

冰晶生长对冷冻水产品品质影响 及新型冷冻方式研究进展

罗江美¹, 赵茜^{1,2,3}, 赵健茹¹, 孙海涛^{2,4}, 邵信儒^{2,4}, 王超¹, 曹亚茹¹, 汪灵松¹, 韦凤举¹
(1. 通化师范学院食品科学与工程学院, 吉林通化 134000)(2. 通化师范学院长白山食用植物资源开发工程
中心, 吉林通化 134000)(3. 浙江工商大学食品与生物工程学院, 浙江杭州 310018)
(4. 吉林医药学院公共卫生学院, 吉林吉林 132013)

摘要: 冷冻技术在水产品保鲜方面应用广泛, 但水产品在冻结过程中受冰晶形成、晶体生长与冰晶重结晶的影响, 易造成细胞结构的破损, 导致水产品品质下降。为深入分析冰晶生长与水产品品质变化间的关系, 该文总结了冰晶生长对水产品的蛋白质变性、脂肪氧化、持水力、质构及感官特性影响, 综述了物理场辅助冻结及添加抗冻剂、重结晶抑制剂等减小冰晶尺寸的新方法, 为控制冰晶生长及提高冷冻水产品品质提供了理论参考。

关键词: 冰晶生长; 水产品; 冷冻; 品质; 新型冷冻方式

文章编号: 1673-9078(2024)02-366-373

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.2.1631

Research Progress on the Effect of Ice Crystal Growth on the Quality of Frozen Aquatic Products and Development of Innovative Freezing Methods

LUO Jiangmei¹, ZHAO Xi^{1,2,3*}, ZHAO Jianru¹, SUN Haitao^{2,4}, SHAO Xinru^{2,4}, WANG Chao¹,
CAO Yaru¹, WANG Lingsong¹, WEI Fengju¹

(1. College of Food Science and Engineering, Tonghua Normal University, Tonghua 134000, China)(2. Changbai Mountain
Edible Plant Resources Development Engineering Center, Tonghua Normal University, Tonghua 134000, China)
(3. School of Food Science and Biotechnology, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China)
(4. School of Public Health, Jilin Medical University, Jilin 132013, China)

Abstract: Freezing technology is widely used in the preservation of aquatic products. However, due to the influence of ice crystal formation, growth, and recrystallization during the freezing process, the cell structure is easily damaged, resulting in a decline in the quality of aquatic products. To analyze deeply the relationship between ice crystal growth and the quality changes of aquatic products, the effects of ice crystal growth on protein denaturation, fat oxidation, water-holding capacity, texture, and

引文格式:

罗江美, 赵茜, 赵健茹, 等. 冰晶生长对冷冻水产品品质影响及新型冷冻方式研究进展[J]. 现代食品科技, 2024, 40(2): 366-373.

LUO Jiangmei, ZHAO Xi, ZHAO Jianru, et al. Research progress on the effect of ice crystal growth on the quality of frozen aquatic products and development of innovative freezing methods [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(2): 366-373.

收稿日期: 2022-12-30

基金项目: 吉林省科技发展计划项目 (YDZJ202101ZYTS091); 吉林省大学生创新创业训练计划项目 (S202110202019); 通化师范学院学生创新训练项目 (CS2021114)

作者简介: 罗江美 (2000-), 女, 本科, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: 1500940294@qq.com

通讯作者: 赵茜 (1994-), 女, 博士研究生, 研究方向: 食品质量与安全, E-mail: zhaoxi2347@163.com

sensory characteristics of aquatic products are summarized in this paper. Some new methods to reduce the size of ice crystals such as physical field-assisted freezing, and addition of antifreezing and recrystallization inhibitors, are reviewed, which provides a theoretical reference for controlling the growth of ice crystals and improving the quality of frozen aquatic products.

