

水产预制食品品质控制及智能监测技术研究进展

赵茜¹, 陈剑¹, 李欢¹, 王彦波^{1,2*}

(1. 浙江工商大学食品与生物工程学院, 浙江杭州 310018)

(2. 北京工商大学食品与健康学院, 北京 100048)

摘要: 近年来, 预制菜因其食用方便、获取便捷的特点市场规模不断扩大, 然而因氧化、微生物作用、内源酶降解导致的水产预制食品品质劣变问题日益凸显。随着水产预制食品产业的不断发展, 调控水产预制食品品质, 监测水产预制食品质量变化, 对产品品质保持及预制菜产业发展具有重要意义。鉴于此, 该研究从预制工艺、包装方式、杀菌技术角度探讨了水产预制食品品质调控方式, 并从检测标签、机器学习、全链条监测角度总结了水产预制食品品质智能监测方法, 以期在水产预制食品品质控制、智能监测及预制菜产业高质量发展提供参考和依据。

关键词: 水产预制食品; 品质控制; 智能监测; 研究进展

文章编号: 1673-9078(2024)01-312-318

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.1.1630

Research Advances in Quality Control and Intelligent Monitoring Technologies for Aquatic Prepared Products

ZHAO Xi¹, CHEN Jian¹, LI Huan¹, WANG Yanbo^{1,2*}

(1. School of Food Science and Biotechnology, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China)

(2. School of Food and Health, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: The increasing popularity of prepared foods in recent years can be attributed to the convenience they offer. However, oxidation, microbial activity, and endogenous enzyme degradation are vital factors that cause deterioration of the quality of aquatic prepared foods. Therefore, regulating quality deterioration and monitoring the quality change of aquatic prepared products are crucial steps for maintaining product quality and promoting the development of the prepared food industry. In this review, the methods used to control the quality of aquatic prepared products (i.e., from the preparation process to the packaging methods and sterilization technology) and intelligent quality monitoring methods used in the industry (i.e., from detection labels to machine learning and full-chain monitoring) are summarized and discussed. This review aims to serve as a reference and basis for the quality control and intelligent monitoring of aquatic prepared products and to provide support for the high-quality development of the prepared food industry.

Key words: aquatic prepared products; quality control; intelligent monitoring; research advances

引文格式:

赵茜,陈剑,李欢,等.水产预制食品品质控制及智能监测技术研究进展[J].现代食品科技,2024,40(1):312-318.

ZHAO Xi, CHEN Jian, LI Huan, et al. Research advances in quality control and intelligent monitoring technologies for aquatic prepared products [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(1): 312-318.

收稿日期: 2022-12-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(32072290); 浙江省基础公益研究计划项目(LGN21C200014; LZ22C200003); 浙江省“三农九方”科技协作计划项目(2022SNJF069)

作者简介: 赵茜(1994-), 女, 博士研究生, 研究方向: 食品质量与安全, E-mail: zhaoxi2347@163.com

通讯作者: 王彦波(1978-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品质量与安全, E-mail: wyb1225@163.com

随着社会的快速发展及生活方式转变,近年来,消费者对便捷食品的需求与日俱增。预制菜因满足消费者对方便、营养和产品品质的高要求,市场迅速扩增^[1]。预制菜是指以农、畜、禽、水产品为原料,配以各种辅料,经预加工后于常温、冷藏、冻藏下贮存的半成品或成品^[2]。通常可将预制菜按照食用方式分为即食、即热、即烹及即配食品。由于显著缩短烹饪时间,近年预制菜市场增幅巨大,已成为现代食品工业的重要组成部分,市场前景广阔^[3]。研究指出,消费者对预制菜的选择围绕在产品的方便程度、感官特征和营养价值等方面^[4]。水产品富含蛋白质、多不饱和脂肪酸、维生素和矿物质,已经成为居民膳食中营养成分的重要摄入来源^[5]。水产预制食品即水产品预制菜,因其营养价值高、加工方式简单、产品风味独特等特点,逐渐成为消费者对预制菜的主要需求,并且在大食物观及健康饮食背景下水产预制食品表现出更为显著的市场优势。然而,贮藏期间新鲜度下降、风味改变、蛋白质及脂质的氧化、内源酶作用下的腐败及微生物代谢产物积累等问题显著降低其食用价值及经济效益,严重影响了水产预制食品的发展^[6,7]。因此,如何调控水产预制食品品质并且通过现代化手段监测水产预制食品品质变化是预制菜产业进一步发展的重点之一。而预制工艺、包装方式及杀菌技术是水产预制食品品质调控的核心要点。鉴于此,本文从预制工艺、包装方式、杀菌技术角度阐述了水产预制食品品质调控方法,总结了通过检测标签、机器学习及全链条监测对水产预制食品品质智能监测的新方法,旨在以调控方式及智能监测手段为水产预制食品生产、加工及贮运过程中品质控制提供参考,为水产预制食品及预制菜产业发展提供依据。

