

低温流通肉类预制菜的品质影响因素与控制技术研究进展

陈璇^{1,2}, 项君涵¹, 肖珊^{1,2}, 邹水洋^{1,2}, 蔡燕雪^{1,2},
王波^{1,2}, 潘晓琴^{1,2}, 王际辉^{1,2*}

(1. 东莞理工学院生命健康技术学院, 东莞 523808; 2. 东莞理工学院特膳食品开发与品质控制研究中心, 东莞市预制菜创新发展与品质控制重点实验室, 东莞市预制菜区域品牌创新发展研究院, 东莞 523808)

摘 要: 随着生活节奏加快和消费习惯的变化, 人们对餐饮的需求也发生了转变, 快捷、方便的餐饮品类越来越受消费者的青睐, 预制菜市场也日渐火热。低温流通的肉类预制菜是预制菜中的重要品类之一, 由于品类丰富、食材新鲜、操作便捷, 成为人们预制菜消费的新选择。但预制菜目前仍存在加工技术不成熟、冷链物流体系不完善、产品生产标准及操作规范流程不统一等问题, 从而导致预制菜感官品质不稳定、安全性不足, 降低人们的消费信心。因此需要对低温肉类预制菜的工艺流程和相应的加工技术进行升级转换, 为低温肉类预制菜行业的高质量发展提供技术支持。本文主要综述了低温肉类预制菜的研究现状, 加工过程对预制菜品质和安全性的影响, 以及可应用于低温肉类预制菜的快速冷却与冷冻、冷链物流、杀菌、智能与活性包装等新型食品加工技术, 以期为预制菜的创新与可持续发展提供参考。

关键词: 低温肉类预制菜; 新型食品加工技术; 智能包装; 数字孪生

Research progress on quality influencing factors and regulation technology of low-temperature circulation prepared meat cuisine

CHEN Xuan^{1,2}, XIANG Jun-Han¹, XIAO Shan^{1,2}, ZOU Shui-Yang^{1,2}, CAI Yan-Xue^{1,2},
WANG Bo^{1,2}, PAN Xiao-Qin^{1,2}, WANG Ji-Hui^{1,2*}

(1. School of Life and Health Technology, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China;
2. Research Center of Special Food Development & Quality Control, Dongguan University of Technology,
Dongguan Key Laboratory of Premade Cuisine Innovative Development & Quality Control, Regional
Brand Innovation & Development Institute of Dongguan Premade Cuisine, Dongguan 523808, China)

ABSTRACT: With the acceleration of life pace and the changes in consumer habits, people's catering demands change a lot, they tend to choose convenient and fast food, which results in the soaring of the premade cuisine market. Low-temperature circulation prepared meat cuisine is one of the important species of prepared cuisine. Because of the

基金项目: 东莞市社会发展科技项目(20231800938702)、生物技术与资源利用教育部重点实验室(大连民族大学)开放课题基金项目(KF2024007)、2023—2024 年东莞市预制菜区域品牌创新发展研究院项目(2339139)

Fund: Supported by the Dongguan Social Development Technology Key Project (20231800938702), the Open Fund of Key Laboratory of Biotechnology and Bioresources Utilization (Dalian Minzu University), Ministry of Education (KF2024007), and the Research Center of Special Food Development & Quality Control, Dongguan University of Technology Project (2339139)

*通信作者: 王际辉, 博士, 教授, 主要研究方向为生物技术与食品安全。E-mail: wangjihui@dgut.edu.cn

*Corresponding author: WANG Ji-Hui, Ph.D, Professor, School of Life and Health Technology, Dongguan University of Technology, No.1, Daxue Road, Songshanhu District, Dongguan 523808, China. E-mail: wangjihui@dgut.edu.cn

various categories, fresh ingredients, and convenient operation, it has become trendy for people to consume prepared cuisine. However, some urgent problems shall be addressed, including the unmaturing processing technology, cold chain logistics system, and the lack of production and operation standards, which cause the fluctuation of the quality and increase the risk of safety problems of products, thus lowering consumer confidence. Therefore, it is necessary to upgrade and transform the process flow and corresponding processing technology of low-temperature prepared meat cuisine, so as to provide technical support for the high-quality development of low-temperature prepared meat cuisine. This paper summarized the advances in low-temperature prepared meat cuisine, the influence of processing on the quality and safety of prepared cuisine, and the state-of-the-art technologies in food processing including rapid cooling and freezing, cold chain logistics, sterilization technology, intelligent and active packages that could be used in prepared cuisine industry. Thus provide suggestions for the innovative and sustainable development of prepared cuisine.

KEY WORDS: low-temperature prepared meat cuisine; emerging food processing technology; intelligent package; digital twin

0 引言

随着时代经济的发展,人们生活节奏加快,消费习惯和饮食习惯也发生了巨大的变化。更多的人开始选择快捷、方便的用餐方式,其中以快餐为主的新餐饮、外卖和预制菜成为了人们餐饮消费的新选择。相对于外卖、快餐,预制菜多为只需要简单加热、烹调的成品或半成品菜肴,具有便捷、安全、营养、品类丰富等优点。同时,我国机械设备、包装技术、冷链物流、电子商务、供应链的不断升级优化,为预制菜行业的发展提供了技术支持。此外,在国家政策指引下,各地政府纷纷出台政策支持预制菜产业的发展。由此可见,预制菜具有较大的消费和发展空间。据报道,2023年中国预制菜规模约为5165亿元,并将以20%的年增长率发展^[1]。

参考团体标准 T/DGIF 001.1—2023《东莞预制菜术语及分类方法》,预制菜是“以一种或多种食材为主料或辅料,添加或不添加调味料、食品添加剂,经净化、切分、调味、烹饪、冷冻、包装、杀菌等全部或部分工序及不同工序顺序的预制处理并在一定条件下贮运,可即食和非即食(加热食用)的一类食品,包括预制菜品、预制汤羹、预制餐食。”。根据原料种类,预制菜可分为畜禽类预制菜、蔬菜类预制菜和水产预制菜等;根据食用方式,又可分为即食、即配、即烹和即热类预制菜;而根据贮藏、运输所需要的条件不同,可将预制菜分为常温和低温(冷藏和冷冻)流通预制菜。其中,冷藏类预制菜即采用巴氏灭菌或同等程度灭菌加工,并在0~10℃条件下进行储藏、运输和销售的预制菜品类。冷冻类预制菜,指经原料预处理和加工、熟制等过程,再进行快速冷冻,并在冷冻条件(<-18℃)进行储藏、运输和销售的预制菜,如各种中央厨房生产的冷冻菜肴、料理包和半成品菜等^[2]。本文中的“低温肉类预制菜”指以畜禽肉类及水产品为主要原料的低温流通预制菜类。艾媒咨询《2022年中国预制菜行业发展趋势研究

报告》显示,近年来,随着我国冷链物流技术与微波技术的不断升级,低温预制菜的品质和安全性得到提升。特别是保质期较短的低温预制菜,已成为人们的消费新趋势,近九成消费者倾向于选择保质期在1个月~3个月以内的预制菜,仅极少数消费者愿意选择保质期半年及以上的预制菜。

虽然预制菜行业发展迅速,但其在生产、加工、储藏、运输、消费等过程中,仍有许多影响其品质与安全性的问题尚未解决。特别是原料加工后的杀菌、包装、储运等环节的不当管理和控制,是引发预制菜食品安全问题的关键。同时食品加工的新兴技术在预制菜领域的应用仍然较少,影响了预制菜产业的规范化和高速化发展。本研究以低温肉类预制菜为对象,阐述其发展现状、加工过程对其安全与品质的影响,分析可用于提升低温肉类预制菜的安全与品质的新型食品加工技术,旨在为预制菜加工技术改进和可持续发展提供参考。

