

# 基于电子鼻(舌)分析 $\gamma$ 射线和电子束辐照工艺对酱板鸭风味的影响

张祺玲 徐远芳 周毅吉 彭玲 易靖超 张勇 郭峰 邓超 李文革

(湖南省核农学与航天育种研究所 湖南省农业生物辐照工程技术研究中心  
生物辐照技术湖南省工程研究中心 长沙 410125)

**摘要** 探讨辐照酱板鸭风味控制的有效措施。采用 $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线和电子束辐照酱板鸭,通过对电子鼻、电子舌实验数据进行雷达分析、主成分分析(Principal components analysis, PCA)和线性判别分析(Linear discriminant analysis, LDA),研究抗氧化剂(0.02% VE+0.03% 茶多酚+0.02% TBHQ)、辐照温度(室温、冰温)和贮藏时间(0 d、30 d)等因素对酱板鸭风味的影响。结果表明: $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线和电子束辐照处理酱板鸭样品气滋味差异显著( $p<0.05$ ),滋味差异主要表现在苦味、涩味和甜味;气味差异主要表现在W2W(芳香化合物和有机硫化物)、W1W(无机硫化物)、W1S(烃类物质)、W5S(氮氧化合物)和W2S(醇类和部分芳香型化合物);各冰温处理组气滋味特征与对照组最接近,各添加抗氧化剂组气滋味特征次之,冰温+添加抗氧化剂的处理对辐照酱板鸭气滋味并未产生明显的协同作用。冰温处理和添加抗氧化剂处理能一定程度上控制辐照酱板鸭风味改变,本研究为辐照酱板鸭风味控制手段选择提供了理论支撑。

**关键词** 酱板鸭,辐照,电子鼻,电子舌,风味

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0052

引用该文:

张祺玲,徐远芳,周毅吉,等.基于电子鼻(舌)分析 $\gamma$ 射线和电子束辐照工艺对酱板鸭风味的影响[J].辐射研究与辐射工艺学报,2023,41(6):060402. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0052.

ZHANG Qiling, XU Yuanfang, ZHOU Yiji, et al. Effects of  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  ray and electron beam irradiation on the flavor of spicy salted duck based on the electronic nose (tongue)[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2023, 41(6): 060402. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0052.



## Effects of $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ ray and electron beam irradiation on the flavor of spicy salted duck based on the electronic nose (tongue)

ZHANG Qiling XU Yuanfang ZHOU Yiji PENG Ling YI Jingchao

ZHANG Yong GUO Feng DENG Chao LI Wenge

(Hunan Institute of Nuclear Agricultural Science and Space Mutation Breeding, Hunan Academy of

基金资助: 湖南农业科技创新资金项目(2020CX45、2019JG03、2018ZD04-2、2017XC12)资助

第一作者: 张祺玲,女,1986年2月出生,2010年于湖南农业大学微生物学专业获理学硕士学位,副研究员,主要从事辐射加工应用研究

通信作者: 李文革,研究员, E-mail: 641386565@qq.com

收稿日期: 初稿 2023-06-05; 修回 2023-06-27

Supported by the Agricultural Science and Technology Innovation Project of Hunan Province (2020CX45, 2019JG03, 2018ZD04-2, and 2017XC12)

First author: ZHANG Qiling (female) was born in February 1986, and obtained her master's degree of science in microbiology from Hunan Agricultural University in 2010, associate professor, mainly engaged in radiation processing application research

Corresponding author: LI Wenge, professor, E-mail: 641386565@qq.com

Received 05 June 2023; accepted 27 June 2023

**ABSTRACT** To explore effective measures to control the flavor of spicy salted duck irradiated by  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  ray and electron beam, the effects of antioxidants and irradiation temperature on the flavor and electron beam were studied using electronic nose and electronic tongue detection techniques. Radar analysis, principal component analysis (PCA), and linear discriminant analysis (LDA) were performed on the E-tongue and E-nose experimental data. The results indicated that there were significant differences in the flavor of spicy salted duck samples with different treatments ( $p < 0.05$ ), and the differences in taste of irradiated spicy salted duck mainly showed bitter taste, astringency taste, and sweet taste. The main differences in odor were W2W (aromatic compounds and organic sulfides), W1W (inorganic sulfides), W1S (hydrocarbons), W5S (nitrogen oxides), and W2S (alcohols and partial aromatic compounds). The flavor characteristics of each ice-temperature treatment group were closest to the control group, followed by the flavor characteristics of each antioxidant group. No obvious synergistic effects were observed on the flavor of irradiated spicy salted duck with ice temperature and antioxidant treatments. Ice temperature and antioxidant treatment could control the flavor change of spicy salted duck to a certain extent. This study provides theoretical support for selecting flavor control methods for spicy salted duck.

**KEYWORDS** Spicy salted duck, Irradiation, Electronic nose, Electronic tongue, Flavor

**CLC** TL99

常德酱板鸭作为中国国家地理标志产品，是富有浓郁地方特色的传统风味美食，享有“湖南经典、常德一绝”的美誉，2012年常德酱板鸭产量达3 000多万只，年产值近10亿元，广受消费者喜爱<sup>[1]</sup>。随着市场不断扩大，常德酱板鸭远销北京、深圳、广州等全国十几个省市以及日本、东南亚等地，由于酱板鸭保质期一般不超过6个月，为确保酱板鸭运输及货架期的安全，对酱板鸭的卫生品质提出了更高的要求。食品辐照技术是世界卫生组织(WHO)、国际原子能机构(IAEA)和联合国粮农组织(FAO)认可应用于食品加工中的安全高效的非热加工技术<sup>[2]</sup>，全世界40多个国家批准在200余种食品中应用辐照技术<sup>[3]</sup>。目前，大量研究表明，利用4~6 kGy吸收剂量辐照处理熟肉制品能有效保持产品的感官品质<sup>[4-6]</sup>，而对肉鸭产品进行辐照处理的吸收剂量则不宜超过4 kGy<sup>[7-8]</sup>。在酱板鸭的辐照加工中，为保证产品货架期，辐照处理的吸收剂量往往需要达到6~8 kGy，在此剂量下，酱板鸭风味会发生改变，产生辐照异味。目前研究认为，肉品辐照异味主要来源是氨基酸分解和脂质氧化<sup>[9]</sup>。何立超等<sup>[10]</sup>采用低剂量(3 kGy) $\gamma$ 辐照处理生鲜猪肉，结果表明，辐照能降低游离氨基酸含量，降解肌肉蛋白质形成小分子肽，从而产生肉品辐照特有滋味；卢佳芳等<sup>[11]</sup>研究发现，1~7 kGy电子束辐照引起花鲈鱼肉中呈愉快味氨基酸占总游离氨基酸的百分比发生改变；

