

高能电子束辐照带鱼营养及品质变化

余慧琳, 赵燕, 李泓浩, 朱加进*

(浙江大学生物系统工程与食品科学学院 食品生物科学技术研究所 杭州 310058)

摘要 带鱼是深受消费者欢迎的海鱼。感染新型冠状病毒的进口带鱼带来极大的食品安全隐患。高能电子束辐照技术是一种高效快速灭活微生物的方法,前期研究发现特定剂量的高能电子束辐照能够灭活新冠病毒。本文研究上述剂量(2,4,7,10 kGy)的电子束辐照对进口带鱼营养、物理、贮藏及感官品质的影响。结果表明,与对照组相比,4~10 kGy 电子束辐照能显著降低带鱼维生素 A 含量,显著增加带鱼硬度、弹性、胶黏性、咀嚼性。其中,10 kGy 电子束辐照能显著降低带鱼挥发性盐基氮含量。2~10 kGy 电子束辐照不会对带鱼感官品质造成不良影响。综合来看,2 kGy 电子束辐照最适宜用于带鱼安全与品质保障。

关键词 电子束辐照; 带鱼; 营养品质; 物理品质; 感官品质

文章编号 1009-7848(2022)09-0178-11 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.09.019

带鱼是中国最重要的经济鱼类之一。随着捕捞强度和消费量的迅速增加,我国对进口带鱼的依赖度逐渐升高。据统计,2019 年我国进口带鱼 14.1 万 t,进口金额高达 25 415 万美元,其中东南亚地区是我国主要的带鱼进口区域^[1]。然而,随着新冠病毒在全球蔓延,2020 年 9 月以来,我国海关总署在印度尼西亚、缅甸等地的进口带鱼外包装中检出新冠病毒阳性,在巴西等地的进口冻带鱼内包装中检出新冠病毒阳性^[2-4]。同年 10 月,中国疾病预防控制中心证实新冠病毒可在冷冻条件下长期存活,且接触新冠病毒污染的水产品外包装可导致人类新冠病毒感染^[5]。目前,以印度为代表的东南亚地区新冠病毒感染还相当严重,新冠病毒极可能随机污染进口带鱼外包装、内包装及食品间隙。由于进口带鱼数量大,来源广,且长期低温环境和塑料包装储存更有利于病毒的长时间保存,进口带鱼仍有很高的安全隐患,可能带来极大的感染风险,危及人民生命安全和国家产业发展^[6]。鉴于此,保障进口带鱼的安全,阻断新冠病毒的传播是目前亟待解决的问题,关乎国计民生。

目前国内对冷链进口带鱼进行新冠病毒灭活的主要方式是对其包装及其加工、储存、运输区域喷洒消毒剂,这种方式虽能在一定程度上阻断新冠病毒的传播,但可能存在低温消毒不彻底,化学

物质和新冠病毒残留以及食品安全等问题^[7-9]。迫切需要找到一种既能有效灭活新冠病毒,又能最大程度保证带鱼品质的消毒方法。2020 年 10 月,浙江大学原子核农业科学研究所联合传染病国家重点实验室进行了新冠病毒电子束辐照灭活试验,其阶段性研究结果表明特定剂量的高能电子束辐照能够有效灭活污染冷链水产品的新冠病毒^[10-11],这为高能电子束辐照技术应用于进口冷链水产品,保障其安全性提供研究基础。高能电子束辐照技术是一种利用电离辐射杀死微生物的有效方法,具有穿透力强、灭活速度快、无产热效应、无残留毒性等特点。戚文元等^[12]发现鲜罗非鱼片经 4 kGy 电子束辐照后再冷藏,能够显著抑制大肠杆菌、沙门氏菌、金黄色葡萄球菌等菌落的生长,且冷藏品质显著提高。傅丽丽等^[13]报道高能电子束辐照能够抑制三文鱼贮藏过程中挥发性盐基氮的产生和菌落总数增长,且 0.5 kGy 电子束辐照不会对三文鱼品质产生影响。罗华彬等^[14]发现适宜的电子束辐照能够抑制带鱼鱼糜中肌原纤维结合型丝氨酸蛋白酶及组织蛋白酶 L 的酶活性,从而减轻对肌原纤维蛋白的降解作用,更有利于鱼糜凝胶的形成。现有研究表明,高能电子束辐照技术是一种可运用于冷链水产品的冷加工物理技术。

然而,目前有研究表明不同剂量的电子束辐照食品品质有较大差异。将高能电子束辐照技术应用于进口带鱼安全保障前,有必要确定能灭活

收稿日期: 2021-09-17

作者简介: 余慧琳(1997—),女,硕士生

通信作者: 朱加进 E-mail: jjzhu337@163.com

新冠病毒的电子束辐照剂量是否会对带鱼品质产生不良影响。目前尚未有采用能够灭活新冠病毒的高能电子束对进口带鱼品质的影响研究。本文选取进口冷链带鱼,采用能够灭活新冠病毒的4种辐照剂量(2,4,7,10 kGy)对其进行高能电子束辐照处理,并对其营养、物理品质和感官品质进行评估,阐明4种辐照剂量对带鱼食用品质的影响,以期为高能电子束辐照技术应用于水产品提供理论参考。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

进口冷冻带鱼,购自杭州农副产品物流中心水产品批发市场;盐酸、乙醚、氢氧化钠、甲醇、氯化钠、氢氧化钾、无水硫酸钠、硫酸钾、硫酸、氧化镁、冰乙酸、三氯乙酸、硼酸、95%乙醇、无水乙醇、乙醚、无水乙醚、甲基红、溴甲酚绿,均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司; α -生育酚、 β -生育酚、 γ -生育酚、 δ -生育酚、亚甲基蓝、石油醚、乙酸镁、视黄醇、2,6-二叔丁基对甲酚,上海麦克林生化科技有限公司;十一碳酸甘油三酯,上海玉博生物科技有限公司;硫酸铜、二丁基羟基甲苯、抗坏血酸,美国Sigma公司;视黄醇、酒石酸钾钠、淀粉酶、氨水、甲醇(色谱纯),上海阿拉丁生化科技股份有限公司;乙酸锌,梯希爱(上海)化成工业发展有限公司;亚铁氰化钾,生工生物工程(上海)股份有限公司。

