

即食肉制品微生物污染及其控制技术研究进展

张志刚¹, 林祥木¹, 胡涛¹, 邹忠爱^{1,2}, 苏永裕¹, 邵乐乐¹
(1.厦门银祥集团有限公司, 肉食品安全生产技术国家重点实验室, 福建 厦门 361100;
2.厦门华厦学院环境与公共健康学院, 福建 厦门 361024)

摘要: 即食肉制品营养丰富、方便快捷, 深受消费者喜爱。然而即食肉制品在加工、贮藏、运输和销售等环节极易受到单增李斯特菌、金黄色葡萄球菌、沙门氏菌等微生物的污染。本文主要综述近年来即食肉制品微生物污染控制技术, 如热处理技术、非热处理技术、抑菌剂和包装技术等研究进展, 探讨各种控制技术的技术特点和优缺点, 以期对各种控制技术在即食肉制品加工中的应用提供参考。

关键词: 即食肉制品; 巴氏杀菌; 高压加工; 抑菌剂; 可食用涂膜

Microbial Contamination of Ready-to-Eat Meat Products and Its Control: A Review

ZHANG Zhigang¹, LIN Xiangmu¹, HU Tao¹, ZOU Zhongai^{1,2}, SU Yongyu¹, SHAO Lele¹

(1.State Key Laboratory of Food Safety Technology for Meat Products, Xiamen Yinxiang Group Co. Ltd., Xiamen 361100, China;
2.College of Environment and Public Health, Xiamen Huaxia University, Xiamen 361024, China)

Abstract: Ready-to-eat meat products are deeply loved by consumers due to their nutritional richness and easiness to consume. However, ready-to-eat meat products are easily contaminated by *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus* and *Salmonella* spp. during processing, storage, transportation and distribution. This paper reviews the methods currently used to control microbial contamination of ready-to-eat meat products, including thermal processing, non-thermal processing, preservation and packaging technologies, with focus on their characteristics, advantages and disadvantages. We expect that this review can provide useful information for the application of microbial control technologies in the processing of ready-to-eat meat products.

Keywords: ready-to-eat meat products; pasteurization; high pressure processing; antimicrobials; edible films

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20191107-269

中图分类号: TS251.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-8123 (2020) 01-0094-09

引文格式:

张志刚, 林祥木, 胡涛, 等. 即食肉制品微生物污染及其控制技术研究进展[J]. 肉类研究, 2020, 34(1): 94-102.

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20191107-269. <http://www.rlyj.net.cn>

ZHANG Zhigang, LIN Xiangmu, HU Tao, et al. Microbial contamination of ready-to-eat meat products and its control: a review[J]. Meat Research, 2020, 34(1): 94-102. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20191107-269. <http://www.rlyj.net.cn>

肉制品营养丰富, 不仅含有大量蛋白质和脂肪, 而且还含有多种维生素、钙、磷等人体所需元素。据统计, 2010年我国肉类总产量达7 925 万t, 2018年我国肉类总产量已达8 517 万t^[1-2]。随着人民生活水平提高和生活节奏加快, 消费者对于营养丰富、食用方便的即食肉制品需求越来越大, 然而, 由于它们在制作和销售过程中很容易被食源性致病菌污染, 因此也是导致食源性疾病爆发的主要食品种类之一^[3]。一项针对2010—2016年中国家庭食源性疾病爆发事件流性特征分析的结果表

明, 7年间共发生5 197起家庭食源性疾病, 累计发病29 210例, 在引起食源性疾病的食品中, 肉及肉制品占比达到16.6%^[4]。同时, 2006—2017年浙江省食源性疾病爆发检测资料分析表明, 细菌引起的食源性疾病事件数和病例数分别占原因查明总数的70.85%和82.79%, 其中肉与肉制品占比12.03%^[5]。因此, 对于微生物的控制是即食肉制品加工所面临的突出问题。传统热杀菌技术虽然能有效灭活微生物, 但是高温对即食肉制品的营养和感官品质产生不良影响, 随着生活水平的提高, 消费者对

收稿日期: 2019-11-07

基金项目: “十三五”国家重点研发计划重点专项(2016YFD0400403)

第一作者简介: 张志刚(1968—)(ORCID: 0000-0002-8344-4779), 男, 研究员, 学士, 研究方向为食品加工与安全。

E-mail: zzzxmcn@163.com

食品品质的需求进一步提高,因此新型热杀菌技术和非热杀菌技术越来越受到行业重视。本文介绍即食肉制品中常见的污染微生物,并进一步综述近年来控制即食肉制品中微生物的最新研究进展,以期对即食肉制品加工行业提供参考和借鉴。

1 肉制品分类及即食肉制品概述

因饮食习惯、物产资源和宗教文化等的差异,各个国家和地区的肉制品多种多样,分类方法也不尽相同。美国农业部农产品销售局编制的肉类采购规范将肉制品分为猪肉制品、牛肉制品、可食副产品和香肠制品四大类^[6]。美国肉制品各分类标准虽然模糊,但因其管理系统十分完善,使美国成为全球肉类制品生产和消费名列前茅的国家。日本农业标准将市场上的肉制品分为四大类:火腿与培根、鲜肉火腿、香肠和咸牛肉,且所有产品均采用HS(即商品分类与编码协调制度)编码^[7]。GB/T 26604—2011《肉制品分类》^[8]根据肉制品的加工工艺将我国肉制品分为腌腊肉制品、酱煮肉制品、熏烧烤烤肉制品、干肉制品、油炸肉制品、肠类肉制品、火腿肉制品、调制肉制品和其他肉制品九大类。

即食肉制品是指经过部分或完全熟制,不需烹调或只需简单加热就能食用的肉制品^[9]。市场上常见的即食肉制品种类繁多,加工工艺也不尽相同。Nikmaram等^[10]曾将即食肉制品分为熟肉制品和热狗,前者主要包括烤(煮)火腿、鸡肉卷、烤牛肉、咸牛肉和萨拉米等。我国常见的熟肉制品主要有酱卤肉、熏烤肉、腌肉、腊肉、油炸肉和风干肉等。尽管即食肉制品多种多样,但由于其蛋白质、脂质含量丰富,在加工、运输及销售过程中极易受到微生物的污染。2003—2015年,中国发生的1 050起校园食源性疾病事件中,肉与肉制品微生物污染是重要的诱因^[11]。

2 即食肉制品中常见污染微生物

单增李斯特菌(*Listeria monocytogenes*),属革兰氏阳性、兼性厌氧菌,是一种人畜共患致病菌,在感染者中致死率为25%~30%,可导致败血症、脑膜炎和胃肠炎等;该菌对营养要求不高,可在较广pH值范围内(4.1~9.6)和高盐浓度(高达13%)条件下存活^[12]。水产品、乳及乳制品、肉制品及家禽均有一定比例的污染,85%~90%人类病例主要通过食用上述食品感染^[13]。李斯特杆菌的致病性与该菌的毒力、宿主年龄和免疫情况有关,各类免疫功能低下的人群及新生儿、孕妇及40岁以上成人易感者;健康成人可出现轻微类似流感症状,其他人群可出现严重症状甚至死亡。尽管鲜肉

