

秦玉燕, 罗义灿, 吴 凤, 等. 不同砧木沃柑果实发育过程中类黄酮化合物变化及综合评价[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(5): 960-976.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.05.015

不同砧木沃柑果实发育过程中类黄酮化合物变化及综合评价

秦玉燕^{1,2,3}, 罗义灿^{1,2,3}, 吴 凤^{1,2,3}, 邓有展^{1,2,3}, 张利伟⁴, 赵 媛¹, 王运儒^{1,2,3}

(1.广西壮族自治区亚热带作物研究所, 广西 南宁 530001; 2.农业农村部亚热带果品蔬菜质量安全控制重点实验室, 广西 南宁 530001; 3.广西亚热带特色水果质量安全控制重点实验室, 广西 南宁 530001; 4.广西壮族自治区农业科学院, 广西 南宁 530007)

摘要: 为了明确不同砧木沃柑果实发育过程中类黄酮化合物组分及含量变化, 同时为不同砧木沃柑果实资源的综合利用及采收期的确定提供理论依据, 本研究以枳壳砧沃柑、香橙砧沃柑、酸橘砧沃柑果实为研究对象, 考察其在 2022 年 7 月至 2023 年 4 月生长发育过程中果肉和果皮中 15 种类黄酮化合物组分的动态变化规律, 并利用主成分分析法进行综合评价。结果显示, 沃柑果肉和果皮中含有的类黄酮化合物种类相同, 均以橙皮苷、新橙皮苷和芸香柚皮苷为主; 但是含量差异较大, 果皮中的橙皮苷、新橙皮苷、川陈皮素、香叶木素、橘皮素、甜橙黄酮、芦丁、槲皮素等含量高于果肉。在果实发育过程中, 沃柑果皮和果肉中各类黄酮化合物的含量总体呈下降趋势。在果实整个发育周期内(当年 7 月至次年 4 月), 枳壳砧沃柑果肉中类黄酮化合物在 7 月的综合评价得分最高, 果皮中类黄酮化合物在 8 月的综合评价得分最高; 香橙砧沃柑和酸橘砧沃柑果肉和果皮中类黄酮化合物均在 7 月的综合评价得分最高。在果实采收期内(1-4 月), 以 2 月份酸橘砧沃柑果肉和果皮中类黄酮化合物的综合评价得分最高; 枳壳砧沃柑果肉和果皮中类黄酮化合物在 1 月份综合评价得分最高; 香橙砧沃柑果肉中类黄酮化合物在 2 月份综合评价得分最高, 果皮中类黄酮化合物在 1 月份综合评价得分最高。酸橘砧沃柑果皮中类黄酮化合物在整个发育期的综合评价得分高于其他砧木沃柑, 果肉中类黄酮化合物在成熟期 1 月、2 月和 4 月的综合评价得分高于另外 2 种砧木沃柑。基于类黄酮化合物综合评价结果确定沃柑最佳采收期为: 枳壳砧沃柑果实的最佳采收期为 1 月, 酸橘砧沃柑果实的最佳采收期为 2 月, 香橙砧沃柑果实的最佳采收期为 1 月或 2 月。以类黄酮化合物为主要成分的功能食品开发宜选择酸橘砧沃柑。

关键词: 沃柑; 砧木; 果实; 类黄酮化合物; 综合评价

中图分类号: S666.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)05-0960-17

Changes in flavonoid compounds and comprehensive evaluation during fruit development of Orah mandarin with different rootstocks

QIN Yuyan^{1,2,3}, LUO Yican^{1,2,3}, WU Feng^{1,2,3}, DENG Youzhan^{1,2,3}, ZHANG Liwei⁴, ZHAO Yuan¹,
WANG Yunru^{1,2,3}

收稿日期: 2024-07-20

基金项目: 广西壮族自治区自然科学基金青年科学基金项目(2021GX-NSFBA196006); 广西壮族自治区农业科学院基本科研业务专项(桂农科 2022YM18); 南宁市科技局重大科技专项项目(20222062); 广西壮族自治区重点研发计划项目(桂农科 AB241484036); 国家现代农业产业技术体系广西创新团队建设专项(nycytxgxtid-2021-05-03)

作者简介: 秦玉燕(1987-), 女, 广西兴安人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为农产品品质与质量安全。(E-mail) 956346090@qq.com

通讯作者: 王运儒, (E-mail) wangaa2008@163.com

(1. Guangxi Subtropical Crops Research Institute, Nanning 530001, China; 2. Key Laboratory of Quality and Safety Control for Subtropical Fruit and Vegetable, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanning 530001, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Quality and Safety Control for Subtropical Fruits, Nanning 530001, China; 4. Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China)

Abstract: This study aims to investigate the changes in the composition and content of flavonoid compounds in Orah mandarin grafted onto different rootstocks during the

fruit development process, and to provide a comprehensive evaluation. This will offer a theoretical basis for comprehensively utilizing Orah mandarin fruit resources from different rootstocks and determining the optimal harvest period. Orah mandarin with *Poncirus trifoliata* Raf, *Citrus×junos* Siebold ex Tanaka and *Citrus reticulata* Blanco rootstocks were selected as research subjects to investigate the dynamic changes in 15 flavonoid components of the peel and pulp from July 2022 to April 2023, and the fruit quality was comprehensively evaluated using principal component analysis. The results showed that the types of flavonoid compounds present in both the peel and pulp of Orah fruits were the same, primarily including hesperidin, neohesperidin, and naringin. However, the content differed significantly. The contents of hesperidin, neohesperidin, nobiletin, diosmetin, tangeretin, sinensetin, rutin, and quercetin in the peel were higher than those in the pulp. During fruit development, the overall content of various flavonoid compounds in both the peel and pulp generally decreased. Throughout the development period, the flavonoid compounds in the pulp of Orah grafted onto *Poncirus trifoliata* Raf rootstock had the highest comprehensive evaluation score in July, while the flavonoid compounds in the peel had the highest comprehensive evaluation score in August. The flavonoid compounds in the peel and pulp of Orah grafted onto *Citrus×junos* Siebold ex Tanaka and *Citrus reticulata* Blanco rootstocks had the highest comprehensive evaluation score in July. During the harvest period (January to April), the highest comprehensive evaluation score of flavonoid compounds was observed in February for the pulp and peel of Orah grafted onto *Citrus reticulata* Blanco rootstock. For Orah grafted onto *Poncirus trifoliata* Raf rootstock, the highest comprehensive evaluation score of flavonoid compounds was obtained in January for both the pulp and peel. The flavonoid compounds in the pulp of Orah grafted onto *Citrus×junos* Siebold ex Tanaka rootstock had the highest comprehensive evaluation score in February, while the flavonoid compounds in the peel had the highest score in January. The flavonoid compounds in the peel of Orah grafted onto *Citrus reticulata* Blanco rootstock had a higher comprehensive evaluation than other rootstocks throughout the development period, and flavonoid compounds in the pulp had a higher comprehensive evaluation than other rootstocks during the mature period in January, February, and April. Based on the comprehensive evaluation of flavonoid compounds, the optimal harvest periods were January for Orah mandarin grafted onto *Poncirus trifoliata* Raf rootstock, February for Orah mandarin grafted onto *Citrus reticulata* Blanco rootstock, and January or February for Orah mandarin grafted onto *Citrus×junos* Siebold ex Tanaka rootstock. For the development of functional foods rich in flavonoids, Orah mandarin grafted onto *Citrus reticulata* Blanco rootstock is recommended.

Key words: Orah mandarin; rootstock; fruit; flavonoid compounds; comprehensive evaluation

沃柑是由坦普尔橘橙与丹西红橘杂交而成的品种,属于晚熟杂交柑橘品种,具有早结高产、外形美观、品质优良、适应性强、抗病能力突出等优点。据不完全统计,截至2023年,广西沃柑的种植面积已超过 $1.133 \times 10^5 \text{ hm}^2$,年产值高达 1×10^{10} 元^[1]。类黄酮是沃柑果实中含量丰富的一类次生代谢物质,对果实的色泽和风味有显著影响,并能提高植物的抗逆性和抗病虫害能力^[2]。此外,类黄酮化合物还具有抗氧化、抗癌、抗炎抑菌、抗衰老等多种对人体有益的生理功能^[3]。某些类黄酮化合物具有明显的苦味、甜味和鲜艳的颜色,因此被广泛应用于食品加工行业。据不完全统计,目前柑橘中已鉴定出的生物类黄酮化合物种类已超过80种,主要分为黄烷酮类化合物、黄酮类化合物和黄酮醇类化合物^[2]。黄烷酮类化合物大多以7-O-糖苷形式存在,含量最为丰富。黄酮类化合物除了以O-糖苷形式存在,还含有一类特殊的多甲氧基黄酮。它们是柑橘属植物中

特有的成分,可用作柑橘分类的标识物。黄酮醇类化合物主要以3-O-糖苷和7-O-糖苷形式存在。随着人们生活水平的不断提升和对健康的日益关注,富含生物活性成分的高品质沃柑及其功能食品具有广阔的开发前景。由于不同砧木类型和不同发育期的果实类黄酮化合物含量具有较大差异,因此,研究不同砧木沃柑果实各个发育期的类黄酮化合物组分及含量,并进行综合评价,获得类黄酮化合物综合评价高的砧木类型和果实发育期,对于制订科学的沃柑营养品质评价体系,促进以沃柑为原料的功能食品开发,推动沃柑加工产业向高质量发展具有重要意义。

不同砧木对果实次生代谢产物的影响广泛存在于嫁接繁殖的果树中^[4]。例如,对苹果果实的研究结果显示,不同砧木会导致相同发育阶段果皮和果肉中总酚、类黄酮化合物、花青苷和类胡萝卜素含量的差异^[5]。对葡萄的研究结果表明,101-14砧木促进了丹

娜葡萄果皮中黄酮醇、黄烷醇和花色苷的积累,而 5A 砧木促进了赤霞珠葡萄中花青素的积累^[6-7]。101-14MGt 和 1103P 砧木促进 Petit Verdot 葡萄中黄酮醇的合成,而 Beta 砧木则抑制除紫丁香苷外的黄酮醇合成^[8]。对欧洲李的研究结果表明,Wavit 砧木上的李子果实含有较高含量的芍药素-3-O-芸香糖苷、矢车菊素-3-O-芸香糖苷和新绿原酸^[9]。Zhou 等^[10]研究发现,Lakkoocha 砧木可促进面包果接穗中类黄酮化合物的合成。砧木对果实次生代谢产物的影响在柑橘中也有研究。比如,对血橙的研究发现,不同砧木和接穗的组合可显著影响其果实中花青素、维生素 C 及有机酸的含量^[11]。应用 C35 砧木的血橙品种 Moro 果实中橙皮苷含量最高,而应用 FA13 砧木的果实中橙皮苷含量最低^[12]。应用香橙砧和枳砧的塔罗科血橙果实总黄酮含量低于红橘砧^[13];香橙砧红江橙果实中总黄酮含量、氨基酸含量以及固酸比显著低于卡里佐枳橙砧^[14]。Li 等^[15]对 Newhall 甜橙的研究结果表明,Poncirus trifoliata 砧木嫁接的甜橙果皮总黄酮含量较高。有关不同砧木对果实类黄酮化合物含量的影响可能与砧木和接穗间的亲和性有关。亲和性较差时,产生的胁迫可能会刺激植物次生代谢产物的合成^[16]。此外,砧木还可能通过调节根系的水分吸收、叶片的光合速率及光合产物的分配,进一步影响柑橘营养成分含量^[17]。

