

天然活性包装膜在冷冻肉贮藏中的应用研究进展

李波^{1,2}, 李帆¹, 陈明绘¹, 赵电波^{1,2}, 白艳红^{1,2}

(1. 郑州轻工业大学 食品与生物工程学院, 郑州 450001;

2. 河南省冷链食品质量安全控制重点实验室, 郑州 450001)

摘要: **目的** 对天然活性包装膜在冷冻肉贮藏中的应用研究进展进行总结, 为后续研究提供理论参考。

方法 在介绍反复冻融对冷冻肉品质影响的基础上, 围绕天然活性包装膜的功能成分、成膜工艺及其在冷冻肉贮藏中的应用研究予以阐述, 讨论现有研究的局限性和今后的研究方向。**结果** 冻融过程中冰晶的反复形成影响冷冻肉体系的细胞结构和理化性质, 加剧肉品品质下降; 天然活性包装膜可以通过降低干耗、抑制氧化等延长肉品货架期。**结论** 天然活性包装膜可有效保护冷冻肉品, 在肉品保鲜领域具有广阔的应用前景。

关键词: 活性包装; 冷冻肉; 反复冻融; 品质; 保鲜

中图分类号: TS205.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)11-0038-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.11.005

Research Progress on Application of Natural Active Packaging Films in Frozen Meat Storage

LI Bo^{1,2}, LI Fan¹, CHEN Ming-hui¹, ZHAO Dian-bo^{1,2}, BAI Yan-hong^{1,2}

(1. College of Food and Biological Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;

2. Henan Key Laboratory of Cold Chain Food Quality and Safety Control, Zhengzhou 450001, China)

ABSTRACT: The work aims to summarize the research progress on application of natural active packaging films in storage of frozen meat to provide theoretical reference for subsequent research. On the basis of introducing the effects of repeated freeze-thaw on the quality of frozen meat, the functional components, film forming process and application research of natural active packaging films in storage of frozen meat were introduced. The limitations of existing research and the future research direction were also discussed. Results showed that the repeated formation of ice crystals during the freeze-thaw process affected the cell structure and physicochemical properties of the frozen meat system, and aggravated the deterioration of meat. The natural active packaging film could extend the shelf life of meat by reducing dry consumption and inhibiting oxidation. Therefore, the natural active packaging film can effectively protect frozen meat and has great application potential in meat preservation.

KEY WORDS: active packaging; frozen meat; repeated freeze-thaw; quality; fresh preservation

低温冷冻是肉品广泛使用的保藏方式,可以有效减缓生化反应,降低微生物的生长速度^[1]。然而,在

冻结过程中会形成大且不规则的冰晶,破坏肌肉组织,降低其保水性,加剧脂肪和蛋白质的氧化分解。

收稿日期: 2023-04-09

基金项目: 河南省重大公益专项 (201300110100); 河南省科技攻关项目 (232102110132)

作者简介: 李波 (1986—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为食品包装安全与质量控制。

通信作者: 白艳红 (1975—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为肉品加工与质量安全控制、食品安全快速检测理论与技术。

更为严重的是,在实际生产、贮藏和销售过程中,由于冷链物流体系的不完善和运输环境的复杂多变,易造成温度波动或冷链衔接间断,使得肉品经历反复冷冻-解冻(冻融)过程^[2]。研究表明,反复冻融会造成冰晶大小形态变化,长大的冰晶对肉体系产生机械破坏作用,并且诱发脂肪和蛋白氧化变性连锁反应,进一步加剧冷冻肉感官品质、营养价值、功能性质及食用品质的下降^[3]。

目前,研究者通过物理场辅助冷冻解冻技术(如高压、超声波和电磁)以及添加生物活性抗冻物质(如冰核蛋白、抗冻蛋白、碳水化合物、多酚等)调节冰晶形态,降低反复冻融对肉及肉制品的负面影响^[4,5]。然而,快速冷冻解冻技术成本高、操作复杂;直接添加生物活性抗冻物质存在分布不均、与肉品质反应等问题。近年来,搭载功能性物质的活性包装在食品保鲜领域得到了广泛的研究,利用抗菌抗氧化功能性成分的缓慢释放及包装的阻隔性,可有效提高肉品的食用品质和延长其货架期。本文首先简要总结反复冻融对冷冻肉品质的影响规律,然后归纳肉品包装中常用的天然活性物质、活性包装膜成膜工艺,以及活性包装膜在冷冻肉贮藏中的应用研究进展,并且对现有研究存在的局限和未来研究方向进行讨论,以期天然活性包装在冷冻肉保鲜中的深入研究与应用提供参考。

1 反复冻融对肉品品质的影响

1.1 反复冻融对冰晶的影响

肉品冷冻过程中,当处于平衡温度以下时,水分子发生过冷沉淀,形成冰晶,冰晶会造成肉品汁液损失和脂肪蛋白质氧化^[5]。反复冻融过程中,当温度升高时,肉品细胞内的冰晶融化,蒸汽压差促使水分子穿过细胞膜分布在细胞间隙中;肉品再次冻结后,由于热力学效应,少部分水分子相互组合生成晶核,随后晶核与周围水分子连续组合,肉品组织内小冰晶逐步变成大冰晶^[6]。冰晶的重结晶和聚集会对肉品造成更大的质量损伤,加剧冷冻肉品质劣变。