1.2 仪器与设备

色差仪 CR400,柯尼卡美能达(中国)投资有限公司;TA-XT2i 质构仪,英国 Stable Micro Systems 公司;温度记录仪 ZDR-20 Pro,泽大仪器有限公司;YP3001N 型电子天平,上海精密科学仪器有限公司;FW100 万能粉碎机,天津泰斯特公司;Agilent T7890 气相色谱仪,安捷伦科技(中国)有限公司;凯氏定氮仪 NKY 6100,上海祎鸿分析仪器有限公司;HZS-H 超级恒温水浴振荡器,金坛市友联仪器研究所;IKA 旋转蒸发仪 RV10,艾卡仪器设备有限公司;高温炉 SX2-10-12,上海锦玫仪器设备有限公司;T6 新世纪紫外可见分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司;Waters e2695 高效液相色谱仪,美国 Waters 公司;电热恒

温干燥箱 DH-202,天津中环实验电炉有限公司。

1.3 方 法

1.3.1 带鱼样品前处理 选取整条带鱼的中段,切成长约 10 cm 的带鱼段。将约 250 g 的带鱼段用聚乙烯真空袋真空包装。包装好的样品由冷链车(-20℃)运送至浙江大学电子加速器平台。

1.3.2 温度实时监测 将温度记录仪探头垂直于辐照面插入冰冻带鱼段的正中央(肉片厚度<4 cm),监测水产品温度变化情况。

1.3.3 辐照处理 设置 5 个辐照剂量(0,2,4,7,10 kGy)对冷冻带鱼进行辐照处理。将真空包装的带鱼置于辐照流水线托盘中,在常温下运送进入辐照处理室进行不同剂量的高能电子束辐照。完成辐照后迅速放入-20℃冰箱保存,用于后续营养成分测定。

1.3.4 脂肪及脂肪酸的测定 参考《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》GB 5009.6-2016,采用索氏抽提法测定带鱼中的脂肪含量^[5]。每个辐照剂量组各称取 2 g 带鱼样品,充分研磨。由索氏抽提器冷凝管上端加入石油醚,抽提带鱼脂肪 6 h。取下接收瓶,回收石油醚、干燥、冷却后称量,重复操作直至恒重。带鱼中脂肪含量的计算公式如下:

$$\text{脂肪含量(g/100 g)} = \frac{m_1 - m_0}{m_2} \times 100 \quad (1)$$

式中: m_0 ——接收瓶的质量; m_1 ——恒重后接收瓶和脂肪的含量; m_2 ——试样的质量。

饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸、多不饱和脂肪酸的测定参考《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》GB 5009.168-2016,采用内标法测定带鱼中的脂肪酸含量^[6]。每个辐照剂量组各称取 0.7 g 均匀的带鱼样品,加入 10 mL 盐酸溶液(8.3 mol/L),混匀,于 70~80℃水浴水解 40 min。水解后的试样,加入 10 mL 95%乙醇,用 50 mL 乙醚石油醚混合液提取带鱼脂肪。提取的脂肪经皂化和甲酯化后,使用气相色谱测定试样中脂肪酸甲酯含量,根据转化系数进行计算。

1.3.5 蛋白质的测定 参考《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》GB 5009.5-2016,采用凯氏定氮法测定带鱼中的蛋白质含量^[7]。每个辐照剂量组各称取 1 g 带鱼样品于定氮瓶中,加入硫酸

铜(0.4 g),硫酸钾(6 g)及硫酸(20 mL,0.0500 mol/L)于消化炉中消化。消化完成后液体呈绿色透明状,取出冷却后加入50 mL水,于自动凯氏定氮仪中测定。带鱼中蛋白质含量的计算公式如下:

$$\text{蛋白质含量(g/100 g)} = \frac{(v_1 - v_2) \times c \times 0.0140}{(m \times v_3 / 100)} \times F \times 100 \quad (2)$$

式中: v_1 ——试液消耗硫酸标准滴定液的体积; v_2 ——试剂空白消耗硫酸标准滴定液的体积; c ——硫酸标准滴定溶液浓度; m ——试样的质量; v_3 ——吸取消化液的体积; F ——氮换算为蛋白质的系数。

1.3.6 还原糖的测定 参考《食品安全国家标准食品中还原糖的测定》GB 5009.7-2016,采用直接滴定法测定带鱼中的还原糖含量^[18]。每个辐照剂量组各称取约4 g带鱼样品于250 mL容量瓶,加入配制好的乙酸锌和亚铁氰化钾溶液,混匀,静置30 min,过滤2次,取后续滤液备用。用碱性酒石酸铜溶液标定试样溶液,直至蓝色刚好褪去为终点,记录样液消耗体积,同法平行操作3份,得出平均消耗体积。带鱼中还原糖含量的计算公式如下:

$$\text{还原糖含量(g/100 g)} = \frac{m_1}{m \times F \times V / 250 \times 1000} \times 100 \quad (3)$$

式中: m_1 ——碱性酒石酸铜溶液相当于还原糖的质量,mg; m ——试样质量,g; F ——系数,为1; V ——测定时平均消耗试样溶液体积,mL。

1.3.7 维生素A、E的测定 参考《食品安全国家标准食品中维生素A、D、E的测定》GB 5009.82-2016,采用反相高效液相色谱法测定带鱼中维生素A、E的含量^[19]。每个辐照剂量组各称取2 g均匀的带鱼样品,温水混匀后,加入抗坏血酸、2,6-二叔丁基对甲酚、无水乙醇、氢氧化钾等溶液,混匀后于80℃恒温水浴振荡皂化30 min,冷却至室温。将皂化液用石油醚-乙醚混合液萃取,醚层用水冲洗至中性,经浓缩后过0.22 μm滤膜后用高效液相色谱测定。带鱼中维生素A或维生素E含量的计算公式如下:

$$X = (\rho \times V \times f \times 100) / m \quad (4)$$

其中: X ——带鱼中维生素A/E的含量,维生

素A含量单位为μg/100 g,维生素E含量为mg/100 g; ρ ——根据标准曲线计算得到的带鱼中维生素A/E的浓度; V ——定容体积; f ——换算因子(维生素A: $f=1$;维生素E: $f=0.001$); m ——带鱼的称样量。

