

## 水果速冻和解冻新技术研究进展

魏思宇, 陈芳, 朱雨辰\*

(中国农业大学食品科学与营养工程学院 国家果蔬加工工程技术研究中心 北京 100089)

**摘要** 冷冻是长期保存水果的重要方法之一,而冷冻过程中产生的冰晶容易损伤细胞结构,导致解冻时汁液损失,严重影响解冻后水果的品质。冷冻水果的品质优化可以从 3 方面开展:渗透脱水预处理,提高冷冻速率,优化解冻过程。基于此,本文从原理、应用和优、缺点 3 个角度,综述渗透脱水预保护技术、高压辅助技术、超声辅助技术、脉冲电场技术、微波辅助技术、磁场辅助技术在水果速冻和解冻中的应用,以期在水果速冻和解冻过程的优化提供新的思路。

**关键词** 水果; 速冻; 解冻; 新技术

**文章编号** 1009-7848(2024)02-0418-14 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.02.038

我国水果资源丰富,是全球最大的水果生产国<sup>[1]</sup>。据统计,2020 年我国水果产量达 28 692.4 万 t,出口额高达 21.7 亿美元,且呈现持续上涨的趋势<sup>[2]</sup>。水果出口成为农民增加收入的重要途径。水果含有丰富的水分,占鲜果质量的 60%~95%<sup>[3-4]</sup>。其在运输和贮存的过程中,极易发生萎蔫、腐烂、变质,失去食用价值。冷冻是常用的水果保存方式,能延长水果的保藏期,保留水果的汁液和可溶性营养物,可全年不间断地为果汁、果酱、水果罐头等水果加工产品提供原料<sup>[5-7]</sup>。

虽然冷冻可以延长保藏期,但是由于新鲜水果中自由水含量高,直接冷冻容易形成大冰晶,损伤细胞结构,造成冷冻水果的品质下降。渗透脱水预处理技术是常用的冷冻前保护措施,通过渗透压差,除去水果中部分自由水。一方面可以减小冷冻时形成冰晶的数量和体积,起到保护细胞结构的作用<sup>[8]</sup>。另一方面,还有助于增加水果硬度,改善水果的外观和口感,减少水果解冻时的汁液损失<sup>[9]</sup>。目前,已应用于芒果<sup>[10]</sup>、荔枝<sup>[11]</sup>、草莓<sup>[12]</sup>、猕猴桃<sup>[12]</sup>、苹果<sup>[13]</sup>、樱桃<sup>[8]</sup>等多种水果的冷冻保护。

水果中的自由水在细胞内的冷冻经过两个过程:晶核形成和冰晶生长。在缓慢冷冻过程中,冰晶先在细胞外形成,同时细胞内的自由水往细胞

外扩散,冰晶在细胞外生长变大<sup>[14]</sup>。大冰晶会对细胞结构造成严重的机械损伤<sup>[14-15]</sup>,破坏细胞壁、细胞膜的微观结构,增加酶促褐变的发生,使水果的色泽发生不可逆的黑化或者变黄,同时还会导致解冻后水果硬度下降、质地变软,大量营养物随汁液流失<sup>[16]</sup>。速冻技术通过加快热量传递,提高冷冻速率,减少水分迁移,使自由水在原有位置形成细小而均匀的冰晶,对细胞结构破坏小。在解冻后水果易于恢复原样,维生素 C、总酚和总花青素等营养物质损失小<sup>[17]</sup>。

解冻是冷冻的逆过程。温度回升过程中,酶促褐变相关酶逐渐从低温状态恢复活性,且微生物活动也逐渐增强。目前,企业大多使用慢速解冻方法,如空气自然解冻、静水解冻、流水解冻等。这类解冻方法速率慢、耗时长,容易使水果在解冻过程中发生氧化褐变,增加被微生物污染的风险<sup>[18]</sup>。研究表明,温度每升高 5 °F,大多数化学反应的速率加快 20%~35%,某些恶化反应的速率甚至可能增加 1~4 倍<sup>[19]</sup>。提高解冻效率,有助于减少劣变反应的发生。现阶段,已有高压辅助解冻技术、超声波辅助解冻技术、微波辅助解冻技术、脉冲电场解冻技术等多种新技术应用于水果解冻,旨在提升解冻效率,提高水果品质,使其尽可能恢复到冻结前的状态。

本文从原理、应用和优、缺点 3 个角度,综述渗透脱水预处理、高压辅助技术、超声辅助技术、脉冲电场技术、微波辅助技术、磁场辅助技术在水果速冻和解冻中的应用,以期在水果速冻和解冻过程的优化提供新的思路。

**收稿日期:** 2023-02-05

**基金项目:** 广东省重点领域研发计划项目(2020B020225003);  
中国科协青年人才托举工程项目(2020QNRC001)

**第一作者:** 魏思宇,女,硕士

**通信作者:** 朱雨辰 E-mail: zhuyuchen@cau.edu.cn

## 1 渗透脱水预处理

水果冷冻及解冻过程中,冰晶对细胞结构的损伤以及褐变酶的作用,容易使水果发生褐变,引起颜色改变。漂烫<sup>[20]</sup>和护色剂<sup>[21]</sup>等预处理是果蔬中常用的预保护措施。漂烫虽能有效抑制多酚氧化酶和过氧化物酶活性,减少褐变发生,但容易使水果质地软化<sup>[22]</sup>。二氧化硫是常用的护色剂,其护色效果虽好,但容易残留危害消费者的健康<sup>[21]</sup>。渗透脱水技术是近年来使用较多的一种预保护措施,借助高渗溶液和水果之间的渗透压差,使水果失去水分,增加可溶性固形物含量。利用渗透压差,自由水从水果中流出,渗透液中的溶质进入水果。一方面,新鲜水果内部的水分含量降低,冷冻时冰晶的数量和体积随之减小,减缓冰晶对水果结构的损伤<sup>[9]</sup>。另一方面,渗透剂的进入使水果的糖浓度增高,味道更甜,同时还能增加水果硬度、保护色泽、减少抗坏血酸和总酚等生物活性物质的损失<sup>[22-23]</sup>。

渗透脱水效果受到脱水时间、渗透液浓度、水果和渗透剂种类等多种因素影响。研究表明,渗透失水过程主要发生在前 2 h<sup>[24]</sup>,渗透液质量分数为 45%时,水果硬度保持良好<sup>[13]</sup>。Marani 等<sup>[24]</sup>发现在同一渗透液中,草莓、猕猴桃、梨和苹果的脱水速率依次增加;在相同浓度下,大分子糖的脱水效果更好,而小分子糖的增固效果更好<sup>[24]</sup>。渗透剂的选择不仅影响脱水速率,还直接关系到水果的感官

品质。在水果渗透脱水过程中,最常用的脱水剂是糖,如蔗糖、麦芽糖、果糖、蜂蜜等(表 1)。Konopacka 等<sup>[8]</sup>研究不同渗透剂对水果感官评价的影响,结果显示:蔗糖、转化糖(等量葡萄糖和果糖的混合物)和去酸果汁处理后的水果富有甜味,消费者接受程度更高;浓缩苹果汁处理后水果的酸度增加;低聚果糖使水果的脆度增加;半乳糖山梨醇和山梨醇等多元醇虽然能增加水果的硬度,但消费者接受程度低,不适合用于水果的渗透脱水。

相比于漂烫和护色剂处理,渗透脱水具有显著的优势。首先,渗透脱水过程不发生相变,对水果结构的负面影响较小;其次,水分含量减少使得冷冻时间缩短,效率提高;再者,由于重量减轻,与冷冻、包装、配送和存储相关的成本降低。值得注意的是,长时间的渗透处理,容易造成水果中的营养成分渗出,细胞持水能力下降,组织孔隙率变化等不利影响。因此,最近的研究转向了将渗透脱水和超声、脉冲电场、高压等新技术联合使用<sup>[25-27]</sup>,以增加渗透脱水的速率,缩短时间,保障水果品质。未来的研究应更深入探究提高渗透脱水速率的方法,如寻找更有效的渗透剂、更高效的辅助渗透措施。此外,除了颜色、硬度、脱水和传质速率等基础指标之外,应更全面地考察脱水过程对细胞微观结构、组织表面孔隙率、冷冻结晶过程和营养物质溶出率等方面的影响。