1 水产预制食品品质调控方式

作为水产预制食品品质的核心调控手段,预制工艺、包装方式及杀菌技术可以通过典型工艺及借助辅助手段应用于品质调控(图1)。如冷冻、腌制、干燥及添加外源物质等预制工艺可以从调控蛋白质、脂质、微生物及酶活性角度调控水产预制食品品质。典型的包装方式及新型可降解包装的应用也为水产预制食品包装选择提供了参考。同时,依据即食、即热、即烹及即配食品的预制食品分类,采用适宜的杀菌技术近年也得到了广泛关注。可见从预制工艺、包装方式及杀菌技术角度调控可为水产预制食品的品质改进及市场发展提供参考。



图1 水产预制食品品质调控方式

Fig.1 Methods of quality control for aquatic prepared products

1.1 预制工艺

预制工艺如食盐腌制能够起到一定程度的杀菌作用,除传统湿腌、干腌方式外,联合滚揉和超声辅助腌制也具有较好的提升水产品风味及防腐保鲜的效果。Lin等^[8]研究盐腌预处理和微波干燥对南美白对虾品质的影响,发现4%食盐腌制和500W微波功率是对虾干燥的最佳条件。Gao等^[9]研究指出高强度超声功率诱导低盐鲢鱼鱼糜形成更致密的微观结构,从而降低了鱼糜凝胶中自由水的流动性,对提高低盐鱼糜凝胶特性起到了正向调控作用。He等^[10]研究指出传统水浴加热相比,超声波辅助水浴加热处理显著提高了鱼糜的凝胶性能,可用于改善低盐鱼糜凝胶性能和微观结构。采用新型冻结技术如超声波辅助冻结、高压辅助冻结、电磁波辅助冻结等方式因其显著提高冷冻速率,能够提高冷冻水产品的保藏效果^[11]。同时,微波干燥、红外辐射干燥、射频干燥也被证实是改进干制水产品的有效方式^[12]。除腌制、冷冻、干燥等传统预制方法外,天然抗氧化剂、新型生物防腐剂等外源物质的添加,也能够起到调控氧化及微生物活动作用,进而调控水产预制食品品质。尤其是天然成分作为防腐剂,可以延缓水产品中微生物生长、酶活性和氧化作用引起的降解。研究发现乳酸菌可以延长食品的保质期,并通过产生代谢物来抑制其他腐败菌生长,对生物胺产生具有抑制作用^[13]。也有研究指出乳酸菌对预制水产品脂肪氧化具有抑制作用,如王悦齐等^[14]将干酪乳杆菌、植物乳杆菌和戊糖片球菌加入

腌干带鱼,发现接菌发酵的腌干带鱼硫代巴比妥酸(Thiobarbituric Acid Reactive Substances, TBARS)、过氧化值等氧化指标均显著低于传统腌干带鱼。各种细菌、真菌和藻类等来源的新型天然防腐剂,在保持水产预制食品质量及延长货架期方面也显示了一定优势^[15]。总体而言,水产预制食品的预制方式具有多样性,而不同预制方式的作用参数也对水产品品质具有重要影响。以预制工艺调控水产预制食品品质虽已有一定成效,但基于水产预制食品种类多样性及预制工艺复杂性,进一步完善水产品预制工艺,持续开发食品级天然防腐保鲜剂,从机理角度探讨其对产品品质的影响仍待深入。

