

文章编号:1000-8551(2021)03-0667-07

# 辐照技术在肉制品加工保鲜中的应用

洪奇华<sup>1</sup> 王梁燕<sup>2,3</sup> 孙志明<sup>3</sup> 华跃进<sup>2,3,\*</sup><sup>(1</sup>浙江大学动物科学学院,浙江 杭州 310058;<sup>2</sup>浙江大学生命科学院生物物理研究所/教育部生物系统稳态与保护重点实验室,浙江 杭州 310058;<sup>3</sup>浙江大学原子核

农业科学研究所/农业农村部核农学重点实验室,浙江 杭州 310058)

**摘要:**食源性致病菌和腐败菌是造成食源性疾病和食品腐败的最主要原因。杀菌剂和防腐剂等传统的食品保鲜技术不仅会破坏食品特有风味,而且会造成化学污染,不利于人体健康。辐照技术作为一种新型的绿色“非热”加工技术,具有环保、安全、便捷、高效等特点,已被广泛应用于食品加工业中。本文结合国内外研究进展,介绍了食品辐照杀菌技术的机理和优势,阐述了辐照技术在生鲜肉和熟食肉制品加工、有害残留物降解中的应用,同时探讨了影响肉制品辐照效果的因素,以期为新工艺的研发提供参考,促进肉制品辐照加工保鲜技术的发展。

**关键词:**辐照;肉制品;杀菌;工艺;保鲜

DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2021.03.0667

“民以食为天、食以安为先”,食品安全直接关系到人类健康,已成为全世界关注的热点。影响食品安全的因素有很多,但病原微生物污染和化学药物残留是影响食品安全的重要原因之一。近年来,食品加工和储存过程中受致病微生物污染、化学药物残留引起的安全事件时有发生。2015年以来,墨西哥连续四年发生食物导致的寄生虫感染;2016年,欧洲多国爆发食品“雪卡病毒”中毒事件,数百人因感染急性胃肠炎住院;2018年12月,美国农业部(United States Department of Agriculture, USDA)召回了1200万磅被沙门氏菌污染的生牛肉产品,至少26个州数百人患病;全球每年有超过1亿人感染沙门氏菌。

肉制品作为重要的食物来源,由于其营养丰富、水分活度较高,在生产、加工、运输和贮存过程中极易被各种致病菌和腐败菌污染<sup>[1-2]</sup>,保质期很短,必须通过适当的方法控制微生物繁殖。传统的肉类保鲜技术主要有低温冷藏、干燥技术、高温灭菌、高压灭菌、微波技术、防腐处理等<sup>[3]</sup>,但各有缺陷。冷冻产品需要专用冷库、冷藏车和冷柜,形成一条巨大且完整的“冷链”,一旦中断就可能影响产品的保质期

及品质;干燥处理、高温灭菌和高压灭菌易使产品外观、质地和风味受损,影响产品销售;紫外线和微波灭菌因穿透性弱而杀菌不彻底;防腐剂和熏蒸药剂的过量使用不仅会破坏食品特有的品质,还会造成化学残留,危害身体健康。上述方法均会在不同程度上造成肉制品的质量下降,因此,需要寻求一种新型的灭菌加工方式。

利用电离辐射( $\gamma$ 射线、高能电子束或X射线)与物质相互作用所产生的效应,对食品进行“冷”杀菌,能有效控制食品中的绝大多数有害微生物,并能最大限度保持食品原有的品质和风味,延长货架期<sup>[4-6]</sup>,该技术已得到越来越多的关注和应用。本文就食品辐照技术在肉类加工保鲜中的应用做简要综述,以期促进该技术的进一步研究与发展。

## 1 食品辐照杀菌的机理和优势

自1930年科学家将射线用于杀灭食品中细菌并获专利以来<sup>[7]</sup>,辐照已作为一种独特、安全、优质、高效的食品“非热”加工技术,在解决食品安全和食品保

收稿日期:2019-09-16 接受日期:2020-01-03

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2015CB910600),国家自然科学基金(31670065、31870051)

作者简介:洪奇华,男,高级实验师,主要从事动物营养和动物产品加工的实验教学与研究。E-mail: hongqihua@zju.edu.cn

\* 通讯作者:华跃进,男,教授,主要从事DNA损伤修复机制和耐辐射球菌极端抗性机理研究。E-mail: yjhua@zju.edu.cn

鲜贮藏中发挥着越来越重要的作用,在国内外得到了广泛的推广应用。

### 1.1 食品辐照杀菌技术的原理

食品辐照杀菌技术是利用波长极短的高能射线(如 $\gamma$ 射线、高能电子束、X射线等)辐照食物表面和内部的微生物,从而达到食品保鲜目的。

高能射线杀灭微生物的机理主要有直接效应和间接效应。直接效应是指射线作用于核酸、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,导致结构破坏和功能丧失;间接效应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。

