

吴俊师, 缪承杜, 温晓梅, 等. 辐照技术在肉及肉制品中的应用研究进展 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(12): 437-444. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022080293

WU Junshi, MIAO Chengdu, WEN Xiaomei, et al. Research Progress on the Application of Irradiation Technology in Meat and Meat Products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(12): 437-444. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022080293

· 专题综述 ·

辐照技术在肉及肉制品中的应用研究进展

吴俊师, 缪承杜, 温晓梅, 蓝碧锋*

(广州辐锐高能技术有限公司, 广东省工业钴-60 伽玛射线应用工程技术研究中心, 广东广州 511458)

摘要: 肉及肉制品辐照是一种利用高能电离射线提高安全性和延长货架期的非热杀菌技术, 能够有效杀灭腐败微生物, 延长肉及肉制品的保质期。以往的研究主要侧重于辐照处理对肉制品的杀菌保鲜效应及效果, 以及辐照对肉类蛋白和脂质氧化的影响规律。近几年研究发现, 辐照在达到保鲜目的的同时, 通过协同其他技术能保持和改善肉类营养成分和品质特性, 凸显出了良好的应用前景, 特别是中式菜和糜类等预制菜领域。本文综述了食品辐照技术在肉制品保鲜的应用和对品质结构特性的影响, 提出了利用抗氧化技术, 可食用涂层和气调包装等辅助工艺来保持或提高肉制品原有品质和风味的建议, 同时也是往后研究食品辐照科学的一个热点趋势, 以期为辐照技术在肉品产业化科学应用提供参考。

关键词: 辐照, 肉及肉制品, 保鲜, 协同技术, 应用前景

中图分类号: TS203

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)12-0437-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022080293

本文网刊:



Research Progress on the Application of Irradiation Technology in Meat and Meat Products

WU Junshi, MIAO Chengdu, WEN Xiaomei, LAN Bifeng*

(Guangzhou Furui High Energy Technology Co., Ltd., Guangdong Industrial Co-60 Gamma Ray Application Engineering Technology Research Center, Guangzhou 511458, China)

Abstract: Meat and meat product irradiation is a non-thermal sterilization technology that uses high-energy ionizing rays to improve safety and extend storage period, effectively killing spoilage microorganisms and extending the storage period of meat and meat products. Previous studies have focused on the sterilization and preservation effects of irradiation treatment on meat products, as well as the impact of irradiation on meat protein and lipid oxidation patterns. In recent years, it has been found that irradiation can maintain and improve the nutritional composition and quality characteristics of meat by synergizing other techniques while achieving freshness, highlighting good prospects for application, especially in the field of prepared dishes such as Chinese and minced dishes. This paper reviews the application of food irradiation technology in the preservation of meat products and its effect on quality and texture characteristics, and proposes the use of auxiliary processes such as antioxidant technology, edible coating and gasification packaging to maintain or improve the original quality and flavour of meat products, as well as a hot trend for future research in food irradiation science, with a view to providing a reference for the scientific application of irradiation technology in meat industrialisation.

Key words: irradiation; meat and meat products; preservation; synergistic technology; application prospects

肉制品味道鲜美, 富含蛋白质、氨基酸、维生素和矿物质等多种营养成分^[1]。但同时也为多种腐败微生物提供了良好的生长条件, 在生产、加工、分销和储存过程中更易受到污染, 引起腐败变质^[2]。传统

杀菌方式^[3](高温、高压和化学物质等)虽然能控制食品中的大部分微生物, 但杀菌过程中产生的不稳定因素会对生鲜肉类或即食性肉制品的食用品质造成不可逆的影响, 甚至会导致肉品中杂环胺等有害物质、

收稿日期: 2022-08-30

作者简介: 吴俊师 (1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 辐照食品加工, E-mail: pls0821@163.com。

* 通信作者: 蓝碧锋 (1977-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 农产品辐照加工, E-mail: 1070497694@qq.com。

肉质松弛和营养流失等问题的出现^[4]。食品辐照技术是一种高能射线,可以有效杀灭或减少食品中食源性致病微生物和寄生虫,相比之下,该技术拥有非热加工的绝对优势,有常温杀菌,无污染无残留和杀菌穿透力强等特点,能有效地解决食品安全和食品保鲜贮藏等问题^[5]。

目前国内共分布有169座辐照中心,其中分布数量前三的省份是江苏(19座)、广东(16座)和山东(16座),发展至今已有部分食品实现辐照应用,如泡椒凤爪、腊味制品及其他风味肉制品等。但辐照加工在食品肉类工业中的应用仍比较局限,大部分停留在研究层面,主要是因为辐照加工后产生的氧化效应会对肉类产品的风味、营养、质构等造成不同程度的影响,加上公众对于辐照等词的忧虑仍难以放下,怀疑食品的安全可靠性,因此会显著降低消费者们的感官体验和购买欲望。但辐照加工的优势仍无可比拟,近期越来越多研究表明,在达到保鲜效果的预期下,通过协同其他技术,可有效地保持肉品原有品质和改善肉制品品质特性,这为辐照技术在肉类及其制品加工中的应用奠定了良好的基础,具有非常广阔的应用前景。本文针对辐照对肉及肉制品保鲜效果、质构影响、品质负面影响及协同其他技术应用效果方面的国内外研究进展进行综述,以期对辐照技术在肉类工业上的科学应用提供理论指导和应用参考。

1 食品辐照杀菌技术的机理

辐照技术一般有三种:γ射线辐照、电子束辐照(≤ 10 MeV)和X射线辐照(一些国家为 ≤ 7.5 MeV,中国为 ≤ 5 MeV),其中又以电子加速器释放的电子束和以 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 源释放的高能γ射线为最常用的两种食品辐照射线类型^[6]。电子束是高能电子流的一种形式,经由电子枪加速到不同的能级,产生粒子流和X射线等高能电子流^[7],具有能量高且可调、辐照能量利用率高、可控性更高等特点,常见于谷物或其他低密度食品杀菌。相比而言,放射性核素钴-60在每次衰变时放出2个高能光子,能量分别为1.17和1.33 MeV,其能量更高、穿透能力不受厚度影响,只与射线活度以及货物密度有关,对大批量产品货物的辐照杀菌更加便捷高效,因此在食品领域中γ射线辐照杀菌的效率更高^[8]。

