

徐成妍, 王乃玉, 蔡净蓉, 等. 六月早柚果实常温贮藏期间糖酸含量变化 [J]. 福建农业学报, 2022, 37 (6): 765–773.  
XU C Y, WANG N Y, CAI J R, et al. Flavor of Liuyuehao Pummelos as Affected by Sugar and Acid Contents in Storage at Ambient Temperature [J].  
Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2022, 37 (6): 765–773.

## 六月早柚果实常温贮藏期间糖酸含量变化

徐成妍<sup>1,2</sup>, 王乃玉<sup>1,2</sup>, 蔡净蓉<sup>1,2</sup>, 赵俊跃<sup>1,2</sup>, 余文琴<sup>1,2\*</sup>

(1. 福建农林大学园艺学院, 福建 福州 350002; 2. 福建农林大学园艺产品贮藏保鲜研究所, 福建 福州 350002)

**摘 要:**【目的】探究六月早柚果实常温贮藏过程中糖酸组分含量变化与其风味品质的关系, 为优化柚类品种结构提供理论和实践依据。【方法】以六月早柚为试验材料, 琯溪蜜柚为对照, 应用超高效液相色谱法测定并分析六月早柚果实贮藏期有机酸组分(柠檬酸、苹果酸、奎尼酸、顺乌头酸、酒石酸、琥珀酸、 $\alpha$ -酮戊二酸)和可溶性糖组分(葡萄糖、果糖、蔗糖)含量的变化。【结果】常温贮藏期间六月早柚汁胞总酸、柠檬酸和苹果酸含量增加, 于贮藏 35 d 达到最大值, 分别是同时期琯溪蜜柚的 81.18%、84.17% 和 1.90 倍; 六月早柚葡萄糖和果糖含量先降低后增加, 均在贮藏 10 d 出现最小值, 分别为同时期琯溪蜜柚的 1.30 倍和 1.47 倍; 蔗糖含量先增加后降低, 在贮藏 10 d 出现最大值, 仅为同时期琯溪蜜柚的 84.45%; 六月早柚糖酸比逐渐降低, 贮藏 35 d 最小, 是同时期琯溪蜜柚的 1.27 倍, 且与苹果酸含量呈显著负相关 ( $P < 0.01$ )。【结论】常温贮藏期间六月早柚汁胞柠檬酸和蔗糖的含量较低, 糖酸比及苹果酸、果糖和葡萄糖的含量较高, 这可能是导致贮藏期六月早柚果实风味变化优于琯溪蜜柚的原因。

**关键词:** 六月早柚; 常温贮藏; 可溶性糖; 有机酸

中图分类号: S 666.3

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2022) 06-0765-09

## Flavor of Liuyuehao Pummelos as Affected by Sugar and Acid Contents in Storage at Ambient Temperature

XU Chengyan<sup>1,2</sup>, WANG Naiyu<sup>1,2</sup>, CAI Jingrong<sup>1,2</sup>, ZHAO Junyue<sup>1,2</sup>, SHE Wenqin<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Horticulture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 2. Institute of Postharvest Science and Technology of Horticultural Products, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

**Abstract:** 【Objective】 Flavor of Liuyuehao pummelos as affected by the sugar and acid contents in the fruits during storage at ambient temperature was studied in order to provide a clue for breeding new variety. 【Method】 Contents of soluble sugars (i.e., glucose, fructose, and sucrose) and organic acids (including citric acid, malic acid, quinic acid, aconitic acid, tartaric acid, succinic acid, and  $\alpha$ -ketoglutarate acid) in the fruits of Liuyuehao pummelo, as well as Guanximiyu pummelo as control, during storage at ambient temperature were monitored using ultra-high performance liquid chromatography (UPLC) for a correlation analysis with the eating quality of the fruits. 【Result】 In storage, the contents of total acid, citric acid, and malic acid in the juice sacs of Liuyuehao pummelos increased to peak in 35 d at 81.18%, 84.17%, and 1.90 times, respectively, of those in Guanximiyu. Glucose and fructose in Liuyuehao pummelos declined initially at the beginning of the storage but reached the minimum in 10 d at 1.30 times and 1.47 times, respectively, of those in Guanximiyu. Meanwhile, sucrose increased at first and followed by a decline with the highest that was 84.45% of Guanximiyu appeared after 10 d of storage. The sugar/acid ratio of the fruits decreased gradually to arrive at the minimum of 1.27 times of Guanximiyu in 35 d. There was a significant inverse correlation between the ratio and the content of malic acid ( $P < 0.01$ ). 【Conclusion】 At ambient temperature, the stored Liuyuehao pummelos had relative lower contents of citric acid and sucrose but higher sugar/acid ratio, malic acid, fructose, and glucose than Guanximiyu. That, perhaps, differentiated the quality of the two pummelo varieties

收稿日期: 2022-03-02 初稿; 2022-05-31 修改稿

作者简介: 徐成妍 (1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 果树生理生化与生态 (E-mail: 1603260181@qq.com)

\* 通信作者: 余文琴 (1970-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 果树生理生化与分子生物学 (E-mail: wenqinshe@163.com)

基金项目: 福建省发改委农业“五新”工程项目 (闽发改农业 [2018]114 号); 福建农林大学创新基金项目 (KSYLC008)

concerning the sensory appealing.

**Key words:** *Citrus maxima* (Burm.) Merr cv. Liuyuezhao pummelo; room temperature storage; soluble sugar; organic acid

