

低温保鲜对水产品蛋白质品质的影响及其调控技术研究进展

高赛¹,杨欣宇¹,刘寅初¹,冯随^{2,3},魏秀卿^{2,3},苏欣娜^{2,3},王世杰¹,高晓光^{1*}

(1.河北科技大学 食品与生物学院,河北 石家庄 050018;2.河北双鸽食品股份有限公司,河北 石家庄 050021;3.河北省生猪加工技术创新中心,河北 石家庄 050021)

摘要:水产品蛋白质含量较高且口感及风味独特,极大丰富了消费者的日常饮食。然而水产品捕捞后贮藏期间易腐败变质,低温保藏是最主要的保鲜方式之一。但是低温会造成其主要营养成分——蛋白质的损伤从而导致品质下降。为提高低温保鲜效果,减少贮藏过程中的蛋白质损伤,可利用低温保鲜技术与辅助技术联用来提高水产品品质的稳定性。该文阐述低温对水产品蛋白质结构与功能的影响,总结低温保鲜过程中蛋白质品质的调控方法,以期为水产品的贮藏保鲜技术提供理论依据。

关键词:水产品;蛋白质;低温保鲜;结构与功能;品质调控

Effects of Low Temperature Preservation on Protein Properties of Aquatic Products and Regulation Technology

GAO Sai¹, YANG Xin-yu¹, LIU Yin-chu¹, FENG Sui^{2,3}, WEI Xiu-qing^{2,3}, SU Xin-na^{2,3},
WANG Shi-jie¹, GAO Xiao-guang^{1*}

(1. College of Food Science and Biology, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, Hebei, China; 2. Hebei Sogreen Food Co., Ltd., Shijiazhuang 050021, Hebei, China; 3. Hebei Province Pig Processing Technology Innovation Center, Shijiazhuang 050021, Hebei, China)

Abstract: The high protein content and unique taste and flavor of aquatic products greatly enrich the daily diet of consumers. However, aquatic products are easy to rot and deteriorate during storage after harvesting, and low temperature preservation is one of the most important ways to keep fresh. But low temperature may damage the protein, the main nutrient of aquatic products, leading to a decline in quality. To improve the effect of low temperature preservation and reduce protein damage during storage, the combination of low temperature preservation technology and auxiliary technology are used to improve the stability of aquatic product quality. In this paper, the effects of low temperature on protein structure and function of aquatic products were discussed, and the regulation methods of protein quality during low temperature preservation were summarized, thus providing the theoretical basis for the preservation technology of aquatic products.

Key words: aquatic products; protein; low temperature preservation; structure and function; quality control

引文格式:

高赛,杨欣宇,刘寅初,等.低温保鲜对水产品蛋白质品质的影响及其调控技术研究进展[J].食品研究与开发,2023,44(2):212-217.

GAO Sai, YANG Xinyu, LIU Yinchu, et al. Effects of Low Temperature Preservation on Protein Properties of Aquatic Products and Regulation Technology[J]. Food Research and Development, 2023, 44(2): 212-217.

基金项目:石家庄市科学技术研究与发展计划项目(211170222A);小龙虾加工贮藏过程营养品质与提升技术(20181123)

作者简介:高赛(1998—),女(汉),硕士研究生,研究方向:农产品加工与贮藏。

*通信作者:高晓光(1984—),男(汉),副教授,博士,研究方向:畜产科学。

我国水域辽阔,水产资源丰富,根据国家统计局发布的数据显示,2021年我国水产品产量达6693万^[1],位居世界前列。水产品具有优良的营养价值,富含蛋白质、多不饱和脂肪酸以及无机盐和维生素等^[2],可作为畜禽类等陆生动物性食品的良好补充。水产品中蛋白质最为丰富,鱼、虾、蟹中粗蛋白含量达15%~22%^[3],对动物性食品蛋白质的贡献率为27.10%^[4],在居民膳食结构中起着重要作用。然而水产品水分含量高,储运过程中蛋白质在微生物和内源酶的作用下易氧化、降解,产生醛、酮、胺类物质而腐败变质^[5]。腐败变质后的水产品不仅风味发生变化,营养价值也显著下降,严重影响水产行业经济发展。目前,低温是保持水产品品质、延长保质期的主要方式之一,根据贮藏温度可分为冷藏、冰温、微冻和冷冻4种保鲜方式^[6],冷藏和冷冻是水产品采用最多的保鲜方式。冷藏可以抑制大部分微生物的生长繁殖和酶的活性,但一些嗜冷菌,如假单胞菌、希瓦氏菌仍能继续生长产生蛋白酶,对蛋白质进行氧化降解^[7];而冷冻也会改变组织中水分的含量和分布,诱导大冰晶的形成,使蛋白质变性^[8],保鲜效果不佳。因此,为降低低温保鲜对蛋白质品质的影响,科研工作者通过大量研究发现,将低温保鲜技术与辅助技术联用可有效缓解此影响。