中可能存在单增李斯特菌,但即食肉制品中单增李斯特菌主要是加工后污染的^[14]。Pesavento等^[15]对意大利肉制品进行检测,发现禽肉制品中单增李斯特菌的污染率为24.5%,牛肉制品中为24.4%,猪肉制品中为21.4%,而在即食肉制品火腿中的污染率为37.5%,三明治中为25.0%。孟赫诚^[16]随机抽取46份广州市部分超市及农贸市场熟食柜台的熟肉制品,通过聚合酶链式反应及生化方法鉴定出样本中有4株单增李斯特菌。1998年以来,单增李斯特菌在美国即食肉制品中的爆发时常发生,但总体呈下降趋势^[17]。2015年对欧盟各成员国的调查表明,在2 847份即食鱼制品和2 366份即食肉制品中单增李斯特菌污染水平分别为3.5%和4.0%^[18]。

金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)是广泛存在于自然界和人体皮肤上的兼性厌氧革兰氏阳性菌,素有“嗜肉菌”的别称,常存在于人体的鼻黏膜、肠道和皮肤等部位,通常不具有致病性,是皮肤化脓感染时常见的病原菌^[19]。虽然金黄色葡萄球菌不具有致病性,但其产生的肠毒素会导致中毒。食品易受其污染,导致人体食物中毒,主要症状有发烧、腹泻和恶心呕吐;金黄色葡萄球菌可分泌20多种毒性蛋白,常见的有7种,可耐高温,100℃加热30 min时不被破坏,成人仅食用100 ng肠毒素A即可导致食物中毒^[19]。当金黄色葡萄球菌污染量达到10⁶ CFU/g以上时,其产生的肠毒素可引起严重食物中毒^[20]。从2012—2013年的检测结果来看,广东省熟肉制品中最主要的致病菌是金黄色葡萄球菌,总体检出率为3.7%,其中酱卤类、熏烤类和蒸炒类熟肉制品检出率分别高达4.6%、5.3%和7.9%^[21]。2016年对我国即食肉制品微生物污染水平的调查发现,1.14%(39/3 417)被测样品中金黄色葡萄球菌检出量超过100 CFU/g,其中烟熏类、酱肉类和油炸类即食肉制品污染率分别达到0.54%、1.57%和1.08%^[11]。

此外,乳酸菌、肉毒梭状芽孢杆菌、沙门氏菌、蜡样芽孢杆菌、热杀索丝菌和大肠杆菌等也是即食肉制品中常见的污染微生物^[3,11,14,22]。鲜肉原料中常含有乳酸菌,经过加工熟制后残存的乳酸菌可恢复生长,进一步成为优势菌群。当乳酸菌数量达到10⁸ CFU/g通常会导导致肉制品的腐败,如产生异味、产气、pH值下降等。人员、环境和加工设备二次污染是即食肉制品污染乳酸菌的主要来源。肉毒梭状芽孢杆菌是革兰氏阳性厌氧菌,菌体不耐热,但其孢子耐热,且产毒素;在厌氧环境中,肉毒梭状芽孢杆菌能分泌毒性较强的肉毒毒素,引起特殊的神经中毒症状,致死率、病死率极高^[22]。肉毒梭状芽孢杆菌易在无氧环境或低酸性食物中生长,如香肠、火腿和腌肉等^[22-23]。姬瑞等^[3]选用半定量风险评估软件(Risk Ranger)、快速微生物定量风险评估和食品安全数据库方法对即食熟肉制品中的主要致病菌进行风险

排序, 结果表明, 风险大小排序依次为单增李斯特菌、金黄色葡萄球菌、蜡样芽孢杆菌和沙门氏菌。

GB 29921—2013《食品安全国家标准 食品中致病菌限量》^[24]规定, 熟肉制品和即食生肉制品中沙门氏菌、单增李斯特菌和大肠埃希氏菌O157:H7均不得检出, 而金黄色葡萄球菌在同一批次5个样品中只允许有1个样品的检出量达到100 CFU/g。同时, GB 2726—2016《食品安全国家标准 熟肉制品》^[25]规定, 同一批次5个样品中只允许有2个样品的菌落总数和大肠菌群检出量达到 10^4 CFU/g和10 CFU/g。综上所述, 由于即食肉制品容易污染微生物, 且即食肉制品污染微生物, 尤其是致病菌对人群危害极大, 因此, 控制微生物污染对即食肉制品的安全十分重要。

3 即食肉制品污染微生物控制技术

3.1 热处理技术

食品的杀菌方法多种多样, 物理方法包括热处理、辐照、高压等, 化学方法包括各种防腐剂和抑菌剂等。虽然杀菌方法千差万别, 但热处理杀菌是食品工业最有效、最经济、最简便的杀菌方法, 因而也是使用最广泛的杀菌方法, 同时也成为评价其他杀菌方法效果的基本参照。即食肉制品常见的热处理杀菌技术为巴氏杀菌, 其他热处理技术还包括红外加热、微波加热和欧姆加热等。

3.1.1 巴氏杀菌

巴氏杀菌是典型的应用于食品工业的热杀菌方式, 即食肉制品包装前后均可采用巴氏杀菌。包装前的巴氏杀菌为直接处理即食肉制品表面, 一般仅需几秒至几分钟, 可使李斯特杆菌数量减少3~4 (lg (CFU/g)); 包装后的巴氏杀菌比包装前需要更长的杀菌时间, 但杀菌更彻底^[26]。Selby等^[27]曾报道, 55、60、65 °C巴氏杀菌处理博洛尼亚香肠中李斯特杆菌的D值(在一定条件下杀死90%活菌数所需要的时间)分别为112~122、7~14、1~2 min。Murphy等^[28]比较博洛尼亚香肠包装前和包装后蒸汽巴氏杀菌效果, 发现包装前巴氏杀菌仅需2 s, 而包装后需2.5 min才可使李斯特杆菌数量减少2 (lg (CFU/g))。周本谦^[29]分别采用水浴巴氏杀菌和微波杀菌处理烟熏火腿, 结果表明, 水浴巴氏杀菌效果远优于微波杀菌处理, 其中80~85 °C杀菌并急速冷却处理工艺能最有效延长烟熏火腿的保质期。

巴氏杀菌效率受杀菌温度、包装大小和产品表面粗糙度等因素影响^[30]。Murphy等^[31]采用96 °C巴氏杀菌杀灭即食火鸡鸡胸肉制品中的李斯特杆菌, 结果表明, 杀菌效率与产品表面粗糙度有关, 杀灭7 (lg (CFU/cm²))的李斯特杆菌需要50 min。此外, 巴氏杀菌与抑菌剂可表现出较好的协同作用。Mangalassary等^[32]采用65 °C、

32 s巴氏杀菌使博洛尼亚香肠中李斯特杆菌数量减少3.5~4.2 (lg (CFU/cm²)), 且在此后12周的冷藏中该菌数量基本保持不变, 而采用巴氏杀菌结合乳酸链球菌素(Nisin, 2 mg/mL)处理的样品在冷藏第2周末检测到李斯特杆菌。Chen等^[33]采用包装后巴氏杀菌(71、81、96 °C)结合片球菌素(3 000、6 000 AU)处理法兰克福香肠, 并将其分别于4、10、25 °C贮藏, 结果表明, 所有结合抑菌剂处理组中李斯特杆菌数量在贮藏7周内均无明显增加。尽管即食肉制品经过前期熟制加热, 但巴氏杀菌仍可导致产品化学、营养及感官品质的变化^[34]。

