

不同品种百香果果实转色期糖酸品质性状评价

吴斌^{1,2}, 苏金生^{3#}, 邢文婷^{1,2}, 宋顺^{1,2}, 马伏宁^{1,2}, 黄东梅^{1,2*}

(¹中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所·农业农村部华南作物基因资源与种质创制重点实验室·海南省热带作物资源遗传改良与创新重点实验室, 海南海口 571101; ²海南省省级西番莲种质资源圃, 海南儋州 571737; ³云南农业大学热带作物学院, 云南普洱 665099)

摘要:【目的】研究黄果百香果和紫果百香果等主栽品种和自育品种果实转色过程中糖酸组分的动态变化, 对培育优质品种、优质果品生产、果实的适时采收具有重要意义。【方法】采用便携式糖酸仪测定百香果果实可溶性固形物含量, 采用自动电位滴定仪测定可滴定酸含量, 采用高效液相色谱法测定果实中糖酸组分及其含量。【结果】随着果实转色成熟, 百香果果肉可溶性固形物含量呈现先增加后下降的趋势, 壮乡蜜宝、中百6号、黄香1号、台农和满天星的可滴定酸含量呈逐渐降低的趋势。除钦蜜的固酸比随着果实转色逐渐增大外, 其余品种的固酸比均呈现先上升后下降的趋势。在百香果果实转色过程中蔗糖含量均呈先上升后下降的趋势, 柠檬酸含量变化均随着果实转色呈现出逐渐下降的趋势。不同百香果品种成熟期的糖酸组分均呈现出显著性差异, 其中中百6号果实中的果糖和葡萄糖含量显著高于其他品种。6个百香果品种的果实中酸组分以柠檬酸为主, 占比达到68.27%~84.22%, 其中台农果实中的柠檬酸、总酸和可滴定酸含量显著高于其他品种。固酸比分析发现, 黄果百香果的固酸比高于紫果, 固酸比从高到低依次为: 钦蜜>壮乡蜜宝>黄香1号>中百6号>台农>满天星。【结论】百香果不同品种的糖酸组分比例在果实不同发育期中存在差异。紫果百香果和黄果百香果均属于柠檬酸优势型。转色期T2~T4是百香果果实品质变化的关键时期。随着果实成熟均出现退糖现象, 且黄果百香果的固酸比大于紫果。果实完全成熟时, 钦蜜果实中的固酸比显著高于其他品种。百香果果实固酸比主要受柠檬酸含量的影响, 且成反比。

关键词: 百香果; 转色期; 可溶性糖; 有机酸; 固酸比

中图分类号: S667.9 文献标志码: A 文章编号: 1009-9980(2024)11-0001-08

Evaluation of Sugar-Acid Quality Traits of Different Passion Fruit Varieties during the Fruit Color-Changing Period

WU Bin^{1,2}, SU Jin-sheng^{3#}, XING Wen-ting^{1,2}, SONG Shun^{1,2}, MA Fu-ning^{1,2}, DANG Zhi-guo¹, HUANG Dong-mei^{1,2*}

(*1 Tropical Crops Genetic Resources Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Key Laboratory of Crop Gene Resources and Germplasm Enhancement in Southern China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Key Laboratory of Tropical Crops Germplasm Resources Genetic Improvement and Innovation of Hainan Province, Haikou, Hainan 571101, China; 2 Germplasm Repository of Passiflora, Hainan Province, Danzhou, Hainan 571737, China; 3 College of Tropical Crop Science, Yunnan Agricultural University, Puer, Yunnan 665099, China*)

收稿日期: 2024-05-28 接受日期: 2024-08-06

基金项目: 2024年海南育种联合攻关项目(百香果育种联合攻关), 海南省科技专项资助(ZDYF2024XDNY281)

作者简介: 吴斌, 男, 助理研究员, 主要从事百香果新品种选育及配套栽培技术管理。E-mail: wubin520327@163.com。#为共同第一作者。

*通信作者 Author for correspondence. E-mail: huangdm@catas.cn

Abstract: 【Objective】 To study the dynamic changes of sugar-acid components during the color transition of main cultivars and self-bred varieties including yellow passion fruit and purple passion fruit, and to lay a foundation for determining the appropriate harvest time, producing high-quality fruits and cultivating high-quality varieties of passion fruit. 【Methods】 Using the main cultivar and self-bred varieties including Qinmi (QM), Zhuangxiang Mibao (ZXMB), Zhongbai No. 6 (ZB-6), Huangxiang No. 1(HX-1), Tainong (TN) and Mantiaying (MTX) for the trial materials, the samples were collected at five different stages according to the degree of fruit color change and ripeness. The five stages are: T1 (after 12 weeks after flowering): green fruit skin, pale yellow flesh; T2 (after 13 weeks after flowering): yellowish fruit skin, yellow flesh; T3 (after 14 weeks after flowering): half-yellow fruit skin, yellow flesh; T4 (ripe period, after 15 weeks after flowering): yellow fruit skin, yellow flesh; T5 (after 16 weeks after flowering): slightly wrinkled fruit skin, yellow flesh. The soluble solid content of the fruit was measured using a sugar-acid meter (ATAGO PAL-BX/ACID 1), the acid content was determined using a ZDJ-4B automatic potentiometric titrator (Shanghai Lei-ci), and the solid-acid ratio was calculated. The organic acids and soluble sugar components and content were determined using high-performance liquid chromatography (HPLC). 【Results】 As the fruits turn color and mature, the soluble solid content of the flesh of QM, ZXMB, ZB-6, HX-1, TN and MTX varieties of passion fruit presents a trend of increasing first and then decreasing, and it reaches its highest value at T3 (the fruit peel is half-yellow, the flesh is yellow). The titratable acid content of ZXMB, ZB-6, HX-1, TN and MTX varieties decreases gradually as the fruits turn color, while that of QM shows an up-and-down trend. Except for QM's solid-acid ratio increasing gradually as the fruits turn color, the solid-acid ratio s of ZXMB, ZB-6, HX-1, TN and MTX varieties all show an up-and-down trend. The sucrose content of passion fruit in the fruit turning color process all shows an up-and-down trend, but the highest value of sucrose content in the fruit turning color process varies among the varieties. The trend of fructose and glucose in different color transformation periods of the six varieties is consistent, among which QM, ZB-6, HX-1, and MTX show a trend of first increasing and then decreasing with fruit color transformation. Citric acid is the main organic acid component of passion fruit, and the trend of citric acid content change of the six passion fruit varieties all shows a gradual decrease as the fruits turn color. Malic acid is the secondly organic acid, while the content of succinic acid, lactic acid and tartaric acid present the lowest. There are significant differences in sugar and acid components among the six passion fruit varieties at maturity stage. The content of fructose and glucose in the fruits of ZB-6 is significantly higher than that of other varieties at maturity stage, while ZXMB has significantly higher soluble solid content than other varieties. The acid components in the mature fruits of the six passion fruit varieties are mainly citric acid, accounting for 68.27%-84.22% of the total. Among them, the citric acid, total acid and titratable acidity content of TN are significantly higher than those of other varieties. From the analysis of the solid-acid ratio of the mature fruits of the six passion fruit varieties, QM has a significantly higher solid-acid ratio than other varieties, and the

solid-acid ratio of yellow passion fruit is higher than that of purple passion fruit. The solid-acid ratio from high to low is as follows: QM > ZXMB > HX-1 > ZB-6 > TN > MTX. 【Conclusion】 The sugar and acid component ratios of different passion fruit varieties vary during different stages of fruit color change and ripeness. T2-T4 is the key period of fruit quality change for QM, ZXMB, ZB-6, HX-1, TN and MTX. With fruit maturity, there is a trend of reducing sugar, and the solid-acid ratio of yellow passion fruit is greater than that of purple passion fruit. When the fruit is fully ripe, the solid-acid ratio from high to low is as follows: QM > ZXMB > HX-1 > ZB-6 > TN > MTX. Both purple passion fruit and yellow passion fruit belong to the citric acid dominant type, and the fruit solid-acid ratio of passion fruit is mainly influenced by citric acid content, and it is inversely proportional. Through the above research, the optimal consumption period of six different passion fruit varieties is from the complete maturity of the fruit to the stage of slightly wrinkled skin. Among them, the fruit of MTX, HX-1, and ZXMB, has a fairly balanced sour and sweet taste at the stage of half-color change quite close to the state of full maturity, so this stage is also suitable for tasting and consumption.