1.3.8 水分的测定 参考《食品安全国家标准食品中水分的测定》GB 5009.3-2016,采用直接干燥法测定带鱼中的水分含量^[20]。每个辐照剂量组各称取约2 g带鱼样品,置于干燥箱中干燥,干燥器内冷却后称量,并重复干燥至恒重。记录称量瓶的质量(m_3)以及称量瓶和带鱼样品干燥前后的质量(m_1 表示称量瓶和带鱼样品干燥前的质量, m_2 表示称量瓶和带鱼样品干燥后的质量)。带鱼中水分含量的计算公式如下:

$$\text{水分含量(g/100 g)} = [(m_1 - m_2) \times 100] / (m_1 - m_3) \quad (5)$$

1.3.9 灰分的测定 参考《食品安全国家标准食品中灰分的测定》GB 5009.4-2016,采用灼烧法测定带鱼中的灰分含量^[21]。每个辐照剂量组各称取约5 g带鱼样品,加入1 mL乙酸镁溶液(240 g/L),完全润湿样品。样品充分炭化后置于高温炉,灼烧至恒重。带鱼中灰分含量的计算公式如下:

$$\text{灰分含量(g/100 g)} = [(m_1 - m_2 - m_0) \times 100] / (m_3 - m_2) \quad (6)$$

式中: m_0 ——氧化镁(乙酸镁灼烧后生成物)的质量; m_1 ——坩埚和灰分的质量; m_2 ——坩埚的质量; m_3 ——坩埚和试样的质量。

1.3.10 挥发性盐基氮(Total Volatile Base Nitrogen, TVB-N)的测定 参考《食品安全国家标准食品中挥发性盐基氮的测定》GB 5009.228-2016,采用自动凯氏定氮仪法测定带鱼中的TVB-N含量^[22]。每个辐照剂量组各称取10 g均匀的带鱼样品于蒸馏管内,加入75 mL水,振摇,使样品均匀分散,浸渍30 min。向蒸馏管内加入1 g氧化镁,与蒸馏器连接,开始测定。带鱼中TVB-N含量的计算公式如下:

$$\text{TVB-N含量} = \frac{(v_1 - v_2) \times c \times 14}{m} \times 100 \quad (7)$$

式中: v_1 ——试液消耗硫酸标准滴定溶液的体积; v_2 ——试剂空白消耗硫酸标准滴定溶液的体积; c ——硫酸标准滴定溶液的浓度; m ——试样质量。

1.3.11 质构评定 将冷冻带鱼置于4℃冰箱中解冻,切成5.0 cm × 5.0 cm × 1.0 cm长方体。采用TA-XT2i质构仪进行质地多面剖析测定,选用P/5平底柱形探头,垂直于肌肉纤维走向进行测定,测试参数设定为:测试速度1 mm/s,触发力为5 g,每个样品测试时间为5 s,探头下行距离为5 mm。

1.3.12 感官评定 招募20名专业被试(男女比例为1:1),按以下方法及标准进行感官评定:带鱼修剪为大小均匀,质量相近的鱼片(8 cm × 4 cm × 1 cm),洗净后在沸水中煮5 min(水与带鱼鱼片的质量比约为2:1)。感官属性包括气味、滋味和质地。各属性评分满分为10分(0分为非常不喜欢,10分为非常喜欢),记录各项指标评分,并计算出总分。

1.4 数据分析

每个辐照剂量组均设置3组平行,进行3次重复试验。采用GraphPad Prism 8进行分析并作图。所有数据都以“平均值 ± 标准差”的形式表示。组间比较采用单因素ANOVA方差分析,Turkey法进行事后检验,以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 电子束辐照对带鱼营养成分的影响

2.1.1 电子束辐照对带鱼脂肪及脂肪酸、蛋白质和还原糖含量的影响 带鱼是一种公认的多脂肪的海鱼。脂肪酸含量是衡量带鱼品质变化的重要指标之一。有研究结果证实带鱼肌肉中不饱和脂

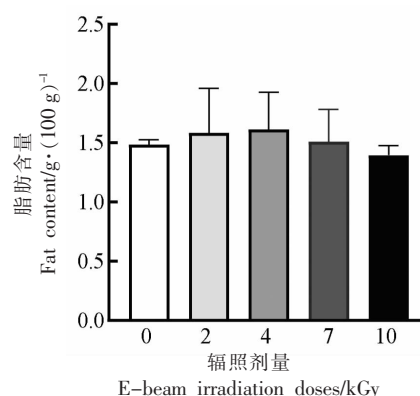


图1 不同辐照剂量下带鱼脂肪含量

Fig.1 Fat content in hairtail under different E-beam irradiation doses

肪酸含量占脂肪酸总量的60.57%,其中多不饱和脂肪酸占31.98%^[23]。本次试验结果发现2~10 kGy电子束辐照不会对带鱼脂肪、饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸、多不饱和脂肪酸含量产生影响($P > 0.05$)(图1,图2)。表明能灭活新冠病毒的高能电子束辐照剂量不会影响带鱼脂肪及脂肪酸含量。

带鱼也是一种高蛋白的鱼类,肌肉中蛋白质含量约占18%,是动物优质蛋白的摄入来源之一。如图3所示,2,4,7,10 kGy电子束辐照下的带鱼蛋白质含量与对照组相比无显著变化($P > 0.05$),表明本次试验采用的电子束辐照剂量能在灭活新冠病毒的同时不对带鱼蛋白质含量造成影响。但后续还有必要研究电子束辐照是否会使带鱼蛋白质生化特性和构象发生变化,从而更全面的阐释辐照对带鱼蛋白质品质的影响及其可能作用机

