

含酱香型白酒广式香肠风干期挥发性 风味物质的变化

Changes of volatile flavor compounds in Cantonese sausage containing sauce-flavor Baijiu during air-drying

聂鑫¹ 陈泓帆^{1,2} 毛竞竞²

NIE Xin¹ CHEN Hongfan^{1,2} MAO Jingjing²

刘达玉² 赵志平² 沈才洪^{3,4}

LIU Dayu² ZHAO Zhiping² SHEN Caihong^{3,4}

(1. 四川旅游学院食品学院, 四川 成都 610100; 2. 成都大学肉类加工四川省重点实验室,

四川 成都 610106; 3. 泸州老窖股份有限公司, 四川 泸州 646000;

4. 国家固态酿造工程技术研究中心, 四川 泸州 646000)

(1. College of Food Science and Technology, Sichuan Tourism University, Chengdu, Sichuan 610100, China; 2. Meat Processing Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu University, Chengdu, Sichuan 610106, China; 3. Luzhou Laojiao Co., Ltd., Luzhou, Sichuan 646000, China; 4. National Engineering Center of Solid-state Brewing, Luzhou, Sichuan 646000, China)

摘要:目的:改善广式香肠风味并创新产品。方法:通过 GC-MS 检测风干 0, 2, 4 d 的含酱香白酒广式香肠的挥发性风味物质,利用多元统计分析挥发性风味物质的变化规律。结果:通过 GC-MS 技术共检测出 39 种挥发性风味物质,包括烃类 18 种、酯类 12 种、醛类 2 种、醚类 2 种、醇类 1 种、酸类 1 种、酮类 1 种和其他类 2 种,其中酯类、醛类、醇类和烃类物质含量在风干过程中显著上升,酮类和醚类物质含量在风干过程中呈先上升后下降趋势,酸类物质含量在风干过程中无显著变化。通过 VIP 值鉴定出 5 种差异风味物质,可作为区分不同风干时间香肠的潜在生物标志物。通过 OAV 共筛选出 6 种关键性风味成分,2-甲基丁酸乙酯、己酸乙酯和丁酸乙酯是 3 组香肠中共有的关键风味物质,在风干过程中含量显著增加。结论:添加酱香型白酒可增加广式香肠挥发性风味物质的种类和含量,并促进新的风味物质形成。

关键词:广式香肠;酱香型白酒;风干期;挥发性风味;气

相色谱—质谱联用

Abstract: **Objective:** This study aimed to improve the flavor of Cantonese sausage and innovate the product. **Methods:** The volatile flavor compounds in the Cantonese sausages containing sauce-flavor Baijiu air-dried for 0 day, 2 days and 4 days were detected by GC-MS, and the changes of volatile flavor compounds were analyzed by multivariate statistics. **Results:** A total of 39 volatile flavor compounds were detected through GC-MS technology, including 18 hydrocarbons, 12 esters, 2 aldehydes, 2 ethers, 1 alcohol, 1 acid, 1 ketone and 2 other compounds. Esters, aldehydes, alcohols and hydrocarbons significantly increased during air-drying, while ketones and ethers showed a trend of first increasing and then decreasing during air-drying. The acids did not change significantly during air-drying. Five different flavor substances were identified through VIP values, which could be served as potential biomarkers for distinguishing sausages with different air-drying times. Six key flavor components were screened through OAV. Ethyl 2-methylbutyrate, ethyl hexanoate, and ethyl butyrate were common key flavor components in three groups of sausages, and their content significantly increased during air-drying. **Conclusion:** Adding sauce-flavor Baijiu can increase the types and contents of volatile flavor compounds in Cantonese sausage and promote the formation of new flavor compounds.

Keywords: Cantonese sausage; sauce-flavor Baijiu; air drying; volatile flavor; gas chromatography-mass spectrometry

基金项目:四川省自然科学基金(编号:2022NSFSC1702)

作者简介:聂鑫,女,四川旅游学院副研究员,博士。

通信作者:赵志平(1981—),男,成都大学教授级高级工程师,博士。E-mail: zhaozhiping@cdu.edu.cn

沈才洪(1966—),男,泸州老窖教授级高级工程师,博士。E-mail: shench@lzl.com

收稿日期:2023-09-30 **改回日期:**2023-11-27

广式香肠是中国广东地区的一种传统特色肉制品^[1]。传统的广式香肠通常是将鲜肉与白糖、白酒等辅料混合均匀后灌肠风干而制成^[2],具有色泽红润、口味鲜甜等特点^[3]。中国白酒是以高粱、小麦等为原料,采用传统固态酿造技术生产的一类蒸馏酒^[4],是广式香肠加工过程中的关键辅料,能显著抑制香肠中的微生物生长并增加香肠风味。周非白等^[5]研究发现,添加白酒和脂质氧化是广式香肠风味形成的主导因素。

脂肪氧化与蛋白质氧化是肉制品风味形成最为关键的因素,在广式香肠制作过程中,原料中的脂肪和蛋白质经脂肪酶和蛋白酶水解后分别形成游离脂肪酸和游离氨基酸^[6],进一步氧化后形成大量的醇、醛、酸和酯类等挥发性化合物,赋予肉制品独特的风味^[7]。微生物发酵产品中通常含有较高含量的微生物酶,这些酶对促进脂肪和蛋白质氧化有重要作用。Mikami等^[8]研究发现,向发酵香肠中添加酒糟能显著加速肌浆蛋白和肌原纤维蛋白的分解,并显著增加发酵香肠中多肽和游离氨基酸含量,且酒糟中的多种生物活性酶显著改善了发酵香肠的风味品质。徐亚超^[9]研究发现,适量的黄酒能显著提高广式香肠风味物质含量,赋予广式香肠较好的醇香和酯香特征。此外,其他天然物质对广式香肠风味也有一定的改善作用。候雨雪^[10]研究发现,向广式香肠中添加桑椹多酚能显著抑制肌原纤维蛋白和脂质的氧化,对防止广式香肠过度氧化有一定作用。Wang等^[11]研究发现,添加草菇内源酶能显著提高广式香肠的口感和挥发性风味。

