

回锅肉不同加工阶段的风味特征分析

白婷, 咎博文, 汪正熙, 张佳敏, 张崧, 王卫

(成都大学肉类加工四川省重点实验室, 四川成都 610106)

摘要: 为了分析回锅肉在不同加工阶段的风味特征, 本文采用固相微萃取-气相色谱-质谱联用法, 检测了回锅肉在不同加工阶段(原料肉、煮制、油炸、拌料调味和包装灭菌)的挥发性风味物质含量, 并通过气味活度值(odor activity value, OAV)分析、主成分分析(principal component analysis, PCA)和聚类分析(cluster analysis, CA), 对风味物质的呈味特征进行了对比分析。结果发现, 在回锅肉的加工过程中, 风味物质种类和含量随着加工程度的增加而呈现递增趋势, 最后的包装灭菌阶段风味物质和含量均达到最高(43种、32487.59 ng/g); OAV值分析得出24种关键风味成分; 进一步的PCA和CA分析反应出拌料调味和包装灭菌是关键风味形成的主要阶段, 而影响其总体风味的主要成分是PC1, 即(*E,E*)-2,4-癸二烯醛、苯乙醛、甲硫基丙醛、乙酸丁酯和反式-2-癸烯醛; 而油炸风味主要取决于PC2(1-辛烯-3-醇、正己醛和(*E*)-2-庚烯醛), PC3(苯甲醛、茴香脑和草蒿脑)则是影响拌料调味主要因素。总之, 本研究揭示了回锅肉不同加工阶段的风味物质种类及其含量。

关键词: 回锅肉; 加工阶段; 挥发性风味物; OAV分析; PCA分析; CA分析

文章篇号: 1673-9078(2021)08-244-257

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.8.0359

Flavor Components in Different Processing Stages of Twice-cooked Pork

BAI Ting, ZAN Bo-wen, WANG Zheng-xi, ZHANG Jia-min, ZHANG Yin, WANG Wei

(Meat Processing Key Lab of Sichuan Province, Chengdu University, Chengdu 610106, China)

Abstract: To analyze the flavor characteristics of twice-cooked pork in different processing stages (raw meat, boiling, frying, seasoning, and packaging and sterilization), volatile component contents in these stages were measured using solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (SPME-GC-MS). Meanwhile, taste characteristics of flavor components were compared and analyzed through odor activity value (OAV) analysis, principal component analysis (PCA), and cluster analysis (CA). The results suggest that the types and amounts of flavor components increase progressively as the pork is further processed, and they reach their maxima (43 kinds and 32487.59 ng/g, respectively) in the final packaging and sterilization stage. A total of 24 key volatile flavor components (OAV \geq 1) were identified. In addition, PCA and CA analysis results show that seasoning, packaging, and sterilization are the main stages of key flavor component formation. Furthermore, the overall flavor is primarily affected by PC1 ((*E,E*)-2,4-decadienal, phenylacetaldehyde, (methylthio-) propionaldehyde, butyl acetate, tetradecane, and (*E*)-2-decenal), whereas the fried flavor is largely due to PC2 (1-octene-3-ol, n-hexanal, and (*E*)-2-heptenal). Lastly, PC3 (benzaldehyde, anethole, and estragole) is the most influential in the seasoning stage. In summary, this study revealed the different kinds of flavor components and their corresponding amounts in different processing stages of twice-cooked pork.

Key words: twice-cooked pork; processing stage; volatile flavor components; odor activity value analysis; principal component analysis; cluster analysis

引文格式:

白婷, 咎博文, 汪正熙, 等. 回锅肉不同加工阶段的风味特征分析[J]. 现代食品科技, 2021, 37(8): 244-257

BAI Ting, ZAN Bo-wen, WANG Zheng-xi, et al. Flavor components in different processing stages of twice-cooked pork [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(8): 244-257

收稿日期: 2021-04-01

基金项目: 四川省重点研发计划项目(2020YFN0151); 四川省科技成果转化项目(2019ZYZF0055); 烹饪科学四川省高等学校重点实验室开放基金项目(PRKX201920); 肉类加工四川省重点实验室开放基金项目(19R-15)

作者简介: 白婷(1989-), 女, 助理研究员, 研究方向: 畜产品加工与质量安全控制

通讯作者: 王卫(1958-), 男, 教授, 研究方向: 畜产品加工与质量安全控制

随着人们生活水平的不断提升,方便营养的工业化菜肴制品逐渐成为消费市场的新宠。回锅肉作为广受消费者青睐的经典川菜品种^[1],其市场需求量大,亟需通过工业化加工以满足餐饮业和家庭烹调的发展需要。为了实现回锅肉的工业化加工,近年来国内外研究人员开展了有关回锅肉的制作工艺及其品质控制方法的研究。邓楷等^[2]以川菜回锅肉的工艺优化为目标,建立了自动炒制回锅肉的最佳工艺为炒制时间 150 s、温度 180 °C;田龙等^[3]确定了回锅肉生产过程的质量安全控制体系;刘平等^[4]对不同工艺加工的回锅肉调料的风味特征的分析,结果为热反应法制备的调味料中呋喃类、含氮类和含硫类化合物对整体风味影响较大;贾丽娜等^[5]建立了速冻调理回锅肉的加工工艺,并从制作的回锅肉菜肴中共检出 91 种挥发性风味物质。但这些研究未对不同加工阶段时回锅肉中的风味物质含量变化进行分析,导致回锅肉在加工过程中的风味变化信息缺失,制约了产品品质的过程控制。

过程控制是实现工业化加工的关键环节,尤其对于工业化加工食品,过程控制不仅关系到产品的质量,而且是决定产品品质的重要步骤^[6]。回锅肉类工业化产品不仅市场需求量大,而且受众面广,实现对该类工业化加工产品的过程控制,对产品品质和质量安全都非常重要。因此,为了剖析回锅肉制作过程中的风味变化,为工业化回锅肉制品的加工提供品质调控依据,本文根据回锅肉制作的 5 个关键阶段,即原料肉、煮制、油炸、拌料调味和包装灭菌,拟对每个加工阶段肉中的风味物质含量变化进行分析,并结合气味活度值分析(odor activity value, OAV)、主成分分析(principal component analysis, PCA)和聚类分析(cluster analysis, CA),研究回锅肉的风味特征变化,以期回锅肉菜肴的工业化加工及加工过程的品质控制提供参考。

1 材料与amp;方法

1.1 原料

1.1.1 材料

原料肉(新鲜猪肉),遂宁市高金食品有限公司;回锅肉混合调味料(主要成分为豆瓣酱、植物油、辣椒、甜面酱、豆豉、酱油、白砂糖、谷氨酸钠、花椒、山梨酸钾),成都国酿食品有限公司;食用油,购于十陵镇好易购超市。

正己烷(色谱纯)和 2,4,6-三甲基吡啶(2 μg/μL),Sigma-Aldrich。

1.1.2 主要仪器设备

HY-DGJD 低温高湿解冻机,山东华誉;350 切条机,诸城盛嘉;夹层锅,诸城时顺;BQPJ-I 台式切片机、BYZG-20 油炸机、BHHJ-III 混合调味机,杭州嘉兴艾博;4202 真空包装机,江西赣云;FY50 全自动不锈钢反压高温蒸煮锅,上海三申;7890B-5977A 型气质联用仪、PAL RSI 85 CTC 多功能自动进样器(含 SPEM 进样器)、HP-5MS UI 色谱柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm),美国 Agilent;50/30 μm DVB/CAR/PDMS 萃取头,美国 Supelco 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 回锅肉的加工工艺及取样

1.2.1.1 回锅肉的加工流程

原料肉(冻肉)选择→解冻→切条→预煮→切片→炸制→拌料调味→计量包装→灭菌→冷却贮藏

1.2.1.2 回锅肉不同加工阶段样品的制备

(1) 原料肉准备阶段(A1):冻肉在冷藏间(0~4 °C)解冻。

(2) 煮制阶段(A2):解冻后原料肉切条(宽 6 cm 长 18~20 cm),煮制(98~100 °C) 25 min,捞出沥干。

(3) 油炸阶段(A3):冷却后肉条进行切片(长 6 cm 厚 0.3 cm),油炸(物料和油量质量比为 1:2,炸制温度 180 °C) 40 s,捞出沥干。

(4) 拌料调味阶段(A4):按照原料肉总重量的 5%加入调味料,混合搅拌(转速 20 r/min) 10 min。

(5) 包装灭菌阶段(A5):铝箔袋真空包装(100 g/袋),灭菌(15'-30'-20'/121 °C) 15 min,反压冷却。

取 5 个加工阶段样品搅碎成肉糜,置于-80 °C 冰箱备用。

1.2.2 SPME-GC-MS 测定

参考王卫等^[7]的方法进行优化。前处理条件:取 3 g 绞碎后的肉糜样品于 15 mL 顶空瓶中密封,设置 CTC 自动进样器预热处理 45 min,样品抽取时间 20 min,解析时间 5 min。