## 0 引言

【研究意义】琯溪蜜柚 [*Citrus maxima* (Burm.) Merr cv. Guanximiyou] 在我国具有悠久的栽培历史，是福建省的主栽品种，成熟期大约在每年 9 月底至 10 月。六月早柚为琯溪蜜柚的早熟芽变品种，于每年 8 月成熟，较琯溪蜜柚早熟 30~60 d<sup>[1]</sup>，其汁胞细腻爽口，柔软多汁，口味清甜，售价为琯溪蜜柚的 2~5 倍，对柚类的品种结构调整起到关键作用，具有较好的经济效益和社会效益。柚类果实贮藏期较长，贮藏期间存在品质组分变化，因此有必要探究六月早柚果实常温贮藏过程中糖酸组分含量变化与其风味品质的关系。【前人的研究进展】有机酸是果实风味品质的重要组成部分之一<sup>[2,3]</sup>。柑橘类果实中有机酸主要由柠檬酸、苹果酸和奎尼酸组成，其中柠檬酸占有有机酸含量的 60%~90%，对果实的酸味具有较大贡献<sup>[4]</sup>。Albertini<sup>[5]</sup> 等发现，在柑橘类果实中，一些无酸品种果实苹果酸含量是柠檬酸的 1.2 倍左右。前人研究发现，在采后贮藏过程中，冰糖橙<sup>[6]</sup>、椪柑<sup>[7,8]</sup>、脐橙<sup>[9]</sup> 有机酸含量显著降低，而沙田柚<sup>[10]</sup> 呈波动下降的趋势。但琯溪蜜柚在贮藏过程中酸度逐渐增加，即存在“回酸”现象<sup>[11]</sup>，这种现象的出现主要是因为柠檬酸无法通过三羧酸循环消耗而不断积累<sup>[12]</sup>。可溶性糖是影响柑橘类果实风味品质的另一个重要指标，柑橘类果实汁胞中可溶性糖以蔗糖、葡萄糖和果糖为主，3 种可溶性糖中果糖甜度最高，葡萄糖风味最好<sup>[13]</sup>。果实风味不仅取决于每种糖的含量，还取决于主要糖的比例。Zheng 等<sup>[14]</sup> 通过比较不同品种葡萄柚汁胞糖组分的含量，发现果糖浓度在低酸葡萄柚中明显较高；徐世荣<sup>[15]</sup> 研究发现，六月早柚汁胞果糖含量高于琯溪蜜柚，而蔗糖则相反。【本研究切入点】前人研究表明，六月早柚果实生长发育过程中糖酸组分含量存在差异，但六月早柚果实常温贮藏过程中糖酸组分含量变化与其风味品质的关系还有待探究。【拟解决的关键问题】以六月早柚为试验材料，琯溪蜜柚为对照，应用超高效液相色谱法测定并分析六月早柚果实贮藏期有机酸和可溶性糖组分含量的变化，探究六月早柚果实常温贮藏过程中糖酸组分含量变化与其风味品质的关系，为提高柚果实品质、优化柚类品种结构提供理论和实践依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

供试材料采自福建省漳州市平和县南胜镇南胜村海拔高度一致、采用相同栽培管理模式的六月早柚果园及琯溪蜜柚果园，以 10 年树龄的六月早柚和琯溪蜜柚果实为试验材料，分别于花后 135 d（九成熟）和花后 190 d（九成熟）采摘六月早柚和琯溪蜜柚，每个品种各选 3 棵树，分别编号为 1~3 号，每个品种每棵树上均采取 30 个果实，采摘当天运回福建农林大学园艺产品贮藏保鲜研究所，选择大小均匀适中、无病虫、无损伤的果实用于试验。对果实进行清洗消毒，晾干后进行常温贮藏，每 5 d 取一次样，每个品种 1~3 号树上的果实作为 3 个生物重复，每个生物重复取果实 3 个，将汁胞混匀后包裹于锡箔纸中，液氮速冻后存入 -80 ℃ 超低温冰箱保存。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 果实可溶性总糖、可滴定酸测定及糖酸比测定

果实可溶性总糖（TSS）参照王学奎等<sup>[16]</sup> 的方法略作改动。取 1 g 柚汁胞样品加入 10 mL 双蒸水和适量石英砂匀浆，80 ℃ 水浴 30 min 后冷却至室温离心，重复 3 次，合并上清液定容至 50 mL 待测。取 1 mL 待测液加入 5 mL 蒽酮-硫酸溶液，沸水浴 10 min，冷却至室温后于 630 nm 下测定吸光值。

可滴定酸（TA）参照 Morales 等<sup>[17]</sup> 的方法略作改动。取 5 g 柚汁胞样品加入 10 mL 双蒸水和适量石英砂冰浴匀浆并离心，重复 3 次，合并上清液定容至 100 mL 待测。取 15 mL 待测液于锥形瓶中，滴入 2~3 滴酚酞指示剂，用邻苯二甲酸氢钾溶液标定过的 0.01 mol·L<sup>-1</sup> 氢氧化钠溶液滴定待测液，每个生物重复滴定 3 次。

糖酸比=总糖/可滴定酸。

#### 1.2.2 有机酸组分测定

（1）有机酸提取方法取 5 g 柚汁胞样品加入 5 mL 20% 乙醇（含 0.1% 甲酸）和适量石英砂冰浴匀浆，离心转移上清液，沉淀继续用 5 mL 提取液重悬后离心，合并上清液，用无水乙醇（含 0.1% 甲酸）调整上清液乙醇浓度至 80%，用等体积石油醚萃取 3 次后 37 ℃ 旋转蒸干，残渣用 5 mL 20% 甲醇（含 0.1% 甲酸）溶解后置于 -40 ℃ 冰箱，上机前离心并稀释，经 0.22 μm 有机相微孔滤膜过滤。

（2）有机酸标准品溶液配置称取适量柠檬酸、苹果酸、奎尼酸、顺乌头酸、α-酮戊二酸、琥珀酸、

酒石酸（色谱纯，Sigma公司）标准品溶于 20% 乙醇（含 0.1% 甲酸）中，配置成 5 mg·mL<sup>-1</sup> 各标准品母液，保存于-40 ℃ 冰箱。根据试验需要稀释到适宜的浓度。

（3）有机酸组分测定参考陈露等<sup>[18]</sup> 等方法略有改动。色谱条件：ACQUITY UPLC<sup>®</sup> BEH C18 色谱柱（2.1 mm×100 mm，1.7 μm，Waters，USA），柱温 30 ℃，流速 0.25 mL·min<sup>-1</sup>，进样量 3 μL；流动相 A 为 0.5 % 甲酸水溶液，流动相 B 为甲醇（含 0.1 % 甲酸）；采用梯度洗脱程序：0~6 min：100% 流动相 A，6~8 min：100%~0% 流动相 A，8~12 min：0% 流动相 A，12~13 min：0%~100% 流动相 A，13~17 min：100% 流动相 A。TUV 紫外检测波长 210 nm。质谱条件：ACQUITY UPLC-QDA 检测器；负离子扫描模式；毛细管电压 0.8 KV；锥孔电压 15 V；离子检测范围：50~1250 Da。质谱定量参数见表 1。

表 1 柚汁胞有机酸组分质谱定量参数  
Table 1 Elution conditions for chromatographic determination of organic acids in pummelo juice sacs

| 化合物<br>Compound           | 保留时间<br>Retention time/min | 相对分子质量<br>Relative molecular mass | 母离子质荷比<br>Parent ion m/z |
|---------------------------|----------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| 柠檬酸<br>Citrate            | 2.34                       | 192.13                            | 191                      |
| 苹果酸<br>Malate             | 1.42                       | 134.09                            | 133                      |
| 奎尼酸<br>Quinate            | 1.81                       | 192.17                            | 191                      |
| 顺乌头酸<br>Aconitate         | 2.53                       | 174.108                           | 173                      |
| α-酮戊二酸<br>α-ketoglutarate | 1.76                       | 146.11                            | 145                      |
| 琥珀酸<br>Succinate          | 2.87                       | 118.09                            | 117                      |
| 酒石酸<br>Tartrate           | 1.18                       | 150.09                            | 149                      |

