

# 胶磨破碎和冷冻破碎对芒果浆品质的影响

王勋<sup>1</sup>, 顾玉梅<sup>2</sup>, 米生喜<sup>3</sup>, 赵强忠<sup>1,3\*</sup>

(1. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510640) (2. 广东省农业科学院农业质量标准与监测技术研究所, 广东广州 510640) (3. 广州现代产业技术研究院, 广东广州 511400)

**摘要:** 该研究以芒果为原料, 比较胶磨破碎和冷冻破碎对芒果浆品质的影响。研究发现: 两种破碎方式对芒果浆的水分、灰分、蛋白质、总酸、总糖、纤维含量无显著影响 ( $P>0.05$ )。胶磨破碎芒果浆的总酚含量、ABTS<sup>+</sup> 自由基清除能力分别为 27.42 mg GAE/100 g、9.04  $\mu\text{mol TE/g}$ , 冷冻破碎芒果浆分别为 31.18 mg GAE/100 g、9.75  $\mu\text{mol TE/g}$ , 说明冷冻破碎能够更好的保护芒果浆的抗氧化活性。胶磨破碎芒果浆粒径为 110.34  $\mu\text{m}$ , 冷冻破碎芒果浆粒径只有 59.49  $\mu\text{m}$ , 说明冷冻破碎芒果浆质地更加细腻, 分散程度有所提高。冷冻破碎芒果浆的  $L^*$  值、 $a^*$  值、 $b^*$  值均显著高于胶磨破碎果浆 ( $P<0.05$ ); 萜烯类化合物总量为 1 805.56  $\mu\text{g/L}$ , 明显高于胶磨破碎芒果浆的 416.96  $\mu\text{g/L}$ 。冷冻破碎芒果浆在芒果味、青草味、细腻度的感官评价指标评分更高, 具有更好的色泽、风味和食用品质。综上, 冷冻破碎芒果浆在抗氧化活性、微观结构、感官品质等方面更佳。冷冻破碎能够更好的保护芒果浆的品质, 可作为一种新型芒果浆加工技术。

**关键词:** 胶磨破碎; 冷冻破碎; 芒果浆; 品质

文章编号: 1673-9078(2024)05-171-180

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.5.0588

## Effects of Colloid Milling and Freeze Milling on the Quality of Mango Pulp

WANG Xun<sup>1</sup>, GU Yumei<sup>2</sup>, MI Shengxi<sup>3</sup>, ZHAO Qiangzhong<sup>1,3\*</sup>

(1. College of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China) (2. Institute of Quality Standard and Monitoring Technology for Agro-products of Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China) (3. Guangzhou Institute of Modern Industrial Technology, Guangzhou 511400, China)

**Abstract:** In this paper, the effects of colloid milling and freeze milling on the quality of mango pulp were compared. The study showed that there were no significance differences in moisture, ash, protein, total acid, total sugar, and fiber contents of mango pulp by the two milling methods ( $P>0.05$ ). The total phenolic content and ABTS scavenging ability of mango pulp prepared by colloid milling were 27.42 mg GAE/100 g and 9.04  $\mu\text{mol TE/g}$  respectively, while those of mango pulp prepared by freezing milling were 31.18 mg GAE/100 g and 9.75  $\mu\text{mol TE/g}$ , respectively. These results indicate that freezing milling could better protect the antioxidant activity of mango pulp. The average particle size of mango pulp prepared by colloid milling was 110.34  $\mu\text{m}$ , whereas that of pulp prepared by freeze milling was only 59.49  $\mu\text{m}$ ; thus the texture and dispersion properties of mango pulp prepared by freeze milling were improved. The  $L^*$ ,  $a^*$  and  $b^*$  values of mango pulp prepared by freeze milling were significantly higher than those of pulp prepared by colloid milling ( $P<0.05$ ). The total

引文格式:

王勋,顾玉梅,米生喜,等.胶磨破碎和冷冻破碎对芒果浆品质的影响[J].现代食品科技,2024,40(5):171-180.

WANG Xun, GU Yumei, MI Shengxi, et al. Effects of colloid milling and freeze milling on the quality of mango pulp [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(5): 171-180.

收稿日期: 2023-05-17

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (32072148); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (32101866)

作者简介: 王勋 (1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品生物技术, E-mail: wangxun13122162029@163.com

通讯作者: 赵强忠 (1976-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品生物技术、食品乳油体系, E-mail: qzzhao@scut.edu.cn

terpene compounds of mango pulp prepared by freeze milling was 1 805.56  $\mu\text{g/L}$ , significantly higher than the 416.96  $\mu\text{g/L}$  of pulp prepared by colloid milling. The sensory evaluation scores of mango flavor, grass flavor, and texture were higher, and mango pulp prepared by freeze milling had superior color, flavor, and eating quality. In summary, mango pulp prepared by freeze milling was better in terms of antioxidant activity, microstructure, and sensory qualities. Freeze milling can effectively preserve mango pulp quality and can be used as a new type of mango pulp processing technology.

**Key words:** colloid milling; freeze milling; mango pulp; quality

芒果属于热带、亚热带水果，原产于印度，我国广东、广西、福建和云南等省区均有种植，是一种典型的岭南特色水果。芒果果肉细腻，汁多味浓，酸甜适口，营养丰富，深受人们喜爱<sup>[1]</sup>。但新鲜芒果极易腐烂变质，品质下降，造成巨大的经济损失<sup>[2,3]</sup>，加工可以有效缓解芒果不易鲜储的难题，目前国内外产量最大的芒果深加工产品是芒果浆及浓缩果汁等。

目前，关于芒果打浆的研究主要采用胶磨破碎，流体或半流体物料通过定齿与转齿间隙，受到强大的剪切力，使物料得到有效破碎。胶磨破碎适用于较高粘度以及较大颗粒的物料，广泛应用于果浆、冰淇淋、乳制品等的加工。然而破碎产生的热量造成果浆风味物质、营养成分的损失，降低感官品质；同时果浆与氧气接触后易发生氧化褐变，影响果浆的色泽<sup>[4]</sup>。此外，芒果果肉中含有较多果胶、糖类，果肉粘结不易破碎。常温破碎时，温度的升高会引起果肉的软化，部分果肉粘结在破碎机腔体内，堵塞筛网和管道，导致破碎难以正常进行。

冷冻破碎是以液氮为冷媒，冷冻和破碎相结合的技术，食品原料在低温冻结状态下破碎成浆。近年来，冷冻破碎已应用于苹果、猕猴桃、胡萝卜、辣椒等果蔬的加工中，并对冷冻破碎制备的各类果浆进行了相关研究<sup>[5]</sup>。冷冻破碎时，物料处于低温环境，能够消除温度升高引起的品质劣变；此外，液氮的排氧作用能避免物料与空气接触，避免发生氧化反应和酶促褐变。低温条件下，糖、纤维等不易破碎的组分硬度及脆性增加，破碎程度明显提高，破碎后产品更加细腻、均匀。