1.2 反复冻融对肉品色泽的影响

反复冻融过程中的温度变化会促进肉品内部氧化物生成,加剧肉品色泽劣变^[7]。Wang等^[8]研究表明,经过5次冻融循环后,肉饼红度显著降低,亮度和黄度显著增加。通常红度值改变与肌红蛋白的氧化还原过程相关,反复冻融会增加肌红蛋白发生氧化还原反应的概率,导致肉品表面色泽的变化。冻融循环时温度波动引起的脂肪氧化也会使肉品黄度值增加。此外,肌肉组织内发生的生化反应和耐冷菌产生的色素也会导致肉品色泽恶化^[9]。

1.3 反复冻融对肉品保水性的影响

反复冻融过程中形成的大冰晶会破坏肉品细胞结构,导致肉品组织内汁液流失严重,使其持水力下降^[8]。反复冻融对肌原纤维蛋白的损害也会引起肉品持水能力下降^[10]。Zhang等^[11]研究发现,随着反复冻融次数的增多,肌原纤维蛋白酶的活性逐渐下降,肉品持水性逐渐降低。

1.4 反复冻融对肉品质构特性的影响

质构特性直接反映肉品的食用品质。有研究发现,与新鲜肉相比,肉品在经历反复冻融后其嫩度无显著变化,但硬度、咀嚼性、弹性总体呈降低趋势,肉品黏附性增加^[12]。反复冻融使肉品汁液流失加重,肌原纤维降解,由此造成肉品的硬度、弹性和其他质构特性下降^[13]。与此同时,微生物的作用使肉品腐败速度加快,产生黏液,进而使肉品黏附性增强^[14]。

1.5 反复冻融对肉品 pH 的影响

反复冻融过程中肉品 pH 值呈现先降低后逐渐升高的趋势。pH 值的降低可能是肉中的中性脂肪酸和磷脂酶解产生了游离脂肪酸,后期上升可能是由于肉品内部的蛋白质降解,产生大量的碱性氨基酸^[15]。同时,微生物酶分解蛋白质生成的大量碱性化合物也会使 pH 值升高^[16]。

1.6 反复冻融对肉品氧化的影响

反复冻融能够引起肉品蛋白质和脂肪氧化。研究表明,在经历反复冻融后,肉品内部所形成的大冰晶破坏了细胞完整性,释放出过氧化物,导致线粒体和溶酶体酶泄漏,促进了蛋白质氧化^[17]。此外,随着反复冻融次数的增加,蛋白质内部巯基基团间产生相互作用,生成大量二硫键,造成蛋白质氧化降解^[18]。高梦雪^[19]研究发现,随着反复冻融次数的增加,肌原纤维蛋白构象的改变会促使蛋白质氧化,蛋白质表面疏水性也呈增强趋势。

反复冻融过程中形成的大冰晶能够损伤肌纤维,释放出氧化酶、自由基、血红素等促氧化剂,促进脂肪氧化。大冰晶也会直接破坏细胞膜,导致脂肪与氧接触面增大,加速脂肪氧化。脂质氧化生成的自由基及氢过氧化物,易分解成戊醛、己醛等二次氧化产物,使肉品出现酸败和色泽劣变^[20]。

2 肉品天然活性包装膜的主要成分及制备

肉品活性包装膜常以生物聚合物为基材,添加增塑剂,并加入天然活性物质增加膜的功能特性。

2.1 肉品活性包装膜的主要成分

2.1.1 成膜基材

用于肉品活性包装基材的生物聚合物有多糖、蛋白质、脂质。多糖主要包括淀粉、果胶、羧甲基纤维素、海藻酸盐、壳聚糖、魔芋葡甘聚糖及其衍生物等。大多数多糖分子含有羟基、氨基等亲水基团,依靠氢键、范德华力等作用成膜^[21]。多糖膜结构简单、力学性能良好,但是较强的亲水性使膜材的阻水性较差。蛋白类依其来源分为植物分离蛋白(如大豆蛋白、小麦蛋白、玉米醇溶蛋白等)和动物分离蛋白(如明胶、胶原蛋白、乳清蛋白)。蛋白膜的力学性能较差,需要通过热变性、化学处理、酶法改性等方法进行改良^[22]。脂质膜常用基质有蜂蜡、石蜡、乙酰化单甘脂、有机脂肪酸、树脂等。脂类物质极性低、疏水性强,因此脂质膜阻湿性好,可延缓食品的水分散失,常应用于畜禽和海产品的包装^[23]。但脂质膜的力学性能较差,也需要通过改性或共混扩大其应用范围。

2.1.2 增塑剂

生物聚合物通常脆且硬,限制了其在食品包装上的应用。加入增塑剂可以影响聚合物分子间相互作用、破坏氢键、减少膜内结晶区域,增强膜的柔韧性和强度,更有利于生物聚合物基质膜在食品包装上的应用。常用的增塑剂包括甘油及其衍生物、山梨糖醇、聚乙二醇等。

