

介电解冻技术对肉类原料品质影响的研究进展

张孝¹, 金亚美², 巫宇航¹, 姚黄兵¹, 杨哪^{1,3,*}, 徐学明^{1,2,3}

(1.江南大学食品学院, 江苏 无锡 214122; 2.江南大学食品科学与资源挖掘全国重点实验室, 江苏 无锡 214122;

3.江南大学食品安全与营养协同创新中心, 江苏 无锡 214122)

摘要: 解冻是冷冻肉制品加工的重要单元操作, 其应用效果关注的重点包括解冻时间、样品温度均匀性、汁液流失率、蒸煮损耗、新鲜度、质构特征和口感变化差异等。因此, 选择适宜的技术及工艺参数最终能得到解冻品质俱佳的肉类原料产品。传统解冻技术包括空气解冻、浸泡解冻等, 新型的物理场解冻包括微波解冻、射频解冻、远红外解冻和欧姆解冻等。以高频电磁波为激励源的微波和射频介电解冻方式因其操作时间短、高效等优点逐渐在冷冻肉制品加工领域得到应用。本文综述了介电解冻技术, 概述其关键影响因素, 探讨了介电解冻过程中肉类原料品质的变化, 并对介电解冻过程中还存在的共同问题以及未来研究方向提出了新的思考。

关键词: 介电特性; 射频解冻; 微波解冻; 肉类原料; 影响因素

Research Advances in the Effect of Dielectric Thawing on the Quality of Raw Meat

ZHANG Xiao¹, JIN Yamei², WU Yuhang¹, YAO Huangbing¹, YANG Na^{1,3,*}, XU Xueming^{1,2,3}

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. State Key Laboratory of Food Science and Resources, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

3. Synergetic Innovation Center of Food Safety and Nutrition, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Thawing is an important unit operation in the processing of frozen meat. Some of the major concerns for its application are thawing duration, temperature uniformity, juice loss, cooking loss, freshness, texture characteristics and taste changes. Good thawing quality for frozen meat can be obtained by choosing appropriate thawing technologies and processing parameters. The traditional thawing technologies include air thawing and water immersion thawing, while several novel physical field thawing methods have been developed include microwave thawing, radio-frequency thawing, infrared thawing and ohmic thawing. The microwave and radio-frequency methods, which both utilize high-frequency electromagnetic wave as excitation source, have seen increasing application in the field of frozen meat processing because of short operating time and high efficiency. This article reviews dielectric thawing technology, summarizes its key influential factors, discusses the changes in meat quality during the dielectric thawing process, and puts forward some thoughts regarding the common problems and future research directions in dielectric thawing.

Keywords: dielectric properties; radio-frequency thawing; microwave thawing; raw meat; influential factors

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230314-145

中图分类号: TS251.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2024) 08-0283-09

引文格式:

张孝, 金亚美, 巫宇航, 等. 介电解冻技术对肉类原料品质影响的研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(8): 283-291.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230314-145. <http://www.spkx.net.cn>

ZHANG Xiao, JIN Yamei, WU Yuhang, et al. Research advances in the effect of dielectric thawing on the quality of raw meat[J]. Food Science, 2024, 45(8): 283-291. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230314-145.

<http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2023-03-14

基金项目: “十四五”国家重点研发计划重点专项(2022YFD2100401); 国家自然科学基金面上项目(32172353);

江苏省自然科学基金项目(BK20211582); 江南大学宜秀生命健康产业研究中心基本科研项目(AQ-202309)

第一作者简介: 张孝(2000—)(ORCID: 0009-0009-8511-9791), 男, 硕士研究生, 研究方向为新型食品研究技术。

E-mail: 19855651302@163.com

*通信作者简介: 杨哪(1982—)(ORCID: 0000-0002-4175-8761), 男, 副研究员, 博士, 研究方向为食品电磁加工技术及装备开发。E-mail: yangna@jiangnan.edu.cn

肉类食品是人们日常饮食的重要组成部分,新鲜及加工肉制品能提供高能量、优质的蛋白质和重要的微量元素^[1]。这些营养物质为人类提供了每日所需的能量^[2],然而,肉制品在储存和过程中也是内源性酶和腐败微生物的良好底物^[3]。因此,在前期原料分配和物流运送过程中需要对各类肉类原料及加工制品进行冷冻处理。低温能抑制肉制品表面滋生的微生物,延长保质期^[4]。同时冷冻储藏(−18℃)也是较为经济的肉类保藏方法。因此,储运后冷冻肉制品的解冻操作方式成为其后期加工或烹饪前的重要步骤。解冻的目的是尽量使冷冻肉类接近新鲜时的理化及感官状态^[5]。由于在冷冻过程中,大量冰晶形成于肉制品的肌纤维组织及细胞内部,因此针对不同部位、不同冻结程度所选取的解冻工艺不当是造成肉制品品质下降最主要的原因。适宜的解冻技术有助于保持并改善冷冻肉制品及其原料的最终消费品质,特别是维持肉制品的保水性,降低蒸煮损耗,抑制蛋白质氧化,避免表面局部温度过高造成的色泽不佳^[6]。相反,解冻方式不当会导致冷冻肉类解冻损耗过大,长时间处理也易引起表面微生物滋生,从而使肉制品腐败^[7]。

传统的解冻工艺包括空气解冻和流动温热水解冻。空气解冻的原理是使空气与冷冻肉制品形成自然对流,将热量通过传导的形式从肉制品外表面传递到样品的中心部位,由于空气比热容小,所以解冻时间较长,通常为12~24 h。流动温热水解冻是通过流水与冷冻肉制品间的热传导进行热量交换,由于水的比热容比空气大,所以解冻速度相对较快。传统解冻工艺优点是设备投入相对较低且易操作,能广泛应用于工业化生产中。但若采用传统的工艺方法,通过由外向内的传热会导致解冻后肉制品质量损耗较大、营养成分和感官品质下降^[8],进而降低产品的经济价值。介电解冻是近十年发展起来的一种新型物理解冻方法,分为微波解冻和射频解冻^[9]。利用高频电磁波,介电解冻能够克服传统解冻过程中的传热慢、解冻时间长、汁液流失大等一系列问题,因而对于批量化的冻肉制品原料解冻操作而言具有积极的影响。目前市面上已存在工业化的连续式介电解冻装备。鉴于此,本文对介电解冻技术进行综述,介绍其影响因素以及对肉制品解冻过程中品质影响的研究进展,以期对介电解冻在冷冻肉制品加工中的应用研究提供依据。

1 介电解冻原理

介电解冻是通过原料分子与电磁场发生相互作用将电磁波能量转化为热能,破坏冰晶从而实现冷冻肉制品的解冻。与传统解冻工艺不同,介电解冻可以在食品内部直接产生热量,无需经历传热过程,其原理是在高频的交变电场中通过样品中极性分子的偶极子旋转或者离

