

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.80605

电子束辐照技术对食品品质的影响 及在食品中的应用研究进展

燕欣悦¹ 胡风庆¹ 宁 崇² 李慧宇² 李 芳³ 郭崇婷²

(1. 辽宁大学生命科学院, 辽宁 沈阳 110031; 2. 辽宁大学轻型产业学院, 辽宁 沈阳 110031;

3. 丹东安德生物科技有限公司, 辽宁 丹东 118300)

摘要: 电子束辐照是一种非热杀菌技术, 由于高效杀菌、绿色节能、安全无残留且可以最大程度保留食品感官特性和营养品质等特点, 被广泛应用于食品工业。文章对电子束辐照技术的原理特点、对食品品质的影响以及在食品工业中的应用和控制因素进行综述, 并展望了电子束辐照技术未来研究的重要方向。

关键词: 电子束; 辐照杀菌; 食品品质; 控制因素; 应用

Research progress on the effect of electron beam irradiation technology on food quality and its application in food

YAN Xinyue¹ HU Fengqing¹ NING Chong² LI Huiyu² LI Fang³ GUO Chongting²

(1. School of Life Science, Liaoning University, Shenyang, Liaoning 110031, China;

2. Light Industry College, Liaoning University, Shenyang, Liaoning 110031, China;

3. Dandong Ande Biotechnology Co., Ltd., Dandong, Liaoning 118300, China)

Abstract: Electron beam irradiation is a non-thermal sterilization technology that is widely used in the food industry due to its efficient sterilization, energy-saving, safety, residue-free nature, and ability to retain the sensory attributes and nutritional quality of food to the greatest extent. This paper reviews the principles and characteristics of electron beam irradiation technology, its impact on food quality, and its applications and controlling factors in the food industry. It also looks forward to the important directions for future research on electron beam irradiation technology.

Keywords: electron beam; irradiation sterilization; food quality; control factors; application

传统的杀菌技术以热杀菌和添加化学防腐剂为主, 虽然可以延长食品的保质期, 但会不同程度地破坏食品原有的风味、营养、质地和颜色等^[1-3]。辐照技术是一种典型的非热杀菌技术, 具有操作方法简单、成本较低、杀菌彻底、作用范围广等特点^[4]。辐照杀菌使用的射线主要包括电子束、X射线和 γ 射线, 均能通过特定的方式控制微生物生长或杀死微生物。然而, X射线在食品处理中的应用十分有限, γ 射线须有专门的设施来储存有害的放射性同位素, 相比之下, 高能电子束辐照技术在无放射性、对食品影响小以及安全性等方面具有显著优势。目前, 大多数研究都集中在电子束辐照的抗菌作用上, 尚缺乏关于电子束辐照对不同种类食品的品质特性影响及应用

的综合资料。因此, 文章就高能电子束辐照技术对食品品质的影响及在食品中的应用进行综述, 并对其未来的研究方向进行展望。

1 电子束辐照技术原理与特点

高能电子束辐照技术是利用电离辐射产生的电磁波来杀灭食品中的微生物, 从而延长食品的货架期。该技术作用原理包括直接杀菌和间接杀菌, 如图1所示。直接杀菌是使射线将微生物脂质、蛋白质和核酸的结构直接发生断裂、交联和降解等, 破坏细胞结构并使其功能丧失; 间接杀菌是食品内水分子经过辐照后分解成过氧化氢、氢原子和羟基自由基等, 进而使生物大分子经氧化还

通信作者: 郭崇婷(1992—), 女, 辽宁大学副教授, 博士。E-mail: guochongting@163.com

收稿日期: 2024-06-30 改回日期: 2024-12-10

原反应改变结构。总之,直接作用和间接作用都是通过射线将生物大分子结构改变,从而达到杀灭微生物的作用^[5]。高能电子束辐照技术可以较大幅度地实现杀菌目的,同时可以保留食品原有口感、营养和风味成分,确保食品安全,从而延长食品货架期^[6]。毛青秀等^[7]研究辐照方式对南酸枣糕品质及货架期的影响,结果表明,低于10 kGy的电子束辐照对枣糕中的感官品质、pH、总糖、蛋白质含量、脂肪含量和总糖含量均无显著性影响,而抗坏血酸含量显著性降低,是由于电子束辐照会使抗坏血酸转化为脱氢抗坏血酸。随着贮藏时间的延长,枣糕的黏度和柔软度降低,色泽由棕黄色逐渐加深为深棕色,这可能是美拉德褐变和抗坏血酸转变为脱氢抗坏血酸导致。

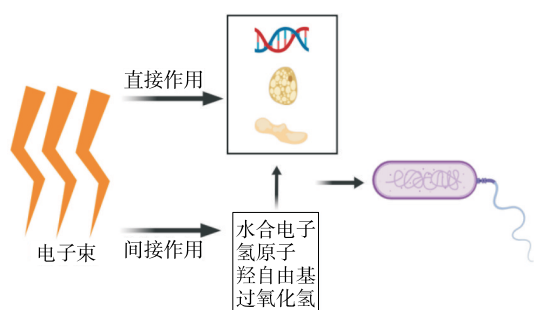


图1 电子束辐照杀菌技术原理

Figure 1 Principle of electron beam irradiation sterilization

电子束辐照技术是通过线性加速器——加速电子产生的^[6],根据电子束辐照的剂量,可以在不显著改变食品感官品质和处理温度的情况下进行杀菌或灭菌^[8]。与其他技术相比具有如下优点^[9-11]:① 安全性较高。相对于 γ 辐照钴源装置,电子束加速器体积更小,且连续性更好。② 操作简单。与其他电离辐照源(γ 射线和X射线)相比,电子束辐照的线性加速器(直流、连续波和脉冲加速器)

的开关和能量可完全控制^[12]。③ 保持食品原有品质。电子束杀菌可在常温和冷冻条件下杀菌,并且只杀灭食品表面的微生物,而不会改变食品内部结构,可保留食品香味及营养物质。④ 耗能较低。电子束辐照技术能耗仅为高温杀菌技术的10%~30%。消耗的能源较少。⑤ 避免二次污染。电子束杀菌可在食品包装后进行杀菌,杀菌彻底,可避免二次污染。⑥ 杀菌食品种类多。电子束辐照技术可以对水产品、肉类、农产品及预制食品杀菌,包括固态和液态食品。

尽管电子束辐照技术具有许多优点,但在实际应用中仍存在问题。例如,电子束辐照对食品中某些成分的影响还需要进一步研究,以确保其对食品品质的安全性。此外,电子束辐照设备的成本和维护费用较高,也限制了其在一些小型食品企业中的应用。

2 电子束辐照技术对食品品质的影响

电子束辐照技术可以有效延缓食品的生理代谢,抑制微生物的繁殖,对食品的营养成分和口感影响较小^[13]。且由于电子束辐照技术处理过程中食品内部温度变化极小,可避免传统加工方法带来的负面影响。然而,长时间或高强度的辐照可能会导致食品的部分成分发生变化,影响其色泽、风味和营养成分等品质,如一些对辐射敏感的维生素(如维生素A、B、C和E)在辐照过程中会有所损失。图2为电子束辐照杀菌技术在食品工业中的应用、对食品品质的影响及优势。

