

DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2022.03.021

· 综 述 ·

海鲜辐照研究进展

王超, 董娟聪, 刘晓明, 党旭红

中国辐射防护研究院, 山西 太原 030006

摘要: 本文就辐照在延长海鲜货架期和保质期、辐照对海鲜品质影响、辐照在海鲜灭菌中的作用, 海鲜辐照生物剂量计研究等方面的研究内容和成果进行概括和探讨, 明确海鲜辐照相关概念, 提出冷链海鲜新冠灭菌辐照灭菌及海鲜辐照剂量控制是目前主要研究内容和方向。

关键词: 海鲜; 辐照; 保鲜; 灭菌; 品质

中图分类号: X591 文献标识码: R 文章编号: 1004-714X(2022)03-0367-06

Research progress on irradiation of seafood

WANG Chao, DONG Juancong, LIU Xiaoming, DANG Xuhong

China Institute of Radiation Protection, Taiyuan 030006 China

Abstract: This paper summarizes and discusses the research and achievements in the effect of irradiation on extending the shelf life and quality guarantee period of seafood, on the quality of seafood, and on seafood sterilization, and seafood irradiation biological dosimeter study, and defines the concepts related to seafood irradiation. Moreover, we propose that irradiation sterilization on severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 of cold-chain seafood and seafood irradiation dose control are the main research content and directions.

Keywords: Seafood; Irradiation; Preservation; Sterilization; Quality

Corresponding author: DANG Xuhong, E-mail: dangxuhong005@163.com

海鲜产品特定的成分使其极易腐烂, 由于加工和处理程序不当, 约有 30%~35% 的海鲜因为腐坏等原因而被浪费, 因此对海鲜进行适当加工以保持其品质和安全是很有必要的。传统的海鲜保存方法包括: 冷藏、冷冻、腌制、烘干、发酵、熏制、罐装。现代的海鲜保存方法还包括^[1-4]: 辐照、高静水压处理、臭氧化、使用天然防腐剂、蒸煮袋处理、脉冲光技术和冷藏或冷冻结合的包装。

1 海鲜和辐照

1.1 海鲜 海鲜包括鱼类、软体类、甲壳类等。鱼类主要分为: 咸水鱼与淡水鱼、脂肪与非脂肪鱼、自由游动与水产养殖鱼等。软体类主要包括: 贻贝、扇贝、贝、牡蛎、蛤、鱿鱼和章鱼等。甲壳类主要包括: 螃蟹、龙虾和虾等。鱼类组成成分主要包括: 水分、蛋白质、脂肪, 微量成分: 矿物质、维生素和酶; 甲壳类和软体类还有糖原形式的碳水化合物。

1.2 辐照 辐照常用的射线是 γ 射线(Co-60 产生), 电子束(10 MeV 以下)和 X 射线(5 MV 以下, 美国是 7.5 MV 以下)。根据辐射剂量分为: 低剂量(≤ 1 kGy), 中剂量(1~10 kGy)和高剂量(>10 kGy)^[5]。 γ 射线穿透深度较大, 剂量分布均匀, 技术成熟, 应用范围广。加速器产生的高能电子束穿透深度仅为几厘米, 适用于辐照厚度较薄的产品。被辐照的食品或含有被辐照成分的食品必须标有辐照标签, 即在食品包装上显示“经辐照处理”的徽标和标识。

FDA 批准了虾、蟹等海鲜的辐照^[6], 世界卫生组织以及美国和欧盟的食品监管机构研究证实, 辐照是安全的^[7], 但不同国家和地区对辐照品类和辐照剂量的规定存在明显差异, 如在德国和希腊等欧洲国家, 仅允许将干草药、香料和调味料辐照到 10 kGy; 在巴西和巴基斯坦等国家, 则允许对所有食物进行辐照。在公认的能量范围内, 辐照食物不会具有放射性, 但可导致辐照食品的营养成分、感官和品质明显改变,

产生自由基形式的辐照分解产物,食品的类型和辐照剂量会显著影响质量和营养价值^[8-10]。

2 辐照延长海鲜货架期

2.1 辐照延长鱼类货架期 国内外大量的研究结果表明,辐照可以延长鱼类的货架期和保质期。

我国学者张晗等^[11]发现冷藏前对鲈鱼肉采用 3~5 kGy 电子束辐照处理可有效延长鲈鱼肉货架期 6~10 d。杨文鸽等^[12]发现 4 kGy 电子束辐照美国红鱼肉,冷藏条件下保质期比对照组延长 5 d 左右,可达到 14 d。吴东晓等^[13]研究表明冷藏前对鲈鱼肉采取 5 kGy 电子束辐照能显著延长普通包装鲈鱼肉保质期。

