

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.80729

# 烤制方式对牛肉挥发性风味物质的影响

马雪媛<sup>1</sup> 张 森<sup>1</sup> 代芹燕<sup>1</sup> 贾洪锋<sup>1</sup> 张佳敏<sup>2</sup>

(1. 四川旅游学院烹饪与食品科学与工程学院, 四川 成都 610100;

2. 成都大学肉类加工四川省重点实验室, 四川 成都 610106)

**摘要:** [目的] 研究烤制方式对牛肉挥发性风味物质的影响。[方法] 筛选烤箱烤制、微波烤制、电烤盘烤制 3 种烤制方式下感官评分最佳的烤制时间, 再结合固相微萃取 (solid phase microextraction, SPME)、气相色谱—质谱 (gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS) 联用技术对 3 种烤制方式下牛肉的挥发性风味物质进行分离鉴定。[结果] 3 种烤制方式下牛肉的感官评分均呈先上升后下降趋势, 烤箱和电烤盘烤制均在烤制时间为 10 min 时感官评分最高, 微波烤制则在烤制时间为 3 min 时感官评分最高。3 种烤制方式的最优烤制时间下分别鉴定出 47, 37, 31 种挥发性化合物, 且主要以醛类、醇类、酮类和烷烃类为主。不同烤制方式下的化合物种类和含量存在明显差异, 烤箱烤制牛肉的主要香气成分为辛烷醛、(E)-2-癸烯醛和 1-辛醇, 微波烤制牛肉的主要香气成分为己酸对硝基苯酯、己酸和十二烷酸, 电烤盘烤制牛肉的主要香气成分为二十烷、己二酸二丁酯和胡莫柳酯。[结论] 采用烤箱 200 °C 烤制 10 min 时, 检出的风味化合物种类最多, 牛肉的风味呈现效果最佳。

**关键词:** 牛肉; 烤制方式; GC-MS; 挥发性风味物质; 感官分析

## Effects of different roasting methods on volatile flavor compounds in beef

MA Xueyuan<sup>1</sup> ZHANG Miao<sup>1</sup> DAI Qinyan<sup>1</sup> JIA Hongfeng<sup>1</sup> ZHANG Jiamin<sup>2</sup>

(1. College of Culinary and Food Science Engineering of Sichuan Tourism University, Chengdu, Sichuan 610100, China;

2. College of Sichuan Key Laboratory of Meat Processing, Chengdu University, Chengdu, Sichuan 610106, China)

**Abstract:** [Objective] To study the effects of different baking methods on the volatile flavor substances in beef. [Methods] The optimal baking durations for sensory scores under three baking methods, *i. e.*, electric oven baking, microwave baking, and electric baking pan baking, were screened. Solid-phase microextraction (SPME) combined with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) was used to separate and identify the volatile flavor substances in beef under the best conditions for each of the three baking methods. [Results] The sensory scores of beef under all three baking methods showed an initial increase followed by a decrease. The highest sensory scores for oven and electric baking pan were achieved at 10 min, while the highest sensory score for microwave baking occurred at 3 min. A total of 47, 37, and 31 volatile compounds were identified under the optimal baking durations for the three methods, respectively, with aldehydes, alcohols, ketones, and alkanes being the main components. There were significant differences in the types and concentrations of compounds under different baking methods. The main aroma components of beef roasted in the oven were octanal, (E)-2-decenal, and 1-octanol. The main aroma components of beef roasted in the microwave were p-nitrophenyl hexanoate, hexanoic acid, and dodecanoic acid. The main aroma components of beef roasted in the electric baking pan were eicosane, dibutyladipate, and homosalate. [Conclusion] The greatest variety of flavor compounds was detected when beef was baked in the oven at 200 °C for 10 min, which provided the best flavor profile for the beef.

**Keywords:** beef; roasting methods; GC-MS; volatile flavor substances; sensory organ

基金项目: 肉类加工四川省重点实验室开放基金项目 (编号: 24-R-07); 四川省大学生创新创业科研项目 (编号: 202211552037)

通信作者: 张森 (1984—), 女, 四川旅游学院副教授, 硕士。E-mail: 414137715@qq.com

收稿日期: 2024-07-27 改回日期: 2025-03-22

引用格式: 马雪媛, 张森, 代芹燕, 等. 烤制方式对牛肉挥发性风味物质的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(6): 26-35.

Citation: MA Xueyuan, ZHANG Miao, DAI Qinyan, et al. Effects of different roasting methods on volatile flavor compounds in beef[J]. Food & Machinery, 2025, 41(6): 26-35.

牛肉是一种相对猪肉来说蛋白质含量高而脂肪含量较低的畜肉。作为消费者最喜爱的肉制品之一,牛肉有卤煮、红烧、爆炒、煲汤等多种烹调方式<sup>[1]</sup>。其中,煎、烤制产品——牛排深受当代年轻人的喜爱,同时各大西餐厅或者西式餐吧也将牛排作为最主流的产品推向顾客<sup>[2]</sup>。

目前,牛肉的烤制方法主要有烤箱烤制、电烤盘烤制、微波烤制、烟熏烤制和真空低温烤制等。烤制过程中,肉类风味的形成主要依靠美拉德反应,肉类中的羰基和氨基化合物经脱水缩合、裂解、聚合等反应后,生成具有肉香味的化合物,如噻吩、吡咯、吡啶和咪唑酮等风味物质<sup>[3]</sup>。不同的烤制时间下牛肉中的一些风味前体物质的分解程度不同,风味也会有所差异<sup>[4]</sup>。目前关于牛肉的研究主要集中在蒸、煮、煎、炸和干制等加工方式中风味物质、理化指标和食用品质的变化,对不同烤制方式处理的牛肉中挥发性风味物质的对比研究较少。

试验拟通过感官分析结合气质联用仪,对烤箱烤制、微波烤制、电烤盘烤制3种烤制方式下牛肉的挥发性风味物质进行测定,分析烤制过程中牛肉挥发性风味物质的变化,旨在为餐饮行业和消费者推荐更健康、科学、合理的牛肉烤制方式提供依据。

## 1 材料与仪器

### 1.1 材料与仪器

原切牛里脊肉:四川欧牛食品有限公司;

食盐:市售;

气相色谱质谱联用仪:GC/MS QP2010Plus型,日本岛津公司;

烤箱:EG7XCG6-NSH型,美的集团股份有限公司;

电烤盘: Bear DKL-D12Y1型,小熊电器股份有限公司;

微波炉:EG7XCG6-NSH型,美的集团股份有限公司;

烘焙电子称:EK813型,精度0.01 g,广东香山衡器股份有限公司。

### 1.2 试验方法

**1.2.1 牛肉预处理** 新鲜的牛里脊用清水冲洗表面,用厨房纸吸干,以垂直牛里脊肌纤维的方向切割成厚度为1 cm的肉片,继续将肉片切成3 cm×3 cm×1 cm的长方体肉块<sup>[5]</sup>。为保证牛肉风味的同时达到去腥的目的,在处理好的肉块中加入0.5%食盐,腌制10 min,随机分成3组,每组200 g。