表 1 常用渗透剂种类及特征

Table 1 Types and characteristics of commonly used osmotic solutes

渗透剂	特征	参考文献
蔗糖	防止氧气进入,减少褐变,并有助于保留水果的风味物质,增加甜度 从性价比、有效性和风味保留来看,是良好的选择	[28]
麦芽糖	与蔗糖溶液相比,水分损失和糖增加量均更低	[29]
低聚果糖	分子质量较高,扩散速率较低	[30]
玉米糖浆	与蔗糖溶液相比,水分损失和糖增加量均更低	[31]
麦芽糊精	分子质量较高,增固效果虽好,但不如相同浓度的蔗糖有效	[32]
蜂蜜	蜂蜜糖由果糖、葡萄糖、麦芽糖、蔗糖和其它碳水化合物组成;与单糖溶液相比,具有高渗透压,脱水速率快;此外,对活性成分和颜色的损伤小,可延长保质期至 5 个月	[33]

## 2 速冻新技术

现阶段,应用于水果冷冻过程的新技术主要有高压辅助冷冻技术、超声辅助冷冻技术、脉冲电

场冷冻技术和磁场辅助冷冻技术,表 2 简单概述了每种技术的原理,优、缺点和应用。与传统的冷冻技术相比,这些新技术的优势主要体现在:1)减

小冰晶体积,提高冷冻速率;2)保留冷冻水果在硬度、风味、滋味、营养物含量等方面的理化特性;3)抑制褐变酶活性,减少氧化褐变。

表2 水果速冻新技术

Table 2 New techniques of fruit freezing

速冻技术	原理	优点	缺点	应用
高压辅助冷冻	降低冰点至0℃以下	冰晶细小而均匀,微观结构损伤小,恰当的压力能抑制褐变酶	设备要求高,成本高,冰晶稳定性要求高	带果皮的水果
超声辅助冷冻	空化效应,气泡破裂加速冷冻	热量交换快,冷冻时间短,冰晶体积小	高强度超声易引起热效应	结构致密的水果
脉冲电场冷冻	细胞膜发生电穿孔,加速热量交换	冷冻速率快	细胞膜损伤严重	加入冷冻保护剂的水果
磁场辅助冷冻	水分子自旋排列	具有抑制冰核形成的潜力,水果外观、风味、质地等保留好,保质期较长	电磁线圈会产生热效应	鲜切水果等

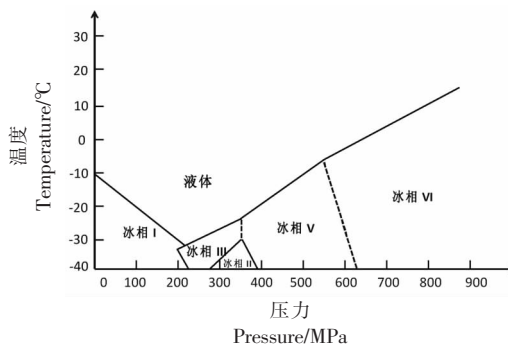
## 2.1 高压辅助冷冻技术

高压辅助冷冻技术是一种通过压力改变冰晶的形成路径和特性,减小形成冰晶体积的速冻技术。不同压力和温度下形成的冰相类型如图1所示<sup>[34]</sup>。常压下,水结冰生成冰相I(密度0.92 g/cm<sup>3</sup>),体积膨胀易导致细胞膜破裂。高压环境下,冰相I会向冰相III~VI转变(冰相VI密度1.31 g/cm<sup>3</sup>),此时形成冰晶的体积较小,冰晶对细胞的伤害也较小<sup>[35]</sup>,解冻时发生滴水损失和氧化褐变的概率降低。现有研究表明,和鼓风冷冻、浸泡冷冻等传统冷冻技术相比,高压辅助冷冻可以更好地保护细胞的微观结构<sup>[36-38]</sup>。施加200 MPa的高压后,不仅能加速冰晶形成,提高冷冻效率,还能较好地维持水果的原有结构,最大程度保留其中的营养物质<sup>[38]</sup>。

高压不仅会改变冷冻时形成冰晶的大小,还会改变酶活性。多酚氧化酶(Polyphenol oxidase, PPO)是常见的与水果品质密切相关的内源性酶,PPO会导致水果中的多酚发生氧化褐变,影响水果的感官品质<sup>[39]</sup>。高压对酶活性的改变,存在增强和抑制2种状态。300 MPa是活化PPO的关键转折点,0.1~200 MPa的低压条件,不会显著改变PPO的活性;当压力达到300 MPa时,高压会诱导PPO活性增强,-20℃的低温条件可以减缓高压诱导的PPO活性增强<sup>[40]</sup>。不过,在Sulaiman等<sup>[39]</sup>的报道中,600 MPa的高压处理5 min可以使草莓中PPO失活率达35%,持续处理15 min后失活率高达

82%。高压辅助冷冻时,除压力和低温条件会影响PPO的活性外,水果的状态也是重要的影响因素。在相同条件下冷冻30 d,果泥中PPO活性增加为冷冻前的2倍,而整果中PPO活性下降为冷冻前的73%<sup>[39]</sup>。

目前,高压辅助冷冻技术通常是先用高压处理再速冻,借助压力抑制样品中微生物的活动和褐变酶的活性,延长水果的保质期。现阶段还较难实现高压和冷冻的同步。首先,在0℃以下运行高压设备,需要使用特殊钢材和合适的压力传输流体<sup>[41]</sup>。其次,还需要精确的监控,提高设备运行的质量和稳定性。此外,超高压要求完全密封的环境,目前只能实现压力实时监测,难以监测样品中心的温度数据,高压过程中的传热、传质研究成为一大难题。因此,后续研究的重点应放在超高压设备的研制,降低设备成本和能耗,以及其辅助冷冻的动力学研究上。

图1 高压下形成的冰相类型<sup>[34]</sup>Fig.1 Ice phase types under high pressure<sup>[34]</sup>

## 2.2 超声辅助冷冻技术

超声波一般指频率高于 20 kHz 的声波。超声辅助冷冻是一种利用低频超声波,产生空化效应,促进冰核形成的速冻技术。超声波传播的过程中会形成空化气泡,气泡破裂时会产生极端高压,达 100 MPa<sup>[42]</sup>。这种压力不仅可以诱导没有形成晶核的溶液初步成核,还能将已成核的冰晶打碎为更细小的部分<sup>[43]</sup>(如图 2)。没有破裂的空化气泡,则会形成一股连续的微流,加速水果和外界环境之间的热量交换,提高冷冻速率<sup>[44]</sup>。研究发现,0.078 W/cm<sup>2</sup> 的超声处理后,苹果、梨和哈密瓜的冷冻相变时间分别缩短至 21.67, 21.33 s 和 16.67 s,冷冻总时间分别缩短了 21.72%, 29.15% 和 44.39%<sup>[45]</sup>。在草莓中也发现了类似的结果,相比于直接冷冻的方法,超声辅助冷冻所需时间更短<sup>[46]</sup>。在超声处理的过程中注入二氧化碳,可以显著降低冷冻时间和冰晶尺寸。二氧化碳和超声联合处理的样品失水量显著低于仅超声处理的样品,且联合处理后样品的质地性能也更高<sup>[47]</sup>。除了促进冰核形成,提高冷冻速率外,相比于传统的冷冻方法,超声处理能更好地保留速冻水果的理化特性<sup>[48-49]</sup>。Fan 等<sup>[50]</sup>采用渗透脱水和 240 W 的超声联合处理猕猴桃,发现不仅能节约 60% 以上的冷冻时间,还能使猕猴桃的滴水损失减少近 50%,硬度增加近 1.5 倍,抗坏血酸含量和风味的保留效果好。不仅如此,猕猴桃的口感也得到显著改善,酸味减弱,甜味增加。另外有研究发现超声辅助冷冻还具有抑制多酚氧化酶和过氧化物酶活性的潜力<sup>[51]</sup>,不过在水果中的研究还较为少见。超声的参数条件对冷冻效率有显著影响。一般来说,超声强度越高,冷冻效率越高。然而,随着超声强度的增加,引起的热效应也增加,不利于冷冻。此外,超声波的特性使得该技术更适用于结构致密的水果,因为样品组织中的空洞会减弱超声波在传播过程中的有效性<sup>[52]</sup>。因此,未来的工作应该考虑对不同类型的水果进行工艺优化,以达到超声强度和产生的热效应之间的平衡。

