



桃果实细胞内糖酸分布对果实甜酸风味的影响

姜凤超, 王玉柱*, 孙浩元, 杨 丽, 张俊环

(北京市农林科学院林业果树研究所, 北京 100093)

摘 要:以成熟‘白凤’桃果实为实验材料,采用区室化分析方法计算细胞内液泡、细胞质和细胞间隙中各糖酸组分的含量,并用调查问卷的方式对成熟桃果实甜酸风味进行评价打分,研究果肉细胞内各糖酸组分含量及其分布对果实甜酸风味的影响。结果表明:(1)成熟桃果实中可溶性糖(蔗糖、葡萄糖、果糖和山梨醇)在液泡、细胞质和细胞间隙的含量分别为 27.3、11.6 和 9.0 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,有机酸(苹果酸、柠檬酸、奎宁酸和莽草酸)含量分别为 2.09、0.94 和 0.35 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$;蔗糖和苹果酸含量分别占果实可溶性糖和有机酸含量的 80.6% 和 77.0%,是成熟桃果实中糖和酸的主要储存形式。(2)果实细胞内各糖酸组分通过细胞膜的渗透速率明显高于液泡膜。(3)块状处理桃果实液泡、细胞质与细胞间隙中的糖含量比、酸含量比及糖酸比分别为 3.0 : 1.3 : 1.0、6.0 : 2.7 : 1.0、13.9 : 12.4 : 23.1,而匀浆处理果实的细胞结构被破坏,其不同细胞器中的比例分别为 1.0 : 1.0 : 1.0、1.0 : 1.0 : 1.0、14.0 : 14.0 : 14.0;块状果实风味评价得分(2.99)明显高于匀浆处理果实(1.98)。研究认为,桃果实细胞中液泡、细胞质和细胞间隙之间糖酸含量以及糖酸比的差异可能是导致果实甜度风味变化的重要原因。

关键词:糖酸分布;甜酸风味;桃

中图分类号: Q945.6⁺5

文献标志码: A

Effects of Intracellular Distribution of Sugar and Acid on Sweetness and Sourness of Peach

JIANG Fengchao, WANG Yuzhu*, SUN Haoyuan, YANG Li, ZHANG Junhuan

(Institute of Forestry and Pomology, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Science, Beijing 100093, China)

Abstract: The aim of the present work was to evaluate the distribution and concentrations of sugars and acids in vacuole, cytoplasm, and free space in peach fruits, and assess their contribution to sweetness and sourness. Compartmental analysis method was used to calculate the concentration of sugars and acids in vacuole, cytoplasm and free space, and a survey was performed to evaluate fruit sweetness and sourness of peach fruits at harvest. The results showed that sugars (sucrose, glucose, fructose and sorbitol) and acids (malate, citrate, quinate and shikimate) in vacuole, cytoplasm and free space were 27.3, 11.6 and 9.0, and 2.09, 0.94 and 0.35 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, respectively, in mature fruits. Sucrose and malate accounting for 80.6% and 77.0% of total sugars and acids, respectively, were principal accumulation form in ripe peach fruits. The tonoplast with lower permeability was the most resistant barrier for sugars and acids to release. Sugar and acid contents in different organelles of the block fruit were 3.0 : 1.3 : 1.0 and 6.0 : 2.7 : 1.0, respectively, but for the homogenized fruit, the cells were destroyed, so the contents in different organelles were 1.0 : 1.0 : 1.0; Sugar and acid ratios in vacuoles, cytoplasm and free space were 13.9 : 12.4 : 23.1, respectively, and the corresponding results in the homogenized fruit were 14.0 : 14.0 : 14.0, respectively. Evaluation score of the block fruit (2.99) was significantly higher than that of the homogenized fruit (1.98). The differences of sugar and acid contents and sugar-acid ratio in vacuole, cytoplasm and free space

收稿日期: 2014-01-08; 修改稿收到日期: 2014-03-31

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2014BAD16B04); 公益性行业(农业)科研专项经费(201003043-03)

作者简介: 姜凤超(1982—), 男, 博士, 主要从事果树水分生理生态学研究。E-mail: jiangfc2010@gmail.com

* 通信作者: 王玉柱, 研究员, 主要从事果树资源育种与生理栽培研究。E-mail: chinabjwyz@sohu.com

may be responsible for the decrease of fruit sweetness.

