

潮汕特色佛手香黄的特征挥发性风味成分分析

林良静¹, 蔡惠钿^{1,2}, 包涵³, 黄雪盈¹, 陈曦¹, 高向阳^{1,2}

(1. 华南农业大学食品学院, 广东省功能食品活性物重点实验室, 广东广州 510642) (2. 华农(潮州)食品研究院有限公司, 广东潮州 521000) (3. 广西生态工程职业技术学院旅游与交通管理学院, 广西柳州, 545004)

摘要: 这项研究基于气相色谱离子迁移谱技术 (gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS) 分析不同品牌的潮汕特色凉果佛手香黄的挥发性风味成分, 检测到 8 种酯类 (6%~12%)、14 种醛类 (10%~14%)、12 种醇类 (13%~17%)、3 种酮类 (3%~5%)、23 种萜烯类 (49%~72%)、6 种酸类 (1%~2%)、3 种呋喃类 (2%~3%)、1 种噻唑类 (0.4%~0.5%) 和 1 种吡嗪类 (0.6%~0.6%), 共 9 类 70 种挥发性物质。通过相对香气活度值 (ROAV) 计算分析得到佛手香黄的挥发性主要风味贡献成分 (ROAV>1) 有香叶醇、香茅醇、芳樟醇、1,8-桉叶素-M、1,8-桉叶素-D、月桂烯-M、甲硫基丙醛、3-甲基丁醛、3-甲基丁醇、丙醛、甲基-2-丁酸甲酯、苯乙醇、壬醛等。其中, 甲硫基丙醛对佛手香黄的风味贡献最大。利用主成分分析 (principal component analysis, PCA) 能够有效区分不同品牌样品。采用偏最小二乘判别分析 (partial least squares discriminant analysis, PLS-DA) 结合单因素方差分析筛选 15 个标志挥发性化合物 (VIP>1)。GC-IMS 可以实现对不同品牌佛手香黄进行区分识别, 并对挥发性化合物的差异进行快速分析, 为佛手香黄特征风味的标志成分定性定量研究提供参考。

关键词: 佛手; 老香黄; 挥发性风味成分; 相对气味活度值; PLS-DA

文章编号: 1673-9078(2021)07-238-249

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.7.0929

Analysis of the Characteristic Volatile Flavor Components of Preserved

Lao-Xiang-Huang of Chaozhou

LIN Liang-jing¹, CAI Hui-tian^{1,2}, BAO Han³, HUANG Xue-ying¹, CHEN Xi¹, GAO Xiang-yang^{1,2}

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Nutraceuticals and Functional Foods, South China Agriculture University, Guangzhou 510642, China) (2. SCAU (Chaozhou) Food Institute Co. Ltd., Chaozhou 521000, China)

(3. Guangxi Eco-engineering Vocational & Technical College, Institute of Tourist & Transportation Management, Liuzhou 545004, China)

Abstract: In this study, the volatile flavor components of different brands of preserved Lao-Xiang-Huang from the Chaoshan area were analyzed based on gas chromatography-ion mobility spectrometry GC-IMS. A total of 9 types and 70 species were detected, including 8 esters (6%~12%), 14 aldehydes (10%~14%), 12 alcohols (13%~17%), 3 ketones (3%~5%), 23 terpenoids (49%~72%), 6 acids (1%~2%), 3 furans (2%~3%), 1 thiazole (0.4%~0.5%) and 1 pyrazine (0.6%~0.6%). Through the calculation and analysis of relative activity value (ROAV), the key volatile flavor contributors of (ROAV>1) were obtained, including geraniol, citronellol, linalool, 1,8-cineole-M, 1,8-cineole-D, myrcene-M, methional, 3-methylbutanal, 3-methylbutanol, propanal, methyl 2-methylbutanoate, 1-phenylethanol and nonanal. Among them, methional contributed the most to the flavor of the preserved Lao-Xiang-Huang. Principal component analysis (PCA) can effectively distinguish the samples of different brands. Partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) combined with one-way ANOVA was used to screen 15 marker volatile compounds (VIP>1). GC-IMS can distinguish different brands of preserved Lao-Xiang-Huang, and allow rapid analysis of the

引文格式:

林良静, 蔡惠钿, 包涵, 等. 潮汕特色佛手香黄的特征挥发性风味成分分析[J]. 现代食品科技, 2021, 37(7): 238-249

LIN Liang-jing, CAI Hui-tian, BAO Han, et al. Analysis of the characteristic volatile flavor components of preserved Lao-Xiang-Huang of Chaozhou [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(7): 238-249

收稿日期: 2020-10-10

基金项目: 广东省科技厅支持粤东西北新型研发机构建设项目 (2018B090902010); 潮州市科技计划项目 (2019ZX02)

作者简介: 林良静 (1996-), 女, 在读硕士, 研究方向: 食品工程

通讯作者: 高向阳 (1966-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 发酵与功能食品化学

differences in volatile compounds, thereby providing a reference for qualitative and quantitative research on the characteristic flavor components of preserved Lao-Xiang-Huang.

Key words: bergamot; preserved Lao-Xiang-Huang; volatile components; relative odor activity value (ROAV); partial least squares discriminant analysis (PLS-DA)

佛手柑是芸香科 (*Rutaceae*) 柑桔属 (*Citrus*) 常绿小乔木植物的果实^[1], 因其独特芳香而备受欢迎^[2,3], 其香气主要来自于其萜烯类、倍半萜烯类以及高级醇类、醛类、酮类、酯类等物质^[4]。佛手柑作为药食两用的药材, 本身辛辣苦涩不适宜服用。潮汕地区流行通过盐腌、冲洗、晒干、炊熟、浸糖液、浸中药粉液、烘干等复杂工艺将佛手柑制成佛手香黄。经炮制后的佛手香黄具有去积祛风、开胃理气、化痰生津的功效, 且风味浓郁香甜、醇厚陈香^[5]。目前对佛手香黄的挥发性风味成分仅有严赞开^[6]等采用 GC-MS 分析发现储存阶段的佛手香黄(Z)-2,3-丁二醇、(E)-2,3-丁二醇的含量明显增加, 但对其核心特殊香气成分鲜有研究报道。

食品的风味和香气通常与挥发性物质相关, 并且是评估消费者对食品在接受或拒绝以及感官上的偏爱的重要因素^[7]。挥发性物质对食品香气的最终贡献不仅取决于其浓度, 还取决于其气味阈值。单一地考虑含量而忽略阈值对挥发性进行判断不够全面。目前, 检测挥发性物质的常用手段是 GC-MS, 但 GC-MS 技术通常检测分子量较大 (C9~C21) 的物质, 无法检测到分子量较小 (C5~C10) 但至关重要的微量风味物质。近年来, GC-IMS 作为挥发性风味检测手段逐渐普及, 可快速、简便以及可检测到分子量较小的微量物质 (C5~C10), 已成功运用在多种食品挥发性风味分析和品质检测上^[8]。香味活度值 (OAV, Odoractivevalue) 是评估挥发性风味对风味贡献值的重要参数, 当 OAV>1 时往往认定其对挥发性风味贡献较大。但是 OAV 值计算涉及数种物质的定量工作, 工作量较大。刘登勇等^[9]将百分比引进 OAV 计算公式中得到新参数 ROAV, 通过新公式可快速计算得到了皋火腿的主要贡献风味物质。樊艳等利用 SPME-GC-MS 结合 ROAV 分析腐乳中的主体风味物质^[10]。

因此本文采用气相色谱-离子迁移色谱 (gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS) 及相对香气活度值 (ROAV) 计算对佛手香黄挥发性物质进行研究, 再通过化学计量对不同品牌的佛手香黄的挥发性物质进行区识别, 确定特殊香气的特征性标志成分, 为提供建立佛手香黄质量标准提供分析检测的物质基础。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

佛手香黄样品在潮汕地区的生产企业和市场收集, 为排除各品牌配方不同以及不同储存时间所带来的风味差异, 选择了 4 个不同品牌以及不同储存时间共 8 种有代表性的样品。具体信息如下:

1-1: 品牌 1, 储存 3 年份潮州老香黄; 2-1: 品牌 2, 储存 1 年份潮州老香黄; 2-2: 品牌 2, 储存 2 年份潮州老香黄; 2-3: 品牌 2, 储存 3 年份潮州老香黄; 3-1: 品牌 3, 储存 1 年份潮州老香黄; 3-2: 品牌 3, 储存 2 年份潮州老香黄; 3-3: 品牌 3, 储存 3 年份潮州老香黄; 3-4: 品牌 3, 储存 4 年份潮州老香黄。

