

基于GC-IMS结合多元统计方法对不同品种植物油制备的辣椒油风味品质的比较

杨芳, 王逊城, 贾洪锋, 许程剑*, 袁海彬

(四川旅游学院食品学院, 四川成都 610100)

摘要: 为了探究植物油种类对辣椒油理化性质和风味的影响, 采用高效液相色谱 (HPLC) 和气相色谱-离子迁移谱 (GC-IMS) 对 6 种食用植物油 (菜籽油、玉米油、大豆油、橄榄油、番茄籽油、山茶油) 制成的辣椒油的辣椒素类物质含量、色差、过氧化值和挥发性有机化合物 (VOCs) 进行检测, 并进行多元统计分析。结果表明: 6 种辣椒油样品的辣椒素类物质含量、辣度和过氧化值具有显著性差异 ($P<0.05$), 色差值接近; 通过 GC-IMS 共检测出 88 种 VOCs, 醛类物质多达 22 种, 通过正交偏最小二乘判别分析 (OPLS-DA) 共筛选出关键风味差异标志物 (VIP>1.2) 19 种, 其中 4-甲基噻唑 (VIP=3.16) 对辣椒油风味贡献度最高; GC-IMS 指纹图谱结合主成分分析 (PCA)、热图聚类分析能将 6 种辣椒油之间的 VOCs 差异进行准确区分。研究结果显示植物油种类对辣椒油风味品质均有不同程度的影响, 尤以菜籽辣椒油最为突出, 呈现出辣度中等 (辣度为 17.72 ± 0.12 度)、颜色纯、香气最丰富且具有良好的稳定性的特点, 为风味多样化的辣椒油产品生产和鉴别提供理论依据。

关键词: 辣椒油; 气相-离子迁移谱; 辣椒素; 挥发性风味成分; 正交偏最小二乘-判别分析

文章编号: 1673-9078(2024)10-338-350

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.10.0985

Comparison of the Flavor Qualities of Chili Oils Prepared from Different Types of Vegetable Oil

YANG Fang, WANG Xuncheng, JIA Hongfeng, XU Chengjian*, YUAN Haibin

(College of Food Science and Technology, Sichuan Tourism University, Chengdu 610100, China)

Abstract: To investigate the influence of vegetable oil on the physicochemical properties and flavor of chili oil, the capsaicinoid content, color difference, peroxide concentrations and volatile organic compounds (VOCs) of chili oil samples prepared from six kinds of edible vegetable oils (rapeseed oil, corn oil, soybean oil, olive oil, tomato seed oil, and camellia oil) were determined using high performance liquid chromatography (HPLC) and gas chromatography-ion mobility spectroscopy (GC-IMS). The six chili oil samples differed significantly in their capsaicinoid and peroxide concentrations and pungency ($P<0.05$) but had similar color difference values. GC-IMS analysis detected the presence of 88 VOCs, with

引文格式:

杨芳,王逊城,贾洪锋,等.基于GC-IMS结合多元统计方法对不同品种植物油制备的辣椒油风味品质的比较[J].现代食品科技,2024,40(10):338-350.

YANG Fang, WANG Xuncheng, JIA Hongfeng, et al. Comparison of the flavor qualities of chili oils prepared from different types of vegetable oil [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(10): 338-350.

收稿日期: 2023-08-21

基金项目: 四川省自然科学基金项目 (2022NSFSC1750); 川菜工业化四川省高等学校工程研究中心项目 (GCZX22-23); 四川旅游学院餐饮食品感官品质智能评价科研创新团队项目 (19SCTUTY04)

作者简介: 杨芳 (1985-), 女, 硕士, 副教授, 研究方向: 食品风味化学, E-mail: sichuanyangf@126.com

通讯作者: 许程剑 (1977-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品风味化学, E-mail: 36111916@qq.com

aldehydes being the most predominant, comprising 22 different types. Orthogonal partial least squares-discriminant analysis screened out 19 key differential markers (VIP>1.2) for key flavors, among which 4-methylthiazole (VIP = 3.16) contributed the most to the flavor of the chili oil samples. The differences in VOCs among the six chili oil samples were effectively distinguished using GC-IMS fingerprint spectra combined with principal component analysis and heat map cluster analysis. The different vegetable oils had varying effects on the flavor and quality of chili oil, with rapeseed oil having a particularly prominent effect. Rapeseed-based chili oil was moderately pungent ($17.72 \pm 0.12^\circ$), had a pure color and the richest aroma, and showed high stability. The findings of this study can serve as a theoretical basis for the production and identification of chili oil products with distinct flavors.

Key words: chili oil; gas chromatography-ion mobility spectrometry; capsaicin; volatile flavor components

辣椒 (*Capsicum annuum* L.) 属茄科一年或多年生植物。辣椒中含有丰富的维生素 C、辣椒素、辣椒红素、类黄酮、多酚等物质^[1-3], 具有抗氧化、清除自由基、抗肿瘤等作用^[2-5]。辣椒油作为辣椒的深加工产品之一, 具有香味浓郁、辣度适口等特点, 深受人们的喜爱^[6], 对中国的饮食文化有着重要的影响, 尤其是在川菜的加工中具有举足轻重的地位。随着经济社会发展和人们生活水平的提高, 消费者对调味品的品质追求也在逐步提升, 辣椒油产品逐渐向健康化、风味口味多样化的方向转变^[7]。

目前, 食品风味的检测分析已成为食品科学领域的热点之一, 气相色谱-离子迁移谱 (Gas Chromatography Ion-Mobility Spectrometry, GC-IMS) 是近年来新兴的快速气相分离和检测联用技术, 可通过测定样品的风味化合物获取样品的风味指纹信息从而实现对样品快速分析和检测, 尤其在痕量物质检测方面更胜一筹, 在食品风味分析及安全检测、医疗健康、环境监测等领域得到了广泛的应用^[8-11]。

辣椒油的风味、色泽、辣味等品质受加工条件、辣椒品种、植物油品种等多种因素的影响^[6,12-14]。Caporaso 等^[15]发现, 常温下向橄榄油中添加不同浓度的辣椒面, 对橄榄油的抗氧化能力和风味具有较大改善。Cecchi 等^[16]研究发现, 用鲜橄榄和鲜辣椒共同研磨制得的辣椒油, 能更好地保留鲜辣椒的香气。杨慧等^[6]发现不同油温条件下制得的复合辣椒油的香气特异性明显。季德胜等^[13]研究发现, 不同煎制程度显著地影响辣椒油风味化合物的种类和含量。杨芳等^[17]发现辣椒的品种对辣椒油的理化性质、挥发性风味物质均有不同程度的影响。尹敏等^[12]通过感官评鉴的方法发现食用植物油的品种和辣椒油的品质有密切关系。由于不同品种植物油自身含有大量的特征性挥发性有机化合物 (Volatile Organic

Compounds, VOCs)^[18], 采用不同植物油加工生产辣椒油对满足辣椒油产品风味多样化的市场需求, 具有较好的市场应用前景, 然而, 基于 GC-IMS 技术对不同植物油制备的辣椒油的风味品质进行对比研究的报道较少。

本研究采用 GC-IMS 等检测技术结合主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA)、正交偏最小二乘判别分析 (Orthogonal Partial Least Squares-Discrimination Analysis, OPLS-DA) 及热图聚类分析等多元统计方法, 对 6 种压榨食用植物油制备的辣椒油的辣椒素类物质含量、色差、过氧化值、挥发性风味物质进行对比分析, 以对辣椒油的理化性质和风味品质进行更为科学、系统的评价, 为风味多样化的辣椒油标准化生产提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

一级压榨菜籽油、一级压榨玉米油、三级压榨大豆油、特级初榨橄榄油, 山东鲁花集团有限公司; 一级压榨番茄籽油, 河北丝路晨光油脂有限公司; 一级压榨山茶油, 江西春源绿色食品有限公司; 干红二荆条辣椒, 购买自四川成都双流牧马山; 精制食用盐 (GB 2721), 四川省盐业总公司。

冰乙酸 (CH_3COOH)、二氯甲烷 (CH_2Cl_2)、碘化钾 (KI)、硫代硫酸钠 ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)、可溶性淀粉、碘酸钾 (分析纯), 成都市科隆化学品有限公司。

