

# 5种不同浓缩方式对荔枝汁品质的影响

柳杰<sup>1,2,3</sup>, 李镜浩<sup>1</sup>, 徐玉娟<sup>1,2\*</sup>, 吴继军<sup>1</sup>, 余元善<sup>1</sup>, 温靖<sup>1</sup>, 李璐<sup>1</sup>, 程丽娜<sup>1\*</sup>

(1. 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)(2. 岭南现代农业科学与技术广东省实验室, 广东广州 510610)  
(3. 华南农业大学食品学院, 广东广州 510642)

**摘要:** 为了获得优质荔枝浓缩汁, 比较分析5种不同浓缩方式(真空浓缩、结冰-解冻浓缩、冷冻浓缩、二级冷冻浓缩、一级冷冻联合真空浓缩)对浓缩汁品质的影响。结果显示, 不同浓缩处理组品质差异显著, 其中, 真空浓缩较其他浓缩方式总酚含量提高8.32%~21.17%、抗氧化能力提高2.38%~35.37%、粒径值降低9.69%~48.69%、总色差 $\Delta E^*$ 值最小, 稳定性最高; 一级冷冻浓缩联合真空浓缩处理组菌落总数、霉菌和酵母、乳酸菌菌落数均显著低于其他组, 二者具有协同杀菌的效果; 二级冷冻浓缩处理组挥发性物质种类(32种)、含量(409.4 mg/L)以及荔枝典型性香气物质香叶醇含量(152.51 mg/L)均为最多, 风味流失最少; 说明真空浓缩、一级冷冻联合真空浓缩、二级冷冻浓缩分别在保护荔枝汁理化品质、杀菌效果、挥发性物质上各有优势, 鉴于理化品质为评价果汁品质较重要的指标, 并结合真空浓缩处理组效率最高、时间成本最低, 可将真空浓缩作为当前相对较适宜的浓缩荔枝汁方式, 未来可在真空浓缩和冷冻浓缩的耦合联用方面进行深入研究, 以期获得更佳的浓缩处理模式。

**关键词:** 荔枝汁; 浓缩; 品质; 风味; 微生物

文章编号: 1673-9078(2024)08-230-242

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.8.0903

## Effect of Five Different Concentration Methods on the Quality of Litchi Juice

LIU Jie<sup>1,2,3</sup>, LI Jinghao<sup>1</sup>, XU Yujuan<sup>1,2\*</sup>, WU Jijun<sup>1</sup>, YU Yuanshan<sup>1</sup>, WEN Jing<sup>1</sup>, LI Lu<sup>1</sup>, CHENG Lina<sup>1\*</sup>

(1. 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)(2. Guangdong Laboratory for Lingnan Modern Agriculture, Guangzhou 510610, China)(3. College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** In order to obtain high-quality concentrated litchi juice, the effects of 5 different concentration methods (vacuum concentration, freezing-thawing concentration, freezing concentration, secondary freeze concentration, primary freezing combined with vacuum concentration) on the quality of concentrated juice were compared and analyzed. The results showed that the quality of the concentrated juice samples obtained by different concentration treatments differed

引文格式:

柳杰, 李镜浩, 徐玉娟, 等. 5种不同浓缩方式对荔枝汁品质的影响[J]. 现代食品科技, 2024, 40(8): 230-242.

LIU Jie, LI Jinghao, XU Yujuan, et al. Effect of five different concentration methods on the quality of litchi juice [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(8): 230-242.

收稿日期: 2023-07-26

基金项目: 岭南现代农业实验室科研项目(NZ2021031); 广东省重点领域研发计划项目(2020B020225002); 广州市科技计划项目(2023B01J2004; 202002020050); 广东省科学技术协会青年科技人才培养计划(SKXRC202318); 广东省农业科学院科技人才引进专项资金项目(R2020YJ-YB2001); 广东省农业科学院“十四五”农业优势产业学科团队(202109TD)

作者简介: 柳杰(1996-), 男, 硕士, 研究方向: 果蔬加工, E-mail: 864017632@qq.com

通讯作者: 程丽娜(1990-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 果蔬加工新技术, E-mail: linake125@163.com; 共同通讯作者: 徐玉娟(1974-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 果蔬深加工, E-mail: guoshuxuyujuan@163.com

significantly. Compared with the other concentration methods, vacuum concentration made the total phenol content being increased by 8.32%~21.17%, antioxidant capacity being increased by 2.38%~35.37%, particle size being decreased by 9.69%~48.69%, total color difference  $\Delta E^*$  value becoming the smallest, and stability becoming the highest. Compared with the other groups, the combination of primary freezing and vacuum concentration exhibited a synergistic bactericidal effect, causing the decreases in the total number of colonies and the number of molds, yeasts and lactic acid bacteria. The secondary freeze concentration led to the highest number of species type (32 kinds) and highest content (409.4 mg/L) of volatile substances as well as the highest content of geraniol (152.51 mg/L), with the least flavor loss. The results indicated that vacuum concentration, primary freezing combined with vacuum concentration and secondary freezing concentration had their respective advantages in protecting physicochemical quality, bactericidal effect and volatile profile of lychee juice. In view of the fact that the physico-chemical quality is an important index for evaluating the quality of fruit juice, while considering the highest efficiency and the lowest time cost of vacuum concentration, it is suggested that at present vacuum concentration can be used as a relatively suitable method to concentrate litchi juice. Further research on the coupling of vacuum concentration and freezing concentration can be carried out in the future in order to obtain a better concentration treatment mode.

**Key words:** litchi juice; concentrating; quality; flavor; microorganism

荔枝 (*Litchi chinensis* Sonn.) 属无患子科, 主要分布在热带和亚热带, 广泛种植于中国及世界上 20 余个国家, 其味美鲜甜, 深受消费者喜爱<sup>[1]</sup>。中国是最大的荔枝种植国, 2022 年我国荔枝种植面积 789.11 万亩, 预测总产量 253.10 万 t, 其次是印度、越南、泰国。此外, 巴基斯坦、马达加斯加、南非、澳大利亚、美国、以色列、巴西、毛里求斯、菲律宾、泰国、台湾、印度尼西亚也有大量荔枝种植, 荔枝品种丰富, 商品化市场规模销售品种达三十几种。2016~2018 年产量前十名的品种包括: 黑叶、妃子笑、怀枝、桂味、白糖罂、白蜡、鸡嘴荔、三月红、双肩玉荷包、糯米滋<sup>[2-5]</sup>。荔枝果肉含有丰富的营养物质, 据报道每 100 g 荔枝果肉含碳水 16.53 g、蛋白 0.83 g、维生素 E 0.07 mg、维生素 B6 0.1 mg、维生素 C 71.5 mg、磷 31 mg、钾 171 mg、钠 1 mg、镁 10 mg。据传统中医理论, 荔枝果肉具有益智、养颜, 止烦消渴、能行气散结、驱寒止痛等效果; 可用于治疗肝郁气滞、睾丸肿痛等症<sup>[2]</sup>; 荔枝果肉含有的多糖成分, 具有提高免疫力, 清除自由基的作用<sup>[3,6,7]</sup>, 果肉营养丰富, 有滋补之功效。

然而, 荔枝极不耐储, 通过加工是延长其产业链的主要手段。目前主要的荔枝加工产品包括荔枝果干、荔枝酒、荔枝饮料、荔枝罐头等。荔枝汁含有多糖、多酚等功能性成分, 具有提高免疫力, 清除自由基的作用。浓缩汁是果汁主要的流通形式, 当前市场对高品质浓缩汁的需求持续增加, 促使研究人员对不同浓缩技术进行不断探究, 试图寻找既能保护果汁品质特性, 又能满足大规模工业生产的