## 2.3 脉冲电场冷冻技术

脉冲电场是一种使细胞膜发生电穿孔,增加其通透性,从而加速冷冻过程的技术。Wiktor 等<sup>[53]</sup>发现脉冲电场处理可以使苹果冷冻的相变过程缩

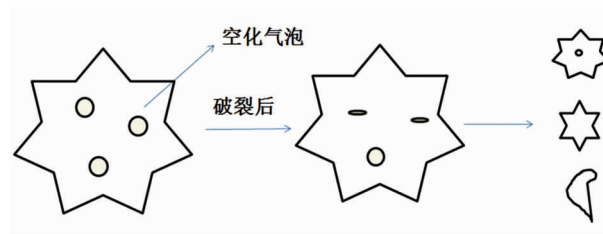


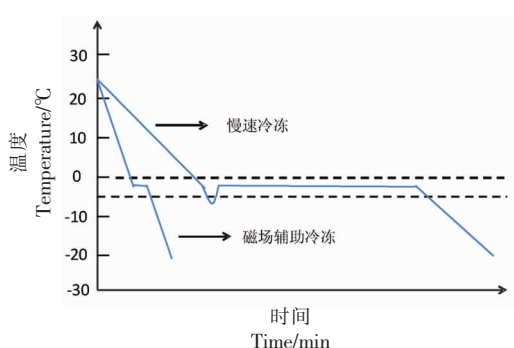
图 2 超声辅助冷冻的原理<sup>[43]</sup>

Fig.2 Principle of ultrasound assisted freezing<sup>[43]</sup>

短 33%,总冻结时间减少 3.5%~17.2%。脉冲电场增加细胞膜通透性,缩短冷冻时间的同时,也会伴随水果硬度下降、颜色改变等问题。对此,有学者提出加入冷冻保护剂,可以缓解细胞膜在冷冻过程中的损伤,提高冷冻效率的同时,保护水果的质地和颜色。Parniakov 等<sup>[54]</sup>发现,苹果经 800 V/cm 的脉冲电场处理后,再浸入冷冻保护液(甘油溶液,20%),可以显著改善苹果的冻融过程,提升苹果硬度。在另一项研究中发现,经过 850 V/cm 的脉冲电场处理后,浸入冷冻保护剂(12%海藻糖和 0.2%含抗冻蛋白的冬小麦提取物),草莓表皮层细胞的存活率升高,且颜色(红色)保留率提高了 30%<sup>[55]</sup>。这可能是因为脉冲电场处理增加了细胞膜的通透性,促进了冷冻保护剂的渗透,提高了冷冻保护效果。不过,脉冲电场技术对细胞膜的损伤是不可忽视的问题。不可逆性电穿孔会导致细胞膜永久性损伤,造成细胞死亡。有研究报道,在 200 V/cm 的脉冲电场作用下,草莓会发生不可逆电穿孔,导致细胞活力完全丧失<sup>[12]</sup>。随着脉冲电场处理强度的增加,细胞解体指数从 0.2 提高到 0.6,多酚和花青素的释放量分别增加至 8.0% 和 8.3%<sup>[56]</sup>。因此,要选择合适的电场强度和持续时间,尽量减小脉冲电场对细胞结构的破坏。此外,在选择冷冻保护剂时,除了考虑水果的安全性,还应充分考察其对水果风味和滋味产生的影响。

## 2.4 磁场辅助冷冻技术

磁场辅助冷冻技术是一种通过磁场作用于水分子,使其核外电子和原子核的自旋沿外部磁场方向排列,实现水果快速冷冻的技术。施加磁场后,水的导热系数增加,冷空气迅速从表面传至食品内部。同时,氢核的振动消除了水结冰过程中的潜热释放,增加了水果的过冷程度(最低不结晶温度),缩短了水结冰的相变区间<sup>[57]</sup>(如图 3),让水果

图3 磁场辅助冷冻原理<sup>[56]</sup>Fig.3 Principle of magnetic field assisted freezing<sup>[56]</sup>

在短时间内实现快速且均匀的冷却。此外,水分子的化学键会受到磁场影响,发生断裂,变成体积更小的冰晶<sup>[57-59]</sup>。食品加工中普遍使用电磁线圈制造磁场,并根据冷冻要求调节电流大小改变磁场强度。磁场对冰晶的作用具有两面性:抑制成核和加速结晶。研究发现,在 $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的过冷水中, $50\text{ mT}$ 的低强度振荡磁场抑制冰成核,超过 $100\text{ mT}$ 的磁场强度则会导致结冰<sup>[60]</sup>。低强度磁场可以提高水果的过冷程度,抑制冰的成核,从根本上避免冰晶对细胞结构的破坏。韩馨仪等<sup>[61]</sup>发现,磁场处理可以有效降低葡萄的相变潜热和结晶温度,经磁感应强度 $4\text{ mT}$ ,频率 $80\text{ Hz}$ 的磁场处理后,葡萄的过冷度提高 $4.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,减缓冻害的发生。经过磁场处理的鲜切菠萝,在 $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右的过冷状态下,保质期可延长至 $14\text{ d}$ ,且在微观结构、质量损失和颜色变化等方面与新鲜菠萝差异不大<sup>[62]</sup>。当环境温度降低时,由于自由水长期处于过冷状态,温度均匀性高,冰晶的形成速率加快<sup>[63]</sup>。磁场类型和磁场强度是影响冰晶形成的两大重要因素。对于磁场类型而言,研究发现施加交变磁场后,冷冻相变时间增加,总

冻结时间延长;而永磁磁场相变时间的变化和磁场强度有关,在 $10\text{ mT}$ 的磁场下,相变时间最短<sup>[64]</sup>。对于磁场强度而言,当交变磁场强度为 $1.26\text{ mT}$ 时,冰晶的平均尺寸可减小 $78\%$ ,磁场强度增加时,冰晶存在变大的趋势<sup>[64]</sup>。除影响冰晶形成外,磁场还会影响水果的成熟度。在一项研究中发现,磁场的应用会降低番茄在成熟过程中的呼吸速率,减少番茄中的酸含量,增加还原糖和胡萝卜素含量<sup>[65]</sup>。

现阶段,磁场辅助冷冻技术在葡萄<sup>[61]</sup>、菠萝<sup>[62]</sup>、樱桃<sup>[64]</sup>、蓝莓<sup>[66]</sup>、芒果<sup>[67]</sup>、哈密瓜<sup>[68]</sup>等多种水果中有广泛应用。该技术具有对细胞结构破坏小、对水果原有特性保护好、成本较低等优点。然而,电磁线圈与交变磁场产生的热效应,会不利于水果的冻结<sup>[66]</sup>。因此,需要谨慎选择磁场强度,并保证外加磁场清洁无污染。另外,离开外磁场后,水果中的磁场效应是否保留,是否需要在冷冻储存过程中继续施加磁场,还需要更多的研究验证,以保证该技术在水果冷冻保鲜中的应用效果。

### 3 解冻新技术

目前,应用于水果解冻过程的新技术主要有高压辅助解冻技术、超声辅助解冻技术、脉冲电场解冻技术和微波辅助解冻技术,表3简单概述了每种技术提高解冻速率的原理,优、缺点和应用的水果类型。和传统的解冻技术相比,这些新技术的优势主要体现在:1)提高解冻速率,减少解冻时间;2)改善水果解冻过程中硬度下降,滴水损失严重,风味恶化,营养物质含量减少等品质问题;3)抑制褐变酶活性,减少颜色劣变;4)抑制微生物活动,杜绝微生物污染。

