

授粉品种对东试早柚果实品质的影响

徐祥增, 张小娇, 张彩虹, 邓琴霖, 高世德*

(云南省热带作物科学研究所, 云南景洪 666100)

[摘要] 研究旨在揭示不同花粉源对东试早柚坐果及果实品质形成的调控效应, 为东试早柚授粉树品种筛选及果实品质定向改良提供理论依据。试验以东试早柚自然授粉为对照, 5个遗传背景不同的柚品种作为父本进行人工杂交授粉, 测定坐果率及15项果实性状指标, 并通过隶属函数法进行综合评价。结果表明, 杂交授粉能够显著提高东试早柚坐果率, 且单果重、果实大小及果皮厚度均显著高于自然授粉, 而果形指数则显著降低。杂交授粉果实明显产生种子, 其中早熟沙田柚授粉果实的种子数最多, 但其种子单粒重显著低于其他品种授粉处理。除非洲柚授粉处理外, 其他品种授粉处理果实可食率均显著低于自然授粉处理, 而可溶性固形物(TSS)含量均显著高于自然授粉处理。杂交授粉处理果实总酸(TA)含量显著高于自然授粉处理, 而固酸比(TSS/TA)则显著低于自花授粉处理。相关性分析显示, 果实裂瓣数与种子数呈极显著负相关, TSS含量与种子数、种子单粒重呈显著正相关; TA含量与单果重、果皮厚度、种子数等呈极显著正相关, 与可食率、TSS/TA呈极显著负相关。综合评价结果表明, 越南青柚和早熟沙田柚授粉处理的果实综合得分高于自然授粉处理。不同品种授粉虽能显著改善果实外观、提升TSS含量, 但也会因父本影响而导致可食率下降和TA含量增加, 果实风味品质降低。鉴于不同品种授粉在果实性状上表现各异、互有优势, 建议在东试早柚生产中作授粉树配置及品质改良时, 需根据目标性状审慎选择父本品种, 以实现果实外观与内在品质的协同提升。

[关键词] 东试早柚; 授粉; 坐果率; 果实品质; 综合评价

中图分类号: S666 文献标识码: A 文章编号: 1672-450X(2026)03-0023-07

Effects of Different Pollination Cultivars on Fruit Quality of Dongshizao Pomelo

XU Xiangzeng, ZHANG Xiaojiao, ZHANG Caihong, DENG Qinlin, GAO Shide*

Yunnan Institute of Tropical Crops, Jinghong 666100, China

Abstract: The objective of this study was to investigate the effects of different pollination cultivars on the fruit quality of Dongshizao pomelo, with the aim of providing a theoretical foundation for the selection of pollinizer trees and the improvement of fruit quality. Dongshizao pomelo was used as the female parent and five pomelo cultivars with different genetic backgrounds as male parents for cross-pollination. The fruit setting rate and 15 fruit trait indicators were measured, and a comprehensive evaluation was conducted using the subordination function method. The results showed that significantly higher fruit set rate was achieved in Dongshizao pomelo through cross-pollination. Furthermore, the single fruit weight, fruit longitudinal and transverse diameters, and peel thickness were significantly higher than the natural pollination fruit, while the fruit shape index was significantly decreased. A substantial quantity of seeds was generated through cross-pollination. While fruit pollinated by Early-maturing Shatian pomelo produced the highest number of seeds, the individual seed weight was significantly lower than the others. With the exception of the African pomelo pollination treatment, all other pollination treatments resulted in a fruit edible rate that was significantly lower than that of naturally pollinated fruits. However, the total soluble solids (TSS) content in these treatments was significantly higher. The total acid (TA) content of

收稿日期: 2026-03-20

基金项目: 云南省热带作物科技创新体系建设专项(RF2026)