张扬等<sup>[6]</sup>研究表明，辐照能降低烤鸭、盐水鸭氨基酸含量；冯敏等<sup>[12]</sup>研究表明，烤鸭、盐水鸭辐照处理前后主要的挥发性风味物质的类别均为氨类和芳香型化合物、无机硫化物、芳香化合物和有机硫化物，但响应值发生改变。大量研究表明，抗氧化剂能通过清除肉品辐照过程中产生的各种自由基，有效控制辐照肉品中蛋白质和脂质的氧化，从而防止辐照异味的形成<sup>[13-15]</sup>。此外，也有观点认为，包装和温度等处理方式能控制辐照异味<sup>[16-17]</sup>。

食品风味通过气滋味来评价，主要采用感官评价和气相色谱-质谱联用法(Gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)评价。为提高评价的客观性、简易性和重复性，电子鼻和电子舌技术逐步发展起来<sup>[18]</sup>。电子鼻和电子舌是模拟人的鼻和舌功能而设计的传感器阵列技术，其传感器不是单独地分析部分气、味信息，而是分析其综合的整体信息，可以敏感地识别气、味指纹<sup>[19]</sup>。近年来，电子鼻和电子舌技术广泛应用于肉制品的检测和区分<sup>[20-23]</sup>，而利用电子鼻和电子舌对酱板鸭进行的研究鲜有报道。本研究以酱板鸭为研究对象，采用电子鼻和电子舌分析技术，利用雷达分析、主成分分析(Principal components analysis, PCA)、线性判别分析(Linear discriminant analysis, LDA)等对冰温、添加抗氧化剂等处理方式下的 $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线和电子束辐照酱板鸭风味成分进行分

析,评价其风味控制效果,为促进辐照技术在鸭肉产品中的应用提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与设备

酱板鸭购于湖南常德某酱板鸭厂,约350 g/袋。

PEN3 电子鼻系统,德国 AIRSENSE 公司,各传感器为 W1C、W5S、W3C、W6S、W5C、W1S、W1W、W2S、W2W、W3S; TS-5000Z 电子舌系统,日本 INSENT 公司,各传感器为 AAE、CT0、CA0、C00、AE1、GL1。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 酱板鸭样品处理

为保证样品的一致性和重复性,酱板鸭经绞肉机绞碎,采用食品级聚乙烯塑料袋包装,真空处理(真空时间 10 s),每袋 100 g。添加抗氧化剂的处理组在包装前添加前期试验筛选出的抗氧化剂组合(0.02% VE+0.03% 茶多酚+0.02% TBHQ);辐照处理组吸收剂量均为 8 kGy;冰温处理组样品辐照前冰箱冷藏至冰温(0 °C),辐照处理时用冰袋保温。样品处理后于室温(25 °C)中分别贮藏 0 d、30 d 后检测。每个处理 3 个重复。具体试验设计见表 1。

表1 试验设计  
Table 1 Sampling design

组别 Groups	处理方式 Treatment
CK	对照 Control
G	<sup>60</sup> Co-γ 射线辐照 <sup>60</sup> Co-γ irradiation
KG	添加抗氧化剂& <sup>60</sup> Co-γ 射线辐照 Add antioxidants & <sup>60</sup> Co-γ irradiation
BG	冰温& <sup>60</sup> Co-γ 射线辐照 Ice temperature & <sup>60</sup> Co-γ irradiation
KBG	添加抗氧化剂&冰温& <sup>60</sup> Co-γ 射线辐照 Add antioxidants & ice temperature & <sup>60</sup> Co-γ irradiation
E	电子束辐照 Electron beam irradiation
KE	添加抗氧化剂&电子束辐照 Add antioxidants & electron beam irradiation
BE	冰温&电子束辐照 Ice temperature & electron beam irradiation
KBE	添加抗氧化剂&冰温&电子束辐照 Add antioxidants & ice temperature & electron beam irradiation

#### 1.2.2 样品辐照

<sup>60</sup>Co-γ 射线辐照在湖南省农业科学院核农学与航天育种研究所湖南辐照中心进行,辐照方式为动态步进。电子束辐照在湖南湘华华大生物科技有限公司进行。辐照过程均分别进行剂量跟踪(γ 射线辐照:重铬酸银剂量计;电子束辐照:剂量片(FWT-60),剂量计/片均经中国计量科学研究院国家剂量保证服务 NDAS 比对标定)。

#### 1.2.3 电子鼻的测定

称取 3 g 样品于 10 mL 的电子鼻专用顶空瓶中,常温下平衡一定时间后插入进样针头,电子鼻进行测定,每个样品进行 3 次平行测定。测定条件:采样时间为 1 s/组;传感器自清洗时间为 120 s;传感器归零时间为 10 s;样品准备时间为 5 s;进样流量为 400 mL/min;分析采样时间为 120 s。

#### 1.2.4 电子舌的测定

称取 50 g 样品,加 250 g 水,匀浆机匀浆 1 min,3 000 r/min 冷冻离心 10 min,上清液抽滤后取滤液进行上机分析,每个样品进行 3 次平行测定。测定条件:采样时间为 1 s/组;分析采样时间为 120 s。

