

# 气调包装结合电子束辐照对蚌肉冰藏品质的影响

蒋慧亮, 邓英嫒, 王正云, 朱永\*

(江苏农牧科技职业学院食品科技学院, 江苏泰州 225300)

**摘要:**为进一步分析气调包装结合电子束辐照对冰藏蚌肉品质的影响,该研究设置对照组(CK)、气调包装组(Modified Atmosphere Packaging, MAP)、电子束辐照组(Electron Beam Irradiation, EB)以及气调包装结合电子束辐照组(Modified Atmosphere Packaging Combined with Electron Beam Irradiation, MAP+EB),通过测定冰藏初始点和货架期终点时蚌肉的质构、色泽、挥发性风味物质和脂肪酸组成指标综合评价蚌肉的品质。结果表明,电子束辐照后蚌肉的硬度、咀嚼性降低,但可延缓微生物繁殖对蚌肉质构的影响。蚌肉色差值在冰藏初始点各组间无显著差异( $P>0.05$ ),在货架期终点,受电子束辐照影响,EB组和MAP+EB组的 $L^*$ 值下降, $b^*$ 值上升。冰藏初始点,CK、MAP、EB和MAP+EB组蚌肉中挥发性风味物质的种类分别为8、17、16和19种,说明气调包装和电子束辐照处理显著提高挥发性风味物质的种类( $P<0.05$ ),并且醛类、酮类物质总含量提高,烃类、醇类物质总含量降低,但无显著差异( $P>0.05$ )。各保鲜组蚌肉中脂肪酸相对总含量分别为49.55%、49.64%、49.61%和49.90%,无显著差异( $P>0.05$ )。综上,气调包装结合电子束辐照对冰藏蚌肉的贮藏品质无明显的不良影响,适合于蚌肉的物理保鲜。

**关键词:** 蚌肉; 气调包装; 电子束辐照; 贮藏品质

文章编号: 1673-9078(2023)06-115-123

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.6.0781

## Effects of Modified Atmosphere Packaging Combined with Electron Beam Irradiation on the Quality of Frozen Mussel Meat

JIANG Huiliang, DENG Yingying, WANG Zhengyun, ZHU Yong\*

(College of Food Science and Technology, Jiangsu Agri-animal Husbandry Vocational College, Taizhou 225300, China)

**Abstract:** The effect of modified atmosphere packaging combined with electron beam irradiation on the quality of frozen mussel meat was analyzed using mussel meat in a control check group (CK), modified atmosphere packaging group (MAP), electron beam irradiation group (EB), and modified atmosphere packaging combined with electron beam irradiation group (MAP+EB). Mussel meat quality was comprehensively evaluated by measuring the texture, color, volatile flavor substances, and fatty acid composition indicators at the initial stage of frozen storage and the end of shelf life. The results showed that the firmness and chewiness of the mussel meat decreased after electron beam irradiation, but the influence of microbial reproduction on the texture of mussel meat was delayed. No significant difference was observed in the color difference of the mussel meat among groups at the initial stage of frozen storage ( $P>0.05$ ). At the end of shelf life, electron beam irradiation affected the mussel meat; the  $L^*$  values of the EB group and MAP+EB group decreased and the  $b^*$  value increased. At the initial stage of frozen storage, there were 8, 17, 16, and 19 types of volatile flavor substances in mussel meat of the CK, MAP, EB and MAP+EB groups, respectively, indicating that modified atmosphere packaging and electron beam irradiation significantly increased the types of volatile flavor substances present ( $P<0.05$ ); the total aldehyde and ketone contents also increased, whereas the total content of hydrocarbons and alcohols decreased; however, the differences were not significant ( $P>0.05$ ). The relative total contents of fatty acids in the mussel meat were 49.55%, 49.64%, 49.61%, and 49.90% in the CK, MAP, EB, and MAP+EB groups, respectively, with no significant differences ( $P>0.05$ ).

引文格式:

蒋慧亮,邓英嫒,王正云,等.气调包装结合电子束辐照对蚌肉冰藏品质的影响[J].现代食品科技,2023,39(6):115-123.

JIANG Huiliang, DENG Yingying, WANG Zhengyun, et al. Effects of modified atmosphere packaging combined with electron beam irradiation on the quality of frozen mussel meat [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(6): 115-123.

收稿日期: 2022-06-21

基金项目: 江苏农牧科技职业学院科研项目(NSF2020ZR12); 泰州市科技支撑计划项目(TN202004)

作者简介: 蒋慧亮(1987-),女,硕士研究生,讲师,研究方向:食品微生物学, E-mail: 408631798@qq.com

通讯作者: 朱永(1987-),男,硕士研究生,讲师,研究方向:食品包装, E-mail: 269216427@qq.com

In summary, modified atmosphere packaging combined with electron beam irradiation had no obvious adverse effects on the storage quality of frozen mussel meat, and is suitable for the preservation of mussel meat.

**Key words:** mussel meat; modified atmosphere packaging; electron beam irradiation; storage quality

河蚌是常见的淡水贝类,新鲜蚌肉中蛋白质含量丰富,其中呈味氨基酸占氨基酸总量的44.33%,因此味道鲜美而深受消费者的喜爱<sup>[1]</sup>。而河蚌也存在着蚌壳较大,不便于运输,取肉后的蚌壳无处安置,造成环境污染的问题,取蚌肉制作成净菜实施生鲜配送即可解决这些问题,但新鲜蚌肉含水量高,易腐败变质,不利于保存,安全有效的保鲜方式是推行蚌肉净菜的重要保障。

气调包装(Modified Atmosphere Packaging, MAP)是一种食品特殊包装方式,通过改变包装内的气体配比,抑制腐败微生物的生长,减缓酶促反应,达到保持食品新鲜度,延长货架期的目的<sup>[2,3]</sup>。电子束是一种新兴物理保鲜技术,目前广泛运用于食品保鲜,包装材料及医疗物品的消杀等,对于水产品贮藏中微生物的繁殖等也有很好的抑制作用<sup>[4,5]</sup>。同时也有研究表明电子束在杀菌的同时,能改变蛋白质的功能<sup>[6]</sup>,促使脂质氧化,进而改变食品风味,破坏食品的感官品质<sup>[7]</sup>。例如5 kGy的电子束辐照能显著改变金枪鱼鱼肉的感官特性,加速蛋白质和脂质氧化<sup>[8]</sup>。经电子束辐照后生碎牛肉脂质氧化和蛋白质氧化程度均显著增加,对感官品质也有影响,但不显著<sup>[9]</sup>。而气调包装与其他的包装方式相比,能更好地维持食品的品质和风味,稳定色泽等感官指标<sup>[10]</sup>。前期研究数据表明,50% CO<sub>2</sub>+30% N<sub>2</sub>+20% O<sub>2</sub>体积配比的气调包装结合5 kGy电子束能较大程度抑制蚌肉冰藏中微生物的增长,减少挥发性盐基氮的产生,气调包装可以有效延缓由于电子束辐照造成的脂肪酸败,蚌肉冰藏货架期得到有效延长<sup>[11]</sup>。而水产品的保鲜不单是延长货架期,还需要关注其对品质的影响。因此本文拟在前期研究基础上,进一步探索气调包装结合电子束辐照对蚌肉感官品质及风味的影响。