2.1 对食品色泽的影响

色泽是评价食品品质的重要指标。一般来说,电子束辐照处理会对海鲜产品、肉制品和农产品的色泽产生不同程度的影响,其中,辐照会使肉制品的颜色变暗,而对其他食品的色泽影响较小或不产生影响^[14-15]。有研究表明,采用电子束辐照技术处理低盐切片腊肉后,在4℃

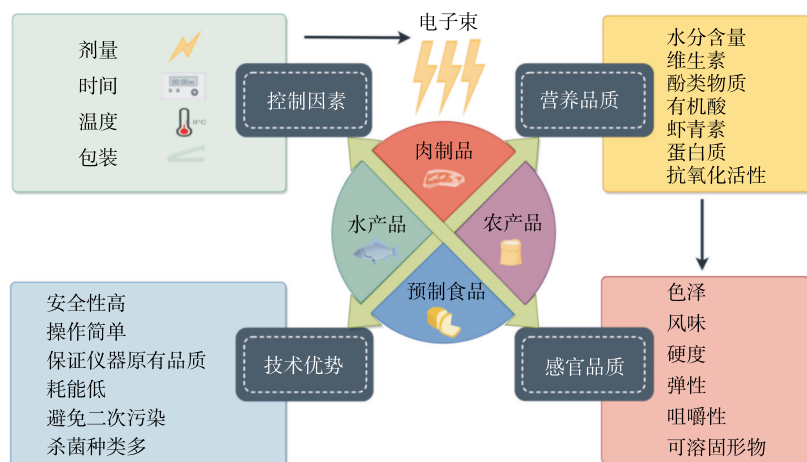


图2 电子束辐照杀菌技术应用、对食品品质的影响及优势

Figure 2 Application, impact on food quality, and advantages of electron beam irradiation sterilization technology

条件下贮藏 180 d 时,辐照组亮度值 L^* 和 red 度值 a^* 与对照组差异不大,而黄度值 b^* 显著高于对照组^[16],这是因为脂质氧化产物和蛋白质的非酶促褐变导致了黄色素 b^* 的增加^[17];腊肉贮藏过程中,色泽 a^* 、 b^* 、 L^* 先升高后降低,这种现象可能是贮藏过程中食品中水分变化导致的^[18]。古明亮等^[19]以散装雪花酥为研究对象,电子束辐照剂量为 1~3 kGy 时,色泽无显著性变化,而电子束辐照剂量为 5~6 kGy 时,雪花酥的色泽变淡程度逐渐增加,可能是由于雪花酥的生产原料含有较多蛋白质和脂肪,导致脂质氧化和蛋白质褐变。Yu 等^[20]发现鲑鱼经电子束辐照处理后颜色发生显著变化, L^* 显著增加,而 a^* 和 b^* 显著降低,这可能是虾青素降解导致的。

某些食品经过电子束辐照后会出现颜色变化,可能是由于:① 化学反应或分解产物形成;② 氧化作用;③ 质感和外观变化;④ 食品中色素的变化。总体来说,电子束辐照对食品色泽影响是多方面的,取决于食品的种类、处理的辐照剂量以及食品本身的化学组成,需要对这些影响进行评估,确保辐照后食品品质符合标准。

2.2 对食品风味的影响

辐照处理后的食品可能会产生一定量的令人不适的气味——“辐照味”,其可能是蛋白质变性和脂肪氧化所导致的^[21]。通过控制辐照剂量和辐照温度等方法来抑制“辐照味”的产生。宋蕊^[22]在不同杀菌方式对羊肉酱包和羊肉块包贮藏期间感官品质变化的研究中发现,采用电子束辐照技术处理后的汤饭羊肉块包和汤饭羊肉酱包在 0~35 d 的气味评分、滋味评分、色泽评分和肉质评分都显著高于高温高压杀菌组。古明亮等^[23]研究了不同剂量电子束辐照对威化饼干感官品质的影响,结果表明,采用 1~5 kGy 剂量辐照时威化饼干总体感官品质并无显著性变化,而当辐照剂量为 6 kGy 时,出现了轻微的辐照味,可能是威化饼干中含有较多的蛋白质和脂肪,蛋白质经辐照后产生硫化氢和甲硫醇,导致了异味;此外,辐照使食品中的大分子产生的自由基会加速脂肪氧化,也会产生有异味的物质。Wu 等^[24]研究了不同剂量电子束辐照处理对培根挥发性成分和感官品质的影响,结果表明,电子束辐照剂量 < 5 kGy 时,挥发性化合物含量和感官品质无显著性变化;然而当辐照剂量为 7,9 kGy 时,挥发性化合物种类和感官品质显著降低,但总酮类、醇类、醛类、酸类和芳烃的浓度在 9 kGy 辐照下显著升高。

电子束辐照对食品风味产生的影响主要体现在以下几个方面:① 辐照引起食品中一些化学成分的改变,如氧化和产生新的风味化合物;② 辐照有时会影响食品中的营养物质,如维生素,这可能会对食品的整体风味产生间接影响;③ 电子束辐照因抑制微生物生长从而防止微生物活动产生的不良风味。总而言之,电子束辐照对食品风味的影响通常比其他食品处理技术(热处理或化学防腐

剂)小。大多数食品经过适当的辐照处理后,风味变化不显著或仍在可接受范围内。因此,应严格控制电子束辐照杀菌剂量,在满足杀菌效果的前提下应尽量减少辐照剂量以保留食品原有的风味。

2.3 对食品营养成分的影响

电子束辐照处理可以最大程度保留食品内的营养成分和活性物质,如维生素、酚类物质和有机酸等,改善蛋白质和不溶膳食纤维结构^[25]。

2.3.1 维生素 维生素是食品中的微量有机物。电子束辐照对维生素的影响较复杂且不同维生素对电子束的敏感度不同。余慧琳等^[26]在研究高能电子束辐照对带鱼中维生素含量的影响中发现,在 4,7,10 kGy 辐照剂量下,维生素 A 含量显著降低,表明维生素 A 对电子束具有高敏感性;维生素 E 含量略有降低,可能是由于维生素 E 被氧化。张娟琴等^[27]在研究电子束辐照对双孢菇采摘后品质的影响中发现,电子束辐照对双孢菇中维生素 B₁、维生素 B₂、烟酸含量无显著性影响;然而维生素 C 含量显著降低。李军等^[28]在研究电子束辐照技术对鸡肉营养品质的影响中也发现,随着辐照剂量的增加,维生素 A、维生素 B₁ 含量显著减少,这可能是由于肉制品中的蛋白质和脂质等经过电子束辐照后被氧化产生了自由基,从而导致维生素被氧化破坏。此外,徐彦瑞^[29]研究了电子束辐照处理过程中辐照时间、剂量和穿透程度对籽瓜汁中维生素 C 含量的影响,结果显示,当辐照剂量为 1~5 kGy 时,维生素 C 含量显著减少;辐照剂量为 5~7 kGy 时,维生素 C 含量降低程度减慢;辐照剂量为 7~10 kGy 时,维生素 C 含量显著降低。叶力瑕等^[30]研究发现,低剂量电子束辐照可以减少猕猴桃在采摘后贮藏期的维生素 C 损失率。

