

高压射流磨系统处理对全果肉赣南脐橙浆理化性质和营养品质的影响

俞灿杰, 吕成良, 帅希祥, 贺小红, 戴涛涛, 邓利珍, 刘成梅, 陈 军

Effects of Industrial-scale Microfluidizer System Processing on the Physicochemical Properties and Nutritional Qualities of Whole-flesh Gannan Navel Orange Pulp

YU Canjie, L Chengliang, SHUAI Xixiang, HE Xiaohong, DAI Taotao, DENG Lizhen, LIU Chengmei, and CHEN Jun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023120062>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高压射流磨处理对全组分燕麦浆的营养成分及理化性质影响

Effects of High-pressure Jet Mill Treatment on Nutritional Composition and Physicochemical Properties of Whole Grain Oat Slurry

食品工业科技. 2020, 41(13): 92-97,111 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.13.015>

挤压膨化对杂粮代餐粉营养品质及理化性质的影响

Effects of Extrusion on Nutritional Quality and Physicochemical Properties of Multigrain Meal Replacement Powder

食品工业科技. 2023, 44(22): 28-35 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022120128>

小米挤压粉与小米生粉理化性质及营养品质的差异比较

Difference of Physicochemical Properties and Nutritional Quality between Raw and Extruded Foxtail Millet Flour

食品工业科技. 2019, 40(22): 13-18,23 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.22.003>

不同酵母对脐橙果酒品质的影响

Effect of Different Yeasts on the Quality of Navel Orange Wine

食品工业科技. 2021, 42(5): 1-10,25 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020060075>

全豆豆浆的高压射流磨制备工艺及贮藏稳定性研究

Study on Preparation and Storage Stability of Whole Soybean Milk by High-pressure Microfluidizer

食品工业科技. 2021, 42(19): 173-181 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020110215>

赣州脐橙果皮果胶的提取工艺优化及其改性前后理化性质和生物活性的研究

Optimization Extraction of Pectin from Ganzhou Navel Orange Peel and Investigation of Its Physicochemical Properties and Biological Activities before and after Modification

食品工业科技. 2022, 43(21): 235-244 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022020242>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

俞灿杰, 吕成良, 帅希祥, 等. 高压射流磨系统处理对全果肉赣南脐橙浆理化性质和营养品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(19): 114–123. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023120062

YU Canjie, LÜ Chengliang, SHUAI Xixiang, et al. Effects of Industrial-scale Microfluidizer System Processing on the Physicochemical Properties and Nutritional Qualities of Whole-flesh Gannan Navel Orange Pulp[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(19): 114–123. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023120062

· 研究与探讨 ·

高压射流磨系统处理对全果肉赣南脐橙浆理化性质和营养品质的影响

俞灿杰¹, 吕成良¹, 帅希祥², 贺小红³, 戴涛涛^{1,4}, 邓利珍^{1,4}, 刘成梅^{1,4}, 陈 军^{1,4,*}

(1.南昌大学食品科学与资源挖掘全国重点实验室, 江西南昌 330047;

2.中国热带农业科学院南亚热带作物研究所, 广东湛江 524091;

3.长沙理工大学食品与生物工程学院, 湖南长沙 410014;

4.江西南大创院食品科技有限公司, 江西南昌 330200)

摘 要:为解决脐橙榨汁过程中肉渣损失、脐橙汁悬浮稳定性差的问题, 本研究采用工业级高压射流磨系统 (Industry-scale microfluidizer system, ISMS) 制备全果肉赣南脐橙浆, 实现赣南脐橙果肉的超细化, 研究 ISMS 不同处理压力 (0、60、90、120 MPa) 对全果肉赣南脐橙浆理化性质 (粒径分布、流变特性、微观形貌、悬浮稳定性、色泽、pH) 和营养品质 (可溶性固形物、V_C、类胡萝卜素、柠檬苦素、柚皮苷含量) 的影响。结果表明, 当 ISMS 压力从 0 MPa 增加到 120 MPa 时, 全果肉赣南脐橙浆的粒径逐渐减小, D_[3,2] 从 59.77 μm 降低至 26.47 μm, 果肉颗粒得到细化且分散得更加均匀, 此外, 橙浆的表观粘度逐渐升高, 稠度系数 K 从 0.126 增加到 0.165。与未经过 ISMS 处理的全果肉赣南脐橙浆相比, 在 ISMS 处理压力为 90 MPa 时, 脐橙浆的不稳定指数最小, 从 0.504 降低至 0.374, 沉淀重量比最高, 从 40.80% 增加至 59.48%, 表明此时全果肉赣南脐橙浆悬浮稳定性最好。此外, 经过 ISMS 处理后全果肉赣南脐橙浆, C* 逐渐增大, 脐橙浆整体色泽更加饱和, 且 ISMS 处理不影响其 pH、可溶性固形物含量。随着 ISMS 处理压力的增大, ISMS 处理后脐橙浆中 V_C 含量增加 11%, 总类胡萝卜素含量增加 15%, 柠檬苦素含量增加 10%, 但不改变柚皮苷含量。综上所述, 为尽可能保留更多脐橙中的营养物质, 故选择 120 MPa 为最佳压力。该研究表明 ISMS 可在工业水平上生产悬浮稳定性好、营养品质佳的全果肉赣南脐橙浆, 为脐橙行业提供新型制浆途径。

关键词: 高压射流磨, 全果肉, 赣南脐橙, 理化性质, 营养品质, 苦味物质

中图分类号: TS255.44

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)19-0114-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023120062

本文网刊:



Effects of Industrial-scale Microfluidizer System Processing on the Physicochemical Properties and Nutritional Qualities of Whole-flesh Gannan Navel Orange Pulp

YU Canjie¹, LÜ Chengliang¹, SHUAI Xixiang², HE Xiaohong³, DAI Taotao^{1,4}, DENG Lizhen^{1,4},
LIU Chengmei^{1,4}, CHEN Jun^{1,4,*}

(1.State Key Laboratory of Food Science and Resources, Nanchang University, Nanchang 330047, China;

2.Institute of Subtropical Crops, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Zhanjiang 524091, China;

3.School of Food Science and Bioengineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410014, China;

4.International Institute of Food Innovation Co., Ltd., Nanchang University, Nanchang 330200, China)

收稿日期: 2023-12-11

基金项目: 江西省重点研发计划 (重点项目) (20212BBF61008)。

作者简介: 俞灿杰 (1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工技术, E-mail: yucanjie@163.com。

* 通信作者: 陈军 (1986-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 食品 (含生物) 资源的开发利用, E-mail: chen-jun1986@hotmail.com。

Abstract: In order to solve the problems of flesh loss in the process of navel orange juice extraction and poor suspension stability of navel orange juice, this study used an industrial-scale microfluidizer system (ISMS) to prepare whole-flesh Gannan navel orange pulp, achieving ultra-fine pulp of Gannan navel orange. The effects of different ISMS processing pressures (0, 60, 90, and 120 MPa) on the physicochemical properties (particle size distribution, rheological properties, micro morphology, suspension stability, color, pH) and nutritional qualities (soluble solids, V_C , carotenoids, limonin, naringin content) of Gannan navel orange pulp was investigated. The results showed that the particle size of whole-flesh Gannan navel orange pulp gradually decreased, and $D_{[3,2]}$ decreased from 59.77 μm to 26.47 μm when the ISMS pressure increased from 0 MPa to 120 MPa. The pulp particles were refined and dispersed more evenly. In addition, the apparent viscosity of orange pulp gradually increased, and the consistency coefficient K increased from 0.126 to 0.165. Compared with whole-flesh Gannan navel orange pulp without ISMS processing, when the ISMS processing pressure was 90 MPa, the instability index of navel orange pulp was the smallest, decreasing from 0.504 to 0.374, and the precipitation weight ratio was the highest, increasing from 40.80% to 59.48%, indicating that the suspension stability of the whole-flesh Gannan navel orange pulp was the best at this time. In addition, after ISMS processing, the C^* of the whole flesh Gannan navel orange pulp gradually increased, and the overall color of the navel orange pulp became more saturated. Moreover, ISMS processing did not affect its pH and total soluble solid content. With the increase of ISMS processing pressure, the V_C content in navel orange pulp increased by 11%, the total carotenoid content increased by 15%, and the limonin content increased by 10% after ISMS processing, but the naringin content remained was not changed. In summary, in order to preserve as much nutrients as possible, 120 MPa was chosen as the optimal pressure. This study shows that ISMS can produce whole-flesh Gannan navel orange pulp with good suspension stability and nutritional quality at the industrial level, providing a new pulping route for the navel orange industry.

