

## 辐照杀菌对低盐切片腊肉风味及理化性质的影响

黄业传，孙梦

### Effect of Irradiation Sterilization on Flavor and Physicochemical Properties of Low-salt Sliced Bacon

HUANG Yechuan and SUN Meng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023050239>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 茶多酚微胶囊对腊肉理化性质及挥发性风味物质的影响

Effect of Tea Polyphenol Microcapsules on Physicochemical Properties and Volatile Flavor Substances of Bacon

食品工业科技. 2020, 41(11): 51-59 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.11.008>

#### 杀菌方式对低盐腌渍黄瓜的品质影响

Effect of Sterilization Methods on the Quality of Low-salt Pickled Cucumber

食品工业科技. 2020, 41(12): 14-20 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.12.003>

#### 不同冷却终压对低盐腊肉真空冷却效果的影响及模拟研究

Influence of Different Final Cooling Pressure on Vacuum Cooling Performances of Low-salt Bacon and Simulation Study

食品工业科技. 2020, 41(11): 240-244 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.11.037>

#### 冰温真空干燥压力对猕猴桃切片干燥品质的影响

Effects of ice-temperature vacuum drying pressure on quality of kiwifruit slices

食品工业科技. 2017(24): 191-193 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.24.037>

#### 风味蛋白酶对贵州腊肉蛋白质水解度、抗氧化能力和感官品质的影响

Effects of Flavourzymes on Protein Hydrolysis, Antioxidant Capacity and Sensory Quality of Guizhou Bacon

食品工业科技. 2019, 40(7): 88-93 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.07.016>

#### 不同杀菌方式对贮藏过程中猕猴桃低糖复合果酱品质的影响

Effect of sterilization methods on quality of kiwi low sugar compound jam during storage

食品工业科技. 2018, 39(5): 53-58,64 <https://doi.org/>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

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. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050239

HUANG Yechuan, SUN Meng. 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. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050239

· 研究与探讨 ·

# 辐照杀菌对低盐切片腊肉风味及理化性质的影响

黄业传<sup>1,2,\*</sup>,孙梦<sup>2,+</sup>

(1.荆楚理工学院生物工程学院,湖北荆门 448000;

2.西南科技大学生命科学与工程学院,四川绵阳 621000)

**摘要:**为探究不同剂量的辐照杀菌对低盐切片腊肉品质的影响,常温下采用高能电子加速器对样品进行辐照处理,剂量分别设定为2、3、4 kGy,以未杀菌组为对照,于4℃储藏的第0、60、120、180 d测定其菌落总数、风味物质及理化指标。结果表明,相同条件下随辐照剂量的增加,低盐切片腊肉的亚硝酸盐含量显著降低( $P<0.05$ ), $a^*$ 值和过氧化值(POV)升高。第180 d时,辐照组的水分含量和 $b^*$ 值显著高于对照组( $P<0.05$ ), $L^*$ 和 $a^*$ 值与对照组差异不显著( $P>0.05$ ),POV值显著低于对照组( $P<0.05$ )。储藏阶段,辐照组菌落总数增长缓慢,且始终低于对照组。二甲基二硫醚等异味物质含量增高,与对照组的风味差异增大,香味评分降低。气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)和电子鼻分析结果显示,辐照异味随储藏时间的延长而减少,主要风味物质含量占比增加,与对照组的风味差异减小。综合分析可得,2、3 kGy 处理的腊肉样品脂肪氧化程度较低;辐照后与对照组的风味差异较小,异味相对较弱;储藏后的水分含量较高,风味较好。但杀菌效果及质构方面,3 kGy 组略优于2 kGy 组,杀菌效果更强,组织结构评分略高,因此3 kGy 为本实验的最佳辐照剂量。

**关键词:**低盐,切片腊肉,辐照,理化性质,风味品质

中图分类号:TS251.5

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2024)05-0089-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050239

本文网刊:



## Effect of Irradiation Sterilization on Flavor and Physicochemical Properties of Low-salt Sliced Bacon

HUANG Yechuan<sup>1,2,\*</sup>, SUN Meng<sup>2,+</sup>

(1. College of Biological Engineering, Jingchu University of Technology, Jingmen 448000, China;

2. College of Life Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** The effect of irradiation sterilization on the quality of low-salt sliced bacon was investigated by subjecting the samples to high-energy electron gas pedal treatment at 2, 3 and 4 kGy at room temperature. The samples were stored at 4 °C and the unsterilized group was used as the control group. The total number of colonies of the samples, flavor substances and the physicochemical indexes were determined when the storage time was 0, 60, 120 and 180 days, respectively. The results showed that the nitrite content of low-salt sliced bacon decreased significantly ( $P<0.05$ ), the  $a^*$  and peroxide value (POV) values increased with the increase of irradiation dose under the same conditions. At 180 d, the moisture content and  $b^*$  values of the irradiated group were significantly higher than those of the control group ( $P<0.05$ ), the  $L^*$  and  $a^*$  values were not significantly different from those of the control group ( $P>0.05$ ), and the POV values were significantly lower than those of the control group ( $P<0.05$ ). During the storage stage, the total bacterial colony values of the irradiated group increased slowly and were always lower than those of the control group, and the content of unpleasant substances such as dimethyl

收稿日期: 2023-05-22 +并列第一作者

基金项目: 荆门市重点科技计划项目(2022YFZD058); 荆门市引导性科技计划项目(2022YDKY166); 荆楚理工学院技术开发项目(HX20230030)。

作者简介/通信作者\*: 黄业传(1975-),男,博士,教授,研究方向:现代食品加工技术,E-mail: huangyc@jcut.edu.cn。

作者简介: 孙梦(1998-),女,硕士,研究方向:畜禽产品加工,E-mail: 420390880@qq.com。

disulfide increased, and the flavor differences with the control group increased, resulting in a decrease in aroma scores. The experimental results of gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) and electronic nose showed that the irradiated off-flavors decreased with the increase of storage time, the content of major flavor substances increased, and the flavor differences with the control group decreased. Overall, 2, 3 kGy-treated bacon samples had lower fat oxidation and the flavor difference between irradiated and control was smaller and the off-flavor was relatively weak. The moisture content was higher and the flavor was better after storage. However, in terms of bactericidal effect and texture, the 3 kGy group was slightly better than the 2 kGy group, with stronger bactericidal effect and slightly higher tissue structure score. Therefore the optimal irradiation was determined to be 3 kGy in this study.

**Key words:** low salt; sliced bacon; irradiation; physicochemical properties; flavor quality

腊肉作为中国传统肉制品之一,历史悠久、种类丰富、极具地方特色。传统腊肉大多是“家庭作坊式”生产,品质和安全极易受环境和人为影响,随着社会的蓬勃发展,工业化标准生产成为大趋势。绿色饮食理念的普及与方便食品、预包装食品的流行,也让腊肉这种高盐、高亚硝酸盐的传统食品受到冲击,向低盐、健康、便捷的生产转变迫在眉睫。与此同时,想要继续保持腊肉保藏期长、易储存的特点,同时改良腊肉的品质,杀菌方式的选择就变得尤为重要。

辐照是一种节能的物理杀菌方法,利用射线穿透能力强的特点,在不打开外包装的情况下杀菌,消除肉制品在生产和制备过程中的交叉感染,且被处理的食品温度变化很小,是一种理想的冷杀菌方法。研究表明辐照能有效杀灭食品中致病和致腐的微生物<sup>[1]</sup>,提高肉类卫生安全,预防食源性疾病。但较高辐照剂量处理食品后,会产生令人难以接受的“辐照味”,不仅与脂肪氧化有关,蛋白质的降解也起了重要作用<sup>[2]</sup>。马丽珍等<sup>[3]</sup>的研究用低剂量( $\leq 2$  kGy)辐照处理冷却猪肉,同时结合真空包装和天然生物保鲜液,有效延缓了其脂肪氧化。王甜等<sup>[4]</sup>采用不同剂量(0~8 kGy)的电子束处理腊肉,发现辐照能有效减少其菌落总数,同时较好地维持腊肉的色泽、质构、蛋白质和脂肪氧化程度。目前国内国外允许使用的食品辐照杀菌剂量很低,所产生的能量均低于食品中可能诱导放射性的能量阈值,因而不会感染放射性物质,并且许多研究也都证实,食用辐照食品是非常安全的。