### 1.2.2 牛肉烤制

(1) 烤箱烤制:温度200℃,烤制时间分别为6,8,10,12,14 min。

(2) 微波烤制:功率850 W,烤制时间分别为2.0,2.5,3.0,3.5,4.0 min。

(3) 电烤盘烤制:功率1 200 W,烤盘温度110℃,烤制时间分别为8,10,12,14,16 min。

**1.2.3 感官评价** 选取10名食品专业的学生组成感官评鉴小组,按表1分别对各组样品的颜色、风味、多汁性和咀嚼性进行单独评定,分数越高说明该项指标越好<sup>[6]</sup>。

**1.2.4 GC-MS分析** 称取均匀后的样品3.00 g于10 mL顶空瓶中,加入20 μL内标物2-甲基-3-庚酮(1 945 μg/mL)<sup>[7]</sup>,60℃水浴5 min,顶空萃取55 min,供GC-MS分析<sup>[8]</sup>。

(1) GC条件:色谱柱为Thermo C<sub>18</sub>小柱(100 mm×2.1 mm,2.2 μm),压力51.6 kPa,总流量50.0 mL/min,柱流1.00 mL/min,升温程序:柱温45℃,保持3 min,以3℃/min升至180℃,保持3 min,以12℃/min升至220℃,保持3 min;不分流进样<sup>[9]</sup>。

(2) MS条件:离子源温度200℃,接口温度240℃,溶剂延长时间3.0 min<sup>[10]</sup>,扫描时间56 min,扫描范围*m/z* 35~500。

(3) 定性、定量分析:将样品中检测出的挥发性风味物质谱图通过NIST2011标准谱库中进行检索、计算其保留指数并与其文献值进行比对,同时结合人工解析质谱图进行确定<sup>[11]</sup>。采用内标法进行定量分析,以质量浓度为194 μg/mL的2-甲基-3-庚酮为内标物,按式(1)对各组分进行定量分析<sup>[12]</sup>。

$$C_x = \frac{S_x \times V_0 \times C_0}{S_0 \times m}, \quad (1)$$

式中:

$C_x$ ——未知化合物的含量,μg/g;

$V_0$ ——内标物的进样体积,μL;

$C_0$ ——内标物的质量浓度,μg/mL;

$S_x$ ——未知化合物的峰面积;

$S_0$ ——添加的内标物峰面积;

$m$ ——试样的质量,g。

**1.2.5 数据处理** 利用Excel、SPSS、Origin等软件对数据进行处理。结果均以平均值±标准差表示,试验数据采用单因素方差分析(ANOVA)和Duncan检验( $P < 0.05$ )其显著性。

表 1 感官评价标准

Table 1 Criteria for sensory evaluation

| 项目           | 评价标准  | 得分   |
|--------------|---|------|
| 颜色<br>(10分)  | 肉块表面明显焦糊,切面出现不均匀的深色斑点,略显发黑                      | 0~2  |
|              | 肉块表面部分焦糊,切面呈现浅红褐色,部分区域出现深色                      | 3~4  |
|              | 肉块表面呈暗红色,切面呈现诱人的红褐色,色泽均匀                        | 5~6  |
|              | 肉块表面焦黄,色泽诱人,切面呈现清晰的暗红色,色泽分明且均匀                  | 7~8  |
|              | 肉块表面焦黄与棕红色交织,呈现出丰富的层次感,切面深暗红色与枣红色相间,色泽极其分明,令人垂涎 | 9~10 |
| 风味<br>(10分)  | 带有明显的糊味,几乎无法察觉烤肉的独特风味                           | 0~2  |
|              | 香味较淡,伴随轻微的糊味,缺乏烤肉的诱人风味                          | 3~4  |
|              | 烤肉香味一般,但无不良杂味,能够被大多数人接受                         | 5~6  |
|              | 烤肉香味较好,滋味鲜美,色香味俱佳,给人带来愉悦的用餐体验                   | 7~8  |
| 多汁性<br>(10分) | 烤肉香味浓郁,滋味鲜美至极,无一丝异味,令人回味无穷,难以忘怀                 | 9~10 |
|              | 几乎无汁液感,口感粗糙如同沙粒,难以顺畅下咽                          | 0~2  |
|              | 汁液较少,整体口感偏干燥,肉制品质地较硬,稍显生涩                       | 3~4  |
|              | 多汁感一般,肉制品略显生硬,但仍有部分干燥感,整体口感尚可接受                 | 5~6  |
| 咀嚼性<br>(10分) | 多汁感较好,肉类中油与水的比例恰到好处,口感滑润,味道更加鲜美                 | 7~8  |
|              | 汁液丰富,口感滑润无比,轻松下咽,令人回味无穷                         | 9~10 |
|              | 肉制品质地坚硬,咀嚼起来十分费力,难以下咽                           | 0~2  |
|              | 肉制品偏硬,咀嚼起来不够顺畅,需要一定的努力                          | 3~4  |
|              | 肉制品的硬度和弹性相对均衡,咀嚼起来较为容易                          | 5~6  |
|              | 肉制品质地柔软,弹性良好,咀嚼起来轻松自如,口感舒适                      | 7~8  |
|              | 肉制品肉感强烈,口感均匀细腻,咀嚼时Q弹顺滑,令人回味无穷                   | 9~10 |

## 2 结果与分析

### 2.1 感官评价结果

烤制时间过长或过短都会影响牛肉的感官和风味。烤制时间太短,牛肉未成熟,没有产生足够的风味物质,烤制时间过长,肌肉中水分流失较多,肉质嫩度降低,咀嚼性变差,色泽变暗。

2.1.1 烤箱烤制对感官评分的影响 由图 1 可知,在烤箱 200℃的烤制条件下,烤制时间为 10 min 时的感官评分最高。烤箱烤制 6~8 min 时,肉块表面呈暗红色、切面呈红褐色,有一定的烤肉香味,烤肉的组织、硬度较好,较易咀嚼,但其烤肉香味偏淡,且多汁感一般,口感略干燥,因此整体感官评分较低。烤箱烤制 10 min 时,肉块表面呈焦黄色、有光泽感、切面呈深暗红色、色泽分明,肉香味浓郁诱人,肉汁丰富、肉质细腻、咀嚼性极好,因此感官得分最高。烤箱烤制 12 min 时,肉块表面色泽具有光泽感、整体颜色偏暗但可以接受,肉香浓郁,但多汁性和咀嚼性较差。烤箱烤制 14 min 时,肉块颜色更深、光泽感消失,肉香味浓郁但汁液明显减少,咀嚼时口感干燥,咀嚼性较差。因此,选择烤箱烤制时间为 10 min。

