

即食小龙虾杀菌及保藏技术的研究进展

王茜¹, 王利强^{1,2}

(1.江南大学, 江苏 无锡 214122; 2.江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

摘要: **目的** 保证即食小龙虾的食品品质, 延长其货架期, 为即食小龙虾杀菌及保藏技术的发展提供理论参考。**方法** 综述即食小龙虾加工的产业现状、存在问题和发展趋势。从腐败机制出发, 分析杀菌和保藏2种工艺延长保质期的作用机制及关键技术点, 阐明其各自的优缺点, 重点探讨国内的研究进展。**结果** 现代灭菌技术可以在很大程度上减小食品品质损失, 热灭菌技术以其安全可控性在未来食品灭菌工业中仍难被取代; 现有的杀菌和保藏工艺可以延长即食小龙虾的货架期, 但仍存在不足。**结论** 探究不同栅栏因子对即食小龙虾保藏的协同作用; 从保藏机制出发构建即食小龙虾在杀菌、保藏过程中的保质与传质模型, 都是未来优化即食小龙虾杀菌及保藏工艺的重要解决方案。

关键词: 即食小龙虾; 保藏技术; 腐败机制; 栅栏因子; 研究进展

中图分类号: TS205.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)23-0098-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.23.012

Research Progress on Sterilization and Preservation Technology of Instant Crayfish

WANG Xi¹, WANG Li-qiang^{1,2}

(1. Jiangnan University, Jiangsu Wuxi 214122, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment & Technology, Jiangsu Wuxi 214122, China)

ABSTRACT: The work aims to ensure the quality of instant crayfish, prolong its shelf life and provide theoretical reference for the development of instant crayfish preservation and sterilization technology. The current industry status, existing issues and development trends of instant crayfish preservation technology were reviewed. Starting from the mechanism of spoilage, the mechanism and key technological points of sterilization and preservation for prolonging shelf life were analyzed and their advantages and disadvantages were expounded. Then, the domestic research progress was discussed emphatically. Modern sterilization technology could greatly reduce the loss of food quality, but thermal sterilization technology with its safety and controllability in the future food sterilization industry was still difficult to be replaced. Existing preservation and sterilization technology could prolong the shelf life of instant crayfish, but there were still some shortcomings. Exploring the synergistic effect of different fence factors on instant crayfish preservation and constructing the preservation and mass transfer models of instant crayfish in the process of sterilization and preservation from the preservation mechanism are both important solutions to optimize the sterilization and preservation technology of instant crayfish in the future.

KEY WORDS: instant crayfish; preservation technology; spoilage mechanism; fence factor; research progress

收稿日期: 2022-02-25

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金 (JUSRP21115); 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室自主研究课题资助项目 (FMZ201902)

作者简介: 王茜 (1998—), 女, 硕士生, 主攻食品包装技术与安全。

通信作者: 王利强 (1977—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为食品包装技术与包装机械。

小龙虾(*Procambarus clarkii*),学名克氏原螯虾,产自美国(中西部)、墨西哥、古巴,后经日本传入我国长江流域,其适应性强,易被养殖,已逐渐成为我国水产品养殖的重要品类之一。据2021年中国小龙虾产业发展报告^[1]显示,受疫情影响,2020年中国小龙虾的总产值约为3 448.46亿元,同比下降了15.07%,但产业整体发展势头依旧良好,养殖面积及产值再创新高,产品品类也由单一速冻虾仁向即食虾、速冻虾仁、速冻带壳虾尾等转变。随着现代人们生活节奏的加快,即食产品因其方便快捷、易于流通运输等优点受到广泛关注,越来越多的食品被开发成即食产品。在众多即食产品中,即食小龙虾以其肉质鲜美,富含高蛋白、低脂肪等特点深受消费者喜爱,符合当代消费者的消费需求,消费占比持续增长^[2]。即食小龙虾的开发改善了目前小龙虾制品效益低下的局面,拓宽了其产业发展的道路。

目前,我国小龙虾加工业以初加工为主。据统计,2020年小龙虾的总加工量为88.07万t左右,同比升高了约10.09%。从规模化加工分布来看,规模化加工企业主要集中在湖北、安徽、江西、江苏等省^[1],因此小龙虾产品在长距离运输过程中的保藏成为整个产业链中的关键一环。由于我国小龙虾产品保藏技术的发展相对较缓,每年因腐败而丢弃的小龙虾制品超过12%,降低了企业的效益,因此在一定程度上限制了小龙虾产业的进一步发展^[3]。此外,消费者对食品的需求也逐渐由数量向质量转变,对食品安全、营养、质构和新鲜度的要求越来越高。原料小龙虾的养殖深受地域、季节的影响,即食小龙虾产品又极易腐败变质,易引发食品安全问题。基于此,开展即食小龙虾保藏和杀菌技术的研究刻不容缓。文中在阐述即食小龙虾加工和储藏过程中的腐败机制的基础上,针对杀菌阶段和储藏阶段,分别综述了国内研究较为广泛的即食小龙虾保藏和杀菌工艺技术,指出其存在的问题,并提出解决方法,展望了即食小龙虾加工和保藏技术的未来发展趋势,以期为加快即食小龙虾在国内市场的产业化进程提供理论参考。

