赵丽丽, 李怡晴, 史宇婷, 等. 基于 E-nose、GC-IMS 和 HS-SPME-GC-MS 解析不同品种辣椒油的风味组成差异 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(13): 46−59. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090349
ZHAO Lili, LI Yiqing, SHI Yuting, et al. Decoding Flavor Composition Differences of Chili Oils from Different Pepper Varieties Based on E-nose, GC-IMS, and HS-SPME-GC-MS[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(13): 46−59. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090349

·特邀主编专栏—果蔬基料制造:基础理论、新型加工、质量控制与智能制造（客座主编:徐贞贞、王永涛、李涛;产业顾问:李仁杰）·

# 基于 E-nose、GC-IMS 和 HS-SPME-GC-MS 解析不同品种辣椒油的风味组成差异

赵丽丽[1], 李怡晴[1,2,+], 史宇婷[1], 史冠莹[1], 张　乐[1], 蒋鹏飞[1], 王明奇[3], 张雪峰[4], 肖作兵[5], 王赵改[1,*]
（1.河南省农业科学院农产品加工研究中心, 河南郑州 450000;
2.河南科技学院食品学院, 河南新乡 453000;
3.郑州雪麦龙食品香料有限公司, 河南郑州 450000;
4.河南友垣食品有限公司, 河南新乡 453000;
5.上海交通大学农业与生物学院, 上海 200000）

**摘　要:** 为系统解析宁夏羊角椒、陕西秦椒、贵州满天星、贵州灯笼椒和四川二荆条五种代表性辣椒油的风味组成差异，本研究采用电子鼻、顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用（headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry，HS-SPME-GC-MS）和气相色谱-离子迁移谱（GC-ion mobility spectrometry，GC-IMS）等多维检测技术，使用主成分分析（principal component analysis，PCA）、正交偏最小二乘判别分析（orthogonal partial least squares discrimination analysis，OPLS-DA）等化学计量学方法，结合气味活度值（odor activity value，OAV）确定关键差异香气化合物。结果表明：电子鼻 PCA 能够有效区分五种辣椒油样品，在 W2S 和 W1W 传感器上差异显著（$P<0.05$），表明不同辣椒油样品在醇类、醛类、酮类、无机硫化物和萜烯类化合物含量上存在明显区分；通过 GC-IMS 和 HS-SPME-GC-MS 在五种辣椒油中分别鉴定出 41 种和 99 种挥发性风味化合物，GC-IMS 筛选出 14 种变量投影重要性（variable importance in projection，VIP）得分大于 1 的关键差异化合物，包括醛类 6 种、酮类 5 种、醇类 1 种、酯类 1 种、芳香烃类 1 种，主要对果香、甜香、坚果、脂香和辛辣刺激气味有明显差异；HS-SPME-GC-MS 筛选出 17 种 VIP 值>1 且 OAV>1 的关键差异香气化合物，通过感官属性与关键差异香气化合物的相关性分析发现 (E)-2-辛烯醛、甲硫基丙醛、茴香脑、2-戊基呋喃、5-甲基糠醛与坚果味、焦甜味和油脂味相近，己醛、庚醛、1-戊醇、(E)-2-己烯醛、苯甲醛、1-辛烯-3-醇、壬醛与油腻味和烟熏味相近，2,3-戊二酮、甲苯、2-乙基-6-甲基吡嗪、3-甲基丁醛、苯乙醛与生青味、辛辣味相近。综合来看，四川二荆条辣椒油的整体香气特征最佳，具有典型的肉香和甜香，主要来源于甲硫基丙醛、2-戊基呋喃和 5-甲基糠醛的贡献；陕西秦椒辣椒油香气特征最为丰富，香辣气味浓郁，其典型气味主要来源于 2-乙基-6-甲基吡嗪；贵州灯笼椒辣椒油具有独特的花香，主要来源于 1-辛烯-3-醇和 2,3-戊二酮的贡献；而贵州满天星和宁夏羊角椒辣椒油的香气特征均不明显，表明二者感官品质相对较弱。本研究通过揭示不同品种辣椒油呈香特性的组成差异，旨在为高品质辣椒油的风味导向开发和质量控制提供理论依据。

**关键词:** 辣椒油, 风味, 感官评价, 电子鼻, 气相色谱离子迁移谱, 气相色谱-质谱联用
**中图分类号:** TS255.36　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)13−0046−14
**DOI:** 10.13386/j.issn1002-0306.2025090349
本文网刊:

**收稿日期:** 2025−09−29　　+并列第一作者
**基金项目:** 河南省重点研发专项（241111111100）; 河南省科技攻关项目（252102110081, 252102110124, 242102111069）; 河南省农业科学院自主创新项目（2025ZC87）; 河南省农业科学院新兴学科发展专项（2024XK04）; 河南省中央引导地方科技发展资金项目（Z20251831027）。
**作者简介:** 赵丽丽（1993−）, 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 农产品贮藏与加工, E-mail: zhaolili1918@126.com。
李怡晴（2000−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品贮藏与加工, E-mail: 2163563138@qq.com。
*** 通信作者:** 王赵改（1980−）, 女, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品贮藏与加工, E-mail: zgwang1999@126.com。

# Decoding Flavor Composition Differences of Chili Oils from Different Pepper Varieties Based on E-nose, GC-IMS, and HS-SPME-GC-MS

**ZHAO Lili[1], LI Yiqing[1,2,+], SHI Yuting[1], SHI Guanying[1], ZHANG Le[1], JIANG Pengfei[1], WANG Mingqi[3], ZHANG Xuefeng[4], XIAO Zuobing[5], WANG Zhaogai[1,*]**

(1.Agricultural Products Processing Center, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450000, China;
2.School of Food Science, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453000, China;
3.Zhengzhou Xuemailon Food Flavor Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China;
4.Henan Youyuan Food Co., Ltd., Xinxiang 453000, China;
5.School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200000, China)

**Abstract:** To systematically analyze the differences in flavor composition among five representative chili oils made from Ningxia Yangjiaojiao, Shaanxi Qinjiao, Guizhou Mantianxing, Guizhou Denglongjia and Sichuan Erjingtiao peppers, this study employed multi-dimensional detection techniques, including electronic nose (E-nose), headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS), and gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS). Chemometric approaches such as principal component analysis (PCA) and orthogonal partial least squares-discrimination analysis (OPLS-DA) were applied, combined with odor activity values (OAV) to identify key differential aroma compounds. The results demonstrated that PCA based on E-nose data could effectively distinguished the five chili oil varieties, with significant differences ($P$<0.05) observed in the responses of W2S and W1W sensors, indicating notable variations in the content of alcohols, aldehydes, ketones, inorganic sulfides, and terpenes. A total of 41 and 99 volatile compounds were identified in the five chili oils via GC-IMS and HS-SPME-GC-MS, respectively. Among them, 14 key differential compounds with variable importance in projection (VIP)>1 were screened from GC-IMS, including 6 aldehydes, 5 ketones, 1 alcohol, 1 ester, and 1 aromatic hydrocarbon, which contributed significantly to fruity, sweet, nutty, fatty, and pungent notes. From HS-SPME-GC-MS, 17 key differential aroma compounds with both VIP>1 and OAV>1 were identified. Correlation analysis between sensory attributes and key differential aroma compounds revealed that (E)-2-octenal, methional, anethole, 2-pentylfuran, and 5-methylfurfural were closely associated with nutty, caramelized sweet, and fatty notes, hexanal, heptanal, 1-pentanol, (E)-2-hexenal, benzaldehyde, 1-octen-3-ol, and nonanal were correlated with greasy and smoky notes, while 2,3-pentanedione, toluene, 2-ethyl-6-methylpyrazine, 3-methylbutanal, and phenylacetaldehyde were correlated with green and pungent notes. Overall, the Sichuan Erjingtiao chili oil exhibited the best overall aroma profile, characterized by typical meaty and sweet notes, primarily attributed to methional, 2-pentylfuran, and 5-methylfurfural. The Shaanxi Qinjiao chili oil displayed the richest aroma characteristics with a strong spicy fragrance, mainly derived from 2-ethyl-6-methylpyrazine. The Guizhou Denglongjiao chili oil exhibited a unique floral aroma, largely contributed by 1-octen-3-ol and 2,3-pentanedione. In contrast, the Guizhou Mantianxing and Ningxia Yangjiaojiao chili oils showed less distinct aroma characteristics, indicating relatively weaker sensory qualities. By elucidating the compositional differences in aroma characteristics of chili oils from different pepper varieties, this study aims to provide a theoretical foundation for the flavor-oriented development and quality control of high-quality chili oils.

**Key words:** chili pepper oil; aroma; sensory evaluation; electronic nose; gas chromatography ion migration spectrum; gas chromatography-mass spectrometry

辣椒油作为一种兼具独特辛辣口感和浓郁香气的复合调味品，不仅是中式菜肴不可或缺的灵魂元素，也在全球饮食文化中占据重要地位[1−2]。近年来，辣椒油在全球市场规模持续增长，2023 年已达到 50.91 亿元，预计 2028 年将增至 68.59 亿元[3]。辣椒油的感官品质，尤其是其独特的风味特征，是决定产品市场价值和消费者接受度的核心因素[4]。而辣椒品种作为风味形成的物质基础，对辣椒油最终风味的构建起着首要且决定性的作用[5]。由于遗传背景、生长环境和农艺措施的差异，不同品种辣椒在风味物质的种类和含量上存在显著区别[6−9]，进而直接影响辣椒油的风味轮廓与复杂性。因此，深入解析不同原料所制辣椒油在风味化学组成上的差异，不仅有助于揭示其风味形成机制，更能为原料优选、风味定向调配及工业化品质控制提供理论依据。

目前，关于辣椒油风味的研究已取得一定进展。Zhu 等[10] 研究了 7 种不同红辣椒粉和辣椒油的辛辣度和感官特性，印度辣椒以最高的斯科维尔指数（85909）、鲜红色、胡椒味和苦味脱颖而出，但缺乏香草味，而其他样品的口味更多样化，质地更温和；张洪新等[11] 研究得到 14 种辣椒油中共有挥发性化合物 32 种，主要有酯类、烯烃类和醛类；石自彬等[12] 发现 10 个品种辣椒制备的辣椒油中挥发性成分含量最高的是酯类物质，包括乙酸甲酯、棕榈酸甲酯和亚麻酸乙酯等。然而，现有研究多侧重于风味的定性表征，从分子水平对不同品种辣椒油风味构成进行系统

定量解析的研究仍较为缺乏，尤其在多种现代分析技术联用与多维度数据融合方面存在明显不足。

随着风味分析技术的发展，多技术联用策略已成为食品风味研究的趋势[13]。电子鼻（electronic nose，E-nose）作为一种快速、非破坏性的感官分析工具，能够快速获取样品的整体气味指纹信息，适用于风味轮廓的初步区分和聚类分析[14−15]；气相色谱-离子迁移谱（gas chromatography-ion mobility spectrometry，GC-IMS）具备高灵敏度和快速分离的优势，特别适用于痕量挥发性物质的检测[16−17]；气相色谱-质谱联用技术（gas chromatography-mass spectrometry，GC-MS）则能够实现挥发性成分的高效分离和准确定量[18]。且 GC-MS 检测的主要为碳链在 $C_8$~$C_{20}$ 之间的分子量大且含量较高的挥发性成分，而 GC-IMS 检测出的则大多为 $C_4$~$C_{10}$ 之间的小分子、挥发性强且含量低的挥发性成分，二者相互补充，能够扩大挥发性成分的检测范围[19]。尽管这些技术已分别用于辣椒油的风味分析，但目前尚未见系统整合多种技术手段全面剖析不同辣椒品种所制辣椒油风味组成差异的研究。