国外相关研究^[6]也发现:3 kGy 剂量组与对照组相比,鲷鱼的保质期增加了 2 倍;1 kGy 或 3 kGy 的 γ 射线辐照冷藏储存的大西洋金枪鱼,保质期延长了 4 d;使用 2.5 kGy~5 kGy 剂量的 γ 射线进行辐照冷藏金头鲷,延长了保质期;经 2.5 kGy 和 kGy 剂量辐照冷藏鲈鱼,保质期分别延长了 2 d 和 4 d;使用 2 kGy 剂量的 γ 辐射对泰国发酵鱼肉糜产品进行辐照,延长保质期约 3 周;低剂量 γ 射线辐照冷藏状态冰鱼产品可延长保质期至 3 周;1 kGy 或 2 kGy 的 γ 射线辐照冷藏地中海鲭鱼,可以延长保质期 5 d。

2.2 辐照延长软体类和甲壳类货架期 国内外大量的实验结果表明,辐照延长了软体类和甲壳类海鲜的货架期和保质期。姚周麟等^[14]研究表明使用电子束处理鱿鱼丝能延长产品保质期。虾在冰中保存时保质期为 7 d,用 1.5 kGy 辐照后可延长产品保质期约 10 d。瞿桂香等^[15]研究表明 6 kGy 剂量电子束辐照即食小龙虾,常温贮藏时间可达 7 d。陈东清等^[16]研究发现电子束辐照能够有效延长小龙虾货架期,4 kGy 以上剂量组的小龙虾常温储藏货架期达 10 d 以上。蒋慧亮等^[17]研究表明电子束辐照能延长货架期,5 kGy 电子束辐照对蚌肉保鲜效果较优。Kannat 等^[18]使用包括降低水活度(0.85)、包装和 γ 射线辐照(2.5 kGy)的组合方法,延长了即食虾在室温下储存的货架期,对照组在 15 d 内出现了霉菌生长,而经辐照的虾,超过 8 周其感官和微生物数量依然可接受。Komolprasert 等^[19]发现经 2 kGy 辐照的牡蛎肉在冷藏下货架期为 21 至 28 d,而未经辐照的牡蛎肉为 15 d。

3 辐照对海鲜品质影响

3.1 辐照对鱼类品质影响 吴东晓等^[13]发现用 3 kGy、5 kGy 和 7 kGy 的电子束辐照鲈鱼肉,可以减

缓其在冷藏期间不饱和脂肪酸氧化速度,使 VBN、组胺含量得到控制。鉏晓艳等^[20]发现电子束对鲈鱼半成品辐照剂量在 4 kGy 左右时可达到灭菌且保持产品原有风味和品质,并有效控制鱼肉色度、pH 值和持水性。杨文鸽等^[21]研究表明电子束辐照美国红鱼肉,低于 5 kGy 剂量辐照美国红鱼肉后感官影响不明显,能较好的保持其原有风味,但 TVB-N 值、POV 均有不同程度增加,超过 5 kGy 剂量后会导致异味产生,随辐照剂量增加挥发性风味成分增加,风味感官评分降低,高剂量辐照组鱼肉色泽略微变红。傅丽丽等^[22]研究表明 0.5 kGy 剂量电子束辐照可以更好地保持三文鱼的品质,1 kGy 和 2 kGy 剂量电子束辐照使三文鱼颜色变暗,辐照使三文鱼的黏附性变小,同时可以抑制三文鱼挥发性盐基氮的产生。傅丽丽等^[23]研究还发现在冷链运输过程中避免温度波动,同时配以 2 kGy 剂量辐照可使冷冻大黄鱼保持良好的品质。