Key words: industrial-scale microfluidizer system; whole-flesh; Gannan navel orange pulp; physicochemical properties; nutritional qualities; bitter substance

我国赣南地区的脐橙种植面积居世界第一, 脐橙年产量居世界第三, 赣南脐橙被列为我国十一大优势农产品之一, 荣获“中华名果”等称号。赣南脐橙富含碳水化合物、有机酸、维生素、类胡萝卜素等营养成分, 具有果实无核、肉质较脆嫩、味甜略酸等优点, 深受人们喜爱。然而, 由于赣南脐橙深加工不足, 主要靠鲜销^[1], 极大地限制了脐橙产业的发展。榨汁是目前脐橙深加工的主要途径之一, 通过多种加工工艺将脐橙处理成为脐橙汁制品, 以达到便于运输、随取随用、提高利用率等目的。

目前, 脐橙汁主要面临着悬浮稳定性差、营养损失严重的问题。在脐橙榨汁工艺中, 通常包括原料选择、清洗分选、压榨、过滤、混合、脱气、去油、杀菌和灌装等工艺。在榨汁和过滤的过程中, 约有 30%~50% 脐橙肉渣被去除^[2], 又由于其味苦、酸度大、水分含量高且易染菌腐败等问题, 目前仅通过直接丢弃或掩埋等方式处理^[3], 这造成了巨大的资源浪费和环境污染。近几年, 随着消费者健康意识的提升, 更注重果汁的营养健康属性^[4]。因此, 研发营养价值高的果汁已成为迫切需要。粉碎技术可以通过果肉的细化使肉渣保留在果汁中, 可极大地保留果肉中的营养成分。但由于目前传统粉碎技术如均质机、胶体磨等难以将大颗粒果肉粉碎, 大颗粒容易在复杂组分间形成密度差, 在重力作用下易沉淀, 导致稳定性较差。因此需要新的粉碎技术来制备悬浮稳定性好、营养价值高的果汁。

动态高压微射流(Dynamic high pressure micro-fluidization, DHPM)是一种超微粉碎技术, 其运行时

产生高速剪切、强烈撞击、空化作用、高能湍流和瞬时压降等强烈的物理作用, 让处理后的物料有良好的超细化、乳化和均一化效果^[5]。DHPM 目前已被广泛运用于制备果蔬浆的相关研究中, 如沙棘浆^[6]、桃浆^[7]、猕猴桃浆^[8]、石榴浆^[9]和草莓浆^[10]等, 研究表明, DHPM 可以将果肉超细化, 不仅明显提高了果蔬浆悬浮稳定性, 而且促进了营养物质和风味物质的释放, 但是由于 DHPM 的微孔流道直径小(<200 μm), 在运行过程中较大的果肉颗粒易堵塞微孔流道, 故通常只能加工已过滤的澄清果汁, 且 DHPM 处理量小(<36 L/h), 不符合工业生产需求。

针对 DHPM 处理量小、微孔流道易堵塞等问题, 本实验室自主研发了一款工业级别的高压射流磨系统(Industry-scale microfluidizer system, ISMS), 该设备是基于 DHPM 的原理, 优化腔道的工业级微射流装置, 示意图见图 1。相比于 DHPM, ISMS 具有更大的处理量(500 L/h)和更大的微孔流道直径(300~500 μm), 能够制备无需过滤的超细果蔬浆, 极大地保留了果蔬中的营养成分。目前课题组已经成功地将 ISMS 用于制备全组分谷物饮料和果蔬浆, 如全豆浆^[11]、玉米浆^[12]、番茄浆^[13]、桑葚浆^[14]和芒果浆^[15]等, 研究表明, ISMS 处理后的果蔬浆既保留了原料中的营养成分, 还能促进一些营养物质的释放。因此, 可将 ISMS 用于生产全果肉赣南脐橙浆。

综上, 为解决脐橙汁悬浮稳定性差、营养浪费等问题, 本研究采用自主研发的高压射流磨系统制备全果肉赣南脐橙浆, 以期提高全果肉赣南脐橙浆悬浮稳定性, 尽可能保留赣南脐橙中的营养成分, 避免传统

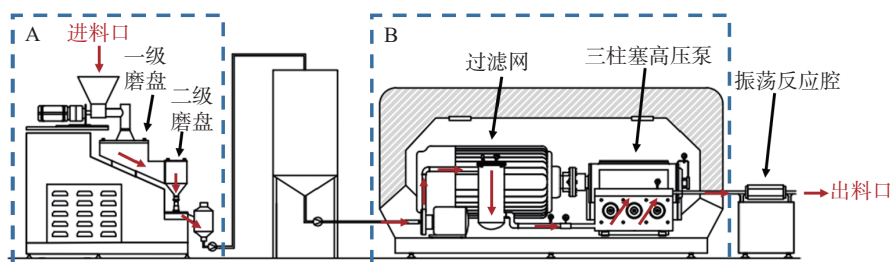


图1 高压射流磨系统设备结构图

Fig.1 Structure diagram of ISMS system

注: A: 湿法前处理; B: 高压射流磨。

制汁工艺产生的赣南脐橙肉渣所导致巨大的资源浪费和环境污染。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

赣南脐橙 信丰农夫山泉果业有限公司; 柠檬苦素标准品($\geq 98\%$)、柚皮苷($\geq 98\%$) 上海源叶生物科技有限公司; L-抗坏血酸标准品($\geq 98\%$)、二甘醇、乙腈 色谱级, 阿拉丁试剂(上海)有限公司; 无水乙醇、正己烷、丙酮、二氯甲烷、三氯化铁、磷酸、三氯乙酸、NaOH 等 所有试剂均为分析纯。

高压射流磨系统(含湿法粉碎机) 自主研发; LUMiFuge 稳定性分析仪 德国 Lum GmbH 公司; TGL-20B 高速离心机 上海安亭科学仪器厂; Primo R 冷冻离心机 美国 Thermo Scientific 公司; Mastersizer 3000 激光衍射粒度分析仪 英国马尔文公司; TU-1810 紫外可见分光光度计 北京普析通用仪器有限公司; MCR-302 流变分析仪 奥地利 Anton Paar 公司; RE-5000 旋转蒸发器 上海秋佐科学仪器有限公司; DELTA-320 pH 计 梅特勒-托利多仪器有限公司; PAL-1 数显手持折光仪 日本 Atago 公司; CM-5 分光测色计 日本柯尼卡美能达公司; SHZ-B 恒温摇床水浴锅 上海博讯实业有限公司; Agilent 1260 液相色谱系统 美国安捷伦科技有限公司; KQ-500E 超声波清洗器 昆山市超声仪器有限公司; CKX41 光学显微镜 日本奥林巴斯株式会社。

1.2 实验方法

1.2.1 全果肉赣南脐橙浆的制备 赣南脐橙经过去皮、切块后, 赣南脐橙果肉与水以 1:1(w/w)的比例加入湿法前粉碎机, 初步粉碎后的料液加入高压射流磨, 调节高压射流磨的压力为 60、90、120 MPa, 制备不同压力下的全果肉赣南脐橙浆分别命名为 ISMS-60、ISMS-90、ISMS-120, 未经高压射流磨处理的全果肉赣南脐橙浆为对照组, 命名为 ISMS-0。全果肉赣南脐橙浆于 4 ℃ 储存用于后期实验。

1.2.2 粒径测定 根据牛晓琴^[16]的方法, 采用激光衍射粒度分析仪对全果肉赣南脐橙浆粒径进行分析, 测定参数: 颗粒折射率 1.52, 颗粒吸收率 0.1, 分散剂为去离子水。记录样品的 $D_{[4,3]}$ 、 $D_{[3,2]}$ 、 D_{10} 、 D_{50} 、