Key words: Passion fruit; color-changed period; soluble sugar; organic acid; solid-acid ratio

百香果 (Passion fruit), 学名西番莲, 是西番莲科西番莲属多年生草质藤本植物。西番莲属的种质资源丰富, 主要集中在南美洲亚马逊河流域, 西番莲属 (*Passiflora* Lim) 有 520 多种, 其中果实可食用的约 60 余种^[1]。在我国作为商业性栽培的品种主要有紫色百香果 (*P. edulis* Sims) ($2n=2x=18$)、黄色百香果 (*P. edulis* f. *flavicarpa*) ($2n=2x=18$) 及其杂交种^[2], 广泛种植于我国广西、福建、云南、海南、台湾等地。近年来, 随着人们对果品和营养的需求越来越高, 加之百香果独特的口感和风味, 可鲜食, 可调果汁, 也可用于加工, 因此市场对鲜食百香果的需求显著增加, 产业得到迅速发展, 据不完全统计截止至 2021 年全国百香果种植面积已突破 6.67 万 hm^2 , 年产量达到 100 万 t, 产值超过 100 亿元。然而, 目前百香果优质鲜食品种较少, 难以满足市场需求, 且对百香果的研究多集中于香气方面^[3-4], 关于果实糖酸组分方面的研究尚显不足, 导致对产业的支持力度也相应匮乏。因此, 研究不同栽培品种的百香果果实糖酸组分的动态变化规律, 对培育优质品种、优质果品生产、果实的适时采收具有重要意义。

糖酸的种类、含量及比例是对果实品质和口感影响最大的因素, 在很大程度上决定了果实的商品价值, 一直以来深受人们关注, 也是广大科研工作者一直致力于品种改良的重要指标之一。百香果果实中可溶性糖以葡萄糖、果糖和蔗糖为主^[5], 有机酸以柠檬酸、苹果酸和琥珀酸为主^[6]。前人在对黄色和紫色百香果的代谢组学和转录组联合分析中发现, 可溶性糖和有机酸的积累在黄色和紫色百香果间有显著差异^[7], 同时对紫色百香果的 3 个不同成熟时期研究发现, 果肉中大量的有机酸在果实成熟过程中显著减少, 葡萄糖在果实成熟过程中积累显著^[8]。而柠檬酸是黄色和紫色百香果果实发育过程中的主要有机酸^[9]。邝瑞彬等^[10]研究发现台农、满天星、芭乐黄金、大黄金等 4 种品种 (系) 中影响百香果果实品质最大的指标

是可溶性固形、可滴定酸、糖酸比等。刘文静等^[1]研究发现台农、紫香、满天星、芭乐黄金果、实生株系紫果等 5 个品系中能够反映百香果品质特征的成分主要有可溶性糖、有机酸等。

从过去的研究中不难发现糖、酸组分的种类和含量的差异直接影响果实的风味和品质。目前我国关于百香果果实的研究方向较为集中在挥发性物质的研究,对于百香果果实转色期糖、酸组分的相关性分析较少。明确百香果果实转色过程中的糖酸变化规律,是优质百香果高效生产的基础。黄色百香果和紫色百香果是我国百香果的主栽品种,其中黄色百香果口感偏甜,以鲜食为主,紫色百香果口感偏酸,以加工为主。本研究以钦蜜和壮乡蜜宝等 2 个黄色百香果,台农和满天星等 2 个紫色百香果,黄香 1 号和中百 6 号等 2 个自主选育的黄色百香果品种为试材,对 6 个百香果果实转色关键期的糖酸组分及含量进行测定,对成熟期果实品质性状进行剖析,明确百香果不同种及不同品种间的糖酸代谢特征,为百香果种植采收以及后期品种选育提供理论基础。

1 材料和方法

1.1 试材及取样

钦蜜(QM)、壮乡蜜宝(ZXMB)、中百 6 号(ZB-6)、黄香 1 号(HX-1)、台农(TN)、满天星(MTX)等 6 个百香果品种,供试品种涵盖了黄果西番莲和紫果西番莲两大主栽类型,而且选取了新优品种和经典品种进行比较。所有材料均保存于海南省省级西番莲种质资源圃(儋州),管理水平趋于一致,长势相近。按果实转色程度不同分为 5 个时期:T1(花后 12 周):果皮绿色,果肉浅黄色;T2(花后 13 周):果皮微黄/微紫红,果肉黄色;T3(花后 14 周):果皮半黄/半紫红,果肉黄色;T4(成熟期,花后 15 周):果皮全黄/全紫红色,果肉黄色;T5(花后 16 周):果皮微皱,果肉黄色。每一时期采摘 6 个生长情况一致的果实,测量果实基础指标后取出果肉,分装入 50 mL 的离心管中,放入-80 °C 的超低温冰箱中保存备用。

1.2 可溶性固形物和可滴定酸的测定

从备用果浆中吸取 1 mL,用糖酸仪(ATAGO PAL-BX/ACID 1)测量可溶性固形物含量。采用 ZDJ-4B 自动电位滴定仪(上海雷磁)测定可滴定酸含量。

1.3 有机酸组分的测定

百香果果浆中有机酸组分及含量的测定采用高效液相色谱法,参考王琴飞等^[12]方法,并加以改良。

样品预处理。称取百香果果浆 1.0 mL 用 0.1%的 H₃PO₄ 溶液定容至 20 mL 放入超声波清洗器中超声提取 30 min(超声频率为 360 kHz,温度为 30 °C),过滤后取滤液离心(10 000×g, 20 min),上清液经 0.22 μm 滤膜过滤后直接进样上机待测。每个样品做 3 次重复

色谱条件。色谱柱为 Polaris C18-A 色谱柱(250 mm×4.6 mm, 5 μm);检测器为紫外检测器;流动相为 98% 0.1%磷酸-2%甲醇;流速为 0.5 mL·min⁻¹;进样量为 20 μL;检测波长为 210 nm;柱温为紫果 30 °C,黄果 40 °C。

1.4 可溶性糖组分的测定

样品预处理, 取百香果果浆 1.2 mL 于 2 mL 离心管, 室温 8000 r·min⁻¹, 离心 10 min, 过膜 0.22 μm 滤膜过滤后直接进样上机待测, 每个样品做 3 次重复。

色谱条件。(色谱柱为 ZORBAX NH2 色谱柱 (4.6×250 mm, 5 μm); 流动相为乙腈-水 (75 : 25, V/V); 流速为 1 mL·min⁻¹; 柱温为 30 °C; 进样量为 10 μL; 示差折光检测器温度为 30 °C。

1.5 数据处理与分析

利用 Microsoft Excel 2016 进行数据处理与绘图, 应用 IBM SPSS Statistics 22 进行差异显著性分析, Origin 2021 进行相关性分析及图表的制作。

总糖含量=蔗糖+果糖+葡萄糖;