GC 条件:HP-5MS UI 色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm);压力 32.0 kPa;流速 1.0 mL/min;载气为 He 气,不分流进样;进样口温度 250 °C;升温程序:起始温度 40 °C,保持 1 min,以 3 °C/min 升至 85 °C,保持 3 min,再以 3 °C/min 升至 105 °C,保持 2 min,再以 12 °C/min 升至 165 °C,再以 10 °C/min 升至 230 °C。

MS 条件:电子电离源(EI);电子能量 70 eV;离子源温度 230 °C,四级杆温度 150 °C;检测器电压 350 V;质量扫描范围(*m/z*):40~500。

表 1 回锅肉加工过程中的挥发性风味物质

Table 1 Volatile flavor substances in twice-cooked pork during processing

序号	保留时间 /min	中文名称	英文名称	分子式	绝对含量/(ng/g)				
					原料肉	煮制	油炸	拌料调味	包装灭菌
1	4.131	正己醛	Hexanal	C ₆ H ₁₂ O	994.25±13.32 ^c	2520.88±12.47 ^b	3179.23±23.05 ^a	2172.64±18.12 ^c	1387.85±15.7 ^d
2	7.068	庚醛	Heptanal	C ₇ H ₁₄ O	187.50±1.69 ^c	245.54±2.38 ^b	296.01±4.14 ^a	164.22±2.83 ^d	180.39 ±2.06 ^c
3	7.214	3-甲硫基丙醛	Methional	C ₄ H ₈ OS	-	-	-	-	89.08±1.87 ^a
4	9.125	(E)-2-庚烯醛	(E)-2-Heptenal	C ₇ H ₁₂ O	-	-	252.61±2.14 ^a	91.51±1.79 ^b	-
5	9.207	苯甲醛	Benzaldehyde	C ₇ H ₆ O	-	-	-	678.56±9.45 ^a	-
6	11.095	正辛醛	Octanal	C ₈ H ₁₆ O	104.98±2.31 ^c	223.00±2.93 ^b	411.27±4.44 ^a	-	-
7	12.78	苯乙醛	Phenylacetaldehyde	C ₈ H ₈ O	-	-	-	330.77±5.14 ^b	1444.58 ±13.12 ^a
8	13.514	(E)-2-辛烯醛	(E)-2-Octenal	C ₈ H ₁₄ O	68.88±3.69 ^c	220.31±5.32 ^b	353.31±7.25 ^a	-	-
9	15.654	壬醛	Nonanal	C ₉ H ₁₈ O	262.92±4.04 ^e	642.18±10.07 ^d	1107.69±7.89 ^c	1129.67±4.7 ^b	1295.26±6.2 ^a
10	18.469	(E)-2-壬烯醛	(E)-2-Nonenal	C ₉ H ₁₆ O	-	122.05±3.25 ^a	-	88.30±2.3 ^b	-
11	24.408	(E)-2-癸烯醛	(E)-2-Decenal	C ₁₀ H ₁₈ O	-	-	133.40±2.78 ^b	140.53±4.69 ^b	245.21±4.55 ^a
12	27.34	(E,E)-2,4-癸二烯醛	(E,E)-2,4-Decadienal	C ₁₀ H ₁₆ O	-	-	58.89±3.52 ^c	242.28±4.7 ^b	621.76±8.95 ^a
13	36.386	十六醛	Hexadecanal	C ₁₆ H ₃₂ O	-	-	-	-	300.42±5.38 ^a
总计		醛类			1618.53±6.87 ^c	3973.96±19.14 ^d	5792.41±22.24 ^a	5038.48±32.99 ^c	5564.55±23.69 ^b
14	5.64	2-呋喃甲醇	2-Furanmethanol	C ₅ H ₆ O ₂	-	-	-	-	528.35±11.15 ^a
15	6.036	1-己醇	1-Hexanol	C ₆ H ₁₄ O	-	-	1248.54±9.41 ^a	-	-
16	9.131	(Z)-2-七萜醇	(Z)-2-Heptenal	C ₇ H ₁₂ O	95.55±2.57 ^a	-	-	-	-
17	10.14	1-辛烯-3-醇	1-Octen-3-ol	C ₈ H ₁₆ O	79.95±3.35 ^d	293.97±11.21 ^c	507.04±15.21 ^a	367.35±7.38 ^b	294.86±8.54 ^c
18	12.308	2-乙基-1-己醇	2-ethyl-1-Hexanol	C ₈ H ₁₈ O	263.33±12.65 ^b	323.97±15.05 ^a	-	-	-
19	14.074	(Z)-2-辛烯-1-醇	(Z)-2-Octen-1-ol	C ₈ H ₁₆ O	-	-	112.54±3.07 ^a	-	-
20	14.121	(E)-氧化芳樟醇	trans-Linalool oxide	C ₁₀ H ₁₈ O ₂	-	-	-	107.57±3.35 ^a	87.26±2.59 ^b
21	15.467	芳樟醇	Linalool	C ₁₀ H ₁₈ O	-	-	-	3388.99±25.19 ^b	4476.40±32.54 ^a
22	19.39	(-)-4-萜品醇	(-)-4-Terpineol	C ₁₀ H ₁₈ O	-	-	-	1114.34±13.55 ^b	1513.35±16.04 ^a
23	20.253	α-松油醇	alpha.-Terpineol	C ₁₀ H ₁₈ O	-	-	-	512.43±13.51 ^b	629.48±12.43 ^a
24	21.296	2-丁基-1-辛醇	2-butyl-1-Octanol	C ₁₂ H ₂₆ O	-	-	-	-	169.46±3.89 ^a
总计		醇类			438.83±26.38 ^c	617.94±22.93 ^d	1868.12±17.69 ^c	5490.68±16.63 ^b	7699.16±25.64 ^a
25	4.515	乙酸丁酯	Acetic acid, butyl ester	C ₆ H ₁₂ O ₂	-	-	-	-	71.99±4.62 ^a
26	10.379	正己酸乙烯酯	n-Caproic acid vinyl ester	C ₈ H ₁₄ O ₂	-	323.97±21.59 ^b	423.64±17.32 ^a	205.52±18.97 ^c	-