FlavourSpec®Laboratory 风味分析仪配有 GC×IMS Library Search 软件, 德国 G.A.S 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 GC-IMS 实验方法

1.2.1.1 样品的前处理

称取样品各 1 g 置于 20 mL 顶空瓶中, 60 °C 孵育 15 min 后进样, 用气相离子迁移谱仪 FlavourSpec®进行 GC-IMS 分析。

1.2.1.2 GC-IMS 条件

色谱柱 FS-SE-54-CB-1 (15 m, ID: 0.53 mm) (美国 Restek 公司) 柱温 60 °C, 载气/漂移气 N₂, IMS 温度 45 °C, 孵育时间 15 min, 孵育温度 60 °C, 进样针温度 65 °C, 孵化转速 500 r/min 进样量 500 μL, 分析时间 30 min。

E1 (漂移气流速) 150 mL/min; E2 (气象载气流速) 0~2 min, 2 mL/min; 2~20 min, 2 mL/min; 20~30 min, 100 mL/min; 30 min, 100 mL/min。

1.2.2 相对气味活度值 (relative odor activity value, ROAV)

该参数设定对样品风味贡献最大成分: $ROAV_{stan}=100$, 其他的成分 (A):

$$ROAV \approx \frac{C\%A}{C\%stan} \times \frac{Tstan}{TA} \times 100$$

式中: C% A、TA 为各风味组分的相对百分含量和对应的感觉阈值; C% stan、Tstan 分别为对样品风味贡献最大组分的相对百分含量和感觉阈值。当物质的 ROAV>1 时, 该物质对于挥发性风味的贡献大, 为主香成分, ROAV 越大, 对风味的贡

献就越大。当 0.1<ROAV<1 时, 该成分作为修饰成分。

1.3 数据处理

使用 G.A.S.开发的 GCxIMS Library Search 软件, 通过内置的 NIST 2014 气相保留指数数据库与 G.A.S. 的 IMS 迁移时间数据库二维定性, 软件内置的 NIST 数据库和 IMS 数据库可对物质进行定性分析; 利用 LAV 软件的 Gallery Plot 插件选取图中所有的待分析区域, 生成指纹图谱; SIMCA-P 14.1 进行主成分分析和 PLS-DA 建模; 用 IBM SPSS 25.0、Excel 软件和

Origin 2018 64Bit 进行数据处理及作图。

2 结果与分析

2.1 挥发性成分定性及定量分析

使用 G.A.S 开发的 GCxIMS Library Search 软件, 通过内置的 NIST 2014 气相保留指数数据库与 G.A.S. 的 IMS 迁移时间数据库二维定性和定量分析, 得到 Gallery Plot 图, 如图 1。

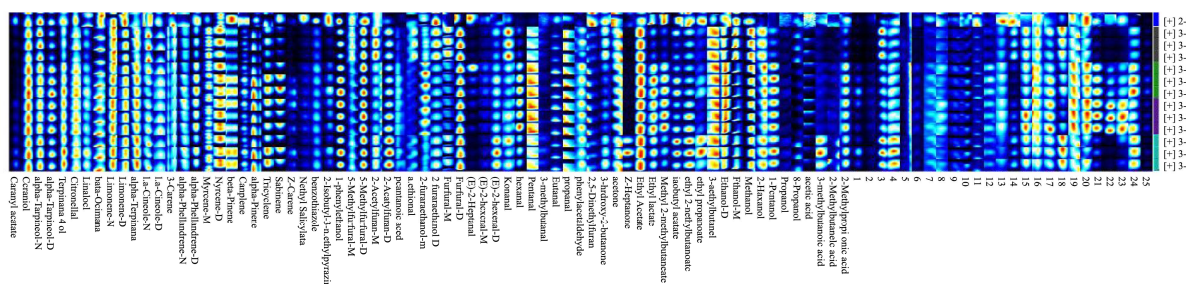


图 1 气相离子迁移谱图中选取的挥发性有机物的 Gallery Plot 图

Fig.1 Gallery plot diagram of volatile organic compounds selected from gas phase ion migration spectrum

注: 1-1: 品牌 1, 储存 3 年份潮州老香黄; 2-1: 品牌 2, 储存 1 年份潮州老香黄; 2-2: 品牌 2, 储存 2 年份潮州老香黄; 2-3: 品牌 2, 储存 3 年份潮州老香黄; 3-1: 品牌 3, 储存 1 年份潮州老香黄; 3-2: 品牌 3, 储存 2 年份潮州老香黄; 3-3: 品牌 3, 储存 3 年份潮州老香黄; 3-4: 品牌 3, 储存 4 年份潮州老香黄。横坐标 1~25 为未知物质。

表 1 佛手香黄的挥发性物质相对百分含量

Table 1 The relative content of volatile flavor substances in Lao-Xiang-Huang preserved

类型	化合物名称	保留时间 /s	相对百分比含量/%							
			1-1	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	3-4
酯类	乙酸香叶酯	992.701	0.77±0.10	0.65±0.08	1.23±0.19	1.75±0.40	3.61±0.29	8.14±2.06	0.59±0.19	3.61±0.32
	乙酸乙酯	137.746	6.57±0.19	7.33±0.30	6.81±0.23	7.42±0.16	3.40±0.42	3.24±0.09	4.45±0.17	3.98±0.36
	乳酸乙酯	215.117	0.28±0.07	0.92±0.11	0.91±0.03	0.62±0.05	0.10±0.00	0.10±0.01	0.24±0.02	0.08±0.00
	Methyl 2-methylbutanoate	204.934	0.10±0.01	0.32±0.04	0.38±0.02	0.16±0.01	0.02±0.00	0.01±0.00	0.02±0.00	0.02±0.00
	乙酸异丁酯	191.251	0.05±0.02	0.09±0.02	0.07±0.01	0.1±0.02	0.01±0.00	0.01±0.00	0.02±0.00	0.01±0.00
	ethyl 2-methylbutanoate	221.799	0.05±0.01	0.05±0.00	0.07±0.01	0.09±0.01	0.05±0.00	0.05±0.00	0.02±0.00	0.05±0.00
醇类	丙酸乙酯	166.431	0.05±0.01	0.09±0.03	0.04±0.01	0.17±0.05	0.02±0.00	0.02±0.01	0.05±0.01	0.01±0.00
	甲基水杨酸酯	654.764	0.37±0.02	0.54±0.02	0.61±0.02	0.49±0.03	0.57±0.03	0.57±0.06	0.41±0.02	0.49±0.02
	3-甲基丁醇	176.043	0.53±0.01	0.5±0.02	0.49±0.02	0.53±0.01	0.26±0.02	0.32±0.01	0.21±0.01	0.28±0.01
	2-己醇	206.207	0.38±0.01	0.47±0.02	0.44±0.02	0.41±0.01	0.39±0.00	0.34±0.04	0.15±0.01	0.36±0.02
	乙醇-M	98.016	1.69±0.04	0.94±0.05	0.83±0.02	1.33±0.05	1.37±0.01	1.28±0.02	1.44±0.04	1.54±0.01
	乙醇-D	98.016	2.77±0.05	4.31±0.11	4.28±0.06	3.21±0.06	3.54±0.06	3.69±0.02	3.19±0.05	3.47±0.06
	1-戊醇	189.979	0.07±0.01	0.17±0.02	0.16±0.01	0.16±0.02	0.02±0.00	0.01±0.00	0.02±0.00	0.01±0.00
	甲醇	87.515	2.10±0.10	1.65±0.17	1.51±0.02	1.66±0.11	1.76±0.05	1.74±0.02	1.96±0.1	1.89±0.13
	2-糠醇-M	244.229	0.28±0.01	0.38±0.02	0.34±0.01	0.25±0.00	0.32±0.02	0.4±0.03	0.39±0.01	0.33±0.04
2-糠醇-D	243.849	1.26±0.04	0.83±0.02	0.79±0.02	1.06±0.02	0.38±0.01	0.32±0.01	0.29±0.02	0.36±0.03	

