

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

王天杨, 关 隼, 罗晶晶, 杨 镰, 李昶甫, 熊怡玲, 易宇文, 乔明锋, 邓 静, 吴华昌

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

WANG Tianyang, GUAN Ju, LUO Jingjing, YANG Lian, LI Changfu, XIONG Yiling, YI Yuwen, QIAO Mingfeng, DENG Jing, and WU Huachang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023080228>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

两种制备方式猪肉香精挥发性风味成分差异性分析

Difference Analysis of Volatile Flavors of Pork Flavoring by Two Preparations

食品工业科技. 2018, 39(19): 258-265,320 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.19.046>

基于电子鼻、GC-MS和GC-IMS技术分析老香黄发酵期间的挥发性成分变化

Analysis of Volatile Components in Laoxianghuang During Fermentation by Electronic Nose, GC-MS and GC-IMS

食品工业科技. 2021, 42(12): 70-80 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020100170>

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>

电子鼻结合气相-离子迁移谱联用技术分析兰茂牛肝菌气调贮藏期间挥发性风味物质的变化

Changes in Volatile Compounds of *Lanmaoa asiatica* during Controlled Atmosphere Storage Using Electronic Nose Combined with Gas Chromatography-Ion Mobility Spectroscopy

食品工业科技. 2021, 42(21): 111-117 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021070297>

电子鼻技术对猪肉挥发性盐基氮的预测研究

Research on prediction of the total volatile basic nitrogen in pork by electronic nose technique

食品工业科技. 2018, 39(7): 243-248 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.07.043>

熟制方式对裹糊猪排品质及挥发性香气成分的影响

Effects of Different Cooking Methods on the Quality and Volatile Aroma Components of Wrapped Pork Chops

食品工业科技. 2021, 42(1): 257-265,270 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019120288>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王天杨, 关 雎, 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. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080228

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]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(14): 234-244. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080228

· 分析检测 ·

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

王天杨¹, 关 雎², 罗晶晶², 杨 镰², 李昶甫², 熊怡玲¹, 易宇文², 乔明锋^{2,3}, 邓 静^{2,*}, 吴华昌^{2,*}

(1. 成都大学食品与生物工程学院, 四川成都 610106;

2. 四川旅游学院四川省烹饪科学重点实验室, 四川成都 610100;

3. 舟曲绿脉农业科技有限责任公司, 甘肃甘南藏族自治州 746300)

摘要: 烹饪方式可对食品风味产生较大影响, 为深入探究烹饪方式对猪肉香气的影响, 本研究采用电子鼻结合气相-离子迁移谱 (gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS) 对不同烹饪方式猪肉挥发性化合物进行多元统计分析, 并使用 GC-IMS 对不同烹饪方式下猪肉的 100 种挥发性化合物 (包括单聚体和二聚体) 进行表征。最终采用正交偏最小二乘判别分析建立出稳定的模型。结果显示, 烹饪方式对猪肉风味化合物的形成至关重要。同蒸制和煮制两种烹饪方式相比, 烤箱烤制和空气炸锅法烹饪的猪肉含有 (E)-2-己烯酸乙酯、1-辛烯-3-醇、(Z)-4-癸烯醛、3-壬烯-2-酮、(E)-2-己烯-1-醇、丁酸丙酯、呋喃酮和双戊烯-M 等特征挥发性化合物, 且空气炸锅法猪肉中 (E)-2-己烯酸乙酯、1-辛烯-3-醇、(Z)-4-癸烯醛、3-壬烯-2-酮的含量比烤箱烤制猪肉高。戊醛和乙酸乙酯标记为蒸制和煮制烹饪方式的特征挥发性物质化合物, 电子鼻传感器的结果表明, RPCA 模型可以有效地识别出各烹饪方式下猪肉的挥发性香气。研究结果揭示了不同的烹饪方式对猪肉挥发性成分的影响, 空气炸锅制和烤箱烤制的香气更为相似, 为猪肉的烹饪加工提供一定的参考。

关键词: 猪肉, 烹饪方式, 气相-离子迁移谱, 挥发性风味化合物, 正交偏最小二乘法

中图分类号: TS207.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)14-0234-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080228



本文网刊:

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

WANG Tianyang¹, GUAN Ju², LUO Jingjing², YANG Lian², LI Changfu², XIONG Yiling¹, YI Yuwen²,

QIAO Mingfeng^{2,3}, DENG Jing^{2,*}, WU Huachang^{2,*}

(1. School of Food and Biological Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China;

2. Sichuan Tourism College Sichuan Provincial Key Laboratory of Culinary Science, Chengdu 610100, China;

3. Zhouqu Green Vein Agricultural Science and Technology Limited Liability Company, Gannan Tibetan Autonomous Prefecture 746300, China)

Abstract: Cooking methods could have a great influence on the flavour of food, to investigate the effect of cooking methods on the aroma of pork, this study used electronic nose combined with gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) for multivariate statistical analyses of the volatile compounds in pork under different cooking methods. GC-IMS was used to characterise 100 volatile compounds (including monomers and dimers) of pork under

收稿日期: 2023-08-22

基金项目: 四川省科技厅重点研发项目 (23ZDYF3065); 四川省教育厅科技创新团队项目 (21SCTUTG01); 肉类加工四川省重点实验室项目 (22-R-30); 舟曲县科技计划项目 (2023001)。

作者简介: 王天杨 (1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 1179787580@qq.com。

* 通信作者: 邓静 (1970-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 传统食品发酵, E-mail: 147684620@qq.com。

吴华昌 (1970-), 男, 硕士, 教授, 研究方向: 食品加工技术, E-mail: 694549215@qq.com。

different cooking methods. Finally, a stable model was established using orthogonal partial least squares discriminant analysis. Results showed that, the cooking method is crucial for the formation of pork flavour compounds. Pork cooked by oven roasting and air fryer methods contained characteristic volatile compounds such as ethyl (E)-2-hexenoate, 1-octen-3-ol, (Z)-4-decenal, 3-nonen-2-one, (E)-2-hexen-1-ol, propyl butyrate, furazanone, and dipentenyl-M, as compared to the two cooking methods of steaming and boiling. The air fryer method pork contained higher levels of (E)-ethyl 2-hexenoate, 1-octen-3-ol, (Z)-4-decenal, and 3-nonen-2-one than the oven-roasted pork. Valeraldehyde and ethyl acetate were labelled as characteristic volatile substance compounds for both steamed and boiled cooking styles, and the results from the electronic nose sensor showed that the RPCA model was effective in identifying volatile substances in pork for each cooking style. The results of the study revealed the effects of different cooking methods on the volatile components of pork and found that the aromas of air fryer preparation and oven roasting were more similar, providing some reference for the cooking and processing of pork.

Key words: pork; cooking methods; gas-ion mobility spectroscopy; volatile flavor compounds; orthogonal partial least squares

猪肉是人们生活中不可或缺的肉类之一,尤其是经烹饪后的猪肉,占据了肉类加工市场的多数。据经济合作与发展调查(OECD)报告表明,中国在全球猪肉产量和消费中排名第一,年人均消费量超过 30 kg^[1]。随着生活水平的提高,人们在注重营养价值的同时,更加关注经不同烹饪方式的猪肉所带来的口感和风味^[2-4]。

近年来,关于猪肉香气成分报道多集中于不同品种猪肉^[5]、不同部位猪肉^[6]和不同加工温度^[7-8]等,Ángel-Rendóna 等^[9]研究表明,烹饪方式是消费者们非常关注的话题,不同烹饪方式可以对食品感官和理化性质产生重大影响。烹饪过程中,食物中大多数香气是由脂质降解,将食材中的脂肪分解成香味物质,并由美拉德反应相互作用而产生,可以使肉类呈现诱人外观,并产生香味^[10]。此外,醇、醛和酯类化合物也在烹饪过程中形成,增强食物的香味^[11]。许雪萍等^[12]应用 GC-MS 对四种加工方式猪肉的挥发性化合物进行表征,但未对烹饪方式下样本间关键挥发性化合物进行深入研究。刘杨等^[13]研究炸制、蒸制和煮制烹饪方式对牛肉挥发性物质的影响,发现炸制烹饪法对肉类挥发物质差异的影响比蒸制和煮制更明显。目前对猪肉尤其是藏香猪在不同烹饪方式下香气成分的研究较为广泛,系统性的不同烹饪方式下猪肉特征香气成分的差异有待进一步阐明。

同 GC-MS 相比,GC-IMS 是用于检测分析挥发性物质一项新型手段,具有反应速度快、操作简单、处理效率高和实时分析的特点^[14]。为了全面了解食物的香气特征,将电子鼻与 GC-IMS 技术相结合是一个较好的分析方法,进一步模拟人类嗅觉而不具有主观偏见^[15]。Zhao 等^[16]和 Nie 等^[17]研究中应用该方法于猪肉和鱼肉研究中,两者结合可对复杂气味进行精准的鉴别分析^[18]。因此,本研究以猪肉为研究对象,采用烤箱烤制、空气炸锅制、水煮和汽蒸四种烹饪方式,对藏香猪肉的猪里脊进行烹饪加工,使用电子鼻结合气相离子迁移谱对不同烹饪方式下的挥发性成分进行测定,以期明确藏香猪在不同烹饪方式热加工下相关挥发性物质的变化及差异,为工业