转下页

接上页

27	24.204	乙酸芳樟酯	Linalyl acetate	C ₁₂ H ₂₀ O ₂	-	-	-	5140.47±32.89 ^b	5636.05±30.26 ^a
28	28.966	α -乙酸萜品酯	alpha.-Terpinyl acetate	C ₁₂ H ₂₀ O ₂	-	-	-	300.85±10.87 ^b	365.37±14.16 ^a
29	29.602	乙酸橙花酯	nerol acetate	C ₁₂ H ₂₀ O ₂	-	-	-	93.52±6.43 ^a	82.09±5.87 ^b
30	30.167	3, 7-二甲基-2, 6-辛二烯-1-醇乙酸酯	3,7-dimethyl-2,6-Octadien-1-ol,acetate	C ₁₂ H ₂₀ O ₂	-	-	-	122.63±6.49 ^b	146.90±7.25 ^a
总计		酯类			0.00	323.97±13.54 ^d	423.64±26.65 ^c	5862.99±35.08 ^b	6302.40±36.25 ^a
31	11.58	α -萜品烯	α -Terpinen	C ₁₀ H ₁₆	-	-	-	474.65±18.89 ^b	661.88±24.21 ^a
32	12.11	D-柠檬烯	D-Limonene	C ₁₀ H ₁₆	-	-	-	3117.56±28.51 ^b	3509.49±26.43 ^a
33	12.658	蒎烯	alpha-pinene	C ₁₀ H ₁₆	-	-	-	305.91±9.76 ^b	328.08±14.34 ^a
34	13.107	(Z)-3,7-二甲基-1,3,6-十八烷三烯	(Z)-3,7-dimethyl-1,3,6-Octatriene	C ₁₀ H ₁₆	-	-	-	313.06±5.43 ^b	344.23±17.56 ^a
35	13.497	(+)-3-萜烯	(+)-3-Carene	C ₁₀ H ₁₆	-	-	-	853.56±17.54 ^a	-
36	14.809	1,5,5-三甲基-6-亚甲基-环己烯	1,5,5-Trimethyl-6-methylene-cyclohexene	C ₁₀ H ₁₆	-	-	-	-	503.00±6.43 ^a
37	14.82	2-萜烯	2-Carene	C ₁₀ H ₁₆	-	-	-	315.28±7.52 ^a	-
38	21.628	4-甲基-1-十一碳烯	4-methyl-1-Undecene	C ₁₂ H ₂₄	-	-	-	-	75.65±0.87 ^a
39	32.172	石竹烯	Caryophyllene	C ₁₅ H ₂₄	-	-	-	99.99±6.89 ^a	96.86±4.87 ^a
40	29.508	2-十一烯	2-Undecenal	C ₁₁ H ₂₀ O	-	-	-	-	174.61±4.68 ^a
总计		烯类			0.00	0.00	0.00	5480.01±25.14 ^b	5693.80±25.95 ^a
41	15.817	5-丁基-壬烷	5-butyl-Nonane	C ₁₃ H ₂₈	-	-	-	-	74.65±3.04 ^a
42	21.826	2,6-二甲基-十一烷	2,6-dimethyl-Undecane	C ₁₃ H ₂₈	-	-	-	-	251.12±6.98 ^a
43	22.281	4-甲基-十二烷	4-methyl-Dodecane	C ₁₃ H ₂₈	-	-	-	-	199.45±7.81 ^a
44	24.601	十四烷	Tetradecane	C ₁₄ H ₃₀	-	-	-	-	344.06±6.43 ^a
45	25.452	4,6-二甲基-十二烷	4,6-dimethyl-Dodecane	C ₁₄ H ₃₀	-	-	-	-	671.72±13.78 ^a
46	25.901	2,6,10-三甲基-十二烷	2,6,10-trimethyl-Dodecane	C ₁₅ H ₃₂	-	-	-	-	115.26±8.21 ^a
47	26.192	2,3,5,8-四甲基-癸烷	2,3,5,8-tetramethyl-Decane	C ₁₄ H ₃₀	-	-	-	-	142.83±4.76 ^a
48	28.051	2,6,11-三甲基-十二烷	2,6,11-trimethyl-Dodecane	C ₁₅ H ₃₂	-	-	-	-	168.78±6.49 ^a
49	32.405	十六烷	Hexadecane	C ₁₆ H ₃₄	-	-	-	-	228.69±7.45 ^a
总计		烷类			0.00	0.00	0.00	0.00	2196.56
50	17.379	吡喃酮	Pyranone	C ₆ H ₈ O ₄	-	-	-	-	519.31±12.65 ^a
51	23.802	胡椒酮	p-menth-1-en-3-one	C ₁₀ H ₁₆ O	-	-	-	83.35±3.33 ^a	-
52	23.82	1-乙酰对薄荷脑-3-酮	1-Acetoxy-p-menth-3-one	C ₁₂ H ₂₀ O ₃	-	-	-	-	190.59±5.65 ^a
53	35.086	2-十五烷酮	2-Pentadecanone	C ₁₅ H ₃₀ O	-	-	-	-	126.00±4.55 ^a
总计		酮类			0.00	0.00	0.00	83.35±3.47 ^b	835.90±33.63 ^a

转下页

接上页

54	10.6	二甲胺亚甲基丙二腈	(Dimethylaminomethylene)malononitrile	C ₆ H ₇ N ₃	-	-	-	2431.09±26.78 ^b	3822.23±42.56 ^a
55	13.666	2-乙酰基吡咯	2-Acetyl pyrrole	C ₆ H ₇ NO	-	-	-	314.70±5.07 ^a	-
总计		含氮类			0.00	0.00	0.00	2745.79±37.89 ^b	3822.23±42.56 ^a
56	23.097	(Z)-茴香脑	(Z)-Anethole	C ₁₀ H ₁₂ O	-	-	-	-	174.53±7.32 ^a
57	23.108	茴香脑	cis-Anethol	C ₁₀ H ₁₂ O	-	-	-	129.50±4.65 ^a	-
58	25.568	草蒿脑	Estragole	C ₁₀ H ₁₂ O	-	-	-	124.21±3.21 ^a	-
59	5.978	对二甲苯	p-Xylene	C ₈ H ₁₀	-	-	-	98.88±2.01 ^b	198.46±4.65 ^a
60	11.958	间异丙基甲苯	1-methyl-3-(1-methylethyl)-Benzene	C ₁₀ H ₁₄	-	-	-	218.60±6.89 ^a	-
总计		其它			0.00	0.00	0.00	571.19±21.07 ^a	372.99±16.89 ^b

注：表中数据均为平均值±标准偏差，“-”表示未检测到该物质；同行的数值上标注不同的小写字母表示有显著性差异（ $p<0.05$ ）。

1.2.3 定性和定量分析

定性：对化合物进行分析时，将得到的数据在仪器的 NIST14.L 谱库中进行检索和匹配，选择匹配度高于 80% 的物质。

定量：以 2,4,6-三甲基吡啶作为内标进行定量分析，根据公式 (1) 计算各物质的绝对含量。

$$C_i = \frac{S_i}{S_{标}} \times \frac{m_{标}}{m_i} \quad (1)$$

式中： C_i 为各挥发性风味物质的绝对含量 (ng/g)； S_i 为挥发性风味物质的峰面积； $S_{标}$ 为内标物的峰面积； m_i 为样品质量/g； $m_{标}$ 为内标物质量 (ng)，本实验内标物的质量为 20000 ng。

1.2.4 关键挥发性风味物质确定

OAV 是某挥发性成分绝对含量与阈值的比值，其大小可以反映各挥发性成分对样品风味的贡献。 $0 \leq OAV < 1$ ，表明该物质对回锅肉风味有修饰作用； $OAV \geq 1$ ，表明该物质对回锅肉整体风味贡献较大^[8,9]。OAV 按照公式 (2) 计算。

$$OAV = \frac{C_i}{T_i} \quad (2)$$

式中： C_i 为某挥发性风味成分的绝对含量 (ng/g)； T_i 为该成分的感觉阈值 (ng/g)。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 进行数据统计，并进一步利用 IBM SPSS Statistics 25.0 进行主成分分析，Origin 2018 进行作图，TB tools 软件进行风味热图可视化。

2 结果与分析

2.1 不同加工阶段挥发性风味成分的总体变化

回锅肉不同加工阶段 SPME-GC-MS 测定结果和总离子流图见表 1、图 1 和图 2。本实验条件下，不同加工阶段共检出 60 种挥发性风味物质，其中醛类 13 种，醇类 11 种，酯类 6 种，烯类 10 种，烷烃类 9 种，酮类 4 种，含氮类 2 种，其他类（苯和醚类）5 种。原料肉中共检出 8 种，总含量为 2057.36 ng/g；煮制后共检出 9 种，总含量为 4915.87 ng/g；油炸后共检出 12 种，总含量为 8084.16 ng/g；拌料调味后共检出 33 种，总含量为 25272.49 ng/g；包装灭菌后共检出 43 种，总含量为 32487.59 ng/g。

挥发性风味物质含量随加工过程显著增加 ($p < 0.05$)，物质种类在拌料熟化后开始显著增加 ($p < 0.05$)。煮制后物质含量增加 2858.51 ng/g，这与酱牛肉^[10]和泡椒鹅肉^[11]加工过程中煮制后的研究结

果类似。油炸后主要物质是醛类和醇类，物质含量比煮制后增加 3168.29 ng/g，脆肉鲩鱼肉油炸后发现类似结果^[12]。拌料调味后物质种类和含量较油炸后分别增加 22 种和 17188.32 ng/g，增加的醇类、酯类、烯类和烷烃类等物质主要来源于添加的调味料，这与浅发酵香肠加入调料腌制后的结果类似^[13]。包装灭菌后物质种类和含量相比拌料调味后分别增加 10 种和 7215.1 ng/g，增加的主要为烷烃类、酮类和含氮类物质，这与酱牛肉灭菌后风味物质变少的趋势有所不同，主要是因为回锅肉的油炸脱水工艺和酱牛肉的卤煮工艺对风味物质的影响区别较大，但两者都表明低于 121 °C 灭菌温度的产品风味更优^[14,15]。