1 低温肉类预制菜的国内外研究现状

预制菜中即食、即热类菜肴在我国已有几十年的发展历史,上世纪90年代初罐头食品的出现标志着预制菜的伊始。在90年代后期,随着麦当劳、肯德基等连锁快餐的进驻,我国的冷链技术和供应链渠道不断完善,为预制菜的运输、销售和发展提供了技术支持。到2020年,受疫情的影响,消费者对储备菜的需求不断高涨,快手菜等新品类开始了高速发展时期。对于生产、加工企业,预制菜的标准化工艺流程降低了原料、人力、运输等成本,可以增加15%~30%毛利率^[3]。同时,低温预制菜的出现改变了传统农产品远距离运输易损耗、地域性与季节性强等特点造成的“流通难”的冷链困局。农产品制成标准化的预制菜后,可有效降低生鲜农产品的浪费^[4]。此外,预制菜还有助于提升冷链的运作效率。低温预制菜的包装相比外形不规则的生鲜农产品,可以节约仓储空间,提高

单位空间利用率。规整的包装更便于成批打包、装卸搬运和仓储运输,利于冷链的管理和作业。而对于消费者,预制菜的操作简单,相比传统烹饪菜肴更便捷、安全、卫生,减少了食材的浪费。

低温肉类预制菜的工艺流程如图 1 所示,工艺流程中的每道工序均会影响产品最终的质量。现阶段预制菜的加工过程中仍存在许多待解决的问题,包括:(1)原料选取与贮藏方式不合理:目前预制菜的原料预处理方式较单一,对不同原料的加工方式没有考虑到原料的特异性,难以保证产品品质。同时,不当的贮藏方式,如对生鲜原料如水产品、绿色蔬菜等净化、切分时没有进行冷藏保存,长期处于温度较高的环境,易导致原料变质;(2)加工熟制工艺不足:如对原料进行长期高温加热等处理,易导致肉品原料发生蛋白质变性、脂质氧化等,使最终产品的口感、安全性下降;为了保证产品的色、香、味,在预制菜调理过程中添加剂的使用过多等;(3)产品储藏与运输方式不当:低温肉类预制菜在储运、销售过程中对温度的要求较高,需要完整的冷链供应链,且更易受温度、湿度、光照强度等环境的影响。运输过程中,如冷链物流车装卸货物等环节,可能会导致一定的温度波动,从而使杀菌过程中残留的微生物如芽孢杆菌等萌发生长,最终引发食源性等疾病等食品安全问题^[5]。因此,根据低温肉类预制菜发展现状分析加工过程对其品质与安全性的影响,进行针对性的工艺优化,采用新型技术提升预制菜质量与安全性,对预制菜制作到销售的工艺流程精准控制等举措,对预制菜行业高效健康发展意义重大。

2 低温肉类预制菜加工过程对其品质与安全的影响

2.1 冷藏/冻藏和解冻/复热过程的影响

肉类预制菜以肉制品为主料,富含蛋白、矿物质、脂肪等营养成分,是良好的能量来源。但由于营养成分丰富,肉制品易受微生物污染,发生腐败变质。同时,常温下肉类组织中脂肪酶、蛋白酶等酶的活动旺盛,易引起蛋白质

氧化、脂肪氧化变性等现象。为了抑制肉类变质,延长保质期,低温保藏技术被广泛应用于预制菜的加工及储藏。然而,在肉类预制菜冷冻贮藏和解冻/复热过程中,肉品原料会发生水分流失、肌肉变色、蛋白质变性、脂质氧化酸败等现象,复热后易出现肉品固液分离的情况^[6],这将显著影响肉类预制菜的品质。

冷冻和解冻过程对肉品原料的品质如持水力、脂质氧化、质构、色泽、pH 等方面均存在较大影响。预制菜中的新鲜肉品原料富含肌原纤维,水分含量高,可以形成良好的三维网络结构,具有较高的持水力,而冻融过程可以改变肉中的水分含量和分布。研究表明冷冻将导致肉制品持水性降低,这是由于冻结过程形成的冰晶导致肌肉组织的粗肌丝发生机械破裂,造成部分汁液流失,同时细胞外渗透压提高,进一步使肌纤维发生收缩和脱水^[7]。此外,冻融过程肌原纤维蛋白的变性也将引发肉品持水力的下降。研究发现,相比慢速冻结,快速冻结的肉制品持水性更好^[8]。

同时,冻融过程加速了肉品原料的脂质氧化。如 CHAKANYA 等^[9]对比了新鲜鹿肉和解冻鹿肉制作的肉糜的脂质氧化情况,结果表明解冻肉制作的肉糜的总硫代巴比妥酸值(thiobarbituric acid reactive substance, TBARS)增长速度显著高于新鲜鹿肉糜,并在储藏的第 8 d 达到 (1.8 ± 0.03) mg MDA/kg,显著高于新鲜鹿肉糜的 TBARS 值 $[(1.0 \pm 0.05)$ mg MDA/kg],表明相比新鲜鹿肉糜,解冻肉制作的肉糜脂质氧化速率显著加快。肉品冷冻过程中的氧化变质,一方面是由于细胞受到机械破坏,增加了与氧气的接触面积,导致脂质氧化。另一方面,由于温度的迅速降低,肌肉细胞发生氧化应激反应,产生了大量活性氧自由基,从而引起肌肉细胞凋亡和脂质氧化反应^[10]。

肉品原料的质构特性也会受到冻融过程的影响。研究发现冷冻肉适口性比冷鲜肉要差,嫩度偏低。冻结和解冻过程中,肉品原料的嫩度与肌纤维的酶解及冰晶形成有关。当肉类食品被冷冻时,钙活化蛋白酶活性受到抑制,因而蛋白质的水解率降低,而在肉品解冻时,钙活化蛋白酶被重新激活,导致冷冻肉类嫩度比冷鲜肉低^[11]。



图 1 低温肉类预制菜的工艺流程

Fig.1 Processing of low-temperature prepared meat cuisine

此外,在冻融过程中,肉品原料的色泽也将发生变化,这是由其肌红蛋白会发生自氧化作用变性引起的,如 QI 等^[12]研究发现,羊肉制品在冻融过程中,肉品的红度(a^*)逐渐降低,黄度(b^*)在 15 个冻融周期后降低,亮度(L^*)逐渐提高,同时肉品的 pH 下降,有机酸类物质增加。蛋白质中的胺类发生氧化反应生成自由基,导致黄色素物质产生,甚至肉品发黑^[7]。

2.2 运输过程的影响

在流通过程中,如果低温肉类预制菜的运输环境温度波动过大,易加快肉类预制菜的品质劣变。GB 31605—2020《食品安全国家标准 食品冷链物流卫生规范》中规定冷藏食品运输过程中的温度不应高于 10℃,表明温度波动是影响低温肉类预制菜安全性的关键因素之一。BRUCKNER 等^[13]研究发现假单胞菌属在温度波动较大的环境中生理活动更强,加速了新鲜猪肉的腐败变质,大大缩短了猪肉的货架期。当温度从 4℃ 提高到 7~15℃ 时,猪肉的货架期缩短了 3.0%~14.9%。目前国内应用于低温预制菜运输的技术主要是冷链物流。冷链物流指食品在生产、贮藏、运输及销售等各环节中一直处于规定的低温下,保证食品品质的过程^[14]。冷链运输过程中,一般采用 -18~40℃、-2~4℃、0~2℃、0~4℃ 4 个温度范围^[15]。我国食品冷链物流相对欧美发达国家起步晚,冷链基础较薄弱,冷链技术和管理水平不高,仍未形成完整的冷链体系,这也限制了预制菜产业的发展。低温肉类预制菜的冷链供应链尚不完善,存在缺乏产地预冷、冷链配送损耗、各环节信息要素不流通、检验检疫关口易受影响不稳定等可能导致冷链“断链”的问题,增加预制菜损耗的风险^[16]。因此,预制菜的升级转型还需要冷链供应链技术的标准化、成熟化作为推力。