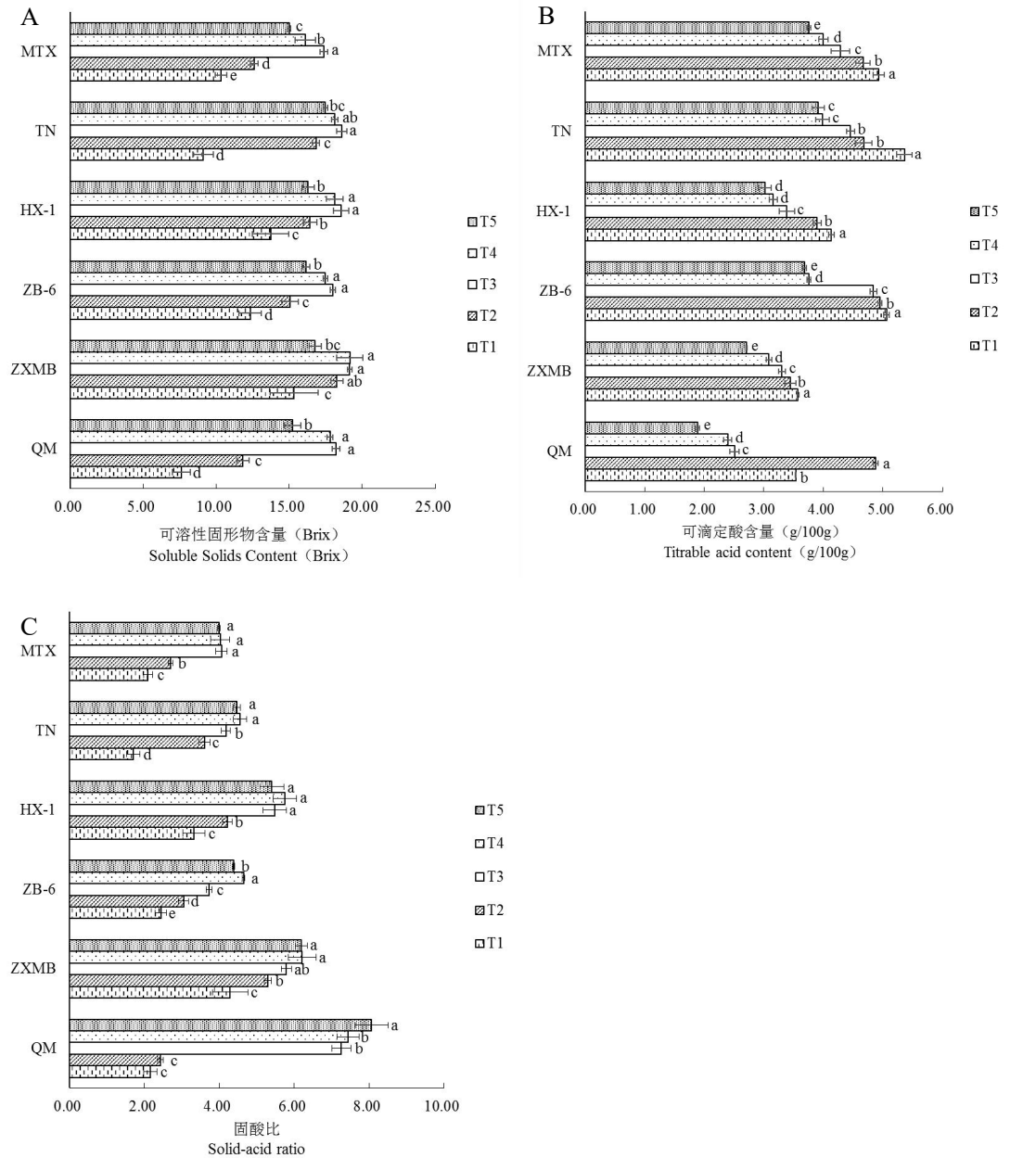
总酸含量=柠檬酸+苹果酸+酒石酸+乳酸;

固酸比为可溶性固形物含量/可滴定酸含量。

2 结果与分析

2.1 百香果果实转色过程中的可溶性固形物和可滴定酸含量分析

钦蜜 (QM)、壮乡蜜宝 (ZXMB)、中百 6 号 (ZB-6)、黄香 1 号 (HX-1)、台农 (TN)、满天星 (MTX) 等 6 个百香果品种的可溶性固形物含量随着果实转色均呈现先增加后下降的趋势 (图 1-A), 且在 T3 时期达到最高值, 分别为 18.20 Brix、19.13 Brix、18.00 Brix、18.57 Brix、18.60 Brix、17.38 Brix。可滴定酸含量随着壮乡蜜宝、中百 6 号、黄香 1 号、台农和满天星的果实转色均呈现逐渐降低的趋势 (图 1-B), 钦蜜则呈现先上升后下降的变化趋势, 在 T2 时期达到最大值 4.88 g·100 g⁻¹。随着百香果果实转色, 6 个百香果品种中, 除钦蜜的固酸比逐渐增大外, 壮乡蜜宝、中百 6 号、黄香 1 号、台农、满天星等 5 个品种的固酸比均呈现先上升后下降的趋势, 并在 T4 时期达到最大值, 分别为 6.22、4.65、5.75、4.56、4.03 (图 1-C)。



A. 可溶性固形物含量变化; B. 可滴定酸含量变化; C. 固酸比含量变化。钦蜜: QM、壮乡蜜宝: ZXMB、中百 6 号: ZB-6、黄香 1 号: HX-1、台农: TN、满天星: MTX。数据以平均值±标准差表示。不同字母表示在 $p < 0.05$ 水平上差异显著。

A. Soluble solid content changes; B. Titratable acid content changes; C. Solid acid ratio changes. Qinmi: QM, Zhuangxiang Mibao: ZXMB, Zhongbai No. 6: ZB-6, Huangxiang No. 1: HX-1, Tainong: TN, Mantianxing: MTX. Data were represented by the mean values \pm standard deviation. Different letters indicated significant difference at the $p < 0.05$ level.

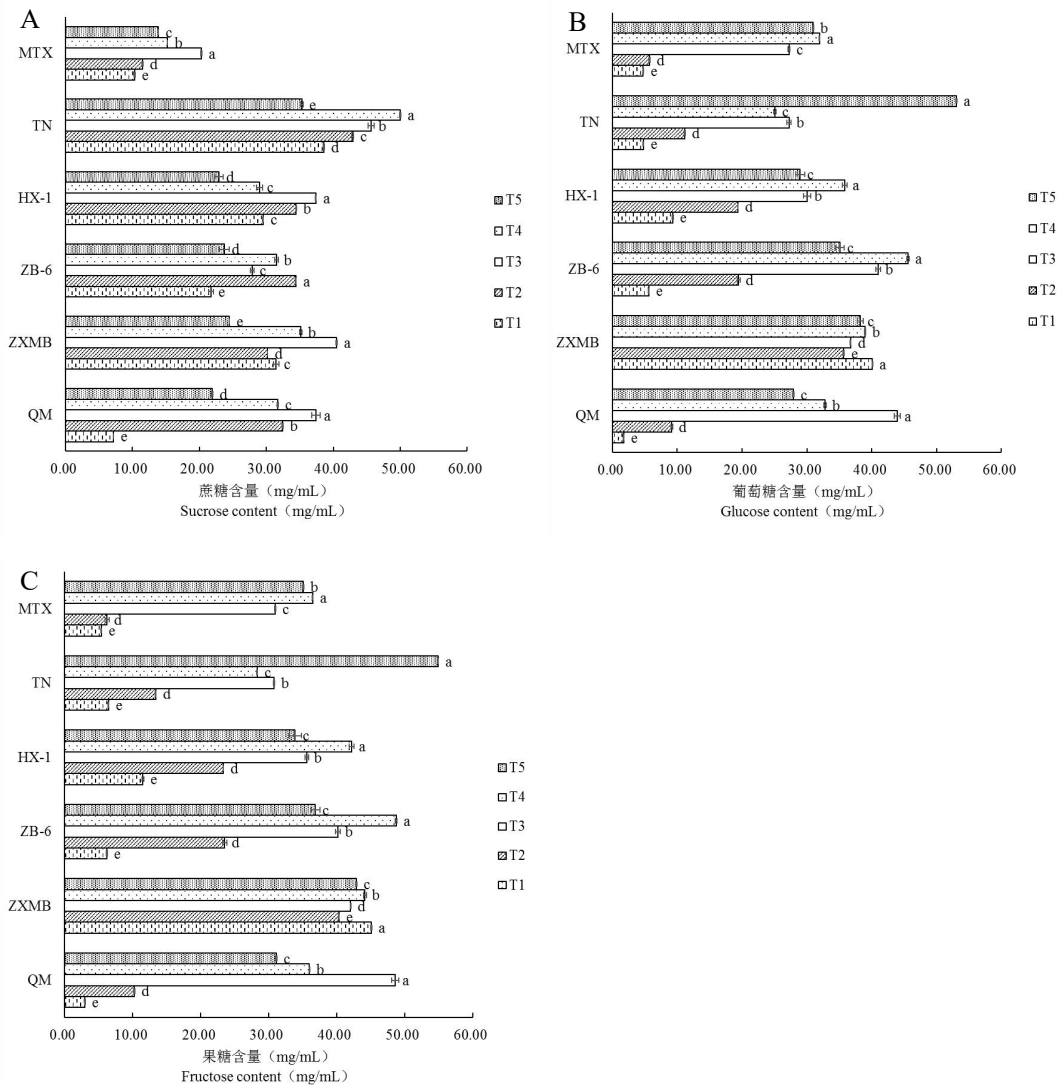
图 1 6 个百香果果实转色过程中物质含量的变化

Fig. 1 Changes in substance content during fruit color transformation of 6 passion fruits

