

# X 射线辐照对冷鲜猪肉品质和货架期的影响

王国霞<sup>1</sup>, 刘梦龙<sup>2</sup>, 李小兵<sup>2</sup>, 高雯暄<sup>1</sup>, 李佳林<sup>1</sup>, 闫鹤<sup>1\*</sup>

(1. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510640)(2. 广州市昊志影像科技有限公司, 广东广州 510000)

**摘要:** 为研究 X 射线辐照对冷鲜猪肉品质的影响。该实验用 0.1~1.0 kGy 梯度的辐照剂量对纯培养细菌、冷鲜猪肉进行处理, 评估不同辐照剂量和贮藏时间下微生物、理化指标和感官特性的变化。结果表明: 微生物菌落数随辐照剂量的增加而减少。纯培养大肠杆菌和单核细胞增生李斯特氏菌的 D<sub>10</sub> 值分别为 0.177 kGy 和 0.180 kGy。0.6 kGy X 射线辐照处理时, 纯培养细菌菌落数显著 ( $p < 0.05$ ) 减少 3.0 log 值以上; 人工接种细菌菌落数显著 ( $p < 0.05$ ) 减少 2.0 log 值以上。1.0 kGy 辐照处理冷鲜猪肉, 固有微生物菌落数显著 ( $p < 0.05$ ) 减少 2.0 log 值以上; 货架期从原来的 4 d 延长到 9 d; 贮藏前期感官评分无显著 ( $p > 0.05$ ) 差异, 后期感官评分下降缓慢; 与对照相比 TVB-N 和 pH 值的上升速率在贮藏期内显著降低 ( $p < 0.05$ ); 辐照后冷鲜猪肉 TBA 值有所增加, 但在贮藏中对照组 TBA 值上升速率大于辐照组。综合考虑, 1.0 kGy X 射线辐照处理冷鲜猪肉, 在保证冷鲜猪肉符合国家食品安全标准规定的同时将货架期延长了 4~5 d, 为冷鲜猪肉的辐照保鲜技术提供科学依据。

**关键词:** X 射线; 冷鲜猪肉; 大肠杆菌; 单核细胞增生李斯特氏菌; 菌落总数; 品质变化; 货架期

文章编号: 1673-9078(2022)10-178-186

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.10.1392

## Effects of X-ray Irradiation on Chilled Pork Quality and Shelf Life

WANG Guoxia<sup>1</sup>, LIU Menglong<sup>2</sup>, LI Xiaobing<sup>2</sup>, GAO Wenxuan<sup>1</sup>, LI Jialin<sup>1</sup>, YAN He<sup>1\*</sup>

(1. School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

(2. Guangzhou Haozhi Imaging Technology Co. Ltd., Guangzhou 510000, China)

**Abstract:** To study the effects of X-ray irradiation on chilled pork quality, irradiation from 0.1 to 1.0 kGy was used to treat cultured pathogens and chilled pork to evaluate changes in microorganism growth, physical and chemical indicators, and sensory characteristics of chilled pork under different irradiation doses and storage times. The number of microbial colonies decreased as the irradiation dose increased. The D<sub>10</sub> values of cultured *Escherichia coli* and *Listeria monocytogenes* were 0.177 kGy and 0.180 kGy, respectively. After treatment by X-ray irradiation at 0.6 kGy, the number of cultured microbial colonies was significantly reduced by more than 3.0 log value ( $p < 0.05$ ), and the number of inoculated microbial colonies decreased significantly by more than 2.0 log value ( $p < 0.05$ ). Furthermore, when chilled pork was treated with 1.0-kGy X-ray irradiation, the number of inherent microbial colonies declined markedly by more than 2.0 log value ( $p < 0.05$ ) while the shelf life was extended from 4 days to 9 days. There was no significant difference in sensory scores ( $p > 0.05$ ) in the early storage period, but in the later period, the sensory score of the irradiated chilled pork slowly decreased. The rates of TVB-N and pH-value increase dropped significantly during the storage period compared with those of the control ( $p < 0.05$ ). The TBA value of the chilled pork increased in all samples after irradiation, but the rate of TBA-value increase in the control group during storage was greater than that in the irradiated group. In summary, 1.0-kGy X-ray irradiation treatment of chilled pork meets national food safety standards and extends shelf life by 4~5 days. This finding provides a scientific basis for irradiation-based preservation of chilled pork.

**Key words:** X-ray; chilled pork; *Escherichia coli*; *Listeria monocytogenes*; total colony count; quality variation; shelf life

引文格式:

王国霞, 刘梦龙, 李小兵, 等. X 射线辐照对冷鲜猪肉品质和货架期的影响[J]. 现代食品科技, 2022, 38(10): 178-186

WANG Guoxia, LIU Menglong, LI Xiaobing, et al. Effects of X-ray irradiation on chilled pork quality and shelf life [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(10): 178-186

猪肉是目前人们餐桌上重要的动物性食品之一,

收稿日期: 2021-12-10

作者简介: 王国霞 (1996-), 女, 在读研究生, 研究方向: 食品微生物安全与控制, E-mail: 18813077277@163.com

通讯作者: 闫鹤 (1972-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 食品微生物安

全与控制, E-mail: yanhe@scut.edu.cn

含有人体生长发育所需的丰富的优质蛋白、脂肪、维生素等, 而且肉质较嫩, 易消化<sup>[1]</sup>。猪肉主要有热鲜肉、冷冻肉和冷鲜肉, 其中冷鲜肉因汁鲜味美、质地柔软、营养丰富, 成为猪肉供应和消费的趋势<sup>[2]</sup>。近年来,

为防控非洲猪瘟,猪肉的流通方式逐渐从“运猪”向“运肉”转变<sup>[3]</sup>,使得冷鲜猪肉成为猪肉供应和消费的主要方向。冷鲜猪肉在生产、流通和销售过程中,因管理或操作不当,存在沙门氏菌、大肠杆菌、李斯特菌等致病菌感染的安全隐患<sup>[4]</sup>。其中,大肠杆菌和单核细胞增生李斯特氏菌被 WHO 列在四大重要的食源性致病菌之中<sup>[5]</sup>。大肠杆菌为革兰氏阴性菌,是食品污染程度的重要指标,一些血清型大肠杆菌对人类以及动物有很强的致病性,它们进入人体后很可能会引起痢疾、霍乱等肠道疾病,威胁人类健康<sup>[6]</sup>;单核细胞增生李斯特氏菌是一种革兰氏阳性菌,4℃时仍可生长<sup>[7]</sup>,据 WHO 报道 30%以上的肉与肉制品被其污染,该菌可引起多种疾病,致死率达 20%~30%或更高<sup>[5,8]</sup>。