2.1.3 肉品包装中常用的天然活性物质

天然活性物质是活性包装发挥防腐保鲜效果的关键,主要有抗菌和抗氧化两大类功能性物质,按照来源可将其分为动物源、微生物源和植物源活性物质。

常用的动物源活性物质有壳聚糖、冰结构蛋白等。壳聚糖存在于甲壳动物外壳,具有良好的抗氧化和抗菌特性^[24],广泛用于果蔬及肉品保鲜。Vieira等^[25]通过壳聚糖和丁香精油结合涂层处理冷冻鱼片,可有效延缓鱼片脂肪氧化,抑制细菌生长。冰结构蛋白具有热活性,其对冰晶的有效修饰有助于减少肉品组织损伤,延缓冷冻储存过程中再结晶的发生。Du等^[26]使用冰结构蛋白浸渍处理鱼肉,以-25℃冷冻7d、4℃解冻12h为一次冻融过程,经历5次冻融循环后,发现鱼肉的水分迁移和微观结构破坏得到有效抑制。

微生物源活性物质主要有乳酸链球菌素(Nisin)、 ϵ -聚赖氨酸等。Nisin提取自乳酸链球菌发酵产物,属于阳离子肽,可以通过疏水作用和静电相互作用与细胞壁上的阴离子成分相互作用,并且抑制细胞壁合成,从而达到抑菌效果^[27]。磨佳琳等^[28]使用Nisin处理牛肉,发现Nisin处理可以有效减缓牛肉氧化,降低微生物数量。 ϵ -聚赖氨酸为白色链霉菌

的代谢产物,对革兰氏阳性、阴性菌、霉菌和酵母菌均有良好的抑菌效果^[29]。在我国, ϵ -聚赖氨酸被逐渐用于各种食品领域,同时也用于包装膜以提高膜的抗菌特性。

植物源活性物质主要包括精油和植物提取物。精油是从植物器官中提取出的复杂化合物^[30],含有高浓度的醛、酚类物质,可破坏微生物细胞膜、细胞质膜,起到高效抑菌和抗氧化作用^[31]。Guerrero等^[32]使用百里香精油、大蒜精油及海藻酸钠制备涂层并处理羊肉,结果表明,精油涂层处理可有效改善冷冻羊肉色泽劣变及汁液流失。植物提取类活性物质主要包括植物多酚、花青素等^[33]。 α -生育酚是一种天然脂溶性抗氧化剂,通过提供氢原子和阻止氢过氧化的分解实现抗氧化效果^[34],已用于肉及肉制品的保鲜。谢菁等^[35]研究发现添加质量分数为1%的 α -生育酚的包装膜能显著延缓冷鲜猪肉硫代巴比妥酸反应物(Thiobarbituric Acid Reactive Substances, TBARS)和总挥发性盐基氮(Total Volatile Basic Nitrogen, TVB-N)值的升高,并能改善肉色。茶多酚是茶叶中多酚类物质的总称,通过结合自由基、螯合金属离子抑制脂质氧化,目前已广泛用于水产、畜禽的保鲜^[36]。梁杰等^[37]研究表明负载茶多酚的海藻酸钠-玉米淀粉薄膜可有效降低鸡肉在储存过程中的pH值,复合膜展现出良好的抗氧化和保鲜能力。

2.2 活性包装膜的制备

目前,主要通过流延法、涂层、螺杆挤出、静电纺丝、3D组装等技术制备负载天然活性物质的膜材,具体成膜工艺如图1所示。

2.2.1 流延法

流延法是将成膜基材与活性物质溶解混合,加入适量增塑剂,经搅拌、均质、过滤、脱气等工序后将成膜液均匀地流延于平板,再经干燥制成薄膜的方法。该制膜法需通过加热来去除和回收溶剂,耗能较高^[38]。

2.2.2 涂层法

涂层法可利用基材负载活性物质通过喷洒、浸渍等方式在食物表面形成透明的薄层,能有效阻隔空气,降低肉品干耗^[39],也可用于复合膜制备。将涂膜液覆盖于原有薄膜上进行二次复合,所得复合膜的力学性能和功能特性都优于原有薄膜。

2.2.3 螺杆挤出技术

螺杆挤出是一种干法加工技术,被广泛应用于聚合物工业中传统塑料包装的生产^[40]。相比传统的流延法,螺杆挤出技术具有速度快、操作简单等优点。然而多数天然活性物质的热稳定性差,螺杆挤出过程中所施加的高温、高压易造成活性物质作用的减弱或丧失,因此该法在天然活性膜的制备中应用不广泛^[41]。

