

# 捕后鱼肉品质评价及保鲜技术研究进展

葛迎港<sup>1</sup>, 陈慧<sup>1,2</sup>, 崔保金<sup>3</sup>, 周德庆<sup>1</sup>, 王珊珊<sup>1</sup>, 孙国辉<sup>1\*</sup>

(1. 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋药物与生物制品功能实验室, 山东青岛 266071)(2. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306)

(3. 长青(中国)日用品有限公司, 山东青岛 266400)

**摘要:** 目前, 我国依然存在鱼类养殖业发展不平衡与保活运输技术不成熟的现状, 大部分捕捞的鱼类仍需经过预先宰杀处理后进行贮运。在此过程中, 鱼肉通常会发生纤维硬化、肉质下降、水分流失、风味变差等品质劣变, 造成其营养价值与商业价值的大幅降低。高效保鲜技术的应用与科学的品质评价是维持鱼肉原有品质, 减少不必要资源浪费的有效途径。本文概述了物理、化学、微生物等鱼肉品质变化评价指标的研究进展, 并从包装、化学和生物等方面系统阐述了低温条件下不同保鲜技术对鱼肉品质变化的影响, 以为鱼肉低温保鲜技术的深入研究与应用提供参考。

**关键词:** 鱼类; 保鲜技术; 品质变化; 评价指标

文章编号: 1673-9078(2024)08-357-366

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.8.0870

## Research Progress on Quality Evaluation and Preservation Technologies of Post-harvest Fish

GE Yinggang<sup>1</sup>, CHEN Hui<sup>1,2</sup>, CUI Baojin<sup>3</sup>, ZHOU Deqing<sup>1</sup>, WANG Shanshan<sup>1</sup>, SUN Guohui<sup>1\*</sup>

(1. Yellow Sea Fisheries Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences / Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China)(2. College of Food Sciences & Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)(3. China Cni (China) Co. Ltd., Qingdao 266400, China)

**Abstract:** At present, the development of fish culture is not balanced and the living fish transportation technologies remain immature in our country. Most of the caught fish are subjected to pre-slaughter treatments before storage and transportation. During this processes, the quality of fish is usually apt to deterioration, including fiber hardening, meat quality decline, water loss, and flavor deterioration, causing significant decreases in nutritional value and commercial value. The application of high-efficiency preservation technologies and scientific quality evaluation are the effective ways to maintain fish's original quality and reduce the unnecessary waste of resources. This article provides an overview of the research progress on the physical, chemical and microbiological indicators for evaluating fish meat quality changes. Moreover, the

引文格式:

葛迎港,陈慧,崔保金,等.捕后鱼肉品质评价及保鲜技术研究进展[J].现代食品科技,2024,40(8):357-366.

GE Yinggang, CHEN Hui, CUI Baojin, et al. Research progress on quality evaluation and preservation technologies of post-harvest fish [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(8): 357-366.

收稿日期: 2023-07-19

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2019YFD0901703); 中国水产科学研究院黄海水产研究所基本科研业务费(20603022022016); 中国水产科学研究院基本科研业务费资助(2023TD72);

作者简介: 葛迎港(1997-), 男, 学士, 助理工程师, 研究方向: 水产品加工与安全, E-mail: GYG19970701@163.com

通讯作者: 孙国辉(1988-), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向: 海洋功能食品与生物制品, E-mail: sungh@ysfri.ac.cn

effects of various preservation techniques on fish quality at low temperature were systematically discussed from the aspects of packaging, chemistry and biology, so as to provide reference for further studies and applications of fish low-temperature preservation technologies.

**Key words:** fish; preservation technologies; quality change; assessment indices

鱼类是中国动物源性食物供应的重要组成部分,据2023年中国渔业统计年鉴统计,2022年鱼类总产量占全国水产品总产量52.9%<sup>[1]</sup>,已成为消费者日常饮食中不可或缺的一部分。目前,我国依然存在鱼类养殖业发展不平衡与保活运输技术不成熟的问题,大部分鱼类捕捞后仍需经过预先宰杀处理<sup>[2]</sup>。鱼类死亡后受体内微生物和内源酶自溶作用的影响,新鲜程度快速下降,严重影响了消费者的购买意愿<sup>[3]</sup>。鉴于此,发展鱼肉保藏技术、延缓鱼肉品质劣变已成为科研人员重点关注与研究的方向。

低温是一种能有效保留鱼肉营养、风味、质构和外观的保藏技术。研究表明,冷冻及低温贮运可以显著降低鱼肉组织中自由水含量,提高脂质稳定性,降低内源酶活性,抑制微生物生长繁殖<sup>[4]</sup>。同时,速冻和恒温还可以有效减少最大冰晶带的形成,避免出现重结晶现象,从而保护鱼肉的细胞结构和组织免受破坏<sup>[5]</sup>。然而,单一的低温保藏方式对鱼肉新鲜品质维持能力有限,通常需结合包装保藏、化学保藏、生物保藏等技术增强保鲜效果<sup>[6,7]</sup>。此外,科学有效的检测指标和技术对保证鱼肉的食用品质与贮藏条件的调整也至关重要。特别是鱼肉新鲜品质的评价,不仅可以作为区分鱼肉质量等级的参照标准,更是调整和评价贮藏条件的重要依据<sup>[8,9]</sup>。因此,为维持鱼肉品质,区分鱼肉品质等级,研究鱼肉的低温保鲜技术与品质变化规律尤为重要。

本文概述了物理、化学、微生物等鱼肉品质评价指标与低温下不同保鲜技术对捕后鱼肉品质变化的影响,为推动鱼肉品质保持与保鲜技术在渔业加工中的应用提供理论依据。

## 1 鱼类品质评价指标

目前,鱼肉品质评价需要通过多项指标进行综合评判,主要概括为物理指标、化学指标和微生物指标。物理指标是评估鱼肉外观与质地的首要标准,可以直接反映鱼肉的新鲜程度与保藏状态;化学指标用于分析鱼肉的营养成分、风味和新鲜度,是鱼

肉整体品质信息的全面评价;微生物指标则用于判断鱼肉中微生物污染水平,对评估鱼肉保质期和安全性至关重要。随着检测技术的迅速发展,现代鱼肉品质评价已经受益于新型实时检测工具的应用。例如,近红外光谱检测、仿生学设备和生物传感器等新型技术的引入,大大提高了鱼肉保鲜过程中品质评价的效率和质量。