间接效应引起的DNA损伤是微生物致死的主要原因。不同微生物对辐照的敏感性不同,同一种微生物对不同种类射线的敏感性也存在差异。如单核细胞增生李斯特菌、金黄色葡萄球菌和副溶血性弧菌在 $\gamma$ 射线辐照时的 $D_{10}$ 值(微生物总数降低至其初始值10%所需要的辐照剂量)分别为0.64、0.63和0.29 kGy,而在电子束辐照时的 $D_{10}$ 值分别为0.79、0.81和0.36 kGy<sup>[8]</sup>。

### 1.2 辐照杀菌技术在食品加工中的优势

相对于传统的食品灭菌方式,辐照杀菌具有多种独特的优势:1)杀菌效果好。射线穿透力强,可对预先包装好的食品进行均匀彻底的灭菌,避免二次污染;2)属于“非热”加工技术。可在常温或冷冻状态下进行,基本不会引起食物内部升温,较好地保持食品色香味形和营养品质;3)操作简单。固液态、干鲜货、大小包等不同形式的食品均可进行辐照杀菌处理,并能够大规模连续快速加工;4)安全环保。不需添加剂,无任何残留,已成为公认的绿色食品保鲜加工技术;5)节约能源。与热处理、干燥和冷冻保藏相比,辐照处理能耗降低几倍到十几倍。据国际原子能机构测算,食品采用冷藏消耗能量为 $90 \text{ kW} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{t}^{-1}$ ,巴氏加热消毒为 $230 \text{ kW} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{t}^{-1}$ ,热消毒为 $300 \text{ kW} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{t}^{-1}$ ,而针对性辐照杀菌仅为 $0.76 \text{ kW} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{t}^{-1}$ <sup>[9]</sup>。

## 2 辐照技术在肉制品保鲜中的应用

辐照技术应用于肉制品能有效地抑制或杀灭致病菌、腐败菌,较好地保持肉制品的色香味,减少食源性疾病,同时延长保质期。该技术可同时应用于冷冻包装和熟畜禽肉类,尤其适合处理那些采用传统方法处理时对风味和品质影响较大的肉制品。

### 2.1 辐照杀菌技术在生鲜肉加工中的应用

冷鲜肉营养物质丰富,富含蛋白质、脂肪、氨基酸、维生素等营养成分,是微生物繁殖的良好基质。近年来,因禽流感和非洲猪瘟爆发等原因,冷鲜肉已成肉类行业消费的主要趋势<sup>[10]</sup>。尽管冷鲜肉的生产、贮存、运输和销售都在低温下进行,但中间不可避免地会发生“冷链中断”,腐败菌或致病菌便会乘虚而入;同时有些微生物具有耐低温的特性,会导致肉制品腐败变质而缩短货架期,甚至危及消费者健康。

由于冷鲜肉独特的物理状态和品质特征,不宜采用高温高压、巴氏灭菌等杀菌手段,而辐照技术能进行“非热杀菌”,与其所需的低温环境不冲突,从而有效降低肉制品中食源性致病和腐败微生物的含量。

目前,对冷鲜猪肉的辐照研究报道较多。Xavier等<sup>[11]</sup>用中等剂量 $\gamma$ 射线(2~5 kGy)辐照肉馅,在贮藏过程中,对微生物指标(大肠菌群、假单胞菌属、嗜温好氧)进行计数,并对理化指标(酸碱度、颜色和硫代巴比妥酸)和感官变化进行了评价,发现在不影响食品质量的情况下, $\gamma$ 射线辐照可降低致病菌存在的风险,从而提出当初始致病菌量不太高时,可采用辐照来提高冷冻肉的安全性;冯晓琳等<sup>[12]</sup>研究认为低剂量的电子束辐照对真空包装冷鲜猪肉品质影响较小;程述震等<sup>[13]</sup>对比了同等剂量下 $\gamma$ 射线和电子束辐照处理冷鲜猪肉的差异,发现电子束辐照后猪肉的理化性质、营养品质和感官风味均优于 $\gamma$ 射线辐照;Li等<sup>[14]</sup>探讨了不同剂量射线辐照鲜猪肉对其后续4℃贮藏过程中品质的影响,结果表明7 kGy剂量以上辐照会产生明显的“辐照味”,但贮存7 d后气味减少;此外,辐照促进了脂质氧化,也显著增加了 $a^*$ 值(红度),但对 $b^*$ 值(亮度)和 $L^*$ 值(黄度)影响不大,且 $a^*$ 值的增加存在剂量依赖性。