作者简介: 徐祥增(1988—), 男, 助理研究员, 硕士, 研究方向为柚类果树栽培生理与品种选育。E-mail: xxz351966214@163.com

*通信作者: 高世德(1974—), 男, 副研究员, 硕士, 研究方向为热带果树栽培技术与推广应用。E-mail: gaoshide228@126.com

cross-pollination fruits was significantly higher than the naturally pollinated fruits, while the TSS/TA ratio was significantly lower. Correlation analysis revealed that the split carpel number had a extremely significant negative correlation with seed number. TSS content had a significantly negative correlation with seed number and single seed weight. TA content had a extremely significant negative correlation with single fruit weight, peel thickness, and seed number, and an extremely significant negative correlation with edible rate and TSS/TA ratio. Comprehensive evaluation results indicated that the fruit comprehensive scores of pollinated with Vietnam Green pomelo and Early-maturing Shatian pomelo were higher than natural pollination. Although pollination with different cultivars significantly improved fruit appearance and increased TSS content, it also decreased the edible rate and increased the TA content due to the paternal parent influence. Different pollination cultivars exhibited varied and advantageous performances across fruit traits. Therefore, to achieve a synergistic enhancement of both external and internal fruit quality in Dongshizao pomelo production, the male parent should be carefully selected based on the target traits when configuring pollinator trees.

Key words: Dongshizao pomelo; pollination; fruit setting rate; fruit quality; comprehensive evaluation

东试早柚 [*Citrus grandis* (L.) Osbeck cv. Dongshi Zaoyou] 是国内少有的早熟柚优良品种之一, 以成熟期早、酸甜适口、风味浓郁等特点深受消费者喜爱, 已成为云南热带及亚热带地区主要栽培柚品种之一。然而, 随着种植规模不断扩大, 其果实品质不稳定、个体间差异较大等问题逐渐显现^[1]。此外, 东试早柚虽具备一定程度的单性结实能力^[2], 但由于其自交不亲和特性, 生产中普遍存在坐果率低、畸形果比例偏高等问题, 已成为制约产业健康发展的主要原因。

异花授粉是果树栽培管理中的一项重要管理措施, 选择适宜的授粉品种不仅能够有效提高坐果率, 还能通过花粉直感效应显著影响果实的质量、果形及可溶性固形物含量、酸度、风味物质组成等品质指标^[3-4]。在猕猴桃^[5]、苹果^[6]、梨^[7]等果树栽培中, 常通过配置授粉树来提高产量和改善果实品质。张曼曼等^[8]研究发现, 采用优良授粉品种‘红菱’为‘富士’和‘新红星’苹果授粉后, 其果形指数, 花色苷、可溶性糖、香气物质含量均有显著提高。在柚类果树中, 授粉品种对果实外观与内在品质的影响亦存在显著差异。已有研究表明, 异花授粉可提高马家柚坐果率, 其中以信木柚授粉处理的果实大小和固酸比均明显提高^[9]; 异花授粉能显著提高青皮红心柚的可溶性固形物含量, 并降低其可滴定酸含量, 从而有效改善果实的固酸比, 其中红宝石柚授粉后果肉红色加深, 越南红柚授粉则使其果皮变薄^[10]。由此可见, 筛选具有较强花粉直感效应的授粉父本,

能够实现果实性状的定向改良, 也是解决东试早柚生产难题的有效途径之一。

鉴于此, 本研究拟通过田间授粉试验, 系统分析不同授粉品种对东试早柚坐果率、果实外观品质及内在品质的影响, 旨在筛选出能够改善东试早柚果实品质的品种, 以期为东试早柚优质高效栽培中授粉树的合理配置提供理论依据和实践指导。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验于2023年在云南省热带作物科学研究所“东试早柚优质高效栽培核心示范园”(22° 01' 49" N, 100° 76' 51" E, 海拔522.73 m)进行。园区管理条件一致, 配备水肥一体化设施。供试材料为24年生东试早柚, 砧木为酸柚, 株行距3 m × 4 m。试验共设6个处理, 以自然授粉为对照, 不同遗传背景的沙暹柚(泰国)、早熟沙田柚(中国)、沙拉瓦克(美国)、非洲柚(南非)、越南青柚(越南)为父本进行人工授粉。于3月10日, 每个处理选取50个花序, 摘除已经开放和未成熟的花蕾, 每个花序保留1朵当天即将开放的花蕾, 去除花瓣和花药, 用毛笔蘸取父本花粉均匀涂抹于柱头上, 立即套袋并挂牌标记。