基于此，本研究选取五种具有地域代表性的干辣椒品种—宁夏羊角椒、陕西秦椒、贵州满天星、贵州灯笼椒和四川二荆条，综合利用定量描述分析（quantitative descriptive analysis，QDA）、E-nose、GC-IMS 及 GC-MS 等多种分析技术，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 discriminant analysis，OPLS-DA）、气味活度值（odor activity value，OAV）及热图聚类等多元统计方法，旨在多维度解析不同品种辣椒油的风味物质组成及其感官属性之间的关联性，识别关键差异标志物。本研究旨在从风味化学的角度阐明辣椒品种对辣椒油风味品质的影响机制，以期为辣椒油的原料选配、风味定向调控与工业标准化生产提供数据支撑与理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

宁夏羊角椒、陕西秦椒、贵州满天星、贵州灯笼椒、四川二荆条　购自河南柘城农贸交易市场；精炼一级大豆油　益海嘉里金龙鱼食品集团股份有限公司；癸酸乙酯标准品　德国 DR.E 公司；$C_6$~$C_{30}$ 正构烷烃标准品　美国 Supelco 公司；正酮 $C_4$~$C_9$ 标准品　国药集团化学试剂北京有限公司。

8890-7000E 型气相色谱-质谱联用仪、HP-5MS 石英毛细管色谱柱（30 m×0.25 μm×0.25 μm）　美国安捷伦公司；FlavourSpec 1H1-00053 GC-IMS 仪（配备分析软件包括 Laboratory analytical viewer（LAV）和 3 款插件以及 GC×IMS Library Search 1.0.3）　德国 G.A.S 公司；WXT-5 毛细管柱（15 m×0.53 mm，0.53 μm）　美国 Restek 公司；A11 研磨粉碎机　德国 IKA 仪器设备有限公司；ME204E 电子天平　梅特勒-托利多仪器有限公司；HH-SJ6CS 六联异步测速恒温磁力搅拌油浴锅　常州市金坛友联仪器研究所；PEN3 便携式电子鼻　Win Muster Airsense Analytics 股份有限公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 样品前处理　辣椒油的制备在杨慧等[20]、叶梦宇等[21] 的方法上进行优化：干辣椒去蒂去籽，粉碎过 40 目筛；按照料液比 1∶9，将辣椒粉于 180 ℃、650 r/min 的大豆油中动态炸制 3 min，静置 2 h 后过滤备用。

1.2.2 感官评价　采用定量描述分析法（quantitative descriptive analysis，QDA）对不同品种辣椒油的主要气味进行人工感官分析，参照赵丽丽等[16] 的方法进行测定并适当调整。感官分析由 10 名小组成员（6 名女性和 4 名男性，年龄：20~35 岁）组成。所有小组成员均受过专业培训，在感官分析方面具有丰富的经验。准确称取 1.00±0.03 g 辣椒油样品于 20 mL 顶空瓶中，将样品随机排列放置在环境相对湿度较低的单间感官室内。

在培训期间，小组成员讨论了不同品种辣椒油样品的不同香气属性，并对闻到的感官特征描述词进行统计。小组成员通过共识最终确定了辛辣味、油脂味、焦甜味、生青味、坚果味、烟熏味、油腻味等 7 个出现频率最高的词汇以及总体风味作为定量描述的依据，这些描述语被认为是不同辣椒油样品气味的重要因素。描述性感官分析采用 0~10 的 10 点制标度法评分，气味强度范围为 0（无）至 10（非常强）。

1.2.3 电子鼻分析样品　采用 PEN3 型电子鼻对不同品种辣椒油的香气特性进行了测定。参考 Liu 等[22] 的方法并作适当调整方法。准确称取 3.000 g 样品，放入 50 mL 离心管中，密封，45 ℃ 水浴加热 30 min，每个样品测量至少重复三次。电子鼻参数：冲洗时间 60 s，取样间隔 1 s，取样时间 100 s，气体流速 400 mL/min。采用第 69~71 s 内数据进行分析。

电子鼻配备了采样装置、包含传感器阵列的探测器单元和用于数据记录和分析的模式识别软件。传感器阵列系统由 10 个金属氧化物半导体传感器组成，将不同的挥发性化合物分为 W1C（芳香族化合物）、W1S（甲基类、短链烷烃）、W1W（萜类化合物和无机硫化物）、W2S（醇类、醛类和酮类）、W2W（有机硫化物和芳香族成分）、W3C（氨和芳香族化合物）、W3S（长链烷烃）、W5C（烷烃芳香族化合物）、W5S（氮氧化物）和 W6S（氢化合物）。

1.2.4 气相色谱-离子迁移色谱测定　参考赵丽丽等[16] 的方法并作适当调整。精确称取 2.000 g 辣椒油样品于 20 mL 顶空样品瓶中，于 60 ℃ 下以 250 r/min 加热孵化 15 min；不分流顶空进样 200 μL。顶空进样针温度 80 ℃；进样针温度 80 ℃，进样前清洗时间 30 s，进样后清洗时间 6 min。

GC 条件：色谱柱为 MXT-5 柱（15 m×0.53 mm，

0.53 μm)；色谱柱温度 40 ℃；载气：高纯氮气(纯度≥99.999%)；载气流速程序：初始 2.0 mL/min，保持 2 min，在 2~10 min 线性增至 5.0 mL/min，在 10~20 min 线性增至 50.0 mL/min，在 20~30 min 线性增至 100.0 mL/min，然后停止流动，总运行时间为 30 min。

IMS 条件：离子源为氚(6.5 keV)；正离子模式；漂移管长度 9.8 cm；管内线性电压 500 V/cm；漂移管温度 45 ℃；漂移气流速 150 mL/min(氮气纯度≥99.999%)。

定性定量分析：使用正酮 $C_4$~$C_9$ 作为外标计算挥发性化合物的保留指数(retention index，RI)，采用 GC-IMS Library Search 软件内置的 2014NIST 数据库和 IMS 数据库对挥发性成分定性分析，挥发性化合物的定量则根据所选信号峰的峰体积进行计算。并通过 GC-IMS 仪器自带 VOCal 数据处理软件的 Reporter 和 Gallery Plot 插件分别生成挥发性成分的差异图谱和指纹图谱。

1.2.5　顶空固相微萃取-气相色谱-质谱测定　参照 Li 等[23] 的方法提取辣椒油中的挥发性成分。精确称取 1.000 g 样品于顶空瓶中，加入 5 μL 癸酸乙酯(0.1 mg/mL)作为内标物，密封后于 60 ℃，200 r/min 的孵化器中平衡 5 min，插入 120 μm DVB/CAR/PDMS Arrow 萃取头，于 60 ℃ 下提取 30 min 后取出萃取头，插入 GC-MS 进样口解吸 5 min，同时开始采集数据。

GC 条件：HP-5MS 毛细管色谱柱(30 m×250 μm×0.25 μm)；载气为 He，恒定流速为1.0 mL/min；5∶1 分流进样模式；升温程序为初温40 ℃ 保持 5 min，以 4 ℃/min 的速率升温至 190 ℃ 保持 2 min，然后以 6 ℃/min 的速率升温至 230 ℃，保持 5 min；进样口温度为 250 ℃。

MS 条件：EI 离子源；扫描方式全扫描；离子源温度 230 ℃；四极杆温度 150 ℃；接口温度 250 ℃；质量扫描范围为 m/z 35~500；检索谱库为 NIST 23.LIB。

通过 NIST 23 标准谱库和 RI 鉴定挥发性成分。选择与 NIST 23 标准谱库匹配度大于 50 的挥发性成分，根据正构烷烃($C_7$~$C_{30}$)标准品保留时间和样品保留时间计算样品中每个化合物 RI，并将其与文献报道的化合物的 RI 进行比较。

$$RI = 100 \times \left( n + \frac{t_x - t_n}{t_{n+1} - t_n} \right)$$

式中：$t_x$ 是化合物 x 的保留时间；$t_n$ 和 $t_{n+1}$ 分别是碳原子数为 n 和 n+1 的正构烷烃保留时间($t_n$<$t_x$<$t_{n+1}$)。

以癸酸乙酯作为内标物，将各化合物峰面积与内标物峰面积进行比较，各化合物含量按下式计算：

$$C = \frac{A_x \times C_0 \times V}{A_0 \times m}$$

式中：C：未知化合物含量，μg/kg；$A_x$：未知化合物峰面积，mAu·s；$A_0$：内标物峰面积，mAu·s；$C_0$：内标物含量，μg/μL；V：内标物体积，μL；m：样品质量，kg。

1.2.6　香气活性值(odor activity value，OAV)　OAV 是指香气活性成分在样品中的浓度是其自身阈值的倍数，即辣椒中鉴定出的香气活性物质的浓度与其阈值的比值；OAV>1 的物质被认为是对辣椒的香气贡献大的关键香气成分[24]。OAV 公式计算：

$$OAV = \frac{C_i}{OT_i}$$

式中：$C_i$：化合物含量 mg/g；$OT_i$：该化合物在油和水中的阈值 mg/g。

### 1.3　数据处理

所有实验均重复测定 3 次，实验结果以平均值±标准差表示。采用 Excel 2010 软件进行数据统计分析；SPSS 27.0 软件中的 Duncan 法进行显著性分析($P$<0.05)；采用 Origin 2022 绘制雷达图、柱状图；采用 SIMCA 14.1 软件进行 OPLS-DA 分析；采用 R 软件(版本 4.2.1)对 $P$ 值进行了 Benjamini-Hochberg(FDR)校正，并利用 Pearson 法对校正后的结果进行可视化展示，绘制相关性聚类热图。

## 2　结果与分析

### 2.1　不同品种辣椒油感官评价结果

本研究以辛辣味、油腻味、烟熏味、坚果味、生青味、焦甜味、油脂味 7 个主要香气感官属性作为评级，依次对不同品种辣椒制备得到的辣椒油香气剖面进行评价(图 1)。可以看出，四川二荆条整体风味佳，其焦甜味和坚果香层次丰富，脂香浓郁，整体风味呈甜香韵；贵州灯笼椒油脂味、烟熏味、焦甜味相对突出；宁夏羊角椒生青味和辛辣味突出，具有类似新鲜青椒味；陕西秦椒在辛辣与油脂香的融合上表现尤为优异，整体香辣气味浓郁；贵州满天星的干草味和油脂味融合较好且协调，但油腻味相对浓郁。

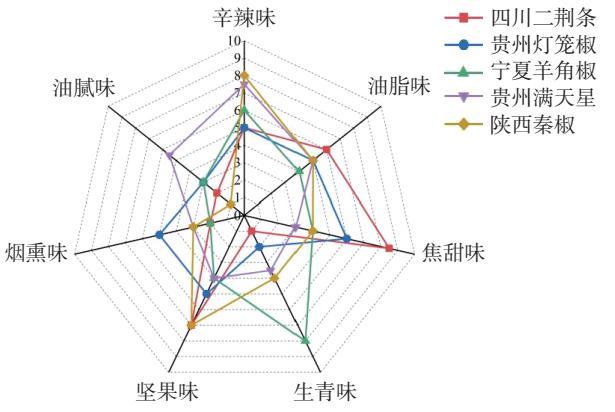



图 1　不同品种辣椒油样品的感官气味轮廓图

Fig.1　Sensory odor profile of different varieties chili oil samples

### 2.2　电子鼻对不同品种辣椒油的风味分析

不同品种辣椒油的电子鼻测定结果如图 2A 所示，可以看出 5 种辣椒油样品均在 W2S 和 W1W 传

感器上的信号强度最高，W3S 和 W3C 传感器的信号强度最低，表明辣椒油对醇类、醛类、酮类、无机硫化物及萜烯类化合物具有较高敏感性，而对烷烃和芳香族化合物的响应较弱。从表 1 的差异性分析来看，5 种辣椒油样品在 W2S 和 W1W 传感器上表现出显著差异，其中四川二荆条在 W2S 和 W1W 上的响应值均最大，且与其他样品存在显著差异（$P<0.05$），陕西秦椒在 W2S、贵州灯笼椒在 W1W 上的响应分别位于第二位，这表明不同品种辣椒油中的醇类、醛类、酮类、无机硫化物和萜烯类化合物含量存在差距，上述化合物种类是区分不同辣椒油挥发性组成的关键。