白酒是广式香肠加工的辅料之一,但目前有关添加酱香型白酒广式香肠风干期挥发性风味物质变化规律的研究较少。研究拟通过 GC-MS 和多元统计分析探讨含酱香型白酒广式香肠风干过程中的挥发性风味成分变化规律,为广式香肠风味改善和创新产品开发提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

猪里脊、背脂:长白猪,四川高金食品股份有限公司;
白糖:成都市郫都区耿马山三食品厂;
食盐:四川乐山联峰盐化有限责任公司;
鸡精、味精:四川国莎实业有限公司;
酱香型白酒:贵州任意门酒业;
2,4,6-三甲基吡啶:基准试剂,美国 Sigma-Aldrich 公司。

1.1.2 主要仪器设备

医用低温保存箱:DW-40L508J 型,青岛海尔生物医疗股份有限公司;

天平:ME204E 型,梅特勒—托利多国际贸易有限公司;

多功能烟熏箱:BYXX-30 型,杭州艾博机械工程有限公司;

气相色谱—质谱联用仪:5977A-7890B 型,美国安捷伦公司;

色谱柱:HP-5MS UI 型(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm),美国安捷伦公司;

固相微萃取探针:SH-SPME-09 PA/PDMS,青岛盛瀚色谱技术有限公司。

1.2 方法

1.2.1 含酱香型白酒广式香肠的制备

(1) 配方:猪肉肥瘦比为 3:7,辅料以鲜肉总重为基础,白糖 10%、食盐 2.5%、酱香型白酒 2.2%、味精 0.15%、鸡精 0.15%、亚硝酸盐 0.006%。

(2) 制作工艺:瘦肉切丝、肥肉切片,按 $m_{\text{肥肉}}:m_{\text{瘦肉}}$ 为 3:7 混匀;将亚硝酸盐溶于白酒后添加至鲜肉中,混匀,加入鸡精、味精、盐、白糖,翻拌均匀,4℃腌制 12 h,灌肠、排气,用 70~80℃热水将香肠表面洗净,55℃烘干 8 h,自然风干 4 d。风干 0,2,4 d 的香肠分别记为 D0、D2 和 D4。

1.2.2 GC-MS 检测 将表面肠衣去除,按 $m_{\text{肥肉}}:m_{\text{瘦肉}}$ 为 3:7 取样,粉碎,精确称取 3 g 粉碎后的香肠样品于 15 mL 顶空瓶中,加入 1 μL 质量浓度为 2 μg/μL 的 2,4,6-三甲基吡啶溶液作为内标,微萃取条件:萃取温度 60℃,萃取时间 30 min,每组平行测试 3 次。

(1) 色谱条件:参照 Chen 等^[12]的方法并稍作改进。气相色谱柱为 HP-5MS UI(30 m×0.25 mm×0.25 μm);压力为 32.0 kPa;流速为 1.0 mL/min;载气为 He 气,采用不分流进样模式;进样口温度 250℃;程序升温:起始温度 40℃,保持 1 min,以 5℃/min 升温至 85℃,保持 2 min;以 3℃/min 升温至 160℃,保持 3 min;以 20℃/min 升温至 230℃,保持 1 min。

(2) 质谱条件:EI 电子源,电子能量 70 eV,离子源温度 230℃,四极杆温度 150℃;检测器电压 350 V;质量扫描范围 40~550(m/z)。

(3) 定性:将测试所得数据在 NIST 14.L 谱库中进行检索与匹配,以匹配度>80%为筛选标准,对化合物进行定性分析。

(4) 定量:对总离子流色谱图进行峰面积归一化定量,对各组分进行定量分析。

1.3 数据处理

采用 Excel 2021 软件进行数据初步统计分析,利用 SPSS Statistics 27.0.1 软件进行显著性分析,多元统计分析通过 Metabo Analyst 5.0(www.metaboanalyst.ca)完成,其余图均采用 R v4.2.3 进行可视化。

2 结果与分析

2.1 挥发性风味定性与定量分析

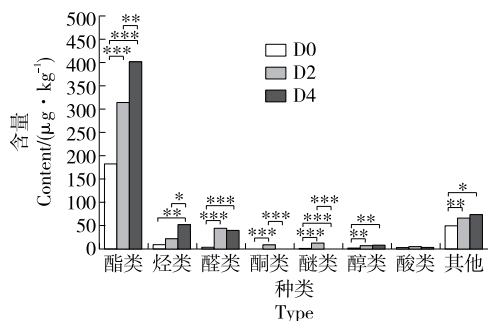
由表 1 和图 1 可知,含酱香型白酒广式香肠中共检出 8 类 39 种挥发性风味物质,包括烃类 18 种、酯类

12 种、醛类 2 种、醚类 2 种、醇类 1 种、酸类 1 种、酮类 1 种和其他类 2 种。D0 样品中共检出 21 种挥发性风味物质,其中酯类物质 10 种、烃类物质 5 种、醛类物质 1 种、酸类物质 1 种、醇类物质 1 种、醚类物质 1 种和其他类物质 2 种。D2 样品中共检出 20 种挥发性风味成分,包括酯类物质 11 种、醛类物质 2 种、烃类物质 2 种、醚类物质 1 种、酮类物质 1 种、醇类物质 1 种、酸类物质 1 种和其他类物质 1 种。D4 样品中共检出 31 种挥发性风味物质,包括酯