化开发高品质藏香猪加工产品提供一定的理论依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

猪肉样本 选择饲养周期达 300 d 的藏香猪,屠宰后猪胴体排酸需达到 24 h,四川成都食品科技公司提供。猪背脊肉低温下迅速运回实验室,去掉表面可见脂肪、筋膜及结缔组织,按每袋约 250 g 分装于真空封装袋中并封口,-18 ℃ 条件下冷冻备用;食用盐 成都市龙泉驿区超市。

GZY-P10-Y 超纯净水仪 湖南科尔顿水务有限公司; **JA503 电子分析天平** 常州市幸运电子设备有限公司; **HH-M8 恒温水浴锅** 上海赫田科学仪器有限公司; **C22-IH30E9 电磁炉** 浙江苏泊尔制造有限公司; **DKL-101L 烤箱** 广东德玛仕设备有限公司; **KJ50D821 空气炸锅** 浙江绍兴苏泊尔制造有限公司; **FOX4000 电子鼻** 法国阿尔法莫斯公司; **Flavour Spec® 气相色谱-离子迁移色谱仪** 德国 G.A.S 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样本制备 参考 Chen 等^[19]方法并稍作修改,将 1 kg 猪背脊肉清洗干净,用刀切割 3 cm×3 cm×3 cm 肉块,加入 10 g 食用盐腌制 30 min 备用。将

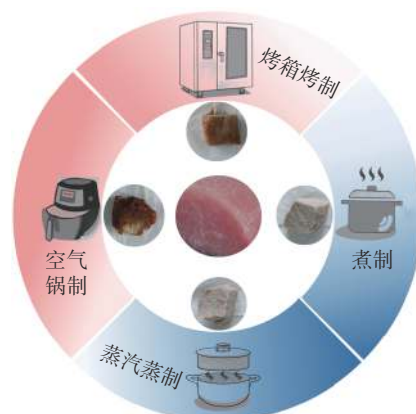


图 1 烹饪样本图

Fig.1 Sample cooking chart

1 kg 猪里脊分为四组, 每组 250 g, 分别进行烹饪, 未经烹饪猪肉作为对照样本(R), 猪肉样本见图 1。

煮制(A)和蒸制(D)烹饪方法的功率和时间均为 1200 W 和 10 min。烤箱烤制(B)和空气炸锅法(C): 温度调至 200 ℃ 预热 10 min 后, 将样本放入设备中间位置, 每隔 5 min 翻动一次, 经烹制 10 min 后取出。所有烹饪样本均达到成熟(中心成熟)。

1.2.2 电子鼻分析 电子鼻检测参考袁灿等^[20]的方法, 每组样本称量 2.0 g 剁碎放入 10 mL 顶空进样瓶中, 进行测定。顶空温度 50 ℃, 孵化时间 300 s, 载气流量 150 mL/s, 进样量 500 μ L, 数据采集时间 120 s, 延迟采集数据 180 s。不同分组猪肉每组测定 10 次, 对其中稳定 3 次结果进行保留。FOX4000 型电子鼻传感器特性见表 1。

表 1 传感器对应敏感物质类型^[20]
Table 1 Sensitive substance type of each sensor^[20]

序号	传感器名称	性能	参考物质
1	LY2/LG	对氧化能力较强的气体灵敏	2-甲基-3-呋喃硫醇
2	LY2/G	对胺类物质灵敏	甲胺
3	LY2/AA	对有机化合物灵敏	戊醛
4	LY2/Gh	对苯胺有选择性	苯胺
5	LY2/gCTI	对胺类物质灵敏	正丁胺
6	LY2/gCT	对烷烃、芳香成分灵敏	丙烷
7	T30/1	对极性化合物灵敏	丙醇
8	P10/1	对非极性化合物灵敏	正辛烷
9	P10/2	对烷烃灵敏	正庚烷
10	P40/1	对氧化能力较强的气体灵敏	甲基糠基二硫醚
11	T70/2	对芳香族化合物灵敏	二甲苯
12	PA/2	对有机化合物灵敏	乙醛、胺类化合物
13	P30/1	对有机化合物灵敏	乙醇
14	P40/2	对氧化能力较强的气体灵敏	甲硫醇
15	P30/2	对有机化合物灵敏	α -松油醇
16	T40/2	对氧化能力较强的气体灵敏	糠硫醇
17	T40/1	对氧化能力较强的气体灵敏	二甲基二硫醚
18	TA/2	对有机化合物灵敏	己醇

1.2.3 GC-IMS 分析 参考 Zhao 等^[16]的方法并稍作修改, 将烹饪处理后的猪肉样本进行破碎, 并准确称取 5.0 g 样本置入具有磁性螺旋密封盖的 20 mL 顶空瓶中, 等待上机检测。所有样本平行测定 3 次。

1.2.3.1 进样条件 50 ℃ 条件下孵化 15 min; 进样方式为顶空进样, 进样温度 65 ℃; 振荡加热, 孵化摇瓶速度 500 r/min; 进样体积 500 μ L 进行检测^[21], 清洗时间 0.5 min。

1.2.3.2 GC 条件 色谱柱: MXT-WAX 色谱柱 (30 m $\times$ 0.53 mm, 1 μ m); 柱温保持在 60 ℃; 载气高纯 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。

1.2.3.3 IMS 条件 漂移管温度 45 ℃; 电子冲击离子源, 离子化模式为正离子; 漂移管长度 9.8 cm; 管

内线性电压 400 V/cm; 漂移气流速 150 mL/min(N₂, 纯度 $\geq$ 99.99%)。

1.3 数据处理

数据处理采用 R 语言进行分析, 在计算变量前将数据分布为正态性, 并使用方差分析寻找组间显著差异($P<0.05$)。GC-IMS 使用仪器配套的 LAV (laboratory analytical viewer)、Gallery Plot 分析; LAV 使用 GC-IMS 数据分析并标记, 并用 NIST 和 IMS 数据库完成; Gallery Plot 绘制指纹图谱。采用 SIMCA 14.1 进行多元统计 OPLS-DA 模型和变量投影重要性分析。

2 结果与分析

2.1 电子鼻分析结果

电子鼻系统能较高灵敏度地识别一定范围内的挥发性物质^[22], 将采集到电子鼻数据制作成 RPCA 模型, 结果如图 2。在 18 根传感器中, 每根探头能够识别出一类化合物, 5 个组分挥发性物质皆有响应且差异显著($P<0.05$)。传感器呈现不同趋势响应值, 各传感器对应化合物参考邓静等^[23]化合物特征比对。

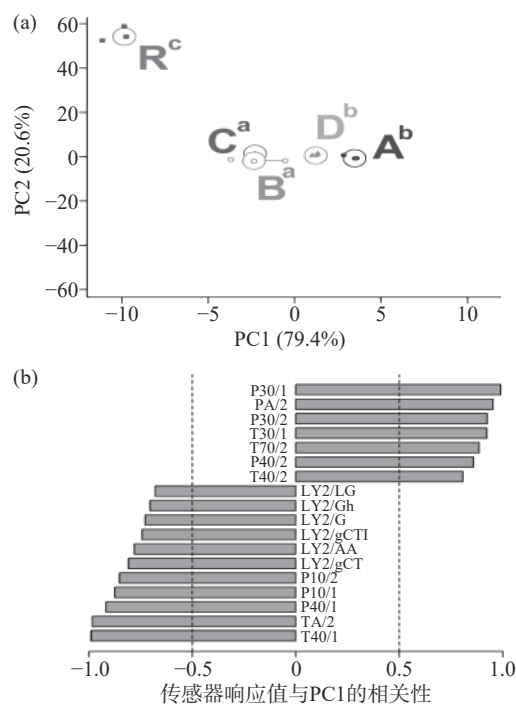


图 2 电子鼻 RPCA 模型

Fig.2 E-nose RPCA model

注: a: 主成分图; b: 载荷图; 图 a 中每个样本组的平均值用空的圆圈表示, 上标小写字母表示样本之间在 PC1 上的显著差异($P<0.05$)。

据卢璇等^[24]研究观点, 根据电子鼻传感器平均响应值, 建立出 RPCA 模型, 对模型计算主成分和皮尔逊相关性, 突出数据结构并找出变量和模型间的关系。计算变量前根据主成分和载荷图将数据分布为正态性, 并使用方差分析寻找样本间的差异。如图 2b 所示, PC1 贡献率达到 79.4%, 很好地概括了

5 个样本。沿着 PC1 分析发现, 未经烹饪样本 R 响应值较低, 同烹饪后 B、C、A 和 D 样本存在较好区分度, 样本 R 传感器响应值特点是 LY2/LG、LY2/Gh、LY2/G、LY2gCTI、LY2/AA、LY2gCT、P10/2、P10/1 和 P40/1 最高, 其对应的腥异味较重。相反, 烹饪后 B、C、A 和 D 样本肉香味浓郁, 对应的传感器 P30/1、PA/2、P30/2、T30/1、T70/2、P40/2 和 T40/2 响应值较高。结果表明: 电子鼻可有效区分并识别出不同烹饪方式的样本香气成分, 经烹饪后的样本间香气存在相似性。C 和 B 样本之间具有较高相似性, 而 A 和 D 样本香气存在较高相似度。

