

# 物理场技术在水产品冷冻冷链中的应用

叶 剑<sup>1</sup>, 徐仰丽<sup>1</sup>, 林胜利<sup>1</sup>, 苏来金<sup>2\*</sup>

(1. 温州市农业科学研究院, 温州市特色食品资源工程技术研究中心, 温州 325006;

2. 温州大学生命与环境科学学院, 温州 325035)

**摘 要:** 在冷链流通过程中, 对新鲜水产品进行冷冻处理能够大大提高其保质期。然而, 传统的冷冻和解冻方法有传热效率低、耗时较长的缺陷, 且难以控制冰晶对食品原料的损伤。所以冷冻水产品经常会面临一系列的质量问题, 如质构劣化、蛋白质变性、持水能力下降等。因此有必要采用高效的冷冻/解冻技术以防止品质劣变。相比于传统方法, 基于物理场(如高压、超声、电场等)的新型冷冻和解冻技术具有高冷冻/解冻速率、低能耗、对产品品质维持更好等优点。本文综述了近年来物理场技术在水产品中的应用, 分析了它们各自的原理、特点、缺陷及未来的发展趋势, 为这些新技术在水产品冷冻冷链中的应用提供相关参考。

**关键词:** 水产品; 冷冻; 解冻; 物理场技术

## Application of physical field technology in frozen aquatic products in cold chain

YE Jian<sup>1</sup>, XU Yang-Li<sup>1</sup>, LIN Sheng-Li<sup>1</sup>, SU Lai-Jin<sup>2\*</sup>

(1. Wenzhou Academy of Agricultural Science, Wenzhou Characteristic Food Resources Engineering and Technology Research Center, Wenzhou 325006, China;

2. College of Life and Environmental Science, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China)

**ABSTRACT:** In the process of cold chain circulation, frozen treatment of fresh aquatic products can greatly increase their shelf life. However, traditional freezing and thawing methods have the defects of low heat transfer efficiency, time consuming, and it is difficult to control the damage of ice crystals on food materials, so that frozen aquatic products are often faced with a series of quality problems, such as structure deterioration, protein denaturation and water holding capacity decline. Therefore, it is necessary to utilize efficient freezing and thawing technology to prevent quality deterioration. Compared with traditional methods, novel freezing and thawing techniques, based on physical fields (such as high pressure, ultrasonic, electric field, etc.), have the characteristics of fast freezing/thawing speed, low energy consumption, and better maintenance of products quality. This paper reviewed the applications of these physical field techniques in aquatic products in recent years, and analyzed their principles, characteristics, defects and future development trends, in order to provide references for the application of these new technologies in the frozen cold chain of aquatic products.

**基金项目:** 温州市基础公益项目(N20180011, N20180017)、温州市重点实验室(工程中心)建设项目(ZD202003)、浙江省水产产业技术项目(2020-2022)、温州市重大科技创新攻关项目(ZS2019001)

**Fund:** Supported by the Public Welfare Basic Project of Wenzhou Technical (N20180011, N20180017), Construction Project of Wenzhou Key Laboratory (Engineering Center) (ZD202003), Aquatic Industry Technology Project of Wenzhou (2020-2022), and Major scientific and Technological Innovation Projects of Wenzhou (ZS2019001)

\***通讯作者:** 苏来金, 博士, 副研究员, 主要研究方向为海洋生物资源开发及利用。E-mail: sulaijin@163.com

\***Corresponding author:** SU Lai-Jin, Ph.D, Associate Professor, College of Life and Environmental Science, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China. E-mail: sulaijin@163.com

**KEY WORDS:** aquatic products; freezing; thawing; physical field technology

## 1 引言

冷冻保鲜是指将食品中心温度降至 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,使产品体内大部分水分冻结,并在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下贮藏、流通和销售的技术<sup>[1]</sup>。该技术操作简便,保鲜时间较长,是目前应用最广泛的食物保鲜技术之一。特别是对于容易腐败的水产品,优质的冷冻保鲜技术及冷链物流体系,使水产品从捕捞后的储藏、运输、加工、销售,直到消费者手中的各环节均处在设定的低温环境下,能够显著延长其保质期。

然而在冷链流通过程中,冷冻保鲜技术长期面临许多技术困难,特别是在储运前的冷冻环节和加工前的解冻环节。由于食品的导热性能较低( $0.5\sim 1.5\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ )<sup>[2]</sup>,传统的食物冷冻和解冻技术速率较慢,进而导致产品蛋白质变性、质构劣化、持水能力下降等现象。为解决相关问题,学者们以提高冷冻食品质量为主要目标,在传统冷冻技术基础上引入超高压、超声波、电场、磁场等物理场,以改善冷冻及解冻过程对食品品质造成的不利影响。本文概述了几种常见物理场技术的原理、优缺点及在水产品冷冻冷链过程中的应用研究进展,以期为其高效应用于水产加工业提供参考。