类黄酮化合物作为沃柑果实中主要的功能性营养物质,其种类和含量是评价沃柑营养品质的重要指标。以往对柑橘类黄酮化合物的研究主要集中于柚子、甜橙、金柑、柠檬等上,在沃柑上的研究较少。目前,尚缺乏对不同砧木沃柑在果实发育过程中类黄酮化合物组分及含量的动态系统研究。而且,柑橘中类黄酮化合物种类繁多,功能和含量各异,使用总黄酮含量对果实品质进行评价并不科学,需要建立不同类黄酮化合物的综合评价方法。枳壳、酸橘、香橙是生产上沃柑嫁接最常用的砧木,以此为试验材料,揭示不同砧木沃柑在各个发育阶段果肉和果皮中 15 种类黄酮化合物含量的动态变化规律。利用主成分分析法(PCA)构建沃柑类黄酮化合物综合评价体系;明确不同砧木间和不同生长发育期类黄酮化合物组分及含量的差异,充实沃柑功能成分数据库,为沃柑功能性产品的开发利用提供数据支撑。根据不同生产目的,选择适宜的采收期,充分利用果实有效成分,为沃柑采收后资源综合利用和保健品开发提供方向。

1 材料与amp;方法

1.1 试验材料

试验地点位于广西壮族自治区南宁市武鸣区双桥镇腾翔村沃柑果园,东经 108°17' 50.10"、北纬 23°06'9.56"。在同一地块选取长势和结果情况基本一致的植株,分别以枳壳、香橙、酸橘为砧木,树龄 6 年,植株的田间管理水平相同。

1.2 试剂与仪器

圣草次苷、芸香柚皮苷、柚皮苷、橙皮苷、新橙皮苷、野漆树苷、香风草苷、枸橼苷、柚皮素、香叶木素、槲皮素、芦丁、川陈皮素、橘皮素、甜橙黄酮、二氢槲皮素、圣草酚、木犀草素、山柰酚、根皮素、槲皮苷共计 21 种类黄酮化合物标准品(纯度 95%以上,由上海安谱瑞世标准技术服务有限公司提供)。LC-20ADXR 高效液相色谱仪(日本岛津公司产品),ABSCIEX Q TRAP 3200 三重四极杆质谱联用仪(美国 ABSCIEX 公司产品),Waters ACQUITY UPLC HSS T3 C18 色谱柱(美国 Waters 科技有限公司产品),TGL-20M 医用离心机(湖南湘仪实验室仪器开发有限公司产品)。

1.3 试验方法

1.3.1 试验设计 每种砧木沃柑选取 2 棵果树作为 1 个处理,每个处理设 3 个重复。在 2022 年 7 月到 2023 年 4 月期间,于每个月的第 1 d 采集沃柑果实。采样时,每个处理从东、南、西、北 4 个方向选取大小均匀、表面完好、无病虫害的果实 30 个。果实采下后立即运回实验室,将果皮和果肉分开,分别用匀浆机搅拌均匀(果肉去核),保存于-20℃冰箱待测。

1.3.2 类黄酮化合物测定方法 果肉和果皮的前处理方法参考张念等^[18]的方法,上机测定使用高效液相色谱串联质谱法(LC-MS/MS)。色谱条件:Waters ACQUITY UPLC HSS T3 (100.0 mm×2.1 mm, 1.8 μm) 色谱柱和同款保护柱;柱温 40℃;进样量为 5 μL;流动相 A 为 0.1% 甲酸水(体积百分数)溶液,流动相 B 为乙腈;梯度洗脱程序:0~1.0 min, 10% B;1.0~9.0 min, 10%~90% B;9.0~11.0 min, 90%~100% B;11.0~11.1 min, 100%~10% B;11.1~13.0 min, 10% B;流速为 0.30 mL/min。质谱条件:采用多反应监测,电喷雾离子源(ESI)温度 550℃,正离子模式下质谱电压为 5 500 V,负离子

模式下质谱电压为-4 500 V,气帘气(CUR)2.068×10⁵ Pa,雾化气GS1和辅助气GS2均为3.45×10⁵ Pa。

1.4 统计分析

用SPSS 22.0软件和Origin Pro 2021软件对数据进行计算和统计分析,采用F检验,多重比较用Duncan's法。类黄酮化合物综合评价方法参考李可等^[19]的方法。

2 结果与分析

2.1 沃柑果肉和果皮中类黄酮化合物组成

在检测的21种类黄酮化合物中,沃柑果肉和果皮中检测到15种,未检测到二氢槲皮素、圣草酚、木犀草素、山柰酚、根皮素和槲皮苷。3种砧木果肉中含量最高的类黄酮化合物为新橙皮苷,占15种类黄酮化合物之和的21.24%~32.87%,其次为橙皮苷和芸香柚皮苷,含量较丰富的还有柚皮苷、香风草苷、枸橼苷和芦丁,此外,还含有少量野漆树苷、圣草次苷、川陈皮素、橘皮素、甜橙黄酮、柚皮素、香叶木素和槲皮素。3种砧木果皮中含量最高的类黄酮化合物为橙皮苷,占15种类黄酮化合物之和的27.06%~37.83%,其次为新橙皮苷,含量较丰富的还有芸香柚皮苷、川陈皮素、芦丁、香风草苷、柚皮苷、枸橼苷、橘皮素和甜橙黄酮,此外,还含有少量野漆树苷、圣草次苷、柚皮素、香叶木素和槲皮素。

2.2 不同砧木沃柑果实发育过程中黄烷酮类化合物含量变化

由图1A可知,沃柑果肉中的圣草次苷含量在2022年7-12月快速下降,2023年1-4月保持相对稳定。同一月份不同砧木沃柑果肉中圣草次苷含量表现为:2022年10月和2023年1月、2月、4月酸橘砧沃柑显著高于枳壳砧沃柑,2022年12月香橙砧沃柑显著高于枳壳砧沃柑,枳壳砧沃柑显著高于酸橘砧沃柑,2023年3月枳壳砧沃柑显著高于香橙砧沃柑,香橙砧沃柑显著高于酸橘砧沃柑。由图1B可知,果皮中圣草次苷含量在2022年7月至2023年4月整体呈现逐步下降的趋势。同一月份3种砧木沃柑果皮中圣草次苷含量均表现为酸橘砧沃柑>香橙砧沃柑>枳壳砧沃柑,且酸橘砧沃柑和枳壳砧沃柑之间的差异均达显著水平。

由图1C可知,沃柑果肉中芸香柚皮苷含量在2022年7-12月整体呈下降趋势,2023年1-4月不同砧木沃柑变化趋势不一。同一月份不同砧木沃柑

果肉中芸香柚皮苷含量表现为:2022年10月酸橘砧沃柑显著高于香橙砧沃柑,2022年11月和2023年1月、3月枳壳砧沃柑显著高于香橙砧沃柑,2022年12月和2023年2月、4月香橙砧沃柑显著高于另外2种砧木沃柑。由图1D可知,沃柑果皮中芸香柚皮苷含量在2022年7月至2023年4月整体呈波动下降趋势。同一月份3种砧木沃柑果皮中芸香柚皮苷含量均表现为酸橘砧沃柑>香橙砧沃柑>枳壳砧沃柑,且除2022年9月外酸橘砧沃柑与另外2种砧木沃柑之间的差异均达显著水平。

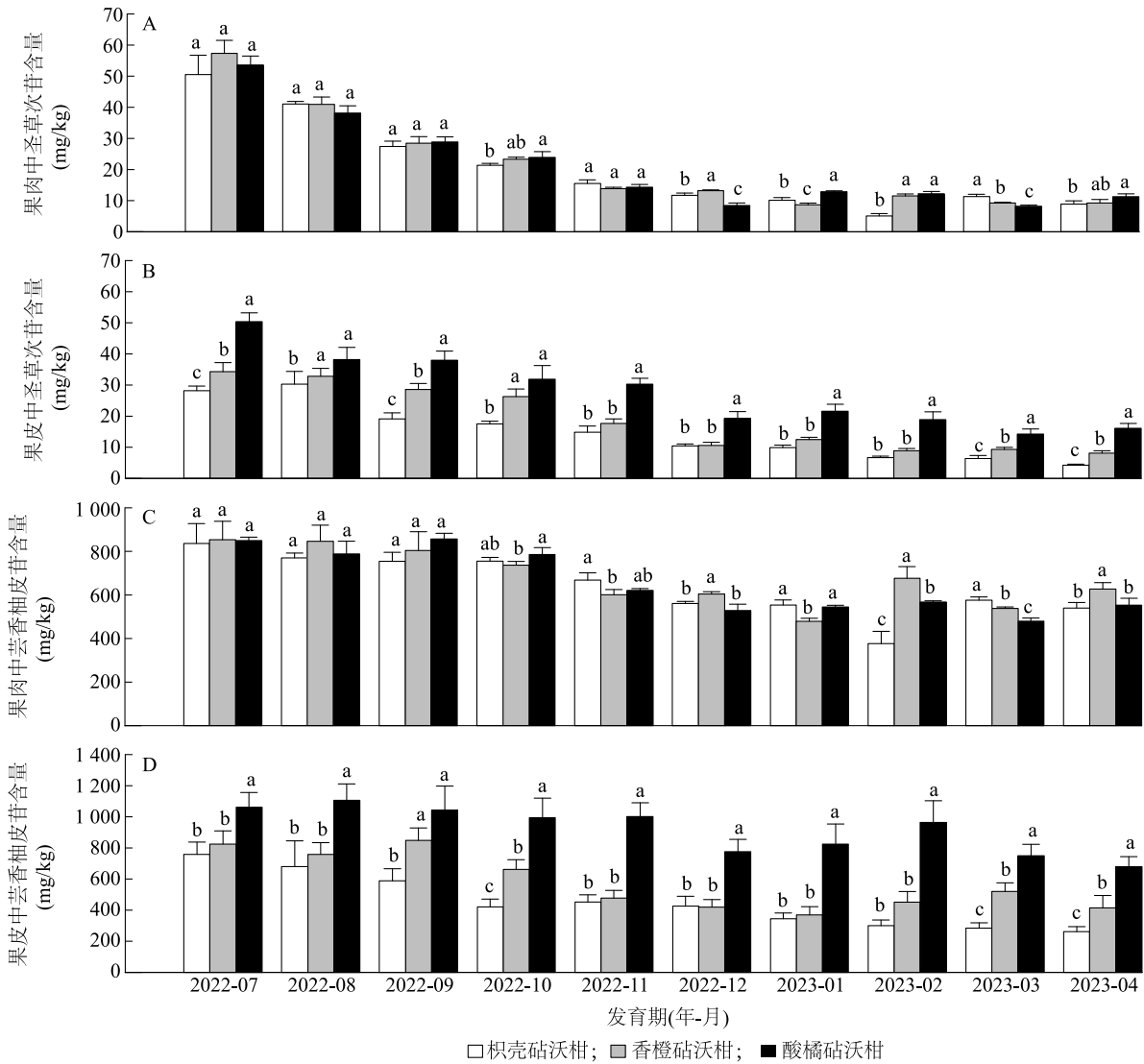
由图2A可知,沃柑果肉中柚皮苷含量在2022年7-12月整体呈下降趋势,2023年1-4月枳壳砧沃柑果肉中柚皮苷含量变化幅度较大,并在2023年2月含量达到最低。同一月份3种砧木沃柑果肉中柚皮苷含量表现为:2022年9月和12月香橙砧沃柑显著高于枳壳砧沃柑,2023年2月和4月枳壳砧沃柑显著低于另外2种砧木沃柑,2023年3月酸橘砧沃柑显著低于另外2种砧木沃柑。由图2B可知,沃柑果皮中柚皮苷含量在2022年7至2023年4月整体呈现波动下降趋势,枳壳砧沃柑和酸橘砧沃柑果皮中柚皮苷含量在2023年4月达最低值,香橙砧沃柑在2023年1月达最低值。同一月份3种砧木沃柑果皮中柚皮苷含量均表现为酸橘砧沃柑>香橙砧沃柑>枳壳砧沃柑,且酸橘砧沃柑与另外2种砧木沃柑间的差异均达显著水平。