以冰藏中的蚌肉为原料,通过气相色谱-质谱(Gas Chromatography-mass Spectrometry, GC-MS)、质构仪、

色差仪等分析比较不同保鲜处理下冰藏蚌肉中挥发性风味物质、脂肪酸组成以及质构和色度的变化,探究分析气调包装结合电子束对冰藏蚌肉感官及风味的影响,以期验证50% CO<sub>2</sub>+30% N<sub>2</sub>+20% O<sub>2</sub>气调包装结合5 kGy电子束对蚌肉品质的影响,为蚌肉的物理保鲜研究提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

鲜活河蚌(产于泰州水域,夏季,选用活力强、个体带壳重400~500 g)购于泰州市海陵区大润发超市。7890A-5975C 气质联用检测仪,美国安捷伦集团;RE-52A 旋转蒸汽检测仪,中国广州亚荣生化仪表厂;SHZ-D 循环水真空泵,巩义市英峪予华检测设备;SPX-25085H-II 生物培养箱,上海市新苗医疗器械制造公司;IS1020 直线电子加速器辐照加工系统,扬州扬福技术公司;MAP-QT 200 扎口气调封袋机,江苏森瑞恒温机械设备公司。CR400 色差仪,日本柯尼卡美能达;TMS-Pro 质构仪,德国 Eppendorf Co;YTLG-10C 台式多歧管真空冷冻干燥器,上海叶拓公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 蚌肉处理

新鲜河蚌去壳、去腮、去消化腺,保留可食用部分,每份蚌肉(50±0.5) g,使用PET包装,样品随机分为4组,分别进行保鲜处理,样品分组及保鲜处理方式如表1所示。

#### 1.2.2 蚌肉电子束辐照处理

按照层冰层样品放入底部有漏水孔的泡沫箱中,封箱。将EB组和MAP+EB组样品冷链运至扬州扬福科技有限公司,参照蒋慧亮等<sup>[6]</sup>的方法进行电子束辐照处理。

表1 样品分组及保鲜处理方式

Table 1 Sample grouping and preservation treatment method

组别	气调比例	电子束辐照
对照组(CK)	空气	否
气调包装组(MAP)	50% CO <sub>2</sub> +30% N <sub>2</sub> +20% O <sub>2</sub> (体积比)	否
电子束辐照组(EB)	空气	5 kGy
气调包装+电子束组(MAP+EB)	50% CO <sub>2</sub> +30% N <sub>2</sub> +20% O <sub>2</sub> (体积比)	5 kGy

### 1.2.3 贮藏试验与样品处理

按照层冰层样品放入底部有漏水孔的泡沫箱中,置于生化培养箱(3±0.5)℃贮藏,适时加冰,根据前期研究所得各保鲜组蚌肉的货架期时间,如表2所示各组样品分别于冰藏货架期初始点和货架期终点取样,进行质构、色差、挥发性成分和脂肪酸相对含量的测定。

表2 不同保鲜组蚌肉冰藏货架期

Table 2 Shelf life of mussel meat frozen in different treatment

groups		
组号	初始点/d	货架期终点/d
CK	0	12
MAP	0	20
EB	0	24
MAP+EB	0	28

### 1.2.4 质构的测定

将待测蚌肉切成2 cm×2 cm×2 cm左右的肉块,置于质构仪上,参照涂敏建等<sup>[12]</sup>的方法,分别测定硬度、弹性、黏附性和咀嚼性,实验平行3次。

### 1.2.5 色差的测定

用色差计测量同一块蚌肉3个不同部位的表面色差值 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 。

### 1.2.6 挥发性风味物质的测定

蚌肉经组织捣碎后采用真空冷冻进行干燥,精确称取2.0 g置于15 mL顶空样品瓶,将萃取头插入样品瓶中进行固相微萃取,60℃水浴平衡吸附30 min后上样,210℃解吸5 min,参考黄忠白等<sup>[13]</sup>建立的方法测定样品中的挥发性风味物质。经NIST谱库检索,人工谱图解析确定挥发性成分(选择相似度大于90%的鉴定结果进行报道),按峰面积归一化法计算风味物质的相对含量。

### 1.2.7 脂肪酸含量测定

蚌肉经组织捣碎后采用真空冷冻进行干燥,取2.0 g样品加入20 mL石油醚涡旋1 min,浸提30 min,离心后取上清液,旋转蒸发得脂肪提取物,取60 mg脂肪提取物加入4 mL异辛烷溶解样品后,加入20 μL氢氧化钾甲醇溶液,涡旋混匀,静置澄清,加入1.0 g硫酸氢钠,涡旋混匀,静置沉淀,用有机针式滤膜取1 mL上清液移至上机瓶中,参考樊燕等<sup>[14]</sup>的方法,利用GC-MS测定样品中脂肪酸组成,报道相似度大于90%的鉴定结果,按峰面积归一化法计算脂肪酸的相对含量。

## 1.3 数据处理

采用SPSS 18.0软件对数据进行统计分析,采用 $t$

检验进行显著性差异分析, $P<0.05$ 表示差异显著, $P>0.05$ 表示差异不显著,各指标平行测定三次,数值用“均值±标准偏差”表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同保鲜组蚌肉冰藏前后的质构变化

在冰藏初始点和货架期终点测定了不同保鲜组蚌肉的质构,结果如图1和图2所示。在冰藏初始点,CK、MAP、EB和MAP+EB组蚌肉的硬度分别为13.67、13.5、13.27和13.5 N,蚌肉的咀嚼性分别为0.85、0.98、0.65和0.64 mj,蚌肉的弹性分别为0.51、0.53、0.35和0.44 mm。经过电子束辐照后的EB组和MAP+EB组蚌肉的硬度、咀嚼性和弹性均略低于CK组,但影响不显著( $P>0.05$ )。陈方雪等<sup>[15]</sup>研究与此相似,电子束辐照导致鲷鱼的硬度、弹性和胶粘性等下降,这可能是因为电子束辐照影响了蚌肉的结构组织、肌原纤维及肌肉脂肪结构<sup>[16]</sup>,导致其硬度降低,咀嚼性随之下降。

