

机械挤压对柚子砂囊的损伤特性及苦味物质增加

陈高辉^{1,2}, 林羨², 徐玉娟², 余元善², 吴继军², 温靖², 肖更生²

(1. 江西农业大学生物科学与工程学院, 江西南昌 330045) (2. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业农村部功能食品重点实验室, 广东省农产品加工重点实验室, 广东广州 510610)

摘要: 本研究以柚子砂囊形变程度为参数, 考察了不同机械挤压程度对沙田柚、白肉蜜柚和红肉蜜柚砂囊物理破损程度、营养成分、色泽及柚皮苷、柠檬苦素等苦味物质的影响。结果表明, 机械挤压对柚子砂囊的色泽、总酸含量影响不大。随着机械挤压程度的增加, 3个柚子品种砂囊的汁液流失率、可溶性蛋白含量、柚皮苷含量、总酚含量、可溶性固形物含量上升, 抗坏血酸含量、原果胶含量均下降, 可溶性果胶和脂肪含量在机械损伤致形变程度为40%时达到最大值。与白肉蜜柚和红肉蜜柚相比, 机械损伤导致沙田砂囊总糖含量下降2.89%, 柠檬苦素含量增加64.12%; 柚皮苷含量增幅较大, 增幅为17.48%。本研究表明, 机械挤压越大对柚子砂囊损伤越大, 而引起的苦味物质累积则因柚子品种而异, 其中机械损伤引起沙田柚苦味的增加较为明显。

关键词: 机械挤压; 柚子; 砂囊; 损伤特性; 苦味物质

文章编号: 1673-9078(2020)06-274-284

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.6.1049

Damage Characteristics and Bitter Substances Increase of Pomelo Juice Sacs Treating by Mechanical Extrusion

CHEN Gao-hui^{1,2}, LIN Xian², XU Yu-juan², YU Yuan-shan², WU Ji-jun², WEN Jing², XIAO Geng-sheng²

(1. College of Bioscience and Engineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

(2. Sericultural & Agri-Food Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China)

Abstract: In this study, the deformation degree of the pomelo juice sac was used as a parameter to investigate the effects of different degrees of mechanical extrusion on the physical damage on Shatian pomelo, white flesh pomelo and red flesh pomelo, as well as their nutritional composition, color, and bitter substances including naringin and limonin. The results showed that mechanical extrusion had little effect on the color and total acid content of the three types of pomelo juice sacs. With the increase of the degree of mechanical compression, the juice loss rate, soluble protein content, naringin content, total phenol content, and total soluble solid content of the three types of pomelo samples increased, whilst their ascorbic acid content and protopectin content decreased. The soluble pectin content and fat content reached their maximum when the degree of deformation caused by mechanical damage was 40%. Compared with the white flesh pomelo and red flesh pomelo, mechanical damage decreased the total sugar content by 2.89%, increased limonin content by 64.12% in Shatian juice sacs, with a greater increment of naringin content (by 17.48%). This study indicated that the greater compression the mechanical extrusion, the greater the damage to the pomelo juice sacs. The accumulation of bitter substances varied depending on pomelo varieties, with the increase of the bitter taste in Shatian pomelo juice sacs being greater.

引文格式:

陈高辉, 林羨, 徐玉娟, 等. 机械挤压对柚子砂囊的损伤特性及苦味物质增加[J]. 现代食品科技, 2020, 36(6): 274-284

CHEN Gao-hui, LIN Xian, XU Yu-juan, et al. Damage characteristics and bitter substances increase of pomelo juice sacs treating by mechanical extrusion [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(6): 274-284

收稿日期: 2019-10-29

基金项目: 广东省特色农机装备技术研发专项(粤农计[2018]52号); 广东省农业技术体系创新团队项目(2019KJ108); 广东省农业科学院果蔬加工研究团队项目(201604TD)

作者简介: 陈高辉(1994-), 男, 在读研究生, 研究方向: 农产品加工与贮藏工程

通讯作者: 肖更生(1965-), 男, 研究员, 研究方向: 农产品加工与贮藏工程

Key words: mechanical extrusion; pomelo; juice sac; damage characteristic; bitter substance

柚子又名文旦、香抛、雷柚,属于芸香科柑橘属乔木植物的果实。柚子作为亚热带主要水果之一,目前在中国、美国、古巴等多个国家都有种植^[1]。我国作为柚子主要种植国家,种植地区主要分布在广西、广东、浙江、福建等省份。柚子果肉中含有碳水化合物、蛋白质、粗脂、粗纤维等营养物质,VB₁、VB₂、VB₆、Vc、VE等丰富的维生素,及钠、钾、钙、磷、铁、锌、铬等种类多样的矿物质^[2]。在生物活性功能方面,柚子果肉因富含多酚、多糖等活性物质,而被赋予抗氧化、抗肿瘤、调节血糖和血脂等功能^[3-5]。

目前,我国柚子绝大部分用于鲜食,只有不到10%的柚子用于加工蜜饯,柚子茶、果酱等产品^[2,6]。其中制约柚子加工产业发展的一个重要原因,现有的柚子砂囊(果粒)与囊衣的分离技术具有一定局限性。目前,产业上柑橘类的砂囊与囊衣分离主要采用酸碱法脱除囊衣、酶法脱除囊衣^[7]、以及传统的人工分瓣分离法。但是这几种方法均存在一定的缺陷,酸碱法会产生大量废水、酶法成本高、手工分瓣分离法效率低下。近年来,采用机械法分离柚子囊衣与砂囊的装备的已见报道,该装备可直接将砂囊与囊衣进行分离,具有可避免二次加工食品污染、成本低廉、效率高、无环境污染等优势。但由于该分离技术基于机械剪切、挤压等作用力,分离过程易造成砂囊一定程度上的品质劣变。尤其是柚子砂囊由于含有苦味前体物质,在受到机械挤压后常常导致苦味物质的增加,并出现“苦味延迟”现象。

果蔬的机械损伤是指水果或蔬菜从采收到销售的过程中因受到外力作用而造成的果实变形、果皮和果肉破损等一些列果实损伤现象^[8]。目前在菠萝^[9]、水蜜桃^[10]、樱桃^[11]、香蕉^[12]、苹果^[13]、番茄^[14]、杨梅^[15]等水果皆有相关方面的报道,而柚子砂囊机械损伤的相关研究则未见报道。因此,本文拟通过以柚子砂囊形变程度为参数,以沙田柚、白肉蜜柚、红肉蜜柚的砂囊为研究对象,考察不同机械挤压程度对柚子砂囊品质及苦味物质的影响,以期对柚子砂囊与囊衣机械化分离设备的优化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验与试剂

沙田柚、琯溪白肉蜜柚、琯溪红肉蜜柚,购于广州沙河顶批发市场。

邻苯二胺(化学纯)、吡啶(化学纯)、福林酚试

剂,国药集团化学试剂有限公司;牛血清蛋白(分析纯),广州市齐云生物技术有限公司;没食子酸(分析纯),天津大茂化学试剂厂;硫酸(分析纯),珠海市化成达化工有限公司;D-半乳糖醛酸一水(生物试剂),生工生物工程有限公司;果糖(标准品)、葡萄糖(标准品)、蔗糖(标准品)、L-抗坏血酸(标准品),上海源叶生物科技有限公司;柠檬苦素(标准品)、柚皮苷(标准品),成都曼思特生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

TA.XTPlus 质构仪,英国 Stable Micro Systems 公司;UltraScan VIS 型全自动色差仪,美国 HunterLab 公司;Agilent 1100 高效液相色谱仪,日本岛津公司;PB-10 型 PH 计,Sartorius 公司;RFM340+全自动台式折光仪,英国 Bellingham+Stanley 公司;UV-1800 型紫外可见分光光度计,日本岛津公司;Cary Eclipse 分子荧光分光光度计,美国 Varian 公司。

