果 树 学 报 2024，41（2）：282-293
Journal of Fruit Science

DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.20230462

基于主成分分析综合评价6个杂交授粉组合的马家柚果实品质

徐宸宇，唐启正，刘慧宇，吴巨勋，伊华林*

（华中农业大学园艺林学学院·果蔬园艺作物种质创新与利用全国重点实验室，武汉 430070）

摘 要：【目的】探究不同杂交授粉组合马家柚果实营养成分特征性状，综合评价杂交果实品质，为选择适宜的马家柚授粉父本提供数据支撑。**【方法】**通过品质指标变异系数分析、相关性分析和主成分分析对2020年广丰地区6个杂交组合马家柚果实样品共18项品质性状指标进行综合评价。**【结果】**单果质量、果皮厚度、蔗糖含量、柠檬酸含量等在内的共18项品质性状指标间差异显著，变异系数为6.35%~114.45%。通过主成分分析提取到5个主成分，累积贡献率可达85.001%，分别反映了果实糖酸、色泽、营养、外观、香气及苦味品质指标。其中，果实可溶性糖和有机酸各组分含量以及甜度值为评价杂交授粉马家柚果实品质的重要因子。**【结论】**主成分因子得分及排序表明鸡尾葡萄柚为马家柚的最佳授粉父本。

关键词：柑橘；马家柚；杂交授粉；主成分分析；品质提升

中图分类号：S666.3 **文献标志码：**A **文章编号：**1009-9980(2024)02-0282-12

Comprehensive evaluation on fruit quality of six hybrid pollination combinations of Majiayou based on the principal component analysis

XU Chenyu, TANG Qizheng, LIU Huiyu, WU Juxun, YI Hualin*

(College of Horticulture & Forestry Sciences of Huazhong Agricultural University/National Key Laboratory for Germplasm Innovation & Utilization of Horticultural Crops, Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract:【Objective】Different hybrid pollination combinations show significant differences in fruit quality of Majiayou. However, research on cross pollination of Majiayou mainly focuses on the evaluation and analysis of conventional quality. There are few studies that comprehensively evaluate the secondary metabolites such as important flesh color indicators like lycopene, flavor indicators like naringin, and aroma substances based on variety characteristics. In order to provide valuable information and evaluation tools for breeders, a total of 18 pomelo fruit quality traits were used for comprehensive evaluation to select suitable male parents for pollination and provide data support for production.【Methods】The fruit setting rate, important secondary metabolites like lycopene and naringin, and major volatile substances of six hybrid pollination combinations of Majiayou were examined, and then the early data on 18 quality traits including single fruit weight, peel thickness, number of seeds, soluble solids, titratable acid, sucrose, glucose, fructose, citric acid, malic acid and sweetness value were used for coefficient of variation (*CV*) analysis, correlation analysis, principal component analysis (PCA), and comprehensive score ranking to evaluate the fruit quality traits of different hybrid pollination combinations in Majiayou.【Results】There were significant differences in the 18 quality traits of fruit among different hybrid pollinated combinations of pomelo, with a coefficient of variation ranging from 6.35% to 114.45%. Among them, the highest fruit setting rate hybrid combination was Majiayou × Tuyou No. 4 (T4) of 55.3%, while Majiayou × Cocktail grapefruit (JW) had the lowest fruit setting rate of 22.9%.

收稿日期：2023-11-09 **接受日期：**2023-12-17

基金项目：国家现代农业（柑橘）产业技术体系专项（CARS-26）；抚州市揭榜挂帅项目（XMBH00091）

作者简介：徐宸宇，男，在读博士研究生，研究方向为柑橘常规杂交育种与品质调控。E-mail：798636860@qq.com

***通信作者** Author for correspondence. Tel：027-87284008，E-mail：yihualin@mail.hzau.edu.cn

The contents of lycopene, naringin, and volatile substances in the juice cells of different hybrid pollination combinations of pomelo were measured. The results showed that different male parents had a significant impact on the secondary metabolites in the juice cells of Majiayou. Among them, the contents of lycopene in Majiayou × Tuyou No. 1 (T1), Majiayou × Tuyou No. 2 (T2) and T4 treatments were significantly higher than those in natural pollination (control), while there was no significant difference between Majiayou × Tuyou No.3 (T3), Majiayou × HB pummelo (HB), and JW treatments and control. In terms of naringin content, HB treatment significantly reduced the naringin content in the fruit, being only 4.05 $mg \cdot g^{-1}$, and there was no significant difference between other treatments and control. The composition and proportion of volatile substances in fruits of different hybrid pollination combinations were as follows: the volatile substances in the juice cells of naturally pollinated Majiayou were mainly sesquiterpenoids, accounting for 44%; next were monoterpenoids, accounting for 24%; Aromatic hydrocarbons accounted for 13%; Other volatile substances (aldehydes, acids, esters and aldehydes) accounted for a total of 20%. Compared to control, there were significant differences in the proportion of main volatile substances of different hybrid pollination combinations, specifically manifested as an increase in the proportion of sesquiterpenoids and a decrease in the proportion of monoterpenes. The proportion of sesquiterpenoids of T1 increased to 60%, which was 16% higher than that of control; Monoterpenoids only accounted for 4%, a decrease of 20% compared to control. Except for T3, the proportion of volatile substances of the hybrid combinations was significantly different, while the proportion of various substances of other four male parents (T2, T4, JW and HB) was similar to that of T1. With T3 combination, the proportion of sesquiterpenoids and monoterpenes decreased to 34% and 9%, respectively, compared to control; Aromatic hydrocarbon substances increased to 16%. The proportion of other volatile substances increased to a certain extent, with aldehydes, acids, esters and aldehydes increasing by 11%, 5%, 5% and 1%, respectively. Analyzing the specific main volatile substances, T3 treatment with the highest content of gemacrene D. significantly reduced the content of gemacrene D in fruits, being only 11.71 $\mu g \cdot g^{-1}$ compared to control, the decrease was 64.1%, and there was no significant difference in the fruits of the other five hybrid pollination combinations. The correlation between different indexes was analyzed. The quality traits of different hybrid pollination combinations were different, and the coefficient of variation ranged from 6.35% to 114.45%. Correlation analysis results showed there were extremely significant or significant correlations among them. The correlation analysis results indicated that there was a highly significant or significant correlation between similar indicators like sugar and acid components. In terms of appearance quality, there was a significant negative correlation between the number of seeds and the thickness of the fruit peel. In terms of nutritional color and flavor, ascorbic acid was significantly and positively correlated with fructose, glucose and malic acid, while naringin was significantly and positively correlated with ascorbic acid. The correlation results reflected consistency and also reflected differences in some indicators like fruit appearance and internal quality due to different parental choices. Principal component analysis was conducted on 18 standardized trait indicators, and a total of 5 principal components were extracted from the 18 quality indicators. The cumulative contribution rate of these 5 principal components reached 85.001%, indicating that the first 5 principal components had already covered most of the fruit quality trait information. The contribution rate of the first principal component was 30.416%, including soluble sugar, organic acid and sweetness value components: fructose (0.930), sucrose (0.832), glucose (0.938), citric acid (0.753), malic acid (0.722) and quinic acid (0.674) and those indicators had higher positive eigenvalues in PC1, indicating that as the contribution rate of the first principal component increased, the contents of sugar and acid related indicators

increased. Finally we ranked the scores of the 5 top principal components based on their variance contribution rates. Among them, JW had the highest comprehensive quality score of 1.39, T1 had a comprehensive quality score of 1.18, ranking second. The hybrid pollination treatments T3, T4, T2 and HB ranked 3-6 in sequence, and control ranked last, in which the comprehensive quality of the fruit was the worst.【Conclusion】The principal component factor score and ranking indicated that Cocktail grapefruit was the best male pollinator for Majiayou, followed by local resource Tuyou No. 1.