D_{90} 值。

1.2.3 流变特性 根据刘嘉宁^[17]的方法, 采用流变仪测定全果肉赣南脐橙浆的流变特性, 测定样品的黏度。使用同心圆筒探头, 向同心圆柱筒中加入 16 mL 样品, 在 25 ℃ 条件下, 测定剪切速率从 0.1 s⁻¹ 到 100 s⁻¹ 时的黏度变化。绘制表观黏度曲线, 并使用 Herschel-Bulkley 方程(式(1))来拟合流变曲线。

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \gamma^n \quad \text{式(1)}$$

式中, τ 为剪切应力, Pa; τ_0 为屈服应力, Pa; K 为稠度系数, Pa·s; γ 为剪切速率, s⁻¹; n 为流动特性指数。

1.2.4 微观形貌 根据 Wellala 等^[18]的方法, 通过 CKX41 光学显微镜观察全果肉赣南脐橙浆的微观形貌。用吸管吸取 1 滴橙浆于载玻片上, 以 45° 的交叉角用盖玻片交叉覆盖, 放置于光学显微镜下以 10 倍的目镜和 10 倍的物镜进行观察。

1.2.5 不稳定指数 根据 Ma 等^[19]的方法, 采用 LUMiFuge 稳定性分析仪测定全果肉赣南脐橙浆的物理稳定性, 通过不稳定指数比较不同样品的稳定性。测定参数: 温度 25 ℃, 离心速度 3000 r/min, 每 10 s 扫描 1 次, 共扫描 300 次。

1.2.6 沉淀重量比 根据 Anese 等^[20]的方法测定样品的沉淀重量比。量取 8 mL 的全果肉赣南脐橙浆, 于 4800 r/min 下离心 15 min。根据式(2)计算沉淀重量比 P(%):

$$P = \frac{W_p}{W_m} \times 100 \quad \text{式(2)}$$

式中, W_p 和 W_m 分别是沉淀物重量和全果肉赣南脐橙浆重量(g)。

1.2.7 色差 采用 CM-5 分光测色计对样品的色度值进行测定, 记录亮度 L^* 值、红绿度 a^* 值和黄蓝度 b^* 值, 并根据式(3)、(4)、(5)计算总色差 ΔE 、色彩饱和度 C^* 和色度值 h^* 。

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad \text{式(3)}$$

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad \text{式(4)}$$

$$h^* = \arctan \frac{b^*}{a^*} \quad \text{式(5)}$$

1.2.8 pH 和可溶性固形物 使用 pH 计测定全果肉赣南脐橙浆的 pH, 并使用手持折光仪测定全果肉赣南脐橙浆可溶性固形物含量。

1.2.9 总维生素 C 含量测定 根据黄世安等^[21], 称取 20.0 mL 样品于离心管中, 加入 20 mL 50 g/L 三氯乙酸(TCA)溶液, 在冰浴条件下, 60 Hz 超声 10 min, 4 ℃ 下 8000 r/min 离心 15 min, 将上清液转到 100 mL 容量瓶中, 重复三次, 将三次所分离的上清液合并, 并用 50 g/L TCA 溶液定容至刻度。取 1.0 mL 样品提取液于试管中, 加入 1.0 mL 50 g/L TCA 溶液, 1 mL 无水乙醇, 0.5 mL 0.4% 磷酸-乙醇, 1 mL 5 g/L BP-乙醇溶液, 0.5 mL 0.3 g/L FeCl₃-乙醇溶液, 30 ℃ 水浴 60 min, 置于 534 nm 处测量并记录吸光度值。以抗坏血酸溶液浓度为 X 轴, 吸光度值为 Y 轴, 制作标准曲线, 测得线性方程为 $Y=0.0332X-0.0109(R^2=0.999)$, 再根据式(6)计算出抗坏血酸含量 P(mg/100 g):

$$P = \frac{V \times m_1}{V_s \times m \times 1000} \times 100 \quad \text{式(6)}$$

式中, m_1 为由标准曲线求得的抗坏血酸的质量(μg); V_s 为所用滴定时样品提取液体积(mL); V 为样品提取液总体积(mL); m 为样品质量(g)。

1.2.10 总类胡萝卜素含量测定 根据 Bamidele 等^[22] 描述的方法, 称取 2 mL 全果肉赣南脐橙浆, 加 5 mL 提取溶剂(正己烷/丙酮/甲醇, 2:1:1, v/v/v), 避光磁力搅拌 10 min, 在 4 ℃ 下 4000 r/min 离心 5 min, 收集上清液, 重复 5 次合并提取液。然后收集有机相, 并用正己烷定容到 25 mL。采用分光光度计于 450 nm 处测定吸光度, 正己烷作为空白对照, 整个操作过程在避光条件下进行。总类胡萝卜素含量 X($\mu\text{g/mL}$)根据式(7)计算:

$$X = \frac{10^4 \times A_{450} \times V}{E\beta \times V_0} \quad \text{式(7)}$$

式中: A_{450} 为 450 nm 处测得的吸光度值, V_0 为加入样品的体积(mL), $E\beta$ 为 β -胡萝卜素在正己烷中的消光系数 2560, V 为提取液定容的总体积(mL)。

1.2.11 柠檬苦素含量测定 参考李一兵^[23] 的方法进行改进, 利用超声波辅助提取橙汁中的柠檬苦素, 使用二氯甲烷作为萃取剂, 将待提取橙汁和二氯甲烷以体积比 1:1(该试验橙汁和二氯甲烷均取 20 mL)加入 50 mL 带盖离心管中, 涡旋振荡后, 室温下 60 Hz 超声提取 40 min, 后于 3000 r/min 的转速离心 10 min, 分离出下层清液, 剩余成分再加入二氯甲烷重复提取 1 次。将 2 次得到的下层清液合并, 使用旋转蒸发仪以 60 ℃ 蒸干后, 加入 1.5 mL 乙腈溶解, 并过 0.22 μm 有机滤膜, 置于 HPLC 进样瓶中待测。使用 HPLC 同时检测柠檬苦素进行检测, 该试验设定参数如下:

色谱柱: Agilent ZORBAX SB-C₁₈(4.6×250 mm,

5 μm); 检测波长 210 nm; 进样量 10 μL ; 柱温 35 ℃; 流动相: 乙腈-0.1% 磷酸水(55:45, v:v), 以流速 1 mL/min 等度洗脱 10 min。

1.2.12 柚皮苷含量测定 采用改良 Davis 分光光度法测柚皮苷含量^[24]。将适量的柚皮苷标准品在 110 ℃ 下干燥至恒重, 准确称取 20.00 mg, 用 50% 乙醇溶解并定容至 100 mL, 得到柚皮苷标准溶液。用蒸馏水将柚皮苷标准溶液分别配制成 40、80、120、160、200 mg/L 的标准溶液。在标准溶液中分别加入 5.0 mL 二甘醇和 0.5 mL 1 mol/L 氢氧化钠溶液, 摇匀后, 放置于 30 ℃ 恒温水浴保温显色 30 min, 测定 430 nm 处的吸光度。以蒸馏水作为空白对照校正测定数据。以柚皮苷浓度为 X 轴, 吸光度值为 Y 轴, 制作标准曲线, 测得线性方程为 $Y=0.0039X-0.0017(R^2=0.999)$ 。

吸取果汁 5 mL, 添加无水乙醇 5 mL, 摇匀, 离心。离心后取上清液 2 mL, 添加 2 mL 的 50% 乙醇成为待测液。准确吸取待测液 0.5 mL 于比色试管, 加入上述同样显色试剂, 显色后, 测定 430 nm 处的吸光度。根据式(8)计算出柚皮苷含量 M(mg/L):

$$M = \frac{C \times V}{V_1} \quad \text{式(8)}$$

式中, C 为由标准曲线得到的柚皮苷浓度(mg/L), V 为待测液总体积(mL), V_1 为离心后取上清液体积(mL)。

1.3 数据处理

以上所有实验重复三次。采用 SPSS 25.0 对实验数据进行处理, 通过邓肯检验($P<0.05$ 认为具有统计学显著性)分析结果, 并表示为平均值±标准偏差, 使用 Origin 2021 对实验数据进行作图。

