

# 液氮喷雾速冻及梯度解冻在荔枝品质保鲜上的优势

吴炜俊<sup>1,2</sup>, 程丽娜<sup>2\*</sup>, 徐玉娟<sup>2</sup>, 余元善<sup>2</sup>, 邹波<sup>2</sup>, 李俊<sup>2</sup>, 肖更生<sup>2,3\*</sup>

(1. 华南农业大学食品学院, 广东广州 510640)(2. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所/农业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)

(3. 仲恺农业工程学院轻工食品学院, 广东广州 510225)

**摘要:** 为探究荔枝的冻融特性, 确定其适宜的冻融方式, 该研究通过液氮喷雾速冻(-40 °C/-60 °C/-80 °C/-100 °C)和梯度解冻(-20 °C/0 °C/5 °C/4 °C/25 °C)对荔枝冻融特性和品质的影响, 并以传统冰柜冻结、浸渍冷冻、室温解冻为对比。结果表明: 在-20~100 °C范围内, 温度越低, 穿过最大冰晶生成带时间越短, 对冻结荔枝的保护效果越好; -100 °C液氮喷雾速冻联合“-20 °C~5 °C~4 °C~25 °C”组梯度解冻能够保持新鲜荔枝营养成分和生物活性物质(多酚、可溶性糖、Vc含量分别为3.92 mg/g、150.69 mg/g、2.15 mg/g)85.00%以上, 其水分流失仅为5.05%, 硬度保留率为57.00%; 细胞结构完整性较好, 抑制了液泡中的自由水向细胞间和细胞壁的流动, 最大程度维持了组织内水分的原有分布。综上, 液氮喷雾速冻联合梯度解冻是荔枝适宜的冻融方式, 能够较好地维持其品质效果, 研究结果可为荔枝的工业贮存与加工提供技术支持。

**关键词:** 荔枝; 液氮喷雾速冻; 梯度解冻; 冻融特性; 营养品质

文章编号: 1673-9078(2022)03-105-114

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.3.0474

## Advantages of Spray Liquid Nitrogen Quick Freezing and Gradient Thawing for Quality Preservation of Litchi

WU Weijun<sup>1,2</sup>, CHENG Lina<sup>2\*</sup>, XU Yujuan<sup>2</sup>, YU Yuanshan<sup>2</sup>, ZOU Bo<sup>2</sup>, LI Jun<sup>2</sup>, XIAO Gengsheng<sup>2,3\*</sup>

(1. College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510640, China) (2. Institute of Sericulture and Agricultural Products Processing, Guangdong Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Functional Food, Ministry of Agriculture/Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China) (3. Zhongkai College of Agricultural Engineering of Light Industry Food Institute, Guangzhou 510225, China)

**Abstract:** In order to explore the freeze-thaw characteristics of litchi and determine its suitable freeze-thaw method, the effects of spray liquid nitrogen quick freezing (-40 °C/-60 °C/-80 °C/-100 °C) and gradient thawing (-20 °C/0 °C/5 °C/4 °C/25 °C) on the freeze-thaw characteristics and quality of litchi were investigated. The obtained results were compared with those of conventional freezer freezing, immersion freezing and ambient temperature thawing. The results show that in the range of -20 °C~100 °C, the lower the temperature, the shorter the time required to pass through the zone of maximum ice crystal formation, and the better the protective effect on frozen litchi. The combination of spray liquid nitrogen quick freezing at -100 °C and a gradient thawing process (-20 °C~5 °C~4 °C~25 °C) preserved over 85.00% of nutrients and bioactive substances of fresh litchi (polyphenol content, soluble sugar content, Vc content were 3.92 mg/g, 150.69 mg/g, 2.15 mg/g, respectively). This combined treatment caused only 5.05% of water loss and 57.00% of hardness retention rate, and maintained quite

引文格式:

吴炜俊,程丽娜,徐玉娟,等.液氮喷雾速冻及梯度解冻在荔枝品质保鲜上的优势[J].现代食品科技,2022,38(3):105-114

WU Weijun, CHENG Lina, XU Yujuan, et al. Advantages of spray liquid nitrogen quick freezing and gradient thawing for quality preservation of litchi [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(3): 105-114

收稿日期: 2021-04-30

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2020B020225003); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2019A151110559); 广东省农业科学院“优秀博士”人才项目(R2020YJ-YB2001); 广东省现代农业产业共性关键技术研发创新团队建设项目(2021KJ117); 广东省农业科学院青年导师项目(R2020QD-031)

作者简介: 吴炜俊(1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 13326828196@163.com

通讯作者: 程丽娜(1990-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向: 果蔬加工新技术, E-mail: cheng.lina@mail.scut.edu.cn; 共同通讯作者: 肖更生(1965-), 男, 研究员, 研究方向: 果蔬精深加工, E-mail: guoshuxgs@163.com

well the integrity of cell structures, which suppressed the flow of free water from the vacuoles towards the intercellular spaces between cells and in the cell walls. In summary, spray liquid nitrogen quick freezing combined with gradient thawing is a suitable freeze-thaw method for litchi, which can maintain its quality. The results of this study provide valuable support for the industrial storage and processing of litchi.

**Key words:** litchi; spray liquid nitrogen quick freezing; gradient thawing; freeze-thaw characteristics; nutritional quality

荔枝 (*Litchi Chinese Soon.*) 是一种营养价值高、口感和风味独特的亚热带水果, 享有“水果之王”美誉, 颇受国内外消费者青睐<sup>[1]</sup>。荔枝以产地鲜销为主, 成熟期一般集中在 5~7 月的高温多湿季节, 采摘后易受微生物侵染或机械性损伤导致品质劣变, 且采后损失严重, 素有“一日色变, 三日味变”之说, 即使利用现代保鲜技术保存在气调低温环境下, 货架期仍不足 30 d<sup>[2,3]</sup>, 严重限制其附加值和降低产业经济效益。

冷冻是一种有效的水果保藏方式, 但由于传统冷冻方式存在冻结速率慢、传热系数低、形成的冰晶量少而粗大等缺点, 导致冻品品质较差<sup>[4]</sup>, 提高冷冻速率是解决这类问题的有效途径。液氮喷雾速冻 (Liquid nitrogen spray freezing, LNF) 具有传热速度快、穿过最大冰晶生产成本带时间短、形成的尺寸细小且均匀分布的优势, 能够保护冻品品质<sup>[5-7]</sup>。Abdullah 等<sup>[8]</sup>在椰枣的速冻研究中表明, 液氮速冻在冷冻速率及营养特性等方面显著优于传统冷冻方式。Lopkulkiaert 等<sup>[9]</sup>在南美白对虾的速冻研究中表明, 液氮速冻在冷冻速率、持水性等方面显著优于风冷、架子接触式冷冻。Cheng 等<sup>[10]</sup>在蓝莓的速冻研究中表明, 液氮速冻在冷冻速率、汁液流失率等方面显著优于浸渍和冰柜冷冻。吴炜俊等<sup>[11]</sup>在杨梅的液氮喷雾速冻 (-20~100 °C) 研究中也类似的结论, 液氮喷雾速冻在杨梅品质保鲜上具有显著的优势, 且随温度的降低, 冻品杨梅的品质最佳。冻品的品质损失程度取决于诸多因素, 例如冻前的预冷、冷冻速率、储存温度, 尤其是解冻方法<sup>[12]</sup>, 解冻是冷冻处理后不可或缺的存在。梯度解冻是指冻品在不同温度梯度下, 经过不同温度阶段的解冻处理, 最终达到汁液流失最少, 冻品品质保留效果最好为目的的解冻方式。ROIHA 等<sup>[13]</sup>研究了冷冻鳕鱼在不同温度 (10 °C、10~-0.5 °C) 下的解冻情况, 发现在 10 °C 解冻 2 h, 再给予 -0.5 °C 处理, 解冻后汁液流失少, 品质保持佳。