#### 1.2.5 数据分析

试验数据采用 Excel 软件整理,利用 SPSS19 和 origin2018 进行进行数据分析及绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 电子舌对不同辐照工艺不同贮藏期酱板鸭滋味分析

电子舌 6 个传感器分别对鲜味、咸味、酸味、苦味、涩味、甜味敏感。若样品某传感器数据值

低于无味点(标样),则该传感器相应滋味就不是样品味觉的有效评价指标。由此,酸味不是酱板鸭味觉值的有效评价指标。

### 2.1.1 雷达分析

经方差分析和最小显著差异法(Least significant difference, LSD)多重比较,不同处理酱板鸭样品对各味觉值的有效评价指标响应显著

( $p < 0.05$ ),且样品间差异显著( $p < 0.05$ )。根据电子舌检测结果平均值绘制雷达图(图1),由图1可知,样品在苦味回味、涩味回味和丰富性上的各点基本汇集在一起,说明样品在这几个滋味品质上差异不大。G-0组与其他组在苦味和涩味上区别较大,E-0组与其他组在甜味上区别较大,贮藏0 d样品与贮藏30 d样品在甜味上分别汇集。

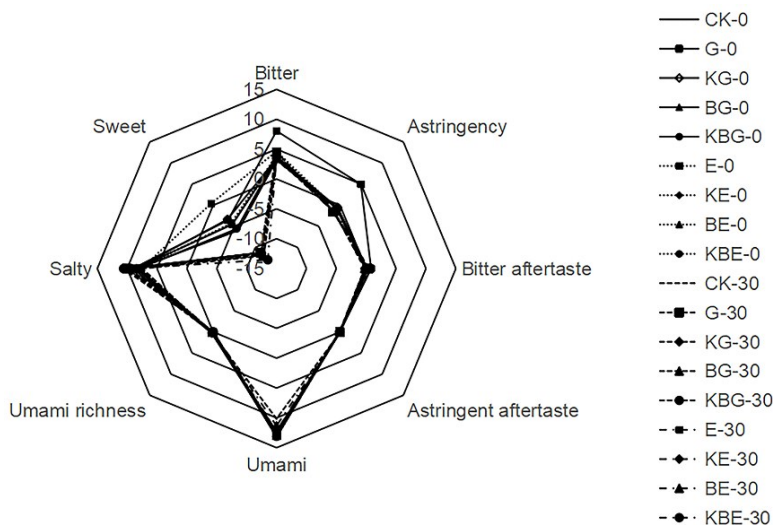


图1 电子舌数据雷达分析图  
Fig.1 Radar analysis map based on electronic tongue data

### 2.1.2 主成分分析

对不同辐照工艺不同贮藏期样品滋味成分进行主成分分析结果见图2。

由图2可知,PC1和PC2的总贡献率均超过90%,表明2种主成分能够反映原始数据的大部分信息。在 $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线辐照贮藏0 d的样品中(图2(a)),BG-0组、KBG-0组和CK-0组滋味相近,G-0组主要在苦味、涩味和咸味上与CK-0组差异明显,KG-0组主要在鲜味上与CK-0组差异明显;电子束射线辐照贮藏0 d的样品中(图2(c)),BE-0组和CK-0组滋味相近,E-0组主要在苦味、甜味和咸味上与CK组差异明显,KE-0组、KBE-0组主要在鲜味上与CK-0组差异明显; $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线辐照贮藏30 d的样品中(图2(b)),G-30组、KG-30组、BG-30组和KBG-30组滋味相近,CK组与4组辐照处理样品差异主要在鲜味和咸味上;电子束射线辐照贮藏30 d的样品中(图2(d)),除KE-30组和KBE-30组滋味相近,其余样品组主要鲜味和咸味

上有差异,其中CK-30组与E-30组差异最大。

滋味作为食品风味的重要特性之一,对产品的质量具有重要影响。现有研究表明,鸭肉和鸭肉制品中主要非挥发性滋味物质包括游离氨基酸、小肽、核苷酸等,且滋味成分含量较高<sup>[24-26]</sup>。本研究结果表明,8 kGy剂量 $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线和电子束辐照处理能对酱板鸭滋味产生明显影响,可能是酱板鸭的滋味物质发生改变,但具体滋味特征化合物变化情况待进一步分析。冰温处理和添加抗氧化剂处理能降低 $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线和电子束辐照对酱板鸭滋味的影响,可能是冰温和抗氧化剂能在一定程度上减缓自由基的形成,从而降低蛋白质降解对滋味的影响;其中冰温处理对辐照酱板鸭滋味控制效果较添加抗氧化剂更佳,其具体机理还待下一步研究。30 d贮藏能明显减弱冰温处理和添加抗氧化剂处理对辐照酱板鸭滋味的控制,尤其是 $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线辐照,可能是由于 $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线辐照后效应较电子束强。