1 即食小龙虾腐败机制的研究进展

在加工过程中,因小龙虾肉具有较高的水分活度和蛋白质含量,因而极易受到细菌的侵袭,导致其腐败变质。在储藏期间,内源酶水解蛋白质、脂肪氧化、微生物致腐作用等都是引起虾肉腐败变质的因素^[4],其中致腐微生物的影响最显著。微生物不断分解虾肉中的营养物质以供自身代谢繁殖,菌落总数随着时间的延长呈上升趋势,同时其代谢生成的有机酸、胺类、醇类、硫化物等有刺激性气味的产物^[5],会导致虾肉制品达到腐败终点而不被接受。

在即食小龙虾的腐败进程中并非全部微生物均参与了致腐作用,仅有部分特定腐败菌参与,而其中

占有优势地位的腐败菌会因加工方式的不同而有所差异^[6],其也对腐败进程起到决定性作用。针对不同方式处理的虾制品进行优势腐败菌鉴定,进一步探究保藏工艺具有重要意义。其中,张泽伟^[5]研究发现,真空包装的即食小龙虾的优势腐败菌为短小芽孢杆菌、解淀粉芽孢杆菌、蜡样芽孢杆菌和赖氨酸芽孢杆菌等;张永进等^[7]实验研究发现,采用巴氏灭菌处理即食小龙虾的优势腐败菌为苏云金芽孢杆菌和希瓦氏菌等;刘文浩等^[8]研究结果表明,气调包装即食小龙虾的优势腐败菌为弗氏柠檬酸杆菌。

2 即食小龙虾杀菌技术的研究进展

2.1 杀菌技术

热灭菌技术是基于高温使蛋白质、核酸等高分子物质变性的原理产生的。当肉制品的中心温度达到70℃时,除耐热芽孢菌外的致病菌基本都会被杀死,因此巴氏灭菌处理可延长食品的保质期,但程度有限,且一般不能脱离低温环境而单独使用^[9]。当肉制品的中心温度维持在120℃时,数分钟即可杀死包括耐热芽孢菌在内的所有致病菌。张泽伟等^[10]通过实验发现,经高温处理后即食小龙虾的保质期较巴氏处理分别延长了24 d(4℃下保藏)和15 d(10℃下保藏)。大量研究表明^[11],热灭菌技术具有较好的可控性、安全性,因此它仍是未来肉及其制品杀菌最主要的方式。

高温会造成虾肉自身的蛋白质变性、氨基酸降解,以及风味和质构的改变^[12],这是限制热灭菌技术进一步发展的瓶颈之一。近年来,新兴的热灭菌技术通过缩短食品达到目标温度所需的时间,从而减少温度对食品品质的损伤。其中,华盛顿州立大学开发了微波辅助巴氏杀菌系统(Microwave Assisted Pasteurization System, MAPS),它利用微波(915 MHz)实现快速加热,与传统水热相比,产品的质量得到大幅改善^[13]。张泽伟^[5]利用过热蒸汽对即食小龙虾进行灭菌,与传统传热相比,增加了蒸汽冷凝在食品表面释放大量热的过程,实现了快速升温。郭力^[14]采用变温灭菌技术(Variable Retort Temperature Sterilization, VRTS)处理即食小龙虾,通过分阶段升温,缩短了每阶段的升温时间,提高了即食小龙虾的感官品质,但该技术对升控温系统和设备的要求较高,目前还未应用于产业化生产。

2.2 现代杀菌工艺

2.2.1 辐照杀菌技术

辐照杀菌技术将高能射线(X-射线、 γ -射线和电子射线等)或水辐解产生的活性自由基作用于病原微生物的DNA,从而达到灭菌效果^[15]。与传统保藏技术相比,辐照杀菌技术具有能耗少、保藏效果突出

等特点,食品品质的损失小。采用辐照灭菌技术时必须严格控制辐照的剂量,大剂量的辐照会增强虾肉的脂质氧化、蛋白质水解和色素降解^[16-17],导致虾肉的颜色变暗、肉质软烂,从而缩短其保质期。同时,由于虾肉具有高水分活度,虾肉内的含硫氨基酸易降解生成含硫的挥发性物质,会产生令人不愉快的“辐射味”^[18]。陈东清等^[19]的研究结果表明,即食小龙虾的最佳电子束辐照量为6 kGy,此剂量可最大限度地保证虾肉的品质,降低辐照引起的品质劣变,在常温下贮藏时,虾的保质期可达到10 d以上。