Key words: Citrus; Majiayou; Cross pollination; Principal component analysis; Quality improvement

杂交授粉是目前植物生产中解决部分品种自花不结实或坐果率低问题、改善现有品种性状、提质增产的有效栽培措施[1]。芸香科柑橘属中柚类品种多数自交不亲和，同时部分柚品种因缺乏单性结实能力导致坐果率较低[2]。标准化建园的单一无性系马家柚成年结果园中果实全部无籽，而混栽其他柚类品种或本地实生土柚的马家柚园区中果实则部分有籽。虽然无籽果实因食用便利广受消费者青睐，但研究发现无籽马家柚普遍存在果皮偏厚、果实粒化和裂瓣率较高以及果实风味不足等一系列不利于马家柚产业健康发展的问题[3-6]。杂交授粉可有效提升果实品质，受异源花粉影响，马家柚经杂交授粉后在单果质量、果皮厚度、固酸比和抗坏血酸含量等综合品质方面相较于无籽果实均有一定程度的改善，同时坐果率也得到了显著提升[7]。这种因外源花粉进入母本而影响杂交果实及种子的现象被称为花粉直感[8-10]，即父本可直接决定后代果实品质优劣[11]。在实际生产中，种植人员往往通过栽种授粉树或人工辅助方式使单一无性系的无籽马家柚产生一定数量的种子，进而实现果实产量和品质的提升。

前人陆续开展了针对不同杂交组合的马家柚果实品质差异研究。其中，以枳壳为父本时马家柚坐果率仅为2.0%，同时果肉中的可溶性固形物含量也显著低于自然传粉马家柚；以沙田柚为父本时马家柚纵横径增大、果肉质量和种子数均显著增加；江坝柚授粉显著提升了马家柚的可滴定酸、可溶性固形物、抗坏血酸含量等内在品质，有效改善了果实风味[12]。但目前关于马家柚适宜授粉材料的筛选与研究较少，在父本选择上也多为盲目性与随机性，授粉材料大都选自目前主栽柑橘品种，未充分发掘马家柚原产地周边的柚类资源。这不仅不利于当地柚资源的收集与保存，还可能导致地方优良种质资源的流失。此外，目前主栽柑橘品种对于柚品种特征次生代谢物的改良与提升仍十分有限。因此，针对性地改良马家柚果实关键次生代谢物质（番茄红素、柚皮苷和香气成分等），提升风味和营养品质并充分利用地方性柚类资源，对探究马家柚不同杂交授粉组合是极具现实意义的。

主成分分析法（PCA）被广泛用于园艺植物品质分析评价，基于数据降维方法，PCA可使繁多的原始变量浓缩至几个综合变量，这些主要变量涵盖了原始变量中的大部分信息，最后通过计算主成分得分，对客观性状指标进行科学评价与归纳。王思威等[13]利用相关性分析和主成分分析的方法对28份白糖罂荔枝样品的共20个品质指标进行综合评价，得到了4个贡献率高的主成分，表明了可滴定酸含量、抗坏血酸含量和甜度等指标是评价白糖罂荔枝果实品质的重要因子，分析结果可为荔枝育种和果品评级提供参考。王小龙等[14]对父本美乐和抗寒性母本华葡1号的12株杂交后代株系的百粒质量及糖酸、总酚、黄烷醇和总黄酮含量等15项综合品质指标进行主成分分析，以筛选高丰产性和抗寒性的酿酒葡萄杂交株系。15个品质指标共划分为4个主成分，累积贡献率可达84.59%，分别反映了杂交株系的籽酚类、皮酚类物质含量以及果实大小和可溶性固形物含量指标，综合得分表明株系XC8综合表现最佳，适宜在东北及西北地区进行推广。

笔者以4个广丰地区本地土柚、HB柚和鸡尾葡萄柚为父本与马家柚进行杂交授粉试验，测定杂交授粉马家柚特征次生代谢物质含量，并结合相关性分析和主成分分析的方法综合评价杂交果实品质，旨在筛选适宜马家柚的授粉父本，同时挖掘广丰周边地区具有利用潜力的柚类资源，提升果实综合品质，为消费者提供更优质的果品。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验选取江西省上饶市广丰县湖丰镇沁园山庄园区中树势一致且无明显病虫害的9年生马家柚成年结果树作为母本树，株行距为4 m×5 m。父本分

别位于母本树周边地区（湖丰镇回树村、大南镇三排村等）的4株树势强旺的本地土柚，均为自然实生树，平均树高6 m，部分风味和果形较优，依次命名为土柚1号、土柚2号、土柚3号和土柚4号（处理编号为T1、T2、T3、T4），以及华中农业大学柑橘种质资源圃中的HB柚（处理编号为HB）与鸡尾葡萄柚（处理编号为JW），对照组（Control）为自然传粉马家柚。单株为1个生物学重复，3次重复。

1.2　试验方法

1.2.1　花粉的收集与制备　于2020年4月20日采集父本单株上尚未完全开放的花朵，分别收集装入自封袋内带回实验室。剥离花瓣并只留下花药置于干净滤纸上，放入26~28 ℃烘箱内干燥约48 h，待花药完全干燥后分别装入2 mL离心管中，于−20 ℃冰箱中保存备用。

1.2.2　杂交授粉　于马家柚盛花期（5月1日）进行杂交授粉试验。选择树冠中下部外围的健壮结果枝，疏除枝上已经开放、未成熟的花以及畸形花。用镊子小心将花瓣及花药剥离，只留下柱头，再用小号毛笔蘸取离心管内的干燥花粉点在柱头上，套袋并于授粉枝末端挂牌。

1.2.3　坐果率和果实品质测定　授粉时记录各杂交组合点授花朵数，并于完成授粉后的3~5 d内摘袋。于第2次生理落果期后统计坐果数，计算不同杂交授粉组合的马家柚坐果率。

各处理于每单株树的中下部的不同方位随机选取3个大小均一的成熟果实，每个处理共采集9个果实进行后续品质指标测定[15]。

1.2.4　番茄红素及柚皮苷含量测定　参考姜启航[16]的方法提取番茄红素。流动相的配制：A相，乙腈∶甲醇＝3∶1（每1000 mL加入三乙胺500 μL），含0.01% 2，6-二叔丁基-4-甲基苯酚（BHT）；B相，100%甲基叔丁基醚（MTBE）（含0.01% BHT），超声脱气30 min。色谱检测系统：Waters 1525，2996二级阵列检测器，717自动进样器，YMC C_{30}类胡萝卜素专用色谱柱（4.6 mm×150 mm，5 μm），流速1 mL·min^{-1}，进样量20 μL，柱温箱30 ℃。所用试剂均为色谱级。