表3 水果解冻新技术

Table 3 New techniques of fruit thawing

解冻技术	原理	优点	缺点	应用
高压辅助解冻	降低自由水的相变温度	解冻时间短、杀灭微生物、延长货架期	汁液流失严重、成本高	高附加值的水果
超声辅助解冻	缩短冰点的相变时间	成本低、解冻速率快、营养成分保留好	容易产生溶解氧和自由基	带蜡涂层的水果
脉冲电场解冻	增加细胞膜通透性	灭菌效果好、抑制褐变酶	细胞膜损伤严重	果汁、果酱等
微波辅助解冻	微波能的穿透性和热效应	应用广、成本低、操作方便、水果特性保留好	容易出现局部过热	大小适中、耐热性较好的水果

### 3.1 高压辅助解冻技术

高压辅助解冻是一种通过降低自由水的相变温度,加快热量传递的快速解冻技术。在 210 MPa 的高压下,水的相变温度降至 $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,样品和热源之间的温度差增大,热量传递速率加快,解冻过程加速完成<sup>[69]</sup>(图 4)。早在 1996 年高压辅助解冻技术就被应用于草莓的解冻<sup>[70]</sup>。和传统的解冻方法相比,该技术在节约解冻时间上具有显著优势。Ben Haj Said 等<sup>[71]</sup>发现对苹果施加 0.2 MPa 的压力后,解冻时间从 588 min 减少到 42 min,汁液损失率从 12%减少至 1.6%。Peng 等<sup>[72]</sup>对比室温空气解冻和高压辅助解冻时,发现施加 100 MPa 的压力后,芒果的解冻时间由 28 min 减少至不到 1 min。除提高解冻效率外,高压处理还能有效阻止微生物污染。在 300 MPa/15 min、400 MPa/5 min、500 MPa/2.5 min 和 600 MPa/1 min 的高压处理条件下,可以完全杀灭芒果浆中的酵母、霉菌和需氧细菌<sup>[73]</sup>。在 400 MPa 的压力下持续处理 5 min,柿子的酵母和霉菌数量减少,货架期延长<sup>[74]</sup>。然而,高压处理对酶的抑制作用还需要进一步探究。有研究指出,在 600 MPa 的压力下保持 5 min,当草莓中心温度从  $34\text{ }^{\circ}\text{C}$  升高到  $71\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,PPO 残余活性降低到 9%<sup>[40]</sup>;在常压下直接  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  处理 5 min,草莓中 PPO 残余活性几乎为 0。在高压处理伴随温度升高的过程中,究竟是压力因素还是热处理因素,对 PPO 酶活性影响更大,还需要更多的试验验证。若热处理因素占主导,那么采用温和热处理代替高压,抑制水果中褐变酶的活性,是一种更高效且经济的手段。

研究发现,高压辅助解冻技术不适用于孔隙度高、结构易被破坏的水果,如草莓<sup>[9]</sup>、蓝莓<sup>[75]</sup>等。在高压解冻草莓<sup>[9]</sup>、芒果<sup>[72]</sup>和哈密瓜<sup>[76]</sup>等水果的报道中均发现,直接辅以高压容易破坏细胞结构,引起严重的滴水损失,且伴随维生素 C 等营养物含量下降和水果颜色劣变。对此,有研究指出在冷冻之前增加渗透脱水前处理,可以有效改善水果硬度下降的问题。Konyole 等<sup>[77]</sup>在冷冻前用果胶甲酯酶和氯化钙溶液浸泡草莓,再采用 200 MPa 的高压辅助解冻后,草莓的硬度比常规解冻组高 1/3。另外,该技术的设备成本和能源成本较高,使其在应用时受限于高附加值的水果,难以在多种水果

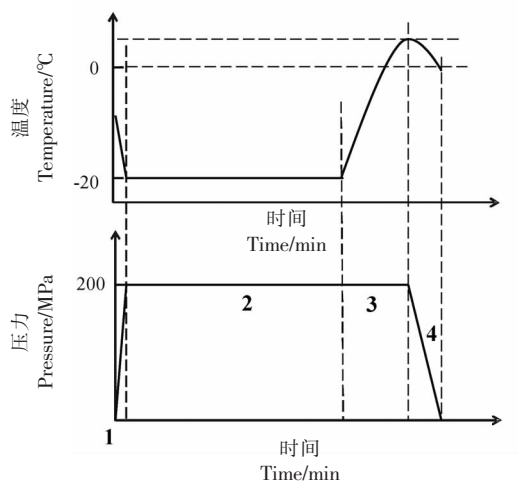


图 4 高压辅助解冻的原理<sup>[69]</sup>

Fig.4 Principle of high pressure assisted thawing<sup>[69]</sup>

中推广。

### 3.2 超声辅助解冻技术

超声辅助解冻是一种通过缩短冰点的相变时间,实现快速解冻的技术。通过调节超声波的频率与强度,可以将超声波衰减产生的热效应稳定在冰点附近,避免解冻组织内部产生局部高温,实现快速而稳定的解冻<sup>[78]</sup>。对于含有蜡涂层的水果,如蓝莓<sup>[79]</sup>,超声处理可以增加细胞膜表面的孔隙率,促进热量传递,且不会破坏细胞膜的完整性。研究显示,超声辅助解冻技术的相变时间仅为浸水解冻的一半,总解冻时间约是浸水解冻的 55%<sup>[80]</sup>。在营养成分保留上,超声辅助解冻也具有显著优势。比较微波解冻、水浴解冻、空气解冻和超声波解冻 4 种方法,结果发现超声波解冻对草莓中的花色苷破坏作用最小<sup>[81]</sup>。不仅如此,超声处理还能增强芒果汁的抗氧化活性,在感官评价中更受青睐<sup>[82]</sup>。超声解冻时将水果浸渍在糖溶液中,能更好地保留水果中的营养成分。以花青素和总固体含量为评价指标,对比超声辅助水浸解冻和超声辅助糖浸解冻蓝莓中的营养成分,发现糖浸组的蓝莓花青素含量和总固体含量更高,且在感官评价中消费者接受度呈现增加趋势。超声强度是超声辅助解冻技术的关键参数。Liu 等<sup>[83]</sup>研究了不同超声强度下解冻芒果的感官和营养特性,发现随着超声强度从  $0.074\text{ W/mL}$  增加到  $0.123\text{ W/mL}$ ,解冻时间比静水解冻减少了 16%~64%,且超声处理使没食

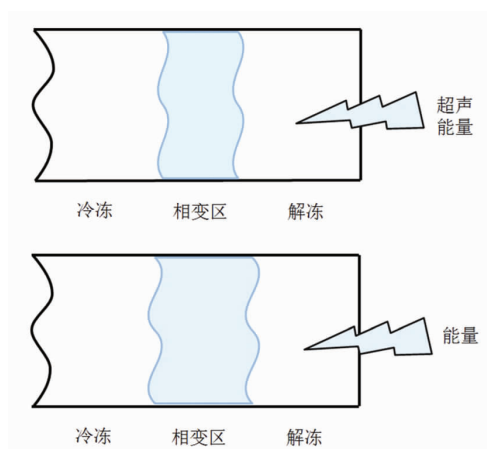


图5 超声辅助解冻的原理<sup>[77]</sup>

Fig.5 Principle of ultrasound assisted thawing<sup>[77]</sup>

子酸、羟基苯甲酸和咖啡酸等酚酸含量增加。然而,过高的超声强度(0.123 W/mL)容易使芒果的黏度增加,茴香醇、壬醛、萜烯、二甲基硫和甲苯等不利于芒果风味的挥发性成分含量增加,导致芒果发生质地劣变和香气恶化。这可能是因为超声过程容易产生溶解氧和自由基,再加上产生的热效应,容易使水果中的营养物氧化劣变。因此,在应用超声辅助解冻水果时,应针对不同种类的水果优化超声波的强度和频率。一方面可以避免水果品质发生劣变,另一方面也能防止超声波强度较高,频率较低(<100 kHz),难以通过水果传输<sup>[84]</sup>。