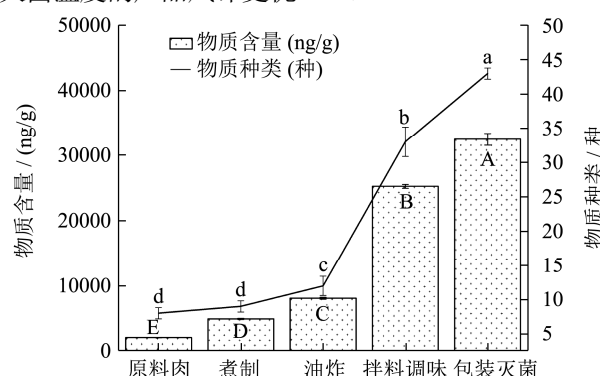
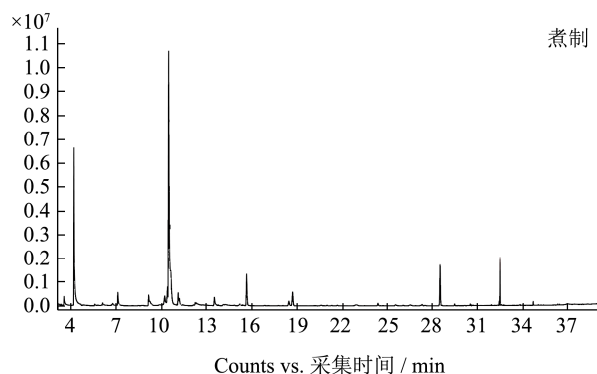
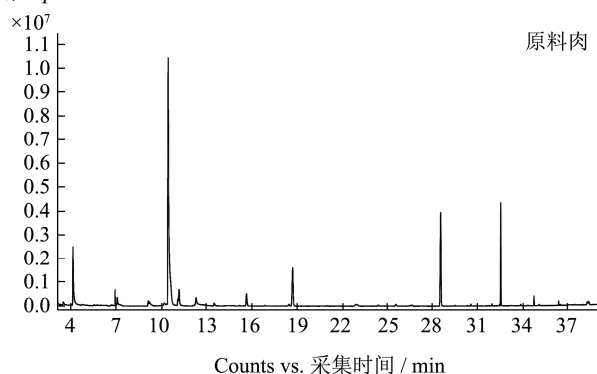


图 1 回锅肉加工过程中挥发性风味物质种类和含量变化

Fig.1 Changes in variety and content of flavor substances of twice-cooked pork during processing

注：不同大写字母表示不同加工过程物质含量差异显著 ($p < 0.05$)，不同小写字母表示不同加工过程物质种类差异显著 ($p < 0.05$)。



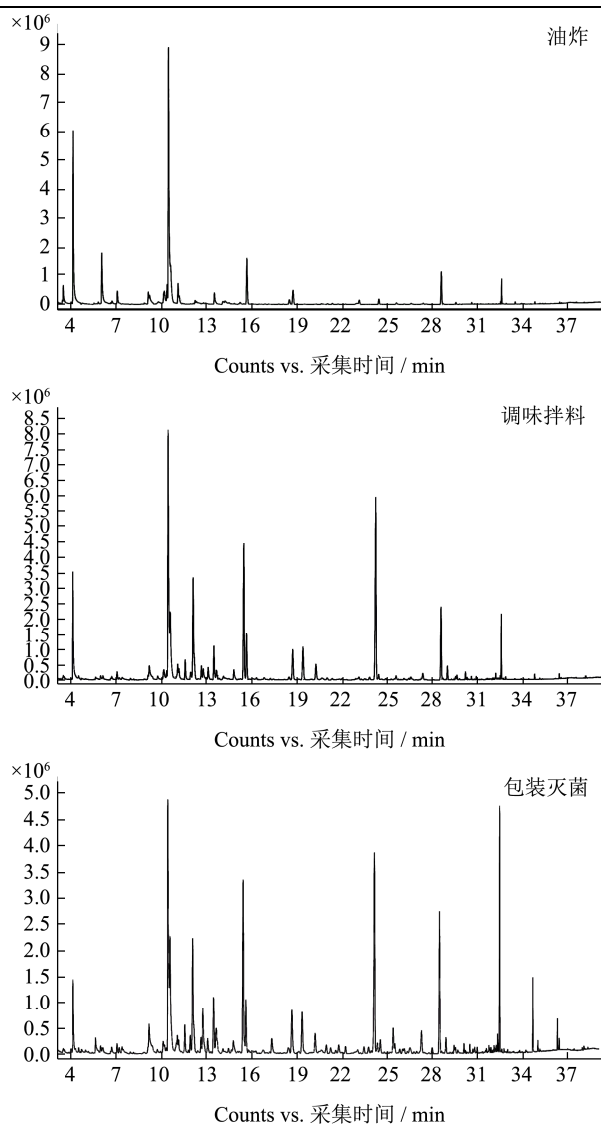


图2 回锅肉加工过程中挥发性风味物质总离子流图

Fig.1 TIC of flavor substances of twice-cooked pork during processing

2.2 回锅肉不同加工阶段挥发性风味物质类别和 OAV 分析

回锅肉加工过程中醛类物质含量由原料肉的 1618.53 ng/g 增加至油炸后最大值 5792.41 ng/g, 灭菌后略下降, 为 5564.55 ng/g, 主要源于高温引起的脂肪氧化分解及氨基酸 Strecker 降解^[16], 还有部分物质来源于所添加的香辛料, 如豆豉、豆瓣等^[9]。醇类物质随加工过程呈不断增长的趋势, 原料肉 438.83 ng/g, 成品中为 7699.16 ng/g。随着碳链不断增长, 不饱和醇类对风味有一定贡献, 呈现植物脂香等特征风味^[17]。烯烃和烷烃类主要在拌料调味和包装灭菌阶段产生, 其中烯烃来自姜、花椒等香辛料, 烷烃主要来自灭菌时脂肪酸烷氧自由基断裂^[4], 所以只在成品中检出,

且含量为 2312.46 ng/g。酮是羰基类化合物的一种, 可由脂质氧化分解或经醇氧化而得, 所以拌料后含量为 83.35 ng/g, 灭菌后显著增加至 835.90 ng/g, 源于高温引起脂肪的持续氧化^[18,19]。此外, 还检测到部分酯类、含氮类、醚类及其它化合物, 其中含氮化合物来自蛋白质的分解代谢^[20], 煮制后只有正己酸乙烯酯一种酯类, 含量为 323.97 ng/g, 其它化合物均在拌料后出现。茴香脑与草蒿脑的含量分别为 129.5 ng/g、124.21 ng/g, 但高温灭菌后未检出。

挥发性风味物质对回锅肉总体风味贡献程度主要由感觉阈值和含量二者共同决定^[21], 导致含量相对较高的挥发物可能对整体风味形成的贡献较小^[20], 可结合各挥发性风味物质及其感觉阈值, 采用 OAV 对特征性挥发性风味物质进行分析, 确定其关键风味物质。各阶段样品风味组分贡献结果如表 2 所示, 不同加工阶段共确定 24 种关键风味物质 ($OA \geq 1$), OAV 值越大表明该物质对回锅肉风味的贡献程度越大^[22], 五个加工阶段的关键性风味物质分别为 6、7、10、18、16 种, 主要为醛类 (12 种)、醇类 (4 种)、酯类 (2 种)、烯类 (3 种)、烷类 (1 种)、其他类 (2 种)。其中, 壬醛、(E)-2-壬烯醛、(E, E)-2,4-癸二烯醛的 $OA > 1000$, 正己醛、甲硫基丙醛、正辛醛、苯乙醛、(E)-2-辛烯醛、(E)-2-癸烯醛、1-辛烯-3-醇、芳樟醇、D-柠檬烯 > 100 , 这 12 种物质对回锅肉整体风味有较大贡献。

24 种关键风味成分的 OAV 整体呈递增趋势, 促进产品整体风味的形成, 芷江鸭^[23]、红烧肉^[24]等产品有类似变化趋势。但与贾丽娜研究发现炒制后变化显著的为酯类和杂环类^[5]不同, 本实验中油炸后变化最显著的为醛类物质, 这是因为采用的热加工方式不同^[25]。

各加工节点 24 种 $OA \geq 1$ 的关键物质中, 原料肉中有正己醛、庚醛、正辛醛、(E)-2-辛烯醛、壬醛和 1-辛烯-3-醇。其中正己醛、庚醛、壬醛和 1-辛烯-3-醇四种物质在加工的各阶段都能检出, 正己醛、庚醛和 1-辛烯-3-醇整体呈先增加后降低的趋势, 壬醛一直呈递增趋势。正己醛是 ω -6 不饱和脂肪酸降解的基本产物^[26], 高温油炸后含量最高 (3238.12 ng/g), 与贾丽娜等^[6]研究发现的正己醛为回锅肉成品在冻藏过程中的代表性醛类物质的结果类似。庚醛含量同脂肪含量呈正相关, 源自脂质的氧化和降解, 并呈现草木、果味和脂肪蜡味^[27]。1-辛烯-3-醇是回锅肉中最具代表性的醇类化合物, 是花生四烯酸 (AA) 在 12-脂氧化酶和亚油酸的作用下自氧化的氧化产物^[28,29], 具有强烈的泥土和蘑菇清香^[30]。壬醛在油炸工艺后含量急剧升高, 具有甜味和水果香气^[31], 主要源于脂肪高温后引