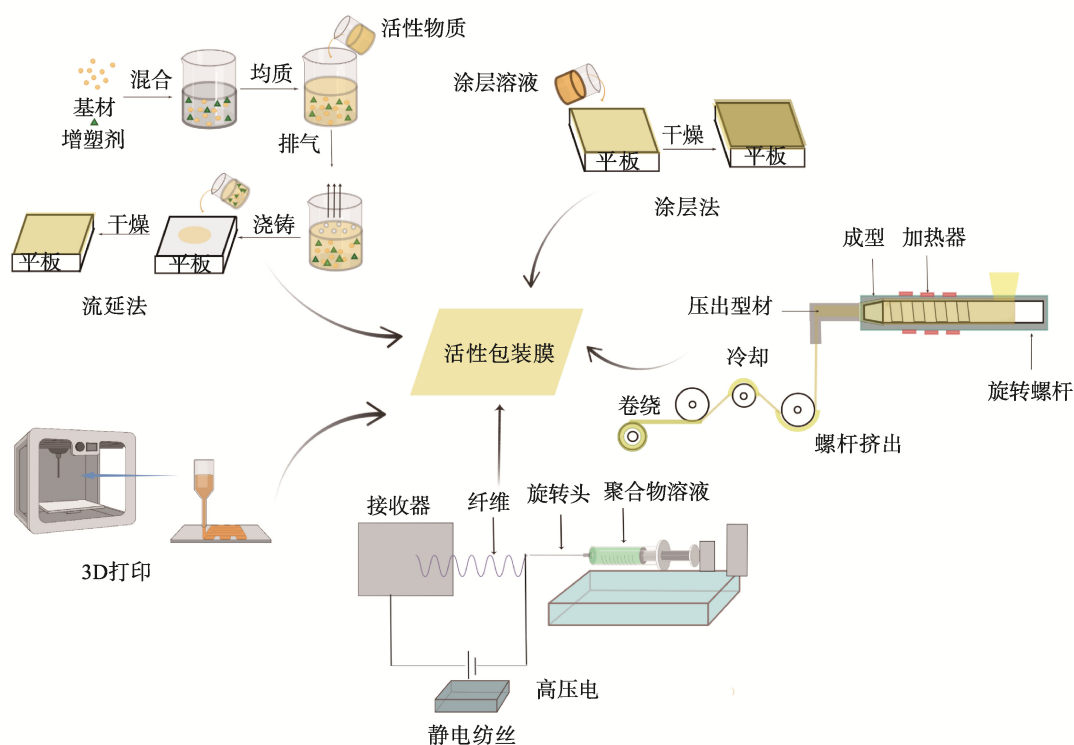


图 1 天然活性包装膜材成膜工艺

Fig.1 Film-forming technology of natural active packaging films

2.2.4 静电纺丝技术

静电纺丝技术是利用静电作用力制备微/纳米纤维材料，其工作原理是在高压静电场作用下，利用电场力及表面张力使纺丝溶液在针头处形成“泰勒锥”；随着电场力的逐渐增大，液滴变成带电射流喷向接收板，射流飞行过程中在静电斥力的作用下进一步劈裂、细化；经过溶剂蒸发，最终在接收板上固化形成纳米纤维膜。相较于传统的活性包装材料制备技术，静电纺丝技术条件温和可控，制得的材料比表面积大、孔隙率高，且对活性物质的包埋率高^[42]。

2.2.5 3D 打印技术

3D 打印技术是一种集计算机、精密驱动、数控和材料科学于一体的新型快速成型技术^[43]。打印材料通过由形状设计模型控制的喷嘴喷出。3D 打印具有生产速度快、周期短、成本低、污染小、适应性强等优势，可通过对所提供的材料进行逐层沉积，构建复杂的 3D 结构抗菌包装膜。然而，目前 3D 打印活性包装膜的研究尚处于起步阶段。

3 天然活性包装膜在冷冻肉贮藏中的应用

天然活性包装膜的应用方式主要为干法或湿法。干法是将膜溶液在一定条件下干燥制成膜片直接用于肉品包装。湿法是将膜溶液以浸泡、喷洒、涂刷等方式作用于肉品表面，在肉品表面形成一层薄的涂

层。本节综述天然活性包装膜在冷冻畜禽肉及水产品中的应用研究。

3.1 畜禽肉

近年来研究发现，使用天然活性包装膜包裹处理冷冻畜禽肉，可有效降低肉品干耗、抑制蛋白质和脂肪氧化。Santos 等^[44]制备负载针叶樱桃甘蔗渣提取物的明胶复合薄膜来包裹牛肉饼，以聚氯乙烯塑料包裹作为对照，样品于 -60°C 下储存 15 d，发现复合薄膜处理的样品较对照组样品干耗更少，并且有效延缓了牛肉饼氧化。Akcan 等^[45]以乳清蛋白为基材，添加月桂草、鼠尾草提取物制成复合薄膜并包裹肉丸，于 -18°C 下储存 60 d，结果表明复合膜具有优良的抗氧化性特，在冷冻储存过程中，处理组肉丸的 TBARS 值和 TVB-N 值显著低于对照组的。Song 等^[46]将迷迭香油树脂和绿茶提取物分别涂覆于聚对苯二甲酸乙二醇酯制备复合薄膜，将复合薄膜制成小袋并密封包裹盛有猪肉的培养皿，随后将样品冷冻保藏。研究发现复合薄膜处理延缓了猪肉脂肪和蛋白质氧化，绿茶提取物中的儿茶素可以在没有迁移的情况下清除包装内的自由基，同时不影响猪肉的感官特性，与涂覆迷迭香油树脂的薄膜相比，绿茶提取物薄膜表现出更高的抗氧化能力。

3.2 水产品

与畜禽肉相比，水产品的水分含量更高，更易受微生物污染和环境影响而腐败变质^[47]。目前研究较多

表 1 天然活性包装膜在冷冻肉中的应用
Tab.1 Application of natural active packaging films in frozen meat