转下页

接上页

	1-苯乙醇	470.349	3.86±0.68	6.87±1.44	7.24±0.88	6.55±1.31	5.36±0.88	8.76±1.18	2.73±0.72	4.32±0.61
	2-丙醇	106.95	0.38±0.01	0.23±0.01	0.19±0.00	0.42±0.01	0.28±0.01	0.2±00.00	0.36±0.01	0.27±0.01
	丙醇	129.167	0.05±0.01	0.09±0.02	0.06±0.02	0.11±0.01	0.04±0.01	0.07±0.00	0.07±0.00	0.08±0.01
噻唑类	苯并噻唑	677.634	0.38±0.01	0.48±0.04	0.45±0.02	0.46±0.03	0.53±0.00	0.50±0.01	0.51±0.03	0.47±0.02
	香茅醛	585.256	4.31±0.46	5.5±0.35	5.31±0.2	4.90±0.50	3.59±0.37	4.40±0.54	2.37±0.01	2.88±0.06
	alpha-水芹烯-D	371.004	1.32±0.24	2.39±0.38	2.27±0.18	1.83±0.44	0.97±0.18	1.81±0.28	0.54±0.08	0.83±0.11
	2-萹烯	355.7	0.18±0.01	0.66±0.39	0.78±0.29	0.69±0.31	0.47±0.19	1.59±0.38	0.19±0.06	0.28±0.09
	月桂烯-M	344.069	1.23±0.05	1.20±0.07	1.23±0.02	1.33±0.06	1.47±0.06	1.05±0.20	1.41±0.06	1.44±0.11
	月桂烯-D	344.681	0.90±0.15	1.13±0.06	1.20±0.03	1.15±0.04	1.12±0.06	0.66±0.29	1.03±0.18	1.11±0.18
	beta-蒎烯	327.541	0.53±0.10	0.88±0.31	0.83±0.18	1.06±0.27	1.08±0.20	0.83±0.14	0.71±0.22	0.70±0.15
	蒎烯	301.218	1.05±0.12	1.78±0.40	1.60±0.23	1.83±0.40	2.13±0.27	2.67±0.38	1.30±0.14	1.58±0.19
	alpha-蒎烯	290.199	1.08±0.17	2.10±0.71	2.09±0.28	2.22±0.53	1.98±0.46	2.88±0.32	0.97±0.49	1.09±0.34
	桉烯	321.419	0.30±0.06	0.90±0.29	0.78±0.15	0.70±0.19	0.75±0.08	0.95±0.06	0.75±0.03	0.93±0.05
	芳樟醇	514.8	1.02±0.15	1.54±0.27	1.51±0.20	1.72±0.33	2.20±0.08	2.79±0.44	1.36±0.03	1.80±0.07
	三环萜	283.465	1.52±0.34	2.26±0.93	2.13±0.47	2.68±0.81	2.70±0.59	4.24±0.34	2.15±0.86	2.18±0.65
烯萜类	beta-罗勒烯	452.239	1.64±0.24	2.15±0.34	2.16±0.24	2.40±0.31	2.31±0.33	2.80±0.53	1.30±0.33	1.68±0.20
	柠檬烯-M	425.898	3.77±0.09	3.59±0.02	3.66±0.05	3.58±0.04	3.65±0.02	3.21±0.27	3.70±0.17	3.67±0.01
	柠檬烯-D	426.721	5.48±0.64	6.82±0.51	7.12±0.25	7.12±0.33	7.40±0.35	8.03±0.24	6.29±0.64	6.29±0.53
	alpha-松油烯	401.001	1.12±0.17	1.23±0.07	1.19±0.02	1.32±0.08	1.26±0.07	1.14±0.08	1.31±0.13	1.39±0.18
	1,8-桉叶素-M	397.94	1.33±0.07	1.20±0.14	1.25±0.04	1.26±0.08	1.21±0.09	0.97±0.21	0.98±0.15	1.07±0.13
	1,8-桉叶素-D	394.267	0.60±0.07	0.76±0.03	0.83±0.06	0.67±0.02	0.59±0.06	0.51±0.08	0.36±0.08	0.38±0.04
	3-萹烯	383.86	3.08±0.04	2.74±0.18	2.74±0.10	2.83±0.16	2.98±0.11	2.50±0.08	3.16±0.12	3.06±0.09
	alpha-水芹烯-M	369.78	1.36±0.06	1.50±0.22	1.70±0.24	1.72±0.15	1.99±0.12	2.15±0.12	1.45±0.10	1.90±0.11
	香叶醇	702.268	5.96±0.41	7.53±0.34	7.44±0.07	7.00±0.40	7.20±0.12	7.39±0.48	5.85±0.15	6.3±0.07
	alpha-松油醇-M	690.977	5.06±0.28	5.47±0.04	5.28±0.03	5.35±0.14	5.54±0.05	5.25±0.12	4.99±0.09	5.15±0.03
	alpha-松油醇-D	686.871	3.15±0.47	6.46±0.68	6.42±0.14	5.10±0.57	5.68±0.09	6.92±0.65	3.91±0.13	4.51±0.18
	松油烯-4-醇	646.841	3.14±0.42	4.38±0.48	4.42±0.18	4.86±0.56	7.22±0.20	7.39±0.84	4.51±0.15	5.97±0.12
吡嗪类	2-异丁基-3-甲基吡嗪	554.313	0.19±0.04	0.58±0.23	0.48±0.04	0.46±0.20	0.13±0.01	0.33±0.13	0.12±0.01	0.11±0.01
	5-甲基糠醛-M	316.106	0.37±0.01	0.24±0.01	0.22±0.02	0.29±0.01	0.33±0.00	0.37±0.02	0.38±0.01	0.40±0.01
	5-甲基糠醛-D	317.627	3.61±0.11	3.80±0.19	4.14±0.43	3.60±0.23	1.84±0.10	1.61±0.12	1.10±0.06	1.83±0.16
	丁醛	133.166	0.11±0.02	0.16±0.03	0.20±0.04	0.13±0.02	0.25±0.02	0.13±0.00	0.24±0.02	0.09±0.01
	丙醛	126.337	1.24±0.07	1.23±0.06	1.33±0.04	1.15±0.02	1.21±0.04	1.11±0.00	1.56±0.10	1.30±0.02
	苯乙醛	411.511	0.62±0.13	0.83±0.04	0.86±0.03	0.8±0.02	0.62±0.07	0.69±0.03	0.67±0.09	0.64±0.10
	壬醛	507.785	0.63±0.03	0.43±0.04	0.47±0.05	0.50±0.10	0.40±0.02	0.43±0.11	0.43±0.08	0.39±0.01
醛类	E-2-庚烯醛	308.989	0.04±0.00	0.17±0.11	0.07±0.01	0.04±0.00	0.03±0.01	0.03±0.01	0.08±0.03	0.02±0.00
	甲硫基丙醛	254.117	0.26±0.01	0.13±0.00	0.11±0.01	0.18±0.01	0.17±0.01	0.15±0.01	0.15±0.01	0.15±0.01
	糠醛-M	223.693	0.74±0.02	0.41±0.02	0.38±0.01	0.58±0.01	0.57±0.02	0.52±0.04	0.58±0.03	0.59±0.01
	糠醛-D	222.933	3.99±0.04	3.59±0.04	3.61±0.04	4.08±0.04	4.37±0.06	4.25±0.12	3.35±0.07	4.27±0.08
	己醛	203.157	0.12±0.01	0.37±0.05	0.42±0.05	0.24±0.03	0.05±0.00	0.03±0.00	0.07±0.01	0.05±0.00
	戊醛	176.156	0.81±0.02	1.17±0.01	1.21±0.00	0.92±0.03	1.07±0.02	1.18±0.02	0.65±0.02	1.03±0.04
	E-2-己烯醛-M	228.257	0.03±0.00	0.07±0.00	0.06±0.00	0.04±0.01	0.06±0.01	0.06±0.00	0.36±0.02	0.05±0.00
	E-2-己烯醛-D	230.709	0.07±0.02	0.10±0.01	0.09±0.01	0.14±0.01	0.03±0.00	0.03±0.00	0.02±0.00	0.02±0.00

