水产品超声辅助浸渍冷冻技术研究进展

常江[a]，宛新国[a]，孙智慧[b]，李晓燕[c*]
（哈尔滨商业大学 a.轻工学院 b.高教发展研究中心 c.能源与建筑工程学院，哈尔滨 150028）

摘要：目的 为延长水产品销售周期，最大程度保持其营养品质，促进水产品冷冻保藏及加工技术的发展和产业化。**方法** 归纳总结超声辅助浸渍冷冻的作用机理，并探究其对冰晶形成和生长以及水产品保鲜加工的影响。**结果** 超声辅助浸渍冷冻能有效提高冷冻效率，减小冰晶晶核规格，缩短冷冻时间，减缓水产品蛋白质变性与脂质氧化速率，改善水产品质构、保持其营养价值，是水产品冷冻处理的有效途径。**结论** 超声辅助浸渍冷冻技术能在一定程度上解决水产品冷冻过程中存在的问题，为水产品冷冻技术产业化提供支持。超声辅助浸渍冷冻技术在作用机制、适用范围和特定环境下的作用衰减等方面存在着一定缺陷，还需深入阐述其作用机理，为冷冻智能装备开发提供保障。

关键词：水产品；浸渍冷冻；超声辅助；研究进展
中图分类号：TB661 **文献标志码：**A **文章编号：**1001-3563(2024)01-0183-08
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.01.021

Research Progress in Ultrasound Assisted Immersion Freezing Technology for Aquatic Products

CHANG Jiang[a], *WAN Xinguo*[a], *SUN Zhihui*[b], *LI Xiaoyan*[c*]
(a. Light Industry, b. Higher Education Development Research Center, c. School of Energy and Building Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China)

ABSTRACT: The work aims to extend the sales cycle of aquatic products, maximize their nutritional quality, and promote the development and industrialization of frozen storage and processing technology for aquatic products. The mechanism of ultrasound assisted immersion freezing and its impact on the formation and growth of ice crystals as well as the preservation and processing of aquatic products were summarized and reviewed. The ultrasound assisted immersion freezing could effectively improve the freezing efficiency, reduce the size of ice crystals, shorten the freezing time, slow down the protein denaturation and lipid oxidation rate of aquatic products, improve the quality structure of aquatic products and maintain their nutritional value, which was an effective way to freeze aquatic products. Ultrasound assisted immersion freezing technology can solve the problems existing in the freezing process of aquatic products to some extent, providing support for the industrialization of aquatic product freezing technology. The ultrasonic assisted immersion freezing technology has certain shortcomings in terms of its mechanism of action, applicability, and attenuation in specific environment. It is necessary to further elaborate on its mechanism of action to provide support for the development of intelligent freezing equipment.

KEY WORDS: aquatic products; immersion freezing; ultrasound assistance; research progress

收稿日期：2023-09-19
基金项目：“十三五”国家科技支撑计划项目（2016YFD0400301）
*通信作者

随着人们健康意识的增强，高营养低脂肪的水产品逐渐受到消费者青睐，但由于水产品中的内源酶和微生物，为其贮藏保鲜带来不良影响，限制了水产及其制品的流通销售[1]。我国水产资源丰富，养殖和出口量居世界前列。相关资料显示，我国每年由于储运导致死亡和腐败的水产品占其总量的 1/10，其中的 36%被制成粉或动物饲料等，浪费极其严重，因此迫切需要利用高效的水产品保鲜技术保持水产品的鲜度品质，以减少其流通期间的品质劣变，提高利用率。目前，水产品的保鲜主要包括化学保藏、生物保藏和物理保藏等[2-4]。化学保藏操作方便，但存在化合物残留，易造成安全问题；生物保藏安全性高，但存在生物活性提取物结构和成分复杂、分离纯化工艺较复杂、成本高昂等问题；物理保藏安全性高，能有效抑制酶活性，减缓新陈代谢作用，从而有效保持水产品质，延长流通周期，近年来成为了国内外研究人员聚焦的热点[5]。

