

陈君玉, 孙渊, 饶雷, 等. 基于不同杀菌方式的红烧肉内脂质和挥发性成分的差异分析 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(14): 345–353.
doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021100300

CHEN Junyu, SUN Yuan, RAO Lei, et al. Comparison of Lipids and Volatile Flavor Components in Chinese Braised Pork in Brown Sauce with Different Sterilization Methods[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(14): 345–353. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021100300

· 分析检测 ·

基于不同杀菌方式的红烧肉内脂质和挥发性成分的差异分析

陈君玉¹, 孙 渊¹, 饶 雷¹, 赵 靛^{1,2}, 王永涛¹, 李全宏¹, 吴晓蒙^{1,*}, 廖小军¹

(1. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 国家果蔬加工工程技术研究中心, 农业农村部果蔬加工重点实验室, 食品非热加工北京市重点实验室, 北京 100083;
2. 中国农业大学(兴化)健康食品产业研究院, 江苏兴化 225700)

摘 要: 为了研究红烧肉在不同杀菌过程中脂质和挥发性成分的变化, 本文采用超高效液相色谱-四极杆-飞行时间质谱技术对未杀菌、巴氏杀菌和超高压杀菌处理的红烧肉的全脂质组分进行定量分析, 共鉴定出 251 种脂质化合物。利用偏最小二乘判别分析和层次聚类分析模型可有效区分未杀菌、巴氏杀菌、超高压杀菌的红烧肉样品, 其中 24 种脂质物质是将其有效区分的关键差异性化合物, 包括 15 种甘油三酯, 8 种磷脂, 1 种 N-酰基乙醇胺。根据脂质化合物的相对含量, 超高压组的红烧肉比巴氏杀菌组更接近于对照组。采用固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术比较了不同杀菌方式处理的红烧肉中主要挥发性物质的种类和含量差异。3 种杀菌方式中共鉴定出 31 种挥发性风味成分, 包括 4 种醇、4 种酸、4 种脂、7 种烷烃、2 种酮、9 种醛和 1 种呋喃。综合分析, 超高压杀菌较好地保持了红烧肉原有的风味和脂质成分, 在肉制品以及中式菜肴的杀菌领域具有较好的应用前景。

关键词: 红烧肉, 脂质成分, 挥发性成分, 杀菌方式, 巴氏杀菌, 超高压杀菌

中图分类号: TS251.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)14-0345-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021100300



本文网刊:

Comparison of Lipids and Volatile Flavor Components in Chinese Braised Pork in Brown Sauce with Different Sterilization Methods

CHEN Junyu¹, SUN Yuan¹, RAO Lei¹, ZHAO Liang^{1,2}, WANG Yongtao¹, LI Quanhong¹,
WU Xiaomeng^{1,*}, LIAO Xiaojun¹

(1. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, National Engineering Research Center for Fruit and Vegetable Processing, Key Laboratory of Fruit and Vegetable Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing Key laboratory for Food Non-thermal Processing, Beijing 100083, China;
2. Xinghua Industrial Research Center for Food Science and Human Health, China Agricultural University, Xinghua 225700, China)

Abstract: To investigate the changes of lipids and volatile flavor components of Chinese braised pork in brown sauce after sterilization processes, quantitative analysis of the whole lipid components of unpasteurized, pasteurized, and ultra-high pressure (UHP) braised pork in the brown sauce was conducted using ultra-performance liquid chromatography coupled with quadrupole-time of flight mass spectrometry. A total of 251 different lipids were identified. Partial least squares discriminant analysis and hierarchical clustering analysis were used to successfully distinguish the braised pork samples processed with different sterilization methods. Among them, 24 lipid substances were the key compounds to effectively distinguish the lipids, including 15 types of triglycerides (TG), 8 types of phospholipids, and N-acyl ethanolamine.

收稿日期: 2021-10-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0400500); 国家重点研发计划项目(2018YFD0400805); 中国农业大学 2115 人才工程资助。

作者简介: 陈君玉(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 营养与食品安全, E-mail: 1245221634@qq.com。

* 通信作者: 吴晓蒙(1986-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品包装与食品安全, E-mail: wuxmeng@cau.edu.cn。

According to the relative contents of lipid compounds, the braised meat after UHP sterilization was closer to the control group than the ones pasteurized. Using solid-phase micro-extraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry, the types and contents of volatile components in braised pork under different sterilization methods were compared. A total of 31 volatile flavor components were identified, including 4 types of alcohols, 4 types of acids, 4 types of lipids, 7 types of alkanes, 2 types of ketones, and 9 types of aldehydes and furan. Based on these results, it was found that the UHP sterilization could maintain the original flavor and lipid composition of Chinese braised pork in brown sauce, which had great potential in meat processing and Chinese cuisine preparation.

Key words: Chinese braised pork in brown sauce; lipid components; volatile components; sterilization; pasteurization; ultra-high pressure (UHP) sterilization

红烧肉是以肥瘦相间的肉为主要原料,配以多种辅料和调味料红烧加工而成的一种典型的传统中式肉类菜肴,其风味独特,咸中带甜、肥而不腻、瘦而不柴,深受广大消费者喜爱^[1]。随着人们生活水平逐渐提高,社会节奏越来越快,消费者在厨房备餐的时间越来越少,进而对方便快捷的预制菜肴产品的市场需求不断提高。作为中式调理食品和中式快餐中重要的菜肴,将传统红烧肉经加工制成即热食用的肉类方便菜肴调理包,配送至熟食店和便利店等,可弥补红烧肉罐头因高温杀菌对品质破坏较大、保质不保鲜的不足,满足快节奏生活人群对食品营养、安全、美味、方便的需求。

肉类食品富含蛋白质、脂肪、氨基酸、维生素等多种营养成分,是微生物生长繁殖的良好基质。因此,在生产和加工过程中极易受到污染。有效杀灭肉品中的微生物是保障肉品安全的一个重要途径^[2]。目前肉制品方便菜肴常用的杀菌方式有热杀菌、辐照杀菌、微波杀菌、超高压杀菌等。其中传统热杀菌虽然在延长保质期方面效果最好,但是对品质构、颜色、营养等损失较大;辐照杀菌作为一种非常高效的冷杀菌技术,虽然可以有效杀灭或减少肉中的食源性致病微生物和寄生虫,但是也会导致肉风味和色泽的劣变^[3];微波杀菌作为一种新型杀菌方式,具有快速、高效、安全、保鲜等优点,但研究表明不适宜的温度、时间、功率等因素易造成肉质构、感官品质以及风味的改变^[4];而超高压(Ultra-high Pressure, UHP)杀菌作为一种非热杀菌技术,对食物的风味、色素等小分子物质的天然结构及水解^[5]几乎无影响,且能够更好地保持食品原有的色香味,此外,UHP具有很好的杀菌灭酶效果,利于食品的长期储藏^[6]。

