

王琳, 李安林, 熊双丽, 等. 红外烤制和微波烤制猪肉品质的对比分析 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(8): 57-66. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023040043

WANG Lin, LI Anlin, XIONG Shuangli, et al. Quality Analysis of Infrared and Microwave Roast Pork[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(8): 57-66. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023040043

· 研究与探讨 ·

红外烤制和微波烤制猪肉品质的对比分析

王琳¹, 李安林², 熊双丽^{2,*}, 熊得全³, 唐丹³

(1.西南财经大学天府学院, 四川成都 610052;

2.四川旅游学院, 四川成都 610100;

3.成都市武侯实验中学, 四川成都 610043)

摘要:以感官评价、质构、丙二醛、过氧化值、蛋白质、挥发性风味物质等为考察因子, 比较分析红外烤制和微波烤制对猪里脊肉品质的影响。结果表明: 两种烤制方式对猪肉色泽影响的差异性不显著 ($P>0.05$)。红外烤制猪肉感官评分比微波烤制猪肉平均高 3.67 分, 但硬度和咀嚼性更低。红外烤制猪肉丙二醛含量和过氧化值分别比微波烤制猪肉增加了 16.89% 和 38.36%。红外烤制猪肉中活性巯基含量极显著低于微波烤制猪肉 ($P<0.01$), 更容易引起蛋白质的氧化。两种烤制方式均使猪肉蛋白质二级结构发生变化, 红外烤制下猪肉蛋白质聚集变性作用更强。红外烤制和微波烤制猪肉分别鉴定出 48 种和 60 种挥发性风味物质, 具有明显差异。红外烤制猪肉的挥发性风味物质中烃类物质种类与相对含量最多, 但对风味贡献不大。杂环类硫化物能提供浓郁的肉香及洋葱味, 微波烤制猪肉杂环类硫化物相对含量比红外烤制高, 种类更多, 肉香味更浓。综合考虑烤肉食用品质及人体健康, 选择微波烤制方式更好。

关键词:猪里脊肉, 红外, 微波, 烤制, 品质

中图分类号: TS251.5⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)08-0057-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023040043

本文网刊:



Quality Analysis of Infrared and Microwave Roast Pork

WANG Lin¹, LI Anlin², XIONG Shuangli^{2,*}, XIONG Dequan³, TANG Dan³

(1.Tianfu College of Southwestern University of Finance and Economics, Chengdu 610052, China;

2.Sichuan Tourism University, Chengdu 610100, China;

3.Chengdu Wuhou Experimental Middle School, Chengdu 610043, China)

Abstract: The effects of infrared baking and microwave baking on the quality of pork tenderloin was compared by using sensory evaluation, texture, malondialdehyde, peroxide value, protein, volatile flavor substances as examination factors. The results showed that, there was no significant difference in the effect of two roasting methods on the color of pork ($P>0.05$). Infrared roasted pork had an average sensory score of 3.67 points higher than microwave roasted pork, but had lower hardness and chewiness. The content of malondialdehyde and peroxide value of infrared roasted pork were 16.89% and 38.36% higher than those of microwave roasted pork, respectively. The active sulfhydryl content in infrared roasted pork was significantly lower than that in microwave roasted pork ($P<0.01$), which was more likely to cause protein oxidation. Both baking methods changed the secondary structure of the protein in roasted pork. The aggregation and denaturation effect of pork protein was stronger under infrared roasting. 48 and 60 volatile flavor compounds were identified in infrared and microwave roasted pork, respectively. There were obvious difference between the two types of roasted pork. Among the volatile flavor compounds in infrared roasted pork, the types and relative content of hydrocarbons were the highest, but they didn't greatly contribute to the flavor. Heterocyclic sulfides could provide strong meat aroma and onion flavor. The relative contents of heterocyclic sulfides in microwave roasted pork was higher than that in infrared

收稿日期: 2023-04-06

基金项目: 四川旅游学院科研团队项目 (21SCTUTY03); 烹饪科学四川省高等学校重点实验室 2021 年开放基金项目 (PRKX2021Z05)。

作者简介: 王琳 (1995-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 18281538842@163.com。

* 通信作者: 熊双丽 (1977-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 粮油食品加工, E-mail: xiongshuangli9@163.com。

roasted pork, and there was more types. It indicated that the meat flavor was stronger. Considering the quality of roast meat and human health, microwave roasting was the better choice.

Key words: pork tenderloin; infrared; microwave; baking; quality

烧烤肉制品因其独特的烟熏和烤香味而在世界各地广受欢迎。肉类采用烧烤、烘烤、微波炉烹饪、油炸、传统烤箱烹饪和煮制等加工方法,能改善其味道、香气和其他感官特征^[1]。蒸煮、煎炸、烧烤等是肉制品常见的加热方式,在加热条件下,肉中的脂肪、蛋白质及糖类等物质发生特定的理化反应。蛋白质变性、脂肪氧化并分解产生氨、胺类和低级脂肪酸等风味物质,导致肉的感官、品质及形态结构发生变化^[2],同时也伴随着如丙烯酰胺、杂环胺、反式脂肪酸及多环芳烃等有害物质的产生,这些变化均与肉制品加热方式及加热参数密切相关^[3]。

有研究表明红外烤制可以防止过热、氧化、低产率和高能源成本^[4],并且具有减少营养物质分解和均匀快速加热的特点^[5]。Suleman 等^[1]研究发现红外烧烤肉饼的极性杂环芳香胺(HAAs)含量显著降低($P<0.05$),并且质构得到良好的改善。微波比烧烤含有更少的杂环芳香胺^[6],研究表明杂环胺的摄入会增加患胰腺癌、食道癌、结肠癌、胃癌等癌症的风险^[7]。红外和微波烤制是近年来发展起来的新型加工方式,能够减缓脂肪的氧化、有害物质的产生,符合绿色环保理念。

因此,本论文通过研究红外和微波烤制两种加工方式对烤肉感官、色差、质构、脂肪氧化、蛋白质结构、风味的影响,旨在揭示不同烤制工艺对烤肉食用品质的影响,以期为人们选择合理的烹饪方法提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

里脊肉 绵阳四汇勋洋贸易有限公司;鸡精 四川国莎实业有限公司;食盐 中盐东兴盐化股份有限公司;辣椒粉 四川翠宏食品有限公司;花椒粉、孜然粉 四川晨鑫食品有限公司;十三香 驻马店市王守义十三香调味品集团有限公司;大豆分离蛋白 临沂山松生物制品有限公司;1,1,3,3-四乙氧基丙烷,苯甲基磺酰氟(PMSF) 上海麦克林生化科技有限公司;牛血清蛋白 上海蓝季科技发展有限公司;磷酸氢二钠、氯化钠、乙二醇双(2-氨基乙基醚)四乙酸(EGTA)、氯化镁、酒石酸钾钠、氢氧化钠、EDTA、硫代硫酸钠、硫代巴比妥酸、三羟甲基氨基甲烷等均为分析纯。

M1-205A 美的微波炉 广东美的厨房电器制造有限公司;OPTO-LAB 胴体肉质颜色测定仪 德国 Mattheus 公司;UV1800 紫外可见分光光度计 翱艺仪器(上海)有限公司;YH-36 远红外食品烤炉 成都瑞昌仪器制造有限公司;FSH-2A 可调高速匀浆机 金坛市医疗仪器厂;冷 Dynamica Velocity 冻高速