### 3.3 脉冲电场解冻技术

脉冲电场解冻技术是一种利用电场增加细胞

膜通透性,从而加快热量传递的快速解冻技术。脉冲电场处理可以使苹果的总解冻时间缩短 71.5%,且经过 10 次 3 000 V/cm 脉冲处理后苹果的汁液损失率仅 1.6%,显著低于空气自然解冻的样品<sup>[53]</sup>。不仅如此,脉冲电场技术还能有效杀灭水果中的微生物,灭菌所需时间仅 0.75 ms<sup>[85]</sup>。高强度脉冲电场(35 kV/cm, 1.7 ms)与抗菌剂联合作用,能使西瓜中大肠埃希菌 O157:H7、肠炎沙门氏菌和单核细胞增生李斯特菌均减少 5 个以上的对数循环<sup>[86]</sup>。此外,脉冲电场处理还有改变酶活性的潜力。在电场强度 30 kV/cm、脉冲频率 600 Hz 的条件下处理 5 ms,葡萄汁中 PPO 失活率可达 100%<sup>[87]</sup>。PPO 活性受电场强度、脉冲频率、脉冲宽度和处理时间等因素影响,其中,处理时间影响最大,脉冲宽度影响最小<sup>[87]</sup>。脉冲电场技术对细胞膜的破坏,决定了该技术不适合用于整果解冻,更适合用于果汁、果酱等液体样品的解冻。虽然脉冲电场技术在提高解冻效率、减少微生物数量和抑制酶活性方面具有优势,但要确保施加的电场强度和持续时间不会过度,对细胞造成不可逆损伤。

### 3.4 微波辅助解冻技术

微波辅助解冻技术是一种利用微波的穿透性,使水果中的水分子剧烈运动产生大量热能的快速解冻技术<sup>[88]</sup>。在蓝莓<sup>[89]</sup>、芒果<sup>[90]</sup>、荔枝<sup>[91]</sup>、哈密瓜<sup>[92]</sup>、树莓<sup>[93]</sup>、桑葚<sup>[94]</sup>、草莓<sup>[95]</sup>、苹果<sup>[96]</sup>等多种水果中有广泛应用,是现阶段应用最多的水果解冻新技术(表 4)。500 W 是微波辅助解冻最常用的功

表 4 微波辅助解冻技术在水果中的应用

Table 4 Application of microwave assisted thawing techniques in fruits

水果种类	参数条件	解冻效果	参考文献
芒果	300 W	既能快速解冻,又能较好地保持芒果的硬度和色泽,VC 和汁液损失小	[90]
哈密瓜	500 W	抗坏血酸保留效果好	[76]
蓝莓	500 W	解冻后的 pH 值和可滴定酸含量与新鲜蓝莓差异不显著,花色苷损失小,总酚含量高,不易褐变	[89]
树莓	500 W	抗氧化成分保留好	[98]
菠萝蜜	800 W	解冻时间短,汁液流失率 0.18%,VC 含量和菌落总数数量与新鲜样品接近	[99]
荔枝	微波炉的解冻档	在解冻时间、汁液流失率、感官评价、可溶性固形物和游离氨基酸含量方面具有优势	[91]
柑橘	微波炉的解冻档	对还原糖、香气、弹性等影响较小,对色泽、硬度等影响比其它解冻样品小	[100]
草莓	微波炉的解冻档	解冻时间短、硬度保持好、汁液损失和花色苷破坏小	[81]

率<sup>[89,92,97]</sup>。Liu等<sup>[98]</sup>的研究表明,和传统的解冻方法相比,微波解冻的速率更快、所需时间更短。比较室温解冻、流水解冻、微波解冻和高压解冻4种解冻方式,发现微波和高压解冻时间比传统解冻方法短,而高压解冻水果容易造成严重的滴水损失,微波解冻对水果质地、颜色和营养成分的影响与功率有关。Wen等<sup>[92]</sup>研究了微波解冻功率对哈密瓜的影响,结果显示,当微波解冻功率为500W时,抗坏血酸的保留效果最好;增加到700W时,虽可以减少水果在解冻时发生的滴水损失、组织损伤和氧化褐变,但抗坏血酸损失严重。微波解冻蓝莓的pH值、可溶性固形物和可滴定酸含量与新鲜蓝莓差异不显著,且对花色苷的保留效果好,单体花色苷检出数量多、总花色苷含量高<sup>[89]</sup>。简言之,该技术所需的设备成本相对较低,操作简单方便,解冻速率快,对水果的质地、颜色、营养成分保留好,可推广性强。不过,水比冰更易吸收微波能,在解冻时容易出现局部过热<sup>[88]</sup>,导致水果糊化。因此,要控制微波的频率、功率、流量和加热时间等,避免局部过热现象发生。此外,水果自身特性也会影响微波辅助解冻的效果,体积较大且耐热性差的水果不适用于微波解冻。

#### 4 讨论与展望

速冻和解冻新技术的应用,有助于减小冷冻对水果细胞结构的损伤,减少解冻过程的滴水损失、酶促褐变和微生物污染,从而起到保持水果硬度、色泽、风味和营养成分的作用。虽然新技术的应用已取得较大进展,但仍然存在几点不足。

其一,基础理论研究还有待完善。在冷冻过程中,冷冻传热和冰晶成核生长的模型还未建立。冰晶除了会影响细胞结构外,还会对微生物种类和数量、酶空间构象和生物活性、水果的质构和组织纤维化等产生影响。其次,新技术作用的持续性还有待考量,在撤除外力作用(高压、磁场、脉冲电场等)后,对冰晶产生的作用效果是否依然存在,还需进一步研究。另外,在复杂的食品体系中,水是以不同形式存在的,如生物大分子中的结合水,细胞膜上的吸附水,离子周围的集聚水等。这些束缚水的性质与自由水区别很大,在冷冻和解冻过程中的变化规律也与自由水存在差异。就目前工作

而言,束缚水的热物理性质还不能直接测出,也很难通过模型计算获得,因而也制约了水传热过程的研究。再者,新技术带来的热效应也是不容忽视的问题。然而,如何评估这个热效应,并且综合考量其对冷冻和解冻过程的影响,目前还尚未发现相关的报道。

其二,不同技术协同组合的研究还有待开展。每种新技术虽都具备不可替代的优势,但同时也有难以避免的缺陷。对于水分含量过高,且硬度较低的水果,如浆果类,单独使用高压辅助技术,会导致水果硬度明显下降。在结合渗透脱水技术后,二者协同作用,不仅能除去水果中部分自由水,提高速冻和解冻效率,还能有效增加水果的硬度和耐压性,保持水果结构的完整性。单独使用脉冲电场技术容易使细胞发生电穿孔,引起不可逆损伤。在加入冷冻保护剂后,脉冲电场能促进保护剂的均匀分布和细胞吸收,增强保护剂对水果的保护作用。此外,现阶段的研究存在一定的割裂性,单独研究渗透脱水、速冻和解冻新技术,而实际上冷冻前处理-冷冻-解冻是一个连续的过程,不同处理会协同影响水果的品质。要获得适合工业化生产的最优水果品质,需要开展全过程研究。

其三,冷冻产业链还处于断链阶段,尚未发展成完整闭环。冷冻食品的质量优化并不局限于冷冻技术这一环节,冷冻保护剂的选择与使用、设备的研制与改进、与设备或冷冻条件配套的包装材料、冷链运输与储存、解冻过程的品质控制等,均是影响冷冻食品品质的关键因素。此外,新技术的设备成本普遍较高,限制了其在实际生产过程中的应用。冷冻工业是食品行业的重要支柱,在水果、蔬菜、肉类、水产品等食品中均有涉及。优化冷链的每一环节,保证冷冻食品的安全性和营养价值,降低冷冻投入的成本,是实际应用的重要前提。

#### 参 考 文 献

- [1] 颜栋勇. 我国水果出口的现状、问题及对策分析——以苹果、梨和桃为例[J]. 对外经贸实务, 2019(8): 48-51.