### 1.1 物理指标

#### 1.1.1 色差值

色差值是利用精密色差仪直接测量鱼肉组织色度值,是评价鱼肉品质变化指标之一。色差值主要受氧合肌红蛋白和高铁肌红蛋白含量以及脂质氧化程度的影响。通常情况下,氧合肌红蛋白会赋予鱼肉组织鲜艳的红色,而黄色与脂质氧化产生自由基攻击色素蛋白密切相关<sup>[10]</sup>。pH、温度、氧分压、脂质氧化、微生物通过影响高铁肌红蛋白还原酶和肌红蛋白结合氧的方式改变肌红蛋白的存在形态,进而影响鱼肉整体色泽<sup>[11]</sup>。然而,色差仪在使用过程中容易受肉样测定位置、外界光照强度和背景色的影响,无法保证结果准确性与稳定性。随着检测技术的更新迭代,基于色差的实时检测技术开始在鱼肉品质评价中推广应用,例如计算机视觉技术、生物传感器技术、光学系统检测技术。Amin等<sup>[12]</sup>采用计算机视觉技术结合人工智能对鲤鱼(*Cyprinus carpio*)进行品质变化评估,准确率为93.01%。Abamba等<sup>[13]</sup>利用多光谱成像技术对珠星三块鱼(*Tribolodon hakonensis*)的品质进行检测,结果发现RGB值可以准确揭示其在贮藏过程中的品质变化。Wang等<sup>[14]</sup>将人工智能和高光谱技术结合,成功建立了大黄鱼品质变化的预测模型。由此可知,基于色差的实时检测技术有望取代传统色差仪分析用于鱼肉品质变化检测评价。

#### 1.1.2 持水力

持水力是指鱼肉对自身水分和外加水分的保持能力,主要受肌原纤维蛋白凝胶网络强度和无序蛋白含量的影响。自由基攻击蛋白质会引起蛋白质骨

架和氨基酸侧链发生变化,导致肽键裂解、氨基酸侧链修饰和蛋白质交联,使蛋白质持水能力明显降低;同时,脂质氧化产生的自由基也会加速蛋白质氧化进程<sup>[15,16]</sup>。评价持水力的指标包括滴水损失率、蒸煮损失率和解冻损失率,这些指标对衡量鱼肉品质和储存稳定性具有一定的参考价值。新型持水力测量仪的工作原理是利用压缩鱼肉的图像分析动态流失的液体,从而计算持水力的变化趋势,如 WHC trend<sup>[17]</sup>。此外,蛋白质降解溶出大量游离氨基酸和胞内物质,会增加鱼肉的导电能力,可用于预测鱼肉的持水能力。Kaewthong 等<sup>[18]</sup>通过腌制液电导率有效预测腌制肉的持水力,电导率与蒸煮损失率之间表现出强烈相关性 ( $r^2 > 0.93$ )。

### 1.1.3 质构

质构是食品流变学和结构属性的组合,质构特性主要受蛋白质和脂肪含量、蛋白质网状结构类型、肌肉内部结合强度以及凝胶能力的影响。鱼类死亡后,肌肉迅速软化,但富有弹性。随着 ATP 的分解,收缩蛋白失去与肌动蛋白的结合能力,同时  $\text{Ca}^{2+}$  与肌动蛋白的隔离消失,以此引发了鱼肉出现僵直现象。随后,在 ATP 彻底分解后,内源性和外源性蛋白酶会破坏肌原纤维和胶原纤维,导致鱼体发生自溶和肌肉软化<sup>[19]</sup>。鱼肉质构可通过机械特性、光谱特征、成像技术等进行评定。机械特性指标包括:嫩度、硬度、弹性、脆性、内聚性黏附性,主要通过 Warner-Bratzler 剪切仪与质构仪进行测定。通过利用红外光谱、拉曼光谱、荧光偏振等光谱技术,可以进行鱼肉质构的微观分析,包括蛋白质二级结构、肌纤维方向和分子间作用力等方面的研究<sup>[20,21]</sup>。此外,为量化评价鱼肉的组织和表面纹理,需运用透射电子显微镜、原子力显微镜、X 射线断层扫描等设备进行成像分析<sup>[22]</sup>。这些先进技术手段提供了对鱼肉微观特征深入了解的途径,促进了对鱼肉质构性质的研究和分析。质构仪通过精确力学分析来评判鱼肉质构特性,操作简单,成本低廉,被大量应用于多种鱼肉属性的测定。

## 1.2 化学指标

### 1.2.1 生物胺和K值

许多化学指标的测定通常需要借助大型色谱仪器进行测定。这些先进的仪器能够提供准确和可靠的分析结果,使我们能更好地了解鱼类质量和安全性方面的信息。例如,在鱼类贮藏过程中游离氨基

酸由微生物脱羧作用形成胺类物质。这类物质摄入会对人体造成很多不利的影 响,组胺、酪胺均可引起头痛、血压上升;尸胺、腐胺会抑制部分生物胺氧化酶的活性;精胺、亚精胺会代谢生成致癌物亚硝酸胺<sup>[23]</sup>。目前,水产品的生物胺限量标准主要集中在组胺,《GB 2733-2015 食品安全国家标准鲜、冻动物性水产品》中对鲜、冻水产品限量标准为不高于  $20 \text{ mg}/100 \text{ g}$ <sup>[24]</sup>。Parate 等<sup>[25]</sup>使用石墨烯等纳米材料结合电化学传感器用于检测金枪鱼汤中组胺含量,检测限为  $3.41 \text{ mg}/100 \text{ g}$ 。Zhang 等<sup>[26]</sup>以金/银纳米簇为内参,制备荧光试纸实现了海产品中挥发性盐基氮 (Total Volatile Base Nitrogen, TVB-N) 的实时可视化检测。Chang 等<sup>[27]</sup>研制出一种超灵敏传感器用以检测鱼肉中的挥发性胺类物质,检测时间只需  $1 \text{ min}$ ,远低于滴定法所需的  $4.0 \text{ h}$ 。该传感器对鲭鱼 (*Pneumatophorus japonicus*) 和带鱼 (*Trichiurus lepturus*) 的检测方法与 TVB-N 常规方法呈高度相似。Lu 等<sup>[28]</sup>通过偶氮衍生化薄层色谱与表面增强拉曼散射光谱相结合的方法,建立了一种便携式金枪鱼组胺现场监测技术,检测限远低于 FDA (Food and Drug Administration) 规定上限。随着研究的深入,生物胺的检测逐渐克服了传统检测方法中的样品预处理和紫外光照射的繁琐需求,实现了可视化检测与即时检测。

通常情况下,  $K$  值用于评价鱼类死亡后体内 ATP 的降解速率。酶促作用和自溶现象均会加速 ATP 的降解速率,因此  $K$  值上升意味鱼肉品质的下降<sup>[29]</sup>。ATP 在鱼体内降解途径为: ATP (三磷酸腺苷)  $\rightarrow$  ADP (二磷酸腺苷)  $\rightarrow$  AMP (一磷酸腺苷)  $\rightarrow$  IMP (肌苷酸)  $\rightarrow$  HxR (肌苷)  $\rightarrow$  Hx (次黄嘌呤)  $\rightarrow$  黄嘌呤  $\rightarrow$  尿酸,该反应会在鱼类死亡后立刻发生。一般认为,  $K$  值  $< 20.0\%$  为一级品质;  $20.0\% \sim 40.0\%$  为二级品质;超过  $60.0\%$  认为彻底腐败,不可食用。 $K$  值的经典检测方法主要有高效液相色谱法、近红外光谱法、分光光度法等。但这些方法大多需要相对昂贵的设备和技术人员进行,难以在现场中应用使用。因此,有必要开发一些方便的  $K$  值测定方法。Chen 等<sup>[30]</sup>利用次黄嘌呤与溶解氧生成的  $\text{H}_2\text{O}_2$  制作了芬顿显色反应生物显色传感器,实现了  $K$  值的目测检测。Zhu 等<sup>[31]</sup>通过 3D 多孔石墨烯柔性纳米酶电极结合人工神经网络算法,实现了对黄嘌呤和次黄嘌呤的智能分析和数字化输出,检测限分别为  $9.0 \mu\text{mol}/\text{L}$  和  $26.0 \mu\text{mol}/\text{L}$ 。随着人工智能和算法