1.3 方法

1.3.1 样品处理

每个柚子品种均结合果皮颜色及其他相关感官特征选择完全成熟、品质上好的柚子。对于同一品种的柚子,均购买相同产地、相同批次收成的柚子。

取样时,每个柚子品种选择柚子数个,轻柔地去皮、去籽、去囊衣,取未破碎的砂囊混匀,待用。

1.3.2 机械挤压处理

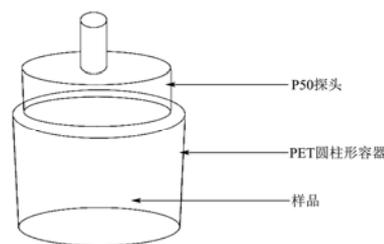


图1 砂囊机械挤压处理示意图

Fig.1 Schematic diagram of mechanical extrusion of pomelo juice sacs

采用质构仪并使用 P50 探头对柚子砂囊进行机械挤压处理。如图 1 所示,采用直径为 650 mm,高为 480 mm 的 PET 圆柱形容器装载砂囊。容器底部平整,直径略大于 P50 探头,P50 探头在容器上下移动过程不与容器内壁产生摩擦。每次挤压处理前,容器底部平铺砂囊,砂囊质量为 45 g。挤压处理过程,质构仪参数为:测试前速度 1 mm/s,测试中速度 1 mm/s,测试后速度 10 mm/s,触发值设定为 5 g 力。造成容器以

形变程度是 0 为对照组, 即未经挤压处理的样品为对照, 考察 P50 探头挤压砂囊形变程度为 20%、40%、60%、80%对砂囊品质的影响。挤压后, 收集 PET 圆柱形容器的样品用于测定汁液流失率、色泽、营养成分及苦味物质含量等指标。

1.3.3 指标测定

1.3.3.1 汁液流失率的测定

挤压前砂囊的重量 (m_1), 挤压后用吸水纸处理砂囊的重量 (m_2), 计算挤压后减少的重量与挤压前砂囊的比值的比值, 得出汁液流失率。见公式 (1)

$$\text{汁液流失率}(\%) = (m_1 - m_2) / m_1 \times 100\% \quad (1)$$

1.3.3.2 糖组分含量的测定

提取: 在 5 g 样品中添加 10 mL 无水乙醇震荡、静置 20 min, 离心 (10 min; 5000 r/min), 过滤膜上样。

糖组分含量的测定采用 HPLC 法测定^[16]。色谱柱: Shodex Asahipak NH2P-50 4E (4.6 mm×250 mm, 5 μm) 色谱柱, 柱温 30 °C; 检测器: 蒸发光 (ELSD) 检测器蒸发光 (ELSD) 检测器检测, 漂移管温度为 40 °C; 流动相: 乙腈:水 (V/V) = 3:1, 流速为 1 mL/min, 进样量为 10 μL。

1.3.3.3 抗坏血酸含量的测定

采用 GB 5009.86-2016《食品安全国家标准食品中抗坏血酸的测定》中的荧光法测定^[17]。

1.3.3.4 可溶性蛋白含量的测定

采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定。取 1 g 样品加 3 mL 磷酸缓冲液, 混匀后离心 (11000 r/min; 15 min); 取 0.4 mL 上清液添加 0.6 mL 纯水混匀后添加 5 mL 考马斯亮蓝溶液, 静置 5 min 后测定, 测定波长为 595 nm。以牛血清蛋白制作标准曲线计算含量。

1.3.3.5 原果胶、可溶性果胶含量的测定

原果胶、可溶性果胶的提取: 取 5 g 样品添加 50 mL 95%乙醇混匀后沸水浴 30 min, 离心 (5000 r/min, 10 min) 后过滤取滤渣, 添加 30 mL 纯水 50 °C 水浴 30 min 后离心 (5000 r/min, 10 min), 取上清液定容到 200 mL, 获得水溶性果胶提取液。残渣加 80 mL 0.5%硫酸溶液, 沸水浴 1 h 后离心 (5000 r/min, 10 min) 取上清液定容到 100 mL, 获得原果胶提取液。

果胶含量的测定: 测定采用咔唑比色法^[18]。取 1 mL 加 6 mL 硫酸; 沸水浴 30 min, 冷却后加 0.5 mL 0.15%咔唑震荡后暗处静置 2 h, 在 523 nm 下测定。以 D-半乳糖醛酸-水制作标准曲线计算含量。

1.3.3.6 总酚的测定

采用 Folin-Ciocalteu 比色法^[19]; 取样品 3 g, 加乙酸乙酯 24 mL 震荡后超声 (30 min; 450 W), 离心 (10

min; 5000 r/min) 后取 1 mL 上清液。分别依次添加 2 mL 福林酚、2 mL 10%碳酸钠溶液静置 1 h 后 760 nm 比色。以没食子酸制作标准曲线计算含量。

1.3.3.7 总酸的测定

采用 GB/T 12456-2008 的《食品中总酸的测定》中的酸碱滴定法^[20]。

1.3.3.8 可溶性固形物 (TSS) 的测定

采用台式折光仪直接测定。

1.3.3.9 脂肪的测定

采用 GB 5009.6-2016 的《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》中的索氏抽提法^[21]。

1.3.3.10 色泽的测定

采用全自动色差仪测定, 色差值以 L^* 、 a^* 、 b^* 和 ΔE 表示, 其中 ΔE 的计算公式为:

$$\Delta E^* = [(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2]^{1/2}$$

式中: L_0 、 a_0 、 b_0 表示为对照组的色差值; L^* 、 a^* 、 b^* 表示用处理组的色差值。

1.3.3.11 柚皮苷、柠檬苦素含量的测定

柚皮苷、柠檬苦素的提取: 取 2 g 样品添加 2 mL 甲醇, 超声提取 (20 min, 300 W), 过 0.22 μm 有机滤膜备用。

柚皮苷、柠檬苦素含量的测定方法: 参考丁帆^[22]的方法, 并改进。仪器为 LC-20AT (日本岛津); 色谱柱: XBridge® shieldRP18 (250×4.6 mm, 5 μm, 美国沃特世); 流动相 A 为超纯水, 流动相 D 为甲醇。梯度洗脱程序如下: 0~10 min, 40% D; 10~15 min, 60% D; 15~20 min, 80% D; 20~25 min, 60% D; 25~30 min, 40% D; 进样量 10 μL, 流速 1 mL/min, 检测波长 210 nm 和 280 nm, 柱温 30 °C。

1.3.4 数据分析

每个实验重复 3 次, 数据用 Excel 处理, 数值以平均值±标准差表示。采用 SPSS 22 软件对所有试验数据进行方差分析 (ANOVA), 用 Duncan 多重比较分析差异的显著性。计算最小显著差数 LSD ($p < 0.05$) 值。

2 结果与分析

2.1 机械挤压对柚子砂囊物理破损程度的影响

采用汁液流失率来表征机械挤压对砂囊的物理破损程度, 破损程度越大则汁液流失率越高。不同机械挤压程度对柚子砂囊汁液流失率的影响及对应的挤压力分别如图 2 (a) 和图 2 (b) 所示。由图 2 (a) 可见, 汁液流失率随机械挤压程度的加大而显著性上升 ($p < 0.05$), 并在形变程度为 80% 时砂囊的汁液流失率

达到最大,白肉蜜柚、红肉蜜柚、沙田柚砂囊汁液流失率分别为:11.91%、12.12%、3.58%。与本结果类似的是,陈燕等^[23]通过对荔枝模拟挤压发现挤压程度增加造成失重率的提高。