食品辐照(Food irradiation),亦称“食品照射”或“电离辐射灭菌”,指将食物暴露在游离辐射下,灭除食物上的微生物、细菌、病毒或微小虫类^[9]。电离辐射产生的γ射线与物质相互作用后,会将一部分能量传递给该物质的分子或原子,分子或原子变成离子,这些离子在食品中产生物理、化学和生物反应^[10]。主要通过两个方面来杀灭病原微生物:直接作用和间接作用。直接作用是指射线对细胞的几个组成部分造成损害,包括核酸、蛋白质、脂类等生物大分子,使其发生电离、激发和化学键断裂,这不仅会随机造成细胞结构破坏和功能丧失,还会使微生物失去复制或

再生的能力^[11];间接作用是先使水分子发生辐解,形成羟基自由基、水合电子、过氧化氢等强氧化或强还原的带电物质,再作用于生物大分子导致其结构破坏,从而使生物体活性受到损伤^[12]。

2 辐照对肉制品的保鲜作用

2.1 辐照对冷鲜肉类食品的保鲜作用

冷鲜肉口感好,具有汁液流失率低、质地柔软、滋味鲜美等特点,已成为目前行业消费的主要趋势。但加工流通过程中容易受到病原微生物的感染,引起腐败变质,缩短货架期,也给消费者生命健康带来潜在威胁。

近年来有较多的文献报道了辐照处理后延长冷鲜肉贮藏期的研究结论。Hossain等^[13]研究发现1.5和2 kGy 2种辐照剂量均能有效地控制孟加拉黑山羊肉中的腐败细菌和病原菌,延长其冷藏货架期;雷英杰等^[14]利用电子束辐照(1~9 kGy, 4℃)处理生鲜猪肉,研究表明辐照处理对微生物具有良好的杀菌作用,能够延长生鲜肉货架期5~8 d;Islam等^[15]采用低剂量(1~3 kGy) ^{60}Co 射线辐照处理的新鲜鸡肉,研究发现2 kGy射线照射组的总活菌数(TVC)、总大肠菌群数(TCC)、总酵母菌和霉菌数(TYMC)均显著低于未照射组($P<0.05$),而且在提高鸡肉的保质期的同时,还尽量保持了鸡肉原有风味品质。

水产品因生活和贮藏环境的影响,大多以冷鲜或冷冻的形式出售,其水分活度和营养物质相对较高,易感染微生物后降解蛋白成氨基酸,转化生成酮酸及具有毒性的生物胺类等小分子化合物,因此,辐照的冷杀菌应用在水产品的保鲜处理上具有一定的优势。Zhen等^[16]利用10 MeV电子束辐照结合真空包装处理大西洋鲑鱼鱼片可显著延长鱼片的货架期6 d;郭红霞等^[17]进一步用低剂量(0~4 kGy)电子束辐照结合真空包装处理新鲜三文鱼,研究发现辐照剂量为1 kGy时贮藏期间各鲜度指标良好,并能最大限度地保持其感官品质和营养价值,且能将货架期延长了6 d左右;戚文元等^[18]研究发现4 kGy辐照吸收剂量电子束辐照可有效杀灭罗非鱼片中的病原微生物,保持鱼肉硬度和正常风味,延长罗非鱼片的冷藏时间,为冰鲜水产品运输到较远地区加工销售提供了相对充裕的时间。而对于颜色变化较敏感的水产品,食品辐照处理不可避免的改变肌红蛋白或虾青素等跟颜色变化相关物质的状态,引起肉类颜色的变化。瞿桂香等^[19]利用辐照处理即食小龙虾后,小龙虾的pH显著升高,虾壳 a^* 和虾肉的 L^* 值差异显著,色泽变得发暗;辐照对肉品色泽的影响主要与肉的颜色主要由肌红蛋白的氧化还原状态及氧结合量来决定^[20],可通过控制调节食品包装内的气体比例含量,减少肉品色泽的变化。Esmer等^[21]研究发现50% O_2 +30% CO_2 +20% N_2 气调包装的冷却肉在14 d的贮藏期内肉色稳定。

从以上情况可以看出,辐照处理对于不同的动

物源肉类食品都能很好的达到杀灭微生物的效果,能有效提高肉类食品贮藏期。而在选择辐照方式、剂量和相适应的气调等技术时,既达到延长保质期的效果,也能避免辐照引起的品质变化。

2.2 辐照对预制熟肉食品的保鲜作用

预制菜是指简单烹调或直接开封即可食用,具有方便、高效的预先烹制菜品,在目前的年轻消费市场越来越受到重视。但预制熟肉食品中一般含有的油脂和辅料含量较多,在贮藏、运输、消费的过程中也易滋生腐败微生物,缩短安全食用日期。

早在前几年就有研究报道利用辐照处理中式传统菜肴腊肉炒豇豆和笋子烧牛肉,菌落总数和霉菌在处理均保持在较低水平,大肠菌群、金黄色葡萄球菌含量在保质期内始终低于检测限,而 TBA(Thiobarbituric Acid)值和粗脂肪含量总体随储藏时间的延长呈持续下降趋势,感官品质均无明显变化,且食用接受度较高^[22],开拓辐照应用在预制菜的前景。张开伟等^[23]进一步利用辐照技术处理无锡肉酿面筋,辐照剂量达到 4 kGy 时能有较强的杀菌能力,且无锡肉酿面筋品质保持良好;张扬等^[24]研究发现辐照处理对盐水鸭、烤鸭的杀菌效果明显,对肉鸭产品的 a^* 值、 b^* 值、 L^* 值没有明显的影响,而氨基酸含量则随着剂量的升高而降低;李娜等^[25]进一步研究电子束辐照处理对烧鸡品质的影响,结果发现辐照处理后烧鸡的 pH、TBA 值、感官指标、质构品质均优于未经辐照处理的对照组,烧鸡的保质期相比对照组延长了 15 d,高效地延长了烧鸡在消费市场上的流通时间。

除此之外,将辐照技术应用在国外特色食品,如热狗、培根和牛肉饼也能达到预期的效果。Ham 等^[26]研究发现不同辐照方式(γ 射线、电子束和 X 射线)和剂量水平处理熟牛肉饼和猪肉香肠后,煮熟的牛肉饼和猪肉香肠的 pH 不受辐射源或剂量的影响,也有效地减少两种食品中的需氧细菌总数,但加速了肉的脂肪氧化;何立超等^[27-28]研究发现辐照(1~9 kGy)可以显著降低火腿肠脂肪和蛋白质的氧化稳定性,5 kGy 剂量辐照对猪肉火腿肠中的微生物起到有效抑制作用。因此大多数预制菜品在烹调后的营养成分较稳定,不易受到辐解自由基氧簇的干扰,很难受到辐照的影响。但不同的辐照来源对加工肉制品的品质属性也有不同的影响,对于色泽敏感和脂肪含量较高的肉类食品也难免会受到自由基氧簇环境的劣变影响,在辐照后的贮藏期间里无法像辐照异味那样复原,从而会影响消费者的感官体验。