近年来,我国人民消费水平提高、消费需求旺盛,促使市场规模扩大。相关政府部门也加大了对冷链物流的扶持,出台了不少相关政策,2021 年国家商务部、国家发展改革委等发布《商贸物流高质量发展专项行动计划》,提出加快推进冷链物流发展,提高城乡冷链设施网络覆盖水平。《“十四五”冷链物流发展规划》提出,2025 年我国初步形成衔接产地销地、覆盖城市乡村的冷链物流网络。目前,我国冷链物流体系正在逐步完善。

2.3 杀菌方式的影响

在预制菜生产过程中,微生物污染是引发预制菜安全问题的主要因素之一。在低温肉制品中,常见的微生物污染包括腐败菌(假单胞菌属)、大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、溶血性弧菌、单增李斯特菌等^[17]。选择合理的杀菌方式有助于提升预制菜的安全性,可以有效延长货架期。不同的杀菌方式对低温肉类预制菜的营养、品质、风味、脂肪氧

化等方面的影响均不相同。如相比于热处理,对麻辣鸡块进行微波处理可以更有效地抑制菌落总数的增长,经 18 d 储藏后菌落总数仅为 3.79 lg CFU/g。同时,经微波处理的麻辣鸡块的质构和感官品质维持较好,脂肪氧化程度较低,这可能是由于微波非热效应促使分子加速碰撞,导致微生物细胞膜破裂,蛋白质和酶变性,最终导致麻辣鸡块中的微生物丧失活力^[18]。张根生等^[19]采用超高压技术处理预调理猪肉馅,结果表明,超高压处理的肉馅 TBARS 值略高于未经高压处理的肉馅,但随着储存时间的延长,超高压处理的肉馅 TBARS 增长速率远低于未经高压处理的肉馅,这可能由于超高压处理破坏了细胞膜结构,导致金属离子的释放,从而促使样品脂肪氧化。同时,超高压处理也明显改变了肉馅的色泽,整个贮藏期间,超高压处理组的 L^* 、 b^* 均高于对照组, a^* 略低于对照组。肉馅色泽的变化可能是超高压引起的蛋白质变性、卟啉环被破坏,以及诱导蛋白质和脂肪氧化加速等因素造成。由此可见,杀菌方式将显著影响肉类的品质。根据预制菜特性有针对性地进行杀菌处理是保证低温肉类预制菜品质的有效手段之一。

2.4 包装方式的影响

预制菜的包装材料与包装方式对保证其安全性十分关键。有效的包装能够减缓预制菜的品质劣变,保留口感及风味。低温肉类预制菜产品种类较多,根据原料不同,需要选择不同的包装方式与包装材料。如即热类预制菜,需要利用可在微波炉、明火或烤箱中进行加热的材料,如聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate, PET)等耐高温的塑料材料。即烹类预制菜多为冷冻产品,需要具有耐久性、耐寒性和加热安全性的材料如铝箔等。研究发现,使用外层材料、中间材料、内层材料分别为聚酯薄膜、铝箔、聚丙烯薄膜的复合高温蒸煮铝箔袋作为红烧肉预制菜的包装材料,经表面杀菌后,既维持了软包装红烧肉的风味,又延长了其货架期^[20]。

此外,低温肉类预制菜的包装技术选择也十分关键。常用的包装技术包括真空包装、气调包装等。真空包装可以有效去除预制菜产品中的氧气,抑制微生物繁殖,结合低温快速冷却与储藏,大大降低预制菜营养成分损失的速度。气调包装指调节食品包装内的气体成分(充入 N_2 或 CO_2),降低食物成分呼吸速率,延迟风味蛋白质等成分的酶解,从而延长保质期的包装技术。气调包装适用于保质期较短、冷藏保存的产品。如对烤鸭采用气调包装(30% CO_2 /70% N_2)协同生物灭菌(茶树精油、牛至精油)处理,可以维持烤鸭的色泽,抑制脂质氧化反应与微生物增殖,相比未处理组延长货架期 7 d^[21]。此外,新型包装技术如活性包装^[22]、智能包装^[23]、纳米包装^[24]等,也在预制菜包装领域具有可观的应用前景。

3 提升低温肉类预制菜品质与安全的新型技术

3.1 快速冷冻与冷却技术

3.1.1 快速冷却与冷冻

低温肉类预制菜中的肉品原料为鲜肉原料或经调理熟制的肉品,在包装前均需要经过快速冷却处理,避免微生物和酶的活动引起食品安全问题。传统冷却方法包括强制风冷、自然风冷、水冷等,耗时较长。真空快速冷却是一种新型冷却技术,具有速度快、均匀性较好、可延长货架期等优点^[25]。研究表明利用真空冷却和浸没式真空冷却方法处理小块水煮牛肉,可以在 350 s 内将牛肉冷却至 10℃。传统的冷风冷却处理使样品水分损失 4.33%,浸没式真空冷却处理使样品水分含量增加 4.29%,且冷却后硬度值上升最小,表明真空冷却速度较快,对牛肉品质影响最小^[26]。因此,将真空冷却技术应用到肉类预制菜中可以提高冷却效率和安全性。但目前真空冷却技术仍存在过度蒸发水分引起肉品干耗等问题,需进一步完善。

快速冷冻对减缓低温肉类预制菜中微生物的生长繁殖、抑制酶活性具有重要意义。研究表明,速冻肉品质比缓慢冻结的肉更好,这是由于快速冷冻/解冻肉品形成的肌原纤维蛋白凝胶通常具有小而均匀的孔隙,而缓慢冷冻或缓慢解冻样品形成的凝胶则具有较大且不规则的孔隙^[27]。相较于其他制冷处理方式,速冻保持食品的风味更佳,营养价值更高。张晓天等^[28]将速冻工艺应用于鸡肉串方便食品中,发现鸡肉串经腌制预油炸后,立即速冻制成即食产品,可以保持较好的色泽、滋味、咀嚼性等品质,满足了消费者对方便快捷和美味的需求。

3.1.2 新型冷冻技术

在肉制品冷冻方面,传统的方法有空气冻结法、直接接触冻结法、间接接触冻结法等。随着冷冻技术的提升,许多新型冷冻技术也应用于改善肉制品的冷冻过程,主要包括物理场方法(高压冷冻技术、超声波辅助冻结技术、电场辅助冻结技术等)及生物化学方法(添加抗冻蛋白、抗冻肽、抗冻多糖等)^[17,29]。这些方法在冷冻肉类预制菜的加工方面也具有良好的应用前景。