Key words: compartmentation of sugar and acid; fruit sweetness and sourness; peach

可溶性糖和有机酸是决定果实甜酸风味的核心物质,了解果实细胞内糖酸分布规律,为从细胞水平分析糖酸对果实风味的影响提供依据,同时,对于阐明糖酸在细胞内积累特点也具有重要意义。果实的口感主要受果实中可溶性糖和有机酸含量及其组分决定^[1-3]。研究认为,果实的甜度和酸度作为果实口感的重要组成部分能够影响消费者的需求,而且它受果实中糖酸动态积累与糖酸比例的影响^[4-7]。另外,糖酸还是植物细胞内参与糖酵解和三羧循环等生理过程的主要物质^[8],为细胞生长发育所需碳架和能量。Yamaki 等通过研究苹果不同细胞器中糖的含量后认为糖在液泡中的积累是膨压产生的主要来源,从而迫使细胞生长和促使果实增大^[9]。由于直接分离和提取细胞内各细胞器的难度较大,目前研究者普遍采用区室化分析方法来无损地估算可溶性物质在液泡、细胞质与细胞间隙中的含量,且该方法已成功用于测定苹果、梨、莓和甜瓜中糖在细胞内的分布上^[10-14],是当前快速有效地测定可溶性物质在细胞内分布的主要研究方法。区室化分析方法在园艺作物上应用和报道较多,但在桃上的相关报道较少,本研究采用区室化分析方法测定可溶性糖和有机酸在桃果实细胞间隙、细胞质和液泡中的含量,并以此为基础分析它们对果实甜酸风味的影响。

1 材料和方法

1.1 实验材料

实验于 2012 年 7 月~2012 年 8 月在北京市通州区果园进行,试验材料为 7 年生桃品种‘白凤’,该品种在 7 月下旬成熟,试验于果实成熟时进行取样。样品采集于上午 09:00~11:00 进行,分别从标记植株树冠东、西、南、北四个方向随机选取无病虫害的果实装入 4℃ 的保温箱中,带回实验室进行处理。

1.2 实验设计

为研究成熟‘白凤’桃果实细胞内糖酸分布对果实甜酸风味的影响,应在保证果实中糖、酸含量相同的条件下分析糖、酸在细胞内不同分布情况,但是这一条件在活体果实组织中难以实现。为此,本试验采用如下方法实现:首先,为了保证果实中糖、酸含量一致,把桃果实切成数个小块(体积 4 cm³),并且平均分为两部分;然后,为使糖、酸在细胞内分布不同,将其中一部分块状果实采用搅拌器进行匀浆处

理,另一部分保持块状不变。匀浆后果实细胞破坏,糖、酸在液泡、细胞质和细胞间隙之间可看作均匀分布,而块状果实中糖、酸在细胞内为非均匀分布,从而满足了实验要求。

1.3 果实甜酸风味评价

首先,将果实切成数个小块,然后平均分成两部分,一部分保持块状(细胞内糖、酸非平均分布)供测试者品尝打分,另一部分搅拌成匀浆(细胞内糖、酸均匀分布)放在小杯中供测试者品尝打分。口感评价分为三个等级:甜(记 3 分)、中等(记 2 分)和不耐(记 1 分)。邀请 50 个测试者在室温 26℃ 房间中对两种形态果实的甜酸风味打分,并以每种形态果实的口感得分计算平均值作为风味评价的最终得分。

1.4 果实细胞内糖、酸含量测定及计算

1.4.1 桃果实中糖、酸的浸提与测定 首先使用自来水清洗掉桃果实表面的茸毛,然后使用蒸馏水进行冲洗。去掉桃果皮后,再使用直径 10 mm 中空并带有活塞的钻孔器向果实中心迅速挖出柱形果肉,将挖出的柱形果肉切为约 2 mm 厚的薄片。取约 10 g 柱形果肉中部的薄片放入 50 mL 2 mmol·L⁻¹ CaCl₂ 溶液中并在 0℃ 下预处理 10 s 以除去表面的糖、酸。然后将处理过的样品放入 50 mL 2 mmol·L⁻¹ CaCl₂ 溶液在通风的条件进行浸提。在规定的时间内(1、2、3、4、5、8、11、14、17、20、23、26、50、100、150、200、250 和 300 min)将测试的样品转移到新的 CaCl₂ 溶液中,同时将含有糖、酸的原 CaCl₂ 浸提液转移至 60 mL 离心管中,放置于 0℃ 的冰箱中进行冷冻,完全结冰后转至 -20℃ 冰箱中保存用以测定溶液中糖与酸的含量。