红烧肉加工过程中脂类物质分解与氧化对风味形成具有重要作用。脂肪酸作为脂肪的主要组成部分,可降解形成游离脂肪酸等风味前体物质,再经过复杂的化学反应产生红烧肉的特征性风味,且肉制品中挥发性香气物质中大部分来自加工过程中脂肪的氧化^[7-8],因此测定红烧肉中脂质的变化是研究红烧肉风味品质的关键。

作为代谢组学的分支之一,脂质组学可以系统、全面地分析研究生物体、组织和细胞中的脂质以及变化机制^[9],其中非靶向脂质组学可以无针对性地对

样品脂质的变化情况进行分析,最大程度地反映样品中脂质的变化规律和趋势,从而找出差异标志物^[10]。它可以和各种分析方法如核磁共振、近红外光谱、气相色谱-质谱、液相色谱-质谱等结合以评估代谢物水平与外界因素之间的关系^[11],其中,超高效液相色谱串联四级杆飞行时间质谱(Ultra Performance Liquid Chromatography Coupled with Quadrupole-Time of Flight Mass Spectrometry, UPLC/Q-TOF-MS)因具有高灵敏度、高选择性、高精密度、高信息采集速度等不可比拟的优势而得到广泛应用^[12]。

近些年来,基于固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术(Solid Phase Micro-Extraction-Gas Chromatographic-Mass Spectrometric, SPME-GC-MS)能有效地对挥发性物质进行检测,该方法最大程度地保留了原有化合物性状,避免了萃取而带来的杂质且操作连续^[13],采用 SPME-GC-MS 研究挥发性成分的应用已十分广泛。王学敬等^[14]利用该法分析出了德州扒鸡中 57 种挥发性风味成分;肖虹等^[15]也从冷却肉中共测出 25 种挥发性成分;孟一等^[16]利用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术检测出牛肉中 37 种特征性挥发成分。

关于红烧肉的研究主要集中在以五花肉为原料的工艺研究,而以肥瘦相间的肉的研究较少,基于此,本研究以猪前肩肉为原料,在前期优化后的红烧肉制作工艺基础上进行巴氏、UHP 杀菌处理,采用 UPLC-Q-TOF-MS 结合非靶向脂质组学技术对处理后红烧肉的脂质成分进行分析,利用主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)、偏最小二乘法判别分析(Partial Least Squares Discriminant Analysis, PLS-DA)和层次聚类分析(Hierarchical Clustering Analysis, HCA),旨在探明不同杀菌方式间红烧肉脂质含量和分布的差异性;采用 SPME-GC-MS 检测了不同杀菌方式后红烧肉样品中挥发性物质的种类和含量,以此来研究产品风味物质的变化规律,以期为企业红烧肉产品杀菌方式的选择提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

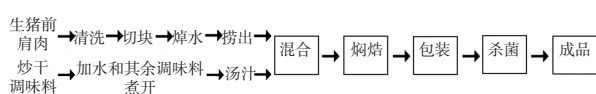
新鲜猪前尖肉、葱、姜、蒜、花椒、大料、桂皮、干辣椒、香叶 购于北京新发地农贸市场;食盐、鸡精、白砂糖、色拉油、老抽酱油、东古一品鲜、料酒、

番茄酱、红曲红 购于当地超市;炸酱、糖色 自制;甲醇、乙腈、异丙醇、甲酸铵 均为色谱纯,赛默飞世尔科技公司。

DHG-9053A 电热鼓风干燥箱 上海精宏实验设备有限公司;TAXT Plus 质构仪 英国 Stable Micro System 公司;Color Quest XE 色差仪 美国 HunterLab 公司;Agilent 7890B/5977A 气相色谱质谱联用仪 美国安捷伦科技有限公司;Sciex Triple TOF6600 离子型淌度超高分辨飞行时间质谱仪 美国 AB Sciex 公司;HPP-30L 超高压设备 北京速原中天。

1.2 实验方法

1.2.1 样品制备



将 500 g 猪前肩肉自然解冻,去除淋巴、碎骨、伤肉、淤血、毛和其它杂质后,洗净、切成 1 cm×1.5 cm×3 cm 的带皮长方体并在 100 ℃ 沸水中焯水 8 min;将 7 g 葱、6 g 姜、4 g 蒜洗净后切碎放置到纱布中包裹,制得调料包备用;0.7 g 花椒、1 g 大料、1 g 干辣椒(即干调味料)洗净后在锅中炒制 20 min 后盛出,将炒制后的干调味料、调料包和洗净后的 1 g 桂皮、0.3 g 香叶放入水中煮制,滤出调料取汤汁备用;将焯水后的猪肉块加入煮好的汤汁中,加入鸡精 3 g、色拉油 10 g、酱油 7 g、料酒 10 g、番茄酱 5 g、炸酱 9 g、红曲红 0.15 g、糖色 10 g,在 90 ℃ 下焖焗 35 min,最后加入食盐 6 g、白砂糖 6 g,得到红烧肉产品并真空包装后,分别进行巴氏杀菌(80 ℃、10 min)、UHP 杀菌(600 MPa、5 min)得到成品,以未杀菌组作为对照组。

1.2.2 脂质组学测定 样品预处理:参考 Sarafian 等^[17]的方法。称取 300 mg 搅碎的红烧肉末于 4 mL 离心管中,加入 2.7 mL 异丙醇,涡旋混合 10 s 后超声处理 10 min。将混合物在 -20 ℃ 下放置 1 h 以上备用。将样品在室温下涡旋混匀后在 4 ℃ 下以 10000 r/min 离心 10 min。上清液过 0.22 μm 聚偏二氟乙烯膜后准备质谱分析。

色谱条件:色谱柱:CSH C₁₈ 柱(50 mm×2.1 mm, 1.7 μm);柱温:55 ℃;流动相 A:含有 0.1% 甲酸和 10 mmol/L 甲酸铵的乙腈/水(60/40, v/v)溶液;流动相 B:含有 0.1% 甲酸和 10 mmol/L 甲酸铵的异丙醇/乙腈(90/10, v/v)溶液;流速:300 μL/min。梯度洗脱程序:0~3 min, 98% A;3~5 min, 90% A;5~6 min, 50% A;6~9 min, 40% A;9~11 min, 30% A;11~15 min, 98% A;进样量 2 μL。

质谱条件:正离子模式检测;扫描范围 m/z 50~2000 Da;去簇电压:80.0 V;离子源温度:550 ℃;雾化气:50 psi;辅助加热气:50 psi;气帘气:25 psi;喷雾电压:5500 V;扫描持续时间:15 min,周期:818,循环时间:1.1003 s;其中,一级质谱和二级质谱碰撞能

量分别为 10 和 30 eV,积累时间分别为 0.049982 和 0.100030 s/spectra。

每个样品各取 2 个重复,作为 2 个平行进行各项指标的测定。

1.2.3 挥发性成分测定 红烧肉挥发性成分测定参考王瑞澄等^[18]的方法并略做修改。

固相微萃取:取杀菌后红烧肉样品于 -20 ℃ 冷冻,用打浆机搅碎混匀后在液氮下速冻后,研磨成粉末。称取 8 g 样品转移至 40 mL 的顶空瓶中,并加入 1 μL 0.816 mg/mL 的 2-甲基-3-庚酮作为内标物。在 60 ℃ 水浴条件下将老化的 DVB/CAR/PDMS 50/30 μm 萃取头插入样品瓶中,顶空吸附 40 min。吸附后的萃取头取出并插入 GC 进样口,于 250 ℃ 解吸 5 min,同时进行 GC-MS 联机分析。