传统冷鲜猪肉保鲜方法如低温保鲜、真空包装等,能在一定程度上延长冷鲜猪肉的货架期,其原理主要是抑制微生物的生长繁殖,但未解决猪肉极易污染病原菌的问题<sup>[9]</sup>。因此,为提高冷鲜猪肉的质量和安全性,需要一种高效的非热杀菌技术<sup>[10-12]</sup>。电离辐射就是一种很有前景的替代方法,可同时确保食品的安全和质量<sup>[13]</sup>。联合国粮食及农业组织(FAO)/国际原子能机构(IAEA)/世界卫生组织(WHO)联合专家委员会报告称,在食品中使用高达 10 kGy 的辐照没有出现毒理、微生物和营养问题<sup>[14]</sup>。美国食品药品监督管理局(FDA)允许使用高达 4.5 kGy 的电离辐射来控制食源性病原体并延长货架期<sup>[15]</sup>。

目前用于食品加工的辐射源有 $\gamma$ -射线、X 射线、电子束。研究较多的是 $\gamma$ -射线和电子束辐照<sup>[16]</sup>。但电子束穿透能力弱,杀菌效果较差;而 $\gamma$ -射线在使用时需屏蔽原子核放射,核废料处理成本高<sup>[17]</sup>。而 X 射线辐照穿透性强,不存在放射性污染、核泄漏等一系列问题,即高效又安全,在食品微生物的杀灭和抑制方面更具优势<sup>[16]</sup>。现有研究表明不同剂量 X 射线可有效杀灭牛奶<sup>[18]</sup>、水果蔬菜<sup>[13,19-24]</sup>、坚果<sup>[25]</sup>、海鲜产品<sup>[10-12,26-28]</sup>和即食产品<sup>[14,29,30]</sup>中的微生物,从而降低食源性疾病的暴发。此外,当辐照达到一定剂量后冷鲜猪肉会产生自由基,导致脂质和蛋白质氧化、颜色和气味变化<sup>[31]</sup>。因此,还需对辐照处理冷鲜猪肉的理化指标和感官属性进行检测。

本文研究了 X 射线辐照对常见病原菌的杀灭效果和冷鲜猪肉在贮藏过程中微生物繁殖、蛋白质降解、脂质氧化、感官变化和货架期的影响。为 X 射线辐照技术在冷鲜猪肉保鲜行业的应用提供理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

原料肉:冷鲜猪肉,购于广州市当地市场。

标准菌株:大肠杆菌(ATCC25922、ATCC25921、BH101);单核细胞增生李斯特氏菌(ATCC19115、104035),均来自本实验室。

包装材料:聚乙烯(PE)自封袋(15×22 cm)、带滤膜的无菌均质袋(20×30 cm),购于广州昌德行生物科技有限公司。

试剂:氯化钠(NaCl)、氧化镁(MgO)、三氯乙酸( $C_2HCl_3O_2$ )、硫代巴比妥酸( $C_4H_4N_2O_2S$ )、乙二胺四乙酸二钠( $C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8$ )、1,1,3,3-四乙氧基丙烷( $C_{11}H_{24}O_4$ ),上海麦克林生化科技有限公司;甲基红( $C_{15}H_{15}N_3O_2$ )、溴甲酚绿( $C_{21}H_{14}Br_4O_5S$ ),上海展云化工有限公司;0.10 mol/L 盐酸标准溶液、硼酸( $H_3BO_3$ ),上海吉至生化科技有限公司; $\varphi=95\%$ 乙醇,广东广试科技股份有限公司;大豆酪蛋白琼脂培养基(TSA)、胰酪大豆胨液体培养基(TSB)、PCA 平板计数琼脂、 $w=0.1\%$ 蛋白胨水、伊红美蓝琼脂培养基、PALCAM 琼脂培养基,广东环凯微生物科技有限公司。

### 1.2 仪器与设备

Sartorius PB-10 pH 计,德国赛多利斯;KDN-103F 自动定氮仪,上海纤检有限公司;UV-1800 岛津紫外分光光度计,上海精密仪器仪表有限公司;HX-4 拍打式无菌均质器,上海沪析实业有限公司;KH5200E 超声波清洗器,昆山禾创超声仪器有限公司;酸式滴定管、SHP-250 型生化培养箱、HK-C2S 型垂直洁净工作台,广东环凯微生物科技有限公司;GI54TW 立式高压灭菌器,上海庆开实验设备有限公司;MPC-5V316 中科都菱冰箱,安徽中科都菱商用电器有限公司;JJ500 型电子天平,常熟市双杰测试仪器厂;摇床培养箱,上海堪鑫仪器设备有限公司;恒温水浴锅,荣华仪器制造有限公司;TGL-16M 高速台式冷冻离心机,湘仪仪器有限公司。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 样品制备

猪肉样品(分割肉)在当地市场购买,获得后立刻放入装有冰袋的保温箱中,20 min 内运回实验室(定义为贮藏第 0 天)。在洁净工作台,无菌操作下将猪肉样品进一步分割成  $6\times 6\text{ cm}^2$ ,厚 3 cm 大小,用于后续实验。

#### 1.3.2 病原菌菌株和生长条件

菌株培养:将每株细菌在胰蛋白酶大豆琼脂(TSA)平板上划线,并在 37℃下孵育 18~24 h。从 TSA 培养基上挑取单个菌落接种在胰蛋白酶大豆肉汤(TSB)

中,并在摇床上 37 °C 持续搅拌 (120 g) 孵育 18~24 h (菌液浓度约  $10^8\sim 10^9$  CFU/mL), 得到菌液。

### 1.3.3 纯培养和人工接种病原菌

纯培养鸡尾酒菌液: 将菌液以 7 000 g 离心 10 min。弃去上清液, 洗涤细菌沉淀并重悬于 10 mL 无菌 0.1% 蛋白胨水 (PW) 中。然后分别将三株大肠杆菌和两株单核细胞增生李斯特氏菌各自以等体积混合并稀释, 得到约  $10^7\sim 10^8$  CFU/mL 的大肠杆菌、单核细胞增生李斯特氏菌鸡尾酒混合液。将鸡尾酒混合液分装在 1.5 mL 离心管中, 用于后续实验。

浸泡法接种冷鲜猪肉: 将 25 g 冷鲜猪肉无菌转移到 1 L 无菌烧杯中, 在 22 °C 下分别加入 500 mL 鸡尾酒混合液, 使用摇床持续搅拌 20 min。浸泡后冷鲜猪肉样品无菌地从浸泡溶液中取出, 沥干 15 s, 然后放置于无菌保鲜膜上, 在 22 °C 风干 30 min (以便细菌附着), 再进行 X 射线处理。

