

两种辐照方式对贵州腊肉中脂肪酸成分的影响

石彬*, 李咏富, 龙明秀, 何扬波, 冉曜琦, 罗其琪

(贵州省农业科学院贵州省现代农业发展研究所, 贵阳 550009)

摘要: 目的 研究了不同辐照处理对贵州腊肉中脂肪酸成分的影响。**方法** 通过气相色谱法(gas chromatography, GC)对贵州腊肉样品中脂肪酸的种类和含量进行了分析, 并研究了⁶⁰Co- γ 射线辐照和高能电子辐照两种辐照方法在0~5 kGy不同辐照剂量对腊肉中脂肪酸成分的影响。**结果** 共检测出26种不同类型的脂肪酸相关成分, 包括16种饱和脂肪酸(saturated fatty acid, SFA)和10种不饱和脂肪酸(unsaturated fatty acid, UFA), 未检测出反式脂肪酸(*trans* fatty acids, TFA)。辐照处理会导致腊肉中SFA含量上升, UFA含量下降, 产生了新的UFA C8:0和C10:0。高能电子辐照在3 kGy以下剂量时对样品影响更大, 而剂量大于3 kGy, 则⁶⁰Co- γ 辐照对样品中脂肪酸影响更大。**结论** 辐照处理会影响腊肉中脂肪酸的含量和种类, 但未产生有害的TFA成分。两种辐照方式的能量大小和穿透能力存在一定差异, 高能电子辐照在低辐照剂量时对腊肉中脂肪酸成分影响较大,⁶⁰Co- γ 辐照则在高剂量时影响更大。

关键词: 气相色谱法; 贵州腊肉; 辐照; 脂肪酸

Effects of 2 kinds of irradiation methods on fatty acids composition in Guizhou bacon

SHI Bin*, LI Yong-Fu, LONG Ming-Xiu, HE Yang-Bo, RAN Yao-Qi, LUO Qi-Qi

(Guizhou Institute of Integrated Agricultural Development, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550009, China)

ABSTRACT: Objective To study the effects of different irradiation treatments on fatty acids in Guizhou bacon. **Methods** The types and content of fatty acids in Guizhou bacon samples were analyzed by gas chromatography (GC), and the effects of ⁶⁰Co- γ irradiation and high-energy electron irradiation at 0–5 kGy on the fatty acid-related components in bacon were studied. **Results** A total of 26 different fatty acids-related components were detected, including 16 kinds of saturated fatty acids (SFA) and 10 kinds of unsaturated fatty acids (UFA), and no *trans* fatty acids (TFA) were detected. Irradiation treatment led to an increase in SFA and a decrease in UFA, producing new SFA C8:0 and C10:0. High-energy electron irradiation had more effects on samples at doses below 3 kGy, while ⁶⁰Co- γ irradiation at doses above 3 kGy had more on fatty acids in samples. **Conclusion** Irradiation treatment will affect the content and type of fatty acids-related components in bacon, but produce no harmful TFA-related components. There are some differences in energy size and penetration between the 2 irradiation methods, high-energy electron irradiation has a greater impact on the fatty acid composition in bacon at low irradiation dose,

基金项目: 贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2021]—一般 123)

Fund: Supported by the Guizhou Provincial Science and Technology Support Project (Qianke Support [2021] General 123)

*通信作者: 石彬, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为农产品辐照加工。E-mail: 406140627@qq.com

*Corresponding author: SHI Bin, Master, Assistant Professor, Guizhou Institute of Integrated Agricultural Development, Guiyang 550009, China. E-mail: 406140627@qq.com

while ^{60}Co - γ irradiation has a greater effect at high dose.

KEY WORDS: gas chromatography; Guizhou bacon; irradiation; fatty acids

0 引言

腊肉是中国的一种传统美食, 中国很多地区都有吃腊肉的习俗^[1-3]。腊肉色泽红润, 具有特有的风味, 是逢年过节餐桌上的必备美食^[4-5], 各个地区的制作方法也存在较大差异。作为贵州省的传统的特色美食, 腊肉主要采用腌制后柴火烟熏的方法制作^[6], 其外表呈红褐色, 内里鲜红油润, 香味独特, 口感醇厚, 深受广大民众喜爱^[7-8]。然而传统的腊肉产品易受微生物影响, 其中腐败菌会影响腊肉的质量安全, 灭菌处理成为一种常见的保鲜方式^[9]。食品辐照灭菌是一种肉类常用的保鲜方式, 其原理是利用一定剂量的射线对食品进行杀菌^[10-12]。相较于传统的杀菌技术, 辐照属于冷杀菌方法, 能够更好的保存食品的风味和营养^[13-14], 目前在肉类保鲜方面有着广泛的应用^[15]。当下主流的辐照保鲜方法为高能电子辐照和 ^{60}Co - γ 辐照两种, 两者分别通过发射电子束和 X 射线产生能量达到灭菌效果^[16-21], 两者能量发生机制不一样, 保鲜效果也存在一定差异。周慧娟等^[22]研究了高能电子辐照对‘红阳’猕猴桃的保鲜效果, 发现 0.5 kGy 的辐照能将‘红阳’猕猴桃的保鲜期延长至 80 d; 白婵等^[23]研究了 ^{60}Co - γ 辐照和电子加速器对草鱼辐照保鲜效果, 结果表明高剂量率 ^{60}Co - γ 辐照下草鱼鱼块表现出最佳的贮藏效果; 陈尚戊等^[24]研究了气调包装对辐照生鲜猪肉保鲜效果的影响, 发现气调协同辐照对生鲜猪肉的感官品质、抑菌有积极作用。然而辐照处理在有效灭菌的同时, 会导致褐变, 产生的能量会对食品本身品质产生影响, 成为腊肉辐照保鲜不可忽视的问题。钜晓艳等^[25]研究了电子束辐照对鲈鱼半成品品质的影响, 研究发现当辐照剂量高于 6.64 kGy 时, 鱼肉的 pH、色泽、持水能力等品质均发生较大变化, 不利于长期储藏。脂肪酸是肉类中重要组成部分^[26-28], 其对原料肉的营养价值、色泽、风味等品质均有显著影响, 还参与人体中各项基础代谢, 具有不可忽视的生理作用^[29-32]。目前关于辐照对肉制品保鲜研究主要集中在灭菌效果和感官风味变化^[33-34], 关于辐照对营养成分的影响报道较少, 尤其对辐照处理后脂肪酸的变化缺乏系统的研究。