结合图 2a、2b 可知,在形变程度为 0~40%范围内,不同品种柚子砂囊的汁液流失率差异不显著,均随着形变程度的增加缓慢增加。形变程度为 40%时,汁液流失率仅为 1.54%至 1.83%之间,表明该挤压强度范围内(1946.27 g 至 2017.40 g),柚子砂囊对机械挤压的耐受力较强,导致的物理损伤较少。当形变程度大于 40%时,白肉蜜柚和红肉蜜柚砂囊的汁液流失率显著增加,当形变程度为 80%时,白肉和红肉蜜柚砂囊的汁液流失率分别增加至 11.91%、12.12%,与形变程度为 40%时的相比,增加幅度分别为 673.38%、873.76%。而沙田柚砂囊的汁液流失率随着形变程度由 40%增加至 80%,仍然保持较慢的增长速率,尽管其在挤压强度内承受的挤压力与蜜柚的无显著性差异。由此可见,沙田柚砂囊比蜜柚砂囊对挤压的承受力更强,造成这一差异的原因可能与砂囊的形态结构和水分含量有关。沙田柚砂囊的结构与白肉蜜柚、红肉蜜柚的相比更为狭长。同时沙田柚砂囊的水分含量为 86.07%,显著低于白肉蜜柚、红肉蜜柚砂囊的 90.18%和 90.21%。

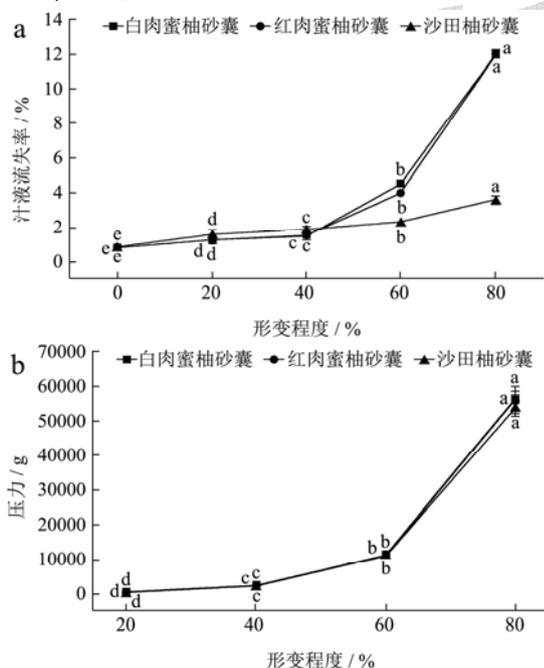


图 2 形变程度对砂囊汁液流失率 (a) 和压力 (b) 的影响

Fig.2 Changes of juice loss rate (a) and pressure (b) on pomelo juice sacs under different deformation degree

注: 不同字母均表示同一品种差异性显著 ($p < 0.05$)。

2.2 机械挤压对柚子砂囊果胶的影响

果胶是细胞壁的重要组成成分,广泛存在于植物的根、茎、果实等,它的存在使细胞壁粘连,从而赋予植物组织机械强度^[24,25]。果胶于细胞壁的两主要存在形式为原果胶和可溶性果胶,其中只有原果胶可赋予细胞机械强度。由图 3a 和 3b 可见,机械损伤会导致可溶性果胶含量上升,原果胶含量下降,这一结果与李萍^[26]的研究结果相一致。机械挤压导致白肉蜜柚砂囊和红肉蜜柚砂囊原果胶含量的显著下降 ($p < 0.05$),但对沙田柚砂囊原果胶含量无显著性影响 ($p > 0.05$)。对于可溶性果胶,当形变程度为 20%时,三个品种柚子砂囊的可溶性果胶含量都未出现显著变化 ($p < 0.05$)。形变程度在 20%到 80%范围内,三个品种柚子砂囊的可溶性果胶含量均先增加后缓慢下降,在形变程度为 40%时达到最高值。机械挤压造成可溶性果胶含量的升高可能是由于原果胶分解导致。但是,当挤压强度过大而造成形变过大时,可能会导致部分可溶性果胶因随汁液流出并粘连于容器内壁而损失。

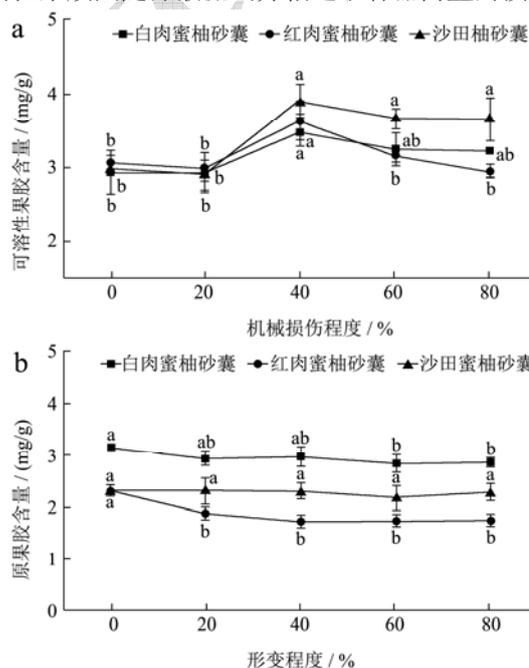


图 3 形变程度对柚子砂囊可溶性果胶 (a)、原果胶 (b) 含量的影响

Fig.3 Effects of deformation degree on soluble pectin contents (a), protopectin contents (b) in pomelo juice sacs

注: 不同字母均表示同一品种差异性显著 ($p < 0.05$)。

2.3 机械挤压对柚子砂囊营养成分的影响

2.3.1 机械挤压对柚子砂囊糖组分的影响

柚子砂囊中的可溶性糖由果糖、葡萄糖和蔗糖组成,该组分随机械挤压的变化如表 1 所示。对照组中的砂囊中白肉蜜柚果糖和葡萄糖含量最高分别为:4.90 mg/g、4.10 mg/g,沙田柚蔗糖和总糖含量最高

分别为: 28.90 mg/g、32.82 mg/g。其中红肉蜜柚砂囊与白肉蜜柚砂囊糖组分相近。而沙田柚砂囊的糖组分与红肉蜜柚和白肉蜜柚的差异显著, 其蔗糖、果糖和葡萄糖含量分别约为后者的 2 倍、1/2、1/2。随着机械挤压造成形变程度的增加, 白肉蜜柚、红肉蜜柚和沙田柚的砂囊糖组分变化分别呈上升、不变和下降的趋势。与白肉蜜柚糖组分变化趋势相似的是, 李莹等^[27]在对草莓机械损伤的研究中发现, 机械损伤会

导致草莓可溶性糖含量的升高。边燕^[28]通过对黄瓜的子叶机械损伤研究也发现, 机械损伤会导致黄瓜的子叶可溶性糖含量上升。此外, 白肉蜜柚和沙田柚的砂囊糖组分的变化幅度均不大于 7.39%。因此, 挤压对柚子砂囊造成的糖组分波动是多个因素综合作用的结果, 其主要原因可能与挤压打破柚子砂囊原有代谢有关, 而新生成的酚类物质可能与糖组分反应而造成还原糖的消耗^[29]。

