

崔燕, 郭加艳, 宣晓婷, 等. 高压均质对 NFC 水蜜桃浊汁稳定性及品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(18): 322–330. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021110085

CUI Yan, GUO Jiayan, XUAN Xiaoting, et al. Effect of High Pressure Homogenization on the Stability and Quality of Not-From-Concentrate Cloudy Honey Peach (*Prunus persica* L.) Juice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(18): 322–330. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021110085

· 贮运保鲜 ·

高压均质对 NFC 水蜜桃浊汁稳定性及品质的影响

崔燕¹, 郭加艳^{1,2}, 宣晓婷¹, 林旭东¹, 尚海涛¹, 邓文艺³, 张铁³, 凌建刚^{1,*}

(1. 宁波市农业科学研究院农产品加工研究所, 国家蔬菜加工技术研发专业中心,

宁波市农产品保鲜工程重点实验室, 浙江宁波 315040;

2. 宁波大学食品与药学学院, 浙江宁波 315800;

3. 湖南一品东方生物科技有限公司, 湖南长沙 410000)

摘要: 本文采用高压均质技术, 探究了均质压力 (20~40 MPa) 及次数 (1~2 次) 对 NFC 水蜜桃浊汁的混浊度、离心沉淀率、粒径、Zeta 电位等稳定性指标和 pH、TSS、总酸、固酸比、还原糖、色泽、总酚、V_C 等品质指标的影响。结果表明: 高压均质 (30~40 MPa/1、20~40 MPa/2) 可有效提高 NFC 水蜜桃浊汁的稳定性, 离心沉淀率较未处理组下降 13.49%~24.22%, 平均颗粒粒径由 1853.67 nm 降至 501.10~665.27 nm, 绝对 Zeta 电位值显著提高 ($P<0.05$)。随着均质压力及次数的增加, 浊汁中可溶性果胶含量上升, 而残存果胶甲基酯酶活力逐渐降低。高压均质后, 浊汁色泽显著改善, L^* 值升高, 褐变指数 BI 值下降 ($P<0.05$); 30 MPa/1 下, 品质保持最佳, 总酚、V_C 含量较未处理组显著提高 ($P<0.05$), 而 pH、TSS、总酸和固酸比无变化 ($P>0.05$); 随着均质次数增加, pH、TSS、总酚和 V_C 含量显著降低 ($P<0.05$), 品质下降。高压均质处理可有效提高 NFC 水蜜桃浊汁稳定性、抑制褐变, 并提高总酚、V_C 等营养物质含量。

关键词: NFC 水蜜桃浊汁, 高压均质, 稳定性, 品质

中图分类号: TS255.44

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)18-0322-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021110085



本文网刊:

Effect of High Pressure Homogenization on the Stability and Quality of Not-From-Concentrate Cloudy Honey Peach (*Prunus persica* L.) Juice

CUI Yan¹, GUO Jiayan^{1,2}, XUAN Xiaoting¹, LIN Xudong¹, SHANG Haitao¹, DENG Wenyi³, ZHANG Tie³,
LING Jiangang^{1,*}

(1. Institute of Agricultural Products Processing, National Vegetable Processing Technology Research and Development Center, Key Laboratory of Preservation engineering of Agricultural Products, Ningbo Academy of

Agricultural Sciences, Ningbo 315040, China;

2. College of Food and Pharmaceutical Sciences, Ningbo University, Ningbo 315800, China;

3. Hunan Yi Pin Dong Fang Biotechnology Co., Ltd., Changsha 410000, China)

Abstract: In order to determine the effect of high pressure homogenization (HPH) on the stability and quality of not-from-concentrate (NFC) cloudy honey peach juice, the samples were subjected to HPH processing with 20~40 MPa for 1~2

收稿日期: 2021-11-10

基金项目: 宁波市科技计划项目 (2019C10033); 宁波市农科院-中国农科院科技合作创新工程项目 (2019CXGC004); “十三五”国家重点研发计划项目 (2017YFD0400703)。

作者简介: 崔燕 (1987-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 农产品非热加工, E-mail: cuiyan1605@126.com。

* 通信作者: 凌建刚 (1973-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品贮运保鲜与非热加工技术, E-mail: nbjg@163.com。

successive passes. The changes in turbidity, centrifugation precipitating rate, particle size distribution, Zeta potential, water soluble pectin content, pectin methylesterase (PME) activity, pH, total soluble solids (TSS), total acidity (TA), TSS/TA, reducing sugar content, color, total phenol and V_C content were evaluated. The results showed that HPH could effectively improve the stability of NFC cloudy honey peach juice. With the treatment of 30~40 MPa/1 and 20~40 MPa/2, the centrifugation precipitating rates significantly decreased by 13.49%~24.22% ($P<0.05$), while the mean particle diameter decreased from 1853.67 nm to 501.10~665.27 nm, as compared to that in untreated samples. Moreover, the absolute Zeta potential significantly increased ($P<0.05$). As the pressure and successive pass increased, the water soluble pectin content tended to increase, while the PME activity gradually decreased. HPH observably increased the L^* value of cloudy peach juice, and reduced its browning index ($P<0.05$), indicating the color of NFC cloudy peach juice was markedly improved. Juice homogenized at 30 MPa/1 showed the best quality. The contents of total phenol and V_C were significantly enhanced ($P<0.05$), whereas no change was found for pH, TSS, TA and TSS/TA levels ($P>0.05$). HPH decreased the pH, TSS, TA, total phenol and V_C content with increasing pass number ($P<0.05$), leading a decline in juice quality. HPH treatment could dramatically improve the stability of NFC cloudy peach juice, and inhibit browning and improve its total phenol and V_C levels.

Key words: not-from-concentrate cloudy honey peach juice; high pressure homogenization; stability; quality

水蜜桃(*Prunus persica* L.)为蔷薇科桃属植物,是桃子南方品种群的一员,其汁多味甜,并富含维生素(B_1 、C)、类胡萝卜素、纤维、蛋白质、铁等营养成分,深受消费者喜爱^[1-2]。湖景蜜露是典型的软溶质型水蜜桃,为水蜜桃主产区——宁波奉化的主栽品种,肉质细软、皮薄汁多,但采后极不耐贮,常温下 2~3 d 便会软化、褐变、失去商品性^[3]。因此,为延长水蜜桃产业链、降低经济损失,除鲜销外,水蜜桃被加工成果汁、果酱、果干等,其中鲜榨非浓缩还原(not from concentrate, NFC)水蜜桃浊汁迎合了现行消费者对果汁“纯天然、健康、营养、口味纯正”的新需求,市场潜力巨大。然而,NFC 水蜜桃浊汁中富含细胞碎片微粒及纤维、蛋白质等大分子物质,极易发生沉淀、分层,保持其稳定性是 NFC 水蜜桃浊汁加工技术的关键所在。

