

# 超声波处理对畜肉解冻过程与解冻后品质影响的研究进展

吴平\*, 姚芳, 王正云, 刘萍, 郑海松, 孙智远, 徐嘉蔓  
(江苏农牧科技职业学院食品科技学院, 江苏泰州 225300)

**摘要:** 超声波加工技术属于物理加工技术的范畴, 近年来因其绿色、无污染的优势被广泛地应用于食品加工领域, 如清洗、酶解、分离、提取、腌制、乳化等。随着食品超声加工技术研究的不断深入, 研究者们还发现超声波对冷冻畜肉产品的解冻过程有着促进以及监测作用。该研究综述了超声波技术原理与潜在的解冻作用机制, 并详细分析了超声波处理对冷冻畜产品解冻效率、保水性、质构、新鲜度、嫩度和脂肪酸组成等关键性指标的影响。此外, 还重点探讨了利用超声波回波信号状态对物料解冻过程进行低损、快速实时监测可行性。该研究不仅为超声波技术在冷冻畜肉产品的快速解冻研究中提供理论与实际应用依据, 还为畜产品解冻过程的超声监测技术发展提供了新的研究思路。

**关键词:** 超声; 解冻; 肉产品; 物理加工

文章篇号: 1673-9078(2022)08-361-371

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.8.1104

## Research Progress on the Effects of Ultrasonic Treatment on Thawing Process and Post-thaw Quality of Livestock Meat

WU Ping\*, YAO Fang, WANG Zhengyun, LIU Ping, ZHENG Haisong, SUN Zhiyuan, XU Jiaman

(College of Food Science and Technology, Jiangsu Agri-animal Husbandry Vocational College, Taizhou 225300, China)

**Abstract:** Ultrasonic processing technology belongs to the category of physical processing technologies. In recent years, it has been widely used in the field of food processing, such as cleaning, enzymolysis, separation, extraction, pickling and emulsification, because of its green and pollution-free advantages. With the deepening of research of food ultrasonic processing technology, researchers also found that ultrasound can be used to promote and monitor the thawing process of frozen animal meat products. In this paper, the principle of ultrasonic technology and the mechanism underlying its potential thawing action are reviewed. The effects of ultrasonic treatment on thawing efficiency, water holding capacity, texture, freshness, tenderness and fatty acid composition of frozen livestock meat products are analyzed in detail. In addition, the feasibility of low loss and fast real-time monitoring of material thawing process by using the ultrasonic echo signal state is discussed. This paper not only provides theoretical and practical bases for the application of ultrasonic technology in the study on rapid thawing of frozen livestock meat products, but also offers a novel research idea for the development of ultrasonic monitoring technology in the thawing process of frozen animal products.

**Key words:** ultrasound; thawing; meat; physical processing

引文格式:

吴平,姚芳,王正云,等.超声波处理对畜肉解冻过程与解冻后品质影响的研究进展[J].现代食品科技,2022,38(8):361-371,+265

WU Ping, YAO Fang, WANG Zhengyun, et al. Research progress on the effects of ultrasonic treatment on thawing process and post-thaw quality of livestock meat [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(8): 361-371, +265

在我国畜牧业结构中, 畜禽养殖业、特别是其中的养猪业一直占据主导地位, 猪肉产量占肉类总产量

收稿日期: 2021-10-02

基金项目: 江苏省大学生创新创业训练计划项目(202112806027Y); 江苏农牧科技职业学院校级科研项目(NSF2021CB02)

作者简介: 吴平(1990-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 食品物理场加工,

E-mail: wuping114@126.com

的54%, 在肉类产量中占比位居首位<sup>[1]</sup>; 猪肉消费量也占据我国城乡居民肉类消费量的60%以上<sup>[2]</sup>。这使得我国成为全世界的畜产品消费大国, 尤其是猪肉消耗量更是高达 $5.6 \times 10^7$  t, 其体量相当于近4亿头的生猪<sup>[3]</sup>。畜肉由于其肌肉化学组成中肌原纤维蛋白含量丰富(图1), 在屠宰后的一段时间内若不能妥善储存, 其包含的自身酶类和一些腐败微生物的生长会加速肉品

的腐败变质, 缩短冷鲜畜肉产品贮存期以及货架期<sup>[4]</sup>。为延长原料肉的贮藏期及最大程度地保持肉品营养品质, 冷冻贮藏技术被普遍地用于肉类制品工业, 其主要贮藏机理是肉制品肌肉纤维中自由流动水分的固定化或去除<sup>[5]</sup>。同时, 低温环境也使得蛋白酶和微生物活性受到抑制。

冷冻畜产品在肉制品加工中有着举足轻重的作用, 是国家进行肉类食品储备与宏观调控的主要筹码<sup>[6]</sup>。然而, 畜肉制品在长期冷冻贮藏中, 由冻藏初期降温过程中形成的小冰晶会不断生长变大, 不仅破坏了肌纤维的微观结构, 还会增大肌蛋白结构周围的溶质浓度。因此, 常常在解冻的过程中出现肉制品原料性质的物理和化学变化, 如蛋白质变性及氧化、色泽、质地及风味变化、汁液流失、脂肪氧化等问题。另外, 肉制品原料中的食源性致病菌的生长与繁殖、肌肉中的蛋白酶等也会严重影响着原料肉的品质。因此, 冷冻畜肉产品的品质高低不仅取决于冷冻技术的优劣, 对肉品的解冻方式也是决定畜肉制品质量的关键因素之一。传统的原料解冻方式(如热空气或水浴解冻)除了耗时较长、能耗较大、效率不高外, 还存在解冻均匀性低、酶促褐变以及微生物污染等问题。目前, 国内外学者也开展了一些特殊解冻方式的研究, 如微波解冻、电解冻和高压解冻等。微波解冻是家庭中应用较为广泛的解冻方式, 具有解冻效率高、穿透性强以及物料内外同步解冻的特点, 但其存在表面过热<sup>[7]</sup>的问题。电解冻的特点是解冻效率高, 受微生物污染较少, 但是物料表面和内部解冻均匀性的问题较为突出, 会出现表面受热融化解冻而核心解冻不足的问题<sup>[8]</sup>。高压解冻速度快, 过程污染小, 但使用成本较高。因此, 寻求一种既能提高解冻效率, 又能缓解表面过热问题的高效绿色解冻技术对最大限度地保留畜肉品质、提高人们对畜产品的食用质量十分重要。

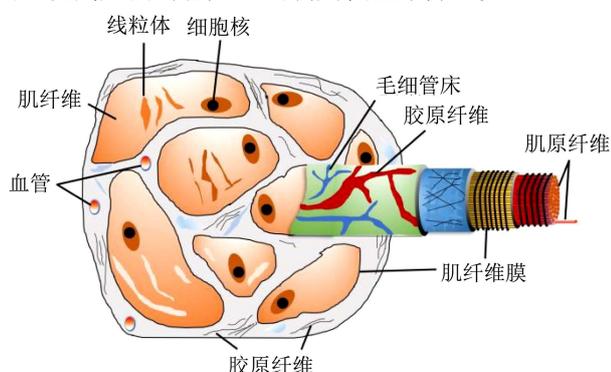


图1 肌肉组织横截面示意图

Fig.1 Schematic diagram of cross section of the muscle tissue

超声波技术作为一种食品物理加工的新技术, 在食品工业中受到越来越广泛的关注。其在食品功能成

分的提取<sup>[9]</sup>、物料属性的无损检测<sup>[10]</sup>、食品灭菌<sup>[11]</sup>、干燥<sup>[12]</sup>、催陈<sup>[13]</sup>、雾化<sup>[14]</sup>以及控制冰晶体生长<sup>[15]</sup>上均有较为深入的研究。近年来, 除上述研究中的辅助冻结外, 研究学者还发现超声波可以强化物料的解冻过程, 促使物料内部各个结晶区域的声能吸收解冻界面不断地向冻结区移动, 解冻均匀性与解冻效率均得到提高。因此, 本文重点综述了超声波解冻技术、作用机制以及其对冷冻畜产品品质的影响, 旨在为目前的冷冻畜肉产品加工业的前处理提供新的解冻思路与技术参考。

