

电子束辐照进口冷冻牛腩的剂量分布及 感官特性研究

戚文元¹, 王海宏¹, 郑琦¹, 岳玲¹, 颜伟强¹, 陈志军¹, 段卓旭², 张艳艳³, 孔秋莲^{1*}

(1. 上海市农业科学院, 上海 201401; 2. 上海束能辐照技术有限公司, 上海 201401; 3. 上海商学院, 上海 201400)

摘要: **目的** 确认电子束辐照冷冻牛腩的剂量分布特性, 研究不同剂量电子束辐照对冷冻牛腩的杀菌效果及辐照后产品色泽、风味、质构等感官指标的变化。**方法** 对不同厚度的冷冻牛腩块分别用 8 kGy 进行单面及双面电子束辐照, 检测其内部剂量分布, 确定辐照适宜的产品厚度, 在此基础上用 0、2、4 kGy 不同剂量对商品包装(1 kg/袋, 最大厚度不超过 8 cm)的冷冻牛腩进行电子束双面辐照, 检测菌落总数、霉菌和酵母、大肠菌群, 同时利用色差仪、电子鼻、质构仪检测冷冻牛腩及其熟制品的色泽、风味、质构等感官指标。**结果** 单面电子束辐照冷冻牛腩的内部剂量呈先上升后下降趋势, 快速下降发生在 3.5~5 cm 深度区域, 产品厚度 3.5 cm 时剂量不均匀度为 1.57。双面辐照可增加电子束穿透深度, 8.1 cm 厚度双面辐照的剂量不均匀度为 1.62。冷冻牛腩中菌落总数、霉菌和酵母、大肠菌群均有检出, 电子束辐照可显著降低冷冻牛腩微生物水平, 商品包装的冷冻牛腩经 2 kGy 电子束双面辐照后无大肠菌群检出, 菌落总数、霉菌和酵母分别较未辐照处理降低 98.8% 和 89.2%。电子束辐照对冷冻牛腩及其熟制品风味、质构无不良影响, 4 kGy 处理显著还提高了冷冻牛腩回复性, 但电子束辐照导致冷冻牛腩色泽参数 a 值和 b 值显著下降, 且剂量越高下降幅度越大。电子束辐照对色泽的影响程度在冷冻牛腩熟制后降低, 2 kGy 处理的 b 值显著高于未辐照处理, 其他各处理的 a 值、 b 值与未辐照处理均无显著差异。**结论** 通过对电子束辐照进口冷冻牛腩的剂量分布及感官特性的研究, 可为冷冻牛腩辐照杀菌的工艺设定和质量控制提供技术参考依据。

关键词: 电子束辐照; 冷冻牛腩; 剂量分布; 杀菌; 感官特性

Dose distribution and sensory characteristics of imported frozen beef sirloin irradiated by electron beam

QI Wen-Yuan¹, WANG Hai-Hong¹, ZHENG Qi¹, YUE Ling¹, YAN Wei-Qiang¹, CHEN Zhi-Jun¹, DUAN Zhuo-Xu², ZHANG Yan-Yan³, KONG Qiu-Lian^{1*}

(1. Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201401, China; 2. Shanghai Shuneng Irradiation Technology Co., Ltd., Shanghai 201401, China; 3. Shanghai Business School, Shanghai 201400, China)

ABSTRACT: Objective To confirm the dose distribution characteristics of frozen beef sirloins irradiated by electron beam, to study the germicidal efficacy of different doses of electron beam irradiation on frozen beef sirloins and the changes of color, flavor, texture and other sensory indicators of irradiated products. **Methods** The frozen

基金项目: 上海市科技兴农项目(沪农科攻字 2016 第 6-3-4)

Fund: Supported by the Shanghai Municipal Agricultural Commission Program (2016 Hu Nong Ke Gong Zi No.6-3-4)

*通信作者: 孔秋莲, 研究员, 主要研究方向为农产品保鲜加工。E-mail: qiuliankong@yahoo.com

*Corresponding author: KONG Qiu-Lian, Professor, Crop Breeding and Cultivation Research Institute, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, No. 1000 Jinqi Road, Fengxian District, Shanghai 201401, China. E-mail: qiuliankong@yahoo.com

beef sirloins with different thickness were irradiated by electron beam with 8 kGy in single and double-sided ways, respectively. The internal dose distribution of the products was detected to determine the appropriate product thickness. On this basis, the frozen beef sirloins of commodity packaging (1 kg/bag, maximum thickness less than 8 cm) were irradiated with different doses at 0, 2 and 4 kGy in double-sided way, and the total number of colonies, mold and yeast, coliforms were detected. Meanwhile, the color, flavor and texture of raw and cooked beef sirloins were detected by color difference meter, electron nose and texture analyzer. **Results** The internal dose of frozen beef sirloin single-sided irradiated by electron beam first increased and then decreased, the rapid decrease occurred in the depth of 3.5-5 cm, and the dose uniformity ratio (DUR) was 1.57 when the product thickness was 3.5 cm. Double-sided irradiation increased the penetration depth of electron beam, and the DUR of double side irradiated frozen beef sirloin with 8.1 cm thickness was 1.62. The total number of colonies, mold and yeast, coliforms were detected in frozen raw beef sirloin. Electron beam irradiation could significantly reduce the microbial levels, no coliforms were detected in frozen beef sirloins double-sided irradiated by electron beam at dose of 2 kGy, and the total number of colonies, mold and yeast decreased by 98.8% and 89.2% respectively. No undesirable effects were found in flavor and texture of irradiated samples. Moreover, the resilience of frozen beef sirloin irradiated at dose of 4 kGy was significantly higher than that of unirradiated ones. However, irradiation resulted in significant decrease of the color parameters (*a* and *b* values), and the higher the dose, the greater the decline. The effect of electron beam irradiation on color of beef sirloin decreased after cooked, and *b* value of 2 kGy irradiated samples was significantly higher than that of unirradiated ones. There was no significant difference in *a* value and *b* value between other treatments and non irradiation treatment. **Conclusion** This study on the dose distribution and sensory characteristics of imported frozen beef sirloin irradiated by electron beam can provide technical reference for the process setting and quality control of frozen beef sirloin irradiation sterilization.