### 1.3.4 辐射器的描述和 X 射线的产生

使用 X-RAD 320 (22 °C, 55%~60% 的相对湿度) 产生特定的辐射剂量 (0.1、0.2、0.3、0.4、0.6、0.8 和 1.0 kGy)。X-RAD 320 是生物学 X 射线辐照仪。主机尺寸 (宽×深×高): 95 cm×105 cm×195 cm, 辐照室尺寸 (宽×深×高): 75 cm×86 cm×102 cm; 球管类型: 金属陶瓷, 固定阳极, 油冷却; X 射线电压: 5~320 kV; 电流: 45 mA。而此次辐照参数设为: 320 kV, 12.5 mA, 剂量率: 7.67 Gy/min。

### 1.3.5 用 X 射线处理纯培养和接种冷鲜猪肉

纯培养鸡尾酒菌液: 采用 1.3.3 制备的鸡尾酒菌悬液, 每管含有 1.0 mL 大肠杆菌或单核细胞增生李斯特氏菌鸡尾酒混合液。其中三管用于确定菌液 (对照) 的初始数量。将另外的离心管放入辐照室中并用 0.1、0.2、0.3、0.4 和 0.6 kGy X 射线辐照处理。

接种后的冷鲜猪肉: 在暴露于 X 射线之前, 使用三份 (对照) 来确定冷鲜猪肉接种的菌量。将另外的接种冷鲜猪肉放入辐照室内, 用与上述相同剂量处理。

### 1.3.6 微生物计数

纯培养鸡尾酒菌液: 在每个辐照剂量下, 从暴露室中取出三管纯培养物。用 0.1% PW 制备系列 10 倍

稀释液。采用倾注法计数菌落数, 将 0.1 mL 稀释液加入 TSA 琼脂平板上, 并在 37 °C 下孵育 18~24 h (以复苏受损细胞)。对菌落进行计数并将结果表示为 log CFU/mL。

接种后的冷鲜猪肉: 在每个辐照剂量下, 从暴露室中取出三份新鲜猪肉样品。将 25.0 g 样品置于无菌均质袋中, 然后加入 225 mL 无菌 0.1wt% PW。使用 HX-4 拍打式无菌均质器将样品均质化 1 min。用 0.1% PW 制备系列 10 倍稀释液。使用倾注法对细菌菌落进行计数。冷鲜猪肉表面存活的细菌种群使用非选择性培养基 (TSA) 培养 6 h, 并为每种细菌覆盖对应的选择性培养基: 伊红美蓝琼脂培养基适用于大肠杆菌, PALCAM 琼脂培养基适用于单核细胞增生李斯特氏菌 (使用非选择性培养基叠加选择性培养基是因为选择性培养基不能支持受损细菌的生长, 因此它在用 X 射线处理后, 使用非选择性培养基 (TSA) 培养 6 h 来复活受损细胞。此外, 使用选择性培养基对于抑制冷鲜猪肉背景微生物群落的生长很重要) [12,20]。对菌落进行计数并将结果表示为 log CFU/g。

### 1.3.7 X 射线对鲜猪肉菌落总数的影响

未接种的新鲜猪肉暴露于 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 kGy 的 X 射线剂量中。根据食品安全国家标准《食品微生物学检验菌落总数测定》(GB 4789.2-2016), 对 4 °C 贮藏期间冷鲜猪肉中微生物菌落总数进行测定, 结果以 log CFU/g 表示。

### 1.3.8 X 射线对鲜猪肉品质的影响

#### 1.3.8.1 感官评定

根据 Li 等<sup>[32,33]</sup>描述的方法并略作修改, 对未接种辐照冷鲜猪肉在 4 °C 储藏期间的感官品质进行评分, 进而判定冷鲜猪肉的新鲜程度。感官品质包括质地、弹性、气味、外观四个方面。感官品质评定小组由 5 名成员组成, 该 5 名成员均为食品专业研究生, 参加过食品感官评定培训, 对食品感官品质分析具有一定的基础知识。评定小组根据冷鲜猪肉呈现的感官状态, 结合感官评分标准 (表 1) 进行打分。评分范围为 5 分~1 分 (5 分=新鲜, 4 分=次新鲜, 3 分=非新鲜, 2 分=腐败, 1 分=完全腐败)。

表 1 4 °C 贮藏期间冷鲜猪肉感官评分标准

Table 1 The standard of sensory analysis for refrigerated pork during storage at 4°C

分数标准	质地	粘度	气味	外观
5	紧致	表皮舒展, 无粘液	猪肉固有的香味, 非常适宜	富有光泽, 且色泽均匀, 红色
4	有弹性	表皮轻微收缩, 滑腻	适宜, 无异味	光泽度下降, 暗红色
3	略有弹性	表皮轻微收缩, 轻微粘手	轻微异味	略有光泽
2	柔软	表皮收缩, 粘手	异味较明显	有点暗沉

1 非常软 表皮收缩, 非常粘手 不被接受 暗沉

1.3.8.2 pH 值

根据 Li 等<sup>[32]</sup>的描述和食品安全国家标准《食品 pH 值的测定》(GB 5009.237-2016), 将 1.3.7 得到的均质液取 10 mL 转移到烧杯中, 4 °C 浸渍 30 min 后用酸度计进行 pH 测定, 平行测定三次。

1.3.8.3 挥发性盐基氮 (TVB-N) 的测定

根据食品安全国家标准《食品中挥发性盐基氮的测定》(GB 5009.228-2016), 采用凯氏定氮仪法测定 4 °C 贮藏期间冷鲜猪肉的 TVB-N, 结果用 mg/100 g 表示。

1.3.8.4 丙二醛的 (TBA) 的测定

根据食品安全国家标准《食品中丙二醛的测定》(GB 5009.181-2016), 对 4 °C 贮藏期间冷鲜猪肉中 TBA 进行测定。TBA 值以每千克样品中所含丙二醛的 (MDA) 质量表示, 单位为 mg/kg。

1.3.9 统计分析

所有实验重复 3 次。合并数据并确定平均值和标准偏差, 并使用 IBM SPSS Statistics 25 比较样品间的平均值进行差异性分析, 差异性分析采用的是单向 ANOVA 分析, 当  $p < 0.05$  时被认为是差异显著。用 GraphPad Prism 8.0.1 进行数据作图。

2 结果与分析

2.1 辐照处理对纯培养病原菌的影响

由图 1 可知, 不同剂量 (0.1、0.2、0.3、0.4 和 0.6 kGy) X 射线辐照后纯培养大肠杆菌和单核细胞增生李斯特氏菌的菌落数较对照组显著 ( $p < 0.05$ ) 下降,

且辐照剂量越高菌落数减少越多。两种病原菌的初始菌落数分别为 7.59、7.42 log CFU/g。0.4 kGy 辐照剂量处理时, 两种病原菌的致死率均可达到 99%以上。0.6 kGy 辐照剂量处理时, 大肠杆菌和单核细胞增生李斯特氏菌的菌落数分别减少了 3.40、3.18 log CFU/g。