添加稳定剂、过滤等是提高果汁稳定性的常用方法,但加工生产中果汁的天然风味、口感、品质劣变严重^[4]。近年来,随着非热加工技术的快速发展,脉冲电场、高压均质等技术涌现,其中高压均质通过剪切、空穴、湍流等作用,在降低粒度、提升果汁物理稳定性及外观品质的同时,具有杀菌钝酶、维持果汁营养品质等效果,且兼具可连续化加工优势,在果蔬汁/浆加工领域备受关注^[5-8]。Yu 等^[9]发现高压均质有助于提高芋头浆的稳定性,10~60 MPa 均质后颗粒平均粒径显著下降并均匀分布,30 MPa 下其稳定性达到最佳,可溶性固形物(total soluble solids, TSS)含量明显提高。Wellala 等^[10]发现,胡萝卜苹果桃复合汁在 140 MPa 均质处理后,稳定性提高的同时,总酚含量及抗氧化活性显著提升。同时,高压均质在苹果浊汁^[11]、胡萝卜汁^[12]等加工中亦表现出明显优势。近年来,高压均质技术被逐渐应用于桃汁加工领域,主要集中在微生物和品质影响方面,且主要以硬溶质桃汁为主^[2,8,13],相关高压均质对软溶质桃 NFC 浊汁稳定性及其品质的影响研究却鲜有报道。

本文以典型软溶质型水蜜桃——湖景蜜露 NFC

浊汁为研究对象,在评价稳定性的基础上,系统分析高压均质对其理化特性以及营养指标的影响,以期为高压均质技术在 NFC 水蜜桃浊汁中的应用推广提供理论依据及技术指导。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

成熟的湖景蜜露水蜜桃 产地为浙江省宁波市奉化区尚田镇龚原村,采摘于 2021 年 7 月,采摘后用浅边塑料托盘单层摆放(每筐 18 颗),并立即运回实验室,待预冷库预冷后转入 0~1 ℃ 冷库贮藏备用;可溶性果胶含量试剂盒 苏州格锐思生物科技有限公司;标准品没食子酸、葡萄糖 上海麦克林生化科技有限公司;食品级抗坏血酸(V_C) 东北制药集团股份有限公司;福林酚试剂、3,5-二硝基水杨酸试剂 北京索莱宝科技有限公司;二氧化氯消毒片 广东星帮尼股份科技有限公司;其他试剂均为分析纯 国药集团化学试剂有限公司。

CYB60-6S 高压均质机 上海东华高压均质机厂;MJ-JS2018A 榨汁机 美的集团股份有限公司;FE-28 型 pH 计 梅特勒-托利多(上海)仪器公司;PAL-BX/ACID F5 型数显糖酸度计 ATAGO(爱拓)中国分公司;Ci60 便携式色差仪 爱色丽(上海)色彩科技有限公司;Zetasizer Nano ZS 电位分析仪 Malvern 仪器有限公司;752S 型紫外/可见分光光度计 上海棱光技术有限公司;MS105DU 电子分析天平 Mettler Toledo 仪器有限公司;H1850R 型台式高速冷冻离心机 湖南湘仪离心机仪器有限公司;TSE240V 超低温冰箱 美国赛默飞世尔科技公司。

1.2 实验方法

1.2.1 NFC 水蜜桃浊汁制备 选取大小均匀、无病虫害、无机械损伤的成熟水蜜桃,流水洗净,去核、切块后浸入预冷的 1% V_C 水溶液 10 min 以降低褐变,随后取出沥水。为进一步防止果汁在制备过程中发生褐变,采用真空螺旋榨汁机进行榨汁,随后按质量

加入 0.2% 的 V_C , 搅拌至完全溶解, 制得 NFC 水蜜桃浊汁, 冰浴放置备用。每次榨汁之前, 榨汁机及器具均使用二氧化氯消毒剂进行杀菌消毒处理, 以减少微生物。

1.2.2 高压均质处理 将制备所得的 NFC 水蜜桃浊汁分别采用 20、30、40 MPa 高压均质处理 1~2 次 (分别命名为 20 MPa/1、30 MPa/1、40 MPa/1、20 MPa/2、30 MPa/2 和 40 MPa/2 组), 并以未处理组 NFC 水蜜桃浊汁为对照 (CK 组), 测定桃浊汁的稳定性及其品质指标的变化, 每个处理重复 3 次。均质前, 高压均质机用二氧化氯消毒剂进行杀菌消毒处理, 以减少微生物。

1.2.3 浊汁稳定性指标测定

1.2.3.1 混浊度测定 参考 Wang 等^[2] 和 Rojas 等^[14] 的方法, 略做修改。将 8 mL NFC 水蜜桃浊汁于 8000 r/min 离心 15 min 后, 以蒸馏水做空白, 取上清液于 660 nm 波长处测定其吸光度, 混浊度以吸光度值表示。测试重复 3 次。

1.2.3.2 离心沉淀率测定 离心沉淀率参考 Sentandreu 等^[15] 方法进行测定, 略作修改。称取样品 10 g, 8000 r/min 离心 20 min, 倒出上清液, 离心管置于 40 °C 烘箱干燥 24 h 后称取沉淀物的重量 W, 离心沉淀率(%)=W/10×100。测试重复 3 次。

1.2.3.3 颗粒粒径与 Zeta 电位测定 样品的颗粒粒径与 Zeta 电位采用 Zetasizer Nano-ZS 电位仪进行测定。测定前, 样品用 pH4.4 的醋酸缓冲液稀释 20 倍后用于测定。

1.2.3.4 可溶性果胶含量测定 采用咔唑比色法测定 NFC 水蜜桃浊汁的可溶性果胶含量, 测定按试剂盒操作说明进行, 结果以每毫升 NFC 水蜜桃浊汁含有的 mg 半乳糖醛酸当量 (mg Gal/mL) 表示。测试重复 3 次。

1.2.3.5 果胶甲基酯酶 (pectin methylesterase, PME) 活力测定 参考文献 [16], 采用电位滴定法对 NFC 水蜜桃浊汁的 PME 活力进行测定。取 40 mL 1% 果胶溶液 (含 0.1 mol/L NaCl, pH7.5) 保温于 30 °C 水浴锅中, 加入 5 mL 桃汁 (用 NaOH 调 pH 至 7.5), 混匀同时开始计时。使用自动滴定仪通过滴加 0.01 mol/L NaOH 溶液自动调节混合液的 pH 保持在 7.5, 记录 10 min 内滴定所消耗的 NaOH 溶液的量。测试重复 3 次。以每毫升样品在 1 min 内消耗的 μmol NaOH 当量定义为一个酶活力单位 (U)。以空白对照组中的 PME 活力为对照, 计算相对 PME 活力。

