

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2022.01.002

红烧肉制备过程中关键环节的风味化合物分析

Analysis of flavor compounds in the process of stewed pork at key stages

姚 敏^{1,2} 谢国芳³ 杨 蓉¹YAO Min^{1,2} XIE Guo-fang³ YANG Rong¹周 迪¹ 龙清孟¹ 张春江⁴ZHOU Di¹ LONG Qing-meng¹ ZHANG Chun-jiang⁴

(1. 贵州省种畜禽种质测定中心, 贵州 贵阳 550018; 2. 贵州大学, 贵州 贵阳 550025;

3. 贵阳学院, 贵州 贵阳 550005; 4. 中国农业科学院农产品加工研究所, 北京 100193)

(1. *Guizhou Livestock and Poultry Germplasm testing Center, Guiyang, Guizhou 550018, China*;2. *Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China*; 3. *Guiyang University, Guiyang,**Guizhou 550005, China*; 4. *Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of**Agriculture Science, Beijing 100193, China*)

摘要:目的:研究红烧肉风味的形成过程。方法:采用电子鼻和气相质谱联用(GC-MS)技术对比红烧肉加工过程中的漂烫、油炸、炖煮及添加调味汁等关键过程,分析其风味物变化情况。结果:电子鼻测定结果与气质联用分析结果一致。五花猪肉和调味汁的风味物含量最高,漂烫、油炸、炖煮阶段风味物质减少但特征风味物不断形成。气质联用共检出 148 种化合物,其中猪肉、漂烫、油炸、炖煮以及成品和调味汁分别为 39, 32, 23, 20, 38, 65 种,主要生成了醛酮类、酯醇类、杂环化合物和芳香烃及其衍生物;成品的特征风味物有己醛、苯甲醛、1-辛烯-3-醇、桂皮醛、2-戊基呋喃、2-乙酰基吡咯、2,3-二甲基-5-乙基吡嗪等。红烧肉制备前期乙偶姻含量较高,而甲氧基苯胺则在制备过程中均比较高。结论:电子鼻技术可以较好地反映红烧肉不同加工阶段的风味物质变化情况,但具体的物质变化需要 GC-MS 进行检测分析。

关键词:红烧肉;风味化合物;GC-MS;电子鼻

Abstract: Objective: The flavor formation process of stewed pork was investigated in this study. **Methods:** Electronic nose and gas-

phase mass spectrometry (GC-MS) techniques were used to compare the key processes such as bleaching, frying, stewing and addition of sauces during the processing of stewed pork, and to analyze the changes of flavor compounds. **Results:** The results of electronic nose measurement were consistent with the results of gas chromatography analysis. The flavor content of raw pork and sauces was the highest, and the flavor substances decreased in the blanching, frying and stewing stages. However, the characteristic flavor substances were formed continuously. A total of 148 compounds were detected by GC-MS, including 39, 32, 23, 20, 38, and 65 compounds in raw pork, blanched, fried, stewed and finished products and sauces, respectively, which mainly produced aldehydes and ketones, esters and alcohols, heterocyclic compounds, and aromatic hydrocarbons and their derivatives. The characteristic flavors of finished products were hexanal, benzaldehyde, 1-octen-3-ol, cinnamaldehyde, 2-pentylfuran, 2-acetyl pyrrole, 2,3-dimethyl-5-ethylpyrazine, etc. The content of acetoin was higher in the pre-preparation stage of stewed pork, while methoxy-phenyl-Oxime stayed high in all of the processes. **Conclusion:** The electronic nose technique can be used to detect the changes of flavor substances in different processing stages of stewed pork, but the specific substance changes need to be determined and analyzed by GC-MS.

Keywords: stewed pork; flavor substance; GC-MS; Electric nose

基金项目:中央引导地方发展专项资金项目(编号:黔科中引地[2018]4015号);贵州省动植物育种专项(编号:黔农育种专字[2017]012号)

作者简介:姚敏,女,贵州省种畜禽种质测定中心工程师,在读博士。

通信作者:龙清孟(1973—),女,贵州省种畜禽种质测定中心正高级兽医师,硕士。E-mail:920542302@qq.com

张春江(1976—),男,中国农业科学院农产品加工研究所正高级工程师,博士。E-mail:410275143@qq.com

收稿日期:2021-07-26

红烧肉具有瘦而不柴,肥而不腻,香气浓郁,风味独特的特点。其风味与脂质有关,如猪脂肪组织中含脂肪(86.07%)、蛋白质(3.27%)、水(10.35%)和微量糖等,并

且水溶性成分(氨基酸及肽类、维生素如硫胺素等)及其脂质成分决定了产品的特征性风味,对五花肉的风味有重要影响^[1]。加工过程中红烧肉的水分、蛋白质、脂肪和总糖等发生了显著变化^[2]。潘见等^[3]采用不同涂层 SPME 与 GC-MS 联用比较分析了定远黑猪肉与瘦肉型猪肉两种猪肉的挥发性风味成分;刘莉丹等^[4]对比了苏式、毛式、东坡肉 3 种红烧肉的挥发性风味成分;朱文政等^[5]采用 SPME-气质联用分析了不同烹制时间红烧肉的挥发性风味成分;王瑞花等^[6]对红烧猪肉工艺进行了优化,并分离鉴定了其挥发性风味成分;史笑娜等^[7-8]重点分析了红烧肉加工过程中脂肪酸变化以及由此引起的挥发性风味物的变化;范丽等^[9]研究了自制调味汁烹制红烧肉中的关键香气活性化合物;薛雁等^[10]分析了毛氏红烧肉的特征风味;赵越等^[11]研究了红烧肉在加工和贮藏过程中的品质变化。文章拟通过电子鼻和气相质谱联用技术对红烧肉制备过程中漂烫、油炸、炖煮与添加调味料