## 1 超声波解冻作用机制

超声波是一类超出人耳听觉频率范围(20 kHz~1 MHz)的声波。它是机械波的一种, 遵循声波传播的基本规律, 能在介质中以机械振动的形式不断传递超声能量。该能量所及之处会产生一系列物理、化学反应, 主要包括机械效应、热效应、空化效应和自由基效应<sup>[16]</sup>。根据超声波能量的高低, 又可分为高频低强度和低频高强度超声波。前者是指频率介于100~200 kHz之间、强度小于1 W/cm<sup>2</sup>的超声波, 它可用于研究食品质量或结构检测, 属于诊断类超声波; 后者是指频率介于18~100 kHz之间、强度大于1 W/cm<sup>2</sup>的超声波, 它可用于食品行业的加工与生产, 属于功率超声波<sup>[17,18]</sup>。这两种类型的超声波为其在冷冻畜产品领域中的解冻与监测应用提供了理论基础。

解冻是指使冻结食品冰晶融化, 生成的水被物料吸收而恢复至原料冻结前新鲜状态的过程, 冻结食品在加工或消费前必须进行解冻。传统的解冻过程是利用热传导的方式实现物料解冻, 如热空气或流水解冻等, 这一过程易引起食品物料品质的变化。特别是冷冻畜肉产品, 不当的解冻方式不仅会造成肉汁损失, 还会导致其他营养成分随汁液而流失, 影响后续加工和食用。传统的解冻方式已无法满足市场的要求。超声波解冻是利用其声能产生的热量来对冻结组织进行解冻的一种新型食品解冻技术。它适用于大体积的食品解冻。超声能量在物料组织内冻结处的衰减程度远远高于未冻结部分<sup>[19]</sup>, 使得声能转化为的热量集中在冻结区, 从而不断推进冻结区与解冻区界面向着解冻区移动, 这是超声波可以加速解冻最本质的原因之一。另外, 不同结晶区域的超声能量吸收也使得物料内外同时发生解冻, 解冻均匀性较好。超声能量与热量的转换方式主要为两种, 即机械效应与空化效应。机械效应的产热原理是, 在超声波作用过程中, 其机械波产生的振动能量被介质吸收后转化为热量, 该热量与介质中超声波频率和持续时间呈正相关<sup>[20,21]</sup>。空化效应

产热原理是, 超声波在传播时是以正负交替的波形形式传递的, 介质中气体收到不断地挤压与膨胀并经历多个周期后, 气泡内压力超出承受极限时发生破裂, 此刻会产生较强的能量<sup>[22]</sup>, 空化泡内部温度变化的数值可高达上千摄氏度, 该热量能够顺利地通过冷冻物料, 加速食品的解冻<sup>[23]</sup>。此外, 空化效应发生时还伴随着液体微射流的产生<sup>[24]</sup>, 对介质形成了一定的搅拌作用, 这种湍流搅拌在固体冷冻物料表面附近更强烈, 同样加快了传热效率, 减少了解冻时间<sup>[25]</sup>。

## 2 超声波技术对冷冻畜肉产品的影响

### 2.1 超声波解冻效率

利用超声波技术进行解冻, 可以大幅度缩短冷冻畜肉解冻时间。Gambuteanu 等<sup>[26]</sup>研究了低强度超声波对猪背最长肌的浸没解冻过程, 结果显示与传统空气解冻相比, 利用频率为 25 kHz、功率为 0.6 W/cm<sup>2</sup> 的超声波可以对 -5~-1 °C 温度区间的解冻效率提高 87%。而且, 解冻温升速率 (0.46、0.57 和 0.84 °C/min) 随着超声强度 (0.2、0.4 和 0.6 W/cm<sup>2</sup>) 的提高不断增加。同样地, Wang 等<sup>[27]</sup>对冷冻猪背最长肌进行解冻的结果也表明, 相比于时长为 55 min 的温水解冻, 利用功率 500 W、频率 40 kHz 的超声波可将解冻时间缩短至 45 min, 且相比于传统静水解冻, 超声处理后对肌肉的凝胶特性品质影响较小。Li 等<sup>[28]</sup>对秘鲁鱿鱼解冻时发现, 使用 40 kHz、240 W 超声波处理, 鱿鱼的解冻损失仅为 10.72%, 显著低于空气和静水解冻结果; 同时, 肌纤维被破坏的程度最小。Guo 等<sup>[29]</sup>对冻白牦牛肉进行超声波解冻时, 同样发现超声介入可以大幅度缩短解冻时间, 且无论是吸热阶段 (-13.5~0 °C)、相变阶段 (0~0.5 °C), 还是融化阶段 (0~4 °C) 的进入速度均要高于传统静水 (25 °C) 解冻组; 同时, 冻白牦牛肉通过上述温度带的速率随着声强的增加而进一步增大。超声波加速解冻的原因一方面是空化效应造成的, 当超声功率达到一定强度时, 冻结的物料结构中会出现小孔<sup>[30]</sup>, 使物料的冻结状态在微观上发生崩解; 另一方面, 已解冻汁液在超声作用下产生的微射流以及湍流也有助于热量的传递与冰晶体的消融<sup>[31]</sup>。

### 2.2 超声波解冻对冷冻畜肉产品品质的影响

超声波最初被用于解冻领域可以追溯至上世纪 50 年代末。Brody 等<sup>[32]</sup>首次发现超声 (20、400 和 1000 kHz) 能够加速对冰冻食品的解冻过程。次年, Wearmouth<sup>[33]</sup>报道了超声波技术在食品解冻领域的应用, 发现超声波缓解了牛奶解冻时发生分离的情况, 保持住了新鲜

度并延长了货架期。尽管早在 1982 年, Kissam 等<sup>[34]</sup>就发现利用 1500 Hz 的声能 (强度≤60 W), 可以将太平洋鳕鱼块解冻时间缩短 71%, 而对风味、质地、酸败度等未产生显著影响。但是超声波技术在冷冻畜肉产品中的应用实际上是在 Shore 等<sup>[35]</sup>对牛骨骼肌超声解冻研究之后才开始兴起。该学者研究了早期压电陶瓷产生的超声波在牛骨骼肌中的衰减过程, 重点探究了受试样品温度对超声波衰减的影响, 发现了在 -20 °C 条件下、2~7 MHz 频率范围内, 超声波在冷冻肌肉组织中的衰减程度均远高于未冻结组织。这一现象也成为今后超声波技术能应用于解冻领域的关键理论基础。超声波解冻技术作为传统冷冻畜肉产品解冻的可替代方式之一, 对于提高畜肉产品产业链前端预加工速度、推进畜产品工业节能与绿色发展具有重要的意义。上述研究者在超声解冻领域中开辟的前期研究基础也为后来的学者们打开了畜肉产品超声物理场解冻的新思路。

#### 2.2.1 保水性

畜肉产品的保水性主要通过解冻后的蒸煮损失率、汁液损失率、滴水损失和离心损失等来评价的。Li 等<sup>[36]</sup>研究超声解冻对鳙鱼鱼片品质影响的研究中发现, 对于慢速冻结的鱼片来说, 采用强度为 0.135 W/L、频率为 28 kHz 的超声波在加速其解冻的同时, 相比于空气解冻或静水解冻, 其蒸煮损失率和解冻损失均无显著性影响。侯晓荣等<sup>[37]</sup>也研究表明, 相比于静水解冻, 超声解冻 (200 W、40 kHz) 可降低其对中国对虾的解冻损失率。这意味着, 超声解冻处理并不会进一步增加对物料的解冻损失率。同样地, 朱明明等<sup>[38]</sup>对不同方式解冻的冷冻猪肉品质特性进行检测, 发现经 100 W、40 kHz 超声解冻后的猪肉蒸煮损失率与新鲜猪肉相比无显著性差异, 而流水解冻的蒸煮损失率显著提高; 超声解冻使其滴水损失率也小于流水解冻, 而离心损失率两者无显著差异。对于超声解冻后猪肉汁液损失率略高于流水解冻, 一方面这可能由于超声解冻速率较高、时间较短, 肉组织内部汁液无法充分回流进细胞内而造成营养物质流失; 另一方面, 解冻过程中, 超声波机械作用产生的能量传递给细胞内外的冰晶体后, 导致组织细胞完整性受到破坏, 引起汁液流失率增加。此外, 超声解冻后的肉类 pH 值降低, 蛋白质分子净电荷下降所引起的分子间斥力的降低也会改变肌肉组织的持水力, 增加汁液损失率<sup>[4,39]</sup>。这提示了使用低功率超声波解冻可能对冷冻畜肉产品的保水性更有利。蒋奕等<sup>[40]</sup>的研究结果印证了这一观点, 即随着超声功率的增加, 解冻猪肉的汁液损失率确实不断提高。程天赋等<sup>[41]</sup>研究解冻方式对鸡肉品质影响时

