

基于物理栅栏因子对肉类食品中沙门菌抑杀作用的研究进展

戚成¹, 林玉海², 王翔¹, 刘箐¹, 董庆利^{1,*}

(1. 上海理工大学医疗器械与食品学院, 上海 200093; 2. 荷美尔(中国)研发创新中心, 上海 200436)

摘要: 肉类食品是人类膳食结构的重要组成部分, 其安全与品质一直是人们关注的重点, 沙门菌是世界范围内引起食物中毒的主要致病菌之一。在肉及肉制品的加工及保藏过程中, 常利用各种栅栏因子来保证其安全与卫生。本文综述了近年来国内外不同物理栅栏因子及其联合其他物理和化学栅栏因子对肉类食品中沙门菌的抑杀作用研究进展, 指出了目前物理栅栏因子研究存在的问题, 并进一步展望了其在未来肉类食品杀菌中的应用重点, 为物理栅栏因子在肉类食品中的应用研究提供参考。

关键词: 物理栅栏因子; 栅栏效应; 肉类食品; 沙门菌; 热杀菌; 高压; 辐照; 等离子体

Progress in Inactivation of *Salmonella* spp. in Meat Foods Based on Physical Hurdle Factors

QI Cheng¹, LIN Yuhai², WANG Xiang¹, LIU Qing¹, DONG Qingli^{1,*}

(1. School of Medical Instrument and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Hormel China Idea and Innovation Center, Shanghai 200436, China)

Abstract: Meat foods are an important part of people's diet, and meat safety and quality are an important concern for people all over the world. *Salmonella* spp. is one of the major pathogens causing food poisoning worldwide. In the processing and preservation of meat and meat products, some physical hurdle factors are often taken into consideration to ensure the safety of meat foods. This review provides an overview of recent progress in the inactivation of *Salmonella* spp. in meat foods by some physical hurdle factors or by combination of physical and chemical hurdle factors. In addition, problems existing in this area of research are discussed and the potential application in the sterilization of meat foods of the physical hurdle factors is reviewed in order to provide a useful reference for the application of physical hurdle factors in meat foods.

Key words: physical hurdle factors; hurdle effect; meat foods; *Salmonella* spp.; thermization; high pressure; irradiation; plasma

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-201709012

中图分类号: TS251.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-8123 (2017) 09-0069-09

引文格式:

戚成, 林玉海, 王翔, 等. 基于物理栅栏因子对肉类食品中沙门菌抑杀作用的研究进展[J]. 肉类研究, 2017, 31(9): 69-77.

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-201709012. <http://www.rlyj.pub>

QI Cheng, LIN Yuhai, WANG Xiang, et al. Progress in inactivation of *Salmonella* spp. in meat foods based on physical hurdle factors[J]. Meat Research, 2017, 31(9): 69-77. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-201709012. <http://www.rlyj.pub>

肉及肉制品是人类不可或缺的动物性蛋白质的主要来源, 我国对肉及肉制品的加工有悠久的历史, 且肉制品的种类繁多、风味独特, 是我国饮食文化的重要组成部分, 但一直以来, 传统肉制品加工存在工艺相对落后、工艺参数模糊、产品和质量不稳定等不足。随着我国人民生活水平的提高, 消费者对肉制品安全及品质的

要求不断提高, 因此, 肉及肉制品的安全与品质受到国内外研究者的普遍关注。

由于肉及肉制品往往需要经过屠宰、分割、加工、包装、贮藏、运输和销售等过程, 而每一个处理过程都会增加微生物污染的几率, 从而增加肉品的安全和品质风险。近年来, 国家卫生和计划生育委员会统计的我国

收稿日期: 2017-08-15

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAK36B04); 国家自然科学基金面上项目(31271896, 31371776);
上海市科委长三角科技联合攻关领域项目(15395810900)

作者简介: 戚成(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为畜产品安全与质量控制。E-mail: 2673484280@qq.com

*通信作者: 董庆利(1979—), 男, 教授, 博士, 研究方向为预测微生物学与风险评估。E-mail: dongqingli@126.com



食源性疾病的监测资料^[1]显示,我国微生物性食物中毒事件起数和中毒人数最多,具有涉及人数多、危害性广和具有明显季节性等特点。2015年爆发的食源性食物中毒事件^[2]中,由微生物引发的中毒事件占总数的33.7% (232/480),且微生物性食物中毒的人数最多,占全年食物中毒总人数的53.7%。其中主要致病因子为沙门菌、蜡样芽孢杆菌等,均是肉及肉制品中的常见致病菌。此外,我国2004—2015年10余年间,国家卫生和计划生育委员会共通报食物中毒类突发公共卫生事件3 521起,涉及中毒人数118 586人^[1-5],其中微生物性食物中毒事件起数和中毒人数最多,分别占总数的29.8%和44.7%,给我国造成巨大经济损失。

随着人们生活水平的提高,消费者对肉及肉制品的种类、风味、新鲜度和安全性等方面的要求也不断提高,这也要求肉品生产厂家对肉品的防腐和保鲜采取更有效、更安全的方法和措施。在肉品加工或保藏过程中,通常结合某种因素或因子来抑制或杀灭肉及肉制品中的致病菌和腐败菌,可以临时或永久性打破肉及肉制品中的微生物平衡,同时提高食品的感官和营养品质,这些因素或因子被称为“栅栏因子”。常见的栅栏因子包括高温、高压、辐照和防腐抑菌剂等。在实际生产加工过程中运用不同的栅栏因子发挥其协同作用,这些因子产生的交互作用就是栅栏效应^[6],即2种或2种以上的灭菌或抑菌技术协同作用可以加强灭菌或抑菌效果,从而改善肉品品质,保证肉品的安全性,这种联合作用可以在降低单一技术使用强度、减少对肉品感官和品质的影响、降低设备成本等情况下对致病菌或腐败菌产生较好的抑杀效果。

作为一类新型杀菌技术,物理杀菌技术具有快速、高效等优点。近年来,物理栅栏因子在肉品加工中的应用研究不断改进,有助于保持肉品的安全、营养及感官特性。基于物理栅栏因子的栅栏技术对肉及肉制品中致病菌的抑杀作用国内外已有相关研究,本文对国内外物理栅栏因子对肉及肉制品中沙门菌抑杀作用的研究进行归纳,并展望了未来物理栅栏因子在肉类食品中可能的发展趋势,以期物理栅栏因子在肉类食品中的应用研究提供参考。

1 物理栅栏因子对肉类食品中沙门菌的抑杀作用

物理栅栏因子主要包括高温、高压、脉冲电场、超声和气调包装等,按照杀菌原理的不同可将物理杀菌技术分为热杀菌技术和非热杀菌技术,目前热杀菌技术主要有蒸汽加热、红外线加热和微波加热等多种方式,超高压、辐照和脉冲电场等则属于非热杀菌技术范畴。