杨镭等^[24]研究显示电子束辐照影响带鱼鱼糜源性 TGase 二级结构及其活力,适宜剂量辐照促进 TGase 分子中 α -螺旋和 β -转角结构转化为 β -折叠及无规卷曲,有利于提高鱼糜 TGase 活性,促进带鱼鱼糜凝胶的形成。张晗等^[25]采用 1、3、5、7 kGy 剂量电子束辐照处理鲈鱼肉发现表面疏水性随辐照剂量上升先增大后减小,并于 5 kGy 时达到最大值。随着辐照剂量的上升,鲈鱼肉肌原纤维蛋白中的 α -螺旋结构向 β -折叠转化。高剂量辐照引起了鲈鱼肉肌原纤维蛋白氧化。

国外研究^[6]也发现:使用 2.5 kGy 和 5 kGy 的剂量辐照鲈鱼,显著降低了 TVC、TVB-N、TMA-N 和 TBA 值;6 kGy 辐照诱导了脂质和蛋白质的氧化,而使用 2 kGy 的剂量对品质无负面影响;随 γ 射线辐照剂量增加,冷藏冰鱼脂质氧化物值也增加;分别用 1 kGy、5 kGy 和 10 kGy 的 γ 射线辐照冷藏状态的竹荚鱼,竹荚鱼肌肉蛋白的电泳图谱在不同 γ 辐射剂量下没有变化,产品的感官属性没有产生不利影响。Altan 等^[26]从微生物、化学和感官数据分析,以 3 kGy 和 5 kGy 辐照并立即冷冻的鱼在 12 个月后质量仍然可以接受,而对照组在 9 个月后发生损坏。

3.2 辐照对软体类和甲壳类品质影响 姚周麟等^[14]研究表明电子束辐照鱿鱼丝,感官影响不明显,色泽略有加深,T-VBN 值、POV、AV 均有不同程度增加。

李新等^[27]以 5、10、20 kGy 剂量辐照冷冻小龙虾肉,发现质构特性(硬度、弹性、黏聚性、胶着度与

咀嚼度)随着辐照剂量增大而增加,色泽指标(L*明亮度、a*红绿偏差与b*蓝黄偏差)均降低。辐照后虾肉中水解氨基酸含量增加,5 kGy 时达到最高值 86.23%。高剂量辐照,虾肉蛋白质浓度升高,蛋白质相对分子质量显著降低。

瞿桂香等^[15]研究表明经电子束辐照的即食小龙虾,色值降低,虾壳 a*和虾肉的 L*值差异显著,色泽发暗;pH 值显著升高。6 kGy 时,即食小龙虾的总氨基酸、必需氨基酸和呈味氨基酸含量显著增加,无辐照味,含硫化合物含量较低,质构影响不明显;7 kGy 时,即食小龙虾达到商业无菌,此时含硫化合物激增,有辐照味,质构变化明显。

陈东清等^[16]发现蒸煮小龙虾电子束辐照合适剂量为 6 kGy,8 kGy 剂量以上辐照小龙虾的虾肉气味、含硫挥发性物质显著增加。

郝云彬等^[28]发现辐照冷藏大管鞭虾可以降低 TVB-N 的产生速度;pH 值呈先降后升的变化趋势;虾中金属含量无影响;7 kGy 辐照后总氨基酸含量增加率最高,达 7.3%。

Sharma 等^[29]以 2 kGy 辐照整个或分段的虾,对挥发性成分的定量分析表明辐照对其影响不显著,说明产品的感官性能也没有受到影响。

Lee 等^[30]以 5 kGy 和 10 kGy 辐照腌制虾发现辐照对水活度、蛋白质、脂质、水分和盐度没有影响。辐照后发酵的虾在发酵过程中 TVB-N 显著增加。腌制与辐照相结合可以有效地保持发酵虾的品质。

Sinanoglou 等^[31]发现经 4.7 kGy 剂量辐照后,软体类和虾的总脂质含量均降低了约 6%;脂肪酸含量发生变化,随着辐照剂量的增加,PUFA 与 SFA 比值降低。

蒋慧亮等^[17]研究表明电子束辐照蚌肉能延缓挥发性盐基氮(TVB-N)增加,5 kGy 辐照保鲜效果较优。5~9 kGy 剂量辐照对感官评价和 TVB-N 的影响差距不大。辐照在一定程度上加速了蚌肉脂肪氧化,剂量越大硫代巴比妥酸值(TBA)上升越快,最大值越大。7~9 kGy 剂量辐照后蚌肉中各类氨基酸含量有不同程度降低。

