

高能电子束辐照脆肉鲩鱼片的贮藏品质分析

陈敏惠, 陈于陇, 李佳鸿, 陈飞平, 叶明强, 王玲, 戚英伟, 罗政, 戴凡炜*

(广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业农村部功能食品重点实验室, 广东省农产品加工重点实验室, 广东广州 510610)

摘要: 该试验研究了高能电子束辐照技术应用于脆肉鲩鱼片的保鲜效果, 采用不同剂量 (0、1、3、5、7 kGy) 的电子束辐照, 结合真空包装于 4 °C 冷藏条件下保鲜, 测定菌落总数 (APC)、脂质氧化产物 (TBARs)、挥发性盐基氮 (TVB-N)、质构 (TPA) 和色度, 结合感官评价探究电子束辐照对鱼片冷藏期间贮藏品质的影响。结果表明, 辐照能较大程度抑制鲩鱼片中微生物的增长, 3~7 kGy 的辐照剂量能使鲩鱼片在整个贮藏期间菌落总数保持在 10^6 CFU/g 以下, 推断 3 kGy 是脆肉鲩鱼片最低有效剂量。虽然辐照处理后会致鲩鱼片 TBARs 值增加, 但在贮藏后期有延缓 TBARs 值上升的效果, 5 kGy 及更低剂量可维持鲩鱼片 TBARs 在较低水平。同样, 辐照能延缓鱼片 TVB-N 含量的增加。辐照对鲩鱼片气味、质构和色值影响差异不显著。综合考量, 在真空包装, 4 °C 冷藏的条件下, 3 kGy 是脆肉鲩鱼片最低有效剂量, 5 kGy 是最高耐受剂量, 使用 3~5 kGy 剂量电子束辐照处理, 最适用于脆肉鲩生鱼片的贮藏保鲜。该研究结果为电子束辐照应用于脆肉鲩鱼片的保鲜提供参考依据。

关键词: 电子束辐照; 辐照剂量; 脆肉鲩; 品质; 货架期

文章编号: 1673-9078(2024)06-169-177

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.6.0527

Storage Quality of *Ctenopharyngodon idellus* Fillets Irradiated by High-energy Electron Beam

CHEN Minhui, CHEN Yulong, LI Jiahong, CHEN Feiping, YE Mingqiang, WANG Ling, QI Yingwei, LUO Zheng, DAI Fanwei*

(Sericultural & Agri-Food Research Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China)

Abstract: In this study, the preservative effect of high-energy electron beam irradiation technology on crisped grass carp fillets was investigated. Different irradiation doses (0, 1, 3, 5, 7 kGy) combined with vacuum packaging and storage under 4 °C refrigeration were applied, and the total colony count (aerobic plate count, APC), lipid oxidation products (thiobarbituric acid, TBARs), volatile basic nitrogen (TVB-N), texture (TPA), color and sensory scores were measured, to examine the effect of electron beam irradiation on the quality of fish fillet during cold storage. The results showed that the

引文格式:

陈敏惠,陈于陇,李佳鸿,等.高能电子束辐照脆肉鲩鱼片的贮藏品质分析[J].现代食品科技,2024,40(6):169-177.

CHEN Minhui, CHEN Yulong, LI Jiahong, et al. Storage quality of *Ctenopharyngodon idellus* fillets irradiated by high-energy electron beam [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(6): 169-177.

收稿日期: 2023-05-06

基金项目: 广东省重点研发计划项目 (2023B0202080003); 广东省乡村振兴战略专项资金项目; 乡村振兴战略专项 (农业科技能力提升) 2022 年地方分院和专家工作站项目 (2023 研究院 06)

作者简介: 陈敏惠 (1996-), 女, 硕士, 实习研究员, 研究方向: 农产品物流与保鲜, E-mail: 729561509@qq.com

通讯作者: 戴凡炜 (1983-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品物流与保鲜, E-mail: daifanwei2011@163.com

growth of microorganisms in the fillets could be inhibited to a great extent by irradiation, and the total colony number of the fillets could be kept below 10^6 CFU/g over the whole storage after the irradiation at a dose of 3~7 kGy, indicating that 3 kGy was the lowest effective dose for the fillets. Although the TBARs value of grass carp fillets increased after the irradiation, the irradiation could delay further increase of TBARs value during the late stage of storage. A dose at 5 kGy or lower could make the TBARs remaining at a relatively low level. Similarly, irradiation could delay the increase of the TVB-N content in grass carp fillets. The effects of irradiation on odor, texture and color of the fillets were insignificant. Taken together, under vacuum packaging and 4 °C cold storage, 3 kGy was the lowest effective dose for the fillets, and 5 kGy was the highest tolerated dose, with the irradiation at a dose of 3~5 kGy being the most suitable treatment for the storage and preservation of the crisped grass carp fillets. The results of this study provide a reference for the application of electron beam irradiation to the preservation of crisped grass carp fillets.