本研究以新鲜芒果果肉为原料，分别采用胶磨破碎、冷冻破碎打浆处理，探究两种破碎方式对芒果浆的营养成分、抗氧化能力、微观结构、感官品质方面的影响，以期冷冻破碎技术在芒果浆中的应用提供理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

供试的芒果：成熟度七八成、品种为台农，13~15  $^{\circ}\text{C}$ 冷链运至实验室，立高食品股份有限公司提供。主要试剂为2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐 (ABTS)、6-羟基-2,5,7,8-四甲基色烷-2-羧酸 (Trolox)、2-辛醇，购自 Sigma (上海) 有限公司，其他试剂均为国产分析纯。

### 1.2 仪器与设备

JMS-130B 胶体磨，廊坊通用机械制造有限公司；冷冻破碎机，广东省亚热带水果深加工工程（中试）研发中心自行研制；UV754N 紫外可见分光光度计，上海佑科仪器仪表有限公司；Varioskan Flash 酶标仪，美国 Thermo 公司；MD-130 光学显微镜，奥林巴斯中国有限公司；Masterisizer 2000 激光粒度分析仪，英国 Malvern 公司；ALPHA 2-4LD plus 冷冻干燥机，德国 Christ 公司；S3400N 扫描电子显微镜，日本 Hitachi 公司；Q20 差示量热扫描仪，TA 沃特世科技（上海）有限公司；CR-10 Plus 色差仪，日本 Konica Minolta 公司；Vortex1 涡旋振荡器，德国 IKA 公司；75  $\mu\text{m}$  CAR/PDMS 萃取纤维头，美国 Supelco 公司；DSQ II 气相色谱-质谱联用仪，美国 Thermo 公司；三合一自动进样器，澳大利亚 SGE 公司。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 芒果浆的制备

分别取 5 kg 新鲜芒果果肉，制备出胶磨破碎芒果浆和冷冻破碎芒果浆，具体生产工艺流程如图 1 所示。胶体磨运行参数：电压 380 V；主轴转速 2 930 r/min，持续 1 min；电机功率 11 kW。冷冻破

碎机运行参数：电压 380 V；主轴转速 3 800 r/min，持续 1 min；电机功率 15 kW；通氮量 200~300 mL/100 g。

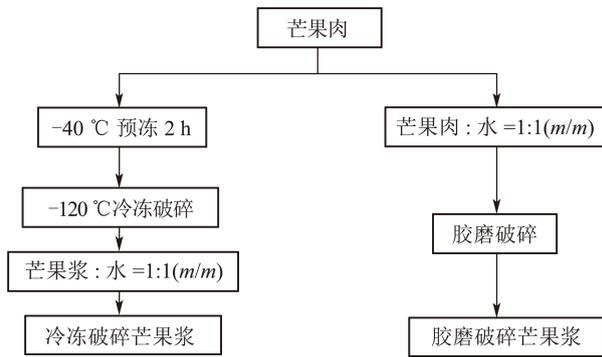


图 1 胶磨破碎和冷冻破碎制备芒果浆的生产工艺流程图  
Fig.1 The flow chart of the production process of colloidal milling and freezing milling to prepare mango pulp

### 1.3.2 芒果浆营养成分的测定

#### 1.3.2.1 芒果浆水分含量的测定

参考 GB/T 5009.3-2016 中直接干燥法测定芒果浆的水分含量。

#### 1.3.2.2 芒果浆灰分含量的测定

参考 GB/T 5009.4-2016 中高温灰化法测定芒果浆的总灰分含量。

#### 1.3.2.3 芒果浆蛋白质含量的测定

参考 GB/T 5009.5-2016 中凯氏定氮法测定芒果浆的粗蛋白质含量。

#### 1.3.2.4 芒果浆总酸含量的测定

参照 GB 12456-2021，根据酸碱中和原理，使用自动电位滴定仪进行测定。称取 5 g 芒果浆，加入去离子水至 80 g，混合均匀后仪器自动加入已标定的 0.1 mol/L 氢氧化钠溶液，滴定溶液 pH 值至 8.20，记录消耗氢氧化钠溶液体积。

#### 1.3.2.5 芒果浆总糖含量的测定

使用蒽酮比色法测定，称取 5 g 芒果浆置于试管，冷水浴中沿管壁缓缓加入硫酸-蒽酮溶液（按 0.2 g 蒽酮、1.0 g 硫酸、100 mL 浓硫酸比例配置），摇匀后沸水浴 10 min，取出冷却至室温，在 620 nm 波长下比色代入标准曲线计算总糖含量。

#### 1.3.2.6 芒果浆纤维含量的测定

参考韩篷慧等<sup>[6]</sup>的方法并稍作修改，称取 1 g 芒果浆放入直筒烧杯内，加 100 mL 中性洗涤剂、几滴十氢化萘、0.5 g 无水亚硫酸钠。磨口圆底烧瓶套上冷凝装置，置于电炉上沸腾后维持微沸 60 min。取出直筒烧杯，将溶液倒入已恒重的玻璃坩埚中进行抽滤，用沸水洗涤至滤液呈中性。经 20 mL 丙酮

冲洗两次后抽滤。玻璃坩埚放入 105 °C 烘箱中 2 h，再放入干燥器内冷却 30 min 后称重，直至恒重。

### 1.3.3 芒果浆抗氧化能力的测定

#### 1.3.3.1 芒果浆总酚含量的测定

采用福林-肖卡（Folin-Ciocalteu）法，取 1 mL 芒果浆与 3 mL 去离子水混合均匀，加入 0.25 mL Folin-Ciocalteu 试剂，随后加入 0.75 mL 质量分数为 20% 的碳酸钠溶液，定容至 6 mL，40 °C 孵育 2 h 后，立即在 760 nm 测定其吸光度。以没食子酸为标准品绘制标准曲线，计算总酚含量。

#### 1.3.3.2 芒果浆 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除能力的测定

参考 Zheng 等<sup>[7]</sup>的方法并稍作修改，将 7 mmol/L ABTS 溶液与 2.45 mmol/L 过硫酸钾等体积混合，室温放置 12~16 h 制得 ABTS 储存液。将 ABTS 储存液稀释一定倍数配成工作液。将 50 μL 芒果浆分散液与 150 μL ABTS 工作液混合，30 °C 反应 30 min 后，于 734 nm 波长处测定吸光度。用去离子水样品作空白组，并用不同浓度 Trolox 溶液制作标准曲线。结果以 Trolox 当量表示。

