

水产品保鲜贮藏期间品质评价方式的研究进展

李 娜, 孙 敏, 王春华, 刘小杰*

(上海城建职业学院健康与社会关怀学院, 上海 201415)

摘 要: 水产品营养价值优良, 是我国居民日常膳食中优质蛋白质的重要来源, 其品质优劣状况与国民整体健康水平紧密关联。但在实际贮藏环节, 水产品极易因温度波动、微生物滋生等环境因素而腐败变质, 造成不同程度的资源浪费、环境污染及经济损失。从蛋白质、油脂、微生物角度出发, 本文首先总结了水产品贮藏期间品质特性变化规律。在此基础上从理化、感官、微生物 3 个方面出发, 重点阐述了目前国内外水产品品质特性评价指标与方法, 也突出光谱技术、低场核磁共振、感官仿生技术等快速无损检测技术与化学计量学的结合在水产品品质特性评价中的作用与应用现状, 旨在为进一步优化水产品品质特性评价体系的构建提供系统性的理论指导, 也突出了快速无损检测技术用于水产品品质特性评价的广泛应用前景。

关键词: 水产品; 品质特性评价; 快速无损

Research progress on quality evaluation indexes of aquatic products during fresh-keeping and storage

LI Na, SUN Min, WANG Chun-Hua, LIU Xiao-Jie*

(College of Health and Social Care, Shanghai Urban Construction Vocational College, Shanghai 201415, China)

ABSTRACT: Aquatic products have excellent nutritional value, which has become an important source of high-quality protein in daily diet of Chinese residents. Quality characteristics of aquatic products is closely related to the overall health of residents. However, in the actual storage process, aquatic products are easily deteriorated as a consequence of environmental factors including temperature fluctuations and microbial growth, resulting in the resources waste, environmental pollution and economic losses. In this paper, from the perspective of proteins, lipid and microorganisms, the changing regularity of quality characteristics of aquatic products was summarized during storage. Then this paper summarized on the evaluation indicators and methods of aquatic product quality characteristics at home and abroad from 3 aspects: Physicochemical, sensory, and microbiological. On the other hand, the application of rapid non-destructive testing techniques combined with chemometric construction methods was paid attention to explain quality properties, which involved low-field nuclear magnetism, sensory bionic technology and spectral analysis. It provided systematic theoretical guidance for further optimizing the construction of aquatic product quality characteristics evaluation system, and also highlighted the wide application prospect of rapid nondestructive testing technology in aquatic product quality characteristics evaluation.

KEY WORDS: aquatic products; quality characteristic evaluation; rapid non-destructive

基金项目: 上海市“晨光计划”项目(19CGB14)

Fund: Supported by the Shanghai “Chenguang Program” (19CGB14)

*通信作者: 刘小杰, 博士, 副教授, 主要研究方向为功能性食品开发与检测。E-mail: liuxiaojie@succ.edu.cn

*Corresponding author: LIU Xiao-Jie, Ph.D, Associate Professor, Shanghai Urban Construction Vocational College, No.2080, Nanting Road, Fengxian District, Shanghai 201415, China. E-mail: liuxiaojie@succ.edu.cn

0 引言

水产品富含优质蛋白、多不饱和脂肪酸、多种微量元素,具有优良的营养价值,被中国营养学会认定推荐为中国居民膳食中的重要优质蛋白来源^[1]。在国民经济快速高效提升、大健康战略的时代背景下,水产品口感鲜嫩爽滑、营养成分易被机体吸收的特性,使其成为我国居民餐桌上不可缺少的组成部分。另一方面,水产品自身营养丰富的特性,正好与水产品贮藏期间引发腐败菌大量繁殖的营养基质需求相契合,其蛋白质、脂肪等营养成分极易因温度、湿度等贮藏环境因素波动而氧化降解,降低其食用性能,造成水产行业经济效益的损失和大量水产资源的浪费与污染,甚至产生对人体健康具有潜在威胁的有毒有害物质^[2]。

目前,用于水产品贮藏保鲜最常见的方法为低温贮藏,这也是最简便、成本控制最有效的技术,其他包括化学/生物保鲜、真空/气调包装、辐照杀菌、超高压处理等冷杀菌技术也被广泛应用于水产品保鲜中,尤其是各类来源天然、安全无毒、易生物降解的生物保鲜剂也被证实具有良好的保鲜效果,具有潜在的应用价值与发展前景^[3-4]。同时,从不同保鲜方式对水产品贮藏期间品质特性影响的相关研究报道中发现:水产品品质特性评价主要围绕物理特性、理化特性、腐败菌繁殖状况、感官风味特性几个方面展开,指标较多,一般采用多指标综合评判的方式,从不同侧面反映水产品的品质优劣状态^[5-6]。俞滢洁等^[7]在姜黄素、胡椒碱复合保鲜剂对三文鱼品质特性影响的研究中,理化特性在沿用持水力、总挥发性盐基氮(total volatile basic nitroge, TVB-N)、硫代巴比妥酸(thiobarbituric acid reactive substances, TBA)、游离氨基酸等传统指标基础上,采用低场核磁共振(low-field nuclear magnetic resonance, LF-NMR)表征不同组分的水含量变化及水分迁移情况,而微生物指标评价在菌落总数、嗜冷菌总数、产 H₂S 菌数、假单胞菌数和乳酸菌数传统指标外,进一步利用激光共聚焦显微镜(confocal laser scanning microscop, CLSM)观察三文鱼贮藏期间微活菌分布变化。ZHAO 等^[8]在评价鱼胶、葡萄籽提取物协同真空包装对罗非鱼片保鲜效果影响的实验中,通过检测二硫键、羰基含量、Ca²⁺-三磷酸腺苷(adenosine triphosphate, ATP)酶活性及二级结构转变研究其蛋白质氧化差异,利用原子力显微镜考察其肌原纤维形态(长度、直径)。同时,研究证明:质量指数法(quality index method, QIM)是被广泛用于评估水产品感官品质特性、新鲜度状况、预测货架期的重要工具^[9]。总体来看,目前关于水产品贮藏期间品质特性评价方法的现有综述中,采用传统的感官、理化、微生物指标进行表征居多,而针对于快速无损检测技术应用于水产品品质特性评价的全面概述相对较少,特别是关于与化学计量学结合的水产品品质特性评价体系的模式构建。

