

多物理场技术在预制菜加工中的应用

彭飞, 黄立俊, 张丽梅

Application of Multi-physical Field Technology in Prefabricated Vegetable Processing

PENG Fei, HUANG Lijun, and ZHANG Limei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024090089>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超高压处理对虾滑预制菜品质特性的影响

Effect of Ultra-high Pressure on the Quality Properties of Shrimp Slips Prepared Dishes

食品工业科技. 2023, 44(11): 88-94 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022070243>

超声结合超高压预处理对冻干草莓片品质的影响

Effect of Ultrasound and Ultrahigh Pressure Pretreatment on Quality of Freeze-dried Strawberry Slices

食品工业科技. 2020, 41(14): 15-21,28 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.14.003>

不同解冻方式对西梅品质的影响

Effect of Different Thawing Methods on Quality of Prunes

食品工业科技. 2022, 43(18): 331-336 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021110295>

物理场解冻在食品领域中的研究进展

Research Progress of Physical Field Thawing on Foods

食品工业科技. 2024, 45(8): 372-379 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023050289>

物理场辅助渗透脱水技术及其在果蔬干燥中的应用

Physical Field-Assisted Osmotic Dehydration Technology and Its Application in Fruit and Vegetable Drying

食品工业科技. 2021, 42(13): 435-440 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020120138>

香菇预制菜制备工艺优化

Optimization of the Preparation Process of *Lentinula edodes* Prefabricated Dishes

食品工业科技. 2023, 44(12): 223-231 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022080073>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

彭飞, 黄立俊, 张丽梅. 多物理场技术在预制菜加工中的应用 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(19): 422-430. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090089

PENG Fei, HUANG Lijun, ZHANG Limei. Application of Multi-physical Field Technology in Prefabricated Vegetable Processing[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(19): 422-430. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090089

· 专题综述 ·

多物理场技术在预制菜加工中的应用

彭 飞, 黄立俊, 张丽梅*

(北京工商大学计算机与人工智能学院, 北京 100048)

摘 要:随着国民饮食方式、消费习惯的转变, 源于传统菜肴的标准化半成品产品“预制菜”蓬勃发展, 其具有快捷、便利和可工业化生产等优势, 未来发展前景广阔; 然而, 由于我国预制菜加工尚处于发展时期, 存在概念模糊、技术装备落后、标准不一、安全卫生隐患等问题。基于此, 本文系统概述了预制菜的产业发展现状、主流分类方式, 剖析了其加工过程中存在的主要问题, 以物理场技术为切入点重点分析了超声、超高压、电磁场以及欧姆加热等新型技术在预制菜加工中的应用情况, 旨在丰富预制菜肴的加工技术与方式, 为预制菜肴可持续发展提供借鉴与参考。

关键词:预制菜, 物理场, 超声, 超高压, 冷冻, 解冻

中图分类号: TS972.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)19-0422-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090089

本文网刊:



Application of Multi-physical Field Technology in Prefabricated Vegetable Processing

PENG Fei, HUANG Lijun, ZHANG Limei*

(School of Computer and Artificial Intelligence, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: With the transformation of national diet and consumption habits, standardised semi-finished products "prepared dishes" flourish derived from traditional dishes is flourishing. It has the advantages of quick, convenient and industrialised production, and has broad prospects for future development. However, as the processing of prepared vegetables in China is still in a period of development, there are problems such as fuzzy concepts, backward technology and equipment, inconsistent standards, and safety and hygiene hazards. Based on this, firstly, the industrial development status and mainstream classification of prepared vegetables are outlined, and the main problems in their processing are analyzed, then, the application of new technologies such as ultrasound, ultra-high pressure, electric-magnetic field and ohmic heating in the processing of prepared vegetables is intensively analyzed. This paper aims to enrich the processing techniques and methods of prepared dishes, and to provide reference for the sustainable development of prepared dishes.

Key words: prepared dish; physical field; ultrasound; ultra-high pressure; freezing; thawing

随着现代生活节奏的加快和工作压力的增加, 越来越多的人没有时间或者不愿花费时间在繁琐的烹饪过程上, 预制菜的出现成为调和这一矛盾的重要手段。中国烹饪协会发布的团体标准《预制菜》(T/CCA 024-2022)明确地将预制菜定义为是以一种或多种农产品为主要原料, 运用标准化流水作业, 经预加工(如分切、搅拌、腌制、滚揉、成型、调味等)或

预烹调(如炒、炸、烤、煮、蒸等)制成, 并进行预包装的成品或半成品菜肴^[1]; 文件还针对预制菜原辅料要求、产品标准要求、生产过程卫生要求等一系列标准进行了规范; 这些标准要求的建立和完善也促使预制菜正不断走向现代标准化、机械化、流水化的工业生产。数据显示, 2023 年中国预制菜市场规模已经达到了 5165 亿元, 同比增长 23.1%, 预计在 2026 年市

收稿日期: 2024-09-09

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2023YFD2101001); 江南大学食品安全与国家战略治理实验室开放型课题 (2025-012W)。

作者简介: 彭飞 (1989-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品加工技术与装备, E-mail: feipeng2012zhu@163.com。

* 通信作者: 张丽梅 (1979-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品加工技术与装备, E-mail: zhanglimei@btbu.edu.cn。

场规模将超过万亿^[2], 未来发展潜力巨大。

预制菜加工过程主要包括原料初加工、烹调、包装、杀菌、速冻、储存与物流等环节^[3]; 这些环节覆盖预制菜从原料到成品的整个加工链, 不仅关系到预制菜的安全性和营养价值, 还直接影响到其口感和风味。传统的预制菜加工技术, 难以满足种类繁多的预制菜工业化生产需求, 多物理场技术因其具有菜品加工质量高^[4]、保鲜效果好^[5]、节约能源与资源^[6]等优势, 将成为我国餐饮行业产品研发与食品科技工作者的重要方向。多物理场技术是指结合多种物理场效应的处理技术, 该技术可以应用于预制菜加工过程中诸如解冻、辅助冷冻、杀菌消毒等多个方面。本文系统概述了预制菜的产业发展现状、主流分类方式, 重点探讨了四种典型的物理场技术(超声、超高压、电磁场、欧姆加热等)在预制菜加工中的应用情况, 以期对预制菜产业发展提供借鉴与参考。

1 预制菜产业发展现状及问题

1.1 预制菜产业现状

近几年来, 在国家政策大力扶持、资本投入不断增加、冷链物流等技术不断完善、饮食结构发生重大变革的背景下, 预制菜市场规模稳步增长, 产值有望突破万亿。

中央一号文件《关于做好 2023 年全面推进乡村振兴重点工作的意见》提出培育乡村新产业新业态, 要求“提升净菜、中央厨房等产业标准化和规范化水平, 培育发展预制菜产业”, 这是预制菜首次被写入中央一号文件。根据人民网 2023 年最新发布的《预制菜行业发展报告》中的数据显示(如图 1 所示), 中国预制菜市场规模 2022 年已达 4196 亿元, 未来 3~5 年将以 20% 左右的增长率持续上升, 预计 2026 年可达到 10720 亿, 正式发展为万亿级市场^[7]。