1.2 仪器与设备

Flavor Spec® 食品风味分析仪 (含 CTC 自动顶空进样器、Laboratory Analytical Viewer(LAV) 分析软件、GC×IMS Library Search 软件及软件内置的

NIST 数据库和 IMS 数据库), 德国 G.A.S 公司; 分析天平, IS128 型, 上海西塘生物科技有限公司; 高效液相色谱仪, 戴安 Ultimate 3000 型, 上海赛默飞世尔科技有限公司; 粉碎机, FP12Q2-400A 型, 美的集团股份有限公司; 色差仪, NH310 型, 深圳市三恩时科技有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 样品制备

辣椒油的制备参考文献^[17]并做修改。

干红二荆条辣椒(去蒂, 无霉变, 35 g) → 微波(功率 1 000 W) 加热 1 min → 凉至室温 → 粉碎 → 过筛(18 目) → 称重(24 g) → 加入食盐(1 g) → 混匀 → 辣椒面, 备用。不同品种植物油(100 g) → 加热至 180 °C → 油淋辣椒面(10 s 内匀速加入) → 搅拌(约 35 s) → 自然降温浸提(24 h) → 编号(样品编号 Y1、Y2、Y3、Y4、Y5、Y6, 分别对应菜籽辣椒油、玉米辣椒油、大豆辣椒油、橄榄辣椒油、番茄辣椒油、山茶辣椒油) → 待测

自然浸提完成后, 取各样品上清油液, 分别用于辣椒素类物质、色差值、过氧化值、挥发性有机化合物(VOCs)检测。

1.3.2 辣椒素类物质检测

按照 GB/T 21266-2007《辣椒及辣椒制品中辣椒素类物质测定及辣度表示方法》^[19]对辣椒素类物质进行检测, 色谱条件为: Zorbax SB-C18 色谱柱(4.6 mm×250 mm×5 μm), 流动相: 甲醇+水(65+35), 进样量: 10 μL, 流量: 1 mL/min, 紫外检测波长: 280 nm, 柱温箱温度: 30 °C, 平行测定 3 次。

$$B = \frac{C}{D} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

B—辣椒素类物质萃取率, %;

C—辣椒油样品中辣椒素类物质总量, g/kg;

D—辣椒面中辣椒素类物质总量, g/kg。

1.3.3 色差的测定

利用三恩时 NH300 高品质电脑色差仪, 采用 LE 照明方式: d/8 (漫射照明, 8° 方向接收), 视觉角度 10° 测定样品的 L^* 、 a^* 、 b^* 值, 用标准白板作标准, 平行测定 3 次。彩度 c^* 计算公式如下:

$$c^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (2)$$

1.3.4 过氧化值的测定

按照 GB 5009.227-2016《食品安全国家标准食品中过氧化值的测定》——滴定法进行测定^[20],

平行测定 3 次。

1.3.5 GC-IMS测定挥发性有机化合物(VOCs)

GC-IMS 的分析条件: 取 1.5 g 辣椒油样品于 20 mL 顶空瓶中, 500 r/min 的速度在 80 °C 下孵育 20 min 后, 自动顶空进样 500 μL, 进样针温度 85 °C, 载气/漂移气为 N_2 (纯度 ≥ 99.999%), 漂移管温度 45 °C, 漂移管长度 9.8 cm, 漂移气流量 150 mL/min, GC 色谱柱为 WAX (30 m×0.53 mm×1 μm) 石英毛细管柱, 色谱柱温度 60 °C, 分析时间 40 min。每种辣椒油样品平行测定 3 次。

利用 Flavor Spec® 配备的 Laboratory Analytical Viewer (LAV) 分析软件及 GC×IMS Library Search 定性软件对辣椒油样品的 VOCs 进行采集和分析; 利用软件内置的 NIST 数据库和 IMS 数据库对物质进行定性分析。

1.3.6 数据处理

利用 SPSS 26.0 软件对样品间差异进行 ANOVA 检验分析, 利用 Duncan 方法进行显著性差异 ($P < 0.05$) 分析; 采用 SIMCA 14.1 软件进行 OPLS-DA、变量重要性投影 (Variable Importance in Projection, VIP) 统计分析; 采用 R 语言进行热图聚类分析; 利用 Excel 2019 和 Origin 2019 进行数据统计和绘图。结果以平均值 ± 标准差 ($\bar{x} \pm s$) 的形式表示。

化合物保留指数 (RI 值) 计算方法: 通过测试已知保留指数标品 (2- 丁酮、2- 戊酮、2- 己酮、2- 庚酮、2- 辛酮、2- 壬酮) 的保留时间, 经 FlavourSpec® 自带的 GC×IMS Library Search 软件拟合出保留时间与保留指数 RI 的关系, 再将 GC-IMS 捕捉到的 VOCs 的保留时间转化为保留指数 RI。

2 结果与讨论

2.1 植物油种类对辣椒油中辣椒素类物质含量的影响

辣椒素类物质 (Capsaicinoids) 是辣椒碱类化合物的总称, 属于酰胺类化合物, 其中辣椒素和二氢辣椒素约占辣椒素类物质总量的 90%^[21]。辣椒素除了可以调味, 还具有清除自由基、抗氧化、抗癌、减肥等活性^[4,22], 但大量摄入辣椒素会产生毒性, 局部刺激导致某些疾病发生^[4]。6 种辣椒油的辣椒素类化合物含量如表 1 所示。

表 1 辣椒油样品的辣椒素类物质含量

Table 1 Content of capsaicinoids in chili oil samples (n=3)

样品编号	辣椒素含量/(g/kg)	二氢辣椒素含量/(g/kg)	辣椒素类物质总量/(g/kg)	斯科维尔指数 (SHU)	辣度/度	辣椒素类物质萃取率/%
Y1	0.11 ± 0.00 ^f	0.05 ± 0.00 ^c	0.17 ± 0.00 ^f	2 657.67 ± 17.90 ^f	17.72 ± 0.12 ^f	12.55 ± 0.08 ^f
Y2	0.22 ± 0.00 ^a	0.08 ± 0.01 ^a	0.33 ± 0.00 ^a	5 042.00 ± 0.00 ^a	33.61 ± 0.00 ^a	23.82 ± 0.00 ^a
Y3	0.16 ± 0.00 ^c	0.06 ± 0.01 ^c	0.25 ± 0.00 ^c	3 875.33 ± 9.24 ^c	25.84 ± 0.06 ^c	18.31 ± 0.04 ^c
Y4	0.12 ± 0.00 ^e	0.05 ± 0.01 ^d	0.20 ± 0.00 ^e	3 058.33 ± 9.24 ^e	20.40 ± 0.06 ^e	14.42 ± 0.00 ^e
Y5	0.20 ± 0.01 ^b	0.07 ± 0.01 ^b	0.30 ± 0.00 ^b	4 574.67 ± 9.24 ^b	30.50 ± 0.06 ^b	21.61 ± 0.04 ^b
Y6	0.15 ± 0.01 ^d	0.07 ± 0.00 ^c	0.24 ± 0.00 ^d	3 659.67 ± 17.90 ^d	24.40 ± 0.12 ^d	17.29 ± 0.08 ^d
辣椒面	1.00 ± 0.00	0.24 ± 0.00	1.37 ± 0.00	21 176.67 ± 54.15	141.18 ± 0.36	—

注：同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)，下同。

由表 1 可知，在辣椒油制备的工艺和配方相同时，6 种植物油对同种辣椒面中辣椒素和二氢辣椒素的浸提能力有显著性差异 ($P < 0.05$)，其中一级压榨玉米油的浸提能力最强，辣椒素类物质萃取率达 23.82%，玉米辣椒油中辣椒素类物质总量达 0.33 g/kg，辣度达 33.61 度，且与其余 5 种压榨植物油的浸提能力有显著性差异 ($P < 0.05$)；菜籽油的浸提能力相对最弱，辣椒素类物质萃取率仅 12.55%，菜籽辣椒油的辣度较低，为 17.72 度。产生以上差异的原因，主要是不同品种植物油的成分不同导致。因此，为满足不同消费者对辣度的多样化需求，在加工辣椒油时可通过选择不同的载体植物油来改善辣椒油辣度。