Key words: electron beam irradiation; irradiation dose; crisp grass carp; quality; shelf life

脆肉鲩 (*Ctenopharyngodon idellus* C.et V) 为我国一种新兴的淡水养殖鱼, 需要采用普通饲料将草鱼养殖体质量达到 1 kg 后, 再改用优质去壳蚕豆饲养 90~120 d, 以改善其肉质, 提高口感和营养价值, 从而受到消费者的青睐^[1,2]。目前, 脆肉鲩主要以活鱼和生鱼片的形式销售, 但活鱼销售量有限, 而鱼片在加工和贮藏中容易受到腐败和致病微生物的污染, 从而影响其品质和食品安全性^[3]。因此, 研究安全可靠的保鲜方式以确保脆肉鲩鱼片的新鲜品质对其经济价值至关重要。

常见的用于灭菌鲩鱼片的技术包括热处理、冷冻保鲜和化学防腐剂处理^[4]。然而, 这些技术存在一些局限性。热处理尽管可以通过高温杀灭微生物, 但高温会导致鱼片过熟、质地变硬和营养损失等问题, 影响其品质和口感^[5]。冷冻保鲜虽然可以抑制微生物生长, 但会引起鱼片质地变差、冻伤和质量损失, 解冻后还可能导致水分流失和质地改变^[6]。化学防腐剂虽然简单高效, 但长期使用化学防腐剂可能对人体健康产生负面影响。相比之下, 高能电子束辐照保鲜更为环保先进, 电子束辐照技术利用电子加速器产生的物理和生化辐照效应, 能够消灭食品中的病原微生物及其他有害菌, 以实现食品保鲜的目的, 在水产品的保鲜研究中被成为“冷杀菌”^[7,8]。近年来的研究表明, 电子束辐照可延长鱼类等水产品的货架期, 并且在很大程度上保持产品的品质。有研究表明, 电子束辐照在鲈鱼 (*Lateolabrax japonicus*)、鲇鱼 (*Pneumatophorus japonicus*)、红虾 (*Solenoceramelantho*) 等水产品的保鲜上都起到了杀菌保鲜的作用^[9-11]。

尽管电子束辐照技术在杀菌方面效果显著, 但其在推广应用方面仍受到一定限制, 主要原因是高

剂量辐照可能会造成肉制品本身的色泽和口感风味会发生变化, 从而影响销售。例如, 经过辐照处理的鲷鱼 (*Ictalurus punctatus*) 在色泽上会相对偏红, 且辐照剂量越大, 辐照气味越明显^[12]; 3 kGy 剂量辐照处理三文鱼 (*Salmo salar*) 会导致鱼肉色泽变淡和异味产生, 极大程度影响了鱼片的感官质量^[13]; 辐照虽然可以显著减少鲣鱼 (*Sarda sarda* Bloch, 1793) 中的细菌种群, 但 5 kGy 照射的鲣鱼在视觉上比其他组颜色更红^[14]。考虑到电子束辐照剂量与水产品杀菌效果、色泽、口感风味等品质密切相关, 且不同品类水产品的适宜辐照剂量也有较大差异, 因此选择水产品适合剂量的电子束辐照保鲜方法显得尤为重要。目前, 关于电子束辐照在脆肉鲩保鲜方面的研究尚未有相关报道, 探究脆肉鲩鱼的适宜电子束辐照剂量有一定应用前景。

本文以人工养殖的脆肉鲩为原料, 将鱼肉加工成鱼片的形状, 采用真空包装形式, 利用不同剂量 (1、3、5、7 kGy) 的高能电子束进行辐照保鲜处理。通过对脆肉鲩鱼片的感官评价、菌落总数测定和理化特性分析, 旨在探究脆肉鲩鱼片的适宜电子束辐照剂量, 为脆肉鲩鱼片的电子束冷杀菌保鲜技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与处理

脆肉鲩, 购于广州天河区西亚兴安生活超市, 条重 (10 ± 0.1) kg, 活鱼急杀后切去头尾和内脏, 去除鱼鳞、鱼骨、鱼皮, 取鱼脊背肉切成大小约 3 mm 厚度的鱼片, 将约 100 g 的鱼片用 20 cm×25 cm 的聚乙烯真空袋真空包装。将包装好的样品放于泡沫

箱中,使用冰袋和碎冰来协助降温,紧接着被运往广州华大生物科技有限公司进行辐照处理,辐照剂量为0(未辐照)、1、3、5、7 kGy。样品辐照完成后,在冷藏条件下运回实验室,于4℃中储藏,在0、3、6、9、12、18 d时取样进行检测,每组3个重复。

1.2 仪器与试剂

电子直线加速器:10 MeV, 20 kW, 北京清华同方威视有限公司; CR-400 色差计, 日本 Konica Minolta 公司; TA-XT Plus 质构仪, 英国 Stable Micro System 公司; CARYE clipse 荧光分光光度计, 美国 VARIAN 公司; Kjeltec8400 凯氏定氮仪, 丹麦 FOSS 公司

氯化钠、硼酸、乙二胺四乙酸二钠、三氯乙酸、氧化钙(分析纯), 天津福晨化学试剂有限公司; 硫代巴比妥酸(分析纯), 源叶生物科技有限公司。

1.3 测试指标及方法

1.3.1 菌落总数(Aerobic Plate Count, APC)的测定

准确称取10 g 鱼肉样品,置于无菌均质袋中,加入90 mL 无菌生理盐水,用高速均质器均质5 min,制成1:10的样品稀释液。从稀释液中取1 mL,加入9 mL 的无菌生理盐水进行梯度稀释,制成1:100的样品稀释液。以此类推,根据需要进行合适的稀释梯度,参照GB4789.2-2016《食品安全国家标准食品微生物学检验菌落总数测定》中的方法^[15]进行APC的测定。

1.3.2 硫代巴比妥酸(TBARs)值的测定

将鱼肉切成小块,加入液氮,用研磨机打成鱼粉,保存至-80℃冰箱。准确称取2 g 鱼粉,放入50 mL 离心管中,加入20 mL 三氯乙酸混合液,混匀后置于恒温摇床上50℃振摇30 min,取出冷却至室温,参照GB5009.181-2016《食品安全国家标准食品中丙二醛的测定》中分光光度法^[16]进行TBARs值的测定。

