

新型解冻技术及其对鱼肉品质影响的研究进展

田 方^{1,2}, 顾笑寒¹, 孙志栋³, 何 龙¹, 蔡路昀^{3*}

(1. 浙江海洋大学食品与药学学院, 舟山 316022; 2. 浙江省海产品健康危害因素关键技术研究重点实验室, 舟山 316022; 3. 浙江大学宁波研究院生物系统工程与食品科学学院, 宁波 315100)

摘 要: 冷冻是水产品保藏的常用手段, 冷冻水产品在进行加工烹饪前首先需要进行解冻。传统解冻技术具有耗时长、能耗高、解冻损失大、品质劣化等缺陷, 水产品解冻后可能出现外观受损、风味变化、蛋白质变性、脂肪氧化等问题, 造成水产品品质大大下降, 营养严重流失, 无法满足消费者的感官需求。因而, 电磁波 (微波、射频、远红外等) 解冻、真空解冻、欧姆解冻、高压静电场解冻以及利用超声波、磁性纳米粒子作为辅助手段的众多新型解冻技术逐渐得到应用和推广, 这些新型解冻技术可有效改善传统解冻技术出现的品质不佳、感官劣变等问题。本文综述了几种新型解冻技术的技术原理、应用方法及各自的优缺点, 重点阐述了不同解冻技术对鱼肉中水分分布状态和肌肉纤维组织状态的影响, 主要体现为对鱼肉的保水性, 新鲜度, 蛋白质的氧化变性、构象变化、聚集特性等方面的影响, 以期新型低耗高效水产品解冻技术的开发及工业化应用提供理论参考与启发。

关键词: 鱼肉品质; 新型解冻技术; 磁性纳米粒子; 辅助加热

Research progress on novel thawing technologies and their effects on the fish quality

TIAN Fang^{1,2}, GU Xiao-Han¹, SUN Zhi-Dong³, HE Long¹, CAI Lu-Yun^{3*}

(1. College of Food and Pharmacy, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China; 2. Key Laboratory of Health Risk for Seafood of Zhejiang Province, Zhoushan 316022, China; 3. Ningbo Research Institute, College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Ningbo 315100, China)

ABSTRACT: Freezing is a common method for preserving aquatic products. The frozen aquatic products on the market must be thawed before processing and cooking. Traditional thawing technologies may have problems such as long-time consumption, high energy consumption, large thawing loss, and quality deterioration. Changes in damaged appearance, flavor, protein denaturation, fat oxidation, and other problems may occur after the thawing of aquatic products, resulting in a significant decline in quality. Besides, serious nutrition is drained in aquatic products. These changes make aquatic products finally unable to meet the needs of consumers. Therefore, new thawing technologies such as electromagnetic wave (microwave, radio-frequency, far-infrared, etc.) thawing, vacuum thawing, ohmic thawing, high-voltage electrostatic thawing, and others using ultrasonic waves and magnetic nanoparticles assisted heating methods have gradually been applied and promoted. These new thawing technologies can effectively improve the

基金项目: 浙江省基础公益研究计划项目(LGN22C200030)、温州市重大科技创新攻关项目(ZN2021002)、省属高校基本科研业务费项目(2021J013)、2020 年国家级大学生创新创业训练计划项目(202010340018)

Fund: Supported by the Basic Public Welfare Research Project of Zhejiang Province (LGN22C200030), the Wenzhou Municipal Science and Technology Research Program (ZN2021002), the Fundamental Research Fund for the Provincial University (2021J013), and the National College Students' Innovative and Entrepreneurial Training Program (202010340018)

***通信作者:** 蔡路昀, 博士, 教授, 主要研究方向食品贮藏加工及质量安全控制。E-mail: cailuyun@zju.edu.cn

***Corresponding author:** CAI Lu-Yun, Ph.D, Professor, Ningbo Research Institute, College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, No.1, Qianhunan Road, Yinzhou District, Ningbo 315100, China. E-mail: cailuyun@zju.edu.cn

problems of poor quality and sensory deterioration of traditional thawing technologies. This paper reviewed the principles, application methods, and advantages and disadvantages of several new thawing technologies. And the effects of different thawing technologies on moisture distribution status and muscle fiber tissue status were highlighted, which were mainly reflected in the effects on water retention, freshness, oxidative denaturation, conformational change, aggregation properties of protein, *etc.* This review aims to provide a theoretical reference and direction for the development and industrial application of new low-consumption and high-efficiency aquatic products thawing technologies.

KEY WORDS: fish quality; novel thawing technologies; magnetic nanoparticles; assisted heating

0 引言

随着食品工业的快速发展,市场对于高品质水产品的需求日益增长,消费者对于水产品质量和安全的要求也逐渐提高。冷冻是目前最安全可靠且广泛应用的保存方法之一,鱼类在捕捞或死亡后通常以冷冻保存的方式延长保质期,从而实现鱼肉的持续供应。冷冻鱼肉在食用或进一步加工前均需进行解冻,冷冻—解冻过程主要影响肉品中水分的含量及分布,随着水分状态在这两个过程中发生变化,水中溶质(蛋白质、碳水化合物、脂质、维生素和矿物质)浓度也随之发生变化,从而改变肉类内部的稳态。此外,在冷冻—解冻过程中,肉类肌肉纤维组织还会受温度变化影响,引起纤维组织细胞性质改变,进而影响肉的质量^[1]。因此,解冻技术对肉制品的品质和质量有十分重要的影响,选择恰当的解冻技术不仅需考虑肉类的品质和状态,还要考虑解冻的能耗水平、操作方便程度和卫生情况等因素,这样更有利于保障解冻肉品的品质。