2.2 植物油种类对辣椒油色差的影响

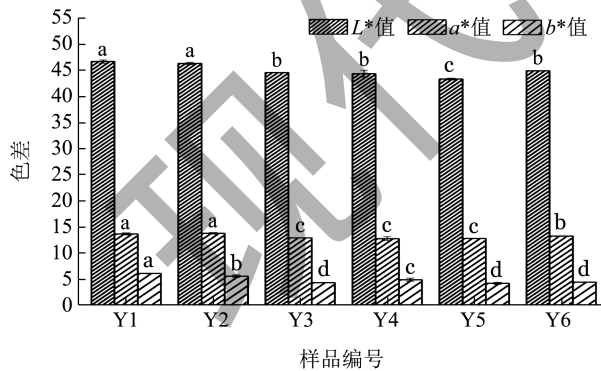


图 1 辣椒油样品色差值

Fig.1 Chromatic aberration value of chili oil samples

注：图中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

食品颜色是食品品质的重要评价指标之一，也是消费者采购食品时的重要参考因素之一，对食品的商品价值有重要影响^[23]。由图 1 可知，亮度 L^* 最大的是 Y1，为 46.710，亮度 L^* 最低的是 Y5，

为 43.347，且 Y5 与其余样品间存在显著性差异 ($P < 0.05$)。在红度 a^* 方面，Y2 最高，为 13.757，最低的是 Y4，为 12.720，在黄度 b^* 方面 Y1 最高，为 6.047，最低的是 Y5，为 4.147。此外，彩度 c^* 越大，表示颜色越纯，Y1、Y2、Y3、Y4、Y5、Y6 辣椒油的 c^* 分别为 14.911、14.824、13.571、13.619、13.412、13.924，菜籽辣椒油的颜色最纯，其次是玉米辣椒油^[23]。以上表明，6 种辣椒油样品的亮度、红度、黄度值有差异但接近，这和尹敏等^[12]用普通菜籽油、普通精练大豆油制得的辣椒油都呈现色泽金红、光亮的结论相吻合。

2.3 植物油种类对辣椒油过氧化值的影响

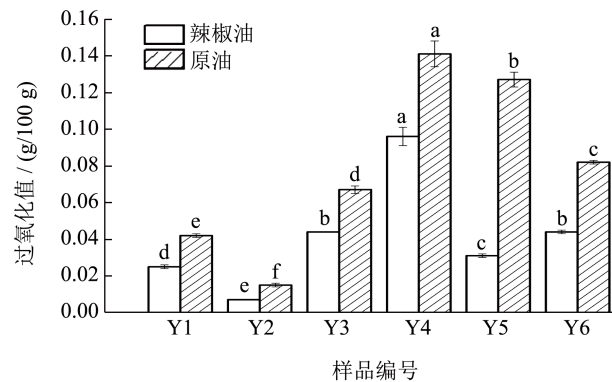


图 2 辣椒油样品和植物油的过氧化值

Fig.2 Peroxide value of chili oil samples and vegetable oils (n=3)

油脂的过氧化值是评价油脂氧化的关键指标，6 种辣椒油样品及其对应的载体油脂原油的过氧化值如图 2 所示。6 种辣椒油样品的过氧化值由低到高的顺序依次为：Y2 < Y1 < Y5 < Y3 ≈ Y6 < Y4，与载体油脂原油相比较，辣椒油样品的过氧化值均低于原油且存在显著性差异 ($P < 0.05$)，尤其

是辣椒素类物质含量较高的样品 Y2 和 Y5, 其过氧化值低于对应原油过氧化值的一半, 分别为对应原油的 48.2%、24.5%, 其他辣椒油样品的过氧化值为原油的 53.8%~68.1%, 这与 Caporaso 等^[15]研究发现辣椒油抗氧化活性提高的趋势与辣椒素浓度的变化趋势相似。由此可见, 辣椒素类物质具有较好的抗氧化作用^[24], 能有效降低植物油过氧化值, 抑制植物油氧化, 提高植物油稳定性^[25]。从辣椒油整体过氧化值的水平上来看, 不同载体油脂制备的辣椒油样品间的过氧化值差异主要受载体油脂的影响较大, 玉米辣椒油过氧化值最低, 其次是菜籽辣椒油。Ben-Hassine 等^[26]发现, 存储 9 个月的橄榄油与新鲜橄榄油相比较, 过氧化值显著升高, 稳定性较差。本实验中橄榄辣椒油过氧化值最高, 这可能是橄榄油更容易被氧化所致。

2.4 植物油种类对辣椒油挥发性有机化合物 (VOCs) 的影响

2.4.1 辣椒油 VOCs 的定性分析

对照 GC×IMS Library Search 内置的 NIST 数据库和 IMS 数据库, 根据辣椒油 VOCs 的保留指数、保留时间和迁移时间进行定性分析, 共检测出 88 种 VOCs, 108 个信号峰, 包含烃类 3 种、醇类 14 种 (二聚体 4 个)、醛类 22 种 (二聚体 9 个)、酮类 13 种 (二聚体 3 个)、羧酸类 4 种 (二聚体 2 个)、酯类 10 种 (二聚体 1 个)、醚类 2 种、杂环类 20 种 (二聚体 1 个), 其中醛类化合物种类最多, 为辣椒油赋予了清香、脂肪、水果香等香气, 结果如表 2 所示。部分 VOCs 以单体和二聚体两种形式存在, 它们具有相近的保留时间和不同的迁移时间, 这是 GC-MS 所检测不出的^[27]。

表 2 辣椒油样品已定性挥发性有机化合物列表
Table 2 List of identified VOCs in chili oil samples

	编号	化合物名称	保留指数	保留时间/s	迁移时间/ms	风味描述
烃类	A1	γ -松油烯	1 256.00	751.390	1.200 99	柑橘柠檬香
	A2	苯乙烯	1 225.90	706.000	1.052 01	甜香
	A3	β -蒎烯	1 134.00	542.826	1.218 38	草木味
醇类	B1	(E)-3-己烯-1-醇-M	1 355.10	928.080	1.260 81	清香
	B2	(E)-3-己烯-1-醇-D	1 355.10	928.080	1.530 73	清香
	B3	2-庚醇	1 329.40	877.710	1.380 43	果香
	B4	1-戊醇-M	1 263.60	763.390	1.256 21	辛辣味、杂醇香
	B5	1-戊醇-D	1 263.60	763.390	1.516 92	辛辣味、杂醇香
	B6	3-甲基-1-丁醇-M	1 220.30	697.788	1.244 63	辛辣味、果香
	B7	1-戊烯-3-醇	1 176.70	625.519	0.943 75	辛辣味
	B8	1-丁醇-M	1 160.80	593.491	1.181 36	果香
	B9	1-丁醇-D	1 161.70	595.133	1.382 42	果香
	B10	2-甲基-1-丙醇	1 109.10	499.867	1.171 14	酒香
	B11	3-甲基-2-丁醇	1 105.90	494.642	1.413 55	果香
	B12	1-丙醇	1 051.60	419.754	1.110 22	酒精味、发酵味
	B13	2-丁醇	1 034.40	398.856	1.147 52	果香
	B14	叔丁醇	919.50	299.586	1.320 31	酒香
	B15	乙醇	945.40	317.582	1.132 60	酒香
	B16	1-己醇	1 367.30	953.073	1.333 21	辛辣味、果香
	B17	3-甲基-1-丁醇-D	1 219.90	697.334	1.492 20	辛辣味、果香
	B18	(Z)-3-己烯醇	1 400.00	1023.104	1.245 54	辛辣味、清香

