

不同加工方式下藏猪肉和杜长大猪肉品质差异分析

徐丽娜, 黄峻榕, 赵莱昱, 任培芳, 张春晖, 黄峰

Analysis of Quality Differences between Tibetan Pork and Duroc×Landrace×Yorkshire Pork under Different Thermal Processing

XU Lina, HUANG Junrong, ZHAO Laiyu, REN Peifang, ZHANG Chunhui, and HUANG Feng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024040396>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于电子鼻、气相-离子迁移谱(GC-IMS)法分析广西螺蛳粉与螺蛳鸭脚煲风味

Analysis of the Flavor of Guangxi Luosi-Noodle and Luosi-Hot-Pot by Electronic Nose and Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry (GC-IMS)

食品工业科技. 2021, 42(9): 281-288 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020070197>

基于电子鼻结合GC-IMS分析不同烹饪方式猪肉的挥发性成分差异

Analysis of Differences in Volatile Components of Pork between Cooking Methods Based on Electronic Nose Combined with GC-IMS

食品工业科技. 2024, 45(14): 234-244 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023080228>

基于气相色谱-离子迁移谱和电子鼻技术分析制坯方式对三华李果坯挥发性成分的影响

Effects of Billet-Making Methods on Volatile Flavor Components of Sanhua Plum Fruit Billets Based on Headspace-Gas Chromatography-Ion Mobility Spectroscopy and Electronic Nose

食品工业科技. 2023, 44(23): 253-261 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023010024>

直隶黑猪与杜长大三元猪肉肉质性状对比分析

Comparative Analysis of Meat Quality Traits between Zhili Black Pigs and DLY Pigs

食品工业科技. 2022, 43(18): 262-271 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021120270>

气相色谱-离子迁移谱技术在蜂蜜品质鉴别中的应用

Application of Gas Chromatography-Ion Mobility Spectroscopy for Honey Quality Evaluation

食品工业科技. 2024, 45(13): 402-410 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024010053>

电子鼻和气相离子迁移谱技术比较瓮臭味及正常红酸汤的风味差异

Analysis on the Flavor Difference of Red Sour Soup Including Urn Odor and Normal Flavor Samples with Electronic Nose and Gas Chromatography-Ion Mobility Spectroscopy

食品工业科技. 2020, 41(14): 216-221,227 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.14.035>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

徐丽娜, 黄峻榕, 赵莱昱, 等. 不同加工方式下藏猪肉和杜长大猪肉品质差异分析 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(6): 293–302. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024040396

XU Lina, HUANG Junrong, ZHAO Laiyu, et al. Analysis of Quality Differences between Tibetan Pork and Duroc×Landrace×Yorkshire Pork under Different Thermal Processing[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(6): 293–302. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024040396

· 分析检测 ·

不同加工方式下藏猪肉和杜长大猪肉 品质差异分析

徐丽娜^{1,2}, 黄峻榕^{1,*}, 赵莱昱², 任培芳³, 张春晖^{1,4}, 黄 峰^{2,4,*}

(1. 陕西科技大学食品科学与工程学院, 陕西西安 710000;

2. 中国农业科学院农产品加工研究所, 北京 100193;

3. 海能未来技术集团股份有限公司, 北京 100192;

4. 中国农业科学院西部农业研究中心, 新疆昌吉 831100)

摘 要: 为分析不同加工方式下藏猪肉和杜长大猪肉品质差异, 研究了煮制、炸制和烤制条件下, 猪肉的加工损失率、剪切力、质构、色泽等指标的变化, 采用了电子鼻和气相-离子迁移色谱对挥发性化合物进行多元统计分析。结果表明, 三种热加工方式下, 煮制组猪肉的加工损失率、剪切力和硬度最低, 水分含量最高。炸制组猪肉硬度最高, 剪切力和咀嚼性最大, 这是由于油的高传热特性导致肉块表面迅速成壳。烤制组猪肉的加工损失率最高, 水分含量最低, 说明以热空气为加热介质容易造成水分丧失导致其加工损失率最高。对于不同品种而言, 藏猪肉的蛋白含量约是杜长大猪肉的 1.07 倍, 肌肉脂肪含量是杜长大猪肉的 0.73 倍。炸制藏猪肉的红度值 (a^* 值) 最高为 14.53 显著高于杜长大猪肉 ($P<0.05$), 说明藏猪肉具有更深的色泽。电子鼻能较好地地区分三种热加工下藏猪肉和杜长大猪肉香气。气相色谱-离子迁移色谱检测到 58 种挥发性风味物质, 煮制方式下藏猪肉和杜长大猪肉中分别检测出 40 种、41 种挥发性化合物, 烤制方式下藏猪肉和杜长大猪肉分别检测出 34 种、33 种化合物, 而在炸制方式中, 藏猪肉和杜长大猪肉中分别检测出 22 种和 15 种挥发性化合物, 这些化合物主要为醛类、酮类和醇类。在煮制和炸制过程中, 藏猪肉的总含硫挥发性物质含量显著高于杜长大猪肉 ($P<0.05$)。炸制藏猪肉特征性风味物质为 α -异甲基紫罗兰酮和乙二醇二甲醚, 而烤制藏猪肉特有的挥发性风味物质是二甲基二硫和 3-羟基-2-丁酮 (M), 煮制藏猪肉则以 4-甲基噻唑为特征。炸制的藏猪肉在色泽、香味和可接受度的评分上明显高于其他加工方式。综上, 在三种不同的热加工方式中, 藏猪肉的水分含量、硬度、色值以及含有杂环类挥发性风味化合物方面表现更为突出, 炸制处理下藏猪肉和杜长大猪肉的风味差异比较显著, 藏猪肉的风味物质相对含量较高, 具有明显的风味品质提升效果, 为充分发挥藏猪肉品质优势提供了数据支撑。

关键词: 藏猪, 加工方式, 品质差异, 电子鼻, 气相色谱-离子迁移谱 (GC-IMS)

中图分类号: TS251.5⁺¹

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)06-0293-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024040396



本文网刊:

Analysis of Quality Differences between Tibetan Pork and Duroc×Landrace×Yorkshire Pork under Different Thermal Processing

XU Lina^{1,2}, HUANG Junrong^{1,*}, ZHAO Laiyu², REN Peifang³, ZHANG Chunhui^{1,4}, HUANG Feng^{2,4,*}

(1. College of Food Science and Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710000, China;

收稿日期: 2024-04-28

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2022YFD1600905); 优质畜产品产业集群-新疆生猪产业链关键技术研发及集成示范 (2022LQ01003); 新疆维吾尔自治区“天山人才”培养计划项目 (2022TSYCCX0048)。

作者简介: 徐丽娜 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 生物与医药 (食品方向), E-mail: xulina166@163.com。

*** 通信作者:** 黄峻榕 (1971-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 预制菜、食品大分子资源的开发与利用, E-mail: huangjunrong@sust.edu.cn。

黄峰 (1982-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 肉品加工与质量控制, E-mail: fhuang226@163.com。

2. Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China;

3. Hanon Scientific Instruments, Beijing 100192, China;

4. Western Agricultural Research Center of the Chinese Academy of Agricultural Sciences, Changji 831100, China)

Abstract: To examine the quality variations between Tibetan pork and Duroc×Landrace×Yorkshire (DLY) pork subjected to different thermal processing methods, this study analyzed changes in cooking loss rate, shear force, texture, and color under boiling, frying, and roasting conditions. Multivariate statistical analysis of volatile organic compounds (VOCs) was conducted using an electronic nose and gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS). The findings indicated that, among the three thermal processing methods, the boiled pork exhibited the lowest cooking loss, shear force, and hardness, and the highest moisture content. The fried pork exhibited the highest hardness, shear force and chewiness due to the high heat transfer properties of the oil, which quickly formed a crust on the surface of the meat. Conversely, the roasted pork demonstrated the highest cooking loss and the lowest moisture content, indicating that using hot air as the heating medium tends to cause water loss, resulting in the highest cooking loss rate. Regarding different breeds, the protein content of Tibetan pork was approximately 1.07 times that of Duroc×Landrace×Yorkshire pork, whereas its intramuscular fat content was 0.73 times that of Duroc×Landrace×Yorkshire pork. The redness value (a^* value) of fried Tibetan pork, which was the highest at 14.53, was significantly greater than that of Duroc×Landrace×Yorkshire pork ($P<0.05$), indicating that Tibetan pork had a deeper color. The electronic nose could effectively distinguish the aromas of Tibetan pork and Duroc×Landrace×Yorkshire pork under the three different heat processing methods. Gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) detected 58 volatile flavor compounds. 40 and 41 volatile compounds were detected in Tibetan and Duroc×Landrace×Yorkshire pork in boiling mode, 34 and 33 compounds were detected in Tibetan and Duroc×Landrace×Yorkshire pork in roasting mode, while 22 and 15 volatile compounds, mainly aldehydes, ketones and alcohols, were detected in Tibetan and Duroc×Landrace×Yorkshire pork in frying mode, respectively. The total content of sulfur-containing volatile compounds in Tibetan pork was significantly higher than that in Duroc×Landrace×Yorkshire pork during both boiling and roasting processes ($P<0.05$). α -Ionone and ethylene glycol dimethyl ether were the characteristic flavor compound in fried Tibetan pork, while 3-hydroxy-2-butanone and 4-methylthiazole were unique to roasted and boiled Tibetan pork, respectively. In sensory evaluation, fried Tibetan pork received the highest scores in terms of aroma, color, and overall acceptability. In conclusion, Tibetan pork exhibits outstanding performance in moisture content, hardness, color value, and heterocyclic volatile flavor compounds among the three different heat processing methods. The flavor differences between deep-fried Tibetan pork and Duroc×Landrace×Yorkshire pork are pronounced, with Tibetan pork showing relatively higher levels of flavor compounds, thus significantly enhancing flavor quality. These findings provide data support for fully utilizing the quality advantages of Tibetan pork.

