

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240904008

顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法分析桂花板鸭 加工过程中挥发性风味物质的变化

王丽¹, 张耀¹, 刘光宪^{1*}, 李雪¹, 黄锦卿¹, 程文龙¹, 董博¹,
刘彩玲¹, 何雪平², 张晓²

(1. 江西省农业科学院农产品加工研究所, 南昌 330200; 2. 瑞昌市溢香农产品有限公司, 九江 332299)

摘要: **目的** 探究桂花板鸭加工过程中挥发性风味成分的变化规律。**方法** 采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱技术, 分析原料肉、腌制1 d、腌制4 d、晾晒10 d、晾晒20 d、成品30 d 6个阶段中挥发性风味物质组分与含量, 结合气味活性值、主成分分析和变量重要性投影, 解析加工过程中关键挥发性风味物质。**结果** 整个加工阶段共鉴定出117种挥发性风味物质, 挥发性风味物质的总含量呈上升趋势。通过气味活性值分析法得到了34种主体挥发性风味物质, 戊醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、壬醛、(E)-2-壬烯醛、2-辛烯-1-醇、3-甲基-1-丁醇、1-辛烯-3-醇、2-戊基呋喃为6个阶段中共有的主体挥发性风味物质, 其中(E,E)-2,4-癸二烯醛和1-辛烯-3-醇为整个加工过程中主要的关键挥发性风味物质。主成分分析表明, 与原料肉和腌制期相比, 桂花板鸭在晾晒和贮藏期内风味产生了显著的变化, 且主体挥发性风味物质在贮藏期内大量积累。此外, 通过变量重要性投影筛选出了13种挥发性风味物质标记物。**结论** 本研究解析了桂花板鸭不同加工阶段挥发性风味成分差异, 为桂花板鸭风味物质研究及其品质评价提供了理论参考。

关键词: 桂花板鸭; 加工过程; 挥发性风味物质; 气味活性值

Analysis of volatile flavor compounds during processing of Guihua dry-cured duck based on headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry

WANG Li¹, ZHANG Yao¹, LIU Guan-Xian^{1*}, LI Xue¹, HUANG Jin-Qing¹,
CHENG Wen-Long¹, DONG Bo¹, LIU Cai-Ling¹, HE Xue-Ping², ZHANG Xiao²

(1. Institute of Agricultural Products Processing, Jiangxi Academy of Agricultural Science, Nanchang 330200, China;
2. Ruichang Yixiang Agricultural Products Products Limited, Jiujiang 332299, China)

ABSTRACT: Objective To explore the changes of volatile flavor compounds during Guihua dry-cured duck processing. **Methods** Headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry was used to

基金项目: 江西省重大科技研发专项“揭榜挂帅”项目(20213AAF02024)、江西省农业科学院基础研究与人才培养专项(JXSNKYJCRC202310)、江西省高层次高技能领军人才工程项目(2022)

Fund: Supported by the Unveiling of Jiangxi Province's Major Science and Technology Research and Development Special Project (20213AAF02024), the Basic Research and Talent Cultivation Project of Jiangxi Academy of Agricultural Sciences (JXSNKYJCRC202310), and the High Level and High Skill Leading Talents Project of Jiangxi Province (2022)

*通信作者: 刘光宪, 博士, 副研究员, 主要研究方向为肉品加工研究。E-mail: liugx178@163.com

*Corresponding author: LIU Guang-Xian, Ph.D, Associate Professor, Institute of Agricultural Products Processing, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, No.602, Nanlian Road, Nanchang 330200, China. E-mail: liugx178@163.com

analyze the components and contents of volatile flavor substances in 6 stages of raw meat, curing for 1 d, curing for 4 d, drying for 10 d, drying for 20 d and product for 30 d. Combining with odor activity value, principal component analysis and variable importance for the projection to analyze the the key volatile flavor compounds during processing. **Results** A total of 117 kinds of volatile flavor compounds were identified during processing, and the total content of volatile flavor compounds showed an increasing trend. Meanwhile, 34 kinds of main volatile flavor substances were obtained by odor activity value analysis. Pentanal, (*E,E*)-2,4-decadienal, nonanal, (*E*)-2-nonenal, 2-octene-1-ol, 3-methyl-1-butanol, 1-octene-3-ol and 2-pentylfuran were the main volatile flavor compounds in the six samples. Among them, (*E,E*)-2,4-decadienal and 1-octene-3-ol were the key volatile flavor compounds in the whole process. The principal component analysis indicated that compared with raw meat and curing period, the flavor of Guihua dry-cured duck changed significantly during drying and storage period, and the main volatile flavor substances accumulated in large quantities during storage period. In addition, 13 kinds of volatile flavor substance markers were screened by variable importance projection. **Conclusion** This study analyze the differences of volatile flavor components of Guihua dry-cured duck during processing, which provide theoretical reference for flavor and quality evaluation of Guihua dry-cured duck.

KEY WORDS: Guihua dry-cured duck; processing; volatile flavor compounds; odor activity value

0 引言

板鸭是我国传统腌腊肉制品的代表^[1], 目前市场上的板鸭产品主要包括南安板鸭、南京板鸭、建昌板鸭、桂花板鸭等。其中, 桂花板鸭属于江西瑞昌特产, 经腌制、漂洗、定型和自然晾晒而成, 形成了独特的生产工艺, 其“色、香、味、型”俱全, 持有原生态传统腊味, 是当地特色猪肉制品。挥发性风味是评价肉制品整体品质的重要指标之一, 挥发风味物质主要来源于肉制品在加工过程中脂质的氧化、蛋白质氨基酸的降解、美拉德反应和硫胺素降解产生的醛类、醇类、酮类等有机化合物^[2]。目前, 针对传统腌腊肉制品的风味研究多以腊肠、火腿和腊肉等^[3-6]为主, 而在板鸭风味方面的研究相对较少, 且多集中于南京板鸭、重庆白市驿板鸭、南安板鸭或不同品牌板鸭产品间的风味比较^[7-11]。但对桂花板鸭加工过程中风味物质的变化研究还相对缺乏。研究表明醇类、醛类、酮类和酯类化合物是板鸭风味形成的主体成分^[8-9], 受原料、环境、加工工艺的影响, 不同地区板鸭的风味物质组成、关键风味物质种类和含量存在一定差异性。

因此, 本研究以桂花板鸭为对象, 采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱(headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS)技术, 探究桂花板鸭在不同加工阶段的风味变化规律, 结合气味活性值(odor activity value, OAV)和主成分分析(principal components analysis, PCA)明确加工过程中主体挥发性风味物质, 通过变量重要性投影(variable importance for the projection, VIP)筛选出主体挥发性风味物质标志物, 为桂花板鸭的风味评价及加工工艺研究提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

分别选取原料肉、腌制 1 d、腌制 4 d、晾晒 10 d、晾晒 20 d、成品 30 d 6 个工艺点的鸭股二头肌作为分析样品, 选取 3 个重复, 将样品置于 -80 °C 冷冻贮藏备用, 上述样品均来源于瑞昌市溢香农产品有限公司。

2-辛醇(色谱纯, 美国 Sigma 公司)。

1.2 仪器与设备

HH-4A 型恒温水浴锅(国华电器有限公司); 7890B-5977B 气相色谱质谱联用仪(美国 Agilent 公司); 57330-U 固相微萃取装置、50/30 μm 57348-U 固相微萃取针(美国 Supelco 公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 挥发性风味物质前处理及检测分析

将板鸭样品于室温下切碎混匀后, 称取 100 mg 样品置于 20 mL 萃取瓶中, 加入 10 μL 10 mg/L 2-辛醇内标物, 密封, 60 °C 水浴 20 min。将经 250 °C 老化 30 min 后的萃取头插入萃取瓶中, 30 min 后取出, 250 °C 解吸 4 min 后进行数据采集与检测。

升温条件: 进样口温度 250 °C, 初始温度 50 °C, 保持 2 min, 以 5 °C/min 速率升温到 100 °C 保持 2 min; 4 °C/min 速率升温到 180 °C 保持 3 min; 5 °C/min 升温到 250 °C 保持 5 min。传输线温度 250 °C, 电子能量 70 eV, 离子源温度 230 °C, 质量扫描范围 20~600 m/z 。

1.3.2 定性定量方法

使用 ChromaTOF 软件和 NIST 库对质谱数据进行对

比分析, 保留正反匹配度大于 800 的物质。以 2-辛醇为内标物对样品中挥发性风味物质进行定量分析, 计算公式如下(1):

$$C_x = \frac{A_x \times m}{A \times M} \quad (1)$$

式中: C_x 和 A_x 分别为待测挥发性化合物的浓度($\mu\text{g}/\text{kg}$)和峰面积; m 和 A 分别为加入内标物的质量(μg)和峰面积; M 为样品的质量, kg 。