1.1 热杀菌技术在肉类食品中的应用

热杀菌技术是应用广泛的杀菌技术之一,其原理主

要是通过温度的升高使致病菌的细胞膜等细胞结构和蛋白质结构发生变化,从而导致菌体死亡或使其生长受到抑制。很多研究人员构建了肉品中沙门菌的热失活动力学模型,如二次多项式模型^[7]、Weibull模型^[8]和线性模型^[9]等,沙门菌的失活状况研究能够用于指导实际的生产加工过程。牛肉及其制品是世界主要消费肉品之一,通常认为鲜切牛肉内部是无菌的,但是在某种情况下,沙门菌可以侵入牛肉内部^[10],另外,牛肉及其制品不完全加热的加工制作方式常给消费者带来潜在的风险,因此,国内外已有较多通过热处理杀灭牛肉中沙门菌的研究。Mann等^[11]采用中低温(62.8℃)和不同湿度(0%~90%)条件处理牛肉块,发现用30%、15%或更低的湿度处理过的烤肉中沙门菌的菌落数有显著差异,且在湿度小于30%时,沙门菌的菌落数降至低于美国农业部(United States Department of Agriculture, USDA)制定的监管标准(6.5 (lg(CFU/g)))。此外,不同肥瘦比的牛肉或鸡肉也会影响沙门菌的热耐受性^[12],而不同温度对沙门菌的杀伤效果有极显著的不同,例如,在60℃条件下杀灭猪肉馅中7个数量级的沙门菌需要106 min,而在70℃条件下仅需要2.03 min^[12-13]。因此,在研究致病菌的热致死作用时,考虑外部条件(如食品基质、含水量等),在最大程度杀灭沙门菌的同时对食品原品质产生较小的影响将更具实际意义。

微波是目前广泛应用的食品加工技术之一,其杀菌原理可分为热效应和非热生化效应两方面。热效应即微波作用于食品时导致温度升高,从而使菌体死亡;非热生化效应则是使菌体在生命活动过程中产生大量电子和离子,导致菌体细胞生长受到抑制或者死亡。与其他热杀菌方法相比,微波杀菌技术具有快速、节能和对食品品质影响小等特点^[6],但微波处理常产生不均匀的热量,因此可能造成食品中病原菌的不完全失活^[14]。红外杀菌也是近年来发现的新型热杀菌技术之一,红外加热具有热辐射率高、加热速度快和传热效率高等优点^[15],目前已被广泛应用于食品的烘烤、干燥以及袋装食品的杀菌等方面。Ha等^[16]将红外杀菌(180 kW, 50 s)应用于即食火腿中,可以使火腿切片表面的鼠伤寒沙门菌减少4.1个数量级,而常规对流加热方式需要180 s,且红外加热处理后的火腿切片色泽和质构特性没有显著变化。此外,红外加热也被应用于即食肉制品,如热狗^[17]、全蛋^[18]和花生^[19]的杀菌中,均有较好的除菌效果。

1.2 非热杀菌技术在肉类食品中的应用

非热杀菌是指利用非加热的杀菌机理杀灭食品中特定微生物的技术。非热杀菌技术不需对食品基质进行加热处理,因而可以最大限度地避免破坏食品原有成分和外观品质。目前应用较为广泛的非热杀菌技术主要包括超高压杀菌、高压脉冲电场杀菌、超声波杀菌、等离子体杀菌和辐照杀菌等^[20]。



1.2.1 超高压对肉类食品中沙门菌的抑杀作用

相对于热杀菌技术,超高压技术中的高压处理能够影响微生物的形态、结构、生化反应和基因机制等,从而使其生理机能丧失,达到杀菌的目的,并且不会造成肉及肉制品中蛋白质结构的变化,可满足消费者对更高品质和更安全的优质、营养肉品的需求^[21]。解华东等^[22]利用超高压技术处理卤制鹅胗,发现在400 MPa以上保压15 min处理可以有效抑制沙门菌的生长,在贮藏9 d后,超高压处理除对鹅胗的色泽产生影响外,对其嫩度、口感、气味及质地等的影响均不显著,说明超高压处理不仅对沙门菌具有较好的杀菌效果,还能最大限度地保证卤制鹅胗的产品品质。Alba等^[23]发现经400 MPa高压处理(8 °C, 60 d)的切片干腌火腿中肠炎沙门菌的数量比未处理时降低了2.56个数量级,但干腌火腿的脂质氧化和颜色会随压力和贮藏时间的增加而增加。因此,在将超高压技术应用于肉类食品时,还应考虑其是否会对产品品质产生影响。超高压杀菌技术通常需要特殊的加压设备和耐压容器等,需要进一步进行研究与开发,但其在食品工业具有广阔的应用前景。

1.2.2 脉冲电场对肉类食品中沙门菌的抑杀作用

脉冲电场(pulsed electric field, PEF)最先被用于增加水果果汁的渗透性,以提高其提取率,同时这也是目前PEF最重要的应用之一^[24-27]。此后,有大量的研究开始关注PEF对致病菌和腐败菌的杀灭作用,例如Buckow^[28]、Mosqueda-Melgar^[29]、Monfort^[30]等分别研究了PEF对橙汁、甜瓜汁及西瓜汁和液体全蛋中沙门菌的杀灭效果,发现PEF对沙门菌均有较好的杀灭作用,可以提高食品的安全性。然而,目前国内外对应用PEF控制肉类食品中沙门菌数量的研究相对较少,并且将PEF应用于肉类食品中时,其对致病菌的杀灭效果可能无法达到预期的效果,例如,Haughton等^[31]发现10株弯曲杆菌分离株在液体培养基中更容易受PEF处理(65 kV/cm, 5 μs, 500 Hz)的影响,在PEF处理30 s后,其菌落数可减少4.33~7.22 (lg (CFU/mL)),而在生鸡肉样本中应用PEF(3.75、15 kV/cm, 10 μs, 5 Hz)并未显著降低样品的总活菌数、肠杆菌科、空肠弯曲杆菌、大肠杆菌或肠炎沙门菌的数量。因此,在实验条件下,PEF可能不适合作为鸡肉等肉类食品中控制微生物污染的安全干预措施。此外,在脉冲电场杀菌处理过程中,由于电极需要与食品直接接触,因此易发生二次污染,这也是该技术在食品中应用的缺点之一。

1.2.3 超声波对肉类食品中沙门菌的抑杀作用

超声波对细菌细胞的破坏主要是通过强烈的机械振荡作用使细胞破裂和死亡。许多研究表明,超声波能够增加致病菌对热的敏感性^[32-34],并且不同致病菌对不同频率超声波的敏感程度也有较大差异,例如,4.6 MHz

的超声波可将鼠伤寒沙门菌全部杀死,但对葡萄球菌仅造成部分伤害^[6]。Alarcon-Rojas等^[35]发现超声波有助于肉品嫩化、延长肉品的货架期而不影响其他品质特性,但有研究表明,单独使用超声波对肉品中沙门菌的灭活效果有限,而与热处理技术联用可以显著提高对沙门菌的灭菌效率,减少热灭菌时间和食品营养的损失^[32,36-37]。同样地,Gambuteanu等^[38]对比了低超声强度(0.2、0.4 W/cm²)和浸入水中解冻的未包装猪肉的物理、化学和微生物等指标,发现2种处理方式的杀菌效果无显著差异。可见,将超声波应用于肉类食品中以杀灭其中致病菌的效果相比于其他非热杀菌技术均有一定差距。