传统的物理保藏技术以冰温保鲜和冻藏为主，尽管可以保持水产品的品质，但较长的冷冻时间使得晶核形成周期长、晶核大、营养细胞内部组织破坏程度大、营养流失严重[6-7]，因此，改进冷冻技术和方法，提高冷冻速率对提高冷冻水产品品质至关重要。浸渍冷冻技术（Immersion Chilling and Freezing，ICF）是将食品置于低温冷冻液中实现速冻的加工技术，与传统冷冻技术相比，其具有高效低能的特点，并能有效提升水产品品质，在国内外广受好评[8-9]。食品的浸渍式冷冻过程最大的特征就是传热传质同时发生，它不仅导致热量迅速传递，同时也伴随着食品内部水分与溶液溶质的相互迁移，其过程如图 1 所示。食品在冻结过程中，其种类、形状、大小、成分组成等因素均会影响冻结速率。浸渍式冷冻技术能有效地提高食品的冷冻速率是因为冷冻液的传热系数高于空气几倍有余。在食品与冷冻液传热过程中，沿热流方向的主要热阻是边界层，其厚度越大，传热效果越差。因此，在浸渍冷冻过程中，可引入辅助技术，如高压、超声、电磁场和微波[10-12]等，从而提升冷冻速率，减小对水产品营养成分的破坏。其中发展最为迅速的是超声波辅助冷冻。超声的声学效应能促进冰晶成核，减少组织破坏引起的营养损失，更好地保持冷冻食品的组织结构，提升保存质量[13-14]。对超声辅助浸渍式速冻技术的保鲜机理和工作过程进行研究并不断优化，有利于更好地保持水产品的鲜度品质，延缓水产品流通期间的品质劣变，提升水产原料的利用率，也可为水产品物理保鲜技术的发展提供参考。本文针对水产品的超声辅助浸渍冷冻技术的研究现状，归纳总结了超声辅助浸渍冷冻技术的机理、实验装置及对水产品品质影响等方面的研究进展，旨在为水产品超声辅助浸渍冷冻加工产业化和冷链物流技术发展提供理论参考。

1　超声辅助浸渍冷冻技术机理

1.1　超声作用机理

超声辅助浸渍冷冻主要利用超声的空化和微射流效应提升水产品的冷冻速率、减小晶核规格和组织损伤，提高水产品保藏和解冻品质。超声是一种频率在 20 kHz 以上、超出人耳听觉极限的机械波，在传播过程中可以引起振动[15]。目前，常见的超声波分为高频低能和低频高能 2 类，高频低能超声波主要应用于食品的无损检测和品质控制，频率超过 100 kHz，但能量较低；低频高能超声频率介于 20~100 kHz，能量较高，主要应用于改善水产品性质等方面[16-18]。空化效应的产生源于超声在介质中传播时可以产生一种高频的机械压力，这种机械压力效应能够使介质中质点因振动而移位，进而在介质中形成高压区和负压区，超声作用会在直径为 1 μm 以下的气泡之间形成负压空化气泡，当超声功率未引起气泡破裂时，空化气泡形成微射流减少了水产品与介质的边界层阻力，提高了介质的传热效率，进而提高了冷冻效率；当超声功率高于气泡空化阈值时，剧烈的震动引起空化气泡的破裂，提高了过冷度、加快了二次成核的速度、减小了冰晶的尺寸[19-20]。冷冻时间的缩短、冰晶尺寸的减小能够降低冷冻对细胞组织造成的损伤，进而提升水产品贮藏品质。超声辅助浸渍冷冻过程中水产品与冷冻液的传热传质过程和超声辅助冷冻技术作用机理分别如图 1 和图 2 所示。

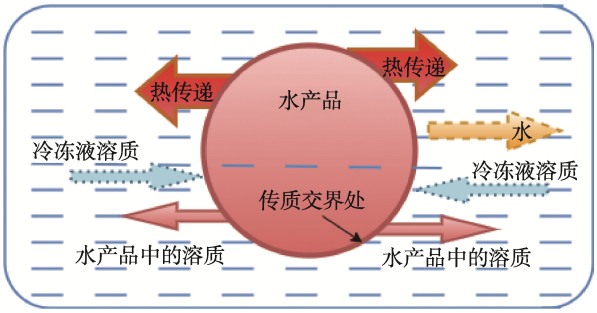


图 1　超声辅助浸渍冷冻过程中食品与冷冻液的传热与传质

Fig.1 Heat and mass transfer between foodstuffs and freezing liquid in immersion freezing processes