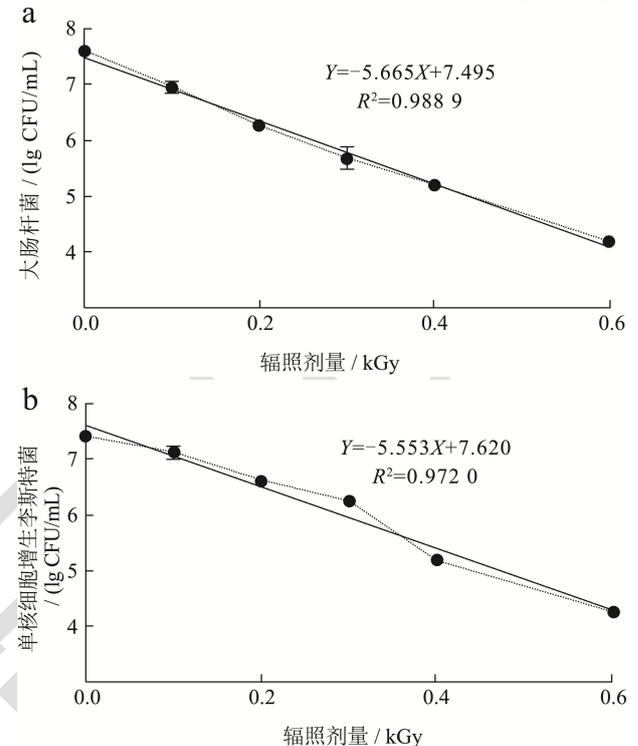


图 1 不同 x 射线剂量对纯培养大肠杆菌 (a)、单核细胞增生李斯特氏菌 (b) 杀灭效果

Fig.1 The inactivation effect of different x-ray doses on pure culture *Escherichia coli* (a), *Listeria monocytogenes* (b)

表 2 不同剂量辐照病原菌存活率与致死率

Table 2 Survival rate and lethality rate of pathogens after different doses of irradiation

供试菌株	线性方程	R <sup>2</sup>	剂量/kGy	纯培养致死率/%	人工接种致死率/%	纯培养 D <sub>10</sub> (kGy)
大肠杆菌	Y=-5.67X+7.50	0.99	0.1	75.92	72.95	
			0.2	95.26	93.07	
			0.3	98.66	94.03	0.177
			0.4	99.59	95.91	
			0.6	99.96	99.45	
单核细胞增生李斯特氏菌	Y=-5.55X+7.62	0.97	0.1	48.76	14.42	
			0.2	84.45	47.91	
			0.3	93.38	62.70	0.180
			0.4	99.43	81.93	
			0.6	99.94	99.07	

将病原菌存活率与辐照剂量进行相关性分析, 得到各供试菌株的线性方程、R<sup>2</sup> 值及 D<sub>10</sub> 值 (表 2)。发现线性模型能准确地拟合两种病原菌的灭活效果, 说明供试菌株存活率与辐照剂量呈一次线性回归关系。

基于线性方程, 得到大肠杆菌和单核细胞增生李斯特氏菌的辐射 D<sub>10</sub> 值分别为 0.177 和 0.180 kGy。且当剂量较低时, 大肠杆菌比单核细胞增生李斯特氏菌对辐照更敏感, 菌落总数下降更多。现有研究表明, 革兰

氏阳性菌和革兰氏阴性菌的细胞膜结构差异是造成这种结果的可能因素之一,革兰氏阴性菌(大肠杆菌)细胞外膜中具有更高的脂质含量<sup>[34]</sup>,更易被灭活,这与 Zhang 等<sup>[35]</sup>的研究结果一致。但当剂量变大时 X 射线对两种病原菌的杀菌效果差异减小。

## 2.2 辐照处理对人工接种病原菌的影响

将两种病原菌接种在冷鲜猪肉上,用不同(0.1、0.2、0.3、0.4 和 0.6 kGy)剂量的 X 射线辐照处理。由图 2 可知大肠杆菌和单核细胞增生李斯特氏菌的菌落数都随着辐照剂量的升高而下降,当辐照剂量达 0.6 kGy 时,接种在冷鲜猪肉上的两种病原菌菌落数分别下降了 2.26、2.03 log CFU/g。与相关研究比较发现, X 射线辐照处理比常见化学杀菌剂(二氧化氯)更多地减少了选定病原菌。Kim 等<sup>[36]</sup>发现二氧化氯使虾的细菌负荷减少了 0.5~1.0 log CFU。Su 等<sup>[37]</sup>研究酸化亚氯酸钠对三文鱼中单增李斯特氏菌的数量减少 0.5 log。Ozer 等<sup>[38]</sup>研究了酸性电解水对鲑鱼鱼片上的单核细胞增生李斯特氏菌或大肠杆菌 O157:H7 菌落数减少 0.40~1.5 log。

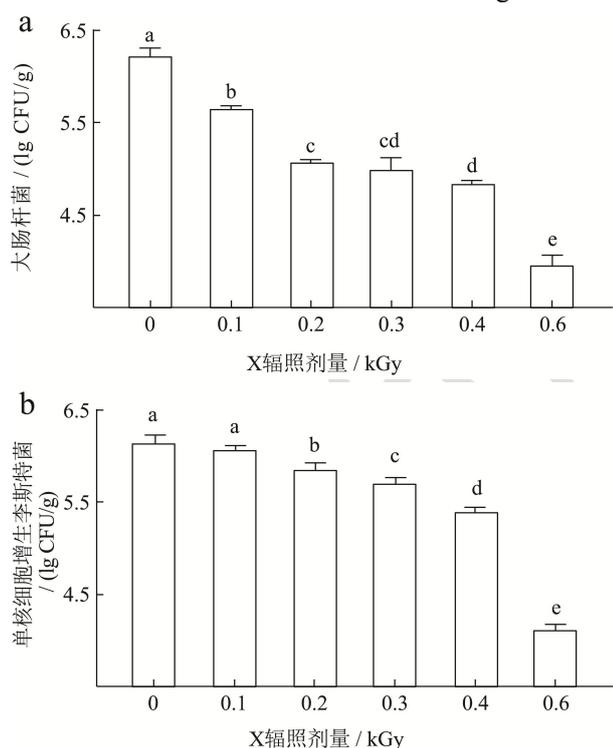


图 2 x 射线剂量对冷鲜猪肉接种大肠杆菌 (a)、单核细胞增生李斯特氏菌 (b) 的杀灭效果

Fig.2 The inactivation effect of x-ray dose on fresh pork inoculation *Escherichia coli* (a), *Listeria monocytogenes* (b)

由图 2 可知,当辐照剂量较低时,大肠杆菌的灭活效果比单核细胞增生李斯特氏菌好,0.1.0 kGy 能将大肠杆菌菌落数减少 0.57 log 值;而单核细胞增生李斯特氏菌仅减少 0.07 log 值,与对照无显著性差异