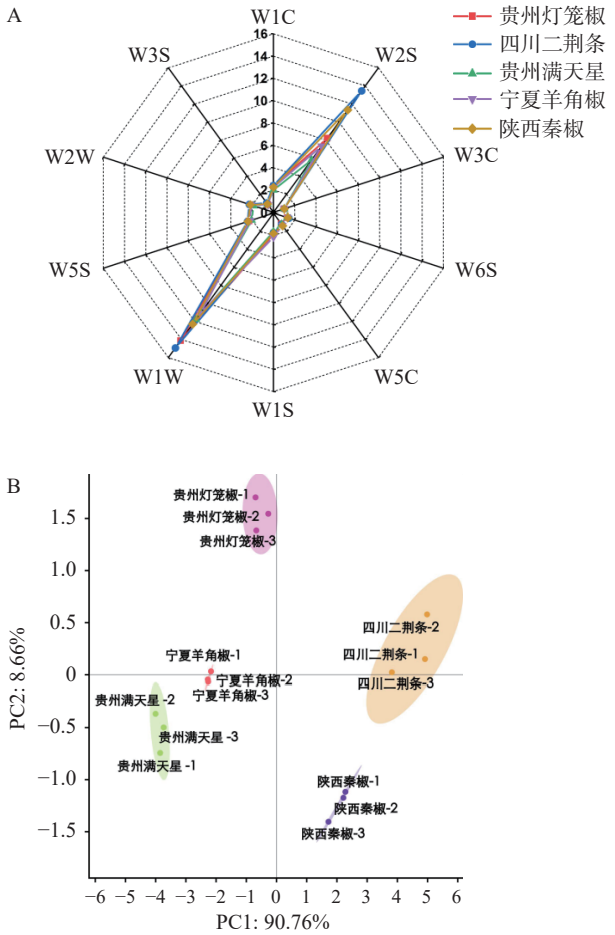



图 2 不同品种辣椒油电子鼻雷达图（A）和主成分分析二维图（B）

Fig.2 Electronic nose radargrams (A) and principal component analysis two-dimensional plots (B) of different varieties chili oil

主成分分析（principal component analysis, PCA）是一种将多个变量通过线性变换选出较少个数重要变量的多元统计方法，可以根据不同样本中主要成分因子的贡献率来评估样品之间的规律性和差异性[25]。由图 2B 可知，PC1 和 PC2 的贡献率分别为 90.76% 和 8.66%，累计贡献率达 99.42%，能够代表挥发性成分的绝大部分原始变量信息，很好地反映样品的主要特征。经过不同品种辣椒原料制备得到的辣椒油样品在分布图中有很好的区分，其中同一样品所形成的圆框范围代表样品的重复性，可以看出单个样品间的重复性均较好。其中，四川二荆条分布在第一象限，贵州灯笼椒和宁夏羊角椒辣椒油分布在第二象限，贵州满天星辣椒油分布在第三象限，陕西秦椒辣椒油则分布于第四象限，上述结果说明 5 种辣椒油挥发性成分之间存在明显差异。由于电子鼻检测结果仅能反映不同品种辣椒油的气味轮廓特征，具体气味特征的差异还需要通过 GC-IMS 对挥发性化合物进行定性定量分析。

## 2.3 不同品种辣椒油 GC-IMS 结果分析

2.3.1 不同品种辣椒油挥发性成分的 GC-IMS 谱图分析 由图 3A 二维谱图可知，不同品种辣椒原料制备得到的辣椒油样品中挥发性成分均可通过 GC-IMS 实现了有效分离，且集中分布在保留时间 100~800 s 与迁移时间 1.0~2.0 ms。某些化合物可能因浓度和性质差异而出现多个信号点，如以单体、二聚体或三聚体形式存在。其中，陕西秦椒辣椒油样品中检测的挥发性化合物的数量相对最多，图中红色区域指示了在该样品中含量较高、而在其他样品中含量较低或不含的挥发性化合物。图 3B 是以陕西秦椒辣椒油的谱图作为参比，其他谱图扣减参比形成的二维差异对比谱图。在扣减后的谱图中，浓度相同的物质颜色相抵消呈白色；蓝色区域表示该物质浓度低于参比样品浓度，蓝色越深表示浓度越低；红色区域说明该物质浓度高于参比样品浓度，红色越深表示该物质浓度越高[16]。通过差异谱图分析，可直观呈现不同辣椒油样品挥发性成分的分布差异。这种差异主要源于辣椒品种的遗传背景对其特征性风味物质（如酯类、萜烯类）合成与积累的直接调控[26]；同时，地理适应性通过光照、土壤等环境因子对关键挥发性组分的含量产生显著影响[27]。品种与环境的共同作用塑造了辣椒油的特征风味轮廓，其中辣椒品种的不同是

表 1 不同品种辣椒油的电子鼻响应值

Table 1 E-nose responses of different varieties chili oil

| 样品名称 | W1C | W2S | W3C | W6S | W5C | W1S | W1W | W5S | W2W | W3S |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 贵州灯笼椒 | 2.35±0.07$^{a}$ | 8.22±0.65$^{c}$ | 1.01±0.00$^{a}$ | 1.34±0.02$^{bc}$ | 1.17±0.05$^{b}$ | 1.91±0.16$^{b}$ | 14.12±0.32$^{a}$ | 2.29±0.05$^{b}$ | 2.18±0.03$^{ab}$ | 0.86±0.01$^{c}$ |
| 四川二荆条 | 2.40±0.07$^{a}$ | 13.45±0.06$^{a}$ | 1.01±0.00$^{a}$ | 1.45±0.04$^{a}$ | 1.23±0.06$^{ab}$ | 1.74±0.03$^{bc}$ | 14.93±0.52$^{a}$ | 2.44±0.01$^{a}$ | 2.27±0.06$^{a}$ | 1.03±0.02$^{a}$ |
| 贵州满天星 | 1.99±0.02$^{c}$ | 5.81±0.17$^{e}$ | 1.01±0.00$^{a}$ | 1.31±0.03$^{c}$ | 1.24±0.20$^{ab}$ | 1.66±0.22$^{c}$ | 11.79±1.58$^{b}$ | 2.06±0.01$^{d}$ | 1.86±0.06$^{c}$ | 0.89±0.00$^{b}$ |
| 宁夏羊角椒 | 2.24±0.05$^{b}$ | 7.35±0.27$^{d}$ | 1.01±0.00$^{a}$ | 1.32±0.02$^{bc}$ | 1.35±0.04$^{ab}$ | 2.16±0.04$^{a}$ | 11.10±1.05$^{b}$ | 2.20±0.06$^{c}$ | 2.09±0.07$^{b}$ | 0.83±0.03$^{c}$ |
| 陕西秦椒 | 2.25±0.04$^{b}$ | 11.33±0.28$^{b}$ | 1.02±0.00$^{a}$ | 1.36±0.02$^{b}$ | 1.40±0.09$^{a}$ | 1.82±0.02$^{bc}$ | 12.30±0.44$^{b}$ | 2.40±0.03$^{a}$ | 2.17±0.02$^{ab}$ | 0.91±0.02$^{b}$ |

注：同一列不同小写字母表示不同样本间差异显著（$P<0.05$）。

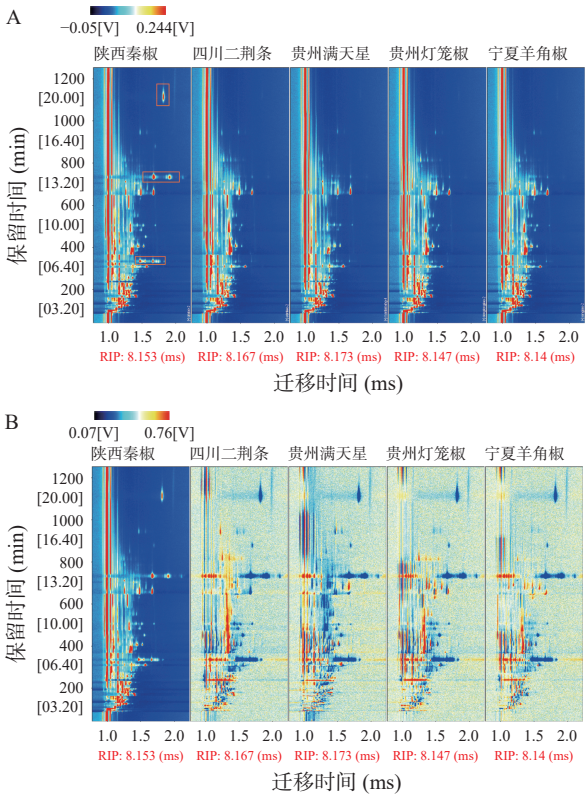



图 3　不同品种辣椒油挥发性成分的 GC-IMS 二维谱图(A)、差异谱图(B)

Fig.3　Two-dimensional GC-IMS spectra (A) and differential spectra (B) of volatile components in different varieties of chili oil

导致辣椒油风味特征产生显著差异的主导因素。

2.3.2　不同品种辣椒油挥发性成分的定性分析　为了进一步分析不同品种辣椒油具体挥发性风味化合物的差异，本文利用 GC-IMS 技术并结合内置数据库，对五种辣椒油样品中的挥发性化合物进行了分析，共检测出 71 个峰。通过软件内置的 NIST2014 和 IMS 数据库鉴定出 41 种挥发性化合物，包括醛类 12 种、酮类 8 种、醇类 5 种、酯类 3 种、酸类 4 种、萜烯类 2 种、呋喃类 2 种、芳香烃类 1 种、含氮类化合物 2 种、含硫化合物 1 种、其他化合物 1 种，如附表 1(附表 1，详见本刊官网 http://www.spgykj.com/_文章的网络版)所示。

结合附表 1和图 4 可知，醛类、酮类和酸类化合物在五种辣椒油挥发性风味组分中的占比最高。其中，醛类化合物的占比均在 27% 以上，主要包括 3-甲基丁醛、己醛、2-甲基-2-戊烯醛和庚醛，这些醛类化合物主要来源于脂肪氧化，种类最多且含量高阈值低[28]，总体呈现脂香、坚果味和青草味，对辣椒油整体风味的贡献显著。其次是酮类和酸类化合物，其含量占比均在 12% 以上，有研究表明，饱和脂肪酸氧化分解会产生烯烃、醇等物质，这些物质在高温条件下可进一步氧化形成酮类化合物[29]。此外，酮类也可能通过美拉德反应和氨基酸降解途径产生[30]，这些酮类化合物主要包括 1-辛烯-3-酮、1-羟基-2-丙酮、1-戊烯-3-酮等，呈现果香和脂肪香气，对油脂风味有积极影响。酸类化合物主要来自脂肪的水解及氧化过程中产生的小分子脂肪酸[31]，主要包括乙酸、丙酸和 3-甲基戊酸等，赋予辣椒油酸味、青草香和辛辣气息。四川二荆条辣椒油中醛类、酸类及含硫化合物的峰体积最高，与电子鼻分析结果相符。此外，陕西秦椒辣椒油在萜烯类与酯类化合物的含量相对较高，其中 $\alpha$-水芹烯、己酸乙酯和正戊酸甲酯等化合物主要贡献青香和土茴香。

