

鱼糜在冻藏阶段的品质影响因素及控制技术

闫艺伟¹, 章学来¹, 莫凡洋², 张信荣²

(1. 上海海事大学 商船学院, 上海 201306; 2. 北京大学 工学院, 北京 100871)

摘要: **目的** 进一步提高鱼糜在冻藏过程中的品质, 提高其产品附加值, 满足消费者对高品质鱼糜的要求。**方法** 介绍鱼糜的物理化学特性和腐败机理, 分析冻结时间、冻结温度、冻结速率和冻融循环对鱼糜冻藏阶段品质变化的影响, 综述低温液氮速冻、物理场辅助冻结为代表的新型冻结方式和抗冻剂在冷冻鱼糜品质控制中的应用, 并对其发展进行展望。**结论** 在鱼糜冻藏过程中, 应综合考虑冻藏时间和冻藏温度的影响, 同时尽量减小温度波动, 防止冻融循环的发生; 为了更好地保持鱼糜的品质, 应进一步研究和优化新型冻结技术在鱼糜中的应用, 并探究新型抗冻剂和复合抗冻剂的可行性, 以期实现产业化应用。

关键词: 鱼糜; 冻藏; 冻结速率; 抗冻剂; 研究进展

中图分类号: TS254.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)19-0152-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.19.017

Quality Influencing Factors and Control Techniques of Surimi During Frozen Storage

YAN Yi-wei¹, ZHANG Xue-lai¹, MO Fan-yang², ZHANG Xin-rong²

(1. Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China; 2. College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

ABSTRACT: The work aims to further improve the quality of surimi during frozen storage, increase the added value of its products, and meet consumers' requirements for high-quality surimi. Physicochemical characteristics and corruption mechanism of surimi were introduced. Then, the effects of freezing time, freezing temperature, freezing rate and freeze-thaw cycles on the quality of surimi during frozen storage were analyzed. The application of new freezing methods represented by low-temperature liquid nitrogen freezing and physical field assisted freezing and the application of antifreeze in the quality control of frozen surimi were reviewed. And their development was prospected. In the frozen storage of surimi, the effects of freezing time and temperature should be comprehensively considered, while temperature fluctuations should be minimized to prevent the occurrence of freeze-thaw cycles. To preserve the quality of surimi preferably, the application of new freezing technology in surimi should be further studied and optimized, and the feasibility of new antifreeze and composite antifreeze should be explored to achieve industrial application.

KEY WORDS: surimi; frozen storage; freezing rate; antifreeze; research progress

据中国渔业统计年鉴^[1]报道, 2020 年我国全年水产品的总产量为 6 549.02 万 t, 较 2019 年增长了约 1.06%, 其中海水和淡水产品的产量分别为 3 314.38 万 t 和 3 234.64 万 t。渔业已成为我国农业中的重要

收稿日期: 2021-11-27

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFD0901002)

作者简介: 闫艺伟 (1997—), 男, 硕士生, 主攻水产品冷冻与保鲜。

通信作者: 张信荣 (1973—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为工程热物理。

产业形式, 同时也是农业农村经济的重要组成部分。鱼肉中含有蛋白质、维生素 A 及多种矿物质等, 营养丰富^[2], 鱼油中含有丰富的长链不饱和脂肪酸, 如亚麻酸、亚油酸、花生四烯酸、二十碳五烯酸 (Eicosapentaenoic Acid, EPA)、二十二碳六烯酸 (Docosahexaenoic Acid, DHA) 等^[3]多种对人体健康有益的生理活性成分。其中, EPA 和 DHA 在调节脂蛋白、血压、哮喘、心脏功能和抗炎等方面有着积极作用^[4]。

作为鱼类加工后的产物, 鱼糜及鱼糜制品已受到消费者的广泛认可和喜爱。鱼糜指将原料鱼经去头尾、去鳞和内脏等预处理后, 通过采肉机分离鱼肉, 再经漂洗、精滤、脱水等工序, 最终得到的成品^[5]。鱼糜制品以鱼糜为原料, 在鱼糜中加入食盐、水及其他辅料后, 经斩拌(擂溃)后变成质地黏稠的鱼肉糊, 再进行罐装成型、加热, 使其形成富有弹性的凝胶^[6], 斩拌(擂溃)可使鱼糜的组织更加均匀, 期间加入适当的盐和调料等可改善鱼糜制品的口味与品质。加热凝胶对鱼糜制品的品质有着重要影响, 也是影响鱼糜制品弹性的主要因素。常见的鱼糜制品有鱼糕、鱼丸、鱼卷、鱼豆腐、鱼香肠、蟹棒等。

冻藏指使被处理物冻结并保持在冻结状态下贮藏的保藏方法, 是保证鱼糜品质的重要手段。鱼糜的品质也间接影响了鱼糜制品的质量, 因此对冻藏过程进行控制优化是保证其品质和食品安全的重要途径^[7]。文中在介绍鱼糜的理化性质和腐败机理的基础上, 分析了冻藏时间、冻藏温度、冻结速率、冻融循环对鱼糜在冻藏阶段品质的影响, 综述了新型冻结方式和抗冻剂在冷冻鱼糜中的应用, 旨在为鱼糜冷冻冷藏技术优化和新型装备研发提供理论参考。