### 1.3.4 芒果浆微观结构的测定

#### 1.3.4.1 芒果浆显微结构观察

将芒果浆混合均匀，胶头滴管吸取滴于载玻片中心，盖上盖玻片，用光学显微镜观察其微观结构（10×40 倍）。

#### 1.3.4.2 芒果浆粒径的测量

芒果浆用去离子水稀释。激光粒度分析仪的参数设定如下：分析模式为通用模式，进样器 Hydro 2000 MU(A)，颗粒折射率为 1.414，颗粒吸收率为 0.001，分散剂为水，分散剂折射率 1.330，泵的转速 2 500 r/min。体积平均直径  $d_{4,3}$  的计算公式如下：

$$d_{4,3} = \frac{\sum n_i d_i^4}{\sum n_i d_i^3} \quad (1)$$

式中：

$d_{4,3}$ ——体积平均直径，μm；

$n_i$ ——直径  $d_i$  颗粒的数量，无量纲；

$d_i$ ——颗粒的直径，μm。

#### 1.3.4.3 芒果浆微观形貌观察

冻干芒果浆粉末通过双面导电胶固定在圆形铝桩，洗耳球吹除多余粉末并喷金，放置于 5 kV 加速电场，用电子扫描显微镜放大 500 倍、1 000 倍观察粉末形态。

#### 1.3.4.4 芒果浆玻璃化转变温度的测定

使用差示扫描量热仪（DSC）测定。参考王双

双<sup>[8]</sup>的方法并稍作修改,称量 8~10 mg 芒果浆冻干粉密封在坩埚中,另备一空坩埚作为对照组置于载物架上。载气为高纯度氮气,流速为 50 mL/min。DSC 扫描程序为:以 10 °C/min 从室温降至 0 °C 冷却,保持 1 min,随后以 10 °C/min 从 0 °C 加热至 70 °C,扫描完成。

### 1.3.5 芒果浆感官品质的测定

#### 1.3.5.1 芒果浆色差的测定

使用色差仪,以标准白板为基准校正,测定芒果浆颜色的变化,记录读数。

#### 1.3.5.2 芒果浆风味物质的测定

2-辛醇不出现在芒果浆的香气成分中,出峰位置附件无干扰峰,是理想的内标物,因此以 2-辛醇作为内标物。

##### (1) HS-SPME 提取香气成分

参考尚朝杰<sup>[9]</sup>的方法并稍作修改。取 7 g 芒果浆加入 15 mL 顶空进样瓶中,加入 20  $\mu$ L 2-辛醇作为内标物,加盖、涡旋混合均匀。在 60 °C 平衡 20 min 后插入 CAR/PDMS 固相微萃取头,于 60 °C 萃取 40 min。将萃取头插入气质联用仪进样口,萃取头在 GC 进样口 250 °C 解析 3 min。两个芒果浆样品之间萃取头 270 °C 老化 10 min,防止芒果浆样品相互污染。

##### (2) GC-MS 测定方法

色谱条件:色谱柱为 DB-5MS 毛细色谱柱(30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25  $\mu$ m)进行分离;载气为高纯度氮气,流量 1 mL/min,不分流;进样温度为 250 °C,柱温 50 °C;升温条件:起始温度为 35 °C,保持 6 min,以 5 °C/min 升到 150 °C,保持 2 min,再以 8 °C/min 升至 250 °C,保持 3 min;质谱条件为 EI 电离原,电子能量 70 eV,倍增电压 350 V;接口温度 250 °C,离子源温度 250 °C,扫描范围 35~350 m/z。

#### 1.3.5.3 芒果浆感官评价

参考张微等<sup>[10]</sup>的方法,用定量描述分析法(QDA)对芒果浆进行感官评价。建立 QDA 感官描述语及其定义,见表 1。以新鲜芒果果肉为参考样,越接近参考样的感官特性得分越高,相对应的指标越好。感官评分标尺分为 9 个档次,见表 2。

### 1.3.6 数据处理

使用 Microsoft Excel 2019、Origin 2021 和 SPSS 22.0 软件对数据进行分析,采用 ANOVA 进行显著性差异分析( $P < 0.05$ ),结果表示为“平均值 $\pm$ 标准差”。采用 NIST 谱库对挥发性物质进行定性及定量分析。

表 1 胶磨破碎及冷冻破碎制备芒果浆的感官评价表

Table 1 Sensory evaluation table of mango pulp prepared by colloid milling and freezing milling

项目	品质特征
芒果味	芒果味,具有低碳酯的味觉
新鲜感	清爽的、新鲜采摘的感觉
青草味	刚割下的嫩草所具有的绿叶的感觉
皮味	强烈、略苦柑橘皮的高脂肪和蜡质所具有的特性
甜味	糖或蜜的滋味
酸味	柠檬的滋味
涩味	茶、酒的丹宁酸引起的感觉,类似咀嚼葡萄柚、石榴或喝红酒的感觉
细腻度	细腻、顺滑

表 2 芒果浆感官评分标尺

Table 2 Sensory scale of mango pulp

评分	强度
3.0	极弱
3.5	很弱
4.0	较弱
4.5	稍弱
5.0	中等
5.5	稍强
6.0	较强
6.5	很强
7.0	极强

## 2 结果与讨论

### 2.1 破碎方式对芒果浆营养成分的影响

胶磨破碎和冷冻破碎制备芒果浆的基本营养成分如图 2 所示,两种破碎方式制备的芒果浆水分、灰分、蛋白质、总酸、总糖、纤维含量无显著差异( $P > 0.05$ )。芒果浆中水分含量最高,为 89.32%~89.33%,折算成果肉水分含量为 78.64%~78.66%;灰分含量最低,仅 0.18%~0.19%,折算成果肉灰分含量为 0.36%~0.38%。芒果浆中总糖含量较高,达 8.99%~9.02%,折算成果肉总糖含量为 17.98%~18.04%,其他营养成分含量由高到低依次为:总酸、纤维、蛋白质。水分、灰分、蛋白质、总酸、总糖、纤维含量折算成果肉中的含量后,与郭艳东等<sup>[11]</sup>的研究结果相似,说明两种破碎方式对芒果浆的基本营养组成无显著性影响。