1.2　超声辅助对冰晶成核及生长的影响

1.2.1　对冰晶成核的影响

初次成核和二次成核是超声辅助成核的 2 个主要阶段。当温度达到成核温度时，开始初次成核，释放出大量潜热，超声的空化作用有助于过冷度的

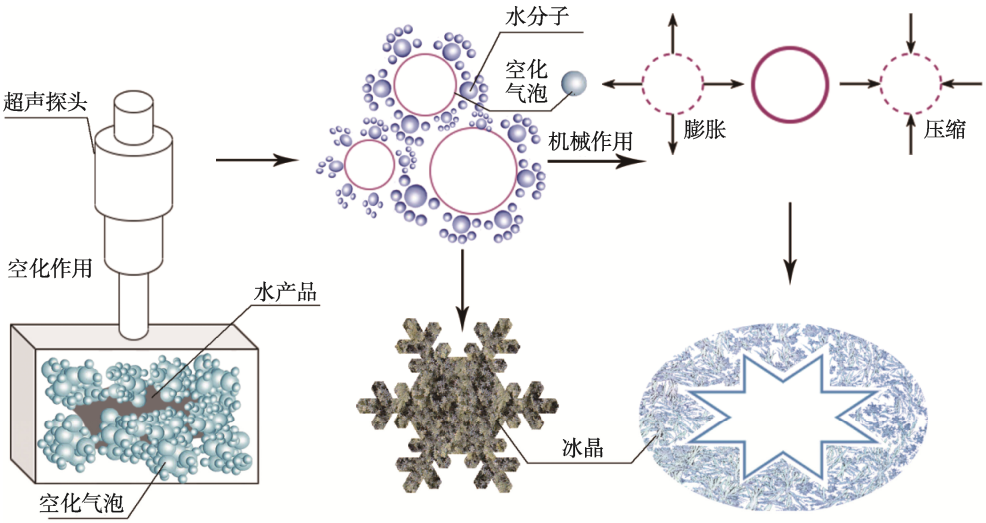


图 2　超声辅助冷冻技术作用机理[21]

Fig.2 Mechanism of ultrasound assisted freezing technology[21]

降低，从而驱动成核过程[21-22]；尺寸达到临界阈值的微气泡本身可充当冰核；稳定的空化气泡运动会导致微流和涡流，从而增强传热和传质，并有助于成核。在基于预先存在的冰晶的二次成核过程中，由于空化气泡的塌陷和剪切力，超声辐照可将这种预先存在的冰的树突分解为许多源自微流较小的碎片，导致产生更多的成核位点。

在无晶体溶液中形成新晶体的过程被称为初次成核。初次成核是冷冻效果和被冷冻食品质量的决定性因素[23]。成核过程自发随机，功率超声的加入能提高初次成核的确定性或可重复性。功率超声会引发空化气泡的塌陷，会显著提升细胞的局部压力和过冷度，导致晶核形成，同时还会控制水到冰的相变过程，提高过冷水中冰晶形成的可能性，而冰晶的重现程度可由超声强度控制[24-26]。冰晶的成核速率和数量与空化作用有关，超声辅助能够诱导细胞内外成核速率，并减小冰晶的尺寸分布[27-28]。吴宇桐等[29]认为超声作用下空化气泡破碎会使局部压力瞬间达到 5×10^6 Pa 以上，同时释放大量的热，引发溶液形成晶核。因此，超声辅助浸渍冷冻技术有利于晶核的快速形成，并可将冰枝晶分解成较小碎片，减少对水产品结构损伤，但诱导冰晶成核的机制还未明晰，成核过程可能存在多种机制的相互作用，有待进一步深入研究。

二次成核指在含有已有晶体的溶液中产生新的晶体，其可通过晶体作为模板形成新的晶体核，也可通过晶体破碎产生更多的成核位点，微射流作用是二次成核的主要诱因。超声的空化气泡产生的微射流可破坏枝晶，改变冰晶的整体生长模式，产生新的晶核，引起二次成核[30-31]。Kiani 等[32]和 Zhang 等[33]研究发现超声空化作用会引起气泡的扩散，导致气泡破碎而引起微射流，使溶液二次成核。分子偏析是超声诱导成核的另一种形式，冰晶成核的驱动力源自空化气泡周边的压力梯度，其间的时间差可由气泡塌陷引起的质量扩散时间决定。因此，2 种理论从不同的角度证实了超声辅助浸渍冷冻有利于冰晶的二次成核，主要由于超声对枝晶的分裂作用，被破碎的冰晶会在冷夜中促进形成新的晶核，但超声成核的机理仍未有明确阐述，还有待于深入研究。

1.2.2　超声辅助浸渍冷冻对晶体生长规律的影响

冰晶规格和分布规律是评价冷冻食品质量的重要参数，营养细胞中冰晶越细、分布越均匀，对细胞和组织的破坏越小，品质和营养保持得越好[34-35]。超声辅助冷冻具有诱导成核和控制冰晶生长的能力，两者取决于过冷程度。当在系统温度低于凝固点温度时施加功率超声，会形成许多原子核，且其只会长到有限大小。Sun 等[36]利用不同频率超声辅助浸渍冷冻技术对鲤鱼进行处理，表明 175 W 的超声功率下，鲤鱼组织的冰晶规格最小，组织细胞破坏程度最低。向迎春等[37]对比了–20 ℃下的冰箱冷冻、直接浸渍冷冻和超声辅助浸渍冷冻后的明虾，结果表明，超声辅助能够优化冰晶生长和调控，减小了冷冻引起的组织损伤。综上所述，超声诱导成核会生成较小的冰晶，降低冰晶的平均尺寸并增加其平均圆形度，优化冰晶的形态和分布。但是关于超声辅助浸渍冷冻对冰晶生长或晶体形态影响的研究成果相对较少，冷冻对象的组织结构不同，冰晶的形态和分布规律也不尽相同。因此，在后续的研究中，需要从多个角度进一步明晰超声辅助的作用机制，为实现工业生产提供理论依据。