3.1.2 其他热处理技术

红外线是一种波长在0.75~1 000 μm范围内的非可见光, 根据波长可分为近红外线(1~3 μm)、中红外线(3~40 μm)和远红外线(40~1 000 μm)。红外加热技术就是利用红外辐射元件发出红外线, 红外线被加热物体吸收后直接转变为热能, 而且近红外波不会加热空气和介质, 因而能量转换效率更高^[35]。此外, 红外加热还具有温度易控、升温迅速、安全无污染等优点。红外加热技术多用于农产品灭酶和果蔬干制, 但随着技术的发展, 其在杀菌领域也有广泛应用且杀菌效果明显。Huang等^[36]采用近红外加热技术处理热狗, 当其表面温度分别达到70、75、80、85 °C时, 李斯特杆菌数量可分别减少1.0、2.1、3.0、5.3 (lg (CFU/g)), 表明近红外加热可有效用于杀灭即食肉制品中的李斯特杆菌。Ha等^[37]采用红外加热处理切片火腿, 50 s处理可使其表面沙门氏菌、大肠杆菌和李斯特杆菌数量分别下降4.10、4.19、3.38 (lg (CFU/g)), 且处理后样品色差和质构与未处理样品无显著差异。但由于食品物料中各组分对红外线的吸收程度不一致, 导致同一红外波长下不同食品物料受热程度不一致, 并且该技术还存在热量不易扩散等缺点^[35], 因此红外加热技术的原理仍需进一步研究。

微波是指频率0.3~300.0 GHz、波长1~100 mm的电磁波。微波加热的原理是加热物体处在微波电磁场的作用下, 加热介质材料中的极性分子间频繁碰撞而产生热量。微波加热温度上升快、能量损害小, 并且微波加热还具有选择性, 不同性质的食品物料对微波的吸收程度不同, 水分含量越高的食品物料加热速率越快。在食品行业, 微波主要应用于解冻、加热、干燥和灭菌等领域。与传统杀菌方法相比, 微波加热灭菌速率快, 更有利于保持食品的营养成分。魏亚青等^[38]采用微波加热麻辣鸡块, 处理60 s即可使鸡肉中心温度达到85 °C, 使其菌落总数降至1.5 (lg (CFU/g)), 并使其保质期从18 d延长至24 d。影响微波杀菌效果的因素主要有微波频率、微波功率和处理时间等。James等^[39]研究影响微波熏肉质量的主要因素, 结果表明, 微波功率、处理时间和试样在微波炉中的位置对产品蒸煮损失率影响较大, 采用工



业隧道式微波装置进行实验,发现熏肉的最适微波处理条件为6 kW、115 s,该条件下处理熏肉的蒸煮损失率较低,且经真空包装后可4℃保藏11~14 d。孙承锋等^[40]研究证实,微波杀菌的终温是影响其杀菌效果的关键因素,酱牛肉经2 450 MHz、750 W微波处理,可在60 s内杀死产品中大部分主要腐败菌,大大降低产品的初始菌数,且对产品的感官质量无不良影响,延长了酱牛肉的货架期。微波能量的吸收取决于食物材料的介电性和磁性,随着微波进入食品,微波强度逐渐减弱,食品表面比内部吸收更多能量、加热更快,这容易导致较深区域的加热不均匀和营养物质的损失;微波波能施加器、介电性能、热性能以及食品物料的几何形状、尺寸等都会影响加热的均匀性。

欧姆加热又称为电阻加热,电流直接通过具有导电性的食品时相应产生热量,在食品物料的两端施加电场时,导电性的食品物料会相应产生热量。水分含量极低或是干燥的物料不适用于欧姆加热^[41]。欧姆加热易操作、无污染、热能利用率高,能实现半固体及固体食品的高温快速杀菌^[42]。基于上述优点,欧姆加热广泛应用于食品杀菌、灭酶、解冻、热烫和浓缩等。Kor等^[43]分别使用欧姆加热(15.26 V/cm)和红外加热处理肉丸,使其中心温度达到75℃,从而保证微生物安全。但是,欧姆加热装置中电极材料的电化学腐蚀问题、温度控制问题和电极表面的食品黏附问题极大限制了该技术的推广应用。

3.2 非热处理技术

近年来,随着食品科技的发展,多种非热杀菌方式已经应用于食品的生产加工。相比于热处理,非热处理技术不仅可以杀灭致病微生物,还能更好地保留食品的营养、色泽、风味和组织状态。许多非热处理技术,如高压、辐照、超声和低温等离子体,也都已经应用到即食肉制品的微生物控制中。

3.2.1 高压加工技术

高压加工技术是指将食品密封于弹性包装容器内,置于水或其他液体作为传压介质的压力系统,经100~1 000 MPa静压处理,在常温甚至更低温度下达到杀菌、钝酶和改善食品功能特性的目的^[44]。高压杀菌技术的处理温度远低于热处理,且杀菌均匀、无污染、操作安全,能保持食品原有风味、色泽和营养价值。高压处理引起细菌细胞死亡主要是通过破坏细菌细胞膜结构使细胞内容物外泄以及破坏细菌细胞关键代谢酶结构。压力的选择取决于使用目的、产品类型和尺寸。400 MPa(约6 000 psi)及以上压力可有效杀灭营养体细菌细胞,包括大肠杆菌、沙门氏菌和李斯特杆菌;通常400~900 MPa高压可有效杀灭营养体细菌细胞,而细菌孢子则可抵抗高达1 000 MPa高压^[45]。400~900 MPa高压可有效杀灭火腿中的李斯特杆菌、沙门氏菌和金黄

色葡萄球菌,提高熟制火腿和干腌火腿的微生物安全和货架期^[46-47]。

高压杀菌效率与压力大小、作用时间、微生物类型、菌株类型和生理状态等因素有关。李斯特杆菌暴露于600 MPa条件下3 min,数量可减少4 (lg (CFU/g)),500 MPa条件下处理5 min可使鸡肉肠中菌落总数减少4 (lg (CFU/g)),并且可进一步延长货架期^[48]。沈旭娇等^[49]分别采用200、400 MPa处理盐水鸭后未检测到微生物,且在低温贮藏6周期间,超高压处理样品菌落总数检测结果均小于1 CFU/g,说明超高压技术能有效杀灭微生物。尽管高压可有效杀灭污染微生物,但该技术同样面临不小的挑战,例如,能耗高,高压杀菌技术的杀菌设备初期投入大、杀菌成本高,使其在实际生产中的应用受到一定限制,同时即食肉制品中富含的蛋白质和脂肪也在一定程度上为微生物提供了保护作用,且高压处理后的亚致死细胞还可在贮藏过程中复苏^[14,45]。