还发现,随着超声功率的提高,不只是汁液损失率增加,持水性也在降低。这说明,高强度超声波引发的冰晶振动也改变了肌肉组织蛋白质的空间构象,在一定程度上会影响肌肉组织的结构,降低持水性。利用低场核磁共振技术,也可以反映出超声波对畜肉产品作用后,其保水性发生的变化。水分横向弛豫时间( $T_2$ )中的  $T_{21}$ 、 $T_{22}$  和  $T_{23}$  分别代表了与肌肉结合紧密的结合水、与肌肉保水性相关且占肌肉 80% 以上的不易流动水以及自由水<sup>[42]</sup>。郑捷等<sup>[43]</sup>发现经超声波解冻后的泥鳅肉  $T_{22}$  峰面积下降,而  $T_{23}$  峰面积增加,这从侧面印证了  $T_{23}$  所代表的自由水是解冻过程中汁液损失的直接来源。因此,在对畜肉产品解冻时,需严格控制超声功率,以最大程度降低其对保水性的影响。

### 2.2.2 质构

质构是影响畜肉产品感官和功能特性的重要品质指标,通常包括硬度、咀嚼性、回弹性和胶黏性等。钟莉等<sup>[44]</sup>对猪里脊进行解冻后发现,相比于静水浸没解冻,40 W 功率的超声解冻降低了其硬度和咀嚼性,而对弹性和回复性无显著影响。张昕<sup>[45]</sup>研究了不同解冻工艺对鸡胸肉品质的影响,结果显示 120~300 W、40 kHz 的超声波降低了鸡肉的咀嚼性和回复性,使硬度数值上产生下降趋势 ( $p>0.05$ ),但对弹性和胶黏性均无显著性影响。上述研究结果均说明超声波解冻可降低肌肉组织的硬度,使得肉质较嫩;但同时咀嚼性的下降也降低了肉的“咬”感<sup>[46]</sup>。这可能与超声波对畜肉产品的纤维组织有一定的损伤作用有关。肉组织细胞受到超声机械或空化作用的影响,使得肌纤维和肌内膜分离,增大了细胞间隙,肌肉组织的紧密程度有所降低<sup>[47]</sup>。超声波解冻对不同畜肉组织质构变化的影响是不同。柏霜等<sup>[48]</sup>对羊肉臊子解冻后的品质特性进行了研究,结果显示超声作用后羊肉硬度、弹性、咀嚼性和胶黏性相比于静水解冻均发生了提高。刘宏影等<sup>[49]</sup>利用 280 W 超声处理金线鱼肌原纤维蛋白时发现,相比于静水解冻,超声解冻未显著影响硬度、弹性和咀嚼性。这可能是超声功率高,肌纤维蛋白排列紧密,其二级结构变化较小。这些超声解冻研究中不一致的结论,推测这可能与受试肉类本身品种或结构不同以及选用超声波功率的高低有关。尽管一些畜肉产品中的部分质构指标受到了超声作用的影响而发生变化,但总体来看,选择合适的超声波作用参数对肌肉蛋白解冻后的品质和功能特性影响是较小的。

### 2.2.3 新鲜度

畜肉产品的新鲜程度是消费者们最为关心的指标之一,它直接关系到食品安全性。影响新鲜度的指标有色泽、pH 值、挥发性盐基氮 (TVB-N)、电导率、

微生物含量等。

色泽其实是影响人们对肉产品接受度最为直观的指标。它通常是由色差计进行测定。朱文慧等<sup>[50]</sup>研究不同解冻方式对秘鲁鱿鱼品质特性影响的过程中发现,相比于流水解冻对照组,尽管超声解冻后鱿鱼肉亮度 L 值有所下降,这可能与失水有关;但是其红值 a 和黄值 b 分别高于和低于对照组,这表明超声解冻能保留住鱿鱼肉的新鲜度。李慢<sup>[47]</sup>还发现在超声波解冻 24 h 后,中国对虾的色泽品质依然高于静水或空气解冻组的结果,感官特性也更接近新鲜组。朱明明等<sup>[38]</sup>发现超声解冻的猪肉 L 值和 a 值均高于流水对照组,同时 b 值也高于对照组,这可能与猪肉脂肪较高有关,再加上较长的处理时间,最终导致其被氧化后发生色泽的变化。因此对于高脂肪含量的畜肉产品,应在保证解冻效率的前提下,需选择合适的超声作用强度与处理时间。

pH 值的变化从本质上来看,其实是对畜肉肌肉系水力大小的反映,即蛋白质分子的净电荷效应。解冻处理过程中,包含蛋白质、矿物质分子的畜肉汁液的流失,破坏了肌细胞的电解质平衡,引起 pH 值变化<sup>[51]</sup>。杜鹏飞等<sup>[52]</sup>对超声解冻后的羊肉 pH 值进行了研究,结果显示与对照组相比,随着超声功率的提高,羊肉 pH 值在不断地降低。而朱明明等<sup>[38]</sup>对猪肉解冻后发现,无论对比对照组、流水解冻组还是空气解冻组,超声解冻后肉品的 pH 值均无显著性影响,这可能是由于只用了 100 W、超声功率低不足以引起过高的电解质失衡导致的。这与蒋奕等<sup>[40]</sup>的研究结果一致,在较低的功率 ( $\leq 200$  W) 范围内,超声对肉品 pH 值影响较小,特别是 100 W 时,与静水解冻相比无显著性差异。郑捷等<sup>[43]</sup>对冷冻泥鳅肉解冻时也得出类似结论,50 W 低功率超声波解冻的肌肉 pH 值与新鲜样品无显著性差异。

TVB-N 指标衡量了肉品的蛋白质分解程度,可用于评价动物性食品的新鲜度<sup>[53]</sup>。张昕等<sup>[45]</sup>研究表明不同超声功率组的鸡胸肉 TVB-N 含量均显著低于流水解冻组,但在功率组内随超声功率的增加,TVB-N 值也不断提高。这说明,超声解冻相比于传统的流水解冻,减少了鸡胸肉中一些能引发肉质脱氨基、脱羧基等化学反应的酶类,降低了碱性含氮类产物含量,提高了新鲜度。Guo 等<sup>[29]</sup>在解冻白牦牛肉的过程中也发现类似结果,在超声 200 和 400 W 时处理时,TVB-N 值显著低于传统的静水解冻对照组,当超声波功率继续提高至 600 W 后,才上升到对照组的数值。该研究者还发现 TVB-N 值与 pH 值的潜在关系,即 pH 值的变化可能与冻猪肉解冻过程中含氮物质的降解有关<sup>[54]</sup>。超

声场处理相比于传统的解冻处理缓解了肌肉蛋白和氨基酸的分解速度,更好地保留了肉品的新鲜度。电导率指标反映了畜肉产品中导电性物质成分的含量,含量越高表明肌肉成分分解越高、新鲜度越低。有研究报告,该指标与 TVB-N 值呈正相关<sup>[55]</sup>,可作为 TVB-N 指标的辅助指标对肉品新鲜度进行验证与评价。