3 辐照对肉制品质构特性的影响

过去的研究往往集中于辐照引起肉类蛋白和脂质氧化对食品体系的负面影响,如针对辐照影响肉及肉制品的保水性、质构特性以及蛋白消化率等问题研究^[29]。但近年来也有报道指出在适宜辐照条件下,不仅能改善肉类制品的质构特性,还可以利用协同技

术维持或提高肉制品品质^[30]。因此食品辐照技术将有可能成为肉类工业中的新型修饰或加工手段。

3.1 肉类嫩度品质

肌原纤维蛋白(myofibrillar protein, MP)是肌肉中最丰富的蛋白质,是肌纤维的重要组成部分。辐照通过影响有关蛋白的水解,直接影响了肌原纤维、结缔组织(胶原蛋白)的结构,从而进一步引起肉品质构的变化,也是提升肉类嫩度最直接的原因^[31]。Kanatt 等^[32]利用辐照(0、2.5、5 和 10 kGy)处理印度三种常见肉类(鸡肉、羊肉和水牛)嫩度,发现 2.5 kGy 的剂量改善了三种肉类的嫩度,而水牛肉剪切力的降低更为明显,肌纤维蛋白和胶原蛋白溶解度以及 TCA 可溶性蛋白质含量在辐照后显著增加。Zhang 等^[33]研究发现辐照引起的蛋白质硫醇氧化损失,增加辐照剂量水平造成肌原纤维蛋白和胶原蛋白片段的降解,从而降低肉类食品的剪切力值。而在针对嫩度提升的研究中,适宜的辐照剂量和协同技术具有很好的应用模式。Kuttinarayanan 等^[34]通过辐照和电刺激对牛肉嫩度的改善具有协同作用,利用 2.5 kGy 剂量辐照处理会影响牛肉钙蛋白酶(calpain)对蛋白质水解程度,剪切力值比对照组降低了 2.35 kgf,牛肉嫩度显著增加。

对于辐照处理提升肉类嫩度还应具有合适的条件,Rowe 等^[35]验证了在辐照处理后高度氧化环境降低了 β -钙蛋白的活性和自溶能力,而 m-钙蛋白的活性不受辐射的影响, β -calain 的失活直接减少了肌原纤维蛋白水解量,从而降低牛排的嫩化程度。Sales 等^[36]认为辐照加工并没有提升冷冻的牛肉的嫩度,而认为冷冻/解冻和陈化才是改善牛肉嫩度的有效技术,说明 γ 射线辐照冷冻肉制品形成氧化环境还受到自身水分子状态和活度的影响,在结晶水里射线能量难以活化水分子形成自由基,进而降低自由基氧化效应。同样,辐照引起的高浓度氧化环境也会抑制钙蛋白酶降解肌纤维,另一方面由于冷冻肉类的水分活度不高,降低辐解水产生自由基氧簇的强度和与自由基活性基团结合的几率,因此激活自由基氧化的环境是嫩度提升的不可或缺的条件之一。

辐照对肉品质构影响的程度还取决于辐照剂量、温度、pH、包装形式、贮藏时间、肌肉类型与含水量,不同种类或不同状态蛋白质的辐照敏感性各不相同^[37],在含水量比较低的情况下,蛋白质经过辐照后则倾向于蛋白质多肽链的断裂,但这种情况下,由于水分子电离出的自由基迁移受限,因此辐照对肉制品品质构影响程度较小^[38]。而在含水量比较高的肉制品中,肌肉蛋白对辐照的敏感性较高,肌纤维断裂引起嫩度的提升的可能性就越高。

3.2 肉类凝胶性能

蛋白质的凝胶性能是决定肉类食品质量优劣的关键因素,直接影响肉制品的组织特性、保水性、粘结性以及产品得率,同时也是判别糜类制品优劣的重

要能力^[39]。

辐照在延长肉制品贮藏期的同时,还会影响内源性转谷氨酰胺酶(transglutaminase, TGase)的结构及其活性,从而促进肉糜凝胶的形成效果^[40-41]。Deng等^[42]研究发现辐照降低了鱼糜凝胶中三氯乙酸可溶性多肽的含量,降低了 α -螺旋含量,增加了 β -折叠含量,这种转化会更有利于蛋白质变性和凝胶形成,凝胶网络结构更加致密有序,凝胶强度、白度和持水性均高于未辐照的鱼糜凝胶。肉糜热诱导凝胶形成过程涉及非特异性缔合和疏水相互作用,而二硫键在该过程中起重要作用。Lin等^[43]进一步用电子束和热处理带鱼鱼糜,促进了研磨和凝固过程中非极性基团之间的疏水相互作用,二硫键的形成加强了鱼糜凝胶能力。Lin等^[44]同样对带鱼鱼糜进行高达9 kGy的电子辐照,在7 kGy时增加了亮度和可表达的水量,且凝胶网络结构更加紧凑,凝胶强度值达到最高。

总结以上情况,一方面辐照通过氧化促进羰基含量生成、减少总巯基的含量和 α -螺旋的解离,有效导致肌球蛋白重链(MHC)的显著聚集,蛋白质交联性的增强,蛋白肽链相互作用形成致密的三维网络结构^[45]。另一方面,蛋白二级、三级和四级结构的变化以及粒径的改变极大地促进了水和肌肉蛋白分子之间的相互作用,增强的无序二级结构和内部氢键有利于蛋白变性并进一步阻止水进入内部,极大地破坏了肌动蛋白网络内的氢键重排,利于弱肌球蛋白重链的较弱MP凝胶,蛋白内部聚集速度快于展开速度的趋势^[46],从而形成弹性凝胶基质和牢固的凝胶质地。

4 辐照协同技术的应用

食品辐照技术一般不会引起食品中原子核的变化,但会产生一些其他的化学反应,比如食品中的核酸、蛋白质、脂类等生物大分子经辐照后易发生电离、激发和化学键断裂,导致结构破坏和功能丧失,其次食物中的水分子发生辐解,形成羟基自由基、水合电子、过氧化氢等强氧化或强还原的带电物质,再作用于生物大分子,导致其结构破坏,从而使生物体活性受到损伤^[47-48]。因此,辐照肉制品在实际生产中存在一些瓶颈,常常需要其他辅助措施完成辐照工艺,保持或提高肉制品原有品质和风味,这也是往后研究食品辐照科学的一个热点趋势。