1.2 试验方法

2023年4月10日, 第二次生理落果结束后统计坐果率。9月5日果实成熟后采收, 每个处理选取5个成熟度一致、无病虫害危害的果实, 带回实

实验室进行各项果实性状指标测定。使用数显游标卡尺测量果实横径、纵径及果皮厚度,每个果实重复测量3次,取平均值并计算果形指数;使用电子天平称量单果重、种子重、果肉质量、果汁质量,计算可食率和出汁率,并统计每个果实的囊瓣数、裂瓣数和种子数。使用柑橘专用糖酸仪PAL-BX/ACID 1(ATAGO, Japan)测定可溶性固形物(TSS)含量和总酸(TA)含量,并计算固酸比(TSS/TA);可溶性糖(SS)含量的测定采用蒽酮比色法^[11]。

1.3 数据处理

采用Microsoft Excel 2010对数据进行整理和统计,利用SPSS 19.0软件进行单因素方差分析,并运用Sigma Plot 10.0软件作图。采用隶属函数法^[12-13]对果实品质进行综合评价,根据各指标对果实品质的影响,将其划分为趋大、趋小和趋中3个类型,并依据表1所示公式分别计算各指标的隶属函数值,以其算术平均值作为果实品质的综合得分。

表1 果实性状指标得分计算规则

指标类型	适用指标	得分	
		$X > X_{ave}$	$X < X_{ave}$
趋大指标	可食率、出汁率、TSS含量、TSS/TA、SS含量	$=50+50(X-X_{ave})/(X_{max}-X_{ave})$	$=50+50(X-X_{ave})/(X_{ave}-X_{min})$
趋中指标	单果重、果实横径、果实纵径、果形指数、囊瓣数、种子数、种子单粒重	$=100-100 (X-X_{ave}) /(X_{max}-X_{ave})$	$=100-100 (X-X_{ave}) /(X_{ave}-X_{min})$
趋小指标	果皮厚度、裂瓣数、TA含量	$=50-50(X-X_{ave})/(X_{max}-X_{ave})$	$=50-50(X-X_{ave})/(X_{ave}-X_{min})$

2 结果与分析

2.1 授粉品种对东试早柚坐果率的影响

从图1可看出,东试早柚自然坐果率为13.06%,而异花授粉能显著提高东试早柚坐果率,其中沙拉瓦克授粉坐果率最高(94.0%),其次为沙暹柚授粉(坐果率为88.0%),早熟沙田柚授粉坐果率为82.0%,非洲柚授粉坐果率78.0%,均显著高于越南青柚授粉坐果率(40.0%)。

2.2 授粉品种对果实表现性状的影响

从表2可看出,异花授粉对东试早柚的果实性状指标具有显著性影响。在单果重方面,异花授粉果实单果重均显著高于自然授粉处理,其中非洲柚授粉果实单果重最大(1 555.98 g),显著高于越南青柚授粉和自然授粉处理,但与其他异花授粉处理间无显著性差异。在果实大小方面,异花授粉果实横径和纵径均显著高于自然授粉处理,而果形指数则显著低于自然授粉处理。其中,沙拉瓦克授粉果实横径和纵径均为最大,且显著高于越南青柚授粉处理。果皮厚度方面,自然授粉果皮最薄(9.96 mm),显著低于所有异花授粉处理;沙拉瓦克授粉果皮厚度(19.44 mm)最大,