起的油酸氧化^[32]。正辛醛是通过不饱和游离脂肪酸和酯化脂肪酸自动氧化过程的非酶机制释放出的一种直链醛，它和己醛、庚酸、辛酸和壬醛呈现“青草状”香气^[33]。(E)-2-辛烯醛从亚油酸氧化降解而来^[34]，已在烤羊肉等多种肉类产品中被鉴定为关键风味物质^[35]。

煮制后猪肉的6种物质OAV值都升高，新增加的(E)-2-壬烯醛OAV达到1525.58，具有青香、脂香、西瓜样品味^[36,37]，是多不饱和脂肪酸氧化的产物^[38]，也是煮制工艺后OAV值最高的物质，说明(E)-2-壬烯醛对煮制后产品风味贡献最大。

表2 回锅肉加工过程中挥发性风味物质的OAV (OAV≥1)

Table 2 OAVs of volatile flavor compounds of twice-cooked pork during processing (OAV≥1)

编号	中文名称	英文名称	阈值/(ng/g)	原料肉	煮制	油炸	拌料调味	包装灭菌
W1	正己醛	Hexanal	4.5	220.94	560.20	706.5	482.81	308.41
W2	庚醛	Heptanal	2.8	66.96	87.69	105.72	58.65	64.42
W3	甲硫基丙醛	Methional	0.2	-	-	-	-	445.40
W4	(E)-2-庚烯醛	(E)-2-Heptenal	4.2	-	-	60.14	21.79	-
W5	苯甲醛	Benzaldehyde	350	-	-	-	1.94	-
W6	正辛醛	Octanal	0.7	149.98	318.57	587.53	-	-
W7	苯乙醛	Benzeneacetaldehyde	4	-	-	-	82.69	361.14
W8	(E)-2-辛烯醛	(E)-2-Octenal	3	22.96	73.44	117.77	-	-
W9	壬醛	Nonanal	1	262.92	642.18	1107.69	1129.67	1295.26
W10	(E)-2-壬烯醛	(E)-2-Nonenal	0.08	-	1525.58	-	1103.78	-
W11	(E)-2-癸烯醛	(E)-2-Decenal	0.3	-	-	444.66	468.42	817.37
W12	(E, E)-2,4-癸二烯醛	(E,E)-2,4-Decadienal	0.07	-	-	841.29	3461.14	8882.31
W13	1-辛烯-3-醇	1-Octen-3-ol	1	79.95	293.97	507.04	367.35	294.86
W14	(Z)-2-辛烯-1-醇	(Z)-2-Octen-1-ol	40	-	-	2.81	-	-
W15	芳樟醇	Linalool	6	-	-	-	564.83	746.07
W16	α -松油醇	alpha.-Terpineol	330	-	-	-	1.55	1.91
W17	乙酸丁酯	Acetic acid, butyl ester	66	-	-	-	-	1.09
W18	乙酸芳樟酯	Linalyl acetate	60	-	-	-	85.67	26.38
W19	D-柠檬烯	D-Limonene	10	-	-	-	311.76	350.95
W20	蒎烯	alpha-pinene	6	-	-	-	50.99	54.68
W21	石竹烯	Caryophyllene	64	-	-	-	1.56	1.51
W22	茴香脑	Anethol	73	-	-	-	1.77	-
W23	草蒿脑	Estragole	7.5	-	-	-	16.56	-
W24	十四烷	Tetradecane	100	-	-	-	-	3.44
合计				79.95	293.97	509.85	1402.05	1480.89

油炸后增加的(E)-2-庚烯醛、(E)-2-癸烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛和(Z)-2-辛烯-1-醇OAV值分别为60.14、444.66、841.29和2.81。其中(E)-2-癸烯醛含量高、阈值低，包装灭菌阶段的OAV值是油炸阶段的两倍，而拌料调味阶段变化不大，说明该物质受温度影响较大。(E)-2-庚烯醛的OAV值在拌料工艺后降为21.79，包装灭菌后未检出，(Z)-2-辛烯-1-醇经花生四烯酸氧化产生，具有脂肪酸败的气味^[39]，拌料调味和包装灭菌工艺后都未检出，说明这两种物质在高温下会被抑制或分解为其他物质。(E,E)-2,4-癸二烯醛是亚油酸氧化的主要产物，具有脂肪味和炸土豆味，其阈值极低，OAV值在油炸后为841.29，熟化后更是高达8882.31，是24

种关键风味成分中的最高值^[40]。

拌料调味后增加的物质(OAV值)为苯甲醛(1.94)、苯乙醛(82.69)和芳樟醇(564.83)、 α -松油醇(1.55)、乙酸芳樟酯(85.67)、D-柠檬烯(311.76)、蒎烯(50.99)、石竹烯(1.56)、茴香脑(1.77)、草蒿脑(16.56)等香辛料中典型特征物质。苯甲醛检出含量为678.56，但其阈值高达350，导致OAV值只有1.94，对产品风味的贡献不如其他醛类，但它是唯一确定的芳族醛^[41]，从苯丙氨酸通过Strecker降解或从亚麻酸通过氧化降解生成^[42]。苯乙醛在拌料后OAV值为82.69，但包装灭菌后达到361.14，说明拌料调味和包装灭菌都有助于该物质的积累，原因主要是其可从调味料中

的豆豉^[43]和苯丙氨酸的Strecker降解获得,呈现出花香和蜂蜜的香气^[36]。烯烃、酯类香料味物质主要来源于香料中^[44],每种物质都具有独特的香味,促进产品风味的形成。芳樟醇、乙酸芳樟酯和D-柠檬烯的OAV值较高,对产品风味贡献较大,其中芳樟醇属于链状萜烯醇类,既有紫丁香、铃兰香味,又有木质香味^[45],乙酸芳樟酯具有茉莉、薰衣草的幽雅花香^[46],D-柠檬烯具有新鲜橙子和柠檬香气^[47]。

包装灭菌后增加的甲硫基丙醛、乙酸丁酯和十四烷,其OAV值分别为89.08、71.99和344.06,但(E)-2-庚烯醛、苯甲醛、(E)-2-壬烯醛、茴香脑和草蒿脑未检出。甲硫基丙醛阈值低,具有醇厚的酱香、洋葱香和红烧肉香,是肉中典型的含硫化合物^[48]。十四烷主要来源于脂肪酸的烷氧自由基断裂后降解而来,但属于直链烷烃,且阈值较高,对香气贡献较小^[49,50]。

2.3 不同加工阶段关键风味物质的主成分分析

对回锅肉不同加工阶段 24 种 OAV ≥ 1 的关键风味成分进行主成分分析(PCA),相关矩阵特征值如表 3 所示,共提取 3 个特征值不小于 1 的主成分,其贡献率分别为 55.11%、20.72%、19.80%,解释了总方差的 95.63%,主成分分析一般提取包含 90%以上信息的主成分^[51],前三个主成分基本保留了 24 种关键挥发性物质的绝大部分信息,可以较好的区分不同加工阶段产品关键风味的变化。

表 3 主成分特征值及累计贡献率

Table 3 Principal component eigenvalue and cumulative contribution rate

主成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
1	13.23	55.11	55.11
2	4.97	20.72	75.83
3	4.75	19.80	95.63
4	1.05	4.375	100.000

表 4 旋转后主成分因子的成分矩阵

Table 4 Rotating principal components loading matrix

序号	中文名称	英文名称	PC1	PC2	PC3
1	(E,E)-2,4-癸二烯醛	(E,E)-2,4-Decadienal	0.984	-0.133	0.087
2	苯乙醛	Benzeneacetaldehyde	0.973	-0.216	-0.06
3	甲硫基丙醛	Methional	0.932	-0.207	-0.286
4	乙酸丁酯	Acetic acid, butyl ester	0.932	-0.207	-0.286
5	十四烷	Tetradecane	0.932	-0.207	-0.286
6	反式-2-癸烯醛	(E)-2-Decenal	0.911	0.285	0.188
7	芳樟醇	Linalool	0.883	-0.196	0.425
8	α -松油醇	alpha.-Terpineol	0.864	-0.191	0.465
9	D-柠檬烯	D-Limonene	0.838	-0.186	0.513
10	乙酸芳樟酯	Linalyl acetate	0.829	-0.184	0.527
11	蒎烯(+)	alpha-pinene	0.822	-0.182	0.539
12	壬醛	Nonanal	0.787	0.545	0.286
13	石竹烯	Caryophyllene	0.786	-0.174	0.593
14	1-辛烯-3-醇	1-Octen-3-ol	0.228	0.945	0.197
15	正己醛	Hexanal	-0.203	0.922	0.056
16	(E)-2-庚烯醛	(E)-2-Heptenal	-0.151	0.910	0.174
17	反式-2-辛烯-1-醇	(Z)-2-Octen-1-ol	-0.163	0.891	-0.19
18	庚醛	Heptanal	-0.350	0.787	-0.504
19	反式-2-辛烯醛	(E)-2-Octenal	-0.461	0.762	-0.449
20	正辛醛	Octanal	-0.484	0.751	-0.446
21	反式-2-壬烯醛	(E)-2-Nonenal	-0.25	-0.036	0.343
22	苯甲醛	Benzaldehyde	0.045	-0.009	0.991
23	茴香脑	Anethol	0.045	-0.009	0.991
24	草蒿脑	Estragole	0.045	-0.009	0.991