色谱条件:DB-WAX 毛细管色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm);进样口温度 250 ℃,分流比 3:1;载气为 He,流速 1.2 mL/min;升温程序:柱温 40 ℃,保持 3 min,以 5 ℃/min 升至 200 ℃,保持 1 min,然后以 10 ℃/min 升至 230 ℃,保持 3 min。

质谱条件:电子电离源;电子能量 70 eV;离子源温度 230 ℃;接口温度 280 ℃;四极杆温度为 150 ℃;质量扫描范围 m/z 45~350。

定性方法:挥发性成分的定性分析通过不同成分在 DB-WAX 色谱柱上的线性保留指数(Linear Retention Index, LRI)并结合 NIST14 谱库检索进行。LRI 可通过配置正构系列烷烃混合标样(C₆-C₃₀)得到保留时间并根据下式进行计算^[19]。

$$LRI = 100N + 100 \frac{t_{R_s} - t_{R_N}}{t_{R(N+n)} - t_{R_N}} \quad \text{式 (1)}$$

式中: N 为色谱图中位于目标物质左侧正构烷烃的碳原子数; n 为位于目标物质两侧的正构烷烃的碳分子数之差; t_{R_s}、t_{R_N}、t_R 分别是色谱图中待测物质、待测物质左侧和右侧正构烷烃的保留时间, min。

定量方法:用 1 μL 的 0.816 μg/μL 的 2-甲基-3-庚酮为内标。对气相色谱-质谱所测得的香气物质浓度进行数据处理,假设其相对内标校正因子为 1,根据下式进行计算:

$$m_s = \frac{m_i \times A_s}{A_i \times m_0 \times 1000} \quad \text{式 (2)}$$

式中: m_s 为挥发性物质含量, μg/kg; m_i 为内标物含量, μg; m₀ 为实验所用肉的质量, g; A_s 为挥发性物质峰面积; A_i 内标物峰面积。

每个样品各取 3 个重复,作为 3 个平行进行各项指标的测定。

1.3 数据处理

利用 MS-DIAL 中自带质谱数据包对 UPLC-Q-TOF-MS 得到的原始数据进行特征峰的提取和处理,并利用 SIMCA-P 14.1 软件进行多元统计分析(PCA、PLS-DA);利用 Origin 2019 绘制聚类热图;利用 SPSS 22.0 进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 基于 UPLC-Q-TOF-MS 的脂质组学分析

2.1.1 不同杀菌方式红烧肉脂质成分的分布分析

本研究采用非靶向脂质组学方法对 3 种杀菌方法处理后的红烧肉进行了脂质组学分析。3 种处理方式中, 累计鉴定出包括甘油三酯(Triglyceride, TG)、磷脂酰胆碱(Phosphatidylchlines, PC)、磷脂酰乙醇胺(Phosphatidylethanolamines, PE)、甘油二酯(Diglyceride, DG)等在内的 251 种脂质化合物。

因红烧肉的脂质成分复杂、难以分析, 而多元统计分析手段能够在多个对象和多个指标互相关联的情况下分析目标样品的统计规律, 因此被广泛运用于组学分析领域。其中 PCA 作为常见的统计学分析手段, 是将原始的多维变量按一定权重组合产生新的主成分, PCA 图可体现样本之间的离散和聚集趋势^[20-21]。本研究基于不同杀菌方式红烧肉的脂质成分的相对含量建立了相应的 PCA 模型, 如图 1 所示, 在 PCA 模型上, 虽所有的样品都在 95% 的置信区间内, 但 $R^2X=0.777$, $Q^2=0.336$, 依据脂质的组成, 对照组、巴氏杀菌组和 UHP 杀菌组红烧肉样品无法较好地进行区分。

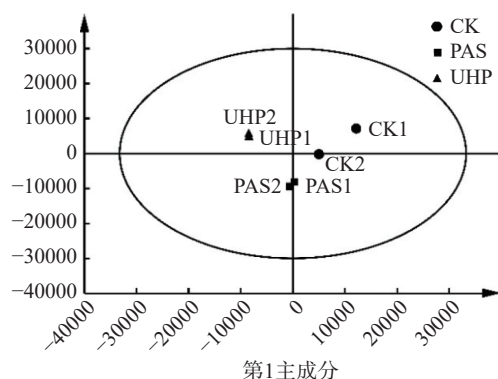


图 1 不同杀菌方式红烧肉脂质成分 PCA 得分图

Fig.1 PCA score plot of lipid components in braised pork in different sterilization methods

注: CK: 对照组; PAS: 巴氏杀菌组; UHP: 超高压杀菌组; 图 2, 图 4 同。

因 PCA 采用无监督的降维分析方法, 存在与研究目的无关的组内误差以及随机误差, 不利于分组信息的准确性。为了准确地确定各组样品的差异, 进一步采用有监督模式识别的 PLS-DA。PLS-DA 通过对不同处理样本(如观测样本、对照样本)的特性分别进行训练以产生训练集, 并检验训练集的可信度, 由于其降维能力和处理多重共线性和相关变量的能力, 且能忽略组内误差、消除与研究目的无关的随机误差, 是代谢组数据分类和回归的经典工具^[22-24]。

根据红烧肉样品的 251 种脂质成分组成和相对含量, 对 3 种处理方式的红烧肉样品进行 PLS-DA 分析, 建立各个处理方式红烧肉的判别分析模型。由图 2 所知, 样品均在 95% 的置信区间内, 各样表现出

明显的聚类趋势, 未发现离群样本点, 说明建立的 PLS-DA 模型可对不同杀菌方式的红烧肉进行分类, 其中对照组和 UHP 杀菌组在第 1 主成分上进行分离, 对照组和巴氏杀菌组主要通过第 2 主成分进行有效区分, 巴氏杀菌组和 UHP 杀菌组在第 1 主成分和第 2 主成分上均可以进行区分。结果表明, 本研究建立的 PLS-DA 模型有良好的拟合参数, $R^2X=0.769$, R^2X 越接近 1, 模型越稳定^[25], $R^2Y(\text{cum})=0.963$, 该模型能够解释 96.3% 的原始数据; $Q^2(\text{cum})=0.845$, Q^2 大于 0.5, 说明模型的预测能力强。

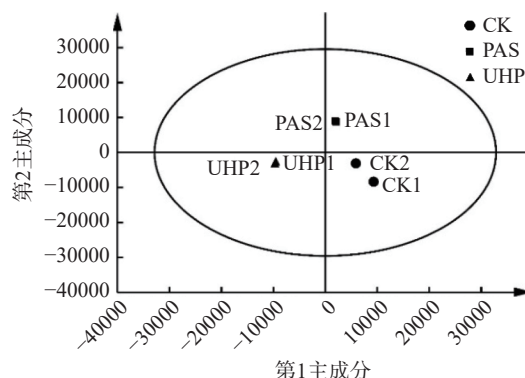


图 2 不同杀菌方式红烧肉脂质成分 PLS-DA 得分图

Fig.2 PLS-DA score plot of lipid components in braised pork in different sterilization methods