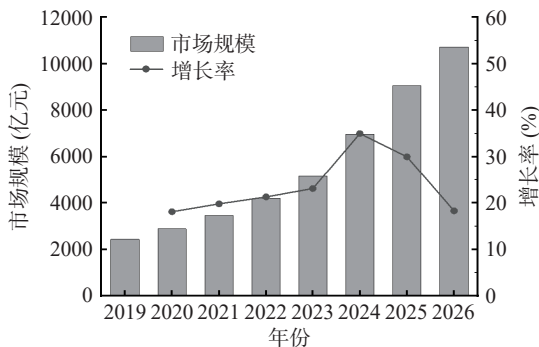


图 1 2019~2026 年中国预制菜市场规模统计及预测
Fig.1 Statistics and forecast of the size of China's prepared dish market from 2019 to 2026

根据《中国烹饪协会五年(2021~2025)工作规划》数据显示, 国内预制菜渗透率只有 10%~15%, 而日本预制菜渗透率已达 60% 以上, 对比国内外市场可以看出, 国内预制菜市场仍有较大的发展空间。在 market 需求的导向下, 近年来我国预制菜市场扩容明显, 相关企业数量持续攀升^[2], 从图 2 数据可知, 从 2014 年至 2020 年七年间, 我国预制菜企业注册量逐

年攀升; 其中, 2020 年相关企业增长势头最猛, 新增企业注册数量达 1.44 万家; 截至当前, 我国现有预制菜相关企业已有 7.75 万家。

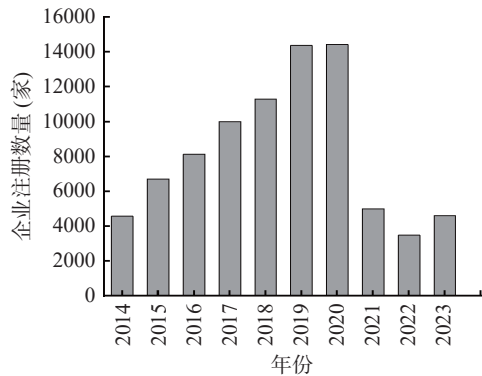


图 2 2014~2023 年中国预制菜相关企业注册量
Fig.2 Number of registered enterprises related to prepared dishes in China from 2014 to 2023
注: 数据来源: 国家市场监督管理总局、企查查, 数据截至 2023-12-5, 仅统计关键词为预制菜、速冻、半成品食品、净食、净菜、即食的企业。

1.2 预制菜分类

预制菜可以根据原料来源、加工程度、流通条件等维度进行分类(表 1)。根据原料种类不同, 可分为畜禽肉类预制菜类、蔬菜类预制菜类、水产类预制菜类三种^[8]。根据预制菜加工程度不同, 将其分为即食、即热、即烹和即配四大类: 第一类为即食类(Ready-to-eat Food), 指开封后即可食用的食品; 第二类为即热类(Ready-to-heat Food), 指只需要简单加热即可食用的食品; 第三类为即烹类(Ready-to-cook Food), 指食材需简单烹饪, 但缩短了烹饪时间; 第四类为即配类(Ready-to-use Food), 食材已经经过清洗、分切、按份包装, 消费者只需自行烹饪和调味^[9]。根据流通所需温度不同, 分为常温流通预制菜、冷藏流通预制菜、冷冻流通预制菜三类: 常温流通预制菜是指经过高温蒸汽灭菌或同等程度灭菌加工的食品; 冷藏流通预制菜是指采用巴氏灭菌或同等程度灭菌加工(如超高压等), 需在冷藏条件下(0~10℃)进行储运和销售; 冷冻流通预制菜是指先经预

表 1 预制菜分类		
Table 1 Classification of prepared dishes		
分类依据	分类	举例
原料种类	畜禽肉类预制菜	腊肠、速冻鸡爪
	蔬菜类预制菜	蔬菜沙拉、蔬菜拼盘
	水产类预制菜	即食三文鱼、调味鱼排
加工程度	即食预制菜	豆干、鸡腿、八宝粥
	即热预制菜	方便面、自嗨锅
	即烹预制菜	鱼香肉丝、椒盐排骨
	即配预制菜	小块肉、预制沙拉
流通条件	常温流通预制菜	蔬菜、肉类和水产品菜肴的罐头食品
	冷藏流通预制菜	冷藏小酥肉等
	冷冻流通预制菜	冷冻菜肴、料理包和半成品菜

处理和烹饪加工,再进行快速冷冻,并在冷冻条件($<-18\text{ }^{\circ}\text{C}$)进行储运的预制菜肴^[10]。

1.3 预制菜加工过程中存在的主要问题

预制菜的本质是传统预调理、是提供方便和快捷的食物选择,是传统食品工业化、现代化的延续^[11]。从早期的罐藏加工、塑料包装、速冻等技术,到如今冷链物流不断完善、互联网技术快速发展和电子商务的普及,相应配套技术的不断突破,推动着预制菜产业的不断发展。我国目前在预制菜的定义上较为模糊,不同的标准对预制菜的定义和分类存在差异,预制菜的定义在不同地区和不同的行业团体中存在差异,例如,中国烹饪协会在 2022 年发布的团体标准中,将预制菜分为即食、即热、即烹、即配四类;而 2024 年 3 月,六部门联合发布的《关于加强预制菜食品安全监管 促进产业高质量发展的通知》中,首次在国家层面明确了预制菜的定义和范围,规定预制菜是加热或熟制后方可食用的预包装菜肴,不包括主食类食品,如速冻面米食品、方便食品等。由于缺乏统一的标准,预制菜行业的准入门槛不明确,导致行业内企业水平参差不齐,影响了行业的整体形象和发展。预制菜产业的快速发展带来了新的监管挑战,如何确保食品安全、提升产品质量、规范市场行为等问题,都需要通过制定和完善相关标准来解决。

预制菜肴产业链涉及加工、贮藏、运输、复热等诸多环节,其品质、营养、新鲜度等会受到一定程度影响。预制菜肴风味、色泽等品质在加工过程中得到适度发育,通过先进的杀菌消毒、速冻技术使预制菜肴品质在贮藏运输环节得以保证,通过消费端相应的复热(解冻)技术使得预制菜肴的风味等品质实现最大程度的发育和再现。因此,预制菜肴工业化在杀菌消毒、速冻、辅助解冻等关键技术方面亟待突破。

传统的预制菜加工技术普遍存在汁液损失率大^[12]、物料温度梯度大、加工时间长、对食品品质影响较大^[13]等问题,这些问题直接影响了预制菜品的最终品质。首先,汁液损失率较大,通常是由于加工过程中的高温和长时间处理导致的,使得食品失去原有的风味和口感;其次,物料温度梯度大,意味着食品在加工过程中不同部位的温度差异显著,这可能导致烹饪不均匀,影响食品的质地和安全性;再者,加工时间长,这不仅增加了能源消耗和生产成本,同时也可能因为长时间的高温处理而降低食品的营养价值和新鲜度;最后,传统的加工技术对食品品质的影响较大,包括可能改变食品的颜色、风味和滋味,以及可能导致外形的塌陷等。这些问题综合起来,使得预制菜在保持传统菜肴的新鲜、风味、营养和安全特性方面存在不足,亟需寻找新的技术来解决上述问题。

随着消费模式的改变和新业态的出现,预制菜的食品安全监管、冷链物流建设、产品风味同质化严重等问题都受到严重挑战。预制菜在贮运过程中需要冷链物流保障其新鲜度和风味,但新消费模式下冷链物流建设成本较高,且对物流效率要求也更高;同