1.3.3 主体挥发性风味物质的评价

通过 OAV 对不同加工阶段的板鸭主体挥发性风味物质进行分析与评价, 计算公式如下(2):

$$\text{OAV} = \frac{C}{\text{OT}} \quad (2)$$

式中: C 为某种挥发性风味化合物的含量, $\mu\text{g}/\text{kg}$; OT 为该化合物的阈值, $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

1.4 数据处理

采用 SPSS 18.0 和 Excel 2016 软件对板鸭制作过程中的挥发性风味物质进行试验数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 桂花板鸭加工过程中挥发性风味物质的变化

由表 1 可知, 在板鸭加工过程中共鉴定出 117 种挥发性风味物质, 包括醛类、酯类、醇类、酮类、酸类及其他类。由图 1 可知, 6 个工艺点的样品中(原料肉、腌制 1 d、腌制 4 d、晾晒 10 d、晾晒 20 d 和成品 30 d)分别鉴定出 68、72、74、84、101 和 96 种挥发性风味物质, 总含量分别为 1965.21、2373.99、2963.90、7562.57、8695.66 和 15063.34 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 挥发性风味物质的种类呈先上升后趋于稳定的状态, 质量浓度呈上升趋势。

表 1 桂花板鸭加工过程中挥发性风味物质成分
Table 1 Components of volatile flavor compounds during Guihua dry-cured duck processing

化合物名称	含量/ $(\mu\text{g}/\text{kg})$						阈值/ $(\mu\text{g}/\text{kg})$	气味描述
	原料肉	腌制 1 d	腌制 4 d	晾晒 10 d	晾晒 20 d	成品 30 d		
醛类								
戊醛	19.70±1.05 ^a	58.62±2.21 ^b	130.80±24.90 ^c	343.43±27.73 ^d	415.31±15.07 ^e	392.35±11.84 ^{de}	12 ^[12]	青香、花香
十六醛	1.00±0.26 ^a	7.07±0.11 ^b	-	-	7.34±0.10 ^b	7.36±0.03 ^b	0.91 ^[13]	甜杏、坚果味
5-乙基环戊-1-烯醛	0.73±0.05 ^a	3.17±0.12 ^b	9.03±0.19 ^c	14.78±0.35 ^d	34.58±2.68 ^e	54.84±4.62 ^f	/	/
苯甲醛	-	56.82±8.61 ^b	16.05±1.35 ^a	97.30±10.58 ^d	97.35±1.35 ^d	79.30±8.61 ^c	350 ^[12]	杏仁味
(E,E)-2,6-壬二烯醛	-	-	0.92±0.02 ^a	-	2.13±0.04 ^b	2.05±0.04 ^b	0.0045 ^[12]	花香
(E)-2-己烯醛	-	-	-	-	17.10±1.84 ^a	-	190 ^[12]	苹果味、杏仁味
癸醛	1.02±0.25 ^a	-	2.24±0.12 ^b	-	11.18±0.30 ^c	25.13±3.03 ^d	0.1 ^[12]	油脂香、果香
柠檬醛	-	-	-	1.20±0.01 ^a	1.25±0.05 ^a	-	5 ^[14]	/
苯乙醛	-	6.72±0.30 ^a	8.28±0.05 ^{ab}	52.59±5.23 ^d	35.92±2.01 ^c	-	4 ^[12]	花香、甜味
3-甲基丁醛	0.78±0.10 ^a	1.54±0.06 ^b	-	20.27±1.46 ^{bc}	18.41±1.11 ^c	22.20±0.36 ^d	0.2 ^[12]	杏仁、坚果味
4-戊基苯甲醛	-	1.81±0.05 ^a	-	-	3.35±0.11 ^b	-	/	/
(E)-2-辛烯醛	-	101.77±9.16 ^a	140.99±38.96 ^b	164.21±40.54 ^{bc}	250.47±29.98 ^d	468.67±39.13 ^e	3 ^[15]	清香味
丙醛	-	3.87±0.17 ^a	22.56±1.12 ^b	-	39.54±1.82 ^c	20.30±0.31 ^b	15.1 ^[16]	清香、果香
(E,E)-2,4-壬二烯醛	4.17±0.30 ^a	5.45±0.21 ^{ab}	33.36±2.80 ^c	-	48.37±2.15 ^d	84.45±3.49 ^e	0.09 ^[15]	果香、油脂
己醛	0.04±0.00 ^a	0.10±0.00 ^b	0.37±0.05 ^d	0.20±0.00 ^c	0.18±0.00 ^c	0.56±0.02 ^c	10 ^[12]	青草味
反-2-十一烯醛	1.37±0.13 ^a	2.31±0.14 ^b	4.52±0.06 ^c	-	10.06±0.71 ^d	25.05±0.75 ^e	0.78 ^[17]	蜡香味、清香味
2-丁基-2-辛烯醛	5.12±0.06 ^d	1.73±0.06 ^a	3.58±0.08 ^b	3.69±0.10 ^b	4.01±0.05 ^{bc}	9.19±0.57 ^c	/	/
2-羟基苯甲醛	-	0.79±0.07 ^a	1.08±0.01 ^{ab}	-	-	-	30 ^[18]	/
(E,E)-2,4-癸二烯醛	2.85±0.10 ^a	6.95±0.05 ^b	46.11±3.62 ^d	29.29±1.89 ^c	47.86±1.46 ^d	90.29±4.73 ^c	0.07 ^[12]	肉味、脂香
(E)-14-十六烯醛	-	-	-	0.42±0.01 ^a	3.95±0.08 ^b	5.31±0.18 ^c	/	/
(E)-2-癸烯醛	-	3.77±0.05 ^a	9.02±0.15 ^b	16.40±0.80 ^c	23.12±1.84 ^d	67.72±7.23 ^c	0.4 ^[17]	松香、青香

表 1(续)