浓缩技术<sup>[8,9]</sup>。目前, 果汁主要浓缩方式包括: 冷冻浓缩、蒸发浓缩、膜浓缩、真空浓缩等, 蒸发浓缩和真空浓缩等是工业生产浓缩果汁的主要加工方式, 然而蒸发浓缩, 不仅浓缩温度高, 而且浓缩过程暴露在有氧环境中, 使荔枝汁热敏性物质受到损失, 同时发生美拉德反应, 果汁褐变严重<sup>[10]</sup>。真空浓缩在真空且较低温度下进行, 不仅能确保浓缩效率和浓缩率, 还可显著抑制果汁褐变和保护酚类、维生素 C 等热敏性物质, 但热浓缩技术依然在一定程度上造成挥发性成分和热敏性物质的损失<sup>[8]</sup>。膜浓缩在果汁浓缩过程中, 工艺效率高、温度低, 但滤膜容易污染, 造成孔径堵塞, 水通量显著降低, 膜浓缩设备发热等问题, 阻碍果汁行业大规模应用<sup>[11]</sup>。冷冻浓缩主要包括渐进式冷冻浓缩、悬浮式冷冻浓缩, 冷冻浓缩与热浓缩相比最主要的优势是低温条件能更好地保护热敏性物质, 渐进式冷冻浓缩存在夹带率高, 同时随着果汁可溶性固形物的增加, 夹带率也随之增加, 产率随之降低等问题<sup>[12,13]</sup>; 悬浮式冷冻浓缩, 存在设备成本高、操作复杂等问题。Fadavi 等<sup>[14]</sup>研究发现番茄汁真空条件欧姆加热浓缩较大气条件下欧姆加热浓缩、常规真空浓缩能更好的提高浓缩效率和保护番茄汁理化品质。Orellana-Palma 等<sup>[15]</sup>指出三级冷冻浓缩较传统蒸发浓缩能更好的保护石榴汁色泽、生物活性物质 (总酚、花青素、单宁、总黄酮)、挥发性物质等品质特性。

因此, 对于上述问题, 本研究采用 5 种方式 (真空浓缩、结冰-解冻浓缩、冷冻浓缩、二级冷冻浓缩、

一级冷冻联合真空浓缩) 浓缩荔枝汁, 重点考察不同浓缩方式对浓缩汁品质的影响, 探究荔枝汁最适宜的浓缩方式, 以期获得优质的荔枝浓缩汁。研究结果将对提高荔枝的附加值提供实际指导意义, 同时为荔枝浓缩汁加工技术的改进提供进一步理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

荔枝(怀枝), 采购于广东省广州市水果批发市场, 挑选品相良好、大小均一的荔枝果实, 清洗后直接榨汁, 用 300 目滤布过滤, 并通过 4 000 r/min 离心 5 min 后得到荔枝清汁, 置于 -20 °C 冰柜中贮藏; 福林酚、亚硝酸钠、硝酸铝、氢氧化钠都为分析纯试剂, 购于天津市科密欧化试剂有限公司; 正构烷烃 (C7-C40), LGC 公司。

荔枝原汁维生素 C、总酚、可溶性糖含量分别为 31.47、611.01、387.95 mg/mL, FRAP (Ferric Ion Reducing Antioxidant Power, 铁离子还原/抗氧化能力) 值为 3.73 mmol/L, 可溶性固形物 16.67 °Brix。

### 1.2 仪器与设备

WF-A2000 榨汁机, 美的有限公司; Ultra Scan VIS 型全自动色差仪, 美国 Hunter Lab 公司; UV1800 型紫外可见分光光度计, 日本岛津公司; T 型热电偶, 美国 Omega Engineering 公司; TC-08 数据采集器, 美国 Omega Engineering 公司; LC-20AT 型高效液相色谱仪, 日本岛津公司; Zettaliter Nano ZSE 激光粒度分析仪, 英国马尔文仪器有限公司; 7890B-5977B 型气相色谱-质谱联用仪, 美国 Agilent 科技公司; AR1500EX 流变仪, 美国 TA 公司; 冷冻浓缩设备为自主研发定制。

### 1.3 实验方案

#### 1.3.1 浓缩实验方案

真空浓缩: 荔枝清汁在真空度 0.005 MPa、转速 50 r/min、温度 55 °C 下进行真空浓缩, 真空浓缩总时长为 20 min。

结冰-解冻浓缩: 将 5 L 荔枝清汁放入 -20 °C 的冰柜中, 待果汁完全冻结后, 放置在水槽中 28 °C 室温解冻, 每 5 min 收集一次解冻液(计为一个样品), 分装在 200 mL 塑料小瓶中, 重复以上步骤, 直到解冻液可溶性固形物与原汁相同为止, 结

冰解冻浓缩总时长为 2 h 20 min。

冷冻浓缩: 荔枝清汁在环温 -12 °C 下进行渐进式冷冻浓缩, 搅拌速率为 144 r/min, 冷冻浓缩总时长为 3 h 30 min。

二级冷冻浓缩: 首先将荔枝清汁冷冻浓缩至 22 °Brix 左右, 合并多次一级冷冻浓缩汁, 与初始浓缩液体积相同, 再次进行二级冷冻浓缩, 二级冷冻浓缩总时长为 3 h 10 min。

一级冷冻浓缩+真空浓缩: 荔枝汁首先渐进式冷冻浓缩 (-12 °C) 至可溶性固形物达到 22 °Brix, 然后进行真空浓缩 (0.005 MPa、50 r/min、55 °C), 一级冷冻浓缩+真空浓缩总时长为 1 h 36 min。

所有浓缩方式的浓缩终点皆为: 40 °Brix, 浓缩完成后置于 -20 °C 冰柜冻存, 待测品质指标。

### 1.3.2 荔枝浓缩汁理化品质测定

#### 1.3.2.1 浓缩果汁浓缩比计算

参考秦贯丰等<sup>[8]</sup>的方法, 并略作修改, 果汁中的可溶性固形物含量在浓缩过程中增加。浓缩比计算公式(1)如下所示。

$$r = \frac{C_{j,1}}{C_{j,0}} \quad (1)$$

式中:

$r$ —浓缩比;

$C_{j,1}$ —荔枝浓缩汁可溶性固形物含量, °Brix;

$C_{j,0}$ —荔枝原汁可溶性固形物含量, °Brix。

#### 1.3.2.2 维生素 C 测定

维生素 C 含量测定采用高效液相色谱进行测定, 色谱条件: C18 色谱柱 (4.6 mm×250 mm, 5 μm), 柱温 30 °C, 维生素 C 检测波长为 254 nm; 流动相: 0.1% (体积分数) 的 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, 调节至 pH 值 2.7; 流速: 1 mL/min; 进样量: 10 μL。样品处理: 经 0.3% (体积分数) 偏磷酸提取后过 0.22 μm 滤膜再进样, 最终结果除以浓缩比, 折算成新鲜荔枝汁浓度的含量。

#### 1.3.2.3 总酚含量测定

参考 Kwaw 等<sup>[16]</sup>的方法。取稀释后的样品 0.5 mL, 加入 1 mL Folin-Ciocalteu 试剂, 振荡混合, 再加入 1 mL 10% 碳酸钠溶液, 避光放置 1 h, 测定 760 nm 处的吸光值。实验结果以没食子酸当量表示, 并除以浓缩比, 折算成新鲜荔枝汁浓度的含量。

#### 1.3.2.4 FRAP 还原能力测定

采用 FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power) 法测定还原能力, 参考 Wu 等<sup>[17]</sup>的方法, 测定

OD<sub>700 nm</sub> 值, 以 Trolox 为标准品, 样品的铁还原能力用 Trolox 的当量来表示 (mmol/L), 并除以浓缩比, 折算成新鲜荔枝汁浓度的含量。

### 1.3.2.5 色差测定

采用 UltraScan VIS 型全自动色差仪, 在反射模式下对果汁样品的色泽进行测定, 以荔枝原汁为色差测定的参比样, 色差结果以  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  和  $\Delta E^*$  表示, 计算公式 (2) 如下所示。

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

式中:

$a^*$ ,  $b^*$ ,  $L^*$ ——荔枝浓缩汁的色差测定值;

$a_0^*$ ,  $b_0^*$ ,  $L_0^*$ ——荔枝原汁的色差测定值。

### 1.3.2.6 粒径测定

采用动态光衍射法测定荔枝浓缩汁粒径分布, 参考蔡天等<sup>[18]</sup>的方法。对样品统一稀释后, 加样 10~15 mL, 确保样品量被仪器检测。

### 1.3.2.7 表观黏度、触变性测定

采用流变仪进行测定, 室温下, 设置剪切速率, 使其由  $1 \text{ s}^{-1}$  逐渐上升到  $100 \text{ s}^{-1}$ , 每 5 s 测定一次数据, 测定不同处理组荔枝汁表观粘度随剪切速率的变化;