KEY WORDS: electronic beams irradiation; frozen beef sirloin; dose distribution; sterilization; sensory characteristics

0 引言

牛肉是我国消费量仅次于猪肉的第二大肉品, 预测 2025 年我国牛肉需求量可达 1200 万 t^[1-3]。但我国肉类生产结构不尽合理, 2016 年牛肉产量 717 万 t, 仅占国内肉类总产量的 8.4%, 远不能满足居民消费需求^[4]。我国长期依靠进口弥补国内牛肉产需缺口, 2017 年肉类产品进口额 71.96 亿美元, 肉类产品进口量从 2007 年的 93.99 万 t 增加到 261.27 万 t, 其中牛肉进口占比从 0.39% 增加到 26.6%^[5-6]。但新鲜牛肉极易腐败变质, 4 °C 冷藏牛肉的货架期只有 3~5 d, 且随着贮藏时间的延长, 牛肉的食用品质及安全性逐渐降低^[7]。腐败微生物和病原微生物是影响肉类货架期和食用安全的重要不利因素, 即使在最严格的屠宰条件下, 新鲜肉类加工过程中也可能受到微生物污染^[8], 统计数字表明, 全球每年因腐败损耗的肉类总量高达数百万 t^[9]。为保证牛肉品质和食用安全, 进口牛肉多为冷冻产品, 但冷冻产品在长期贮藏过程中仍有微生物缓慢生长, 且冷冻状态使产品的消毒灭菌等安全控制措施受到较大技术限制。

辐照技术可提高食品的微生物安全性, 延长食品货架期, 已在世界 50 多个国家允许使用^[10]。作为一种物理冷加工技术, 辐照加工可满足不宜进行热处理的食品的消毒杀

菌需求, 技术利用 γ 射线、电子束、X 射线等对食品进行处理, 可杀菌、除虫、抑制生物酶活性, 其应用范围包括抑制发芽、杀灭昆虫和寄生虫、延长保质期、消除致病菌、减少微生物数量等多个方面^[11]。但研究及生产实践发现, 辐照加工对肉类及其制品的色泽、风味等感官品质易产生不良影响, 如红色消退^[12]、辐照异味等^[13]。电子束辐照是一种新型辐照方式, 在加工效率、减少某些产品的辐照异味方面比传统 γ 射线辐照更有优势^[14]。但电子束穿透能力低于 γ 射线, 为保证辐照产品的加工效果和质量, 必须对工艺和产品辐照厚度进行严格要求^[15-16]。有关电子束辐照工艺的研究目前少见报道, 本研究以进口冷冻牛腩为试材, 明确电子束辐照中冷冻牛腩的剂量分布特性, 探讨适宜的加工厚度, 在此基础上确认不同剂量电子束辐照对冷冻牛腩的微生物水平及感官品质的影响, 明确电子束辐照冷冻牛腩的可行性工艺及其加工效果, 以期电子束辐照进口牛肉产品的生产实践及产品质量控制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

冷冻牛腩块, 市购, 规格 1 kg/袋, 单块尺寸约 2.7 cm×2.7 cm。原料产地巴西, 原料分装地黑龙江, 贮运温度

-18℃。保温袋运送至实验室,-18℃冰柜保存直至电子束辐照处理,保证产品到实验室后24 h内进行辐照处理。

辐照后产品于-18℃贮存,检测前提前取出,按NY/T 3524—2019《冷冻肉解冻技术规范》方法空气解冻,解冻后检测微生物指标和感官指标。熟牛腩材料为冷冻牛腩解冻后在90℃水浴锅30 min至中心温度达75℃^[17]。表中冷冻牛腩以R标出,熟牛腩以C标出。

1.2 仪器与试剂

IS1020 电子加速器(北京清华同方威视公司);CTA FTR125 薄膜剂量计(日本 FujiFilm 公司);重铬酸银液体化学剂量计(上海束能辐照技术有限公司);Chroma Meter CR-400 色差仪(日本柯尼卡美能达公司);PEN3 电子鼻(北京盈盛恒泰科技有限责任公司);TA-XT Plus 型质构仪(英国 SMS 公司)。

平板计数琼脂培养基、孟加拉红琼脂培养基、月桂基硫酸盐胰蛋白胨培养基、煌绿乳糖胆盐培养基(广州环凯陆桥科玛嘉公司)。

1.3 方法

1.3.1 电子束辐照

辐照利用电子加速器在上海束能辐照技术有限公司进行,设备能量10 MeV,功率20 kW,剂量率8.44 kGy/s。

(1) 剂量分布检测的电子束辐照

选择形状较规则,大小较一致的冷冻牛腩块,稍加修整,按单块(高度约2.7 cm)、双块(高度约5.4 cm)、3块(高度约8.1 cm)叠加形成不同产品厚度处理,分别在不同厚度处理的牛腩块中放置三醋酸纤维素(cellulose triacetate, CTA)薄膜剂量计,单块厚度处理在牛腩上下表面和中间层放置CTA,双块和3块厚度叠加处理分别在上下表层、各层接触面及各块牛腩的中间层放置CAT。单块、双块和3块厚度处理牛肉分别放置3片、5片和7片CTA。每种深度处理分别进行单面及双面辐照,单次辐照剂量8 kGy。每个剂量水平均设置3次重复。测定单面及双面辐照情况下不同厚度牛腩内部的剂量变化情况,并根据厚度范围内的剂量变化计算不同厚度的剂量不均匀度(测定深度范围内剂量最高点与剂量最低点的剂量比值)。

(2) 商品包装的电子束辐照

在确认剂量分布的基础上,对商品包装的冷冻牛腩进行电子束辐照,市购包装规格1 kg/袋,单包最大厚度不超过8 cm。冷冻牛腩单包单层摆放,进行电子束双面辐照,剂量水平为0、2、4 kGy。每个剂量水平设置3次重复。按JJG 1028—91《使用重铬酸银剂量计测量 γ 射线水吸收剂量标准方法》,使用重铬酸银液体化学剂量计对实际辐照剂量进行监测,确保剂量水平误差在 $\pm 10\%$ 之内。剂量计的校准按照GB/T 16640—2008《辐射加工剂量测量系统的选择和校准导则》进行。

