelo with obovate or subuliform fruit, yellow green pericarp and yellowish white pulp.	自然授粉 Natural pollination	CK
Cocktail	葡萄柚,柚和橘的杂交种,果实扁圆形或圆球形,果皮黄白色,果肉橙黄色。 A cultivar of grapefruit hybrid between grapefruit and orange. The fruit was oblateness or sphericity, yellowish white pericarp and orange-yellow pulp.	东试早柚♀×Cocktail♂ Dongshizao pummelo♀×Cocktail♂	T1
Sarawak	柚品种,果实高扁圆形,果皮淡黄色,果肉黄绿色,汁胞柔软多汁。 A cultivar of pummelo with oblate fruit, yellowish pericarp, yellow-green pulp, soft and succulent pulp.	东试早柚♀×Sarawak♂ Dongshizao pummelo♀×Sarawak♂	T2
Tahition	柚品种,果实圆球形,果皮淡黄色,果肉黄白色,汁胞细软化渣。 A cultivar of pummelo with spherical fruit, yellowish pericarp, yellowish white pulp and soft and succulent flesh.	东试早柚♀×Tahition♂ Dongshizao pummelo♀×Tahition♂	T3
Oroblanco	杂交葡萄柚,果实偏小,果实扁球形,果皮淡黄色,果肉黄白色,果肉易分离,汁胞细软化渣。 A hybrid cultivar of grapefruit. The fruit was oblateness, yellowish pericarp, yellowish white pulp and soft and succulent flesh.	东试早柚♀×Oroblanco♂ Dongshizao pummelo♀×Oroblanco♂	T4
泰国红宝石柚 Hongbaoshi pummelo	柚品种,果面密被白茸毛,果皮绿色,果肉红色,汁胞细软化渣。 A cultivar of pummelo. The surface of the fruit was covered by densely white fuzz, with green pericarp, red pulp and soft and succulent flesh.	东试早柚♀×泰国红宝石柚♂ Dongshizao pummelo♀×Hongbaoshi pummelo♂	T5
越南青柚 Vietnam green pummelo	柚品种,果面粗糙,果皮绿色,果肉淡红色,汁胞脆嫩。 A cultivar of pummelo with rough surface, green pericarp, reddish pulp and crisp.	东试早柚♀×越南青柚♂ Dongshizao pummelo♀×Vietnam green pummelo♂	T6
泰国红宝石柚:越南青柚1:1混合花粉 Hongbaoshi pummelo and Vietnam green pummelo with 1:1 mixed pollen		东试早柚♀×(泰国红宝石柚:越南青柚1:1混合花粉)♂ Dongshizao pummelo♀×(Hongbaoshi pummelo and Vietnam green pummelo with 1:1 mixed pollen)♂	T7
Flame	葡萄柚,果实椭圆形,果皮和果肉红色。 A cultivar of grapefruit with oval fruit, red pericarp and pulp.	东试早柚♀×Flame♂ Dongshizao pummelo♀×Flame♂	T8
Genetic Dwarf	葡萄柚,果实圆球形,果皮淡黄色,果肉白色。 A cultivar of grapefruit with spherical fruit, yellowish pericarp and white pulp.	东试早柚♀×Genetic Dwarf♂ Dongshizao pummelo♀×Genetic Dwarf♂	T9

1.3 试验方法

1.3.1 花粉采集与授粉 父本花粉采自云南省热带作物科学研究所柑橘种质资源圃。授粉前一天上午,挑选父本品种当天将要开放的成熟花蕾带回实验室,自然条件下摊晾,待花瓣展开后,剪取花药并置于4℃冰箱保存。授粉当天,每个处理每株选取3~4朵不同方位当天即将开放的花蕾,小心剪去花瓣和雄蕊(花药),用毛笔蘸取父本花粉均匀涂抹到母本柱头上,然后立即套袋并挂牌标记。授粉后20 d摘除套袋。

1.3.2 坐果率统计与果实生长观测 花后20 d,每个试验组选取大小基本一致的5个果实挂牌标记,每间隔20 d测量一次果实横径、纵径,直至果实采收。花后40 d,调查每个试验组坐果数,并计算坐果率。

1.3.3 果实内源激素含量测定 花后60 d,每个试验组选取大小基本一致的5个果实,采用酶联免疫法^[19]测定果实内源激素赤霉素(GA₃)、脱落酸(ABA)、吲哚乙酸(IAA)、玉米素(ZT)、反玉米素核苷(tZR)含量。试剂盒购自苏州格锐思生物科技有限公司。

1.3.4 果实品质测定 于2022年9月1日果实成熟后,测定果实生长测量标记的果实品质。使用电子天平测定质量,并计算果实可食率、出汁率等。用电子游标卡尺测定果实横径、纵径和果皮厚度,用PAL-BX/ACID 1糖酸仪(ATAGO, Japan)测定可溶性固形物含量、总酸含量,计算固酸比,采用蒽酮比色法^[20]测定可溶性糖含量,采用2,6-二氯酚靛酚滴定法^[21]测定维生素C含量,用考马斯亮蓝染色法^[20]测定可溶性蛋白含量,采用乙酰化法^[22]测定果肉木质素含量,参照许鹭^[23]的方法测定果肉柚皮苷含量。

1.4 数据处理

采用Microsoft Excel 2010对数据进行统计和图表制作,利用SPSS 19.0软件对试验数据进行差异性分析、相关性分析、主成分分析。

通过Logistic 曲线方程^[24]对果实生长指标进行拟合,计算Logistic 生长曲线上的最大生长速率(V_m)和2个生长拐点 t_1 (高峰期)、 t_2 (盛末期)出现的时间, t_1 之前为速生期前期、 $t_1 \sim t_2$ 为速生期后期、 t_2 之后为生长后期, t_2 之前为整个速生期。

利用SPSS19.0软件对各授粉组合果实品质进行主成分分析,首先对各项指标进行标准化处理,根据主成分分析降维思想,采用最大方差法计算出主

成分旋转载荷矩阵,根据旋转载荷矩阵计算各主成分因子得分 F_i ,结合方差贡献率计算各授粉组合的综合得分:

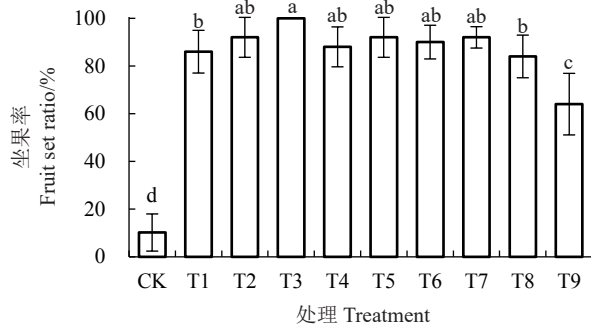
$F = \sum n (W_i \times F_i) / W$,其中 W_i 为各主成分方差贡献率, W 为总方差贡献率^[25]。

采用模糊隶属函数法^[26]对果实品质进行综合评价,分析指标与试验目标呈正相关,采用隶属函数公式计算,计算公式为: $U_{ij} = (X_{ij} - X_{j \min}) / (X_{j \max} - X_{j \min})$;分析指标与试验目标呈负相关,则采用反隶属函数公式计算,计算公式为: $U_{ij} = 1 - (X_{ij} - X_{j \min}) / (X_{j \max} - X_{j \min})$;其中, U_{ij} 表示 i 处理 j 指标的隶属函数值, X_{ij} 表示 i 处理 j 指标的测定值, $X_{j \max}$ 和 $X_{j \min}$ 分别表示各处理 j 项指标测定值中的最大值和最小值。先计算各项指标的隶属函数值,再计算所有指标平均值即为综合得分。综合得分值越大,品质越好;反之则越差。

2 结果与分析

2.1 不同授粉品种对东试早柚坐果率的影响

从图1可看出,异花授粉显著提高东试早柚坐果率。东试早柚自然授粉坐果率为10.19%,显著低于异花授粉。不同品种授粉组合中,Tahition授粉坐果率为100%,显著高于Cocktail、Flame、Genetic Dwarf授粉;而Genetic Dwarf授粉坐果率(64.00%)显著低于其他授粉组合,但显著高于自然授粉,是自然授粉坐果率的5.9倍。



不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。

Different small letters indicate significant difference ($p < 0.05$).