时由于调味剂、增鲜剂的通用,导致预制菜产品风味同质化严重,无法完全保留和复原菜品的原始风味。大量研究表明,多物理场技术的应用可以通过调节物理场具体参数在保证食品品质的前提下,提高生产效率、减少汁液损失、减少能源消耗;例如:马超锋等^[14]用不同功率超声波解冻经壳聚糖涂膜的罗非鱼片,发现超声解冻能更好保持罗非鱼片解冻品质,450 W 超声功率作用下的罗非鱼片与传统流水解冻相比,有更低的解冻时间和解冻损失率。多物理场技术对于保留食品固有的营养成分、质构、风味和色泽有较大优势,在杀菌消毒、速冻、辅助冷冻等方面的应用越来越受到关注,这为预制菜行业提供了新型技术创新手段和发展方向;随着其不断发展和创新,未来在预制菜加工领域的应用将会越来越广泛。

2 多物理场技术在预制菜加工中的应用

在保证食品安全的前提下,国内外学者在传统解冻、冷冻、杀菌消毒的基础上不断探索超高压、超声波、电磁场、欧姆等物理场技术,用以改善预制食品品质。下面分别针对上述典型物理场技术的原理、优缺点以及在预制菜加工中的应用情况展开综述。

2.1 超声技术

超声技术是指利用超声波在物质中传播、反射时产生的振动能量,在介质中产生强大的剪切力和高温,从而达到所需加工目的的技术^[15],可应用于解冻、辅助冷冻、杀菌消毒等方面。

2.1.1 超声解冻 超声波解冻是利用超声波传播和振动的原理来加速冷冻食品解冻的方式,当超声波传导到冷冻物体内部时,声波振动产生的热量可以对冷冻食品进行解冻,穿过多种不同介质时界面分界处产生的热量最大。以冷冻食品为例,在冷冻食品冻结面与解冻面的分界处所受超声波的热效应最为显著^[16]。因此,可以通过调节超声波的频率和强度使冻结界面稳定持续地向解冻界面转化^[17],从而达到解冻的目的。

马翼飞等^[18]对比五种不同解冻方式对小黄鱼品质的影响,实验发现:超声解冻能使小黄鱼品质维持在较高水平,且超声解冻是最适合小黄鱼工业化加工的解冻方式。Chu 等^[19]采用不同功率的超声波对大黄鱼进行解冻处理,发现超声波处理可显著提高解冻效率、降低解冻损失率,解冻后的大黄鱼具有更好的色泽和新鲜度;但超声功率过大(320 W)时会破坏蛋白质微观结构,240 W 处理时能较好保持大黄鱼的品质且损伤最小,适合快速解冻。综上,在应用超声解冻时,应结合食品的物性、结构和尺寸、解冻要求等因素具体分析,选择合适的超声波频率和功率,以确保解冻过程的安全性、有效性,避免对解冻后产品的营养和理化特性造成不利影响。

2.1.2 超声辅助冷冻 超声辅助冷冻作为一项新型的冷冻技术,其作用原理是依靠超声处理过程中产生的空化效应、机械效应和热效应^[20]。通过这些超声效应对食品组织内晶核的形成和冰晶的生长进行有

效控制, 在提高冷冻速率的同时, 促进细小且均匀分布的冰晶的生成、减小冰晶对食品品质的损伤^[21]。超声波处理作用下, 冷冻食品内部会产生大量的结晶中心, 且形成的晶粒尺寸受超声频率和强度控制, 可以通过控制超声参数加速冻结过程, 获得细小而均匀分布的晶粒, 减小对预制菜微观结构的破坏。

Comandini 等^[22]以马铃薯为研究对象进行冷冻处理, 结果表明: 与对照组相比, 超声辅助处理通过降低样品过冷度, 缩短成核前时间, 并显著缩短了浸没马铃薯样品的总冷冻时间。Zhang 等^[23]利用不同功率的超声波对猪最长肌进行处理, 结果表明: 超声辅助能显著提高肌肉排的冷冻速率, 且 180 W 的实验条件下, 总冷冻时间最短, 样品内部形成的冰晶最小且分布最均匀, 但冷冻样品的解冻损失随着超声功率的增大先减小后增大, 180 W 超声功率处理下, 样品解冻损失最小。邱爽^[24]以美国红鱼为研究对象, 探究超声辅助冷冻用于美国红鱼冷冻的适应参数, 结果显示: 在样品冷藏过程中, 施加适当功率(200 W)的超声波能有效维持样品品质, 同时抑制肌原纤维蛋白的氧化变性; 当功率较高时虽然减少了解冻损失但破坏了肌原纤维蛋白的完整性, 鱼肉品质有所下降。诸多研究表明, 超声波在预制食品冷冻过程中应用潜力巨大, 特别是在提升冷冻效率、降低冷冻成本、保证冷冻食品质量和感官特性方面效果最为显著。因此, 本文可为超声辅助冷冻技术在预制菜加工中的深入研究与推广应用提供借鉴与参考。

2.1.3 超声杀菌消毒 超声波具有空化作用(即振动冲击, 破坏细胞结构和功能, 直至细胞裂解)^[25], 能够实现快速高效、无污染杀菌的目的。但是, 超声杀菌受局部杀菌范围影响较为严重, 单独使用时杀菌效果通常不能满足要求, 因此, 国内外学者^[26]尝试结合紫外线、电场、微波等技术形成组合杀菌技术; 组合技术不仅能显著提高杀菌效果, 还可以降低同等工作效率下的技术能耗。有关研究表明^[27], 在紫外线杀菌过程中加入超声波, 能有效增强杀菌效果; 这种强化过程首先体现在超声波在传播过程中会产生高剪切力与微射流, 从而对细菌体的结构造成显著破坏。Ciccolini 团队^[28]利用超声与温度组合技术对酿酒酵母进行处理, 结果表明: 超声波能破坏细胞结构, 增加细胞对热的敏感性; 与单独热处理相比, 超声与温度协同, 更容易破坏酵母细胞。超声波杀菌技术作为一

种新兴的杀菌方法, 具备快速高效灭菌的优点, 通常需要与其他技术组合使用, 以更大程度提高灭菌效率, 未来的研究将集中在优化超声波参数、探索与其他技术的协同效应以及进一步提高杀菌效果等方面。超声技术在预制菜加工中的应用原理及优缺点汇总于表 2。

2.2 超高压技术

目前, 普遍认为压强超过 100 MPa 为超高压, 其作为工业化程度较高的食品非热处理技术, 主要是利用高压使食品中的酶、蛋白质等生物高分子物质失去活性或变性^[6]。在超高压条件下, 生物体高分子立体结构中的氢键结合、疏水结合、离子结合等非共有结合发生变化, 使蛋白质变性、酶失活, 细胞膜破裂、微生物菌体死亡; 同时对预制菜食品中所包含的色素、风味物质、维生素等低分子物质的共价键影响较小。鉴于超高压技术上述特点, 目前其被广泛应用于预制菜加工领域, 主要用于保持预制菜品原有的色泽、风味和营养价值。下面针对超高压技术在解冻、辅助冷冻、杀菌三个方面的应用进行综述。