2.3.2 酚类物质 酚类物质具有良好的抗氧化活性,电子束辐照技术一般可使食品中总酚含量升高,从而增强其抗氧化活性。Kim 等^[31]研究发现,即食谷物保健食品经 10 kGy 高剂量电子束辐照处理后还原糖含量轻微增加,氨基氮含量轻微减少,但变化不显著,总酚含量和抗氧化活性升高,而胡萝卜素和叶绿素含量降低。Guo 等^[32]研究了电子束辐照对发酵辣白菜酱中植物化学物质、抗氧化活性和挥发性成分的影响,结果表明,酱料经电子束辐照处理后表现出较高的总酚含量和抗氧化活性,且挥发性物质总含量提高了 43.92%~61.87%。Chen 等^[33]研究发现,红枣果酱经电子束辐照技术处理后生物活性物质如酚类物质、有机酸和环磷酸腺苷含量提高,且抗氧化活性增强。杨苗等^[34]发现,经电子束辐照后的粳糯糜子的总酚含量增加,其中,粳性糜子总酚含量在 4 kGy 时达到最高;糯性糜子总酚含量在 8 kGy 时达到最高,这可能是由于电子束辐照使细胞壁溶解,促进活性物质的溶出和可提取性;当辐照剂量增加到 8~10 kGy 时,总酚含量降低。此外,辐照组粳糯糜子中没食子酸、白藜芦

醇、咖啡酸、儿茶素、山柰酚含量上升,而表儿茶素和原儿茶酸含量变化不大。

2.3.3 蛋白质 蛋白质是食品中重要的成分,电子束辐照不会显著改变蛋白质含量,但会使蛋白质的结构改变,从而引起蛋白质的物理化学性质改变。Zhang等^[35]研究发现,电子束辐照可以通过杀灭微生物来保存鹰嘴豆蛋白,但过度的辐照可能会引起氧化应激,从而改变鹰嘴豆蛋白的功能和营养价值。随着辐照剂量的增加,蛋白质溶解度出现先升高后下降的趋势;不同剂量的电子束对蛋白质消化率无显著性影响。肽组学分析表明,肽长、疏水性、净电荷和C端残基的分布都受到辐照的影响,导致鹰嘴豆蛋白的物理化学性质改变。Han等^[36]研究了电子束辐照对花生壳中功能性化合物含量和皮肤衰老相关酶抑制活性的影响,结果显示,随着辐照剂量的增加,总酚含量逐渐增加,提高了胶原酶和弹性蛋白酶抑制活性。因此,电子束辐照花生壳在功能性化妆品材料中具有潜在的应用价值。此外,电子束辐照技术(剂量为0~8 kGy)对银鲤块的水分含量和蛋白质含量无显著性影响^[37]。Yang等^[38]在研究电子束辐照对真空包装大西洋鲑鱼片贮

藏期品质的影响中也发现,电子束辐照对鱼片可溶性蛋白影响不显著,且随着辐照剂量的增加,可抑制挥发性盐基氮(TVB-N)含量的增加,从而延长其贮藏期。

适当的辐照可以延缓食品中维生素C的降解速率,提高有机酸、多酚类化合物含量和抗氧化活性,但对食品内水分含量和蛋白质含量无显著性影响。总体而言,电子束辐照对食品营养品质的影响是复杂的,它可能会影响某些营养物质的含量和稳定性,但在适当的辐照条件下,可以帮助保持食品的新鲜度和安全性,尤其是在长途运输或贮藏过程中,但需综合考虑食品类型、辐照剂量以及消费者对食品的营养需求。

3 电子束辐照技术在食品工业中的应用

电子束辐照技术已经在国内外得到了广泛的研究和应用。例如,电子束辐照已经被成功应用于水产品、肉类、蔬菜、水果、豆类等多种食品的加工中(如表1所示),可有效延长食品的保质期,提高食品的安全性。同时,随着技术的不断发展,电子束辐照技术也在不断改进和优化以适应不同种类食品的加工需求。

表1 允许进行辐照食品种类汇总

Table 1 Summary of food types permitted for irradiation

标准名称	食品种类	适用范围	允许辐照剂量/ kGy
T/GDIFST 005—2022《冷鲜水产品辐照杀菌技术规范》	冷鲜水产品	冷鲜鱼类、冷鲜虾蟹类、冷鲜贝类等	鱼类 3~6 虾蟹贝类 3~7
GB 14891.6—1994《辐照猪肉卫生标准》	猪肉	旋毛虫猪肉	0.65
GB 14891.7—1997《辐照冷冻包装畜禽肉类卫生标准》	冷冻包装畜禽肉类	猪、牛、羊、鸡、鸭等冷冻包装畜禽肉类	≤2.5
GB 14891.1—1997《辐照熟畜禽肉类卫生标准》	熟畜禽肉类	熟猪肉、熟牛肉、熟羊肉、熟兔肉、盐水鸭、烤鸭、烧鸡、扒鸡等	≤8
GB 14891.5—1997《辐照新鲜水果、蔬菜类卫生标准》	新鲜水果、蔬菜类	草莓、胡萝卜、葡萄、蘑菇等 17 种	≤1.5
GB 14891.3—1997《辐照干果果脯类卫生标准》	干果果脯类	花生仁、桂圆、空心莲、核桃、生杏仁、红枣、桃脯、杏脯、山楂脯及其他蜜饯类	0.4~1.0
GB 14891.8—1997《辐照豆类、谷类及其制品卫生标准》	豆类、谷类及其制品	豆类、谷类及豆制品、谷类制品	豆类≤0.2 谷类 0.4~0.6
GB 14891.4—1997《辐照香辛料类卫生标准》	香辛料类	所有品种	≤10
GB 14891.2—1994《辐照花粉卫生标准》	花粉	玉米、荞麦、高粱等 7 种植物的蜜源的纯花粉及混合花粉	≤8

3.1 在水产品中应用

由于水产品的产地和生产工艺不同,容易受到微生物污染,如病原微生物和寄生虫等,影响食品安全和人类健康^[6]。电子束辐照可以通过灭活食源性病菌来提高水产品安全性且不会对水产品的感官特性和营养物质产生显著性影响^[39]。陈方雪等^[40]研究了电子束辐照对鲈鱼冷藏期间品质的影响,采用 1.5 kGy 电子束辐照剂量处理的鲈鱼,菌落总数在冷藏期间一直处于较低的增长速率,在