参考丁帆[17]的方法提取柚皮苷。流动相的配制：A相，0.3%甲酸（超纯水配制）；B相，甲醇，超声脱气20~30 min。色谱柱：C_{18}（150 mm×4.6 mm，5 μm），流速1 mL·min^{-1}，进样量20 μL，柱温箱温度35 ℃。柚皮苷标准品购自上海源叶生物科技有限公司，所用试剂均为色谱级。

1.2.5　挥发性物质含量测定　参考刘翠华[18]的方法提取和检测挥发性物质含量，并做略微调整。取液氮冻存的马家柚汁胞组织研磨后加入500 μL ddH_2O和含有1 μg·mL^{-1}壬酸甲酯（纯度≥99.8%，Sigma公司，美国）的MTBE（HPLC级，Fisher美国）涡旋混匀，置于超声波清洗仪（SB-5200D，宁波新芝）中低温萃取40 min，10 000 r·min^{-1}离心收集上层有机相，过0.22 μm滤膜后注射至带有内插管的棕色进样瓶内，待上机检测。色谱柱为TRACE TR-5 MS柱（30 m×0.25 mm，0.25 μm，Thermo Scientific，Bellefonte，PA，USA）。载气为高纯氦气（99. 999%），分流比30∶1，恒流模式，流速为1 mL·min^{-1}。进样口、离子源和传输线的温度分别为250 ℃、260 ℃和280 ℃。

GC的升温程序如下：40 ℃保持3 min，然后以2 ℃·min^{-1}的速度升温至160 ℃并保留1 min，然后以5 ℃·min^{-1}的速度升温至200 ℃并保留1 min，最后以8 ℃·min^{-1}的速度升温至240 ℃并保留3 min。MS的条件如下：EI（电子轰击）离子源，电子轰击能量70 eV，正离子扫描模式，质量扫描范围45~400 m·z^{-1}，3 min后开始采集质谱数据[19]。

1.3　数据统计与分析

试验数据采用Excel 2016软件进行统计与作图，采用SPSS 26软件进行差异显著性分析、相关性分析和主成分分析。

参考Zhang等[20]的方法计算甜度值，并略有调整，果糖、蔗糖、葡萄糖甜度分别为175、100和75，本研究中山梨醇不计算在内。甜度值/(g·L^{-1})=(蔗糖含量×100+果糖含量×175+葡萄糖含量×75)/1000。

各主成分因子得分Y的计算方法：首先计算出主成分旋转载荷矩阵U，$U_i=A_i/\sqrt{\lambda}$；U_i表示第i个主成分，i=1，2，…，n，A为旋转后的成分矩阵，λ为各组分特征值。计算出主成分旋转矩阵U后进一步通过$Y_i=U_i\times X_i$（X_i为各原始变量标准化后的值）求出各主成分得分，最后通过各主成分得分Y_i计算出不同杂交组合综合得分$F=W_i\times Y_i/W_{i总}$（W_i为各主成分方差贡献率）。

2　结果与分析

2.1　不同授粉组合马家柚坐果率分析

由表1可以看出，除鸡尾葡萄柚处理外，其余杂

交授粉组合的坐果率均高于48%，与鸡尾葡萄柚处理呈显著差异，其中T4处理的坐果率最高，为55.3%，其次是T2处理，而鸡尾葡萄柚处理的坐果率仅为22.9%。

2.2 6个杂交授粉组合对马家柚果实番茄红素和柚皮苷含量的影响

马家柚是典型的红肉柚类，果肉中富含的番茄红素和柚皮苷是评价马家柚营养价值的重要组分，其中柚皮苷味苦，对果实风味构成起着至关重要的作用[21]。如图1所示，不同杂交授粉组合果实番茄红素含量与自然传粉相比存在差异，其中，T1、T2、T4处理番茄红素含量均显著高于自然传粉，而T3、HB柚和鸡尾葡萄柚处理与自然传粉均无显著差异。在柚皮苷含量方面，HB柚处理显著降低了柚皮苷含量（仅为4.05 mg·g^{-1}），其他处理与自然传粉均无显著差异。

表1 不同授粉组合马家柚坐果率

Table 1 Fruit setting rate of Majia pummelo in different pollination combinations

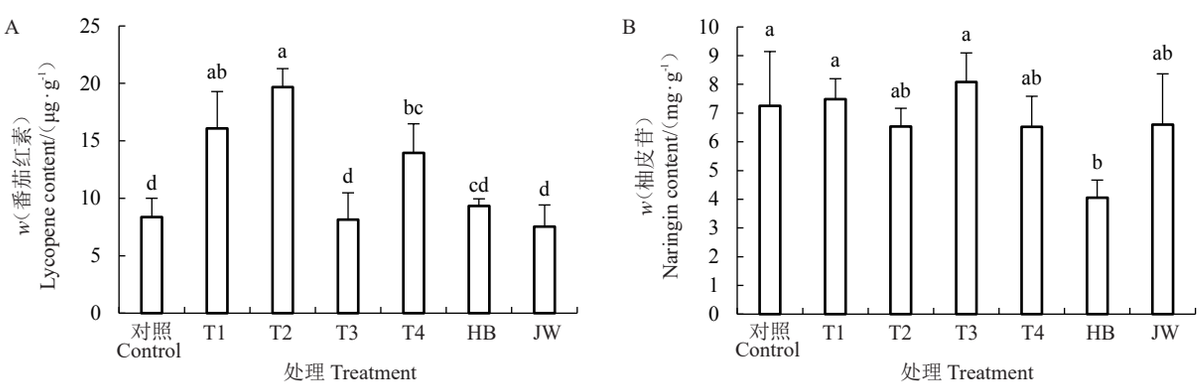
处理 Treatment	授粉组合（♀×♂） Pollination combinations（♀×♂）	授粉数量/朵 Pollination quantity/flower	坐果数 Number of fruits	坐果率 Fruit setting rate/%
T1	马家柚×土柚1号 Majiayou × Tuyou No.1	147	79	53.7±0.11 a
T2	马家柚×土柚2号 Majiayou × Tuyou No.2	128	69	53.9±0.04 a
T3	马家柚×土柚3号 Majiayou × Tuyou No.3	126	61	48.4±0.03 a
T4	马家柚×土柚4号 Majiayou × Tuyou No.4	150	83	55.3±0.03 a
HB	马家柚×HB柚 Majiayou × HB pummelo	200	96	48.4±0.03 a
JW	马家柚×鸡尾葡萄柚 Majiayou × Cocktail grapefruit	398	91	22.9±0.02 b

注：同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different small letters after the same column indicate significant differences at the 0.05 level. The same below.