除了冷鲜猪肉,也有不少文献对冷鲜牛肉、鸡肉、羊肉等进行了辐照研究。Kundu等<sup>[15-16]</sup>测试了低剂量电子束辐照生牛肉片的效果,发现1 kGy剂量电子束辐照新鲜牛肉表面对完整牛肉肌肉块的感官特性影响很小,但可降低大肠杆菌O157:H7、VTEC和沙门氏菌混合物存活率;肖欢等<sup>[17]</sup>和翟建青等<sup>[18]</sup>发现<sup>60</sup>Co- $\gamma$ 射线和电子束辐照均显著降低了冷鲜鸡的总菌落数,总挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)值、嫩度和色度等参数均优于未辐照样品;Henriques等<sup>[19]</sup>研究发现 $\gamma$ 射线能有效灭活羊肉中的大肠菌群和沙门氏菌,并且3 kGy剂量的辐照效果最佳;Derakhshan等<sup>[20]</sup>评估了鹌鹑肉经电子束辐照后,于4℃保存15 d的微生物学、化学和感官变化,发现辐

照降低了样品的微生物水平,且 TVB-N 含量显著降低,硫代巴比妥酸(thiobarbituric acid, TBA)水平显著升高,但感官特性变化不大,因此用 1.5~3 kGy 剂量的电子束处理鹌鹑以延长货架期比较合适。

综合以上研究结果:采用 1~3 kGy 低剂量  $\gamma$  射线或电子束辐照处理不同形态的冷鲜猪肉或其他畜禽肉品,均能显著降低微生物水平,有利于肉制品的保鲜和减少致病微生物的危害;7 kGy 以上剂量辐照会产生明显的“辐照味”,生产中选用辐照剂量时需引起重视;电子束辐照后猪肉的各项品质指标均优于  $\gamma$  射线辐照,因此,建议肉制品辐照加工时尽可能选择电子束辐照手段。

## 2.2 辐照杀菌技术在熟食肉制品加工中的应用

我国是饮食文化大国,各地的传统名特肉制品琳琅满目,如干制品(猪肉脯、牛肉脯等)、酱卤制品(叉烧肉、酱牛肉、盐水鸭等)、熏烤制品(烤鸡、烤鸭等)、油炸制品、火腿制品等。但其中大部分产品极易受到微生物污染,导致货架期偏短,只能以供应本地为主,无法远销和外销。利用辐照技术可以抑制或杀死普通熟食包装中的微生物,延长货架期,开拓产品更广阔的市场。

相对于冷鲜肉,熟食可采用较高剂量电子束进行辐照处理。张艳艳等<sup>[21]</sup>用电子束辐照处理散装即食酱卤牛肉,发现 6.0 kGy 剂量电子束辐照可控制微生物水平,对感官和脂质过氧化等指标均无显著影响,并能延长货架期至 10 d;陈秀兰等<sup>[22]</sup>用 6 kGy 以上剂量辐照采用铝箔袋真空包装并经 4℃ 低温预处理的盐水鹅,其货架期从对照的 1 周延长至 2 个月以上;张扬等<sup>[23]</sup>发现 4 kGy 剂量<sup>60</sup>Co- $\gamma$  射线辐照盐水鸭和烤鸭,既可以充分控制其含菌量,又可以保持较好的品质;Feng 等<sup>[24]</sup>用电子束辐照腌制的熟火鸡肉,发现脂质氧化作用不大,蛋白质氧化增加,且辐照后有褪色现象,但腌制的熟火鸡肉制品比未腌制的氧化耐受性更高;李娜等<sup>[25]</sup>发现电子束辐照能改善真空包装烧鸡的贮藏品质,杀菌效果显著;An 等<sup>[26]</sup>评估了 0~4.5 kGy 剂量电子束辐照后 4℃ 真空包装下贮存 40 d 期间熏鸭肉的质量参数和稳定性,认为低剂量电子束辐照和真空包装有利于延长保质期,且不影响烟熏鸭肉的感官特性;何立超等<sup>[27]</sup>用 5 kGy 剂量  $\gamma$  射线辐照处理猪肉火腿肠,可以对微生物起到有效的抑制作用。因此,利用 4~6 kGy 剂量的电子束辐照熟食肉制品,既可以很好地控制微生物水平,提高货架期,又不影响其感官品质。

## 2.3 辐照技术在有害残留物降解中的应用

利用一定剂量的电离射线辐照肉制品,能使其中的

的化学污染物发生转变或降解,改变其结构和特性,从而去除食品中的重金属、抗生素、发色剂、毒素等有害残留物,同时较好地维持肉制品的品质。含铬(Cr)饲料的使用,容易导致六价铬积聚在猪肉中,为降低含铬猪肉对人体的毒性,Ren 等<sup>[28]</sup>尝试用高能电子束辐照处理瘦肉、肥肉和大理石纹猪肉,发现该方法能将高毒性六价铬有效地还原为低毒三价铬,还原效率最高达 98.03%;李军等<sup>[29]</sup>研究表明 4 kGy 剂量电子束辐照能显著降解鸡肉中的氯霉素,残留浓度为 5.42 mg·kg<sup>-1</sup>的氯霉素降解率达 89.7%;10 kGy 剂量电子束辐照使残留浓度为 1.17 mg·kg<sup>-1</sup>的磺胺间甲氧嘧啶降解 34.2%;毛青秀<sup>[30]</sup>研究发现辐照对腊肉中的亚硝酸盐具有一定的降解作用;Domijan 等<sup>[31]</sup>发现  $\gamma$  射线能在一定程度上减少干腌肉制品中赭曲霉素 A 的含量,但由于基质的复杂性,其降低幅度有限。开展电子束辐照对更多有害残留物降解作用的研究,对打造绿色食品、保障人类健康具有重要意义。