应用食品	活性物质	基材	处理方式	主要结果	参考文献
羊肉	百里香精油、大蒜精油	海藻酸钠	涂层	降低了羊肉在冷冻过程中的干耗、色泽劣变、脂肪氧化	[32]
牛肉饼	针叶樱桃甘蔗渣提取物	明胶	流延成膜	改善了肉品色泽，减少了牛肉饼蛋白质和脂肪氧化	[44]
肉丸	月桂草、鼠尾草提取物	乳清蛋白	流延成膜	可有效降低肉丸脂质氧化	[45]
猪肉	迷迭香油树脂、绿茶提取物	聚对苯二甲酸乙二醇	流延成膜	复合膜具有极强的抗氧化性，延缓了猪肉脂肪和蛋白质氧化	[46]
鱼片	丁香精油	壳聚糖	浸渍	涂层可降低冷冻大比目鱼鱼片的脂质氧化和微生物生长	[25]
大黄鱼	表没食子儿茶素没食子酸酯	黄花胶-海藻酸钠	涂层	延缓了鱼肉蛋白质和脂肪氧化（抑制过氧化氢、丙二醛和碳基的生成，保持较高的Ca ²⁺ -ATP 酶活性和巯基含量），延缓鲜鱼的肌原丝降解	[50]
鸡肉	月桂精氨酸	壳聚糖	涂层	提高了鸡肉的氧化稳定性，较好维持了鸡肉的感官品质	[51]
鲤鱼	透明质酸	大豆β-伴球蛋白	涂层	有效抑制微冻鲤鱼肉持水力、肌原纤维蛋白、巯基和Ca ²⁺ -ATP 酶活性的下降，延缓TVB-N、TBARS、可溶性肽、电导率和羰基的增长	[52]

的是使用活性物质涂层处理改善水产品 在冷冻储存中的品质劣变。冯潇等^[48]利用藜麦蛋白 Pickering 乳液处理鱼糜，将其加热制备成蛋白凝胶进行冻融处理并检测，结果发现添加 Pickering 乳液可抑制冻融引发的冰晶尺寸增大，降低鱼糜干耗，延缓鱼肉质构的变化速率，提高蛋白凝胶的稳定性。Du 等^[26]研究了冬小麦蛋白对鱼肉在冻融循环过程中的品质影响，发现与对照组相比，经冬小麦蛋白处理的样品的离心损失、解冻损失和蒸煮损失都明显减少，样品的微观结构也有明显改善。于淑池等^[49]将卵形鲳鲹鱼片浸泡于聚葡萄糖、茶多酚、低聚木糖和乳酸钠的混合液后进行冷冻处理，研究发现活性物质浸渍处理可延缓鱼肉蛋白质变性、降低鱼肉冻藏期间的干耗，具有良好的保鲜效果。

4 结语

目前，天然活性包装膜在冷冻肉中的应用方式多为涂层处理。涂层处理能够在肉品表面形成一层阻隔，结合活性物质释放，有助于延缓冷冻肉脂肪和蛋白质氧化，保持肉品色泽。然而，对经历反复冻融过程的肉品而言，复杂的运输贮藏条件以及多变的肉品组织状态容易破坏涂层结构，降低其阻隔性，加大冷冻肉与空气的接触，并且影响其中天然活性物质的释放。基于此，开发负载天然功能性成分且具有良

好机械性、疏水性、阻隔性、低温稳定性的活性包装膜材，有利于改善和提高冷冻肉，尤其是反复冻融肉的品质。

基于生物聚合物和天然活性成分的活性包装在提高冷冻肉品质方面具有明显优势，但其应用仍然存在一些问题。生物聚合物的机械性、稳定性、阻隔性较差，难以满足食品包装材料的特性要求。已发现的天然活性成分有限，且对高温、高压条件的敏感性较强，将其应用于工业化生产仍具有巨大挑战。今后应加强生物材料的技术研发，通过基材筛选和材料改性进一步构建功能特性优良的冷冻肉活性包装膜材；探索新的天然活性物质，综合运用微生物和组学方法研究其作用机理，加强天然活性包装膜制备工艺的研究，维持活性成分的长效稳定。为顺应人们对安全肉品的消费需求，有必要借助数学模型、计算机模拟等开展活性包装膜中功能性物质的释放动力学研究，并结合毒理学和食品感官科学系统评估活性成分的生物安全性、最大允许添加量及其对肉品营养和感官特性的影响。

参考文献：

[1] 刘妙，杨宪时，张小伟，等. 复配保鲜剂对反复冻融鲢鱼品质的影响[J]. 食品与发酵工业，2016，42(5): 140-145.