1.3.3 挥发性盐基氮(Total Volatile Basic-N, TVB-N)的测定

准确称取1.3.5中制备的鱼粉2 g,放入50 mL 离心管中,加入50 mL 蒸馏水,摇匀后浸渍30 min 后上机进行检测,参照GB5009.228-2016《食品安全国家标准食品中挥发性盐基氮的测定》中全自动凯氏定氮仪法^[17]进行TVB-N的测定。

1.3.4 质构(Texture Profile Analysis, TPA)的测定

将鱼片从真空袋取出,使用模具将其切成直径为2 cm 的鱼片,在室温下使用质构仪进行分析试验,包括硬度、弹性、黏附性和咀嚼性。TPA 模式参数的设定参考张晗等^[18]的方法,探头型号为P/50 柱形,测前速度2 mm/s,测中速度1 mm/s,测后速度1 mm/s,应变量50%,5 g 触发力。每组样品的检测均重复六次。

1.3.5 色度值

色度值使用色差仪进行检测,使用前进行白板校准,以鲢鱼片近鱼皮的背部肌肉为测试点,对每一肉样选取上中下3个点平行测定3次,每个剂量水平测试3块鱼肉。记录 L^* 、 a^* 、 b^* 值。

1.3.6 感官评价

表1 新鲜鱼肉感官评价标准

项目	级别	标准
气味	新鲜(5分)	鱼特有的鲜味浓郁
	较新鲜(4分)	鱼特有的鲜味一般
	一般(3分)	鱼特有的鲜味清淡,有异味
	腐败(2分)	鱼特有的鲜味消失,有腐败的腥臭味
	严重腐败(1分)	浓烈腥臭味
色泽	新鲜(5分)	色泽好,有光泽
	较新鲜(4分)	色泽好,有较好的光泽
	一般(3分)	色泽较好,略有光泽
	腐败(2分)	色泽黯淡,肌肉切面无光泽
	严重腐败(1分)	色泽暗褐色,无光泽
外观特征	新鲜(5分)	表面致密光滑,无汁液流失,无黏性物
	较新鲜(4分)	表面致密光滑,有少量汁液流失
	一般(3分)	表面松散无黏性物,汁液明显流失
	腐败(2分)	表面松软发黏,汁液流失较多
	严重腐败(1分)	表面发黏,有明显塌陷,汁液流失多而浑浊
组织状态	新鲜(5分)	肌肉组织紧密,纹理清晰,富有弹性
	较新鲜(4分)	肌肉组织较为紧密,纹理较清晰,有弹性
	一般(3分)	肌肉组织不紧密也不松散,一般弹性
	腐败(2分)	肌肉组织部分松散,略有弹性
	严重腐败(1分)	肌肉组织松散,无弹性

参照 GB/T 37062-2018 水产品感官评价指南^[19], 成立了由 12 名成员组成的测评小组, 其中男女人数各半, 年龄均分布在 20~50 岁之间, 均为身体健康、味觉正常的人员。按气味、色泽、外观特征和组织状态为指标, 进行鱼片的感官评价, 表 1 为鱼片的评分标准。感官评分时, 在总分(20 分)的基础上, 先以各指标的得分相加算出总评分, 再取平均值。

1.4 数据分析

实验数据以 Microsoft Office Excel 2010 (美国微软公司), 进行汇总, SPSS Statistics 26 (美国 IBM 公司) 进行单因素 ANOVA 检验, 选用事后比较“LSD”、“S-N-K”进行多重比较显著性差异分析, 采用 Sigma Plot 10.0 (美国 Systat 公司) 作图。

2 结果与分析

2.1 电子束辐照处理对鲢鱼片菌落总数(APC)的影响

菌落总数的测定可以用来评估鱼肉微生物污染程度与新鲜度。如图 1 所示, 辐照处理能显著降低鲢鱼片 APC, 随着辐照剂量的增加, 辐照组的 APC 逐渐减少。随着贮藏时间的延长, 各组 APC 均不断上升, 在 18 d 的贮藏期间, 对照组的 APC 高于辐照组, 并且在后期的贮藏过程中急剧增加, 从初始的 5.08 lg CFU/g 迅速增加到第 9 天的 7.08 lg CFU/g, 超出水产品微生物限量标准 10^7 CFU/g^[20]。在辐照组中, 经过 1 kGy 处理的鱼片在贮藏的第 18 天也超出了超过限量标准, 从初始的 4.64 lg CFU/g 增长到 7.06 lg CFU/g, 而 3、5 和 7 kGy 辐照组鱼片 APC 始终保持在低值水平, 整个贮藏期间均低于 10^6 CFU/g, 分别为 5.99、4.55、3.83 lg CFU/g。这一结果表明, 电子束辐照可以有效地减少鲢鱼片内的微生物数量, 而且其杀菌能力随着辐照剂量的增加而增强。对鱼片的辐照主要是用辐照降低微生物含量而达到延长货架期的目的, 上述结果表明 3 kGy 辐照鲢鱼片可有效控制微生物数量, 因此本研究推断 3 kGy 是鲢鱼片辐照的最低有效剂量。然而, 如果辐照剂量不足, 则可能无法达到理想的效果。在有关保鲜鲢鱼的研究中指出, 这可能是由于电子束辐照导致鱼肉中微生物细胞的 DNA 被电离和激发, 从而引起细胞正常功能和繁殖代谢发生不可逆的变化, 导致微生物细胞失去扩繁能力或破裂