鉴于此, 本研究通过气相色谱法(gas chromatography, GC)分析了电子辐照和 ^{60}Co - γ 辐照两种不同辐照方式后贵州腊肉中脂肪酸的变化情况及规律, 以期为提升贵州的腊肉的保鲜品质提供参考和技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

当年新制作的腊肉样品(贵州詹腊坊食品有限公司);

没食子酸、盐酸、乙醚、石油醚、正己烷、甲醇、乙醇、三氟化硼(分析纯, 上海国药集团有限公司); 脂肪酸甲酯标准品(色谱纯, 安诺伦生物科技有限公司)。

1.2 仪器与设备

FA-1004 电子天平(精度 0.1 mg, 上海舜宇恒平科学仪器有限公司); CT14RD 高速台式冷冻离心机(上海天美科学仪器有限公司); Agilent 7890A 气相色谱仪、CD-2560 色谱柱(100 m \times 0.25 mm, 0.20 μm)[安捷伦科技(中国)有限公司]; RE-5299 真空旋转蒸发仪(郑州华辰仪器有限公司); HH-4S 电热恒温水浴锅(上海捷呈实验仪器有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 辐照处理

以 ^{60}Co - γ 射线和高能电子装置分别作为辐照源, 选取同一批次的腊肉样品进行不同圈数的辐照处理, 辐照每圈剂量为 1 kGy, 将辐照处理完的样品置于常温下 24 h 备用。

1.3.2 样品前处理

试样水解: 将腊肉样品用小型绞肉机搅碎, 称取均匀试样 0.5 g, 加入 0.1 g 焦性没食子酸, 加入几粒沸石, 再加入 2 mL 95%乙醇, 混匀。加入 2 mol/L 的盐酸溶液 10 mL, 混匀。将烧瓶放入 70 $^{\circ}\text{C}$ 水浴中水解 40 min。每隔 10 min 振荡一下烧瓶, 使黏附在烧瓶壁上的颗粒物混入溶液中。水解完成后, 取出烧瓶冷却至室温。

脂肪的提取: 水解后的试样, 加入 10 mL 95%乙醇, 混匀。将烧瓶中的水解液转移到分液漏斗中, 用 50 mL 乙醚石油醚混合液冲洗烧瓶和塞子, 冲洗液并入分液漏斗中, 加盖, 摇匀后静置 10 min。将醚层提取液收集到 250 mL 烧瓶中。按照以上步骤重复提取水解液 3 次, 最后用乙醚石油醚混合液冲洗分液漏斗, 并收集到已恒重的烧瓶中, 置于真空旋转蒸发仪蒸干处理。

脂肪酸甲酯化: 在脂肪提取物中, 继续加入 2 mL 2% 氢氧化钠甲醇溶液, 85 $^{\circ}\text{C}$ 水浴锅中水浴 30 min, 加入 3 mL 14% 三氟化硼甲醇溶液, 于 85 $^{\circ}\text{C}$ 水浴锅中水浴 30 min。水浴完成后, 等温度降到室温, 在离心管中加入 1 mL 正己烷, 振荡萃取 2 min 之后, 静置 1 h, 等待分层。取上层清液 100 μL , 用正己烷定容到 1 mL。用 0.45 μm 滤膜过膜后上机测试。

1.3.3 GC 分析条件

色谱柱: CD-2560 (100 m \times 0.25 mm, 0.20 μm); 升温程序: 130 $^{\circ}\text{C}$ 保持 5 min, 以 4 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率升温至 240 $^{\circ}\text{C}$, 保持 30 min。进样口温度: 250 $^{\circ}\text{C}$; 载气流速: 0.5 mL/min; 分流进样, 分流比: 10:1; 检测器: 氢火焰离子化检测器(flame ionization detector, FID); 检测器温度: 250 $^{\circ}\text{C}$, 采用

外标法定量, 标品为脂肪酸甲酯。

1.4 数据分析

实验结果采用 SPASS 22.0 软件对数据进行分析处理, 所有结果保留 2 位小数; 采用 Origin 9.0 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 腊肉中脂肪酸相关成分分析

通过 GC 对腊肉中的脂肪酸相关成分种类和含量进行了测试, 得到脂肪酸 GC 图谱, 结果如图 1、2 所示。由图 1 可知, 腊肉中检测出 6 种不同的短链脂肪酸成分, 含量由高到低分别为 C2:0(乙酸)、C3:0(丙酸)、C4:0(正丁酸)、C5:0(正戊酸)、C5:0(异)(异戊酸)、C4:0(异)(异丁酸)。由图 2 可知腊肉中含有丰富的长链脂肪酸成分, 且长链脂肪酸成分之间含量存在较大差异, 需要进一步对各脂肪酸成分含量和种类进行分析研究。对腊肉样品中脂肪酸成分种类和含量进行了检测, 结果如表 1 所示。由表 1 可知空白腊肉样品中共检测出了 24 种脂肪酸相关成分, 包括 14 种饱和脂肪酸(saturated fatty acid, SFA)、4 种单不饱和脂肪酸(monounsaturated fatty acid, MUFA)、6 种多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acids, PUFA), 未检测出反式脂肪酸(*trans* fatty acids, TFA)。其中 C2:0、C16:0、C18:1n9c 相关成分含量最高, 分别为 45.46、19.93、36.66 $\mu\text{g/g}$, 为腊肉中几种主要的脂肪酸成分, 样品同时中还检测出 α -亚油酸(C18:3n3)、花生四烯酸(C20:4n6)、二十二碳六烯酸(docosahexaenoic acid, DHA) (C22:6n3)等人体重要的脂肪

酸成分。尉立刚等^[31]对冷冻新鲜猪肉中脂肪酸含量进行了研究, 共检测 15 种长链脂肪酸, 冷冻 0 d 时, 其中 C16:0、C18:1n9c 脂肪酸含量分别为 23.25、37.83 $\mu\text{g/g}$, 与本研究结果具有一致性。