离心机 青岛浩赛科技股份有限公司;FreeZone2.5 冷冻真空干燥机 美国 Lasconco 公司;FT-IR5700 傅里叶变换红外光谱仪 美国热电公司;Clarus 680-Clarus SQ8T 气相-质谱联用仪 美国 Perkin Elmer 公司;TA.XT plus 质构仪 英国 Stable Micro Systems 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 烤肉腌制 以里脊肉为基准,鸡精 0.3%、食用盐 1.1%、辣椒粉 3.2%、花椒粉 0.5%、嫩肉粉 1.0%、十三香 1.0%、孜然粉 0.3%、柠檬汁 2.5%、茶多酚 0.03%、大豆分离蛋白 2.0%、大蒜 4.8%、葵花籽油 12.0%。先将鸡精、食用盐等调料置于盆中混匀后,再加入葵花籽油,将所有腌制剂混匀后加入切制后的里脊肉均匀混合。常温常压下腌制 20 min。

1.2.2 烤制参数 经前期实验得出红外烤制和微波烤制参数:将肉片切制 3.0 mm,红外烤箱上下火预热到 175 ℃ 后,烤制 11 min;

将微波火力调至 P80,肉片厚度为 4.0 mm,烤制 3.0 min。

1.2.3 烤肉品质分析

1.2.3.1 感官评价 成立由 10 人组成的专业评定小组,在一间整洁、安静的房间里评估。评价每个样品后清水漱口,2 min 后再进行下一个样品的评定。总分 100 分,各项指标计算后相加为烤肉的最终感官得分。感官评价的各项指标均应符合食品安全国家标准 GB 2726-2016《熟肉制品》^[8]中的感官要求,并

表 1 烤肉感官评分标准与细则

Table 1 Criteria for sensory evaluation of roast meat		
指标	评价标准	分值(分)
色泽 (20分)	色泽红色偏金黄,让人有强烈的食欲	16~20
	色泽白色偏黄,让人有些食欲	11~15
	色泽偏白或黄色偏黑	6~10
	色泽呈深棕发黑,让人完全没有食欲	0~5
	干爽结实,表面整齐,渗油,弹性小	19~25
组织状态 (25分)	稍干爽,组织结实,有渗油现象,表皮微有弹性或表皮过硬	12~18
	表皮潮湿,肉质较软,有弹性	6~11
	表面凹凸不平,无渗油,无弹性	0~5
	烤肉味浓烈鲜香,无异味、强烈酸味	26~30
	烤肉味较好,无异味、酸味	16~25
风味 (30分)	烤肉味较淡或有糊味、酸味	8~15
	无烤肉特有味或酸味过强	0~7
	咀嚼性好,肉感强,无油腻感	19~25
	易咀嚼,弹性好,较油腻	12~18
	咀嚼性一般,需要较多能量,油腻	6~11
咀嚼性 (25分)	咀嚼困难,无弹性,质地干或油腻感较重	0~5
	总分	100

通过查阅相关资料^[9],结合本实验实际情况,制定如表 1 烤肉感官评分标准与细则。

1.2.3.2 质构与色差测定 质构与色差测定采用王琳等^[10]的方法略作修改。取烤肉,选择平整部分,去除表面调料等杂物,采用探头 A/MORS,设定测试模式:压缩,测前速度:2.00 mm/s、测中速度:1.00 mm/s、测后速度:10.00 mm/s。目标模式:应变 85%,触发力:15 g。色差测定:清理烤肉表面调料,使用胴体色差仪对样品 L^* 、 a^* 、 b^* 进行测定,每个样品测定 6 次,取平均值。

1.2.3.3 脂肪氧化指标测定 丙二醛测定参照国标 GB 5009.181-2016《食品中丙二醛的测定》分光光度计法测定^[11];过氧化值测定参照国标 GB 5009.227-2016《食品中过氧化值的测定》滴定法测定^[12]。

1.2.3.4 肌原纤维蛋白提取 按照万红兵等^[13]的方法得到肌原纤维蛋白(myofibrillar proteins, MPs)提取液,用于测定蛋白质总巯基、二硫键的含量、表面疏水性。采用郭丽萍^[14]方法得到 MPs 提取液,用于测定肌原纤维蛋白二级结构。

1.2.3.5 蛋白质浓度测定 参考秦宜德等^[15]双缩脲法测定蛋白质浓度,重复测定 3 次。标准曲线方程如下: $Y=0.0349X-0.0019$, $R^2=0.9998$

1.2.3.6 蛋白质巯基和二硫键测定 调整 MPs 分散液浓度至 4 mg/mL,根据申辉^[16]的方法测定总巯基和游离巯基含量。总巯基含量与游离巯基的差值为二硫键含量。

1.2.3.7 蛋白质表面疏水性测定 用 A 缓冲溶液(0.6 mol/L NaCl, 50 mmol/L Na_2HPO_4 , pH=7.0)将 MPs 溶液质量浓度调整为 1 mg/mL,参考 Chelh 等^[17]的方法略作修改进行测定。取 1 mL 样品溶液,加入 100 μL 1 mg/mL 的溴酚蓝溶液,1 mL 缓冲液 A 加入 100 μL 溴酚蓝溶液作为空白对照,在室温下漩涡振荡 10 min,以 4 $^{\circ}\text{C}$ 、10000 r/min 的条件离心 15 min,取上清液稀释 10 倍后,在 595 nm 波长测定吸光值,公式计算溴酚蓝结合量(μg),表示表面疏水性。

$$\text{溴酚蓝结合量}(\mu\text{g})=(\text{OD}_{\text{空白对照}}-\text{OD}_{\text{样品}})/\text{OD}_{\text{空白对照}}\times 100$$

式中: $\text{OD}_{\text{空白对照}}$ 表示空白对照吸光值; $\text{OD}_{\text{样品}}$ 表示样品吸光值。

1.2.3.8 蛋白质二级结构测定 采用郭丽萍^[14]方法略作修改,将扫描次数修改为 1 次。

1.2.4 风味成分分析

1.2.4.1 GC-MS 分析 参考曾茂茂等^[18]方法略作修改,取均匀的样品 3.0 g 于 15 mL 顶空瓶中并以聚四氟乙烯隔垫密封,将样品进行 70 $^{\circ}\text{C}$ 、气浴 30 min。带捕集阱的顶空进样器设置:萃取温度 70 $^{\circ}\text{C}$,萃取时间 30 min,进样针温度 75 $^{\circ}\text{C}$,传输线温度 75 $^{\circ}\text{C}$,干吹 5 min,解析 0.1 min,加压/释压 2 min;捕集阱温度 40 $^{\circ}\text{C}$,捕集阱保持 5 min;捕集阱循环次数 4 次;GC 循环 48 min;色谱柱 5.0 psi,瓶压 40 psi,解析 5.0 psi。

1.2.4.2 GC-MS 条件 气相色谱: Elite-5MS(30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μm);升温程序:起始温度为 35 $^{\circ}\text{C}$,保持 3 min,以 4 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升到 80 $^{\circ}\text{C}$ 并保持 2 min,再以 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升到 130 $^{\circ}\text{C}$ 并保持 2 min,最后以 8 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升到 230 $^{\circ}\text{C}$ 并保持 5 min。