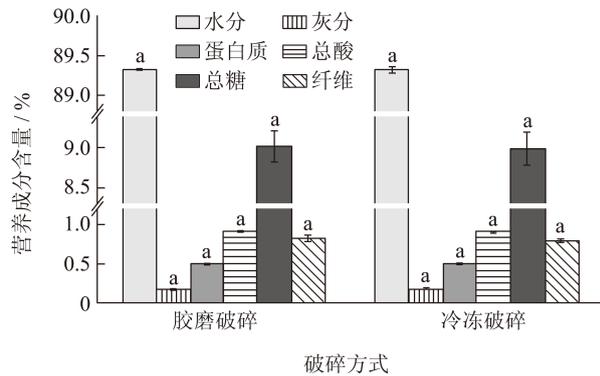


图2 胶磨破碎和冷冻破碎制备芒果浆的基本营养成分

Fig.2 The basic nutritional components of mango pulp prepared by colloid milling and freezing milling

注：同一指标中不同小写字母表示具有显著差异 ( $P < 0.05$ )。图3同。

## 2.2 破碎方式对芒果浆抗氧化能力的影响

酚类化合物广泛存在于植物体内，对水果风味及色泽有重要贡献，同时具有抗菌、抗氧化等生理活性<sup>[12,13]</sup>。胶磨破碎和冷冻破碎制备芒果浆的总酚含量如图3所示。冷冻破碎芒果浆的总酚含量较高，为31.18 mg GAE/100 g；胶磨破碎芒果浆的总酚含量低，也有27.42 mg GAE/100 g，折算为果肉总酚含量为54.84~62.36 mg GAE/100 g，与王贵一等<sup>[14]</sup>测定台农芒果果实总酚含量结果一致。冷冻破碎芒果浆的总酚含量比胶磨破碎芒果浆高13.71%，总酚含量的差异可能取决于破碎系统的温度及芒果浆与氧气接触时间，冷冻破碎低温、无氧环境能够降低芒果浆总酚的损失。Garcia-alonso等<sup>[15]</sup>发现了低温条件更有利于果汁酚类物质的保留。张丽娟等<sup>[16]</sup>的研究表明了受热会使酚类物质降解，并且酚类化合物在酶作用下形成的邻二酚化合物容易被氧化成醌类物质。

通过ABTS<sup>+</sup>自由基清除能力评估破碎方式对芒果浆抗氧化能力的影响，结果如图3所示。胶磨破碎芒果浆具有最低的ABTS<sup>+</sup>自由基清除能力，为9.04  $\mu\text{mol TE/g}$ ；冷冻破碎芒果浆ABTS<sup>+</sup>自由基清除能力最高，达9.75  $\mu\text{mol TE/g}$ ，比胶磨破碎芒果浆提高了7.85%。芒果浆的总酚含量与ABTS<sup>+</sup>自由基清除能力呈现正相关，相关系数为0.98 ( $P < 0.01$ )。Tommonaro等<sup>[17]</sup>的研究发现番茄低温破碎后能够保持较高的ABTS<sup>+</sup>自由基清除能力，而在高温破碎中由于抗氧化物质的损失，导致抗氧化能力明显降低。

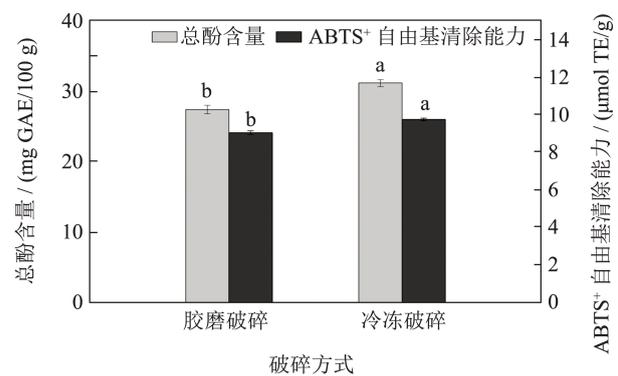


图3 胶磨破碎和冷冻破碎制备芒果浆的总酚含量及

ABTS<sup>+</sup> 自由基清除能力Fig.3 Total phenolics content and the ABTS<sup>+</sup> scavenging activity of mango pulp prepared by colloid milling and freezing milling

## 2.3 破碎方式对芒果浆微观结构的影响

### 2.3.1 芒果浆的显微结构和粒径

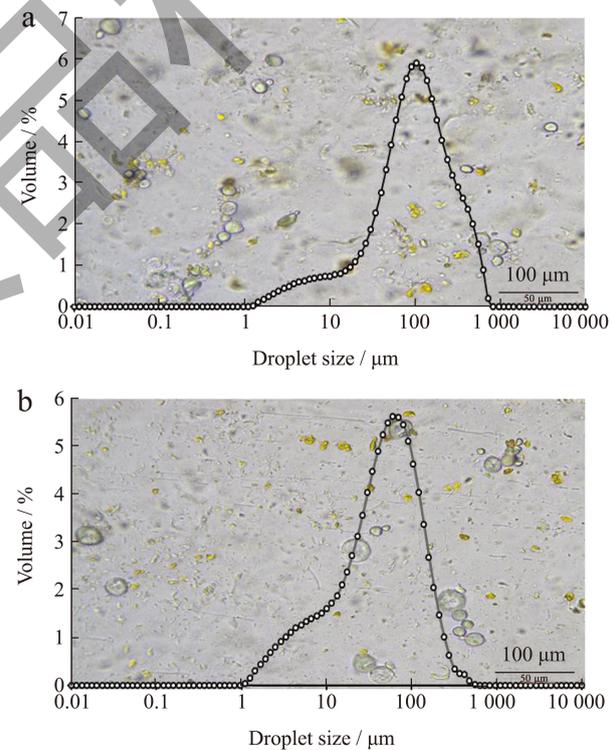


图4 胶磨破碎和冷冻破碎制备芒果浆的显微结构和粒径分布

Fig.4 Microstructure and particle size distribution of mango pulp prepared by colloid milling and freezing milling

注：a代表胶磨破碎制备的芒果浆，b代表冷冻破碎制备的芒果浆。下同。

胶磨破碎和冷冻破碎制备芒果浆的显微结构和粒径分布如图4所示。比较图4a、b可以发现，冷冻破碎芒果浆中大颗粒数量降低，小颗粒数量逐渐

增多, 颗粒粒径明显降低, 与 Kubo 等<sup>[18]</sup>高压均质处理番茄汁的微观结构变化类似。冷冻破碎芒果浆颗粒分布更加均匀, 果浆细腻性、分散性提高。粒径是评价果浆品质的重要指标之一, 胶磨破碎芒果浆的粒径最大, 为 110.34  $\mu\text{m}$ ; 而冷冻破碎芒果浆的粒径显著降低 ( $P < 0.05$ ), 只有 59.49  $\mu\text{m}$ 。相比胶磨破碎芒果浆, 冷冻破碎芒果浆的粒径降低了 46.08%, 与显微观察结果一致。芒果浆显微结构及粒径的变化, 说明冷冻破碎强度更高, 破碎效果好, 制备的芒果浆粒径更小。