炖煮等关键环节的挥发物及其变化进行研究,进一步探讨红烧肉风味物质形成机理,以期对红烧肉风味理论研究提供依据。

1 材料与方法

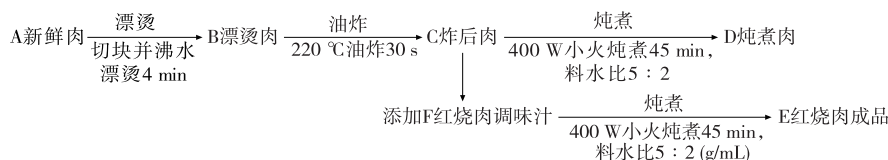
1.1 材料与仪器

新鲜五花肉:白条猪,市售;
电子鼻: PEN3.5 型,德国 Airsense 公司;
GC-MS 联用仪: QP2010 型,日本岛津公司;
SPME 自动进样器、萃取头(50/30 μm DVB/CAR/PDMS): 上海安谱实验公司;
电子分析天平: BS110s 型,德国 Sartorius 公司;
电磁炉: WT2218T01 型,中国美的公司。

1.2 方法

1.2.1 原料处理 参考文献[12]。

红烧肉的制备流程:



1.2.2 挥发性物质测定

(1) 取样: A、B、C、D、E、F 经切碎并混合均匀制得样品,取 1.0 g 放入 10 mL 密闭取样瓶中,采用顶空抽样测定。

(2) 电子鼻检测: 电子鼻探头共 10 个,其中 W1C 对(甲苯类)芳香成分灵敏, W5S 对氮氧类化合物灵敏, W3C 对(苯类)芳香性成分灵敏, W6S 具有氢气选择性, W5C 对(烷烃类)芳香成分灵敏, W1S 具有甲烷选择性, W1W 对硫化物灵敏, W2S 对醇类灵敏, W2W 对(有机硫化物)芳香成分灵敏, W3S 对烷烃类灵敏。检测条件: 载气采用干燥空气(流速 300 mL/min); 探头经过滤空气清洗 180 s, 并在 10 s 内进样, 检测时间 60 s(取 48~52 s 的结果); 每个样品重复 3 次取平均值。

(3) GC-MS 联用仪检测: 采用 50/30 μm DVB/CAR/PDMS 萃取头, 270 °C 老化 1 h。样品 A、B、C、D、E、F 分别放入 SPME 装置, 60 °C 平衡 15 min 后进行萃取; 萃取温度 60 °C, 萃取时间 30 min, 其后立即进行 GC-MS 联用仪分析; 解析温度 260 °C, 解析时间 5 min。

(4) 气相色谱: 采用 HP-5MS 毛细管柱(60 m × 0.32 mm × 1.8 μm) 色谱柱; 先升至 40 °C, 保持 10 min, 5 °C/min 升温至 200 °C, 20 °C/min 升温至 250 °C, 保持 5 min; 载气为氦气, 流速 1.0 mL/min, 不分流进样。

(5) 质谱条件: 采用电子轰击(EI)源的电离方式, 电子能量 70 eV, 电子倍增电压 1 753 V; 质量扫描范围 30~550 amu。

(6) 化合物定性及定量: 色谱检测结果经质谱计算机数据库系统检索并在 Wiley710 和 NISTDEMO 标准谱库中匹配确定(相似度 > 80); 采用峰面积归一法进行定量计算。

2 结果与分析

2.1 电子鼻分析红烧肉制备关键节点的挥发性物质

由图 1 可知, 各样品中醛酮、呋喃、吡喃等氮氧类化合物含量最高且差别明显, 其次是醇类物质。由图 2 可知, A、F 样品的挥发物最多, B、C、D、E 样品的挥发物含量接近且 F > A > E > D > B > C。这可能是在热加工条件下, A、F 样品的风味物质容易转化或者散失, 而 C 样品由

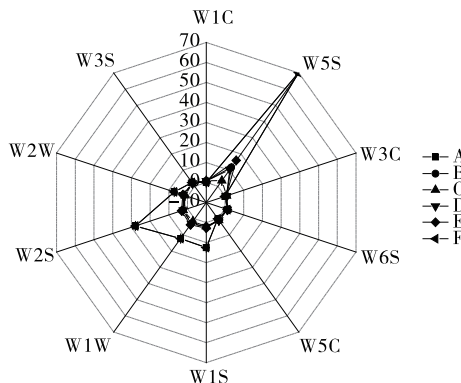


图 1 红烧肉制备过程中的挥发性风味物质
Figure 1 The volatility during the process of stewed pork

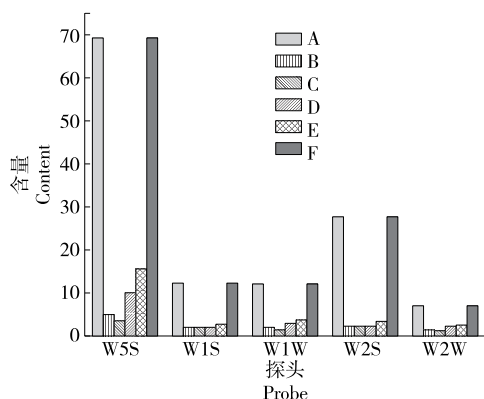


图2 红烧肉制备过程中的化合物变化

Figure 2 The analysis of volatility during the process of stewed pork

于在高温条件下挥发性小分子散失量大,而D样品在炖煮过程中生成了部分风味物,说明炖煮条件与红烧肉风味形成有着更为密切的关系,E样品比D样品的含量又增多,说明添加调味汁对红烧肉风味具有重要影响。在烃类方面(W1S),各样品间差别不大;在硫化物上(W1W和W2W), $E>D>C$,说明添加调味汁炖煮肉阶段有利于硫化物类风味物的生成,此外醇类化合物(W2S)的变化与硫化物相似。