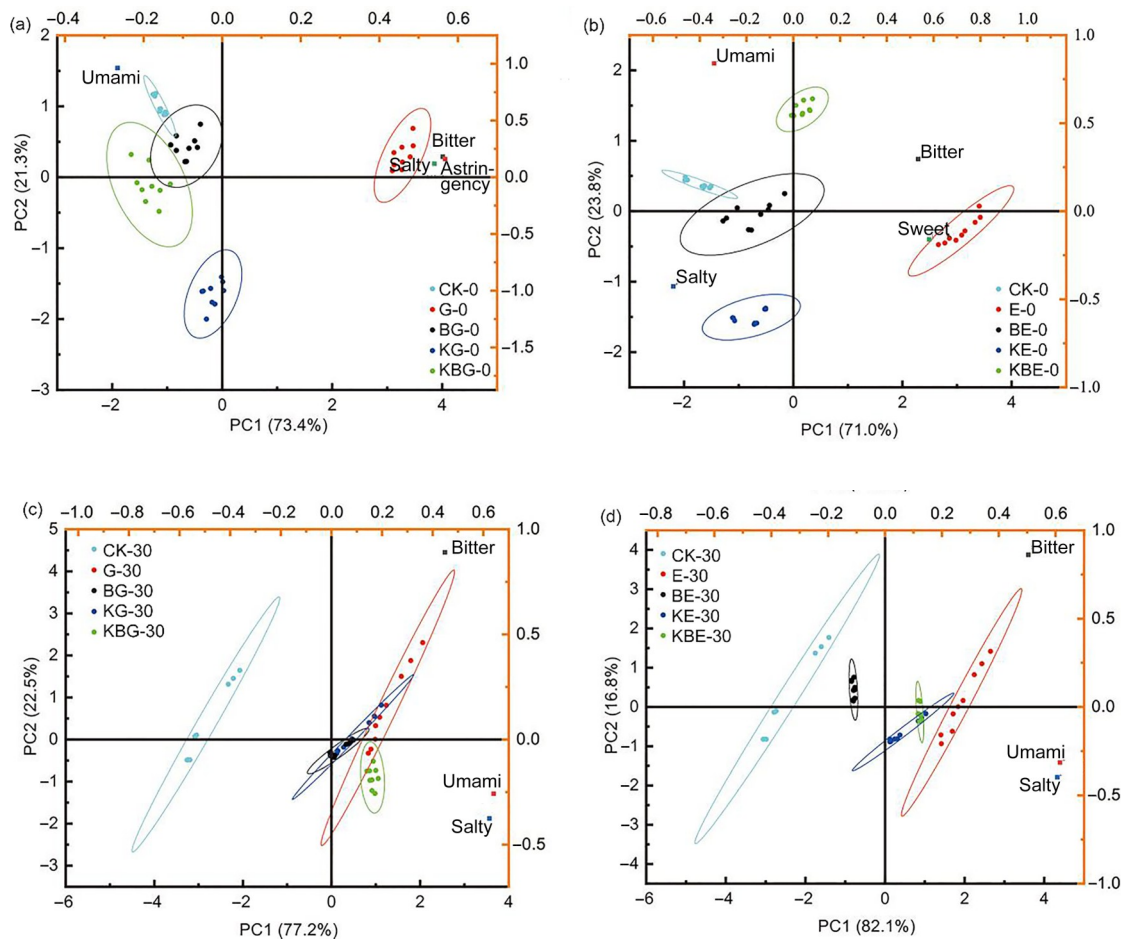


图2 不同处理酱板鸭样品电子舌PCA分析图谱:(a)  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线辐照贮藏0 d样品;(b) 电子束射线辐照贮藏0 d样品;(c)  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线辐照贮藏30 d样品;(d) 电子束射线辐照贮藏30 d样品(彩色见网络版)

Fig.2 PCA analysis of different brands spicy salted duck for e-tongue: (a) sample irradiated by  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  ray and stored 0 d; (b) sample irradiated by electron beam and stored 0 d; (c) sample irradiated by  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  ray and stored 30 d; (d) sample irradiated by electron beam and stored 30 d (color online)

## 2.2 电子鼻对不同辐照工艺不同贮藏期酱板鸭气味分析

电子鼻 10 个传感器 W1C、W5S、W3C、W6S、W5C、W1S、W1W、W2S、W2W、W3S 对应的敏感物质分别为芳香型化合物、氮氧化物、氨类和芳香型化合物、氢化物、烯烃和芳香型化合物、烃类物质、无机硫化物、醇类和部分芳香型化合物、芳香化合物和有机硫化物、烷烃。

### 2.2.1 雷达分析

经方差分析和 LSD 多重比较, 除传感器 W6S 响应数据差异不显著 ( $p > 0.05$ ), 不同处理酱板鸭样品对各气味值的有效评价指标响应显著 ( $p < 0.05$ ), 且样品间差异显著 ( $p < 0.05$ )。根据电子鼻检测结果平均值绘制雷达图 (图 3), 可以看出, 所有样品主要的挥发性组分为 W2W (芳香化合物和有机硫

化物)、W1W (无机硫化物)、W1S (烃类物质)、W5S (氮氧化物) 和 W2S (醇类和部分芳香型化合物), 说明其主要的挥发性组分相同, 其中,  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线和电子束辐照贮藏 0 d 样品挥发性成分相应强度由强至弱分别为芳香化合物和有机硫化物 > 无机硫化物 > 烃类物质 > 氮氧化物 > 醇类和部分芳香型化合物, 差异主要来自芳香化合物和有机硫化物、无机硫化物;  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线和电子束辐照贮藏 30 d 样品挥发性成分相应强度由强至弱分别为烃类物质 > 芳香化合物和有机硫化物 > 无机硫化物 > 氮氧化物 > 醇类和部分芳香型化合物, 差异主要来自烃类物质、氮氧化物。冯敏<sup>[27]</sup> 研究表明, 烤鸭、盐水鸭辐照处理前后主要的挥发性风味物质的类别是为氨类和芳香型化合物、无机硫化物、芳香化合物和有机硫化物, 与本研究结果不完全一致, 可能是不同特色鸭肉制品制作工艺

的差别对挥发性风味物质影响较大。

### 2.2.2 主成分分析

分别对 $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线和电子束辐照贮藏0 d和贮藏30 d样品气味指标进行主成分分析。PCA分析