芒果果肉含糖量高, 胶磨破碎容易导致胶体磨粘结、堵塞, 降低破碎效果。冷冻破碎时, 机器内温度降低至果肉的脆化温度以下, 导致果肉冻结, 并且内部不均匀收缩, 产生微裂纹, 组织结合力下降。破碎作用力造成内部裂纹迅速扩大, 制备的果浆粒径更小, 质地更细腻。Saxena 等<sup>[19]</sup>发现了随着破碎温度的升高, 孜然颗粒越粗, 而在  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  下破碎能够获得更小粒径的孜然颗粒。

### 2.3.2 芒果浆的微观形貌

通过 SEM 观察芒果浆的微观结构, 胶磨破碎和冷冻破碎制备的芒果浆冻干后分别放大 500 倍和 1 000 倍的微观形貌如图 5 所示。胶磨破碎芒果浆为光滑的片状结构, 而冷冻破碎芒果浆则呈现粗糙的骨架结构。造成这一现象的可能原因是: 冷冻破碎的强度高于胶磨破碎。随着破碎强度的增加, 果浆中长链纤维被打断, 变成短链纤维均匀地分散在芒果浆中, 冷冻干燥时果糖吸附的纤维数量更多, 而呈现纤维骨架结构<sup>[20]</sup>。值得注意的是, 无论是胶磨破碎芒果浆, 还是冷冻破碎芒果浆的微观形貌, 均观察不到独立、分散的颗粒, 而呈现大块片状或骨架状结构, 宏观表现为粘结成块, 可能原因是: 芒果浆中总糖含量高, 纤维含量低, 干燥时果糖吸附的纤维数量少, 容易团聚在纤维表面, 粘连成块<sup>[20]</sup>。

### 2.3.3 芒果浆的玻璃化转变温度

玻璃化转变温度是指无定形材料由“玻璃态”向“橡胶态”转变时的温度, 当玻璃化转变温度低于环境温度时, 芒果浆中分子扩散速率小, 内部不易发生理化反应, 保质期得以延长。玻璃化转变在评价物料的稳定性和衡量产品货架期方面具有重要作用。

图 6 为胶磨破碎和冷冻破碎制备芒果浆的 DSC 曲线, DSC 热图上热流变化的台阶即为玻璃化转变,

对应的温度为玻璃化转变温度。可以发现胶磨破碎及冷冻破碎芒果浆均发生了玻璃化转变, 对应的玻璃化转变温度为 14.38、14.97  $^{\circ}\text{C}$ , 冷冻破碎芒果浆的玻璃化转变温度高于胶磨破碎芒果浆。芒果浆中总糖含量高, 主要以蔗糖、葡萄糖、果糖为主, 故玻璃化转变温度较低。杨忻瑞等<sup>[21]</sup>的研究表明低分子糖能够显著降低食品体系的玻璃化转变温度。

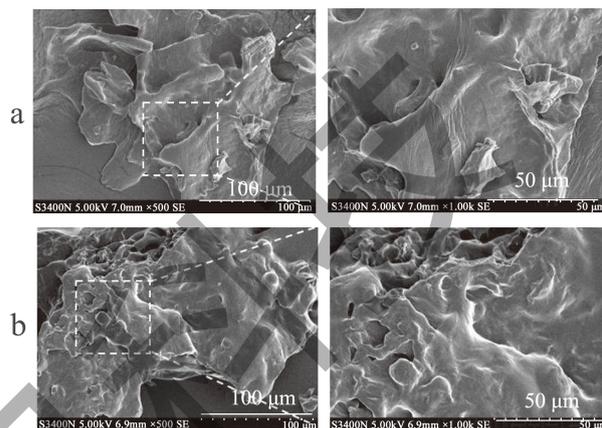


图 5 胶磨破碎和冷冻破碎制备芒果浆的微观形貌

Fig.5 Micromorphology of mango pulp prepared by colloid milling and freezing milling

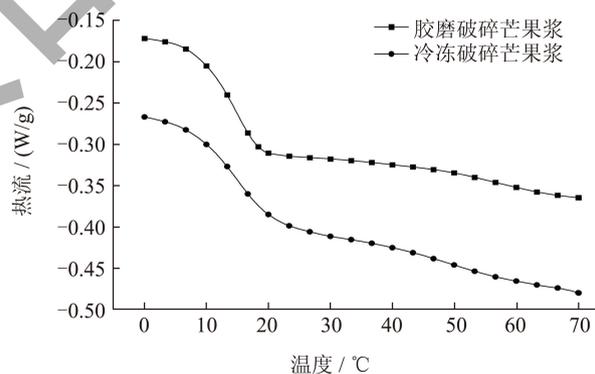


图 6 胶磨破碎和冷冻破碎制备芒果浆的 DSC 曲线

Fig.6 DSC curves of mango pulp prepared by colloid milling and freezing milling

## 2.4 破碎方式对芒果浆感官品质的影响

### 2.4.1 芒果浆的色差

色泽是芒果浆的感官指标之一, 根据芒果浆的外观颜色可以预判芒果浆的品质好坏, 也会直接影响消费者的喜好。胶磨破碎和冷冻破碎制备芒果浆的外观如图 7 所示, 色差值如表 3 所示。与胶磨破碎芒果浆相比, 冷冻破碎芒果浆颜色更加明亮, 更接近新鲜芒果的色泽;  $L^*$  值从 31.70 提高至 33.80,  $a^*$  值从 6.35 升高至 8.05,  $b^*$  值从 14.70 提高至

19.20, 分别提高了 6.62%、26.77%、30.61%。成熟芒果为橙黄色, 主要由类胡萝卜素构成, 包括萹菜黄素、 $\beta$ -胡萝卜素、叶黄素和番茄红素<sup>[22]</sup>。胶磨破碎芒果浆色泽不佳, 可能原因是: 破碎时温度升高及与氧气接触, 导致果浆中类胡萝卜素的降解。而在冷冻破碎时, 液氮快速汽化降低破碎温度, 同时排出机器内氧气, 避免果浆发生氧化反应和酶促褐变。Zepka 等<sup>[23]</sup>发现了高温是引起果汁中类胡萝卜素降解的主要原因。张霞等<sup>[24]</sup>的研究表明氮气环境及冷打浆可以降低梨浆的褐变率, 果浆更加接近鲜果色泽。