因此,本文在简要概述水产品保鲜贮藏期间品质特性变化规律的基础上,重点侧重于传统品质特性评价指标、基于化学计量学的快速无损技术两部分,详细阐述分析了当前水产品品质特性评价方法的研究进展,旨在为进一步优化水产品品质特性评价体系的构建提供系统性的理论指导,也为研究不同保鲜技术对水产品品质特性的影响提供参考。

1 水产品贮藏期间品质变化规律

水产品脱离生长所需环境或经人为机械屠宰后,肌肉组织先后经历僵直、解僵、自溶、腐败阶段^[10],伴随着一系列复杂的生化反应,最终将蛋白质、脂肪、糖等生物大分子转化为有异味的小分子次级代谢产物及有毒有害成分,导致品质劣变而逐渐失去食用价值。

水产品富含的优质蛋白具有易消化吸收的特性,主要以肌原纤维蛋白、肌浆蛋白、基质蛋白等形式存在,尤其是肌原纤维蛋白在维持骨骼肌完整性、保障肌肉正常收缩功能、保持良好品质特性等方面发挥重要作用^[11]。受缺氧、ATP 供给量减少、乳酸积累等环境因素影响,水产品贮藏期间会因组织蛋白酶、钙蛋白酶、细胞凋亡酶等内源性蛋白酶水解活性激活及腐败菌大量繁殖两方面作用而发生不同程度的蛋白质降解,并产生醛、酮、酸类及异味挥发性成分,这也是水产品腐败味产生的重要缘由^[8,12]。蛋白质降解可依次分为以下 3 阶段:1)肽和游离氨基酸释放,即蛋白质水解;2)由氨基酸产生生物胺;3)氨、酮酸、挥发性有机物的积累,即氨基酸脱氨作用。但目前研究主要强调内源性蛋白酶、腐败菌介导的蛋白质降解与品质特性之间的关联性方面,涉及相关的蛋白质降解机制研究还比较局限,特别是基于蛋白质组、代谢组、基因组等不同水平的研究还需进一步展开。

水产品含有丰富的多不饱和脂肪酸,极易因腐败菌繁殖、相关氧化酶等环境因素的多重作用而加速油脂氧化进程,产生过氧化物和次级代谢产物,因此油脂氧化是水产品腐败变质期间酸败味的重要来源^[13-14]。大量文献证明:脂质氧化期间释放的 O₂⁻自由基、OOH⁻自由基等活性氧成分可转化为过氧化物,从而促进油脂氧化过程^[15-17]。同时,活性氧与线粒体凋亡途径密切相关,对细胞凋亡酶的激活发挥着重要作用^[18]。作为一种重要的内源性蛋白酶,细胞凋亡酶的激活可加剧水产品贮藏期间的蛋白质氧化降解进程,因此有理由认为活性氧也很可能是水产品蛋白质氧化降解的重要应激因素,蛋白质氧化、油脂氧化具有潜在的强关联性。实际上,水产品贮藏期间生物胺、挥发性化合物的积累是蛋白质、油脂氧化的综合反应结果,其中涉及的蛋白质氧化、油脂氧化互作机制也需要进一步深入研究。

微生物生长繁殖是水产品腐败变质的另一重要因素,

每种水产品都有其特定的优势腐败菌,并在贮藏期间出现有规律的微生物群落演替^[19-20]。水产品的优势腐败菌包括假单胞菌属、希瓦氏菌属、气单胞菌属等类型,可依靠群体感应现象实现信息传递与交流,因此群体感应机制的研究在一定程度上帮助理解腐败菌的致腐作用^[21]。同时,研究发现:腐败菌可利用蛋白质水解产物寡肽、游离氨基酸、经脱氨、转氨、脱羧作用,导致生物胺及异味挥发性化合物积累,加剧感官风味特性的劣变^[22-23]。其中组胺、尸胺、腐胺的积累是导致水产品品质特性劣变的重要生物胺类型,其中精氨酸脱氨酶(arginine deaminase, ADI)途径、精氨酸脱羧酶(arginine decarboxylase, ADC)途径、谷氨酸乙酰化被认为是腐胺形成的重要途径^[24]。YAVUZER 等^[25]研究发现:艾氏假单胞菌、磷光假单胞菌具有较强的产组胺能力,金黄色葡萄球菌产酪胺能力较强。但针对于挥发性化合物研究,目前还是强调其与品质特性间的相关性分析,从代谢角度出发探析腐败菌对风味特性的影响机制研究还不够深入,这也将成为微生物致腐机制研究提供了新的思路。另外,腐败菌产生的胞外蛋白酶、生物被膜也有可能对其致腐作用密切相关。