辐照技术运用于肉制品行业已经多年,众多学者对辐照作用于猪肉<sup>[5]</sup>、羊肉<sup>[6]</sup>、鸡肉<sup>[7]</sup>、蚌肉<sup>[8]</sup>、牛肉<sup>[9]</sup>等都有了不同程度的研究,但应用于腊肉杀菌方面的研究较少,且杀菌剂量、样品种类及杀菌方式的不同都会造成不同程度的影响。故本研究制作低盐高水分的切片腊肉,研究不同剂量的辐照杀菌对其理化性质、风味及微生物情况的影响,探究本实验低盐切片腊肉的最佳辐照剂量。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

新鲜猪里脊肉 四川绵阳市青义镇家多乐超市;食盐 重庆合川盐化工业有限公司;烟熏柏木屑 河北省邢台市清河工业园区木林森木材商城;硼酸

钠、亚铁氰化钾、亚硝酸钠、乙酸锌、对氨基苯磺酸、盐酸蔡乙二胺、三氯乙酸、硫代巴比妥酸、无水硫酸钠、石油醚、三氯甲烷、冰乙酸、碘化钾、可溶性淀粉、硫代硫酸钠 分析纯,成都科龙试剂厂。

OPTO-LAB 脍体肉质颜色测定仪 德国 MATTHAUS;PEN3 电子鼻 德国 Airsense 公司;GCMS-QP2020 型 GC-MS 联用仪 日本岛津公司;75  $\mu\text{m}$  碳分子筛/聚二甲基硅氧烷(carboxeml/polydimethylsiloxane, CARIPDMS)萃取头 美国 Supelco 公司;手动 SPME 进样器 上海安谱科学仪器有限公司;TA XTplus 物性测试仪 英国 SMS 公司;RE-52AA 旋转蒸发仪 上海亚容生化仪器厂;SW-CJ-2F 超净工作台 苏州安泰空气技术有限公司;VF-ProAcc-10/20 高能电子加速器。

### 1.2 实验方法

1.2.1 腊肉加工工艺 a.选用肥瘦比例在 3:7~4:6 之间的冷鲜猪里脊肉,修刮净皮层上的残毛及污垢,清洗干净,沿边修割整齐,分割为长 15 cm、宽 3 cm 左右的长方形块状,于 30 °C 温水中漂洗 2 min,除去肉条表面的浮油、污物,取出后沥干水分<sup>[10]</sup>;

b.食盐添加量为肉重的 2.5%,亚硝酸钠 0.005%,混合后涂抹在肉条的表面。于 4 °C 冰箱中干腌 48 h,每天翻动一次;

c.腌制结束后于烘箱中 50 °C(湿度为 49%)预热 1 h,60 °C(湿度为 62%)继续烘 18 h,烘烤结束后用柏木屑烟熏 8 h(烟熏温度为 40~50 °C),最终成品水分含量控制在 40% 左右;

d.将制作得到的成品腊肉切成长为 8 cm、宽为 3 cm、厚为 3 mm 左右的肉片。

1.2.2 杀菌工艺 将制作好的低盐切片腊肉真空包装后送至四川润祥辐照技术有限公司,采用剂量率约为 260 Gy/s 的高能电子加速器(VF-ProAcc-10/20, 10 MeV, 20 kW),进行辐照处理。辐照设定剂量为 2、3、4 kGy,辐照温度为 25 °C 左右,采用重铬酸银剂量计测定样品的吸收剂量,实际吸收剂量在设定剂量的±5% 左右。以未杀菌处理的样品为对照,于 4 °C 储藏的第 0、60、120、180 d 测定指标。

1.2.3 菌落总数 采用 GB 47892-2022《食品微生物学检验 菌落总数测定》进行测定,结果用 CFU/g 表示。

1.2.4 理化指标测定 按照 GB 5009.3-2016 测定样

品的水分含量; 按照 GB 5009.237-2016 测定样品 pH; 采用 OPTO-LAB 胚体肉质颜色测定仪测定样品色差值; 采用 TA XTplus 物性测试仪测定样品质构参数(质构仪参数设置为测前速度为 2 mm/s, 测中速度 1 mm/s, 测后速度为 1 mm/s, 触发力为 5 g, 压缩距离为 50%, 测定间隔时间为 5 s, 探头型号为 P/0.5, 每个样品测量 3 次); 按照 GB 5009.33-2016 测定样品亚硝酸盐含量; 按照 GB 5009.227-2016 测定样品过氧化值。

**1.2.5 感官评价** 选定十名食品专业研究生作为感官评定人员并进行培训。将四组不同杀菌处理的低盐切片腊肉(真空包装)分别在 100 ℃ 下蒸 15 min。十名感官评定人员对腊肉色泽、组织结构、香味和口味四个方面进行感官评分并求平均值作为综合评分, 具体评分标准参考宋忠祥等<sup>[11]</sup> 的方法。采用雷达图法对评分结果进行分析<sup>[12]</sup>。

**1.2.6 电子鼻分析** 在张云齐等<sup>[10]</sup> 的方法基础上略作修改, 分析采样时间设定为 160 s, 选取测定过程中 140~142 s 的数据用于后续分析。

**1.2.7 风味物质种类及相对含量测定** 取均匀的样品 3.0 g 于 15 mL 顶空瓶中, 以聚四氟乙烯隔垫密封, 采用固相微萃取, 60 ℃ 水浴萃取 40 min。解析条件为 250 ℃, 6 min。气相色谱与质谱参数参考刘芝君等<sup>[13]</sup> 的方法设定, 挥发性风味成分与自带数据库相匹配, 选择匹配度  $\geq 80$  的结果, 采用归一化法对峰面积进行定量。

### 1.3 数据处理

实验取样完全随机, 重复 3 次。采用 Origin 7.0(OriginLab, USA)绘制柱状图、折线图及雷达图, 相关性分析使用 SPSS 25.0, 采用 Duncan 法进行多样本间差异显著性分析, 当  $P < 0.05$  时被认为具有统计学意义。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同辐照剂量对低盐切片腊肉菌落总数的影响

辐照产生的射线能引起 DNA 序列中的碱基发生改变、分子中的化学键断裂, 最终杀灭微生物, 使食品不易腐败变质<sup>[14]</sup>。由表 1 可知, 辐照对低盐切片腊肉的杀菌效果十分显著。辐照组在 60 d 前无任何菌落检出, C、D 组直至 120 d 时菌落总数仍为 0, 辐

表 1 不同辐照剂量处理的低盐切片腊肉在储藏阶段的菌落总数变化

Table 1 Changes in the total number of colonies in low-salt sliced bacon treated with different irradiation doses during storage

储藏时间(d)	微生物总数(CFU/g)			
	A(空白对照组)	B(2 kGy)	C(3 kGy)	D(4 kGy)
0	$2 \times 10^2$	0	0	0
60	$3 \times 10^2$	0	0	0
120	$7.5 \times 10^3$	$2.5 \times 10^2$	0	0
180	$8.75 \times 10^4$	$6.5 \times 10^2$	$3.5 \times 10^2$	$2.5 \times 10^2$

照剂量和杀菌保藏效果呈正相关。第 180 d 时, 辐照组的菌落总数远低于对照组两个对数值, 且低于 GB 14891.1-1997 辐照熟畜禽肉类卫生标准  $5 \times 10^4$  CFU/g, 说明辐照杀菌可以有效延长低盐切片腊肉的保藏期至 180 d 后。

### 2.2 不同辐照剂量对低盐切片腊肉水分含量的影响

干腌肉制品的水分含量会影响脂肪及蛋白质的氧化水解<sup>[15]</sup>, 与口感及货架期密切相关。从图 1 可以看出, 辐照对低盐切片腊肉的水分含量影响较小, 与对照组相比较略微降低但差异不显著( $P > 0.05$ ), 随储藏时间增加, 水分含量呈下降趋势。储藏阶段, 所有组的水分含量均呈下降趋势, 但辐照组的下降速度明显低于对照组。第 180 d 时, 辐照组的水分含量显著高于对照组( $P < 0.05$ ), 归因于辐照降低了微生物和酶对胞内液泡的破坏, 延缓了细胞降解, 有效保持细胞结构的完整性<sup>[16]</sup>。叶爽等<sup>[17]</sup> 发现低剂量辐照处理能抑制和延缓香菇水分的迁移及散失, 与本实验结果一致。虽然储藏期内水分含量均在减少, 但辐照增强了低盐切片腊肉的持水性, 并随储藏时间增加, 这种持水性表现越明显, 且高持水性也提升了腊肉的口感。