1.2 包装方式

水产预制食品的包装方式需基于产品特点,在考虑原料特点、加工方式、储运条件等因素下进行选择。真空包装能通过隔绝氧气抑制水产品的蛋白质氧化及脂质氧化进程,被广泛用于水产预制食品的包装环节。除常规的真空包装外,采用塑料弹性袋体如“烹烹袋”的新型包装方式也被应用于部分方便及即热食品中。然而,水产预制食品主要的塑料包装难降解,在加工过程中可能产生微塑料,易造成塑料单体及增塑剂迁移,影响产品安全性。近年来基于绿色成分的多功能、多用途的可降解包装材料由于其生物降解性、生物相容性和可持续性的特点,受到了广泛关注^[16]。其中,植物纤维材质可降解材料,如耐高温的食品级纸浆模塑在预制半成品的外包装上得到了应用。淀粉基功能性新材料、纳米纤维素等因可降解的特点,也表现出优异的包装效果。Balasubramaniam等^[17]研究改性的纳米纤维素薄膜,发现其具有较好的水蒸气阻隔性能,更好地保持了薄膜的力学性能,具有替代塑料包装的潜力。Chang等^[18]开发了基于抗菌普鲁兰纤维的包装,可生物降解,能够包装食品底物,延长其货架期,提高安全性,为生产可扩展、低成本和环保的可生物降解抗菌包装系统提供了思路。Lopes等^[19]将含有马铃薯皮酚类物质的淀粉基薄膜用于熏制鲷鱼片包装,发现复合薄膜包装的熏鱼颜色、质地、风味均得到改善,指出马铃薯皮酚类物质适用于开发具有增强食品包装性能的淀粉基薄膜。壳聚糖、明胶、海藻酸钠等膜基质包埋茶多酚、丁香精油、乳酸链球菌素等活性物质的活性涂膜也因其抑菌、可降解的特点而被广泛关注^[20]。Jamróz等^[21]采用明胶、淀粉、羧甲基纤维素、纤维素及绿茶渣作为包装材料

保存鲑鱼样品,发现该包装对鱼片生物胺的积累具有抑制作用,且该创新包装易于生物降解,可延长鲑鱼片的保质期。新型可降解包装材料是预制食品发展的重要环节,然而,部分基于生物聚合物的包装存在亲水性和机械阻力差等局限性。要获得具有良好阻隔性、力学性能、生产成本低、环境友好和生物降解等特点的复合材料,需依据水产品特点及预制工艺对包装材料进行成分配比、组合改进及参数优化,以便更好从包装角度调控水产预制食品品质。

1.3 杀菌技术

水产预制食品易受微生物与内源酶的影响发生品质劣变。热杀菌是即食水产预制食品常用的杀菌技术,如超高温杀菌、微波杀菌和欧姆杀菌等。传统的热杀菌基于热传导杀灭微生物,升温较慢,温度分布不均匀,易对产品品质造成不良影响^[22]。Jiang等^[23]研究罗非鱼即食鱼饼的加工方法及其对品质和风味的影响指出,鱼饼颜色较深是高温下美拉德反应作用的结果。近年来,利用非热物理场开发绿色、智能、环保和安全的杀菌技术在食品杀菌、组分分离和活性物质提取等领域得到了诸多关注^[24,25]。根据所使用的物理方法,物理场作用可分为超高压、电场、射频、超声波、等离子体、酸性电解水杀菌等方式^[26]。新型物理场杀菌技术对水产预制食品的调控效果如表1所示。采用物理场杀菌技术处理可减弱微生物代谢生长和繁殖,减少有害代谢产物的积累,可保持水产品的营养价值,延缓腐败进程,延长贮藏货架期^[27]。Cong等^[28]研究紫外线杀菌对生食牡蛎品质的影响,指出20℃下的紫外线杀菌可以更好地保持牡蛎原有风味。研究指出低温等离子体技术在水产品保鲜中可用于减菌处理、虾黑变抑制、改善品质等^[29]。He等^[30]等研究微酸电解水冰对凡纳滨对虾冷藏过程中代谢物和挥发性产物的影响,发现微酸性电解水冰抑制了腐败菌的生长,可以利用微酸电解水冰调节腐败代谢产物来调控水产品品质。总体而言,超高压、电场、射频、紫外线、低温等离子体、微酸性电解水等新型物理场杀菌技术对水产预制食品的新鲜度、质构、风味起到了较好的调控作用。然而,物理场杀菌受限于设备及预制产品的复杂性,在预制菜领域的应用大多尚处在研究阶段,但随着物理技术的不断深入,杀菌技术要点的进一步优化,将对预制菜产业发展产生深远影响。