目前关于荔枝冻融的研究相对匮乏, Liang 等<sup>[14]</sup>发现 -35 °C 浸渍冷冻的冻结处理, 通过保护微观结构和降低汁液流失率, 可显著延长其冻藏期 6 个月。目前, 暂无关于液氮喷雾速冻和梯度解冻荔枝的相关报道。本研究分析了液氮喷雾速冻的不同温度对荔枝冻结特性的影响, 同时以冰柜冻结和浸渍冷冻为对比;

并联合梯度解冻探索了荔枝的冻融规律, 最终获得最适宜的冻融处理模式, 为荔枝速冻保鲜提供技术参考, 同时为果蔬速冻行业提供进一步理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与设备

#### 1.1.1 材料

荔枝 (冷冻实验: 妃子笑品种; 解冻实验: 桂味品种), 采购于水果农贸市场 (广东广州), 分类筛选大小形状均一、无机械性损伤、无虫害霉变的荔枝, 每 6 颗荔枝/袋用密封袋 (13×18 cm) 真空包装后置于 4 °C 冷库预冷 24 h, 以备待用。

注: 由于荔枝上市期短, 解冻实验是在冷冻实验确定最适宜的冷冻方式和冷冻温度的基础上开展的, 因此, 二者为两批不同品种的荔枝果实。

#### 1.1.2 主要仪器

DJL-QF 液氮喷雾速冻机, 深圳市德捷力冷冻科技有限公司; Ultra Scan VIS 型全自动色差仪, 英国 Hunter Lab 公司; Infinite M200PRO 酶标仪, 瑞士 TECAN 公司; TA XTplus 质构仪, 英国 Stable Micro System 公司; CR22GIII 高速冷冻离心机, 日本日立公司; UV1800 型紫外可见分光光度计, 日本岛津公司; Cary Eclipse 分子荧光分光光度计, 美国 Varian 公司; TC-08 热电偶温度采集仪, Omega Engineering Inc., CT, USA; T type 热电偶, Omega Engineering Inc., CT, USA。

#### 1.1.3 实验方案

冷冻和解冻实验处理如表 1 所示, 采用液氮喷雾速冻机分别设置处理温度为 -40±2 °C、-60±2 °C、-80±2 °C、-100±2 °C, 冷冻实验以样品核心温度达到 -20 °C 为终点, 冷冻后置于 -20 °C 冰柜中保存以备待测, 测定于冰箱 (4 °C) 作解冻处理后进行指标分析。

在冷冻实验基础上, 确定 LNF<sub>-100 °C</sub> 为合适的荔枝冻结处理方式, 准备 LNF<sub>-100 °C</sub> 冻结荔枝, 作为解冻实验样品, 解冻梯度以样品核心温度达到每一阶段的环温为终点。冷冻和解冻温度通过热电偶测定温度数据由热电偶连接的数据采集器在线获得。

表1 不同冻融处理方式

Table 1 Different methods of freezing and thawing

冷冻处理组	处理方式	解冻处理组	处理方式
LNF <sub>-40</sub> °C	液氮速冻-40±2 °C	LT1	-20 °C~-5 °C~4 °C~25 °C
LNF <sub>-60</sub> °C	液氮速冻-60±2 °C	LT2	-20 °C~0 °C~4 °C~25 °C
LNF <sub>-80</sub> °C	液氮速冻-80±2 °C	LT3	-20 °C~4 °C~25 °C
LNF <sub>-100</sub> °C	液氮速冻-100±2 °C	LT4	-20 °C~-5 °C~25 °C
IF <sub>-20</sub> °C	浸渍冷冻、冰柜冷冻-20 °C	LT5	-20 °C~0 °C~25 °C
RF <sub>-20</sub> °C	冰柜速冻-20 °C	LT6	-20 °C~25 °C

## 1.2 测定指标

### 1.2.1 冷冻时间

采用热电偶温度采集仪监测并记录不同冷冻处理组从初始温度(4 °C)到冷冻终温(-20 °C)所需时间,包括通过最大冰晶生成带(-1 °C~-5 °C)的时间。

### 1.2.2 水分流失(Water Loss, WL)

测定方法参考 Utrera 等<sup>[15]</sup>,具体为:准确称量冷冻前、解冻后荔枝整果的重量,分别为  $m_1$ 、 $m_2$ ,水分流失计算公式如式(1):

$$WL / \% = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100\% \quad (1)$$

### 1.2.3 色泽(Color)

采用全自动色差仪的反射模式测定荔枝果壳的色泽变化,记录颜色参数为光度值  $L^*$ 、红绿值  $a^*$  和黄蓝值  $b^*$ ,以新鲜组作为色泽测定参比样,色泽变化值  $\Delta E$  计算公式如式(2)<sup>[16]</sup>:

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

### 1.2.4 硬度(Hardness)

对解冻前、后的荔枝整果进行硬度测试:采用 p50 圆柱形平底探头,测试前速度 1.60 mm/s,测试中速度 0.8 mm/s,测试后速度 2.00 mm/s,压缩变性程度 30.0%,触发力为 5.0 g,时间为 10 s,以两次压缩最大峰值的平均值作为样品的硬度指标,每组样品随机取样并进行 15 次平行测定。所有样品测试前在室温下放置 1 h,避免硬度测试受到温度的干扰<sup>[17]</sup>。

### 1.2.5 可溶性糖(Soluble sugar)

参考 Yang 等<sup>[18]</sup>方法,具体为:取荔枝果肉样品 10 g,分别采用热水浸提法提取、苯酚-硫酸法测定、葡萄糖法绘制标准曲线,最终结果以葡萄糖当量表示。

### 1.2.6 维生素 C(Vitamin C, Vc)

取 1 g 荔枝果肉样品,加入 20 mL 1% (W/V) 草酸,离心,取上清,避光反应 40 min。采用荧光法测定,荧光测定条件为:激发波长 355 nm,发射波长 425 nm;两端狭缝均为 5 nm;适当灵敏度条件下测定

各管的荧光强度和空白荧光强度,样品荧光强度减去样品空白荧光强度,取得相对的荧光强度。

### 1.2.7 多酚(Polyphenol)、花色苷(Anthocyanin)、氧化自由基吸收能力(Oxidation free radical absorptive capacity, ORAC)

取荔枝果壳 2 g,样品提取方法参考 Alothman 等<sup>[19]</sup>,多酚测定方法参考 Yu 等<sup>[20]</sup>采用福林酚法测定 OD<sub>760nm</sub> 吸光值,通过没食子酸标准曲线换算成总酚含量。

花色苷含量参照 Jiang 等<sup>[21]</sup>方法并稍作修改,以上述酚类提取液作为花色苷提取液,于分光光度计上分别测 510 nm 和 700 nm 的吸光度:

$$A = (A_{510} - A_{700})pH_{1.0} - (A_{510} - A_{700})pH_{4.5} \quad (3)$$

则粗提物样品液中花色苷的浓度为:

$$C / (\text{mg} / 100\text{g}) = (A \times M_w \times f \times 1000) \times V / (\epsilon \times 1 \times m) \quad (4)$$