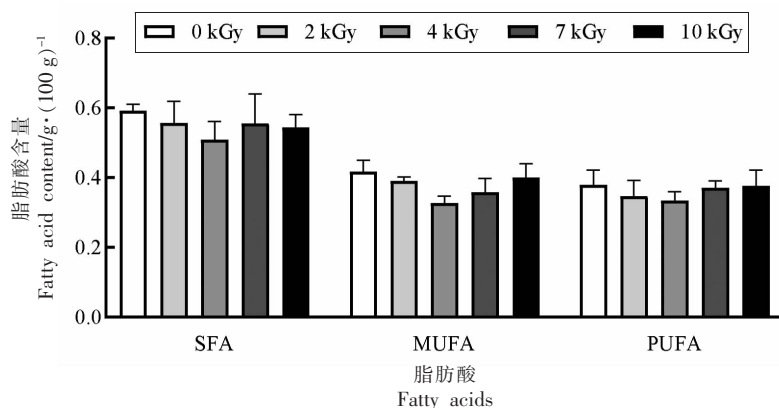


图2 不同辐照剂量下带鱼饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸、多不饱和脂肪酸含量

Fig.2 Saturated fatty acids, monounsaturated fatty acids, and polyunsaturated fatty acids content in hairtail under different E-beam irradiation doses

制。

如图4所示,经2~10 kGy电子束辐照后,带鱼还原糖含量无显著变化($P>0.05$)。这可能是由于带鱼本身是一种高蛋白、多脂肪的鱼类,还原糖

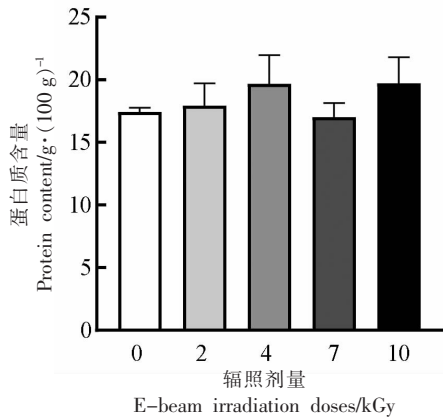


图3 不同辐照剂量下带鱼蛋白质含量

Fig.3 Protein content in hairtail under different E-beam irradiation doses

含量占比少,导致辐照后变化幅度更小。有研究表明带鱼中的总糖质量分数约为0.11%左右,约为蛋白质质量分数的1/160,脂肪质量分数的1/47^[23]。

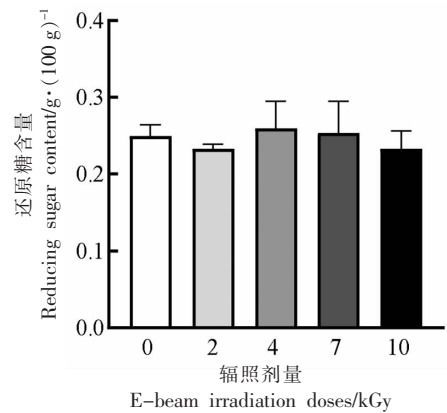
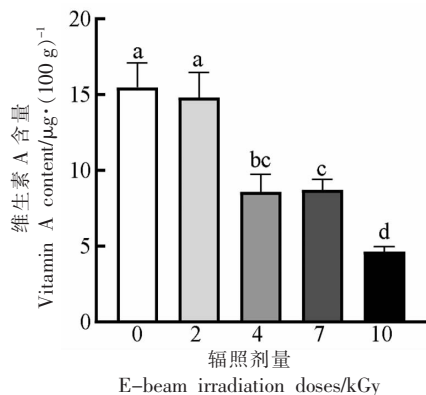


图4 不同辐照剂量下带鱼还原糖含量

Fig.4 Reducing sugar content in hairtail under different E-beam irradiation doses

2.1.2 电子束辐照对带鱼维生素A、维生素E含量的影响 如图5所示,在4,7,10 kGy电子束辐照剂量下,带鱼中维生素A含量分别降低至 (8.58 ± 1.16) , (8.73 ± 0.70) , $(4.66 \pm 0.32) \mu\text{g}/100 \text{g}$,与对照组 $(15.49 \pm 1.61) \mu\text{g}/100 \text{g}$ 相比有显著性差异($P<0.05$),表明带鱼中的维生素A对中高剂量高能电子束辐照具有较高的敏感性。广义上的维生素A包括视黄醇、视黄醛、视黄酸、视黄醇乙酸酯和视黄醇棕榈酸酯及其衍生物。维生素A是一种极易被氧化的脂溶性维生素,Crank等^[24]证实了单线态氧能够参与维生素A的初始氧化过程。但维



注:相同小写字母表示差异不显著,不同小写字母表示差异显著。

图5 不同辐照剂量下带鱼维生素A含量

Fig.5 Vitamin A content in hairtail under different E-beam irradiation doses

生素A的氧化不仅与氧气浓度有关,还与光、光敏剂、过氧化物、微量金属元素、水分的存在相关^[24-29]。维生素A醇及其酯类衍生物中含有的羰基或酯基结构与光或光敏剂发生的自由基链式反应或阳离子光解反应也与维生素A含量相关^[24-25]。因此,在不同剂量辐照下,带鱼中维生素A含量差异较大的原因可能与辐照后维生素A醇及其衍生物含量及种类差异、辐照过程中过氧化物生成量等因素有关。