化合物名称	含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$)						阈值/($\mu\text{g}/\text{kg}$)	气味描述
	原料肉	腌制 1 d	腌制 4 d	晾晒 10 d	晾晒 20 d	成品 30 d		
十二醛	-	-	-	-	0.12±0.00 ^a	0.12±0.00 ^a	1 ^[12]	洋葱味, 清香味
2,4-二甲基苯甲醛	0.38±0.00 ^a	5.44±0.23 ^{cd}	1.61±0.03 ^a	4.16±0.05 ^c	2.76±0.01 ^b	8.81±0.54 ^c	/	/
3-乙基苯甲醛	0.33±0.00 ^a	1.17±0.01 ^a	1.35±0.01 ^a	2.75±0.05 ^b	4.30±0.05 ^c	3.31±0.01 ^b	/	/
十四烷醛	0.67±0.02 ^{ab}	1.75±0.01 ^c	0.40±0.01 ^a	1.47±0.06	3.03±0.09 ^d	-	/	/
庚醛	11.80±0.40 ^a	42.73±1.91 ^b	85.77±11.46 ^c	-	384.07±39.83 ^d	598.65±32.54 ^e	3 ^[12]	脂肪味、油味
(<i>E,E</i>)-2,4-辛二烯醛	-	-	-	-	4.52±0.07 ^a	11.98±0.03 ^b	/	/
乙醛	-	72.52±0.53 ^b	43.15±0.91 ^a	-	80.35±1.65 ^b	-	/	/
十五醛	2.09±0.08 ^a	3.92±0.01 ^b	-	-	5.70±0.09 ^c	2.12±0.03 ^a	1.48 ^[15]	/
(<i>E,E</i>)-2,4-七烯醛	0.68±0.01 ^a	2.01±0.03 ^b	17.28±0.62 ^c	8.54±0.34 ^c	12.82±0.05 ^d	22.60±1.02 ^f	/	/
4-酮醛	-	-	-	0.54±0.02 ^a	1.03±0.03 ^b	1.62±0.01 ^c	/	/
2-乙基-2-己烯醛	-	1.53±0.06 ^a	-	17.69±0.35 ^b	20.07±0.95 ^{bc}	49.92±1.32 ^d	/	/
十三醛	-	1.29±0.01 ^a	-	1.02±0.02 ^a	2.74±0.02 ^c	1.50±0.06 ^{ab}	/	/
(<i>E</i>)-2-戊烯醛	-	-	5.83±0.14 ^b	3.31±0.05 ^a	9.67±0.36 ^d	7.51±0.45 ^c	/	/
(<i>Z</i>)-2-庚醛	3.89±0.03 ^a	12.29±0.15 ^b	65.80±1.32 ^c	63.94±5.68 ^c	143.15±10.65 ^d	284.18±20.38 ^e	/	/
壬醛	9.61±0.31 ^a	20.28±1.63 ^b	58.38±10.81 ^c	183.69±29.41 ^d	370.19±31.91 ^e	783.98±21.45 ^f	1 ^[12]	油脂香, 甜橙香
辛醛	5.60±0.26 ^a	12.58±0.60 ^b	24.70±2.94 ^c	89.32±10.09 ^d	178.31±7.51 ^e	494.44±12.07 ^f	6.9 ^[12]	清香, 甜橙香
丁醛	-	0.72±0.03 ^a	-	-	9.10±0.08 ^b	9.77±0.14 ^b	11 ^[19]	/
(<i>E</i>)-2-壬烯醛	0.36±0.04 ^a	1.03±0.02 ^b	3.51±0.02 ^c	4.83±0.18 ^{cd}	11.38±0.15 ^c	23.60±0.27 ^f	0.19 ^[12]	黄瓜味, 纸壳味
酯类								
己酸乙酯	5.46±0.81 ^a	44.89±3.25 ^c	23.28±0.25 ^b	250.25±10.68 ^d	257.63±23.68 ^d	1484.88±100.25 ^e	/	/
庚酸乙酯	-	-	-	7.66±0.05 ^a	12.73±0.05 ^b	141.75±6.98 ^c	/	/
亚油酸乙酯	-	-	2.09±0.02 ^d	1.40±0.04 ^c	0.47±0.01 ^a	0.94±0.02 ^b	/	/
3-甲基丁酸乙酯	-	-	-	5.03±0.20 ^b	2.14±0.10 ^a	8.37±0.50 ^c	/	/
3-甲基环戊基乙酸酯	-	2.62±0.04 ^b	1.27±0.02 ^a	6.62±0.05 ^c	8.16±0.35 ^{cd}	-	/	/
十六酸乙酯	1.82±0.02 ^a	-	14.88±0.54 ^{cd}	12.03±0.25 ^c	7.58±0.45 ^b	9.07±0.15 ^{bc}	/	/
乳酸乙酯	-	77.07±5.32 ^b	321.45±15.68 ^c	-	28.70±1.98 ^a	30.83±2.65 ^a	/	水果香
戊酸乙酯	-	-	-	11.40±0.20 ^b	6.62±0.98 ^a	36.55±3.25 ^c	/	/
十八酸乙酯	-	-	-	1.03±0.02 ^b	-	0.66±0.01 ^a	/	/
丁酸乙酯	-	4.91±0.09 ^{ab}	3.13±0.04 ^a	7.75±0.07 ^c	-	-	1 ^[20]	香蕉、菠萝味
邻苯二甲酸二丁酯	2.88±0.12 ^a	-	4.18±0.51 ^b	23.38±2.38 ^c	14.97±4.35 ^d	10.93±3.94 ^c	/	/
2-甲基丁酸乙酯	-	-	0.39±0.02 ^a	2.14±0.02 ^b	-	-	0.3 ^[21]	苹果香、清香
辛酸乙酯	-	-	3.09±0.09 ^a	22.88±1.12 ^b	25.26±0.09 ^b	250.57±29.92 ^c	19.3 ^[22]	青草味
乙酸乙酯	7.61±0.32 ^c	2.58±0.06 ^b	11.26±0.28 ^d	0.65±0.03 ^a	0.60±0.03 ^a	0.61±0.01 ^a	7.5 ^[20]	甜味
醇类								
辛醇	17.67±1.30 ^a	45.52±4.19 ^c	23.20±2.88 ^{ab}	93.41±8.70 ^d	127.92±15.57 ^e	200.59±17.58 ^f	126 ^[12]	油脂味
甲硫醇	-	-	-	2.32±0.01 ^a	5.61±0.06 ^b	8.99±0.12 ^c	/	/
2-辛烯-1-醇	8.64±0.26 ^a	101.72±28.15 ^c	68.37±11.08 ^b	150.50±10.73 ^d	227.67±13.48 ^e	115.66±4.06 ^f	4 ^[12]	柑橘味

表 1(续)

化合物名称	含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$)						阈值/($\mu\text{g}/\text{kg}$)	气味描述
	原料肉	腌制 1 d	腌制 4 d	晾晒 10 d	晾晒 20 d	成品 30 d		
3-甲基-1-丁醇	4.63±0.08 ^a	117.86±37.06 ^c	287.88±61.91 ^f	87.78±7.65 ^{cd}	55.47±0.79 ^b	71.55±2.64 ^c	0.35 ^[23]	杏仁、麦芽
丙醇	-	14.63±0.52 ^a	32.70±1.68 ^b	-	-	-	/	/
苯乙醇	5.10±0.12 ^a	24.17±3.72 ^{cd}	35.88±1.01 ^e	19.96±0.19 ^b	19.14±0.36 ^b	22.01±2.05 ^{bc}	7.23 ^[20]	玫瑰花香
苯甲醇	0.98±0.01 ^a	1.39±0.05 ^b	1.38±0.05 ^b	-	2.91±0.04 ^c	4.24±0.11 ^d	/	/
1-戊烯-3-醇	10.52±0.05 ^a	104.37±20.35 ^c	26.32±3.25 ^b	161.21±12.67 ^e	113.32±20.34 ^c	122.57±15.35 ^d	358.1 ^[24]	烧烤味、肉味
3-甲基-1-庚醇	-	-	-	1.63±0.02 ^a	-	6.23±0.35 ^b	/	/
1-辛烯-3-醇	271.47±11.94 ^a	311.01±58.58 ^{ab}	627.60±70.5 ^c	2220.06±204.84 ^d	2742.01±212.52 ^e	2300.80±301.25 ^d	1 ^[12]	蘑菇味、泥土味
庚醇	21.44±2.35 ^a	-	26.01±1.95 ^{ab}	97.78±10.35 ^c	109.32±9.24 ^{cd}	149.23±20.34 ^c	520 ^[12]	青草味、芳香味
三甲基硅醇	11.82±1.02 ^a	17.03±1.05 ^c	13.26±0.09 ^b	13.73±2.02 ^b	10.24±1.98 ^a	-	/	/
丁醇	10.45±0.05 ^a	16.03±0.14 ^{bc}	14.31±1.32 ^b	27.48±3.25 ^c	13.95±2.35 ^b	20.21±3.01 ^d	/	/
戊醇	86.01±9.68 ^a	101.10±1.35 ^b	132.81±15.36 ^c	530.69±20.36 ^e	284.93±30.25 ^d	302.30±10.35 ^d	4000 ^[12]	清香
1-甲氧基-2-丙醇	21.95±0.58 ^d	8.04±0.32 ^c	5.32±0.94 ^b	-	8.21±0.64 ^c	3.07±0.62 ^a	/	/
己醇	222.81±20.35 ^{bc}	138.09±10.68 ^a	156.62±13.57 ^a	241.36±22.38 ^c	198.63±15.36 ^b	252.29±19.98 ^{cd}	500 ^[12]	水果芬芳香
酮类								
丙酮	814.39±68.12 ^d	144.17±12.35 ^c	72.23±9.65 ^b	87.06±8.35 ^b	29.52±6.37 ^a	26.69±5.32 ^a	/	/
1-羟基-2-丙酮	0.42±0.01 ^a	0.36±0.00 ^a	-	-	-	-	80000 ^[18]	/
3-辛烯-2-酮	1.23±0.10 ^a	7.36±0.62 ^b	1.78±0.03 ^a	38.99±2.62 ^c	100.64±0.71 ^d	156.00±16.37 ^c	6.7 ^[16]	/
2-庚酮	8.01±0.18 ^a	47.47±4.99 ^{bc}	34.79±3.16 ^b	129.61±10.09 ^d	220.71±19.29 ^c	305.15±23.95 ^f	140 ^[12]	甜蜜花香味
2-辛酮	12.38±0.40 ^a	30.65±3.90 ^b	-	47.92±3.62 ^c	68.87±2.54 ^d	75.49±5.34 ^c	50.2 ^[24]	苹果味、花香味
3-辛酮	-	-	-	6.27±1.32 ^a	12.79±1.65 ^c	7.54±0.94 ^{ab}	50 ^[25]	/
6-甲基-5-庚烯-2-酮	1.16±0.02 ^a	3.04±0.20 ^b	2.47±0.34 ^a	7.96±1.35 ^c	13.88±0.51 ^c	10.81±0.64 ^d	50.2 ^[24]	甜味、水果味
2,3-丁二酮	116.71±12.35 ^c	55.35±11.35 ^b	-	45.75±9.64 ^a	-	-	/	/
2,3-戊二酮	2.41±0.08 ^a	30.79±1.89 ^d	9.48±0.46 ^b	33.08±0.95 ^d	22.81±1.49 ^c	-	29 ^[16]	烤肉味、焦糖味
2-癸酮	-	-	-	3.24±0.01 ^a	7.85±0.05 ^b	21.65±0.41 ^c	7.94 ^[13]	/
酸类								
2-乙基己酸	1.00±0.02 ^a	1.22±0.05 ^a	-	3.23±0.04 ^c	1.53±0.12 ^{ab}	-	/	/
辛酸	4.36±1.02 ^a	7.66±0.65 ^b	-	8.14±0.98 ^b	-	45.34±5.62 ^c	910 ^[23]	奶酪味、果酸味
丙酸	6.12±1.35 ^a	-	-	-	-	15.86±1.35 ^b	/	/
己酸	60.40±0.36 ^a	211.62±59.76 ^c	80.72±5.27 ^b	1523.95±196.17 ^e	656.98±32.72 ^d	3495.59±433.84 ^f	3000 ^[12]	辛辣味、刺激味
乙酸	107.88±25.37 ^b	86.74±5.34 ^a	112.11±9.24 ^b	188.62±15.34 ^d	200.89±20.35 ^d	120.84±14.35 ^{bc}	26000 ^[23]	酸味
戊酸	-	-	7.71±0.54 ^a	118.90±9.34 ^c	50.67±0.57 ^b	205.84±22.35 ^d	/	/
3-甲基丁酸	-	-	-	-	52.30±0.61 ^a	131.38±20.96 ^b	20 ^[23]	酸味
壬酸	1.72±0.31 ^a	-	-	3.29±0.94 ^{bbc}	2.45±0.37 ^{ab}	20.06±1.94 ^d	342000 ^[12]	油脂味
4-羟基丁酸	0.89±0.06 ^a	3.81±0.18 ^b	-	5.58±0.64 ^c	3.95±0.37 ^b	7.84±1.35 ^d	/	/
庚酸	-	-	-	-	-	80.83±20.35 ^a	130 ^[23]	油脂味
其他类								
对甲酚	1.49±0.02 ^a	-	1.21±0.02 ^a	1.75±0.05 ^{ab}	1.55±0.07 ^a	2.33±0.56 ^b	3.9 ^[12]	肉味、皮革味
苯酚	-	-	-	-	7.57±1.32 ^a	10.26±2.65 ^b	5500 ^[18]	甜香味
2-己基吡啶	-	-	0.38±0.00 ^a	3.41±0.14 ^b	-	7.13±0.65 ^c	/	/
三甲苯	1.39±0.05 ^a	-	4.78±1.30 ^b	4.87±0.24 ^b	17.71±2.54 ^c	51.35±10.32 ^d	/	/