目前,已有60多种辐照食品在40多个国家和地区得到批准^[20]。在国外,此技术已经得到广泛研究和应用,国内在这方面的研究和应用相对较少,主要原因在于消费者对其安全性存疑,因此社会媒体应对其安全性进行报道,食品组织也应进一步出台相关规定表明其安全性。此外,在对即食小龙虾包装系统进行辐照处理时,还应考虑包装材料的影响,如不同厚度、不同种类包装材料的辐照穿透能力,辐照对包装材料的化学迁移速率等^[21],这些因素都需要科研人员进一步探究。

2.2.2 超高压杀菌技术

超高压杀菌技术利用100~1 000 MPa的超高压压力致使病原菌的细胞膜及细胞壁的渗透性发生剧烈变化,抑制酶活性和遗传物质复制,从而达到灭菌保鲜的效果^[22]。超高压杀菌技术的保藏效果受到压力、处理温度、保压时间、微生物的种类状态、升/卸压处理过程等因素的影响^[23-24]。在一定范围内,压力越大,保压时间越长,或处理的环境越严苛(低于15℃或高于30℃,强酸强碱等),灭菌效果越好。Shi等^[25]通过实验得出,上述参数会显著影响虾肉的品质,且与品质损失呈正相关,因此平衡两者的关系、探究最佳工艺参数是超高压灭菌技术的重要研究方向。其中,周蓓蓓等^[26]以熟制小龙虾虾仁为研究对象,采用响应面法证明在40.3℃条件下加压350 MPa,并维持30.3 min,可达到商业无菌,且品质损失相对最小。谢慧明等^[27]直接以小龙虾中的葡萄球菌为研究对象,建立了灭菌模型,探究出满足进出口安全要求的灭菌条件:压力>343.24 MPa,温度>55℃,时间>10.95 min。

超高压灭菌在常温下即可实现,且只作用于物料的非共价键,对小分子物质(如氨基酸、色素等)不起作用,因此超高压灭菌处理可以最大程度地保留食品的口感^[28],是一种绿色的保藏技术,其未来的发展前景光明。由于超高压杀菌技术存在设备体量大、成本高、一次性可处理物料少、无法实现连续生产等问题,因此只能加工软包装产品,局限性较大。此外,超高压杀菌技术对于包装材料本身的传质性能也存在显著影响^[29]。目前,日本、美国,以及一些欧洲国家在超高压杀菌技术的研究方面一直走在前列,国内无论是在研究深度还是广度上都与之存在较大差距,

还处在研究和应用的初级阶段^[30],仅有极少数经超高压处理的食物进入市场,且国内外均未见超高压处理的即食小龙虾产品出现。

3 即食小龙虾保藏技术研究进展

3.1 低温保藏

一般来说,20~40℃为微生物最适宜的生长环境^[31]。在低于5℃时,腐败菌的代谢活动、氧化反应、酶反应都会变得缓慢或者停止,低温可延长即食小龙虾的保质期。在0~4℃时,部分嗜冷菌仍可低速繁殖,因此冷藏保藏的货架期较短^[32],且在离开低温环境后腐败菌会重新“苏醒”,进而引起小龙虾的腐败变质。较之冷藏保藏,冻藏保藏的保藏效果更优,且保藏温度越低,越有利于减少汁液流失率,减缓质构变化和脂质氧化水解的进程^[33],即虾肉品质的损失越小。吴晨燕等^[34]实验表明,在4℃时,即食麻辣小龙虾能保藏4周而不变质,而在-18℃条件下其保质期则长达4个月。此外,冻结速度对即食小龙虾品质也有显著影响,快速冻结可降低虾肉品质的损失程度^[35]。这是由于缓慢冻结会导致大冰晶的形成,快速冻结可使虾肉细胞内外都生成了微小、量多且分布均匀的冰晶。赵立等^[36]将熟制小龙虾肉经-60℃的速冻后保藏于-18℃环境下,发现6个月后仍可食用,甚至较刚熟制加工后的肉质在感官、营养价值、风味上都有所提高。

低温保藏技术在即食小龙虾中已广泛应用,但需要配套冷库及冷链物流等设备,这增加了生产成本和能耗,且一旦设备出现故障或操作人员出现失误,将会造成很大的经济损失。随着技术的不断进步,新的制冷技术随之产生,YOO等^[37]提出用冷冻剂制冷的技术,冷冻剂与食品的温差较大,且冷冻剂的沸腾使得表面传热率更高,因此冻结速度更快,此技术无需机械制冷设备,仅需要低温储罐和喷涂设备即可实现。由于此技术易导致食品的变形,会影响售卖,冷冻剂的成本一般也较高,因此该技术还无商业应用的实例。此外,现代产业也对低温保藏技术提出了更高要求,应实现由传统技术向现代产业系统的转变,如与其他专业相结合,研发高效率、高稳定性的温控制冷系统,以及利用建模分析冷藏过程中的温度分布^[38],进而探究能耗更小、品质损失更小的冻结速度和温度。

3.2 添加保鲜剂

保鲜剂又称防腐剂,可抑制微生物的呼吸作用,使微生物缺少提供能量的物质,从而难以维持正常的新陈代谢和细胞膜的完整性,继而导致微生物的死亡^[39],主要包括化学保鲜剂和天然保鲜剂等。魏静^[40]比较了12种天然保鲜剂、化学保鲜剂对即食小龙虾