Key words: ice crystals growth; aquatic products; freezing; quality; innovative freezing methods

我国是水产品大国, 2021 年全国水产品总量达 6 690.29 万 t, 连续多年位居世界首位^[1]。冷冻处理能延长水产品货架期, 最大程度保留水产品的鲜度和营养价值, 其是迄今为止最常用的水产保鲜方法。然而, 水产品在冻藏过程中, 由于受冰晶的形成及重结晶影响, 品质劣变不可避免^[2]。在冷冻过程中, 水产品中的水分发生相变转变成冰晶的过程是实现冷冻的关键环节, 但在此阶段显著影响细胞完整性, 导致细胞结构受损, 造成品质劣变^[3]。冻结水产品品质在很大程度上取决于其形成冰晶的体积、尺寸和所处的位置状态。冷冻及冻藏期间, 由于冷冻温度的波动、贮藏存放时间的长短等因素综合作用, 冻结后的水产品可能会出现反复冻融的情况。随着冻融次数的增加, 冰晶尺寸进一步扩张、产生重结晶, 加剧肌纤维的损伤, 水产品品质显著降低^[4-6]。因此, 分析水产品冷冻过程中冰晶的形成及变化, 研究如何控制冰晶的生长及重结晶现象, 进而延缓水产品品质降低, 是冷冻水产品保鲜的重要内容之一。为了深入研究水产品冷冻过程中受到冰晶生长所带来的品质变化及有效的冰晶生长调控手段, 本文综述了冰晶对水产品贮藏期间品质变化的影响, 从新型冷冻方式及添加外源物质角度总结了水产品贮藏期间冰晶的控制措施, 对冰晶的生长观测及动力学冷冻数值模拟的未来发展进行了展望, 旨在为进一步优化水产品冻结方式、改善冰晶关联的水产品品质控制提供理论参考。

1 冰晶生长对水产品贮藏期间品质变化的影响

水产品中冰晶的形成过程一般包括冰晶核的形成与晶体的生长两个过程^[7]。冰晶的形成代表样品中的水分子发生转为冰的相变, 该过程是决定水产品冻藏品质的关键。在冷冻过程中, 冰晶体的生长具有一定规律。Nakazawa 等^[8]研究指出, 晶核形成到晶体生长的整个过程(如图 1)是食品冷冻最明显、最直接的结果, 这种不可避免的过程是引起冷

冻食品品质劣变、产生汁液流失的主要原因。在迅速冷冻的情况下, 样品中会快速形成大量的晶核, 随着晶核数增多, 最终生成大量小冰晶。然而, 在缓慢冷冻条件下, 形成的晶核数量较少, 伴随冷冻过程的持续深入, 最终形成体积较大、形状不规则的大冰晶, 直接影响产品的品质, 容易造成颗粒状的口感和质地^[2]。

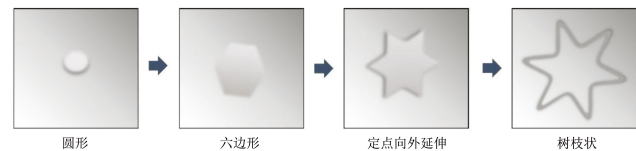


图 1 冰晶体的生长过程

Fig.1 The growth of ice crystals

1.1 冰晶生长对水产品蛋白质冷冻变性的影响

在水产品冷冻的初始阶段, 随着冷冻时间的延长, 组织中的游离水比结合水先冻结, 还未冻结的水分子会慢慢在冰晶上汇合, 结合水分子数量降低, 产生内部应力, 导致蛋白质分子的变性。其中, Qiu 等^[10]研究美国红鱼的冷冻过程发现, 经过慢速空气冻结的鱼片中冰晶体积较大且形状不均匀, 导致肌原纤维蛋白降解程度大, 肌原纤维小片化指数明显升高; Li 等^[11]研究冷冻过程中鲤鱼品质变化时得出, 冷冻处理导致蛋白质聚集和机械损伤, 引起蛋白质氧化和降解现象。尤其在慢速冷冻处理的过程当中, 聚集的体积大、形状不规则的冰晶对细胞结构造成破坏, 导致细胞调节功能丧失, 解冻以后的结合水和游离水无法回到原来位置, 使复水性降低, 加剧了水产品蛋白质的变性。

1.2 冰晶生长对水产品脂肪氧化的影响

冷冻过程中, 温度持续下降使部分水分冷冻成冰, 但在还未冻结的水分作用下, 肌肉组织会继续进行生化反应。此外, 贮藏期间水产品的温度波动现象导致冰晶分布和形态发生变化, 引起的细胞破裂会释放血红素等促氧化物质, 进而导致脂肪氧化现象^[12]。其中, 姜晴晴等^[13]研究表明, 在反复冻融时, 在氧化酶作用下带鱼大冰晶的产生及冰晶再