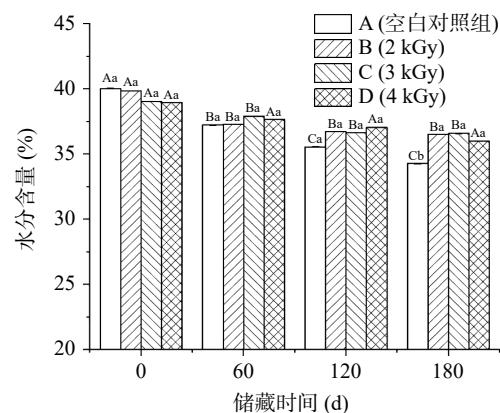


图 1 不同辐照剂量处理的低盐切片腊肉在储藏阶段的水分含量变化

Fig.1 Changes in moisture content of low-salt sliced bacon treated with different irradiation doses during storage

注: 图中小写字母不同表示同一储藏时间不同处理组之间差异显著( $P < 0.05$ ), 大写字母不同表示同一处理组不同储藏时间之间差异显著( $P < 0.05$ ), 图 2~图 4 同。

### 2.3 不同辐照剂量对低盐切片腊肉 pH 的影响

如图 2 所示, 辐照后较对照组 pH 略微降低, 但四组腊肉间差异不显著( $P > 0.05$ )。这说明辐照对腊肉 pH 的影响较小, Brewer<sup>[18]</sup> 的研究结果也证实了这一点。储藏期间, 辐照组和对照组的 pH 总体都呈上升趋势, 这是由于微生物的分解作用和腊肉中的内源酶降解蛋白质产生氨类及其他碱性物质所导致<sup>[19]</sup>。与 Otto 等<sup>[20]</sup> 的研究结果相同, 储藏时间和辐照剂量对辐照组的 pH 均无显著性影响( $P > 0.05$ )。对照组的 pH 在整个储藏过程中始终高于辐照处理组, 且差异显著( $P < 0.05$ ), 这是因为辐照杀灭了大部

分微生物,减缓了腊肉在储藏过程中的腐败变质,延长了其保藏期。

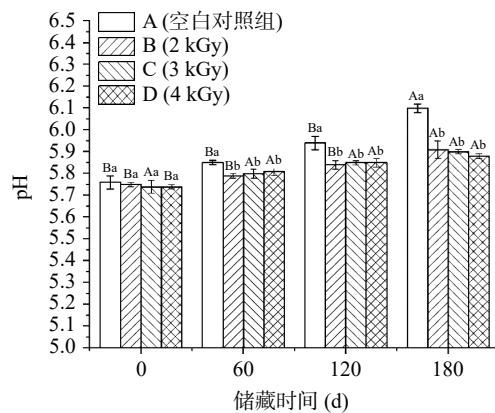


图2 不同辐照剂量处理的低盐切片腊肉在储藏阶段pH的变化

Fig.2 Changes in pH of low-salt sliced bacon treated with different irradiation doses during storage

#### 2.4 不同辐照剂量对低盐切片腊肉色泽的影响

如表2所示,辐照后第0 d时,低盐切片腊肉的 $L^*$ 值降低,  $a^*$ 、 $b^*$ 值增加。 $L^*$ 和 $b^*$ 值与辐照剂量大小无明显的线性关系。 $a^*$ 值大小和辐照剂量呈正相关,B(2 kGy)与对照组差异不显著( $P>0.05$ ),C(3 kGy)和D(4 kGy)与对照组差异显著( $P<0.05$ )。Nam等<sup>[21]</sup>的研究认为肉及肉制品经辐照处理后,其氧化还原电位(ORP)降低,并产生CO作为肌红蛋白的第六配位基,进而形成羧基肌红蛋白,导致红度 $a^*$ 值的增加。而 $b^*$ 值黄色素的形成可能是由于脂肪氧化产物和磷脂头基团中的胺或蛋白质中的胺发生非酶褐变所致<sup>[4]</sup>。储藏过程中,对照组和辐照组的 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 值均先升高后降低,这可能与水分含量的变化有关。

Xavier等<sup>[22]</sup>的研究表明,辐照后肉的 $L^*$ 值不受辐照剂量和温度的影响,但随保藏时间的延长而降低。第180 d时,辐照处理组的 $L^*$ 和 $a^*$ 值与对照组差异不显著( $P>0.05$ ),但 $b^*$ 在整个储藏过程中始终高于对照组且差异显著( $P<0.05$ )。

表2 不同辐照剂量处理的低盐切片腊肉在储藏阶段的颜色变化

Table 2 Color changes of low-salt sliced bacon treated with different irradiation doses during storage

测定指标	储藏时间(d)	A(空白对照组)	B(2 kGy)	C(3 kGy)	D(4 kGy)
$L^*$	0	43.33±0.58 <sup>a</sup>	40.00±1.00 <sup>b</sup>	42.33±0.58 <sup>a</sup>	36.00±1.00 <sup>c</sup>
	60	46.33±0.58 <sup>a</sup>	52.00±1.00 <sup>a</sup>	53.00±0.00 <sup>a</sup>	53.33±1.50 <sup>a</sup>
	120	42.67±1.16 <sup>ab</sup>	44.33±1.16 <sup>a</sup>	42.00±0.00 <sup>b</sup>	42.67±0.58 <sup>ab</sup>
	180	38.67±0.58 <sup>a</sup>	38.00±1.00 <sup>a</sup>	38.33±0.58 <sup>a</sup>	37.67±0.58 <sup>a</sup>
$a^*$	0	24.00±0.00 <sup>c</sup>	24.00±0.00 <sup>c</sup>	25.00±0.00 <sup>b</sup>	27.00±0.00 <sup>a</sup>
	60	28.67±0.58 <sup>c</sup>	33.33±0.58 <sup>a</sup>	33.00±0.00 <sup>a</sup>	29.67±0.58 <sup>b</sup>
	120	25.33±0.58 <sup>b</sup>	26.33±0.58 <sup>a</sup>	25.00±0.00 <sup>b</sup>	25.00±0.00 <sup>b</sup>
	180	23.67±0.58 <sup>a</sup>	24.33±0.58 <sup>a</sup>	24.00±0.00 <sup>a</sup>	24.00±0.00 <sup>a</sup>
$b^*$	0	14.33±0.58 <sup>b</sup>	15.00±0.00 <sup>ab</sup>	15.67±0.58 <sup>a</sup>	14.67±0.58 <sup>ab</sup>
	60	14.67±0.58 <sup>c</sup>	20.67±0.58 <sup>a</sup>	21.33±0.58 <sup>a</sup>	17.00±0.00 <sup>b</sup>
	120	14.00±0.00 <sup>d</sup>	16.67±0.58 <sup>b</sup>	18.33±0.58 <sup>a</sup>	15.67±0.58 <sup>c</sup>
	180	12.67±0.58 <sup>b</sup>	15.00±0.00 <sup>a</sup>	15.67±0.58 <sup>a</sup>	15.67±0.58 <sup>a</sup>

注:同行肩标字母不同表示差异显著( $P<0.05$ ),表3同。

#### 2.5 不同辐照剂量对低盐切片腊肉质构的影响

由表3可知,第0 d时,辐照后低盐切片腊肉的硬度显著变小( $P<0.05$ )、弹性和内聚性显著增大( $P<0.05$ );除3 kGy组与对照组差异显著( $P<0.05$ )外,回复力和咀嚼度无规律性变化。刘福莉等<sup>[23]</sup>使用 $\gamma$ 射线和电子束辐照处理火腿肠,质构测定发现,其硬度随辐照剂量的增加而显著降低,与本实验测定结果相同,这可能是由于辐照影响了蛋白质结构。目

表3 不同辐照剂量处理的低盐切片腊肉在储藏阶段的质构变化

Table 3 Textural changes of low-salt sliced bacon treated with different irradiation doses during storage