1.2.4 等离子体对肉类食品中沙门菌的抑杀作用

等离子体是一种新型食品冷杀菌技术,其杀菌原理是利用高电压使等离子体处于电离状态,等离子体中包含的活性氧原子、氧分子以及未电离的中性粒子可以与微生物体中的多种成分发生反应,从而影响微生物的正常生长,最终导致其死亡^[39]。由于等离子体杀菌技术与食品无直接接触,并且不会使食品基质温度明显增加,因此正逐步受到研究人员的关注。Yong等^[40]用等离子体(频率15 kHz)处理牛肉干10 min后,鼠伤寒沙门菌的数量减少了2.59 (lg (CFU/g)),且牛肉干的肌红蛋白含量和剪切力等均没有显著变化,牛肉干的风味、异味均可接受。Jayasena等^[41]用等离子体(频率15 kHz)处理鲜猪肉和牛肉后,样品中鼠伤寒沙门菌的数量分别降低了2.68、2.58 (lg (CFU/g)),质地和亮度值(L*)不受等离子体处理的影响,但在处理5、7.5 min后,样品红度值(a*)显著降低,10 min后脂质氧化也发生显著变化,而这种肉品质变化的变化可以通过栅栏技术来避免。Dirks^[42]、Lee^[43]等将等离子体技术分别应用于生猪肉和鸡胸肉中,结果表明等离子体技术均能很好地降低肉品中沙门菌的污染水平。但等离子体也会诱导细菌进入非可培养(viable but non-culturable, VBNC)状态,为公共安全带来潜在风险^[44]。目前,我国对于应用等离子体杀菌技术杀灭肉类食品中沙门菌的研究相对较少,此方面的研究有待进一步加强。

1.2.5 辐照对肉类食品中沙门菌的抑杀作用

辐照杀菌技术是一类利用紫外线、X射线、γ射线和电子束等放射线对食品进行杀菌的技术,是目前非热杀菌中重要的杀菌技术之一,具有广阔的应用前景。辐射线能够穿透细胞,使其细胞膜和细胞质分子发生电离作用,同时也会导致DNA和RNA等产生损伤和突变,影响致病菌的各种生命活动,导致微生物死亡,是一种高效的非热杀菌技术,但长期以来辐照食品的安全性一直是人们关注的重要问题。1983年,国际食品法典委员会(Codex Alimentarius Commission, CAC)确认不超过10 kGy的辐射剂量对消费者来说均是安全的,不需要进

行毒理学测试^[45],且在营养学上也安全可靠。此后,美国食品药品监督管理局(Food and Drug Administration, FDA)于1990年批准了 γ 射线、X射线和电子束3种辐射射线用于食品加工中^[46]。我国也陆续颁布了包括熟食禽类和冷冻分割禽肉类等辐照食品的卫生标准^[6]。近年来辐照杀菌技术在肉类食品中的部分应用研究如表1所示。

表1 辐照杀菌技术对肉类食品中沙门菌抑制作用的部分研究
Table 1 Representative studies of *Salmonella* spp. inactivation in meat foods by radiation sterilization techniques

辐射线	基质	辐照条件	主要研究内容	主要研究者
短波紫外线 (Ultraviolet-C, UV-C)	猪血浆	254 nm	沙门菌失活模型构建	Blázquez等 ^[47]
脉冲紫外线	干腌 腊肉制品	30% UV、30%红外 辐射和40%可见光	沙门菌菌落数变化; 感官品质变化	Ganan等 ^[48]
	牛肉	30% UV、30%红外 辐射和40%可见光	沙门菌菌落减少量;感官品质及 货架期变化	Hierro等 ^[49]
X射线	鸡胸肉片	0.1、0.5、1.0、2.0 kGy	菌落减少量; 贮藏期间菌落变化	Mahmoud等 ^[50]
	叙利亚山 羊肉	0、2、4、6 kGy	不同剂量处理对沙门菌、菌落 总数、羊肉品质的影响	Al-Bachir等 ^[51]
γ 射线	即食伊朗 烧鸡	0、1.5、3.0、4.5 kGy	贮藏期间品质变化;沙门菌及 微生物种群变化	Fallah等 ^[52]
	凤爪软 罐头	0、6、8、10 kGy	对沙门菌的杀灭作用及对 产品品质的影响	高鹏等 ^[53]
	兔肉	1.5、3.0 kGy	贮藏期间沙门菌的检出情况; 感官品质和货架期变化	Badr等 ^[54]
	生牛肉	0~2.52 kGy	脂肪含量对牛肉中沙门菌辐射 D值和失活曲线的影响	Clavero等 ^[55]
	牛肉	1 kGy	不同血清型、接种水平和贮藏 时间的沙门菌变化	Kundu等 ^[56]
电子束	火腿片	0~3.5 kGy	对沙门菌 D_{90} 值和迟滞期的 影响;失活正态分布和残存 细菌的大小Gamma分布拟合	Aguirre等 ^[57]
	即食发酵 干香肠	1~3 kGy	电子束剂量优化; 对香肠感官品质的影响	Cabeza等 ^[58]

UV在食品领域的应用最早可以追溯到1906年的法国用于饮用水消毒,但相对于其他非热杀菌技术,UV杀菌在食品工业中的应用相对比较缓慢。UV的穿透能力相对较弱,一般用于液体食品以及物料等的表面杀菌,其对微生物的灭活主要依靠短波电磁辐射,波长250、254、270 nm的UV已被广泛用于空气消毒、液体(饮用水、牛奶等)和食品表面的杀菌^[59]。X射线和 γ 射线的穿透能力较强,能激发被辐照物质中的分子,使其发生电离作用,从而对致病菌产生杀伤作用。 γ 射线常用的放射源多为放射性同位素,如⁶⁰Co和¹³⁷Cs等。而电子束是一种机械来源的辐射线,具有低而有效的穿透能力,由于电子束对食品品质影响较小,并且不使用放射性同位素,因此更易于被消费者所接受^[60],这也使电子束在食品工业中的应用更具优势。目前很多研究表明电子束照射可以显著降低肉及肉制品中的微生物数量^[61-63]。

1.3 其他物理栅栏因子在肉类食品中的应用

在肉类加工工业中,气调包装(modified atmosphere

packaging, MAP)是一种常见的食品包装措施,已被广泛应用于肉类食品的冷藏保鲜和对致病菌的抑制作用研究。栗云鹏等^[64]将MAP应用于鲜猪肉的保鲜,发现冷藏(4℃)过程中,经MAP处理鲜猪肉的菌落总数、大肠菌群增长缓慢,沙门菌出现较晚,其中70% O₂+25% CO₂+5% N₂的组合应用于鲜猪肉贮藏的综合评价效果最好,样品保质期可达10 d。作为一种产品包装技术,MAP常常与其他化学抑菌剂联用来更好地抑制肉品中沙门菌的生长^[65-66]。此外,基于物理因素的杀菌或抑菌方法还有传统的干制、腌制等,它们均通过降低肉品的水分活度(water activity, a_w)达到抑制腐败菌和致病菌的目的。董庆利等^[67]发现在25℃条件下,用TSB培养基对肠炎沙门菌进行培养的10 d内,先在添加15% NaCl的培养基中处理,再在pH 4.5的培养基中处理对肠炎沙门菌的灭活效果最好。由于此类方法通常兼有肉品加工的效果,已经不能满足人们对肉类食品新鲜、营养方面的需求,因此干制和腌制常用于牛肉干等部分肉品的加工中。