( $p > 0.05$ )。说明冷鲜猪肉中的单核细胞增生李斯特氏菌需要较高的辐照剂量处理才能使菌落数减少显著。同时还发现接种在冷鲜猪肉上的病原菌对于 X 射线的敏感性低于纯培养的病原菌。这与先前相关研究结果一致, Mahmoud 等<sup>[12]</sup>研究表明,对纯培养、半壳牡蛎和全壳牡蛎分别使用 0.75、1.0、3.0 kGy X 射线,创伤弧菌的减少量大于 6 log。Mahmoud 等<sup>[39]</sup>研究表明相同剂量对于鸡蛋壳和鸡胸肉上病原菌的杀灭效果不一样。说明 X 射线对于病原菌的杀灭效果不仅受不同菌种的影响,还受病原菌附着介质的影响。推测冷鲜猪肉的初始微生物状况、水分含量、肉品温度影响了 X 射线辐照对特定病原菌的杀灭效果<sup>[40]</sup>,因此对食品中病原菌的杀灭还需增加辐照剂量。

## 2.3 辐照处理对冷鲜猪肉菌落总数的影响

菌落总数是判定冷鲜猪肉变质与否的重要指标,其数量的增加会造成肉的腐败变质。图 3a 显示了冷鲜猪肉经不同剂量(0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 kGy) X 射线辐照处理,并在贮藏期间菌落总数变化。辐照处理显著( $p < 0.05$ )降低了冷鲜猪肉的菌落总数,且辐照剂量越大,杀菌效果越好。

通常,冷鲜猪肉在 4 °C 冰箱里放置 4~6 d<sup>[41,42]</sup>时菌落总数超过《鲜、冻禽产品》国家标准卫生要求  $1 \times 10^6$  CFU/g<sup>[43]</sup>,无法食用。由图 3a 可知,本实验中对对照组样品在第 4 天超过限值 6 log CFU/g。0.2 kGy 组样品在第 4 天接近限值;其它各组分别在第 5 天(0.4 kGy)、第 7 天(0.6 kGy)、第 9 天(0.8、1.0 kGy)超过限值。说明当辐照剂量超过 0.4 kGy 后冷鲜猪肉的货架期随着辐照剂量的升高而延长。且当辐照剂量为 1.0 kGy 时,货架期延长了约 4~5 d。

## 2.4 辐照处理对冷鲜猪肉感官评分的影响

感官品质是消费者对肉类新鲜度评价的直接指标。由图 4 可知各组样品在 4 °C 有氧贮藏条件下感官品质的变化情况:由图 4 可知,在贮藏期间,所有样品的色泽、气味、质地和组织弹性得分呈现稳定下降的趋势,在贮藏前期(前 4 d)各组样品间的感官评分没有显著性差异( $p > 0.05$ )。但从第 5 天起对对照组评分下降变快,评分出现显著差异。当感官评分为 3~3.5 时,冷鲜猪肉颜色由红色变为暗红色,出现轻微的异味,表面有轻微粘液产生,弹性减小,逐渐开始变质。当评分小于 3 分时,冷鲜猪肉的颜色开始呈现暗灰色,有明显的臭味产生,表面粘手,失去弹性,冷鲜猪肉已处于腐败状态,失去食用价值。由图 4 可知,当辐照剂量达 1.0 kGy,冷鲜猪肉的感官无显著差异,但是辐照会延缓冷鲜猪肉感官

品质的劣化速度,从而延长冷鲜猪肉的货架期,这与冷鲜猪肉菌落总数的变化相关联。

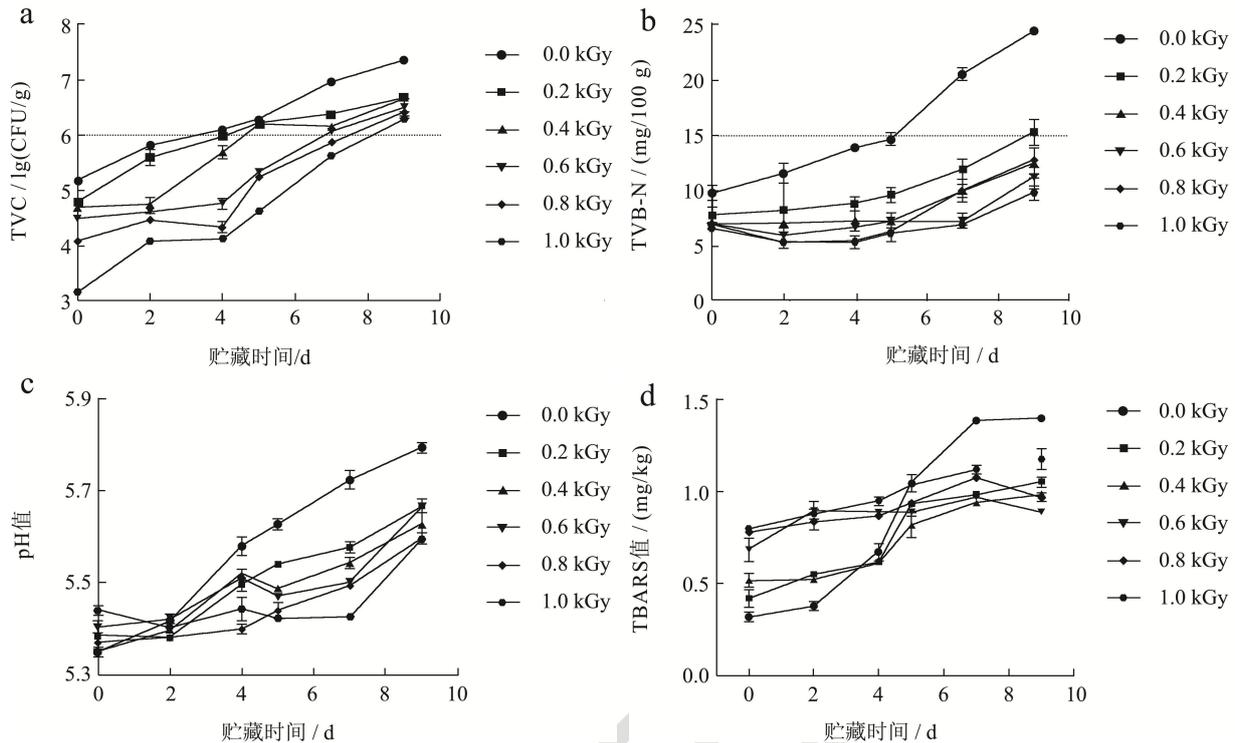


图3 不同剂量X射线处理冷鲜猪肉在冷藏过程中 TVC、TVB-N、pH 和 TBA 的变化

Fig.3 Changes in TVC, TVB-N, pH and TBA of fresh pork treated with different doses of X-ray during cold storage