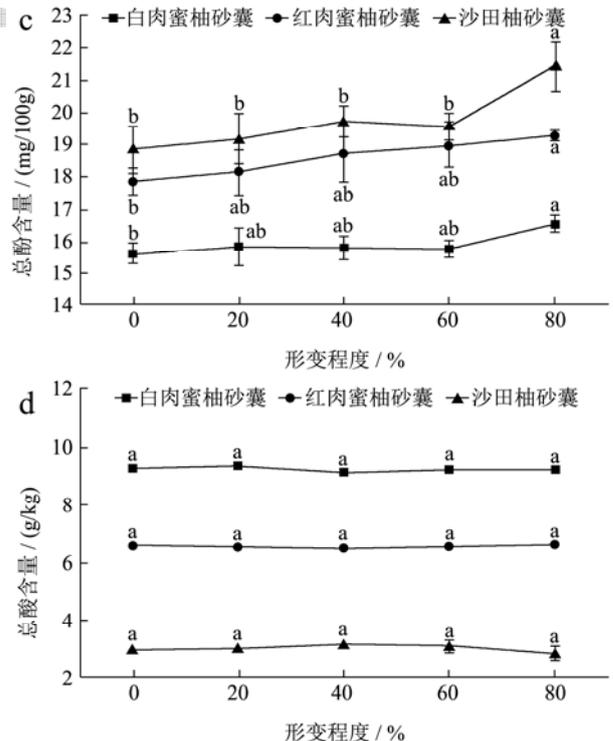
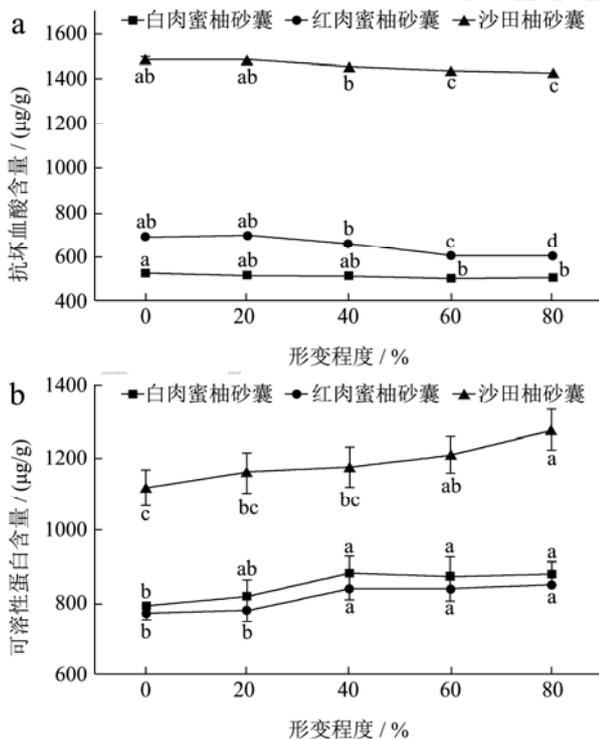
表 1 形变程度对柚子砂囊糖组分的影响

Table 1 Effect of deformation degree on the sugar composition of pomelo juice sacs

品种	指标	形变程度				
		0	20%	40%	60%	80%
白肉蜜柚/(mg/g)	果糖	4.90±0.05 ^c	4.96±0.07 ^{bc}	5.04±0.06 ^b	5.11±0.07 ^a	5.15±0.05 ^a
	葡萄糖	4.10±0.04 ^c	4.11±0.03 ^{bc}	4.18±0.05 ^{ab}	4.22±0.07 ^a	4.25±0.01 ^a
	蔗糖	14.61±0.15 ^d	14.88±0.07 ^{cd}	15.09±0.18 ^{bc}	15.34±0.10 ^b	15.57±0.19 ^a
	总糖	23.60±0.22 ^c	23.89±0.03 ^{bc}	24.31±0.28 ^b	24.66±0.23 ^a	24.96±0.23 ^a
红肉蜜柚/(mg/g)	果糖	4.46±0.08 ^a	4.43±0.04 ^a	4.53±0.03 ^a	4.43±0.03 ^a	4.51±0.02 ^a
	葡萄糖	3.59±0.05 ^a	3.53±0.04 ^a	3.62±0.08 ^a	3.54±0.07 ^a	3.61±0.06 ^a
	蔗糖	15.70±0.26 ^a	15.40±0.25 ^a	15.73±0.13 ^a	15.59±0.24 ^a	15.40±0.27 ^a
	总糖	23.75±0.39 ^a	23.36±0.25 ^a	23.75±0.27 ^a	23.56±0.33 ^a	23.35±0.31 ^a
沙田柚/(mg/g)	果糖	2.03±0.04 ^a	1.99±0.01 ^a	1.91±0.03 ^b	1.87±0.01 ^b	1.88±0.05 ^b
	葡萄糖	1.90±0.02 ^a	1.86±0.04 ^{ab}	1.83±0.04 ^{bc}	1.79±0.01 ^c	1.81±0.02 ^{bc}
	蔗糖	28.90±0.58 ^a	28.91±0.46 ^a	28.23±0.38 ^a	28.17±0.20 ^a	28.33±0.55 ^a
	总糖	32.82±0.64 ^a	32.76±0.51 ^a	31.97±0.44 ^b	31.75±0.23 ^b	31.87±0.60 ^b

注: 不同字母均表示同一品种差异性显著 ($p < 0.05$)。

2.3.2 机械挤压对柚子砂囊其他营养成分的影响



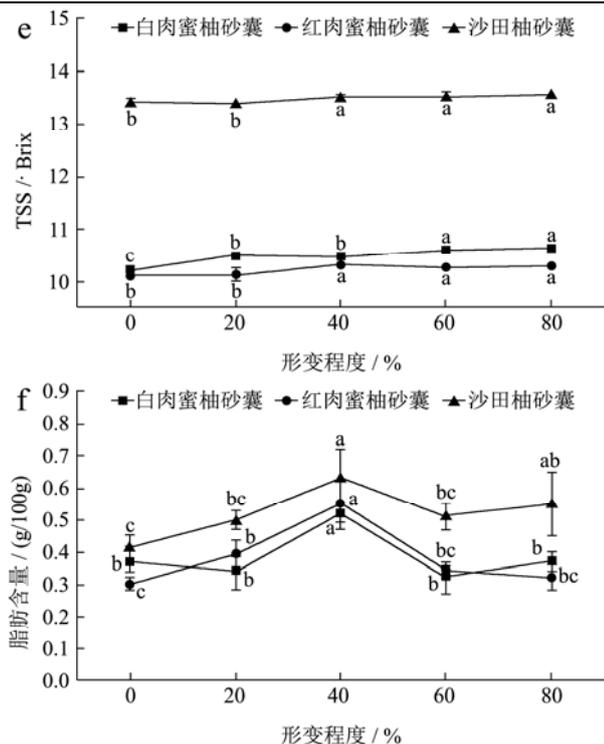


图4 形变程度对柚子砂囊抗坏血酸(a)、可溶性蛋白(b)、总酚(c)、总酸(d)、TSS(e)、脂肪(f)含量的影响

Fig.4 Effects of deformation degree on ascorbic acid contents (a), soluble protein contents (b), total phenol contents (c), total acids contents (d), TSS (e) and fat contents (f) in pomelo juice sacs

注: 不同字母均表示同一品种差异性显著 ($p < 0.05$)。

抗坏血酸(Vc)是人体不可缺少的重要维生素,并在柚子果肉具有较高的含量^[30,31]。由图4a可见,对照组中,沙田柚砂囊抗坏血酸含量为1481.19 $\mu\text{g/g}$,远高于红肉蜜柚砂囊的699.44 $\mu\text{g/g}$ 和白肉蜜柚砂囊的519.89 $\mu\text{g/g}$ 。沙田柚砂囊Vc含量高于蜜柚,这一结果与甘耀坤等^[32]的一致。与对照组相比,形变程度在40%及以下,3个品种柚子砂囊的抗坏血酸含量均无明显下降($p > 0.05$)。在形变程度达到60%,抗坏血酸含量显著下降($p < 0.05$),说明一定程度的机械损伤会导致柚子砂囊抗坏血酸含量下降,这一结果与王艳颖等^[24]、陈守江等^[33]相一致。其原因可能与汁液流出有关,柚子砂囊汁液流失率随着挤压程度的增大而增大,随着汁液流失而暴露并氧化的抗坏血酸也越来越多,从而导致柚子砂囊抗坏血酸的损失^[34]。

