

农产品贮藏加工

影响冻结贮运过程鱼类品质变化因素的研究进展

周鹏程¹, 谢晶^{1,2,3}

(1.上海冷链装备性能与节能评价专业技术服务平台, 上海 201306; 2.上海海洋大学 食品学院, 上海 201306; 3.食品科学与工程国家级实验教学示范中心(上海海洋大学), 上海 201306)

摘要: **目的** 介绍影响鱼类冻结贮存品质的因素、应对品质下降的措施, 以及近几年国内外的研究进展, 为今后优化冻藏工艺、保持冻藏鱼类品质提供参考。**方法** 总结国内外对影响冻藏鱼类品质因素的研究, 介绍冻藏鱼类冰晶生长、蛋白质降解和脂肪氧化对鱼肉品质的影响, 归纳抑制鱼肉品质下降的方法。**结果** 在冻结贮运过程中, 冰晶的形成、生长、融化、反复冻融等都会损坏鱼体细胞, 引发蛋白质变性。此外, 鱼体死亡后内源性蛋白酶会促进蛋白质降解, 同时改变鱼肉的质构, 从而影响鱼肉的品质。鱼体内富含的脂肪在贮运过程中会发生氧化反应, 随着贮藏时间的延长, 将会严重影响鱼肉的风味、口感。**结论** 冻结贮运技术能有效地保持鱼类的鲜度, 为了更好地保持鱼肉品质, 还需要结合其他保鲜技术进行复合保鲜。

关键词: 冻结; 鱼肉; 冰晶; 蛋白质; 脂肪; 品质

中图分类号: TS254.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)13-0001-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.13.001

Advance in Research on the Factors Affecting the Fish Quality in Frozen Storage and Transportation

ZHOU Peng-cheng¹, XIE Jing^{1,2,3}

(1.Shanghai Professional Technology Service Platform on Cold Chain Equipment Performance and Energy Saving ation, Shanghai 201306, China; 2.College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3.National Experimental Teaching Demonstration Center for Food Science and Engineering (Shanghai Ocean University), Shanghai 201306, China)

ABSTRACT: The work aims to introduce the influencing factors of frozen storage quality of fish, the measures to deal with the deterioration of fish quality and the research progress in recent years at home and abroad, so as to provide reference for optimizing frozen storage technology and maintaining frozen fish quality in the future. The researches on the factors affecting the frozen fish quality at home and abroad were summarized, and the effects of ice crystal growth, protein degradation and fat oxidation of frozen fish on fish quality were introduced to summarize the methods to inhibit the deterioration of fish quality. First, the formation, growth, melting and repeated freezing-thawing of ice crystals would damage fish cells and lead to protein denaturation in the frozen storage and transportation. Second, endogenous proteases would promote protein degradation after fish death, and change the texture of fish, thus affecting fish quality. The last, the rich fat in fish would be oxidized during storage and transportation, which would seriously affect the flavor and taste of

收稿日期: 2020-02-19

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划(2019YFD0901604); 上海市科委科技创新行动计划(19DZ1207503); 上海市科委公共服务平台建设项目(17DZ2293400)

作者简介: 周鹏程(1996—), 男, 硕士生, 主攻制冷及低温工程。

通信作者: 谢晶(1968—), 女, 博士, 上海海洋大学教授, 主要研究方向为食品冷冻冷藏。

fish with the extension of storage time. Frozen storage and transportation technology can effectively maintain the freshness of fish. To better preserve fish quality, it is also necessary to combine with other preservation technologies for compound preservation.

KEY WORDS: frozen; fish; ice crystal; protein; fat; quality

鱼肉是一种富含优质蛋白、多不饱和脂肪酸、氨基酸, 以及一些微量营养元素的健康食物^[1]。鱼体捕捞死亡后会发生一系列反应, 即经过僵直、自溶和腐败等 3 个阶段。随着时间的推移, 鱼肉由新鲜变为腐败^[2], 如何长时间保持鱼的鲜度一直是研究的热点。冻结贮存能够有效地保持鱼的鲜度、营养和风味, 并且可以延长鱼肉的货架期, 满足鱼肉长期保存的市场需求, 是行业中应用最广泛的保鲜技术^[3]。在冻结过程中, 鱼体内会生成大量冰晶, 会刺破鱼体细胞, 对鱼体的组织结构造成破坏。在贮运过程中, 因温度波动会造成冰晶融化、再结晶。此外, 随着冻结贮运时间的延长, 鱼肉会因蛋白质降解、脂肪氧化, 使鱼体散发出强烈的鱼腥味, 这些变化都会导致鱼肉品质下降。文中选择对冻结贮运过程中鱼肉品质变化的影响因素以及如何抑制其品质下降的方法等进行综述, 旨在为进一步优化鱼类冻结贮运保鲜技术提供理论参考。