YAN D Y. Analysis on current situation, problems



- and countermeasures of fruit export in China, taking apples, pears and peaches as examples[J]. *Foreign Economic and Trade Practice*, 2019(8): 48–51.
- [2] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020: 387–389.
- Bureau of Statistics, the People's Republic of China. *China statistical yearbook*[M]. Beijing: China Statistics Press, 2020: 387–389.
- [3] WU J, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Drip loss control technology of frozen fruits and vegetables during thawing: A review [J]. *International Agrophysics*, 2021, 35(3): 235–250.
- [4] LU X M, ZHAO C Y, SHI H, et al. Nutrients and bioactives in citrus fruits: Different citrus varieties, fruit parts, and growth stages[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2023, 63 (14): 2018–2041.
- [5] HU R, ZHANG M, LIU W C, et al. Novel synergistic freezing methods and technologies for enhanced food product quality: A critical review [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2022, 21(2): 1979–2001.
- [6] 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 & Technology*, 2018, 75: 46–55.
- [7] MCGINNIS M J, GUSTASHAW K A R, PAINTER J E. Fruit myth or fact: Is fresh fruit better than unsweetened frozen or canned fruit?[J]. *Nutrition Today*, 2020, 55(6): 322–327.
- [8] KONOPACKA D, JESIONKOWSKA K, KLEWICKI R, et al. The effect of different osmotic agents on the sensory perception of osmo-treated dried fruit[J]. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 2009, 84(6): 80–84.
- [9] VAN BUGGENHOUT S, MESSAGIE I, MAES V, et al. Minimizing texture loss of frozen strawberries: Effect of infusion with pectinmethylesterase and calcium combined with different freezing conditions and effect of subsequent storage/thawing conditions [J]. *European Food Research and Technology*, 2006, 223(3): 395–404.
- [10] LAMILLA C P, VAUDAGNA S R, ALZAMORA S M, et al. Effect of the high-pressure assisted-infusion processing on nutritional and antioxidant properties of mango cubes[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2021, 71: 102725.
- [11] FONG-IN S, NIMITKEATKAI H, PROMMAJAK T, et al. Ultrasound-assisted osmotic dehydration of litchi: Effect of pretreatment on mass transfer and quality attributes during frozen storage[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2021, 15 (4): 3590–3597.
- [12] TYLEWICZ U, TAPPI S, GENOVESE J, et al. Metabolic response of organic strawberries and kiwifruit subjected to PEF assisted-osmotic dehydration [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2019, 56: 102190.
- [13] TALENS P, MARTÍNEZ-NAVARRETE N, FITO P, et al. Changes in optical and mechanical properties during osmodehydrofreezing of kiwi fruit[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2002, 3(2): 191–199.
- [14] BULUT M, BAYER Ö, KIRTIL E, et al. Effect of freezing rate and storage on the texture and quality parameters of strawberry and green bean frozen in home type freezer[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2018, 88: 360–369.
- [15] KOBAYASHI R, SUZUKI T. Effect of supercooling accompanying the freezing process on ice crystals and the quality of frozen strawberry tissue[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2019, 99: 94–100.
- [16] CHAROENREIN S, OWCHAROEN K. Effect of freezing rates and freeze-thaw cycles on the texture, microstructure and pectic substances of mango [J]. *International Food Research Journal*, 2016, 23(2): 613.
- [17] WU J, JIA X, FAN K. Recent advances in the improvement of freezing time and physicochemical quality of frozen fruits and vegetables by ultrasound application[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2022, 57(6): 3352–3360.
- [18] KESHANI M, ZAMINDAR N, HAJIAN R. Physicochemical properties of frozen tuna fish as affected by immersion ohmic thawing and conventional thawing[J]. *Food Science and Technology International*, 2022, 28(8): 728–734.
- [19] BURR H K. Quality and safety in frozen foods[J]. *JAMA*, 1960, 174(9): 1178.
- [20] 傅释仪. 菠萝蜜果肉冻结和贮藏的特性及菠萝蜜酸奶的研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2019.

- FU S Y. Study on freezing and storage characteristics of jackfruit pulp and jackfruit yogurt[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2019.
- [21] 靳婕, 路雪美, 冯小雨. 果蔬化学护色技术研究进展[J]. 吉林医药学院学报, 2022, 43(1): 61–63.
- JIN J, LU X M, FENG X Y. Fruit and vegetable chemistry color technology research progress[J]. Journal of Jilin Institute of Medicine, 2022, 43(1): 61–63.
- [22] 刘帮迪, 冯欣欣, 舒畅, 等. 渗透脱水预处理对冷冻杏果实品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2022, 10: 32–39.
- LIU B D, FENG X X, SHU C, et al. Effects of osmotic dehydration pretreatment on fruit quality of frozen apricot[J]. Preservation and Processing, 2022, 10: 32–39.
- [23] 赵金红, 温馨, 彭郁, 等. 渗透压脱水前处理对芒果冻藏中品质变化的影响[J]. 现代食品科技, 2014, 30(5): 117, 225–231.
- ZHAO J H, WEN X, PENG Y, et al. Effects of osmotic dehydration pretreatment on quality changes of mango frozen storage[J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(5): 117, 225–231.
- [24] MARANI C M, AGNELLI M E, MASCHERONI R H. Osmo-frozen fruits: Mass transfer and quality evaluation[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(4): 1122–1130.
- [25] AHMED I, QAZI I M, JAMAL S. Developments in osmotic dehydration technique for the preservation of fruits and vegetables[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2016, 34: 29–43.
- [26] NOWACKA M, DADAN M, TYLEWICZ U. Current applications of ultrasound in fruit and vegetables osmotic dehydration processes [J]. Applied Sciences, 2021, 11(3): 1269.
- [27] NOWACKA M, TYLEWICZ U, ROMANI S, et al. Influence of ultrasound-assisted osmotic dehydration on the main quality parameters of kiwifruit[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 41: 71–78.
- [28] PATTANAPA K, THERDTHAI N, CHANTRAPORNCHAI W, et al. Effect of sucrose and glycerol mixtures in the osmotic solution on characteristics of osmotically dehydrated mandarin cv. (Sai-Namphaung)[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2010, 45(9): 1918–1924.
- [29] MA Y C, YI J Y, BI J F, et al. Understanding of osmotic dehydration on mass transfer and physical properties of freeze-dried apple slices: A comparative study of five saccharides osmotic agents [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(3): e16328.
- [30] KLEWICKI R, UCZCIWEK M. Effect of osmotic dehydration in fructose, sucrose and fructooligosaccharide solutions on the content of saccharides in plums and apples and their energy value[J]. Agricultural and Food Science, 2008, 17: 9.
- [31] ZONGO A P, KHALLOUFI S, RATTI C. Effect of viscosity and rheological behavior on selective mass transfer during osmotic dehydration of mango slices in natural syrups[J]. Journal of Food Process Engineering, 2021, 44(7): e13745.
- [32] BROCHIER B, MARCZAK L D F, NOREÑA C P Z. Use of different kinds of solutes alternative to sucrose in osmotic dehydration of yacon[J]. Brazilian Archives of Biology and Technology, 2014, 58(1): 34–40.
- [33] KHUBBER S, CHATURVEDI K, TAGHI GHARIBZAHEDI S M, et al. Non-conventional osmotic solutes (honey and glycerol) improve mass transfer and extend shelf life of hot-air dried red carrots: Kinetics, quality, bioactivity, microstructure, and storage stability[J]. LWT, 2020, 131: 109764.
- [34] LEBAIL A, CHEVALIER D, MUSSA D M, et al. High pressure freezing and thawing of foods: A review[J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(5): 504–513.
- [35] CHENG L N, SUN D W, ZHU Z W, 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.
- [36] ALIZADEH E, CHAPLEAU N, DE LAMBALLERIE M, et al. Effect of different freezing processes on the microstructure of Atlantic salmon (*Salmo salar*) fillets[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2007, 8(4): 493–499.
- [37] LI Z Y, CHEN S H, LIU F X, et al. Effects of high-pressure low-temperature freezing and thawing process on potato qualities [J]. Advanced Materials Research, 2012, 554: 1521–1525.
- [38] OTERO L, MARTINO M, ZARITZKY N, et al.