可溶性蛋白是重要的渗透调节物质和营养物质。由图4b可见,对照组中,白肉蜜柚和红肉蜜柚砂囊的可溶性蛋白含量分别为791.13 $\mu\text{g/g}$ 和770.39 $\mu\text{g/g}$ 。而沙田柚砂囊的可溶性蛋白含量为1118.27 $\mu\text{g/g}$ 显著高于蜜柚,这一结果与甘耀坤等^[32]的结果一致。图4b显示,随着形变程度的加大,沙田柚砂囊的可溶性蛋

白呈现显著性上升($p < 0.05$)并在形变程度为80%达到最大1279.53 $\mu\text{g/g}$,增幅为14.42%。对于白肉蜜柚砂囊和红肉蜜柚砂囊,在形变程度在40%及以下时其可溶性蛋白呈现显著上升($p > 0.05$),在形变程度在40%以上时则无显著性变化。与本结果类似的是,张哲等^[35]通过研究运输过程中对猕猴桃的机械损伤,发现机械损伤会导致猕猴桃可溶性蛋白含量上升。

多酚是一类具有多种生理活性和药理学活性的天然产物。由图4c可见,对照组中,不同品种柚子砂囊的总酚含量差异显著,其中沙田柚砂囊的多酚含量最高为18.82 mg/100 g,其次是红肉蜜柚砂囊为17.86 mg/100 g,白肉蜜柚砂囊的多酚含量最低为15.61 mg/100 g。

当形变程度小于60%时,柚子砂囊总酚含量无显著性变化($p > 0.05$)。而形变程度为80%时,三个品种柚子砂囊的总酚含量都显著上升($p < 0.05$)。与机械挤压导致柚子砂囊总酚含量升高这一结果相类似的是,Surjadinata等^[36]通过胡萝卜的机械损伤研究发现,机械损伤强度越大,多酚物质累积越高。而机械挤压造成柚子砂囊总酚含量的增加可能涉及植物的防御机制,柚子砂囊因机械挤压压迫而促进酚类物质的生成^[37]。

总酸不仅与其成熟度有关还与品种有关,是影响口感的重要指标。由图4d可见,对照组中,不同品种柚子砂囊的总酸含量差异显著,其中白肉蜜柚砂囊总酸含量为9.27 g/kg,显著高于红肉蜜柚砂囊的6.52 g/kg和沙田柚砂囊的2.97 g/kg。当形变程度在80%以内,机械挤压对3个品种柚子砂囊总酸含量均无显著性变化($p > 0.05$)。与本结果类似的是,李莹等^[27]的研究发现机械损伤对草莓总酸含量无明显影响。

可溶性固形物含量(TSS)是指液体或流体食品中所有溶解于水的化合物的总称。由图4e可见,对照组中,沙田柚砂囊TSS为13.40°Brix,显著高于白肉蜜柚砂囊的10.24°Brix和红肉蜜柚砂囊的10.12°Brix。与对照组相比,白肉蜜柚砂囊TSS在形变程度为20%、以及由40%增加到60%时出现显著性上升($p < 0.05$)。红肉蜜柚沙田柚砂囊则在形变程度为40%时出现显著性上升($p < 0.05$),当形变程度由40%增加到80%均未见无显著性变化($p > 0.05$)。与本结果类似的是,李莹等^[27]在对草莓机械损伤的研究中发现,机械损伤会导致草莓TSS的升高。机械挤压过程中,柚子砂囊TSS的增加可能与其中可溶性蛋白含量、可溶性果胶和总酚含量的增加有关。

如图4f所示,新鲜柚子砂囊中的脂肪含量为0.30~0.41 g/100 g。在形变范围为80%以内,随着机械挤压强度增加的增加,柚子砂囊脂肪含量先增加后减

少,并在形变程度大于60%后稳定下来。在形变程度为40%时,柚子砂囊的脂肪含量达到最高值,红肉蜜柚、白肉蜜柚和沙田柚的砂囊的脂肪含量分别达到0.55、0.52和0.63 g/100 g。与本实验结果相似的是,Oboh^[38]在驱虫苋叶子的采后处理研究也发现,浸泡、挤压等采后处理均引起了驱虫苋叶叶脂肪含量的增高,但其原因有待进一步研究。

2.4 机械挤压对柚子砂囊色泽的影响

L 值称为明亮指数, L 值越高,亮度越高。由图 5a 可见,对照组中,白肉蜜柚、红肉蜜柚和沙田柚砂囊的 L 值分别为 42.13、37.76、44.85。砂囊随着形变程度的增加,白肉蜜柚、红肉蜜柚和沙田柚砂囊的 L 值分别呈显著上升($p<0.05$)、不变和轻微下降的趋势。其中沙田柚砂囊 L 值的下降可能与其较高的酚类物质导致的酶促褐变有关^[39]。白肉蜜柚砂囊 L 值上升的原因则有待进一步研究。a 值的增加和减少分别代表色泽接近红色和绿色。

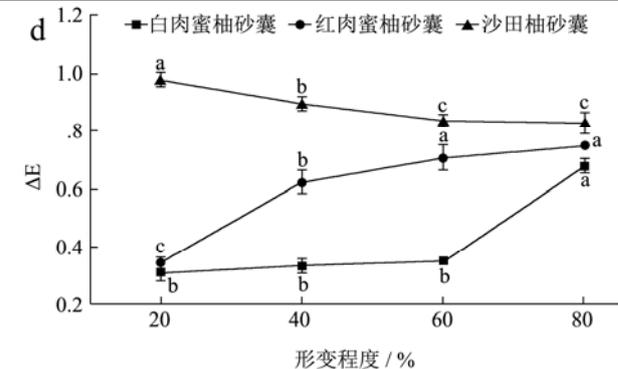
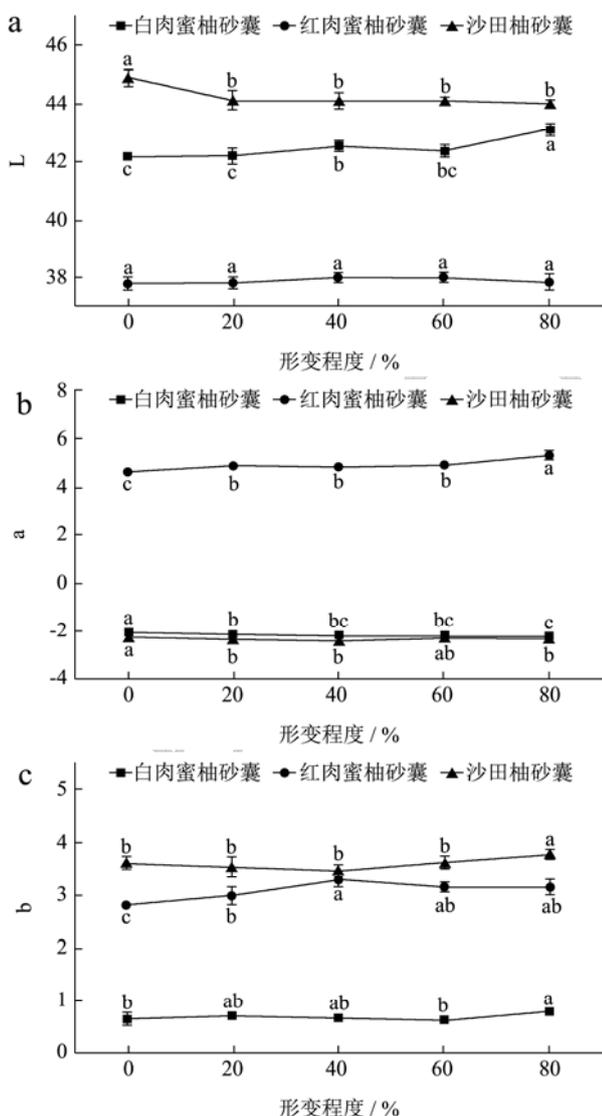