转下页

接上页

	3-甲基丁醛	149.155	0.11±0.01	0.08±0.01	0.07±0.00	0.11±0.01	0.14±0.02	0.14±0.00	0.32±0.02	0.18±0.01
	2-乙酰基咪喃-M	273.132	0.37±0.00	0.35±0.00	0.31±0.01	0.31±0.01	0.34±0.01	0.36±0.02	0.31±0.01	0.34±0.01
咪喃类	2-乙酰基咪喃-D	273.132	1.12±0.10	1.02±0.07	1.23±0.14	1.82±0.09	1.96±0.07	2.16±0.02	1.08±0.03	2.07±0.07
	2,5-二甲基咪喃	173.874	0.36±0.01	0.38±0.01	0.38±0.02	0.38±0.05	0.57±0.06	0.39±0.01	0.32±0.02	0.38±0.01
	戊酸	266.287	0.13±0.01	0.21±0.02	0.22±0.01	0.21±0.01	0.17±0.01	0.22±0.04	0.13±0.01	0.15±0.02
	乙酸	142.247	0.17±0.02	0.17±0.02	0.22±0.01	0.13±0.01	0.57±0.01	0.55±0.01	0.49±0.02	0.59±0.02
酸类	3-甲基丁酸	255.53	0.04±0.00	0.07±0.00	0.05±0.00	0.26±0.06	0.06±0.00	0.06±0.00	0.10±0.01	0.06±0.00
	2-甲基丁酸	257.39	0.04±0.01	0.07±0.01	0.05±0.00	0.16±0.02	0.63±0.03	0.81±0.09	0.90±0.09	0.83±0.04
	2-二甲基乙酸	196.927	0.15±0.02	0.37±0.02	0.36±0.02	0.32±0.02	0.21±0.00	0.20±0.03	0.32±0.01	0.21±0.01
	乙偶姻	158.662	1.67±0.10	0.83±0.14	0.89±0.14	1.43±0.20	2.62±0.22	1.01±0.01	0.40±0.03	1.27±0.19
酮类	丙酮	110.061	1.97±0.03	2.00±0.07	1.99±0.05	1.97±0.01	2.68±0.03	2.81±0.01	2.66±0.02	2.66±0.02
	2-庚酮	257.757	0.01±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00	0.1±0.04	0.02±0.00	0.02±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00

图1中每一列为同一保留时间及漂移时间下的有机物(不同样品中相同的物质)的信号峰;其色块颜色越白,峰强越强,含量越高。从3个品牌的佛手香黄中检测到8种酯类、15种醛类、11种醇类、3种酮类、23种烯萜类、6种酸类、3种咪喃类、1种噻唑类和1种吡嗪类。将70种已知挥发性风味化合物归类,利用面积归一法计算各挥发性成分的相对百分含量并统计如表1。

将各类挥发性化合物汇总并进行单因素分析及显著性差异分析,绘制柱形图,如图2。

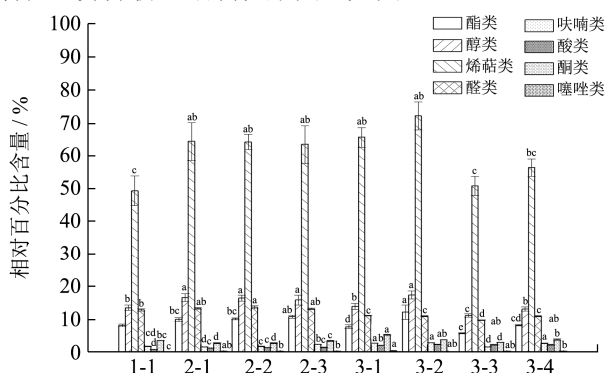


图2 基于GC-IMS分析佛手香黄的不同种类挥发性物质相对百分比柱形图

Fig.2 The relative percentages bar diagram of the volatile organic compounds in Lao-Xiang-Huang preserved were detected by GC-IMS

不同品牌不同储藏时间的佛手香黄样品中萜烯类种类丰富,与其他物质相比,相对百分含量均最高,约50%~70%。不同品牌的佛手香黄的烯萜类物质有差异,品牌2的烯萜类物质显著高于其他品牌。佛手香黄在储藏前3年,烯萜类相对百分含量变化不显著,第3年样品烯萜类物质显著减少。烯萜类物质一般来自植物自身,具有花草的香味。生佛手的烯萜类物质在蒸制过程损失严重^[11],且腌制放置过程中持续下降

^[6]。柠檬烯是新鲜佛手的标志物质,占比约30%~50%^[12],腌制后的潮州老香黄中的柠檬烯损失严重,仅相对百分含量8%~10%。其次,相对百分含量较高的香叶醇、 α -松油醇-M、 α -松油醇-D均在腌制佛手中被报道^[13],为花香味特征^[14]。

醇类物质主要由氨基酸的脱羧和脱氨产生,具有清凉的感受^[15],有研究表明在储存期间醇类物质会显著增加,且成为佛手香黄储存过程香味增浓的主要原因^[16]。本研究中醇类物质相对含量随时间变化并不显著,但不同品牌间醇类含量有显著差异,品牌2的佛手香黄的3-甲基丁醇、1-戊醇、甲醇、1-苯乙醇均高于其余两者。与醇类的结果类似,醛类物质相对含量随时间变化不显著,品牌2的醛类相对百分含量显著高于其余两者。醛类有强烈香味,香味一般似果香,味甜带涩^[17]。其含量较高的是丙醛,表现出青草、可可和咖啡味^[18]。

酯类物质主要来源于脂肪酸氧化、氨基酸代谢及醇和醛等代谢合成,通常带有水果的香气^[19]。品牌2的酯类物质显著高于其他品牌,并且随着储藏时间的增加,酯类物质相对百分含量增加。本文检测的酯类中含量最高的是乙酸香叶酯和乙酸乙酯。乙酸香叶酯具有玫瑰和薰衣草的香气,是一种重要的香料来源^[20]。乙酸乙酯能产生令人愉悦的水果香气^[21]。其余的咪喃、酸类、吡嗪类物质相对百分含量较低。

2.2 基于ROAV计算分析佛手香黄的主要挥发性风味变化

对检测结果中风味成分的在水中的香味阈值进行查询并计算,定义对样品香味贡献最大的成分3-甲硫基丙醛ROAV为100,其他风味成分的ROAV由式(1)计算得出,得表2。

表2 佛手香黄挥发性风味成分的相对风味活度值

Table 2 The relative odor activity value of volatile flavor components in Lao-Xiang-Huang preserved

物质名称	阈值/ (mg/kg)	ROAV								
		1-1	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	3-4	
乙酸香叶酯	玫瑰薰衣草 ^[22]	0.1	0.12	0.20	0.46	0.39	0.84	2.30	0.16	1.00
香叶醇	花香 ^[23]	0.0075	12.14	30.70	36.86	20.85	22.28	27.80	21.33	23.16
alpha-松油醇-M	樟脑气味、辛辣味 ^[24]	0.3	0.26	0.56	0.65	0.40	0.43	0.49	0.45	0.47
alpha-松油醇-D	樟脑气味、辛辣味 ^[24]	0.3	0.16	0.66	0.79	0.38	0.44	0.65	0.36	0.41
苯并噻唑	炖肉味、肉汤味 以及烧烤味 ^[25]	0.35	0.02	0.04	0.05	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04
香茅醛	香茅、柠檬香气 ^[26]	0.01	6.57	16.80	19.71	10.96	8.33	12.43	6.48	7.94
芳樟醇	木香 ^[23]	0.0015	10.35	31.29	37.40	25.61	34.02	52.53	24.86	33.11
beta-罗勒烯	青香味、热带香韵、木香味 以及花香和蔬菜香味 ^[27]	0.034	0.74	1.93	2.36	1.58	1.58	2.33	1.05	1.37
柠檬烯-M	柠檬香气 ^[27]	1	0.06	0.11	0.14	0.08	0.08	0.09	0.10	0.10
柠檬烯-D	柠檬香气 ^[27]	1	0.08	0.21	0.26	0.16	0.17	0.23	0.17	0.17
alpha-蒎品烯		0.085	0.20	0.44	0.52	0.35	0.34	0.38	0.42	0.45
1,8-桉叶油素-M	浓郁香味 ^[28]	0.0026	7.83	14.06	17.93	10.85	10.84	10.56	10.34	11.31
1,8-桉叶油素-D	浓郁香味 ^[28]	0.0026	3.55	8.94	11.92	5.72	5.29	5.50	3.79	4.03
3-萜烯	宜人的花香 ^[29]	2.153	0.02	0.04	0.05	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04
alpha-水芹烯-M	菠萝香 ^[30]	0.2	0.10	0.23	0.32	0.19	0.23	0.30	0.20	0.26
alpha-水芹烯-D	菠萝香 ^[30]	0.2	0.10	0.37	0.42	0.20	0.11	0.26	0.07	0.11
月桂烯-M	香脂气味	0.0166	1.13	2.21	2.75	1.79	2.06	1.78	2.33	2.38
月桂烯-D	香脂气味	0.0166	0.83	2.09	2.68	1.54	1.57	1.12	1.70	1.84
茨烯		1.86	0.01	0.03	0.03	0.02	0.03	0.04	0.02	0.02
alpha-蒎烯	松树、树脂香	0.15	0.11	0.43	0.52	0.33	0.31	0.54	0.18	0.20
5-甲基糠醛-D	杏仁味、焦糖味 ^[31]	6	0.01	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
2-乙酰基呋喃-M	杏仁、香甜味 ^[32]	1	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
2-乙酰基呋喃-D	杏仁、香甜味 ^[32]	1	0.02	0.03	0.05	0.04	0.05	0.06	0.03	0.06
戊酸	(汗臭味 ^[33])	0.5	<0.1	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
甲硫基丙醛	煮马铃薯的香味 ^[34,35] , 肉香及肉汤风味 ^[36]	0.00004	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2-呋喃甲醇-M	甜香、焦香、面包香、 咖啡香 ^[37]	1	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
2-呋喃甲醇-D	甜香、焦香、面包香、 咖啡香 ^[37]	1	0.02	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
糠醛-D	苦杏仁、面包香和 咖啡香 ^[38]	8	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01
(E)-2-己烯醛-M	水果香气 ^[39]	0.008	0.06	0.26	0.26	0.12	0.16	0.20	1.21	0.18
(E)-2-己烯醛-D	水果香气 ^[39]	0.008	0.14	0.40	0.44	0.40	0.09	0.11	0.08	0.08
乙醛	刺激、酸败味	0.21	0.01	0.05	0.07	0.03	0.01	0.00	0.01	0.01
戊醛	辛辣气息, 稀释后 有果香面包香 ^[37]	0.2	0.06	0.18	0.22	0.10	0.12	0.17	0.09	0.14
3-甲基丁醛	麦芽味(刺鼻的辛辣味) ^[40]	0.00025	6.81	9.18	9.78	9.71	13.45	15.72	35.35	20.12