3.2.2 辐照加工技术

辐照加工技术是利用高能射线处理目标产品,通过辐照剂量控制达到贮藏保鲜、杀虫杀菌、延长产品货架期的目的。与传统的热杀菌技术相比,辐照杀菌能耗低、污染小、辐照剂量可控,杀菌同时可以较好地保持食品感官和营养品质,对预包装食品也具有良好的杀菌效果。目前已经商业化应用的有γ射线、X射线和不同能量的高能电子束(≤10 MeV),商业普及率最高的辐射源是钴-60。辐照灭菌的原理主要是破坏细菌DNA分子,影响RNA转录和蛋白质翻译,此外还可导致酶和细胞膜结构的破坏^[45]。

王守经等^[50]使用不同剂量的γ射线处理酱驴肉,结果表明,不同剂量的辐照能够有效杀灭酱驴肉表面污染菌,不同程度减缓贮藏过程中酱驴肉中挥发性盐氮含量的增加,其中8 kGy辐照处理酱驴肉中未检测到微生物。1.5~2.0 kGy辐照剂量可使腊肠和烤牛肉中的李斯特杆菌数量减少3 (lg (CFU/g)),2.0 kGy辐照剂量可使法兰克福香肠和火腿中的李斯特杆菌数量减少3 (lg (CFU/g))^[51]。然而,有研究表明,随着辐照剂量的增加,辐照处理可引起即食肉制品脂肪氧化,因而商业用剂量大多在3 kGy以下,该剂量可杀灭5 (lg (CFU/g))的李斯特杆菌^[52]。GB 14891.1—1997《辐照熟畜禽肉类卫生标准》^[53]规定,熟畜禽肉类总体平均吸收剂量不得大于8 kGy。出于安全考虑,食品法典委员会也规定,辐照剂量不得超过10 kGy^[14]。尽管辐照杀菌有诸多优势,但消费者对于辐照是否会影响人体健康的担忧是影响辐照杀菌发展的重要因素。同时,辐照杀菌设备昂贵,且为保证辐射线不发生泄露,企业需要大量资金和精力来建立完善的安全防护措施,这使其应用受到一定程度的限制^[54]。

3.2.3 超声杀菌技术

超声波是一种频率大于20 000 Hz的机械波，具有声波的普遍特点。但是超声波频率大、波长短，因而在液体传播过程中会引起一些特殊性能，主要有空化效应以及伴随空化作用而引发的机械效应、热学效应等。在食品工业中，超声波主要应用于杀菌、解冻、干燥、均质和提取等。一般认为，超声波对液体中微生物杀灭作用的机制主要是空化效应。空化效应是指超声波于液体介质中传播时，液体微粒往往会剧烈振动，从而产生大量小气泡，液体中的微小气泡核随着超声波的传播作用产生振动，声压随之上升，当达到一定数值时，气泡便会迅速生长、膨大，再崩溃、闭合，使得液体中的小微粒之间发生剧烈碰撞，小气泡中发生的一系列生长和崩溃的动力学过程为超声波空化^[55]。张磊等^[56]采用300 W超声处理小包装卤牛肉，当处理时间达到15~20 min，菌落总数下降明显，且超声处理改善了卤牛肉的色泽和嫩度。60 W超声处理可使模拟体系中的李斯特杆菌数量减少4 (lg (CFU/g))，巴氏杀菌(74 °C、10.53 min)结合超声(25 kHz、200 W)处理可抑制香肠中嗜冷菌和乳酸菌的生长繁殖(贮藏时间可达60 d)^[57-58]。然而，超声处理也会加速脂质氧化，并对产品结构 and 风味产生不良影响。此外，超声波杀菌技术通常需要在液体介质中作用，每次处理的样品量有限，低频高功率设备产生的噪音较大，目前实现产业化应用还有一段距离。同时，低频高功率和高频低功率的杀菌原理也并不完全一致。

3.2.4 等离子体杀菌技术

等离子体是一种由自由电子和带电离子为主要成分的物质形态，它可以由中性气体在高电压作用下激发诱导产生。作为一种新兴的绿色杀菌技术，等离子体杀菌技术具有杀菌温度低、耗时短、适合热敏性食品的特点，不会产生有毒物质，且不会对操作者造成伤害。低温等离子体杀菌技术可以产生多种具有杀菌性能的物质，如活性氧、活性氮、带电粒子和紫外光子等，其杀菌机理可解释为对细胞的蚀刻作用、细胞膜穿孔与静电作用和大分子氧化^[59]。影响低温等离子体工作效率的因素包括处理时间、处理电压、处理方式和气体类型，此外，环境因素，如pH值、相对湿度和样品性质对低温等离子体的杀菌效果均有显著影响。Kim等^[60]使用氦气和氧气产生等离子体，用于杀灭切片培根中的李斯特杆菌、大肠杆菌和沙门氏菌，结果表明，菌落总数减少4.58 (lg (CFU/g))。黄现青等^[61]发现，500 W低温等离子体处理180、300、480 s可延长酱卤鸭货货架期，是未处理真空包装产品货架期的2倍，说明低温等离子体处理有明显的杀菌效果。

低温等离子体用于预包装即食肉制品的灭菌具有重要意义。将密封包装的食品置于2个电极之间，包装内部

的气体被激发放电，产生的等离子体可有效对包装即食肉制品进行灭菌，有效避免先杀菌后包装造成的二次污染^[62]。Rod等^[63]研究低温等离子体对接种李斯特杆菌牛肉干的杀菌效果，结果表明，低温等离子体处理可抑制聚乙烯袋内牛肉干表面李斯特杆菌的生长，在一定条件下可以进行多次间隔处理来增加杀菌效果。然而，低温等离子体技术目前还存在一些问题。首先，低温等离子体的杀菌机制和对产品品质的影响仍然缺乏深入研究；其次，由于等离子体穿透深度不大，对于深入产品内部的细菌，其灭菌效果还不够好；另外，等离子体的杀菌效果与等离子体种类、参数设置及环境因素等密切相关，这也增加了实际应用和优化加工条件的难度^[62]。

3.3 抑菌剂

用于即食肉制品抑菌保鲜的抑菌剂按照其来源可划分为人工合成抑菌剂和天然抑菌剂。

3.3.1 人工合成抑菌剂

人工合成抑菌剂使用方便、防腐抑菌效果好，是目前较为常用的防腐保鲜方式。在肉制品生产中，亚硝酸盐是传统的发色剂和防腐剂，它不仅可使肉制品呈现良好的色泽，且可抑制罐头和发酵制品中肉毒梭菌的生长，此外，亚硝酸盐还具有提高风味、改善质构和抗氧化的作用^[64]。但是，加入量过多、搅拌不均匀或加工工艺不合理极易导致亚硝酸盐残留量过高，从而引起人体中毒，因此多年来各国科学家都在试图寻找亚硝酸盐的有效替代品，如使用其他天然或人工合成、但毒性小的抑菌剂替代物，但目前仍未得到令人满意的结果。