1 鱼糜的特性

1.1 物理化学性质

鱼糜富含高质量的可食用动物蛋白, 易被人体消化吸收。由于加工方式的不同, 鱼糜在物理化学方面有着与其他水产品不同的特性。

1.1.1 化学组成

一般鱼糜的化学组成包括水分、灰分(无机盐类)、粗蛋白和粗脂肪等^[8]。其中, 水分的含量相对最高, 一般质量分数为 70%~80%; 粗蛋白的质量分数为 15~20%; 灰分和粗脂肪的质量分数都低于 1%。鱼肉中的肌肉蛋白按照其溶解性可分为盐溶性蛋白、水溶性蛋白和不溶性蛋白。其中, 盐溶性蛋白是形成凝胶的主要成分, 其含量的高低直接决定鱼糜凝胶的质量, 进而影响鱼糜制品的持水性、弹性等流变学特性^[9]。在鱼糜制品的加工过程中, 水溶性蛋白和盐溶性蛋白的比例会随着鱼糜凝胶的形成而不断降低。

1.1.2 物理特性

鱼糜具有不同于其他食品的物理特性, 包括持水力、凝胶强度、质构特性等。与其他水产品、肉制品相比, 鱼糜具有更强的持水力, 高持水力保证了鱼糜在外力影响下具有保持其原有水分的能力, 从而保证了鱼糜的口感^[10]。凝胶的强弱由破断力与破断距离的乘积表示, 在鱼糜加工过程中, 凝胶的强度是评价鱼糜制品最重要的指标。质构特性通常采用质构仪测得, 主要包括 8 个特征值, 即凝胶的硬度、黏性、弹性、脆性、咀嚼性、内聚性、胶黏性、回复性等^[11], 这些特征值可综合反映鱼糜的优劣, 为提高鱼糜的质量提供参考。

1.2 腐败机理

与新鲜水产品相比, 鱼糜经过擂溃等步骤后, 其中微生物的种类和数量已经发生了很大变化, 因而其两者的腐败方式也有很大的差异。鱼糜的腐败主要由细菌等微生物生长所致, 在酶和微生物的作用下蛋白质会分解, 产生氨 (NH_3)、胺类物质 (RCH_2NH_2) 及有机酸, 氨和胺类等碱性含氮物质与有机酸结合生成的挥发性盐基氮 (TVB-N) 是用来反映水产品 and 肉品腐败程度的常用指标^[12]。此外, 鱼糜的脂肪中含有较多的不饱和脂肪酸 (EPA、DHA 等), 在贮藏过程中易发生氧化, 从而导致其品质降低。

2 鱼糜在冻藏阶段的品质影响因素

冻藏过程是鱼糜最易发生品质劣变的关键阶段, 通过对冻藏阶段的各因素加以控制, 能更好地保证其品质, 延长其货架期。在冻藏过程中, 对鱼糜品质影响较大的因素主要有冻藏温度、冻藏时间、冻结速率和冻融循环次数。

2.1 冻藏温度

研究表明, 冻藏温度是影响鱼肉中蛋白质冷冻变性程度和速度的关键因素, 鱼肉蛋白在冻藏过程中的变性对鱼糜品质和风味的影响较大。岳开华等^[13]分析了不同冻藏温度 (-14、-24、-17 °C) 对海鲈鱼鱼糜理化特性、流变特性和凝胶特性的影响, 发现冻藏温度越低, 对抑制其蛋白质变性越有利, 但更低的温度会使其弹性模量和凝胶性能下降。林灵^[14]采用 2 种不同的处理方式对鲟鱼鱼糜在 -80 °C 和 -20 °C 下冻藏 2 个月后的品质进行了研究, A 组先将鱼肉在 -35 °C 下速冻, 再分别置于 -80 °C 和 -20 °C 环境下冻藏 2 个月, 然后制成鱼糜; B 组先将鱼肉制作成鱼糜, 并添加复合抗冻剂后分别在 -80 °C、-20 °C 条件下冻藏 2 个月, 所有样品均置于 4 °C 下解冻后进行品质的测量。2 组结果均表明, -80 °C 条件下鲟鱼鱼糜的品质明显优于 -20 °C。在实际生产和生活中, 应根据需

要选择合适的冻藏温度,从而在保证鱼糜品质的前提下,最大程度地保留其口感。

2.2 冻藏时间

冻藏时间对鱼糜品质的影响较大。唐淑玮^[15]研究发现,鲟鱼鱼糜的凝胶特性随着冻藏时间的延长而降低,且蛋白质氧化程度加深,凝胶强度、持水力和白度呈下降趋势。宁云霞等^[16]研究发现,随着冻藏时间的延长(0~90 d),由革胡子鲶鱼鱼糜制成的鱼豆腐的含水量、持水力、凝胶强度和感官评分等均显著下降。钱攀^[17]对鲮鱼肉进行实验研究发现,鲮鱼肉中肌动球蛋白的含量随着冻藏时间的增加而降低,鱼肉蛋白的降解和变性也随着冻藏时间的增加愈发严重。Xie等^[18]利用三步红外光谱法研究了鱼糜蛋白在低温贮藏过程中的变性机理,从而探讨了冷冻时间对草鱼鱼糜的影响。结果表明,冻结时间对鱼糜的影响主要体现在蛋白质变性上。根据分析结果,草鱼鱼糜蛋白的冷冻变性过程可分为3个阶段:稳定期(0~4周)、缓慢变化期(4~12周)、恶化期(>12周)。由此可见,应尽量避免将鱼糜长时间低温储藏,以防止蛋白质品质的劣变和口感的下降。