由图2C可知,随着果实生长发育,沃柑果肉中橙皮苷含量前4个月高于后6个月,枳壳砧沃柑和香橙砧沃柑果肉橙皮苷含量在2022年11月快速下降,酸橘砧沃柑在2022年12月快速下降。同一月份不同砧木沃柑果肉中橙皮苷含量表现为:2022年8月酸橘砧沃柑显著高于香橙砧沃柑,2022年12月枳壳砧沃柑和香橙砧沃柑显著高于酸橘砧沃柑,2023年1月、2月、4月酸橘砧沃柑显著高于枳壳砧沃柑和香橙砧沃柑。由图2D可知,沃柑果实生长发育过程中果皮中橙皮苷含量变化不大,同一月份3种砧木沃柑果皮中橙皮苷含量差异仅2022年12月酸橘砧沃柑显著高于香橙砧沃柑,2023年2月酸橘砧沃柑显著高于枳壳砧沃柑,其余月份无显著差异。在各个发育期,3种砧木沃柑果皮中的橙皮苷含量是果肉的2.3~5.0倍,远高于果肉。

由图3A可知,随着果实生长发育,沃柑果肉中新橙皮苷含量前4个月高于后6个月,枳壳砧沃柑

果肉中新橙皮苷含量在 2022 年 12 月和 2023 年 2-4 月显著下降,香橙砧沃柑在 2023 年 1 月与 2022 年 12 月相比显著下降,之后的几个月相对平稳,酸橘砧沃柑在 2022 年 12 月和 2023 年 3 月分别与上个月相比显著下降。同一月份不同砧木沃柑果肉中新橙皮苷含量表现为:2022 年 12 月香橙砧沃柑显著高于枳壳砧沃柑和酸橘砧沃柑,2023 年 1 月枳壳砧

沃柑和酸橘砧沃柑显著高于香橙砧沃柑,2023 年 2 月和 4 月酸橘砧沃柑显著高于枳壳砧沃柑和香橙砧沃柑。由图 3B 可知,沃柑果实生长发育过程中果皮中新橙皮苷含量变化不大,同一月份 3 种砧木沃柑果皮中新橙皮苷含量无显著差异。在各个发育期,3 种砧木沃柑果皮中的新橙皮苷含量是果肉的 2.2~3.8 倍,远高于果肉。



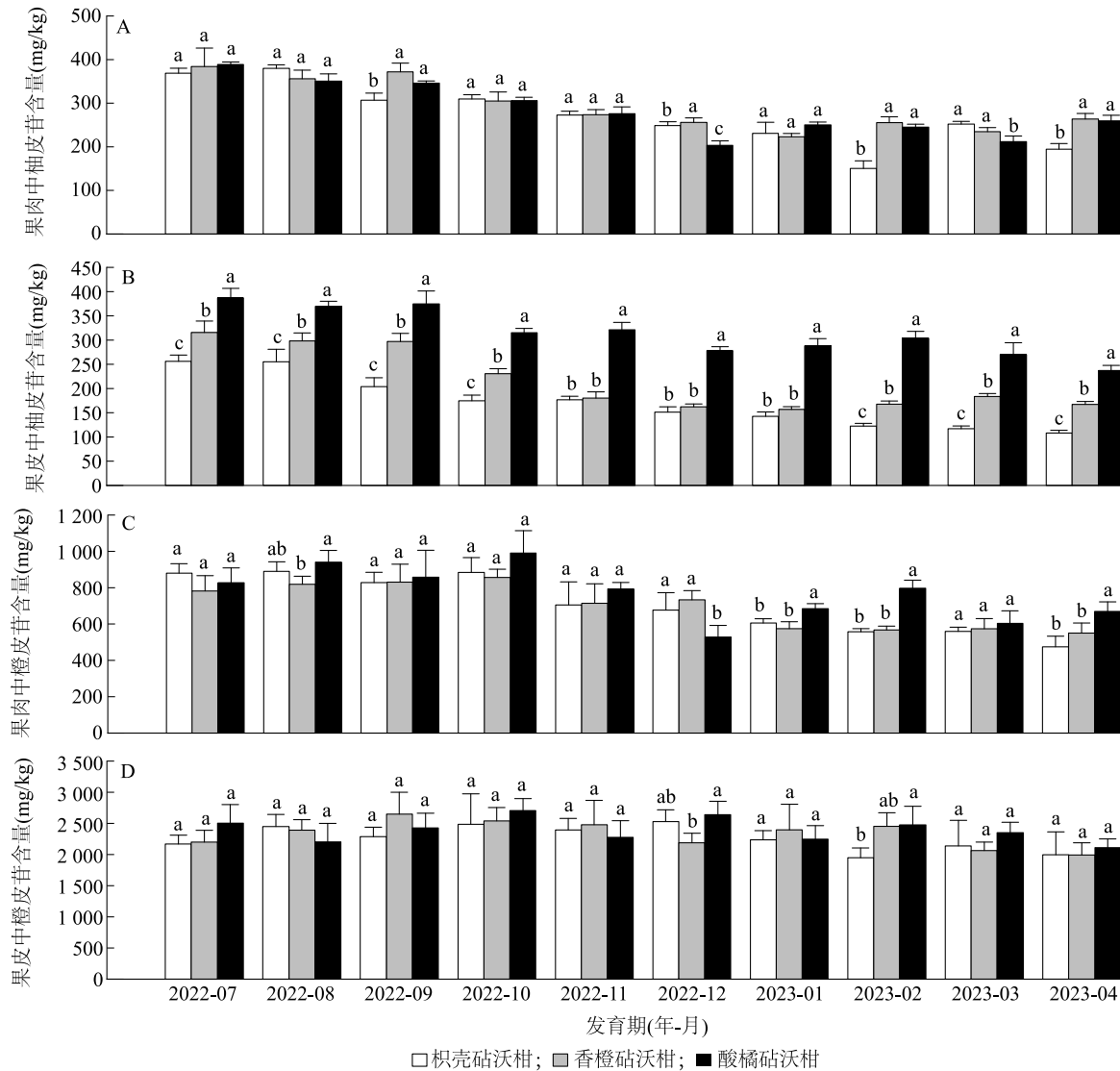
A:3 种砧木沃柑果肉中圣草次苷含量;B:3 种砧木沃柑果皮中圣草次苷含量;C:3 种砧木沃柑果肉中芸香柚皮苷含量;D:3 种砧木沃柑果皮中芸香柚皮苷含量。图柱上不同小写字母表示同一发育期不同砧木沃柑果肉或者果皮中黄酮类化合物含量存在显著差异 ($P < 0.05$)。

图 1 不同砧木沃柑果实发育过程中圣草次苷含量和芸香柚皮苷含量变化

Fig.1 Changes in eriocitrin content and naringin content during fruit development of Orah mandarin with different rootstocks

由图 3C 可知,随着果实生长发育,沃柑果肉中香风草苷含量前 4 个月均高于后 6 个月,枳壳砧沃柑和酸橘砧沃柑果肉香风草苷含量在 2022 年 11 月

快速下降,香橙砧沃柑在 2022 年 8 月快速下降。同一月份不同砧木沃柑果肉中香风草苷含量表现为:2022 年 7 月和 12 月香橙砧沃柑显著高于枳壳砧沃



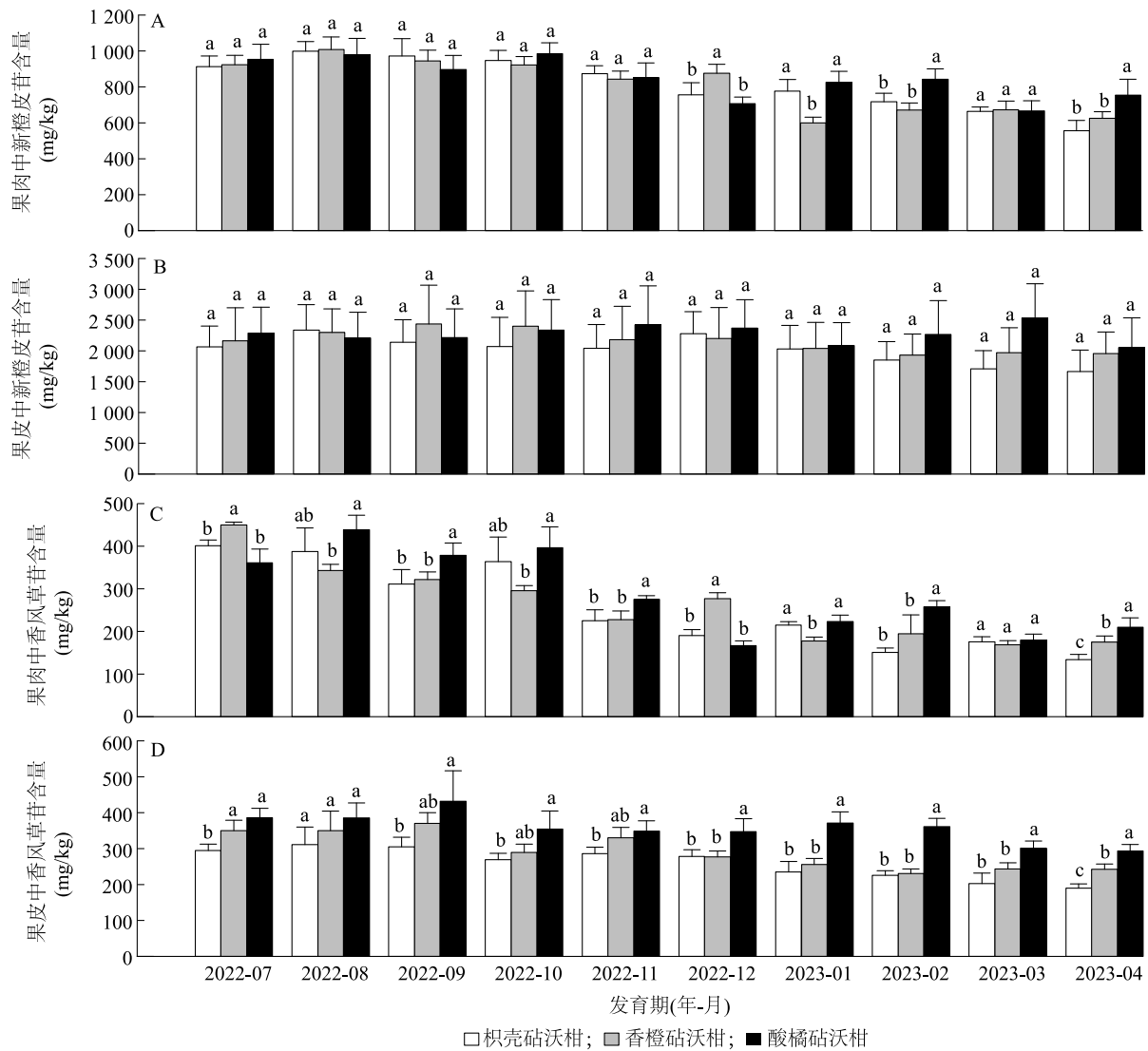
A:3种砧木沃柑果肉中柚皮苷含量;B:3种砧木沃柑果皮中柚皮苷含量;C:3种砧木沃柑果肉中橙皮苷含量;D:3种砧木沃柑果皮中橙皮苷含量。图柱上不同小写字母表示同一发育期不同砧木沃柑果肉或者果皮中黄酮类化合物含量存在显著差异($P < 0.05$)。

图2 不同砧木沃柑果实发育过程中柚皮苷含量和橙皮苷含量变化

Fig.2 Changes of naringin content and hesperidin content during fruit development of Orah mandarin with different rootstocks