图谱可见(图4)，虽然PC1和PC2的总贡献率均超过95%，两种主成分能够反映原始数据的大部分信息，但各样品组间基本都有所重叠，不能区分样品差异。



图3 电子鼻数据雷达分析图  
Fig.3 Radar analysis map based on electronic nose data

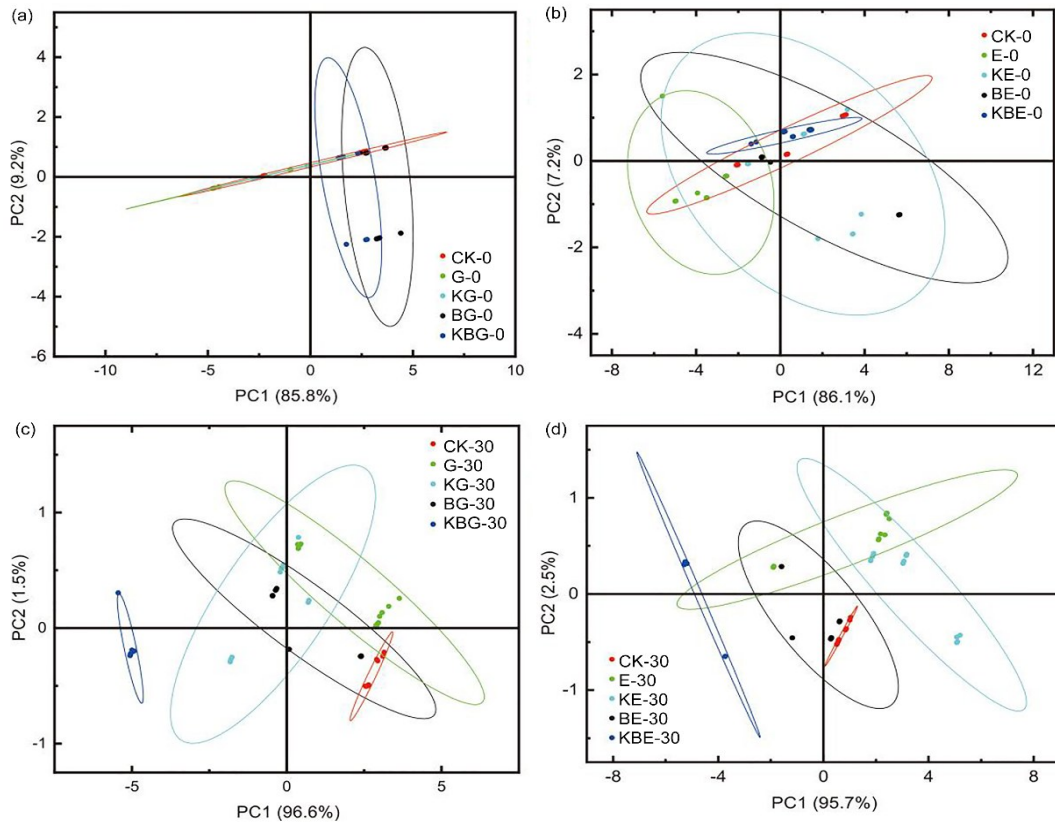


图4 不同处理酱板鸭样品电子鼻PCA分析图谱:(a)  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线辐照贮藏0 d样品;(b) 电子束辐照贮藏0 d样品;(c)  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线辐照贮藏30 d样品;(d) 电子束辐照贮藏30 d样品(彩色见网络版)  
Fig.4 PCA analysis of different brands spicy salted duck for e-nose: (a) sample irradiated by  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  ray and stored 0 d; (b) sample irradiated by electron beam and stored 0 d; (c) sample irradiated by  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  ray and stored 30 d; (d) sample irradiated by electron beam and stored 30 d (color online)

### 2.2.3 LDA 分析

LDA 分析图谱(图 5)与 PCA 图谱比较发现, LDA 分析方法更能有效区分样品之间的差异。 $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线辐照贮藏 0 d 的样品中(图 5(a)), KBG-0 组和 CK-0 组气味相近, 其次是 BG-0 组和 G-0 组, 气味差异最大的是 KG-0 组; 电子束射线辐照贮藏 0 d 的样品中(图 5(c)), BE-0 组和 CK-0 组气味相近, 其次是 KE-0 组和 KBE-0 组, 气味差异最大的是 E-0 组;  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线辐照贮藏 30 d 的样品中(图 5(b)), CK-30 组和其他组气味差异较大, G-30 组和 KG-30 组气味相近, 其次是 BG-30 组, KBG-30 组气味差异最大; 电子束射线辐照贮藏 30 d 的样品中(图 5(d)), KE-30 组和 CK-30 组气味相近, E-30 组和 BE-30 组、KBE-30 组气味相近。

辐照肉制品挥发性气味物质的产生可能与脂质和蛋白质的氧化分解有关, 其中在辐照自由基

等作用下的氨基氧化、脱氨脱羧、交联降解反应使蛋白质氧化降解是辐照异味气体的主要来源<sup>[28-29]</sup>。研究表明, 辐照处理虽然没有改变酱板鸭挥发性风味物质的主要组成类别但对主要挥发性风味物质含量产生了影响, 可能由于辐照引起脂肪、蛋白质降解或氨基酸结构破坏; 冰温和添加抗氧化剂的处理一定程度上能降低电子束辐照对酱板鸭气味的影响, 可能与冰温和抗氧化剂处理能减少脂肪和蛋白质等的氧化有关。30 d 贮藏后酱板鸭烃类物质明显增加, 这与施帅等<sup>[26]</sup>分析辐照盐水鸭贮藏过程中的风味变化得到的结果一致。30 d 贮藏能明显减弱冰温处理和添加抗氧化剂处理对 $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线辐照酱板鸭气味的控制, 添加抗氧化剂处理对 30 d 贮藏后的电子束辐照酱板鸭气味控制较好。