1 冻结贮运过程鱼类品质变化因素

1.1 冰晶生长对鱼肉品质的影响

鱼类的冻结贮运技术是利用冷冻技术将鱼体中心温度降低至 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下, 并且在低于或等于 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度下进行贮藏和流通。在这个贮运过程中, 鱼体内的大部分水都被冻结, 生成大量的冰晶^[4], 而贮运过程因温度的波动又会造成冰晶的消融和再结晶, 这些都会导致鱼肉的持水性降低、肌肉组织受损、质构变差, 从而降低鱼肉的品质。在整个冻结贮运过程中, 冰晶的生成与冻结前处理、冻结方式、冻藏温度和冻藏时间息息相关^[5-6]。

冻结过程中, 在冻结速率较慢时, 鱼体内的水分形成的冰晶数量少、尺寸大, 对鱼体组织破坏较大; 相反, 在冻结速率快时, 冰晶的数量多、尺寸小, 则对鱼体组织的破坏较小^[7]。冻结过程中的相变阶段是决定冻结速率和冻后鱼肉质量的关键, 因此怎样冻结才能快速通过最大冰晶生成带一直是鱼类冻藏工艺研究的热点^[8]。

欧帅等^[9]在冻结大菱鲆时发现, 相较于 -20 , $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冰箱冻结和 -20 , $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的平板冻结, $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 液氮冻结的冻结速率最快, 平板冻结优于冰箱冻结, 杨慧^[10]、于刚^[11]、宋敏^[12]也有类似发现。巩涛硕等^[13]在冻结金鲳鱼时发现, $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的螺旋式速冻要优于 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 超低温冻结、 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 平板冻结和 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰柜冻

结。蒋慧珠等^[14]在不同冻结温度下冻结鲑鱼的实验结果表明, 温度越低冻结效果越好。这些研究表明, 冻结温度低、冻结速率快的冻结方式在通过最大冰晶生成带时产生的冰晶数量更多、体积更小, 对鱼肉组织的破坏越小, 更能保证鱼肉品质。

在鱼肉的贮运过程中, 温度波动使得较小的冰晶融化, 然后在大冰晶表面重新冻结, 大冰晶的尺寸因此变得更大^[15]。这种微小的冷冻、解冻、再冷冻循环, 会造成冰晶的数目减小、体积变大、蛋白质结构变化和水分迁移, 导致鱼肉品质不断下降^[16]。汤元睿等^[17]通过模拟 3 种不同温度变化的冷链物流过程, 发现在冻藏条件 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 反复波动的情况下, 金枪鱼的新鲜度甚至低于一直处于 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冻藏条件, 实验表明减缓金枪鱼品质的下降应当尽量避免温度的波动。李念文等^[18]模拟金枪鱼经历不同规模的温度波动时发现, 尽管金枪鱼处于冻藏温度, 但是在贮藏过程中不同的温度波动对鱼肉品质的影响不同, 温度波动越大, 大目金枪鱼肉的红色值下降越大, 持水力和盐溶性蛋白含量越低。在贮运期间, 为了保持鱼的品质, 应尽可能避免温度波动, 提高设备对热量波动的灵敏性, 加强对鱼肉温度的监控, 及时修正热量侵扰引起的温度波动, 使鱼肉一直保持在稳定的低温状态, 在无法保障鱼体一直处于最合适的贮存环境下, 应当降低温度波动的幅度和次数。

当贮运状态恶劣、温度波动剧烈时, 鱼肉会发生反复冻融情况。龚漱玉^[19]发现在反复冻融下, 三文鱼的品质快速下降, 感官和质构变化尤其显著。黄涵^[20]、张崑^[21]等也发现, 反复冻融会造成鱼体内的冰晶反复重结晶, 会破坏鱼肉的细胞组织, 反复冻融的次数越多, 则鱼肉受到的损伤越大, 鱼肉的质构、持水力、感官评价价值都会显著下降。由此可见, 在冷链流通过程中应该严格把控温度的变化, 配置完善的冷链设备, 尽可能避免反复冻融的发生, 减少温度波动幅度和次数。

1.2 蛋白质降解对鱼肉品质的影响

鱼死亡后, 鱼肉缺乏氧气, 使得线粒体产生的能量减少, 活性氧得到积累, 细胞通过自噬用新形成的细胞器代替受损的细胞器, 又或者参加程序性细胞死亡程序(细胞凋亡), 而细胞凋亡是细胞自杀的优先选择方式^[22]。细胞凋亡会引起肌原纤维结构蛋白质降解, 肌纤维节段增加, 肌肉纤维的剪切力急剧下降^[23], 从而导致鱼肉质构软化, 降低了鱼肉品质^[24]。