2.2 GC-IMS 分析

2.2.1 GC-IMS 图谱分析 采用 GC-IMS 分析不同烹饪方式下猪肉的挥发性物质, 根据二维图谱提供的整体信息区分样本之间挥发性物质的差异。这些区域点显示出不同的保留时间(Y 轴), 不同的相对漂移时间(X 轴), 以及不同信号强度(Z 轴), 背景为蓝色表示浓度较低, 区域越红说明挥发性物质浓度越高^[14]。

如图 3 所示, 图 3a 三维地形图初步分析猪肉挥发性化合物的浓度, 提供一个偏差视觉印象, 即 5 个样本在香气方面存在较大差异。这表明 GC-IMS 技

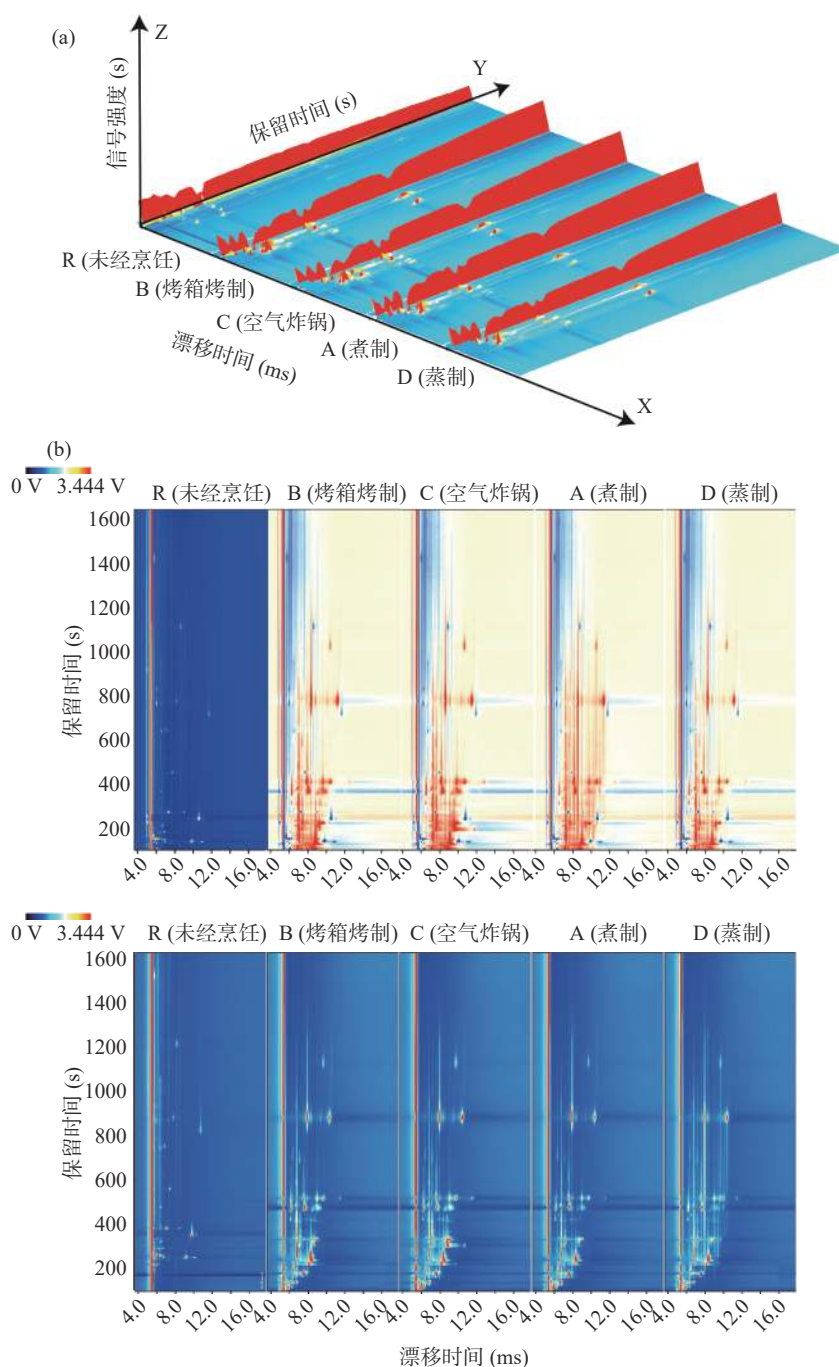


图 3 不同烹饪方式猪肉 GC-IMS

Fig.3 GC-IMS of pork by different cooking methods

注: a: 三维地形图; b: 二维差异图。

术可以用于区分不同样本之间的香气差异。为进一步比较分析,由图 3b 二维差异图可知,5 个样本之间差异点大多数保留时间在 200 到 1200 s 之间化合

物,离子保留时间在 6.0~10 ms。通过 GC-IMS 系统软件 NIST 和 IMS 数据库比对,对 5 个样本共鉴定出 100 种化合物(单聚体和二聚体),包括酯类