2 结果与分析

2.1 ISMS 不同处理压力对全果肉赣南脐橙浆粒径及粒径分布的影响

果浆的粒径大小分布对消费者的口感偏好度有较大影响, 也影响产品的物理稳定性及流变学性质等^[25]。表 1 列出了 ISMS 不同处理压力下全果肉赣南脐橙浆的粒径 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 、 $D_{[4,3]}$ 和 $D_{[3,2]}$ 。结果表明, 随着处理压力的增大, 粒径显著减小($P<0.05$)。当压力增加到 120 MPa 时, $D_{[3,2]}$ 从 59.77 μm 减少到 26.47 μm , $D_{[4,3]}$ 从 128.33 μm 减少到 47.90 μm , D_{10} 从 28.80 μm 减小到 13.80 μm , D_{50} 从 105.00 μm 减小到 40.43 μm , D_{90} 从 262.00 μm 减小到 94.20 μm 。 $D_{[4,3]}$ 是体积平均粒径值, 受较大颗粒影响较大, 而 $D_{[3,2]}$ 是表面积平均粒径值, 少量的大颗粒对其影响不大。在 ISMS 处理过程中较小的碎片比更大的碎片或整个细胞更难破碎^[26]。结果表明 ISMS 具有较好的粉碎效果, 对大颗粒的粉碎效果要显著优于小颗粒, 因此推断 ISMS 处理过程中会优先粉碎粒径较大的颗粒。

表 1 不同 ISMS 处理压力对全果肉赣南脐橙浆粒径的影响

Table 1 Effect of different ISMS processing pressures on the particle size of whole-flesh Gannan navel orange pulp

样品	$D_{[3,2]}$ (μm)	$D_{[4,3]}$ (μm)	D_{10} (μm)	D_{50} (μm)	D_{90} (μm)
ISMS-0	59.77 ± 0.65^a	128.33 ± 0.58^a	28.80 ± 0.10^a	105.00 ± 0.00^a	262.00 ± 1.73^a
ISMS-60	33.67 ± 0.12^b	62.70 ± 0.26^b	18.03 ± 0.06^b	51.93 ± 0.06^b	119.33 ± 0.58^b
ISMS-90	28.73 ± 0.06^c	52.83 ± 0.06^c	15.20 ± 0.00^c	44.30 ± 0.10^c	104.00 ± 0.00^c
ISMS-120	26.47 ± 0.12^d	47.90 ± 0.10^d	13.80 ± 0.00^d	40.43 ± 0.06^d	94.20 ± 0.40^d

注: 同一列不同的字母表示不同样品具有显著性差异($P < 0.05$), 表2、表3同。

ISMS 处理对全果肉赣南脐橙浆粒径分布的影响如图 2 所示。所有样品的粒径分布均为单峰, 表现较为集中。经 ISMS 处理后, 峰发生左移, 小颗粒组分的体积比增加, 表明更多的大颗粒被粉碎成小颗粒。粒径分布变得更窄, 表明颗粒变得更加均一。未经 ISMS 处理的样品, 粒径分布主要在 $100 \sim 1000 \mu\text{m}$ 之间, 说明仍有一些细胞及片段存在^[11]。经 ISMS 处理后, 全果肉赣南脐橙浆的粒径分布主要在 $0 \sim 100 \mu\text{m}$, 低于植物细胞的一般直径(约 $100 \mu\text{m}$)^[27], 说明细胞可能发生破裂, 导致细胞内容物的释放, 进而提高内容物的得率。

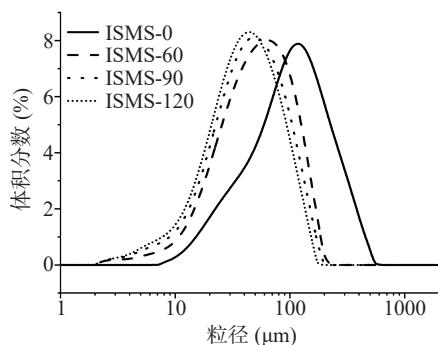


图 2 不同 ISMS 处理压力对全果肉赣南脐橙浆粒径分布的影响

Fig.2 Effect of different ISMS processing pressures on particle size distribution of whole-flesh Gannan navel orange pulp

2.2 ISMS 不同处理压力对全果肉赣南脐橙浆流变学特性的影响

食品的流变学特性是表征其感官品质的重要参数, 在果蔬汁/浆的加工工艺优化方面具有重要的理论指导作用, 适当的黏度可以给果汁提供更丰富、饱满的口感^[26]。ISMS 处理后全果肉赣南脐橙浆的表观黏度与剪切速率关系如图 3 所示。表 2 计算了全果肉赣南脐橙浆的屈服应力(τ_0)、稠度系数(K)和流动性指数(n), 模型的回归系数($R^2=0.999$)。由图 3 可知, 所有样品的表观黏度随着剪切速率的增加而降低, 呈现剪切稀化现象($0 < n < 1$), 说明全果肉赣南脐橙浆具有假塑性流体的特征^[26]。在相同剪切速率下, 随着 ISMS 的处理压力升高, 全果肉赣南脐橙浆的表观黏度逐渐升高(K 值增加), 在 120 MPa 时黏度最大(K 值为 0.165)。根据表 2 可知, 样品经 ISMS 处理后, n 值减小而 K 值增加, 说明随着压力的升高, 剪切稀化程度增加, 样品黏度增加, 即全果肉

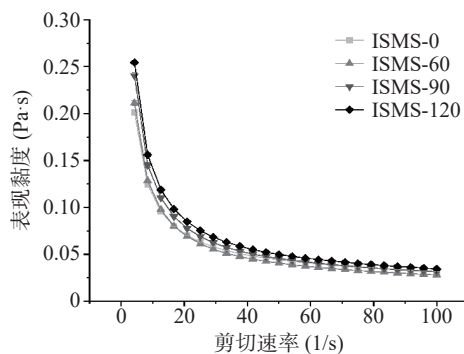


图 3 不同 ISMS 处理压力对全果肉赣南脐橙浆表观黏度的影响

Fig.3 Effect of different ISMS processing pressures on the apparent viscosity of whole-flesh Gannan navel orange pulp

表 2 不同 ISMS 处理压力对全果肉赣南脐橙浆的 Herschel-Bulkley 模型拟合参数

Table 2 Herschel-Bulkley model fitting parameters of different ISMS processing pressures on whole-flesh Gannan navel orange pulp

样品	τ_0 (Pa)	K (Pa·s)	n	R^2
ISMS-0	0.528 ± 0.014^c	0.126 ± 0.005^b	0.662 ± 0.006^a	0.999
ISMS-60	0.598 ± 0.015^b	0.129 ± 0.004^b	0.615 ± 0.005^{bc}	0.999
ISMS-90	0.709 ± 0.007^a	0.135 ± 0.012^b	0.628 ± 0.012^b	0.999
ISMS-120	0.706 ± 0.020^a	0.165 ± 0.000^a	0.610 ± 0.002^c	0.999

赣南脐橙浆样品随着 ISMS 处理压力的增加而更稠。其表观黏度升高的原因可能是因为 ISMS 处理导致细胞分裂和破碎, 不仅增加了悬浮颗粒的表面积^[25], 而且还将细胞壁成分和细胞内容物释放到果汁中, 并可能通过范德华力、静电力和水合力增强颗粒间的相互作用^[28], 进而导致表观黏度增加。

此外, 在一些研究中, 也发现均质处理增加了果汁的表观黏度, 如猕猴桃汁^[29], 而在番茄汁^[16]和芒果汁^[15]等发现了黏度降低的现象, 说明黏度变化现象可能不仅与果肉细胞破碎情况和粉碎均质压力有关。