高压冷冻是在高压条件下加速肉品冷冻的技术。水在高压条件下,冰点较低,冰晶尚未形成,然后迅速降低压力,因而能形成非常大的超冷度,促使大量冰晶核迅速生成,产生许多均匀细小的冰晶^[30]。相对传统冻结方法,高压冷冻避免了肉品组织细胞外产生成片的大冰晶而导致的组织变形,对肉纤维的机械破坏较小。苏光明等^[31]对比了高压冷冻技术与传统冷冻技术(空气冻结法、接触冻结法)对牛肉品质的影响,结果表明采用传统冻结技术处理后的牛肉中的冰晶体积较大,结构粗糙,而高压冷冻技术处理后的牛肉中的冰晶体积较为细小均匀,能最大限度保持牛肉的品质。

超声波辅助冻结技术是利用超声波来改善食品冻结过程的一种新型冻结技术。在超声波作用下,肉制品的冰晶核加速形成,同时控制冰晶核的大小,达到良好的冷冻效果^[32-33]。冻结过程中冰晶的形成主要依赖于空化效应。空化效应是由于超声波在穿透液相介质时使得液相介质承受较大的负压,破坏液相介质结构的完整性,从而产生气泡,气泡进一步变大,并在冻结过程中形成晶核。作为一种新型冷冻技术,超声波辅助冻结技术在国内外已被广泛研究^[32,34]。如研究超声辅助冻结处理对猪背最长肌品质的影响发现,相比传统的空气冻结处理,超声辅助冻结处理样品冰晶粒径减小 66.31%,肌纤维结构完整,剪切力减小 15.57%,嫩度改善,水分损失降低 5.05%。同时,样品冻结速率与冰晶粒径呈极显著正相关关系($r=0.982$),表明超声辅助冻结技术可以通过调控冻结过程、抑制冰晶的生成,改善猪背最长肌的冻藏品质^[35]。超声波辅助冻结还具有冻结速度快,对细胞损伤小,减少肉制品中的微生物总数等优点,在冷冻肉类预制菜加工领域有着良好的应用前景。

电场辅助冻结技术是用于肉制品冷冻的新型技术之一,利用电场辅助冻结技术可以提高冰晶的成核温度,降低过冷度,加速冻结过程,从而形成小而均匀的冰晶,降低肌肉组织的机械损伤及细胞萎缩,从而提高冷冻肉类预制菜的品质^[36-38]。其原理是在电场中形成的离子流提高了传热速率和水分子的极化作用,从而加速了细小冰晶的形成。目前电场辅助解冻技术在肉制品加工方面的应用仍然较少。XIE 等^[39]将电场辅助技术应用于调理牛排的冷冻,结果表明相比传统的空气冻结法,电场辅助技术处理减少了牛排因冷冻引起的肌纤维横断面间隙,从而有效降低了肌原纤维损失。此外,电场辅助处理牛排的总巯基含量(1.06 nmol/mg)低于空气冻结样品总巯基含量(1.06 nmol/mg),表明样品蛋白氧化程度减少,品质有所提高。

冷冻保护剂的添加是一类能有效延缓肉品原料的品质劣变和微生物滋长的生物化学方法。常见的冷冻保护剂包括抗冻蛋白质、抗冻肽、抗冻多糖、氨基酸等^[40-42]。抗冻蛋白质是一种能够抑制冰晶生成的一类食品添加剂,可以从细菌、真菌、植物蛋白、鱼类和昆虫中提取^[43]。肉品中添加抗冻蛋白质一方面能够抑制冷冻过程中冰晶形成,减少对肌纤维的机械破坏,减少汁液流失,另一方面能够减少冷冻肉品原料在储藏过程中冰晶的形成和重结晶,从而提高肉品质量。但是目前抗冻蛋白质价格较高,其应用受到了极大限制。此外,常用作抗冻的水溶性多肽可以与肌原纤维蛋白周围的结合水通过氢键结合,从而抑制冰晶形成,延缓蛋白聚集。如银鲤鱼多肽可以减少鱼糜肌纤维蛋白羰基的形成,抑制游离巯基含量的下降,预防蛋白氧化。同时,银鲤鱼多肽有助于鱼糜形成良好的三维网络结构,在鱼糜制品的冻融过程中起重要保护作用^[44]。

蔗糖和山梨醇是用于冷冻肉制品的传统保护剂,但它们也为肉制品带来了额外的甜味和热量值,影响肉制品的最终口感和营养价值。将热量较低的多糖,如葡甘低聚糖、卡拉胶、改性淀粉等应用于肉品原料的冷冻保护已成为新兴的研究趋势^[45-46]。其原理是多糖的羟基基团可以通过氢键和水分子及肌原纤维蛋白的极性残基发生相互作用,减少冷冻过程中冰晶的形成,还可以避免肌原纤维蛋白在冷冻过程中发生变性和聚集^[47]。其他冷冻保护剂如氨基酸,包括 *L*-精氨酸和 *L*-赖氨酸等,在冷冻或冻融循环中有效地提高了肌纤维蛋白的储存模量、凝胶强度和持水力^[48-49]。这是由于冷冻保护剂抑制了羰基的生成、增加了总巯基含量,因而减轻了肌肉蛋白质的氧化。抗氧化剂也被广泛用作冷冻保护剂,以防止冷冻引起的肌原纤维蛋白变性和氧化。如 α -生育酚(α -tocopherol, α -TOH)属于维生素 E 的一种,已被用作食品抗氧化剂,以抑制蛋白质和脂质氧化。因为 α -TOH 的羟基可以提供一个氢原子,从而清除自由基,避免自由基链式反应导致的脂质氧化。新型冷却和冷冻技术在不断发展和完善,但仍存在设备要求高、成本高企、使用场地和环境限制多等不足,在低温肉类预制菜领域的应用仍须进行针对性改进。

3.2 流通环节的新技术

预制菜冷链运输包括了预冷、仓储、运输配送、销售等多个环节,涉及了食品安全、智能设备、智慧冷链和政策标准等多个领域。冷链物流实时监测预制菜的品质情况对保障预制菜安全与品质十分关键。常用于预制菜冷链监控的智能技术有新鲜度指示剂、射频识别设备(radio frequency identification, RFID)、时间-温度指示器

(time-temperature indicators, TTI)等,其中 TTI 系统可以实时监测冷链温度和时间情况,为消费者提供有关食品保质期的真实信息^[50]。

此外,应用现代化数字技术,构建预制菜的数字化冷链追踪溯源系统,也是冷链技术发展的新趋势。数字孪生技术是对某一对象或系统全生命周期的虚拟表示(图 2),根据实体反馈的信息和数据进行监控、仿真分析和计算,需要通过分析大量数据模拟食品内部、外部的变化^[16]。在预制菜冷链追踪环节,数字孪生模型可以通过解析、运算 RFID 等收集的预制菜实时信息,识别预制菜在冷链运输过程中的内外部环境因素,诊断预制菜劣变发生的源头,如磕碰、温湿度、光照、微生物反应等易忽视的细节,还能帮助解决追踪溯源的信息透明化、可视化等难题,促进冷链各环节的信息流通,大幅提高预制菜流通的效率。

3.3 解冻/复热技术

肉类预制菜经消费者购买后至到达餐桌前,消费者对其的处理方式也会影响其品质与安全性。目前预制菜常用的解冻方法包括空气解冻法、水解冻法、真空解冻、超声解冻和微波解冻法等。如相比普通解冻方式,超声波解冻的猪肉汁液损失率与蒸煮损失率均有所下降,且肉的嫩度也有所增加^[51]。预制菜的复热方法包括传统方法,如煮、蒸、炒、煎、炸、烤等,和新型快速加热技术如微波加热、超声辅助加热、红外加热等^[52]。微波复热技术能降低烹饪损失,较好地保留活性成分,还能降低蛋白质和脂肪的氧化程度,延缓预制菜的品质劣变,是预制菜较常用的复热方式之一。如采用微波技术处理红烧猪肉,其挥发性风味成分显著增多^[53]。但同时微波复热也会引起预制菜品