表 1(续)

化合物名称	含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$)						阈值/($\mu\text{g}/\text{kg}$)	气味描述
	原料肉	腌制 1 d	腌制 4 d	晾晒 10 d	晾晒 20 d	成品 30 d		
甲苯	3.31±0.32 ^a	32.95±0.65 ^c	5.53±0.49 ^{ab}	7.32±0.94 ^{bc}	13.61±2.01 ^d	15.80±0.91 ^d	1550 ^[18]	/
2-甲基萘	-	-	-	-	0.55±0.02 ^a	0.81±0.03 ^a	/	/
对二甲苯	2.15±0.08 ^a	-	4.94±1.04 ^b	4.33±0.84 ^b	10.21±2.64 ^c	24.38±4.61 ^d	450.11 ^[18]	油味、天竺葵味
十五烷	1.04±0.40 ^a	-	-	5.53±1.02 ^b	19.00±2.05 ^c	16.98±3.25 ^c	/	/
癸烷	-	-	-	0.30±0.00 ^a	1.18±0.24 ^b	9.25±1.32 ^c	/	/
2-甲基吡嗪	2.82±0.24 ^a	-	2.35±0.64 ^a	-	-	-	60000 ^[12]	肉味
邻二甲苯	1.37±0.35 ^a	14.51±1.32 ^c	-	3.42±0.02 ^b	-	18.29±1.05 ^{sd}	490 ^[18]	油味、天竺葵味
十二烷	3.28±0.54 ^a	12.15±3.57 ^{cd}	5.77±0.57 ^{ab}	9.68±1.35 ^c	22.33±2.55 ^c	113.04±30.32 ^f	/	/
十九烷	2.61±0.05 ^a	2.02±0.84 ^a	3.06±0.35 ^a	6.57±0.87 ^b	13.88±1.68 ^d	10.53±1.35 ^c	/	/
辛烷	0.24±0.01 ^a	0.31±0.01 ^a	0.44±0.02 ^b	2.76±0.51 ^c	6.04±1.34 ^d	21.75±5.32 ^c	1190 ^[26]	肉香
十四烷	2.02±0.02 ^a	2.17±0.21 ^a	2.84±0.08 ^a	-	34.69±5.32 ^b	30.15±4.37 ^b	1000 ^[17]	微弱腊味
3-乙基吡啶	-	-	-	-	0.41±0.01 ^a	-	/	/
3-甲基十三烷	-	-	-	-	3.06±0.21 ^a	6.78±1.02 ^b	/	/
苯乙烯	0.69±0.02 ^a	-	0.76±0.03 ^a	-	-	-	35 ^[20]	芬香味
D-柠檬烯	1.68±0.21 ^a	22.60±1.37 ^f	3.12±0.91 ^b	3.81±0.24 ^c	5.86±0.91 ^d	11.25±1.34 ^c	200 ^[23]	柠檬味、橘子味
2-戊基呋喃	15.88±1.47 ^a	67.45±6.54 ^c	28.34±2.06 ^b	120.65±10.37 ^d	469.03±20.96 ^e	722.79±33.77 ^f	6 ^[12]	香料味、黄油味
1,2,3-三甲基苯	-	3.59±0.25 ^c	0.89±0.11 ^a	0.82±0.05 ^a	2.56±0.84 ^b	7.62±1.65 ^d	/	/
十三烷	1.24±0.68 ^a	-	2.17±0.14 ^b	4.89±0.47 ^{cd}	5.32±0.34 ^{de}	4.10±0.54 ^c	220 ^[15]	刺激性气味
十一烷	-	-	-	-	1.67±0.24 ^a	5.58±0.64 ^b	/	/
萘	-	-	-	1.64±0.09 ^a	2.63±0.12 ^b	-	60 ^[18]	樟脑味
正己烷	-	1.52±0.15 ^a	-	-	-	-	/	/
乙苯	1.47±0.24 ^a	9.70±0.84 ^d	2.66±0.34 ^b	2.47±0.34 ^b	5.63±0.91 ^c	9.96±0.81 ^d	2205 ^[18]	花香味
壬烷	-	-	-	-	3.56±0.14 ^a	18.64±1.94 ^b	/	/
(E)-3-辛烯	-	-	-	1.59±0.35 ^a	2.79±0.98 ^b	3.88±0.84 ^c	/	/

注: -表示未检测到该化合物;下同。/表示文献未有相关描述。不同小写字母代表同行数据差异显著, $P < 0.05$ 。

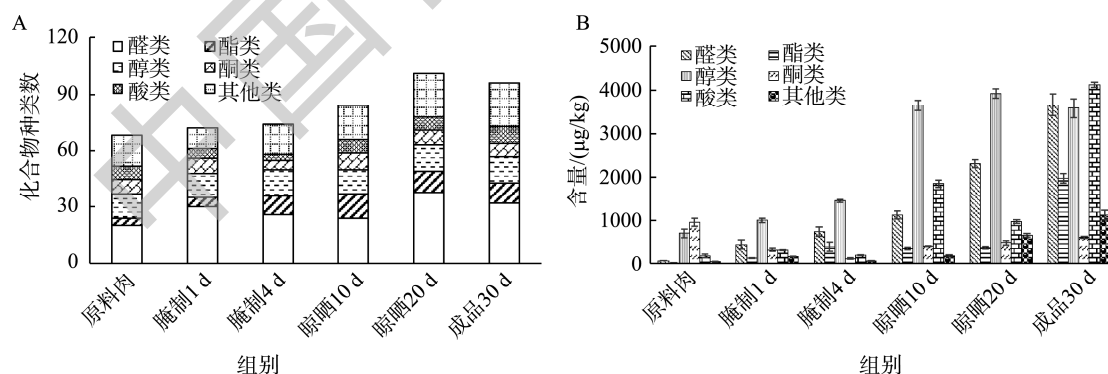


图 1 桂花板鸭加工过程中挥发性风味物质的种类(A)及含量(B)

Fig.1 Composition (A) and content (B) of volatile flavor compounds during the processing of Guihua dry-cured duck

2.1.1 醛类物质变化分析

醛类物质的风味阈值较低,其主要来源于脂质氧化降解、氨基酸和还原糖发生的美拉德反应^[27],是构成肉制品特征风味的重要组成部分和区分不同类别肉制品风味差

异的主要因素^[28]。由图 1A 可知,6 个样品中共鉴定出 39 种醛类物质,是桂花板鸭加工过程中种类最丰富的挥发性风味物质;由图 1B 可知,醛类物质的含量呈上升趋势,从原料肉 72.19 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 到成品 30 d 增加到 3658.88 $\mu\text{g}/\text{kg}$,这与