图5 形变程度对柚子砂囊L值(a)、a值(b)、b值(c)、 ΔE (d)的影响

Fig.5 Effect of deformation on L value (a), a value (b), b value (c) and ΔE (d) of pomelo juice sacs

注: 不同字母均表示同一品种差异性显著 ($p<0.05$)。

由图 5b 可见,对照组中,白肉蜜柚、红肉蜜柚和沙田柚砂囊的 a 值分别为: -2.04、4.62、-2.28。其中红肉蜜柚砂囊因其色泽偏红而具有较高的 a 值。随着挤压程度的增加,红肉蜜柚囊、白肉蜜柚和沙田柚砂囊 a 值分别上升、下降和下降,但变化幅度不大。b 值增加和减少分别代表色泽接近黄色和蓝色。

图 5c 可见,对照组中,白肉蜜柚、红肉蜜柚和沙田柚砂囊的 b 值分别为: 0.64、2.78、3.59。而形变程度的增加均使 3 个柚子品种砂囊的 b 值呈现轻微的增长趋势 ($p<0.05$),其中,红肉蜜柚砂囊 L 值、a 值、b 值变化趋势王艳颖等^[40]的结果一致,其研究发现机械损伤会导致富士苹果 L 值下降, a 值和 b 值上升。

由图 5d 所示,总色差 (ΔE) 结果表明,不同柚子品种相比,机械挤压对沙田柚砂囊色泽的影响最大,并于形变程度为 20% 时达到最大值,值为 0.98。而机械挤压对白肉蜜柚和红肉蜜柚砂囊的影响则随着挤压程度的增加而增加,并在形变程度为 80% 时达到最大分别为 0.68、0.83。总体而言,不同挤压程度导致所有柚子砂囊总色差变化幅度都不大于 1,表明当挤压造成的形变程度不大于 80% 时,其对柚子砂囊色泽的影响较小。

2.5 机械挤压对柚子砂囊苦味物质的影响

柚子砂囊主要含有两类苦味物质,一类是以柠檬苦素为代表的柠檬苦素类似物;另一类是以柚皮苷为代表的黄酮类物质^[41-43]。

由图 6a 可见,对照组中,三个品种砂囊柚皮苷含量从高到低分别为沙田柚 148.77 $\mu\text{g/g}$ 、红肉蜜柚 135.78 $\mu\text{g/g}$ 、白肉蜜柚 121.84 $\mu\text{g/g}$ 。与对照相比,白肉蜜柚砂囊和红肉蜜柚砂囊的柚皮苷含量分别在形变程度 60% 和 40% 以下未发生显著性变化。随后,随着

机械挤压导致形变程度的增加,白肉蜜柚砂囊和红肉蜜柚砂囊的柚皮苷含量增加,并在形变程度为80%时达到最大分别为130.41 $\mu\text{g/g}$ 和163.97 $\mu\text{g/g}$,与对照组相比分别增加了7.03%和20.76%。而沙田柚砂囊的柚皮苷含量在形变程度为0~80%的范围内均随形变程度的显著上升($p<0.05$)并在形变程度为80%时达到最大为174.78 $\mu\text{g/g}$,增加了17.48%。机械挤压引起柚子砂囊中柚皮苷含量的增加,可能与机械挤压导致砂囊因应激引起的苯丙氨酸增多有关。苯丙氨酸可以在不同酶的作用下,反应生成肉桂酸、*p*-香豆酸、4-香豆-辅酶A、查尔酮类,进而转化为柚皮苷等黄酮酮类物质^[44,45]。与本结果相似的是,刘盟盟等^[46]研究也发现机械损伤会导致冷蒿部分黄酮类物质增加。

由图6b可见,对照组中,白肉蜜柚砂囊的柠檬苦素含量为61.23 $\mu\text{g/g}$,红肉蜜柚为50.05 $\mu\text{g/g}$,沙田柚的为27.96 $\mu\text{g/g}$ 。挤压程度对不同品种柚子砂囊的影响差异显著不同。随着挤压引起形变程度的增加,白肉蜜柚、红肉蜜柚和沙田柚砂囊中柠檬苦素的含量分别呈先上升后下降、下降和上升的趋势。

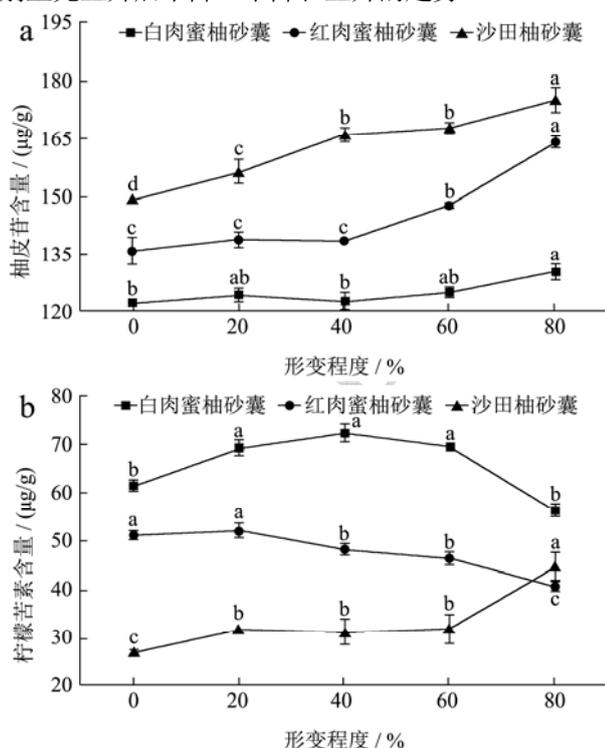


图6 形变程度对柚子砂囊柚皮苷(a)、柠檬苦素(b)含量影响

Fig.6 Effects of deformation degree on naringin (a) and limonin (b) contents in pomelo juice sacs

注: 不同字母均表示同一品种差异性显著($p<0.05$)。

其中,当形变程度为80%时,白肉蜜柚砂囊的柠檬苦素含量降至未经挤压前的水平,沙田柚砂囊柠檬苦素含量上升至44.41 $\mu\text{g/g}$,与对照组相比增加了

64.12%。柚子砂囊中柠檬苦素含量受挤压程度影响的差异有多方面的影响因素。其中,柚子砂囊中柠檬苦素主要通过柠檬苦素A环内酯在柠檬苦素D环内酯水解酶的作用下形成柠檬苦素,而这一过程受到包括酸在内的影响^[47]。此外,红肉及白肉蜜柚砂囊柠檬苦素下降可能与柠檬苦素葡萄糖转移酶及LGT基因相关。李一冰^[48]发现不同品种柑橘汁胞中,柠檬苦素含量下降与柠檬苦素葡萄糖转移酶表达量成正相关,与LGT基因表达成负相关。LGT基因参与柠檬苦素葡萄糖转移酶的表达调控,在柠檬苦素葡萄糖转移酶的作用下,柠檬苦素会生成柠檬苦素糖苷类物质。

综合柚子砂囊中两种苦味物质随机挤压程度的变化规律发现,机械挤压对沙田柚苦味物质的影响最大,造成两类苦味物质的显著增加。机械挤压对白肉蜜柚苦味物质的影响则相对较小。

3 结论

3.1 在形变程度为0~40%范围内,不同品种柚子砂囊的汁液流失率差异不显著,均随着形变程度的增加缓慢增加。当形变程度大于40%时,白肉蜜柚和红肉蜜柚砂囊的汁液流失率显著增加且破损严重,沙田柚砂囊则显示较强的挤压承受力。

3.2 不同品种柚子砂囊在营养成分方面具有一定的差异。机械挤压对不同品种柚子砂囊的总酸含量影响不大,但其增加会导致抗坏血酸含量的下降,可溶性蛋白、总酚、可溶性固形物含量的增加,以及脂肪含量的先增加后减少。

3.3 除沙田柚外,白肉蜜柚砂囊和红肉蜜柚砂囊的原果胶含量略有下降。3个品种柚子砂囊的可溶性果胶含量均随着形变程度的增加先增加后缓慢下降,并在形变程度为40%时达到最高值。

3.4 机械挤压会导致柚子砂囊色泽一定程度的改变,但形变程度不大于80%时,其对柚子砂囊色泽的影响较小。

3.5 不同品种柚子砂囊的柚皮苷和柠檬苦素含量差异显著。机械挤压导致柚皮苷含量增加,而对柠檬苦素含量的影响因品种而异,白肉蜜柚、红肉蜜柚和沙田柚砂囊中柠檬苦素的含量分别呈先上升后下降、下降和上升的趋势。

参考文献

- [1] 张怡.福建特产柚子加工及综合利用技术的研究[D].福州:福建农林大学,2009
ZHANG Yi. Study on the processing and comprehensive utilization technology of Fujian specialty grapefruit [D].