柑和酸橘砧沃柑,2022年8月和10月酸橘砧沃柑显著高于香橙砧沃柑,2022年9月和11月酸橘砧沃柑显著高于枳壳砧沃柑和香橙砧沃柑,2023年1月酸橘砧沃柑和枳壳砧沃柑显著高于香橙砧沃柑,2023年2月和4月酸橘砧沃柑显著高于枳壳砧沃柑和香橙砧沃柑。由图3D可知,沃柑果实生长发育过程中果皮中香风草苷含量变化不大。同一月份不同砧木沃柑果皮中香风草苷含量表现为:2022年7月、9月、10月和11月酸橘砧沃柑显著高于枳壳砧沃柑,2022年12月及2023年1-4月酸橘砧沃柑显著高于枳壳砧沃柑和香橙砧沃柑。

由图4A可知,沃柑果肉中枸橼苷含量在2022年7-12月整体呈下降趋势,2023年1-4月不同砧木沃柑变化趋势不一。同一月份不同砧木沃柑果肉中枸橼苷含量表现为:2022年12月香橙砧沃柑显著高于枳壳砧沃柑和酸橘砧沃柑,2022年11月和2023年1月、2月、4月酸橘砧沃柑显著高于枳壳砧沃柑和香橙砧沃柑。由图4B可知,沃柑果实生长发育过程中不同砧木沃柑果皮中枸橼苷含量变化不一。同一月份不同砧木沃柑果皮中枸橼苷含量表现为:2022年7月、10-12月和2023年1-3月酸橘砧沃柑显著高于枳壳砧沃柑和香橙砧沃柑,2022年9



A:3 种砧木沃柑果肉中新橙皮苷含量;B:3 种砧木沃柑果皮中新橙皮苷含量;C:3 种砧木沃柑果肉中香风草苷含量;D:3 种砧木沃柑果皮中香风草苷含量。图柱上不同小写字母表示同一发育期不同砧木沃柑果肉或者果皮中黄酮类化合物含量存在显著差异($P<0.05$)。

图 3 不同砧木沃柑果实发育过程中新橙皮苷含量和香风草苷含量变化

Fig.3 Changes in neohesperidin content and didymin content during fruit development of Orah mandarin with different rootstocks

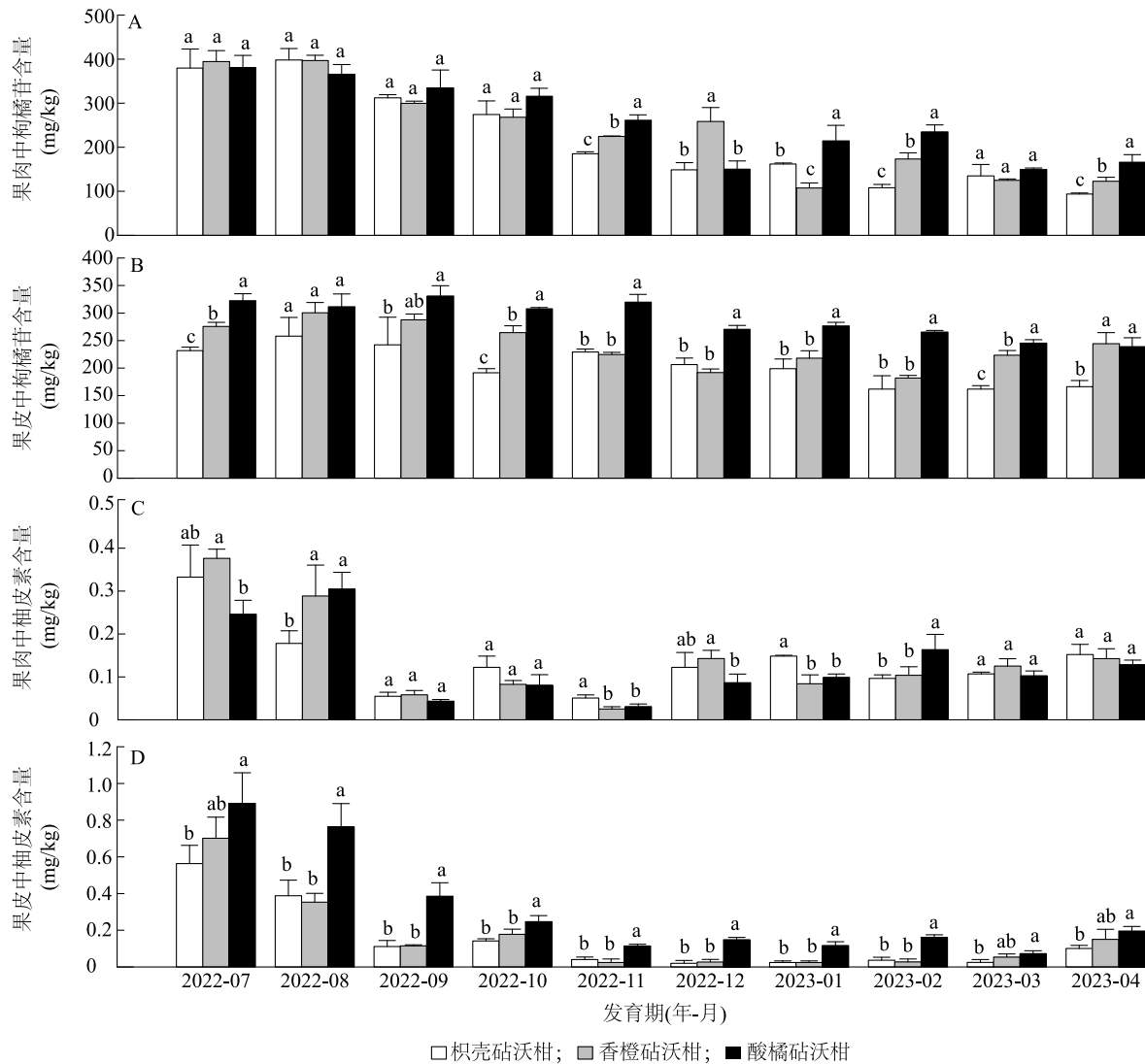
月酸橘砧沃柑显著高于枳壳砧沃柑,2023 年 4 月酸橘砧沃柑和香橙砧沃柑显著高于枳壳砧沃柑。

由图 4C 可知,随着果实生长发育,沃柑果肉中柚皮素含量前 2 个月显著高于后 8 个月,3 种砧木沃柑果肉中柚皮素含量均在 2022 年 9 月急速下降,之后呈现波动变化。同一月份不同砧木沃柑果肉中的柚皮素含量表现为:2022 年 7 月和 12 月香橙砧沃柑显著高于酸橘砧沃柑,2022 年 8 月酸橘砧沃柑和香橙砧沃柑显著高于枳壳砧沃柑,2022 年 11 月和 2023 年 1 月枳壳砧沃柑显著高于香橙砧沃柑和酸橘砧沃柑,2023 年 2 月酸橘砧沃柑显著高于枳壳

砧沃柑和香橙砧沃柑。由图 4D 可知,沃柑果皮中柚皮素含量在 2022 年 7-11 月整体呈现快速下降趋势,之后保持相对稳定。同一月份不同砧木沃柑果皮中柚皮素含量表现为:2022 年 7 月和 2023 年 3-4 月酸橘砧沃柑显著高于枳壳砧沃柑,2022 年 8-12 月和 2023 年 1-2 月酸橘砧沃柑显著高于枳壳砧沃柑和香橙砧沃柑。

2.3 不同砧木沃柑果实发育过程中黄酮类化合物含量变化

由图 5A 可知,沃柑果肉中野漆树苷含量在 2022 年 7-12 月整体呈下降趋势,2023 年 1-4 月不同砧木



A:3种砧木沃柑果肉中枸橼苷含量;B:3种砧木沃柑果皮中枸橼苷含量;C:3种砧木沃柑果肉中柚皮素含量;D:3种砧木沃柑果皮中柚皮素含量。图柱上不同小写字母表示同一发育期不同砧木沃柑果肉或者果皮中黄酮类化合物含量存在显著差异($P<0.05$)。

图4 不同砧木沃柑果实发育过程中枸橼苷含量和柚皮素含量变化

Fig.4 Changes of poncirin content and naringenin content during fruit development of Orah mandarin with different rootstocks

沃柑变化趋势不一。同一月份不同砧木沃柑果肉中野漆树苷含量表现为:2022年9月枳壳砧沃柑显著高于香橙砧沃柑,2022年10月酸橘砧沃柑显著高于香橙砧沃柑,2022年12月香橙砧沃柑显著高于另外2种砧木沃柑,2022年11月和2023年1-4月,酸橘砧沃柑显著高于另外2种砧木沃柑。由图5B可知,沃柑果皮中野漆树苷含量在2022年7-12月逐步下降,2023年1-4月枳壳砧果皮中野漆树苷含量继续下降,2023年4月达最低值。同一月份不同砧木沃柑果皮中野漆树苷含量表现为:2022年7月、9月、10月和2023年1-4月枳壳砧沃柑显著低于另外2种砧木沃柑,

2022年10-12月和2023年1-2月,酸橘砧沃柑显著高于另外2种砧木沃柑。

由图5C可知,沃柑果肉中香叶木素含量在2022年8-12月整体呈快速下降趋势,2023年1-4月未检出。同一月份不同砧木沃柑果肉中香叶木素含量表现为:2022年7月枳壳砧沃柑显著高于酸橘砧沃柑,2022年9月枳壳砧沃柑和香橙砧沃柑显著高于酸橘砧沃柑,2022年10月香橙砧沃柑显著高于另外2种砧木沃柑。由图5D可知,沃柑果皮中香叶木素含量在2022年7-12月高于2023年1-4月,不同砧木沃柑果皮中香叶木素含量变化趋势不

一。同一月份不同砧木沃柑果皮中香叶木素含量表现为:2022 年 8-10 月枳壳砧沃柑显著高于另外 2 种砧木沃柑,2022 年 11-12 月,酸橘砧沃柑显著低于另外 2 种砧木沃柑,2023 年 1-4 月,香橙砧沃柑显著低于另外 2 种砧木沃柑。各个发育期,3 种砧木果皮中的香叶木素含量远高于果肉。

由图 5E 可知,沃柑果肉中川陈皮素含量在 2022 年 7-12 月急速下降,2023 年 1-4 月保持相对稳定。同一月份不同砧木沃柑果肉中川陈皮素含量表现为:2022 年 7 月酸橘砧沃柑显著高于另外 2 种砧木沃柑,2022 年 8 月、10 月、11 月和 2023 年 2 月香橙砧沃柑显著高于另外 2 种砧木沃柑,2022 年 9 月和 12 月枳壳砧沃柑显著高于另外 2 种砧木沃柑,2023 年 1 月和 3 月酸橘砧沃柑显著低于另外 2 种砧木沃柑,2023 年 4 月枳壳砧沃柑显著低于另外 2 种砧木沃柑。由图 5F 可知,沃柑果皮中川陈皮素含量在 2022 年 7-11 月相对稳定,2022 年 12 月到 2023 年 4 月期间缓慢下降。同一月份不同砧木沃柑果皮中川陈皮素含量表现为:2022 年 7 月和 9 月酸橘砧沃柑显著高于枳壳砧沃柑,2022 年 11-12 月枳壳砧沃柑显著高于酸橘砧沃柑,2023 年 1 月、3 月、4 月香橙砧沃柑显著低于枳壳砧沃柑和酸橘砧沃柑,2023 年 2 月香橙砧沃柑显著低于枳壳砧沃柑。在各个发育期,3 种砧木沃柑果皮中川陈皮素含量远高于果肉。