2.3 冻结速率

冻结速率对鱼糜品质的影响主要体现在对冰晶形态和大小的调控等方面。鱼糜肌肉细胞之间的水分在冻结时会形成冰晶,而冰晶的生长会对细胞造成机械损伤,会破坏其组织结构^[19]。在冻结速率较低时,鱼糜通过最大冰晶生成带的时间较长,从而会形成尺寸较大、数量较少且分布不均匀的冰晶。在冻结速率较高时,冰晶的分布更加均匀、数量更多、单个冰晶的体积更大,进而减小了对细胞和组织的破坏^[20]。Shinji等^[21]研究发现,冰晶的等效当量直径一般为20~450 μm,且冰晶的等效直径随着冻结速率的增加呈指数下降趋势,鱼糜蛋白质的变性程度随着冰晶尺寸的减小而减小。说明较高的冻结速率更有利于保持鱼糜的品质,应进一步研究、开发新型冻结技术,以期鱼糜在更快的速率下被冻结。

2.4 冻融循环次数

在鱼糜的冷链运输过程中,常常会发生由温度波动引起的冷冻-解冻现象,出现多次冻融循环。在冻融循环中,冰晶会发生重结晶现象,小的冰晶会消失或减小,然后在下一次冻结时依附于大冰晶形成更大的冰晶,从而对细胞和组织结构造成更大的破坏。此外,冻融循环也会加速蛋白质的变性和脂肪的氧化,造成产品的品质下降、营养流失、弹性降低、口感变差等^[22],因此研究冻融循环对鱼糜品质的影响十分必要。

吴晓等^[23]以草鱼和鲤鱼鱼糜为研究对象,在4个月内对其进行了4次冻融循环,发现2种鱼糜的持

水性随着冻融次数的增加均显著降低,蒸煮损失率显著增加,且2种鱼糜之间无显著差异。此外,反复冻融增加了鱼糜的脂肪氧化程度,相较于新鲜鱼糜其色泽出现大幅度下降。Abe等^[24]研究了冻融循环对阿拉斯加鳕鱼鱼糜的凝胶形成能力和蛋白质变性的影响,结果表明,鱼糜在冻融循环后的凝胶能力减弱,特别是肌球蛋白在再次冻结时发生了变性,从而大大降低了鱼糜的凝胶形成能力,而且鱼糜凝胶形成能力的降低会导致其加热凝胶后的质构特性下降。总的来说,冻融循环降低了阿拉斯加鳕鱼鱼糜的凝胶形成能力,并加剧了其蛋白质的变性,且肌球蛋白重链聚合被抑制是冻融循环导致阿拉斯加鳕鱼鱼糜凝胶能力下降的主要原因。Oh等^[25]研究了冻融循环对养殖真鲷(Pagrus major)鱼糜成胶能力的影响,并采用不同级别的阿拉斯加鳕鱼制作的鱼糜进行了对比试验,发现冻融循环导致所有鱼糜凝胶的凝胶强度、持水能力(WHC)和凝胶质构特性降低,养殖真鲷鱼糜凝胶的WHC和白度均高于阿拉斯加鳕鱼鱼糜的WHC和白度,几种鱼糜凝胶的剪切力、硬度、断裂力和变形量均有所下降。

在一些鱼糜产品(如鱼滑和鱼糕)的加工过程中,会在产品中添加猪肉背部脂肪,用来改善鱼糜制品的风味和光滑度。Shang等^[26]采用新鲜草鱼制作鱼糜,分析了添加不同含量猪肉背部脂肪(50、100、150 g/kg)对鱼糜多次冻融循环后肌红蛋白和脂质氧化程度的影响,发现冻融循环次数和脂肪含量的增加都会导致TBARS值增加、肌红蛋白氧化程度加深、血红素铁含量降低、非血红素铁含量增加,反复冻融将加剧鱼糜脂肪氧化和蛋白质变性,最终导致鱼糜品质的下降。添加猪肉背部脂肪改善了草鱼鱼糜的亮度,但会导致脂质和肌红蛋白氧化程度的加重。在实际生产中,应综合考虑猪肉背部脂肪对鱼糜产品口感、白度和冻融循环后品质的影响。

研究表明,冻融循环会使鱼糜的品质下降,因此应在鱼糜加工、储藏、销售等各个环节严格控制温度,防止因温度波动造成的冻融循环。此外,应进一步研究磁场^[27]等物理场在鱼糜冻融循环过程中的积极作用,为鱼糜冻融循环过程的改进提供参考。

3 鱼糜冻藏阶段的品质控制技术

3.1 新型冻结技术

冻结方式是影响鱼糜冷冻速率最主要的因素,平板式冷冻、风冷冻结等传统冷冻方式具有冷冻速度慢、占用空间大、消耗资源多等缺点,而且冷冻时会产生较大的冰晶,导致鱼糜品质的下降。由此可见,开发和新型冻结方法对提高鱼糜的品质十分必要。