测定指标	储藏时间(d)	A(空白对照组)	B(2 kGy)	C(3 kGy)	D(4 kGy)
硬度(g)	0	5220.273±81.593 <sup>a</sup>	4903.566±164.358 <sup>b</sup>	4665.385±55.586 <sup>c</sup>	4381.171±38.236 <sup>d</sup>
	60	5518.475±210.296 <sup>a</sup>	5703.215±129.962 <sup>a</sup>	5667.228±150.715 <sup>a</sup>	5608.641±189.044 <sup>a</sup>
	120	5977.204±61.054 <sup>b</sup>	6046.733±128.342 <sup>b</sup>	6239.911±77.758 <sup>a</sup>	6370.756±32.824 <sup>a</sup>
	180	5881.022±44.125 <sup>a</sup>	5461.931±116.410 <sup>b</sup>	5530.194±14.802 <sup>b</sup>	4928.372±82.862 <sup>c</sup>
咀嚼度	0	3222.742±12.861 <sup>ab</sup>	3198.001±136.015 <sup>ab</sup>	3282.292±124.478 <sup>a</sup>	3028.264±97.152 <sup>b</sup>
	60	3383.198±37.839 <sup>c</sup>	4229.431±145.895 <sup>a</sup>	3852.14±105.221 <sup>b</sup>	3296.681±73.370 <sup>c</sup>
	120	3835.422±85.216 <sup>c</sup>	3664.276±298.396 <sup>c</sup>	5099.41±113.488 <sup>a</sup>	4674.126±225.001 <sup>b</sup>
	180	3646.111±82.137 <sup>c</sup>	4006.022±41.547 <sup>b</sup>	4279.022±89.864 <sup>a</sup>	3602.609±75.089 <sup>c</sup>
弹性(%)	0	94.433±0.565 <sup>b</sup>	96.616±1.213 <sup>a</sup>	97.166±0.669 <sup>a</sup>	96.095±1.414 <sup>ab</sup>
	60	88.124±0.824 <sup>c</sup>	91.225±0.677 <sup>b</sup>	94.665±1.580 <sup>a</sup>	90.489±1.661 <sup>bc</sup>
	120	91.089±0.778 <sup>b</sup>	86.121±0.080 <sup>c</sup>	97.315±1.972 <sup>a</sup>	98.132±0.114 <sup>a</sup>
	180	88.179±1.780 <sup>c</sup>	96.034±0.375 <sup>a</sup>	95.999±1.637 <sup>a</sup>	91.186±0.739 <sup>b</sup>
回复力(%)	0	20.355±0.541 <sup>b</sup>	20.434±0.296 <sup>b</sup>	21.876±0.017 <sup>a</sup>	20.150±0.618 <sup>b</sup>
	60	18.081±0.115 <sup>c</sup>	22.448±0.211 <sup>b</sup>	23.725±1.040 <sup>a</sup>	18.253±0.176 <sup>c</sup>
	120	20.965±0.103 <sup>c</sup>	24.241±1.258 <sup>b</sup>	28.139±0.557 <sup>a</sup>	23.243±0.389 <sup>b</sup>
	180	23.226±1.032 <sup>a</sup>	23.852±0.491 <sup>a</sup>	25.123±1.048 <sup>a</sup>	24.417±0.865 <sup>a</sup>
内聚性	0	0.673±0.005 <sup>c</sup>	0.704±0.003 <sup>ab</sup>	0.707±0.011 <sup>a</sup>	0.692±0.005 <sup>b</sup>
	60	0.617±0.005 <sup>d</sup>	0.687±0.003 <sup>b</sup>	0.706±0.001 <sup>a</sup>	0.651±0.004 <sup>c</sup>
	120	0.684±0.004 <sup>c</sup>	0.678±0.023 <sup>c</sup>	0.800±0.003 <sup>a</sup>	0.726±0.004 <sup>b</sup>
	180	0.720±0.009 <sup>b</sup>	0.743±0.007 <sup>a</sup>	0.733±0.004 <sup>a</sup>	0.716±0.002 <sup>b</sup>

前关于电子束辐照对肉制品品质的影响并未获得一致结论, 还需进一步探究, 但相比于牛肉、鸡肉等肉制品, 低剂量辐射对猪肉制品的影响较小<sup>[24]</sup>。

储藏过程中, 四组低盐切片腊肉的硬度总体先升高再降低, 回复力、内聚性、弹性、咀嚼度无明显变化规律, 与辐照剂量大小也无明显相关性。第 180 d 时, 所有组的硬度较初始值均有所升高, 且对照组依旧高于辐照处理组, 这可能与水分的散失有关; 内聚性和咀嚼度也高于各组第 0 d 的测定值, B(2 kGy) 和 C(3 kGy) 高于对照组且差异显著( $P<0.05$ ), D(4 kGy) 与对照组差异不显著( $P>0.05$ ); 回复力也有所增加, 且所有组之间差异均不显著( $P>0.05$ ); 弹性较第 0 d 时有所下降, 但辐照处理组优于对照组, 低剂量辐照组(B、C) 优于较高剂量辐照组(D)。

## 2.6 不同辐照剂量对低盐切片腊肉亚硝酸盐含量的影响

从图 3 可以看出, 辐照杀菌显著降低了( $P<0.05$ ) 低盐切片腊肉的亚硝酸盐含量, 且辐照剂量越大, 对亚硝酸盐的降解作用就越强, 由原本的 11.37 mg/kg 分别降至 9.75、9.23、8.79 mg/kg。这与毛青秀等<sup>[25]</sup> 的报道一致, 与辐照引起食品中的胺、氨类等含氮物质与亚硝酸根离子间的转换有关。储藏期间, 对照组的亚硝酸盐含量先下降至 120 d 后略微升高, 亚硝酸盐含量的增加可能与某些有硝酸还原能力的微生物生长繁殖有关<sup>[26]</sup>; 辐照处理组则一直呈下降趋势, 且含量始终低于空白对照组, 亚硝酸盐含量的降低是因为辐照杀灭并抑制了微生物活性。辐照组与空白对照组相比, 在整个储藏期内亚硝酸盐含量都更低, 亚硝酸盐可以在人体内反应生成致癌物质亚硝胺, 并能增强生物胺的中毒风险, 因此辐照处理更能保证低盐切片腊肉的安全和健康。

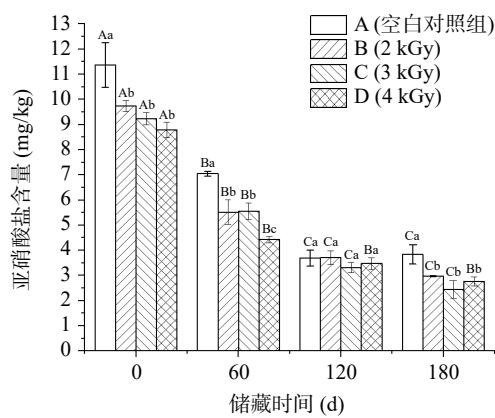


图 3 不同辐照剂量处理的低盐切片腊肉在储藏阶段的亚硝酸盐含量变化

Fig.3 Changes in nitrite content of low-salt sliced bacon treated with different irradiation doses during storage

## 2.7 不同辐照剂量对低盐切片腊肉脂肪氧化的影响

研究表明<sup>[27]</sup>, 辐照加快了自由基的生成, 引发了其链式反应, 且辐照剂量和氧化速度呈正相关。

图 4 所示, 第 0 d 时, A、B、C、D 组的过氧化值分别为 0.023、0.031、0.034、0.039 g/100 g, 可以看出低盐切片腊肉经辐照杀菌后脂肪氧化加剧, 且辐照剂量越大, 过氧化值越高。随着储藏时间的增加, 各组样品的 POV 值上升, 但辐照组的增长速度低于对照组, 且增长速度与辐照剂量大小呈反相关。储藏至第 120 d 时, 对照组的 POV 值开始高于辐照处理组, 且 D(4 kGy) 达到峰值后开始降低, 说明辐照抑制了微生物和酶活性, 延缓了低盐切片腊肉的脂肪氧化速度, 这与姚周麟等<sup>[28]</sup> 的研究结果相似。第 180 d 时, 对照组的过氧化值为 0.055 g/100 g, 显著高于辐照组( $P<0.05$ )。GB2730-2015《食品安全国家标准 腌腊肉制品》中规定其过氧化值应  $\leq 0.5$  g/100 g, 本实验的腊肉产品均符合标准。

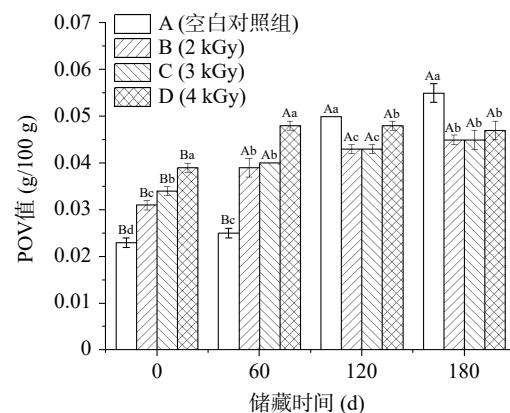


图 4 不同辐照剂量处理的低盐切片腊肉在储藏阶段的过氧化值变化

Fig.4 Changes in peroxide values of low-salt sliced bacon treated with different irradiation doses during storage