4.1 抗氧化技术

天然抗氧化剂因其安全性高、抗氧化活性强,具有延缓肉质劣变、延长货架期的作用,被广泛应用于肉类食品中的保鲜^[49]。抗氧化剂能与辐解产生的超氧化物阴离子等活性氧簇结合,降低活性自由基与蛋白质外部敏感基团或脂质结合,从而抑制或延缓肉制品蛋白质、脂肪产生氧化效应,保护肉品色泽和品质。

在肉制品色泽保护的研究中,刘文龙等^[50]将天然抗氧化剂茶多酚(TP)和葡萄籽提取物(GSE)应用到辐照(3 kGy)猪肉的保鲜中,发现抗氧化剂的添加

能够减缓辐照产生自由基而引起的氧化效应,避免肉色褐变,保持了原有感官品质,对延长货架期也有不错的效果。Ziyi等^[51]进一步在猪肉中添加壳聚糖、香芹酚、茶多酚,采用2 kGy辐照剂量的 γ 射线处理新鲜猪肉,处理后沙门氏菌、金黄色葡萄球菌数大幅减少,猪肉色泽没有受到较大影响,脂质氧化得到减缓;Ayari等^[52]研究表明利用肉桂醛、抗坏血酸和十水焦磷酸钠组成的生物活性化合物结合 γ 辐射(2 kGy)对碎牛肉可以有效降低肉类样品的微生物数量,能有效抑制辐照处理后产生的氧化反应和风味的劣变;何立超等^[28]研究发现维生素E、茶多酚、迷迭香提取物3种抗氧化剂均能有效抑制辐照诱导的猪肉火腿肠蛋白质和脂肪的氧化,减少辐照异味的形成,说明抗氧化剂能有效的与辐照产生的活性氧簇自由基结合,从而控制营养物质(蛋白脂肪)氧化的发生,进一步抑制不良风味的产生。Arshad等^[53]利用两个剂量(1和2 kGy)的 γ 辐照和3%姜黄粉(TP)联合处理,2 kGy+TP处理的鸡肉在微生物和物理化学品质、抗氧化活性以及鸡肉的感官特性方面都可以达到最佳。

不仅如此,抗氧化剂复配和协同还能有效减缓辐照引起的肉制品中脂质氧化,降低了亚硝酸盐含量,且不影响肉制品的pH和感官特性^[54]。白婵等^[55]研究表明分别用无菌蒸馏水(对照)、大蒜素、4 kGy⁶⁰Co- γ 射线辐照、0.3 g/100 mL葡萄籽提取物以不同结合方式处理新鲜鲈鱼片,能有效减缓鲈鱼脂质氧化,减少菌落总数,延缓汁液流失率。Nisar等^[56]表明添加辣木叶粉(MLP)后都能提高肉类中氨基酸和脂肪酸的含量,将1.5 kGy辐照结合2% MLP还有利于鸡肉的保鲜贮藏。

4.2 可食用涂层技术

天然来源制备的可食用涂层和薄膜因其生物活性特性,如抗真菌、抗菌和抗氧化活性,受到了特别的关注,发展成为一种食品添加剂的载体,如香料、抗菌剂、抗氧化剂和酶。这种类型的包装可以调节功能化合物向食品中的释放,并保持食品表面高水平的添加剂^[57]。

Hassanzadeh等^[58]利用低剂量 γ 辐照(2.5 kGy)和添加葡萄籽提取物(0.1%)的壳聚糖可食涂膜(2%)处理鸡胸肉,研究表明该处理对细菌生长有显著的抑制作用($P<0.05$)和脂质氧化具有保护作用,保质期至少延长了14 d。 γ 射线辐照和壳聚糖复合活性涂层作为屏障系统,阻碍了外来病原微生物、化学物质进入,在辐照处理杀菌后同样起到保护肉类环境作用;Vladimir^[59]研究表明通过番木瓜乙醇提取物与可食性涂膜联合处理鸡腿肉,可导致辐照鸡腿肉在冷藏过程中硫代巴比妥酸反应物质(TBARS)含量略有增加,但对总挥发性氮(TVB-N)含量没有影响,在有效地去除腐败微生物的同时,能延长冷藏的货架期,改善辐照引起鸡腿肉的不良感官和安全性。

壳聚糖、壳聚糖-茶多酚或壳聚糖-香芹酚具有杀

菌活性, 并与辐照相加或协同作用灭活新鲜猪肉上的沙门氏菌和金黄色葡萄球菌, 提供了理想的安全边际。Rao 等^[60] 将羊肉烤肉串和五花培根等肉制品用壳聚糖包被并在用 4 kGy 辐照处理, 发现可显著延缓脂质过氧化, 并可防止微生物生长而导致的腐败。利用天然活性涂层或抗菌药物(壳聚糖、香芹酚、茶多酚)结合辐照处理, 能在低剂量辐照有效的灭活食源性病原体^[51], 延缓脂质氧化和保护肉制品色泽, 为提高肉类安全和肉类质量提供一种新的解决方案。

4.3 气调包装

气调保藏是一种改变所处环境气体组成成分的保藏方法, 具有低成本、安全性高、能较好保持肉制品的风味、色泽、品质以及营养等特点^[12]。通过气调包装技术对食品进行密封包装, 调整气体含量比例, 降低过氧化物的生成, 缓解电离辐照带来的氧化反应。辐照协同气调包装技术在肉制品品质改善中的应用如表 1 所示。

张海伟等^[61] 初步研究表明, 添加抗氧化剂并结合真空包装能显著降低辐照猪肉糜中的脂肪氧化, 冷却肉的脂肪氧化方面真空包装要优于有氧包装; 蒋慧亮等^[62] 利用气调包装结合电子束对蚌肉的保鲜效果, 表明 50% CO₂+30% N₂+20% O₂ 气调包装结合电子束处理后蚌肉的冰藏货架期能达到 28 d, 相较于空白组延长了 16 d, 且能更好抑制蚌肉中的微生物的增长, 减少蚌肉中挥发性盐基氮的产生, 降低蚌