图1 不同授粉组合坐果率

Fig. 1 Fruit set rate of different pollination combinations

2.2 不同品种授粉对东试早柚果实生长的影响

如图2所示,不同授粉组合果实横径(图2-A)和纵径(图2-B)生长变化趋势基本一致,均呈近似“S”形曲线增长,但不同品种授粉对东试早柚果实横径和纵径生长表现出明显差异。花后160 d,自然授粉

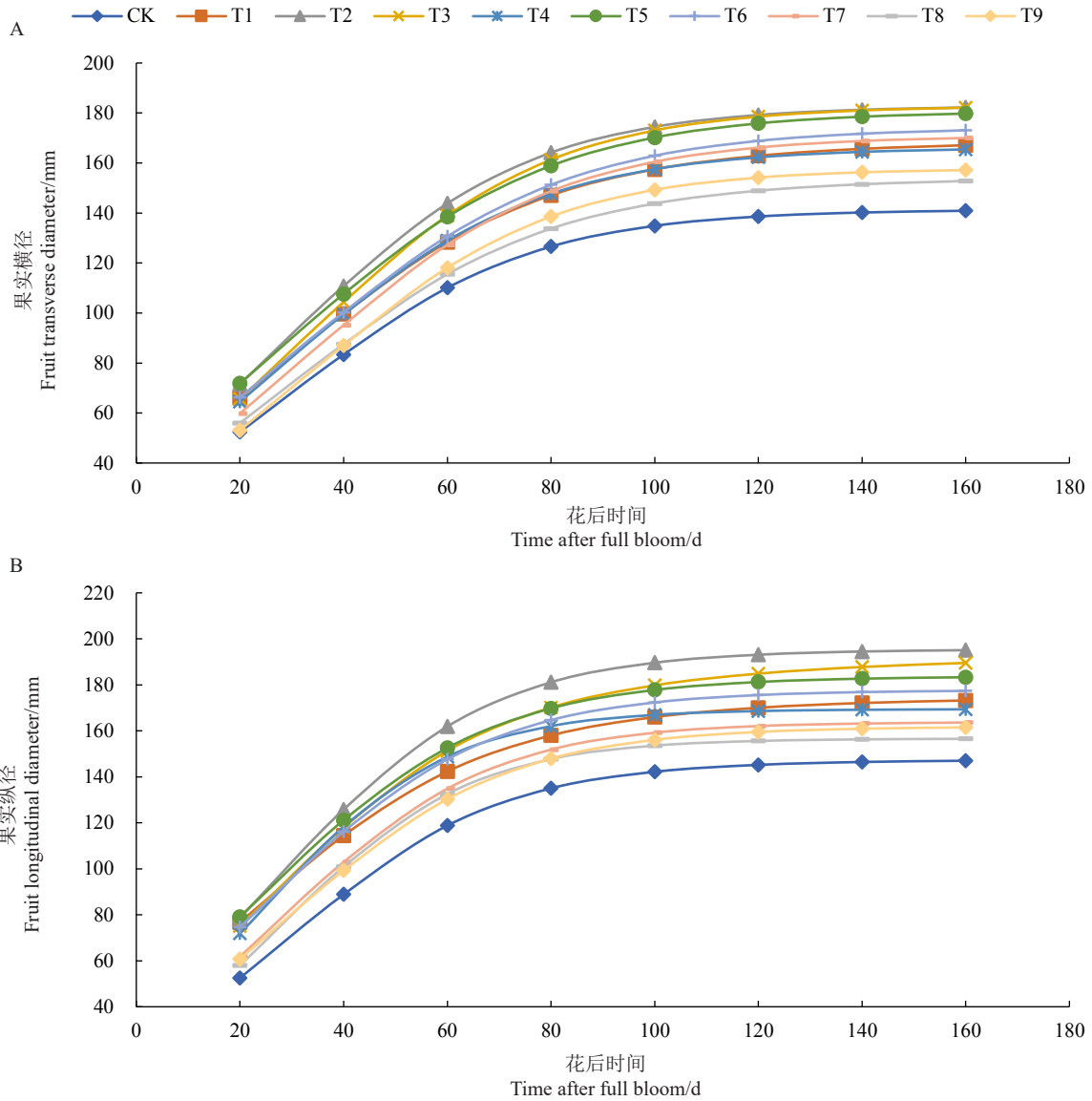


图2 不同授粉组合果实生长动态

Fig. 2 Fruit growth dynamics in different pollination combinations

果实横径和纵径增长幅度明显低于异花授粉;Flame授粉果实横径和纵径分别比自然授粉果实增加5.28%和4.78%,其他品种授粉果实横径和纵径增长幅度均高于Flame授粉果实;其中Sarawak授粉果实横径和纵径增长幅度最大,比自然授粉果实增加了26.33%和29.27%。

通过Logistic曲线方程对不同授粉组合果实横径和纵径累积生长量进行拟合, R 值在0.985~0.993之间,显著性均达到极显著水平(表2)。根据Logistic曲线拟合参数,可将果实生长划分为3个阶段,即 t_1 之前为速生前期、 t_1 ~ t_2 为速生后期、 t_2 之后为生长后期,其中 t_2 之前为整个速生期。从横径发育看,不同品种授粉对果实最大生长速率、速生期没有显

著差异,但对果实速生前期有显著影响;Sarawak授粉果实横径速生前期最短,约为30 d,Flame授粉果实横径速生前期最长,约为36 d;与自然授粉果实相比,Sarawak、Oroblanco、泰国红宝石柚授粉果实速生前期缩短1~2 d,越南青柚、Tahition、Genetic Dwarf、(泰国红宝石柚:越南青柚1:1混合花粉)、Flame授粉果实横径速生前期延长了2~4 d。从纵径发育看,不同品种授粉对果实最大生长速率的影响没有显著差异,但对整个速生期有显著影响;与自然授粉果实相比,Cocktail、Oroblanco、泰国红宝石柚授粉果实纵径速生前期显著缩短5~6 d,并且Oroblanco授粉果实纵径速生期缩短10 d,Tahition授粉果实纵径速生期延长5 d。从整体看,不同授粉组合

表 2 不同授粉组合果实生长 Logistic 模型特征值
Table 2 Eigenvalues in fruit growth Logistic model of different pollination combinations

处理 Treatment	横径 Transverse diameter				纵径 Longitudinal diameter							
	F	R	p	$V_m/(mm \cdot d^{-1})$	t_1/d	t_2/d	t_3/d	$V_m/(mm \cdot d^{-1})$	t_1/d	t_2/d	t_3/d	
CK	5.458	0.990	0.003	1.74±0.16	31.45±3.44 abc	61.12±3.86	5.611	0.992	0.003	1.96±0.43	31.05±3.15 a	58.44±4.71 ab
T1	5.336	0.989	0.003	1.59±0.36	31.18±2.46 bc	65.17±10.94	5.705	0.988	0.003	1.79±0.66	25.36±1.91 c	57.40±10.98 ab
T2	5.524	0.991	0.003	1.71±0.23	29.81±3.88 c	60.30±3.90	5.719	0.990	0.003	1.95±0.39	27.67±4.51 abc	54.80±4.48 ab
T3	5.378	0.991	0.003	1.70±0.25	33.31±1.94 abc	64.11±2.79	5.583	0.990	0.003	1.85±0.68	31.03±6.10 a	63.53±2.35 a
T4	5.595	0.993	0.002	1.70±0.30	30.77±2.34 c	61.94±5.68	6.008	0.992	0.002	2.23±0.29	25.28±1.98 c	48.42±3.66 b
T5	5.404	0.986	0.005	1.57±0.14	30.43±2.45 c	63.32±4.08	5.701	0.987	0.004	1.84±0.26	26.06±1.87 bc	54.24±4.83 ab
T6	5.289	0.989	0.004	1.55±0.20	32.22±2.30 abc	65.65±3.80	5.767	0.991	0.003	1.87±0.24	26.60±2.19 abc	54.30±3.06 ab
T7	5.184	0.989	0.004	1.64±0.22	34.78±2.81 ab	66.12±5.95	5.606	0.990	0.003	2.00±0.30	29.85±2.09 abc	55.71±4.30 ab
T8	5.353	0.985	0.005	1.67±0.41	35.33±2.08 a	65.07±2.33	5.551	0.987	0.004	2.19±0.41	29.71±3.65 abc	53.09±5.27 ab
T9	5.202	0.988	0.004	1.71±0.07	33.69±2.93 abc	66.33±10.30	5.484	0.989	0.004	1.88±0.21	30.64±1.88 ab	58.03±5.02 ab

注: F 为 F 检验的统计量值; R 为拟合优度指数; p 表示显著性; V_m 为最大生长速率; t_1 、 t_2 为 Logistic 曲线的 2 个关键拐点, 分别代表高峰期和盛末期出现的天数。不同小写字母表示差异显著(显著性水平 $p < 0.05$)。下同。

Note: F is the statistical value of F-test; R is goodness-of-fit index; p stands for significance; V_m is maximum growth rate; t_1 and t_2 are the two key inflection points of Logistics curve, representing the days of peak period and end of peak period, respectively. Different small letters indicate significant difference (significance level $p < 0.05$). The same below.