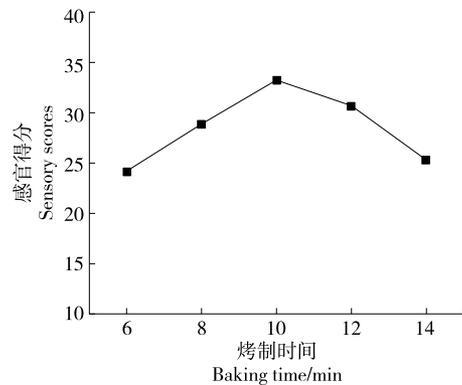


图 1 烤箱烤制时间对感官评分的影响

Figure 1 Effect of electric oven baking time on sensory score

2.1.2 微波烤制对感官评分的影响 由图 2 可知,在微波 850 W 的烤制条件下,烤制时间为 3.0 min 的烤肉感官评分最高。微波烤制 2.0 min 时,肉块表面呈浅棕色、无光泽感,烤肉香味淡,伴有一定异味,烤肉汁液少,且不易咀嚼。微波烤制 2.5 min 时,肉块颜色变深、呈暗红色、有一定光泽,异味消失而肉香味出现,但多汁性和咀嚼性仍不足。微波烤制 3.0 min 时,肉块表面呈焦黄色、切面呈枣红

色、有光泽感,烤肉香味浓郁,烤肉多汁性好,组织柔软、咀嚼性好,感官评分最高。微波烤制 3.5 min 时,肉块颜色开始变暗、呈暗红色、切面呈红棕色,烤肉香味更浓郁,但多汁性下降,肉质开始变硬,因此感官评分下降。微波烤制 4.0 min 时,肉块表面呈暗红棕色、切面呈红褐色,有焦香味,汁液较少,口感干燥且不易咀嚼。因此,选择微波烤制时间为 3.0 min。

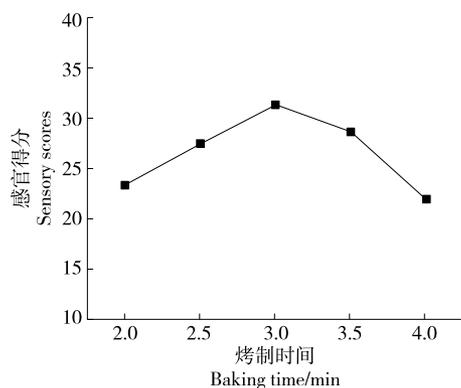


图2 微波烤制时间对感官评分的影响

Figure 2 Effect of microwave baking time on sensory score

2.1.3 电烤盘烤制对感官评分的影响 由图3可知,在电烤盘 110 °C 的烤制条件下,烤制时间为 10 min 时感官评分最高。电烤盘烤制 8 min 时,肉块表面呈焦黄色、切面呈枣红色、有淡淡的光泽感,烤肉香味浓,多汁感较好,肉质柔软、咀嚼性好,所以感官评分较高。电烤盘烤制 10 min 时,肉块表面呈焦黄色、切面呈深枣红色、油光感更加强烈,烤肉香味浓郁,肉质鲜嫩爽滑、组织中油与水的比例均匀,多汁性、咀嚼性均较好,故感官评分最高。电烤盘烤制 12 min 时,肉块表面呈焦黄色、切面呈红棕色、有油光感,烤肉香味浓郁诱人,但多汁性降低,质地开始变干燥。电烤盘烤制 14 min 时,肉块表面呈暗红色、切面呈红褐色、光泽感减弱,多汁性变差,咀嚼性一般。电烤盘烤制 16 min 时,肉块表面出现焦糊、切面发黑,呈淡淡焦糊味,质地干燥,肉质变硬、咀嚼性较差,整体感官评分最低。因此,选择电烤盘烤制时间为 10 min。

由表 2 可知,烤箱 200 °C 烤制(A)、微波 850 W 烤制(B)、电烤盘 110 °C 烤制(C)的感官评分均极显著,表明 3 种烤制方式下的牛肉感官评分差异有统计学意义。

## 2.2 GC-MS 分析

2.2.1 牛肉的香气成分及含量 由表 3 可知,在烤箱烤制、微波烤制、电烤盘烤制 3 种烤制方式下分别检出 47,

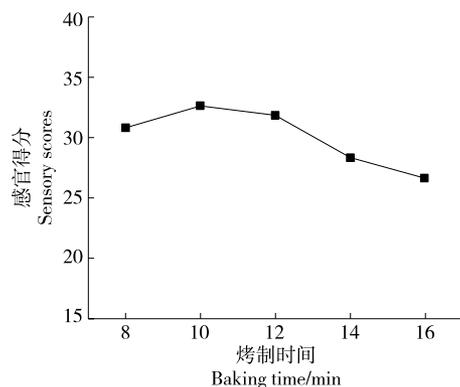


图3 电烤盘烤制时间对感官评分的影响

Figure 3 Effect of microwave baking pan baking time on sensory score

表 2 感官评分方差分析<sup>†</sup>

Table 2 Analysis of variance of sensory score

| 来源 | 平方和     | 自由度 | 均方     | F 值    | P 值   | 显著性 |
|----|---------|-----|--------|--------|-------|-----|
| A  | 332.200 | 4   | 83.050 | 59.040 | 0.001 | **  |
| B  | 355.867 | 4   | 88.967 | 75.395 | 0.001 | **  |
| C  | 150.200 | 4   | 37.550 | 39.665 | 0.001 | **  |

† \*为显著( $P < 0.05$ );\*\*为极显著( $P < 0.01$ )。

37, 31 种挥发性化合物。3 种烤制方式下牛肉中检出的挥发性风味物质种类、数量以及含量不同(详见表 4),可能是因为烤箱和微波炉的受热相对于电烤盘更加均匀,因此更有利于风味物质的形成与挥发;而微波加热的时间远远短于烤箱的,部分反应可能来不及完成,所以形成的挥发性风味物质的含量不如烤箱。这也说明烤制的方式、时间与牛肉在烤制过程中形成的化合物种类、数量紧密相关。

表 3 不同烤制方式下牛肉挥发性风味物质种类及含量

Table 3 Types and content of volatile flavor compounds in beef samples treated with different roasting methods

| 种类 | 烤箱烤制 |  | 微波烤制 |  | 电烤盘烤制 |  |
|----|------|--|------|--|-------|--|
|    | 数量   | 含量/<br>( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) | 数量   | 含量/<br>( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) | 数量    | 含量/<br>( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) |
| 酮类 | 4    | 0.671                                      | 2    | 0.424                                      | 4     | 0.168                                      |
| 醛类 | 23   | 11.790                                     | 18   | 5.857                                      | 11    | 2.130                                      |
| 醇类 | 10   | 1.172                                      | 5    | 0.697                                      | 3     | 0.274                                      |
| 酸类 | 2    | 0.133                                      | 2    | 0.177                                      | 1     | 0.079                                      |
| 烷类 | 4    | 0.307                                      | 5    | 0.167                                      | 6     | 0.212                                      |
| 酯类 | 3    | 0.294                                      | 4    | 0.147                                      | 6     | 0.494                                      |
| 其他 | 1    | 0.108                                      | 1    | 0.082                                      | 0     | 0.000                                      |
| 总计 | 47   | 14.476                                     | 37   | 7.550                                      | 31    | 3.357                                      |