1.3.2 微生物学检验

菌落总数、霉菌和酵母、大肠菌群分别参照GB 4789—2016中的系列标准4789.2《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》、4789.15《食品安全国家标准 食品微生物学检验 霉菌和酵母计数》、4789.3《食品微生物学检验 大肠菌群计数》。

1.3.3 色泽测定

Chroma Meter CR-400 色差仪检测。每个处理测试3块,每块测试3次,测试时避开白色脂肪部位。色泽参数使用L、a、b系统,L、a、b是三维矩形颜色空间参数,L为黑白明度轴参数,0表示黑,100表示白;a为红/绿轴参数,a(+)表示红色程度,a(-)表示绿色程度;b为蓝/黄轴参数,b(+)表示黄色程度,b(-)表示蓝色程度。

1.3.4 风味评价及测定

风味评价采用10点制评分法,参考SOHN等^[18]方法稍有改动,评价人员10人,分别对辐照前后的冷冻牛腩和熟制牛腩嗅闻评分,对风味可接受程度进行评价,不可接受0~1分,可接受2~4分,喜欢5~7分,非常喜欢8~9分。

风味测定使用PEN3电子鼻检测,电子鼻气敏传感器探头包括W1C、W5S、W3C、W6S、W5C、W1S、W1W、W2S、W2W和W3S。牛腩样品切成0.2 cm×0.2 cm×0.2 cm的小颗粒,取2.0 g放入20 mL顶空瓶中,静置20 min后检测。检测条件:样品测定间隔1 s,清洗时间120 s,归零时间5 s,样品准备时间5 s,测定时间100 s,载气流量400 mL/min,进样流量400 mL/min。传感器信号在50 s后基本稳定,选定采集信号时间为80 s。不同辐照处理样品测定3次重复,测定时保持室温25℃。电子鼻测定结果利用Winmuster进行响应值分析和主成分分析(principal component analysis, PCA)。

1.3.5 质构测定

TA-XT Plus 型质构仪检测。取牛腩块稍加修整,切成约长1.5 cm×1.5 cm×1.5 cm的小块。检测条件:TPA模式,探头型号P/36R,测前速率1 mm/s,测中速率1 mm/s,测后速率1 mm/s,间隔时间5 s,数据收集率200点/s,压缩距离10 mm(生牛腩),8 mm(熟牛腩),触发力5.0 g,触发类型auto。每个样品重复测定3次,结果取平均值。

1.4 数据统计与分析

采用SPSS 19.0 统计分析软件进行显著性差异分析。

2 结果与分析

2.1 电子束辐照冷冻牛腩的剂量与深度关系

以不同块数的冷冻牛腩块叠加,研究不同厚度冷冻牛腩产品内的深度剂量分布情况。图1所示的是单面辐照(S)和双面辐照(D)时冷冻牛腩的深度剂量分布,为更直观显示,以被辐照产品上表面的剂量为基准剂量,对其他部位剂量进行归一化处理,均以与上表面剂量的比值表示。

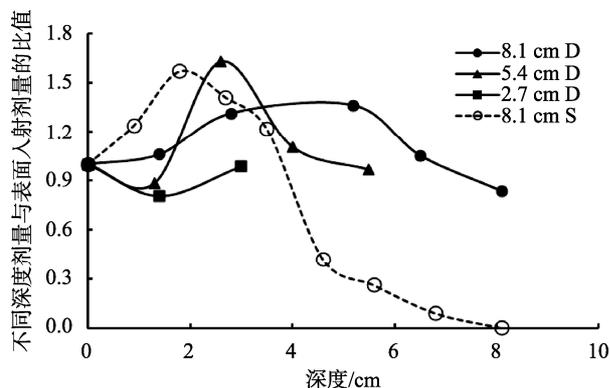


图 1 单面(S)及双面(D)电子束辐照冷冻牛腩的深度剂量分布
Fig.1 Depth dose distribution in frozen beef sirloin irradiated by electron beam in single-side (S) and double-side (D) ways

由图 1 看出, 单面辐照时, 冷冻牛腩内剂量随深度增加呈现先上升后下降趋势, 最高剂量点出现在 2.5 cm 深度点附近, 与表面入射剂量相等的点出现在 3.5 cm 深度点附近, 随后快速下降, 4~5 cm 深度区域即下降到表面入射剂量的 30%。计算单面辐照处理不同深度处理的剂量不均匀度(最高点与最低点剂量比值), 发现辐照深度 3.5 cm 时剂量不均匀度为 1.57。双面辐照可增加产品的辐照深度, 2.7、5.4、8.1 cm 深度内所测点剂量都在表面入射剂量的 80% 以上, 计算不同深度的最高点与最低点剂量比值, 发现 3 种不同厚度的剂量不均匀度分别为 1.23、1.85、1.62(图 1)。综合考虑辐照效率和剂量不均匀度, 以 8.1 cm 厚度双面辐照最优。

2.2 电子束辐照冷冻牛腩的微生物变化

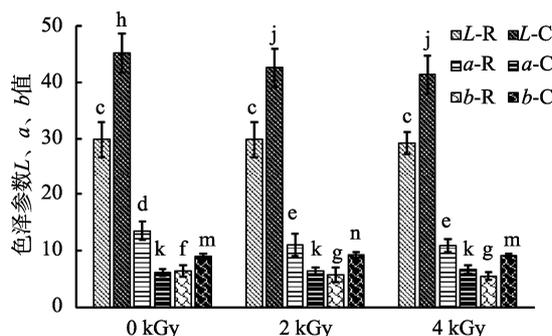
不同剂量双面辐照的冷冻牛腩的微生物水平见表 1。未辐照的冷冻牛腩菌落总数、霉菌和酵母、大肠菌群均有检出, 电子束辐照可有效降低冷冻牛腩的微生物水平, 2 kGy 和 4 kGy 处理均无大肠菌群检出; 2 kGy 处理的菌落总数、霉菌和酵母分别较未辐照处理降低 98.8% 和 89.2%; 4 kGy 处理的菌落总数、霉菌和酵母均小于 100 CFU/g, 分别为未辐照处理的 0.08% 和 4.7%。大肠菌群是常见食源性菌群, 也是食源性细菌污染的主要监测指标^[19-20], 其中致病性的致泻性大肠埃希氏菌在生畜禽肉中常有检出^[21]。因此, 电子束辐照对大肠菌群具有良好的杀灭效果, 低剂量处理即可有效保证产品的卫生安全。