2.3 6个杂交授粉组合对马家柚果实主要挥发性物质种类及含量的影响

挥发性物质组成了果实特殊的风味，不同杂交授粉组合果实挥发性物质组成及占比情况如图2所示，自然传粉马家柚果实汁胞中的挥发性物质以倍半萜类物质为主，占比44%；其次为单萜类物质，占比24%；芳香烃类物质占比13%；其他挥发性物质（醛、酸、酯、醛）共占比19%。相较于自然传粉马家柚，不同杂交授粉组合果实汁胞中的主要挥发性物质占比均产生了明显差异，具体表现为倍半萜类物质占比提升和单萜类物质占比降低。以马家柚×土柚1号为例，授粉后果实汁胞中倍半萜类物质占比提升至60%，与自然传粉相比提升了16个百分点；单萜类物质仅占比4%，相较于自然传粉降低了20个百分点。除马家柚×土柚3号杂交果实挥发性物

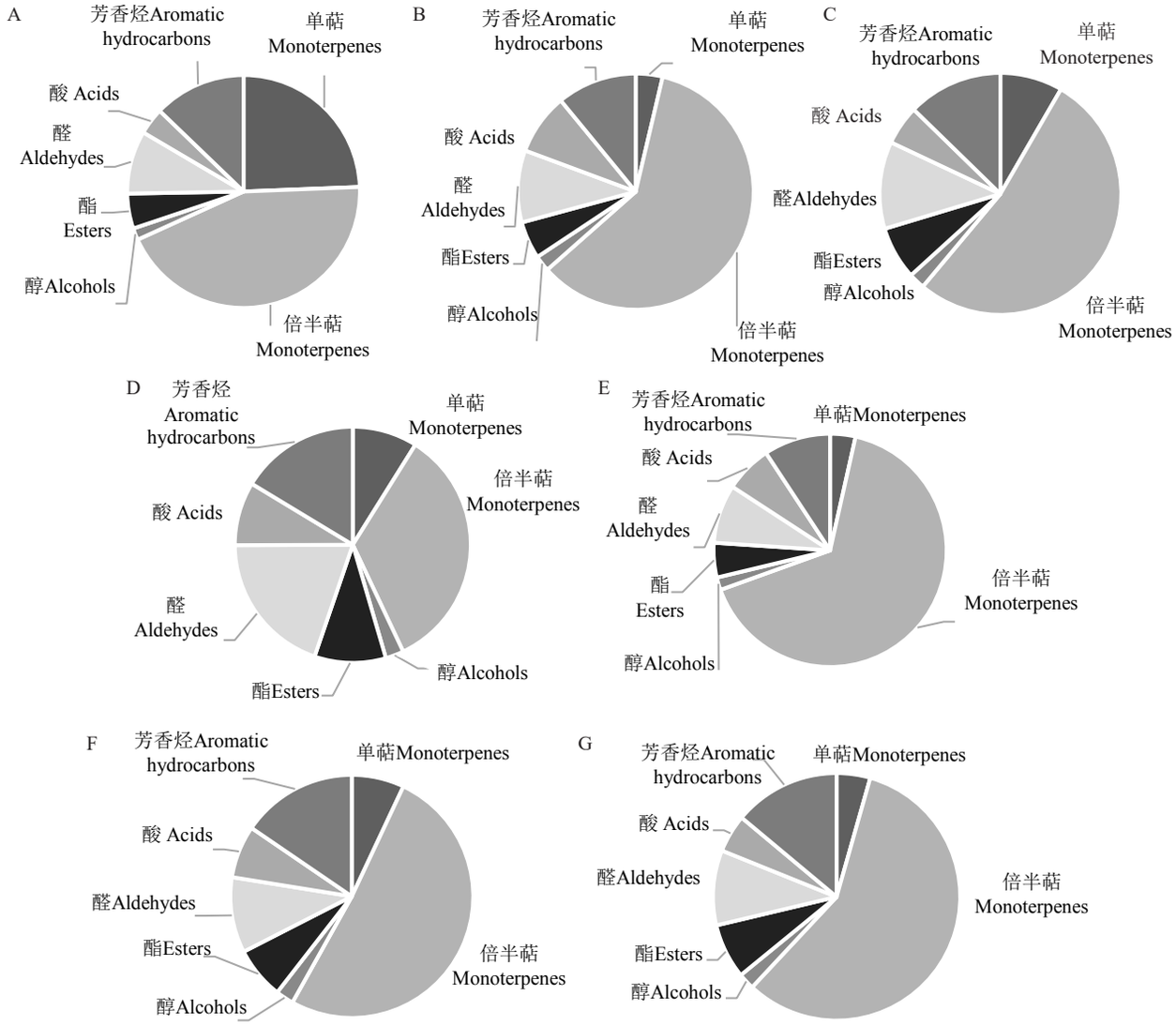


不同的小写字母表示处理之间在 0.05 水平差异显著。下同。

Different small letters indicate significant differences at the 0.05 level. The same below.

图1 不同授粉组合对果实番茄红素和柚皮苷含量的影响

Fig. 1 Effect of different pollination combinations on lycopene and naringin content in fruits



A. 自然传粉；B. 马家柚×土柚 1 号；C. 马家柚×土柚 2 号；D. 马家柚×土柚 3 号；E. 马家柚×土柚 4 号；F. 马家柚×HB 柚；G. 马家柚×鸡尾葡萄柚。

A. Natural pollination; B. Majiayou× Tuyou No. 1; C. Majiayou× Tuyou No. 2; D. Majiayou× Tuyou No. 3; E. Majiayou× Tuyou No. 4; F. Majiayou× HB pummelo; G. Majiayou× Cocktail grapefruit.

图 2　不同授粉组合果实主要挥发性物质种类含量占比

Fig. 2　Proportion of main volatile matter types in fruits of different pollination combinations

质占比与其余杂交组合存在明显不同外，其他4个父本（T2、T4、鸡尾葡萄柚、HB柚）与马家柚杂交果实汁胞中各物质组成占比与马家柚×土柚1号中基本一致。以土柚3号为父本授粉后汁胞中倍半萜和单萜类物质占比相较于自然传粉果实分别降至34%和9%；芳香烃类物质增加至16%；其他挥发物质占比均有一定提升，醛、酸、酯、醛占比分别增加了11%、5%、5%和1%。

对挥发性物质中占比较高的倍半萜、单萜、芳香烃和醛类物质进行含量测定分析，结果如图3所示，主要挥发性物质中以倍半萜类物质（吉马烯）含量最高。土柚3号为父本授粉的果实吉马烯含量显著降低，仅为11.71 μg · g^{-1}，相较于自然传粉显著降低64.1%，除土柚4号处理外，其他4个杂交授粉组合的果实吉马烯含量较自然传粉果实无显著差异。自然传粉果实汁胞中的主要单萜类物质*D*-柠檬烯含量为18.12 μg · g^{-1}，与对照相比，6个杂交授粉组合的*D*-柠檬烯含量均显著降低。在芳香烃类物质方面，处理果实汁胞中乙苯含量较自然传粉果实无显著差异，而对二甲苯含量则均表现为显著降低。在醛类物质方面，对照和处理汁胞中的3-己烯醛含量无显著差异，以土柚2号和HB柚为父本时较自然传粉显