## 2.8 不同辐照剂量对低盐切片腊肉风味物质的影响

气相色谱-质谱(GC-MS)共分析检测出 137 种挥发性风味物质, 详情见表 4。储藏第 0 d, A(空白对照组)、B(2 kGy)、C(3 kGy)、D(4 kGy) 分别检测出 44、27、42、50 种挥发性化合物; 储藏至第 180 d 时, 分别检测出 54、60、52、55 种。可以看出, 辐照不同程度加速了脂肪氧化, 生成的氢过氧化物能够分解形成烷烃、醛、酮、醇、酸和酯等具有不同风味特征的低分子量化合物<sup>[29]</sup>。而随着储藏时间的延长, 风味物质的种类也有所增多。

醛类化合物主要由脂肪氧化产生, 如多不饱和脂肪酸氧化产生辛醛和壬二醛等<sup>[30]</sup>。己醛、庚醛、辛醛、壬醛、癸醛等是腊肉的特征风味物质, 在本实验中均有检出, 除己醛外其余醛类物质在辐照后以及储藏后含量占比大幅增加。第 0 d 时, B、C、D 分别检测出己醛 31.01%、23.04%、24.40%; 辛醛 0.44%、1.38%、1.33%; 癸醛 0.04%、0.10%、0.20%; 而 A 组均未检出。第 180 d 时, A、B、C、D 组分别检测出己醛 12.22%、23.90%、24.60%、23.93%; 辛醛 0.46%、1.39%、1.90%、2.60%; 壬醛 1.99%、2.38%、2.27%、3.04%; 癸醛 0.15%、0.14%、0.10%、1.10%。通过这

表4 不同辐照剂量处理的低盐切片腊肉在储藏阶段的挥发性风味物质种类及相对含量

Table 4 Types and relative contents of volatile flavor substances in low-salt sliced bacon treated with different irradiation doses during storage

续表 4

种类	挥发性风味物质	相对含量(%)							
		A-0	B-0	C-0	D-0	A-180	B-180	C-180	D-180
D7	2-乙基-1-己醇	—	—	—	—	1.63	2.42	1.19	2.60
D8	4-乙基环己醇	—	—	—	—	—	—	—	0.18
D9	1-辛醇	—	—	—	—	—	6.45	—	0.14
D10	1-十一烷醇	—	—	—	—	—	—	—	0.37
D11	正十三烷-1-醇	—	—	—	—	—	—	0.12	0.50
D12	5-甲基-2-(1-甲基乙基)-1-己醇	—	—	—	—	0.05	0.05	0.04	—
D13	1,4-二甲基-7-(丙-1-烯-2-基)十氢偶氮-4-醇	—	—	—	—	—	0.03	—	—
D14	(3R,3R,5S,6R,7aR)-3,6,7,7-四甲基八氢-3a,6-乙酰-5-醇	—	—	—	—	0.02	0.02	—	0.02
D15	(R)-(-)-14-甲基-8-十六炔-1-醇	—	—	—	—	—	—	—	0.02
D16	柏木脑	0.17	1.22	0.47	0.44	0.41	0.37	0.31	0.41
D17	乙二醇己二酸二甘醇	0.10	—	—	—	—	—	—	—
E	酯类	0.51	0.00	0.44	0.18	0.00	0.00	0.06	0.00
	种数	2	0	2	1	0	0	1	0
E1	五氟丙酸十一烷基酯	—	—	—	—	—	—	0.06	—
E2	邻苯二甲酸二乙酯	0.43	—	0.26	0.18	—	—	—	—
E3	邻苯二甲酸二丁酯	0.08	—	—	—	—	—	—	—
E4	棕榈油酸-二十二烷基酯	—	—	0.18	—	—	—	—	—
F	酸类	0.00	0.87	0.34	3.19	0.00	0.39	0.00	0.00
	种数	0	2	1	2	0	1	0	0
F1	2,5-二甲基-苯磺酸	—	0.22	0.34	0.41	—	0.39	—	—
F2	对羟基苯基膦酸	—	—	—	2.78	—	—	—	—
F3	(R)-5-甲基-2-(支撑基-1-烯基-2-基)十六烷基-4-烯基-1-基3-甲基丁酸	—	0.65	—	—	—	—	—	—
G	醚类	0.00	9.80	8.33	10.35	0.00	2.86	3.19	5.59
	种数	0	1	2	3	0	1	1	1
G1	二甲基二硫醚	—	9.80	7.97	6.02	—	2.86	3.19	5.59
G2	2-苯乙基异丙醚	—	—	0.36	—	—	—	—	—
G3	2-丙烯基甲基二硫醚	—	—	—	3.22	—	—	—	—
G4	烯丙基二硫醚	—	—	—	1.10	—	—	—	—
H	烃类	4.58	8.06	11.98	16.08	24.76	17.91	28.10	14.84
	种数	15	9	18	26	27	30	25	29
H1	1,3,5,7-环辛四烯	—	—	—	—	0.85	—	—	—
H2	1-癸烯	—	—	—	—	—	—	0.21	3.13
H3	1-十一烯	—	—	—	—	—	0.05	—	0.09
H4	(Z)-3-十二烯	—	—	—	—	—	—	—	0.09
H5	$\alpha$ -柏木烯	0.81	2.48	2.58	3.31	1.91	2.48	3.45	2.76
H6	长叶烯	0.13	0.26	0.16	0.15	0.15	0.14	0.15	0.27
H7	$\beta$ -柏木烯	0.22	0.78	0.70	0.92	0.61	0.73	1.07	0.75
H8	1,5-二甲基-8-(1-甲基乙烯基)-[S-(Z, E)]-1,5-环癸二烯	—	—	—	—	—	0.03	—	—
H9	罗汉柏烯	0.97	2.44	2.60	3.37	1.96	2.25	3.41	2.42
H10	花侧柏烯	0.33	1.26	0.94	1.01	0.96	1.02	0.84	1.12
H11	顺-1-氯-9-十八烯	—	—	—	—	—	—	—	0.25
H12	(1R,4S,5S)-1,8-二甲基-4-(丙-1-烯-2-基)螺[4.5]癸-7-烯	—	—	—	0.09	0.08	0.10	0.10	0.14
H13	(1R,5S)-1,8-二甲基-4-(丙烷-2-亚甲基)螺[4.5]-12-7-烯	0.05	—	0.18	0.18	0.22	0.26	0.24	0.32
H14	2,6,6,9-四甲基三环[5.4.0.0(2,8)]十一碳烯-9-烯	—	—	—	0.04	0.02	0.03	0.03	0.05
H15	(R)-3-亚甲基-6-((s)-1,2,2-三甲基环戊基)环己基-1-烯	—	—	—	0.04	0.03	0.03	0.03	0.05
H16	1,7-十六二烯	—	—	—	—	—	0.02	0.01	0.05
H17	2-丙烯基-二硫化甲基	—	—	1.12	—	—	—	—	—
H18	(1R)-2,6,6-三甲基双环庚-2-庚烯	—	—	—	0.55	—	—	—	—
H19	4-蒈烯	—	0.39	0.36	—	—	—	—	—
H20	莰烯	—	0.17	0.39	0.46	—	—	—	—
H21	1-甲基-5-(1-甲基乙烯基)	—	—	1.09	—	—	—	—	—
H22	1-甲基-4-(6-甲基庚-5-烯-2-基)环己烷-1,3-二烯	—	—	—	0.22	—	—	—	—
H23	花柏烯	0.13	—	—	0.35	—	—	—	—