溶液中糖组分采用离子色谱进行测定,测定条件为:色谱柱为 CarboPac PA1 4 mm×250 mm(带 CarboPac PA1 4 mm×50 mm 保护柱);进样量:10 μL;流速:1 mL·min⁻¹;柱温:30℃;检测器:脉冲安培检测器,Au 电极,淋洗液:200 mmol·L⁻¹ 氢氧化钠洗脱。

溶液中酸组分采用液相色谱进行测定,测定条件为:酸柱 Agilent poroshell 120SB-C₁₈ (4.6 mm×100 mm, 2.7 μm),流动相 A:B=99.5:0.5(其中,A 表示 2.28 g K₂HPO₄·3H₂O;B 为甲醇),流速 0.5 mL·min⁻¹,检测波长为 210 nm,检测器为二极管阵列检测器(DIONEX PAD-100)。

1.4.2 浸提液中糖、酸含量的计算 不同时间浸提液中糖、酸含量计算以蔗糖为例,其它糖、酸组分含量的计算过程类同。浸提液中蔗糖含量计算公式:

$$C_{\text{蔗糖}} = \frac{S_c \times V}{m}$$

式中, $C_{\text{蔗糖}}$ 表示每克桃鲜样中蔗糖的含量($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$), S_c 表示浸提液中蔗糖的含量($\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$), V 表示浸提液的体积(mL), m 表示桃样品鲜重(g)。

1.4.3 桃果实细胞内糖、酸含量的计算 桃果实细胞内糖酸含量采用区室化分析方法测定。区室化分析方法认为糖、酸在果肉组织中以扩散作用的方式通过液泡膜与细胞膜,随着浸提时间不断增加,细胞间隙中的糖酸先扩散出来,接下来是细胞质,最后是液泡。对于果实组织中释放出来的糖、酸使用 Macklon 的方法进行分析^[15],计算过程见图 1。将不同浸提时间下桃果实细胞中糖、酸含量取以 10 为底的对数,然后相对于浸提时间作图,图中最后的直线部分(50~300 min)表示液泡中糖、酸的释放过程(图 1,A,a),通过回归分析可以得到相应的回归方程,经过计算得到纵截距(V)和斜率(K_1), 10^V 即为液泡中糖酸的含量(单位: $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,表示液泡中糖、酸含量占桃样品鲜重的比例), K_1 即为糖、酸通过液泡膜的渗透速率(单位: $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$,表示每分钟内液泡中糖、酸渗出液泡膜或细胞膜含量占桃样品鲜重的比例)。通过上面回归方程计算不同时间液泡中糖、酸含量,并从原糖、酸含量中减掉,然后取以 10 为底对数并以相对浸提时间进行作图,图中最后的直线部分(8~26 min)表示细胞质中糖、酸的释放过程(图 1,B,b),通过相应回归方程得到截距(C)和斜率(K_2), 10^C 即为细胞质中糖、酸的含量, K_2 即为糖、酸通过液泡膜的渗透速率。重复上面的过程可以得到第三条直线,该直线(1~5 min)表示的是细胞间隙中糖、酸的释放过程,通过相应回归方程得到纵截距(F), 10^F 即为细胞间隙中相应的糖、酸含量(图 1,C,c)。

1.5 数据分析

采用 SAS 统计软件和 Excel 2013 对测定指标进行相应的统计分析与作图。

2 结果与分析

2.1 桃果实糖酸浸提过程中细胞内糖、酸含量的变化规律

依据区室化分析方法通过作图计算得到桃果实细胞内液泡、细胞质与细胞间隙中各糖酸组分的含

量变化规律,其中浸提 50~300 min、8~26 min、1~5 min 内分别表示的是液泡、细胞质、细胞间隙中糖、酸的释放过程,各拟合直线斜率表示渗透速率(图 1)。结果显示,随着浸提时间增加,各细胞器浸提液中糖酸组分含量迅速下降,并且表现为在开始阶段下降较快,在最后阶段下降较慢;不同的糖、酸组分含量及渗透速率各不相同;液泡中蔗糖含量明显高于果糖、葡萄糖与山梨醇,液泡中苹果酸含量明显高于柠檬酸、莽草酸与奎宁酸。