1.2.3 可溶性糖组分测定

（1）可溶性糖提取方法可溶性糖提取参考龚江美<sup>[19]</sup> 的方法加以修改。取 2 g 柚汁胞加入 20 mL 80% 乙醇和适量石英砂匀浆，80 ℃ 水浴 30 min，离心取上清，重复 2 次，合并 3 次上清液于蒸发皿中，80 ℃ 水浴蒸干。残渣用 20 mL 双蒸水充分溶解后离心，上清液稀释后经 0.22 μm 水相微孔滤膜过滤。

（2）可溶性糖标准品溶液配置称取适量果糖、葡萄糖、蔗糖（色谱纯，上海源叶生物科技有限公司）标准品溶于双蒸水中，配置成 10 mg·mL<sup>-1</sup> 各标准品母液，保存于-40 ℃ 冰箱。根据试验需要稀释

到适宜的浓度。

（3）可溶性糖组分测定参考蔡灿军<sup>[20]</sup> 的方法略有改动。色谱条件：ACQUITY UPLC<sup>®</sup> BEH Amide 氨基柱（2.1 mm×100 mm，1.7 μm，Waters，USA），柱温：35 ℃，流速 0.2 mL·min<sup>-1</sup>，进样量 2 μL，流动相 A 为 0.2 % 氨水溶液，流动相 B 为乙腈；采用梯度洗脱程序：0~15 min：15% 流动相 A，15~15.5 min：15%~5% 流动相 A，15.5~23.5 min：5% 流动相 A，23.5~24 min：5%~15% 流动相 A，24~30 min：15% 流动相 A。漂移管温度 50 ℃，气体流速 1.5 L·min<sup>-1</sup>。

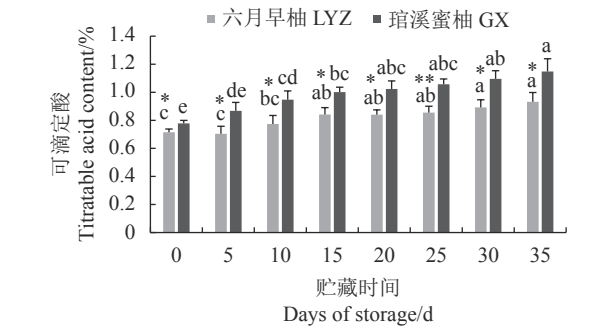
1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 软件进行数据处理和制图，SPSS 26.0 软件进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 柚果实常温贮藏期间可滴定酸、可溶性总糖含量及糖酸比变化

由图 1 可知，常温贮藏过程中六月早柚和琯溪蜜柚可滴定酸含量逐渐增加。贮藏 35 d 时，六月早柚汁胞可滴定酸含量是贮藏 0 d 的 1.30 倍，琯溪蜜柚汁胞可滴定酸含量是贮藏 0 d 的 1.48 倍。贮藏过程中六月早柚汁胞可滴定酸含量始终低于琯溪蜜柚，两者存在不同程度的显著差异。



不同小写字母表示同一柚品种不同贮藏时间之间显著差异 ( $P<0.05$ )；\*\*、\*表示同一贮藏时间不同柚品种之间差异极显著 ( $P<0.01$ ) 或差异显著 ( $P<0.05$ )；下同。

Different lowercase letters indicate significant differences among different storage times of the same pummelo ( $P<0.05$ ). \*\* and \* indicate extremely significant ( $P<0.01$ ) or significant ( $P<0.05$ ) difference between different pummelo varieties at the same storage time. The same as below.

图 1 柚果实常温贮藏过程中汁胞可滴定酸变化  
Fig. 1 Changes on titratable acids in pummelo juice sacs during storage

由图 2 可知，常温贮藏过程中六月早柚和琯溪蜜柚可溶性总糖含量总体呈 M 型波动变化的趋势。贮藏 0 d 至 10 d，六月早柚和琯溪蜜柚总糖含量缓慢上升，贮藏 10 d 至 20 d 六月早柚总糖含量显著下降

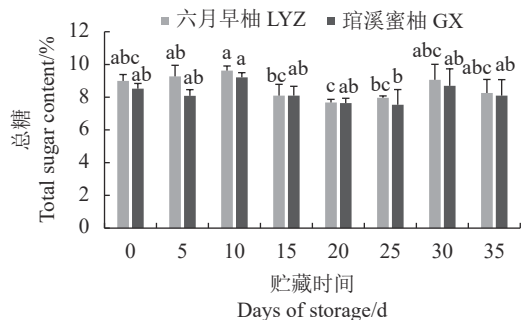


图2 柚果实常温贮藏过程中汁胞总糖含量变化

Fig. 2 Changes on total sugars in pummelo juice sacs during storage

( $P < 0.05$ ), 降幅约为 20.24%; 贮藏 10 d 至 25 d 琯溪蜜柚总糖含量显著下降 ( $P < 0.05$ ), 降幅约为 18.15%。贮藏 15 d 和 20 d, 六月早柚与琯溪蜜柚汁胞总糖含量的差异极小, 其余贮藏时间六月早柚汁胞总糖含量始终高于琯溪蜜柚。

由图 3 可知, 常温贮藏过程中六月早柚和琯溪蜜柚糖酸比呈波动下降的趋势。贮藏 0 d 至 10 d, 六月早柚汁胞糖酸比变化不大, 贮藏 10 d 后显著下降 ( $P < 0.05$ ), 降幅约为 23.05%, 贮藏 15 d 后变化不明显。贮藏 35 d 时, 琯溪蜜柚汁胞糖酸比显著下降, 仅为 0 d 的 64.18%。贮藏过程中六月早柚汁胞糖酸比始终高于琯溪蜜柚, 除贮藏 20 d 和 35 d, 两者存在不同程度的显著差异。

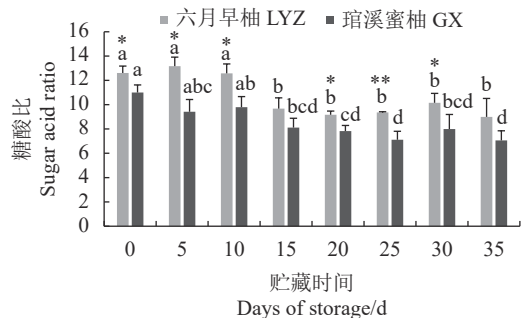


图3 柚果实常温贮藏过程中汁胞糖酸比变化

Fig. 3 Changes on sugar/acid ratio of pummelo juice during storage

## 2.2 柚果实常温贮藏期间有机酸组分含量变化

### 2.2.1 柚果实常温贮藏期间柠檬酸含量变化

由图 4 可知, 常温贮藏过程中六月早柚和琯溪蜜柚柠檬酸含量逐渐增加。贮藏 35 d 时, 六月早柚汁胞柠檬酸含量是贮藏 0 d 的 1.29 倍, 涨幅为 28.70%, 琯溪蜜柚汁胞柠檬酸含量是贮藏 0 d 的 1.48 倍, 涨幅为 47.60%。贮藏过程中六月早柚汁胞柠檬酸含量始终低于琯溪蜜柚, 贮藏 10 d 至 30 d 两者存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。

