徐嘉成, 卢文静, 谌迪, 等. 基于 GC-MS 和 GC-IMS 分析不同配方五香调味油的挥发性物质差异 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(7): 304−315. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030296
XU Jiacheng, LU Wenjing, CHEN Di, et al. Analysis of VOCs Differences between Different Formulations of Five-spice Flavored Oils Based on GC-MS and GC-IMS[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(7): 304−315. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030296

· 分析检测 ·

基于 GC-MS 和 GC-IMS 分析不同配方五香调味油的挥发性物质差异

徐嘉成[1], 卢文静[2], 谌　迪[2], 张　岑[2], 陈　轩[2], 陈海涛[3], 陈光银[4], 刘兴泉[1,*], 肖朝耿[2,*]
（1.浙江农林大学食品与健康学院, 浙江杭州 311300;
2.浙江省农业科学院食品科学研究所, 浙江杭州 310021;
3.北京工商大学轻工科学技术学院, 北京市食品风味化学重点实验室, 北京 100048;
4.浙江顶味食品有限公司, 浙江温州 325200）

摘　要: 为探究不同配方五香调味油风味物质差异，本研究采用电子鼻、顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用以及气相-离子迁移谱相结合的方法分析 6 种不同配方五香调味油挥发性物质的差异。结果表明：在 6 种调味油样品中，电子鼻传感器对挥发性物质中的烷烃类、醇类、酮类、醛类物质响应较强，其中 PF6 的风味响应强度较大。顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用（Headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry，HS-SPME-GC-MS）共检测出 118 种挥发性有机化合物（Volatile organic compounds，VOCs），主要包含烯烃类、酯类、酮类、醇类、烷烃类、醛类、酸类、酚类、醚类以及杂环化合物等，其中以茴香料为主的配方 1 有 31 种，配方 3 有 33 种，配方 5 有 37 种，配方 6 有 46 种；以桂皮料为主的配方 2 有 47 种；以山奈料为主的配方 4 有 32 种。通过相对气味活度值（Relative odor activity value，ROAV）判定 6 种配方调味油的关键风味物质，共筛选出 14 种对调味油香气有较大贡献的化合物，其中以大茴香醛、草蒿脑、桉叶油醇为主，分别表现为茴香香气和樟脑香气。气相-离子迁移谱（Gas chromatography-ion mobility spectrometry，GC-IMS）共鉴定出 45 种挥发性物质，经主成分分析（Principal component analysis，PCA）和偏最小二乘回归分析（Partial least squares-discriminant analysis，PLS-DA）得出，配方间区分明显并且筛选出 19 种关键风味差异化合物，包括芳甲基苯甲醇、2-甲基-2-丙醇、乙酸己酯、氧化芳樟醇、1-辛醇、1-戊烯-3-酮等。本项研究有助于为复杂的风味体系研究提供基础，并为香辛料产品开发提供参考。

关键词: 五香调味油, 电子鼻, 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用（HS-SPME-GC-MS）, 气相-离子迁移谱（GC-IMS）, 风味物质
中图分类号: TS225　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)07−0304−12
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030296
本文网刊:

Analysis of VOCs Differences between Different Formulations of Five-spice Flavored Oils Based on GC-MS and GC-IMS

XU Jiacheng[1], LU Wenjing[2], CHEN Di[2], ZHANG Cen[2], CHEN Xuan[2], CHEN Haitao[3], CHEN Guangyin[4], LIU Xingquan[1,*], XIAO Chaogeng[2,*]
（1.College of Food and Health, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, China;
2.Food Science Institute, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China;
3.Beijing Key Laboratory of Flavor Chemistry, School of Light Industry, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China;
4.Zhejiang Dingwei Food Co., Ltd., Wenzhou 325200, China）

收稿日期: 2025−03−25
基金项目: 浙江省重点农业企业研究院项目“高品质营养健康型复合调味料加工关键技术研究及产业化”（2022C02064）。
作者简介: 徐嘉成（2000−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 1697365747@qq.com。
*** 通信作者:** 刘兴泉（1973−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: liuxq@zafu.edu.cn。
肖朝耿（1978−）, 男, 硕士, 研究员, 研究方向: 食品加工新技术, E-mail: xiaochaogeng@163.com

Abstract: In order to explore the differences in volatile organic compounds (VOCs) among six different formulations of five-spice seasoning oils, electronic nose, headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS), and gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) were used in this study. The electronic nose sensor had a strong response to alkanes, alcohols, ketones and aldehydes in VOCs, and PF6 had a strong flavor response. HS-SPME-GC-MS identified 118 VOCs in the six formulations, including olefins, esters, ketones, alcohols, alkanes, aldehydes, acids, phenols, ethers, and heterocyclic compounds. Anise-based PF1 had 31 VOCs, PF3 had 33, PF5 had 37, and PF6 had 46; Cinnamon-based PF2 had 47; Galangal-based PF4 had 32. Relative odor activity value (ROAV) analysis found 14 key VOCs, with anisaldehyde, artemisia ketone, and eucalyptol (responsible for anise and camphor-like aromas) being the major contributors. A total of 45 VOCs were identified by GC-IMS, through principal component analysis (PCA) and partial least squares discriminant analysis (PLS-DA), 19 key VOCs differentiating the formulations were found, such as phenethyl alcohol, 2-methyl-2-propanol, ethyl hexanoate, oxylinalool, 1-octanol, and 1-penten-3-one. This study is helpful to provide a basis for the study of complex flavor system, and provide a reference for the development of spice products.

Key words: five-spice seasoning oils; E-nose; headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS); gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS); flavor substances

调味油是一种通过将各种香料浸泡在油中制成的调味品，能够为食物增添丰富的风味和香气。通常，制作调味油时会选择中性味道的植物油，如大豆油、菜籽油或葵花籽油，以便更好地吸收和传递香料的风味，Tian 等[1] 在对制备的葱香油进行风味物质检测时发现，以菜籽油作为载体油脂制得的葱香油中挥发性物质种类数最多，倪瑞洁[2] 在制备花椒调味油时发现，与大豆油、花生油、葵花仁油相比，一级压榨菜籽油作为载体油脂制备的花椒调味油，色泽鲜亮且风味最为协调，且菜籽油是制作调味油最为常用的载体油脂。调味油为一种即食调味品，可直接淋在菜肴上，增添浓郁香气和风味。在烹饪过程中，其也可以作为基础油使用，用于煎炒、烤制或炖煮各种食材，从而提升菜肴整体的风味层次。此外，调味油还可以用作腌制液，将食材在烹饪前进行短时间腌制，使其在烹饪过程中更加入味。从健康角度上，通过调味油摄入的香料也能提供多种健康益处，如抗炎、抗菌和促进消化等[3]。五香是一种具有悠久历史和丰富风味的中式复合香辛料，广泛用于中国及其他东亚国家的烹饪中。五香粉的独特之处在于它融合了多种主要香料的香气和味道，形成了一个多层次、复杂的风味体系，其中花椒具有麻辣感和青香，能在口腔中产生独特的麻感，八角和桂皮提供了甜香和辛辣的口感，丁香则增添了强烈的香气和辛辣感，然而五香并不局限于固定的香料品类和数量，也可添加陈皮、山奈、砂仁等香料，不同的配方提供了不同的风味。将五香作为香料原料与油脂共同加工即可制得五香调味油。

五香调味油和花椒调味油都属于调味油的范畴，两者都具有相似的加工工艺和研究手段，而花椒调味油目前应用较为广泛。陈丽兰等[4] 采用气相色谱-质谱联用（Gas chromatography-mass spectrometry，GC-MS）等技术，鉴定出 14 种不同花椒油中芳樟醇、乙酸芳樟酯、苯乙酸甲酯、γ-松油烯、水芹烯等为关键风味物质。高夏洁等[5] 以不同产地的红花椒为对象分析不同产区花椒油的关键风味物质，分析得到关键香气物质为芳樟烯、桉叶油醇、月桂烯、柠檬烯等。刘玉兰等[6] 通过研究发现，商品花椒调味油与新鲜压榨花椒籽油相比，在反映花椒油特征的挥发性风味成分含量方面和感官评价方面均具有高度相似性和一致性。总体而言，目前对花椒调味油的风味特性研究较为成熟，但针对五香调味油的风味研究仍有欠缺，徐立荣等[7] 曾以电子鼻为检测手段，研究油料比值、浸提温度、浸提时间和保温时间等因素对五香调味油风味的影响，但未对具体风味成分进行深入研究。

本研究通过电子鼻、顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用（Headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry，HS-SPME-GC-MS）及气相-离子迁移谱（Gas chromatography-ion mobility spectrometry，GC-IMS）相结合的方式对 6 种配方五香调味油风味物质进行分析。通过电子鼻初步分析五香调味油风味差异，然后对气质联用检测到的挥发性物质进行层次聚类分析（Hierarchical cluster analysis，HCA）并结合相对气味活度值（Relative odor activity value，ROAV）筛选各配方的关键香气物质，最后进行 GC-IMS 检测定性调味油中的挥发性物质并运用偏最小二乘回归分析（Partial least squares-discriminant analysis，PLS-DA）确定对风味轮廓有重要影响的关键风味差异化合物。本研究旨在深入探究复合香辛料调味油的具体风味成分及来源，为复杂的风味体系研究提供基础。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