质谱:电离方式为 EI;电子能量 70 eV;离子源温度 230 $^{\circ}\text{C}$;接口温度 250 $^{\circ}\text{C}$;灯丝电流 150 A;扫描质量范围 45~450 m/z。

1.2.4.3 定量与定性分析 根据 NIST 标准谱库检索结果,采用峰面积归一化法计算各组分相对含量^[19]。

1.3 数据处理

数据结果均以平均值 $\pm$ 标准偏差表示。数据整理分析利用 Microsoft Excel 2016(微软公司);采用 Origin2021 软件(OriginLab 公司)绘图;SPSS 17.0 (SPSS 公司)对数据进行显著性分析;采用 PeakFit 4.12 软件(SPSS 公司)、Omnice 8.2 软件(Nicolet, USA)对傅里叶红外光谱数据进行去卷积、拟合峰处理。

2 结果与分析

2.1 红外烤制和微波烤制对猪肉感官评价、质构特性和色泽的影响

红外和微波烤制对猪肉感官、质构和色泽的影响如表 2 所示。两种烤制方式对猪肉感官评分的影响差异达到极显著水平($P<0.01$),红外烤制猪肉感官评分比微波烤制猪肉平均高 3.67 分。红外烤制猪肉组织状态表面平滑,干爽结实,色泽均匀,微波烤制的猪肉表面略微凹凸不平。微波烤制猪肉硬度和咀嚼性均高于红外烤制猪肉,可能是因为使用微波烤制时,分子的运动促使蛋白质变性等反应更快、更强烈,导致大量自由水分子的生成,从而使水分流失更多,流失速度更剧烈、更快^[20]。猪肉色泽常用 L^* 、 a^* 、 b^* 来衡量。由表 2 可知,红外烤制和微波烤制方

表 2 两种烤制方式对猪肉感官、质构和色泽的影响

Table 2 Effects of two roasting methods on the sensory, texture and color of pork

烤制方式	感官评分(分)	质构特性		色泽		
		硬度(g)	咀嚼性(g $\cdot$ s)	L^*	a^*	b^*
红外烤制	83.67 $\pm$ 1.03 ^A	887.26 $\pm$ 76.66 ^B	827.19 $\pm$ 88.38 ^B	28.33 $\pm$ 0.58 ^a	16.60 $\pm$ 0.55 ^a	28.00 $\pm$ 1.22 ^a
微波烤制	80.00 $\pm$ 1.79 ^B	1076.35 $\pm$ 38.44 ^A	1258.88 $\pm$ 132.35 ^A	26.33 $\pm$ 0.58 ^b	15.33 $\pm$ 1.15 ^b	26.33 $\pm$ 0.58 ^b

注: 同列肩注相同字母表示差异不显著($P>0.05$); 肩注不同大写字母表示差异极显著($P<0.01$); 肩注不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

式对猪肉色泽影响不显著($P>0.05$)。但微波烤制 L^* 、 a^* 、 b^* 值均小于红外烤制,表明前者烤制方式猪肉色泽亮度低于后者,可能是因为微波烤制猪肉的表面不平整,导致光的折射率小。总体来看,红外烤制猪肉感官评分优于微波烤制猪肉。

2.2 红外烤制和微波烤制对猪肉脂肪氧化的影响

图 1 反映红外烤制和微波烤制对猪肉脂肪氧化影响变化规律。图中红外烤制猪肉丙二醛(MDA)含量及过氧化值明显大于微波烤制猪肉,丙二醛含量增加了 16.89%,过氧化值增加了 38.36%,两种烤制方式对脂肪氧化的影响存在极显著的差异($P<0.01$)。可能是因为红外烤制猪肉时间大于微波烤制,氢过氧化物极不稳定,加之时间的延长,容易生成次级代谢产物,如一些低级脂肪酸、醛、酮等物质,使 MDA 含量增加^[21],MDA 过量会导致人体关节软体基质受损,出于健康考虑,微波烤制优于红外烤制。

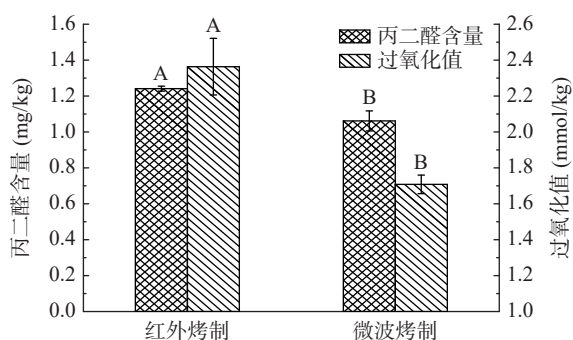


图 1 红外和微波烤制对猪肉脂肪氧化的影响

Fig.1 Effects of infrared baking and microwave baking on pork texture

注:两种烤制方法标注不同大写字母,表示具有极显著性差异, $P<0.01$;标注不同小写字母,表示具有显著性差异, $P<0.05$;图 2~图 3 同。

2.3 红外烤制和微波烤制对猪肉蛋白质氧化的影响

蛋白质中游离巯基和二硫键的含量对于研究蛋白质的空间构象、稳定性和功能特性特别重要^[22]。图 2 反映两种烤制方式对猪肉肌原纤维蛋白巯基和二硫键变化的规律。由图 2 可知,两种烤制方式烤肉的肌原纤维蛋白的活性巯基含量存在极显著差异($P<0.01$),二硫键含量有显著性差异($P<0.05$)。红外

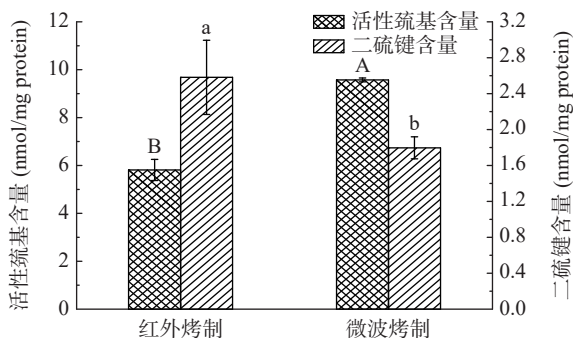


图 2 红外烤制和微波烤制对活性巯基与二硫键含量的影响

Fig.2 Effects of infrared and microwave baking on the content of active thiol and disulfide bonds

烤肉中活性巯基小于微波烤肉,二硫键含量增加。可能是因为猪肉经过高温处理后,肌原纤维蛋白结构发生改变,活性巯基被氧化成二硫键^[10],二硫键增加,说明红外烤制对猪肉蛋白质氧化程度高,而越来越多的研究表明,摄入氧化蛋白会对机体肠道健康、氧化应激和器官功能等均有一定的负面影响^[23]。微波烤制相比红外烤制产生更少的氧化蛋白,是更优的选择。