果实最大生长速率纵径大于横径, 横径速生前期、速生期大于纵径。

花后 60 d, 不同品种授粉东试早柚幼果中内源激素含量表现出不同程度差异(表 3)。自然授粉果实中 GA_3 和 IAA 含量显著高于异花授粉果实, GA_3 含量在泰国红宝石柚和 Flame 授粉幼果中最低, 而(泰国红宝石柚:越南青柚 1:1 混合花粉)、Flame 授粉幼果中 IAA 含量最低。细胞分裂素类激素, 以越南青柚、Flame、泰国红宝石柚授粉幼果中 ZT 含量最高, 自然授粉、泰国红宝石柚授粉幼果中 tZR 含量最低。泰国红宝石柚、Genetic Dwarf、(泰国红宝石柚:越南青柚 1:1 混合花粉)授粉幼果的 ABA 含量最高, Flame 授粉幼果的 ABA 含量最低。

2.3 不同品种授粉对东试早柚果实外在品质的影响

由表 4 可知, 不同品种授粉后东试早柚单果质量、果实横纵径都呈不同幅度的增加。与自然授粉果实相比, Flame 授粉果实单果质量增加 12.67%, 未达到显著性水平; 其他授粉组合果实单果质量显著高于自然授粉, 分别比自然授粉果实单果质量增加 27.77%~85.08%。从果实横径和纵径来看, 异花授粉果实横径和纵径均高于自然授粉, 其中 Sarawak 授粉果实横径和纵径显著高于自然授粉和其他异花授粉。从果形指数来看, Sarawak 授粉果实的果形指数最大, Cocktail、Oroblanco、Tahition、(泰国红宝石柚:越南青柚 1:1 混合花粉)、Genetic Dwarf 授粉果实果形指数显著低于自然授粉果实。另外, 以葡萄柚品种 Cocktail、Oroblanco、Flame、Genetic Dwarf 授粉果实单果质量、果实横径和纵径均低于以柚品种 Sarawak、Tahition、泰国红宝石柚、越南青柚授粉果实; (泰国红宝石柚:越南青柚 1:1 混合花粉)授粉果实单果质量、果实横径、果实纵径均比泰国红宝石柚、越南青柚授粉果实低, 且显著低于泰国红宝石柚授粉果实。

从表 5 中可看出, Sarawak 授粉果实平均果皮厚度与 Tahition 授粉果实无显著差异, 但显著高于自然授粉和其他授粉组合。东试早柚自然授粉果实平均囊瓣数为 14 瓣, 异花授粉后果实囊瓣数增加至 16~17 瓣, 其中以 Sarawak、Tahition、泰国红宝石柚、越南青柚、Flame、Genetic Dwarf 等 6 个品种授粉果实囊瓣数增加显著。自然授粉果实平均裂瓣数 4 瓣, 以 Cocktail、Tahition、Oroblanco、越南青

表3 不同授粉组合果实内源激素含量

Table 3 The contents of endogenous hormones in fruits from different pollination combinations

处理 Treatment	$\rho(\text{GA}_3)/(\text{pg} \cdot \text{mL}^{-1})$	$\rho(\text{IAA})/(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{ZT})/(\text{ng} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{tZR})/(\text{ng} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{ABA})/(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$
CK	662.55±6.74 a	107.83±2.93 a	365.44±2.78 c	404.71±14.53 f	288.87±3.25 c
T1	589.02±10.12 de	96.03±2.10 cd	354.30±0.90 d	496.10±9.00 b	296.20±7.78 c
T2	578.62±14.22 e	94.29±2.47 cd	384.08±6.67 b	457.58±9.45 cd	322.46±8.99 b
T3	597.13±6.23 cde	102.02±2.62 b	350.80±7.75 d	500.30±6.26 b	318.93±7.54 b
T4	584.28±19.20 e	96.09±1.09 cd	343.88±3.25 d	523.87±7.55 a	298.08±4.69 c
T5	522.22±7.43 f	97.51±1.34 c	404.70±5.69 a	415.51±10.65 f	353.16±6.09 a
T6	605.03±4.94 cd	102.78±2.66 b	414.19±10.66 a	490.01±10.74 b	288.87±2.02 c
T7	614.11±7.56 bc	87.63±0.39 e	384.47±7.49 b	448.83±12.47 de	342.35±8.45 a
T8	511.26±5.79 f	88.83±2.18 e	406.48±5.25 a	439.15±2.47 e	265.58±4.84 d
T9	626.96±12.24 b	93.08±1.94 d	348.63±4.28 d	469.42±6.35 c	347.03±9.58 a

注:GA₃为赤霉素;IAA为吲哚乙酸;ZT为玉米素;tZR为反式玉米素核苷;ABA为脱落酸。

Note: GA₃ is Gibberellic acid; IAA is Indole acetic acid; ZT is Zeatin; tZR is trans-Zeatin riboside; ABA is Abscisic acid.

表4 不同授粉组合果实外观指标

Table 4 Fruit mass and fruit shape parameters of different pollination combinations

处理 Treatment	单果质量 Single fruit mass/g	果实横径 Fruit transverse diameter/mm	果实纵径 Fruit longitudinal diameter/mm	果形指数 Fruit shape index
CK	1 158.10±200.42 e	147.30±10.95 g	157.01±11.28 f	1.07±0.09 ab
T1	1 619.69±308.85 cd	169.43±10.93 cd	171.42±19.05 cd	1.01±0.08 c
T2	2 143.44±429.54 a	186.09±13.44 a	202.98±14.34 a	1.09±0.07 a
T3	1 857.97±268.37 b	178.91±9.76 b	179.19±18.47 bc	1.00±0.09 c
T4	1 587.25±276.76 d	167.93±10.85 de	169.54±18.50 cde	1.01±0.08 c
T5	1 962.98±245.76 b	182.61±9.01 ab	187.24±14.36 b	1.03±0.07 bc
T6	1 795.74±342.13 bc	175.98±12.61 bc	182.37±13.63 b	1.04±0.05 bc
T7	1 644.61±361.39 cd	171.76±16.08 cd	171.80±19.48 cd	1.00±0.06 c
T8	1 304.88±308.10 e	155.07±13.78 f	164.52±18.67 def	1.06±0.06 ab
T9	1 479.75±272.03 d	161.49±11.97 ef	160.02±17.19 ef	0.99±0.07 c