2 物理栅栏因子与其他技术联用对肉类食品中沙门菌的抑杀作用

2.1 多种物理栅栏因子在肉类食品中的应用

物理杀菌技术通常具有较好的杀菌效果,但有时也会对肉及肉制品的感官品质和营养价值等产生一定影响,尤其是热杀菌技术。因此,在肉类食品的实际生产加工中,通常运用不同的栅栏因子并将它们科学有效地组合起来,发挥其协同作用,以提高栅栏因子对肉中微生物的抑杀效果或降低某种栅栏因子对肉品感官或质量品质的影响,保证食品的卫生及安全性。由于UV-C穿透能力弱,UV-C杀菌技术通常仅用于食品表面的杀菌,而UV-C杀菌与其他杀菌技术联用可以产生栅栏效应,更好地杀灭肉品中的致病菌。Ha等^[68]将UV-C与近红外加热技术联用,发现二者对火腿切片中大肠杆菌O157:H7、鼠伤寒沙门菌和单增李斯特菌有较好的协同杀菌作用,同时不影响火腿切片的品质。但有时不同物理杀菌技术处理顺序等的不同也会影响2种物理方法对沙门菌的杀菌效果,Gayán等^[69]发现同时进行UV-C和热处理对沙门菌具有协同杀菌作用,而先进行UV-C辐照,随后再进行热处理则对沙门菌的杀菌产生的协同效应较小。

热杀菌技术是肉类食品加工中常用的有效微生物杀灭方法之一,而肉品中水分含量的不同通常会对热处理杀灭沙门菌的效果产生较大影响。Vasan等^[70]用5% NaCl-2.5%三聚磷酸钠调整牛肉的 a_w ,发现 a_w 的增加会显著提高牛肉中沙门菌的 $D_{55℃}$,不利于热处理的杀菌效果,因此,在应用热处理杀菌时不能忽略肉制品的 a_w 等指标。MAP技术是肉及肉制品中常用的抑菌保鲜技



术之一，也是近年来研究人员关注的焦点之一，常将MAP技术单独或者与其他物理、化学抑菌方法联合用于肉品的包装与贮藏过程。Chiasson等^[71]发现常规包装（78.1% N₂+20.9% O₂+0.036% CO₂）牛肉馅中伤寒沙门菌的 γ 辐照D₁₀值为0.526 kGy，MAP（60% O₂+30% CO₂+10% N₂）后，其D₁₀值降至0.221 kGy，而加入香芹酚和焦磷酸钠并结合MAP可将伤寒沙门菌的D₁₀值降至0.053 kGy，且无论是否添加香芹酚和焦磷酸钠，在真空包装和100% CO₂包装条件下，伤寒沙门菌 γ 辐射D₁₀值的降低都少于MAP处理时的降低值。但Kudra等^[72]发现用电子束辐照鸡肉，随后进行真空或MAP冷藏处理对鸡肉中沙门菌的影响不大。近年来不同物理栅栏因子联用对肉类食品中沙门菌抑杀作用的部分研究如表2所示。

表2 多种物理栅栏因子联用对肉类食品中沙门菌抑杀作用的部分研究
Table 2 Representative studies of *Salmonella* spp. inactivation in meat foods by multiple physical hurdle factors

物理栅栏因子	联合栅栏因子	基质	主要研究内容	研究结果	主要研究者
高温	a_w	瘦牛肉	牛肉水分含量对细胞耐热性的影响	水分含量升高，热耐受性提高	Vasan等 ^[70]
	a_w 、pH值和山梨酸钾	碎牛肉干	失活响应面模型构建	三者有显著交互作用；降低牛肉干pH值可提高温度和山梨酸钾对沙门菌的抑杀作用效率	Juneja等 ^[73]
近红外加热	UV-C	即食切片火腿	杀菌效果与产品品质、协同杀菌机制	对测试致病菌有协同杀菌作用	Ha等 ^[68]
高压	a_w 和脂肪含量	干腌火腿	失活响应面模型构建	高压和 a_w 对沙门菌致死率有显著影响，脂肪含量不会对沙门菌起显著保护作用	Bover-Cid ^[74]
	温度	干腌火腿	失活响应面模型构建	压力和时间是最重要的因素；温度显著影响二者的交互作用	Bover-Cid等 ^[75]
	CO ₂	禽肉香肠	高压与CO ₂ 的杀菌作用	CO ₂ 环境下肠炎沙门菌更耐受高压；其他菌对高压更敏感，2种因子显示协同效应	Al-Nehlawi等 ^[76]
γ 射线	腌制	猪肉	联合杀菌效果及对猪肉感官品质的影响	腌制与低剂量 γ 辐射有协同抑菌作用；延长货架期，不影响猪肉品质	Fadhel等 ^[77]
	MAP、香芹酚和焦磷酸钠	牛肉馅	联合栅栏因子对沙门菌辐照敏感性的影响	香芹酚和焦磷酸钠可降低MAP、真空环境下沙门菌的D ₁₀ 值；真空或CO ₂ 环境下D ₁₀ 值的降低小于MAP	Chiasson等 ^[71]
	MAP	猪肉	对沙门菌致死率和残存菌生长状况的影响	MAP对辐照沙门菌的致死率无显著影响	高美须等 ^[78]
电子束	MAP	鸡胸肉	辐照后真空或MAP冷藏对沙门菌的抑杀效果	可有效减少鸡肉中的沙门菌，但在随后的真空或MAP冷藏中对其影响不大	Kudra等 ^[72]

2.2 物理联合化学栅栏因子在肉类食品中的应用

化学防腐抑菌剂是肉类工业中一类重要的栅栏因子，近年来，随着化学品在食品工业中的应用，食品的防腐保鲜技术不断发展，肉类工业中常用的化学防腐抑

菌剂主要分为化学合成防腐剂（如亚硝酸钠、苯甲酸和苯甲酸钠、山梨酸和山梨酸钾等）和天然有机防腐剂（如有机酸、植物精油和细菌素等）。随着消费者对食品安全性要求的不断提高，各种天然、安全、高效的天然防腐抑菌剂将更多地应用于肉类工业中。

各种栅栏因子结合使用的效果除了是单个因子作用的累加，还能发挥栅栏因子的协同效应。物理栅栏因子对致病菌和腐败菌的影响多是引起微生物的失活，有效降低肉品中的微生物数量，从而保证肉品的卫生与安全性，而化学栅栏因子则是在肉品贮藏过程中抑制其中微生物的生长繁殖，因此2种栅栏因子的联合使用往往可以有效保证肉品的品质与安全，也是目前多种栅栏因子联合抑菌研究的重要研究方向之一。Huang Shirong等^[79]研究了超临界CO₂（2 000 psi，35℃，2 h）和迷迭香粉（2.5%和5.0%）联合处理对4℃条件下贮藏猪肉馅的微生物和理化性质的影响，发现超临界CO₂联合迷迭香粉（5.0%）处理对减少猪肉馅中的微生物种群有更显著的效果，但超临界CO₂单独处理2 h加速了冷藏过程中猪肉馅的脂肪氧化，添加迷迭香后可以显著减缓氧化速率的升高，这2种物理和化学栅栏因子的联用可能是一种肉类工业中潜在的有效措施，可以用以提高长时间暴露于超临界CO₂环境的猪肉馅的稳定性。近年来物理与化学栅栏因子联用对肉类食品中沙门菌抑杀作用的部分研究如表3所示。