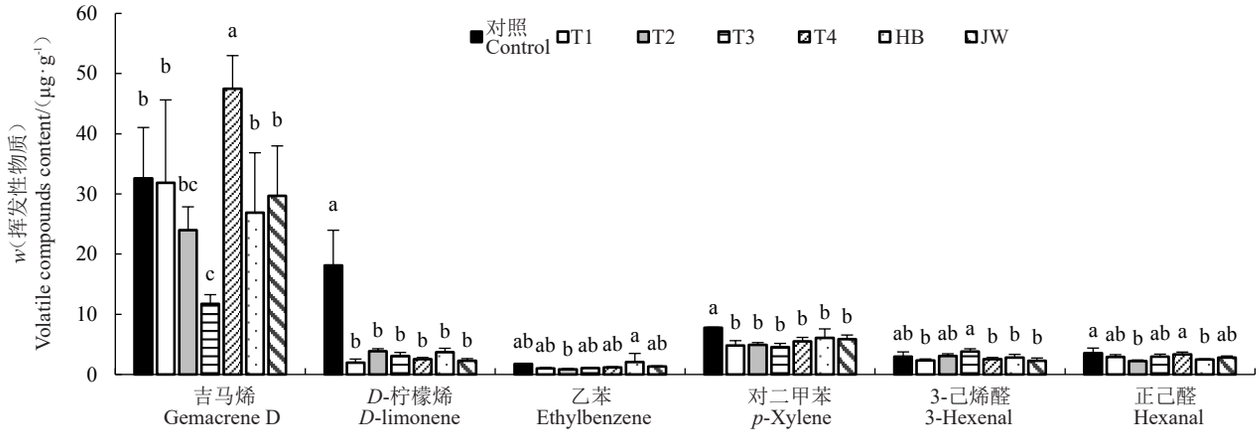


图3 不同授粉组合对主要挥发性物质含量的影响

Fig. 3 Effect of different pollination combinations on main volatile compounds content

著降低了汁胞中的正己醛含量。

2.4 6个杂交授粉组合马家柚果实品质变异系数分析

变异系数直接反映了个体受不同父本处理后的品质性状变异程度。6个杂交授粉组合的果实共18个品质性状[21]包含了外观(单果质量、果皮厚度和种子数)、甜酸(可溶性固形物、可滴定酸、固酸比、蔗糖、柠檬酸含量和甜度值等)、色泽营养(番茄红素、抗坏血酸、柚皮苷含量)和香气(*D*-柠檬烯、吉马烯含量)。18个性状指标间变异程度明显,变异系数介于6.35%~114.45%之间,其中*D*-柠檬烯变异系数最大,为114.45%;其次为种子数,变异系数为57.21%。以上数据表明杂交授粉后果实挥发性物质和种子数受不同父本影响程度较大。单果质量、果皮厚度、抗坏血酸和可溶性固形物含量指标的变异系数为18个性状指标的后四名,均低于10%,表明上述4个性状指标受杂交授粉影响较小(表2)。

2.5 相关性分析

18个品质性状指标标准化后,建立完整的评价

表2 不同授粉组合果实主要品质指标分析

Table 2 Analysis of main quality indicators of fruits in different pollination combinations

品质代号 Quality code	品质指标 Quality index	平均数 Average	标准差 Standard deviation	变异系数 Variation coefficient/%
Q1	单果质量 Single fruit mass/g	1 122.46	73.90	6.58
Q2	果皮厚度 Pericarp thickness/mm	20.19	1.95	9.67
Q3	种子数 Number of seeds	145.62	83.32	57.21
Q4	固酸比 TSS/TA	24.84	5.15	20.74
Q5	*w*(可溶性固形物) Total soluble solids content/%	15.33	0.97	6.35
Q6	*w*(可滴定酸) Titratable acidity/%	0.67	0.21	31.98
Q7	*w*(蔗糖)Sucrose content/(mg·g^{-1})	34.29	9.56	27.88
Q8	*w*(果糖) Fructose content/(mg·g^{-1})	18.89	3.67	19.40
Q9	*w*(葡萄糖) Glucose content/(mg·g^{-1})	22.88	4.64	20.30
Q10	*w*(柠檬酸) Citric acid content/(mg·g^{-1})	5.23	1.45	27.65
Q11	*w*(苹果酸) Malic acid content/(mg·g^{-1})	0.42	0.13	30.93
Q12	*w*(奎尼酸) Quinic acid content/(mg·g^{-1})	0.42	0.11	25.13
Q13	*w*(抗坏血酸) Vitamin C content/(mg·100 g^{-1})	8.99	0.77	8.55
Q14	*ρ*(甜度值) Sweetness value/(g·L^{-1})	85.06	18.20	21.39
Q15	*w*(番茄红素) Lycopene content/(μg·g^{-1})	11.87	4.73	39.88
Q16	*w*(柚皮苷) Naringin content/(mg·g^{-1})	6.65	1.27	19.35
Q17	*w*(*D*-柠檬烯) *D*-limonene content/(μg·g^{-1})	5.07	5.80	114.45
Q18	*w*(吉马烯) Gemacrene D content/(μg·g^{-1})	29.17	10.74	36.81

注:Q1~Q14 数据集引自文献[22]。

Note: Q1~Q14 datasets cited from reference [22].

体系。由表3可知，不同指标间存在显著相关性：外观品质中，种子数与果皮厚度呈显著负相关。甜酸方面，可滴定酸含量与固酸比呈极显著负相关；葡萄糖、果糖与蔗糖含量三者间呈极显著正相关；柠檬酸与可溶性固形物和可滴定酸含量呈显著正相关；苹果酸与果糖含量呈显著正相关；奎尼酸与蔗糖和葡萄糖含量呈极显著正相关，与果糖含量呈显著正相关；甜度值与蔗糖、果糖、葡萄糖和奎尼酸含量呈极显著正相关。营养色泽及风味方面，抗坏血酸与果糖和苹果酸含量呈显著正相关，与葡萄糖含量呈极显著正相关；柚皮苷与抗坏血酸含量呈显著正相关；主要挥发性物质*D*-柠檬烯含量与种子数和3种可溶性糖含量及甜度值呈显著负相关。由此可以发现，不同杂交授粉组合品质指标间存在诸多相关性，并非完全独立。此外，表3中显示种子数与果皮厚度呈显著负相关；固酸比又分别与果皮厚度呈显著负相关，与种子数呈显著正相关，这表明外观品质与内在品质间也存在着一定的关联性。