## 2 物理场技术在水产品冷冻过程中的应用

一般认为,食物冷冻速率越快越好,这是由于速冻时,食品的中心温度快速通过最大冰晶生成带,由此产生的冰晶较小,且冰晶分布接近天然食品中的液态水分布,由此减小对组织细胞的损伤且能降低蛋白质氧化变性<sup>[3]</sup>。目前应用较多的冷冻方法大致可分为鼓风冷冻、低温冷冻、直接接触冷冻和浸渍冷冻等<sup>[4,5]</sup>,它们主要通过提升外部冷冻效率来加速冷冻。但由于食品的导热性能较低,这些方法的冷冻速率或效果依然不尽人意。采用液氮速冻虽然有极高的冷冻速率,但液氮的使用成本较高,且过高的冷冻速度也可能导致水产品低温断裂<sup>[6]</sup>。进一步提升冷冻质量,施加物理场辅助冷冻,调控水分子结晶过程,对改良冷冻食品品质有重大意义。

### 2.1 高压冷冻

高压冷冻技术是指在常规冷冻过程中施加  $200\sim 600\text{ MPa}$  的压力场,使食品中水分的冰点下降即过冷度增大,从而调控食品中的晶核形成以及冰晶生长的冷冻技术<sup>[7]</sup>。在高压状态下将物料降低至设定温度,然后释放压力,此时食品内部在短时间内形成均匀且较小的冰晶。压力和冻结终点温度不同,形成的冰晶类型也略有差异,由此可将该技术分成高压辅助冷冻和高压转变冷冻<sup>[8]</sup>。高压冷冻技术在冰晶调控上的优势使其克服了传统冷冻过程中大冰晶对组

织的伤害<sup>[9]</sup>,因此得到了业界的广泛认可,是目前认可度最高的新型冷冻技术之一<sup>[10]</sup>。经过深入研究,许多学者还发现高压辅助处理可有效抑制鱼体的冻藏过程中脂肪氧化<sup>[11,12]</sup>,提高产品的质构特性<sup>[13]</sup>,但也有学者发现高压处理会使鱼肉肌原纤维蛋白含量降低<sup>[14]</sup>。因此,针对特定的经济水产品还需进一步的研究高压处理对产品冷冻品质的影响。

### 2.2 超声波辅助冷冻

超声辅助冷冻技术是在食品冻结过程中加入低频超声波( $20\sim 40\text{ kHz}$ ),以加速水分相变过程的操作方法。通过超声波在媒介中传播时产生的机械效应、空穴效应和热效应,一方面能提高传热和传质效率,另一方面使空化气泡诱导冰晶晶核的形成,而且能使较大冰晶破碎从而形成小而均匀分布的冰晶,对食品的微观结构破坏较小<sup>[15]</sup>,因此能延缓冻品品质败坏,具有较好的应用价值。目前,该技术的应用研究主要集中于果蔬类产品<sup>[16-18]</sup>,多项研究表明<sup>[19]</sup>超声波辅助下能有效提高原料的冷冻速度,形成较小的冰晶,但其辅助水产品及肉类食品原料冷冻的应用研究近年来才逐渐浮现,这可能与水产品及肉产品的肌肉结构较果蔬更复杂有关。如 Zhang 等<sup>[20]</sup>以猪肉为实验对象,在中心温度达到  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  时开启  $180\text{ W}$  的超声波处理  $8\text{ min}$ 。结果表明,该方法明显减小了肌肉中冰晶的尺寸,并且使得冰晶的分布更加均匀,降低了肉的解冻损失,改善了肉的冷冻品质;向迎春<sup>[21]</sup>以中国对虾为研究对象,在超声起始温度  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,超声功率  $180\text{ W}$ ,超声时间  $5.0\text{ s}$  条件下测得冻结中国对虾通过最大冰晶生成带的时间为  $106\text{ s}$ ,产生的冰晶小于浸渍和冰箱冻结的样品,但贮藏  $60\text{ d}$  还不能明显看出该技术在样品理化指标方面的相对优势;Sun 等<sup>[22]</sup>发现  $175\text{ W}$  的超声功率辅助能使冷冻鲤鱼形成的冰晶小而均匀,解冻和烹饪损失更少,且降低了游离水和结合水的迁移率。因此该技术在冷冻水产品及肉制品这方面的应用前景光明。

### 2.3 电场辅助冷冻

电场辅助冷冻是通过改变水分子的偶极矩,诱导其发生极化作用,令其自由能降低,从而加速冰晶形成并抑制大分子冰晶形成。近年来关于高压静电场辅助冷冻的研究时有报道。研究表明,静电场可诱发猪肉、羊肉水分成核,控制冰晶大小及形态,提高冻结速率<sup>[23-25]</sup>。但利用静电场辅助水产品冷冻的研究未见报道,且目前该技术的研究仍以相关机制研究为主,研究对象多为模拟食品,和真实食品的冰晶形成机制可能有一定区别<sup>[26]</sup>。

