

基于GC-MS比较不同炸制时间猪肉丸挥发性风味成分的变化

赵赵^{1,2}, 刘薇^{1,2}, 王卅¹, 槐雪^{1,2}, 黄南娟^{1,2}, 孙洋^{1,2}, 张贝宁^{1,2}, 朱文政^{1,2,3*}, 周晓燕^{1,2,3,4*}

(1. 扬州大学旅游烹饪学院, 江苏扬州 225127) (2. 江苏省淮扬菜产业化工程研究中心, 江苏扬州 225127)

(3. 中餐非遗技艺传承文化和旅游部重点实验室, 江苏扬州 225127)

(4. 上海中侨职业技术大学烹饪与酒店管理学院, 上海 201514)

摘要: 为比较不同炸制时间得到的猪肉丸风味物质的变化及规律, 该研究以油炸猪肉丸为研究对象, 采用固相微萃取-气相色谱质谱联用技术 (SPME-GC-MS) 对油炸猪肉丸的挥发性风味物质进行了分离分析, 并进一步结合化学计量方法、感官评价进行判别分析。结果表明, 共检出醇类、醛类、烷烃类、酯类、酸类、酮类、烯炔类、醚类、其他共 9 大类化合物成分 55 种, 其中醛类物质含量最高, 并通过计算 OAV (Odor Activity Value) 值结合 PLS-DA 分析, 可区分不同炸制时间的差异, 初步确定正己醛、壬醛、 β -蒎烯、正戊醇、桉烯、桉烯、乳酸丁酯、异戊醇、月桂烯 9 种挥发性风味物质为油炸猪肉丸的特征性风味物质, 且炸制时间在 12 min 时风味丰度更好。该研究可以为高品质猪肉丸的开发提供风味理论依据, 也可为“狮子头”“牛肉丸”等丸状类食品工业化生产及预制菜风味研究提供借鉴和参考。

关键词: 油炸猪肉丸; 炸制时间; 挥发性成分; 风味物质; 气相色谱-质谱法 (GC-MS)

文章编号: 1673-9078(2025)01-273-283

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.1.1355

Comparison of the Changes in Volatile Flavor Components of Pork Meatballs Prepared over Different Frying Time Periods Based on GC-MS

ZHAO Zhao^{1,2}, LIU Wei^{1,2}, WANG Sa¹, HUAI Xue^{1,2}, HUANG Nanjuan^{1,2}, SUN Yang^{1,2},

ZHANG Beining^{1,2}, ZHU Wenzheng^{1,2,3*}, ZHOU Xiaoyan^{1,2,3,4*}

(1.College of Tourism Cuisine, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)(2.Jiangsu Huaiyang Vegetable Industrialization Engineering Research Center, Yangzhou 225127, China)(3.Key Laboratory of Chinese Intangible Cultural Heritage, Ministry of Culture and Tourism, Yangzhou 225127, China) (4.School of Cuisine and Hotel Management, Shanghai Zhongqiao Vocational and Technical University, Shanghai 201514, China)

Abstract: To compare the changing trends of the flavor compounds of pork meatballs obtained over different frying time periods, this study took fried pork meatballs as the research object, and used solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (SPME-GC-MS) to separate and analyze the volatile flavor components of fried pork meatballs, and further combined with chemometric methods and sensory evaluation for discriminant analysis.

引文格式:
赵赵,刘薇,王卅,等.基于GC-MS比较不同炸制时间猪肉丸挥发性风味成分的变化[J].现代食品科技,2025, 41(1): 273-283.

ZHAO Zhao, LIU Wei, WANG Sa, et al. Comparison of the changes in volatile flavor components of pork meatballs prepared over different frying time periods based on GC-MS [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(1): 273-283.

收稿日期: 2023-11-13

基金项目: 扬州市-扬州大学市校合作共建创新科技平台项目 (YZ2020267); 中餐非遗技艺传承文化和旅游部重点实验室开放课题 (WLB202201); 扬州大学高层次人才科研启动基金项目 (137012607); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (KYCX24_3863)

作者简介: 赵赵 (1999-), 男, 硕士, 研究方向: 烹饪科学与技术, E-mail: yzdxlpzyz@163.com

通讯作者: 朱文政 (1986-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 烹饪科学与技术, E-mail: zhuwz@yzu.edu.cn; 共同通讯作者: 周晓燕 (1964-), 男, 学士, 教授, 研究方向: 烹饪科学与技术, E-mail: yzuxyz@163.com

time periods, deep-fried pork meatballs were used in this study. Solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (SPME-GC-MS) was employed to separate and analyze the volatile flavor compounds of the deep-fried pork meatballs. Moreover, discriminant analysis was conducted by chemometric methods and sensory evaluations. The results revealed a total of 55 compounds belonging to nine categories, alcohols, aldehydes, alkanes, esters, acids, ketones, olefins, ethers and others, were detected, among which aldehydes had the highest content. Through Odor Activity Value (OAV) calculations and Partial Least Squares-Discriminant Analysis (PLS-DA), differences caused by the variations in frying time were distinguished. Nine volatile flavor compounds, namely hexanal, nonanal, β -myrcene, 1-pentanol, sabinene, β -pinene, butyl lactate, isoamyl alcohol, and lauricene, were preliminarily identified as the characteristic flavor compounds of deep-fried pork meatballs. The flavor abundance was the highest when the frying time was 12 min. This research provides a theoretical basis for the development of high-quality pork meatballs and a reference for the industrial production of ball-shaped foods like “lion's head” and “beef meatballs” and the flavor research of prefabricated dishes.

Key words: pork meatball; frying time; volatile components; flavor substance; gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS)

油炸猪肉丸是我国北方一道具有悠久历史的传统家常菜肴^[1],与山东的“四喜丸子”、扬州的“红烧狮子头”、汕头的“牛肉丸”等丸类食品有着外表与制作方式上的相似之处,深受我国民众所喜爱,在节日期间十分常见,同时油炸的成熟方式,也是最古老的加工方式之一,最早可以追溯到16世纪^[2]。猪肉,作为日常生活中不可或缺的食品原料,可以为人体提供维生素、蛋白质、矿物质等营养素,具有较高的营养价值^[3]。传统的加热方式与常见的食品原料相碰撞,产生了独特的诱人风味,使油炸猪肉丸在市场和家庭中持续占据着非常重要的地位。油炸食品的风味特征关系到食品的整体可接受性^[4],油炸过程中涉及到复杂的反应变化,在高温下,由于水分减少、淀粉糊化、美拉德反应等因素,使油炸制品具有诱人的色泽、独特的风味,对消费者极具吸引力^[5],油炸食品的风味在食品行业中的受欢迎程度起着决定性作用^[6],油炸猪肉丸也是如此,其风味的好坏直接影响到食用者的喜好程度。油炸猪肉丸的风味产生与变化,与其加热时间存在很大关系。

近几年,关于油炸猪肉丸的研究较少,主要集中在工艺优化、配方优化、有害物分析、营养成分分析等方面,例如董向向^[7]对传统猪肉丸配方进行了优化,将部分肥肉用麦麸代替,有效降低了猪肉丸的饱和脂肪酸含量,并采取微波与油炸结合的烹饪方式,降低了有害物质的产生;孙莹等^[8]在猪肉丸子中加入了马铃薯全粉丰富丸子口感和营养价值,