3.1.1 低温液氮速冻

由于液氮的温度较低、与被冻结物之间的温差较大, 所以其冷冻速度极快, 液氮冷冻所形成的冰晶较小且分布均匀。液氮冷冻技术已广泛应用于鱼、冬虫夏草等食品的贮藏中^[28-29]。Gao 等^[30]通过实验发现, 液氮冷冻可缩短鳙鱼鱼糜在最大冰晶形成区的冻结时间、提高冻结速率, 并且能够有效防止鳙鱼鱼糜的蛋白质变性。高文宏等^[31]提出了一种液氮协同水溶性大豆多糖冷冻鱼糜的方法, 采用该方法可缩短鱼糜的冻结时间, 减小冰晶的体积, 减少冰晶对鱼糜组织和细胞带来的损害。此外, 水溶性大豆多糖可有效防止鱼糜肌原纤维蛋白在冻藏过程中蛋白溶解度、总疏基含量下降等现象。Luo 等^[32]研究了转谷氨酰胺酶 (MTGase) 交联白鲢鱼糜凝胶在不同液氮温度 (-30、-70、-90 °C) 下进行喷雾冻结后的理化变化情况。结果表明, 经 -70 °C 和 -90 °C 液氮冷冻后其品质指标相对最理想, 且降低液氮喷雾的温度可以缩短白鲢鱼糜凝胶在最大冰晶形成区的时间, 随着冻结温度的降低和交联程度的增加, 鱼糜凝胶的孔隙变小, 结构逐渐致密, 凝胶性能更好。同时, 磁共振成像 (MRI) 结果显示, 质子密度加权图像亮度随着液氮喷雾温度的降低而下降, 图像亮度呈现出由外向内的下降趋势, 说明凝胶网络内部的水更易向外部迁移和渗透。总的来说, 低温液氮速冻技术在鱼糜的冻藏保鲜方面具有巨大的潜力。

3.1.2 物理场辅助冻结

在鱼糜的冻结过程中, 较大的冰晶会导致鱼糜细胞的破裂, 造成不可逆的破坏, 解冻后汁液流失严重, 其中的风味物质也会因此流失。近年来, 国内外涌现出了几种新型物理场辅助冻结技术, 通过控制冰晶尺寸的大小和分布来提高鱼糜冻结后的品质, 从而提高其产品的附加值^[33]。

磁场辅助冻结技术是较为新颖的辅助冻结方式之一。在磁场的作用下水会产生磁偶极矩, 水的分子能和表面张力下降, 水分子的内部结构更加趋于稳定, 从而在冻结时抑制冰晶的生成^[34]。Otero 等^[35]研究了震荡磁场对蟹棒品质的影响, 结果表明, 在蟹棒冷冻过程中施加小于 2 mT 的低频震荡磁场并不能避免蟹棒品质的劣化, 解冻后蟹棒的损伤并没有显著减少。该研究的频率范围较窄, 应在更大范围内进一步进行研究, 从而全面了解磁场对鱼糜冷冻过程的潜在影响。

高压冷冻技术指在食品冷冻过程中施加 200~600 MPa 的压力场, 使食品中水分的过冷度增大、冰点下降, 从而调控冰晶生长的技术^[36]。食品在高压条件下被冷却到设定温度后释放压力, 内部便会形成均匀且较小的冰晶。在高压冷冻过程中, 压力和终结点温度的不同会造成冰晶类型的差异, 因此高压冷冻技

术可分为高压辅助冷冻、压力转换辅助冷冻和压力诱导冻结等^[37]。其中, 高压辅助冷冻是目前应用和研究的热点。Moreno 等^[38]研究了不同的压强 (0、40、80、200 MPa) 辅助冷冻对低品质飞鱼鱼糜凝胶性能的影响, 结果表明, 经高压 (80 MPa 除外) 处理后的鱼糜凝胶具有更好的弹性、力学性能和能量稳定性, 而且高压改善了鱼糜的蛋白质结构, 增强了鱼糜的破断力。对于不同种类鱼糜来说, 其最适合的冷冻压强也不尽相同, 加之高压设备具有成本高、危险性高等缺点, 从而限制了高压辅助冷冻的产业化应用。

超声波辅助冷冻也是一种新型的冷冻技术, 具有广阔的工业应用前景。现有研究表明, 在食品冷冻过程中施加超声波可以诱发冰晶成核^[39]、减小冰晶尺寸^[40]、缩短冷冻时间^[41], 并保证冷冻食品的品质^[42]。超声波产生的空化效应是对食品冷冻结晶产生影响的主要因素, 但是其具体机理尚未完全明确。Gao 等^[43]使用频率为 28 kHz 的超声波分别在功率 180、300、420、540 W 下对新鲜草鱼鱼糜进行冻结实验, 结果表明, 超声波可以显著提高草鱼鱼糜的冻结速率, 且在功率为 300 W 时的冻结速率最大。此外, 添加可溶性大豆多糖可以有效缓解草鱼鱼糜在 -18 °C 贮藏期间的蛋白质变性, 将超声波辅助冷冻技术与可溶性大豆多糖结合并应用于冷冻鱼糜将是一项非常有前景的技术。虽然超声波辅助冻结技术的优势明显, 但如果对其强度控制不当, 则可能会引起冻结物品质的劣化^[44]。由此可见, 应进一步研究不同种类、不同大小鱼糜的超声波适用范围。

电场可以改变水分子的偶极矩, 并诱导其发生极化作用, 水分子因此重新定向, 并形成更有序的团簇结构, 从而导致其自由能的降低, 加速了冰晶的形成^[45]。Fallah-Joshaqani 等^[46]指出, 采用静电场辅助冻结技术能提高冰晶的成核温度, 但当静电场强度过强时会造成相反的结果, 对于不同的食品采用静电场辅助冷冻时还需要具体确定最佳的电场强度。苏金来等^[47]提出了一种基于电场协同的水产品快速冷冻方法, 首先将产品放置于准备好的流化冰浆上, 采用低电压冰温处理 1~8 h 后, 再采用高电压冷冻处理 20~50 min, 处理后放入冷冻环境中。该方法采用冷冻结合电场的方法, 是一种储藏效果好、冷冻成本低的冷冻方法, 用该方法处理后水产品内的冰晶粒度更小、数量更少。此方法也可用于鱼糜的快速冻结。