结晶增加了脂肪氧化的概率；Shi等^[14]研究罗非鱼冷冻过程中的品质变化指出，冰晶作用下肌肉细胞完整性被破坏，导致脂肪酶、蛋白酶和核酸酶的释放，加速了脂肪氧化过程；Sun等^[15]研究不同冷冻方式对鲤鱼肌肉质量和物理化学性质时也指出，超声辅助冻结形成的形状较小、体积较为规则的冰晶对肌肉组织的影响更小，样品的硫代巴比妥酸值更低。由此可见，冰晶生长对水产品脂肪氧化的影响主要表现在脂肪氧化相关酶系的影响，及促氧化物质的产生。而采取有效措施控制冰晶的生长，能够从调节酶及促氧化物质等角度为水产品的冷冻保藏工艺及技术方面的深入研究提供理论依据。

1.3 冰晶生长对水产品持水性的影响

在水产品的冷冻贮藏过程中，肌肉组织中的水分以冰晶状态存在，有效减缓其内部生化反应和微生物活动，但冰晶的生长及重结晶现象会对肌肉组织造成损伤，影响肌肉组织的持水性^[16]。其中，Liu等^[17]研究指出冰晶的形成破坏了鳙鱼鱼片细胞膜和细胞器膜的完整性，解冻后引起水分及可溶性物质的损失；Chen等^[18]研究低温速冻和超声波辅助冷冻对鲈鱼冷冻贮藏品质的影响时指出，-40℃超声辅助冷冻的样品冰晶更小，持水性更高，显著减少了解冻和蒸煮损失；Diao等^[19]研究浸没冻结方法对草鱼持水力、冰晶和水分迁移的影响时发现，液体冷冻样品细胞内冰晶更小、更规则，显著减少水分在冷冻贮藏过程中的迁移。在快速冷冻的情况下，样品中会快速形成大量晶核，最终生成大量小冰晶，而缓慢冷冻下形成的晶核数量较少，冰晶体积较大、形状不规则，直接影响产品的品质，易造成产品颗粒状的口感和质地。鉴于冰晶生长对持水性的影响，需要在冷冻过程中控制冰晶形成的大小和体积，以最大程度减轻冰晶生长引起的汁液流失及可溶性物质的损失。

1.4 冰晶生长对水产品质量特性的影响

冷冻过程中水产品质量特性的变化主要受冰晶生长及其重结晶过程的影响。冰晶的形成使组织内的水分降低，对组织及细胞产生伤害，细胞间隙增大，因此降低肌肉的弹性，口感变差。其中，Yang等^[20]比较冰晶、内源性蛋白酶和氧化作用在暗纹东方鲀鱼片冻藏软化中的影响，结果发现冰晶是造成其鱼片肉质软化的主导性因素；Yang等^[21]观察暗纹河豚鱼片在不同冷冻条件下的结构变化，发现液

氮和多元冷冻液处理的样品横截面较平整，形成的冰晶更细小均匀，细胞损伤更小，质地特征保持较好；Tan等^[22]研究温度波动条件对大黄鱼鱼片冰晶生长和再结晶的影响，指出冷冻处理下样品中冰晶的生长造成了细胞机械损伤，进而引起了大黄鱼肌肉组织结构的改变。冻藏过程中冰晶的大小和分布影响着水产品肌纤维的完整性，组织细胞间隙也会随着冰晶生长逐步扩大，引起鱼片的软化。因此，对冷冻水产品质量特性的保持，可以从控制冰晶生长过程角度着手，有效抑制冰晶生长及其重结晶过程，以最大程度保持水产品品质。

1.5 冰晶生长对水产品感官特性的影响

由冰晶所导致的组织破坏，冷冻过程中物理及化学性质改变，冰晶生成引起的组织液的溶解度增大，都是导致冷冻水产品色泽加深的重要原因。其中，Kono等^[23]研究冷冻过程中冷冻速度、冰晶大小和鲑鱼表面颜色之间的关系，发现冻结速率快，样品冰晶尺寸的减小， L^* 值增大， a^* 值和 b^* 值减小，表面颜色逐渐变浅；Cartagena等^[24]对冷冻贮藏过程中金枪鱼质量变化的研究发现，冷冻处理后鱼肉的质地和颜色发生明显变化。除色泽外，冷冻过程的冰晶形成和冰晶生长也影响脂质氧化及多不饱和脂肪酸的降解过程，引起水产品的风味变化。Yu等^[25]研究冰晶对冷冻暗纹东方鲀贮藏过程中风味特征的影响指出，细小冰晶减少了鱼片中次黄嘌呤、三甲胺和腐胺等产异味化合物的积累，液氮冷冻的细小冰晶对鱼片冻藏过程中的风味流失起显著保持作用。冰晶生长对冷冻水产品色泽、气味等感官品质产生的不良影响，影响消费者接受度。采取合适的方式控制冰晶生长，延缓水产品蛋白质冷冻变性、脂肪氧化、持水性、质构特性及感官特性的变化逐渐成为水产品冷冻相关研究的重要内容。