的保藏效果, 结果表明, 化学保鲜剂——乙二胺四乙酸二钠的保藏效果相对最佳, 在其质量分数为 0.02% 时即可使即食小龙虾在 30 °C 下保存 7 d。由于化学保鲜剂的安全性低于天然防腐剂的安全性, 因此化学保鲜剂在即食性水产品中的实际应用较少^[41-42], 天然保鲜剂的价格较高, 且存在改变食品颜色和风味的可能性。单一保鲜剂一般只针对 1 种或几种菌落有抑菌性, 保藏的局限性较大, 因此出现了复配型保鲜剂。一方面复配型保鲜剂减少了单一保鲜剂的用量, 降低了成本, 另一方面又增强了单一保鲜剂的保藏效果^[43]。于晓慧^[44]制备了可应用于即食小龙虾的最佳组合浓度的复配型保鲜剂, 经处理后优势腐败菌柠檬酸杆菌 Y3 的细胞壁溶解、细胞质溶出, 其形态严重破损、边缘模糊不清, 灭菌效果较明显。不过, 该作者只探究了特定加工方式下的保藏效果, 未对其他加工方式下的可行性做进一步探究。

高浓度、长时处理可达到更好的抑菌效果, 但这也易使病原微生物产生一定的抗性, 尤其是添加过多的化学保鲜剂必定会给人们的健康带来影响, 因此不能过分追求保质期而多加、乱加保鲜剂。此外, 为了弥补单一保鲜剂的不足, 未来一方面应针对不同加工方式处理的即食小龙虾进行复配保鲜剂的研究, 另一方面也要研发具有水溶性、兼顾抗氧抗菌性的高效保鲜剂。

3.3 保鲜包装

保鲜包装利用包装材料为物料建立一个独立于外界环境的适于储存的微环境。气调保鲜包装 (Modified Atmosphere Packaging, MAP) 针对物料自身性质建立特定的气氛环境^[45]。真空保鲜包装 (Vacuum Packaging, VP) 通过抽出包装内的空气建立真空无氧的环境。从保藏机制可以看出, VP 不能用于以优势腐败菌为厌氧菌的物料的保藏, 根据张泽伟^[5]对真空包装即食小龙虾优势腐败菌的鉴定可知, 从贮藏终点分离出的 4 类优势腐败菌为兼性厌氧菌, 因此 VP 只能延缓即食小龙虾的腐败变质, 还应与其他保藏技术结合进行复合保藏^[46]。相较于 VP, MAP 的保藏效果更优, 但其气氛组成应根据特定物料进行探究确定, 同时还应综合考虑环境温湿度、光照等的影响, 其成本更高, 目前还未见应用于即食小龙虾的研究报道。Chen 等^[47]探究了冷冻龙虾尾的最佳气体体积比, CO₂/O₂/N₂ 的体积比为 8:1:1。Djordjevi 等^[48]的研究结果表明, 当 CO₂ 的体积分数为 50% 时, 抑制病原菌生长的效果显著。

气调保鲜及真空保鲜包装均未改变食品成分而达到了保藏效果, 食品品质基本不会损失, 但这 2 种包装技术也对包装材料的研发方面提出了更高要求, 应用于此技术的包装材料应具有优良的阻隔性能和力学性能, 且保藏效果与包装材料的阻隔性能呈正相

关。李肖婵^[46]探究了不同材料的真空包装对即食小龙虾保藏效果的影响, 结果表明, PET/AL/PA/PP 复合蒸煮袋的性能较优异, 但此材料的成本相对较高。由此可见, 研发高性价比的包装材料, 尤其是将功能性薄膜运用于保藏包装技术是未来的重要课题之一^[49]。

4 存在的问题及解决办法

4.1 栅栏因子理论

德国 Leistner 博士^[50]提出的栅栏因子理论认为, 可以通过某些抑制病原菌生长的因子 (如温度、pH 值、防腐剂、水活性、优势腐败菌等)^[51]打破其内部平衡, 减缓微生物的致腐效应, 或致其死亡。同时, 根据即食小龙虾的腐败机制可知, 影响虾肉腐败的因素较多, 采用单一的保藏技术都存在一定程度的局限性, 利用不同栅栏因子及其交互作用, 从多角度、多阶段即可实现更经济安全的保藏效果。瞿桂香等^[52]基于高剂量辐照会带来食品安全问题的考虑, 对即食椒盐小龙虾采用辐照与真空联用的保藏技术, 结果表明, 真空包装的引入可以减少辐照剂量, 并达到了相同的保藏效果。不同的栅栏因子往往具有协同作用, 保藏效果会优于单纯叠加, Ouattara 等^[53]将高能射线因子与抗菌剂因子联用, 证明 γ -射线辐照技术与抗菌涂层技术具有协同效应, 较未处理的熟制虾, 经保藏处理后其保质期延长了 5 d。李肖婵^[46]将温度、气氛和防腐剂 3 种栅栏因子结合, 此保藏技术可使即食小龙虾在 37 °C 环境下的保藏时间长达 4 个月, 远超目前市场上现有产品的保质期, 但未评价此技术在虾肉感官、质构等方面的损失。此外, 不仅是即食小龙虾的保藏, 整个食品行业的保藏都在往多栅栏因子协同保鲜的方向发展^[54-56]。

