

冰晶对冻结水产品品质的影响及抑制措施

边楚涵^{1,2}, 谢晶^{1,2,3,4}

(1.上海海洋大学 食品学院, 上海 201306; 2.上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心, 上海 201306;
3.教育部海洋食品精深加工关键技术省部共建协同创新中心, 上海 201306;
4.食品科学与工程国家级实验教学示范中心, 上海 201306)

摘要: **目的** 为进一步优化水产品的冻结方式、改善水产品在冻藏期间的品质提供理论参考。**方法** 介绍冰晶对水产品中蛋白质、脂质、质构特性, 以及色泽、气味等感官品质的影响, 冻结时形成的体积大且分布不均匀的冰晶会对水产品品质造成不可逆转的破坏。综述在水产品冻结领域中能够有效改善冰晶对水产品品质影响程度的方法, 包括超声辅助冻结技术、高压处理技术、添加抗冻剂等, 并对冻结技术的发展进行展望。**结论** 为了更好地抑制冰晶形成带来的危害, 在后续的研究中除了优化现有冻结技术和开发新型冻结技术外, 还可以尝试将不同技术进行复合使用, 谋求更佳的协同作用。此外, 目前的新型冻结技术大多处于实验阶段, 仍需对其作用机制进行深入探究, 同时对不同技术的工艺参数进行优化。

关键词: 冰晶; 水产品; 冻结; 品质变化; 冻结速率

中图分类号: TS254.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)03-0105-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.03.013

Effects of Ice Crystal on Frozen Aquatic Products and Its Inhibition Measures

BIAN Chu-han^{1,2}, XIE Jing^{1,2,3,4}

(1.College of Food Sciences and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2.Shanghai Engineering Research Center of Aquatic Product Processing & Preservation, Shanghai 201306, China;
3.Collaborative Innovation Center of Seafood Deep Processing, Ministry of Education, Shanghai 201306, China;
4.National Experimental Teaching Demonstration Center for Food Science and Engineering, Shanghai 201306, China)

ABSTRACT: The work aims to provide theoretical references for further optimizing the freezing method of aquatic products and improving the quality of aquatic products during freezing storage. The effects of ice crystals on protein, lipid, texture characteristics, color, smell and other sensory qualities of aquatic products were introduced. Ice crystals with large volume and uneven distribution formed during freezing caused irreversible damage to the quality of aquatic products. The methods effectively inhibiting the effects of ice crystals on the quality of aquatic products in during freezing were summarized, including ultrasonic-assisted freezing technology, high-pressure treatment technology, adding anti-freeze, etc., and the development of freezing technology was prospected. In order to better restrain the damage caused by ice crystal formation, in the follow-up research, apart from optimizing the existing freezing technology and developing new freezing technology, it is possible to combine different technologies to seek better synergy. In addition, at present,

收稿日期: 2021-05-07

基金项目: 国家“十三五”重点研发项目(2019YFD0901603); 上海市科委科技创新行动计划(19DZ1207503); 上海市科委能力建设项目(19DZ2284000)

作者简介: 边楚涵(1997—), 女, 上海海洋大学硕士生, 主攻食品科学与工程。

通信作者: 谢晶(1968—), 女, 博士, 上海海洋大学教授, 主要研究方向为制冷工程。

most of the new freezing technologies are in the experimental stage, and it is still necessary to deeply explore the mechanism and optimize the technological parameters of different technologies.

KEY WORDS: ice crystals; aquatic products; freezing; quality change; freezing rate

水产品营养丰富,富含优质蛋白,且其组织蛋白质的结构与人体蛋白质的结构较为相似^[1],易为人体消化吸收,因此具有较高的食用价值和经济价值。在水产品捕捞后的运输、加工等一系列过程中,由于水产品会受到微生物的污染和自身酶的作用,因而极易发生腐败变质。冻藏保鲜是一种在水产品加工业中被广泛使用的保藏方式,它能够有效地抑制微生物的生命活动,降低酶的生物活性,从而延长水产品的货架期。食品的冻结指随着温度的降低,水分从液相变为固相,在相变过程中水分转化为冰晶,当食品中心温度达到 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,其中90%以上的水分会转化为冰晶。冰晶的生成包括冰核的形成和冰晶体的生长等2个过程^[2]。冰晶会对微生物细胞造成机械损伤,使其原生质凝固,从而使微生物死亡,同时也会导致水产品的组织结构遭到破坏。冰晶的大小、形态和分布状况与冻结条件密切相关。在冻结速率较慢时,不能迅速排除潜热,使最大冰晶在生成带停留时间较长,产生的晶核数量较少,冰晶体积较大,且在水产品肌肉组织中分布不均匀,从而对肌肉组织细胞造成不可逆的破坏,同时引起水产品感官品质的下降和营养成分的流失。在冻结速率较高时,产生的冰晶数量较多、细小、分布均匀,这在很大程度上减小了对水产品品质的破坏程度^[3-4]。巩涛硕等^[5]通过对比平板冻结、螺旋式冻结、超低温冻结和冰柜冻结等不同方式对金鲳鱼品质特性的影响发现,超低温冻结和螺旋式冻结速率最快,形成的冰晶较小,能使金鲳鱼获得较好的综合品质。此外,冻结温度和水产品种类差异等因素也会对冰晶的形成有所影响,从而影响水产品的品质。文中将重点针对冰晶的形成对水产品品质的具体影响,以及抑制水产品品质劣变的方法等进行综述,旨在为进一步优化水产品的冻结方式、改善水产品冻藏期间的品质提供理论参考。