2.2.1 超高压解冻 超高压解冻技术主要是通过降低样品水分冰点以达到快速解冻的效果^[16]。对比自然解冻、冷藏解冻、流水解冻等传统解冻方式, 超高压解冻具有解冻速率快、汁液损失率低、对菜品品质风味影响小等优点。Schubring 团队^[29]对比了 200 MPa 压力辅助解冻与常压 15 ℃ 流水解冻对解冻后鱼片质量的影响, 结果表明: 超高压处理显著缩短了鱼片的解冻时间、减少了滴水损失; 且超高压处理下的鱼片各项品质指标都要优于传统解冻方式。此外, 超高压加工能够不受加工样品形状和尺寸的影响, 压力都可均匀快速传递到整个样品中, 使其得到均匀处理。Li 等^[30]分析了超高压解冻和常规水浴解冻后鸡胸肉中水的状态, 评估了超高压解冻对保水能力的影响, 实验发现: 对比常规解冻, 超高压解冻的解冻损失和解冻时间均明显降低; 但若压力控制不当, 会导致蛋白质变性、降解、肉制品超微结构变化加剧^[31]。总体来看, 超高压解冻技术可以减少解冻损失, 在食品解冻方面应用前景广阔, 但由于所需成本过高、工业化解冻设备不完备等弊端, 当前未被广泛应用, 仍需要进一步开发和完善相应装备。

2.2.2 超高压冷冻 超高压冷冻是在常压浸渍冷冻过程中施加压力场进行辅助冻结的冷冻方式(速

表 2 超声技术在预制菜加工中的应用
Table 2 Application of ultrasonic technology in prefabricated dishes processing

技术	原理	优缺点
超声解冻	利用超声的热效应, 即声波振动产生的能量对冷冻食品进行解冻。调节超声波的频率和强度, 使冻结界面稳定持续地向解冻界面转化	提高解冻效率, 降低解冻损失率, 适合快速解冻; 但操作较为复杂, 需精确控制超声波频率、强度、解冻温度
超声辅助冷冻	依靠超声处理过程中产生的空化效应、机械效应和热效应	提升冷冻效率, 降低冷冻成本, 减小冰晶对食品品质的损伤, 但对设备成本和技术要求较高
超声杀菌消毒	利用超声波形成的空化作用来完成杀菌的目的	能快速高效、无污染达到杀菌目的, 但单独使用时杀菌效果一般不能满足要求。因此, 目前大多数学者都把研究放到了超声组合技术上

冻)^[32]。其作用原理为:在预制菜品冷冻过程中,通过增加压力场改变预制菜中水分的相变点即增大过冷度,从而达到调控冰晶的生长及晶核形成的目的。依据冰晶形成路径不同,超高压冷冻又可以分为压力辅助冷冻、压力转变冷冻和压力诱导冷冻三种形式^[33]。

Aubourg 等^[34]研究了高静水压预处理大西洋鲑鱼在冷冻和冷藏过程中功能和感官特性的变化,实验发现:在冷冻和冷冻储存前使用高压预处理,可以有效改善大西洋鲑鱼品质;150 MPa 处理的样品与新鲜肌肉相似,咀嚼度和硬度未受到影响;且处理后的样品感官可接受性优于冷冻鱼对照组,与新鲜鲑鱼接近。Otero 等^[35]通过对比常规空气冷冻和高压辅助冷冻对茄子纤维结构的破坏,实验结果表明:随着冷冻速率的减小和样品体积的增加,微观结构的破坏会加剧;高压辅助冷冻对茄子表面纹理损伤明显降低,并且较少依赖于样品体积。总体来看,超高压冷冻技术作为目前较为成熟的非热加工技术,已经成功商业化^[36],是预制菜速冻技术中认可度最高的一种;但由于超高压设备需要承受极高的压力,因此对设备强度和密封性有很高的要求,这极大增加了设备成本和维护难度。

2.2.3 超高压杀菌 食品加工领域中的超高压杀菌技术,通常是指将食品物料放置在柔性容器内密封,以水或者其他流体作为传压介质,在 100~1000 MPa 压力下持续处理一段时间达到杀菌的目的^[37]。其作用原理为:通过超高压破坏微生物的细胞膜和细胞壁、抑制酶的活性、影响遗传物质的复制等来实现微生物致死的目的;对比传统热处理杀菌技术,超高压杀菌主要是破坏菌体蛋白质中的非共价键,对共价键影响很小,因此能更好地保存食品原有风味和营养成分^[38]。

赵越等^[39]对鲜驼乳进行超高压处理发现,随着处理压力和时间的增加,杀菌效果得到明显提升,且 600 MPa 的超高压处理杀菌效果最佳。王雪青等^[40]研究发现高压处理猕猴桃酱与传统热处理相比有明显的护色效果,且维生素含量更高;在 700 MPa 高压下杀菌,对稳定色泽和抑制 V_C 氧化效果最佳。总体来看,超高压杀菌技术对比热处理,具有突出优势;但由于受到压力大小、加压方式、压力介质和菜品固有成分等一系列因素的影响,还需要针对特定食品选择有针对性的除菌工艺^[41],例如可通过超高压杀灭乳制品中的微生物,改善乳制品质量,加速奶酪的熟化过程;未来的研究需要进一步优化超高压杀菌工艺,降低成本,并探究超高压与其他技术的联合使用,以提

高杀菌效率和扩大其在预制菜加工中的应用范围。超高压技术在预制菜加工中的应用原理及优缺点汇总于表 3。

2.3 电磁场技术

电磁场技术作为一种新型的食品加工处理方法,可以应用于预制菜加工中以提高食品品质和保鲜效果;适宜的电磁场处理能够在不损害预制菜品质的前提下,有效保持其营养成分,并延长其储藏期^[42]。本文聚焦于高压静电场解冻、磁场辅助冷冻和微波解冻三种在预制菜加工中应用最为广泛的电磁场技术展开综述,对于提升预制菜加工质量、延长菜品保质期等具有指导意义。

2.3.1 高压静电场解冻 高压静电场解冻的作用机理主要来自两个方面:一是高压静电场的微能源作用加速氢键的断裂,从而打破了极性水分子团结构在氢键作用下的分子聚合、解散的动态平衡^[43],使得冰块都以小冰晶形式存在;二是电晕风的作用^[17],电晕风内的带电离子在冻结物料表面产生湍流和漩涡,增大了传热系数,从而达到加快解冻速率的目的。

唐梦等^[44]以冻罗非鱼为研究对象进行解冻研究,发现在 3.8 kV、5 ℃ 实验条件下,高压静电场解冻速率是对照组速率的 1.59 倍;且高压静电场解冻后,鱼片 TVB-N 值和菌落总数都低于对照组;这表明高压静电场不仅可以加速解冻,还能够抑制微生物的生长代谢。姚薇等^[45]在肉糜解冻过程中施加高压静电场,实验结果表明,在 150 kV/min 电场作用条件下,肉糜汁液流失率降低 18.71%,在解冻过程中施加高压静电场还会使得肉糜色泽更好。上述研究表明,对比传统解冻方式,高压静电场解冻具有解冻速率快、汁液损失率小、抑制微生物生长、降低蛋白质变性等诸多优势;但也有相关研究表明,高压静电场解冻技术应用于湿度过高的环境中时,有空气被击穿的可能性,存在一定的安全隐患^[43],因此该技术目前仍具有较大的改进空间。此外,高压静电场在预制菜解冻应用中的机器设备以及电压条件的优化都至关重要,相关问题有待更深入的探索。

2.3.2 磁场辅助冷冻 磁场辅助冷冻技术是通过在冷冻食品周围施加磁场,利用磁场对水分冰晶的影响促进小体积冰晶的形成,从而达到提高冷冻食品质量、延长贮藏期的目的^[46]。作为新兴速冻技术的一种,关于磁场辅助冷冻的作用机理尚无明确统一的定论^[47]。目前,主流解释分为两种^[48]:部分学者认为磁