1 低温保鲜技术对水产品蛋白质结构与功能的影响

低温是水产品最为常用的保鲜方式之一,较低的温度可以抑制水产品中微生物的生长繁殖,降低酶活性,减弱生化反应速率,保持水产品的鲜度和营养价值;但低温贮藏会对水产品蛋白质的结构与功能特性产生一定的影响,从而降低水产品品质。

1.1 低温保鲜对蛋白质二级结构的影响

蛋白质二级结构与其功能特性、产品品质特性密切相关,因此,探究低温对蛋白质二级结构的影响对提高水产品品质具有重要意义。蛋白构象主要包括 α -螺旋、 β -转角和无规则卷曲结构。 α -螺旋结构含量丰富,是所有二级结构中稳定性最强的有序结构,可作为判断蛋白质结构稳定性的指标^[9],其稳定性主要依靠肽链上羰基氧和氨基氢之间的氢键形成的相互作用力来维持^[10]。

大量研究表明,低温贮藏会引起蛋白质二级结构的变化,贮藏期间羰基氧的电子云密度增加,氢键相互作用力减弱, α -螺旋向 β -转角和无规则卷曲结构转变,导致二级结构的不稳定^[11-12]。Walayat等^[13]将鲢鱼中提取的肌原纤维蛋白放置于 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下贮藏,发现冷冻期间肌原纤维蛋白的氢键逐渐断裂,至第60天贮藏结束时, α -螺旋的含量从冷冻前的74%下降至30%, β -转角和无规则卷曲含量增加,蛋白质分子由紧凑有

序逐渐转向疏松无序,结构松散,变性严重,鲢鱼的风味和营养价值下降。Tan等^[14]研究发现与慢速冷冻($-25\text{ }^{\circ}\text{C}$)相比快速冷冻($-80\text{ }^{\circ}\text{C}$)具有相对稳定的二级结构, $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 快速冷冻能够让部分溶质分子困在迅速形成的小冰晶中,溶质外漏的减少减弱了pH值的变化,从而减小了pH值对 α -螺旋向 β -转角和无规则卷曲结构转化的影响。

低温贮藏期间,冰晶的形成和离子强度的增大,引起 α -螺旋含量的减少。冻结温度越低,冻结速率越快,通过冰晶生成带的时间越短,对蛋白质二级结构的影响越小。

1.2 低温保鲜对蛋白质溶解度和表面疏水性的影响

疏水性和溶解度是蛋白质重要的物理性质,分别反映蛋白质的变性和聚集程度^[15]。一般来说,蛋白质表面疏水性和溶解度是呈负相关的,即疏水性越小,溶解度越大,水产品的加工性能越好。因此,可根据溶解度性质来提高水产品品质。溶解度的大小主要由两种相互作用决定,蛋白质-水之间的离子相互作用和蛋白质-蛋白质分子间的疏水相互作用,前者有利于蛋白质溶解,后者则会导致蛋白质溶解度的降低^[15]。

Du等^[16]研究发现镜鲤鱼在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷冻贮藏180d时,肌原纤维蛋白的溶解度可由新鲜鱼时的65.3%下降到51.0%,表明低温会降低蛋白质溶解度。溶解度大小易受温度差异的影响。王标^[17]以鳊鱼鱼糜为研究对象,比较了冷藏($4\text{ }^{\circ}\text{C}$)、冰温($-2\text{ }^{\circ}\text{C}$)、微冻($-4\text{ }^{\circ}\text{C}$)和冷冻($-18\text{ }^{\circ}\text{C}$)4种贮藏温度下溶解度的变化。结果表明,在6周的贮藏过程中,冷冻组肌原纤维蛋白溶解度明显低于相同时期的其他3组。这是因为冷冻过程中,大冰晶的形成和细胞内离子浓度的增加破坏了肌原纤维蛋白的结构,使埋藏在蛋白质分子内的疏水基团暴露于分子表面,此时蛋白质-蛋白质分子间疏水作用增强,分子间发生聚集,溶解度下降。Mehta等^[18]研究发现,南美白对虾在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷藏时,肌原纤维蛋白的溶解度在0~8d时基本不变,8d以后急剧下降。而王标^[17]的试验结果却得到了相反的变化趋势,在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷冻时鳊鱼鱼糜的肌原纤维蛋白溶解度在前两周内迅速下降,2周以后趋于平稳,产生此差异的原因可能与保鲜温度有关。