4.2 数值模型的建立

单一技术存在的局限性同样可以通过自身技术参数的优化加以解决。近年来, 计算机数值模拟技术迅速发展, 以理论推算为基础的数值方法被广泛应用于食品杀菌和保藏工艺优化中^[57]。针对食品的数值模型研究始于 20 世纪 70 年代, 研究至今已基本实现食品在加工保藏阶段中的物料变化和参数条件的精准控制, 可以最大程度地保证食品品质, 提高能源的利用率和转化率^[58]。目前, 常用的模型包括热传质模型、菌落生长-失活模型、食品货架期模型等, 这些研究主要集中于罐装固体食品和灌装液体食品, 针对即食小龙虾的模型研究鲜有报道。以计算流体力学 (CFD) 在即食小龙虾热灭菌过程数值模拟中的应用为例, CFD 即采用各种离散化的数学方法建立传热和微生物热致死模型, 预测食品在热灭菌过程中的温度变化、温度分布及微生物致死情况, 为进一步优化即食小龙虾热杀菌工艺提供了理论基础。

5 结语

现代消费者对即食小龙虾食品安全、品质、风味等方面的要求越来越高,为了进一步推动其在国内市场的产业化进程,亟需优化即食小龙虾的杀菌和保藏技术。未来,一方面应依据栅栏因子理论,发展多种栅栏因子联用的保藏技术,此技术可以很好地解决单一保藏技术面临的瓶颈,既保证了食品的品质和安全,又降低了能耗和成本,符合可持续发展的要求;另一方面,要与多学科交叉合作探究保藏机制,从机制出发优化工艺参数,并配套研发相关设备,提高控制的精度和灵敏度,将新技术落地,以推动小龙虾产业的发展。

参考文献:

- [1] 佚名. 中国小龙虾产业发展报告(2021)[J]. 中国水产, 2021(7): 27-33.
Anon. Development Report of Crayfish Industry in China (2021)[J]. China Fisheries, 2021(7): 27-33.
- [2] 江杨阳. 小龙虾低温贮藏品质变化规律及其腐败菌鉴定[D]. 杭州: 浙江大学, 2019: 23-24.
JIANG Yang-yang. Studies on the Quality Changes of Red Swamp Crayfish and Its Specific Spoilage Organisms during Low Temperature Storage[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019: 23-24.
- [3] 李楚君, 涂宗财, 温平威, 等. 中国小龙虾产业发展现状和未来发展趋势[J]. 食品工业科技, 2022, 43(8): 463-470.
LI Chu-jun, TU Zong-cai, WEN Ping-wei, et al. Present Situation and Future Development Trend of Crayfish Processing in China[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(8): 463-470.
- [4] 王芳, 周国燕. 甲壳类水产品变质问题和低温保鲜及其辅助技术的研究进展[J]. 食品与发酵科技, 2021, 57(4): 106-112.
WANG Fang, ZHOU Guo-yan. Advances in the Research on the Deterioration of Crustacean Aquatic Products and the Low Temperature Preservation and Its Auxiliary Technologies[J]. Food and Fermentation Sciences & Technology, 2021, 57(4): 106-112.
- [5] 张泽伟. 过热蒸汽进行调味小龙虾杀菌的研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2019: 16-17.
ZHANG Ze-wei. Study on Sterilization of Seasoned Crayfish (Procambarus Clarkii) by Superheated Steam[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2019: 16-17.
- [6] 沈春玉, 赵玉巧, 颜冬梅. 鱼类产品中优势腐败菌、天然防腐剂及保鲜技术的研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2020, 31(3): 172-178.
SHEN Chun-yu, ZHAO Yu-qiao, YAN Dong-mei. Research Progress on Specific Spoilage Organisms, Natural Preservatives and Preservation Technology in Fish Products[J]. China Food Additives, 2020, 31(3): 172-178.
- [7] 张永进, 魏静, 王伟, 等. 巴氏灭菌即食小龙虾特定腐败菌的 16S rRNA 鉴定[J]. 渔业现代化, 2013, 40(6): 46-51.
ZHANG Yong-jin, WEI Jing, WANG Wei, et al. Molecular Identification of Specific Spoilage Organisms from Ready-to-Eat Crayfish Sterilized by Pasteurization[J]. Fishery Modernization, 2013, 40(6): 46-51.
- [8] 刘文浩, 徐晓云, 吴婷, 等. ϵ -聚赖氨酸盐酸盐对气调包装即食小龙虾的保鲜效果研究[J]. 中国调味品, 2021, 46(8): 12-16.
LIU Wen-hao, XU Xiao-yun, WU Ting, et al. Effect of ϵ -Polylysine Hydrochloride on Preservation of Ready-to-Eat Crayfish by Modified Atmosphere Packaging[J]. China Condiment, 2021, 46(8): 12-16.
- [9] BORNHORST E R, LIU Fang, TANG Ju-ming, et al. Food Quality Evaluation Using Model Foods: A Comparison Study between Microwave-Assisted and Conventional Thermal Pasteurization Processes[J]. Food and Bioprocess Technology, 2017, 10(7): 1248-1256.
- [10] 张泽伟, 吉宏武, 段伟文, 等. 两种灭菌方式对熟制小龙虾冷藏期间品质的影响[J]. 广东海洋大学学报, 2019, 39(6): 93-100.
ZHANG Ze-wei, JI Hong-wu, DUAN Wei-wen, et al. Effect of Two Sterilization Treatment on the Quality of Cooked Crayfish(Procambarus Clarkii)Product during Refrigerated Storage[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2019, 39(6): 93-100.
- [11] RUIZ V, ALONSO R, SALVADOR M, et al. Impact of Shoulders on the Calculus of Heat Sterilization Treatments with Different Bacterial Spores[J]. Food Microbiology, 2021, 94: 103663.
- [12] 葛孟甜, 李正荣, 赖年悦, 等. 两种杀菌方式对即食小龙虾理化性质及挥发性风味物质的影响[J]. 渔业现代化, 2018, 45(3): 66-74.
GE Meng-tian, LI Zheng-rong, LAI Nian-yue, et al. Effects of the Two Sterilization Methods on Physico-chemical Properties and Volatile Flavor Compounds of Ready-to-Eat Procambarus Clarkii[J]. Fishery Modernization, 2018, 45(3): 66-74.
- [13] TANG Ju-ming. Unlocking Potentials of Microwaves for Food Safety and Quality[J]. Journal of Food Science,