目前, 新型冻结技术仍处于实验研究阶段, 尚未大规模应用。可见, 应探讨各种冻结技术工业化应用的可行性, 在原理、设备、工艺等方面进行深入研究, 从而实现规模化应用。

3.2 抗冻剂控制技术

鱼肉蛋白较畜禽蛋白更易于发生变质, 在冷冻过程中加入抗冻剂是目前抑制鱼肉蛋白冷冻变性最常用

的方法。Noguchi 等^[48]经过研究,总结出能抑制冷冻鱼肉中蛋白质变性的物质一般具有以下特点:分子相对较小;分子中含有必须基团($-\text{COOH}$ 或 $-\text{OH}$)中的 1 个和辅助基团($-\text{COOH}$ 、 $-\text{SO}_3\text{H}$ 、 $-\text{NH}_2$ 、 $-\text{OH}$ 、 $-\text{PO}_3$ 、 $-\text{SH}$)中的 1 个或多个;必须基团与辅助基团之间的分布需合理。

传统的鱼糜抗冻剂主要为蔗糖、多聚葡萄糖等分子量相对较小的糖或糖醇类物质、多聚磷酸盐、羧酸类及氨基酸等,具有热量大、甜度高等缺点。近年来,针对蛋白质水解物、抗冻蛋白、多酚类和藻类提取物

等新型绿色抗冻剂的研究为传统抗冻剂的更新换代提供了依据^[49-50]。不同种类的抗冻剂对鱼糜的作用机理也存在差异,具体如表 1 所示。

新型鱼糜抗冻剂也存在不足,如很多蛋白水解物在酶解时会产生明显的苦味^[51],需要进一步研究抗冻蛋白的安全性^[52],很多多酚类物质和藻类提取物都带有颜色等。新型抗冻剂在鱼糜中的使用 and 商业化应用还需要进一步研究,还应进一步研发复合抗冻剂,探究不同抗冻剂的协同效果,从而使鱼糜具有更好的抗冻效果。

表 1 鱼糜抗冻剂的分类及其作用机理
Tab.1 Classification and action mechanism of surimi antifreeze

类别	名称	作用机理
糖和糖醇类	木糖醇、麦芽糖、淀粉、乳糖、山梨糖醇、葡萄糖、蔗糖、木糖等	分子中的羟基与蛋白质的某些基团结合,导致蛋白质分子处于饱和状态,避免蛋白质的聚集变性 ^[53]
复合磷酸盐	焦磷酸盐、三磷酸盐、六磷酸盐等	提高鱼糜的 pH 值;引起离子强度的增加;促进冷冻鱼糜的盐溶性蛋白和肌原纤维蛋白的解胶 ^[54]
蛋白质水解物	黑鲭鲨皮肤水解明胶、骨蛋白水解液、狗鳕鱼蛋白水解物等	含有大量的亲水性氨基酸,与水分子集合形成氢键,从而增强了水分子的低温耐受性,延缓了冰晶的生成 ^[55]
蛋白质	新型抗冻蛋白	能够不可逆地与冰晶结合,阻止冰晶的生长,降低溶液冰点 ^[56] ;强化加固细胞,避免冷冻损伤 ^[57]
多酚类	黄酮、羟基肉桂酸、木脂素和酚酸等	天然多酚类化合物作为抗氧化剂、抗菌剂及蛋白质的交联剂,可以保持或提高产品的质量 ^[58]
藻类提取物	红藻糖苷、多管藻乙醇提取物等	藻类提取物具有很强的抗氧化效果,可抑制鱼糜蛋白的氧化变性 ^[59]

4 结语

自鱼糜出现以来,已日渐成为人们日常生活中常用的食品,如何提高鱼糜的品质一直是鱼糜行业的核心问题。在鱼糜的冻藏环节,冻藏时间、冻藏温度、冻结速率和冻融循环对鱼糜品质都有较大影响,采用抗冻剂,以及低温液氮速冻和物理场辅助冻结等新型冻结技术,可以在一定程度上控制鱼糜在冻藏阶段的品质劣化。然而,新型冻结技术具有成本高、设备复杂等不足,尚处于实验室研究阶段,因此应进一步探索新型冻结技术对鱼糜品质的影响机理,并对工艺、设备进行优化,以期实现产业化应用。同时,应深入研究新型鱼糜抗冻剂的作用,并研发出适合鱼糜的复合抗冻剂,以期更好地抑制鱼糜蛋白质和脂肪的冷冻变性。此外,应开发新型的鱼糜储藏、运输设备,以减小其温度波动,从而减少冻融循环的发生,降低鱼糜在全冷链环节的品质劣化。

参考文献:

- [1] 农业农村部渔业渔政管理局. 2020 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2021: I-III. Fishery Administration Bureau, Ministry of Agriculture and Rural Affairs. China Fishery Statistical Yearbook 2020[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2020: I-III.
- [2] 蒋慧琪, 王晶, 汪愈超, 等. 养殖大黄鱼肌肉品质评价及其营养调控的研究进展[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2021, 47(3): 275-283. JIANG Hui-qi, WANG Jing, WANG Yu-chao, et al. Research Progress on Evaluation of Cultured Large Yellow Croaker Muscle Quality and Nutritional Regulation[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2021, 47(3): 275-283.
- [3] 陈媚依. 鹧鸪茶提取物对鱼糜制品凝胶特性及保藏品质的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020: 3-5.