2 新型冷冻方式对冰晶生长的调控

水产品在冷冻和冻藏过程中，冰晶的生长导致其品质下降。传统冰晶控制措施主要包括降低冷冻温度和提高冷冻速度。随着温度的降低，冻结过程中冰晶形成所需时间缩短，更易产生较小且匀称的晶体。低温可以抑制酶活性，更利于水产品保持良好的质地性能，可以最大限度地减少营养损失。近年来，随着机械设备和理论研究的不断发展与深入，新型辅助冻结技术和外源物质辅助提高水产品品质得到广泛关注。研究表明物理场辅助冻结方法

应用于水产品冷冻,可缩短冻结时间,提高冻结速率,减小冰晶体积,最大限度减少营养损失,更好地保持产品品质^[26]。另外,为减少冰晶生长和重结晶对水产品的影响,近年来天然低温保护剂引起广泛关注,并被应用于冷冻食品工业中以克服冻害^[2]。如天然多糖,其流变学特性和抗氧化活性具有低温稳定作用,已被证明能抑制冰晶的生长,在保持食

品冷冻品质方面潜力巨大^[27]。表1总结了新型冷冻方式的作用机制及对水产品品质的调控效果,可以看出新型辅助冻结方式及添加外源物质主要从促进冰核形成、抑制冰晶体生长及重结晶现象等方面对典型水产品的冷冻品质保持起到了显著的调控作用,通过上述方法控制冻结期间冰晶的形成和分布对提高冷冻水产品的质量意义重大。

表1 新型冷冻方式的作用机制及对水产品品质的调控效果

Table 1 The mechanism of the innovative methods and the regulation effect on the quality of aquatic products

冻结技术	作用机制	处理对象	关键调控效果	参考文献
超声波辅助冻结	空化气泡诱导冰晶成核,微射流效应破碎大冰晶,促进冰晶生成	草鱼、鲤鱼、对虾	显著提高冷冻速率,冰晶均匀,对肌肉组织破坏更小	[28-31]
微波辅助冻结	微波诱导水分子偶极旋转,摩擦热导致的冰晶融化及再生	肉类	显著减小冰晶尺寸,提高冷冻效率	[32,33]
高压辅助冻结	压力改变水与冰晶间的相变转化	鳕鱼、对虾	有效保持产品的色泽和组织结构,形成的冰核均匀,冰晶尺寸较小	[34-37]
射频辅助冻结	促进水分子偶极旋转,使冻结点降低,促使冰晶形成及冰晶裂解	虹鳟鱼	冰晶尺寸较小,样品肌肉组织的水分损失显著降低	[38,39]
添加外源物质	降低冰点、抑制成核、抑制冰晶的重结晶	鲢鱼、带鱼、大黄鱼、对虾	显著抑制冰晶的生长,减缓蛋白质及脂质氧化进程	[40-47]

2.1 超声波辅助冻结法

超声波产生的空化气泡能促进水产品冻结过程中初级冰晶的形成,空化气泡破裂产生的微射流,可促进大冰晶破碎成分布更均匀的小冰晶,减小冰晶对食品品质的影响^[28]。其中,Shi等^[29]研究超声波处理对草鱼理化性质及显微结构的影响发现,超声处理下冷冻速率更高,冰晶所造成的草鱼的机械损伤和解冻损失更小;向迎春等^[30]研究了超声辅助冻结中虾的冰晶状态与水分变化,发现超声作用下样品只需130 s即可通过最大冰晶生成带,且与传统冷冻方式相比,超声波辅助冻结冷冻速度更快,并且对组织的破坏力极小。虽然超声波辅助冻结法可以促进晶核形成和较小冰晶的均匀分布,但超声条件如果控制不当仍会影响食品质量。Sun等^[31]研究了超声辅助冷冻对鲤鱼冻结时间的影响,发现随着超声功率的增加(125、150、175、200、225 W)鱼片相变时间先缩短后延长,175 W超声处理时的相变时间最短,过高的超声功率延长了样品冻结过程通过最大冰晶生成带的时间,影响了鱼肉的品质。此外,超声波处理时间是影响冷冻过程的一个重要因素,在载冷剂中施加超声时,部分振动产生的能量被载冷剂持续吸收转化为热能,处理时间过长会导致冷冻速率降低^[27]。因此,研究适用