残存 PME 活力(%)=高压均质处理后 PME 活力/空白对照组 PME 活力×100

1.2.4 浊汁理化品质指标测定

1.2.4.1 色泽测定 采用 Ci60 便携式色差仪对 NFC 水蜜桃浊汁的色泽进行测定。在白板、黑板校正后,

测定样品色泽, 记录 L^* 、 a^* 、 b^* 值, 测试重复 6 次, 并计算其总色差 (ΔE) 和褐变指数 BI^[17]。

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

$$BI = \frac{100(x-0.31)}{0.17}$$

其中:

$$x = \frac{a^* + 1.75L^*}{5.645L^* + a^* - 3.012b^*}$$

式中: ΔL^* —处理组与对照组 L^* 值之差; Δa^* —处理组与对照组 a^* 值之差; Δb^* —处理组与对照组 b^* 值之差。

1.2.4.2 pH、TSS、总酸 (total acidity, TA)、固酸比和还原糖测定 采用 pH 计对 NFC 水蜜桃浊汁的 pH 进行测定。采用数显糖酸度计分别对样品的 TSS 和 TA 含量进行测定, TSS 含量以 °Brix 表示, TA 含量以 % 表示, 并计算固酸比 (TSS/TA)。测试重复 3 次。

参考文献 [18], 采用 3,5-二硝基水杨酸法测定 NFC 水蜜桃浊汁中的还原糖含量。取 0.5 mL 样品, 加入少量蒸馏水混匀, 并用蒸馏水定容至 25 mL, 80 °C 水浴提取 30 min 后, 10000 r/min 离心 10 min。取 2 mL 上清液至具塞刻度试管, 加入 1.5 mL 3,5-二硝基水杨酸试剂, 沸水浴加热 5 min, 取出立即冷却至室温, 再以蒸馏水定容至 20 mL 刻度处, 混匀, 于波长 540 nm 处测定吸光度值, 对比相应的葡萄糖标准曲线 ($y=0.6004x$, $R^2=0.9995$) 计算还原糖含量。测试重复 3 次。

1.2.5 浊汁营养指标测定

1.2.5.1 总酚含量测定 采用福林酚法测定 NFC 水蜜桃浊汁的总酚含量。样品提取: 0.5 mL NFC 水蜜桃汁与 4 mL 60% 乙醇充分混匀, 提取 10 min 后, 10000 r/min 离心 10 min, 上清液即多酚粗提液。多酚含量测定参照 Yap 等^[19] 方法进行, 略作修改。0.1 mL 粗提液中加入 0.3 mL 0.5 mol/L 福林酚试剂, 充分混匀后静置 30 s, 随后加入 1.2 mL 0.5 mol/L 的 NaCO_3 溶液, 混匀, 室温避光静置 1 h, 以 60% 乙醇为空白样, 测定 765 nm 处吸光值。结果以每 100 mL NFC 水蜜桃浊汁含有的 mg 没食子酸当量 (mg GAE/100 mL) 表示。测试重复 3 次。

1.2.5.2 V_C 含量测定 V_C 含量参考文献 [18], 采用分光光度法进行果汁中 V_C 含量的测定。取 0.5 mL 样品, 加入 5 mL 50 g/L 三氯乙酸溶液混匀, 并用 50 g/L 三氯乙酸溶液定容至 100 mL, 提取、离心后取 1 mL 上清液, 加入 50 g/L 三氯乙酸溶液和无水乙醇各 1 mL, 混合均匀。随后, 依次加入 0.5 mL 0.4% 磷酸-乙醇溶液、1 mL 5 g/L 红菲咯啉-乙醇溶液和 0.5 mL 0.3 g/L FeCl_3 -乙醇溶液。30 °C 反应 60 min, 于波长 534 nm 处测定吸光度值。对比相应的 V_C 标准曲线计算样品中的 V_C 含量, 结果以 mg/mL 表示。测试

重复 3 次。

1.2.6 数据分析 各组数据以平均值 $\pm$ 标准差(mean $\pm$ SD)表示,应用 SPSS 18.0 软件以 one-way ANOVA 法及 Duncan 检验对实验数据进行组间比较和差异显著性分析。以 $P<0.05$ 为存在显著性差异。

2 结果与分析

2.1 高压均质处理对 NFC 水蜜桃浊汁稳定性的影响

2.1.1 高压均质处理对 NFC 水蜜桃浊汁混浊度的影响

混浊度是反映新鲜果汁悬浮稳定性的一个重要指标,与分散在果汁中的不溶性颗粒如果胶、蛋白、脂肪、纤维素和半纤维素等密切相关,一般以离心后果汁上清液的混浊度值表示^[2,20]。高压均质后各组的浊度值如图 1 所示,可以看出均质对浊汁的混浊度产生了明显影响。与未处理的 NFC 水蜜桃浊汁相比,20 MPa/1、30 MPa/1、40 MPa/1 高压均质处理后,浊汁的混浊度显著提高($P<0.05$),混浊度值由 1.43 上升至 1.48~1.51,表明高压均质可显著提高 NFC 水蜜桃浊汁的悬浮稳定性,推测是因为在高压均质的剪切力、空穴效应等作用下,浊汁的颗粒粒径变小,使得离心后上清液中的悬浮颗粒增多,从而提高了样品的吸光值和混浊度^[14,21]。然而,在 2 次均质后各组混浊度呈现出下降趋势,其中 20 MPa/2、30 MPa/2 组较未处理组下降了 8.44%~9.74%,显著低于未处理组水平($P<0.05$),这可能是由于随着均质次数的增加,浊汁的颗粒粒径变得更小,会让更多的光通过果汁,从而引起混浊度的下降^[2]。Szczepanska 等^[12]认为果汁混浊度的下降是由于高压均质后果汁中的大颗粒悬浮物被裂解,而较小的颗粒会分散于较大颗粒间空隙中,因而降低了果汁的混浊度。由上可得,均质后 NFC 水蜜桃浊汁的混浊度均发生了不同程度的上升或下降,说明高压均质处理能使浊汁的稳定性提高。

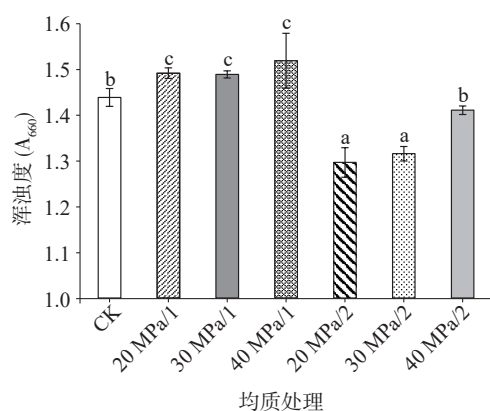


图 1 高压均质处理对 NFC 水蜜桃浊汁混浊度的影响
Fig.1 Effect of high pressure homogenization on the turbidity of NFC cloudy honey peach juice