式中:

$M_w$ —花色苷的分子量 449.2;

$f$ —稀释因子;

$\epsilon$ —主要花色苷的摩尔吸收率 26900。

ORAC 测定参考 Steed 等<sup>[22]</sup>方法,采用酶标仪进行荧光测定,设备参数:激发波长 485 nm,发射波长 520 nm,循环 35 次,每个循环 2.5 min。以 Trolox 为标准品,结果以 Trolox 当量表示( $\mu\text{mol/L}$ )。

### 1.2.8 多酚氧化酶(Polyphenol oxidase, PPO)

取荔枝果壳 5 g, PPO 活性测定参考 Ali 等<sup>[23]</sup>和 Martynenko 等<sup>[24]</sup>方法,在 OD<sub>410nm</sub> 处测定吸光值,每分钟变化 0.001 为一个酶活单位,酶活力表示为 U/(g·min)。

### 1.2.9 微观结构

参考 Wang 等<sup>[25]</sup>方法并稍作修改,采用扫描电子显微镜(SEM)对鲜样、解冻后荔枝果肉样品进行微观结构观察。具体为:从荔枝果肉横截面取样(1\*1 cm),随后用 2.5%戊二醛溶液在室温固定 2 h 后在 4 °C 下固定 24 h。固定后的样品用 pH 7.2、0.1 mol/L

的磷酸缓冲液清洗两次后,采用 50%、60%、70%、80%、90%、100%的乙醇梯度脱水各 30 min,最后用冷冻干燥机干燥。荔枝处理样的微观结构观察使用的是高真空电子扫描显微镜,将样品粘于扫描台的导电胶上,经离子溅射喷金后放入扫描电镜样品室进行观察,设备工作电压 15.0 kV,放大倍数 200 倍条件下进行。

### 1.2.10 体系水分布转态

低场核磁共振 (Low field nuclear magnetic resonance, LF-NMR) 常用来测定食品的水分状态、分布及含量比例。荔枝果肉中水分分布测量根据 YANG 等<sup>[26]</sup>方法,并作轻微修改。将荔枝果肉置于 NMR 的样品管底部,选择 CPMG 模式:回波时间为 0.2 ms、回波数为 5000、样品中心频率 200 kHz、循环延迟 2,扫描次数 32、测试温度为 25 °C。

## 1.3 数据处理与分析

采用 SPSS 24.0 对数据进行 ANOVA 分析和显著性比较,当  $p < 0.05$  时,表明具有显著性差异。所有实验无特殊标明,均保持 3 个平行,实验结果均用平均值±标准差 (mean±SD) 表示。

## 2 结果与讨论

### 2.1 液氮喷雾速冻对荔枝冻结和品质特性影响

#### 2.1.1 冻结特性

如图 1a 所示,荔枝的冻结过程包括预冷阶段(快速降温,4~-1 °C)、相变阶段(穿过最大冰晶生成带)、淬火阶段(-5~-20 °C)。一般认为,样品中心达到-5 °C 时,60%可冻结水已发生相变;不同温度液氮喷雾速冻、浸渍冷冻、冰柜冻结荔枝的成核点约为-1.5~-3 °C 左右,因此本文以-1~-5 °C 计为最大冰晶生成带区。不同冻结处理的冷冻总时间与相变时间(图 1b),可排序为:RF<sub>-20 °C</sub>>>IF<sub>-20 °C</sub>>>LNF<sub>-40 °C</sub>>LNF<sub>-60 °C</sub>>LNF<sub>-80 °C</sub>>LNF<sub>-100 °C</sub>。其中 LNF<sub>-60 °C</sub>较 RF<sub>-20 °C</sub>、LNF<sub>-40 °C</sub>冷冻总时间缩短 85.57%、24.55%,但是穿过最大冰晶生成带时间缩短 54.18%、6.47%,这说明前两者主要差异在于预冷和淬火阶段,其中冻结损伤差异主要发生在淬火阶段,由降温速率的不同和冰晶机械损伤造成;第一者与第三者的差异主要发生在相变阶段,由于冻结速率的不同导致;其他各组之间穿过最大冰晶生成带时间差异显著,表明冷冻荔枝品质的变化差异是由冷冻速率的不同、传热压力和冰晶机械压力共

同造成的<sup>[5]</sup>。LNF<sub>-100 °C</sub>组的淬火阶段时间约为 LNF<sub>-80 °C</sub>的一半,LNF<sub>-80 °C</sub>处理的相变时间仅约为 LNF<sub>-60 °C</sub>的 1/3 左右,说明-80 °C液氮喷雾速冻处理缩短荔枝冻结总时间的关键温度,-100 °C液氮喷雾冻结是保护荔枝品质的关键温度。

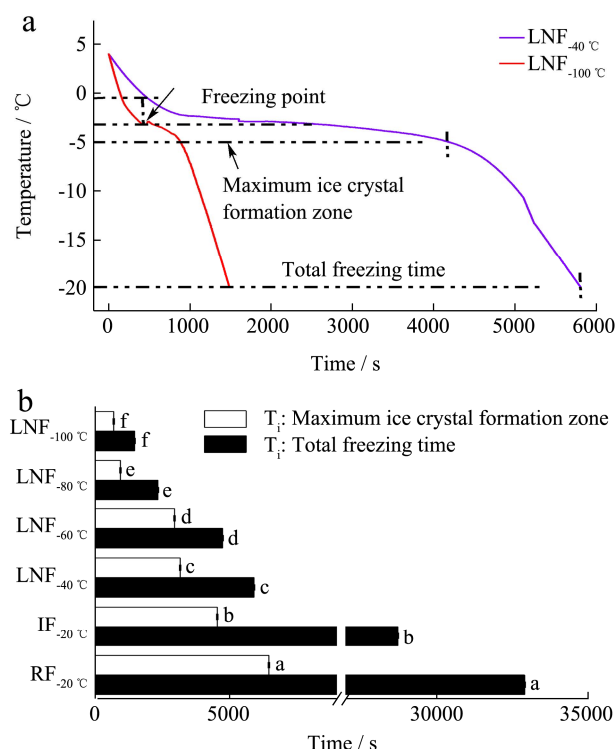


图 1 不同冻结处理对荔枝冷冻时间的影响

Fig.1 The effect of different freezing treatments on the freezing time of litchi

注: a: 冷冻曲线; b: 冷冻时间。

#### 2.1.2 物理特性

##### 2.1.2.1 硬度与水分流失

硬度常作为感官品质的主要评价依据之一,荔枝经不同温度的 LNF、IF、RF 处理后,硬度和水分流失的变化如图 2 所示。冷冻处理后,荔枝的硬度值较新鲜组(45.43 N)均发生显著下降,这主要是由于冰晶的冻融导致细胞骨架排列紧密度与支撑度的变化、细胞壁中果胶类物质的降解或细胞壁中钙离子的保护作用减弱导致荔枝的质地软化<sup>[27]</sup>,这与 Alhamdan 等<sup>[28]</sup>研究结果一致。结合水分流失的变化,大体可分为低温组(-20~-60 °C)与超低温组(-80~-100 °C):处理温度同为-20 °C 时,IF 的处理组硬度、汁液保持程度较 RF 优,这主要是由于前者的冷冻速率快于后者,穿过最大冰晶生成带的时间较后者显著缩短,冰晶对细胞结构的破坏程度小;处理温度降到-80 °C 时,硬度得到转折性升高,其中 LNF<sub>-80 °C</sub>处理组较 LNF<sub>-60 °C</sub>显著性升高 4.53%;LNF<sub>-60 °C</sub>处理组较 LNF<sub>-40 °C</sub>组仅下降 1.76%,二者之间无显著性差异;而 LNF<sub>-80 °C</sub>处理