续表 4

种类	挥发性风味物质	相对含量(%)							
		A-0	B-0	C-0	D-0	A-180	B-180	C-180	D-180
H24	α-铜氨烯	—	—	—	0.17	—	—	—	—
H25	2,4,4-三甲基己烷	—	—	—	—	—	0.12	—	—
H26	2,3-二甲基辛烷	—	—	—	—	—	—	0.55	—
H27	5-氯-5-甲基壬烷	—	—	—	—	—	—	2.39	—
H28	丙基环戊烷	—	—	—	—	0.13	—	0.13	—
H29	十五烷	—	—	0.08	—	—	0.03	0.03	0.30
H30	4-七氟丁氧三烷	—	—	—	—	—	0.19	0.27	—
H31	十四烷	—	—	—	0.07	—	0.12	0.34	0.21
H32	环癸烷	—	—	—	—	—	—	0.07	0.14
H33	正十二烷	—	0.09	0.16	0.11	0.20	0.20	0.22	0.39
H34	2,5-二甲基十一烷	—	—	—	—	0.03	0.03	0.04	0.07
H35	4,6-二甲基十二烷	—	—	—	—	0.15	—	0.15	0.21
H36	4-甲基十二烷	—	—	—	—	—	—	—	0.07
H37	十六烷	—	—	—	—	0.13	0.14	0.09	—
H38	八甲基七烷	—	—	—	—	0.03	0.14	0.03	—
H39	2-甲基六烷	—	—	—	—	—	—	—	0.07
H40	十七烷	—	—	—	—	—	0.03	—	—
H41	1-乙烯基-1-甲基-2,4-双(1-甲基乙烯基)-[1S-(1 $\alpha$ ,2 $\beta$ ,4 $\beta$ )]-环己烷	—	—	—	—	0.03	—	0.03	—
H42	十八烷	—	—	—	—	0.08	0.09	—	—
H43	2,4,4-三甲基己烷	—	—	—	—	—	—	3.30	—
H44	己烷	—	—	—	1.93	—	—	—	—
H45	1-亚甲基-4-(1-甲基乙烯基)-环己烷	—	—	—	1.95	—	—	—	—
H46	2-甲基-1-丙烯基-环戊烷	0.81	—	—	—	—	—	—	—
H47	5-甲基-5-丙基壬烷	—	—	0.57	—	—	—	—	—
H48	3,6-二甲基-癸烷	—	—	—	0.11	—	—	—	—
H49	3,6-二甲基-辛烷	—	—	0.10	—	—	—	—	—
H50	2-甲基-5-丙基-壬烷	0.05	—	—	—	—	—	—	—
H51	二十四烷	0.06	—	—	—	—	—	—	—
H52	三十六烷	0.57	—	—	—	—	—	—	—
H53	甲苯	—	—	—	—	14.94	5.29	8.60	0.94
H54	邻二甲苯	—	—	—	—	0.76	0.48	—	—
H55	1-甲氧基-3-甲基苯	—	—	—	—	—	—	0.34	—
H56	甲氧基甲基苯	—	—	—	—	0.65	—	0.50	—
H57	2,3-二甲氧基甲苯	0.19	0.17	0.18	0.15	0.25	3.30	0.22	0.30
H58	1,3-二(1,1-二甲基乙基)-苯	—	—	—	0.04	—	0.03	0.04	0.09
H59	3,6,6,7-四甲基-3-乙烯基2,3,3a,4,5,6-六氢-1H-茚	0.10	—	—	—	0.08	—	—	—
H60	2,3,6,7,8,8a-六氢-3,6,8,8-四甲基-(3R,3aR,6S,7R,8aR)-1H-3a,7-甲基苯	0.08	—	0.26	0.17	0.13	0.15	0.16	0.16
H61	(1R,4aR,8aR)-2,5,5,8a-四甲基-4,5,6,7,8,8a-六氢-1H-1,4a-甲萘	0.08	—	0.21	0.20	0.25	0.26	0.55	0.32
H62	十氢-4a-甲基-1-亚甲基-7-(1-甲基乙烯基)-萘	—	—	—	0.02	—	—	0.01	0.02
H63	1,1,4a-三甲基-5,6-二甲基十二氢萘	—	—	—	0.07	0.05	0.07	0.06	—
H64	(1R,4R,4aS,8aR)-4,7-二甲基-1-(丙-1-烯-2-基)-1,2,3,4,4a,5,6,8a-八氢萘	—	—	—	—	0.07	0.10	0.13	0.09
H65	(1R,3aS,4aS,8aS)-1,4,4,6-四甲基-1,2,3,3a,4,4a,7,8-八氢环戊 [1,4]环丁[1,2]苯	—	—	—	—	—	—	0.19	—
H66	3,6,6,7-四甲基-3-乙烯基2,3,3a,4,5,6-六氢-1H-茚	—	—	—	—	—	—	0.09	—
H67	1,3-二甲基苯	—	—	—	0.39	—	—	—	—
H68	2-异丙烯基-4a,8-二甲基-1,2,3,4,4a,5,6,7-八氢萘	—	—	0.29	—	—	—	—	—
I	其他	7.90	0.00	0.00	0.00	3.58	2.01	3.23	2.69
	种数	4	0	0	0	1	1	1	1
I1	2-乙酰基呋喃	7.60	—	—	—	3.58	2.01	3.23	2.69
I2	1,4;3,6-二脱水-ALPHA-D-吡喃葡萄糖	0.16	—	—	—	—	—	—	—
I3	3,4-脱水d-半乳糖	0.05	—	—	—	—	—	—	—
I4	2,3-脱水甘露聚糖	0.10	—	—	—	—	—	—	—
	合计(种)	44	27	42	50	54	60	52	55

些物质含量占比的增加可以表明辐照处理及储藏时间对脂质氧化程度的加深, 这与本实验对于脂肪氧化的分析相互印证, 与何立超等<sup>[31]</sup>研究发现己醛含量与 TBARs 值呈明显的线性关系结论类似。

酚类物质是烟熏肉制品的典型风味成分, 熏制过程中, 木材里的木质素分解产生愈创木酚及同系物, 本实验主要检测出苯酚、愈创木酚、2-甲氧基-5-甲基苯酚、4-乙基愈创木酚等。不同辐照剂量处理使腊肉中的主要酚类物质含量占比降低, 但也有个例, C 组的愈创木酚和 D 组的苯酚含量占比较对照组略微升高。同时辐照处理后也会产生新酚类物质, 如 3-甲基苯酚、3-烯丙基-6-甲氧基苯酚等, 但含量占比都较低。储藏后, 对照组的酚类种类数变少, 但含量占比变化较小; 辐照组较初始时有所升高, 但主要酚类及总含量占比依旧小于对照组。这说明辐照可能会抑制部分酚类物质的呈现, 也有可能是因为辐照促进脂质氧化产生的“异味”降低了酚类物质的含量占比, 影响了腊肉烟熏风味的表达。

酮类物质主要是由于烘烤过程中的加热促使不饱和脂肪氧化及氨基酸降解产生, 其含量和数量远低于醛类和酚类化合物, 但可以起到风味增强的作用<sup>[32]</sup>。辐照后酮类物质的含量及数量大幅下降, 这可能是因为辐照倾向于将大分子物质分解为醛类和烃类物质<sup>[33]</sup>, 此外实验中所检测到的酮类物质多为呋喃酮, 即分子式中存在成环碳碳双键, 因而更容易被辐照氧化分解; 储藏过程也使酮类物质的含量占比降低(除 C 组)。其中乙基环戊烯醇酮是一种天然香料, 不稳定极易氧化分解, 本实验辐照后以及储藏后都未检测到该物质, 证实了辐照对腊肉的氧化作用。

醇类物质通常来源于微生物分解或脂肪氧化。第 0 d 时, 辐照组的醇类总含量占比远低于对照组, 且随着辐照剂量的升高而降低。第 180 d 时, 所有组的醇类数量增多, 辐照组的总含量占比升高, 但对照组降低。储藏前后所有组都检测到 3-呋喃甲醇和柏木脑, 柏木脑来源于柏木烟熏, 辐照及储藏对其含量影响较小。储藏后所有组检测到 2-乙基-1-己醇等, 辐照组检测到不饱和醇类如 1-辛烯-3-醇等, 赋予腊肉蘑菇、木头等香气<sup>[34]</sup>。

腊肉中的酯类物质一般来源于微生物或者醇和酸的酯化反应, 可以赋予腊肉良好的风味。本实验检测到的酯类数量及含量都较低, 储藏后几乎所有组都未检测到, 这可能是酸类物质较少所导致。本实验所有组检测到的酸类物质含量占比及数量都较低, 对照组储藏前后均未检出, 辐照组储藏前后均检出 2, 5-二甲基-苯磺酸, 对腊肉风味有一定的影响。

辐照前后烷烃变化很大, 数量及含量占比随辐照剂量的增加而增加。第 0 d 时, A、B、C、D 分别检测出 15、9、18、26 种烃类物质, 分别占比 4.58%、8.06%、11.98%、16.08%, 该结果与 Kong 等<sup>[35]</sup>的发现相似, 碳氢化合物可能是脂肪的主要辐射分解产物。储藏后所有组检测到的烃类物质数量及含量占

比(除 D 组外)均有所增加。储藏前后所有组均检测出  $\alpha$ -柏木烯、长叶烯、 $\beta$ -柏木烯、罗汉柏烯和花侧柏烯, 这些物质来源于柏木油, 带有柏木烟熏风味。