2.2 不同辐照处理对腊肉中脂肪酸相关成分的影响

2.2.1 不同辐照处理对腊肉中脂肪酸相关成分的含量和种类的影响

通过 GC 对腊肉中常见脂肪酸进行了测试, 研究了 ^{60}Co - γ 和高能电子辐照两种处理对腊肉中脂肪酸相关成分的含量和种类的影响, 结果如表 2、3 所示。由表 2 可知, ^{60}Co - γ 辐照处理的腊肉样品在 0~3 kGy 辐照剂量下, 共检测出 24 种不同脂肪酸成分, 当辐照剂量为 4、5 kGy 时, 检测出 25 种脂肪酸相关成分, 产生了新的脂肪酸成分 C10:0, 含量分别为 0.04、0.05 $\mu\text{g/g}$, 由表 3 可知, 不同剂量高能电子辐照剂量为 0、1 kGy 时, 样品中共检测出 24 种的脂肪酸相关成分; 当辐照剂量大于 2 kGy 时, 新检测出了的脂肪酸成分 C10:0; 当辐照剂量为 3、4、5 kGy 时, 共检测出 26 种脂肪酸相关成分, 新检测出了 C8:0 和 C10:0 两种饱和脂肪酸。由结果可知两种辐照方式处理的样品中各脂肪酸相关成分的含量均发生显著了变化, 在剂量较大时, 样品中均检出了新的脂肪酸成分, 表明两种辐照处理均对腊肉中脂肪酸相关成分的种类和含量产生了影响。C8:0 和 C10:0 等新脂肪酸成分的产生可能是由于辐照剂量较大时, 其能量会对脂肪酸的化学键产生影响, 导致断裂产生新的脂肪酸成分。

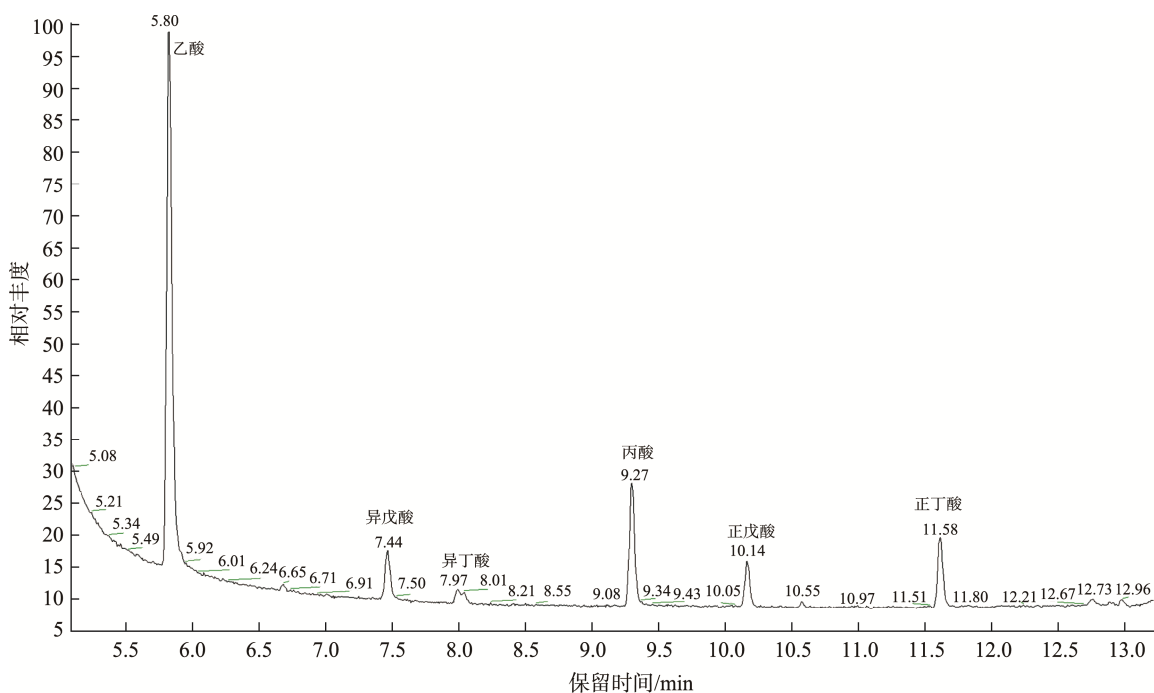
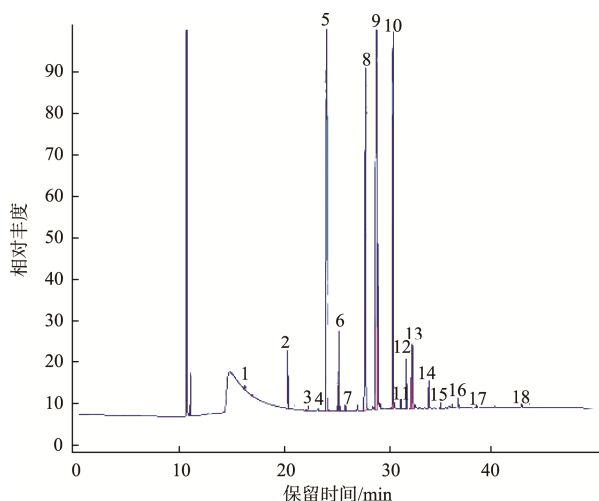


图 1 腊肉中短链脂肪酸的气相色谱图

Fig.1 Gas chromatogram of short chain fatty acids in bacon



注: 1: C12:0; 2: C14:0; 3: C14:1; 4: C15:0; 5: C16:0; 6: C16:1; 7: C17:0; 8: C18:0; 9: C18:1n9c; 10: C18:2n6c; 11: C20:0; 12: C20:1; 13: C18:3n3; 14: C20:2; 15: C20:3n6; 16: C20:4n6。

图 2 腊肉中中链脂肪酸的气相色谱图

Fig.2 Gas chromatogram of long chain fatty acids in bacon

2.2.2 不同辐照处理对腊肉中 SFA 相关成分的影响

通过 GC 的检测方法分析了不同辐照方式对腊肉样品中 SFA 相关成分总含量的变化, 结果如表 4 所示。样品中共检测出 16 种 SFA 相关成分, 其中 C2:0、C16:0、C18:0 含量为腊肉中主要的 SFA 成分。由表 4 可知, 随着辐照剂量的增加, 腊肉样品 SFA 成分的总量呈上升趋势, 推测是辐照处理产生的能量加速了脂肪酸中化学键的断裂和不饱和脂肪酸的氧化, 促进 SFA 成分的形成, 相对于双键, SFA 中的单键更加稳定, 不容易氧化分解。当辐照剂量为 1~4 kGy 时, ⁶⁰Co-γ 辐照的样品中 SFA 成分含量分别为 89.20、97.19、100.47 和 110.64 μg/g; 而高能电子辐照样品中 SFA 相关成分含量分别为 95.22、105.75、112.72、114.82 μg/g, 在相同剂量下, 高能电子辐照的样品中 SFA 相关成分含量显著高于