2.4 红外烤制和微波烤制对猪肉蛋白结构的影响

蛋白质表面疏水性是最重要的结构性性质之一^[24],表面疏水性(H_0)含量是蛋白质变性的重要指标,一般以溴酚蓝的结合量来表示,反映蛋白质三级结构变化^[22]。红外烤制和微波烤制对猪肉肌原纤维蛋白表面疏水性的影响如图 3 所示。红外烤制猪肉肌原纤维蛋白的表面疏水性大于微波烤制,说明红外烤制中肌原纤维蛋白被氧化导致蛋白质折叠,有更多的疏水性氨基酸暴露在分子表面^[25],表明红外烤制猪肉蛋白质展开程度比微波烤制的高,容易发生疏水性聚集,使蛋白质结构更加紧密,巯基之间更容易形成二硫键^[26],蛋白质氧化程度高。表面疏水性、二硫键是维持蛋白质三级结构稳定的重要作用力,疏水性越高,代表着蛋白质发生变性时稳定性越高,因此红外烤肉的稳定性高于微波烤制的,但两种烤制方式在表面疏水性差异并不显著($P>0.05$)。

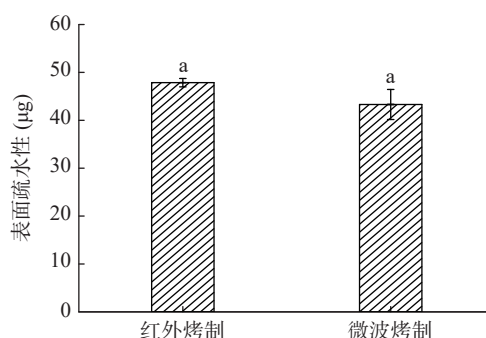


图 3 红外烤制和微波烤制对表面疏水性的影响

Fig.3 Effects of infrared and microwave curing on the surface hydrophobicity

将处理后肌原纤维蛋白红外光谱图的酰胺 I 带($1700\sim 1600\text{ cm}^{-1}$)用 Peakfit 软件进行去卷积、求二阶导数,进行多峰拟合。利用峰面积求得 β -折叠、 α -螺旋、 β -转角结构的比率。 $1615\sim 1637\text{ cm}^{-1}$ 为 β -折叠; $1637\sim 1645\text{ cm}^{-1}$ 为无规卷曲; $1645\sim 1660\text{ cm}^{-1}$ 为 α -螺旋; $1660\sim 1695\text{ cm}^{-1}$ 为 β -转角^[27]。拟合图谱如图 4,观察曲线拟合结果,可以发现重叠峰和小肩峰被明显的分离,蛋白质的结构有明显的变化,相应的定量信息如表 3 所示。

表 3 反映红外烤制和微波烤制对猪肉肌原纤维蛋白二级结构的影响变化规律。由表 3 可知,经过两种烤制方式处理后,蛋白质二级结构遭到破坏,两者二级结构发生变化。红外烤制后猪肉中 β -折叠达 33.21%,其他三类无规则卷曲、 α -螺旋、 β -转角分别为 22.79%、21.32%、22.68%;微波烤制后 α -螺旋达

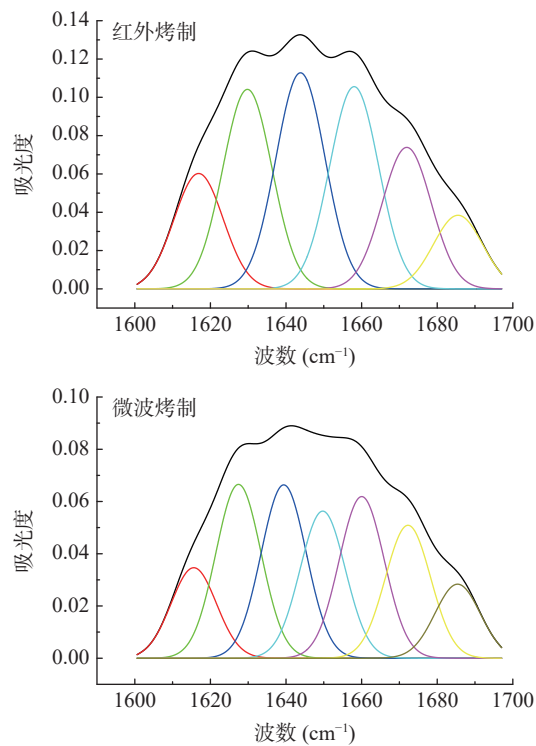


图 4 红外烤制和微波烤制猪肉肌原纤维蛋白酰胺 I 带曲线拟合结果

Fig.4 Fitting results of myofibrillary amide I band curve of infrared and microwave roasted pork

表 3 红外烤制和微波烤制猪肉中肌原纤维蛋白二级结构含量变化(%)

Table 3 Changes of myofibrillar protein secondary structure in infrared and microwave roasted pork (%)

烤制方式	β -折叠	无规则卷曲	α -螺旋	β -转角
红外烤制	33.21	22.79	21.32	22.68
微波烤制	27.73	18.18	32.38	21.71

32.38%,其他三类 β -折叠、无规则卷曲、 β -转角分别为 27.73%、18.18%、21.71%。红外烤制猪肉 α -螺旋含量低于微波烤制,说明红外烤制更易导致蛋白质二级结构解构和展开^[28],使疏水性基团大量暴露,表面疏水性增加^[29],同时,红外烤制样品的 β -折叠含量比微波烤制高,代表红外烤制猪肉的蛋白质分子间聚集程度更强^[30]。

2.5 红外烤制与微波烤制对猪肉挥发性风味物质的影响

如表 4 所示,两种烤制方式共检测到 76 种化合物,其中红外烤制 48 种,微波烤制 60 种。由图 5 可以看出,红外烤制猪肉中醛类有 5 种、醇类 2 种、吡咯类 1 种、酮类 2 种、酯类 1 种、酚类 1 种、醚类 3 种、烃类 19 种、非杂环硫化物 8 种、杂环硫化物 6 种。其中烃类相对含量最高,占 54.63%,其次为非杂环硫化物,占 31.96%,含量最低的为酮类,仅占

表 4 红外烤制和微波烤制挥发性风味物质的 GC-MS 鉴定结果

Table 4 GC-MS identification results of volatile flavor components from infrared and microwave baking

序号	保留时间(min)	物质种类	物质名称	CAS号	分子式	相对含量(%)	
						红外	微波
1	2.355	醛类	丙醛	123-38-6	C ₃ H ₆ O	4.833	...
2	3.676		异戊醛	590-86-3	C ₅ H ₁₀ O	0.126	...
3	3.851		甲基乙基乙醛	96-17-3	C ₅ H ₁₀ O	0.080	0.118
4	7.190		正己醛	66-25-1	C ₆ H ₁₂ O	0.324	0.321
5	13.310		苯甲醛	100-52-7	C ₇ H ₆ O	...	0.061
6	24.541		枯名醛	122-03-2	C ₁₀ H ₁₂ O	0.337	0.024
7	25.062	醇类	3-异丙基苯甲醛	34246-57-6	C ₁₀ H ₁₂ O	...	0.486
8	3.709		环丙基甲基甲醇	765-42-4	C ₅ H ₁₀ O	...	0.340
9	9.750		3-甲基-2-戊醇	565-60-6	C ₆ H ₁₄ O	0.143	...
10	14.140		反式-2-辛烯-1-醇	18409-17-1	C ₈ H ₁₆ O	0.078	...
11	15.136	吡咯类	1H-茛-5-醇	107535-11-5	C ₂₀ H ₂₄ O ₂	...	0.019
12	5.360		N-甲基吡咯	96-54-8	C ₅ H ₇ N	0.055	0.027
13	5.410		4-甲基-2-戊酮	108-10-1	C ₆ H ₁₂ O	0.052	...
14	5.460	酮类	己酮, 2-己酮	591-78-6	C ₆ H ₁₂ O	...	0.024
15	19.159		(-)-小茴香酮	7787-20-4	C ₁₀ H ₁₆ O	...	0.025
16	20.418		侧柏酮	546-80-5	C ₁₀ H ₁₆ O	...	0.050
17	25.517		胡椒酮	89-81-6	C ₁₀ H ₁₆ O	...	0.023
18	2.400	酯类	三甲氧基酯	503-30-0	C ₃ H ₆ O	...	6.531
19	5.081		N-乙酰基-N-甲氧基-2-甲基-甲酯	87687-85-2	C ₈ H ₁₅ NO ₄	...	0.104
20	13.152		6-氨基-4-氧代-4H-1-苯并吡喃-2-羧酸乙酯	30095-81-9	C ₁₂ H ₁₁ NO ₄	...	0.145
21	22.882		(4-甲基-1-丙烷-2-基环己-3-烯-1-基)乙酸酯	4821-04-9	C ₁₂ H ₂₀ O ₂	0.456	0.208
22	33.225	酚类	2,4-二叔丁基酚	96-76-4	C ₁₄ H ₂₂ O	0.158	...
23	2.200	酸类	氨基甲磺酸	13881-91-9	CH ₃ NO ₃ S	...	4.276
24	25.392	醚类	4-烯丙基苯甲醚	140-67-0	C ₁₀ H ₁₂ O	0.110	...
25	26.146		(Z)-茴香脑	25679-28-1	C ₁₀ H ₁₂ O	0.106	0.100