醚类物质是本实验辐照异味的主要构成, 这些直链或杂环硫化物具有硫磺味、熟卷心菜味<sup>[36]</sup>。辐照后第 0 d 均检出二甲基二硫醚, C 还检测出 2-苯乙基异丙醚, D 额外检测出 2-丙烯基甲基二硫醚及烯丙基二硫醚, 辐照剂量与异味程度呈正相关。储藏后, 辐照组含有的二甲基二硫醚含量占比降低, 其余醚类物质均消失。据报道, 二甲基二硫醚通常在储藏过程中慢慢消失<sup>[37]</sup>。

综上所述, 辐照对低盐切片腊肉的风味有一定程度的负面影响, 尤其是刚辐照后, 检测出许多异味物质, 如二甲基二硫醚、2-丙烯基甲基二硫醚等, 对酚类、酮类及醇类物质的呈现产生不利影响; 并且由于辐照过程加速了脂肪氧化, 辐照组的醛类物质含量占比较高, 尤其是己醛含量占比最高。经过储藏, 辐照组的不良风味逐渐挥发, 但二甲基二硫醚并未完全消失, 酚类和醇类物质的含量占比升高, 风味有所提升。

## 2.9 不同辐照剂量处理的低盐切片腊肉在储藏期间的电子鼻分析

由图 5 可知, 电子鼻分析中, LD1 和 LD2 合计 97.37%, 包含大量样本信息。第 0 d 时, 辐照组与对照组风味差异较大; 第 180 d 时, 辐照组与对照组差异缩小。整个储藏过程中, B 与 A 均有重叠, 风味差异较小。第 0 d 的数据与 120 d 的数据之间差异最大, 差异在 LD1; 与第 60 d 的数据之间差异最小, 且差异在 LD2。综合分析可得, 辐照会影响腊肉的风味, 且辐照剂量越高影响越大, 但随着储藏时间的延长风味差异逐渐变小。

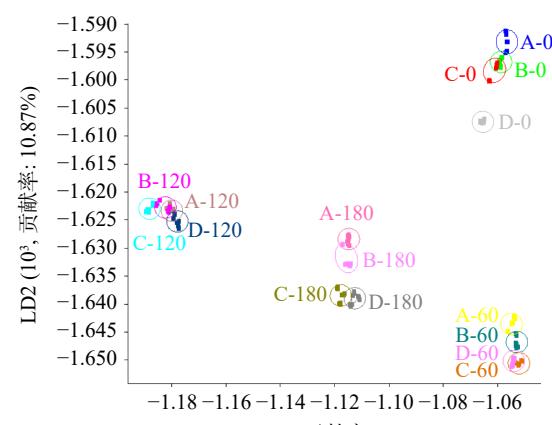


图 5 不同辐照剂量处理的低盐切片腊肉在储藏阶段的风味电子鼻分析

Fig.5 Flavor e-nose analysis of low-salt sliced bacon treated with different irradiation doses during storage

注: A: 空白对照组、B: 2 kGy、C: 3 kGy、D: 4 kGy; -数字代表储藏时间(d)。

## 2.10 不同辐照剂量对低盐切片腊肉感官评价的影响

如图 6 所示, 第 0 d 时, 辐照组的色泽、组织结构及口味评分与对照组差异很小, 因为辐照对腊肉的

细胞结构破坏很小,对水分含量的影响也不显著,提高了腊肉的 $a^*$ 值,以及由于脂肪氧化而 $b^*$ 升高,但肉眼无较大差异;香味评分显著低于对照组,这与GC-MS检测出的辐照异味有关;对照组的综合评分略高于辐照组。第180 d时,辐照组的色泽、口味评分与对照组差异较小;组织结构评分高于对照组,这是由于辐照加强了腊肉的持水性,储藏后辐照组水分含量较高,口感较好;香味评分方面,辐照组有所升高,归因于储藏后辐照异味的挥发;B、C的综合评分高于A、D组。

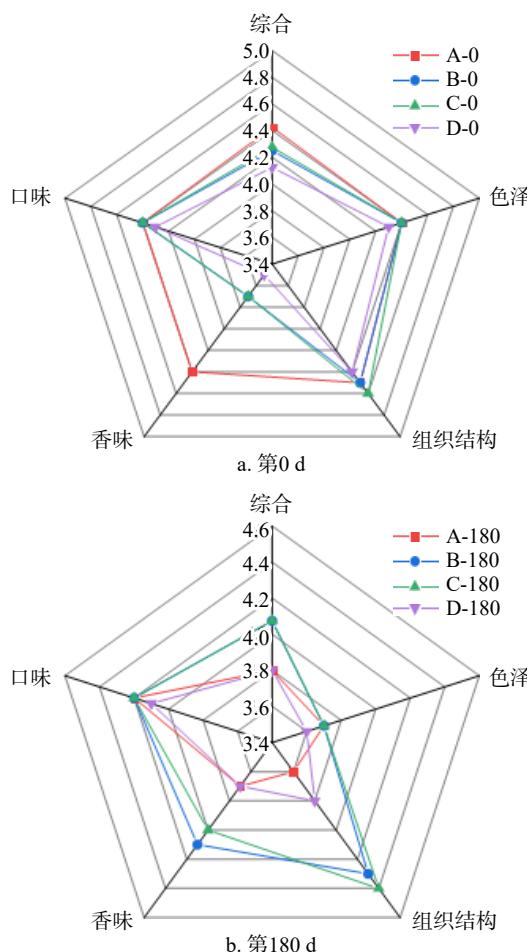


图6 不同辐照剂量处理的低盐切片腊肉在储藏阶段的感官评分雷达图

Fig.6 Radar plot of sensory scores of low-salt sliced bacon treated with different irradiation doses during storage

### 3 结论

不同剂量的辐照杀菌处理有效延长了低盐切片腊肉的保藏期至180 d后,第180 d时,辐照组的菌落总数远低于对照组两个对数值。辐照初期由于二甲基二硫醚等异味物质的存在,对风味影响较大,且辐照剂量越高,负面影响越大,但随着储藏时间的延长,辐照异味挥发,风味有所提升。辐照杀菌还增强了低盐切片腊肉的持水性,对质构和pH方面的影响较小,显著降低了亚硝酸盐含量,且后续抑制了亚硝酸盐的增长。虽然辐照杀菌过程会一定程度促进脂肪的氧化,但在后续储藏过程中能够延缓脂肪的氧

化。综合分析,辐照处理组腊肉总体较空白对照组腊肉品质更优,不同辐照剂量处理的腊肉品质之间有差异,其中2、3 kGy处理的腊肉样品脂肪氧化程度较低,辐照后与对照组的风味差异较小,异味相对较弱,储藏后的水分含量较高,风味较好。但杀菌效果及质构方面,3 kGy略优于2 kGy,杀菌效果更强,组织结构评分略高,因此3 kGy为低盐切片腊肉的最佳辐照剂量。辐照杀菌使得低盐切片腊肉在较长的储藏期内仍能得到较高的感官评分以及保留多种风味物质,能较好地保证低盐切片腊肉的品质利于生产销售,且辐照组在整个储藏期内亚硝酸盐含量均维持在较低水平,因此辐照处理更能保证低盐切片腊肉的安全和健康。

### 参考文献

- [1] 贾倩,李淑荣,高美须,等.电子束辐照对素鸡杀菌效果及品质特性影响的研究[J].核农学报,2012,26(2):295-299,339.  
[JIA Q, LI S R, GAO M S, et al. Study on the effect of electron beam irradiation on the sterilization effect and quality characteristics of vegetarian chicken[J]. Journal of Nuclear Agriculture, 2012, 26(2): 295-299, 339.]
- [2] AHN D U, C. JO D G O. Analysis of volatile components and the sensory characteristics of irradiated raw pork[J]. Meat Science, 2000, 54(3): 209-215.
- [3] 马丽珍,南庆贤,戴瑞彤.真空包装冷却猪肉低剂量辐照后的理化和感官特性变化[J].农业工程学报,2003(4):184-187. [MA L Z, NAN Q X, DAI R T. Changes in physicochemical and sensory properties of vacuum-packed cooled pork after low-dose irradiation [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2003(4): 184-187.]
- [4] 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. Effect of different electron beam irradiation treatments on the quality of traditional Zhenba bacon[J]. Meat Research, 2022, 36(10): 16-23.]
- [5] 马涛,林琼,王志东,等.利用GC-MS检测辐照猪肉中的挥发性碳氢化合物[J].食品科学,2010,31(16):176-179. [MA T, LIN Q, WANG Z D, et al. Determination of volatile hydrocarbons in irradiated pork by GC-MS[J]. Food Sciences, 2010, 31(16): 176-179.]
- [6] 刘春泉,冯敏,李澧,等.辐照处理对冷冻羊肉品质的影响[J].核农学报,2014,28(6):1018-1023. [LIU C Q, FENG M, LI L, et al. Effect of irradiation treatment on the quality of frozen lamb[J]. Journal of Nuclear Agrobiology, 2014, 28(6): 1018-1023.]
- [7] 哈益明,居华,王锋,等.辐照对冷却鸡肉中致病微生物的杀灭及贮藏特性的影响[J].食品科学,2009,30(19):74-77. [HA Y M, JU H, WANG F, et al. Effect of irradiation on the killing and storage characteristics of pathogenic microorganisms in cooled chicken meat[J]. Food Science, 2009, 30(19): 74-77.]
- [8] 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. [JIANG H L, GU Y, YANG X, et al. The effect of electron beam irradiation on the preservation of mussels[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(24): 272-276, 285.]
- [9] 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. [CHENG S Z, ZHANG C H, ZHANG J, et al. Effect of electron beam irradiation on the quality of nitrogen-filled packaged cold beef[J]. Food Science, 2016, 37(18): 230-235.]
- [10] 张云齐,云周苗,朱美淋,等.毛竹叶浸提浓缩液结合竹竿烟