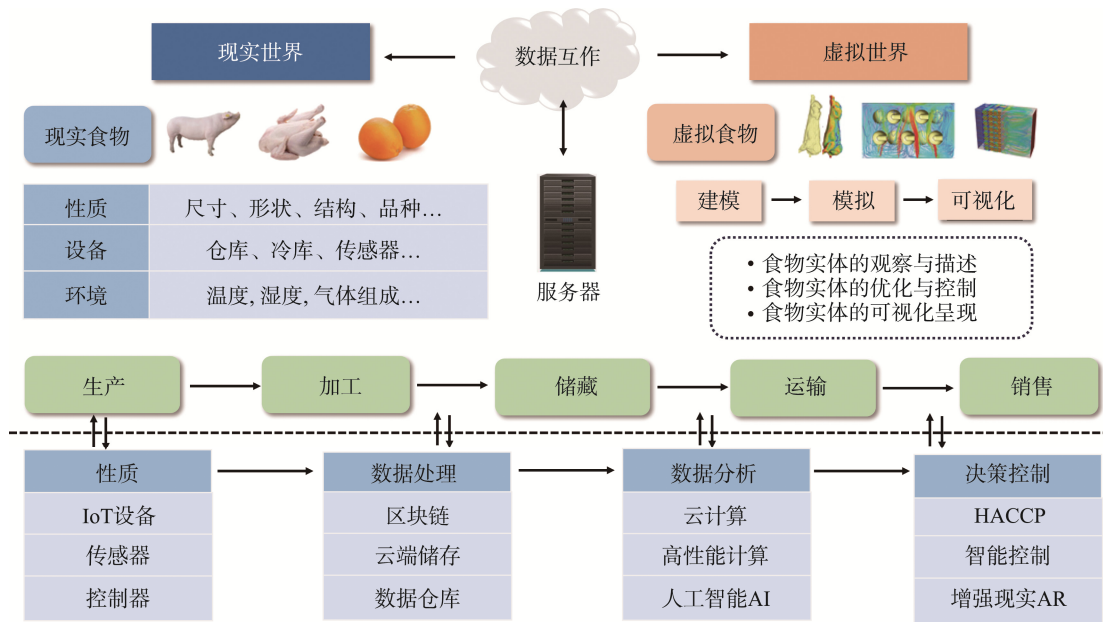


图 2 数字孪生系统^[5]
Fig.2 Digital twin system^[5]

的色泽、口感的变化,如研究发现微波复热处理使调理猪肉的 L^* 显著减小, a^* 增加,微波加热 2 min 以上肉的嫩度显著增加^[54]。此外,也有研究表明,相比微波处理,传统的蒸汽复热方法处理佛跳墙冷冻调理食品,感官、质构特性和色泽变化程度均为最佳^[55]。因此,应根据预制菜品的类型选择合适的解冻、复热方法。

3.4 杀菌技术

国内外食品工业中,肉类预制菜的传统杀菌技术主要分为热杀菌和非热杀菌两类。热杀菌包括超高温杀菌、巴氏灭菌、射频杀菌等,延长肉类预制菜的保质期的同时也将引起营养成分的损失、颜色、风味和质构等的变化^[56]。对于肉类预制菜,热杀菌还容易导致肉类“过熟味”的产生,影响产品口感和风味。非热杀菌指不通过加热的方式,杀灭食物中的致病微生物,主要利用非热效应如超声空化效应、射线、高压等破坏微生物细胞壁或细胞膜,起抑菌或杀菌的作用,包括超高压杀菌、微波杀菌、辐照杀菌等^[57]。相比热杀菌技术,非热技术可以达到保留食品原有色、香、味的效果,还具有安全、高效节能等优点。如超高压杀菌主要利用超高压破坏微生物细胞结构,改变其蛋白质的构象与活性而使微生物失活,达到杀灭微生物和芽孢,延长保质期的效果^[58]。研究显示,205 MPa 的超高压处理 15 min 可使真空包装预调理猪肉馅在 4℃ 条件下的货架期从 10 d 延长至 14 d,且其菌落总数、挥发性盐基氮值(total volatile basic nitrogen, TVB-N)、TBARS 值、pH 相比未经超高压处理组的上升速率显著减慢,色差、质构劣化程度低^[19]。同时,辐照灭菌也可通过伽马射线、X 光线等产生的辐射促使离子或自由基的产生,从而对微生物 DNA 造成损伤,影响其繁殖^[59]。当辐照剂量大于 6 kGy 可有效杀灭低温肉品中的微生物。该技术具有节能、高效、保留食品原有品质与风味的优点。

此外,生物杀菌技术在食品保鲜领域的应用也越来越多。生物灭菌剂主要分为植物精油如茶树精油等,微生物及其代谢产物如乳酸链球菌素、纳他霉素等,动物源杀菌剂如溶菌酶等^[60-61]。研究表明,乳酸链球菌素和溶菌酶等天然保鲜剂复合使用可以将盐水方腿的货架期从 10 d 延长至 3 个月以上^[62]。作为一种天然的保鲜技术,生物灭菌剂不仅可以达到抑制腐败菌和致病菌生长的效果,还能规避添加化学保鲜剂而引发的安全性问题。虽然许多新型杀菌技术尚未成熟,如具有费用高昂、使用方式受限等不足,但由于其高效、便捷、安全等特性,具有广阔的应用前景。

3.5 新型包装技术

随着食品包装技术的不断发展,许多新型包装技术纷纷涌现,特别是纳米包装、活性包装和智能包装,将是预制菜包装技术发展的方向。纳米包装指运用纳米技术将传统包装改性,形成具有纳米结构和特殊功能的包装材料,

如淀粉纳米复合材料、纤维素纳米复合材料、蛋白质纳米复合材料等^[24]。如采用纳米银聚乙烯保鲜袋对新鲜酱鸭进行包装,相比普通聚乙烯保鲜袋能较好地维持酱鸭风味,降低鸭肉 TVB-N 值,延缓脂肪氧化,并抑制微生物的生长繁殖^[63]。对于水产类预制菜,活性包装可以起较好的保鲜作用。活性包装通过将添加剂如壳聚糖、植物精油、纳米颗粒等掺入包装系统,防止微生物和化学污染,延长预制菜的保质期^[22,64]。如采用掺入香芹酚、柠檬醛和 α -松油醇精油的聚对苯二甲酸丁二醇酯(poly butylene adipate terephthalate, PBAT)与聚乳酸(poly lactic acid, PLA)的生物可降解薄膜(PBAT/PLA)包装太平洋白对虾,可有效稳定虾肉中的蛋白质构象,延缓蛋白质变性、抑制微生物生长、并预防黑变现象^[65]。活性包装效果良好,但需要考虑活性物质的添加对预制菜风味、口感的影响,以最大限度维持预制菜的原有风味。

智能包装技术利用产品温度、代谢物等监测预制菜的质量变化,并对预制菜进行针对性品质调控。如利用 pH 传感器检测预制菜的 pH 变化,或通过着色剂指示食物新鲜度^[23]。将负载紫薯花青素和/或茜素的羧甲基纤维素/马铃薯淀粉指示膜用于猪肉新鲜度检测,随着猪肉腐败程度的增加,指示膜呈现肉眼可见的颜色变化,与猪肉的 pH 和 TVB-N 值的变化趋势一致^[66]。智能包装技术还可以实现预制菜贮藏和流通过程的实时监控与可追溯性,可以很好地解决消费者对食品安全性的担忧,促进预制菜产业的发展。