由图 6A 可知,沃柑果肉中橘皮素含量在 2022 年 7-11 月急速下降,2022 年 12 月到 2023 年 4 月期间保持稳定。同一月份不同砧木沃柑果肉中橘皮素含量表现为:2022 年 10-11 月香橙砧沃柑显著高于另外 2 种砧木沃柑,2022 年 9 月、12 月和 2023 年 1 月枳壳砧沃柑显著高于酸橘砧沃柑,2023 年 2 月酸橘砧沃柑显著高于枳壳砧沃柑,2023 年 3 月酸橘砧沃柑显著低于另外 2 种砧木沃柑,2023 年 4 月枳壳砧沃柑显著低于另外 2 种砧木沃柑。由图 6B 可知,沃柑果皮中橘皮素含量在 2022 年 7-11 月期间呈先下降再升高的趋势,2022 年 12 月到 2023 年 4 月期间逐渐下降。同一月份不同砧木沃柑果皮中橘皮素含量表现为:2022 年 8 月枳壳砧沃柑显著高于酸橘砧沃柑,2022 年 10 月香橙砧沃柑显著高于另外 2 种砧木沃柑,2022 年 11 月到 2023 年 3 月枳壳砧沃柑显著高于另外 2 种砧木沃柑,2023 年 1 月、3 月、4 月香橙砧沃柑显著低于另外 2 种砧木沃柑。

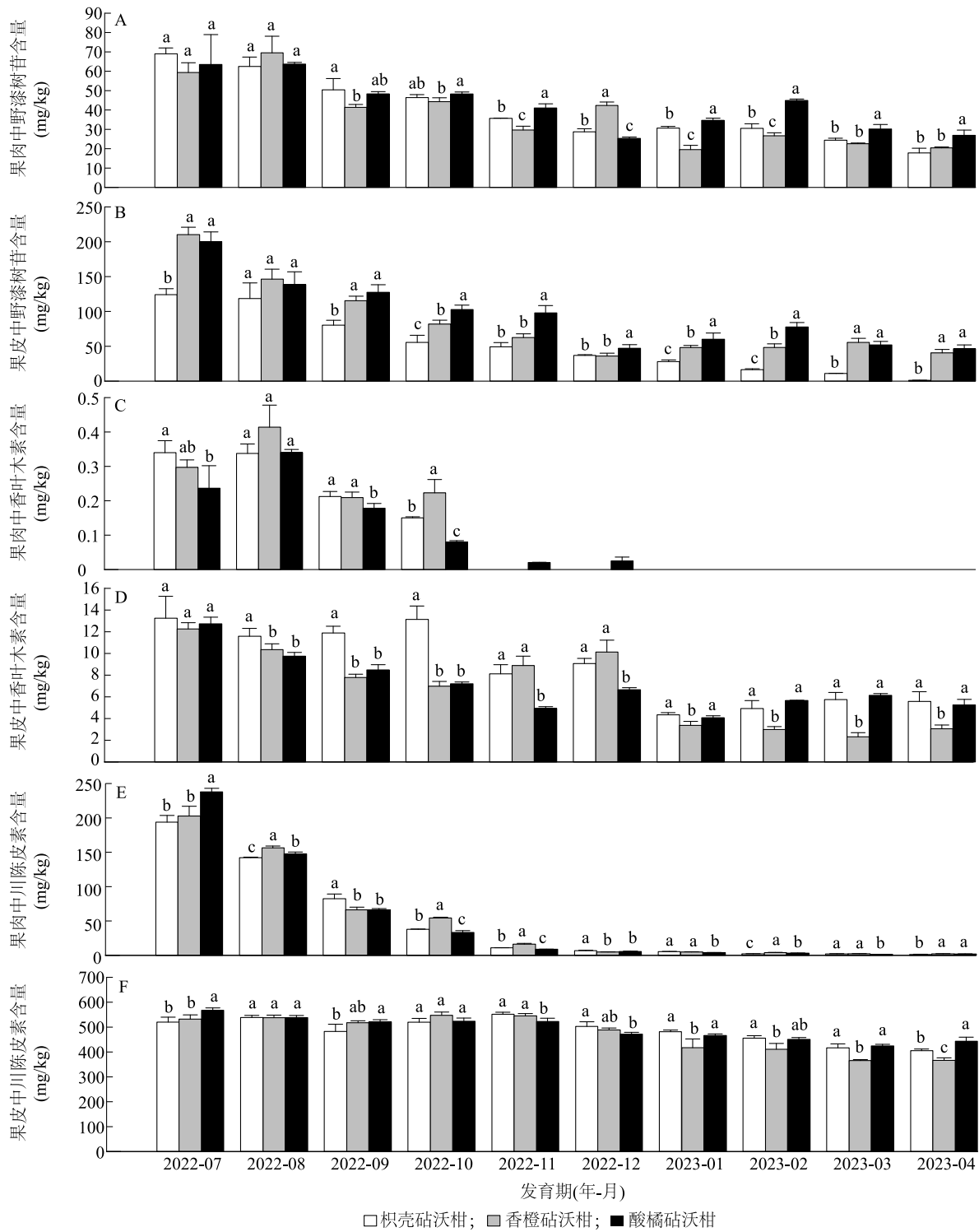
在各个发育期,3 种砧木沃柑果皮中橘皮素含量远高于果肉。

由图 6C 可知,沃柑果肉中甜橙黄酮含量在 2022 年 7-11 月急速下降,2022 年 12 月到 2023 年 4 月期间保持稳定。同一月份不同砧木沃柑果肉中甜橙黄酮含量表现为:2022 年 8 月香橙砧沃柑显著高于酸橘砧沃柑,2022 年 9 月、12 月和 2023 年 1 月枳壳砧沃柑显著高于另外 2 种砧木沃柑,2022 年 10-11 月香橙砧沃柑显著高于枳壳砧沃柑和酸橘砧沃柑,2023 年 2 月和 4 月枳壳砧沃柑显著低于另外 2 种砧木沃柑,2023 年 3 月酸橘砧沃柑显著低于另外 2 种砧木沃柑。由图 6D 可知,沃柑果皮中甜橙黄酮含量在 2022 年 7-11 月期间小幅波动,2022 年 12 月到 2023 年 4 月期间逐渐下降。同一月份不同砧木沃柑果皮中甜橙黄酮含量表现为:2022 年 10 月香橙砧沃柑显著高于酸橘砧沃柑,2022 年 11-12 月和 2023 年 1 月枳壳砧沃柑显著高于酸橘砧沃柑,2022 年 12 月和 2023 年 1-2 月枳壳砧沃柑显著高于香橙砧沃柑,2023 年 3-4 月香橙砧沃柑显著低于另外 2 种砧木沃柑。在各个发育期,3 种砧木沃柑果皮中的甜橙黄酮含量是果肉的 4.8~1 404.2 倍,远高于果肉。

2.4 不同砧木沃柑果实发育过程中黄酮醇类化合物含量变化

由图 7A 可知,随着果实生长发育,不同砧木沃柑果肉中芦丁含量变化趋势不同,整体呈现先升高后波动下降趋势。同一月份不同砧木沃柑果肉中芦丁含量表现为:2022 年 9 月和 2023 年 1 月、2 月、4 月酸橘砧沃柑显著高于另外 2 种砧木沃柑,2022 年 12 月香橙砧沃柑显著高于另外 2 种砧木沃柑,2023 年 3 月香橙砧沃柑显著低于另外 2 种砧木沃柑。由图 7B 可知,沃柑果皮中芦丁含量随着果实生长发育变化幅度不大。同一月份不同砧木沃柑果皮中芦丁含量表现为:2022 年 7 月枳壳砧沃柑显著低于另外 2 种砧木沃柑,2022 年 10 月和 2023 年 1 月、4 月香橙砧沃柑显著高于枳壳砧沃柑,2022 年 12 月和 2023 年 2 月酸橘砧沃柑显著高于香橙砧沃柑。在各个发育期,3 种砧木沃柑果皮中芦丁含量高于果肉。

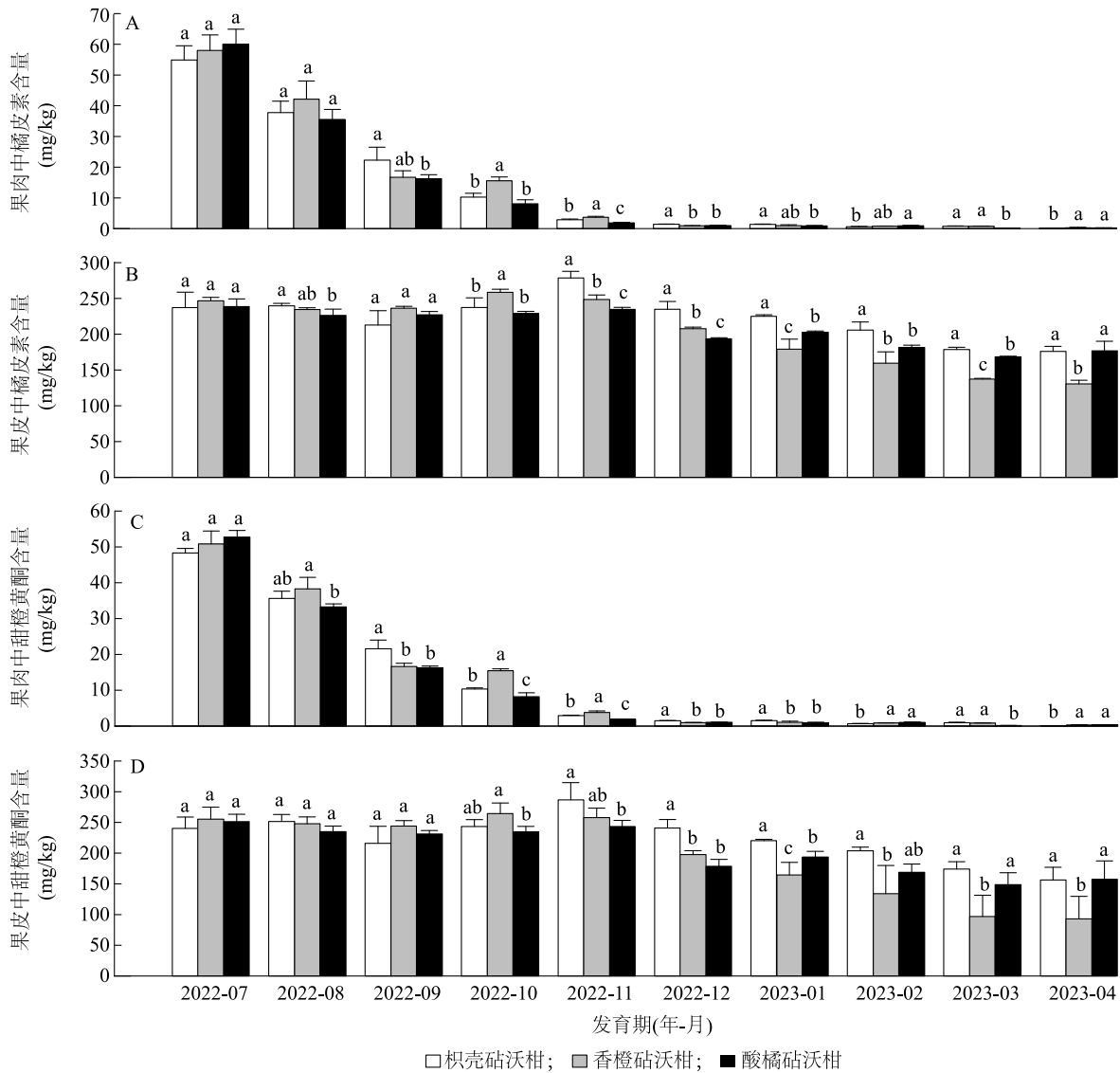
由图 7C 可知,沃柑果肉中槲皮素含量在 2022 年 7-11 月快速下降,2022 年 12 月至 2023 年 4 月枳壳砧沃柑果肉中槲皮素含量变化幅度较大,香橙砧沃柑和酸橘砧沃柑变化幅度较小。同一月份不同



