

基于电子鼻和气质联用技术分析德庄火锅底料在煮制过程中挥发性物质变化

何 莲, 易宇文, 徐向波, 乔明锋, 裴红燕, 贾洪锋, 王 钵, ChanSook Wah, 杨 翠, 邓 静

Analysis of Volatile Substances in Dezhuang hotpot Base during Cooking Based on Electronic Nose and GC-MS Technology

HE Lian, YI Yuwen, XU Xiangbo, QIAO Mingfeng, PEI Hongyan, JIA Hongfeng, WANG Bo, Chan Sook Wah, YANG Cui, and DENG Jing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024010239>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

10种市售牛油火锅底料理化指标及挥发性物质差异分析

Analysis of Chemical Indexes and Volatile Substances in 10 Kinds of Commercially Available Butter Hotpot Base Materials

食品工业科技. 2024, 45(20): 252-261 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023100279>

HS-SPME结合GC-MS分析麻辣火锅底料炒制和熬煮过程中挥发性物质的变化

Analysis of Changes in Volatile Components during Parching and Boiling of Spicy Hot Pot Seasoning by GC-MS Combined with HS-SPME

食品工业科技. 2020, 41(19): 52-59 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.19.009>

基于电子鼻和气质联用分析萌芽大蒜挥发性物质差异

Analysis of the Difference of Volatile Substances in Sprouted Garlic Based on Electronic Nose and GC-MS

食品工业科技. 2024, 45(5): 243-252 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023050008>

基于电子鼻和气质联用评价煮制方式对香菇汤挥发性风味物质的影响

Effect of Cooking Methods on Volatile Flavor Compounds in *Lentinus edodes* Soups Analyzed by Electronic Nose and SPME-GC-MS

食品工业科技. 2020, 41(20): 6-11, 19 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.20.002>

基于电子鼻结合GC-IMS分析不同烹饪方式猪肉的挥发性成分差异

Analysis of Differences in Volatile Components of Pork between Cooking Methods Based on Electronic Nose Combined with GC-IMS

食品工业科技. 2024, 45(14): 234-244 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023080228>

基于电子鼻和SPME/GC-MS技术对勐海县晒青茶的挥发性物质分析

Analysis of Volatile Substances in Sun-dried Green Tea in Menghai County Based on Electronic Nose and SPME/GC-MS Technology

食品工业科技. 2022, 43(19): 84-91 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021120286>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

何莲, 易宇文, 徐向波, 等. 基于电子鼻和气质联用技术分析德庄火锅底料在煮制过程中挥发性物质变化 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(24): 252–262. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024010239

HE Lian, YI Yuwen, XU Xiangbo, et al. Analysis of Volatile Substances in Dezhuang hotpot Base during Cooking Based on Electronic Nose and GC-MS Technology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(24): 252–262. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024010239

· 分析检测 ·

基于电子鼻和气质联用技术分析德庄火锅底料在煮制过程中挥发性物质变化

何 莲^{1,2,3}, 易宇文^{1,*}, 徐向波³, 乔明锋¹, 裴红燕³, 贾洪锋¹, 王 钵⁴, Chan Sook Wah²,
杨 翠^{3,5}, 邓 静¹

(1. 四川旅游学院烹饪科学四川省高等学校重点实验室, 四川成都 610100;

2. 泰莱大学健康与医学院生物科学学院, 雪兰莪州梳邦再也 47500;

3. 四川旅游学院烹饪与食品科学工程学院, 四川成都 610100;

4. 西南大学食品科学学院, 重庆 400715;

5. 成都大学食品与生物工程学院, 四川成都 610100)

摘 要:为探究 0 min (A)、30 min (B)、60 min (C) 和 90 min (D) 煮制时间的德庄火锅底料挥发性物质的变化, 试验以德庄火锅底料在煮制过程中挥发性物质为研究对象, 采用电子鼻、捕集阱顶空-气质联用仪 (Trap head space-gas chromatography-mass spectrometry, HS- Trap-GC-MS) 结合雷达图、主成分分析、气味活度值 (odor activity value, OAV) 和正交偏最小二乘法判别分析 (orthogonal partial least squares discriminant analysis, OPLS-DA) 探究不同煮制时间的德庄火锅底料气味变化规律。电子鼻检测结果表明, 不同煮制时间的火锅底料的整体气味轮廓差异明显; GC-MS 分析显示 4 个样品共检测到 87 种挥发性物质, 烯烃、醇类和醚类物质是不同煮制时间的火锅底料的主要挥发性物质; OAV 分析显示芳樟醇和茴香脑是不同煮制时间的共有关键挥发性物质。2-苄醇、二氢香芹醇、丙酮、二烯丙基二硫、丙酸异戊酯、 α -松油醇、(1S)-(+)-3-萹烯、(E)- β -罗勒烯、P-伞花烃、丙酸乙酯、正戊烯、对二甲苯是导致样品差异的特征物质。煮制时间对德庄火锅底料的挥发性物质组成和气味特性有显著影响。研究结果可为火锅底料的研发、品控及指导消费提供参考。