子极化发生运动摩擦而产生出热能^[10]。根据使用电磁波频率的不同,介电解冻分为微波解冻和射频解冻。

微波频率范围为300 MHz~300 GHz,而射频的频率范围通常在10~300 MHz之间^[11]。国际上为工业、科学及医疗应用分配了5个频率用于微波和射频加热,其中微波加热解冻的频率为915 MHz和2 450 MHz,而射频加热解冻的频率则为13.56、27.12 MHz和40.68 MHz^[12]。微波解冻过程中,热量的产生主要是由振荡电磁场诱导极性小分子尤其是水分子进行快速的旋转引起^[13]。在高频交变电场作用中,偶极子即水分子试图沿电场方向重新排列。这种排列以每秒100万次的频率发生,并导致水分子间的高速旋转摩擦^[13],进而使冷冻肉品表面及浅层各个部分同时获得热量而快速升温,但微波的穿透深度有限,容易造成样品局部过热和表面水分蒸发的现象。

射频解冻与微波解冻的差异是利用频率更低的振荡电磁波对样品进行解冻处理,主要作用于食材内部的极性生物大分子和自由离子,其电磁波穿透深度加强。除了样品内部的往复离子运动,当待解冻肉制品受到射频波的影响,所含极性大分子也会在振荡电磁场的方向上进行偶极子旋转运动^[14]。极性大分子和带电离子同时相互作用,并发生摩擦,达到加热的效果。因此,射频加热主要机制是离子传导^[15],其次是大分子的旋转摩擦。由于肉制品中存在大量的肌肉纤维蛋白大分子和K、Na、Ca等电解质离子,故射频加热过程中肉制品内部温度分布相对均匀。

2 肉类原料介电特性影响因素

食品或细胞组织的介电参数已经成为食品电学特性研究中具有价值的理化指标。介电特性是与微波和射频加热相关的重要物理属性,影响着样品对电磁波的吸收和反射,同时也决定样品的温升效率^[16]。通常情况下,一般由复数形式的相对介电常数(ϵ)、介电常数(ϵ')和介电损耗(ϵ'')描述物质的介电特性,可表示为下式:

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$$

式中: $j = -1$;介电常数 ϵ' 反映食品原料在电磁场中储存电能的能力,影响穿过样品的位移电流分布和相位;介电损耗 ϵ'' 反映电磁波能量转化为热能的能力,影响能量的吸收和衰减,同时描述了各种极化机制的能量耗散能力^[17],大部分食品物料的介电损耗为正值且小于其介电常数。

2.1 频率

离子传导和偶极旋转是介电解冻过程的主要损耗机制。在射频作用下,离子传导是引起介电损耗的主要原因。频率越高,离子间的摩擦与碰撞越剧烈,产生的

热量越多。所以射频段的介电损耗随着频率的增大而减小。在微波频段引起介电损耗的主要原因是自由水中的离子传导和偶极子极化。理论上,各种极化机制(极性、电子、离子的和瓦格纳-麦克斯韦效应)都具有相应的介电损耗在起作用^[18]。实际上,瓦格纳-麦克斯韦效应的频率峰值约为0.1 MHz,其热效应贡献与离子传导相比则相对较小^[19]。

Yang Linxin等^[20]发现在低频范围,南极磷虾和南美白对虾的介电常数随着频率的增加而降低,特别是当温度在-5~-3℃时,这种趋势更加显著。主要原因是振荡电磁场频率提高,偶极子的重新定向排列和离子键扭曲程度变弱,从而导致极化减小^[21]。在较高的频率范围内(1~3 GHz),两种产品的介电常数随频率的增加基本保持不变或略有增加。刘艳^[22]研究羊肉的介电常数和介电损耗在射频解冻过程中随频率和温度的变化趋势,发现羊肉的介电常数和介电损耗均随频率的增加而呈现出下降的趋势;在相同温度下,频率越低,羊肉的介电常数和介电损耗越高。这是因为当频率较低时,离子具有的导电性所带来的介电损耗会占主导地位。当频率提高时,水分子在高频电磁波中定向排列,部分偶极子的旋转跟不上感应电场的变化速率,随即产生弛豫现象,导致介电常数下降。

2.2 温度

温度对肉制品介电特性的影响同时也取决于其他因素,例如频率、水分和盐含量等。冻结状态下肉制品中游离状态的水分较少,此时原料的介电常数和介电损耗较小。在解冻过程中,肉制品的自由水含量增大,介电常数和介电损耗都会显著增大。在低频时,介电损耗随温度升高而增大,这是离子传导引起的。在高频时,介电损耗随温度升高而减小。高频的电磁波穿透深度较低,所以冷冻样品的温升主要发生在表面区域,进而降低了冷冻肉制品的整体能量吸收^[23]。

Farag等^[24]对牛肉在-18~10℃温度范围内的介电特性进行了分析,发现在-18~-1℃温度范围内,牛肉的介电常数和介电损耗随温度的升高而增大,其中在-18~-5℃温度范围呈现缓慢地提升,而在-5~-1℃温度范围则出现快速地升高。此温度范围(-5~-1℃)为解冻区,肌肉内冰晶发生相变并吸收热量,用以克服物料内部分子间的吸引力。但在-1~10℃温度范围内,牛肉的介电常数基本维持不变,原因可能是在较低的温度下,样品中的游离水含量降低,导致介电常数减小^[25],同时,水分子在冰晶融化过程中失去约束,游离水含量增多^[26]。Purohit等^[27]也发现磨碎牛肉的介电常数和介电损耗随温度的升高而显著增大。胡晓亮^[28]发现当温度在-18~0℃时,低温度区的狭鳕鱼糜介电常数较小,这是因为在冻结点温度下,水主要以冰晶形式存

在;在0~18℃范围,随温度升高则狭鳕鱼糜的介电常数呈现下降趋势,这是因为温度进一步升高,水分降低。当在0℃时,样品含水量最高且介电常数最大。

2.3 水分

水分对肉制品介电特性的影响也取决于它的存在形式。肉制品中的水分子以自由态和结合态的形式存在。在介电解冻过程中,水分子由于具有一定的偶极性质,因此是影响解冻效果的最重要因素^[29]。水分含量越高,肉制品的介电常数和介电损耗则越高。因为结合水对介电极化的响应比自由水更小,所以一般来说,自由水对介电特性的影响比结合水更大。对于高水分含量的样品,自由水与结合水的比例是影响其介电特性的关键因素。