⁶⁰Co-γ 辐照($P<0.05$)。当辐照剂量达到 5 kGy 时, 两种辐照方式样品中 SFA 相关成分含量分别为 116.00、117.08 μg/g, 两者见不存在显著性差异($P>0.05$), 这可能与两种辐照方式产生的能量强度以及辐照穿透能力有关, 辐照剂量较大时 ⁶⁰Co-γ 辐照穿透能力更强。

表 1 腊肉中脂肪酸的种类与含量($n=3$)
Table 1 Types and content of fatty acids in bacon ($n=3$)

脂肪酸种类	脂肪酸含量均值/(μg/g)	方差
C2:0	45.46	0.61
C3:0	5.54	0.19
C4:0(异)	0.48	0.01
C4:0	2.33	0.15
C5:0(异)	0.93	0.02
C5:0	1.07	0.02
C12:0	0.06	0.01
C14:0	1.17	0.01
C14:1	0.01	0.01
C15:0	0.02	0.01
C16:0	19.93	0.02
C16:1	1.68	0.01
C17:0	0.15	0.01
C18:0	9.97	0.02
C18:1n9c	36.66	0.06
C18:2n6c	8.26	0.01
C20:0	0.20	0.01
C20:1	1.34	0.01
C18:3n3	1.50	0.01
C20:2	0.61	0.01
C20:3n6	0.06	0.01
C20:4n6	0.10	0.01
C24:0	0.02	0.01
C22:6n3	0.02	0.01

表 2 ⁶⁰Co-γ 辐照对腊肉中脂肪酸的影响($n=3$, μg/g)
Table 2 Effects of ⁶⁰Co-γ irradiation on fatty acid in bacon ($n=3$, μg/g)

脂肪酸名称	辐照剂量/kGy					
	0	1	2	3	4	5
乙酸	45.46±0.61 ^a	48.99±0.69 ^b	53.39±1.01 ^c	56.62±2.01 ^d	65.91±1.06 ^c	69.57±0.91 ^f
丙酸	5.54±0.19 ^a	5.57±0.14 ^a	6.51±0.84 ^b	6.80±0.56 ^{bc}	7.27±0.24 ^{bc}	7.37±0.28 ^c
异丁酸	0.48±0.01 ^a	0.88±0.03 ^b	0.72±0.03 ^c	0.86±0.04 ^b	0.90±0.03 ^b	0.98±0.08 ^d
正丁酸	2.33±0.15 ^a	2.81±0.11 ^b	3.47±0.20 ^c	3.44±0.18 ^c	3.62±0.18 ^d	3.23±0.08 ^c
异戊酸	0.93±0.02 ^a	1.20±0.07 ^b	2.04±0.05 ^c	2.91±0.07 ^d	2.99±0.10 ^d	3.28±0.05 ^c
正戊酸	1.07±0.02 ^a	0.95±0.03 ^b	1.03±0.04 ^a	1.82±0.05 ^c	1.85±0.02 ^{cd}	1.90±0.04 ^d
C10:0	-	-	-	-	0.04±0.01 ^a	0.05±0.01 ^a
C12:0	0.06±0.01 ^a	0.05±0.01 ^a	0.05±0.01 ^a	0.04±0.01 ^a	0.05±0.01 ^a	0.05±0.01 ^a
C14:0	1.17±0.01 ^a	0.55±0.03 ^b	0.98±0.06 ^c	0.88±0.02 ^d	0.83±0.04 ^d	0.88±0.03 ^d
C14:1	0.01±0.01 ^a	0.01±0.01 ^a	0.01±0.01 ^a	0.01±0.01 ^a	0.01±0.01 ^a	0.01±0.01 ^a
C15:0	0.02±0.01 ^a	0.03±0.01 ^a	0.03±0.01 ^a	0.02±0.01 ^a	0.02±0.01 ^a	0.02±0.01 ^a

表 2(续)

脂肪酸名称	辐照剂量/kGy					
	0	1	2	3	4	5
C16:0	19.93±0.02 ^a	18.35±0.41 ^b	18.20±0.56 ^b	16.62±1.05 ^c	16.26±0.48 ^c	16.66±0.47 ^c
C16:1	1.68±0.01 ^a	1.68±0.06 ^a	1.31±0.05 ^b	1.31±0.08 ^b	1.27±0.05 ^c	1.24±0.10 ^c
C17:0	0.15±0.01 ^a	0.14±0.01 ^a	0.15±0.02 ^a	0.15±0.01 ^a	0.17±0.01 ^b	0.18±0.01 ^b
C18:0	9.97±0.02 ^{ab}	9.47±0.43 ^a	10.40±0.52 ^b	10.11±0.44 ^{ab}	10.54±0.56 ^b	11.63±0.36 ^d
C18:1n9c	36.66±0.06 ^a	31.15±0.84 ^b	29.29±0.96 ^c	25.97±1.02 ^d	22.36±0.83 ^c	22.52±1.06 ^c
C18:2n6c	8.26±0.01 ^a	8.59±0.52 ^a	8.08±0.33 ^{ab}	7.60±0.26 ^b	5.48±0.44 ^c	5.02±0.42 ^c
C20:0	0.20±0.01 ^a	0.19±0.02 ^a	0.21±0.01 ^a	0.19±0.01 ^a	0.18±0.02 ^a	0.19±0.01 ^a
C20:1	1.34±0.01 ^a	1.25±0.11 ^b	1.08±0.15 ^c	0.96±0.04 ^d	0.92±0.04 ^d	0.92±0.03 ^d
C18:3n3	1.50±0.01 ^a	1.43±0.05 ^b	0.83±0.04 ^c	0.87±0.02 ^c	0.70±0.01 ^d	0.53±0.02 ^e
C20:2	0.61±0.01 ^a	0.57±0.03 ^a	0.51±0.03 ^b	0.59±0.02 ^a	0.46±0.03 ^{bc}	0.42±0.03 ^c
C20:3n6	0.24±0.02 ^a	0.11±0.01 ^b	0.08±0.01 ^c	0.06±0.01 ^{cd}	0.05±0.01 ^d	0.04±0.01 ^d
C20:4n6	0.10±0.01 ^a	0.08±0.01 ^b	0.07±0.01 ^b	0.05±0.01 ^c	0.02±0.01 ^d	0.02±0.01 ^d
C24:0	0.02±0.01 ^a	0.02±0.01 ^a	0.01±0.01 ^a	0.01±0.01 ^a	0.01±0.01 ^a	0.01±0.01 ^a
C22:6n3	0.02±0.01 ^a	0.02±0.01 ^a	0.02±0.01 ^a	0.01±0.01 ^a	0.01±0.01 ^a	0.01±0.01 ^a