2 水产品品质评价

贮藏期间,水产品的品质评价指标的选择对于不同保鲜方法的保鲜效果差异评判至关重要,传统的品质特性评价主要围绕感官特性、理化指标、微生物数量3个方面展开,近年来基于计量学的快速无损检测技术也被广泛应用于品质特性评价中。当然具体选用哪些指标要根据水产品品种、保鲜方法、试验环境等因素综合决定,选择的有效性会在很大程度上影响试验结果的准确性。

2.1 理化特性评价

水产品理化特性的传统评价一般涉及蛋白质水解变性、蛋白质氧化降解、酶活性变化、脂质酸败程度、水分损失迁移等多方面(具体见表1),在水产品品质特性评价中具有重要的参考价值^[35-36]。

蛋白质降解或油脂氧化期间产生的游离氨基酸、游离脂肪酸通常可采用全自动氨基酸分析仪、气相色谱法实现种类鉴定、定量分析的目的。类似地,水产品贮藏期间积累的挥发性化合物可借助于超高效液相色谱-串联质谱(ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry, UPLC-MS/MS)法进行定量分析,以提供品质劣变进程中积累的中间代谢产物信息。从这个角度看,基于蛋白质、油脂等营养物质代谢过程的研究势必会成为未来水产品品质特性机制研究的重要方向,代谢组学、脂质组学、蛋白质组学的研究手段潜力巨大。

同时,作为水产品蛋白质的主要存在形式,肌原纤维蛋白稳定性也常被用于分析蛋白质变性、水解及氧化降解

程度,通过聚丙烯酰胺-凝胶电泳(sodiumdodecylsulfate-polyacrylamide gel electrophoresis, SDS-PAGE)可评价肌原纤维结构蛋白降解程度,主要包括肌动蛋白、肌球蛋白、肌钙蛋白、肌联蛋白等,表现在肌动球蛋白的结构功能稳定性、肌丝解聚、分子间作用力改变、疏水性氨基酸的暴露等方面,这在一定程度上有助于更深层次理解水产品贮藏期间组织软化、保水性变差等品质特性劣变的缘由^[37]。同时,通过原子力显微镜、扫描电镜、透射电镜可实现对肌节长度、肌原纤维微结构、粗细肌丝完整性的可视化观察,也可侧面考察蛋白质的降解程度^[38-39]。另外,蛋白质组学也逐渐成为研究水产品贮藏期间肌原纤维蛋白降解的有力工具,尤其是不同类型的热休克蛋白表达被关注到^[40]。

光谱技术分析法为解释水产品贮藏期间蛋白质特性提供了全新的视角,傅立叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR)、拉曼光谱常被应用于考察水产品蛋白质二级结构、三级结构等构象改变情况。尤其是伴随着化学计量学在食品科学研究的不断应用,基于化学计量学的光谱技术通过建立光谱指纹信息与传统品质特性指标之间的相关性,在鉴定水产品新鲜度差异性、水产品真伪性、水产品产地差异方面具有广阔的应用前景^[41]。HASSOUN 等^[42]研究证明:主成分分析(principal component analysis, PCA)、因子判别分析(factor discriminant analysis, FDA)协同应用于光谱信号分析可更加准确地预测鳕鱼的新鲜度状态。张喜才^[11]利用不同近红外光谱预处理技术结合PCA、偏最小二乘法(partial least squares, PLSR)及多元线性回归(multiple linear regression, MLR)建立了石斑鱼贮藏期间挥发性盐基氮值预测模型的有效性,结果表明:采用标准正态变量变换预处理结合MLR具有最佳的预测准确度。但是,目前光谱技术主要作为传统评价指标的辅助性手段,并不能全面地提供水产品品质特性状况信息。因此,基于光谱技术构建的传统品质指标预测模型的可重复性与适用范围也还需要进一步验证。

低场核磁共振技术(low-field nuclear magnetic resonance, LF-NMR)具有仪器操作简单、样品需要量少且预处理简便、无损检测、无浪费污染等优势,目前主要用于食品基质物理特性的检测,特别是在不同组分的水分含量及迁移规律、脂质含量及脂肪酸组成方面具有相对比较成熟的应用研究^[43-44]。相比较于LF-NMR,共振成像技术(magnetic resonance imaging, MRI)通过2D伪彩图亮度差异可提供食品化学成分及内部结构的信息,经常与LF-NMR联合应用于食品品质特性研究中。LAN 等^[45]通过LF-NMR联合考察冻融循环次数对凡纳滨对虾品质特性及水分迁移速率的影响,结果表明:随着贮藏时间延长,横向弛豫时间 T_{22} 和 T_{23} 不断延长,伪彩图亮度逐渐降低,说明不易流动水向自由水转化的过程中,水分迁移速率也在提升。从研究内容来看,目前还集中于水产品传统理化特性与