Subbaiah 等^[25]将尼罗罗非鱼在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下冷冻 150 d 发现,在冻藏期间罗非鱼的蛋白溶解度显著下降,通过电泳图发现,在冻结贮藏前 3 个月肌球蛋白重链没有明显变化,而贮藏 90 d 后,肌球蛋白重链开始降解,而整个冻藏期间肌动蛋白未发生明显变化。Lu 等^[26]在 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下冻藏鳙鱼,探究了肌原纤维和肌浆中组织蛋白酶的活性变化,发现在整个冻藏期间,组织蛋白酶 B 和组织蛋白酶 B⁺的活性先下降后上升,冻藏能够有效地抑制酶活性,但是随着冻藏的时间延长,低温对酶活性的抑制能力下降;同时实验表明,温度越低,对酶活性的抑制能力越好。Bao 等^[27]对黑鲤肌肉蛋白降解的研究中有相似的结论,在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻藏条件下前期黑鲤的蛋白质未发生明显变化。

蛋白质的降解会影响鱼肉的品质,而内源性蛋白酶又是影响蛋白质降解的主要因素,只要抑制内源性蛋白酶就能够有效地抑制蛋白质的降解,进而保障鱼肉的品质。在冻藏前期,由于低温会抑制酶活性,蛋白质不会发生明显的变化,但是随着时间的推移,这种抑制效果会被削弱。

1.3 脂肪氧化对鱼肉品质的影响

脂肪氧化和水解是导致鱼肉变质腐败的重要原因之一。鱼肉富含多不饱和脂肪酸,在低温环境中,虽然脂肪氧化和水解速度有所下降,但是随着时间的推移,脂肪还是会逐渐氧化,产生酮类、醇类、醛类等物质,使得鱼肉的风味、口感发生了很大变化,这些变化会降低冻藏期鱼类的质量,使其经济价值下降^[28-29]。

鱼肉脂肪受到温度光照的影响,在冻结贮存过程中与空气中的氧发生反应时,不饱和脂肪酸的烃基链会断裂,产生一系列醛类、酮类和酸败等物质,从而散发出特有的鱼腥味^[30]。刘辉鸿等^[31]对罗非鱼腥味变化及形成机理进行了研究,通过测量挥发性盐基氮、过氧化值、游离脂肪酸、硫代巴比妥酸值、共轭二烯发现,随着脂肪氧化反应的进行,挥发性合成物数量得到累积,使鱼肉散发出强烈的鱼腥味、哈喇味。赵巧灵等^[32]研究了金枪鱼不同部分的肉在冷藏条件下色泽的变化发现,鱼体各部分肌肉都会产生褐变,脂肪含量不同则褐变程度不同,脂肪含量高的部位褐变得越快。冻藏不能阻止脂肪的氧化,随着脂肪氧化,鱼肉的色泽、口感会劣化,并且散发出让人难以接受的气味,因此如何有效地抑制脂肪氧化,一直是水产品保鲜的关键。

2 抑制鱼肉品质下降的措施

2.1 控制冰晶生长分布

如何有效地降低冰晶对鱼肉的损伤、控制冰晶的

生长一直是近年来的研究热点。除了加快冻结速率之外,现阶段有效控制冰晶生长的方法有超声波辅助冻结^[33]、静电场辅助冻结、磁场辅助冻结^[34]和向鱼肉中添加抗冻蛋白等。在众多新型速冻方法中,超声波辅助冻结是将鱼体内的溶液空化,导致气泡产生,而气泡可以作为冰晶的核,诱导晶核的形成,促进生成更多的晶核,从而抑制冰晶的生长。此外,在交替传播的超声波中,已形成的冰晶还会断裂,因而冻结过程中不会形成较大的冰晶,使鱼肉的品质得到了保障^[35]。

研究发现,抗冻蛋白(Antifreeze proteins, AFPs)能够抑制冰晶的生长。AFPs 是一种特殊的蛋白,它以非依数性质降低食品的冰点,却不影响其冰晶的熔点,冰点与熔点之间存在差值为热滞现象,这个差值叫做热滞活性^[36]。抗冻蛋白依附在冰晶表面,阻止水分子与冰晶结合,修饰冰晶的形态,从而抑制冰晶的生长和重结晶^[37]。生活在低温环境中的生物体内都有广泛且多样化的抗冻蛋白,研究人员已经从很多水产品^[38]、昆虫^[39]和植物^[40]上发现抗冻蛋白,但是提取抗冻蛋白的成本较高、效率较低、技术尚不成熟,目前在食品冻结中的应用范围也十分有限。