转下页

接上页										
乙酸乙酯	菠萝风味	7.5	0.01	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01
正丁醛		0.00526	0.32	0.92	1.39	0.54	1.11	0.70	1.25	0.47
2-Methylpropionic acid		1	<0.1	0.01	0.01	0.01	<0.1	0.01	0.01	0.01
丙醇		0.007	0.12	0.40	0.32	0.35	0.14	0.27	0.28	0.31
3-甲基丁醇	刺激性 ^[41] , 霉味、焦糊 ^[42]	0.00025	32.17	61.65	72.20	47.72	23.97	35.90	23.21	31.42
(E)-2-庚烯醛		0.04	0.02	0.13	0.06	0.02	0.02	0.02	0.06	0.02
丙醛	青草、可可和咖啡味 ^[18]	0.007	2.70	5.38	7.04	3.66	4.02	4.47	6.08	5.13
Methyl 2-methylbutanoate		0.00025	5.83	38.54	56.52	14.45	1.86	1.66	2.21	1.75
乙酸异丁酯	香蕉味 ^[43]	0.3	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
2-庚酮	果香 ^[30]	0.01	0.02	0.03	0.04	0.23	0.04	0.04	0.04	0.03
ethyl 2-methylbutanoate		0.027	0.03	0.06	0.09	0.07	0.05	0.05	0.03	0.05
丙酸乙酯	苹果和葡萄味 ^[44,45]	0.01	0.08	0.27	0.17	0.39	0.04	0.07	0.15	0.03
水杨酸甲酯	薄荷 ^[46]	0.06	0.09	0.27	0.38	0.18	0.22	0.27	0.19	0.23
苯乙醛	玉簪花香气 ^[47]	0.0011	8.61	23.14	28.88	16.35	13.10	17.80	16.55	16.01
壬醛	坚果烤香味 ^[48]	0.0035	2.75	3.72	4.97	3.20	2.66	3.49	3.39	3.05

通常, 具有较高 ROAV (大于 1) 的香气化合物被认为是总体香气的主要贡献者, 0.1<ROAV<1 的成分被认为在总体香气中起协调作用^[49]。

与陈小爱等人利用 GC-IMS 分析潮州佛手香黄的挥发性物质的结果不同, 本研究利用 GC-IMS 结合 ROAV 分析 8 个佛手香黄样品中相对香气值最高的均为甲硫基丙醛^[50]。甲硫基丙醛 (0.09%~0.27%) 相对含量虽不高, 但由于其低阈值, 对佛手香黄风味贡献最大, 奠定了潮州佛手香黄的基础风味特征。甲硫基丙醛由蛋氨酸通过 Strecker 降解反应合成^[51], 具有煮马铃薯的香味^[34,35], 也有研究证明甲硫基丙醛具有肉香及肉汤风味^[35]。这一差异可能是不同品牌佛手香黄的腌制过程中的盐腌和干燥过程不同工艺造成的^[47]。

在佛手香黄中含量较高的烯萜类物质仍是风味的主要来源之一, 累积香气值达 44~117。有研究表明在新鲜佛手中, 香叶醇 (12.14~36.86) 和芳樟醇 (10.35~52.53) 是佛手精油中的关键风味物质^[49], 带有花香、木香等香气。在品牌 2 佛手香黄中该两类物质的相对香气值均高于其他品牌, 但随时间变化不明显。另外, 具有较高香气活度值的苯乙醛 (8.61~28.88), 3-甲基丁醛 (6.81~20.12)、3-甲基丁醇 (23.21~72.20) 和壬醛 (2.66~4.97) 也是佛手香黄风味重要来源之一。苯乙醛有浓郁的玉簪花香气^[47]。3-甲基丁醛、3-甲基丁醇和壬醛在佛手风味相关的文献中还未被报道。3-甲基丁醛被描述为麦芽味 (刺鼻的辛辣味)^[40], 是令人不愉悦的风味。但 3-甲基丁醛对香气的贡献取决于化合物的浓度^[51], 3-甲基丁醛在低浓度下, 该味会变得果香而令人愉悦^[40]。3-甲基丁醇青香、带有刺激性^[41], 霉味、焦糊^[42]。壬醛有坚果

烤香味^[48]。

alpha-松油醇-M、alpha-松油醇-D、月桂烯-D、alpha-蒎烯、己醛、beta-罗勒烯是新鲜佛手精油的主要成分^[49]。经过腌制炮制后, 在潮州香黄中它们均 ROAV<1, 作为风味协调成分。这些物质对佛手香黄的风味具有协调作用, 使风味更加浓郁, 和谐。

2.3 动态主成分分析

利用 SIMCA-P 软件对不同品牌的佛手香黄样品挥发性化合物进行主成分分析, 结果如图 3 所示。

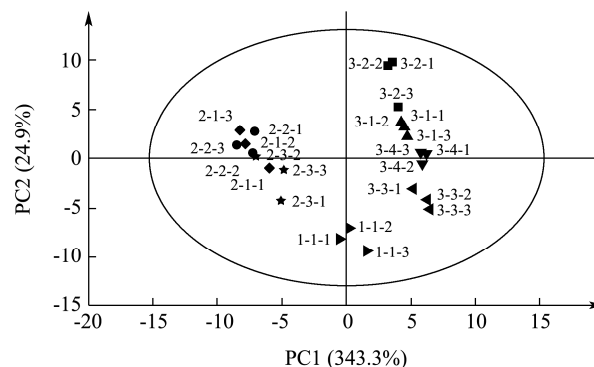


图3 佛手香黄挥发性物质的主成分分析

Fig.3 PCA analyzed of volatile compounds of Lao-Xiang-Huang preserved

PCA 分析可通过对大量数据进行降维, 减少数据冗余。本研究通过 SIMCA-P 软件对 8 组样品进行主成分分析。主成分 1 贡献率为 34.3%, 主成分 2 贡献率为 24.9%, 累计贡献率为 59.2%, 可以有效解释总变异的 59.2%的原始数据信息, 通过二维空间分布可以直观观察到组间及组内的差异。同组样品距离相近, 组内差异小, 样品间重复性较好。由图 3 可知, 同一

品牌的佛手香黄分布距离较近,不同品牌区分度较大,主要差异体现在 PC1 上。而同一品牌不同储存时间的样品也有一定的区分度,主要差异体现在 PC2 上。上述结果表明, GC-IMS 可对不同品牌的潮州佛手香黄进行分类鉴别,可用于鉴别佛手香黄来源,建立溯源体系。