表 1 电子束辐照冷冻牛腩的微生物水平变化
Table 1 Changes of microorganism level in frozen beef sirloin irradiated by electron beam

剂量/kGy	菌落总数/(CFU/g)	霉菌和酵母/(CFU/g)	大肠菌群/(MPN/g)
0	9.1×10^4	9.0×10^2	75
2	1.1×10^3	97	<3
4	76	42	<3

2.3 电子束辐照冷冻牛腩的色泽变化

电子束辐照对牛腩色泽产生影响, 辐照后牛腩红色消退。用色差仪对牛腩色泽进行检测, 结果见图 2。冷冻牛腩辐照后黑白参数 L 值变化不大, 统计分析也未发现显著差异。但辐照导致冷冻牛腩红绿参数 a 值和蓝黄参数 b 值下降, 且剂量越高下降幅度越大, 其中 2 kGy 下降幅度分别为 18.2% 和 9.8%, 4 kGy 下降幅度分别为 19.6% 和 13.6%。对不同剂量处理冷冻牛腩及熟牛腩的 L 、 a 、 b 值分别进行显著性分析, 统计分析结果表明, 未辐照冷冻牛腩的 a 值和 b 值显著高于辐照处理, 表明辐照导致冷冻牛腩红绿参数值向绿色偏移, 黄蓝参数值向蓝色偏移, 红色程度降低、蓝色程度增加, 与实际观察中牛腩红色消退结果一致。但 2 kGy 和 4 kGy 处理的 a 值和 b 值无显著差异。牛腩熟制品的黑白参数 L 值较熟制前上升, 表明亮度增加, 未辐照处理的上升幅度显著高于 2 kGy 和 4 kGy 处理, 2 kGy 和 4 kGy 处理的 L 值无显著差异。冷冻牛腩熟制后红绿参数 a 值下降, 蓝黄参数 b 值上升, 辐照处理的 a 值和 b 值均高于未辐照处理, 但除 2 kGy 处理的 b 值显著高于未辐照处理外, 各处理间熟牛腩的 a 值和 b 值无显著差异。



注: 不同小写字母表示差异显著, 仅对同一产品单个指标的不同剂量间比较, 其中 c 标识冷冻牛腩 L 值, d 和 e 标识冷冻牛腩 a 值, f 和 g 标识冷冻牛腩 b 值, h 和 j 标识熟牛腩 L 值, k 标识熟牛腩 a 值, m 和 n 标识熟牛腩 b 值。

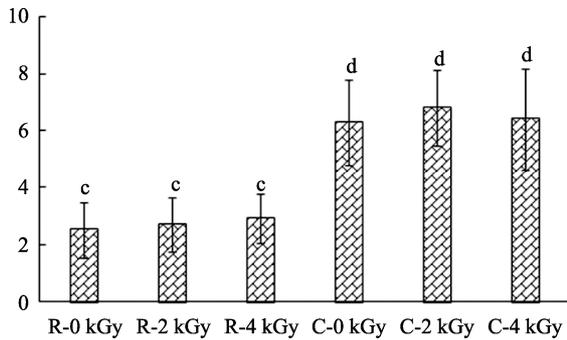
图 2 电子束辐照牛腩的色泽参数(L 、 a 、 b)变化($n=3$)

Fig.2 Changes of color parameters (L , a and b) of beef sirloin irradiated by electron beams ($n=3$)

2.4 电子束辐照冷冻牛腩的风味变化

风味评分结果表明, 2 kGy 和 4 kGy 电子束处理对冷冻牛腩及其熟制产品的风味无不良影响。冷冻牛腩 3 个处理的总体风味均在可接受水平(2~4 分), 熟牛腩 3 个处理的总体风味均在喜欢水平(5~7 分)。电子束辐照处理可以在适当条件下提高牛腩的被接受程度, 电子束辐照处理的冷冻牛腩的风味得分高于未辐照冷冻牛腩, 其中冷冻牛腩 4 kGy 处理的风味评分最优; 熟制后 2 kGy 电子束辐照处理的牛腩得分最高(图 3)。统计分析结果表明, 冷冻牛腩及

其熟制品的风味在各处理间差异均不显著。



注: 不同小写字母表示差异显著, 仅对同一产品单个指标的不同剂量间比较, 其中 c 标识冷冻牛腩, d 标识熟牛腩。

图 3 电子束辐照牛腩的风味评分($n=3$)

Fig.3 Flavor scores of beef sirloin irradiated by electron beam ($n=3$)

电子鼻作为一种智能仿生嗅觉系统, 利用气敏传感器阵列、信号处理和模式识别实现生物嗅觉功能模拟, 可通过获取的气味指纹信息对气体或挥发性成分做定性或定量的检测, 已有研究用于肉制品、酒类、茶叶、调味品等食品的挥发气味的识别和分类^[22]。

对不同处理方式的牛腩样品进行电子鼻分析, 将得到的数据进行主成分分析。由图 4-1 看出, 主成分 PC1 贡献率为 60.9%, PC2 贡献率 21.2%, 两个主成分累积贡献率为 82.1%(超过 70%), 说明 PC1 和 PC2 能够反映样品的整体信息。辐照对冷冻牛腩风味有一定影响, 0、2、4 kGy 处理的分布区域距离明显, 其中 2 kGy 处理分别和 0 kGy、4 kGy 处理间有交叉重叠, 4 kGy 处理和 0 kGy 处理间无交叉重叠,