并采用单因素和正交实验,结合感官评价确定了马铃薯猪肉丸的最佳加工工艺;尹茂文^[9]运用涂膜技术、蒸煮预处理、复合膜等方式,有效降低了油炸猪肉丸最终的含油量并改善了油炸猪肉丸的食用品质;王艳^[10]研究了超声波辅助油炸对肉丸炸制时间、水分含量、鲜味物质含量、有害物质含量的影响。目前,尚未见到通过GC-MS (Gas Chromatography-Mass Spectrometry) 技术分析不同炸制时间对油炸猪肉丸挥发性风味物质变化影响的报道。

本文以油炸猪肉丸为实验对象,采取内标法,通过GC-MS技术对不同炸制时间猪肉丸挥发性风味物质进行分析鉴定,筛选出不同炸制时间下猪肉丸的挥发性风味物质,并通过计算OAV (Odor Activity Value) 值找出其中标志性化合物,结合感官评价对各不同炸制时间的猪肉丸进行综合分析,为油炸猪肉丸及其预制产品的工业化生产加工提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

前腿肉(外三元猪)、鸡蛋,购于扬州大润发超市;生姜,购于扬州大润发超市;小葱,购于扬州大润发超市;淀粉(风车牌);料酒(古越龙山牌);色拉油(鲁花牌);食用盐(淮盐牌)。

辛酸甲酯,美国赛默飞世尔科技公司(Thermo Fisher Scientific)。

1.2 仪器与设备

FA2204B 电子天平, 上海天美天平仪器有限公司; 101-00B 鼓风干燥机, 浙江绍兴市苏珀仪器有限公司; L-101P 油炸锅 (10 L), 广东德玛仕智能厨房设备有限公司; 57330-U 手动固相微萃取 (Solid-Phase Microextraction, SPME) 进样器, 美国默克公司 (Supelco); 萃取头 (75 μm , CarboxenTM/polydimethylsiloxen, CAR/PDMS)、DSQ II 气质联用仪, 美国赛默飞世尔科技公司 (Thermo Fisher Scientific)。

1.3 方法

1.3.1 样品制备

样品制备流程如图 1 所示, 参考魏越胜等^[11]制方法, 并稍作修改, 将猪前腿肉洗净、沥干水分, 放入冰箱 (-20 $^{\circ}\text{C}$) 冷冻 2 h, 取出将肥肉、瘦肉分开并切成长条状, 将切分好的肥肉、瘦肉加工成石榴米大小的肉糜, 按照肥瘦比例 3:7 的标准混合猪肉糜, 每 500 g 混合料添加鸡蛋液 55 g、淀粉 20 g、葱姜末各 10 g、料酒 30 g, 混合搅拌 3 min, 摔打 1 min 上劲, 而后放入冰箱 (4 $^{\circ}\text{C}$) 静置 1 h 促进混合料的乳化效果, 静置后称取 30 g/个, 并揉搓成圆形, 放入 180 $^{\circ}\text{C}$ 油锅浸炸, 炸制过程中, 根据油炸肉丸的关键步骤, 依据前期预实验, 设置合理的采样点, 炸制过程中, 从 4 min 处开始取样, 往后每 2 min 取一次样, 每次取出 3 个平行样, 取至 12 min, 用吸油纸吸除样品表面色拉油, 冷却至常温放入 4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱冷藏待测。

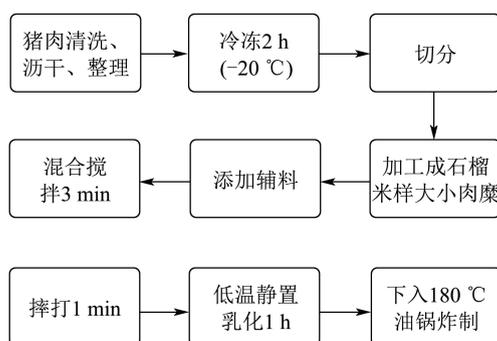


图 1 样品制备流程图

Fig.1 Sample preparation flow chart

1.3.2 顶空固相微萃取

结合参考朱文政等^[12]、Song 等^[13]的测定方法, 并略作修改, 将冷却至室温的油炸猪肉丸在超净工作台内迅速加工成肉糜, 准确称取 10.0 g 的油炸肉

丸样品, 置于容量为 200 mL 的萃取瓶中, 加入内标化合物 (20 μL 辛酸甲酯, 0.013 7 mg/mL), 封口膜封口。将萃取头放在 250 $^{\circ}\text{C}$ 的环境中老化 40 min, 然后通过瓶口的橡胶密封塞插入萃取瓶中。放置于 60 $^{\circ}\text{C}$ 精密数显热风水浴槽中静置平衡 40 min, 萃取完成后, 立即拔出萃取头并将其插入 GC 注射口, 打开气质联用仪进行采集数据并分析鉴定。

1.3.3 GC-MS检测

GC 条件: 色谱毛细管柱为 DB-Wax (30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μm), 进样口温度为 250 $^{\circ}\text{C}$, 载气为氦气, 流量 1.0 mL/min, 不分流进样; 色谱柱升温条件: 初始温度 40 $^{\circ}\text{C}$, 保持 2 min, 以 4 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速度升至 120 $^{\circ}\text{C}$, 再以 8 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率升温至 240 $^{\circ}\text{C}$, 保持 7 min。

MS 条件: 采用电子电离模式, 电离方式 EI, 电子电离能量 70 eV; 离子源温度 240 $^{\circ}\text{C}$, 质量扫描范围: 30~450 (m/z)。

挥发性风味物质的定性定量分析: 参考张文玉等^[14]的分析方法, 将经色谱柱分离后的化合物, 通过检索数据库 (NIST2014) 进行质谱分析鉴定, 筛选出正负匹配度大于 80% 的化合物, 结合保留时间和参考文献对挥发性风味物质进行再次鉴定分析。利用已知质量浓度的辛酸甲酯峰面积计算样品中各挥发性风味物质的含量, 计算公式如公式 (1) 所示:

$$W_x = \frac{60 \times 1000 \times A_x}{A_i} \times M_i \quad (1)$$

式中:

W_x ——目标化合物挥发性物质的含量, $\mu\text{g}/\text{kg}$;

A_i ——内标化合物辛酸甲酯的峰面积;

A_x ——目标化合物挥发性物质的峰面积;

M_i ——内标化合物辛酸甲酯的质量浓度, $\mu\text{g}/\mu\text{L}$;

60——加入内标物的体积, μL 。

1.3.4 气味活度值分析 (Odor Activity Value, OAV)

参考刘登勇等^[15]的分析方法, 并根据单位变化作出适当调整, 参考各挥发性风味物质的阈值和气味活度值^[16]确定油炸肉丸中的主体风味成分, 相关研究表明 $0 \leq \text{OAV} \leq 1$ 的物质通常被认为是在食物整体香味中起修饰作用, $\text{OAV} \geq 1$ 的化合物通常被认为是食物基质整体香气的有效贡献者; $\text{OAV} \geq 10$ 的化合物被认为是影响食物香气的重要物质^[17], 计算如公式 (2) 所示:

$$\text{OAV} = \frac{C_i}{\text{OT}_i \times 1000} \quad (2)$$

式中:

C_i —挥发性风味物质的质量浓度, $\mu\text{g}/\text{kg}$;

OT_i —风味物质的感觉阈值, mg/kg 。

1.4 感官评价

感官评分标准设计结合油炸猪肉丸的实际情况而制定, 如表 1 所示。将制作完成的油炸猪肉丸分别放入一次性餐盘中, 邀请 10 位 (5 男 5 女) 经过嗅觉、视觉和味觉敏感且来自烹饪与营养教育、营养与食品卫生学、食品科学与工程专业具有一定专业基础的评价人员对油炸猪肉丸色泽、质地、口味、气味四个方面进行感官评价。保证环境安静 (无气味、噪音污染), 所有评价人员评价每个样品时需要在 5 min 内完成, 同时在进行下一个样品评价前用纯净水漱口。

表 1 油炸猪肉丸感官评分表

Table 1 Sensory rating table for fried pork meatballs	
项目	评定标准
色泽	色泽金黄, 外观明亮且有光泽 (20~250)
	色泽呈微黄色或微褐色, 颜色、光泽较暗淡 (14~19)
	色泽呈褐色, 颜色明亮但无光泽 (8~13)
质地	色泽呈暗褐色, 颜色、光泽较暗淡 (≤ 7)
	外表焦脆, 内里软嫩 (20~25)
	外表焦脆, 内里略焦或内里较软烂 (14~19)
口味	外表较嫩, 内里软烂 (8~13)
	外表焦糊, 内里焦脆 (≤ 7)
	口味鲜香, 酥嫩适口 (20~25)
气味	口味鲜香, 口感一般 (14~19)
	口味、口感都表现一般 (8~13)
	口味、口感较差 (≤ 7)
气味	有香味且风味十足, 无不良气味 (20~25)
	有香味, 风味略好且无不良气味 (14~19)
	香味较明显, 风味不明显, 无异味 (8~13)
	香味不明显, 风味不明显, 有异味 (≤ 7)

1.5 数据处理

每个样品重复测样 3 次, 使用 Office Excel 2021 和 IBM SPSS Statistics 27.0 软件对最终数据进行平均值和标准差分析, 利用 Metabo Analyst 进行 PLS-DA 分析, 采用 Origin 2021 进行数据图像处理。

2 结果与分析

2.1 SPME-GC-MS检测结果及挥发性风味物质分析

为了充分明确不同炸制时间对油炸猪肉丸挥发

性化合物的影响, 采取 GC-MS 技术对猪肉丸的挥发性风味化合物进行分析鉴定, 风味分析总离子流见图 2, 五种油炸肉丸样品的挥发性风味物质成分检测结果见表 2、3 及图 3。

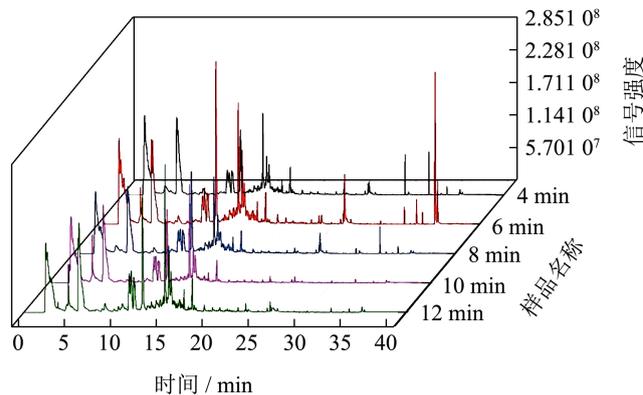


图 2 五种油炸肉丸样品总离子流图

Fig.2 Total ion flow diagram of five kinds of fried meatball samples

如表 2 所示, 共检测出 55 种挥发性风味物质, 可分为 9 类: 分别为醇类 (9 个)、醛类 (11 个)、烷烃类 (10 个)、酯类 (12 个)、酸类 (1 个)、酮类 (1 个)、烯炔类 (7 个)、醚类 (1 个)、其他 (3 个)。其中, 保留时间大于 2 min 的挥发性物质有正己醛、2- 甲基吡嗪、正戊醇、壬醛、庚醛、正十二烷、十二甲基二氢六硅氧烷、乳酸丁酯、苜烯、2,5- 二甲基吡嗪 10 种化合物。从样品角度看, 炸制时间为 12 min 时, 总挥发性风味物质成分最高 ($157\ 660.47\ \mu\text{g}/\text{kg}$), 其次为 4 min ($132\ 038.21\ \mu\text{g}/\text{kg}$)、8 min ($127\ 856.34\ \mu\text{g}/\text{kg}$)、10 min ($99\ 854.35\ \mu\text{g}/\text{kg}$)、6 min ($90\ 838.69\ \mu\text{g}/\text{kg}$)。从挥发性化合物种类看, 醛类总挥发性风味物质含量最高 ($206\ 348.23\ \mu\text{g}/\text{kg}$), 其次为醇类 ($191\ 127.10\ \mu\text{g}/\text{kg}$)、烯类 ($88\ 695.99\ \mu\text{g}/\text{kg}$)、酯类 ($55\ 985.75\ \mu\text{g}/\text{kg}$)、烷烃类 ($52\ 379.53\ \mu\text{g}/\text{kg}$)、酮类 ($9\ 893.53\ \mu\text{g}/\text{kg}$)、其他 ($3\ 105.00\ \mu\text{g}/\text{kg}$)、酸类 ($691.05\ \mu\text{g}/\text{kg}$)、醚类 ($21.89\ \mu\text{g}/\text{kg}$)。醛类物质虽然种类不是很多, 但是阈值较低, 含量最高, 是油炸猪肉丸香气的主要成分, 与 Dashmaa 等^[18]对猪肉主要风味的研究相似, 同时醇类物质阈值相对偏高, 在油炸猪肉丸香气中起辅助修饰作用。其他类别风味包括甲基二苄胺、2,5- 二甲基吡嗪、2- 甲基吡嗪三种物质, 是油炸肉制品中比较常见的风味物质, 可以为整体提供焦味、烤土豆味, 在较低浓度下也具有较高的嗅觉感受。