死亡^[21]。Lv 等^[22]也提出, 由辐照产生的自由基(如 $H\cdot$ 和 $OH\cdot$) 可以杀死鱼肉中的寄生虫, 灭活内源性酶, 抑制微生物生长, 从而有效延长保质期。根据以上结果, 电子束辐照可以应用于脆肉鲢的保鲜, 以减少其微生物数量并延长其保质期。但需要注意的是, 辐照剂量的选择可以显著影响电子束辐照的保鲜效果。

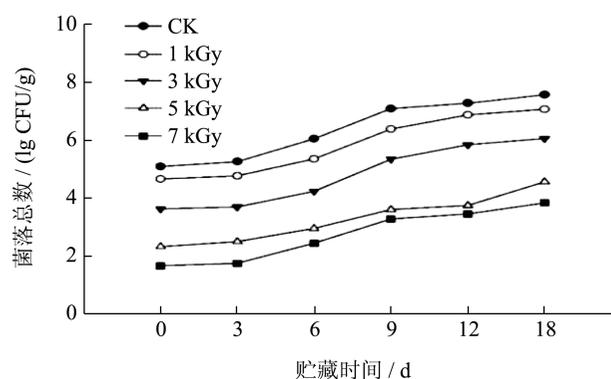


图 1 脆肉鲢鱼片冷藏期间菌落总数的变化

Fig.1 APC of crisped grass carp fillets during cold storage

2.2 电子束辐照处理对鲢鱼片TBARs值的影响

脂质二次氧化产物(TBARs)来源于脂肪酸的氧化过程, 脂质氧化是导致水产品腐坏变质的重要原因, TBARs 值是用于反映水产品贮藏过程中度的重要指标之一^[23,24]。不同剂量电子束辐照处理的鲢鱼片在冷藏中的 TBARs 值变化趋势如图 2 所示。数据表明, 随着贮藏时间的延长, 各组 TBARs 值均有所增加。在贮藏的初期阶段, 处理组的 TBARs 值均高于对照组, 并且随着辐照剂量的增加, TBARs 含量也呈现出增加的趋势, 说明电子束辐照加速了鱼肉脂质氧化, 导致 TBARs 值上升。研究表明, 辐照会催化肉类中的自由基产生, 加速脂质氧化, 氧化程度与辐照剂量呈正相关^[25]。值得注意的是, 在贮藏期达到第 18 天时, 对照组的 TBARs 相比于第 0 天增加了 537.78%, 但辐照组的增加幅度仅为 195.41%、100.18%、124.44%、287.45%, 表明辐照处理在贮藏后期有抑制鱼肉氧化的效果。在整个贮藏过程中, 7 kGy 处理组在整个贮藏过程中 TBARs 值均处于相对较高的水平, 相比而言, 5 kGy 及更低剂量则较好的保持了鲢鱼片的品质, 推断 5 kGy 是鲢鱼片辐照的最高有效剂量。Li 等^[26]也得到了类似的结论, 采用低剂量电子束辐照(3 kGy)可以减缓大嘴鲈鱼中不饱和脂肪酸的氧化, 减少大嘴鲈鱼的脂质氧化。

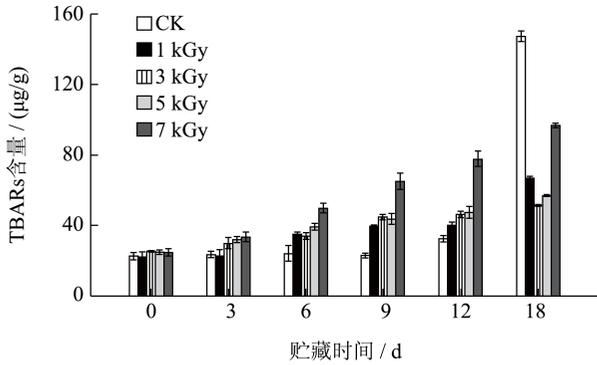


图2 脆肉鲢鱼片冷藏期间TBARs的变化

Fig.2 TBARs of crisped grass carp fillets during cold storage

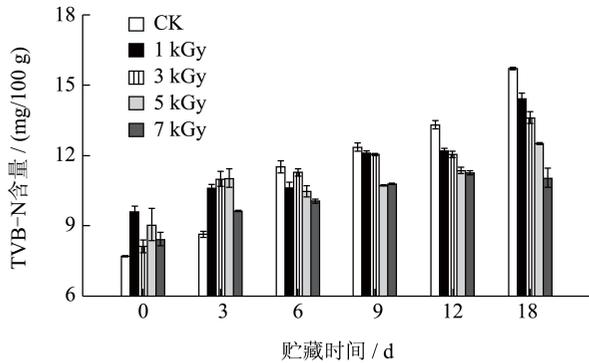


图3 脆肉鲢鱼片冷藏期间TVB-N的变化

Fig.3 TVB-N of crisped grass carp fillets during cold storage

2.3 电子束辐照处理对鲢鱼片TVB-N值的影响

TVB-N值的增加可能是由于内源性酶活性增加或腐败细菌生长分解蛋白质产生氨类碱性含氮物质，其含量是用来判断肉类新鲜度的重要指标^[27,28]。各组间贮藏期间TVB-N含量的变化如图3所示，随着贮藏时间的延长，各组间TVB-N值均出现了不同程度的增加。对照组鱼肉初始的TVB-N含量为7.73 mg/100 g，低于辐照组，但在第6天TVB-N含量达到11.55 mg/100 g，高于辐照组。在贮藏后期(12~18 d)，鱼肉的TVB-N含量与电子束辐照剂量成反比。在18 d的贮藏期结束后，各组的TVB-N含量相比于初始值分别增加了103.02%、86.21%、75.86%、62.07%、43.10%。说明电子束辐照可以有效地抑制鱼肉中TVB-N含量的增加，且辐照剂量与抑制效果成正相关。余慧琳等^[29]在研究保鲜时发现，电子束辐照可以抑制带鱼蛋白质分解和组胺生成，从而显著降低挥发性盐基氮的含量。Xu等^[30]发现，使用较低剂量(1~3 kGy)的电子束辐照结合冷藏贮藏可以延缓蛋白质的氧化，显著延长黄鳝