注: 不同字母表示差异显著($P<0.05$); 图 2、图 4~图 7 同。

2.1.2 高压均质处理对 NFC 水蜜桃浊汁离心沉淀率的影响 离心沉淀率是反映浊汁稳定性的重要参数,

其值越低表明稳定性越高,反之则越低。如图 2 所示,高压均质前 NFC 水蜜桃浊汁的离心沉淀率为 14.71%,高压均质处理后其离心沉淀率呈现下降趋势,除 20 MPa/1 组外,其他组离心沉淀率较未处理组显著下降 13.49%~24.22%($P<0.05$),表明 ≥ 30 MPa/1 高压均质处理可以有效提高 NFC 水蜜桃浊汁的悬浮稳定性,但各组间无明显差异($P>0.05$)。Sentandreu 等^[15]在橙汁高压均质研究中亦发现了相似结果。均质下离心沉淀率的下降主要可能是由于在高压均质的剪切力、空穴作用、压力梯度等作用下,果汁中的颗粒粒径下降,分散更均匀,整个果汁体系变得相对稳定,进而离心过程中沉淀率下降。

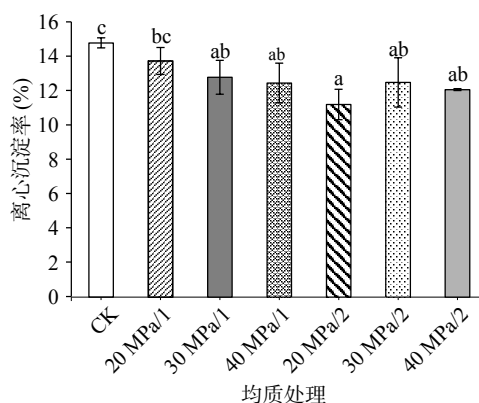


图 2 高压均质处理对 NFC 水蜜桃浊汁离心沉淀率的影响
Fig.2 Effect of high pressure homogenization on the centrifugal sedimentation rate of NFC cloudy honey peach juice

2.1.3 高压均质处理对 NFC 水蜜桃浊汁颗粒粒径分布和 Zeta 电位的影响

悬浮液的粒径在保持体系稳定性中起着重要作用,粒径越小,体系稳定性越高,沉降越慢,越不易发生分层^[22]。高压均质前后 NFC 水蜜桃浊汁的颗粒粒径分布如图 3 所示。经高压均质处理后,浊汁的颗粒粒径分布峰向左移动,颗粒粒径减小,粒径分布变窄,表明体系变得更为均匀、稳定。由表 1 可知,高压均质后各组的平均颗粒粒径均显著小于未处理组($P<0.05$),平均颗粒粒径从 1853.67 nm 降至 501.10~727.20 nm,稳定性增强,这

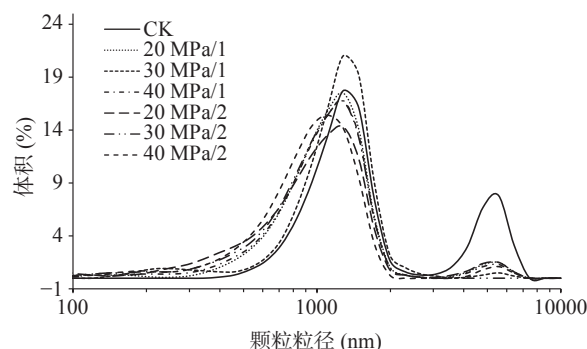


图 3 高压均质处理对 NFC 水蜜桃浊汁颗粒粒径分布的影响

Fig.3 Effect of high pressure homogenization on the particle size distribution of NFC cloudy honey peach juice

表1 高压均质处理对 NFC 水蜜桃浊汁平均颗粒粒径和 Zeta 电位的影响

Table 1 Effect of high pressure homogenization on the mean particle diameter and Zeta potential of NFC cloudy honey peach juice

处理	平均颗粒粒径(nm)	Zeta电位(mV)
CK	1853.67±55.61 ^d	-5.43±0.21 ^c
20 MPa/1	727.20±22.43 ^c	-6.05±0.16 ^b
30 MPa/1	665.27±19.95 ^b	-6.13±0.42 ^b
40 MPa/1	632.40±37.09 ^b	-6.30±0.22 ^{ab}
20 MPa/2	535.27±7.90 ^a	-6.25±0.48 ^{ab}
30 MPa/2	501.10±7.37 ^a	-6.83±0.09 ^a
40 MPa/2	551.47±15.84 ^a	-6.82±0.44 ^a

注: 同一列不同字母表示差异显著($P<0.05$); 表2~表3同。

与在其他果蔬汁所得到的结果相一致^[2,6,13,23],表明高压均质处理能显著降低 NFC 水蜜桃浊汁的颗粒粒径,进而提高其稳定性。分析均质压力和次数对平均颗粒粒径影响发现,压力仅在单次条件下对其有显著影响,平均颗粒粒径随着均质压力的增加呈现下降趋势;而随着均质次数的增加,浊汁的平均颗粒粒径显著下降($P<0.05$)。

Zeta 电位可反映静电斥力大小,常被用于评价微粒分散体系的稳定性^[2]。如表1所示,各组的 Zeta 电位均为负值,表明高压均质前后 NFC 水蜜桃浊汁中含有更多的带负电荷的颗粒。与未处理组相比,高压均质后各组的绝对 Zeta 电位值显著提高($P<0.05$),为未处理组的 111.12%~125.84%,但各压力间无显著差异($P>0.05$)。浊汁中负电荷的增加将增强颗粒间的静电斥力,进而破坏现有的聚合并阻止进一步的聚合^[9],该结果进一步证实了高压均质可有效提高 NFC 水蜜桃浊汁稳定性的结论。Yu 等^[9]在高压均质处理芋头浆时发现,高压均质可显著提高其绝对 Zeta 电位值。Zhu 等^[11]在苹果浊汁 20~30 MPa 高压均质下亦得到了相似的结果。