表 2 不同烹饪方式猪肉中鉴定的挥发性化合物

Table 2 Volatile compounds identified in pork by different cooking methods

类别	序号	化合物名称	CAS号	保留时间(s)	样本					特征描述
					R	A	B	C	D	
酯类	A1	丁酸丙酯	105-66-8	591.65	0.28±0.04 ^c	0.68±0.12 ^b	1.03±0.06 ^a	0.90±0.07 ^a	0.66±0.07 ^b	甜味,果味
	A2	己酸异戊酯	2198-61-0	1.206.933	2.96±0.65 ^a	0.75±0.05 ^b	0.64±0.01 ^{bc}	0.59±0.04 ^c	0.64±0.05 ^{bc}	芸香果味
	A3	丁酸异戊酯	106-27-4	876.781	1.38±0.12 ^c	7.83±0.68 ^a	8.24±0.51 ^a	7.68±0.74 ^a	4.67±0.62 ^b	甜瓜和浆果味
	A4	格蓬酯	67634-00-8	824.195	7.28±3.59 ^a	0.21±0.05 ^b	0.16±0.02 ^b	0.17±0.02 ^b	0.18±0.02 ^b	果香
	A5	苯乙酸甲酯	101-41-7	750.882	2.38±0.43 ^a	0.35±0.04 ^c	0.50±0.07 ^b	0.47±0.01 ^{bc}	0.37±0.02 ^{bc}	花香
	A6	庚酸乙酯	106-30-9	521.249	0.89±0.34 ^b	4.86±0.48 ^a	4.47±0.37 ^a	3.86±0.31 ^a	4.12±0.42 ^a	果香并带些许辛辣和油味
	A7	异戊酸异戊酯	659-70-1	519.922	0.58±0.35 ^a	0.65±0.32 ^a	0.48±0.06 ^a	0.40±0.07 ^a	0.53±0.09 ^a	苹果香
	A8	异丁酸异丁酯	97-85-8	517.661	0.45±0.02 ^c	3.13±0.38 ^a	3.08±0.29 ^a	2.65±0.35 ^a	1.59±0.40 ^b	菠萝香
	A9	3-甲硫基丙酸乙酯	13327-56-5	479.616	0.13±0.03 ^c	0.33±0.04 ^b	0.52±0.05 ^a	0.50±0.01 ^a	0.31±0.03 ^b	洋葱香
	A10	(E)-2-己烯酸乙酯	27829-72-7	414.488	0.51±0.11 ^{ab}	0.34±0.02 ^{bc}	0.44±0.03 ^b	0.71±0.12 ^a	0.31±0.05 ^c	-
	A11	丁酸乙酯-D	105-54-4	385.661	1.95±0.37 ^a	0.17±0.03 ^{bc}	0.28±0.03 ^b	0.23±0.03 ^b	0.12±0.02 ^c	清新果味
	A12	庚酸甲酯	106-73-0	353.628	11.85±3.50 ^b	0.11±0.05 ^a	0.08±0.00 ^a	0.09±0.01 ^{ab}	0.09±0.01 ^{ab}	水果香
	A13	正己酸乙酯	123-66-0	338.648	0.12±0.02 ^c	0.43±0.01 ^a	0.26±0.03 ^b	0.25±0.01 ^b	0.40±0.05 ^a	水果香甜
	A14	乙酸糠酯	623-17-6	334.076	0.09±0.02 ^d	0.19±0.01 ^a	0.16±0.01 ^b	0.13±0.00 ^c	0.20±0.01 ^a	香蕉香
	A15	2-甲基丁酸甲酯	868-57-5	323.776	0.92±0.23 ^b	0.02±0.01 ^a	0.02±0.00 ^a	0.02±0.00 ^a	0.04±0.01 ^b	果香
	A16	3-羟基丁酸乙酯	5405-41-4	291.406	0.39±0.09 ^a	0.03±0.01 ^{ab}	0.03±0.01 ^{ab}	0.02±0.01 ^b	0.02±0.01 ^b	葡萄酒味
	A17	丙酸丁酯	590-01-2	265.384	3.29±0.50 ^c	9.70±0.50 ^a	9.58±0.28 ^a	8.50±0.04 ^b	10.42±0.40 ^a	水果味
	A18	戊酸乙酯	539-82-2	254.853	10.71±1.93 ^a	0.34±0.03 ^b	0.31±0.02 ^b	0.37±0.05 ^b	0.42±0.04 ^b	果香
	A19	乙酸异戊酯	123-92-2	225.223	0.17±0.02 ^b	0.26±0.01 ^a	0.23±0.02 ^a	0.16±0.03 ^b	0.16±0.01 ^b	香蕉味
	A20	乙酸甲酯	79-20-9	187.912	0.37±0.08 ^c	2.38±0.11 ^b	2.49±0.07 ^{ab}	2.36±0.08 ^b	2.73±0.14 ^a	威士忌味
	A21	甲酸异戊酯	110-45-2	184.769	0.03±0.01 ^b	0.12±0.03 ^a	0.08±0.01 ^a	0.08±0.01 ^a	0.12±0.02 ^a	酒香浓郁
	A22	丁酸乙酯-M	105-54-4	178.345	0.05±0.01 ^c	0.31±0.03 ^a	0.22±0.02 ^b	0.21±0.01 ^b	0.29±0.05 ^a	清新苹果味
	A23	异丁酸乙酯	97-62-1	174.959	0.03±0.00 ^a	0.02±0.01 ^a	0.03±0.01 ^a	0.03±0.01 ^a	0.04±0.01 ^a	辛辣
	A24	乙酸乙酯	141-78-6	122.135	0.22±0.05 ^d	1.79±0.06 ^b	1.31±0.07 ^c	1.42±0.10 ^c	2.87±0.20 ^a	葡萄和樱桃的微妙味
酮类	B1	2-戊酮-D	107-87-9	306.12	0.11±0.01 ^{bc}	0.12±0.02 ^{bc}	0.18±0.05 ^b	0.34±0.01 ^a	0.10±0.02 ^c	水果和香蕉微妙的发酵味
	B2	甲基壬基甲酮	112-12-9	882.554	1.36±0.75 ^a	1.71±0.05 ^a	1.62±0.07 ^a	1.52±0.04 ^a	1.34±0.08 ^a	奶油奶酪
	B3	仲辛酮	111-13-7	879.308	0.73±0.13 ^{ab}	0.79±0.10 ^{ab}	0.92±0.03 ^a	0.91±0.01 ^a	0.63±0.08 ^b	乳制品
	B4	3-壬烯-2-酮	18402-83-0	563.683	2.29±0.17 ^a	0.13±0.05 ^b	0.10±0.01 ^b	0.12±0.01 ^b	0.11±0.01 ^b	-
	B5	呋喃酮	3658-77-3	469.607	0.46±0.10 ^b	0.43±0.02 ^b	0.94±0.08 ^a	0.88±0.04 ^a	0.38±0.05 ^b	焦糖香
	B6	3-甲基-2-戊酮	565-61-7	427.167	0.03±0.01 ^d	0.07±0.01 ^{bc}	0.05±0.00 ^{cd}	0.07±0.01 ^b	0.12±0.01 ^a	-
	B7	1-辛烯-3-酮	4312-99-6	322.706	0.31±0.03 ^c	1.49±0.14 ^a	1.60±0.11 ^a	0.80±0.10 ^b	1.58±0.05 ^a	蘑菇味
	B8	2-戊酮-M	107-87-9	321.466	0.08±0.01 ^a	0.05±0.01 ^b	0.05±0.01 ^b	0.04±0.01 ^b	0.06±0.01 ^{ab}	水果发酵香
	B9	二异丁基酮	108-83-8	309.828	0.17±0.03 ^c	0.33±0.03 ^{bc}	0.63±0.22 ^{ab}	1.02±0.06 ^a	0.44±0.15 ^b	柑橘香
	B10	3-庚烯-2-酮	1119-44-4	295.718	1.82±0.38 ^a	0.03±0.01 ^b	0.04±0.00 ^b	0.04±0.01 ^b	0.04±0.01 ^b	椰子味
	B11	2-丁酮-M	78-93-3	252.904	0.35±0.11 ^c	2.46±0.03 ^a	2.03±0.07 ^b	1.99±0.02 ^b	2.50±0.17 ^a	果香
	B12	2-丁酮-D	78-93-3	228.925	1.23±0.57 ^c	0.03±0.00 ^{bc}	0.02±0.01 ^{ab}	0.02±0.00 ^a	0.03±0.01 ^{abc}	果香
	B13	2-甲基四氢呋喃-3-酮	3188-00-9	181.868	0.26±0.20 ^c	5.49±0.23 ^{ab}	4.95±0.12 ^b	5.00±0.10 ^b	5.94±0.33 ^a	坚果味
	B14	4-甲基-2-戊酮	108-10-1	166.793	0.24±0.09 ^{ab}	0.13±0.04 ^b	0.14±0.03 ^b	0.23±0.04 ^{ab}	0.29±0.06 ^a	乳制品
	B15	3-羟基-2-丁酮	513-86-0	165.648	0.27±0.03 ^{bc}	0.19±0.03 ^{cd}	0.15±0.01 ^d	0.30±0.06 ^b	0.60±0.06 ^a	黄油香
	B16	1-戊烯-3-酮-D	1629-58-9	150.246	0.28±0.11 ^c	0.73±0.05 ^a	0.45±0.03 ^{bc}	0.54±0.03 ^b	0.87±0.08 ^a	辛辣味
醇类	B17	1-戊烯-3-酮-M	1629-58-9	147.825	0.05±0.00 ^a	0.23±0.02 ^{bc}	0.23±0.03 ^b	0.30±0.01 ^c	0.30±0.04 ^c	辛辣味
	C1	异丙醇	67-63-0	245.77	1.26±0.16 ^b	0.01±0.00 ^a	0.01±0.00 ^a	0.01±0.00 ^a	0.01±0.00 ^a	木质霉味
	C2	反-2,顺6-壬二烯醇	28069-72-9	650.188	0.47±0.29 ^a	0.18±0.02 ^b	0.24±0.02 ^{ab}	0.25±0.02 ^{ab}	0.17±0.02 ^b	青苹果味
	C3	正辛醇	111-87-5	479.575	0.65±0.13 ^c	6.65±0.61 ^a	6.02±0.13 ^{ab}	5.79±0.14 ^b	6.81±0.16 ^a	柑橘味
	C4	仲丁醇	78-92-2	424.665	0.28±0.07 ^c	0.71±0.10 ^b	0.60±0.03 ^b	0.70±0.04 ^b	1.18±0.10 ^a	-
	C5	1-辛烯-3-醇	3391-86-4	322.796	0.06±0.01 ^d	0.40±0.08 ^c	0.71±0.05 ^b	1.17±0.11 ^a	0.37±0.09 ^c	蘑菇香
	C6	(E)-2-己烯-1-醇	2305-21-7	224.476	0.52±0.12 ^d	3.61±0.13 ^b	4.21±0.04 ^a	3.99±0.20 ^{ab}	2.18±0.21 ^c	果味
	C7	糠醇	98-00-0	222.254	11.63±1.34 ^a	0.08±0.01 ^b	0.06±0.01 ^b	0.07±0.01 ^b	0.08±0.02 ^b	苦味