旋转后主成分因子的成分矩阵见表4,与PC1高度正相关的物质有(*E,E*)-2,4-癸二烯醛、苯乙醛、甲硫基丙醛、乙酸丁酯、十四烷和反式-2-癸烯醛,与PC2高度正相关的物质有1-辛烯-3-醇、正己醛、(*E*)-2-庚烯醛,与PC3高度正相关的物质有苯甲醛、茴香脑和草蒿脑。

根据主成分特征值及旋转成分矩阵,计算得到回锅肉的主成分得分,以PC1为横坐标、PC2和PC3为纵坐标,将回锅肉的样本投影到三维坐标系上,得到不同加工阶段样品分布情况(图3)。由图3a和3c可知,油炸后的样品位于散点图左上角区域,与其它样品距离较远,且与PC2高度正相关,表明油炸工艺对PC2的物质影响最大,结合图3b和3d可知,PC1物质主要来自于拌料调味和包装灭菌,PC2物质主要来自于油炸阶段,PC3物质主要来自于拌料调味。

各工艺阶段的特征物质,油炸阶段为1-辛烯-3-醇、正己醛、(*E*)-2-庚烯醛和(*E,E*)-2,4-癸二烯醛,主要反映回锅肉中的脂香和肉香^[10,12];拌料调味和包装灭菌为苯乙醛、甲硫基丙醛、乙酸丁酯、十四烷和反式-2-癸烯醛,拌料调味为苯甲醛、茴香脑和草蒿脑,主要反映回锅肉中的花果清香和油香味^[36,37];包装灭菌后苯甲醛、茴香脑、草蒿脑和(*E*)-2-庚烯醛未检出,表明对成品风味起主要作用的只有PC1和PC2中的8种物质,其中1-辛烯-3-醇和正己醛是肉类原料中具有的特征物质,但随加工过程含量升高^[52];而反式-2-癸烯醛、(*E,E*)-2,4-癸二烯醛和苯乙醛分别为油炸^[41,53]和拌料调味后检出的新物质。

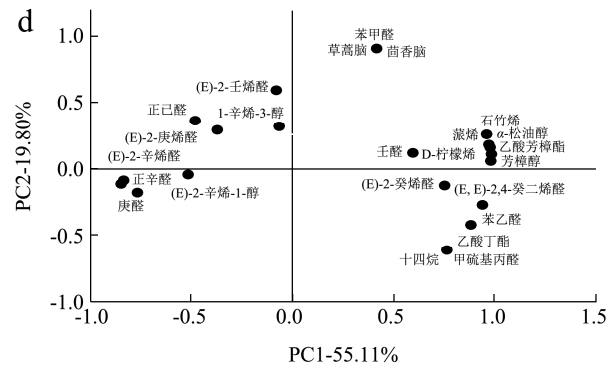
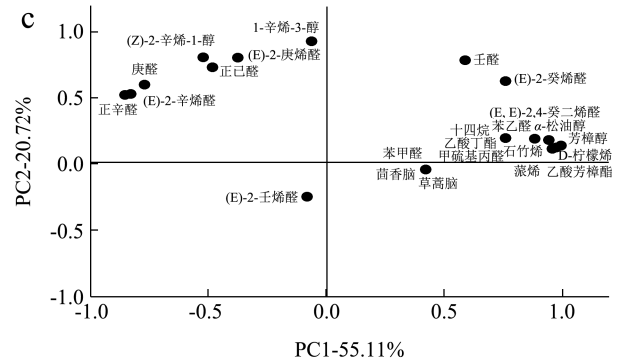
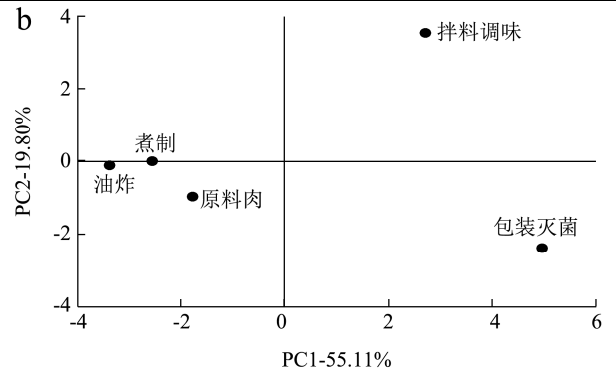
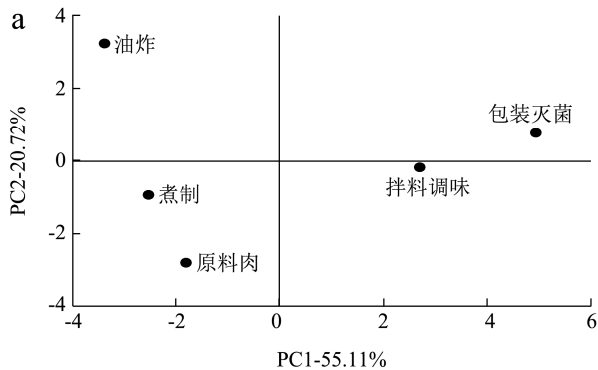


图3 回锅肉关键风味物质主成分载荷图及各阶段样品主成分得分图

Fig.3 Principal component load diagram of key flavor

substances principal component score in twice-cooked pork

注: a: 主成分得分图; b: 主成分得分图; c: 主成分载荷图; d: 主成分载荷图。

2.4 不同加工阶段关键风味物质的聚类分析

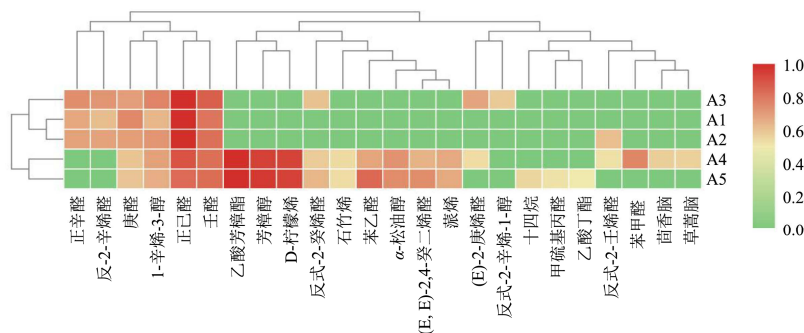


图4 样品中关键挥发性风味物质的OAV热图

Fig.4 OAV heat map of key volatile substances in samples

回锅肉加工过程中关键风味物质的热图分析见图4,不同加工阶段关键风味物质的组成和含量存在较大差异,样品A1和A2聚在一起,A4和A5聚在一起,说明原料肉和煮制工艺风味物质组成和含量相似,拌料调味和包装灭菌后的相似,而油炸工艺不同于其他4个阶段,且风味物质主要形成于加工后期的拌料调味和包装灭菌。

3 结论

风味衰减调控是工业化菜肴过程质量控制的关键点之一,对工业化菜肴回锅肉不同加工阶段挥发性风味成分的分析显示,加工进程对产品的风味呈现极为重要的影响。本实验中,风味物种类随加工进程逐渐增加,原料肉有8种(2057.36 ng/g),煮制后9种(4915.87 ng/g),油炸后为12种(8084.16 ng/g),拌料调味后33种(25272.49 ng/g),包装灭菌后43种(32487.59 ng/g)。气味活度值(OAV)分析确定出24种OAV \geq 1的关键风味物质,进一步的PCA和CA分析证实,前3个主成分(95.63%)可表征各加工阶段的特征风味物质,与其呈现高度正相关的物质有8种。各工序中拌料调味和包装灭菌是风味物质形成的关键阶段,影响总体风味的主要成分是PC1,即(*E,E*)-2,4-癸二烯醛、苯乙醛、甲硫基丙醛、乙酸丁酯、十四烷和反式-2-癸烯醛;而影响其油炸风味的是PC2,即1-辛烯-3-醇、正己醛和(*E*)-2-庚烯醛;PC3(苯甲醛、茴香脑和草蒿脑)则是影响拌料调味风味的主要成分。本研究揭示了回锅肉不同加工阶段的风味物质种类及其含量,可为回锅肉菜肴工业化加工中过程控制的研究提供参考。