传统解冻技术主要有空气、冷藏、静水及流水解冻等^[2]。这些技术主要存在解冻时间过长和环境卫生污染等问题,导致解冻食品的营养损失较大,风味、外观都受到严重影响,而且可能存在致病菌污染等食品安全风险。因此,食品工业亟需新型安全高效的解冻技术。近些年,许多新型解冻技术不断涌现,如微波解冻、射频解冻、远红外解冻、超声波辅助解冻、高压静电场辅助解冻、磁性纳米粒子辅助解冻等^[3]。这些新型技术主要通过改变解冻条件和解冻介质,达到减少解冻时间、降低解冻能耗、提高解冻产品品质的效果。在传统解冻技术中,解冻介质一般为空气或水,而新型解冻技术会使用导热性能不同的各种固体介质或其溶液。解冻介质能够发挥作用的最低温度为 0~7℃,最高为 12~25℃,以避免出现温度过低导致解冻效果不明显,或温度过高导致鱼肉成熟或品质受损等现象^[4]。但目前的新型解冻技术在使用过程中依然可能存在产品局部过热、水分损失、蛋白质氧化、脂质氧化、感官品质变化等问题。因而,新型解冻技术在发展过程中仍需不断改进,以更加高效合理地应用于肉类产品加工业中。

本文介绍了几种新型解冻技术的优劣特性及应用原理,重点阐述了不同解冻技术对鱼肉理化品质的影响,并进一步

探讨分析了提高解冻效率、优化解冻效果的方向,以期为开发有利于保障鱼肉品质的新型解冻技术提供理论参考。

1 新型解冻技术的应用

近年来,国内外学者对解冻技术的研究主要侧重于解决缩短解冻时间,改善升温过快、局部过热,以及提高操作方便性等问题。在众多新型解冻技术中,使用单一电磁波(微波、射频、远红外)进行解冻、两种电磁波联合解冻、电磁波与其他技术组合解冻等多种技术得到较为广泛的应用和深入的研究。

1.1 单一新型解冻技术

1.1.1 电磁波解冻

电磁波解冻是指在一定频率的电磁波作用下将冷冻食品解冻的技术。电磁波解冻能够显著缩短解冻时间,加快解冻的速率^[5]。微波与射频能够穿透到物体内部,引起水、糖、脂质、蛋白质等极性分子的相互摩擦,从而将电能转化为热能进行解冻。远红外线自身具有热效应,但是远红外线的穿透能力有限,仅能穿透物体表面一定深度。其解冻原理是通过将能量投射到物体表面被物料吸收后,使水分子共振产生热量,再经过内部导热,传递到全部物体实现解冻^[6]。电磁波解冻与辐射功率有关,如功率过低则无法穿透被解冻物体,而功率过高会导致短时间过度加热,两种情况均会造成解冻不均匀。

1.1.2 超声波解冻

超声波振动产生的能量被物体内外同时吸收并转化为热能,这种热效应可直接应用于解冻,超声波对传热效应的促进能够显著提高解冻速率^[1]。以水为解冻介质时,超声波空化效应产生的空化气泡会破裂释放能量,并加大介质的流速,提高解冻速率和均匀性。研究表明超声波解冻可以改善肌球蛋白的结构性质,从而提高肉品的保水性,但同时也会对肌肉组织造成一定的物理损伤,导致鱼肉含水量降低^[7]。在实际应用中需要考虑超声波解冻的频率和强度,以及超声波衰减对解冻效果的影响^[8]。

1.1.3 真空解冻

真空解冻利用水在真空密闭环境下沸腾产生大量低温水蒸气后会在冷冻物料表面凝结放热,并与食品进行热交换,从而达到解冻的目的^[9]。真空解冻过程中,食品物料

处于真空、低氧的环境,可以较好地阻止蛋白质、脂质的氧化并抑制好氧微生物的繁殖。操作中真空度越大,解冻速率越快,解冻后肉的品质越好^[10]。但真空解冻的应用成本和操作要求较高,在推广普及上有一定难度,因此目前真空解冻的食品多为生食鱼虾类等价值较高的水产品。

1.1.4 欧姆解冻

欧姆解冻是将需解冻的食品置于某种介质中,直接放在通电极板之间,通电加热解冻,解冻时多采用 50~60 Hz 交流电,因此也称为低频电解冻^[11-12]。欧姆解冻的原理是以物体作为电路中的电阻,将电流转变为热能,因此加热的穿透深度不受物体厚度影响,加热量由物体的电导率和作用时间决定。欧姆解冻速度快、耗电少,但极易由于冷冻物料的形状不规则、表面不平滑,导致冷冻物料与电极板不能完全贴合,引起局部过热,造成过热部分熟化或严重变质^[12]。因此欧姆解冻在实际应用中成本较低,但是局限性较大。

1.1.5 高压静电场解冻

高压静电场解冻通过利用高压静电场产生的电晕风引起的湍流和涡流现象,达到增强传热效用的目的,进而提高解冻速率^[13]。该解冻技术能够较好地阻止蛋白质、脂质氧化,并有效抑制微生物繁殖,但在规模化应用中,高压静电场解冻对设备要求较高,不同参数设置对解冻效果影响较大,需要一定的前期探索研究。研究发现当电压过高时,高压静电场内会产生臭氧,臭氧将导致蛋白质和脂质氧化加剧,对质构和色泽产生较大影响^[14-15]。