1 冰晶对水产品品质的影响

1.1 质构

在水产品的冻结过程中,当温度下降到冻结点以下时,食品中的水分会转化为冰晶,体积增大。这是因为在结冰过程中,水分子高度有序地排列,每个水分子通过氢键与相邻的4个水分子结合,形成了稳定的四面体刚性结构,使冰晶体积膨胀。水产品细胞外肌肉组织间的水结成冰晶,冰晶的膨胀压力会对肌肉组织结构造成不可逆的损伤^[6],体积大且分布不均匀的冰晶是造成肌肉细胞形态改变、

机械损伤的主要原因,从而导致解冻后水产品的肌肉组织结构发生改变、持水力下降^[7]。持水力的高低反映了水产品冻藏和运输过程中的质量损失、解冻后的汁液流失、烹饪过程中的蒸煮损失和肉质收缩程度,同时与食用时肉质的嫩度和多汁性呈正相关的关系^[8]。

YANG F等^[9]通过实验对比了冰晶、内源蛋白水解、氧化等3种不同因素对暗纹东方鲀肉质发生软化的影响程度,得出结论:冰晶是对肉质软化造成影响的主导性因素。冰晶生长造成细胞破裂,使得肉质软化,大大降低了水产品的质构特性和感官品质,从而使其失去了食用价值。汪经邦等^[10]也以暗纹东方鲀为研究对象,分别检测了微冻($-3\text{ }^{\circ}\text{C}$)、冰温($-1\text{ }^{\circ}\text{C}$)、冷藏($4\text{ }^{\circ}\text{C}$)、 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温度条件对暗纹东方鲀肌肉组织中的水分迁移、质构品质、外观色泽的影响,研究中发现,在低于其冻结点的微冻状态下,肌肉组织中形成的冰晶对细胞的骨架结构造成了破坏,导致鱼肉在解冻后硬度显著下降。

1.2 色泽

水产品的色泽是一个重要的感官指标,通过检测其色差值,即 L^* (照度,相当于亮度)、 a^* (样品从红色到绿色的范围)、 b^* (样品从黄色到蓝色的范围)等值来反映水产品的色泽变化。虽然色泽变化对水产品解冻后的品质无明确影响,但其市场价值会因外观色泽的变化而降低,这也是一种品质恶化的表现。KONO S等^[11]以鲑鱼鱼片为研究对象,探究冻结速率、冰晶大小和表面颜色之间的定量关系,实验中发现,经快速冻结的鱼片呈白色和较少的红色,这是由于在食品表层形成的大量细小冰晶造成光在表层发生了散射,使水产品的整体色泽变浅,不过长期冻藏所引起的干耗也会造成水产品色泽发生变化。INDERGÅRD E等^[12]发现,长期冻藏会导致大西洋鲑鱼肌肉的颜色由白色变向黄色,这种变化是因干耗引起。由此可见,还需深入探究引起水产品色泽变化的多种原因之间的交互关系,以确切了解色泽变化的根本机制。

1.3 蛋白质

蛋白质是水产品中重要的营养成分。在水产品的冷冻保鲜过程中,冻结对水产品的肌肉细胞和组织结构所产生的不利影响会导致蛋白质的结构发生改变。体积大且分布不均匀的冰晶会对水产品的肌肉组织造成机械性损伤,破坏肌原纤维蛋白的稳定性,进而

影响蛋白质的结构和功能^[13]。相比之下,体积小且分布均匀的冰晶更有助于维护肌原纤维蛋白的结构稳定性。尽管较低的冻藏温度能够维持水产品蛋白质的结构稳定性,但是随着冻藏时间的延长,蛋白质的生化特性还会发生一定程度的改变^[14]。BAO Y等^[15]在研究青鱼冻藏期间蛋白质的降解与其肌肉结构变化之间的关系时发现,冰晶会造成肌肉纤维的严重变形,包括肌原纤维断裂、肌肉细胞间隙变大等,从而对蛋白质产生影响。