Key words: Tibetan pork; processing method; quality differences; electronic nose; gas chromatography-ion migration spectroscopy (GC-IMS)

藏猪(Tibetan pig)是中国独有的高原、高寒放牧猪种,生长于高寒、缺氧以及温度波动大的极端环境,因此具有独特的生理特性^[1]。藏猪肉蛋白含量丰富,营养价值高,被誉为“高原之珍”,深受消费者青睐^[2]。近年来,对藏猪的研究主要集中在基因选育^[3]、风味特性^[4]、胴体性状^[5]等方面,为藏猪的营养调控、风味发育、遗传选育提供了大量的科学依据。杜长大猪(Duroc×Landrace×Yorkshire, DLY)以其卓越的生长速度、饲料利用率和瘦肉率成为广受欢迎的商业猪种^[6]。藏猪和杜长大猪由于生长环境、饲养方式和基因型的差异使它们在肉质、营养价值和加工特性展现出不同的优势和特点^[7-8]。热加工是肉制品食用品质和风味形成的重要环节,不同的热加工方式对肉制品品质、风味、颜色等具有显著影响。水煮、油炸和烘烤是最常见的三种热加工方式,分别以水、食用油和空气为传热介质,对食物产生不同的影响。董轩^[9]发现在蒸煮、煎炸和烘烤热加工中,蒸煮方式对羊肉的综合破坏性相对较小,煎炸方式下羊肉的呈味核苷酸含量比较高。目前研究大多集中在不同热加工方式对白猪及地方特色黑猪的影响,袁静

等^[10]比较分析了煮制、烤制、炸制对猪里脊品质的影响,结果表明炸制的鲜味值最高,烤制的脂肪氧化最明显。李睿等^[11]比较不同加工类型下荣昌猪风味发育情况,发现不同烹饪方式下的特征风味物质也有所不同。研究不同热加工对猪肉品质和风味的影响可以确定最优的烹饪方式,以帮助肉类产业优化加工技术。然而,目前在煮、炸和烤热加工方式下藏猪肉和普通商品猪肉的品质差异缺乏系统评价,因此,本研究利用嫩度仪、电子鼻和气相色谱-离子迁移谱(Gas chromatography-ion migration spectroscopy, GC-IMS)等技术,系统比较藏猪肉和杜长大白猪肉在煮制、炸制、烤制三种加工方式下的加工损失率、质构特性、剪切力、色泽变化及风味可视化差异,以期热加工过程藏猪肉食用品质和风味发育提供数据支撑,明确藏猪肉的不同加工方式下的产品品质优势。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

地方特色猪和商品猪生长周期差异比较大,商

品猪出栏时间一般为 6 月龄,藏猪作为一种特色猪,出栏时间一般为 13 月龄,根据市售的最佳出栏时间选择商品化藏猪($n=12$, 13 月龄,体重 60 kg) 购于西藏藏好发展有限公司(林芝);商品猪(杜洛克公猪 $\times$ (长白公猪 $\times$ 大约克母猪))($n=12$, 6 月龄,体重 110 kg) 购于天康食品有限公司(郑州);大豆油 购于北京幸福荣耀超市(农大南路店)。

K9840 自动凯氏定氮仪 海能未来技术集团股份有限公司; C-LM3B 数字显示肌肉嫩度仪 东北农业大学工程学院; CR-400 色差仪 日本柯尼卡美能达公司; TA-XT Plus 质构分析仪 英国 Stable Micro Systems 公司; DH-101-3BS 电热恒温鼓风干燥箱 天津市中环实验电炉有限公司; iX6U 光波烤箱 格兰仕集团有限公司; PEN3 便携式电子鼻 德国 Airsense 公司; ST1004 多路温度测定仪 东莞万创电子制品有限公司; Flavour Spec®食品风味分析与质量控制系统(配备自动顶空进样器、Laboratory Analytical Viewer(LAV) 分析软件及 GC-IMS Library Search 定性软件) 德国 G.A.S 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 基本组分测定 分别取藏猪和杜长大猪的背最长肌部位的肉,去除可见脂肪和结缔组织后,根据 GB/T 5009.5-2016《食品安全国家标准食品中蛋白质的测定》中凯氏定氮法测定其蛋白质含量;根据 GB/T 5009.6-2019《食品安全国家标准食品中脂肪的测定》测定其脂肪含量;参考 GB/T 5009.3-2016《食品安全国家标准食品中水分的测定》测定水分含量。

1.2.2 猪肉样品前处理 12 条猪背最长肌去除可见脂肪和结缔组织后,每条背最长肌均切出 20 块(3 cm $\times$ 3 cm $\times$ 2 cm),将所得的肉块均分成 4 组,每个处理为 60 块肉样,未进行热加工为对照组,其他三组分别进行如下加工方式。

煮制处理:将多路温度测定仪的温度感应探头插入肉块中心位置,然后将肉块放入沸水中,进行加热处理,当温度测定仪显示温度为 80 ℃ 后取出,冷却至室温后将肉样表面水分擦干待测。

炸制处理:油温控制在 180 ℃ 后,将多路温度测定仪的温度感应探头插入肉块中心位置,然后将肉块放入油锅中,当温度测定仪显示温度为 80 ℃ 后取出,冷却至室温后将肉块表面油擦干待测。

烤制处理:烤箱温度平衡在 200 ℃,将多路温度测定仪的温度感应探头插入肉块中心位置,然后将肉块放入烤箱中,每 5 min 翻一次面,当温度测定仪显示温度为 80 ℃ 后取出,冷却至室温后将肉样表面水分擦干待测。

1.2.3 加工损失率测定 参照王静帆等^[12]方法,将加工前的样品表面水分擦干并称重(精确至 0.01 g)记为 m_1 (g),将加工后的样品表面水分擦干并称重(精确至 0.01 g)记为 m_2 ,按照公式(1)计算加工损失率。

$$\text{加工损失率}(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100$$

式 (1)

1.2.4 剪切力和质构特性测定 将肉样沿着肌纤维方向,切成大小为 1.0 cm $\times$ 1.0 cm $\times$ 2.0 cm 的小块,用嫩度仪垂直于肌纤维方向测定剪切力,测试速度为 1.0 mm/s,每个样品测 3 次取平均值。

参考王峰等^[13]测定方法,稍加修改。将肉样沿着肌纤维方向,切成 1.0 cm $\times$ 1.0 cm $\times$ 1.0 cm 的肉块,采用 TPA 压缩测试模式,每组样品测定 6 次,去除异常值后取平均值。物性测试仪设置参数:选取 P/36 探头,测前速度 1 mm/s、测试速度 1 mm/s、测后速度 1 mm/s、测试时间间隔 5 s,触发力为 5 g,数据采集速率为 400 pps,应变量为 50%。

1.2.5 色泽测定 将样品表面水分擦干,用便携式色差仪对每个样品随机选取 3 个位置进行测定,每个位置重复测定 3 次,取其平均值。

1.2.6 电子鼻测定 参照强宇等^[14]的方法,称取 2.0 g 样品于风味顶空瓶中,在 50 ℃ 恒温水浴锅中平衡 30 min 后进行检测。检测前传感器置于干燥空气中平衡 180 s,检测 60 s,选取信号稳定的 48~52 s 为信号采集时间。PEN3 电子鼻标准传感器阵列及其性能描述如表 1 所示。

表 1 PEN3 便携式电子鼻标准传感器阵列及性能描述
Table 1 Sensor arrays and performance descriptions of portable electronic nose

序列号	传感器名称	敏感化合物
R1	W1C	芳香类化合物
R2	W5S	氮氧类化合物
R3	W3C	氨类, 芳香类化合物
R4	W6S	氢化物
R5	W5C	短链烷烃, 芳香化合物
R6	W1S	甲基类化合物
R7	W2S	醇类, 醛酮类化合物
R8	W1W	无机硫化物
R9	W2W	芳香成分、有机硫化物
R10	W3S	长链烷烃

1.2.7 GC-IMS 测定 参考 Wu 等^[15]方法,稍加修改。称取 1 g 样品于顶空瓶中,50 ℃ 孵化 15 min,进样温度 65 ℃,孵化摇瓶速度 500 r/min,进样体积 0.5 mL。GC 条件:色谱柱: MXT-5 色谱柱(15 mL, 0.53 mm ID, 1 μ m FTK),柱温保持在 60 ℃,载气为高纯 N₂(纯度 $\geq 99.99\%$),载气流速: 0~2 min, 2 mL/min; 2~10 min, 2~10 mL/min; 10~20 min, 10~100 mL/min; 20~30 min, 100~150 mL/min; IMS 条件: 漂移管温度 45 ℃,离子化模式为正离子; 漂移气流速 150 mL/min。

1.2.8 感官评价 参考黄欣悦等^[16]方法,稍加改动。选择具有感官评价经验的学生 20 人(10 名男生, 10 名女生)组成感官评价小组,将两种猪肉经不同方式热加工后,在感官实验室内参照感官评定打分表(表 2)进行感官评定。

表2 不同加工方式下猪肉的感官评价标准

Table 2 Sensory evaluation criteria of pork under different thermal processing methods