表 1 含酱香型白酒广式香肠风干期挥发性风味物质含量[†]
Table 1 Absolute content of volatile flavor substances during the drying period of Cantonese sausage containing sauce-flavor Baijiu

种类	化合物名称	保留时间/ min	含量/($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)		
			D0	D2	D4
烃类	对二甲苯	6.211	5.22±0.77 ^c	12.75±1.90 ^b	19.10±1.28 ^a
	苯乙烯	6.876	—	14.41±2.06 ^a	5.53±1.86 ^b
	2,2,3,3-四甲基戊烷	10.583	—	—	7.49±1.28
	2,7-二甲基辛烷	10.647	—	—	7.67±1.68
	(+)-柠檬烯	12.308	2.61±0.44	—	2.15±0.43
	2,4,6-三甲基辛烷	13.654	2.33±0.01 ^a	—	1.74±0.18 ^b
	3,4,5,6-四甲基辛烷	14.657	—	—	2.54±0.84
	4,5-二甲基壬烷	14.750	—	—	1.59±0.33
	2,5,6-三甲基癸烷	15.240	—	—	0.78±0.09
	2,3,4-三甲基庚烷	15.473	—	—	0.40±0.01
	正十三烷	16.184	—	—	0.52±0.04
	2,6,11-三甲基十二烷	16.196	—	—	0.67±0.07
	6-乙基-2-甲基癸烷	17.186	—	—	0.28±0.04
	5,6-二甲基十一烷	17.315	—	—	3.16±0.33
	5-乙基癸烷	17.793	—	—	0.75±0.12
	3-甲基十一烷	19.320	—	—	4.82±0.60
	4,8-二甲基十一烷	24.676	0.64±0.01	—	—
	2,4-二甲基癸烷	25.527	0.80±0.01	—	0.80±0.05
酯类	丁酸乙酯	4.445	41.13±3.65 ^c	110.82±10.26 ^b	140.92±18.19 ^a
	2-甲基丁酸乙酯	5.727	0.77±0.07 ^b	0.39±0.06 ^b	2.34±0.47 ^a
	3-甲基丁酸乙酯	5.815	1.25±0.53 ^b	1.74±0.10 ^b	8.57±1.53 ^a
	乙酸苯乙酯	7.062	—	2.57±0.37	—
	戊酸乙酯	7.359	27.26±1.23 ^b	50.20±5.86 ^a	55.42±3.03 ^a
	己酸乙烯酯	10.577	—	14.37±2.00	—
	己酸乙酯	11.247	64.37±4.79 ^c	96.64±4.51 ^b	121.84±5.36 ^a
	庚酸乙酯	15.677	6.70±0.72	6.46±0.63	7.39±0.84
	2-乙基己酸乙酯	16.172	1.29±0.09	—	—
	辛酸乙酯	21.162	27.02±0.74 ^b	24.41±1.98 ^b	42.18±1.94 ^a
	壬酸乙酯	26.606	7.89±1.65 ^a	5.32±0.87 ^b	4.92±0.22 ^b
	癸酸乙酯	30.586	9.28±0.17 ^b	11.01±1.69 ^b	18.77±1.43 ^a
醚类	二甲醚	7.791	—	12.53±0.28	—
	草蒿脑	25.819	0.69±0.01	—	—
醛类	正己醛	4.392	—	30.27±2.68 ^b	23.36±1.70 ^a
	正壬醛	15.858	4.01±0.35 ^c	14.61±1.34 ^b	16.85±1.28 ^a
醇类	1-辛烯-3-醇	10.396	1.75±0.47 ^b	7.03±1.44 ^a	7.40±0.93 ^a
酮类	2,5-庚二酮	10.583	—	9.06±1.43	—
酸类	甲酸	7.791	3.34±0.25 ^c	7.77±1.11 ^a	4.71±0.28 ^b
其他	1,1-二乙氧基乙烷	3.128	48.95±1.59 ^b	66.23±5.36 ^a	73.67±13.25 ^a
	1,1-二乙氧基-3-甲基丁烷	9.370	0.59±0.13	—	—

[†] 同行小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。



*, $P < 0.05$; **, $P < 0.001$; ***, $P < 0.001$

图1 含酱香型白酒广式香肠风干期各类挥发性风味物质含量

Figure 1 Absolute content of various volatile flavor substances during the drying period of Cantonese sausage containing sauce-flavor Baijiu

类物质 9 种、烃类物质 17 种、醛类物质 2 种、醇类物质 1 种、酸类物质 1 种和其他类物质 1 种。

酯类物质主要来源于醇类物质和酸类物质在酶促或非酶促作用下的酯化反应^[13]。酯类物质也是白酒中最为主要的挥发性风味成分之一,短链脂肪酸生成的酯呈典型的果香味^[14],长链脂肪酸生成的酯具有油脂味^[15]。酯类物质通常阈值较低,对肉制品风味形成有重要作用。随着风干时间的延长,酯类物质含量从 $186.96 \mu\text{g}/\text{kg}$ 显著上升至 $402.34 \mu\text{g}/\text{kg}$,可能是由于广式香肠中的脂肪在风干过程中不断氧化水解,产生醇类和脂肪酸等小分子物质,醇类和酸类物质再进一步发生酯化反应生成酯类物质,与 Chen 等^[12]的研究结果一致。酯类物质是广式香肠中含量最高的挥发性风味物质,可能是酱香型白酒中含有大量的酯类物质所致,与姚瑶等^[16]研究的结论一致。酯类通常赋予发酵香肠和腊肉水果香气,其中癸酸乙酯、辛酸乙酯、丁酸乙酯、庚酸乙酯、己酸乙酯均具有水果香气,且在白酒中均被检出^[17]。