注: 同行不同字母表示差异显著($P<0.05$), -表示无此项, 表 3 同。

表 3 高能电子辐照对腊肉中脂肪酸的影响($n=3$, $\mu\text{g/g}$)
Table 3 Effects of high-energy electron irradiation on fatty acid in bacon ($n=3$, $\mu\text{g/g}$)

脂肪酸名称	辐照剂量/kGy					
	0	1	2	3	4	5
乙酸	45.46±0.61 ^a	50.31±0.99 ^b	55.02±1.38 ^c	55.11±1.87 ^c	58.44±1.23 ^d	60.51±1.31 ^d
丙酸	5.54±0.19 ^a	5.46±0.88 ^a	7.01±0.84 ^b	6.96±0.77 ^b	7.03±0.50 ^b	7.12±0.14 ^c
异丁酸	0.48±0.01 ^a	0.95±0.03 ^b	1.01±0.04 ^b	1.22±0.04 ^c	1.31±0.02 ^d	1.35±0.06 ^d
正丁酸	2.33±0.15 ^a	3.01±0.21 ^b	3.65±0.13 ^c	4.01±0.26 ^d	4.05±0.15 ^d	4.12±0.11 ^d
异戊酸	0.93±0.02 ^a	1.16±0.06 ^b	3.04±0.05 ^c	3.21±0.03 ^d	3.16±0.10 ^d	3.96±0.03 ^c
正戊酸	1.07±0.02 ^a	1.18±0.04 ^b	1.23±0.02 ^b	2.62±0.03 ^c	2.85±0.06 ^d	2.94±0.07 ^c
C8:0	-	-	-	0.25±0.01 ^a	0.33±0.02 ^b	0.36±0.02 ^b
C10:0	-	-	0.08±0.01 ^a	0.14±0.01 ^b	0.14±0.01 ^b	0.21±0.01 ^c
C12:0	0.06±0.01 ^{ab}	0.07±0.01 ^a	0.07±0.01 ^a	0.05±0.01 ^{bc}	0.07±0.01 ^a	0.04±0.01 ^c
C14:0	1.17±0.01 ^a	1.02±0.04 ^b	1.10±0.03 ^c	0.96±0.01 ^d	0.88±0.02 ^c	0.62±0.02 ^f
C14:1	0.01±0.01 ^a	0.01±0.01 ^a	0.01±0.01 ^a	0.01±0.01 ^a	0.01±0.01 ^a	0.01±0.01 ^a
C15:0	0.02±0.01 ^a	0.06±0.01 ^b	0.04±0.01 ^c	0.05±0.01 ^{bcd}	0.03±0.01 ^{ad}	0.02±0.01 ^a
C16:0	19.93±0.02 ^a	21.35±1.06 ^{ab}	22.20±0.56 ^{bd}	26.62±1.05 ^c	23.26±1.48 ^d	22.47±0.98 ^{bd}
C16:1	1.68±0.01 ^a	1.41±0.08 ^{bc}	1.45±0.04 ^{bc}	1.52±0.15 ^{ab}	1.35±0.05 ^{bc}	1.32±0.26 ^c
C17:0	0.15±0.01 ^a	0.19±0.02 ^b	0.21±0.02 ^{bc}	0.18±0.01 ^b	0.23±0.02 ^c	0.25±0.01 ^c
C18:0	9.97±0.02 ^a	10.27±0.58 ^a	10.86±0.96 ^a	11.12±0.58 ^a	12.86±0.76 ^b	12.92±0.44 ^b
C18:1n9c	36.66±0.06 ^a	29.22±0.63 ^b	28.48±0.82 ^{bc}	27.52±1.66 ^{cd}	26.45±0.44 ^{dc}	25.33±1.20 ^c
C18:2n6c	8.26±0.01 ^a	8.26±0.45 ^a	8.33±0.24 ^a	7.82±0.41 ^b	6.41±0.25 ^c	5.71±0.66 ^d
C20:0	0.20±0.01 ^{ab}	0.17±0.01 ^a	0.22±0.02 ^b	0.20±0.02 ^{ab}	0.17±0.02 ^a	0.18±0.02 ^a
C20:1	1.34±0.01 ^a	1.31±0.20 ^a	1.28±0.08 ^a	1.06±0.04 ^b	1.01±0.11 ^b	1.02±0.06 ^b
C18:3n3	1.50±0.01 ^a	1.32±0.03 ^b	0.91±0.04 ^c	0.72±0.02 ^d	0.78±0.05 ^d	0.66±0.04 ^c
C20:2	0.61±0.01 ^a	0.54±0.06 ^{abc}	0.58±0.01 ^{ab}	0.52±0.07 ^{bc}	0.48±0.03 ^c	0.46±0.05 ^c
C20:3n6	0.24±0.02 ^a	0.18±0.01 ^b	0.15±0.01 ^c	0.16±0.01 ^{bc}	0.11±0.01 ^d	0.09±0.01 ^d
C20:4n6	0.10±0.01 ^a	0.07±0.01 ^b	0.04±0.01 ^c	0.05±0.01 ^c	0.01±0.01 ^d	0.02±0.01 ^d
C24:0	0.02±0.01 ^a	0.02±0.01 ^a	0.01±0.01 ^a	0.02±0.01 ^a	0.01±0.01 ^a	0.01±0.01 ^a
C22:6n3	0.02±0.01 ^a	0.01±0.01 ^a	0.01±0.01 ^a	0.02±0.01 ^a	0.01±0.01 ^a	0.01±0.01 ^a

表 4 两种辐照方式对腊肉中 SFA、MUFA 和 PUFA 总量的影响($\mu\text{g/g}$, $n=3$)
Table 4 Effects of the 2 irradiation methods on the total amount of SFA, MUFA and PUFA in bacon ($\mu\text{g/g}$, $n=3$)