表 1 新型物理场杀菌技术对水产预制食品品质的调控效果

杀菌技术	处理对象	调控效果	文献
超高压	带鱼鱼丸	350 MPa 处理 5 min 可以有效降低带鱼鱼丸的菌落总数和挥发性盐基氮 (Total Volatile Base-Nitrogen, TVB-N) 含量, 提高鱼丸的新鲜度, 但会降低鱼丸的凝胶强度, 建议 300 MPa 处理 5 min 作为带鱼鱼丸的适宜杀菌技术	[31]
电场	鲑鱼	高压芒刺电场处理显著降低鲑鱼的菌落总数, 未对鲑鱼的营养及理化性质产生负面影响	[32]
射频联合碳点	蟹肉丸	射频 - 碳点联合处理 30 min 鱼丸的三甲胺及醛类物质浓度显著低于碳点处理和高压蒸汽处理, 射频 - 碳点可作为抑制蟹肉丸腥味形成的杀菌方法	[33]
等离子体	鮫鱈鱼	介质阻挡放电等离子体处理 30 min 鮫鱈鱼表面的蜡样芽孢杆菌和金黄色葡萄球菌数量减少 90% 以上	[34]
超声联合酸性电解水	金枪鱼	微酸性电解水处理抑制鱼肉的菌落总数、TVB-N、TBARS 增加, 280 W 超声处理合 55 mg/mL 的微酸性电解水对金枪鱼蛋白质降解的抑制作用较好, 鱼肉微观结构和质地保持最好	[35]

表 2 检测标签对水产品品质的智能监测效果

检测标签	处理对象	监测效果	文献
四苯乙烯、聚甲基丙烯酸、罗丹明 B	鲑鱼	标签颜色变化与 TVB-N 呈线性相关, 颜色呈现粉色到蓝色的过渡	[41]
花青素、藻蓝蛋白、明胶、大豆多糖	草鱼	薄膜标签随草鱼新鲜度变化呈现出颜色演变, 与鱼肉的 pH 值、TVB-N、ATP 关联化合物和 K 值相关	[42]
溴甲酚紫及溴百里香酚蓝	青鱼	TVB-N 积累, 溴甲酚紫智能标签逐渐转变为蓝色	[43]
琼脂、聚乙烯醇、姜黄素	罗氏沼虾	随贮藏时间延长, 虾体呈现黄色到红色的颜色变化, 与 TVB-N 变化具有相关性	[44]

2 水产预制食品品质智能监测

2.1 基于检测标签的智能监测

近年来, 以检测标签监测水产品的新鲜度、质量变化和安全性因其高效、便捷、提供实时信息的特点得到了广泛关注^[36]。微生物作用产生的挥发性成分如氨、二甲胺、三甲胺等物质的影响是水产品变质的重要原因之一^[37]。已有相关研究围绕水产品构建了智能检测标签 (表 2), 并发现标签颜色变化与水产品的 TVB-N 变化密切相关。另外, Ye 等^[38]研究基于美拉德反应的木糖 - 赖氨酸的时间 - 温度指示器, 发现该指示器的颜色变化与鲭鱼 TVB-N 含量有良好的相关性, 可用于鲭鱼新鲜度的可视化监测。而 Liu 等^[39]构建了基于玉米醇溶蛋白的智能生物胺响应荧光标签用于水产品新鲜度的