常海军等^[9]研究结果一致。戊醛、5-乙基环戊-1-烯醛、己醛、2-丁基-2-辛烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、2,4-二甲基苯甲醛、3-乙基苯甲醛、(E,E)-2,4-七烯醛、(Z)-2-庚醛、壬醛、辛醛和(E)-2-壬烯醛为 6 个样品中共有的挥发性醛类物质。其中, 5-乙基环戊-1-烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、(Z)-2-庚醛、壬醛、辛醛和(E)-2-壬烯醛的含量随着加工过程呈上升趋势。其中, 辛醛和壬醛主要是由原料肉中脂肪在微生物和内源酶的作用下氧化产生的, 有助于对肉制品形成鲜香的油脂香和水果清香^[29]; (E,E)-2,4-癸二烯醛、(Z)-2-庚醛和(E)-2-壬烯醛可能源于多不饱和脂肪酸(如花生四烯酸和亚油酸)的氧化降解, 赋予桂花板鸭脂香和青草香味。短链饱和醛、烯醛, 如戊醛、辛醛、庚醛、壬醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、(Z)-2-庚醛和(E)-2-壬烯醛是鸭肉制品的典型醛类物质^[19,30], 由表 1 可知, 这些醛类物质含量相对较高, 是构成桂花板鸭加工过程中主要的醛类物质。其中, 晾晒 20 d 的戊醛含量高于成品 30 d, 这可能与在板鸭贮藏过程中部分醛类物质参与氧化反应; 而(E)-2-辛烯醛在原料肉中未检测出, 随着加工过程中脂肪氧化降解, 其含量呈上升趋势。

2.1.2 酯类物质变化分析

酯类物质主要是在微生物作用下羧酸类和醇类发生酯化反应产生的, 其阈值较低但有助于提升肉制品整体风味品质^[31]。6 个样品中共鉴定出 14 种酯类, 其含量呈上升的趋势, 成品 30 d 总酯含量达到 1975.16 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。原料肉与腌制过程中酯类物质含量与种类较少, 其中庚酸乙酯、3-甲基丁酸乙酯、戊酸乙酯仅在晾晒和贮藏期检测出, 且呈上升趋势, 可能是在晾晒、贮藏加工过程中脂质氧化所产生的醇与游离酸之间相互作用产生了一定的酯类化合物。辛酸乙酯在腌制 4 d 后才检测出, 在加工后期含量逐步上升, 说明该酯类物质主要在晾晒与贮藏过程中产生。己酸乙酯和乙酸乙酯为 6 个样品中共有的挥发性酯类物质, 成品 30 d 的己酸乙酯的含量最高(1484.88 $\mu\text{g}/\text{kg}$), 占酯类物质总量的 75.18%。除 3-甲基环戊基乙酸酯外, 其余的酯类均为乙酯类, 这可能是由于板鸭加工过程中加入了一定量的白酒, 其含有的乙醇是参与酯化反应的重要物质, 这些乙酯化合物是由相应的酸类与乙醇发生酯化反应产生的, 它们对肉制品的果香和脂香味有一定的增强作用, 该结果与张顺亮等^[32]研究结果一致。

2.1.3 醇类物质变化分析

由图 1B 可知, 6 个样品中醇类物质总含量分别为 693.49、1000.96、1451.66、3647.91、3919.33 和 3579.74 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 占比分别为 35.28%、42.16%、48.97%、48.24%、45.07% 和 23.76%。在整个加工过程中, 醇类物质含量呈先上升后下降的趋势, 其主要来源于不饱和脂肪酸的氧化和醛类物质还原^[33], 在腌制过程中, 脂肪酸不断的氧化和醛类物质的还原, 相应的醇类物质含量逐步上升, 但随着不断晒制, 醇类物质会裂解为酮类、醛类化合物或发生酯化反应, 因

此后期醇类物质含量呈下降趋势。辛醇、2-辛烯-1-醇、3-甲基-1-丁醇、苯乙醇、1-辛烯-3-醇、1-戊烯-3-醇、丁醇、戊醇和己醇为加工过程中共有的挥发性醇类物质。有研究报道^[20,34-35]辛醇、丁醇、戊醇、己醇和 1-辛烯-3-醇是肉制品中主要的醇类物质, 结果显示这些醇类物质在桂花板鸭加工过程中含量相对较高, 但在含量上存在一定的差异性, 这可能与肉制品的种类、加工方式有关。在整个加工过程中含量最高的醇类物质均为 1-辛烯-3-醇, 其主要是由亚油酸或其它不饱和脂肪酸氧化产生的, 且在整个加工过程中呈上升趋势。戊醇、3-甲基-1-丁醇和己醇的含量相对较高, 但饱和醇类的阈值相对较高, 其对整体风味的贡献较小。戊醇主要由油酸氧化而成, 有助于肉制品形成清香味, 在晾晒 10 d 样品中含量最高(530.69 $\mu\text{g}/\text{kg}$), 呈现先上升后下降的趋势, 这可能是板鸭在晾晒与贮藏过程中, 醇类物质发生裂解或酯化反应。

2.1.4 酮类物质变化分析

酮类物质可通过脂肪氧化降解和美拉德反应产生, 风味阈值较高, 但其性质较为稳定, 一般具有奶香味和果香味。由图 1B 可知, 酮类物质在原料肉中含量最高(956.71 $\mu\text{g}/\text{kg}$), 其含量呈先下降后上升的趋势, 前期可能由于酮类是形成杂环化合物的中间体, 作为反应底物而被消耗, 后期在晾晒和储藏期间由肉制品中的脂质氧化或美拉德反应产生。丙酮、3-辛烯-2-酮、2-庚酮和 6-甲基-5-庚烯-2-酮是 6 个样品中共有的挥发性酮类物质。其中, 2-庚酮能赋予肉制品辛辣味, 其含量呈上升趋势, 在成品 30 d 中含量较高(305.15 $\mu\text{g}/\text{kg}$), 这与童红甘^[35]研究结果一致。研究结果显示, 原料肉中的丙酮含量最高(814.39 $\mu\text{g}/\text{kg}$), 但随着加工的进行呈下降趋势, 这可能因丙酮的含量与肉质品的新鲜度有关。2-辛酮和 2-癸酮在原料肉与腌制过程中均未检测出, 这可能是晾晒、贮藏过程中不饱和脂肪氧化和氨基酸的降解导致的。与其他挥发性风味物质相比, 酮类物质的含量与种类相对较少, 这可能与酮类物质可通过氧化降解成其他物质有关。同时, 酮类物质的阈值高于其同分异构体的醛类物质, 对风味贡献不突出, 主要是起到辅助和修饰作用。

2.1.5 酸类物质和其他类物质变化分析

酸类物质的含量总体呈上升趋势, 这可能与腌制、晾晒等加工过程中脂肪水解和氧化产生一定的酸类物质有关。己酸和乙酸是加工过程中共有的挥发性酸类物质, 其中己酸含量呈上升趋势, 这与表 1 中己酸乙酯的含量呈上升趋势且含量较高相吻合, 表明在加工阶段己酸参与了酯化反应; 而乙酸含量较为稳定, 但两者的阈值较高, 对肉风味贡献起到助香、协调和平衡的辅助作用。

此外, 6 个样品中共鉴定出 28 种其他类物质, 包括烃类、酚类、呋喃类、吡嗪类化合物。烃类物质是脂肪酸烷基自由基的裂解产物, 是杂环物质的中间体, 但其含量较低, 阈值较高, 一般认为对风味的影响较小。2-戊基呋喃

属于杂环化合物,具有香料味、黄油味,主要来源于脂肪氧化和美拉德反应,其含量相对较高且呈上升趋势。童红甘等^[10]发现重庆市驿板鸭的酚类物质含量显著高于其他品牌地区板鸭,但本研究中仅检测出对甲酚和苯酚,且含量较低,这可能与重庆白市驿板鸭在制作过程中经烟熏处理有关。有研究报道^[36-37]在腌腊制品中检测出二烯丙基二硫醚、茴香脑等多种醚类化合物,但本研究中未检测出醚类化合物,这些醚类化合物可能来源于腌腊肉制品在加工过程中添加的八角、茴香等香料物质。