LF-NMR 横向弛豫时间的相关性、LF-NMR 结合化学计量学预测水产品货架期研究,以证明 LF-NMR 用于水产品品质评价中的潜在应用价值^[46]。高兴盛等^[47]利用 LF-NMR 结合 PCA、PLSR 建立的鲍鱼水分或脂肪含量预测模型具有良好的准确性与稳定性。WANG 等^[48]研究了不同贮藏温度下金枪鱼蛋白质与水分含量变化规律,研究结果表明: T₂₁ 与持水性、蛋白质二级结构、巯基含量等蛋白质指标间具有良好的相关性,可用来监测金枪鱼的蛋白质特性变化。但是,仪器的高成本、检测灵敏度、仪器精确度、样品适用性的提升将会是未来 LF-NMR 应用于水产品品质特性评价的主要发力点,通过与传统指标的结合以及与其他设备的关联使用在一定程度上无疑是行之有效的方法。

2.2 感官评价

目前水产品贮藏期间感官特性的评价通常采用以下方法: 以对应类型水产品的产品标准为基础稍做修改,从外观、气味等角度构建其全面的感官评价标准,由专业的感官评价小组成员作为“机器”分别对其进行评分(十分制或百分制),取平均值作为最终得分^[49-50]。比较直观,但感官评定员的感觉灵敏度、培训水平、感官分析方法的选择及感官测评的组织方案设计,都会对结果产生不同程度的干扰,特别是无法避免感官评定人员的主观意识差异带来的弊端。因此,感官特性用于水产品品质特性评价的局限性较大,只能发挥一定的参考价值。换言之,目前水产品品质特性评价研究中还是主要根据理化、微生物指标综合判断,感官特性表征只能起到辅助的作用。一般情况下,需要对感官评价小组成员进行专业的培训,以减少评判误差。

模糊数学法、质量指数法被认为是目前用于水产品感官特性评价、预测货架期的有效工具^[51-52],其中质量指数法采用缺陷评分可建立起感官评分值与贮藏时间之间的关系,即实现科学合理实现水产品的评分系统构建。特别地,质构仪、电子鼻、电子舌等感官仿生仪器测量方法也被广泛用于水产品感官特性评价中,具有结果客观准确、可量化、灵敏度高、重现性好的优势,可能在未来水产品感官品质特性评价中具有潜在的发展潜力^[53]。感官仿生技术结合 PCA、PDA、PLSR 等化学计量学用于水产品品质特性评价中相关指标的预测模式构建,可达到对水产品品质特性的量化效果^[54]。陈东杰等^[55]在采集鲈鱼贮藏期间电

子鼻气味信号的基础上,通过 PCA、PLSR 统计方法建立了 TVB-N 值、菌落总数和假单胞菌数量的预测模型,经验证得前两者预测模型拟合高,而后者拟合度较差。GU 等^[56]采用电子鼻结合 PLSR 半量化鲑鱼贮藏期间甲醛的积累量,并利用 *t* 检验验证可得模型预测值与实测值之间无显著性差异。APTREI 等^[57]研究证明: 电子舌信号与鱼类贮藏时间有密切关系,再结合其他指标可检测其新鲜度,这在 WU 等^[58]的论述中也详细进行了说明。

不过,感官仿生技术的应用还具有一定的局限性,相关研究还处于初步阶段,未来尤其应关注感官仿生技术预测模型的通用性验证,仪器的成本也是限制其发展的重要原因。另外,便携式感官仿生仪器的研发也会为消费者评估水产品感官特性状况提供极高的便捷性。

2.3 微生物指标评价

微生物数量与水产品类型、优势腐败菌类型及代谢特征、贮藏时间、保鲜方式等因素相关,作为最基本的微生物评价指标,菌落总数计数已被普遍应用于水产品贮藏期间的品质特性评价,基于微生物群落演替的优势腐败菌计数也具有重要的应用价值^[59-60]。另外,激光共聚焦显微镜通过将微生物连续体积进行采样转化为三维图像,以考察微活菌分布状况,与腐败菌计数相联系可确定微生物的生长繁殖情况,以评价水产品品质特性状况^[7]。高通量测序法可提供微生物群落丰富度与多样性信息,在鉴定优势腐败菌、评估水产品品质状况中应用广泛。XU 等^[61]制备得到氧化锌-环氧树脂复合抑菌剂并用于银鲫保鲜,采用高通量 16S 核糖体 RNA 基因测序得出抑菌剂处理的银鲫微生物多样性明显降低,利用扫描电镜也观察到微生物的细胞膜完整性发生了一定程度的破坏。通过氨基酸脱羧活性、氨基酸脱氨活性、胞外蛋白酶活性、微生物细胞膜跨膜电位、细胞膜损伤程度(DNA、蛋白质泄露)、静态生物膜形成情况等指标可有助于理解水产品贮藏期间的微生物致腐作用^[22]。综合来看,目前针对于微生物指标的评价还主要集中于代表性菌落数量的检测,从微生物致腐机制研究出发的评价方法可更加深刻地理解水产品的品质特性劣变机制。同时,传统的微生物计数存在耗时长、成本投入高、潜在环境污染等弊端,基于仪器测量法的微生物评价方法将可能会具有广阔的应用前景与现实指导作用。