2.2 百香果果实转色过程中可溶性糖组分及含量的变化

百香果在果实转色过程中蔗糖含量均呈先上升后下降的趋势 (图 2-A), 但蔗糖含量在果实转色过程中的最高值因品种而异, 其中钦蜜、壮乡蜜宝、黄香 1 号和满天星在 T3 时期

蔗糖含量最高，分别为 $37.45 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、 $40.49 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、 $37.39 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 和 $20.30 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ ，中百 6 号在 T2 时期蔗糖含量最高 ($34.40 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$)，台农在 T4 时期蔗糖含量最高 ($49.98 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$)。果糖和葡萄糖在 6 个品种中的果实不同转色时期的变化趋势相一致 (图 2-B, C)，钦蜜、中百 6 号、黄香 1 号和满天星随着果实转色，果糖和葡萄糖均呈现出先升高后降低的趋势，其中钦蜜的果糖和葡萄糖含量在 T3 时期达到最高，分别为 $43.96 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 和 $37.45 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ ，中百 6 号、黄香 1 号、满天星的果糖和葡萄糖含量在 T4 时期达到最高，果糖含量分别为 $48.76 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、 $42.19 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、 $36.51 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ ，葡萄糖含量分别为 $45.57 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、 $35.88 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、 $31.94 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。随着台农果实的转色，其果糖和葡萄糖含量在 T5 时期最高。而壮乡蜜宝果实转色期的果糖和葡萄糖含量变化趋势均为先降低后升高再下降的趋势，但变化幅度均较小。



A. 蔗糖含量变化; B. 葡萄糖含量变化; C. 果糖含量变化。钦蜜: QM、壮乡蜜宝: ZXMB、中百 6 号: ZB-6、黄香 1 号: HX-1、台农: TN、满天星: MTX。数据以平均值 \pm 标准差表示。不同字母表示在 $p < 0.05$ 水平上差异显著。

A. Sucrose content changes; B. Glucose content changes; C. Fructose content changes. Qinmi: QM, Zhuangxiang Mibao: ZXMB,

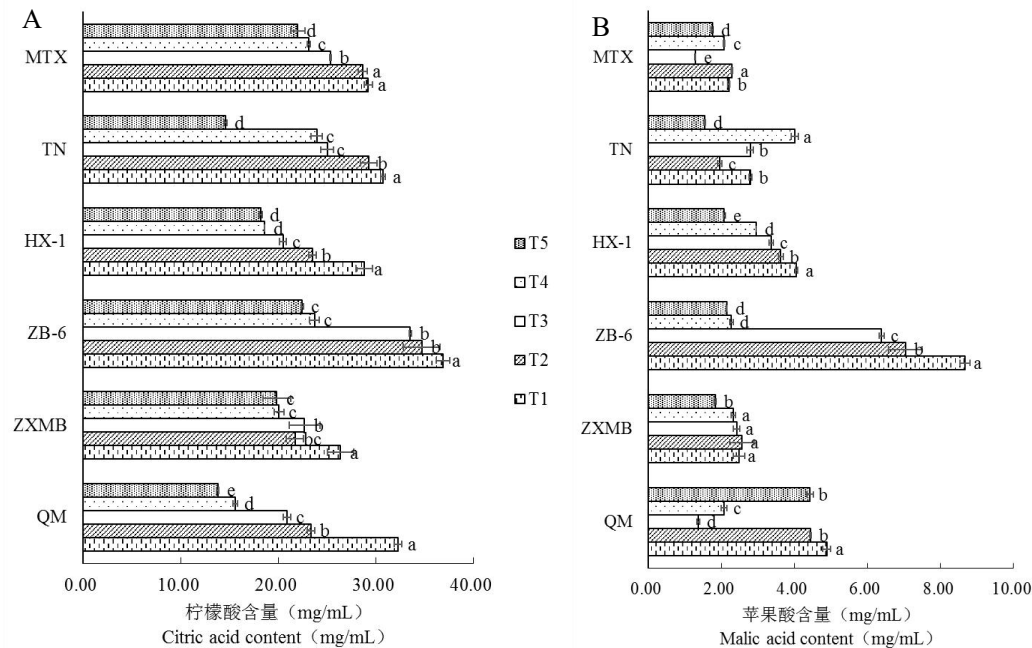
Zhongbai No. 6: ZB-6, Huangxiang No. 1: HX-1, Tainong: TN, Mantianxing: MTX. Data were represented by the mean values \pm standard deviation. Different letters indicated significant difference at the $p < 0.05$ level.