表 2 五种油炸肉丸样品的挥发性风味物质成分

Table 2 Volatile flavor components of five fried meatball samples (µg/kg)		保留时间/min	4 min	6 min	8 min	10 min	12 min
化合物	CAS 号						
醇							
异胡薄荷醇	89-79-2	0.09	144.69 ± 20.20 ^a	—	—	—	—
乙醇	64-17-5	8.62	17 657.78 ± 23.41 ^a	28 813.22 ± 103.21 ^b	24 305.525 ± 243.06 ^a	24 148.85 ± 66.67 ^a	28 198.235 ± 34.40 ^b
苯乙醇	60-12-8	1.63	6 312.65 ± 13.67 ^a	5 713.20 ± 33.13 ^a	5 499.31 ± 0.55 ^c	2 982.455 ± 30.57 ^c	4 960.265 ± 69.66 ^b
1-辛烯-3-醇	3391-86-4	0.15	1 277.48 ± 35.30 ^b	1 528.28 ± 26.56 ^a	—	—	1 528.28 ± 14.26 ^b
异戊醇	123-51-3	1.22	3 406.76 ± 28.20 ^b	3 420.365 ± 15.71 ^a	1 158.9 ± 11.59 ^b	—	—
2-苧醇	464-45-9	0.36	—	—	—	303.2 ± 6.25 ^a	—
正戊醇	71-41-0	2.24	14 612.49 ± 33.20 ^b	—	5 478.05 ± 54.78 ^a	—	9 597.11 ± 36.35 ^a
桉叶油醇	470-82-6	0.04	—	12.84 ± 3.32 ^a	—	—	—
alpha-松油醇	98-55-5	0.12	33.58 ± 28.20 ^a	—	—	33.58 ± 2.31 ^a	—
醛							
正己醛	66-25-1	7.02	25 335.37 ± 5.65 ^c	3 120.34 ± 201.22 ^a	26 657.855 ± 266.58 ^a	27 307.05 ± 21.91 ^b	24 221.545 ± 30.62 ^a
异戊醛	590-86-3	0.20	193.83 ± 15.62 ^b	—	—	—	—
反-2-十二烯醛	20407-84-5	1.37	98.53 ± 9.94 ^a	200.21 ± 10.21 ^a	139.69 ± 1.40 ^b	247.225 ± 3.10 ^a	237.61 ± 8.69 ^b
壬醛	124-19-6	2.21	13 919.85 ± 18.62 ^a	2 397.13 ± 35.65 ^a	7 614.855 ± 76.15 ^b	9 306.72 ± 95.10 ^a	23 036.05 ± 45.29 ^b
正辛醛	124-13-0	0.84	4 776.53 ± 23.20 ^a	3 661.24 ± 54.31 ^a	3 323.64 ± 33.24 ^b	4 667.53 ± 38.65 ^a	5 457.48 ± 35.42 ^b
十二醛	112-54-9	1.77	1 075.22 ± 36.30 ^c	1 000.23 ± 34.22 ^c	585.97 ± 5.86 ^a	741.81 ± 21.12 ^b	598.14 ± 14.29 ^c
庚醛	111-71-7	3.71	1 411.49 ± 22.36 ^{ab}	1 613.43 ± 28.23 ^a	1 157.645 ± 11.58 ^a	1 354.885 ± 3.10 ^a	1 458.13 ± 2.12 ^b
戊醛	110-62-3	0.36	35.91 ± 0.89 ^b	—	50.86 ± 0.51 ^a	—	—
苯甲醛	100-52-7	1.73	448.95 ± 8.64 ^b	354.79 ± 23.32 ^a	877.6 ± 8.78 ^a	965.165 ± 7.30 ^a	1 107.35 ± 10.64 ^c
(Z)-3,7-二甲基辛-2,6-二烯醛	106-26-3	1.28	489.65 ± 5.26 ^a	472.30 ± 13.43 ^a	442.38 ± 4.42 ^a	836.07 ± 19.45 ^b	1 706.61 ± 4.65 ^c
癸醛	112-31-2	0.17	—	821.68 ± 18.65 ^b	—	—	821.68 ± 12.20 ^a
正十二烷	112-40-3	2.45	4 065.66 ± 13.26 ^b	215.34 ± 15.26 ^a	10 382.19 ± 103.82 ^{ab}	1 488.865 ± 16.87 ^a	3 818.13 ± 20.35 ^a
2-甲基十一烷	7045-71-8	0.48	219.245 ± 10.74 ^a	574.51 ± 19.65 ^a	780.93 ± 7.81 ^a	—	—
3-甲基戊烷	96-14-0	1.24	—	1 330.88 ± 36.35 ^a	1 219.93 ± 12.20 ^a	297.53 ± 0.21 ^a	1 330.88 ± 8.69 ^a
十二甲基二氢六硅氧烷	995-82-4	3.93	7 764.2 ± 22.31 ^a	375.08 ± 25.62 ^c	480.405 ± 4.80 ^b	342.93 ± 2.36 ^b	1 643.05 ± 10.25 ^b
正己烷	110-54-3	0.85	1 195.95 ± 12.36 ^b	696.435 ± 80.07 ^a	—	1 195.95 ± 43.25 ^b	—
十一烷	1120-21-4	0.77	1 088.12 ± 18.26 ^a	1 613.34 ± 21.73 ^a	1 941.05 ± 19.41 ^b	818.18 ± 16.98 ^a	1 543.12 ± 9.56 ^{ab}
十四烷	629-59-4	0.56	733.15 ± 13.25 ^b	1 017.92 ± 33.21 ^a	746.82 ± 7.47 ^b	883.04 ± 19.84 ^b	—
B-硝基苯乙烷	6125-24-2	0.23	—	—	467.49 ± 4.67 ^a	—	—
正十五烷	629-62-9	0.36	—	991.66 ± 25.36 ^a	402.41 ± 4.02 ^b	—	991.66 ± 20.35 ^a
正十六烷	544-76-3	0.42	89.08 ± 5.36 ^a	—	—	—	208.91 ± 10.25 ^b