2.2 气相质谱联用仪分析结果

2.2.1 GC-MS分析挥发性物质种类与含量 由表1可知,A样品共检出39种化合物,酮类物质含量最高为37.39%,其次杂环、酯类分别为19.96%,16.10%,醇类和酯类的种类丰富,分别为16,8种。B样品共检出32种化合物,其中酮类含量最高为33.28%,杂环和醇类含量增加为32.36%,16.21%,种类均减少,此时酸类含量增加且种类较A样品丰富得多,但醇类和酸类的阈值相对较高^[3]。C样品共检出23种化合物,种类少于A、B样品,但

3种酮类含量达43.64%,其次醇类20.81%,种类和B样品的变化不大,杂环类油炸过程减少为20.22%,而醛类含量进一步增加。醛类在D样品中达最大值52.05%,是肉加热过程中主要的风味物质,主要来源于脂肪降解等^[13],其阈值低,是影响肉风味的重要化合物^[14];酮类在D样品中大部分转化为醛类,含量仅1.4%,大大低于C样品,酮类物质对肉的整体风味有一定影响^[5];醇类和酸类生成酯类,杂环如呋喃、吡喃类等有一定减少。酯类阈值相对高,对风味影响不大,而杂环如呋喃等阈值低,对风味影响大^[5]。五花肉制备过程中,醛酮类是主要的风味物质,酯类在炖煮条件下生成,杂环类在漂烫、油炸过程中增加,炖煮过程中减少,而烷类与烯类及其衍生化合物在热加工过程中不断损失,特别到了D阶段均未检出。在肉的热加工关键环节漂烫、油炸和炖煮环节检出的化合物种类分别是32,23,20种,种类不增却形成了独特的肉类风味,是因为生成了具有特征风味的化合物。

F样品中,烯类及其衍生物和醇类含量分别为53.27%和27.78%,占总体风味物的81.05%,但在E样品中含量不高,说明易损失。此外E样品在调味汁的作用下醛类比D样品的相对少,但种类丰富。杂环化合物在红烧肉中含量远高于调味汁与炖煮肉,是因为红烧肉的调味汁添加了焦糖等,焦糖反应能产生大量呋喃类化合物^[14],以及吡嗪、吡咯、呋喃酮等风味物质^[15],添加调味汁F使杂环类种类与含量都更丰富,赋予了红烧肉独特的风味。醇类和酯类在E样品中种类、含量均低于D和F样品,而酸类增加,可能是D和F样品中的醇类和酯类在加热条件下易挥发散失,而酸类经裂解氧化转换等反应生成。F样品中的烷类化学性质稳定,在热加工过程中损失小。F、E和D样品的挥发性风味物种类分别为64,38,20种,说明红烧肉调味汁的添加大大丰富了红烧肉的风味物质,改变了产品风味。

表1 红烧肉制备关键环节不同挥发性物质的种类数和含量

Table 1 The numbers and contents of stewed pork volatility during the process

类别	A 样品		B 样品		C 样品		D 样品		E 样品		F 样品	
	种类	含量/%	种类	含量/%	种类	含量/%	种类	含量/%	种类	含量/%	种类	含量/%
酯类	8	16.10	2	2.78	2	0.54	2	11.43	3	2.33	8	3.93
酸类	2	6.62	8	6.45	4	4.73	2	1.42	5	9.99	2	0.82
醇类	16	11.33	10	16.21	9	20.81	8	17.07	4	4.74	7	28.03
酮类	2	37.39	3	33.28	3	43.64	1	1.40	3	8.61	2	0.33
醛类	1	0.26	1	2.59	1	9.17	4	52.05	6	20.20	4	6.48
烯炔类	2	1.48	3	1.72	1	0.61	0	0.00	5	10.86	26	53.02
烷炔类	4	6.86	3	4.61	1	0.28	0	0.00	1	0.82	5	1.48
杂环化合物	4	19.96	2	32.36	2	20.22	3	16.63	11	42.45	11	5.91
总计	39	100.00	32	100.00	23	100.00	20	100.00	38	100.00	65	100.00

2.2.2 红烧肉制备关键环节的风味物质

(1) 醛类风味物质:由表 2 可知,从 A 到 E 过程中, C6~C10 的挥发性醛类化合物主要由脂肪氧化降解生成,含量较高,有较强挥发性且阈值低,是熟肉的重要风味物质^[16-17],主要有己醛、苯甲醛、苯乙醛、羟基香茅醛、2-甲基丁醛、2-乙基丁醛、壬醛等,提供了熟肉的脂肪味,高浓度时呈青草、油脂味道。己醛在 E 样品中含量 3.28%,具有青草香,是油酸、亚油酸和花生四烯酸等的氧化产物^[18],在各阶段不断生成,炖煮阶段由乙偶姻转化成己醛。乙偶姻是重要的中间物质。苯甲醛在 E 样品中含量 8.98%,具苦杏仁的坚果香,是亚油酸或苯丙氨酸的降解产物^[6],在炖煮阶段后才出现,是重要的风味物质。苯乙醛、2-甲基丁醛、2-乙基丁醛和羟基香茅醛来自调味汁