的引入, 鱼肉  $K$  值的检测变得更加方便、快捷、高效。

在对鱼肉新鲜度的评价中, 利用次黄嘌呤与挥发性盐基氮含量的相关性可以更加准确判断保藏鱼肉品质的变化程度。

### 1.2.2 酶、蛋白质与脂质氧化

对鱼肉品质影响较大的酶主要包括: 基质金属蛋白酶、明胶酶、钙蛋白酶、组织蛋白酶、半胱氨酸和丝氨酸蛋白酶<sup>[32]</sup>。肌原蛋白被蛋白酶水解后, 肌纤维之间出现间隙和断裂,  $\alpha$ -螺旋降低, 羰基化水平上升, 巯基含量下降等现象<sup>[33]</sup>。肌红蛋白解离后产生高铁肌红蛋白、亚铁肌红蛋白、硫化血红素以及卟啉基团降解后释放的铁原子均能以不同形式介导脂质氧化, 同时脂质氧化产生小分子醛酮类物质又具有介导肌红蛋白氧化的能力<sup>[34]</sup>。这一系列的变化会严重降低鱼肉组织的弹性、硬度, 也使其挥发性风味成分发生劣变。Liu 等<sup>[35]</sup>基于生物组学的研究发现俄罗斯鲟 (*Acipenser gueldenstaedti*) 中有 27 种蛋白质与鱼肉氧化过程中异味的形成相关, 特别是蛋白酶体与过氧化物酶体。Li 等<sup>[36]</sup>利用电子鼻、电子舌、色度仪结合数据融合和机器学习算法评价了冷冻竹筴鱼 (*Trachurus japonicus*) 的品质变化, 结果表明该方法可以有效预测鱼肉中蛋白质、脂质氧化程度和  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活性。此外, 蛋白质氧化产生的一元胺和不饱和脂肪酸氧化分解产生的己醛、壬醛、辛醛等都是鱼肉不良风味的主要来源。因此, 开发鱼肉品质评价中酶、蛋白质与脂质氧化的实时监测技术对渔业加工至关重要。

### 1.2.3 挥发性成分

鱼肉中挥发性成分主要来源于外部生存环境, 脂质和蛋白质氧化分解, 以及微生物代谢。氨基酸与不饱和脂肪酸氧化分解产生的一元胺、醛、含硫化物等不良风味成分与感官品质密切相关。在海水鱼中, 氧化三甲胺被还原为三甲胺和二甲胺, 是鱼腥味来源主要来源之一, 而淡水鱼中由于缺乏氧化三甲胺与三甲胺, 固不适合将其作为品质评价指标<sup>[37]</sup>。当下, 科研人员已开始利用不良风味成分判断鱼肉的品质变化。沈秋霞等<sup>[38]</sup>利用电子鼻对冷藏三文鱼 (*Salmon*) 的品质进行研究, 结果表明电子鼻可以快速判别其品质的变化程度。此外, 一些更加快捷的挥发性成分实时检测技术开始逐步取代传统的感官评定和气相色谱/质谱技术用于鱼肉品质的鉴别。Zahra 等<sup>[39]</sup>开发出一种纳米铜离子比色计, 根据颜色变化可实时监测包装鱼肉中挥发性硫化物

含量, 从而实现对鱼肉品质劣变程度的快速评判。Radouane 等<sup>[40]</sup>开发了基于 5 种金属氧化物的气体传感器, 可实现欧洲沙丁鱼 (*Pilchard*) 品质变化的实时监控, 结果均与国际标准相吻合。

### 1.3 微生物指标

腐败微生物繁殖是引起鱼肉品质劣变的重要原因。常温环境中, 鱼类腐败菌主要为革兰氏阴性发酵细菌 (大肠杆菌属、产气杆菌属), 这类细菌通过发酵鱼肉中的糖类和蛋白质产生硫化氢、氨和苯甲酸等刺激性物质, 使鱼肉的口味和色泽恶化。低温贮藏鱼类的腐败菌为革兰氏阴性冷营养微生物 (假单胞菌属、异单胞菌属), 其氨化作用、硫化作用产生异味, 导致鱼肉营养价值下降和风味劣变<sup>[41]</sup>。一般情况下, 新鲜鱼肉中的菌落总数为 2.0~4.0 lg CFU/g, 当菌落总数增长到 6.0~7.0 lg CFU/g 时可视为鱼肉处于腐败初期<sup>[42]</sup>。腐败菌微生物传统的检测方法有微生物培养方法、酶联免疫吸附测定和聚合酶链反应。但这类方法受环境条件限制, 不能实现微生物的快速精准鉴别。滚圆扩增法作为一种新型恒温微生物检测技术具有特异性强、灵敏度高、引物设计简单等特点。图 1 为其工作原理, 首先利用锁式探针识别微生物的目标 DNA 构建具有特定起始位点的环状 DNA 分子, 然后引物与该环状 DNA 分子结合, 并在 DNA 多聚酶的作用下开始合成新的 DNA 链, 最后加入反向引物使单链 DNA 实现链式增长<sup>[43,44]</sup>。循环完成后, 利用凝胶电泳、荧光光谱分析目的序列。Song 等<sup>[45]</sup>利用一种双适体辅助滚圆扩增法技术实现了对海产品中副溶血性弧菌可视化实时检测, 检测限 10.0 lg CFU/g。

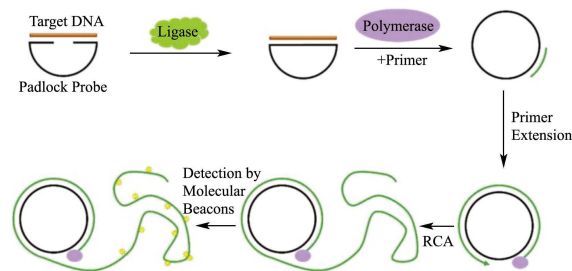


图 1 滚圆扩增原理图

Fig.1 Schematic diagram of the rolling circle amplification

在对鱼肉的品质评价中, 每一个指标都有其针对性和不足之处, 必须结合其他指标才能准确识别鱼肉品质的变化。伴随纳米技术与算法的引入, 新型可视化实时检测技术被不断应用于水产品加工行业, 为鱼肉保藏和品质保持技术的发展提速增效。