糖类物质对冻藏水产品有抗冻保水的作用,能够束缚水产品中的部分自由水,并转换成结合水以减缓冰晶的成长。沈春蕾等^[41]处理好虾仁后,在糖类物质溶液中浸泡 3 h 后,再在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下冻藏 84 d 发现,糖类物质能够有效地维持肌肉的组织结构、色泽,降低汁液的流失,减弱了冰晶对虾仁组织结构的破坏,对抑制冰晶成长有显著作用。

细小的冰晶在鱼肉解冻时能减少汁液的流失,降低营养和风味的下降幅度,提供更好的品质^[42]。冻结时,增加冰晶的成核数,控制冰核成长速度,使鱼肉快速通过最大冰晶生成带。冻结后保存在冻藏温度下,减少温度波动,降低冰核在冻藏期间融化、再结晶的可能性,以维持在冻藏期间的品质。

2.2 抑制蛋白质水解的方法

在冻藏保鲜的基础上结合其他处理方式能够进一步抑制内源性蛋白酶的活性,从而达到抑制蛋白质水解的目的,目前主要采用的方式有超高压、保鲜剂等^[43]。

高压加工技术(High Pressure Processing, HPP)技术能够使内源性蛋白酶失活,并且不影响鱼肉的感官特性和营养价值,其对酶的影响和高温处理相似,但是又优于高温处理,已经用于多种海鲜产品的加工。Pita^[44]用 HPP 技术预处理欧洲无须鳕,在 $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下冻结贮存 12 个月后发现,经 300 MPa 压力下保持 2 min 预处理后,鳕鱼的质地和颜色能够有效保持 6 个月。Méndez^[45]在沙丁鱼冷冻前以 3 MPa/s 的速度对

其施加压力,达到预设压力后立即减压,减压时间小于3 s,经过HPP预处理,发现组织蛋白酶B的活性与未处理的对照组有明显差异,且施加压力大小与组织蛋白酶的活性有良好的相关性。

在冻藏过程中蛋白质的氧化会引起肌原纤维蛋白的降解,抑制蛋白质氧化,也可以抑制蛋白质的降解,传统的化学保鲜剂会对食品造成一定的污染。随着对保鲜剂的不断研究,生物保鲜剂因其天然、安全、方便逐渐成为海产品保鲜剂的研究重点^[46]。多酚类物质能够有效地抑制水产品脂质氧化,从而减缓蛋白降解,研究发现多酚类物质表没食子儿茶素没食子酸酯(Epigallocatechin Gallate, EGCG)能够抑制罗非鱼肌原纤维蛋白的氧化降解^[47],茶多酚能够减缓黄鱼糜的蛋白质降解,同时提高其使用品质^[48]。

冻藏本身能够很好地抑制蛋白酶的活性,不同鱼的内源性蛋白酶种类不同,目前研究主要集中在不同种类鱼蛋白质的降解机制研究,关于如何更有针对性地抑制蛋白降解的方法还需进一步探究。

2.3 抑制脂肪氧化

抑制脂肪的氧化可以从镀冰衣、添加抗氧化剂和辐照处理等方面入手。镀冰衣能够在冻鱼表面形成一层冰,阻断鱼体与氧气接触,降低脂肪的氧化速度,并且能够减少鱼肉水分的流失,而使用抗氧化剂作为冰衣原料可以进一步抑制鱼肉的脂肪氧化^[49]。谭明堂等^[50]通过不同配方的镀冰衣技术处理鲑鱼后,再冻藏6个月,与不镀冰衣的对照组相比,脂肪的氧化程度得到显著降低。李敏等^[51]用复合抗氧化剂在罗非鱼致死切片后进行浸渍处理,通过单因素实验和正交优化实验,获得一种成本低、品质优的罗非鱼片复合抗氧化剂配方,异抗坏血酸钠的质量浓度为4 g/L、维生素E的质量浓度为2 g/L、茶多酚的质量浓度为3 g/L,该配方可以缓解罗非鱼片在冻藏过程中鱼体内脂肪氧化的速率,延长其货架期。

为了应对脂肪氧化,将抗氧化剂溶解后涂抹在鱼肉表面,或者以粉末状、精油或汁液混入鱼肉肉糜中是最常见的方法^[52],但是合成的抗氧化剂摄入过多,会造成不良后果,因而天然产物抗氧化剂日益受到关注。针对不同的水产品,寻求相应的抗氧化剂是研究的重点。

3 结语

鱼类冻结贮运技术在行业中已经成熟应用,该方法能有效地延缓鱼的腐败,延长鱼类产品的货架期,提高水产品的经济价值。由于技术和设备的不完善,在流通过程中,每个环节都无法精准地控制温度,尤其是在冷链各环节之间温度波动颇多,由此引发冰晶的生长、融化和再结晶,从而损坏鱼肉的组织结构,