沙暹柚授粉果皮厚度(18.23 mm)次之,且都显著高于其他异花授粉处理。

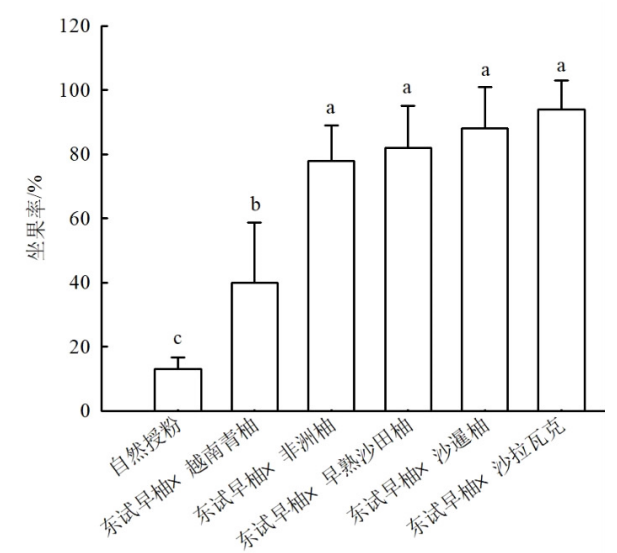


图1 不同品种授粉组合的东试早柚坐果率

注:图中不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

异花授粉能够提高果实囊瓣数,其中沙拉瓦克、早熟沙田柚、非洲柚授粉果实的囊瓣数显著高于自然授粉处理。与自然授粉相比,异花授粉对果实裂瓣数无显著性影响,但越南青柚授粉果

实的裂瓣数显著高于沙拉瓦克、早熟沙田柚授粉处理。东试早柚因自交不亲和产生无籽果实,异花授粉后果实均明显产生种子。其中,早熟沙田柚授粉果实的种子数最多(194粒),显著高于越南青柚(102.2粒)和沙暹柚(153.4粒)授粉处理;

但其种子单粒重(0.18 g)显著低于其他异花授粉处理。这表明早熟沙田柚授粉后形成的果实种子数量多但单粒重较小,而越南青柚授粉后的果实种子数量较少,但种子相对较大。

表 2 不同品种授粉东试早柚果实性状指标

处理	单果重/g	果实横径/mm	果实纵径/mm	果形指数	果皮厚度/mm
自然授粉	914.22±56.66c	129.25±5.82c	134.73±2.08c	1.04±0.05a	9.96±1.16c
东试早柚×沙拉瓦克	1530.08±57.43ab	172.37±4.03a	169.17±7.45a	0.98±0.02b	19.44±2.00a
东试早柚×早熟沙田柚	1492.50±85.68ab	168.08±2.17a	164.20±5.45ab	0.98±0.02b	15.57±1.91b
东试早柚×越南青柚	1421.50±115.39b	161.42±4.43b	161.24±4.26b	1.00±0.02b	15.44±2.38b
东试早柚×沙暹柚	1484.26±78.59ab	167.48±3.18a	162.95±2.45ab	0.97±0.03b	18.23±1.23a
东试早柚×非洲柚	1555.98±110.20a	170.66±5.45a	167.06±6.27ab	0.98±0.01b	17.26±1.92ab

处理	囊瓣数	裂瓣数	种子数	种子单粒重/g
自然授粉	14.20±1.10b	3.60±0.89ab	0.00±0.00d	0.00±0.00c
东试早柚×沙拉瓦克	16.80±1.30a	2.00±0.71b	170.80±11.82ab	0.22±0.01a
东试早柚×早熟沙田柚	17.80±3.27a	2.40±1.14b	194.00±7.31a	0.18±0.01b
东试早柚×越南青柚	15.40±1.82ab	5.60±2.61a	102.20±22.25c	0.23±0.02a
东试早柚×沙暹柚	16.20±1.30ab	4.20±2.28ab	153.40±53.83b	0.21±0.02a
东试早柚×非洲柚	17.60±0.89a	3.20±1.92ab	179.00±19.01ab	0.22±0.02a

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

2.3 授粉品种对果实内在品质的影响

从表3可看出,异花授粉对东试早柚出汁率无显著性影响,但明显降低其可食率。其中,自然授粉果实可食率为60.02%,与非洲柚授粉果实之间差异不显著,但显著高于其他异花授粉处理;沙拉瓦克授粉果实的可食率最低(51.62%),显著低于自然授粉和非洲柚授粉果实。异花授粉对果实可溶性糖(SS)含量无显著性影响,但对其可溶性固形物(TSS)含量、总酸(TA)含量及固酸比(TSS/TA)的影响达到显著性水平。异花授粉果实的可溶性固形物含量为10.96%~11.76%,而