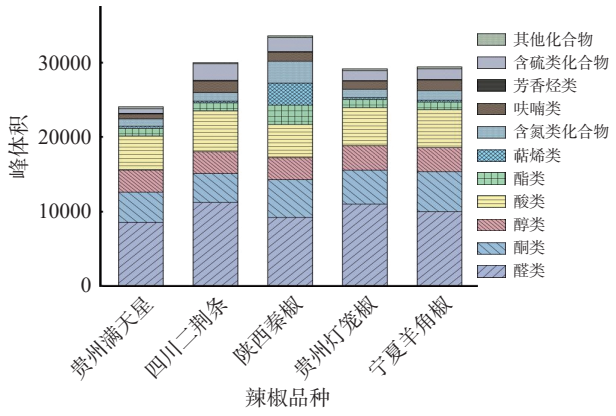



图 4　不同品种辣椒油中挥发性化合物含量变化

Fig.4　Content changes of volatile components in different varieties of chili oil

2.3.3　不同品种辣椒油挥发性有机物指纹图谱差异　为了更直观地比较不同品种辣椒油样品间挥发性化合物种类与含量差异，本研究采用 GalleryPlot 插件生成五种辣椒油样品的挥发性成分指纹图谱，结果如图 5 所示。图中各点颜色深浅反映化合物浓度差异，可以直观呈现五种辣椒油样品之间化合物气味轮廓。化合物可能会产生多个信号，其中单聚体、二聚体和三聚体分别以 M、D、T 表示[32]。结合附表 1 所鉴定出的 41 个挥发性化合物，可以观察到以下特征：

A 框为所有样品共有挥发性物质的特征峰区域，共有 29 种化合物，其中定性 15 种，主要为 2,3-丁二醇、乙酸、3-甲基丁醛、戊醛、乙酸甲酯、1-羟基-2-丙酮等，这些物质整体风味以焦糖、辛辣刺激和脂肪香气为主；B 框为贵州灯笼椒、四川二荆条、宁夏羊角椒、陕西秦椒样品中信号强度显著高于贵州满天星的物质，共有 19 种化合物，其中鉴定出 9 种，主要有 2-甲基-1-丁醇、吡嗪、1-戊烯-3-醇、3-甲基戊酸、2-呋喃甲醇、2-甲基-1-戊醇、2-苯乙醛、1-甲基-1H-吡咯-2-甲醛、庚醛等，风味呈现烤洋葱、坚果、热带果香及刺激性气味；C 框是四川二荆条辣椒油样品中特有或信号强度显著高于其他辣椒的物质，主要有 3-辛酮、1,3-二甲基三硫化物、(-)-$\beta$-蒎烯，赋予该样品青香、脂香和辛香风味；D 框是宁夏羊角椒和陕西秦椒辣椒油样品中信号强度显著高于其他辣椒的物质，共 12 种化合物，定性出 8 种，包括 2-甲基丙醛、3-羟基-2-丁酮、3-戊烯-2-酮、1-乙酰氧基-2-丙酮、2,4-庚二烯醛、1-辛烯-3-酮、1-戊烯-3-醇、乙苯

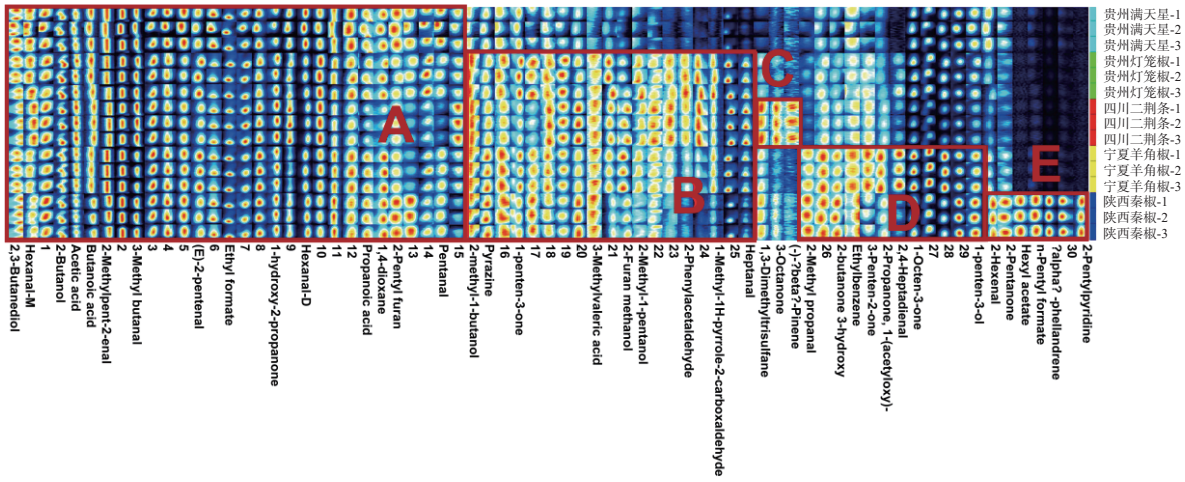



图 5　不同品种辣椒油挥发性化合物指纹图谱

Fig.5　Fingerprints of volatile components in different varieties of chili oil

等，主要贡献坚果味、黄油味和蘑菇香气；E 框为陕西秦椒辣椒油样品中信号强度较高的物质，共 7 种化合物，其中定性出 6 种，包括 2-己烯醛、2-戊酮、己酸乙酯、正戊酸甲酯、α-水芹烯、2-戊基吡啶等，风味贡献以甜杏仁、果香、青香、土茴香及脂肪香为特征。上述结果表明不同品种干辣椒对辣椒油气味轮廓影响较大，整体呈现辛辣味、脂肪香、焦香等气味特征；其中四川二荆条气味谱图与贵州灯笼椒相似，具有独特的辛香和青香；陕西秦椒与宁夏羊角椒相似，具有独特的杏仁香、果香和青香；而贵州满天星整体气味较弱，挥发性化合物数量最少。

2.3.4　不同品种辣椒油挥发性成分的主成分分析（principal component analysis, PCA）　正交偏最小二乘法判别分析（OPLS-DA）通过降维将复杂数据直观化，是一种有监督模式的分析方法。其通过去除代谢物中与分类变量不相关的正交变量，从而获取更加可靠的代谢物组间差异的相关程度信息进而筛选差异变量[33]。以定性的 41 个挥发性化合物为 X 变量，不同品种辣椒油样品为 Y 变量，分别建立 PCA 模型和 OPLS-DA 模型。PCA 模型的 $R^2X$=0.995、$Q^2$=0.916；OPLS-DA 模型的 $R^2X$=0.962、$R^2Y$=0.977、$Q^2$=0.93，表明两个模型对不同品种辣椒油中挥发性化合物均具有较好的预测能力。从不同品种辣椒油挥发性成分的 PCA 得分图（图 6A）可以看出，不同品种的辣椒油样品表现出明显的区分。其中贵州满天星和陕西秦椒各自归为一类，而四川二荆条、贵州灯笼椒、宁夏羊角椒分布较为接近，可归为同一大类。进一步构建的 OPLS-DA 模型，并对其进行 200 次置换模拟，结果如图 6B 所示，模型 $Q$ 回归线与横坐标交叉，且截距为负数，所有置换检验 $R^2$ 和 $Q^2$ 均低于原始值，表明模型未出现过拟合，预测性能良好[34]，能够用来描述不同品种辣椒油中挥发性化合物的差异。且从图 6C 聚类分析图可以看出，不同品种辣椒油中挥发性化合物存在显著差异，该结果与 PCA 分类结果一致。所有样品可分为两大类，其中第一大类包括贵州满天星和陕西秦椒；第二类包括四川二荆条、贵州灯笼椒和宁夏羊角椒，其中贵州灯笼椒和宁夏羊角椒进一步聚为一小类。

变量投影重要性（variable importance in projection, VIP）能够筛选出不同品种辣椒油中的特征挥发性化合物[35]。为了进一步表征不同品种辣椒油中挥发性化合物之间的差异，计算并检验了 OPLS-DA 模型的 VIP 得分，采用“大于 1”的标准，VIP 值越高，表明该化合物在不同品种辣椒油中的差异越显著[36]。如图 6D 所示，共筛选出 14 种（VIP>1）的关键差异挥发性化合物，包括醛类 6 种、酮类 5 种、醇类 1 种、酯类 1 种、芳香烃类 1 种，分别为 2-丁醇、1-乙酰氧基-2-丙酮、3-戊烯-2-酮、乙苯、乙酸甲酯、1-甲基-1H-吡咯-2-甲醛、2-甲基-2-戊烯醛、3-甲基丁醛、2,4-庚二烯醛、3-辛酮、1-辛烯-3-酮、1-戊烯-3-酮、2-苯乙醛、反式-2-戊烯醛，这些挥发性化合物是导致不同品种辣椒油风味组分差异显著的重要特征标志，主要贡献果香、甜香、坚果、脂香和辛辣味等。

上述结果表明，不同品种辣椒油风味组成差异显著，其中贵州满天星和陕西秦椒气味轮廓相似，贵州灯笼椒和宁夏羊角椒相似。通过 OPLS-DA 模型 VIP 值>1 筛选出 14 种区别不同品种辣椒油特征风味的关键差异挥发性化合物。由于 GC-IMS 检测的大多为 $C_4$~$C_{10}$ 之间的小分子、挥发性强且含量低的挥发性成分，因此后续将采用 GC-MS 检测 $C_8$~$C_{20}$ 之间的分子量大且含量较高的挥发性成分。

## 2.4　HS-SPME-GC-MS 对不同品种辣椒油的挥发性成分分析

2.4.1　不同品种辣椒油挥发性成分的含量和种类变化　采用 HS-SPME-GC-MS 对不同品种辣椒油的挥发性风味物质进行定性定量分析。由附表 2（附表 2，详见本刊官网 http://www.spgykj.com/_文章的网络版）可知，五种辣椒油中共检测鉴定出 99 种挥发性化合物，主要包括酯类 10 种、醛类 27 种、醇类 12 种、酸类 3 种、酮类 23 种、酚类 3 种、呋喃类

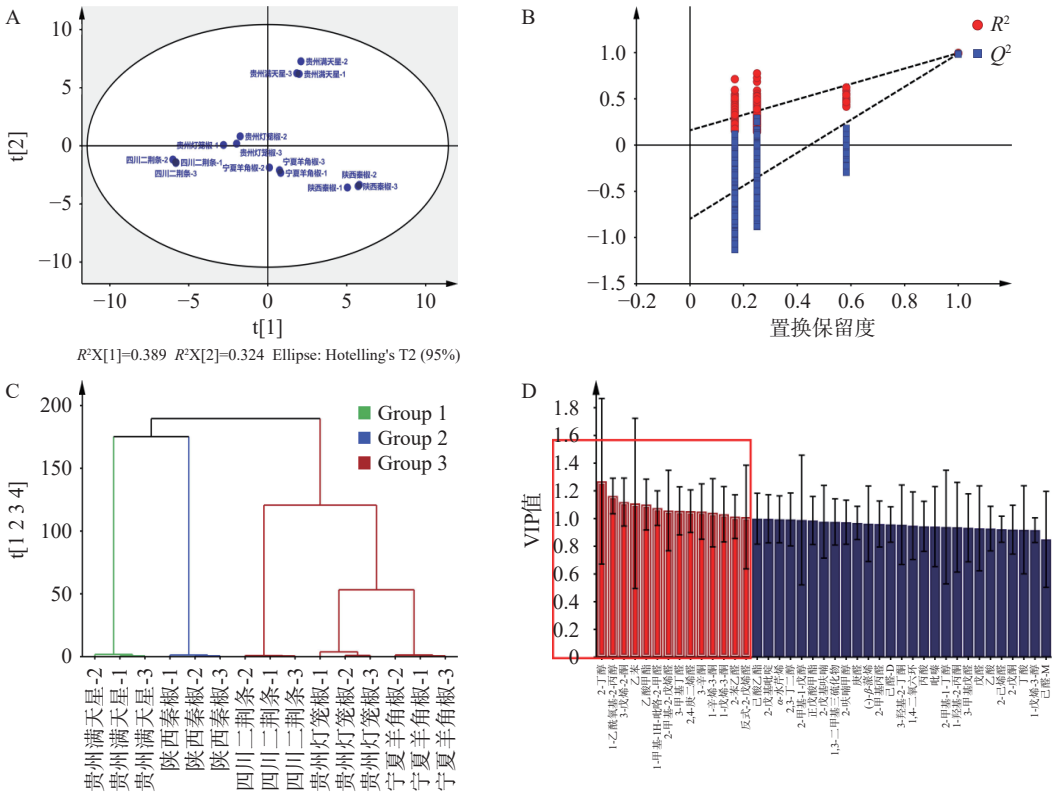



图 6　不同品种辣椒油挥发性成分的 PCA 得分图

Fig.6　PCA scores of volatile components in different varieties of chili oil

5 种、烯烃类 2 种、芳香烃类 2 种、烷烃类 2 种及含氮类 10 种。如图 7 所示，5 种不同品种辣椒油中 VOCs 数量和含量均存在较大差别，这与不同品种辣椒原料直接相关。从化合物数量上看（图 7A），贵州满天星、四川二荆条、陕西秦椒、贵州灯笼椒、宁夏羊角椒辣椒油中分别含有 65、75、80、68、57 种挥发性化合物，其中陕西秦椒的 VOCs 数量最多，其次为四川二荆条，而宁夏羊角椒中 VOCs 数量则最少。5 种辣椒油样品中 VOCs 组成种类相似，主要以醛类、酮类、醇类、酯类、含氮化合物、酸类、呋喃类等为主，该结果与电子鼻分析结果基本一致。