### 2.2.2 柚果实常温贮藏期间苹果酸含量变化

由图 5

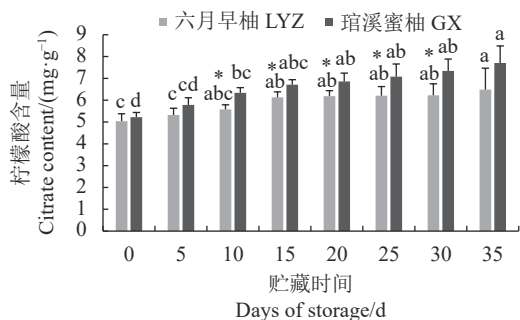


图4 柚果实常温贮藏过程中汁胞柠檬酸含量变化

Fig. 4 Changes on citrate content in pummelo juice sacs during storage

可知, 六月早柚与琯溪蜜柚汁胞苹果酸含量变化趋势存在差异。贮藏 0 d 至 25 d, 六月早柚汁胞苹果酸含量缓慢上升, 贮藏 25 d 后上升幅度加大, 琯溪蜜柚汁胞苹果酸含量则表现为贮藏 0 d 至 25 d 缓慢下降, 贮藏 25 d 后逐渐上升。贮藏 35 d 时, 六月早柚汁胞苹果酸含量是 0 d 的 1.50 倍, 是同时期琯溪蜜柚的 1.89 倍。贮藏过程中六月早柚汁胞苹果酸含量始终高于琯溪蜜柚, 两者存在不同程度的显著差异。

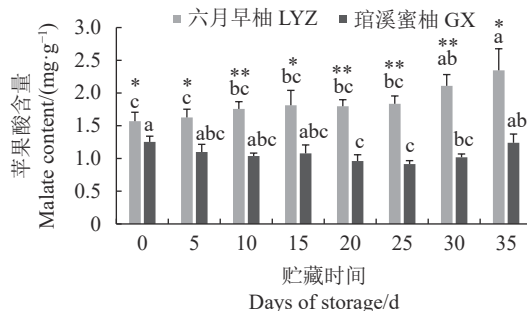


图5 柚果实常温贮藏过程中汁胞苹果酸含量变化

Fig. 5 Changes on malate content in pummelo juice sacs during storage

### 2.2.3 柚果实常温贮藏期间顺乌头酸含量变化

由图 6 可知, 六月早柚与琯溪蜜柚汁胞顺乌头酸含量变化趋势存在差异。贮藏 0 d 至 10 d, 六月早柚汁胞顺乌头酸含量逐渐降低, 贮藏 10 d 至 30 d 变化不明显, 贮藏 30 d 后显著下降 ( $P < 0.05$ ), 贮藏 35 d 六月早柚汁胞顺乌头酸含量仅为 0 d 的 47.38%。琯溪蜜柚汁胞顺乌头酸含量总体呈 M 型变化趋势, 贮藏 5 d 和 30 d 出现两个峰值, 分别是 0 d 的 1.42 倍和 1.44 倍, 是同时期六月早柚的 3.79 倍和 4.36 倍。贮藏过程中, 六月早柚汁胞顺乌头酸含量始终低于琯溪蜜柚, 两者存在极显著差异 ( $P < 0.01$ )。

### 2.2.4 柚果实常温贮藏期间汁胞奎尼酸含量变化

由图 7 可知, 六月早柚与琯溪蜜柚汁胞奎尼酸含量变化均表现为下降-上升-下降的趋势。贮藏 0 d 至 10 d, 六月早柚汁胞奎尼酸含量逐渐下降, 琯溪蜜柚则表现为先显著下降后缓慢降低; 贮藏 25 d 后, 六

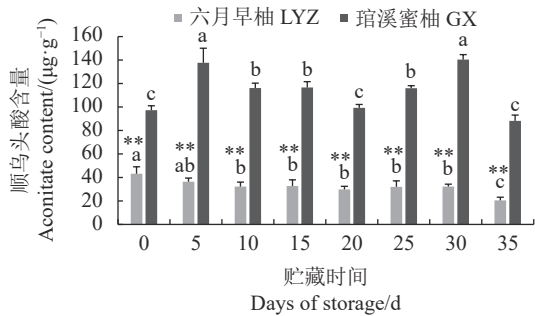


图6 柚果实常温贮藏过程中汁胞顺乌头酸含量变化

Fig. 6 Changes on aconitate content in pummelo juice sacs during storage

月早柚汁胞奎尼酸含量增大，琯溪蜜柚的显著上升 ( $P<0.05$ )。贮藏过程中六月早柚汁胞奎尼酸含量始终低于琯溪蜜柚，除贮藏10 d和30 d，两者存在不同程度的显著差异。

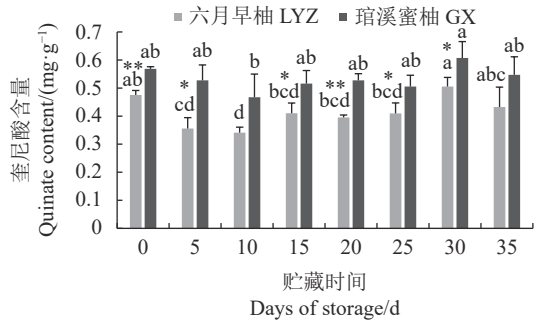


图7 柚果实常温贮藏过程中汁胞奎尼酸含量变化

Fig. 7 Changes on quinate content in pummelo juice sacs during storage

2.2.5 柚果实常温贮藏期间汁胞酒石酸含量变化 由图8可知，常温贮藏过程中六月早柚与琯溪蜜柚汁胞酒石酸含量变化规律相似，呈先下降后上升的趋势。贮藏0 d至20 d，六月早柚和琯溪蜜柚汁胞酒石酸含量缓慢下降；贮藏20 d后六月早柚汁胞酒石酸含量先显著上升而后显著下降 ( $P<0.05$ )，于贮藏30 d出现一个峰值，是20 d的1.49倍，是同时期琯溪蜜柚的1.71倍；贮藏25 d后，琯溪蜜柚汁胞酒石酸含量显著上升 ( $P<0.05$ )。贮藏过程中六月早柚