或经转化反应后生成,由缬氨酸、异亮氨酸、亮氨酸等氨基酸的 Strecker 降解产生^[9]。其中苯乙醛具水果甜香,羟基香茅醛具青草香。壬醛和反-2 壬烯醛是过程产物,被转化为 2-戊基呋喃等,壬醛主要由油酸氧化产生^[19]。总体来说,醛类主要在红烧肉加工后期产生,集中在调味汁和炖煮阶段,对红烧肉的风味产生了重要影响。

(2) 酮类风味物质:酮类由不饱和脂肪酸氧化降解、美拉德反应、氨基酸降解等产生^[20],主要有乙偶姻(又名 3-羟基-2-丁酮)、羟基丙酮、2-庚酮、2-甲基-3-辛酮、5-羟基-2,7-二甲基-4-辛酮、2-十五酮等,其阈值不高,清香,影响红烧肉的整体风味。乙偶姻是一种令人愉快的风味物,有强烈奶油、脂肪等香气。除了乙偶姻,E 样品中主要成分羟基丙酮和 2-庚酮是由己醛等转化生成,2-庚酮有

表 2 红烧肉制备过程中的挥发性风味物质

Table 2 The volatility of stewed pork during the process

种类	化合物名称	保留时间/ min	含量/%					
			A	B	C	D	E	F
酯类	辛酸乙酯	16.65	—	—	—	—	—	2.01
	乙酸乙酯	4.59	2.75	—	—	—	—	—
	甲酸异戊酯	10.53	9.73	—	—	—	—	—
	己酸乙酯	13.66~20.83	—	—	—	10.88	—	0.46
	2,4-二甲基戊酸乙酯	15.06	—	1.85	—	—	—	—
	3-甲基丁烷-2-碳酸丙酯	16.40	0.36	—	—	—	—	0.15
	3-甲硫基-s-丁酸丙酯	16.89	1.99	—	—	—	—	—
	草酸异丁基十七酯	18.13	—	—	—	—	—	—
	甲酸辛酯	19.78	—	—	0.25	—	—	—
	4-羟基丁酸乙酰酯	21.01~21.02	—	—	—	—	0.36	0.10
	(Z)-2-甲基-丁酸甲基乙基	21.42	—	—	—	0.55	—	—
	丁二酸二乙酯、琥珀酸二乙酯	21.95	—	—	—	—	—	0.57
	2-甲基-1-(1,1-二甲基乙基)-1,3-丙酸丙酯	24.81	—	—	—	—	—	—
	3-乙酰乙酸-2-丁烷-2-甲基丁酸	16.89	—	0.93	—	—	—	—
	二异丁酸 1-反-丁基-2-甲基-1,3-二丙基酯	24.81	0.91	—	—	—	—	—
	3-苯丙酸乙酯	24.92	—	—	—	—	—	0.25
	戊二酸异二丁酯	26.33	0.11	—	—	—	—	—
	辛酸辛酯	26.97	—	—	—	—	—	0.36
	邻苯二甲酸二异丁酯	27.39	—	—	0.29	—	—	—
	棕榈酸异丙酯	29.00	0.06	—	—	—	—	—
	棕榈酸乙酯、十六酸乙酯、十六烷酸乙酯	29.22	—	—	—	—	—	—
	桃醛、 α -庚基- γ -丁内酯	29.44	—	—	—	—	—	—
	酞酸二甲酯、邻苯二甲酸二甲酯	29.99~30.00	—	—	—	—	0.14	0.03
酞酸二乙酯、邻苯二甲酸二乙酯	31.21	0.19	—	—	—	—	—	
胆甾烯基亚油酸酯	27.09	—	—	—	—	1.83	—	

续表 2

种类	化合物名称	保留时间/ min	含量/%					
			A	B	C	D	E	F
酸类	乙酸	17.09	—	—	—	—	5.74	—
	2-乙基丁酸	15.02	5.59	—	—	—	—	—
	4-甲基-3-戊酸	20.29	—	0.84	—	—	—	—
	丁酸	21.19	—	—	—	—	0.51	—
	甲基-戊酸 2-甲基苯甲酸	21.25	—	0.80	1.00	—	—	—
	异戊酸、3-甲基丁酸	21.91~21.93	1.03	1.82	0.76	—	0.87	—
	正己酸	24.45~24.47	—	1.07	2.57	1.18	1.73	—
	庚酸	25.76	—	—	—	—	—	0.26
	羟苯基磷酸	26.28	—	0.18	—	—	—	—
	辛酸、羊脂酸	26.93~26.94	—	0.51	0.40	0.24	1.14	0.56
	壬酸	28.16	—	0.80	—	—	—	—
	癸酸	29.62	—	0.43	—	—	—	—
	乙醇	3.94	—	—	—	—	—	26.39
	戊醇	11.98~12.02	—	2.48	4.15	2.86	1.10	—
	2-甲基辛醇	7.09	0.08	—	—	—	—	—
醇类	十一醇	8.38	0.12	—	—	—	—	—
	3-(1,1-二甲基乙基)-2,2,4,4-四甲基-3-戊醇	12.49~12.56	2.23	—	5.28	5.17	—	0.69
	2-甲基-2-戊烯-1-醇	13.66	0.39	—	—	—	—	—
	壬醇	14.55~14.56	1.29	—	—	—	—	—
	己醇	15.01	—	7.26	6.59	2.59	1.40	—
	3-甲基-1,3,5-戊三醇	15.01	—	—	0.14	—	—	—
	二丙基二硫、二丙基二硫醚	15.50	—	—	—	—	—	0.08
	4-甲基-1-(1-甲基乙基)-环己醇	16.05	—	—	—	—	—	0.17
	2-甲基-3-己醇	16.56	0.38	—	—	—	—	—
	1-辛烯-3-醇、蘑菇醇、1-烯-3-辛醇	17.10	—	2.10	3.22	5.26	—	—
	2,7-二甲基-4,5-辛二醇	17.54~17.54	1.43	0.44	—	—	—	—
	2-乙基-己醇	18.12~18.12	0.54	0.63	—	—	—	—
	2-丙基-1-戊醇	18.13	—	—	—	0.27	—	—
	2,3-丁二醇	19.34~19.35	1.60	0.52	—	—	—	0.24
	2-辛醇	19.35	—	—	0.49	—	—	—
	6-甲基-2-庚醇	19.36	—	—	—	—	—	—
	环辛醇	20.93	—	—	—	—	—	—
	(Z)-2-辛烯醇	20.93	—	—	0.32	0.27	—	—
	烯丙基正戊基甲醇	21.42~21.42	—	0.53	0.45	—	—	—
	4-羟基壬烯	21.42	0.22	—	—	—	—	—
	苯醇、苯基醇、苯甲醇	24.81~24.81	—	—	—	—	1.15	0.25
	双(1-甲基-2-羟乙基)醚	24.89~24.90	0.68	0.85	—	—	—	—
	2-(2-羟基丙氧基)-1-丙醇	24.90~24.98	0.60	0.90	0.17	0.33	—	—
1-(2-甲氧基-1-甲基乙氧基)异丙醇	24.98	—	—	—	0.32	—	—	
苯乙醇	25.25	0.67	—	—	—	1.09	—	
十三醇	25.86~25.86	0.63	—	—	—	—	—	
二乙二醇、二甘醇	25.87	0.13	0.50	—	—	—	—	
十六醇	28.13	0.34	—	—	—	—	—	
4-乙基苯酚、对乙基苯酚	28.18	—	—	—	—	—	0.21	