Yadav等^[80]发现将被微生物污染的鸡皮预浸在质量浓度为100~300 mg/L的亚氯酸钠或0.02%~0.06%的香芹素中可使鼠伤寒沙门菌对热更敏感，有助于在较低的烹饪温度和较短的时间内进行鸡皮安全性关键控制点设计。此外，将化学防腐抑菌剂与包装材料结合制成活性包装系统与物理栅栏因子联用，从而更有效、更方便地保证肉品的安全与品质是未来食品防腐保鲜的重要研究方向之一^[81-82]。Ahmed等^[83]用聚乙二醇和肉桂精油制备聚乳酸复合活性薄膜，通过抗菌活性测试，发现复合薄膜对所测试单增李斯特菌和鼠伤寒沙门菌表现出不同的抗菌活性，且该活性薄膜有良好的柔韧性和延展性；此后Ahmed等^[84]将其应用到鸡肉包装中，测试活性包装联合高压处理对冷藏鸡肉中单增李斯特菌、鼠伤寒沙门菌抑制和灭活的协同作用效果，结果表明，300 MPa压力处理，同时活性包装中的肉桂精油添加水平为17%时，鸡肉在21 d贮藏期内的单增李斯特菌和鼠伤寒沙门菌数量（初始接菌量约为10⁶ CFU/g）可降至安全水平。

表3 物理与化学栅栏因子联用对肉类食品中沙门菌抑杀作用的部分研究
Table 3 Representative studies of *Salmonella* spp. inactivation in meat foods by combination of physical and chemical hurdle factors

物理栅栏因子	联合栅栏因子	基质	主要研究内容	研究结果	主要研究者
高温	亚氯酸钠或香芹酚	鸡肉皮	线性回归计算沙门菌热失活D值	亚氯酸钠或香芹酚使沙门菌热致死作用更敏感	Yadav等 ^[80]
	乳酸钠和牛至精油	牛肉馅	与乳酸钠或牛至精油联合或二者联合对沙门菌属的抑杀效果	牛至精油增加沙门菌属热失活率; 乳酸钠降低热失活率, 再添加精油可降低低热和乳酸钠拮抗性	Juneja等 ^[81]
高压	肉桂精油	鸡肉	联合活性包装肉桂精油对单增李斯特菌和沙门菌的抑杀作用	协同效应, 300 MPa和17%肉桂精油的抑杀作用最强	Ahmed等 ^[84]
UV-C	乳酸钾、二乙酸钠和月桂酸精氨酸酯	法兰克福香肠	3种抑菌剂联合使用对致病菌的抑杀效果	协同效应, 且UV-C与3种抑菌剂组合比单独使用更有效	Sommers等 ^[86]
电子束	乳酸	牛肉	乳酸对电子束杀菌效果的影响	协同效应, 乳酸增强电子束对沙门菌的杀灭作用	Li等 ^[87]
	韭菜提取物	猪肉干	联合抑杀效果	添加1.0%韭菜提取物的牛肉干中鼠伤寒沙门菌等显著减少	Kang等 ^[88]
MAP	香芹酚	火鸡胸肉片	二者联用对沙门菌的抑杀效果	浸渍处理肉片时, 香芹酚与CO ₂ 有协同作用	Nair等 ^[85]
	迷迭香精油	禽肉片	二者联用对贮藏期禽肉片沙门菌等的影响	对禽肉片中的沙门菌和单增李斯特菌无显著抑制	Kahraman等 ^[86]
	荷叶精油	鲜猪肉	二者的联合抑菌效果	低氧MAP复合荷叶精油对沙门菌的抑制效果优于高氧MAP, 但不能很好保持肉的感官品质	张赞彬等 ^[89]

3 结 语

物理栅栏因子是栅栏技术应用的重要环节, 国内外已有大量研究, 部分研究内容已实现小规模工业化应用, 并且取得了一定效益, 但仍存在以下问题有待进一步解决: 1) 部分杀菌技术在对微生物产生杀灭作用的同时, 也会对肉及肉制品的感官和营养品质等产生一定影响, 因此在研究杀菌技术杀灭食品中致病菌的同时还应进一步严格考察该技术在更加复杂加工环境下对食品基质造成的不良影响, 并进行不断改良, 进一步提升技术的实用性; 2) 部分杀菌设备制造成本高, 设备结构复杂, 操作难度较高, 不利于杀菌技术的大范围工业化应用, 因此, 开发结构简单、操作方便、成本合适的技术设备将更具实际意义; 3) 消费者对部分技术, 如辐照等仍存在安全性疑虑, 尤其是肉及肉制品辐照后是否有放射性物质残留、是否会产生毒性物质等, 虽已有大量研究证明这些技术的安全风险较低, 但消费者对辐照产品卫生安全性问题的担忧仍是阻碍辐照杀菌大范围工业化应用的障碍。

进一步优化物理杀菌技术设备, 降低其成本, 简化操作过程, 并与天然抑菌剂联合使用, 开发活性包装, 实现保证安全性的同时, 降低物理杀菌强度, 更加注重产品品质, 这将是未来物理杀菌技术研究和发展的重点, 也将更有利于物理杀菌技术在肉类产业中的推广与应用。

参考文献:

- [1] 邓国兴, 姜随意, 高志贤. 1999—2014年全国重大食物中毒通报资料的汇总与分析[J]. 食品研究与开发, 2015(10): 149-152.
- [2] 国家卫生计生委办公厅. 国卫办应急发[2016]5号: 关于2015年全国食物中毒事件情况的通报[EB/OL]. (2016-04-01) [2017-09-01]. <http://www.nhfp.gov.cn/yjb/s7859/201604/8d34e4c442c54d33909319954c43311c.shtml>.
- [3] 卫生部文件. 卫应急发[2005]58号: 卫生部关于2004年全国重大食物中毒情况的通报[J]. 中国食品卫生杂志, 2005, 17(3): 464-465.
- [4] 卫生部文件. 卫应急发[2006]81号: 卫生部关于2005年全国重大食物中毒情况的通报[J]. 中国食品卫生杂志, 2006, 18(3): 269-271.
- [5] 庞璐, 张哲, 徐进. 2006—2010年我国食源性性疾病暴发简介[J]. 中国食品卫生杂志, 2011, 23(6): 560-563.
- [6] 江汉湖, 董明盛. 食品微生物学[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2010: 320-332.
- [7] JUNEJA V K, GONZALES-BARRON U, BUTLER F, et al. Predictive thermal inactivation model for the combined effect of temperature, cinnamaldehyde and carvacrol on starvation-stressed multiple *Salmonella* serotypes in ground chicken[J]. International Journal of Food Microbiology, 2013, 165(2): 184-199. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2013.04.025.
- [8] MAFART P, COUVERT O, GAILLARD S, et al. On calculating sterility in thermal preservation methods: application of the Weibull frequency distribution model[J]. International Journal of Food Microbiology, 2002, 72(1): 107-113. DOI:10.1016/S0168-1605(01)00624-9.
- [9] GEERAERD A H, HERREMANS C H, VAN IMPE J F. Structural model requirements to describe microbial inactivation during a mild heat treatment[J]. International Journal of Food Microbiology, 2000, 59(3): 185-209. DOI:10.1016/S0168-1605(00)00362-7.
- [10] ORTA-RAMIREZ A, MARKS B P, WARSOW C R, et al. Enhanced thermal resistance of *Salmonella* in whole muscle compared to ground beef[J]. Journal of Food Science, 2005, 70(7): 359-362. DOI:10.1111/j.1365-2621.2005.tb11480.x.
- [11] MANN J E, BRASHEARS M M. Contribution of humidity to the lethality of surface-attached heat-resistant *Salmonella* during the thermal processing of cooked ready-to-eat roast beef[J]. Journal of Food Protection, 2007, 70(3): 762-765. DOI:10.4315/0362-028X-70.3.762.
- [12] JARVIS N A, O'BRYAN C A, DAWOUD T M, et al. An overview of *Salmonella* thermal destruction during food processing and preparation[J]. Food Control, 2016, 68: 280-290. DOI:10.1016/j.foodcont.2016.04.006.
- [13] OSAILI T M, GRIFFIS C L, MARTIN E M, et al. Thermal inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella*, and *Listeria monocytogenes* in breaded pork patties[J]. Journal of Food Science, 2007, 72(2): 56-61. DOI:10.1111/j.1365-2621.2001.tb16099.x.
- [14] VADIVAMBAL R, JAYAS D S. Non-uniform temperature distribution during microwave heating of food materials: a review[J]. Food and Bioprocess Technology, 2010, 3(2): 161-171. DOI:10.1007/s11947-008-0136-0.
- [15] RASTOGI N K. Recent trends and developments in infrared heating in food processing[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2012, 52(9): 737-760. DOI:10.1080/10408398.2010.508138.
- [16] 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.