1.2.3　超声辅助浸渍对冷冻速率的影响

冷冻速率是衡量水产品冷冻效果的重要参数。

相比于传统冷冻方式，快速冷冻可形成更小冰晶、缓解细胞脱水速率、保护组织结构，从而更好地保持水产品品质。叶剑等[38]、向迎春等[37]和刘宏影等[39]利用超声辅助浸渍冷冻技术分别对鲍鱼、明虾和海鲈鱼片进行了处理。结果发现超声辅助浸渍冷冻比直接浸渍冷冻的速度提升了 10 倍，比冰箱冷冻提升了 90.15%。超声辅助浸渍冷冻能够提升冷冻速度的主要原因在于晶核的形成速率和尺寸分布。通过 1.2.1 节和 1.2.2 节可知，超声的空化作用能够引起晶枝的破损，生成尺寸更小、分布更均匀的冰核，可以有效地提高冰晶的形成速率，进而提高冷冻速率。因此，超声辅助浸渍冷冻有利于提高冷冻速率，减少结晶对组织细胞的伤害，获得更好的组织结构，保持水产品的含水率和营养。

2　超声辅助浸渍冷冻装置

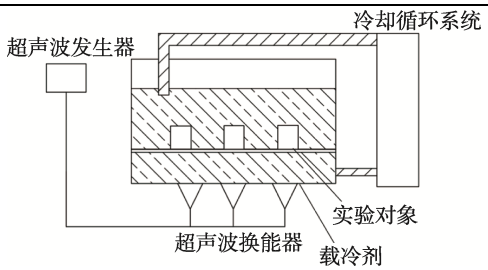
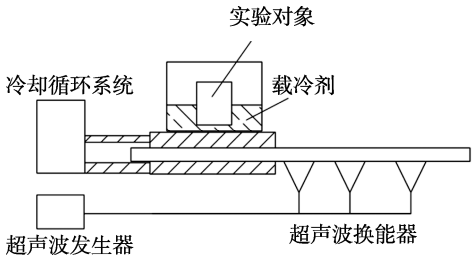
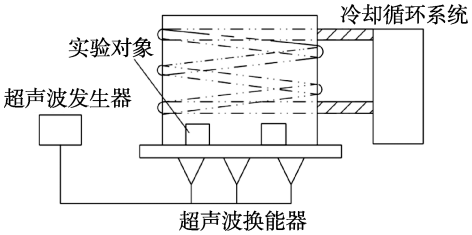
近年来，国内外对超声辅助浸渍冷冻装置的研究日益升温，常用的超声辅助浸渍冷冻设备根据浸渍方式的不同可分为全浸没式、半浸没式和非浸没式三大类。通常超声辅助浸渍冷冻装置由超声系统、冷却剂循环系统、制冷循环系统、温度检测系统和数据记录系统等几部分组成。超声系统通常由多个传感器组构成，这些传感器均匀地连接在冷冻槽底部，另一端则连接到发电机上。冷却液循环系统通过位于温度控制端的盘管泵送，并与压缩机相连的热交换器进行冷却和温度控制。温度检测系统通常与数据记录系统耦合，由热电偶探针和连接到计算机的数据记录器组成。常见的超声辅助冷冻装置结构及特点如表 1 所示。就超声辅助浸渍冷冻装置而言，全浸式辅助冷冻装置目前应用最为广泛，半浸没式和非浸没式超声辅助冷冻装置鲜有使用。Sun 等[40]在 180 W 超声辅助条件下对鲤鱼进行了全浸渍冷冻，研究结果表明，与传统冷冻和空气冷冻相比，超高压辅助全浸渍冷冻的鲤鱼组织中的冰晶更小，蛋白质稳定性更高，硫代巴比妥酸活性物和挥发性盐基氮总量较低，提高了鲤鱼在冷冻过程中的质量。

3　超声辅助浸渍冷冻对水产品品质的影响

超声辅助浸渍冷冻能缩短冷冻时间，形成小而均匀的冰晶，提升水产品的水分、颜色与质构等，削弱冰晶对蛋白质等营养物质组织结构的破坏程度，保持其品质。

表 1　常见超声辅助冷冻装置结构及特点[41]

Tab.1 Structures and characteristics of common ultrasound assisted freezing devices[41]