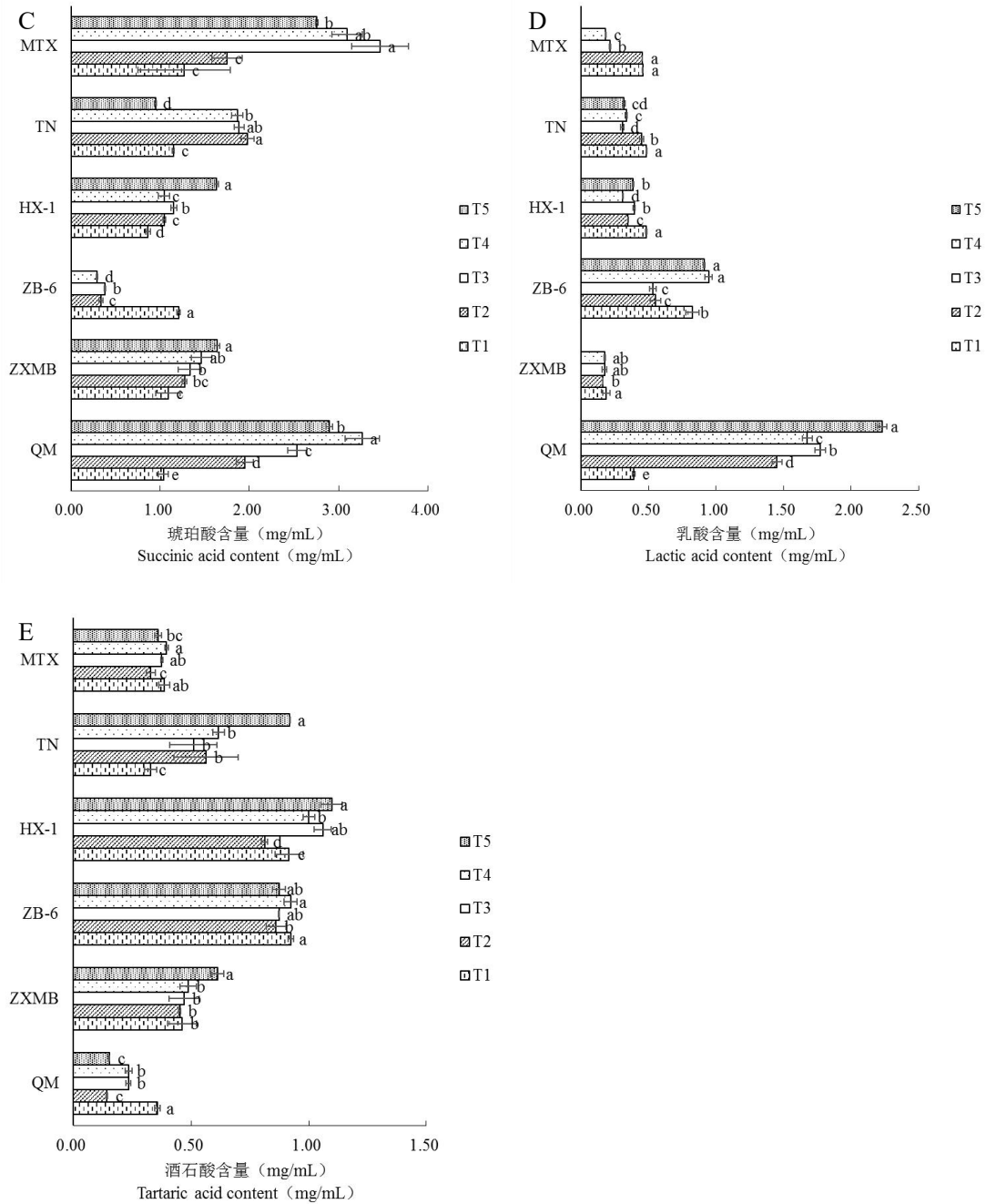
图 2 6 个百香果果实转色过程中可溶性糖含量的变化

Fig. 2 Changes in soluble sugar content during fruit color transformation of 6 passion fruits

2.3 百香果果实转色过程中有机酸组分及含量的变化

百香果果实转色期的有机酸含量变化如图 3 所示。不同品种的有机酸组分的含量及其变化趋势不同，整体来看，柠檬酸为百香果果实有机酸的主要成分（13.80~36.89 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ ），其在不同时期的含量均远高于苹果酸、琥珀酸、乳酸和酒石酸，占总酸的 58.69%~87.12%，且 6 个百香果品种的柠檬酸含量变化均随着果实转色呈现出逐渐下降的趋势（图 3-A）。其次为苹果酸含量在 2.29~8.67 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 间，其中中百 6 号的苹果酸含量高于其他品种（图 3-B），并随着果实转色呈现下降的趋势。百香果果实中琥珀酸、乳酸和酒石酸的含量较低，分别为 0.29~3.46 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、0.16~2.23 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、0.14~1.10 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ ，且在 T5 时期壮乡蜜宝和满天星未检测出乳酸，中百 6 号未检测出琥珀酸。满天星和钦蜜的琥珀酸含量高于其他品种，并在果实转色过程中呈现出先上升后下降的趋势（图 3-C），在 T3 和 T4 时期达到最高，分别为 3.46 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 和 3.27 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。钦蜜的乳酸含量高于其他品种，并随着果实转色呈现升高的趋势（图 3-D）





A. 柠檬酸含量变化; B. 苹果酸含量变化; C. 琥珀酸含量变化; D. 乳酸含量变化; E. 酒石酸含量变化。QM、壮乡蜜宝: ZXMB、中百6号: ZB-6、黄香1号: HX-1、台农: TN、满天星: MTX。数据以平均值±标准差表示。不同字母表示在 $p < 0.05$ 水平上差异显著。

A. Citric acid content changes; B. Malic acid content changes; C. Succinic acid changes; D. Lactic acid changes; E. Tartaric acid changes. Qinmi: QM, Zhuangxiang Mibao: ZXMB, Zhongbai No. 6: ZB-6, Huangxiang No. 1: HX-1, Tainong: TN, Mantianxing: MTX. Data were represented by the mean values ± standard deviation. Different letters indicated significant difference at the $p < 0.05$ level.

图3 6个百香果果实转色过程中有机酸含量的变化

Fig. 3 Changes in organic acid content during fruit color transformation of 6 passion fruits

2.4 不同品种百香果果实成熟期糖酸组分的含量差异性和相关性分析

由表 1 可知，在成熟期的 6 个百香果品种糖酸组分均呈现出品种间的显著性差异。中百 6 号果实中的果糖和葡萄糖含量显著高于其他品种，虽然台农果实中的蔗糖含量显著高于其他品种，但中百 6 号果实中的总糖含量显著高于其他品种，而在可溶性固形物含量中壮乡蜜宝显著高于其他品种。6 个百香果品种的果实中酸组分以柠檬酸为主，占比达到 68.27%~84.22%，其中台农果实中的柠檬酸、总酸和可滴定酸含量显著高于其他品种，满天星果实中的可滴定酸含量与台农无显著性差异，由此可见，紫色百香果果实中的可滴定酸含量均显著高于黄色百香果品种。固酸比是对果实口感起决定性作用的理化指标，从 6 个百香果品种的固酸比分析发现，钦蜜果实中的固酸比显著高于其他品种，且黄色百香果的固酸比高于紫色百香果，固酸比从高到低依次为：钦蜜>壮乡蜜宝>黄香 1 号>中百 6 号>台农>满天星。

表 1 6 个百香果品种成熟期糖酸组分含量的比较 (平均值±标准误差)

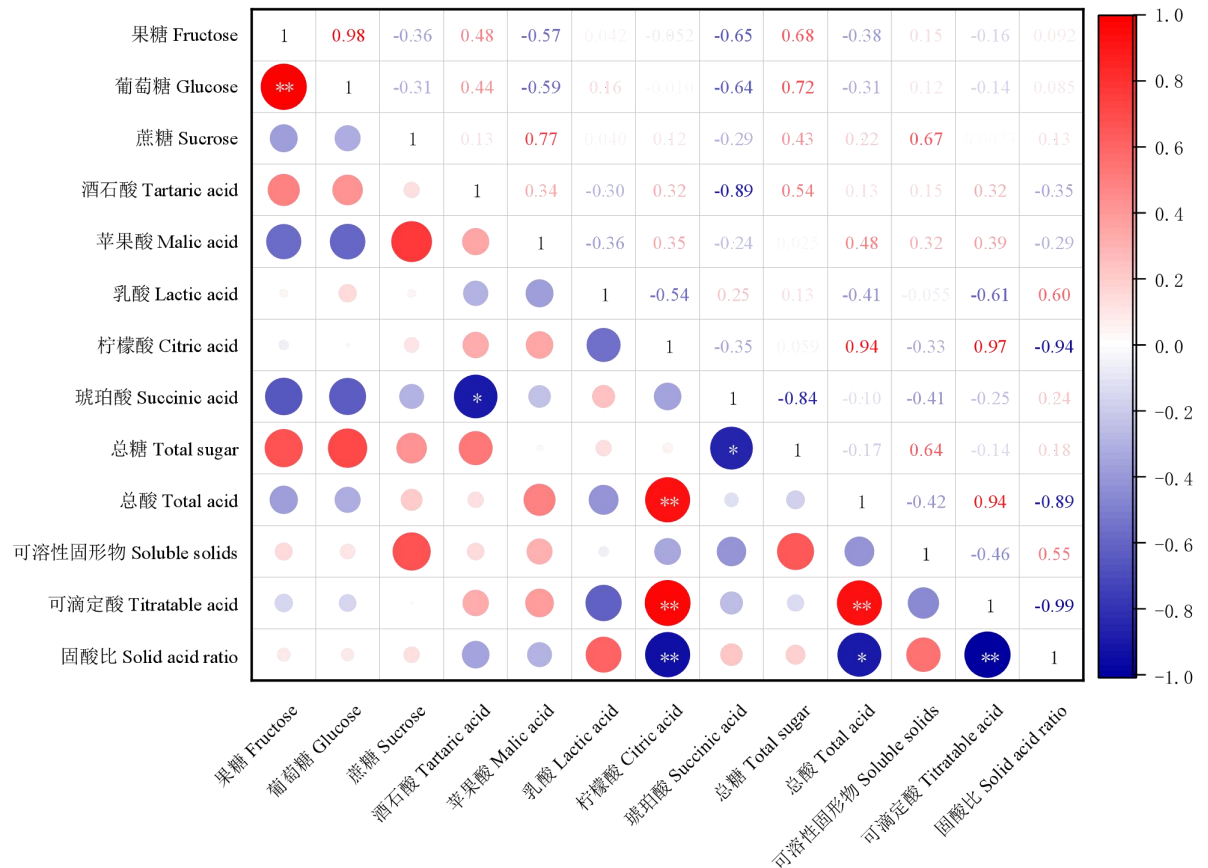
Table 1 Comparison of sugar and acid content during maturity of 6 passion fruit (mean±SE)