烃类物质主要由脂质和脂肪酸氧化形成^[18]。烃类物质是香肠风干过程中种类最多的挥发性风味成分,与王宁宁等^[19]的研究结果一致。随着风干时间的延长,烃类物质含量从 $11.60 \mu\text{g}/\text{kg}$ 显著上升至 $59.99 \mu\text{g}/\text{kg}$,可能是由于脂质和脂肪酸在风干过程中不断氧化降解所致。通常饱和烃类物质的感官阈值较高,对肉制品挥发性风味的影响有限^[20]。但不饱和烃类物质的阈值较低,对肉制品挥发性风味有较大影响。广式香肠中共检出 3 种不饱和烃类物质,分别为苯乙烯、(+)-柠檬烯和对二甲苯,其中(+)-柠檬烯具有强烈的柑橘香气。

醛类物质主要来源于油酸和亚油酸等不饱和脂肪酸的氧化裂解^[21],通常具有浓烈的香气和较低的阈值,其香味具有一定的叠加作用^[22],对广式香肠特征风味的形成具有重要作用^[23]。随着风干时间的延长,醛类物质含量显著上升,在第 2 天达到峰值 $44.87 \mu\text{g}/\text{kg}$,而后逐渐下降

至 $40.21 \mu\text{g}/\text{kg}$,可能是由于醛类物质在风干后期逐渐被还原为醇所致^[24]。广式香肠中共检出 2 种醛类物质,分别为正壬醛和正己醛,其中正己醛具有青草和油脂香气,被认为是干腌火腿中重要的特征风味物质^[25]。正壬醛由脂肪氧化产生,被认为是衡量脂质氧化的重要指标^[26]。正壬醛含量随风干时间的延长不断上升,可能是由于脂质在风干过程中不断氧化所致。

醇类物质是广式香肠中重要挥发性风味物质,主要来源于碳水化合物发酵、甲基酮还原、氨基酸代谢和脂质氧化等多种途径^[27]。通常,饱和醇类阈值较低,对风味影响不大,但不饱和醇类对风味有重要影响^[28]。广式香肠中仅检出 1 种不饱和醇类物质 1-辛烯-3-醇,该醇具有强烈的蘑菇香气,主要来源于亚油酸的氧化^[29]。亚油酸在亚油酸酯 10R-酯氧合酶和脂氧合酶作用下生成 10(R)-氢过氧化物,再经氢过氧化物裂解酶作用,生成 1-辛烯-3-醇^[30]。1-辛烯-3-醇含量在香肠风干过程中不断上升,表明随着风干时间的延长,亚油酸氧化程度加剧。

2.2 聚类分析

由图 2 可知,3 种广式香肠的风味物质组成存在明显差异。层次聚类分析表明,风干过程中含酱香型白酒广式香肠风味发生了显著变化,其中 D0 和 D2 样品被聚为一类,说明其风味特征较为相似。

2.3 多元统计分析

2.3.1 主成分分析(PCA) 由图 3(a)可知,PCA 将风味分为 2 个主成分,其中 PC1 贡献率为 91.40%,PC2 贡献率为 6.40%,累计贡献率为 97.80%,表明所建立的 PCA 模型能很好地反映含酱香型白酒广式香肠样品的整体风味。3 个样品的 9 个样本点均处于 95%置信区间内,样品彼此间无交叉重合,分离明显,表明不同风干时间含酱香型白酒广式香肠的挥发性风味差异明显。

由图 3(b)可知,对 PC1 贡献较大的物质主要有丁酸乙酯、己酸乙酯、戊酸乙酯和 1,1-二乙氧基乙烷;对 PC2 贡献较大的物质主要有正己醛、辛酸乙酯、己酸乙酯、苯乙烯、二甲醚和 2,5-庚二酮。丁酸乙酯是对 PC1 贡献最大的挥发性风味成分,具有强烈的水果香气。此外,对 PC1 贡献较大的己酸乙酯和戊酸乙酯也具有水果和花香气。因此,PC1 主要反映了广式香肠的花果香气。对 PC2 贡献较大的有正己醛和辛酸乙酯,分别具有油脂和白兰地类酒香,说明 PC2 主要反映了广式香肠的油脂和酒香气。

2.3.2 PLS-DA 分析 由图 3(c)可知,PLS-DA 分析将风味分为 2 个主成分,其中主成分 1 贡献率为 64.90%,主成分 2 贡献率为 20.40%,累计贡献率为 85.30%,表明所建立的 PLS-DA 模型能较好地反映香肠样品的整体风味。 $R^2 X$ 和 Q^2 是评判 PLS-DA 模型的主要参数, $R^2 X = 0.976 > 0.5$, $Q^2 = 0.889$,说明 PLS-DA 模型具有较好的可解释度。各香肠样品分别位于坐标系不同区域,无重合,