名称	结构示意图	特征
全浸没式超声辅助冷冻装置		应用最为广泛的超声辅助浸渍冷冻装置，适合于液体样品、固体样品和半固体样品
半浸没式超声辅助冷冻装置		半浸式冷冻装置是一个与超声换能器锦棉结合的金属板，容器内的样品与介质一起放置在平板上，改善超声在平板和容器间的传播
非浸没式超声辅助冷冻装置		样品与超声波辅助浸渍式冷冻设备直接接触，无需任何冷却剂浸没。避免了冷却液污染，但会导致超声波通过空气传播的能量损失

3.1　水分

水是决定水产品稳定性的关键成分，因为其分布和相互作用随水产品成分的不同而变化。水与其他组分的相互作用和键合也决定了不同温度下的水活性。水产品的含水量较高，以游离水、固定化水和结合水的方式存在。在冷冻储存过程中，由于水的渗透去除、冰晶对肌纤维的破坏、肌纤维蛋白的聚集等变化会引起水产品的质构、颜色、风味等发生变化，从而导致品质降低。超声辅助浸渍冷冻技术限制了水的流动，提高了冷冻速率，缩短了冷冻周期，减少了结合水的析出。空化作用减小了冰晶的尺寸和分布，改善了水产品中水分子的分布和迁移[42-43]，降低了冰晶对组织纤维的破坏，提升了水产品的品质。叶剑等[38]发现空气冷冻、浸渍冷冻后，鲩鱼的持水力有所降低，而超声辅助浸渍冷冻后鲩经过 12 周的储藏后鱼的持水力仍然维持得较好。说明，超声辅助能够在一定程度上弥补浸渍冷冻技术的短板，提升水产品品质。

3.2　质构

质构是表征水产品口感特征的重要指标之一，包括其硬度、咀嚼性、弹性等，真实反映了水产品的品质。水产品在冷冻过程中的冰晶大小、冷冻速率等工艺指标与水产品的质构有着紧密的联系。在冷冻过程中，冰晶的形成会破坏水产品的肌原纤维及结缔组织，从而引起质构的破坏。超声辅助浸渍冷冻技术能够提高冷冻速率、诱导晶核生长分布而形成更小且分布均匀的冰晶，减小由于冰晶的形成造成的水产品肌肉组织破坏程度，有利于水产品质构特性的保持。Ying 等[44]基于 Box-Behnken 优化了超声辅助浸渍冷冻工艺条件，在超声功率 180 W 下，中国对虾的纤维组织明显优于非超声冷冻的显微组织切片。Ma 等[45]研究了大黄鱼超声辅助冷冻的品质，结果表明处理后的样品质量参数和显微组织更接近新鲜样品，具有更明显的纹理特征和更强的持水能力。缓解了由于冷冻引起的解冻损失和烹饪损失，降低了大黄鱼的 K 值和硫代巴比妥酸值等，有效保持了大黄鱼品质。

3.3　色差

色差指 2 个试样在颜色知觉上的差异，它包括明度差、彩度差和色相差三方面。水产品在贮藏过程中，随着腐败的进行，体表的明度和色度会随之改变。因此，水产品的色差是消费者评价水产品新鲜度最直观的指标，也是刺激消费者购买欲望的直接因素。Shi 等[46]研究发现利用超声辅助冷冻技术处理的鲶鱼由于表面游离水的增加使鱼肉白度呈波动性增加，由于酶和氧气接触发生的脂质氧化使鱼肉从白色到微黄色变化的程度变得比较缓慢，有效地抑制了鱼肉颜色的变化。明度和亮度的变化与鱼肉含水量紧密联系，在储藏过程中，鱼肉会由于水分的损失影响其色泽，使鱼肉黯淡无光。因此，超声辅助浸渍冷冻技术在保持水产品水分方面的优势会减小其在流通和储藏方面的色差损失，但是否与冰晶分布和大小有关，还有待进一步研究。

3.4　蛋白质

水产品中的蛋白质含量丰富，还含有多种矿物质、氨基酸及维生素等营养物质，备受消费者的关注。由于水产品肉质含水量较高，容易引起蛋白质的变性，因此，在储藏和销售过程中受到了诸多限制。冷冻是当下最常见的储存方式，探究超声辅助浸渍冷冻对水产品蛋白质的影响，能够检验水产品在冻藏过程中的品质变化。孙协军等[47]研究了海鲈鱼片在超声辅助浸渍冷冻下的鱼肉蛋白质特性，结果表明，此方法能保持纤维蛋白的三级结构和品质。Yang 等[48]利用超声辅助浸渍冷冻技术对美洲石首鱼的品质和蛋白质氧化程度进行了分析。结果表明，利用超声辅助冷冻技术处理的石首鱼肌原纤维的氧化变性蛋白质在冷冻储存 90 d 后减少。此外，超声频率为 200 W 组的冷冻样本与其他组相比具有更高的蛋白质稳定性。因此，超声辅助浸渍冷冻能降低蛋白质的变性和结构破坏的程度，降低氧化程度，加速角状体的冷冻过程，保持其肌肉质量，提高蛋白的稳定性和完整性，使水产品纤维更加紧实，提升其口感并保持营养，减少自由水和结合水的流动性，保持组织细胞的含水量，提升加工品质。超声辅助能改善冷冻后水产品的品质和营养价值，其根本在于超声辅助对冰晶的成核作用。因此，对其作用机理的进一步探究，能实现超声辅助浸渍冷冻技术的工业化。