# 3 影响肉制品辐照效果的因素

影响肉制品辐照效果的因素很多,主要有辐照剂量和剂量率、肉制品的微生物状况、水分含量、温度、气体和添加剂等。

## 3.1 辐照剂量和剂量率

辐照剂量是影响辐照效果的主要因素。辐照剂量过低,不足以杀死有害微生物;辐照剂量过高,又可能会引起肉制品的脂肪和蛋白质氧化、保水性下降、蒸煮损失率增加、色度改变等<sup>[32]</sup>,从而影响肉制品的质量。我国规定以杀灭沙门氏菌为目的,对冷冻包装的猪肉、羊肉、牛肉、鸡肉、鸭肉等冷冻包装肉进行辐照时,平均吸收剂量不大于 2.5 kGy<sup>[33]</sup>;对熟猪肉、熟牛肉、熟羊肉、熟兔肉、盐水鸭、烤鸭、烧鸡、扒鸡等辐照时,总体平均吸收剂量不得大于 8 kGy<sup>[34]</sup>。

越来越多的研究认为,剂量率也是影响辐照效果的重要因素。通常较高的剂量率可获得较好的辐照效果,但剂量率过高会影响感官品质,因此要根据实际情况获得最优剂量率。王宁等<sup>[35]</sup>发现同样在 2 kGy 剂量下,不同电子束辐照剂量率对真空包装冷鲜牛肉品质也有影响,当剂量率为 2 500 Gy·s<sup>-1</sup>时,微生物和理化指标的综合辐照效果最佳;程述震等<sup>[36]</sup>发现剂量率为 150 kGy·min<sup>-1</sup>时,牛肉肌原纤维蛋白的二级结构和热稳定性更好。

在实际操作过程中,要根据不同肉制品的辐照目的和特点,兼顾考虑,选择合适的辐照剂量率和剂量范



围。对于无现成标准的辐照对象,要经过微生物学测定和品质鉴定试验,获得最佳的辐照参数。

### 3.2 肉制品的微生物状况

肉制品的初始微生物状况、品质好坏直接影响辐照保鲜的效果,也是辐照剂量设定的决定因素。微生物含量越高,相同的杀菌率需要更高的辐照剂量;辐照剂量相同时,初始菌量越低,杀菌效果越好<sup>[37]</sup>。据此,要注意保证肉制品辐照前整个过程处于良好状态,尽可能将肉制品的初始菌量控制在较低水平。

肉类中所含微生物的种类不同,其辐照杀菌效果也有所不同。不同种类的微生物对辐射的耐受性不一样,革兰氏阳性菌(李斯特菌、金黄色葡萄球菌等)>革兰氏阴性菌(沙门氏菌等)<sup>[38]</sup>,因此,需要掌握每类微生物的最低有效辐照剂量,尽可能选用最低的辐照剂量,以达到最理想的效果。

### 3.3 肉制品的水分含量

肉制品的含水量也会影响辐照灭菌的效果<sup>[38]</sup>。在低含水量状态下进行辐照,自由基的生成量比较少,其间接效应降低,辐照作用会显著减弱<sup>[39]</sup>。同时,肉制品含水量的高低对辐照味的产生也有较大影响,含水量高的肉制品辐照后易产生“辐照味”<sup>[40]</sup>。因此,对于同一类肉制品,要达到相同的灭菌效果,含水量高的辐照剂量可以低一些;而为控制肉制品的品质,可以适当降低游离水的含量。

### 3.4 肉制品的温度

微生物的耐辐射性一般会随着温度的升高而降低。提高肉制品温度,用较低辐照剂量即可达到较好的灭菌效果;而降低温度,则需要增加辐照剂量。李淑荣等<sup>[38]</sup>研究发现 4℃ 冷却肉中沙门氏菌和李斯特菌的  $D_{10}$  值均低于 -18℃ 冷冻肉;Gunther 等<sup>[41]</sup>用  $\gamma$  射线辐照处理鸡肝,发现 -20℃ 预冷鸡肝中弯曲杆菌的  $D_{10}$  值为 0.748 kGy,而在未预冷鸡肝中的  $D_{10}$  值为 0.361 kGy,表明预冷的肉类产品要适当提高辐照剂量。