组在水分流失方面较 LNF<sub>60</sub> °C 处理组下降 20.11%；LNF<sub>100</sub> °C 处理组较 LNF<sub>80</sub> °C 组下降 22.13%，但考虑到预实验中-120 °C 液氮处理会导致严重的裂果率和水流失，温度再进一步降低，不适宜对荔枝冻结。因此，综合考察，低温液氮喷雾速冻和浸渍冷冻优于冰柜冻结；在-20 °C~100 °C 范围内，-80 °C 是液氮喷雾速冻荔枝的物理指标变化转折点，进一步降低温度至-100 °C 液氮处理可能是保护营养成分相对较适宜的环温。

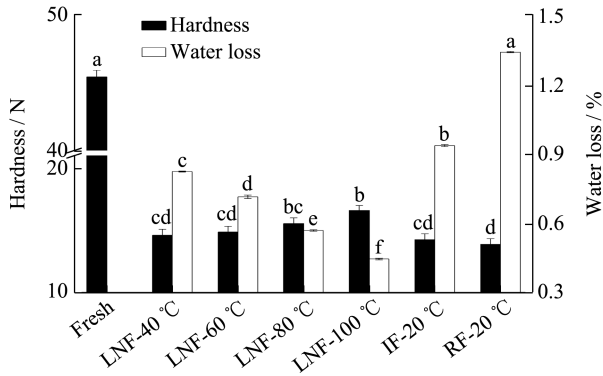


图2 不同冷冻方式对荔枝硬度和水分流失的影响

Fig.2 The effect of different freezing methods on litchi hardness and water loss

2.1.2.2 色泽

不同冷冻方式对荔枝色泽色差变化如图3所示，各组之间存在显著性差异 ( $p < 0.05$ )。新鲜荔枝色泽鲜亮，各组冷冻温度处理的荔枝冻融后的 L\*、a\*、b\* 值均明显下降，LNF 处理组内，随着冷冻温度的降低，L\*、a\*、b\* 值具有上升的趋势，对应  $\Delta E$  值降低，且明显优于 IF 和 RF 组处理效果；其中，LNF<sub>100</sub> °C 与新鲜荔枝最接近，且  $\Delta E$  值 (15.71) 最小，可视为处理效果最佳。

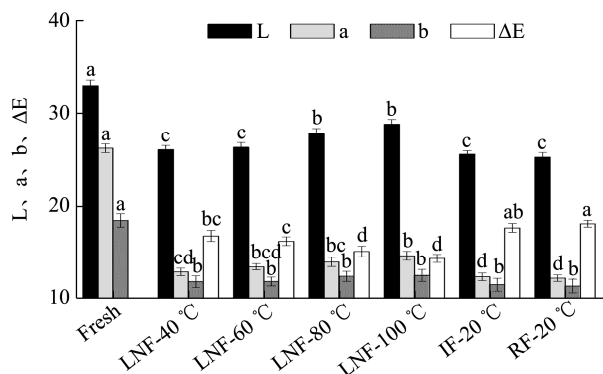


图3 不同冷冻方式对荔枝色泽的影响

Fig.3 The effect of different freezing methods on the color of litchi

这可能是由于不同冷冻方式在冻结过程中形成大小形状不一的冰晶，对荔枝造成机械性损伤，导致细胞壁产生不可逆的破坏，引起 PPO 等酶类发生不同程

度的激活<sup>[29]</sup>，激活的酶类与果壳中的酚类化合物接触后发生酶促反应，这类氧化产物通过氧化聚合反应形成褐变物质<sup>[5]</sup>；又因酚醛物质之间的关系，经冻融处理后氧气和酶的浓度增加，也是新鲜荔枝在冻融后褐变程度加深的重要原因<sup>[30]</sup>，从而导致亮度下降并引起 L\*、a\*、b\* 值不同程度的降低。一般来说，冷冻温度越低，冷冻速率越快，传热传质速率高，所形成的冰晶越细小且分布均匀，对细胞损伤程度越小<sup>[31]</sup>，对 L\*、a\*、b\* 值的影响程度也会减小。因此，通过对荔枝不同冷冻方式的色泽变化分析，可发现液氮喷雾速冻处理在维持果壳色泽方面效果较优于其它两种方式，而 LNF<sub>100</sub> °C 在色泽保护方面具有显著优势，能减少冰晶的机械损伤，是维持荔枝冷冻保鲜的重要方式。

2.1.3 功能性成分

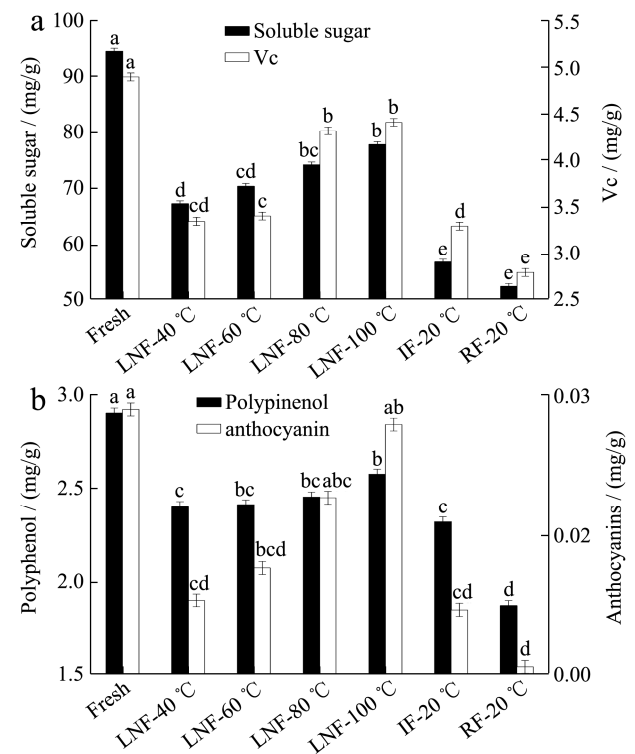


图4 不同冷冻处理对荔枝功能性成分的影响

Fig.4 The effect of different freezing treatments on the functional components of litchi

注：a：多糖和 Vc；b：多酚和花色苷。

多糖和 Vc 是荔枝重要的功能性营养成分，且为水溶性，与冻融后汁液流失存在密切相关性。荔枝经不同温度的 LNF、IF、RF 处理后，多糖和 Vc 含量发生一定程度下降，如图 4a 所示：各处理组间二者变化的显著性大体相符，按功能性成分保留率效果可分为：LNF<sub>100</sub> °C ≥ LNF<sub>80</sub> °C > LNF<sub>60</sub> °C > LNF<sub>40</sub> °C > IF<sub>20</sub> °C > RF<sub>20</sub> °C，这与水分流失的变化趋势类似，液氮喷雾速冻和浸渍冷冻优于冰柜冻结。值得注意的是，-60 °C 液氮处理是提高多糖和 Vc 保留率的第一个关键温度，