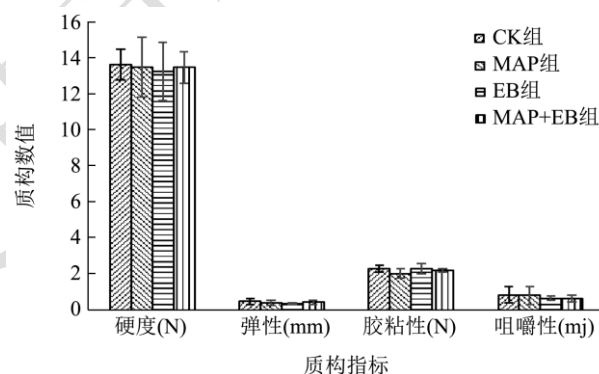


图1 不同保鲜组蚌肉在初始点的质构变化

Fig.1 Texture changes of mussel meat in different preservation groups at the initial point

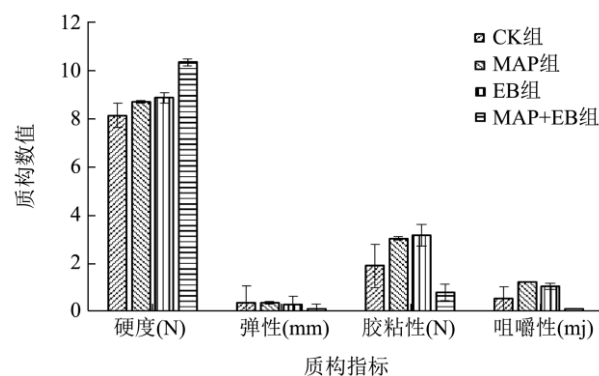


图2 不同保鲜组蚌肉在货架期终点的质构变化

Fig.2 Texture changes of mussel meat in different preservation groups at the end of shelf life

随着贮藏时间的推移,当各组蚌肉分别到达货架期终点时,CK组蚌肉的硬度为8.13 N,其他三组的

蚌肉的硬度均高于 CK 组的蚌肉,其中 MAP+EB 组蚌肉的硬度为 10.33 N。由于在贮藏过程中水产品中蛋白质被微生物及酶分解,造成硬度的下降<sup>[17]</sup>,而气调包装和电子束辐照都能延缓微生物的繁殖<sup>[11]</sup>,因此也能减少水产品中蛋白质的流失,故而经过气调包装和电子束处理后的蚌肉,其硬度下降的较少。腐败微生物的生长也会导致水产品中粘附性能的提高<sup>[18]</sup>,在货架期终点各组蚌肉的胶粘性都有所上升,CK 组蚌肉初始点的胶粘性为 2.3 N,其货架期终点的胶粘性为 2.93 N。由于电子束辐照对微生物有抑制作用,气调包装能延缓微生物的生长,所以 MAP、EB 和 MAP+EB 组蚌肉货架期终点的胶粘性分别为 2.73、2.53 和 2.33 N,均略小于 CK 组 ( $P>0.05$ )。傅丽丽等<sup>[17]</sup>研究发现辐照组三文鱼的胶粘性同样比未辐照组小。综合来看,气调包装结合电子束辐照对蚌肉的质构没有明显的不良影响,能延缓蚌肉质构品质的下降。

## 2.2 不同保鲜组蚌肉冰藏前后色差的变化

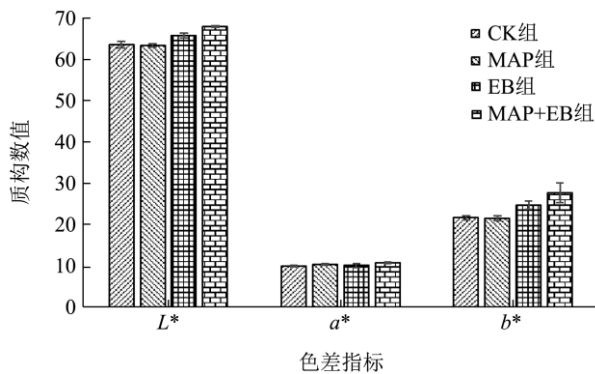


图3 不同保鲜组蚌肉在初始点色差的变化

Fig.3 Changes of mussel meat color difference at initial point in different preservation groups

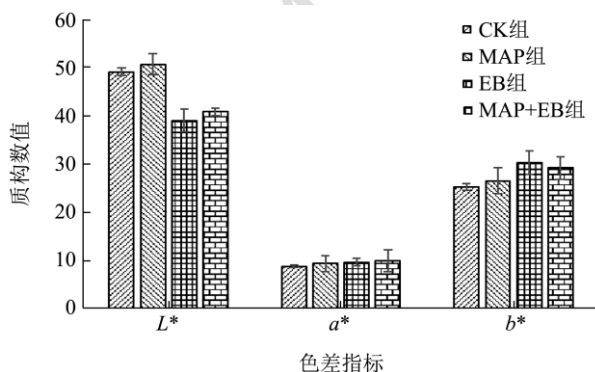


图4 不同保鲜组蚌肉在货架期终点色差的变化

Fig.4 Changes of mussel meat color difference at the end of shelf life in different preservation groups

色差是影响消费者对水产品质量感知的主要因素之一<sup>[19]</sup>。在冰藏初始点和货架期终点测定了不同保鲜组蚌肉的色差,结果见图3和图4。经过电子束辐照

以及气调包装后,在冰藏初始点,各保鲜组蚌肉的  $L^*$ 、 $a^*$ 和  $b^*$ 值都没有明显的区别 ( $P>0.05$ )。但当各组蚌肉分别到达货架期终点时,  $L^*$ 值均有所下降,CK 组蚌肉的  $L^*$ 值为 49.08,EB 组和 MAP+EB 组蚌肉的  $L^*$ 值分别为 39.01、40.76 均低于 CK 组。各组蚌肉的  $a^*$ 值没有显著的差异 ( $P>0.05$ ),  $b^*$ 值较初始点均有上升,CK 组蚌肉的  $b^*$ 值为 25.26,EB 组和 MAP+EB 组蚌肉的  $b^*$ 值分别为 30.26、29.20 均高于 CK 组。张晗<sup>[20]</sup>等研究发现电子束辐照后鲑鱼肉较未辐照组出现  $L^*$ 值下降、 $b^*$ 值上升的现象,与本文研究发现类似。电子束辐照诱导了蚌肉中的脂质氧化和羰基化合物的产生,羰基化合物与氨基酸发生美拉德反应从而形成黄褐色<sup>[21]</sup>。因此 EB 组的  $b^*$ 值最高,气调包装在一定程度上能缓和电子束辐照诱导的脂质氧化,故 MAP+EB 组的  $b^*$ 值较 EB 组有所降低。