设置剪切速率, 使其由  $1 \text{ s}^{-1}$  逐渐上升到  $200 \text{ s}^{-1}$ , 再由每  $200 \text{ s}^{-1}$  逐渐下降到  $1 \text{ s}^{-1}$ , 获得触变性变化数据。

### 1.3.2.8 菌落总数、霉菌和酵母、乳酸菌测定

分别参考国标 GB4789.2-2016、GB4789.15-2016、GB4789.35-2016 测定荔枝浓缩汁中的菌落总数、霉菌和酵母菌落数、乳酸菌菌落数。

### 1.3.2.9 挥发性物质定性定量分析

参考 An 等<sup>[19]</sup>的方法。准确称取 6 g 荔枝原汁于顶空萃取瓶中, 加入 2 g 氯化钠及磁力搅拌转子, 于  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  水浴中平衡 10 min; 随后将装有三相固相微萃取针顶空萃取 30 min。

GC 条件色谱柱: HB-5MS 弹性毛细管柱 ( $30 \text{ m} \times 0.25 \text{ mm} \times 0.25 \text{ } \mu\text{m}$ ); 载气为氦气, 进样口温度为  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ , 载气 (氦气) 流量为  $1.7 \text{ mL/min}$ , 色谱柱升温程序均为  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  (保温 5 min) - 以  $4 \text{ }^\circ\text{C/min}$  升温 -  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  结束。采用不分流进样模式。

MS 条件质谱条件: 采用全扫描模式 (Scanmode) 采集信号, 电离方式 EI, 电子轰击能量为  $70 \text{ eV}$ ; 接口温度  $280 \text{ }^\circ\text{C}$ , 离子源温度为  $230 \text{ }^\circ\text{C}$ , 四级杆温度为  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ , 扫描质量范围为  $35\sim 350 \text{ u}$ , 扫描速度: 每秒 5.2 次。

定性分析: 利用 NIST 标准谱库自动检索各组

分的保留时间、质谱匹配度  $\geq 80\%$ 、计算保留指数 (Retention Index, RI) 来辅助质谱检索定性。利用质谱信息与标准信息库 NIST 进行比对; 使用 C7-C40 的系列正构烷烃计算各挥发性成分的保留指数, 利用正构系列烷烃混合标样 (C7-C40) 并计算待测物质 LRI, 公式 (3) 如下所示:

$$LRI = 100N + \frac{100n(t_{Ra} - t_{RN})}{t_{R(N+n)} - t_{RN}} \quad (3)$$

式中:

$N$ ——色谱图中位于目标物质左侧正构烷烃的碳原子数;

$n$ ——位于目标物质两侧的正构烷烃的碳分子数之差;

$t_{Ra}$ 、 $t_{RN}$  和  $t_{R(N+n)}$ ——分别是色谱图中待测物质, 待测物质左侧和右侧正构烷烃的保留时间。

定量分析: 采用内标 (己酸乙酯) 法进行定量分析, 利用全扫描采集得到的质量色谱图结合内标法对样品中香气物质进行定量。具体操作方法如下: 准确加入  $20 \text{ } \mu\text{L}$  经乙醇稀释的内标溶液 ( $5 \text{ mg/L}$ ) 于 6 g 荔枝汁中, 采用以上气质条件分析样品。根据公式中求得的各物质的相对定量因子  $f_i'$  和定量离子峰面积、所对应的内标定量离子峰面积以及内标物质的浓度计算荔枝汁中各物质的浓度。计算公式 (4) 如下:

$$m_i = f_i' \cdot A_i \cdot \frac{m_s}{A_s} \quad (4)$$

式中:

$m_i$ ——为待测物质 i 的浓度;

$f_i'$ ——为物质 i 的相对定量校正因子;

$A_i$ ——为物质 i 定量离子的峰面积;

$m_s$ ——是内标物质的浓度;

$A_s$ ——是内标物质定量离子的峰面积。

## 1.3.3 数据统计与分析

所有样品都设置 3 个或以上平行, 测定结果以平均值  $\pm$  标准差来表示。采用 Origin 2018 软件绘图, 通过 SPSS 24.0 进行方差分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同浓缩处理对荔枝浓缩汁维生素 C 含量的影响

维生素 C 是果汁中重要的营养物质之一。不同浓缩处理荔枝浓缩汁维生素 C 的含量变化如图 1 所示。不同处理组差异显著, 除冷冻浓缩处理组外,

二级冷冻浓缩处理组显著高于其他处理组,较其他处理组维生素 C 保护率提高 4%~164.5%,这是因为二级冷冻浓缩相对于传统热浓缩,本身不会引起果汁维生素 C 降解或变质,维生素 C 属于热敏性物质,在热作用下容易氧化分解,所以真空浓缩组维生素 C 含量损失严重;而二级冷冻浓缩处理组维生素 C 保护率高于结冰解冻浓缩和冷冻浓缩处理组,可能是因为冷冻浓缩会贴着腔体表面缓慢生成较厚的冰环,使得冷冻浓缩在生成较厚的冰环后,降低了防冻液对荔枝汁冷量的传递,结冰速率下降,使得荔枝汁中所含的维生素 C 被夹带到冰相中,而分级进行冷冻浓缩可以减少因腔体表面较厚冰环的影响,提高浓缩的效率,降低维生素 C 的夹带率<sup>[20]</sup>,结冰解冻浓缩可能是因为解冻过程中,冰晶体具有较大比表面积,吸附力大,冰晶体表面会吸附溶质,造成损失<sup>[21]</sup>。综上,二级冷冻浓缩处理组是保护荔枝汁维生素 C 的适宜处理模式。

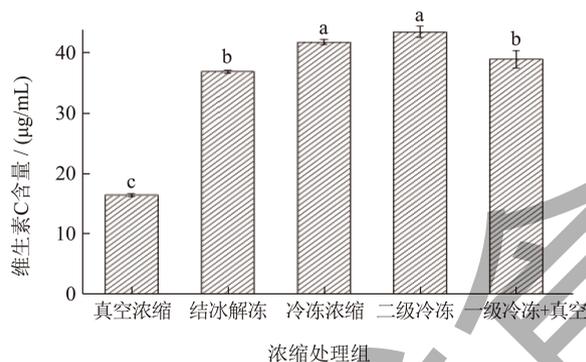


图 1 不同浓缩处理对荔枝浓缩汁维生素 C 含量的影响  
Fig.1 Effects of different concentration treatment on the vitamin C content of concentrated litchi juice

注:不同字母表示显著性差异 ( $P < 0.05$ )。下图同。

## 2.2 不同浓缩处理组对荔枝汁总酚的影响

总酚是重要的抗氧化成分之一。不同浓缩处理荔枝浓缩汁总酚含量变化如图 2 所示。不同浓缩处理组之间具有显著性差异,真空浓缩处理组总酚保留效果最好,较其他处理组总酚含量提高 8.32%~21.17%,说明真空浓缩汁总酚含量损失较小,这主要是由于一方面真空热浓缩能破坏果肉细胞和共价键,导致部分酚类物质被释放到细胞外;另一方面 55 °C 的真空热浓缩,也使得部分内源酶失活,不能通过内源酶来加速降解酚类物质;同时,加热也会破坏多酚和蛋白质组成的复合物,从而增加总酚化合物的提取率<sup>[10,22]</sup>。而结冰解冻浓缩、冷冻浓缩、二级冷冻浓缩处理组的总酚含量相对较低,可

能由于冷冻浓缩过程中,冰晶体夹带部分溶质导致损失,冰晶体具有较大的比表面积,吸附力大,冰晶体表面会吸附溶质,造成损失<sup>[21]</sup>。此外,在低温环境下,多酚氧化酶保留一定的活性,冷冻浓缩温度越高,冻结速率越低,氧化反应和酶促褐变的时间变长<sup>[23]</sup>。综上,真空浓缩处理是保护荔枝汁总酚含量的适宜处理模式。