保鲜温度的选择对贮藏期间蛋白质溶解度的变化大小和趋势起着至关重要的作用,为获得良好的保鲜效果应根据具体保鲜周期选择合适的贮藏温度。另外,贮藏期间可添加多酚类物质阻止蛋白质疏水基团外露,同时引入多酚中的亲水基团,提高蛋白溶解度^[19]。

1.3 低温保鲜对蛋白质凝胶特性的影响

蛋白凝胶是指变性蛋白分子交联聚集形成高度有序的三维网络结构的过程,是蛋白质一种重要的功

能性质,与水产品嫩度、保水性等密切相关^[20]。凝胶结构取决于蛋白质分子的变性展开和交联聚集的速度,当变性速度大于聚集速度时,有利于致密有序的凝胶网络的形成^[21]。

贮藏时间、温度等均会对凝胶性能造成一定的影响。Mehta等^[18]研究发现,当温度保持在0℃~1℃对南美白对虾进行贮藏时,贮藏前8d凝胶质构参数(硬度、弹性、黏度、咀嚼性)无显著变化;而14d贮藏结束时,凝胶硬度显著下降,降低了54%。Lu等^[22]发现,将鳙鱼放于-20℃冷冻时,肌原纤维蛋白凝胶的纹理参数(硬度、黏度、弹性、咀嚼性)呈先上升后下降的趋势,第7周时凝胶参数达到最佳。7周后蛋白凝胶各项指标开始下降,其原因可能是由于贮藏时间过长,氧化形成的二硫键过多交联,导致氢键数量下降,二级结构被破坏,蛋白间不良聚集,阻碍了凝胶的形成。试验结果表明,短期低温贮藏有利于凝胶质地的形成。Liu等^[23]比较不同贮藏温度对鲤鱼蛋白凝胶的影响,发现经-3℃处理的鲤鱼的肌原纤维蛋白硬度和弹性显著优于-1℃冰温保鲜组。

综上可知,短期低温贮藏对蛋白凝胶并无显著影响,甚至会增强凝胶形成能力。因此,在加工、贮藏环节,尽可能采用较短的贮藏时间和较低的贮藏温度,以维持肌原纤维蛋白凝胶特性。

1.4 低温保鲜对蛋白质乳化性的影响

蛋白质的乳化性主要包括乳化活性和乳化稳定性,可以反映蛋白质与脂肪的交联能力。诸多研究指出,水产品低温长期贮藏期间由于蛋白质氧化过度,导致其结构被破坏,乳化性能下降^[24]。

Du等^[16]研究表明,在-18℃冷冻贮藏的镜鲤鱼的肌原纤维蛋白乳化活性和乳化稳定性显著下降。乳化性减小的主要原因是贮藏期间氧化变性导致蛋白质聚集,聚集后颗粒粒径较大,当吸附在油滴表面时无法保持其柔韧性,从而使乳化稳定性下降。Sun等^[25]在-18℃冷冻的鲤鱼中提取的肌原纤维蛋白乳液中也得到了相似的结论。此外,常娅妮等^[26]探究了调味鱼在-80、-30、-18℃冷冻处理后置于-18℃贮藏期间肌原纤维蛋白乳液的稳定性,发现随着贮藏时间的延长,肌原纤维蛋白氧化、变性使疏水基团暴露于分子表面,蛋白溶解度下降,乳化粒子数目减少,调味鱼肌原纤维蛋白乳化性均下降。但不同冷冻速率处理的乳化性下降速度不同,在20周的贮藏过程中,-18℃冷冻处理组的乳化性最小,波动范围最大。若贮藏时间较短,在4周内可使用-30℃处理,需长期贮藏时应选择-80℃速冻处理。Liu等^[23]研究发现,-1℃和-3℃下冰温保鲜鲤鱼,-3℃时蛋白质乳化性变化较小。