## 2.3 不同保鲜组蚌肉冰藏前后挥发性风味物质组成的变化

不同保鲜组在冰藏初始点时蚌肉中的挥发性风味物质组成如表3所示,CK 组蚌肉中挥发性风味物质以烃类、酮类和酯类为主,CK、MAP、EB 和 MAP+EB 组的挥发性风味物质总含量分别为 53.48%、53.62%、58.78%和 60.88%,经过气调包装和电子束辐照处理后蚌肉中的挥发性风味物质总含量变化不大,略有增加,但差异不显著 ( $P>0.05$ ),但挥发性风味物质种类有所增加,其中 CK 组挥发性风味物质仅有 8 种,MAP、EB 和 MAP+EB 组的挥发性风味物质种类分别为 17、16 和 19 种,说明气调包装和电子束辐照能提高蚌肉中的挥发性风味物质的种类。MAP、EB 和 MAP+EB 组烃类物质的总含量相较于 CK 组蚌肉中的 39.79% 分别降至 28.21%、24.49%和 24.74%。醇类物质的总含量相较于 CK 组蚌肉中的 13.69% 分别降至 8.86%和 7.89%。烃类和醇类含量降低,而醛类、酮类物质的种类和总含量有所提高,CK 组蚌肉中未检测到醛类物质,MAP 组、EB 组和 MAP+EB 组蚌肉中醛类物质的总含量为 11.5%、9.1%和 11.25%。CK 组蚌肉中酮类物质总含量为 3.16%,MAP、EB 和 MAP+EB 组蚌肉中酮类物质总含量分别为 4.86%、12.71%和 13.13%。电子束辐照对蚌肉中醛类、酮类物质的影响较显著 ( $P<0.05$ )。卢佳芳等<sup>[22]</sup>研究发现电子束辐照后花鲑鱼中所含的醛类和酮类物质相对含量均有增加,与蚌肉中的挥发性风味物质组成变化类似。食品中的脂质氧化及美拉德反应形成了醛类物质<sup>[23]</sup>,而电子束辐照会加速脂肪氧化,促使烃类物质转化成醛,

同时氨基酸降解产生酮<sup>[24]</sup>, 酯类物质氧化生产醛、酮等物质, 酮对水产品风味有重要的贡献, 是特殊的风味物质<sup>[25-27]</sup>。呋喃是一种重要的风味化学物质, 由氨基酸与还原糖发生美拉德反应而产生<sup>[24,28]</sup>。2-戊基呋喃为肉中脂质氧化的指示物<sup>[29]</sup>, 也是水产品中特殊的风味物质<sup>[30]</sup>, 在 MAP 组、EB 组和 MAP+EB 组蚌肉

中分别检测到了 2-戊基呋喃, 且 MAP+EB 组蚌肉中 2-戊基呋喃含量略低于 EB 组, 说明电子束辐照促进了蚌肉的脂质氧化, 气调包装能缓和脂质氧化。胡科娜<sup>[31]</sup>同样发现电子束辐照后鳗鱼鲞中呋喃类物质含量提高, 为鳗鱼鲞提供特殊的风味。

表 3 不同保鲜组蚌肉初始点挥发性风味物质的相对含量

Table 3 Relative contents of volatile flavor substances at the initial point of mussel meat in different preservation groups

类别	挥发性风味物质	保留时间/min	相对含量/%			
			CK 组	MAP 组	EB 组	MAP+EB 组
烃类	正十二烷	8.60	-	0.04±0.0 <sup>b</sup>	0.27±0.0 <sup>a</sup>	0.34±0.02 <sup>a</sup>
	六甲基环三硅氧烷	6.82	7.81±0.12 <sup>a</sup>	5.60±0.17 <sup>b</sup>	4.39±0.17 <sup>b</sup>	4.73±0.31 <sup>b</sup>
	十一烷	16.59	-	-	0.32±0.0 <sup>a</sup>	0.50±0.03 <sup>a</sup>
	八甲基环四硅氧烷	13.47	13.78±0.27 <sup>a</sup>	10.07±0.51 <sup>b</sup>	8.79±0.35 <sup>c</sup>	7.26±0.47 <sup>c</sup>
	环戊聚二甲基硅氧烷	18.46	6.55±0.19 <sup>a</sup>	5.54±0.21 <sup>ab</sup>	4.56±0.23 <sup>b</sup>	4.86±0.20 <sup>b</sup>
	4-甲基-癸烷	14.03	7.94±0.29 <sup>a</sup>	5.25±0.23 <sup>b</sup>	4.65±0.19 <sup>b</sup>	5.74±0.29 <sup>b</sup>
	长叶烯	25.29	3.71±0.2 <sup>a</sup>	1.71±0.05 <sup>b</sup>	1.51±0.02 <sup>b</sup>	1.32±0.04 <sup>b</sup>
	烃类总含量		39.79±0.67 <sup>a</sup>	28.21±0.63 <sup>b</sup>	24.49±0.77 <sup>b</sup>	24.74±0.71 <sup>b</sup>
醛类	正己醛	5.78	-	9.88±0.32 <sup>a</sup>	9.10±0.26 <sup>a</sup>	9.42±0.57 <sup>a</sup>
	苯甲醛	11.69	-	1.61±0.03 <sup>a</sup>	-	1.83±0.06 <sup>a</sup>
	醛类总含量		-	11.50±0.39 <sup>a</sup>	9.10±0.20 <sup>b</sup>	11.25±0.55 <sup>a</sup>
酮类	$\beta$ -紫罗兰酮	27.29	-	0.35±0.01 <sup>a</sup>	0.27±0.01 <sup>a</sup>	0.41±0.02 <sup>a</sup>
	2-十一酮	22.30	-	0.57±0.02 <sup>a</sup>	0.48±0.01 <sup>a</sup>	0.43±0.02 <sup>a</sup>
	(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮	15.64	3.16±0.15 <sup>b</sup>	3.52±0.16 <sup>b</sup>	6.12±0.39 <sup>a</sup>	5.56±0.34 <sup>a</sup>
	3,5-辛二烯-2-酮	15.65	-	0.21±0.01 <sup>b</sup>	4.58±0.21 <sup>a</sup>	5.27±0.29 <sup>a</sup>
	3-辛烯-2-酮	14.58	-	0.19±0.0 <sup>b</sup>	1.26±0.0 <sup>a</sup>	1.46±0.03 <sup>a</sup>
	酮类总含量		3.16±0.13 <sup>b</sup>	4.85±0.12 <sup>b</sup>	12.71±0.58 <sup>a</sup>	13.13±0.57 <sup>a</sup>
醇类	2,6-二甲基环己醇	16.75	7.54±0.3 <sup>a</sup>	3.30±0.09 <sup>b</sup>	3.87±0.25 <sup>b</sup>	3.96±0.14 <sup>b</sup>
	1-辛烯-3-醇	12.55	6.15±0.23 <sup>a</sup>	3.35±0.1 <sup>b</sup>	4.99±0.37 <sup>b</sup>	3.88±0.12 <sup>b</sup>
	醇类总含量		13.69±0.41 <sup>a</sup>	6.8±0.24 <sup>c</sup>	8.86±0.22 <sup>b</sup>	7.89±0.41 <sup>bc</sup>
其他	2-戊基呋喃	12.96	-	1.62±0.02 <sup>b</sup>	3.62±0.15 <sup>a</sup>	2.79±0.09 <sup>a</sup>
	甲氧基苯酚	10.05	-	0.56±0.01 <sup>a</sup>	-	1.13±0.02 <sup>a</sup>