劣化鱼肉品质。随着贮存时间的延长,内源性蛋白酶将导致蛋白质的降解,鱼肉质构会改变。脂肪的氧化在冻藏后期会严重影响鱼肉的口感和风味,并且最终导致鱼类的变质。冰晶的生长消融、蛋白质的降解和脂肪的氧化是影响其品质下降的主要原因。

现阶段我国的冷链体系尚不完善,全程温度的精准控制还不能实现,冷藏车等相关设备及管理有待进一步优化,蛋白酶抑制剂、抗氧化剂等多用于冷藏保鲜,对于冻藏产品的关注较少。今后需要进一步优化冻藏工艺,减少冻结阶段冰晶形成对鱼类组织的破坏;优化冷链技术和设备管理,减少贮运过程中温度的波动;研究栅栏技术,探究更有效的蛋白酶抑制技术和抗氧化剂配方,并结合镀冰衣工艺等,保持冻藏鱼类在长期贮藏过程的品质,延长货架期,提高其经济效益。

参考文献:

- [1] MOHANTY B P, MAHANTY A, GANGULY S, et al. Nutritional Composition of Food Fishes and their Importance in Providing Food and Nutritional Security[J]. Food Chemistry, 2019, 293: 561—570.
- [2] 王亚会, 王锡昌, 王帅, 等. 水产品新鲜及腐败程度的评价指标[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(10): 240—246.
WANG Ya-hui, WANG Xi-chang, WANG Shuai, et al. Advances in Freshness and Corruption of Aquatic Product[J]. Food and Fermentation Industry, 2015, 41(10): 240—246.
- [3] 唐佳楣, 廖媛媛, 汤海青, 等. 不同冻结方法对大黄鱼冻藏期间品质的影响[J]. 宁波大学学报(理工版), 2019, 32(6): 35—42.
TANG Jia-mei, LIAO Yuan-yuan, TANG Hai-qing, et al. Effect of Different Freezing Rates on the Quality of PseudosciaenaCrocea during Frozen Storage[J]. Journal of Ningbo University(Natural Science & Engineering Edition), 2019, 32(6): 35—42.
- [4] 张南海. 不同冻结方式、贮藏温度和解冻方式对彭泽鲫品质的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2018: 6—7.
ZHANG Nan-hai. Effect of Different Freezing Methods, Storage Temperature and Thawing Methods on the Quality of Pengze Crucian Carp[D]. Nanchang: Nanchang University, 2018: 6—7.
- [5] 向迎春, 黄佳奇, 杨志坚, 等. 冻结方式对凡纳滨对虾贮藏中组织冰晶及品质的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(5): 280—287.
XIANG Ying-chun, HUANG Jia-qi, YANG Zhi-jian, et al. Effect of Different Freezing Methods on the Ice Crystals and Quality of White Shrimp (Penaeus Vannamei) in the Storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(5): 280—287.
- [6] 于丽霞. 冻结方式和冻藏条件对罗氏沼虾品质的影