总之,低温贮藏会导致水产品乳化性能的下降,

但不同冷冻速率、冷冻温度对乳化性能影响不同,在具体加工保鲜中应根据产品实际需要设定合适的贮藏参数。

2 蛋白质品质变化调控技术

单一使用低温保鲜技术会对水产品蛋白质的结构与功能产生一定程度的破坏,水产品品质发生劣变,难以达到理想的保鲜效果。为改善这种现象,研究人员发现,可将低温保鲜技术与超声波、保鲜剂、气调保鲜、低压静电场等辅助技术联合使用,从而减缓蛋白质不良品质的变化。

2.1 超声波辅助技术

超声波作为一种绿色安全的物理加工技术,由于其独特的空化效应引起的冲击波、微射流、剪切力、自由基生成等物理和化学反应,可促进制品冷冻过程中晶核的形成,减小冰晶大小,提高冷冻速率,缩短处理时间,进而改善水产品品质^[27]。

Chen等^[28]研究表明,与普通的空气速冻保鲜相比,超声波辅助浸入式冷冻(超声波功率320W,频率45kHz)可通过空化气泡的破裂和由此产生的压力使其具有最小的冰晶尺寸,显著降低结合水向游离水的转变,从而降低蒸煮损失和解冻损失。同时,小冰晶减小了对细胞的机械损伤,使 α -螺旋和 β -折叠含量高于空气速冻保鲜样品。Sun等^[29]探究了不同冷冻功率的超声波处理(0、125、150、175、200、225W)对鲤鱼肌原纤维蛋白结构的影响,发现在适宜的超声波功率下(≤ 175 W),空化气泡和微射流效应缩短了冷冻时间,维持了蛋白质二、三级结构。但当施加较高的超声功率时(>175 W)会起到相反的作用,空化气泡破裂产生的高强度冲击波、微射流和剪切力,导致蛋白质过度变性展开,所以在实际应用中应设定合适的超声波处理参数。目前,超声波工作模式单一,大多数应用都集中在单频超声上,近期发现多频超声具有更高的超声强度和空化效应。Zhao等^[30]使用单频超声(20kHz)、双频超声(20kHz和28kHz)、三频超声(20、28、40kHz)辅助浸泡冷藏大黄鱼,发现与单频超声相比多频超声可以延缓贮藏期间肌原纤维蛋白荧光强度的下降,提高蛋白颗粒分布的均匀性,特别是经过双频超声处理的样品更好地维持了蛋白质结构的稳定性。

超声波作为一种新型加工冷冻技术,在水产品冷冻过程中对冰晶的形成和生长具有良好的改善作用。然而其工作模式单一,对多频超声的研究还需进一步深入探索。

2.2 添加保鲜剂

保鲜剂是指添加到食品中以保持食品营养成分及色香味不变物质^[31]。为防止水产品冷藏、冰温、

微冻保鲜时品质劣变过快,可在水产品低温贮藏前添加适量的保鲜剂以缓解蛋白酶对蛋白质的氧化降解。根据保鲜剂来源的不同,可分为化学保鲜剂和生物保鲜剂。其中生物保鲜剂具有绿色安全的特点,被广泛用于水产品保鲜中^[32]。研究表明,使用单一保鲜剂,会出现用量过大且保鲜效果不佳的现象,而将多种生物保鲜剂进行复配,可发挥其协同作用从而使保鲜效果大幅提升^[33]。为使保鲜效果达到最佳,常用真空浸渍和纳米材料加以辅助。真空浸渍时,真空可去除水产品表面空隙的气体 and 液体,使保鲜剂快速直接的引入到多孔组织内,提高涂层效率^[34]。SiO₂、TiO₂ 和 ZnO 已被认为是潜在的纳米材料,常与保鲜剂壳聚糖混合使用,其尺寸小可均匀分布在壳聚糖中,并通过表面羟基与壳聚糖分子生成氢键,提高涂层机械性能^[35]。

Xiong 等^[36]研究发现,2%明胶、2%壳聚糖、0.2%没食子酸、0.5%丁香油和 0.5%大豆卵磷脂涂层可以有效抑制大西洋鲑鱼冷藏过程中巯基氧化成二硫键,第 15 天时含有保鲜涂层样品的游离巯基的含量远高于第 10 天时未经处理的样品,表明保鲜剂涂层将蛋白质氧化延长至少 5 d。Zhao 等^[11]将罗非鱼放入含有明胶和葡萄籽提取物的溶液中,并对溶液施加 5 kPa 真空压力。葡萄籽提取物中含有多种天然多酚,多酚-蛋白质相互作用可以减少蛋白质氧化过程中疏水基团的暴露,增强蛋白质二级结构稳定性。徐赵萌等^[37]发现带鱼鱼丸用纳米 Ag/ZnO 和壳聚糖混合物涂层,可有效减缓鱼丸鲜度的下降,抑制蛋白酶活性,延缓蛋白质分解,进而更好维持鱼丸凝胶特性。