脉冲电场通过影响细胞或组织渗透性增强传质,增加了细胞内材料冻结的可能性,提高了冻结速度,缩短了

冻结时间。不仅如此,脉冲电场辅助下的冰晶形态均匀、圆整,延伸率较小,接近圆度<sup>[27]</sup>。科研人员将苹果<sup>[28]</sup>、马铃薯<sup>[29]</sup>、菠菜叶片<sup>[30]</sup>等在冷冻前或冷冻阶段采用脉冲电场处理,发现冷冻时间至少可缩短 24%,另外,脉冲电场提高了细胞吸收变形剂和低温保护剂的能力。Shayanfar 等<sup>[31]</sup>研究表明胡萝卜片浸泡在氯化钙、甘油、海藻糖的水溶液中经脉冲电场处理,冷冻后可以更好地保持其硬度和颜色属性。但该技术同样在水产品冷冻中的应用研究较少。

## 2.4 磁场辅助冷冻

磁场对水分子冻结结晶影响机制目前仍有争议<sup>[32]</sup>,但在食品冷冻领域已经有较多的研究,如 Ku 等<sup>[33]</sup>采用磁场辅助冷冻方式结合微波解冻处理猪肉,发现该方法能够获得较高的感官性质和持水性,减少烹饪损失。娄耀邦等<sup>[34]</sup>研究了弱强度(0~11 G)静磁场对鲤鱼冷冻过程的影响,发现弱磁场对鲤鱼的冻结点几乎没有影响。虽然能显著加速水分子相变过程,却令整个冷冻过程延缓。但是 Rodriguez 等<sup>[35]</sup>和 Otero 等<sup>[36]</sup>的研究结果表明,添加磁场并未对冷冻时间、持水力和质构方面有显著性影响。故磁场确实能在一定程度上调控冷冻食品的冰晶形成,在维持食品品质方面存在积极作用,但其对冷冻过程的影响结果不一致。当然这也可能是不同类型的食品原料导致的区别。为了该技术的稳定应用和有效推广,还需要更稳定的实验结论。

## 3 物理场技术在水产品解冻过程中的应用

解冻方式的选择对产品质量变化以及加工特性等起着非常重要的作用。现阶段,水产品解冻实际生产中主要采用自然解冻、冷藏解冻、流水解冻、微波解冻等<sup>[37]</sup>。这些方法主要存在的问题有解冻时间长、汁液流失、原料保水性下降、品质劣变等<sup>[38,39]</sup>,很难满足生活水平逐渐提高的消费者的要求。因此在传统解冻流程中引入物理场如高压、超声波、电场等技术以辅助解冻的方法逐渐引来食品领域专家的关注。

### 3.1 高压解冻

高压解冻可视作高压冷冻的逆过程,在传统解冻过程中加入 100~300 MPa 高压处理样品,使样品水分的冰点下降,以达到快速解冻的效果,根据加压的程度还可分为高压辅助解冻和高压诱导解冻<sup>[40]</sup>。相对传统的空气解冻和静水解冻,高压解冻具有高解冻速率、低解冻损失的优点<sup>[41,42]</sup>,但压力控制不当也可能导致肌肉蛋白质变性及其他不良变化。如 Schubring 等<sup>[43]</sup>考察了 200 MPa 高压解冻对鳕鱼、鲑鱼等多种鱼类肌肉的影响,发现高压处理对色泽、质构、汁液损失等指标的影响因不同鱼种而异,因此针对不同物料,需选择合适的解冻压力、解冻温度和解冻时间。Jia 等<sup>[44]</sup>分别用 70、140 和 210 MPa 高压辅助解

冻猪肉,发现 140 MPa 下解冻损失最小,较适用于猪肉解冻。且随压力提高,解冻时间逐渐缩短,但蛋白质降解和猪肉超微结构变化加剧。

### 3.2 超声波解冻

采用超声波辅助解冻是近年来的研究热点。该方法主要利用超声波的热效应加速传统解冻过程。当超声波穿透 2 种不同的介质时,界面的产热量更大,所以超声波的吸收与产热主要发生在食品内部冻结区与解冻区的分界处,在食品的冻结点附近达到最大<sup>[45]</sup>。由于食品的冻结区对超声波的吸收比未冻结区对超声波吸收更容易,所以不易发生局部过热等不良反应,能更好地维持食品品质。目前该技术在水产品中的研究报道较少,但大都取得了较好的结果。马翼飞等<sup>[46]</sup>比较了多种解冻方式对小黄鱼品质的影响,发现在 20 °C 水中加入 43 kHz、200 W 的超声波辅助解冻能有效维持鱼肉的质构,且色泽、蛋白及脂肪氧化等指标均保持在较高的水平。马超锋等<sup>[45]</sup>用不同功率超声波解冻经壳聚糖涂膜的罗非鱼片,发现 450 W 超声功率作用下的罗非鱼片有较低的解冻时间和解冻损失率,且  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活性维持较好,但脂肪氧化程度较高。和静水解冻相比,超声辅助解冻对品质仍有一定程度的破坏<sup>[47,48]</sup>,实际应用时需要慎重选择超声条件。