说明 4 kGy 处理的风味物质与未辐照样品有明显差异。冷冻牛腩熟制后风味物质发生明显变化, 0、2、4 kGy 处理的熟牛腩的分布区域均与对应剂量的冷冻牛腩有明显距离, 但不同辐照处理间差异变小, 0、2、4 kGy 处理的分布区域互有交叉重叠。电子鼻不同传感器探头的分布区域见图 4-2, 可发现冷冻牛腩的分布区域集中在 W1S、W2S、W3S、W5S、W6S 探头区域, 熟制后的风味分布区域集中在 W1W、W2W、W1C、W3C、W5C 探头区域。

风味雷达图分析发现, 冷冻牛腩和熟牛腩的响应值不同, 不同探头间的差异和图 4-2 一致, 其中各处理在 W1S、W2S、W5S 探头上的响应值有明显差异。进一步分析处理间差别明显的冷冻牛腩的响应值, 可看出 W1S、W2S、W3S、W5S、W1W、W2W 上响应值差别明显, 其中 W1S、W2S、W3S 可以较好的区分未辐照冷冻牛腩样品及不同剂量辐照的冷冻牛腩样品(图 5)。

2.5 电子束辐照冷冻牛腩的质构变化

电子束辐照对牛腩质构参数的影响见表 2。电子束辐照对冷冻牛腩的硬度、弹性、内聚性无显著影响, 但在黏性、咀嚼性、回弹性方面表现显著性差异, 其中 2 kGy 处理的黏性、咀嚼性显著高于 0 kGy 处理和 4 kGy 处理, 4 kGy 处理的回复性显著高于 0 kGy 处理。冷冻牛腩熟制后, 各处理在质构方面的差异幅度降低, 仅 4 kGy 处理在弹性方面显著高于 0 kGy 处理和 2 kGy 处理。徐亚丹等^[23]研究发现, 牛肉低温贮藏过程中, 硬度、回复性随时间延长而降低, 与牛肉新鲜度显著相关, 回复性可作为牛肉低温储藏期间新鲜度的检测指标。由此认为电子束辐照对牛腩质构无不良影响, 4 kGy 处理显著还提高了冷冻牛腩回复性。

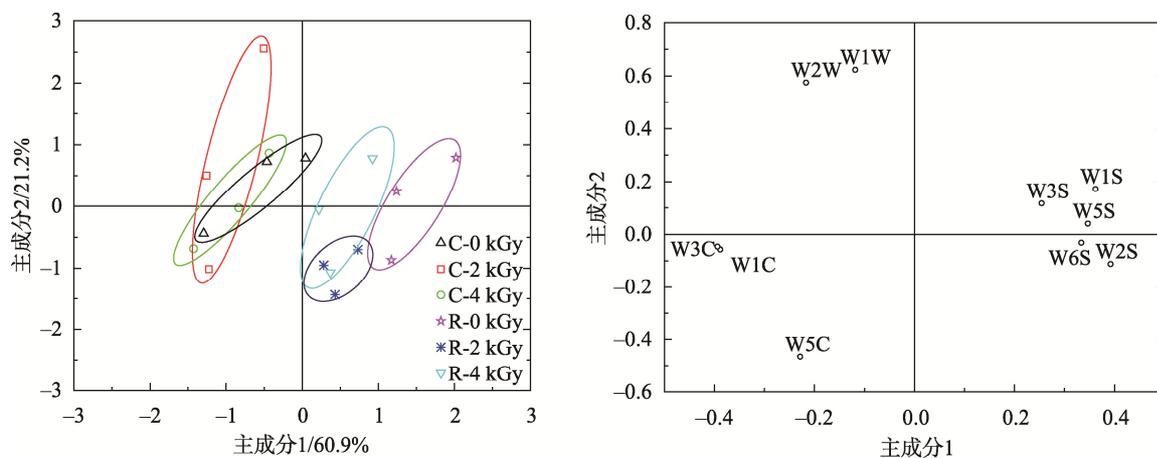


图 4 电子束辐照牛腩风味变化的 PCA 分析

Fig.4 PCA analysis of flavor changes of beef sirloin irradiated by electron beam

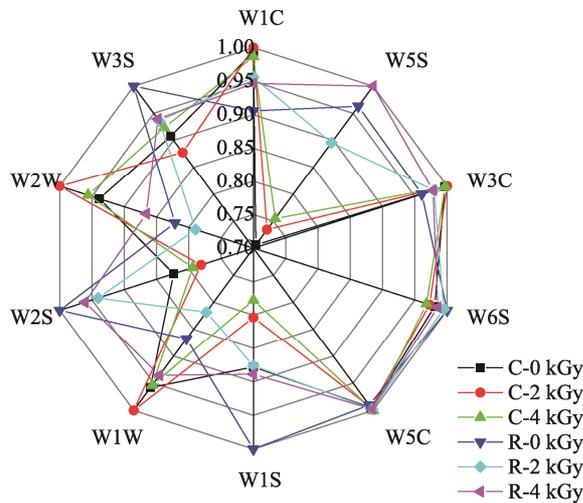


图 5 电子束辐照牛腩的风味雷达图

Fig.5 Flavor radar image of beef sirloin irradiated by electron beam

3 结论与讨论

辐照产品包装内的剂量不是均匀一致的, 一般用剂量不均匀度[剂量均匀率(dose uniformity rate, DUR)=最高剂量/最低剂量]描述这种剂量不均匀性, DUR 与产品密度以及包装大小有关。为保证被辐照产品的质量均一性, DUR 应尽量小, 例如对实验研究样品, DUR 应尽量不超过 1.05, 一般通过减小包装尺寸可以实现。但在实际生产加工中, 因加工效率和经济效益的原因, DUR 要远超过 1.05, 一般实际生产中 γ 射线辐照要求 DUR 控制在 1.5~3.0, 但在产品包装、密度等特殊情况下, DUR 有时候可能更高^[24]。本研究发现, 单面电子束辐照冷冻牛腩, 产品厚度 3.5 cm 时 DUR 为 1.57, 双面辐照可增加电子束穿透深度, 8.1 cm 厚度双面辐照 DUR 为 1.62。为保证加工效率, 8.1 cm 厚度双面辐照是冷冻牛腩可行的电子束辐照工艺。