肉中 TBA 值; 陈尚戊等^[63] 进一步结合气调方式处理猪肉, 发现 35% O₂+35% CO₂+30% N₂ 组对减缓了辐照生鲜猪肉的脂肪氧化速度, 对维持辐照生鲜猪肉的感官品质、抑菌有积极作用; 周亚军等^[64] 采用不同剂量辐照处理真空包装和气调包装(75% CO₂+25% N₂) 酱牛肉, 发现辐照剂量与杀菌效果呈正相关, 辐照剂量在 4~6 kGy 时酱牛肉品质较好, 气调包装酱牛肉 4 kGy 辐照贮藏品质较佳, 货架期可达 18 d。

4.4 其他技术

近年来, 在食品辐照技术广泛应用的基础上引入其他非热杀菌技术(如高压处理(High Pressure)、高强度脉冲、酸性电解水(Acidic electrolyzed water, AEW)和陈化技术), 降低辐照处理引起的氧化不良效应, 延长食品的贮藏期。辐照协同其他技术在肉制品品质改善中的应用如表 2 所示。Alahakoon 等^[68] 研究表明, 柑橘皮提取物(CPE, 2%)与电子束辐照(EB, 1 和 2 kGy)和高压(HP, 300 和 400 MPa)的协同作用是一种在不影响调味鸡肉感官属性的情况下延长腌制产品的保质期的有效方法; 酸性电解水具有较低的 pH、较高的有效氯浓度(Available chlorine concentration, ACC)和氧化还原电位(Oxidation-reduction potential, ORP)^[69], 且对人体是安全无害的, 张昊宇等^[70] 采用辐照和酸性电解水结合处理小龙虾仁, 发现酸性电解水结合辐照的杀菌效果显著($P<0.05$)。

表 1 辐照协同气调包装技术在肉制品品质改善中的应用

Table 1 Application of irradiation synergistic modified atmosphere packaging technology in the quality improvement of meat products			
样品	处理条件	处理效果	参考文献
猪五花肉糜	抗氧化剂+真空包装	添加抗氧化剂并结合真空包装能显著降低辐照猪肉糜中的脂肪氧化	[61]
蚌肉	体积分数 50% CO ₂ +30% N ₂ +20% O ₂	减少蚌肉中挥发性盐基氮的产生和减缓脂肪氧化, 有效抑制蚌肉中的微生物的增长, 货架期达28 d, 延长了16 d	[62]
生鲜猪肉	体积分数 35% O ₂ +35% CO ₂ +30% N ₂	减缓了辐照生鲜猪肉的脂肪氧化速度, 对维持辐照肉的感官品质、抑菌有积极作用, 货架期延长了5 d以上	[63]
酱牛肉	体积分数 75% CO ₂ +25% N ₂	辐照剂量在4~6 kGy时酱牛肉品质较好, 超过则会出现辐照异味, 保质期可达18 d	[64]
鸡胸肉	体积分数 70% CO ₂ +30% N ₂	高剂量辐照(4 kGy)并贮藏25 d以后, TBARS值仍未超过1 mg/kg	[65]
冷却猪肉	体积分数 60% O ₂ +30% CO ₂ +10% N ₂	提高辐照猪肉的品质, 脂肪氧化少而且肉的颜色稳定, 无任何异味	[66]
酱牛肉	体积分数 75% CO ₂ +25% N ₂	对脂肪氧化有一定的控制作用, 对酱牛肉的颜色没有显著影响, 能有效延长酱牛肉的货架期4 d	[67]

表 2 辐照协同其他技术在肉制品品质改善中的应用

Table 2 Application of irradiation synergistic with other technologies in the improvement of meat product quality			
样品	处理条件	处理效果	参考文献
鸡肉	柑橘皮提取物(CPE, 2%)与 电子束辐照和高压	不影响调味鸡肉感官属性的情况下延长腌制产品的保质期	[67]
小龙虾仁	辐照+酸性电解水	杀菌效果显著, 且不影响虾仁食用品质	[69]
牛肉	辐照+老化技术	剪切力值降低和IMP下降, 次黄嘌呤增加, 在低老化温度下缩短老化时间可以减少脂质氧化程度	[71]
牛肉	辐照+真空包装	增加牛肉高铁肌红蛋白含量, 但也会增加胶原蛋白的溶解度, 从而降低牛肉的剪切力	[72]
牛肉	辐照+反复冻融	改善蛋白质氧化及品质的影响	[73]
草鱼鱼糜	辐照+微波加热	减少电子束辐照对于草鱼鱼糜气味不利的影响	[74]

5 结语与展望

食品辐照技术也称为“冷巴氏杀菌”，其杀菌效率高，也在改善辐照引起的肉制品劣变和提高肉糜凝胶性能的应用方面也表现很大的潜力，将会成为修饰和加工肉及肉制品的一种新型手段。但目前辐照食品行业仍然面临阻碍发展的一系列问题：如缺乏符合食品辐照发展的法律法规体系；食品辐照卫生标准及工艺标准修订严重滞后于技术和产业发展；没有完善的辐照食品研究、管理体系；行政管理人员和公众对辐照食品缺乏认识等。

因此将食品辐照技术与食品肉类工业的应用衔接，满足更多人的消费需求，就应重视基础研究，加大科研投入，加强对辐照食品安全性的研究、新辐照食品产品的开发、新应用领域研究；制定新的《辐照食品安全管理方法》、完善食品辐照标准体系；扩大食品辐照产业化的品种和规模；建立与国际接轨的辐照食品鉴定标准和方法，促进辐照食品贸易的发展；加大宣传力度、提高辐照食品的可接受性。

食品辐照经过了60年的世界性的研究，已被证明是一种有效地提高食品安全性和延长食品货架期的加工方式；食品辐照已经成功从实验室走向市场，显示出旺盛的生命力和巨大的社会效益，且具有其他技术不能比拟的优势，这也必使其拥有广阔的发展前景，有望成为保障国家食品安全的有利武器。