冰晶对细胞结构的破坏还会对细胞调节功能产生不利影响,从而引发蛋白质的变性。在水产品的缓慢冻结过程中,由于质子集中在未冻结的水中,导致结构蛋白附近的pH值降低,也会引发蛋白质的变性。与此同时,肌肉细胞外的水分形成较大的冰晶,导致水产品的肌肉组织发生横向收缩,相反,快速冷冻过程中形成的较小冰晶能够捕获质子,使得蛋白质变性的程度降低,减少了水产品的解冻损失^[16-17]。此外,由于在冻结过程中水分变成冰晶后,残留液中的盐浓度增高,在盐析作用或重金属离子作用下,水产品中的蛋白质也会发生变性^[18]。水分在形成冰晶时体积膨胀产生内应力,因而蛋白质分子凝聚变性。李志鹏等^[19]对南美白对虾虾仁和虾肉糜在冻藏期间的蛋白质品质特性进行了检测,发现细胞间的结合水形成了冰晶,导致肌动球蛋白间因产生了化学键,从而使其盐溶性降低,这与上述原因相契合。

1.4 脂质

脂质氧化是导致食品质量下降的关键问题之一,水产品中富含不饱和脂肪酸,且具有易氧化的特点^[20]。不饱和脂肪酸氧化后会生成具有特殊气味的低分子羰基化合物,例如醛、酮、酸等^[21],同时会使脂质发生酸败,引起水产品的腐败变质,造成严重的营养流失、品质下降,甚至生成有毒化合物,从而引发食品安全问题^[22]。在水产品的贮藏过程中,影响脂质氧化的因素主要有金属离子、酶作用、游离自由基,以及微生物的生命活动。冰晶的形成对脂质的影响主要表现在冻结时,肌肉组织细胞外产生的冰晶会对肌肉细胞造成破坏,解冻时线粒体和溶酶体脂肪酶被释放,进入肌浆中,同时细胞膜发生结构损伤,导致血红素等具有促氧化功能物质的释放,造成脂肪酸与酶类的直接接触,从而加速脂质的氧化。此外,解冻后因冰晶融化水分的流失,肌肉组织间空隙增加,脂质与氧气接触的面积变大,促进了脂质酸败和特殊气味物质的生成^[23]。在冻结状态下,虽然低温在很大程度上延缓了生化反应的进行,但仍会发生一些不可忽视的氧化降解,随着冻藏时间的延长,脂质氧化程度也会增加^[6]。唐一新等^[24]通过测定过氧化值、丙二醛含量来

检测冻藏期间南极磷虾的脂质氧化程度,结果表明,尽管在较低的冻藏温度下进行贮藏,其脂质还是发生了严重的氧化劣变现象。

1.5 风味

水产品的风味可以分为味觉和气味。味觉由非挥发性化合物组成,如游离氨基酸(Free Amino Acids, FAAs)、核苷酸和有机酸等。气味由挥发性化合物组成,如醛、醇、酮、酯、酸和碳氢化合物等^[25]。在冷冻过程中,冰晶的形成及其在细胞中体积的增大会导致解冻后风味物质大量流失,且加速了冰晶对细胞和肌纤维的机械破坏所引起的物理化学变化进程。水产品快速冻结过程中形成的冰晶较小,可以减少异味化合物(如次黄嘌呤、三甲胺、赖氨酸和腐胺)的积累,并在贮藏期间更易保持与鲜味相关的游离氨基酸和肌苷单磷酸的含量^[26]。这是由于较小的冰晶使肌纤维和细胞维持了较好的完整性,在一定程度上减缓了生化反应的发生进程,使三甲胺等异味化合物累积量减少,也可以降低解冻损失,因而减少了水溶性氨基酸的流失。方林等^[27]通过检测在-40℃速冻、-20℃乙醇液体冻结和-20℃静止空气冻结条件下草鱼中呈味物质的变化时也得到了相同的结论。

综上所述,目前关于冷冻水产品品质改变的大量研究更侧重于监控营养物质的流失,以及检测水产品新鲜度的变化,以确保食品的安全性和可食性,对于感官性指标的研究相对来说不够全面,因此在以后的品质检测中应该研究水产品的质构、色泽、风味等发生变化的机理,针对改善其感官品质来研究新型的品质保鲜技术,在保障水产食品安全的基础上进一步优化其感官品质,从而达到最佳的食用价值。此外,冻结水产品中的冰晶对蛋白质、脂质等营养物质产生影响后,某一营养物质的氧化、变性也会促进其他营养物质发生劣化反应,因此要对各类营养物质的交互影响机理进行深入研究,为探求改善品质的方法提供理论基础。