关键词: 火锅底料, 煮制时间, 电子鼻, 气相色谱质谱联用仪, 香气活性值, 正交偏最小二乘判别分析

中图分类号: TS207.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)24-0252-11

本文网刊:

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024010239



Analysis of Volatile Substances in Dezhuang hotpot Base during Cooking Based on Electronic Nose and GC-MS Technology

HE Lian^{1,2,3}, YI Yuwen^{1,*}, XU Xiangbo³, QIAO Mingfeng¹, PEI Hongyan³, JIA Hongfeng¹, WANG Bo⁴,
Chan Sook Wah², YANG Cui^{3,5}, DENG Jing¹

(1. Key Laboratory of Culinary Science of Sichuan Provincial Colleges and Universities,
Sichuan Tourism University, Chengdu 610100, China;

收稿日期: 2024-01-23

基金项目: 四川省高校科研创新团队建设计划 (18TD0043); 四川旅游学院科技创新团队项目 (21SCTUTG01); 烹饪科学四川省高等学校重点实验室 (PRKX201907, PRKX2023Z07); 肉类加工四川省重点实验室 (19-R-20, 21-R-16); 川菜工业化四川省高等学校工程研究中心 (GCZX22-33, GCZX22-07); 四川旅游学院校级科研项目 (2023SCTUZD12, SCTUZD13, 2023SCTUZK92); 川菜发展研究中心 (CC21Z07, CC23Z03, CC22Z08, CC23Z19, CC24Z19); 四川省科技计划资助项目 (2023ZYD0079, 2024NSFSC0371); 大学生创新创业训练计划项目 (202311552212)。

作者简介: 何莲 (1984-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品营养与风味化学, E-mail: yolotusung@qq.com。

*** 通信作者:** 易宇文 (1980-), 男, 硕士, 研究员, 研究方向: 食品风味化学, E-mail: 147684620@qq.com。

2.School of Biosciences, Faculty of Health and Medical Sciences, Taylor's University, Subang Jaya 47500, Malaysia;

3.College of Culinary and Food Science Engineering, Sichuan Tourism University, Chengdu 610100, China;

4.School of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China;

5.College of Food and Biological Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China)

Abstract: To explore the changes in volatile compounds of Dezhuang hotpot base at different cooking times at 0 min (A), 30 min (B), 60 min (C) and 90 min (D), electronic nose, trap head space-gas chromatography-mass spectrometry (HS-Trap-GC-MS) combined with radar charts, principal component analysis, odor activity value (OAV), and orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA) were utilized to explore the odor variation patterns of Dezhuang hotpot base cooked for varying durations. Results of the electronic nose indicated significant differences in the overall odor profiles of the hotpot base at different cooking times. The GC-MS analysis revealed that a total of 87 volatile compounds were detected across four samples, with olefins, alcohols, and ethers being the main volatile substances in the hotpot base cooked for various durations. The OAV analysis showed that linalool and anethole were key volatile compounds common to different cooking times. Compounds such as 2-caryophyllene, dihydrocarveol, acetone, divinyl disulfide, isoamyl propionate, α -terpineol, (1S)-(+)-3-carene, (E)- β -ocimene, P-cymene, ethyl propionate, n-pentene, and p-xylene were identified as characteristic substances contributing to the differences among the samples. The composition and aroma characteristics of Dezhuang hotpot base were significantly influenced by the cooking time. The results of the study can provide references for the research and development, quality control, and consumer guidance of hotpot base materials.

Key words: hotpot base; cooking time; electronic nose; gas chromatography-mass spectrometry; odor activity value; orthogonal partial least squares discriminant analysis

火锅是中国特有的一种饮食文化,在我国极具影响力,深受广大消费者的喜爱。火锅是消费者利用滚烫的汤料(底料)直接将原材料烫熟而食用的消费方式,因而火锅风味主要来源于烫制原料的汤料,也称为底料。目前对火锅底料的研究主要集中在火锅底料风味物质鉴定^[1-2]、火锅底料在储藏中风味的变化^[3-4]、新型火锅底料开发^[5-6]、火锅底料加工过程中香气变化等^[7],这些研究都从不同角度探究了火锅底料。杨莉等^[8]通过单锅小炒的方式制作火锅底料并利用气质联用技术探究了火锅底料在炒制、熬煮过程中风味物质的变化,发现单锅小炒制作的火锅底料与工业化生产的火锅底料差异很大,而火锅市场消费的火锅底料大多是工业化产品,因而其结果并不具有代表性。重庆德庄十年火锅底料是牛油红汤底料的代表之一,深受消费者喜爱,具有较高的市场占有率。