续表 2

化合物	CAS 号	保留时间/min	4 min	6 min	8 min	10 min	12 min
正己酸乙酯	123-66-0	0.44	4 114.49 ± 20.36 ^b	5 230.77 ± 45.37 ^a	4 062.4 ± 40.62 ^b	3 322.39 ± 65.32 ^b	5 230.77 ± 16.23 ^c
壬酸乙酯	123-29-5	0.48	101.83 ± 2.36 ^a	201.21 ± 4.35 ^a	93.58 ± 0.94 ^b	111.21 ± 8.95 ^b	240.63 ± 4.32 ^a
己酸甲酯	106-70-7	0.17	121.45 ± 8.56 ^a	—	—	—	—
辛酸乙酯	106-32-1	0.38	1 015.53 ± 10.23 ^a	1 643.28 ± 14.37 ^a	858.2 ± 8.58 ^c	777.66 ± 4.25 ^b	1 578.5 ± 28.32 ^b
癸酸乙酯	110-38-3	0.19	—	427.16 ± 16.74 ^a	—	121.55 ± 5.25 ^d	201.15 ± 4.23 ^c
棕榈酸甲酯	112-39-0	0.16	—	2 784.04 ± 34.26 ^a	—	—	—
乳酸丁酯	138-22-7	2.55	4 437.06 ± 23.30 ^a	4 933.26 ± 26.34 ^a	2 696.57 ± 26.97 ^c	4 437.06 ± 30.25 ^a	4 172.955 ± 1.79 ^b
异戊酸乙酯	108-64-5	0.19	—	—	98.51 ± 0.99 ^a	—	—
甲酸异戊酯	110-45-2	0.44	—	1 122.55 ± 18.65 ^a	11.41 ± 0.11 ^c	304.44 ± 6.52 ^a	1 122.55 ± 20.36 ^b
邻苯二甲酸二丁酯	84-74-2	0.34	—	51.66 ± 3.25 ^a	239.12 ± 2.39 ^a	—	51.66 ± 0.98 ^b
(Z,Z)-9,12-十八烷二烯酸乙酯	544-35-4	0.07	7.27 ± 0.10 ^a	—	—	7.27 ± 0.54 ^c	—
乙酸冰片酯	76-49-3	0.14	—	27.3 ± 0.46 ^a	—	—	27.3 ± 1.35 ^b
油酸	112-80-1	0.06	21.54 ± 0.22 ^a	—	649.49 ± 6.49 ^c	20.02 ± 3.23 ^c	—
丙酮	67-64-1	0.35	—	7 040.57 ± 44.26 ^a	2 852.96 ± 28.53 ^b	—	—
2- 蒎烯	80-56-8	1.44	1 046.465 ± 121.71 ^a	463.36 ± 30.24 ^c	543.26 ± 30.24 ^c	1 149.37 ± 10.72 ^{ab}	1976.41 ± 15.32 ^b
(-)- 莰烯	5794-04-7	0.20	666.42 ± 20.32 ^{bc}	—	—	—	—
桉烯	3387-41-5	0.76	14 255.37 ± 22.15 ^b	—	17 642.52 ± 176.43 ^a	—	24 031.99 ± 39.25 ^c
β- 蒎烯	127-91-3	0.57	—	—	1 712.09 ± 17.12 ^{bc}	8 632.965 ± 92.03 ^b	2 313.21 ± 12.43 ^a
茨烯	79-92-5	2.38	—	—	2 861.665 ± 28.62 ^a	2 994.645 ± 31.26 ^c	3 194.245 ± 30.37 ^b
月桂烯	123-35-3	0.22	—	6 025.21 ± 18.65 ^a	—	—	—
(Z)-3,7- 二甲基-1,3,6- 十八烷三烯	3338-55-4	0.20	—	—	335.97 ± 3.36 ^a	—	—
对薄荷-1,3,8- 三烯	18368-95-1	0.06	30.25 ± 0.53 ^a	—	—	30.25 ± 2.14 ^b	—
甲基烯丙基硫酸酯	10152-76-8	0.06	—	21.89 ± 0.94 ^a	—	—	—
甲基二苄胺	102-05-6	0.18	485.03 ± 0.36 ^{ab}	485.03 ± 15.62 ^a	—	—	—
2,5- 二甲基吡嗪	123-32-0	4.26	15.76 ± 0.45 ^b	24.45 ± 2.36 ^c	28.35 ± 2.36 ^a	24.48 ± 1.89 ^a	61.82 ± 6.51 ^b
2- 甲基吡嗪	203-645-8	5.35	—	987.04 ± 45.31 ^a	—	—	993.04 ± 6.25 ^b

注: 所有结果均以均值 ± 标准误差表示, 同一行不同上标不同字母, 表示差异具有统计学意义 ($P < 0.05$)。

表 3 不同炸制时间的肉丸挥发性风味物质数量汇总
Table 3 Summary of volatile flavor substances of meatballs at different frying times

化合物类别	4 min	6 min	8 min	10 min	12 min
醇类	7	5	4	4	4
醛类	10	9	9	8	8
烷烃类	7	7	8	6	6
酯类	6	9	7	7	8
酸类	1	0	1	1	0
酮类	0	1	1	0	0
烯炔类	3	2	4	4	4
醚类	0	1	0	0	0
其他	2	3	1	1	2
共计	36	37	35	31	32

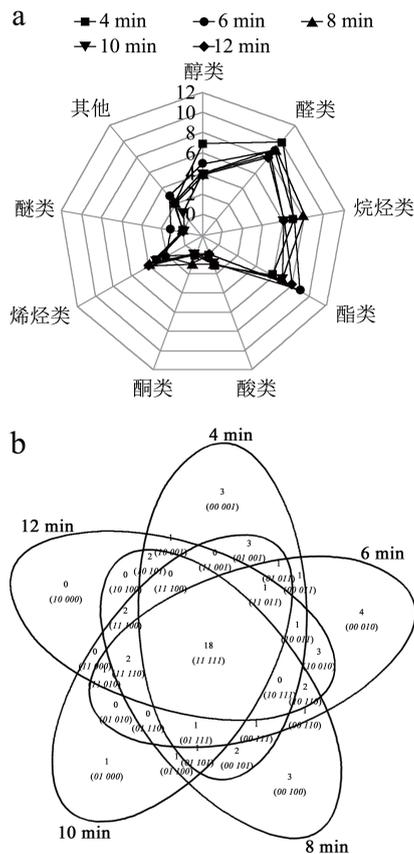


图 3 五种肉丸样品风味成分种类 (a) 和含量图 (b)
Fig.3 Types and contents of flavor components in five kinds of meatball samples

根据油炸猪肉丸挥发性风味的离子流图建立了不同炸制时间下的风味香气图谱，五种不同炸制时间的猪肉丸有明显差异。如图 3a 所示，油炸时间在 4 min 时醇类、醛类化合物含量表现突出，在 6 min 时酯类化合物含量表现突出，在 12 min 时烯炔类化合物含量表现突出，油炸时间在 4、6 min 时风味种类较多，在这两个时间段后，挥发性风

味物质数量呈现减少趋势，这可能是油炸过程中，随着时间的延长对肉丸的风味化合物产生了一定程度的破坏，但伴随着肉丸内部复杂的反应进行，也提升了风味物质的含量，例如吡嗪类、烯类风味化合物，使其在炸制 12 min 时风味化合物更加集中、风味更加浓郁。如图 3b 所示，5 种不同炸制时间的猪肉丸，共检测出乙醇、苯乙醇、正己醛、反-2-十二烯醛、壬醛、正辛醛、十二醛、庚醛、苯甲醛、(Z)-3,7-二甲基辛-2,6-二烯醛、正十二烷、十二甲基二氢六硅氧烷、十一烷、正己酸乙酯、壬酸乙酯、辛酸乙酯、乳酸丁酯、2,5-二甲基吡嗪 18 种共有的挥发性风味物质，其中炸制时间在 4 min 有 3 种特有的挥发性风味化合物，分别是异胡薄荷醇、异戊醛、己酸甲酯；在 6 min 有 4 种特有的挥发性风味化合物，分别是桉叶油醇、棕榈酸甲酯、月桂烯、甲基烯丙基硫醚；在 8 min 有 3 种特有的挥发性风味化合物，分别是 B-硝基苯乙烷、异戊酸乙酯、(Z)-3,7-二甲基-1,3,6-十八烷三烯；在 10 min 有 1 种特有的挥发性风味化合物，是 2-茨醇，可以表明各样品风味物质含量之间存在较为明显差异。

2.2 样品特征性香味物质分析 (OAV)

通过判断化合物的含量高低，并不能判断其对风味贡献程度的大小，但通过查询各风味物质的阈值，计算出 OAV 值可以用于评估油炸猪肉丸中各香气成分的贡献度^[19]。如表 4 所示，通过查询、计算，共筛选出 35 种 OAV 值 > 1 的挥发性风味物质，其中，醇类有 6 种，醛类有 10 种，烷烃类有 3 种，酯类有 8 种，酮类有 1 种，烯炔类有 6 种，醚类有 1 种，这些挥发性化合物对整体香气贡献较大，其中 ≥ 10 的挥发性风味化合物则可以确定为整个香气组成的重要成分^[20]。