### 3.3 高压静电场解冻

高压静电场解冻技术在直流和交流高压下均可进行,一方面其产生的能量可以加速氢键断裂,促使冰块以小冰晶形式存在;另一方面电场产生的电晕风带动空气粒子在冻结物料表面产生湍流和涡旋,从而增加了传热系数,加快解冻速率<sup>[49]</sup>。该技术运用在食品解冻中能起到提高解冻速率<sup>[50]</sup>,降低解冻损失,减少蛋白质变性,抑制微生物生长等积极作用<sup>[51]</sup>,Mousakhani-Ganjeh 等<sup>[52]</sup>采用高压静电场处理冻结黄鳍金枪鱼,解冻速率是对照组空气解冻的 1.78 倍;Li 等<sup>[53]</sup>研究表明在高压静电场下解冻鲤鱼,其解冻时间与空气解冻相比减少了 50 min,汁液流失降低了 2.95%,解冻后菌落总数,气单胞菌,假单胞菌和乳酸菌均有所减少。Jia 等<sup>[54]</sup>发现静电场能促进盐的扩散,解冻速率随盐浓度的增加而增加,与空气解冻组相比,汁液流失显著降低,使假单胞菌数量减少了 0.5 log。但该技术目前还有改进空间,比如随着电场强度的增加,会产生臭氧,加速冻样样品在解冻过程中脂质氧化<sup>[55]</sup>;在湿度较大时,高压静电场可能导致空气被击穿,因此存在安全隐患。

### 3.4 电磁场解冻

以微波技术和射频技术为代表的电磁场解冻技术同样是应用前景较好的新型解冻方式。微波解冻的相关研究与应用较多,是目前商业上最成熟的快速解冻技术之一。主要利用微波使冷冻原料中的水分子发生旋转、振动、碰

撞、摩擦,以产生热量,达到解冻的目的。一般来说,微波频率越高,解冻速度越快。常用的微波频率有 915 MHz 和 2450 MHz 2 种<sup>[56]</sup>。前者加热速度稍慢,但穿透力强,解冻损失小,在工业上应用较多。而后者与之相反,适合用于解冻小型冷冻食品,常用于家庭微波炉。多项研究表明微波解冻相较传统解冻方法具有速度快、对食品物料品质维持较好等优点<sup>[57,58]</sup>,但液态水会比冰吸收更多热量则导致该解冻过程中易出现局部过热现象。Kim 等<sup>[59]</sup>研究发现局部过热可能与微波功率有关,在 2450 MHz 频率下,解冻速度随功率提升而加快,但 250 W 以上的功率会造成鸡胸肉热分布不均、色泽与保水性不佳等不良现象。为解决局部过热,近年来一些研究尝试将超声、远红外等技术与微波结合,发现微波组合解冻能较好地维持产品品质<sup>[60,61]</sup>,有较好的应用前景。

射频解冻的原理与微波解冻类似,通过电磁场引发食品内部离子移动和偶极旋转,使食品内部加热从而实现快速解冻。射频频率一般为 13.56、27.12、40.68 MHz<sup>[62]</sup>,而波长远大于微波,因此对食品物料有更好的穿透能力,从而使食品加热更均匀。刘富康等<sup>[56]</sup>比较了空气解冻、微波解冻、射频解冻对冷冻鱼糜的解冻效果和凝胶特性的影响,发现射频解冻效率虽不及微波解冻,但过热现象没有后者剧烈,鱼糜品质仅稍差于解冻效率最低的空气解冻,因此适合工业推广,这与陈潜等<sup>[63]</sup>对冷冻鱼浆的解冻研究结论相似。近年来一些研究<sup>[62,64]</sup>利用计算机软件如 COMSOL Multiphysics 对射频解冻过程进行建模,模拟解冻过程中的温度变化,并与实测数据进行比较,确立射频参数、食品物料性质及解冻质量间的联系,为射频技术的应用和相关设备的开发提供了参考,但这类研究在水产品中少见。