2.2 桃果实不同细胞器内糖酸组分含量比较

桃果实不同细胞器中糖、酸主要组分及其含量如表 1 所示。液泡、细胞质和细胞间隙中可溶性糖(蔗糖、葡萄糖、果糖、山梨醇)含量分别为 27.3、11.6 和 9.0 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,各组分含量也均表现为液泡>细胞质>细胞间隙,即成熟桃果实中可溶性糖及其组分主要分布在液泡中;各组分含量间比较而言,各细胞器中蔗糖含量明显高于其余组分,而其余组分含量相近,桃果实中蔗糖含量占可溶性糖含量的 80.6%,是成熟桃果实中糖的主要积累形式。

同时,桃果实中液泡、细胞质和细胞间隙中可溶性酸(苹果酸、柠檬酸、奎宁酸和莽草酸)含量分别为 2.09、0.94 和 0.35 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,各酸组分含量除奎宁酸外也表现为液泡>细胞质>细胞间隙,即桃果实中可溶性酸及其组分苹果酸、柠檬酸、莽草酸主要分布在液泡中,但是奎宁酸主要分布在细胞质中。各可溶性酸组分含量比较而言,苹果酸和柠檬酸含量远高于莽草酸、奎宁酸含量,而又以苹果酸含量最高,其占可溶性有机酸含量的 77.0%,是成熟桃果实中有机酸的主要积累形式。

2.3 桃果实中糖酸通过膜的渗透速率比较

桃果实中糖、酸透过液泡膜和细胞膜的渗透速率可由液泡和细胞质阶段相应的释放曲线斜率得到。其中,各种糖、酸组分透过细胞膜的渗透速率均明显高于液泡膜(表 2);桃果实细胞内糖组分通过液泡膜与细胞膜的速率普遍高于酸组分。各糖组分间比较而言,通过细胞膜的速率以蔗糖最高($33.57 \times 10^{-3} \text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$),而以果糖释放速率最低,通过液泡膜的速率以山梨醇较高,但以蔗糖最低;与其它酸组分相比,苹果酸和柠檬酸通过细胞膜和液泡膜的渗透速率较高。

2.4 桃果实细胞内糖酸分布对果实甜酸风味的影响

糖、酸在桃果实细胞内分布并不相同,并且不同处理果实之间甜酸风味也存在明显差异(表 3)。其中,细胞内糖、酸非平均分布处理(块状果实)评价得

分(2.99)明显高于糖、酸平均分布处理果实(匀浆果实,1.98),表明糖、酸非平均分布果实甜度较高。对于各细胞器(液泡、细胞质、细胞间隙)中可溶性糖含量和有机酸含量的比例而言,由于平均分布处理果

实细胞结构被破坏,糖、酸在细胞中呈现均匀分布的状态,所以不同细胞器中的比例均为1.0:1.0:1.0,而对应的非平均分布处理则分别为3.0:1.3:1.0和6.0:2.7:1.0。另外,非平均分布处理果实液