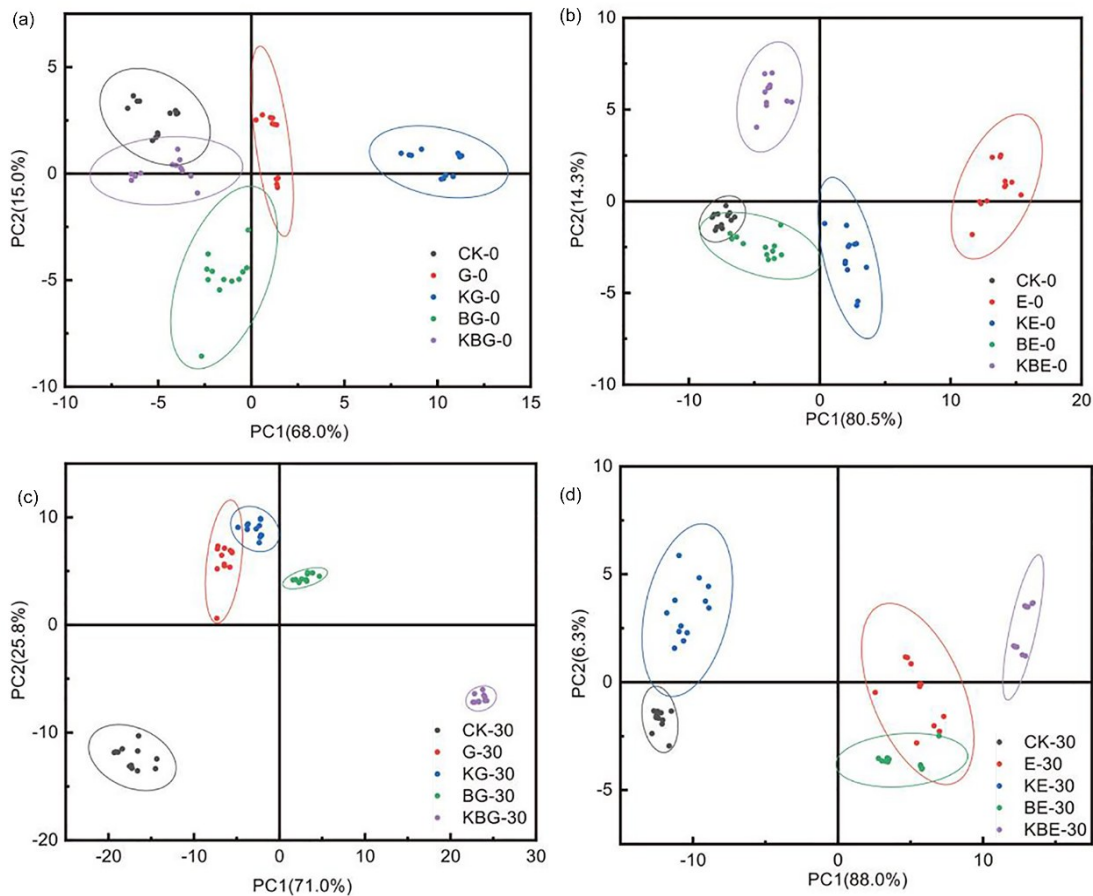


图 5 不同处理酱板鸭样品电子鼻 LDA 分析图谱:(a)  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线辐照贮藏 0 d 样品;(b) 电子束射线辐照贮藏 0 d 样品;(c)  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线辐照贮藏 30 d 样品;(d) 电子束射线辐照贮藏 30 d 样品(彩色见网络版)

Fig.5 LDA analysis of different brands spicy salted duck for e-nose: (a) sample irradiated by  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  ray and stored 0 d; (b) sample irradiated by electron beam and stored 0 d; (c) sample irradiated by  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  ray and stored 30 d; (d) sample irradiated by electron beam and stored 30 d (color online)

### 3 结论

本研究基于电子鼻和电子舌分析不同辐照工艺对酱板鸭贮藏期间风味的影响。结果表明， $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线和电子束辐照处理都能导致酱板鸭风味发生改变，但主要风味物质类别没有明显改变；冰温处理和添加抗氧化剂处理能一定程度上控制辐照酱板鸭风味改变，冰温处理效果较添加抗氧化剂的处理效果更佳；冰温处理和添加抗氧化剂处理对 $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线辐照酱板鸭贮存期风味控制效果弱，冰温处理对电子束辐照酱板鸭贮存期滋味控制较好，添加抗氧化剂处理对电子束辐照酱板鸭贮存期气味控制较好。今后的研究可将电子鼻电子舌和感官评价以及其他风味物质检测方法联合使用，为酱板鸭风味控制手段提供进一步理论支撑。

**作者贡献声明** 张祺玲完成了论文实验设计，实验数据的处理和分析，论文的撰写和修改；徐远芳完成了电子舌的测定；周毅吉完成了电子鼻的测定；彭玲指导了论文的实验设计，对文章进行了修改；易靖超和张勇完成了辐照前样品的处理；郭峰和邓超完成了样品的辐照处理；李文革提供本文的研究思路及经费，对文章进行了修改。所有作者均已阅读并认可该论文最终版的所有内容。