4　结语

超声辅助浸渍冷冻技术能加快晶核的形成、控制冰晶规格和分布、提高冷冻速度、减小组织损伤、最大程度保持水产品品质和营养价值。关于该技术在水产品中的应用和作用机制的研究也成为了研究热点，拥有广阔的应用前景，能为水产品加工产业发展和智能装备开发提供有效途径。已有研究成果表明超声辅助浸渍冷冻具有一定的优越性，但也存在着一定的技术缺陷：对脂肪含量比较高的海产品而言，超声的空化作用会引起局部压力和温度的增大，在水中生成大量自由基，

加速脂类物质的氧化变质；如何避免超声作为能量波，在传递过程中可能会出现的散射或衰减引起的作用减弱；当水产品中含有特殊结构时，超声作用可能会产生异味，影响水产品品质。综上所述，超声辅助浸渍冷冻技术的适用范围和技术缺陷尚未得到解决，作用机制也尚未明晰，需要在今后的研究中深入探究并解决。

参考文献：

[1] WU S L, KANG H B, LI D J. Research Status and Application Progress of Fresh-Keeping Technology of Aquatic Products[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2019, 47(22): 4-6.

[2] 谢晶，谭明堂，范敏浩. 冰晶的形成和影响因素及其对水产品品质的影响[J]. 粮食与油脂，2023，36(9): 1-6.
XIE J, TAN M T, FAN M H. Formation and Influencing Factors of Ice Crystals and Impact on the Quality of Aquatic Products[J]. Cereals & Oils, 2023, 36(9): 1-6.

[3] 吕任之. 浅谈我国水产品工业现状及发展趋势[J]. 广东蚕业, 2020, 54(4): 49-50.
LYU R Z. Discussion on the Present Situation and Development Trend of Aquatic Products Industry in China[J]. Guangdong Sericulture, 2020, 54(4): 49-50.

[4] 崔蓬勃，周剑，丁玉庭，等. 水产品物理保鲜技术的最新研究进展[J]. 浙江工业大学学报，2022，50(3): 341-348.
CUI P B, ZHOU J, DING Y T, et al. Latest Research Progress on Physical Fresh-Keeping Technology of Aquatic Products[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2022, 50(3): 341-348.

[5] 刘亚楠，李欢，蒋凡，等. 基于活性包装视角下的水产品保鲜机制研究进展[J]. 食品科学，2022，43(13): 285-291.
LIU Y N, LI H, JIANG F, et al. Progress in Research on the Preservation Mechanism of Aquatic Products from the Perspective of Active Packaging[J]. Food Science, 2022, 43(13): 285-291.

[6] 励建荣. 海水鱼类腐败机制及其保鲜技术研究进展[J]. 中国食品学报, 2018, 18(5): 1-12.
LI J R. Research Progress on Spoilage Mechanism and Preservation Technology of Marine Fish[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(5): 1-12.

[7] 李娜，孙敏，王春华，等. 水产品保鲜贮藏期间品质评价方式的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报，2022, 13(4): 1099-1105.
LI N, SUN M, WANG C H, et al. Research Progress on Quality Evaluation Indexes of Aquatic Products during Fresh-Keeping and Storage[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(4): 1099-1105.

[8] LEBAIL A, CHEVALIER-LUCIA D, MUSSA D M, et al. High Pressure Freezing and Thawing of Foods: A Review[J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(5): 504-513.

[9] CHENG X F, ZHANG M, XU B G, et al. The Principles of Ultrasound and Its Application in Freezing Related Processes of Food Materials: A Review[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, 27: 576-585.

[10] ORLOWSKA M, HAVET M, LE-BAIL A. Controlled Ice Nucleation under High Voltage DC Electrostatic Field Conditions[J]. Food Research International, 2009, 42(7): 879-884.

[11] KAKU M, KAMADA H, KAWATA T, et al. Cryopreservation of Periodontal Ligament Cells with Magnetic Field for Tooth Banking[J]. Cryobiology, 2010, 61(1): 73-78.

[12] XANTHAKIS E, LE-BAIL A, RAMASWAMY H. Development of an Innovative Microwave Assisted Food Freezing Process[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2014, 26: 176-181.

[13] ZHENG L Y, SUN D W. Innovative Applications of Power Ultrasound during Food Freezing Processes-A Review. Trends in Food Science & Technology, 17(1), 16-23[J]. Trends in Food Science & Technology, 2006, 17(1): 16-23.