畜肉因微生物生长而发生的腐败变质是影响其新鲜度、质量和安全性的重要因素之一。超声波解冻一方面解冻速率高,能快速通过微生物繁殖的阶段,减弱了其外部的生存空间、降低了微生物数量;另一方面,超声的机械和空化效应也使得微生物细胞发生损伤,从而抑制它们的活性。Gambuteanu 等<sup>[56]</sup>利用 25 kHz、0.2~0.4 W/cm<sup>2</sup> 的超声波对猪背最长肌进行解冻后发现,好氧微生物数量相比于静水解冻降低了约 11%。谷小慧<sup>[57]</sup>也发现超声波抑制了微生物的繁殖,经超声解冻处理的猪肉中大肠杆菌数量比水解冻、甚至新鲜猪肉还要低 1 个对数值。杜鹏飞等<sup>[52]</sup>在对羊肉的解冻效果研究后得出结论,肉中的菌落总数随超声波强度的增加不断降低,超声抑制了微生物的生物代谢。在冷冻海鲜的解冻上,超声波对微生物的抑制效果也明显高于空气和静水解冻,保证了制品解冻后的新鲜度<sup>[58]</sup>。超声波对微生物的抑制作用来源于其机械振动产生的强大剪切力,它可以破坏细胞膜、引发细胞凋亡<sup>[59]</sup>。此外,空化效应带来的微射流与空化泡破裂瞬间产生的高温也是撕扯细胞、继而引发细胞内容物外泄直至细胞死亡的主要原因。

超声解冻对低脂肪的水产品色泽保持较好,而对较高脂肪的畜肉原料有一定的影响。超声作用的突出优势是通过减少含氮类物质含量以及解冻快速而缓解了肌肉蛋白分解速率来降低肉品 TVB-N 含量,从而保持住了原料肉的新鲜度;此外,产生的机械与空化效应对菌体的生长抑制作用也从侧面提高了原料的贮存品质。

#### 2.2.4 嫩度

嫩度指标本质上其实是肉制品肌肉中各种蛋白质结构特性的宏观反映。不少研究结果表明,畜肉制品的剪切力<sup>[60]</sup>、肌原纤维小片化指数<sup>[61]</sup>、pH 值<sup>[62]</sup>和持水力<sup>[63]</sup>等均与肌肉的嫩度有关,嫩度这项指标的重要性不言而喻。有研究者发现超声波处理可改变肌肉的嫩度。Zhang 等<sup>[64]</sup>对冷冻鸡胸肉解冻后发现,在 200~500 W 超声作用下,剪切力不断地降低;并在 500 W 时,剪切力仅为不加超声组的 77.8%。李兰会<sup>[65]</sup>研究超声对山羊臀部肌肉嫩化时发现,超声影响了宰后第 2~6 d 的肌肉剪切力,尤其是处理后的第 3 d,其剪切力与未经超声处理的宰后第 6~7 d 剪切力值无显著性差异,这说

明,超声加速了山羊臀肌的后熟,提高了肉质嫩度。刘梦等<sup>[66]</sup>利用 0.3 和 0.6 W/cm<sup>2</sup> 的超声波连续一段时间处理牛肉干后,发现其剪切力值显著下降。Al-Hilphy 等<sup>[67]</sup>利用强度为 24 W/cm<sup>2</sup>、频率为 12 kHz 的超声波处理鸡胸肉 15 s 时,发现肉质剪切力显著降低,嫩度升高。Hu 等<sup>[68]</sup>研究螺肉超声处理研究时,也发现类似结论,当超声强度从 100 W 升至 200 W 后,超声波降低了其近 15% 的剪切力。究其原因,一方面,超声波无论作用于处在冻结状态的冰晶体还是普通肌肉组织,其机械振动作用产生的机械能均会引起畜肉产品内原本完整肌肉细胞的破坏<sup>[69]</sup>;另一方面,超声波导致的肌肉细胞或亚细胞结构的破坏,导致了胞内各种蛋白酶和溶酶体的释放,这使得酶促反应的加剧以及蛋白质的分解,最终也会引起肌细胞的剪切力值下降与嫩度增加<sup>[70]</sup>。

超声波解冻在提高肉品解冻效率的同时,还影响了其肌纤维的剪切力值,这说明超声场改变了畜肉中肌肉的蛋白组织结构,相比于化学改性嫩化时试剂的残留以及污水处理等问题,物理改性更具有潜在的推广前景,符合当下的高效与绿色发展趋势。另外,值得注意的是,在解冻时的所采用的超声功率与持续时间需严格控制,避免因追求肌肉嫩化效果而过多地影响到肉品的其他解冻品质。

#### 2.2.5 脂肪酸组成

畜肉制品中的脂肪酸组成的特征会影响到肉的风味和营养价值,适度的脂肪氧化可形成一些风味化合物,如醛酮类、醇类、烃类等;而过度的脂肪氧化则会对人体健康造成影响<sup>[71]</sup>。据报道,超声波处理对畜肉产品脂肪酸(包括饱和脂肪酸, SFA; 单不饱和脂肪酸, MUFA; 多不饱和脂肪酸, PUFA)组成有一定的影响。陈银基等<sup>[72]</sup>研究了超声波对腌渍牛肉脂肪酸组成的作用效果,结果显示 25 kHz、0.68 W/cm<sup>2</sup> 的超声波结合 2% 低浓度食盐腌制显著提高了牛肉脂肪酸 PUFA/SFA (P/S) 比值,同时也降低了脂肪酸动脉粥样硬化指数 (IA) 和血栓指数 (IT)。该结果在黄瀚<sup>[73]</sup>的研究中也得到印证,该研究者发现在腌制时辅以超声处理,不仅可降低兔肉脂肪含量,还增加了总脂肪酸中 P/S 值,减少了兔肉脂肪酸营养损失。高天丽等<sup>[74]</sup>对横山羊肉超声干制法进行了研究,发现经 40 kHz、300 W 超声波处理后羊肉中的饱和脂肪酸 C<sub>14:0</sub> (肉豆蔻酸) 发生显著降低,而对总 MUFA 相对含量无显著影响。C<sub>14:0</sub> 是引发胆固醇增加的主要原因之一<sup>[75]</sup>,其相对含量的减少降低了机体高密度和低密度脂蛋白含量积累的风险。雷辰等<sup>[76]</sup>在五花肉的炖煮中引入了超声波,研究发现经 40 kHz、250 W 超声处理后,五花

肉中饱和脂肪酸之一的硬脂酸 ( $C_{18:0}$ ) 相对含量增加, 其具有预防动脉粥样硬化的作用<sup>[77]</sup>。另外, 该研究者还发现 PUFA 相对含量显著降低以及 MUFA 含量的显著升高。有相关研究表明, 在加工过程中 PUFA 相比于 SFA 和 MUFA 更易发生降解<sup>[78]</sup>。由于高含量的 PUFA 会降低肉品的质构和风味, 因此经超声处理后 PUFA 含量的降低, 缓解了肉品风味品质的下降。除超声功率外, 超声频率也会影响脂肪酸组成。Ojha 等<sup>[79]</sup>研究超声频率对牛肉干脂肪酸组成的影响研究时, 发现使用 25 和 45 kHz 的超声显著提升了脂肪酸组成中的 P/S 值, 而 33 kHz 对此无显著性影响。在畜肉解冻领域中, 国内外关于超声对肉制品解冻后的脂肪酸组成的研究鲜有报道。杜鹏飞等<sup>[52]</sup>对羊肉超声解冻后的品质进行了研究, 结果显示不同功率的超声波 (120~300 W) 均对羊肉脂肪酸组成无显著性影响。主要原因之一是超声解冻平均作用时间较短; 另外, 不同的肉类含有不同的脂肪酸种类与相对含量, 超声波解冻有可能对除羊肉外的其他肉类脂肪酸组成产生影响, 不过这有待研究者的进一步探究。