参考文献

- [1] 朱建军. 肉类的营养价值及宜食用量[J]. *肉类工业*, 2015(3): 54-56. [ZHU J J. Nutritional value and suitable consumption of meat[J]. *Meat Industry*, 2015(3): 54-56.]
- [2] AHMAD M I, FAROOQ S, ALHAMOUD Y, et al. A review on mycoprotein: History, nutritional composition, production methods, and health benefits[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 121(1): 14-29.
- [3] 周惠健, 袁静瑶, 朱丹, 等. 杀菌方式对红烧老鹅脂脂肪酸组成和挥发性风味的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(18): 216-222. [ZHOU H M, YUAN J Z, ZHU D, et al. Effects of sterilization methods on fatty acid composition and volatile flavor of braised old goose[J]. *Food Science*, 2019, 40(18): 216-222.]
- [4] 王惠汀, 孙学颖, 王丹, 等. 肉制品中杂环胺类化合物形成及控制措施的研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(5): 195-203. [WANG H S, XUN X Y, WANG D, et al. Research progress on the formation and control measures of heterocyclic amines in meat products[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(5): 195-203.]
- [5] AJIBOLA O J. An overview of irradiation as a food preservation technique[J]. *Novel Research in Microbiology Journal*, 2020, 4(3): 779-789.
- [6] DILEEP S Y, MANASA K. Irradiation in food processing: A review[J]. *International Journal of Chemical Studies*, 2018, 7(2): 131-136.
- [7] 王媛, 刘雪婷, 陈金定, 等. 电子束辐照技术在食品工业中的应用现状及研究进展[J]. *食品工业*, 2021, 42(7): 257-261. [WANG Y, LIU X T, CHEN J D, et al. Application status and research progress of electron beam irradiation technology in food industry[J]. *Food Industry*, 2021, 42(7): 257-261.]
- [8] JAISWAL A K. Wholesomeness and safety aspects of irradiated foods[J]. *Food Chemistry*, 2019, 285: 363-368.
- [9] 段鑫, 欧杰, 李柏林. 辐照技术在肉制品杀菌保鲜中的应用[J]. *食品科学*, 2010, 31(1): 278-282. [DUAN X, OU J, LI B L. Application of irradiation technology in sterilization and preservation of meat products[J]. *Food Science*, 2010, 31(1): 278-282.]
- [10] 李国林, 林平, 李咏富, 等. 辐照处理在动物源食品加工中的应用[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(6): 211-216. [LI G L, LIN P, LI Y F, et al. Application of irradiation treatment in animal-derived food processing[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(6): 211-216.]
- [11] 洪奇华, 王梁燕, 孙志明, 等. 辐照技术在肉制品加工保鲜中的应用[J]. *核农学报*, 2021, 35(3): 667-673. [HONG Q H, WANG L Y, SUN Z M, et al. Application of irradiation technology in the processing and preservation of meat products[J]. *Journal of Nuclear Agronomy*, 2021, 35(3): 667-673.]
- [12] LUNG H M, CHENG Y C, CHANG Y H, et al. Microbial decontamination of food by electron beam irradiation[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2015, 44(1): 66-78.
- [13] HOSSAIN S, KHAN R, HABIB R, et al. Effects of gamma irradiation on shelf life and quality of black bengal goat meat[J]. *Asian-Australasian Journal of Food Safety and Security*, 2017, 1(1): 65-73.
- [14] 雷英杰, 陈尚茂, 敬楹莹, 等. 电子束辐照处理对生鲜猪肉的保鲜作用[J]. *现代食品科技*, 2021, 37(10): 136-144. [LEI Y J, CHEN S W, JING Y Y, et al. Preservation effect of electron beam irradiation on fresh pork[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2021, 37(10): 136-144.]
- [15] ISLAM A, SADAKUZZAMAN M, HOSSAIN M A, et al. Effect of gamma irradiation on shelf life and quality of indigenous chicken meat[J]. *Journal of Bangladesh Agricultural University*, 2019, 17(4): 560-566.
- [16] ZHEN Y, WANG H, WANG W, et al. Effect of 10MeV E-beam irradiation combined with vacuum-packaging on the shelf life of Atlantic salmon fillets during storage at 4 °C[J]. *Food Chemistry*, 2014, 145: 535-541.
- [17] 郭红霞, 冯涛, 戚文元, 等. 电子束辐照对储藏期间三文鱼鲜度的影响[J]. *保鲜与加工*, 2020, 20(6): 14-9,24. [GUO H X, FENG T, QI W Y, et al. Effects of electron beam irradiation on salmon freshness during storage[J]. *Preservation and Processing*, 2020, 20(6): 14-9,24.]
- [18] 戚文元, 王海宏, 岳玲, 等. 电子束辐照杀菌对罗非鱼片冷藏期和感官品质的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(5): 138-146. [QI W Y, WANG H H, YUE L, et al. Effects of electron beam irradiation sterilization on storage period and sensory quality of tilapia fillets[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2020, 48(5): 138-146.]
- [19] 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 G X, MA W H, QIAN W X, et al. Quality analysis of ready-to-eat crayfish irradiated with different doses of electron beam[J]. *Food Science and Technology*, 2020, 45(10): 155-161.]
- [20] 程述震, 王志东, 张春晖, 等. 肉及肉制品中蛋白氧化的研究进展[J]. *食品工业*, 2017, 38(1): 230-234. [CHENG S Z, WANG Z D, ZHANG C H, et al. Research progress on protein oxidation in meat and meat products[J]. *Food Industry*, 2017, 38(1): 230-234.]
- [21] ESMER O K, IRKIN R, DEGIRMENCIOGLU N, et al. The effects of modified atmosphere gas composition on microbiological criteria, color and oxidation values of minced beef meat[J]. *Meat*

Science, 2010, 88(2): 221–226.

[22] 陈谦, 杨敏, 高鹏, 等. $\sim(60)\text{Co-}\gamma$ 辐照对中式传统菜肴方便食品品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(21): 249–253, 262.

[CHEN Q, YANG M, GAO P, et al. Effects of $\sim(60)\text{Co-}\gamma$ irradiation on the quality of traditional Chinese instant food[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2019, 47(21): 249–253, 262.]

[23] 张开伟, 汤力, 吴晶. 辐照技术在无锡肉酿面筋杀菌保鲜中的应用[J]. 食品科技, 2012, 37(11): 54–57. [ZHANG K W, TANG L, WU J. Application of irradiation technology in sterilization and preservation of Wuxi meat gluten[J]. Food Science and Technology, 2012, 37(11): 54–57.]

[24] 张扬, 赵永富, 常国斌, 等. 辐照处理对盐水鸭和烤鸭品质的影响[J]. 金陵科技学院学报, 2017, 33(3): 89–92. [ZHANG Y, Zhao Y F, CHANG G B, et al. Effects of irradiation on the quality of salted duck and roast duck[J]. Journal of Jinling Institute of Science and Technology, 2017, 33(3): 89–92.]

[25] 李娜, 骆琦, 薛丽丽, 等. 辐照对烧鸡贮藏期品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(8): 183–187. [LI N, LUO Q, XUE L L, et al. Effects of irradiation on the quality of roast chicken during storage[J]. Food Research and Development, 2017, 38(8): 183–187.]