本实验所用低芥酸菜籽油　山东鲁花集团有限公司出品，置于常温避光处储存；常用香辛料八角、白胡椒、陈皮、丁香、豆蔻、甘草、干姜、桂皮、花椒、砂仁、山奈、五加皮、小茴香等　购于菜佳宜公司，置于低温干燥处储存。

C-Nose 电子鼻　上海保圣实业发展有限公司；

5191-5874 顶空固相微萃取纤维(DVB/C-WR/PDMS/10)、6890N-G5795B GC-MS 联用仪、DB-WAX(30 m×0.25 mm, 0.25 μm)毛细管色谱柱 美国 Agilent 公司; FlavourSpec®GC-IMS 联用仪、MXT-5 非极性色谱柱 德国 G.A.S 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 不同配方五香调味油的制备 香辛料的配方参考高延等[8]的方法及根据地域口味不同稍作修改,以丁香 10 g, 甘草 30 g, 桂皮 10 g, 花椒 10 g, 小茴香 40 g 为 PF1; 八角 20 g, 陈皮 6 g, 干姜 5 g, 桂皮 43 g, 花椒 18 g, 小茴香 8 g 为 PF2; 八角 10 g, 丁香 5 g, 甘草 30 g, 桂皮 10 g, 五加皮 10 g, 小茴香 35 g 为 PF3; 丁香 22 g, 豆蔻 11 g, 桂皮 12 g, 砂仁 11 g, 山奈 44 g 为 PF4; 八角 55 g, 白胡椒 3 g, 甘草 5 g, 干姜 15 g, 桂皮 8 g, 砂仁 4 g, 山奈 10 g 为 PF5; 八角 30 g, 桂皮 15 g, 花椒 30 g, 五加皮 10 g, 小茴香 15 g 为 PF6 形成 6 种不同的复合香辛料配方,经过干燥后打粉,直至可过 40 目筛后备用。调味油制备参照 Sun 等[9]的方法稍作修改,每个配方取 30 g 香辛料,加入 150 g 菜籽油在 130 ℃ 下进行加热浸提,保温 10 min 后取出过滤,冷却至室温后以 4000 r/min 条件离心并在 4 ℃ 下储存待测。

1.2.2 电子鼻(E-Nose)检测 使用电子鼻对 6 种五香调味油风味特征进行分析,电子鼻系统配备 18 个传感器,每个传感器响应不同的挥发性物质成分,具体如表 1 所示。将 10 mL 调味油样品放置到 40 mL 顶空样品瓶中,密封后静置 60 min,用空气作为载气对传感器阵列进行清洗,使信号响应归零。每组准备三个样品进行三次平行实验,取 59~60 s 的数据的平均值作进一步分析。

表 1 传感器对应响应物质名称

Table 1 Sensor corresponding response substance name

传感器名称	主要响应物质
S1	丙烷、烟雾等
S2	含碳类物质
S3	氢气
S4	硫化物
S5	含氮类物质
S6	醛酮类
S7	短链烷烃类、可燃性气体等
S8	液化气
S9	烷烃,醇类、酮类等
S10	氢气、含氢气体类
S11	烷烃,一氧化碳等
S12	液化气,甲烷类
S13	短链烷烃类
S14	甲烷,燃气,烟雾等
S15	含碳类物质、醇类、醛类等
S16	硫化氢
S17	氨气,胺类等
S18	甲苯、丙酮、乙醇等

1.2.3 顶空固相微萃取-气质联用(HS-SPME-GC-MS)检测 参照 Ni 等[10]的方法稍作修改,将 6 种调味油样品各取 2 mL 于 20 mL 顶空样品瓶中,用聚四氟乙烯瓶盖封隔,避光保存。预先将涂有 DVB/C-WR/PDMS/10 的萃取纤维头插入 GC-MS 进样口(250 ℃)进行老化。在 80 ℃ 的恒温水浴中振荡样品,样品平衡时间为 15 min,萃取时间为 30 min。然后将萃取后的纤维头取出后立即插入 GC-MS 进样口中,于 250 ℃ 解吸 5 min。采用 DB-WAX 色谱柱(均为 30 m×0.25 mm, 0.25 μm)分离挥发性化合物,进样口温度 250 ℃; 进样方式为 1∶1 分流模式; 载气为氦气(99.99%); 流速 1.5 mL/min; 升温程序: 初温 60 ℃, 以 5 ℃/min 升温至 70 ℃, 保持 10 min, 以 3 ℃/min 升温至 95 ℃, 保持 7 min, 以 3 ℃/min 升温至 120 ℃, 保持 6 min, 再以 3 ℃/min 升温至 140 ℃, 保持 6 min, 最后以 10 ℃/min 升温至 210 ℃, 保持 3 min。质谱条件: 电子电离(EI)模式; 电子能量 70 eV; 离子源温度 230 ℃; 传输线温度 250 ℃; 质量扫描范围 m/z 30~450; 溶剂延迟 1 min。通过比对质谱图,利用 NIST 17 标准谱库检索,根据匹配保留时间和质谱碎片以实现化合物的鉴定,并采用峰面积归一化法计算各挥发性成分的相对百分含量。

通过计算 ROAV,确定香气物质对样品风味的贡献。

$$ROAV_A = (C_A/T_A)\times(T_{stan}/C_{stan})\times 100$$

式中: C_A 表示化合物 A 的相对百分含量; T_A 表示化合物 A 的香气阈值; T_{stan} 及 C_{stan} 分别是对样品风味贡献最大的化合物的香气阈值和相对百分含量。

1.2.4 气相-离子迁移谱(GC-IMS)检测 参照 Zheng 等[11]的方法稍作修改,顶空进样条件: 准确称取 1.5 g 五香调味油,装入 20 mL 顶空进样瓶中密封。70 ℃ 条件下孵育 20 min, 孵化转速 500 r/min; 进样针温度 85 ℃; 进样体积 500 μL。

GC 条件: MXT-5 非极性色谱柱(15 m×0.53 mm, 1 μm); 柱温 60 ℃; 分析时间 30 min; 载气: N_2(纯度≥99.999%); 载气流速: 0~2 min, 2 mL/min; 2~10 min, 2~10 mL/min; 10~20 min, 10~100 mL/min; 20~30 min, 100~150 mL/min。

IMS 条件: 漂移管长度 5 cm; 管内线性电压 400 V/cm; 漂移气: N_2(纯度≥99.999%); 流速 150 mL/min; IMS 温度 45 ℃。每组准备三个样品进行三次平行实验。

数据分析: 基于 NIST2020 RI DB-5 数据库,对样本的挥发性有机物进行定性分析。

1.3 数据处理

柱形图、雷达图采用 Origin 2021 软件绘图。PCA 采用基迪奥生物信息云平台绘图。采用 Tbtools v2.21 绘图进行挥发性风味物质的层次聚类分析。GC-IMS 指纹图谱和挥发性化合物定性通过

内置的 Gallery Plot 插件和 GC×IMS Library Search 实现。采用 SIMCA 14.0 软件进行 PLS-DA 分析和绘图。

2　结果与分析

2.1　电子鼻对五香调味油的风味分析

使用 PCA 可直观地根据不同调味油样品之间的距离来判断样品之间的相似性或差异性，结果如图 1 所示，前两个主成分 PC1 和 PC2 对总方差的贡献率分别为 75.4% 和 15.5%，累积贡献率达到 90.9%，表明主成分分析能反映出不同配方五香调味油的原始风味信息。不同配方香辛料调味油样品的空间分布不同，PF4 和 PF5 的调味油分布在 PC1 的负侧，PF1 的调味油分布在 PC2 的正侧，PF2 与 PF3 则在原点周围，这 3 类样品之间距离相近，表明样品间差异较小；配方 6 位于 PC1 的正侧，距离其他样品较远，说明与其他样品风味有明显差异。