维生素E经辐照后的含量变化如图6所示,各辐照组与对照组间无显著差异($P>0.05$),但带

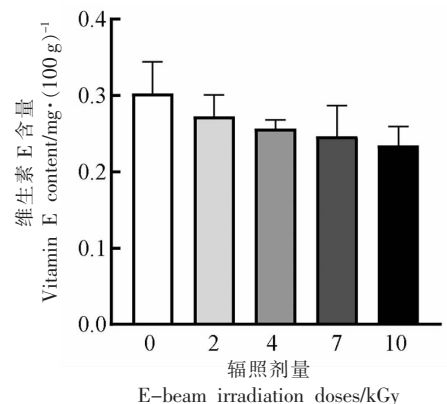


图6 不同辐照剂量下带鱼维生素E含量

Fig.6 Vitamin E content in hairtail under different E-beam irradiation doses

鱼中维生素 E 含量在不同剂量电子束辐照后略有降低。维生素 E 是一种天然抗氧化物质,但在空气和光照条件下也会被缓慢氧化,试验组中维生素 E 含量的减少可能是由于电子束辐照后少量维生素 E 被氧化。

2.1.3 电子束辐照对带鱼水分、灰分含量的影响

食品中水分的含量及存在状态影响食品的结构、加工特性及稳定性^[30]。食品中的水分一般可以分为结合水和自由水,研究表明,辐照首先作用于食品中的水分,加速水的电离,产生水合离子、氢

离子、氢氧根离子和自由基,然后这些基团再与其它营养成分反应,影响食品的营养品质^[30-31]。如图 7 所示,与对照组相比,2,4,7,10 kGy 电子束辐照均未对带鱼水分含量产生显著影响($P>0.05$)。

食品灰分一般指食品经高温灼烧后残留的钾、钙、钠、铁、硅、磷等元素的氧化物或无机盐^[32]。灰分中的主要成分是矿物质,因此灰分含量也是评价食品营养品质的重要参考指标之一^[33]。如图 8 所示,2~10 kGy 电子束辐照均不会使带鱼灰分含量发生明显变化($P>0.05$)。

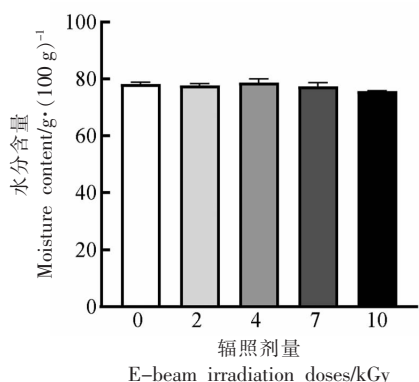


图 7 不同辐照剂量下带鱼水分含量

Fig.7 Water content in hairtail under different E-beam irradiation doses

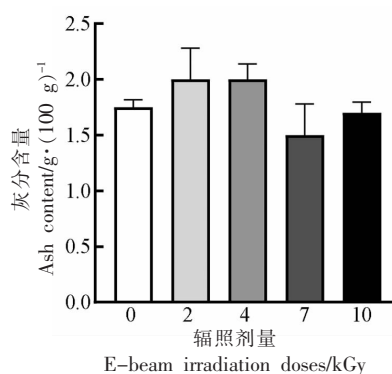


图 8 不同辐照剂量下带鱼灰分含量

Fig.8 Ash content in hairtail under different E-beam irradiation doses

2.2 电子束辐照对带鱼贮藏品质的影响

挥发性盐基氮是肉腐败时由蛋白质分解而产生氨及胺类等碱性含胺物质与同时产生的有机酸结合形成的一种盐基态氮,是判断肉类食品新鲜度常测定的理化指标之一^[34]。在本次试验中测得带鱼挥发性盐基氮含量如图 9 所示,带鱼中挥发性盐基氮含量经 0~7 kGy 电子束辐照后分别为 (14.80 ± 0.42) , (14.60 ± 1.27) , (13.25 ± 1.63) , (13.20 ± 1.70) mg/100 g, 在 10 kGy 电子束辐照后挥发性盐基氮含量显著降低至 (1.18 ± 0.83) mg/100 g ($P<0.05$)。在高剂量电子束辐照下,带鱼中微生物繁殖、代谢和生理活动被抑制,蛋白酶和组氨酸脱羧酶钝化或损伤,活性降低,抑制蛋白质分解,组胺生成,从而使挥发性盐基氮值显著降低。研究结果表明 10 kGy 电子束辐照能有效抑制带鱼腐败,保持其新鲜度。

2.3 电子束辐照对带鱼物理品质的影响

带鱼经 2~10 kGy 电子束辐照后,硬度与对照

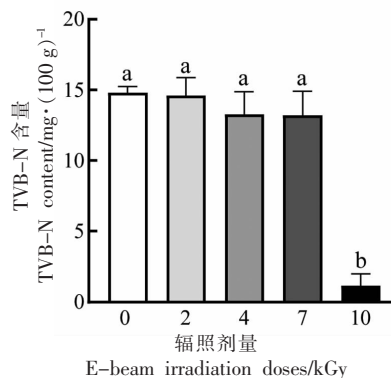


图 9 不同辐照剂量下带鱼挥发性盐基氮含量

Fig.9 TVB-N content in hairtail under different E-beam irradiation doses

注:相同小写字母表示差异不显著,不同小写字母表示差异显著。

组相比显著升高($P<0.05$)。10 kGy 辐照处理组硬度甚至能达到 470.21 ± 45.23 ,与对照组相比增大大约 3 倍。辐照使带鱼硬度升高可能有如下原因:一是辐照使得肌原纤维单元变小,肌节宽度收缩,蛋白质发生凝聚^[12];二是辐照使得蛋白酶失活,蛋白

质分解能力下降,从而硬度升高^[14]。当辐照剂量大于4 kGy时,带鱼的弹性分别显著增大至 0.45 ± 0.01 , 0.50 ± 0.03 ($P < 0.05$) (表1)。辐照处理使带鱼弹性升高,这可能是由于辐照使蛋白质凝聚,出现不溶聚集体,使其结构更加紧密。

黏聚性是指咀嚼鱼肉时,鱼肉抵抗受损并紧密连接保持完整的性质。与对照组相比,辐照处理对带鱼的黏聚性没有显著影响 ($P > 0.05$)。但辐照使带鱼胶黏性显著升高,2,4,7,10 kGy 电子束辐照下带鱼胶黏性可分别达到 166.40 ± 37.72 , 137.21 ± 8.30 , 148.51 ± 11.73 , 269.38 ± 1.21 ($P < 0.05$)。胶黏性反映细胞间结合力的大小,细胞间