A:3种砧木沃柑果肉中野漆树苷含量;B:3种砧木沃柑果皮中野漆树苷含量;C:3种砧木沃柑果肉中香叶木素含量;D:3种砧木沃柑果皮中香叶木素含量;E:3种砧木沃柑果肉中川陈皮素含量;F:3种砧木沃柑果皮中川陈皮素含量。图柱上不同小写字母表示同一发育期不同砧木沃柑果肉或者果皮中黄酮类化合物含量存在显著差异($P < 0.05$)。

图5 不同砧木沃柑果实发育过程中野漆树苷含量、香叶木素含量和川陈皮素含量变化

Fig.5 Changes of rhoifolin content, diosmetin content and nobiletin content during fruit development of Oran mandarin with different rootstocks



A;3 种砧木沃柑果肉中槲皮素含量;B;3 种砧木沃柑果皮中槲皮素含量;C;3 种砧木沃柑果肉中甜橙黄酮含量;D;3 种砧木沃柑果皮中甜橙黄酮含量。图柱上不同小写字母表示同一发育期不同砧木沃柑果肉或者果皮中黄酮类化合物含量存在显著差异($P < 0.05$)。

图 6 不同砧木沃柑果实发育过程中槲皮素含量和甜橙黄酮含量变化

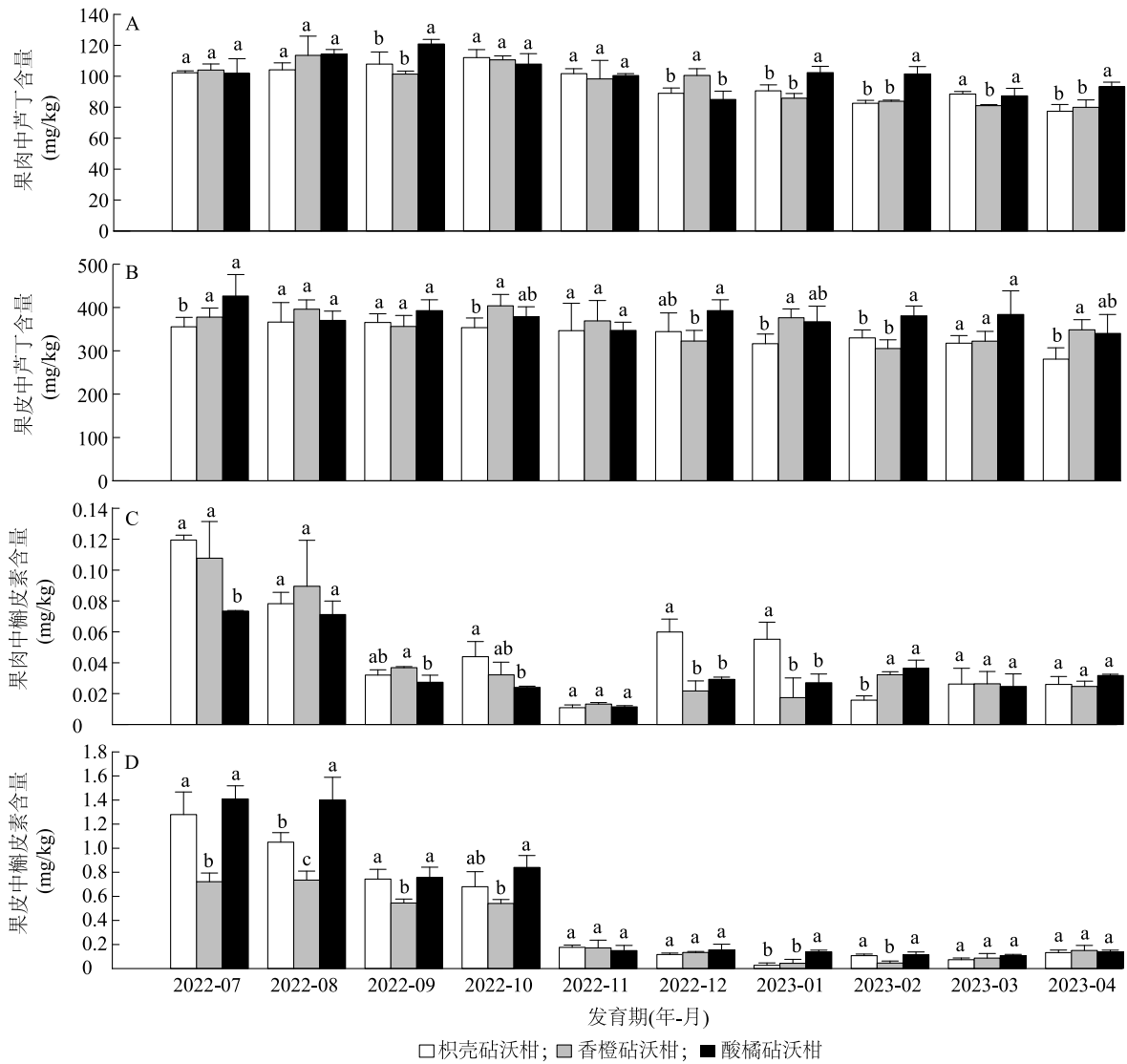
Fig.6 Changes in tangeretin content and sinensetin content during fruit development of Oranh mandarin with different rootstocks

砧木沃柑果肉中槲皮素含量表现为:2022 年 7 月酸橘砧沃柑显著低于另外 2 种砧木沃柑,2022 年 9 月香橙砧沃柑显著高于酸橘砧沃柑,2022 年 10 月枳壳砧沃柑显著高于酸橘砧沃柑,2022 年 12 月和 2023 年 1 月枳壳砧沃柑显著高于另外 2 种砧木沃柑,2023 年 2 月枳壳砧沃柑显著低于另外 2 种砧木沃柑。由图 7D 可知,随着果实生长发育,沃柑果皮中槲皮素含量前 4 个月显著高于后 6 个月,2022 年 11 月至 2023 年 4 月期间果皮中槲皮素含量相对稳定。同一月份不同砧木沃柑果皮中槲皮素含量表现

为:2022 年 7-9 月和 2023 年 2 月香橙砧沃柑显著低于另外 2 种砧木沃柑,2022 年 10 月酸橘砧沃柑显著高于香橙砧沃柑,2023 年 1 月酸橘砧沃柑显著高于另外 2 种砧木沃柑。

2.5 不同砧木沃柑果实中类黄酮化合物的综合评价

2.5.1 果肉中类黄酮化合物的综合评价 对果肉中 15 种类黄酮化合物进行 PCA 分析(表 1)。结果表明,PCA 分析得到的前 2 个主成分的特征值均大于 1,且累计方差贡献率达 92.330%,说明这 2 个主成分能反映 15 种化合物的绝大部分信息,因此选取前 2 个主成分信



A:3种砧木沃柑果肉中芦丁含量;B:3种砧木沃柑果皮中芦丁含量;C:3种砧木沃柑果肉中槲皮素含量;D:3种砧木沃柑果皮中槲皮素含量。图柱上不同小写字母表示同一发育期不同砧木沃柑果实中黄酮醇类化合物含量存在显著差异($P<0.05$)。

图7 不同砧木沃柑果实发育过程中黄酮醇类化合物含量变化

Fig.7 Changes in the content of various flavonol compounds during the fruit development of Oran mandarin with different rootstocks

息进行后续分析计算。主成分1的方差贡献率达到了79.681%,特征值为11.952,主要与圣草次苷、芸香柚皮苷、柚皮苷、橙皮苷、新橙皮苷、野漆树苷、香风草苷、枸橼苷、香叶木素、川陈皮素、橘皮素、甜橙黄酮等表现为较高正相关性,这些指标在果肉综合评价中起主导作用。主成分2的方差贡献率为12.649%,特征值为1.897,与柚皮素、槲皮素、芦丁相关程度高,其中与柚皮素、槲皮素呈正相关,与芦丁呈负相关。

利用PCA分析中的2个主成分对果肉进行综合评价。将表1中各指标的主成分载荷值除以主成分相对应的特征值的平方根作为特征向量,以特征

向量为权重建立综合评价模型: $F = 0.863F_1 + 0.137F_2$ (F 表示综合得分, F_1 、 F_2 分别表示主成分1的得分、主成分2的得分),获得不同砧木沃柑果肉在各个发育期的综合得分,得分高低反映果肉综合品质的高低。以果实发育期为横坐标,综合得分为纵坐标进行绘图(图8)。由图8可知,3种砧木沃柑果肉均在2022年7月综合得分最高,随着果实发育(2022年7-12月),果肉综合得分逐渐下降;果实成熟后(2023年1-4月),果肉综合得分呈现出波动变化。同一月份不同砧木沃柑果肉综合得分情况:2022年7-8月和12月香橙砧沃柑果肉的得分

最高,2022 年 9-11 月香橙砧沃柑果肉的得分最低。2023 年 1 月,酸橘砧沃柑果肉的得分最高,枳壳砧沃柑次之,香橙砧沃柑最低。2023 年 2 月和 4 月,酸橘砧沃柑果肉的得分最高,香橙砧沃柑次之,枳壳砧沃柑最低。2023 年 3 月,枳壳砧沃柑果肉的得分略高于酸橘砧沃柑和香橙砧沃柑。在果实成熟期内(2023 年 1-4 月),所有砧木沃

柑中酸橘砧沃柑果肉的得分 2 月最高、品质最好,枳壳砧沃柑果肉的得分 1 月最高、品质最好,香橙砧沃柑果肉的得分 2 月最高、品质最好。因此以果肉为主要目的时枳壳砧沃柑果实的最佳采收期为 1 月,香橙砧沃柑和酸橘砧沃柑果实的最佳采收期为 2 月。

表 1 沃柑果肉中类黄酮化合物的主成分(PCA)分析

Table 1 Principal component analysis (PCA) of flavonoid compounds in the pulp of Orah mandarin

类黄酮化合物	主成分 1	主成分 2	类黄酮化合物	主成分 1	主成分 2
圣草次苷	0.970	0.176	香叶木素	0.937	0.087
芸香柚皮苷	0.905	-0.172	槲皮素	0.793	0.514
柚皮苷	0.935	-0.106	芦丁	0.771	-0.565
橙皮苷	0.825	-0.500	川陈皮素	0.933	0.298
新橙皮苷	0.850	-0.448	橘皮素	0.932	0.317
野漆树苷	0.962	-0.074	甜橙黄酮	0.942	0.287
香风草苷	0.944	-0.216	特征值	11.952	1.897
枸橼苷	0.970	-0.179	方差贡献率(%)	79.681	12.649
柚皮素	0.654	0.653	累积方差贡献率(%)	79.681	92.330

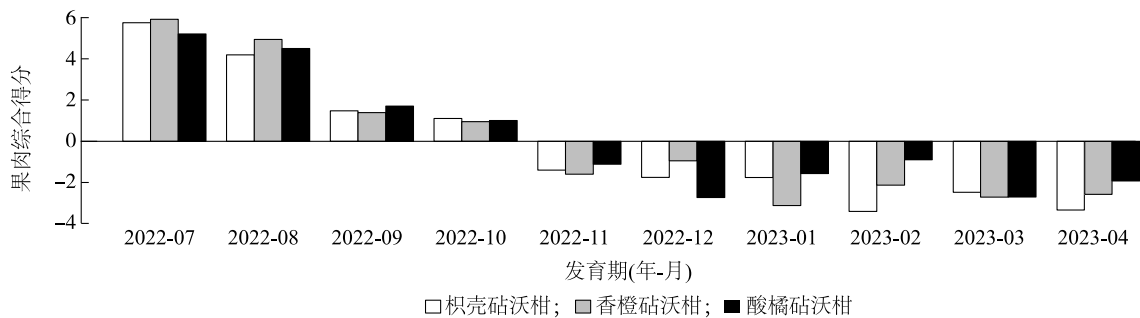


图 8 不同砧木沃柑果肉的得分

Fig.8 Comprehensive scores of the pulp of Orah mandarin with different rootstocks