12 d 贮藏期内菌落总数一直未超过国标限制且鱼肉未出现腐败现象,这是因为电子束辐照可抑制微生物生长,降低了鲈鱼 TVB-N 和硫代巴比妥酸(TBARs)含量,说明低剂量的辐照处理可有效延长鲈鱼的贮藏期,抑制鱼肉的氧化。此外,在贮藏期间,辐照组鱼肉色泽变化最小,硬度下降趋势较为平缓,鱼肉肌束间空隙较为紧密,说明电子束辐照对于肌原纤维和鱼肉中水分影响较小或无显著性影响,表明电子束辐照处理未破坏鲈鱼内部结构。戚

文元等^[41]在电子束辐照对罗非鱼片冷藏期和感官品质的影响研究中发现,电子束辐照可抑制食品病原菌和 TVB-N 的增长,随着辐照剂量的增大(≤ 8 kGy),病原菌的数量呈指数减少,同时可减缓硬度的下降幅度;当辐照剂量为 0~4 kGy 时,嗅感评分逐渐升高,而当辐照剂量达到 8 kGy 时,产生了辐照异味。Yu 等^[42]在研究电子束辐照对大西洋鲑鱼质量指标的影响中发现,电子束辐照处理可显著提高大西洋鲑鱼的 TVB-N 值,降低其硬度、咀嚼性和 a^* 值。Li 等^[37]研究了不同剂量电子束辐照对银鲤块水分分布和肉质的影响,发现在电子束辐照剂量为 0~4 kGy 时食品表观含水量和肌原纤维蛋白含量随着辐照剂量的增加而增加,这可能是由于电子束辐照导致氢键弱化,使游离水转化为包埋水。适当的辐照处理可以提高银鲤块的嫩度,并抑制肌动球蛋白的分解和变形,有助于改善鱼肉的弹性和质地;过高剂量辐照会导致鱼肉持水能力和 pH 显著降低,可能是由于辐照可以促进肌糖原的分解,产生三磷酸腺苷(ATP)、磷酸肌酸和乳酸盐等,从而加速食品腐败变质。

电子束辐照在水产品处理中的应用主要体现在电子束辐照可以有效杀灭水产品表面和内部的细菌和寄生虫,这对于鲜活性要求高、易腐败的水产品尤为重要,可以减少贮藏、运输和销售过程中的损失,从而延长保质期和提高食品安全性。此外,与传统热处理方法相比,电子束辐照对水产品的影响较小,可以有效保持其口感、色泽和营养成分,使处理后的水产品更接近生鲜状态。

3.2 在肉制品中应用

辐照杀菌能有效抑制和杀灭鲜肉、冷冻包装畜禽肉及熟畜禽肉类制品中的腐败菌,可较好地保持肉制品的感官品质,并延长货架期。祁玉霞等^[43]研究了不同杀菌方式对烟熏鸭胸品质的影响,结果显示,电子束辐照组鸭胸在贮藏初期感官分数较高,是由于杀菌温度低、脂肪破坏程度低以及美拉德反应较弱;随着贮藏时间的延长,由于水分的散失、蛋白质和脂质的氧化导致鸭胸的亮度及红度逐渐降低,鸭胸的咀嚼性与硬度有先升高后降低的趋势,至贮藏后期,由于蛋白质脱氢和脂肪的氧化,鸭胸风味与质构随之改变,感官品质下降。Derakhshan 等^[44]研究了电子束辐照对鹌鹑肉化学品质和感官品质的影响,发现辐照显著降低了鹌鹑肉 TVB-N 含量,并促进了 TBARs 含量增加,但对感官品质无显著性影响。

3.3 在初级农产品中应用

电子束辐照可以实现杀灭有害微生物、杀虫、抑制发芽的效果,且处理过程中不会使初级农产品温度升高,无化学残留,从而有利于农产品安全,是一种能够最大程度保持初级农产品品质的无害化杀菌技术^[45]。Du 等^[46]研究了不同剂量电子束辐照对大米贮藏期间膨胀力、色泽、糊化和感官品质的影响,结果显示,随着辐照剂量的增

加,膨胀力和糊化程度呈下降趋势,是由于辐照会破坏淀粉结构,阻碍吸水能力,从而阻碍大米的溶胀能力,增强了大米的耐咀嚼性;由于辐照过程中产生的自由基使糖苷键和肽键结构降解以及美拉德反应导致大米的 L^* 和 b^* 分别降低和升高。过高剂量的电子束辐照会导致大米的硬度、口感、色泽等感官评分降低,而低剂量辐照可使大米保持较高的感官品质。Mohamed 等^[10]研究了电子束辐照对自然高度污染玉米样品中微生物的影响,结果表明,电子束辐照处理能减少曲霉属和镰刀菌数量,从而进一步降低形成霉菌毒素的风险。此外,Liu 等^[47]研究发现,玉米淀粉经电子束辐照改性处理后淀粉颗粒的相对分子质量较小、黏度较低并具有更高的溶解性。Elias 等^[48]研究了电子束辐照技术对新鲜覆盆子采摘后的品质影响,结果表明,电子束辐照可以保持新鲜覆盆子在冷藏 7 d 内的总酚含量和抗氧化活性;但随着贮藏时间的延长,总酚和抗坏血酸含量显著下降;在 14 d 的贮藏期内,覆盆子嗜温细菌和丝状真菌数量显著减少,且并未检测到食源性病原体。Yoon 等^[49]研究了电子束辐照对草莓采摘后品质的影响,结果表明,不超过 1 kGy 的辐照剂量可以减少微生物数量,抑制草莓的颜色变化(L^* 下降、 a^* 升高、 b^* 升高)和腐烂率,延迟草莓软化,减少质量损失,而对贮藏过程中草莓的可溶固形物含量、pH 值和可滴定酸含量无显著性影响,这可能是由于电子束辐照可以延迟贮藏期间不溶性果胶向可溶性果胶的转化。

电子束辐照在初级农产品中的应用主要体现在几个方面:① 杀菌。电子束辐照可以有效杀灭初级农产品中的细菌、霉菌和其他微生物,如水果和蔬菜表面的病原菌或贮藏中可能存在的致病微生物,有助于延长初级农产品保质期和提高食品安全性。② 抑制腐烂。电子束辐照帮助抑制某些水果和蔬菜的成熟速度和延缓腐烂的进程。对于降低运输和贮藏过程中的损耗,保持初级农产品的品质和营养特性具有重要意义。③ 控制害虫。对于一些谷物和坚果等农产品,电子束辐照可以用来防止仓储过程中的害虫侵害,从而保持初级农产品的质量和卫生安全。