- 2015, 80(8): E1776-E1793.
- [14] 郭力. 小龙虾即食产品的研制[D]. 无锡: 江南大学, 2010: 44-45.
- GUO Li. Development of Ready-to-Eat Product of Crayfish[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2010: 44-45.
- [15] JAYATHILAKAN K, SULTANA K. Irradiation Preservation of Meat and Meat Products and Its Effect-a Review[J]. Journal of Meat Science, 2018, 13(1): 1.
- [16] ZHAO Li-ming, ZHANG Yin, PAN Zhong-li, et al. Effect of Electron Beam Irradiation on Quality and Protein Nutrition Values of Spicy Yak Jerky[J]. LWT, 2018, 87: 1-7.
- [17] FELICIANO C P. High-Dose Irradiated Food: Current Progress, Applications, and Prospects[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2018, 144: 34-36.
- [18] KONG Qiu-lian, YAN Wei-qiang, YUE Ling, et al. Volatile Compounds and Odor Traits of Dry-Cured Ham (Prosciutto Crudo) Irradiated by Electron Beam and Gamma Rays[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2017, 130: 265-272.
- [19] 陈东清, 汪兰, 熊光权, 等. 电子束辐照对蒸煮小龙虾品质及货架期的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2019, 37(3): 39-45.
- CHEN Dong-qing, WANG Lan, XIONG Guang-quan, et al. Effects of Electron-Beam Irradiation on the Quality and Shelf Life of Steamed Crayfish[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2019, 37(3): 39-45.
- [20] AMIT S K, UDDIN M M, RAHMAN R, et al. A Review on Mechanisms and Commercial Aspects of Food Preservation and Processing[J]. Agriculture & Food Security, 2017, 6(1): 51.
- [21] PILLAI S D, SHAYANFAR S. Electron Beam Technology and other Irradiation Technology Applications in the Food Industry[J]. Topics in Current Chemistry, 2017, 375(1): 6.
- [22] TEWARI S, SEHRAWAT R, NEMA P K, et al. Preservation Effect of High Pressure Processing on Ascorbic Acid of Fruits and Vegetables: A Review[J]. Journal of Food Biochemistry, 2017, 41(1): e12319.
- [23] 张凡, 王永涛, 廖小军. 超高压升/卸压过程对杀菌效果的影响研究进展[J]. 中国食品学报, 2020, 20(5): 293-302.
- ZHANG Fan, WANG Yong-tao, LIAO Xiao-jun. Research Progress on the Effect of Pressurization and Depressurization on High Hydrostatic Pressure Sterilization[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(5): 293-302.
- [24] SUN Sheng-qian, SULLIVAN G, STRATTON J, et al. Effect of HPP Treatment on the Safety and Quality of Beef Steak Intended for Sous Vide Cooking[J]. LWT, 2017, 86: 185-192.
- [25] SHI Liu, XIONG Guang-quan, YIN Tao, et al. Effects of Ultra-High Pressure Treatment on the Protein Denaturation and Water Properties of Red Swamp Crayfish (*Procambarus Clarkia*)[J]. LWT, 2020, 133: 110124.
- [26] 周蓓蓓, 陈小雷, 鲍俊杰, 等. 超高压加工工艺对小龙虾仁品质影响的初步研究[J]. 食品科技, 2018, 43(6): 154-160.
- ZHOU Bei-bei, CHEN Xiao-lei, BAO Jun-jie, et al. Primary Research on the Effect of Ultra-High Pressure Processing Technology on the Quality of Freshwater Crawfish Tailmeat by Response Surface Methodology[J]. Food Science and Technology, 2018, 43(6): 154-160.
- [27] 谢慧明, 张文成, 潘见, 等. 淡水小龙虾中金黄色葡萄球菌超高压杀菌模型建立[J]. 食品科学, 2006, 27(11): 214-216.
- XIE Hui-ming, ZHANG Wen-cheng, PAN Jian, et al. Modeling the Sterilization of *Staphylococcus Aureus* in Crayfish. Germ Falls by UHP[J]. Food Science, 2006, 27(11): 214-216.
- [28] 姜开新, 马丽卿. 杀菌技术在食品加工中的应用进展[J]. 食品安全导刊, 2020(17): 37.
- JIANG Kai-xin, MA Li-qing. Application Progress of Sterilization Technology in Food Processing[J]. China Food Safety Magazine, 2020(17): 37.
- [29] 路婉秋, 卢立新, 唐亚丽, 等. 超高压下食品包装的传质与微观结构的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(13): 242-249.
- LU Wan-qiu, LU Li-xin, TANG Ya-li, et al. Mass Transfer and Microstructure of Packaging during High Pressure Processing[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(13): 242-249.
- [30] LI Xiang, FARID M. A Review on Recent Development in Non-Conventional Food Sterilization Technologies[J]. Journal of Food Engineering, 2016, 182: 33-45.
- [31] COOMBS C E O, HOLMAN B W B, FRIEND M A, et al. Long-Term Red Meat Preservation Using Chilled and Frozen Storage Combinations: A Review[J]. Meat Science, 2017, 125: 84-94.
- [32] WU Suo-lian, KANG Huai-bin, LI Dong-jiao. Research Progress of Low Temperature Preservation Technology for Aquatic Products[J]. Agricultural Biotechnology, 2019, 8(5): 139-141.
- [33] LI Da-peng, QIN Na, ZHANG Long-teng, et al. Degrada-