由于当变量数量大于样品数量时, 使用有监督判别方法进行分析时易产生过拟合现象, 因此需要使用置换检验方法考察 PLS-DA 在无差异情况下的建模效果^[24]。如图 3 所示, 经过 200 次交叉验证之后, 3 个模型中 Q^2 回归直线在 Y 轴的截距均小于 0, 表明该 PLS-DA 判别模型不存在过拟合现象, 模型较为可靠, 可进行后续差异性成分分析。

2.1.2 不同杀菌方式红烧肉脂质成分的差异分析

变量重要性预测(variable importance in the projection, VIP)值可以量化 PLS-DA 模型的每个变量对分类的贡献, VIP 值越大, 该脂质成分的含量在不同杀菌方式的红烧肉样品之间的差异越大, 对分类起着越关键的作用, 通常认为 VIP 值大于 1 的变量在不同类别之间差异显著, 对分类起着重要作用, 同时结合 t 检验的 P 值($P<0.05$)比较分析不同组样品中的具体差异性表达化合物^[25-26]。寻找差异化合物并鉴定结果如表 1 所示, 不同杀菌方式的红烧肉中显著差异化合物有 24 个, 包括 15 种 TG、4 种 PC、3 种 PE、1 种溶血磷脂酰胆碱(lyso-PC, LPC)以及 1 种 N-酰基乙醇胺(N-acylethanolamine, NAE)。

采用次聚类分析法对杀菌方式的红烧肉中的差异化合物进行分析, 结果见图 4。图中颜色表示含量, 红色表示相对含量较高, 绿色表示相对含量较低, 通过对鉴定的化合物进行 HCA 后, 从图中可以看出不同杀菌方式的红烧肉中脂质化合物的含量具有显著差别, 可以根据脂质种类区分每组杀菌方式。

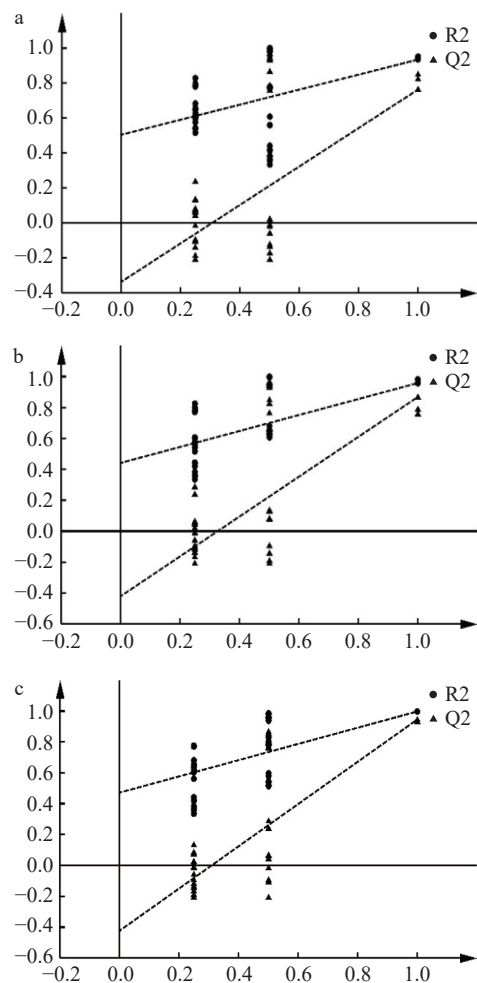


图3 不同杀菌方式红烧肉脂质成分 PLS-DA 模型置换验证图

Fig.3 PLS-DA model replacement validation plots of lipid components in braised pork in different sterilization methods

注: a: 对照组; b: 巴氏杀菌组; c: 超高压杀菌组。

经过巴氏杀菌以及 UHP 处理后, 红烧肉中的 TG 种类发生较大改变, TG 中序号 1~4、6~8 类在巴

表 1 PLS-DA 模型中 VIP 值大于 1、*P* 值小于 0.05 的 24 种脂质化合物

Table 1 The 24 lipid components with VIP>1, *P*<0.05 in PLS-DA model

序号	化合物	VIP
1	TG 46:2;TG (10:0/18:1/18:1)	1.50
2	TG 46:1;TG (14:0/14:0/18:1)	1.09
3	TG 56:2;TG (16:0/20:1/20:1)	2.02
4	TG 54:2;TG (16:0/18:1/20:1)	3.35
5	PC (O-36:3)	1.03
6	TG 56:7;TG (18:1/18:1/20:5)	1.11
7	TG 56:5;TG (18:1/18:1/20:3)	1.15
8	TG 50:2;TG (16:0/16:1/18:1)	2.84
9	PC 35:4;PC (18:0/17:4)	1.40
10	TG 54:5;TG (18:1/18:2/18:2)	3.38
11	PE (P-38:5);PE (P-18:1/20:4)	1.10
12	PC 36:3	1.75
13	PC 36:3;PC (18:1/18:2)	2.45
14	TG 48:2;TG (16:0/16:1/16:1)	1.76
15	TG 54:6;TG (18:2/18:2/18:2)	3.76
16	TG 54:8;TG (18:2/18:3/18:3)	1.36
17	TG 56:2;TG (20:0/18:1/18:1)	2.11
18	PE (O-40:9)	1.26
19	TG (52:3;10);TG (16:0/18:1/18:2;10)	1.02
20	TG 54:1;TG (18:0/18:0/18:1)	2.77
21	TG 52:5;TG (16:0/18:2/18:3)	1.35
22	PE (O-38:8)	1.36
23	LPC 18:2	1.16
24	NAE 4:0	1.07

氏杀菌中含量增加, 7、8、10、14 类在 UHP 处理组含量增加, 而其原有的 TG 种类含量降低; 除 PE(O-40:9)、PE(O-38:8)、LPC 18:2 外, 其余磷脂均有不同程度的增加, 且 UHP 处理后磷脂相对含量总体高于巴氏杀菌, 这可能与磷脂的长链多不饱和脂肪酸含量