续表 4

序号	保留时间(min)	物质种类	物质名称	CAS号	分子式	相对含量(%)	
						红外	微波
26	26.513	萜烯类	104-46-1	C ₁₀ H ₁₂ O	2.456	1.165	
27	9.579		对二甲苯	106-42-3	C ₈ H ₁₀	0.126	...
28	11.885		α -侧柏烯	2867-05-2	C ₁₀ H ₁₆	0.443	0.222
29	12.130		3,6,6-三甲基-双环(3.1.1)庚-2-烯	4889-83-2	C ₁₀ H ₁₆	1.348	...
30	12.164		2-蒎烯	80-56-8	C ₁₀ H ₁₆	...	0.524
31	12.818		蒎烯	79-92-5	C ₁₀ H ₁₆	0.120	0.051
32	13.790		β -松油醇	99-84-3	C ₁₀ H ₁₆	...	0.187
33	13.936		β -蒎烯	127-91-3	C ₁₀ H ₁₆	4.114	1.394
34	15.220		α -水芹烯	99-83-2	C ₁₀ H ₁₆	0.930	0.056
35	15.315		(1S,3S)-反式-4-萘烯	5208-50-4	C ₁₀ H ₁₆	0.354	...
36	15.345		3-萘烯	13466-78-9	C ₁₀ H ₁₆	2.010	0.022
37	15.741		萘品油烯	586-62-9	C ₁₀ H ₁₆	0.643	0.347
38	16.124		邻-异丙基苯	527-84-4	C ₁₀ H ₁₄	0.790	0.611
39	16.391		(+)-枞油烯	1461-27-4	C ₁₀ H ₁₆	35.037	11.356
40	16.770		罗勒烯	13877-91-3	C ₁₀ H ₁₆	...	0.125
41	17.250		(E)-3,7-二甲基-1,3,6-辛三烯	3779-61-1	C ₁₀ H ₁₆	0.246	...
42	17.275		(Z)- β -罗勒烯	3338-55-4	C ₁₀ H ₁₆	...	0.348
43	17.796		γ -松油烯	99-85-4	C ₁₀ H ₁₆	4.724	2.442
44	19.005		别罗勒烯	673-84-7	C ₁₀ H ₁₆	0.413	...
45	19.226		3,5-二甲基环丁苯	28749-81-7	C ₁₀ H ₁₂	...	0.031
46	19.705		(1S)-(+)-3-萘烯	498-15-7	C ₁₀ H ₁₆	2.772	10.866
47	22.498		(1S,3R)-顺式-4-萘烯	5208-49-1	C ₁₀ H ₁₆	0.067	...
48	29.790		立方烯	16728-99-7	C ₁₅ H ₂₄	0.071	...
49	29.794		α -蒎烯	3856-25-5	C ₁₅ H ₂₄	...	0.013
50	31.099		(Z)-石竹烯	13877-93-5	C ₁₅ H ₂₄	0.312	...
51	31.115	炔类	(-)-异丁香烯	118-65-0	C ₁₅ H ₂₄	...	0.051
52	32.620		α -姜黄烯	644-30-4	C ₁₅ H ₂₂	0.104	0.017
53	4.477		(Z)-甲基1-丙烯基硫醚	52195-40-1	C ₄ H ₈ S	3.448	...
54	2.980		烯丙基硫醇	870-23-5	C ₃ H ₆ S	4.137	21.704
55	4.539		烯丙基甲基硫	10152-76-8	C ₄ H ₈ S	0.310	4.712
56	5.627		二甲基二硫醚	624-92-0	C ₂ H ₆ S ₂	1.358	2.687
57	9.225	非杂环硫化物	二烯丙基硫醚	592-88-1	C ₆ H ₁₀ S	13.188	10.201
58	10.880		1,1'-硫代二-1-丙烯	33922-80-4	C ₆ H ₁₀ S	...	0.284
59	11.426		烯丙基甲基二硫醚	2179-58-0	C ₄ H ₈ S ₂	1.296	0.675
60	18.730		二烯丙基二硫	2179-57-9	C ₆ H ₁₀ S ₂	7.953	3.236
61	21.198		甲基烯丙基三硫醚	34135-85-8	C ₄ H ₈ S ₃	...	0.039
62	27.038		二烯丙基三硫醚	2050-87-5	C ₆ H ₁₀ S ₃	0.266	0.276
63	10.484		2-乙基噻吩	1918-82-7	C ₆ H ₆ S	...	0.425
64	12.977		3H-1,2-二噻茂	288-26-6	C ₃ H ₄ S ₂	...	2.042
65	20.693		5,8-二硫螺环[3.4]辛烷	380-90-5	C ₆ H ₁₀ S ₂	...	0.211
66	21.865		4-甲基-1,2,3-三硫杂戊烷	116664-29-0	C ₃ H ₆ S ₃	0.684	2.397
67	22.403	杂环硫化物	1,4-二硫杂环庚烷-6-酮	34654-19-8	C ₅ H ₈ OS ₂	...	0.150
68	23.149		3-乙基基-3,6-二氢二噻吩	62488-52-2	C ₆ H ₈ S ₂	0.227	0.106
69	23.766		噻吩并[3,2-b]噻吩	251-41-2	C ₆ H ₄ S ₂	0.194	0.240
70	24.083		2-乙基基-4H-1,3-二噻英	80028-57-5	C ₆ H ₈ S ₂	0.319	0.106
71	29.590		5-甲基-1,2,3,4-四噻烷	116664-30-3	C ₃ H ₆ S ₄	0.336	1.216
72	29.944		1,3-二硫杂-2-噻酮	930-35-8	C ₃ H ₂ S ₃	2.043	5.958
73	16.529		桉叶醇	470-82-6	C ₁₀ H ₁₈ O	...	0.348
74	35.197	其他	噻吩-3,4-二氰基	18853-32-2	C ₆ H ₂ N ₂ S	...	0.049
75	35.418		2,4,6-三氟嘧啶	696-82-2	C ₄ HF ₃ N ₂	...	0.016
76	38.853		八硫杂环辛烷	10544-50-0	S ₈	0.303	0.213