注: -表示未检出, 同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ( $P<0.05$ )。下表同。

表 4 不同保鲜组蚌肉在货架期终点挥发性风味物质的相对含量

Table 4 Relative contents of volatile flavor compounds in mussel meat of different preservation groups at the end of shelf life

类别	挥发性风味物质	保留时/min	相对含量/%			
			CK 组	MAP 组	EB 组	MAP+EB 组
烃类	正十二烷	8.60	-	0.36±0.0 <sup>b</sup>	0.85±0.02 <sup>a</sup>	0.57±0.02 <sup>ab</sup>
	六甲基环三硅氧烷	6.82	0.12±0.01 <sup>a</sup>	-	-	0.4±0.01 <sup>a</sup>
	十一烷	16.59	0.28±0.01 <sup>b</sup>	-	0.92±0.01 <sup>a</sup>	0.56±0.01 <sup>ab</sup>
	八甲基环四硅氧烷	13.47	0.32±0.02 <sup>b</sup>	1.59±0.04 <sup>a</sup>	-	0.3±0.01 <sup>b</sup>
	环戊聚二甲基硅氧烷	18.46	0.52±0.02 <sup>a</sup>	0.52±0.02 <sup>a</sup>	-	0.59±0.02 <sup>a</sup>
	4-甲基-癸烷	14.03	0.57±0.03 <sup>a</sup>	0.78±0.02 <sup>a</sup>	-	-
	长叶烯	25.29	3.90±0.11 <sup>a</sup>	0.12±0.01 <sup>b</sup>	-	-
	烃类总含量		6.72±0.20 <sup>a</sup>	3.38±0.24 <sup>b</sup>	1.77±0.02 <sup>c</sup>	2.42±0.11 <sup>bc</sup>

续表 4

类别	挥发性风味物质	保留时/min	相对含量/%			
			CK 组	MAP 组	EB 组	MAP+EB 组
醛类	正己醛	5.78	8.52±0.28 <sup>a</sup>	9.01±0.32 <sup>a</sup>	7.99±0.28 <sup>a</sup>	8.66±0.34 <sup>a</sup>
	苯甲醛	11.69	1.08±0.04 <sup>b</sup>	2.47±0.14 <sup>a</sup>	2.11±0.02 <sup>a</sup>	2.32±0.13 <sup>a</sup>
	醛类总含量		9.60±0.32 <sup>a</sup>	11.48±0.50 <sup>a</sup>	10.10±0.41 <sup>a</sup>	10.98±0.42 <sup>a</sup>
酮类	$\beta$ -紫罗兰酮	27.29	0.26±0.02 <sup>b</sup>	0.62±0.02 <sup>a</sup>	-	0.51±0.02 <sup>ab</sup>
	2-十一酮	22.30	-	0.53±0.02 <sup>b</sup>	1.54±0.02 <sup>ab</sup>	1.83±0.04 <sup>a</sup>
	(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮	15.64	1.33±0.01 <sup>b</sup>	1.45±0.03 <sup>b</sup>	5.01±0.03 <sup>a</sup>	4.31±0.25 <sup>ab</sup>
	3,5-辛二烯-2-酮	15.65	4.41±0.22 <sup>b</sup>	5.04±0.19 <sup>b</sup>	7.21±0.12 <sup>ab</sup>	7.72±0.34 <sup>a</sup>
	3-辛烯-2-酮	14.58	0.30±0.01 <sup>b</sup>	-	1.78±0.02 <sup>ab</sup>	2.54±0.19 <sup>a</sup>
	酮类总含量		6.30±0.31 <sup>b</sup>	7.63±0.2 <sup>b</sup>	15.54±0.39 <sup>ab</sup>	16.9±0.64 <sup>a</sup>
醇类	2,6-二甲基环己醇	16.75	6.43±0.33 <sup>a</sup>	4.86±0.14 <sup>b</sup>	3.00±0.06 <sup>c</sup>	1.57±0.2 <sup>d</sup>
	1-辛烯-3-醇	12.55	6.90±0.36 <sup>a</sup>	6.56±0.27 <sup>a</sup>	6.65±0.23 <sup>a</sup>	5.21±0.18 <sup>a</sup>
	醇类总含量		13.33±0.51 <sup>a</sup>	11.41±0.35 <sup>ab</sup>	9.65±0.41 <sup>b</sup>	6.78±0.22 <sup>c</sup>
其他	2-戊基呋喃	12.96	1.09±0.02 <sup>b</sup>	-	-	2.98±0.09 <sup>a</sup>
	甲氧基苯酚	10.05	0.56±0.01 <sup>b</sup>	1.34±0.03 <sup>a</sup>	0.08±0.01 <sup>c</sup>	-

冰藏货架期终点时各组蚌肉中挥发性风味物质的种类和含量如表 4 所示, 经过贮藏后, 蚌肉中的挥发性风味物质相对含量逐渐减少, CK、MAP、EB 和 MAP+EB 组蚌肉中的挥发性风味物质的总含量分别降低至 37.60%、35.25%、37.14% 和 40.06%。但是各保鲜组不同挥发性风味物质的相对含量组间差别与初始点类似, MAP、EB 和 MAP+EB 组蚌肉中挥发性风味物质种类多于 CK 组, 醛、酮类总含量较 CK 组高。总体上, 气调包装及电子束辐照对蚌肉的挥发性风味物质含量有一定的影响, 但无不良影响。杨文鸽<sup>[32]</sup>同样研究发现, 电子束辐照在一定程度上改善了泥蚶肉的风味。