LNF<sub>-80</sub>℃与LNF<sub>-60</sub>℃之间存在显著性差异,-80℃液氮冻结是第二个关键温度。其中,LNF<sub>-40</sub>℃与LNF<sub>-60</sub>℃处理组间的荔枝多糖和Vc上无显著性差异,这与质构变化趋势相类似,主要是因为多糖除了存在汁液中,还包括果胶等成分储存于细胞壁中<sup>[32]</sup>;LNF<sub>-80</sub>℃处理较LNF<sub>-60</sub>℃处理的多糖保留率发生显著性上升,且与LNF<sub>-100</sub>℃之间无显著性差异,因此-80℃液氮处理是荔枝冻结的关键温度,-100℃液氮处理可能是保护营养成分相对较适宜的环温。

酚类物质是一种极利于身体健康的功能性营养成分,荔枝在LNF、IF、RF处理后多酚及花色苷含量均降低,如图4b所示,多酚及花色苷含量的保留效果排序相似:LNF<sub>-100</sub>℃>LNF<sub>-80</sub>℃≥LNF<sub>-60</sub>℃≥LNF<sub>-40</sub>℃≥IF<sub>-20</sub>℃>RF<sub>-20</sub>℃,显著性变化趋势与多糖和Vc的效果类似。LNF<sub>-100</sub>℃处理后多酚及花色苷含量能够分别保持鲜样(2.58 mg/g、2.79 mg/100 g)的88.81%、96.31%,具有明显的作用效果,较IF<sub>-20</sub>℃分别显著性提高11.04%、89.77%;以RF<sub>-20</sub>℃组处理效果最差,多酚、花色苷损失率高达35.42%、63.44%;因此,-100℃液氮处理是保持冷冻荔枝酚类物质最适宜的模式。这主要是由于LNF<sub>-100</sub>℃具备相对较快的冷冻速率,汁液流失少,对细胞保护作用强,因而营养成分损失少。

### 2.1.4 抗氧化特性

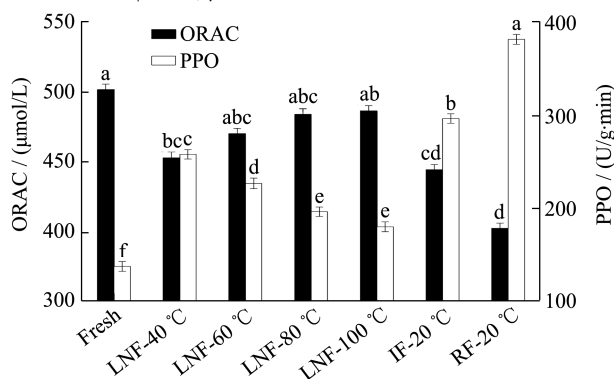


图5 不同冷冻处理对荔枝ORAC和PPO活性的影响

Fig.5 The effect of different freezing treatments on litchi ORAC and PPO activity

荔枝中酚类物质对氧化自由基吸收能力可表征其抗氧化能力,荔枝经不同温度的LNF、IF、RF处理后,ORAC和PPO酶活性变化如图5所示。通过图中可分析,各组间的显著性差异基本对应,温度越低,氧化自由基吸收能力(ORAC)越好,对应酶活性越低,这与Cano等<sup>[29]</sup>研究结果相类似;按抗氧化能力效果可分为:LNF<sub>-100</sub>℃>LNF<sub>-80</sub>℃≥LNF<sub>-60</sub>℃>LNF<sub>-40</sub>℃>IF<sub>-20</sub>℃>RF<sub>-20</sub>℃,这与色泽变化趋势类似,液氮喷雾速冻显著优于浸渍冷冻和冰柜冻结。值得注意的是,-60℃液氮处理是提高抗氧化能力的第一个关键温

度,与LNF<sub>-80</sub>℃处理对氧化自由基吸收能力无显著性差异,较LNF<sub>-40</sub>℃处理ORAC抗氧化能力显著性提高3.81%,PPO酶活性降低12.02%;而LNF<sub>-80</sub>℃与LNF<sub>-60</sub>℃之间存在显著性差异,-80℃液氮冻结是第二个关键温度,与LNF<sub>-100</sub>℃处理对PPO酶活性无显著性差异;LNF<sub>-100</sub>℃处理后ORAC抗氧化能力能够保持鲜样(272.37 μmol/L)的96.18%,对应PPO活性仅提高了31.16%;这是由于新鲜荔枝细胞结构中的PPO活性较低;酶的两种状态(游离态和结合态)在冻融处理后相互发生变化,细胞内容物中水分来不及迁移,随冷冻速率形成大小程度不一的冰晶,冰晶消长必对细胞结构产生不同程度的机械性损伤,进而导致H<sup>+</sup>离子强度及pH等发生变化,引起结合态PPO被激活而转化为游离态随汁液流出,从而使PPO活性呈上升趋势,引起酚类物质含量也随之下降,对应抗氧化能力降低<sup>[33]</sup>。因此,在-20~-100℃范围内,-100℃液氮处理是保持荔枝抗氧化能力的最适宜模式。

## 2.2 梯度解冻对速冻荔枝品质特性影响

### 2.2.1 物理性质

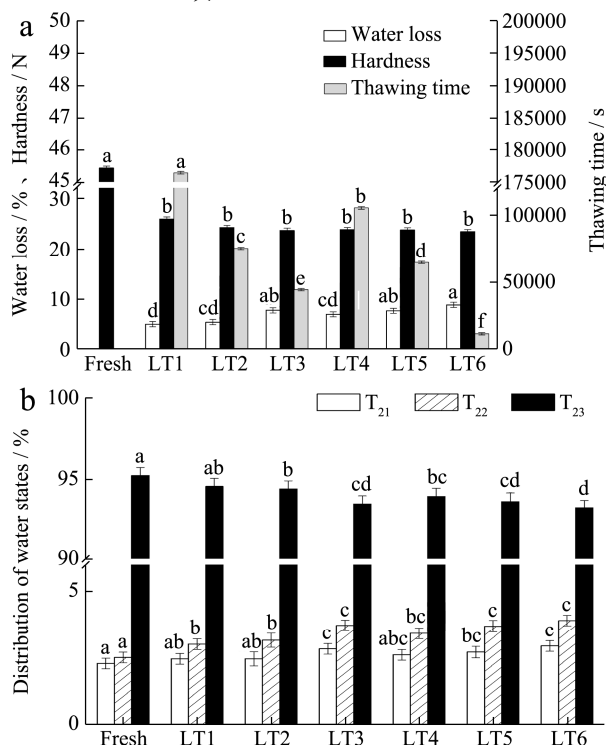


图6 不同解冻方法对荔枝物理性质的影响

Fig.6 Effects of various thawing method on the physical changes of litchi

注: a: 解冻时间、汁液流失和硬度; b: 水态分布。

不同梯度解冻方式对荔枝解冻时间、水分流失和硬度变化如图6a所示,各组间差异性显著(p<0.05)。解冻时间依次:LT1≥LT4>LT2>LT5>LT3>LT6,其中