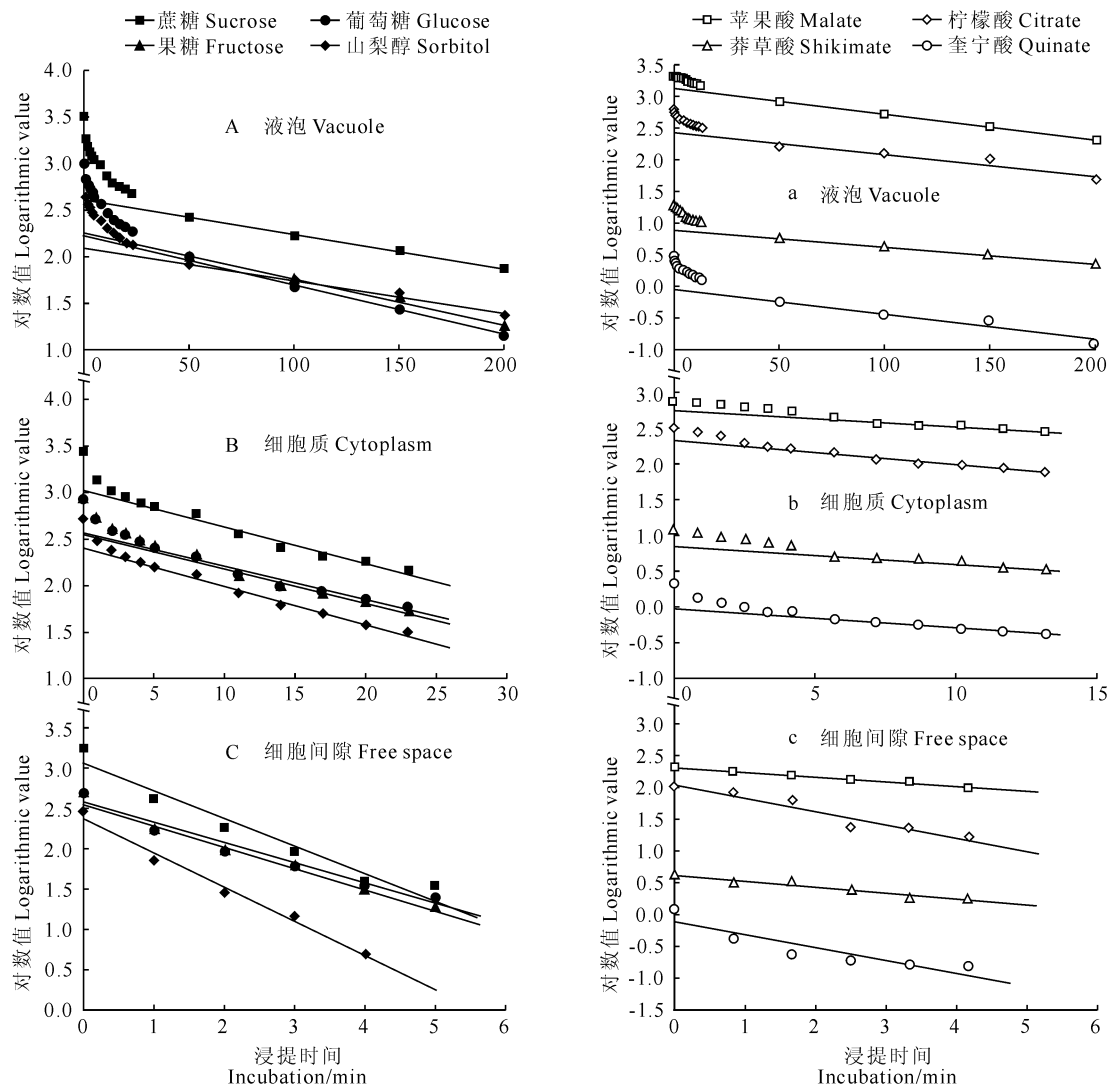


图1 区室化分析方法计算桃果实液泡、细胞质和细胞间隙中糖酸含量以及细胞膜与液泡膜的通透性
Fig.1 Compartmental analysis method to determine sugar and acid contents in the vacuole,cytoplasm,and free space and the permeability of tonoplast and plasma membrane in the tissues of peach fruit

表1 桃果实细胞内不同细胞器中糖酸含量

Table 1 Sugar and acid contents in different compartments of peach fruit

糖酸组分含量 Contents of sugar and acid components		液泡 Vacuole	细胞质 Cytoplasm	细胞间隙 Free space
可溶性糖 Soluble sugar	蔗糖 Sucrose/(mg·g ⁻¹)	22.14±1.36	8.32±0.46	8.11±0.54
	葡萄糖 Glucose/(mg·g ⁻¹)	1.67±0.37	1.15±0.16	0.35±0.15
	果糖 Fructose/(mg·g ⁻¹)	1.77±0.39	1.08±0.15	0.31±0.06
	山梨醇 Sorbitol/(mg·g ⁻¹)	1.68±0.29	1.07±0.08	0.21±0.03
可溶性酸 Soluble acid	苹果酸 Malate/(mg·g ⁻¹)	1.73±0.12	0.65±0.03	0.22±0.01
	柠檬酸 Citrate/(mg·g ⁻¹)	0.35±0.01	0.28±0.01	0.12±0.01
	奎宁酸 Quinate/(μg·g ⁻¹)	0.95±0.02	1.25±0.03	0.16±0.01
	莽草酸 Shikimate/(μg·g ⁻¹)	9.58±0.42	8.22±0.22	5.59±0.13

表 2 糖酸透过液泡膜与细胞质膜的渗透速率

Table 2 Constant velocity for sugars and acids across the plasma membrane and tonoplast