由上可得,不同高压均质处理均能有效降低 NFC 水蜜桃浊汁的平均颗粒粒径及 Zeta 电位值($P<0.05$),其中压力可显著降低单次条件下的平均颗粒粒径($P<0.05$),但对 Zeta 电位及 2 次条件下的平均颗粒粒径无显著影响($P>0.05$);均质次数可显著降低 NFC 水蜜桃浊汁的平均颗粒粒径($P<0.05$)。结合混浊度(图1)和离心沉淀率(图2)结果可以确证,高压均质下浊汁颗粒粒径和 Zeta 电位值的显著下降是其稳定性提高的重要原因,高压均质是提高水蜜桃浊汁稳定性的有效方法。

2.1.4 高压均质处理对 NFC 水蜜桃浊汁中可溶性果胶含量和 PME 酶活的影响 高压均质前后 NFC 水蜜桃浊汁中可溶性果胶含量变化如图4所示。未处理组的可溶性果胶含量为 3.01 mg Gal/mL,高压均质后,除 20 MPa/1 组外,其他处理组样品中的可溶性果胶含量均显著提高($P<0.05$),含量为未处理组的 1.07~1.25 倍,并随着均质强度的增强呈现出上升

趋势。Liu 等^[24]研究发现,20~180 MPa 高压均质处理显著提高了胡萝卜汁中的可溶性果胶含量,但各压力间无显著差异。这可能是由于在高压均质强烈的空穴、剪切等作用下,细胞壁结构被进一步破坏,促使果胶释放到浊汁体系中,可溶性果胶含量增加^[21,25]。高压均质下可溶性果胶的增加可提高果汁的黏度,根据 Stokes 定律,黏度越高沉降越慢,果汁的稳定性提高^[26],因此可溶性果胶含量的上升亦是 NFC 水蜜桃浊汁高压均质后稳定性增加(混浊度(图1)和离心沉淀率(图2))的原因之一。

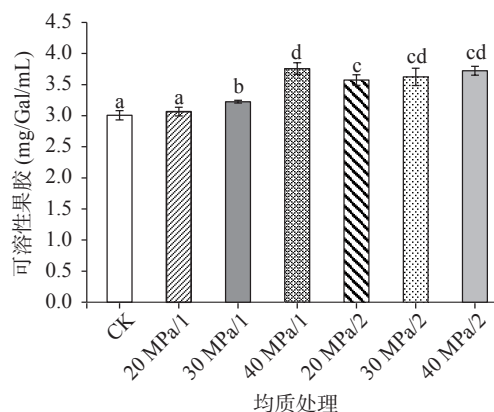


图4 高压均质处理对 NFC 水蜜桃浊汁中可溶性果胶含量的影响

Fig.4 Effect of high pressure homogenization on the water soluble pectin content of NFC cloudy honey peach juice

果胶甲基酯酶可催化果胶去甲酯化生产果胶酸和甲醇,直接影响果汁的混浊稳定性^[13,16,27]。如图5所示,随着均质压力和次数的增加,残存 PME 活力逐渐下降,除 20 MPa/1 组外,各组 PME 活力均显著降低($P<0.05$),残存活力分别为未处理组的 89.38% (30 MPa/1)、86.63%(40 MPa/1)、82.65%(20 MPa/2)、82.42%(30 MPa/2)和 78.21%(40 MPa/2),表明高压均质对 NFC 水蜜桃浊汁中的 PME 具有一定的钝化作用,这可能是高压均质条件下可溶性果胶含量显著增加(图4)的另一重要原因。高压均质对 PME 的钝

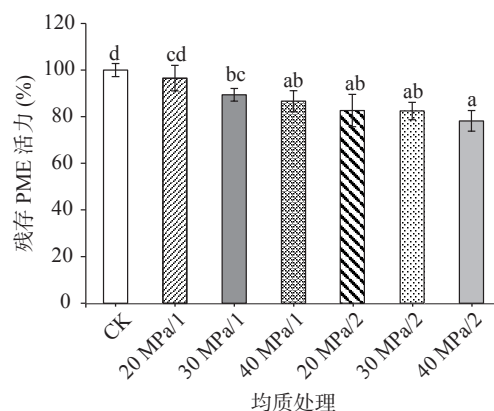


图5 高压均质处理对 NFC 水蜜桃浊汁中残存 PME 活力的影响

Fig.5 Effect of high pressure homogenization on the residual PME activity of NFC cloudy honey peach juice

化作用亦在苹果猕猴桃复合汁^[28]、NFC 胡萝卜桃复合汁^[29]等果汁中得到了证实。

由上可得, ≥ 30 MPa/1 处理可显著提高 NFC 水蜜桃浊汁中的可溶性果胶含量,并降低其 PME 酶活($P<0.05$),其中压力仅在单次条件下对可溶性果胶含量和 PME 酶活具有显著性影响($P<0.05$)。推测 ≥ 30 MPa/1 处理下, NFC 水蜜桃浊汁中的细胞壁结构被进一步破坏,同时 PME 酶活降低,促使可溶性果胶含量和粘度上升,进而提高了浊汁的稳定性。

2.2 高压均质处理对 NFC 水蜜桃浊汁理化品质的影响

2.2.1 高压均质处理对 NFC 水蜜桃浊汁色泽的影响

色泽是果汁的重要指标,直接关系消费者的选择^[29]。如表 2 所示,未处理组的 L^* 值为 40.15,高压均质后 NFC 水蜜桃浊汁的 L^* 值上升至 42.18~44.70,显著高于未处理组水平($P<0.05$),并随均质强度的增加呈现上升的趋势,表明高压均质可显著提高浊汁的亮度,光泽度变好,这可能是由于高压均质处理后,浊汁中的悬浮颗粒粒径逐渐变小,光反射能力变强,从而引起了样品亮度的增加^[9,30],目前在橙汁^[30]、NFC 胡萝卜水蜜桃复合果汁^[29]、苹果汁^[31]等高压均质研究中亦得到了类似结果。与 L^* 值变化趋势相反, NFC 水蜜桃浊汁的 a^* 和 b^* 值在均质处理后呈现出明显的下降趋势,表明高压均质处理能使 NFC 水蜜桃浊汁的颜色相对变绿、变蓝。

总色差 ΔE 反映高压均质前后果汁颜色的整体变化,0~0.5 之间视为无色差,0.5~1.5 之间视为稍有 色差,1.5~3.0 之间视为有明显色差,3.0~6.0 之间则 视为肉眼可见色差^[32]。由此可见,单次高压均质组 (20~40 MPa/1, 1.71~2.37)和 40 MPa/2(2.26)组在色

泽上与未处理组相比存在明显色差,但肉眼不可察 觉,而 20 MPa/2(3.20)、30 MPa/2(4.20)组则显现出 了肉眼看见色差。高压均质处理后,各组 NFC 水蜜 桃浊汁的褐变程度明显下降,BI 值均显著低于未处 理组水平($P<0.05$),这可能是由于高压均质对桃汁中 的多酚氧化酶产生了钝化作用,致使酶活下降,从而 减少了褐变^[13]。