2 抑制措施

在冷冻过程中,不同冻结方法冷冻水产品需要的时间也不同,这对水产品中冰晶的形成具有至关重要的影响。冻结方法会影响冻结速率,冻结速率越快,生成的冰晶体积越小、数量越多,且在水产品中分散更均匀,对水产品的肌肉组织破坏也相对较小,并且减少了水分的迁移,较好地保持了水产品的品质^[28]。GAO W等^[29]通过对蛋白质的溶解性进行测定发现,液氮速冻形成的较小冰晶能在一定程度上减缓蛋白质的变性。由此,目前大量研究正致力于通过改变冻结方法来改善冻结和冻藏水产品的品质。

2.1 超声波辅助冻结技术

超声波是一种新型技术,近年来,该技术在食品加工与保藏领域的应用研究已经越来越广泛,包括冷冻、解冻、微生物灭活和提取等^[30-31]。其中,超声波辅助冻结技术能够有效加速冷冻过程中冰晶核的形成,缩短冻结时间,从而改善冷冻食品的品质。超声波可以在固体、液体和气体介质中传播,其辅助冻结的作用机理主要包括空化作用、传热作用和机械作用^[32]。超声波能产生空化气泡和微射流,空化气泡可以充当原冰核,诱导冰晶成核,同时空化气泡破裂所产生的机械力可以将已生成的冰晶打碎,形成更小的尺寸,使其再次充当原核,促进冰晶的再结晶,使冰晶数量增加,体积相对减小^[17]。此外,超声波产生的微射流引起的强力搅动作用能够有效地提高对流换热速率,空化气泡快速运动也会增加传热和传质的速率,从而缩短了冻结时间^[33]。SUN QX等^[34]通过实验证明在适当的超声功率下,超声波辅助冻结技术显著缩短了鲤鱼鱼肉样品的冷冻时间,并且使其微观结构的受损率降低,提高了鱼肉的持水性、质构等品质。SHI ZJ等^[35]利用超声波辅助冻结技术对草鱼进行冷冻,同样发现超声波能够有效加快冻结速率,改善草鱼的脂质、蛋白质等理化品质,使草鱼肌肉组织的显微结构得到保护。

值得注意的是,虽然超声功率越高,促进冰晶成核和传热的能力就越强,但超声功率过高时也会延长冻结时间。这是由于功率越高,其产生的热量也会增加,从而降低了冻结速率^[34]。尽管超声波辅助冻结技术能够有效地改善冻结水产品的品质,但这项技术还存在一些尚未解决的问题:在冻结过程中超声波频率升高所产生的热量如何扩散;不同超声处理设备由于其设备体积、参数不同,在整个冻结过程中所产生的各种效果可能会存在差异,因此超声处理对于不同设备和冻结对象是否具有普适性还有待商榷;超声功率过高,其产生的微射流搅动作用也会对水产品的肌肉组织结构产生一定的作用力,使其不同程度地受损^[36]。由此可见,应该进一步探究超声波辅助冻结的机理,以及其在实际生产中的工艺要求。

2.2 高压处理技术

高压通过改变压力来调节水产品中水分的相变过程,控制冰晶的成核和生长。将水产品冷却到一定的温度(无冰晶生成)下,然后迅速释放压力,可以使水产品内部形成的冰晶细小均匀。高压冻结技术在水产品保藏领域应用时,其处理强度存在一定的阈值,压力过高会使蛋白质和脂质发生氧化,蛋白质的空间构象和食品色泽改变,硬度降低,持水性和pH值也会受到影响^[37-38]。此外,冷冻高压设备的制造和使用成本较高,使得该项技术的规模化应用受

到了阻碍。

目前,高压处理技术也被应用于水产品冻结前的预处理中^[39]。CARTAGENA L等^[40]在冻结前对长鳍金枪鱼高压(200 MPa)处理6 min,冻藏12个月后,与对照组相比,高压处理组解冻损失和脂质氧化程度都较低。PREGO R等^[41]在罐装前对鲭鱼分别进行高压(200、400、600 MPa)处理2 min后,在-30℃下冻结48 h,再进行不同时间的冻藏,发现600 MPa高压预处理组对质量损失和脂质氧化的抑制作用最显著。PITA-CALVO C等^[42]对冷冻鳕鱼进行高压预处理后冷冻保藏12个月,并进行理化指标的检测,结果表明,300 MPa高压预处理提高了冷冻鳕鱼的硬度、粘附性和弹性等质构特性。TORRES JA等^[43]研究了经过150、300、450 MPa高压预处理后的竹荚鱼在冷冻保藏过程中品质和感官特性的变化,发现高压预处理使其肌肉组织特性得以保持,其中150 MPa压力处理的鱼肉感官特性最好。这可能是由于过高的压力会对水产品的质构造成损伤,因此高压处理需针对不同种类的水产品选择适宜的加工参数,以期在不对水产品造成损伤的前提下获得最佳的品质。