续表 2

编号	化合物名称	保留指数	保留时间/s	迁移时间/ms	风味描述
C1	苯乙醛	1 766.20	2 264.820	1.264 57	玫瑰香、甜香
C2	壬醛 -M	1 399.80	1 022.660	1.483 72	柑橘香、脂肪香
C3	壬醛 -D	1 400.30	1 023.760	1.941 14	柑橘香、脂肪香
C4	(E,E)-2,4-庚二烯醛	1 518.70	1 323.680	1.200 31	脂肪香
C5	(E)-2-庚烯醛 -D	1 329.00	876.920	1.670 29	清香、脂肪香
C6	(E)-2-庚烯醛 -M	1 329.40	877.710	1.257 74	清香、脂肪香
C7	顺 -4-庚烯醛	1 278.60	787.370	1.136 58	清香、脂肪香
C8	(E)-2-己烯醛 -M	1 229.80	711.750	1.181 36	清香、脂肪香
C9	2-甲基-2-戊烯醛 -M	1 196.40	664.117	1.161 68	清香、果香
C10	2-甲基-2-戊烯醛 -D	1 196.40	664.117	1.480 84	清香、果香
C11	(E)-2-戊烯醛 -M	1 147.80	568.369	1.107 74	果香、辛辣味
C12	(E)-2-戊烯醛 -D	1 148.10	568.949	1.362 58	果香、辛辣味
C13	(Z)-2-戊烯醛 -M	1 125.10	527.151	1.110 22	果香、辛辣味
C14	(Z)-2-戊烯醛 -D	1 124.80	526.571	1.361 34	果香、辛辣味
C15	己醛 -M	1 098.40	482.451	1.278 05	清香、脂肪香
C16	己醛 -D	1 098.40	482.451	1.562 72	清香、脂肪香
C17	戊醛	1 000.40	360.541	1.422 25	发酵香、果香
C18	3-甲基丁醛	927.20	304.811	1.399 87	巧克力、奶酪味
C19	丁醛	886.50	278.106	1.278 05	巧克力味
C20	2-甲基丙醛	828.20	243.855	1.280 53	花香、辛辣味
C21	丙醛	816.40	237.470	1.141 30	辛辣味
C22	二乙缩醛	902.90	288.556	1.028 18	甜香、脂肪香
C23	丙烯醛	864.70	264.754	1.056 77	果香
C24	乙醛	759.70	209.024	0.983 42	辛辣味
C25	异丁烯醛	892.00	281.590	1.218 38	花香
C26	庚醛 -M	1 194.30	661.308	1.342 34	脂肪香、柑橘香
C27	庚醛 -D	1 194.30	661.308	1.698 77	脂肪香、柑橘香
C28	3-甲基-2-丁烯醛 -M	1 213.50	688.116	1.096 75	果香
C29	3-甲基-2-丁烯醛 -D	1 213.80	688.580	1.359 95	果香
C30	(E)-2-己烯醛 -D	1 229.80	711.7150	1.515 98	青香、脂肪香
C31	苯甲醛	1 550.20	1 417.167	1.157 73	苦杏仁味、果香
D1	1-羟基-2-丙酮 -M	1 312.70	846.530	1.066 04	辛辣的甜味
D2	1-羟基-2-丙酮 -D	1 313.10	847.330	1.231 67	辛辣的甜味
D3	乙偶姻 -M	1 298.10	820.150	1.070 64	奶油味
D4	乙偶姻 -D	1 297.70	819.350	1.329 82	奶油味
D5	环戊酮	1 173.90	619.770	1.094 19	薄荷味
D6	4-甲基-3-戊烯-2-酮	1 115.30	510.316	1.120 17	土豆味
D7	2-己酮	1 104.90	492.901	1.197 24	果香
D8	2,3-戊二酮	1 061.80	432.526	1.199 73	黄油味

醛类

酮类

续表 2

	编号	化合物名称	保留指数	保留时间/s	迁移时间/ms	风味描述
酮类	D9	1-戊烯-3-酮-M	1 039.30	404.661	1.081 63	辛辣味
	D10	1-戊烯-3-酮-D	1 039.80	405.241	1.311 61	辛辣味
	D11	2-戊酮	997.10	357.058	1.353 88	果香
	D12	2,3-丁二酮	963.70	330.934	1.181 08	黄油味
	D13	2-丁酮	911.70	294.361	1.244 48	果香
	D14	丙酮	835.50	247.919	1.110 22	苹果香、梨香
	D15	2-庚酮	1 190.80	655.440	1.258 91	果香、辛辣味
	D16	2-环己烯-1-酮	1 424.70	1 079.296	1.103 33	烤香
羧酸类	E1	(E)-2-丁烯酸	1 795.00	2 411.140	1.100 77	乳酪味
	E2	丁酸-M	1 716.80	2 034.610	1.163 45	乳酪味
	E3	丁酸-D	1 715.70	2 029.870	1.365 69	乳酪味
	E4	丙酸	1 635.90	1 707.110	1.118 51	酸味
	E5	乙酸-M	1 501.80	1 275.910	1.057 83	酸味
	E6	乙酸-D	1 502.60	1 278.170	1.156 26	酸味
酯类	F1	γ -丁内酯	1 710.30	2 006.140	1.087 05	奶油香
	F2	丙酸丁酯	1 155.00	581.993	1.286 81	果香
	F3	乙酸异戊酯	1 114.00	507.994	1.283 02	果香
	F4	丙酸异丁酯	1 107.70	497.545	1.721 85	果香
	F5	乙酸甲酯	848.80	255.466	1.196 00	果香
	F6	乙酸乙酯	895.70	283.912	1.332 74	果香
	F7	丙酸乙酯	960.60	328.612	1.432 2	果香
	F8	异丁酸乙酯	1 019.90	382.020	1.575 16	果香
	F9	(E)-2-己烯酸乙酯-M	1 325.60	870.536	1.331 72	—
	F10	(E)-2-己烯酸乙酯-D	1 326.30	871.787	1.813 17	—
	F11	丙酸己酯	1 339.40	896.945	1.433 80	果香
醚类	G1	1,8-桉叶素	1 230.40	712.570	1.302 28	草木味
	G2	二甲基硫醚	793.00	225.279	0.958 56	洋葱味、蒜味
杂环类	H1	糠醇	1 732.70	2105.81	1.127 50	面包味
	H2	3-呋喃甲醇	1 662.10	1 806.780	1.098 28	—
	H3	乙酰吡嗪	1 651.70	1 766.440	1.138 73	爆米花香
	H4	5-甲基糠醛	1 563.60	1 459.170	1.128 68	焦糖味
	H5	2-乙酰基呋喃	1 538.90	1 382.900	1.130 28	坚果香
	H6	糠醛-M	1 492.30	1 250.010	1.093 37	木香、甜香
	H7	糠醛-D	1 492.30	1 250.010	1.336 70	木香、甜香
	H8	2-乙基-5,6-二甲基吡嗪	1 497.00	1 262.810	1.226 83	烧焦味
	H9	2-乙基-5-甲基吡嗪	1 412.10	1 050.320	1.203 62	咖啡味
	H10	2-乙基吡嗪	1 385.10	990.440	1.099 78	清香
	H11	2,3-二甲基吡嗪	1 367.60	953.670	1.118 18	坚果味

续表 2

编号	化合物名称	保留指数	保留时间/s	迁移时间/ms	风味描述	
H12	2,6- 二甲基吡嗪	1 348.70	915.290	1.110 51	巧克力味	
H13	2,5- 二甲基吡嗪	1 335.20	888.910	1.112 04	坚果香、烘烤香	
H14	4- 甲基噻唑	1 286.40	800.160	1.362 03	坚果香	
H15	2- 甲基吡嗪	1 274.60	780.980	1.092 11	坚果香	
杂 环 类	H16	吡啶	1 196.40	664.117	1.274 16	鱼腥味
	H17	2- 甲基噻吩	1 061.80	432.526	1.040 61	硫磺味
	H18	噻吩	1 029.00	392.470	1.043 09	大蒜味
	H19	2- 乙基呋喃	946.20	318.163	1.279 29	焦香
H20	2- 戊基呋喃	1 241.50	729.223	1.249 99	果香、清香	
H21	2- 乙基 -3,5- 二甲基吡嗪	1 484.30	1 228.406	1.210 04	坚果香	

注：“-M”表示单体，“-D”表示二聚体；“-”表示未知。

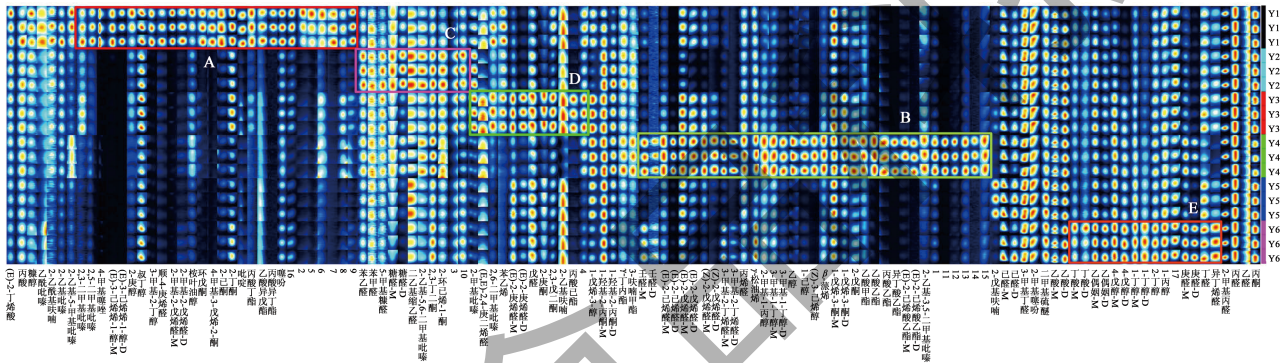


图 3 辣椒油样品的指纹图谱

Fig.3 Fingerprint spectra of chili oil samples (n=3)