综上,高压均质处理显著提高了 NFC 水蜜桃浊 汁的 L^* 值,降低了 a^* 、 b^* (除 30 MPa/2 外)和褐变指 数 BI 值($P<0.05$),色泽得到了明显改善。

2.2.2 高压均质处理对 NFC 水蜜桃浊汁 pH、TSS、

TA、固酸比及还原糖的影响 高压均质处理前后 NFC 水蜜桃浊汁 pH、TSS、TA、固酸比及还原糖含 量的变化如表 3 所示。NFC 水蜜桃浊汁的初始 pH 为 4.36(近酸性),单次高压均质后桃浊汁的 pH 无显著变化($P>0.05$),而经过 2 次高压均质后,桃浊 汁的 pH 下降至 4.29~4.34,显著低于未处理组水平 ($P<0.05$),这可能是由于随着均质强度的增加,桃浊 汁中的细胞进一步被破坏,有机酸被溶出进入浊汁体 系^[33]。Yildiz 等^[13]发现离核桃汁(*Freestone peaches*) 经 55 MPa 均质处理,pH 发生明显下降。Patrignani 等^[34]也报道,高压均质处理会引起杏汁 pH 的明显 降低。

与未处理 NFC 水蜜桃浊汁相比,高压均质后, 各组的 TSS 随均质压力、次数的上升呈现下降趋势, 其中 40 MPa/1(12.1°Brix)、20 MPa/2(11.9°Brix)、 30 MPa/2(11.8°Brix)、40 MPa/2(11.9°Brix)组 TSS 含量显著低于未处理组(12.5°Brix)水平($P<0.05$),这 可能是由于均质过程中桃浊汁中的酶发生变性而引

表 2 高压均质处理对 NFC 水蜜桃浊汁色泽的影响

Table 2 Effect of high pressure homogenization on the color of NFC cloudy honey peach juice

处理	L^*	a^*	b^*	ΔE	BI
CK	40.51±1.31 ^a	-0.90±0.08 ^c	3.93±0.26 ^c	-	8.30±0.50 ^d
20 MPa/1	42.18±0.22 ^b	-1.55±0.02 ^b	3.58±0.05 ^{bc}	1.71±0.22 ^a	5.93±0.10 ^{bc}
30 MPa/1	42.56±0.23 ^b	-1.56±0.02 ^b	3.60±0.08 ^{bc}	2.08±0.22 ^b	5.90±0.18 ^{bc}
40 MPa/1	42.82±0.22 ^b	-1.53±0.06 ^b	3.43±0.21 ^{ab}	2.37±0.22 ^b	5.51±0.41 ^{ab}
20 MPa/2	43.70±0.17 ^c	-1.66±0.02 ^a	3.69±0.10 ^{cd}	3.20±0.17 ^c	5.80±0.25 ^{bc}
30 MPa/2	44.70±0.34 ^d	-1.67±0.01 ^a	3.87±0.25 ^{de}	4.20±0.33 ^d	6.05±0.54 ^c
40 MPa/2	42.69±0.24 ^b	-1.65±0.03 ^a	3.34±0.18 ^a	2.26±0.26 ^b	5.09±0.46 ^a

表 3 高压均质处理对 NFC 水蜜桃浊汁 pH、TSS、TA、固酸比及还原糖的影响

Table 3 Effect of high pressure homogenization on the pH, TSS, TA, TSS/TA and reducing sugar content of NFC cloudy honey peach juice

处理	pH	TSS(°Brix)	TA(%)	固酸比	还原糖(mg/mL)
CK	4.36±0.01 ^c	12.5±0.12 ^c	0.49±0.01 ^a	25.27±0.46 ^b	13.01±0.10 ^c
20 MPa/1	4.36±0.01 ^{bc}	12.3±0.10 ^{bc}	0.50±0.02 ^a	24.62±0.79 ^{ab}	11.87±0.79 ^a
30 MPa/1	4.36±0.01 ^c	12.3±0.10 ^{bc}	0.50±0.02 ^a	24.45±0.83 ^{ab}	13.38±0.06 ^d
40 MPa/1	4.37±0.02 ^c	12.1±0.06 ^b	0.51±0.01 ^a	23.65±0.65 ^a	12.88±0.06 ^{bc}
20 MPa/2	4.34±0.02 ^b	11.9±0.12 ^a	0.49±0.01 ^a	24.53±0.81 ^{ab}	12.82±0.04 ^b
30 MPa/2	4.31±0.01 ^a	11.8±0.06 ^a	0.50±0.02 ^a	23.55±0.75 ^a	14.70±0.04 ^c
40 MPa/2	4.29±0.01 ^a	11.9±0.12 ^a	0.49±0.02 ^a	24.40±0.76 ^{ab}	14.89±0.02 ^f

起的^[2]。Wang等^[2]研究发现,久保桃汁经20 MPa均质处理后TSS值同样表现出下降趋势。与pH、TSS的变化趋势不同,高压均质后各组的TA则未发生显著变化($P>0.05$)。各高压均质组的固酸比值在23.55~24.62之间,与未处理组(25.27)较为接近,仅40 MPa/1和30 MPa/2组出现了显著下降($P<0.05$)。与未处理组相比,20 MPa下桃浊汁中还原糖含量显著下降($P<0.05$),40 MPa/1组无显著变化,而30 MPa/1、30 MPa/2和40 MPa/2组则显著增加($P<0.05$)。

然而,另有研究报道,高压均质可显著提高黑加仑汁的TSS^[33]。Liu等^[29]研究发现,高压均质对NFC胡萝卜水蜜桃复合果汁的pH、TSS和TA无显著影响。Wellala等^[10]发现高压均质对胡萝卜苹果水蜜桃复合果汁的TSS和TA无显著影响,但会显著提高其pH,并在不同复合比例下显著降低或显著提高或不影响其固酸比。推测出现不同结果的原因可能与样品体系,包括样品种类、悬浮体系特性等有关,亦与高压均质设备性能及加工参数,如均质阀、压力、次数、温度等密切相关。

综上,高压均质后NFC水蜜桃浊汁的pH、TSS、固酸比及还原糖含量发生了不同程度的变化,其中20 MPa/1、30 MPa/1组的理化性质维持较好,pH、TSS、TA和固酸比均无显著变化($P>0.05$)。