常见的人工合成抑菌剂有山梨酸及其钾盐、抗坏血酸、乳酸及其钠盐、双乙酸钠等。其中，各种有机羧酸及其盐常被用于即食肉制品中污染微生物的控制，如乳酸钠、山梨酸钾和双乙酸钠。乳酸钠可通过降低产品水分活度、影响细胞膜的质子通透性，从而阻止微生物侵入，此外乳酸根离子还具有抑菌功能，能有效抑制李斯特杆菌、沙门氏菌和大肠杆菌生长^[65]。双乙酸钠和乳酸钠联合使用效果最佳，国外已用于商业午餐肉、香肠、萨拉米和烟熏火腿的防腐抑菌^[66]。Seman等^[66]使用氯化钠、双乙酸钠和乳酸钾，并通过调节产品水分活度控制萨拉米中单增李斯特菌的生长，结果表明，增加双乙酸钠含量可显著降低单增李斯特菌的生长速率($P<0.11$)。

1.6 g/100 mL乳酸钠和0.1 g/100 mL双乙酸钠联合使用可有效控制12周冷藏期间切片火腿中李斯特杆菌的生长^[67]。有机酸的抑菌机理常常是有机酸通过非解离形式进入细菌细胞内部，由于细胞内pH值高于外界环境，有机酸在细胞内发生解离，从而导致细胞内pH值降低，进而导致关键生理功能丧失，引起细胞死亡；而有机酸盐类的抑菌机理则稍有不同，如高浓度的乳酸根离子使丙酮酸更易被还原为乳酸，从而抑制细胞的能量代谢^[45]。

然而，由于消费者担心人工合成抑菌剂的安全问题，近年来天然来源抑菌剂已经引起研究者的极大兴趣。

3.3.2 天然抑菌剂

天然抑菌剂是指从动植物、微生物体内或代谢产物内提取的一类具有抑菌防腐作用的物质。天然抑菌剂作用范围广、对产品气味、色泽等品质影响小；因其来源于动植物或微生物，消费者接受程度高。在我国传统熟制肉制品加工中经常使用大蒜、花椒、肉桂、丁香和百里香等天然香辛料，其中含有丰富的大蒜素、多酚类、黄酮类和功能性脂肪酸类抑菌物质^[68]。目前，植物提取物对于即食肉制品的抑菌防腐作用已经成为研究热点。Higginbotham等^[69]使用芙蓉花提取物控制热狗中李斯特杆菌和金黄色葡萄球菌的生长，结果表明，120 mg/mL芙蓉花提取物处理60 min后冷藏24 h可使李斯特杆菌和金黄色葡萄球菌数量减少2 (lg (CFU/g))，而240 mg/mL芙蓉花提取物处理60 min后冷藏24 h可使李斯特杆菌数量下降约1.5 (lg (CFU/g))，同时金黄色葡萄球菌数量低于检出限。Vodnar^[70]将绿茶和黑茶提取物加入壳聚糖中用于控制火腿中的李斯特杆菌，相比于单独使用壳聚糖涂膜，添加提取物的壳聚糖涂膜显著抑制了李斯特杆菌的生长，效果最佳的绿茶提取物-壳聚糖涂膜组合使李斯特杆菌数量由3.20 (lg (CFU/cm²))降至2.65 (lg (CFU/cm²))。李晓^[71]研究银杏叶、山楂叶、竹叶、花生红衣和荷叶提取物对大肠杆菌的抑制效果，结果表明，植物提取物均对大肠杆菌具有抑制作用，且植物提取物可降低发酵香肠贮藏过程中的脂肪氧化。上述植物提取物表现出抑菌防腐作用主要与其含有的多酚类物质有关，多酚类物质能够破坏细胞膜、阻碍电子及质子的传递，还可促使细胞内容物凝固^[45]。

Nisin是由乳酸链球菌发酵产生的一种环多肽，含有34个氨基酸残基，分子质量为3 354 Da。Nisin富含赖氨酸、组氨酸、缬氨酸、亮氨酸和异亮氨酸，不含带有负电荷的氨基酸，这种独特的结构使其与细胞膜具有高亲和力；Nisin可以和细胞膜内磷脂相互作用，破坏细胞膜功能、引起细胞内容物外流；Nisin作为一种安全无毒的防腐剂已被广泛应用，其可有效抑制李斯特杆菌和肉毒杆菌的孢子^[45]。GB 2760—2014《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》^[72]规定，Nisin可作为防腐剂添加到预制肉制品和熟肉制品中，其最大使用量为0.5 g/kg。Ruiz等^[73]将Nisin应用于火腿的防腐，结果表明，0.5 g/100 mL Nisin处理可使火腿中李斯特杆菌数量显著下降，且在63 d冷藏期间李斯特杆菌数量始终未超过2 (lg (CFU/g))。刘琨毅等^[74]研究Nisin质量浓度、溶液pH值、处理温度和处理时间对其抑菌效果的影响，结果表明，Nisin质量浓度0.26 g/L、溶液pH 3.89、处理温度22 ℃、处理时间21 min可使中式腊肠原料肉中菌落总数下降22.4%。

溶菌酶又称胞壁质酶或N-乙酰胞壁质聚糖水解酶，是一种天然酶，存在于乳汁、唾液、眼泪、蛋清和鱼卵中。溶菌酶是一种光谱抑菌剂，专一性作用于肽聚糖分子的N-乙酰胞壁酸与乙酰葡萄糖胺之间的1,4-糖苷键，使细菌细胞壁变得松弛，失去对细胞的保护作用，进而导致细胞死亡；溶菌酶在酸性条件下较稳定，在pH 3.0时加热至96 ℃，保持15 min仍能保持87%的活力^[75]。为有效发挥溶菌酶的防腐抑菌作用，其常与其他物质复配使用。徐歆等^[76]使用Nisin、柠檬酸和溶菌酶研究西式火腿肠高效、安全的复配防腐剂，结果表明，保鲜效果最好的复配防腐剂配方为0.225 g/100 mL Nisin+0.225 g/100 mL柠檬酸+0.195 g/100 mL溶菌酶。

此外，片球菌素、壳聚糖和乳铁蛋白等天然来源的抑菌剂也可用于即食肉制品的抑菌防腐^[14,45,68]。

3.4 包装技术

即食肉制品的包装技术主要是指真空包装、气调包装和可食用涂膜技术等。包装并不能起到杀灭微生物的作用，一般只是抑制微生物的生长繁殖。保鲜的前提是样品中的初始菌数较低，否则就不能达到延长保质期的目的。真空包装技术主要通过无氧环境减少肉中脂肪氧化、控制微生物的生长繁殖，达到延长货架期的目的。而气调包装主要通过二氧化碳的抑菌作用，调节氧气、二氧化碳和氮气的比例，抑制肉制品贮藏过程中腐败菌的生长^[68]。包装技术通常与其他技术相结合，进一步达到延长货架期的目的^[77-78]。Khorsandi等^[77]对乳化香肠进行真空包装，其货架期可达14 d，而真空包装结合Nisin (10 mg/kg)处理可使其货架期进一步延长至28 d。