2.5.2 果皮中类黄酮化合物的综合评价 对果皮中 15 种类黄酮化合物进行 PCA 分析(表 2)。分析结果表明,PCA 分析得到的前 3 个主成分的特征值均大于 1,且累计方差贡献率达 88.994%,说明这 3 个主成分能反映 15 种化合物的绝大部分信息,因此选取前 3 个主成分信息进行后续分析计算。主成分 1 的方差贡献率达到了 63.088%,特征值为 9.463,主要与圣草次苷、芸香柚皮苷、柚皮苷、野漆树苷、香风草苷、枸橼苷、芦丁、川陈皮素等表现为较高正相关性,这些化合物在果皮综合评价中起主导作用。

主成分 2 的方差贡献率为 14.884%,特征值为 2.233,与橘皮素、甜橙黄酮呈正相关。主成分 3 的方差贡献率为 11.022%,特征值为 1.653,与橙皮苷、新橙皮苷、柚皮素相关程度高,其中与橙皮苷、新橙皮苷呈正相关,与柚皮素呈负相关。

利用 PCA 分析中的 3 个主成分对果皮进行综合评价。建立果皮综合评价模型: $F = 0.709 F_1 + 0.167 F_2 + 0.124 F_3$ (F 表示综合得分, F_1 、 F_2 、 F_3 分别表示主成分 1 的得分、主成分 2 的得分、主成分 3 的得分),获得不同砧木沃柑果皮在各个发育期的

综合得分,得分高低反映果皮综合品质的高低。以果实发育期为横坐标,综合得分为纵坐标进行绘图(图9)。由图9可知,香橙砧沃柑和酸橘砧沃柑果皮在2022年7月综合得分最高,枳壳砧沃柑果皮在2022年8月综合得分最高,随着果实发育,3种砧木果皮综合得分均呈下降趋势。在整个发育期,同一月份中酸橘砧沃柑果皮的综合得分均高于另外2种砧木沃柑。2022年7-11月和2023年4月,香橙砧

沃柑果皮的综合得分高于枳壳砧沃柑;而2022年12月和2023年1-3月,枳壳砧沃柑果皮的综合得分高于香橙砧沃柑。在果实成熟期,即2023年1-4月,酸橘砧沃柑果皮的综合得分在2月最高;枳壳砧沃柑和香橙砧沃柑果皮在1月综合得分最高,因此以果皮为目的时酸橘砧沃柑果实的最佳采收期为2月,枳壳砧沃柑和香橙砧沃柑果实的最佳采收期为1月。

表2 沃柑果皮中类黄酮化合物的主成分(PCA)分析

Table 2 Principal component analysis (PCA) of flavonoid compounds in the peel of Orah mandarin

类黄酮化合物	主成分1	主成分2	主成分3	类黄酮化合物	主成分1	主成分2	主成分3
圣草次苷	0.969	-0.092	-0.154	香叶木素	0.653	0.546	-0.270
芸香柚皮苷	0.855	-0.448	0.007	槲皮素	0.790	0.148	-0.473
柚皮苷	0.891	-0.420	-0.035	芦丁	0.804	-0.202	0.203
橙皮苷	0.542	0.084	0.674	川陈皮素	0.824	0.522	0.123
新橙皮苷	0.712	-0.168	0.531	橘皮素	0.667	0.682	0.173
野漆树苷	0.892	-0.079	-0.300	甜橙黄酮	0.693	0.667	0.148
香风草苷	0.888	-0.281	0.162	特征值	9.463	2.233	1.653
枸橼苷	0.860	-0.422	0.092	方差贡献率(%)	63.088	14.884	11.022
柚皮素	0.758	-0.074	-0.602	累积方差贡献率(%)	63.088	77.972	88.994

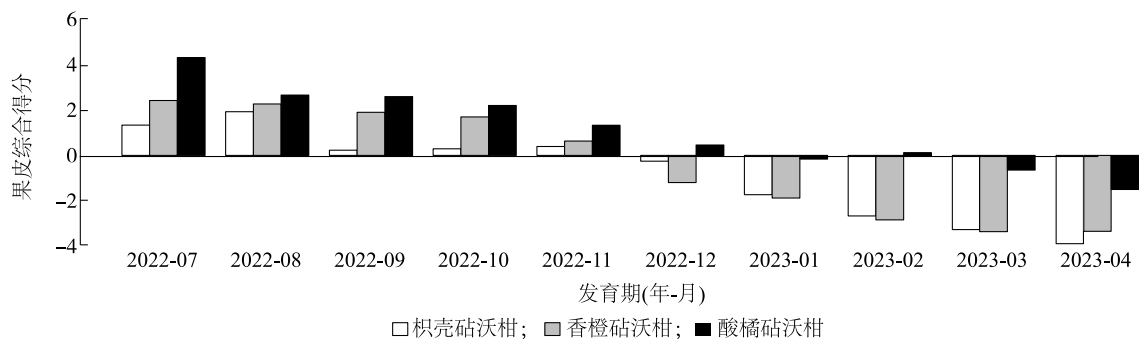


图9 不同砧木沃柑果皮的综合得分

Fig.9 Comprehensive scores of the peel of Orah mandarin with different rootstocks

3 讨论

3.1 沃柑果实发育过程中类黄酮化合物组成和含量的变化

在果实发育过程中,沃柑果肉和果皮中各类黄酮化合物的含量总体呈下降趋势,与张念等^[18]在琯溪蜜柚和尹会平等^[20]在金柑中的研究结果一致。类黄酮化合物含量的下降可能与果实增大产生的生理稀释作用有关。Moriguchi等^[21]研究结果表明,柑

橘类果实在发育初期会大量积累类黄酮化合物,随着果实增大,类黄酮化合物的合成逐渐减少。韩寒冰等^[22]研究了化橘红果实生长发育过程中类黄酮化合物的动态变化,结果显示果龄在15~60 d的化橘红果实中野漆树苷、柚皮素、柚皮苷和芹菜素的含量随着果实增大而下降。Li等^[23]在连续3个生长季节测定了国庆1号温州蜜柑果实发育过程中的柠檬苦素、诺米林和柚皮苷的含量,结果显示,这些化合物在果实组织中的含量总体上呈现下降趋势。

Chen 等^[24]研究了香柑素苷、柚皮苷、橙皮苷、双甲苷、橙皮素、川陈皮素和橘皮素 7 种类黄酮化合物在 4 种甜橙果实发育过程中的含量变化,结果发现不同种质果实的不同组织中各类黄酮化合物总体呈下降趋势。果实发育过程中类黄酮化合物含量的下降还可能与基因表达下调有关。李昕琪^[25]对茶枝柑果实的研究发现,类黄酮化合物和挥发性物质的含量随着果实成熟而减少,特别是多甲氧基黄酮,其含量在成熟果实中最低。转录组分析揭示了整个果实发育期内基因表达的变化趋势:下调基因数量显著多于上调基因,并且大多数基因的表达随着发育期的延长逐渐下调。

3.2 沃柑不同组织中类黄酮化合物组成和含量的差异

沃柑果肉和果皮中类黄酮化合物含量排名前 3 的组分为橙皮苷、新橙皮苷和芸香柚皮苷,说明黄酮类化合物为沃柑果实的主要类黄酮化合物,本研究结果与朱丽莎等^[26]在甜橙中的研究结果相似。沃柑果皮中类黄酮化合物含量对比发现,橙皮苷平均含量最高,这与王海帆等^[27]在沃柑果皮中的研究结果一致。果肉中新橙皮苷平均含量最高,橙皮苷次之,这与郭鹏妹等^[28]在金柑杂种中的研究结果一致。部分研究结果显示,新橙皮苷在果肉中的含量很低,与本研究结果存在差异。例如张念等^[18]报道了同一成熟期琯溪蜜柚果肉中类黄酮化合物含量表现为柚皮苷>野漆树苷>新橙皮苷>新圣草次苷。李勋兰等^[29]研究结果表明,在 11 种杂柑和甜橙果肉中,主要类黄酮化合物种类为橙皮苷、芸香柚皮苷和香风草苷,新橙皮苷的含量很低或未检出。牛静琪等^[30]测定了 60 种常见柑橘属水果果肉中类黄酮化合物组成及含量,结果表明,橙皮苷、芸香柚皮苷和香风草苷是宽皮柑橘和橙果肉中主要的类黄酮化合物,新橙皮苷的含量很低或未检出。这些研究结果的差异可能是由于柑橘种质的不同。研究发现,不同柑橘种质中类黄酮化合物的种类和含量存在明显差异。例如,血橙中通常含有丰富的花青苷,但是柚、橘等种质中花青苷含量很低或未检测到^[2]。柚类中的柚皮苷含量丰富,但橙皮苷含量很低;橙类中含量较高的物质为橙皮苷、芸香柚皮苷和香风草苷;柠檬中含量较高的物质为圣草次苷和橙皮苷;宽皮柑橘类和橙类中橙皮苷、新橙皮苷含量也存在差异^[30]。张玉等^[31]测定了 5 种柑橘果皮中 6 种类黄

酮化合物含量,结果显示,常山胡柚果皮中的主要类黄酮化合物为柚皮苷和新橙皮苷,宫川温州蜜柑和哈姆林甜橙果皮中以橙皮苷为主,衢州椪柑和蕉柑果皮中主要含有橙皮苷和川皮素。黄胜佳等^[32]的研究结果表明,沃柑果皮中的新橙皮苷和柚皮苷含量显著高于其他品种。

柑橘类黄酮化合物组成和含量的差异还表现在不同组织间。研究结果表明,葡萄柚果肉富含橙皮苷、柚皮苷、柚皮素、橙皮素和芦丁,而果皮中只检测到柚皮苷、橙皮苷^[33]。在本研究中,沃柑果肉和果皮中含有的类黄酮化合物种类相同,但是含量差异较大。沃柑果皮中的橙皮苷、香叶木素、新橙皮苷、橘皮素、甜橙黄酮、川陈皮素、芦丁、槲皮素等含量远高于果肉,特别是 3 种多甲氧基黄酮类化合物(橘皮素、川陈皮素和甜橙黄酮)在果皮中含量丰富,但在果肉中含量较低,与张静等^[34]在晚熟柑橘中的研究结果一致。本研究发现沃柑果实发育过程中,果肉中川陈皮素、橘皮素和甜橙黄酮含量急速降低,但在果皮中下降缓慢,这可能是造成成熟期柑橘果皮和果肉中多甲氧基黄酮类化合物差异极大的主要原因。多甲氧基黄酮类化合物可作为柑橘产品质量控制、产品溯源和柑橘品种分类的依据。本研究对多甲氧基黄酮类化合物在沃柑果实中的含量检测结果显示,果肉和果皮中均表现为川陈皮素含量最高,橘皮素和甜橙黄酮含量接近,与王彤等^[35]研究的多甲氧基黄酮类化合物在不同宽皮柑橘中的积累模式略有不同,其研究结果认为,宽皮柑橘果皮中的多甲氧基黄酮类化合物以川陈皮素为主,而果肉中则以橘皮素为主。

3.3 不同砧木沃柑类黄酮化合物综合评价

3 种砧木中,酸橘砧沃柑果皮在整个发育期的综合评价高于枳壳砧沃柑和香橙砧沃柑,酸橘砧沃柑果肉在 2022 年 11 月和 2023 年 1 月、2 月和 4 月的综合评价高于枳壳砧沃柑和香橙砧沃柑;因此酸橘砧沃柑的类黄酮化合物综合评价整体最优。刘要鑫等^[36]研究发现,酸橘砧沃柑相比枳壳砧沃柑呈现出生长势强、树冠高大等特点。张丹等^[37]研究发现,酸橘砧沃柑还具有稳产性好,溃疡病发病率较低,抗冻寒能力强等优点,但相比枳壳砧沃柑和香橙砧沃柑,其果实降酸慢,固酸比较低。陈招芳等^[13]对塔罗科血橙的研究结果表明,香橙砧塔罗科血橙和枳壳砧塔罗科血橙果实的总黄酮含量低于红橘砧