参考文献

- [1] 周炫宇.近代成渝地区饮食文化地理研究[D].重庆:西南大学,2014
ZHOU Xuan-yu. Research on geography of food culture in chengyu region [D]. Chongqing: Southwest University, 2014
- [2] 邓楷,黄静,罗丹,等.回锅肉工业化生产参数优化研究[J].中国调味品,2019,44(10):63-67,72
DENG Kai, HUANG Jing, LUO Dan, et al. Study on optimization of industrial production parameters of twice-cooked pork slices [J]. China Condiment, 2019, 44(10): 63-67, 72
- [3] 田龙,张婧芸,鲁云凤.回锅肉生产中 HACCP 体系的建立[J].肉类工业,2017,12:46-50
TIAN Long, ZHANG Jing-yun, LU Yun-feng. Establishment of HACCP system in the production of twice-cooked pork [J]. Meat Industry, 2017, 12: 46-50
- [4] 刘平,黄湛,陆阳,等.不同方法制备的回锅肉调味料的风味特征[J].食品与发酵工业,2015,41(7):202-207
LIU Ping, HUANG Zhan, LU Yang, et al. Flavor characteristics of twice-cooked pork flavorings prepared by different method [J]. Food and Fermentation Industries, 2015, 41(7): 202-207
- [5] 贾丽娜,焦爱权,赵建伟,等.回锅肉加工及冻藏过程中风味物质的变化[J].食品与生物技术学报,2015,34(12):1269-1277
JIA Li-na, JIAO Ai-quan, ZHAO Jian-wei, et al. Study on the changes of volatile flavor components in double-fried pork during the processing and frozen storage [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2015, 34(12): 1269-1277
- [6] 王卫,张佳敏,赵志平,等.川菜肉类工业化关键技术研究进展[J].肉类研究,2020,34(5):98-103
WANG Wei, ZHANG Jia-min, ZHAO Zhi-ping, et al. Recent progress in industrialization of Sichuan-style meat dishes and related key technologies [J]. Meat Research, 2020, 34(5): 98-103
- [7] 王卫,张旭,张佳敏,等.四川酱香型风干腊肠加工贮藏特性及其“浅发酵”特征研究[J].食品工业科技,2020,42(1):82-88
WANG Wei, ZHANG Xu, ZHANG Jia-min, et al. The processing and storage characteristics of Sichuan sauce-flavored air-dried sausage and its characteristics of “shallow fermentation” [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 42(1): 82-88
- [8] Feng Y Z, Cai Y, Fu X, et al. Comparison of aroma-active compounds in broiler broth and native chicken broth by aroma extract dilution analysis (AEDA), odor activity value (OAV) and omission experiment [J]. Food Chemistry, 2018, 265(4): 274-280
- [9] Zhu J C, Wang L Y, Xiao Z B, et al. Characterization of the key aroma compounds in mulberry fruits by application of gaschromatography-olfactometry (GC-O), odor activity value (OAV), gaschromatography-mass spectrometry (GC-MS) and flame photometric detection (FPD) [J]. Food Chemistry, 2018, 245(4): 775-785
- [10] 孙承锋,喻倩倩,宋长坤,等.酱牛肉加工过程中挥发性成分的含量变化分析[J].现代食品科技,2014,30(3):130-136
SUN Cheng-feng, YU Qian-qian, SONG Chang-kun, et al. Changes of volatile compounds during the processing of spiced beef [J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(3): 130-136
- [11] 胡玉娇.泡椒鹅肉工艺优化及加工过程中挥发性成分的变化

- 化研究[D].雅安:四川农业大学,2014
- HU Yu-jiao. Process optimization and the study on the changes of volatile compounds of goose meat with pickled peppers [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2014
- [12] 周敏.冷冻及烹调方式对脆肉鲩鱼肉品质的影响[D].南昌:江西科技师范大学,2018
- ZHOU Min. Effects of freezing and cooking treatment on quality of *Ctenopharyngodon idellus* C. et V [D]. Nanchang: Jiangxi Science and Technology Normal University, 2018
- [13] 张旭,王卫,白婷,等.四川浅发酵香肠加工进程中挥发性风味物质测定及其主成分分析[J].现代食品科技,2020,36(10): 274-283
- ZHANG Xu, WANG Wei, BAI Ting, et al. Determination and principal component analysis of the volatile flavor substances during the processing of Sichuan light fermented sausage [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(10): 274-283
- [14] 吴倩蓉,朱宁,周慧,等.加工工艺对酱牛肉中蛋白质降解及风味物质的影响[J/OL]. 食品科学,2020-08-31.<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20200831.1146.030.html>
- WU Qian-rong, ZHU Ning, ZHOU Hui-min, et al. The changes in the protein degradation and flavor substance of sauce beef during processing [J/OL]. Food Science,2020-08-31. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20200831.1146.030.html>
- [15] 黄本婷.川菜家常菜肴回锅肉工业化加工技术研究[D].成都:成都大学,2020
- HUANG Ben-ting. Study on the industrialized processing technology of Sichuan Hui Guo-rou [D]. Chengdu: Chengdu University, 2020
- [16] 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 Xin, ZHANG Chun-jiang, HU Hong-hai, et al. Analysis and comparison of volatile flavor compounds in different styles of Chinese traditional cacon [J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(12): 247-254
- [17] Chen X, Luo J, Lou A H, et al. Duck breast muscle proteins, free fatty acids and volatile compounds as affected by curing methods [J]. Food Chemistry, 2021, 338: 128138
- [18] Irma Isnafia A, Dyah Nurul A, Wulandari Z, et al. Physicochemical properties, fatty acid profiles, and sensory characteristics of fermented beef sausage by probiotics *Lactobacillus plantarum* IIA-2C12 or *Lactobacillus acidophilus* IIA-2B4 [J]. Journal of Food Science, 2016, 81(11): 2761-2769
- [19] Emmy T, Claudia D, Ann De W. et al. Non-volatile and volatile composition of west African bulk and Ecuadorian fine-flavor cocoa liquor and chocolate [J]. Food Research International (Ottawa, Ont.), 2020, 130: 108943
- [20] Chen G J, Song H L, Ma C W. Aroma-active compounds of Beijing roast duck [J]. Flavour and Fragrance Journal, 2009, 24(4): 186-191
- [21] 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
- LIU Deng-yong, ZHOU Guang-hong, XU Xing-lian. “ROAV” method: a new method for determining key odor compounds of Rugao ham [J]. Food Science, 2008, 7: 370-374
- [22] Hoang N X, Ferng S, Ting C H, et al. Optimizing the initial moromi fermentation conditions to improve the quality of soy sauce (Article) [J]. LWT - Food Science and Technology, 2016, 74: 242-250
- [23] 龚姚谦,刘红梅,罗凤莲,等.加工工艺对芷江鸭挥发性风味成分的影响[J].食品与机械:2020,36(7):194-200
- GONG Yao-qian, LIU Hong-mei, LUO Feng-lian, et al. Effect of processing technology on the volatile flavor components of Zhijiang duck [J]. Food & Machinery, 2020, 36(7): 194-200
- [24] 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 Wen-zheng, YAN Shun-yang, XU Yan, 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
- [25] Rasinska E, Rutkowska J, Czarniecka-Skubina E, et al. Effects of cooking methods on changes in fatty acids contents, lipid oxidation and volatile compounds of rabbit meat [J]. LWT - Food Science & Technology, 2019, 110: 64-70
- [26] Kataoka H, Lord H L, Pawliszyn J. Applications of solid-phase microextraction in food analysis [J]. Journal of Chromatography A, 2000, 880(1) :35-62
- [27] Bai S, Wang Y R, Luo R M, et al. Formation of flavor volatile compounds at different processing stages of household stir-frying mutton Saozi in the northwest of China [J]. LWT, 2020: 110735
- [28] Glenda F, Salomé L, Manuel P, et al. Volatile profile of Atlantic shellfish species by HS-SPME GC/MS [J]. Food Research International, 2012, 48(2): 856-865
- [29] Edwald L, Eunok C. Changes in oxidation-derived off-flavor