#### 2.4 不同保鲜组蚌肉冰藏前后脂肪酸组成的变化

脂肪酸是有机酸中链状羧酸的总称, 分为饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸<sup>[33]</sup>。各处理组中蚌肉的冰藏初始点和货架期终点的脂肪酸组成如表 5、表 6 所示。由表 5 可知, CK、MAP、EB 和 MAP+EB 组的脂肪酸总含量分别为 49.55%、49.64%、49.61% 和 49.90%, 脂肪酸相对含量无显著差异 ( $P>0.05$ )。其中, EB 和 MAP+EB 组蚌肉中的亚麻酸相对含量分别为 1.54%、1.23%, 花生四烯酸相对含量分别为 5.89%、6.90%, 肉豆蔻酸相对含量分别为 1.17%、1.79%, 较 CK 组均略有提高, 但差异不显著 ( $P>0.05$ )。与梅卡琳等<sup>[34]</sup>研究发现相似, 电子束辐照后细点圆趾蟹肉中的花生四烯酸含量较对照组显著提高。二十碳五烯酸

(Eicosapentaenoic Acid, EPA)、二十二碳六烯酸 (Docosahexaenoic Acid, DHA) 是重要的长链多不饱和脂肪酸。CK 组蚌肉中检测出 EPA 相对含量为 6.23%, 而 MAP、EB 和 MAP+EB 组蚌肉中 EPA 相对含量分别为 5.58%、4.81% 和 4.52%, 较 CK 组略有降低, 但差异不显著 ( $P>0.05$ )。各处理组蚌肉中 DHA 相对含量分别为 5.15%、4.54%、5.12% 和 6.17%, 气调包装和电子束辐照对 EPA、DHA 的含量有所影响, 但是差异不显著 ( $P>0.05$ )。EPA、DHA 含量的差别可能也与样品本身的生活习性有关, 天然存在的 EPA 和 DHA 主要分布在动物体内以及一些微藻的体内<sup>[35]</sup>。同时不饱和脂肪酸不稳定, 也易被电子束辐照诱导发生氧化反应。

货架期终点时, CK 组蚌肉中脂肪酸总含量较冰藏初始点降低了 4.79%, 其他处理组蚌肉中的脂肪酸总含量较初始点均略有降低, MAP+EB 组降低了 6.9%, 但是各组之间的脂肪酸相对总含量没有明显的差异 ( $P>0.05$ ), 说明电子束和气调包装对蚌肉中的脂肪酸组成没有显著的影响。傅俊杰等<sup>[36]</sup>用  $\gamma$  射线对海虾和河虾仁进行辐照处理, 研究表明辐照对虾仁中的脂肪酸含量影响不明显。货架期终点时蚌肉中检测出 EPA 相对含量分别为 4.01%、4.5%、2.77% 和 3.92%, 较初始点都有所降低, 而四组蚌肉中均未检出 DHA, 这可能是因为不饱和脂肪酸性质活泼, 容易发生氧化, 产生酮、醛等风味性物质<sup>[37]</sup>, 因此货架期终点时各组蚌肉中的 DHA 和 EPA 含量均降低。总体上, 电子束辐照及气调包装对蚌肉中的优质多不饱和脂肪酸含量有一定的影响, 但是差异不显著 ( $P>0.05$ )。

表 5 不同保鲜组蚌肉在初始点的脂肪酸相对含量

Table 5 Relative fatty acid content of mussel meat in different preservation groups at the initial point

脂肪酸	保留时间/min	相对含量/%			
		CK 组	MAP 组	EB 组	MAP+EB 组
棕榈酸	9.99	8.07±0.02 <sup>a</sup>	8.50±0.02 <sup>a</sup>	7.57±0.02 <sup>a</sup>	7.24±0.02 <sup>a</sup>
硬脂酸	12.42	4.42±0.02 <sup>a</sup>	5.37±0.01 <sup>a</sup>	4.07±0.03 <sup>a</sup>	3.35±0.01
亚麻酸	17.82	1.05±0.03 <sup>ab</sup>	0.54±0.01 <sup>b</sup>	1.54±0.01 <sup>a</sup>	1.23±0.02 <sup>a</sup>
肉豆蔻酸	7.85	0.66±0.02 <sup>b</sup>	1.40±0.05 <sup>a</sup>	1.17±0.03 <sup>ab</sup>	1.79±0.02 <sup>a</sup>
花生四烯酸	14.33	5.03±0.01 <sup>b</sup>	4.70±0.02 <sup>b</sup>	5.89±0.04 <sup>ab</sup>	6.90±0.03 <sup>a</sup>
反-9-十八碳烯酸	12.17	8.26±0.05 <sup>a</sup>	7.80±0.03 <sup>a</sup>	8.12±0.03 <sup>a</sup>	8.56±0.02 <sup>a</sup>
二十碳五烯酸	14.45	6.23±0.05 <sup>a</sup>	5.58±0.04 <sup>ab</sup>	4.81±0.03 <sup>b</sup>	4.52±0.01 <sup>b</sup>
二十二碳六烯酸	17.34	5.15±0.08 <sup>a</sup>	4.54±0.02 <sup>b</sup>	5.12±0.02 <sup>ab</sup>	6.17±0.04 <sup>a</sup>
胆固醇	15.55	-	-	2.53±0.02 <sup>a</sup>	0.94±0.02 <sup>b</sup>
月桂醛缩二甲醇	11.25	1.6±0.0 <sup>a</sup>	0.93±0.02 <sup>a</sup>	1.03±0.02 <sup>a</sup>	0.83±0.01 <sup>a</sup>
4,8,12-三甲基十三碳酸	8.38	1.44±0.02 <sup>a</sup>	1.33±0.02 <sup>ab</sup>	0.75±0.04 <sup>b</sup>	0.81±0.01 <sup>b</sup>
1-十六炔	17.75	1.12±0.02 <sup>ab</sup>	1.88±0.03 <sup>a</sup>	-	0.92±0.01 <sup>b</sup>
15-甲基十六烷酸	10.68	1.34±0.01 <sup>a</sup>	1.83±0.02 <sup>a</sup>	1.77±0.03 <sup>a</sup>	2.34±0.02 <sup>a</sup>
14-甲基十五烷酸	9.56	0.72±0.01 <sup>a</sup>	1.10±0.04 <sup>a</sup>	1.02±0.02 <sup>a</sup>	1.91±0.02 <sup>a</sup>
13-methyl tetradecanal	9.49	1.45±0.01 <sup>a</sup>	0.88±0.04 <sup>a</sup>	1.16±0.02 <sup>a</sup>	-
10-十九碳烯酸	13.40	0.73±0.01 <sup>a</sup>	0.63±0.02 <sup>a</sup>	0.78±0.01 <sup>a</sup>	0.79±0.03 <sup>a</sup>
顺-10-碳烯酸	10.41	0.95±0.01 <sup>a</sup>	1.4±0.01 <sup>a</sup>	1.20±0.01 <sup>a</sup>	1.61±0.02 <sup>a</sup>
顺-7,10,13,16 二十二碳四烯酸	17.43	1.34±0.01 <sup>a</sup>	1.24±0.01 <sup>a</sup>	1.07±0.02 <sup>a</sup>	-