自然授粉果实的为10.54%。除非洲柚授粉的果实与自然授粉无显著差异外,其余异花授粉处理的可溶性固形物含量均显著高于自然授粉处理。其中,以沙暹柚授粉处理的含量最高,达11.76%,显著高于自然授粉处理。此外,异花授粉处理显著提高了东试早柚果实总酸含量,是自然授粉处理的1.48~1.60倍;而固酸比较自然授粉处理低5.85~7.29,均显著低于自花授粉处理,但各异花授粉处理间的总酸含量和固酸比均无显著性差异。

表 3 不同品种授粉东试早柚果实内在品质指标

处理	可食率/%	出汁率/%	SS 含量/%	TSS 含量/%	TA 含量/%	TSS/TA
自然授粉	60.02±1.55a	68.49±1.62a	4.51±0.95a	10.54±0.49c	0.52±0.09b	20.96±3.92a
东试早柚×沙拉瓦克	51.62±2.23c	67.46±2.36a	3.73±0.63a	11.36±0.32ab	0.83±0.03a	13.67±0.75b
东试早柚×早熟沙田柚	53.16±3.92bc	67.24±2.44a	4.39±1.30a	11.36±0.46ab	0.77±0.11a	15.11±2.54b
东试早柚×越南青柚	53.48±4.02bc	66.46±7.71a	4.42±0.54a	11.18±0.23ab	0.77±0.05a	14.66±1.15b
东试早柚×沙暹柚	54.13±3.01bc	64.21±4.29a	3.83±0.48a	11.76±0.72a	0.83±0.10a	14.14±1.38b
东试早柚×非洲柚	56.11±2.63ab	67.31±3.67a	4.07±0.36a	10.96±0.43bc	0.80±0.09a	13.85±1.65b

2.4 果实性状指标间的相关性分析

为探究果实各性状之间的内在关系,对15个果实相关性状进行了相关性分析,结果如表4所

示。分析结果表明,各性状间存在不同程度的相关性,部分性状间达到显著或极显著水平。在果实外观方面,单果重与果实横径、纵径及果皮厚

度均呈极显著正相关;而果形指数则与单果重、横径及果皮厚度呈显著或极显著负相关。在果实内在品质方面,裂瓣数与种子数呈极显著负相关。可食率与单果重、果实纵/横径、果皮厚度、种子数及单粒重均呈显著或极显著负相关。在果实风味品质方面,可溶性固形物含量与种子数、单粒重呈显著正相关,与果形指数呈显著负相关。总酸含量与单果重、果实纵/横径、果皮厚度、种子数及单粒重均呈极显著正相关,而与可食率和固酸比呈极显著负相关。固酸比则与果实外观性状指标、种子性状及总酸含量呈极显著负相关,但与果形指数和可食率呈极显著正相关。可溶性糖含量与果皮厚度呈显著负相关,与可食率呈显著正相关,与其他性状相关性不显著,说明果皮越厚的果实,其糖含量和可食率越低。