Dong Jincheng等^[30]研究解冻过程中水分添加量对牛肉糜加热均匀性和色泽的影响,结果发现增加样品的含水量会使其肉制品在解冻过程中的介电常数和损耗因子增加,进而对射频加热均匀性产生不利影响。Bengtsson等^[31]在10~200 MHz条件下对冷冻和解冻过程中瘦牛肉和鳕鱼的介电参数进行了测定,发现在解冻过程中样品的介电常数显著增加,尤其在水分含量高的物料中。Yang Linxin等^[20]也指出不同含水率样品之间的介电特性差异较大。高水分食物在射频频率范围内的介电损耗与离子迁移所造成的损耗相关,且随温度的升高而增加。

2.4 盐分

一方面,盐渍的肉制品自由水的含量减少,导致介电损耗增大,介电常数降低。另一方面,随着盐含量的增加,带电粒子增多,离子浓度增大,离子迁移率也相应增大,从而使介电损耗增大。对于未加盐的肉制品,增加其盐分含量能加快它的解冻速率。但是较高的盐含量通过降低渗透深度增加了解冻时间和解冻的不均匀度。盐分含量对介电常数有积极影响,而对穿透深度有负面影响^[32]。

Uan等^[33]发现介电损耗随样品的盐分含量增加而提高,而介电常数没有明显变化。Wang Rui等^[34]研究了食盐和蔗糖含量对食品介电特性的变化规律,结果发现食盐和蔗糖添加均提高了样品在低温(-25~-5℃)条件下的介电常数和介电损耗。相对于蔗糖含量,盐分含量对样品介电特性的影响更大,其介电常数随含盐量的增加而逐渐减小,介电损耗随含盐量和温度的提高而显著增大。Dong Jincheng等^[30]发现盐分的增加降低了牛肉的介电常数,因为含盐量较高的样品,游离水含量下降,能快速极化的水分相对较少,介电常数也随之下降。

2.5 脂肪

脂肪属于非极性物质,所以它与电磁波的作用相对较弱,且在电磁场暴露的环境下被认为是“惰性物质”。食物脂肪含量的增加通常伴随着水分含量的降低,进而降低了介电效应。在相同条件下,肉类原料的

脂肪含量越高,其介电常数和介电损耗越低^[35]。同时,增加脂肪含量会导致肉制品的介电常数降低^[36]。

Lyng等^[37]分析了在27.12、915 MHz和2 450 MHz条件下不同瘦肉和脂肪的介电特性,发现脂肪的介电参数较瘦肉更低,所有瘦肉的介电常数处于同一数量级且在70.5~77.8范围之间。相比之下,猪肉脂肪的介电常数更低,而瘦肉的介电损耗值排序为羊肉<猪肉<牛肉<火鸡<鸡肉,同时猪肉脂肪的介电损耗低于所有瘦肉的介电损耗。Zhang Lu等^[38]也发现脂肪含量的增加降低了介电常数,并对其介电损耗的抑制作用较小。

3 介电解冻技术对肉制品品质的影响

传统解冻方法由于传热慢且时间较长,故无法满足高效的冷冻肉制品的解冻操作。鉴于此,市场更青睐新型的物理解冻方法^[39]。介电解冻功能装置及其设备在民用和生产端都得到了一定的应用,例如微波炉的快速解冻功能和连续化射频解冻机。前期研究发现介电解冻技术对肉制品各项品质指标均有不同程度影响。

3.1 保水性

肉的保水性取决于肌原纤维蛋白的结构^[40]。疏水相互作用、静电斥力及氢键等对维持蛋白质的结合水起着关键作用。介电解冻处理对肌原纤维蛋白构象会产生一定影响。相同功率下,肉制品吸收的微波能量比射频能量更大,因此在解冻过程中微波易引起表面局部过热,进而破坏氢键,导致肌原纤维蛋白三级结构发生改变,影响肉制品的保水性。Wang Bo等^[41]也提出微波作用下的肌原纤维蛋白凝胶结合水流动性增强。这可能是由于局部过热现象所导致的氢键变弱,引起部分肌球蛋白变性和不稳定凝胶网络。射频解冻的热效应更均匀,处理后的肉制品保水性更好。

肉类产品的保水性主要通过解冻损耗、蒸煮损失和滴水损耗评价。肉的解冻损失和蒸煮损失少,则解冻肉品的保水性佳。

3.1.1 解冻损耗

解冻过程中的汁液损失会影响产品的蛋白质功能特性,导致肉品原料的感官、嫩度及色泽变差,同时也会引起蛋白质和脂肪的氧化,以及营养成分的流失等现象,从而使肉品的经济价值降低。

Wang Bo等^[42]研究比较了真空解冻、超声波解冻和微波解冻对猪背肌肉品质的影响,发现微波解冻样品的损耗在所有解冻样品中最高并达到4.71%,且蛋白质的完整性被严重破坏;而真空解冻的样品蛋白质损失最低,这可能是由于微波解冻过程中的瞬时高温蒸发了样品表面水分,同时使蛋白质氧化变性,导致蛋白质结合水的能

力下降,而真空解冻过程中的低氧环境延缓了蛋白质氧化。Ambrosiadis等^[43]发现对于牛肉而言,低功率的微波解冻有时会造成更大的质量损耗。微波解冻造成相对较高的损耗是因为高频振荡电磁波能迅速加热样品表面的水分并加速其蒸发。有报道称微波结合其他解冻方法能减少此类解冻损失。Zhu Mingming等^[44]对猪背肌肉在不同解冻方式下的理化特性变化进行了分析,发现微波联合空气对流解冻处理的样品损耗最低(1.74%)。此外,磁性纳米颗粒结合射频解冻也有利于维持肉类物料的保水性,这在解冻海鲈鱼的研究中得到了应用^[45]。

3.1.2 蒸煮损耗

蒸煮损耗是包括加热后大量水分和一些营养物质损耗的总和。蒸煮损耗增加的原因可能是冷冻和解冻过程对肌肉纤维结构的改变,从而导致肉的持水能力下降^[46]。

Yu Longhao等^[47]报道称由于牛肉解冻的水分流失,解冻牛肉的蒸煮损耗会低于新鲜肌肉。Choi等^[48]比较了射频解冻、浸泡解冻、强制空气对流解冻和微波解冻等不同处理方法对冷冻猪里脊肉的品质影响,发现新鲜样品的蒸煮损耗率为31.85%,显著低于所有解冻处理的样品(34.33%~37.57%),各解冻处理方法间的蒸煮损耗差异并不显著。朱亚莉^[49]比较了不同解冻条件下猪肉样品的蒸煮损耗变化,发现当解冻到中心温度为-1℃时,与新鲜猪肉的蒸煮损耗(33.8%)相比,射频解冻、浸泡解冻、强制空气对流解冻组的蒸煮损耗分别增加到38.9%、41.1%、40.3%,表明传统浸泡解冻的效果最差。姜纪伟^[50]研究了不同解冻方式对冷冻罗非鱼片保水性的影响,发现射频解冻样品的蒸煮损耗为17.77%,显著低于其他解冻方法,所以得出结论即射频解冻能有效降低冷冻样品的蒸煮损耗。