2.3 物理场辅助冻结技术

电场辅助冻结技术(包括静电场和交变电场技术)通过在与被冻结食品直接接触或不接触的2个电极之间施加直流或交流电压来进行。该技术能够诱导成核,当电流强度增大到一定程度时,成核温度就会升高,降低了过冷度,使得食品中形成的冰晶较小,从而降低了解冻损失,延缓了蛋白质降解进程,更好地保持了食品原有的品质^[44]。电场辅助冻结技术能够降低能耗,但在实际应用时存在一些安全问题,因此还需要进一步优化改善。

在食品冷冻行业的应用中,最常见的电磁波辅助冻结技术有微波辅助冻结技术和射频辅助冻结技术。电磁波可以在冻结过程中对冰的裂解过程进行干扰,影响冰晶的成核过程,并将初始晶体分解成体积更小的晶体^[45]。在脉冲微波和连续微波的冻结过程中,采用微波辅助冻结技术所形成的冰晶体积显著变小^[46]。HAFEZPARAST-MOADAB N等^[47]以常规的鼓风冷冻法为对照,研究了3种射频脉冲模式和3个电极间隙(2、3、4 cm)对冷冻虹鳟鱼品质特性的影响,结果发现在射频辅助冻结下,形成的冰晶体积显著减小,最优组检测到的冰晶尺寸约为对照组冰晶尺寸的75%,解冻后汁液流失低于对照组,较好地保持了冷冻虹鳟鱼的组织性能。目前,对于微波/射频辅助冻结水产品的研究还处于初步阶段,这种利用电磁波辅助的冻结技术在水产品冻结方面具有较大的潜力,但是需要进一步研究其作用机理,并优化其在实际应用中的工艺参数。虽然物理场辅助冻结技术能保持冻结水产品的品质,但在使用成本、能耗

和安全性方面存在风险,因此其应用和研究具有一定的局限性。

2.4 其他方式

除了上述3种物理措施之外,还有一些抑制冰晶对水产品品质影响的化学冻结方法,常见的有添加抗冻保护剂。

抗冻保护剂是一类可以降低冰点、提高抗冻能力的物质,目前常见的一些新型抗冻保护剂主要有糖类抗冻剂、蛋白水解产物、复合磷酸盐抗冻剂,以及抗冻蛋白。糖类抗冻剂作为保水剂,能够有效地减轻水产品冻结及冻藏过程中的干耗损失,因此广泛应用于冷冻水产品的加工生产中。糖类抗冻剂可以改变蛋白质分子中结合水的状态,取代蛋白质分子表面的结合水,并与之结合,从而抑制蛋白质的变性^[32]。抗冻蛋白的主要作用机制:能吸附到冰晶表面,随着浓度的增加或作用时间的变长,修饰冰晶的生长形态,阻止体系中的水与已存在的冰晶结合,使得局部冻结点下降,降低了冰点^[48];具有抑制冰晶重结晶的能力,这也是抗冻保护剂发挥抗冻性的主要途径^[49-50]。

ZHANG B等^[51]研究了虾仁冻藏过程中,褐藻多糖和褐藻寡糖对冰晶生长的抑制作用,并与焦磷酸钠($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$)处理时糖分子与冰晶之间的相互作用进行了对比,通过观察其显微结构,发现在冻结前使用褐藻多糖和褐藻寡糖浸渍预处理对冷冻凡纳滨对虾肌肉组织结构的稳定性产生了显著影响,有效地降低了冰晶对肌原纤维的损伤。此外,ZHANG B等^[52]采用了卡拉胶低聚糖和低聚木糖对冷冻凡纳滨对虾进行冻结前的浸渍处理,显微结构成像显示,浸渍预处理可以有效抑制冰晶在肌肉组织中的生长和重结晶,减弱了冰晶带来的损伤;通过聚丙烯酰胺凝胶电泳法(SDS-PAGE)分析,糖类抗冻剂处理对肌肉蛋白的稳定性同样有显著影响,其抑制了温度波动所造成的肌肉蛋白降解。

目前仍需要深入探索抗冻剂的作用机理,以及研发复合抗冻剂,以获得协同效果,同时还应该尝试将抗冻剂与其他冻结方式相结合,以改善其与水产品肌肉组织的结合状态,从而达到更有效的抗冻效果。例如,GAO W等^[29]将可溶性大豆多糖与液氮速冻技术相结合来改善冷冻鳙鱼鱼糜的品质特性,结果表明,此种处理方式的协同作用显著地提高了冻结速率,降低了冰晶对冷冻鳙鱼鱼糜的损害,同时有效抑制了蛋白质的降解。