品种 Variety	果糖 Fructose/ (mg·mL ⁻¹)	葡萄糖 Glucose/ (mg·mL ⁻¹)	蔗糖 Sucrose/ (mg·mL ⁻¹)	酒石酸 Tartaric acid/ (mg·mL ⁻¹)	苹果酸 Malic acid/ (mg·mL ⁻¹)	乳酸 Lactic acid/ (mg·mL ⁻¹)	柠檬酸 Citric acid/ (mg·mL ⁻¹)	琥珀酸 Succinic acid/ (mg·mL ⁻¹)	总糖 Total sugar/ (mg·mL ⁻¹)	总酸 Total acid/ (mg·mL ⁻¹)	可溶性固形 物 Soluble solids/Brix	可滴定酸 Titrateable acid (g·100 g ⁻¹)	固酸比 Solid acid ratio
钦蜜 QM	36.01±0.03 e	32.84±0.18 d	31.72±0.06 c	0.23±0.01 f	2.08±0.07 d	1.68±0.04 a	15.62±0.24 e	3.27±0.19 a	100.58±0.24 e	22.88±0.40 d	17.80±0.20 b	2.40±0.07 d	7.44±0.30 a
壮乡蜜 宝	44.16±0.22 b	38.96±0.12 b	35.17±0.15 b	0.49±0.03 d	2.33±0.05 c	0.18±0.01 d	20.08±0.50 c	1.46±0.12 c	118.28±0.19 b	24.54±0.71 c	19.17±0.90 a	3.09±0.05 c	6.22±0.38 b
ZXMB 中百 6 号	48.76±0.12 a	45.57±0.17 a	31.53±0.24 c	0.92±0.03 b	2.28±0.05 c	0.95±0.03 b	23.72±0.51 ab	0.29±0.01 e	125.86±0.12 a	28.16±0.58 b	17.47±0.15 b	3.76±0.03 b	4.65±0.04 c
ZB-6 黄香 1 号	42.19±0.34 c	35.88±0.36 c	28.98±0.47 d	1.00±0.03 a	2.96±0.01 b	0.31±0.01 c	18.61±0.01 d	1.04±0.06 d	107.05±1.11 c	23.93±0.03 c	18.13±0.58 ab	3.16±0.07 c	5.75±0.31 b
HX-1 台农 TN	28.35±0.04 f	25.07±0.16 f	49.98±0.07 a	0.62±0.02 c	4.01±0.10 a	0.34±0.01 c	23.95±0.58 a	1.87±0.06 b	103.40±0.13 d	30.78±0.72 a	18.13±0.21 ab	3.98±0.11 a	4.56±0.18 cd
满天星 MTX	36.51±0.04 d	31.94±0.07 e	15.24±0.01 e	0.40±0.01 e	2.08±0.02 d	0.18±0.01 d	23.13±0.13 b	3.09±0.17 a	83.69±0.10 f	28.88±0.26 b	16.10±0.70 c	4.00±0.08 a	4.03±0.25 d

注：表中不同小写字母表示同一组分在品种间差异达到显著水平 ($p < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the table indicate significant differences in the same component among varieties ($p < 0.05$).

为探明 6 个百香果品种果实转色过程中各糖酸组分间的关系,对 6 个百香果品种果实成熟期的固酸比、可溶性固形物、可滴定酸、总糖、总酸及各糖酸组分含量进行相关性分析。如图 4 可知,果糖与葡萄糖呈极显著正相关;琥珀酸与酒石酸和总糖呈显著性负相关;总酸与柠檬酸、可滴定酸呈极显著正相关,与固酸比呈显著性负相关;可滴定酸与柠檬酸、总酸呈极显著正相关,与固酸比呈极显著性负相关;固酸比与柠檬酸、可滴定酸呈极显著性负相关,与总酸呈显著性负相关。由此表明,柠檬酸是影响百香果果实固酸比的重要因素,即百香果果实中的柠檬酸含量越高,可滴定酸含量就越高,而固酸比则越低,口感越酸。



*代表差异显著 ($p < 0.05$); **代表差异极显著 ($p < 0.01$)。

*indicates significant difference ($p < 0.05$); **indicates significant difference ($p < 0.01$).

图 4 6 个百香果品种成熟期糖酸组分含量的相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis of the content of sugar and acid components during the maturity period of 6 passion fruit

3 讨论

百香果作为我国近年来备受瞩目的新兴热带水果,其独特的香气、酸甜的口感和丰富的营养价值赢得了广泛的赞誉。本研究选取主栽品种、自育品种等 6 种百香果品种,进行果实

转色期的品质特征分析发现,随着百香果果实转色,6个百香果品种均出现“退糖”现象,即随着百香果果实的成熟,可溶性固形物含量降低的情况。可溶性固形物是评价果实品质的一个重要指标,其主要成分是可溶性糖^[13]。生产上常用可溶性固形物含量来代替果实中可溶性糖含量,且吴芳芳等^[14]研究发现不同发育期黄金百香果果实中可溶性固形物含量与可溶性糖含量呈极显著正相关,且变化趋势一致,出现退糖现象,与本研究结果相一致。百香果的口感主要受固酸比的影响,比值越大,果实越甜,比值越小,果实越酸^[15]。虽然6种百香果果实中的可溶性固形物含量和可滴定酸含量在果实转色后期均出现不同程度的下降,但其固酸比呈现上升的趋势,吴斌等^[16]在黄金百香果果实不同发育期固酸比变化趋势的研究结果相一致。由此可见,百香果完全成熟至果皮微皱时期(T4~T5时期),果实口感逐渐变甜,其中钦蜜果实的固酸比最高。

糖酸作为影响果实口感的决定性因素。前人研究表明果实可溶性糖组分及含量因不同作物而异,葡萄^[17]果实中葡萄糖含量最高,荔枝^[18]、杧果^[19]、桃^[20]等果实中蔗糖含量最高,苹果^[21]、梨^[22]等果实中果糖含量最高。本研究中对钦蜜、壮乡蜜宝、中百6号、黄香1号、满天星等5个百香果果实成熟期的糖组分分析发现果糖含量均最高,而台农果实成熟期的蔗糖含量均最高。前人对紫香果实中的糖组分分析发现蔗糖含量最高^[5],与本研究台农果实糖组分的结果相一致,主要原因可能在于紫香是从紫果与黄果的杂交种台农1号中筛选出的品种。王宇等^[23]对紫香、黄金和满天星等3种百香果果实糖组分研究发现含量最高的是葡萄糖,与本研究中的黄果百香果和满天星果实糖组分的结果相一致。由此可见,同一作物不同品种间可溶性糖组分含量存在差异,造成这一结果的原因主要是因为可溶性糖的相互转化与品种密切相关^[24]。果实中的有机酸组分因不同品种而异,按照果实中积累主要有有机酸的含量,可将果实分为苹果酸型、柠檬酸型和酒石酸型三大类^[25]。王琴飞等^[12]对紫色百香果和黄色百香果中的有机酸进行检测,结果显示表明柠檬酸含量最高。袁启凤等^[5]对紫香1号百香果果实有机酸分析发现柠檬酸含量最高,与本研究结果相一致。本研究中6种百香果果实成熟期柠檬酸含量占总酸的68.27%~84.22%,因此紫色百香果和黄色百香果均属于柠檬酸优势型。