综上所述,保鲜剂的加入有效阻止了水产品与环境的直接接触,缓解了低温对水产品蛋白质结构与功能的不利影响。

2.3 气调保鲜辅助技术

低温保鲜通常是将水产品不经任何处理直接置于空气下进行贮藏。然而空气中的氧气易加速水产品蛋白质氧化速率^[38],水产品在低温贮藏前可采用气调包装进行预处理。用一种或多种混合气体(常用气体为二氧化碳、氧气、氮气)置换包装容器中的空气,通过改变贮藏环境中气体种类和占比,减缓水产品中蛋白质的氧化速率和微生物的生长繁殖^[39-40]。

He 等^[41]以普通包装为对照,研究气调包装(70%N₂和 30%CO₂)对罗非鱼冷冻期间蛋白质氧化的影响,在 14 d 贮藏期间,气调保鲜组罗非鱼的蛋白质巯基含量和溶解度的下降幅度明显小于非处理组,说明无氧包装有效减弱了蛋白质氧化程度。Zhang 等^[42]比较了不同包装方式,空气包装、真空包装、气调包装(30%N₂和 70%CO₂)对石斑鱼冷藏过程中蛋白质氧化降解的影响,结果发现,真空和气调包装对冷冻石斑鱼鱼片肌

原纤维蛋白的氧化和降解有积极的抑制作用,且气调包装优于真空包装,Li 等^[43]也得到了类似结论。此外,Li 进一步研究发现,将 0.3% ϵ -聚赖氨酸壳聚糖-海藻酸钠生物活性涂层与气调包装(60%CO₂、5%O₂、35%N₂)联合使用可对冷藏期间河豚肌原纤维蛋白的氧化和降解起双重抑制作用。河豚品质的劣变主要由内源性酶和微生物引起,富含阳离子的 ϵ -聚赖氨酸可通过静电作用吸附在微生物的阴离子表面,破坏微生物的细胞膜,使其死亡;低氧包装中含有较少的活性氧,从而降低蛋白质氧化。二者协同可使河豚肌原纤维蛋白免受大气氧化和细菌蛋白水解的影响。低温贮藏前经气调包装处理可延长水产品保质期,但高浓度 CO₂ 气调包装易增大水产品汁液损失率。Masniyom 等^[44]在气调保鲜前用焦磷酸盐对鲈鱼进行预处理,可有效缓解水分损失,且磷酸盐还能螯合促氧化的金属离子,抑制蛋白质氧化。

总之,气调包装主要通过改变环境中气体类型和比例改善水产品品质。在后续发展过程中,可以与其他技术,如保鲜剂、保水剂等配合,提高作用效果。

2.4 低压静电场辅助技术

低温作为水产品最主要的贮藏方式之一,是途中运输和商家储存的主要形式,可获得更长的货架期,保持良好的风味。然而,低温贮藏会改变组织中水的含量和分布,这导致形成大而不均匀的冰晶并随后对肌肉造成机械损伤^[45-46]。近年来,静电场已成为低温贮藏期间保持食品品质的有效方法。相比于高压静电场的高能耗、高安全隐患,低压静电场具有操作简单、安全节能等优势^[47]。研究发现,低温贮藏过程中利用低压静电场可以有效减少蛋白质的破坏程度和降解速率。张家玮^[48]研究表明低压静电场协同低温贮藏带鱼时,电场可以通过改变细胞膜通透性来提高自由水离子强度,抑制冰晶成核,维持 Ca²⁺-三磷酸腺苷酶活性,使在 3 000 V 静电场中保鲜的带鱼货架期比原来延长 7 d。张珊^[49]发现,静电场环境中产生的电晕风对贮藏过程中产生的冰晶具有一定的冲击作用,冰块受冲击力破坏变小,从而减弱微冻贮藏时凡纳滨白对虾的蛋白质变化,增强蛋白质的稳定性。然而,目前低压静电场保鲜技术在水产品中的应用仍处于起步阶段,需进一步深入研究。

3 总结与展望

低温保鲜一直是保持水产品质量和延长保质期的有效方法,然而随着人们对新鲜水产品需求的增加,保鲜技术受到高度重视,各种新型、绿色安全的保鲜技术在不断发展。通过在传统低温贮藏基础上与超声波技术、添加保鲜剂、气调保鲜、低压静电场等技术