醇类化合物在油炸猪肉丸整体风味形成中发挥着较为关键的作用，主要是由脂质氧化和 Strecker 降解反应生成^[21]。五种炸猪肉丸检测出苯乙醇、1-辛烯-3-醇、异戊醇、2-茨醇、正戊醇、桉叶油醇等 6 种醇类化合物。其中苯乙醇在全时段均被检出，具有玫瑰香气；1-辛烯-3-醇是由亚油酸氧化分解而成，在 4、6、12 min 时被检出，贡献了蘑菇和泥土味；正戊醇在 4、8、12 min 时被检出，具有温和的特殊气味；桉叶油醇在 6 min 时被检出，具有樟脑样香气和清凉味道。通过分析，可以发现，OAV ≥ 10 的醇类化合物有苯乙醇、1-辛烯-3-醇、异戊醇、正戊醇等 4 种挥发性风味化合物。

表 4 肉丸中主要的挥发性风味物质阈值及OAV值

Table 4 Main volatile flavor substance thresholds and OAV values in meatballs

	化合物	CAS 号	阈值/(mg/kg)	4 min	6 min	8 min	10 min	12 min
醇类	苯乙醇	1960/12/8	0.021	300.60	272.06	261.87	142.02	236.20
	1-辛烯-3-醇	3391-86-4	0.002 7	473.14	566.03	—	—	566.03
	异戊醇	123-51-3	0.006 1	558.49	560.72	189.98	—	—
	2-苜醇	464-45-9	0.08	—	—	—	3.79	—
	正戊醇	71-41-0	0.150 2	97.29	—	36.47	—	63.90
	桉叶油醇	470-82-6	0.005 08	—	2.53	—	—	—
醛类	正己醛	66-25-1	0.23	110.15	13.57	115.90	118.73	105.31
	异戊醛	590-86-3	0.000 35	553.80	—	—	—	—
	反-2-十二烯醛	20407-84-5	0.007 3	13.50	27.43	19.14	33.87	32.55
	壬醛	124-19-6	0.003 1	4 490.27	773.27	2 456.40	3 002.17	7 430.98
	正辛醛	124-13-0	0.17	28.10	21.54	19.55	27.46	32.10
	十二醛	112-54-9	0.033	32.58	30.31	17.76	22.48	18.13
	庚醛	111-71-7	0.26	5.43	6.21	4.45	5.21	5.61
	苯甲醛	100-52-7	0.085	5.28	4.17	10.32	11.35	13.03
	(Z)-3,7-二甲基辛-2,6-二烯醛	106-26-3	0.008 8	55.64	53.67	50.27	95.01	193.93
癸醛	112-31-2	0.002 6	—	316.03	—	—	316.03	
烷烃类	正十二烷	112-40-3	0.77	5.28	0.28	13.48	1.93	4.96
	十四烷	629-59-4	1	0.73	1.02	0.75	0.88	—
	B-硝基苯乙烷	6125-24-2	0.002	—	—	233.75	—	—
酯类	正己酸乙酯	123-66-0	0.04	102.86	130.77	101.56	83.06	130.77
	己酸甲酯	106-70-7	0.07	1.74	—	—	—	—
	辛酸乙酯	106-32-1	0.019 3	52.62	85.14	44.47	40.29	81.79
	癸酸乙酯	110-38-3	0.005	—	85.43	—	24.31	40.23
	棕榈酸甲酯	112-39-0	2	—	1.39	—	—	—
	乳酸丁酯	138-22-7	0.000 000 029	1.53E+08	1.70E+08	9.30E+07	1.53E+08	1.44E+08
	异戊酸乙酯	108-64-5	0.000 069	—	—	1427.68	—	—
	乙酸冰片酯	76-49-3	0.075	—	0.36	—	—	0.36
酮类	丙酮	67-64-1	2	—	3.52	1.43	—	—
烯烃类	2-蒎烯	80-56-8	0.1	10.46	4.63	5.43	11.49	19.76
	桉烯	3387-41-5	1.5	9.50	—	11.76	—	16.02
	β -蒎烯	127-91-3	0.18	—	—	9.51	47.96	12.85
	月桂烯	123-35-3	0.112 5	—	53.56	—	—	—
	(Z)-3,7-二甲基-1,3,6-十八烷三烯	3338-55-4	0.01	—	—	33.60	—	—
	对薄荷-1,3,8-三烯	18368-95-1	0.015	2.02	—	—	2.02	—
醚类	甲基烯丙基硫醚	10152-76-8	0.000 5	—	43.78	—	—	—

醛类化合物是猪肉中主要的挥发性风味物质^[22], 主要是脂质氧化以及脂肪氧化过程中的降解产物, 有一些也会通过美拉德反应产生, 大多具有油脂、青草和坚果味, 同时因其气味感受阈值较低, 该类化合物也是其他食物风味物质的重要组成部分。五种油炸猪肉丸样品中检测出正己醛、异戊醛、反-2-十二烯醛、壬醛、正辛醛、十二醛、庚醛、苯甲醛、(Z)-3,7-二甲基辛-2,6-二烯醛、癸醛等10种醛类物质, 在油炸猪肉丸的香味体系中发挥重要作用。正己醛由亚油酸降解生成^[23], 有自动氧化及聚合作用, 在少量酸存在时更显著, 可以为猪肉丸带来辛味。异戊醛有苹果香味, 正辛醛有果子香气, 十二醛有紫罗兰样的强烈而又持久的香气可以赋予猪肉丸清新的味道, 也可以起到调和风味的作用^[24]。苯甲醛具有苦杏仁味, 燃烧时具有芳香气味, 壬醛有强烈的油脂气味、甜橙气息、油炸香、烤焦香, 癸醛具有新鲜的油脂香, 稀薄时则有果味香, 可以赋予猪肉丸特殊的焦味、烧烤味。通过分析, 可以看出, 醛类是油炸猪肉丸风味组成体系中最为重要的一类挥发性风味化合物, 其中正己醛、异戊醛、反-2-十二烯醛、壬醛、正辛醛、十二醛、苯甲醛、(Z)-3,7-二甲基辛-2,6-二烯醛、癸醛等9种风味化合物 OAV 值 ≥ 10 , 是油炸猪肉丸挥发性风味化合物组成中的重要成分。

酯类通常由脂质氧化的产物醇和游离脂肪酸反应生成, 是一类重要的香气化合物类别, 大多化合物都具有水果香味, 可赋予油炸猪肉丸独特的花香、果香和甜香气味^[25]。本研究在5个样品中检测出的酯类化合物有正己酸乙酯、己酸甲酯、辛酸乙酯、癸酸乙酯、棕榈酸甲酯、乳酸丁酯、异戊酸乙酯等8种化合物。正己酸乙酯、辛酸乙酯、乳酸丁酯、在各时段均被检出, 其中辛酸乙酯具有白兰地酒香味, 可以赋予猪肉丸一定的酒香风味; 癸酸乙酯在6、10、12 min 时被检出, 具有椰子香型香气; 异戊酸乙酯在8min 时被检出, 有果子香味。通过分析可以看出, 酯类风味物质大多具有典型的水果风味, 其中正己酸乙酯、辛酸甲酯、辛酸乙酯、癸酸乙酯、乳酸丁酯、异戊酸乙酯 OAV 值 ≥ 10 , 在猪肉丸挥发性风味化合物体系中发挥重要作用。