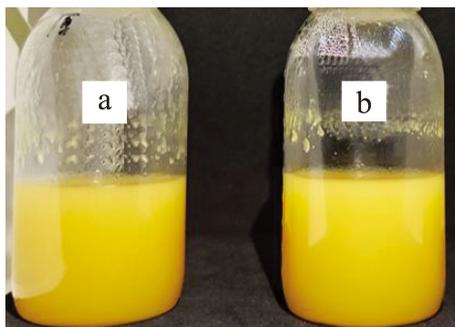


图7 胶磨破碎和冷冻破碎制备芒果浆的外观图

Fig.7 Appearance of mango pulp prepared by colloid milling and freezing milling

表3 胶磨破碎和冷冻破碎制备芒果浆的色差

Table 3 The color difference of mango pulp prepared by colloid milling and freezing milling

破碎方式	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta E$
胶磨破碎	$31.70 \pm 0.14^b$	$6.35 \pm 0.07^b$	$14.70 \pm 0.14^b$	$35.52 \pm 0.08^b$
冷冻破碎	$33.80 \pm 0.14^a$	$8.05 \pm 0.21^a$	$19.20 \pm 0.14^a$	$39.70 \pm 0.01^a$

注: 同列右肩不同小写字母表示具有显著差异 ( $P < 0.05$ )。  $L^*$  表示明亮度, 正数表示偏亮, 负数表示偏暗;  $a^*$  表示红绿值, 正数表示偏红, 负数表示偏绿;  $b^*$  表示黄蓝值, 正数表示偏黄, 负数表示偏蓝;  $\Delta E$  表示总色差。

$\Delta E$  可以判断两种芒果浆色泽是否存在明显差异, 当  $\Delta E < 0.5$  表示差异不明显, 当  $0.5 < \Delta E < 1.5$  表示差异轻微明显, 当  $1.5 < \Delta E < 3$  表示差异明显,  $\Delta E > 3$  表示差异明显可见<sup>[25]</sup>。冷冻破碎芒果浆与胶磨破碎芒果浆的  $\Delta E$  为 4.18, 说明两种破碎方式制备的果浆存在明显颜色差异, 冷冻破碎对芒果浆色泽的保护效果更好。

#### 2.4.2 芒果浆的风味物质

胶磨破碎和冷冻破碎制备芒果浆的挥发性香气

成分经计算机谱库 (NIST) 检索, 解谱得到芒果浆的主要香气成分及含量, 采用以 2-辛醇为内标的内标定量法进行计算。2 种芒果浆的 HS-SPME-GC-MS 总离子流图和解谱结果分别如图 8 和表 4 所示。表 4 为胶磨破碎和冷冻破碎制备芒果浆的主要挥发性成分及含量, 不同破碎方式制备的芒果浆主要香气成分相同, 但含量存在明显差异。共检测出 29 种香气成分, 其中: 萜烯类化合物 8 种, 酯类化合物 4 种, 醛类化合物 11 种, 酮类化合物 2 种, 醇类化合物 2 种, 羧酸类化合物 2 种。

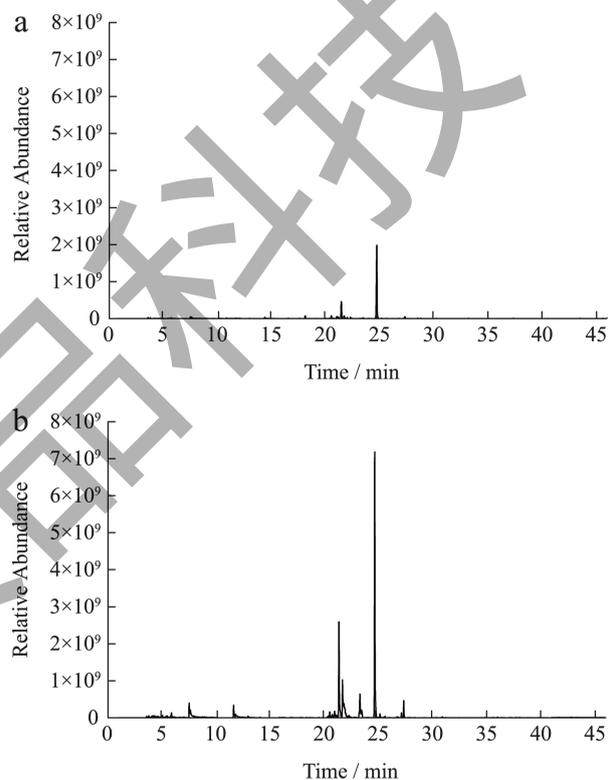


图8 胶磨破碎和冷冻破碎制备芒果浆的 HS-SPME-GC-MS 总离子流图

Fig.8 Total ion chromatogram (TIC) of mango pulp prepared by colloid milling and freezing milling

芒果中含有 270 多种香气物质, 主要为单萜、倍半萜、醇、酯、醛、酮等化合物, 其中萜烯类化合物具有特殊香气, 能赋予芒果橘、松和果香的气味, 是芒果中最主要的挥发性香气成分<sup>[26]</sup>。胶磨破碎、冷冻破碎芒果浆中萜烯类化合物含量分别为 416.96、1 805.56  $\mu\text{g/L}$ 。其中, 冷冻破碎芒果浆的萜烯类化合物占香气成分总含量的 83.38%, 与谢若男等<sup>[26]</sup>测定结果一致。冷冻破碎芒果浆中萜烯类化合物总量是胶磨破碎芒果浆的 4.33 倍, 芒果特征香气强度更加明显; 而胶磨破碎时温度较高, 芳香物质尤其是低沸点香气成分逸散, 还有部分香气成

分分解, 芒果浆中萜烯类化合物损失严重<sup>[27]</sup>。萜烯类化合物中萜品油烯含量最高, 其次是 3- 萜烯、 $\alpha$ - 异松油烯。冷冻破碎芒果浆中萜品油烯含量为 1 101.50  $\mu\text{g/L}$ , 而胶磨破碎芒果浆中仅 301.14  $\mu\text{g/L}$ , 冷冻破碎更有利于保持芒果的特征香气成分。胶磨破碎时, 因温度升高容易导致物料香气成分的损失,

冷冻破碎则能有效避免这类问题, 液氮可带走破碎时产生的热量, 物料处于低温环境, 能够消除温度升高引起的品质劣变。Karam 等<sup>[28]</sup>报道了胶磨破碎时机器摩擦产生热量, 造成物料温度升高, 导致风味成分的损失; 而通过对破碎机器进行降温可以降低挥发性香气成分的损失, 保持较好的风味品质。

表 4 胶磨破碎和冷冻破碎制备芒果浆的主要挥发性成分

Table 4 The main volatile components of mango pulp prepared by colloid milling and freezing milling