表 1 水产品贮藏期间理化特性评价指标
Table 1 Evaluation indexes of protein properties of aquatic products during storage

评价项目	理化特性改变	评价指标	参考文献
蛋白质	蛋白质变性、蛋白质水解、蛋白质氧化降解	TVB-N 值、三甲胺(trimethylamine, TMA-N)、相关酶活性、氨基酸侧链(巯基含量、巯基含量、二硫键含量)、可溶性性肽含量、构象改变、表面疏水性、游离氨基酸含量、肌肉组织结构形态、生物胺、挥发性化合物等相关酶活性[脂肪氧合酶(lipoxygenase, LOX)]、过氧化值(peroxide value, POV)、硫代巴比妥酸值、游离脂肪酸、挥发性化合物等	[26-30]
油脂	油脂酸败		[31-32]
水分	水分含量、水分动态迁移	持水力、滴水损失率、蒸煮损失率、水分含量、水分活度	[33-34]

综合来看,传统指标检测结果准确性高,可依靠已有的成熟国际国内标准参考,衡量水产品的品质特性与新鲜度状况,在目前研究中仍然发挥着重要的作用。当然,操作流程烦琐、样品前处理影响试验结果、人力物力成本高,且样品预处理需大量化学试剂极易引起环境污染与资源浪费,这些弊端也将成为其应用受到限制的重要因素。

3 总结与展望

在国民经济飞速发展的时代,伴随着我国居民对绿色健康的消费模式追求,水产品需求量也在逐年递增。遵循着水产品贮藏期间由新鲜状态逐渐劣变的规律性,传统的理化、微生物、感官指标评价分别围绕蛋白质变性、蛋白质氧化、脂质氧化酸败、腐败菌生长繁殖等方面展开,研究应用成熟且结果准确度高,但存在操作流程烦琐、制样有效性低、潜在安全忧患等弊端。基于化学计量学的低场核磁技术、感官仿生技术和光谱技术法等快速无损技术凭借其安全无污染、仪器操作简单、样品制备简易且需要量少、可量化指标等独特优势,与水产品贮藏期间品质特性指标间建立起良好的关联性,可作为传统品质特性检测方法的辅助性手段,具有广阔的应用前景。不过,目前应用研究还比较局限,未来应突破利用快速无损技术结合化学计量学建立传统指标预测模型的单一研究形式,预测模型的普遍适用性验证应进一步加深,这也将成为未来重要的发展方向。同时,针对快速无损技术存在的仪器灵敏度低、精确度差、仪器成本高等问题,还需要进一步加强机械设备的改进、联用设备的开发,特别是便携式仪器的使用。