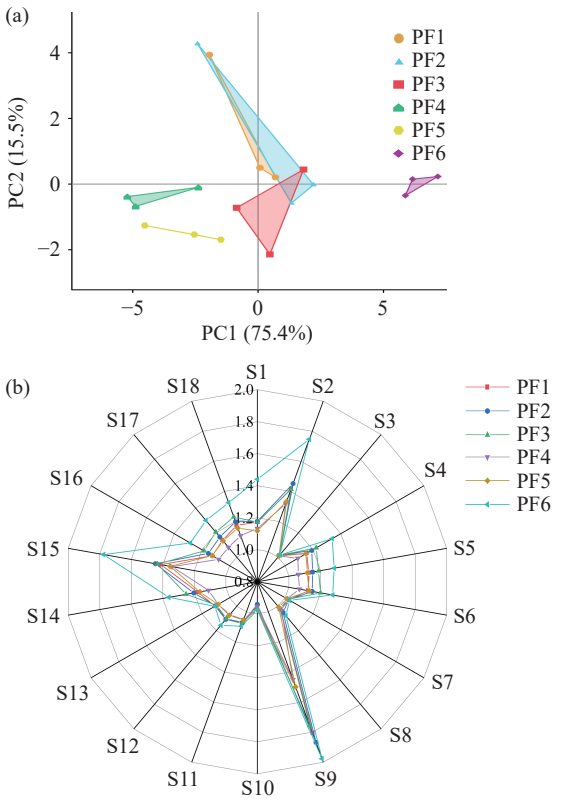


图 1　调味油的电子鼻风味主成分分析(a)与雷达响应图(b)

Fig.1　Principal component analysis (a) and radar response map (b) of electronic nose flavor in seasoning oil

根据 18 个传感器对样品的平均响应值建立传感器信号雷达强度图，以便比较 6 种配方五香调味油样品的风味轮廓。不同传感器对应不同的响应物质，结果如图 1 所示，在传感器 2、9、15 上对五香调味油的风味轮廓感知更敏感，说明调味油风味物质中含有较多的烷烃类、醇类、酮类、醛类物质，各配方在传感器 13 上的响应值较小，说明调味油中含有较少的短链烷烃。从整体响应程度看，不同配方调味油的香气轮廓大体一致，PF6 的风味响应强度较大，PF4 的风味响应强度较小。电子鼻的检测可以在一些传感器上较好地区分样品，但要表征代表调味油香气的具体物质则需要进一步检测分析。

2.2　HS-SPME-GC-MS 对五香调味油风味成分的分析

2.2.1　调味油样品风味物质种类及含量比较　采用 HS-SPME-GC-MS 对 6 种配方调味油的 VOCs 进行检测分析，共检测出 118 种 VOCs，包括烯烃类 25 种，酯类 19 种，酮类 16 种，醇类 13 种，烷烃类 9 种，醛类 8 种，酸类 7 种，吡啶类 4 种，酚类 4 种，醚类 3 种，吡嗪类 3 种，其他 7 种。如图 2 所示，6 种配方五香调味油的 VOCs 种类和含量存在较大差别，这与配方中添加不同的香辛料和不同的配比有直接关系。从化合物数量上看，调味油 PF2 的 VOCs 数量最为丰富，多达 47 种，其次是调味油 PF6，为 46 种，最少的是 PF1，仅为 31 种，这可能与所添加的香辛料风味本身寡淡有关。6 种配方调味油的 VOCs 组成种类大致相同，以醚类、醛类、烯烃类和酯类为主，这与电子鼻的检测结果相似。从化合物相对含量上看，其中醚类化合物在调味油配方 1、3、6 中占比最高，分别为 43.25%、43.85%、46.38%，烯烃类化合物在调味油配方 2、5 中占比最高，分别为 31.42%、54.94%，这与添加香辛料导致香辛料中风味物质进入油脂有较大关联，香辛料的 VOCs 主要以醚类、烯烃类为主。一些含氮化合物如吡嗪类化合物是由糖类和蛋白质通过美拉德反应产生[12]，碳水化合物、蛋白质和脂肪间通过糖类热降解产生呋喃类物质，这在制备葱油中也有报道[13]。

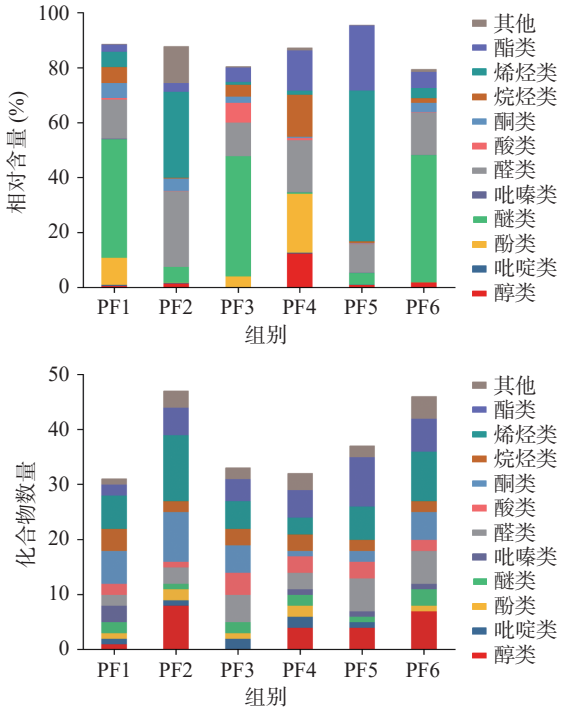


图 2　不同配方五香调味油风味物质组成

Fig.2　Composition of flavor compounds in different formulations of five spice seasoning oils

通过 Upset 图可看出各配方的共有物质和特有物质，如图 3 所示，橙色柱状表示调味油 VOCs 的总

数量，黑色的圆点表示含有的 VOCs，点和点之间的连线表示共有的 VOCs，绿色柱状则分别表示共有挥发性成分的数量，当仅有一个点无连线时，说明这是该配方的特有物质。从图中可看出，6 种调味油所含 VOCs 共性物质较低，其中 PF2 所含特有化合物有 14 种，PF2 与 PF6 共有物质最多，为 8 种，6 种配方共有化合物为 2 种，分别为顺式肉桂醛和乙酸。

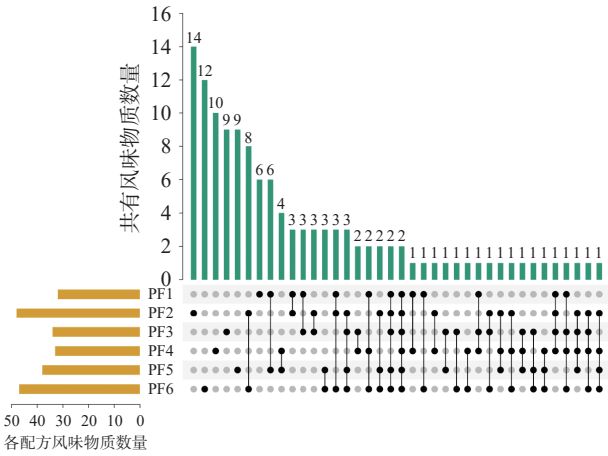


图 3　不同配方五香调味油 Upset 图

Fig.3　Upset diagram of five spice seasoning oils with different formulas

2.2.2　五香调味油风味物质的层次聚类热图分析

采用层次聚类分析 6 种配方五香调味油的 VOCs 变量并绘制热图。如图 4 所示，6 种配方五香调味油含有的 VOCs 聚集为不同的类别，其中 PF2、PF6 为一类，其他配方为一类。此外，检出的 VOCs 中醛类、烯烃类、醇类物质含量相对较高，主要是因为香辛料在高温加热时大量的香味物质溶入油脂中，如顺式肉桂醛、草蒿脑、茴香醚、茴香烯等由香辛料提供的 VOCs，这些物质是香辛料含有的典型挥发性物质，在纯菜籽油热处理样品中未检测到[2]。此外，在检出物质中也发现一些环状化合物的存在，这可能是由于油脂在高温下发生了非氧化热聚合反应和氧化热聚合反应生成环状化合物[14]。

从香辛料配方与检出的 VOCs 对应关系看：水芹烯在 PF1、PF2、PF6 中被检出，而其他配方中未检出，这可能与这三种配方中添加了花椒有关，一些萜类化合物如水芹烯已被确定为花椒油中的特征香气物质[9]，其具有胡椒风味[5]；γ-松油烯在 PF2 中被检出，而其他配方不含，这可能与其配方中添加了陈皮有关，陈霖虹等[15] 在陈皮精油中检测出含量最高的萜烯类物质为 γ-松油烯，其具有油香、木香风味；PF4 未检出草蒿脑，而其他配方都含有该物质，因此，推测草蒿脑是茴香类香料的特有 VOCs，蒲丹丹等[16] 在分析小茴香香气活性成分中检测到大量 4-烯丙基苯甲醚（草蒿脑），八角中也有测得，这与上述结果一致。PF1 与 PF4 未添加八角（又称大茴香），且两种配方均未检测到大茴香醛，说明大茴香醛是八角特有的 VOCs，可与添加了小茴香的调味油进行明显区分。由于五香风味的调味料中桂皮是重要的一味香料，因此在制作调味油中，所有配方都添加了桂皮，顺式肉桂醛在所有配方中均有检测到，其风味描述为具有肉桂香，且相对含量与添加比例相关，其中 PF2 的桂皮添加量最高，所检测到的顺式肉桂醛相对含量也