3.4 在预制食品中应用

预制食品俗称预制菜,是指运用现代标准化流水作业,对原料进行不同程度的预加工处理,经过科学包装,最终以成品或半成品形态销售的深加工食品。预制食品自 2020 年进入公众视线,产业持续扩容并受到食品制造业、食品加工业、消费者等社会各界关注,开始进入快速发展阶段,同时,预制食品的安全性也随之步入食品企业和消费者的视野^[50]。电子束辐照可以在低温下有效消除预制食品中的细菌、霉菌等微生物,保留预制食品的感官品质和营养成分,从而延长其货架期^[51]。林伟^[52]研究发现,自热火锅经 6~10 kGy 电子束辐照后,整个货架期样品

的菌落数均符合国家标准,而且自热火锅中肉包中所用的肉为白肉,电子束辐照杀菌对其色泽 a^* 和 b^* 值无显著性影响。鲁怡婷等^[53]研究了不同杀菌方式对即食调味克氏原螯虾尾贮藏期间品质的影响,结果表明,电子束辐照组(6 kGy)蛋白质和脂质的氧化程度均显著低于高温组(116 °C、15 min),且随着贮藏时间延长,辐照组即食调味克氏原螯虾尾亮度值 L^* 呈先下降后上升的趋势,这可能是由于虾肉的肌肉组织被破坏,水分回渗所导致,而高温组存在黑变现象。综合考虑,电子束辐照处理对即食克氏原螯虾尾贮藏过程中品质保持效果较佳。

电子束辐照在预制食品中的应用也有一些显著的优点:① 延长保质期。通过电子束辐照可以有效杀灭预制食品中的病原菌等,对于减少食品在贮藏、运输和销售中的损耗和质量下降有重要意义,并提高食品的安全性和卫生水平。② 保持食品质量。电子束辐照与传统杀菌方法相比对预制食品的感官品质和营养成分的影响更小,有利于预制食品保持原始的风味和质地,避免因过度加热而导致的食品品质损失。③ 适用多种类型的食品。电子束辐照应用广泛,可以满足不同类型预制食品的处理需求。

4 电子束辐照技术在食品工业中应用的关键控制因素

电子束辐照处理可能会引起食品品质的降低和营养物质的流失,因此,需要控制辐照过程中的一些因素,如辐照剂量、温度、包装条件等。其中,辐照剂量决定病原微生物的杀灭程度,从而影响食品的货架期。电子束辐照杀菌相比于传统的欧姆加热杀菌、高温高压杀菌等热杀菌技术,其优点是在低温下对食品进行杀菌可以避免对食品中生物大分子结构和含量的影响,最大程度地保留其营养品质。此外,电子束辐照联合其他包装技术可以更好地达到延长食品贮藏期的目的,如真空包装、气调包装及加入除氧剂等。

4.1 电子束辐照剂量

电子束辐照剂量是控制食品感官品质和营养成分的重要因素。当辐照剂量过小时,对食品的品质影响较小,但可能杀菌不彻底,导致食品腐败变质^[54];但当辐照剂量过大时,可能对食品品质如色泽、风味、水分含量和营养成分等影响过大^[35]。孔秋莲等^[55]研究了不同电子束辐照剂量对牛肉糜杀菌效果和感官品质的影响,结果表明,2.11, 8.44 kGy的辐照剂量对病原菌的杀灭效果无显著性差异;辐照剂量越小,红度值下降幅度越大、嗅感评价越高。Zhao等^[56]研究了不同剂量电子束辐照对南美白虾品质的影响,结果表明,随着剂量的增加,南美白虾中维生素E含量呈剂量依赖显著性降低,蛋白质含量、水分和灰分无显著性差异;低剂量(≤ 4 kGy)时对虾的色泽无影

响,而当电子束辐照剂量达到10 kGy时可显著改变虾的色泽,降低TVB-N和TBARs含量,降低虾的弹性、硬度和咀嚼性。该结果可能是因为过量的辐照引起了盐溶性蛋白质的变性,肌原纤维和肌浆蛋白的变形以及虾青素的降解和脂质氧化^[57-59]。黄业传等^[16]采用电子束辐照技术探究不同剂量(2, 3, 4 kGy)的辐照对低盐切片腊肉品质的影响,结果显示,随着辐照剂量增加,红度 a^* 值逐渐升高。这是由于肉制品经过辐照处理后,氧化还原电位降低,产生了CO成为肌红蛋白的第六位配位基^[60],产生羧基肌红蛋白。然而,Rodrigues等^[61]在研究不同剂量(2.5, 5.0, 7.5, 10.0 kGy)电子束辐照对枸杞生物活性成分的影响时发现,电子束辐照剂量不影响枸杞样品中活性物质的自由基清除活性,但5 kGy剂量处理时枸杞总酚含量达到最高。

总而言之,辐照剂量的选择须依据不同食品种类和品质评价指标而定。因此,辐照剂量的选择应综合考虑食品的保质期、品质和安全性等因素。① 延长保质期。通过控制辐照剂量,可以使食品中微生物大幅度减少,从而延长食品保质期。对于需要长途运输的食品、季节性食品或需长时间保存的食品较重要。② 改善食品品质。适当辐照剂量可以帮助改善食品感官品质和营养成分,如保持水果蔬菜的色泽、减少肉类不良气味和减少农产品的昆虫污染。③ 安全性考量。与传统方法相比,电子束辐照后的食品在化学成分上没有显著差异,应确保合理剂量不会对消费者产生负面影响。

4.2 电子束辐照温度

温度显著影响食品的黏度与水分流动性,当自由水被冷冻时,自由基分散度低,不易与食品中的营养成分和活性物质反应,因此可延缓食品的氧化并延长其货架期^[62]。温度过高时,食品中的生物大分子变性,可能导致感官品质的降低及营养物质的损失^[63]。因此,降低处理温度可以降低电子束辐照对食品感官品质的影响。张明^[64]采用不同电子束辐照温度和剂量对真空包装盐水鹅进行处理后,发现辐照剂量为8~10 kGy时能促进脂质氧化分解,产生多不饱和脂肪酸;在低温下进行辐照,可抑制盐水鹅中的脂肪氧化,且不饱和脂肪酸的氧化反应并未与辐照剂量成正比。Jaczynski等^[65]在不同热处理条件下对鱼糜类海产品进行电子束辐照处理,当样品温度为5~23 °C时,电子束辐照既不改变产品色泽也不损害产品纹理;相比之下,由于淀粉的糊化等影响,热处理鱼糜硬度显著降低,亮度值 L^* 显著增加,而在冷冻条件下进行电子束辐照处理时会提高产品硬度,可能是由于冷冻样品产生了额外的化学键所致^[66]。

辐照过程可能会对食品的温度产生一定影响,例如:① 尽管电子束本身不会显著升高食品温度,但辐照过程中的电子束沉积可能导致食品的热效应,取决于辐照剂

量和食品的热传导效应;② 实际应用中,通常对食品的环境温度进行控制,以确保辐照过程中食品温度在安全范围内,特别对于水果和蔬菜等易受热食品,需采取额外措施来控制温度,以避免品质的损失;③ 高剂量电子束辐照会对食品产生一定程度的热效应,可能对食品的感官品质产生影响。因此,需要根据不同食品特性和辐照处理要求,合理调节辐照剂量,以平衡杀菌效果和食品品质间的关系。