可食用涂膜技术是一种以可食用性物质为材料，通过不同分子间的相互作用形成具有保护作用的薄膜。多糖、蛋白质和脂质是用于制备涂膜液的三大主要基质，常用的涂膜基质材料包括壳聚糖、果胶、海藻酸钠、明胶和玉米醇溶蛋白等^[79-80]。其中，壳聚糖是目前多糖可食用涂膜中应用最广泛的基质，其具有性能稳定、成膜性好、抗菌能力良好等特点^[81]。刘娜等^[82]选用海藻酸钠、壳聚糖和溶菌酶制备天然涂膜液，用于腌腊肉的保鲜，结果表明，随着壳聚糖质量分数的增加，样品菌落总数呈下降趋势，当壳聚糖质量分数达到1.5%时菌落总数趋于稳定。近年来，许多研究证明，在可食用膜中添加抗菌物质可有效减少食源性微生物数量^[83-84]。Yemis等^[83]在大豆蛋白可食用膜中分别添加百里香和牛至精油，该食用膜对牛肉中大肠杆菌、单增李斯特菌和金黄色葡萄球菌具有明显的抑制作用。Catarino等^[84]在乳清蛋白膜中添加牛至精油并将其用于葡萄香肠，有效抑制了香肠中微生物生长，使其货架期延长15~20 d。

4 结 语

现代快节奏的生活方式使得营养丰富、快速便捷的即食肉制品受到众多消费者青睐,然而即食肉制品的生产加工一直受到污染微生物的困扰。本文综述即食肉制品中常见污染微生物及其控制技术。热处理技术虽然能有效灭活微生物,但极易对即食肉制品的营养和感官品质产生不良影响。非热杀菌技术对即食肉制品有良好的杀菌效果,但存在设备昂贵和技术参数不完善等问题,此外,非热杀菌技术对产品品质的影响因即食肉制品种类和处理工艺等的不同而存在差异。即食肉制品加工方式不同、种类繁多,单一的微生物控制手段可能会存在一定的欠缺,因此,为有效延长产品货架期、保证即食肉制品的质量,可将多种控制技术联合使用。

参考文献:

[1] 范萌,惠腾,刘毅,等. 包装材料与方式对熟肉制品贮藏品质的影响[J]. 食品科技, 2017, 42(11): 126-130. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2017.11.024.

[2] 国家统计局. 2018年猪牛羊禽肉产量8 517 万吨,比上年略降0.3%[J]. 肉类工业, 2019(2): 58.

[3] 姬瑞,曹慧,徐斐,等. 即食熟肉制品中主要致病菌的风险排序[J]. 食品科学, 2015, 36(11): 197-201. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201511038.

[4] 张晶,李薇薇,杨淑香,等. 中国2010—2016年家庭食源性疾病爆发事件流行特征分析[J]. 中国公共卫生, 2019, 35(10): 1379-1382. DOI:10.11847/zgggs1123875.

[5] 孙亮,陈莉莉,廖宁波,等. 2006—2017年浙江省食源性疾病爆发事件监测资料分析[J]. 中国卫生检验杂志, 2019, 29(15): 1874-1877.

[6] United States Department of Agriculture: agricultural marketing service[EB/OL]. [2019-09-15]. <https://www.ams.usda.gov/grades-standards/imps>.

[7] 刘登勇,周光宏,徐幸莲. 国外的肉制品分类与编码方法[J]. 肉类工业, 2005(12): 37-40. DOI:10.3969/j.issn.1008-5467.2005.12.016.

[8] 中国商业联合会商业标准中心,南京雨润食品有限公司,河南省漯河市双汇实业集团有限责任公司,等. 肉制品分类: GB/T 26604—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011: 1-6.

[9] 刘阳,唐莉娟,王凌云,等. 即食肉制品产业发展现状与市场前景[J]. 食品工业, 2017, 38(2): 275-279.

[10] NIKMARAM N, BUDARAJU S, BARBA F J, et al. Application of plant extracts to improve the shelf-life, nutritional and health-related properties of ready-to-eat meat products[J]. Meat Science, 2018, 145: 245-255. DOI:10.1016/j.meatsci.2018.06.031.

[11] YANG Shuran, PEI Xiaoyan, YANG Dajin, et al. Microbial contamination in bulk ready-to-eat meat products of China in 2016[J]. Food Control, 2018, 91: 113-122. DOI:10.1016/j.foodcont.2018.03.027.

[12] 黄敏欣,赵文红,白卫东,等. 肉及肉制品中单增李斯特菌的研究进展[J]. 肉类工业, 2015(3): 45-49.

[13] 陈文杰. 单核细胞增生李斯特菌概况及检测技术进展[J]. 中国城乡企业卫生, 2017(12): 32-34. DOI:10.16286/j.1003-5052.2017.12.012.

[14] HORITA C N, BAPTISTA R C, CATURLA M Y R, et al. Combining reformulation, active packaging and non-thermal post-packaging decontamination technologies to increase the microbiological quality and safety of cooked ready-to-eat meat products[J]. Trends

in Food Science and Technology, 2018, 72: 45-61. DOI:10.1016/j.tifs.2017.12.003.

[15] PESAVENTO G, DUCCI B, NIERI D, et al. Prevalence and antibiotic susceptibility of *Listeria* spp. isolated from raw meat and retail foods[J]. Food Control, 2010, 21(5): 708-713. DOI:10.1016/j.foodcont.2009.10.012.

[16] 孟赫诚. 广州市熟肉制品微生物污染状况及其耐药性传播研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012: 28-105.

[17] BUCHANAN R L, GORRIS L G M, HAYMAN M M, et al. A review of *Listeria monocytogenes*: an update on outbreaks, virulence, dose-response, ecology, and risk assessments[J]. Food Control, 2017, 75: 1-13. DOI:10.1016/j.foodcont.2016.12.016.

[18] KURPAS M, WIECZOREK K, OSEK J. Ready-to-eat meat products as a source of *Listeria monocytogenes*[J]. Journal of Veterinary Research, 2018, 61(1): 49-55. DOI:10.2478/jvetres-2018-0007.

[19] 孔祥瑞,王洪柱. 金黄色葡萄球菌检测方法的研究进展[J]. 中国乳业, 2017(10): 72-74. DOI:10.16172/j.cnki.114768.2017.10.020.

[20] 马冉,雷柳冰,田国梁,等. 东莞市区肉菜市场熟肉制品中金黄色葡萄球菌的污染溯源分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 12(10): 3873-3877.

[21] 王建,朱海明,赖蔚琴,等. 2012—2013年广东省熟肉制品致病菌污染状况分析[J]. 华南预防医学, 2016, 42(2): 192-195. DOI:10.13217/j.scjpm.2016.0192.

[22] 李泉. 肉毒杆菌食品中毒的认识与防治探讨[J]. 食品安全导刊, 2015(15): 33-34. DOI:10.16043/j.cnki.cfs.2015.15.012.

[23] LARA J A F, SENIGALIA S W B, OLIVEIRA T C R M, et al. Evaluation of survival of *Staphylococcus aureus* and *Clostridium botulinum* in charqui meats[J]. Meat Science, 2003, 65(1): 609-613. DOI:10.1016/S0309-1740(02)00254-1.

[24] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准食品中致病菌限量: GB 29921—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013: 1-2.

[25] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 熟肉制品: GB 2726—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-2.

[26] 叶志能,王斌. 即食肉制品中李氏杆菌的杀菌方法[J]. 食品工业科技, 2008, 29(7): 304-305. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2008.07.076.

[27] SELBY T L, BERZINS A, GERRARD D E, et al. Microbial heat resistance of *Listeria monocytogenes* and the impact on ready-to-eat meat quality after post-package pasteurization[J]. Meat Science, 2006, 74(3): 425-434. DOI:10.1016/j.meatsci.2006.02.018.