表 6 不同保鲜组蚌肉在货架期终点脂肪酸相对含量

Table 6 Relative fatty acid content of mussel meat at end point of shelf life in different preservation groups

脂肪酸	保留时间/min	相对含量/%			
		CK 组	MAP 组	EB 组	MAP+EB 组
棕榈酸乙酯	10.30	1.37±0.01 <sup>a</sup>	1.24±0.01 <sup>a</sup>	1.87±0.03 <sup>a</sup>	1.24±0.02 <sup>a</sup>
棕榈酸	9.99	7.32±0.03 <sup>a</sup>	6.34±0.0 <sup>a</sup>	6.89±0.05 <sup>a</sup>	6.29±0.05 <sup>a</sup>
硬脂酸乙酯	13.31	0.37±0.01 <sup>b</sup>	0.63±0.01 <sup>a</sup>	0.70±0.04 <sup>a</sup>	0.54±0.03 <sup>a</sup>
肉豆蔻酸	7.85	0.54±0.01 <sup>b</sup>	0.64±0.01 <sup>b</sup>	0.68±0.02 <sup>b</sup>	0.91±0.03 <sup>a</sup>
花生四烯酸	14.33	5.14±0.02 <sup>a</sup>	4.66±0.01 <sup>a</sup>	4.53±0.04 <sup>a</sup>	5.04±0.03 <sup>a</sup>
反-9-十八碳烯酸	12.17	8.06±0.01 <sup>a</sup>	7±0.03 <sup>a</sup>	7.02±0.04 <sup>a</sup>	7.47±0.05 <sup>a</sup>
二十碳五烯酸	14.45	4.01±0.02 <sup>a</sup>	4.50±0.02 <sup>a</sup>	2.77±0.08 <sup>b</sup>	3.92±0.02 <sup>a</sup>
胆固醇	15.55	-	0.49±0.02 <sup>b</sup>	1.73±0.02 <sup>a</sup>	1.24±0.05 <sup>a</sup>
月桂醛缩二甲醇	11.25	1.44±0.03 <sup>a</sup>	1.13±0.02 <sup>a</sup>	1.03±0.05 <sup>a</sup>	0.95±0.04 <sup>a</sup>
4,8,12-三甲基十三碳酸	8.38	0.95±0.01 <sup>a</sup>	0.90±0.02 <sup>a</sup>	1.21±0.05 <sup>a</sup>	0.91±0.02 <sup>a</sup>
1-十六炔	17.75	1.22±0.03 <sup>a</sup>	1.24±0.04 <sup>a</sup>	1.75±0.06 <sup>a</sup>	0.91±0.03 <sup>a</sup>
15-甲基十六烷酸	10.68	1.00±0.05 <sup>a</sup>	1.10±0.02 <sup>a</sup>	1.21±0.05 <sup>a</sup>	1.37±0.04 <sup>a</sup>
13-methyl tetradecanal	9.49	1.08±0.02 <sup>a</sup>	1.71±0.04 <sup>a</sup>	1.32±0.01 <sup>a</sup>	1.19±0.02 <sup>a</sup>
顺-11-二十烯酸	14.92	7.75±0.01 <sup>a</sup>	7.76±0.02 <sup>a</sup>	7.83±0.07 <sup>a</sup>	6.00±0.06 <sup>a</sup>
10-十九碳烯酸	13.4	0.95±0.01 <sup>a</sup>	0.32±0.04 <sup>c</sup>	0.37±0.05 <sup>c</sup>	0.59±0.07 <sup>b</sup>
1,4,8-Dodecatriene,(E,E,E)	11.91	1.73±0.0 <sup>a</sup>	1.95±0.05 <sup>a</sup>	1.64±0.04 <sup>a</sup>	2.48±0.06 <sup>a</sup>
顺-10-碳烯酸	10.41	0.82±0.02 <sup>a</sup>	0.67±0.03 <sup>a</sup>	0.98±0.03 <sup>a</sup>	1.05±0.05 <sup>a</sup>
顺-7,10,13,16 二十二碳四烯酸	17.43	1.02±0.01 <sup>a</sup>	0.97±0.08 <sup>a</sup>	1.05±0.04 <sup>a</sup>	0.91±0.02 <sup>a</sup>