结合力小,则胶黏性增大。胶黏性升高的原因可能是辐照破坏了蛋白质的结构,胶原蛋白变性成为可溶性溶胶随着肌肉中的水分流失,肌原纤维之间的间隙增大,细胞间的结合力减少使得肌肉结构松弛,胶黏性增大^[35]。

咀嚼性是咀嚼食物所需的能量,是硬度、内聚性、弹性、胶黏性共同作用的结果^[14]。当辐照剂量大于等于2 kGy时,带鱼的咀嚼性从 170.68 ± 31.10 分别显著降低至 83.31 ± 1.86 , 118.36 ± 2.67 , 102.22 ± 8.29 , 95.92 ± 2.41 ($P < 0.05$) (表1)。推测咀嚼性的降低可能与辐照后硬度、弹性、胶黏性增大有关。

表1 不同剂量电子束辐照后带鱼硬度、弹性、黏聚性、胶黏性和咀嚼性

Table 1 Hardness, springiness, adhesiveness, cohesiveness and chewiness of hairtail under different E-beam irradiation doses

质构特性	辐照剂量/kGy				
	0	2	4	7	10
硬度	164.35 ± 8.44^c	295.35 ± 34.62^b	242.11 ± 1.94^b	258.93 ± 17.66^b	470.21 ± 45.23^a
弹性	0.37 ± 0.005^b	0.38 ± 0.04^b	0.30 ± 0.02^c	0.45 ± 0.01^a	0.50 ± 0.03^a
黏聚性	0.59 ± 0.04^a	0.49 ± 0.04^a	0.57 ± 0.04^a	0.57 ± 0.006^a	0.58 ± 0.05^a
胶黏性	96.16 ± 1.11^c	166.40 ± 37.72^b	137.21 ± 8.30^{bc}	148.51 ± 11.73^b	269.38 ± 1.21^a
咀嚼性	170.68 ± 31.10^a	83.31 ± 1.86^b	118.36 ± 2.67^b	102.22 ± 8.29^b	95.92 ± 2.41^b

注:上标小写字母不同,表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.4 电子束辐照对带鱼感官特性的影响

感官评定结果如表2和图10所示。辐照处理组带鱼与对照组带鱼的感官评分没有显著性差异 ($P > 0.05$),说明在各辐照剂量下,辐照对带鱼食用品质不会造成影响。

3 结论

本研究对经高能电子束辐照(2,4,7,10 kGy)灭活新冠病毒的进口带鱼进行了营养品质、物理

品质、贮藏品质及感官品质的多指标测定。研究结果表明,灭活新冠病毒的4种辐照剂量均不会对带鱼脂肪及脂肪酸含量、蛋白质含量、还原糖含量、维生素E含量、水分含量、灰分含量产生显著影响。4~10 kGy辐照剂量下,带鱼维生素A含量显著降低。10 kGy电子束辐照下,带鱼TVB-N值显著降低。同时,10 kGy电子束辐照对带鱼质构特性影响较大。但4种辐照剂量均不会对带鱼的感官品质产生不良影响。因此,在考虑灭活新冠病毒

表2 不同剂量电子束辐照带鱼的感官评定结果

Table 2 Sensory evaluation of hairtail under different E-beam irradiation doses

指标	辐照剂量/kGy				
	0	2	4	7	10
气味	5.92 ± 1.89	6.00 ± 1.78	6.75 ± 1.59	5.50 ± 2.02	6.75 ± 1.30
滋味	6.00 ± 1.41	6.26 ± 2.18	6.42 ± 1.85	6.17 ± 2.03	6.58 ± 1.50
质地	4.83 ± 1.62	5.17 ± 1.52	6.00 ± 1.83	5.75 ± 2.13	6.42 ± 1.66
总分	16.75 ± 4.02	17.08 ± 4.68	19.17 ± 4.34	17.42 ± 5.48	19.75 ± 3.11

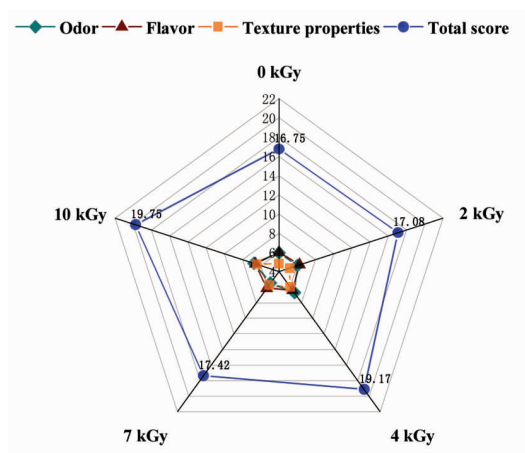


图 10 不同剂量电子束辐照带鱼的感官评定结果

Fig.10 Sensory profiles for odor, flavor, and texture properties of hairtail under different E-beam irradiation doses