- compounds of roasted sesame oil during accelerated storage in the dark [J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2012, 1(1): 89-93
- [30] Marušić N, Vidaček S, Janči T, et al. Determination of volatile compounds and quality parameters of traditional Istrian dry-cured ham [J]. *Meat Science*, 2014, 96(4): 1409-1416
- [31] Wang Y B, Li F, Chen J, et al. High-throughput sequencing-based characterization of the predominant microbial community associated with characteristic flavor formation in Jinhua ham [J]. *Food Microbiology*, 2021, 94: 103643
- [32] Hoa B, Kyeong S R, Nguyen T K L, et al. Influence of particular breed on meat quality parameters, sensory characteristics, and volatile components [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2013, 22(3): 651-658
- [33] Ianni A, Bennato F, Martino C, et al. Volatile flavor compounds in cheese as affected by ruminant diet [J]. *Molecules*, 2020, 25(3): 461
- [34] Jayasena D D, Ahn D U, Nam K C. Flavour chemistry of chicken meat: a review [J]. *Asian-australasian Journal of Animal Sciences*, 2013, 26(5): 732-742
- [35] 柏鹤, 罗瑞明, 王永瑞, 等. 无菌真空包装酱羊肉特征性挥发性风味成分分析[J]. *肉类研究*, 2020, 34(8): 41-45
BAI He, LUO Rui-ming, WANG Yong-rui, et al. Analysis of characteristic volatile flavor components in aseptic vacuum packaged spiced mutton [J]. *Meat Research*, 2020, 34(8): 41-45
- [36] 赵泽伟, 丁筑红, 顾苑婷, 等. 基于 SPME-GC-MS 和电子鼻分析苡仁油加速氧化过程挥发性成分变化[J]. *食品科学*, 2019, 40(16): 220-226
ZHAO Ze-wei, DING Zhu-hong, GU Yuan-ting, et al. Changes in volatile components of coix seed oil during accelerated oxidation analyzed by solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry and electronic nose [J]. *Food Science*, 2019, 40(16): 220-226
- [37] 刘苗苗. 黄瓜脂氢过氧化物裂解酶基因 CshPLs 参与醛类香气合成的初步分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018
LIU Miao-miao. CshPLs gene of cucumber lipid hydroperoxides lyase was involved in the preliminary analysis of aldehyde aroma synthesis [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018
- [38] 谭椰子, 周光宏, 徐幸莲, 等. 3 个品牌干腌火腿皮下脂肪挥发性风味比较分析[J]. *食品科学*, 2019, 40(16): 185-192
TAN Ye-zi, ZHOU Guang-hong, XU Xing-lian, et al. Volatile compounds in subcutaneous fat of three brands of dry-cured hams [J]. *Food Science*, 2019, 40(16): 185-192
- [39] 明庭红, 苏秀榕, 周君, 等. 基于 2 种培养基生长的植物乳杆菌发酵草鱼的关键风味比较[J]. *食品科学*, 2016, 37(16): 179-186
MING Ting-hong, SU Xiu-rong, ZHOU Jun, et al. Comparison of key flavor substances of fermented grass carp with *Lactobacillus plantarum* based on two growth media [J]. *Food Science*, 2016, 37(16): 179-186
- [40] 高爽, 丁丹, 罗瑞明. 基于固相微萃取-气相色谱-质谱和电子鼻法的烤羊腿中可挥发性香气成分分析[J]. *肉类研究*, 2020, 10: 40-46
GAO Shuang, DING Dan, LUO Rui-ming. Analysis of volatile aroma components of roasted lamb leg by solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry and electronic nose [J]. *Meat Research*, 2020, 34(10): 40-46
- [41] Guo Q, Kong X F, Hu C J, et al. Fatty acid content, flavor compounds, and sensory quality of pork loin as affected by dietary supplementation with l - arginine and glutamic acid [J]. *Journal of Food Science (John Wiley & Sons, Inc.)*, 2019, 84(12): 3445-3453
- [42] Ding A Z, Zhu M, Qiang X Q, et al. Effect of fatty acids on the flavor formation of fish sauce [J]. *LWT*, 2020, 134: 110259
- [43] 黄红霞, 孟鹭, 康旭, 等. 顶空固相微萃取—气质联用技术分析传统豆豉中的挥发性成分[J]. *农产品加工*, 2010, 9: 25-29
HUANG Hong-xia, MENG Yuan, KANG Xu, et al. Volatile flavor compounds in traditional lobster sauce with head space solid-phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Academic Periodical of Farm Products Processing*, 2010, 9: 25-29
- [44] 邵俊锋, 李波, 陆炆, 等. 基于主成分分析法的盐水鹅老卤风味强度评价模型的构建[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(14): 262-268
SHAO Jun-feng, LI Bo, LU Yang, et al. Construction of evaluation model for flavor intensity of salted goose aged brine based on principal component analysis [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(14): 262-268
- [45] 赵凤, 许萍, 曾诗雨, 等. 鲟鱼传统发酵过程中挥发性风味物质的分析评价[J]. *食品科学*, 2019, 40(10): 236-242
ZHAO Feng, XU Ping, ZENG Shi-yu, et al. Analysis of volatile compounds in fermented sturgeon [J]. *Food Science*, 2019, 40(10): 236-242
- [46] 张蕊. 乙酸芳樟酯合成工艺优化[D]. 上海: 华东理工大学,

- 2014
ZHANG Rui. Optimization of the synthesis of linalyl acetate [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2014
- [47] 杨明翰, 骆骄阳, 乔美玲, 等. 多伞阿魏挥发油化学成分 GC-MS 分析及 D-柠檬烯抗胃癌活性研究[J]. 中国现代应用药学, 2020, 37(7): 806-813
YANG Ming-han, LUO Jiao-yang, QIAO Mei-ling, et al. GC-MS analysis of volatile oil from *Ferula ferulaeoides* and anti-gastric cancer activity of D-limonene *in vitro* [J]. China Academic Journal Electronic Publishing House, 2020, 37(7): 806-813
- [48] Zhao J, Wang M, Xie J C, et al. Volatile flavor constituents in the pork broth of black-pig [J]. Food Chemistry, 2017, 226: 51-60
- [49] 沈菲, 罗瑞明, 丁丹, 等. 基于相对气味活度值法的新疆大盘鸡中主要挥发性风味物质分析[J]. 肉类研究, 2020, 34(8): 46-50
SHEN Fei, LUO Rui-ming, DING Dan, et al. Analysis of main volatile flavor compounds in Xinjiang market chicken based on relative odor activity value [J]. Meat Research, 2020, 34(8): 46-50
- [50] 宋焕禄. 食品风味化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 43
SONG Huan-lu. Food Flavor and Chemistry [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 43
- [51] Farag M A, Fayek N M, Abou R A. Volatile profiling in *Rhus coriaria* fruit (sumac) from three different geographical origins and upon roasting as analyzed via solid-phase microextraction [J]. Peerj, 2018, 6(7): e5021
- [52] 张凯华, 臧明伍, 张哲奇, 等. 不同复热方式对猪耳朵制品挥发性风味和脂肪氧化的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(14): 242-248
ZHANG Kai-hua, ZANG Ming-wu, ZHANG Zhe-qi, et al. Effect of reheating methods on volatile flavor constituents and lipid oxidation in cooked pig ear [J]. Food Science, 2018, 39(14): 242-248
- [53] 薛永霞, 张作乾, 张洪才, 等. 不同加工阶段对上海熏鱼(草鱼)风味物质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(16): 160-168
XUE Yong-xia, ZHANG Zuo-qian, ZHANG Hong-cai, et al. Effect of different processing stages on flavor components of Shanghai smoked fish made from grass carp [J]. Food Science, 2019, 40(16): 160-168
-
- (上接第 301 页)
- [17] 李玮, 贾彦博, 励炯, 等. QuEChERS-气相色谱-串联质谱法测定熟肉制品中 9 种 N-亚硝胺类化合物[J]. 中国食品卫生杂志, 2019, 31(2): 141-145
LI Wei, JIA Yan-bo, LI Jiong, et al. Determination of nine N-nitrosamines in cooked meat by QuEChERS-gas chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2019, 31(2): 141-145
- [18] 陶森, 孙金山, 王雅玲, 等. 水产干制品中 N-二甲基亚硝胺 QuEChERS 低温萃取及 GC-MS 检测方法建立[J]. 中国公共卫生, 2020, 36(10): 1503-1506
TAO Sen, SUN Jin-shan, WANG Ya-ling, et al. Detection of N-dimethylnitrosamine in dried aquatic products with QuEChERS low temperature extraction and GC-MS [J]. Chin J Public Health, 2020, 36(10): 1503-1506
- [19] 朱萌萌, 叶群, 周婷婷, 等. 气相色谱-串联质谱法测定肉制品中 10 种挥发性 N-亚硝胺类化合物[J]. 色谱, 2019, 37(2): 207-215
ZHU Meng-meng, YE Qun, ZHOU Ting-ting, et al. Determination of 10 volatile N-nitrosamines in meat products by gas chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Chromatography, 2019, 37(2): 207-215
- [20] 吴翠华, 杜高发, 李婷, 等. 高效液相色谱-串联质谱法测定腌制肉制品中的 N,N-二甲基亚硝胺含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(7): 1695-1699
WU Cui-hua, DU Gao-fa, LI Ting, et al. Determination of N,N-dimethylnitrosamine in marinated meat products by high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2018, 9(7): 1695-1699