表 4 不同烤制方式下牛肉中挥发性风味物质含量<sup>†</sup>

| Table 4 Content of volatile flavor compounds in beef samples treated with different roasting methods |                               | μg/g                     |                           |                           |
|--|-------------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 种类   | 名称                            | 烤箱烤制                     | 微波烤制                      | 电烤盘烤制                     |
| 酮类   | 2,3-辛二酮                       | 0.444±0.089 <sup>a</sup> | 0.410±0.113 <sup>a</sup>  | 0.051±0.013 <sup>b</sup>  |
|  | 二氢-5-甲基-5-(2-甲基丙基)-2-(3H)-呋喃酮 | 0.167±0.065              | —                         | —                         |
|  | 1-(1H-吡咯-2-基)乙烷酮              | 0.035±0.012 <sup>a</sup> | —                         | 0.014±0.004 <sup>b</sup>  |
|  | 6,10-二甲基-5,9-十一碳二烯-2-酮        | 0.026±0.010              | 0.014±0.004               | 0.017±0.005               |
|  | 5-己基-5-甲基氧杂环己烷-2-酮            | —                        | —                         | 0.086±0.005               |
| 醛类   | 己醛                            | 4.005±2.136 <sup>a</sup> | 0.905±0.512 <sup>ab</sup> | 0.444±0.186 <sup>b</sup>  |
|  | 壬醛                            | 1.661±0.316 <sup>a</sup> | 0.639±0.221 <sup>b</sup>  | 0.311±0.011 <sup>b</sup>  |
|  | 十六烷醛                          | 1.134±0.538 <sup>a</sup> | 0.421±0.160 <sup>b</sup>  | 0.577±0.057 <sup>ab</sup> |
|  | 十五烷醛                          | 0.842±0.491 <sup>a</sup> | 0.299±0.085 <sup>ab</sup> | 0.134±0.015 <sup>b</sup>  |
|  | 苯甲醛                           | 0.662±0.261              | 0.431±0.103               | 0.407±0.016               |
|  | 辛烷醛                           | 0.559±0.120 <sup>a</sup> | 0.276±0.072 <sup>b</sup>  | —                         |
|  | 十四烷醛                          | 0.534±0.319 <sup>a</sup> | 0.192±0.048 <sup>ab</sup> | 0.067±0.003 <sup>b</sup>  |
|  | 庚醛                            | 0.464±0.247 <sup>a</sup> | 0.133±0.104 <sup>b</sup>  | —                         |
|  | 十三醛                           | 0.462±0.257              | —                         | —                         |
|  | 戊醛                            | 0.353±0.169              | 0.211±0.036               | —                         |
|  | 十八烷醛                          | 0.163±0.067              | —                         | 0.091±0.010               |
|  | (E)-2-癸烯醛                     | 0.178±0.086 <sup>a</sup> | 0.066±0.016 <sup>b</sup>  | 0.015±0.004 <sup>b</sup>  |
|  | 反-2-十一烯醛                      | 0.177±0.099 <sup>a</sup> | 0.066±0.008 <sup>ab</sup> | 0.023±0.001 <sup>b</sup>  |
|  | 癸醛                            | 0.098±0.044 <sup>a</sup> | 0.039±0.018 <sup>b</sup>  | 0.048±0.008 <sup>ab</sup> |
|  | (E)-2-壬烯醛                     | 0.106±0.054              | —                         | —                         |
|  | (E,E)-2,4-癸二烯醛                | 0.074±0.027              | 0.053±0.004               | —                         |
|  | (E)-2-辛烯醛                     | 0.050±0.021              | 0.031±0.006               | —                         |
|  | (E)-4-癸烯醛                     | 0.047±0.024              | —                         | —                         |
|  | 十一醛                           | 0.046±0.022 <sup>a</sup> | 0.020±0.001 <sup>b</sup>  | 0.011±0.000 <sup>b</sup>  |
|  | 13 甲基十四烷醛                     | 0.047±0.021              | —                         | —                         |
|  | 2-丁基-2-辛烯醛                    | 0.076±0.070              | 0.021±0.008               | —                         |
|  | 4-乙基苯甲醛                       | 0.033±0.022 <sup>a</sup> | 0.013±0.001 <sup>ab</sup> | —                         |
|  | 顺式-9-十六碳烯醛                    | 0.019±0.012              | —                         | —                         |
| 十二烷醛   | —                             | 0.041±0.033              | —                         |                           |
| 醇类   | 1-辛烯-3-醇                      | 0.369±0.170 <sup>a</sup> | 0.235±0.011 <sup>ab</sup> | 0.059±0.004 <sup>b</sup>  |
|  | 1-戊醇                          | 0.177±0.075              | 0.113±0.018               | —                         |
|  | 1-辛醇                          | 0.221±0.134 <sup>a</sup> | 0.083±0.003 <sup>ab</sup> | 0.030±0.002 <sup>b</sup>  |
|  | 1-己醇                          | 0.082±0.026 <sup>a</sup> | 0.021±0.006 <sup>b</sup>  | —                         |
|  | 1-庚醇                          | 0.141±0.062              | —                         | —                         |
|  | (Z)-2-辛烯-1-醇                  | 0.077±0.030              | 0.054±0.007               | —                         |
|  | 1-壬烯-3-醇                      | 0.036±0.014              | —                         | —                         |
|  | 正十五醇                          | 0.025±0.009              | —                         | —                         |
|  | 1-十四醇                         | 0.029±0.019              | —                         | —                         |
|  | 庚二醇                           | 0.015±0.009              | —                         | —                         |
|  | 2-甲氧基-1-丙醇                    | —                        | 0.192±0.045               | 0.185±0.025               |