表5 不同授粉组合果实生物学性状

Table 5 Fruit characters of different pollination combinations

处理 Treatment	果皮厚度 Pericarp thickness/mm	囊瓣数 Carpel number	裂瓣数 Split carpel number	种子数 Seed number	单粒种子质量 Single seed mass/g	可食率 Edible rate/%	出汁率 Juice extraction rate/%
CK	13.43±1.53 b	14.20±1.10 b	3.60±0.89 a	0.00±0.00 d	0.00±0.00 c	56.05±2.31 ab	74.76±2.81 bc
T1	13.02±6.10 b	16.00±1.87 ab	1.40±1.14 bc	78.20±44.79 c	0.22±0.04 a	56.42±4.51 ab	78.72±0.73 ab
T2	19.67±3.42 a	16.80±1.30 a	2.00±1.41 abc	191.40±18.82 ab	0.23±0.02 a	49.66±3.93 c	78.58±2.19 ab
T3	17.62±3.84 ab	17.40±1.82 a	1.40±1.67 bc	206.60±12.44 a	0.23±0.01 a	51.12±3.88 bc	76.40±1.43 abc
T4	14.09±1.96 b	16.20±1.48 ab	1.00±1.00 c	54.00±41.43 c	0.20±0.02 a	56.20±3.27 ab	79.60±1.30 a
T5	12.72±2.57 b	16.60±1.52 a	2.20±0.84 abc	181.80±22.08 ab	0.21±0.02 a	55.13±3.66 ab	75.47±1.07 abc
T6	13.00±1.51 b	16.80±1.48 a	1.00±1.73 c	157.20±46.04 b	0.23±0.02 a	55.57±5.50 ab	78.30±6.27 ab
T7	13.55±4.70 b	16.20±1.10 ab	0.80±0.84 c	191.60±39.81 ab	0.19±0.01 a	55.13±3.66 ab	73.64±3.58 c
T8	14.51±3.21 b	16.40±1.82 a	3.20±1.64 ab	5.60±3.97 d	0.13±0.08 b	59.52±4.91 a	76.66±1.42 abc
T9	14.10±0.71 b	17.00±1.41 a	2.20±1.30 abc	71.20±31.55 c	0.19±0.02 a	60.68±2.57 a	75.10±3.11 bc

柚、(泰国红宝石柚:越南青柚 1:1 混合花粉)授粉显著降低果实裂瓣数。自然授粉条件下东试早柚为无籽果实,异花授粉后产生种子。Flame 授粉果实种子数和单粒种子质量显著低于其他授粉组合;葡萄

柚 Oroblanco、Genetic Dwarf、Cocktail 授粉果实种子数 54~78 粒,以柚授粉果实种子数(>150 粒)显著高于以葡萄柚授粉果实。与自然授粉果实相比,Sarawak 授粉果实可食率显著降低了 11.40%,而 Flame

和 Genetic Dwarf 授粉果实可食率分别提高了 6.19% 和 8.26%。从出汁率来看,自然授粉果实出汁率为 74.76%, Oroblanco 授粉果实出汁率 (79.60%) 显著高于自然授粉果实。

2.4 不同品种授粉对东试早柚果实内在品质的影响

不同品种授粉对东试早柚果实内在品质有显著影响(表 6)。与自然授粉果实相比, Sarawak、Tahitian、泰国红宝石柚、越南青柚授粉显著降低果实可

表 6 不同授粉组合果实内在品质

Table 6 Fruit inherent quality of different pollination combinations

处理 Treatment	w(可溶性固形物) Total soluble solid content/%	w(总酸) Titratable acidity content/%	固酸比 TSS/TA	w(可溶性糖) Soluble sugar content/ (mg·g ⁻¹)	w(可溶性蛋白) Soluble protein content/ (mg·g ⁻¹)	w(维生素 C) Vitamin C content/ (mg·g ⁻¹)	w(木质素) Lignin content/ (mg·g ⁻¹)	w(柚皮苷) Naringin content/ (mg·g ⁻¹)
CK	11.84±1.35 ab	0.61±0.01 ef	19.33±2.06 a	7.60±1.86 a	0.45±0.22 a	5.45±1.07 a	50.54±14.14 bc	7.99±0.91 abc
T1	10.84±0.43 bc	0.68±0.08 cde	16.25±2.35 b	6.39±1.63 ab	0.33±0.05 a	4.55±0.31 b	66.66±8.33 ab	9.62±3.46 ab
T2	9.32±1.39 d	0.73±0.05 bc	12.90±2.20 de	4.15±0.86 c	0.30±0.17 a	4.41±0.67 b	68.89±21.85 ab	10.56±2.51 a
T3	10.52±0.25 c	0.76±0.05 b	13.89±1.00 cde	5.97±0.45 abc	0.36±0.10 a	5.17±0.64 ab	47.67±11.61 c	10.24±2.57 a
T4	12.22±0.50 a	0.64±0.05 def	19.23±1.43 a	6.39±2.85 ab	0.32±0.14 a	5.17±0.46 ab	72.81±21.60 a	5.93±0.82 cd
T5	10.70±0.39 c	0.72±0.08 bc	14.92±1.70 bcd	5.52±0.61 abc	0.37±0.05 a	4.88±0.46 ab	45.43±11.96 cd	5.35±1.18 cd
T6	10.72±0.58 c	0.88±0.04 a	12.17±1.19 e	5.16±0.87 bc	0.42±0.05 a	5.19±0.70 ab	45.27±11.33 cd	7.02±1.84 bcd
T7	11.44±0.34 abc	0.72±0.06 bcd	16.02±1.39 bc	6.52±0.71 ab	0.36±0.15 a	5.07±0.16 ab	41.63±15.30 cd	4.78±0.56 d
T8	11.56±0.84 abc	0.58±0.03 f	19.85±0.79 a	7.12±1.68 ab	0.42±0.13 a	4.58±0.35 b	27.40±9.82 de	7.78±2.33 abc
T9	11.52±0.42 abc	0.68±0.07 bcde	17.02±1.71 b	6.78±1.17 ab	0.47±0.07 a	5.10±0.31 ab	15.85±5.05 e	7.79±1.08 abc

溶性固形物含量;其余授粉组合果实可溶性固形物含量无显著差异, Oroblanco 授粉果实可溶性固形物含量(12.22%)比自然授粉果实高 0.38 个百分点。葡萄柚 Cocktail、Oroblanco、Flame、Genetic Dwarf 授粉对东试早柚果实总酸含量无显著影响,不同品种柚授粉后果实总酸含量显著高于自然授粉。自然授粉、Flame、Genetic Dwarf 授粉果实固酸比无显著差异,均显著高于其余授粉组合果实。不同品种授粉果实可溶性蛋白含量无显著差异,但对可溶性糖、维生素 C、木质素、柚皮苷含量有显著影响(表 6)。自然授粉果实可溶性糖含量(7.60 mg·g⁻¹)和维生素 C 含量(5.45 mg·g⁻¹)最高; Sarawak 和越南青柚授粉果实可溶性糖含量,以及 Cocktail、Sarawak、Flame 授粉果实维生素 C 含量,均显著低于自然授粉。Oroblanco 授粉果实木质素含量(72.81 mg·g⁻¹)最高,显著高于自然授粉果实;而 Flame、Genetic Dwarf 授粉显著降低果实木质素含量。(泰国红宝石柚:越南青柚 1:1 混合花粉)授粉果实柚皮苷含量最低(4.78 mg·g⁻¹),虽然与泰国红宝石柚、越南青柚授粉果实无显著差异,但显著低于自然授粉果实。

2.5 不同品种授粉果实品质指标相关性分析

从表 7 可看出,果实外观指标单果质量、果实横径、果实纵径与果皮厚度互呈极显著正相关,果形指数与果实纵径、果皮厚度互呈显著正相关;裂瓣数与

果实横径、种子数、总酸含量呈显著负相关,与可食率、固酸比呈显著正相关;种子数与单果质量、果实横径、果实纵径、果皮厚度呈显著正相关,可食率与单果质量、果实横径、果实纵径、果形指数、果皮厚度呈极显著负相关。功能性成分维生素 C 含量与果实纵径、果形指数呈显著负相关,与可溶性固形物含量、固酸比呈显著正相关。营养指标可溶性蛋白含量与单果质量、果实横径、果实纵径呈显著负相关,与可溶性糖含量、可溶性固形物含量呈极显著正相关。风味指标可溶性糖含量、可溶性固形物含量、固酸比与单果质量、果实横径、果实纵径、种子数呈极显著负相关,可溶性糖含量与可食率、可溶性固形物含量、固酸比互呈显著正相关,与总酸含量呈显著负相关;可溶性固形物含量与总酸含量呈极显著负相关,与固酸比呈极显著正相关;总酸含量与单果质量、果实横径、果实纵径呈极显著正相关,与固酸比呈极显著负相关。

2.6 不同品种授粉东试早柚果实品质综合评价

为进一步明确不同品种授粉对东试早柚果实品质的影响,对不同品种授粉果实 14 项品质指标进行主成分(PCA)分析。各项指标数据进行标准化处理,根据 PCA 降维的思想,将不同品种授粉果实品质指标划分为若干主成分。选择特征值大于 0.80,各因子载荷绝对值大于 0.530 作为解释变量,14 项