参考文献

- [1] 中国营养学会. 中国居民膳食指南[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2016. Chinese Nutrition Society. Dietary guidelines for Chinese residents [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2016.
- [2] LORENTZEN G, AGEIEVA TN, HEIDE M, *et al.* Temperature fluctuations in processing and distribution: Effect on the shelf life of fresh cod fillets (*Gadus morhua* L.) [J]. Food Control, 2020, 112: 107102.
- [3] 李娜, 谢晶. 组合保鲜方式应用于水产品保鲜的研究进展[J]. 食品与机械, 2017, 33(11): 204–207, 220.
LI N, XIE J. Research progress in the application of combined preservation methods to the preservation of aquatic products [J]. Food Mach, 2017, 33(11): 204–207, 220.
- [4] SABINE S. The effects of processing technologies and preparation on the final quality of fish products [J]. Trends Food Sci Technol, 2015, 44(2): 131–146.
- [5] JU J, LI L, QIAO Y, *et al.* The effects of vacuum package combined with tea polyphenols (V+TP) treatment on quality enhancement of weever (*Micropterus salmoides*) stored at 0 °C and 4 °C [J]. LWT, 2018, 91: 484–490.
- [6] UMARAW P, MUNEKATA P, VERMA AK, *et al.* Edible films/coating with tailored properties for active packaging of meat, fish and derived products [J]. Trends Food Sci Technol, 2020. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.01.032
- [7] 俞滢洁, 林婷, 杨胜平, 等. 姜黄素结合胡椒碱对冷链物流运输过程中三文鱼保鲜效果研究[J]. 食品与发酵工业, 2021, (3): 1–12.
YU YJ, LIN T, YANG SP, *et al.* Study on the effect of curcumin combined with piperine on the preservation of salmon during cold chain logistics transportation [J]. Food Ferment Ind, 2021, (3): 1–12.
- [8] ZHAO X, ZHOU Y, ZHAO L, *et al.* Vacuum impregnation of fish gelatin combined with grape seed extract inhibits protein oxidation and degradation of chilled tilapia fillets [R]. International Conference on High Performance Computing & Simulation, 2018.
- [9] JORGE F, PAULO VP, JOAE S, *et al.* Quality index method for fish quality control: Understanding the applications, the appointed limits and the upcoming trends [J]. Trends Food Sci Technol, 2021. DOI: 10.1016/j.tifs.2021.03.011
- [10] 励建荣. 海水鱼类腐败机制及其保鲜技术研究进展[J]. 中国食品学报, 2018, 18(5): 1–12.
LI JR. Research progress on the spoilage mechanism of marine fish and its preservation technology [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2018, 18(5): 1–12.
- [11] 张喜才. 石斑鱼冷藏过程中品质评价、蛋白变化以及内源性蛋白酶作用机制研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020.
ZHANG XC. Study on quality evaluation, protein changes and endogenous protease mechanism of grouper during cold storage [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020.
- [12] FRASER OP, SUMAR S. Compositional changes and spoilage in fish (part II) -microbiological induced deterioration [J]. Nutr Food Sci, 1998, 98(6): 325–329.
- [13] FA VO, PACHECO AR, LUGO SME, *et al.* Application of the freshness quality index (K value) for fresh fish to canned sardines from Northwestern Mexico [J]. J Food Compos Anal, 1997, 10(2): 158–165.
- [14] LE T, TAKAHASHI K, OKAZAKI E, *et al.* Mitigation of lipid oxidation in tuna oil using gelatin pouches derived from horse mackerel (*Trachurus japonicus*) scales and incorporating phenolic compounds [J]. LWT, 2020. DOI: 10.1016/j.lwt.2020.109533
- [15] CEYLAN Z, KUTLU N, MERAL R, *et al.* Protective effect of grape seed oil-loaded nanofibers: Limitation of microbial growth and lipid oxidation in kashar cheese and fish meat samples [J]. Food Biosci, 2021, 42: 101076.
- [16] MAQSOOD S, BENJAKUL S. Effect of bleeding on lipid oxidation retardation and quality retention of seabass (*Lates calcarifer*) slices during iced storage [J]. Food Chem, 2011, 124(2): 459–467.
- [17] RICHARD MP, DETTMANN MA. Comparative analysis of different hemoglobins: Autoxidation, reaction with peroxide and lipid oxidation [J]. J Agric Food Chem, 2003, 51(13): 3886–3891.
- [18] 王琳琳. Cyt-c 释放和介导宰后牦牛肉线粒体凋亡途径激活机制及对嫩度影响的研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
WANG LL. Cyt-c release and mediation of mitochondrial apoptosis pathway activation mechanism in yak meat after slaughter and its effect on tenderness [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018.
- [19] 周慧, 盖园明, 徐超, 等. 基于 16S rDNA 测序及培养基法探究虹鳟鱼贮藏优势腐败菌[J]. 微生物学杂志, 2021, 41(1): 25–32.
ZHOU H, GAI YM, XU C, *et al.* Based on 16S rDNA sequencing and culture medium method to explore the dominant spoilage bacteria of rainbow trout [J]. J Microbiol, 2021, 41(1): 25–32.