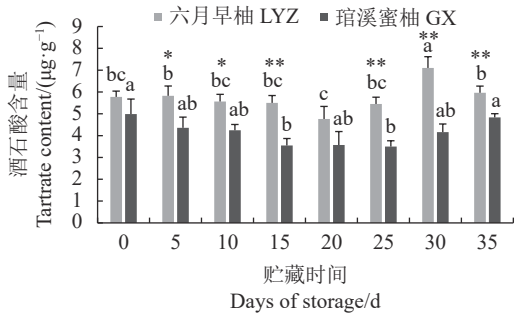


图8 柚果实常温贮藏过程中汁胞酒石酸含量变化

Fig. 8 Changes on tartrate content in pummelo juice sacs during storage

汁胞酒石酸含量始终高于琯溪蜜柚，除贮藏10 d和20 d，两者存在不同程度的显著差异。

2.2.6 柚果实常温贮藏期间汁胞α-酮戊二酸含量变化

由图9可知，六月早柚与琯溪蜜柚汁胞α-酮戊二酸含量变化趋势存在差异。贮藏过程中六月早柚汁胞α-酮戊二酸含量呈波动变化的趋势，贮藏5 d至15 d显著上升 ( $P<0.05$ )，贮藏30 d至35 d显著下降 ( $P<0.05$ )；琯溪蜜柚汁胞α-酮戊二酸含量表现为下降-上升的趋势，贮藏0 d至15 d显著下降 ( $P<0.05$ )，贮藏25 d至35 d显著上升 ( $P<0.05$ )。

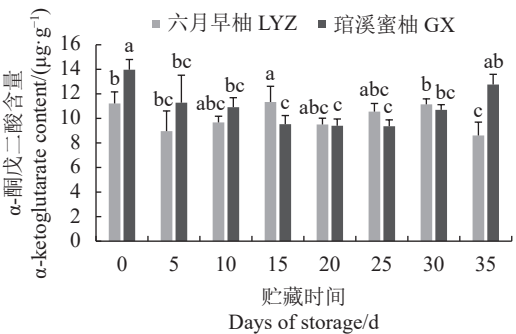


图9 柚果实常温贮藏过程中汁胞α-酮戊二酸含量变化

Fig. 9 Changes on α-ketoglutarate content in pummelo juice sacs during storage

2.2.7 柚果实常温贮藏期间汁胞琥珀酸含量变化

由图10可知，常温贮藏过程中六月早柚与琯溪蜜柚汁胞琥珀酸含量变化总体呈下降-上升-下降的趋势。贮藏0 d至20 d，六月早柚汁胞琥珀酸含量波动下降，贮藏20 d后显著上升 ( $P<0.05$ )，至贮藏30 d增长42.45%。贮藏0 d至10 d，琯溪蜜柚汁胞琥珀酸含量显著下降 ( $P<0.05$ )，降幅为39.23%，贮藏25 d后，琯溪蜜柚汁胞琥珀酸含量先显著上升而后显著下降 ( $P<0.05$ )。

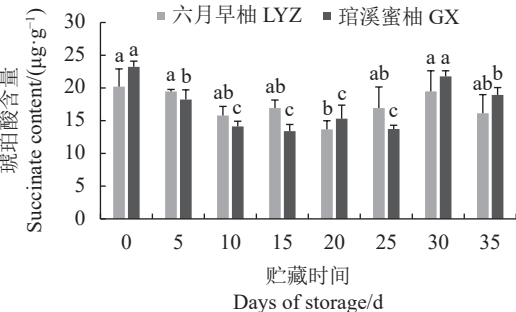


图10 柚果实常温贮藏过程中汁胞琥珀酸含量变化

Fig. 10 Changes on succinate content in pummelo juice sacs during storage

2.3 柚果实常温贮藏期间汁胞可溶性糖组分含量变化

2.3.1 柚果实常温贮藏期间汁胞果糖含量变化

由图11可知，六月早柚与琯溪蜜柚汁胞果糖含量变化趋势相似，均表现为前期下降后期上升。贮藏

5 d 至 10 d 琯溪蜜柚汁胞果糖含量显著降低 ( $P < 0.05$ ), 贮藏 10 d 时六月早柚汁胞果糖含量小幅下降, 是同时期琯溪蜜柚的 1.47 倍; 贮藏 25 d 时, 琯溪蜜柚汁胞果糖含量显著上升 ( $P < 0.05$ ), 贮藏 30 d 时, 六月早柚汁胞果糖含量显著上升 ( $P < 0.05$ ), 是同时期琯溪蜜柚的 1.44 倍。贮藏过程中六月早柚汁胞果糖含量始终高于琯溪蜜柚, 在贮藏前期和贮藏后期二者存在不同程度的显著差异。

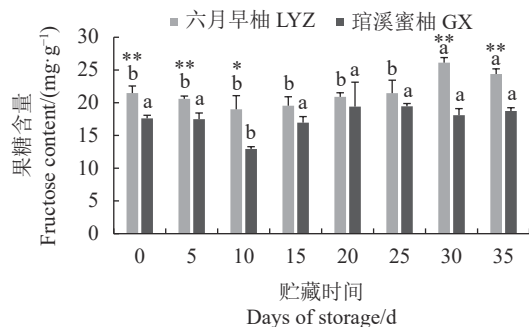


图 11 柚果实常温贮藏过程中汁胞果糖含量变化

Fig. 11 Changes on fructose content in pummelo juice sacs during storage

2.3.2 柚果实常温贮藏期间汁胞葡萄糖含量变化 由图 12 可知, 常温贮藏过程中六月早柚和琯溪蜜柚汁胞葡萄糖含量变化呈先下降后上升的趋势。二者含量的低值出现在贮藏 10 d, 分别为贮藏 0 d 的 70.14% 和 70.88%, 贮藏 10 d 六月早柚汁胞葡萄糖含量是琯溪蜜柚的 1.30 倍; 贮藏 30 d 六月早柚汁胞葡萄糖含量出现峰值, 是同时期琯溪蜜柚的 1.46 倍, 较贮藏 10 d 增加 41.26%。贮藏过程中六月早柚汁胞葡萄糖含量始终高于琯溪蜜柚, 二者存在不同程度的显著差异。

2.3.3 柚果实常温贮藏期间汁胞蔗糖含量变化 由图 13 可知, 常温贮藏过程中六月早柚和琯溪蜜柚汁胞蔗糖含量变化趋势总体呈 M 型。贮藏 10 d 六月早柚和琯溪蜜柚汁胞蔗糖含量出现第一个峰值, 分别是贮藏 0 d 的 1.24 和 1.32 倍, 贮藏 25 d 时含量较低, 是贮藏 0 d 的 76.42% 和 83.89%, 贮藏 30 d 出现第二个高峰, 分别是贮藏 0 d 的 1.05 和 1.13 倍。贮藏过程中六月早柚汁胞蔗糖含量显著低于琯溪蜜柚, 除贮藏 20 d, 二者存在不同程度的显著差异。