- 响研究[D]. 无锡: 江南大学, 2018: 2—5.
YU Li-xia. Study on the Effects of Freezing Methods and Frozen Conditions on the Quality of *Macrobrachium Rosebergii*[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018: 2—5.
- [7] 吴祖亮. 冻罗非鱼片中冰晶含量的质构参量关联及对品质影响的研究[D]. 海口: 海南大学, 2017: 3—5.
WU Zu-liang. Research on Relevance of Frozen Water Content with Texture Parameters and Effect on Quality in Frozen Tilapia Fillets[D]. Haikou: Hai Nan University, 2017: 3—5.
- [8] KAALE L D, EIKEVIK T M, BARDAL T, et al. The Effect of Cooling Rates on the Ice Crystal Growth in Air-packed Salmon Fillets during Superchilling and Superchilled Storage[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2013, 36(1): 110—119.
- [9] 欧帅, 赵峰, 邹朝阳, 等. 不同冻结方式对大菱鲆鱼片冻藏过程中品质变化的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(24): 188—195.
OU Shuai, ZHAO Feng, ZOU Zhao-yang, et al. Effects of Different Freezing Methods on Quality Changes during the Frozen Storage of Turbot Fillets[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2019, 45(24): 188—195.
- [10] 杨慧, 陈德经, 陈海涛, 等. 不同冻结方式对大鲈肉品质的影响[J]. *食品科技*, 2019, 44(5): 121—127.
YANG Hui, CHEN De-jing, CHEN Hai-tao, et al. Effects of Different Freezing Methods on the Quality of Chinese Giant Salamander Meat[J]. *Food Science and Technology*, 2019, 44(5): 121—127.
- [11] 于刚, 杨少玲, 张慧, 等. 不同冻结方式对黄鳍金枪鱼品质变化的比较研究[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(10): 325—329.
YU Gang, YANG Shao-ling, ZHANG Hui, et al. Comparison of Four Different Freezing Techniques about the Preservation Effects on Yellowfin Tuna[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(10): 325—329.
- [12] 宋敏, 许艳顺, 夏文水, 等. 冻结方式对鲷鱼片品质的影响[J]. *食品科技*, 2017, 42(8): 154—159.
SONG Min, XU Yan-shun, XIA Wen-shui, et al. Effects of Different Freezing Methods on the Quality of Channel Catfish Fillets[J]. *Food Science and Technology*, 2017, 42(8): 154—159.
- [13] 巩涛硕, 蓝蔚青, 王蒙, 等. 不同冻结方式对金鲷鱼水分、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.
- [14] 蒋慧珠, 赵峰, 马玉洁, 等. 不同冷冻温度对鲮鱼理化指标及新鲜度的影响[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(21): 258—262.
JIANG Hui-zhu, ZHAO Feng, MA Yu-jie, et al. Effects of Different Freezing Temperatures on Physicochemical Properties and Freshness of Spanish Mackerel[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(21): 258—262.
- [15] ZHANG B, CAO H J, WEI W Y, 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.
- [16] CAO M, WANG J, CAO A, et al. The Impact of Recrystallisation on the Freeze-thaw Cycles of Red Seabream (*Pagrus Major*) Fillets[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2019, 54(5): 1642—1650.
- [17] 汤元睿, 谢晶, 徐慧文, 等. 冷链物流过程中温度变化对金枪鱼新鲜度的影响[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(13): 332—336.
TANG Yuan-rui, XIE Jing, XU Hui-wen, et al. Effects of Temperature Changes on Freshness of Tuna (*Thunnus Obesus*) Fillet in Cold Chain Logistics[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(13): 332—336.
- [18] 李念文, 汤元睿, 谢晶, 等. 物流过程中大眼金枪鱼 (*Thunnus obesus*) 的品质变化[J]. *食品科学*, 2013, 34(14): 319—323.
LI Nian-wen, TANG Yuan-rui, XIE Jing, et al. Physicochemical Quality Properties of *Thunnus obesus* during Logistical Process[J]. *Food Science*, 2013, 34(14): 319—323.
- [19] 龚漱玉. 反复冻融对生鲜三文鱼品质的影响[J]. *食品工业*, 2019, 40(5): 12—15.
GONG Shu-yu. Effect of Repeated Freeze-thawing on Meat Quality of Fresh Salmon Meats[J]. *The Food Industry*, 2019, 40(5): 12—15.
- [20] 黄涵, 徐云强, 熊光权, 等. 冻融循环对鲷鱼片品质的影响[J]. *食品科技*, 2019, 44(6): 126—132.
HUANG Han, XU Yun-qiang, XIONG Guang-quan, et al. Effect of Repeated Freezing and Thawing on the Quality of Catfish[J]. *Food Science and Technology*, 2019, 44(6): 126—132.
- [21] 张崑, 钱琴, 郭思亚, 等. 反复冻融处理对白乌鱼肉品质的影响[J]. *食品工业*, 2019, 40(3): 27—30.
ZHANG Yin, QIAN Qin, GUO Si-ya, et al. Effect of Freezing and Thawing Treatment on the Quality of White Mullet Fish[J]. *The Food Industry*, 2019, 40(3): 27—30.
- [22] LONGO V, LANA A, BOTTERO M T, et al. Apoptosis in Muscle-to-meat Aging Process: The Omic Witness[J]. *Journal of Proteomics*, 2015, 125: 29—40.
- [23] YANG F, JIA S, LIU J, et al. The Relationship Between Degradation of Myofibrillar Structural Proteins and Texture of Superchilled Grass Carp (*Ctenopharyngodon Idella*) Fillet[J]. *Food Chemistry*, 2019, 301: 125278.