表 3 超高压技术在预制菜加工中的应用

Table 3 Application of ultra-high pressure technology in prefabricated dishes processing

技术	原理	优势	劣势
超高压解冻	降低样品水分冰点,同时使冰的融化温度下降	解冻速率快、汁液损失率低、对菜品品质风味影响较小	成本过高,工业化设备不完备
超高压冷冻	改变水分的相变点即增大过冷度,从而达到调控冰晶的生长及晶核形成的目的	冷冻速率较少依赖于样品体积,有效延长食品保质期	设备成本和维护难度高,操作复杂
超高压杀菌	破坏微生物细胞膜和细胞壁、影响遗传物质的复制	对共价键影响很小,因此能更好地保存食品原有风味和营养成分	实施过程中影响因素较多,成本较高

场辅助冷冻技术是通过增大水分子的过冷度, 从而改善冰晶的形状和大小, 进而影响冰晶成核过程、改善冻品品质; 另外一部分学者认为是磁场打破了水分子间氢键的原有平衡状态, 破坏了氢键的网络结构, 改变了水的摩擦系数, 影响了传质传热速度, 从而改变了冷冻速率。

马国骅^[49]研究表明, 1 mT 静磁场和 1 mT 交变磁场处理后的猪肉和牛肉冰点均出现下降现象, 相变时间和整体冻结时间也明显缩短, 且 1 mT 交变磁场组相变时间分别比冰箱组缩短了 66.67%(猪肉)和 65.00%(牛肉)。Okuda 等^[50]以鲭鱼片为样品施加脉冲磁场进行冷冻处理, 发现振荡磁场可缩短鱼片冻结时间、抑制组织的冰晶损伤, 改善冻鱼品质。魏贺赟^[51]分别使用 0、15、20、30 G 直流静磁场对罗非鱼冷冻处理, 实验表明: 静磁场辅助冷冻技术能有效改善罗非鱼肉品质, 减少汁液损失; 但其品质不随磁场强度的增大而增大, 在 15 G 处理时效果最佳。尽管磁场辅助冷冻技术显示出提升食品冷冻品质的潜力, 但其作用机制尚未完全明确^[48], 且目前该技术主要停留在实验室研究阶段^[52]。未来的研究需要进一步揭示磁场辅助冷冻的作用机理, 优化设备设计, 并推动该技术从实验室走向商业应用, 以实现更广泛的食品品质提升。

2.3.3 微波解冻 微波解冻的本质^[53]是依靠电磁波对冷冻样品中的不同极性基团(主要为冷冻菜品中的水分子)作用, 使极性分子在电场中高速振荡, 分子间产生剧烈摩擦, 从而将微波能转化为热能实现解冻的效果; 其特点是具备穿透性, 可以对物料内部冻结点较低冰晶优先解冻, 物料外层未解冻的部分形似保护罩, 发挥了一定的锁水作用, 极大地降低了解冻损失率^[54]。

Peng 等^[55]以传统的解冻方法(空气解冻和水解冻)作为对照, 实验发现微波解冻能显著缩短冷冻芒果的解冻时间, 且 300 W 微波解冻时解冻过程最快, 汁液损失率最小, 感官评分最高。林而舒^[56]比较了室温解冻、微波解冻、静水解冻和冷藏室解冻四种不同的解冻方法对半刺厚唇鱼的解冻时间和鱼肉形态的影响, 结果发现, 微波解冻虽然可以极大缩短解冻时间, 但出现样品局部高温熟化现象, 这会导致脂肪氧化、蛋白质变性等问题, 也局限了后续的加工步骤。欧阳杰等^[57]对比自然解冻、流水解冻、低温解冻和微波解冻四种解冻方式对大黄鱼解冻效率和品质的影响, 结果表明, 微波解冻速率最快, 均匀性最好, 但缺点是: 蛋白质和脂肪氧化程度最高, 持水性和肌肉弹性最差。褚筱然等^[58]选取冷冻驴肉为研究对象, 采用包括微波解冻在内的五种解冻方式进行解冻, 对解冻时间和解冻后驴肉品质进行分析。实验表明, 按解冻所需时间长短依次排序为微波<超声波<流水<自然空气<低温, 在解冻品质上, 低温解冻对驴肉品质影响最小, 但耗时最长, 为 18.78 h; 微波解冻

由于所需时间最短, 解冻后的驴肉汁液流失率低且肉质较好, 也是目前首选的驴肉解冻方式。

上述研究表明, 微波解冻技术最大的优点在于解冻速率快, 但该技术目前仍存在解冻不均匀、样品局部过热的问题, 易导致菜品表面出现熟化现象。在预制菜实际加工过程中, 还应结合菜品的物料特性选择最合理的解冻方式, 在保证菜品品质的前提下实现更为高效的解冻。

2.4 欧姆加热技术

欧姆加热又被称为电阻加热或者焦耳加热, 是一种新型的加热技术^[59], 是一种在食品物料两端介入电极, 利用食品自身的电阻特性把电能转化为热能的加热方式。食品物料中含有可电离的酸或盐, 并表现出一定的电阻特性, 当有电流通过时, 在食品内部会产生电阻热效应, 从而实现加热的目的^[60]; 由于热量是从具有电阻特性的物料内部产生的, 因此这种加热技术在不依赖介质和接触界面的前提下, 就可以在食品物料内部快速均匀地进行热传递^[61]。

戴妍等^[62]对比了传统水浴加热与欧姆加热肉块两种条件下, 到一定终点温度时肉块的脂肪和蛋白质氧化动态变化情况, 结果显示: 欧姆加热处理肉块能显著缩短加热时间, 是传统水浴加热组时间的 1/6~1/2; 当加热温度达到 80 ℃, 欧姆加热处理肉块的 TBARS 值显著低于水浴加热处理组。刘蕾^[63]以冷冻金枪鱼为实验材料, 发现利用欧姆加热方式加热金枪鱼加热速度较快且加热过程电导率呈线性增加。周亚军等^[64]研究表明, 欧姆加热过程中, 被加热物料的温度分布接近均匀温度场, 即欧姆加热与传统加热方式相比加热更加均匀。美国食品加工协会的一项调查显示, 大约 35% 的果汁生产商经历过由于巴氏杀菌失败而导致果汁大规模变质的情况, 嗜酸耐热菌因其高水平的耐热性, 是导致苹果汁变质的主要原因。Kim 等^[65]对比了欧姆加热和传统加热系统对嗜酸耐热菌芽孢的抑制效果, 结果表明: 100 摄氏度的欧姆加热可以在短时间内(30 s)对苹果汁进行有效灭菌, 且对苹果汁的品质(糖度、颜色、pH)几乎没有影响。

此外, 欧姆加热不需传热面、加热均匀, 不影响食品品质; 加热速度快, 不受物料尺寸和形状的影响; 能量转化效率高, 可达 95% 以上, 应用前景十分广阔^[60]。但仍存在不少技术难题, 主要体现在以下三个方面^[66]: 一是由于欧姆加热的加热速率与食品的导电率直接相关, 加热后期, 随导电率升高, 食品加热速度难以控制; 二是在加热过程中, 样品中蛋白质、脂肪等有可能会黏附在电极表面, 影响电极稳定性的同时还会降低加热效率; 三是针对非均质的复杂食品物料, 内部各部分电阻不同, 因此, 如何对非均匀物料进行预处理, 保证通电时内部电流均匀分布是影响加工后食品品质的关键。以上多物理场技术在预制菜加工中的应用原理及优缺点见表 4。