续表 4

| 种类  | 名称                 | 烤箱烤制                     | 微波烤制                     | 电烤盘烤制                    |
|-----|--------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 酯类  | 1,2-苯二甲酸双(2-甲基丙基)酯 | 0.163±0.045 <sup>a</sup> | 0.023±0.008 <sup>b</sup> | 0.042±0.054 <sup>b</sup> |
|     | 戊酸 1-甲基乙酯          | 0.068±0.023              | 0.073±0.033              | 0.064±0.021              |
|     | 己酸己基酯              | 0.062±0.010              | —                        | —                        |
|     | 己酸对硝基苯酯            | —                        | 0.027±0.006              | —                        |
|     | 壬基戊酯亚硫酸            | —                        | 0.024±0.006              | —                        |
|     | 水杨酸 2-乙基己酯         | —                        | —                        | 0.142±0.098              |
|     | 胡莫柳酯               | —                        | —                        | 0.116±0.067              |
|     | 己二酸二丁酯             | —                        | —                        | 0.106±0.068              |
|     | 亚硫酸 2-戊酯己酯         | —                        | —                        | 0.024±0.003              |
| 酸类  | 十二烷酸               | 0.118±0.075              | 0.159±0.112              | 0.079±0.015              |
|     | 壬酸                 | 0.015±0.004              | —                        | —                        |
|     | 己酸                 | —                        | 0.019±0.008              | —                        |
| 烷烃类 | 十四烷                | 0.117±0.016 <sup>a</sup> | 0.052±0.018 <sup>b</sup> | 0.067±0.019 <sup>b</sup> |
|     | 十五烷                | 0.099±0.037 <sup>a</sup> | 0.040±0.012 <sup>b</sup> | 0.038±0.004 <sup>b</sup> |
|     | 十三烷                | 0.054±0.011              | —                        | —                        |
|     | 2,6,10-三甲基十三烷      | —                        | —                        | 0.022±0.004              |
|     | 1-十二烷醇             | 0.038±0.015              | —                        | —                        |
|     | 十四烷基环氧乙烷           | —                        | 0.036±0.005              | —                        |
|     | 十六烷                | —                        | 0.026±0.006 <sup>b</sup> | 0.030±0.009 <sup>a</sup> |
|     | 二十烷                | —                        | 0.013±0.003 <sup>b</sup> | 0.043±0.008 <sup>a</sup> |
|     | 十七烷                | —                        | —                        | 0.012±0.001              |
| 其他  | 2-戊基味喃             | 0.108±0.069              | 0.082±0.019              | —                        |

† “—”表示未检出;字母不同表示差异显著( $P<0.05$ )。

### 2.2.2 牛肉的挥发性风味物质分析

(1) 酮类挥发性风味物质:酮类物质可以由不饱和脂肪酸受热氧化后降解<sup>[13]</sup>,也可以通过美拉德反应产生<sup>[14]</sup>,通常在食品中呈奶香或果香味<sup>[9]</sup>。由表 3 可知,3 种不同烤制方式中分别检出 4,2,4 种酮类化合物。2,3-辛二酮和 6,10-二甲基-5,9-十一碳二烯-2-酮为 3 种烤制方式中都存在的酮类化合物,而 2,3-辛二酮含量较高,其在肉类中通常会呈现出甜的奶油香<sup>[15]</sup>。烤箱 200 °C 烤制 10 min 时检出的酮类化合物的种类和含量为 3 种烤制方式中最高的,其中 2,3-辛二酮含量也高于其他两种烤制方式;微波 850 W 烤制 3 min 时检出的酮类化合物只有 2 种,其含量也是 3 种方式中最少的;电烤盘 110 °C 烤制 10 min 时检出的酮类物质种类较多,但其含量是 3 种烤制方式中最低的。因此,在烤箱 200 °C 烤制 10 min 时可能最有利于牛肉中这些酮类物质尤其是 2,3-辛二酮的挥发。但由于酮类物质在所有挥发性风味物质中占比较小,因此对 3 种不同烤制方式下牛肉挥发性风味的贡献并不突出。

(2) 醛类挥发性风味物质:醛类化合物为碳基化合物,主要产生于脂质氧化过程,具有强挥发性、浓度高的特点<sup>[5]</sup>,为肉的香气成分特征物质,同时在 3 种烤制方式

下检出的物质种类和含量相较于其他种类物质中最多。不同烤制过程处于持续加热状态,由于美拉德反应、脂质氧化反应和 Strecker 热降解反应,醛类物质与其他类型化合物相比浓度最高<sup>[15]</sup>。3 种烤制方式下分别检出 23,18,11 种醛类化合物,共有的醛类化合物有己醛、壬醛、十六烷醛、十五烷醛、苯甲醛、十四烷醛、(E)-2-癸烯醛、反-2-十一烯醛、癸醛和十一醛,这些物质可能是肉类产生熟味的关键因子<sup>[16]</sup>。己醛具有甜樱桃成熟果实的香气,主要由亚油酸和花生四烯酸氧化产生<sup>[17]</sup>;壬醛具有玫瑰香气<sup>[18]</sup>,主要由油酸氧化产生<sup>[19]</sup>;苯甲醛具有杏仁香、樱桃香、坚果香和木质香;十四烷醛、十五烷醛、十六烷醛主要为烷烃类的醛,具有的气味较为微弱,通常呈现油香或脂肪香<sup>[20]</sup>;(E)-2-癸烯醛、反-2-十一烯醛等烯醛类化合物通常具有清香和果香;癸醛具有甜香、柑橘香、蜡香、花香;十一醛具有柑橘味和肥皂味<sup>[16]</sup>。烤箱 100 °C 烤制 10 min 时醛类化合物种类最多,其特有的化合物为十三醛、(E)-2-壬烯醛、(E)-4-癸烯醛、13 甲基十四烷醛和顺式-9-十六碳烯醛,其中贡献最大的为十三醛,具有皂香、柑橘香、脂肪香<sup>[21]</sup>;微波 850 W 烤制 3 min 时特有的化合物为十二烷醛,具有皂香、蜡质香和柑橘香<sup>[16]</sup>;电烤盘 110 °C 烤

制 10 min 时没有特有的醛类化合物。因此,烤箱 200 °C 烤制 10 min 时可能最有利于醛类化合物的挥发。

(3) 醇类挥发性风味物质:3 种烤制方式下分别检出 10, 5, 3 种醇类化合物,共有的化合物为 1-辛烯-3-醇和 1-辛醇,1-辛烯-3-醇具有蘑菇、薰衣草、玫瑰和乾草等香气<sup>[22]</sup>。醇类是脂肪氧化或氨基酸降解的产物,由于烤箱烤制温度在 3 种方式中最高,且烤制温度与醇类物质的产量成正比,因此烤箱 200 °C 烤制 10 min 时检出了多种特有的醇类物质,分别为 1-庚醇、1-壬烯-3-醇、正十五醇、1-十四醇何庚二醇,它们主要赋予牛肉坚果香、脂肪香、蘑菇香、清香和果香<sup>[19,21]</sup>。2-甲氧基-1-丙醇是微波 850 W 烤制 3 min 和电烤盘 110 °C 烤制 10 min 时均有检出的物质,但 2-甲氧基-1-丙醇通常不具有明显的气味,所以对牛肉的风味贡献不大。

(4) 酸类挥发性风味物质:3 种烤制方式下分别检出 2, 2, 1 种酸类物质,共有化合物为十二烷酸,即月桂酸,具有月桂油香味<sup>[23]</sup>;烤箱 200 °C 烤制 10 min 时特有的化合物为壬酸,具有脂肪、蜡质、干酪和温柔的甜奶油香气<sup>[24]</sup>;微波 850 W 烤制 3 min 时特别含有己酸,其通常赋予食物干酪香、脂肪香和一些酸味<sup>[25]</sup>。3 种样品中酸类物质的种类和含量均相对较低,酸类物质阈值较高,但其对烤制牛肉的整体香气贡献不显著。