梅卡琳等^[32]研究表明电子束 1~9 kGy 剂量辐照细点圆趾蟹蟹肉后,蟹肉营养和滋味没有明显的负面影响,蟹肉饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸总量均无显著影响,各辐照组味精当量值均高于对照组,其中 1 kGy 组蟹肉的味精当量值最高,达到 17.92%。7 kGy 及以上剂量组蟹肉总氨基酸和非

必需氨基酸含量下降比较明显;辐照没有改变蟹肉的第 1 和第 2 限制性氨基酸种类,各组蟹肉均为质量较好的蛋白质;随着辐照剂量增加,蟹肉中的游离氨基酸总量呈下降趋势,但呈鲜、甜味的游离氨基酸含量有所增加,说明适当的辐照剂量对蟹肉氨基酸的呈味有改善作用,对蟹肉鲜味有提升作用。

4 辐射海鲜灭菌

辐照海鲜可以减低其微生物危害性。辐照将减少但不能完全消除海鲜体内或外表的病原体数量,包括李斯特菌、金黄色葡萄球菌、弧菌、沙门氏菌、志贺氏菌和大肠杆菌。

4.1 海鲜中的细菌 引起人类感染的常见海鲜细菌包括弧菌、沙门氏菌、志贺氏菌、大肠杆菌和李斯特菌。当人们摄入食物中细菌预先形成的毒素时,就会发生食源性中毒。在 1973—2006 年,弧菌占与海鲜有关疾病的 54%。沙门氏菌和志贺氏菌各占约 10%,李斯特菌占约 1%,肉毒梭菌毒素占与海鲜有关疾病的 25%,金黄色葡萄球菌产生的几种毒素占与海鲜相关的疾病不到 5%。除细菌外,病毒病原体导致了所有与海产品相关的疾病暴发的 16%。甲型肝炎主要与受污染水域的双壳类软体类有关,在所有与海产品有关的暴发疾病中占约 5%。创伤弧菌和副溶血性弧菌是在温暖的沿海地区,尤其是在夏季月份常见的细菌,对牡蛎的消费者造成食源性疾病,副溶血弧菌可在感染后 2~48 h 内引起非出血性腹泻,潜伏期为 1~7 d,可在 2 d 内导致死亡^[33]。

为了防止食用海鲜期间的感染或中毒,抑制所有病原体的生长至关重要。

4.2 辐照灭菌 FDA 允许对软体类和甲壳类辐照最大剂量分别为 5.5 kGy 和 6.0 kGy。SCF 建议对于大多数鱼类和渔业产品,3 kGy 的剂量足以有效杀灭细菌形成的病原体。实际上,大多数病原体将在低得多的辐射剂量下失活。

鉏晓艳等^[20]发现电子束对鲈鱼半成品的辐照剂量在 4 kGy 左右时可达到灭菌目的。杨文鸽等^[12]发现辐照能有效降低菌落总数,其中 $D_{10} = 1.61$ kGy, $D = 5.40$ kGy (D_{10} :杀灭 90% 细菌所需剂量, D :杀灭 100% 细菌所需剂量)。姚周麟等^[14]发现电子束处理能有效降低鱿鱼丝的菌落总数,其中 $D_{10} = 3.62$ kGy, $D = 8.98$ kGy。郝云彬等^[28]发现 1 kGy 的辐照剂量即可杀灭冷藏大管鞭虾体内外大部分的微生物,辐照剂量越高,杀菌作用越强。肖林等^[34]使用 15 kGy 和

25 kGy 2 种剂量电子束对密闭罐装鲜贻贝进行辐照, 结果表明辐照可有效杀灭各类微生物, 且其食用性和风味没产生明显影响, 常温下保鲜期达到 6 个月。

国外科研人员研究^[6]发现电子束辐照可以有效地减少熏制三文鱼上的李斯特菌和腐败菌, 李斯特菌的种群在 1.0 kGy 时显著降低, 并且在等于或大于 2.0 kGy 时被完全消除; 用李斯特菌菌株接种熏鲱鱼后进行 0.5~2.0 kGy 剂量 X 射线照射, 分别在 3℃ 和 10℃ 下存储了 90 d 和 17 d, X 射线辐照使李斯特菌显著减少, 2.0 kGy 剂量完全消除了李斯特菌种群, 并且在整个存储期间都保持了这种效果; 3.0 kGy 的辐照不影响牡蛎的感官评分, 同时会使 2 种沙门氏菌菌株显著减少; 2.25 kGy 的辐射可以使沙门氏菌显著减少, 冷冻样品可以维持该状态 3 个月以上; 6 kGy γ 辐照地中海贻贝的影响, 辐照后贻贝中的腹泻性贝类中毒(DSP)毒素含量明显降低, 但辐照对贻贝的外观和品质产生了一定的负面影响。