表7 不同授粉组合果实品质指标间的相关性
Table 7 Correlation analysis among fruit quality indexes of different pollination combinations

指标 Index	单果质量 Single fruit mass	果实横径 Fruit transverse diameter	果实纵径 Fruit longitudinal diameter	果形指数 Fruit shape index	果皮厚度 Pericarp thickness	裂瓣数 Split carpel number	种子数 Seed number	可食率 Edible rate	维生素C含量 Vitamin C content	可溶性糖含量 Soluble sugar content	可溶性蛋白含量 Soluble protein content	可溶性固形物含量 Total solid content	总酸含量 Titratable acidity content
果实横径 Fruit transverse diameter	0.948**												
果实纵径 Fruit longitudinal diameter	0.894**	0.803**											
果形指数 Fruit shape index	0.104	-0.125	0.488**										
果皮厚度 Pericarp thickness	0.400**	0.368**	0.499**	0.287*									
裂瓣数 Split carpel number	-0.222	-0.300*	-0.228	0.047	-0.068								
种子数 Seed number	0.699**	0.708**	0.615**	-0.007	0.329*	-0.458**							
可食率 Edible rate	-0.385**	-0.393**	-0.580**	-0.385**	-0.608**	0.322*	-0.574**						
维生素C含量 Vitamin C content	-0.105	-0.112	-0.285*	-0.320*	0.050	0.116	-0.058	0.124					
可溶性糖含量 Soluble sugar content	-0.582**	-0.503**	-0.607**	-0.278	-0.180	0.224	-0.434**	0.292*	0.249				
可溶性蛋白含量 Soluble protein content	-0.354*	-0.369**	-0.454**	-0.217	-0.258	0.095	-0.230	0.260	0.261	0.370**			
可溶性固形物含量 Total soluble solid content	-0.490**	-0.465**	-0.574**	-0.275	-0.197	0.203	-0.495**	0.368**	0.547**	0.682**	0.366**		
总酸含量 Titratable acidity content	0.453**	0.479**	0.374**	-0.075	0.175	-0.393**	0.666**	-0.341*	-0.033	-0.312*	-0.026	-0.364**	
固酸比 TSS/TA	-0.597**	-0.603**	-0.580**	-0.086	-0.241	0.381**	-0.755**	0.444**	0.295*	0.562**	0.232	0.766**	-0.866**

注:**表示在0.01水平上极显著相关;*表示在0.05水平上显著相关。

Note: ** indicates a significant correlation at $p < 0.01$; * indicates a significant correlation at $p < 0.05$.

品质指标共提取出5个主成分,结果如表8所示。第1主成分贡献率为24.382%,其中单果质量(0.875)、果实横径(0.887)、果实纵径(0.723)为PC1中正向特征值较高的指标,主要是果实大小指标;可溶性糖

含量(-0.536)、可溶性蛋白含量(-0.596)为PC1中负向特征值较高的指标,主要构成果实营养品质,可将PC1概括为果实大小及营养品质指标。第2主成分贡献率为19.299%,主要正向特征值指标为种子

表8 不同授粉组合果实综合品质主成分旋转载荷矩阵和方差贡献率

Table 8 Principal component rotation load matrix and variance contribution rate of comprehensive quality of different pollination combinations

品质指标 Quality index	主成分 Principal component				
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
单果质量 Single fruit mass	0.875	0.351	-0.060	0.195	0.016
果实横径 Fruit transverse diameter	0.887	0.355	0.014	0.083	-0.143
果实纵径 Fruit longitudinal diameter	0.723	0.242	-0.305	0.487	0.009
果形指数 Fruit shape index	-0.095	-0.115	-0.537	0.683	0.214
果皮厚度 Pericarp thickness	0.319	0.058	0.149	0.787	-0.012
裂瓣数 Split carpel number	-0.065	-0.294	0.081	-0.063	0.866
种子数 Seed number	0.503	0.638	-0.010	0.238	-0.321
可食率 Edible rate	-0.187	-0.276	0.095	-0.784	0.296
维生素C含量 Vitamin C content	-0.019	0.003	0.843	0.019	0.127
可溶性糖含量 Soluble sugar content	-0.536	-0.294	0.504	-0.089	-0.053
可溶性蛋白含量 Soluble protein content	-0.596	0.339	0.372	-0.157	0.283
可溶性固形物含量 Total soluble solid content	-0.370	-0.423	0.710	-0.103	0.008
总酸含量 Titratable acidity content	0.179	0.876	-0.008	0.068	-0.190
固酸比 TSS/TA	-0.352	-0.812	0.354	-0.114	0.151
特征值 Eigenvalues	3.413	2.702	2.156	2.106	1.165
方差贡献率 Variance contribution/%	24.382	19.299	15.400	15.044	8.322
累积方差贡献率 Cumulative contribution rate/%	24.382	43.681	59.080	74.124	82.446

数(0.638)、总酸含量(0.876),负向特征值较高指标为固酸比(-0.812),可概括为种子数及酸味指标。第3主成分贡献率为15.400%,维生素C含量(0.843)、可溶性固形物含量(0.710)为正向特征值较高指标,果形指数(-0.537)为负向特征值较高指标,可概括为果实风味及果形指标。第4主成分贡献率为15.044%,正向特征值较高的指标为果形指数(0.683)和果皮厚度(0.787),负向特征值较高的指标为可食率(-0.784),可概括为果实可食率指标。第5主成分贡献率为8.322%,裂瓣数(0.866)正向特征值较大,对PC5产生正向影响,可概括为裂瓣指标。

以各主成分对应的方差贡献率为权重,对5个主成分得分和相应权重进行线性加权求和,构建果实品质综合评价函数 $F=(0.24382 \times F_1 + 0.19299 \times F_2 + 0.154 \times F_3 + 0.15044 \times F_4 + 0.08322 \times F_5) / 0.82446$,不同授粉组合果实综合得分如表9所示。第1主成分因子得分较高的是Sarawak、泰国红宝石柚、Tahition授粉果实,说明这3个品种授粉果实单果质量、果实

横径、果实纵径较大,可溶性糖、可溶性蛋白含量较低;自然授粉、Flame、Genetic Dwarf授粉果实得分较低,说明果实可溶性糖、可溶性蛋白含量较高。第2主成分因子得分高的是越南青柚、Tahition、Sar-

表9 不同授粉组合主成分因子得分及果实品质综合得分

Table 9 Principal component factor scores and comprehensive fruit quality scores of different pollination combinations

处理 Treatment	因子得分 Factor score					综合得分 Comprehensive score, F	排名 Rank
	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅		
T3	0.613	0.682	0.405	0.734	-0.155	0.535	1
T2	0.849	0.459	-0.940	1.018	0.334	0.402	2
T6	-0.062	1.640	0.027	-0.376	-0.008	0.301	3
T5	0.756	0.403	-0.098	-0.366	0.314	0.264	4
T7	0.206	0.142	0.568	-0.508	-1.141	-0.008	5
T9	-0.465	0.019	0.230	-0.397	0.479	-0.114	6
T4	0.064	-1.171	0.368	0.085	-0.803	-0.252	7
T1	0.019	-0.409	-0.580	-0.366	-0.448	-0.310	8
CK	-1.341	-0.633	0.382	0.267	0.772	-0.347	9
T8	-0.641	-1.131	-0.362	-0.091	0.656	-0.472	10

awak、泰国红宝石柚授粉果实,说明种子数较多、总酸含量较高,固酸比较低;Oroblanco、Flame 授粉果实得分较低,表明固酸比较高。第3主成分因子得分较高的是泰国红宝石柚;越南青柚1:1混合花粉、Tahition、自然授粉、Oroblanco 授粉果实,说明维生素C含量、可溶性固形物含量较高。第4主成分因子得分最高的是Sarawak、Tahition 授粉果实,说明果形指数大、果皮厚、可食率低。第5主成分因子得分较高的是自然授粉、Flame 授粉果实,说明裂瓣较多。从综合得分看,果实综合品质排名前5均为以不同品种柚授粉果实,综合表现为果实大、种子多、酸度高,可溶性蛋白、可溶性糖含量和固酸比较低;葡萄柚品种Flame、Genetic Dwarf、Oroblanco、Cocktail 授粉果实综合得分较低,单果质量和果实直径较小。