(5) 烃类挥发性风味物质:烷烃类化合物大多数情况下香气较弱或不具有明显香气,因此对牛肉的风味贡献相较于其他化合物而言较小,但也是构成牛肉独特风味不可或缺的成分,在烤制牛肉中检出的含量偏少。3 种烤制方式下共有的物质有十四烷和十五烷;烤箱 200 °C 烤制 10 min 时特有的物质为十三烷和 1-十二醇烷,1-十二醇烷具有油脂的味道<sup>[26]</sup>;微波 850 W 烤制 3 min 时特有的物质为十四烷基环氧乙烷;电烤盘 200 °C 烤制 10 min 时特有的物质为 2, 6, 10-三甲基十三烷和十七烷。这些烷烃类化合物大多数存在于烟草中,因此可能会为烤制牛肉提供一些独特的烟熏味。

(6) 酯类挥发性风味物质:酯类物质的产生可能来源于醇和酸之间的酯化反应,是烤牛肉风味物质中必不可少的一类化合物,它们通常赋予食物水果香和花香<sup>[27]</sup>。3 种烤制方式下分别检出了 3, 4, 6 种酯类化合物。酯类是氢过氧化降解生成内脂,对食品风味形成起关键性作用,烤制肉类风味差异大多是由于脂肪酸氧化的产物不同导致的<sup>[28]</sup>。3 种烤制方式下共有物质为 1, 2-苯二甲酸双(2-甲基丙基)酯和戊酸 1-甲基乙酯。微波 850 W 烤制 3 min 下的酯类物质最少,而电烤盘 110 °C 烤制 10 min 下的酯类物质最多,且具有 4 种特有的化合物,为水杨酸 2-乙基己酯、胡莫柳酯、己二酸 2-丁酯和亚硫酸 2-戊酯己酯,其中

胡莫柳酯通常会为食物提供温和的薄荷香味,说明烤制温度较高时脂类损失较大。因此,电烤盘 110 °C 烤制 10 min 可能更有利于酯类化合物的挥发。

(7) 其他类挥发性风味物质:烤箱 200 °C 烤制 10 min 和微波 850 W 烤制 3 min 时均检出了 2-戊基呋喃,而电烤盘 110 °C 烤制 10 min 时未检出其他物质。2-戊基呋喃通常情况下会呈现出类似焦糖或焦糖化的气味<sup>[29]</sup>,使牛肉的风味更加丰富。

### 2.2.3 牛肉的关键挥发性风味物质分析

(1) PCA 分析:由图 4 可知,第一、二主成分的累计贡献率为 87.9% > 80%,表明主成分可以反映样品香气的整体信息<sup>[30]</sup>。3 种样品分布在 3 个不同的象限,能够很好地区分,说明 3 种烤制方式下牛肉的香气成分具有显著差异。PC1 的贡献值远大于 PC2,说明在横坐标上样品的距离越大,其差异性越大<sup>[31]</sup>。样品 B(微波烤制)各平行结果之间分布紧密,表明其重复性高。样品 A(烤箱烤制)和样品 B(微波烤制)在横坐标上分布距离较近,说明两者香气成分差异较小;样品 A(烤箱烤制)与样品 C(电烤盘烤制)在横坐标上距离较远,说明其香气成分差异较大;样品 B(微波烤制)与样品 C(电烤盘烤制)在横坐标上距离较近,且在纵坐标上距离较远,表明二者香气成分相似,其差异主要体现在 PC2 上。

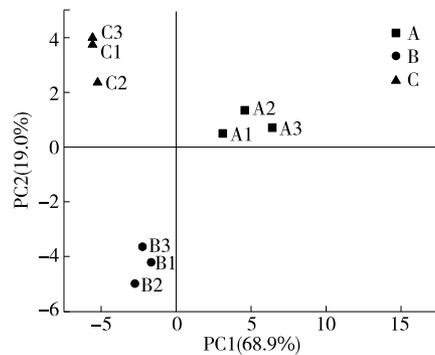


图 4 不同烤制方式下牛肉 GC-MS 数据的主成分分析 (PCA) 二维图

Figure 4 PCA 2D diagram of beef GC-MS data under different roasting methods

(2) 聚类分析:由图 5 可知,3 种烤制方式下的牛肉样品可以聚为两类,其中微波烤制样品(B)和电烤盘烤制样品(C)聚为一类,说明微波烤制样品和电烤盘烤制样品的关键香气成分相似,与 PCA 分析所得结果相似。烤箱烤制样品的主要香气成分为辛烷醛、(E)-2-癸烯醛、1-辛醇等;微波烤制样品的主要香气成分为己酸对硝基苯酯、己酸、十二烷醛等;电烤盘烤制样品的主要香气成分为二十