LT6 组所需时间最短为 11899 s, LT1 解冻时间最长为 176433 s, 是其他组的 1.67~14.83 倍; 经冻融后, 硬度呈现降低趋势, 与水分流失的差异变化趋势基本对应, 顺序依次为 LT1>LT2>LT4>LT5>LT3>LT6; 梯度解冻处理组硬度、水分保持程度较室温解冻优; LT1 的硬度保持率可达 57.00%, 较其他组提高了 6.91%~10.54%, 其汁液流失率仅为 5.05%, 但硬度组间无差异性是因除了与汁液流失息息相关<sup>[34]</sup>, 同时果胶含量与细胞壁损伤程度等也是重要的影响因素<sup>[35,36]</sup>; LT6 组 WL 值最高为 8.86%, 硬度维持率为 48.43%, 这表明了解冻时间与水分流失/硬度之间不呈一定相关性。

解冻温度降低意味着荔枝表面空气与外部水蒸气压力差减小, 可使冰晶体溶化速度与水分转移及被吸附的速度相协调<sup>[37]</sup>, 水分蒸发和冰晶升华强度随之降低, 且使得冻品在冰冻状态下整体升温, 解冻均匀且条件温和; 荔枝经冻融后由于所形成的冰晶对细胞骨架的排列紧密度和细胞壁的完整性产生破坏, 组织中的总水分也会降低, 不易流动水会向自由水转化<sup>[38]</sup>, 最终以汁液形式流失, 从而导致果实软化, 对应硬度也降低, 引起果实质地变软。Li 等<sup>[39]</sup>采用 2 °C→6 °C→2 °C 低温梯度解冻方式对牛肉处理, 发现其有助于牛肉解冻, 与 4 °C 解冻相比, 可显著降低牛肉理化品质劣变和解冻汁液流失率, 且肌肉微观结构遭破坏程度较轻。

低场核磁共振的弛豫时间  $T_2$  可间接反映水的自由度, 各峰值面积占总面积的比例, 反映不同种类水的含量; 其中,  $T_2$  值越短水与底物结合的越紧密, 流动性越差;  $T_2$  值越长水分越自由, 流动性越好<sup>[40,41]</sup>。图 6b 反映了荔枝经不同梯度解冻方式处理之后, 体系内各部分水的变化, 包括  $T_{21}$ (ms)、 $T_{22}$ (ms)、 $T_{23}$ (ms)。 $T_{21}$  是与大分子结合的水, 一般认为是存在于植物细胞壁中<sup>[42]</sup>,  $T_{22}$  为植物细胞中不易流动的水, 一般位于细胞质或者细胞外间隙的胞外液,  $T_{23}$  一般认为是存在于液泡中的自由水, 其流动性最大<sup>[43]</sup>。与新鲜荔枝 (95.22%) 相比, 经冻融后的荔枝, 总体自由水比例的发生显著性下降 ( $p<0.05$ ), 降低约 0.71%~2.15%; 不易流动水和结合水上升趋势显著 ( $p<0.05$ ), 前者 (0.20%~0.55%) 较后者 (0.07%~0.28%) 增加比例高。虽然液氮喷雾速冻 (-100 °C) 形成的冰晶较小, 但荔枝中水分含量较高, 在冻融过程中所形成的冰晶对细胞结构仍具有一定的破坏作用, 细胞不能完全吸收原来水分, 细胞膜通透性增加, 导致水和其他物质间交换速率增加, 液泡中水分大量损失, 造成自由水的流失。不同解冻组对液泡中的水均产生一定程度的影响,

导致自由水的比例减小, 而细胞间的水都有一定程度的增加, 其中 LT1 模式的荔枝液泡中自由水流失最少, 仅降低了 0.71%, LT6 组流失高达 2.15%, 这可能是因为无论哪种解冻模式对细胞膜的完整性和细胞壁都有一定程度的破坏, 液泡中的水分很容易流向细胞间, 极少部分流动到细胞壁, 进而使大量的水分从果肉中渗出, 从而产生汁液损失, 这与前面汁液流失率及硬度变化等指标的影响趋势是一致的。综合得出: LT1 模式对速冻荔枝解冻效果最佳。

### 2.2.2 功能性成分

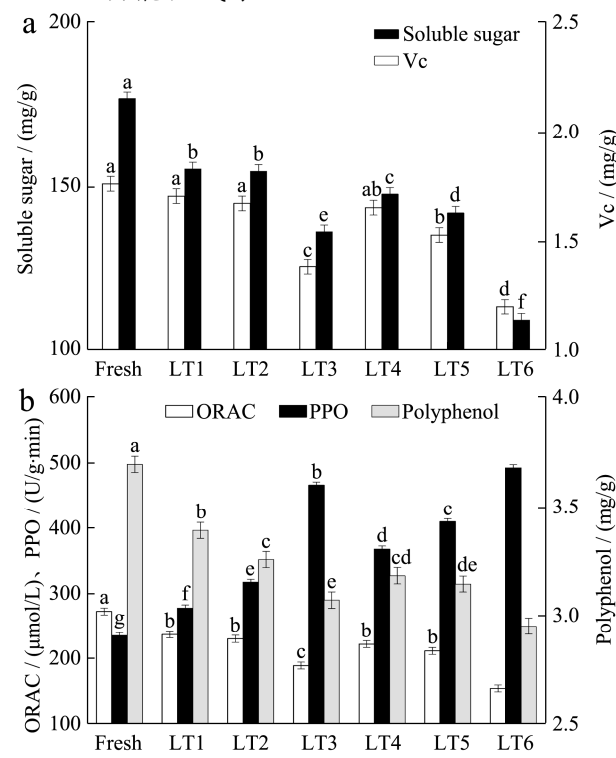


图 7 不同梯度解冻方法对荔枝功能成分的影响

Fig.7 Effects of different gradient thawing method on the functional components of litchi

注: a: 可溶糖和 Vc; b: ORAC、PPO 和多酚。

不同梯度解冻方式对荔枝功能性成分的影响如图 7a、7b 所示, 各组间差异性显著 ( $p<0.05$ )。经冻融后的荔枝功能性成分均呈下降趋势, 各指标变化趋势基本相似, 依次为: LT1>LT2>LT4>LT5>LT3>LT6; 梯度解冻组具有显著优势, 其中, LT1 组影响程度最低, 其多糖、Vc、多酚、抗氧化活性保留率分别可达 97.52%、84.98%、91.78%、86.92%, LT2 组次之; 室温解冻效果最差, 多糖、Vc、多酚、抗氧化活性较新鲜值降低了 24.92%、47.17%、20.15%、43.48%; PPO 活性与多酚含量具有负相关, 变化趋势与上述成分变化相反, 呈现升高趋势, LT1 组解冻效果最好, PPO 活性略微升高 18.21%, LT6 组上升幅度高达 77.60%, 效果最差。

因多糖和 Vc 是热敏性较强的水溶性物质,且分解速率极易受温度的影响,在常温下的降解速度呈指数上升趋势<sup>[44]</sup>,荔枝在不同解冻过程中细胞受到不同程度的破坏,导致水溶性物质随汁液大量流失。另外,ANNA 等<sup>[45]</sup>研究发现果实体系中存在非冻结相,导致扩散控制等一系列反应,引起体系内一切糖类物质发生氧化降解反应,但低温可有效减缓糖类的降解反应,降低多糖含量的损失。