表3　杂交授粉马家柚不同果实品质的相关性

Table 3　Correlation of different fruit quality of hybrid pollinated pomelo

指标 Index	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13	Q14	Q15	Q16	Q17	Q18
Q1	1																	
Q2	−0.63	1																
Q3	0.42	−0.78*	1															
Q4	0.16	−0.79*	0.85*	1														
Q5	−0.52	0.69	−0.09	−0.30	1													
Q6	−0.29	0.88**	−0.69	−0.92**	0.63	1												
Q7	0.09	0.07	0.53	0.12	0.71	0.22	1											
Q8	0.12	−0.16	0.72	0.37	0.57	−0.03	0.96**	1										
Q9	0.05	−0.05	0.65	0.29	0.65	0.06	0.98**	0.99**	1									
Q10	−0.19	0.62	−0.17	−0.53	0.83*	0.81*	0.68	0.50	0.57	1								
Q11	0.08	−0.43	0.83*	0.73	0.32	−0.43	0.63	0.76*	0.72	0.14	1							
Q12	−0.19	0.28	0.31	0.01	0.75	0.34	0.88**	0.85*	0.89**	0.74	0.44	1						
Q13	−0.22	0.05	0.50	0.45	0.63	−0.09	0.70	0.76*	0.78*	0.38	0.76*	0.75	1					
Q14	0.05	0.01	0.60	0.22	0.68	0.13	0.99**	0.99**	1.00**	0.62	0.69	0.89**	0.75	1				
Q15	0.19	−0.58	0.60	0.59	−0.34	−0.57	0.18	0.36	0.32	−0.34	0.19	0.29	0.20	0.26	1			
Q16	−0.70	0.35	0.10	0.30	0.61	−0.04	0.31	0.35	0.39	0.16	0.44	0.48	0.79*	0.37	0.05	1		
Q17	−0.58	0.43	−0.77*	−0.33	−0.22	0.11	−0.82*	−0.86*	−0.81*	−0.38	−0.67	−0.57	−0.44	−0.80*	−0.31	0.15	1	
Q18	−0.35	−0.01	−0.04	−0.09	−0.03	0.06	−0.05	−0.04	−0.03	−0.01	−0.16	−0.02	−0.41	−0.04	0.21	−0.20	0.09	1

注：*和**分别代表品质指标在 0.05 水平和 0.01 水平上的差异显著性。

Note: * and ** represent the significant differences in quality indicators at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

2.6　主成分分析

对18个标准化的性状指标进行主成分分析，结果如表4所示。以特征值＞1为标准，选取各因子载荷绝对值＞0.650作为解释变量，18个品质指标共提取出5个主成分，这5个主成分累积贡献率可达85.001%，表明前5个主成分已经涵盖了大部分的果实品质性状信息，可代表原本的18个品质指标进行评价。

第1主成分贡献率为30.416%，其中果糖含量（0.930）、蔗糖含量（0.832）、葡萄糖含量（0.938）、柠檬酸含量（0.753）、苹果酸含量（0.722）、奎尼酸含量（0.674）为PC1中正向特征值较高的指标，主要是可溶性糖、有机酸和甜度值各组分，表明当第1主成分贡献率升高时，糖酸相关指标含量随之增加。马家柚为高糖高酸型柚类，较高的单糖含量构成了其主要的糖酸风味，第1主成分可概括为果实糖酸风味指标。第2主成分贡献率为20.122%，主要正向特征指标为固酸比（0.792）、可溶性固形物含量（0.661）、抗坏血酸含量（0.735），负向指标为可滴定酸含量（−0.654）和*D*-柠檬烯含量（−0.897）。PC2主要反映了杂交授粉果实甜酸及营养品质，该指标是表征马家柚综合品质的关键指标。第3主成分贡献率为17.575%，主要涵盖了单果质量（−0.669）、果皮厚度（0.737）、种子数（−0.815）等果实外观品质以及番茄

表4 杂交授粉马家柚综合品质主成分旋转载荷矩阵和方差贡献率

Table 4 Principal component rotationload matrix and variance contribution rate of comprehensive quality of hybrid pollinated pomelo

品质代号 Quality code	主成分 Principal component				
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Q1	−0.384	0.196	−0.669	0.079	0.027
Q2	−0.074	−0.044	−0.737	0.400	−0.086
Q3	0.274	0.379	−0.815	0.057	0.219
Q4	0.136	0.792	−0.521	0.053	−0.014
Q5	0.284	0.661	0.340	0.301	0.140
Q6	−0.064	−0.654	0.658	0.104	0.037
Q7	0.832	0.344	−0.186	0.298	−0.012
Q8	0.930	0.242	0.021	0.090	0.157
Q9	0.938	0.194	0.059	0.116	0.150
Q10	0.753	−0.358	0.162	−0.292	0.217
Q11	0.722	0.295	−0.020	−0.239	−0.282
Q12	0.674	0.044	0.039	0.262	0.552
Q13	0.474	0.735	−0.049	0.244	−0.010
Q14	0.933	0.194	−0.070	0.225	0.021
Q15	0.045	0.354	0.767	−0.319	0.084
Q16	−0.095	−0.034	0.126	0.108	−0.936
Q17	−0.123	−0.897	0.103	0.110	−0.019
Q18	−0.206	−0.078	0.014	−0.877	0.038
特征值 Eigenvalue	5.475	3.622	3.163	1.600	1.440
方差贡献率 Variance contribution rate/%	30.416	20.122	17.575	8.888	8.000
累积贡献率 Accumulated contribution rate/%	30.416	50.538	68.113	77.001	85.001

红素含量(0.767)在内的色泽品质指标,可概括为果实外观及色泽指标。第4主成分贡献率为8.888%,吉马烯含量(−0.877)有较大的负向特征值,对PC4产生负向影响,可概括为果实香气指标。第5主成分贡献率为8.000%,柚皮苷含量(−0.936)对PC5产生主要的负向影响,可概括为苦味指标。

2.7 6个杂交授粉组合果实品质综合得分及排序

以各主成分方差贡献率为权重,对前5个主成分进行得分以及相应权重线性加权求和并代入计算公式$F=W_i\times Y_i/W_{i总}$,得到果实品质综合得分F=(0.304 16 PC1+0.201 22 PC2+0.175 75 PC3+0.088 88 PC4+0.080 00 PC5)/0.850 01。由表5可知,依据自然传粉

表5 6个杂交授粉组合主成分因子得分及果实综合品质得分

Table 5 Principal component factor scores and comprehensive fruit quality scores of six hybrid pollination combinations

处理 Treatment	授粉组合(♀×♂) Pollination combination	因子得分 Factor score					综合得分(F) Comprehensive score	排序 Rank
		Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5		
对照 Control	自然传粉 Natural pollination	−4.20	−3.66	2.10	−0.64	−1.68	−2.16	7
T1	马家柚×土柚1号 Majiayou × Tuyou No.1	2.05	1.98	−0.43	0.52	0.18	1.18	2
T2	马家柚×土柚2号 Majiayou × Tuyou No.2	0.09	0.96	−0.65	−0.26	0.41	0.14	5
T3	马家柚×土柚3号 Majiayou × Tuyou No.3	1.82	1.97	−1.13	1.74	−0.97	0.97	3
T4	马家柚×土柚4号 Majiayou × Tuyou No.4	0.96	1.16	−0.82	−1.61	0.25	0.30	4
HB	马家柚×HB柚 Majiayou × HB pummelo	−3.02	−1.45	−1.57	−1.31	0.55	−1.83	6
JW	马家柚×鸡尾葡萄柚 Majiayou × Cocktail grapefruit	2.30	−0.96	2.50	1.57	1.25	1.39	1

果实及6个杂交授粉组合果实品质各主成分的得分系数，综合前5个主成分得分后计算出各处理的综合得分F值。其中，马家柚×鸡尾葡萄柚果实综合品质得分最高为1.39，该杂交组合分别在第1主成分（糖酸风味指标）、第3主成分（果实外观及色泽指标）和第5主成分（果实苦味指标）中得分最高。马家柚×土柚1号综合品质得分为1.18，排名第二，该杂交组合在第2主成分——甜酸及营养指标中得分最高。杂交授粉处理T3、T4、T2、HB依次排名3~6名，自然传粉排名最后，果实综合品质最差。