2.3 ISMS 不同处理压力对全果肉赣南脐橙浆微观形貌的影响

不同 ISMS 处理压力对全果肉赣南脐橙浆微观形貌的影响如图 4 所示。ISMS-0 与其他经过 ISMS 处理的样品相比, 具有更完整的片段, 随着 ISMS 处理压力的升高, 果肉纤维片段逐渐变小且分散。这是因为 ISMS 处理时的高速剪切、强烈撞击、空化作

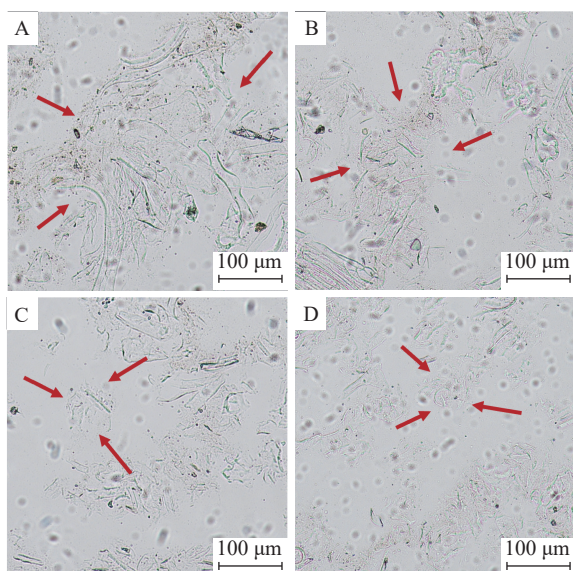


图 4 不同 ISMS 处理压力对全果肉赣南脐橙浆微观形貌的影响

Fig.4 Effect of different ISMS processing pressures on the micromorphology of whole-flesh Gannan navel orange pulp

注: A~D 分别为 ISMS-0、ISMS-60、ISMS-90、ISMS-120。

用、高能湍流和瞬时压降等剧烈机械作用,导致束状片段的破碎和分散^[11]。这与粒径结果相符,验证了 ISMS 处理可以有效细化和分散果肉颗粒,进而有效延缓颗粒沉降。Silva 等^[30]研究表明未经高压均质处理的菠萝浆有着较大的果肉颗粒,而经过高压均质处理后,果肉颗粒粒径显著减小,较小果肉颗粒数量增加。

2.4 ISMS 不同处理压力对全果肉赣南脐橙浆不稳定性指数的影响

果汁的稳定性会影响果汁的感官和销售,通过测定全果肉赣南脐橙浆的不稳定指数,评估全果肉赣南脐橙浆中颗粒的沉降,表征不同处理压力对全果肉赣南脐橙浆稳定性。不稳定指数是指离心结束后样品对光透过率的百分比,与稳定性呈负相关,不稳定指数越大,表明离心后的样品透过率越大,样品越不稳定^[31]。不同 ISMS 处理压力对全果肉赣南脐橙浆不稳定性指数的影响如图 5 所示,经过 ISMS 处理后,全果肉赣南脐橙浆的不稳定指数均显著降低 ($P<0.05$),而随着 ISMS 处理压力的升高,呈现出先下降后升高的趋势,在 90 MPa 下,不稳定指数最低,说明 90 MPa 时,全果肉赣南脐橙浆悬浮稳定性最好。有研究表明,颗粒沉降速率与颗粒大小、分散介质密度差成正比,这意味着颗粒越大,沉降速率大,且分散介质密度差越大,沉降速率越大^[32]。由图 5 可知,当压力在 0~90 MPa 时,经 ISMS 处理后的全果肉赣南脐橙浆中大量较大果肉颗粒转变成较小颗粒,颗粒间作用力加强,延缓了颗粒的沉降速率,因此橙浆悬浮稳定性提高,而当压力大于 90 MPa 时,橙浆中颗粒浓度会继续增加,颗粒介质密度持续增加^[32],导致分散介质密度差增大,颗粒沉降速率逐渐增加,

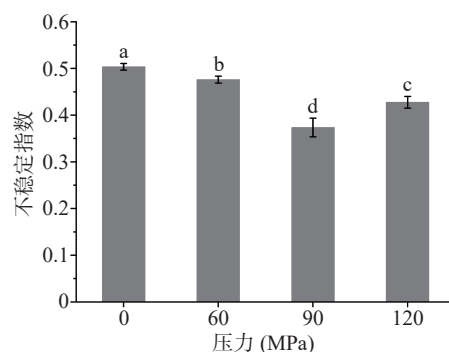


图 5 不同 ISMS 处理压力对全果肉赣南脐橙浆不稳定性指数的影响

Fig.5 Effect of different ISMS processing pressures on the instability index of whole-flesh Gannan navel orange pulp

注: 图中不同的字母表示不同样品具有显著性差异 ($P<0.05$); 图 6、图 8~图 10 同。

橙浆悬浮稳定性下降。

2.5 ISMS 不同处理压力对全果肉赣南脐橙浆沉淀重量比的影响

沉淀重量比是表示果蔬汁/浆物理稳定性的重要指标,也表示体系内大分子的持水能力^[33]。不同 ISMS 处理压力对全果肉赣南脐橙浆沉淀重量比的影响如图 6 所示。由图可知,随着压力从 0 MPa 增加至 90 MPa,样品的沉淀重量比从 40.80% 增加至 59.48%,并且在 90 MPa 时达到最高,随着压力继续增加至 120 MPa,沉淀重量比有所下降。有研究表明,经过高压均质处理后的橙浆含有大量粒径较小的果胶和不可溶性纤维,有助于提高橙浆的持水能力^[34]。随着 ISMS 处理压力的升高,粉碎增强了体系持水能力,导致橙浆悬浮稳定性增加,但 ISMS 处理压力到达一定程度后,可能导致部分果胶解聚,果胶的网络结构被破坏^[35],体系持水能力下降,从而造成悬浮稳定性下降。这一结果与不稳定性指数结果一致,即 ISMS 在 90 MPa 下处理的全果肉赣南脐橙浆稳定性最好。结合粒径、流变特性、不稳定性指数和沉淀重量比可推断出 ISMS 处理后脐橙浆稳定性的提高可能与粒径减小和表观黏度增大有关^[25]。

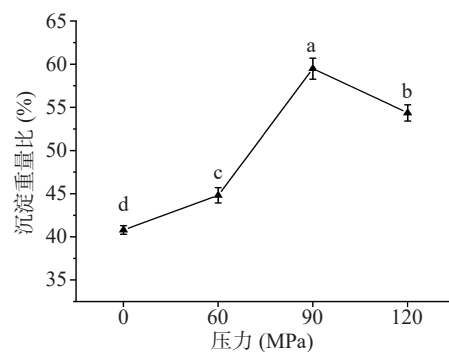


图 6 不同 ISMS 处理压力对全果肉赣南脐橙浆沉淀重量比的影响

Fig.6 Effect of different ISMS processing pressures on the weight ratio of precipitated whole-flesh Gannan navel orange pulp

表 3 不同 ISMS 处理压力对全果肉赣南脐橙浆色泽的影响

Table 3 Effect of different ISMS processing pressures on the color of whole-flesh Gannan navel orange pulp

样品	L^*	a^*	b^*	ΔE	h^*	C^*
ISMS-0	54.94±0.33 ^a	-5.58±0.06 ^a	17.06±0.57 ^a	—	17.95±0.53 ^a	-1.26±0.15 ^b
ISMS-60	55.07±0.12 ^a	-5.79±0.29 ^b	16.13±0.26 ^b	0.97±0.24 ^a	17.14±0.25 ^{ab}	-1.23±0.01 ^a
ISMS-90	55.23±0.12 ^a	-5.97±0.21 ^c	16.44±0.31 ^{ab}	0.81±0.19 ^a	17.49±0.29 ^{ab}	-1.22±0.01 ^a
ISMS-120	55.27±0.12 ^a	-6.06±0.04 ^d	16.35±0.29 ^{ab}	0.95±0.56 ^a	17.43±0.29 ^{ab}	-1.22±0.01 ^a