描述	20~17分	16~13分	12~9分	8~5分	4~1分
色泽	色泽均匀,自然协调	色泽较均匀,较协调	色泽一般,光泽一般	色泽较不均匀,光泽较差	色泽不均匀,光泽差
气味	香味浓郁,无异味	香味较浓郁,无异味	香味一般,有轻微异味	香味较淡,有异味	香味较差,有明显异味
质地	组织致密,弹性好	组织较致密,弹性较好	组织致密一般,弹性一般	组织较松散,弹性较差	组织松散,弹性差
口感	肉质可口,咀嚼性好	肉质较为可口,有较好的咀嚼性	肉质较柴,有一定的咀嚼性	肉质柴,咀嚼性差	肉质老韧,咀嚼性非常差
可接受度	能很好接受	能较好接受	能正常接受	较难接受	难以接受

1.3 数据处理

通过 SPSS 22 软件对数据进行处理,结果用“平均值±标准偏差”表示,显著性水平为 $P<0.05$,每个实验指标平行测定 3 次。雷达图用 Origin 软件进行处理;使用仪器配套的分析软件,包括 LAV 和 3 款插件以及 GC×IMS Library Search 进行样品分析。

2 结果与分析

2.1 未加工两种猪肉的理化指标分析

由表 3 可知,藏猪和杜长大猪的含水量分别为 72.06%、73.08%,具有显著性差异($P<0.05$)。肌内脂肪对猪肉的多汁性和嫩度的影响均成正相关^[17],藏猪肉和杜长大猪肉的肌内脂肪含量分别为 2.37%、3.24%,藏猪肌内脂肪含量是杜长大猪的 0.73 倍,与杜长大猪肉相比,藏猪肉的肌内脂肪含量低,在养殖过程中杜长大猪以舍饲为主,舍饲提供的饲料营养比较全面,运动量较少,可沉积更多脂肪,而藏猪以半放牧式饲养为主,且运动量较大,不利于肌肉组织中脂肪积累^[18]。肉类中蛋白质含量是评价肉类好坏的重要指标,对肉的品质起着决定性作用^[19],由表 3 知,藏猪肉和杜长大猪肉的蛋白质含量分别为 22.98%、21.42%,藏猪肉的蛋白含量约是杜长大猪的 1.07 倍($P<0.05$),其原因可能是藏猪生活在高原地区食物以野生植物和定期投喂的饲料为主,这种独有的饲养因素,使藏猪具有蛋白质高的特点^[20]。

表3 藏猪肉和杜长大猪肉的理化指标

Table 3 Basic chemical components of Tibetan pork and Duroc×Landrace×Yorkshire pork

指标	杜长大猪	藏猪
水分(%)	73.08±0.18 ^A	72.06±0.23 ^B
肌内脂肪(%)	3.24±0.51 ^A	2.37±0.14 ^B
蛋白质(%)	21.42±0.25 ^B	22.98±0.27 ^A
剪切力(N)	26.61±5.28 ^B	39.90±2.97 ^A
L^*	49.30±0.65 ^A	43.41±0.47 ^B
a^*	2.40±0.52 ^B	3.88±0.43 ^A
b^*	5.57±0.33 ^A	4.47±0.65 ^B

注:不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

色泽是消费者选择肉制品的第一感官印象。与杜长大猪相比,藏猪肉的肉质亮度 L^* 值和 b^* 值具有显著性差异($P<0.05$),藏猪肉的 a^* 值显著高于杜长大猪,但 L^* 值和 b^* 值显著低于杜长大猪,藏猪肉色总体颜色更红。研究表明,高原藏猪的肌红蛋白相关基因表达水平最高,加热过程会加速肌红蛋白的氧化而导致

肉变色^[21]。刘凡等^[22]研究证明藏猪的肌红蛋白含量高于杜长大猪,且肌红蛋白含量与红度值呈现正相关。研究结果表明,因其独特的饲养方式和生存环境使藏猪肉的蛋白含量和剪切力要高于杜长大猪肉,颜色更鲜红。

2.2 加工方式对藏猪肉和杜长大猪肉加工损失率的影响

多汁性是影响猪肉食用品质的一个重要的因素,与烹饪损失高度相关^[23]。高加工损失率会导致低的食用质量,由图 1(a)可知,不同热加工方式造成猪肉热加工损失率范围为 34.18%~39.57%($P<0.05$)。烤制的加工损失率高于其他两种加工方式,可能因为烤制的温度比较高,以热空气作为介质,更容易造成水分的蒸发,这与章杰等^[24]的研究结果一致。三种热加工方式下藏猪肉和杜长大猪肉之间的加工损失率无显著性差异($P>0.05$)。由图 1(b)可以看出,同一种热加工方式下,藏猪的水分含量显著高于杜长大猪($P<0.05$)。炸制的加工损失率高于煮制,可能是油炸过程中的高温会使猪肉中所含的水产生“爆炸性”

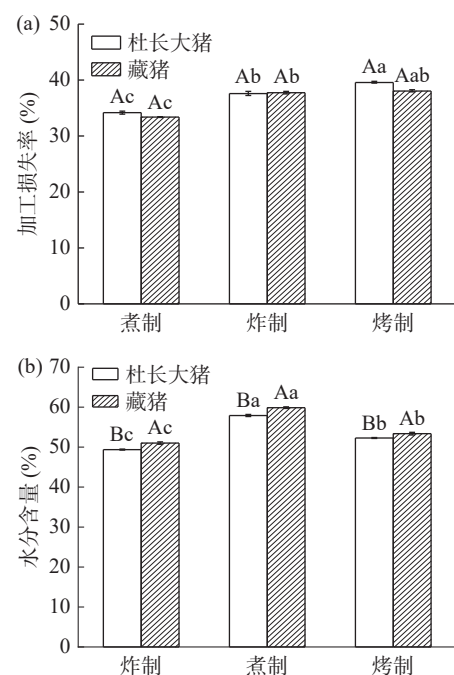


图1 不同热加工方式下猪肉加工损失率(a)和水分含量(b)

Fig.1 Cooking loss (a) and moisture content (b) of pork under different thermal processing methods

注:大写字母 A~B 表示不同品种猪差异显著($P<0.05$);小写字母 a~d 表示不同热加工方式差异显著($P<0.05$),图 2 同。

沸腾,从而使细胞壁破裂,形成毛细管孔和空隙,容易造成水分的流失^[25]。三种热加工方式下,加工损失率和水分含量呈负相关关系,热加工过程中猪肉蛋白变性,肌纤维收缩,导致肉中持水性降低^[26]。在煮制、炸制和烤制这三种热加工方式下,两种猪肉的加工损失率无显著差异。而在三种热加工方式下,藏猪肉的含水量均显著高于杜长大猪肉,这表明藏猪肉具有更高的持水能力,可能因为藏猪生长在高原低氧环境中,长期适应这种环境可能使其肌肉组织具有更强的保水能力,以应对恶劣的气候条件^[27]。

2.3 加工方式对藏猪肉和杜长大猪肉剪切力和质构特性的影响

嫩度是肉类的关键指标,剪切力越小,表明肉质越嫩。图 2 可知,相比于生肉,热加工方式处理后藏猪肉和杜长大猪肉的剪切力均显著增加($P<0.05$),炸制处理方式剪切力显著高于其他方式($P<0.05$),这是因为在炸制过程中表面会迅速形成一层外壳,增大了剪切力^[28]。煮制藏猪肉和杜长大猪肉剪切力最小,可能因为煮制方式下水分含量比较高,说明煮制方式下猪肉的嫩度好,食用品质高。同一热加工方式下,藏猪肉的剪切力要高于杜长大猪,但两者之间没有显著性差异($P>0.05$)。结合烹饪损失和水分含量结果,可以发现本研究中煮制、炸制和烤制与之相符。两种猪之间没有显著性差异,可能是因为加热至中心温度 80 ℃ 时,肉中的蛋白质变性和凝固,肌纤维收缩,水分释放,这些变化可能会掩盖原本

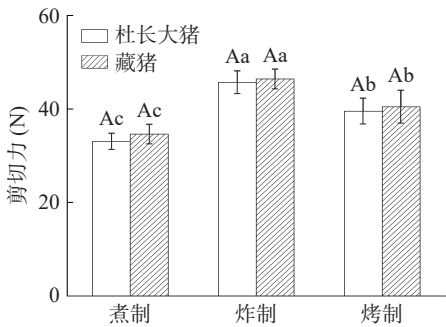


图 2 不同热加工方式下猪肉剪切力

Fig.2 Shear force of pork under different thermal processing methods

在生肉中存在的结构差异,使两种猪肉的剪切力趋于一致。

质构特性是肉制品最重要的品质属性之一,内聚性反映肉块本身组织紧密程度,其值越高代表肉块的质地和口感越好,咀嚼性是硬度、弹性及内聚性的综合体现,其值越大说明肉样口感方面对应的“咬感”就越好^[29]。由表 4 可知,经三种热加工后藏猪肉和杜长大猪的硬度、内聚性、弹性、咀嚼性相较于鲜肉组均显著增大($P<0.05$),炸制组具有最高的硬度,炸制藏猪肉内聚性、弹性和咀嚼性均比烤制和煮制藏猪肉高,可能是因为不同的加工方式会使肉块中产生不同的分子作用强度,进而呈现出不同的质构特性^[30]。由于炸制过程中的高温烹饪和脆皮形成,使得猪肉表面形成了较硬的外壳,从而增加了其整体的硬度和咀嚼性^[31]。同时,炸制过程中可能会使肌肉组织中的蛋白质结构发生改变,增加了肉质的弹性和内聚性^[32]。在炸制热加工方式下,藏猪肉的内聚性、弹性和咀嚼性高于杜长大猪肉,可能的原因是炸制形成的外壳对硬度的影响大于肉本身的硬度^[33]。