表 2 电子束辐照牛腩的质构参数变化

Table 2 Changes in texture of beef sirloin irradiated by electron beam

剂量	硬度	弹性	内聚性	黏性	咀嚼性	回复性
R-0 kGy	1836.31±72.14 ^c	0.63±0.06 ^c	0.49±0.03 ^c	900.67±91.48 ^c	571.37±94.00 ^c	0.16±0.01 ^c
R-2 kGy	4084.90±1234.27 ^c	0.59±0.04 ^c	0.51±0.06 ^c	1943.67±286.88 ^d	1125.72±181.14 ^d	0.19±0.00 ^{cd}
R-4 kGy	1637.67±459.02 ^c	0.68±0.07 ^c	0.60±0.06 ^c	927.93±170.20 ^c	616.76±74.69 ^c	0.22±0.04 ^d
C-0 kGy	11079.58±1576.30 ^c	0.73±0.03 ^c	0.66±0.04 ^c	7316.67±1254.17 ^c	5334.66±1068.54 ^c	0.27±0.02 ^c
C-2 kGy	12009.91±1091.92 ^c	0.75±0.02 ^c	0.64±0.02 ^c	7700.02±888.45 ^c	5781.73±754.69 ^c	0.28±0.02 ^c
C-4 kGy	15110.34±1518.82 ^c	0.86±0.03 ^f	0.72±0.07 ^c	10874.01±2018.00 ^c	9436.00±2079.04 ^c	0.32±0.04 ^c

注: 不同小写字母表示差异显著, 仅对同一产品单个指标的不同剂量间比较, 其中 c 和 d 标识冷冻牛腩, e 和 f 标识熟牛腩。

辐照对肉类色泽的红绿参数 a 值影响较大, 其变化因肉类种类而异, 鸡肉^[25]、猪肉及其火腿制品^[26-29]辐照后 a 值升高, 三文鱼^[12]、牛肉^[30-31]辐照后 a 值下降。辐照导致肉类红色消退的原因是肌红蛋白分子特别是铁离子对辐射较为敏感, 研究发现牛肉色泽对辐照比较敏感, 辐照后易出现绿色或棕灰色等不良色泽^[32]。本研究发现未辐照冷冻生牛腩的 a 值和 b 值显著高于辐照处理, 表明辐照导致冷冻生牛腩红绿参数值向绿色偏移, 黄蓝参数值向蓝色偏移, 但 2 kGy 和 4 kGy 处理的 a 值和 b 值无显著差异。另外, 辐照对冷冻生牛腩色泽的影响在熟制后明显降低。辐照异味是食品辐照中另一个需要关注的因素, 肉类食品辐照易发生辐照异味, 原因可能是辐照过程中产生的自由基导致食品中脂类、蛋白质等成分氧化, 产生类似臭鸡蛋、腥味、酸味等不良刺激性气味^[13,18,33]。相比 γ 射线辐照, 电子束辐照可以更好地保持风干的原有风味, 降低辐照异味程度^[34]。本研究发现, 电子束辐照冷冻牛腩及其熟制品的风味受电子束辐照影响较小, 各处理间风味评价得分未发现显著差异, 电子束辐照处理还可在适当条件下提高牛

腩的风味接受程度, 冷冻牛腩 4 kGy 处理的风味评分最优, 加工熟制后 2 kGy 电子束辐照处理的牛腩得分最高。SOHN 等^[18]研究也发现, 10 kGy γ 射线辐照的碎牛肉的风味评价与未辐照样品无显著差异。电子鼻分析结果表明, 不同剂量电子束辐照冷冻牛腩的风味 PCA 区域有所差异, 其中 4 kGy 处理样品与未辐照样品的差异程度大于 2 kGy 处理。另外, 冷冻牛腩的分布区域集中在 W1S、W2S、W3S、W5S、W6S 探头区域, 熟制后风味分布区域集中在 W1W、W2W、W1C、W3C、W5C 探头区域, 其中 W1S、W2S、W3S 可以较好的区分未辐照冷冻牛腩样品和不同剂量辐照的冷冻牛腩样品。电子束辐照后, 冷冻牛腩及其熟制品的质构参数无不良变化, 辐照冷冻牛腩的硬度、弹性、内聚性未发生显著变化, 而且 2 kGy 处理显著提高了黏性、咀嚼性, 4 kGy 处理显著提高了回复性, 熟牛腩 4 kGy 处理在弹性方面显著高于 0 kGy 处理和 2 kGy 处理。赖宏刚等^[35]研究也表明, 冷鲜鸡肉经 2~8 kGy γ 射线处理后咀嚼性有所增加。TOLEDO 等^[36]认为辐照后鸡胸肉嫩度下降的原因是辐照导致了肉类汁液损失, 但发现嫩度下降幅度和辐照剂量没

有相关性。LV等^[37]研究发现1~9 kGy辐照后,文蛤肉的硬度、黏性、咀嚼性和回复性上升,1~5 kGy剂量范围内,剂量越高,上升幅度越大,但7、9 kGy剂量的硬度、黏性、咀嚼性和回复性反而低于5 kGy,其变化趋势和肌原纤维蛋白二级结构中 β -折叠型含量的变化趋势一致,可能辐照导致部分 α -螺旋结构转为 β -折叠结构,而剂量增加到一定程度后, β -折叠和 β -转角两种二级结构还发生互相转化,认为是辐照导致肌原纤维蛋白二级结构变化,从而导致质构参数硬度、黏性、咀嚼性和回复性变化。