### 参考文献

- 1 汤阳. 才下舌尖, 又上心间——常德酱板鸭[N]. 湖南日报, 2013-8-30(8).  
TANG Yang. Just under the tip of the tongue, and on the heart -Changde spicy salted duck[N]. Hunan Daily, 2013-8-30(8).
- 2 Roberts P B. Food irradiation is safe: half a century of studies[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2014, **105**: 78-82. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2014.05.016.
- 3 王珊珊, 潘俊, 曹美云, 等. 国内外食品辐照技术标准的应用现状分析[C]//中国核学会. 中国核科学技术进展报告(第六卷)—中国核学会2019年学术年会论文集第8册: 核技术工业应用分卷. 北京: 中国原子能出版社, 2020: 67-72.  
WANG Shanshan, PAN Jun, CAO Meiyun, *et al.* Analysis on the present situation of the application of the technical standard of food irradiation of domestic and overseas[C]//Chinese Nuclear Society. Progress report on chinese nuclear science and technology (volume 6) —  
Proceedings of the 2019 Academic Annual Conference of the Chinese Nuclear Society, volume 8: sub-volume on nuclear technology industrial applications. Beijing: China Atomic Energy Press, 2020: 67-72
- 4 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. DOI: 10.11869/j.issn.100-8551.2021.03.0667.  
HONG Qihua, WANG Liangyan, SUN Zhiming, *et al.* Application of irradiation technology in meat products processing and preservation[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, **35**(3): 667-673. DOI: 10.11869/j.issn.100-8551.2021.03.0667.
- 5 Feng X, Moon S, Lee H, *et al.* Effect of irradiation on the parameters that influence quality characteristics of uncured and cured cooked Turkey meat products[J]. *Poultry Science*, 2016, **95**(12): 2986-2992. DOI: 10.3382/ps/pew272.
- 6 李娜, 骆琦, 薛丽丽, 等. 辐照对烧鸡贮藏期品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2017, **38**(8): 183-187. DOI: 10.3969/j.issn.1005-6521.2017.08.043.  
LI Na, LUO Qi, XUE Lili, *et al.* Effect of irradiation on quality characteristics of stored roast chicken[J]. *Food Research and Development*, 2017, **38**(8): 183-187. DOI: 10.3969/j.issn.1005-6521.2017.08.043.
- 7 张扬, 赵永富, 常国斌, 等. 辐照处理对盐水鸭和烤鸭品质的影响[J]. 金陵科技学院学报, 2017, **33**(3): 89-92. DOI: 10.16515/j.cnki.32-1722/n.2017.03.0021.  
ZHANG Yang, ZHAO Yongfu, CHANG Guobin, *et al.* Effect of irradiation processing on the quality of salty duck and roast duck[J]. *Journal of Jinling Institute of Technology*, 2017, **33**(3): 89-92. DOI: 10.16515/j.cnki.32-1722/n.2017.03.0021.
- 8 An K A, Arshad M S, Jo Y, *et al.* E-beam irradiation for improving the microbiological quality of smoked duck meat with minimum effects on physicochemical properties during storage[J]. *Journal of Food Science*, 2017, **82**(4): 865-872. DOI: 10.1111/1750-3841.13671.
- 9 李成梁, 靳国锋, 马素敏, 等. 辐照对肉品品质影响及控制研究进展[J]. 食品科学, 2016, **37**(21): 271-278. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-201621046.  
LI Chengliang, JIN Guofeng, MA Sumin, *et al.* Progress in understanding and controlling the detrimental effects of irradiation treatment on meat quality[J]. *Food Science*, 2016, **37**(21): 271-278. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-201621046.
- 10 何立超, 吴文敏, 杨海燕, 等.  $\gamma$ -辐照生鲜猪肉中氨基酸



- 及小分子肽组成特征分析[J]. 食品科学, 2018, **39**(24): 26-33. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-201824005.
- HE Lichao, WU Wenmin, YANG Haiyan, *et al.* Amino acid and polypeptide profiles of  $\gamma$ -irradiated fresh pork [J]. Food Science, 2018, **39**(24): 26-33. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-201824005.
- 11 卢佳芳, 朱煜康, 徐大伦, 等. 不同剂量电子束辐照对花鲈鱼肉风味的影响[J]. 食品科学, 2021, **42**(12): 153-158. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20191104-046.
- LU Jiafang, ZHU Yukang, XU Dalun, *et al.* Effect of electron beam irradiation with different doses on flavor of lateolabrax japonicus meat[J]. Food Science, 2021, **42**(12): 153-158. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20191104-046.
- 12 林若泰, 耿胜荣, 刘杨岷, 等. 冷却包装猪肉辐照异味气体成分研究[J]. 中国农业科学, 2008, **41**(3): 918-924. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2008.03.039.
- LIN Ruotai, GENG Shengrong, LIU Yangmin, *et al.* Study on off-odor volatiles of irradiated packaged raw pork[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, **41**(3): 918-924. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2008.03.039.
- 13 龙明秀, 刘敏, 田竹希, 等. 植酸和茶多酚复合抗氧化剂对辐照卤制鸡翅品质的影响[J]. 肉类研究, 2019, **33**(2): 64-71. DOI: 10.7506/rlyj1001-8123-20190111-009.
- LONG Mingxiu, LIU Min, TIAN Zhuxi, *et al.* Effects of natural antioxidant combinations of phytic acid and tea polyphenols on the quality of irradiated marinated chicken wings[J]. Meat Research, 2019, **33**(2): 64-71. DOI: 10.7506/rlyj1001-8123-20190111-009.
- 14 何立超, 杨海燕, 孙秀秀, 等. 3种抗氧化剂对辐照猪肉火腿肠异味的控制技术[J]. 核农学报, 2019, **33**(3): 509-517. DOI: 10.11869/j.issn.100-8551.2019.03.0509.
- HE Lichao, YANG Haiyan, SUN Xiuxiu, *et al.* Study on the off-odor controlling of irradiated cooked pork ham sausage by three different antioxidants[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, **33**(3): 509-517. DOI: 10.11869/j.issn.100-8551.2019.03.0509.
- 15 刘文龙, 雷英杰, 刘倩, 等. 抗氧化剂协同电子束辐照对生鲜猪肉的保鲜作用[J]. 食品科技, 2021, **46**(10): 101-107. DOI: 10.13684/j.cnki.spkj.2021.10.017.
- LIU Wenlong, LEI Yingjie, LIU Qian, *et al.* Effect of antioxidants and electron beam irradiation on fresh pork preservation[J]. Food Science and Technology, 2021, **46**(10): 101-107. DOI: 10.13684/j.cnki.spkj.2021.10.017.
- 16 耿胜荣, 林若泰, 熊光权, 等. 去除冷却猪肉辐照异味方法初探[J]. 农业工程学报, 2009, **25**(3): 258-261.
- GENG Shengrong, LIN Ruotai, XIONG Guangquan, *et al.* Preliminary research on the method for reducing irradiation off-odor from refrigerated raw pork[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, **25**(3): 258-261.
- 17 张海伟, 哈益明, 王锋. 包装形式对辐照冷却猪肉脂肪氧化的影响[J]. 核农学报, 2006, **20**(2): 128-131. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8551.2006.02.013.
- ZHANG Haiwei, HA Yiming, WANG Feng. Effect of packaging on lipid oxidation in raw irradiated pork patties [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2006, **20**(2): 128-131. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8551.2006.02.013.
- 18 王俊, 胡桂仙, 于勇, 等. 电子鼻与电子舌在食品检测中的应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2004, **20**(2): 292-295. DOI: 10.3321/j.issn:1002-6819.2004.02.069.
- WANG Jun, HU Guixian, YU Yong, *et al.* Research and application of electronic nose and electronic tongue in food inspection[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, **20**(2): 292-295. DOI: 10.3321/j.issn:1002-6819.2004.02.069.
- 19 王婧. 电子鼻 电子舌对不同规格番茄酱风味的分析[J]. 农产品加工, 2021(6): 52-55. DOI: 10.16693/j.cnki.1671-9646(X).2021.03.048.
- WANG Jing. Analysis of electronic nose and electronic tongue on the flavor of tomato sauce with different specifications[J]. Farm Products Processing, 2021(6): 52-55. DOI: 10.16693/j.cnki.1671-9646(X).2021.03.048.
- 20 王琼, 徐宝才, 于海, 等. 电子鼻和电子舌结合模糊数学感官评价优化培根烟熏工艺[J]. 中国农业科学, 2017, **50**(1): 161-170. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2017.01.014.
- WANG Qiong, XU Baocai, YU Hai, *et al.* Electronic nose and electronic tongue combined with fuzzy mathematics sensory evaluation to optimize bacon smoking procedure[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, **50**(1): 161-170. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2017.01.014.
- 21 徐宝才, 李聪, 马倩, 等. 基于电子鼻和电子舌分析盐水鸭风味的差异性[J]. 中国食品学报, 2017, **17**(12): 279-286. DOI: 10.16429/j.1009-7848.2017.12.035.
- XU Baocai, LI Cong, MA Qian, *et al.* Analysis on the flavor difference of salted duck based on the electronic nose and electronic tongue[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2017, **17**(12): 279-286. DOI: 10.16429/j.1009-7848.2017.12.035.