2.4 加工方式对藏猪肉和杜长大猪肉色泽的影响

亮度值 L^* 、红度值 a^* 、黄度值 b^* 值是获得肉色的客观量化指标。由表 5 可知,三种热加工方式下,煮制组的藏猪肉和杜长大猪肉 L^* 值为 65.96、68.66,显著高于炸制组和烤制组($P<0.05$),出现这种现象可能是因为以水为介质时,美拉德反应会降低,肉中肌红蛋白变性凝固,从而使肌肉亮度增加^[34]。 a^* 值的增加可能是因为高温热加工会加速肉中肌红蛋白的氧化,使其转变为高铁肌红蛋白,从而导致肉的色泽变暗^[35]。炸制藏猪肉有着最高的 a^* 值为 14.53,表明其肌红蛋白氧化程度最深。 b^* 值增加与脂肪氧化反应密切相关^[36],三种处理方式下,炸制藏猪和杜长大猪肉具有最高的 b^* 值,分别为 19.49、20.71,由此可知炸制处理会使猪肉有着最高的脂肪氧化。与杜长大猪相比,藏猪在三种热加工方式下 a^* 值均较高,而 L^* 值均较低。在色泽方面,煮制加工的杜长大猪肉具有较高的亮度值,炸制加工的藏猪肉具有较高的黄度值。高原低氧环境适应使藏猪肌肉携氧能力显著增强,血红蛋白含量升高^[37]。

表 4 不同热加工方式下猪肉的质构特性

Table 4 Texture characteristics and shear force value of pork under different thermal processing methods

指标	种类	鲜肉	煮制	炸制	烤制
硬度(g)	杜长大猪	7150.8±150.8 ^{Ad}	13505.18±400.0 ^{Bc}	20217.6±980.1 ^{Aa}	17882.1±539.1 ^{Bb}
	藏猪	8721.1±1076.8 ^{Ad}	15724.5±523.0 ^{Ac}	20736.5±504.5 ^{Aa}	19164.2±529.1 ^{Ab}
内聚性(g·sec)	杜长大猪	0.1±0.2 ^{Ab}	0.3±0.1 ^{Ba}	1.6±0.0 ^{Ba}	0.7±0.0 ^{Aa}
	藏猪	0.2±0.0 ^{Ab}	0.5±0.1 ^{Aa}	1.7±0.1 ^{Aa}	0.9±0.1 ^{Ba}
弹性(%)	杜长大猪	30.4±1.9 ^{Ac}	56.3±1.8 ^{Bb}	71.3±0.6 ^{Ba}	60.9±0.8 ^{Ba}
	藏猪	27.2±1.9 ^{Ac}	59.4±1.0 ^{Ab}	73.7±0.3 ^{Aa}	64.0±0.7 ^{Ab}
咀嚼性(%)	杜长大猪	732.6±55.0 ^{Ad}	3274.2±157.4 ^{Bc}	6276.2±252.8 ^{Ba}	6070.7±305.2 ^{Bb}
	藏猪	690.90±253.7 ^{Ad}	3966.7±195.2 ^{Ac}	7355.7±239.6 ^{Aa}	5935.4±242.9 ^{Ab}

注:大写字母A~B表示不同品种猪差异显著($P<0.05$);小写字母a~d表示不同热加工方式差异显著($P<0.05$),表5~表6同。

表 5 不同热加工方式下猪肉的色泽

Table 5 Color of pork under different thermal processing methods

加工方式	L^*		a^*		b^*	
	杜长大猪	藏猪	杜长大猪	藏猪	杜长大猪	藏猪
煮制	68.66±0.34 ^{Aa}	65.96±0.35 ^{Ba}	0.03±0.16 ^{Bc}	0.77±0.46 ^{Ac}	12.78±0.61 ^{Ac}	11.29±0.32 ^{Bc}
炸制	40.84±0.59 ^{Ac}	36.98±0.76 ^{Bc}	12.11±0.87 ^{Ba}	14.53±0.93 ^{Aa}	20.71±0.13 ^{Aa}	19.49±0.75 ^{Aa}
烤制	54.03±0.89 ^{Ab}	50.40±1.98 ^{Bb}	4.54±0.55 ^{Bb}	6.27±1.72 ^{Ab}	17.41±2.46 ^{Bb}	17.89±0.49 ^{Ab}

2.5 加工方式对藏猪肉和杜长大猪肉整体风味的影响

采用电子鼻对热加工后的猪肉整体风味进行分析,由图 3(a)可知 10 个传感器在所有样品中均具有响应值,表明不同热加工方式下藏猪和杜长大猪产生的香气构成具有一定的相似性,但 W1W、W1S、W5S 传感器对样品中挥发性物质响应值比较明显,这意味着样品含有较高水平的硫化物、甲基类化合物、氮氧类化合物。同时炸制在 W1W、W1S、W5S、W2W、W2S 传感器上响应值比较强烈,出现这种结果是因为油炸处理过程中由于美拉德反应形成大量杂环化合物^[38]。煮制在 W3S、W1C 传感器上响应值比较强烈。

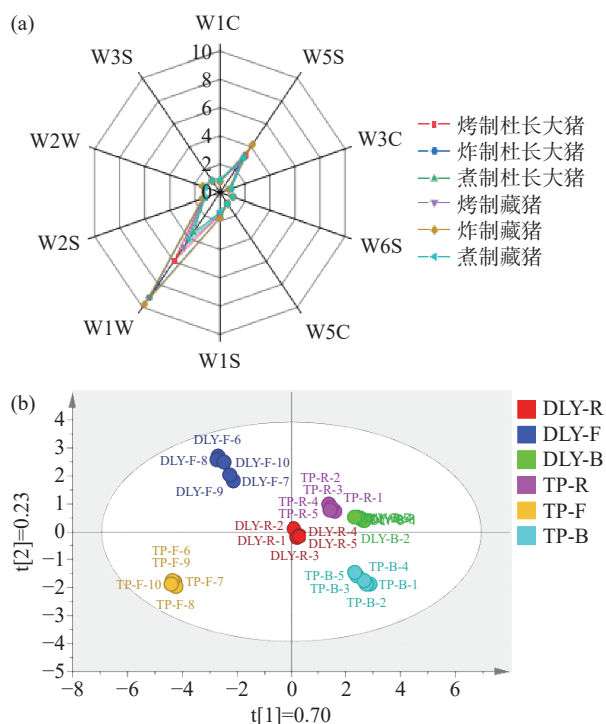


图 3 不同热加工方式下猪肉电子鼻响应值雷达图(a)和主成分分析得分图(b)

Fig.3 Radar image of the E-nose response data (a) and principal component analysis score plot (b) of pork under different thermal processing methods

注: DLY-R: 烤制的杜长大猪肉; DLY-F: 炸制的杜长大猪肉; DLY-B: 煮制的杜长大猪肉; TP-R: 烤制的藏猪肉; TP-F: 炸制的藏猪肉; TP-B: 煮制的藏猪肉; 图 5 同。

由图 3(b)可知,电子鼻 PCA 图第一主成分(PC1)的贡献率为 70%,第二主成分(PC2)的贡献率为 23%,PC1 和 PC2 贡献率之和值 $\geq 80\%$,说明此图

能够很好反映样品的整体信息。三种烹饪方式分布于相对独立的区域,说明电子鼻可以较好地地区分每种烹饪方式下藏猪和杜长大猪香气。炸制组位于 PC1 的负侧,煮制组和烤制组分别位于 PC1 的正侧,说明炸制猪肉气味与其他组别差异较大。炸制和煮制中藏猪位于 PC2 轴的负侧,而杜长大猪位于 PC2 轴正侧,说明藏猪和杜长大猪整体的风味轮廓差异显著。烤制组中藏猪肉和杜长大猪肉相距较近,两者之间的风味物质较相似。

2.6 加工方式对藏猪肉和杜长大猪肉挥发性风味化合物的影响

采用顶空气相-离子迁移谱(GC-IMS)对热加工后猪肉的挥发性有机化合物进行检测,通过 GC 保留时间和离子迁移时间对挥发性成分进行定性分析,由图 4 的指纹谱图可以看出煮制和烤制的猪肉挥发性物质要多于炸制的猪肉,乙酸乙酯(M)、1-辛烯-3-醇、1-辛烯-3-酮、丁酸戊酯、2,4,6-三甲基吡啶、顺-4-庚烯醛、2-甲基丁酸、2-庚酮、4-甲基噻唑等是煮制猪肉整体风味的主要风味物质,3-羟基-2-丁酮(M)、正己醛(M)、正戊醛、丙酸异丁酯、异戊酸甲酯、四氢噻吩-3-酮是烤制猪肉整体风味的主要风味物质。4-甲基-2-戊酮和 2-戊酮(M)、乙二醇二甲基醚、 α -异甲基紫罗兰酮、异丙硫醇等物质是炸制特征风味物质。炸制能减少脂质氧化导致挥发性物质的减少^[39];挥发性物质的存在和含量变化对烹饪处理后的猪肉风味产生了显著影响^[40]。三种烹饪方式下共检测出 58 种挥发性风味物质,由图 5 和表 6 可知,在炸制方式下,共检测出 24 种挥发性化合物,其中藏猪肉含有 21 种,而杜长大猪肉中则含有 15 种,杜长大猪肉中特有的挥发性化合物为 4-甲基-2-戊酮和 2-戊酮(M),藏猪肉中特有的挥发性化合物包括乙二醇二甲基醚和 α -异甲基紫罗兰酮化合物。在烤制方式下,共检测出 35 种挥发性化合物,其中藏猪中含有 34 种,杜长大猪中含有 31 种,藏猪肉中特有的挥发性化合物为二甲基二硫和 3-羟基-2-丁酮(M),而烤制杜长大猪肉中特有的挥发性化合物为巴豆酸乙酯。在煮制方式下,共检测出 42 种挥发性化合物,藏猪中含有 40 种,杜长大猪中含有 41 种,藏猪肉含有的特征挥发性化合物为 4-甲基噻唑,而杜长大猪肉含有的特征挥发性化合物为甲酸丁酯。炸制方式下猪肉中的酮类和醛类挥发性化合物含量较高,藏猪的杂环类挥发性化合物和含硫化合物含量显著高于