5 海鲜辐照生物剂量计

国内外相关研究表明, 海鲜体内的某些物质和辐照剂量具有相关性, 且部分指标呈剂量-效应关系, 具有做成辐照生物剂量计的可能。辐射生物剂量计可以进行辐射剂量标记, 监测食品安全。

张晗等^[11]采用 1、3、5、7 kGy 剂量电子束辐照鲈鱼肉, 结果表明 1 kGy 辐照组总巯基含量显著上升, 随着辐照剂量继续上升; 盐溶蛋白含量、活性巯基含量、 Ca^{2+} -ATPase 活力下降; 羰基和二硫键含量上升, 且呈剂量-效应关系。

Kim 等^[35]辐照鱿鱼, 能够使脂质分解, 产生碳氢化合物和 2-烷基环丁酮。此类化合物在未辐照的鱿鱼中是不存在的, 当辐照剂量大于 0.5 kGy 时产生, 并且其浓度随着辐照剂量的增加而增加。因此碳氢化合物或 2-烷基环丁酮可用于对食品辐射剂量标记。

6 讨 论

辐照是食品保存的一种方法, 原理包括: 延缓或消除发芽或成熟; 破坏导致食源性疾病的病原体, 改善食品安全; 破坏腐败微生物, 延长产品的货架期; 控制害虫入侵。辐照是一种辅助保存技术, 不能替代确保商品安全的严格食品安全标准。

辐照海鲜是为了消除或减少食源性病原体并延长海鲜的保质期, 因此辐照在海鲜保存和灭菌中有重要作用。与辐照冷冻产品相比, 辐照在冷藏中延长货

架期更有效。通常以 1.0~3.0 kGy 的剂量对海鲜产品进行辐照, 有效延缓微生物变质, 延长海鲜在冷藏条件下的保存期限。

我国多次在进口冷冻海鲜产品中发现新冠病毒, 而辐照是消灭病毒的一种有效方法, 因此研究新冠病毒冷冻状态下的灭菌剂量, 及在该剂量下对冷冻海鲜品质和安全的的影响, 将是一个很重要的研究内容和方向。此外海鲜产品自身辐照生物剂量计研究也是必要的, 其可以估算辐照剂量, 保护消费者安全。

利益冲突 本研究由署名作者按以下贡献声明独立开展, 排名无争议。文章不涉及任何利益冲突

作者贡献声明 王超、董娟聪负责调研文献, 编写论文; 刘晓明负责论文思路; 党旭红负责论文修改

参考文献

- [1] Erkan N, Günlü A, Genç İY. Alternative seafood preservation technologies: ionizing radiation and high pressure processing[J]. J Fish Sci, 2014, 8 (3) : 238-251.
- [2] Nagaraj Rao RC. Recent advances in processing and packaging of fishery products: a review[J]. Aquat Procedia, 2016, 7: 201-213. DOI: 10.1016/j.aqpro.2016.07.028.
- [3] Mei J, Ma X, Xie J. Review on natural preservatives for extending fish shelf life[J]. Foods, 2019, 8 (10) : 490. DOI: 10.3390/foods8100490.
- [4] Sampels S. The effects of storage and preservation technologies on the quality of fish products: a review[J]. J Food Process Preserv, 2015, 39 (6) : 1206-1215. DOI: 10.1111/jfpp.12337.
- [5] Fellows PJ. Food processing technology: principles and practices[M]. Amsterdam: Elsevier, 2018: 279-280.
- [6] Kontominas MG, Badeka AV, Kosma IS, et al. Innovative seafood preservation technologies: recent developments[J]. Animals, 2021, 11 (1) : 92. DOI: 10.3390/ANI11010092.
- [7] FDA. Irradiated food & packaging-food irradiation: what you need to know[R]. New Hampshire: FDA, 2018.
- [8] Munir MT, Federighi M. Control of foodborne biological hazards by ionizing radiations[J]. Foods, 2020, 9 (7) : 878. DOI: 10.3390/foods9070878.
- [9] Maherani B, Hossain F, Criado P, et al. World market development and consumer acceptance of irradiation technology[J]. Foods, 2016, 5 (4) : 79. DOI: 10.3390/foods5040079.
- [10] Roberts PB. Food irradiation: standards, regulations and world-wide trade[J]. Radiat Phys Chem, 2016, 129: 30-34. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2016.06.005.
- [11] 张晗, 吕鸣春, 梅卡琳, 等. 电子束辐照对鲈鱼肉杀菌保鲜效果及品质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39 (21) : 66-71. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-201821010.