## 4 展 望

为保障新鲜水产品特别是海产品的充足供应,业界通常采用冷冻冷链储运以提高产品的货架期。由于水产物料的水分及蛋白质含量较高,在产品冷冻及解冻过程中易发生冰晶损伤、蛋白质变性、汁液损失等问题,导致货架期缩短。传统的冷冻和解冻方法存在用时较长、效率低下、无法控制品质劣变等缺陷,无法满足消费者日益增长的优质产品需求。基于物理场的各类新技术的加入能够有效提升产品冷冻和解冻效率,控制大冰晶形成、蛋白质变性和营养流失等缺陷,且对环境没有额外负担,因此在水产品冷冻冷链中具有很好的应用前景。

总体来看,结合物理场的冷冻及解冻技术在果蔬和肉类食品中的应用研究较多,在水产品特别是海产品中的应用较少,且它们对不同水产品的冻融机制及效果仍有待进一步验证。超高压、超声波、电场、电磁场等新技术虽然都表现出较好的潜力,但又各有缺陷,今后的研究可以

深入探讨物理场技术的组合应用,或是将物理场技术与新材料结合,兼顾冻融效率和质量。另一方面,这些物理场技术的应用目前大都处于实验室阶段,而在实际应用中,大型的冷冻、解冻设备可能难以精确控制物理场条件,局部过热等问题依然存在,这会限制新技术的应用。结合场地、设备等条件选择合适的冻融方法,通过计算机建模分析有望系统性地解决此类问题,但成本相对较高。因此新型物理场技术的大规模商业化应用仍需进一步推进。

## 参考文献

- [1] 沈月新, 章超桦, 薛长湖, 等. 水产食品学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.  
Shen YX, Zhang CH, Xue CH, *et al.* Aquatic food science [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2001.
- [2] Sun DW, Li B. Microstructural change of potato tissues frozen by ultrasound-assisted immersion freezing [J]. *J Food Eng*, 2003, 57(4): 337–345.
- [3] 任青. 不同类别的食品冻结特性的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2014.  
Ren Q. The research on the freezing characteristic of different kinds of foods [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2014.
- [4] Delgado AE, Zheng L, Sun DW. Influence of ultrasound on freezing rate of immersion-frozen apples [J]. *Food Bioprocess Technol*, 2009, 2(3): 263–270.
- [5] Orłowska M, Havet M, Le-Bail A. Controlled ice nucleation under high voltage DC electrostatic field conditions [J]. *Food Res Int*, 2009, 42(7): 879–884.
- [6] 于刚, 杨少玲, 张慧, 等. 不同冻结方式对黄鳍金枪鱼品质变化的比较研究[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(10): 325–329.  
Yu G, Yang SL, Zhang H, *et al.* Comparison of four different freezing techniques about the preservation effects on yellow-fin tuna [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2015, 36(10): 325–329.
- [7] 程丽娜. 超高压冷冻中压力及冷冻因素不同作用之间关系的探讨模式下虾蛋白质变性的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.  
Cheng LN. Effects of different combinations of pressure and freezing factors from high pressure freezing on denaturation of prawn (*Metapenaeus*) protein [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [8] Le-Bail A, Chevalier D, Mussa DM, *et al.* High pressure freezing and thawing of foods: A review [J]. *Int J Refrig*, 2002, 25(5): 504–513.
- [9] Malinowska-Pañczyk E, Walecka M, Pawłowicz R, *et al.* The effect of high pressure at subzero temperature on proteins solubility, drip loss and texture of fish (cod and salmon) and mammal's (pork and beef) meat [J]. *Food Sci Technol Int*, 2014, 20(5): 383–395.
- [10] Truong B, Buckow R, Stathopoulos C, *et al.* Advances in high-pressure processing of fish muscles [J]. *Food Eng Rev*, 2015, 7(2): 109–129.
- [11] Aubourg SP, Torres JA, Saraiva JA, *et al.* Effect of high-pressure treatments applied before freezing and frozen storage on the functional and sensory properties of Atlantic mackerel (*Scomberscombrus*) [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2013, 53(1): 100–106.
- [12] Pitacalvo C, Guerra R E, Saraiva JA, *et al.* High-pressure processing before freezing and frozen storage of European hake(*Merluccius*