说明各香肠风味差异明显。

采用 100 次循环迭代置换检验对 PLS-DA 模型进行

验证,结果如图 3(d)所示。 $P < 0.01$,表明 PLS-DA 模型
稳定可靠,不存在过拟合现象。

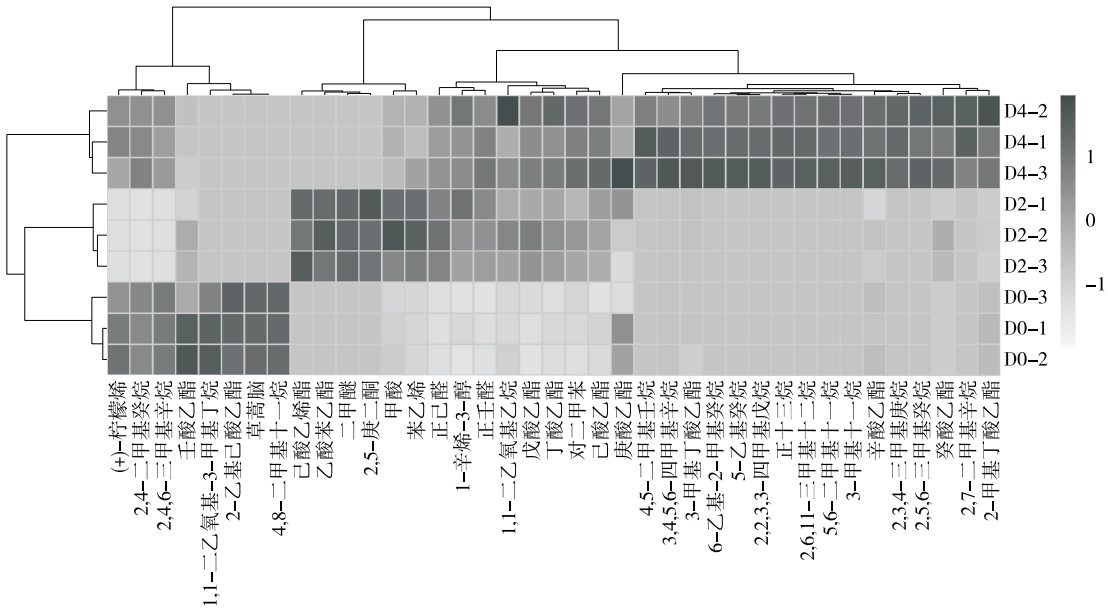


图 2 酱香型白酒广式香肠风干期挥发性风味物质聚类热图

Figure 2 Heat map of volatile flavor substance clustering during the drying period of Cantonese sausage containing sauce-flavor Baijiu

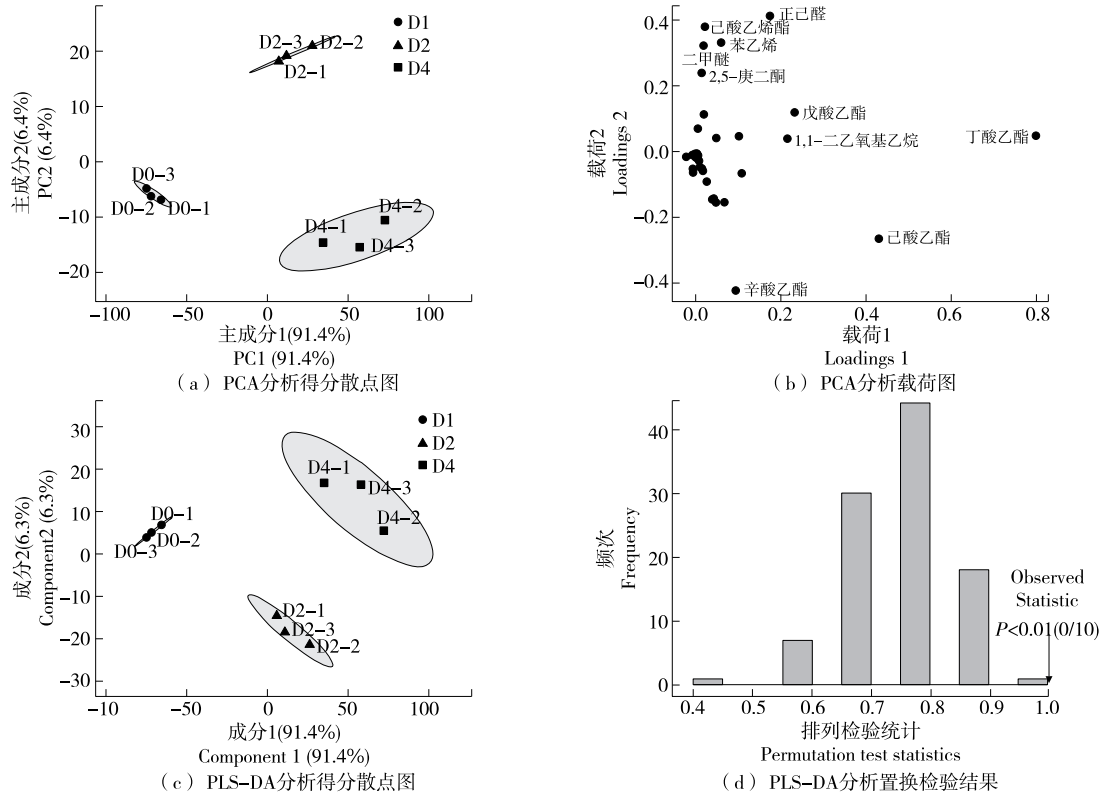


图 3 含酱香型白酒广式香肠风干期挥发性风味多元统计分析

Figure 3 Multivariate statistical analysis of volatile flavor during the drying period of Cantonese sausage containing sauce-flavor Baijiu

2.4 差异性风味物质筛选

通过 PLS-DA 的变量投影重要性(VIP)对 5 种香肠的差异性风味物质进行筛选,如图 4 所示。以 VIP>1 为筛选标准^[31]共鉴定出 5 个 VIP>1 的风味成分,可作为区分不同风干时间香肠的潜在生物标志物,分别为丁酸乙酯、己酸乙酯、戊酸乙酯、1,1-二乙氧基乙烷和正己醛。其中丁酸乙酯、己酸乙酯、戊酸乙酯和 1,1-二乙氧基乙烷在 D4 样品中含量较高,而正己醛在 D2 样品中含量较高。