3.1.3 滴水损耗

滴水损失是冻藏肉类的重要指标。与滴水损失同时发生的还有营养物质流失,即水溶性蛋白质、维生素和矿物质都能在滴水中找到。Frag等^[51]研究证实,与传统的空气解冻方法相比,更快速的射频解冻方法有利于减少滴水损失和微量营养素的损失,可能是由于缓慢解冻过程中重结晶造成细胞损伤。解冻速度快,相变时间短,滴水损失减少。Bedane等^[52]研究了冷冻鸡胸肉射频解冻过程中解冻温度均匀性和质量参数的变化,使用65 mm电极间隙的交错式射频解冻系统,完全解冻至(-0.73±0.79)℃,耗时40 min,与常规解冻4℃条件下用18 h相比,显著缩短了解冻时间,降低了滴水损失,改善了质构特性。Kim等^[53]也指出微波解冻牛肉的滴水损失低于常规解冻方式。张艳妮等^[54]研究不同解冻方式对鸡胸肉物理品质的影响,发现微波解冻组滴水损失率最高,可能是因为微波加热不均匀,使部分蛋白质变性,并致使样品中的水分大量散失。

3.2 新鲜度

肉制品及其原料的新鲜程度关系着食品的安全可食用性,是消费者们最为关心的指标之一。影响新鲜度的指标包括色泽、pH值、总挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)、微生物含量等。介电解冻处理能使肉品质指标发生改变,因此可能导致新鲜度发生变化。

3.2.1 色泽

肉的色泽取决于多种因素,包括肌红蛋白状态、水分和脂质氧化程度等,影响消费者的购买欲望。肉品表面的颜色以 L^* 、 a^* 、 b^* 值衡量, L^* 表示亮度值, a^* 表示红度值, b^* 表示黄度值。目前研究认为,介电解冻处理导致肉制品脂质、蛋白质氧化水平、保水性等发生改变,从而影响肉的色泽。Augustyńska-Prejsnar等^[5]研究空气、温水和微波对鸡胸肉解冻品质的影响,发现所有样品均呈现亮度 L^* 值降低且黄度 b^* 值升高的趋势,但微波解冻样品的色差变化更为显著。Choi等^[48]研究了采用不同解冻方式处理的冻结猪里脊肉色泽变化,发现与新鲜样相比,微波解冻样品的 L^* 值升高,而射频解冻、强制空气对流解冻和浸泡解冻处理的 L^* 值与对照相比没有显著差异。此外,微波解冻会导致猪里脊肉的 a^* 值显著降低,而射频解冻处理后的 a^* 和 b^* 值均无明显的变化。由于肉类原料的持水性下降,使样品表面的光反射率降低,进而导致 L^* 值的下降^[55]。同时,肌红蛋白氧化是 a^* 值变化的主要原因,微波处理使高铁肌红蛋白形成量减少,最终影响解冻肉的红度值。而增加的脂质氧化效果和肌红蛋白的形成则是导致 b^* 值变化的因素^[56]。

3.2.2 pH值

pH值能反映肉类原料的持水力。解冻处理过程中,随着肉类原料汁液的流失,肌细胞的电解质平衡被破坏,溶质浓度增加,从而造成样品pH值的下降^[57]。肌肉中糖原降解产生的酸性物质也会引起样品pH值的下降。解冻时,一些肉类原料的蛋白质会发生水解,进而产生出挥发性化合物如三甲胺、二甲胺和氨类物质,进而导致样品pH值的升高^[58]。也有研究报道,不同解冻方式对肉制品的pH值影响较小^[59]。Zhu Yali等^[60]对冷冻瘦肉样品在3 kW、27.12 MHz条件下进行射频解冻测试,发现解冻至-4℃时,射频解冻、浸泡解冻、空气对流解冻样品组的pH值分别为6.1、5.9、6.1,其中浸泡解冻的样品pH值略低于其他两种方法。张莉等^[61]比较了不同解冻方法对羊肉的处理,发现各组样品的pH值均显著下降,相较于其他组,微波解冻的羊肉pH值最小,这可能是由于微波解冻的温升不均匀,造成样品肌原纤维破坏,游离的汁液流出,进而导致pH值下降。

3.2.3 TVB-N值

TVB-N是以挥发性胺和有毒含氮化合物形式存在的一级、二级和三级胺的总称^[62]。因为挥发性氮是由腐败微生物降解肌肉中的蛋白质或非蛋白氮化合物所产生,故TVB-N值可用来评估肉类食品的腐败程度^[63]。介电解冻的局部高温可杀死部分表面微生物,防止肉制品腐败。Ho等^[64]研究了微波解冻处理后牛里脊肉的理化特性,发现对照组的TVB-N值高于其他样品,且TVB-N值也随微波剂量的增加而降低。柏霜等^[65]发现羊肉经过不同方式解冻后的TVB-N值均呈现显著降低,而微波解冻因时间较短,故蛋白质的分解程度最小且TVB-N值也相对较低。Choi等^[48]发现采用包括微波解冻和射频解冻在内的不同解冻方法处理猪里脊肉的所有样品TVB-N值均低于20 mg/100 g,表明这些解冻方法能满足产品较高的新鲜度标准,这与杨明远等^[66]的结论类似。

3.2.4 硫代巴比妥酸反应物(thiobarbituric acid reactive substance, TBARS)值

脂肪氧化程度是衡量冷冻肉品质的重要指标,TBARS值的大小代表了肉类原料脂肪氧化程度的强弱。解冻时间越长,脂质氧化程度越高。介电解冻用时较短,但超过一定功率强度阈值其产生的物理化学效应也可能对肉制品产生不利影响,例如较高的局部过热温度容易使脂质氧化。Gan Sunlong等^[67]比较了3种不同组织结构和成分的肉类原料在解冻后的品质变化,发现解冻后猪肉、牛肉和羊肉的TBARS值均有不同程度的增加,微波解冻后猪肉、牛肉和羊肉的TBARS值均低于浸泡解冻的样品,但高于通过超声波解冻的样品。微波解冻后TBARS值较高的原因可能是微波解冻产生的过热现象促进了脂质的氧化。TBARS值与温度分布不均匀性密切相关^[60]。李双^[68]发现通过射频解冻罗非鱼时,样品中心和边缘的TBARS值没有呈现出规律性,并且TBARS值较低,说明射频解冻温度分布较为均匀,对样品的脂质氧化程度较小。马翼飞^[69]发现微波解冻的小黄鱼TBARS值低于其他常规解冻样品,说明物理场解冻对小黄鱼的脂肪影响较小。