续表 2

类别	序号	化合物名称	CAS号	保留时间(s)	样本					特征描述
					R	A	B	C	D	
醛类	C8	(E)-3-己烯-1-醇-M	928-97-2	206.121	0.52±0.12 ^d	3.61±0.13 ^b	4.21±0.04 ^a	3.99±0.20 ^{ab}	2.18±0.21 ^c	—
	C9	(E)-3-己烯-1-醇-D	928-97-2	205.858	0.15±0.02 ^b	0.35±0.19 ^{ab}	0.53±0.06 ^a	0.56±0.02 ^a	0.60±0.07 ^a	—
	C10	4-甲基-2-戊醇	108-11-2	174.583	0.04±0.01 ^b	0.14±0.10 ^{ab}	0.23±0.02 ^a	0.24±0.01 ^a	0.26±0.02 ^a	—
	C11	1-戊醇	71-41-0	163.493	0.21±0.02 ^c	0.33±0.10 ^{bc}	0.38±0.05 ^{ab}	0.43±0.02 ^{ab}	0.57±0.04 ^a	发酵面包味
	C12	乙二醇二甲醚-D	110-71-4	137.028	0.04±0.01 ^d	0.15±0.04 ^c	0.15±0.02 ^c	0.29±0.01 ^b	0.63±0.09 ^a	—
	C13	乙二醇二甲醚-M	110-71-4	133.971	0.11±0.02 ^d	0.64±0.04 ^c	0.52±0.06 ^c	1.00±0.05 ^b	1.27±0.12 ^a	—
	C14	异丁醇	78-83-1	122.105	0.04±0.01 ^c	0.38±0.04 ^a	0.30±0.02 ^b	0.28±0.02 ^b	0.41±0.01 ^a	威士忌
	C15	丙醇	71-23-8	92.748	0.06±0.01 ^b	0.13±0.03 ^a	0.18±0.03 ^a	0.22±0.01 ^a	0.17±0.06 ^a	发酵味, 细微坚果香
	D1	2-十一烯醛	2463-77-6	886.459	2.58±1.33 ^b	14.31±0.85 ^a	13.17±0.02 ^a	13.04±0.34 ^a	13.01±0.25 ^a	柑橘皮, 略带肥皂味
	D2	(Z)-4-癸烯醛	21662-09-9	694.821	1.61±0.14 ^a	0.91±0.05 ^c	1.18±0.06 ^b	1.41±0.07 ^{ab}	0.82±0.11 ^c	柑橘香
	D3	(E)-2,4-庚二烯醛-M	5910-85-0	340.324	0.04±0.01 ^c	0.26±0.01 ^a	0.28±0.01 ^a	0.25±0.02 ^a	0.21±0.02 ^b	香甜的奶油
烯类	D4	(E)-2,4-庚二烯醛-D	5910-85-0	337.263	0.63±0.10 ^a	0.23±0.03 ^b	0.21±0.02 ^b	0.16±0.01 ^c	0.18±0.02 ^{bc}	香甜的奶油
	D5	异丁醛	78-84-2	205.439	0.06±0.01 ^c	0.02±0.00 ^a	0.02±0.00 ^a	0.03±0.00 ^b	0.02±0.00 ^a	新鲜的麦芽
	D6	丙醛	123-38-6	175.787	0.02±0.02 ^a	0.03±0.01 ^a	0.03±0.01 ^a	0.04±0.01 ^a	0.04±0.00 ^a	有霉味, 酵母味
	D7	戊醛-M	110-62-3	168.537	0.12±0.07 ^c	0.91±0.03 ^b	0.77±0.01 ^b	0.83±0.06 ^b	1.21±0.15 ^a	杏仁、麦芽辛辣味
	D8	戊醛-D	110-62-3	166.444	0.25±0.03 ^d	0.51±0.08 ^{bc}	0.30±0.02 ^{cd}	0.61±0.17 ^b	2.38±0.62 ^a	杏仁、麦芽辛辣味
	D9	2-甲基丁醛	96-17-3	143.251	0.24±0.03 ^c	1.24±0.02 ^a	1.27±0.04 ^a	1.07±0.05 ^b	1.00±0.02 ^b	发霉杂粮味
	D10	异戊醛	590-86-3	137.093	0.02±0.01 ^c	0.13±0.02 ^b	0.12±0.01 ^b	0.11±0.00 ^b	0.17±0.02 ^a	坚果味
	D11	丁醛	123-72-8	114.888	0.04±0.01 ^c	0.38±0.02 ^c	0.23±0.01 ^d	0.46±0.02 ^b	0.97±0.06 ^a	发酵味
	E1	萘品油烯	586-62-9	499.94	0.49±0.10 ^a	0.15±0.03 ^c	0.11±0.01 ^d	0.29±0.03 ^b	0.14±0.01 ^{cd}	柠檬和酸橙花香味
	E2	苯乙烯-M	100-42-5	880.148	1.78±0.27 ^a	0.13±0.01 ^b	0.12±0.01 ^b	0.12±0.01 ^b	0.14±0.02 ^b	—
	E3	双戊烯-D	138-86-3	473.526	4.22±0.59 ^a	0.24±0.03 ^b	0.25±0.02 ^b	0.18±0.03 ^{bc}	0.13±0.02 ^c	草本柑橘芳香
杂环	E4	γ -松油烯	99-85-4	445.562	0.13±0.02 ^a	0.15±0.04 ^a	0.04±0.01 ^c	0.07±0.01 ^b	0.14±0.02 ^a	柑橘, 酸橙味
	E5	α -蒎烯-M	80-56-8	417.222	0.08±0.01 ^a	0.07±0.02 ^a	0.10±0.01 ^a	0.09±0.00 ^a	0.04±0.01 ^b	浓郁的木本松木香
	E6	α -蒎烯-D	80-56-8	384.266	0.34±0.05 ^a	0.21±0.04 ^b	0.29±0.01 ^{ab}	0.22±0.02 ^b	0.24±0.02 ^b	浓郁的木本松木香
	E7	双戊烯-M	138-86-3	383.206	0.17±0.02 ^c	0.49±0.09 ^b	1.11±0.12 ^a	1.20±0.05 ^a	0.47±0.12 ^b	草本柑橘香
	E8	松油烯	99-86-5	370.676	0.04±0.01 ^c	0.01±0.00 ^a	0.01±0.00 ^a	0.02±0.01 ^b	0.01±0.00 ^a	酒香
	E9	苯乙烯-D	100-42-5	233.143	0.11±0.01 ^c	0.25±0.02 ^b	0.39±0.03 ^a	0.42±0.03 ^a	0.13±0.03 ^c	—
	F1	5-甲基-2-乙基吡嗪	13360-64-0	334.78	0.22±0.02 ^c	3.00±0.19 ^a	3.17±0.04 ^a	2.85±0.12 ^a	2.37±0.27 ^b	咖啡香
	F2	2,5-二甲基吡嗪	123-32-0	932.074	0.99±0.20 ^a	0.04±0.01 ^b	0.04±0.01 ^b	0.04±0.01 ^b	0.04±0.01 ^b	坚果味脂肪味
	F3	2-甲基吡嗪	109-08-0	867.468	3.87±0.37 ^a	0.18±0.01 ^b	0.18±0.02 ^b	0.17±0.02 ^{bc}	0.15±0.01 ^c	坚果烘烤味
	F4	3,5-二甲基-2-乙基吡嗪	13925-07-0	487.196	0.18±0.02 ^c	0.64±0.04 ^b	0.80±0.05 ^a	0.83±0.02 ^a	0.68±0.05 ^b	坚果焦糖
	F5	2,3,5-三甲基吡嗪	14667-55-1	399.426	0.61±0.21 ^b	0.04±0.01 ^{ab}	0.03±0.01 ^{ab}	0.03±0.00 ^a	0.04±0.01 ^{ab}	生坚果
酸类	F6	2,4,6-三甲基吡啶	108-75-8	322.229	0.03±0.01 ^c	0.10±0.02 ^b	0.14±0.01 ^a	0.09±0.01 ^b	0.09±0.01 ^b	—
	F7	2-甲基-3-甲硫基呋喃	63012-97-5	295.401	0.07±0.02 ^a	0.02±0.01 ^b	0.02±0.01 ^b	0.03±0.00 ^b	0.03±0.01 ^b	温和的肉味
	F8	2-乙基吡嗪	13925-00-3	293.747	0.64±0.05 ^a	0.02±0.00 ^b	0.02±0.00 ^b	0.02±0.00 ^b	0.02±0.01 ^b	坚果味
	F9	2-正丁基呋喃	4466-24-4	264.214	0.67±0.07 ^a	0.04±0.01 ^b	0.03±0.00 ^b	0.03±0.01 ^b	0.04±0.01 ^b	—
	G1	丙酸	1979-9/4	151.84	0.18±0.04 ^a	0.17±0.01 ^{ab}	0.15±0.01 ^{ab}	0.11±0.00 ^b	0.13±0.03 ^{ab}	辛辣
	G2	正戊酸	109-52-4	260.388	1.66±0.36 ^a	0.05±0.01 ^{bc}	0.04±0.01 ^c	0.06±0.01 ^b	0.07±0.01 ^b	牛奶和奶酪味
	G3	2-甲基丁酸	116-53-0	223.734	0.07±0.01 ^b	0.07±0.01 ^b	0.10±0.00 ^a	0.10±0.01 ^a	0.07±0.00 ^{ab}	果香味
	G4	异戊酸	503-74-2	204.631	0.09±0.01 ^c	0.11±0.01 ^{bc}	0.13±0.01 ^{ab}	0.13±0.01 ^a	0.11±0.01 ^{abc}	奶酪味
	G5	乙酸	64-19-7	104.782	0.22±0.02 ^c	1.08±0.01 ^b	1.02±0.03 ^b	1.49±0.13 ^a	1.08±0.06 ^b	过熟的水果
	H1	二丙硫醚	111-47-7	234.148	0.05±0.01 ^b	0.18±0.01 ^a	0.19±0.01 ^a	0.19±0.01 ^a	0.18±0.01 ^a	洋葱味
	H2	苯并噻唑	95-16-9	746.293	1.61±0.36 ^a	0.12±0.01 ^b	0.11±0.01 ^b	0.10±0.01 ^b	0.12±0.01 ^b	咖啡香
其他	H3	2,6-二氯苯酚	87-65-0	707.399	0.48±0.17 ^a	0.45±0.03 ^a	0.40±0.02 ^a	0.39±0.02 ^a	0.48±0.03 ^a	—
	H4	4-甲基苯酚	106-44-5	468.532	0.58±0.20 ^c	1.69±0.05 ^b	2.20±0.05 ^a	2.07±0.03 ^a	1.49±0.06 ^b	—
	H5	萘烷-D	91-17-8	461.404	0.21±0.02 ^d	0.56±0.05 ^c	0.81±0.04 ^a	0.73±0.03 ^{ab}	0.69±0.02 ^b	—
	H6	萘烷-M	91-17-8	453.778	0.92±0.13 ^a	0.39±0.03 ^b	0.51±0.09 ^b	1.02±0.15 ^a	0.39±0.03 ^b	—
	H7	三乙胺	280-57-9	425.792	0.08±0.06 ^a	0.06±0.01 ^a	0.07±0.01 ^a	0.06±0.01 ^a	0.07±0.00 ^a	—
	H8	氨基苯	62-53-3	191.234	0.11±0.06 ^a	0.15±0.01 ^a	0.13±0.01 ^a	0.12±0.01 ^a	0.13±0.02 ^a	—
	H9	三乙胺	121-44-8	189.717	0.06±0.05 ^b	0.11±0.01 ^{ab}	0.17±0.01 ^a	0.15±0.01 ^a	0.11±0.02 ^{ab}	—
	H10	烯丙基腈	109-75-1	143.309	0.29±0.06 ^d	3.30±0.33 ^b	2.46±0.07 ^c	3.67±0.07 ^b	6.51±0.33 ^a	—