以改善果实内在品质为目的,兼顾果实外观品质,利用隶属函数法对10个授粉组合果实品质进行综合评价,将单果质量、果实横径、果实纵径、可食率、维生素C含量、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、可溶性固形物含量、固酸比等9项指标采用隶属函数公式分别计算隶属函数值,果形指数、果皮厚度、裂瓣数、种子数、总酸含量等5项指标采用反隶属函数公式计算隶属函数值。先计算各项指标的隶属函数值,再计算所有指标平均值即为综合得分。综合得分值越大,品质越好;反之则越差。结果表明,Genetic Dwarf、Oroblanco 授粉果实综合得分为0.68、0.67,高于自然授粉果实综合得分0.66;Flame 授粉果实综合得分为0.63,处于较高的水平(表10)。从总体来看,以葡萄柚授粉果实综合评分高于不同品种柚授粉果实,泰国红宝石柚:越南青柚1:1混合花粉授粉果实综合得分高于泰国红宝石柚、越南青柚授粉果实。

3 讨论

本研究中发现异花授粉能够显著提高东试早柚坐果率,这与前期研究结果一致^[27],而不同品种授粉坐果率提高程度不同可能与花粉遗传特性有关。有研究表明,植物坐果和果实生长发育取决于内源激素的合成和相互作用^[28-29],而果实内源激素来源于花粉及花粉管、受精的胚珠和花以外的营养器官^[30],发育中的种子则是幼果内源激素的主要合成场所^[31-32]。聂磊等^[33]的研究认为,异花授粉使发育期沙田柚果实内源激素水平上升,从而导致异花

表 10 不同授粉组合果实品质隶属函数法综合评价结果
Table 10 Quality comprehensive score and ranking of the different pollination combinations

处理 Treatment	隶属函数值 Subordinative function value									综合得分 Average score	综合排名 Rank					
	单果质量 Single fruit mass	果实横径 Fruit transverse diameter	果实纵径 Fruit longitudinal diameter	果形指数 Fruit shape index	果皮厚度 Pericarp thickness	裂瓣数 Split carpe number	种子数 Seed number	可食率 Edible rate	维生素C含量 Vitamin C content			可溶性糖含量 Soluble sugar content	可溶性蛋白含量 Soluble protein content	可溶性固形物含量 Total soluble solid content	总酸含量 Titratable acid	固酸比 TSS/TA
CK	0.00	0.00	1.00	0.23	0.90	0.00	1.00	0.58	1.00	1.00	0.89	0.87	0.90	0.93	0.66	3
T1	0.47	0.57	0.31	0.80	0.96	0.79	0.62	0.61	0.17	0.65	0.21	0.52	0.69	0.53	0.57	5
T2	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.57	0.07	0.00	0.56	0.00	0.00	0.00	0.52	0.09	0.27	10
T3	0.71	0.82	0.52	0.89	0.29	0.79	0.00	0.13	0.53	0.53	0.39	0.41	0.41	0.22	0.47	9
T4	0.44	0.53	0.73	0.82	0.80	0.93	0.74	0.59	0.33	0.65	0.14	1.00	0.81	0.92	0.67	2
T5	0.82	0.91	0.34	0.65	1.00	0.50	0.12	0.50	0.34	0.40	0.42	0.48	0.53	0.36	0.53	7
T6	0.65	0.74	0.45	0.55	0.96	0.93	0.24	0.54	0.60	0.29	0.72	0.48	0.00	0.00	0.51	8
T7	0.49	0.63	0.68	0.91	0.88	1.00	0.07	0.50	0.00	0.69	0.37	0.73	0.55	0.50	0.57	6
T8	0.15	0.20	0.84	0.32	0.74	0.14	0.97	0.90	0.22	0.86	0.70	0.77	1.00	1.00	0.63	4
T9	0.33	0.37	0.93	1.00	0.80	0.50	0.66	1.00	0.17	0.76	1.00	0.76	0.67	0.63	0.68	1

授粉果实大于自花授粉。笔者在本研究中发现不同品种授粉果实横径和纵径净生长量大于自然授粉果实,并且不同授粉处理间果实内源激素含量存在差异,推测可能是果实内源激素含量差异影响果实的生长发育,最终导致不同授粉处理间果实大小的差异。在本研究中,不同品种葡萄柚授粉果实单果质量、果实横径、果实纵径均小于以不同品种柚授粉果实,这与毛桑隐等^[14]关于花粉直感效应对马家柚果实外观品质影响的研究结果一致,原因可能是葡萄柚果形较小从而影响授粉果实大小。

异花授粉导致果实大小、单果质量、果实形状,以及可溶性糖、有机酸、挥发性物质、矿质元素等物质含量及组分发生变化,最终影响果实品质^[3,14,18],但不同品种授粉对果实品质的影响程度不同。前人研究发现,泰国金柚授粉显著提高东试早柚可溶性固形物含量、固酸比、还原糖含量,泰国白肉蜜柚授粉降低可滴定酸含量^[27],琯溪蜜柚授粉则显著提高可溶性固形物和可滴定酸含量^[34]。在本研究中,不同品种柚授粉后果实可溶性固形物含量和固酸比显著降低,而总酸含量显著升高;葡萄柚品种 Oroblanco 授粉果实可溶性固形物含量高于自然授粉果实,并且葡萄柚授粉果实可溶性固形物含量和固酸比高于不同品种柚授粉。柚和葡萄柚不同品种授粉后,果实质量、果实形状、果皮厚度等外在品质和可溶性固形物、总酸、维生素C含量等内在品质存在较大差异,这说明异花授粉对东试早柚果实品质的效应受品种以及授粉品种的影响,这与毛桑隐等^[14]、彭建平^[15]、陈秋夏等^[17]对马家柚、度尾文旦柚、永嘉早香柚的研究结果一致。

柚异花授粉后往往产生大量种子,而种子可通过激素、多胺等内源物质调控可溶性糖、有机酸等物质代谢过程,而渗透调节物质含量变化可能与果实内裂有关^[11]。东试早柚自交不亲和,单一品种种植结实率较低,果实为无籽。异花授粉后东试早柚果实种子数量增加,不同品种授粉果实种子数、单粒种子质量存在差异,表现出明显花粉种子直感效应,这与吴方方等^[35]对马家柚的研究结果一致。异花授粉产生种子排列在中心柱周围,能够有效缓解果实横向生长拉力,从而降低果实内裂^[15,36]。本研究表明,东试早柚果实种子数与果实横径呈显著正相关,而裂瓣数与果实横径、种子数呈显著负相关,说明异花授粉形成种子能够有效缓解果实内裂。

通过品质指标间相关性分析,发现单果质量与

果实横径和纵径呈极显著正相关,果形指数与果实纵径呈极显著正相关,与胡安华等^[37]的研究结果一致;而单果质量、果实横径、果实纵径等外在品质指标与可溶性固形物、可溶性糖、可溶性蛋白含量等内在品质指标呈显著负相关,这说明东试早柚果实大小与内在品质有着密切关系,果实越大,内在品质相对较差。果实品质是一个综合性状,采用某个指标无法对果实品质进行综合评价,通过主成分分析法和模糊隶属函数法对多项品质指标进行综合评价,能够准确评价果实品质。笔者在本研究中利用主成分分析法从14项品质指标中提取了5个主成分,累积贡献率达到82.446%,涵盖大部分品质信息。根据主成分得分和载荷值,发现第1主成分正向增长有利于提高单果质量、果实横径、果实纵径,第2主成分正向增长有利于提高种子数和总酸含量,第3主成分正向增长可提高维生素C含量和可溶性固形物含量,第4主成分正向增长可提高果形指数和果皮厚度,第5主成分正向增长可提高裂瓣数。结合品质指标间相关性和主成分因子得分分析,发现以不同品种柚授粉果实综合表现为果实大、种子多、酸度高,可溶性蛋白、可溶性糖含量和固酸比较低;以不同品种葡萄柚授粉果实综合表现为单果质量和果实直径较小。通过模糊隶属函数法对14项品质指标进行综合评价,结果表明葡萄柚品种 Genetic Dwarf 和 Oroblanco 授粉果实综合品质优于东试早柚自然授粉果实;其余2个葡萄柚品种 Flame 和 Cocktail 授粉果实综合得分高于柚不同品种授粉果实。