- merluccius*): effect on mechanical properties and visual appearance [J]. *Eur Food Res Technol*, 2018, 224, 423–431.
- [13] Vázquez M, Fidalgo LG, Saraiva JA, *et al.* Preservative effect of a previous high-pressure treatment on the chemical changes related to quality loss in frozen Hake (*Merluccius merluccius*) [J]. *Food BioprocTech*, 2017, 11(2): 293–304.
- [14] Méndez L, Fidalgo LG, Pazos M, *et al.* Lipid and protein changes related to quality loss in frozen sardine (*Sardina pilchardus*) previously processed under high-pressure conditions [J]. *Food Bioproc Technol*, 2017, 10(2): 296–306.
- [15] Zhang P, Zhu Z, Sun DW. Using power ultrasound to accelerate food freezing processes: Effects on freezing efficiency and food microstructure [J]. *Crit Rev Food Sci*, 2018, 58(16): 2842–2853.
- [16] Islam MN, Min Z, Fang Z, *et al.* Direct contact ultrasound assisted freezing of mushroom (*Agaricusbisporus*): Growth and size distribution of ice crystals [J]. *Int J Refrig*, 2015, (5): 46–53.
- [17] Vallespir F, Cárcel JA, Marra F, *et al.* Improvement of mass transfer by freezing pre-treatment and ultrasound application on the convective drying of beetroot (*Beta vulgaris* L.) [J]. *Food Bioproc Technol*, 2018, 11(1): 72–83.
- [18] Cheng XF, Zhang M, Adhikari B, *et al.* Effect of ultrasound irradiation on some freezing parameters of ultrasound-assisted immersion freezing of strawberries [J]. *Int J Refrig*, 2014, 44: 49–55.
- [19] 索原杰, 宣晓婷, 崔燕, 等. 超声波辅助冻结在水产品及肉类产品中的应用研究进展及解冻机制[J]. *生物加工过程*, 2018, 16(3): 78–83.
- Suo YJ, Xuan XT, Cui Y, *et al.* Application of ultrasonic-assisted freezing and thawing technique for aquatic and meat products [J]. *Chin J Bioproc Eng*, 2018, 16(3): 78–83.
- [20] Zhang M, Niu H, Chen Q, *et al.* Influence of ultrasound-assisted immersion freezing on the freezing rate and quality of porcine longissimus muscles [J]. *Meat Sci*, 2017, 136: 1–8.
- [21] 向迎春. 超声辅助冻结中国对虾的组织冰晶状态及其品质变化的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- Xiang YC. Studies on the effect of ultrasonic assisted freezing on the ice crystals and the quality changes in *Fenneropenaeus chinensis* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [22] Sun QX, Zhao XX, Zhang C, *et al.* Ultrasound-assisted immersion freezing accelerates the freezing process and improves the quality of common carp (*Cyprinus carpio*) at different power levels [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2019, 108: 106–112.
- [23] Xanthakis E, Havet M, Chevallier S, *et al.* Effect of static electric field on ice crystal size reduction during freezing of pork meat [J]. *Innov Food Sci Emerg*, 2013, 20: 115–120.
- [24] Dalvi-Isfahan M, Hamdami N, Le-Bail A. Effect of freezing under electrostatic field on the quality of lamb meat [J]. *Innov Food Sci Emerg*, 2016, 37: 68–73.
- [25] Jia G, He X, Nirasawa S, *et al.* Effects of high-voltage electrostatic field on the freezing behavior and quality of pork tenderloin [J]. *J Food Eng*, 2017, 204: 18–26.