4 结束语

低温肉类预制菜是预制菜的重要组成部分,在预制菜品类中占较大的消费比例,受到消费者的青睐,是预制菜重点发展品类和消费新趋势。由于中式菜肴的品类和熟制方式多样化及消费者对低温肉类预制菜风味、口感、营养和安全性等的需求越来越高,对预制菜加工技术和品质控制仍需要持续创新与升级。本文详细解析了预制菜加工后期储运过程对低温肉类预制菜品质与安全性的影响,并提出了相应的新型技术,有助于解决预制菜行业发展的困境。未来的预制菜必将向多元化、智能化、规模化、营养化、功能化、安全化的方向发展。营养化、功能化的实现主要包括减盐减钠、减糖、减脂,使用药食同源等优质食品原料等方式;智能化、规模化的实现则是通过新型智能食品加工技术与冷链、数字孪生等技术赋能供应链的发展,发展以消费者个性化需求为核心的精细化经营模式与数字化管理体系,助力预制菜产业进入创新与可持续发展的新阶段。

参考文献

- [1] 王娟,高群玉,姜文勇.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.

- WANG J, GAO QY, LOU WY. Development status and trends of the pre-prepared food industry in China [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2023, 39(2): 99–103.
- [2] 吴晓蒙, 饶雷, 张洪超, 等. 新型食品加工技术提升预制菜肴质量与安全[J]. *食品科学技术学报*, 2022, 40(5): 1–13.
- WU XM, RAO L, ZHANG HC, *et al.* Quality and safety improvement of premade cuisine by novel food processing technologies [J]. *J Food Sci Technol*, 2022, 40(5): 1–13.
- [3] 王国强, 周丽媛. 提升预制菜质量与安全的方法分析[J]. *食品安全导刊*, 2023, (4): 183–185.
- WANG GQ, ZHOU LY. Analysis of methods to improve the quality and safety of prefabricated dishes [J]. *China Food Saf Magaz*, 2023, (4): 183–185.
- [4] 王静香, 张忠明, 李纪岳, 等. 我国预制菜产业发展特点与趋势预判[J/OL]. *粮油食品科技*: 1–9. [2023-12-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.TS.20231108.1159.002.html>
- WANG JX, ZHANG ZM, LI JY, *et al.* Development characteristics and trend prediction of prefabricated dishes industry in China [J]. *Sci Technol Cere Oils Foods*: 1–9. [2023-12-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.TS.20231108.1159.002.html>
- [5] REN Q, FANG K, YANG X, *et al.* Ensuring the quality of meat in cold chain logistics: A comprehensive review [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2022, 119: 133–151.
- [6] 郑荣美, 胡萍, 张磊, 等. 低温肉制品研究现状与发展趋势[J/OL]. *中国农学通报*: 1–8. [2023-12-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1984.S.20230529.1049.002.html>
- ZHENG RM, HU P, ZHANG L, *et al.* Research status and development trend of low temperature meat products [J/OL]. *Chi Agric Sci Bull*: 1–8. [2023-12-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1984.S.20230529.1049.002.html>
- [7] DU X, WANG B, LI H, *et al.* Research progress on quality deterioration mechanism and control technology of frozen muscle foods [J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2022, 21(6): 4812–4846.
- [8] ZHANG Y, BAI G, WANG J, *et al.* Myofibrillar protein denaturation/oxidation in freezing-thawing impair the heat-induced gelation: Mechanisms and control technologies [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2023, 138: 655–670.
- [9] CHAKANYA C, ARNAUD E, MUCHENJE V, *et al.* Colour and oxidative stability of mince produced from fresh and frozen/thawed fallow deer (*Dama dama*) meat [J]. *Meat Sci*, 2017, 126: 63–72.
- [10] SUN H, ZHAO Y, ZHAO J, *et al.* Ultrasound thawing for improving the eating quality and off-flavor of frozen duck meat and its possible mechanisms [J]. *LWT*, 2023, 187: 115314.
- [11] COOMBS CEO, HOLMAN BWB, FRIEND MA, *et al.* Long-term red meat preservation using chilled and frozen storage combinations: A review [J]. *Meat Sci*, 2017, 125: 84–94.
- [12] QI J, LI C, CHEN Y, *et al.* Changes in meat quality of ovine longissimus dorsi muscle in response to repeated freeze and thaw [J]. *Meat Sci*, 2012, 92(4): 619–626.
- [13] BRUCKNER S, ALBRECHT A, PETERSEN B, *et al.* A predictive shelf life model as a tool for the improvement of quality management in pork and poultry chains [J]. *Food Control*, 2013, 29(2): 451–460.
- [14] HAN J, ZUO M, ZHU W, *et al.* A comprehensive review of cold chain logistics for fresh agricultural products: Current status, challenges, and future trends [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2021, 109: 536–551.
- [15] GALLART-JORNET L, RUSTAD T, BARAT JM, *et al.* Effect of superchilled storage on the freshness and salting behaviour of Atlantic salmon (*Salmo salar*) fillets [J]. *Food Chem*, 2007, 103(4): 1268–1281.
- [16] 匡红云, 郝皓, 游世胜, 等. 数字孪生赋能预制菜冷链发展的研究进展[J/OL]. *现代食品科技*: 1–9. [2023-12-17]. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.6.0359>
- KUANG HY, HAO H, YOU SS, *et al.* A study on the development of a digital twin to empower the pre-prepared food cold chain [J/OL]. *Mod Food Sci Technol*: 1–9. [2023-12-17]. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.6.0359>
- [17] LU N, MA J, SUN D. Enhancing physical and chemical quality attributes of frozen meat and meat products: Mechanisms, techniques and applications [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2022, 124: 63–85.
- [18] 唐彬, 靳苗苗, 张洪翠, 等. 微波处理及其非热效应对麻辣鸡块品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2018, 44(12): 200–207.
- TANG B, JIN MM, ZHANG HC, *et al.* Effects of microwave processing and its non-thermal effect on quality of spicy chicken [J]. *Food Ferment Ind*, 2018, 44(12): 200–207.
- [19] 张根生, 王军茹, 刘志彬, 等. 超高压处理预调理猪肉馅工艺优化及贮藏品质变化[J]. *包装工程*, 2023, 44(3): 96–105.
- ZHANG GS, WANG JR, LIU ZB, *et al.* Optimization of ultra-high pressure treatment and quality changes of pre-conditioned pork filling during storage [J]. *Packag Eng*, 2023, 44(3): 96–105.
- [20] 马晓宁. 红烧肉常温软包装罐头加工工艺研究[J]. *肉类工业*, 2015, (3): 1–3.
- MA XN. Study on Sprocessing technology of flexible packaged stewed pork can at room temperature [J]. *Meat Ind*, 2015, (3): 1–3.
- [21] 陈雪, 赵嘉越, 董鹏程, 等. 生物保鲜剂结合气调包装对烤鸭货架期及微生物多样性的影响[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(10): 177–187.
- CHEN X, ZHAO JY, DONG PC, *et al.* Effects of biological preservative combined with modifed atmosphere packaging on shelf-life and microbial diversity of roast duck [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2021, 21(10): 177–187.
- [22] 谢京颖, 王雅茹, 高彦祥. 食品活性包装研究现状[J]. *中国食品添加剂*, 2023, 34(9): 304–315.
- XIE JY, WANG YH, GAO YX. Research status of food active packaging [J]. *China Food Addit*, 2023, 34(9): 304–315.
- [23] 李涵瑜, 孙飞龙, 罗如梦, 等. 智能包装的发展及应用[J]. *现代农业装备*, 2023, 44(4): 19–24.
- LI HY, SUN FL, LUO RM, *et al.* Development and application of intelligent package [J]. *Mod Agric Equip*, 2023, 44(4): 19–24.
- [24] 郑皓华, 邓雅洁, 吴志林. 纳米包装材料表面改性技术及包装形态表现研究[J]. *材料导报*, 2022, 36(19): 71–75.
- ZHENG HH, DENG YJ, WU ZL. Research on surface modification technology of nano packaging materials and packaging morphological expressions [J]. *Mater Rev*, 2022, 36(19): 71–75.
- [25] 郭治宇. 肉制品真空冷却技术研究进展[J]. *食品安全导刊*, 2022, (28): 168–171.
- GUO ZY. Research progress of vacuum cooling technology for meat products [J]. *China Food Saf Magaz*, 2022, (28): 168–171.