鱼片的货架期，更适合肉制品的保鲜。

2.4 电子束辐照处理对鲢鱼片质构的影响

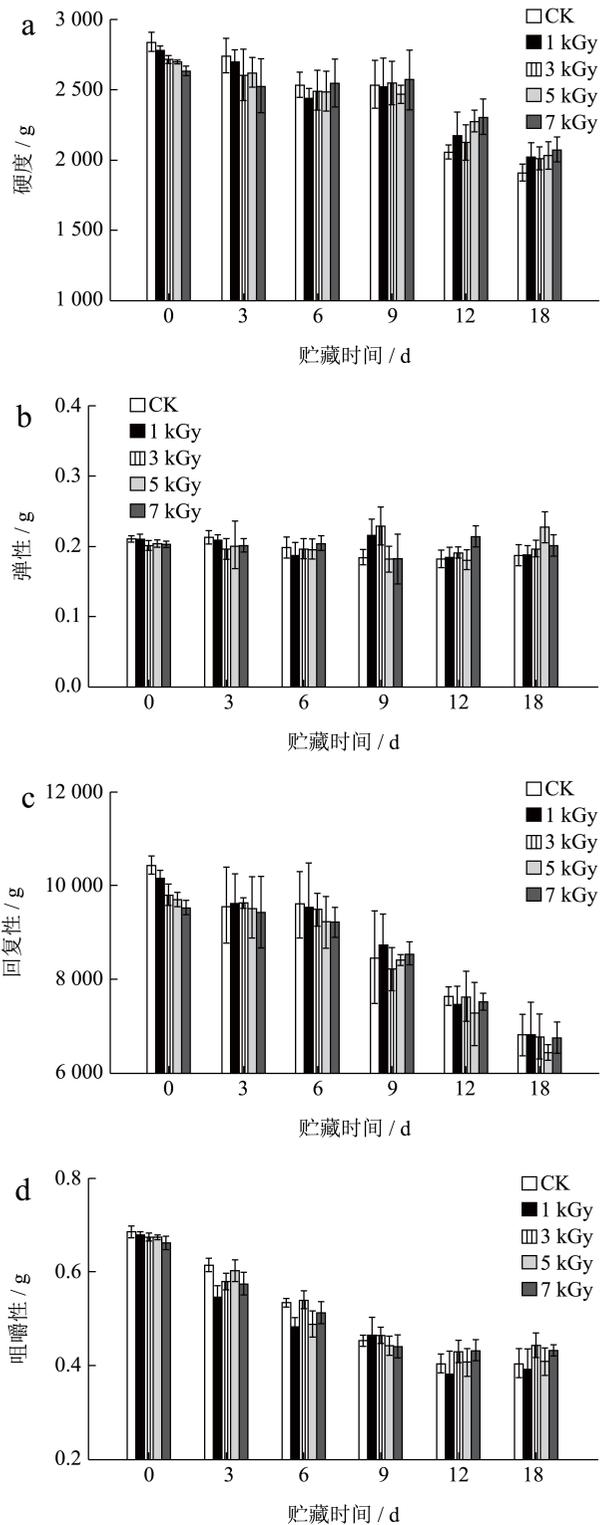


图4 脆肉鲢鱼片冷藏期间质构特性的变化

Fig.4 Texture properties of crisped grass carp fillets during cold storage

表 2 脆肉鲩鱼片冷藏期间色值的变化

Table 2 Chromatic value of crisped grass carp fillets during cold storage

色值	辐照剂量/kGy	贮藏时间/d					
		0	3	6	9	12	18
L^*	0	49.16 ± 1.61 ^{ab}	45.48 ± 0.89 ^{bc}	45.69 ± 0.95 ^{ab}	51.09 ± 0.60 ^a	56.06 ± 1.44 ^a	62.04 ± 0.78 ^a
	1	50.79 ± 0.95 ^{ab}	48.89 ± 0.49 ^a	47.39 ± 0.61 ^a	48.73 ± 0.61 ^a	53.83 ± 0.58 ^{ab}	59.80 ± 0.65 ^b
	3	51.64 ± 1.35 ^a	44.96 ± 0.84 ^c	44.66 ± 0.59 ^b	48.93 ± 0.82 ^a	50.83 ± 0.77 ^b	60.33 ± 0.44 ^{ab}
	5	47.09 ± 0.65 ^b	47.74 ± 0.73 ^{ab}	46.76 ± 0.51 ^a	50.08 ± 1.26 ^a	54.1 ± 1.19 ^a ^b	61.07 ± 0.47 ^{ab}
	7	48.23 ± 0.99 ^{ab}	45.64 ± 0.68 ^{bc}	44.29 ± 1.04 ^b	44.29 ± 1.04 ^b	52.68 ± 0.48 ^{ab}	58.97 ± 0.61 ^b
	0	0.22 ± 0.2	-0.16 ± 0.18 ^{ab}	-0.54 ± 0.21	-0.54 ± 0.21	-0.99 ± 0.13	-0.66 ± 0.19
a^*	1	0.56 ± 0.16	-0.87 ± 0.14 ^b	-0.50 ± 0.34	-0.50 ± 0.34	-0.67 ± 0.60	0.50 ± 0.24
	3	0.19 ± 0.11	0.82 ± 0.38 ^a	-0.12 ± 0.14	-0.29 ± 0.22	-0.49 ± 0.37	0.14 ± 0.45
	5	0.66 ± 0.27	0.06 ± 0.14 ^{ab}	-0.44 ± 0.24	-0.96 ± 0.29	-0.85 ± 0.08	-0.43 ± 0.27
	7	0.27 ± 0.05	-0.09 ± 0.03 ^{ab}	-0.50 ± 0.15	-0.81 ± 0.23	-0.32 ± 0.39	-0.01 ± 0.15
	0	2.91 ± 1.20 ^a	2.76 ± 0.26	3.56 ± 0.35 ^a	3.85 ± 0.71 ^{ab}	3.03 ± 0.67 ^{ab}	5.05 ± 0.47
	b^*	1	2.11 ± 0.82 ^a	3.05 ± 0.38	2.94 ± 0.23 ^{ab}	4.42 ± 0.54 ^a	3.9 ± 0.25 ^a
3		1.18 ± 0.44 ^{ab}	2.02 ± 0.33	2.41 ± 0.22 ^{bc}	3.76 ± 0.44 ^{ab}	1.59 ± 0.53 ^b	5.12 ± 0.57