2.5 关键性风味物质筛选

通过计算风味化合物的 OAV 值,共筛选出 6 种 OAV>1 的关键性风味物质(表 2)。2-甲基丁酸乙酯、己酸乙酯和丁酸乙酯在 D0、D2 和 D4 样品中的 OAV>1,是含酱香型白酒广式香肠中最重要的挥发性风味成分,构成了含酱香型白酒广式香肠特征风味的基础。2-甲基丁酸乙酯^[33]、己酸乙酯^[34]和丁酸乙酯^[35]具有水果香气,

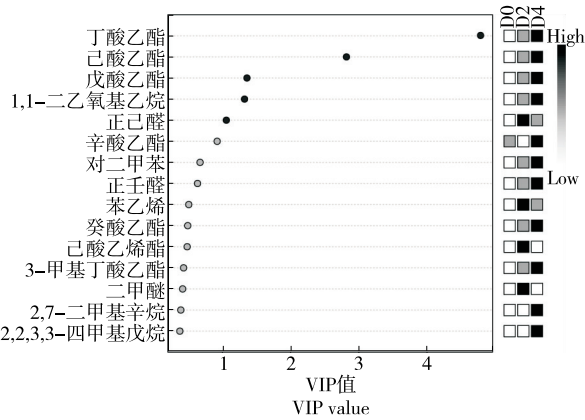


图 4 酱香型白酒广式香肠风干期差异性挥发性风味筛选
Figure 4 Differential volatile flavor screening during the drying period of Cantonese sausage containing sauce-flavor Baijiu

表 2 含酱香型白酒广式香肠风干期挥发性风味气味活度值[†]

Table 2 Volatile flavor odor activity value during the air-drying of Cantonese sausage containing sauce-flavor Baijiu

化合物名称	保留时间/ min	阈值 ^[32] / ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	OAV			气味描述
			D0	D2	D4	
正壬醛	15.858	15	0.27	0.97	1.12	柑橘、油脂香气
正己醛	4.392	5	—	6.05	4.67	青草、油脂香气
2-甲基丁酸乙酯	5.727	0.15	5.10	2.62	15.62	苹果、水果香气
3-甲基丁酸乙酯	5.815	2	0.63	0.87	4.28	菠萝、水果香气
己酸乙酯	11.247	8	8.05	12.08	15.23	菠萝、水果香气
丁酸乙酯	4.445	0.1	411.30	1 108.22	1 409.19	菠萝、水果香气

[†] 物质风味描述查自 <http://www.thegoodscentscompany.com/>。

对香肠风味形成有重要作用。此外,正壬醛和 3-甲基丁酸乙酯是 D4 样品中特有的关键挥发性化合物,可赋予含酱香型白酒广式香肠油脂和水果香气。

3 结论

研究以不同风干时间的含酱香型白酒广式香肠为对象,通过 GC-MS 联用技术对其挥发性风味成分进行了检测。结果表明,3 个不同风干时间香肠样品中共检出 39 种挥发性风味物质,包括烃类 18 种、酯类 12 种、醛类 2 种、醚类 2 种、醇类 1 种、酸类 1 种、酮类 1 种和其他类 2 种。不同风干时间酱香型白酒广式香肠在挥发性风味组成上存在显著性差异,其中酯类、醛类、醇类和烃类质含量在风干过程中呈显著上升趋势,酮类和醚类物质含量呈先上升后下降趋势,酸类物质含量无显著变化,说明风干有助于提高广式香肠的花果香气和油脂香气。多元统计分析和聚类分析表明 3 种香肠样品风味存在显著差异,其中风干 0 d 和风干 2 d 样品的风味较为相似。通过 VIP 值筛选出 5 种差异性风味物质,可作为不同风干时间香肠的潜在生物标志物。利用 OAV 筛选出了 6 种关键性风味物质,且在风干过程中关键风味数呈上升趋势。

微生物是影响香肠风味的关键因素,通过高通量测序、代谢组学和宏基因组学等多组学技术深入探究风干过程中的微生物和代谢物变化,将是未来研究的主要方向。

参考文献

[1] SHANG X, ZHOU Z, JIANG S, et al. Interrelationship between myoglobin oxidation and lipid oxidation during the processing of Cantonese sausage with d-sodium erythorbate[J]. J Sci Food Agric, 2020, 100(3): 1 022-1 029.

[2] WANG X, XU M, CHENG J, et al. Effect of Flammulina velutipes on the physicochemical and sensory characteristics of Cantonese sausages[J]. Meat Science, 2019, 154: 22-28.

[3] 陈泓帆, 聂鑫, 宋川, 等. 浓香和酱香型白酒对广式香肠质构和挥发性风味物质的影响[J]. 中国调味品, 2023, 48(5): 44-49.

CHEN H F, NIE X, SONG C, et al. Effects of strong-flavor and sauce-flavor Baijiu on the texture and volatile flavor of Cantonese sausages[J]. China Condiment, 2023, 48(5): 44-49.

[4] 骆茂香, 邱树毅, 徐兴江, 等. 白酒中非挥发性风味成分检测分析研究进展[J]. 中国酿造, 2023, 42(9): 19-25.