塔罗科血橙。韩晓等^[6]认为雨热同期的气候条件下,早熟砧木有助于沃柑果实类黄酮化合物的积累,树势旺盛且丰产能力强的砧木不利于沃柑果实中类黄酮化合物的积累。但陈敏等^[14]在容器栽培的不同砧木红江橙果实中发现,树势最强的卡里佐枳橙砧红江橙果实中总黄酮含量显著高于资阳香橙砧红江橙。这些研究结果的差异可能与不同种植区域的环境差异以及不同的栽培管理技术有关。不同砧木对接穗果实中类黄酮化合物组成和含量的影响可能与砧木独特的遗传特性有关。不同砧木对营养物质同化能力的差异和独特的根系分泌物、微生物群落的差异可能会影响接穗的生长发育。砧木中的遗传物质如 miRNA 可以在砧木和接穗之间移动,影响接穗中与类黄酮化合物代谢相关的酶含量和基因表达,进而引起果实中类黄酮化合物代谢的差异^[6]。

本研究对 3 种砧木沃柑果实中类黄酮化合物综合评价结果表明,在整个果实发育期,枳壳砧沃柑果肉在 7 月综合评价得分最高,果皮在 8 月综合评价得分最高。香橙砧沃柑和酸橘砧沃柑果肉和果皮均在 7 月综合评价得分最高,类黄酮化合物综合品质最好。每年 7-8 月正是沃柑第 1 次疏果期,此时果实中类黄酮化合物综合评价得分最高,疏下来的果实可用于开发以类黄酮化合物为主要成分的功能产品。每年 1-4 月是广西南宁地区沃柑果实成熟期,也是沃柑采收期。本研究结果表明,2 月份酸橘砧沃柑果肉和果皮的综合评价得分均高于另外 2 种砧木沃柑,所以酸橘砧沃柑果实最佳采收期为 2 月份。枳壳砧沃柑果实最佳采收期为 1 月份;香橙砧沃柑以果肉为目的的果实最佳采收期为 2 月份,以果皮为目的的最佳采收期为 1 月份。若以鲜食为主则选择果肉中类黄酮化合物综合评价得分最高时为最佳采收期,若以果皮加工为主可选择果皮中类黄酮化合物综合评价得分最高时为最佳采收期。采收时间对果实营养品质的影响较大,适当早采在一定程度上可保持柑橘果实中较高的类黄酮化合物水平^[38]。

4 结论

沃柑果实中的类黄酮化合物以橙皮苷、新橙皮苷和芸香柚皮苷等为主,果肉和果皮间类黄酮化合物含量存在差异。各类黄酮化合物含量随着果实发育期推进总体呈下降趋势。3 种砧木沃柑果实中类黄酮化合物含量存在差异,类黄酮化合物综合评价

结果以酸橘砧沃柑整体更优。在沃柑果实整个发育周期内,枳壳砧沃柑果肉中类黄酮化合物在 7 月综合评价得分最高,果皮在 8 月综合评价得分最高;香橙砧沃柑和酸橘砧沃柑果肉和果皮中类黄酮化合物均在 7 月综合评价得分最高。在果实采收期内(1-4 月),类黄酮化合物综合评价得分最高的为 2 月份酸橘砧沃柑。基于类黄酮化合物综合评价结果确定沃柑最佳采收期为:枳壳砧沃柑的最佳采收期为 1 月,酸橘砧沃柑的最佳采收期为 2 月;香橙砧沃柑的最佳采收期为 1 月或 2 月。本研究结果适用于以类黄酮化合物为主要成分的功能食品的开发,若以鲜食为主最佳采收期的确定还需综合考虑沃柑果实中糖、酸含量以及维生素 C 含量等其他营养指标。

参考文献:

- [1] 朱芙蓉,刘韦清,毛德源,等.响应面优化酸法提取沃柑果皮果胶工艺[J].中国酿造,2024,43(2):226-231.
- [2] 陈嘉景,彭昭欣,石梅艳,等.柑橘中类黄酮的组成与代谢研究进展[J].园艺学报,2016,43(2):384-400.
- [3] 李阳,曹婷,安琪,等.柑橘中黄酮类化合物的提取技术、功能特性及应用研究进展[J].食品工业科技,2022,43(9):439-446.
- [4] SI Y, DANE F, RASHOTTE A, et al. Cloning and expression analysis of the *Cerboh* gene encoding respiratory burst oxidase in *Citrullus colocynthis* and grafting onto *Citrullus lanatus* (watermelon) [J]. Journal of Experimental Botany, 2010, 61(6): 1635-1642.
- [5] 宋伊真,王芝云,沙广利,等.不同砧穗组合的苹果果实总酚、类黄酮和果皮色素含量变化的研究[J].青岛农业大学学报(自然科学版),2014,31(3):172-176.
- [6] 韩晓,杨航宇,陈为凯,等.不同砧木对欧亚种葡萄‘丹娜’果实类黄酮物质的影响[J].中国农业科学,2022,55(10):2013-2025.
- [7] HAN X, WANG Y, LU H C, et al. The combined influence of rootstock and vintage climate on the grape and wine flavonoids of *Vitis vinifera* L. cv. Cabernet Sauvignon in Eastern China [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 978497.
- [8] SHI N, WANG W R, LI H Q, et al. Modifications of *Vitis vinifera* L. cv. Petit Verdot grape flavonoids as affected by the different rootstocks in Eastern China [J]. Technology in Horticulture, 2023, 3: 14.
- [9] TRENDAFILOVA A, IVANOVA V, TRUSHEVA B, et al. Chemical composition and antioxidant capacity of the fruits of European plum cultivar ‘Čačanska leptotica’ influenced by different rootstocks [J]. Foods, 2022, 11(18): 2844.
- [10] ZHOU Y C, UNDERHILL S J R. Total flavonoid contents and the expression of flavonoid biosynthetic genes in breadfruit (*Artocarpus*

- altilis*) scions growing on lakoocha (*Artocarpus lakoocha*) rootstocks[J]. *Plants*,2023,12(18):3285.
- [11] LANA G, MODICA G, LAS CASAS G, et al. Molecular insights into the effects of rootstocks on maturation of blood oranges[J]. *Horticulturae*,2021,7(11):468.
- [12] MORALES J, BERMEJO A, NAVARRO P, et al. Rootstock effect on fruit quality, anthocyanins, sugars, hydroxycinnamic acids and flavanones content during the harvest of blood oranges ‘Moro’ and ‘Tarocco Rosso’ grown in Spain[J]. *Food Chemistry*,2021,342:128305.
- [13] 陈招芳,黎思辰,杨镰聪,等. 不同砧木对塔罗科血橙果实抗氧化能力的影响[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*,2022,37(3):447-454.
- [14] 陈敏,吴天利,吕远达,等. 不同砧木红江橙容器栽培生长和果实品质分析[J]. *园艺学报*,2023,50(7):1547-1562.
- [15] LI Q, YAO J F, ZHENG W, et al. Hetero-grafting affects flavonoid biosynthesis in sweet orange ‘Newhall’ (*Citrus sinensis*) peels: a metabolomics and transcriptomics analysis[J]. *Frontiers in Plant Science*,2023,14:1218426.
- [16] MAGNUS S, GAZDIK F, ANJUM N A, et al. Assessment of antioxidants in selected plant rootstocks[J]. *Antioxidants*,2020,9(3):209.
- [17] MORALES ALFARO J, BERMEJO A, NAVARRO P, et al. Effect of rootstock on *Citrus* fruit quality: a review[J]. *Food Reviews International*,2023,39(5):2835-2853.
- [18] 张念,彭怡霖,陈细羽,等. 不同成熟期琯溪蜜柚果实功能成分的差异分析[J]. *果树学报*,2022,39(6):1042-1053.
- [19] 李可,林籽汐,刘佳,等. 基于主成分分析和聚类分析的李子果实品质综合评价[J]. *食品工业科技*,2024,45(8):293-300.
- [20] 尹会平,王夜梅,李江南,等. 不同生长阶段金柑果实中类黄酮等活性物质含量差异分析[J]. *食品与发酵工业*,2023,49(17):274-282.
- [21] MORIGUCHI T, KITA M, TOMONO Y, et al. Gene expression in flavonoid biosynthesis: correlation with flavonoid accumulation in developing *Citrus* fruit[J]. *Physiologia Plantarum*,2001,111(1):66-74.
- [22] 韩寒冰,李海航,曾祥有,等. 化橘红果实生长发育过程中类黄酮的动态变化[J]. *植物学报*,2014,49(4):424-431.
- [23] LI S J, WANG Z, DING F, et al. Content changes of bitter compounds in ‘Guoqing No. 1’ *Satsuma* mandarin (*Citrus unshiu* Marc.) during fruit development of consecutive 3 seasons[J]. *Food Chemistry*,2014,145:963-969.
- [24] CHEN J J, ZHANG H Y, PANG Y B, et al. Comparative study of flavonoid production in lycopene-accumulated and blonde-flesh sweet oranges (*Citrus sinensis*) during fruit development[J]. *Food Chemistry*,2015,184:238-246.
- [25] 李昕琪. 茶枝柑果实生长发育过程中主要次生代谢物变化规律分析[D]. 武汉:华中农业大学,2023.
- [26] 朱丽莎,张静,张耀海,等. 不同品种甜橙类酚类物质检测及含量差异性研究[J]. *食品与发酵工业*,2019,45(10):216-224.
- [27] 王海帆,王鹏,王福,等. 不同栽培品种柑橘果皮黄酮类成分含量及抗氧化活性比较研究[J]. *天然产物研究与开发*,2024,36(1):117-124.
- [28] 郭鹏妹,秦艳,赵希娟,等. 金柑果实主要次生代谢产物含量及差异分析[J]. *食品与发酵工业*,2021,47(9):32-41.
- [29] 李勋兰,洪林,杨蕾,等. 11个柑橘品种果实营养成分分析与品质综合评价[J]. *食品科学*,2020,41(8):228-233.
- [30] 牛静琪,刘悦含,宋爽,等. 柑橘属果肉多酚物质组分含量分布及关联分析[J]. *营养学报*,2023,45(3):294-300.
- [31] 张玉,吴慧明,王伟,等. 不同品种柑橘果皮中类黄酮含量及其采后变化[J]. *食品科学*,2010,31(6):202-204.
- [32] 黄胜佳,叶霜,熊博,等. 柑橘果肉、果皮中酚类物质含量差异性研究[J]. *食品与发酵工业*,2018,44(4):241-247.
- [33] WU T, GUAN Y Q, YE J N. Determination of flavonoids and ascorbic acid in grapefruit peel and juice by capillary electrophoresis with electrochemical detection[J]. *Food Chemistry*,2007,100(4):1573-1579.
- [34] 张静,朱丽莎,张耀海,等. 不同晚熟柑橘中酚类物质的含量检测及分析[J]. *食品与机械*,2018,34(12):27-33,69.
- [35] 王彤,叶子茂,刘梦雨,等. 多甲氧基黄酮在不同宽皮柑橘品种组织中的积累变化规律[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*,2021,47(6):729-735.
- [36] 刘要鑫,陈东奎,李果果,等. 不同砧木对沃柑树体及果实品质的影响[J]. *南方农业学报*,2019,50(2):338-343.
- [37] 张丹,钟坤,蒋振华,等. 不同砧木嫁接沃柑在桂北地区的综合表现调查分析[J]. *现代农业科技*,2022(21):87-90.
- [38] 敖淼,李福香,赵吉春,等. 柑橘在贮藏加工过程中酚类化合物的变化[J]. *食品与发酵工业*,2019,45(9):282-288.

(责任编辑:黄克玲)