1.2 联合解冻技术

单一的解冻技术存在解冻效率低、解冻品品质下降、加热不均匀、应用范围有限等问题。通过几种解冻技术的联合使用,可以从一定程度上解决上述问题。真空联合电磁波、超声波联合电磁波等解冻技术得到了广泛的研究。微波—真空联合解冻技术,将真空环境下解冻温度低与微波的强穿透性和水分子对微波的强吸收能力结合,可以在一定程度上克服解冻肉品局部过热的缺陷,达到提高解冻效率、改善解冻品质的目的^[16]。超声波联合电磁波解冻,需将两种发射装置置于同一空间内,并同时发射超声波和电磁波作用于冷冻物体以对其进行解冻。超声波能够弥补微波解冻加热不均匀的缺点,降低蛋白质变性程度,改善局部温度过高、渗透性差等情况^[17]。

磁性纳米粒子联合电磁波解冻作为一种新兴的解冻技术,能够有效克服单一解冻方式的固有缺点,因而成为研究者关注的热点。该技术以一定浓度的磁性纳米粒子溶液作为解冻介质,首先使被解冻物体置于其中,再将被解冻物体与解冻介质共同置于电磁波发射装置内完成解冻。磁性纳米粒子是由纯金属、金属合金或金属氧化物组成的一类纳米粒子^[18-19]。低剂量磁性纳米粒子被人体摄入后对其健康基本没有影响,且其使用已获得美国食品和药物管理局的批准^[20-21]。磁性纳米粒子加热作为一种生物传热技术,已广泛应用于生物医学领域。科研人员以提高细胞存活率为

目的,将超顺磁 Fe_3O_4 纳米粒子应用于人体细胞和动物细胞的复温或解冻,发现磁性纳米粒子可显著提高复温和解冻过程中的加热速率,并使物体的温度变化更加均匀^[22-23]。目前对于使用磁性纳米粒子作为介质进行解冻的研究较少,部分研究表明磁性纳米粒子联合微波解冻可以有效提高解冻效率,降低解冻损失,增加鱼肉中结合水的含量,并且能够减缓蛋白质的氧化,较好地维持蛋白质结构^[21,24]。

2 新型解冻技术对解冻鱼肉品质的影响

鱼肉的品质变化与鱼肉水分分布状态、肌肉组织状态、脂质氧化、蛋白质变性等密切相关^[25]。水分分布状态和肌肉组织状态之间又存在高度关联性,研究发现肉类经冷冻和解冻之后,肌肉中的冰晶生长使原有的纤维排列变得杂乱疏松甚至发生断裂,肌肉纤维组织的微观结构遭到破坏,导致固定水含量下降,自由水含量增加^[26]。

鱼肉品质的变化可通过如解冻损失、色泽、质构、新鲜度、蛋白质二级和三级结构变化,蛋白质聚集和降解程度等指标来反映。在解冻过程中,鱼肉肌肉中的水分流动性和分布反映了水和蛋白质之间的结合能力,解冻后自由水难以重新回到肌肉中,因而自由水流动性较高,导致鱼肉的解冻损失增大,保水能力降低^[27]。保水性是衡量鱼肉解冻品质的重要理化标准,而解冻损失是表征保水性变化的重要指标,与水分、脂肪和可溶性蛋白质的损失紧密相关,用来反映鱼肉的水分损失及新鲜度的变化^[28]。鱼肉色泽往往随新鲜度变化而迅速改变,与蛋白质和脂肪的氧化程度、含水量、色素含量等均密切相关。其变化常用亮度值、红度值、黄度值来表示,其中的亮度值往往会受鱼肉表面游离水反射光的影响,因此水分在鱼肉中存在的形式和分布方式也会影响鱼肉色泽^[29]。质构是体现鱼肉感官和功能特性的重要指标,包括硬度、咀嚼性、回弹性、胶黏性等,解冻对肌肉组织结构的破坏会造成这些指标的变化。鱼肉的新鲜度受蛋白质分解和脂肪氧化情况的影响,主要由电导率、挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVBN)含量、硫代巴比妥酸反应物(thiobarbituric acid reactant, TBARS)含量等指标的变化来体现^[30]。多项研究表明,电导率与TVBN值呈现直线线性回归关系,即随着肉类腐败变质,电导率和TVBN值均随之逐渐增加,这是因为肌肉组织受损后,蛋白质和脂肪会发生分解,产生的小分子扩散到游离水中导致电导率上升,所以电导率的变化可体现鱼肉肌肉纤维组织受损的情况^[31-35]。综上,本文通过总结保水性、新鲜度和蛋白质的氧化变性、构象变化、聚集特性等指标的变化来分析鱼肉中水分分布情况和肌肉组织状态,探讨不同解冻技术对解冻鱼肉品质的影响。