除了杀菌效率外,还要考虑温度对一些辐射敏感营养成分的影响,尤其是对高水分、高脂肪、高蛋白质的产品。肉类食品在射线照射下产生的“辐照味”,基本上与辐照剂量成正比。但若在低温下处理,则可降低自由基活性,减少营养成分的氧化,从而有效降低“辐照味”的产生。如用 6 kGy 剂量辐照南京六合牛脯,25℃ 下会有少量辐照味,而在 10℃ 以下则很好地保持原有的牛肉香味<sup>[42]</sup>。因此,建议高脂肪的产品应在 10℃ 以下进行辐照处理。采取辐照前预冷、冰盒辐照等方式,既可以抑制加工过程中污染的嗜温菌的生长与繁殖,又可降低辐照过程中产生的辐照味。在实

际生产中通过温度和辐照剂量的优化,既能降低微生物含量,又能不产生“辐照味”,从而保证肉制品质量。

### 3.5 气体氛围

氧气的存在可增加微生物对辐照的敏感性,包装袋中有氧气会提高辐照杀菌效果;但氧电离形成的臭氧等物质会加速蛋白质和脂肪的氧化作用,产生“辐照味”,而且有氧条件会促进需氧菌的繁殖,因此还需要控氧。对于肉类产品来说,控氧相对更重要,目前肉制品行业中常用的真空或改良气调包装肉制品,正好符合肉制品辐照加工的要求。

在气体氛围影响研究方面,大多针对于真空、CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub> 改良气调包。Kudra 等<sup>[43-44]</sup>研究发现辐照-CO<sub>2</sub> 气调联合和辐照-真空联合,能较好地控制牛肉糜中的大肠杆菌、鸡肉中的沙门氏菌和弯曲杆菌,同时发现辐照和高浓度 CO<sub>2</sub> 可用于控制即食肉类中的单核细胞增生李斯特菌;Gunes 等<sup>[45]</sup>研究表明碎牛肉气调包(3% O<sub>2</sub>+50% CO<sub>2</sub>+47% N<sub>2</sub>)用 3 kGy 剂量辐照后冷藏 3 周内均未有致病菌的安全风险,并能保持牛肉丸品质;程述震等<sup>[2]</sup>推荐用 2.5 kGy 左右的低剂量电子束辐照处理充氮包装冷鲜牛肉,既可以杀灭微生物,又能较好地保持牛肉品质,提高冷鲜牛肉的货架期;张新笑等<sup>[46]</sup>发现在 4℃ 贮藏条件下,气调包装中 20%~40% 的 CO<sub>2</sub> 能抑制冷鲜鸡肉中荧光假单胞菌的生长繁殖。

实际操作中,辐照处理时是否需氧、真空、气调、充氮等,需要根据处理的具体对象、特性、目的和贮藏环境条件等加以综合考虑。

### 3.6 添加抗氧化剂

各种天然提取物抗氧化剂均能提高肉制品的抗氧化能力,而且复合抗氧化剂效果更好。在肉制品中加入维生素、多酚类等抗氧化剂,主要是通过消除自由基来阻断后续的链式反应,从而减少“辐照味”,延缓氧化腐败,并提高肉色。

Schevey 等<sup>[47]</sup>用不同的抗氧化剂(石榴提取物、葡萄籽提取物、丁基羟基茴香醚)和 1.5 kGy 剂量  $\gamma$ -射线辐照处理牛肉饼,发现抗氧化剂对辐照后脂肪氧化具有显著的抑制作用,尤其是丁基羟基茴香醚表现得更出色;Xiao 等<sup>[48]</sup>发现日粮膳食中添加抗氧化剂(维生素 E+丁基羟基茴香醚)的生鸡肉,经电子束辐照处理后脂质和蛋白质氧化明显降低,亮度和红度增加;薛菲等<sup>[49]</sup>还发现添加了优化的复合抗氧化剂后,对盐水鸭辐照制品的抗氧化效果更好;龙明秀等<sup>[50]</sup>研究发现,植酸与茶多酚具有协同抗氧化效果,能较好地保持辐照卤制鸡翅的品质和风味。

## 4 小结与展望

相对于传统的肉制品保鲜方法,辐照技术兼具环保、安全、便捷、高效等诸多特点,能较好地防控食源性致病菌和腐败菌危害并保持肉制品的应用品质,同时可以降解一些有害残留物,尤其适用于采用传统方法处理效果差的产品。辐照剂量和剂量率、肉制品状态、含水量、温度、气体和添加剂等因素均会影响辐照效果,因此,在辐照工艺设计优化中,需要综合考虑各种影响因子。