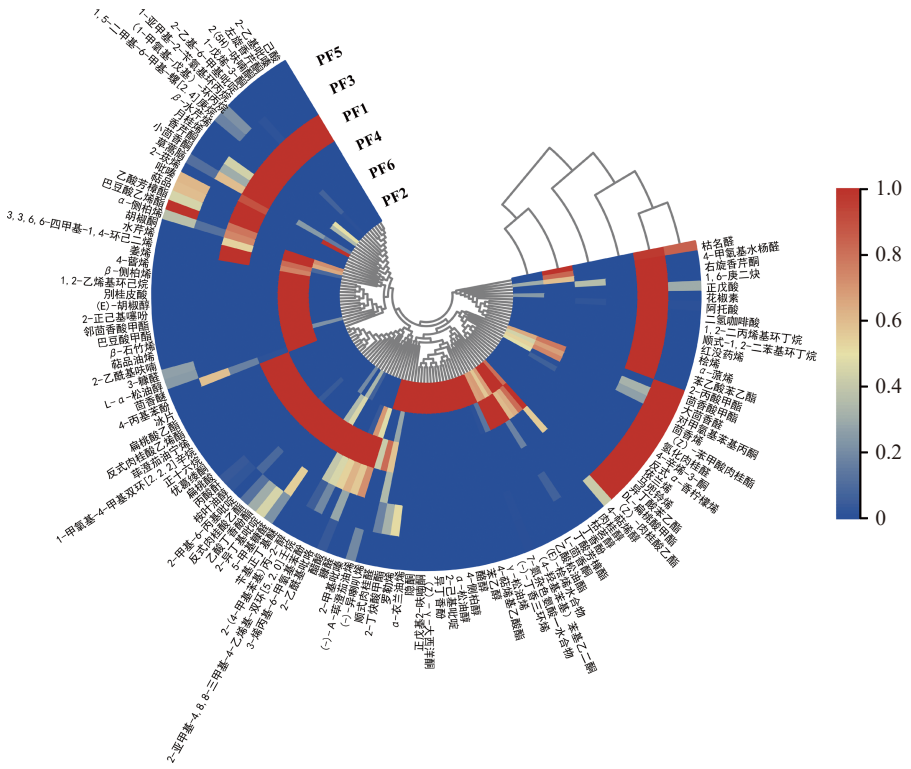


图 4　不同配方五香调味油风味物质热图

Fig.4　Heat map of flavor compounds in different formulas of five spice seasoning oil

最高，醛类是桂皮中主要的 VOCs 类别[17]，其中又以反式肉桂醛为主，由于在高温下易发生异构化，反式肉桂醛转化为顺式结构，两者香气极为相似。一些 VOCs 如小茴香酮，其在调味油中的检出与是否添加小茴香密切相关，然而，在部分配方（PF2 和 PF6）中，尽管添加了小茴香，却未检测到小茴香酮。原因可能是：一方面，小茴香本身所含的小茴香酮相对较少；另一方面，在制作过程中，热处理使得小茴香酮的挥发性增强，从而只有少量的小茴香酮能够保留在调味油中。因此，若想增加小茴香酮在调味油中的保留量，可以考虑适当提高小茴香的添加量。

从检出主要 VOCs 的特性看：从醇类看，PF4 检测出桉叶油醇，含量达到 10.80%，桉叶油醇具有樟脑气息。除 PF1 与 PF3 外，都检出了 4-萜烯醇，其具有木香与辛香[18]，此外，α-松油醇与 L-α-松油醇分别在 PF2、PF5、PF6 中被检出，两者同样提供了薄荷香气[19]，肉桂醇在 PF2 与 PF6 中检测到，尽管相对含量较低（小于 1%），但由于其气味阈值较低，因此对整体风味贡献较大，呈现出香脂和花香的味道[20]。醛类是脂质的衍生物，一般阈值较低，具有脂肪香味[21]，顺式肉桂醛是 6 种配方调味油的共有物质，枯茗醛在 PF3、PF5、PF6 中被检出，枯茗醛天然存在于丁香、茴香与肉桂中，具有辛辣味、小茴香味[2]，此外，5-甲基糠醛在除 PF1、PF6 外的配方中均被检测到，具有甜香、辛香以及咖啡、焦糖的感官特征[22]。酸类物质的总体比例较低，对风味贡献不大。酮类物质主要来源于脂肪氧化和美拉德反应，在调味油中含量不高，且阈值较高，呈现的香气不够鲜明强烈，主要对其他风味起辅助作用，可与调味油中其他风味物质（如醇类、酯类）结合使整体风味更加有层次感且变得饱满[23]，其中香芹酮在 PF1 与 PF3 中存在，具有清香和薄荷香[20]。烯烃类物质主要来源于香辛料中，具有较高的气味阈值，对调味油风味起辅助、修饰作用。从各配方调味油整体看，烯烃类种类多但共有成分较少且百分含量普遍偏低，可能与配方本身共性低和烯烃类物质本身存在于香辛料的含量较低有关，但由于茴香在配方中添加较多，因此茴香烯例外。α-蒎烯主要呈清香气味[24]，主要存在于广西桂皮中，其他品类香辛料中也有存在，月桂烯具有清淡的脂香、果香香气[20]，在桂皮、肉豆蔻等香辛料均含有。酯类物质中的反式肉桂酸乙酯、乙酸芳樟酯具有果香和花香的特征，它们对总体气味有协同效应，但乙酸芳樟酯对感官的影响更大[25−26]。其他物质如 2-甲基吡嗪、2-乙基吡嗪、2-乙酰基吡咯等具有坚果香或烘烤香，吡嗪类化合物产生原因与油料的加热处理有关，高油温导致发生美拉德反应，碳水化合物降解生成吡嗪的碳链，氨基酸提供了其中的氮原子[27]，2-乙酰基吡咯则是美拉德反应中脯氨酸与单糖反应的产物[28]，但这三种物质并不都存在于各个配方。

2.2.3　五香调味油风味物质的 ROAV 分析　简单观察相对含量无法判断各个香气成分对整体风味的贡献，许多 VOCs 本身并不具有香气，或者具有香气的 VOCs 虽然含量较高，但其气味阈值较高，因此其相对气味活度值较低，对样品整体呈香不能产生明显影响，有些 VOCs 虽然含量较低，但其气味阈值非常低，相对气味活度值较高，对样品整体香气贡献较大。将 GC-MS 获得的气味变量利用 ROAV 方法处理，可以快速判别香气成分对整体风味的贡献，进而筛选出关键风味化合物[29]。通常香气组分 ROAV≥1，被认为其对样品香气有很大贡献，0.1≤ROAV<1 的组分对样品总体风味具有重要修饰作用，ROAV<0.1 的组分对样品香气几乎没有影响。

调味油中的风味物质 ROAV 如表 2 所示。已知风味阈值的香气化合物中筛选出 14 种 ROAV≥1 的关键香气化合物，按 ROAV 值的大小排序，在 PF1 中：草蒿脑>月桂烯>顺式肉桂醛>茴香醚>β-水

表 2　调味油中 VOCs 的相对气味活度值

Table 2　ROAVs of volatile compounds in flavored oils

序号	CAS号	名称	风味阈值[5, 30]	PF1	PF2	PF3	PF4	PF5	PF6	香气特征
1	470-82-6	桉叶油醇	0.0046	−	−	−	681.4400	1.6781	15.2317	樟脑香
2	97-53-0	丁香酚	0.0060	−	2.8103	−	−	−	1.2776	丁香香气
3	123-11-5	大茴香醛	0.0001	−	2301.7329	223.8011	−	715.2919	2643.1761	八角、杏仁味
4	57194-69-1	顺式肉桂醛	0.0500	4.5787	100.0000	5.9276	100.0000	4.2337	39.6108	肉桂香
5	109-52-4	正戊酸	0.0016	−	−	1.0575	−	0.3271	−	果香
6	2244-16-8	右旋香芹酮	0.0230	−	1.2754	0.5640	−	−	1.8789	葛缕子味
7	99-83-2	水芹烯	0.0400	0.6675	0.7618	−	−	−	5.1591	胡椒味
8	4180-23-8	茴香烯	0.0150	−	353.5148	−	−	100.0000	2.8108	茴香香气
9	123-35-3	月桂烯	0.0012	4.9855	21.8390	−	−	−	−	脂香、辛辣味
10	3856-25-5	α-蒎烯	0.0140	−	−	1.0150	−	−	−	松脂味
11	555-10-2	β-水芹烯	0.0360	1.0949	6.8677	−	−	−	−	柑橘香气
12	4192-77-2	反式肉桂酸乙酯	0.1650	−	−	−	2.2059	0.0285	−	甜香、脂香
13	104-46-1	茴香醚	0.0570	1.8423	−	10.4937	2.2515	−	100.0000	茴香香气
14	140-67-0	草蒿脑	0.0060	100.0000	191.7772	100.0000	−	20.0821	234.2676	大茴香香气