5		0.11 ± 0.92 ^{ab}	2.01 ± 0.25	2.98 ± 0.36 ^{ab}	2.37 ± 0.40 ^b	2.78 ± 0.46 ^{ab}	6.45 ± 0.34
7		-1.18 ± 0.22 ^b	2.18 ± 0.14	1.76 ± 0.2 ^c	2.1 ± 0.35 ^b	2.87 ± 0.58 ^{ab}	5.18 ± 0.36

注: 对于同一指标, 同列肩标字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。

脆肉鲩的质构特性是评价其新鲜度的重要指标之一, 通过仪器模拟人口腔的咀嚼, 对鱼肉进行压缩, 能一定程度上反映鱼肉的品质, 作为新鲜度指标评价的依据^[31]。从图 4 中可以看出, 不同剂量辐照处理后, 辐照当天对照组鱼肉在硬度、弹性、咀嚼性以及回复性整体上均略高于辐照组, 这可能是因为辐照处理对鱼肉的一些理化性质产生了影响, 导致其质构特性发生了变化。随着贮藏时间的延长, 鱼肉酶活性下降, 肌球蛋白变性, 从而导致鱼肉硬度值下降。实验结果显示, 在贮藏后期的 12~18 d, 辐照组的鱼肉硬度大于对照组, 说明辐照处理在一定程度上抑制了鱼肉腐败的速度, 从而维持其较高的硬度。然而, 在贮藏期间内, 鱼肉的弹性特性并未随时间延长而产生明显变化, 各组间均维持在较稳定的数值, 辐照处理未对其产生影响。随着贮藏时间的延长, 鱼肉的回复性下降, 但辐照处理并未对其结果产生明显改变, 说明辐照处理对鱼肉回复性没有显著影响。咀嚼性是肌肉硬度、肌肉回复性、肌肉弹性的综合性结果, 随着贮藏时间的延长, 鱼肉咀嚼性呈现先下降后趋于平稳的趋势, 但电子束辐照未对其产生明显影响。以上结果表明, 辐照虽

然在贮藏前期对鱼肉的质构特性产生一定的影响, 但是在贮藏后期, 能维持鱼肉硬度的下降, 弹性、回复性和咀嚼性没有伴随辐照产生影响, 可应用于鲩鱼片的保鲜。此研究结果与其他研究得出的结论相一致, 电子束辐照对斑节对虾^[32]、三文鱼^[33]、鲈鱼^[34]的质构同样也没有显著影响。

2.5 电子束辐照处理对鲩鱼片色值的影响

颜色属性是评估鱼类新鲜度和质量的基本参数之一, 可能受到几个因素的影响, 例如血红素色素含量、氧化状态、血红素色素的配体形成和物理特性^[35]。本研究采用 L^* (亮度)、 a^* (红色) 和 b^* (黄色) 值定量评估鲩鱼片的颜色特征, 表 2 显示了不同电子束剂量照射的鲩鱼片 L^* 、 a^* 、 b^* 值。结果显示, 随着贮藏时间的增加, 鲩鱼片的 L^* 值先下降后上升, 相比于辐照组样品, 对照组在贮藏后期 L^* 值上升更明显。在整个贮藏期内, 各组样品间的 a^* 值基本保持稳定, 而 b^* 值在贮藏期间呈上升趋势。在辐照结束当天, 随着电子束辐照剂量的增加, 鲩鱼片的 b^* 值呈现下降趋势, b^* 值与电子束辐照剂量成反比, 但在贮藏后期, 不同辐照剂量处理组之间

的鱼肉样品 b^* 值并没有明显差异, 与对照组 b^* 值也无明显差异。戚文元等^[36]对真空包装的罗非鱼片进行了电子束处理, 发现处理后的鱼片的 a^* 值下降, b^* 值上升, 对鱼片的色泽产生了影响。Zhang 等^[37]对草鱼鱼糜进行电子束辐照处理后发现, 处理的样品与对照相比具有较高的 L^* 、较低的 a^* 和 b^* 值。综合研究结果可得, 电子束辐照对鲢鱼片的色值特征影响整体上较小, 适用于鲢鱼的保鲜。