糖酸组分 Sugar and acid components	液泡膜 Vacuole membrane	细胞膜 Plasma membrane
蔗糖 Sucrose/($\times 10^{-6}$ mg \cdot g $^{-1}\cdot$ min $^{-1}$)	3.42 \pm 0.21	33.57 \pm 1.13
葡萄糖 Glucose/($\times 10^{-6}$ mg \cdot g $^{-1}\cdot$ min $^{-1}$)	3.22 \pm 0.50	23.33 \pm 2.01
果糖 Fructose/($\times 10^{-6}$ mg \cdot g $^{-1}\cdot$ min $^{-1}$)	4.43 \pm 0.62	21.00 \pm 1.22
山梨醇 Sorbitol/($\times 10^{-6}$ mg \cdot g $^{-1}\cdot$ min $^{-1}$)	4.53 \pm 0.13	27.57 \pm 1.03
苹果酸 Malate/($\times 10^{-6}$ mg \cdot g $^{-1}\cdot$ min $^{-1}$)	3.90 \pm 0.09	26.87 \pm 1.15
柠檬酸 Citrate/($\times 10^{-6}$ mg \cdot g $^{-1}\cdot$ min $^{-1}$)	3.37 \pm 0.30	25.30 \pm 0.92
奎宁酸 Quinate/($\times 10^{-6}$ μ g \cdot g $^{-1}\cdot$ min $^{-1}$)	3.48 \pm 0.32	23.43 \pm 0.30
莽草酸 Shikimate/($\times 10^{-6}$ μ g \cdot g $^{-1}\cdot$ min $^{-1}$)	2.78 \pm 0.11	23.68 \pm 0.66

表 3 桃果实细胞内不同糖酸分布、糖酸比及果实甜酸风味评价

Table 3 The intracellular distribution of sugars and acids,sugar and acid ratio in vacuole,cytoplasm and free space,and sweetness and sourness evaluation of peach fruit with the different treatments

处理 Treatment	液泡：细胞质：细胞间隙 Vacuole：Cytoplasm：Free space			甜酸风味得分 Sweetness and sourness evaluation
	糖/酸 Sugar/acid	糖 Sugar	酸 acid	
非平均分布 Non-uniformly distributed	13.9：12.4：23.1	3.0：1.3：1.0	6.0：2.7：1.0	2.99 \pm 0.02
平均分布 Uniform distribution	14.0：14.0：14.0	1.0：1.0：1.0	1.0：1.0：1.0	1.98 \pm 0.38

泡、细胞质与细胞间隙的糖酸比分别为 13.9、12.4 和 23.1,而平均分布处理果实中分别为 14.0、14.0 和 14.0(表 3),虽然平均分布处理的糖酸比略高于非平均处理,但其果实甜酸风味得分明显低于非平均处理。

3 讨 论

3.1 细胞内糖酸含量区室化分析方法

本试验中桃果实细胞内糖酸含量采用区室化分析方法计算得到,其中糖的释放曲线与苹果、梨和草莓中糖的渗出规律一致^[11-13]。另外,关于苹果、梨和草莓等园艺作物果实细胞中糖的分布早有报道,但在桃上报道较少,主要原因为浸提液中糖含量低于液相色谱仪的检测限而无法检出,因此,本试验通过适当延长浸提时间增加浸提液中糖的含量,并采用离子色谱对浸提液中糖含量进行检测,得到不同浸提时间下糖的含量,进而建立回归方程计算得到细胞内液泡、细胞质和细胞间隙中糖含量。果实中糖、酸的积累一般在果实发育后期^[16-20]。因此,应用区室化分析方法测定果实糖、酸等物质含量,应尽量选择果实发育后期以利于浸提液中糖、酸含量的测定。

3.2 桃果实细胞内糖、酸分布与其果实甜酸风味的关系

众所周知,可溶性糖和有机酸是决定果实风味的主要因素,其含量和比值(即糖酸比)对果实整体的甜度与酸度起决定性作用,经常被用来评价果实的风味^[21-23]。本研究发现,在成熟桃果实中,块状处