超声波作用一定时间后, 能改变畜肉产品脂肪酸组成的原因与其空化效应以及热效应密不可分。肌细胞中充满了肌浆, 当接受超声波作用后, 其胞内液体随即产生空化效应和机械热效应。超声空化效应会使探头接触处的肉中油脂发生氧化, 导致脂肪酸组成的变化<sup>[80]</sup>。此外, 超声处理可对物料产生小分子化合物的聚合或解聚作用<sup>[81]</sup>。肌肉中脂肪酸链是长链大分子物质, 当超声作用于其中后, 便引起了脂肪酸链的聚合或解聚作用, 最终影响了畜肉产品中脂肪酸的组成与相对含量。值得注意的是, 在超声处理时应当注意控制超声波处理的作用强度, 避免过强的超声波引发的脂肪酸加速氧化。

### 2.3 超声波对解冻过程的监测作用

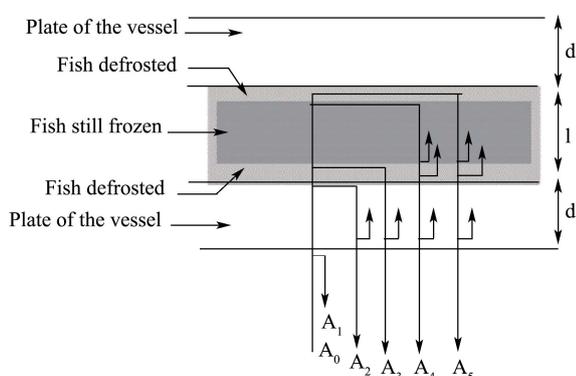


图 2 样品中传播回波的路径示意图<sup>[85]</sup>

Fig.2 Schematic path of propagation echoes in the sample

注:  $A_0$  为原始超声波;  $A_1$  是介质水与容器壁面产生的回波;

$A_2$  是容器壁面与鱼肉交界处产生的回波;  $A_3$  是解冻与冻结状态鱼肉界面间的回波;  $A_4$  是冻结鱼肉与上层已解冻鱼肉界面间的回波;  $A_5$  是上层鱼肉与容器壁面产生的回波。

超声波不仅可以对冷冻畜肉进行解冻处理, 还能对肉品的解冻过程进行监测。我们知道, 超声波分为高能量超声 (高强度、低频) 和低能量超声 (低强度、高频)。前者常用于剪切、加工或强化辅助, 正如超声解冻过程等, 而后者即可用于无损检测<sup>[82,83]</sup>。这里所描述的监测作用使用的即是低能量超声波, 联合傅里叶变换分析超声波时域或频率域特性, 来探究超声波性质与介质性质之间的关系, 进而达到研究物料内部结构特性变化的目的。相比于化学或生物手段, 超声波物理场对物料性质的改变具有监测速度快、低损伤, 并可实现在线监测的特点。利用食品的声学特性进行物料性质的快速监测已成为食品品质快速检测技术的热点研究方向之一<sup>[84]</sup>。Kadi 等<sup>[85]</sup>在对鱼肉解冻过程进行监测时, 采用的装置包含了一个宽带超声换能器以及一个超声波脉冲接收器, 它通过五种超声回波来确定样品的解冻状态 (图 2)。图 3a 表示鱼肉解冻的起点, 此时冻结与解冻两相间的界面还未形成, 所以回波  $A_2$  和  $A_3$  是重叠在一起的, 同时还出现了超声穿过整个冻肉组织后被上方的冻结与解冻界面反射的少量回波  $A_4$ , 这说明解冻初始时超声波可对冷冻肉的两侧同时作用, 保证了解冻过程的均匀性。图 3b 表示解冻终点, 此时可观察到肉品两侧解冻界面的回波  $A_3$  与  $A_4$  消失, 而鱼肉与容器壁边界回波  $A_5$  产生, 这说明随着解冻时间的延长, 肉品四周的冻结/解冻相界面不断向肉样的中心推进, 当相界面消失时, 表明解冻结束; 相比于图 3a 中回波  $A_4$  的位置, 图 3b 中  $A_5$  的位置更靠前且波形振幅更宽, 这说明超声波在解冻后的肉中的传播速率提高, 并且衰减较小, 这样当声波通过上方肉品与器壁界面时, 才有较高的剩余能量发生反射。而  $A_4$  较小的反射振幅更加印证了超声波在解冻时, 声能较多地消耗在了冰晶融化的两相界面中, 这也是超声波能加速物料解冻的本质原因之一。从图 3c 超声反射信号回波位置的演变图中, 同样可以看出随着解冻时间的延长 (沿 y 轴向下) 介质水与下层容器壁界面回波  $A_2$  一直都在, 而下层容器壁与鱼肉之间的回波  $A_3$  在解冻的伊始与  $A_2$  重叠, 但随后分离开来。当解冻时间约为 50 min 时,  $A_3$  消失, 紧接着回波  $A_5$  产生, 这个时间节点即为解冻完成点。该研究结果直观、准确地标识了冻结鱼肉中相变的发生与最终的解冻终点, 描述出了超声波能量作用于物料外层解冻界面的完整过程, 保证肉品解冻均匀性的同时, 也揭示了超声作用机制, 为畜肉产品解冻中超声回波监测技术的应用提供了理

论基础。近年来,超声成像技术更是提高了超声监测的精确性。孙宗保等<sup>[86]</sup>对冷鲜和解冻牛肉进行了基于超声波成像技术的鉴别研究,结果表明根据牛肉超声图像反射回波强度,可轻易地分辨出解冻牛肉样品。这是因为解冻后的牛肉组织有一定的损伤,细胞汁液外流与组织液混合后,引起肌纤维边界模糊,导致了内部质构差异减少,相比于冷鲜牛肉样品,解冻后肉样图像的整体反射回波较小(图4b)。上述研究均表明超声波可用于物料解冻过程的实时监测与质量评估,这为超声技术在畜肉产品解冻领域的发展提供了新的研究思路。

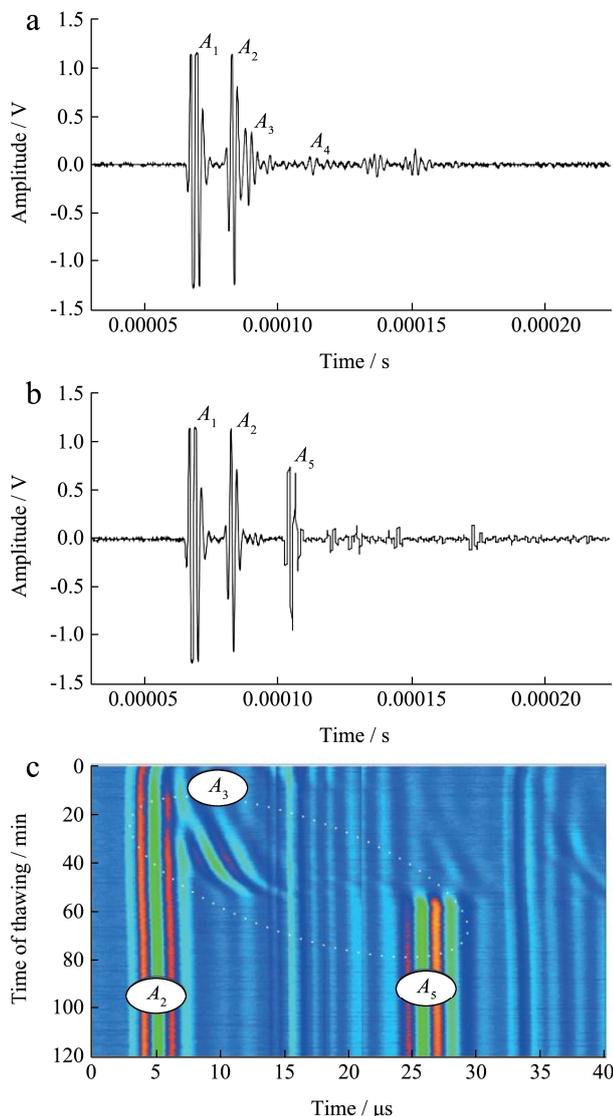


图3 解冻开始(a)、结束(b)声波振幅变化与声波反射信号(c)回波位置演变图<sup>[85]</sup>

Fig.3 Changes of the ultrasound wave amplitude at the beginning (a) and end (b) of thawing and the evolution of the echoes position of the signal (c) reflected by the sample during the thawing