[26] HAM Y K, KIM H W, HWANG K E, et al. Effects of irradiation source and dose level on quality characteristics of processed meat products[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2017, 130: 259–264.

[27] 何立超, 马素敏, 李成梁, 等. 辐照处理提高猪肉火腿肠保鲜效果[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 296–302. [HE L C, MA S M, LI C L, et al. Irradiation treatment improves the preservation effect of pork ham sausage[J]. Chinese Journal of Agricultural Engineering, 2016, 32(22): 296–302.]

[28] 何立超, 杨海燕, 孙秀秀, 等. 3种抗氧化剂对辐照猪肉火腿肠异味的控制技术研究[J]. 核农学报, 2019, 33(3): 509–517. [HE L C, YANG H Y, SUN X X, et al. Control technology of three antioxidants on irradiated pork ham sausage[J]. Journal of Nuclear Agronomy, 2019, 33(3): 509–517.]

[29] 刘茜. 功能食品(含脂类与含蛋白类)辐照标志物鉴定检测技术研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2014. [LIU Q. Research on identification and detection technology of irradiation markers of functional foods (containing lipids and proteins)[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2014.]

[30] 魏文婧. 低能电子束处理对冷鲜牛排品质及货架期的影响研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022. [WEI W J. Study on the effect of low-energy electron beam treatment on the quality and shelf life of chilled steak[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022.]

[31] YOON H S, LEE J W, LEE K H, et al. Effect of gamma irradiation on the microstructure and post-mortem anaerobic metabolism of bovine muscle[J]. Radiation Physics & Chemistry, 2001, 61(2): 163–169.

[32] KANATT S R, CHAWLA S P, SHARMA A. Effect of radiation processing on meat tenderisation[J]. Radiation Physics & Chemistry, 2015, 111: 1–8.

[33] ZHANG M, HE L, LI C, et al. Effects of gamma ray irradiation-induced protein hydrolysis and oxidation on tenderness change of fresh pork during storage[J]. Meat Science, 2020, 163: 108058.

[34] KUTTINARAYANAN P, RAMANATHAN R. Effects of low-dose irradiation and electrical stimulation on quality parameters of beef longissimus from Bos indicus×Bos taurus bulls[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2010, 45(5): 1009–

1015.

[35] J ROWE, R M K, M L S, et al. Oxidative environments decrease tenderization of beef steaks through inactivation of mu-calpain[J]. Journal of Animal Science, 2004, 82(11): 3254–3266.

[36] SALES L A, RODRIGUES L M, SILVA D, et al. Effect of freezing/irradiation/thawing processes and subsequent aging on tenderness, color, and oxidative properties of beef[J]. Meat Science, 2020, 163(May): 108078.1.

[37] KWON J H, AHN J J, SHAHBAZ H. Food irradiation processing[M]. Food Engineering Handbook: Food Engineering Fundamentals, 2015.

[38] HALLIDAY J W, CASPERSEN J M, NICKERSON C L, et al. ESR studies of transient free radicals in irradiated food components[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2007, NS-26(1): 1771–1775.

[39] HE N. Effects of high hydrostatic pressure on the conformational structure and gel properties of myofibrillar protein and meat quality: A review[J]. Foods, 2021, 10(8): 1872.

[40] KIM T K, HWANG K E, HAM Y K, et al. Interactions between raw meat irradiated by various kinds of ionizing radiation and transglutaminase treatment in meat emulsion systems[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2019, 166: 108452.

[41] HONGWEI, CAO, XIDONG, et al. Catalytic effect of transglutaminase mediated by myofibrillar protein crosslinking under microwave irradiation[J]. Food Chemistry, 2019, 284: 45–52.

[42] DENG S, LV L, YANG W, et al. Effect of electron irradiation on the gel properties of *Collichthys lucidus* surimi[J]. Radiation Physics & Chemistry, 2017, 130(Complete): 316–320.

[43] LIN X, YANG W, XU D, et al. Effect of electron irradiation and heat on the structure of hairtail surimi[J]. Radiation Physics & Chemistry, 2015, 114: 50–54.

[44] LIN X, YANG W, XU D, et al. Improving gel properties of hairtail surimi by electron irradiation[J]. Radiation Physics & Chemistry, 2015, 110: 1–5.

[45] QIN J, LEI Y, QIU H, et al. Effect of hydroxyl radical oxidation on degradation of myofibrillar proteins from coregonus peled[J]. Food Science, 2019(15): 31–36.

[46] LI C L, HE L C, MA S, et al. Effect of irradiation modification on conformation and gelation properties of pork myofibrillar and sarcoplasmic protein[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 84: 181–192.

[47] 泰彦小. The principle of food irradiation and wholesomeness of irradiated food[J]. 日本原子力文化振興財団月報, 2003, 242: 1–3. [TAI Y X. The principle of food irradiation and wholesomeness of electrically food[J]. Dankai Monthly Report, Japan Atomic Power Culture Stimulation, 2003, 242: 1–3.]

[48] 李斌, 杨泰, 肖洪, 等. 辐照对食品品质的影响及辐照食品的研究进展[J]. 粮食与油脂, 2019, 32(4): 3. [LI B, YANG Q, XIAO H, et al. Effects of irradiation on food quality and research progress of irradiated food[J]. Food and Oil, 2019, 32(4): 3.]

[49] 章林, 黄明, 周光宏. 天然抗氧化剂在肉制品中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2012, 33(7): 5. [ZHANG L, HUANG M, ZHOU G H. Research progress on the application of natural antioxidants in meat products[J]. Food Science, 2012, 33(7): 5.]

[50] 刘文龙, 雷英杰, 刘倩, 等. 抗氧化剂协同电子束辐照对生鲜猪肉的保鲜作用[J]. 食品科技, 2021, 46(10): 101–107. [LIU W L, LEI Y J, LIU Q, et al. The effect of antioxidant combined with electron beam irradiation on fresh pork[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(10): 101–107.]