注: ...表示未测出。

0.05%。微波烤制猪肉检测出醛类有 5 种、醇类 2 种、吡咯类 1 种、酮类 4 种、酯类 4 种、酸类 1 种、醚类 2 种、烃类 18 种、非杂环硫化物 9 种、杂环硫化物 10 种。其中非杂环硫化物含量最高,占 39.30%,其次烃类占 28.66%、杂环硫化物占 17.36%。对比红外烤制猪肉挥发性风味物质,微波烤制没有酚类物质,有一种酸类物质。由表 4 所示,红外烤制猪肉中二叔丁基酚占比 0.16%,微波烤制中氨基甲磺酸占比 4.28%。

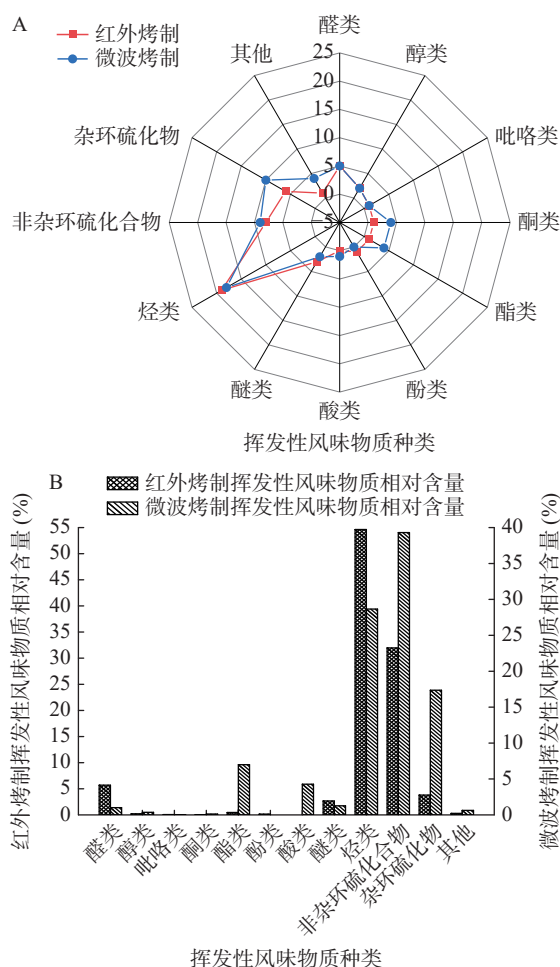


图 5 两种烤制方式挥发性风味物质种类及相对含量
Fig.5 Types and relative content of volatile flavor compounds in two different baking methods
注: A-挥发性物质种类数量; B-挥发性风味物质相对含量。

醛类化合物阈值较低,是熟肉中重要的风味化合物^[31]。由表 4 可知,微波烤制猪肉中未检出丙二醛、戊异醛,红外烤肉中不含苯甲醛。其中正己醛、甲基乙基乙醛、枯名醛均有。枯名醛可能来源于孜然^[32]。亚油酸、花生四烯酸氧化分解后,能产生正己醛,其具有苹果香味和青草香味^[33]。从图 5 可以看出,红外烤肉中醛类物质相对含量比微波烤肉高,根据相关报道,醛类物质的产生是由脂肪氧化引起的^[34],可能是因为微波烤肉脂肪氧化程度低,导致醛类物质生成量相对较低。

从图 5 可以看出,两种烤制方式对应猪肉的总

醇含量有差异,微波烤肉的醇类物质含量较高,为 0.36%,红外烤肉中醇类物质含量较低,仅为 0.22%。吡咯类化合物具有烤肉香、焦香。

挥发性风味物质酮类是由不饱和脂肪酸的热氧化或降解产生的^[35]。图 5 可知,酮类物质的种类少,其相对含量也较低,这与唐春红等^[36]研究结果相似。部分酮类化合物也是杂环化合物的前体物质,对风味的形成有重要作用^[37]。红外烤制中酮类含量为 0.05%,微波烤制的酮类含量为 0.12%。酯类物质阈值较高,对风味贡献较小^[38]。酯类物质在红外烤制和微波烤制分别占 0.47% 和 6.99%。一般酯类提供果香味^[39],其中乙酸酯类具有奶油、脂肪气味。

由图 5 可知,鉴定出的醚类物质在红外烤肉和微波烤肉分别含有 3 种和 2 种,其中红外烤制占 2.67%,微波烤制 1.27%。由表 4 可知,4-烯丙基苯甲醚在微波烤制中未检出。其中茴香脑是天然的香料,广泛应用于食品添加剂中,具有茴香、甘草和香辛料的气味,主要来源于十三香^[39]。

烃类是熟猪肉中种类多、提供肉类风味较少的一类物质^[40]。在瘦猪肉的风味中有数种脂环化合物,它们有烷基取代的环己烷和一些萜类化合物,如 Alpha-姜黄烯^[41]。由图 5 可知红外烤肉中烃类物质有 19 种,占 54.63%。微波烤肉有 18 种烃类物质,占 28.66%,相较于红外烤制,微波烤制的烃类化合物比红外烤制低 25.97%。由表 4 可以看出,烃类物质中红外烤制与微波烤制(+)-枞油烯含量最高,分别为 35.04%、11.36%;3-萜烯能够呈现比较愉快的气味,可能是辣椒中的呈味物质^[42];β-蒎烯、α-侧伯烯、α-水芹烯可能是花椒^[43]、十三香^[44]。

非杂环硫化物具有肉香的特征,其阈值很低,极少的含量就能产生很好的效果。图 5 可知,红外烤制猪肉非杂环硫化物种类和相对含量低于微波烤制。由表 4 可知,微波烤肉挥发性风味物质中含有更多的烯丙基硫醇、二甲基二硫醚,其中烯丙基硫醇含量比红外烤肉多 17.57%,烯丙基硫醇具有浓郁的洋葱味^[45],可用于肉品、调味品等食品用香精香料;二甲基二硫醚具有强烈洋葱味^[46],能够给肉制品、烘焙食品提供香气^[47];二甲基二硫醚、二烯丙基硫醚含量较高,可能存在于烤肉中,也可能与加工过程中添加的大蒜也密切相关^[48]。

杂环硫化物具有脂香、肉香^[49],其阈值较低,在形成肉香方面起着关键性作用。从图 5 可以看出,微波烤制猪肉中杂环硫化物相对含量及种类高于红外烤制,由表 4 可知,两者差别主要体现在 4-甲基-1,2,3-三硫杂戊烷、1,3-二硫杂-2-硫酮的相对含量。

综上所述,微波烤制猪肉挥发性风味物质更丰富,并且具有肉香、脂香特征的杂环硫化物与非杂环硫化物在微波烤肉中相对含量及种类均比红外烤肉多,而红外烤制猪肉中含量更多的是对猪肉风味贡献不大的烃类物质。