表 4 果实性状指标间的相关性

性状指标	单果重	果实横径	果实纵径	果形指数	果皮厚度	囊瓣数	裂瓣数	种子数	种子单粒重	可食率	出汁率	TSS 含量	TA 含量	TSS/TA
果实横径	0.967**													
果实纵径	0.937**	0.938**												
果形指数	-0.519**	-0.619**	-0.31											
果皮厚度	0.643**	0.713**	0.688**	-0.390*										
囊瓣数	0.401*	0.471**	0.35	-0.484**	0.487**									
裂瓣数	-0.22	-0.26	-0.16	0.34	-0.24	-0.06								
种子数	0.834**	0.857**	0.739**	-0.662**	0.605**	0.545**	-0.541**							
种子单粒重	0.836**	0.867**	0.852**	-0.448*	0.716**	0.28	-0.14	0.652**						
可食率	-0.688**	-0.669**	-0.681**	0.27	-0.452*	-0.10	0.08	-0.528**	-0.739**					
出汁率	0.01	-0.05	-0.10	-0.07	-0.26	-0.13	-0.16	-0.02	-0.12	0.14				
TSS 含量	0.32	0.36	0.25	-0.383*	0.34	0.15	-0.23	0.493**	0.379*	-0.33	-0.23			
TA 含量	0.626**	0.701**	0.605**	-0.546**	0.70**	0.32	-0.27	0.626**	0.707**	-0.653**	-0.15	0.432*		
TSS/TA	-0.630**	-0.702**	-0.623**	0.521**	-0.611**	-0.25	0.21	-0.544**	-0.692**	0.571**	0.06	-0.18	-0.93**	
SS 含量	-0.28	-0.28	-0.31	0.06	-0.388*	-0.17	0.08	-0.17	-0.22	0.404*	0.04	0.12	-0.30	0.22

注:**表示在 0.01 水平上显著相关,*表示在 0.05 水平上显著相关。

2.5 不同品种授粉果实性状综合评价

采用隶属函数法对果实性状进行综合评价,结合各项指标间的相关性分析结果,将 15 项指标划分为趋大指标、趋小指标和趋中指标。其中:趋大指标是指数值越大越好的指标,包括可食率(U_{10})、出汁率(U_{11})、可溶性固形物含量(U_{12})、固酸比(U_{14})、可溶性糖含量(U_{15})等 5 项指标;趋小指标是指数值越小越好的指标,包括果皮厚度

(U_5)、裂瓣数(U_7)和总酸含量(U_{13});趋中指标是指数值适中(以平均值为适中值)为最佳的指标,包括单果重(U_1)、果实横径(U_2)、果实纵径(U_3)、果形指数(U_4)、囊瓣数(U_6)、种子数(U_8)、种子单粒重(U_9)等 7 项指标。得分越高,说明果实综合品质越好。综合评价结果如表 5 所示,越南青柚授粉果实综合评分最高(53.56),其果实大小适中,种子数量中等,但种子较大,且裂瓣数较多。

表 5 不同品种授粉果实性状综合评价

处理	隶属函数值															综合得分	排名
	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_7	U_8	U_9	U_{10}	U_{11}	U_{12}	U_{13}	U_{14}	U_{15}		
自然授粉	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	47.62	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	100.00	100.00	100.00	43.17	3
沙拉瓦克	16.58	0.00	0.00	42.11	0.00	68.18	100.00	38.18	15.69	0.00	68.27	64.71	0.00	0.00	0.00	27.58	6
早熟沙田柚	40.63	39.68	53.59	21.05	53.40	0.00	86.67	0.00	90.20	24.63	61.60	64.71	41.08	5.04	82.78	44.34	2
越南青柚	86.08	99.61	85.48	82.35	54.49	56.25	0.00	76.71	0.00	29.67	42.39	48.98	41.08	13.57	86.74	53.56	1
沙暹柚	45.91	45.22	67.06	0.00	17.57	93.75	33.33	66.81	31.37	40.12	0.00	100.00	0.00	28.46	12.05	38.78	4
非洲柚	0.00	15.86	22.80	21.05	31.62	13.64	60.00	24.68	15.69	62.87	63.68	32.14	21.16	41.62	39.85	31.11	5

其次为早熟沙田柚授粉果实,综合评分为44.34,主要果实性状特征为囊瓣较多,种子数量多但大小中等,裂瓣数相对较少,可食率和固酸比相对较低。沙暹柚、非洲柚和沙拉瓦克授粉果实综合得分分别为38.78、31.11和27.58,均低于自然授粉果实综合得分(43.17)。