表 1 鱼肉低温保鲜方法

Table 1 Low temperature preservation methods of fish

	温度	原理	优点	不足
冷藏	4.0 °C 左右	鱼体内源酶与微生物受到抑制，但依然缓慢生长	操作简单，家庭、市场广泛适用	品质劣化迅速，保质期短，必须辅以其他技术
冰温	0.0 °C ~ 冰点	水未冻结，生物、化学和物理变化被一定程度抑制	货架期约为冷藏的 1.0~1.5 倍	温度控制严格，运输中需不断加冰，不合适长期保存
过冷	低于冰点 1.0~2.0 °C	5.0%~30.0% 水处于冻结状态，显著抑制微生物生长繁殖，内源酶活性下降	货架期约为冷藏的 1.5~4.0 倍	温度控制极严格，易形成大冰晶，造成更高汁液泄漏和肌纤维断裂，不适合长期保存
冷冻	-18.0 °C 及以下	微生物生长和酶活性强烈抑制	保质期长达一年	细胞结构破坏，造成汁液流失、干耗、色泽劣变严重等问题

表 2 不同鱼类在不同保藏温度下保藏效果

Table 2 Preservation effect of different fish under different storage temperature

鱼类品种	贮藏温度	保藏效果
草鱼 <sup>[53]</sup> <i>Ctenopharyngodon idella</i>	4.0 °C 冷藏、-0.5 °C 冰温、-3.5 °C 微冻	冰温保藏效果明显优于冷藏，贮藏期延长 2 倍，且能增强草鱼风味
三文鱼 <sup>[54]</sup> <i>Oncorhynchus</i>	3.0 °C 冷藏、-2.0 °C 过冷、-18.0 °C 冻藏	12 d 内过冷贮藏优于冷藏和冻藏，持水力优于冻藏
虹鳟鱼 <sup>[55]</sup> <i>Oncorhynchus mykiss</i>	4.0 °C 冷藏、-20.0 °C 和 -80.0 °C 冻藏	30 d 内 -20.0 °C 和 -80.0 °C 冷藏保鲜效果无差异
鲈鱼 <sup>[56]</sup> <i>Lateolabrax maculatus</i>	-10.0 °C、-18.0 °C、-80.0 °C 冻藏	32 周贮藏期内 -80.0 °C 冻藏有效保持鱼肉稳定
鲟鱼 <sup>[46]</sup> <i>Acipenser</i>	4.0 °C 冷藏、-3.0 °C 微冻	货架期冷藏 6 d，微冻 18 d
蓝点马鲛 <sup>[57]</sup> <i>Scomberomorus niphoniu</i>	-90.0 °C 液氮速冻、-30.0 °C 平板速冻、-50.0 °C 和 -30.0 °C 冰箱冻结、-18.0 °C 冷库冻结	液氮速冻效果最优，-50.0 °C 冰箱冻结与 -30.0 °C 平板速冻效果稍差，但明显好于 -30.0 °C 冰箱冻结与冷库冻结
金鲳鱼 <sup>[58]</sup> <i>Trachinotus ovatus</i>	-35.0 °C 螺旋冻结、-30.0 °C 平板冻结、-50.0 °C 超低温冻结、-20.0 °C 冰柜冻结	与其他冻结方式相比，螺旋式冻结处理的综合效果最佳
鲤鱼 <sup>[59]</sup> <i>Cyprinus carpio</i>	-18.0 °C 下超声波辅助浸入式冷冻、空气冷冻、浸入式冷冻	综合各项指标超声波辅助浸入式冷冻样品质量显著优于另外两组样品

## 2 低温及辅助保鲜技术

低温是常见的鱼肉保鲜手段，具有操作方便、效果显著的优点。然而，低温贮藏也会产生营养流失、干耗、弹性下降等问题。为更好地发挥低温作用，保鲜过程还需要综合考虑鱼肉本身的品质特性、食品添加剂和包装材料等因素，以最大程度延长保质期，减缓品质劣变，降低能源消耗。

### 2.1 低温保鲜

不同保藏条件对鱼肉品质变化产生不同程度的影响。根据鱼肉中自由水的冻结状态可分为，冷藏、冰温、过冷、冷冻四种保藏方式（表 1）<sup>[38,46]</sup>。过冷和冰温条件相较于冷藏能够更有效地延长鱼肉的货架期。然而，过冷温度的控制较为困难。一旦温度

过低或无法精确控制，就很容易导致物质过冷变成固态，当温度降低到低于鱼肉组织的凝固点时，水分分子会以特定的方式排列并形成冰晶。这些较大的冰晶在形成过程中会对肌肉纤维结构造成破坏，蛋白酶也会在过冷温度下被激活，引起肌纤维蛋白质的降解和肌节的分解<sup>[47]</sup>。冷冻保藏是贮藏时间相对较长的一种低温保藏技术，可以有效抑制微生物的生长，但冷冻会破坏肌肉细胞结构，提高自由水含量，导致鱼肉品质下降<sup>[48]</sup>。鱼肉在冷冻保藏中的品质劣变与多种因素相关，包括鱼的种类、宰杀方式、冷冻保护剂、冻结速率、贮藏温度等<sup>[49,50]</sup>。特别是低于冰点温度的贮藏中温度波动引起的冰晶再结晶现象，会加速鱼肉组织蛋白质功能退化与脂质氧化进程<sup>[51]</sup>。

低温冻结通过改变水在鱼肉中的存在形式和水

分活度, 减缓化学反应与生物降解进程以达到延长货架期的目的。研究表明, 更快地降低鱼类表面温度可以有效控制冷冻条件下鱼肉中的水分流失, 同时冻结鱼肉的品质也会随冷冻时间的延长而劣化<sup>[52]</sup>。相对于普通冷冻, 速冻具有有效抑制冰晶生长与重结晶、对细胞破坏更小、冰晶分散均匀等优点。目前常见的冻结方式有液氮速冻、平板速冻、螺旋冻结、浸入式冻结与空气冻结等, 其中液氮速冻的效果较好, 平板速冻与螺旋式冻结应用于实际生产中较为经济实用, 同时利用超声波等技术辅助冻结也可以显著改善冻结效果(表2)。近年来, 随着冲击冷冻、电场与磁场辅助冷冻等新兴冷冻方式不断应用, 鱼肉产品的品质得到显著提升, 货架期明显延长。