- [51] ZIYI H, YINGPING X, BINGKUI W, et al. Combined treatments of low dose irradiation with antimicrobials for inactivation of foodborne pathogens on fresh pork[J]. *Food Control*, 2021, 125: 107977.
- [52] AYARI S, HAN J, VU K D, et al. Effects of gamma radiation, individually and in combination with bioactive agents, on microbiological and physicochemical properties of ground beef[J]. *Food Control*, 2016, 64: 173–180.
- [53] ARSHAD M S, AMJAD Z, YASIN M, et al. Quality and stability evaluation of chicken meat treated with gamma irradiation and turmeric powder[J]. *International Journal of Food Properties*, 2019, 22(1): 154–172.
- [54] HWANG K-E, KIM H-W, SONG D-H, et al. Effects of antioxidant combinations on shelf stability of irradiated chicken sausage during storage[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2015, 106: 315–319.
- [55] 白焯, 许萍, 黄敏, 等. 辐照结合复配保鲜剂对鲈鱼贮藏品质的影响[J]. *肉类研究*, 2021, 35(6): 50–56. [BAI C, XU P, HUANG M, et al. Effects of irradiation combined with compound preservative on storage quality of sea bass[J]. *Meat Research*, 2021, 35(6): 50–56.]
- [56] NISAR M F, ARSHAD M S, YASIN M, et al. Influence of irradiation and moringa leaf powder on the amino acid and fatty acid profiles of chicken meat stored under various packaging materials[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2019, 43(9): e14166.
- [57] BAZARGANI-GILANI B, ALIAKBARLU J, TAJIK H. Effect of pomegranate juice dipping and chitosan coating enriched with *Zataria multiflora* Boiss essential oil on the shelf-life of chicken meat during refrigerated storage[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2015, 29: 280–287.
- [58] HASSANZADEH P, TAJIK H, ROHANI S M R, et al. Effect of functional chitosan coating and gamma irradiation on the shelf-life of chicken meat during refrigerated storage[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2017, 141: 103–109.
- [59] VLADIMIR M. Using of combined treatment between edible coatings containing ethanolic extract of papaya (*Carica papaya* L.) leaves and gamma irradiation for extending shelf-life of minced chicken meat[J]. *American Journal of Food Science and Technology*, 2014, 2(1): 6–16.
- [60] RAO M S, CHANDER R, SHARMA A. Development of shelf-stable intermediate-moisture meat products using active edible chitosan coating and irradiation[J]. *Journal of Food Science*, 2010, 70(7): 325–331.
- [61] 张海伟, 哈益明, 王锋. 包装形式对辐照冷却猪肉糜脂肪氧化的影响[J]. *核农学报*, 2006(2): 128–131. [ZHANG H W, HA Y M, WANG F. Effects of packaging form on fat oxidation of irradiated chilled minced pork[J]. *Chinese Journal of Nuclear Agronomy*, 2006(2): 128–131.]
- [62] 蒋慧亮, 王正云, 杨絮, 等. 气调包装结合电子束辐照对蚌肉的保鲜效果[J]. *现代食品科技*, 2021, 37(3): 147–153. [JIANG H L, WANG Z Y, YANG X, et al. The effect of modified atmosphere packaging combined with electron beam irradiation on the preservation of mussels[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2021, 37(3): 147–153.]
- [63] 陈尚茂, 李吉洪, 汤利元, 等. 气调包装对辐照生鲜猪肉保鲜效果及品质的影响[J]. *肉类工业*, 2022(4): 12–17. [CHEN S X, LI J H, TANG L Y, et al. Effects of modified atmosphere packaging on the preservation effect and quality of irradiated fresh pork[J]. *Meat Industry*, 2022(4): 12–17.]
- [64] 周亚军, 李大宇, 陈艳, 等. 辐照剂量对不同包装酱牛肉贮藏品质的影响[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2021, 51(4): 1548–1556. [ZHOU Y J, LI D Y, CHEN Y, et al. Effects of irradiation dose on storage quality of beef with different packaging sauces[J]. *Journal of Jilin University (Engineering Science)*, 2021, 51(4): 1548–1556.]
- [65] CHOULIARA E, BADEKA A, SAVVAIDIS I, et al. Combined effect of irradiation and modified atmosphere packaging on shelf-life extension of chicken breast meat: Microbiological, chemical and sensory changes[J]. *European Food Research & Technology*, 2008, 226(4): 877–888.
- [66] 耿胜荣, 林若泰. 包装方式对减轻冷却猪肉辐照异味的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2008(2): 137–139. [GENG S R, LIN R T. Effects of packaging methods on reducing the odor of irradiated chilled pork[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2008(2): 137–139.]
- [67] 李大宇. 不同杀菌工艺和包装技术对酱牛肉贮藏品质的影响试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020. [LI D Y. Experimental study on the effect of different sterilization processes and packaging technologies on the storage quality of sauce beef[D]. Changchun: Jilin University, 2020.]
- [68] ALAHAKOON A U, JAYASENA D D, JUNG S, et al. Effects of electron beam irradiation and high pressure treatment combined with citrus peel extract on seasoned chicken breast meat[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2015, 39(6): 2332–2339.
- [69] 赵爱静, 王萌, 赵飞, 等. 酸性电解水冰对南美白对虾杀菌保鲜效果的研究[J]. *现代食品科技*, 2016, 32(3): 126–131, 245. [ZHAO A J, WANG M, ZHAO F, et al. Study on the sterilization and fresh-keeping effect of acidic electrolyzed water ice on *Penaeus vannamei*[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2016, 32(3): 126–131, 245.]
- [70] 张昊宇, 胡谨然, 冯卓, 等. 酸性电解水结合辐照对淡水小龙虾虾仁品质的影响[J]. *食品工业*, 2019, 40(9): 177–181. [ZHANG H Y, HU J R, FENG Z, et al. Effects of acidic electrolyzed water combined with irradiation on the quality of freshwater crayfish shrimp[J]. *Food Industry*, 2019, 40(9): 177–181.]
- [71] DONG G, CHEORUN J, CHEOL K H, et al. Application of electron-beam irradiation combined with aging for improvement of microbiological and physicochemical quality of beef loin[J]. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 2016, 36(2): 215–222.
- [72] RODRIGUES L M, SALES L A, FONTES P R, et al. Combined effects of gamma irradiation and aging on tenderness and quality of beef from Nellore cattle[J]. *Food Chemistry*, 2020, 313(C): 126137.
- [73] 陈茜茜, 黄明, 邹玉峰, 等. 辐照和反复冻融对牛肉蛋白质氧化及食用品质的影响[J]. *食品科学*, 2014, 35(19): 1–5. [CHEN Q Q, HUANG M, ZOU Y F, et al. Effects of irradiation and repeated freezing and thawing on beef protein oxidation and edible quality[J]. *Food Science*, 2014, 35(19): 1–5.]
- [74] 张鸿飞. 电子束辐照结合微波加热对鱼糜保鲜及品质的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2016. [ZHANG H F. Effects of electron beam irradiation combined with microwave heating on the preservation and quality of surimi[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.]