LUO M X, QIU S Y, XU X J, et al. Research progress on the

- detection and analysis of non-volatile flavor components in Baijiu [J]. China Brewing, 2023, 42(9): 19-25.
- [5] 周非白, 孙为正, 赵谋明. 广式腊肠挥发性风味物质的形成机理及贮存与蒸煮的影响[J]. 食品与发酵工业, 2012, 38(3): 17-22.
- ZHOU F B, SUN W Z, ZHAO M M. The mechanism of volatile flavor compounds in Cantonese sausage and its changes during the storage[J]. Food and Fermentation Industries, 2012, 38(3): 17-22.
- [6] 莫然, 唐善虎, 李思宁, 等. NaCl 添加量对发酵牦牛肉灌肠成熟过程中理化品质及挥发性风味物质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(4): 69-79.
- MO R, TANG S H, LI S N, et al. Effect of NaCl addition on the physicochemical quality and volatile flavor compounds of fermented yak meat sausage during the maturation process[J]. Food Science, 2022, 43(4): 69-79.
- [7] 侯冉, 窦露, 任钦, 等. 丁酸梭菌对小尾寒羊宰后成熟过程中挥发性风味物质的影响及机理研究[J]. 食品科学, 2023, 44(12): 181-188.
- HOU R, DOU L, REN Q, et al. Effect and mechanism of dietary supplementation of *Clostridium butyricum* on volatile flavor compounds in meat of small tailed-han sheep during postmortem aging[J]. Food Science, 2023, 44(12): 181-188.
- [8] MIKAMI N, TSUKADA Y, PELPOLAGE S W, et al. Effects of Sake lees (Sake-kasu) supplementation on the quality characteristics of fermented dry sausages [J]. Heliyon, 2020, 6 (2): e03379.
- [9] 徐亚超. 白酒发酵副产物黄水在广式腊肠中的应用研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2017: 50-51.
- XU Y C. Application of liquor fermentation byproduct-yellow water in Cantonese sausage[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2017: 50-51.
- [10] 候雨雪. 桑椹多酚对广式腊肠风味的影响及其机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022: 52.
- HOU Y X. Investigation on the effect of mulberry polyphenols on the flavor of Cantonese sausage and its regulation mechanism[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022: 52.
- [11] WANG X, ZHOU P, CHENG J, et al. The role of endogenous enzyme from straw mushroom (*Volvariella volvacea*) in improving taste and volatile flavor characteristics of Cantonese sausage[J]. LWT, 2022, 154: 112627.
- [12] CHEN H, KANG X, WANG X, et al. Potential correlation between microbial diversity and volatile flavor substances in a novel Chinese-style sausage during storage [J]. Foods, 2023, 12 (17): 3 190.
- [13] 张香美, 叶翠, 卢涵, 等. 发酵香肠制作过程中菌群演替及挥发性风味成分变化规律[J]. 中国食品学报, 2022, 22(5): 282-290.
- ZHANG X M, YE C, LU H, et al. The succession of bacterial flora and the variation of volatile flavor components during the production of fermented sausage[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(5): 282-290.
- [14] 伍思佳, 杨貽功, 火兴三, 等. 两种蒸馏工艺对威士忌特征香气的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(10): 341-350.
- WU S J, YANG Y G, HUO X S, et al. Effect of two distillation processes on the characteristic aroma of whisky[J]. Food Science, 2023, 44(10): 341-350.
- [15] 刘雨曦, 薛佳, 傅宝尚, 等. 超声波喷雾-冷冻干燥与传统干燥技术制备高汤粉体的比较[J]. 食品科学, 2020, 41(11): 128-134.
- LIU Y X, XUE J, FU B S, et al. Comparative study on preparation of broth powder by ultrasonic spraying-freeze drying and traditional drying techniques [J]. Food Science, 2020, 41 (11): 128-134.
- [16] 姚瑶, 聂鑫, 宋川, 等. 浓香型白酒对风干期广味香肠挥发性风味物质形成的影响[J]. 中国酿造, 2023, 42(8): 90-96.
- YAO Y, NIE X, SONG C, et al. Effect of strong-flavor Baijiu on the formation of volatile flavor compounds in Cantonese sausage during air drying[J]. China Brewing, 2023, 42(8): 90-96.
- [17] 王震, 叶宏, 朱婷婷, 等. 清香型白酒风味成分的研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(7): 232-244.
- WANG Z, YE H, ZHU T T, et al. Progress in research on the flavor components of light-flavor Baijiu[J]. Food Science, 2022, 43(7): 232-244.
- [18] JEFFERY J, CARRADUS M, SONGIN K, et al. Optimized method for determination of 16 FDA polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in mainstream cigarette smoke by gas chromatography-mass spectrometry[J]. Chem Cent J, 2018, 12(1): 27.
- [19] 王宁宁, 冯美琴, 孙健. 低钠复合盐对发酵香肠理化特性及风味的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(16): 1-7.
- WANG N N, FENG M Q, SUN J. Effect of low-sodium salt mixture on physicochemical properties and flavor of fermented sausages[J]. Food Science, 2021, 42(16): 1-7.
- [20] 姚芳, 赵延胜, 王海蓝, 等. 银杏果酶解发酵前后风味成分的变化及主成分分析[J]. 现代食品科技, 2021, 37(6): 251-265.
- YAO F, ZHAO Y S, WANG H L, et al. Changes and principal component analysis of flavor components in ginkgo seed before and after enzymolysis-fermentation[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(6): 251-265.
- [21] WANG Y, JIANG Y T, CAO J X, et al. Study on lipolysis-oxidation and volatile flavour compounds of dry-cured goose with different curing salt content during production [J]. Food Chem, 2016, 190: 33-40.
- [22] MOTTRAM D S. Flavour formation in meat and meat products: A review[J]. Food Chem, 1998, 62(4): 415-424.
- [23] HONG S P, LEE E J, KIM Y H, et al. Effect of fermentation temperature on the volatile composition of kimchi[J]. J Food Sci, 2016, 81(11): C2 623-C2 629.
- [24] WU S, YANG J, DONG H, et al. Key aroma compounds of Chinese dry-cured Spanish mackerel (*Scomberomorus niphonius*) and their potential metabolic mechanisms[J]. Food Chem, 2021, 342: 128381.