3.2.5 菌落总数

菌落总数用来衡量食品被细菌污染的程度及其卫生质量。介电解冻过程用时较短,且电磁波能抑制微生物的生长繁殖。Zhu Mingming等^[44]对猪背肌肉在不同解冻方式下的菌落总数进行比较,发现经过不同解冻处理后的样品菌落总数相对于对照组都较高,而微波解冻的样品具有相对较低的总活菌数,这可能是由于微波解冻的时间较短所致。王琳琳等^[70]比较了不同解冻方式处理后牦牛肉菌落总数变化,发现自然解冻的样品菌落总数最多,微波解冻的样品菌落总数最少,同时说明微波解冻能抑制酶和微生物对肌肉蛋白的分解,这与朱明明等^[71]的研究结果类似。万海伦等^[72]研究了不同解冻方式对冷冻生食鱼片的品质影响,发现微波解冻能较好地抑制生

食鱼片中微生物的生长繁殖,这可能是微波解冻时样品表面快速温升造成。

3.3 蛋白质

解冻处理会影响肉制品蛋白质的氧化降解,从而决定肉制品的质构、持水能力、风味以及营养成分等特性。解冻过程中蛋白质的结构变化可通过蛋白质溶解度、表面疏水性、浊度和粒径等指标评估。肌原纤维蛋白是构成肌肉纤维的主要成分,因此肉品质改变与肌原纤维蛋白结构及功能改变有关。目前研究证明,介电解冻在调控产品品质上具有一定优势。

3.3.1 蛋白质溶解度

溶解度能反映蛋白质的变性和聚集。在解冻过程中,水分和其他物质的渗出是降低肉制品蛋白质溶解度的重要影响因素^[73]。蛋白质的溶解度也反映蛋白质构象的变化及其生理功能的改变^[74]。介电解冻有促进蛋白质氧化的作用,同时导致肌原纤维排列松散,有助于增加产品嫩度。Choi等^[48]在比较不同方法解冻猪里脊肉时发现,与微波解冻相比,经射频解冻处理的猪肉糜样品能表现出更高的蛋白质溶解度,这表明射频处理不会引起显著的蛋白质变性。张莉等^[75]研究了不同解冻方式对冷冻羊肉蛋白质氧化的影响,发现微波解冻后羊肉中全蛋白的溶解度最低且达到141.67 mg/g,显著低于其他解冻处理,说明全蛋白溶解度的大幅下降是由于微波解冻引起的样品局部温度过高,破坏了蛋白质的结构。局部过热会促进活性氧的产生,还原性氨基酸残基易被氧化,引发氨基酸侧链修饰。

3.3.2 表面疏水性

表面疏水性是判断肌原纤维蛋白构象稳定性的重要指标。蛋白质氧化会暴露其疏水性氨基酸残基,影响蛋白质与水的结合能力^[76]。Peng Zeyu等^[77]发现与新鲜样品相比,微波解冻后肌原纤维蛋白的表面疏水性提高了14.58%。Li Fangfei等^[78]也发现微波处理增加了肌原纤维蛋白的表面疏水性,这可能是由于微波解冻导致的温升不均匀,致使肌原纤维蛋白结构展开,原本处于分子内部的疏水区暴露,同时内部偶极子在微波场中振荡引起不均匀加热,会导致部分蛋白质去折叠,从而增加了蛋白的表面疏水性^[79]。微波处理能促进蛋白质的去折叠,有助于自由基进入氨基酸,从而对样品产生不利影响。邹咪^[80]分别用流水解冻、冰水解冻和射频解冻处理冷冻大黄鱼,发现这3种解冻方式下的大黄鱼肌原纤维蛋白的表面疏水性分别为24.95、24.4 μg 和19.19 μg ,贮藏4 d后则分别升高到41.91、37.79 μg 和35.02 μg ,说明射频解冻对大黄鱼肌原纤维蛋白结构影响较小。

3.3.3 粒径和浊度

粒径和浊度都反映蛋白质在加热过程中的聚集状态,这两项指标的升高意味着蛋白质的聚集程度加强^[81]。Wang Bo等^[41]在相同加热温度下,用不同解冻方法处理猪肉,发现经过微波解冻处理后的肌原纤维蛋白粒径分布变宽且浊度值高于新鲜样品,这可能是微波解冻样品中蛋白质结构的折叠暴露了部分疏水残基,促进了肌原纤维蛋白聚集的现象,而聚集体的形成导致光散射并阻碍光的传输,从而增加了吸光度。微波处理会促进肌纤维蛋白的氧化和变性,可能导致聚合物形成,从而引起颗粒的增加。Kong Dewei等^[82]比较空气对流解冻、浸泡解冻、微波解冻处理对冷冻羊肉肌原纤维蛋白特性的影响,发现空气对流解冻和浸泡解冻处理会导致样品浊度显著增加,微波解冻处理则对样品的浊度无显著影响。彭泽宇^[83]发现微波解冻处理的猪肉肌原纤维蛋白平均粒径较高,而微波联合空气解冻处理的样品平均粒径变化不显著。

3.3.4 蛋白质结构

刘磊等^[84]报道称由于微波解冻导致肉类原料的受热温升不均一,进而使鹅腿肉组织中的蛋白质 α -螺旋结构遭到显著破坏。Wang Xuesong等^[85]发现微波解冻处理后的鱼肉样品蛋白质三级结构被破坏,同时肌肉结构受损。Li Fangfei等^[78]研究了不同解冻技术包括射频解冻(4 $^{\circ}\text{C}$)、浸泡解冻(18 $^{\circ}\text{C}$)、真空解冻(25 $^{\circ}\text{C}$)、超声波解冻(20 $^{\circ}\text{C}$)和微波解冻对肌原纤维蛋白构象的影响,发现新鲜组织中的 α -螺旋相对含量为51.37%,经过射频解冻、浸泡解冻、真空解冻、超声波解冻和微波解冻处理后,分别降低到46.45%、44.38%、49.98%、48.72%和40.25%,表明解冻过程中肌原纤维蛋白的 α -螺旋结构丢失。同样,采用浸泡解冻和微波解冻的样品肌原纤维蛋白荧光强度高于射频解冻、真空解冻和超声波解冻组。梁诗惠等^[86]发现微波解冻处理后的鸡腿肉肌原纤维蛋白中 α -螺旋含量最少,而 β -折叠含量则相对较高,这可能是由于微波解冻所引起的样品过热现象,导致 α -螺旋向其他结构转化,从而导致其蛋白质稳定性降低。但是,共价键负责维持蛋白质的一级结构,不受解冻过程的影响^[82]。