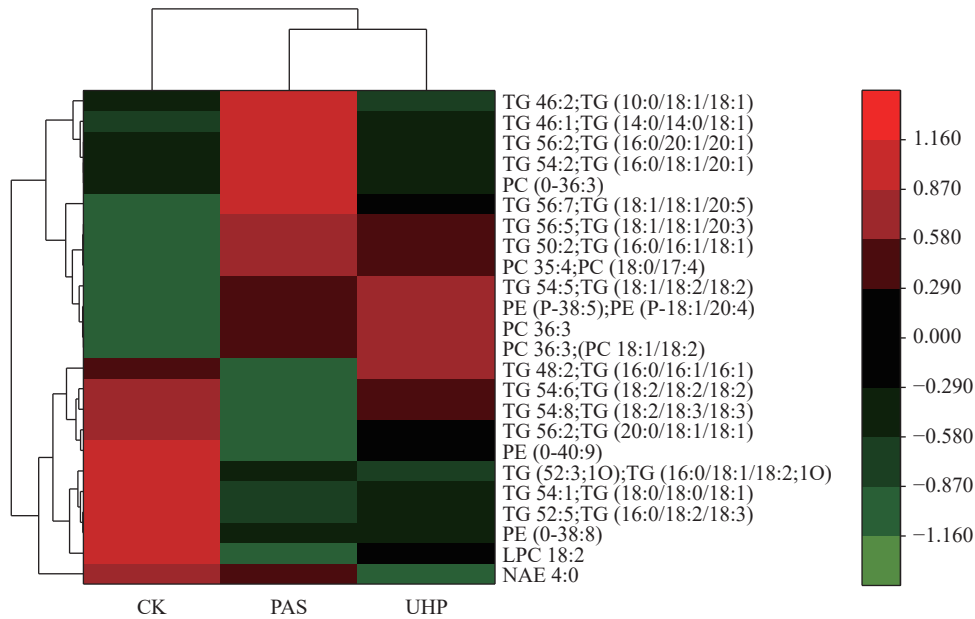


图 4 24 种关键差异脂质成分在不同杀菌方式红烧肉中的含量分布热图

Fig.4 Heat map of 24 key lipid components among braised pork in different sterilization methods

高,巴氏杀菌温度高使得磷脂容易降解有关^[27]。研究表明,在加热过程中红烧肉脂肪组织中结缔组织受热收缩,致使其包裹的脂肪细胞受到较大的压力后破碎,另一方面,脂肪受热后熔化分解,产生脂肪酸、风味物质等,也会使脂肪含量发生变化^[28],而在压力处理的过程中,红烧肉中的肌红蛋白会转变为变性的铁肌红蛋白,同时释放三价铁离子,促进脂肪氧化^[29],另一方面,超高压作用导致肌原纤维蛋白与游离脂肪酸之间静电力、范德华力、疏水力等相互作用的改变而引起了游离脂肪酸的释放^[30],进一步造成了两种杀菌方式下红烧肉脂质的变化。

2.2 基于 SPME-GC-MS 的挥发性成分分析

肉制品中挥发性成分的种类及相对含量是评价肉制品杀菌方式好坏的重要指标^[31]。利用 SPME-GC-MS 方法对 3 种不同处理方式红烧肉进行挥发性化合物检测及定性定量分析。如表 2 所示,共鉴定出 31 种挥发性风味成分,包括 4 种醇、4 种酸、4 种脂、7 种烃、2 种酮、9 种醛和 1 种呋喃。

醇类物质主要来源于脂肪氧化和 Strecker 降解反应,饱和脂肪醇的阈值较高,对整体风味贡献相对较小,而不饱和醇的阈值较低,对风味有一定贡献^[32]。肉桂醇为含有油脂香气的不饱和醇^[33],与对

表 2 不同杀菌方式对红烧肉挥发性成分的影响

Table 2 Effect of different pasteurization methods on volatile components of stewed pork

序号	化合物	线性保留指数		含量(μg/kg)			定性方法
		计算值	引用值	对照	巴氏杀菌	超高压杀菌	
醇类							
1	正戊醇	762	759	1.95±0.12 ^b	1.32±0.04 ^c	2.43±0.13 ^a	MS/RI
2	正辛醇	1053	1061	1.76±0.10 ^b	1.65±0.08 ^c	2.75±0.15 ^a	MS/RI
3	3-苄醇(+)	1257	1259	1.87±0.09 ^a	1.27±0.05 ^b	1.86±0.10 ^a	MS/RI
4	肉桂醇	NA	NA	1.13±0.03 ^a	0.93±0.02 ^b	1.12±0.03 ^a	MS
酸类							
5	己酸	973	982	1.38±0.07 ^a	1.43±0.06 ^a	0.92±0.03 ^b	MS/RI
6	辛酸	1168	1161	2.14±0.14 ^a	1.42±0.07 ^b	0.43±0.02 ^c	MS/RI
7	壬酸	1274	1280	1.59±0.09 ^b	2.27±0.15 ^a	1.32±0.08 ^c	MS/RI
8	正癸酸	1361	1353	1.42±0.08 ^a	0.76±0.04 ^b	1.41±0.07 ^a	MS/RI
酯类							
9	正己酸乙酯	NA	NA	1.42±0.06 ^b	1.92±0.10 ^a	1.39±0.07 ^b	MS
10	2-糠酸甲酯	NA	NA	1.15±0.05 ^b	1.25±0.04 ^a	1.12±0.06 ^b	MS
11	苯甲酸乙基酯	NA	NA	0.98±0.04 ^b	1.28±0.04 ^a	0.99±0.03 ^b	MS
12	辛酸乙酯	1324	1315	0.93±0.04 ^a	0.97±0.04 ^a	0.93±0.03 ^a	MS
烃类							
13	正二十一烷	2357	2341	14.32±0.34 ^a	12.37±0.33 ^b	14.35±0.46 ^a	MS/RI
14	正十八烷	1785	1791	2.47±0.03 ^b	3.24±0.05 ^a	2.45±0.02 ^b	MS/RI
15	反式-1,2-甲基环戊烷	NA	NA	0.43±0.02 ^a	0.24±0.01 ^b	0.46±0.01 ^a	MS
16	正十九烷	1964	1957	4.18±0.05 ^b	5.32±0.06 ^a	4.20±0.04 ^b	MS/RI
17	十二烷	1202	1211	0.42±0.02 ^b	0.51±0.03 ^a	0.41±0.02 ^b	MS/RI
18	柠檬烯	1194	1205	0.43±0.02 ^b	0.63±0.02 ^a	0.24±0.01 ^c	MS/RI
19	月桂烯	1153	1143	20.35±0.43 ^a	19.27±0.41 ^b	18.43±0.36 ^c	MS/RI
酮类							
20	3-羟基-2-丁酮	618	622	3.44±0.03 ^a	2.92±0.02 ^b	3.37±0.02 ^a	MS/RI
21	2,3-辛二酮	991	995	0.71±0.01 ^a	0.43±0.01 ^b	0.69±0.01 ^a	MS/RI
醛类							
22	正己醛	851	858	5.52±0.05 ^a	5.32±0.04 ^a	3.46±0.03 ^b	MS/RI
23	正辛醛	1061	1058	0.74±0.01 ^a	0.71±0.01 ^a	0.72±0.01 ^a	MS/RI
24	壬醛	1152	1154	2.53±0.02 ^a	2.43±0.03 ^b	2.55±0.02 ^a	MS/RI
25	苯甲醛	942	938	0.65±0.02 ^a	0.92±0.01 ^b	0.67±0.01 ^a	MS/RI
26	反式-2-癸烯醛	1206	1213	3.39±0.03 ^c	3.87±0.02 ^a	3.61±0.02 ^b	MS/RI
27	柠檬醛	1423	1432	3.45±0.04 ^a	3.34±0.04 ^b	3.42±0.03 ^a	MS/RI
28	十三醛	1556	1562	0.82±0.02 ^b	0.89±0.02 ^a	0.80±0.01 ^b	MS/RI
29	反式肉桂醛	NA	NA	5.28±0.04 ^b	5.42±0.02 ^a	5.31±0.03 ^b	MS
30	糠醛	NA	NA	2.45±0.02 ^b	2.74±0.03 ^a	2.51±0.02 ^b	MS
呋喃							
31	2-正戊基呋喃	NA	NA	4.31±0.04 ^a	5.21±0.04 ^a	4.35±0.03 ^a	MS