2.4.2 辣椒油VOCs的GC-IMS指纹图谱

为直观呈现 6 种辣椒油样品之间 VOCs 的差异，通过 GC-IMS 检测得到指纹图谱如图 3 所示，Y 轴为样品编号（每 1 行为 1 个样品的指纹图谱），X 轴为 VOCs 的名称或编号，点的颜色越红面积越大表示 VOCs 含量越高^[28]。

结合图 3 和表 2 可知，6 种辣椒油样品之间的 VOCs 具有明显差异。3- 甲基丁醛、乙酸 (-M、-D)、己醛 (-M、-D)、(E)-2- 戊烯醛 (-M、-D)、苯乙醛、2- 甲基丙醛、1- 戊醇 (-M、-D)、1- 戊烯 -3- 醇、乙偶姻、1- 羟基 -2- 丙酮 (-M、-D)、2,3- 戊二酮、1- 戊烯 -3- 酮、 γ - 丁内酯和二甲基硫醚在 6 种辣椒油中含量均较高，可为辣椒油贡献脂肪香、辛辣味、果香、清香、花香等总体风味特征。A 区域 4- 甲基噻唑、2,5- 二甲基吡嗪、(E)-3- 己烯 -1- 醇 (-M、-D)、3- 甲基 -2- 丁醇、顺 -4- 庚烯醛、2- 甲基 -2- 戊烯醛、环戊酮、4- 甲基 -3- 戊烯 -2- 酮、2- 己酮和丙酸异丁酯等化合物在菜籽辣椒油 (Y1) 中含量高且与其余 5 种辣椒油

存在显著性差异 ($P < 0.05$)，因此 Y1 的风味与其余 5 种辣椒油差异明显。B 区域的乙酸乙酯、丙酸乙酯、异丁酸乙酯、(E)-2- 己烯酸乙酯、3- 甲基 -1- 丁醇 (-M、-D)、乙醇、1- 己醇、(Z)-3- 己烯醇、 β - 蒎烯、乙酸甲酯、1- 戊烯 -3- 酮 (-M、-D) 在橄榄辣椒油 (Y4) 中含量高且与其余 5 种辣椒油存在显著性差异 ($P < 0.05$)，因此橄榄辣椒油 (Y4) 的风味与其余 5 种辣椒油差异亦明显。Caporaso 等^[15]也在橄榄辣椒油 VOCs 中发现 3- 甲基 -1- 丁醇、乙醇、1- 己醇、(Z)-3- 己烯醇、 β - 蒎烯均具有较高的浓度。D 区域的化合物在大豆辣椒油 (Y3) 中含量高，其中丙酸己酯、2,3- 戊二酮、2- 庚酮、戊醛、(E)-2 庚烯醛 (-M、-D)、2- 甲基吡嗪在 Y3 中含量高且与其余 5 种辣椒油存在显著性差异 ($P < 0.05$)。C、E 两区域的化合物分别在玉米辣椒油 (Y2) 和山茶辣椒油 (Y6) 中含量高。番茄辣椒油 (Y5) 和山茶辣椒油 (Y6) 风味接近，但庚醛 (-M、-D)、丁酸 (-M、-D)、3- 甲基 -2- 丁烯醛 (-M、-D) 和壬

醛(-M、-D)在山茶辣椒油(Y6)中的含量高于番茄辣椒油(Y5),而2-戊基呋喃、(E)-2-戊烯醛(-M、-D)却在番茄辣椒油(Y5)中相对含量较高,这使得番茄辣椒油(Y5)和山茶辣椒油(Y6)亦能有效区分。

Zhuang等^[29]研究发现,植物油挥发性化合物的产生很大程度上受油中脂肪酸组成的影响,主要来源于亚麻酸氧化的(E,E)-2,4-庚二烯醛、2-戊烯醛是大豆油典型的挥发成分,而主要来自油酸氧化的壬醛、辛醛,以及与亚麻酸高度相关的2-己烯醛在橄榄油中具有较高的含量。Liu等^[30]在煎炸5h以上的大豆油中发现了较高浓度的(E,E)-2,4-庚二烯醛、(E)-2-庚烯醛,分别达到1343.60 μg/kg、2047.50 μg/kg,是煎大豆油的特征风味化合物。以上表明,植物油的脂质组成与挥发性物质密切相关,因此不同植物油对辣椒油风味具有一定影响,具体风味的形成机理还需进一步研究。

2.4.3 辣椒油各类VOCs含量统计

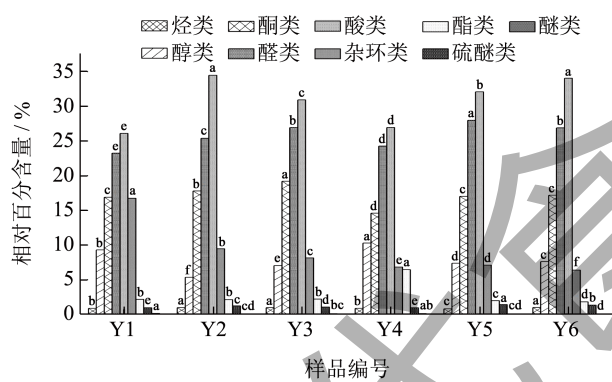


图4 辣椒油样品中各类VOCs相对百分含量

Fig.4 Relative content of VOCs in chili oil samples

为了清晰呈现辣椒油样品VOCs相对含量,6种辣椒油样品各类VOCs相对百分含量统计如图4所示。6种辣椒油样品的VOCs总量差异较大,由高到低顺序为:Y4>Y1>Y3>Y6>Y5>Y2,橄榄辣椒油(Y4)最高且与其余样品间存在显著性差异($P<0.05$),菜籽辣椒油(Y1)和玉米辣椒油(Y3)总量较为接近,玉米辣椒油(Y2)总量最低。各类VOCs中,相对百分含量较高的主要有酸类26.09%~34.46%、醛类23.24%~27.97%、酮类14.59%~19.18%、杂环类6.37%~16.73%、醇类5.35%~10.29%。

具有酸味的乙酸在6种辣椒油的VOCs中含量均较高,相对百分含量为19.65%~26.98%,有研

究表明,酸类物质主要来源于浸提过程中辣椒粉的释放,辣椒粉中丰富的乙酸可能来源于辣椒在干燥过程中辣椒果实的发酵^[15]。季德胜等^[13]从用大豆油在130℃下浸提干辣椒制备的辣椒油的VOCs中检测到乙酸的最高含量达19.69%,张洪新等^[14]研究发现,用菜籽油在220℃下浸提干辣椒制得的辣椒油的VOCs中乙酸相对含量为6.57%,这与杨慧等^[6]发现乙酸随着浸提温度升高而降低的趋势相吻合。酸味是辣椒油中的“异味”物质,降低“异味”物质的含量会使得辣椒油风味得到提升^[10]。醛类化合物主要来源于脂肪氧化,种类最多含量高且阈值低^[31],对辣椒油风味贡献大,可为辣椒油提供辛辣味、果香、花香等香气。3-甲基丁醛在6种辣椒油样品中含量均较高,达到4.65%~7.85%,据Counet等^[32]报道,该物质主要来源于异亮氨酸Strecker降解,可为辣椒油提供巧克力和奶酪味。另据Caporaso等^[15]报道,戊醛、庚醛等饱和醛以及2-烯醛类化合物主要来自于脂的自动氧化,特别是(E)-2-庚烯醛,源自亚油酸自动氧化。据有关研究表明^[30],醇是一类能贡献清香风味的化合物,主要来源于不饱和脂肪酸降解,尤其是戊醇,广泛存在于煎炸油中,在6种辣椒油样品的VOCs中,戊醇相对含量为0.50%~2.18%。另外,具有清香的(E)-3-己烯-1-醇在菜籽辣椒油(Y1)的VOCs中含量较高,相对含量为3.05%,具有酒香的乙醇在橄榄辣椒油(Y4)中含量高,达2.97%。酯类化合物在橄榄辣椒油(Y4)中含量最高,尤其是乙酸乙酯相对含量为2.82%,使得橄榄辣椒油(Y4)与其余5种辣椒油间存在显著性差异($P<0.05$),所以橄榄辣椒油(Y4)的酯香最浓。醇类和酸类化合物可通过酯化反应^[33]生成具有果香、清香的酯类化合物,是降低辣椒油中的“异味”物质含量和提升辣椒油的酯香气的途径之一。作为脂肪氧化的另一主要产物的酮类^[34]在辣椒油中含量也较高,相对含量为14.59%~19.18%,为辣椒油贡献了辛辣奶香气味。作为提供典型烤香风味的杂环类化合物,在菜籽辣椒油(Y1)中含量最高,总的相对含量达16.73%,尤其是具有坚果香的4-甲基噻唑贡献最大,相对含量为7.73%,使得菜籽辣椒油的烘烤香、坚果香气最浓。另有研究表明,2-戊基呋喃可赋予“焦糖味”^[35],其主要来源于亚油酸的氧化而非美拉德反应^[36,37],具有焦香香气的2-乙基呋喃可能来源于亚麻酸的氧化^[38]。