- Fuzhou: Fujian Agricultural and Forestry University, 2009
- [2] 马超侠,柯佑鹏.世界柚子生产及贸易的发展趋势分析[J].热带农业科技,2008,31(4):32-36
MA Chao-xia, KE You-peng. The trend analysis of pomelo production and its trade in the world [J]. Tropical Agricultural Science and Technology, 2008, 31(4): 32-36
- [3] 王标诗,吴艺华,杜建中,等.沙田柚活性成分的提取及其生理功能的研究进展[J].食品研究与开发,2014,35(10):129-132
WANG Biao-shi, WU Yi-hua, DU Jian-zhong, et al. Development of extraction and physiological activities of active substance from citrus *graudis osbeck* [J]. Food Research and Development, 2014, 35 (10): 129-132
- [4] 方波.中国特有柚类资源类黄酮含量变化及抗氧化活性研究[D].重庆:西南大学,2013
FANG Bo. Study on the change of flavonoid content and antioxidant activity of grapefruit resources in China [D]. Chongqing: Southwest University, 2013
- [5] Yi L, Ma S, Ren D. Phytochemistry and bioactivity of citrus flavonoids: A focus on antioxidant, anti-inflammatory, anticancer and cardiovascular protection activities [J]. Phytochemistry Reviews, 2017, 16(3): 479-511
- [6] 张放.国内外柚(含葡萄柚)生产与贸易分析[J].中国果业信息,2015,32(11):15-25
ZHANG Fang. Production and trade analysis of grapefruit (including grapefruit) at home and abroad [J]. China Fruit Industry Information, 2015, 32 (11): 15-25
- [7] 尹锦辉,吴菲菲,赵良忠,等.柑橘果肉饮料生产中去果皮和脱囊衣技术研究进展[J].食品工业,2016,5:254-256
YIN Jin-hui, WU Fei-fei, ZHAO Liang-zhong, et al. Progress on technology of dehull and removal of endocarp in citrus pulp beverage processing [J]. Food Industry, 2016, 5: 254-256
- [8] 宋欣,杨磊,李艳聪.果蔬机械损伤研究综述[J].江苏农业学报,2016,32(5):1196-1200
SONG Xin, YANG Lei, LI Yan-cong. Research advances in mechanical damage of fruits and vegetables [J]. Journal of Jiangsu Agriculture, 2016, 32(5): 1196-1200
- [9] Aguila J S D, Kluge R A, Roulet M C, et al. Compression damage as the principal factor in mechanical injury of pineapple postharvest [J]. Acta Horticulturae, 2013, 1012(1012): 1181-1187
- [10] 黎春红,周宏胜,张雷刚,等.不同内包装方式对模拟运输过程中水蜜桃品质的影响[J].现代食品科技,2017,33(12):177-183,114
LI Chun-hong, ZHOU Hong-sheng, ZHANG Lei-gang, et al. Effects of different inner-packages treatments on the quality of juicy peach fruits during simulated transportation [J]. Modern Food Technology, 2017, 33(12): 177-183, 114
- [11] Zhou J, He L, Karkee M, et al. Effect of catching surface and tilt angle on bruise damage of sweet cherry due to mechanical impact [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 121: 282-289
- [12] Maia V M, Salomão L C C, Siqueira D L, et al. Physical and metabolic changes induced by mechanical damage in Dwarf-Prata banana fruits kept under cold storage [J]. Australian Journal of Crop Science, 2014, 8(7): 1029
- [13] Ma S, Karkee M, Fu H, et al. Evaluation of shake-and-catch mechanism in mechanical harvesting of apples [J]. Transactions of the ASABE, 2018, 61(4): 1257-1263
- [14] 周俊,孟一猛,张娜,等.机械手不同抓取控制方式对番茄机械损伤的影响分析[J].农业机械学报,2017,48(11):21-27
ZHOU Jun, MENG Yi-meng, ZHANG Na, et al. Impact of robot grasping control modes on mechanical damage of tomato [J]. Journal of Agricultural Machinery, 2017, 48 (11): 21-27
- [15] Ma X L, Chen X Y, Yan Y S, et al. Mechanical damage test and biomechanical characteristics of red bayberry fruit [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(16): 282-287
- [16] Yu Y, Xiao G, Xu Y, et al. Effects of dimethyl dicarbonate (DMDC) on The fermentation of litchi juice by *Lactobacillus casei* as an alternative of heat treatment [J]. Journal of Food Science, 2014, 79(5): 947-954
- [17] GB 5009.86-2016,食品中抗坏血酸的测定[S]
GB 5009.86-2016, Determination of Ascorbic Acid in Food [S]
- [18] 曹建康,姜微波,赵玉梅.果蔬采摘后生理生化试验指导[M].北京:中国轻工业出版社,2007:84-87
CAO Jian-kang, JIANG Wei-bo, ZHAO Yu-mei. Guidance on Physiological and Biochemical Tests of Fruits and Vegetables After Picking [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007: 84-87
- [19] Yu Y, Xu Y, Wu J, et al. Effect of ultra-high pressure homogenisation processing on phenolic compounds, antioxidant capacity and anti-glucosidase of mulberry juice [J]. Food chemistry, 2014, 153: 114-120
- [20] GB/T 12456-2008,食品中总酸的测定[S]
GB/T 12456-2008, Determination of Total Acids in Foods [S]
- [21] GB 5009.6-2016,食品中脂肪的测定[S]