- dation of Adenosine Triphosphate, Water Loss and Textural Changes in Frozen Common Carp (*Cyprinus Carpio*) Fillets during Storage at Different Temperatures[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2019, 98: 294-301.
- [34] 吴晨燕, 王晓艳, 王洋, 等. 熟制麻辣小龙虾冷藏和冻藏条件下的品质变化[J]. *肉类研究*, 2018, 32(5): 52-56.
- WU Chen-yan, WANG Xiao-yan, WANG Yang, et al. Quality Change of Cooked Spicy Crayfish during Refrigerated and Frozen Storage[J]. *Meat Research*, 2018, 32(5): 52-56.
- [35] 谭明堂. 鱿鱼冻藏工艺及解冻方式的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020: 20-26.
- TAN Ming-tang. Study on Frozen Storage Technology and Thawing Method of Squid[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020: 20-26.
- [36] 赵立, 陈军, 陈晓明, 等. 不同冷冻温度处理的熟制克氏原螯虾肉的营养评价[J]. *食品科技*, 2013, 38(7): 67-72.
- ZHAO Li, CHEN Jun, CHEN Xiao-ming, et al. Nutritional Evaluation in Cooked Crayfish Meat under Different Frozen Temperature Treatments[J]. *Food Science and Technology*, 2013, 38(7): 67-72.
- [37] YOO S M, SHIM J B, KIM K I, et al. Effects of Various Freezing and Thawing Techniques on Pork Quality in Ready-to-Eat Meals[J]. *African Journal of Food Science*, 2015, 9(11): 525-533.
- [38] 阙婷婷, 刘文娟, 陈士国, 等. 水产品低温保鲜技术研究现状[J]. *中国食品学报*, 2013, 13(8): 181-189.
- QUE Ting-ting, LIU Wen-juan, CHEN Shi-guo, et al. Research Progress of Low Temperature Preservation Technology in Aquatic Products[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2013, 13(8): 181-189.
- [39] BEYA M M, NETZEL M E, SULTANBAWA Y, et al. Plant-Based Phenolic Molecules as Natural Preservatives in Comminuted Meats: A Review[J]. *Antioxidants*, 2021, 10(2): 263.
- [40] 魏静. 即食小龙虾的腐败菌相分析及杀菌技术的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014: 26-39.
- WEI Jing. Analysis of Spoilage Bacteria and Study on Sterilization Technology of Instant Crayfish[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014: 26-39.
- [41] DA SILVA B D, BERNARDES P C, PINHEIRO P F, et al. Chemical Composition, Extraction Sources and Action Mechanisms of Essential Oils: Natural Preservative and Limitations of Use in Meat Products[J]. *Meat Science*, 2021, 176: 108463.
- [42] EL-SABER BATIHA G, HUSSEIN D E, ALGAMMAL A M, et al. Application of Natural Antimicrobials in Food Preservation: Recent Views[J]. *Food Control*, 2021, 126: 108066.
- [43] 王明, 张家涛, 周斌, 等. 丁香酚复合保鲜剂对腐败希瓦氏菌的抗菌作用机制[J]. *食品科学*, 2021, 42(13): 10-16.
- WANG Ming, ZHANG Jia-tao, ZHOU Bin, et al. Antibacterial Mechanism of Eugenol-Containing Composite Preservatives Against *Shewanella Putrefaciens*[J]. *Food Science*, 2021, 42(13): 10-16.
- [44] 于晓慧. 即食小龙虾保鲜剂的复配及其抑菌机理的初步研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017: 69-70.
- YU Xiao-hui. Study on Preparation of Compound Preservative of Ready-to-Eat Crayfish and Its Preliminary Antibacterial Mechanisms[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017: 69-70.
- [45] CONTE-JUNIOR C A, MONTEIRO M L G, PATRÍCIA R, et al. The Effect of Different Packaging Systems on the Shelf Life of Refrigerated Ground Beef[J]. *Foods (Basel, Switzerland)*, 2020, 9(4): 495.
- [46] 李肖婵. 即食风味小龙虾的复合保鲜工艺研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020: 36-43.
- LI Xiao-chan. Study on the Compound Preservative Technology of Ready-to-Eat Flavored Crayfish[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020: 36-43.
- [47] CHEN Gong, GUTTMANN R P, XIONG Y L, et al. Protease Activity in Post-Mortem Red Swamp Crayfish (*Procambarus Clarkii*) Muscle Stored in Modified Atmosphere Packaging[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(18): 8658-8663.
- [48] DJORDJEVIĆ J, BOŠKOVIĆ M, STARČEVIĆ M, et al. Survival of *Salmonella* SPP. in Minced Meat Packaged under Vacuum and Modified Atmosphere[J]. *Brazilian Journal of Microbiology*, 2018, 49(3): 607-613.
- [49] SANI M A, AZIZI-LALABADI M, TAVASSOLI M, et al. Recent Advances in the Development of Smart and Active Biodegradable Packaging Materials[J]. *Nanomaterials (Basel, Switzerland)*, 2021, 11(5): 1331.
- [50] LEISTNER L. Further Developments in the Utilization of Hurdle Technology for Food Preservation[J]. *Journal of Food Engineering*, 1994, 22(1): 421-432.
- [51] PUTNIK P, PAVLIĆ B, ŠOJIC B, et al. Innovative Hurdle Technologies for the Preservation of Functional Fruit Juices[J]. *Foods (Basel, Switzerland)*, 2020, 9(6): 699.