从化合物相对含量上看（图 7B），二荆条辣椒油中挥发性化合物的总含量最高（591.58 μg/g），秦椒辣椒油次之（582.66 μg/g），而羊角椒、灯笼椒和满天星辣椒油中挥发性化合物的总含量分别为 419.02、365.66 和 338.22 μg/g。在各类挥发性成分中，酮类化合物相对含量在五种辣椒油中占比最高（47.26%~55.47%），醛类化合物次之（28.03%~37.65%），表明酮类和醛类化合物在整体风味构成中占据主导地位，这一发现与杨芳等[37] 及陶秀梅等[38] 的研究结果相符，为辣椒油提供果香、坚果香和脂肪香气。醇类化合物的含量居于醛类和酮类化合物之后（4.92%~7.95%），通常来源于醛类等脂质氧化产物的还原反应[39]，为辣椒油提供甜香和果香风味。此外，醇类与酸类化合物可通过酯化反应[40] 生成具有果香、清香特征的酯类化合物（1.04%~2.35%），是降低辣椒油中“异味”和提升辣椒油酯香气的途径之一。

通过图 7C 韦恩图可直观看出共有物质和特有物质。在 5 种样品中检测到 40 种共有化合物，包含（E,Z）-2,4-癸二烯醛、（E,E）-2,4-庚二烯醛、（E）-2-癸烯醛、糠醛、庚醛、己醛、壬醛、2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4H-吡喃-4-酮、呋喃酮、2-辛烯等化合物，主要贡献油脂、焦甜、辛辣刺激和坚果香。四川二荆条中检测到 7 种特有化合物，包括 5,5-二甲基-2(5H)-呋喃酮、异麦芽醇、异丙基丙烯酸酯、4-氧代丁酸甲酯、四甲基吡嗪、2-（甲氧基甲基）呋喃、3-甲基丁酸，主要贡献焦糖甜香、柑橘苹果果香和奶酪香，带有坚果和烘烤香气。陕西秦椒检测到 5 种特有化合物，包括 3-甲基-2-丁烯酸甲酯、2-乙基-6-甲基吡嗪、甲基吡嗪、2-吡咯烷酮、4-乙烯基苯酚，主要贡献草莓果香、烤面包香、巧克力香以及辛辣烟熏味。贵州灯笼椒检测到 3 种特有化合物，包括 1-羟基-2-丙酮、苯乙酮、（Z）-3-辛烯-1-醇，主要贡献花香、甜香和蘑菇气味。而贵州满天星和宁夏羊角椒中不含特有化合物。上述结果表明四川二荆条和陕西秦椒辣椒油样品中香气最为突出，挥发性化合物含量高且数量多，分别具有独特的甜香、焦香和果香、烤香、辛辣味；其次为贵州灯笼椒样品，具有独特的花香。而贵州满天星和宁夏羊角椒样品的综合香气则不够突出。

2.4.2　不同品种辣椒油挥发性化合物的正交偏最小二乘法判别分析（orthogonal partial least squares discriminant analysis，OPLS-DA）　本研究以定性的

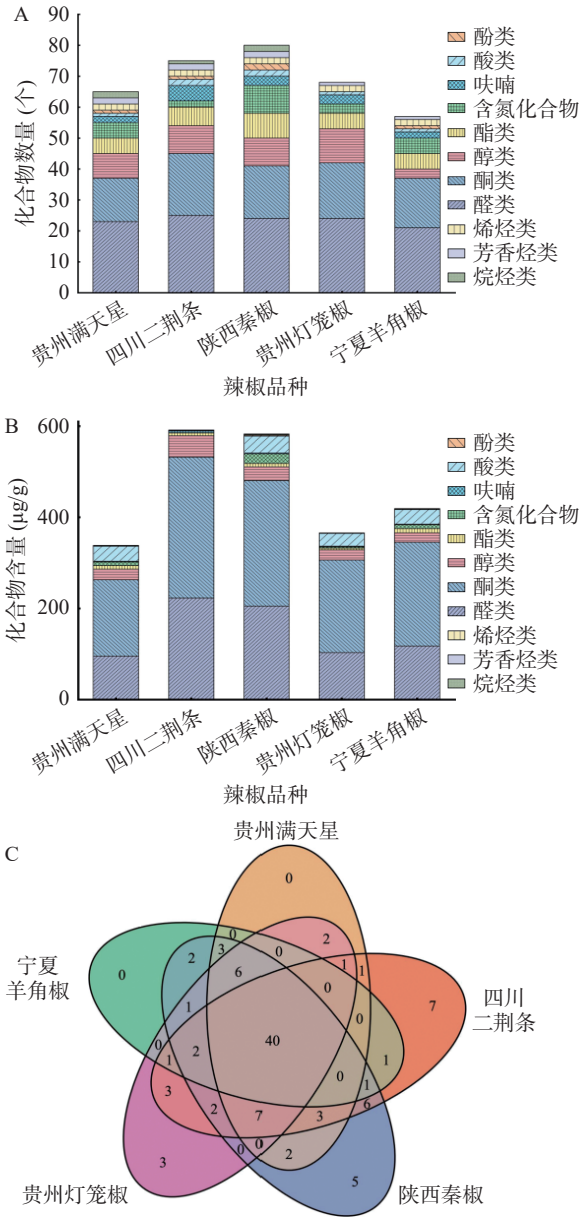



图 7 不同品种辣椒油挥发性化合物的种类图(A)、含量图(B)和韦恩图(C)

Fig.7 Amount (A), content (B) and veen diagram (C) of volatile components in different varieties of chili oil

99 个挥发性化合物作为 X 变量，不同辣椒油样品作为 Y 变量，构建 OPLS-DA 模型，模型的判别效果如图 8A 所示，$R^2X$=0.859，$R^2Y$=0.991，$Q^2$=0.953，说明该模型对不同品种辣椒油中挥发性化合物具有较好的预测能力。对 OPLS-DA 模型进行 200 次置换模拟，结果如图 8D 所示，模型 $Q$ 回归线与横坐标交叉，且截距为负数，所有置换检验 $R^2$ 和 $Q^2$ 均低于原始值，表明未出现过拟合，该模型的预测能力良好[34]，能够用来表征不同品种辣椒油中挥发性化合物的差异。且从图 8A 中可以看出，各辣椒油样品挥发性成分之间存在显著差异，该结果与电子鼻 PCA 结果一致。样品可分为 4 个组别：宁夏羊角椒集中于第一象限，陕西秦椒分布于第二象限，四川二荆条位于第三象限，贵州灯笼椒和贵州满天星则聚集于第四象限。

图 8B 双标图显示，挥发性化合物与辣椒样品的距离越近，其在样品中的作用越关键。结合附表 2 可以看出，四川二荆条与 5,5-二甲基-2(5H)-呋喃酮、甲硫基丙醛、2-乙烯基呋喃、5-壬醇等化合物紧密相关，具有焦甜、坚果、脂肪及肉味香气。陕西秦椒与 3-甲基-2-丁烯酸甲酯、2-乙基-6-甲基吡嗪、2-吡咯烷酮、2-乙烯基苯酚等化合物相邻，呈现出果香、坚果香、辛辣和油脂气味。贵州灯笼椒与 1-羟基-2-丙酮、苯乙酮、(Z)-3-辛烯-1-醇相邻，展现出甜香、花香和青香。宁夏羊角椒与 1-(1H-吡咯-2-基)乙酮、邻苯二甲酸二丁酯、E-2-十一烯醛等化合物相邻，主要贡献青草、烘烤和坚果香。贵州满天星与苯甲醛、乙偶姻相邻，展现出坚果、杏仁和脂肪香气。

为了进一步表征不同品种辣椒油中挥发性化合物之间的差异，计算并检验了 OPLS-DA 模型的 VIP 得分。如图 8C 所示，共筛选出 48 种 VIP>1 标志性挥发性化合物，主要包括醛类化合物 14 种，酮类 10 种，含氮化合物 6 种，呋喃类化合物 5 种，醇类 4 种，烯烃类 2 种，酯类、酚类、酸类、烷烃、芳香烃类各 1 种，其他类化合物 2 种。为更清晰地展示挥发性化合物在不同品种辣椒油中的含量差异分布，在 48 种 VIP 值>1 的差异风味化合物中筛选出 16 种 VIP 值>1.1 的关键差异化合物绘制聚类热图，通过颜色变化直观表征不同样品中挥发性化合物含量的差异。如图 8E 所示，不同品种辣椒油差异挥发性化合物的样本块分布具有显著差异性。从聚类结果可以看出，16 种关键差异挥发性化合物可以被区分为 5 类，其中 1-(1H-吡咯-2-基)乙酮、3-甲基丁醛、3,5-二羟基-2-甲基-4H-吡喃-4-酮、(E)-2-辛烯醛、2(3H)-呋喃酮聚为一类(A 类)，1-羟基-2-丙酮聚为一类(B 类)，1-甲基-1H-吡咯、1-(4-甲基苯基)乙酮、糠基甲酸酯、茴香脑、苯乙酮、2-乙酰基-5-甲基呋喃聚为一类(C 类)，苯甲醛、1-辛烯-3-醇聚为一类(D 类)，5-(羟甲基)二氢呋喃-2(3H)-酮、N-乙酰基-3-吡咯啉聚为一类(E 类)。其中，A 和 B 类区域中化合物在各样品间差异最为显著，其中，来源于异亮氨酸的 Strecker 降解[41] 的 3-甲基丁醛可作为陕西秦椒标志性差异化合物，赋予其果香特征；1-羟基-2-丙酮是贵州灯笼椒标志性差异化合物，主要贡献焦香；2(3H)-呋喃酮是四川二荆条标志性差异化合物，主要贡献黄油、焦糖甜香，两者都是多由氨基酸与还原糖在加热条件下通过美拉德反应生成[42]。上述结果说明导致不同品种辣椒油风味差异的挥发性化合物主要有 1-(1H-吡咯-2-基)乙酮、3-甲基丁醛、3,5-二羟基-2-甲基-4H-吡喃-4-酮、(E)-2-辛烯醛、2(3H)-呋喃酮、1-羟基-2-丙酮，其中 3-甲基丁醛为陕西秦椒特征果香味的标志性差异化合物，2(3H)-呋喃酮是四川二荆条特征焦糖甜香的标志性差异化合物，1-羟基-2-丙酮则是贵州灯笼椒特征焦香的标志性差异化合物。