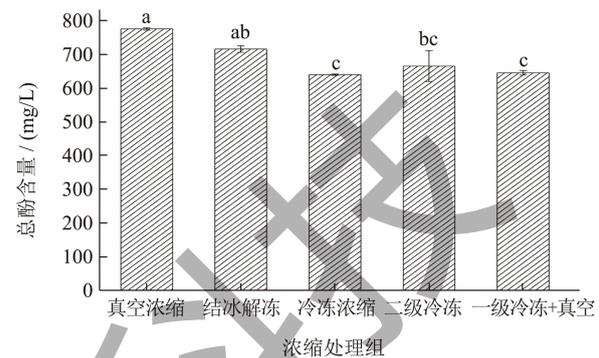


图 2 不同冷冻浓缩处理组对浓缩荔枝汁总酚含量的影响  
Fig.2 Effects of different concentration treatment on the total phenols content of concentrated litchi juice

## 2.3 不同浓缩处理对荔枝汁抗氧化能力的影响

抗氧化活性是评价果蔬汁的重要指标之一,荔枝汁中有丰富的酚类、维生素 C 等物质,同抗氧化能力息息相关。不同浓缩处理荔枝浓缩汁抗氧化能力如图 3 所示,FRAP 值约为 3.5~4.8 µmol/L。不同浓缩处理组差异性显著,真空浓缩处理组抗氧化能力显著高于其他处理组,较其他处理组提高 2.38%~35.37%,同总酚含量变化趋势相似,这主要是因为水果中的多酚含量和抗氧化活性之间存在一定的线性关系<sup>[24,25]</sup>,但不完全同步,因为热处理使得多酚种类或形态结构发生变化,使其抗氧化活性增强<sup>[26]</sup>。还可能是由于美拉德反应,通过热处理破坏细胞壁,使酚类活性物质溶出<sup>[27]</sup>,且有报道果汁真空浓缩至 35~45 °Brix 之间多酚、黄酮含量上升的现象,这可能是因为真空浓缩处理时间短,酚类和黄酮物质未受到高温的影响,水分快速大量蒸发,使得酚类物质含量提高<sup>[28]</sup>,此外,低温处理组(结冰解冻浓缩、冷冻浓缩、二级冷冻浓缩)可能是因为低温环境下,多酚氧化酶仍拥有一定的酶活力,发生一定程度酶促反应使得荔枝浓缩汁的抗氧化活性含量受到损失<sup>[29]</sup>。综上,真空浓缩处理组是保护荔枝汁抗氧化活性的适宜处理模式。

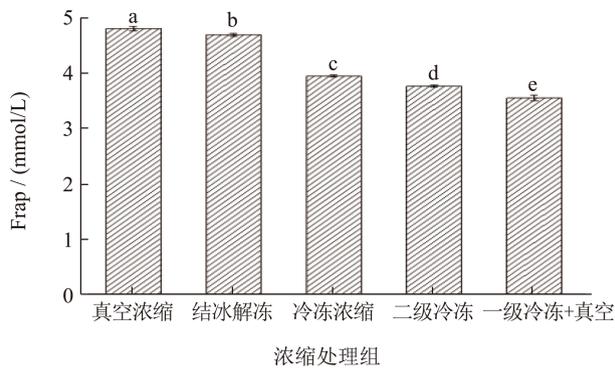


图3 不同浓缩处理对浓缩荔枝汁抗氧化能力的影响

Fig.3 Effects of different concentration treatment on the FRAP of concentrated litchi juice

#### 2.4 不同浓缩处理对荔枝浓缩汁色泽的影响

果汁加工过程的色差值变化是评价褐变程度最直观的指标之一。不同浓缩处理荔枝浓缩汁色差值变化如表1所示。原汁  $L^*$  值最高, 颜色鲜亮, 经不同浓缩处理后,  $L^*$  值都显示出下降的趋势,  $a^*$ 、 $b^*$  值均有显著上升 ( $P < 0.05$ ), 这跟荔枝汁浓缩后, 颜色变深的现象相符, 这可能是由于随着可溶性固形物增加, 由于荔枝汁自身包含的颜色变化; 果汁颜色变深的机制还可能与酶促褐变和非酶促褐变有关, 结冰解冻处理组  $L^*$  值最低, 这可能是由于结冰解冻浓缩过程中, 果肉细胞破裂, 酚类物质与多酚氧化酶接触几率增大, 发生了酶促褐变。此外, 还可能是因为在低温环境下, 多酚氧化酶仍保留一定的活性, 冷冻浓缩温度越高, 冻结速率越低, 且结冰解冻浓缩过程与氧气接触, 氧化反应和酶促褐变的时间变长<sup>[23]</sup>。一级冷冻浓缩+真空浓缩处理组  $L^*$  值与二级冷冻浓缩处理组无显著性差异, 真空浓缩处理组  $\Delta E^*$  最小, 说明真空环境氧气含量低, 酚类活性物质氧化被抑制, 这也是真空浓缩处理组褐

变较轻的原因。综上, 真空浓缩处理被认为是对荔枝浓缩汁色泽保护效果最优的处理模式。

#### 2.5 不同浓缩处理对荔枝浓缩汁粒径的影响

粒径是果汁稳定性的重要参数之一, 一般来说, 粒径值越小, 果汁体系就越稳定。不同浓缩处理荔枝浓缩汁的粒径和 PDI (聚合物分散系数) 如图4所示。各处理组与原汁相比粒径值均有所降低 (5.76%~57.26%), 这可能是因为热浓缩和冷冻浓缩都有降低浓缩汁粒径的作用, 其中真空热浓缩粒径值最低, 较其他处理组粒径值下降 9.69%~48.69%, 这与 Paula 等<sup>[29]</sup>的研究结果类似, 橙汁经过巴氏杀菌热处理的粒径值较液氮速冻-室温解冻、液氮速冻-冰箱解冻、超冷冻-微波解冻处理组和未处理组最小。Yu 等<sup>[30]</sup>也发现香蕉汁在经过 45~60 °C 热处理后, 随着处理温度提高, 果汁中的粒径值越小。此外, Wang 等<sup>[31]</sup>也发现豆浆随着冷冻时间的增加, 小豆浆颗粒 (<10  $\mu\text{m}$ ) 的体积百分比增加, 而大豆浆颗粒 (>50  $\mu\text{m}$ ) 的体积百分比减少, 同时豆浆的平均粒径也随冷冻时间增加而减少, 这说明, 热浓缩和冷冻浓缩处理均对荔枝汁稳定性有一定的改善作用。结合 PDI 进一步分析, 一般 PDI 值越大, 分子量分布范围越宽, PDI 越小, 分子量分布越均匀。经过处理后, 各处理组较原汁 PDI 值均上升 (5.69%~26.02%), 说明热处理 (真空浓缩、一级冷冻浓缩+真空浓缩) 和低温浓缩处理 (结冰解冻浓缩、冷冻浓缩、二级冷冻浓缩) 都会导致荔枝汁中的颗粒分布范围变宽, 但各处理组 PDI 值介于 0.31~0.246 之间, 说明各处理组 PDI 值相差较小, 冷冻浓缩处理比真空热浓缩处理 PDI 值略低, 无显著性差异。综上, 真空浓缩处理是降低粒径值, 提高荔枝汁稳定性的适宜处理模式。

表1 荔枝浓缩汁色差变化

Table 1 The color changes of concentrated lychee juice

样品	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta E^*$
原汁	$36.83 \pm 0.02^a$	$0.07 \pm 0.07^d$	$1.47 \pm 0.12^c$	0
真空浓缩	$36.20 \pm 0.03^c$	$0.89 \pm 0.20^c$	$3.21 \pm 0.11^c$	$2.17 \pm 0.04^c$
结冰解冻	$28.64 \pm 0.21^c$	$0.30 \pm 0.16^d$	$2.18 \pm 0.22^d$	$8.22 \pm 0.29^a$
冷冻浓缩	$29.85 \pm 0.06^d$	$0.78 \pm 0.17^c$	$2.31 \pm 0.08^d$	$7.07 \pm 0.03^b$
二级冷冻浓缩	$36.58 \pm 0.08^b$	$1.73 \pm 0.04^b$	$3.97 \pm 0.10^b$	$3.14 \pm 0.10^d$
一级冷冻浓缩+真空浓缩	$36.47 \pm 0.08^b$	$2.25 \pm 0.03^a$	$4.42 \pm 0.10^a$	$3.80 \pm 0.07^c$

注: (1)  $L^*$  值为光度值, 0 表示黑色, 100 表示白色;  $a^*$  值为红绿值, 值越高越偏红; (2)  $\Delta E^*$  表示色泽变化值, 本实验以蒸馏水为标样; (3)  $b^*$  值为黄蓝值,  $b^*$  越高越偏黄; (4) 不同字母表示显著性差异 ( $P < 0.05$ )。