2.6 ISMS 不同处理压力对全果肉赣南脐橙浆色泽的影响

果蔬汁/浆的色泽是评价其品质好坏的重要指标,直接影响消费者的喜好度。不同 ISMS 处理压力对全果肉赣南脐橙浆色泽的影响如表 3 所示。 C^* 表示色调与具有相同亮度的灰色相比,两者间差异程度, C^* 越大,说明果蔬汁/浆的颜色强度越高,越鲜艳。用 ΔE 判断色泽差异是否明显, $\Delta E < 0.5$ 代表差异不明显, $0.5 < \Delta E < 1.5$ 代表差异轻微明显, $1.5 < \Delta E < 3$ 代表差异明显, $\Delta E > 3$ 代表差异肉眼可见^[36]。研究表明经过 ISMS 处理后,全果肉 L^* 、 ΔE 和 h^* 值无明显变化,而 a^* 显著下降($P < 0.05$), b^* 略微下降, C^* 值显著增加($P < 0.05$),表明产品的绿色增加,黄色略微减少,颜色更加饱和。 a^* 显著下降可能是因为赣南脐橙果皮细胞内的叶绿素经 ISMS 破碎释放到果汁当中,导致全果肉赣南脐橙浆的色泽轻微变绿^[8]。由图 7 可知,ISMS 处理对橙浆整体色泽影响不明显。 b^* 略微下降的可能由于 ISMS 处理使得橙浆中的酚类物质氧化降解^[14],引起黄色略微下降,而随着压力的增加,促进了酚类物质的释放,使得黄色恢复。总体来说,由于 $0.5 < \Delta E < 1.5$,说明颜色变化轻微明显,但不易通过肉眼辨别。

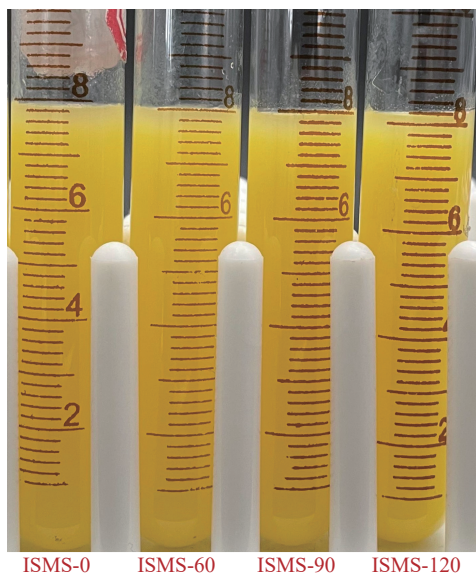


图 7 不同 ISMS 处理压力的全果肉赣南脐橙浆

Fig.7 Whole-flesh Gannan navel orange pulp under different ISMS processing pressures

2.7 ISMS 不同处理压力对全果肉赣南脐橙浆 pH 和可溶性固形物含量的影响

pH 影响橙浆的营养品质,而可溶性固形物含量

(Total soluble solids, TSS)影响着橙浆的风味和品质^[16]。不同 ISMS 处理压力对全果肉赣南脐橙浆 pH 和 TSS 含量的影响如表 4 所示,橙浆的 pH 在 3.91~3.94 之间。经过 ISMS 处理后,样品的 pH 没有显著变化,同 Abliz 等^[6] 研究结果类似,该研究用高压微射流处理沙棘汁,结果发现当高压微射流处理压力为 50 MPa 和 75 MPa 时,沙棘汁的 pH 与对照组区别不大。由表 4 可知,橙浆的 TSS 含量在 6.80~6.87 Brix°之间,不同 ISMS 压力处理橙浆不影响其 TSS 含量。有研究表明,经过高压均质处理后的番茄汁和胡萝卜、苹果及桃子的混合果汁的 TSS 含量同样无显著变化,可能是因为 TSS 主要与原料本身有关,而受加工方式的影响较小^[32,37-38]。

表 4 不同 ISMS 处理压力对全果肉赣南脐橙浆 pH 和 TSS 含量的影响

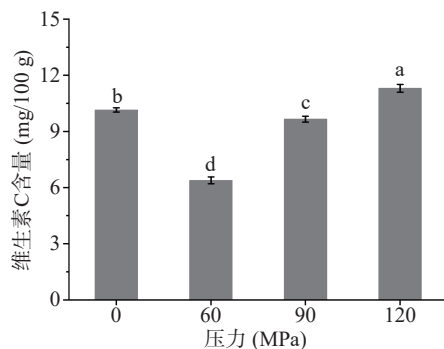
Table 4 Effects of different ISMS processing pressures on pH and TSS content of whole-flesh Gannan navel orange pulp

样品	ISMS-0	ISMS-60	ISMS-90	ISMS-120
pH	3.91±0.01 ^a	3.92±0.01 ^a	3.94±0.05 ^a	3.94±0.02 ^a
TSS(Brix°)	6.83±0.06 ^a	6.87±0.06 ^a	6.83±0.06 ^a	6.80±0.00 ^a

注:同一行不同的字母表示不同样品具有显著性差异($P < 0.05$)。

2.8 ISMS 不同处理压力对全果肉赣南脐橙浆维生素 C 含量的影响

V_C 因其分子结构中含连烯二醇结构,性质极不稳定。温度、湿度、压力、摩擦、微量元素、光和酸等都可对其产生影响^[39]。不同 ISMS 处理压力对全果肉赣南脐橙浆 V_C 含量的影响如图 8 所示。从图中可以看出,随着压力的升高, V_C 呈现先下降后升高的趋势,在 60 MPa 时达到最小值,而在 120 MPa 时达

图 8 不同 ISMS 处理压力对全果肉赣南脐橙浆 V_C 含量的影响Fig.8 Effect of different ISMS processing pressures on V_C content in whole-flesh Gannan navel orange pulp

到最高值。这可能由于当处理橙汁的压力较小时, ISMS 对 V_C 的释放小于对 V_C 的破坏,使得 V_C 含量下降,在 60 MPa 时达到最小值。随着压力的升高, ISMS 对 V_C 释放大于对 V_C 的破坏,导致其逐渐升高,且高于 ISMS-0,达到 11.30 mg/100 g,提高 11%。本团队前期研究表明, ISMS 处理后能够促进细胞中 V_C 的释放^[40],而空化效应能够去除溶解氧,防止抗坏血酸降解^[41]。

2.9 ISMS 不同处理压力对全果肉赣南脐橙浆总类胡萝卜素含量的影响

类胡萝卜素作为赣南脐橙重要营养物质,其含量受加工条件影响。不同 ISMS 处理压力对全果肉赣南脐橙浆总类胡萝卜素的影响如图 9 所示,随着 ISMS 处理压力的增大,总类胡萝卜素含量显著增加,从 11.21 $\mu\text{g/mL}$ 增加到 12.91 $\mu\text{g/mL}$,可能是由于 ISMS 处理压力的提高,更强大的机械作用使得果肉颗粒变小,引起细胞破裂,导致全果肉赣南脐橙浆中的类胡萝卜素从细胞结构中释放,这与牛晓琴^[16]的实验结果略有不同,其研究表明,在 ISMS 处理压力小于 90 MPa,总类胡萝卜素含量无明显变化,而当 ISMS 处理压力达到 90 MPa 时,总类胡萝卜素含量略有增加,说明 ISMS 对总类胡萝卜素的影响可能与水果的组分及其细胞结构有关。

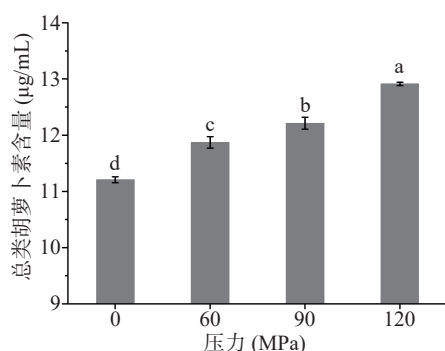


图 9 不同 ISMS 处理压力对全果肉赣南脐橙浆总类胡萝卜素含量的影响

Fig.9 Effect of different ISMS processing pressures on total carotenoid content of whole-flesh Gannan navel orange pulp