- [20] ZOGUL Y, KULEY E, AKYOL I, *et al.* Antimicrobial activity of thyme essential oil nanoemulsions on spoilage bacteria of fish and food-borne pathogens [J]. Food Biosci, 2020. DOI: 10.1016/j.fbio.2020.100635
- [21] 王立燕, 刘永生. 细菌群体感应种类及其信号分子的研究进展[J]. 中国预防兽医学报, 2015, 37(4): 318–320.
- WANG LY, LIU YS. Research progress on the types of bacterial quorum sensing and its signaling molecules [J]. Chin J Prev Veter Med, 2015, 37(4): 318–320.
- [22] YI ZK, XIE J. Assessment of spoilage potential and amino acids deamination & decarboxylation activities of *Shewanella putrefaciens* in bigeye tuna (*Thunnus obesus*) [J]. LWT, 2021, 156: 24–29.
- [23] ZHUANG S, LIU X, LI Y, *et al.* Biochemical changes and amino acid deamination & decarboxylation activities of spoilage microbiota in chill-stored grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) fillets [J]. Food Chem, 2020, 336: 127683.
- [24] ZHUANG S, YAN YQ, HONG H, *et al.* Exploration of the roles of spoilage bacteria in degrading grass carp proteins during chilled storage: A combined metagenomic and metabolomic approach [J]. Food Res Int, 2021, 152: 110926.
- [25] YAVUZER MN, YAVUZER E, KULEY E. Safflower and bitter melon extracts on suppression of biogenic amine formation by fish spoilage bacteria and food borne pathogens [J]. LWT, 2021. DOI: 10.1016/j.lwt.2021.111398
- [26] 凌胜男, 陈雪叶, 王红丽, 等. 解冻方式对鳊鱼理化特性及微观结构的影响[J/OL]. 食品与发酵工业: 1-10. [2022-02-11]. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.027631.
- LING SN, CHEN XY, WANG HL, *et al.* Effects of thawing methods on physicochemical properties and microstructure of anchovy [J/OL]. Food Ferment Ind: 1-10. [2022-02-11]. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.027631.
- [27] JIA S, LI Y, ZHUANG S, *et al.* Biochemical changes induced by dominant bacteria in chill-stored silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) and GC-IMS identification of volatile organic compounds [J]. Food Microbiol, 2019, 84: 103248.
- [28] 高文宏, 侯睿, 曾新安. 水溶性大豆多糖改善浸渍冷冻鱼糜蛋白的变性[J]. 现代食品科技, 2019, 35(2): 134–140.
- GAO WH, HOU R, ZENG XAN. Water-soluble soybean polysaccharides improve the denaturation of frozen surimi protein [J]. Mod Food Sci Technol, 2019, 35(2): 134–140.
- [29] BEKHIT E, HOLMAN B, GITERU SG, *et al.* Total volatile basic nitrogen (TVB-N) and its role in meat spoilage: A review [J]. Trends Food Sci Technol, 2021, 109: 280–302.
- [30] LIU YY, ZHANG LT, GAO S, *et al.* Effect of protein oxidation in meat and exudates on the water holding capacity in bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*) subjected to frozen storage [J]. Food Chem, 2021, 370: 131079.
- [31] CHEN G, LI JY, GAO RC, *et al.* Preservation of sturgeon using a photodynamic non-thermal disinfection technology mediated by curcumin [J]. Food Biosci, 2020. DOI: 10.1016/j.fbio.2020.100594
- [32] MD S, MATOS G, CASAL S, *et al.* Quality evolution of raw meat under hyperbaric storage-fatty acids, volatile organic compounds and lipid oxidation profiles [J]. Food Biosci, 2021, 42(5): 101108.
- [33] CHAN SS, ROTABAKK BT, LOVDAL T, *et al.* Skin and vacuum packaging of portioned *Atlantic salmon* originating from refrigerated seawater or traditional ice storage [J]. Food Packag Shelf, 2021, 30: 100767.
- [34] BIAN CH, CHEN H, YU HJ, *et al.* Effect of multi-frequency ultrasound assisted thawing on the quality of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) [J]. Ultrason Sonochem, 2022, 82: 105907.
- [35] 王明, 郝文婷, 杨丽丽, 等. 壳聚糖分子质量对原位改性纳米 CaCO_3 -壳聚糖涂膜食品保鲜性能的影响[J]. 中国食品学报, 2020, 20(8): 191–200.
- WANG M, HAO WT, YANG LL, *et al.* The influence of chitosan molecular weight on the fresh-keeping performance of in-situ modified nano- CaCO_3 -chitosan coating film [J]. Chin J Food Sci, 2020, 20(8): 191–200.
- [36] YU DW, ZHAO WY, YANG F, *et al.* A strategy of ultrasound-assisted processing to improve the performance of bio-based coating preservation for refrigerated carp fillets (*Ctenopharyngodon idellus*) [J]. Food Chem, 2020, 345(4): 128862.
- [37] YANG F, JIA SN, LIU JX, *et al.* The relationship between degradation of myofibrillar structural proteins and texture of superchilled grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) fillet [J]. Food Chem, 2019, 301: 125278.
- [38] HDA B, CHEN LA, OU C, *et al.* Development and characterization of fish myofibrillar protein/chitosan/rosemary extract composite edible films and the improvement of lipid oxidation stability during the grass carp fillets storage [Z]. 2021.
- [39] FENG X, BANSAL N, YANG H. Fish gelatin combined with chitosan coating inhibits myofibril degradation of golden pomfret (*Trachinotus blochii*) fillet during cold storage [J]. Food Chem, 2016, 200: 283–292.
- [40] ANDJELKOVI U, JOSI D. Mass spectrometry based proteomics as foodomics tool in research and assurance of food quality and safety [J]. Trends Food Sci Technol, 2018, 77: 100–119.
- [41] MAGNEA GK, SIGURJON A, HORDUR GK, *et al.* The application of near infrared spectroscopy to study lipid characteristics and deterioration of frozen lean fish muscles [J]. Food Chem, 2014, 159(159): 420–427.
- [42] HASSOUN A, KAROUI R. Front-face fluorescence spectroscopy coupled with chemometric tools for monitoring fish freshness stored under different refrigerated conditions [J]. Food Control, 2015, 54: 240–249.
- [43] 刘纯友, 马美湖, 王庆玲, 等. 核磁共振技术在食品脂质研究中的应用新进展[J]. 食品工业科技, 2017, 38(12): 342–346.
- LIU CY, MA MH, WANG QL, *et al.* New progress in the application of nuclear magnetic resonance technology in the research of food lipids [J]. Food Ind Sci Technol, 2017, 38(12): 342–346.
- [44] TAN MQ, LIN ZY, ZU YX, *et al.* Effect of multiple freeze-thaw cycles on the quality of instant sea cucumber: Emphatically on water status of by LF-NMR and MRI [J]. Food Res Int, 2018, 109: 65–71.
- [45] LAN WQ, HU XY, SUN XH, *et al.* Effect of the number of freeze-thaw cycles number on the quality of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*): An emphasis on moisture migration and microstructure by LF-NMR and SEM [J]. Aquacult Fisheries, 2020, 5(4): 193–200.
- [46] 王馨云, 谢晶. 不同冷藏条件下金枪鱼的水分迁移与脂肪酸变化的相关性[J]. 食品科学, 2020, 41(5): 200–206.
- WANG XY, XIE J. Correlation between water migration and fatty acid changes of tuna under different cold storage conditions [J]. Food Sci, 2020, 41(5): 200–206.
- [47] 高兴盛, 李艳茹, 郭卫华. 低场核磁共振技术结合化学计量学建立鲍鱼水分和脂肪含量预测模型[J]. 现代农业科技, 2016, 4(8): 267–270,