## 2.4 柚果实常温贮藏期间糖、酸及组分含量相关性分析

对常温贮藏过程中六月早柚和琯溪蜜柚糖酸组分及总糖、总酸含量和糖酸比进行相关性分析 (表 2)。六月早柚总酸含量与柠檬酸、苹果酸和奎尼酸含量呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ); 总糖含量与柠檬酸、苹果酸和总酸含量显著负相关 ( $P < 0.05$ ), 与蔗糖含量呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ); 糖酸比与柠檬

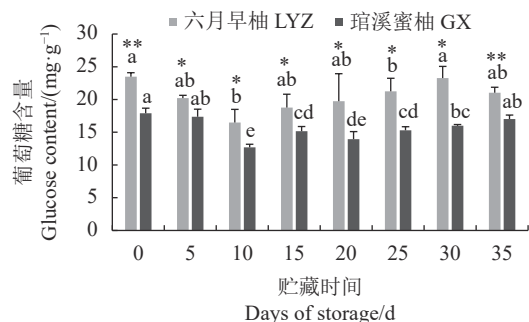


图 12 柚果实常温贮藏过程中汁胞葡萄糖含量变化

Fig. 12 Changes on glucose content in pummelo juice sacs during storage

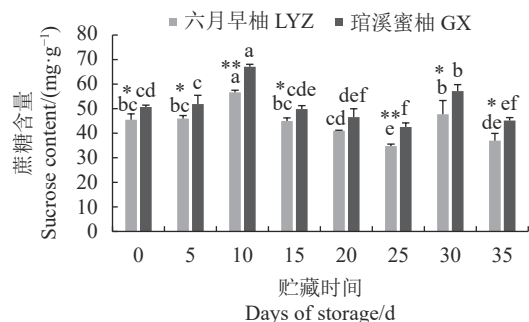


图 13 柚果实常温贮藏过程中汁胞蔗糖含量变化

Fig. 13 Changes on sucrose content in pummelo juice sacs during storage

酸、苹果酸和总酸含量呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ ), 与蔗糖和总糖含量呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )。琯溪蜜柚总酸含量与柠檬酸含量呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 总糖含量与蔗糖含量呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ); 糖酸比与柠檬酸和总酸含量呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ ), 与蔗糖和总糖含量呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )。

## 3 讨论与结论

在采后贮藏过程中果实失去外源养分供给, 需要依靠自身积累的碳水化合物、有机酸等营养物质来维持生命活动, 其中三羧酸循环是柠檬酸降解的主要途径之一。Sun 等<sup>[21]</sup>、Yun 等<sup>[22]</sup>研究发现多个品种柚果实采后贮藏期间有机酸含量下降, 但琯溪蜜柚在贮藏过程中会因三羧酸循环受抑制使柠檬酸持续积累而出现“回酸”现象<sup>[12,23]</sup>。本研究中六月早柚和琯溪蜜柚在贮藏过程中柠檬酸含量逐渐增加且远高于其他有机酸, 变化趋势与总酸一致, 但六月早柚是否如琯溪蜜柚一样存在采后酸化现象还需延长贮藏期并加以探究。苹果酸是三羧酸循环中另一个重要的中间产物, 也是柠檬酸的合成前体<sup>[24,25]</sup>, 可以作为底物参与呼吸<sup>[26]</sup>或糖异生作用<sup>[27]</sup>。本试验中六月早柚汁胞苹果酸含量在贮藏过程中显著高于琯溪

表 2 六月早柚和琯溪蜜柚糖、酸及组分含量相关性分析  
Table 2 Correlation on sugars, acids, and other chemicals between Liuyuezao and Guanximiyou pummelos

| 指标<br>Index                | 柠檬酸<br>Citrate | 苹果酸<br>Malate | 奎尼酸<br>Quinate | 顺乌头酸<br>Aconitate | α-酮戊二酸<br>α- ketoglutarate | 琥珀酸<br>Succinate | 酒石酸<br>Tartrate | 果糖<br>Fructose | 葡萄糖<br>Glucose | 蔗糖<br>Sucrose | 总酸<br>TA | 总糖<br>TSS | 糖酸比<br>TSS/TA |
|----------------------------|----------------|---------------|----------------|-------------------|----------------------------|------------------|-----------------|----------------|----------------|---------------|----------|-----------|---------------|
| 柠檬酸<br>Citrate             | 1              | −0.055        | −0.035         | 0.056             | −0.197                     | −0.137           | −0.211          | 0.128          | −0.168         | −0.272        | 0.983**  | −0.162    | −0.862**      |
| 苹果酸<br>Malate              | 0.432**        | 1             | 0.178          | 0.020             | 0.475**                    | 0.434**          | 0.540**         | 0.025          | 0.244          | 0.000         | −0.011   | −0.008    | 0.038         |
| 奎尼酸<br>Quinate             | 0.337*         | 0.417**       | 1              | 0.400**           | 0.369**                    | 0.398**          | 0.179           | 0.165          | 0.208          | −0.102        | −0.055   | 0.004     | 0.021         |
| 顺乌头酸<br>Aconitate          | 0.022          | −.337*        | 0.252          | 1                 | 0.098                      | 0.288*           | −0.014          | −0.071         | −0.022         | 0.301*        | 0.066    | 0.051     | −0.071        |
| α-酮戊二酸<br>α- ketoglutarate | 0.190          | 0.042         | 0.523**        | 0.205             | 1                          | 0.482**          | 0.505**         | −0.133         | 0.425**        | 0.064         | −0.212   | 0.107     | 0.228         |
| 琥珀酸<br>Succinate           | −0.036         | 0.106         | 0.365*         | 0.285*            | 0.304*                     | 1                | 0.565**         | 0.137          | 0.436**        | 0.084         | −0.111   | 0.155     | 0.210         |
| 酒石酸<br>Tartrate            | −0.061         | 0.370**       | 0.392**        | −0.045            | 0.093                      | 0.266            | 1               | 0.031          | 0.342*         | 0.136         | −0.201   | 0.083     | 0.291*        |
| 果糖<br>Fructose             | 0.204          | 0.375**       | 0.401**        | −0.042            | 0.036                      | 0.212            | 0.299*          | 1              | 0.147          | −0.587**      | 0.109    | −0.096    | −0.162        |
| 葡萄糖<br>Glucose             | 0.066          | 0.193         | 0.346*         | 0.124             | 0.153                      | 0.183            | 0.212           | 0.397**        | 1              | −0.292*       | −0.177   | −0.059    | 0.099         |
| 蔗糖<br>Sucrose              | −0.259         | −0.197        | −0.025         | 0.273             | 0.119                      | 0.034            | 0.078           | −0.109         | −0.015         | 1             | −0.275   | 0.534**   | 0.488**       |
| 总酸<br>TA                   | 0.889**        | 0.701**       | 0.476**        | −0.085            | 0.169                      | 0.072            | 0.057           | 0.345*         | 0.098          | −0.274        | 1        | −0.153    | −0.887**      |
| 总糖<br>TSS                  | −0.291*        | −0.293*       | −0.089         | 0.179             | 0.015                      | 0.130            | 0.143           | 0.039          | 0.179          | 0.618**       | −0.322*  | 1         | 0.415**       |
| 糖酸比<br>TSS/TA              | −0.753**       | −0.530**      | −0.256         | 0.200             | −0.016                     | 0.082            | 0.070           | −0.163         | 0.077          | 0.568**       | −0.802** | 0.734**   | 1             |