## 2.2 其他辅助低温措施

### 2.2.1 包装保鲜

低温保鲜过程中, 合理的包装方式是延缓鱼肉品质衰变的重要途径之一, 常见的有空气包装、真空包装及气调包装。空气包装一般用透明膜对产品进行包装处理, 该方式仅能避免外界环境对产品的污染。真空包装是一种通过隔绝氧气, 抑制微生物生长以延长产品货架期的有效方法。气调包装则是使用不同比率的 O<sub>2</sub>、N<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 等气体来取代食品包装中的空气以延长食品货架期的一种包装技术。与其它包装相比, 气调包装具有护色、保留产品形状、抑制厌氧微生物生长、灵活控制气体成分等优点。童光森等<sup>[60]</sup>发现高氧气调包装(80.0% O<sub>2</sub>+20.0% CO<sub>2</sub>)下乌鳢鱼(*Channa argus*)鱼片相对于 CO 气调包装(0.8% CO+69.4% N<sub>2</sub>+29.8% CO<sub>2</sub>)和真空包装的货架期分别延长了 3 d 和 6 d。Chan 等<sup>[61]</sup>对大西洋鲑鱼(*Salmo salar*)分别进行气调包装(60.0% CO<sub>2</sub>+40.0% N<sub>2</sub>)、真空贴体包装和普通包装, 发现 4.0 °C 冷藏下气调包装和真空贴体包装皆可有效抑制微生物繁殖并延长货架期 6 d, 但气调包装中鱼肉表现出更红润的色泽。陈芷雯<sup>[62]</sup>的研究表明, 高 CO<sub>2</sub> 低 O<sub>2</sub> 体积分数下有利于降低鱼肉糖酵解速率, 延缓鱼类宰杀后的生理变化, 适当的 O<sub>2</sub> 浓度有利氧合肌红蛋白的生成, 赋予鱼肉更为鲜郁的红色。Yang 等<sup>[63]</sup>分析 CO<sub>2</sub> 对细菌的作用是抑制其蛋白酶和脂肪酶的活性, 从而改变了细菌的生长和代谢, 以达到抑制菌落增长的目的。

目前食品中常用的塑料包装材料主要包括聚偏

二氯乙烯、聚乙烯、聚丙烯和尼龙等。聚偏二氯乙烯作为一种高阻隔包装材料, 具有防止鱼肉香气扩散、减少包装内部气体向外逸散的优点, 常用作气调包装的包装材料。在低密度聚乙烯、聚烯烃、PA/PE 真空袋、无菌屏障袋 4 种不同材料包装对鲑鱼(*Salmo salar*)保鲜的研究中发现, -25.0 °C 条件下高阻隔性包装对鱼肉品质劣变的抑制作用显著优于聚低密度聚乙烯<sup>[64]</sup>。木材作为一种可降解的包装材料也受到了研究者的关注, 相比塑料制品, 木材包装可以有效降低人体对微塑料和邻苯二甲酯类塑化剂的摄入。Avila 等<sup>[65]</sup>对凤尾鱼(*Engraulis encrasicolus*)的包装中使用了松木, 与发泡聚乙烯和高密度聚乙烯相比, 可以更好的抑制微生物生长。近年来, 生物保藏剂结合生物纳米材料制备保鲜涂膜成为研究的热点。这类生物涂膜具有可再生性、生物相容性、抗菌性和生物降解性等优点。Youssef 等<sup>[66]</sup>将大蒜提取物和 TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒结合制备了新型生物纳米复合涂膜并用于罗非鱼(*Oreochromis mossambicus*)保鲜实验, 结果表明该纳米复合材料通过诱发自由基与活性氧攻击细胞膜磷脂双分子层使细胞裂解从而达到抑菌的效果。随着新型生物材料的开发与纳米技术的引入, 可循环、抗菌、易降解的生物活性包装材料将逐渐取代传统包装材料应用于食品的保鲜。

### 2.2.2 化学保鲜

化学保鲜一般是使用化学类添加剂对鱼肉进行处理, 结合低温保藏起到保鲜的效果。按使用目的可将化学制剂分为食品杀菌剂和食品防腐剂。食品杀菌剂主要用于杀死鱼肉加工前所携带的微生物, 保证后续加工的安全性, 例如臭氧与酸性电解水处理。在我国山梨酸及其钾盐与焦硫酸钠是允许添加在冷冻水产品的一类化学防腐剂, 皆可通过调节代谢相关酶的活性达到抑菌的目的。蒋奕等<sup>[67]</sup>发现通过双乙酸钠结合脉冲电光处理鲤鱼(*Cyprinus*)能显著抑制微生物繁殖, 保持鱼肉持水力并减缓脂肪氧化。由高铭等<sup>[68]</sup>研究表明, 使用山梨酸钾和 ε-聚赖氨酸盐浸泡高白鲑鱼(*Coregonus peled*)可以有效延长细菌生长的延滞期, 降低鱼肉中细菌的繁殖速度。因过量添加剂的摄入会对人体健康产生影响, 所以在使用过程中需严格遵守相关标准的用量。

### 2.2.3 生物保鲜

生物保藏剂具有无味无毒、安全、易降解等特性, 成为近期食品保藏剂开发的热门方向。生物保

藏剂根据来源可分为三种：植物的提取物及精油、动物的壳聚糖和微生物的细菌素<sup>[69]</sup>。

植物精油一般指通过蒸汽蒸馏过程获得的挥发性油状液体，而植物提取物则是植物材料经过清洗、干制、研磨萃取出的溶剂<sup>[70]</sup>。最初常用浸泡方式来应用植物萃取物以及精油，一般浸泡 30 min 后沥干水分，同时结合不同包装方式进行低温保藏<sup>[71]</sup>，而最近的研究多将其制备成纳米乳液后与其他生物材料结合进行涂膜或覆膜包装<sup>[72,73]</sup>。Wang 等<sup>[74]</sup>将牛至精油与微孔淀粉结合制备淀粉/聚乙烯醇薄膜并用于鲈鱼 (*Lateolabrax japonicus*) 的保鲜，达到了显著抑制微生物繁殖、脂肪氧化和蛋白质分解的效果。Lan 等<sup>[75]</sup>研究真空贮藏与果胶植物精油（牛至精油、姜精油）复合涂膜对大黄鱼 (*Pseudosciaena crocea*) 冷藏品质的影响，结果表明二者结合可以有效降低自由水含量，抑制蛋白质氧化和肌肉内源酶活性。值得注意的是，植物提取物和精油的使用效果受其纯度、种类以及使用方法等影响，在使用过程中应遵循适量原则，以确保安全和有效的保鲜效果。

壳聚糖是一种线性阳离子高分子聚合物，具有生物相容性、抗氧化性、抑菌性以及聚合成膜性等特点，常用于制作具有防腐性能的覆膜与涂料。2013 年美国食品和药物管理局将壳聚糖列入一般公认安全物质 (Generally Recognized as Safe, GRAS)，可作为安全无毒的食品保鲜材料。但当基质 pH 上升，壳聚糖会转化为不溶形式而失去抗菌活性，使用时添加其它生物活性成分或进行改性处理则能更好发挥其抗菌作用<sup>[76]</sup>。Wang 等<sup>[77]</sup>研究的壳聚糖与黄皮籽油复合膜可以有效抑制金鲷鱼 (*Trachinotus blochii*) 中微生物的繁殖及水解酶与脂氧合酶的活性，达到延缓色泽与质构变化的目的。Qi 等<sup>[78]</sup>研究发现，纳米分子壳聚糖因量子尺寸效应相较于大分子壳聚糖拥有更高的抗菌性能，可用于保持鱼肉品质的稳定。壳聚糖使用时应充分考虑其浓度、范围以及处理方法等因素，避免因使用不当对鱼肉感官品质造成不良的影响。