视觉和实时监测, 颜色响应可呈现出从粉色到绿色的清晰可辨过渡。智能标签用于水产预制食品的加工、储存和运输过程中可实时持续监测水产品的状态, 有利于发展更健康、更安全、更可持续的预制食品供应链, 具有广阔的发展潜力。然而, 据研究统计, 目前诸多检测标签成本在总包装成本中的占比较大, 超过 50%^[40]。已建立的检测标签通过 pH、TVB-N 等响应表现出颜色变化直观提供产品的信息, 在生鲜水产品监测上表现出显著优势, 应用较为广泛。智能检测标签在水产预制食品中的推广可以着重围绕即烹水产品展开, 通过完善标签类型, 改进标签制备工艺, 开发新型标签制备材料来监测水产预制食品的品质。且后续开发应考虑标签成本投入问题, 着力降低检测标签在总包装材料中的占比, 控制加工操作的成本, 从而强化其商业可行性。

2.2 基于机器学习的智能监测

传统的水产预制食品新鲜度、风味等品质检测方法检测周期较长,因此开发精准、快速的无损检测手段及进行计算机模拟、机器学习,用以获得水产预制食品品质的相关信息,对预制菜品质监测具有指示意义。而随着互联网技术的蓬勃发展,也促使计算机模拟及机器学习手段逐步成为食品领域研究的新热点。已有研究人员通过机器视觉系统结合残差神经网络模型,开发了冷鲜大黄鱼新鲜度图像识别应用程序,用户可通过简单操作在线获取产品新鲜度信息^[45]。Ma等^[46]利用获得的主食、肉类、海鲜及蔬菜图像训练了深度学习神经网络架构,可以对菜肴的营养进行估算。同时,也已有相关研究关注于借助机器学习的手段对水产预制食品的新鲜度、成分含量、品质监测的影响。Li等^[47]以电子鼻、电子舌、色差数据融合结合机器学习进行冻藏竹荚鱼的新鲜度评估和预测,发现机器学习建立的预测模型可以有效地预测竹荚鱼品质变化;Moosavi-Nasab等^[48]指出可以使用高光谱成像结合深度线性神经网络分析评估虹鳟鱼片中TVB-N含量;Zeng等^[49]研究关联深度学习网络框架的高光谱成像及低场核磁共振数据,可以实现盐渍海参中水分含量的快速无损检测,验证了基于Fusion-net DL框架的数据融合检测的优势。采用计算机模拟、机器学习结合数据融合可以对水产预制食品的新鲜度及品质进行综合评估,以便提供更为准确的产品信息,对水产预制食品加工及后端销售提供了参考。然而,目前的相关内容多停留于研究阶段,如何将计算机模拟、建模预测及机器学习的方式更好与产业相融合,指导实际预制菜产业化生产仍亟待解决。另外,提高机器学习模型准确率,改进水产品品质监测预测的精确度仍待进一步研究。

2.3 基于全链条的智能监测

食品智能制造加工系统,利用物联网和智能控制进行数字化监测,可结合开发预制菜的生产线,监测生产环节的色泽、风味等品质变化情况,进行预制菜生产工艺环节优化,完成预制菜加工制造全链条的智能控制。借助云计算、物联网、区块链及人工智能等技术可以通过数字化助力预制菜生产链的高效联通,为预制菜的生产、加工、储运及销售全过程提供精准信息及产品安全性提示等^[50]。Misimi等^[51]指出基于计算机视觉方法可以自动检测

鳕鱼和鲑鱼鱼片在贮藏过程中的大小和形状变化,并依此来进行鱼片的分级;Lee等^[52]开发并测试了一种基于计算机视觉的鲍鱼自动分级算法,克服了传统鲍鱼人工分选和机械分级的弊端。自动化、智能化生产是现代食品工业发展的必然趋势,也是食品工业转型升级的关键途径,预制菜发展也要基于智能化及大数据的深度融合来形成预制菜品质保持及健康发展的产业模式。Jagtap等^[53]以即食食品的加工工厂为案例,分析基于物联网的实时数字化食品生产监测系统,发现食品的数字化生产可以有效减少加工过程中的原料损耗。Shrivastava等^[54]研究指出,数字孪生技术为获得与食品加工生产过程中的传感器数据的实时耦合提供了可能性,具有监测食品质量的能力。另外,预制食品质量安全预警追溯的关键技术及智能检测平台的开发,也有助于建立预制菜各加工环节及消费端食用的可溯源化和风险预警^[55]。预制菜发展与变革对智能装备及全链条数字化监测技术提出了更高的要求、更多的挑战。目前预制菜产业由于品种众多及工艺复杂的问题,缺少配套智能装备,亟待更新智能化工艺。完善预制食品加工过程的全链条数字监测体系,改进现代化制造装备及品质检测设备,正逐渐成为水产预制食品发展的重要内容之一。