注: a: TVC 变化; b: TVB-N 变化; c: pH 值变化; d: TBA 值变化。从平行数据之间的标准偏差得出的误差线 (n=3)。

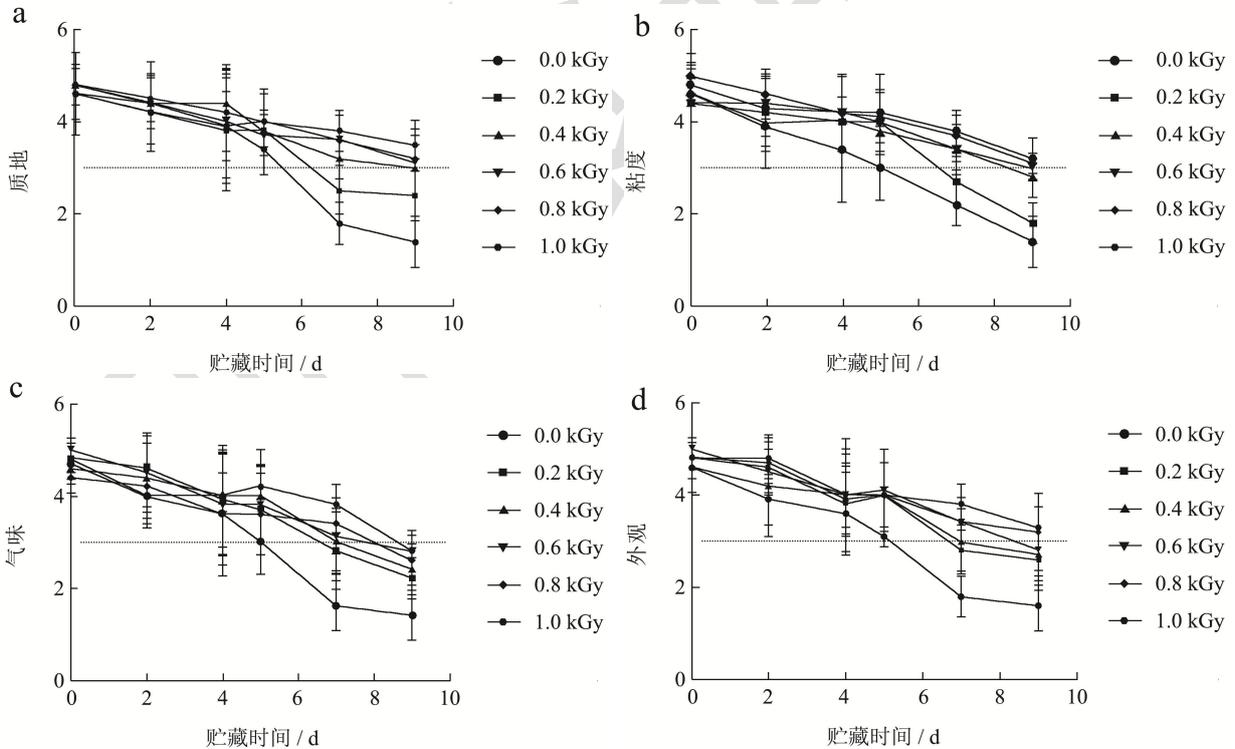


图4 不同剂量X射线处理冷鲜猪肉在冷藏过程中感官评分的变化

Fig.4 Changes in sensory scores of fresh pork treated with different doses of X-ray during storage

注: a: 质地变化; b: 粘度变化; c: 气味变化; d: 外观变化。从平行数据之间的标准偏差得出的误差线 (n=3)。

## 2.5 辐照处理对冷鲜猪肉 TVB-N 的影响

TVB-N 是检测肉类品质的直接指标,是国标中规定用于评价肉质鲜度的唯一理化指标,其数值会随着

肉类腐败程度的加深而增加,因此常用于检测肉质的新鲜程度<sup>[44]</sup>,4℃贮藏期间各组冷鲜猪肉样品 TVB-N 的变化情况如图 3b 所示。所有冷鲜猪肉的 TVB-N 随着贮藏时间的延长而呈上升趋势。且对照组冷鲜猪肉上升最快,在第 5 天接近我国食品安全标准规定 TVB-N 限值 15 mg/100 g<sup>[45]</sup>。而到第 9 天,辐照组只有 0.2 kGy 处理的冷鲜猪肉刚好超过限值,说明辐照能显著减小 TVB-N 的增长。这是因为对照组冷鲜猪肉微生物繁殖更快,在此过程中利用酶分解蛋白质,从而产生氨以及胺类碱性含氮物质,和带有异味的含硫化合物,使 TVB-N 值变大<sup>[42,46]</sup>。研究表明,TVB-N 的形成主要是由于特定氨基酸的酶促脱羧,这与假单胞菌和肠杆菌科有关<sup>[47]</sup>,肠杆菌科将氨基酸分解为恶臭的二胺和硫化物<sup>[48]</sup>,而假单胞菌色氨酸无氧代谢产生 3-甲基吲哚会在肉中产生难闻的气味<sup>[49]</sup>。此外,导致腐臭气味的己醛主要与热杀索丝菌相关<sup>[50]</sup>。这也与各组样品菌落总数和感官评分的变化相对应。

## 2.6 不同剂量 X 射线处理对冷鲜猪肉 pH 的影响

pH 值是食品保鲜中一项重要指标,受肉质本身和微生物影响发生一定的变化,从而反映冷鲜肉的品质<sup>[51]</sup>。4℃贮藏期间各组冷鲜猪肉 pH 值的变化情况如图 3c 所示。对照组样品在贮藏期间 pH 值呈稳定上升;而辐照处理冷鲜猪肉在贮藏过程中 pH 值增长缓慢,在第 5 天有部分波动。除 1.0 kGy 处理的冷鲜猪肉外,其它各辐照处理组冷鲜猪肉的 pH 值从第 4 天起均处于平稳的增长。这与先前的研究结果一致,姜秀杰等<sup>[52]</sup>利用 5 kGy  $\gamma$ -射线辐照调理鸡肉发现,随着贮藏时间延长,pH 值总体呈缓慢上升趋势。通常肉的 pH 值受到多种因素的影响,如三磷酸腺苷(ATP)的分解、肌糖元的分解、肌肉细胞的呼吸作用、肌肉蛋白质的降解以及产酸性微生物的生长等<sup>[2]</sup>。对照组与辐照组冷鲜猪肉储藏期 pH 值的变化,主要受冷鲜猪肉微生物繁殖及相关酶对蛋白质的分解作用影响<sup>[2]</sup>。