- 274.
- GAO XS, LI YR, GUO WH. Low-field nuclear magnetic resonance technology combined with chemometrics to establish a prediction model for abalone moisture and fat content [J]. *Mod Agric Sci Technol*, 2016, 4(8): 267–270, 274.
- [48] WANG XY, XIE J. Evaluation of water dynamics and protein changes in bigeye tuna (*Thunnus obesus*) during cold storage [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2019, 108: 289–296.
- [49] 唐森, 何剑, 张义浩, 等. 壳聚糖-咖啡酸衍生物涂膜对多宝鱼保鲜效果的研究[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(7): 99–103.
- TANG S, HE J, ZHANG YH, *et al.* Study on the fresh-keeping effect of chitosan-cafeic acid derivative coating on Tubo fish [J]. *Food Res Dev*, 2020, 41(7): 99–103.
- [50] NDE A, MAE B, SC B, *et al.* Influence of partial sodium replacement on proximate composition, physical and sensory quality of marinated anchovy (*Engraulis encrasicolus*) [J]. *LWT*, 2021, 137: 110476.
- [51] 步营, 吕月月, 朱文慧, 等. 基于模糊数学与响应面分析法开发味噌风味鲮鱼罐头[J]. *中国调味品*, 2021, 46(9): 90–94.
- BU Y, LV YY, ZHU WH, *et al.* Development of miso-flavored Spanish Mackerel canned food based on fuzzy mathematics and response surface analysis [J]. *China Cond*, 2021, 46(9): 90–94.
- [52] PAULA B, KUSHIDA MM, VIEGAS E, *et al.* Development of quality index method (QIM) scheme for Acoupa weakfish (*Cynoscion acoupa*) [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2014, 57(1): 267–275.
- [53] 郑舒文, 陈卫华. 基于电子鼻和电子舌技术的鲳鱼鲜度评定[J]. *中国调味品*, 2019, 48(5): 169–174.
- ZHENG SW, CHEN WH. Freshness evaluation of cod based on electronic nose and electronic tongue technology [J]. *Chin Season*, 2019, 48(5): 169–174.
- [54] 谢桂林, 赵奇, 郭一霏, 等. 仿生咀嚼装置及其在食品质地评价中应用研究进展[J]. *食品与机械*, 2021, 37(6): 213–218.
- XIE GL, ZHAO Q, GUO YF, *et al.* Bionic chewing device and its application in food texture evaluation [J]. *Food Mach*, 2021, 37(6): 213–218.
- [55] 陈东杰, 姜沛宏, 张长峰, 等. 基于电子鼻与统计学方法的海鲈鱼新鲜度品质预测[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(17): 235–239.
- CHEN DJ, JIANG PH, ZHANG CF, *et al.* Prediction of sea bass freshness and quality based on electronic nose and statistical methods [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2018, 39(17): 235–239.
- [56] GU DC, LIU W, YU Y, *et al.* A novel method for rapid quantitative evaluating formaldehyde in squid based on electronic nose [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2019, 101: 382–388.
- [57] APTREI IM, RODRIGUEZ ML, APTREI C, *et al.* Fish freshness monitoring using an E-tongue based on polypyrrole modified screen-printed electrodes [J]. *IEEE Sens J*, 2013, 13(7): 2548–2554.
- [58] WU LL, PU HB, SUN DW. Novel techniques for evaluating freshness quality attributes of fish: A review of recent developments [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2018, 83: 259–273.
- [59] 蓝蔚青, 车旭, 巩涛硕, 等. 基于高通量分析流通方式对大目金枪鱼品质与微生物种群变化影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(20): 178–184.
- LAN WQ, CHE X, GONG TS, *et al.* Based on high-throughput analysis of the impact of circulation methods on the quality and microbial population changes of bigeye tuna [J]. *Food Sci*, 2019, 40(20): 178–184.
- [60] WU JL, GE SY, LIU H. Properties and antimicrobial activity of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) skin gelatin-chitosan films incorporated with oregano essential oil for fish preservation [J]. *Food Packag Shelf*, 2014, 2(1): 7–16.
- [61] XU J, SONG R, DAI Y, *et al.* Characterization of zinc oxide nanoparticles-epoxy resin composite and its antibacterial effects on spoilage bacteria derived from silvery pomfret (*Pampus argenteus*) [J]. *Food Packag Shelf*, 2019, 22(1): 100418.
- (责任编辑: 韩晓红 于梦娇)

作者简介



李娜, 博士研究生, 主要研究方向为水产品贮藏与保鲜。
E-mail: lina@succ.edu.cn



刘小杰, 博士, 副教授, 主要研究方向为功能性食品开发与检测。
E-mail: liuxiaojie@succ.edu.cn