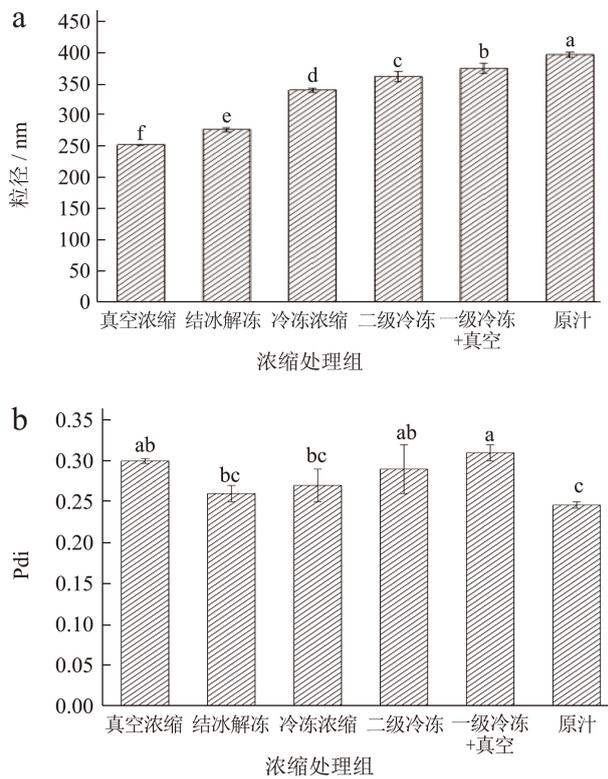


图4 不同低温浓缩处理对浓缩荔枝汁粒径 (a) 和 PDI (b) 的影响

Fig.4 Effects of different concentration treatment on the size (a) and PDI (b) of concentrated litchi juice

### 2.6 不同浓缩处理对荔枝浓缩汁流变特性的影响

表观黏度是果汁浓缩的重要参数, 在高密度的浓缩果汁加工过程中, 果汁高黏度时会使得加工效率变低, 因此对果汁黏度的测定对液体食品来说是必要的<sup>[32]</sup>。由图 5a 可看出, 各处理组表观黏度较原汁都显著增加, 这可能是因为黏度依赖于分子间的作用力及水-溶质(糖、酸)的相互作用并通过氢键强度和分子间距表现出来, 而荔枝汁的浓度和温度会显著影响氢键强度和分子间距。此外, 可溶性固形物增加使得水合分子和溶质羟基的氢键作用增加, 在流体流动时会增加流动阻力, 使得流体表观黏度增加。低温浓缩处理组(结冰解冻浓缩、二级冷冻浓缩、冷冻浓缩)表观粘度大于热浓缩处理组(真空浓缩、一级+真空浓缩), 这可能是因为浓缩过程较低的温度导致分子迁移率降低和分子间间距减少, 使得流动阻力增加。如图 5b 所示, 不同浓缩处理组及原汁均未产生触变环, 说明移除剪切力后, 表观黏度迅速恢复, 剪切力和剪切速率呈线性关系, 进一步证明 6 种荔枝汁均为牛顿流体, 表观

黏度变化与时间无关。综上, 不同浓缩处理组的荔枝汁均为牛顿流体。

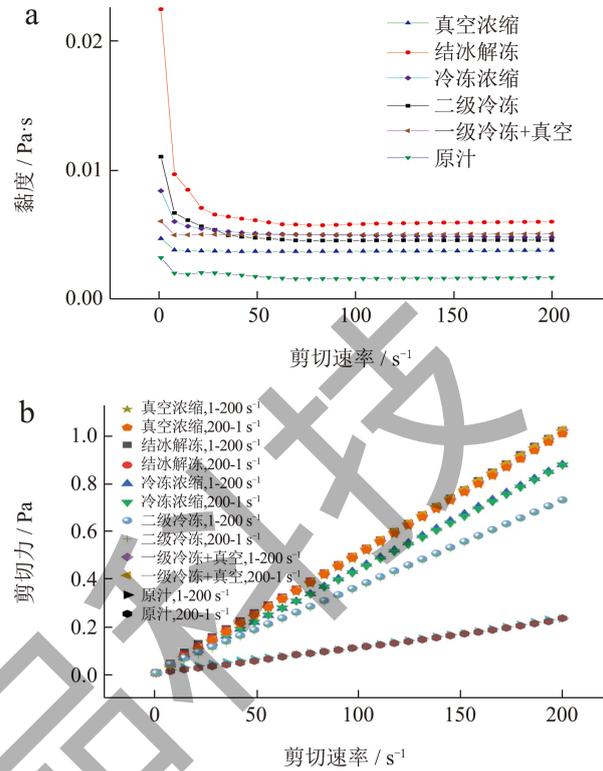


图5 不同浓缩处理组对荔枝浓缩汁黏度 (a) 和触变性 (b) 的影响

Fig.5 Effects of different concentration treatment groups on the viscosity (a) and thixotropy (b) of concentrated litchi juice

### 2.7 不同浓缩处理对荔枝浓缩汁微生物含量的影响

微生物是果蔬汁加工过程中评价食品安全的重要指标, 菌落总数、霉菌和酵母、乳酸菌为荔枝汁的天然污染菌群, 因此对不同浓缩技术的菌落总数、霉菌和酵母、乳酸菌的菌落数进行监测, 对荔枝汁的进一步深加具有重要意义。不同浓缩处理组的荔枝浓缩汁微生物变化如表 2 所示, 各处理组菌落总数、霉菌和酵母(除冷冻浓缩处理组外)、乳酸菌菌落数较原汁都有显著下降, 主要有两方面的原因, 一方面是冷冻浓缩过程的缓慢冻结形成的冰晶颗粒较大, 且分布不均匀, 对微生物细胞有一定的破坏作用, 使微生物生长停滞, 部分能生成芽孢的微生物有较强的抗低温特性, 但其营养细胞仍对低温敏感, 易被冻伤也可能是由于冷冻和解冻的过程导致部分微生物细胞膜或细胞壁破裂, 细胞内成分流出, 蛋白质构象发生改变等造成<sup>[33]</sup>; 热处理后菌落总数、霉菌和酵

母、乳酸菌菌落数也有明显的下降<sup>[34,35]</sup>，主要是因为热处理可使微生物的酶变性失活并破坏微生物的细胞膜从而杀灭微生物<sup>[36]</sup>，但有报道 60 °C 不足以杀死果汁体系内的所有微生物，更高的热处理温度灭菌效果越好，而本实验真空浓缩处理组温度为 55 °C，因此未取得较好的杀菌效果<sup>[35]</sup>。一级冷冻浓缩+真空浓缩处理组菌落总数、霉菌和酵母、乳酸菌菌落数均显著低于其他组，这可能是因为冷冻浓缩和热处理两者对微生物的致死效果产生了协同作用。综上，一级冷冻浓缩联合真空浓缩处理组杀菌效果最好。

表 2 不同浓缩处理对荔枝浓缩汁微生物含量的影响 (lg CFU/mL)

样品名	菌落总数	霉菌与酵母	乳酸菌
原汁	9.30 ± 0.02 <sup>a</sup>	6.48 ± 0.48 <sup>b</sup>	9.03 ± 0.04 <sup>a</sup>
真空浓缩	8.46 ± 0.001 <sup>b</sup>	3.59 ± 0.08 <sup>d</sup>	8.58 ± 0.05 <sup>b</sup>
结冰解冻	6.62 ± 0.16 <sup>d</sup>	2.87 ± 0.034 <sup>e</sup>	6.00 ± 0.01 <sup>e</sup>
冷冻浓缩	7.24 ± 0.07 <sup>e</sup>	7.38 ± 0.003 <sup>a</sup>	8.00 ± 0.01 <sup>e</sup>
二级冷冻	6.21 ± 0.01 <sup>e</sup>	5.00 ± 0.02 <sup>e</sup>	6.52 ± 0.04 <sup>d</sup>
一级冷冻+真空	5.62 ± 0.02 <sup>f</sup>	1.87 ± 0.003 <sup>f</sup>	5.52 ± 0.15 <sup>f</sup>