4 结 语

本文综述了介电技术在肉类解冻中的研究进展及其对肉品质的影响。由于现代食品工业和预制菜等餐饮消费的发展,传统解冻工艺已经无法满足冷冻肉制品自然常规解冻的高效操作需求。依赖于成套装备技术的发展,介电解冻作为新型的物理解冻方法开始逐步应用于冷冻肉制品的批量化处理。介电解冻对维持肉制品的保

水性和新鲜度有着一定的效果,但在抑制蛋白质氧化和变性方面的效果不显著。一方面,介电解冻过程中,高能量的电磁波会破坏肌原纤维蛋白结构,使其与水结合的能力下降,影响肉制品保水性。另一方面,过程时间相对较短和局部短暂高温可抑制表面微生物滋生和腐败,从而较好地维持肉制品新鲜度。介电解冻尤其是微波处理过程中,容易出现温升不均匀现象,这会促进肉制品的蛋白质氧化以及蛋白质结构改变,是否造成有害物质的产生,还需要进一步研究。近年来介电解冻与其他技术结合逐渐成为了新的研究热点。随着冷冻肉制品消费的增多,为了改善解冻效果的均匀性,最大限度地保证肉品原料品质,介电解冻技术还有待进一步的深入研究。

参考文献:

- [1] STEFAAN D S, ELS V. Meat: the balance between nutrition and health. a review[J]. Meat Science, 2016, 120: 145-156. DOI:10.1016/j.meatsci.2016.04.008.
- [2] LASKOWSKI W, GÓRSKA-WARSEWICZ H, KULYKOVETS O. Meat, meat products and seafood as sources of energy and nutrients in the average polish diet[J]. Nutrients, 2018, 10(10): 1412. DOI:10.3390/nu10101412.
- [3] BORRÁS E, FERRÉ J, BOQUÉ R, et al. Data fusion methodologies for food and beverage authentication and quality assessment: a review[J]. Analytica Chimica Acta, 2015, 891: 1-14. DOI:10.1016/j.aca.2015.04.042.
- [4] MOHSEN D, NASSER H, EPAMEINONDAS X, et al. Review on the control of ice nucleation by ultrasound waves, electric and magnetic fields[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 195: 222-234. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2016.10.001.
- [5] AUGUSTYŃSKA-PREJSNAR A, ORMIAN M, SOKOŁOWICZ Z. Physicochemical and sensory properties of broiler chicken breast meat stored frozen and thawed using various methods[J]. Journal of Food Quality, 2018, 2018: 1-9. DOI:10.1155/2018/6754070.
- [6] JIA G L, 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 Science and Technology, 2018, 99: 268-275. DOI:10.1016/j.lwt.2018.09.064.
- [7] ZHANG Y, DING C J. The study of thawing characteristics and mechanism of frozen beef in high voltage electric field[J]. IEEE Access, 2020, 8: 134630-134639. DOI:10.1109/ACCESS.2020.3010948.
- [8] BALPETEK D, GÜRBÜZ Ü. Application of ohmic heating system in meat thawing[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2015, 195(C): 2822-2828. DOI:10.1016/j.sbspro.2015.06.400.
- [9] CHRISTOPH J B. Methods for (industrial) thawing of fish blocks: a review[J]. Journal of Food Process Engineering, 2018, 41(1): e12598. DOI:10.1111/jfpe.12598.
- [10] MARRA F, ZHANG L, LYNG G J. Radio frequency treatment of foods: review of recent advances[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 91(4): 497-508. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2008.10.015.
- [11] UYAR R, BEDANE F T, ERDOĞDU F, et al. Radio-frequency thawing of food products: a computational study[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 146: 163-171. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2014.08.018.
- [12] WANG S, TANG J. Radio frequency and microwave alternative treatments for insect control in nuts: a review[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2001, 10(3): 105-120.
- [13] GUZIK P, KULAWIK P, ZAJĄC M, et al. Microwave applications in the food industry: an overview of recent developments[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021, 62(29): 21-20. DOI:10.1080/10408398.2021.1922871.
- [14] CHANDRASEKARAN S, RAMANATHAN S, TANMAY B. Microwave food processing: a review[J]. Food Research International, 2013, 52(1): 243-261. DOI:10.1016/j.foodres.2013.02.033.
- [15] LLAVE Y, SAKAI N. Dielectric defrosting of frozen foods[M]// GRUMEZESCU A M, HOLBAN A M. Food processing for increased quality and consumption. Academic Press, 2018: 383-422. DOI:10.1016/B978-0-12-811447-6.00013-8.
- [16] JOSEPH D, CARMEN M I. Modeling the drying kinetics of microwave vacuum drying of concentrated skim milk: correlation of dielectric properties, drying stages, and specific energy demand at pilot scale[J]. Drying Technology, 2023, 41(1): 17-33. DOI:10.1080/07373937.2022.2080220.
- [17] SOSA-MORALES M E, VALERIO-JUNCO L, LÓPEZ-MALO A, et al. Dielectric properties of foods: reported data in the 21st century and their potential applications[J]. LWT-Food Science and Technology, 2010, 43(8): 1169-1179. DOI:10.1016/j.lwt.2010.03.017.
- [18] TANG J, FENG H, LAU M. Microwave heating in food processing[M]// YANG X H, TANG J. Advances in bioprocessing engineering. Singapore: World Scientific Publishing, 2002: 1-43. DOI:10.1142/9789812706584_0001.
- [19] METAXAS A C, MEREDITH R J. Industrial microwave heating[M]. Cambridge: IET Digital Library, 1988: 659.
- [20] YANG L X, QIU W Q, YIN Y L, et al. Dielectric properties of antarctic krill (*Euphausia superba*) and white shrimp (*Penaeus vannamei*) during microwave thawing and heating[J]. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 2017, 51(1): 3-30. DOI:10.1080/08327823.2017.1291067.
- [21] 张亚瑾. 南美白对虾的射频解冻均匀性及品质研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022: 14-16.
- [22] 刘艳. 羊肉射频解冻技术研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017: 14-16.
- [23] LLAVE Y, SAKAI N. Food processing for increased quality and consumption[M]. Amsterdam: Elsevier, 2018: 383-422.
- [24] FARAG K W, LYNG J G, MORGAN D J, et al. Dielectric and thermophysical properties of different beef meat blends over a temperature range of -18 to +10 degrees C[J]. Meat Science, 2008, 79(4): 79. DOI:10.1016/j.meatsci.2007.11.005.
- [25] LLAVE Y, MORI K, KAMBAYASHI D, et al. Dielectric properties and model food application of tylose water pastes during microwave thawing and heating[J]. Journal of Food Engineering, 2016, 178(1): 20-30. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2016.01.003.
- [26] LI Y F, ZHANG Y, SU X R, et al. Experimental and numerical investigations of shaped hole film cooling with the influence of endwall cross flow[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 120: 42-55. DOI:10.1016/j.jheatmasstransfer.2017.11.150.
- [27] PUROHIT A, KUMARI A, ROY A, et al. Determination of dielectric properties and predictive modeling for designing radio-frequency heating of ground beef[J]. Frontiers in Food Science and Technology, 2022, 2: 960471. DOI:10.3389/frfst.2022.960471.
- [28] 胡晓亮. 狭鳕鱼糜射频解冻技术研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2018: 29-30.
- [29] ROOPESH M S, RAVI K T, JIE X, et al. Water activity change at elevated temperatures and thermal resistance of *Salmonella* in all