4 结 论

异花授粉能够显著提高东试早柚坐果率,同时对果实生长发育和果实品质有显著影响。葡萄柚授粉一定程度上能够改善东试早柚果实品质,其中 Genetic Dwarf 和 Oroblanco 授粉后坐果率及单果质量、果实大小、固酸比、可溶性固形物含量等品质指标适中,适宜作为东试早柚授粉品种。

参考文献 References:

- [1] 刘承浪,冯迪,曹宗洪,闫素云,张永青,徐祥增,高世德,叶俊丽,柴利军,谢宗周,邓秀新. 东试早柚与沙田柚和水晶柚遗传背景比较[J]. 园艺学报, 2023, 50(11):2337-2349.
LIU Chenglang, FENG Di, CAO Zonghong, YAN Suyun, ZHANG Yongqing, XU Xiangzeng, GAO Shide, YE Junli, CHAI Lijun, XIE Zongzhou, DENG Xiuxin. Comparative analysis of genetic background of 'Dongshi zaoyou', 'Shatianyou'

- and 'Shuijingyou' pummelo[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2023,50(11):2337-2349.
- [2] 杨芬,刘雅兰,张婷婷,彭舒,田鑫. 果树花粉直感效应形成机理研究进展[J]. *经济林研究*,2020,38(2):235-240.
YANG Qin, LIU Yalan, ZHANG Tingting, PENG Shu, TIAN Xin. Research progress on formation mechanism of xenia effect in fruit trees[J]. *Non-wood Forest Research*, 2020, 38(2): 235-240.
- [3] 洪俊彦,黄仁,黄春颖,王建华,徐一帆,李佩佩,胡渊渊,黄坚钦,李岩. 植物花粉直感的研究进展及展望[J]. *植物生理学报*,2020,56(2):151-162.
HONG Junyan, HUANG Ren, HUANG Chunying, WANG Jianhua, XU Yifan, LI Peipei, HU Yuanyuan, HUANG Jianqin, LI Yan. Research progress and prospects of xenia[J]. *Plant Physiology Journal*, 2020, 56(2): 151-162.
- [4] 薛辉,曹尚银,牛娟,李好先,张富红,赵弟广. 花粉直感对'突尼斯'石榴坐果及果实品质的影响[J]. *果树学报*,2016,33(2):196-201.
XUE Hui, CAO Shangyin, NIU Juan, LI Haoxian, ZHANG Fuhong, ZHAO Diguang. Effects of xenia on fruit setting and quality in 'Tunisia' pomegranate[J]. *Journal of Fruit Science*, 2016, 33(2): 196-201.
- [5] 曼苏尔·那斯尔,杜润清,陈湘颖,周伟权,牛莹莹,阿布来克·尼牙孜,廖康. 新疆梨品种与'库尔勒香梨'授粉亲和性及花粉直感[J]. *果树学报*,2019,36(4):447-457.
Mansur · Nasir, DU Runqing, CHEN Xiangying, ZHOU Weiquan, NIU Yingying, Ablah · Niyaz, LIAO Kang. Pollination compatibility and pollen xenia of Xinjiang pear cultivars with 'Kuerlexiangli' pear[J]. *Journal of Fruit Science*, 2019, 36(4): 447-457.
- [6] 沙海峰,朱元娣,高琪洁,张文. 花粉直感对京白梨品质的影响[J]. *果树学报*,2006,23(2):287-289.
SHA Haifeng, ZHU Yuandi, GAO Qijie, ZHANG Wen. Effect of xenia on fruit quality of Jingbaili pear cultivar[J]. *Journal of Fruit Science*, 2006, 23(2): 287-289.
- [7] 张旭辉,袁德义,邹锋,范晓明,唐静,朱周俊. 锥栗花粉直感效应研究[J]. *园艺学报*,2016,43(1):61-70.
ZHANG Xuhui, YUAN Deyi, ZOU Feng, FAN Xiaoming, TANG Jing, ZHU Zhoujun. Studies on the pollen xenia of *Castanea henryi*[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2016, 43(1): 61-70.
- [8] 沈建生,滕元文,陈一帆,王华新,林贤锐. 金华大白桃花粉直感研究及授粉组合模糊综合评价[J]. *果树学报*,2011,28(5):755-762.
SHEN Jiansheng, TENG Yuanwen, CHEN Yifan, WANG Huaxin, LIN Xianrui. Study on the xenia effect and indistinctly comprehensive evaluation of pollination combinations in Jinhua Dabai peach[J]. *Journal of Fruit Science*, 2011, 28(5): 755-762.
- [9] TABER S K, OLMSTEAD J W. Impact of cross- and self-pollination on fruit set, fruit size, seed number, and harvest timing among 13 southern highbush blueberry cultivars[J]. *HortTechnology*, 2016, 26(2): 213-219.
- [10] ALIZADEH- SALTE S, FARHADI N, ARZANI K, KHOSH-GHALB H. Almond oil quality as related to the type of pollen source in Iranian self incompatible cultivars[J]. *International Journal of Fruit Science*, 2018, 18: 29-36.
- [11] 刘冬峰,林绍生,陈巍,朱祝军,宋洋,郭秀珠,李发勇. 异花授粉对柚果实代谢产物的影响及其与内裂的关系[J]. *核农学报*, 2021, 35(2): 271-279.
LIU Dongfeng, LIN Shaosheng, CHEN Wei, ZHU Zhujun, SONG Yang, GUO Xiuzhu, LI Fayong. Effect of cross-pollination on metabolites and its relationship with fruit inner-cracking in pomelo[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, 35(2): 271-279.
- [12] 刘婉君,张莹,张玉星,杜国强. 18个品种授粉'鸭梨'果实品质和香气成分分析与评价[J]. *食品科学*, 2022, 43(2): 294-302.
LIU Wanjun, ZHANG Ying, ZHANG Yuxing, DU Guoqiang. Analysis and evaluation of fruit quality and aroma components of 'Yali' pear (*Pyrus bretschneideri* Rehd.) pollinated with eighteen pollinizers[J]. *Food Science*, 2022, 43(2): 294-302.
- [13] 杨亚妮,苏智先. 中国名柚资源与品种现状研究[J]. *四川师范学院学报(自然科学版)*, 2002, 23(2): 163-169.
YANG Yani, SU Zhixian. Resources and actualities of breeds of famous *Citrus grandis* in China[J]. *Journal of Sichuan Teachers College (Natural Science)*, 2002, 23(2): 163-169.
- [14] 毛桑隐,路志浩,张祥,叶俊丽,伊华林,柴利军,邓秀新,吴方方,徐强. 花粉直感对马家柚果实品质的影响[J]. *果树学报*, 2023, 40(11): 2391-2402.
MAO Sangyin, LU Zhihao, ZHANG Xiang, YE Junli, YI Hualin, CHAI Lijun, DENG Xiuxin, WU Fangfang, XU Qiang. Effect of xenia on fruit quality of Majiayou[J]. *Journal of Fruit Science*, 2023, 40(11): 2391-2402.
- [15] 彭建平,李小初,郑玉亮,陈清西,陈文山. 授粉对度尾文旦柚裂果及果实品质的影响[J]. *中国果树*, 2007(3): 27-28.
PENG Jianping, LI Xiaochu, ZHENG Yuliang, CHEN Qingxi, CHEN Wenshan. Effects of pollination on dehiscent fruit and fruit quality of 'Duwei' pummelo[J]. *China Fruits*, 2007(3): 27-28.
- [16] 余文琴,赵晓玲,潘东明. 授粉处理对琯溪蜜柚粒化过程中果皮若干生理生化指标的影响[J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2008, 37(4): 355-359.
SHE Wenqin, ZHAO Xiaoling, PAN Dongming. Effect of pollination on physiology and biochemistry in pericarp of Guanxi-miyou pummelo at the stage of granulation[J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2008, 37(4): 355-359.
- [17] 陈秋夏,徐昌杰,王伟杰,郑坚,陈昆松. 人工授粉对永嘉早柚果实发育与贮藏品质的影响[J]. *果树学报*, 2005, 22(4): 412-415.
CHEN Qiuxia, XU Changjie, WANG Weijie, ZHENG Jian, CHEN Kunsong. Effect of artificial pollination on fruit development and quality in storage of Yongjiiaoxiangyou pomelo[J]. *Journal of Fruit Science*, 2005, 22(4): 412-415.
- [18] 靳瑞霞. 马家柚不同授粉组合果实品质研究[D]. 武汉:华中农业大学,2013.
JIN Ruixia. Study effect of different pollination combination on fruit quality of Majia pummelo[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013.
- [19] 吴颂如,陈婉芬,周燮. 酶联免疫法(ELISA)测定内源植物激素[J]. *植物生理学通讯*, 1988, 24(5): 53-57.
WU Songru, CHEN Wanfen, ZHOU Xie. Enzyme linked immunosorbent assay for endogenous plant hormones[J]. *Plant Physi-*