续表 2

种类	化合物名称	保留时间/ min	含量/%					
			A	B	C	D	E	F
酮类	庚酮	2.58	—	—	—	—	1.09	—
	乙酮	2.58	—	—	—	—	—	0.05
	乙偶姻、3-羟基-2-丁酮、甲基乙酰甲醇	12.80~12.82	37.06	28.46	39.30	1.40	2.87	—
	羟基丙酮、丙酮醇	13.01	—	—	—	—	4.65	—
	2-甲基-3-辛酮	13.65	—	2.67	2.77	—	—	—
	5-羟基-2,7-二甲基-4-辛酮	18.77~18.77	—	2.15	1.57	—	—	—
	2-十九烷酮、甲基十七烷基甲酮	20.55	—	—	—	—	—	0.28
	2-十五酮	26.47	0.33	—	—	—	—	—
醛类	2-甲基丁醛	3.51~3.54	—	—	—	—	2.95	0.55
	己醛	6.86~7.68	—	2.59	9.17	47.00	3.28	—
	2-乙基丁醛	9.06~9.05	—	—	—	—	0.78	—
	壬醛 Nonanal	15.71	—	—	—	2.52	—	0.70
	反-2-壬烯醛、(E)-壬烯醛	16.43	—	—	—	0.98	—	—
	2-乙基-己醛	17.10	0.26	—	—	—	—	—
	癸醛	18.25	—	—	—	—	—	—
	苯甲醛	18.75~18.76	—	—	—	1.55	8.98	2.15
	苯乙醛、2-苯基乙醛、苄甲醛	21.29	—	—	—	—	3.61	3.08
	羟基香茅醛、7-羟基-3,7-二甲基辛醛	24.91	—	—	—	—	0.60	—
	(E)-2-庚烯醛	13.59~13.65	—	—	—	—	—	0.38
	月桂烯、7-甲基-3-亚甲基-1,6-辛二烯	9.17	—	—	—	—	—	4.40
	D-柠檬烯、右旋萜二烯	9.76~9.83	—	0.12	—	—	—	22.86
	苯乙烯、苏合香烯	11.62	—	—	—	—	0.57	—
	罗勒烯、3,7-二甲基-1,3,6-辛三烯	11.72~11.77	—	—	—	—	—	0.67
	反-2-辛烯醛	16.43	—	—	—	—	—	0.27
	L-香芹醇、2-甲基-5-(2-丙基)-2-环己烯-1-醇	16.87	—	—	—	—	—	0.23
	古巴烯、胡椒烯、咕巴烯	18.05	—	—	—	—	—	1.11
烯类及其 衍生物	丁酸芳樟酯、丁酸-1-乙烯基-1,5-二甲基-4-己烯基酯	19.66	—	—	—	—	—	0.47
	α -香柑油烯	20.27	—	—	—	—	—	0.17
	4-萜烯醇;4-甲基-1-(1-甲基乙基)-3-环己烯-1-醇	20.65	—	—	—	—	—	0.36
	(Z)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛	22.03	—	—	—	—	—	1.73
	γ -衣兰油烯	22.16	—	—	—	—	—	0.33
	松油醇、萜品醇	22.33	—	—	—	—	—	1.11
	合成右旋龙脑、2-茨醇	22.41~22.41	—	—	—	—	0.36	0.71
	α -柏木烯、(1S,2R,5S)-2,6,6,8-四甲基三环[5.3.1.0 ^{1.5}]十一碳-8-烯	22.65	—	—	—	—	—	0.79
	β -红没药烯	22.74	—	—	—	—	—	0.60
	(E)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛	22.83	—	—	—	—	—	2.62
	甘菊蓝	22.91~22.92	0.14	0.37	—	—	—	0.47
	萘	22.92	—	—	—	—	0.22	—
2-十一烯醛	23.13	—	—	—	—	—	—	