2.3 高压均质处理对NFC水蜜桃浊汁营养品质的影响

2.3.1 高压均质处理对NFC水蜜桃浊汁中总酚含量的影响 高压均质前后NFC水蜜桃浊汁中总酚含量的变化如图6所示。未处理样品中的总酚含量为37.37 mg GAE/100 mL,单次均质(20~40 MPa)处理会增加样品中的总酚含量,20 MPa/1、30 MPa/1、40 MPa/1组多酚含量较未处理组分别提高了28.86%、22.29%和10.50%($P<0.05$),这可能是由于高压均质引起了细胞壁组织破坏、颗粒变小,结合态或被物理截留在复杂基质中的多酚等物质在剪切、空穴作用下被释放,进而增加了多酚等物质的提取率^[29]。Sauceda-Galvez等^[31]在苹果汁、Wellala等^[10]在胡萝卜

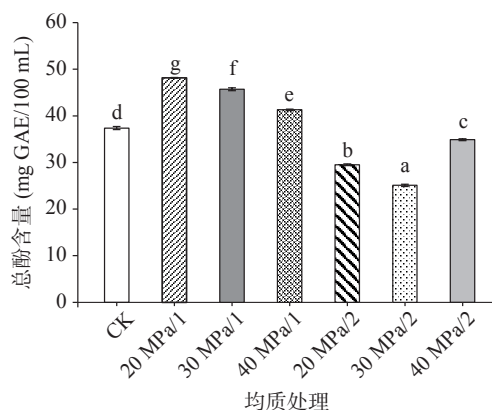


图6 高压均质处理对NFC水蜜桃浊汁中总酚含量的影响

Fig.6 Effect of high pressure homogenization on the total phenolic content of NFC cloudy honey peach juice

苹果桃复合汁的高压均质研究中亦得到了相似结果。然而,随着均质压力、次数的增加,样品中的总酚含量呈现下降趋势,20 MPa/2、30 MPa/2、40 MPa/2组多酚含量显著低于未处理组水平($P<0.05$),这可能是因为随着均质强度的上升,均质引起的温度上升越大,此外多次均质增加了样品暴露于氧气的时间并可能会增加样品中与氧气接触,进而促进了多酚的氧化,导致总酚含量降低^[2]。因此,为有效保持NFC水蜜桃浊汁中的总酚,均质次数以单次为宜。

2.3.2 高压均质处理对NFC水蜜桃浊汁中V_C含量的影响 如图7所示,高压均质处理显著提高了NFC水蜜桃浊汁中的V_C含量($P<0.05$),其中30 MPa/1组V_C含量最高,为9.22 mg/mL,推测V_C含量的提高可归因于高压均质下强烈的空穴、湍流和碰撞作用增加了悬浮颗粒中V_C等活性成分的提取率,此外均质后颗粒变小,测定时离心后保留在上清液中的悬浮物增加,V_C含量提高。然而,有文献报道,高压均质(20~160 MPa)处理对久保桃汁的V_C含量无明显影响^[2];相反地,Benjamin等^[35]研究发现,150 MPa高压均质造成了石榴汁中V_C含量的显著下降,造成结果不同的原因与样品特性、均质条件等不同相关。

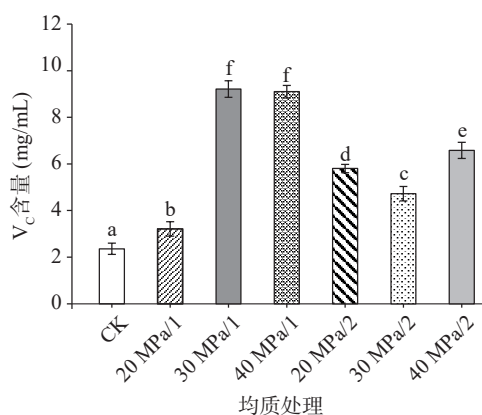


图7 高压均质处理对NFC水蜜桃浊汁中V_C含量的影响

Fig.7 Effect of high pressure homogenization on the V_C content of NFC cloudy honey peach juice

结合总酚结果可以得出,20~40 MPa/1均质可有效提高NFC水蜜桃浊汁中营养物质(总酚和V_C含量),其中30 MPa/1的效果最佳。

3 结论

高压均质处理有助于提高NFC水蜜桃浊汁的稳定性,随着均质压力及次数的增加,NFC水蜜桃浊汁的离心沉淀率、颗粒粒径呈现下降趋势,可溶性果胶含量呈现上升趋势,≥30 MPa/1处理后体系变得更为均匀、稳定。在高压均质作用下,NFC水蜜桃浊汁的色泽得到有效改善,亮度L*值显著增加($P<0.05$),褐变指数BI值显著下降($P<0.05$)。20~30 MPa/1条件下,pH、TSS、TA和固酸比未发生明显变化($P>0.05$),总酚和V_C含量显著增加($P<0.05$);而在2次均质后,各组的pH、TSS、总酚、V_C含量等

指标均显著降低($P<0.05$), 品质尤其是营养品质较单次均质下降严重。综上, 30 MPa 单次均质可在显著提高 NFC 水蜜桃浊汁稳定性的同时($P<0.05$), 有效维持其理化性质(pH、TSS、TA 和固酸比), 并显著提高其营养品质(总酚和 V_C 含量)。高压均质作为一种物理手段, 在 NFC 水蜜桃浊汁等果汁加工中具有潜在的应用前景, 但高压均质对 NFC 水蜜桃浊汁微生物及贮藏期稳定性、品质及微生物等影响有待进一步深入研究。此外, 高压均质的钝酶、杀菌效果有限, 在 NFC 水蜜桃浊汁等果汁加工生产中, 需结合超高压、巴氏等杀菌钝酶过程, 以提高产品的稳定性和安全性。