表 4 多物理场技术在预制菜加工中的应用

Table 4 Application of kinds of multi-physical field technology in prefabricated dishes processing

技术	原理	优点	缺点
高压静电场解冻	微能源作用加速了氢键断裂;电晕风的产生	解冻速率快、汁液损失率小、抑制微生物生长、降低蛋白质变性	会出现空气被击穿现象存在一定的安全隐患
磁场辅助冷冻	增大水分子的过冷度;破坏氢键的网络结构	缩短冻结时间、抑制组织的冰晶损伤,改善冻品品质	作用机理尚无明确统一的定论
微波解冻	使极性分子在电场中快速振动,分子间产生剧烈摩擦,产生热量	解冻速率快,极大缩短解冻时间,感官评分高	出现局部高温熟化现象,易导致脂肪氧化、蛋白质变性等问题
欧姆加热	利用食品自身的电阻特性把电能转化为热能	不需传热面、加热均匀,不影响食品品质;加热速度快,不受物料尺寸和形状的影响	加热后期,食品加热速度难以控制;如何确保加热过程中电极稳定性和物料内部电流均匀分布是亟需解决的难题

3 总结与展望

文章综述了超声、超高压、电磁场以及欧姆加热等物理场技术在预制菜加工中的应用情况,明确了多物理场技术在提升预制菜的加工效率和菜品品质中的重要性。相较于传统预制菜加工技术,多物理场技术能够在更短的时间内完成食品加工过程,并在解冻、冷冻、杀菌等方面展现出独特优势,更好满足消费者对预制菜高品质、个性化、多样化的消费需求。将多物理场技术合理地应用于预制菜生产加工,不仅可以提高预制菜品品质、减少汁液损失、缩短加工时间、降低成本,还有助于研发新型预制菜品,进而拓宽预制菜的市场空间。

尽管目前已开展了比较多的相关研究,但仍存在一些问题:a.不同的食材和加工方式可能对多物理场技术有不同的适应性和效果,因此在应用时需要有针对性的研究和工艺优化。b.不同物理场间的相互作用涉及不同的物理性质和耦合作用,导致各物理场之间的耦合效应难以准确描述,最优的物理场组合和工艺参数难以确定。c.多物理场加工技术虽然在部分加工步骤中能弥补传统加工技术的不足,但仍面临严峻的考验,例如:工业化设备不完善、难以精确控制物理场条件、成本相对较高等亟待解决的难题。

今后可以围绕 3 个方面开展研究:a.考虑不同种类、不同来源食材的理化特性,构建食材加工特性数据库,深入研究其不同处理方式和工艺条件下组分的变化规律及多组分间的相互作用规律。b.构建多物理场协同作业策略模型,探究在多物理场及多尺度条件下的耦合协同增效规律与机理,精准分析多物理场对食材性质的影响以及这些性质变化与预制菜品品质之间的内在联系。c.通过人工智能、食品科学、化学、大数据分析等多学科交叉融合,创新预制菜肴预处理、预烹调、预包装、仓储物流保鲜理论与技术体系,开发更多适应于预制菜加工的工业化设备,实现多物理场加工技术的精细化管理。基于此,随着多物理场技术的持续创新、设备的集成与工艺优化,其将逐渐成为预制菜加工行业的重要工具,助力食品行业实现绿色健康和可持续性发展。

参考文献

- [1] 中国烹饪协会. T/CCA 024-2022 预制菜[S]. 北京, 2022. [Chinese Cuisine Association. T/CCA 024-2022 Prepared dishes[S]. Beijing, 2022.]
- [2] 蒋雨秀. 预制菜市场前景分析[J]. 农村新技术, 2023(4): 48-49. [JIANG Y X. Prospect analysis of prefabricated vegetable market[J]. Rural New Technology, 2023(4): 48-49.]
- [3] 曾璐瑶, 王海滨, 廖鄂, 等. 畜禽类预制菜加工技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(7): 490-499. [ZENG L Y, WANG H B, LIAO E, et al. Research progress on processing technology of livestock and poultry prepared vegetables[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(7): 490-499.]
- [4] 张德权, 刘欢, 孙祥祥, 等. 预制菜肴工业化加工技术现状与趋势分析[J]. 中国食品学报, 2022, 22(10): 39-47. [ZHANG D Q, LIU H, SUN X X, et al. Current situation and trend analysis of industrialized processing technology of prepared dishes[J]. Chinese Journal of Food Science, 2022, 22(10): 39-47.]
- [5] 李秀霞, 刘孝芳, 刘宏影, 等. 超声波辅助冷冻与低温速冻对海鲈鱼冰晶形态及冻藏期间鱼肉肌原纤维蛋白结构的影响[J]. 中国食品学报, 2019, 21(10): 169-176. [LI X X, LIU X F, LIU H Y, et al. Effects of ultrasonic-assisted freezing and low-temperature quick-freezing on ice crystal morphology and fish myofibrillar protein structure of sea bass during frozen storage[J]. Chinese Journal of Food Science, 2019, 21(10): 169-176.]
- [6] 周琳, 李轶, 赵建新, 等. 物理场新技术在鱼糜制品加工中的应用[J]. 食品科学, 2013, 34(19): 346-350. [ZHOU L, LI Y, ZHAO J X, et al. Application of new physical field technology in the processing of surimi products[J]. Food Science, 2013, 34(19): 346-350.]
- [7] 预制菜行业发展报告: 中国预制菜相关企业达 7.59 万家[J]. 新民周刊, 2023(26): 31. [Prefabricated dishes industry development report: China's prefabricated dishes related enterprises reached 75900[J]. Xinmin Weekly, 2023(26): 31.]
- [8] 赵超凡, 陈树俊, 李文兵, 等. 预制菜产业发展问题分析[J]. 现代食品科技, 2023, 39(2): 104-109. [ZHAO C F, CHEN S J, LI W B, et al. Analysis on the development of prepared vegetable industry[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(2): 104-109.]
- [9] 赵靛琳. 预制菜行业现状及问题研究[J]. 现代营销(经营版), 2021(9): 146-147. [ZHAO L L. Research on the status quo and problems of prepared food industry[J]. Modern Marketing (Management Edition), 2021(9): 146-147.]
- [10] 吴晓蒙, 饶雷, 张洪波, 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, 2019, 40(5): 1-13. [WU X M, RAO L, ZHANG H B, et al. New food processing technology to improve the quality and safety of prepared dishes[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 40(5): 1-13.]
- [11] 孙宝国, 王静. 中国传统食品现代化[J]. 中国工程科学, 2013, 15(4): 4-8,2. [SUN B G, WANG J. Modernization of Chinese traditional food[J]. Engineering Science, 2013, 15(4): 4-8,2.]