2.2 挥发性风味物质的 OAV 分析

挥发性风味物质对肉制品风味贡献度是由各挥发性风味物质的浓度及其风味阈值共同决定,一般认为, OAV>1 的挥发性风味物质对样品的整体风味有直接影响,且 OAV 越大,则对风味的贡献越大。由表 2 可知, OAV>1 的主体挥发性风味物质共有 34 种,包括 17 种醛类、4 种酯类、5 种醇类、5 种酮类、2 种酸类、1 种呋喃类,且随着加工过程的进行,气味活性化合物的种类呈增加趋势。戊醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、壬醛、(E)-2-壬烯醛、2-辛烯-1-醇、3-甲基-1-丁醇、1-辛烯-3-醇、2-戊基呋喃为 6 个样品中共有的主体挥发性风味物质。有研究表明^[10,20,34](E,E)-2,4-癸二烯醛和 1-辛烯-3-醇分别属于脂肪族醛类和醇类,多数源自于脂肪酸的氧化降解,赋予肉制品油脂、清香、蘑菇及坚果的香味,为肉制品中常见的主体挥发性风味物质,

结果显示这两种化合物的 OAV 值均呈上升趋势,在成品 30 d 中分别为 1289.86 和 2300.80,是桂花板鸭加工阶段中主要的主体挥发性风味物质。3-甲基-1-丁醇在整个加工阶段含量虽较低,但其阈值低(0.35 μg/kg),在腌制 1 d、腌制 4 d 和晾晒 10 d 中 OAV 值较高。2-戊基呋喃是一种衍生于亚油酸或其他 n-6 脂肪酸的非羰基化合物,是板鸭加工过程中产生的特有风味物质^[35],因阈值较低,对 6 个样品的风味具有较大贡献(OAV>2),成品 30 d 中 OAV 最大(120.47)。(E,E)-2,4-壬二烯醛在原料肉、腌制 1 d、腌制 4 d、晾晒 20 d 和成品 30 d 中 OAV 值较高,能赋予肉制品果香、油脂味。2-甲基丁酸乙酯具有浓郁的苹果香和清香味,仅在腌制 4 d 和晾晒 10 d 样品中检测出,虽含量低,但阈值相对较低,是腌制 4 d 和晾晒 10 d 中特征香气物质。2,3-戊二酮能赋予肉制品烤肉味和焦糖味,其阈值相对较高,仅腌制 1 d 和晾晒 10 d 的 OAV 值大于 1,这可能与其在加工后期发生了氧化降解有关。综上所述,在桂花板鸭不同加工阶段的特征香气物质的成分存在一定的差异性。在腌制、晾晒等加工过程中会伴随着一定的脂肪氧化、美拉德反应和酯化反应,会导致醛类、醇类、酮类、酯类、酸类物质大量产生,但酮类、酯类、酸类物质的阈值相对较大, OAV 值相对较小,对风味整体贡献不突出。因此,醛类和醇类是桂花板鸭加工过程中主要的主体风味物质,与王浩文等^[8]和常海军等^[9]研究结果一致。

表 2 桂花板鸭加工过程中挥发性风味物质 OAV 分析
Table 2 OAV analysis of volatile flavor compounds during the processing of Guihua dry-cured duck

化合物名称	OAV					
	原料肉	腌制 1 d	腌制 4 d	晾晒 10 d	晾晒 20 d	成品 30 d
戊醛	1.64	4.89	10.90	28.62	34.61	32.70
十六醛	1.10	7.77	-	-	8.07	8.09
(E,E)-2,6-壬二烯醛	-	-	204.44	-	473.33	455.56
癸醛	10.20	-	22.40	-	111.80	251.30
苯乙醛	-	1.68	2.07	13.15	8.98	-
3-甲基丁醛	3.90	7.70	-	101.35	92.05	111.00
(E)-2-辛烯醛	-	33.92	47.00	54.74	83.49	156.22
丙醛	-	+	1.49	-	2.62	1.34
(E,E)-2,4-壬二烯醛	46.33	60.56	370.67	-	537.44	938.33
反-2-十一烯醛	1.76	2.96	5.79	-	12.90	32.12
(E,E)-2,4-癸二烯醛	40.71	99.29	658.71	418.43	683.71	1289.86
(E)-2-癸烯醛	-	9.43	22.55	41.00	57.80	169.30
庚醛	3.93	14.24	28.59	-	128.02	199.55
十五醛	1.41	2.65	-	-	3.85	1.43
壬醛	9.61	20.28	58.38	183.69	370.19	783.98
辛醛	+	1.82	3.58	12.94	25.84	71.66
(E)-2-壬烯醛	1.89	5.42	18.47	25.42	59.89	124.21
丁酸乙酯	-	4.91	3.13	7.75	-	-

表 2(续)

化合物名称	OAV					
	原料肉	腌制 1 d	腌制 4 d	晾晒 10 d	晾晒 20 d	成品 30 d
2-甲基丁酸乙酯	-	-	1.30	7.13	-	-
辛酸乙酯	-	-	+	1.19	1.31	12.98
乙酸乙酯	1.01	+	1.50	+	+	+
辛醇	+	+	+	+	1.02	1.59
2-辛烯-1-醇	2.16	25.43	17.09	37.63	56.92	28.92
3-甲基-1-丁醇	13.23	336.74	822.51	250.80	158.49	204.43
苯乙醇	+	3.34	4.96	2.76	2.65	3.04
1-辛烯-3-醇	271.47	311.01	627.60	2220.06	2742.01	2300.80
3-辛烯-2-酮	+	1.10	+	5.82	15.02	23.28
2-庚酮	+	+	+	+	1.58	2.18
2-辛酮	+	+	-	+	1.37	1.50
2,3-戊二酮	+	1.06	+	1.14	+	-
2-癸酮	-	-	-	+	+	2.73
己酸	+	+	+	+	+	1.17
3-甲基丁酸	-	-	-	-	2.62	6.57
2-戊基呋喃	2.65	11.24	4.72	20.11	78.17	120.47

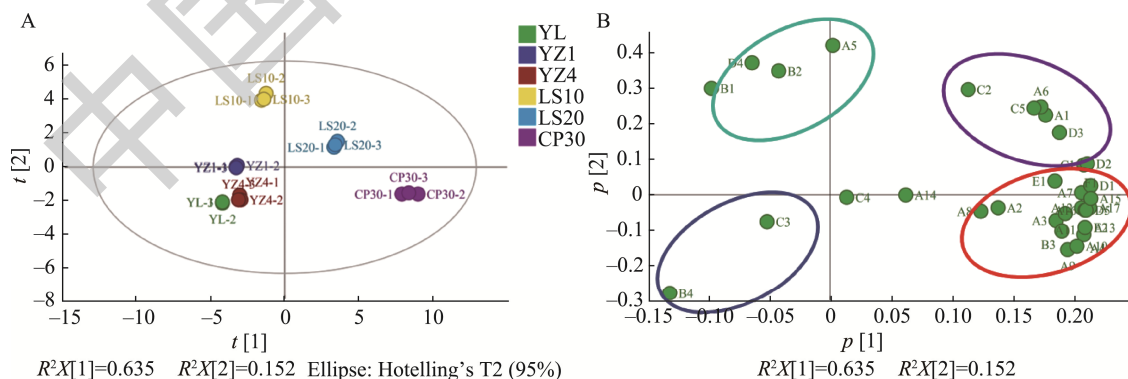
注: +表示 OAV 值小于 1; -表示未检测出该化合物。

2.3 主体挥发性风味物质 PCA 分析

基于筛选出的 34 种主体挥发性风味物质成分对桂花板鸭不同加工阶段样品进行 PCA 分析, 由图 2A 可知, PC1 贡献率为 63.5%, PC2 贡献率为 15.2%, 总贡献率为 78.7%, 表明第 1 和第 2 主成分能较好地反映样品风味特征。由图 2A 可知, 晾晒 20 d 和成品 30 d 的样品分布在 Y 轴右侧, 其余样品分布在 Y 轴左侧, 说明在 PC1 上晾晒 20 d 和成品 30 d 与其他 4 组(原料肉、腌制 1 d、腌制 4 d 和晾晒 10 d)存在差异显著; 在 PC2 上样本大致分布两部分, 其中, 晾晒 10 d 分布在 X 轴上方, 原料肉、腌制 1 d 和腌制 4 d 分布在 X 轴下方, 说明晾晒 10 d 与原料肉、腌制 1 d 和腌制 4 d 存在差异显著, 该结果与表 1 中挥发性风味物质的变

化规律相类似。由图 2B 可知, 蓝色圈内的化合物与原料肉、腌制 1 d 和腌制 4 d 相关性较高, 绿色圈内的化合物与晾晒 10 d 相关性较高, 紫色圈内的化合物与晾晒 20 d 相关性较高。红色圈内的化合物与成品 30 d 高度相关, 且多数化合物集中于红色圈内, 如(*E*)-2-壬烯醛、2-癸酮、辛醛、(*E*)-2-癸烯醛、(*E,E*)-2,4-癸二烯醛、(*E,E*)-2,6-壬二烯醛等, 表明在贮藏期内挥发性风味物质显著积累, 该结果与 OAV(表 2)结果一致。