2.6 电子束辐照处理对鲢鱼片感官品质的影响

感官评价能直接反应水产品鲜度的结果, 包含气味、色泽、表观特征和组织状态四大指标, 是鱼肉新鲜度评价体系中重要的环节^[38]。从图 5 中可以看出, 随着贮藏时间的延长, 各组间鲢鱼片的感官得分均呈下降趋势, 但对照组的感官评分相比辐照组下降的速度更快。在感官评分满分为 20 分的基础上, 对照组鲢鱼片在第 9 天与辐照组出现差异, 评分仅为 13.33 分, 并在第 12 天低于感官可接受值 (12 分), 且伴随腐败异味产生。相比之下, 各辐照组在贮藏第 12 天的评分均高于感官可接受值, 说明辐照能较好地保持鲢鱼片的感官品质, 将鲢鱼片货架期延长到 12 d。郭红霞等^[39]探究了电子束辐照对三文鱼的保鲜效果, 发现经辐照处理的三文鱼货架期可长达 12 d, 与对照组相比, 延长了 6 d 左右, 同样也起到了延长保质期的作用。

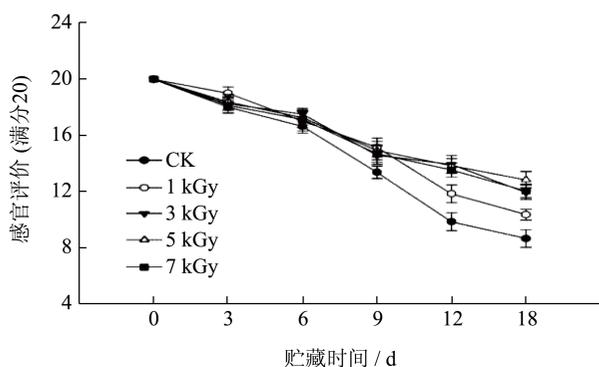


图 5 脆肉鲢鱼片冷藏期间感官评价的变化

Fig.5 Sensory evaluation of crisped grass carp fillets during cold storage

值得注意的是, 在贮藏第 12 天, 1 kGy 辐照组感官评分低, 与 3、5、7 kGy 辐照组出现差异, 并且第 18 天评分仅为 10.33 分, 低于感官可接受值, 说明 1 kGy 的辐照强度不够, 杀菌不彻底, 在贮藏后期难以起到保鲜的效果。相较之下, 3、5、7 kGy 鱼肉辐照组在贮藏第 18 天的感官评分均在感官可

接受值之上, 分别为 12.1、12.8、12 分, 且并未出现辐照异味, 说明辐照对鲢鱼片感官品质的影响与其使用剂量密切相关, 且 3 kGy 的辐照处理可以将鲢鱼片货架期延长到 18 d。

3 结论

本研究旨在对不同剂量 (0、1、3、5、7 kGy) 的脆肉鲢鱼片进行了感官评价、色差、质构和理化性质的分析, 探究电子束辐照在脆肉鲢鱼片保鲜中的应用潜力。根据 APC 结果可知电子束辐照能有效减少鲢鱼片中微生物的数量, 且辐照剂量与抑菌效果成正相关, 1 kGy 的辐照剂量小, 随着贮藏期的延长, 无法达到理想的保鲜效果, 3 kGy 则是脆肉鲢鱼片最低有效剂量。TBARs 值结果显示, 经过辐照处理的鱼片在贮藏前期会导致 TBARs 值小幅增加, 但在贮藏后期能显著抑制其上升, 有利于脆肉鲢的贮藏保鲜。然而, 7 kGy 的辐照处理超出了鱼片的最高耐受剂量, 加速了鱼片脂质氧化, TBARs 值均处于相对较高的水平, 相比而言, 5 kGy 及更低剂量则较好的保持了鲢鱼片的品质。TVB-N 指标的测定表明, 电子束辐照可以有效地抑制鱼肉中 TVB-N 含量的增加, 且辐照剂量与抑制效果成正相关。鲢鱼片质构和色值的分析表明, 在 4 °C 的低温贮藏条件下, 不同辐照剂量对鲢鱼片的质构和色值影响不明显。感官评价分析表明, 辐照处理并未对鲢鱼片产生辐照异味, 3~7 kGy 辐照组在第 18 天仍高于感官可接受值, 延长了贮藏时间。综合考虑, 本研究推断 3 kGy 是脆肉鲢鱼片最低有效剂量, 5 kGy 是最高耐受剂量, 即选择 3~5 kGy 辐照剂量为脆肉鲢生鱼片的最佳贮藏保鲜条件。本研究的结果将为脆肉鲢结合电子束辐照的贮藏保鲜提供参考依据。

参考文献

- [1] 郑鑫禹,张峻铭,谢骏,等.蚕豆水提取物及维生素C和E对草鱼肌肉质构、营养成分以及氧化应激的影响[J].水产学报,2023,47(6):118-132.
- [2] TIAN J, JI H, WANG Y, et al. Lipid accumulation in grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) fed faba beans (*Vicia faba* L.) [J]. Fish Physiol Biochem, 2019, 45(2): 631-642.
- [3] 林婉玲,丁莫,王锦旭,等.包装方式和材料对调理脆肉鲢鱼片冷藏过程品质的影响[J].农业工程学报,2018, 34(2):284-291.
- [4] 张鸿飞.电子束辐照结合微波加热对鱼糜保鲜及品质的