- [26] 李一飞. 高压静电场对模型食品冷冻过程的影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- Li YF. Effect of high-voltage electric field on model food freezing behaviors [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [27] Mok JH, Choi W, Park SH, *et al.* Emerging pulsed electric field (PEF) and static magnetic field (SMF) combination technology for food freezing [J]. *Int J Refrig*, 2015, 50: 137–145.
- [28] 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]. *J Food Eng*, 2015, 146: 8–16.
- [29] Jalté M, Lanoiselle JL, Lebovka NI, *et al.* Freezing of potato tissue pre-treated by pulsed electric fields [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2009, 42(2): 576–580.
- [30] Dymek K, Rems L, Zorec B, *et al.* Modeling electroporation of the non-treated and vacuum impregnated heterogeneous tissue of spinach leaves [J]. *Innov Food Sci Emerg*, 2015, 29: 55–64.
- [31] Shayanfar S, Chauhan O, Toepfl S, *et al.* Pulsed electric field treatment prior to freezing carrot discs significantly maintains their initial quality parameters after thawing [J]. *Int J Food Sci Tech*, 2014, 49(4): 1224–1230.
- [32] 靳爽, 孙淑凤, 王元博, 等. 磁场对冰晶成核过程影响的研究进展[J]. *食品科技*, 2019, 44(12): 56–60.
- Jin S, Sun SF, Wang YB, *et al.* Research progress in the effect of magnetic field on nucleation process of ice crystals [J]. *Food Sci Technol*, 2019, 44(12): 56–60.
- [33] Ku SK, Jeong JY, Park JD, *et al.* Quality Evaluation of pork with various freezing and thawing Methods [J]. *Korean J Food Sci An*, 2014, 34(5): 597–603.
- [34] 娄耀郑, 赵红霞, 李文博, 等. 静磁场对鲤鱼冷冻过程影响的实验[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2013, 43(6): 89–94.
- Lou Y, Zhao H, Li W, *et al.* Experimental of the effects of static magnetic field on carp frozen process [J]. *J Shandong Univ(Eng Sci Ed)*, 2013, 43(6): 89–94.
- [35] Rodríguez AC, James C, James SJ. Effects of weak oscillating magnetic fields on the freezing of pork Loin [J]. *Food Bioproc Technol*, 2017, 10(9): 1–7.
- [36] Otero L, Pérez-Mateos M, Rodríguez AC, *et al.* Electromagnetic freezing: Effects of weak oscillating magnetic fields on crab sticks [J]. *J Food Eng*, 2017, 200: 87–94.
- [37] 欧阳杰, 倪锦, 吴锦婷, 等. 解冻方式对大黄鱼解冻效率和品质的影响[J]. *肉类研究*, 2016, 30(8): 30–34.
- Ouyang J, Ni J, Wu JT, *et al.* Influence of thawing methods on thawing efficiency and quality of *Pseudosciaenacrocea* [J]. *Meat Res*, 2016, 30(8): 30–34.
- [38] 张珂, 关志强, 李敏, 等. 解冻方法对冻藏肉类食品品质影响的研究进展[J]. *肉类研究*, 2014, 28(8): 24–29.
- Zhang K, Guan ZQ, Li M, *et al.* Effects of various thawing methods on the quality characteristics of frozen meat: A review [J]. *Meat Res*, 2014, 28(8): 24–29.
- [39] 刘燕, 王锡昌, 刘源. 金枪鱼解冻方法及其品质评价的研究进展[J]. *食品科学*, 2009, 30(21): 476–480.
- Liu Y, Wang XC, Liu Y. Thawing methods for frozen tuna and its quality evaluation: A review [J]. *Food Sci*, 2009, 30(21): 476–480.
- [40] 周国燕, 李红卫, 胡琦玮, 等. 食品的高压冷冻冷藏原理及应用进展[J]. *食品工业科技*, 2009, (3): 334–336, 339.
- Zhou G, Li HW, Hu QW, *et al.* Mechanism and application progress of high-pressure freezing of food [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2009, (3): 334–336, 339.