于不同类型、重量和尺寸的水产品的超声波功率,并扩大超声波冷冻技术在水产品中的应用也是超声波辅助冻结的重要发展方向。

2.2 微波辅助冻结法

微波辅助冻结在冷冻和微波辐射的作用下影响冰晶成核和晶体增长,已被研究指出是减小冰晶尺寸的可能方法。微波应用于冻结的机制是微波诱导水分子偶极旋转产生摩擦热,产生的摩擦热在冰晶成核和晶体生长过程中导致冰晶瞬间反复融化和再生,从而阻碍冰晶体的进一步生长^[32]。Sadot等^[33]研究发现,微波辅助提供的能量是影响冰晶尺寸的关键因素,辅助冻结的方式更利于获得尺寸较小的冰晶。冰晶尺寸越小,对细胞造成的机械损伤越小,更利于保持细胞完整性和冻结水产品品质。Xanthakis等^[32]研究指出与微波能量的冷冻辅助相比,传统冷冻方式形成的冰晶尺寸较大和肌肉微观结构的损伤较高,而微波辅助冻结下样品平均冰晶尺寸可降低62%。目前,微波辅助冷冻仍处于研究阶段,针对不同水产品原料的微波功率、冻品质量变化的分析对物理场辅助冷冻技术的发展具有重要意义。

2.3 高压辅助冻结法

超高压辅助冷冻主要通过调节使用压力的方式

使冰点下降,改变水与冰晶之间的相变转化,形成细小且均匀分布的胞内冰晶,对保持水产品的质量具有一定优势^[34]。高压辅助冻结法一般在200~400 MPa下对食品进行冷冻处理,其中Pita-Calvo等^[35]研究发现鳕鱼高压辅助冷冻处理,对鱼片色泽和组织结构起到了较好的保持作用;Su等^[36]比较虾肉在压力辅助冻结和传统冻结时冰晶的等效直径和横截面积,结果表明相比压力辅助冻结,传统冻结处理后冰晶的尺寸更大,纹理外观的损坏更为严重。高压辅助冻结处理能在水产品中促进形成均匀的冰核,减小冰晶尺寸,然而压力超过细胞耐受性,则导致高压下蛋白质、脂质的氧化以及细胞失活^[37]。因此,为拓宽高压辅助冻结技术在水产品冷冻加工中的应用,其作用的压力大小范围和施加时间等要素有待深入探讨。

2.4 射频辅助冻结法

射频辅助冻结在冷冻食品中的运用,能吸引水分子偶极旋转,使冻结点降低,促使更多冰晶形成,并将最开始的冰晶裂解为多个细小冰晶^[38]。其中,Hafezparast-Moadab等^[39]利用射频辅助冷冻虹鳟鱼,发现射频辅助冷冻法不仅冻结速率很快,且能有效减小冰晶大小,对保持其色泽、质构及新鲜度起到重要作用;Anese等^[38]研究了射频技术在食品冷冻中的应用前景,射频低温样品的解冻损失远低于空气和低温冻结样品的解冻损失,更少的细胞间隙和细胞破裂被观察到,使组织呈现出更好的细胞结构,射频样品的冰晶较小,且主要位于细胞内水平。在冷冻过程中借助于控制冰晶行为的物理场辅助技术,已经提出了一些新兴的方法来调节冰核和冰晶生长。包括超声波辅助冻结、微波辅助冻结、高压辅助冻结、射频辅助冻结等技术,能够抑制冰晶生长及重结晶,从而更好地控制冰晶的均匀分布。然而,物理场辅助冷冻技术在水产品冷冻行业的实际应用中,仍需要针对不同类别水产品冷冻关键环节、技术因素、设备更新、成本调控等方面不断改进。