[14] LI D M, ZHU Z W, SUN D W.. Effects of Freezing on Cell Structure of Fresh Cellular Food Materials: A Review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018: 46-55.

[15] 孙献坤，王庆玲，刘瑞，等. 超声波辅助冷冻技术及其对肉品品质影响的研究进展[J]. 食品科技，2022, 47(6): 153-158.
SUN X K, WANG Q L, LIU R, et al. Ultrasonic Assisted Freezing Technology and Its Effect on Meat Quality: A Review[J]. Food Science and Technology, 2022, 47(6): 153-158.

[16] IOANNIS S A, KONSTANTIONS V K, SMALIA G S. Ultrasounds in the Food Methods and Effects on Quality, Safety, and Organoleptic Characteristics of Foods: A Review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutri-

tion, 2017, 57: 109-128.

[17] VICENT V, NDOYE F T, VERBOVEN P, et al. Effect of Dynamic Storage Temperatures on the Microstructure of Frozen Carrot Imaged Using X-ray Micro-CT[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 246: 232-241.

[18] MARTÍNEZ-PADILLA L P, FRANKE L, XU X Q, et al. Improved Extraction of Avocado Oil by Application of Sono-Physical Processes[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 40: 720-726.

[19] 先兆君. 超声辅助冷冻对预制调理红糖馒头面团品质的影响及作用机制研究[D]. 合肥：合肥工业大学, 2021: 5-7.
XIAN Z J. Effect of Ultrasound-Assisted Freezing on Quality of Prepared Brown Sugar Steamed Bread Dough and Its Mechanism Investigation[D]. Hefei: Hefei University of Technology: 5-7.

[20] PAN N, DONG C H, DU X, et al. Effect of Freeze-Thaw Cycles on the Quality of Quick-Frozen Pork Patty with Different Fat Content by Consumer Assessment and Instrument-Based Detection[J]. Meat Science, 2021, 172: 108313.

[21] AGHAPOUR AKTIJ S, TAGHIPOUR A, RAHIMPOUR A, et al. A Critical Review on Ultrasonic-Assisted Fouling Control and Cleaning of Fouled Membranes[J]. Ultrasonics, 2020, 108: 106228.

[22] NAKAGAWA K, HOTTOT A, VESSOT S, et al. Influence of Controlled Nucleation by Ultrasounds on Ice Morphology of Frozen Formulations for Pharmaceutical Proteins Freeze-Drying[J]. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 2006, 45(9): 783-791.

[23] QIU S, CUI F C, WANG J X, et al. Effects of Ultrasound-Assisted Immersion Freezing on the Muscle Quality and Myofibrillar Protein Oxidation and Denaturation in Sciaenops Ocellatus[J]. Food Chemistry, 2022, 377: 131949.

[24] COMANDINI P, BLANDA G, SOTO CABALLERO M, et al. Effects of Power Ultrasound on Immersion Freezing Parameters of Potatoes[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2013, 18: 120-125.

[25] CHENG X F, ZHANG M, ADHIKARI B, et al. Effect of Ultrasound Irradiation on some Freezing Parameters of Ultrasound-Assisted Immersion Freezing of Strawberries[J]. International Journal of Refrigeration, 2014: 49-55.

[26] HICKLING R. Nucleation of Freezing by Cavity Collapse and Its Relation to Cavitation Damage[J]. Nature, 1965, 206: 915-917.

[27] QIU L Q, ZHANG M, CHITRAKAR B, et al. Application of Power Ultrasound in Freezing and Thawing Processes: Effect on Process Efficiency and Product Quality[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 68: 105230.

[28] PETZOLD G, AGUILERA J M. Ice Morphology: Fundamentals and Technological Applications in Foods[J]. Food Biophysics, 2009, 4(4): 378-396.

[29] 吴宇桐，崔梦晗，王宇琦，等. 超声辅助冷冻技术的作用机制及其对食品品质影响的研究进展[J]. 食品科学, 2018, 39(17): 275-280.
WU Y T, CUI M H, WANG Y Q, et al. Mechanism of Ultrasonic-Assisted Freezing Technique and Its Effect on the Quality of Frozen Foods: A Review[J]. Food Science, 2018, 39(17): 275-280.

[30] KIANI H, ZHANG Z H, SUN D W. Effect of Ultrasound Irradiation on Ice Crystal Size Distribution in Frozen Agar Gel Samples[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2013, 18: 126-131.

[31] CHOW R, BLINDT R, CHIVERS R, et al. A Study on the Primary and Secondary Nucleation of Ice by Power Ultrasound[J]. Ultrasonics, 2005, 43(4): 227-230.