3 结论

对比红外烤制和微波烤制后猪肉,发现红外烤制后猪肉在色泽、组织状态上优于微波烤制,感官评分比微波烤制猪肉高 3.67 分,但其脂肪氧化程度更高,丙二醛含量较微波烤制猪肉增加 16.89%,过氧化值增加 38.36%。另外,红外烤制猪肉中活性巯基含量显著少于微波烤制猪肉,二硫键含量有所增加,表面疏水性大于微波烤制,表明红外烤制方式更易增强蛋白质的氧化。从风味角度看,红外烤制和微波烤制猪肉中分别检出挥发性风味物质的种类为 48 种和 60 种,微波烤制挥发性风味物质种类丰富,其中肉香呈味物质,如杂环硫化物、非杂环硫化物相对含量及种类均优于红外烤制,肉香味更浓,说明微波烤制猪肉风味成分更多。尽管不同人群对烤肉制品的品质要求不一,综合各方面对比结果和健康层面考虑,微波烤制方式更优。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] SULEMAN R, HUI T, WANG Z, et al. Comparative analysis of charcoal grilling, infrared grilling and superheated steam roasting on the colour, textural quality and heterocyclic aromatic amines of lamb patties[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2020, 55(3): 1057-1068.
- [2] 李宏燕, 何建国, 马莹, 等. 自然对流红外辐射复合加热在羊肉烤制过程中的传热解析[J]. *食品科学*, 2017, 38(21): 61-66. [LI H Y, HE H G, MA Y, et al. Heating transfer analysis during mutton roasting by natural convection combined with infrared radiation[J]. *Food Science*, 2017, 38(21): 61-66.]
- [3] KOSULWAT S, GREENFIELD H, BUCKLE KA. True retention of nutrients on cooking of Australian retail lamb cuts of differing carcass classification characteristics[J]. *Meat Science*, 2003, 65(4): 1407-1412.
- [4] RAHIMI D, KASHANINEJAD M, ZIAIIFAR AM, et al. Effect of infrared final cooking on some physico-chemical, and engineering properties of partially fried chicken nugget[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2018, 47: 1-8.
- [5] RASTOGI N K. Recent trends and developments in infrared heating in food processing[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2012, 52(9): 737-760.
- [6] VIEGAS O, NOVO P, PINTO E, et al. Effect of charcoal types and grilling conditions on formation of heterocyclic aromatic amines (HAs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in grilled muscle foods[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2012, 50(6): 2128-2134.
- [7] 李诗萌, 喻倩倩, 董展廷, 等. 肉类热加工过程中有害物质的形成与控制研究进展[J]. *肉类研究*, 2021, 35(1): 92-97. [LI S M, YU Q Q, DONG Z T, et al. A review of the formation and control of hazardous substances in meat during thermal processing[J]. *Meat Research*, 2021, 35(1): 92-97.]
- [8] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 2726-2016 食品安全国家标准 熟肉制品[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 2726-2016 National standard for food safety. Cooked meat products[S]. Beijing: China Standards Press, 2016.]
- [9] 周兰. 冷鲜调理烧烤牛肉的配方优化及其品质研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2018. [ZHOU L. Pre-conditioned barbecue chilled beef formula optimization and its quality research[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2018.]
- [10] 王琳, 冉佩灵, 熊双丽, 等. 超高压腌制对烤制猪肉品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(15): 1-9. [WANG L, RANG P L, XIONG S L, et al. Effect of ultra-high pressure curing on the quality of roasted pork[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(15): 1-9.]
- [11] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.181-2016 食品安全国家标准 食品中丙二醛的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.181-2016 National standard for food safety. Determination of malondialdehyde in foods[S]. Beijing: China Standards Press, 2016.]
- [12] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.227-2016 食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.227-2016 National standard for food safety. Determination of peroxide value in foods[S]. Beijing: China Standards Press, 2016.]
- [13] 万红兵, 李海鹏, 雷元华, 等. 烹饪熟度对牛肉肌原纤维蛋白结构特性和氧化特性的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(13): 17-25. [WAN H B, LI H P, LEI Y H, et al. Effect of degree of doneness on structural and oxidation properties of beef myofibrillar protein[J]. *Food Science*, 2021, 42(13): 17-25.]
- [14] 郭丽萍. 超高压结合热处理对猪肉蛋白质氧化、结构及特性的影响[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2016. [GUO L P. Effects of combined ultra-high pressure and thermal treatment on oxidation, structure and properties of pork proteins[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2016.]
- [15] 秦宜德, 张胜权. 生物化学与分子生物学实验[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2017: 17-18. [QING Y D, ZHANG S Q. Biochemistry and Molecular Biology Experiment[M]. Hefei: China University of Science and Technology Press, 2017: 17-18.]
- [16] 申辉. 猪肉肌原纤维蛋白与特定风味化合物的相互作用机制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019. [SHENG H. The interaction mechanism of porcine myofibrillar proteins with typical flavor compounds[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.]
- [17] CHELH I, GATELLIER P, SANTE-LHOUTELLIER V. Technical note: A simplified procedure for myofibril hydrophobicity determination[J]. *Meat Science*, 2006, 74(4): 681-683.
- [18] 曾茂茂, 李伶俐, 何志勇, 等. 甘氨酸对美拉德反应体系及产生肉香风味物质的影响[J]. *食品科学*, 2012, 33(7): 32-36. [ZENG M M, LI L L, HE Z Y, et al. Effect of glycine on maillard reaction system and meat flavor compounds[J]. *Food Science*, 2012, 33(7): 32-36.]
- [19] 王蓉, 曾文锦, 刘盼, 等. 顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱联用法对 3 种洋葱挥发性风味成分的分析[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(2): 319-327. [WANG R, ZENG W J, LIU P, et al. Anal-