注：不同字母表示显著性差异 ( $P < 0.05$ )。

## 2.8 不同荔枝浓缩汁挥发性物质变化

荔枝原汁主要挥发性成分是醇类、萜烯类、酯类物质和醛类物质，占总挥发性成分的 85.37%，其中醇类物质含量较多的香叶醇 91.00 mg/L、芳樟醇 8.45 mg/L、异戊烯醇 6.16 mg/L，香叶醇是荔枝汁的典型香气物质，具有柑桔、水果的香味。萜烯类物质含量较多的是  $\beta$ -水芹烯 3.26 mg/L、柠檬烯 2.66 mg/L、 $\gamma$ -松油烯 1.47 mg/L；醛类物质含量较多的是 (Z)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛。荔枝原汁与 5 种不同处理的荔枝浓缩汁共有的香气物质有香叶醇、芳樟醇、柠檬烯。如图 6a、6b 所示，从原汁、结冰解冻浓缩、一级冷冻浓缩+真空浓缩、二级冷冻浓缩、真空浓缩、冷冻浓缩处理组中分别鉴定出 28、24、13、32、15、32 种挥发性成分，分别消失了 11 种、17 种、7 种、19 种、12 种，同时也分别产生 8 种、5 种、16 种、6 种、15 种新的挥

发性物质，香气物质总含量分别为 181.73、276.84、65.98、409.4、122.23、152.16 mg/L。由此可看出两个热处理组（真空浓缩、一级冷冻浓缩+真空浓缩），风味物质种类和物质总含量都有逐渐减少的趋势，低温浓缩处理组（结冰解冻浓缩、二级冷冻浓缩、冷冻浓缩）较热处理组能更好的保护挥发性物质。二级冷冻浓缩处理组总物质含量是其他处理组的 1.48~6.20 倍，说明其对荔枝浓缩汁风味的保护效果最好。同时，其香叶醇（荔枝中典型的香气物质）的含量也是最高的。

结合表 3 进一步分析，二级冷冻浓缩处理组较原汁产生了 16 种新的高级醇类、萜烯类、酯类、杂环类、其他类物质，如：橙花醇、月桂烯、甲酸香草酯、邻-异丙基苯、反式芳樟醇氧化物等物质，这可能是因为冷冻浓缩过程中固相液相的分配系数及不同物质间的氧化还原反应或其他机制参与，生成了新的化合物使得挥发性物质增多<sup>[37]</sup>，综上，二级冷冻浓缩处理对荔枝汁风味物质影响较小，能保护荔枝汁的原有风味。

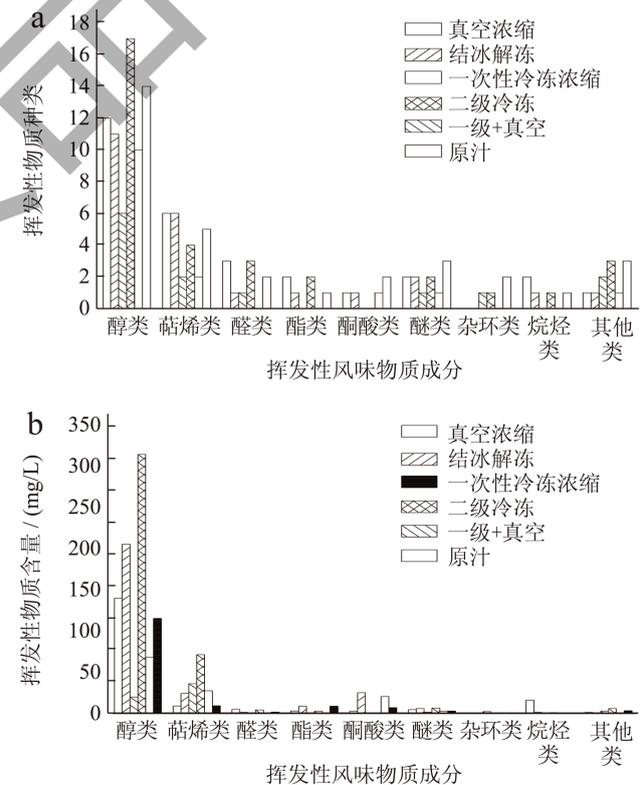


图 6 荔枝汁中各类挥发性物质的种类 (a) 及含量 (b)  
Fig.6 Types (a) and content (b) of various volatile substances in lychee juice

表 3 不同荔枝浓缩汁HS-SPME-GC-MS挥发性物质定性定量分析结果 (mg/L)

Table 3 Qualitative and quantitative results of HS-SPME-GC-MS volatiles of different litchi juice concentrates

NO.	保留时间/min	RI	挥发性物质	原汁	真空浓缩	结冰解冻	冷冻浓缩	二级冷冻	一级冷冻 + 真空	鉴定方法	
1	5.967	748.41	3-Buten-1-ol, 3-methyl-	3-甲基-3-丁烯-1-醇	∕	∕	∕	8.63 ± 1.27	∕	RI, MS	
2	6.196	755.71	1-Butanol, 2-methyl-	2-甲基-1-丁醇	∕	∕	∕	4.04 ± 0.48	∕	RI, MS	
3	4.690	708.79	2-Butanol, 3-methyl-	3-甲基-2-丁醇	∕	∕	4.53 ± 0.85	∕	∕	RI, MS	
4	7.538	797.87	Prenol	异戊烯醇	6.16 ± 0.02	29.75 ± 4.66	1.48 ± 0.39	29.63 ± 0.11	4.60 ± 1.52	RI, MS	
5	11.168	880.24	2-Hexen-1-ol, (E)-	反式-2-己烯醇	∕	∕	∕	4.18 ± 0.45	∕	RI, MS	
6	11.274	882.64	1-Hexanol	正己醇	∕	∕	∕	13.34 ± 0.07	∕	RI, MS	
7	8.755	826.15	2,3-Butanediol	2,3-丁二醇	4.81 ± 0.03	∕	∕	∕	∕	RI, MS	
8	11.124	879.28	Cyclohexanol	环己醇	1.36 ± 0.15	∕	∕	∕	∕	RI, MS	
9	12.488	912.21	2-Heptanol	2-庚醇	∕	∕	0.89 ± 0.29	0.92 ± 0.02	∕	RI, MS	
10	15.928	987.02	1-Octen-3-ol	1-辛烯-3-醇	∕	20.02 ± 4.03	8.51 ± 0.35	20.02 ± 0.07	∕	RI, MS	
11	16.005	997.92	5-Hepten-2-one, 6-methyl-	6-甲基-5-庚烯-2-醇	∕	∕	3.21 ± 0.35	∕	∕	RI, MS	
12	16.410	1 008.86	3-Octanol	3-辛醇	2.23 ± 0.14	∕	1.52 ± 0.12	∕	∕	RI, MS	
13	19.656	1 093.49	cis-Linalool oxide	顺- $\alpha,\alpha$ -5-三甲基-5-乙烯基四氢吡喃-2-甲醇	∕	2.99 ± 0.73	4.82 ± 0.65	11.84 ± 0.91	∕	RI, MS	
14	20.481	1 118.85	Linalool	芳樟醇	8.45 ± 0.17	8.35 ± 1.23	4.11 ± 0.09	6.06 ± 0.51	0.86 ± 0.01	RI, MS	
15	21.064	1 134.95	Phenylethyl Alcohol	苯乙醇	3.55 ± 0.12	10.08 ± 1.90	∕	11.65 ± 1.17	6.52 ± 1.78	RI, MS	
16	23.224	1 195.63	(3R,6S)-2,2,6-Trimethyl-6-vinyltetrahydro-2H-pyran-3-ol	(3R,6S)-2,2,6-三甲基-6-乙烯基四氢-2H-吡喃-3-醇	∕	0.92 ± 0.22	∕	1.28 ± 0.11	0.67 ± 0.13	RI, MS	
17	23.326	1 197.61	Terpinen-4-ol	4-松油醇	2.54 ± 0.28	2.26 ± 0.44	1.72 ± 0.14	3.65 ± 0.59	∕	RI, MS	
18	23.829	1 212.29	$\alpha$ -Terpineol	$\alpha$ -松油醇	7.51 ± 0.07	8.58 ± 3.15	6.30 ± 0.19	16.54 ± 1.37	∕	RI, MS	
19	24.787	1 241.20	Trifluoroacetyl-lavandulol	三氟乙酰-薰衣草醇	∕	∕	∕	1.34 ± 0.27	∕	RI, MS	
20	25.077	1 249.68	6-Octen-1-ol, 3,7-dimethyl-, (R)-	(R)-3,7-二甲基-6-辛烯醇	8.60 ± 0.15	∕	∕	∕	∕	RI, MS	
21	25.079	1 249.74	Citronellol	香茅醇	∕	∕	29.39 ± 1.18	∕	∕	RI, MS	
22	25.189	1 252.96	Isogeraniol	异香叶醇	3.18 ± 0.29	3.65 ± 1.05	2.85 ± 0.21	5.83 ± 0.10	∕	RI, MS	
23	25.198	1 253.23	2,6-Octadien-1-ol, 3,7-dimethyl-, (Z)-	橙花醇	∕	10.84 ± 3.71	∕	23.08 ± 0.06	0.86 ± 0.01	RI, MS	
24	26.120	1 281.13	Geraniol	香叶醇	91.002 ± 11.61	39.52 ± 6.38	108.03 ± 24.77	45.77 ± 2.66	152.51 ± 7.16	6.74 ± 0.81	RI, MS