- [12] 陈怡璇. 金枪鱼新型解冻技术研究及其模型食品开发[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021. [CHEN Y X. Research on new thawing technology of tuna and development of model food[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021.]
- [13] WANG B, KONG B H, LI F F, et al. Changes in the thermal stability and structure of protein from porcine longissimus dorsi induced by different thawing methods[J]. *Food Chemistry*, 2020, 316: 126375.
- [14] 马超锋, 关志强, 李敏, 等. 超声波解冻对壳聚糖涂膜罗非鱼片的水分分布及品质相关性研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(2): 332–336, 369. [MA C F, GUAN Z Q, LI M, et al. Study on water distribution and quality correlation of tilapia fillets coated with chitosan by ultrasonic defrosting[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(2): 332–336, 369.]
- [15] 袁英髦, 曹雁平. 食品工业中超声技术现状与发展趋势[J]. 食品工业科技, 2011, 32(3): 442–445. [YUAN Y M, CAO Y P. Current status and development trend of ultrasonic technology in food industry[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2011, 32(3): 442–445.]
- [16] 叶剑, 徐仰丽, 林胜利, 等. 物理场技术在水产品冷冻冷链中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 11(22): 8194–8199. [YE J, XU Y L, LIN S L, et al. Application of physical field technology in frozen cold chain of aquatic products[J]. *Journal of Food Safety and Quality Inspection*, 2019, 11(22): 8194–8199.]
- [17] 巫宇航, 金亚美, 张孝, 等. 物理场解冻在食品领域中的研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(8): 372–379. [WU Y H, JIN Y M, ZHANG X, et al. Research progress of physical field thawing in food field[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(8): 372–379.]
- [18] 马翼飞, 刘欢, 单钱艺, 等. 不同解冻方式对小黄鱼品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 47(1): 222–228. [MA Y F, LIU H, SHAN Q Y, et al. Effects of different thawing methods on the quality of small yellow croaker[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2019, 47(1): 222–228.]
- [19] CHU Y M, TAN M T, BIAN C H, et al. Effect of ultrasonic thawing on the physicochemical properties, freshness, and protein-related properties of frozen large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) [J]. *Journal of Food Science*, 2022, 87(1): 52–67.
- [20] 孙献坤, 王庆玲, 刘瑞, 等. 超声辅助冷冻技术及其对肉品品质影响的研究进展[J]. 食品科技, 2002, 47(6): 153–158. [SUN X K, WANG Q L, LIU R, et al. Research progress of ultrasound-assisted freezing technology and its effect on meat quality[J]. *Food Science and Technology*, 2002, 47(6): 153–158.]
- [21] 邱爽, 李学鹏, 王金厢, 等. 超声波辅助冷冻技术及其在食品中的应用[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(1): 190195–195. [QIU S, LI X P, WANG J X, et al. Ultrasonic assisted freezing technology and its application in food[J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(1): 190195–195.]
- [22] COMANDINI P, BLANDA G, SOTO-CABALLERO M, et al. Effect of power ultrasound on immersion freezing parameters of potatoes[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2013, 18: 120–125.
- [23] ZHANG M C, NIU H L, CHEN Q, et al. Influence of ultrasound-assisted immersion freezing on the freezing rate and quality of porcine longissimus muscles[J]. *Meat Science*, 2018, 136: 1–8.
- [24] 邱爽. 超声波辅助冷冻对美国红鱼贮藏品质及蛋白质氧化变性的影响[D]. 锦州: 渤海大学, 2020. [QIU S. Effects of ultrasound-assisted freezing on storage quality and protein oxidation denaturation of American red fish[D]. Jinzhou: Bohai University, 2020.]
- [25] BUTZ P, TAUSCHER B. Emerging technologies: Chemical aspects[J]. *Food Research International*, 2002, 35(2-3): 279–284.
- [26] MCClements D. Advances in the application of ultrasound in food analysis and processing[J]. *Trends in Food Science and Technology*, 1995, 6(9): 293–299.
- [27] 李少华, 李中, 李翠翠. 超声波与物理场组合食品技术研究进展解读[J]. 食品安全导刊, 2021(22): 147, 151. [LI S H, LI S, LI C C. Research progress of ultrasonic and physical field combined food technology [J]. *Food Safety Guide*, 2021(22): 147, 151.]
- [28] CICCOLINI L, TAILLANDIER P, WILHEM A M, et al. Low frequency thermo-ultrasonication of *Saccharomyces cerevisiae* suspensions: Effect of temperature and of ultrasonic power[J]. *Chemical Engineering Journal*, 1997, 65(2): 145–149.
- [29] SCHUBRING R, MEYER C, SCHLUTER C, et al. Impact of high pressure assisted thawing on the quality of fillets from various fish species[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2003, 4(3): 257–267.
- [30] LI W M, WANG P, XU X L, et al. Use of low-field nuclear magnetic resonance to characterize water properties in frozen chicken breasts thawed under high pressure[J]. *European Food Researcher and Technology*, 2014, 239(2): 183–188.
- [31] JIA F, JING Y, DAI R T, et al. High-pressure thawing of pork: Water holding capacity, protein denaturation and ultrastructure[J]. *Food Bioscience*, 2020, 38: 100688.
- [32] 程丽娜. 超高压冷冻中压力及冷冻因素不同作用模式下虾蛋白变性的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017. [CHENG L N. Study on protein denaturation of shrimp under different action modes of pressure and freezing factors during ultra-high pressure freezing [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.]
- [33] 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, 2019, 42(6): 328–333. [LI L, SUN Z H, LI X Y, et al. Application of ultra-high pressure technology in frozen food processing[J]. *Food Industry*, 2019, 42(6): 328–333.]
- [34] AUBOURG S, TORRES J, SARAIVA J, et al. Effect of high-pressure treatments applied before freezing and frozen storage on the functional and sensory properties of Atlantic mackerel (*Scomber scombrus*) [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2013, 53(1): 100–106.
- [35] OTERO L, SOLAS M, SANZ P, et al. Contrasting effects of high-pressure-assisted freezing and conventional air-freezing on eggplant tissue microstructure[J]. *Zeitschrift fuer Lebensmittel-Untersuchung und-Forschung A/Food Research and Technology*, 1998, 206(5): 338–342.
- [36] TRUONG B, BUCKOW R, STATHOPOULOS C, et al. Advances in high-pressure processing of fish muscles[J]. *Food Engineering Review*, 2015, 7(2): 109–129.
- [37] 邹溪. 食品超高压杀菌技术及其研究进展[J]. 食品安全导刊, 2018(27): 184. [ZOU X. Technology of food ultra-high pressure sterilization and its research progress[J]. *Food Safety Guide*, 2018(27): 184.]
- [38] 林向阳, 陈金海, 郑丹丹, 等. 超高压杀菌技术在食品中的应用[J]. 农产品加工(学刊), 2005(1): 9–12. [LIN X Y, CHEN J H, ZHENG D D, et al. Application of ultra-high pressure sterilization technology in food[J]. *Agricultural Products Processing (Journal)*, 2005(1): 9–12.]
- [39] 赵越, 夏亚男, 刘康玲, 等. 超高压杀菌技术对鲜驼乳品质的影响[J]. 中国乳品工业, 2020, 48(1): 27–31, 37. [ZHAO Y, XIA Y N, LIU K L, et al. Effect of ultra-high pressure sterilization technology on the quality of fresh camel milk[J]. *Dairy Industry of China*, 2019, 48(1): 27–31, 37.]
- [40] 王雪青, 兰凤英, 邵汝梅. 高压对猕猴桃酱质量的影响[J]. 食品与发酵工业, 2001(8): 28–30. [WANG X Q, LAN F Y,