2.10 ISMS 不同处理压力对全果肉赣南脐橙浆柠檬苦素和柚皮苷含量的影响

柑橘类果实中苦味物质主要有柠檬苦素和柚皮苷,柠檬苦素是果实加工后产生的“延迟苦味”的主要原因^[42]。“延迟苦味”是指柑橘类果实鲜食无苦味,但经过榨汁、杀菌和冷藏等加工处理后而表现出苦味。不同 ISMS 处理压力对全果肉赣南脐橙浆柠檬苦素的影响如图 10A 所示,所有样品的柠檬苦素含量均高于 3.4 mg/L(柠檬苦素在果汁/浆中的苦味阈值)^[43],证实柠檬苦素是赣南脐橙中主要苦味物质之一。经过 ISMS 处理后的橙浆,柠檬苦素含量均小幅增加,从 13.86 mg/L 增加至 15.23 mg/L。这可能由于 ISMS 作为新型制浆设备,通过高速剪切、空化

效应等一系列作用细化橙汁,使柠檬苦素含量在处理过程中有所变化。随着 ISMS 处理压力的升高,射流磨粉碎效果加强,能够将果肉粒径减小至 100 μm 以下,引起更多的植物细胞破碎,而存在于细胞中中性或微碱性膜囊泡内部的柠檬苦素非苦味前体物质——柠檬苦酸 A 环内酯(Limonate A-ring lactone, LARL)释放遇到呈酸性的果汁,再经过柠檬苦素 D 环内酯水解酶, LARL 逐渐催化闭合形成柠檬苦素,导致柠檬苦素含量增加^[44]。

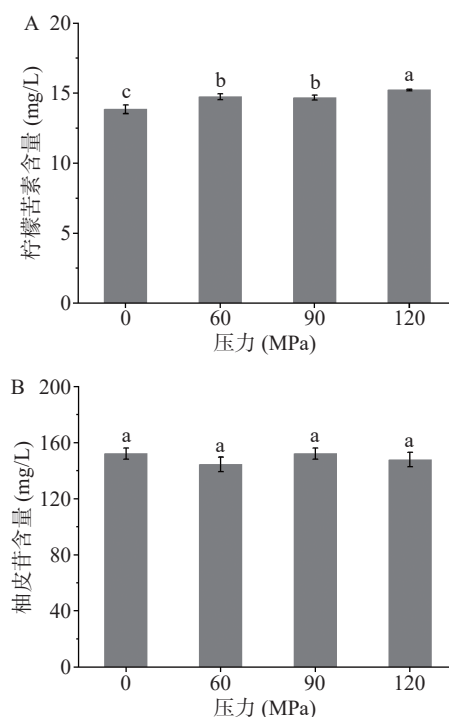


图 10 不同 ISMS 处理压力对全果肉赣南脐橙浆柠檬苦素(A)和柚皮苷(B)含量的影响

Fig.10 Effects of different ISMS processing pressures on limonin (A) and naringin (B) contents in whole-flesh Gannan navel orange pulp

柚皮苷含量不仅与赣南脐橙成熟度有关,随着果实成熟度增加而逐渐降低^[43],还有研究表明柚皮苷含量因加工方式的不同而改变^[45]。不同 ISMS 处理压力对全果肉赣南脐橙浆柚皮苷的影响如图 10B 所示。由图可知,经过射流磨处理后的橙浆,柚皮苷含量无明显变化,不受 ISMS 压力变化影响,可能由于随着 ISMS 处理压力的提高,不仅引起了更多植物细胞的破碎,促进了柚皮苷的释放, ISMS 中剧烈的机械作用及其热效应还可能导致柚皮苷降解,而两种效果保持相当,因此柚皮苷含量无显著变化^[45]。所有样品柚皮苷含量约为 147.95 mg/L,均显著高于 30 mg/L(柚皮苷在果汁/浆中的苦味阈值)^[46],证实柚皮苷也是赣南脐橙中主要苦味物质之一。苦味标志物的含量测定说明 ISMS 处理能够促进柠檬苦素产生,但不改变柚皮苷含量。

3 结论

采用工业级 ISMS 制备全果肉赣南脐橙浆,能实

现赣南脐橙果肉的超细化。ISMS 通过破坏组织和细胞结构显著减小了全果肉赣南脐橙浆的颗粒大小,粒径分布范围变得更窄,颗粒变得更小更均一。流变学性质表明 ISMS 处理使全果肉赣南脐橙浆的表现黏度增加。ISMS 处理后全果肉赣南脐橙浆的不稳定指数显著减小、沉淀重量比显著增加,在 90 MPa 下全果肉赣南脐橙浆达到最稳定的状态。稳定性的提高与粒径减小和表现黏度增大有关。此外,ISMS 对全果肉赣南脐橙浆的 pH 和 TSS 无明显影响,但颜色饱和度显著增加。随着 ISMS 处理压力的增大,全果肉赣南脐橙浆的 V_C 含量呈现先减小后增加的趋势,在 120 MPa 处理时最高。而随压力的增大,总类胡萝卜素含量显著增加。此外,ISMS 处理使柠檬苦素含量小幅增加,但对柚皮苷含量无明显影响。综上所述,ISMS 是具有一定潜力的制浆设备,可在工业水平上生产具有稳定性好、营养品质佳的全果肉赣南脐橙浆,为脐橙行业提供新型制浆途径。本研究探究了 ISMS 对全果肉赣南脐橙浆物理性质和营养品质的影响,而 ISMS 提高全果肉赣南脐橙浆稳定性机制和脐橙细胞破碎情况尚处于猜测阶段,仍需通过对全果肉赣南脐橙浆的果胶、蛋白质等大分子、内源酶以及细胞破碎情况的研究进行验证。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 郭慧,黄金秀.科技创新推动赣南脐橙产业升级的路径研究[J]. *农业技术与装备*, 2023(10): 127-130,133. [GUO Hui, HUANG Jinxiu. Research on the path of science and technology innovation drive the upgrading of gannan navel orange[J]. *Agricultural Technology & Equipment*, 2023(10): 127-130,133.]
- [2] MAMMA D, CHRISTAKOPOULOS P. Biotransformation of citrus by-products into value added products[J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2014, 5(4): 529-549.
- [3] DUNIERE L, SINDOU J, CHAUCHEYRAS-DURAND F, et al. Silage processing and strategies to prevent persistence of undesirable microorganisms[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2013, 182(1-4): 1-15.
- [4] 单杨.我国柑橘工业现状及发展趋势[J]. *农业工程技术(农产品加工业)*, 2014, 551(4): 13-17. [SHAN Yang. The current situation and development trend of citrus industry in China[J]. *Agriculture Engineering Technology(Agricultural Product Processing Industry)*, 2014, 551(4): 13-17.]
- [5] CHEN J, LIANG R H, LIU W, et al. Degradation of high-methoxyl pectin by dynamic high pressure microfluidization and its mechanism[J]. *Food Hydrocolloids*, 2012, 28(1): 121-129.
- [6] ABLIZ A, LIU J, MAO L, et al. Effect of dynamic high pressure microfluidization treatment on physical stability, microstructure and carotenoids release of sea buckthorn juice[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 135(1): 110277.
- [7] WANG X, WANG S, WANG W, 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.
- [8] WANG X Y, WU S H, ZONG W. Comparison of the influence of dynamic high-pressure microfluidization and conventional homogenization on the quality of kiwi fruit juice[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2018, 34(6): 1039-1045.
- [9] 赵光远,陈美丽,许艳华,等.超高压微射流对石榴汁微生物及抗氧化活性的研究[J]. *食品科技*, 2017, 42(2): 89-93. [ZHAO Guangyuan, CHEN Meili, XU Yanhua, et al. Effects of ultra-high pressure microfluidization treatment on antioxidant activity and microorganism of pomegranate juice[J]. *Food Science and Technology*, 2017, 42(2): 89-93.]
- [10] 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.
- [11] LI Y T, CHEN M S, DENG L Z, et al. Whole soybean milk produced by a novel industry-scale microfluidizer system without soaking and filtering[J]. *Journal of Food Engineering*, 2020, 291(4): 110228.
- [12] GUO X, MCCLEMENTS D J, CHEN J, et al. The nutritional and physicochemical properties of whole corn slurry prepared by a novel industry-scale microfluidizer system[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 144: 111096.
- [13] DAI T, MCCLEMENTS D J, NIU X, et al. Whole tomato juice produced by a novel industrial-scale microfluidizer: Effect on physical properties and *in vitro* lycopene bioaccessibility[J]. *Food Research International*, 2022, 159: 111608.
- [14] 董盼豪. 桑葚酚类物质研究及全组分果汁研发[D]. 南昌: 南昌大学, 2021. [DONG Panhao. Study on phenolic compounds of mulberry fruit and whole-component juice development[D]. Nanchang: Nanchang University, 2021.]
- [15] KE Y, DAI T, XIAO M, et al. Industry-scale microfluidizer system produced whole mango juice: Effect on the physical properties, microstructure and pectin properties[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2022, 75: 102887.
- [16] 牛晓琴. 高压射流磨系统制备全果番茄饮料研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2021. [NIU Xiaoqin. Study on whole tomato beverage preparation by industry-scale microfluidizer system[D]. Nanchang: Nanchang University, 2021.]
- [17] 刘嘉宁. 高压均质对胡萝卜汁物化特性和类胡萝卜素生物有效性的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018. [LIU Jianing. Effects of high pressure homogenization on physico-chemical properties and carotenoid bioaccessibility of carrot juice[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2018.]
- [18] WELLALA C K D, BI J, LIU X, et al. Effect of high pressure homogenization on mixed juice stability, rheology, physicochemical properties and microorganism reduction[J]. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 2020, 57(5): 1944-1953.
- [19] MA L, ZOU L, MCCLEMENTS D J, et al. One-step preparation of high internal phase emulsions using natural edible Pickering stabilizers: Gliadin nanoparticles/gum Arabic[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 100: 105381.
- [20] ANESE M, MIROLO G, BERALDO P, et al. Effect of ultrasound treatments of tomato pulp on microstructure and lycopene *in vitro* bioaccessibility[J]. *Food Chemistry*, 2013, 136(2): 458-463.
- [21] 黄世安,董晓庆,蔡明佳,等.褪黑素对采后‘蜂糖李’果实品质和生理特性的影响[J]. *北方园艺*, 2021, 489(18): 103-110. [HUAN Shian, DONG Xiaoqing, CAI Mingjia, et al. Effects of melatonin treatment on fruit quality and physiological characteristics