3 讨论与结论

在杂交授粉过程中,不同授粉品种的花粉特性,如花粉大小、形态、活力和内源激素含量,以及品种间的授粉亲和性、花柱中内源激素与多胺含量等均存在差异,这些因素直接影响花粉在柱头上的萌发和受精过程,而授粉亲和性较好的品种有助于提高坐果率和改善果实品质^[14-15]。本研究,不同授粉品种均能显著提高东试早柚的坐果率,这一结果在前期研究^[1, 16]中也得到了证实。不同品种授粉的坐果率存在显著性差异,这可能归因于授粉品种间的遗传差异会影响杂交授粉的亲和力,而亲和力较低的杂交组合往往坐果率较低^[9, 17]。本研究结果表明,异花授粉显著提高东试早柚单果重、果实横径、果实纵径、果皮厚度等果实外观品质指标,这可能是由于异花授粉影响果实内源激素含量的变化,进而调控果实生长,最终导致果实产生差异^[18]。而不同品种授粉果实的外观品质上存在显著性差异,表明父本花粉的遗传特性对东试早柚果实外观品质具有显著性影响,这与在马家柚^[9]、琯溪蜜柚^[19]、玉皇柚^[20]等柚类果树上的研究结果相一致。东试早柚为自交不亲和品种,单性结实形成无籽果实,而用不同品种授粉后能正常产生种子,且不同品种授粉所结果实的种子数和单粒重存在差异,这可能与授粉品种的遗传特性有关^[21]。

异花授粉不仅影响果实的外观品质,也显著调控其内在品质与风味特性,但不同授粉品种对果实品质的影响存在差异^[3-4]。曾莎芮等^[22]研究发现,以文旦柚授粉能显著提高梅州金柚的可食率,而以三红柚授粉则显著降低其可食率;同时,异花授粉均显著提升其出汁率。赵凌吉等^[23]研究显示,金沙柚经马家柚和广丰酸柚授粉后,其可食率显著高于三红蜜柚授粉处理,而三红蜜柚

授粉则显著提高金沙柚的出汁率;此外,以马家柚、红肉蜜柚和沙田柚授粉可显著提高金沙柚的可溶性固形物含量,而以鸡尾葡萄柚授粉则显著增加其可滴定酸含量,其中马家柚授粉处理的固酸比优于其他处理。本研究结果显示,异花授粉对东试早柚出汁率和可溶性糖含量无显著性影响;除非洲柚授粉后的果实可食率略低于自然授粉外,其他品种授粉后的果实可食率均显著低于自然授粉。同时,异花授粉均显著提高了果实可溶性固形物和总酸含量,而固酸比则显著降低。这说明,异花授粉虽能有效改善柚果实内在品质,但其效果受父本花粉遗传特性的影响。

本研究中,果实各性状间具有显著相关性。其中,果皮厚度与单果重、果实横、纵径呈极显著正相关,表明果实越大则果皮越厚;可食率与外观品质及种子性状指标呈显著或极显著负相关,说明异花授粉导致果实变大、果皮变厚及种子增多是导致可食率下降的主要原因。刘冬峰等^[24]研究发现,早香柚果实内裂与种子有无,以及异花授粉后种子数量密切相关。本研究发现,果实裂瓣数与种子数呈极显著正相关,而与种子单粒重无显著相关性,表明果实囊瓣的开裂程度主要受异花授粉形成的种子数量影响,而与种子大小无关。总酸含量与外观品质及种子性状指标呈极显著正相关,与可食率、固酸比呈极显著负相关,说明果实越大、果皮越厚、种子越多,可食率越低且酸度越高。固酸比与外观品质及种子性状指标、总酸含量呈极显著负相关,与果形指数、可食率呈极显著正相关,表明果实越小、果皮越薄、种子越少、酸度越低,则固酸比越高,风味品质越好。鉴于果实各性状间普遍存在相关关系,单一指标高低并不能够评价果实综合品质。为此,本研究将15项果实性状指标分为趋大指标、趋小指标和趋中指标3个类型,以各指标的平均值为基准,最大值和最小值为界限,分别计算各项指标得分,既避免指标信息丢失,也能充分体现数据携带的信息,使得综合评价结果更客观合理^[13]。综合评价结果表明,越南青柚和早熟沙田柚授粉处理的果实综合得分高于自然授粉处理。其中,越南青柚授粉果实大小适中,但种子