电离射线若处理不当会改变肉制品的理化性质,对色泽、风味、质构等感官品质和营养成分造成一定程度的破坏,甚至产生令人不愉快的“辐照味”<sup>[51-53]</sup>,从而影响消费者对辐照肉制品的可接受度。在实际应用中,需要根据辐照食品种类和辐照环境条件,充分研究最佳辐照处理方案,以消除辐照对肉制品产生的不利影响。如为减少辐照异味,可以考虑用真空、气调( $N_2$ 、 $CO_2$ 等惰性气体)包装、低温、添加抗氧化剂、吸附剂等方法来有效降低辐照的副作用。另外,若能将其与传统的盐腌、干制、熏制、高压、红外线、微波、热处理或化学处理等方法<sup>[54-57]</sup>相结合进行联合杀菌,可降低肉制品所需的辐照剂量,因此,利用综合辐照技术和传统保鲜技术优势互补,集成创新解决肉制品安全与保质控制关键技术难题,能更好地发挥其优势,真正做到肉制品加工保鲜技术的高效与优质。

### 参考文献:

- [1] 程述震,刘伟,冯晓琳,张洁,林琼,解新方,王志东. 电子束辐照对冷鲜猪里脊肉品质及蛋白特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(3): 151-156
- [2] 程述震,张春晖,张洁,解新方,王志东. 电子束辐照对充氮包装冷鲜牛肉品质的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(18): 230-235
- [3] 宋大巍,刘松昱,金宝麟,孙跃如,张丽萍. 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
- [4] 华跃进. 中国核农学通论[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2016
- [5] 王梁燕,洪奇华,孙志明,华跃进. 电子束辐照技术在生命科学中的应用[J]. 核农学报, 2018, 32(2): 283-290
- [6] 李成梁,靳国锋,马素敏,何立,马美湖. 辐照对肉品品质影响及控制研究进展[J]. 食品科学, 2016, 37(21): 271-278
- [7] 傅俊杰. 农产品辐照加工及检测[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2013
- [8] Song H P, Kim B, Yun H, Kim D H, Kim Y J, Jo C. Inactivation of 3-strain cocktail pathogens inoculated into Bajirak jeotkal, salted, seasoned, and fermented short-necked clam (*Tapes pilippinarum*), by gamma and electron beam irradiation[J]. Food Control, 2009, 20(6): 580-584
- [9] 张奇志,王文亮,孙宏春,王守经,孙守义. 我国辐照食品的研究现状及发展前景[J]. 中国食物与营养, 2007(2): 29-31
- [10] 付伟,阎红玉,赵宇恒,郝凌峰. 多地生猪调运受阻冷鲜肉渐成发展趋势[J]. 中国食品, 2019(5): 77-79
- [11] Xavier M L, Dauber C, Mussio P, Delgado E, Maquieira A, Soria A, Curuchet A, Márquez R, Méndez C, López T. Use of mild irradiation doses to control pathogenic bacteria on meat trimmings for production of patties aiming at provoking minimal changes in quality attributes[J]. Meat Science, 2014, 98(3): 383-391
- [12] 冯晓琳,王晓拓,王丽芳,王志东. 电子束辐照对真空包装冷鲜猪肉品质的影响[J]. 中国食品学报, 2015, 15(2): 126-131
- [13] 程述震,王宁,王晓拓,王志东,丁武. 电子束和 $\gamma$ 射线辐照对冷鲜猪肉保鲜效果的研究[J]. 核农学报, 2016, 30(5): 897-903
- [14] Li C L, He L C, Jin G F, Ma S M, Wu W M, Gai L. Effect of different irradiation dose treatment on the lipid oxidation, instrumental color and volatiles of fresh pork and their changes during storage[J]. Meat Science, 2017, 128: 68-76
- [15] Kundu D, Holley R. Effect of low-dose electron beam irradiation on quality of ground beef patties and raw, intact carcass muscle pieces[J]. Journal of Food Science, 2013, 78(6): S920-S925
- [16] Kundu D, Gill A, Lui C, Goswami N, Holley R. 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
- [17] 肖欢,韩燕,翟建青,邹剑敏,盛中伟,蒋云升,赖宏刚,曹宏. $^{60}Co$ - $\gamma$ 射线和电子束辐照对冷鲜鸡保鲜效果的异同性研究[J]. 核农学报, 2018, 32(7): 1358-1367
- [18] 翟建青,韩燕,肖欢,高玉时,束婧婷,蒋云升,赖宏刚,曹宏. 电子束辐照对冷鲜鸡相关品质的影响研究[J]. 食品工业科技, 2018, 39(7): 281-285
- [19] Henriques L S V, da Costa Henry F, Barbosa J B, Ladeira S A, de Faria Pereira S M, da Silva Antonio I M, Teixeira G N, Martins M L L, de Carvalho Vital H, dos Prazeres Rodrigues D, dos Reis E M F. Elimination of coliforms and *Salmonella* spp. in sheep meat by gamma irradiation treatment[J]. Brazilian Journal of Microbiology, 2014, 44(4): 1147-1153
- [20] Derakhshan Z, Oliveri Conti G, Heydari A, Hosseini M S, Mohajeri F A, Gheisari H, Kargar S, Karimi E, Ferrante M. Survey on the effects of electron beam irradiation on chemical quality and sensory properties on quail meat[J]. Food and Chemical Toxicology, 2018, 112: 416-420
- [21] 张艳艳,王健,李海军,孔秋莲,戚文元. 电子束辐照对酱卤牛肉品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(14): 4441-4443
- [22] 陈秀兰,曹宏,包建忠,翟建青,王锦荣,韩燕,蒋云升,董杰,徐浪. 鹅肉制品的辐照保质研究[J]. 核农学报, 2005, 19(5): 371-374
- [23] 张扬,赵永富,常国斌,冯敏. 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