## 2.7 辐照处理对冷鲜猪肉 TBA 的影响

TBA 是用于评价脂肪氧化程度最广泛指标之一<sup>[53]</sup>。脂肪氧化是制约肉及其制品内在品质、贮藏保鲜和货架期的重要因素。由图 3d 可知各组冷鲜猪肉在 4℃贮藏时脂质氧化情况,第 0 天对照组冷鲜猪肉的 TBA 值最低,且随辐照剂量的增加 TBA 值也增加。但随着贮藏时间的延长,第 9 天时对照组冷鲜猪肉的 TBA 值最高,0.6 kGy 辐照组的 TBA 值最低。说明辐照剂量不是越大越好。贮藏第 0 天,对照冷鲜猪肉的 TBA 值除了与 0.2 kGy 辐照组无显著性差异( $p=0.09$ )外,其

它辐照组的 TBA 值都显著增加( $p<0.05$ )。说明辐照剂量高于 0.2 kGy 时,辐照会加速冷鲜猪肉脂肪、蛋白质等的氧化,且辐照剂量越大,影响越大<sup>[53]</sup>。但随着贮藏时间的延长,对照组冷鲜猪肉的 TBA 上升更快,这可能是对照组冷鲜猪肉存活的微生物含量更高,诱导脂质氧化<sup>[31]</sup>。说明当辐照剂量小于 1.0 kGy 时,贮藏条件或氧气对冷鲜猪肉脂质氧化的影响比辐照更重要,这与 Ahn 等<sup>[54]</sup>的研究结果相一致。随着贮藏时间的延长,到贮藏后期各组冷鲜猪肉的 TBA 值趋于平缓,甚至出现下降。这可能归因于 TBA 反应产物与其他组织成分的相互作用或肌肉内源抗氧化代谢物的消耗<sup>[31]</sup>。或是随着贮藏的进行,挥发性氧化产物逐渐减少,致各组冷鲜猪肉 TBA 值在达到最大值后呈下降趋势<sup>[55]</sup>。

## 3 结论

相较于对照组冷鲜猪肉,X 射线辐照能使冷鲜猪肉中的微生物菌落数显著减少,蛋白质和脂肪的氧化分解和感官品质的劣变延缓,使冷鲜猪肉的营养价值和感官在符合国家食品安全标准规定,延长冷鲜肉货架期,0.4 kGy 辐照剂量能延长冷鲜猪肉的货架期约 1 d,而 1.0 kGy 辐照剂量能使冷鲜猪肉的货架期延长 4~5 d。说明 X 射线辐照适用于冷鲜猪肉的保鲜。

本文通过研究 X 射线辐照对于冷鲜猪肉病原菌和腐败菌杀灭效果以及 X 射线辐照对冷鲜猪肉品质、感官和货架期影响,为 X 射线作为一种新技术在食品行业的广泛应用,特别是生鲜肉行业提供理论基础。

## 参考文献

- [1] 顾可飞.电子束辐照对冷藏猪脊肉品质特性的影响[J].现代食品科技,2013,29(3):498-500
- [2] 程述震,刘伟,冯晓琳,等.电子束辐照对冷鲜猪肉品质及蛋白特性的影响[J].食品与发酵工业,2017,43(3):151-156
- [3] 付伟,阎红玉,赵宇恒,等.多地生猪调运受阻冷鲜肉渐成发展趋势[J].中国食品,2019,5:77-79
- [4] 李新,林若泰,熊光权,等.冷鲜肉辐照异味和脂肪氧化控制技术的研究[J].核农学报,2010,24(5):1001-1005
- [5] 石磊,王文燕,闫鹤.猪肉中单核细胞增生李斯特菌的分离与耐药性研究[J].现代食品科技,2013,29(12):2826-2829
- [6] 陶然,王昕,苏志伟.食品中大肠杆菌快速检测方法的研究综述[J].食品安全导刊,2017,24:72
- [7] 朱奇,郑丹桂,陈玉翡,等.食源性致病菌单核细胞增生李斯特菌检测能力验证结果分析[J].检验医学与临床,2021,18(17):2619-2621
- [8] Arslan S, F Özdemir. Prevalence and antimicrobial resistance of *Listeria* spp. in homemade white cheese [J]. Food Control,

- 2008, 19(4): 360-363
- [9] 雷英杰,陈尚戊,敬榭莹,等.电子束辐照处理对生鲜猪肉的保鲜作用[J].现代食品科技,2021,37(10):136-144
- [10] Mahmoud B S M, Nannapaneni R, Chang S, et al. Improving the safety and quality of raw tuna fillets by X-ray irradiation [J]. Food Control, 2016, 60: 569-574
- [11] Mahmoud B S M, Burrage D D. Inactivation of *Vibrio parahaemolyticus* in pure culture, whole live and half shell oysters (*Crassostrea virginica*) by X-ray [J]. Letters in Applied Microbiology, 2009, 48(5): 572-578
- [12] Mahmoud B S M. Reduction of *Vibrio vulnificus* in pure culture, half shell and whole shell oysters (*Crassostrea virginica*) by X-ray [J]. International Journal of Food Microbiology, 2009, 130(2): 135-139
- [13] Mahmoud B S M. The effects of X-ray radiation on *Escherichia coli* O157:H7, *Listeria monocytogenes*, *Salmonella enterica* and *Shigella flexneri* inoculated on whole Roma tomatoes [J]. Food Microbiology, 2010, 27(8): 1057-1063
- [14] Cho G, Ha J. Application of X-ray for inactivation of foodborne pathogens in ready-to-eat sliced ham and mechanism of the bactericidal action [J]. Food Control, 2019, 96: 343-350
- [15] Administration F A D. Ionizing radiation for the treatment of food [Z]. 2017
- [16] Mooskian S R, Jeong S, Marks B P, et al. X-Ray irradiation as a microbial intervention strategy for food [J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2012, 3(1): 493-510
- [17] 尚颀斌.电子束和 $\gamma$ -射线辐照对冷鲜肉品质影响的差异及作用机制研究[D].北京:中国农业科学院,2013
- [18] Mahmoud B S M. Inactivation effect of X-ray treatments on *Cronobacter* species (*Enterobacter sakazakii*) in tryptic soy broth, skim milk, low-fat milk and whole-fat milk [J]. Letters in Applied Microbiology, 2009, 49(5): 562-567
- [19] Mahmoud B S M. Effects of X-ray treatments on pathogenic bacteria, inherent microflora, color, and firmness on whole cantaloupe [J]. International Journal of Food Microbiology, 2012, 156(3): 296-300
- [20] Mahmoud B S M, Nannapaneni R, Chang S, et al. Effect of X-ray treatments on *Escherichia coli* O157:H7, *Listeria monocytogenes*, *Shigella flexneri*, *Salmonella enterica* and inherent microbiota on whole mangoes [J]. Letters in Applied Microbiology, 2016, 62(2): 138-144
- [21] Mahmoud B S M. Effect of X-Ray treatments on pathogenic bacteria, inherent microbiota, color, and texture on parsley leaves [J]. Foodborne Pathogens and Disease, 2012, 9(10): 922-927
- [22] Mahmoud B S M, Bachman G, Linton R H. Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, *Listeria monocytogenes*, *Salmonella enterica* and *Shigella flexneri* on spinach leaves by X-ray [J]. Food Microbiology, 2010, 27(1): 24-28
- [23] Jeong S, Marks B P, Ryser ET, et al. Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 on lettuce, using low-energy X-ray irradiation [J]. Journal of Food Protection, 2010, 73(3): 547-551
- [24] Mahmoud B S M. Effects of X-ray radiation on *Escherichia coli* O157:H7, *Listeria monocytogenes*, *Salmonella enterica* and *Shigella flexneri* inoculated on shredded iceberg lettuce [J]. Food Microbiology, 2010, 27(1): 109-114
- [25] Sanghyup J, Bradley P M, Elliot T R, et al. The effect of X-ray irradiation on Salmonella inactivation and sensory quality of almonds and walnuts as a function of water activity [J]. International Journal of Food Microbiology, 2012, 153(3):365-371
- [26] Mahmoud B S M. Control of *Listeria monocytogenes* and spoilage bacteria on smoked salmon during storage at 5 °C after X-ray irradiation [J]. Food Microbiology, 2012, 32(2): 317-320
- [27] Mahmoud B S, R Coker, Y C Su, Reduction in *Listeria monocytogenes* and spoilage bacteria on smoked catfish using X-ray treatments [J]. Lett Appl Microbiol, 2012, 54(6): 524-529
- [28] Y Su C, Coker R, Su Y C. Reduction in *Listeria monocytogenes* and spoilage bacteria on smoked catfish using X-ray treatments [J]. Letters in Applied Microbiology, 2012, 54(6): 524-529
- [29] Mahmoud B S M. Effect of X-ray treatments on inoculated *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella enterica*, *Shigella flexneri* and *Vibrio parahaemolyticus* in ready-to-eat shrimp [J]. Food Microbiology, 2009, 26(8): 860-864
- [30] Robertson C B, Andrews L S, Marshall D L, et al. Effect of x-ray irradiation on reducing the risk of *Listeriosis* in ready-to-eat vacuum-packaged smoked mullet [J]. Journal of Food Protection, 2006, 69(7): 1561-1564
- [31] Li C, He L, Jin G, et al. Effect of different irradiation dose treatment on the lipid oxidation, instrumental color and volatiles of fresh pork and their changes during storage [J]. Meat Science, 2017, 128: 68-76
- [32] Li N, Zhang Y, Wu Q, et al. High-throughput sequencing