左下三角为六月早柚，右上三角为琯溪蜜柚，\*表示差异显著（ $P<0.05$ ），\*\*表示差异极显著（ $P<0.01$ ）。  
Data with triangles on lower left indicate Liuyuezao pummelo; those with triangles on upper right Guanximiyou; \* means significant difference at  $P<0.05$ ; \*\* means extremely significant difference at  $P<0.01$ .

蜜柚，且与可滴定酸呈显著正相关（ $r=0.701$ ， $P<0.01$ ），推测苹果酸对六月早柚的风味品质具有一定的影响。

柚果实的甜度不仅取决于糖的含量，还取决于可溶性糖之间的比例。前人对葡萄柚<sup>[14]</sup>、甜橙<sup>[28,29]</sup>和温州蜜柑<sup>[30,31]</sup>的研究表明，果实成熟时葡萄糖与果糖含量相近，蔗糖含量约为果糖含量的 2~6 倍；张智伟<sup>[1]</sup>研究发现，六月早柚果实成熟时葡萄糖与果糖含量相近，蔗糖含量约为果糖含量的 1.5~2 倍。本研究中，果实成熟时六月早柚汁胞葡萄糖与果糖含量相近，且显著高于琯溪蜜柚，而蔗糖则相反；六月早柚汁胞蔗糖含量是果糖的 2 倍，琯溪蜜柚的为 3 倍。可溶性糖不仅是果实风味品质的重要成分，也是参与调控果实生命活动中许多物质的代谢过程<sup>[32]</sup>。采后贮藏过程中，柚果实以蔗糖分解为

主，同时伴随着蔗糖合成<sup>[33]</sup>。本研究中，贮藏前期六月早柚和琯溪蜜柚汁胞葡萄糖和果糖含量降低，蔗糖含量升高，可能是因为葡萄糖和果糖在蔗糖合酶的作用下合成蔗糖以维持果实的风味品质。贮藏中后期六月早柚蔗糖含量降低，葡萄糖和果糖含量增加，可能是由于果实衰老使细胞壁成分降解产生葡萄糖、蔗糖降解产生的葡萄糖和果糖进入多条呼吸途径产生能量以维持果实生命活动。

果实风味仅取决于糖和酸的含量，还与糖酸比有关。孙晓华<sup>[10]</sup>认为果肉作为果实中的食用部分，其中含有的糖、酸及二者的比例直接反映其风味特性。郑丽静等<sup>[34]</sup>、林媚等<sup>[35]</sup>认为采用糖酸比更适合作为果实风味品质评价指标。颜博杰等<sup>[36]</sup>认为高糖高酸的番茄果实风味比较浓郁，高糖低酸则味道较平淡，低糖高酸果实酸味明显，低糖低酸则淡而无

味。本研究中,果实成熟时六月早柚汁胞糖酸比略高于琯溪蜜柚;贮藏初期六月早柚保持较高的糖酸比。相关性分析表明,六月早柚汁胞苹果酸含量与糖酸比呈极显著负相关( $r=-0.530$ ,  $P<0.01$ ),而琯溪蜜柚汁胞苹果酸含量与糖酸比无相关性,推测苹果酸是导致六月早柚和琯溪蜜柚风味差异的原因之一。

综上所述,常温贮藏期间六月早柚柠檬酸和蔗糖的含量较低,糖酸比及苹果酸、果糖和葡萄糖的含量较高,这可能是导致贮藏期六月早柚果实风味变化优于琯溪蜜柚的原因,可以为优化柚类品种结构提供理论和实践依据。

#### 参考文献:

- [1] 张智伟. 琯溪蜜柚芽变株系‘六月早’的若干生物学性状研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2017.
- ZHANG Z W. The biological characteristic study of new strain ‘Liu yue zao’ from bud mutation of pumelo[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017. (in Chinese)
- [2] DING Y D, CHANG J W, Ma Q L, et al. Network analysis of postharvest senescence process in citrus fruits revealed by transcriptomic and metabolomic profiling [J]. *Plant Physiology*, 2015, 168 (1): 357–376.
- [3] STRAZZER P, SPELT C E, LI S J, et al. Hyperacidification of *Citrus* fruits by a vacuolar proton-pumping P-ATPase complex [J]. *Nature Communications*, 2019, 10 (1): 744.
- [4] WU S W, ZHANG C M, LI M, et al. Effects of potassium on fruit soluble sugar and citrate accumulations in Cara Cara navel orange (*Citrus sinensis* L. Osbeck) [J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 283: 110057.
- [5] ALBERTINI M V, CARCOUET E, PAILLY O, et al. Changes in organic acids and sugars during early stages of development of acidic and acidless citrus fruit [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2006, 54 (21): 8335–8339.
- [6] MA X Q, LI N, GUO J, et al. Involvement of CsPH8 in citrate accumulation directly related to fruit storage performance of ‘Bingtang’ sweet orange mutants [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 170: 111316.
- [7] 陈明. 椪柑和脐橙果实柠檬酸合成与降解相关基因表达及其调控研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- CHEN M. Expression and its regulation of citric acid synthesis and degradation related genes in the fruits of Ponkan and navel orange[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
- [8] 常媛媛, 李先信, 盛玲, 等. ‘早蜜’椪柑采后主要品质性状变化研究 [J]. 江西农业大学学报, 2021, 43 (2): 270–278.
- CHANG Y Y, LI X X, SHENG L, et al. Postharvest changes in main quality traits of ‘Zaomi’ Ponkan [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2021, 43 (2): 270–278. (in Chinese)
- [9] 杨滢滢. ‘纽荷尔’脐橙果实柠檬酸合成与降解机理的研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2017.
- YANG Y Y. Research on synthesis and degradation of citric acid in ‘Newhall’ navel orange fruit[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [10] 孙晓华. 柚果实采后贮藏期间有机酸代谢的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
- SUN X H. Organic acid metabolism in pumelo fruit during postharvest storage phase[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [11] 张小红. 琯溪蜜柚(*Citrus grandis* (L.) Osbeck. cv. guanximiyu)果实采后酸代谢研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2005.
- ZHANG X H. Studies on the metabolism of organic acids in citrus guanxi-miyu (*Citrus grandis* (L.) Osbeck. cv. guanximiyu) fruit after harvest[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2005. (in Chinese)
- [12] 徐世荣. 琯溪蜜柚果实采后柠檬酸代谢的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2017.
- XU S R. Studies on citric acid metabolism of guanxi pumelo fruit during postharvest storage[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017. (in Chinese)
- [13] LIN Q, WANG C Y, DONG W C, et al. Transcriptome and metabolome analyses of sugar and organic acid metabolism in Ponkan (*Citrus reticulata*) fruit during fruit maturation [J]. *Gene*, 2015, 554 (1): 64–74.
- [14] ZHENG H W, ZHANG Q Y, QUAN J P, et al. Determination of sugars, organic acids, aroma components, and carotenoids in grapefruit pulps [J]. *Food Chemistry*, 2016, 205: 112–121.
- [15] 徐世荣. 柚早熟芽变‘六月早柚’果实成熟的分子机理若干研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2020.
- XU S R. Fruit ripening molecular mechanism of ‘Liu yue zaoyou’ pummelo[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2020. (in Chinese)
- [16] 王学奎, 黄见良. 植物生理生化实验原理与技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015: 171–173.
- [17] MORALES J, TÁRREGA A, SALVADOR A, et al. Impact of ethylene degreening treatment on sensory properties and consumer response to citrus fruits [J]. *Food Research International*, 2020, 127: 108641.
- [18] 陈露, 李家明, 林志强, 等. 紫色小白菜有机酸的提取优化及UPLC定量分析 [J]. 天然产物研究与开发, 2019, 31 (6): 1038–1045.
- CHEN L, LI J M, LIN Z Q, et al. Optimization of organic acids and UPLC analysis of purple cabbage [J]. *Natural Product Research and Development*, 2019, 31 (6): 1038–1045. (in Chinese)
- [19] 龚江美. 一个琯溪蜜柚新种质的选育与品质评价研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2018.
- GONG J M. Identification and quality evaluation of a new bud mutant of Pummelo. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2018. (in Chinese)
- [20] 蔡灿军. 不同MA包装对荔枝采后贮藏生理的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2020.