3 结语

基于氧化、内源酶及微生物作用的水产预制食品品质劣变,可以通过改进预制工艺、包装方式及采用新型杀菌技术来调控产品品质。进一步完善预制菜产业标准,实现生产标准化、品质规范化、类别多样化,调控水产预制食品的风味,力争口味复原,关注减盐增鲜,更新水产预制食品的品质评价方式,有助于以科技助力预制菜品质调控。水产品的智能监测是未来水产预制食品及整个预制菜产业发展的重点。建立智能化检测标签、完善智能化装备,结合大数据、物联网、区块链等技术构建预制食品全链条智能化监测体系为预制菜的安全及可溯源提供基础。同时,机器学习、计算机模拟、数据融合等多种技术手段协同实现预制菜智能制造与品质调控是未来预制菜产业发展的重要方向。结合基础研究的品质调控,结合产业的装备更新,结合现代化信息手段的监测技术升级,可以提升预制食品的工业化技术水平,将推动预制菜产业变革及高质量发展。

参考文献

- [1] HUANG M, ZHANG M, BHANDARI B. Recent development in the application of alternative sterilization technologies to prepared dishes: A review [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(7): 1188-1196.
- [2] 王娟,高群玉,娄文勇.我国预制菜行业的发展现状及趋势[J].*现代食品科技*,2023,39(2):99-103.
- [3] LAGUNA L, GÓMEZ B, GARRIDO M D, et al. Do consumers change their perception of liking, expected satiety, and healthiness of a product if they know it is a ready-to eat meal? [J] *Foods*, 2020, 9(9): 1257.
- [4] ANA I A, SCHOOLMEESTER D, DEKKER M, et al. To cook or not to cook: a means-end study of motives for choice of meal solutions [J]. *Food Quality and Preference*, 2007, 18(1): 77-88.
- [5] FLETCHER C A, ST CLAIR R, SHARMINA M. Seafood businesses' resilience can benefit from circular economy principles [J]. *Nature Food*, 2021, 2(4): 228-232.
- [6] MOHAMMADALINEJHAD S, ALMASI H, MORADI M. Immobilization of Echium amoenum anthocyanins into bacterial cellulose film: A novel colorimetric pH indicator for freshness/spoilage monitoring of shrimp [J]. *Food Control*, 2020, 113: 107169.
- [7] JIANG J, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Current processing and packing technology for space foods: a review [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, 60(21): 3573-3588.
- [8] LIN Y, GAO Y, LI A, et al. Improvement of pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) drying characteristics and quality attributes by a combination of salting pretreatment and microwave [J]. *Foods*, 2022, 11(14): 2066.
- [9] GAO X, YOU J, YIN T, et al. Simultaneous effect of high intensity ultrasound power, time, and salt contents on gelling properties of silver carp surimi [J]. *Food Chemistry*, 2023, 403: 134478.
- [10] HE X, LV Y, LI X, et al. Improvement of gelation properties of silver carp surimi through ultrasound-assisted water bath heating [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022, 83: 105942.
- [11] YU H, MEI J, XIE J. New ultrasonic assisted technology of freezing, cooling and thawing in solid food processing: A review [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022,90: 106185.
- [12] 刘静,赵亚,石启龙.果蔬和水产品新型干燥预处理技术研究进展及未来展望[J].*食品工业科技*,2022,43(10):32-42.
- [13] WEBB L, MA L, LU X. Impact of lactic acid bacteria on the control of *Listeria monocytogenes* in ready-to-eat foods [J]. *Food Quality and Safety*, 2022, 6: fyac045.
- [14] 王悦齐,吴燕燕,李来好,等.抗氧化乳酸菌对发酵腌干带鱼脂肪氧化的影响及其主成分分析[J].*食品科学*, 2017,38(8):231-238.