细菌素通常指细菌产生的多肽物质，一般由 10~50 个氨基酸残基组成，具有抑菌、护色、抗氧化等特性。根据细菌素的合成机制可将细菌素分为 3 类：I 类（翻译后修饰的小肽），II 类（未修饰的多肽）和 III 类（分子量 > 10 ku 且不耐热的多肽）。目前，乳酸链球菌素 (Nisin) 是唯一通过欧

盟认证并能够直接添加于食品中的 I 类细菌素，其主要通过作用革兰氏阳性菌脂质 II，破坏细胞糖基化转移过程，从而抑制细胞壁的形成<sup>[79]</sup>。Gulzar 等<sup>[80]</sup>研究发现，添加乳酸链球菌素制备而成的明胶/壳聚糖纳米纤维薄膜用于鲈鱼 (*Lateolabrax japonicus*) 鱼片的保藏可以显著提升纳米纤维薄膜拉伸强度，并且在 4.0 °C 时可以有效降低水分损失，抑制革兰氏阳性菌繁殖、脂肪氧化和蛋白质降解。Meng 等<sup>[81]</sup>发现由乙酰化高丝氨酸内酯与乳酸链球菌素结合而成的生物保藏剂可以使 4.0 °C 冷藏鲟鱼 (*Acipenser sturio linnaeus*) 的货架期延长 5 d。应当注意的是，细菌素使用时应考虑 pH 值、食品成分、酶等因素的影响，避免使用不当引起活性的丧失。

将生物材料嵌入包装薄膜或涂层用于制备食品的抗菌包装，抑制保藏过程中的品质劣变与致病微生物繁殖，避免包装材料与食品成分的相互作用，提高食品的安全性，延长保质期，减少损耗。因此，含有生物材料的创新抗菌包装体系，特别是微胶囊或纳米封装形式，在未来鱼肉保鲜行业中将拥有巨大的发展潜力。

### 3 结论与展望

综上所述，为了最大程度地延长鱼肉的保藏期并提高资源利用率，低温保鲜过程中需结合品质特性、微生物污染水平、营养成分等指标进行动态调整。气调保鲜、速冻保鲜以及保鲜涂层等辅助保藏措施，可以有效地抑制鱼肉的腐败菌繁殖和氧化变质，保持其原有感官品质和营养成分。虽然微波辅助、液氮速冻和纳米材料等辅助技术在保鲜领域展现出巨大潜力，但由于其成本高、操作复杂和需要专业培训等问题，普及方面还有一定的挑战。生物活性材料具有良好的功能特性，如抑菌性、抗氧化性、天然无毒性等，在鱼肉保鲜领域展现出巨大的应用潜力。随着国内消费者观念的日渐提升，对鱼肉保鲜方式与品质控制要求越来越高，根据鱼肉不同特性的专一性保鲜方式将是未来研究的热点方向。目前，仅靠单一指标并不能准确评估鱼肉的品质变化，因此迫切需要开发具备多种指标检测功能的便携式检测仪器，用于快速评判鱼肉整体品质变化与保藏效果。另外还需要建立标准化措施，作为评估鱼肉品质的补充或替代方法。在鱼类储存和运输过程中，仿生学技术可应用于鱼肉品质评价的实时监测，但是还需要开发更加完备的检测系统来满

足各种复杂的测定条件。将光谱技术与人工智能和机器学习相结合,加强光谱信息的利用,为鱼肉品质评价提供更准确可靠的预测模型。这些新技术用于鱼肉新鲜品质保持和鉴别已成为鱼肉品质标准化发展趋势。

### 参考文献

- [1] 农业部渔政渔业管理局.中国渔业统计年鉴2023[M].北京:中国农业出版社,2023.
- [2] BALDI S C, PARISI G, BONELLI A, et al. Effects of different stunning/slaughter methods on frozen fillets quality of cobia (*Rachycentron canadum*) [J]. Aquaculture, 2018, 486: 107-113.
- [3] GANN S, KURT H. Systematic review and critical reflection on the isolation and identification methods for spoilage associated bacteria in fresh marine fish [J]. Journal of Microbiological Methods, 2022, 203: 106599.
- [4] 吕颖,谢晶.温度波动对冻藏水产品品质影响及控制措施的研究进展[J].食品与发酵工业,2020,46(10):290-295.
- [5] LIU X Y, ZHANG X L, WANG G B, et al. Application of super-cooled storage of aquatic products: a review [J]. International Journal of Refrigeration, 2023, 154: 66-72.
- [6] 叶剑,徐仰丽,吴士专,等.冷链流通过程中水产品低温保鲜技术研究进展[J].食品安全质量检测学报,2018, 9(8):1769-1775.
- [7] SEZER Y Ç, BULUT M, BORAN G, ALWAZEER D. The effects of hydrogen incorporation in modified atmosphere packaging on the formation of biogenic amines in cold stored rainbow trout and horse mackerel [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 112: 104688.
- [8] 张倩.不同环境温度条件下黄颡鱼冷藏保鲜对其肌肉品质、营养成分及微生物多样性的影响[D].重庆:西南大学,2020.
- [9] LIU Z L, YANG W G, WEI H M, et al. The mechanisms and applications of cryoprotectants in aquatic products: an overview [J]. Food Chemistry, 2023, 408: 135202.
- [10] GAO S, LIU Y Y, FU Z X, et al. Uncovering quality changes of salted bighead carp fillets during frozen storage: the potential role of time-dependent protein denaturation and oxidation [J]. Food Chemistry, 2023, 414: 135714.
- [11] 黄卉,孙申宇,魏涯,等.红色肉贮藏期间肌红蛋白与肉色变化研究进展[J].南方水产科学,2020,16(3):119-124.
- [12] AAMIN T G, FATAHI S, BANAN A, et al. Real-time nondestructive monitoring of common carp fish freshness using robust vision-based intelligent modeling approaches [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 159: 16-27.
- [13] ABAMBA K O, YOSHITO S, HUANG Z, et al. Evaluating Japanese dace (*Tribolodon hakonensis*) fish freshness during storage using multispectral images from visible and UV excited fluorescence [J]. LWT, 2021, 151: 112207.
- [14] WANG S G, DAS A K, PANG J, et al. Real-time monitoring the color changes of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) fillets based on hyperspectral imaging empowered with artificial intelligence [J]. Food Chemistry, 2022, 382: 132343.
- [15] LI Q, SUN X, MUBANGO E, et al. Effects of protein and lipid oxidation on the water holding capacity of different parts of bighead carp: eye, dorsal, belly and tail muscles [J]. Food Chemistry, 2023, 423: 136238.
- [16] 邹朝阳,赵峰,欧帅,等.冷藏和冰藏条件下大菱鲆品质变化与蛋白质氧化相关性[J].食品与发酵工业,2019, 45(22):213-219.
- [17] BARBERA S. Whctrend, an up-to-date method to measure water holding capacity in meat [J]. Meat Science, 2019, 152: 134-140.
- [18] KAEWTHONG P, WATTANACHANT S. Effect of sugar and starch levels on electrical conductivity of marinade solutions in improving water-holding capacity of marinated broiler breast meat [J]. The Journal of Applied Poultry Research, 2019, 28(1): 42-51.
- [19] WU L L, PU H B, SUN D W. Novel techniques for evaluating freshness quality attributes of fish: a review of recent developments [J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 83: 259-273.
- [20] SCHREUDER F K, MIEK S, KONSTANTINA K, et al. Texture methods for evaluating meat and meat analogue structures: a review [J]. Food Control, 2021, 127: 108103.
- [21] TERESA A, DANIEL C, GRASSI S, et al. Evaluation of fresh meat quality by Hyperspectral Imaging (HSI), Nuclear Magnetic Resonance (NMR) and Magnetic Resonance Imaging (MRI): a review [J]. Meat Science, 2021, 172: 108340.
- [22] AMIN T G, SODABEH F, OMIND M O, et al. Meat quality evaluation based on computer vision technique: a review [J]. Meat Science, 2019, 156: 183-195.
- [23] 邵宏宏,周秀锦,相兴伟,等.4种海产品冷藏期间挥发性盐基氮和生物胺含量变化[J].食品安全质量检测学报, 2022,13(9):2794-2801.
- [24] 曾媛,袁超璐,陈益敏,等.测定金枪鱼产品中的生物胺含量[J].食品安全质量检测学报,2018,9(22):5881-5887.
- [25] PARATE K, POLAC C P, SONAL V R, et al. Aerosol-jet-printed graphene electrochemical histamine sensors for food safety monitoring [J]. 2D Materials, 2020, 7(3): 034002.
- [26] ZHANG W Y, MA J, SUN D W. Dual-signal fluorescent test strips for spoilage sensing of packaged seafood: visual monitoring of volatile basic nitrogens [J]. Food Chemistry, 2023, 414: 135725.
- [27] CHANG L Y, CHUANG M Y, ZAN H W, et al. One-minute fish freshness evaluation by testing the volatile amine gas with an ultrasensitive porous-electrode-capped organic gas sensor system [J]. Acs Sensors, 2017, 2(4): 531.
- [28] LU X, JI S, REN Z, et al. Rapid, convenient, and ultrasensitive