辐照剂量	总 SFA 含量		总 MUFA 含量		总 PUFA 含量	
	$^{60}\text{Co-}\gamma$ 辐照	高能电子辐照	$^{60}\text{Co-}\gamma$ 辐照	高能电子辐照	$^{60}\text{Co-}\gamma$ 辐照	高能电子辐照
0	87.33±2.30 ^a	87.33±2.30 ^a	39.69±0.82 ^a	39.69±0.82 ^a	10.73±0.44 ^a	10.73±0.44 ^a
1	89.20±1.52 ^a	95.22±1.88 ^b	34.09±0.30 ^a	31.95±0.72 ^b	10.80±0.66 ^a	10.38±0.32 ^a
2	97.19±0.98 ^a	105.75±2.44 ^b	31.69±1.06 ^a	31.22±1.59 ^a	9.59±0.49 ^a	10.02±0.76 ^a
3	100.47±1.71 ^a	112.72±2.58 ^b	28.25±1.33 ^a	30.11±1.65 ^b	9.18±1.02 ^a	9.29±0.87 ^a
4	110.64±2.01 ^a	114.82±3.20 ^b	24.56±1.77 ^a	28.82±1.01 ^b	6.72±0.12 ^a	7.80±0.22 ^b
5	116.00±3.64 ^a	117.08±4.05 ^a	24.69±0.50 ^a	27.68±0.38 ^b	6.04±0.35 ^a	6.95±0.20 ^b

注: 同一组别不同字母表示有显著性差异($P<0.05$)。

2.2.3 不同辐照处理对腊肉中 MUFA 相关成分的影响

通过 GC 对不同方式辐照处理的腊肉样品中 MUFA 相关成分的总量进行了检测, 结果如表 4 所示。由 2.1 中结果可知, 腊肉样品中共检测出 4 种 MUFA 相关成分, 分别为 C14:1、C16:1、C18:1n9c、C20:1。表 4 结果表明随着辐照剂量的增加, 样品中 MUFA 成分总含量呈下降趋势。辐照剂量为 0 的样品中 MUFA 成分含量为 39.69 $\mu\text{g/g}$, 5 kGy 的两种不同辐照处理的 MUFA 相关成分的含量分别达到了 24.69、27.68 $\mu\text{g/g}$, 存在明显的下降。当辐照剂量为 1 kGy 时, $^{60}\text{Co-}\gamma$ 辐照的样品中 MUFA 成分含量为 34.09 $\mu\text{g/g}$, 显著高于高能电子辐照的样品($P<0.05$); 当辐照剂量为 2 kGy 时, 两种辐照处理的样品中 MUFA 相关成分含量无显著差异($P>0.05$); 当辐照剂量为 3~5 kGy 时, $^{60}\text{Co-}\gamma$ 辐照的样品中 MUFA 相关成分含量分别为 28.25、24.56、24.69 $\mu\text{g/g}$, 高能电子辐照样品 MUFA 相关成分含量分别为 30.11、28.82、27.68 $\mu\text{g/g}$, 前者 MUFA 相关成分含量显著低于后者($P<0.05$)。结果表明两种辐照方式处理对样品中 MUFA 相关成分影响存在差异, 辐照剂量小于 2 kGy 时, $^{60}\text{Co-}\gamma$ 辐照对腊肉中 MUFA 相关成分含量影响较大; 而当辐照剂量大于 3 kGy 时, $^{60}\text{Co-}\gamma$ 辐照比高能电子辐照对腊肉中 MUFA 相关成分影响更大。

2.2.4 不同辐照处理对腊肉中 PUFA 相关成分的影响

通过 GC 的方法对不同方式辐照处理的腊肉样品中 PUFA 相关成分的总量进行了检测, 结果如表 4 所示。由 2.1 结果可知, 腊肉样品中共检测出 6 种 PUFA 相关成分。包括 2 个双不饱和键脂肪酸成分、2 个 3 不饱和键脂肪酸成分、1 个 4 不饱和键脂肪酸成分和 1 个 6 不饱和键脂肪酸成分。由表 4 结果可知, 两种辐照处理均会导致腊肉样品中 PUFA 相关成分含量下降, 随着辐照剂量的增加, 样品中 PUFA 相关成分的含量下降趋势增大。当辐照剂量为 1~3 kGy 时, $^{60}\text{Co-}\gamma$ 辐照的样品中 PUFA 相关成分含量分别为 10.80、9.59 和 9.18 $\mu\text{g/g}$, 高能电子辐照样品 PUFA 成分含量分别为 10.38、10.02 和 9.29 $\mu\text{g/g}$, 两种辐照方式处

理的样品中 PUFA 相关成分含量无显著差异($P>0.05$)。当辐照剂量 4~5 kGy 时, $^{60}\text{Co-}\gamma$ 辐照的样品中 PUFA 相关成分含量分别为 6.72、6.04 $\mu\text{g/g}$, 高能电子辐照样品 PUFA 相关成分含量分别为 7.80、6.95 $\mu\text{g/g}$, $^{60}\text{Co-}\gamma$ 辐照的样品中 PUFA 相关成分含量显著低于高能电子辐照的样品($P<0.05$)。结果表明辐照剂量较小时, 两种辐照方式对腊肉样品中 PUFA 相关成分影响差异较小; 而当辐照剂量较大时, $^{60}\text{Co-}\gamma$ 辐照对样品中 PUFA 相关成分含量影响大于高能电子辐照处理。

3 结 论

通过 GC 检测分析表明贵州腊肉样品中含有丰富的脂肪酸成分, 样品中共检测出 26 种脂肪酸相关成分, 其中 16 种 SFA 成分、4 种 MUFA 成分、6 种 PUFA 成分, 未检测出 TFA 相关成分。腊肉样品除了含乙酸、C16:0、C18:1n9c 等主要的脂肪酸相关成分, 同时还含有 α -亚油酸、花生四烯酸、DHA 等人体重要的脂肪酸成分。 $^{60}\text{Co-}\gamma$ 辐照和高能电子辐照两种方式会影响腊肉中脂肪酸成分的种类和含量, 辐照处理的样品中 SFA 成分总含量上升, UFA 成分总含量呈下降趋势, 辐照剂量较大时产生了 C8:0 和 C10:0 两种新的脂肪酸成分。然而不同的辐照方式对腊肉的脂肪酸影响存在差异, 当辐照剂量低于 3 kGy 时, 高能电子辐照对腊肉中脂肪酸成分含量影响大于 $^{60}\text{Co-}\gamma$ 辐照, 当辐照剂量大于 3 kGy 时, $^{60}\text{Co-}\gamma$ 辐照对样品脂肪酸成分影响更大, 这可能不同能量穿透能力有关, 高能电子辐照穿透力较弱有关, 而高剂量的 $^{60}\text{Co-}\gamma$ 辐照穿透能力更强。辐照处理后腊肉中脂肪酸相关成分的变化, 是否会对腊肉的品质和风味产生影响, 有待进一步实验探究。