此外,不同品种的糖酸组分比例在果实不同发育期中存在差异。赵爱玲等^[26]采用超高效液相色谱法对20个枣品种果实中的主要糖和有机酸组分进行分析发现糖组分及其含量在不同品种果实发育期存在显著差异,柠檬酸含量在不同发育时期无显著差异。本研究中除壮乡蜜宝在5个果实转色期,果糖含量一直保持最高外,其余5个品种在前期以蔗糖为主,后期以果糖为主,与梨成熟果实中的糖以果糖为主的结果相一致^[27]。柑橘等柠檬酸优势型的果实在生长转色过程中柠檬酸含量呈现先增加后降低的趋势^[28]。本研究中6个百香果品种的果实中的柠檬酸含量随着果实成熟逐渐减少,主要是样品采集以转色初期(膨大期)开始,即T1时期果肉已经转成黄色而导致柠檬酸含量逐渐降低。

前人已在枣^[29]、葡萄^[30]等多种作物中表明固酸比与可滴定酸呈极显著性负相关,本研

究对果实糖酸组分进行相关性分析发现,百香果固酸比与柠檬酸、可滴定酸呈极显著性负相关 ($p < 0.01$),这与前人的研究结果基本一致,由此可见,固酸比受柠檬酸含量的影响最为显著 ($p < 0.01$)。李慧敏等^[31]对蜜奈夏橙的研究也表明固酸比与可滴定酸、柠檬酸含量呈极显著负相关 ($p < 0.01$)。

4 结 论

百香果不同品种的糖酸组分比例在果实不同发育期中存在差异。转色期 T2~T4 是钦蜜、壮乡蜜宝、中百 6 号、黄香 1 号、台农、满天星等 6 个百香果品种果实品质变化的关键时期,随着果实成熟均出现退糖现象,且黄果百香果的固酸比大于紫果。果实完全成熟时,固酸比从高到低依次为:钦蜜>壮乡蜜宝>黄香 1 号>中百 6 号>台农>满天星。紫果百香果和黄果百香果均属于柠檬酸优势型,百香果果实固酸比主要受柠檬酸含量的影响,且成反比。通过上述研究,6 个不同品种的百香果最佳食用期为果实完全成熟至果皮微皱期,其中满天星、黄香 1 号及壮乡蜜宝这 3 个品种的果实,在达到半转色阶段后,其酸甜口感的平衡已相当接近完全成熟时的状态,因此这一阶段也同样适宜品尝和食用。

参考文献 References:

[1] COSTA J L, DE JESUS O N, OLIVEIRA G A F, DE OLIVEIRA E J. Effect of selection on genetic variability in yellow passion fruit[J]. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 2012, 12(4): 253-260.

[2] 刘娟,肖鑫丽,刘京宏,彭磊,姜睿,王家艳,周余. Oryzalin 在西番莲多倍体育种中的应用[J]. *天津农业科学*, 2014, 20(1): 17-20.

LIU Juan, XIAO Xinli, LIU Jinghong, PENG Lei, JIANG Rui, WANG Jiayan, ZHOU Yu. Application of oryzalin on polyploid breeding of *Passiflora edulis*[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2014, 20(1): 17-20.

[3] 方灵,孔宝玉,韦航,颜孙安,刘文静,司瑞茹,史梦竹,梁启富,任丽花,傅建炜. 不同发育阶段黄金百香果挥发性成分差异性研究[J]. *果树学报*, 2022, 39(12): 2376-2389.

FANG Ling, KONG Baoyu, WEI Hang, YAN Sun' an, LIU Wenjing, SI Ruiru, SHI Mengzhu, LIANG Qifu, REN Lihua, FU Jianwei. Study on variation of volatile components in Golden Passion Fruit at different development stages[J]. *Journal of Fruit Science*, 2022, 39(12): 2376-2389.

[4] 吴斌,黄东梅,邢文婷,宋顺,苏金生,杨其军. 不同黄金百香果品种果肉挥发性成分分析[J]. *中国果树*, 2023(9): 57-64.

WU Bin, HUANG Dongmei, XING Wenting, SONG Shun, SU Jinsheng, YANG Qijun. Analysis of volatile components in sarcocarp of different varieties of yellow passion fruit[J]. *China Fruits*, 2023(9): 57-64.

[5] 袁启凤,严佳文,王红林,李仕品,陈楠,王宇,韩秀梅,马玉华. 百香果品种‘紫香 1 号’果实糖、酸和维生素成分分析[J]. *中国果树*, 2019(4): 43-47.

YUAN Qifeng, YAN Jiawen, WANG Honglin, LI Shipin, CHEN Nan, WANG Yu, HAN Xiumei, MA Yuhua. Measurement of soluble sugars, organic acids and vitamins in ‘Zixiang 1’ passion fruit by high performance liquid chromatography[J]. *China Fruits*, 2019(4): 43-47.

[6] 蒋越华,陈永森,金刚,秦玉燕,时鹏涛,农耀京,王运儒,李乾坤. 离子交换色谱法测定西番莲

中有机酸[J]. 化学分析计量, 2018, 27(6): 47-50.

JIANG Yuehua, CHEN Yongsen, JIN Gang, QIN Yuyan, SHI Pengtao, NONG Yaojing, WANG Yunru, LI Qiankun. Determination of organic acids in *Passiflora* by ion exchange chromatography[J]. Chemical Analysis and Meterage, 2018, 27(6): 47-50.

[7] QIU W W, SU W Q, CAI Z Y, DONG L, LI C B, XIN M, FANG W K, LIU Y Q, WANG X M, HUANG Z B, REN H, WU Z J. Combined analysis of transcriptome and metabolome reveals the potential mechanism of coloration and fruit quality in yellow and purple *Passiflora edulis* Sims[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(43): 12096-12106.

[8] XIN M, LI C B, HE X M, LI L, YI P, TANG Y Y, LI J M, LIU G M, SHENG J F, SUN J. Integrated metabolomic and transcriptomic analyses of quality components and associated molecular regulation mechanisms during passion fruit ripening[J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 180: 111601.

[9] ZHANG X X, WEI X X, ALI M M, RIZWAN H M, LI B Q, LI H, JIA K J, YANG X L, MA S F, LI S J, CHEN F X. Changes in the content of organic acids and expression analysis of citric acid accumulation-related genes during fruit development of yellow (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa*) and purple (*Passiflora edulis* f. *edulis*) passion fruits[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22(11): 5765.

[10] 邝瑞彬, 孔凡利, 杨护, 杨敏, 周陈平, 魏岳荣. 百香果果汁营养特性分析与评价[J]. 食品工业科技, 2021, 42(9): 347-357.

KUANG Ruibin, KONG Fanli, YANG Hu, YANG Min, ZHOU Chenping, WEI Yuerong. Analysis and assessment of nutritional components of passion fruits juice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(9): 347-357.

[11] 刘文静, 潘葳, 吴建鸿. 5种百香果品系间氨基酸组成比较及评价分析[J]. 食品工业科技, 2019, 40(24): 237-241.

LIU Wenjing, PAN Wei, WU Jianhong. Comparative analysis and evaluation of amino acids composition among five passion fruit varieties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(24): 237-241.

[12] 王琴飞, 李莉萍, 高玲, 王明, 应东山, 张如莲. 反相高效液相色谱法测定西番莲中的有机酸[J]. 热带作物学报, 2015, 36(8): 1511-1517.

WANG Qinfei, LI Liping, GAO Ling, WANG Ming, YING Dongshan, ZHANG Rulian. Analysis of organic acids in passion fruit by reverse phase high performance liquid chromatography[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2015, 36(8): 1511-1517.

[13] 别智鑫, 韩东峰, 赵彩霞. 采收期可溶性固形物含量与秦美猕猴桃品质的关系[J]. 西北林学院学报, 2007, 22(2): 88-90.

BIE Zhixin, HAN Dongfeng, ZHAO Caixia. Determination of harvesting time of kiwifruits with good quality[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007, 22(2): 88-90.