多酚、抗氧化性能和 PPO 活性三者间存在密切相关性,在 O<sub>2</sub> 及温度等条件影响下, PPO 使酚类物质发生酶促褐变,而这些氧化产物通过聚合反应产生褐变物质<sup>[5]</sup>,导致抗氧化能力降低和果壳色泽和品质发生劣变。CANO 等<sup>[29]</sup>对木瓜酶提取溶液的冻藏研究中发现,解冻后 PPO 活性显著增加 4 倍。一般而言,细胞内的 PPO 与细胞器结合紧密,酶活性较低,在冻融过程中潜在的酶活因受外界条件刺激而被激活,导致结合酶被释放后转化为游离态而引起 PPO 活性上升<sup>[46]</sup>。但不同解冻方式会呈现差异性,温度对酶的影响较大,较高的解冻温度对细胞结构损伤程度大,增加细胞内容物溶出量,促进游离态 PPO 的累积,进而加速酚类物质的酶促速率,导致酚类物质显著降低,对应抗氧化能力随之变化。综上,LT1 是维持荔枝功能性成分的有效解冻方式。

### 2.2.3 不同梯度解冻方式对荔枝果肉微观结构的影响

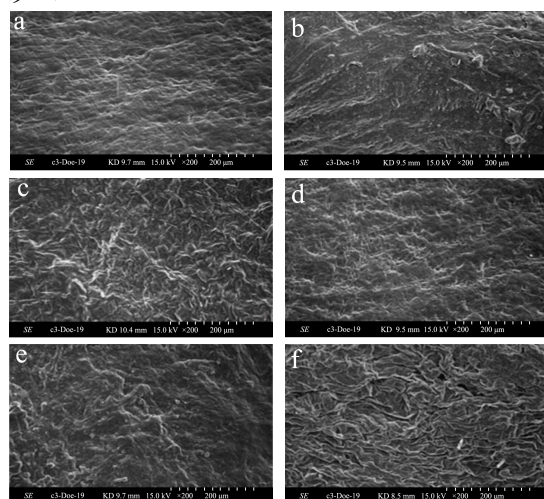


图 8 不同梯度解冻方法的荔枝微观结构图

Fig.8 Microstructure diagram of litchi with different gradient thawing methods

注: a: LT1; b: LT2; c: LT3; d: LT4; e: LT5; f: LT6。

通过扫描电镜比较不同梯度解冻模式对果肉微观结构的影响如图 8 所示。如图 8 显示,解冻会导致细胞结构的完整性产生一定程度的破坏,细胞间隙会变大,致密结构遭到破坏和破裂。Zhu 等<sup>[5]</sup>研究不同冷

冻过程下枸杞内表皮的显微结构时发现,经冻融处理后会枸杞内表皮结构造成较大的影响,细胞结构改变,细胞层出现破裂现象,细胞间的层次结构发生混淆等。通过荔枝果肉微观结构图可分析,图 8f 中显示细胞遭到破坏程度较大,导致组织完整性部分丧失,致密结构被破坏和间隙变大,由此可导致水分更易渗出胞外而引起严重的汁液流失,处理效果最差。因梯度解冻组温度较低、条件温和,对荔枝质构破坏程度较小,细胞结构比室温解冻(LT6)相对更完整、致密,缝隙也较小,细胞壁结构遭破坏程度较轻(8a~8e),梯度解冻对组织完整性、减少细胞损伤具有保护作用,以 LT1 组微观结构较完整,层次结构平整,处理效果最佳,因而汁液流失率低,这也与解冻荔枝的汁液流失率及质构变化趋势的研究结果基本相符。因此,LT1 组为荔枝解冻最适宜的模式。

### 3 结论

本文通过液氮喷雾速冻(-40℃/-60℃/-80℃/-100℃)和梯度解冻(-20℃/0℃/5℃/4℃/25℃)与传统冰柜冻结、浸渍冷冻、室温解冻作对比,分析了荔枝冻融特性和品质的影响。LNF 是一种较优越的冷冻方法,在-20℃~100℃范围内,随温度降低,荔枝的冻结速率越高,对冻结荔枝的保护效果越好,以 LNF<sub>-100℃</sub> 的品质与新鲜荔枝最相似,而 IF、RF 效果较劣。冷冻必须是一个完整和系统的过程,解冻对冷冻处理是不可或缺的存在,以“-20℃~-5℃~4℃~25℃”梯度解冻模式对果实微观结构的损伤最小,细胞结构完整性较好,抑制了液泡中的自由水向细胞间和细胞壁的流动,对保证果实在冻融过程中的品质起着最重要的作用。结论:LNF<sub>-100℃</sub>和“-20℃~-5℃~4℃~25℃”梯度解冻模式具有明显的优势,并且二者模式结合应用所得到产品的效果更佳,这为改善荔枝冷冻-解冻加工工艺提供了理论依据和技术支撑。

### 参考文献

- [1] Cabral T A, Cardoso L D M, Pinheiro S A, et al. Chemical composition, vitamins and minerals of a new cultivar of lychee (*Litchi chinensis* cv. *Tailandes*) grown in Brazil [J]. *Fruits*, 2014, 69(6): 425-434
- [2] Mangaraj S, Goswami T K, Giri S K, et al. Permeable MA packaging of litchi (cv. *Shahi*) for preserving quality and extension of shelf-life [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2012, 71: 1-12
- [3] Hajare S N, Saxena S, Kumar S, et al. Quality profile of litchi (*Litchi chinensis*) cultivars from India and effect of radiation