- 影响[D].杭州:浙江大学,2016.
- [5] LIN W, YANG X, LI L, et al. Effect of ultrastructure on changes of textural characteristics between crisp grass carp (*Ctenopharyngodon idellus* C.et V) and grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) inducing heating treatment [J]. Journal of the Science, 2016, 81(2): 404-411.
- [6] YU D, REGENSTEIN J, ZANG J, et al. Inhibition of microbial spoilage of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) fillets with a chitosan-based coating during refrigerated storage [J]. Food Microbiology, 2018, 20(285): 61-68.
- [7] PAN M, YANG J, LIU K, et al. Irradiation technology: an effective and promising strategy for eliminating food allergens [J]. Food Research International, 2021, 148(12): 110578.
- [8] MOHAMMADI X, MATINFAR G, KHANEGHAH A, et al. Emergence of cold plasma and electron beam irradiation as novel technologies to counter mycotoxins in food products [J]. World Mycotoxin Journal, 2021, 14(1): 75-82.
- [9] XU D, ZHANG H, ZHANG L, et al. Effects of electron beam irradiation on quality of weever fillets during refrigerated storage [J]. Food Frontiers, 2021, 2(4): 519-526.
- [10] 吴东晓,杨文鹤,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.
- [11] YU Q, PAN H, QIAN C, et al. Determination of the optimal electron beam irradiation dose for treating shrimp (*Solenocera melanthero*) by means of physical and chemical properties and bacterial communities [J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 153: 112539.
- [12] 陈方雪,周明珠,邓祎,等.电子束辐照处理对鲷鱼冷藏期间品质的影响[J].肉类研究,2021,35(6):57-62.
- [13] YANG Z, WANG H, 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, 15(145): 535-541.
- [14] ALTAN C, OKAN A, TURAN H. Synergistic effect of freezing and irradiation on bonito fish (*Sarda sarda* Bloch, 1793) [J]. Food Protection, 2016, 79(12): 2136-2142.
- [15] GB 4789.2-2016,食品安全国家标准,食品微生物学检验,菌落总数测定[S].
- [16] GB 5009.181-2016,食品安全国家标准,食品中丙二醛的测定[S].
- [17] GB 5009.228-2016,食品安全国家标准,食品中挥发性盐基氮的测定[S].
- [18] 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.
- [19] GB/T 37062-2018,水产品感官评价指南[S].
- [20] 江艳华,姚琳,朱文嘉,等.国内外水产品微生物限量标准的比对分析[J].中国渔业质量与标准,2015,5(4): 6-16.
- [21] 李美锦,黄佳珺,陈亚楠,等.电子束辐照的熟制鲢鱼块贮藏品质分析[J].现代食品科技,2023,39(2):214-220.
- [22] LV M C, MEI K L, ZHANG H, et al. Effects of electron beam irradiation on the biochemical properties and structure of myofibrillar protein from *Tegillarca granosa* meat [J]. Food Chemistry, 2018, 254: 64-69.
- [23] MALTAR-STRMEČKI N, LJUBIĆ-BEER B, LAŠKAJ R, et al. Effect of the gamma radiation on histamine production, lipid peroxidation and antioxidant parameters during storage at two different temperatures in sardine (*Sardina pilchardus*) [J]. Food Control, 2013, 34: 132-137.
- [24] DIETER A, EHLERMANN. Particular applications of food irradiation: meat, fish and others [J]. Radiation Physics and Chemistry, 2016, 129: 53-57.
- [25] LI H, LI M, 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): 2963.
- [26] LI H, YU Y, XIONG G, et al. Cobalt-60 and electron beam irradiation-induced lipid oxidation in largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(12): 4612-4617.
- [27] ANNAMALAI, LAKSHMI, SIVAM, et al. Comparative study on the quality changes of croaker (*Johnius dussumieri*) fish stored in slurry ice and flake ice [J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2018, 27(4): 814-827.
- [28] ARSHAD M, KWON J, AHMAD R, et al. Influence of E - beam irradiation on microbiological and physicochemical properties and fatty acid profile of frozen duck meat [J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(2): 1020-1029.
- [29] 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.
- [30] XU D, ZHANG H, ZHANG L, et al. Effects of electron beam irradiation on quality of weever fillets during refrigerated storage [J]. Food Frontiers, 2021, 2(4): 519-526.
- [31] 张立敏.电子束辐照技术对鱼类过敏原活性及质构的影响[D].青岛:中国海洋大学,2013.
- [32] MARASINGHE B, RATHNAYAKE R, RANASINGHE R, et al. Effect of gamma irradiation on microbial, physical and chemical parameters of postharvest *Penaeus monodon*

- F [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2022, 192(4): 109883.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] QIAO M, FLETCHER D, SMITH D, et al. The effect of broiler breast meat color on pH, moisture, water-holding capacity, and emulsification capacity [J]. *Poultry Science*, 2001, 80(5): 676-680
- [36] 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.
- [37] ZHANG H, WANG W, ZHANG S, et al. Influence of 10-MeV E-beam irradiation and vacuum packaging on the shelf-life of grass carp surimi [J]. *Food Bioprocess Technol*, 2016, 9: 830-838.
- [38] MBARKI R, MILOUD N B, SELMI S, et al. Effect of vacuum-packaging and low-dose irradiation on the microbial, chemical and sensory characteristics of chub mackerel (*Scomber japonicus*) [J]. *Food Microbiology*, 2009, 26: 821-826.
- [39] 郭红霞,冯涛,戚文元,等.电子束辐照对储藏期间三文鱼鲜度的影响[J].保鲜与加工,2020,20(6):14-19.