- LIU Miao, YANG Xian-shi, ZHANG Xiao-wei, et al. Effect of Complex Preservatives on the Quality of Repeated Freeze-Thaw Squid[J]. Food and Fermentation Industries, 2016, 42(5): 140-145.
- [2] JIANG Qing-qing, NAKAZAWA N, HU Ya-qin, et al. Changes in Quality Properties and Tissue Histology of Lightly Salted Tuna Meat Subjected to Multiple Freeze-Thaw Cycles[J]. Food Chemistry, 2019, 293: 178-186.
- [3] 崔晓颖, 赵鑫琦, 刘春云, 等. 冰晶形貌对反复冻融肉体系稳定性影响的研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(11): 214-221.
- CUI Xiao-ying, ZHAO Xin-qi, LIU Chun-yun, et al. Progress in Understanding the Effect of Ice Crystal Morphology on the Stability of Repeatedly Frozen-thawed Meat System[J]. Food Science, 2022, 43(11): 214-221.
- [4] 张帅, 徐乐, 梁小慧, 等. 肉类冷冻解冻技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(16): 5363-5368.
- ZHANG Shuai, XU Le, LIANG Xiao-hui, et al. Research Progress of Freezing and Defrosting Technology of Meat Product[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(16): 5363-5368.
- [5] DU Xin, WANG Bo, LI Hai-jing, et al. Research Progress on Quality Deterioration Mechanism and Control Technology of Frozen Muscle Foods[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2022, 21(6): 4812-4846.
- [6] NIAN Lin-yu, CAO Ai-ling, CAI Lu-yun, 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, 219: 139-148.
- [7] 李媛媛, 赵钜阳, 韩齐, 等. 反复冻融对肉制品品质影响的研究进展[J]. 食品工业, 2015, 36(8): 243-248.
- LI Yuan-yuan, ZHAO Ju-yang, HAN Qi, et al. Influence of Freeze-Thaw Cycles on the Quality of Meat: A Review[J]. The Food Industry, 2015, 36(8): 243-248.
- [8] WANG Bo, LI Fang-fei, PAN Nan, et al. Effect of Ice Structuring Protein on the Quality of Quick-Frozen Patties Subjected to Multiple Freeze-Thaw Cycles[J]. Meat Science, 2021, 172: 108335.
- [9] 周昱宇, 毛云, 王立娜, 等. 冻融次数对藏羊肉品质特性的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(11): 342-349.
- ZHOU Yu-yu, MAO Yun, WANG Li-na, et al. Effect of Freezing-Thawing Times on Quality Characteristics of Tibetan Mutton[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(11): 342-349.
- [10] 乔鑫, 潘丽, 刘莹, 等. 反复冻融对羊肉蛋白质氧化及其品质影响的研究[J]. 食品科技, 2021, 46(9): 109-115.
- QIAO Xin, PAN Li, LIU Ying, et al. Effect of Repeated Freezing and Thawing on Protein Oxidation and Quality of Mutton[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(9): 109-115.
- [11] ZHANG Yue-mei, PUOLANNE E, ERTBJERG P. Mimicking Myofibrillar Protein Denaturation in Frozen-Thawed Meat: Effect of pH at High Ionic Strength[J]. Food Chemistry, 2021, 338: 128017.
- [12] 陈俊文, 刘巧瑜, 李湘銮, 等. 解冻方式、反复冻融对猪肉品质的影响[J]. 食品工业, 2021, 42(4): 14-17.
- CHEN Jun-wen, LIU Qiao-yu, LI Xiang-luan, et al. Effects of Freezing Methods and Repeated Freezing-Thawing on Pork Quality[J]. The Food Industry, 2021, 42(4): 14-17.
- [13] WARNER R D, WHEELER T L, HA M, et al. Meat Tenderness: Advances in Biology, Biochemistry, Molecular Mechanisms and New Technologies[J]. Meat Science, 2021, 185(11): 108657.
- [14] 赵立柱, 魏占楠, 张燕, 等. 冻融次数对牦牛肉胶原蛋白特性及品质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(7): 107-114.
- ZHAO Li-zhu, WEI Zhan-nan, ZHANG Yan, et al. Effect of Freezing-Thawing Times on Collagen Properties and Quality of Yak Meat[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(7): 107-114.
- [15] 陈丽丽, 张树峰, 袁美兰, 等. 反复冻融对脆肉鲩鱼肉营养品质和质构特性的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2019, 40(1): 72-78.
- CHEN Li-li, ZHANG Shu-feng, YUAN Mei-lan, et al. Effect of Freeze-Thaw Cycles on Nutritional Quality and Texture Change of *Ctenopharyngodon Idellus* C. et V[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 40(1): 72-78.
- [16] WEI Hua-mao, TIAN Yuan-yong, YAMASHITA T, et al. Effects of Thawing Methods on the Biochemical Properties and Microstructure of Pre-Rigor Frozen Scallop Striated Adductor Muscle[J]. Food Chemistry, 2020, 319: 126559.
- [17] 李孟孟, 李腾飞, 杜鹏飞, 等. 反复冻融对羊肉品质的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(11): 290-294.
- LI Meng-meng, LI Teng-fei, DU Peng-fei, et al. Effect of Freeze-Thaw Cycles on Quality Characteristics of Mutton[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(11): 290-294.
- [18] YANG Fang, JING Dian-tao, DIAO Yu-duan, 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*, 2019, 118: 108762.