- CHEN Mei-yi. The Effect of Partridge Tea Extract on the Gel Properties and Preservation Quality of Surimi Products[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020: 3-5.
- [4] FARJADIAN S, MOGHADDERI M, KALANI M, et al. Effects of Omega-3 Fatty Acids on Serum Levels of T-helper Cytokines in Children with Asthma[J]. Cytokine, 2016, 85: 61-66.
- [5] 李满雄, 李水红, 李论. 鱼糜加工技术及其研究进展[J]. 食品安全导刊, 2019(12): 152.
- LI Man-xiong, LI Shui-hong, LI Lun. Surimi Processing Technology and Its Research Progress[J]. China Food Safety Magazine, 2019(12): 152.
- [6] 刘前, 吴靖娜, 陈晓婷, 等. 加工工艺对鱼糜及其制品品质影响的研究进展[J]. 渔业研究, 2019, 41(6): 540-548.
- LIU Qian, WU Jing-na, CHEN Xiao-ting, et al. Research Progress on the Effect of Processing Technology on the Quality of Surimi and Its Products[J]. Journal of Fisheries Research, 2019, 41(6): 540-548.
- [7] 陈竞豪, 苏晗, 马冰迪, 等. 鱼糜制品品质控制技术研究进展[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(6): 200-206.
- CHEN Jing-hao, SU Han, MA Bing-di, et al. Research Progress on Quality Control Technology of Surimi Products[J]. Food Research and Development, 2019, 40(6): 200-206.
- [8] JIN S K, KIM I S, KIM S J, et al. Effect of Muscle Type and Washing Times on Physico-chemical Characteristics and Qualities of Surimi[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 81(3): 618-623.
- [9] 梁辉红, 卢涵, 张香美. 蛋白二、三级结构对鱼糜凝胶质构和持水力的影响及其测定方法研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2021, 52(10): 87-96.
- LIANG Yun-hong, LU Han, ZHANG Xiang-mei. Research Progress on the Effects of Protein Secondary and Tertiary Structures on Texture and Water Holding Capacity of Surimi Gel and Protein Structure Determination Methods[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2021, 52(10): 87-96.
- [10] KONG Wen-jun, ZHANG Tao, FENG Dan-dan, et al. Effects of Modified Starches on the Gel Properties of Alaska Pollock Surimi Subjected to Different Temperature Treatments[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 56: 20-28.
- [11] MENG Ling-lu, JIAO Xi-dong, YAN Bo-wen, et al. Effect of Fish Mince Size on Physicochemical and Gelling Properties of Silver Carp (*Hypophthalmichthys Molitrix*) Surimi Gel[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021(3): 111912.
- [12] 宁云霞. 革胡子鲶鱼鱼糜及其鱼糜制品在冻藏过程中的品质变化[D]. 天津: 天津农学院, 2020: 7.
- NING Yun-xia. Quality Changes of *Clarias Gariepinus* Surimi and Its Surimi Products During Frozen Storage[D]. Tianjin: Tianjin Agricultural University, 2020: 7.
- [13] 岳开华, 张业辉, 刘学铭, 等. 冻藏温度对海鲈鱼鱼糜蛋白生化指标及其凝胶特性的影响[J]. 现代食品科技, 2016, 32(6): 225-232.
- YUE Kai-hua, ZHANG Ye-hui, LIU Xue-ming, et al. The Effect of Storage Temperature on Biochemical Indicators and Gel Properties of Sea Bass Surimi[J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(6): 225-232.
- [14] 林灵. 不同冻藏处理方式对鲟鱼糜品质特性的影响及鲟鱼脯凝胶条件的优化研究[D]. 四川: 四川农业大学, 2019: 16-28.
- LIN Ling. Effects of Different Frozen Treatment Methods on Quality Characteristics of *A. baerii* Surimi and Optimization of Gel Conditions of Squid Chop[D]. Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2019: 16-28.
- [15] 唐淑玮. 鲟鱼鱼糜在冻藏过程中的品质变化[C]// 中国食品科学技术学会第15届年会论文摘要集. 北京: 中国食品科学技术学会, 2018: 779-780.
- TANG Shu-wei. Quality Changes of Sturgeon Surimi during Frozen Storage[C]// Abstracts of Papers of the 15th Annual Meeting of Chinese Society for Food Science and Technology. Beijing: Chinese Society for Food Science and Technology, 2018: 779-780.
- [16] 宁云霞, 鲍佳彤, 杨淇越, 等. 革胡子鲶鱼鱼糜冻藏时间对鱼豆腐品质特性的影响[J]. 肉类研究, 2020, 34(4): 64-70.
- NING Yun-xia, BAO Jia-tong, YANG Qi-yue, et al. Effect of Frozen Storage Time of *Clarias Gariepinus* Surimi on the Quality Characteristics of Fish Tofu [J]. Meat Research, 2020, 34(4): 64-70.
- [17] 钱攀. 液体快速冻结对鲮鱼品质影响的研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2017: 49.
- QIAN Pan. Study on the Quality of *Bighead Carps* After Liquid Quick Freezing[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2017: 49.
- [18] XIE Jun, YAN Yu, PAN, Qian-nan, et al. Effect of Frozen Time on *Ctenopharyngodon Idella* Surimi: With Emphasis on Protein Denaturation by Tri-step Spectroscopy[J]. Journal of Molecular Structure, 2020, 1217: 128421.
- [19] 边楚涵, 谢晶. 冰晶对冻结水产品品质的影响及抑制措施[J]. 包装工程, 2022, 43(3): 105-112.
- BIAN Chu-han, XIE Jing. Effects of Ice Crystal on Frozen Aquatic Products and Its Inhibition Measures[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(3): 105-112.
- [20] 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.
- [21] SHINJI K, MADOKA K, TETSUYA A, et al. Effect of