联合使用,来减少冻藏对水产品蛋白质的影响,更好的维持蛋白质的结构与功能。水产品低温保鲜时虽然已有较多外加辅助手段,但也面临一些问题。目前,科研工作者以低压静电场对低温贮藏后水产品理化性质的影响研究为主,关于对水产品蛋白质结构与功能影响的研究相对较少,需进一步探索。此外,研究人员在优化原有保鲜技术的基础上应继续探究新型的保鲜技术,以最大限度维持储存过程中水产品蛋白质的品质,以提高水产品经济价值。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国 2021 年国民经济和社会发展统计公报[1]——2022 年 2 月 28 日[N]. 人民日报, 2022-03-01(10). The State Statistical Bureau. Statistical bulletin of the People's Republic of China on national economic and social development in 2021[1]——February 28, 2022[N]. People's Daily, 2022-03-01(10).
- [2] 马聪聪, 张九凯, 卢征, 等. 水产品新鲜度检测方法研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(19): 334-342. MA Congcong, ZHANG Jiukai, LU Zheng, et al. A review of methods for freshness detection of aquatic products[J]. Food Science, 2020, 41(19): 334-342.
- [3] 章超桦, 薛长湖. 水产食品学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010. ZHANG Chaohua, XUE Changhu. Aquatic food science[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2010.
- [4] 朱雪梅, 赵明军, 王宇光, 等. 水产品可食率与蛋白质贡献比较研究[J]. 中国渔业质量与标准, 2021, 11(3): 32-39. ZHU Xuemei, ZHAO Mingjun, WANG Yuguang, et al. Comparative study on edible rate and protein contribution of aquatic products[J]. Chinese Fishery Quality and Standards, 2021, 11(3): 32-39.
- [5] WANG R F, HU X Y, AGYEKUMWAA A K, et al. Synergistic effect of kojic acid and tea polyphenols on bacterial inhibition and quality maintenance of refrigerated sea bass (*Lateolabrax japonicus*) fillets [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 137: 110452.
- [6] 邹金浩, 杨怀谷, 唐道邦, 等. 畜禽鲜肉保鲜技术研究进展[J]. 肉类研究, 2020, 34(10): 96-102. ZOU Jinhao, YANG Huaigu, TANG Daobang, et al. Recent progress in preservation technologies for fresh meat and poultry[J]. Meat Research, 2020, 34(10): 96-102.
- [7] LAN W Q, LANG A, ZHOU D P, et al. Combined effects of ultrasound and slightly acidic electrolyzed water on quality of sea bass (*Lateolabrax japonicus*) fillets during refrigerated storage[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 81: 105854.
- [8] WALAYAT N, WANG X K, LIU J H, et al. Kappa-carrageenan as an effective cryoprotectant on water mobility and functional properties of grass carp myofibrillar protein gel during frozen storage[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 154: 112675.
- [9] LIU H T, ZHANG H, LIU Q, et al. Solubilization and stable dispersion of myofibrillar proteins in water through the destruction and inhibition of the assembly of filaments using high-intensity ultrasound [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 67: 105160.
- [10] WEI P Y, ZHU K X, CAO J, et al. The inhibition mechanism of the texture deterioration of tilapia fillets during partial freezing after treatment with polyphenols[J]. Food Chemistry, 2021, 335: 127647.
- [11] ZHAO X, ZHOU Y G, ZHAO L, et al. Vacuum impregnation of fish gelatin combined with grape seed extract inhibits protein oxidation and degradation of chilled tilapia fillets[J]. Food Chemistry, 2019, 294: 316-325.
- [12] WALAYAT N, XIONG Z Y, XIONG H G, et al. Cryoprotective effect of egg white proteins and xylooligosaccharides mixture on oxidative and structural changes in myofibrillar proteins of *Culter alburnus* during frozen storage[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 158: 865-874.