参考文献

- [1] 朱早林, 徐宝才, 黄千里. 徽式腊肉刀板香中优势微生物的分离鉴定[J]. 肉类研究, 2022, 36(5): 7-13.
ZHU HL, XU BC, HUANG QL. Isolation and identification of dominant

- microorganisms in the incense [J]. *Meat Res*, 2022, 36(5): 7–13.
- [2] 胡鹏, 周焯辉, 陈光静, 等. 湖南腊肉中生物胺含量及品质分析[J]. *食品与机械*, 2022, 38(1): 68–72.
HU P, ZHOU HH, CHEN GJ, *et al.* Analysis of biological amine content and quality in Hunan preserved meat [J]. *Food Mach*, 2022, 38(1): 68–72.
- [3] 张百刚, 梁海荣, 黄橙辉, 等. 陇西腊肉复合保鲜剂配方优化[J]. *肉类研究*, 2021, 35(1): 26–33.
ZHANG BG, LIANG HR, HUANG CH, *et al.* Longxi bacon compound preservative formula optimization [J]. *Meat Res*, 2021, 35(1): 26–33.
- [4] 李艳玲. 腊肉浅尝“年味儿”, 莫误健康[J]. *中医健康养生*, 2022, 8(2): 9–11.
LI YL. Taste the “New Year flavor” through the bacon, do not affect your health [J]. *TCM Health Life-Nurt*, 2022, 8(2): 9–11.
- [5] 庄文勤. 家乡腊肉扑鼻香[J]. *农村工作通讯*, 2022, (4): 64.
ZHUANG WQ. Hometown bacon is fragrant [J]. *Rural Work Commun*, 2022, (4): 64.
- [6] 聂黔丽, 王修俊, 周雯, 等. 低钠复合盐腌制对苗岭腊肉品质的影响[J]. *包装工程*, 2021, 42(19): 114–121.
NIE QL, WANG XJ, ZHOU W, *et al.* Effect of low-sodium composite salt curing on the quality of Miaoling bacon [J]. *Packag Eng*, 2021, 42(19): 114–121.
- [7] 熊敏, 秦建. 黔式传统腌腊肉食用安全性探析[J]. *微量元素与健康研究*, 2016, 33(4): 45–47.
XIONG M, QIN J. Analysis on the safety of Guizhou traditional bacon [J]. *Stud Trace Elements Health*, 2016, 33(4): 45–47.
- [8] 孔晓雪, 白云, 曾宪明, 等. 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[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(7): 88–93.
KONG XX, BAI Y, ZENG XM, *et al.* Effect of flavor proteases on proteolysis, antioxidant capacity and sensory quality of Guizhou preserved meat [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2019, 40(7): 88–93.
- [9] 刘娜, 梁美莲, 谭媛元, 等. 响应面法优化切片腊肉的脉冲强光-紫外照射杀菌工艺[J]. *肉类研究*, 2017, 31(6): 29–34.
LIU N, LIANG ML, TAN YY, *et al.* Optimizing the pulse-intense light-UV irradiation sterilization process of sliced bacon by response surface method [J]. *Meat Res*, 2017, 31(6): 29–34.
- [10] 孟晓烨. 辐照保鲜的果蔬安全问题[J]. *中国果菜*, 2014, 34(5): 49.
MENG XY. Safety problem of irradiated fresh fruits and vegetables [J]. *China Fruit Veg*, 2014, 34(5): 49.
- [11] 程述震, 王晓拓, 王志东. 辐照对肉品质影响[J]. *食品工业*, 2016, 37(2): 236–239.
CHENG SZ, WANG XT, WANG ZD. Effects of irradiation on meat quality [J]. *Food Ind*, 2016, 37(2): 236–239.
- [12] 刘俊轩, 苏霞, 何彦瑾, 等. 辐照保鲜技术对肉类及其制品影响的研究现状[J]. *食品与发酵工业*, 2012, 38(10): 151–154.
LIU JX, SU X, HE YJ, *et al.* Current status of the influence of irradiation preservation technology on meat and its products [J]. *Food Ferment Ind*, 2012, 38(10): 151–154.
- [13] 陈银基, 陈霞, 蒋伟鑫, 等. γ -辐照处理对谷物储藏及品质特性的影响研究进展[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(4): 358–362.
CHEN YJ, CHEN X, JIANG WX, *et al.* Research progress on the influence of γ -irradiation treatment on grain storage and quality characteristics [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2014, 35(4): 358–362.
- [14] 张振山, 刘双燕, 刘玉兰, 等. 辐照在食品工业中的应用研究进展[J]. *中国调味品*, 2013, 38(11): 113–116.
ZHANG ZS, LIU SY, LIU YL, *et al.* Progress in the application of radiation in the food industry [J]. *China Cond*, 2013, 38(11): 113–116.
- [15] 董娟聪, 程娇, 党旭红, 等. 辐照对冷冻肉类食品品质影响的研究现状[J]. *核技术*, 2022, 45(1): 17–23.
DONG JC, CHENG J, DANG XH, *et al.* Current status of the effect of irradiation on food quality of frozen meat [J]. *Nucl Technol*, 2022, 45(1): 17–23.
- [16] 周冉冉, 高虹, 范秀芝, 等. ^{60}Co - γ 射线和电子束辐照对鲜香菇保鲜效果的初步研究[J]. *核农学报*, 2019, 33(3): 490–497.
ZHOU RR, GAO H, FAN XZ, *et al.* Preliminary study on the effect of ^{60}Co - γ and electron beam irradiation on fresh mushroom preservation [J]. *J Nucl Agric Sci*, 2019, 33(3): 490–497.
- [17] 肖欢, 韩燕, 翟建青, 等. ^{60}Co - γ 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.
XIAO H, HAN Y, ZHAI JQ, *et al.* The ences and differences between the effect of ^{60}Co - γ and electron beam irradiation on the preservation of chilled chickens [J]. *J Nucl Agric Sci*, 2018, 32(7): 1358–1367.
- [18] 杨俊丽, 乔勇进, 王海宏, 等. 高能电子束与 ^{60}Co - γ 射线对大蒜辐照保鲜效果的比较研究[J]. *食品科学*, 2010, 31(12): 260–265.
YANG JL, QIAO YJ, WANG HH, *et al.* Comparative study of garlic irradiation preservation effect of high-energy electron beam and ^{60}Co - γ [J]. *Food Sci*, 2010, 31(12): 260–265.
- [19] HUSSAIN PR, DAR MA, WANI AM. Impact of radiation processing on quality during storage and post-refrigeration decay of plum (*Prunus domestica* L.) cv. Santarozza [J]. *Rad Phys Chem*, 2013, 85: 234–242.
- [20] KONG Q, WU A, QI W, *et al.* Effects of electron -beam irradiation on blueberries inoculated with *Escherichia coli* and their nutritional quality and shelf life [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2014, 95: 28–35.
- [21] 石彬, 李咏富, 何扬波, 等. ^{60}Co - γ 射线辐照对“贵长”猕猴桃储藏品质的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(15): 6042–6048.
SHI B, LI YF, HE YB, *et al.* Effect of ^{60}Co - γ irradiation on storage quality of “Guichang” kiwi [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(15): 6042–6048.
- [22] 周慧娟, 叶正文, 施春晖, 等. 高能电子辐照对猕猴桃保鲜效果的影响[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(25): 133–138.
ZHOU HJ, YE ZW, SHI CH, *et al.* Effects of high-energy electron irradiation on the preservation effect of kiwi fruit [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2015, 31(25): 133–138.
- [23] 白婵, 耿胜荣, 徐晨, 等. 不同剂量率 ^{60}Co 源与电子加速器对草鱼辐照保鲜效果影响[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(9): 333–338.
BAI C, GENG SR, XU C, *et al.* Different dose rates of ^{60}Co sources and electron accelerators affect the preservation effect of grass carp irradiation [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2017, 38(9): 333–338.
- [24] 陈尚戎, 李吉洪, 汤利元, 等. 气调包装对辐照生猪肉保鲜效果及品质的影响[J]. *肉类工业*, 2022, (4): 12–17.