目前新型冻结技术大多处于实验室研究阶段,尚未取得工业化应用的成果,因此还应进一步探求各种冻结技术扩大应用的可行性,优化其加工工艺,研发适合工业使用的相关设备,提升产量,从而实现以上冻结技术在食品工业中的规模化应用。

3 结语

在冻结和冻藏过程中,冰晶的形成对于各类营养成分和品质的影响举足轻重。由于冷冻水产品的品质发生改变是多种因素协同作用的结果,保持水产品的品质除了要抑制冰晶的体积、数量、分布状态外,还要考虑诸多其他因素的影响,因此今后可以将抑制冰晶形成的冻结技术与其他抗氧化、抑菌等方面的技术相结合,研发更好的低温协同保鲜技术。例如,将超声辅助冻结技术与保水剂相结合,以降低水产品冻藏过程中可能出现的干耗等现象,将冻结技术与天然抗氧化剂或一些包装方式相结合,以抑制水产品的蛋白质和脂质的氧化等。除此之外,目前一些新兴冻结技术还处于实验阶段,还需要对其作用机制进行深入细致的探究,同时对不同技术的工艺参数进行不断优化,探究各种技术对不同水产品是否具有普适性,从而实现实验室成果到实际工业应用的转化。

参考文献:

- [1] 王建红. 水产品的营养价值与研究[J]. 食品安全导刊, 2017(30): 74.
WANG Jian-hong. Nutritional Value and Research of Aquatic Products[J]. China Food Safety Magazine, 2017(30): 74.
- [2] LUAN Lan-lan, WANG Li-ping, WU Tian-tian, et al. A Study of Ice Crystal Development in Hairtail Samples during Different Freezing Processes by Cryosectioning Versus Cryosubstitution Method[J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 87: 39-46.
- [3] ZHU Zhi-wei, ZHOU Qian-yun, SUN Da-wen. Measuring and Controlling Ice Crystallization in Frozen Foods: A Review of Recent Developments[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 90: 13-25.
- [4] 储渊明, 谢晶. 水产品冻藏品质变化及镀冰衣技术的研究进展[J]. 包装工程, 2020, 41(17): 31-37.
CHU Yuan-ming, XIE Jing. Research Progress on Quality Change of Frozen Storage of Aquatic Products and Application of Glazing Technology[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(17): 31-37.
- [5] 巩涛硕, 蓝蔚青, 王蒙, 等. 不同冻结方式对金鲳鱼水分、组织结构与品质变化的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(23): 213-219.
GONG Tao-shuo, LAN Wei-qing, WANG Meng, et al. Effects of Different Freezing Methods on Water State, Tissue Structure and Quality Changes of Trachinotus Ovatus[J]. Food Science, 2019, 40(23): 213-219.
- [6] SUN Qin-xiu, SUN Fang-da, XIA Xiu-fang, et al. The Comparison of Ultrasound-Assisted Immersion Freez-