- [19] 高梦雪. 抗氧化涂层对冷冻分割牛肉贮藏性能及氧化稳定性的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021. GAO Meng-xue. Effect of Antioxidant Coating on the Storage Performance and Oxidative Stability of Frozen Cut Beef [D]. Huhehaote: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.
- [20] PAN Nan, DONG Chun-hui, DU Xin, 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] CAZON P, VELAZQUEZ G, RAMÍREZ J A, et al. Polysaccharide-Based Films and Coatings for Food Packaging: A Review[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 68: 136-148.
- [22] 徐晶, 程文健, 金红, 等. 胶原蛋白膜改性技术研究进展[J]. *农产品加工*, 2018(1): 64-67. XU Jing, CHENG Wen-jian, JIN Hong, et al. Research Progress of Modification Technologies for Collagen Film[J]. *Farm Products Processing*, 2018(1): 64-67.
- [23] UMARAW P, VERMA A K. Comprehensive Review on Application of Edible Film on Meat and Meat Products: An Eco-Friendly Approach[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2017, 57(6): 1270-1279.
- [24] 陈佳新, 陈倩, 孔保华. 壳聚糖的保鲜机制及其在肉与肉类制品保鲜中应用的研究进展[J]. *肉类研究*, 2016, 30(10): 35-39. CHEN Jia-xin, CHEN Qian, KONG Bao-hua. Preservative Mechanism of Chitosan and Its Application in Meat Products[J]. *Meat Research*, 2016, 30(10): 35-39.
- [25] VIEIRA B, MAFRA J, BISPO A, et al. Combination of Chitosan Coating and Clove Essential Oil Reduces Lipid Oxidation and Microbial Growth in Frozen Stored Tambaqui (*Colossoma Macropomum*) Fillets[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 116: 108546.
- [26] DU Xin, CHANG Peng, TIAN Jia-yi, et al. Effect of Ice Structuring Protein on the Quality, Thermal Stability and Oxidation of Mirror Carp (*Cyprinus Carpio L.*) Induced by Freeze-Thaw Cycles[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 124: 109140.
- [27] 姚文俊, 杨勇, 刘希, 等. 微生物源乳酸链球菌素(Nisin)及在食品中应用研究进展[J]. *中国调味品*, 2023, 48(1): 215-220. YAO Wen-jun, YANG Yong, LIU Xi, et al. Research Progress of Nisin from Microorganism and Its Application in Food[J]. *China Condiment*, 2023, 48(1): 215-220.
- [28] 磨佳琳, 刘程惠, 戴祥英, 等. Nisin 抑制冷鲜牛肉氧化的研究[J]. *肉类工业*, 2019(12): 38-42. MO Jia-lin, LIU Cheng-hui, DAI Xiang-ying, et al. Study on Inhibiting Oxidation of Chilled Beef by Nisin[J]. *Meat Industry*, 2019(12): 38-42.
- [29] YE Ruo-song, XU Heng-yi, WAN Cui-xiang, et al. Antibacterial Activity and Mechanism of Action of ϵ -Poly-L-Lysine[J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2013, 439(1): 148-153.
- [30] RIBEIRO J S, SANTOS M J M C, SILVA L K R, et al. Natural Antioxidants Used in Meat Products: A Brief Review[J]. *Meat Science*, 2019, 148: 181-188.
- [31] 李娜, 刘小杰, 梅俊, 等. 药食同源植物精油在食品保鲜中的应用进展[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(23): 298-304. LI Na, LIU Xiao-jie, MEI Jun, et al. Research Progress on Application of Medicinal and Edible Homologous Essential Oils in Food Preservation[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(23): 298-304.
- [32] GUERRERO A, FERRERO S, BARAHONA M, et al. Effects of Active Edible Coating Based on Thyme and Garlic Essential Oils on Lamb Meat Shelf Life after Long-Term Frozen Storage[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100(2): 656-664.
- [33] 阮程程, 张钰萌, 熊国远, 等. 抗氧化可食膜在食用油和肉品保鲜中的应用[J]. *包装工程*, 2019, 40(23): 32-39. RUAN Cheng-cheng, ZHANG Yu-meng, XIONG Guo-yuan, et al. Application of Antioxidant Edible Film in Preservation of Edible Oil and Meat[J]. *Packaging Engineering*, 2019, 40(23): 32-39.
- [34] GEORGANTELIS D, BLEKAS G, KATIKOU P, et al. Effect of Rosemary Extract, Chitosan and α -Tocopherol on Lipid Oxidation and Colour Stability during Frozen Storage of Beef Burgers[J]. *Meat Science*, 2007, 75(2): 256-264.
- [35] 谢菁, 卢立新, 潘嘹, 等. 基于 α -生育酚抗氧化膜的冷鲜猪肉保鲜包装研究[J]. *食品与机械*, 2019, 35(5): 132-136. XIE Jing, LU Li-xin, PAN Liao, et al. Study on Preservation Packaging of Chilled Pork Based On α -Tocopherol Antioxidant Films[J]. *Food & Machinery*, 2019, 35(5): 132-136.
- [36] 鞠健, 乔宇, 李冬生, 等. 茶多酚对冷藏鲈鱼鲜度变化及肌原纤维蛋白氧化的影响[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(2): 290-294. JU Jian, QIAO Yu, LI Dong-sheng, et al. Effect of Tea Polyphenols on the Freshness and the Oxidation of Myofibrillar Protein of Weever during Cold Storage[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(2): 290-294.
- [37] 梁杰, 蔡力锋, 刘涛, 等. 茶多酚对海藻酸钠/玉米淀