2.4.4 辣椒油样品VOCs的主成分分析 (PCA)

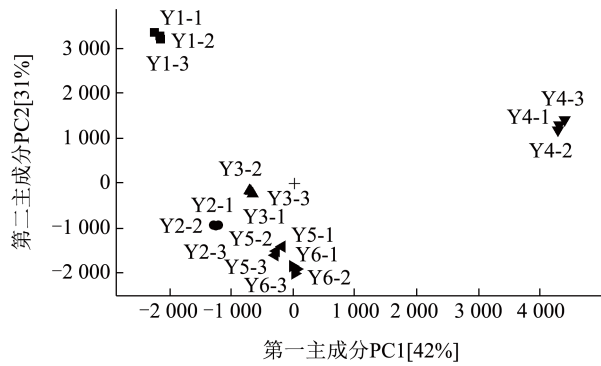


图 5 辣椒油样品的主成分分析

Fig.5 Principal component analysis of chili oil samples

利用 LAV 软件对 6 种辣椒油所有 VOCs 的含量进行主成分分析 (PCA), 结果如图 5 所示。第一主成分 PC1 (42%) 和第二主成分 PC2 (31%) 占方差的 73%, 能反映样品的总体特征^[39]。橄榄辣椒油 (Y4) 的 PC1 与其余 5 种辣椒油差异明显, 可根据 PC1 对 Y4 进行区分; 菜籽辣椒油 (Y1) 的 PC2 与其余 5 种辣椒油差异明显, 可根据 PC2 对 Y1 进行区分; Y4 和 Y1 的风味与其余 4 种辣椒油差异明显, 该结果与指纹图谱一致; Y2、Y3、Y5、Y6 的 PC1 和 PC2 均接近, 但仍能各自成组。因此, 根据 PCA 可对 6 种辣椒油进行准确区分。

2.4.5 辣椒油样品VOCs的正交偏最小二乘判别分析 (OPLS-DA)

偏最小二乘判别分析 (Partial Least Squares-Discrimination Analysis, PLS-DA) 是一种基于偏最小二乘回归算法的有监督的分析方法, 可实现复杂数据的可视化、判别分析和预测^[40], 然而, 该模型不能选择变量并忽略非信息变量^[41], OPLS-DA 是一种改进的 PLS-DA 方法, 它使用不同的预测变量和正交分量来解释组内和组间的差异^[42]。本实验以 6 组辣椒油样品的挥发性风味有机化合物的峰面积为 X 变量, 以辣椒油类别为 Y 变量, 利用 SIMCA 14.1 软件对辣椒油样品进行有监督的 OPLS-DA, 构建辣椒油所用不同食用植物油的溯源模型。在 OPLS-DA 中使用 7 倍交叉验证和 200 次随机重分类对辣椒油 VOCs 进行建模、因子载荷分析和变量重要性投影 (VIP) 计算, 结果如图 6 和图 7 所示。

由图 6a 可知, $R_x^2(\text{cum})=0.985$, $R_y^2(\text{cum})=0.994$, $Q^2(\text{cum})=0.979$, 说明建立的 OPLS-DA 模型能有效

解释 6 组辣椒油之间的差异, 且该模型具有较好的预测能力。由因子载荷图可知, 菜籽辣椒油 (Y1) 和橄榄辣椒油 (Y4) 差异明显, 玉米辣椒油 (Y2)、大豆辣椒油 (Y3)、番茄辣椒油 (Y5) 和山茶辣椒油 (Y6) 差异较小, 但各自成组, 其中, (E)-3-己烯-1-醇-M (B1)、(E)-3-己烯-1-醇-D (B2)、顺-4-庚烯醛 (C7)、丙酸异丁酯 (F4)、4-甲基-3-戊烯-2-酮 (D6)、2-己酮 (D7)、2-甲基-2-戊烯醛-M (C9)、4-甲基噻唑 (H14) 与 Y1 的相关性高, 对菜籽辣椒油的风味贡献较大。异丁酸乙酯 (F8)、(E)-2-己烯酸乙酯-D (F10)、乙酸乙酯 (F6)、(Z)-3-己烯醇 (B18)、2-戊酮 (D11)、丙酸乙酯 (F7)、(E)-2-己烯酸乙酯-M (F9)、乙酸甲酯 (F5)、(E)-2-己烯醛-D (C30)、(Z)-2-戊烯醛-D (C14)、1-己醇 (B16) 与 Y4 的相关性高, 橄榄辣椒油的风味也比较丰富。在其他样品中, 二乙缩醛 (C22) 与 Y2 相关性较高, 丙酸己酯 (F11) 与 Y3 相关性较高, 2-戊基咪喃 (H20) 与 Y5 相关性较高, 2-庚酮 (D15)、丁酸-D (E3)、丁酸-M (E2) 与 Y6 相关性较高。该结果与指纹图谱和 PCA 结果一致。

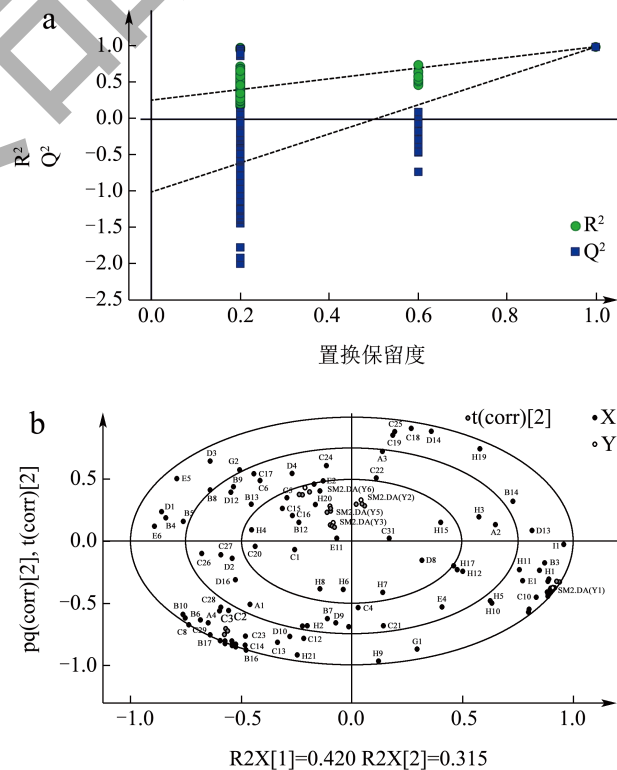


图 6 辣椒油样品 VOCs 的 OPLS-DA 置换图 (a) 和因子载荷图 (b)

Fig.6 Permutation test plots (a) and scores plot (b) of OPLS-DA based on the VOCs of chili oil samples