4.3 食品包装形式

食品经辐照后周围的气体会逸散到食物中,而在电子束辐照处理过程中,通常会发生氧气的辐解,从而产生“辐照味”。在有氧包装中,辐照会促进醛类的产生^[67],因此,可以通过真空包装、气调包装、脱气和添加除氧剂等来降低辐照带来的危害。Han 等^[68]研究了低剂量电子束辐照对预包装的新鲜生菜心包装功能的影响,发现 1.5, 3.2 kGy 的电子束辐照剂量改善了低密度聚乙烯包装(LDPE)的氧气阻隔能力,包装内 O₂ 浓度降低,CO₂ 浓度升高,且水蒸气渗透性和 LDPE 刚度均不受电子束辐照的影响。程述震^[69]在电子束辐照对充氮包装冷却牛肉品质的影响研究中发现,2.5 kGy 的电子束辐照剂量使充氮包装冷却牛肉的菌落总数下降,并保持其较优的感官品质和营养品质,有效延长了货架期。蒋慧亮等^[70-71]研究了气调包装结合电子束辐照对蚌肉的保鲜效果,结果表明,50% CO₂ + 30% N₂ + 20% O₂ 的气调包装条件下能较大幅度地抑制微生物的生长、TVB-N 的产生及脂肪的氧化,降低了 TBARs 值,有效改善了蚌肉的色泽。

电子束辐照对不同形式的食品包装产生一定的影响,主要取决于食品包装材料以及辐照处理条件,几种常见食品包装形式在电子束辐照中的影响如下:① 塑料包装。市场上大多数食品以塑料包装形式出售。电子束辐照通常不会对塑料包装产生显著影响,电子束对塑料包装穿透力较强,在适当剂量下不会产生严重影响。然而一些特殊塑料可能对电子束敏感,需要进行适当测试和评估。② 纸质包装。电子束辐照可能导致纸张强度和柔韧性的变化,可以通过调整辐照剂量和处理条件来降低影响。③ 玻璃和金属包装。玻璃和金属通常对电子束不敏感,因为这些材料对辐照有较高阻隔性。

5 结论与展望

电子束辐照技术作为一种新型的食品加工技术,能较好地杀灭病原微生物,具有广阔的应用前景和巨大的发展潜力。为了使食品达到更好的感官品质和营养品质,可根据海鲜、肉制品、果蔬、预制食品等品类的自身特性,分别研发最适宜的高能电子束辐照处理工艺,规范其工艺参数、探究其辅助协同技术,以此建立食品辐照杀菌和保藏工艺标准体系,实现精准化辐照,使辐照杀菌和辐

照保鲜技术更好地发挥其优势,提高食品的稳定性和品质,进而延长贮藏期和货架期。此外,电子束辐照技术可以与真空包装或添加天然抗氧化剂及除氧剂来避免不良影响,提高食品的物理、化学和感官品质。在此基础上,电子束辐照还可与其他杀菌技术(高温高压杀菌、紫外线杀菌、微波杀菌等)联用,从而达到更好的杀菌效果。同时,需要加强对电子束辐照技术安全性和食品品质影响的研究,以确保其在食品加工中的安全性和有效性。

在未来发展中,随着技术的不断进步和成本的降低,电子束辐照技术将在食品工业中得到更广泛的应用和推广。电子束辐照技术将与物联网、大数据等新技术相结合,实现智能化、自动化的生产和管理。这将进一步提高生产效率、降低能耗和减少人力成本,为相关产业的发展注入新的动力,推动整个行业的技术进步和产业升级。随着科技的不断进步和应用领域的不断拓展,电子束辐照技术有望在食品工业、医疗卫生、绿色环保等更多领域发挥重要作用,为人类的健康安全和生活质量做出更大贡献。

参考文献

- [1] BAI Y, COSTLOW L, EBEL A, et al. Review: retail consumer price data reveal gaps and opportunities to monitor food systems for nutrition[J]. Food Policy, 2021, 104: 102148.
- [2] ALSAEDI A W M, AL-HILPHY A R, AL-MOUSAWI A J, et al. Non-thermal pasteurization of milk by elongated electrode moderate electrical field: chemical and sensory analysis during cold storage and shelf-life determination[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2024, 94: 103647.
- [3] DHIMAN A, SUHAG R, CHAUHAN D S, et al. Status of beetroot processing and processed products: thermal and emerging technologies intervention[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 114: 443-458.
- [4] 张军凯, 包青平, 孙志峰, 等. 食品加工新型杀菌技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(8): 3 099-3 103. ZHANG J K, BAO Q P, SUN Z F, et al. Research progress on new sterilization technology in food processing[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2017, 8(8): 3 099-3 103.
- [5] 何凯锋, 陈秀金, 臧鹏, 等. 辐照杀菌技术对食品品质的影响及控制研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(10): 299-305. HE K F, CHEN X J, ZANG P, et al. Research progress on effect of irradiation sterilization on food quality and its control[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(10): 299-305.
- [6] GAUTAM R K, VENUGOPAL V. Electron beam irradiation to control biohazards in seafood[J]. Food Control, 2021, 130: 108320.
- [7] 毛青秀, 徐远芳, 陈渠玲, 等. 辐照方式对南酸枣糕品质及货架期的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(2): 109-116, 138. MAO Q X, XU Y F, CHEN Q L, et al. Effects of irradiation