续表 2

种类	化合物名称	保留时间/ min	含量/%					
			A	B	C	D	E	F
烯类及其 衍生物	茴香脑、1-甲氧基-4-[(Z)-1-丙烯基]苯	24.15~24.16	1.34	1.23	0.61	—	4.00	4.85
	卡拉烯	24.28	—	—	—	—	—	0.41
	反式肉桂醛、桂皮醛;3-苯基-2-丙烯醛	25.05~26.72	—	—	—	—	5.71	5.33
	对甲氧基苯甲醛、大茴香醛	26.58	—	—	—	—	—	2.14
	乙酸桂酯、乙酸 3-苯基烯丙酯	27.94	—	—	—	—	—	0.51
	丁香酚、2-甲氧基-4-烯丙基酚、4-烯丙基愈疮木酚、4-烯丙基-2-甲氧基苯酚	28.12	—	—	—	—	—	0.24
	4-乙烯基-2-甲氧基苯酚、对乙烯基愈疮木酚	28.47	—	—	—	—	—	0.12
	肉桂醇、 β -苯丙烯醇	29.75	—	—	—	—	—	0.14
	2,2-二甲基-葵烷	4.25~4.26	1.23	3.93	—	—	—	—
	2-环丙基丙烷	8.92	—	—	—	—	—	—
烷类	十四烷	9.84~15.71	—	0.44	—	—	—	0.24
	3-甲基-5-丙基-壬烷	12.94	—	0.24	—	—	0.82	—
	2,6,10,15-四甲基庚烷	13.58	—	—	—	—	—	0.48
	5-丁基-5-乙基十七烷	14.55	—	—	—	—	—	0.11
	己烷	18.26	0.27	—	—	—	—	—
	十九烷	18.26	—	—	0.28	—	—	—
	2-甲烯-4,8,8-三甲基-4-乙基-双环壬烷	20.48	—	—	—	—	—	0.30
	二十烷	20.55	0.63	—	—	—	—	—
	1,19-二十烷二烯	23.12~23.71	—	—	—	—	—	0.35
	2,5-二甲基-2,5-二羟基己烷	23.39	4.73	—	—	—	—	—
	正十八烷	23.76	—	—	—	—	—	—
	2-戊基呋喃	10.86~11.56	—	—	—	—	4.77	—
	4,6-二甲基嘧啶	14.54	—	—	—	—	2.39	0.16
	2H-皮兰-2-甲醇	16.04~16.06	1.72	6.88	4.08	1.72	3.79	0.41
	2,3-二甲基-5-乙基吡嗪	16.92	—	—	—	0.42	—	—
	2,6-二乙基吡嗪	16.92	—	—	—	—	0.19	—
	2-甲基-1,3-草酰硫烷	17.06	—	—	—	—	—	1.43
2-乙酰基呋喃	18.33	—	—	—	—	—	0.85	
3-呋喃甲醇;呋喃-3-甲醇	21.68~21.68	—	—	—	—	5.82	1.06	
甲氧基苯胺	23.24~23.26	17.77	25.48	16.14	14.49	21.41	—	
杂环类	1-(1,5-二甲基-4-己基)-4-甲基苯	23.43	—	—	—	—	—	0.63
	2-乙酰基吡咯	25.94~25.97	—	—	—	—	0.71	0.78
	5-羟甲基糠醛	26.04	—	—	—	—	0.83	—
	5-苯基-2-呋喃酮	26.61	0.15	—	—	—	—	—
	4,5-二甲基-1,3-二氧杂环戊烯-2-酮	27.54	—	—	—	—	0.18	—
	对甲氧基苯基丙酮	28.02~28.01	—	—	—	—	0.16	0.25
	3-(1-苯-乙氧)-3-氢-异苯呋喃酮	29.04	—	—	—	—	—	0.02
	5-庚基-2-呋喃酮	29.44~31.36	0.32	—	—	—	—	—
	2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4-氢-吡喃-4-酮	29.54~29.55	—	—	—	—	2.20	0.30
	2,3-二氢苯并呋喃	31.56	—	—	—	—	—	0.02

类似梨的水果香味。2-甲基-3-辛酮和 5-羟基-2,7-二甲基-4-辛酮仅在漂烫和油炸阶段检出,甲基酮类是脂肪降解产生的游离酮酸自氧化形成,是酮类中对肉类风味有贡献的主要物质^[19],2-十五酮仅在 A 样品中检出,醛酮在加工过程中可相互转化,部分酮类化合物也是杂环化合物的前体物质,对风味的形成有重要作用。

(3) 醇类风味物质:醇类主要来自脂质氧化和 Strecker 降解反应^[11],是醇还原酶将醛或酮还原为相应的醇^[21],常有蘑菇味和金属味,对肉制品风味有一定的影响作用。红烧肉加工过程中醇类物质含量丰富,漂烫、油炸使其含量不断增加达 20.81%,但种类减少,炖煮过程略微下降,加入调味汁后可能挥发性风味物质增多,相对含量减少。F 样品由于有料酒等成分,醇类总量 27.78%,其中乙醇 26.39%,对酯类形成有重要作用。E 样品中仅检出己醇、戊醇、苯甲醇和苯乙醇,而已醇、2-甲基-2-戊烯-1-醇、戊醇、1-辛烯-3-醇(蘑菇醇)在各阶段均有检出,其中 1-辛烯-3-醇是熟肉重要的风味特征化合物,具较强蘑菇香气,可能是二十四碳烯酸的氢过氧化物的降解物^[7],在炖煮后增加。A 样品检出的壬醇、2,3-丁二醇、二甘醇等 10 余种化合物在后期加工中不再检出,可能是通过酯化反应等生成了其他物质。