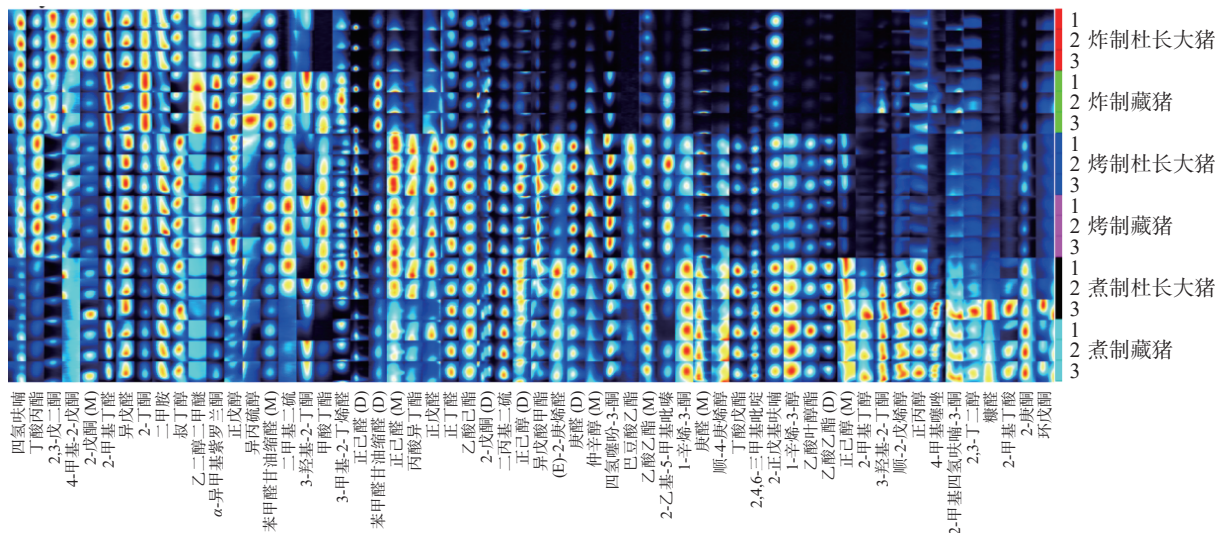


图 4 不同热加工方式下猪肉中挥发性化合物的 Gallery Plot 图

Fig.4 Gallery plot of volatile compound peaks selected of pork under different thermal processing methods

注: 图中颜色代表物质含量, 白色表示含量较低, 红色表示含量较高, 颜色越红表示含量越高。

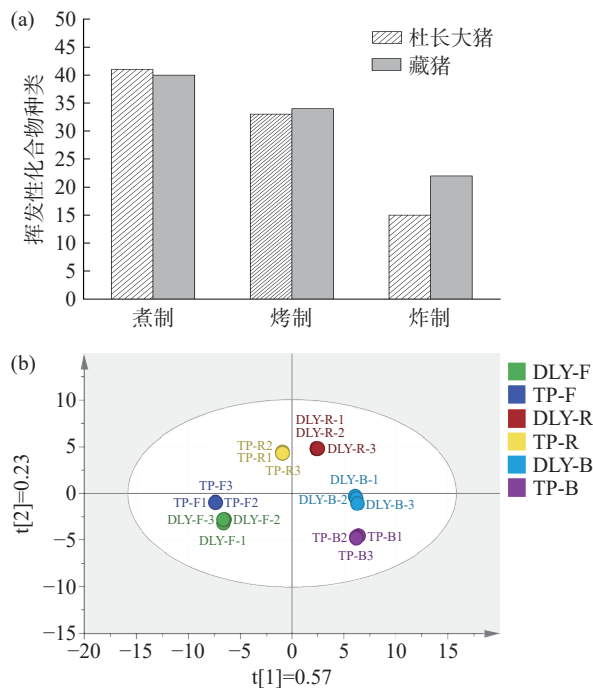


图 5 不同热加工方式下猪肉挥发性化合物种类柱状图(a)和主成分分析得分图(b)

Fig.5 Column chart (a) and principal component analysis score (b) of volatile compounds in pork under different thermal processing methods

杜长大猪含量($P<0.05$), 杂环中呋喃类主要呈甜香味; 煮制方式下醇类挥发性化合物含量较高, 杜长大猪肉的酸类和醛类挥发性化合物含量高于藏猪, 尤其是己醛、戊醛和壬醛, 这些物质在高含量下具有明显的肉腥味^[41]; 烤制方式下杜长大猪肉的酯类挥发性化合物和酸类挥发性化合物含量高于藏猪, 而酮类和醛类化合物的含量低于藏猪。藏猪的独特饮食和生长环境可能导致其肉质中前体物质的不同, 从而在热加工过程中生成较多的杂环类化合物和含硫化化合物^[42]。为了进一步探究不同加工方式对猪肉风味化

合物的影响, 由图 5(b)可知, 挥发性化合物 PCA 图第一主成分(PC1)的贡献率为 57%, 第二主成分(PC2)的贡献率为 23%, PC1 和 PC2 贡献率之和 $\geq 80\%$, 说明此图能够反映样品的整体信息。炸制挥发性风味物质含量主要集中在 PC1 负侧, 烤制和煮制主要位于 PC1 的正侧, 说明炸制猪肉的气味与其他组别差异较大, 此结果与电子鼻结果相似。王天杨等^[43]利用电子鼻和 GC-IMS 技术得出了蒸制、煮制、烤制和空气炸锅烹饪方式下的猪肉挥发性成分主要为酯类、酮类、醇类和醛类, 与此结果相似。总的来说, 热加工方式能够促进两种猪肉之间差异性化合物的形成, 从而赋予猪肉独特的风味特性。

2.7 感官评价

感官评定是评价猪肉制品的重要指标之一, 从图 6 中可知, 煮制方式下, 杜长大猪肉的色泽优于藏猪肉, 然而在气味、质地、口感和接受度等方面, 藏猪肉的感官评分均高于杜长大猪肉, 烤制方式下藏猪肉在色泽和气味方面评分明显高于杜长大猪肉, 炸制藏猪肉在色泽、质地、口感、气味以及接受度等方面均明显优于杜长大猪肉。在三种热加工方式中, 油炸的藏猪肉表面呈现出更为金黄的色泽, 具有明显的色泽优势, 并且在色泽、气味、质地、口感和可接受度等方面的评分均高于其他热加工方式。此外, 煮制猪肉的接受度和气味评分相对较低, 煮制的猪肉腥味较为突出, 而炸制的猪肉腥味较为轻微。Irene 等^[44]研究发现炸制以油为介质有助于降低猪肉本身的腥味, 产生不同的芳香化合物, 而赋予独特的香味。戊醛、己醛和庚醛的气味均被形容为草腥味, 在煮制中被检测出来含量均比较高, 此结果与 GC-IMS 测定结果相符。炸制藏猪表现出较为突出的优势, 其炸制过程中所产生的特有气味在一定程度上彰显了藏猪的风味特点, 同时具有较为诱人的金黄色泽。

表 6 不同热加工方式下猪肉中鉴定的挥发性风味物质
Table 6 Volatile compounds identified in pork by different thermal processing methods