- point-of-care sensing of histamine from fish: a portable chromatographic platform based on derivatization reaction [J]. *Journal of Chromatography A*, 2023, 1696: 463953.
- [29] 杨汝晴,陈玉磊,孙乐常,等. 鲈鱼在4 °C冷藏过程中的肌肉品质变化[J]. *食品科学*, 2023, 44(1): 239-245.
- [30] CHEN Z T, LIN Y, MA X M, et al. Multicolor biosensor for fish freshness assessment with the naked eye [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 252: 201-208.
- [31] ZHU Y F, LIU P, XUE T, et al. Facile and rapid one-step mass production of flexible 3D porous graphene nanozyme electrode via direct laser-writing for intelligent evaluation of fish freshness [J]. *Microchemical Journal*, 2021, 162: 105855.
- [32] AVTAR S, SOOTTAWAT B. Proteolysis and Its control using protease inhibitors in fish and fish products: a review [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2018, 17(2): 496-509.
- [33] GE L, WANG N, LI X, et al. Phosphoproteomic insight into the changes in structural proteins of muscle architecture associated with texture softening of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) fillets during chilling storage [J]. *Food Chemistry*, 2023, 422: 136262.
- [34] 王兆明,贺稚非,李洪军. 脂质和蛋白质氧化对肉品品质影响及交互氧化机制研究进展 [J]. *食品科学*, 2018, 39(11): 295-301.
- [35] LIU F J, SHEN S K, CHEN Y W, et al. Quantitative proteomics reveals the relationship between protein changes and off-flavor in Russian sturgeon (*Acipenser gueldenstaedti*) fillets treated with low temperature vacuum heating [J]. *Food Chemistry*, 2021, 370: 131371.
- [36] LI H Y, WANG Y, ZHANG J X, et al. Prediction of the freshness of horse mackerel (*Trachurus japonicus*) using e-nose, e-tongue, and colorimeter based on biochemical indexes analyzed during frozen storage of whole fish [J]. *Food Chemistry*, 2023, 402: 134325.
- [37] NISACHON P, SUPHAWUTH S, NARIN T, et al. Paper-based electrochemiluminescence device for the rapid estimation of trimethylamine in fish via the quenching effect of thioglycolic acid-capped cadmium selenide quantum dots [J]. *Food Chemistry*, 2022, 366: 130590.
- [38] 沈秋霞,王晓君,卢朝婷,等. 基于电子鼻技术对真空包装三文鱼片的新鲜度评价 [J]. *食品与发酵工业*, 2018, 44(10): 241-247.
- [39] ZAHRA T, HAJAR S. A colorimetric indicator based on copper nanoparticles for volatile sulfur compounds to monitor fish spoilage in intelligent packaging [J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2022, 33: 100884.
- [40] RANOUEANE L, YASSINE A, JEAN B S, et al. Assessing the freshness of agadir blue fish using a metal oxide gas sensing array [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 22(1): 1-5.
- [41] GRAM L, DALGAARD P. Fish spoilage bacteria-problems and solutions [J]. *Current Opinion Biotechnology*, 2002, 13(3): 262-266.
- [42] 余达威. 壳聚糖涂膜对冷藏草鱼片的品质影响研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2019.
- [43] XU X Y, SU Y, ZHANG Y Z, et al. Novel rolling circle amplification biosensors for food-borne microorganism detection [J]. *Trends in Analytical Chemistry*, 2021, 141: 116293.
- [44] DUNBAR S, DAS S. Amplification chemistries in clinical virology [J]. *Journal of Clinical Virology*, 2019, 115: 18-31.
- [45] SONG S, WANG X, XU K, et al. Visualized detection of vibrio parahaemolyticus in food samples using dual-functional aptamers and cut-assisted rolling circle amplification [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(4): 1244-1253.
- [46] 梅俊,许振琨,郁慧洁,等. 冷链物流中海水鱼的腐败机制及保鲜技术研究进展 [J]. *食品与生物技术学报*, 2022, 41(7): 84-99.
- [47] 陈依萍,崔文萱,高瑞昌,等. 冷藏与微冻贮藏过程中鲟鱼肉品质变化 [J]. *渔业科学进展*, 2020, 41(1): 178-186.
- [48] YU D, XU Y, REGENSTEIN J M, et al. The effects of edible chitosan-based coatings on flavor quality of raw grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) fillets during refrigerated storage [J]. *Food Chemistry*, 2018, 242: 412-420.
- [49] 张龙翼,张嵩,张鹏程,等. 冷藏过程中一氧化碳对白乌鱼肉品质的影响 [J]. *现代食品科技*, 2019, 35(3): 95-100.
- [50] SHI L, XIONG G, DING A, et al. Effects of freezing temperature and frozen storage on the biochemical and physical properties of *Procambarus clarkii* [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2018, 91: 223-229.
- [51] LI F, WANG B, KONG B, et al. Decreased gelling properties of protein in mirror carp (*Cyprinus carpio*) are due to protein aggregation and structure deterioration when subjected to freeze-thaw cycles [J]. *Food Hydrocoll*, 2019, 97: 105223.
- [52] MULOT V, BENKHELIFA H, PATHIER D, et al. Measurement of food dehydration during freezing in mechanical and cryogenic freezing conditions [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2019, 103: 329-338.
- [53] 蔡广来,王金庆,童年. 贮藏温度对草鱼片冰温保鲜的影响 [J]. *安徽农业大学学报*, 2020, 47(3): 380-385.
- [54] PARK D H, LEE S Y, BYEON Y M, et al. Effect of supercooling storage applied with stepwise algorithm for fishes (salmon and olive flounder) and its freshness during extended storage [J]. *Food Bioscience*, 2022, 49: 101950.
- [55] YU M, SOFIA L, ANN R, et al. Metabolic profile of fish muscle tissue changes with sampling method, storage strategy and time [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2020, 1136: 42-50.
- [56] 汪兰,曾俊杰,吴文锦,等. 不同冻藏温度对鲈鱼品质的影响 [J]. *食品工业科技*, 2018, 39(21): 287-292.
- [57] 赵峰,蒋慧珠,王轰,等. 不同冻结工艺条件对蓝点马鲛品质的影响 [J]. *中国渔业质量与标准*, 2019, 9(2): 9-15.
- [58] 巩涛硕,蓝蔚青,王蒙,等. 不同冻结方式对金鲟鱼水分、