- CAI C J. Effects of different MA packaging on postharvest storage physiology of litchi[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2020. (in Chinese)
- [21] SUN X H, XIONG J J, ZHU A D, et al. Sugar and organic acid changes in pericarp and endocarp tissues of pumelo fruit during postharvest storage [J]. *Scientia Horticulturae*, 2012, 142: 112–117.
- [22] YUN Z, LI W Y, PAN Z Y, et al. Comparative proteomics analysis of differentially accumulated proteins in juice sacs of Ponkan (*Citrus reticulata*) fruit during postharvest cold storage [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2010, 56 (3): 189–201.
- [23] 盛玲. GABA支路调控柑橘果实柠檬酸代谢的机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
- SHENG L. Mechanism of gamma-Aminobutyric acid shunt regulating citrate metabolism in citrus fruit[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [24] ETIENNE A, GÉNARD M, LOBIT P. What controls fleshy fruit acidity? A review of malate and citrate accumulation in fruit sacs [J]. *Journal of experimental botany*, 2013, 64 (6): 1451–1469.
- [25] LADO J, GAMBETTA G, ZACARIAS L. Key determinants of citrus fruit quality: Metabolites and main changes during maturation [J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, 233: 238–248.
- [26] 韩寿坤. 苹果采后苹果酸含量及其转运体基因MdALMT9调控机制研究[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2020.
- HAN S K. Regulation mechanisms of malate content and malate transporter gene MdALMT9 in postharvest apple fruit[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020. (in Chinese)
- [27] SCHOUREN R E, WOLTERING E J, TIJSKENS L. M. M. Sugar and acid interconversion in tomato fruits based on biopsy sampling of locule gel and pericarp tissue [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 111: 83–92.
- [28] YU K Q, XU Q, DA X L, et al. Transcriptome changes during fruit development and ripening of sweet orange (*Citrus sinensis*) [J]. *BMC Genomics*, 2012, 13 (1): 10.
- [29] EMMANOUILIDOU M G, KYRIACOU M C. Rootstock-modulated yield performance, fruit maturation and phytochemical quality of ‘Lane Late’ and ‘Delta’ sweet orange [J]. *Scientia Horticulturae*, 2017, 225: 112–121.
- [30] NAVARRO J M, PEREZ-PEREZ J G, ROMERO P, et al. Analysis of the changes in quality in mandarin fruit, produced by deficit irrigation treatments [J]. *Food Chemistry*, 2010, 119 (4): 1591–1596.
- [31] 易明亮, 肖洒, 刘德春, 杨莉, 匡柳青, 刘勇, 胡威. 温州蜜柑完熟栽培期间果实糖酸变化及其相关基因表达分析 [J]. 江西农业大学学报, 2022, 44 (1): 35–44.
- YI M L, XIAO S, LIU D C, et al. Analysis on changes in sugar and organic acid and related gene expression in fruit of satsuma mandarin during delayed harvest cultivation [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2022, 44 (1): 35–44. (in Chinese)
- [32] DELPHINE M. P, JOSÉ G. V, SONIA O. Metabolite changes during postharvest storage: Effects on fruit quality traits [J]. *Metabolites*, 2020, 10 (5): 187–187.
- [33] CHEN C Y, PENG X, CHEN J Y, et al. Mitigating effects of chitosan coating on postharvest senescence and energy depletion of harvested pummelo fruit response to granulation stress [J]. *Food Chemistry*, 2021, 348: 129113.
- [34] 郑丽静, 聂继云, 闫震. 糖酸组分及其对水果风味的影响研究进展 [J]. 果树学报, 2015, 32 (2): 304–312.
- ZHENG L J, NIE J Y, YAN Z. Advances in research on sugars, organic acids and their effects on taste of fruits [J]. *Journal of Fruit Science*, 2015, 32 (2): 304–312. (in Chinese)
- [35] 林媚, 姚周麟, 王天玉, 等. 8个杂交柑橘品种的糖酸组分含量及特征研究 [J]. 果树学报, 2021, 38 (2): 202–211.
- LIN M, YAO Z L, WANG T Y, et al. A study on the components and characteristics of sugars and acids in 8 hybrid citrus cultivars [J]. *Journal of Fruit Science*, 2021, 38 (2): 202–211. (in Chinese)
- [36] 颜博杰, 刘晓奇, 张洋, 等. 番茄果实采后贮藏期风味品质的动态变化 [J]. 甘肃农业大学学报, 2021, 56 (1): 94–101.
- XIE B J, LIU X Q, ZHANG Y, et al. Dynamic changes of flavor quality of tomato fruits in postharvest storage period [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2021, 56 (1): 94–101. (in Chinese)

(责任编辑: 吴宇琳)