注: M表示单聚体, D表示二聚体, 相同CAS号物质为单聚体^[25]; 挥发性物质描述来源于TGSC信息系统(好香味信息系统www.thegoodscentscompany.com); “—”表示未查出香气描述; 同行不同上标小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

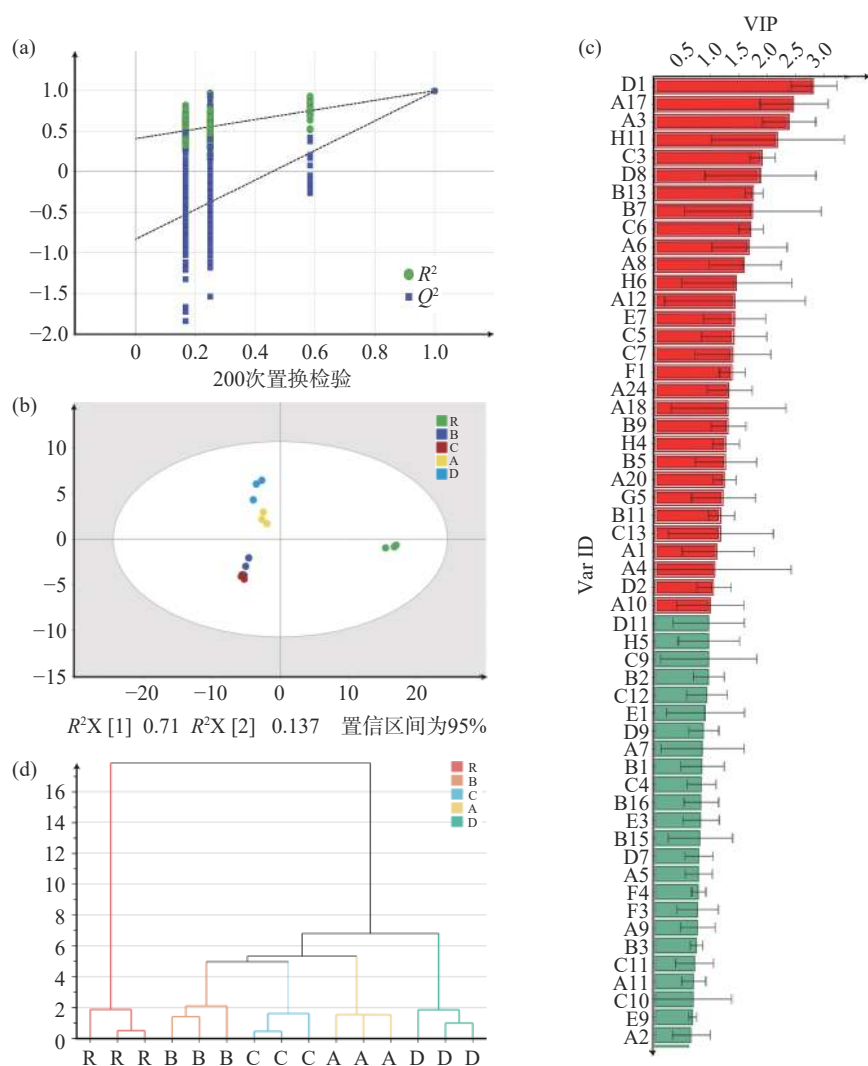


图 5 不同烹饪方式猪肉 OPLS-DA 分析

Fig.5 Orthogonal Partial Least Squares-Discriminant of pork by different cooking methods

注: a: 置换检验模型图; b: PCA 图; c: VIP 化合物图; d: 层次聚类图。

箱烤制部分,第 3 类是蒸和煮制部分。表明空气炸锅法和烤箱烤制的猪肉在高温下都会产生类似挥发性物质,这些物质主要包括芳香化合物、醛类和酮类等复杂的化合物^[37]。当平均距离为 6 时,可以将样本分为 2 类:第 1 类是未经烹饪部分,第 2 类是经烹饪后的猪肉,结果与 GC-IMS 中 PCA 主成分表征一致。

2.4 特征化合物分析

根据 Chen 等^[38]的观点,为确定关键性挥发物质更深入地了解不同烹饪方式猪肉风味的影响,将 VIP 大于 1 的挥发性物质绘制成热图进行分析,能更好地区分 5 种不同样本间差异。如图 6 所示,重要的风味成分能够被有效地辨认。未经烹饪部分的挥发性物质较为特别,前人研究表明^[39],猪肉的腥气味来源包括醇类物质,未经烹饪猪肉表现为让人不舒服气味^[5]。在本研究中,发现 R 样本中含有较高浓度酯类和醇类化合物,包括具有苦味的糠醇、庚酸甲酯、格蓬酯和戊酸乙酯等^[37,40]。高温的烹饪过程会挥发和去除绝大部分的腥气味^[6]。

4 烹饪方式中样本 B 和 C 挥发性化合物浓度高于 A 和 D 样本,图 6 进一步发现,样本 B 和 C 的特征挥发性化合物包括(E)-2-己烯酸乙酯、1-辛烯-3-醇、(Z)-4-癸烯醛、3-壬烯-2-酮、(E)-2-己烯-1-醇、丁酸丙酯、呋喃酮和双戊烯-M。其中,化合物(E)-2-己烯酸乙酯、1-辛烯-3-醇、(Z)-4-癸烯醛和 3-壬烯-2-酮在 C 样本中浓度较高。可能是由于烤箱和空气炸锅法在烹饪过程中的温度较高,相比蒸煮烹饪方式,这会形成特征挥发性物质并使风味更加的浓郁。具有酒香的戊醛-D^[41],葡萄、樱桃香的乙酸乙酯^[42]、蘑菇味 1-辛烯-3-酮^[39]和乙二醇二甲醚-M 是样本 A、D 的特征化合物。研究表明,烹饪方式的选择、温度的高低和美拉德反应对风味形成尤为关键^[43]。烤箱烤制和空气炸锅法的烹饪过程中,温度相比蒸煮会更高,猪肉在高温的情况下,表面会形成微焦黄的外层,并生成复杂化合物产生特殊香气。