- [24] Feng X, Moon S, Lee H, Ahn D U. Effect of irradiation on the parameters that influence quality characteristics of uncured and cured cooked turkey meat products[J]. Poultry Science, 2016, 95(12): 2986-2992
- [25] 李娜, 骆琦, 薛丽丽, 何绍媛, 刘常金. 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
- [26] An K A, Arshad M S, Jo Y, Chung N, Kwon J H. E-Beam irradiation for improving the microbiological quality of smoked duck meat with minimum effects on physicochemical properties during storage[J]. Journal of Food Science, 2017, 82(4): 865-872
- [27] 何立超, 马素敏, 李成梁, 彭岸, 余翔, 靳国锋. 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
- [28] Ren J Y, Zhang G L, Wang D F, Han J, Wu Z Y, Cai D Q. One-step and nondestructive reduction of Cr(VI) in pork by high-energy electron beam irradiation[J]. Journal of Food Science, 2018, 83(4): 1173-1178
- [29] 李军, 田毅峰, 王爱芹, 张明辉, 张秀梅. 电子束辐照降解鸡肉中两种兽药残留的研究[J]. 食品研究与开发, 2013, 34(5): 124-126
- [30] 毛青秀. 辐照对腊制品中亚硝酸盐降解效果与机理研究[D]. 长沙: 中南大学隆平分院, 2013: 13-20
- [31] Domijan A M, Pleadin J, Mihaljević B, Vahčić N, Frece J, Markov K. Reduction of ochratoxin A in dry-cured meat products using gamma-irradiation[J]. Food Additives and Contaminants: Part A, 2015, 32(7): 1185-1191
- [32] 赖宏刚, 蒋云升, 张元嵩, 曹宏, 肖欢. 辐照处理对冷鲜鸡肉的品质影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(19): 206-211
- [33] 北京市卫生防疫站, 华西医科大学, 河南省卫生防疫站, 中国预防医学科学院营养与食品卫生研究所. GB 14891.7-1997 辐照冷冻包装畜禽肉类卫生标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997
- [34] 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, 山东省卫生防疫站. GB 14891.1-1997 辐照熟食禽肉类卫生标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997
- [35] 王宁, 王晓拓, 王志东. 电子束辐照剂量率对真空包装冷鲜牛肉品质的影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(7): 241-247
- [36] 程述震, 王晓拓, 张洁, 解新方, 王志东, 丁武. 电子束剂量率对牛肉蛋白结构和理化性质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(13): 150-156
- [37] 哈益明, 居华, 王锋, 范蓓, 刘书亮.  $\gamma$ 射线辐照控制冷却鸡肉中的致病菌及贮藏期变化研究[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2009, 27(5): 275-279
- [38] 李淑荣, 王丽, 冯利芳, 史依沫, 马智宏, 徐毓谦, 王振铃, 汪慧华, 汪长钢. 食品中致病菌  $\gamma$ 射线辐照杀菌效果影响因素研究[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(1): 181-185
- [39] 崔龙, 王倩倩, 王嫻, 许勃, 董威杰, 陈云堂, 石晓华. 油炸土豆片中丙烯酰胺辐照消解效应研究[J]. 包装工程, 2019, 40(17): 20-26
- [40] 高兴岗, 李霞, 王文亮, 徐红霞, 徐同成. 食品辐照异味研究的进展[J]. 农产品加工, 2008(12): 51-53
- [41] Gunther N W, Abdul-Wakeel A, Scullen O J, Sommers C. The evaluation of gamma irradiation and cold storage for the reduction of *Campylobacter jejuni* in chicken livers[J]. Food Microbiology, 2019, 82: 249-253
- [42] 陈忠海, 张卫东, 郭秉义, 刘践. 熟畜禽肉类食品辐照保鲜灭菌的工艺问题[J]. 核农学报, 1996, 17(3): 119-120
- [43] Kudra L L, Sebranek J G, Dickson J S, Mendonca A F, Larson E M, Jackson-Davis A L, Lu Z. Effects of vacuum or modified atmosphere packaging in combination with irradiation for control of *Escherichia coli* O157:H7 in ground beef patties[J]. Journal of Food Protection, 2011, 74(12): 2018-2023
- [44] Kudra L L, Sebranek J G, Dickson J S, Mendonca A F, Zhang Q, Jackson-Davis A, Prusa K J. 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
- [45] Gunes G, Ozturk A, Yilmaz N, Ozcelik B. Maintenance of safety and quality of refrigerated ready-to-cook seasoned ground beef product (meatball) by combining gamma irradiation with modified atmosphere packaging[J]. Journal of Food Science, 2011, 76(6): M413-M420
- [46] 张新笑, 章彬, 卞欢, 王道营, 吴满刚, 孙芝兰, 诸永志, 徐为民. 不同二氧化碳比例气调对冷鲜鸡肉中荧光假单胞菌的抑制作用[J]. 食品科学, 2018, 39(13): 266-271
- [47] Schevey C T, Toshkov S, Brewer M S. Effect of natural antioxidants, irradiation, and cooking on lipid oxidation in refrigerated, salted ground beef patties[J]. Journal of Food Science, 2013, 78(11): S1793-S1799
- [48] Xiao S, Zhang W G, Lee E J, Ma C W, Ahn D U. Effects of diet, packaging, and irradiation on protein oxidation, lipid oxidation, and color of raw broiler thigh meat during refrigerated storage[J]. Poultry Science, 2011, 90(6): 1348-1357
- [49] 薛菲, 蒋云升, 张敏, 沈中原, 丁金祥. 盐水鸭辐照制品抗氧化保质技术研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(6): 342-343, 366
- [50] 龙明秀, 刘敏, 田竹希, 何扬波, 石彬, 梁倩, 李咏富. 植酸和茶多酚复合抗氧化剂对辐照卤制鸡翅品质的影响[J]. 肉类研究, 2019, 33(2): 64-71
- [51] 李成梁, 靳国锋, 马素敏, 何立, 马美湖. 辐照对肉品品质影响及控制研究进展[J]. 食品科学, 2016, 37(21): 271-278
- [52] 冯敏, 汪敏, 常国斌, 张扬, 赵永富. 电子鼻和其他挥发性风味物质检测方法联合[J]. 核农学报, 2019, 33(6): 1116-1121
- [53] 程述震, 王晓拓, 王志东. 辐照对肉品品质的影响[J]. 食品工业, 2016, 37(2): 236-239
- [54] Baptista R F, Lemos M, Teixeira C E, Vital H C, Carneiro C S, Múscico E T, Conte Júnior C A, Mano S B. Microbiological quality and biogenic amines in ready-to-eat grilled chicken fillets under vacuum packing, freezing, and high-dose irradiation[J]. Poultry Science, 2014, 93(6): 1571-1577
- [55] 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
- [56] 王晶晶, 徐超, 杨题隆, 刘训悦, 丁兴成. 壳聚糖协同  $\gamma$ 射线辐