2.4 不同品牌佛手香黄挥发性成分差异分析

通过 SIMCA-P 软件对不同品牌的佛手香黄的挥发成分建立 PLS-DA 模型。PLS-DA 是有监督的分析,有助于高维数据的可视化、判别分析与代谢变化有关的潜在代谢物。经 PLS-DA 分析, $R^2X=0.92$, $R^2Y=0.977$, $Q^2=0.943$, R^2X 和 R^2Y 分别表示模型所能解释 X 和 Y 矩阵信息的百分比,当 $R^2X-R^2Y<0.3$, $Q^2>0.5$ 代表该模型较可靠。利用置换检验对 PLS-DA 模型建立结果进行检验,如图 4。右侧 R^2Y 及 Q^2 值为真实值,左侧为预测值,当预测值均低于真实值且 R^2Y 与 Q^2 的回归线斜率大于 1, Q^2 截距为负值时,

模型预测结果稳定性较好,未出现过拟合现象。

通过模型相对应的载荷图分析不同品牌佛手香黄的差异化学成分,以变量重要性投影 (VIP) 值描述变量的贡献程度,当 VIP 值>1 时,该物质可认为是重要差异物质。其 VIP 值见图 5,初步筛选出 VIP 值>1 的 18 个差异化学成分。

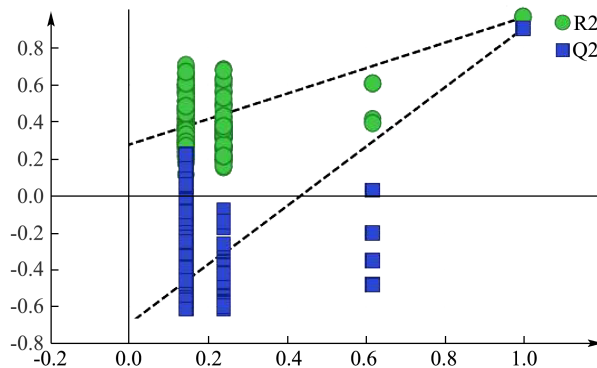


图 4 佛手香黄挥发性物质的 PLS-DA Permutations 图
Fig.4 PLS-DA permutations test of Lao-Xiang-Huang preserved

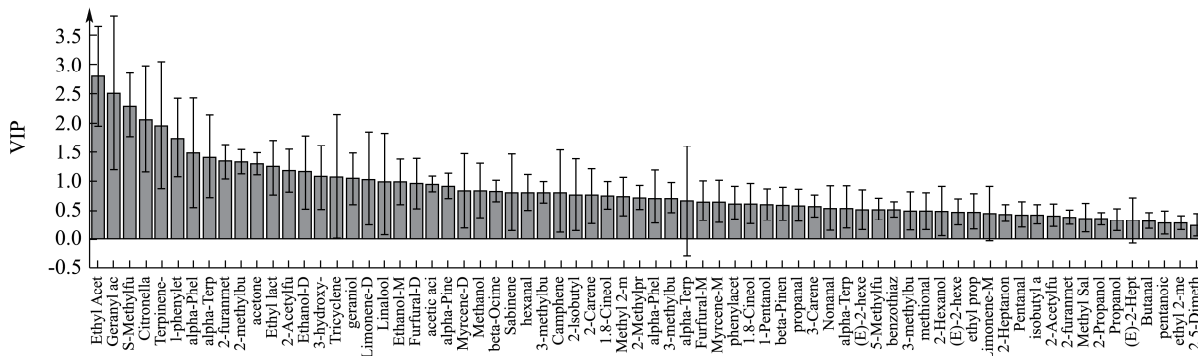


图 5 佛手香黄挥发性物质的 VIP 图

Fig.5 VIP analysis of Lao-Xiang-Huang preserved

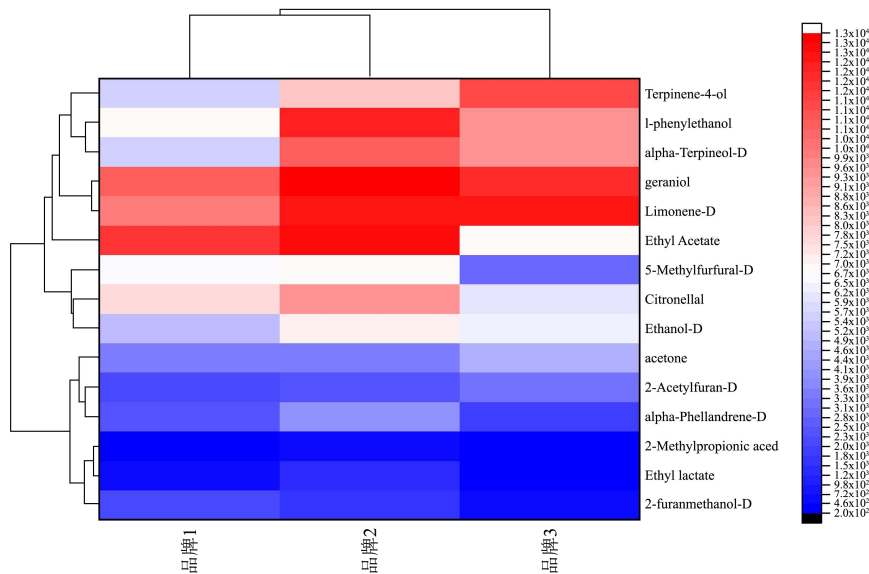


图 6 佛手香黄差异挥发性物质的热图

Fig.6 Heatmap of differential volatile substances Lao-Xiang-Huang preserved

采用单因素方差分析对3个品牌的佛手香黄的18个差异性物质进行显著性分析,筛选 $p < 0.05$ 的物质,继续筛选出15个差异物质,包括2-糠醇-D、乙醇-D、乳酸乙酯、2-二甲基乙酸、乙酸乙酯、5-甲基糠醛-D、 α -水芹烯-D、柠檬烯-D、香叶醇、 α -松油醇-D、香茅醛、1-苯乙醇、松油烯-4-醇、2-乙酰基呋喃-D、丙酮。利用热图对差异性化学成分的峰强度数值进行比较,见图6。

由图6结合单因素方差分析结果,品牌1的标志挥发性化合物为2-糠醇-D,品牌2的标志挥发性化合物为乙醇-D、乳酸乙酯、2-二甲基乙酸、乙酸乙酯、5-甲基糠醛-D、 α -水芹烯-D、柠檬烯-D、香叶醇、 α -松油醇-D、香茅醛、1-苯乙醇。品牌3的标志挥发性化合物为松油烯-4-醇、2-乙酰基呋喃-D、丙酮。

3 结论

本文利用GC-IMS检测佛手香黄挥发性风味物质由8种酯类、15种醛类、11种醇类、3种酮类、23种烯萜类、6种酸类、3种呋喃类、1种噻唑类和1种吡嗪类组成。利用GC-IMS结合ROAV分析确认佛手香黄的特征性风味成分主要由甲硫基丙醛和烯萜类物质组成,呈现果香、花香的风味特征。结合PCA、PLS-DA和单因素方差分析了不同品牌的挥发性化合物的变化,筛选出15个标志挥发性化合物。标志成分既反映佛手香黄风味的本质特征,又有助于进一步建立专属性、针对性的质量评价方法和质量标准,为佛手香黄质量控制及质量溯源体系及辨别伪劣提供理论基础。