理果实甜度明显高于匀浆处理果实,并且这种现象并不能简单应用传统的理论(糖酸比)进行解释,因为两个处理果实中糖、酸含量相同,糖酸比也相同,但甜度却不同;通过对两个处理果实细胞内糖、酸分布的分析发现,块状处理果实中糖、酸主要分布在液泡中,而匀浆处理果实中糖、酸均匀分布,因此,推测糖、酸在细胞内的分布差异可能是导致不同处理果实甜酸风味变化的主要原因。

首先,应用细胞水平的糖酸比对不同处理果实甜酸风味的变化进行分析。因为细胞内糖、酸分布不同,所以细胞内不同细胞器中糖酸比并不相同。块状果实液泡、细胞质与细胞间隙的糖酸比分别为 13.9、12.4 和 23.1,而平均分布处理果实中为 14.0、14.0 和 14.0,块状处理果实液泡中的糖酸比虽然略低于匀浆果实,但块状处理果实细胞内糖酸主要分布在液泡中,并且块状处理果实液泡中糖的含量是匀浆处理的 1.7 倍。在糖酸比接近的条件下,果实风味由糖酸含量决定,所以块状处理果实甜度会优于匀浆处理果实。并且,细胞内糖酸分布影响果实风味的结论与前人总结的糖酸含量及糖酸比决定果实风味的结论并不矛盾,传统意义上的糖酸比是以整个果实为研究对象,是宏观水平的度量,而细胞水平上糖酸比是对传统糖酸比更进一步细化。

其次,从糖、酸浓度角度对不同处理果实甜酸风味的变化进行讨论。糖、酸在液泡、细胞质和细胞间隙三者之间存在明显的浓度梯度,而研究表明舌头对味觉的感知主要取决于物质的浓度,并且浓度越

高味觉感越强^[24-26]。因此,对于块状果实而言,由于液泡中糖酸的浓度高于细胞质与细胞间隙,所以舌头上味蕾接受的瞬时甜酸等味觉主要来自液泡。然而,在匀浆处理果实中,不同细胞器之间糖、酸浓度达到平稳,无浓度梯度存在,所以甜酸风味明显下降。有的学者会提出这样的问题:块状果实在咀嚼的时候果肉细胞同样被破坏,糖酸在细胞内也呈均匀分布状态,虽然这种状态存在,但需要一定的时间,而味蕾对甜酸风味的感应是瞬时发生,两者之间

存在明显的时间差,所以块状果实的风味优于匀浆果实。随着块状果实咀嚼时间的增加,会明显感觉果实的甜度下降,这种现象恰好印证了上面的分析。

然而,应该指出的是,本研究只是简单地揭示果实甜酸风味与细胞内糖酸分布之间的关系。为系统地阐明它们之间的关系,应在果实中糖酸含量相同的前提下,研究糖酸在细胞内不同的分布对果实风味的影响,但是这种研究条件在活体果实组织中难以实现,期待将来可以应用先进实验手段得以实现。

参考文献:

- [1] GAUTIER H, DIAKOU-VERDIN V, BÉNARD C, *et al.* How does tomato quality (sugar, acid, and nutritional quality) vary with ripening stage, temperature, and irradiance? [J]. *J. Agr. Food Chem.*, 2008, **56**(4): 1 241—1 250.
- [2] PAN T F(潘腾飞), LI Y Y(李永裕), QIU D L(邱栋梁). A review of molecular mechanism during the formation of fruit quality [J]. *Subtropical Plant Science* (亚热带植物科学), 2006, **35**(1): 81—84 (in Chinese).
- [3] NIU J(牛景), ZHAO J B(赵剑波), WU B H(吴本宏), *et al.* Sugar and acid contents in peach and nectarine derived from different countries and species [J]. *Acta Horticulturae Sinica* (园艺学报), 2006, **33**(1): 6—11 (in Chinese).
- [4] CRISOSTO C H, CRISOSTO G, BOWERMAN E. Searching for consumer satisfaction; new trends in the California peach industry [C]// MARRA F, SOTTILE F. Proceedings of the First Mediterranean Peach Symposium. Agrigento, Italy, 10 September, 2003: 113—118.
- [5] CRISOSTO C H, CRISOSTO G M. Relationship between ripe soluble solids concentration (RSSC) and consumer acceptance of high and low acid melting flesh peach and nectarine [*Prunus persica* (L.) Batsch] cultivars [J]. *Postharvest Biol. Tec.*, 2005, **38**(3): 239—246.
- [6] CRISOSTO C H, CRISOSTO G M, METHENEY P. Consumer acceptance of 'Brooks' and 'Bing' cherries is mainly dependent on fruit SSC and visual skin color [J]. *Postharvest Biol. Tec.*, 2003, **28**(1): 159—167.
- [7] WU B H(吴本宏), LI SH H(李绍华), QUILLOT B, *et al.* Influence of hairless of fruit epidermis and flesh color on contents of sugars and acids and their relationship in peach [J]. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2003, **36**(12): 1 540—1 544 (in Chinese).
- [8] 潘瑞炽. 植物生理学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 128—129.
- [9] YAMAKI S. Isolation of vacuoles from immature apple fruit flesh and compartmentation of sugars, organic acids, phenolic compounds and amino acids [J]. *Plant Cell Physiol.*, 1984, **25**(1): 151—166.
- [10] YAMADA H, KAGA Y, AMANO S. Cellular compartmentation and membrane permeability to sugars in relation to early or high temperature-induced watercore in apples [J]. *Sci. Horticulture*, 2006, **108**(1): 29—34.
- [11] YAMAKI S, INO M. Alteration of cellular compartmentation and membrane permeability to sugars in immature and mature apple fruit [J]. *J. Am. Soc. Hortic Sci.*, 1992, **117**(6): 951—954.
- [12] YAMAKI S, INO M, OZAKI S, *et al.* Cellular compartmentation and transport into tonoplast vesicles of sugars with ripening of pear fruit [J]. *Physiological Basis of Postharvest Technologies*, 1992, 343: 12—17.
- [13] JOHN O A, YAMAKI S. Sugar content, compartmentation, and efflux in strawberry tissue [J]. *J. Am. Soc. Hortic Sci.*, 1994, **119**(5): 1 024—1 028.
- [14] OFOSU A J, YAMAKI S. Sugar content and compartmentation in melon [*Cucumis melo*] fruit and the restriction of sugar efflux from flesh tissue by ABA [J]. *J. Jpn. Soc. Hortic Sci.*, 1994, **63**: 685—692.
- [15] MACKLON A E S. Cortical cell fluxes and transport to the stele in excised root segments of *Allium cepa* L. [J]. *Planta*, 1975, **122**(2): 109—130.
- [16] SEYMOUR G B, ØSTERGAARD L, CHAPMAN N H, *et al.* Fruit development and ripening [J]. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 2013, **64**: 219—241.
- [17] GIOVANNONI J. Molecular biology of fruit maturation and ripening [J]. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 2001, **52**(1): 725—749.
- [18] INZÉ D, DE VEYLDER L. Cell cycle regulation in plant development [J]. *Annu. Rev. Genet.*, 2006, **40**: 77—105.
- [19] MORIGUCHI T, SANADA T, YAMAKI S. Seasonal fluctuations of some enzymes relating to sucrose and sorbitol metabolism in peach fruit [J]. *J. Am. Soc. Hortic Sci.*, 1990, **115**(2): 278—281.
- [20] SRIVASTAVA A, HANDA A K. Hormonal regulation of tomato fruit development; a molecular perspective [J]. *J. Plant Growth Regul.*, 2005, **24**(2): 67—82.
- [21] PATRICK J W, BOTH A F C, BIRCH R G. Metabolic engineering of sugars and simple sugar derivatives in plants [J]. *Plant Biotechnol. J.*, 2013, **11**(2): 142—156.
- [22] WADA H, MATTHEWS M A, SHACKEL K A. Seasonal pattern of apoplastic solute accumulation and loss of cell turgor during ripening of *Vitis vinifera* fruit under field conditions [J]. *J. Exp. Bot.*, 2009, **60**(6): 1 773—1 781.
- [23] SAFTNER R A, DAIE J, WYSE R E. Sucrose uptake and compartmentation in sugar beet taproot tissue [J]. *Plant Physiol.*, 1983, **72**(1): 1—6.
- [24] MARSH K B, FRIEL E N, GUNSON A, *et al.* Perception of flavour in standardised fruit pulps with additions of acids or sugars [J]. *Food Qual Prefer.*, 2006, **17**(5): 376—386.
- [25] LINDEMANN B. Receptors and transduction in taste [J]. *Nature*, 2001, **413**(6 852): 219—225.
- [26] JORDAN R B, SEELYE R J. Relationship between taste perception, density and soluble solids concentration in kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) [J]. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 2009, **37**(4): 303—317.