2.1 单一解冻技术对解冻鱼肉品质的影响

2.1.1 电磁波解冻技术

电磁波解冻需将鱼肉置于电磁波发生装置中进行,

表 1 列举了使用 3 种电磁波解冻技术和其他传统解冻技术解冻鱼肉样品的实例, 并对比了解冻效果的异同之处。单独使用微波或射频解冻, 其解冻效率要明显高于空气解冻, 但是微波解冻造成的解冻损失远高于空气解冻, 且极易出现过热现象; 而射频解冻则会使产品受热更均匀, 并有效降低局部过热现象的出现, 鱼肉的肌肉纤维组织结构也维持得较为完整^[36]。此外, 与新鲜样品相比, 微波解冻后鱼肉的红色值显著降低, 说明微波解冻可能会在一定程度上导致鱼肉感官品质下降, 而射频解冻处理的鱼肉仍可保持较高的亮度值^[37-38]。这是因为与微波相比, 射频的波长和功率更大, 能够更深入地渗透至鱼肉组织中, 使热量在鱼肉内部分布地更加均匀^[40]。电磁波解冻能够提高解冻效率, 缩短鱼肉与空气接触的时间, 使鱼肉受热更均匀, 有效减少解冻损失, 同时提升鱼肉蛋白质的热稳定性, 保持肌肉纤维微观结构的完整性。但是使用单一电磁波解冻技术有时仍存在加热不均匀、样品局部过热、保水性严重下降等问题。

2.1.2 其他解冻技术

其他解冻技术主要包括真空解冻、超声波解冻、欧姆解冻、高压静电场解冻等。真空解冻、超声波解冻和欧姆解冻技术均可大大缩短解冻时间, 降低解冻损失^[41-44]。其中, 真空解冻产品的解冻损失更小, 保水性更好, 原因在于真空解冻时饱和水蒸气在鱼肉表面形成冷凝液体水, 减少了解

冻过程中鱼肉水分的流失^[41]。进一步研究发现, 在不同真空度条件下进行解冻, 真空度越大, 尽管解冻时间随之缩短, 解冻损失反而随之增加, 从而影响鱼肉的品质^[45]。超声波解冻有效提高了解冻效率, 但是使用高频率超声波解冻会使肌肉纤维结构出现较为严重变化, 包括肌肉有序结构被破坏, 纤维发生卷曲和断裂, 纤维之间的孔隙增大, 导致鱼肉保水性降低^[46-47]。低频超声波解冻对鱼肉的色泽无明显影响, 但超声功率过高可能会引起肌红蛋白的氧化造成红色值降低, 影响色泽^[43,47]。欧姆解冻可以将热量传递到鱼肉的每个部分, 解冻效率极高。但是该技术存在加热不均匀、被解冻鱼肉各个部位温度差异大的问题, 易导致达到解冻终点温度时电导率的变化加快, 影响鱼肉品质^[44]。利用单一高压静电场解冻技术处理样品, 其解冻损失和蛋白质脂肪氧化可得到有效缓解, 但是亮度和红色值降低, 感官品质下降。这可能是由于高压静电场产生的负离子和臭氧导致肌红蛋白反应产生的二价铁离子发生氧化; 黄度值上升, 可能归因于臭氧和负离子使卟啉环氧化导致褐变^[48]。唐梦等^[49]研究发现, 高压静电场处理的罗非鱼片解冻损失较低, 蒸煮损失较高, 这与 LI 等^[50]和 MOUSAKHANI-GANJEH 等^[48]的研究结果一致。因此, 单一使用上述新型解冻技术均存在使产品保水性下降、蛋白质氧化加剧、色泽变化加剧等问题。研究中大多将两种解冻技术联合使用, 以优化产品的解冻效果(表 2)。

表 1 不同电磁波解冻技术对鱼肉品质的影响
Table 1 Effects of different electromagnetic wave thawing technologies on fish quality

解冻样品	解冻技术	关键解冻效果	参考文献
白姑鱼糜	微波、射频	射频解冻样品的解冻损失率低于微波解冻; 微波解冻样品的肌原纤维蛋白变性较严重。	[35]
海鲈鱼	微波、射频	微波解冻样品的电导率高于射频解冻, 肌肉纤维组织结构损伤最严重。射频解冻加热最均匀, 解冻损失较低。	[36]
欧洲鳗鲡	微波	样品表面红色值较低, TVBN 值和 pH 值较高。	[37]
罗非鱼	射频	样品解冻损失率降低, TBARS 值降低, 色泽较好。	[38]
鲈鱼	微波	解冻时间最短, TVBN 值较低。	[39]

表 2 其他解冻技术对鱼肉品质的影响
Table 2 Effects of other thawing technologies on fish quality

解冻样品	解冻技术	关键解冻效果	参考文献
大黄花鱼	超声波	样品的解冻损失率最低, 水分迁移率显著降低。	[41]
罗非鱼	真空、超声波、高压静电场	3 种方式解冻的样品解冻损失率都显著降低; 真空解冻对肌肉纤维的影响最小, 超声波解冻对肌肉纤维破坏最大; 高压静电场解冻样品的 TVBN 值较低, 但是色泽变暗、发黄。	[42,49]
鲤鱼	超声波、高压静电场	解冻损失率都显著降低, TVBN 值和 TBARS 含量降低。	[43,50]
金枪鱼	欧姆	解冻损失率降低, 电导率变化较快。	[44]
鳙鱼	超声波	解冻损失率较大, 色泽没有显著变化。	[47]
金枪鱼	高压静电场	TVBN 值显著降低, 蛋白质溶解度显著降低。	[48]