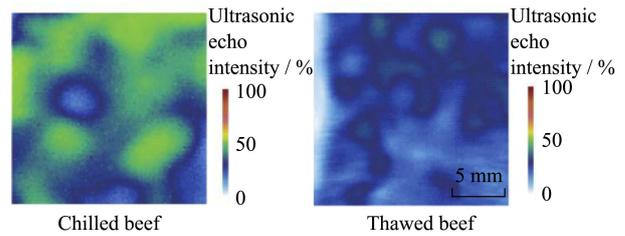


图4 冷鲜和解冻牛肉超声图像<sup>[86]</sup>

Fig.4 Ultrasound images of chilled and frozen-thawed beef

### 3 总结与展望

本文综述了超声波对冷冻畜肉产品品质的影响与其潜在的解冻机制,并重点探讨了物料解冻过程中的超声实时监测研究。经文献的整理与分析,发现超声波主要利用其“机械效应”和“空化效应”产生的能量在组织内冻结处的衰减程度远远高于未冻结部分这一特性,将声能转化为热量,不断推进冻结区与解冻区的界面向着解冻区移动。相比于传统的空气、静水或流水解冻,超声波处理对冷冻畜肉产品的解冻有着安全、绿色、高效和低损等优势。在一定的频率、功率以及处理时长下,超声波可通过降低TVB-N含量以及抑制微生物活性的方式来改善畜肉产品的新鲜度;通过降低畜肉硬度以改善质构;通过降低剪切力以增加肉品嫩度;通过影响畜肉脂肪酸P/S比值,降低部分饱和脂肪酸含量、提高不饱和脂肪酸含量,来影响肉的脂肪酸组成。此外,若能将超声波功率在解冻时一直控制在较低的水平,以及尝试使用交替多频超声处理,那么是否可在最大程度上降低对畜肉产品保水性的影响,使解冻后的肉品品质接近于冷鲜肉的质量,这是今后亟待解决的首要关键问题。对于低能量超声波来说,其能通过联合傅里叶变换分析超声波时域或频率域特性,来探究超声波性质与介质性质之间的关系,从而能研究物料内部结构特性变化。在物料解冻过程中,可通过多种超声回波状态来确定样品的实时解冻状态。综上,超声波技术不仅在多种畜肉产品的解冻中扮演着“促进者”的作用,还能在解冻的过程中兼任“监测者”,这可为畜肉产品超声解冻技术未来的工业化应用与发展提供崭新的研究思路与研究基础。

### 参考文献

[1] 李小成.非洲猪瘟后我国生猪产业发展的思考[J].今日养猪业,2021,3:10-11  
 LI Xiaocheng. Thoughts on the development of China's pig industry after African swine fever [J]. Today's Pig Industry, 2021, 3: 10-11

- [2] 李元鑫.政策性生猪保险的微观效应及对养殖收入的影响[D].北京:中国农业科学院,2021  
LI Yuanxin. The micro effect of policy-based swine insurance and its effect on breeding income [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021
- [3] 郑鸿焘.提高生猪检疫工作效率的策略[J]. 畜禽业,2020,31(1):37-38  
ZHENG Hongtao. Strategies for improving the efficiency of pig quarantine [J]. Livestock and Poultry Industry, 2020, 31(1): 37-38
- [4] Ranucci D, Roila R, Andoni E, et al. *Punica granatum* and *Citrus* spp. extract mix affects spoilage microorganisms growth rate in vacuum-packaged cooked sausages made from pork meat, emmer wheat (*Triticum dicoccum* Schübler), almond (*Prunus dulcis* Mill.) and hazelnut (*Corylus avellana* L.) [J]. Foods, 2019, 8(12): 1-13
- [5] Ersoy B, Aksan E, Zeren A. The effect of thawing methods on the quality of eels (*Anguilla anguilla*) [J]. Food Chemistry, 2008, 111(2): 377-380
- [6] 黄鸿兵.冷冻及冻藏对猪肉冰晶形态及理化品质的影响[D].南京:南京农业大学,2005  
HUANG Hongbing. Effect of freezing process and frozen storage on ice crystal properties and physicochemical characters of pork muscle [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2005
- [7] Zhu M, Peng Z, Lu S, et al. Physicochemical properties and protein denaturation of pork longissimus dorsi muscle subjected to six microwave-based thawing methods [J]. Foods, 2020, 9(1): 1-16
- [8] 王洛阳.食品快速解冻保鲜柜的设计研究[D].青岛:青岛科技大学,2016  
WANG Luoyang. Design research of food rapid thawing fresh-keeping cabinet [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2016
- [9] Sharayei P, Azarpazhooh E, Zomorodi S, et al. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of astaxanthin from green tiger (*Penaeus semisulcatus*) shrimp shell [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 76: 105666
- [10] Firouz M S, 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(11): 1140-1149
- [11] Chen F Y, Zhang M, Yang C H. Application of ultrasound technology in processing of ready-to-eat fresh food: a review[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 63: 104953
- [12] Kahraman O, Malvandi A, Vargas L, et al. Drying characteristics and quality attributes of apple slices dried by a non-thermal ultrasonic contact drying method [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 73(7): 105510
- [13] Ma X, Li T, He Y, et al. Preliminary study on ultrasonic ageing Zhenjiang vinegar mechanism based on maillard simulation system [J]. Journal of Food Quality, 2020, 2020: 1-9
- [14] Kudo T, Sekiguchi K, Sankoda K, et al. Effect of ultrasonic frequency on size distributions of nanosized mist generated by ultrasonic atomization [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 37: 16-22
- [15] Yuan J, Li H, Tao W, et al. An effective method for extracting anthocyanins from blueberry based on freeze-ultrasonic thawing technology [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 68: 105192
- [16] Izadifar Z, Babyn P, Chapman D. Mechanical and biological effects of ultrasound: a review of present knowledge [J]. Ultrasound in Medicine & Biology, 2017, 43(6): 1085-1104
- [17] Zheng L Y, Sun D W. Innovative applications of power ultrasound during food freezing processes-a review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2006, 17(1): 16-23
- [18] 赵峰,杨江帆,林河通.超声波技术在食品加工中的应用[J].武夷学院学报,2010,29(2):21-26  
ZHAO Feng, YANG Jiangfan, LIN Hetong. Ultrasound and its application in food industry [J]. Journal of Nanping Teachers College, 2010, 29(2): 21-26
- [19] Liu Y, Chen S, Pu Y, et al. Ultrasound-assisted thawing of mango pulp: effect on thawing rate, sensory, and nutritional properties [J]. Food Chemistry, 2019, 286(1): 576-583
- [20] 李笑笑.高场强超声波处理对大豆分离蛋白结构及乳化性的影响[D].广州:华南理工大学,2020  
LI Xiaoxiao. Effect of high intensity ultrasonic treatment on structure and emulsification of soy protein isolate [D]. Guangzhou: South China University of Science and Engineering, 2020
- [21] 王娟娟,周昌瑜,王冲,等.超声波技术在肉品加工中的应用以及对肉品风味前体物质的影响[J].食品工业科技,2019,40(16):320-323  
WANG Juanjuan, ZHOU Changyu, WANG Chong, et al. The application of ultrasonic technology in meat processing and its influence on flavor precursors [J]. Food Industry Technology, 2019, 40(16): 320-323
- [22] Ye Y, Zhu Y, Lu N, et al. Treatment of rhodamine B with cavitation technology: comparison of hydrodynamic cavitation with ultrasonic cavitation [J]. RSC Advances, 2021, 11(9):