- [24] 葛黎红. 内源蛋白酶在低温保鲜草鱼质构劣化中的作用与控制研究[D]. 无锡: 江南大学, 2017: 8—11.
GE Li-Hong. Study on Correlation of Endogenous Proteases with Texture Deterioration of Grass Carp (*Ctenopharyngodon idella*) during Chilled Storage and Quality Control[D]. Wuxi: JiangNan University, 2017: 8—11.
- [25] SUBBAIAH K, MAJUMDAR R K, CHOUDHURY J, et al. Protein Degradation and Instrumental Textural Changes in Fresh Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) during Frozen Storage[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2015, 39(6): 2206—2214.
- [26] LU H, ZHANG L, SHI J, et al. Effects of Frozen Storage on Physicochemical Characteristics of Bighead Carp (*Aristichthys nobilis*) Fillets[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2019, 43(10): e14141.
- [27] BAO Y, WANG K, YANG H, et al. Protein Degradation of Black Carp (*Mylopharyngodon piceus*) Muscle during Cold Storage[J]. *Food Chemistry*, 2020, 308: 125576.
- [28] 李鹏鹏. 水产品冻藏过程中脂肪氧化对蛋白质变性影响的研究进展[C]// 广东省食品学会.“食品工业新技术与新进展”学术研讨会暨 2014 年广东省食品学会年会论文集, 2014: 5.
LI Peng-peng. A Review on the Effect of Aquatic Products Fat Oxidation on the Protein Denaturation during the Frozen[C]// Guangdong Institute of Food Science and Technology. "New Technology and New Progress in Food Industry" Symposium & Proceedings of the Annual Meeting of Guangdong Food Society in 2014, 2014: 5.
- [29] 颜明月. 臭氧水处理对罗非鱼片蛋白质和脂质氧化及品质的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2015: 3—5.
YAN Ming-yue. Effects of Ozone Water Treatment on Protein Oxidation and Lipid Oxidation and Quality of Tilapia Fillets[D]. Nanning: Guangxi University, 2015: 3—5.
- [30] 李婷婷, 丁婷, 胡文忠, 等. 冷藏大西洋鲑背部鱼片脂肪氧化变化规律及货架期模型的建立[J]. *水产学报*, 2015, 39(2): 265—274.
LI Ting-ting, DING Ting, HU Wen-zhong, et al. Change Characteristics of Fat Oxidation and Establishment of Shelf-life Model for Refrigerated Dorsal and Belly *Salmo Salar* Fillets[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2015, 39(2): 265—274.
- [31] 刘辉鸿, 胡飞, 冯倩倩, 等. 冻藏期间罗非鱼腥味变化及形成机理[J]. *食品与发酵工业*, 2013, 39(9): 52—55.
LIU Hui-hong, HU Fei, FENG Qian-qian, et al. Formation of Fishy Odor in Tilapia Muscle and Smell Change during Iced Storage[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2013, 39(9): 52—55.
- [32] 赵巧灵, 廖明涛, 刘书臣, 等. 蓝鳍金枪鱼脂肪氧化和鱼肉色泽的变化研究[J]. *中国食品学报*, 2014, 14(7): 79—86.
ZHAO Qiao-ling, LIAO Ming-tao, LIU Shu-chen, et al. Research on the Change of Lipid Oxidation and Meat Color of Bluefin Tuna[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2014, 14(7): 79—86.
- [33] ZHANG P Z, ZHU Z W, SUN D W. Using Power Ultrasound to Accelerate Food Freezing Processes: Effects on Freezing Efficiency and Food Microstructure[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2018, 58(16): 2842—2853.
- [34] DALVI-ISFAHAN M, HAMDAMI N, XANTHAKIS E, et al. Review on the Control of Ice Nucleation by Ultrasound Waves, Electric and Magnetic Fields[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 195: 222—234.
- [35] KIANI H, ZHANG Z, 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.
- [36] 史明卉, 刘俊杰, 赵雪珺, 等. 抗冻蛋白诱导冰晶界面层融化的分子动力学模拟[J]. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(5): 515—521.
SHI Ming-hui, LIU Jun-jie, ZHAO Xue-jun, et al. Molecular Dynamics Simulations of Melting Ice/Water Interfaces Induced by Antifreeze Proteins[J]. *Journal of Inner Mongolia University(Natural Science Edition)*, 2017, 48(5): 515—521.
- [37] 年琳玉. 鲱鱼抗冻蛋白对真鲷品质特性的影响及抗冻机制研究[D]. 锦州: 渤海大学, 2019: 1—7.
NIAN Lin-yu. Study on the Antifreeze Mechanism and Effect on Quality Characteristics of Red SeaBream (*Pagrosomus major*) by Herring Antifreeze Protein[D]. Jinzhou: Bo Hai University, 2019: 1—7.
- [38] 陈莹, 安虹霏, 张秋爽, 等. 大西洋鲑鱼IV型抗冻蛋白的表达与纯化[J]. *生物技术*, 2017, 27(3): 218—222.
CHEN Ying, AN Hong-fei, ZHANG Qiu-shuang, et al. Expression and Purification of *Salmo Salar* Type 4 Antifreeze Protein[J]. *Biotechnology*, 2017, 27(3): 218—222.
- [39] 徐凯, 陈东海, 王志, 等. 熊蜂抗冻蛋白基因序列分析及表达特性研究[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2019, 39(5): 74—81.
XU Kai, CHEN Dong-hai, WANG Zhi, et al. Sequencing Analysis and Expression Characteristics of AFP Gene in *Bombus Terrestris*[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition)*, 2019, 39(5): 74—81.
- [40] 杨刚, 史鹏辉, 孙万仓, 等. 白菜型冬油菜质外体抗冻蛋白研究[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(2): 210—217.
YANG Gang, SHI Peng-hui, SUN Wan-cang, et al. Study on Apoplast Anti-freeze Proteins in Winter Turnip Rape(*Brassica Rape L*)[J]. *Chinese Journal of*