杂交授粉组合马家柚×鸡尾葡萄柚的果实综合品质排名最高，其次为马家柚×土柚1号。作为对照的自然传粉果实品质评分最低，符合预期结果。上述结果证实了利用主成分分析方法能真实评估不同杂交授粉组合对马家柚果实品质的影响，同时也表明了杂交授粉可有效改善马家柚果实的综合品质。

3　讨　论

主成分分析可将原始数据个数较多、数据间交叉冗余且彼此间具有较高相关性的果实品质性状指标降维成为几个涵盖绝大部分数据信息的成分[13]，笔者通过PCA将18个品质性状指标转化为5个互相独立的综合指标，其累积贡献率达到85.001%，已涵盖大部分的品质信息。5个主成分分别反映了杂交授粉马家柚的糖酸、外观、风味营养、香气及苦味品质，其中，前3个主成分将生产中重点关注的关键性品质指标集中体现。例如第1主成分为果实的可溶性糖含量、有机酸含量和甜度值指标，符合马家柚典型的“高糖高酸”品种特性。固酸比作为第2主成分的主要正向特征指标，鸡尾葡萄柚处理的因子得分为−0.96（表5），以鸡尾葡萄柚为父本相较于其他杂交处理组合均显著提高了马家柚果实的柠檬酸含量，但授粉后可溶性糖各组分含量与T1处理差异不显著，该因素直接导致鸡尾葡萄柚处理果实固酸比提升不显著[22]。此外，马家柚所特有的高番茄红素与高抗坏血酸含量以及特殊的香气被集中反映在第2和第3主成分内。笔者利用主成分分析有效避免了因人为因素导致的品质性状概括不全、造成主观判断不客观等情况，分析所得出的马家柚×鸡尾葡萄柚和马家柚×土柚1号2个杂交组合可有效满足马家柚品质差异化育种需求，为育种者提供更多有针对性的品质改良方法，有效优化了品种杂交配置和选择的方案。

杂交授粉后的果实坐果率因授粉亲本间亲缘关系的远近产生明显差异。例如，以脐红猕猴桃为母本、中华猕猴桃的不同品种（HX-2和JX-X与母本间亲缘关系间存在差异）为父本授粉后坐果率相差28%；以不同品种的软枣猕猴桃（R-X）、黑蕊猕猴桃（HR-X）和满天星猕猴桃（M-X）雄株授粉后的坐果率同样差异较大。即父母本间亲缘关系较近，授粉后坐果率高；亲缘关系较远，坐果率随之降低[23]。这一结论于本研究中得到了很好的验证，以鸡尾葡萄柚为父本时的马家柚坐果率为22.9%；本地土柚和HB柚为父本时，坐果率则普遍介于48%~56%之间。其中，马家柚与广丰及周边地区部分土柚亲缘关系极近，与HB柚（相似系数0.827）亲缘关系较近，而鸡尾葡萄柚（相似系数0.617）与马家柚亲缘关系则较远[24]。

不同授粉组合的马家柚种子数同样受亲本遗传关系影响。以马家柚近缘系的土柚与HB柚为父本授粉后果实种子数200粒左右；而远缘系的鸡尾葡萄柚授粉后果实种子数仅为60余粒，该结果与杨海健[7]探究马家柚不同杂交授粉组合对后代影响的研究结果相一致。通常因无籽马家柚增加至百余粒种子后会降低食用便利性，易受到消费者诟病。但笔者研究发现，杂交授粉后马家柚可食率与自然传粉果实相比并无明显差异。与柑、橘类种子散乱分布于果实内部不同，柚类种子均紧密分布于中心柱周围，更易于直接剥离。此外，种子数增加的同时显著提升了单果质量并降低了果皮厚度，有效弥补了马家柚的品质缺陷。在实际生产中，马家柚果实内的种子会因与授粉树距离的远近而表现出数量和形态的差异，即两者间距离越远，种子数相应减少并出现瘪籽等现象。因此，对于马家柚授粉树的不同配置方式如何影响杂交果实种子还有待进一步深入研究。同时后续还需要进一步扩大父本株系选择范围，期望找到产生较少种子数，并能有效提升马家柚综合品质的最优杂交组合。

相关研究表明，杂交授粉后的果实品质表现出明显的花粉直感现象，即杂交果实品质性状普遍介于父母本之间[25]。例如，番茄红素、柚皮苷和挥发性物质作为构成马家柚色泽和风味品质的重要次生代谢物[16]，其在果实中的含量直接决定了马家柚营养成分含量的高低。本研究中多数本地土柚授粉后的

马家柚果肉中的番茄红素含量显著高于自然传粉马家柚，而以鸡尾葡萄柚为父本时则无显著变化。笔者推测这可能是由于与马家柚亲缘关系较近的土柚在长期的自然繁育过程中保持了红肉性状，即杂交父本果肉中的番茄红素含量始终维持在较高水平；而作为非红肉类型的鸡尾葡萄柚，则会使授粉后的马家柚番茄红素含量维持与母本相同水平。此外，作为柚类主要的苦味来源，柚皮苷含量过高会直接导致柚口感苦涩而无法食用。本研究的6个杂交授粉组合中也仅有马家柚×HB柚的果实柚皮苷含量显著低于自然传粉。但因消费者日益多样化的果品需求与柚皮苷独有的抗炎保健功效，柚皮苷含量的减少在一定程度上也导致了马家柚营养品质的降低[26]。因此，后续还可进一步通过感官风味评价衡量马家柚苦味阈值，用以辅助马家柚品质改良。综合本研究通过主成分分析筛选出的2个品质性状互有区分的杂交授粉组合，可供育种人员针对于不断变化的市场需求与品质亲好性有目的性地实现马家柚授粉组合的差异化配置。

4 结 论

通过对6个杂交授粉组合马家柚果实色泽和风味关键次生代谢物进行测定，结合品质性状进行相关性分析和主成分分析，对马家柚杂交果实品质进行综合评价。通过主成分分析提取到5个主成分，累积贡献率可达85.001%，分别反映了果实糖酸、色泽、营养、外观、香气及苦味品质指标。杂交授粉组合马家柚×鸡尾葡萄柚的果实综合品质排名最高，其次为马家柚×土柚1号。研究结果为马家柚杂交授粉后果实内在营养物质代谢规律提供依据，也为生产中马家柚杂交亲本的选择提供参考。

参考文献 References:

[1] DUNG C D，WALLACE H M，BAI S H，OGBOURNE S M，TRUEMAN S J. Cross-pollination affects fruit colour，acidity，firmness and shelf life of self-compatible strawberry[J]. PLoS One，2021，16(9)：e0256964.

[2] LIANG M，CAO Z H，ZHU A D，LIU Y L，TAO M Q，YANG H Y，XU Q，WANG S H，LIU J J，LI Y P，CHEN C W，XIE Z Z，DENG C L，YE J L，GUO W W，XU Q，XIA R，LARKIN R M，DENG X X，BOSCH M，FRANKLIN-TONG V E，CHAI L J. Evolution of self-compatibility by a mutant Sm-RNase in citrus[J]. Nature Plants，2020，6(2)：131-142.