参考文献

- [1] 岳玲,程轩轩,唐晓敏,等.佛手的传统应用[J].中国实验方剂学杂志,2019,25(4):213-218
YUE Ling, CHENG Xuan-xuan, TANG Xiao-min, et al. Traditional application of citri sarcodactylis fructus [J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2019, 25(4): 213-218
- [2] 周肇基.奇香入室佛手柑[J].植物杂志,2003,1:16
ZHOU Zhao-ji. Exotic fragrance bergamot [J]. Life World, 2003, 1: 16
- [3] 大茶.闻果,满室清芬[J].中国集体经济,2016,26:44-49
DA Cha. Smell the fruit, fill the room [J]. China Academic Journal Electronic Publishing House, 2016, 26: 44-49
- [4] 杨慧,周爱梅,林敏浩,等.佛手挥发精油提取及其药理研究进展[J].食品安全质量检测学报,2013,5:1347-1352
YANG Hui, ZHOU Ai-mei, LIN Min-hao, et al. Research progress of extraction methods and pharmacological effects of bergamot essential oil [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2013, 5: 1347-1352
- [5] 郑玉忠,郭守军,杨永利,等.药食凉果老香黄制作工艺的研究[J].农产品加工(学刊),2014,1:44-45
ZHENG Yu-zhong, GUO Shou-jun, YANG Yong-li, et al. Production process of preserved fruits Laoxianghuang [J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2014, 1: 44-45
- [6] 严赞开,严奉伟.佛手挥发性物质在腌制过程中的变化[J].食品科学,2012,33(2):181-184
YAN Zan-kai, YAN Feng-wei. Variations in volatile compounds in bergamot during curing [J]. Food Science, 2012, 33(2): 181-184
- [7] Ah-Young K, Md M R, M A E A, et al. Identification of volatile organic compounds generated from healthy and infected powdered chili using solvent-free solid injection coupled with GC/MS: application to adulteration [J]. Food Chemistry, 2014, 156
- [8] 汤酿,刘静宜,陈小爱,等.基于GC-MS和GC-IMS联用法分析不同采收期广佛手精油挥发性成分[J].食品科学,2020:1-17
TANG Niang, LIU Jing-yi, CHEN Xiao-ai, et al. Analysis of volatile components in essential oil of finger citron from Guangdong province at different picking times by GC-MS and GC-IMS [J]. Food Science, 2020: 1-17
- [9] 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
- [10] 樊艳.SPME-GC-MS结合ROAV分析腐乳中的主体风味物质[J].食品工业科技,2020:1-17
FAN Yan. Analysis of main flavor substances in fermented soybean curd by SPME-GC-MS and ROAV [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020: 1-17
- [11] 汪金玉,张秋霞,陈康,等.基于GC-MS技术分析广佛手蒸制前后挥发性成分的差异[J].中国实验方剂学杂志,2019, 25(13):126-132
WANG Jin-yu, ZHANG Qiu-xia, CHEN Kang, et al. Comparison of volatile components in citri sarcodactylis fructus from Guangdong province before and after being steamed by GC-MS [J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2019, 25(13): 126-132
- [12] 严赞开,赖宣,黄玉细,等.佛手鲜果与腌制果挥发油成分比较研究[J].热带作物学报,2012,33(11):2075-2078

- YAN Zan-kai, LAI Xuan, HUANG Yu-xi, et al. A Comparative Study of Volatile Oils Between Fresh Fruit and Preserved Fruit of Bergamot [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2012, 33(11): 2075-2078
- [13] 蔡炳彪,张凤梅,牛云蔚.桂花精油特征香气成分研究[J].食品工业,2019,40(7):301-303
- CAI Bing-biao, ZHANG Feng-mei, NIU Yun-wei. Study on the aroma active components of *Osmanthus* essential oil [J]. The Food Industry, 2019, 40(7): 301-303
- [14] Hernández-Orte P, Cersosimo M, Loscos N, et al. The development of varietal aroma from non-floral grapes by yeasts of different genera [J]. Food Chemistry, 2008, 107(3): 1064-1077
- [15] 严赞开,赖宣,黄玉细,等.佛手果在腌制过程中香气成分的变化[C]//中国化学会第9届天然有机化学学术会议,中国南海海口,中国化学会,2012:116
- YAN Zan-kai, LAI Xuan, HUANG Yu-xi, et al. Variations in volatile compounds in bergamot during curing [C]// CCS 9th National Symposium on Natural Product chemistry. China Hainan Haikou, Chinese Chemical Society, 2012: 116
- [16] 张晓磊,李春扬,张世满,等.同时蒸馏萃取技术分析酿酒原料青稞中挥发性化合物的研究[J].酿酒科技,2012,7:115-118
- ZHANG Xiao-lei, LI Chun-yang, ZHANG Shi-man, et al. Analysis of volatile compounds in hulless barley by simultaneous distillation and extraction coupled with GC-MS [J]. Liquor - Making Science & Technology, 2012, 7: 115-118
- [17] 刘国琴,方昭西,李琪.热榨与冷榨对亚麻油风味物质的影响及风味特征成分分析[J].华南理工大学学报(自然科学版),2015,43(11):1-7
- LIU Guo-qin, FANG Zhao-xi, LI Qi. The influence of hot pressing and cold pressing on the flavor of linseed oil and the analysis of flavor characteristic components [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2015, 43(11): 1-7
- [18] 李艳,康俊杰,成晓玲,等.3种酿酒酵母酿造赤霞珠干红葡萄酒的香气成分分析[J].食品科学,2010,22:385-389
- LI Yan, KANG Jun-jie, CHENG Xiao-ling, et al. Aroma components in cabernet sauvignon dry red wine fermented with three species of yeast strains [J]. Food Science, 2010, 22: 385-389
- [19] 郭彦伟.酒花整体风味物质的形成及变化研究[D].济南:齐鲁工业大学,2019
- GUO Yan-wei. Study on formation and change of overall flavor substances in hops [D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2019
- [20] 王永泽,梅乐和.离子液体中脂肪酶催化合成乙酸香叶酯的研究[J].浙江大学学报(工学版),2006,40(7):151-154
- WANG Yong-ze, MEI Le-he. Geranyl acetate synthesis by lipase catalyzed in ionic liquid [J]. Journal of Zhejiang University, 2006, 40(7): 151-154
- [21] 徐星.植物油氧化过程中脂肪酸和挥发性成分变化的研究[D].杭州:浙江工商大学,2013
- XU Xing. Study on changes of fatty acid and volatile component of vegetable oils during the oxidation [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2013
- [22] 周斌,任洪涛,张劲松,等.气相色谱-质谱联用分析晚香玉净油的成分[J].现代食品科技,2012,28(9):1215-1218
- ZHOU Bin, REN Hong-tao, ZHANG Jin-song, et al. The analysis of the chemical constituents of absolute oil of tuberose by GC-MS [J]. Modern Food Science and Technology, 2012, 28(9): 1215-1218
- [23] David M, van Ruth Saskia M, A P M, et al. Gas chromatography-olfactometry analysis of the volatile compounds of two commercial Irish beef meats [J]. Talanta, 2003, 60(4)
- [24] 张丹,韦广鑫,王文,等.安顺普定刺梨与无籽刺梨营养成分及香气物质比较研究[J].食品工业科技,2016,37(12):149-154
- ZHANG Dan, WEI Guang-xin, WANG Wen, et al. Comparative research on basic ingredients and volatile aroma compounds of *Rosa roxburghii* Tratt and *Rosa sterilis* D.shi [J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(12): 149-154
- [25] 胡冬英,徐大满,储梦龙,等.樟树精油主要化学成分概述[J].林产工业,2019,11(56):61-64
- HU Dong-ying, XU Da-man, CHU Meng-long, et al. Brief introduction on main chemical constituents of *Cinnamomum camphora* essential oil [J]. China Forest Products Industry, 2019, 11(56): 61-64
- [26] 田维芬,周君,明庭红,等.基于电子鼻和GC-MS的不同品牌橄榄油挥发性风味物质研究[J].食品工业科技,2017,38(7):285-292
- TIAN Wei-fen, ZHOU Jun, MING Ting-hong, et al. Analysis of volatile flavor components from different regions of olive oil by electronic nose and gas chromatography technology [J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(7): 285-292
- [27] Tian T, Yang H, Yang F, et al. Optimization of fermentation conditions and comparison of flavor compounds for three fermented greengage wines [J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 89: 542-550