- ology Communications, 1988, 24(5):53-57.
- [20] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 134-200.
LI Hesheng. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 134-200.
- [21] 姜启航. 套袋对柚果实类胡萝卜素代谢和品质的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
JIANG Qihang. Studies on the effects of bagging on carotenoid biogenesis and quality of pummelo fruits[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019.
- [22] 黄汉唐. 木质素代谢相关基因在柚果实发育过程中的作用机理初探[D]. 福州: 福建农林大学, 2020.
HUANG Hantang. Preliminary exploration on mechanism of lignin metabolism related genes of pomelo during fruit development stages[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2020.
- [23] 许鹭. 柚皮中柚皮苷的提取、分离纯化及其固体分散体与卵磷脂复合物的制备及表征[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
XU Lu. Extraction and purification of naringin in grapefruit peel and preparation and characterization of its solid dispersion and lecithin compound[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [24] 崔党群. Logistic 曲线方程的解析与拟合优度测验[J]. 数理统计与管理, 2005, 24(1): 112-115.
CUI Dangqun. Analysis and making good fitting degree test for Logistic curve regression equation[J]. Application of Statistics and Management, 2005, 24(1): 112-115.
- [25] 徐宸宇, 唐启正, 刘慧宇, 吴巨勋, 伊华林. 基于主成分分析综合评价 6 个杂交授粉组合马家柚果实品质[J/OL]. 果树学报, 2023; 1-13 (2023-12-27). DOI: 10.13925/j.cnki.gsxb.20230462.
XU Chenyu, TANG Qizheng, LIU Huiyu, WU Juxun, YI Hualin. Comprehensive evaluation of fruit quality of six hybrid pollination combinations of 'Majiayou' based on principal component analysis[J/OL]. Journal of Fruit Science, 2023; 1-13 (2023-12-27). DOI: 10.13925/j.cnki.gsxb.20230462.
- [26] 徐臣善, 徐爱红, 高东升, 程述汉. 苹果果实生长的数学模型及各生长指标间的相关性分析[J]. 植物科学学报, 2015, 33(1): 72-80.
XU Chenshan, XU Aihong, GAO Dongsheng, CHENG Shuhan. Mathematical model of apple fruit growth and correlation analysis among growth indices[J]. Plant Science Journal, 2015, 33(1): 72-80.
- [27] 易小艳, 赵志平, 陈彭坤, 徐祥增, 李开雄, 张阳梅. 不同品种花粉对东试早柚着果率及果实品质的影响[J]. 中国南方果树, 2021, 50(5): 35-37.
YI Xiaoyan, ZHAO Zhiping, CHEN Pengkun, XU Xiangzeng, LI Kaixiong, ZHANG Yangmei. Effect of pollen source on fruit-setting rate and fruit quality of Dongshizao pomelo[J]. South China Fruits, 2021, 50(5): 35-37.
- [28] SETHA S, KONDO S, HIRAI N, OHIGASHI H. Xanthoxin, abscisic acid and its metabolite levels associated with apple fruit development[J]. Plant Science, 2004, 166(2): 493-499.
- [29] SANTNER A, CALDERON-VILLALOBOS L I A, ESTELLE M. Plant hormones are versatile chemical regulators of plant growth[J]. Nature Chemical Biology, 2009, 5: 301-307.
- [30] 樊卫国, 安华明, 刘国琴, 何嵩涛, 刘进平. 刺梨果实与种子内源激素含量变化及其与果实发育的关系[J]. 中国农业科学, 2004, 37(5): 728-733.
FAN Weigu, AN Huaming, LIU Guoqin, HE Songtao, LIU Jinping. Changes of endogenous hormones contents in fruit, seeds and their effects on the fruit development of *Rosa roxburghii*[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(5): 728-733.
- [31] 刘丙花, 姜远茂, 彭福田, 赵凤霞, 王海云, 赵林. 甜樱桃红灯果实发育过程中果肉及种子内源激素含量变化动态[J]. 果树学报, 2008, 25(4): 593-596.
LIU Binghua, JIANG Yuanmao, PENG Futian, ZHAO Fengxia, WANG Haiyun, ZHAO Lin. Dynamic changes of endogenous hormone contents in the pulp and seeds of sweet cherry fruit during growth and development[J]. Journal of Fruit Science, 2008, 25(4): 593-596.
- [32] DORCEY E, URBEZ C, BLÁZQUEZ M A, CARBONELL J, PEREZ-AMADOR M A. Fertilization-dependent auxin response in ovules triggers fruit development through the modulation of gibberellin metabolism in *Arabidopsis*[J]. The Plant Journal, 2009, 58(2): 318-332.
- [33] 聂磊, 刘鸿先. 不同授粉处理对沙田柚果实发育中内源激素水平变化的影响[J]. 果树学报, 2002, 19(1): 27-31.
NIE Lei, LIU Hongxian. Effect of pollination on the change of endohormones in the fruit of Shatianyou pomelo variety[J]. Journal of Fruit Science, 2002, 19(1): 27-31.
- [34] 王绍华, 龙春瑞, 李进学, 高俊燕, 彭抒昂, 王自然, 赵俊, 寸待泽, 李晶, 周东果, 张金智, 岳建强. 琯溪蜜柚花粉对水晶蜜柚的直感效应[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2017, 43(6): 646-650.
WANG Shaohua, LONG Chunrui, LI Jinxue, GAO Junyan, PENG Shu'ang, WANG Ziran, ZHAO Jun, CUN Daize, LI Jing, ZHOU Dongguo, ZHANG Jinzhi, YUE Jianqiang. Pollen xenia effect of Guanxi pummelo on the fruit of Shuijing pummelo[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2017, 43(6): 646-650.
- [35] 吴方方, 杨海建, 曹立新, 毛祥青, 刘翠华. 授粉对广丰马家柚果实品质的影响[J]. 中国南方果树, 2012, 41(3): 76-77.
WU Fangfang, YANG Haijian, CAO Lixin, MAO Xiangqing, LIU Cuihua. Effect of pollination on fruit quality in Guangfengmajiayou pomelo[J]. South China Fruits, 2012, 41(3): 76-77.
- [36] 陈秋夏, 郑坚, 张旭乐, 徐文荣. 永嘉早香柚果实裂瓣规律与授粉调控[J]. 果树学报, 2007, 24(1): 68-71.
CHEN Qiuxia, ZHENG Jian, ZHANG Xule, XU Wenrong. Study on the effect of hand pollination on juice sac cracking of Yongjia Zaoxiangyou pomelo cultivar[J]. Journal of Fruit Science, 2007, 24(1): 68-71.
- [37] 胡安华, 窦万福, 祁静静, 雷天刚, 陈善春, 邹修平, 彭爱红, 许兰珍, 姚利晓, 何永睿, 李强. 柚类种质资源表型多样性分析及综合评价[J]. 分子植物育种, 2020, 18(2): 650-664.
HU Anhua, DOU Wanfu, QI Jingjing, LEI Tiangang, CHEN Shanchun, ZOU Xiuping, PENG Aihong, XU Lanzhen, YAO Lixiao, HE Yongrui, LI Qiang. Phenotypic diversity analysis and comprehensive evaluation of pomelo germplasms[J]. Molecular Plant Breeding, 2020, 18(2): 650-664.