[3] 徐宸宇 . 马家柚优系遗传鉴定及提高品质技术研究[D]. 武汉：华中农业大学，2021.
XU Chenyu. Genetic identification of superiority and quality improvement technology research of Majia pomelo[D]. Wuhan：Huazhong Agricultural University，2021.

[4] 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.

[5] 罗友进，陈霞，胡佳羽，程玥晴，王武，谢永红 . 柑橘枯水发生机制研究进展[J]. 江苏农业科学，2019，47(1)：31-34.
LUO Youjin，CHEN Xia，HU Jiayu，CHENG Yueqing，WANG Wu，XIE Yonghong. Research progress of mechanism of citrus section-drying[J]. Jiangsu Agricultural Sciences，2019，47(1)：31-34.

[6] 姚海磷 . 异花授粉对‘琯溪蜜柚’果实品质及有机酸组分的影响[D]. 福州：福建农林大学，2015.
YAO Hailin. The effects of cross-pollination on fruit quality and organic acid components in ‘Guanximiyou’ pummelo (*Citrus grandis*)[D]. Fuzhou：Fujian Agriculture and Forestry University，2015.

[7] 杨海健 . 柑橘有性杂交创造新种质及授粉对马家柚和HB柚果实品质的影响研究[D]. 武汉：华中农业大学，2012.
YANG Haijian. The study of creating citrus new germplasm by sexual hybridization and the hybridization influence on the fruit quality of Majiayou and HB pomelo[D]. Wuhan：Huazhong Agricultural University，2012.

[8] TRUEMAN S J，KÄMPER W，NICHOLS J，OGBOURNE S M，HAWKES D，PETERS T，BAI S H，WALLACE H M. Pollen limitation and xenia effects in a cultivated mass-flowering tree，*Macadamia integrifolia* (Proteaceae) [J]. Annals of Botany，2022，129(2)：135-146.

[9] WANG S H，LONG C R，LIU H M，PAN L，YANG S Z，ZHAO J，JIANG Y，BEI X J. Comparative physiochemical and transcriptomic analysis reveals the influences of cross-pollination on ovary and fruit development in pummelo (*Citrus maxima*) [J]. Scientific Reports，2023，13：19081.

[10] 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.

[11] 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 Hua-

lin，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.

[12] 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 combanition on fruit quality of Majia pummelo[D]. Wuhan：Huazhong Agricultural University，2013.

[13] 王思威，孙海滨，常虹，钟声，赵俊生，王潇楠 . 基于主成分分析综合评价白糖罂荔枝果实品质[J]. 果树学报，2022，39(4)：610-620.
WANG Siwei，SUN Haibin，CHANG Hong，ZHONG Sheng，ZHAO Junsheng，WANG Xiaonan. Comprehensive evaluation of fruit quality of Baitangying litchi based on principal component analysis[J]. Journal of Fruit Science，2022，39(4)：610-620.

[14] 王小龙，史祥宾，冀晓昊，王宝亮，张艺灿，王海波 . 基于主成分分析的酿酒葡萄杂交后代果实品质评价[J]. 中外葡萄与葡萄酒，2021(5)：8-13.
WANG Xiaolong，SHI Xiangbin，JI Xiaohao，WANG Baoliang，ZHANG Yican，WANG Haibo. Fruit evaluation of hybrid progeny of wine grape based on principal component analysis[J]. Sino-Overseas Grapevine & Wine，2021(5)：8-13.

[15] 范素杰 . 汁用甜橙品种品质的综合分析[D]. 武汉：华中农业大学，2010.
FAN Sujie. Comprehensive analysis of quality of orange juice processing cultivars[D]. Wuhan：Huazhong Agricultural University，2010.

[16] 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.

[17] 丁帆 . 柑橘中几种苦味物质的检测及评价[D]. 武汉：华中农业大学，2009.
DING Fan. Determination and evaluation of naringin，limonin and nomilin in *Citrus*[D]. Wuhan：Huazhong Agricultural University，2009.

[18] 刘翠华 . 莽山野柑果实特征香气及花粉直感效应的解析[D]. 武汉：华中农业大学，2014.
LIU Cuihua. Analysis of the characteristic aroma and pollen direct sensation effect of Mangshanyegan (*Citrus nobilis* Lauriro) [D]. Wuhan：Huazhong Agricultural University，2014.

[19] 施要强，张海朋，刘翠华，蒋友武，王振华，谢宗周，曾继吾，徐娟 . 不同发育时期莽山野柑果皮中挥发性物质代谢谱的变化[J]. 华中农业大学学报，2020，39(1)：34-43.
SHI Yaoqiang，ZHANG Haipeng，LIU Cuihua，JIANG Youwu，WANG Zhenhua，XIE Zongzhou，ZENG Jiwu，XU Juan. Changes of volatile profile in Mangshanyegan fruit peels at different development stages[J]. Journal of Huazhong Agricultural University，2020，39(1)：34-43.

[20] ZHANG L T. The Sweetness of sugars[J]. Journal of South China University of Technology，2002，30(1)：89-91.

[21] 张海朋，彭昭欣，石梅艳，温欢，张红艳，徐娟 . 柑橘果实风味组学研究进展[J]. 华中农业大学学报，2021，40(1)：32-39.
ZHANG Haipeng，PENG Zhaoxin，SHI Meiyan，WEN Huan，ZHANG Hongyan，XU Juan. Advances on citrus flavoromics[J]. Journal of Huazhong Agricultural University，2021，40(1)：32-39.

[22] 徐宸宇，曹立新，唐启正，吴巨勋，伊华林 . 马家柚遗传来源鉴定与适宜授粉品种筛选[J]. 华中农业大学学报（自然科学版），2022，41(2)：124-135.
XU Chenyu，CAO Lixin，TANG Qizheng，WU Juxun，YI Hualin. Identification of Majia pomelo germplasm and screening of varieties with suitable pollination[J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Natural Science Edition)，2022，41(2)：124-135.

[23] 成红梅 . ‘脐红’猕猴桃花粉直感效应的试验研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2017.
CHENG Hongmei. The experiment of xenia effect on red-fleshed kiwifruit ‘Qihong’[D]. Yangling：Northwest A & F University，2017.

[24] 曹立新 . 江西省广丰县柚资源调查与马家柚起源分析[D]. 武汉：华中农业大学，2012.
CAO Lixin. The investigation of pummelo germplasms and the origin analysis of Majiayou in Guangfeng，Jiangxi Province[D]. Wuhan：Huazhong Agricultural University，2012.

[25] SAPIR G，BARAS Z，AZMON G，GOLDWAY M，SHAFIR S，ALLOUCHE A，STERN E，STERN R A. Synergistic effects between bumblebees and honey bees in apple orchards increase cross pollination，seed number and fruit size[J]. Scientia Horticulturae，2017，219：107-117.

[26] KARN A. 基于体外发酵的柑橘黄酮与人体肠道菌群相互作用研究[D]. 北京：中国农业科学院，2020.
KARN A. In vitro study of interactions between citrus flavonoids and gut microbiota[D]. Beijing：Chinese Academy of Agricultural Sciences，2020.