- processing [J]. Radiation Physics and Chemistry, 2010, 79(9): 994-1004
- [4] Wu L, Orikasa T, Tokuyasu K, et al. Applicability of vacuum-dehydrofreezing technique for the long-term preservation of fresh-cut eggplant: effects of process conditions on the quality attributes of the samples [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 91(4): 560-565
- [5] Zhu Z, Luo W, Sun D W. Effects of liquid nitrogen quick freezing on polyphenol oxidase and peroxide activities, cell water states and epidermal microstructure of wolfberry [J]. LWT, 2020, 120: 108923
- [6] Zhu Z, Zhou Q, Sun D W. Measuring and controlling ice crystallization in frozen foods: a review of recent developments [J]. Trends in Food Science and Technology, 2019, 90: 13-25
- [7] Yang F, Jing D, Yu D, et al. Differential roles of ice crystal, endogenous proteolytic activities and oxidation in softening of obscure pufferfish (*Takifugu obscurus*) fillets during frozen storage [J]. Food Chemistry, 2019, 278: 452-459
- [8] Abdullah A, Bakri H, Hassan A, et al. Cryogenic freezing of fresh date fruits for quality preservation during frozen storage [J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2015, 17(1): 9-16
- [9] Lopkulkiaert W, Prapatsornwattana K, Rungsardthong V. Effects of sodium bicarbonate containing traces of citric acid in combination with sodium chloride on yield and some properties of white shrimp (*Penaeus vannamei*) frozen by shelf freezing, air-blast and cryogenic freezing [J]. LWT - Food Science and Technology, 2009, 42(3): 768-776
- [10] Cheng L, Wu W, An K, et al. Advantages of liquid nitrogen quick freezing combine gradient slow thawing for quality preserving of blueberry [J]. Crystals, 2020, 10(5): 368
- [11] 吴炜俊,程丽娜,徐玉娟,等.液氮喷雾速冻在杨梅品质保鲜上的优势[J].现代食品科技,2020,36(10):140-146,330  
WU Weijun, CHENG Lina, XU Yujuan, et al. Advantages of liquid nitrogen spray quick freezing in the quality preservation of bayberry [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(10): 140-146, 330
- [12] Qian S, Li X, Wang H, et al. Effect of subfreezing storage (-6, -9 and -12 °C) on quality and shelf life of beef [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2018, 53: 2129-2140
- [13] Roiha I S, Tveit G M, Bachi C J, et al. Effects of controlled thawing media temperatures on quality and safety of pre-rigor frozen Atlantic cod (*Gadus morhua*) [J]. LWT, 2018, 90: 138-144
- [14] Liang D, Lin F, Yang G, et al. Advantages of immersion freezing for quality preservation of litchi fruit during frozen storage [J]. LWT - Food Science and Technology, 2015, 60(2): 948-956
- [15] Utrera M, Morcuende D, Estevez M. Temperature of frozen storage affects the nature and consequences of protein oxidation in beef patties [J]. Meat Science, 2014, 96(3): 1250-1257
- [16] Holcroft D M, Kader A A. Controlled atmosphere-induced changes in pH and organic acid metabolism may affect color of stored strawberry fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 1999, 17(1): 19-32
- [17] Zhou Q, Ma C, Cheng S, et al. Changes in antioxidative metabolism accompanying pitting development in stored blueberry fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2014, 88: 88-95
- [18] Yang B, Prasad K N, Jiang Y. Structure identification of a polysaccharide purified from litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) pulp [J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 137: 570
- [19] Alothman M, Bhat R, Karim A A. Antioxidant capacity and phenolic content of selected tropical fruits from Malaysia, extracted with different solvents [J]. Food Chemistry, 2009, 115(3): 785-788
- [20] Yu Y, Xu Y, Wu J, et al. Effect of ultra-high pressure homogenisation processing on phenolic compounds, antioxidant capacity and anti-glucosidase of mulberry juice [J]. Food Chemistry, 2014, 153(15): 114-120
- [21] Jiang X J, Lin H, Shi J, et al. Effects of a novel chitosan formulation treatment on quality attributes and storage behavior of harvested litchi fruit [J]. Food Chemistry, 2018, 252: 134-141
- [22] Steed L E, Truong V D. Anthocyanin content, antioxidant activity, and selected physical properties of flowable purple-fleshed sweet potato purees [J]. Journal of Food Science, 2008, 73(5): 215-221
- [23] Ali S, Khan A S, Malik A U, et al. Effect of controlled atmosphere storage on pericarp browning, bioactive compounds and antioxidant enzymes of litchi fruits [J]. Food Chemistry, 2016, 206(1): 18-29
- [24] Martynenko A, Chen Y. Degradation kinetics of total anthocyanins and formation of polymeric color in blueberry hydrothermodynamic (htd) processing [J]. Journal of Food Engineering, 2016, 171: 44-51
- [25] Wang C, Meng X. Effect of 60 Co  $\gamma$ -irradiation on storage

- quality and cell wall ultra-structure of blueberry fruit during cold storage [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2016, 38: 91-97
- [26] Yang H, Han M, Bai Y, et al. High-pressure processing alters water distribution enabling the production of reduced-fat and reduced-salt pork sausages [J]. *Meat Science*, 2015, 102: 69-78
- [27] Bonat C G, Ghanem A, Su-ling B M, et al. Influence of freezing process and frozen storage on the quality of fruits and fruit products [J]. *Food Reviews International*, 2016, 32(3): 280-304
- [28] Alhamdan A, Hassan B, Alkahtani H, et al. Cryogenic freezing of fresh date fruits for quality preservation during frozen storage [J]. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2018, 17(1): 9-16
- [29] Cano M P, Ancos B D, Lobo G. Peroxidase and polyphenoloxidase activities in papaya during postharvest ripening and after freezing/thawing [J]. *Journal of Food Science*, 1995, 60(4): 815-817
- [30] Neungnapa R, Jia Z, Duan X W, et al. Effects of various temperatures and pH values on the extraction yield of phenolics from litchi fruit pericarp tissue and the antioxidant activity of the extracted anthocyanins [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2008, 9(7): 1333-1341
- [31] Cheng L, Sun D, Zhu Z, et al. Emerging techniques for assisting and accelerating food freezing processes: a review of recent research progresses [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2017, 57(4): 769-781
- [32] Cheng L, Wu W, An K, et al. Advantages of liquid nitrogen quick freezing combine gradient slow thawing for quality preserving of blueberry [J]. *Crystals*, 2020, 10(5): 368
- [33] Holzwarth M, Korhummel S, Carle R, et al. Evaluation of the effects of different freezing and thawing methods on color, polyphenol and ascorbic acid retention in strawberries (*Fragaria x ananassa* Duch) [J]. *Food Research International*, 2012, 48(1): 241-248
- [34] Liu B, Wang K, Shu X, et al. Changes in fruit firmness, quality traits and cell wall constituents of two highbush blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.) during postharvest cold storage [J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 246: 557-562
- [35] Paniagua C, Pose S, Morris V J, et al. Fruit softening and pectin disassembly: an overview of nanostructural pectin modifications assessed by atomic force microscopy [J]. *Annals of Botany*, 2014, 114(6): 1375-1383
- [36] Deng L Z, Mujumdar A S, Yang X H, et al. High humidity hot air impingement blanching (HHAIB) enhances drying rate and softens texture of apricot via cell wall pectin polysaccharides degradation and ultrastructure modification [J]. *Food Chem*, 2018, 261: 292-300
- [37] Kiani H, Sun D W. Water crystallization and its importance to freezing of foods: a review [J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2011, 22(8): 407-426
- [38] Li D, Zhu Z, Sun D W. Effects of freezing on cell structure of fresh cellular food materials: a review [J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2018, 75: 46-55
- [39] Li Y, Jia W, Zhang C H, et al. Fluctuated low temperature combined with high-humidity thawing to reduce physicochemical quality deterioration of beef [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2014, 7(12): 3370-3380
- [40] Hills B P. Applications of low-field NMR to food science [J]. *Annual Reports on NMR Spectroscopy*, 2006, 58: 117-230
- [41] Baranowska H M, Sikora M, Kowalski S, et al. Interactions of potato starch with selected polysaccharide hydrocolloids as measured by low-field NMR [J]. *Food Hydrocolloids*, 2008, 22(2): 336-345
- [42] Shao X, Li Y. Application of low -field NMR to analyze water characteristics and predict unfrozen water in blanched sweet corn [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2013, 6(6): 1593-1599
- [43] Santagapita P, Laghi L, Panarese V, et al. Modification of transverse NMR relaxation times and water diffusion coefficients of kiwifruit pericarp tissue subjected to osmotic dehydration [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2013, 6(6): 1434-1443
- [44] Lee S K, Kader A A. Preharvest and postharvest factors influencing vitamin C content of horticultural crops [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2000, 20(3): 207-220
- [45] Anna R, Renato C N, Daniela V, et al. Modification of glass transition temperature through carbohydrates addition and anthocyanin and soluble phenol stability of frozen blueberry juices [J]. *Journal of Food Engineering*, 2003, 56(2): 229-231
- [46] Zhu Z, Wu X, Geng Y, et al. Effects of modified atmosphere vacuum cooling (MAVC) on the quality of three different leafy cabbages [J]. *LWT*, 2018, 94: 190-197