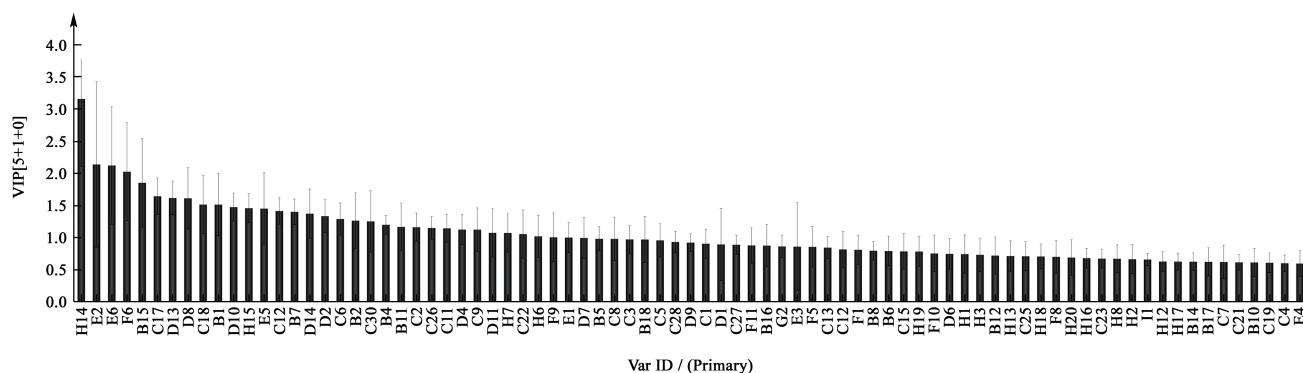


图7 辣椒油样品 VOCs 的 VIP 值
Fig.7 VIP scores of VOCs in chili oil samples

变量重要性投影 (VIP) 可用于筛选对 6 种辣椒油香气轮廓有重要影响的关键风味差异标志物^[39], 如图 7 所示, VIP > 1.2 的 VOCs 共有 19 种, VIP 值越大, 则该 VOC 对辣椒油分类的贡献度越大。对分类贡献最高的 10 种 VOCs 依次是 4- 甲基噻唑 (H14)、丁酸 -M (E2)、乙酸 -D (E6)、乙酸乙酯 (F6)、乙醇 (B15)、戊醛 (C17)、2- 丁酮 (D13)、2,3- 戊二酮 (D8)、3- 甲基丁醛 (C18)、(E)-3- 己烯 -1- 醇 -M (B1)。季德胜等^[13]在研究中也发现, 2,3- 戊二酮 (OAV=1 100)、乙酸 (OAV=226)、3- 甲基丁醛 (OAV=605) 香气活性值最高, 是辣椒油关键特征风味物质。

2.4.6 辣椒油样品 VOCs 的热图聚类分析

为了直观区分关键风味差异标志物在 6 种辣椒油中的变化, 根据筛选出的 19 种特征差异标志物 (VIP > 1.2) (同一种物质的单体和二聚体归为同一种物质) 的峰强度绘制聚类热图 (图 8)。菜籽辣椒油 (Y1) 和橄榄辣椒油 (Y4) 风味独特, 优先分组, 尤其是 4- 甲基噻唑 (H14)、(E)-3- 己烯 -1- 醇 -M (B1)、(E)-3- 己烯 -1- 醇 -D (B2)、2- 丁酮 (D13) 在菜籽辣椒油 (Y1) 中体积分数最高, 相对含量分别为 7.73%、1.79%、1.26%、2.16%, 因此菜籽辣椒油的风味最为突出。辛松林等^[43]研究表明, 菜籽油具有特殊的烘焙、坚果气味, 2- 丁酮在四川菜籽辣椒油中具有较高的浓度, 当浸提油脂变为菜籽油和大豆油按体积比 8:2 掺杂后, 能显著增大辣椒油中 2- 丁酮, 而本实验中, 2- 丁酮在菜籽辣椒油中浓度最高, 相对含量为 2.16%, 其次是在大豆油中, 相对含量为 1.86%, 这进一步说明 2- 丁酮是菜籽辣椒油和大豆辣椒油的典型风味物质。此外, (E)-2- 己烯醛 -D (C30)、乙酸乙酯 (F6)、乙醇 (B15)、1- 戊烯 -3- 酮 -D (D10) 在橄榄辣椒油 (Y4) 中浓

度最高, 相对含量分别为 0.49%、2.82%、2.97%、1.54%, 结合指纹图谱可以看出, 壬醛在橄榄辣椒油中的浓度也最高, 相对含量为 0.92%, 因此橄榄辣椒油 (Y4) 的风味也比较独特, 这与 Zhuang 等^[29]研究发现 2- 己烯醛、壬醛是橄榄油中高浓度的油酸氧化后的典型的风味物质的结论相吻合。玉米辣椒油 (Y2)、大豆辣椒油 (Y3)、番茄辣椒油 (Y5) 和山茶辣椒油 (Y6) 的风味虽没有菜籽辣椒油 (Y1) 和橄榄辣椒油 (Y4) 突出但又各具特色, 从图 8 来看, 亦能区分, 与 GC-IMS 指纹图谱、PCA、OPLS-DA 结果一致。

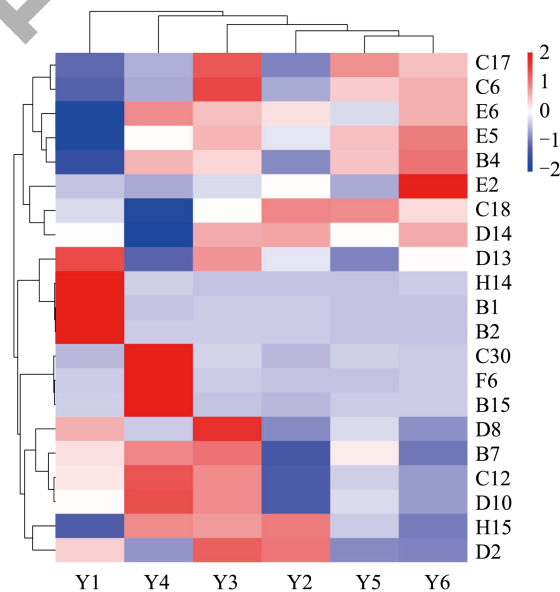


图 8 辣椒油样品标志差异风味物质的聚类热图

Fig.8 Heat map based on the key differential markers of chili oil samples

3 结论

采用 HPLC 和 GC-IMS 等检测技术, 对采用菜籽油、玉米油、大豆油、橄榄油、番茄籽油、山茶

油等6种植物油制备的辣椒油的理化性质和风味化合物进行对比分析。结果表明,6种辣椒油样品的辣度和过氧化值具有显著性差异($P < 0.05$),玉米辣椒油辣度最高(33.61度),菜籽辣椒油辣度最低(17.72度),二者均有较低的过氧化值;6种辣椒油样品色泽接近,菜籽辣椒油颜色最纯。通过GC-IMS共检测出88种VOCs,醛类最多,其次是杂环类,分别对应22、20种,GC-IMS指纹图谱表明各辣椒油样品之间的VOCs具有明显差异。通过OPLS-DA能将6种辣椒油之间的风味差异有效区分,与PCA、热图聚类分析结果一致。通过变量重要性投影共筛选出19种关键风味差异标志物(VIP > 1.2),其中4-甲基噻唑、丁酸-M、乙酸-D、乙酸乙酯、乙醇、戊醛、2-丁酮、2,3-戊二酮、3-甲基丁醛和(E)-3-己烯-1-醇-M对辣椒油风味贡献度最高。以上表明,植物油种类对辣椒油的辣度、色差、过氧化值、VOCs均有不同程度的影响,其中尤以菜籽辣椒油最为突出,呈现出辣度中等(17.72度)、颜色纯、香气最丰富且具有良好稳定性的特点。通过GC-IMS检测技术及多元统计分析方法,可以将6种辣椒油样品准确地地区分,可为风味多样化的辣椒油产品生产和鉴别提供一定理论依据。