注：表中“−”表示未检出物质，香气特征来源于文献[2,5]以及https://www.vcf-online.nl的风味描述。

芹烯，共 5 种，草蒿脑呈现的大茴香香气是 PF1 的主要香气类型；在 PF2 中：大茴香醛>茴香烯>草蒿脑>顺式肉桂醛>月桂烯>β-水芹烯>丁香酚>右旋香芹酮，共 8 种，其中大茴香醛的 ROAV 值远高于其他物质，可认为大茴香醛的八角、杏仁味是 PF2 的主要香气类型；在 PF3 中：大茴香醛>草蒿脑>茴香醚>顺式肉桂醛>正戊酸>α-蒎烯，共 6 种，八角、杏仁味是该配方的主要香气；在 PF4 中：桉叶油醇>顺式肉桂醛>茴香醚>反式肉桂酸乙酯，共 4 种，其中桉叶油醇的 ROAV 值最高，主要在该配方中呈现樟脑味；在 PF5 中：大茴香醛>茴香烯>草蒿脑>顺式肉桂醛>桉叶油醇，共 5 种，大茴香醛所具有的八角、杏仁味是该配方的主要气味；在 PF6 中：大茴香醛>草蒿脑>茴香醚>顺式肉桂醛>桉叶油醇>水芹烯>茴香烯>右旋香芹酮>丁香酚，共 9 种，该配方主要气味为八角、杏仁味。由此可见，除 PF4 表现为樟脑味，其余配方均表现为八角（茴香）的风味，原因是大茴香醛和草蒿脑的风味阈值低，而且相对含量高，导致 ROAV 值显著偏高，二者表现出的香气类型成为调味油的主导风味。由于杂环化合物 2-甲基吡嗪、2-乙酰基吡咯的风味阈值较高，相对含量低，因此该物质对调味油的整体风味没有影响。

2.3　GC-IMS 对五香调味油风味成分的分析

2.3.1　VOCs 指纹图谱分析　GC-IMS 作为一种非靶向分析方法，根据保留时间和漂移时间识别 VOCs[31]，并具有快速检测、结果直观的特点。GC-IMS 获得的谱图如图 5 所示，其中水平坐标表示迁移时间，垂直坐标表示保留时间，红色垂直线表示归

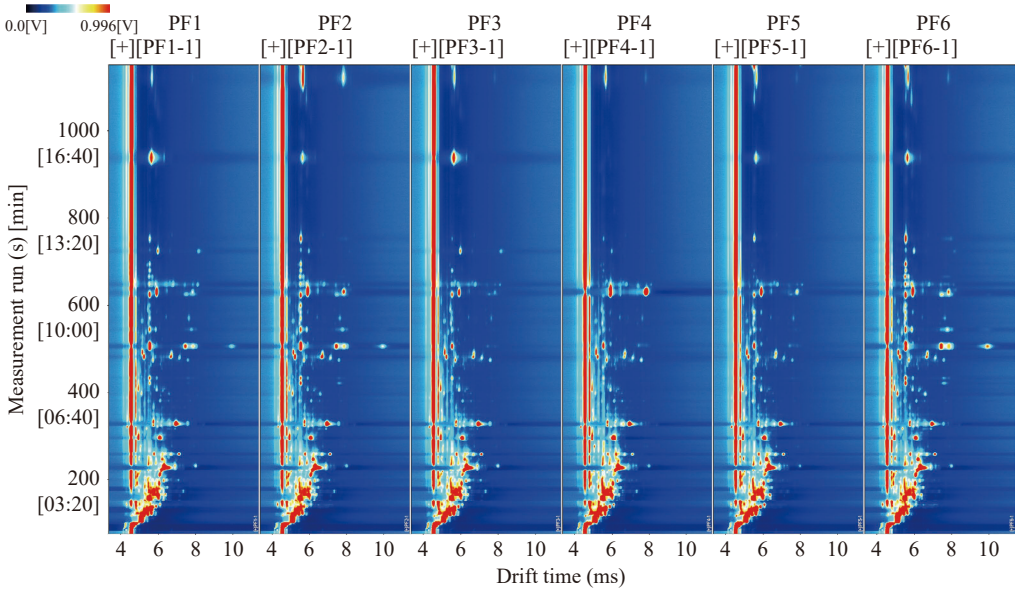


图 5　不同配方五香调味油 VOCs 的 GC-IMS 二维谱图

Fig.5　GC-IMS two-dimensional spectra of volatile compounds in different formulations of five spice seasoning oils

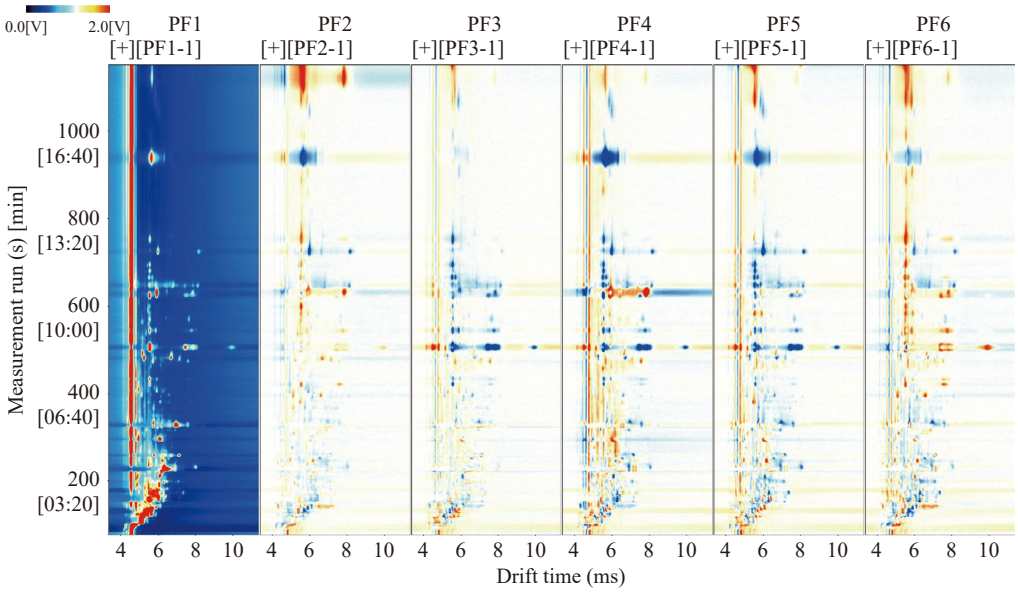


图 6　不同配方五香调味油 VOCs 的 GC-IMS 差异谱图

Fig.6　GC-IMS differential spectra of volatile compounds in different formulations of five spice seasoning oils

一化反应离子峰(RIP)，RIP 峰两侧的点代表 VOCs，颜色变化代表挥发性成分浓度高低，较低浓度以蓝色显示，较高浓度以红色显示，由图可知，大部分 VOCs 在迁移时间为 4.0~8.0 ms 和保留时间 200~800 s 的范围内。以其中一个样品为对照可生成差异谱图，颜色加深则为 VOCs 浓度相对较高，反之则相对较低，在图 6 中可见 PF6 的 VOCs 点的颜色发生了明显的加深，说明其 VOCs 浓度较其他样品升高。在二维图谱上对 VOCs 点进行具体物质的定性，利用设备自带软件的内置插件生成气味指纹图谱，如图 7 所示，以便观察不同组间风味化合物的差异。每行代表样品中选择的所有信号峰，每列对应不同样品中同一 VOCs 的信号峰。不同的颜色表示不同的浓度，白点表示较低的含量，红点表示较高的含量[32]。通过定性，得到 45 种化合物，其中一种含有二聚体(2-甲氧基-4-乙烯基苯酚)，二聚体是具有相近的保留时间和不同的迁移时间的化合物的另一种形式，具体化合物如表 3 所示。