- [28] 刘娜,邓莉,张俊杰.顶空固相微萃取-气相色谱质谱-嗅闻法测定不同品牌红腐乳挥发性风味物质[J].中国调味品,2017,42(7):146-151
LIU Na, DENG Li, ZHANG Jun-jie. Analysis of volatile flavor compounds in red preserved bean curd with different brands by headspace solid-phase micro-extraction and gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry [J]. China Condiment, 2017, 42(7): 146-151
- [29] 周琦,张敏,贾潇,等.油菜籽微波过程对油中焙烤风味形成的影响[J].中国油脂,2018,43(12):35-40
ZHOU Qi, ZHANG Min, JIA Xiao, et al. Influence of rapeseed microwave process on roasting flavor forming of oils [J]. China Oils and Fats, 2018, 43(12): 35-40
- [30] 林琪,金涛,罗睿林,等.两种焦糖色的特征风味成分和4-甲基咪唑分析[J].中国测试,2018,44(7):51-55
LIN Qi, JIN Tao, LUO Rui-lin, et al. Analysis of characteristic flavor components and 4-methylimidazole in two kinds of caramel colors [J]. China Measurement & Test, 2018, 44(7): 51-55
- [31] 乔翠红,全佳平,欧婷婷,等.气相色谱-嗅闻-质谱联用分析兼香型白酒风味成分[J].食品研究与开发,2019,40(18):160-165
QIAO Cui-hong, TONG Jia-ping, OU Ting-ting, et al. Analysis of flavor components in compound flavor liquor by gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry [J]. Food Research and Development, 2019, 40(18): 160-165
- [32] H J S. Potato flavor [J]. American Journal of Potato Research, 2010, 2(87): 209-217
- [33] 赵兵,张敏,梁杉.过度蒸煮对马铃薯风味化合物组成的影响[J].食品科学,2017,38(22):200-204
ZHAO Bin, ZHANG Min, LIANG Shan. Effect of overcooking on flavor compounds of potato [J]. Food Science, 2017, 38(22): 200-204
- [34] R C C, M H J. A fresh look at meat flavor [J]. Meat Science, 2007, 77(1): 63-80
- [35] 王文艳,刘凌,吴娜,等.板栗及其膨化制品的挥发性香气成分分析[J].食品与发酵工业,2012,38(5):197-205
WANG Wen-yan, LIU Ling, WU Na, et al. Volatile flavor compounds of chestnuts and puffed chestnut products [J]. Food and Fermentation Industries, 2012, 38(5): 197-205
- [36] 蔡鹏飞,邵传贞,张娜,等.芝麻香白酒特征风味物质的猜想[J].酿酒,2014,41(5):76-78
CAI Peng-fei, SHAO Chuan-zhen, ZHANG Na, et al. The conjecture for characteristic flavor compounds of sesame flavor liquor [J]. Liquor Making, 2014, 41(5): 76-78
- [37] Rosita G, G H E. Generation of Swiss cheese flavor components by the reaction of amino acids with carbonyl compounds [J]. Elsevier, 1989, 72(3): 604-613
- [38] 张翼鹏,廖头根,何邦华,等.基于GC-O、OAV和S型曲线法研究西梅特征香气[J].食品科学,2020,41(22):271-278
ZHANG Yi-peng, LIAO Tou-gen, HE Bang-hua, et al. Identification of characteristic aroma compounds in prunes based on GC-O, OAV and S-curve method [J]. Food Science, 2020, 41(22): 271-278
- [39] 杜静怡,朱婷婷,黄明泉,等.清香型志都五谷酒关键香气成分分析[J].食品科学,2021,42(2):185-192
DU Jing-yi, ZHU Ting-ting, HUANG Ming-quan, et al. Characterization of key aroma compounds in Chinese Zhiduwugu light flavor Baijiu [J]. Food Science, 2021, 42(2): 185-192
- [40] Y M W W, D D T, H S C. Flavor and texture of banana chips dried by combinations of hot air, vacuum, and microwave processing [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(7): 1883-1889
- [41] Peng Y, Bishop K S, Zhang J, et al. Characterization of phenolic compounds and aroma active compounds in feijoa juice from four New Zealand grown cultivars by LC-MS and HS-SPME-GC-O-MS [J]. Food Research International, 2020, 129: 108873
- [42] López-López A, Sánchez A H, Cortés-Delgado A, et al. Relating sensory analysis with SPME-GC-MS data for Spanish-style green table olive aroma profiling [J]. LWT - Food Science and Technology, 2018, 89: 725-734
- [43] Rödel W. Fenarolis Handbook of Flavor Ingredients. Herausgeber von T. E. Furia und N. Bellanca, 2. Auflage, CRC Press Inc., Cleveland 1975. Bd. 1: 551 Seiten, 11 Abb., 105 Tab.; Preis 34,95 \$; Bd. II: 928 Seiten, 23 Abb., 164 Tab.; Preis 45,95 \$[J]. John Wiley & Sons, Ltd, 1977,21(3)
- [44] 王悠然,周春娟,杨永利.龙眼果皮干燥前后挥发性化学成分GC-MS分析[J].湖北农业科学,2015,3(54):682-686
WANG You-ran, ZHOU Chun-juan, YANG Yong-li. Analysis of volatile components from longan pericarp before and after dryness by GC-MS [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2015, 3(54): 682-686
- [45] 田甜,韦锦坚,文金华,等.不同季节凌云白毫茶绿茶的香气成分差异分析[J/OL].食品科学,2020,<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20200108.1657.081.html>
TIAN Tian, WEI Jin-jian, WEN Jin-hua, et al. Analysis of the aroma components differences of Lingyun Pekoe tea green tea in different harvesting seasons [J/OL]. Food Science, 2020, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20200108.1657.08>

- 1.html
- [46] Jianping W, Yuxiang Z, Yuwei W, et al. Assessment of chemical composition and sensorial properties of ciders fermented with different non-*Saccharomyces* yeasts in pure and mixed fermentations [J]. International Journal of Food Microbiology, 2020, 318(2): 108471
- [47] Chen X, Chen H, Xiao J, et al. Variations of volatile flavour compounds in finger citron (*Citrus medica* L. var. *sarcodactylis*) pickling process revealed by E-nose, HS-SPME-GC-MS and HS-GC-IMS [J]. Food Research International, 2020, 138: 109717
- [48] Rong D J K M M. Enhancement of the primary flavor compound methional in potato by increasing the level of soluble methionine [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2003, 51(51): 5695-5702
- [49] 杨君,郜海燕,储国海,等.基于GC-MS和GC-O联用法分析佛手精油关键香气成分[J].食品科学,2015,36(20):194-197
- YANG Jun, GAO Hai-yan, CHU Guo-hai, et al. Characterization of volatile constituents and odorous compounds in essential oil of finger citron (*Citrus medica* L. var. *sarcodactylis* Swingle) by GC-MS and GC-O [J]. Food Science, 2015, 36(20): 194-197
- [50] 陈小爱,蔡惠钰,刘静宜,等.基于电子鼻、GC-MS和GC-IMS技术分析老香黄发酵期间的挥发性成分变化[J/OL].食品工业科技 :1-17[2021-05-01]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020100170>
- CHEN Xiao-ai, CAI Hui-tian, LIU Jing-yi, et al. Analysis of Volatile Components in Laoxianghuang During Fermentation by Electronic nose, GC-MS and GC-IMS [J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 1-17[2021-05-01]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020100170>
- [51] Song G, Zhang M, Peng X, et al. Effect of deodorization method on the chemical and nutritional properties of fish oil during refining [J]. LWT, 2018, 96: 560-567

(上接第 258 页)

- [19] 高阳,赵生,许式强,等.龙井茶挥发油的旋转锥体柱提取及其应用研究[J].食品工业,2015,36(5):120-124
- GAO Yang, ZHAO Sheng, XU Shi-qiang, et al. Study on Longjing tea essential oil extracted by spinning cone column and its application [J]. The Food Industry, 2015, 36(5): 120-124
- [20] 董玉鹏,孙萍,李永才,等.反式-2-己烯醛对梨果黑斑病菌 *Alternaria alternata* 的抑菌作用及其机理[J].食品科学, 2020,41(7):191-197
- DONG Yu-peng, SUN Ping, LI Yong-cai, et al. Inhibitory effect and mechanism of trans-2-hexenal against inoculated *Alternaria alternata* on pear fruit [J]. Food Science, 2020, 41(7): 191-197
- [21] LU Hong-bao, XU Shuang-yu, ZHANG Wen-juan, et al. Nematicidal activity of trans-2-hexenal against southern root-knot nematode (*Meloidogyne incognita*) on tomato plants [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(3): 544-550
- [22] 刘纯友,马美湖,靳国锋,等.角鲨烯及其生物活性研究进展[J].中国食品学报,2015,15(5):147-156
- LIU Chun-you, MA Mei-hu, JIN Guo-feng, et al. Research process on squalene and bioactivities [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15(5): 147-156
- [23] 龙正海,杨再昌,杨雄志.油茶树嫩枝挥发油 GC-MS 分析及其体内外抗菌作用[J].食品与生物技术学报,2008,2:47-51
- LONG Zheng-hai, YANG Zai-chang, YANG Xiong-zhi. Analysis of the volatile oil of tender branchers from *Camellia oleifera* by GC-MS and study on anti-microbial activities [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2008, 2: 47-51
- [24] 韩宝瑜,周成松.茶梢和茶花信息物引诱有翅茶蚜效应的研究[J].茶叶科学,2004,4:249-254
- HAN Bao-yu, ZHOU Cheng-song. Attracting effect of volatile infochemicals from tea shoots and flowers on winged tea aphids [J]. Journal of Tea Science, 2004, 4: 249-254
- [25] 郭晓春,宋顺超,胡光辉,等.几种油茶挥发物对刺股沟臀肖叶甲的引诱试验[J].西部林业科学,2018,47(5):53-56
- GUO Xiao-chun, SONG Shun-chao, HU Guang-hui, et al. Attraction test of main volatile components of *Camellia oleifera* on *Colaspoides opaca* [J]. Journal of West China Forestry Science, 2018, 47(5): 53-56