[28] MURPHY R Y, HANSON R E, JOHNSON N R, et al. Combining antimicrobial and steam treatments in a vacuum-packaging system to control *Listeria monocytogenes* on ready-to-eat Franks[J]. Journal of Food Science, 2005, 70(2): M138-M140. DOI:10.1111/j.1365-2621.2005.tb07104.x.

[29] 周本谦. 热杀菌处理对烟熏火腿保质期的影响[J]. 保鲜与加工, 2007, 7(3): 50-53.

[30] MANGALASSARY S, HAN I, RIECK J, et al. Effect of combining nisin and/or lysozyme with in-package pasteurization on thermal inactivation of *Listeria monocytogenes* in ready-to-eat turkey bologna[J]. Journal of Food Protection, 2007, 70(11): 2503-2511. DOI:10.4315/0362-028X-70.11.2503.

[31] MURPHY R Y, DUNCAN L K, DRISCOLL K H, et al. Thermal inactivation of *Listeria monocytogenes* on ready-to-eat turkey breast meat products during postcook in-package pasteurization with hot water[J]. Journal of Food Protection, 2003, 66(9): 1618-1622. DOI:10.4315/0362-028X-66.9.1618.



- [32] MANGALASSARY S, HAN I, RIECK J, et al. Effect of combining nisin and/or lysozyme with in-package pasteurization for control of *Listeria monocytogenes* in ready-to-eat turkey bologna during refrigerated storage[J]. Food Microbiology, 2008, 25(7): 866-870. DOI:10.1016/j.fm.2008.05.002.
- [33] CHEN C M, SEBRANEK J G, DICKSON J S, et al. Combining pediocin (ALTA 2341) with postpackaging thermal pasteurization for control of *Listeria monocytogenes* on frankfurters[J]. Journal of Food Protection, 2004, 67(9): 1855-1865. DOI:10.1002/jctb.1094.
- [34] SANGO D M, ABELA D, MCELHATTON A, et al. Assisted ultrasound applications for the production of safe foods[J]. Journal of Applied Microbiology, 2014, 116(5): 1067-1083. DOI:10.1111/jam.12468.
- [35] 王楠, 侯旭杰. 新型加热技术在食品加工中的应用及其研究进展[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(4): 209-215. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2019.04.037.
- [36] HUANG L, SITES J. Elimination of *Listeria monocytogenes* on hotdogs by infrared surface treatment[J]. Journal of Food Science, 2008, 73(1): M27-M31. DOI:10.1111/j.1750-3841.2007.00589.x.
- [37] HA J W, RYU S R, KANG D H. Evaluation of near-infrared pasteurization in controlling *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella enterica* serovar typhimurium, and *Listeria monocytogenes* in ready-to-eat sliced ham[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2012, 78(18): 6458-6465. DOI:10.1128/AEM.00942-12.
- [38] 魏亚青, 唐彬, 张洪翠, 等. 姜蒜提取物对微波间歇处理麻辣鸡块的辅助保鲜作用[J]. 包装工程, 2018, 39(21): 102-110. DOI:10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.21.019.
- [39] JAMES C, BARLOW K E, JAMES S J, et al. The influence of processing and product factors on the quality of microwave pre-cooked bacon[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77(4): 835-843. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2005.08.010.
- [40] 孙承锋, 南庆贤, 牛天贵. 微波杀菌在酱牛肉保鲜中的应用研究[J]. 食品工业科技, 2001, 22(3): 11-13. DOI:10.3969/j.issn.1002-0306.2001.03.004.
- [41] 刘春娟. 熟肉制品加工过程热处理工艺研究现状及分析[J]. 吉林农业, 2017(15): 95. DOI:10.14025/j.cnki.jlly.2017.15.048.
- [42] 曾雪, 王伟, 李雪瑞, 等. 荸荠汁欧姆加热特性及欧姆加热对其澄清度的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(51): 39-44. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2019.15.007.
- [43] KOR G, ICIER F. Thermal imaging during infrared final cooking of semi-processed cylindrical meat product[J]. Infrared Physics and Technology, 2016, 79: 242-251. DOI:10.1016/j.infrared.2016.11.002.
- [44] ZHU S, NAIM F, MARCOTTE M, et al. High-pressure destruction kinetics of *Clostridium sporogenes* spores in ground beef at elevated temperatures[J]. International Journal of Food Microbiology, 2008, 126(1): 86-92. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2008.05.009.
- [45] JIANG Jiang, XIONG Youling L. Technologies and mechanisms for safety control of ready-to-eat muscle foods: an updated review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2015, 55(13): 1886-1901. DOI:10.1080/10408398.2012.732624.
- [46] HEREU A, BOVER-CID S, GARRIGA M, et al. High hydrostatic pressure and biopreservation of dry-cured ham to meet the food safety objectives for *Listeria monocytogenes*[J]. International Journal of Food Microbiology, 2012, 154(3): 107-112. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2011.02.027.
- [47] MARCOS B, JOFR A, AYMERICH T, et al. Combined effect of natural antimicrobials and high pressure processing to prevent *Listeria monocytogenes* growth after a cold chain break during storage of cooked ham[J]. Food Control, 2008, 19(1): 76-81. DOI:10.1016/j.foodcont.2007.02.005.
- [48] BOTSARIS G, TAKI A. Effect of high-pressure processing on the microbial quality throughout the shelf life of vacuum-packed sliced ham and frankfurters[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2015, 39(6): 840-845. DOI:10.1111/jfpp.12294.
- [49] 沈旭娇, 徐幸莲, 周光宏, 等. 超高压处理对南京盐水鸭货架期的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(4): 250-254.
- [50] 王守经, 铃莉研, 柳尧波, 等. 不同剂量辐照酱驴肉贮藏效果快速检测[J]. 肉类工业, 2019(4): 49-52. DOI:10.3969/j.issn.1008-5467.2019.04.013.
- [51] FOONG S C, GONZALEZ G L, DICKSON J S. Reduction and survival of *Listeria monocytogenes* in ready-to-eat meats after irradiation[J]. Journal of Food Protection, 2004, 67(1): 77-82. DOI:10.1089/1066527041887320.
- [52] YUN H, LEE K H, LEE H J, et al. Effect of high-dose irradiation on quality characteristics of ready-to-eat chicken breast[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2012, 81(8): 1107-1110. DOI:10.1016/j.radphyschem.2011.10.024.
- [53] 江苏省卫生防疫站, 江苏省农业科学院原子能农业利用研究所. 辐照熟食禽肉类卫生标准: GB 14891.1—1997[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997: 1.
- [54] 吴晓丽, 张相生, 蒋爱民, 等. 酱卤肉制品保鲜技术研究进展[J]. 肉类工业, 2014(7): 46-50. DOI:10.3969/j.issn.1008-5467.2014.07.014.
- [55] 王娟娟, 周昌瑜, 王冲, 等. 超声波技术在肉品加工中的应用以及对肉品风味前体物质的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(16): 320-323; 335. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2019.16.053.
- [56] 张磊, 蔡华珍, 杜庆飞, 等. 超声波杀菌对小包装卤牛肉微生物及品质的影响[J]. 山西农经, 2017(24): 68-70. DOI:10.16675/j.cnki.cn14-1065/f.2017.24.042.
- [57] CICHOSKI A J, RAMPELOTTO C, SILVA M S, et al. Ultrasound-assisted post-packaging pasteurization of sausages[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2015, 30: 132-137. DOI:10.1016/j.ifset.2015.04.011.
- [58] WU X, NARSIMHAN G. Synergistic effect of low power ultrasonication on antimicrobial activity of melittin against *Listeria monocytogenes*[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 75: 578-581. DOI:10.1016/j.lwt.2016.10.008.
- [59] 章建浩, 黄明明, 王佳媚, 等. 低温等离子体冷杀菌关键技术装备研究进展[J]. 食品科学技术学报, 2018, 36(4): 8-15. DOI:10.3969/j.issn.2095-6002.2018.04.002.
- [60] KIM B, YUN H, JUNG S, et al. Effect of atmospheric pressure plasma on inactivation of pathogens inoculated onto bacon using two different gas compositions[J]. Food Microbiology, 2011, 28(1): 9-13. DOI:10.1016/j.fm.2010.07.022.
- [61] 黄现青, 宋莲军, 赵秋艳, 等. 低温等离子体(500 W)处理对真空包装酱卤鸭腿货架期的影响[J]. 肉类工业, 2018(3): 30-35. DOI:10.3969/j.issn.1008-5467.2018.03.007.
- [62] 韩格, 陈倩, 孔保华. 低温等离子体技术在肉品保藏及加工中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(3): 295-301. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180128-387.
- [63] ROD S K, HANSEN F, LEIPOLD F, et al. Cold atmospheric pressure plasma treatment of ready-to-eat meat: inactivation of *Listeria innocua* and changes in product quality[J]. Food Microbiology, 2012, 30(1): 233-238. DOI:10.1016/j.fm.2011.12.018.
- [64] 杨琳. 肉制品中亚硝酸盐替代物研究进展[J]. 肉类研究, 2011, 25(1): 30-32. DOI:10.3969/j.issn.1001-8123.2011.01.008.