2.2 联合解冻技术对解冻鱼肉品质的影响

2.2.1 超声波联合电磁波解冻技术

目前有关超声波解冻技术的多项研究表明, 超声波更适合作为辅助解冻手段, 与其他技术进行联合解冻。经超声波处理后, 鱼肉中的固定水含量较高, 游离水含量较低, 且肌肉纤维之间的孔隙得到松弛, 有利于保留水分, 从而降低解冻损失^[42]。也有学者得到了相反的研究结果, 即超声波功率过高, 解冻损失也随之增大。许晴^[51]使用超声波辅助微波解冻或远红外解冻有效降低了样品的解冻损失和蒸煮损失, 且解冻所得鱼肉的电导率显著低于单一使用超声波或电磁波解冻的样品。进一步研究发现, 超声波辅助微波解冻或远红外解冻样品的蛋白质二级结构更为稳定, 蛋白质聚集程度较低, 肌动蛋白的热稳定性优于单一解冻处理, 且细胞内结合水含量也较高^[52]。因此, 选用合适的超声波频率进行解冻, 可有效保持鱼肉肌肉纤维结构的完整性, 提高鱼肉的保水性, 若同时联合电磁波解冻技术处理样品, 可进一步提高解冻效率, 达到有效降低解冻损失, 提高鱼肉新鲜度的目的。

2.2.2 磁性纳米粒子联合电磁波解冻技术

与单一使用微波或远红外解冻技术相比, Fe₃O₄ 磁性纳米粒子溶液辅助微波或远红外解冻对鱼肉外观色泽的影响最小, 还可延缓鱼肉蛋白质氧化, 提高受热均匀性^[53-54]。利用壳聚糖磁性纳米(CS@Fe₃O₄)溶液联合微波或远红外解冻真鲷鱼块, 根据水分分布状态的分析发现联合解冻的样品中不易流动水含量较高, 保水性较好, 解冻损失显著降低^[55]。ZHU 等^[21]采用 Fe₃O₄ 纳米粒子联合微波解冻茎柔鱼时也得到了类似的研究结果, 即联合解冻样品的解冻损失最低。微波的机械作用易导致解冻时鱼肉蛋白质发生聚集和交联, 而 CAI 等^[56]研究发现, 磁性纳米粒子联合微波解冻能够有效抑制真鲷肌肉中蛋白质的聚集, 这可能是由于磁性纳米粒子增加了蛋白质的热稳定性, 从而缓解了蛋白质的变性。张文娣^[35]在解冻海鲈鱼的研究中发现, 磁性纳米粒子联合射频解冻和磁性纳米粒子联合微波解冻都能够较好地保持鱼肉的新鲜度。其中磁性纳米粒子联合

射频解冻的样品中其蛋白质二级结构 α 螺旋的含量与新鲜鱼肉最接近, 即利用该联合技术解冻后鱼肉的蛋白质二级结构稳定性较高, 蛋白质降解程度较低, 且样品中自由水含量最少, 保水性最佳。因此, 磁性纳米粒子联合电磁波解冻能够有效提升解冻鱼肉的保水性, 降低蛋白质降解和聚集程度, 抑制蛋白质变性, 改善单一电磁波解冻技术带来的缺陷。

表 3 总结了以上研究中超声波联合电磁波解冻技术和磁性纳米粒子联合电磁波解冻技术对鱼肉样品品质的影响。

3 结束语

消费者对鱼肉产品的需求不断增长, 鱼肉产品的远距离、长时间流通已成为趋势, 冷冻技术作为最有效的品质保障技术已普遍应用于鱼类等水产品的贮运过程中。解冻效果良好与否, 对鱼肉产品的外观、品质、安全性有至关重要的影响。传统解冻技术效率过低, 在较长的解冻过程中, 蛋白质的严重变性和色泽变化会导致鱼肉品质恶化。单一新型解冻技术可显著提高解冻效率, 但仍存在由于加热不均匀导致的蛋白质氧化变性, 脂肪氧化和保水性下降等问题。解冻技术存在的这些固有缺陷和市场对于鱼肉品质的高要求进一步推动了对于联合解冻技术的研究。近年来, 联合解冻技术在提高解冻效率、改善解冻产品品质方面有了一定进步, 如有效抑制蛋白质变性和脂肪氧化, 维持水分分布状态, 减少营养成分的流失, 以及提高解冻产品的感官品质, 因此具有巨大的应用潜力。但是目前联合解冻技术多局限于实验室研究阶段, 主要解冻对象为体积较小、形状较规则的冷冻鱼肉, 对于大型冷冻鱼体和不规则形态鱼肉的解冻效果及其机制仍需进行深入研究。此外, 研发集成前处理、解冻、解冻过程监控、恒温保藏等多模块多功能, 适用于各类鱼肉产品的大型工业解冻设备, 是实现联合解冻技术工业化应用的重要一步。同时, 在新型解冻技术推广使用的过程中, 减少解冻的前处理操作步骤、提高联合解冻技术操作的方便性, 简化解冻流程也是未来需要不断探索的研究方向。

表 3 联合解冻技术对鱼肉品质的影响
Table 3 Effects of combined thawing technologies on fish quality