- [17] 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.
- [18] ALKAYA G B, ERDOGU D F, HALKMAN A K, et al. Surface decontamination of whole-shell eggs using far-infrared radiation[J]. Food and Bioprocess Technology, 2016, 98: 275-282. DOI:10.1016/j.fbp.2016.02.006.
- [19] ESER E, EKIZ H I. Surface temperature a critical parameter to control peanut quality during far infrared pretreatment process[J]. International Food Research Journal, 2016, 23(5): 2130-2137.
- [20] 费楠, 李芳菲, 党苗苗, 等. 非热杀菌技术特点及在肉制品加工中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(2): 540-544.
- [21] JERMANN C, KOUTCHMA T, MARGAS E, et al. Mapping trends in novel and emerging food processing technologies around the world[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2015, 31: 14-27. DOI:10.1016/j.ifset.2015.06.007.
- [22] 解华东, 布丽君, 葛良鹏, 等. 超高压处理对卤制鹅肝灭菌保鲜与品质的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(14): 247-252.
- [23] ALBA M, MONTIEL R, BRAVO D, et al. High pressure treatments on the inactivation of *Salmonella enteritidis* and the physicochemical, rheological and color characteristics of sliced vacuum-packaged dry-cured ham[J]. Meat Science, 2012, 91(2): 173-178. DOI:10.1016/j.meatsci.2012.01.015.
- [24] YOGESH K. Pulsed electric field processing of egg products: a review[J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 53(2): 934-945. DOI:10.1007/s13197-015-2061-3.
- [25] EVRENDILEK G A, AVSAR Y K, EVRENDILEK F. Modelling stochastic variability and uncertainty in aroma active compounds of PEF-treated peach nectar as a function of physical and sensory properties, and treatment time[J]. Food Chemistry, 2016, 190: 634-642. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.06.010.
- [26] JAEGER H, SCHULZ M, LU P, et al. Adjustment of milling, mash electroporation and pressing for the development of a PEF assisted juice production in industrial scale[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2012, 14: 46-60. DOI:10.1016/j.ifset.2011.11.008.
- [27] LOGINOVA K, LOGINOV M, VOROBIEV E, et al. Quality and filtration characteristics of sugar beet juice obtained by "cold" extraction assisted by pulsed electric field[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 106(2): 144-151. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2011.04.017.
- [28] BUCKOW R, NG S, TOEPFL S. Pulsed electric field processing of orange juice: a review on microbial, enzymatic, nutritional, and sensory quality and stability[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2013, 12(5): 455-467. DOI:10.1111/1541-4337.12026.
- [29] MOSQUEDA-MELGAR J, RAYBAUDI-MASSILIA R M, MARTÍN-BELLOSO O. Influence of treatment time and pulse frequency on *Salmonella enteritidis*, *Escherichia coli* and *Listeria monocytogenes* populations inoculated in melon and watermelon juices treated by pulsed electric fields[J]. International Journal of Food Microbiology, 2007, 117(2): 192-200. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2007.04.009.
- [30] MONFORT S, GAYÁN E, SALDAÑA G, et al. Inactivation of *Salmonella* Typhimurium and *Staphylococcus aureus* by pulsed electric fields in liquid whole egg[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2010, 11(2): 306-313. DOI:10.1016/j.ifset.2009.11.007.
- [31] HAUGHTON P N, LYG J G, CRONIN D A, et al. Efficacy of pulsed electric fields for the inactivation of indicator microorganisms and foodborne pathogens in liquids and raw chicken[J]. Food Control, 2012, 25(1): 131-135. DOI:10.1016/j.foodcont.2011.10.030.
- [32] LI X, FARID M. A review on recent development in non-conventional food sterilization technologies[J]. Journal of Food Engineering, 2016, 182: 33-45. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2016.02.026.
- [33] BAUMANN A R, MARTIN S E, FENG H. Power ultrasound treatment of *Listeria monocytogenes* in apple cider[J]. Journal of Food Protection, 2005, 68(11): 2333-2340. DOI:10.4315/0362-028X-68.11.2333.
- [34] DELMAS H, BARTHE L. Ultrasonic mixing, homogenization, and emulsification in food processing and other applications[J]. Power Ultrasonics, 2015: 757-791. DOI:10.1016/B978-1-78242-028-6.00025-9.
- [35] ALARCON-ROJO A D, JANACUA H, RODRIGUEZ J C, et al. Power ultrasound in meat processing[J]. Meat Science, 2015, 107: 86-93. DOI:10.1016/j.meatsci.2015.04.015.
- [36] BARBA F J, KOUBA M, DO PRADO-SILVA L, et al. Mild processing applied to the inactivation of the main foodborne bacterial pathogens: a review[J]. Trends in Food Science and Technology, 2017, 66: 20-35. DOI:10.1016/j.tifs.2017.05.011.
- [37] CHANDRAPALA J, OLIVER C, KENTISH S, et al. Ultrasonics in food processing[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2012, 19(5): 975-983. DOI:10.1016/j.ultsonch.2012.01.010.
- [38] GAMBUREANU C, ALEXE P. Effects of ultrasound assisted thawing on microbiological, chemical and technological properties of unpackaged pork *longissimus dorsi*[M]. The Annals of the University of Dunarea de Jos of Galati: Fascicle VI-Food Technology, 2013: 98-107.
- [39] 王佳媚, 黄明明, 乔维维, 等. 冷源等离子体冷杀菌技术及其在食品中的应用研究[J]. 中国农业科技导报, 2015, 17(5): 55-62.
- [40] YONG H I, LEE H, PARK S, et al. Flexible thin-layer plasma inactivation of bacteria and mold survival in beef jerky packaging and its effects on the meat's physicochemical properties[J]. Meat Science, 2017, 123: 151-156. DOI:10.1016/j.meatsci.2016.09.016.
- [41] JAYASENA D D, KIM H J, YONG H I, et al. Flexible thin-layer dielectric barrier discharge plasma treatment of pork butt and beef loin: effects on pathogen inactivation and meat-quality attributes[J]. Food Microbiology, 2015, 46: 51-57. DOI:10.1016/j.fm.2014.07.009.
- [42] DIRKS B P, DOBRYNIN D, FRIDMAN G, et al. Treatment of raw poultry with nonthermal dielectric barrier discharge plasma to reduce *Campylobacter jejuni* and *Salmonella enterica*[J]. Journal of Food Protection, 2012, 75(1): 22-28. DOI:10.4315/0362-028X.JFP-11-153.
- [43] LEE H, YONG H I, KIM H J, et al. Evaluation of the microbiological safety, quality changes, and genotoxicity of chicken breast treated with flexible thin-layer dielectric barrier discharge plasma[J]. Food Science and Biotechnology, 2016, 25(4): 1189-1195. DOI:10.1007/s10068-016-0189-1.
- [44] LIAO Xinyu, LIU Donghong, XIANG Qisen, et al. Inactivation mechanisms of non-thermal plasma on microbes: a review[J]. Food Control, 2016, 75: 83-91. DOI:10.1016/j.foodcont.2016.12.021.
- [45] MAHERANI B, HOSSAIN F, CRIADO P, et al. World market development and consumer acceptance of irradiation technology[J]. Foods, 2016, 5(4): 1-21. DOI:10.3390/foods5040079.
- [46] MAHMOUD B S, NANNAPANENI R, CHANG S, et al. Effect of X-ray treatments on *Escherichia coli* O157:H7, *Listeria monocytogenes*, *Shigella flexneri*, *Salmonella enterica* and inherent microbiota on whole mangoes[J]. Letters in Applied Microbiology, 2016, 62(2): 138-144. DOI:10.1111/lam.12518.