- ing, 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.
- [7] KAALE L D, EIKEVIK T M. The Development of Ice Crystals in Food Products during the Superchilling Process and Following Storage, a Review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2014, 39(2): 91-103.
- [8] CHAN S S, ROTH B, SKARE M, et al. Effect of Chilling Technologies on Water Holding Properties and other Quality Parameters Throughout the Whole Value Chain: From Whole Fish to Cold-Smoked Fillets of Atlantic Salmon (*Salmo Salar*)[J]. *Aquaculture*, 2020, 526: 735381.
- [9] YANG Fang, JING Dian-tao, YU Da-wei, 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.
- [10] 汪经邦, 李沛韵, 谢晶, 等. 不同贮藏温度对暗纹东方鲀水分迁移、质构和色泽的影响及其货架期预测[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(6): 73-81.
- WANG Jing-bang, LI Pei-yun, XIE Jing, et al. Effects of Different Temperatures on Moisture Migration, Texture and Color of *Takifugu Obscure*s During Storage and the Prediction of Shelf-Life[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(6): 73-81.
- [11] 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.
- [12] INDERGÅRD E, TOLSTOREBROV I, LARSEN H, et al. The Influence of Long-Term Storage, Temperature and Type of Packaging Materials on the Quality Characteristics of Frozen Farmed Atlantic Salmon (*Salmo Salar*)[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2014, 41: 27-36.
- [13] ZHANG Chao, LI Xiang-ao, WANG Hao, et al. Ultrasound-Assisted Immersion Freezing Reduces the Structure and Gel Property Deterioration of Myofibrillar Protein from Chicken Breast[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 67: 105137.
- [14] 陈晓楠, 赵金丽, 张宾, 等. 低温冻藏过程中鲈鱼肌肉蛋白质氧化特性研究[J]. *包装工程*, 2020, 41(17): 38-45.
- CHEN Xiao-nan, ZHAO Jin-li, ZHANG Bin, et al. Oxidation of Muscle Protein in Mackerel during Cryopreservation[J]. *Packaging Engineering*, 2020, 41(17): 38-45.
- [15] BAO Yu-long, WANG Ke-yu, YANG Hong-xu, et al. Protein Degradation of Black Carp (*Mylopharyngodon Piceus*) Muscle during Cold Storage[J]. *Food Chemistry*, 2020, 308: 125576.
- [16] ZHANG Yue-mei, ERTBJERG P. On the Origin of Thaw Loss: Relationship between Freezing Rate and Protein Denaturation[J]. *Food Chemistry*, 2019, 299: 125104.
- [17] GARCÍA-SÁNCHEZ G, SOTELO-ROMERO C R, PACHECO-AGUILAR R, et al. Effect of Freezing on Protein Denaturation and Gelling Capacity of Jumbo Squid (*Dosidicus Gigas*) Mantle Muscle[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2015, 60(2): 737-742.
- [18] JIANG Qing-qing, JIA Ru, NAKAZAWA N, et al. Changes in Protein Properties and Tissue Histology of Tuna Meat as Affected by Salting and Subsequent Freezing[J]. *Food Chemistry*, 2019, 271: 550-560.
- [19] 李志鹏, 周晓娇, 张宾, 等. 南美白对虾肉糜低温冻藏过程中蛋白质的特性变化[J]. *现代食品科技*, 2021, 37(1): 117-124.
- LI Zhi-peng, ZHOU Xiao-jiao, ZHANG Bin, et al. Changes in Protein Characteristics of Minced Shrimp (*Litopenaeus Vannamei*) Meat during Deep-Frozen Storage[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2021, 37(1): 117-124.
- [20] ZHOU Xin, ZHOU Da-yong, LIU Zhong-yuan, et al. Hydrolysis and Oxidation of Lipids in Mussel *Mytilus Edulis* during Cold Storage[J]. *Food Chemistry*, 2019, 272: 109-116.
- [21] MARIUTTI L R B, BRAGAGNOLO N. Influence of Salt on Lipid Oxidation in Meat and Seafood Products: A Review[J]. *Food Research International*, 2017, 94: 90-100.
- [22] WANG Zi-chao, LU Yu-qin, YAN Yu-zhen, et al. Effective Inhibition and Simplified Detection of Lipid Oxidation in Tilapia (*Oreochromis Niloticus*) Fillets during Ice Storage[J]. *Aquaculture*, 2019, 511: 634183.
- [23] CHENG Wei-wei, SØRENSEN K M, ENGELSEN S B, et al. Lipid Oxidation Degree of Pork Meat during Frozen Storage Investigated by Near-Infrared Hyperspectral Imaging: Effect of Ice Crystal Growth and Distribution[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 263: 311-319.
- [24] 唐一新, 陈京美, 冷凯良, 等. 南极磷虾冻藏过程中脂质品质的变化[J]. *食品科技*, 2018, 43(6): 149-153.
- TANG Yi-xin, CHEN Jing-mei, LENG Kai-liang, et al. Lipid Quality Changes of Antarctic Krill (*Euphausia Superba*) during Frozen Storage[J]. *Food Science and Technology*, 2018, 43(6): 149-153.
- [25] DUAN Ze-lin, ZHOU Yan-gen, LIU Wen-juan, et al. Variations in Flavor According to Fish Size in Rainbow