序号	保留时间/min	香气成分	含量/ $\mu\text{g/L}$	
			胶磨破碎浆	冷冻破碎浆
1	20.52	月桂烯	11.29 $\pm$ 0.79 <sup>b</sup>	47.86 $\pm$ 1.19 <sup>a</sup>
2	21.45	3- 萜烯	69.80 $\pm$ 3.24 <sup>b</sup>	395.44 $\pm$ 2.36 <sup>a</sup>
3	21.70	$\alpha$ - 异松油烯	14.14 $\pm$ 0.91 <sup>b</sup>	123.19 $\pm$ 2.53 <sup>a</sup>
4	22.21	柠檬烯	16.83 $\pm$ 0.14 <sup>b</sup>	99.32 $\pm$ 1.72 <sup>a</sup>
5	22.29	罗勒烯	0.67 $\pm$ 0.03 <sup>b</sup>	2.06 $\pm$ 0.38 <sup>a</sup>
6	23.46	松油烯	2.44 $\pm$ 0.26 <sup>b</sup>	32.99 $\pm$ 1.95 <sup>a</sup>
7	23.95	3,8- 对薄荷二烯	0.65 $\pm$ 0.08 <sup>b</sup>	3.20 $\pm$ 0.65 <sup>a</sup>
8	24.72	萜品油烯	301.14 $\pm$ 6.57 <sup>b</sup>	1101.50 $\pm$ 9.14 <sup>a</sup>
9	4.62	乙酸甲酯	2.78 $\pm$ 0.25 <sup>b</sup>	9.42 $\pm$ 0.30 <sup>a</sup>
10	5.34	乙酸乙酯	1.24 $\pm$ 0.68 <sup>b</sup>	3.29 $\pm$ 0.41 <sup>a</sup>
11	8.90	丁酸甲酯	4.27 $\pm$ 0.36 <sup>b</sup>	13.02 $\pm$ 1.06 <sup>a</sup>
12	17.59	己酸甲酯	4.75 $\pm$ 0.12 <sup>b</sup>	13.50 $\pm$ 0.48 <sup>a</sup>
13	8.00	戊醛	1.32 $\pm$ 0.04 <sup>b</sup>	2.50 $\pm$ 0.17 <sup>a</sup>
14	10.13	反式-2- 戊烯醛	10.38 $\pm$ 0.22 <sup>b</sup>	21.80 $\pm$ 0.51 <sup>a</sup>
15	11.99	正己醛	4.26 $\pm$ 0.24 <sup>b</sup>	7.43 $\pm$ 0.86 <sup>a</sup>
16	14.37	2- 己烯醛	11.64 $\pm$ 0.68 <sup>b</sup>	26.13 $\pm$ 0.90 <sup>a</sup>
17	16.55	正庚醛	2.40 $\pm$ 0.18 <sup>b</sup>	4.66 $\pm$ 0.34 <sup>a</sup>
18	19.02	2- 庚烯醛	0.90 $\pm$ 0.06 <sup>b</sup>	2.60 $\pm$ 0.18 <sup>a</sup>
19	23.32	反-2- 辛烯醛	1.41 $\pm$ 0.13 <sup>b</sup>	5.65 $\pm$ 0.25 <sup>a</sup>
20	25.17	壬醛	3.10 $\pm$ 0.29 <sup>b</sup>	5.13 $\pm$ 0.37 <sup>a</sup>
21	27.13	反, 顺-2,6- 壬二烯醛	29.07 $\pm$ 0.49 <sup>b</sup>	73.23 $\pm$ 1.04 <sup>a</sup>
22	28.49	(E)- 柠檬醛	1.65 $\pm$ 0.25 <sup>b</sup>	8.83 $\pm$ 0.34 <sup>a</sup>
23	30.20	$\beta$ - 环柠檬醛	1.49 $\pm$ 0.16 <sup>b</sup>	2.99 $\pm$ 0.48 <sup>a</sup>
24	7.65	1- 戊烯-3- 酮	40.18 $\pm$ 0.45 <sup>b</sup>	62.31 $\pm$ 1.26 <sup>a</sup>
25	36.47	香叶基丙酮	0.90 $\pm$ 0.05 <sup>b</sup>	1.69 $\pm$ 0.18 <sup>a</sup>
26	10.83	顺-2- 戊烯-1- 醇	8.39 $\pm$ 0.25 <sup>b</sup>	27.71 $\pm$ 0.50 <sup>a</sup>
27	14.57	2- 己烯-1- 醇	4.42 $\pm$ 0.12 <sup>b</sup>	9.12 $\pm$ 0.48 <sup>a</sup>
28	11.82	丁酸	10.24 $\pm$ 0.53 <sup>b</sup>	53.28 $\pm$ 0.68 <sup>a</sup>
29	20.00	正己酸	1.42 $\pm$ 0.18 <sup>b</sup>	5.58 $\pm$ 0.48 <sup>a</sup>

注: 同行右肩不同小写字母表示具有显著差异 ( $P < 0.05$ )。采用以 2- 辛醇为内标的内标定量法。

### 2.4.3 芒果浆的感官评价

采用模糊综合判别法,胶磨破碎和冷冻破碎制备的芒果浆感官评价结果如图9所示,冷冻破碎芒果浆在芒果味、青草味、细腻度指标评分更高。

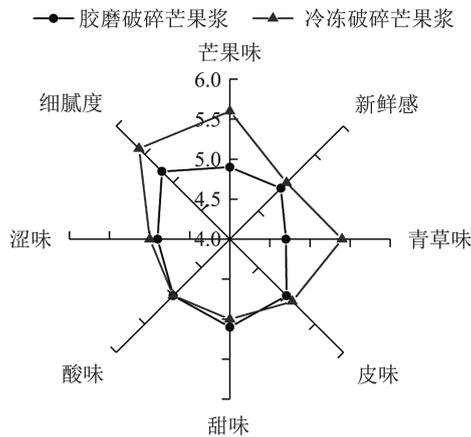


图9 胶磨破碎和冷冻破碎制备芒果浆的感官评价  
Fig.9 Sensory evaluation of mango pulp prepared by colloid milling and freezing milling

根据2.4.2已测定两种芒果浆的萜烯类化合物及酯类化合物的含量,发现:冷冻破碎芒果浆的萜烯类化合物、酯类化合物含量分别是胶磨破碎芒果浆的4.33倍、3.01倍。萜烯类化合物能赋予芒果浆橘香、果香<sup>[29]</sup>;酯类化合物能赋予果浆芒果滋味,并调和其他挥发性成分使整体风味更加柔和<sup>[30]</sup>,芒果味评分结果与萜烯类化合物、酯类化合物含量结果一致。芒果浆中醛类、醇类化合物对于青草味的产生十分重要。表4中胶磨破碎芒果浆的醛类、醇类化合物含量仅67.62、12.81 μg/L;冷冻破碎芒果浆的醛类、醇类化合物含量高达160.95、36.83 μg/L,比胶磨破碎芒果浆分别高出138.02%、187.51%,冷冻破碎芒果浆的青草味更加强烈。此外,根据2.3.1测定的芒果浆粒径结果,冷冻破碎芒果浆的粒径只有59.49 μm,比胶磨破碎芒果浆降低了46.08%,口感更加细腻、丝滑,细腻度指标评分更高。