- Preservation of microstructure in peach and mango during high-pressure-shift freezing[J]. *Journal of Food Science*, 2000, 65(3): 466–470.
- [39] SULAIMAN A, SILVA F V M. High pressure processing, thermal processing and freezing of ‘Camarosa’ strawberry for the inactivation of polyphenoloxidase and control of browning[J]. *Food Control*, 2013, 33(2): 424–428.
- [40] CHENG L, ZHU Z, SUN D W. Impacts of high pressure assisted freezing on the denaturation of polyphenol oxidase[J]. *Food Chemistry*, 2021, 335: 127485.
- [41] LI B, SUN D W. Novel methods for rapid freezing and thawing of foods – A review[J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 54(3): 175–182.
- [42] SUSLICK K S. Sonochemistry [J]. *Science*, 1990, 247(4949): 1439–1445.
- [43] CHENG X F, ZHANG M, XU B G, et al. The principles of ultrasound and its application in freezing related processes of food materials: A review[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2015, 27: 576–585.
- [44] WU X F, ZHANG M, ADHIKARI B, et al. Recent developments in novel freezing and thawing technologies applied to foods[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2017, 57(17): 3620–3631.
- [45] 曹雪慧, 王甄妮, 白鸽, 等. 超声波对不同孔隙率水果冻结特性的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(7): 128–133.
- CAO X H, WANG Z N, BAI G, et al. Effects of ultrasonic wave on freezing characteristics of fruits with different porosity[J]. *Food Science*, 2021, 42(7): 128–133.
- [46] CHENG X F, ZHANG M, ADHIKARI B, et al. Effect of ultrasound irradiation on some freezing parameters of ultrasound-assisted immersion freezing of strawberries[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2014, 44: 49–55.
- [47] XU B G, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Infusion of CO<sub>2</sub> in a solid food: A novel method to enhance the low-frequency ultrasound effect on immersion freezing process[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2016, 35: 194–203.
- [48] NOWAK K W, ZIELINSKA M, WASZKIELIS K M. The effect of ultrasound and freezing/thawing treatment on the physical properties of blueberries [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2019, 28(3): 741–749.
- [49] SOLTANI FIROUZ M, FARAHMANDI A, HOSSEINPOUR S. Early detection of freeze damage in navel orange fruit using nondestructive low intensity ultrasound coupled with machine learning[J]. *Food Analytical Methods*, 2021, 14(6): 1140–1149.
- [50] FAN K, ZHANG M, WANG W Q, et al. A novel method of osmotic–dehydrefreezing with ultrasound enhancement to improve water status and physicochemical properties of kiwifruit[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2020, 113: 49–57.
- [51] ISLAM Md N, ZHANG M, ADHIKARI B, et al. The effect of ultrasound-assisted immersion freezing on selected physicochemical properties of mushrooms [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2014, 42: 121–133.
- [52] ZHU Z W, CHEN Z B, ZHOU Q Y, et al. Freezing efficiency and quality attributes as affected by voids in plant tissues during ultrasound-assisted immersion freezing[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2018, 11(9): 1615–1626.
- [53] WIKTOR A, SCHULZ M, VOIGT E, et al. The effect of pulsed electric field treatment on immersion freezing, thawing and selected properties of apple tissue[J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 146: 8–16.
- [54] PARNIAKOV O, LEOVKA N I, BALS O, et al. Effect of electric field and osmotic pre-treatments on quality of apples after freezing–thawing[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2015, 29: 23–30.
- [55] VELICKOVA E, TYLEWICZ U, DALLA ROSA M, et al. Effect of pulsed electric field coupled with vacuum infusion on quality parameters of frozen/thawed strawberries[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 233: 57–64.
- [56] LAMANAUSKAS N, BOBINAITĖ R, ŠATKAUSKAS S, et al. Pulsed electric field-assisted juice extraction of frozen/thawed blueberries[J]. *Zemdirbyste–Agriculture*, 2015, 102(1): 59–66.
- [57] KAUR M, KUMAR M. An innovation in magnetic field assisted freezing of perishable fruits and vegetables: A review [J]. *Food Reviews International*, 2020, 36(8): 761–780.
- [58] JAMES C, PURNELL G, JAMES S J. A review of

- novel and innovative food freezing technologies [J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8: 1616–1634.
- [59] ZHANG L, YANG Z, DENG Q J. Effects of pulsed magnetic field on freezing kinetics and physical properties of water and cucumber tissue fluid [J]. Journal of Food Engineering, 2021, 288: 110149.
- [60] KANG T, YOU Y, HOPTOWIT R, et al. Effect of an oscillating magnetic field on the inhibition of ice nucleation and its application for supercooling preservation of fresh-cut mango slices[J]. Journal of Food Engineering, 2021, 300: 110541.
- [61] 韩馨仪, 赵松松, 刘斌, 等. 交变磁场抑制葡萄冻害机理分析及试验研究[J]. 河北农业大学学报, 2021, 44(2):97–103.  
HAN X Y, ZHAO S S, LIU B, et al. Alternating magnetic field grape frost damage mechanism analysis and test study[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2021, 44(2): 97–103.
- [62] KANG T, HER J Y, HOPTOWIT R, et al. Investigation of the effect of oscillating magnetic field on fresh-cut pineapple and agar gel as a model food during supercooling preservation [J]. Transactions of the ASABE, 2019, 62(5): 1155–1161.
- [63] 周子鹏, 赵红华, 赵红霞, 等. 交变磁场对水及生理盐水过冷过程的影响[J]. 高校化学工程学报, 2013, 27(2): 205–209.  
ZHOU Z P, ZHAO H H, ZHAO H X, et al. Effect of alternating magnetic field on the supercooling process of water and saline[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2013, 27(2): 205–209.
- [64] TANG J Y, ZHANG H N, TIAN C Q, et al. Effects of different magnetic fields on the freezing parameters of cherry[J]. Journal of Food Engineering, 2020, 278: 109949.
- [65] BOE A A, DO J Y, SALUNKHB D K. Tomato ripening: Effects of light frequency, magnetic field, and chemical treatments[J]. Economic Botany, 1968, 22(2): 124–134.
- [66] TANG J, SHAO S, TIAN C. Effects of the magnetic field on the freezing process of blueberry[J]. International Journal of Refrigeration, 2020, 113: 288–295.
- [67] PUZA E A, MAYO F E C, POLO J M A, et al. Effect of freezing with oscillating magnetic fields on the physical and sensorial characteristics of mango[J]. Brazilian Journal of Food Technology, 2019, 22: e2018169.
- [68] HER J Y, KANG T, HOPTOWIT R, et al. Oscillating magnetic field (OMF) based supercooling preservation of fresh-cut honeydew melon[J]. Transactions of the ASABE, 2019, 62(3): 779–785.
- [69] ROUILLÉ J, LEBAIL A, RAMASWAMY H S, et al. High pressure thawing of fish and shellfish[J]. Journal of Food Engineering, 2002, 53(1): 83–88.
- [70] ESHTIAGHI M N, KNORR D. High hydrostatic pressure thawing for the processing of fruit preparations from frozen strawberries[J]. Food Biotechnology, 1996, 10(2): 143–148.
- [71] BEN HAJ SAID L, BELLAGHA S, ALLAF K. Measurements of texture, sorption isotherms and drying/rehydration kinetics of dehydrofrozen-textured apple[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 165: 22–33.
- [72] PENG Y, ZHAO J H, WEN X, et al. The comparison of microwave thawing and ultra-high-pressure thawing on the quality characteristics of frozen mango[J]. Foods, 2022, 11(7): 1048.
- [73] LIU F X, WANG Y T, BI X F, et al. Comparison of microbial inactivation and rheological characteristics of mango pulp after high hydrostatic pressure treatment and high temperature short time treatment [J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 12: 11.
- [74] KUMARI A, FARID M. Optimization of high pressure processing for microbial load reduction in *Diospyros kaki* 'Fuyu' pulp using response surface methodology[J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57(7): 2472–2479.
- [75] PACIULLI M, MEDINA MEZA I G, RINALDI M, et al. Improved physicochemical and structural properties of blueberries by high hydrostatic pressure processing[J]. Foods, 2019, 8(7): 272.
- [76] WEN X, HU R, ZHAO J H, et al. Evaluation of the effects of different thawing methods on texture, colour and ascorbic acid retention of frozen hami melon (*Cucumis melo* var. *saccharinus*)[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2015, 50(5): 1116–1122.
- [77] KONYOLE S O, OIYE S O, OKIROR G, et al. Frozen strawberry quality enhancement using high