2.5 添加外源物质

除了物理场辅助冷冻外,近年来,抗冻保护剂及重结晶抑制剂的深入研究也对冰晶引起的水产品损伤起到了较好的抑制调控作用。其中,Cao等^[40]研究不同添加量和聚合度下菊粉对鲢鱼鱼糜水分迁移、冰晶形成及冻融稳定性的影响,发现菊

粉的添加能够减小组织中冰晶的生长,并且对保水性能和质构特性起到了较好的保持作用,指出菊粉在冷冻鱼糜工业中具有作为冷冻保护剂的潜力;Damodaran等^[41]研究发现鱼明胶水解物多肽具有抑制冰晶生长的作用;Zhang等^[42,43]研究发现海藻糖和褐藻胶寡糖能够抑制虾体冰晶生长和再结晶,卡拉胶寡糖和低聚木糖也能够减缓大冰晶对肌肉组织造成的损害;栾兰兰^[44]研究冷冻带鱼冻藏过程中的品质变化发现,壳寡糖作为抗冻剂对冰晶生长的抑制和抗冻保水作用明显;Tan等^[22]研究指出加入纤维素二糖和羧基化纳米纤维素新型冷冻保护剂对冷冻大黄鱼的组织结构起到了保护作用。除物理增强冷冻方法外,抗冻蛋白是一种基于生化方法的技术^[45],也有利于提高冷冻食品质量。抗冻蛋白可以通过降低冰点、抑制成核等过程控制冰晶的大小,以实现保护冷冻水产品的组织免受冷冻损伤的目的^[46]。Nian等^[47]研究发现鲱鱼抗冻蛋白与壳聚糖磁性纳米的结合可减少冰晶引起的真鲷肌肉组织的机械损伤,减小鱼肉的蛋白质和脂质氧化,减小蛋白构象变化。抗冻保护剂、重结晶抑制剂及抗冻蛋白的研发与应用,能有效抑制冰晶生长和重结晶引起的水产品肌原纤维变性和组织结构破坏,深入的开发及机理研究能对水产品的品质控制产生更为深远的影响。

3 总结与展望

水产品冷冻过程中容易受到冰晶生长带来的机械损伤,主要影响蛋白质、脂质、持水性、质构特性及色泽、气味等感官品质变化,造成贮藏过程中品质劣变,营养价值降低。为了更好地控制冰晶形成所带来的品质变化,提高产品的货架期,需要不断优化现有冻结方式和开发新型冻结技术。新型辅助冷冻方式包括超声波、高压、微波、射频等辅助或加速冷冻过程形成更小的冰晶体,提高冷冻速度,显著减小冰晶对水产品造成的损伤,对保持冷冻水产品质量具有一定的潜力。然而,目前这些技术中的大多数仍处于实验阶段,尚需要大量的工作来探索机制,优化技术参数,以实现在冷冻水产品中的工业应用。抗冻保护剂及重结晶抑制剂在一定程度上能够抑制冰晶生长和重结晶引起的水产品肌原纤维变性和组织结构破坏,但对于抗冻剂及重结晶抑制剂的作用机理,适宜添加量,新成分研发等方面的研究仍有待深入探索。随着机械的进步与科技的发展,显微镜观测技术、光谱成像技术、动力

学模拟技术的不断深入与完善,使水产品冰晶的原位检测、精准预测成为现实。采用动力学模拟预测冰晶结构,辅以显微镜、光谱技术检测,可提供更丰富的冰晶信息,有助于深入了解和调控冰晶形成及重结晶现象,多角度技术融合是未来获取冰晶信息的重要趋势。在这些冷冻、检测及模拟技术的研究中,进行参数的确定和成本的控制也是实现其在水产品行业应用的关键。与此同时,诸多新技术、新手段的结合,不断明确技术的适用场景及优化使用效果,提高水产品的品质,也一定会对冷冻水产品行业发展产生深远、积极的影响。