烯炔类最常见的是由热解、脱羧、脱水和异构化等反应生成, 有时也会随着食物成熟或者加工过程中的催化特定反应而形成, 也有可能来自于香辛料。本研究在5个样品中检出 OAV 值 > 1 的化合物有2-蒎烯、桉烯、 β -蒎烯、月桂烯、(Z)-3,7-二甲

基-1,3,6-十八烷三烯、对薄荷-1,3,8-三烯6种挥发性风味物质。2-蒎烯在各时段均有发现; β -蒎烯在8、10、12 min 时检出, 具有树脂和松脂香气; 月桂烯在6 min 时被检出, 具有清淡的香脂香气。通过分析, 可以发现烯炔类化合物虽然在样品中检出数量并不少, 但与其他几类化合物相比, 整体香味贡献程度仍然不高。

烷烃类物质在样品中被检出 OAV 值 > 1 的有正十二烷、十四烷、B-硝基苯乙烷4种化合物。因其阈值较高, 所以对于整体风味的贡献也比较小, 主要是在整体风味中起到协同作用。

酮类物质种类少、含量低, 是由多不饱和脂肪酸的降解或热氧化产生的^[26]。本研究在5个样品中检出 OAV 值 > 1 的化合物仅有丙酮一种, 该化合物具有芳香气味且具辛辣甜味, 并没有检测出 OAV 值 > 10 的挥发性风味化合物。醚类物质也是在本研究中仅测出一种即甲基烯丙基硫醚, 该化合物具有硫醚的特殊味道, 是大蒜的代谢物之一, 吃完大蒜嘴巴中有特殊的味道, 也是这种味道所致。

综上所述, 结合本研究中的猪肉丸样品挥发性化合物对应的 OAV 值进一步分析, 通过 OAV 值的大小比较表明油炸猪肉丸的整体风味主要归因于苯乙醇、1-辛烯-3-醇、异戊醇、正戊醇、正己醛、异戊醛、反-2-十二烯醛、壬醛、正辛醛、十二醛、苯甲醛、(Z)-3,7-二甲基辛-2,6-二烯醛、癸醛、正己酸乙酯、辛酸甲酯、辛酸乙酯、癸酸乙酯、乳酸丁酯、异戊酸乙酯、2-蒎烯、桉烯、 β -蒎烯、月桂烯、(Z)-3,7-二甲基-1,3,6-十八烷三烯等 OAV 值 ≥ 10 的挥发性化合物。

2.3 多元统计分析

采用 PLS-DA 具有复杂数据直观化、可视化等特点, 对实验结果进一步分析, 可以起到很好的监督分析作用。如图 4a 可知, 五个样品中 4 min (A) 位于第二象限, 6 min (B) 位于第三象限, 8 min (C) 位于第四象限, 10 min (D) 位于第四象限, 12 min (E) 位于第二象限, 虽然 8 min 与 10 min 距离较近, 但仍能明显区分五个样品位置, 表明种炸制时间可以进行区分。变量投影重要性系数 (Variable Importance Projection, VIP) 是 PLS-DA 模型中较为重要的输出参数, 可以进一步反映出挥发性化合物对建立模型的贡献率^[27], 一般判别 VIP 值 > 1 的化合物对模型判别具有重要作用。由图 4b 可知, VIP 值 > 1 的化合物中, 正己醛(10)最大, 其次为正

己醛 (49)、苧烯 (13)、壬醛 (48), 一般值越大, 证明该挥发性化合物在不同的炸制时间下的差异越显著。

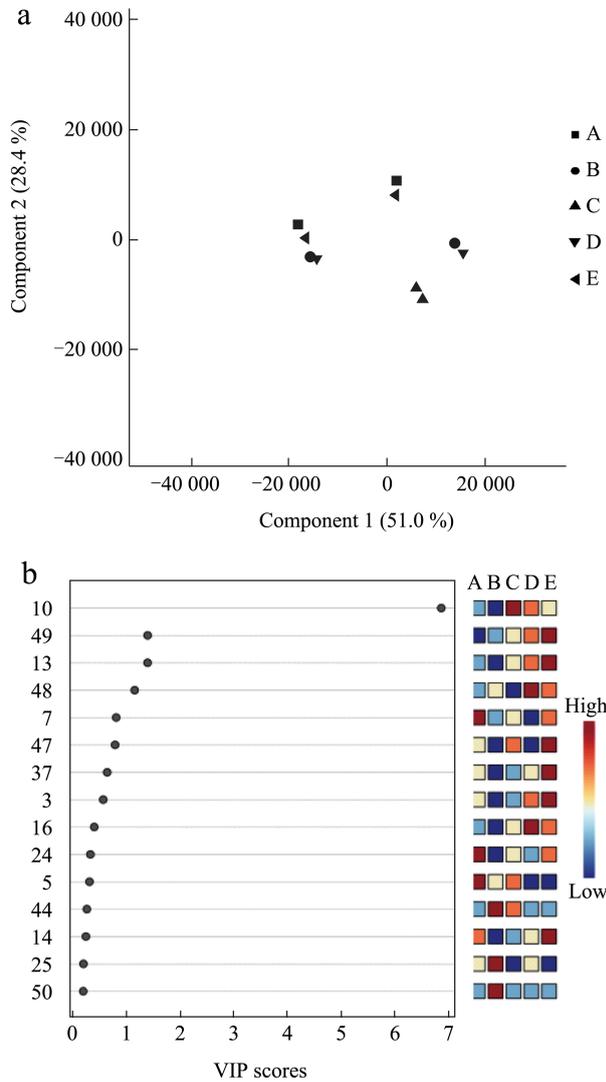


图 4 PLS-DA 载荷图 (a) 和 VIP 图 (b)

Fig.4 PLS-DA Load diagram (a) and VIP diagram (b)

2.4 感官评价结果分析

由图 5 可知, 样品色泽评价得分呈现先上升后下降趋势, 在加热时间为 10 min 时得分最高, 色泽呈现金黄色, 外观明亮且有光泽, 随后分别是加热时间为 12、8、6、4 min 时的样品, 加热时间为 4 min 时, 加热时间较短, 外表颜色较浅; 加热时间为 12 min 时, 加热时间较长, 猪肉丸外表颜色由金黄转变至微褐色。样品质地评价得分也是呈现先上升后下降趋势, 在加热时间为 10 min 时得分最高, 质地外酥里嫩, 在食用时具有较好的质感; 加热时间为 12 min 时, 虽然外表焦脆, 但是内部也呈现出了一定的焦感, 会影响到食用感受; 在加热

时间为 4 min 时, 虽然已经成熟, 但还是较为软嫩, 不符合传统油炸猪肉丸的质地特点, 所以得分表现较低。样品口味评价得分呈现先持平后上升趋势, 在加热时间为 12 min 时得分最高, 口味鲜香、酥嫩适口, 在加热时间为 4~10 min 时, 得分保持基本持平状态, 差别不大, 但是在加热时间为 4~8 min 时, 各评价人员评分差别较大, 可能与个人饮食习惯有关, 而在加热时间为 10 min 时, 各评价人员评分差别较小。样品气味评价得分呈现先下降后上升的趋势, 在加热时间为 12 min 时得分最高, 风味表现较好且风味十足, 无不良气味, 随后分别是加热时间为 10、4、8、6 min, 但是 4~8 min 时分数差别不是很大, 加热时间为 4 min 时得分略高。