- GB 5009.6-2016, Determination of Fat in Food [S]
- [22] 丁帆.柑橘中几种苦味物质的检测及评价[D].武汉:华中农业大学,2009
DING Fan. Detection and evaluation of several bitter substances in citrus [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009
- [23] 陈燕,蔡伟亮,向和平,等.机械损伤对荔枝生理与果皮形态的影响[J].农机化研究,2013,35(2):138-141
CHEN Yan, CAI Wei-liang, XIANG He-ping, et al. Effects of mechanical injury on physiology and peel morphology of litchi [J]. Agricultural Mechanization Research, 2013, 35 (2): 138-141
- [24] 王艳颖,胡文忠,庞坤,等.机械损伤对富士苹果营养成分变化的影响[J].食品科技,2007,32(10):70-74
WANG Yan-ying, HU Wen-zhong, PANG Kun, et al. Effect of mechanical injury on the change of nutritive composition of fuji apple [J]. Food Science and Technology, 2007, 32 (10): 70-74
- [25] 岳英,鲁晓燕,刘艳,等.梨不同品种果实硬度与果胶含量的相关性研究[J].北方园艺,2011,15:15-17
YUE Ying, LU Xiao-yan, LIU Yan, et al. Study on correlation between firmness and pectin content of different pear cultivars [J]. North Horticulture, 2011, 15: 15-17
- [26] 李萍.黄花梨模拟运输振动引起的机械损伤与品质损害[D].杭州:浙江大学,2014
LI Ping. Mechanical damage and quality damage caused by simulated transportation vibration of Huanghua pear [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014
- [27] 李莹,任艳青,闫化学,等.机械伤对草莓果实理化品质的影响[J].食品科技,2013,38(4):18-23
LI Ying, REN Yan-qing, YAN Hua-xue, et al. Effect of mechanical stress on physical and chemical quality of strawberry [J]. Food Science and Technology, 2013, 38(4): 18-23
- [28] 边燕.黄瓜植株机械损伤效应及其生理生化物质应答的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2009
BIAN Yan. Study on mechanical injury effect and physiological and biochemical response of cucumber plants [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2009
- [29] 王丽颖,李福香,杨雅轩,等.多糖与多酚相互作用机制及其对多酚特性的影响研究进展[J].食品科学,2017,38(11):283-289
WANG Li-ying, LI Fu-xiang, YANG Ya-xuan, et al. Interaction mechanism between polyphenols and polysaccharides and effect on polyphenolic properties: A review [J]. Food Science, 2017, 38(11): 283-289
- [30] 何利刚,蒋迎春,王志静,等.柚果实贮藏期品质指标与枯水粒化的关系[J].湖北农业科学,2014,53(24):6038-6044
HE Li-gang, JIANG Ying-chun, WANG Zhi-jing, et al. The relationship between quality parameters and granulation in different pomelo fruits during normal storage [J]. Hubei Agricultural Science, 2014, 53(24): 6038-6044
- [31] 方志峰,朱婷,张若杰,等.广西9种主要水果食物营养成分分析及评价[J].应用预防医学,2018,24(4):281-284,287
FANG Zhi-feng, ZHU Ting, ZHANG Ruo-jie, et al. Analysis and evaluation of nutritional ingredients of nine main fruit in Guangxi [J]. Applied Preventive Medicine, 2018, 24 (4): 281-284, 287
- [32] 甘耀坤,曾诗媛,卿莉萍,等.广西容县沙田柚与蜜柚营养成分的比较研究[J].玉林师范学院学报,2009,30(3):58-62
GAN Yao-kun, ZENG Shi-yuan, QING Li-ping, et al. The comparative study of nutrient composition between *Citrus grandis* var. *shatinyu hort* and *Citrus grandis cv.* Rongxian pomelo in Rongxian Guangxi [J]. Journal of Yulin Normal University, 2009, 30(3): 58-62
- [33] 陈守江,张德静.机械伤对草莓贮藏期间生理变化的影响[J].保鲜与加工,2006,6(1):16-17
CHEN Shou-jiang, ZHANG De-jing. Effect of mechanical injury on physiological changes of strawberry during storage [J]. Preservation and Processing, 2006, 6(1): 16-17
- [34] 舒晓明.抗氧化剂L-抗坏血酸氧化降解动力学研究[D].成都:四川大学,2006
SHU Xiao-ming. Kinetic Study on oxidative degradation of antioxidant L-ascorbic acid [D]. Chengdu: Sichuan University, 2006
- [35] 张哲,张治权,毛力,等.运输过程中机械振动对猕猴桃贮藏品质的影响[J].食品与机械,2017,33(1):104-109
ZHANG Zhe, ZHANG Zhi-quan, MAO Li, et al. Effect of mechanical vibration during the transportation process on the storage quality of kiwi fruit [J]. Food and Machinery, 2017, 33(1): 104-109
- [36] Surjadinata B B, Cisneros-Zevallos L. Biosynthesis of phenolic antioxidants in carrot tissue increases with wounding intensity [J]. Food Chemistry, 2012, 134(2): 615-624
- [37] 顾小辉,魏建和,王国全,等.虫害诱导植物合成防御性次生代谢产物的研究进展[J].生命科学研究,2017,21(5):86-93, 98
GU Xiao-hui, WEI Jian-he, WANG Guo-quan, et al. Progresses on the defensive secondary metabolites induced

- by herbivorous insects in plants [J]. Life Science Research, 2017, 21(5): 86-93, 98
- [38] OBOH Ganiyu. Effect of some post-harvest treatments on the nutritional properties of *Cnidioscolus acontifolus* leaf [J]. Pakistan Journal of Nutrition, 2005, 4(4): 226-230
- [39] 黎婕,陈中,林伟锋.梅州金柚果肉中过氧化物酶特性的研究[J].食品工业科技,2014,35(1):133-136
LI Jie, CHEN Zhong, LIN Wei-feng. Study on enzymatic characteristics of peroxidase (pod) in pomelo [J]. Food Industry Technology, 2014, 35(1): 133-136
- [40] 王艳颖.机械损伤对富士苹果采后软化生理的影响[J].食品研究与开发,2008,29(5):132-136
WANG Yan-ying. Effects of mechanical damage on postharvest softening physiology of fuji apples [J]. Food Research and Development, 2008, 29(5): 132-136
- [41] 黄春霞,刘萍,邓光宙,等.采用高效液相色谱法测定沙田柚果实主要苦味物质的研究[J].中国南方果树,2014,43(6):57-59
HUANG Chun-xia, LIU Ping, DENG Guang-zhou, et al. Determination of main bitter substances in shatian pomelo fruit by HPLC [J]. Fruit tree of Southern China, 2014, 43(6): 57-59
- [42] 胡阳.蜜柚苦味物的 HPLC 检测、提取及脱苦菌株的筛选 [D].成都:四川农业大学,2007
HU Yang. HPLC detection, extraction and screening of debittering strains of bitter substances in pomelo [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2007
- [43] 白小鸣,王华,郭莉,等.柚果实苦味物质及其分析检测方法概述[J].中国南方果树,2014,43(4):22-24
BAI Xiao-ming, WANG Hua, GUO Li, et al. Summary of bitter substances in pomelo fruits and their analytical methods [J]. Fruit Trees in South China, 2014, 43(4): 22-24
- [44] Hyun M W, Yun Y H, Kim J Y, et al. Fungal and plant phenylalanine ammonia-lyase [J]. Mycobiology, 2011, 39(4): 257-265
- [45] Liu C, Long J, Zhu K, et al. Characterization of a citrus R2R3-MYB transcription factor that regulates the flavonol and hydroxycinnamic acid biosynthesis [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 25352
- [46] 刘盟盟,贾丽,程路芸,等.冷蒿酚酸及其抗氧化防御酶活性对机械损伤的响应[J].植物生态学报,2017,41(2):219-230
LIU Meng-meng, JIA Li, CHENG Lu-yun, et al. Responses of phenolic acid and defensive enzyme activities to mechanical damage in *Artemisia frigida* [J]. Journal of Plant Ecology, 2017, 41(2): 219-230
- [47] Hasegawa S. Metabolism of limonoids. Limonin D-ring lactone hydrolase activity in *Pseudomonas* [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1976, 24(1): 24-26
- [48] 李一兵.不同柑橘品种果汁类柠檬苦素的含量变化及相关基因表达分析[D].重庆:西南大学,2018
LI Yi-bing. Analysis of limonoids content changes and related gene expression in different citrus fruit juices [D]. Chongqing: Southwest University, 2018

(上接第 104 页)

- [27] 张玉玉,黄明泉,陈海涛,等.7 种面酱的电子鼻和电子舌辨别分析[J].中国食品学报,2012,12(1):198-205
ZHANG Yu-yu, HUANG Ming-quan, CHEN Hai-tao, et al. Discrimination and analysis of seven kinds of fermented flour paste by electronic nose and electronic Tongue [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2012, 12(1): 198-205
- [28] 刘兴辰,张焱,李仁杰,等.超高压和高温短时处理对胡萝卜汁品质的影响[J].中国食品学报,2015,15(1):108-114
LIU Xing-chen, ZHANG Yan, LI Ren-jie, et al. Effects of high hydrostatic pressure and high temperature short time processing on qualities of carrot Juice [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15(1): 108-114