类别	序号	化合物	化学式	CAS	保留指数	保留时间	迁移时间	峰体积(a.u.)					
						(s)	(ms)	炸制杜长大猪	炸制藏猪	烤制杜长大猪	烤制藏猪	煮制杜长大猪	煮制藏猪
醛类	1	苯甲醛甘油缩醛(M)	C ₁₀ H ₁₂ O ₃	1708390	969.3	527.946	1.15	ND	2154.20±21.57	ND	ND	ND	ND
	2	苯甲醛甘油缩醛(D)	C ₁₀ H ₁₂ O ₃	1708390	969.2	527.684	1.47	ND	859.51±14.96	ND	ND	ND	ND
	3	(E)-2-庚烯醛	C ₇ H ₁₂ O	18829555	957.2	503.522	1.25	ND	ND	1127.12±16.93 ^{Ab}	569.09±11.92 ^{Bb}	1144.17±12.46 ^{Aa}	846.06±38.12 ^{Bb}
	4	庚醛(M)	C ₇ H ₁₄ O	111717	925.4	444.462	1.33	ND	ND	4411.58±205.73 ^{Ab}	3346.25±142.91 ^{Bb}	8519.71±287.67 ^{Ba}	10085.76±10.21 ^{Aa}
	5	庚醛(D)	C ₇ H ₁₄ O	111717	898.7	400.381	1.67	ND	ND	4048.43±40.80 ^{Ab}	3601.46±85.14 ^{Bb}	4734.13±177.46 ^{Aa}	4352.02±120.75 ^{Ba}
	6	糠醛	C ₅ H ₄ O ₂	98011	816.7	297.52	1.32	ND	ND	ND	ND	626.49±13.23 ^{Ba}	1534.12±31.88 ^{Aa}
	7	正己醛(D)	C ₆ H ₁₂ O	66251	813.1	293.666	1.56	8657.82±19.26 ^{Bc}	11464.07±53.70 ^{Ac}	25749.91±43.18 ^{Aa}	22562.14±2.27 ^{Ba}	22367.93±6.86 ^{Ab}	15186.46±5.35 ^{Bb}
	8	正戊醛	C ₅ H ₁₀ O	110623	714.2	201.593	1.20			2129.24±13.58 ^{Aa}	1782.28±15.10 ^{Ba}	ND	ND
	9	2-甲基丁醛	C ₅ H ₁₀ O	96173	658.9	168.149	1.40	11653.42±2.01 ^{Ba}	14835.08±17.40 ^{Aa}	8069.28±9.92 ^{Bc}	9863.92±16.30 ^{Ab}	10243.86±27.46 ^{Ab}	9754.30±33.99 ^{Bc}
	10	异戊醛	C ₅ H ₁₀ O	590863	638.7	159.085	1.19	1172.63±1.04 ^{Ab}	684.00±3.43 ^{Bc}	1346.94±26.26 ^{Aa}	1217.46±15.39 ^{Bb}	1145.39±2.46 ^{Bc}	1250.06±7.16 ^{Aa}
	11	正丁醛	C ₄ H ₈ O	123728	593.9	140.664	1.29	ND	ND	2378.08±7.89 ^{Aa}	2122.13±9.21 ^{Ba}	2029.67±14.50 ^{Ab}	1970.20±5.79 ^{Bb}
	12	正己醛(M)	C ₆ H ₁₂ O	66251	811.8	292.339	1.26	ND	ND	4409.04±163.20 ^{Aa}	4297.57±50.55 ^{Ba}	3288.72±101.10 ^{Ab}	3353.69±28.20 ^{Ab}
	13	3-甲基-2-丁烯醛	C ₅ H ₈ O	107868	754.3	235.578	1.07	2128.63±41.31 ^{Bb}	3543.03±37.03 ^{Aa}	2103.98±93.37 ^{Bc}	2767.20±16.69 ^{Ab}	2965.02±22.86 ^{Aa}	1672.40±142.23 ^{Bc}
醇类	14	仲辛醇(M)	C ₈ H ₁₈ O	123966	985.3	562.038	1.43	ND	ND	3070.14±8.83 ^{Aa}	2917.32±7.84 ^{Ba}	ND	ND
	15	1-辛烯-3-醇	C ₈ H ₁₆ O	3391864	985.1	561.472	1.72	ND	ND	ND	ND	2221.25±1.64 ^{Ba}	2663.32±39.70 ^{Aa}
	16	顺-4-庚烯醇	C ₇ H ₁₂ O	6728310	899.5	401.731	1.63	ND	ND	1828.79±6.34 ^{Ab}	1530.65±11.97 ^{Bb}	2164.39±38.10 ^{Ba}	2563.89±36.24 ^{Aa}
	17	正己醇(D)	C ₆ H ₁₄ O	111273	877.1	369.682	1.65	ND	ND	3056.31±17.97 ^{Aa}	2139.06±4.46 ^{Ba}	2969.06±9.83 ^{Ab}	2023.73±12.27 ^{Bb}
	18	正己醇(M)	C ₆ H ₁₄ O	111273	885.2	380.596	1.33	ND	ND	ND	ND	4468.70±57.42 ^{Aa}	3990.93±2.91 ^{Ba}
	19	2,3-丁二醇	C ₄ H ₁₀ O ₂	513859	792.8	272.975	1.37	ND	ND	ND	ND	729.70±7.53 ^{Ba}	1261.51±5.38 ^{Aa}
	20	正戊醇	C ₅ H ₁₂ O	71410	778.1	258.46	1.25	1815.68±3.12 ^{Bb}	1854.39±2.92 ^{Ab}	2367.14±11.37 ^{Bb}	2722.93±5.15 ^{Aa}		
	21	2-甲基丁醇	C ₅ H ₁₂ O	137326	730.1	214.388	1.23	ND	ND	ND	ND	1045.51±3.31 ^{Bb}	1674.58±2.15 ^{Aa}
	22	叔丁醇	C ₄ H ₁₀ O	71363	667.6	172.219	1.18	1328.49±0.85 ^{Ac}	837.52±0.44 ^{Bc}	1727.87±1.74 ^{Aa}	1594.96±2.15 ^{Ba}	1591.13±0.63 ^{Ab}	1538.77±7.91 ^{Bb}
	23	正丙醇	C ₃ H ₈ O	71238	567.5	130.83	1.12	ND	ND	ND	ND	760.72±6.43 ^{Aa}	632.17±7.47 ^{Ba}
	24	顺-2-戊烯醇	C ₅ H ₁₀ O	1576950	776.3	256.708	1.43	ND	ND	ND	ND	5960.09±30.01 ^{Ba}	8351.09±15.92 ^{Aa}
	25	四氢噻吩-3-酮	C ₄ H ₆ OS	1003049	983	556.912	1.43	ND	ND	3974.26±80.15 ^{Aa}	3878.72±19.98 ^{Ba}	3843.93±31.37 ^{Ab}	3562.19±31.10 ^{Bb}
	26	1-辛烯-3-酮	C ₈ H ₁₄ O	4312996	989.1	570.351	1.67	ND	ND	ND	ND	1423.40±16.83 ^{Aa}	1376.55±3.20 ^{Ba}
酮类	27	2-庚酮	C ₇ H ₁₄ O	110430	887.6	383.921	1.62	ND	ND	2747.84±25.28 ^{Ab}	1742.75±20.00 ^{Bc}	4741.40±55.79 ^{Ba}	5971.51±23.82 ^{Aa}
	28	环戊酮	C ₅ H ₈ O	120923	798.3	278.492	1.34	ND	ND	ND	ND		1182.28±14.08 ^{Aa}
	29	2-甲基四氢呋喃-3-酮	C ₅ H ₈ O ₂	3188009	803.1	283.32	1.42	ND	ND	ND	ND	2089.20±97.68 ^{Aa}	2764.54±140.03 ^{Aa}
	30	3-羟基-2-丁酮(M)	C ₄ H ₈ O ₂	513860	712.8	200.434	1.07	ND	859.72±38.41 ^{Aa}	ND	496.93±13.65 ^{Ac}	654.76±35.73 ^{Bb}	784.17±4.17 ^{Ab}
	31	4-甲基-2-戊酮	C ₆ H ₁₂ O	108101	744.5	226.76	1.16	337.86±3.25	ND	ND	ND	ND	ND
	32	3-羟基-2-丁酮(D)	C ₄ H ₈ O ₂	513860	745.4	227.585	1.33	ND	ND	ND	ND	15372.44±90.50 ^{Ba}	19493.88±47.00 ^{Aa}
	33	2,3-戊二酮	C ₅ H ₈ O ₂	600146	695.5	187.396	1.20	1376.58±6.05 ^{Aa}	1031.42±3.97 ^{Ba}	ND	ND	ND	ND
	34	2-戊酮(M)	C ₅ H ₁₀ O	107879	683.9	180.097	1.12	256.64±1.38	ND	ND	ND	ND	ND
	35	2-戊酮(D)	C ₅ H ₁₀ O	107879	693.8	186.202	1.39	5280.42±164.92 ^{Bc}	10634.10±51.38 ^{Ac}	12699.68±65.84 ^{Ab}	11564.79±72.67 ^{Bb}	13672.23±57.06 ^{Aa}	13434.66±79.08 ^{Ba}
	36	2-丁酮	C ₄ H ₈ O	78933	582.4	136.293	1.24	6455.37±6.22 ^{Ba}	7708.99±4.78 ^{Aa}	4383.86±1.10 ^{Bb}	6007.89±30.46 ^{Ab}	ND	ND
	37	α -异甲基紫罗兰酮	C ₅ H ₈ O	67641	493.8	106.856	1.12	ND	4037.24±19.29 ^{Aa}	1534.65±26.80 ^{Bb}	2612.43±9.13 ^{Ab}	947.97±39.94 ^{Bc}	1712.69±7.63 ^{Ac}
	38	丁酸戊酯	C ₉ H ₁₈ O ₂	540181	1100.8	786.472	1.94	ND	ND	ND	ND	2713.70±8.16 ^{Aa}	2344.54±39.22 ^{Ba}
	39	乙酸己酯	C ₈ H ₁₆ O ₂	142927	1007	604.698	1.41	ND	ND	2426.50±83.04 ^{Aa}	2024.93±43.12 ^{Ba}	2141.95±10.04 ^{Ab}	1954.70±32.66 ^{Bb}
酯类	40	乙酸叶醇酯	C ₈ H ₁₄ O ₂	3681718	1005.6	602.433	1.82	ND	ND	1459.93±50.62 ^{Ab}	1061.89±16.97 ^{Bb}	1883.09±20.61 ^{Ba}	1978.91±31.10 ^{Aa}
	41	丁酸丙酯	C ₇ H ₁₄ O ₂	105668	889.2	386.129	1.26	811.39±3.71 ^{Bb}	1096.97±4.82 ^{Ab}	1242.76±40.08 ^{Ba}	1347.34±30.88 ^{Aa}	ND	ND
	42	丙酸异丁酯	C ₇ H ₁₄ O ₂	540421	852.5	338.417	1.26	ND	ND	4065.22±16.04 ^{Aa}	3009.83±33.29 ^{Ba}	3376.91±39.91 ^{Ab}	2013.98±516.84 ^{Bb}
	43	巴豆酸乙酯	C ₆ H ₁₀ O ₂	623701	844.2	328.426	1.56	ND	ND	1145.81±23.56	ND	ND	ND
	44	异戊酸甲酯	C ₆ H ₁₂ O ₂	556241	772.5	252.937	1.53	ND	ND	7431.26±13.80 ^{Aa}	5517.34±2.21 ^{Ba}	6274.12±3.20 ^{Ab}	5425.38±19.48 ^{Bb}
	45	甲酸丁酯	C ₅ H ₁₀ O ₂	592847	736.7	219.995	1.53	ND	667.38±17.27 ^{Ab}	595.08±1.58 ^{Ba}	785.03±1.80 ^{Aa}	545.50±4.66 ^{Ab}	ND
	46	乙酸乙酯(M)	C ₄ H ₈ O ₂	141786	601.9	143.786	1.33	ND	ND	933.01±2.68 ^{Ab}	625.62±4.93 ^{Bb}	1263.15±1.73 ^{Aa}	1043.00±0.96 ^{Ba}
	47	乙酸乙酯(D)	C ₄ H ₈ O ₂	141786	608.1	146.283	1.10	ND	ND	ND	ND	2107.68±6.48 ^{Aa}	1357.07±1.14 ^{Ba}
	48	2,4,6-三甲基吡啶	C ₈ H ₁₁ N	108758	996.5	587.117	1.16	ND	ND	6070.42±43.01 ^{Ab}	5048.17±8.26 ^{Bb}	8260.01±20.87 ^{Ba}	8804.53±596.59 ^{Aa}
	49	2-正戊基呋喃	C ₉ H ₁₄ O	3777693	989.1	570.344	1.25	ND	ND	ND	ND	795.62±2.76 ^{Aa}	675.21±2.5 ^{Ba}
杂环类	50	4-甲基噻唑	C ₄ H ₃ N ₂ S	693958	842.5	326.489	1.06	ND	ND	ND	ND	ND	4839.40±33.28
	51	乙二醇二甲醚	C ₄ H ₁₀ O ₂	110714	644.2	161.49	1.32	ND	4456.35±4.40	ND	ND	ND	ND
	52	四氢呋喃	C ₄ H ₈ O	109999	603.2	144.287	1.07	1341.21±5.60 ^{Ba}	1419.39±4.51 ^{Aa}	876.45±19.22 ^{Bb}	1183.64±6.85 ^{Ab}	ND	ND
	53	2-乙基-5-甲基吡嗪	C ₇ H ₁₀ N ₂	13360640	998.9	591.108	1.68	ND	3039.47±22.97 ^{Ab}	2164.02±33.81 ^{Ba}	3239.63±51.80 ^{Aa}	1237.74±29.86 ^{Bb}	1948.04±29.06 ^{Ac}
含硫化合物	54	二丙基二硫	C ₆ H ₁₄ S ₂	629196	1103.7	792.868	1.48	ND	ND	3884.64±4.59 ^{Ab}	3203.21±1.46 ^{Bb}	5022.68±2.41 ^{Ba}	5357.33±27.82 ^{Aa}
	55	二甲基二硫	C ₂ H ₆ S ₂	624920	736.3	219.684	1.15	ND	212.41±10.20 ^{Aa}	ND	218.45±7.31 ^{Ab}	ND	ND
	56	异丙硫醇	C ₃ H ₈ S	75332	560.9	128.488	1.15	165.08±2.34 ^{Ba}	240.68±16.13 ^{Aa}	145.35±3.61 ^{Ab}	104.16±1.82 ^{Bc}	123.91±5.76 ^{Bc}	124.80±4.31 ^{Ab}
	57	2-甲基丁酸	C ₅ H ₁₀ O ₂	116530	869.7	360.001	1.47	164.89±5.76 ^{Bc}	175.30±4.32 ^{Ac}	243.30±1.34 ^{Ab}	244.86±1.76 ^{Ab}	829.46±10.76 ^{Ba}	1547.48±15.07 ^{Aa}
	58	二甲胺	C ₂ H ₇ N	124403	573.9	133.171	1.07	912.28±9.66 ^{Ab}	576.04±3.03 ^{Bb}	873.66±25.60 ^{Ac}	884.47±4.76 ^{Ac}	856.07±4.92 ^{Ba}	974.84±1.80 ^{Aa}