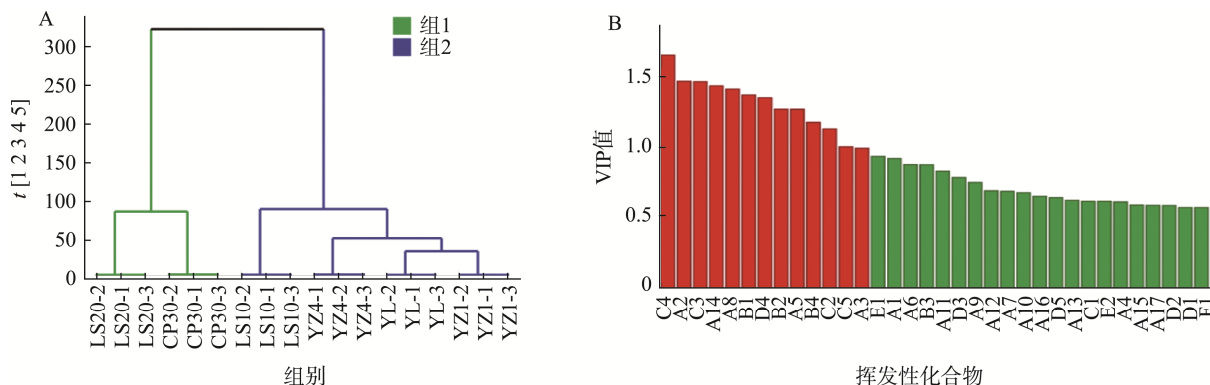
进一步对样品挥发性风味物质进行偏最小二乘判别分析(partial least squares-discriminant analysis, PLS-DA), 层次聚类分析(hierarchical clustering analysis, HCA)结果显示(图 3A), 6 个不同加工阶段分为 3 类: 晾晒 20 d 和成品 30 d 为一类, 晾晒 10 d 为第二类, 原料肉、腌制 1 d 和



注: YL. 原料肉; YZ1. 腌制 1d; YZ4. 腌制 4 d; LS10. 晾晒 10 d; LS20. 晾晒 20 d; CP30. 成品 30 d. A1. 戊醛; A2. 十六醛; A3. (*E,E*)-2,6-壬二烯醛; A4. 癸醛; A5. 苯乙醛; A6. 3-甲基丁醛; A7. (*E*)-2-辛烯醛; A8. 丙醛; A9. (*E,E*)-2,4-壬二烯醛; A10. 反-2-十一烯醛; A11. (*E,E*)-2,4-癸二烯醛; A12. (*E*)-2-癸烯醛; A13. 庚醛; A14. 十五醛; A15. 壬醛; A16. 辛醛; A17. (*E*)-2-壬烯醛; B1. 丁酸乙酯; B2. 2-甲基丁酸乙酯; B3. 辛酸乙酯; B4. 乙酸乙酯; C1. 辛醇; C2. 2-辛烯-1-醇; C3. 3-甲基-1-丁醇; C4. 苯乙醇; C5. 1-辛烯-3-醇; D1. 3-辛烯-2-酮; D2. 2-庚酮; D3. 2-辛酮; D4. 2,3-戊二酮; D5. 2-癸酮; E1. 己酸; E2. 3-甲基丁酸; F1. 2-戊基呋喃。

图 2 主成分分析(A)及载荷图(B)

Fig.2 Principal component analysis (A) and loading plot (B)



注: VIP 图中红色表示 VIP>1; 组别与化合物的简称同图 2 注释。

图 3 基于 PLS-DA 模型的 HCA (A) 和 VIP (B) 分析

Fig.3 HCA (A) and VIP (B) analysis based on PLS-DA model

腌制 4 d 为第三类, 这与 PCA 结果相吻合(图 2A), 表明桂花板鸭加工过程中, 在晾晒与贮藏期间风味产生了显著的变化。通常认为 VIP 评分大于 1.0 的代谢物是重要的差异香气标志物, 由图 3B 可知, 共 13 种化合物 VIP 大于 1.0, 包括 3-甲基-1-丁醇、苯乙醇、十六醛、十五醛、丙醛、丁酸乙酯、2,3-戊二酮、苯乙醛、2-甲基丁酸乙酯、乙酸乙酯、2-辛烯-1-醇、1-辛烯-3-醇、(E,E)-2,6-壬二烯醛。

3 结论

桂花板鸭加工过程中挥发性风味物质含量呈上升趋势, 且鉴定出 117 种挥发性风味物质, 在原料肉、腌制 1 d、腌制 4 d、晾晒 10 d、晾晒 20 d 和成品 30 d 样品中分别鉴定出 68、72、74、84、101 和 96 种。结合 OAV 筛选出 34 种主体挥发性风味物质, 其中醛类和醇类是整个加工过程中主要的主体挥发性风味物质。在晾晒和贮藏期, 桂花板鸭风味产生了显著的变化, 尤其在贮藏期挥发性风味物质显著积累, 并筛选出 13 种 VIP>1 的挥发性风味标志物。研究结果为桂花板鸭加工过程中特征挥发性风味物质形成的机理揭示及加工工艺优化提供了一定的理论依据。

参考文献

- 王正莉, 王卫, 陈林, 等. 传统腌腊肉制品中微生物多样性研究进展[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(8): 202-206.
WANG ZL, WANG W, CHEN L, et al. Advances in the study of microbial diversity in traditional cured meat products [J]. Food Res Dev, 2021, 42(8): 202-206.
- 滕飞, 刘小琳, 钟强, 等. 基于风味组学和脂质组学分析不同品种原料鸭对卤鸭挥发性风味的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(12): 176-186.
TENG F, LIU XL, ZHONG Q, et al. Flavoromic and lipidomic analysis of the effect of different breeds on volatile flavor components of pot-stewed duck [J]. Food Sci, 2024, 45(12): 176-186.
- MAI RJ, LIU JY, YANG J, et al. Formation mechanism of lipid-derived volatile flavor compounds metabolized by inoculated probiotics and their improving effect on the flavor of low-salt dry-cured mackerel [J]. Food Chem, 2024, 1: 137636.
- XIN L, PAIO CX, JU M, et al. Effects of low salt on lipid oxidation and hydrolysis, fatty acids composition and volatiles flavor compounds of dry-cured ham during ripening [J]. LWT, 2023, 2: 187.
- 文瑜. 木糖葡萄糖球菌对传统川式腌腊肉制品产品特性的影响研究[D]. 成都: 成都大学, 2024.
- WEN Y. Study on the effect of *Staphylococcus xylose* on the product characteristics of traditional Sichuan-style cured meat products [D]. Chengdu: Chengdu University, 2024.
- GAO F, WANG D, ZHANG K, et al. Characterization of the effect of *Lactobacillus helveticus* IMAUJBH1 on lipid profiles and volatile flavors of mutton fermented sausages in Inner Mongolia based on lipomics and GC-MS [J]. LWT, 2024, 3: 202116290.
- 曲直, 林耀盛, 唐道邦, 等. 不同品种板鸭的理化特性及风味物质比较[J]. 现代食品科技, 2014, 30(7): 273-278, 291.
QU Z, LIN YS, TANG DB, et al. Physicochemical properties of different dry cured duck and differences of volatile compounds [J]. Mod Food Sci Technol, 2014, 30(7): 273-278, 291.
- 王浩文, 邓静, 唐红梅, 等. 不同品牌樟茶鸭风味特征分析[J]. 食品工业科技, 2020, 41(6): 215-222.
WANG HW, DENG J, TANG HM, et al. Analysis of flavor characteristics of smoked duck from different brands [J]. Sci Technol Food Ind, 2020, 41(6): 215-222.
- 常海军, 谢娜娜, 余艳. 重庆白市驿板鸭挥发性物质及其风味特性分析[J]. 食品科学, 2016, 37(8): 136-141.
CHANG HJ, XIE NN, YU Y. Analysis of volatile compounds and flavor characteristics of chongqing baishiye salted duck [J]. Food Sci, 2016, 37(8): 136-141.
- 童红甘, 王武, 张华锋, 等. HPLC、GC-MS 结合多元统计分析方法探究不同地区板鸭风味差异[J]. 现代食品科技, 2018, 34(12): 228-238.
TONG HG, WANG W, ZHANG HF, et al. Comparative analysis flavor components of dry-cured ducks from different regions by HPLC, GC-MS combined with multivariate [J]. Mod Food Sci Technol, 2018, 34(12): 228-238.
- 陆应林. 南京板鸭加工过程中蛋白降解及风味物质的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
LU YL. Studies on protein degradation and flavor compounds during processing of Nanjing dry-salted duck [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.
- GKARANE V, BRUNTON NP, HARRISON SM, et al. Volatile profile of grilled lamb as affected by castration and age at slaughter in two breeds [J]. J Food Sci, 2018, 83(10): 2466-2477.
- 葛孟甜, 李肖婵, 林琳, 等. 我国四个地区河蟹蟹肉挥发性物质的比较[J]. 中国调味品, 2019, 44(4): 16-22.
GE MT, LI XC, LIN L, et al. Comparison of volatile compounds in crab meat from four regions in China [J]. Chin Cond, 2019, 44(4): 16-22.
- 谢恬, 王丹, 马明娟, 等. OAV 和 GC-O-MS 法分析五香驴肉风味活性物质[J]. 食品科学, 2018, 39(8): 123-128.
XIE T, WANG D, MA MJ, et al. Identification of flavor-active compounds in spiced donkey meat by odor activity value (OAV) calculation and gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry [J]. Food Sci, 2018, 39(8): 123-128.
- 王丽, 刘光宪, 张德权, 等. 安福火腿游离脂肪酸、风味物质及氨基酸