参考文献

- [1] MENDES N D, GONCALVES E. The role of bioactive components found in peppers [J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 99: 229-243.
- [2] SINISGALLI C, VEZZA T, DIEZ-ECHAVE P, et al. The beneficial effects of red sun-dried *Capsicum annuum* L. Cv senise extract with antioxidant properties in experimental obesity are associated with modulation of the intestinal microbiota [J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2021, 65(3): 2000812.
- [3] IC E. Quantitative viscosity determination in irradiated major spices (black pepper, cardamom, cinnamon, ginger, and turmeric) by using a vibro viscometer for long-term storage [J]. Food Control, 2022, 133: 108679.
- [4] LUO X J, PENG J, LI Y J. Recent advances in the study on capsaicinoids and capsinoids [J]. European Journal of Pharmacology, 2011, 650(1): 1-7.
- [5] 罗鑫,牛素敏,董轶群,等.辣椒素缓解低温低湿条件下小鼠胃肠道炎症[J].现代食品科技,2023,39(1):1-10.
- [6] 杨慧,黄绿红,张帆,等.基于感官和气相色谱-离子迁移谱分析油温对辣椒油风味的影响[J].中国食品学报,2021, 21(9):328-335.
- [7] 李幼筠,周邈.善用麻辣的川味复合调味料[J].中国酿造, 2012,31(11):149-152.
- [8] KARPAS Z. Applications of ion mobility spectrometry (IMS) in the field of foodomics [J]. Food Research International, 2013, 54(1): 1146-1151.
- [9] NAZARETH J, PAN D, KIM J W, et al. Discriminatory ability of gas chromatography-ion mobility spectrometry to identify patients hospitalized with covid-19 and predict prognosis [J]. Open Forum Infectious Diseases, 2022, 9(11): ofac509.
- [10] GAO W, YANG X F, ZHU X M, et al. The variation of odor characteristics of wastewater sludge treated by advanced anaerobic digestion (aad) and the contribution pattern of key odorants [J]. Science of the Total Environment, 2022, 840: 156722.
- [11] WANG S Q, CHEN H T, SUN B G. Recent progress in food flavor analysis using gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) [J]. Food Chemistry, 2020, 315: 126158.
- [12] 尹敏.影响辣椒油品质的因素[J].中国调味品,2009,34(9): 93-95.
- [13] 季德胜,郑桂青,孙俊,等.顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用分析辣椒油中的风味物质[J].现代食品科技,2017, 33(6):276-284.
- [14] 张洪新,刘辉,陈光静,等.不同品种辣椒油制品的品质研究[J].食品与发酵工业,2019,45(5):190-198.
- [15] CAPORASO N, PADUANO A, NICOLETTI G, et al. Capsaicinoids, antioxidant activity, and volatile compounds in olive oil flavored with dried chili pepper (*Capsicum annuum*) [J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2013, 115(12): 1434-1442.
- [16] CECCHI L, BALLI D, URCIUOLI S, et al. Co-milling of sound olives with fresh chili peppers improves the volatile compound, capsaicinoid and sensory profiles of flavoured olive oil with respect to the typical infusion [J]. Food Chemistry, 2023, 404: 134696.
- [17] 杨芳,袁海彬,贾洪锋,等.基于气相色谱-离子迁移谱结合多元统计方法分析辣椒品种对辣椒油理化性质和风味物质的影响[J].食品与发酵工业,2023,49(19):319-328.
- [18] 陈通.基于GC-IMS技术的植物油品质分析方法研究[D].镇江:江苏大学,2020.
- [19] GB/T 21266-2007,辣椒及辣椒制品中辣椒素类物质测定及辣度表示方法[S].
- [20] GB 5009.227-2016,食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定[S].
- [21] KOBATA K, TODO T, YAZAWA S, et al. Novel capsaicinoid-like substances, capsiate and dihydrocapsiate, from the fruits of a nonpungent cultivar, ch-19 sweet, of pepper (*Capsicum annuum* L.) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1998, 46(5): 1695-1697.
- [22] 丁城,梁言,田敏,等.辣椒抽提物对缓解小鼠食源性肥胖

- 及调控基因表达的作用[J].现代食品科技,2017,33(5):1-6,13.
- [23] 杨兆甜,李方巍,王震昊,等.食品颜色评价及在食品工业中的应用[J].食品工业科技,2021,42(24):417-423.
- [24] SI W H, LIANG Y T, MA K Y, et al. Antioxidant activity of capsaicinoid in canola oil [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(24): 6230-6234.
- [25] CAVAZZA A, CORTI S, MANCINELLI C, et al. Effect of the addition of chili pepper powder on vegetable oils oxidative stability [J]. Journal of the American Oil Chemists Society, 2015, 92(11-12): 1593-1599.
- [26] BEN-HASSINE K, TAAMALLI A, FERCHICHI S, et al. Physicochemical and sensory characteristics of virgin olive oils in relation to cultivar, extraction system and storage conditions [J]. Food Research International, 2013, 54(2): 1915-1925.
- [27] LI M Q, YANG R W, ZHANG H, et al. Development of a flavor fingerprint by HS-GC-IMS with PCA for volatile compounds of tricholoma matsutake singer [J]. Food Chemistry, 2019, 290: 32-39.
- [28] YANG L Z, LIU J, WANG X Y, et al. Characterization of volatile component changes in jujube fruits during cold storage by using headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Molecules, 2019, 24(21): 3904.
- [29] ZHUANG Y, DONG J, HE X M, et al. Impact of heating temperature and fatty acid type on the formation of lipid oxidation products during thermal processing [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 913297.
- [30] LIU Y, LI J W, CHENG Y J, et al. Volatile components of deep-fried soybean oil as indicator indices of lipid oxidation and quality degradation [J]. European Food Research and Technology, 2020, 246(6): 1183-1192.
- [31] ADEBOWALE K O, LAWAL O S. Microstructure, physicochemical properties and retrogradation behaviour of mucuna bean (*Mucuna pruriens*) starch on heat moisture treatments [J]. Food Hydrocolloids, 2003, 17(3): 265-272.
- [32] COUNET C, CALLEMIEN D, OUWERX C, et al. Use of gas chromatography-olfactometry to identify key odorant compounds in dark chocolate. Comparison of samples before and after conching [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(8): 2385-2391.
- [33] CARMONA-ESCUZIA R P, PONCE-ALQUICIRA E, GARCIA-PARRA M D, et al. Changes in the sensory odor profile during *chorizo* maturation and their relationship with volatile compound patterns by partial least square regression (PLS) [J]. Foods, 2023, 12(5): 932.
- [34] 陈海涛,张宁,徐晓兰,等.SPME和SDE-GC-MS分析贾永信腊羊肉挥发性风味成分[J].食品科学,2013,34(14):187-191.
- [35] ZHANG C P, WANG Y T, DING D Y, et al. Volatile profiles of *Allium tenuissimum* L. flower fried by four different oils, using SPEM-GC-MS, and sensory evaluation coupled with partial least squares regression [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 109: 104461.
- [36] PARK M H, JEONG M K, YEO J, et al. Application of solid phase-microextraction (SPME) and electronic nose techniques to differentiate volatiles of sesame oils prepared with diverse roasting conditions [J]. Journal of Food Science, 2011, 76(1): C80-C88.
- [37] LEE J, KIRN D H, CHANG P S, et al. Headspace-solid phase microextraction (HS-SPME) analysis of oxidized volatiles from free fatty acids (FFA) and application for measuring hydrogen donating antioxidant activity [J]. Food Chemistry, 2007, 105(1): 414-420.
- [38] HU Q, ZHANG J K, HE L, et al. New insight into the evolution of volatile profiles in four vegetable oils with different saturations during thermal processing by integrated volatolomics and lipidomics analysis [J]. Food Chemistry, 2023, 403: 134342.
- [39] WU Z, CHEN L, WU L, et al. Classification of chinese honeys according to their floral origins using elemental and stable isotopic compositions [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(22): 5388-5394.
- [40] AZIZAN K A, BAHARUM S N, RESSOM H W, et al. GC-MS analysis and PLS-DA validation of the trimethyl silyl-derivatization techniques [J]. American Journal of Applied Sciences, 2012, 9(7): 1124-1136.
- [41] JIMENEZ-CARVELO A M, MARTIN-TORRES S, ORTEGA-GAVILAN F, et al. PLS-DA vs sparse PLS-DA in food traceability. A case study: Authentication of avocado samples [J]. Talanta, 2021, 224: 121904.
- [42] KANG C D, ZHANG Y Y, ZHANG M Y, et al. Screening of specific quantitative peptides of beef by LC-MS/MS coupled with OPLS-DA [J]. Food Chemistry, 2022, 387: 132932.
- [43] 辛松林,舒朝龙,冯飞,等.气相色谱-离子迁移质谱技术分析掺入不同比例大豆油的原香型菜籽油对四川糊辣椒油风味的影响[J].中国调味品,2021,46(3):70-75.