- [47] BLÁZQUEZ E, RODRÍGUEZ C, RÓDENAS J, et al. Ultraviolet (UV-C) inactivation of *Enterococcus faecium*, *Salmonella choleraesuis* and *Salmonella* Typhimurium in porcine plasma[J]. PloS One, 2017, 11(4): 1-11. DOI:10.1371/journal.pone.0175289.
- [48] GANAN M, HIERRO E, HOSPITAL X F, et al. Use of pulsed light to increase the safety of ready-to-eat cured meat products[J]. Food Control, 2013, 32(2): 512-517. DOI:10.1016/j.foodcont.2013.01.022.
- [49] HIERRO E, GANAN M, BARROSO E, et al. Pulsed light treatment for the inactivation of selected pathogens and the shelf-life extension of beef and tuna carpaccio[J]. International Journal of Food Microbiology, 2012, 158(1): 42-48. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2012.06.018.
- [50] MAHMOUD B S M, CHANG S, WU Y, et al. Effect of X-ray treatments on *Salmonella enterica* and spoilage bacteria on skin-on chicken breast fillets and shell eggs[J]. Food Control, 2015, 57: 110-114. DOI:10.1016/j.foodcont.2015.03.040.
- [51] AL-BACHIR M, ZEINOU R. Effect of gamma irradiation on the microbial load, chemical and sensory properties of goat meat[J]. Acta Alimentaria, 2014, 43(2): 264-272. DOI:10.1556/AAlim.43.2014.2.10.
- [52] FALLAH A A, SAEI-DEHKORDI S S, RAHNAMA M. Enhancement of microbial quality and inactivation of pathogenic bacteria by gamma irradiation of ready-to-cook Iranian barbecued chicken[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2010, 79(10): 1073-1078. DOI:10.1016/j.radphyschem.2010.04.015.
- [53] 高鹏, 王艳, 黄敏, 等. ^{60}Co - γ 射线辐照对凤爪软罐头的灭菌作用和品质的影响[J]. 食品科学, 2009, 30(21): 36-38.
- [54] BADR H M. Use of irradiation to control foodborne pathogens and extend the refrigerated market life of rabbit meat[J]. Meat Science, 2004, 67(4): 541-548. DOI:10.1016/j.radphyschem.2010.04.015.
- [55] CLAVERO M R, MONK J D, BEUCHAT L R, et al. Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonellae*, and *Campylobacter jejuni* in raw ground beef by gamma irradiation[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1994, 60(6): 2069-2075.
- [56] KUNDU D, GILL A, LUI C, et al. Use of low dose E-beam irradiation to reduce *E.coli* O157:H7, non-O157 (VTEC) *E.coli* and *Salmonella* viability on meat surfaces[J]. Meat Science, 2014, 96(1): 413-418. DOI:10.1016/j.meatsci.2013.07.034.
- [57] AGUIRRE J S, RODRÍGUEZ M R, DE FERNANDO G D G. Effects of electron beam irradiation on the variability in survivor number and duration of lag phase of four food-borne organisms[J]. International Journal of Food Microbiology, 2011, 149(3): 236-246. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2011.07.003.
- [58] CABEZA M C, DE LA HOZ L, VELASCO R, et al. Safety and quality of ready-to-eat dry fermented sausages subjected to E-beam radiation[J]. Meat Science, 2009, 83(2): 320-327. DOI:10.1016/j.meatsci.2009.05.019.
- [59] BINTSIS T, LITOPOULOU-TZANETAKI E, ROBINSON R K. Existing and potential applications of ultraviolet light in the food industry: a critical review[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2000, 80(6): 637-645. DOI:10.1002/(SICI)1097-0010(20000501)80:6<637::AID-JSFA603>3.0.CO;2-1.
- [60] YONG H I, KIM H J, NAM K C, et al. Radiation sensitivity of foodborne pathogens in meat byproducts with different packaging[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2015, 115: 153-157. DOI:10.1016/j.radphyschem.2015.06.023.
- [61] FARKAS J. Irradiation as a method for decontaminating food: a review[J]. International Journal of Food Microbiology, 1998, 44(3): 189-204. DOI:10.1016/S0168-1605(98)00132-9.
- [62] CÁRCCEL J A, BENEDITO J, CAMBERO M I, et al. Modeling and optimization of the E-beam treatment of chicken steaks and hamburgers, considering food safety, shelf-life, and sensory quality[J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 96: 133-144. DOI:10.1016/j.fbp.2015.07.006.
- [63] PARK J G, YOON Y, PARK J N, et al. Effects of gamma irradiation and electron beam irradiation on quality, sensory, and bacterial populations in beef sausage patties[J]. Meat Science, 2010, 85(2): 368-372. DOI:10.1016/j.meatsci.2010.01.014.
- [64] 栗云鹏, 高晨, 王蕊, 等. 气调包装保鲜技术对猪肉冷藏保鲜效果的影响[J]. 北京农学院学报, 2017(1): 43-47.
- [65] NAIR D V T, KIESS A, NANNAPANENI R, et al. The combined efficacy of carvacrol and modified atmosphere packaging on the survival of *Salmonella*, *Campylobacter jejuni* and lactic acid bacteria on turkey breast cutlets[J]. Food Microbiology, 2015, 49: 134-141. DOI:10.1016/j.fm.2015.01.010.
- [66] KAHRAMAN T, ISSA G, BINGOL E B, et al. Effect of rosemary essential oil and modified-atmosphere packaging (MAP) on meat quality and survival of pathogens in poultry fillets[J]. Brazilian Journal of Microbiology, 2015, 46(2): 591-599. DOI:10.1590/S1517-838246220131201.
- [67] 董庆利, 石育娇, 刘箐, 等. 酸化和渗透压不同处理顺序对肠炎沙门菌失活的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(4): 201-208.
- [68] HA J W, KANG D H. Inactivation kinetics of *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella enterica* serovar Typhimurium, and *Listeria monocytogenes* in ready-to-eat sliced ham by near-infrared heating at different radiation intensities[J]. Journal of Food Protection, 2014, 77(7): 1224-1228. DOI:10.4315/0362-028X.JFP-13-561.
- [69] GAYÁN E, SERRANO M J, RASO J, et al. Inactivation of *Salmonella enterica* by UV-C light alone and in combination with mild temperatures[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2012, 78(23): 8353-8361. DOI:10.1128/AEM.02010-12.
- [70] VASAN A, INGHAM S C, INGHAM B H. Comparative effect of heat shock on survival of O157:H7 and non-O157 shiga toxigenic *Escherichia coli* and *Salmonella* in lean beef with or without moisture-enhancing ingredients[J]. Journal of Food Protection, 2017, 80(6): 1002-1008. DOI:10.4315/0362-028X.JFP-16-335.
- [71] CHIASSEN F, BORSA J, LACROIX M. Combined effect of carvacrol and packaging conditions on radiosensitivity of *Escherichia coli* and *Salmonella* Typhi in ground beef[J]. Journal of Food Protection, 2005, 68(12): 2567-2570. DOI:10.4315/0362-028X-68.12.2567.
- [72] KUDRA L L, SEBRANEK J G, DICKSON J S, et al. Control of *Salmonella enterica* Typhimurium in chicken breast meat by irradiation combined with modified atmosphere packaging[J]. Journal of Food Protection, 2011, 74(11): 1833-1839. DOI:10.4315/0362-028X.JFP-11-195.
- [73] JUNEJA V K, VALENZUELA-MELENDRÉS M, HEPERKAN D, et al. Development of a predictive model for *Salmonella* spp. reduction in meat jerky product with temperature, potassium sorbate, pH, and water activity as controlling factors[J]. International Journal of Food Microbiology, 2016, 236: 1-8. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2016.06.028.
- [74] BOVER-CID S, BELLETTI N, AYMERICH T, et al. Modelling the impact of water activity and fat content of dry-cured ham on the reduction of *Salmonella enterica* by high pressure processing[J]. Meat Science, 2017, 123: 120-125. DOI:10.1016/j.meatsci.2016.09.014.
- [75] BOVER-CID S, BELLETTI N, GARRIGA M, et al. Response surface methodology to investigate the effect of high pressure processing on *Salmonella* inactivation on dry-cured ham[J]. Food Research International, 2012, 45(2): 1111-1117. DOI:10.1016/j.foodres.2011.05.004.