- Relationships Among Freezing Rate, Ice Crystal Size and Color on Surface Color of Frozen Salmon Fillet[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 214(6): 158-165.
- [22] 韩昕苑, 从娇娇, 樊震宇, 等. 冻融循环对冷冻罗非鱼片品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(18): 136-142.
- HAN Xin-yuan, CONG Jiao-jiao, FAN Zhen-yu, et al. Effect of Freeze-thaw Cycles on the Quality of Frozen Tilapia (*Oreochromis Niloticus*) Fillets[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(18): 136-142.
- [23] 吴晓, 孙卫青, 杨华, 等. 反复冻融对草鱼和鲤鱼冷冻鱼糜品质变化的影响[J]. 食品科学, 2012, 33(20): 323-327.
- WU Xiao, SUN Wei-qing, YANG Hua, et al. Effect of Repeated Freeze-thaw Cycles on Quality Properties of Frozen Surimis of Grass Carp and Common Carp[J]. Food Science, 2012, 33(20): 323-327.
- [24] ABE S, ASADA T, KAJIWARA K. Effects of Freeze-thaw Cycles on Gel-forming Ability and Protein Denaturation in Alaska Pollock Frozen Surimi[J]. Journal of Food Quality, 2019: 1-9.
- [25] OH J H, KARADENIZ F, GAO Ya, et al. Gel-forming Ability of Surimi from Aquacultured Pagrus Major as Affected by Freeze-Thaw Cycle[J]. Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2019, 19(5): 423-430.
- [26] SHANG Xiao-lan, YAN Xun-you, LI Qiu-ling, et al. Effect of Multiple Freeze-Thaw Cycles on Myoglobin and Lipid Oxidations of Grass Carp (*Ctenopharyngodon Idella*) Surimi with Different Pork Back Fat Content. Food Science of Animal Resources, 2020, 40(6): 969-979.
- [27] WANG Zhe, TAN Yin-ying, YANG Na, et al. Influence of Oscillating Uniform Magnetic Field and Iron Supplementation on Quality of Freeze-thawed Surimi[J]. RSC Advances, 2019, 9(57): 33163-33169.
- [28] JIANG Qi-xing, YIN Ting, YANG Fang, et al. Effect of Freezing Methods on Quality Changes of Grass Carp During Frozen Storage[J]. Journal of Food Process Engineering, 2020, 43(11): 3-9.
- [29] YOU Tian, LI Dong-mei, LUO Wen-huang, et al. Rapid Freezing Using Atomized Liquid Nitrogen Spray Followed by Frozen Storage Below Glass Transition Temperature for Cordyceps Sinensis Preservation: Quality Attributes and Storage Stability[J]. LWT, 2020, 123: 109066.
- [30] 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.
- [31] 高文宏, 黄扬萍, 曾新安. 一种液氮协同水溶性大豆多糖冷冻鱼糜的方法: 中国, 108925613A[P]. 2018-12-04.
- GAO Wen-hong, HUANG Yang-ping, ZENG Xin-an. A Method for Freezing Surimi with Liquid Nitrogen and Water-soluble Soybean Polysaccharide: China, 108925613A [P]. 2018-12-04.
- [32] LUO Xiao-ying, LI Jin-ling, YAN Wen-li, et al. Physicochemical Changes of MTGase Cross-Linked Surimi Gels Subjected to Liquid Nitrogen Spray Freezing[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 160: 642-651.
- [33] 陈聪, 杨大章, 谢晶. 速冻食品的冰晶形态及辅助冻结方法研究进展[J]. 食品与机械, 2019, 35(8): 220-225.
- CHEN Cong, YANG Da-zhang, XIE Jing. Review on Ice Crystal Shape and Assisted Freezing Methods of Quick-frozen Food[J]. Food and Machinery, 2019, 35(8): 220-225.
- [34] ZHOU Hong-ling, JIN Ya-mei, HONG Ting-ting, et al. Effect of Static Magnetic Field on The Quality of Frozen Bread Dough[J]. LWT, 2022, 154: 1-9.
- [35] OTERO Laura, PÉREZ-MATEOS Miriam, RODRÍGUEZ Antonio C, et al. Electromagnetic Freezing: Effects of Weak Oscillating Magnetic Fields on Crab Sticks[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 200 (5): 87-94.
- [36] CHENG Li-na, ZHU Zhi-wei, SUN Da-wen. Impacts of High Pressure Assisted Freezing on the Denaturation of Polyphenol Oxidase[J]. Food Chemistry, 2021: 127485.
- [37] CHENG Lina, SUN Da-wen, ZHU Zhi-wei, et al. Effects of High Pressure Freezing (HPF) on Denaturation of Natural Actomyosin Extracted from Prawn (*Metapenaeus Ensis*) [J]. Food Chemistry, 2017, 229: 252-259.
- [38] MORENO H M, BARGIELA V, TOVAR C A, et al. High Pressure Applied to Frozen Flying Fish (*Parexocoetus Brachyterus*) Surimi: Effect on Physicochemical and Rheological Properties of Gels[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 48(Jun): 127-134.
- [39] MA Xuan, MEI Jun, XIE Jing. Mechanism of Ultrasound Assisted Nucleation During Freezing and Its Application in Food Freezing Process[J]. International Journal of Food Properties, 2021, 24(1): 68-88.
- [40] WANG Xiao-dan D, DONG Yan-li, WU Rui-jia, et al. A Method to Improve Water-holding Capacity of Beef During Freezing-thawing Process Using Ultrasound Treatment[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(1): 7.
- [41] TIAN You, ZHANG Pei-zhi, ZHU Zhi-wei, et al. Development of A Single/Dual-Frequency Orthogonal Ultrasound-Assisted Rapid Freezing Technique and Its Effects on Quality Attributes of Frozen Potatoes[J]. Journal of Food Engineering, 2020, 286: 110112.
- [42] NOWAK K W, ZIELINSKA M, WASZKIELIS K M.