电子束辐照在防止食源性致病微生物污染方面具有巨大的应用潜力,致病大肠杆菌O157不同菌株466和DT66在碎牛肉中的 γ 射线辐照 D_{10} 值分别为0.25 kGy和0.34 kGy^[38],接种致病大肠杆菌O157、O26、O103、O111、O145的碎牛肉经1 kGy γ 射线辐照后,致病菌含量即可降低5 log CFU/g,2.5 kGy γ 射线辐照可保证初始带菌量水平高达 10^7 CFU/g的碎牛肉无致病大肠杆菌检出^[39]。本研究发现,冷冻牛腩初始带菌量水平较低,大肠菌群为75 CFU/g,2 kGy电子束辐照冷冻牛腩无大肠菌群检出,但实际辐照生产中还需要根据初始带菌量确认适宜的辐照剂量。

综上所述,8.1 cm厚度的冷冻牛腩产品以电子束双面辐照的剂量不均匀度为1.62,可用于实际生产加工。市购商品包装(规格1 kg/袋,单包最大厚度不超过8 cm)经2 kGy电子束双面辐照后,大肠菌群无检出,菌落总数显著降低,有效提高了冷冻牛腩产品的卫生安全水平。辐照对冷冻牛腩的风味、质构无不良影响,但会导致冷冻牛腩色泽发生不良变化, a 值和 b 值显著下降,经过熟制后电子束辐照的影响效果降低。

参考文献

- 顾春涛, 毕伟伟, 朱军莉. 冷鲜牛肉贮藏中菌群结构及优势菌致腐性的分析[J]. 食品科学, 2019, 40(18): 76-82.
GU CT, BI WW, ZHU JL. Bacterial community structure and spoilage potential of dominant bacteria in chilled beef [J]. Food Sci, 2019, 40(18): 76-82.
- 赵玉明, 田晋梅, 彭晓光. 复合香辛料精油配方优化及对冰温贮藏牛肉保鲜效果研究[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(12): 182-187.
ZHAI YM, TIAN JM, PENG XG. Formula optimization of complex spice essential oil and effect on the quality of beef under the condition of vacuum packing and ice-temperature storage [J]. Food Res Dev, 2017, 38(12): 182-187.
- 付丽, 高雪琴, 胡晓波, 等. 保鲜盒包装冷鲜牛肉贮藏期间品质及菌相变化[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(14): 35-41.
FU L, GAO XQ, HU XB, *et al.* Change in quality and bacteria phase of chilled beef in fresh box packaging during storage [J]. Food Res Dev, 2019, 40(14): 35-41.
- 付丽, 胡晓波, 吴丽, 等. 天然保鲜剂的配比优化及其对牛肉保鲜效果的影响[J]. 现代食品科技, 2018, 34(6): 204-211, 187.
FU L, HU XB, WU L, *et al.* Optimization of ratio of natural preservative agents and its effect on the beef preservation effect [J]. Mod Food Sci Technol, 2018, 34(6): 204-211, 187.
- 王楚婷, 刘爱军, 王远浓. 中国牛肉市场的供给与需求分析[J]. 福建茶叶, 2020, 42(3): 57-59.
WANG CT, LIU AJ, WANG YN. Analysis of supply and demand of beef market in China [J]. Tea Fujian, 2020, 42(3): 57-59.
- 张懿. 中国肉类进口国际市场依赖程度研究[J]. 中国畜牧杂志, 2019, 55(8): 174-180.
ZHANG Y. Research on the dependence of China's meat import on the international market [J]. Chin J Anim Sci, 2019, 55(8): 174-180.
- 李儒仁, 沈瑞, 荣良燕, 等. 生物保鲜剂延长冷鲜牛肉货架期的效果[J]. 肉类研究, 2018, 32(1): 30-35.
LI RR, SHEN R, RONG LY, *et al.* Effect of biological preservatives in extending the shelf-life of chilled beef [J]. Meat Res, 2018, 32(1): 30-35.
- 牛淑慧, 王艺伦, 徐晔, 等. 乳酸和醋酸对冷却牛肉喷雾减菌效果的研究[J]. 食品科技, 2020, 45(1): 167-173.
NIU SH, WANG YL, XU Y, *et al.* Effect of lactic acid and acetic acid spray on decontamination in cooling beef [J]. Food Sci Technol, 2020, 45(1): 167-173.
- 张一敏, 朱立贤, 张万刚, 等. 生鲜牛肉中的腐败微生物概述[J]. 食品科学, 2018, 39(13): 289-296.
ZHANG YM, ZHU LX, ZHANG WG, *et al.* An overview of spoilage microorganisms in fresh beef [J]. Food Sci, 2018, 39(13): 289-296.
- 高美须, 陈浩, 刘春泉, 等. 食品辐照技术在中国的研究和商业化应用[J]. 核农学报, 2007, (6): 606-611.
GAO MX, CHEN H, LIU CQ, *et al.* Researches and commercialization of food irradiation technology in China [J]. J Nucl Agric Sci, 2007, (6): 606-611.
- FARKAS J, MOHA'CSI-FARKAS C. History and future of food irradiation [J]. Trend Food Sci Technol, 2011, 22: 121-126.
- YANG Z, WANG HY, 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 Chem, 2014, 145: 535-541.
- BREWER MS. Irradiation effects on meat flavor: A review [J]. Meat Sci, 2009, 81: 1-14.
- 吴庆, 孔秋莲, 戚文元, 等. γ 射线和电子束辐照对意式风干火腿色泽和脂质氧化的影响[J]. 上海农业学报, 2013, 29(2): 38-42.
WU Q, KONG QL, QI WY, *et al.* Effects of γ -ray/electron beam irradiation on odor and lipid oxidation of prosciutto [J]. Acta Agric Shanghai, 2013, 29(2): 38-42.
- ZIAIE F, ZIMEK Z, BULK S, *et al.* Calculated and measured dose distribution in electron and X-ray irradiated water phantom [J]. Radiat Phys Chem, 2002, 63: 177-183.
- 陈志军, 戚文元, 颜伟强, 等. 10 MeV电子直线加速器辐照工艺确定的简便方法及其应用[J]. 核农学报, 2016, 30(4): 755-763.
CHEN ZJ, QI WY, YAN WQ, *et al.* Development of an easy and effective method for 10 MeV linear accelerator irradiation and its application in food process [J]. J Nucl Agric Sci, 2016, 30(4): 755-763.
- YANG HS, LEE EJ, MOON SH, *et al.* Addition of garlic or onion before irradiation on lipid oxidation, volatiles and sensory characteristics of cooked ground beef [J]. Meat Sci, 2011, 88: 286-291.
- SOHN SH, JANG A, KIM JK, *et al.* Reduction of irradiation off-odor and