- Eco-agriculture, 2016, 24(2): 210—217.
- [41] 沈春蕾, 张小利, 赵金丽, 等. 糖醇对冻藏南美白对虾的品质保障作用[J]. 包装工程, 2019, 40(1): 15—23. SHEN Chun-lei, ZHANG Xiao-li, ZHAO Jin-li, et al. Effect of Sugar Alcohols on the Quality of Shrimp (*Litopenaeus Vannamei*) during Frozen Storage[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(1): 15—23.
- [42] 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: 7—15. LUAN Lan-lan. Establishment of Prediction Model for Ice Crystal Growth and Quality Evaluation System Based on Fractal Dimension of Frozen Hairtails (*Trichiurus Haumela*)[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018: 7—15.
- [43] 杨静. 暗纹东方鲀冷藏过程中质构劣化和蛋白降解变化研究[D]. 无锡: 江南大学, 2017: 2—4. YANG Jing. Study on Texture Softening and Protein Deterioration Change of Puffer Fish (*Takifugu Obscure*) during Refrigerated Storage[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017: 2—4.
- [44] 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.
- [45] MÉNDEZ L, FIDALGO L G, PAZOS M, et al. Lipid and Protein Changes Related to Quality Loss in Frozen Sardine (*Sardina Pilchardus*) Previously Processed under High-pressure Conditions[J]. Food and Bioprocess Technology, 2017, 10(2): 296—306.
- [46] 王硕, 谢晶, 刘爱芳. 生物保鲜技术在海产品中的应用及展望[J]. 包装工程, 2017, 38(1): 137—142. WANG Shuo, XIE Jing, LIU Ai-fang. Application of Bio-preservation Technology in Marine Products and the Prospects[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(1): 137—142.
- [47] 赵永强, 杨贤庆, 李来好, 等. EGCG 对尼罗罗非鱼肌原纤维蛋白降解的抑制作用[J]. 水产学报, 2018, 42(8): 1307—1314. ZHAO Yong-qiang, YANG Xian-qing, LI Lai-hao, et al. Inhibition of EGCG on Myofibrillar Protein Degradation of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*)[J]. Journal of Fisheries of China, 2018, 42(8): 1307—1314.
- [48] 吕卫金, 赵进, 汪金林, 等. 茶多酚延缓冷藏大黄鱼肌原纤维蛋白变性降解机理研究[J]. 中国食品学报, 2014, 14(1): 60—67. LYU Wei-jin, ZHAO Jin, WANG Jin-lin, et al. Effects of Tea Polyphenols on Preservation Mechanism of Myofibrillar Protein from Large Yellow Croak[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2014, 14(1): 60—67.
- [49] TAN M, LI P, YU W, et al. Effects of Glazing with Preservatives on the Quality Changes of Squid during Frozen Storage[J]. Applied Sciences, 2019, 9(18): 3849.
- [50] 谭明堂, 王金锋, 余文晖, 等. 冰衣结合保鲜剂处理对冻藏鲑鱼品质的影响[J]. 渔业现代化, 2019, 46(4): 73—80. TAN Ming-tang, WANG Jin-feng, YU Wen-hui, et al. Effects of Glazing with Preservative Treatment on the Quality of Squid during Frozen Storage[J]. Fishery Modernization, 2019, 46(4): 73—80.
- [51] 李敏, 关志强, 李鹏鹏. 复合抗氧化剂浸渍处理提升冻藏罗非鱼片品质[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9): 291—298. LI Min, GUAN Zhi-qiang, LI Peng-peng. Antioxidants Dipping Treatment Improving Quality of Frozen Tilapia Fillets[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(9): 291—298.
- [52] 类红梅, 罗欣, 毛衍伟, 等. 天然抗氧化剂的功能及其在肉与肉制品中的应用研究进展[J/OL]. 食品科学: 1—15[2020-02-18]. LEI Hong-mei, LUO Xin, MAO Yan-wei, et al. A Review of the Function and Application of Natural Antioxidants in Meat and Meat Products[J/OL]. Food Science: 1—15[2020-02-18].