的前提下,本试验证明 2 kGy 电子束辐照最适宜用于带鱼品质保障。

参 考 文 献

- [1] 张珂慎. 进口规模大增, 2019 年中国带鱼消费规模增长 4.7% [EB/OL]. (2020-10-12) [2021-05-02]. <http://www.chyxx.com/industry/202010/899835.html>. ZHANG K S. Imports have soared, with China's hairtail consumption growing by 4.7% in 2019 [EB/OL]. (2020-10-12) [2021-05-02]. <http://www.chyxx.com/industry/202010/899835.html>.
- [2] 中华人民共和国海关总署. 海关总署对印度尼西亚 2 家企业采取紧急预防性措施 [EB/OL]. (2020-12-03) [2021-05-02]. <http://www.customs.gov.cn/customs/xwfb34/302425/3422435/index.html>. General Administration of Customs of the People's Republic of China. The General Administration of Customs has taken emergency preventive measures against 2 enterprises in Indonesia [EB/OL]. (2020-12-03) [2021-05-02]. <http://www.customs.gov.cn/customs/xwfb34/302425/3422435/index.html>.
- [3] 中华人民共和国海关总署. 海关总署对缅甸 1 家企业采取紧急预防性措施 [EB/OL]. (2021-12-08) [2022-05-02]. <http://www.customs.gov.cn/customs/xwfb34/302425/4043704/index.html>. General Administration of Customs of the People's Republic of China. The General Administration of Customs has taken emergency preventive measures against an enterprise in Myanmar [EB/OL]. (2021-12-08) [2022-05-02]. <http://www.customs.gov.cn/customs/xwfb34/302425/4043704/index.html>.
- [4] 中华人民共和国海关总署. 海关总署对巴西 1 家水产品企业采取紧急预防性措施 [EB/OL]. (2020-09-25) [2021-05-02]. <http://jiangmen.customs.gov.cn/customs/xwfb34/302425/3301890/index.html>. General Administration of Customs of the People's Republic of China. The General Administration of Customs has taken emergency preventive measures against a Brazilian aquatic products enterprise [EB/OL]. (2020-09-25) [2021-05-02]. <http://jiangmen.customs.gov.cn/customs/xwfb34/302425/3301890/index.html>.
- [5] 中国青年网. 新冠病毒“物传人”: 冷链、水产是传播重要渠道 [EB/OL]. (2021-01-06) [2021-05-02]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1688126007792863514&wfr=spider&for=pc>. China Youth Network. Novel coronavirus "object to person": cold chain and aquatic products are important channels of transmission [EB/OL]. (2021-01-06) [2021-05-02]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1688126007792863514&wfr=spider&for=pc>.
- [6] VAN DOREMALEN N, BUSHMAKER T, MORRIS D H, et al. Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1 [J]. *New England Journal of Medicine*, 2020, 382(16):1564-1567.
- [7] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 关于印发进口冷链食品预防性全面消毒工作方案的通知 [EB/OL]. (2020-11-09) [2021-05-02]. <http://www.nhc.gov.cn/sps/s7891/202011/26b2fabc696b48e3b2dab5cdb2fd50d9.shtml>. National Health Commission of the People's Republic of China. Notice on the issuance of work Program for preventive comprehensive disinfection of imported cold chain food [EB/OL]. (2020-11-09) [2021-05-02]. <http://www.nhc.gov.cn/sps/s7891/202011/26b2fabc696b48e3b2dab5cdb2fd50d9.shtml>.
- [8] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 关于印发冷链食品生产经营新冠病毒防控技术指南和冷链食品生产经营过程新冠病毒防控消毒技术指南的通知 [EB/OL]. (2020-10-22) [2021-05-02]. <http://www.nhc.gov.cn/cms-search/xxgk/getManuscriptXxgk.htm?id=ff228979f1534c3abca56559f14ea115>. National Health Commission of the People's Republic of China. Notice on the issuance of work Program for preventive comprehensive disinfection of imported cold chain food [EB/OL]. (2020-11-09) [2021-05-02]. <http://www.nhc.gov.cn/sps/s7891/202011/26b2fabc696b48e3b2dab5cdb2fd50d9.shtml>.

- lic of China. Notice on printing and distributing technical guidelines for novel coronavirus prevention and control in cold chain food production and operation and technical guidelines for novel coronavirus prevention and control and disinfection in cold chain food production and operation[EB/OL]. (2020-10-22)[2021-05-02]. <http://www.nhc.gov.cn/cms-search/xxgk/getManuscriptXxgk.htm?id=ff228979f1534c3abca56559f14ea115>.
- [9] TALEBIAN S, WALLACE G G, SCHROEDER A, et al. Nanotechnology-based disinfectants and sensors for SARS-CoV-2[J]. *Nature Nanotechnology*, 2020, 15(8): 618-621.
- [10] 欧旭飞. 核技术助力进口冷链食品物流新冠病毒防控[EB/OL]. (2020-11-27)[2021-05-02]. <http://www.cab.zju.edu.cn/inas/2020/1127/c13144a2221066/page.htm>. OU X F. Nuclear technology helps prevent and control coronavirus for imported cold chain food logistics [EB/OL]. (2020-11-27)[2021-05-02]. <http://www.cab.zju.edu.cn/inas/2020/1127/c13144a2221066/page.htm>.
- [11] 浙江大学. 电离辐射灭活冷链食品中新型冠状病毒的消毒方法及系统:CN202110013231.6[P]. 2021-02-05. Zhejiang University. Novel Coronavirus disinfection method and system for inactivating cold chain food by ionizing radiation; CN202110013231.6[P]. 2021-02-05.
- [12] 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 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.
- [13] 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. FU L L, LIN M, GAO Y, et al. Effect of electron beam irradiation on quality of salmon[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(8): 1521-1527.
- [14] 罗华彬, 林露, 高星, 等. 电子束辐照对带鱼鱼糜内源性蛋白酶活性及其构象单元的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(9): 23-28. LUO H B, LIN L, GAO X, et al. Effect of electron beam irradiation on the activity and conformational unit of endogenous proteases from hairtail surimi[J]. *Food Science*, 2019, 40(9): 23-28.
- [15] 全国信息与文献标准化技术委员会. 信息与文献都柏林核心元数据元素集: GB 5009.6-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-2. National Technical Committee on Information and Literature Standardization. Information and Documentation. Set of Dublin core metadata elements; GB 5009.6-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 1-2.
- [16] 全国信息与文献标准化技术委员会. 信息与文献都柏林核心元数据元素集: GB 5009.168-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-6. National Technical Committee on Information and Literature Standardization. Information and Documentation. Set of Dublin core metadata elements; GB 5009.168-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 1-6.
- [17] 全国信息与文献标准化技术委员会. 信息与文献都柏林核心元数据元素集: GB 5009.5-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-3. National Technical Committee on Information and Literature Standardization. Information and Documentation. Set of Dublin core metadata elements; GB 5009.5-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 1-3.
- [18] 全国信息与文献标准化技术委员会. 信息与文献都柏林核心元数据元素集: GB 5009.7-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-4. National Technical Committee on Information and Literature Standardization. Information and Documentation. Set of Dublin core metadata elements; GB 5009.7-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 1-4.
- [19] 全国信息与文献标准化技术委员会. 信息与文献都柏林核心元数据元素集: GB 5009.82-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-5. National Technical Committee on Information and Literature Standardization. Information and Documentation. Set of Dublin core metadata elements; GB 5009.82-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 1-5.
- [20] 全国信息与文献标准化技术委员会. 信息与文献都柏林核心元数据元素集: GB 5009.3-2016[S]. 北