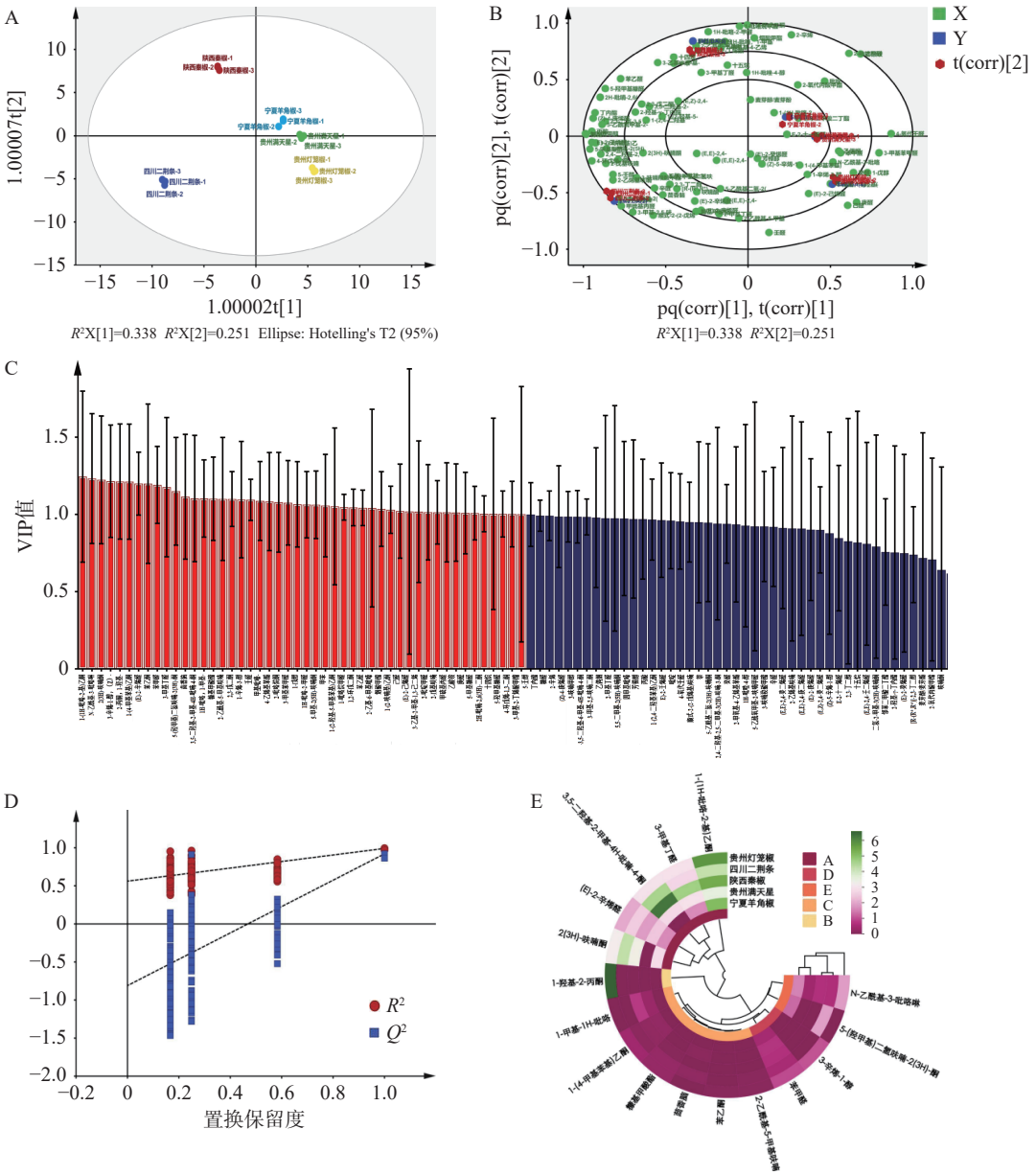



图 8　不同品种辣椒油挥发性化合物的 OPLS-DA 得分图(A)、双标图(B)、置换检验图(C)、VIP 值(D)、聚类热图(E)

Fig.8　OPLS-DA score plot (A), biplot (B), permutation test plot (C), VIP values (D), and clustered heatmap (E) of volatile compounds in chili oils from different varieties

## 2.5　关键差异香气化合物分析

通过计算风味化合物的含量与感官阈值的比值可以得到香气活度值(odor activity value, OAV)，OAV>1 的风味化合物被认为是关键香气化合物，对辣椒油香气组成有较大贡献，OAV 越大，影响程度越重要[43]。对 HS-SPME-GC-MS 检测到的 48 种 VIP 值>1 的差异风味化合物进行 OAV 计算，筛选出 17 种 VIP>1 且 OAV>1 的关键差异香气化合物，如表 2 所示，其中贵州满天星、四川二荆条、陕西秦椒、贵州灯笼椒和宁夏羊角椒辣椒油样品分别检测到 15、15、14、14 和 12 种关键差异香气化合物。5 种辣椒油含有 11 种共有的关键差异香气化合物，包括(E)-2-辛烯醛、苯甲醛、3-甲基丁醛、(E)-2-己烯醛、苯乙醛、庚醛、己醛、壬醛、2-戊基呋喃、甲苯、5-甲基糠醛，主要贡献果香、草本香和焦糖、油脂、坚果烘烤香。其中，(E)-2-辛烯醛(399.39~627.33)、3-甲基丁醛(124.49~361.08)和苯乙醛(63.37~227.35)在所有样品中具有较高的 OAV，为辣椒油提供了丰富的脂肪香、坚果味、辣香、焦香及蜂蜜甜香。苯甲醛(7.59~15.64)、己醛(24.86~49.77)、壬醛(22.75~41.17)、5-甲基糠醛(5.41~32.30)、2-戊基呋喃(10.74~25.86)，为辣椒油提供了苦杏仁、油脂、玫瑰、豆香和焦甜香。上述化合物共同构成了辣椒油的整体风味。

四川二荆条辣椒油独有或显著高于其他品种的关键差异香气化合物，包括(E)-2-辛烯醛、甲硫基丙醛、2-戊基呋喃、5-甲基糠醛、茴香脑。其中，甲硫基丙醛因具有极低的阈值和较高的浓度，致使其 OAV 高达 7471.40，是贵州满天星的(797)的 9 倍，贵州灯笼椒(530.80)的 14 倍，是二荆条辣椒油具有土豆、肉味鲜香的主要来源；2-戊基呋喃(25.86)是由亚油

表 2 不同品种辣椒油的挥发性成分的 OAV 分析

Table 2 OAV analysis of volatile components in different varieties of chili oil

| 英文名称 | 化合物名称 | CAS | 阈值[47−48]（mg/kg） | 香气特征 | OAV | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 贵州满天星 | 四川二荆条 | 陕西秦椒 | 贵州灯笼椒 | 宁夏羊角椒 |
| 2-Octenal, (E)- | (E)-2-辛烯醛 | 2548-87-0 | 0.004 | 醛香、油脂味 | 603.44±2.21 | 627.33±27.20 | 456.14±20.41 | 498.39±15.30 | 399.39±9.15 |
| Benzaldehyde | 苯甲醛 | 100-52-7 | 0.06 | 苦杏仁、坚果 | 11.21±0.50 | 8.10±0.50 | 10.80±0.44 | 15.64±1.06 | 7.59±0.50 |
| Butanal, 3-methyl- | 3-甲基丁醛 | 590-86-3 | 0.013 | 焦香、发酵酱香、坚果 | 223.41±11.14 | 207.33±7.71 | 361.08±8.85 | 224.82±14.55 | 124.49±15.30 |
| Acetophenone | 苯乙酮 | 98-86-2 | 5.629 | 果香、山楂香 | – | – | – | 0.02±0.00 | – |
| Ethanone, 1-(4-methylphenyl)- | 1-(4-甲基苯基)乙酮 | 122-00-9 | 1.99 | 花香、果味、樱桃味 | 0.09±0.01 | 0.07±0.00 | 0.11±0.00 | 0.20±0.05 | – |
| 2-Hexenal, (E)- | (E)-2-己烯醛 | 6728-26-3 | 0.424 | 青草、苦杏仁气味 | 1.15±0.36 | 0.81±0.10 | 0.56±0.03 | 0.95±0.14 | 0.57±0.09 |
| Benzeneacetaldehyde | 苯乙醛 | 122-78-1 | 0.083 | 杏仁或樱桃的甜香气味 | 136.87±5.25 | 181.82±3.63 | 227.35±5.81 | 63.37±4.22 | 95.31±3.48 |
| Heptanal | 庚醛 | 111-71-7 | 0.5 | 油脂、油腻味 | 1.07±0.08 | 0.85±0.02 | 0.75±0.12 | 1.40±0.09 | 0.86±0.11 |
| Hexanal | 己醛 | 66-25-1 | 0.075 | 新鲜油脂或青草的气味 | 45.85±2.35 | 34.20±0.61 | 24.86±2.76 | 49.77±2.11 | 30.16±6.91 |
| Nonanal | 壬醛 | 124-19-6 | 0.15 | 豆味、脂肪 | 34.33±1.03 | 37.18±0.17 | 22.75±0.37 | 41.17±2.07 | 22.78±0.70 |
| Methional | 甲硫基丙醛 | 3268-49-3 | 0.0002 | 焦甜香、油脂肉汤鲜香 | 797.00±86.89 | 7471.40±263.33 | – | 530.80±42.00 | – |
| 2,3-Pentanedione | 2,3-戊二酮 | 600-14-6 | 0.0003 | 发酵气味、果味、烘烤味、黄油味和焦糖味 | – | 1983.30±167.82 | 1762.43±32.24 | – | 2072.59±12.44 |
| 1-Octen-3-ol | 1-辛烯-3-醇 | 3391-86-4 | 0.034 | 蘑菇气味 | 38.15±4.00 | 29.61±2.98 | 19.19±5.41 | 42.79±2.80 | – |
| 1-Pentanol | 1-戊醇 | 71-41-0 | 0.47 | 刺鼻的酒精气味，略带甜香和发酵的气息 | 1.77±0.32 | – | – | 1.57±0.38 | – |
| Pyrazine, methyl- | 甲基吡嗪 | 109-08-0 | 27 | 炒坚果、烘烤咖啡 | – | – | 0.05±0.00 | – | – |
| Furan, 2-pentyl- | 2-戊基呋喃 | 3777-69-3 | 0.1 | 豆香、黄油味、焦糖 | 15.21±0.54 | 25.86±1.10 | 19.29±2.61 | 14.55±0.77 | 10.74±0.57 |
| 4-Vinylphenol | 4-乙烯基苯酚 | 2628-17-3 | 14.7 | 药用、辛辣 | – | – | 0.04±0.01 | – | – |
| Toluene | 甲苯 | 108-88-3 | 0.33 | 溶剂气味 | 0.69±0.05 | 0.64±0.02 | 1.15±0.07 | 0.41±0.02 | 0.35±0.23 |
| 2-Furancarboxaldehyde, 5-methyl- | 5-甲基糠醛 | 620-02-0 | 1.11 | 焦糖、甜杏仁味，肉香 | 5.41±0.08 | 32.30±0.12 | 21.50±0.37 | 10.91±0.28 | 14.85±0.22 |
| 5-Hydroxymethylfurfural | 5-羟甲基糠醛 | 67-47-0 | 1000 | 油脂、焦糖 草本 | – | 0.05±0.00 | 0.07±0.01 | – | 0.02±0.01 |
| Ethanone, 1-(2-furanyl)- | 1-(2-呋喃基)乙酮 | 1192-62-7 | 10 | 甜香、坚果香、烤香、杏仁、焦糖、咖啡、烟熏香 | 0.18±0.00 | 0.35±0.01 | 0.30±0.01 | 0.24±0.02 | 0.22±0.01 |
| Pyrazine, 2-ethyl-6-methyl- | 2-乙基-6-甲基吡嗪 | 13925-03-6 | 0.04 | 坚果、烤香、可可咖啡香 | – | – | 10.27±3.98 | – | – |
| 1H-Pyrrole-2-carboxaldehyde | 1H-吡咯-2-甲醛 | 1003-29-8 | 65 | 甜香、坚果香、烘烤香 | – | – | 0.02±0.00 | – | 0.01±0.00 |
| Tetradecane | 十四烷 | 629-59-4 | 1 | 无气味 | 0.08±0.02 | 0.08±0.03 | 0.30±0.11 | – | – |
| Ethanone, 1-(1H-pyrrol-2-yl)- | 1-(1H-吡咯-2-基)乙酮 | 1072-83-9 | 58.58525 | 霉味、坚果味 | 0.06±0.01 | 0.07±0.01 | 0.09±0.01 | 0.10±0.00 | 0.09±0.01 |
| 2-Propanone, 1-hydroxy- | 2-丙酮, 1-羟基- | 116-09-6 | 10 | 甜香、焦糖香 | – | – | – | 0.66±0.01 | – |
| Anethole | 茴香脑 | 104-46-1 | 0.014 | 甜美的甘草、茴香香气 | 5.98±1.66 | 9.76±3.51 | – | – | – |