- Zhang H, Lv MC, Mei KL, et al. Effects of electron beam irradiation on the preservation and quality of sea bass (*Lateolabrax japonicus*) meat[J]. *Food Sci*, 2018, 39 (21): 66-71. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-201821010.
- [12] 杨文鸽, 傅春燕, 徐大伦, 等. 电子束辐照对美国红鱼杀菌保鲜效果的研究[J]. *核农学报*, 2010, 24 (5): 991-995. DOI: 10.11869/hnxb.2010.05.0991.
- Yang WG, Fu CY, Xu DL, et al. Effects of electron beam irradiation on preservation of *Sciaenops ocellatus*[J]. *J Nucl Agric Sci*, 2010, 24 (5): 991-995. DOI: 10.11869/hnxb.2010.05.0991.
- [13] 吴东晓, 杨文鸽, 徐大伦, 等. 电子束辐照对鲈鱼肉品质的影响[J]. *核农学报*, 2012, 26 (3): 484-489. DOI: 10.11869/hnxb.2012.03.0484.
- Wu DX, Yang WG, Xu DL, et al. Effect of electron beam irradiation on the quality of mackerel (*Pneumatophorus japonicus*) meat[J]. *J Nucl Agric Sci*, 2012, 26 (3): 484-489. DOI: 10.11869/hnxb.2012.03.0484.
- [14] 姚周麟, 周星宇, 丁士芳, 等. 电子束冷杀菌对即食鱿鱼丝保藏作用的研究[J]. *食品工业科技*, 2009, 30 (6): 323-325.
- Yao ZL, Zhou XY, Ding SF, et al. Study on the preservation of instant shredded squid with electron-beam cold sterilization[J]. *Sci Technol Food Indus*, 2009, 30 (6): 323-325.
- [15] 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. DOI: 10.13684/j.cnki.spkj.2020.10.026.
- Qu GX, Ma WH, Qian WX, et al. Quality changes of instant crayfish irradiated by different electron-beam[J]. *Food Sci Technol*, 2020, 45 (10): 155-161. DOI: 10.13684/j.cnki.spkj.2020.10.026.
- [16] 陈东清, 汪兰, 熊光权, 等. 电子束辐照对蒸煮小龙虾品质及货架期的影响[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2019, 37 (3): 030401. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2019.rj.37.030401.
- Chen DQ, Wang L, Xiong GQ, et al. Effects of electron-beam irradiation on the quality and shelf life of steamed crayfish[J]. *J Radiat Res Radiat Process*, 2019, 37 (3): 030401. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2019.rj.37.030401.
- [17] 蒋慧亮, 顾玉, 杨絮, 等. 电子束辐照对蚌肉的保鲜效果[J]. *食品工业科技*, 2020, 41 (24): 272-276, 285. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2020030201.
- Jiang HL, Gu Y, Yang X, et al. Effects of electron beam irradiation on preservation of mussel meat[J]. *Sci Technol Food Indus*, 2020, 41 (24): 272-276, 285. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2020030201.
- [18] Kanatt SR, Chawla SP, Chander R, et al. Development of shelf-stable, ready-to-eat (RTE) shrimps (*Penaeus indicus*) using γ -radiation as one of the hurdles[J]. *LWT- Food Sci Technol*, 2006, 39 (6): 621-626. DOI: 10.1016/j.lwt.2005.03.016.
- [19] Komolprasert V. Packaging for foods treated by ionizing radiation[M]//Han JH. Packaging for Nonthermal Processing of Food. Ames: Blackwell Publishing, 2007: 87-116.
- [20] 鉏晓艳, 李海蓝, 张金木, 等. 不同剂量电子束辐照对鲈鱼半成品灭菌及品质的影响[J]. *保鲜与加工*, 2018, 18 (5): 49-54. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6221.2018.05.009.
- Chu XY, Li HL, Zhang JM, et al. Effects of different doses of electron beam irradiation on sterilization and quality of semi-finished products of *Micropterus salmoides*[J]. *Storage Process*, 2018, 18 (5): 49-54. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6221.2018.05.009.
- [21] 杨文鸽, 林娴萍, 茅宇虹, 等. 电子束辐照对美国红鱼肉挥发性风味成分的影响[J]. *核农学报*, 2014, 28 (1): 60-68. DOI: 10.11869/j.issn.100-8551.2014.01.0060.
- Yang WG, Lin XP, Mao YH, et al. Effect of electron-beam irradiation on the volatile flavor compounds in *Sciaenops ocellatus* meat[J]. *J Nucl Agric Sci*, 2014, 28 (1): 60-68. DOI: 10.11869/j.issn.100-8551.2014.01.0060.
- [22] 傅丽丽, 林敏, 高原, 等. 电子束辐照对三文鱼品质的影响研究[J]. *核农学报*, 2017, 31 (8): 1521-1527. DOI: 10.11869/j.issn.100-8551.2017.08.1521.
- Fu LL, Lin M, Gao Y, et al. Effect of electron beam irradiation on quality of salmon[J]. *J Nucl Agric Sci*, 2017, 31 (8): 1521-1527. DOI: 10.11869/j.issn.100-8551.2017.08.1521.
- [23] 傅丽丽, 高原, 林敏, 等. 温度波动及电子束辐照对冷冻大黄鱼品质与货架期的影响[J]. *核农学报*, 2017, 31 (12): 2350-2357. DOI: 10.11869/j.issn.100-8551.2017.12.2350.
- Fu LL, Gao Y, Lin M, et al. Effect of temperature fluctuations and electron beam irradiation on quality and the shelf life of frozen large yellow croaker[J]. *J Nucl Agric Sci*, 2017, 31 (12): 2350-2357. DOI: 10.11869/j.issn.100-8551.2017.12.2350.
- [24] 杨镭, 徐安琪, 朱煜康, 等. 辐照对带鱼鱼糜内源性转谷氨酰胺酶及凝胶特性的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41 (11): 71-76. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20190502-008.
- Yang R, Xu AQ, Zhu YK, et al. Effect of irradiation on endogenous transglutaminase and gel properties of hairtail surimi[J]. *Food Sci*, 2020, 41 (11): 71-76. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20190502-008.
- [25] 张晗, 高星, 宣仕芬, 等. 电子束辐照对鲈鱼肉肌原纤维蛋白生化特性及其构象的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40 (13): 81-86. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20180518-265.
- Zhang H, Gao X, Xuan SF, et al. Effect of electron beam irradiation on biochemical properties and structure of Myofibrillar protein from *Lateolabrax japonicus* meat[J]. *Food Sci*, 2019, 40 (13): 81-86. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20180518-265.
- [26] Altan CO, Turan H. Synergistic effect of freezing and irradiation on bonito fish[J]. *J Food Prot*, 2016, 79 (12): 2136-2142. DOI: 10.4315/0362-028X.JFP-16-026.
- [27] 李新, 熊光权, 廖涛, 等. 小龙虾虾肉辐照后理化指标与蛋白质性质分析[J]. *核农学报*, 2016, 30 (10): 1941-1946. DOI: 10.11869/j.issn.100-8551.2016.10.1941.
- Li X, Xiong GQ, Liao T, et al. Analysis of physicochemical