- SHAO R M. Effect of high pressure on quality of kiwi paste[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2001(8): 28-30.]
- [41] 钱其龙. 食品超高压杀菌技术及其研究进展[J]. *食品安全导刊*, 2017(15): 118. [QIAN Q L. Technology of food ultra-high pressure sterilization and its research progress[J]. *Food Safety Guide*, 2017(15): 118.]
- [42] 王文月, 李旋, 胡佳星, 等. 电磁场处理技术在果蔬保鲜加工中的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2025, 46(6): 398-406. [WANG W Y, LI X, HU J X, et al. Research progress of electromagnetic field treatment technology in fruit and vegetable fresh-keeping processing[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2025, 46(6): 398-406.]
- [43] 臧芳波, 吕蒙, 付永杰, 等. 高压静电场解冻技术在肉类及肉制品中的应用[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(5): 303-308. [ZANG F B, LÜ M, FU Y J, et al. Application of high voltage electrostatic field thawing technology in meat and meat products[J]. *Food and Yeast Industry*, 2021, 47(5): 303-308.]
- [44] 唐梦, 岑剑伟, 李来好, 等. 高压静电场解冻对冻罗非鱼片品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(13): 1-6. [TANG M, CEN J W, LI L H, et al. Effect of high voltage electrostatic field thawing on quality of frozen tilapia fillets[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(13): 1-6.]
- [45] 姚薇, 王标, 马玲, 等. 高压静电场冻融处理对肉糜品质的影响[J]. *农产品加工*, 2016(3): 17-19. [YAO W, WANG B, MA L, et al. Effect of freeze-thaw treatment by high voltage electrostatic field on quality of minced meat[J]. *Agricultural Products Processing*, 2016(3): 17-19.]
- [46] 张虹虹, 苏江鹏, 张伊, 等. 提高冷冻水产品品质的新型速冻技术研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(22): 192-197. [ZHANG H H, SU J P, ZHANG Y, et al. Research progress of new quick-freezing technology to improve the quality of frozen aquatic products[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(22): 192-197.]
- [47] OTERO L, RODRIGUEZ A, PEREZ-MATEOS M, et al. Effects of magnetic fields on freezing: Application to biological products[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2016, 15(3): 646-667.
- [48] 侯倩, 丁林欢, 张虹虹, 等. 磁场辅助冷冻技术在食品中的应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(22): 360-367. [HOU Q, DING L H, ZHANG H H, et al. Application of magnetic field assisted freezing technology in food [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(22): 360-367.]
- [49] 马国骅. 磁场对冷冻猪肉和牛肉品质的影响研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021. [MA G J. Effect of magnetic field on quality of frozen pork and beef [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.]
- [50] OKUDA K, KAWAUCHI A, YOMOGIDA K. Quality improvements to mackerel (*Scomber japonicus*) muscle tissue frozen using a rapid freezer with the weak oscillating magnetic fields[J]. *Cryobiology*, 2020, 95: 130-137.
- [51] 魏贺赞. 磁场辅助冻结对罗非鱼片品质变化的研究[D]. 海口: 海南大学, 2022. [WEI H Y. Study on the change of tilapia fillet quality by magnetic field assisted freezing[D]. Haikou: Hainan University, 2022.]
- [52] 翁金通, 生庆海, 刘敬科, 等. 磁场辅助低温贮藏技术在食品中的应用及研究进展[J]. *食品科学*, 2018, 44(23): 372-382. [WENG J T, SHENG Q H, LIU J K, et al. Application and research progress of magnetic field-assisted low temperature storage technology in food[J]. *Journal of Food Science*, 2018, 44(23): 372-382.]
- [53] 杨林莘. 南极磷虾肉糜的微波解冻特性研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2018. [YANG L X. Research on microwave thawing characteristics of Antarctic krill minced meat[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2018.]
- [54] 葛孟甜, 李肖婵, 林琳, 等. 不同解冻方式对早熟蟹肉理化性质及挥发性风味物质的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(8): 2181-2189. [GE M T, LI X C, LIN L, et al. Effects of different thawing methods on physicochemical properties and volatile flavor substances of premature crab meat[J]. *Journal of Food Safety and Quality Inspection*, 2019, 10(8): 2181-2189.]
- [55] PENG Y, ZHAO J H, WEN X, et al. The comparison of microwave thawing and ultra-high-pressure thawing on the quality characteristics of frozen mango[J]. *Foods*, 2022, 11(7): 1048.
- [56] 林而舒. 不同解冻方式对半刺厚唇鱼风味物质的影响[J]. *水产养殖*, 2023, 44(7): 1-5, 17. [LIN E S. Effects of different thawing methods on flavor substances of *Pachycheilus semi-spinosus* [J]. *Aquaculture*, 2023, 44(7): 1-5, 17.]
- [57] 欧阳杰, 倪锦, 吴锦婷, 等. 解冻方式对大黄鱼解冻效率和品质的影响[J]. *肉类研究*, 2016, 30(8): 30-34. [OUYANG J, NI J, WU J T, et al. Effects of defrosting methods on defrosting efficiency and quality of large yellow croaker[J]. *Meat Research*, 2016, 30(8): 30-34.]
- [58] 褚筱然, 王海洁, 杜鹏飞, 等. 不同解冻方式对驴肉品质特性的影响[J]. *山东农业科学*, 2019, 56(2): 131-137. [CHU X R, WANG H J, DU P F, et al. Effects of different thawing methods on quality characteristics of donkey meat[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2019, 56(2): 131-137.]
- [59] 王乐, 闫宇壮, 冯国勇, 等. 食品复热技术发展与应用分析[J]. *食品工业*, 2021, 42(10): 243-248. [WANG L, YAN Y Z, FENG G Y, et al. Analysis on development and application of food reheating technology[J]. *Food Industry*, 2021, 42(10): 243-248.]
- [60] 单长松, 李法德, 王少刚, 等. 欧姆加热技术在食品加工中的应用进展[J]. *食品与发酵工业*, 2017, 43(10): 269276-276. [SHAN C S, LI F D, WANG S G, et al. Application of ohmic heating technology in food processing[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2017, 43(10): 269276-276.]
- [61] 郑子涛, 金亚美, 张令涛, 等. 电场技术在食品杀菌中的研究进展[J]. *食品科学*, 2023, 44(11): 177-184. [ZHENG Z T, JIN Y M, ZHANG L T, et al. Research progress of electric field technology in food sterilization[J]. *Food Science*, 2023, 44(11): 177-184.]
- [62] 戴妍, 卢忆, 喻倩倩, 等. 欧姆加热过程对猪肉氧化和体外消化率动态变化的研究[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(5): 103-107. [DAI Y, LU Y, YU Q Q, et al. Study on dynamic changes of oxidation and *in vitro* digestibility of pork during ohmic heating[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(5): 103-107.]
- [63] 刘蕾. 金枪鱼欧姆解冻—加热过程温度分布解析及实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2016. [LIU L. Analysis and experimental study on temperature distribution during ohmic thawing and heating of tuna[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2016.]
- [64] 周亚军, 殷涌光, 王淑杰, 等. 食品欧姆加热技术的原理及研究进展[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2004(2): 324-329. [ZHOU Y J, YIN Y G, WANG S J, et al. Principle and research progress of ohmic heating technology for food[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2004(2): 324-329.]
- [65] KIM N H, RYANG J H, LEE B S, et al. Continuous ohmic heating of commercially processed apple juice using five sequential electric fields results in rapid inactivation of *Alicyclobacillus acidoterrestris* spores[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2017, 246: 80-84.
- [66] 周祖宁. 食品检测中现代检测技术的应用与分析[J]. *食品安全导刊*, 2024(20): 190-192. [ZHOU Z N. Application and analysis of modern detection technology in food detection[J]. *Food Safety Guide Publication*, 2024(20): 190-192.]