- [26] 宋晓燕, 栾宇宸, 刘宝林. 不同冷却方式对小块水煮牛肉品质的影响[J]. 制冷技术, 2023, 43(1): 64–70.
- SONG XY, LUAN YC, LIU BL. Effect of different cooling methods on quality of small-size of water-cooked beef [J]. J Refrig, 2023, 43(1): 64–70.
- [27] ZHANG C, LIU H, XIA X, *et al.* Effect of ultrasound-assisted immersion thawing on emulsifying and gelling properties of chicken myofibrillar protein [J]. LWT, 2021, 142: 111016.
- [28] 张晓天, 范大明, 孙传范, 等. 不同加工工艺对微波鸡肉串品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(7): 27–31.
- ZHANG XT, FAN DM, SUN CF, *et al.* Impact of different processing techniques on quality of microwavable chicken strings [J]. Food Res Dev, 2010, 31(7): 27–31.
- [29] ZHANG Y, PUOLANNE E, ERTBJERG P. Mimicking myofibrillar protein denaturation in frozen-thawed meat: Effect of pH at high ionic strength [J]. Food Chem, 2021, 338: 128017.
- [30] 李立, 孙智慧, 李晓燕, 等. 超高压技术在冷冻食品加工中的应用[J]. 食品工业, 2021, 42(6): 328–333.
- LI L, SUN ZH, LI XY, *et al.* Application of high pressure technology in frozen food processing [J]. Food Ind, 2021, 42(6): 328–333.
- [31] 苏光明, Ramaswamy Hosahalli S., 于勇, 等. 牛肉高压冷冻过程中热变化和冰晶形态研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(3): 206–214.
- SU GM, RAMASWAMY HS, YU Y, *et al.* Thermal behaviors and ice crystal properties in pressure shift freezing of beef [J]. Trans Chin Soc Agric Mach, 2014, 45(3): 206–214.
- [32] 索原杰, 宣晓婷, 崔燕, 等. 超声波辅助冻结在水产品及肉类产品中的应用研究进展及解冻机制[J]. 生物加工过程, 2018, 16(3): 78–83.
- SUO YJ, XUAN XT, CUI Y, *et al.* Application of ultrasonic-assisted freezing and thawing technique for aquatic and meat products [J]. Chin J Bioprocess Eng, 2018, 16(3): 78–83.
- [33] 张晓敏, 张尚悦, 白鸽, 等. 超声波辅助冻结对蓝莓渗透质特性的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(2): 223–231.
- ZHANG XM, ZHANG SY, BAI G, *et al.* Effect of ultrasonic-assisted immersion freezing on the osmotic mass transfer characteristics of blueberry [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2023, 23(2): 223–231.
- [34] ZHANG Z, SHI W, WANG Y, *et al.* Mono-frequency ultrasonic-assisted thawing of frozen goose meat: Influence on thawing efficiency, product quality and microstructure [J]. Ultrason Sonochem, 2023, 98: 106489.
- [35] JUNGUANG L, XUYANG M, JIAWEN Z, *et al.* Insight into the mechanism of the quality improvement of porcine after ultrasound-assisted immersion freezing [J]. Int J Food Sci Technol, 2022, 57(8): 5068–5077.
- [36] 李侠, 杨方威, 王航, 等. 静电场辅助冻结-解冻对牛肉肌原纤维蛋白二级结构的影响[J]. 核农学报, 2018, 32(9): 1750–1756.
- LI X, YANG FW, WANG H, *et al.* The effects of electrostatic field assisted freezing and thawing on myofibrillar protein secondary structure [J]. Acta Agric Nucl Sin, 2018, 32(9): 1750–1756.
- [37] 乔丹丹, 李斯琦, 格日勒图, 等. 等离子电场辅助冷冻羊肉过程中冰晶变化及热力学分析[J/OL]. 中国食品学报: 1–9. [2023-12-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4528.TS.20231016.1758.006.html>
- QIAO DD, LI SQ, GE RLT, *et al.* Ice crystal changes and thermodynamic analysis during plasma electric field assisted freezing of mutton [J/OL]. J Chin Inst Food Sci Technol: 1–9. [2023-12-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4528.TS.20231016.1758.006.html>
- [38] 尚柯, 杨方威, 李侠, 等. 静电场辅助冻结-解冻对肌肉保水性及蛋白理化特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(3): 157–162.
- SHANG K, YANG FW, LI X, *et al.* Effect of electrostatic field-assisted freezing-thawing on water-holding capacity and physicochemical characteristics of beef muscle proteins [J]. Food Sci, 2018, 39(3): 157–162.
- [39] XIE Y, CHEN B, GUO J, *et al.* Effects of low voltage electrostatic field on the microstructural damage and protein structural changes in prepared beef steak during the freezing process [J]. Meat Sci, 2021, 179: 108527.
- [40] 黄秋钰, 俞珊, 姜海鑫, 等. 甲壳素纳米晶体对带鱼肌原纤维蛋白的冷冻保护作用[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(14): 105–111.
- HUANG QY, YU S, JIANG HX, *et al.* Cryo-protective effect of chitin nanocrystals on myofibrin of hairtail fish [J]. Food Res Dev, 2023, 44(14): 105–111.
- [41] 王昊乾, 张静雯, 杨雄洲, 等. 抗氧化肽在真空冷冻干燥过程中对乳双歧杆菌 Probio-M8 的保护作用[J]. 中国食品学报, 2023, 23(10): 32–40.
- WANG HQ, ZHANG JW, YANG XZ, *et al.* Protective effect of antioxidant peptides on *Bifidobacterium animalis* subsp. lactis Probio-M8 during vacuum freeze-drying [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2023, 23(10): 32–40.
- [42] 谢晨, 熊泽语, 李慧, 等. 金针菇多糖对三文鱼片冻藏期间品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(22): 178–183.
- XIE C, XIONG ZY, LI H, *et al.* Effects of polysaccharide from *Flammulina velutipes* on quality of Atlantic salmon (*Salmo salar*) fillets during frozen storage [J]. Food Ferment Ind, 2021, 47(22): 178–183.
- [43] 杨福生, 王定坤, 王发鹏, 等. 抗冻大豆蛋白凝胶电解质制备及应用[J]. 林产化学与工业, 2023, 43(2): 36–42.
- YANG FS, WANG DK, WANG FP, *et al.* Preparation of antifreezing soybean protein-based gel electrolytes and application in electrochemical capacitors [J]. Chem Ind For Prod, 2023, 43(2): 36–42.
- [44] SHEN X, LI T, LI X, *et al.* Dual cryoprotective and antioxidant effects of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) protein hydrolysates on unwashed surimi stored at conventional and ultra-low frozen temperatures [J]. LWT, 2022, 153: 112563.
- [45] 祁雪儿, 姚慧, 齐贺, 等. 多羟基糖类物质对冷冻虾仁中水的重结晶的改善作用[J]. 现代食品科技, 2020, 36(1): 91–97.
- QI XER, YAO H, QI H, *et al.* Improvement of polyhydroxy saccharides on recrystallization of water in *Litopenaeus vannamei* during frozen storage [J]. Mod Food Sci Technol, 2020, 36(1): 91–97.
- [46] 孙国皓. 常用抗冻剂及其在冷链食品工业中的应用[J]. 现代食品, 2021, (4): 77–81.
- SUN GH. Commonly used antifreeze agents and their applications in the cold chain food industry [J]. Mod Food, 2021, (4): 77–81.
- [47] ZHU S, YU J, CHEN X, *et al.* Dual cryoprotective strategies for ice-binding and stabilizing of frozen seafood: A review [J]. Trends Food Sci Technol, 2021, 111: 223–232.
- [48] 包鹏起. 外源性赖氨酸、精氨酸对冷冻猪背长肌(*Longissimus muscles*)保水性的影响及机理研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- BAO PQ. Study on the effect of exogenous lysine and arginine on the water holding capacity of the frozen porcine *Longissimus lumborum* and