- purpose wheat flour and peanut butter[J]. Food Research International, 2016, 81: 163-170. DOI:10.1016/j.foodres.2016.01.008.
- [30] DONG J C, KOU X X, LIU L T, et al. Effect of water, fat, and salt contents on heating uniformity and color of ground beef subjected to radio frequency thawing process[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2021, 68: 102604. DOI:10.1016/j.ifset.2021.102604.
- [31] BENGTSSON N E, MELIN J, REMI K, et al. Measurements of the dielectric properties of frozen and defrosted meat and fish in the frequency range 10–200 MHz[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2010, 14(8): 592-604. DOI:10.1002/jsfa.2740140812.
- [32] ANANTHESWARAN R C, LIU L. Effect of viscosity and salt concentration on microwave heating of model non-newtonian liquid foods in a cylindrical container[J]. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 2016, 29(2): 119-126. DOI:10.1080/08327823.1994.11688239.
- [33] UAN D G, CHENG M, WANG Y, et al. Dielectric properties of mashed potatoes relevant to microwave and radio-frequency pasteurization and sterilization processes[J]. Journal of Food Science, 2004, 69(1): 30-37. DOI:10.1111/j.1365-2621.2004.tb17864.x.
- [34] WANG R, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Effect of salt and sucrose content on dielectric properties and microwave freeze drying behavior of re-structured potato slices[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 106(4): 290-297. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2011.05.015.
- [35] WANG J, LUECHAPATTANAPORN K, WANG Y F, et al. Radio-frequency heating of heterogeneous food-meat lasagna[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 108(1): 183-193. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2011.05.031.
- [36] LI Y L, LI F, TANG J M, et al. Radio frequency tempering uniformity investigation of frozen beef with various shapes and sizes[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2018, 48: 42-55. DOI:10.1016/j.ifset.2018.05.008.
- [37] LYNG J G, ZHANG L, BRUNTON N P. A survey of the dielectric properties of meats and ingredients used in meat product manufacture[J]. Meat Science, 2004, 69(4): 589-602. DOI:10.1016/j.meatsci.2004.09.011.
- [38] ZHANG L, LYNG J G, BRUNTON N P. The effect of fat, water and salt on the thermal and dielectric properties of meat batter and its temperature following microwave or radio frequency heating[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 80(1): 142-151. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2006.05.016.
- [39] FARAG K W, LYNG J G, MORGAN D J, et al. A comparison of conventional and radio frequency thawing of beef meats: effects on product temperature distribution[J]. Food and Bioprocess Technology, 2011, 4(7): 1128-1136. DOI:10.1007/s11947-009-0205-z.
- [40] ALI S. Effect of multiple freeze-thaw cycles on the quality of chicken breast meat[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
- [41] WANG B, DU X, KONG B H, et al. Effect of ultrasound thawing, vacuum thawing, and microwave thawing on gelling properties of protein from porcine *longissimus dorsi*[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 64: 104860. DOI:10.1016/j.ultsonch.2019.104860.
- [42] 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. DOI:10.3390/foods11091368.
- [43] AMBROSIADIS I, THEODORAKAKOS N, GEORGAKIS S, et al. Influence of thawing methods on the quality of frozen meat and the drip loss[J]. Fleischwirtschaft, 1994, 74(3): 320.
- [44] ZHU M M, PENG Z Y, LU S, et al. Physicochemical properties and protein denaturation of pork *longissimus dorsi* muscle subjected to six microwave-based thawing methods[J]. Foods, 2019, 9(1): 26. DOI:10.3390/FOODS9010026.
- [45] ZHANG W D, GUAN W L, CAI L Y, et al. Effects of magnetic nanometer combined with radio frequency or microwave thawing on physicochemical properties of myofibrillary protein in sea bass[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 154: 112585. DOI:10.1016/j.lwt.2021.112585.
- [46] VIEIRA C, DIAZ M T, MARTÍNEZ B, et al. Effect of frozen storage conditions (temperature and length of storage) on microbiological and sensory quality of rustic crossbred beef at different states of ageing[J]. Meat Science, 2009, 83(3): 398-404. DOI:10.1016/j.meatsci.2009.06.013.
- [47] YU L H, LEE E S, JEONG J Y, et al. Effects of thawing temperature on the physicochemical properties of pre-rigor frozen chicken breast and leg muscles[J]. Meat Science, 2005, 71(2): 375-382. DOI:10.1016/j.meatsci.2005.04.020.
- [48] CHOI E J, PARK H W, CHUNG Y B, et al. Effect of tempering methods on quality changes of pork loin frozen by cryogenic immersion[J]. Meat Science, 2017, 124: 69-76. DOI:10.1016/j.meatsci.2016.11.003.
- [49] 朱亚莉. 猪肉的解冻工艺影响因素及解冻品质研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020: 17-18.
- [50] 姜纪伟. 冷冻罗非鱼片射频解冻效果的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021: 16-17.
- [51] FARAG K W, DUGGAN E, MORGAN D J, et al. A comparison of conventional and radio frequency defrosting of lean beef meats: effects on water binding characteristics[J]. Meat Science, 2009, 83(2): 278-284. DOI:10.1016/j.meatsci.2009.05.010.
- [52] BEDANE T F, ALTIN O, EROL B, et al. Thawing of frozen food products in a staggered through-field electrode radio frequency system: a case study for frozen chicken breast meat with effects on drip loss and texture[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2018, 50: 139-147. DOI:10.1016/j.ifset.2018.09.001.
- [53] KIM Y B, JEONG J Y, KU S K, et al. Effects of various thawing methods on the quality characteristics of frozen beef[J]. Korean Journal for Food Science of Animal Resources, 2013, 33(6): 723-729. DOI:10.5851/kosfa.2013.33.6.723.
- [54] 张艳妮, 刘婷, 张雯雯, 等. 不同解冻方式对鸡胸肉物理品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(22): 57-63. DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2021.22.009.
- [55] HUGHES J M, OISETH S K, PURSLOW P P, et al. A structural approach to understanding the interactions between colour, water-holding capacity and tenderness[J]. Meat Science, 2014, 98(3): 520-532. DOI:10.1016/j.meatsci.2014.05.022.
- [56] XIONG Y L, DECKER E, FAUSTMAN C, et al. Protein oxidation and implications for muscle food quality[M]// DECKER E A, FAUSTMAN C, LOPEZ-BOTE C J. Antioxidants in muscle foods: nutritional strategies to improve quality. Wiley-Interscience, 2000: 85-111.
- [57] EYGONIE C, BRITZ J T, HOFFMAN C L. Impact of freezing and thawing on the quality of meat: review[J]. Meat Science, 2012, 91(2): 93-98. DOI:10.1016/j.meatsci.2012.01.013.
- [58] JIAN J, LI L, YU Q, et al. The effects of vacuum package combined with tea polyphenols (V+TP) treatment on quality enhancement of weever (*Micropterus salmoides*) stored at 0 °C and 4 °C[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 91: 484-490. DOI:10.1016/j.lwt.2018.01.056.
- [59] KONG D W, HAN R W, YUAN M D, et al. Slightly acidic electrolyzed water as a novel thawing media combined with ultrasound