- [15] GOKOGLU N. Novel natural food preservatives and applications in seafood preservation: A review [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(5): 2068-2077.
- [16] AHARI H, GOLESTAN L, ANVAR S A A, et al. Bio-nanocomposites as food packaging materials; the main production techniques and analytical parameters [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2022, 310: 102806.
- [17] BALASUBRAMANIAM S P L, PATEL A S, NAYAK B. Surface modification of cellulose nanofiber film with fatty acids for developing renewable hydrophobic food packaging [J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2020, 26: 100587.
- [18] CHANG H, XU J, MACQUEEN L A, et al. High-throughput coating with biodegradable antimicrobial pullulan fibres extends shelf life and reduces weight loss in an avocado model [J]. *Nature Food*, 2022, 3(6): 428-436.
- [19] LOPES J, GONCALVES I, NUNES C, et al. Potato peel phenolics as additives for developing active starch-based films with potential to pack smoked fish fillets[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2021, 28: 100644.
- [20] SUN X, WANG J, DONG M, et al. Food spoilage, bioactive food fresh-keeping films and functional edible coatings: Research status, existing problems and development trend [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 119: 122-132.
- [21] JAMRÓZ E, TKACZEWSKA J, KOPEĆ M, et al. Shelf-life extension of salmon using active total biodegradable packaging with tea ground waste and furcellaran-CMC double-layered films [J]. *Food Chemistry*, 2022, 383: 132425.
- [22] LUAN D, WANG Y, TANG J, et al. Frequency distribution in domestic microwave ovens and its influence on heating pattern [J]. *Journal of Food Science*, 2017, 82(2): 429-436.
- [23] JIANG C, CHEN Y, LI S, et al. Ready-to-eat fish cake processing methods and the impacts on quality and flavor [J]. *Foods*, 2022, 11(21): 3321.
- [24] ZHANG W, HUANG L, CHEN W, et al. Influence of ultrasound-assisted ionic liquid pretreatments on the functional properties of soy protein hydrolysates [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 73: 105546.
- [25] YU Q, PAN H, QIAN C, et al. Determination of the optimal electron beam irradiation dose for treating shrimp (*Solenocera melantho*) by means of physical and chemical properties and bacterial communities [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 153: 112539.
- [26] YU Q, ZHANG M, JU R, et al. Advances in prepared dish processing using efficient physical fields: A review [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022, 27: 1-15.
- [27] 蓝蔚青,陈雪宁,谢晶.低温等离子体技术在水产品保鲜中的应用研究进展[J].*肉类研究*,2022,36(6):60-66.
- [28] CONG X, WANG Q, SUN C, et al. Temperature effects on the nutritional quality in Pacific oysters (*Crassostrea gigas*) during ultraviolet depuration [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2022, 102(4): 1651-1659.