- [65] 孙宏民. 肉制品中常用的防腐剂[J]. 农产品加工, 2006(2): 38-39. DOI:10.3969/j.issn.1671-9646-C.2006.02.020.
- [66] SEMAN D L, BORGER A C, MEYER J D, et al. Modeling the growth of *Listeria monocytogenes* in cured ready-to-eat processed meat products by manipulation of sodium chloride, sodium diacetate, potassium lactate, and product moisture content[J]. Journal of Food Protection, 2002, 65(4): 651-658. DOI:10.1002/jctb.595.
- [67] GLASS K A, MCDONNELL L M, RASSEL R C, et al. Controlling *Listeria monocytogenes* on sliced ham and turkey products using benzoate, propionate, and sorbate[J]. Journal of Food Protection, 2007, 70(10): 2306-2312. DOI:10.4315/0362-028X-70.10.2306.
- [68] 宋大巍, 刘松昱, 金宝麟, 等. 传统酱卤肉制品杀菌防腐技术研究进展[J]. 科学技术创新, 2018(11): 45-46.
- [69] HIGGINBOTHAM K L, BURRIS K P, ZIVANOVIC S, et al. Aqueous extracts of *Hibiscus sabdariffa* calyces as an antimicrobial rinse on hot dogs against *Listeria monocytogenes* and methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*[J]. Food Control, 2014, 40: 274-277. DOI:10.1016/j.foodcont.2013.12.011.
- [70] VODNAR D C. Inhibition of *Listeria monocytogenes* ATCC 19115 on ham steak by tea bioactive compounds incorporated into chitosan-coated plastic films[J]. Chemistry Central Journal, 2012, 6: 74. DOI:10.1186/1752-153X-6-74.
- [71] 李晓. 植物提取物对发酵香肠的品质影响[D]. 南京: 南京师范大学, 2018: 54-55.
- [72] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品添加剂使用标准: GB 2760—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014: 71-72.
- [73] RUIZ A, WILLIAMS S K, DJERI N, et al. Nisin affects the growth of *Listeria monocytogenes* on ready-to-eat turkey ham stored at four degrees Celsius for sixty-three days[J]. Poultry Science, 2010, 89(2): 353-358. DOI:10.3382/ps.2008-00503.
- [74] 刘琨毅, 王琪, 郑佳, 等. 乳酸链球菌素在中式腊肠防腐保鲜中的应用[J]. 中国食品添加剂, 2018(2): 144-149. DOI:10.3969/j.issn.1006-2513.2018.02.016.
- [75] 郭月红, 李洪军, 廖洪波, 等. 肉类食品防腐保鲜技术的研究进展[J]. 肉类工业, 2005(2): 30-32. DOI:10.3969/j.issn.1008-5467.2005.02.008.
- [76] 徐歆, 黄琴, 阎永贞, 等. 西式火腿肠复配防腐剂的研制[J]. 食品科学, 2011, 32(14): 356-360.
- [77] KHORSANDI A, ESKANDARI M H, AMINLARI M, et al. Shelf-life extension of vacuum packed emulsion-type sausage using combination of natural antimicrobials[J]. Food Control, 2019, 104: 139-146. DOI:10.1016/j.foodcont.2019.04.040.
- [78] KARPIŃSKA-TYMOSZCZYK M, DRASZANOWSKA A. The effect of natural and synthetic antioxidants and packaging type on the quality of cooked poultry products during frozen storage[J]. Food Science and Technology International, 2019, 25(5): 429-439. DOI:10.1177/1082013219830196.
- [79] HASSAN B, CHATHA S A S, HUSSAIN A I, et al. Recent advances on polysaccharides, lipids and protein based edible films and coatings: a review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 109: 1095-1107. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2017.11.097.
- [80] BOLÍVAR-MONSALVE H, RAMÍREZ-TORO C, BOLÍVAR G, et al. Mechanisms of action of novel ingredients used in edible films to preserve microbial quality and oxidative stability in sausages: a review[J]. Trends in Food Science and Technology, 2019, 89: 100-109. DOI:10.1016/j.tifs.2019.05.011.
- [81] 李雪, 贺稚非, 李洪军. 可食性膜在肉及肉制品保鲜贮藏中的应用研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(2): 237-243. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.017373.
- [82] 刘娜, 梁美莲, 谭媛元, 等. 天然涂膜液对切片腌腊肉品质及货架期的影响[J]. 肉类研究, 2017, 31(8): 12-17. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-201708003.
- [83] YEMIS G P, CANDOGAN K. Antibacterial activity of soy edible coatings incorporated with thyme and oregano essential oils on beef against pathogenic bacteria[J]. Food Science and Biotechnology, 2017, 26(4): 1113-1121. DOI:10.1007/s10068-017-0136-9.
- [84] CATARINO M D, ALVES-SILVA J M, FERNANDES R P, et al. Development and performance of whey protein active coatings with *Origanum virens* essential oils in the quality and shelf life improvement of processed meat product[J]. Food Control, 2017, 80: 273-280. DOI:10.1016/j.foodcont.2017.03.054.