注: ND: 未检测到。

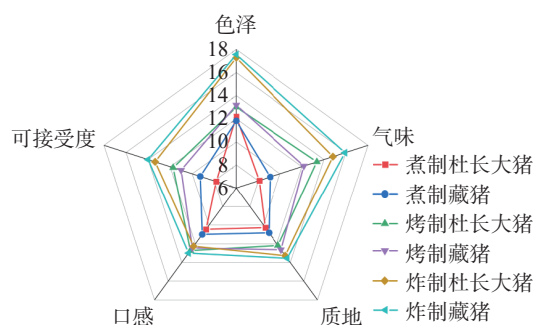


图 6 不同热加工方式下猪肉感官评价雷达图

Fig.6 Radar image of sensory evaluation of pork under different thermal processing methods

3 结论

通过比较了煮、炸、烤三种热加工方式下藏猪肉和杜长大猪肉的食用品质、挥发性风味物质和感官品质等方面的差异。对于加工方式而言,煮制猪肉具有较高的得率和嫩度,说明以水介质使猪肉的水分含量能够得到较好地保持,导致质地也相对较软。与烤制相比,炸制的加工损失率较低,但观察到更高的硬度,这主要是因为外壳的形成破坏了水分保持对嫩度的保护作用。此外,在所有热加工方式中,藏猪肉的水分含量、硬度、色值以及含有杂环类挥发性风味化合物方面表现更为突出,藏猪属于高原猪种,长期生活在缺氧环境中,半放牧式饲养,以野生植物为食,活动量大,因此蛋白含量较高,肌内脂肪沉积较少,猪肉颜色偏红。GC-IMS 测得煮制猪肉的醛类含量比较高,尤其是己醛、壬醛、戊醛等含量比较高导致腥味比较强。这导致煮制猪肉的可接受度下降,藏猪肉的己醛、壬醛及戊醛含量低于杜长大猪,腥味较小。炸制藏猪肉的挥发性风味化合物种类高于杜长大猪,尤其是吡嗪、噻唑等杂环类含量比较高,赋予藏猪肉特殊的香味。因此,藏猪肉在三种热加工方式下表现出更好的食用品质和感官评分,其中炸制展现出较好的品质特性。本研究的发现为不同猪肉品种的热加工优化提供了科学依据。

© The Author(s) 2025. 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] MA Y F, HAN X M, HUANG C P, et al. Population genomics analysis revealed origin and high-altitude adaptation of Tibetan pigs[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 11463.

[2] 张莹, 孙忠祥, 曾艺. 藏猪传统养殖系统及其农业文化遗产特征[J]. *古今农业*, 2023(3): 113-120, 69. [ZHANG Ying, SUN Zhongxiang, ZENG Yi. The traditional farming system of Tibetan pig and its characteristics of agricultural heritage systems[J]. *Ancient and Modern Agriculture*, 2023(3): 113-120, 69.]

[3] 李伟, 张飞燕, 宋婷婷, 等. 藏猪与雅南猪 IGF-I 基因的克隆与序列分析[J]. *浙江农业学报*, 2015, 27(8): 1324-1330. [LI Wei, ZHANG Feiyan, SONG Tingting, et al. Cloning and sequence analysis of IGF-I gene in Tibetan pig and Yanan pig[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2015, 27(8): 1324-1330.]

[4] 尹添柱, 商振达, 董冰. 藏猪肉风味特性及其形成途径研究进展[J]. *中国畜牧杂志*, 2023, 59(12): 49-55. [YIN Tianzhu, SHANG Zhenda, DONG Bing. Research progress on flavor characteristics and formation pathways of Tibetan pork[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2023, 59(12): 49-55.]

[5] 陈小连, 周泉勇, 宋文静, 等. 赣南藏香猪与杜长大商品猪胴体性状和肉品质比较分析[J]. *江西农业大学学报*, 2020, 42(2): 282-290. [CHEN Xiaolian, ZHOU Quanyong, SONG Wenjing, et al. Comparison of carcass traits and meat quality between Tibetan pig in South Jiangxi and Duroc X Yorkshire X Landrace commercial pigs[J]. *Journal of Jiangxi Agricultural University*, 2020, 42(2): 282-290.]

[6] 杨红杰, 彭华, 王林云. 从我国猪肉消费趋势展望地方猪种发展前景[J]. *中国畜牧杂志*, 2014, 50(16): 6-10. [YANG Hongjie, PENG Hua, WANG Linyun, et al. Future prospects for the development of Chinese in digenous pig breeds with perspective of pork consumption trends[J]. *Chinese Journal of Animal Husbandry*, 2014, 50(16): 6-10.]

[7] HAN D, ZHANG C H, FAUCONNIER M L, et al. Characterization and differentiation of boiled pork from Tibetan, Sanmenxia and Duroc×0(Landrac×Yorkshire) pigs by volatiles profiling and chemometrics analysis[J]. *Food Research International*, 2020, 130: 108910.

[8] ZHANG Y, ZHANG Y, LI H, et al. Comparison of nutrition and flavor characteristics of five breeds of pork in China[J]. *Foods*, 2022.

[9] 董轩. 羊肉品质评价指标、影响因素及不同烹调方式对品质的影响[J]. *现代食品*, 2020(23): 16-19. [DONG Xuan. Evaluation indexes, influencing factors and effects of different cooking methods on mutton quality[J]. *Modern Food*, 2020(23): 16-19.]

[10] 袁静, 冯美琴, 孙健. 热加工方式对猪肉品质及氧化特性的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(21): 114-120. [YUAN Jing, FENG Meiqin, SUN Jian, et al. Effects of thermal processing methods on the quality and oxidation characteristics of pork[J]. *Food Science*, 2023, 44(21): 114-120.]

[11] 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 Rui, WANG Haiyan, LI Xing, et al. Evaluation of flavor differences among pork from rongchang pigs processed by different cooking methods[J]. *Meat Research*, 2021, 35(11): 31-37.]