- 京: 中国标准出版社, 2016: 1-2.
- National Technical Committee on Information and Literature Standardization. Information and Documentation. Set of Dublin core metadata elements: GB 5009.3-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 1-2.
- [21] 全国信息与文献标准化技术委员会. 信息与文献都柏林核心元数据元素集: GB 5009.4-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-4.
- National Technical Committee on Information and Literature Standardization. Information and Documentation. Set of Dublin core metadata elements: GB 5009.4-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 1-4.
- [22] 全国信息与文献标准化技术委员会. 信息与文献都柏林核心元数据元素集: GB 5009.228-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-3.
- National Technical Committee on Information and Literature Standardization. Information and Documentation. Set of Dublin core metadata elements: GB 5009.228-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 1-3.
- [23] 揭珍, 徐大伦, 杨文鸽. 新鲜带鱼营养成分及风味物质的研究[J]. 食品与生物技术学报, 2016, 35(11): 1201-1205.
- JIE Z, XU D L, YANG W G. Analysis of nutritional and flavor components in the fresh *trichiurus lepturus* muscle[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2016, 35(11): 1201-1205.
- [24] CRANK G, PARDIJANTO M S. Photo-oxidations and photosensitized oxidations of vitamin A and its palmitate ester[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 1995, 85(1): 93-100.
- [25] 孟海男. 维生素 A(VA)与人体健康的关系[J]. 饮料工业, 2011, 14(4): 7-10.
- MENG H N. Vitamin A (VA) and human health[J]. The Beverage Industry, 2011, 14(4): 7-10.
- [26] 俞安, 尹红, 陈志荣, 等. 维生素 A 稳定性影响因素研究进展[J]. 中国食品学报, 2013, 13(1): 124-131.
- YU A, YIN H, CHEN Z R, et al. Study on the effect factors of vitamin A stability[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2013, 13(1): 124-131.
- [27] WOODALL A A, LEE S W M, WEESIE R J, et al. Oxidation of carotenoids by free radicals: relationship between structure and reactivity[J]. Biochimica Et Biophysica Acta (bba) -general Subjects, 1997, 1336(1): 33-42.
- [28] TESORIERE L, D'ARPA D, RE R, et al. Antioxidant reactions of all-transretinol in phospholipid bilayers: effect of oxygen partial pressure, radical fluxes, and retinol concentration[J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 1997, 343(1): 13-18.
- [29] RUTKOWSKI K, DIOSADY L L. Vitamin A stability in triple fortified salt[J]. Food Research International, 2007, 40(1): 147-152.
- [30] 陈琳莉, 李侠, 张春晖, 等. 低场核磁共振法测定五种肉类中不同状态水分含量[J]. 分析科学学报, 2015, 31(1): 90-94.
- CHEN L L, LI X, ZHANG C H, et al. Determination of different state moisture content in five kinds of meat using low-field NMR[J]. Journal of Analytical Science, 2015, 31(1): 90-94.
- [31] 龙薇运. 低剂量电子束辐照对蛤蜊保藏影响的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- LONG W Y. Research on the effects of low dose electron beam irradiation on clam preservation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [32] 孙颖瑛, 许艳顺, 夏文水, 等. 发酵咸鱼贮藏过程中理化与感官品质变化研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(17): 286-291.
- SUN Y Y, XU Y S, XIA W S, et al. Changes in physicochemical and sensory quality of fermented fish during storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(17): 286-291.
- [33] 董红霞, 郑钦月. 食品灰分测定中的问题探究[J]. 食品安全导刊, 2020(21): 116-117.
- DONG H X, ZHENG X Y. Research on the problems in the determination of food ash content[J]. China Food Safety Magazine, 2020(21): 116-117.
- [34] BHAT R, SRIDHAR K R. Nutritional quality evaluation of electron beam-irradiated lotus (*Nelumbo nucifera*) seeds[J]. Food Chemistry, 2008, 107(1): 174-184.
- [35] 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 and Chemistry, 2001, 61(2): 163-169.

The Nutrition and Quality Changes of Hairtail Irradiated by High Energy Electron Beam

Yu Huilin, Zhao Yan, Li Honghao, Zhu Jiajin*

(Institute of Food Science, School of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058)

Abstract Hairtail is one of the most popular marine fish. Since the outbreak of COVID-19, severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) has been detected in numerous imported hairtails in China, posing significant health risks. Electron beam (E-beam) irradiation is an efficient and rapid method of inactivating microorganisms. Previous work found that specific doses of E-beam irradiation can inactivate SARS-CoV-2 in cold-chain seafood. The article studied the effects of 2, 4, 7, 10 kGy of E-beam irradiation on the nutritional, physical, storage, and sensory quality of imported hairtail. The results showed that 4–10 kGy E-beam irradiation significantly reduced the vitamin A content of hairtail while significantly increasing its hardness, elasticity, adhesiveness, and chewiness. The dose of 10 kGy irradiation significantly decreased the total volatile base nitrogen (TVB-N) content of hairtail. It was shown that 2–10 kGy E-beam irradiation had no effect on the sensory quality of hairtail. In conclusion, a dose of 2 kGy was recommended in consideration of the keeping safety and quality in hairtail.

Keywords E-beam irradiation; hairtail; nutritional quality; physical quality; sensory property