- 组织结构与品质变化的影响[J].食品科学,2019,40(23): 213-219.
- [59] SUN Q, SUN F, XIA X, et al. The comparison of ultrasound-assisted immersion freezing, air freezing and immersion freezing on the muscle quality and physicochemical properties of common carp (*Cyprinus carpio*) during freezing storage [J]. Ultrason Sonochem, 2019, 51: 281-291.
- [60] 童光森,严利强,郭嘉吻,等.包装方式对乌鳢鱼片冷藏期品质变化及烹饪效果影响[J].美食研究,2021,38(1):88-92.
- [61] CHAN S, STEPH N, SKARE M, et al. Evaluation of physical and instrumentally determined sensory attributes of atlantic salmon portions packaged in modified atmosphere and vacuum skin [J]. LWT, 2021, 146: 111404.
- [62] 陈芷雯.气调包装对冰鲜鸡糖酵解及鸡肉品质的影响[D].南昌:江西农业大学,2020.
- [63] YANG J, LIANG R R, MAO Y, et al. Potential inhibitory effect of carbon dioxide on the spoilage behaviors of pseudomonas fragi in high-oxygen packaged beef during refrigerated storage [J]. Food Microbiology, 2023, 112: 104229.
- [64] 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.
- [65] AVILA C R, HASCORT A S H, CASTILLO A G R. Hygienic properties exhibited by single-use wood and plastic packaging on the microbial stability for fish [J]. LWT, 2019, 113: 108309.
- [66] YOUSSEF A M, EL S H, EL N I, et al. Preparation and characterization of novel bionanocomposites based on garlic extract for preserving fresh nile tilapia fish fillets [J]. Rsc Advances, 2021, 11(37): 35730.
- [67] 蒋奕,俞龙浩.脉冲强光杀菌结合双乙酸钠和乳酸双芽菌处理对煎制鲤鱼冷藏期间品质的影响[J].肉类研究, 2018,32(8):57-63.
- [68] 由高铭,陈欣然,赵前程,等.抑菌剂浸泡液对冷藏高白鲑鱼肉腐败菌的抑制效果[J].水产科学,2018,37(5):584-590.
- [69] BAPTISTA R C, HORITA C N, SANTANA A S. Natural products with preservative properties for enhancing the microbiological safety and extending the shelf-life of seafood: a review [J]. Food Research International, 2020, 127: 108762.
- [70] MUNOZ S C, VIDAL C P, CANTER L P, et al. Encapsulation of plant extract compounds using cyclodextrin inclusion complexes, liposomes, electrospinning and their combinations for food purposes [J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 108: 177-186.
- [71] GURAN H S, OKSUZTEPE G, COBAN O E, et al. Influence of different essential oils on refrigerated fish patties produced from bonito fish (*Sarda sarda* Bloch, 1793) [J]. Czech Journal of Food Sciences, 2015, 33(1): 37-44.
- [72] AMOLI Z A, MEHDIZADEH T, TAJIK H, et al. Shelf life extension of refrigerated, vacuum-packed rainbow trout dipped in an alginate coating containing an ethanolic extract and/or the essential oil of *Mentha aquatica* [J]. Chemical Papers, 2019, 73(10): 2541-2550.
- [73] YESIM O, ESEMERAY K B, ISMAIL A, et al. Antimicrobial activity of thyme essential oil nanoemulsions on spoilage bacteria of fish and food-borne pathogens [J]. Food Bioscience, 2020, 36: 100635.
- [74] WANG J X, CHEN C W, XIE J. Loading oregano essential oil into microporous starch to develop starch/polyvinyl alcohol slow-release film towards sustainable active packaging for sea bass (*Lateolabrax japonicus*) [J]. Industrial Crops & Products, 2022, 188: 115679.
- [75] LAN W Q, SUN Y Q, CHEN M L, et al. Effects of pectin combined with plant essential oils on water migration, myofibrillar proteins and muscle tissue enzyme activity of vacuum packaged large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) during ice storage [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2021, 30: 100699.
- [76] NGUYEN T T, DAO U T T, BUI Q P T, et al. Enhanced antimicrobial activities and physiochemical properties of edible film based on chitosan incorporated with *Sonneratia caseolaris* (L) engl leaf extract [J]. Progress in Organic Coatings, 2020, 140: 105487.
- [77] WANG S T, LIU Z Q, ZHAO M T, et al. Chitosan-wampee seed essential oil composite film combined with cold plasma for refrigerated storage with modified atmosphere packaging: a promising technology for quality preservation of golden pompano fillets [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 224: 1266-1275.
- [78] QI L, XU Z, JIANG X, et al. Preparation and antibacterial activity of chitosan nanoparticles [J]. Carbohydrate Research, 2004, 339(16): 2693-2700.
- [79] EGHBAL N, VITON C, ADEMG G. Nano and microencapsulation of bacteriocins for food applications: a review [J]. Food Bioscience, 2022, 50: 102173.
- [80] GULZAR S, TAGRIDA M, PRODPRAN T, et al. Antimicrobial film based on polylactic acid coated with gelatin/chitosan nanofibers containing nisin extends the shelf life of Asian seabass slices [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2022, 34: 100941.
- [81] MENG G, ZHANG Y, GAO L, et al. Effect of AHL-lactonase and nisin on microbiological, chemical and sensory quality of vacuum packaged sturgeon storage at 4 °C AHL-lactonase and nisin inhibit sturgeon spoilage [J]. International Journal of Food Properties, 2021, 24(1): 222-232.