- 5096-5106
- [23] 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 Yuyao, XIE Jing, WANG Jinfeng. Comparison and competitiveness assessment between ultrasonic thawing and traditional thawing methods [J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(6): 253-258
- [24] Tzanakisi, Eskinidg, Georgoulas A, et al. Incubation pit analysis and calculation of the hydrodynamic impact pressure from the implosion of an acoustic cavitation bubble [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2014, 21(2): 866-878
- [25] Dadan M, Matys A, Kaminska-Dworznicka A, et al. Improvement of freezing processes assisted by ultrasound [J]. Design and Optimization of Innovative Food Processing Techniques Assisted by Ultrasound, 2021: 217-273
- [26] Gambuteanu C, Alexe P. Comparison of thawing assisted by low-intensity ultrasound on technological properties of pork longissimus dorsi muscle [J]. Journal of Food Science & Technology, 2015, 52(1): 2130-2138
- [27] 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, 2019, 64: 104860
- [28] Li X X, Sun P, Jia J Z, et al. Effect of low frequency ultrasound thawing method on the quality characteristics of Peru squid (*Dosidicus gigas*) [J]. Food Science and Technology International, 2019, 25(2): 171-181
- [29] Guo Z, Ge X, Yang L, et al. Ultrasound-assisted thawing of frozen white yak meat: effects on thawing rate, meat quality, nutrients, and microstructure [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 70: 105345
- [30] Li X X, Sun P, Ma Y Y, et al. Effect of ultrasonic thawing on the water holding capacity, physico-chemical properties, and structure of frozen tuna fish (*Thunnus tonggol*) myofibrillar proteins [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(11): 5083-5091
- [31] Cai L, Zhang W, Cao A, et al. Effects of ultrasonics combined with far infrared or microwave thawing on protein denaturation and moisture migration of *Sciaenops ocellatus* (red drum) [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 55(1): 96-104
- [32] Brody A L, Antenevich J N. Ultrasonic defrosting of frozen foods [J]. Food Technology, 1959, 13(1): 109-110
- [33] Wearmouth W G. Frosonic milk: a recent British development [J]. International Journal of Refrigeration-revue Internationale Du Froid, 1960, 3(3): 56-58
- [34] Kissam A D, Nelson R W, Ngao J, et al. Water-thawing of fish using low frequency acoustics [J]. Journal of Food Science, 1982, 47(1): 71-75
- [35] Shore D, Woods M O, Miles C A. Attenuation of ultrasound in post rigor bovine skeletal muscle [J]. Ultrasonics, 1986, 24(2): 81-87
- [36] Li D, Zhao H, Muhammad A I, 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 Chemistry, 2020, 320: 126614
- [37] 侯晓荣,米红波,茅林春.解冻方式对中国对虾物理性质和化学性质的影响[J].食品科学,2014,35(4):243-247  
HOU Xiaorong, MI Hongbo, MAO Linchun. Influence of thawing methods on physico-chemical changes of Chinese shrimp (*Fenneropenaeus chinensis*) [J]. Food Science, 2014, 35(4): 243-247
- [38] 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  
ZHU Mingming, WANG Yaqiu, LIU Xinjian, et al. Effects of rapid and wlow thawing methods on quality characteristics and protein denaturation of frozen pork [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(23): 23-30, 36
- [39] Huff-Lonergan E, Lonergan S M. Mechanisms of water-holding capacity of meat: the role of postmortem biochemical and structural changes [J]. Meat Science, 2005, 71(1): 194-204
- [40] 蒋奕,程天赋,王吉人,等.超声波解冻对猪肉品质的影响[J].肉类研究,2017,31(11):14-19  
JIANG Yi, CHENG Tianfu, WANG Jiren, et al. Effect of ultrasonic thawing on the quality characteristics of frozen pork [J]. Meat Research, 2017, 31(11): 14-19
- [41] 程天赋,俞龙浩,蒋奕,等.基于低场核磁共振探究解冻过程中肌原纤维水对鸡肉食用品质的影响[J].食品科学,2019,40(9): 16-22  
CHENG Tianfu, YU Longhao, JIANG Yi, et al. Effect of myofibrillar water on chicken quality during thawing as studied by low-field nuclear magnetic resonance [J]. Food Science, 2019, 40(9): 16-22
- [42] Liu J, Yu X, Liu Y. Effect of ultrasound on mill starch and protein in ultrasound-assisted laboratory-scale corn wet-milling [J]. Journal of Cereal Science, 2021, 100: 103264
- [43] 郑捷,徐婷婷,胡爱军,等.解冻方式对冷冻泥鳅肌肉组织理化

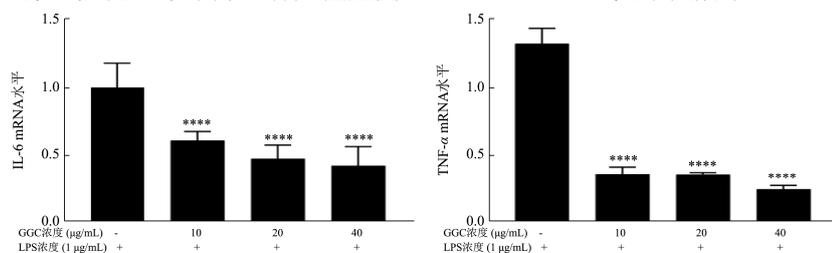
- 性质和微观结构的影响[J].食品科学技术学报,2020,38(6): 88-96
- ZHENG Jie, XU Tingting, HU Aijun, et al. Effect of thawing method on physicochemical properties and microstructure of frozen loach muscle [J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 38(6): 88-96
- [44] 钟莉,杨庆峰,陈文,等.不同解冻方法对畜禽肉品质的影响[J].食品工业,2016,37(12):42-46
- ZHONG Li, YANG Qingfeng, CHEN Wen, et al. Effects of different thawing methods on animal meat quality [J]. Food Industry, 2016, 37(12): 42-46
- [45] 张昕.不同解冻工艺对鸡胸肉品质的影响[D].南京:南京农业大学,2017
- ZHANG Xin. Effects of different thawing methods on the quality of chicken breast [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017
- [46] 张春晖,李侠,李银,等.低温高湿变温解冻提高羊肉的品质[J].农业工程学报,2013,29(6):267-273
- ZHANG Chunhui, LI Xia, LI Yin, et al. Low-variable temperature and high humidity thawing improves lamb quality [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(6): 267-273
- [47] 李慢,马晓彬,王文骏,等.解冻方式对中国对虾品质的影响[J].中国食品学报,2019,19(5):182-190
- LI Man, MA Xiaobin, WANG Wenjun, et al. Effects of thawing methods on the quality of Chinese shrimp [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(5): 182-190
- [48] 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
- BO Shuang, YANG Wenting, NIU Jia, et al. Effects of different thawing methods on quality characteristics of fried and diced mutton [J]. China Condiment, 2017, 42(6): 10-17
- [49] 刘宏影,马莹莹,李秀霞,等.解冻方式对金线鱼肌原纤维蛋白热稳定性和组织结构的影响[J].华中农业大学学报,2019,38(6):31-38
- LIU Hongying, MA Yingying, LI Xiuxia, et al. Effect of different thawing methods on thermal stability and tissue structure of myofibrin of *Nemipterus virgatus* [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38(6): 31-38
- [50] 朱文慧,宦海珍,步莹,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 Wenhui, HUAN Haizhen, BU Ying, et al. Effects of different thawing methods on quality and flavor characteristics of *Dosidicus gigas* [J]. Food Research and Development, 2019, 40(18): 84-89
- [51] Chan J, Omana D A, Betti M. Effect of ultimate pH and freezing on the biochemical properties of proteins in turkey breast meat [J]. Food Chemistry, 2011, 127(1): 109-117
- [52] 杜鹏飞,汝医,孙蓓,等.超声波解冻对羊肉品质的影响[J].肉类研究,2020,34(1):39-44
- DU Pengfei, RU Yi, SUN Bei, et al. Effect of ultrasonic thawing on quality characteristics of frozen mutton [J]. Meat Research, 2020, 34(1): 39-44
- [53] Moosavi-Nasab M, Khoshnoudi-Nia S, Azimifar Z, et al. Evaluation of the total volatile basic nitrogen (TVB-N) content in fish fillets using hyperspectral imaging coupled with deep learning neural network and meta-analysis [J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 5094-5105
- [54] Yang X, Hui W, Badoni M. Effects of meat pH and the initial numbers of spores of *clostridium estertheticum* on the development of blown pack spoilage of vacuum-packaged beef [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2014, 49(7): 1619-1625
- [55] 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):1178-1180
- YANG Xiujuan, ZHANG Xi, ZHAO Jinyan, et al. Application of conductivity evaluate pork freshness [J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(5): 1178-1180
- [56] Gambuteanu C, Alexe P. Effects of ultrasound assisted thawing on microbiological, chemical and technological properties of unpackaged pork longissimus dorsi [J]. Annals of the University Dunarea De Jos of Galati, 2013, 37(1): 98-107
- [57] 谷小慧.超声波对冷冻肉品质影响的研究[D].大连:大连工业大学,2013
- GU Xiaohui. Study of the effect of ultrasonic wave on frozen meat quality [D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2013
- [58] 牛改改,秦成丰,游刚,等.解冻方式对近江牡蛎肉感官特征和理化指标的影响[J].食品工业科技,2020,41(16):271-278
- NIU Gaigai, QIN Chengfeng, YOU Gang, et al. Effects of thawing methods on sensory characteristics and physicochemical indices of oyster (*Ostrea rivularis* Gould) meat [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(16): 271-278
- [59] Becton M, Averett R, Wang X. Effects of nanobubble collapse on cell membrane integrity [J]. Journal of Micromechanics & Molecular Physics, 2017, 2(2): 1-19
- [60] 万红兵,祁兴磊,李海鹏,等.加热温度和时间对牛肉嫩度影响的主成分分析评价[J].农业工程学报,2018,34(13):311-318
- WANG Hongbing, QI Xinglei, LI Haipeng, et al. Evaluation of