(4) 酸、酯类风味物质: E 样品中酯类仅有 4-羟基丁酸乙酰酯和邻苯二甲酸二甲酯且含量少,可能来自调味汁或猪肉加工过程。甲酸异戊酯、乙酸乙酯、3-甲基磺基-s-丁酸丙酯等仅在生肉 A 样品中,加工后未检出,2,4-二甲基戊酸乙酯仅在 B 样品中检出,而邻苯二甲酸二异丁酯和甲酸辛酯仅在 C 样品中检出,D 样品中主要是己酸己烯酯。F 样品中检出多种相对含量不高的酯类,但大多并不在红烧肉中出现。

(5) 烷烃类及芳香族风味物质:红烧肉中烷烃类主要来自烷氧自由基断裂^[22],阈值高,但部分烃类是形成杂环化合物的前体,且多种烃对红烧肉的风味有整体提升作用^[23-24]。红烧肉中芳香族化合物大多来自调味汁,共检出 27 种,总量达 53.27%,如桂皮醛具有强烈的桂皮油和肉桂油的香气。猪肉在加工过程中主要检出茴香脑、甘菊蓝,且含量较少。说明调味汁的芳香化合物对红烧肉风味有较为重要的作用。

(6) 杂环风味物质:共检出 10 余种杂环化合物,含量 42.45%,其中呋喃环类如 2-戊基呋喃源于油酸氧化的辛醛、壬醛^[9],具有甜香,赋予肉制品良好风味。5-羟甲基糠醛,又名 5-羟基甲基呋喃甲醛,由葡萄糖或果糖脱水生成,呈甘菊味。3-呋喃甲醇由糠醛经加氢还原,有苦辣气味,对人体有害。吡喃环类如 2H-皮兰-2-甲醇,2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4-氢-吡喃-4-酮,后者是美拉德反应或糖裂解产物,具有甜润香气。含氮杂环化合物主要有甲氧基苯胺、4,6-二甲基嘧啶、2-乙酰基吡咯、2,6-二乙基-吡

啶,其中 2-乙酰基吡咯是比较重要的风味物质,香气宜人,来自美拉德反应,多产生于高温低水分烹饪条件^[10]。其他物质如 4,5-二甲基-1,3-二氧杂环戊烯-2-酮和对甲氧基苯基丙酮,后者由茴香脑反应而来。甲氧基苯胺和 2H-皮兰-2-甲醇在加工过程中均有检出,炖煮阶段检出的 2,3-二甲基-5-乙基吡啶属于吡啶类化合物,由氨基酸 Strecker 降解生成,所有的吡啶类化合物都可以提供烘烤香^[25],仅生肉中检出 5-庚基-2-呋喃酮和 5-苯基-2-呋喃酮,是香味增效剂类。在调味汁中亦检出 10 余种,但含量不高。同时由于调味汁中焦糖、料酒、酱油以及其他物质相互作用,经热降解、焦糖化、美拉德反应等^[26]生成了独特的红烧肉风味。

3 结论

试验表明,电子鼻测定与气质联用分析的结果一致:① 五花肉和调味汁中含有大量风味物质,在热加工条件下的漂烫、油炸、炖煮环节损失了一部分,但特征风味物质不断形成。主要的风味物质是氮氧类化合物,如醛酮、呋喃和吡喃类等含量高且变化大,其次醇类和硫化物。烃类变化不大,基本不参与反应。② 红烧肉制备过程中共检出 148 种物质,主要来源于两个方面:五花肉本身的风味前体物质在热加工条件下产生,以及调味汁中存在大量风味物与五花猪肉中的风味物融合、反应,其中不饱和脂肪酸氧化降解生成的醛类、呋喃类等是红烧肉烹制过程中的主要风味物质。调味汁对红烧肉风味的贡献主要是芳香烃类化合物,焦糖化反应产生的呋喃以及类吡啶、吡咯、呋喃酮等杂环化合物。但是调味汁风味的大部分物质未在红烧肉中得以保留。③ 红烧肉的主要风味物质有己醛、苯甲醛、1-辛烯-3-醇、桂皮醛、2-戊基呋喃、2-乙酰基吡咯和 2,3-二甲基-5-乙基吡啶等。红烧肉加工过程中甲氧基苯胺含量较高,而乙偶姻在加工前期含量高。后续拟采用电子舌、氨基酸分析仪和高效液相色谱等分析红烧肉的滋味特征及其滋味物质如氨基酸、脂肪酸、肌苷酸等,探讨红烧肉的滋味形成理论。

参考文献

- [1] 黄业传, 贺稚非, 李洪军, 等. 皮下脂肪和肌内脂肪对猪肉风味的作用[J]. 中国农业科学, 2011, 44(10): 2 118-2 130.
- [2] 张春江, 张良, 黄峰, 等. 中式肉类菜肴加工中营养品质变化研究进展[J]. 生物产业技术, 2017(4): 76-81.
- [3] 潘见, 杨俊杰, 邹英子. 不同涂层 SPME 与 GC-MS 联用比较分