### 3 结论

气调包装及电子束辐照处理后蚌肉的硬度和咀嚼性略降低,但随着贮藏的进行,能有效延缓硬度的下降以及胶黏性的上升,在货架期终点时,MAP+EB组蚌肉的硬度高于CK组,胶黏性小于CK组。冰藏初始点各组蚌肉的色差值都没有明显的区别( $P>0.05$ ),但电子束辐照加速了脂质氧化,在货架期终点时,MAP+EB和EB组蚌肉的 $b^*$ 值较初始点均有上升。经气调包装及电子束辐照处理后蚌肉中挥发性风味物质的种类增加,其中醛类、酮类物质的种类和含量提高,烃类和醇类物质的种类和含量降低,但总含量无显著差异( $P>0.05$ )。各组蚌肉中脂肪酸组成及相对含量也无明显差异( $P>0.05$ )。综上,气调包装结合电子束辐照对蚌肉的质构、色泽、挥发性风味物质以及脂肪酸的组成都没有不良的影响。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] JIANG Fenghua, ZHOU Lei, ZHOU Wei, et al. Effect of modified atmosphere packaging combined with plant essential oils on preservation of fresh-cut lily bulbs [J]. LWT - Food Science and Technology, 2022, 162: 113513.
- [3] 张晨,杨诗奇,李超,等.气调包装与其他技术结合在食品保鲜中的研究进展[J].食品工业,2020,41(5):287-290.
- [4] Farkas J. Irradiation for better food [J]. Trend in Food Science & Technology, 2006, 17: 1-5.
- [5] Myung Woo, Byun Ju Won, Lee Hong Sun Yok, et al. Application of gamma irradiation for inhibition of food allergy [J]. Radiation Physics and Chemistry, 2002, 63(3): 369-370.
- [6] ZHANG Meng, FENG Xumei, LIANG Yaru, et al. Effects of electron beam irradiation pretreatment on the structural and functional properties of okara protein [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2022, 79: 103049.
- [7] WANG Zhenhua, WANG Kaiyun, ZHANG Min, et al. Effect of electron beam irradiation on shelf life, noodle quality, and volatile compounds of fresh millet-wheat noodles [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(12): 16064.
- [8] Tingting Bu, Yang Jin, Xiaohui Li, et al. Effect of electron irradiation and bayberry polyphenols on the quality change of yellowfin tuna fillets during refrigerated storage [J]. Radiation Physics and Chemistry, 2017, 138(10): 67-71.
- [9] Xi Feng, Cheorun Jo, Ki Chang Nam, et al. Impact of electron-beam irradiation on the quality characteristics of raw ground beef [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2019, 54: 87-92.
- [10] Zhang Xijia, Zhang Min, Law Chung Lim, et al. High-voltage electrostatic field-assisted modified atmosphere packaging for long-term storage of pakchoi and avoidance of off-flavors [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2022, 79: 103032.
- [11] 蒋慧亮,王正云,杨絮,等.气调包装结合电子束辐照对蚌肉的保鲜效果[J].现代食品科技,2021,37(3):147-153.
- [12] 涂敏建,迟海,杨宪时,等.不同水分含量对南极磷虾烤虾质构和色泽的影响[J].现代食品科技,2012,28(9):1102-1105.
- [13] 黄忠白,丁媛,黄健,等.栉孔扇贝柱和扇贝裙边中挥发性物质的比较分析[J].食品科学,2016,37(4):98-102.
- [14] 樊燕,孙晨阳,王博,等.GC/MS 分析俄罗斯鲟鱼不同部位脂肪酸组成[J].现代食品科技,2015,31(1):231-235.
- [15] 陈方雪,周明珠,邓祎,等.电子束辐照处理对鲟鱼冷藏期间品质的影响[J].肉类研究,2021,35(6):57-62.
- [16] 罗华彬,林露,高星,等.电子束辐照对带鱼鱼糜内源性蛋白酶活性及其构象单元的影响[J].食品科学,2019,40(9):23-28.
- [17] 傅丽丽,林敏,高原,等.电子束辐照对三文鱼品质的影响研究[J].核农学报,2017,31(8):1521-1527.
- [18] 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(19):206-211.
- [19] Ferdaous Boughattasa, Daria Vilkovaa, Elena Kondratenko, et al. Targeted and untargeted techniques coupled with chemometric tools for the evaluation of sturgeon (*Acipenser gueldenstaedtii*) freshness during storage at 4 °C [J]. Food Chemistry, 2020, 312(C): 12600-12609.
- [20] 张晗,吕鸣春,梅卡琳,等.电子束辐照对鲈鱼肉杀菌保鲜效果及品质的影响[J].食品科学,2018,39(21):66-71.
- [21] Siriporn Riebroy, Soottawat Benjakul, Wonnop Visessanguan, et al. Effect of irradiation on properties and storage stability of Som-fug produced from bigeye snapper [J]. Food Chemistry, 2006, 103(2): 274-286.
- [22] 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.
- [23] Mireille Cardinal, Marianne Chaussy, Claire Donnay-Moreno, et al. Use of random forest methodology to link aroma profiles to volatile compounds: Application to enzymatic hydrolysis of Atlantic salmon (*Salmo salar*) by-products combined with Maillard reactions [J]. Food Research International, 2020, 134(prepublish): 109254.
- [24] Li Xinran, Dong Yifei, Jiang Pengfei, et al. Identification of changes in volatile compounds in sea cucumber *Apostichopus*



- japonicus* during seasonings soaking using HS-GC-IMS [J]. LWT - Food Science and Technology, 2022, 154: 112695.
- [25] Xiaoyi Tan, Libo Qi, Fengjiao Fan, et al. Analysis of volatile compounds and nutritional properties of enzymatic hydrolysate of protein from cod bone [J]. Food Chemistry, 2018, 264(30): 350-357.
- [26] Olivia B W, Christine M. Food irradiation-position of ADA [J]. Journal of the American Dietetic Association, 2000, 100(2): 246-253.
- [27] 赵颖颖,李三影,欧芳兰,等.热处理八角茴香对猪排骨挥发性风味的影响[J].中国调味品,2021,46(6):46-53.
- [28] 杨茗媛,王小凤,乙丛敏,等.养殖大黄鱼挥发性成分分析[J].食品工业科技,2018,39(4):202-209.
- [29] 刘登勇,赵志南,吴金城,等.基于 SPME-GC-MS 分析熏制材料对熏鸡腿挥发性风味物质的影响[J].食品科学,2019,40(24):220-227.
- [30] Yanohara Taishi, Taoka Yousuke, Yamamoto Mizuki. Rapid production of fish sauce from the internal organs of white sturgeon, *Acipenser transmontanus* Richardson, 1836 [J]. Fermentation, 2022, 8(5): 238-238.
- [31] 胡科娜,高兴杰,谷贵章,等.竹叶黄酮联合电子束对鳗鱼鲞风味物质产生的影响研究[J].核农学报,2021,35(11):2550-2558.
- [32] 杨文鹤,李超,徐大伦,等.电子束辐照对泥蚶肉挥发性风味成分的影响[J].中国食品学报,2012,12(3):176-184.
- [33] T V Ivanova, A S Voronkov, T Kh Kumakhova, et al. Distinguishing features of fatty acid content and composition in total lipids of *Malus orientalis* Uglitzk pericarp [J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2020, 67(3): 463-471.
- [34] 梅卡琳,宣仕芬,谭贝贝,等.电子束辐照对细点圆趾蟹肉营养及滋味成分的影响[J].食品科学,2019,40(8):169-174.
- [35] 曾晶,戢颖瑞,蓝东明,等.反式 EPA/DHA 的来源、检测技术与生理功能研究进展[J].中国油脂,2022,47(1):53-59.
- [36] 傅俊杰,劳华均,刘波静.辐照冻虾仁对其营养品质影响的影响[J].核农学报,2004,18(5):381-384.
- [37] 徐斯婕,张权,胡明明,等.6 种鱼类鱼汤中脂肪酸组成和挥发性风味物质比较[J].食品安全质量检测学报,2022,13(10): 3115-3122.