醇类

续表 3

NO.	保留时 间/min	RI	挥发性物质	原汁	真空浓缩	结冰解冻	冷冻浓缩	二级冷冻	一级冷冻 + 真空	鉴定 方法
25	12.029	901.61	Styrene	∕	∕	3.51 ± 1.10	2.81 ± 0.57	∕	∕	RI, MS
26	16.318	1 006.18	<i>β</i> -Myrcene	∕	3.56 ± 0.27	7.39 ± 1.12	2.81 ± 0.15	11.41 ± 0.86	∕	RI, MS
27	16.257	1 001.73	<i>β</i> -Pimene	∕	∕	5.07 ± 0.37	1.29 ± 0.07	∕	∕	RI, MS
28	16.226	1 005.08	<i>β</i> -Phellandrene	∕	∕	∕	∕	∕	∕	RI, MS
29	17.705	1 042.55	Limonene	2.66 ± 0.44	24.43 ± 4.70	4.07 ± 0.75	2.09 ± 0.14	55.30 ± 7.82	26.66 ± 9.12	RI, MS
30	18.078	1 053.29	trans- <i>β</i> -Ocimene	1.08 ± 0.18	∕	2.55 ± 0.08	0.79 ± 0.04	2.53 ± 0.08	∕	RI, MS
31	18.511	1 064.07	<i>γ</i> -Terpinene	1.47 ± 0.23	∕	2.25 ± 0.83	∕	2.50 ± 0.15	∕	RI, MS
32	33.298	1 509.95	(4a <i>S</i> ,9a <i>R</i> )-3,5,5,9-Tetramethyl- 2,4a,5,6,7,9a-hexahydro-1 <i>H</i> - benzo[7]annulene	0.56 ± 0.13	∕	∕	∕	∕	∕	RI, MS
33	33.757	1 525.26	Naphthalene, 1,2,3,5,6,8a-hexahydro-4,7- dimethyl-1-(1-methylethyl)-, (1 <i>S</i> -cis)-	0.44 ± 0.09	∕	∕	∕	∕	∕	RI, MS
34	10.529	865.93	2-Hexenal	∕	∕	∕	∕	∕	1.22 ± 0.02	RI, MS
35	25.494	1 263.26	cis-Citral	0.19 ± 0.01	∕	∕	1.09 ± 0.28	1.00 ± 0.20	∕	RI, MS
36	26.584	1 292.40	2,6-Octadienal, 3,7- dimethyl-, (E)-	1.88 ± 0.13	∕	1.84 ± 0.10	∕	2.77 ± 0.1	∕	RI, MS
37	11.188	880.71	Formic acid, hexyl ester	∕	∕	∕	9.30 ± 0.63	∕	∕	RI, MS
38	19.678	1 090.01	Ethyl 2-(5-methyl-5- vinyltetrahydrofuran-2-yl) propan-2-yl carbonate	1.53 ± 0.19	∕	9.23 ± 1.92	∕	1.18 ± 0.21	∕	RI, MS
39	30.112	1 403.70	Geranyl acetate	1.95 ± 0.04	∕	∕	∕	∕	∕	RI, MS
40	25.093	1 250.15	6-Octen-1-ol, 3,7-dimethyl-, formate	∕	∕	∕	∕	1.97 ± 0.002	∕	RI, MS
41	5.520	734.92	Acetoin	∕	21.13 ± 7.97	∕	4.53 ± 0.85	∕	∕	RI, MS
42	22.447	1 167.71	4 <i>H</i> -Pyran-4-one, 2,3-dihydro- 3,5-dihydroxy-6-methyl-	3.12 ± 1.84	∕	25.61 ± 0.85	3.01 ± 2.53	∕	∕	RI, MS

续表 3

NO.	保留时 间/min	RI	挥发性物质	原汁	真空浓缩	结冰解冻	冷冻浓缩	二级冷冻	一级冷冻 + 真空	鉴定 方法
43	19.788	1 099.38	Benzene, (2-methoxyethyl)-	3.90 ± 0.29	∕	5.21 ± 1.92	1.59 ± 0.22	4.79 ± 0.1	∕	RI,MS
44	20.785	1 127.62	2H-Pyran, tetrahydro-4- methyl-2-(2-methyl-1- propenyl)-	∕	∕	∕	1.24 ± 0.08	∕	∕	RI,MS
45	20.986	1 129.77	trans-Rose oxide	1.11 ± 0.04	3.15 ± 2.40	1.13 ± 0.32	0.57 ± 0.04	2.27 ± 0.56	1.97 ± 0.05	RI,MS
46	11.020	876.93	p-Xylene	∕	∕	∕	0.64 ± 0.34	∕	∕	RI,MS
47	17.423	1 036.001	Benzene, 1-ethyl-2,4-dimethyl-	∕	∕	∕	0.46 ± 0.01	∕	∕	RI,MS
48	17.554	1 039.55	o-Cymene	∕	∕	∕	∕	1.28 ± 0.33	∕	RI,MS
49	20.056	1 107.32	Benzene, 1-methyl-4-(1- methylphenyl)-	∕	∕	∕	∕	∕	2.79 ± 0.67	RI,MS
50	11.911	895.76	2,4-Dithiapentane	2.09 ± 0.1	∕	1.86 ± 0.54	0.49 ± 0.18	1.48 ± 0.02	∕	RI,MS
51	15.810	993.10	Heptane, 2,4,6,6-pentamethyl-	14.57 ± 0.51	∕	∕	∕	∕	∕	RI,MS
52	18.381	1 061.88	1,3,6-Octatriene, 3,7- dimethyl-, (Z)-	∕	∕	∕	1.09 ± 0.02	∕	∕	RI,MS
53	19.402	1 090.82	trans-Linalool oxide (furanoid)	∕	∕	∕	1.48 ± 0.33	3.35 ± 0.05	∕	RI,MS
54	21.513	1 146.44	1-Cyclohexene-1-methanol, α,α,4-trimethyl-	∕	∕	∕	∕	2.12 ± 0.61	∕	RI,MS
55	22.441	1 174.32	2H-Pyran, 3,6-dihydro- 4-methyl-2-(2-methyl-1- propenyl)-	1.80 ± 0.48	∕	∕	1.18 ± 0.48	∕	2.59 ± 0.22	RI,MS
56	34.050	1 536.71	2,4-Di-tert-butylphenol	∕	1.07 ± 0.44	∕	∕	0.91 ± 0.19	0.68 ± 0.25	∕
57	38.241	1 685.72	Neointermedeol	∕	∕	1.31 ± 0.30	∕	∕	∕	∕