- 析两种猪肉挥发性风味成分[J]. 食品科学, 2012, 33(12): 169-172.
- PAN Jian, YANG Jun-jie, ZOU Ying-zi. Comparative analysis of flavor components in Pork from different breeds by SPME with different fiber coatings and GC-MS[J]. Food Science, 2012, 33(12): 169-172.
- [4] 刘莉丹, 黄峰, 周芳伊, 等. 三种红烧肉挥发性风味成分的比较研究[J]. 食品工业科技, 2019, 40(13): 141-147.
- LIU Li-dan, HUANG Feng, ZHOU Fang-yi, et al. Comparative study on volatile flavor components of three kinds of braised pork meats[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(13): 141-147.
- [5] 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.
- [6] 王瑞花, 姜万舟, 汪倩, 等. 红烧猪肉工艺优化及其挥发性风味成分的分离与鉴定[J]. 中国食品学报, 2017, 17(5): 208-216.
- WANG Rui-hua, JIANG Wan-zhou, WANG Qian, et al. Process optimization of braised pork and isolation and identification of its volatile flavor components[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2017, 17(5): 208-216.
- [7] 史笑娜, 黄峰, 张良, 等. 红烧肉加工过程中脂肪降解、氧化和挥发性风味物质的变化研究[J]. 现代食品科技, 2017, 33(3): 257-265.
- SHI Xiao-na, HUANG Feng, ZHANG Liang, et al. Changes in lipolysis, lipid oxidation, and volatile flavor compounds during the processing of red braised pork[J]. Modern Food Science and Technology, 2017, 33(3): 257-265.
- [8] 顾伟钢, 张进杰, 姚燕佳, 等. 红烧肉制作过程中脂肪氧化和脂肪酸组成的变化[J]. 食品科学, 2011, 32(17): 76-80.
- GU Wei-gang, ZHANG Jin-jie, YAO Yan-jia, et al. Lipid oxidation and fatty acid composition change during the processing of stewed pork[J]. Food Science, 2011, 32(17): 76-80.
- [9] 范丽, 徐晓东, 宋泽, 等. 自制调味汁烹制红烧肉中关键香气活性化合物的分析研究[J]. 现代食品科技, 2017, 33(7): 245-253, 230.
- FAN Li, XU Xiao-dong, SONG Ze, et al. Analysis of the key aroma-active compounds in braised pork[J]. Modern Food Science and Technology, 2017, 33(7): 245-253, 230.
- [10] 薛雁, 周芳伊, 黄峰, 等. 毛氏红烧肉特征风味成分分析[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(11): 153-158.
- XUE Yan, ZHOU Fang-yi, HUANG Feng, et al. Analysis of characteristic flavor components of mao's braised meat[J]. Food Research and Development, 2019, 40(11): 153-158.
- [11] 赵越. 红烧肉在加工和储藏过程中的品质变化研究[D]. 无锡: 江南大学, 2017.
- ZHAO Yue. Study on quality change of stewed pork during processing and storage[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.
- [12] 张泓, 姚敏, 黄峰, 等. 一种毛式红烧肉的制备方法: CN20150253992[P]. 2015-05-18.
- ZHANG Hong, YAO Min, HUANG Feng, et al. A preparation method of Mao-style roast pork: CN20150253992[P]. 2015-05-18.
- [13] YANG Yang, ZHANG Xin, WANG Ying, et al. Study on the volatile compounds generated from lipid oxidation of Chinese bacon (unsmoked) during processing[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2017, 119(10): 1600512(1-10).
- [14] SHIBAMOTO T. Heterocyclic compounds found in cooked meats[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1980, 28(2): 237-243.
- [15] 唐琳, 张春英. 肉类的风味及其形成机制[J]. 山东师大学报(自然科学版), 1996, 11(2): 74-78.
- TANG Lin, ZHANG Chun-ying. Flavor of meat and its formation mechanism[J]. Journal of Shandong Normal University (Natural Science), 1996, 11(2): 74-78.
- [16] 刘登勇, 赵志南, 吴金城, 等. 基于 SPME-GC-MS 分析熏制材料对熏鸡腿挥发性风味物质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(24): 220-227.
- LIU Deng-yong, ZHAO Zhi-nan, WU Jin-cheng, et al. Effects of different smoking materials on volatile flavor compounds in smoked chicken thighs[J]. Food Science, 2019, 40(24): 220-227.
- [17] 马菲, 邹延军, 刁欣悦. 酱制时间对传统酱卤猪肉制品风味及质构变化规律的影响[J]. 食品与机械, 2019, 35(9): 55-63.
- MA Fei, HUANG Yan-jun, DIAO Xin-yue. Effect of sauce time on the flavor and texture change of traditional sauce and braised pork products[J]. Food & Machinery, 2019, 35(9): 55-63.
- [18] LORENZO J M, DOMINGUEZ R. Cooking losses, lipid oxidation and formation of volatile compounds in foal meat as affected by cooking procedure[J]. Flavor and Fragrance Journal, 2014, 29(4): 240-248.
- [19] SHOTA Tanimoto, KAORI Kitabayashi, CHIHIRO Fukusima, et al. Effect of storage period before reheating on the volatile compound composition and lipid oxidation of steamed meat of yellowtail *Seriola quinqueradiata*[J]. Fisheries Science, 2015, 81(6): 1 145-1 155.
- [20] 纪有华, 王荣兰. 红烧肉风味形成途径探讨[J]. 扬州大学烹饪学报, 2006(2): 19-23.
- JI Yuo-hua, WANG Lan-rong. Exploring the flavour formation pathways of braised pork [J]. Culinary Science Journal of Ynagzhou University, 2006(2): 19-23.
- [21] 王瑞澄, 周芳伊, 黄峰, 等. 毛氏红烧肉挥发性风味物质分析方法的建立[J]. 食品科技, 2019, 44(4): 308-313.
- WANG Rui-cheng, ZHOU Fang-yi, HUANG Feng, et al. Establishment of analysis method for volatile flavor compounds in Mao red braised pork [J]. Food Science and Technology, 2019, 44(4): 308-313.