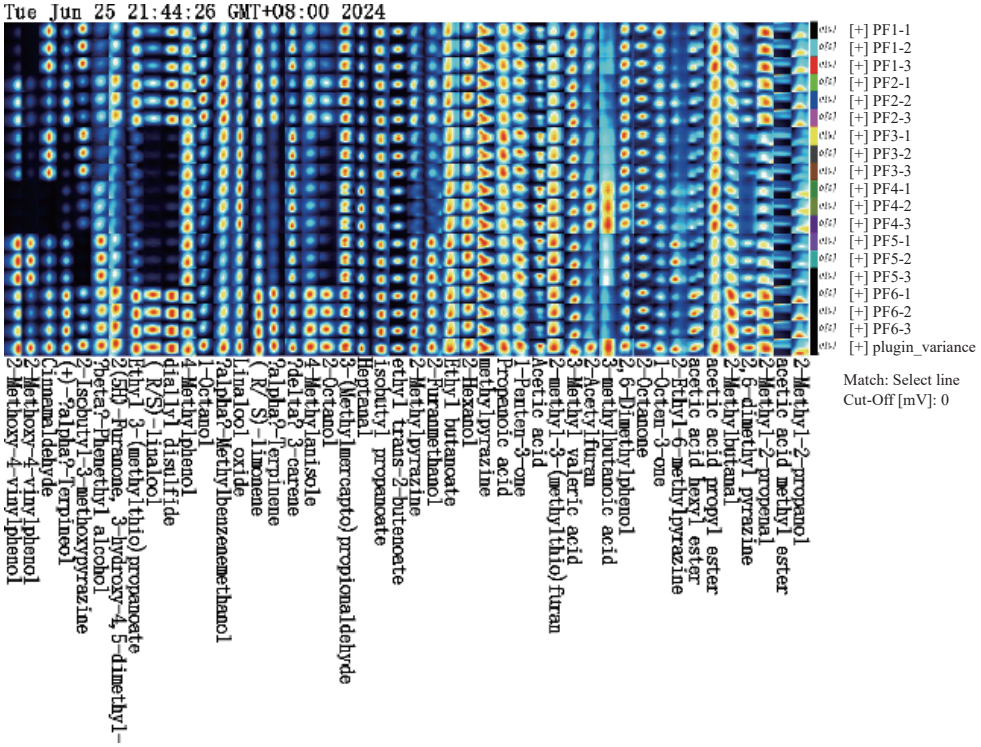


图 7　不同配方五香调味油 VOCs 的 GC-IMS 指纹图谱

Fig.7　GC-IMS fingerprint spectra of volatile compounds in different formulations of five spice seasoning oils

表 3　GC-IMS 定性五香调味油的 VOCs

Table 3　Qualitative analysis of volatile compounds in five spice seasoning oil by GC-IMS

序号	挥发物种类	中文名称	分子质量	保留指数	保留时间(s)	迁移时间(ms)
1	酯类	3-甲硫基丙酸乙酯	148.2	1096.4	545.349	1.21338
2		丙酸异丁酯	130.2	853.8	260.316	1.27095
3		反式-2-丁烯酸乙酯	114.1	850.5	258.293	1.55711
4		丁酸乙酯	116.2	815.7	237.727	1.20491
5		乙酸己酯	144.2	1009.3	405.901	1.37206
6		乙酸丙酯	102.1	714.4	184.366	1.15843
7		乙酸甲酯	74.1	516.7	122.223	1.19639
8	烯烃类	柠檬烯	136.2	1028.8	433.528	1.21431
9		α-萜品烯	136.2	1020.5	421.508	1.21431
10		3-蒈烯	136.2	1011.4	408.675	1.29873
11	酮类	2-辛酮	128.2	991	382.323	1.33984
12		1-辛烯-3-酮	126.2	977.7	367.529	1.26095
13		1-戊烯-3-酮	84.1	669.1	165.918	1.31312
14		3-羟基-4,5-二甲基-2(5H)-呋喃酮	128.1	1109.4	569.982	1.21434
15	酸类	3-甲基戊酸	116.2	945.7	334.242	1.26206
16		3-甲基丁酸	102.1	888.8	282.989	1.22051
17		丙酸	74.1	691.2	173.717	1.26331
18		乙酸	60.1	589.1	141.329	1.05457

续表 3

序号	挥发物种类	中文名称	分子质量	保留指数	保留时间(s)	迁移时间(ms)
19	醛类	肉桂醛	132.2	1255.9	936.646	1.23498
20		3-甲硫基丙醛	104.2	905.9	297.128	1.08127
21		庚醛	114.2	905.5	296.728	1.33106
22		2-甲基丁醛	86.1	676.3	168.36	1.1615
23		2-甲基-2-丙烯醛	70.1	569.9	135.99	1.21553
24	吡嗪类	2-异丁基-3-甲氧基吡嗪	166.2	1180.9	726.31	1.31153
25		2-甲基吡嗪	94.1	835.5	249.19	1.09146
26		甲基吡嗪	94.1	797.5	227.612	1.4081
27		2-乙基-6-甲基吡嗪	122.2	990.6	381.861	1.2054
28		2,6-二甲基吡嗪	108.1	919.5	309.277	1.13207
29	呋喃类	2-甲基-3-甲硫基呋喃	128.2	950.8	339.328	1.09984
30		2-乙酰基呋喃	110.1	879.3	276.634	1.11157
31	醚类	4-甲基苯甲醚	122.2	1004.6	399.429	1.11762
32	酚类	2-甲氧基-4-乙烯基苯酚	150.2	1322.6	1174.382	1.21448
33		2-甲氧基-4-乙烯基苯酚(二聚体)	150.2	1322.6	1174.382	1.75781
34		2,6-二甲基苯酚	122.2	1106.6	564.475	1.12873
35		4-甲基苯酚	108.1	1067.3	494.141	1.13034
36	醇类	(+)-*α*-松油醇	154.3	1192.5	755.453	1.21545
37		氧化芳樟醇	170.3	1055.3	474.291	1.25308
38		2-己醇	102.2	817.5	238.738	1.28534
39		2-呋喃甲醇	98.1	832.6	247.504	1.35815
40		*β*-苯乙醇	122.2	1117.3	585.28	1.29651
41		芳樟醇	154.3	1096.8	545.983	1.70206
42		甲基苯甲醇	122.2	1058.7	479.872	1.56206
43		2-辛醇	130.2	1003.9	398.504	1.44428
44		1-辛醇	130.2	1060.2	482.334	1.46483
45		2-甲基-2-丙醇	74.1	538	127.562	1.14672
46	其他	二烯丙基二硫化物	146.3	1075.6	508.261	1.63017

通过指纹图谱可看出，2-甲氧基-4-乙烯基苯酚在 PF1 和 PF4 中含量较低，该物质表现为焦香和丁香香味。肉桂醛在 PF4 中含量较低，具有肉桂香[33]。*α*-松油醇具有茴香和薄荷风味，该物质在 PF3 和 PF4 中含量较低。2-异丁基-3-甲氧基吡嗪在 PF5 中含量较低，其具有青椒和花香的特点。在 PF3、PF4、PF5 中，3-甲硫基丙醛、芳樟醇、二烯丙基二硫化物、*α*-蒎品烯的含量相较其他配方显著偏低，其中 3-甲硫基丙醛具有烤土豆香气，芳樟醇具有铃兰香气，二烯丙基二硫化物具有刺鼻蒜味。6 种配方都含有的乙酸己酯和丁酸乙酯分别具有果味和甜味[34]，1-辛烯-3-酮则呈现出土壤、蘑菇和金属味[35]。

2.3.2 主成分分析(PCA) PCA 表明，PC1 贡献率和 PC2 贡献率分别为 44.1% 和 28.7%，前两个主成分的累积贡献率为 72.8%，说明 2 个主成分能较好地体现原始数据所反映的信息。由图 8 可知，主成分分析能够对 6 种配方调味油进行较好的区分，其中 PF1 与 PF3 较为接近，这可能与两者配方相似度较高有关，即都加入了大量的小茴香。PF2 与 PF6 也较为接近，这与 GC-MS 检测得到的 VOCs 聚类结果相似。PF4 距离其他样品较远，可能与配方中未添加茴香类香料而加入了大量的山柰有关。由于 GC-IMS 作为一种补充分析手段，与 GC-MS 的检测原理有所不同，因此其鉴定得到的 VOCs 与 GC-MS 所鉴定得到的有较大区别，两者结合应用可以完善五香调味油的整体风味信息。

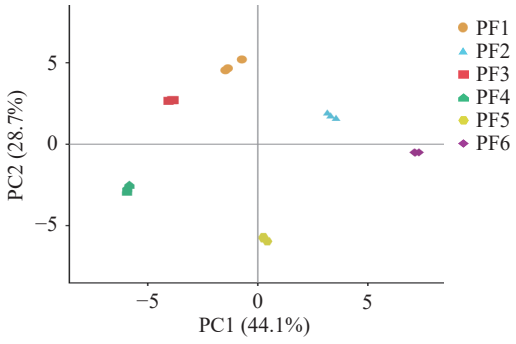


图 8 不同配方五香调味油 VOCs 的 GC-IMS 主成分分析

Fig.8 GC-IMS principal component analysis of volatile compounds in different formulations of five spice seasoning oils

2.3.3 偏最小二乘判别分析(PLS-DA) 偏最小二乘判别分析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[36]，以五香调味油的 VOCs 的峰体积和配方为变量使用 7 倍交叉验证和 200 次随机重分类对五香

调味油 VOCs 进行置换检验、因子载荷分析和变量重要性投影（Variable importance in projection, VIP）计算。

如图 9 置换检验模型所示，模型中 R^2_X=0.965，R^2_Y=0.995，Q^2 =0.980，Q^2 的回归线截距为负值，说明该模型稳定性较好，无过拟合现象，且具有较好的预测能力。由图 10 因子载荷图可知，VOCs 与样品点较为接近说明二者相关性较高，其中，2-异丁基-3-甲氧基吡嗪、丁酸乙酯与 PF1 相关性较高；3-甲基戊酸、1-辛醇、反式-2-丁烯酸乙酯、乙酸己酯与 PF2 相关性较高；2,6-二甲基苯酚、1-辛烯-3-酮与 PF3 相关性较高；乙酸与 PF4 相关性较高；3-甲硫基丙醛、2-甲基-3-甲硫基呋喃与 PF5 相关性较高；(+)-α-松油醇与 PF6 相关性较高。从样品间差异看，PF1、PF12、PF13 与 PF4、PF15、PF16 分别处于横轴两侧，该结果与 PCA 结果一致。