- methods on quality and shelf life of *Choerospondias axillaris* pastilles[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(2): 109-116, 138.
- [8] TAHERGORABI R, MATAK K E, JACZYNSKI J. Application of electron beam to inactivate salmonella in food: recent developments[J]. *Food Research International*, 2012, 45(2): 685-694.
- [9] 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. Research progress of electron beam irradiation technology and its application in food industry[J]. *The Food Industry*, 2021, 42(7): 257-261.
- [10] MOHAMED A B, CHAVEZ R A, WAGACHA M J, et al. Efficacy of electron beam irradiation in reduction of mycotoxin-producing fungi, aflatoxin, and fumonisin, in naturally contaminated maize slurry[J]. *Toxicon: X*, 2022, 16: 100141.
- [11] FERNANDES Â, ANTONIO A L, OLIVEIRA M B P P, et al. Effect of gamma and electron beam irradiation on the physico-chemical and nutritional properties of mushrooms: a review[J]. *Food Chemistry*, 2012, 135(2): 641-650.
- [12] KHOURYIEH H A. Novel and emerging technologies used by the US food processing industry[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2021, 67: 102559.
- [13] BEZUGLOV V V, BRYAZGIN A A, YU VLASOV A, et al. Mixed feed and its ingredients electron beam decontamination [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, 168: 012111.
- [14] 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.
- [15] PILLAI S D, SHAYANFAR S. Electron beam technology and other irradiation technology applications in the food industry [J]. *Topics in Current Chemistry*, 2016, 375(1): 6.
- [16] 黄业传, 孙梦. 辐照杀菌对低盐切片腊肉风味及理化性质的影响[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(5): 89-99.
- HUANG Y C, SUN M. Effect of irradiation sterilization on flavor and physicochemical properties of low-salt sliced bacon [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(5): 89-99.
- [17] 王甜, 吴锐霄, 杨春杰, 等. 不同电子束辐照处理对传统镇巴腊肉品质的影响[J]. *肉类研究*, 2022, 36(10): 16-23.
- WANG T, WU R X, YANG C J, et al. Effects of electron beam irradiation on the quality of traditional Zhenba smoked cured meat[J]. *Meat Research*, 2022, 36(10): 16-23.
- [18] DE LA PAZ XAVIER M, DAUBER C, MUSSIO P, et al. 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.
- [19] 古明亮, 张朝林, 高鹏. 电子束辐照对雪花酥杀菌效果及感官品质的影响[J]. *现代面粉工业*, 2020, 34(4): 12-15.
- GU M L, ZHANG C L, GAO P. Effect of electron beam irradiation on sterilization effect and sensory quality of snowflake crisp[J]. *Modern Flour Industry*, 2020, 4: 12-15.
- [20] YU H L, ZHANG J H, ZHAO Y, et al. Effects of specific doses of E-beam irradiation which inactivated SARS-CoV-2 on the nutrition and quality of Atlantic salmon[J]. *Food Science and Human Wellness*, 2023, 12(4): 1 351-1 358.
- [21] WARD L R, KERTH C R, PILLAI S D. Nutrient profiles and volatile odorous compounds of raw milk after exposure to electron beam pasteurizing doses[J]. *Journal of Food Science*, 2017, 82(7): 1 614-1 621.
- [22] 宋蕊. 新疆汤饭羊肉块包和羊肉酱包的开发及贮藏研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2021: 38-54.
- SONG R. Research on the development and storage of mutton and mutton sauce bags in Xinjiang rice soup[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2021: 38-54.
- [23] 古明亮, 张朝林, 高鹏. 市售威化饼干的微生物检测及电子束辐照杀菌效果研究[J]. *粮油与饲料科技*, 2020(3): 11-16.
- GU M L, ZHANG C L, GAO P. Microbial detection of commercial wafer biscuits and sterilization effect by electron beam irradiation[J]. *Grain Oil and Feed Technology*, 2020(3): 11-16.
- [24] WU R X, YANG C J, XI L J, et al. Evaluation of the influence of flavor characteristics of cooked bacon with different sterilization methods by GC-IMS combined with HS-SPME-GC-MS and electronic nose[J]. *Foods*, 2022, 11(22): 3 547.
- [25] 李欣, 王宁晓璇, 梅源, 等. 新型非热杀菌技术在发酵果蔬制品中的应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(15): 400-408.
- LI X, WANG N X X, MEI Y, et al. Research progress on the application of novel non-thermal sterilization technologies in fermented fruit and vegetable products[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(15): 400-408.
- [26] 余慧琳, 赵燕, 李泓浩, 等. 高能电子束辐照带鱼营养及品质变化[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(9): 178-188.
- YU H L, ZHAO Y, LI H H, et al. The nutrition and quality changes of hairtail irradiated by high energy electron beam[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2022, 22(9): 178-188.
- [27] 张娟琴, 邢增涛, 白冰, 等. 电子束辐照对双孢菇采后品质的影响[J]. *核农学报*, 2011, 25(1): 88-92.
- ZHANG J Q, XING Z T, BAI B, et al. Effect of electron beam irradiation on postharvest quality of *Agaricus bisporus*[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2011, 25(1): 88-92.
- [28] 李军, 田毅峰, 晏锐锐, 等. 电子束辐照对鸡肉营养品质的影响[J]. *食品科技*, 2012, 37(1): 122-124.
- LI J, TIAN Y F, YAN R R, et al. Effect of electron beam irradiation on nutrient quality of the chicken[J]. *Food Science and Technology*, 2012, 37(1): 122-124.

- [29] 徐彦瑞. 籽瓜汁电子束辐照杀菌技术及设备的研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2020: 31-42.
- XU Y R. Study on sterilization technology and equipment of seed-used watermelon juice by electron beam irradiation[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2020: 31-42.
- [30] 叶力瑕, 牛耀星, 王燕, 等. 低剂量电子束辐照对徐香猕猴桃生理品质与氧化酶的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(14): 355-362.
- YE L X, NIU Y X, WANG Y, et al. Effects of low dose electron beam irradiation on physiological quality and oxidase of actinidia Xuxiang[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(14): 355-362.
- [31] KIM G R, RAMAKRISHNAN S R, AMEER K, et al. Irradiation effects on chemical and functional qualities of ready-to-eat *Saengshik*, a cereal health food[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2020, 171: 108692.
- [32] GUO J Y, JIKE X L, WU C Y, et al. Phytochemicals, antioxidant capacities and volatile compounds changes in fermented spicy Chinese cabbage sauces treated by thermal and non-thermal technologies[J]. Food Research International, 2024, 176: 113803.
- [33] CHEN M L, WANG Z H, YU J T, et al. Effects of electron beam irradiation and ultrahigh-pressure treatments on the physicochemical properties, active components, and flavor volatiles of jujube jam[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 187: 115292.
- [34] 杨苗, 林姿娜, 王永伦, 等. 基于电子束辐照处理的粳糯糜子理化特性及抗氧化活性[J]. 食品科学, 2023, 44(17): 43-50.
- YANG M, LIN Z N, WANG Y L, et al. Physicochemical properties and antioxidant activity of non-waxy and waxy proso millet (*Panicum miliaceum* L.) subjected to electron beam irradiation [J]. Food Science, 2023, 44(17): 43-50.
- [35] ZHANG Y Q, KONG Y F, XU W J, et al. Electron beam irradiation alters the physicochemical properties of chickpea proteins and the peptidomic profile of its digest[J]. Molecules, 2023, 28(16): 6 161.
- [36] HAN N, LEE J Y, KIM M, et al. Effect of electron-beam irradiation on functional compounds and biological activities in peanut shells[J]. Molecules, 2023, 28(21): 7 258.
- [37] LI H L, LI M J, ZHAO Q, et al. Analysis of water distribution and muscle quality of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) chunks based on electron-beam irradiation[J]. Foods, 2022, 11(19): 2 693.
- [38] YANG Z, WANG H Y, WANG W, et al. Effect of 10 MeV 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.
- [39] WEI Q, MEI J, XIE J. Application of electron beam irradiation as a non-thermal technology in seafood preservation[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 169: 113994.
- [40] 陈方雪, 王世哲, 邱文兴, 等. 超高压和辐照杀菌对鲈鱼冷藏期间品质的影响[J]. 肉类研究, 2023, 37(6): 34-40.
- CHEN F X, WANG S Z, QIU W X, et al. Effect of ultra-high pressure versus irradiation sterilization on the quality of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) during refrigerated storage[J]. Meat Research, 2023, 37(6): 34-40.
- [41] 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, 2020, 48(5): 138-146.
- QI W Y, WANG H H, YUE L, et al. Effects of electronic beams irradiation sterilization on cold storage life and sensory quality of tilapia fillets[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2020, 48(5): 138-146.
- [42] YU H L, ZHANG J H, LI H H, et al. Effects of E-beam irradiation on the physicochemical properties of Atlantic cod (*Gadus morhua*) [J]. Food Bioscience, 2022, 50: 101803.
- [43] 祁玉霞, 李宏宇, 吴熙, 等. 不同杀菌方式对烟熏鸭胸产品品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(22): 259-267.
- QI Y X, LI H Y, WU X, et al. Effects of different sterilization methods on the quality of smoked duck breast products[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(22): 259-267.
- [44] DERAKHSHAN Z, OLIVERI CONTI G, HEYDARI A, et al. 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.
- [45] PILLAI S D, SHAYANFAR S. Electron beam processing of fresh produce: a critical review[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2018, 143: 85-88.
- [46] DU Z H, XING J L, LUO X H, et al. Characterization of the physical properties of electron-beam-irradiated white rice and starch during short-term storage[J]. PLoS One, 2019, 14(12): e0226633.
- [47] LIU X Y, XI C Y, LIANG W, et al. Influence of pre- or post-electron beam irradiation on heat-moisture treated maize starch for multiscale structure, physicochemical properties and digestibility[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 313: 120891.
- [48] ELIAS M I, MADUREIRA J, SANTOS P M P, et al. Preservation treatment of fresh raspberries by e-beam irradiation[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 66: 102487.
- [49] YOON Y S, KIM J K, LEE K C, et al. Effects of electron-beam irradiation on postharvest strawberry quality[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(9): e14665.
- [50] 惠成章, 刘爱群. 我国预制菜产业发展现状及对策[J]. 辽宁农业科学, 2024(2): 69-71.
- HUI C Z, LIU A Q. The development status and countermeasures of China's prefabricated vegetable industry [J]. Liaoning Agricultural Sciences, 2024(2): 69-71.
- [51] YING X G, LI T Y, DENG S G, et al. Advancements in nonthermal physical field technologies for prefabricated