- The Effect of Ultrasound and Freezing/Thawing Treatment on the Physical Properties of Blueberries. *Food Science & Biotechnology*, 2018, 28(3): 741-749.
- [43] GAO Wen-hong, HOU Rui, ZENG Xin-an. Synergistic Effects of Ultrasound and Soluble Soybean Polysaccharide on Frozen Surimi from Grass Carp[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 240(1): 1-8.
- [44] 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.
- [45] 叶剑, 徐仰丽, 林胜利, 等. 物理场技术在水产品冷冻冷链中的应用[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(22): 8194-8199.
- YE Jian, XU Yang-li, LIN Sheng-li, et al. Application of Physical Field Technology in Frozen Aquatic Products in Cold Chain[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2020, 11(22): 8194-8199.
- [46] FALLAH-JOSHAQANI S, HAMDAMI N, KESHAVERZI E, et al. Evaluation of the Static Electric Field Effects on Freezing Parameters of Some Food Systems[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2019(99): 30-36.
- [47] 苏来金, 杨会成, 徐仰丽, 等. 基于电场协同的水产品快速冷冻方法: 中国, 112400973A[P]. 2021-02-26.
- SU Lai-jin, YANG Hui-cheng, XU Yang-li, et al. Quick-Freezing Method of Aquatic Products Based on Electric Field Synergy: China, 112400973A[P]. 2021-02-26.
- [48] NOGUCHI S, MATSUMOTO J J. Studies on the Control of Denaturation of Fish Muscle Proteins During Frozen Storage: Preventive Effect of Na-glutamate[J]. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*, 1975, 36: 1078-1087.
- [49] 袁悦. 新型冷冻罗非鱼鱼糜抗冻剂的筛选与作用机理研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019: 4-7.
- YUAN Yue. A Novel Cryoprotectants Selection and Its Mechanism Study of Cryoprotectants for Frozen Nile Tilapia (*Oreochromis Niloticus*) Surimi[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019: 4-7.
- [50] WALAYAT Noman, XIONG Han-guo, XIONG Zhou-yi, et al. Role of Cryoprotectants in Surimi and Factors Affecting Surimi Gel Properties: A Review[J]. *Food Reviews International*, 2020, 38(6): 1-20.
- [51] NIKOO Mehdi, BENJAKUI Soottawat. Potential Application of Seafood-derived Peptides as Bifunctional Ingredients, Antioxidant-cryoprotectant: A Review[J]. *Journal of Functional Foods*, 2015, 19(5): 753-764.
- [52] WANG Wen-long, CHEN Meng-shi, WU Jin-hong, et al. Hypothermia Protection Effect of Antifreeze Peptides from Pigskin Collagen on Freeze-dried *Streptococcus Thermophilus* and Its Possible Action Mechanism[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 63(2): 878-885.
- [53] 宋蕾. 冻藏条件和糖类抗冻剂对调理肉丸品质的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2016: 11-12.
- SONG Lei. The Effect of Frozen Storage Conditions and Sugar Antifreeze on the Quality of Conditioned Meatballs[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016: 11-12.
- [54] 叶丽红, 许艳顺, 夏文水, 等. K-卡拉胶、复合磷酸盐和蛋清粉对高水分鱼丸水分和质构特性的影响[J]. *食品科技*, 2019, 44(4): 291-297.
- YE Li-hong, XU Yan-shun, XIA Wen-shui. The Effect of K-carrageenan, Compound Phosphate and Egg White Powder on the Moisture and Texture Properties of High-moisture Fish Balls[J]. *Food Science and Technology*, 2019, 44(4): 291-297.
- [55] DU Li-hui, BETTI M. Chicken Collagen Hydrolysate Cryoprotection of Natural Actomyosin: Mechanism Studies During Freeze-thaw Cycles and Simulated Digestion[J]. *Food Chemistry*, 2016, 211: 791-802.
- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] MAQSOOD Sajid, BENJAKUI Soottawat, SHAHIDI Fereidoon. Emerging Role of Phenolic Compounds as Natural Food Additives in Fish and Fish Products[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2013, 53(2): 162-179.
- [59] BABAKHANI A, FARVIN K H S, Jacobsen C. Antioxidative Effect of Seaweed Extracts in Chilled Storage of Minced Atlantic Mackerel (*Scomber Scombrus*): Effect on Lipid and Protein Oxidation[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2016, 9(2): 1-13.