- hydrostatic pressure and vacuum infusion with pectin methylesterase and calcium chloride solution[J]. The African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development, 2021, 21(1): 17290-17312.
- [78] QIU L Q, ZHANG M, CHITRAKAR B, et al. Application of power ultrasound in freezing and thawing Processes: Effect on process efficiency and product quality [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 68: 105230.
- [79] NOWAK K W, ZIELINSKA M, WASZKIELIS K M. The effect of ultrasound and freezing/thawing treatment on the physical properties of blueberries [J]. Food Science and Biotechnology, 2019, 28 (3): 741-749.
- [80] CAO X, ZHANG F, ZHU D, et al. Evaluation of the effects of immersion thawing methods on quality of blueberries[J]. Journal of Food Process Engineering, 2020, 43(11): e13538.
- [81] 刘雪梅, 孟宪军, 李斌, 等. 不同解冻方法对速冻草莓品质的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(22): 276-281.
- LIU X M, MENG X J, LI B, et al. The strawberry quality can be affected by different thawing methods [J]. Food Science, 2014, 35(22): 276-281.
- [82] SANTHIRASEGARAM V, RAZALI Z, GEORGE D S, et al. Effects of thermal and non-thermal processing on phenolic compounds, antioxidant activity and sensory attributes of chokanan mango (*Mangifera indica* L.) juice[J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(11): 2256-2267.
- [83] LIU Y, CHEN S H, PU Y F, et al. Ultrasound-assisted thawing of mango pulp: Effect on thawing rate, sensory, and nutritional properties [J]. Food Chemistry, 2019, 286: 576-583.
- [84] DELGADO A E, SUN D W. Ultrasound-assisted freezing[M]// Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing. New York: Springer New York, 2011: 495-509.
- [85] SÁNCHEZ-MORENO C, PLAZA L, ELEZ-MARTÍNEZ P, et al. Impact of high pressure and pulsed electric fields on bioactive compounds and antioxidant activity of orange juice in comparison with traditional thermal processing [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(11): 4403-4409.
- [86] MOSQUEDA-MELGAR J, RAYBAUDI-MASSILIA R M, MARTÍN-BELLOSO O. Combination of high-intensity pulsed electric fields with natural antimicrobials to inactivate pathogenic microorganisms and extend the shelf-life of melon and watermelon juices [J]. Food Microbiology, 2008, 25(3): 479-491.
- [87] MARSELLÉS-FONTANET Á R, MARTÍN-BELLOSO O. Optimization and validation of PEF processing conditions to inactivate oxidative enzymes of grape juice[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 83(3): 452-462.
- [88] BASAK T, AYAPPA K G. Analysis of microwave thawing of slabs with effective heat capacity method [J]. AIChE Journal, 1997, 43(7): 1662-1674.
- [89] 陈晓维, 余元善, 徐玉娟, 等. 不同解冻方式下的蓝莓品质的比较分析[J]. 现代食品科技, 2019, 35(9): 139, 170-175.
- CHEN X W, YU Y S, XU Y J, et al. Comparative analysis of blueberry quality under different thawing methods[J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(9): 139, 170-175.
- [90] 彭郁, 赵金红, 倪元颖. 不同解冻新技术对芒果品质的影响[J]. 食品工业, 2015, 36(6): 14-18.
- PENG Y, ZHAO J H, NI Y Y. Effects of different thawing techniques on mango quality[J]. Food Industry, 2015, 36(6): 14-18.
- [91] 陈宏运, 伍志权, 何鑫平, 等. 不同解冻方法对液浸速冻荔枝品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(5): 77-81.
- CHEN H Y, WU Z Q, HE X P, et al. Effects of different thawing methods on quality of liquid frozen litchi[J]. Food Research and Development, 2016, 37(5): 77-81.
- [92] WEN X, HU R, ZHAO J H, et al. Evaluation of the effects of different thawing methods on texture, colour and ascorbic acid retention of frozen hami melon (*Cucumis melo* var. *saccharinus*)[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2015, 50(5): 1116-1122.
- [93] XU B G, CHEN J N, YUAN J, et al. Effect of different thawing methods on the efficiency and quality attributes of frozen red radish[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101(8): 3237-3245.
- [94] 王夷秀, 陈芹芹, 毕金峰, 等. 不同解冻方法对速冻桑葚汁液流失率、理化品质及抗氧化活性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(7): 149-154.
- WANG Y X, CHEN Q Q, BI J F, et al. Effects of

- different thawing methods on juice loss rate, physical and chemical quality and antioxidant activity of quick-frozen mulberry[J]. *Food Science*, 2017, 38(7): 149-154.
- [95] 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 xananassa* Duch.)[J]. *Food Research International*, 2012, 48(1): 241-248.
- [96] WATANABE T, ANDO Y. Evaluation of heating uniformity and quality attributes during vacuum microwave thawing of frozen apples[J]. *LWT*, 2021, 150: 111997.
- [97] 吕春茂, 刘璐, 孟宪军, 等. 不同解冻方式对树莓抗氧化成分及其活性的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2018, 49(6): 661-670.
- LÜ C M, LIU L, MENG X J, et al. Effects of different thawing methods on antioxidant components and activity of raspberry[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2018, 49(6): 661-670.
- [98] LIU L, LV C M, MENG X J, et al. Effects of different thawing methods on flavor compounds and sensory characteristics of raspberry[J]. *Flavour and Fragrance Journal*, 2020, 35(5): 478-491.
- [99] 姜怡彤, 接伟光, 徐飞, 等. 解冻方式对速冻菠萝蜜果肉品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(1): 266-271, 278.
- JIANG Y T, JIE W G, XU F, et al. Effects of thawing methods on fruit quality of quick-frozen jackfruit[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(1): 266-271, 278.
- [100] 胡中海, 孙谦, 马亚琴, 等. 不同解冻方法对速冻温州蜜柑橘瓣品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(14): 123-126, 130.
- HU Z H, SUN Q, MA Y Q, et al. Effects of different thawing methods on the quality of quick-frozen tangerine petals[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(14): 123-126, 130.

## Research Progress on New Techniques of Fruit Quick Freezing and Thawing

Wei Siyu, Chen Fang, Zhu Yuchen\*

(National Engineering Research Center for Fruit and Vegetable Processing, College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100089)

**Abstract** Freezing is one of the convenient ways for the long-term preservation of fruits. However, the ice crystals produced in the freezing process tend to damage the cell structure, resulting in the loss of juice during thawing. Thus, the quality of fruits after thawing is seriously affected. Three methods could be used to optimize the quality of frozen fruits: Using osmotic dehydration, increasing the freezing rate, optimizing the thawing process. In this study, the new techniques used in fruit freezing and thawing were summarized, such as the osmotic dehydration protection, high-pressure, ultrasound, pulse electric field, microwave and magnetic field. The principles, applications, advantages and disadvantages were compared. This article provided new ideas for the development of fruit freezing and thawing.

**Keywords** fruit; freeze; thaw; new techniques