(下转第 17 页)

- relationship[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(15): 4 053-4 094.
- [13] XIE L, CHEN Q, HUANG H, et al. Inhibitory effects of cupferron on the monophenolase and diphenolase activity of mushroom tyrosinase[J]. Int J Biochem Cell Biol, 2003, 35: 1 658-1 666.
- [14] 孔令悦, 向华, 唐克华, 等. 白及多糖脂质体的制备及对酪氨酸酶活性的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(5): 160-163, 174.
- KONG L Y, XIANG H, TANG K H, et al. Preparation of polysaccharide liposomes from *Betula striata* and their effects on tyrosinase activity [J]. Food & Machinery, 2020, 36(5): 160-163, 174.
- [15] 余雨婷, 张彦, 张迎, 等. 基于分子对接探究紫苏粗提物对代谢综合征相关酶的抑制作用[J]. 食品与机械, 2022, 38(4): 183-188.
- YU Y T, ZHANG Y, ZHANG Y, et al. Explore the inhibitory effect of *Perilla* crude extract on metabolic syndrome-related enzymes based on molecular docking[J]. Food & Machinery, 2022, 38(4): 183-188.
- [16] 彭知云. 新型多功能酪氨酸酶抑制剂的构建与机制研究及在食品保鲜中的应用[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022: 117-138.
- PENG Z Y. The construction and mechanism study of novel multifunctional tyrosinase inhibitors and their application in food preservation [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022: 117-138.
- [17] 李晓芳. 酪氨酸酶与抑制剂作用机制的分子模拟及光谱学研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022: 36-49.
- LI X F. Mechanism study on the interaction between tyrosinase and inhibitor by molecular simulation and spectroscopy [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022: 36-49.
- [18] LI J, FENG L, LIU L, et al. Recent advances in the design and discovery of synthetic tyrosinase inhibitors[J]. European Journal of Medicinal Chemistry, 2021, 224: 113744.
- [19] HASHIM F J, VICHITPHAN S, HAN J, et al. Alternative approach for specific tyrosinase inhibitor screening: Uncompetitive inhibition of tyrosinase by *Moringa oleifera* [J]. Molecules, 2021, 26(15): 4 576.
- [20] MANN T, GERWAT W, BATZER J, et al. Inhibition of Human tyrosinase requires molecular motifs distinctively different from mushroom tyrosinase [J]. Journal of Investigative Dermatology, 2018, 138(7): 1 601-1 608.
- [21] HALDYS K, LATAJKA R. Thiosemicarbazones with tyrosinase inhibitory activity[J]. Med Chem Comm, 2019, 10(3): 378-389.
- [22] LAVANYA G, MAGESH C J, VENKATAPATHY K, et al. Design, synthesis, spectral characterization and molecular docking studies of novel pyranoquinolinyl dihydropyridine carboxylates as potential antibacterial agents including *Vibrio cholerae* with minimal cytotoxicity towards fibroblast cell line (L-929) [J]. Bioorganic Chemistry, 2021, 107: 104582.
- [23] ASHOORIHA M A, KHOSHNEVISZADEH M, KHOSHNEVISZADEH M L, et al. Kojic acid natural product conjugates as mushroom tyrosinase inhibitors [J]. European Journal of Medicinal Chemistry, 2020, 201: 112480.
- (上接第8页)
- [25] SHI Y, LI X, HUANG A. A metabolomics-based approach investigates volatile flavor formation and characteristic compounds of the Dahe black pig dry-cured ham [J]. Meat Science, 2019, 158: 107904.
- [26] SHAHIDI F, ZHONG Y. Lipid oxidation and improving the oxidative stability[J]. Chem Soc Rev, 2010, 39(11): 4 067-4 079.
- [27] SIDIRA M, KANDYLIS P, KANELAKI M, et al. Effect of immobilized *Lactobacillus casei* on the evolution of flavor compounds in probiotic dry-fermented sausages during ripening[J]. Meat Science, 2015, 100: 41-51.
- [28] BIANCHI F, CANTONI C, CARERI M, et al. Characterization of the aromatic profile for the authentication and differentiation of typical Italian dry-sausages[J]. Talanta, 2007, 72(4): 1 552-1 563.
- [29] GRILO F S, WANG S C. Walnut (*Juglans regia* L.) volatile compounds indicate kernel and oil oxidation[J]. Foods, 2021, 10(2): 329.
- [30] 朱萌. 脂肪酸对速酿鱼露香气形成的影响[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2020: 47-48.
- ZHU M. Effect of fatty acids on formation of aroma of fish sauce during fast fermentation [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2020: 47-48.
- [31] WANG J, LI X, WU Y, et al. HS-SPME/GC-MS reveals the season effects on volatile compounds of green tea in high-latitude region [J]. Foods, 2022, 11(19): 3 016.
- [32] VAN GEMERT L J. Odour thresholds: Compilations of odour threshold values in air, water and other media: Second edition[M]. Netherlands: Oliemans Punter & Partners BV, 2011: 1-536.
- [33] 李莉峰, 时月, 李婷, 等. 促生菌剂处理对网纹甜瓜风味的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(19): 108-116.
- LI L F, SHI Y, LI T, et al. Effect of growth promoting agents on flavor of netted melon [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(19): 108-116.
- [34] FAN W, QIAN M C. Characterization of aroma compounds of chinese "Wuliangye" and "Jiannanchun" liquors by aroma extract dilution analysis[J]. J Agric Food Chem, 2006, 54(7): 2 695-2 704.
- [35] 唐柯, 张小倩, 李记明, 等. 威代尔冰葡萄酒发酵过程中香气动态变化规律[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(1): 62-70.
- TANG K, ZHANG X Q, LI J M, et al. Dynamic changes of aroma during Vidal ice wine fermentation [J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(1): 62-70.