- analysis of bacterial community composition and quality characteristics in refrigerated pork during storage [J]. Food Microbiology, 2019, 83: 86-94
- [33] Li Q, Zhang L, Luo Y. Changes in microbial communities and quality attributes of white muscle and dark muscle from common carp (*Cyprinus carpio*) during chilled and freeze-chilled storage [J]. Food Microbiology, 2018, 73: 237-244
- [34] Bourré L, Giuntini F, Eggleston I M, et al. Effective photoinactivation of Gram-positive and Gram-negative bacterial strains using an *HIV-1* tat peptide-porphyrin conjugate [J]. Photochemical & Photobiological Sciences: Official Journal of the European Photochemistry Association and the European Society for Photobiology, 2010, 9(12): 1613-1620
- [35] Zhang H, Seck H L, Zhou W. Inactivation of *Salmonella typhimurium*, *Escherichia coli* O157:H7, *Staphylococcus aureus*, and *Listeria monocytogenes* in cardamom using 150 KeV low-energy X-ray [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 67: 102556
- [36] Kim J M, Huang T S, Marshall M R, et al. Chlorine dioxide treatment of seafoods to reduce bacterial loads [J]. Journal of Food Science, 1999, 64(6): 1089-1093
- [37] Su Y, Morrissey M T. Reducing levels of *Listeria monocytogenes* contamination on raw salmon with acidified sodium chlorite [J]. Journal of Food Protection, 2003, 66(5): 12747690
- [38] Nil P O, Ali D. Electrolyzed oxidizing water treatment for decontamination of raw salmon inoculated with *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* Scott A and response surface modeling [J]. Journal of Food Engineering, 2004, 72(3): 234-241
- [39] Mahmoud B S M, Chang S, Wu Y, et al. Effect of X-ray treatments on *Salmonella enterica* and spoilage bacteria on skin-on chicken breast fillets and shell eggs [J]. Food Control, 2015, 57: 110-114
- [40] 洪奇华,王梁燕,孙志明,等.辐照技术在肉制品加工保鲜中的应用[J].核农学报,2021,35(3):667-673
- [41] 李宁.冷鲜猪肉中微生物多样性和优势腐败菌分子检测技术研究[D].无锡:江南大学,2019
- [42] 肖欢,韩燕,翟建青,等.<sup>60</sup>Co- $\gamma$ 射线和电子束辐照对冷鲜鸡保鲜效果的异同性研究[J].核农学报,2018,32(7):1358-1367
- [43] GB 16869-2005,食品安全国家标准鲜、冻禽产品[S]
- [44] 晁晴晴,周贺彩,曹立民,等.HS/SPME GC/MS 法研究大菱鲆和南美白对虾冷藏中的典型 TVB N 组分变化规律[J].食品工业科技,2018,39(20):249-255
- [45] GB 2707-2016,食品安全国家标准鲜(冻)畜、禽产品[S]
- [46] 程述震,张春晖,张洁,等.电子束辐照对充氮包装冷鲜牛肉品质的影响[J].食品科学,2016,37(18):230-235
- [47] Christiana C B, Apostolos P, Michael G K, et al. Possible role of volatile amines as quality-indicating metabolites in modified atmosphere-packaged chicken fillets: Correlation with microbiological and sensory attributes [J]. Food Chemistry, 2007, 104(4)
- [48] J S. Managing microbial spoilage in the meat industry [J]. Food Spoilage Microorganisms, 2006: 213-286
- [49] Danilo E, Annalisa C, Antonella N, et al. Different molecular types of *Pseudomonas fragi* have the same overall behaviour as meat spoilers [J]. International Journal of Food Microbiology, 2010, 142(1): 120-131
- [50] Ramirez R, Cava R. Volatile profiles of dry-cured meat products from three different Iberian x Duroc genotypes [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(5): 1923-1931
- [51] 吴艺鸣.冷链运输中不同包装方式对生鲜猪肉品质的比较分析[J].现代食品科技,2020,36(3):127-132
- [52] 姜秀杰,张德权,张东杰,等.包装形式对辐照调理鸡肉理化特性的影响[J].核农学报,2011,25(2):276-280
- [53] 程述震,王宁,王晓拓,等.电子束和 $\gamma$ 射线辐照对冷鲜猪肉保鲜效果的研究[J].核农学报,2016,30(5):897-903
- [54] D U Ahn CJMD. Quality characteristics of pork patties irradiated and stored in different packaging and storage conditions [J]. Meat Science, 2000
- [55] 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