1-辛烯-3-醇是由八个碳原子链和一个羟基组成的脂肪醇,来源于猪肉的脂肪酸中。在烹饪烤制空气炸锅的加热过程中会发生氧化和分解反应,产生不

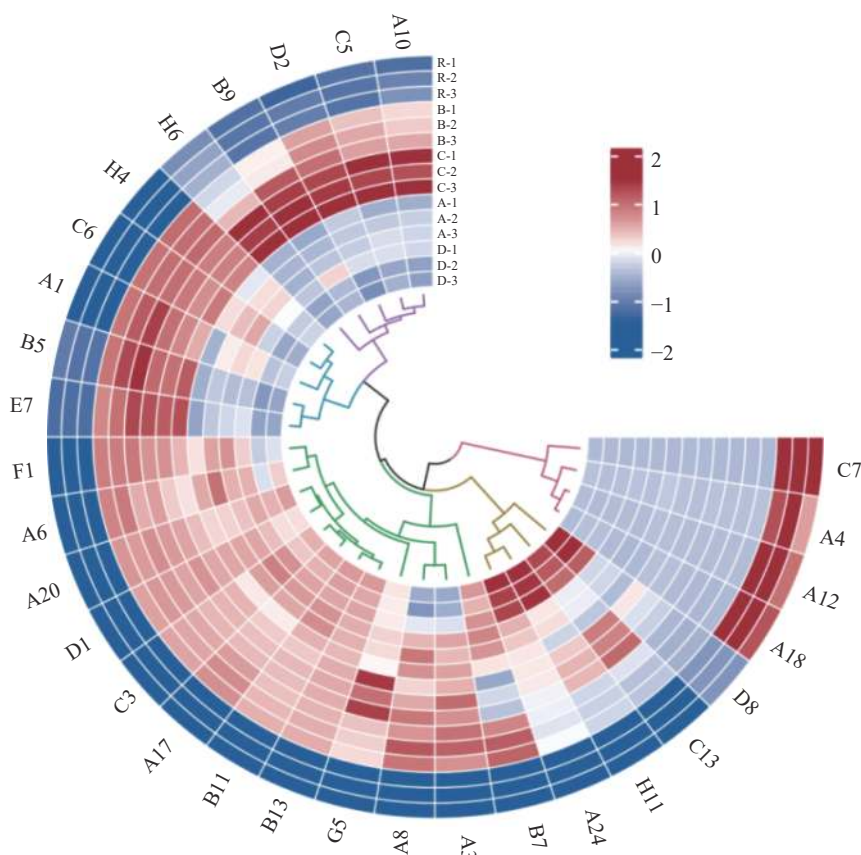


图6 不同烹饪方式猪肉 VIP 热图

Fig.6 Map of vip flavour substances of pork by different cooking methods

饱和烃类化合物,其中包括 1-辛烯-3-醇^[44]。在此之前, Li 等^[4] 在烹饪东坡肉研究中,标记该化合物为炸制东坡肉阶段中赋予食物蘑菇香和花香的特征香气物质。醛类中的戊醛和酯类的乙酸乙酯作为蒸制和煮制烹饪方式的特征化合物,已在鸡肉^[45] 和牛肉^[46] 中发现,并被认为是蒸煮烹饪中脂肪氧化和酯化反应有用的标记。戊醛是一种饱和脂肪酸醛, Li 等^[47] 通过研究水煮对鸭肉的特征挥发性化合物分析发现,脂质氧化通常发生在不饱和键上,并产生戊醛和乙酸乙酯等过氧化物。这些物质具有不稳定性,并倾向于生成醛类化合物。因此,特别是通过蒸煮的烹饪方式,它们具有淡淡的果香和花香的风味。从这些研究中推断,烹饪猪肉中的特征风味化合物戊醛和乙酸乙酯与蒸煮两种方式有关,从而影响最终食物中的不同风味。

3 结论

本研究利用电子鼻结合气相色谱-离子迁移谱技术,探究了不同烹饪方式对猪肉风味的影响。结果表明,电子鼻能模拟人体嗅觉能够区分出各烹饪方式的特征气味,经烹饪后的样本间香气存在相似性;空气炸锅法和烤箱烤制样本的香气之间具有较高相似性,而煮制和蒸制样本的香气较相似。采用 GC-IMS 技术对未经烹饪、蒸、煮、烤箱烤制和空气炸锅法猪肉的挥发性化合物进行测定,其中区分烹饪方式的挥发性化合物主要包括酯类、酮类、醇类和醛类化

合物。经 OPLS-DA 模型,筛选出 30 种 VIP 值大于 1 的化合物,包括糠醇、庚酸甲酯、格蓬酯、戊酸乙酯、(E)-2-己烯酸乙酯、1-辛烯-3-醇、(Z)-4-癸烯醛、3-壬烯-2-酮、(E)-2-己烯-1-醇、丁酸丙酯、呋喃酮、双戊烯-M、戊醛-D、乙二醇二甲醚-M、乙酸乙酯、1-辛烯-3-酮等物质。本文得出了不同烹饪方式对猪肉挥发性成分差异,为烹饪猪肉的方式选择提供了一定的理论依据和参考。选取的藏香猪为对象,以期明确藏香猪在不同烹饪方式热加工下相关挥发性化学物质的变化及差异,为工业化开发高品质藏香猪加工产品提供一定的理论依据。猪肉种类多、风味浓郁,后续烹饪加工不同种类猪肉成分的研究,应考虑结合 GCO 技术进一步对特征香气化合物进行探讨。

© 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] HAWTHORNE L M, BEGANOVIĆ A, SCHWARZ M, et al. Suitability of biodegradable materials in comparison with conventional packaging materials for the storage of fresh pork products over extended shelf-life periods[J]. *Foods*, 2020, 9(12): 1802.
- [2] 张海峰, 陈锐, 王祖力, 等. 一线城市城镇居民猪肉消费偏好及影响因素研究—基于北上广调查数据的分析[J]. *价格理论与实践*, 2023(8): 1-4. [ZHANG H F, CHEN R, WANG Z L, et al. Research on pork consumption preferences and influencing factors

- of urban residents in first-tier cities: an analysis based on survey data from north, shanghai and guangzhou[J]. *Price Theory and Practice*, 2023(8): 1-4.]
- [3] 赵钜阳, 陆家慧. 中式烹饪食品挥发性风味物质研究进展[J]. *中国调味品*, 2021, 46(11): 178-182. [ZHAO J Y, LU J H. Research progress on volatile flavor substances in Chinese culinary foods[J]. *Chinese Seasonings*, 2021, 46(11): 178-182.]
- [4] LI W L, ZHENG L T, XIAO Y, et al. Insight into the aroma dynamics of Dongpo pork dish throughout the production process using electronic nose and GC×GC-MS[J]. *LWT*, 2022, 169: 113970.
- [5] HAN D, ZHANG C H, FAUCONNIER M L, et al. Characterization and differentiation of boiled pork from Tibetan, Sanmenxia and Duroc×(Landrac×Yorkshire) pigs by volatiles profiling and chemometrics analysis[J]. *Food Research International*, 2020, 130: 108910.
- [6] 孟维一, 古瑾, 徐淇淇, 等. 顶空气相色谱-离子迁移谱分析不同部位和品种猪肉的挥发性风味化合物[J]. *食品科学*, 2021, 42(24): 206-212. [MENG W Y, GU J, XU Q Q, et al. Analysis of volatile flavor compounds in different parts and varieties of pork by headspace gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. *Food Science*, 2021, 42(24): 206-212.]
- [7] LI H H, GENG W H, HARUNA. A S, et al. Identification of characteristic volatiles and metabolomic pathway during pork storage using HS-SPME-GC/MS coupled with multivariate analysis[J]. *Food Chemistry*, 2022, 373: 131431.
- [8] 王文艳, 韩砚, 杨雅新, 等. 不同冷却方式对低温熟制猪肉品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(1): 356-361. [WANG W Y, HAN Y, YANG Y X, et al. Effect of different cooling methods on the quality of low-temperature cooked pork[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2023, 44(1): 356-361.]
- [9] ÁNGEL-RENDÓN S V, FILOMENA-AMBROSIO A, HERNÁNDEZ-CARRIÓN M, et al. Pork meat prepared by different cooking methods. a microstructural, sensorial and physicochemical approach[J]. *Meat Science*, 2020, 163: 108089.
- [10] WU W D, ZHAN J L, TANG X Y, 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.
- [11] ISMAIL I, HWANG Y H, BAKHSH A, et al. Control of sous-vide physicochemical, sensory, and microbial properties through the manipulation of cooking temperatures and times[J]. *Meat Science*, 2022, 188: 108787.
- [12] 许雪萍, 李静, 范亚苇, 等. 不同烹调方式对猪肉脂质氧化和挥发性风味物质的影响[J]. *食品工业*, 2019, 40(1): 151-155. [XU X P, LI J, FAN Y W, et al. Effects of different cooking methods on lipid oxidation and volatile flavor substances of pork[J]. *Food Industry*, 2019, 40(1): 151-155.]
- [13] 刘杨, 黄佳, 贾洪峰, 等. 不同烹饪方法对牛肉挥发性风味物质的影响[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(10): 305-313. [LIU Y, HUANG J, JIA H F, et al. Effect of different cooking methods on volatile flavor substances of beef[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2022, 43(10): 305-313.]
- [14] CHRISTMANN J, ROHN S, ROHN P. GC-IMS-TOOLS-A new python package for chemometric analysis of GC-IMS data[J]. *Food Chemistry*, 2022, 394: 133476.
- [15] LU W H, JIANG R, LI X B, et al. Characterization and discrimination of volatile compounds in gel-pen ink via headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry combined with chemometric strategies[J]. *Microchemical Journal*, 2022, 182: 107855.
- [16] ZHAO X, FENG J Y, LAGHI L, et al. Characterization of flavor profile of “Nanx Wudl” sour meat fermented from goose and pork using gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) combined with electronic nose and tongue[J]. *Foods*, 2023, 12(11): 2194.
- [17] NIE S, LI L H, WANG Y Q, et al. Discrimination and characterization of volatile organic compound fingerprints during sea bass (*Lateolabrax japonicus*) fermentation by combining GC-IMS and GC-MS[J]. *Food Bioscience*, 2022, 50: 102048.
- [18] YU S S, HUANG X Y, WANG L, et al. Qualitative and quantitative assessment of flavor quality of Chinese soybean paste using multiple sensor technologies combined with chemometrics and a data fusion strategy[J]. *Food Chemistry*, 2023, 405: 134859.
- [19] CHEN J H, TAO L N, ZHANG T, et al. Effect of four types of thermal processing methods on the aroma profiles of acidity regulator-treated tilapia muscles using E-nose, HS-SPME-GC-MS, and HS-GC-IMS[J]. *LWT*, 2021, 147: 111585.
- [20] 袁灿, 何莲, 胡金祥, 等. 基于电子舌和电子鼻结合氨基酸分析鱼香肉丝调料风味的差异[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(9): 48-55. [YUAN C, HE L, HU J X, et al. Flavor differences of shredded fish and pork seasoning based on electronic tongue and electronic nose combined with amino acid analysis[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2022, 43(9): 48-55.]
- [21] 曹伟峰, 张悦妍, 向情儒, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 和 GC-IMS 结合电子鼻分析真空冷却对酱牛肉风味的影响[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(9): 341-348. [CAO W F, ZHANG Y Y, XIANG Q R, et al. Analysis of effect of vacuum cooling on flavor of soy sauce beef based on HS-SPME-GC-MS and GC-IMS combined with electronic nose[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(9): 341-348.]
- [22] CHEN X A, CHEN H Q, XIAO J, et al. Variations of volatile flavour compounds in finger citron (*Citrus medica* L. var. sarcodactylis) pickling process revealed by E-nose, HS-SPME-GC-MS and HS-GC-IMS[J]. *Food Research International*, 2020, 138: 109717.
- [23] 邓静, 罗晶晶, 朱开宪, 等. 基于电子鼻和气相色谱-离子迁移谱法分析不同等级俄色绿茶香气物质差异[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(1): 236-243. [DENG J, LUO J J, ZHU K X, et al. Analysis of differences in aroma substances between different grades of Russian green tea based on electronic nose and gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. *Journal of Food Safety and Quality Inspection*, 2023, 14(1): 236-243.]
- [24] 卢璇, 张茜, 赵宇轩, 等. 基于代谢组学技术结合智能感官探究临床乳房炎对牛乳风味和滋味物质影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(20): 1-10. [LU X, ZHANG Q, ZHAO Y X, et al. Study on the influence of clinical mastitis on milk flavor and taste substances based on metabolomics technology and intelligent senses[J]. *Food Science*, 2023, 44(20): 1-10.]
- [25] 陈丽兰, 杨心怡, 乔明锋, 等. 基于 GC-IMS、GC-MS 和 OAV 法分析花椒粉颗粒度对花椒油挥发性香气成分的影响[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(8): 301-310. [CHEN L L, YANG X Y, QIAO M F, et al. Analysis of the effect of pepper powder granularity on volatile aroma components of pepper oil based on GC-IMS, GC-MS and OAV methods[J]. *Food Industry Science and Technology* 2023, 44(8): 301-310.]
- [26] WANG X W, FENG T T, WANG X J, et al. Microwave heating and conduction heating pork belly: Non-volatile compounds and their correlation with taste characteristics, heat transfer modes, and matrix microstructure[J]. *Meat Science*, 2022, 192: 108899.