- its mechanism [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021.
- [49] 丁雅丽, 胡响响, 冯玄, 等. 小分子促进抗冻蛋白抗冻效果的分子机制[J]. 应用化学, 2021, 38(12): 1612–1620.
- DING YL, HU XX, FENG X, *et al.* Mechanism of enhancing antifreeze protein activity by low molecular mass molecules [J]. Chin J Appl Chem, 2021, 38(12): 1612–1620.
- [50] WANG S, LIU X, YANG M, *et al.* Review of time temperature indicators as quality monitors in food packaging [J]. Packag Technol Sci, 2015, 28: 839–867.
- [51] 蒋奕, 程天赋, 王吉人, 等. 超声波解冻对猪肉品质的影响[J]. 肉类研究, 2017, 31(11): 14–19.
- JIANG Y, CHENG TF, WANG JR, *et al.* Effect of ultrasonic thawing on the quality characteristics of frozen pork [J]. Meat Res, 2017, 31(11): 14–19.
- [52] 张帆. 反复冻融、解冻方法及加热方式对鸭肉品质影响的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- ZHANG F. The study on the effect of freeze-thaw cycles, thawing methods and heating methods on the quality of duck meat [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016.
- [53] 王瑞花, 陈健初, 叶兴乾, 等. 配送和贮藏条件及二次加热方式对红烧猪肉脂质氧化、挥发性风味物质和脂肪酸组成的影响[J]. 中国食品学报, 2017, 17(9): 157–167.
- WANG RH, CHEN JC, YE XQ, *et al.* Effect of delivery, storage and reheating procedures on the lipid oxidation, volatile flavor compounds and fatty acid compositions [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2017, 17(9): 157–167.
- [54] 王波, 谢安国, 康怀彬, 等. 微波复热对不同预制调理肉品的品质影响研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(8): 78–83.
- WANG B, XIE ANG, KANG HB, *et al.* Study on the effect of microwave reheating on the quality of meat prefabricated by different methods [J]. Food Res Dev, 2018, 39(8): 78–83.
- [55] 胡琴, 黄旭辉, 祁立波, 等. 佛跳墙冷冻调理食品在不同复热方式下的品质变化[J]. 现代食品科技, 2021, 37(4): 163–171.
- HU Q, HUANG XH, QI LB, *et al.* Quality changes of frozen prepared fotingqiang product reheated by different methods [J]. Mod Food Sci Technol, 2021, 37(4): 163–171.
- [56] 孙司卉, 范婧, 任丽琨, 等. 非热杀菌新技术在保持食品品质方面的应用趋势[J]. 中国食品卫生杂志, 2023, 35(6): 961–966.
- SUN SH, FAN J, REN LK, *et al.* Trends in application of the latest non-thermal sterilization technologies in maintaining food quality [J]. Chin J Food Hyg, 2023, 35(6): 961–966.
- [57] 郑巧, 张娟, 杨苗, 等. 非热杀菌技术在冷链生鲜食品中杀菌消毒的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(11): 197–204.
- ZHENG Q, ZHANG J, YANG M, *et al.* Research progress on non-thermal sterilization technology for sterilization and disinfection in cold chain fresh food [J]. J Food Saf Qual, 2023, 14(11): 197–204.
- [58] SONG Q, LI R, SONG X, *et al.* The effect of high-pressure processing on sensory quality and consumer acceptability of fruit juices and smoothies: A review [J]. Food Res Int, 2022, 157: 111250.
- [59] 何立超, 马素敏, 李成梁, 等. 辐照处理提高猪肉火腿肠保鲜效果[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 296–302.
- HE LC, MA SM, LI CL, *et al.* Improving preservative effect of pork ham sausages by irradiation [J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2016, 32(22): 296–302.
- [60] FIRMANDA A, FAHMA F, WARSIKI E, *et al.* Antimicrobial mechanism of nanocellulose composite packaging incorporated with essential oils [J]. Food Control, 2023, 147: 109617.
- [61] WU C, ZHI Z, DUAN M, *et al.* Insights into the formation of carboxymethyl chitosan-nisin nanogels for sustainable antibacterial activity [J]. Food Chem, 2023, 402: 134260.
- [62] 曾友明, 马小明, 丁泉水, 等. 天然保鲜剂延长低温肉制品货架期的研究[J]. 肉类工业, 2002, (11): 21–24.
- CENG YM, MA XM, DING QS, *et al.* Study on extending shelf life of low-temperature meat products with natural preservatives [J]. Meat Ind, 2002, (11): 21–24.
- [63] 宋益娟, 关荣发, 芮昶, 等. 纳米包装材料对酱鸭贮藏品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(32): 15913–15914.
- SONG YJ, GUAN RF, RUI C, *et al.* Effects of nano-packaging on the preservation of sauced duck [J]. J Anhui Agric Sci, 2012, 40(32): 15913–15914.
- [64] 安艳霞, 刘欣, 雷永伟, 等. 生物基活性食品包装材料的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(18): 190–200.
- AN YX, LIU X, LEI YW, *et al.* Advance in bio-based active food packaging materials [J]. J Food Saf Qual, 2023, 14(18): 190–200.
- [65] LAORENZA Y, HARNKARNSUJARIT N. Carvacrol, citral and α -terpineol essential oil incorporated biodegradable films for functional active packaging of Pacific white shrimp [J]. Food Chem, 2021, 363: 130252.
- [66] 李波, 李文, 杨新, 等. 基于紫薯花青素/茜素的猪肉新鲜度智能指示膜研究[J/OL]. 食品与发酵工业: 1–12. [2023-12-17]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.037557>
- LI B, LI W, YANG X, *et al.* Development of intelligent indicator films based on purple sweet potato anthocyanin/alizarin for monitoring pork freshness [J/OL]. Food Ferment Ind: 1–12. [2023-12-17]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.037557>

(责任编辑: 郑丽 张晓寒)

作者简介



陈璇, 博士, 讲师, 主要研究方向为食品营养与安全。

E-mail: 2023030@dgut.edu.cn



王际辉, 博士, 教授, 主要研究方向为生物技术与食品安全。

E-mail: wangjihui@dgut.edu.cn