照对冷鲜猪肉品质的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2016, 42(2): 220-227

[57] Ben F Y, Leroy V, Dussault D, St-Yves F, Lauzon M, Salmieri S, Jamshidian M, Vu D K, Lacroix M. Combined effects of marinating

and  $\gamma$ -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

## Application of Irradiation Technology in Meat Products Processing and Preservation

HONG Qihua<sup>1</sup> WANG Liangyan<sup>2,3</sup> SUN Zhiming<sup>3</sup> HUA Yuejin<sup>2,3,\*</sup>

(<sup>1</sup> College of Animal Sciences, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058; <sup>2</sup> Institute of Biophysics, College of Life Sciences, Zhejiang University/The MOE Key Laboratory of Biosystems Homeostasis and Protection, Hangzhou, Zhejiang 310058; <sup>3</sup> Institute of Nuclear-Agricultural Sciences, Zhejiang University/Key Laboratory of Chinese Ministry of Agriculture and Rural Affairs for Nuclear-Agricultural Sciences, Hangzhou, Zhejiang 310058)

**Abstract:** Food-borne pathogens and spoilage bacteria are the main causes of food-borne diseases and food spoilage. Traditional food preservation agents, such as fungicides and preservatives, not only destroy the unique flavor of food, but also cause chemical pollution, which are harmful to human's health. As a new type of green "non-thermal" processing technology, irradiation has the characteristics of low environmental impact, safety, convenience and high efficiency, and it has been widely used in food processing industry. Based on recent domestic and international research progress, this manuscript described the mechanisms and advantages of food irradiation and sterilization technology as well as its application in processing meat products and degrading harmful residues. In addition, the factors that affect the irradiation effects on meat products were discussed to provide references for further development of irradiation technology in meat products processing and preservation.

**Keywords:** irradiation, meat products, sterilization, technology, fresh-keeping