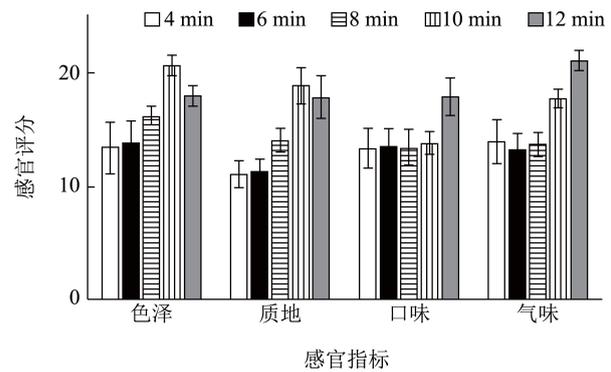


图 5 感官评价得分图

Fig.5 Score chart of sensory evaluation

3 结论

本研究利用 GC-MS 技术结合 OAV 值计算分析了不同炸制时间下的猪肉丸挥发性化合物组成及含量, 在国内目前未见有相关研究, 是该食品风味研究中的首次探索, 共鉴定出 56 种挥发性风味物质, 包括醇类、醛类、烷烃类、酯类、酸类、酮类、烯炔类、醚类、其他共 9 大类化合物成分, 从样品角度看, 炸制时间为 12 min 时总挥发性风味物质成分最高; 从挥发性化合物种类看, 醛类总挥发性风味物质含量最高。

通过 PLS-DA 与 OAV 结合的方式分析, 初步确定正己醛、壬醛、 β -苧烯、正戊醇、桉烯、桉烯、乳酸丁酯、异戊醇、月桂烯 9 种挥发性风味物质为油炸猪肉丸的特征性风味物质。研究结果表明, 油炸时间在 4、6 min 时风味种类较多, 在这两个时间段后, 挥发性风味物质数量呈现减少趋势, 这可能是油炸过程中, 随时间的延长对肉丸的风味化合物产生了一定程度的破坏, 但伴随着肉丸内部复杂的

反应进行,也提升了风味物质的含量,例如吡嗪类、烯类风味化合物,使其在炸制 12 min 时风味化合物更加集中、风味更加浓郁,炸制时间在 12 min 时,挥发性风味物质种类有上升的趋势,且风味丰度更好,但随着炸制时间的延长,其色泽、质地表现会出现一定程度的下滑,也会带来一定的营养、口感上的改变,加上通过计算 OAV 值来分析样品中的风味存在一定的局限性,需要后续结合其感官表现继续深入研究,为油炸猪肉丸及预制菜生产的品质评定提供更加客观的理论依据。

参考文献

- [1] 魏跃胜,李茂顺.食品添加剂对传统制作油炸肉丸质量的影响[J].食品研究与开发,2012,33(5):201-204.
- [2] 赵永敢,石晓,刘少阳.煮制时间对卤牛肉出品率的影响[J].肉类工业,2013,6:21-22.
- [3] GIVENS I. The nutritional value of milk and meat, their association with human health/disease and how this is reflected in consumer information [J]. *Animal-Science Proceedings*, 2022, 13(1): 32.
- [4] 周明珠,杜柳,邱文兴,等.油炸肉制品风味的研究进展[J].现代食品科技,2023,39(5):367-375.
- [5] ERICKSON M D. Deep Frying: Chemistry, Nutrition, and Practical Applications [M]. Elsevier, 2015.
- [6] CHANG C, WU G, ZHANG H, et al. Deep-fried flavor: Characteristics, formation mechanisms, and influencing factors [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, 60(9): 1496-1514.
- [7] 董向向.猪肉丸的配方优化及烹饪方式改进[J].食品安全导刊,2019,30:185.
- [8] 孙莹,苗榕芯,江连洲.马铃薯猪肉丸子加工工艺研究[J].食品研究与开发,2018,39(14):109-114.
- [9] 尹茂文.降低油炸猪肉丸含油量方法及其对品质影响研究[D].南京:南京农业大学,2017.
- [10] 王艳.超声波辅助油炸对肉丸品质的影响及其机理研究[D].南京:南京农业大学,2019.
- [11] 魏跃胜,李茂顺,陈智.传统油炸肉丸贮藏性研究[J].食品研究与开发,2012,33(10):191-195.
- [12] 朱文政,刘薇,季明勇,等.不同肥瘦比和烹制时间对狮子头猪肉丸特征挥发性风味成分的影响[J].现代食品科技,2022,38(6):257-266,159.
- [13] SONG J, CHEN Q, BI J, et al. GC/MS coupled with MOS e-nose and flash GC e-nose for volatile characterization of Chinese jujubes as affected by different drying methods [J]. *Food Chemistry*, 2020, 331: 127201.
- [14] 张文玉,李雅,马赫,等.气相色谱-质谱联用结合化学计量法分析不同干燥方式对茺荑风味物质的影响[J].食品与发酵工业,2024,50(4):294-301.
- [15] 刘登勇,周光宏,徐幸莲.确定食品关键风味化合物的一种新方法:“ROAV”法[J].食品科学,2008,7:370-374.
- [16] 里奥·范海默特.化合物香味阈值汇编 [M].化合物香味阈值汇编,2015.
- [17] ZHU Y, LV H P, SHAO C Y, et al. Identification of key odorants responsible for chestnut-like aroma quality of green teas [J]. *Food Research International*, 2018, 108: 74-82.
- [18] DASHMAA D, CHO B-W, ODKHUU G, et al. Meat quality and volatile flavor traits of Duroc, Berkshire and Yorkshire breeds [J]. *Food Science of Animal Resources*, 2011, 31(6): 807-816.
- [19] LU C, ZHANG Y, ZHAN P, et al. Characterization of the key aroma compounds in four varieties of pomegranate juice by gas chromatography-mass spectrometry, gas chromatography-olfactometry, odor activity value, aroma recombination, and omission tests [J]. *Food Science and Human Wellness*, 2023, 12(1): 151-160.
- [20] WANG J, HAN M, MENG J, et al. Identification of key odor-active compounds and development of odor wheels in rubber product industries using TD/GC-O-MS, OAV, and statistical analysis [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2023, 14: 101837.
- [21] 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.
- [22] 刘浩悦,李聪,王颖,等.国内黑猪肉风味研究进展[J].现代食品科技,2023,39(9):337-352.
- [23] SOHAIL A, AI-DALALI S, WANG J, et al. Aroma compounds identified in cooked meat: A review [J]. *Food Research International*, 2022, 157: 111385.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] ZANG M, WANG L, ZHANG Z, et al. Changes in flavour compound profiles of precooked pork after reheating (warmed-over flavour) using gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry with chromatographic feature extraction [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2020, 55(3): 978-987.
- [27] ROSSINI K, VERDUN S, CARIOU V, et al. PLS discriminant analysis applied to conventional sensory profiling data [J]. *Food Quality and Preference*, 2012, 23(1): 18-24.