- 分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(16): 236-242.
- WANG L, LIU GX, ZHANG DQ, *et al.* Analysis of free fatty acids, flavor substances and amino acids in Anfu ham [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(16): 236-242.
- [16] 刘同, 杨悠悠, 刘大鹏, 等. 肉鸭胸肌特异挥发性风味物质的鉴定[J]. 畜牧兽医学报, 2022, 53(2): 402-413.
- LIU T, YANG YY, LIU DP, *et al.* Identification of specific volatile flavor compounds in breast muscle of meat duck [J]. *Acta Veter Zootech Sinica*, 2022, 53(2): 402-413.
- [17] 孙圳, 韩东, 张春晖, 等. 定量卤制鸡肉挥发性风味物质剖面分析[J]. 中国农业科学, 2016, 49(15): 3030-3045.
- SUN Z, HAN D, ZHANG CH, *et al.* Profile analysis of the volatile flavor compounds of quantitative marinated chicken during processing [J]. *Sci Agric Sin*, 2016, 49(15): 3030-3045.
- [18] 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 DY, ZHAO ZN, WU JC, *et al.* Effects of different smoking materials on volatile flavor compounds in smoked chicken thighs [J]. *Food Sci*, 2019, 40(24): 220-227.
- [19] 杜晓兰, 杨文敏, 黄永强, 等. 基于顶空气相离子迁移谱比较 3 种加工方式对番鸭肉挥发性风味物质的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(24): 269-275.
- DU XL, YANG WM, HUANG YQ, *et al.* Effects of three processing methods on volatile flavor compounds of muscovy duck meat as investigated by headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. *Food Sci*, 2021, 42(24): 269-275.
- [20] 张哲奇, 臧明伍, 张凯华, 等. 关键工艺对粉蒸肉挥发性特征风味形成的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(4): 222-228.
- ZHANG ZQ, ZANG MW, ZHANG KH, *et al.* Effect of key processing steps on formation of volatile flavor components in steamed pork with rice [J]. *Food Sci*, 2019, 40(4): 222-228.
- [21] 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.
- TANG YZ, ZHOU GH, XU XL, *et al.* Volatile compounds in subcutaneous fat of three brands of dry-cured hams [J]. *Food Sci*, 2019, 40(16): 185-192.
- [22] 蒋肇祥, 黄雨婷, 邓莎, 等. 不同复合菌种发酵驴肉香肠的风味特性[J]. 食品科技, 2019, 44(12): 99-104.
- JIANG ZY, HUANG YT, DENG S, *et al.* Flavor properties of donkey sausages fermented by different compound bacteria [J]. *Food Sci Technol*, 2019, 44(12): 99-104.
- [23] TIAN HX, LI FH, QIN L, *et al.* Quality evaluation of beef seasonings using gas chromatography-mass spectrometry and electronic nose: Correlation with sensory attributes and classification according to grade level [J]. *Food Anal Method*, 2014, 8(6): 1522-1534.
- [24] 顾赛麒, 吴浩, 张晶晶, 等. 固相萃取整体捕集剂-气相色谱-质谱联用技术分析中华绒螯蟹性腺中挥发性成分[J]. 现代食品科技, 2013, 29(12): 3019-3025.
- GU SQ, WU H, ZHANG JJ, *et al.* Analysis of volatile components in gonad of *Eriocheir sinensis* by monolithic material sorptive extraction coupled with gas chromatography and mass spectrometry [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2013, 29(12): 3019-3025.
- [25] 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 WZ, YANG SY, XU Y, *et al.* Analysis of volatile flavor components of braised pork with different cooking time by SPME-GC-MS [J]. *Food Ferment Ind*, 2021, 47(2): 247-253.
- [26] 李柯呈, 徐宝才, 姚忠, 等. 干腌盐量对南京盐水鸭特征风味成分的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(17): 98-104.
- LI KC, XU BC, YAO Z, *et al.* Effects of dry-curing salt amount on the characteristic flavor components of Nanjing boiled salted duck [J]. *Food Ferment Ind*, 2019, 45(17): 98-104.
- [27] PAVLIDIS DE, MALLOUCHOS A, ERCOLINI D, *et al.* A volatilomics approach for off-line discrimination of minced beef and pork meat and their admixture using HS-SPME GC/MS in tandem with multivariate data analysis [J]. *Meat Sci*, 2019, 151: 43-53.
- [28] MAN LM, REN W, QIN HX, *et al.* Characterization of the relationship between lipids and volatile compounds in donkey, bovine, and sheep meat by UHPLC-ESI-MS and SPME-GC-MS [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2023, 175: 114426.
- [29] TANIMOTO S, KITABAYASHI K, FUKUSIMA C, *et al.* Effect of storage period before reheating on the volatile compound composition and lipid oxidation of steamed meat of yellowtail *Seriolaquin queradiata* [J]. *Fish Sci*, 2015, 81(6): 1145-1155.
- [30] 刘欢, 张德权, 王振宇, 等. 北京烤鸭腿皮与腿肉关键挥发性风味物质解析[J]. 中国食品学报, 2021, 21(2): 308-318.
- LIU H, ZHANG DQ, WANG ZY, *et al.* Analysis of aroma compounds in leg skin and leg meat from Beijing roasted duck [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2021, 21(2): 308-318.
- [31] DENG SY, LIU YH, HUANG F, *et al.* Evaluation volatile flavor compounds in bacon made by different pig breeds during storage time [J]. *Food Chem*, 2021, 357: 129765.
- [32] 张顺亮, 王守伟, 成晓瑜, 等. 湖南腊肉加工过程中挥发性风味成分的变化分析[J]. 食品科学, 2015, 36(16): 215-219.
- ZHANG SL, WANG SW, CHENG XY, *et al.* Changes in volatile flavor components during hunan cured meat processing [J]. *Food Sci*, 2015, 36(16): 215-219.
- [33] 周蕾. 气相色谱-质谱联用分析冷藏-二次加热过程后猪肉中挥发性物质变化[J]. 食品科技, 2021, 46(6): 256-262.
- ZHOU L. Changes of volatile compounds in cooked pork during refrigerating and reheating as analyzed by GC-MS [J]. *Food Sci Technol*, 2021, 46(6): 256-262.
- [34] 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 HM, ZHANG SL, HAO YF, *et al.* Analysis of major flavor components of tuotuo pork, a traditional meat product in liangshan, southwest China's Sichuan, by HS-SPME-GC-MS-O combined with electronic nose [J]. *Food Sci*, 2021, 42(2): 218-226.
- [35] 童红甘. 钾盐替代对传统板鸭风味品质的影响研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- TONG HG. Influence of partial replacement of NaCl with KCl on the flavor quality of dry-cured duck [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.
- [36] 张云齐, 云周苗, 朱美淋, 等. 毛竹叶浸提浓缩液结合竹竿烟熏对腊肉风味品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(12): 123-130.
- ZHANG YQ, YUN ZM, ZHU ML, *et al.* Effect of moso bamboo leaf extracts combined with bamboo stalk smoking on the flavor of bacon [J]. *Food Ferment Ind*, 2022, 48(12): 123-130.
- [37] 黄苓, 孙震, 曾小群, 等. 多食材替代亚硝酸盐对腊肉挥发性风味的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(3): 324-333.
- HUANG L, SUN Z, ZENG XQ, *et al.* Effects of multi-ingredients for nitrite on the volatile flavor compounds in cured meat [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2021, 21(3): 324-333.

(责任编辑: 蔡世佳 韩晓红)

作者简介



王 丽, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为肉品加工。
E-mail: 294641397@qq.com



刘光宪, 博士, 副研究员, 主要研究方向为肉品加工研究。
E-mail: liugx178@163.com