- [13] WALAYAT N, XIONG Z Y, XIONG H G, et al. The effect of egg white protein and β -cyclodextrin mixture on structural and functional properties of silver carp myofibrillar proteins during frozen storage[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 135: 109975.
- [14] TAN M T, YE J X, XIE J. Freezing-induced myofibrillar protein denaturation: Role of pH change and freezing rate[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 152: 112381.
- [15] 彭林, 马良, 戴宏杰, 等. 多酚与肌原纤维蛋白相互作用机制及其对蛋白特性的影响研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(11): 239-246. PENG Lin, MA Liang, DAI Hongjie, et al. Recent progress in understanding the interaction mechanism between polyphenols and myofibrillar protein and its effects on protein properties[J]. Food Science, 2020, 41(11): 239-246.
- [16] DU X, LI H J, PAN N, et al. Effectiveness of ice structuring protein on the myofibrillar protein from mirror carp (*Cyprinus carpio* L.) during cryopreservation: Reduction of aggregation and improvement of emulsifying properties[J]. International Journal of Refrigeration, 2022, 133: 1-8.
- [17] 王标. 鲮鱼鱼糜在不同低温贮藏下的品质及其蛋白质理化特性的研究[D]. 太原: 山西农业大学, 2019. WANG Biao. Studies on quality and protein physical and chemical properties of carp surimi under different cold storage conditions[D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2019.
- [18] MEHTA N K, ROUT B, BALANGE A K, et al. Dynamic viscoelastic behaviour, gelling properties of myofibrillar proteins and histological changes in shrimp (*L. vannamei*) muscles during ice storage[J/OL]. Aquaculture and Fisheries, 2021.
- [19] WANG X, XIONG Y L, SATO H, et al. Controlled cross-linking with glucose oxidase for the enhancement of gelling potential of pork myofibrillar protein[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(50): 9523-9531.
- [20] XIE Y S, YU X L, WANG Z M, et al. The synergistic effects of myofibrillar protein enrichment and homogenization on the quality of cod protein gel[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 127: 107468.
- [21] UTRERA M, MORCUENDE D, ESTÉVEZ M. Temperature of frozen storage affects the nature and consequences of protein oxidation in beef patties[J]. Meat Science, 2014, 96(3): 1250-1257.
- [22] LU H, ZHANG L T, LI Q Z, et al. Comparison of gel properties and biochemical characteristics of myofibrillar protein from bighead carp (*Aristichthys nobilis*) affected by frozen storage and a hydroxyl radical-generation oxidizing system[J]. Food Chemistry, 2017, 223: 96-103.
- [23] LIU Q, CHEN Q, KONG B H, et al. The influence of superchilling and cryoprotectants on protein oxidation and structural changes in the myofibrillar proteins of common carp (*Cyprinus carpio*) surimi[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 57(2): 603-611.
- [24] XIA X F, KONG B H, XIONG Y L, et al. Decreased gelling and emulsifying properties of myofibrillar protein from repeatedly frozen-thawed porcine longissimus muscle are due to protein denaturation and susceptibility to aggregation[J]. Meat Science, 2010, 85(3): 481-486.
- [25] SUN Q X, ZHANG C, LI Q X, et al. Changes in functional properties