- effects of heating temperature and time on tenderness of beef based on principal component analysis [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(13): 311-318
- [61] 羿庆燕,董玉影,李官浩,等.不同质量等级延边黄牛肉肌纤维的组织特性[J].肉类研究,2013,1(6):10-13  
YI Qingyan, DONG Yuying, LI Guan hao, et al. Muscle fiber characteristics of beef samples of yanbian yellow cattle from different quality grades [J]. Meat Research, 2013, 1(6): 10-13
- [62] Carlson K B, Prusa K J, Fedler C A, et al. Postmortem protein degradation is a key contributor to fresh pork loin tenderness [J]. Journal of Animal Science, 2017, 95(4): 1574-1586
- [63] 张金天,侯婷婷,梁成云,等.宰前饮用复合磷酸盐水对延边黄牛肉贮藏品质的影响[J].食品与机械,2019,35(10):99-102  
ZHANG Jintian, HOU Tingting, LIANG Chengyun, et al. The effects of drinking compound phosphate water before slaughter on the meat quality of Yanbian yellow cattle [J]. Food & Machinery, 2019, 35(10): 99-102
- [64] Zhang C, Sun Q, Chen Q, et al. Effectiveness of ultrasound-assisted immersion thawing on the thawing rate and physicochemical properties of chicken breast muscle [J]. Journal of Food Science, 2021, 86(5): 1692-1703
- [65] 李兰会.超声波处理对羊肉嫩化效果的研究[D].保定:河北农业大学,2003  
LI Lanhui. Effects of supersonic wave on mutton tenderness [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2003
- [66] 刘梦,杨震,史智佳,等.超声辅助腌制处理对牛肉干干燥及理化特性的影响[J].食品科学,2019,40(21):121-126  
LIU Meng, YANG Zhen, SHI Zhijia, et al. Effect of ultrasound-assisted curing on drying rate and physicochemical characteristics of beef jerky [J]. Food Science, 2019, 40(21): 121-126
- [67] Al-Hilphy A R, Al-Temimi A B, Rubaiy H, et al. Ultrasound applications in poultry meat processing: a systematic review [J]. Journal of Food Science, 2020, 85(5): 1386-1396
- [68] Hu J, Ge S, Huang C, et al. Tenderization effect of whelk meat using ultrasonic treatment [J]. Food Science & Nutrition, 2018, 6(6): 1848-1857
- [69] Liu Z, Xiong Y L, Chen J. Protein oxidation enhances hydration but suppresses water-holding capacity in porcine longissimus muscle [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry 2010, 58(19): 10697-10704
- [70] Jayasooriya S D, Torley P J, D'arcy B R, et al. Effect of high power ultrasound and ageing on the physical properties of bovine semitendinosus and longissimus muscles [J]. Meat Science, 2007, 75(4): 628-639
- [71] 周建伟,孟倩,高德,等.超声加工技术对牛肉及其制品品质影响的研究进展[J].现代食品科技,2020,36(1):302-308  
ZHOU Jianwei, MENG Qian, GAO De, et al. Research progress on the effects of ultrasonic technology on the quality of beef and its derived products [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(1): 302-308
- [72] 陈银基,鞠兴荣,周光宏.食盐腌渍与超声波处理对牛肉脂肪酸组成的影响[J].食品科学,2009,30(19):8-13  
CHEN Yinji, JU Xingrong, ZHOU Guanghong. Effect of salting combined with ultrasonic treatment on fatty acid composition of beef [J]. Food Science, 2009, 30(19): 8-13
- [73] 黄瀚.不同腌制方式对兔肉及其产品加工过程品质的影响[D].重庆:西南大学,2016  
HUANG Han. Effect of different curing on the quality of rabbit meat and processing of rabbit steak [D]. Chongqing: Southwest University, 2016
- [74] 高天丽,李林强,张婷,等.微波和超声波辅助处理对干制横山羊肉中脂肪酸的影响[J].肉类研究,2017,31(1):7-12  
GAO Tianli, LI Linqiang, ZHANG Ting, et al. Effects of microwave/ultrasonic assisted treatments on fatty acids of dried goat meat [J]. Meat Research, 2017, 31(1): 7-12
- [75] Mello J, Rodrigues A B B, Giampietro-Ganeco A, et al. Characteristics of carcasses and meat from feedlot-finished buffalo and *Bos indicus* (Nellore) bulls [J]. Animal Production Science, 2017, 58(7): 1-9
- [76] 雷辰,夏延斌,车再全,等.超声波在五花猪肉炖煮工艺中的应用[J].肉类研究,2016,30(6):25-28  
LEI Chen, XIA Yanbin, CHE Zaiquan, et al. Ultrasonic application for stewing pork belly [J]. Meat Research, 2016, 30(6): 25-28
- [77] Edwardhj, Zhang J, Kris-Etherton P M. Cardiovascular disease risk of dietary stearic acid compared with trans, other saturated, and unsaturated fatty acids: a systematic review [J]. American Journal of Clinical Nutrition, 2010, 91(1): 46-63
- [78] Alfaia C, Alves S P, Lopes A F, et al. Effect of cooking methods on fatty acids, conjugated isomers of linoleic acid and nutritional quality of beef intramuscular fat [J]. Meat Science, 2010, 84(4): 769-777
- [79] Ojha K S, Harrison S M, Brunton N P, et al. Statistical approaches to access the effect of *Lactobacillus sakei* culture and ultrasound frequency on fatty acid profile of beef jerky [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2017, 57(1): 1-7

## 勘 误

对于 2022 年第 38 卷第 7 期，本刊做出以下勘误：

1.第 7 页图 7 最下方一行后面应为“+ + + +”，见下图所示。



2.第 15 页图 2b 的纵坐标的“10000”应为“100000”，右下角倒数第三行的“Q3 象限”应为“Q4 象限”；第 16 页图 4a 最下方一行“H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>”后面应为“- + - +”。

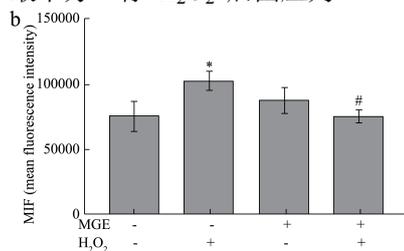


图2b

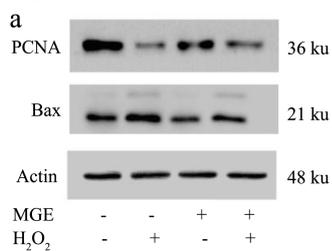


图4a

3.第 62 页转接的参考文献应从“29”开始编号。