参考文献

- [1] 农业农村部渔业渔政管理局,全国水产技术推广总站,中国水产学会. 2021中国渔业统计年鉴[M].北京:中国农业出版社,2022.
- [2] TIAN Y, ZHU Z, SUN D W. Naturally sourced bio-substances for regulating freezing points in food researches: Fundamentals, current applications and future trends [J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 95: 131-140.
- [3] ZHU Z, ZHOU Q, SUN D W. Measuring and controlling ice crystallization in frozen foods: A review of recent developments [J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 90: 13-25.
- [4] SYAMALA DEVI R M, MANAHILOH K N, MUHUNTHAN B, et al. Understanding the influence of state/phase transitions on ice recrystallization in Atlantic salmon (*Salmo salar*) during frozen storage [J]. Food Biophysics, 2012, 7(1): 57-71.
- [5] NDOYE F T, ALVAREZ G. Characterization of ice recrystallization in ice cream during storage using the focused beam reflectance measurement [J]. Journal of Food Engineering, 2015, 148: 24-34.
- [6] ULLAH J, TAKHAR P S, SABLANI S S. Effect of temperature fluctuations on ice-crystal growth in frozen potatoes during storage [J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 59(2): 1186-1190.
- [7] ZHU S, YU J, CHEN X, et al. Dual cryoprotective strategies for ice-binding and stabilizing of frozen seafood: A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 111: 223-232.
- [8] NAKAZAWA N, OKAZAKI E. Recent research on factors influencing the quality of frozen seafood [J]. Fisheries Science, 2020, 86(2): 231-244.
- [9] 何立群,张永锋,罗大为.生命材料低温保护剂溶液二维降温结晶过程中的分形特征[J].自然科学进展,2002, 11:49-53.
- [10] QIU S, CUI F, WANG J, 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.
- [11] LI F, WANG B, KONG B, et al. Decreased gelling properties of protein in mirror carp (*Cyprinus carpio*) are due to protein aggregation and structure deterioration when subjected to freeze-thaw cycles [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 97: 105223.
- [12] 杜宇凡,姜晴晴,施文正,等.冷冻水产品脂肪和蛋白质氧化及其控制措施研究进展[J].食品工业科技,2022, 43(6): 429-435.
- [13] 姜晴晴,邵世奇,陈士国,等.冻融循环对带鱼蛋白质性质及肌肉品质的影响[J].中国食品学报,2016,16(4):122-129.
- [14] SHI Y, WEI P, SHI Q, et al. Quality changes and deterioration mechanisms in three parts (belly, dorsal and tail muscle) of tilapia fillets during partial freezing storage [J]. Food Chemistry, 2022,385(15): 132503.
- [15] SUN Q, SUN F, XIA X, 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.
- [16] ANDERSSSEN K E, SYED S, STORMO S K. Quantification and mapping of tissue damage from freezing in cod by magnetic resonance imaging [J]. Food Control, 2021, 123: 107734.
- [17] LIU Y, ZHANG L, GAO S, et al. Proteomic analysis of exudates in thawed fillets of bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*) to understand their role in oxidation of myofibrillar proteins [J]. Food Research International, 2022, 151: 110869.
- [18] CHEN X, LIU H, LI X, et al. Effect of ultrasonic-assisted immersion freezing and quick-freezing on quality of sea bass during frozen storage [J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 154: 112737.
- [19] DIAO Y, CHENG X, WANG L, et al. Effects of immersion freezing methods on water holding capacity, ice crystals and water migration in grass carp during frozen storage [J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 131: 581-591.
- [20] YANG F, JING D, YU D, et al. Differential roles of ice crystal, endogenous proteolytic activities and oxidation in softening of obscure pufferfish (*Takifugu obscurus*) fillets during frozen storage [J]. Food Chemistry, 2019, 278: 452-459.
- [21] YANG F, JING D, DIAO Y, et al. Effect of immersion freezing with edible solution on freezing efficiency and physical properties of obscure pufferfish (*Takifugu obscurus*)