注:上标不同字母标注表明同一行中数据差异显著($P<0.05$);NA表示未查到线性保留指数。

对照组相比,巴氏杀菌样品中不饱和醇肉桂醇的含量显著降低($P<0.05$),而 UHP 样品中未发生显著变化($P>0.05$)。

酯类物质常具有水果和清甜香气,主要来源于加热过程中猪肉脂质氧化产生的醇与游离脂肪酸的相互作用,为肉带来特征香气^[8,34],但由表 2 可知,酯类在红烧肉中种类较少且相对含量低,且因酯类物质的阈值较高,对风味的影响较小^[35],因此对红烧肉风味贡献不突出。

烃类物质在各组样品中均具有较高的含量,它主要来源于脂肪酸烷氧自由基的均裂,在检测到的 7 种烃类物质中,饱和烃类占 5 种,且 3 组样品之间差异不大。由于烃类物质具有较高的阈值,一般认为对红烧肉香气无特殊贡献,但有些可能是形成杂环化合物的重要中间体,有助于提高红烧肉的整体风味质量^[36-37]。巴氏杀菌组的烷烃化合物与其他组存在较大差异,但超高压杀菌组和未杀菌组物质含量差异不大,揭示饱和烃类物质可能受温度影响较大,而三组之间烯烃化合物相对差异较小,表明烯烃化合物受温度影响较小^[34]。

在红烧肉氧化降解生成的物质中,醛类是最丰富的挥发性化合物,三种样品中共检测出 9 类化合物,醛的阈值一般很低,具有脂肪香味,是肉品香味的主要构成部分^[36]。由表 2 可知,3 组样品未杀菌组-巴氏杀菌组-超高压杀菌组醛类物质含量比为 1:1.03:0.93,可以看出巴氏杀菌组醛类物质的含量高于其他 2 组,而超高压杀菌组含量最低,这是由于醛类物质主要来源于脂肪酸的受热降解、氧化。含量较多的几种物质中,正己醛是亚油酸的氧化产物,浓度较低时,具有清香和草香味,浓度较高时,具有酸败味和辛辣味^[38-39],壬醛具有玫瑰、柑橘等香气,有强的油脂气味,存在于肉桂油中,能够使肉香更浓郁^[40]。反式肉桂醛大量存在于肉桂等植物体内,具有肉桂芳香气味,不饱和醛大多具有愉快的香气且阈值较低,如反式-2-癸烯醛,此物质具有脂肪香味且带有猪肉香韵^[41-42],糠醛具有焙烤香、苦杏仁气味,呈黄棕色,可能对红烧肉鲜艳的色泽有贡献^[8,33]。

酮类化合物主要来自于脂肪或醇类的氧化降解作用和美拉德反应,因其阈值远高于醛类,一般认为对风味影响不大,主要对其他风味物质起辅助作用,使肉类产品香味更加饱满,有层次感^[40]。3-羟基-2-丁酮具有甜香、奶制品香,并带有脂肪的油腻气息,2,3-辛二酮稀释有油脂香味^[43],与对照组相比,巴氏杀菌后红烧肉中两种酮的相对含量均明显降低($P<0.05$),而 UHP 后无明显影响,UHP 能更好地维持红烧肉的原有香气。

呋喃物质主要来源于美拉德反应以及氨基酸、硫胺素的热降解反应,虽含量较少,但阈值较低,对风味具有较大影响^[37]。2-正戊基呋喃具有豆香、果香、青香及类似蔬菜的香韵^[40];巴氏杀菌后,产品中呋喃

物质略有升高。

酸类化合物主要来自脂肪的水解以及脂肪氧化过程中产生的小分子脂肪酸,对整体的风味起到协调、平衡的作用^[8]。本实验中共检测到 4 种酸类化合物,其中壬酸具有一定的脂肪香,己酸具有一定的腐臭味,辛酸具有一定的汗味,正癸酸具有一定的酸腐味和脂肪味^[44-45],与对照组相比,巴氏杀菌在增强了红烧肉原有的香味的同时,也增加了霉臭味等不良风味,而超高压杀菌可以减弱红烧肉的脂肪臭味和酸腐味,更好地保持和突出红烧肉的特征香气物质。

3 结论

本研究通过 UPLC-Q-TOF-MS 结合非靶向代谢组学技术对不同杀菌方式下的红烧肉的脂质成分进行测定并最终筛选出 24 种关键性脂质物质且主要差异物质为 TG,且该技术可有效区分不同杀菌方式处理的红烧肉。根据脂质化合物的相对含量,显示 UHP 杀菌组更接近于对照组。采用 SPEM-GC-MS 技术,对不同杀菌方式处理的红烧肉挥发性成分进行检测并鉴定出包括 4 种醇、4 种酸、4 种脂、7 种烃、2 种酮、9 种醛和 1 种呋喃物质在内的 31 种化合物,且不同杀菌方式处理的红烧肉中挥发性成分含量差异较明显。综合看来,不同杀菌方式均会对脂质化合物和风味物质产生一定的影响,但从脂质成分和挥发性成分方面来看,UHP 较巴氏杀菌对产品的影响较小。

参考文献

- [1] 刘登勇,谭阳,董丽. 红烧肉的传承、挖掘与提升[J]. 食品研究与开发,2015,36(13): 134-138. [LIU D Y, TAN Y, DONG L. The inheritance, exploration and advance of stewed pork with brown sauce[J]. Food Research and Development, 2015, 36(13): 134-138.]
- [2] 白艳红,李全顺,毛多斌,等. 电子束辐照对冷却猪肉杀菌保鲜效果的研究[J]. 辐射研究与辐射工艺学报,2009,27(2): 89-94. [BAI Y H, LI Q S, MAO D B, et al. The effects of electron beam irradiation on sterilization and preservation of chilled pork[J]. J Radiat Res Radiat Process, 2009, 27(2): 89-94.]
- [3] 李成梁,靳国锋,马素敏,等. 辐照对肉品品质影响及控制研究进展[J]. 食品科学,2016,37(21): 271-278. [LI C L, JIN G F, MA S M, et al. Progress in understanding and controlling the detrimental effects of irradiation treatment on meat quality[J]. Food Science, 2016, 37(21): 271-278.]
- [4] 张祎敬,秦丽娟,宋贤良,等. 微波杀菌对盐鸡翅根杀菌效果及品质影响[J]. 食品工业科技,2016,37(20): 245-248. [ZHANG Y J, QIN L Y, SONG X L, et al. Effects of microwave sterilization on sterilization effect and quality of salt-baked chicken wings[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(20): 245-248.]
- [5] 赵俊芳,赵玉生. 初探食品工业中的超高压灭菌技术[J]. 包装与食品机械,2006(5): 27-30. [ZHAO J F, ZHAO Y S. Discussion on the ultra-high pressure sterilization technology in food industry[J]. Packaging and Food Machinery, 2006(5): 27-30.]