- ysis of volatile flavor components in three onion by headspace solid phase microextraction combined with gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(2): 319-327.]
- [20] 杨文昇. “阳光猪肉”品质及不同加工方式下物质变化规律研究[D]. 锦州: 渤海大学, 2020. [YANG W S. Study on "Yangguang-Pork" quality and substance change laws under different processing methods[D]. Jinzhou: Bohai University, 2020.]
- [21] 谢东娜, 王道营, 闫征, 等. 加热方式对鸡肉制品不同部位脂质氧化的影响[J]. *食品科学技术学报*, 2019, 37(6): 29-36. [XIE D N, WANG D Y, YAN Z, et al. Effect of heating methods on lipid oxidation in different parts of chicken products[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2019, 37(6): 29-36.]
- [22] CHEN X Y, GUO M Z, SANG Y X, et al. Effect of ball-milling treatment on the structure, physicochemical properties and allergenicity of proteins from oyster (*Crassostrea gigas*) [J]. *LWT*, 2022, 166: 1-9.
- [23] 齐世超, 李洪军, 王俊鹏, 等. 膳食中氧化蛋白对机体健康影响的研究进展[J]. *食品科学*, 2021, 42(19): 334-342. [QI S C, LI H J, WANG J P, et al. Progress in understanding the effect of dietary oxidized protein on body health[J]. *Food Science*, 2021, 42(19): 334-342.]
- [24] DU Q H, WU Y H, XUE S, et al. Extraction concentration of NaCl on structural, physicochemical and functional properties of *Moringa oleifera* seeds protein[J]. *LWT*, 2022, 155: 1-9.
- [25] SUN W, ZHOU F, SUN D W, et al. Effect of oxidation on the emulsifying properties of myofibrillar proteins[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2013, 6(7): 1703-1712.
- [26] ANGELO C, ROSIANE L C. The effects of acidification rate, pH and ageing time on the acidic cold set gelation of whey proteins[J]. *Food Hydrocolloids*, 2008, 22(3): 439-448.
- [27] 童今柱. 加热方式对鸭肉肌原纤维蛋白结构和功能性质及肉品质形成的影响研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019. [TONG J Z. Effects of heating methods on the structure, functional properties and meat quality of duck myofibrin[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.]
- [28] HAO L L, SUN J W, PEI M Q, et al. Impact of non-covalent bound polyphenols on conformational, functional properties and in vitro digestibility of pea protein[J]. *Food Chemistry*, 2022, 383: 1-9.
- [29] CHEFTEL J, CULIOLI J. Effects of high pressure on meat: A review[J]. *Meat Science*, 1997, 46(3): 211-236.
- [30] 冯雪平. 热处理温度对鲢肌球蛋白结构和凝胶水分影响的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016. [FENG X P. Effect of the heating temperature on changes of the bighead carp myosin structures and the gel water[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.]
- [31] 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. [LIU D Y, ZHAO Z N, WU J C, et al. Effects of different smoking materials on volatile flavor compounds in smoked chicken thighs[J]. *Food Science*, 2019, 40(24): 220-227.]
- [32] 朱羽尧, 王美珍, 陈楠, 等. 不同提取预处理方法对孜然精油提取成分组成的影响[J]. *中国野生植物资源*, 2018, 37(3): 19-23. [ZHU Y R, WANG M Z, CHEN N, et al. Effect of different pretreatment to the essential oil yield and components of *cuminum cyminum* [J]. *Chinese Wild Plant Resources*, 2018, 37(3): 19-23.]
- [33] 李婷婷. 超高压结合热处理对猪肉滋味物质及风味的影响[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2017. [LI T T. Effect of high pressure combined with thermal treatment on taste compounds and flavor of pork[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2017.]
- [34] YANG Y, ZHANG X, WANG Y, et al. Study on the volatile compounds generated from lipid oxidation of Chinese bacon (unsmoked) during processing[J]. *Lipid/Fett*, 2017, 119(10): 1600512.
- [35] 黄佳, 贾洪锋, 张振宇, 等. 不同成熟度煎制牛排中挥发性物质的研究[J]. *食品科技*, 2022, 47(5): 165-172, 181. [HUANG J, JIA H F, ZHANG Z Y, et al. Study on volatile substances in pan-fried beefsteak with different maturity[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 47(5): 165-172, 181.]
- [36] 唐春红, 陈旭华, 张春晖, 等. 不同卤制方法对鸡腿肉中挥发性风味化合物的影响[J]. *食品科学*, 2014, 35(14): 123-129. [TANG C H, CHEN X H, ZHANG C H, et al. Effects of different marinating methods on volatile flavor compounds of chicken thigh[J]. *Food Science*, 2014, 35(14): 123-129.]
- [37] 姚敏, 谢国芳, 杨蓉, 等. 红烧肉制备过程中关键环节的风味化合物分析[J]. *食品与机械*, 2022, 38(1): 15-23, 43. [YAO M, XIE G F, YANG R, et al. Analysis of flavor compounds in the process of stewed pork at key stages[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(1): 15-23, 43.]
- [38] 朱文政, 严顺阳, 徐艳, 等. 顶空固相微萃取-气质联用分析不同烹制时间红烧肉挥发性风味成分[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(2): 247-253. [ZHUN W Z, YAN S Y, XU Y, et al. Analysis of volatile flavor components of braised pork with different cooking time by SPME-GC-MS[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(2): 247-253.]
- [39] 陈丽兰, 陈祖明, 杜莉. 烤肉酱挥发性风味物质的分析[J]. *中国调味品*, 2018, 43(10): 156-159. [CHEN L L, CHEN Z M, DU L. Analysis of volatile flavor compounds of barbecue sauce[J]. *China Condiment*, 2018, 43(10): 156-159.]
- [40] 秦刚, 李洪军, 贺雅非, 等. 荣昌猪肉在不同烤制温度条件下的挥发性风味物质变化[J]. *食品科学*, 2011, 32(18): 190-194. [QING G, LI H J, HE Z F, et al. Variation of aroma compounds in rongchang pork at different roast temperatures[J]. *Food Science*, 2011, 32(18): 190-194.]
- [41] 林宇山, 岑泳延. 对猪肉风味的探讨[J]. *食品工业科技*, 2006, 27(9): 194-197. [LI Y S, CEN Y Y. Discussion on the flavor of pork[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2006, 27(9): 194-197.]
- [42] 何莲, 张浩, 乔明锋, 等. 蒜香烧烤酱配方优化及挥发性风味成分分析[J]. *中国调味品*, 2019, 44(4): 57-63. [HE L, ZHANG H, QIOA M F, et al. Optimization of formula and analysis of volatile flavor components of garlic barbecue sauce[J]. *China Condiment*, 2019, 44(4): 57-63.]
- [43] 张玉霖, 周亮, 陈莉, 等. 顶空固相微萃取结合 GC-MS 分析花椒油香气成分[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(1): 173-178. [HANG Y L, ZHOU L, CHEN L, et al. Analysis of aroma components in *zanthoxylum* essential oil by headspace solid phase microextraction coupled with GC-MS[J]. *Food Research and Development*, 2019, 40(1): 173-178.]
- [44] 李睿, 王海燕, 李星, 等. 不同加工方式荣昌猪肉风味差异性评价[J]. *肉类研究*, 2021, 35(11): 31-37. [LI R, WANG H Y, LI X. Evaluation of flavor differences among pork from rongchang pigs

processed by different cooking methods[J]. Meat Research, 2021, 35(11): 31-37.]

[45] 王蓓, 韩兆盛, 杨智杰, 等. 6类常见食品中含硫化合物风味特征及形成机理研究进展[J]. 食品科学技术学报, 2022, 40(6): 13-25. [WANG B, HAN Z S, YANG Z J, et al. Research progress on flavor characteristics and formation mechanism of sulfur compounds in six common foods[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 40(6): 13-25.]

[46] 林良静, 古汶玉, 甘忠宏, 等. GC-IMS 评价双螺杆挤压处理对香菇柄挥发性成分的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(18): 257-262, 300. [LIN L J, GU W Y, GAN Z H, et al. Effect of twin screw extrusion on the volatile components of lentinus edodes stalks by GC-IMS[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(18): 257-262, 300.]

[47] 周江菊. 顶空固相微萃取气质联用分析大蒜挥发性风味成分[J]. 中国调味品, 2010, 35(9): 95-99. [ZHOU J J. HP-SPME-GC-MS analysis of volatile flavor components of garlic[J]. China Condiment, 2010, 35(9): 95-99.]

[48] 范波, 王鹏, 韩颖, 等. 基于智能感官和气质联用分析不同产地的蒜[J]. 中国调味品, 2022, 47(8): 160-166. [FAN B, WANG P, HAN Y, et al. Analysis of garlic from different producing areas based on intelligent sense and GC-MS[J]. China Condiment, 2022, 47(8): 160-166.]

[49] 张音. 鸭汤风味特征及鸭肉香精制备工艺研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2012. [ZHANG Y. Studies on the flavor characteristics of duck soup and technics of making duck flavoring[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2012.]