- fillets [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 118: 108762.
- [22] TAN M, DING Z, YANG D, et al. The quality properties of frozen large yellow croaker fillets during temperature fluctuation cycles: improvement by cellobiose and carboxylated cellulose nanofibers [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 194: 499-509.
- [23] KONO S, KON M, ARAKI T, et al. Effects of relationships among freezing rate, ice crystal size and color on surface color of frozen salmon fillet [J]. Journal of Food Engineering, 2017, 214: 158-165.
- [24] CARTAGENA L, PUÉRTOLAS E, MARAÑÓN I M. Evolution of quality parameters of high pressure processing (HPP) pretreated albacore (*Thunnus alalunga*) during long-term frozen storage [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 62: 102334.
- [25] YU D, JING D, YANG F, et al. The factors influencing the flavor characteristics of frozen obscure pufferfish (*Takifugu obscurus*) during storage: Ice crystals, endogenous proteolysis and oxidation [J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 122: 147-155.
- [26] ZHAN X, SUN D W, ZHU Z, et al. Improving the quality and safety of frozen muscle foods by emerging freezing technologies: A review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 58(17): 2925-2938.
- [27] LU N, MA J, SUN D W. Enhancing physical and chemical quality attributes of frozen meat and meat products: Mechanisms, techniques and applications [J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 124: 63-85.
- [28] SIREESHA T, GOWDA N A N, KAMBHAMPATI V. Ultrasonication in seafood processing and preservation: a comprehensive review [J]. Applied Food Research, 2022, 2(2): 100208.
- [29] SHI Z, ZHONG S, YAN W, et al. The effects of ultrasonic treatment on the freezing rate, physicochemical quality, and microstructure of the back muscle of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 111: 301-308.
- [30] 向迎春. 超声辅助冻结中国对虾的组织冰晶状态及其品质变化的影响研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [31] SUN Q, ZHAO 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-Food Science and Technology, 2019, 108: 106-112.
- [32] 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.
- [33] SADOT M, CURET S, CHEVALLIER S, et al. Microwave assisted freezing part 2: Impact of microwave energy and duty cycle on ice crystal size distribution [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 62: 102359.
- [34] TIRONI V, DE LAMBALLERIE M, LE-BAIL A. Quality changes during the frozen storage of sea bass (*Dicentrarchus labrax*) muscle after pressure shift freezing and pressure assisted thawing [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2010, 11(4): 565-573.
- [35] PITA-CALVO C, GUERRA-RODRÍGUEZ E, SARAIVA J A, et al. High-pressure processing before freezing and frozen storage of European hake (*Merluccius merluccius*): effect on mechanical properties and visual appearance [J]. European Food Research and Technology, 2018, 244(3): 423-431.
- [36] SU G, RAMASWAMY H S, ZHU S, et al. Thermal characterization and ice crystal analysis in pressure shift freezing of different muscle (shrimp and porcine liver) versus conventional freezing method [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2014, 26: 40-50.
- [37] CARTAGENA L, PUÉRTOLAS E, MARAÑÓN I M. Impact of different air blast freezing conditions on the physicochemical quality of albacore (*Thunnus alalunga*) pretreated by high pressure processing [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 145: 111538.
- [38] ANESE M, MANZOCCO L, PANOZZO A, et al. Effect of radiofrequency assisted freezing on meat microstructure and quality [J]. Food Research International, 2012, 46(1): 50-54.
- [39] HAFEZPARAST-MOADAB N, HAMDAMI N, DALVI-ISFAHAN M, et al. Effects of radiofrequency-assisted freezing on microstructure and quality of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillet [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018, 47: 81-87.
- [40] CAO Y, ZHAO L, HUANG Q, 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, 2022, 124: 107267.
- [41] DAMODARAN S, WANG S Y. Ice crystal growth inhibition by peptides from fish gelatin hydrolysate [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 70: 46-56.
- [42] ZHANG B, ZHAO J, CHEN S, et al. Influence of trehalose and alginate oligosaccharides on ice crystal growth and recrystallization in whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during frozen storage with temperature fluctuations [J]. International Journal of Refrigeration,

- 2019, 99: 176-185.
- [43] ZHANG B, CAO H, WEI W, et al. Influence of temperature fluctuations on growth and recrystallization of ice crystals in frozen peeled shrimp (*Litopenaeus vannamei*) pre-soaked with carrageenan oligosaccharide and xylo-oligosaccharide[J]. Food Chemistry, 2020, 306: 125641.
- [44] 栾兰兰. 冷冻带鱼冰晶生长预测模型及分形维数品质评价体系的建立[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [45] CHEN X, SHI X, CAI X, et al. Ice-binding proteins: A remarkable ice crystal regulator for frozen foods [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021, 61(20): 3436-3449.
- [46] HE Z, LIU K, WANG J. Bioinspired materials for controlling ice nucleation, growth, and recrystallization [J]. Accounts of Chemical Research, 2018, 51(5): 1082-1091.
- [47] NIAN L, CAO A, CAI L, et al. Effect of vacuum impregnation of red sea bream (*Pagrosomus major*) with herring AFP combined with CS@ Fe₃O₄ nanoparticles during freeze-thaw cycles [J]. Food Chemistry, 2019, 291: 139-148.