注: –表示未检出。

酸氧化产生的亚油酸甲酯过氧化氢降解生成[44], 和5-甲基糠醛(32.30)共同赋予二荆条辣椒油更丰富的“焦糖味”[45]。此外, 2,3-戊二酮在四川二荆条(1983.30)、陕西秦椒(1762.43)和宁夏羊角椒(2072.59)辣椒油样品中也呈现出高的 OAV, 其主要通过糖降解途径及降解产物与氨基酸的相互作用生成, 呈现带有坚果香的奶油焦糖味[46]。在陕西秦椒辣椒油样品中独有化合物为 2-乙基-6-甲基吡嗪

(10.27)，是其区别于其他品种的关键风味化合物，主要赋予秦椒油坚果、烤香和可可香气特征。贵州满天星样品中(E)-2-己烯醛(1.15)OAV 高于其他四个品种，主要赋予辣椒青草果香气。综上所述，5 种辣椒油的共同气味特征主要是由(E)-2-辛烯醛、3-甲基丁醛和苯乙醛贡献的脂肪香、焦香和坚果香，而四川二荆条的特征香气则主要是由甲硫基丙醛、2-戊基呋喃和 5-甲基糠醛贡献的肉香和甜香，陕西秦椒和贵州满天星的特征香气是由 2,3-戊二酮、2-乙基-6-甲基吡嗪和(E)-2-己烯醛贡献的坚果香和青草果香，贵州灯笼椒和宁夏羊角椒的特征香气是由 1-辛烯-3-醇和 2,3-戊二酮贡献的花香和青香。

### 2.6　感官属性与关键差异香气化合物的相关性分析

为探明感官风味特征与关键香气化合物之间的关联，本研究对差异挥发性成分与感官属性进行了相关性分析，并绘制了经 $P$ 值矫正后的基于显著性标记的相关性热图(图 9)。该热图采用层次聚类法构建，依据变量间相似性对感官属性与风味化合物进行聚类。颜色梯度表示相关性强弱，范围自−1~1，其中深红色代表强正相关，浅黄色代表强负相关，显著性以星号标识($^{*}P$<0.05，$^{**}P$<0.01，$^{***}P$<0.001)，以表明统计可靠性[49]。通过图中分析结果显示，甲硫基丙醛、2-戊基呋喃和 5-甲基糠醛与焦甜味、坚果味和油脂味呈显著正相关性，而与生青味呈显著负相关($P$<0.05)，其负相关性可能源于这些化合物通过氧化降解生青味的前体[50] 或通过香气掩盖对生青气味的感知；(E)-2-辛烯醛与油脂味呈显著正相关性；己醛、1-戊醇与烟熏味和油腻味呈显著正相关性；(E)-2-己烯醛和油腻味呈显著正相关；壬醛与坚果味呈显著正相关性，与辛辣味和生青味呈显著负相关。

通过聚类分析，风味化合物与感官属性可划分为三大类。第一类包括壬醛、1-辛烯-3-醇、苯甲醛、(E)-2-己烯醛、1-戊醇、己醛、庚醛以及油腻味和烟熏味。该类可进一步细分：苯甲醛、1-辛烯-3-醇和壬醛则与烟熏味聚为一小类；己醛、(E)-2-己烯醛、1-戊醇与庚醛属于脂质氧化产物，与油腻味聚为一小类。第二类包括(E)-2-辛烯醛、甲硫基丙醛、茴香脑、2-戊基呋喃、5-甲基糠醛与坚果味、焦甜味和油脂味感官属性相近，该类化合物可作为烘焙与脂肪风味的重要贡献组分。第三类包括 2,3-戊二酮、甲苯、2-乙基-6-甲基吡嗪、3-甲基丁醛、苯乙醛与生青味、辛辣味感官属性聚为一类。

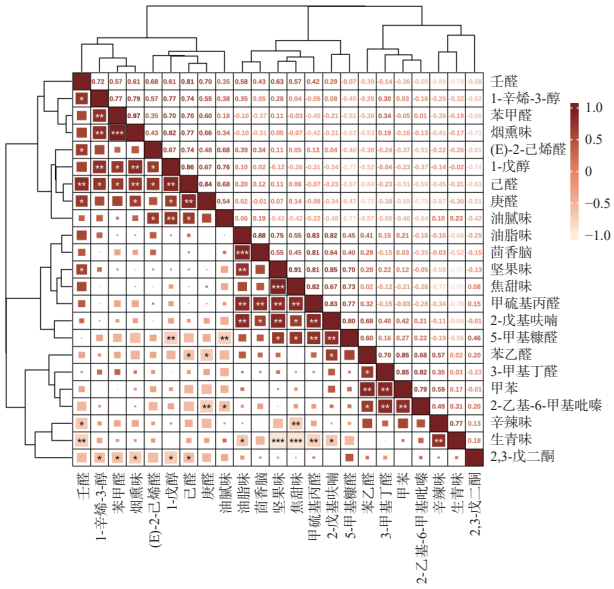



图 9　气味强度与关键差异香气化合物含量的相关性聚类热图

Fig.9　Clustered heat map of correlation between odor intensity and the content of key differential aroma compounds

## 3　讨论与结论

本研究综合应用电子鼻、GC-IMS 和 HS-SPME-GC-MS 技术，结合 PCA、OPLS-DA、聚类热图等多元统计分析方法成功实现了对宁夏羊角椒、陕西秦椒、贵州满天星、贵州灯笼椒、四川二荆条五种代表性辣椒油的有效区分。感官与电子鼻结果表明，不同品种辣椒油特征风味存在明显差异，且在电子鼻 W2S 和 W1W 传感器上表现出显著差异($P$<0.05)。进一步通过 GC-IMS 和 GC-MS 在五种辣椒油中分别鉴定出 41 种和 99 种挥发性化合物，GC-IMS 筛选出 14 种 VIP>1 的关键差异化合物，GC-MS 筛选出 17 种 VIP>1 且 OAV>1 的关键差异香气化合物。其中，五种辣椒油中的共有关键差异香气化合物，主要包括(E)-2-辛烯醛、3-甲基丁醛、苯乙醛、苯甲醛、己醛、壬醛、5-甲基糠醛、2-戊基呋喃，为辣椒油提供丰富的焦甜香、脂肪香、坚果味及辣香。该结果和前人研究结果[4−5] 类似，均认为 3-甲基丁醛、(E)-2-辛烯醛、苯甲醛、壬醛对风味贡献度高，是影响辣椒油特征风味的关键化合物。此外，通过对比研究发现，四川二荆条辣椒油的整体香气特征最佳，且具有典型的肉香和甜香，主要来源于甲硫基丙醛、2-戊基呋喃和 5-甲基糠醛的香气贡献；陕西秦椒辣椒油香气特征最为丰富，香辣气味浓郁，其典型气味主要来源于 2-乙基-6-甲基吡嗪；贵州灯笼椒样品，具有独特的花香，主要来源于 1-辛烯-3-醇和 2,3-戊二酮的香气贡献。而贵州满天星和宁夏羊角椒呈现的辣椒油香气特征均不明显，表明二者感官品质相对较弱。陈雨佳等[5] 研究也表明二荆条辣椒最适合制作辣椒油，其香气特征最佳，与本文结果一致。

本研究成功揭示了不同品种辣椒油的风味组成差异，该结果可以指导辣椒油产品的品质评价和产品开发，能够推动后期利用不同配比的辣椒原料制作高品质风味辣椒油产品，以期为今后辣椒油的标准化和工业化生产提供理论依据和技术支撑，助力辣椒油产业的高质量发展。然而，本研究虽鉴定出了不同品种辣椒油的关键差异风味化合物，但其感官贡献度仍需通过 GC-O 嗅闻或感官评价实验进一步验证，从而实现风味的精准鉴定与定向调控。

© 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] 李昌文. 辣椒油的加工工艺研究[J]. 中国调味品, 2007, 32(11): 53−54. [LI Changwen. Study on the technology of pepper's product mixed edible oil[J]. China Condiment, 2007, 32(11): 53−54.]

[2] XU Xinxing, WU Bingbing, ZHAO Wenting, et al. Shifts in autochthonous microbial diversity and volatile metabolites during the fermentation of chili pepper (*Capsicum frutescens* L.)[J]. Food Chemistry, 2021, 335: 127512.

[3] 中国报告大厅. 2025-2030 年中国辣椒油产业运行态势及投资规划深度研究报告[EB/OL]. (2023-11-21)[2025-08-08]. https://www.chinabgao.com/info/1247239.html. [China Report Hall. In-depth research report on operation situation and investment planning of China's chili oil industry, 2025-2030[EB/OL]. (2023-11-21)[2025-08-08]. https://www.chinabgao.com/info/1247239.html.]

[4] 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. [JI Desheng, ZHENG Guiqing, SUN Jun, et al. Analysis of flavor compounds in chili oil by head-space solid-phase micro-extraction gas chromatography mass spectrometry[J]. Modern Food Science & Technology, 2017, 33(6): 276−284.]

[5] 陈雨佳, 易宇文, 张浩, 等. 多元化学计量法结合电子感官分析不同品种干辣椒对辣椒油风味特征影响[J]. 食品科学, 2025, 46(17): 244−253. [CHEN Yujia, YI Yuwen, ZHANG Hao, et al. Effects of different varieties of chili on the flavor characteristics of chili oil analyzed by multivariate chemometrics combined with electronic nose[J]. Food Science, 2025, 46(17): 244−253.]

[6] 王雪雅, 陆宽, 孙小静, 等. 贵州不同辣椒品种的品质及挥发性成分分析[J]. 食品科学, 2018, 39(4): 212−218. [WANG Xueya, LU Kuan, SUN Xiaojing, et al. Quality and flavor analysis of different hot pepper varieties grown in Guizhou[J]. Food Science, 2018, 39(4): 212−218.]

[7] 蓬桂华, 王永平, 李文馨, 等. 25 个干辣椒品种色、香、味品质差异评价[J]. 食品工业科技, 2021, 42(8): 242−248. [PENG Guihua, WANG Yongping, LI Wenxin, et al. Differences and comprehensive of color, aroma and taste quality of 25 dry pepper varieties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(8): 242−248.]