- aquatic food: a comprehensive review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2024, 23(1): e13290.
- [52] 林伟. 自加热方便火锅加工关键工艺的研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2019: 50-66.
- LIN W. Study on the key technology of self-heating convenient hot pot[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2019: 50-66.
- [53] 鲁怡婷, 谭宏渊, 黄丽琪, 等. 杀菌方式对即食调味克氏原螯虾尾贮藏品质的影响[J]. 广东海洋大学学报, 2024, 44(2): 1-9.
- LU Y T, TAN H Y, HUANG L Q, et al. Effects of sterilization method on quality of ready-to-eat seasoned crayfish tails during storage[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2024, 44(2): 1-9.
- [54] BHATIA S S, WALL K R, KERTH C R, et al. Benchmarking the minimum electron beam (eBeam) dose required for the sterilization of space foods[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2018, 143: 72-78.
- [55] 孔秋莲, 郑琦, 颜伟强, 等. 不同辐照工艺对牛肉糜杀菌效果及感官品质的影响[J]. 上海农业学报, 2023, 39(4): 131-139.
- KONG Q L, ZHENG Q, YAN W Q, et al. Effects of irradiation methods on sterilization and sensory quality of minced beef[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2023, 39(4): 131-139.
- [56] ZHAO Y, YU H L, LI H H, et al. Effect of E-beam irradiation on the qualitative attributes of shrimp (*Penaeus vannamei*) [J]. Food Bioscience, 2023, 52: 102350.
- [57] LOPKULKIAERT W, PRAPATSORNWATTANA K, RUNGSARDTHONG V. Effects of sodium bicarbonate containing traces of citric acid in combination with sodium chloride on yield and some properties of white shrimp (*Penaeus vannamei*) frozen by shelf freezing, air-blast and cryogenic freezing[J]. LWT-Food Science and Technology, 2009, 42(3): 768-776.
- [58] WANG Z Y, HE F, RAO W L, et al. Proteomic analysis of goat *Longissimus dorsi* muscles with different drip loss values related to meat quality traits[J]. Food Science and Biotechnology, 2016, 25(2): 425-431.
- [59] CHOI Y S, KIM H W, HWANG K E, et al. Effects of gamma irradiation on physicochemical properties of heat-induced gel prepared with chicken salt-soluble proteins[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2015, 106: 16-20.
- [60] NAM K C, AHN D U. Carbon monoxide-heme pigment is responsible for the pink color in irradiated raw turkey breast meat[J]. Meat Science, 2002, 60(1): 25-33.
- [61] RODRIGUES F T, RAMOS KOIKE A C, GALO DA SILVA P, et al. Effects of electron beam irradiation on the bioactive components of goji-berry[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2021, 179: 109144.
- [62] BREWER M S. Irradiation effects on meat flavor: a review[J]. Meat Science, 2009, 81(1): 1-14.
- [63] YANG J, WEI W J, HOLMAN B W B, et al. Effects of low-energy electron beam irradiation on the shelf-life and quality of vacuum-packaged beef steaks during chilled storage[J]. Meat Science, 2022, 193: 108932.
- [64] 张明. 两种辐照方式对盐水鹅品质和微生物的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2019: 43-62.
- ZHANG M. Effects of two irradiation methods on quality and microorganisms of salted geese[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2019: 43-62.
- [65] JACZYNSKI J, PARK J W. Physicochemical properties of surimi seafood as affected by electron beam and heat[J]. Journal of Food Science, 2003, 68(5): 1 626-1 630.
- [66] SHIE J S, PARK J W. Physical characteristics of surimi seafood as affected by thermal processing conditions[J]. Journal of Food Science, 1999, 64(2): 287-290.
- [67] DU M, AHN D U, NAM K C, et al. Influence of dietary conjugated linoleic acid on volatile profiles, color and lipid oxidation of irradiated raw chicken meat[J]. Meat Science, 2000, 56(4): 387-395.
- [68] HAN J, GOMES-FEITOSA C L, CASTELL-PEREZ E, et al. Quality of packaged romaine lettuce hearts exposed to low-dose electron beam irradiation[J]. LWT-Food Science and Technology, 2004, 37(7): 705-715.
- [69] 程述震. 电子束辐照对充氮包装冷却牛肉品质及蛋白特性的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017: 21-28.
- CHENG S Z. Effect of electron beam dose rates on the quality and protein characteristics of chilled beef in nitrogen-filled packaging[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017: 21-28.
- [70] 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. Effects of modified atmosphere packaging combined with electron beam irradiation on preservation of mussel meat[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(3): 147-153.
- [71] MILIJASEVIC J B, MILIJASEVIC M, DJORDJEVIC V. Modified atmosphere packaging of fish: an impact on shelf life [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 333(1): 012028.