- characteristics and protein properties in irradiated crayfish[J]. *J Nucl Agric Sci*, 2016, 30 (10) : 1941-1946. DOI: [10.11869/j.issn.100-8551.2016.10.1941](https://doi.org/10.11869/j.issn.100-8551.2016.10.1941).
- [28] 郝云彬, 邵宏宏, 相兴伟, 等. 辐照对大管鞭虾冷冻保鲜品质的影响[J]. *食品与机械*, 2019, 35 (12) : 126-129,136. DOI: [10.13652/j.issn.1003-5788.2019.12.023](https://doi.org/10.13652/j.issn.1003-5788.2019.12.023).
- Hao YB, Shao HH, Xiang XW, et al. The effect of irradiation on preservation of the *Solenocera melanthero* during storage[J]. *Food Mach*, 2019, 35 (12) : 126-129,136. DOI: [10.13652/j.issn.1003-5788.2019.12.023](https://doi.org/10.13652/j.issn.1003-5788.2019.12.023).
- [29] Sharma SK, Basu S, Gholap AS. Effect of irradiation on the volatile compounds of shrimp (*Solenocera choprii*)[J]. *J Food Sci Technol*, 2007, 44 (3) : 267-271.
- [30] Lee KH, Ahn HJ, Jo C, et al. Production of low salted and fermented shrimp by irradiation[J]. *Food Sci*, 2002, 67 (5) : 1772-1777. DOI: [10.1111/j.1365-2621.2002.tb08721.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb08721.x).
- [31] Sinanoglou VJ, Batrinou A, Konteles S, et al. Microbial population, physicochemical quality, and allergenicity of molluscs and shrimp treated with cobalt-60 gamma radiation[J]. *J Food Prot*, 2007, 70 (4) : 958-966. DOI: [10.4315/0362-028X-70.4.958](https://doi.org/10.4315/0362-028X-70.4.958).
- [32] 梅卡琳, 宣仕芬, 谭贝贝, 等. 电子束辐照对细点圆趾蟹肉营养及滋味成分的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40 (8) : 169-174. DOI: [10.7506/spkx1002-6630-20180424-313](https://doi.org/10.7506/spkx1002-6630-20180424-313).
- Mei KL, Xuan SF, Tan BB, et al. Effects of electron beam irradiation on nutritional and taste components of *Ovalipes punctatus* meat[J]. *Food Sci*, 2019, 40 (8) : 169-174. DOI: [10.7506/spkx1002-6630-20180424-313](https://doi.org/10.7506/spkx1002-6630-20180424-313).
- [33] Collins MV, Flick GJ, Smith SA, et al. The effects of e-beam irradiation and microwave energy on eastern oysters (*Crassostrea virginica*) experimentally infected with *Cryptosporidium parvum*[J]. *Eukaryot Microbiol*, 2005, 52 (6) : 484-488. DOI: [10.1111/j.1550-7408.2005.00056.x](https://doi.org/10.1111/j.1550-7408.2005.00056.x).
- [34] 肖林, 陆锐锋, 胡华超, 等. 电子束高剂量辐照新鲜贻贝肉制品的试验研究[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2011, 29 (3) : 179-182.
- Xiao L, Lu RF, Hu HC, et al. research on fresh mussel meat irradiated by high-dose electron beam[J]. *J Radiat Res Radiat Process*, 2011, 29 (3) : 179-182.
- [35] Kim JH, Seo HY, Kim KS. Analysis of radiolytic products of lipid in irradiated dried squids (*Todarodes pacificus*)[J]. *J Food Prot*, 2004, 67 (8) : 1731-1735. DOI: [10.4315/0362-028X-67.8.1731](https://doi.org/10.4315/0362-028X-67.8.1731).
- (收稿日期:2021-09-08)