- CHEN SW, LI JH, TANG LY, *et al.* Influence of gas-regulated packaging on the preservation effect and quality of irradiated fresh pork [J]. *Meat Ind*, 2022, (4): 12–17.
- [25] 鉏晓艳, 李海蓝, 张金木, 等. 不同剂量电子束辐照对鲈鱼半成品灭菌及品质的影响[J]. *保鲜与加工*, 2018, 18(5): 49–54.
- CHU XY, LI HL, ZHANG JM, *et al.* Effect of different doses of electron beam irradiation on the sterilization and quality of sea bass semi-finished products [J]. *Stor Proc*, 2018, 18(5): 49–54.
- [26] 王品. 猪肉半干香肠发酵成熟过程中脂肪酸变化分析[J]. *食品安全导刊*, 2020, (21): 79.
- WANG P. Analysis of fatty acid changes during fermentation and maturation of pork semi-dried sausage [J]. *China Food Saf Mag*, 2020, (21): 79.
- [27] 农秋云, 刘嘉琪, 单体中. 猪肉中脂肪酸组成的品种差异及脂肪酸沉积的调控机制[J]. *动物营养学报*, 2019, 31(6): 2507–2514.
- NONG QY, LIU JQ, SHAN TZ. Variety ences of fatty acid composition and regulation mechanism of fatty acid deposition in pork [J]. *Chin J Anim Nutr*, 2019, 31(6): 2507–2514.
- [28] 侯召华, 罗婧, 宁浩然, 等. 冷鲜与真空冷冻干燥猪里脊肉中脂肪酸气相色谱-质谱分析[J]. *肉类研究*, 2014, 28(7): 15–18.
- HOU ZH, LUO J, NING HR, *et al.* Fatty acid gas chromatography-mass spectrometry analysis in chilled and vacuum freeze-dried pig tenderloin [J]. *Meat Res*, 2014, 28(7): 15–18.
- [29] 席斌, 郭天芬, 杨晓玲, 等. 对不同品种猪肉中脂肪酸、氨基酸及肌苷酸的比较研究[J]. *饲料研究*, 2019, 42(7): 31–34.
- XI B, GUO TF, YANG XL, *et al.* Comparative study of fatty acids, amino acids and inosines in different varieties of pork [J]. *Feed Res*, 2019, 42(7): 31–34.
- [30] 许雪萍, 李静, 范亚苇, 等. 烹调方式对猪肉肌肉脂肪中脂肪酸组成的影响[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(5): 196–203.
- XU XP, LI J, FAN YW, *et al.* Effect of cooking style on fatty acid composition in intramuscular fat in pork [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2020, 20(5): 196–203.
- [31] 尉立刚, 柴雅婷, 郭超然, 等. 冷冻储藏对猪肉、羊肉和牛肉中脂肪酸含量变化的影响[J]. *中国科技论文*, 2019, 14(4): 385–390.
- WEI LG, CHAI YT, GUO CR, *et al.* Effect of frozen storage on fatty acid content changes in pork, mutton, and beef [J]. *China Sci Paper*, 2019, 14(4): 385–390.
- [32] 石言彪, 高偲佳, 王会. 短链脂肪酸调控过敏性疾病研究进展[J]. *四川大学学报(医学版)*, 2022, 53(1): 28–34.
- SHI YB, GAO CJ, WANG H. Progress in short-chain fatty acid regulation of allergic diseases [J]. *J Sichuan Univ (Med Sci)*, 2022, 53(1): 28–34.
- [33] 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.
- HONG QH, WANG LY, SUN ZM, *et al.* Application of irradiation technology in the preservation of meat products [J]. *J Nucl Agric Sci*, 2021, 35(3): 667–673.
- [34] 刘俊轩, 苏霞, 何彦瑾, 等. 辐照保鲜技术对肉类及其制品影响的研究现状[J]. *食品与发酵工业*, 2012, 38(10): 151–154.
- LIU JX, SU X, HE YJ, *et al.* Current status of the influence of irradiation preservation technology on meat and its products [J]. *Food Ferment Ind*, 2012, 38(10): 151–154.

(责任编辑: 于梦娇 郑 丽)

作者简介



石 彬, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为农产品辐照加工。

E-mail: 406140627@qq.com