解冻样品	解冻技术	关键效果	参考文献
大口黑鲈	磁性纳米粒子联合远红外解冻, 磁性纳米粒子联合微波解冻	解冻样品弹性较好, 色泽接近新鲜样品, 蛋白质构象稳定, 聚集和氧化程度较低。	[24,54,57]
海鲈鱼	磁性纳米粒子联合微波解冻, 磁性纳米粒子联合射频解冻	鱼肉凝胶性能较好; 保水性较好; 改善了蛋白质的聚集和降解, 蛋白质氧化程度较低。	[35]
海鲈鱼	超声波联合微波解冻, 超声波联合远红外解冻	解冻损失显著降低, 肌肉纤维组织结构损伤较小, 微观结构比较完整, 蛋白质降解程度较低。	[46,51]
美国红鱼	超声波联合微波解冻, 超声波联合远红外解冻	蛋白质构象稳定, 聚集程度较低, 肌肉纤维组织结构损伤较小; 样品游离水含量较低。	[52]
真鲷	CS@Fe ₃ O ₄ 联合微波解冻, CS@Fe ₃ O ₄ 联合远红外解冻	缓解蛋白质的氧化, 提高蛋白质结构稳定性; 样品的水分分布情况与新鲜鱼肉接近。	[55-56]

参考文献

- [1] LEYGONIE C, BRITZ TJ, HOFFMAN LC. Impact of freezing and thawing on the quality of meat: Review [J]. Meat Sci, 2012, 91(2): 93–98.
- [2] WANG B, DU X, KONG BH, *et al.* Effect of ultrasound thawing, vacuum thawing, and microwave thawing on gelling properties of protein from porcine *Longissimus dorsi* [J]. Ultrason Sonochem, 2020, 64: 104860.
- [3] CAI LY, CAO MJ, REGENSTEIN J, *et al.* Recent advances in food thawing technologies [J]. Compr Rev Food Sci F, 2019, 18(4): 953–970.
- [4] ARCHER M, EDMONDS M, GEORGE M. Seafood thawing [J]. Seafood Res Dev, 2008, (2): 1–45.
- [5] 张亚瑾, 焦阳. 冷冻和解冻技术在水产品中的应用研究进展[J]. 食品与机械, 2021, 37(1): 215–221, 236.
- ZHANG YJ, JIAO Y. Research status and prospect of freezing and thawing technologies of aquatic products [J]. Food Mach, 2021, 37(1): 215–221, 236.
- [6] 李慢. 超声辅助解冻对中国对虾品质影响的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- LI M. Studies on the effects of ultrasound-assisted thawing on qualities of Chinese shrimp [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [7] GUO ZL, GE XZ, YANG LH, *et al.* Ultrasound-assisted thawing of frozen white yak meat: Effects on thawing rate, meat quality, nutrients, and microstructure [J]. Ultrason Sonochem, 2021, 70(1): 105345.
- [8] 孙聿尧, 谢晶, 王金锋. 超声波解冻与传统解冻方式的比较与竞争力评估[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(6): 253–258.
- SUN YY, XIE J, WANG JF. Comparison and competitiveness assessment between ultrasonic thawing and traditional thawing methods [J]. Food Ferment Ind, 2021, 47(6): 253–258.
- [9] BACKI CJ. Sustainable fish production and processing [M]. Orlando: Academic Press, 2022.
- [10] 李贺强, 邹同华, 宋睿琪, 等. 不同真空解冻条件对猪肉品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(4): 130–135.
- LI HQ, ZOU TH, SONG RQ, *et al.* Effects of different vacuum thawing conditions on pork quality [J]. Food Ferment Ind, 2021, 47(4): 130–135.
- [11] KANG T, JUN S. Fundamentals of ohmic processing: modeling and commercial applications [J]. Innov Food Process Technol, 2021. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815781-7.00004-4>
- [12] 李念文, 谢晶, 周然. 金枪鱼解冻方法及解冻品质评价的研究进展[J]. 广东农业科学, 2012, 39(19): 108–111.
- LI NW, XIE J, ZHOU R. Research progress on thawing methods for frozen tuna and thawing quality evaluation [J]. Guangdong Agric Sci, 2012, 39(19): 108–111.
- [13] DALVI-ISFAHAN M, HAMDAMI N, LE-BAIL A, *et al.* The principles of high voltage electric field and its application in food processing: A review [J]. Food Res Int, 2016, 89: 48–62.
- [14] 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.
- [15] 张馨月, 邓绍林, 胡洋健, 等. 几种新型解冻技术对肉品质影响的研究进展[J]. 食品发酵与工业, 2020, 46(12): 293–298.
- ZHANG XY, DENG SL, HU YJ, *et al.* Advances in effects of selected novel thawing technologies on meat quality [J]. Food Ferment Ind, 2020, 46(12): 293–298.
- [16] 雷健, 黄莹莹, 胡海宏, 等. 真空-微波技术在冰箱食品解冻方向的研究[C]. 2021 年中国家用电器技术大会论文集, 2021.
- LEI J, HUANG YY, HU HH, *et al.* Research on the application of vacuum microwave technology in food thawing of refrigerator [C]. Proceedings of 2021 China Household Electrical Appliances Technology Meeting, 2021.
- [17] 蔡路昀, 万江丽, 周小敏, 等. 超声波技术在鱼类加工中的应用研究进展[J]. 食品科学技术学报, 2020, 38(2): 114–120.
- CAI LY, WAN JL, ZHOU XM, *et al.* Advanced in application of ultrasonic technology in fish processing [J]. J Food Sci Technol, 2020, 38(2): 114–120.
- [18] MALHOTRA N, LEE JS, LIMAN RAD, *et al.* Potential toxicity of iron oxide magnetic nanoparticles: A review [J]. Molecules, 2020, 25(14): 1–26.
- [19] 孙涛, 王光辉, 陆安慧, 等. 磁性氧化铁纳米颗粒的研究进展[J]. 化工进展, 2010, 29(7): 1241–1249.
- SUN T, WANG GH, LU ANH, *et al.* Research development of magnetic magnetite nanoparticles [J]. Chem Ind Eng Prog, 2010, 29(7): 1241–1249.
- [20] KIM BYS, RUTKA JT, CHAN WCW. Nanomedicine [J]. New Engl J Med, 2010, 17(2): 121–130.
- [21] ZHU WH, LI Y, BU Y, *et al.* Effects of nanowarming on water holding capacity, oxidation and protein conformation changes in jumbo squid (*Dosidicus gigas*) mantles [J]. LWT-Food Sci Technol, 2020, 129(19): 109511.
- [22] MANUCHEHRABADI N, GAO Z, ZHANG JJ, *et al.* Improved tissue cryopreservation using inductive heating of magnetic nanoparticles [J]. Sci Trans Med, 2017, 9(379): 4586.
- [23] WANG JY, ZHAO G, ZHANG ZL, *et al.* Magnetic induction heating of superparamagnetic nanoparticles during rewarming augments the recovery of hUCM-MSCs cryopreserved by vitrification [J]. Acta Biomater, 2016, 33: 264–274.
- [24] CAI LY, WAN JL, LI XX, *et al.* Effects of different thawing methods on physicochemical properties and structure of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. J Food Sci, 2020, 85(3): 582–591.
- [25] NIAN LY, CAO AL, CAI LY. Investigation of the antifreeze mechanism and effect on quality characteristics of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) during F-T cycles by hAFP [J]. Food Chem, 2020, 325: 126918.
- [26] 刁玉华, 林松毅, 梁瑞, 等. 南极磷虾肉冻融循环过程水分的迁移及微观结构变化[J]. 中国食品学报, 2022, 22(6): 242–250.
- DIAO YH, LIN SY, LIANG R, *et al.* Moisture migration and microstructure changes of *Antarctic krill* meat during multiple freeze-thaw