[12] 王静帆, 黄峰, 沈青山, 等. 低温长时蒸煮对猪肉品质的影响[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(3): 643-652. [WANG Jingfan, HUANG Feng, SHEN Qingshan, et al. The influence of low-temperature and long-time cooking on the quality of pork products[J]. *Chinese Agricultural Science*, 2021, 54(3): 643-652.]

[13] 王峰, 张雯雯, 吴晓霞. 不同时间紫外处理对冷鲜猪肉品质变化的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(6): 207-214. [WANG Feng, ZHANG Wenwen, WU Xiaoxia, et al. Effect of ultraviolet treatment at different time on quality changes of chilled pork[J]. *Journal of Food Safety and Quality Testing*, 2023, 14(6): 207-214.]

[14] 强宇, 姜薇, 刘成江, 等. 风冷与冷藏过程中酱卤牛肉风味逸散行为研究[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(16): 3224-3241. [QIANG Yu, JIANG Wei, LIU Chengjiang, et al. Flavor escape behavior of stewed beef with soy sauce during air-cooling and refrigeration[J]. *Chinese Agricultural Science*, 2022, 55(16): 3224-3241.]

[15] WU Weida, ZHAN Junliang, TANG Xiaoyan, et al. Characterization and identification of pork flavor compounds and their precursors in Chinese indigenous pig breeds by volatile profiling and multivariate analysis[J]. *Food Chemistry*, 2022, 385: 132543.

[16] 黄欣悦. 萝卜炖牛腩预制菜加工工艺研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023. [HUANG Xinyue. Research on the processing technology of prepared food stewed brisket with radish[D]. Wu-

han: Huazhong Agricultural University, 2023.]

[17] 苏艳芳, 牛乃琪, 宗文成, 等. 北京黑猪 LPL 和 NUDT3 基因多态性及其与肉质性状的关联分析[J]. 中国畜牧兽医, 2024, 51(3): 1111-1121. [SU Yanfang, NIU Naiqi, ZONG Wencheng, et al. Polymorphisms of LPL and NUDT3 genes and its association analysis with meat quality traits in Beijing black pigs[J]. Chinese Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2024, 51(3): 1111-1121.]

[18] 张盼, 商鹏, 张博, 等. 舍饲与放牧条件下藏猪的屠宰性能和肉质比较[J]. 中国畜牧杂志, 2019, 55(3): 107-109. [ZHANG Pan, SHANG Peng, ZHANG Bo, et al. Comparison of slaughter performance and meat quality of Tibetan pigs under different feeding conditions: Confinement feeding vs. free-range grazing[J]. Journal of Chinese Animal Husbandry, 2019, 55(3): 107-109.]

[19] 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 Wensheng, Quality of sunlight pork" and study on the variation of substances under different processing methods[D]. Jinzhou: Bohai University, 2020.]

[20] 邵会. 藏猪性成熟前后睾丸组织中 lncRNA 和 circRNA 的差异表达及筛选[D]. 林芝: 西藏农牧学院, 2023. [SHAO Hui. Differential expression and screening of lncRNA and circRNA in testes of tibetan pigs before and after sexual maturity[D]. Linzhi: Xizang Institute of Agriculture and Animal Husbandry. 2023.]

[21] GAN M, SHEN L, FAN Y, et al. High altitude adaptability and meat quality in tibetan pigs: A reference for local pork processing and genetic improvement[J]. *Animals*, 2019, 9(12): 1080.

[22] 刘凡, 殷志康, 刘辉, 等. 藏猪与大白猪食用品质与肌纤维类型的相关性研究[J]. 食品工业科技, 2021, 42(24): 271-277.

[LIU Fan, YIN Zhikang, LIU Hui, et al. Correlation between meat quality and muscle fiber types of Tibetan and Large White pigs[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(24): 271-277.]

[23] 杨天意, 周晓燕, 罗飞, 等. 烹饪加工对肉类品质和营养特性影响的研究进展[J]. 美食研究, 2022, 39(1): 44-52. [YANG Tianyi, ZHOU Xiaoyan, LUO Fei, et al. Research advances in effect of cooking on meat quality and nutrition properties[J]. Culinary Research, 2022, 39(1): 44-52.]

[24] 章杰, 何航, 熊子标. 烹饪方式对猪肉品质及营养成分的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(6): 21-25, 29. [ZHANG Jie, HE Hang, XIONG Zibiao. Effect of cooking methods on the quality and nutritive contents of pork[J]. Food and Machinery, 2018, 34(6): 21-25, 29.]

[25] RANI L, KUMAR M, KAUSHIK D, et al. A review on the frying process: Methods, models and their mechanism and application in the food industry[J]. *Food Research International*, 2023, 172: 113176.

[26] 蔡如玉, 段梦琪, 王士欣, 等. 藏猪与大白猪胴体性能及肉质特性分析[J]. 家畜生态学报, 2021, 42(7): 35-38. [CAI Ruyu, DUAN Mengqi, WANG Shixin, et al. Analysis on carcass performance and meat quality between the Tibetan Pig and Large White Pig[J]. *Journal of Animal Ecology*, 2021, 42(7): 35-38.]

[27] TRAORE S, AUBRY L, GATELLIER P, et al. Effect of heat treatment on protein oxidation in pig meat[J]. *Meat Science*, 2012, 91(1): 14-21.

[28] ASOKAPANDIAN, SANGAMITHRA, GABRIELA J S, et al. "Deep fat frying of foods: A critical review on process and product parameters." [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, 60(20): 3400-3413.

[29] SHEN L, LEI H, ZHANG S, et al. The comparison of energy metabolism and meat quality among three pig breeds[J]. *Animal*

Science Journal, 2014, 85(7): 770-779.

[30] 胡燕燕. 羊肉电烤制工艺研究及其特征风味物质解析[D]. 石河子: 石河子大学, 2023. [HU Yanyan. A study on the electric roasting process of mutton and analysis of its characteristic flavor compounds[D]. Shihezi: Shihezi University, 2023.]

[31] BAGARINAO N C, KAUR L, BOLAND M. Effects of ultrasound treatments on tenderness and *in vitro* protein digestibility of New Zealand Abalone, *Haliotis iris* [J]. *Foods*, 2020, 9(8): 1122.

[32] OSA-MORALES M E, SOLARES-ALVARADO A P, AGUILERA-BOCANEGRA, et al. Reviewing the effects of vacuum frying on frying medium and fried foods properties[J]. *Int J Food Sci Technol*, 2022, 57: 3278-3291.

[33] TORNBERG E. Effects of heat on meat proteins – Implications on structure and quality of meat products[J]. *Meat Science*, 2005, 70(3): 493-508.

[34] 杜林. 浅谈油炸成熟方式对烹饪原料品质的影响[J]. *食品安全导刊*, 2022(35): 129-131, 140. [DU Lin. A brief talk on the influence of frying maturity on the quality of cooking materials[J]. *Food Safety Guide*, 2022(35): 129-131, 140.]

[35] HUGHES J M, OISETH S K, PURSLOW P P, et al. A structural approach to understanding the interactions between colour, water-holding capacity and tenderness[J]. *Meat Science*, 2014, 98(3): 520-532.

[36] LU Fangfei, ZHONG Qiang, KONG Baohua, et al. Deterioration in quality of quick-frozen pork patties induced by changes in protein structure and lipid and protein oxidation during frozen storage[J]. *Food Research International*, 2020, 133: 109142.

[37] WANG J, XIAO J, LIU X, et al. Tandem mass tag-labeled quantitative proteomic analysis of tenderloins between Tibetan and Yorkshire pigs[J]. *Meat Science*, 2021, 172: 108343.

[38] SUN W, JI H, ZHANG D, et al. Evaluation of aroma characteristics of dried shrimp (*Litopenaeus vannamei*) prepared by five different procedures[J]. *Foods*, 2022, 11(21): 3532.

[39] ECHEGARAY N, PATERIO M, DOMÍNGUEZ R, et al. Effects of different cooking methods and of the inclusion of chestnut (*Castanea sativa* Miller) in the finishing diet of Celta pig breed on the physicochemical parameters and volatile profile of *Longissimus thoracis et lumborum* muscle[J]. *Food Research International*, 2020, 137: 109407.

[40] LI J, LIU J, ZHANG S, et al. The effect of rearing conditions on carcass traits, meat quality and the compositions of fatty acid and amino acid of LTL in Heigai pigs[J]. *Animals*, 2021, 12(1): 14.

[41] 刘春节, 张涛, 曾治国, 等. 畜禽肉类腥味物质检测与去除方法研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(14): 338-345. [LIU Chunjie, ZHANG Tao, ZENG Zhiguo, et al. Research progress on detection and removal methods of fishy substances in livestock and poultry meat[J]. Food and Fermentation Industry, 2023, 49(14): 338-345.]

[42] ZHAO L Y, SARA E, YANG P, et al. Establishing the relations of characteristic aroma precursors and volatile compounds for authenticating Tibetan pork[J]. *Food Chemistry*, 2023, 427: 136717.

[43] 王天杨, 关睢, 罗晶晶, 等. 基于电子鼻结合 GC-IMS 分析不同烹饪方式猪肉的挥发性成分差异[J]. 食品工业科技, 2024, 45(14): 234-244. [WANG Tianyang, GUAN Ju, LUO Jingjing, et al. Analysis of differences in volatile components of pork between cooking methods based on electronic nose combined with GC-IMS[J]. Food Industry Technology, 2024, 45(14): 234-244.]

[44] IRENE P, MA DOLORES G, MACARENA E, et al. Sensory perception of meat from entire male pigs processed by different heating methods[J]. *Meat Science*, 2017, 134: 98-102.