- [41] Li WM, Wang P, Xu XL, *et al.* Use of low-field nuclear magnetic resonance to characterize water properties in frozen chicken breasts thawed under high pressure [J]. *Eur Food Res Technol*, 2014, 239(2): 183–188.
- [42] Rouillé J, Lebail A, Ramaswamy HS, *et al.* High pressure thawing of fish and shellfish [J]. *J Food Eng*, 2002, 53(1): 83–88.
- [43] Schubring R, Meyer C, Schlüter O, *et al.* Impact of high pressure assisted thawing on the quality of fillets from various fish species [J]. *Innov Food Sci Emerg*, 2003, 4(3): 257–267.
- [44] Jia F, Jing Y, Dai RT, *et al.* High-pressure thawing of pork: Water holding capacity, protein denaturation and ultrastructure [J]. *Food Biosci*, 2020: 100688.
- [45] 马超锋, 关志强, 李敏, 等. 超声波解冻对壳聚糖涂膜罗非鱼片的水分分布及品质相关性研究[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(2): 332–336, 369. Ma CF, Guan ZQ, Li M, *et al.* The relationship between water distribution and quality of tilapia fillets with chitosan film as affected by different ultrasonic wave [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2017, 38(2): 332–336, 369.
- [46] 马翼飞, 刘欢, 单钱艺, 等. 不同解冻方式对小黄鱼品质的影响[J/OL]. *食品与发酵工业*, 2020, <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.025025> Ma YF, Liu H, Shan QY, *et al.* Effect of different thawing methods on the quality of small yellow croaker [J/OL]. *Food Ferment Ind*, 2020, <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.025025>.
- [47] Li X, Sun P, Ma Y, *et al.* Effect of ultrasonic thawing on the water-holding capacity, physicochemical properties and structure of frozen tuna (*Thunnus tonggol*) myofibrillar proteins [J]. *J Sci Food Agric*, 2019, 99(11): 5083–5091.
- [48] 张树峰, 陈丽丽, 赵利, 等. 不同解冻方法对脆肉鲩鱼肉品质特性的影响[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(3): 56–62. Zhang SF, Chen LF, Zhao L, *et al.* Effect of different thawing methods on quality characteristics of *Ctenopharyngodonidellus C. et V* [J]. *J Henan Univ Technol(Nat Sci Ed)*, 2019, 40(3): 56–62.
- [49] 臧芳波, 吕蒙, 付永杰, 等. 高压静电场解冻技术在肉类及肉制品中的应用研究进展[J/OL]. *食品与发酵工业*, 2020, <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.025166> Zang FB, Lv M, Fu YJ, *et al.* Research progress of application of high voltage electrostatic field thawing technology in meat and meat products [J/OL]. *Food Ferment Ind*, 2020, <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.025166>.
- [50] 张源, 谢晶, 管伟康. 青鱼在高压静电场中冻结解冻的实验研究[J]. *制冷*, 2002, 21(3): 6–9. Zhang Y, Xie J, Guan W. The experimental study on the fish frozen and thawed in the high electrostatic voltage field [J]. *Refrigeration*, 2002, 21(3): 6–9.
- [51] Jia GL, Liu HJ, Nirasawa S, *et al.* Effects of high-voltage electrostatic field treatment on the thawing rate and post-thawing quality of frozen rabbit meat [J]. *Innov Food Sci Emerg*, 2017, 41: 348–356.
- [52] Mousakhani-Ganjeh A, Hamdami N, Soltanizadeh N. Impact of high voltage electric field thawing on the quality of frozen tuna fish (*Thunnus albacares*) [J]. *J Food Eng*, 2015, 156: 39–44.
- [53] Li DP, Jia SL, Zhang LT, *et al.* Post-thawing quality changes of common carp (*Cyprinus carpio*) cubes treated by high voltage electrostatic field (HVEF) during chilled storage [J]. *Innov Food Sci Emerg*, 2017, 42: 25–32.
- [54] Jia GL, Sha K, Meng J, *et al.* Effect of high voltage electrostatic field treatment on thawing characteristics and post-thawing quality of lightly salted, frozen pork tenderloin [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2019, 99: 268–275.
- [55] Rahbari M, Hamdami N, Mirzaei H, *et al.* Effects of high voltage electric field thawing on the characteristics of chicken breast protein [J]. *J Food Eng*, 2018, 216: 98–106.
- [56] 刘富康, 张柔佳, 李锋, 等. 解冻方式对冷冻鱼糜解冻效果和凝胶特性的影响[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2019, 50(4): 681–685. Liu FK, Zhang RJ, Li F, *et al.* Influence of thawing ways on thawing effects and gel properties of frozen surimi [J]. *J Shandong Agric Univ (Nat Sci Ed)*, 2019, 50(4): 681–685.
- [57] 朱文慧, 宦海珍, 步营, 等. 不同解冻方式对秘鲁鲑鱼肌肉品质和风味特性的影响[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(18): 84–89. Zhu WH, Huan HZ, Bu Y, *et al.* Effects of different thawing methods on quality and flavor characteristics of *Dosidicus gigas* [J]. *Food Res Dev*, 2019, 40(18): 84–89.
- [58] 刘蒙佳, 周强, 戴玉梅, 等. 不同解冻方法及添加抗冻剂处理对冷冻海鲈鱼片解冻品质影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(8): 210–218. Liu MJ, Zhou Q, Dai YM, *et al.* Effect of different thawing methods and antifreeze treatment on the quality of frozen sea bass (*Percafluviatilis*) fillets [J]. *Food Ferment Ind*, 2020, 46(8): 210–218.
- [59] Kim TH, Choi JH, Choi YS, *et al.* Physicochemical properties of thawed chicken breast as affected by microwave power levels [J]. *Food Sci Biotechnol*, 2011, 20(4): 971–974.
- [60] Jin J, Wang XD, Han Y, *et al.* Combined beef thawing using response surface methodology [J]. *Czech J Food Sci*, 2016, 34(6): 547–553.
- [61] Cai LY, Cao MJ, Cao AL, *et al.* Ultrasound or microwave vacuum thawing of red seabream (*Pagrus major*) fillets [J]. *Ultrason Sonochem*, 2018, 47: 122–132.
- [62] 张建敏, 冯显英, 李慧, 等. 不同因素对射频解冻猪肉效果的影响[J]. *肉类研究*, 2019, 33(1): 19–24. Zhang JM, Feng XY, Li H, *et al.* Influence of different factors on radio frequency thawing of pork [J]. *Meat Res*, 2019, 33(1): 19–24.
- [63] 陈潜, 范大明, 曹洪伟, 等. 射频对冷冻鱼浆的解冻效果研究[J]. *食品研究与开发*, 2017, 38(22): 90–96. Chen Q, Fan DM, Cao HW, *et al.* Study on thawing effect of radio frequency on frozen minced fish [J]. *Food Res Dev*, 2017, 38(22): 90–96.
- [64] Uyar R, Bedane TF, Erdogdu F, *et al.* Radio-frequency thawing of food products—A computational study [J]. *J Food Eng*, 2015, 146: 163–171.

(责任编辑: 王 欣)

## 作者简介



叶 剑, 硕士, 助教, 主要研究方向为水产品加工及贮藏。

E-mail: jianye1127@163.com



苏来金, 博士, 副研究员, 主要研究方向为海洋生物资源开发及利用。

E-mail: sulaijin@163.com