- for improving thawed mutton quality, nutrients and microstructure[J]. Food Chemistry: X, 2023, 18: 100630. DOI:10.1016/j.fochx.2023.100630.
- [60] ZHU Y L, LI F, TANG J M, et al. Effects of radio frequency, air and water tempering, and different end-point tempering temperatures on pork quality[J]. Journal of Food Process Engineering, 2019, 42(4): e13026. DOI:10.1111/jfpe.13026.
- [61] 张莉, 孙佳宁, 朱明睿, 等. 解冻方式对羊肉品质及微观结构的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(8): 1607-1617. DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2022.08.1607.
- [62] LI K, KANG Z L, ZOU Y F, et al. Effect of ultrasound treatment on functional properties of reduced-salt chicken breast meat batter[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(5): 2622-2633. DOI:10.1007/s13197-014-1356-0.
- [63] EL D A, HOLMAN B W B, GITERU S G, et al. Total volatile basic nitrogen (TVB-N) and its role in meat spoilage: a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 109: 280-302. DOI:10.1016/j.tifs.2021.01.006.
- [64] HO J, JIN L, KANG H Y, et al. Effect of microwave treatment on the physicochemical and microbiological characteristics of beef loin during storage at 4 °C[J]. Korean Journal of Food Science and Technology, 2013, 45(2): 161-166.
- [65] 柏霜, 杨文婷, 牛佳, 等. 不同解冻方式对羊肉臊子品质特性的影响[J]. 中国调味品, 2017, 42(6): 10-17. DOI:10.3969/j.issn.1000-9973.2017.06.003.
- [66] 杨明远, 姜晶丹, 谢晶, 等. 解冻方式对乌鳢品质的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2021, 30(5): 913-921. DOI:10.12024/j.sou.20200503055.
- [67] GAN S L, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Effects of different thawing methods on quality of unfrozen meats[J]. International Journal of Refrigeration, 2022, 134: 168-175. DOI:10.1016/j.ijrefrig.2021.11.030.
- [68] 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: 62-63.
- [69] 马翼飞. 不同贮藏温度和解冻方式对冻结小黄鱼品质的影响研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021: 17-18.
- [70] 王琳琳, 陈炼红, 李璐倩, 等. 解冻方式对牦牛肉蛋白氧化、功能特性及新鲜度的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 342-349. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.05.038.
- [71] 朱明明, 王亚秋, 刘新建, 等. 快速与慢速解冻对冷冻猪肉品质特性及蛋白变性的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(23): 23-30; 36. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2018.23.005.
- [72] 万海伦, 应晓国, 赵波, 等. 不同解冻方式对生食鱼片解冻品质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(15): 227-235. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210524-290.
- [73] QI J, LI C B, CHEN Y J, et al. Changes in meat quality of ovine *longissimus dorsi* muscle in response to repeated freeze and thaw[J]. Meat Science, 2012, 92(4): 619-626. DOI:10.1016/j.meatsci.2012.06.009.
- [74] ZHANG Y L, LIU G S, XIE Q W, et al. A comprehensive review of the principles, key factors, application, and assessment of thawing technologies for muscle foods[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2022, 22: 107-134. DOI:10.1111/1541-4337.13064.
- [75] 张莉, 孙佳宁, 朱明睿, 等. 不同解冻方式对哈萨克羊肉脂质及蛋白质氧化的影响[J]. 食品科学技术学报, 2022, 40(2): 161-171. DOI:10.12301/spxb202100411.
- [76] SUN W Z, ZHOU F B, SUN D W, et al. Effect of oxidation on the emulsifying properties of myofibrillar proteins[J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6(7): 143-150; 197. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.10.023.
- [77] PENG Z Y, ZHU M M, ZHANG J, et al. Physicochemical and structural changes in myofibrillar proteins from porcine *longissimus dorsi* subjected to microwave combined with air convection thawing treatment[J]. Food Chemistry, 2020, 343: 128412. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.128412.
- [78] LI F F, WANG B, LIU Q, et al. Changes in myofibrillar protein gel quality of porcine *longissimus* muscle induced by its structural modification under different thawing methods[J]. Meat Science, 2019, 147: 108-115. DOI:10.1016/j.meatsci.2018.09.003.
- [79] ZHANG M C, LI F F, DIAO X P, et al. Moisture migration, microstructure damage and protein structure changes in porcine *longissimus* muscle as influenced by multiple freeze-thaw cycles[J]. Meat Science, 2017, 133: 10-18. DOI:10.1016/j.meatsci.2017.05.019.
- [80] 邹咪. 冻结和解冻条件对大黄鱼肌原纤维蛋白特性和品质的影响研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020: 33-34.
- [81] XIAO H M, WU Y F, LIU J, et al. Potential mechanism of different gelation properties of white and red muscle fibre from crocodile (*Crocodylus siamensis*) meat: study of myofibrillar protein[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 143(1): 111045. DOI:10.1016/j.lwt.2021.111045.
- [82] KONG D W, HAN R W, YUAN M D, et al. Ultrasound combined with slightly acidic electrolyzed water thawing of mutton: effects on physicochemical properties, oxidation and structure of myofibrillar protein[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 93: 106309. DOI:10.1016/J.ULTSONCH.2023.106309.
- [83] 彭泽宇. 微波联合解冻方式的筛选及其改善猪肉保水性的机制研究[D]. 新乡: 河南科技学院, 2021: 44-45.
- [84] 刘磊, 夏强, 曹锦轩, 等. 不同解冻方法对鹅腿肉理化特性和品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(15): 256-261. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20191018-196.
- [85] WANG X S, XIE J. Effects of different thawing methods on the quality of frozen horse mackerel[J]. Food Science, 2020, 41(23): 137-143. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20191105-050.
- [86] 梁诗惠, 冯钰敏, 邓华荣, 等. 解冻方式对鸡腿肉蛋白氧化特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(5): 223-229. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.030331.