- [52] 瞿桂香, 马文慧, 钱文霞, 等. 不同剂量电子束辐照即食小龙虾的品质分析[J]. 食品科技, 2020, 45(10): 155-161.
- QU Gui-xiang, MA Wen-hui, QIAN Wen-xia, et al. Quality Changes of Instant Crayfish Irradiated by Different Electron-Beam[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(10): 155-161.
- [53] OUATTARA B, SABATO S F, LACROIX M. Combined Effect of Antimicrobial Coating and Gamma Irradiation on Shelf Life Extension of Pre-Cooked Shrimp (*Penaeus* spp)[J]. International Journal of Food Microbiology, 2001, 68(1/2): 1-9.
- [54] 李娜, 谢晶. 鱿鱼保鲜技术的研究进展[J]. 包装工程, 2018, 39(1): 40-46.
- LI Na, XIE Jing. Research Progress of Preservation Technology of Squid[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(1): 40-46.
- [55] ISHAQ A, SYED Q A, EBNER P D, et al. Multiple Hurdle Technology to Improve Microbial Safety, Quality and Oxidative Stability of Refrigerated Raw Beef[J]. LWT, 2021, 138: 110529.
- [56] ROBICHAUD V, BAGHERI L, SALMIERI S, et al. Effect of Γ -Irradiation and Food Additives on the Microbial Inactivation of Foodborne Pathogens in Infant Formula[J]. LWT, 2021, 139: 110547.
- [57] ROOHI R, HASHEMI S M B. Experimental, Heat Transfer and Microbial Inactivation Modeling of Microwave Pasteurization of Carrot Slices as an Efficient and Clean Process[J]. Food and Bioprocess Processing, 2020, 121: 113-122.
- [58] 刘东红, 徐恩波, 邹明明, 等. 复杂食品体系及食品加工过程的模型与分析: 现状及进展[J]. 中国食品学报, 2019, 19(10): 1-10.
- LIU Dong-hong, XU En-bo, ZOU Ming-ming, et al. Modeling and Analysis of Complex Food Systems and Processes: Status and Advance[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(10): 1-10.

责任编辑: 彭颖