- 熏对腊肉风味品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(12): 123–130. [ZHANG Y Q, YUN Z M, ZHU M L, et al. Effect of moso bamboo leaf extract concentrate combined with bamboo pole smoking on flavor quality of bacon[J]. Food and Fermentation Industry, 2022, 48(12): 123–130.]
- [11] 宋忠祥, 樊少飞, 付浩华, 等. 低盐液熏腊肉加工工艺优化及品质分析[J]. 肉类研究, 2020, 34(7): 46–52. [SONG Z X, FAN S F, FU H H, et al. Optimization of low-salt liquid smoked bacon processing and quality analysis[J]. Meat Research, 2020, 34(7): 46–52.]
- [12] 王洪伟, 索化夷, 张玉, 等. 感官评价和 GC-MS 结合偏最小二乘回归法分析酚类化合物对腊肉烟熏风味的贡献[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(21): 244–249. [WANG H W, SUO H Y, ZHANG Y, et al. Sensory evaluation and GC-MS combined with partial least squares regression to analyze the contribution of phenolic compounds to the smoked flavor of bacon[J]. Food and Fermentation Industry, 2019, 45(21): 244–249.]
- [13] 刘芝君, 黄业传, 卿兰, 等. 茶多酚微胶囊对腊肉理化性质及挥发性风味物质的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(11): 51–59. [LIU Z J, HUANG Y C, QING L, et al. Effect of tea polyphenol microcapsules on physicochemical properties and volatile flavor substances of bacon[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(11): 51–59.]
- [14] 吴海霞. 食品辐照技术发展进程及展望[J]. 农产品加工, 2009(7): 57–58, 61. [WU H X. Development process and prospect of food irradiation technology[J]. Agricultural Product Processing, 2009(7): 57–58, 61.]
- [15] UTRERA M, MORCUENDE D, ESTEVEZ M. Temperature of frozen storage affects the nature and consequences of protein oxidation in beef patties[J]. Meat Science, 2014, 96(3): 1250–1257.
- [16] SHI D, ZHOU R, FENG X, et al. Effects of low-dose  $\gamma$ -irradiation on the water state of fresh *Lentinula edodes*[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 118: 108764.
- [17] 叶爽, 陈璁, 高虹, 等.  $\gamma$  射线辐照对香菇采后贮藏过程中水分特性及理化指标的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(17): 91–97. [YE S, CHEN T, GAO H, et al. Effects of  $\gamma$ -ray irradiation on moisture characteristics and physicochemical parameters of shiitake mushrooms during postharvest storage[J]. Food Science, 2021, 42(17): 91–97.]
- [18] BREWER M S. Irradiation effects on meat flavor: A review [J]. Meat Science, 2008, 81(1): 1–14.
- [19] MUELA E, SAUDO C, CAMPO M M, et al. Effect of freezing method and frozen storage duration on instrumental quality of lamb throughout display[J]. Meat Science, 2010, 84(4): 662–669.
- [20] OTOO E A, OCLOO F, APPIAH V. Effect of gamma irradiation on shelf life of smoked guinea fowl (*Numida meleagris*) meat stored at refrigeration temperature[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2022, 194: 110041.
- [21] 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.
- [22] XAVIER M D L P, 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.
- [23] 刘福莉, 陈华才, 杨菁怡.  $\gamma$  辐照和电子束辐照对猪肉火腿肠质量的影响研究[J]. 中国计量学院学报, 2010, 21(4): 314–318. [LIU F L, CHEN H C, YANG J Y. Study on the effect of gamma irradiation and electron beam irradiation on the quality of pork ham sausage[J]. Journal of China Academy of Metrology, 2010, 21(4): 314–318.]
- [24] DAVIS K J, SEBRANEK J G, HUFF-LONERGAN E, et al. The effects of irradiation on quality of injected fresh pork loins[J]. Meat Science, 2004, 67(3): 395–401.
- [25] 毛青秀, 邓钢桥, 李文革, 等. 辐照对水溶液中亚硝酸盐降解效果研究[J]. 激光生物学报, 2013, 22(3): 225–229. [MAO Q X, DENG G Q, LI W G, et al. Study on the degradation effect of irradiation on nitrite in aqueous solution[J]. Journal of Laser Biology, 2013, 22(3): 225–229.]
- [26] 刘法佳, 吴燕燕, 李来好, 等. 降低腌制食品中亚硝酸盐含量的研究进展[J]. 广东农业科学, 2011, 38(1): 165–167, 73. [LIU F J, WU Y Y, LI L H, et al. Research progress on reducing nitrite content in pickled foods[J]. Guangdong Agricultural Science, 2011, 38(1): 165–167, 73.]
- [27] ONYANGO A N. Small reactive carbonyl compounds as tissue lipid oxidation products; and the mechanisms of their formation thereby[J]. Chemistry and Physics of Lipids, 2012, 165(7): 777–786.
- [28] 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 Z L, ZHOU X Y, DING S F, et al. Study on the effect of electron beam cold sterilization on the preservation of ready-to-eat shredded squid[J]. Food Industry Science and Technology, 2009, 30(6): 323–325.]
- [29] ULU H. Evaluation of three 2-thiobarbituric acid methods for the measurement of lipid oxidation in various meats and meat products[J]. Meat Science, 2004, 67(4): 683–687.
- [30] CHUNG H Y. Volatile components in crabmeats of *Charybdis feriatus*[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1999, 47(6): 2280–2287.
- [31] 何立超, 李成梁, 马素敏, 等. 辐照对猪肉火腿肠风味与品质的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(9): 34–39. [HE L C, LI C L, MA S M, et al. Effect of irradiation on flavor and quality of pork ham sausage[J]. Food Science, 2017, 38(9): 34–39.]
- [32] RUIZ J, VENTANAS J, CAVA R. New device for direct extraction of volatiles in solid samples using SPME[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(11): 5115–5121.
- [33] 舒晓燕, 周鑫, 蒋维, 等. 多元法分析高能电子束辐照对白芷挥发性成分的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(18): 243–250. [SHU X Y, ZHOU X, JIANG W, et al. Multivariate analysis of the effect of high-energy electron beam irradiation on volatile components of Angelica dahurica[J]. Food Science, 2022, 43(18): 243–250.]
- [34] 张顺亮, 王守伟, 成晓瑜, 等. 湖南腊肉加工过程中挥发性风味成分的变化分析[J]. 食品科学, 2015, 36(16): 215–219. [ZHANG S L, WANG S W, CHENG X Y, et al. Analysis of changes in volatile flavor components during the processing of Hunan bacon [J]. Food Science, 2015, 36(16): 215–219.]
- [35] KONG Q L, YAN W Q, YUE L, et al. Volatile compounds and odor traits of dry-cured ham (*Prosciutto crudo*) irradiated by electron beam and gamma rays[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2017, 130: 265–272.
- [36] CHUNG H Y, CADWALLADER K R. Aroma extract dilution analysis of blue crab claw meat volatiles[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 42(12): 2867–2870.
- [37] AHN D U, NAM K C, DU M, et al. Volatile production in irradiated normal, pale soft exudative (PSE) and dark firm dry (DFD) pork under different packaging and storage conditions [J]. Meat Science, 2001, 57(4): 419–426.