- [29] 郁佳怡,钱韻芳.非热杀菌技术在水产品保鲜中的应用研究进展[J].肉类研究,2022,36(9):51-57.
- [30] HE Y, XIE Z, XU Y, et al. Effect of slightly acid electrolysed water ice on metabolite and volatilome profile of shrimp (*Penaeus vannamei*) during cold storage [J]. Food Control, 2023, 145: 109421.
- [31] LUO H, SHENG Z, GUO C, et al. Quality attributes enhancement of ready-to-eat hairtail fish balls by high-pressure processing [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 147: 111658.
- [32] QI M, YAN H, ZHANG Y, et al. Impact of high voltage prick electrostatic field (HVPEF) processing on the quality of ready-to-eat fresh salmon (*Salmo salar*) fillets during storage [J]. Food Control, 2022, 137: 108918.
- [33] ZHAO L, ZHANG M, WANG H. Inhibition of the fishy odor from boiled crab meatballs during storage via novel combination of radio frequency and carbon dots [J]. Food Control, 2022, 136: 108843.
- [34] CHOI M S, JEON E B, KIM J Y, et al. Impact of non-thermal dielectric barrier discharge plasma on *Staphylococcus aureus* and *Bacillus cereus* and quality of dried blackmouth angler (*Lophiomus setigerus*) [J]. Journal of Food Engineering, 2020, 278: 109952.
- [35] LIU X, SUN X, CHEN X, et al. Effect of slightly acidic electrolyzed water (SAEW) combined with ultrasound sterilization on quality of Bigeye tuna (*Thunnus obesus*) during cryogenic storage [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2023, 115: 104999.
- [36] CHENG H, XU H, MCCLEMENTS D J, et al. Recent advances in intelligent food packaging materials: Principles, preparation and applications [J]. Food Chemistry, 2022, 375: 131738.
- [37] DUDNYK I, JANEČEK E R, VAUCHER JOSET J, et al. Edible sensors for meat and seafood freshness [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 259: 1108-1112.
- [38] YE B, CHEN J, YE H, et al. Development of a time-temperature indicator based on Maillard reaction for visually monitoring the freshness of mackerel [J]. Food Chemistry, 2022, 373: 131448.
- [39] LIU Y, JIANG W, YANG Z, et al. Intelligent biogenic amine-responsive fluorescent label for visual and real-time monitoring of seafood freshness [J]. Food Chemistry, 2022, 388: 132963.
- [40] POYATOS-RACIONERO E, ROS LIS J V, VIVANCOS J L, et al. Recent advances on intelligent packaging as tools to reduce food waste [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 172: 3398-3409.
- [41] LIU X, WANG Y, ZHANG Z, et al. On-package ratiometric fluorescent sensing label based on AIE polymers for real-time and visual detection of fish freshness [J]. Food Chemistry, 2022, 390: 133153
- [42] TAVAKOLI S, MUBANGO E, TIAN L, et al. Novel intelligent films containing anthocyanin and phycocyanin for nondestructively tracing fish spoilage [J]. Food Chemistry, 2023, 402: 134203.
- [43] 何华鹏,张慙,陈慧芝,等.青鱼新鲜度智能标签的研究[J].食品与生物技术学报,2019,38(1):100-106.
- [44] ZHANG J, HUANG X, ZOU X, et al. A visual indicator based on curcumin with high stability for monitoring the freshness of freshwater shrimp, *Macrobrachium rosenbergii* [J]. Journal of Food Engineering, 2021, 292: 110290.
- [45] 罗礼纯.基于残差神经网络模型的冷鲜大黄鱼新鲜度识别研究及应用[D].杭州:浙江工商大学,2022.
- [46] MA P, LAU C P, YU N, et al. Image-based nutrient estimation for Chinese dishes using deep learning [J]. Food Research International, 2021, 147: 110437.
- [47] LI H, WANG Y, ZHANG J, 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.
- [48] MOOSAVI-NASAB M, KHOSHNOUDI-NIA S, AZIMIFAR Z, et al. Evaluation of the total volatile basic nitrogen (TVB-N) content in fish fillets using hyperspectral imaging coupled with deep learning neural network and meta-analysis [J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 5094.
- [49] ZENG F, SHAO W, KANG J, et al. Detection of moisture content in salted sea cucumbers by hyperspectral and low field nuclear magnetic resonance based on deep learning network framework [J]. Food Research International, 2022, 156: 111174.
- [50] 李兆丰,孔昊存,刘延峰,等.未来食品: 机遇与挑战[J].中国食品学报,2022, 22(4):1-13.
- [51] MISIMI E, ERIKSON U, DIGRE H, et al. Computer vision-based evaluation of pre-and postrigor changes in size and shape of Atlantic cod (*Gadus morhua*) and Atlantic salmon (*Salmo salar*) fillets during rigor mortis and ice storage: effects of perimortem handling stress [J]. Journal of Food Science, 2008, 73(2): E57-E68.
- [52] LEE D, LEE K, KIM S, et al. Design of an optimum computer vision-based automatic abalone (*Haliotis discus hannai*) grading algorithm [J]. Journal of Food Science, 2015, 80(4): E729-E733.
- [53] JAGTAP S, RAHIMIFARD S. The digitisation of food manufacturing to reduce waste—case study of a ready meal factory [J]. Waste Management, 2019, 87: 387-397.
- [54] SHRIVASTAVA C, BERRY T, CRONJE P, et al. Digital twins enable the quantification of the trade-offs in maintaining citrus quality and marketability in the refrigerated supply chain [J]. Nature Food, 2022, 3(6): 413-427.
- [55] 李兆丰,刘炎峻,徐勇将,等.数字化食品在新时代下的发展与挑战[J].食品科学,2022,43(11):1-8.