较大且裂瓣数偏多;早熟沙田柚授粉果实种子数量较多、大小中等,裂瓣较少,但可食率和固酸比偏低。

综上所述,异花授粉虽能显著提高坐果率、单果重、果实大小等外观指标,并提升可溶性固形物含量,但因受父本遗传特性的影响,果实可食率显著下降、总酸含量增加及固酸比降低。在供试的5个父本品种中,越南青柚和早熟沙田柚授粉处理的果实综合得分高于自然授粉处理,但不同品种授粉的果实性状表现各异、互有优势。因此,在东试早柚生产中作授粉树配置及品质改良时,需根据目标性状审慎选择父本品种,以实现果实外观与内在品质的协同提升。

参考文献:

- [1] 徐祥增,邓乐晔,张小娇,等. 柚和葡萄柚花粉直感对东试早柚果实生长及品质的影响[J]. 果树学报,2024,41(4):665-678.
- [2] 刘承浪,黄文铠,闫素云,等. ‘东试早柚’果实无核成因探究[J]. 华中农业大学学报,2024,43(5):91-97.
- [3] 杨芩,刘雅兰,张婷婷,等. 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.
- [4] 洪俊彦,黄仁,黄春颖,等. 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.
- [5] 黄晗羽,莫沙,陈梦洁,等. 不同授粉品种花粉对湘猕枣果实生长和品质的影响[J]. 果树学报,2024,41(4):725-737.
- [6] 王宝侠,韩永增,包敖民,等. 授粉品种对‘塞外红’苹果果实品质的影响[J]. 经济林研究,2023,41(4):22-30,39.
- [7] 曼苏尔·那斯尔,杜润清,陈湘颖,等. 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.
- [8] 张曼曼,王增辉,毛云飞,等. 不同授粉组合对‘富士’和‘新红星’苹果品质的影响[J]. 中国农业科学,2018,51(18):3551-3560.
- [9] 毛桑隐,路志浩,张祥,等. 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.
- [10] 毕光林,胡玲,陈林杨,等. 异花授粉对青皮红心柚坐果率、果实生长发育及品质的影响[J]. 果树学报,2026,43(2):346-355.
- [11] 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,2000:195-197.
- [12] 徐祥增,邓乐晔,张彩虹,等. 柚果实性状变异分析与优良种质筛选[J/OL]. 热带作物学报,2025-11-27. <https://link.cnki.net/urlid/46.1019.S.20251127.0853.002>.
- [13] 张慧艺,汪丽霞,吴伊静,等. 18份胡柚种质果实品质分析与综合评价[J]. 果树学报,2024,41(6):1033-1043.
- [14] 孙天雨,温玥,田嘉,等. 不同授粉处理对库尔勒香梨果实偏斜和品质的影响[J]. 江苏农业科学,2026,54(1):176-184.
- [15] 杨芩,刘雅兰,张婷婷,等. 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.
- [16] 易小艳,赵志平,陈彭坤,等. 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.
- [17] 李学铃,刘英,吴文龙,等. 不同倍性蓝莓杂交组合的结实特性及果实感官品质研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2025,49(3):41-51.
- [18] 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(1):27-31.
- [19] 王绍华,寸待泽,龙春瑞,等. 云南小香橼授粉对琯溪蜜柚果实生长发育及品质的影响[J]. 江西农业学报,2017,29(5):43-45.
- [20] 狄明慧,张红艳,李登朝,等. 采收时期和授粉对玉皇柚品质的影响[J]. 华中农业大学学报,2022,41(4):210-216.
- [21] 吴方方,杨海建,曹立新,等. 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.
- [22] 曾莎芮,马瑞丰,刘蕊,等. 不同品种授粉树对梅州金柚果实品质的影响[J]. 中国果树,2025(8):68-77.
- [23] 赵凌吉,吴霞,刘德春,等. 基于主成分分析综合评价不同授粉品种对金沙柚坐果和果实品质的影响[J]. 果树学报,2025,42(12):2885-2897.
- [24] 刘冬峰,林绍生,陈巍,等. 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.