参考文献

- [1] SPILIMBERGO S, CIOLO L. Supercritical CO_2 and N_2O pasteurisation of peach and kiwi juice[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2010, 45(8): 1619–1625.
- [2] WANG X Y, WANG S S, WANG W J, et al. Comparison of the effects of dynamic high-pressure microfluidization and conventional homogenization on the quality of peach juice[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(13): 5994–6000.
- [3] 朱麟, 凌建刚, 尚海涛, 等. 冰温对湖景蜜桃贮藏品质影响[J]. *食品与机械*, 2016, 32(12): 115–123. [ZHU L, LING J G, SHANG H T, et al. Effects of controlled freezing-point storage treatment on quality of "Hujingmili" juicy peaches[J]. *Food and Machinery*, 2016, 32(12): 115–123.]
- [4] 马亚琴, 贾蒙, 张晨. 高压均质技术在果汁加工中的应用[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(3): 265–273. [MA Y Q, JIA M, ZHANG C. Application of high pressure homogenization technology in fruit juice processing[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(3): 265–273.]
- [5] WELLALA C K D, BI J F, LIU X, et al. Effect of high pressure homogenization on water-soluble pectin characteristics and bioaccessibility of carotenoids in mixed juice[J]. *Food Chemistry*, 2022, 371: 131073.
- [6] ZHOU L Y, GUAN Y J, BI J F, et al. Change of the rheological properties of mango juice by high pressure homogenization[J]. *Lwt-Food Science and Technology*, 2017, 82: 121–130.
- [7] MESA J, HINESTROZA-CORDOBA L I, BARRERA C, et al. High homogenization pressures to improve food quality, functionality and sustainability[J]. *Molecules*, 2020, 25(14): 3305.
- [8] 宁椿, 周林燕, 毕金峰, 等. 高压均质技术结合 V_C 处理对桃浊汁微生物和品质的影响[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(11): 141–149. [NING C, ZHOU L Y, BI J F, et al. Effect of high pressure homogenization on microorganism and quality of cloudy peach juice with V_C [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2019, 19(11): 141–149.]
- [9] YU Z Y, JIANG S W, CAO X M, et al. Effect of high pressure homogenization (HPH) on the physical properties of taro (*Colocasia esculenta* (L.) Schott) pulp[J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 177: 1–8.
- [10] WELLALA C K D, BI J F, LIU X, et al. Effect of high pressure homogenization combined with juice ratio on water-soluble pectin characteristics, functional properties and bioactive compounds in mixed juices[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2020, 60: 102279.
- [11] ZHU D, KOU C, WEI L, et al. Effects of high pressure homogenization on the stability of cloudy apple juice[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 358: 022059.
- [12] SZCZEPANSKA J, SKAPSKA S, POLASKA M, et al. High pressure homogenization with a cooling circulating system: The effect on physiochemical and rheological properties, enzymes, and carotenoid profile of carrot juice[J]. *Food Chemistry*, 2021, 370: 131023.
- [13] YILDIZ G. Application of ultrasound and high-pressure homogenization against high temperature-short time in peach juice[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2019, 42(3): e12997.
- [14] ROJAS M L, LEITE T S, CRISTIANINI M, et al. Peach juice processed by the ultrasound technology: Changes in its microstructure improve its physical properties and stability[J]. *Food Research International*, 2016, 82: 22–33.
- [15] SENTANDREU E, GURREA M D, BETORET N, et al. Changes in orange juice characteristics due to homogenization and centrifugation[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 105(2): 241–245.
- [16] RAO L, GUO X F, PANG X L, et al. Enzyme activity and nutritional quality of peach (*Prunus persica*) juice: Effect of high hydrostatic pressure[J]. *International Journal of Food Properties*, 2014, 17(6): 1406–1417.
- [17] KORTEIN K, APPIAH V, ODAMTTEN G T, et al. Determination of color parameters of gamma irradiated fresh and dried mushrooms during storage[J]. *Croatian Journal for Food Technology, Biotechnology and Nutrition*, 2015, 10(1/2): 66–71.
- [18] 曹健康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007: 39–41, 44–46. [CAO J K, JIANG W B, ZHAO Y M. Experiment guidance of postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007: 39–41, 44–46.]
- [19] YAP J Y, HII C L, ONG S P, et al. Effects of drying on total polyphenols content and antioxidant properties of *Carica papaya* leaves[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100(7): 2932–2937.
- [20] SILVA V M, SATO A C K, BARBOSA G, et al. The effect of homogenisation on the stability of pineapple pulp[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2010, 45(10): 2127–2133.
- [21] 关云静. 高压均质对 NFC 芒果汁微生物和品质的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016: 37. [GUAN Y J. Effect of high pressure homogenization on microbial and quality attributes of not-from-concentrate mango juice[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016: 37.]
- [22] KARACAM C H, SAHIN S, OZTOP M H. Effect of high pressure homogenization (microfluidization) on the quality of Ottoman strawberry (*F-ananassa*) juice[J]. *Lwt-Food Science and Technology*, 2015, 64(2): 932–937.
- [23] KUBO M T K, AUGUSTO P E D, CRISTIANINI M. Effect

of high pressure homogenization (HPH) on the physical stability of tomato juice[J]. *Food Research International*, 2013, 51(1): 170–179.

[24] LIU X, LIU J N, BI J F, et al. Effects of high pressure homogenization on pectin structural characteristics and carotenoid bioaccessibility of carrot juice[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 203: 176–184.

[25] MOELANTS K R N, JOLIE R P, PALMERS S K J, et al. The effects of process-induced pectin changes on the viscosity of carrot and tomato sera[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2013, 6(10): 2870–2883.

[26] LIU X, LIU J N, BI J F, et al. Effects of high pressure homogenization on physical stability and carotenoid degradation kinetics of carrot beverage during storage[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 263: 63–69.

[27] LIU J N, BI J F, MCCLEMENTS D J, et al. Impacts of thermal and non-thermal processing on structure and functionality of pectin in fruit- and vegetable- based products: A review[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 250: 116890.

[28] 易俊洁. 基于清洁标签理念的苹果与猕猴桃复合浊汁品质研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017: 73. [YI J J. Quality changes in cloudy apple-kiwifruit mixed juice: Innovative clean label concept[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017: 73.]

[29] LIU J N, BI J F, LIU X, et al. Modelling and optimization of high-pressure homogenization of not-from-concentrate juice: Achieving better juice quality using sustainable production[J]. *Food Chemistry*, 2022, 370: 131058.

[30] VELAZQUEZ-ESTRADA R M, HERNANDEZ-HERRERO M M, GUAMIS-LOPEZ B, et al. Influence of ultra-high pressure homogenisation on physicochemical and sensorial properties of orange juice in comparison with conventional thermal processing[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2019, 54(5): 1858–1864.

[31] SAUCEDA-GALVEZ J N, CODINA-TORRELLA I, MARTINEZ-GARCIA M, et al. Combined effects of ultra-high pressure homogenization and short-wave ultraviolet radiation on the properties of cloudy apple juice[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 136: 110286.

[32] CSERHALMI Z, SASS-KISS A, TOTH-MARKUS M, et al. Study of pulsed electric field treated citrus juices[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2006, 7(1-2): 49–54.

[33] KRUSZEWSKI B, ZAWADA K, KARPINSKI P. Impact of high-pressure homogenization parameters on physicochemical characteristics, bioactive compounds content, and antioxidant capacity of blackcurrant juice[J]. *Molecules*, 2021, 26(6): 1802.

[34] PATRIGNANI F, TABANELLI G, SIROLI L, et al. Combined effects of high pressure homogenization treatment and citral on microbiological quality of apricot juice[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2013, 160(3): 273–281.

[35] BENJAMIN O, GAMRASNI D. Microbial, nutritional, and organoleptic quality of pomegranate juice following high-pressure homogenization and low-temperature pasteurization[J]. *Journal of Food Science*, 2020, 85(3): 592–599.