### 3 结论

与胶磨破碎相比,冷冻破碎芒果浆的基本营养成分的含量无显著差异( $P>0.05$ );总酚含量、ABTS<sup>+</sup>自由基清除能力分别提高了13.71%、7.85%,说明冷冻破碎更好地保护了芒果浆的抗氧化活性。冷冻破碎芒果浆的粒径比胶磨破碎芒果浆降低了46.08%,果浆质地细腻,分散程度有所提高。冷冻破碎芒果浆的色泽澄清明亮,特征香气强度明显,

果浆滋味醇厚、口感细腻,具有更好的食用品质。

综上所述,冷冻破碎芒果浆在抗氧化活性、微观结构、感官品质等方面更佳。冷冻破碎能够更好地保护芒果浆的品质,为其在果浆加工中的应用提供了理论依据。

### 参考文献

- [1] CHIN C F, TEOH E Y, CHEE M J Y, et al. Comparative proteomic analysis on fruit ripening processes in two varieties of tropical mango (*Mangifera indica*) [J]. The Protein Journal, 2019, 38(6): 704-715.
- [2] PATEL M K, FANYUK M, FEYNGENBERG O, et al. Phenylalanine induces mango fruit resistance against chilling injuries during storage at suboptimal temperature [J]. Food Chemistry, 2023, 405: 134909.
- [3] AWAD M A, AL-QURASHI A D, EL-DENGAWY E F A, et al. Quality and biochemical changes of 'Hindi-Besennara' mangoes during shelf life as affected by chitosan, trans-resveratrol and glycine betaine postharvest dipping [J]. Scientia Horticulturae, 2017, 217: 156-163.
- [4] DIOP A, MEOT J, LECHAUDEL M, et al. Impact of preharvest and postharvest on color changes during convective drying of mangoes [J]. Foods, 2021, 10(3): 490.
- [5] 时静.冷破碎澳洲青苹果浆原料特性研究及其产品开发[D].西安:陕西师范大学,2016.
- [6] 韩慧慧,李范洙,张先,等.酶辅助提取法制备寒葱速溶茶的加工工艺[J].食品工业,2021,42(10):110-114.
- [7] ZHENG L, ZHAO M M, XIAO C Q, et al. Practical problems when using ABTS assay to assess the radical-scavenging activity of peptides: importance of controlling reaction pH and time [J]. Food Chemistry, 2016, 192: 288-294.
- [8] 王双双.谷朊粉及其主要组分抑制果糖吸湿作用的研究[D].武汉:华中农业大学,2022.
- [9] 尚朝杰.芒果带皮果汁加工过程中品质变化及控制的研究[D].湛江:广东海洋大学,2015.
- [10] 张微,李汴生.超高压和热灭菌对芒果原浆品质影响的比较[J].食品工业科技,2010,31(4):104-107,110.
- [11] 郭艳东,张腾,冯月梅,等.怒江峡谷8种中熟芒果营养成分分析与评价[J].中国食物与营养,2022,28(10):19-25.
- [12] SIMONETTI G, BRASILI E, PASQUA G. Antifungal activity of phenolic and polyphenolic compounds from different matrices of *Vitis vinifera* L. against human pathogens [J]. Molecules, 2020, 25(16): 3748.
- [13] RAINHA J, GOMES D, RODRIGUES L R, et al. Synthetic biology approaches to engineer *Saccharomyces cerevisiae* towards the industrial production of valuable polyphenolic compounds [J]. Life, 2020, 10(5): 56.

- [14] 王贵一,孟嘉璐,许文静,等.不同品种芒果的营养成分及风味物质分析[J].食品工业科技,2022,43(1):71-79.
- [15] GARCIA-ALONSO F J, BRAVO S, CASAS J, et al. Changes in antioxidant compounds during the shelf life of commercial tomato juices in different packaging materials [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57(15): 6815-6822.
- [16] 张丽娟,邹波,肖更生,等.枸杞原浆低氧打浆联合不同杀菌技术的比较分析[J].现代食品科技,2022,38(11):158-165.
- [17] TOMMONARO G, PRISCO R D, ABBAMONDI G R, et al. Bioactivity of tomato hybrid powder: antioxidant compounds and their biological activities [J]. *Journal of Medicinal Food*, 2013, 16(4): 351-356.
- [18] 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.
- [19] SAXENA S N, BARNWAL P, BALASUBRAMANIAN S, et al. Cryogenic grinding for better aroma retention and improved quality of indian spices and herbs: a review [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2018, 41(6): 12826.
- [20] 赵萌萌,党斌,张文刚,等.超微粉碎对青稞麸皮粉微观结构及功能特性的影响[J].农业工程学报,2020,36(8):278-286.
- [21] 杨忻瑞,毕金峰,陈芹芹,等.无定形态小分子糖对枣粉水分吸附及玻璃化转变的影响[J].中国食品学报,2022, 22(11):65-76.
- [22] MELENDEZ-MARTINEZ A J, ESQUIVEL P, RODRIGUEZ-AMAYA D B. Comprehensive review on carotenoid composition: transformations during processing and storage of foods [J]. *Food Research International*, 2023, 169: 112773.
- [23] ZEPKA L Q, MERCADANTE A Z. Degradation compounds of carotenoids formed during heating of a simulated cashew apple juice [J]. *Food Chemistry*, 2009, 117(1): 28-34.
- [24] 张霞,张超,马越,等.梨浆充气冷打工艺的优化[J].食品工业科技,2016,37(23):211-215.
- [25] 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.
- [26] 谢若男,马晨,张群,等.海南省芒果主产区主栽品种果实挥发性成分的对比[J].热带作物学报,2019,40(3):558-566.
- [27] 左俊.芒果香气成分分析及加工过程中芒果香气变化的研究[D].南宁:广西大学,2008.
- [28] KARAM M C, PETIT J, ZIMMER D, et al. Effects of drying and grinding in production of fruit and vegetable powders: a review [J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 188(11): 32-49.
- [29] 黄立标,袁艺洋,陈琳,等.基于主成分分析和HS-SPME-GC-MS技术综合评价不同品种芒果品质特性[J].食品工业科技,2023,44(3):297-306.
- [30] CAMELEYRE M, MADRELLE V, LYTRA G, et al. Impact of whisky lactone diastereoisomers on red wine fruity aromatic expression in model solution [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(39): 10808-10814.