- [76] AL-NEHLAWI A, GURI S, GUAMIS B, et al. Synergistic effect of carbon dioxide atmospheres and high hydrostatic pressure to reduce spoilage bacteria on poultry sausages[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 58(2): 404-411. DOI:10.1016/j.lwt.2014.03.041.
- [77] FADHEL Y B, LEROY V, DUSSAULT D, et al. Combined effects of marinating and γ -irradiation in ensuring safety, protection of nutritional value and increase in shelf-life of ready-to-cook meat for immunocompromised patients[J]. Meat Science, 2016, 118: 43-51. DOI:10.1016/j.meatsci.2016.03.020.
- [78] 高美须, THAYER D W. ^{137}Cs 辐照和MAP综合处理对猪肉中沙门氏菌的影响[J]. 同位素, 2000, 13(1): 1-6.
- [79] HUANG Shirong, LIU Bin, GE Du, et al. Effect of combined treatment with supercritical CO_2 and rosemary on microbiological and physicochemical properties of ground pork stored at 4 $^{\circ}\text{C}$ [J]. Meat Science, 2017, 125: 114-120. DOI:10.1016/j.meatsci.2016.11.022.
- [80] YADAV A S, SAXENA G K, SAXENA V K, et al. Thermal inactivation of *Salmonella* Typhimurium on dressed chicken skin previously exposed to acidified sodium chlorite or carvacrol[J]. Food Control, 2016, 66: 227-232. DOI:10.1016/j.foodcont.2016.02.014.
- [81] 姜尚洁, 黄俊彦. 现代食品包装新技术: 活性包装[J]. 包装工程, 2015, 36(21): 150-154.
- [82] 陈洪生, 孔保华, 刁静静. 活性包装在肉类保鲜中的应用[J]. 肉类工业, 2007(2): 12-14.
- [83] AHMED J, MULLA M Z, ARFAT Y A. Thermo-mechanical, structural characterization and antibacterial performance of solvent casted polylactide/cinnamon oil composite films[J]. Food Control, 2016, 69: 196-204. DOI:10.1016/j.foodcont.2016.05.013.
- [84] AHMED J, MULLA M, ARFAT Y A. Application of high-pressure processing and polylactide/cinnamon oil packaging on chicken sample for inactivation and inhibition of *Listeria monocytogenes* and *Salmonella* Typhimurium, and post-processing film properties[J]. Food Control, 2017, 78: 160-168. DOI:10.1016/j.foodcont.2017.02.023.
- [85] JUNEJA V K, HWANG C, FRIEDMAN M. Thermal inactivation and postthermal treatment growth during storage of multiple *Salmonella* serotypes in ground beef as affected by sodium lactate and oregano oil[J]. Journal of Food Science, 2010, 75(1): M1-M6. DOI:10.1111/j.1750-3841.2009.01395.x.
- [86] SOMMERS C H, SCULLEN O J, SITES J E. Inactivation of foodborne pathogens on frankfurters using ultraviolet light and GRAS antimicrobials[J]. Journal of Food Safety, 2010, 30(3): 666-678. DOI:10.1111/j.1745-4565.2010.00232.x.
- [87] LI S, KUNDU D, HOLLEY R A. Use of lactic acid with electron beam irradiation for control of *Escherichia coli* O157:H7, non-O157 VTEC *E.coli*, and *Salmonella* serovars on fresh and frozen beef[J]. Food Microbiology, 2015, 46: 34-39. DOI:10.1016/j.fm.2014.06.018.
- [88] KANG M, KIM H J, JAYASENA D D, et al. Effects of combined treatments of electron-beam irradiation and addition of leek (*Allium tuberosum*) extract on reduction of pathogens in pork jerky[J]. Foodborne Pathogens and Disease, 2012, 9(12): 1083-1087. DOI:10.1089/fpd.2012.1249.
- [89] 张赞彬, 缪存铅, 宋庆. 荷叶精油与气调包装协同对鲜肉的抑菌活性研究[J]. 食品工业, 2010(1): 57-60.