[8] 张小慧, 连梦瑶, 李欢, 等. 不同品种辣椒挥发性香味物质的对比[J]. 食品工业, 2023, 44(12): 119−125. [ZHANG Xiaohui, LIAN Mengyao, LI Huan, et al. Comparison of volatile aroma substances in different varieties of pepper[J]. The Food Industry, 2023, 44(12): 119−125.]

[9] LI Wenqi, WANG Yuan, XING Lijie, et al. Analysis of volatile and non-volatile components of dried chili pepper (*Capsicum annuum* L.)[J]. Foods, 2025, 14(5): 712.

[10] ZHU Yiwen, LI Xiang, JIANG Shui, et al. Multi-dimensional pungency and sensory profiles of powder and oil of seven chili peppers based on descriptive analysis and Scoville heat units[J]. Food Chemistry, 2023, 411: 135488.

[11] 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. [ZHANG Hongxin, LIU Hui, CHEN Guangjing, et al. Study on the quality of chili oil products from different chili varieties[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(5): 190−198.]

[12] 石自彬, 周世中. 辣椒品种对辣椒油品质影响研究[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(2): 69−73. [SHI Zibin, ZHOU Shizhong. Study on the effect of chili varieties on the quality of chili oil[J]. Cereals & Oils, 2022, 35(2): 69−73.]

[13] 兰韬, 陈李品, 王涛, 等. 基于 E-nose、GC-MS 和 GC-IMS 分析不同制油工艺对海南山茶油品质及风味特征的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(17): 63−77. [LAN Tao, CHEN Lipin, WANG Tao, et al. Investigating the impact of different oil production processes on the quality and flavor characteristics of Hainan *Camellia* oil based on E-nose, GC-MS, and GC-IMS analyses[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(17): 63−77.]

[14] TIGGEMANN L, BALLEN S C, BOCALON C M, et al. Electronic nose system based on polyaniline films sensor array with different dopants for discrimination of artificial aromas[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 43: 112−116.

[15] WANG Zhaogai, ZHAO Lili, JIANG Pengfei, et al. Sensory properties of rehydrated *Toona sinensis* shoots after dehydrated by different drying methods and association with gamma-glutamyl transferase reaction[J]. Food Chemistry, 2024, 448: 139075.

[16] 赵丽丽, 王继红, 卢晨曦, 等. 气相色谱-离子迁移谱结合多元统计学分析不同包装对香椿粉品质的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(7): 252−262. [ZHAO Lili, WANG Jihong, LU Chenxi, et al. Effect of different packaging materials on the quality of *Toona sinensis* powder analyzed by gas chromatography-ion mobility spectrometry combined with multivariate statistical analysis[J]. Food Science, 2024, 45(7): 252−262.]

[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. [YANG Fang, YUAN Haibin, JIA Hongfeng, et al. Effects of chili varieties on physicochemical properties and flavor compounds of chili oil based on GC-IMS combined with multivariate statistical methods[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(19): 319−328.]

[18] 李娟, 任路静, 孙冠男, 等. 气相色谱-质谱联用技术及其在代谢组学中的应用[J]. 生物工程学报, 2013, 29(4): 434−446. [LI Juan, REN Lujing, SUN Guannan, et al. Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) and its application in metabonomics[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2013, 29(4): 434−446.]

[19] 张乐, 魏依馨, 史冠莹, 等. 基于 GC-IMS 和 GC-MS 技术结合化学计量法分析干燥方式对香椿挥发性成分的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(11): 222−234. [ZHANG Le, WEI Yixin, SHI Guanying, et al. Analysis of the effect of drying methods on volatile components of *Toona sinensis* based on GC-IMS and GC-MS combined with chemometrics[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(11): 222−234.]

[20] 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. [YANG Hui, HUANG Lühong, ZHANG Fan, et al. Effect of oil temperature on the flavor of chilli oil by GC-IMS and sensory evaluation[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(9): 328−335.]

[21] 叶梦宇, 王嘉昊, 徐怀德, 等. 油温对辣椒油品质的影响[J]. 中国调味品, 2022, 47(1): 124−127,132. [YE Mengyu, WANG Jiahao, XU Huaide, et al. Effect of oil temperature on the quality of chili oil[J]. China Condiment, 2022, 47(1): 124−127,132.]

[22] LIU Miao, HU Liu, DENG Na, et al. Effects of different hot-air drying methods on the dynamic changes in color, nutrient and aroma quality of three chili pepper (*Capsicum annuum* L.) varieties[J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101262.

[23] LI Dingding, CHU Beibei, LI Bo, et al. The difference analysis of physicochemical indexes and volatile flavor compounds of chili oil prepared from different varieties of chili pepper[J]. Food Research International, 2024, 190: 114657.

[24] ZHANG Jing, WANG Cheng, WANG Junwen, et al. Comprehensive fruit quality assessment and identification of aroma-active compounds in green pepper (*Capsicum annuum* L.)[J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 9: 1027605.

[25] 李俊秀, 姜三平. 基于主成分分析的图像自适应阈值去噪算法[J]. 红外技术, 2014, 36(4): 311. [LI Junxiu, JIANG Sanping. Adaptive threshold image denoising algorithm based on principal

component analysis[J]. Infrared Technology, 2014, 36(4): 311. ]
[ 26 ] RODRÍGUEZ-BURRUEZO A, KOLLMANNSBERGER H, GONZÁLEZ-MAS M C, et al. HS-SPME comparative analysis of genotypic diversity in the volatile fraction and aroma-contributing compounds of *Capsicum fruits* from the annuum−chinense−frutescens complex[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(7): 4388−4400.
[ 27 ] 杨芳, 邓凤琳, 袁海彬, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱结合多元统计方法研究辣椒产地对辣椒油理化性质和风味成分的影响[J]. 核农学报, 2023, 37(7): 1393−1402. [ YANG Fang, DENG Fenglin, YUAN Haibin, et al. Study on physicochemical properties and flavor components of chili oil from different geographical origins based on gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) combined with multivariate statistical method[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2023, 37(7): 1393−1402. ]
[ 28 ] 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.
[ 29 ] ZHANG Qing, WAN Chong, WANG Chenzhi, et al. Evaluation of the non-aldehyde volatile compounds formed during deep-fat frying process[J]. Food Chemistry, 2018, 243: 151−161.
[ 30 ] ZHANG Lang, HU Yingying, WANG Yan, et al. Evaluation of the flavour properties of cooked chicken drumsticks as affected by sugar smoking times using an electronic nose, electronic tongue, and HS-SPME/GC-MS[J]. LWT, 2021, 140: 110764.
[ 31 ] 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. ]
[ 32 ] 赵丽丽, 李怡晴, 徐梦瑶, 等. 1-MCP 结合主动气调保鲜对鲜切小米辣贮藏品质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(17): 373−385. [ ZHAO Lili, LI Yiqing, XU Mengyao, et al. Effect of 1-MCP combined with controlled atmosphere preservation on the storage quality of freshly cut *Capsicum frutescens*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(17): 373−385. ]
[ 33 ] 张琴, 董晓庆, 林欣, 等. 基于 UPLC-MS/MS 的不同产地蜂糖李果实初生代谢差异分析[J]. 食品科学, 2023, 44(8): 284−292. [ ZHANG Qin, DONG Xiaoqing, LIN Xin, et al. Ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry-based metabolomic analysis of primary metabolites in 'Fengtang' Plum fruits from different geographical origins[J]. Food Science, 2023, 44(8): 284−292. ]
[ 34 ] 丁习林, 王桂瑛, 邹颖玲, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱结合多元统计学分析 KCl 部分替代 NaCl 对宣威火腿挥发性风味化合物的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(24): 190−198. [ DING Xilin, WANG Guiying, ZOU Yingling, et al. Influence of partial replacement of NaCl with KCl on the volatile compounds of Xuanwei ham investigated by gas chromatography-ion mobility spectrometry combined with multivariate statistical analysis[J]. Food Science, 2020, 41(24): 190−198. ]
[ 35 ] 倪瑞洁, 詹萍, 田洪磊. 基于 GC-IMS 结合多元统计方法分析炸制时间对花椒调味油挥发性物质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(6): 279−286. [ NI Ruijie, ZHAN Ping, TIAN Honglei. Effects of frying time on volatile flavor compounds in fried pepper (*Zanthoxylum bungeanum*) oil as analyzed by gas chromatography-ion mobility spectrometry and multivariate statistical analysis[J]. Food Science, 2022, 43(6): 279−286. ]
[ 36 ] 刘少瑛, 周志磊, 俞红波, 等. GC×GC-TOFMS 结合化学计量学解析传统型半干黄酒的挥发性陈化标志物质[J]. 食品科学, 2023, 44(18): 249−258. [ LIU Shaopu, ZHOU Zhilei, YU Hongbo, et al. Characterization of volatile aging markers in traditional semi-dry Huangjiu by comprehensive two-dimensional gas chromatography-time of flight mass spectrometry and chemometrics[J]. Food Science, 2023, 44(18): 249−258. ]
[ 37 ] 杨芳, 邓凤琳, 贾洪锋, 等. 辣椒面颗粒度对辣椒油理化性质和挥发性风味物质的影响[J]. 食品与机械, 2023, 39(10): 157−165. [ YANG Fang, DENG Fenglin, JIA Hongfeng, et al. Study on the effects of granularity of paprika on physicochemical properties and volatile flavor compounds of chili oil[J]. Food & Machinery, 2023, 39(10): 157−165. ]
[ 38 ] 陶秀梅, 刘昌树, 刘建国, 等. 不同伴随物含量的菜籽油对辣椒油风味特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(20): 199−208. [ TAO Xiumei, LIU Changshu, LIU Jianguo, et al. Effects of rapeseed oils with different levels of concomitants on the flavour characteristics of chilli oils[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(20): 199−208. ]
[ 39 ] ZAMORA R, NAVARRO J L, AGUILAR I, et al. Lipid-derived aldehyde degradation under thermal conditions[J]. Food Chemistry, 2015, 174: 89−96.
[ 40 ] CARMONA-ESCUTIA R P, PONCE-ALQUICIRA E, GARCÍA-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.
[ 41 ] 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.
[ 42 ] YANG Ping, SONG Huanlu, WANG Lijin, et al. Characterization of key aroma-active compounds in black garlic by sensory-directed flavor analysis[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(28): 7926−7934.
[ 43 ] XU Lirong, YU Xiuzhu, LI Mengjun, et al. Monitoring oxidative stability and changes in key volatile compounds in edible oils during ambient storage through HS-SPME/GC–MS[J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20(sup3): S2926−S2938.
[ 44 ] 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.
[ 45 ] ZHANG Chenping, WANG Yutong, DING Danyang, et al. Volatile profiles of *Allium tenuissimum* L. flower fried by four different oils, using SPME–GC–MS, and sensory evaluation coupled with partial least squares regression[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 109: 104461.
[ 46 ] 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.
[ 47 ] VAN GEMERT L J. Complications of odour threshold values in air, water and other media[M]. Netherlands: Oliemans Punter & Partners BV, 2003.
[ 48 ] VAN GEMERT L J. Complications of flavour threshold values in water and other media[M]. 2nd. Beijing: Science Publishing Company, 2015.
[ 49 ] 曾烁瑶, 张瑛毓, 甄诺, 等. 不同贮存温度对清香型白酒滋味品质及挥发性风味成分的影响[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(9): 327−335. [ ZENG Shuoyao, ZHANG Yingyu, ZHEN Nuo, et al. Effects of different storage temperatures on taste qualities and volatile components of light-flavor Baijiu[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(9): 327−335. ]
[ 50 ] GARCÍA-GONZÁLEZ D L, TENA N, APARICIO-RUIZ R, et al. Relationship between sensory attributes and volatile compounds qualifying dry-cured hams[J]. Meat Science, 2008, 80(2): 315−325.