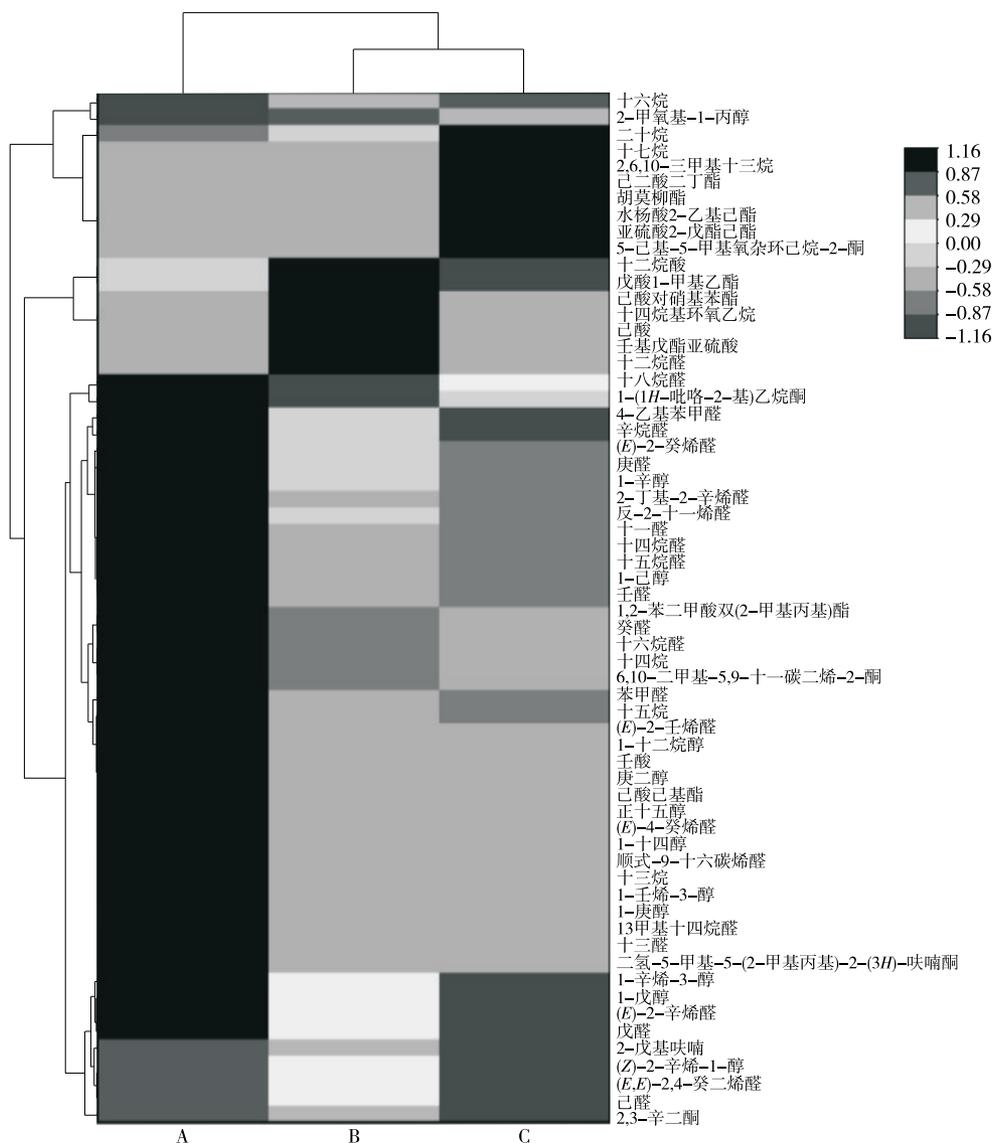


图5 不同烤制方式下牛肉香气成分聚类热图

Figure 5 Cluster heatmap of key volatile flavor compounds in beef samples treated with different roasting methods

烷、己二酸二丁酯、胡莫柳酯等。

### 3 结论

牛肉在烤箱 200 °C、微波 850 W、电烤盘 110 °C 下烤制,其感官评分均随烤制时间的延长先增加后下降,分别在烤箱 200 °C 烤制 10 min、微波 850 W 烤制 10 min、电烤盘 110 °C 烤制 10 min 时的感官评分最高。3 种烤制方式下分别鉴定出 47, 37, 31 种挥发性化合物,其中烤箱 200 °C 烤制 10 min 时检出的风味化合物种类最多。主成分分析(PCA)和聚类分析表明,微波烤制和电烤盘烤制的关键香气成分相似。不同烤制方式下的化合物种类和含量有明显差异,烤箱烤制牛肉的主要香气成分为辛烷醛、(*E*)-2-癸烯醛和 1-辛醇,微波烤制牛肉的主要香气成分为

己酸对硝基苯酯、己酸和十二烷酸,电烤盘烤制牛肉的主要香气成分为二十烷、己二酸二丁酯和胡莫柳酯。烤箱烤制增加了烤牛肉中酮类、醛类、醇类和酸类物质的种类和含量;电烤盘烤制增加了烤牛肉中烷类和酯类风味物质的种类。综上,烤箱 200 °C 烤制 10 min 时,牛肉风味呈现效果最佳。试验仅选择了 3 种烤制方式进行分析,下一步可增加烤制方式,优化烤制参数,同时结合电子鼻和电子舌等分析检测的方法,为牛肉在不同烤制方式下风味物质的形成机理及工艺参数的确定提供理论参考。

### 参考文献

- [1] KERTH C. Determination of volatile aroma compounds in beef using differences in steak thickness and cook surface

- temperature[J]. *Meat Science*, 2016, 117: 27-35.
- [2] 孟祥忍, 吴鹏, 王恒鹏, 等. 切割角度和制熟方式对牛排品质因子及挥发性风味物质的影响[J]. *食品与机械*, 2018, 34(11): 24-28.
- MENG X R, WU P, WANG H P, et al. Effects of cutting angle and processing methods on quality factors and volatile flavor compounds of steak[J]. *Food & Machinery*, 2018, 34(11): 24-28.
- [3] 朱芙蓉, 黄俊逸, 张志, 等. 多糖在人造肉制备中的应用研究[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(24): 376-382.
- ZHU F R, HUANG J Y, ZHANG Z, et al. Research on the application of polysaccharides in the preparation of artificial meat[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(24): 376-382.
- [4] 贡慧, 杨震, 史智佳, 等. 不同熬煮时间对北京酱牛肉挥发性风味成分的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(10): 183-190.
- GONG H, YANG Z, SHI Z J, et al. Effect of different cooking times on volatile flavor components in Beijing spiced beef[J]. *Food Science*, 2017, 38(10): 183-190.
- [5] 许蜜蜜, 邱月, 王旭骅, 等. 不同复热处理牛肉特征风味物质分析[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(20): 309-314.
- XU M M, QIU Y, WANG X H, et al. Analysis of characteristic flavor of roast beef with different reheat treatments[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(20): 309-314.
- [6] 肉孜·阿木提, 史勇, 吕仲明. 便携式烤肉炉不同烤制条件对烤肉品质的影响分析[J]. *包装与食品机械*, 2017, 35(5): 25-29.
- Rouzi Amuti, SHI Y, LU Z M. Meat quality analysis under different roasting conditions based on portable barbecue stove [J]. *Packaging and Food Machinery*, 2017, 35(5): 25-29.
- [7] 李娟. 我国不同地区酱卤牛肉风味物质剖面分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018:22-24.
- LI J. Flavor profiling of marinated beef collected from different regions of China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018: 22-24.
- [8] 罗美燕, 刘唤明, 香江, 等. 虾酱中风味菌株的筛选及其发酵性能分析[J]. *广东海洋大学学报*, 2022, 42(2): 79-87.
- LUO M Y, LIU H M, XIANG J, et al. Isolation of flavor strains in shrimp paste and analysis of fermentation characteristic[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2022, 42(2): 79-87.
- [9] 刘杨, 黄佳, 贾洪锋, 等. 不同烹饪方法对牛肉挥发性风味物质的影响[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(10): 305-313.
- LIU Y, HUANG J, JIA H F, et al. Effects of different cooking methods on volatile flavor compounds in beef[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(10): 305-313.
- [10] 杨爽, 徐琳, 黄锐函, 等. 不同真空油炸时间对猪肉丝品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(1): 214-221.
- YANG S, XU L, HUANG R H, et al. Effect of different vacuum frying time on quality of shredded meat[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(1): 214-221.
- [11] 郭瑞, 李盼盼, 张晓莉, 等. SPME-GC-MS/MS 结合多元统计分析研究不同储藏年份玉米风味物质差异[J]. *粮油食品科技*, 2024, 32(3): 179-186.
- GUO R, LI P P, ZHANG X L, et al. Diversity analysis of volatile flavor compounds of corn with various storage years based on SPME-GC-MS/MS and multivariate statistical analysis[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2024, 32(3): 179-186.
- [12] 陈丽兰, 杨心怡, 乔明锋, 等. 基于 GC-IMS, GC-MS 和 OAV 法分析花椒粉颗粒度对花椒油挥发性香气成分的影响[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(8): 301-310.
- CHEN L L, YANG X Y, QIAO M F, et al. Effects of different pepper powder particle sizes on volatile aromatic compounds in *Zanthoxylum* oil based on GC-IMS, GC-MS, and OAV[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(8): 301-310.
- [13] RUIZ J, VENTANAS J, CAVA R. New device for direct extraction of volatiles in solid samples using SPME[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2001, 49(11): 5 115-5 121.
- [14] WETTASINGHE M, VASANTHAN T, TEMELLI F, et al. Volatiles from roasted byproducts of the poultry-processing industry[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2000, 48(8): 3 485-3 492.
- [15] 柏霜, 王永瑞, 罗瑞明, 等. 不同高温烹饪方式加工过程中滩羊肉风味化合物的差异比较[J]. *食品科学*, 2021, 42(24): 166-174.
- BAI S, WANG Y R, LUO R M, et al. Formation of and changes in volatile flavor compounds in Tan sheep meat during processing by different high-temperature cooking methods[J]. *Food Science*, 2021, 42(24): 166-174.
- [16] 李嘉灏, 曾瑶英, 熊玉帛, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 及电子舌对预制梅菜扣肉关键性风味与过熟味评价分析[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(21): 234-245.
- LI J H, ZENG Y Y, XIONG Y B, et al. Evaluation and analysis of key flavor and warmed-over flavor of pre-prepared steamed pork with preserved vegetable based on HS-SPME-GC-MS combined with electronic tongue[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(21): 234-245.
- [17] RUIZ J, GARCÍA C, MURIEL E, et al. Influence of sensory characteristics on the acceptability of dry-cured ham[J]. *Meat Science*, 2002, 61(4): 347-354.
- [18] 周景瑞, 罗文菊, 许浩翔, 等. 贵州省关岭牛不同部位牛肉挥发性风味物质和脂肪酸差异比较[J]. *湖北农业科学*, 2024, 63(4): 148-154.
- ZHOU J R, LUO W J, XU H X, et al. Comparison of volatile flavor compounds and fatty acids differences in beef from different parts of Guanling cattle in Guizhou Province[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2024, 63(4): 148-154.