- of common carp (*Cyprinus carpio*) myofibrillar protein as affected by ultrasound-assisted freezing[J]. Journal of Food Science, 2020,85(9): 2879-2888.
- [26] 常娅妮, 马丽珍, 杨梅, 等. 不同冷冻方式对调味鱼贮藏期间肌原纤维蛋白的影响[J]. 肉类研究, 2019,33(10): 63-68.
CHANG Yani, MA Lizhen, YANG Mei, et al. Effects of different freezing methods on myofibrillar proteins from prepared fish products during storage[J]. Meat Research, 2019, 33(10): 63-68.
- [27] 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-Food Science and Technology, 2019, 108: 106-112.
- [28] CHEN X Q, LIU H Y, LI X 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.
- [29] SUN Q X, CHEN Q, XIA X F, et al. Effects of ultrasound-assisted freezing at different power levels on the structure and thermal stability of common carp (*Cyprinus carpio*) proteins[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 54: 311-320.
- [30] ZHAO X Y, LAN W Q, ZHAI Y T, et al. Multi-frequency ultrasound: A potential method to improve the effects of surface decontamination and structural characteristics on large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) during refrigerated storage[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 79: 105787.
- [31] FLETCHER N. Food additives: preservatives[M]//Encyclopedia of food safety. Amsterdam: Elsevier, 2014: 471-473.
- [32] 谢伊莎, 傅新鑫, 郑佳楠, 等. 天然保鲜剂对预制南美白对虾贮藏品质的影响[J]. 食品工业科技, 2021,42(4): 264-270.
XIE Yisha, FU Xinxin, ZHENG Jianan, et al. Effects of bio-preservatives on the quality of pre-cooked Pacific white shrimp (*Penaeus vannamei*) during refrigerated storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(4): 264-270.
- [33] 黄昊, 何涓源, 赖思婷, 等. 青虾复配天然保鲜剂配方优化[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(24): 80-85.
HUANG Hao, HE Juanyuan, LAI Siting, et al. Formula optimization of A compound natural preservative for *Macrobrachium nipponense* [J]. Food Research and Development, 2021, 42(24): 80-85.
- [34] SHIEKH K A, BENJAKUL S, GULZAR S. Impact of pulsed electric field and vacuum impregnation with Chamuang leaf extract on quality changes in Pacific white shrimp packaged under modified atmosphere[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 149: 111899.
- [35] 吴朝凌. 纳米氧化物/壳聚糖复合抗菌涂膜材料的制备及其在鱼丸保鲜中的应用研究[D]. 锦州: 渤海大学, 2016.
WU Chaoling. Preparation of nano oxide/chitosan composite antibacterial coatings and its application in preservation of fish balls[D]. Jinzhou: Bohai University, 2016.
- [36] XIONG Y, KAMBOJ M, AJLOUNI S, et al. Incorporation of salmon bone gelatine with chitosan, gallic acid and clove oil as edible coating for the cold storage of fresh salmon fillet[J]. Food Control, 2021, 125: 107994.
- [37] 徐赵萌, 吴朝凌, 魏旭青, 等. 纳米 Ag/ZnO-壳聚糖复合涂膜对带鱼鱼丸的保鲜性能研究[J]. 渤海大学学报(自然科学版), 2020, 41(4): 303-307.
XU Zhaomeng, WU Chaoling, WEI Xuqing, et al. The preservation properties of nano-Ag/ZnO-chitosan coatings on Hairtail fish balls [J]. Journal of Bohai University (Natural Science Edition), 2020, 41(4): 303-307.
- [38] ZHENG Y, ZHOU F, ZHANG L, et al. Effect of different extent of protein oxidation on the frozen storage stability of muscle protein in obscure pufferfish (*Takifugu obscurus*) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 137: 110416.
- [39] WANG Z C, YAN Y Z, FANG Z X, et al. Application of nitric oxide in modified atmosphere packaging of tilapia (*Oreochromis niloticus*) fillets[J]. Food Control, 2019, 98: 209-215.
- [40] GUO Y C, HUANG J C, CHEN Y R, et al. Effect of grape seed extract combined with modified atmosphere packaging on the quality of roast chicken[J]. Poultry Science, 2020, 99(3): 1598-1605.
- [41] HE Y F, HUANG H, LI L H, et al. The effects of modified atmosphere packaging and enzyme inhibitors on protein oxidation of tilapia muscle during iced storage[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 87: 186-193.
- [42] ZHANG X C, HUANG W B, XIE J. Effect of different packaging methods on protein oxidation and degradation of grouper (*Epinephelus coioides*) during refrigerated storage[J]. Foods, 2019, 8 (8): 325.
- [43] LI P Y, MEI J, XIE J. Chitosan-sodium alginate bioactive coatings containing ϵ -polylysine combined with high CO₂ modified atmosphere packaging inhibit myofibril oxidation and degradation of farmed pufferfish (*Takifugu obscurus*) during cold storage[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 140: 110652.
- [44] MASNIYOM P, BENJAKUL S, VISESSANGUAN W. Combination effect of phosphate and modified atmosphere on quality and shelf-life extension of refrigerated seabass slices[J]. LWT-Food Science and Technology, 2005, 38(7): 745-756.
- [45] XIE Y, ZHOU K, CHEN B, et al. Applying low voltage electrostatic field in the freezing process of beef steak reduced the loss of juiciness and textural properties[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 68: 102600.
- [46] XIE Y, CHEN B, GUO J, et al. Effects of low voltage electrostatic field on the microstructural damage and protein structural changes in prepared beef steak during the freezing process[J]. Meat Science, 2021, 179: 108527.
- [47] QIAN S Y, LI X, WANG H, et al. Effects of low voltage electrostatic field thawing on the changes in physicochemical properties of myofibrillar proteins of bovine *Longissimus dorsi* muscle[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 261: 140-149.
- [48] 张家玮. 低压静电场协同低温对舟山带鱼保鲜效果的研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2021.
ZHANG Jiawei. Study on the effect of low-voltage electrostatic field and low temperature on the preservation of Zhoushan *Trichiurus lepturus* [D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2021.
- [49] 张珊. 低压静电场对凡纳滨对虾保鲜效果研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2021.
ZHANG Shan. Study on the effect of low voltage electrostatic field on fresh-keeping of *Litopenaeus vannamei* [D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2021.