- cycles [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2022, 22(6): 242–250.
- [27] WANG B, BAI X, DU X, *et al.* Comparison of effects from ultrasound thawing, vacuum thawing and microwave thawing on the quality properties and oxidation of porcine *Longissimus lumborum* [J]. Foods, 2022, 11(9): 1368.
- [28] OUYANG Q, LIU LH, ZAREEF M, *et al.* Application of portable visible and near-infrared spectroscopy for rapid detection of cooking loss rate in pork: comparing spectra from frozen and thawed pork [J]. LWT-Food Sci Technol, 2022, 160: 113304.
- [29] DANG DS, BUHLER JF, STAFFORD CD, *et al.* Nix Pro 2 and color muse as potential colorimeters for evaluating color in foods [J]. LWT-Food Sci Technol, 2021, 147: 111648.
- [30] PRABHAKAR PK, VATSA S, SRIVASTAV PP, *et al.* A comprehensive review on freshness of fish and assessment: Analytical methods and recent innovations [J]. Food Res Int, 2020, 133: 109157.
- [31] 杨秀娟, 张曦, 赵金燕, 等. 应用电导率评价猪肉的新鲜度[J]. 现代食品科技, 2013, 29(5): 1178–1191.
- YANG XJ, ZHANG X, ZHAO JY, *et al.* Application of conductivity evaluate pork freshness [J]. Mod Food Sci Technol, 2013, 29(5): 1178–1191.
- [32] 张丽娜, 罗永康, 李雪, 等. 草鱼鱼肉电导率与鲜度指标的相关性研究 [J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(4): 153–157.
- ZHANG LN, LUO YK, LI X, *et al.* Research on relationship between electric conductivity and freshness indicators of grass carp [J]. J China Agric Univ 2011, 16(4): 153–157.
- [33] 沈莲清, 陈荷凤, 朱兆服, 等. 电化学法快速检测肉品新鲜度之研究 [J]. 食品科学, 1996, 17(3): 55–58.
- SHEN LQ, CHEN HF, ZHU ZF, *et al.* Rapid determination of freshness of meats by electrochemistry method [J]. Food Sci, 1996, 17(3): 55–58.
- [34] 周梁, 卢艳, 周伦, 等. 猪肉冰温贮藏过程中的品质变化与机理研究 [J]. 现代食品科技, 2011, 27(11): 1296–1311.
- ZHOU L, LU Y, ZHOU Q, *et al.* Changes in physical-chemical and sensory characteristics of pork under controlled freezing point storage conditions [J]. Mod Food Sci Technol, 2011, 27(11): 1296–1311.
- [35] 张文娣. 基于物化特性、空间效应及分子动力学模拟研究不同解冻方式对海鲈鱼品质的影响[D]. 锦州: 渤海大学, 2021.
- ZHANG WD. Effects on the quality of sea bass by different thawing treatments based on physicochemical characteristics, spatial effects and molecular dynamics simulation [D]. Jinzhou: Bohai University, 2021.
- [36] 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.
- [37] ERSOY B, AKSAN E, ÖZEREN A. The effect of thawing methods on the quality of eels (*Anguilla anguilla*) [J]. Food Chem, 2008, 111(2): 377–380.
- [38] 李双. 鱼类介电特性及射频解冻工艺研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020.
- LI S. Study on dielectric properties and radio frequency thawing technology of fish [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020.
- [39] 刘欢, 陈雪, 宋立玲, 等. 不同解冻方式对鲈鱼鲜度及品质的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(10): 259–265.
- LIU H, CHEN X, SONG LL, *et al.* Effect of different thawing methods on freshness and quality of *Scomber japonicus* [J]. Food Sci, 2016, 37(10): 259–265.
- [40] ALTEMIMI A, AZIZ SN, AL-HILPHY ARS, *et al.* Critical review of radio-frequency (RF) heating applications in food processing [J]. Food Qual Saf-oxford, 2019, 3(2): 81–91.
- [41] BIAN CH, CHENG H, YU HJ, *et al.* Effect of multi-frequency ultrasound assisted thawing on the quality of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) [J]. Ultrason Sonochem, 2022, 82: 105907.
- [42] 关志强, 张珂, 李敏, 等. 不同解冻方法对冻藏罗非鱼片理化性能的影响[J]. 渔业现代化, 2016, 43(4): 38–43.
- GUAN ZQ, ZHANG K, LI M, *et al.* Effects of various thawing methods on the physicochemical characteristics of frozen tilapia fillets [J]. Fish Mod, 2016, 43(4): 38–43.
- [43] SUN QX, KONG BH, LIU SC, *et al.* Ultrasound-assisted thawing accelerates the thawing of common carp (*Cyprinus carpio*) and improves its muscle quality [J]. LWT-Food Sci Technol, 2021, 141: 111080.
- [44] LIU L, LLAVE Y, JIN YZ, *et al.* Electrical conductivity and ohmic thawing of frozen tuna at high frequencies [J]. J Food Eng, 2017, 197: 68–77.
- [45] 张珂, 关志强, 李敏, 等. 真空解冻工艺对罗非鱼片品质的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(8): 281–285.
- ZHANG K, GUAN ZQ, LI M, *et al.* Effects of various thawing methods on the physicochemical characteristics of frozen tilapia fillets [J]. Sci Technol Food Ind, 2016, 37(8): 281–285.
- [46] 蔡路昀, 许晴, 曹爱玲. 不同超声辅助解冻方式对海鲈鱼品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2020, 41(24): 8.
- CAI LY, XU Q, CAO AIL. Effects of different ultrasound-assisted thawing methods on the quality of the sea bass [J]. Sci Technol Food Ind, 2020, 41(24): 8.
- [47] LI DN, ZHAO HH, IDRIS AI, *et al.* The comparison of ultrasound-assisted thawing, air thawing and water immersion thawing on the quality of slow/fast freezing bighead carp (*Aristichthys nobilis*) fillets [J]. Food Chem, 2020, 320: 126614.
- [48] 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.
- [49] 唐梦, 岑剑伟, 李来好, 等. 高压静电场解冻对冻罗非鱼片品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2017, 38(13): 1–6.
- TANG M, CEN JW, LI LH, *et al.* Impact of high voltage electric field thawing on the quality of frozen tilapia fillet [J]. Sci Technol Food Ind, 2017, 38(13): 1–6.