注: RI 表示通过保留指数鉴定, MS 表示质谱。

### 3 结论

本实验以荔枝汁为对象,探究5种不同浓缩方式对浓缩汁品质特性的影响,以色差、可溶性糖、维生素C、总酚、FRAP还原能力、菌落总数、霉菌和酵母、乳酸菌、表观黏度、触变性、粒径和PDI、挥发性物质等作为评价指标并对其进行分析。结果表明,不同浓缩方式对浓缩荔枝汁的品质有显著影响:真空浓缩处理组在总酚含量、抗氧化能力方面较其他处理组分别提高8.32%~21.17%、2.38%~35.37%,粒径较其他处理组降低(5.76%~57.26%),色泽方面,总色差值 $\Delta E^*$ 较未处理组变化最小,因此判断其对浓缩汁营养物质保留效果优于其他处理组。冷冻浓缩+真空浓缩对微生物的杀灭效果最好,二者具有协同杀菌的作用。二级冷冻浓缩处理组的挥发性物质总含量、典型香气物质含量、挥发性物质种类皆为最高,且消失的挥发性物质数目最少,所以判断其挥发性物质保护效果最好,因此认为,真空浓缩处理和二级冷冻浓缩处理在保护荔枝汁的理化和风味品质方面各有优势。此外,5种浓缩方式中,真空浓缩时间最短,浓缩效率最高,综合考量,建议当前可将真空浓缩作为浓缩荔枝汁相对较适宜的方式。未来可在二者的联合处理上继续深入研究,以期获得最佳浓缩模式。

### 参考文献

- [1] WANG D, DENG Y, CHEN X, et al. Elucidating the effects of *Lactobacillus plantarum* fermentation on the aroma profiles of pasteurized litchi juice using multi-scale molecular sensory science [J]. *Current Research in Food Science*, 2023, 6: 100481.
- [2] 贾照志,周晖.荔枝的药用价值[J].*大家健康(学术版)*, 2013,7(3):196-197.
- [3] Pareek S. Chapter 17-nutritional and biochemical composition of lychee (*Litchi chinensis* Sonn.) Cultivars [C]// Simmonds M S J, Preedy V R. *Nutritional Composition of Fruit Cultivars*. San Diego: Academic Press, 2016: 395-418.
- [4] 齐文娥,陈厚彬,罗滔,等.中国大陆荔枝产业发展现状、趋势与对策[J].*广东农业科学*,2019,46(10):132-139.
- [5] 陈厚彬,苏钻贤,杨胜男.2022年全国荔枝生产形势分析[J].*中国热带农业*,2022,3:5-14.
- [6] 曾杨.荔枝汁冷冻浓缩技术研究[D].广州:华南理工大学,2010.
- [7] 赵芳.荔枝浓缩汁工艺研究[D].长沙:中南林业科技大学,2012.
- [8] 秦贵丰,丁中祥,原姣姣,等.苹果汁冷冻浓缩与真空蒸发浓缩效果的对比[J].*食品科学*,2020,41(7):102-109.
- [9] ORELLANA-PALMA P, PETZOLD G, ANDANA I, et al. Retention of ascorbic acid and solid concentration via centrifugal freeze concentration of orange juice [J]. *Journal of Food Quality*, 2017, 4: 1-7.
- [10] VISUTHIWAN S, ASSATARAKUL K. Kinetic modeling of microbial degradation and antioxidant reduction in lychee juice subjected to UV radiation and shelf life during cold storage [J]. *Food Control*, 2021, 123: 107770.
- [11] SINGH V, DAS C. Clarification of Citrus fruit (*Mosambi*) juice by hybrid (Pretreatment and Membrane) process [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 47: 1384-1388.
- [12] QIN F G F, DING Z, PENG K, et al. Freeze concentration of apple juice followed by centrifugation of ice packed bed [J]. *Journal of Food Engineering*, 2021, 291: 110270.
- [13] ROSLI N N H M, HARUN N H, RAHMAN R A, et al. Preservation of total phenolic content (TPC) in cucumber juice concentrate using non-thermal progressive freeze concentration: Quantitative design characteristics and process optimization [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 330: 129705.
- [14] FADAVI A, YOUSEFI S, DARVISHI H, et al. Comparative study of ohmic vacuum, ohmic, and conventional-vacuum heating methods on the quality of tomato concentrate [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2018, 47: 225-230.
- [15] ORELLANA-PALMA P, GUERRA-VALLE M, GIANELLI M P, et al. Evaluation of freeze crystallization on pomegranate juice quality in comparison with conventional thermal processing [J]. *Food Bioscience*, 2021, 41: 101106.
- [16] KWAW E, MA Y, TCHABO W, et al. Effect of *lactobacillus* strains on phenolic profile, color attributes and antioxidant activities of lactic-acid-fermented mulberry juice [J]. *Food Chemistry*, 2018, 250: 148-154.
- [17] WU W, XIAO G, YU Y, et al. Effects of high pressure and thermal processing on quality properties and volatile compounds of pineapple fruit juice [J]. *Food Control*, 2021, 130: 108293.
- [18] 蔡天.控温超声辅助酶解对苹果浊汁稳定性及风味的影响[D].锦州:渤海大学,2021.
- [19] AN K J, LIU H C, FU M Q, et al. Identification of the cooked off-flavor in heat-sterilized lychee (*Litchi chinensis* sonn.) Juice by means of molecular sensory science [J]. *Food Chemistry*, 2019, 301: 125282.
- [20] 门戈阳.局部块冰式多级冷冻浓缩制备高浓度苹果醋的研究[D].南昌:南昌大学,2016.
- [21] 陈国辉.杏汁冷冻浓缩技术的研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2013.

- [22] DEBBARMA T, THANGALAKSHMI S, TADAKOD M, et al. Comparative analysis of ohmic and conventional heat-treated carrot juice [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 45(9): e15687.
- [23] 王喜芳,李保国,朱珩.草莓液氮速冻特性及营养品质的研究[J].*包装工程*,2018,39(23):62-68.
- [24] 王丹,王智能,董丽红,等.灭菌和贮藏温度对荔枝汁中多酚化合物组成、含量及其抗氧化活性的影响[J].*食品工业科技*,2021,42(11):275-280.
- [25] ZHANG R F, ZENG Q S, DENG Y Y, et al. Phenolic profiles and antioxidant activity of litchi pulp of different cultivars cultivated in Southern China [J]. *Food Chemistry*, 2013, 136(3-4): 169-176.
- [26] MAGHSOUDLOU Y, ASGHARI GHAJARI M, TAVASOLI S. Effects of heat treatment on the phenolic compounds and antioxidant capacity of quince fruit and its tisane's sensory properties [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2019, 56(5): 2365-2372.
- [27] ALONGI M, VERARDO G, GORASSINI A, et al. Phenolic content and potential bioactivity of apple juice as affected by thermal and ultrasound pasteurization [J]. *Food & Function*, 2019, 10(11): 7366-7377.
- [28] 龙倩倩.西番莲果汁加工过程中香气成分变化[D].广州:华南农业大学,2018.
- [29] MAPELLI-BRAHM P, STINCO C M, RODRIGO M J, et al. Impact of thermal treatments on the bioaccessibility of phytoene and phytofluene in relation to changes in the microstructure and size of orange juice particles [J]. *Journal of Functional Foods*, 2018, 46: 38-47.
- [30] YU Y S, XIAO G S, WU J J, et al. Comparing characteristic of banana juices from banana pulp treated by high pressure carbon dioxide and mild heat [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2013, 18: 95-100.
- [31] WANG L L, CHENG Y M, LI, Z G. The effects of freezing on soybean microstructure and qualities of soymilk [J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 116(1): 1-6.
- [32] MANJUNATHA S S, RAJU P S. Modelling the Rheological behaviour of tender coconut (*Cocos nucifera* L) water and its concentrates [J]. *International Food Research Journal*, 2013, 20(2): 731-743.
- [33] YAMAMOTO S A, HARRIS L J. The effects of freezing and thawing on the survival of *Escherichia coli* O157: H7 in apple juice [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2001, 67(1-2): 89-96.
- [34] 吴逸华,王海滨.热杀菌对速冻木瓜果肉果汁感官特性、Vc含量及菌落总数的影响[J].*武汉工业学院学报*,2012, 31(4):17-20.
- [35] 张丽娟,邹波,肖更生,等.黄皮原浆超高压和热杀菌的比较分析[J].*现代食品科技*,2021,37(9):200-206.
- [36] MANDHA J, SHUMOY H, MATEMU A O, et al. Characterization of fruit juices and effect of pasteurization and storage conditions on their microbial, physicochemical, and nutritional quality [J]. *Food Bioscience*, 2023, 51: 102335.
- [37] YODA T, MIYAKI H, SAITO T. Freeze concentrated apple juice maintains its flavor [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 1-10.