- [19] TANIMOTO S, KITABAYASHI K, FUKUSIMA C, et al. Effect of storage period before reheating on the volatile compound composition and lipid oxidation of steamed meat of yellowtail *Seriola quinqueradiata*[J]. *Fisheries Science*, 2015, 81(6): 1 145-1 155.
- [20] 谢雪华, 邱月, 王旭骅, 等. 基于 QDA 和 GC-MS 的热加工牛肉特征挥发性风味物质分析[J]. *中国食品学报*, 2023, 23(5): 301-310.  
XIE X H, QIU Y, WANG X H, et al. Analysis of characteristic volatile flavor substances in thermally processed beef meats based on QDA and GC-MS methods[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2023, 23(5): 301-310.
- [21] 廖林. 超声波辅助复合蛋白酶对冬菜扣肉加工工艺及品质特性的影响研究[D]. 重庆: 西南大学, 2023: 48-49.  
LIAO L. Study on the effect of ultrasound-assisted complex protease on the processing technology and quality characteristics of winter vegetable buckle[D]. Chongqing: Southwest University, 2023: 48-49.
- [22] 谢恬, 王丹, 马明娟, 等. OAV 和 GC-O-MS 法分析五香驴肉风味活性物质[J]. *食品科学*, 2018, 39(8): 123-128.  
XIE T, WANG D, MA M J, et al. Identification of flavor-active compounds in spiced donkey meat by odor activity value (OAV) calculation and gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry[J]. *Food Science*, 2018, 39(8): 123-128.
- [23] 姜兴东. 基于薄膜微萃取的香稻香气风味物质检测方法研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023: 56-58.  
JIANG X D. Study on the detection method of aroma and flavor substances in fragrant rice based on thin film microextraction[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023: 56-58.
- [24] 胡航伟, 段秋虹, 刘凌霄, 等. 挥发性风味分析技术及其在传统发酵豆制品中应用研究进展[J]. *中国调味品*, 2023, 48(11): 196-202.  
HU H W, DUAN Q H, LIU L X, et al. Research progress of volatile flavor analysis technologies and their application in traditional fermented soybean products[J]. *China Condiment*, 2023, 48(11): 196-202.
- [25] 杨青博, 梁佳蕊, 孟永宏, 等. 苹果汁发酵用乳酸菌 WFC 414 和 WFC502 的筛选、鉴定与评价[J]. *安徽农业科学*, 2024, 52(9): 139-146.  
YANG Q B, LIANG J R, MENG Y H, et al. Screening, identification and evaluation of lactic acid bacteria WFC 414 and WFC 502 for apple juice fermentation[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2024, 52(9): 139-146.
- [26] 程鑫. 乳酸菌发酵对糙米蒸煮食用品质改良效果的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2018: 18-19.  
CHENG X. Study on improving cooking and eating qualities of brown rice by lactic acid bacteria fermentation[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018: 18-19.
- [27] 瓮亚楠, 马晓蕊, 陈涛, 等. 基于气相色谱质谱和气相离子迁移色谱对谷氨酸-葡萄糖美拉德反应体系中挥发性风味物质分析[J]. *食品与发酵工业*, 2025, 51(2): 320-330.  
WENG Y N, MA X R, CHEN T, et al. Analysis of volatile flavor compounds in glutamic acid-glucose Maillard reaction system based on gas chromatography-mass spectrometry and gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2025, 51(2): 320-330.
- [28] 罗玉龙, 靳志敏, 刘夏炜, 等. 肉制品中香味物质形成原因研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2015, 41(2): 254-258.  
LUO Y L, JIN Z M, LIU X W, et al. Development of research on aroma of mechanism in meat products[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2015, 41(2): 254-258.
- [29] 韦仕静, 林喆, 姚崇, 等. 食用动物油脂制备肉味香精的研究现状[J]. *中国食品添加剂*, 2021, 32(2): 123-127.  
WEI S J, LIN Z, YAO C, et al. The review of meat flavor preparation from edible animal oils[J]. *China Food Additives*, 2021, 32(2): 123-127.
- [30] 孙光城, 罗秀群, 林丹, 等. 基于 GC-MS 分析牛肉不同部位对牛肝菌牛肉酱品质及挥发性香气成分的影响[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(19): 216-227.  
SUN G C, LUO X Q, LIN D, et al. Analysis of impact of different parts of beef on the quality and volatile aroma components of boletus beef sauce based on GC-MS[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(19): 216-227.
- [31] 陈丽兰, 易宇文, 吴华昌, 等. GC-MS 结合电子鼻分析不同品牌郫县豆瓣对于焗牛肉品质的影响[J]. *中国调味品*, 2022, 47(9): 39-43.  
CHEN L L, YI Y W, WU H C, et al. Analysis on effect of different brands of pixian bean paste on the quality of stir-fried beef by gas chromatography-mass spectrometry combined with electronic nose[J]. *China Condiment*, 2022, 47(9): 39-43.