- [27] WANG W L, FENG X, ZHANG D N, et al. Analysis of volatile compounds in Chinese dry-cured hams by comprehensive two-dimensional gas chromatography with high-resolution time-of-flight mass spectrometry[J]. *Meat Science*, 2018, 140: 14–25.
- [28] LI W, CHEN Y P, BLANK I, et al. GC×GC-ToF-MS and GC-IMS based volatile profile characterization of the Chinese dry-cured hams from different regions[J]. *Food Research International*, 2021, 142: 110222.
- [29] WANG X Y, WANG R, TONG X, et al. Characterization of different meat flavor compounds in Guangdong small-ear spotted and Yorkshire pork using two-dimensional gas chromatography–time-of-flight mass spectrometry and multi-omics[J]. *LWT*, 2022, 169: 114010.
- [30] MARTÍNEZ-ONANDI N, RIVAS-CAÑEDO A, NUÑEZ M, et al. Effect of chemical composition and high pressure processing on the volatile fraction of Serrano dry-cured ham[J]. *Meat Science*, 2016, 111: 130–138.
- [31] 倪瑞洁, 詹萍, 田洪磊, 等. 基于 GC-IMS 结合多元统计方法分析炸制时间对花椒调味油挥发性物质的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(6): 279–286. [NI R J, ZHAN P, TIAN H L, et al. Analysis of the effect of frying time on volatile substances of pepper seasoning oil based on GC-IMS combined with multivariate statistical method[J]. *Food Science*, 2022, 43(6): 279–286.]
- [32] 周佳, 苏丹, 王志霞, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 和多元统计分析三种红茶特征挥发性成分[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(17): 342–350. [ZHOU J, SU D, WANG Z X, et al. Analysis of characteristic volatile components of three kinds of black tea based on hs-spme-gc-ms and multivariate statistics[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(17): 342–350.]
- [33] MARTÍN-GÓMEZ A, RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ P, CARDADOR M J, et al. Guidelines to build PLS-DA chemometric classification models using a GC-IMS method: dry-cured ham as a case of study[J]. *Talanta Open*, 2023, 7: 100175.
- [34] 王近近, 袁海波, 滑金杰, 等. 基于多元统计分析的不同品种和嫩度大叶种茶树新梢主要滋味物质的比较[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(24): 81–92. [WANG J J, YUAN H B, SLIDE J J, et al. Comparison of the main taste substances of the new tips of tea trees of different varieties and tenderness based on multivariate statistical analysis[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2022, 43(24): 81–92.]
- [35] LIU Z J, HUANG Y Q, KONG S S, et al. Selection and quantification of volatile indicators for quality deterioration of reheated pork based on simultaneously extracting volatiles and reheating precooked pork[J]. *Food Chemistry*, 2023, 419: 135962.
- [36] 秦力悦, 石萍萍, 李荣辉, 等. 基于主成分分析和聚类分析的烘烤类澳洲坚果果仁综合品质评价[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(18): 331–341. [QIN L Y, SHI P P, LI R H, et al. Comprehensive quality evaluation of roasted Macadamia nuts based on Principal component analysis and cluster analysis[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2023, 44(18): 331–341.]
- [37] 周慧敏, 张顺亮, 郝艳芳, 等. HS-SPME-GC-MS-O 结合电子鼻对坨坨猪肉主体风味评价分析[J]. *食品科学*, 2021, 42(2): 218–226. [ZHOU H M, ZHANG S L, HAO Y F, et al. Evaluation and analysis of main flavor of pork with HS-SPME-GC-MS-O combined with electronic nose[J]. *Food Science*, 2021, 42(2): 218–226.]
- [38] CHEN J Y, YANG Y Q, DENG Y L, et al. Aroma quality evaluation of Dianhong black tea infusions by the combination of rapid gas phase electronic nose and multivariate statistical analysis[J]. *LWT*, 2022, 153: 112496.
- [39] SOHAIL A, AL-DALALI S, WANG J A, et al. Aroma compounds identified in cooked meat: A review[J]. *Food Research International*, 2022, 157: 111385.
- [40] 徐梓烺. HS-SPME-GC-MS 技术用于猪肉品质检测的方法研究[D]. 重庆: 西南科技大学, 2021. [XU Z H. A methodological study of HS-SPME-GC-MS technology for pork quality testing[D]. Chongqing: Southwest University of Science and Technology, 2021.]
- [41] 张楠. 三种猪肉食用品质的差异研究[D]. 太原: 山西农业大学, 2020. [ZHANG N. Study on the difference of edible quality of three kinds of pork[D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2020.]
- [42] WANG P P, KAN Q X, YANG L X, et al. Characterization of the key aroma compounds in soy sauce by gas chromatography-mass spectrometry-olfactometry, headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry, odor activity value, and aroma recombination and omission analysis[J]. *Food Chemistry*, 2023, 419: 135995.
- [43] 黄杨斌, 杜卿卿, 任晓钺, 等. 析因设计探究温度与水分活度对美拉德反应模型的影响[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(15): 21–28. [HUANG Y B, DU Q Q, REN X P, et al. Analytical design to investigate the effect of temperature and water activity on the model of Merad reaction[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2020, 41(15): 21–28.]
- [44] GIRARD B, DURANCE T, Headspace volatiles of sockeye and pink salmon as affected by retort process[J]. *Journal of Food Science*, 2000, 65(1): 34–39.
- [45] 姚文生, 蔡莹莹, 刘登勇, 等. 不同材料熏制鸡腿肉挥发性物质 GC-IMS 指纹图谱分析[J]. *食品科学技术学报*, 2019, 37(6): 37–45. [YAO W S, CAI Y X, LIU D Y, et al. GC-IMS fingerprint analysis of volatile substances in smoked chicken thigh meat from different materials[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2019, 37(6): 37–45.]
- [46] AL-DALALI SAM, LI C, XU B C. Effect of frozen storage on the lipid oxidation, protein oxidation, and flavor profile of marinated raw beef meat[J]. *Food Chemistry*, 2022, 376: 131881.
- [47] LI C, AL-DALALI S, WANG Z P, et al. Investigation of volatile flavor compounds and characterization of aroma-active compounds of water-boiled salted duck using GC–MS–O, GC–IMS, and E-nose[J]. *Food Chemistry*, 2022, 386: 132728.