[14] 吴芳芳, 吴斌, 黄东梅, 徐兵强, 冯红玉, 李新国. 不同发育期百香果品质及 EMP-TCA 代谢限速酶活性变化[J]. 分子植物育种, 2023, 21(24): 8218-8226.

WU Fangfang, WU Bin, HUANG Dongmei, XU Bingqiang, FENG Hongyu, LI Xinguo. Changes of quality and EMP-TCA metabolism rate-limiting enzyme activities in different development stages of passion fruit[J]. Molecular Plant Breeding, 2023, 21(24): 8218-8226.

[15] 吴斌, 张越根, 黄东梅, 邢文婷, 杨其军, 徐兵强, 宋顺. 黄金百香果杂交子代果实性状遗传倾向分析[J]. 果树学报, 2022, 39(9): 1587-1596.

WU Bin, ZHANG Yuegen, HUANG Dongmei, XING Wenting, YANG Qijun, XU Bingqiang, SONG Shun. Analysis of genetic tendency of fruit characters in hybrid progenies of *Passiflora edulis* f. *flavicarpa* Deg.[J]. Journal of Fruit Science, 2022, 39(9): 1587-1596.

[16] 吴斌, 黄东梅, 邢文婷, 苏金生, 杨其军, 宋顺. 黄金百香果果实品质与矿质元素的灰色关联度分析[J]. 中国果树, 2024(1): 85-92.

WU Bin, HUANG Dongmei, XING Wenting, SU Jinsheng, YANG Qijun, SONG Shun. Grey correlation analysis of fruit quality and mineral elements in fruits of yellow passion fruit[J]. China Fruits, 2024(1): 85-92.

[17] 郭权, 郭印山, 郭修武. 葡萄‘红地球’与‘双优’杂交后代果实糖酸的遗传规律[J]. 分子植物育种, 2021, 19(10): 3424-3431.

GUO Quan, GUO Yinshan, GUO Xiuwu. Genetic law of sugar and acid in the fruits of hybrids between ‘red globe’ and ‘shuangyou’ [J]. Molecular Plant Breeding, 2021, 19(10): 3424-3431.

[18] 蔡灿军, 郭志雄, 潘腾飞, 尤有利, 郭雅倩, 李瑞, 潘东明, 余文琴, 陈桂信, 潘鹤立. 应用 UPLC 分析荔枝果皮、假种皮可溶性糖和有机酸组分的变化[J]. 中国农学通报, 2021, 37(31): 139-144.

CAI Canjun, GUO Zhixiong, PAN Tengfei, YOU Youli, GUO Yaqian, LI Rui, PAN Dongming, SHE Wenqin, CHEN Guixin, PAN Heli. Analysis of soluble sugars and organic acids in *Litchi* pericarp and aril by UPLC[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(31): 139-144.

[19] 郭晓杰, 田海, 马晨, 张群, 王盼, 阳辛凤. 不同芒果品种果实可溶性糖组分含量特征分析[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(11): 125-132.

GUO Xiaojie, TIAN Hai, MA Chen, ZHANG Qun, WANG Pan, YANG Xinfeng. Analysis of the content characteristics and soluble sugar components of mango fruits from various cultivars[J]. Food Research and Development, 2021, 42(11): 125-132.

[20] 张素敏, 杨巍, 王柏松. 5 个露地中晚熟桃品种果实糖酸组分研究[J]. 中国果树, 2022(11): 59-62. ZHANG Sumin, YANG Wei, WANG Baisong. Study on sugar and acid components of five mid-late ripening peach cultivars in the field[J]. China Fruits, 2022(11): 59-62.

[21] 郑丽静. 苹果果实糖酸特性及其与风味关系研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015. ZHENG Lijing. Research on characteristics of sugar-acid composition and their relationship with taste in apple fruits[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015.

[22] 徐文清. 梨果实生长过程中糖酸组分变化及积累特性的研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2016. XU Wenqing. Study on the changes of sugar and organic acid components and accumulation properties in pear fruits[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2016.

[23] 王宇, 王红林, 方晓彤, 穆波, 曾帆, 马玉华, 周俊良. 3 种百香果果实糖含量与糖代谢相关基因表达的分析[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(17): 25-30.

WANG Yu, WANG Honglin, FANG Xiaotong, MU Bo, ZENG Fan, MA Yuhua, ZHOU Junliang. Analysis of sugar content and sugar metabolism-related gene expression in three varieties of passion fruit[J]. Food Research and Development, 2021, 42(17): 25-30.

[24] 段敏杰, 伊洪伟, 杨丽, 武峥, 王进. 不同砂梨品种果实糖酸组分及含量分析[J]. 南方农业学报,

2020, 51(9): 2236-2244.

DUAN Minjie, YI Hongwei, YANG Li, WU Zheng, WANG Jin. Sugar and acid compositions and their contents in different *Pyrus pyrifolia* varieties[J]. Journal of Southern Agriculture, 2020, 51(9): 2236-2244.

[25] 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 Lijing, NIE Jiyun, YAN Zhen. Advances in research on sugars, organic acids and their effects on taste of fruits[J]. Journal of Fruit Science, 2015, 32(2): 304-312.

[26] 赵爱玲, 薛晓芳, 王永康, 隋串玲, 任海燕, 李登科. 枣果实糖酸组分特点及不同发育阶段含量的变化[J]. 园艺学报, 2016, 43(6): 1175-1185.

ZHAO Ailing, XUE Xiaofang, WANG Yongkang, SUI Chuanling, REN Haiyan, LI Dengke. The sugars and organic acids composition in fruits of different Chinese jujube cultivars of different development stages[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2016, 43(6): 1175-1185.

[27] 殷晨, 田路明, 曹玉芬, 董星光, 张莹, 霍宏亮, 齐丹, 徐家玉, 刘超. 梨果实糖酸研究进展[J]. 果树学报, 2023, 40(12): 2610-2623.

YIN Chen, TIAN Luming, CAO Yufen, DONG Xingguang, ZHANG Ying, HUO Hongliang, QI Dan, XU Jiayu, LIU Chao. Research progress in sugar and acid in pear fruit[J]. Journal of Fruit Science, 2023, 40(12): 2610-2623.

[28] 易明亮, 张王妮, 杨莉, 匡柳青, 刘德春, 刘勇, 胡威. ‘马家柚’果实发育期有机酸含量变化及柠檬酸代谢相关基因的表达分析[J]. 江西农业大学学报, 2022, 44(4): 841-851.

YI Mingliang, ZHANG Wangni, YANG Li, KUANG Liuqing, LIU Dechun, LIU Yong, HU Wei. Analysis of organic acid content and expression of citric acid metabolism related genes during fruit development of ‘Majia’ pomelo[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2022, 44(4): 841-851.

[29] 薛晓芳, 赵爱玲, 焦文丽, 王永康, 任海燕, 石美娟, 苏万龙, 李毅, 刘丽, 李登科. 枣品种资源果实的糖酸含量特征分析[J]. 植物遗传资源学报, 2024, 25(1): 60-71.

XUE Xiaofang, ZHAO Ailing, JIAO Wenli, WANG Yongkang, REN Haiyan, SHI Meijuan, SU Wanlong, LI Yi, LIU Li, LI Dengke. Characteristics analysis of sugar-acid content in fruit of jujube varieties[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2024, 25(1): 60-71.

[30] 黄丽萍, 马小河, 王敏, 刘晓婷, 赵旗峰. 鲜食葡萄种质酸甜风味指标评价与分析[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2022(3): 55-58.

HUANG Liping, MA Xiaohe, WANG Min, LIU Xiaoting, ZHAO Qifeng. Study on flavor evaluation index of table grape germplasms[J]. Sino-Overseas Grapevine & Wine, 2022(3): 55-58.

[31] 李慧敏, 郑洁新, 曾凯芳, 邓丽莉. 不同采收成熟度对蜜奈夏橙果实营养品质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(19): 390-400.

LI Huimin, ZHENG Jiexin, ZENG Kaifang, DENG Lili. Effect of different harvest maturity on the nutritional quality of midnight *Valencia* orange fruit[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(19): 390-400.