- 粉复合膜的影响及保鲜应用[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(1): 7-16.
- LIANG Jie, CAI Li-feng, LIU Tao, et al. Effect of Tea Polyphenols on Sodium Alginate/Corn Starch Composite Film and Its Application in Freshness Preservation[J]. Food Research and Development, 2022, 43(1): 7-16.
- [38] 刘妍靖, 李西月, 刘跃洲, 等. 可食用抗菌膜在食品包装领域的应用及研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(9): 331-339.
- LIU Yan-jing, LI Xi-yue, LIU Yue-zhou, et al. Application of Edible Antibacterial Film in Food Packaging Field: A Review[J]. Food Science, 2023, 44(9): 331-339.
- [39] 高立红. 复合涂膜保鲜液对冷鲜肉保鲜效果研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
- GAO Li-hong. Study on the Preservation Effect of Compound Coating Preservation Liquid on Chilled Fresh Meat[D]. Shenyang: Shen Yang Agricultural University, 2018.
- [40] SANI M A, AZIZI-LALABADI M, TAVASSOLI M, et al. Recent Advances in the Development of Smart and Active Biodegradable Packaging Materials[J]. Nanomaterials, 2021, 11(5): 1331.
- [41] CUI Cong-li, JI Na, WANG Yan-fei, et al. Bioactive and Intelligent Starch-Based Films: A Review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 116(4): 854-869.
- [42] 冯坤, 皇甫露露, 相启森, 等. 静电纺丝技术在食品抗菌保鲜中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(20): 6554-6562.
- FENG Kun, HUANGFU Lu-lu, XIANG Qi-sen, et al. Research Progress on the Application of Electrospinning Technology in Food Antibacterial Preservation[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(20): 6554-6562.
- [43] LEAW Z E, KONG I, PUI L P. 3D Printed Corn Starch-Gelatin Film with Glycerol and Hawthorn Berry (*Crataegus Pinnatifida*) Extract[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(9): 15752.
- [44] SANTOS E D, SOUSA T C D, NETO D C D, et al. Edible Active Film Based on Gelatin and Malpighia Emarginata Waste Extract to Inhibit Lipid and Protein Oxidation in Beef Patties[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 154: 112837.
- [45] AKCAN T, ESTÉVEZ M, SERDAROĞLU M. Antioxidant Protection of Cooked Meatballs During Frozen Storage by Whey Protein Edible Films with Phytochemicals from *Laurus Nobilis* L. and *Salvia Officinalis*[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 77: 323-331.
- [46] SONG Xue-chao, CANELLAS E, WRONA M, et al. Comparison of Two Antioxidant Packaging Based on Rosemary Oleoresin and Green Tea Extract Coated on Polyethylene Terephthalate for Extending the Shelf Life of Minced Pork Meat[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2020, 26: 100588.
- [47] 王帅, 任丹丹, 吴哲, 等. 多酚类化合物及其在水产品保鲜中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(21): 7200-7206.
- WANG Shuai, REN Dan-dan, WU Zhe, et al. Research Progress on Polyphenols and Its Application in Aquatic Products Preservation[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(21): 7200-7206.
- [48] 冯潇, 张帆, 陈颖, 等. 藜麦蛋白 Pickering 乳液添加对鱼糜蛋白凝胶冻融稳定性的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(10): 2038-2046.
- FENG Xiao, ZHANG Fan, CHEN Ying, et al. Effects of Adding Quinoa Protein Pickering Emulsion on Freeze-Thaw Stability of Fish Surimi Gel[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(10): 2038-2046.
- [49] 于淑池, 谢家淑. 复合抗冻剂的配方优化及对卵形鲳鲹冻藏品质的影响[J]. 食品科技, 2020, 45(7): 267-274.
- YU Shu-chi, XIE Jia-shu. Optimization of the Formulation of Composite Cryoprotectant and Its Effects on the Quality of Frozen *Trachinotus Ovatus*[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(7): 267-274.
- [50] PEI Ju-xin, MEI Jun, WU Gan, et al. Gum Tragacanth-Sodium Alginate Active Coatings Containing Epigallocatechin Gallate Reduce Hydrogen Peroxide Content and Inhibit Lipid and Protein Oxidations of Large Yellow Croaker (*Larimichthys Crocea*) During Superchilling Storage[J]. Food Chemistry, 2022, 397: 133792.
- [51] ABDEL-NAEEM H H S, ZAYED N E R, MANSOUR H A. Effect of Chitosan and Lauric Arginate Edible Coating on Bacteriological Quality, Deterioration Criteria, and Sensory Attributes of Frozen Stored Chicken Meat[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 150: 111928.
- [52] 王鹏, 郭丽, 王红新, 等. 透明质酸-大豆 β -伴球蛋白涂膜对微冻鲤鱼的保鲜效果[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(23): 7613-7621.
- WANG Peng, GUO Li, WANG Hong-xin, et al. Preservation Effect of Hyaluronic Acid-Soybean β -Conglycinin Coating on Slightly Frozen Carp[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(23): 7613-7621.