- lipid oxidation in ground beef by alpha-tocopherol addition and the use of a charcoal pack [J]. *Radiat Phys Chem*, 2009, 78: 141–146.
- [19] 张盼, 王俊平. 壳聚糖-普鲁兰多糖复合抗菌保鲜膜对冷鲜牛肉的保鲜效果[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(6): 194–201.
ZHANG P, WANG JP. Effect of chitosan-pullulan composite antibacterial-films on fresh-keeping of chilled beef [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2020, 20(6): 194–201.
- [20] 闫华伟, 袁文清. 细菌性食物中毒采用大肠菌群测试菌片快速检测的价值分析[J]. *内蒙古医学杂志*, 2020, 52(7): 839–840.
YAN HW, YUAN WQ. Value analysis of rapid detection of coliform bacteria in bacterial food poisoning [J]. *Inner Mongolia Med J*, 2020, 52(7): 839–840.
- [21] 李可维, 刘思洁, 赵薇, 等. 9274 份肉及肉制品食源性致病菌监测结果分析[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(23): 9033–9038.
LI KW, LIU SJ, ZHAO W, *et al.* Analysis of monitoring results of foodborne pathogens in 9274 meat and meat products [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(23): 9033–9038.
- [22] 李翠翠, 李永丽. 近五年电子鼻在食品检测中的应用[J]. *粮食与油脂*, 2020, 33(11): 11–13.
LI CC, LI YL. The application of electronic nose in food inspection during the last five years [J]. *J Cere Oils*, 2020, 33(11): 11–13.
- [23] 徐亚丹, 代丽. 牛肉低温储藏期间质构参数分析及新鲜度指标的确定[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(12): 267–272.
XU YD, DAI L. Analysis of texture parameters and determination of freshness index of beef in low temperature storage [J]. *Transact Chin Soci Agric Eng*, 2016, 32(12): 267–272.
- [24] IAEA. Gamma irradiators for radiation processing [Z].
- [25] DU M, NAM KC, HUR SJ, *et al.* Effect of dietary conjugated linoleic acid, irradiation, and packaging conditions on the quality characteristics of raw broiler breast fillets [J]. *Meat Sci*, 2002, 60: 9–15.
- [26] ZHU MJ, MENDONCA A, AHN DU. Temperature abuse affects the quality of irradiated pork loins [J]. *Meat Sci*, 2004, 67: 643–649.
- [27] DAVIS KJ, SEBRANEK JG, HUFF-LONERGAN E, *et al.* The effects of irradiation on quality of injected fresh pork loins [J]. *Meat Sci*, 2004, 67: 395–401.
- [28] CABEZA MC, DELAHOZ L, VELASCO R, *et al.* Safety and quality of ready-to-eat dry fermented sausages subjected to E-beam radiation [J]. *Meat Sci*, 2009, 83: 320–327.
- [29] ZHU MJ, LEE EJ, MENDONCA A, *et al.* Effect of irradiation on the quality of turkey ham during storage [J]. *Meat Sci*, 2003, 66: 63–68.
- [30] MILLAR SJ, MOSS BW, STEVENSON MH. The effect of ionising radiation on the colour of beef, pork and lamb [J]. *Meat Sci*, 2000, 55: 349–360.
- [31] YANG HS, LEE EJ, MOON SH, *et al.* Effect of garlic, onion, and their combination on the quality and sensory characteristics of irradiated raw ground beef [J]. *Meat Sci*, 2011, 89: 202–208.
- [32] BREWER S. Irradiation effects on meat color: A review [J]. *Meat Sci*, 2004, 68: 1–17.
- [33] DU M, HUR SJ, AHN DU. Raw-meat packaging and storage affect the color and odor of irradiated broiler breast fillets after cooking [J]. *Meat Sci*, 2002, 61(1): 49–54.
- [34] KONG QL, YAN WQ, YUE L, *et al.* Volatile compounds and odor traits of dry-cured ham (*Prosciutto crudo*) irradiated by electron beam and gamma rays [J]. *Radiat Phys Chem*, 2017, 130: 265–272.
- [35] 赖宏刚, 蒋云升, 张元嵩, 等. 辐照处理对冷鲜鸡肉的品质的影响[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(9): 206–211.
LAI HG, JIANG YS, ZHANG YS, *et al.* Effect of irradiation on the quality of chilled chicken [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2018, 46(9): 206–211.
- [36] TOLEDO T, SOLANGE GCB, SPOTO M, *et al.* Sensory evaluation of chicken breast under gamma irradiation at commercial doses [J]. *J Food Sci*, 2010, 70(1): 8–12.
- [37] LV M, MEI K, ZHANG H, *et al.* Effects of electron beam irradiation on the biochemical properties and structure of myofibrillar protein from *Tegillarca granosa* meat [J]. *Food Chem*, 2018, 254: 64–69.
- [38] KAWASAKI S, SAITOA M, MOCHIDA M, *et al.* Inactivation of *Escherichia coli* O157 and *Salmonella Enteritidis* in raw beef liver by gamma irradiation [J]. *Food Microbiol*, 2019, 78: 110–113.
- [39] CAP M, LIRES C, CINGOLANI C, *et al.* Identification of the gamma irradiation dose applied to ground beef that reduces Shiga toxin producing *Escherichia coli* but has no impact on consumer acceptance [J]. *Meat Sci*, 2021, 174: 108414.

(责任编辑: 于梦娇)

作者简介



戚文元, 研究员, 主要研究方向为农产品保鲜加工。
E-mail: sunny0123@vip.163.com



孔秋莲, 博士, 研究员, 主要研究方向为农产品保鲜加工。
E-mail: qiuliankong@yahoo.com