- 22 郭金英, 李杰, 吴影, 等. 基于电子舌和色谱技术分析蒸煮猪肉滋味物质[J]. 食品与机械, 2019, **35**(8): 32-36. DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.08.006.  
GUO Jinying, LI Jie, WU Ying, *et al.* Analysis of taste substances of cooked pork based on electronic tongue and chromatographic techniques[J]. Food & Machinery, 2019, **35**(8): 32-36. DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.08.006.
- 23 沈秋霞, 朱克永, 李明元, 等. 低场核磁结合电子鼻判定复合保鲜剂对冷藏虹鳟鱼片品质变化的影响[J]. 食品与机械, 2019, **35**(12): 130-136. DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.12.024.  
SHEN Qiuxia, ZHU Keyong, LI Mingyuan, *et al.* LF-NMR combined with electronic nose to analyze the quality changes of refrigerated rainbow trout treated with composite preservative[J]. Food & Machinery, 2019, **35**(12): 130-136. DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.12.024.
- 24 周楠楠, 楼宵玮, 王颖, 等.  $^1\text{H}$ 核磁共振结合多元统计方法分析糟鸭加工过程中滋味化合物的变化[J]. 食品科学, 2019, **40**(6): 232-238. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20180416-208.  
ZHOU Nannan, LOU Xiaowei, WANG Ying, *et al.* Changes in taste compounds during processing of vinasse-cured duck as studied by  $^1\text{H}$  NMR combined with multivariate data analysis[J]. Food Science, 2019, **40**(6): 232-238. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20180416-208.
- 25 陶正清, 刘登勇, 周光宏, 等. 盐水鸭工业化加工过程中主要滋味物质的测定及呈味作用评价[J]. 核农学报, 2014, **28**(4): 632-639. DOI: 10.11869/j.issn.100-8551.2014.04.0632.  
TAO Zhengqing, LIU Dengyong, ZHOU Guanghong, *et al.* Taste evaluation of non-volatile taste compounds in Nanjing cooked duck during modern processing[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2014, **28**(4): 632-639. DOI: 10.11869/j.issn.100-8551.2014.04.0632.
- 26 施帅, 陆应林, 徐幸莲. 南京板鸭加工过程中小肽及游离氨基酸变化的研究[J]. 食品科学, 2006, **27**(3): 100-103. DOI: 10.3321/j.issn:1002-6630.2006.03.020.  
SHI Shuai, LU Yinglin, XU Xinglian. Research on changes of peptides and free-amino acids during processing of Nanjing cured-dry duck[J]. Food Science, 2006, **27**(3): 100-103. DOI: 10.3321/j.issn:1002-6630.2006.03.020.
- 27 冯敏, 汪敏, 常国斌, 等. 电子鼻检测辐照肉鸭产品的挥发性风味物质[J]. 核农学报, 2019, **33**(6): 1116-1121. DOI: 10.11869/j.issn.100-8551.2019.06.1116.  
FENG Min, WANG Min, CHANG Guobin, *et al.* The detection of volatile flavor substances of irradiated duck products by electronic nose[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, **33**(6): 1116-1121. DOI: 10.11869/j.issn.100-8551.2019.06.1116.
- 28 Lund M N, Heinonen M, Baron C P, *et al.* Protein oxidation in muscle foods: a review[J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2011, **55**(1): 83-95. DOI: 10.1002/mnfr.201000453.
- 29 Ahn D U, Jo C, Olson D G. Analysis of volatile components and the sensory characteristics of irradiated raw pork[J]. Meat Science, 2000, **54**(3): 209-215. DOI: 10.1016/S0309-1740(99)00081-9.