- tics of postharvest 'fengtang plum'[J]. *Northern Horticulture*, 2021, 489(18): 103–110.]
- [22] BAMIDELE O P, FASOGBON M B. Chemical and antioxidant properties of snake tomato (*Trichosanthes cucumerina*) juice and pineapple (*Ananas comosus*) juice blends and their changes during storage[J]. *Food Chemistry*, 2017, 220: 184–189.
- [23] 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 Yibin. Content changes of the limonoid and related gene expression analysis in juice of different citrus cultivars[D]. Chongqing: Southwest University, 2018.]
- [24] 徐慧珏. 两株乳酸菌对沙田柚汁的脱苦研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014. [XU Huiyu. Study of debittering effect of two strains of lactobacillus in Shatian pomelo juice[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.]
- [25] 杨颖, 丁胜华, 单杨, 等. 微粉碎工艺对赣南脐橙全果原浆粒径及流变特性的影响[J]. 中国食品学报, 2018, 18(11): 112–119. [YANG Yin, DING Shenghua, SHAN Yang, et al. Effects of micro-grinding process on particle size and rheological properties of whole fruit pulp of gannan navel orange[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2018, 18(11): 112–119.]
- [26] ZHOU L, GUAN Y, BI J, et al. Change of the rheological properties of mango juice by high pressure homogenization[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 82: 121–130.
- [27] 王俊一. 正仰视角生物显微平台的设计与试验[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2022. [WANG Junyi. Design and experiment of biomicro-imaging platform with forward and upward viewing angles[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2022.]
- [28] 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 Yaqin, JIA Meng, ZHANG Chen. Application of high-pressure homogenization technology in fruit juice processing[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(3): 265–273.]
- [29] PATRIGNANI F, MANNOZZI C, TAPPI S, et al. (Ultra) high pressure homogenization potential on the shelf-life and functionality of kiwifruit juice[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10: 246.
- [30] SILVA V M, KAWAZOE SATO A C, 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.
- [31] 田浩, 何志勇, 王召君, 等. 可溶性大豆多糖与果胶对酸化乳饮料的稳定机制对比[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(5): 66–73. [TIAN Hao, HE Zhiyong, WANG Zhaojun, et al. Comparison of stabilization mechanism of acidified milk beverage stabilized by soluble soybean polysaccharides and pectin[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2022, 41(5): 66–73.]
- [32] ZHU D, SHEN Y, WEI L, et al. Effect of particle size on the stability and flavor of cloudy apple juice[J]. *Food Chemistry*, 2020, 328: 126967.
- [33] COLLE I, VAN BUGGENHOUT S, VAN LOEY A, et al. High pressure homogenization followed by thermal processing of tomato pulp Influence on microstructure and lycopene *in vitro* bioaccessibility[J]. *Food Research International*, 2010, 43(8): 2193–2200.
- [34] VAN BUGGENHOUT S, WALLECAN J, CHRISTIAENS S, et al. Influence of high-pressure homogenization on functional properties of orange pulp[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2015, 30: 51–60.
- [35] YU W, CUI J, ZHAO S, et al. Effects of high-pressure homogenization on pectin structure and cloud stability of not-from-concentrate orange juice[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2021, 8: 647748.
- [36] PATHARE P B, OPARA U L, AL-SAID F A J. Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: A review[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2013, 6(1): 36–60.
- [37] YAN B, MARTINEZ-MONTEAGUDO S I, COOPERSTONE J L, et al. Impact of thermal and pressure-based technologies on carotenoid retention and quality attributes in tomato juice[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2017, 10(5): 808–818.
- [38] GAO R, YE F, WANG Y, et al. The spatial-temporal working pattern of cold ultrasound treatment in improving the sensory, nutritional and safe quality of unpasteurized raw tomato juice[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 56: 240–253.
- [39] 李傲, 李倩, 徐金龙, 等. 动态高压微射流对菠萝汁维生素C、总酚含量及其抗氧化性的影响[J]. 高压物理学报, 2013, 27(6): 936–941. [LI Ti, LI Qian, XU Jinlong, et al. Effects of dynamic high-pressure microfluidization treatment on vitamin c, the total polyphenol content and the antioxidant activity of pineapple juice[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2013, 27(6): 936–941.]
- [40] KE Y, CHEN J, DAI T, et al. Industry-scale microfluidizer: A novel technology to improve physiochemical qualities and volatile flavor of whole mango juice[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2022, 75: 102887.
- [41] CHENG L H, SOH C Y, LIEW S C, et al. Effects of sonication and carbonation on guava juice quality[J]. *Food Chemistry*, 2007, 104(4): 1396–1401.
- [42] MONTOYA C, GONZALEZ L, PULIDO S, et al. Identification and quantification of limonoid aglycones content of *Citrus* seeds[J]. *Revista Brasileira De Farmacognosia-Brazilian Journal of Pharmacognosy*, 2019, 29(6): 710–714.
- [43] 张娜威, 潘思轶, 范刚, 等. 柑橘果汁中的苦味物质及脱苦技术研究进展[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(1): 40–48. [ZHANG Nawei, PANG Siyi, FANG Gang, et al. Bitter substances and progress of debittering technology in citrus juice[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2021, 40(1): 40–48.]
- [44] MANNERS G D. Citrus limonoids: analysis, bioactivity, and biomedical prospects[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55(21): 8285–8294.
- [45] M'HIRI N, IOANNOU I, BOUDHRIOUA N M, et al. Effect of different operating conditions on the extraction of phenolic compounds in orange peel[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2015, 96: 161–170.
- [46] 夏辛珂, 张媛娥, 雷生姣, 等. 柚苷酶高产菌株选育及其产酶在蜜橘果汁脱苦中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(2): 226–232. [XIA Xinke, ZHANG Yuane, LEI Shengjiao, et al. Mutation of high naringinase producing strains and its application in debittering citrus juice[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(2): 226–232.]