- Trout (*Oncorhynchus Mykiss*)[J]. *Aquaculture*, 2020, 526: 735398.
- [26] YU Da-wei, JING Dian-tao, YANG Fang, 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.
- [27] 方林, 施文正, 刁玉段, 等. 冻结方式对不同部位草鱼呈味物质的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(12): 199-204.
- FANG Lin, SHI Wen-zheng, DIAO Yu-duan, et al. Effect of Freezing Methods on the Taste Components in Different Parts of Grass Carp Meat[J]. *Food Science*, 2018, 39(12): 199-204.
- [28] 周鹏程, 谢晶. 影响冻结贮运过程鱼类品质变化因素的研究进展[J]. *包装工程*, 2020, 41(13): 1-7.
- ZHOU Peng-cheng, XIE Jing. Advance in Research on the Factors Affecting the Fish Quality in Frozen Storage and Transportation[J]. *Packaging Engineering*, 2020, 41(13): 1-7.
- [29] GAO Wen-hong, HUANG Yang-ping, ZENG Xin-an, et al. Effect of Soluble Soybean Polysaccharides on Freeze-Denaturation and Structure of Myofibrillar Protein of Bighead Carp Surimi with Liquid Nitrogen Freezing[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 135: 839-844.
- [30] QIU Li-qing, ZHANG Min, 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.
- [31] BHARGAVA N, MOR R S, KUMAR K, et al. Advances in Application of Ultrasound in Food Processing: A Review[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 70: 105293.
- [32] SUN Ya-nan, ZHANG Min, BHANDARI B, et al. Ultrasound Treatment of Frozen Crayfish with Chitosan Nano-Composite Water-Retaining Agent: Influence on Cryopreservation and Storage Qualities[J]. *Food Research International*, 2019, 126: 108670.
- [33] ZHANG Chao, SUN Qin-xiu, CHEN Qian, et al. Effects of Ultrasound-Assisted Immersion Freezing on the Muscle Quality and Physicochemical Properties of Chicken Breast[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2020, 117: 247-255.
- [34] SUN Qin-xiu, ZHAO Xin-xin, ZHANG Chao, 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: 106-112.
- [35] SHI Zhi-jia, ZHONG Sai-yi, YAN Wen-jie, 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*, 2019, 111: 301-308.
- [36] CHEN Jia-hui, ZHANG Xing, CHEN Yan, et al. Effects of Different Ultrasound Frequencies on the Structure, Rheological and Functional Properties of Myosin: Significance of Quorum Sensing[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 69: 105268.
- [37] GUYON C, MEYNIER A, DE LAMBALLERIE M. Protein and Lipid Oxidation in Meat: A Review with Emphasis on High-Pressure Treatments[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2016, 50: 131-143.
- [38] DE OLIVEIRA F A, NETO O C, SANTOS L M R D, et al. Effect of High Pressure on Fish Meat Quality - a Review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2017, 66: 1-19.
- [39] CARTAGENA L, PUÉRTOLAS E, MARAÑÓN I M. Application of High Pressure Processing after Freezing (before Frozen Storage) or before Thawing in Frozen Albacore Tuna (*Thunnus Alalunga*)[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2020, 13(10): 1791-1800.
- [40] CARTAGENA L, PUÉRTOLAS E, MARTÍNEZ DE MARAÑÓN I. 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.
- [41] PREGO R, FIDALGO L G, SARAIVA J A, et al. Impact of Prior High-Pressure Processing on Lipid Damage and Volatile Amines Formation in Mackerel Muscle Subjected to Frozen Storage and Canning[J]. *LWT*, 2021, 135: 109957.
- [42] PITA-CALVO C, GUERRA-RODRÍGUEZ E, SARAIVA J A, et al. Effect of High-Pressure Processing Pretreatment on the Physical Properties and Colour Assessment of Frozen European Hake (*Merluccius Merluccius*) during Long Term Storage[J]. *Food Research International*, 2018, 112: 233-240.
- [43] TORRES J A, SARAIVA J A, GUERRA-RODRÍGUEZ E, et al. Effect of Combining High-Pressure Processing and Frozen Storage on the Functional and Sensory Properties of Horse Mackerel (*Trachurus Trachurus*)[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2014, 21: 2-11.
- [44] JHA P K, XANTHAKIS E, JURY V, et al. Advances of Electro-Freezing in Food Processing[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2018, 23: 85-89.

- [45] CHIZOBA EKEZIE F G, SUN Da-wen, HAN Zhang, et al. Microwave-Assisted Food Processing Technologies for Enhancing Product Quality and Process Efficiency: A Review of Recent Developments[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 67: 58-69.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] 吴金鸿, 杨丹璐, 周密, 等. 抗冻蛋白与冰-水界面相互作用的理论机制研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(11): 244-252.
- WU Jin-hong, YANG Dan-lu, ZHOU Mi, et al. Advances in Understanding the Theoretical Mechanism of the Interaction between Antifreeze Proteins and the Ice-Water Interface Layer[J]. Food Science, 2021, 42(11): 244-252.
- [49] TIAN You, ZHU Zhi-wei, SUN Da-wen. Naturally Sourced Biosubstances for Regulating Freezing Points in Food Researches: Fundamentals, Current Applications and Future Trends[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 95: 131-140.
- [50] XIANG Hong, YANG Xiao-hu, KE Lei, et al. The Properties, Biotechnologies, and Applications of Antifreeze Proteins[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 153: 661-675.
- [51] ZHANG Bin, CAO Hui-juan, LIN Hui-min, et al. Insights into Ice-Growth Inhibition by Trehalose and Alginate Oligosaccharides in Peeled Pacific White Shrimp (*Litopenaeus Vannamei*) during Frozen Storage[J]. Food Chemistry, 2019, 278: 482-490.
- [52] ZHANG Bin, CAO Hui-juan, WEI Wan-ying, 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 Xylooligosaccharide[J]. Food Chemistry, 2020, 306: 125641.