- [50] LI DP, JIA SL, ZHANG LT, *et al.* Effect of using a high voltage electrostatic field on microbial communities, degradation of adenosine triphosphate, and water loss when thawing lightly-salted, frozen common carp (*Cyprinus carpio*) [J]. *J Food Eng*, 2017, 212: 226–233.
- [51] 许晴. 五种超声辅助解冻方式对海鲈鱼品质的影响[D]. 锦州: 渤海大学, 2020.
- XU Q. Effects of five ultrasound-assisted thawing methods on the quality of sea bass (*Perca fluviatilis*) [D]. Jinzhou: Bohai University, 2020.
- [52] CAI LY, ZHANG WD, CAO AL, *et al.* Effects of ultrasonics combined with far infrared or microwave thawing on protein denaturation and moisture migration of *Sciaenops ocellatus* (red drum) [J]. *Ultrason Sonochem*, 2019, 55: 96–104.
- [53] CAI LY, WAN JL, LI XX, *et al.* Effects of different thawing methods on conformation and oxidation of myofibrillar protein from largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. *J Food Sci*, 2020, 85(8): 2470–2480.
- [54] 万江丽. 不同解冻方式对大口黑鲈品质的影响[D]. 锦州: 渤海大学, 2020.
- WAN JL. Effects of different thawing methods on the quality of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [D]. Jinzhou: Bohai University, 2020.
- [55] 李钰金, 代雨菲, 蔡路昀, 等. CS@Fe₃O₄ 结合微波或远红外解冻对真鲷品质特性的影响[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(12): 144–154.
- LI YJ, DAI YF, CAI LY, *et al.* Effect of CS@Fe₃O₄ combined microwave or far infrared thawing on the quality characteristics of the red sea bream [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2021, 21(12): 144–154.
- [56] CAI LY, DAI YF, CAO AL, *et al.* The effects of CS@Fe₃O₄ nanoparticles combined with microwave or far infrared thawing on microbial diversity of red seabream (*Pagrus major*) fillets based on high-throughput sequencing [J]. *Food Microbiol*, 2020, 91: 103511.
- [57] CAO MJ, CAO AL, LI YC, *et al.* Effects of magnetic nanoparticles plus microwave on the thawing of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) fillets based on iTRAQ quantitative proteomics [J]. *Food Chem*, 2019, 286: 506–514.

(责任编辑: 韩晓红 郑 丽)

作者简介

田 方, 博士, 讲师, 主要研究方向为水产品贮藏保鲜及质量安全控制。
E-mail: tianfang@zjou.edu.cn



蔡路昀, 博士, 教授, 主要研究方向为食品贮藏加工及质量安全控制。
E-mail: cailuyun@zju.edu.cn