[32] KIANI H, SUN D W. Water Crystallization and Its Importance to Freezing of Foods: A Review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2011, 22(8): 407-426.

[33] ZHANG X, INADA T, YABE A, et al. Active Control of Phase Change from Supercooled Water to Ice by Ultrasonic Vibration 2. Generation of Ice Slurries and Effect of Bubble Nuclei[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(23): 4533-4539.

[34] DELGADO A E, ZHENG L Y, SUN D W. Influence of Ultrasound on Freezing Rate of Immersion-Frozen Apples[J]. Food and Bioprocess Technology, 2009, 2(3): 263-270.

[35] 李晓燕，樊博玮，赵宜范，等. 超声辅助冷冻技术在食品浸渍式冷冻中的研究进展[J]. 包装工程, 2021, 42(11): 11-17.
LI X Y, FAN B W, ZHAO Y F, et al. Research Progress of Ultrasound-Assisted Freezing Technology in Food Immersion Chilling and Freezing[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(11): 11-17.

[36] SUN Q X, ZHAO X X, 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, 2019, 108(3): 106-112.

[37] 向迎春, 黄佳奇, 栾兰兰, 等. 超声辅助冻结中国对虾的冰晶状态与其水分变化的影响研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(2): 203-210.
XIANG Y C, HUANG J Q, LUAN L L, et al. Study on the Effect of Ultrasonic Assisted Freezing on the Ice Crystals and Water Changes in Penaeus Chinensis[J]. Food Research and Development, 2018, 39(2): 203-210.

[38] 叶剑, 林胜利, 戴璐怡, 等. 超声辅助浸渍冷冻对鲶鱼肉品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(16): 5193-5199.
YE J, LIN S L, DAI L Y, et al. Effects of Ultrasound-Assisted Immersion Freezing on the Muscle Quality in Miichthys Miiuy[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(16): 5193-5199.

[39] 刘宏影. 超声波辅助冷冻与低温速冻对海鲈鱼冰晶形成及品质特性的影响[D]. 锦州: 渤海大学, 2020.
LIU H Y. Effects of Ultrasonic-Assisted Freezing and Low-Temperature Quick Freezing on Ice Crystal Formation and Quality Characteristics of Sea Bass[D]. Jinzhou: Bohai University, 2020.

[40] SUN Q X, SUN F D, XIA X F, et al. The Comparison of Ultrasound-Assisted Immersion Freezing, Air Freezing and Immersion Freezing on the Muscle Quality and Physicochemical Properties of Common Carp (Cyprinus Carpio) during Freezing Storage[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 51: 281-291.

[41] FU X Z, BELWAL T, CRAVOTTO G, et al. Sono-Physical and Sono-Chemical Effects of Ultrasound: Primary Applications in Extraction and Freezing Operations and Influence on Food Components[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 60: 104726.

[42] CAO Y, ZHAO L Y, HUANG Q L, et al. Water Migration, Ice Crystal Formation, and Freeze-Thaw Stability of Silver Carp Surimi as Affected by Inulin under Different Additive Amounts and Polymerization Degrees[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 124(6): 107267.

[43] LIU H Y. Effcets of Ultrasound-Assisted Freezing and Quick-freezing on Ice Crystal and Formation and Quality Characteristics of Sea Bass (*Lateolabrax Japonicus*)[D]. Jinzhou: Bohai University, 2021: 16-38.

[44] YING Y B, XIANG Y C, LIU J L, et al. Optimization of Ultrasonic-Assisted Freezing of Penaeus Chinensis by Response Surface Methodology[J]. Food Quality and Safety, 2021, 5: 1-9.

[45] MA X, MEI J, XIE J. Effects of Multi-Frequency Ultrasound on the Freezing Rates, Quality Properties and Structural Characteristics of Cultured Large Yellow Croaker (Larimichthys Crocea)[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 76: 105657.

[46] SHI L, YIN T, XIONG G Q, et al. Microstructure and Physicochemical Properties: Effect of Pre-Chilling and Storage Time on the Quality of Channel Catfish during Frozen Storage[J]. LWT, 2020, 130 109606.

[47] 孙协军, 时广源, 魏雅静, 等. 超声波辅助冷冻对海鲈鱼肌原纤维蛋白理化性质的影响[J]. 食品与发酵科技, 2022, 58(4): 20-24.
SUN X J, SHI G Y, WEI Y J, et al. Effect of Ultrasonic Assisted Freezing on Physicochemical Properties of Sea Bass Myofibrin[J]. Food and Fermentation Sciences & Technology, 2022, 58(4): 20-24.

[48] YANG F, JING D T, DIAO Y D, et al. Effect of Immersion Freezing with Edible Solution on Freezing Efficiency and Physical Properties of Obscure Pufferfish (Takifugu Obscurus) Fillets[J]. LWT, 2019, 118(4): 108762.