- [6] B B BOYNTON, CA SIMS, STEVEN SARGENT, et al. Quality and stability of pre-cut mangos and carambolas subjected to high-pressure processing[J]. *Journal of Food Science*, 2002, 67(1): 405–415.
- [7] 纪有华, 王荣兰. 红烧肉风味形成途径探讨[J]. *扬州大学烹饪学报*, 2006(2): 19–23. [JI Y H, WANG R L. Discussion on the ways of flavour development in stewed pork with brown sauce[J]. *Culinary Science Journal of Yangzhou University*, 2006(2): 19–23.]
- [8] 史笑娜, 黄峰, 张良, 等. 红烧肉加工过程中脂肪降解、氧化和挥发性风味物质的变化研究[J]. *现代食品科技*, 2017, 33(3): 257–265. [SHI X N, HUANG F, ZHANG L, et al. Changes in lipolysis, lipid oxidation, and volatile flavor compounds during the processing of red braised pork[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2017, 33(3): 257–265.]
- [9] XIANLIN H, W G R. Global analyses of cellular lipidomes directly from crude extracts of biological samples by ESI mass spectrometry: A bridge to lipidomics[J]. *Journal of Lipid Research*, 2003, 44(6): 1071–1079.
- [10] 缪秋韵, 高雯, 李杰, 等. 脂质组学分析方法进展及其在中药研究中的应用[J]. *中国中药杂志*, 2019, 44(9): 1760–1766. [MIAO Q Y, GAO W, LI J, et al. Progress on lipidomics analytical methods and their applications in studies of traditional Chinese medicines[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2019, 44(9): 1760–1766.]
- [11] 徐春晖, 王远兴. 基于 UPLC-QTOF-MS 结合非靶向代谢组学鉴别三种江西名茶[J]. *食品科学*, 2022, 43(02): 316–323. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20210105-042. [XU C H, WANG Y X. Discrimination of three famous tea in Jiangxi based on UPLC-QTOF-MS combined with non-targeted metabolomics[J]. *Food Science*, 2022, 43(02): 316–323. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20210105-042.]
- [12] 张杨, 冯宝民, 卢轩. UPLC/Q-TOF-MS 联用技术在药物分析中的应用进展[J]. *天然产物研究与开发*, 2017, 29(11): 1992–1996. [ZHANG Y, FENG B M, LU X. Research progress on application of UPLC/Q-TOF-MS in pharmaceutical analysis[J]. *Natural Product Research and Development*, 2017, 29(11): 1992–1996.]
- [13] 何余勤, 胡荣锁, 张海德, 等. 基于电子鼻技术检测不同焙烤程度咖啡的特征性香气[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(18): 247–255. [HE Y Q, HU R S, ZHANG H D, et al. Characteristic aroma detection of coffee at different roasting degree based on electronic nose[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(18): 247–255.]
- [14] 王学敬, 李聪, 王玉峰, 等. SPME-GC-MS 法分析德州扒鸡挥发性风味成分的条件优化及成分分析[J]. *南京农业大学学报*, 2016, 39(3): 495–501. [WANG X J, LI C, WANG Y F, et al. Condition optimization and analysis of volatile flavour compounds in Dezhou braised chicken by SPME-GC-MS[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2016, 39(3): 495–501.]
- [15] 肖虹, 谢晶. SPME-GC-MS 法测定冷却肉的挥发性成分[J]. *食品科学*, 2010, 31(20): 406–409. [XIAO H, XIE J. Determination of volatile components of chilled pork based on SPME-GC-MS[J]. *Food Science*, 2010, 31(20): 406–409.]
- [16] 孟一, 张玉华, 姜沛宏, 等. 不同新鲜度牛肉特征性挥发成分的研究[J]. *现代食品科技*, 2017, 33(4): 271–277. [MENG Y, ZHANG Y H, JIANG P H, et al. Study of the characteristic volatile components in beef at different degrees of freshness[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2017, 33(4): 271–277.]
- [17] SARAFIAN M H, GAUDIN M, LEWIS M R, et al. Objective set of criteria for optimization of sample preparation procedures for ultra-high throughput untargeted blood plasma lipid profiling by ultra performance liquid chromatography-mass spectrometry[J]. *Analytical Chemistry*, 2014, 86(12): 5766–5774.
- [18] 王瑞澄, 周芳伊, 黄峰, 等. 毛氏红烧肉挥发性风味物质分析方法的建立[J]. *食品科技*, 2019, 44(4): 308–313. [WANG R C, ZHOU F Y, HUANG F. Establishment of analysis method for volatile flavor compounds in Mao red braised pork[J]. *Food Science and Technology*, 2019, 44(4): 308–313.]
- [19] ZHAO C, LIANG Y, FANG H, et al. Temperature-programmed retention indices for gas chromatography-mass spectroscopy analysis of plant essential oils[J]. *Journal of Chromatography A*, 2005, 1096(1): 76–85.
- [20] 胡谦, 张九凯, 韩建勋, 等. 基于 UPLC-QTOF-MS 技术的压榨和浸出油茶籽油甘油酯组成比较分析[J]. *食品科学*, 2021, 42(2): 235–240. [HU Q, ZHANG J K, HAN J X, et al. Comparative analysis of the glyceride compositions of pressed and extracted camellia seed oil using ultra-high performance liquid chromatography coupled with quadrupole time-of-flight mass spectrometry[J]. *Food Science*, 2021, 42(2): 235–240.]
- [21] 李鑫磊, 俞晓敏, 林军, 等. 基于非靶向代谢组学的白茶与绿茶、乌龙茶和红茶代谢产物特征比较[J]. *食品科学*, 2020, 41(12): 197–203. [LI X L, YU X M, LIN J, et al. Comparative metabolite characteristics of white tea with green tea, oolong tea and black tea based on non-targeted metabolomics approach[J]. *Food Science*, 2020, 41(12): 197–203.]
- [22] CHUEN L L, AZIZ J A. Predictive modelling of colossal ATR-FTIR spectral data using PLS-DA: Empirical differences between PLS1-DA and PLS2-DA algorithms[J]. *The Analyst*, 2019, 144(8).
- [23] 石婷, 陈倩, 闫小丽, 等. 核磁共振氢谱结合化学计量学快速检测掺假茶油[J]. *食品科学*, 2018, 39(22): 241–248. [SHI T, CHEN Q, YAN X L, et al. ¹H NMR spectroscopy combined with chemometrics for the rapid detection of adulterated camellia oil (*Camellia oleifera* Abel.)[J]. *Food Science*, 2018, 39(22): 241–248.]
- [24] SUYOUNG KANG, 朱荫, 郑新强, 等. 不同季节绿茶香气成分的判别与聚类分析[J]. *食品科学*, 2018, 39(14): 268–275. [SUYOUNG K, ZHU Y, ZHENG X Q, et al. Multivariate statistical analysis of volatiles compounds in green teas from different harvesting seasons[J]. *Food Science*, 2018, 39(14): 268–275.]
- [25] 田甜, 韦锦坚, 文金华, 等. 不同季节凌云白毫绿茶的香气成分差异分析[J]. *食品科学*, 2020, 41(22): 252–259. [TIAN T, WEI J J, WEN J H, et al. Seasonal variability of aroma components of lingyun pekoe green tea[J]. *Food Science*, 2020, 41(22): 252–259.]