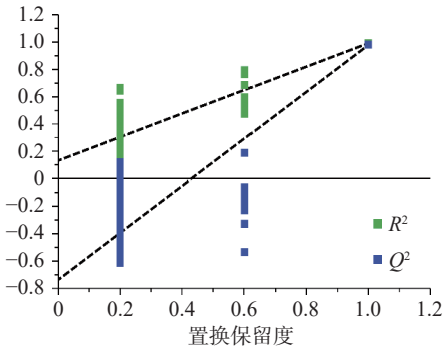


图 9　调味油 VOCs 的 PLS-DA 置换检验

Fig.9　Displacement test for PLS-DA analysis of volatile compounds in seasoning oil

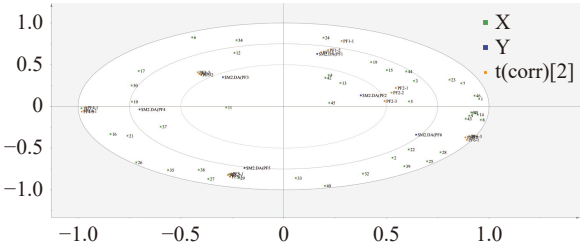


图 10　调味油 VOCs 的 PLS-DA 因子载荷图

Fig.10　Factor loading diagram for PLS-DA analysis of volatile compounds in seasoning oil

VIP 可用于筛选对 6 种五香调味油风味轮廓有重要影响的关键风味差异化合物[37]，如图 11 所示，19 种 VIP 值≥1 的 VOCs 在判别分类中具有重要贡献，按照 VIP 值高低依次为甲基苯甲醇、2-甲基-2-丙醇、乙酸己酯、氧化芳樟醇、1-辛醇、1-戊烯-3-酮、反式-2-丁烯酸乙酯、3-蒈烯、肉桂醛、2-辛酮、丁酸乙酯、2-异丁基-3-甲氧基吡嗪、2,6-二甲基苯酚、丙酸、2-甲基丁醛、3-甲基戊酸、2-甲基-3-甲硫基呋喃、丙酸异丁酯、2-甲基-2-丙烯醛，VIP 值越大，则对五香调味油分类的贡献度越大。

相较 GC-IMS 方法，HS-SPME-GC-MS 方法可检测到烷烃类物质，这可能与烷烃类物质的质子亲和力比水弱有关，而 GC-IMS 方法依靠化合物的质子亲和力，因此难以检测到烷烃类物质[38]。此外，由于 IMS 数据库完善度低且两者检测原理（如离子模式）不同[39]，使得到的 VOCs 存在较大差异且重合度低，HS-SPME-GC-MS 方法检测得到的 VOCs 数量远远高于 GC-IMS 方法，仅 1-戊烯-3-酮、乙酸、2-甲基吡嗪、2-乙酰基呋喃等物质同时被检出，但两种方法的结合可以更全面地定性五香调味油中的 VOCs，一般来说，GC-IMS 对分子量较小的醛类、酮类、酯类、醇类响应较好，如通过 IMS 检出了芳樟醇、氧化芳樟醇、庚醛等物质。

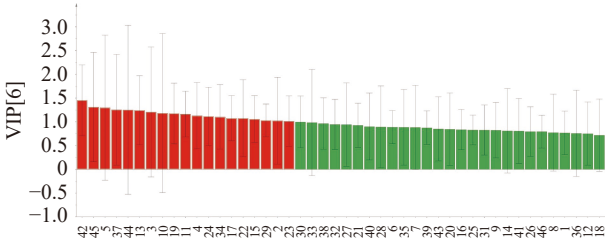


图 11　调味油 VOCs 的 PLS-DA 变量重要性投影分析

Fig.11　VIP analysis of PLS-DA analysis of volatile compounds in seasoning oil

注：图中序号代表的物质与表 3 中五香调味油 VOCs 序号代表的一致。

3　结论

本研究采用电子鼻、HS-SPME-GC-MS、GC-IMS 相结合的方法对不同配方五香调味油的风味物质进行探究，结果表明各配方的风味物质存在较大差异。在 6 种配方调味油样品中，通过气质联用共检测出 118 种 VOCs，其中醚类、醛类、醇类、烯烃类物质总体比例较高；通过分析 ROAV 值确定了 14 种关键香气化合物，除配方 4 中具有樟脑味的桉叶油醇对调味油风味影响较大外，其余配方中含有较多的关键香气化合物如草蒿脑、大茴香醛为调味油贡献了较多的八角（茴香）风味。经 GC-IMS 检测定性得到 45 种 VOCs，通过 PLS-DA 分析中的 VIP 值确定了 19 种关键风味差异化合物，同时发现该检测手段检出的 VOCs 数量较少，且与 GC-MS 方法检测得到的 VOCs 重合度低，但作为一种较新的检测方法，GC-IMS 具有方便快捷的优势，无需复杂的手动过程，在风味成分研究中可与 GC-MS 结合使用形成互补优势。本研究比较了不同配方五香调味油的风味差异及风味特征，以期为香辛料调味油产品开发和风味分析提供参考。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] TIAN Peng, ZHAN Ping, TIAN Honglei, et al. Effects of different vegetable oils on the aroma characteristics of deep-fried shallot flavoring evaluated by HS-SPME/GC-MS coupled with PLSR