(上接第 366 页)

- [32] Klein EE, Hanley J, Bayouth J, et al. Task group 142 report: quality assurance of medical accelerators[J]. *Med Phys*, 2009, 36 (9) : 4197-212. DOI: [10.1118/1.3190392](https://doi.org/10.1118/1.3190392).
- [33] Dieterich S, Cavedon C, Chuang CF, et al. Report of AAPM TG 135: quality assurance for robotic radiosurgery[J]. *Med Phys*, 2011, 38 (6) : 2914-2936. DOI: [10.1118/1.3579139](https://doi.org/10.1118/1.3579139).
- [34] Zhou S, Li JY, Du Y, et al. Development and longitudinal analysis of plan-based streamlined quality assurance on multiple positioning guidance systems with single phantom setup[J]. *Front Oncol*, 2021, 11: 683733. DOI: [10.3389/fonc.2021.683733](https://doi.org/10.3389/fonc.2021.683733).
- [35] Paxton AB, Manger RP, Pawlicki T, et al. Evaluation of a surface imaging system's isocenter calibration methods[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2017, 18 (2) : 85-91. DOI: [10.1002/acm2.12054](https://doi.org/10.1002/acm2.12054).
- [36] Bry V, Licon AL, McCulloch J, et al. Quantifying false positional corrections due to facial motion using SGRT with open - face Masks[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2021, 22 (4) : 172-183. DOI: [10.1002/acm2.13170](https://doi.org/10.1002/acm2.13170).
- (收稿日期:2021-11-06)