- [26] WOLD S, SJÖSTRÖM M, ERIKSSON L. PLS-regression: A basic tool of chemometrics[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2001, 58(2): 109–130.
- [27] 许雪萍. 不同加工方式处理对猪肉中脂质的影响研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2018. [XU X P. Effect of different processing methods on lipid in pork[D]. Nanchang: Nanchang University, 2018.]
- [28] 刘登勇, 谭阳, 盖圣美, 等. 猪五花肉红烧过程中脂肪和脂肪酸的变化规律[J]. *食品科学*, 2015, 36(23): 28–32. [LIU D Y, TAN Y, GAI S M, et al. Changes in fatty acid composition and fat content during processing of braised pork belly in brown sauce[J]. *Food Science*, 2015, 36(23): 28–32.]
- [29] 董士楷, 张志祥, 尚海涛, 等. 腌制类食品的超高压处理研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(10): 14–16, 20. [DONF S K, ZHANG Z X, SHANG H T, et al. Review of the research on the ultra-high pressure treatment of pickled food[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46(10): 14–16, 20.]
- [30] 崔燕, 林旭东, 康孟利, 等. 超高压技术在水产品贮藏与加工中的应用研究进展[J]. *食品科学*, 2016, 37(21): 291–299. [CUI Y, LIN X D, KANG M L, et al. Advances in application of ultra high pressure for preservation and processing of aquatic products[J]. *Food Science*, 2016, 37(21): 291–299.]
- [31] 黄易安, 徐耀. 不同杀菌方式对酱肉肉制品中风味成分的影响[J]. *中国调味品*, 2019, 44(4): 89–92, 112. [HUANG Y A, XU Y. Effects of different sterilization ways on flavor components in marinated meat products[J]. *China Condiment*, 2019, 44(4): 89–92, 112.]
- [32] 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.]
- [33] 范丽, 徐晓东, 宋泽, 等. 自制调味汁烹饪红烧肉中关键香气活性化合物的分析研究[J]. *现代食品科技*, 2017, 33(7): 245–253, 230. [FAN L, XU X D, SONG Z, et al. Analysis of the key aroma-active compounds in braised pork[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2017, 33(7): 245–253, 230.]
- [34] 张哲奇, 臧明伍, 张凯华, 等. 关键工艺对粉蒸肉挥发性特征风味形成的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(4): 222–228. [ZHANG Z Q, ZANG M W, ZHANG K H, et al. Effect of key processing steps on formation of volatile flavor components in steamed pork with rice[J]. *Food Science*, 2019, 40(4): 222–228.]
- [35] 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. [ZHU 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.]
- [36] 范婷婷, 郑福平, 张逸君, 等. 不同蒸制时间条件下鸡胸肉挥发性成分比较[J]. *食品科学*, 2014, 35(22): 115–120. [FAN T T, ZHENG F P, ZAHNG Y J, et al. Comparison of volatile components in chicken breast steamed for different periods[J]. *Food Science*, 2014, 35(22): 115–120.]
- [37] 张薇, 程晓燕, 黄卫宁, 等. 含天然酵母粉发酵面包的营养与老化特性及风味化合物特征[J]. *食品科学*, 2014, 35(23): 33–38. [ZHANG W, CHENG X Y, HUANG W N, et al. Nutritional properties, staling characteristics and volatile flavor compounds of natural yeast sourdough bread[J]. *Food Science*, 2014, 35(23): 33–38.]
- [38] 康翠翠, 施文正, 方林, 等. 不同冻结方式对草鱼肉挥发性成分的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(14): 229–235. [KANG C C, SHI W Z, FANG L, et al. Effects of different freezing methods on the volatile components of grass carp meat[J]. *Food Science*, 2018, 39(14): 229–235.]
- [39] 郭昕, 张春江, 胡宏海, 等. 不同类型腊肉挥发性风味成分的比较研究[J]. *现代食品科技*, 2014, 30(12): 247–254. [GUO X, ZHANG C J, HU H H, et al. Analysis and comparison of volatile flavor compounds in different styles of Chinese traditional bacon[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2014, 30(12): 247–254.]
- [40] 孟凡冰, 刘达玉, 向茂德, 等. 不同卤制方法对白鹅腿肉品质及挥发性风味成分的影响[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(5): 272–279. [MENG F B, LIU D Y, XIANG M D, et al. Effects of different bittern process on volatile flavor compounds of white goose thigh[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(5): 272–279.]
- [41] 潘见, 杨俊杰, 邹英子. 不同涂层 SPME 与 GC-MS 联用比较分析两种猪肉挥发性风味成分[J]. *食品科学*, 2012, 33(12): 169–172. [PAN J, YANG J J, ZOU Y Z. Comparative analysis of flavor components in pork from different breeds by SPME with different fiber coatings and GC-MS[J]. *Food Science*, 2012, 33(12): 169–172.]
- [42] 胡玉娇, 李诚, 苏赵, 等. 泡椒鹅肉工艺优化及挥发性风味物质的构成[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(4): 261–266. [HU Y J, LI C, SU Z, et al. Processing optimization and volatile flavor compounds of goose meat with pickled peppers[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(4): 261–266.]
- [43] 李星, 张晓春, 欧秀琼, 等. 微波杀菌对荣昌卤鹅皮脂及肌肉中挥发性风味化合物的影响研究[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(1): 42–50. [LI X, ZHANG X C, OU X Q, et al. Study on changes of volatile components in sebum and muscle of halogen goose before and after microwave sterilization[J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(1): 42–50.]
- [44] 何英霞, 蒋玉梅, 李霖昕, 等. 不同酶和酵母对干红葡萄酒香气影响的差异分析[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(S1): 325–332. [HE Y X, JIANG Y M, LI J X, et al. Effect of different yeasts and maceration enzymes on aromatic components of cabernet gernischt red wine[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(S1): 325–332.]
- [45] 张文刚, 张焱, 杨希娟, 等. 不同品种青稞炒制后挥发性风味物质 GC-MS 分析[J]. *食品科学*, 2019, 40(8): 192–201. [ZHANG W G, ZHANG Y, YANG X J, et al. GC-MS analysis of volatile flavor substances in different varieties of roasted hulless barley[J]. *Food Science*, 2019, 40(8): 192–201.]