[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(9): e14698.
[2] 倪瑞洁. 花椒调味油特征香气物质解析及其呈香属性效应机制研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2022. [NI Ruijie. Analysis of characteristic aroma substances in *Zanthoxylum bungeanum* flavoring oil and study on the mechanism of aroma property effect[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2022.]
[3] CHEN Kai, ZHANG Min, DENG Dewei. The synergistic antimicrobial effects and mechanism of cinnamon essential oil and high voltage electrostatic field and their application in minced pork[J]. Food Control, 2024, 163: 110475.
[4] 陈丽兰, 杨心怡, 乔明锋, 等. 基于 GC-IMS、GC-MS 和 OAV 法分析花椒粉颗粒度对花椒油挥发性香气成分的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(8): 301−310. [CHEN Lilan, YANG Xinyi, QIAO Mingfeng, et al. Effects of different pepper powder particle sizes on volatile aromatic compounds in *Zanthoxylum* oil based on GC-IMS, GC-MS, and OAV[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(8): 301−310.]
[5] 高夏洁, 高海燕, 赵镭, 等. SPME-GC-MS 结合 OAV 分析不同产区花椒炸花椒油的关键香气物质[J]. 食品科学, 2022, 43(4): 208−214. [GAO Xiajie, GAO Haiyan, ZHAO Lei, et al. Analysis of key aroma components in fried *Zanthoxylum bungeanum* oil from different production areas by solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry combined with odor activity value[J]. Food Science, 2022, 43(4): 208−214.]
[6] 刘玉兰, 李锦, 王格平, 等. 花椒籽油与花椒油风味及综合品质对比分析[J]. 食品科学, 2021, 42(14): 195−201. [LIU Yulan, LI Jin, WANG Geping, et al. Comparative study on flavor and overall quality of *Zanthoxylum bungeanum* seed oil and *Zanthoxylum bungeanum* oil[J]. Food Science, 2021, 42(14): 195−201.]
[7] 徐立荣, 孙培成, 于修烛, 等. 基于电子鼻检测五香调味油加工条件的优化[J]. 食品科学, 2014, 35(20): 308−313. [XU Lirong, SUN Peicheng, YU Xiuzhu, et al. Optimization of processing conditions for five-spice condiment oil based on electronic nose analysis[J]. Food Science, 2014, 35(20): 308−313.]
[8] 高延, 万颖敏, 于修烛, 等. 五香调味油研制及其氧化稳定性研究[J]. 中国调味品, 2012, 37(10): 25−29. [GAO Yan, WAN Yingmin, YU Xiuzhu, et al. Study on processing of five-spice condiment oil and its oxidative stability[J]. China Condiment, 2012, 37(10): 25−29.]
[9] SUN Jie, SUN Baoguo, REN Fazheng, et al. Characterization of key odorants in Hanyuan and Hancheng fried pepper (*Zanthoxylum bungeanum*) oil[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(23): 6403−6411.
[10] NI Ruijie, YAN Haiyan, TIAN Honglei, et al. Characterization of key odorants in fried red and green Huajiao (*Zanthoxylum bungeanum* Maxim. and *Zanthoxylum schinifolium* Sieb. et Zucc.) oils[J]. Food Chemistry, 2022, 377: 131984.
[11] ZHENG Lili, WANG Shenwan, YANG Yang, et al. Volatile aroma compounds of passion fruit seed oils: HS-GC-IMS analysis and interpretation[J]. Food Chemistry: X, 2024, 21: 101212.
[12] ZHANG Ning, SUN Baoguo, MAO Xueying, et al. Flavor formation in frying process of green onion (*Allium fistulosum* L.) deep-fried oil[J]. Food Research International, 2019, 121: 296−306.
[13] TIAN Peng, ZHAN Ping, TIAN Honglei, et al. Analysis of volatile compound changes in fried shallot (*Allium cepa* L. var. *aggregatum*) oil at different frying temperatures by GC-MS, OAV, and multivariate analysis[J]. Food Chemistry, 2021, 345: 128748.
[14] 姬恒慧, 陈季旺, 翟嘉豪, 等. 深度油炸过程煎炸油的氧化及其对油炸外裹糊鱼块品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(4): 97−104. [JI Henghui, CHEN Jiwang, ZHAI Jiahao, et al. Oxidation of frying oil during deep-fat frying and the effects of frying oil oxidation on the quality attributes of fried batter-breaded fish nuggets[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(4): 97−104.]
[15] 陈霖虹, 肖更生, 徐玉娟, 等. 不同贮藏方式陈皮精油成分及其抗氧化活性分析[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(3): 215−224. [CHEN Linhong, XIAO Gengsheng, XU Yujuan, et al. Analysis of essential oil composition and antioxidant activity of Pericarpium Citri Reticulatae in different storage methods[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(3): 215−224.]
[16] 蒲丹丹, 孟瑞馨, 曹博雅, 等. SAFE-GC-MS/O 法比较 18 种浓香型天然香辛料香气活性成分差异分析[J]. 精细化工, 2024, 41(6): 1328−1344,1392. [PU Dandan, MENG Ruixin, CAO Boya, et al. Comparative analysis of aroma-active compounds among 18 strong fragrance natural spices by SAFE-GC-MS/O[J]. Fine Chemicals, 2024, 41(6): 1328−1344,1392.]
[17] FARAG M A, LABIB R M, NOLETO C, et al. NMR approach for the authentication of 10 cinnamon spice accessions analyzed via chemometric tools[J]. LWT, 2018, 90: 491−498.
[18] 余代鑫, 尹梦廷, 郭盛, 等. 基于 GC-MS 和 FT-NIR 结合化学计量学的干姜产地鉴别及挥发性成分含量快速预测[J]. 中国现代中药, 2025, 27(5): 831−841. [YU Daixin, YIN Mengting, GUO Sheng, et al. Identification of geographical origin and rapid prediction of volatile component of Zingiberis Rhizoma via GC-MS and FT-NIR with chemometrics[J]. Modern Chinese Medicine, 2025, 27(5): 831−841.]
[19] 高露, 赵镭, 史波林, 等. 气相色谱-质谱联用结合气味活度值分析红花椒油的关键香气物质特征[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(22): 295−301. [GAO Lu, ZHAO Lei, SHI Bolin, et al. GC-MS combined with odor activity value to analyze key aroma substance characteristics of red Chinese pepper oil[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(22): 295−301.]
[20] 曹博雅, 蒲丹丹, 郑瑞仪, 等. SAFE-GC-MS 结合 GC-O 法分析 20 种辛香型香辛料香气活性成分[J/OL]. 食品科学, 1−16 [2025-04-27]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20231206.1030.007.html. [CAO B Y, PU D D, ZHENG R Y, et al. Characterization of the aroma-active compounds among 20 pungent spices by SAFE-SPME-GC-MS/O[J/OL]. Food Science, 1−16[2025-04-27]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20231206.1030.007.html.]
[21] LIANG Xin, QIAN Ruyi, WANG Dan, et al. Lipid-derived aldehydes: New key mediators of plant growth and stress responses[J]. Biology, 2022, 11(11): 1590.
[22] 古丽努尔·买买提, 蒋睿, 罗刚, 等. 新疆特色果木烟熏液制备及其品质分析[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(20): 232−238. [GULINUER Maimaiti, JIANG Rui, LUO Gang, et al. Preparation and quality analysis of smoke liquid from Xinjiang's characteristic fruit trees[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(20): 232−238.]
[23] 孟凡冰, 刘达玉, 向茂德, 等. 不同卤制方法对白鹅腿肉品质及挥发性风味成分的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(5): 272−279. [MENG Fanbing, LIU Dayu, XIANG Maode, et al. Effects of different bittern process on volatile flavor compounds of white goose thigh[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(5): 272−279.]
[24] 普晓燕, 马兴胜, 于传龙, 等. 虾夷扇贝真空油炸过程中的传质规律及品质特性研究[J]. 中国食品学报, 2025, 25(5): 379−395.

［PU Xiaoyan, MA Xingsheng, YU Chuanlong, et al. Mass transfer law and quality characteristics of *Patinopecten yessoensis* during vacuum frying［J］. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25(5): 379−395.］

［25］ ŁYCZKO J, JAŁOSZYŃSKI K, SURMA M, et al. HS-SPME analysis of true lavender (*Lavandula angustifolia* Mill.) leaves treated by various drying methods［J］. Molecules, 2019, 24(4): 764.

［26］ XIAO Zuobing, LI Qi, NIU Yunwei, et al. Odor-active compounds of different lavender essential oils and their correlation with sensory attributes［J］. Industrial Crops and Products, 2017, 108: 748−755.

［27］ YU Hang, ZHANG Ruyue, YANG Fangwei, et al. Control strategies of pyrazines generation from Maillard reaction［J］. Trends in Food Science & Technology, 2021, 112: 795−807.

［28］ du PREEZ B V P, de BEER D, MOELICH E I, et al. Development of chemical-based reference standards for rooibos and honeybush aroma lexicons［J］. Food Research International, 2020, 127: 108734.

［29］ YANG Xuebo, CHEN Qiuhan, LIU Shouchun, et al. Characterization of the effect of different cooking methods on volatile compounds in fish cakes using a combination of GC-MS and GC-IMS［J］. Food Chemistry, 2024, 22: 101291.

［30］ 里奥·范海默特. 化合物嗅觉阈值汇编［M］. 北京：科学出版社, 2018.［van GEMERT L J. Compilations of odour threshold values in air, water and other media［M］. Beijing: Science Press, 2018.］

［31］ FENG H, TIMIRA V, ZHAO J L, et al. Insight into the characterization of volatile compounds in smoke-flavored sea bass (*Lateolabrax maculatus*) during processing via HS-SPME-GC-MS and HS-GC-IMS［J］. Foods, 2022, 11(17): 2614.

［32］ XU Jiyuan, ZHANG Ying, HU Changbao, et al. The flavor substances changes in Fuliang green tea during storage monitoring by GC-MS and GC-IMS［J］. Food Chemistry, 2023, 21: 101047.

［33］ 卫佳音, 杨同香, 吴向天, 等. 基于顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱技术和感官分析传统地方特色美食大肠汤的关键风味化合物［J/OL］. 食品与发酵工业, 1−9［2025-04-27］. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.042080.［WEI J Y, YANG T X, WU X T, et al. Analysis of key flavor compounds in traditional local specialties (Dachang Tang) by headspace solid-phase microextraction combined with gas chromatography-mass spectrometry and sensory evaluation［J/OL］. Food and Fermentation Industries, 1−9［2025-04-27］. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.042080.］

［34］ DENG Siyang, LIU Yunhe, HUANG Feng, et al. Evaluation of volatile flavor compounds in bacon made by different pig breeds during storage time［J］. Food Chemistry, 2021, 357: 129765.

［35］ 余进, 曾艳, 白艳, 等. 香气活性值结合气相色谱-嗅闻技术分析辣椒油的关键挥发性风味化合物［J］. 食品与发酵工业, 2024, 50(1): 286−292.［YU Jin, ZENG Yan, BAI Yan, et al. Analysis of key volatile flavour compounds in chilli oil by odor activity value combined with gas chromatography-olfactometry［J］. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(1): 286−292.］

［36］ EVA. GC-MS analysis and PLS-DA validation of the trimethyl silyl-derivatization techniques［J］. American Journal of Applied Sciences, 2012, 9(7): 1124−1136.

［37］ WU Zhaobin, CHEN Lanzhen, WU Liming, 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.

［38］ 夏兰欣, 周贵华, 王广, 等. GC-MS 和 GC-IMS 分析食用油对熟炕马铃薯挥发性成分的影响［J］. 中国粮油学报, 2022, 37(12): 236−245.［XIA Lanxin, ZHOU Guihua, WANG Guang, et al. Conjoint analysis of effects of edible oil on volatile components of cooked Kang potatoes by GM-MS and GC-IMS［J］. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(12): 236−245.］

［39］ HE Junhua, WU Xuehui, YU Zhiliang. Microwave pretreatment of *Camellia* (*Camellia oleifera* Abel.) seeds: Effect on oil flavor［J］. Food Chemistry, 2021, 364: 130388.