火锅底料中的香气物质具有分子量小、沸点低、挥发性强的特点。选择有效的香气检测方法对火锅底料中的香气成分进行检测至关重要。电子鼻是一种快速识别样品整体气味轮廓的仪器,其检测结果具有客观性、重复性、可视性等优点,但无法判断样品之间气味差异的具体物质^[9]。气相色谱质谱联用仪(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)是分离、鉴定复杂有机物的有效工具^[9]。电子鼻结合 GC-MS 在火锅底料检测中有广泛应用。马丽娅等^[1]利用电子鼻结合 GC-MS 分析花椒对火锅底料挥发性物质的贡献,结果表明四川茂汶红花椒与其他品种花椒具有显著差异,不同品种花椒混合后的特征香味变化明显。夏亚男等^[10]利用电子鼻和气质联用分析 4 个品牌的川味火锅底料,发现烯烃类和无机硫化物、氮氧化物、甲基类、醇类和芳香族化合物对川

味火锅底料的气味影响较大。另外,正交偏最小二乘判别分析(orthogonal partial least squares discriminant analysis, OPLS-DA)是一种基于正交信号校正法的有监督回归分析方法,常用于分析样品之间的差异,是 PLS-DA 的延伸和扩展^[11]。

本研究以重庆德庄十年火锅底料在煮制过程中挥发性物质为研究对象,采用电子鼻、HS-Trap-GC-MS 技术结合雷达图、主成分分析(principal component analysis, PCA)、香气活性值(odor activity value, OAV)、OPLS-DA,识别火锅底料在煮制过程中整体气味轮廓,鉴定火锅底料在煮制过程中的挥发性物质,分析火锅底料在煮制过程中的主要香气物质及差异,以期火锅底料配方开发、工艺改良、品控及指导消费提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

德庄十年火锅底料 购于成都市龙泉驿永辉超市。

FOX 4000 电子鼻 法国 Alpha MOS 公司;Clarus 680 气相色谱仪、Elite-5MS(长 30 m×0.25 mm, 0.25 μ m)色谱柱、Clarus SQ8T 质谱仪、HST40 捕集阱顶空进样器 美国珀金埃尔默公司;C22-IA812 型电磁炉 浙江苏泊尔股份有限公司;其他为实验室常用仪器设备。

1.2 实验方法

1.2.1 样品的制备 按德庄火锅底料的使用说明书制作汤料:取 1 袋(300 g)德庄火锅底料于炒锅中,加水 1000 mL,在 800 W 的功率下进行加热。当汤料初次沸腾时,迅速取汤料上层清液 50 mL,记录为 0 min(A),然后再在 30 min(B)、60 min(C)和

90 min(D)分别取样。

1.2.2 电子鼻检测条件 样品前处理:取 2.0 mL 样品装入洁净的 10 mL 顶空瓶,用顶空盖垫密封,备用。

电子鼻条件:顶空产生温度 100 ℃(模拟消费场景),顶空加热 300 s;进样量 1000 μ L,手动进样,进样速度 1000 μ L/s,载气流量 150 mL/s,数据采集 120 s,传感器清洁 180 s,每个样品平行检测 18 次,取后 9 次在 120 s 时,获得的稳定信号进行分析。

1.2.3 GC-MS 检测条件 萃取条件:将 2.0 mL 样品置于 20 mL 的顶空瓶中,用 GC-MS 专用瓶盖密封,装入自动进样器,备用。

萃取及进样条件:萃取温度 70 ℃,进样针温度 75 ℃,传输线温度 80 ℃,萃取时间 1800 s,干吹 120 s,解析 10 s,顶空瓶加压/释压 120 s,捕集阱(40 \pm 1 ℃)保持 240 s,捕集阱循环 4 次。

GC 条件:进样口温度是 230 ℃,升温程序:起始温度 40 ℃,以 2.5 ℃/min 速度升至 100 ℃,保持 1 min。再以 12 ℃/min 速度从 100 ℃ 升至 150 ℃,保持 1 min,最后以 20 ℃/min 速度升至 230 ℃。

MS 条件:离子源 EI,电子能量 70 eV,离子源温度 230 ℃;全扫描模式;质量扫描范围 45~400 m/z。

定性与定量分析:首先去除柱流失的含硅类物质,然后选取正反匹配均大于 800(最大为 999),参考 NIST 2011 谱库,同时结合质谱图进行定性。每个样品检测 5 次,仅选取 3 次及以上能检测到的物质作为最终结果,以相对峰面积计算相对含量。

1.2.4 香气活性值(OAV)评价 香气活性值(odor activity value, OAV)是评价食品中各气味物质对样品整体香味贡献的常用评价指标。OAV 的计算参考刘登勇等^[12]的方法:

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

其中, C_i 为第 i 个挥发性物质的相对含量; T_i 为该物质在水中的阈值。

1.3 数据处理

电子鼻雷达图、主成分分析及制图采用 Origin 2021 完成, OPLS-DA 分析、预测变量重要性投影(variable importance in projection, VIP)、绘图采用 SIMCA14.1 软件完成,平均值及标准偏差($\bar{x} \pm s$)采用 EXCEL 2021 完成。

2 结果与分析

2.1 不同煮制时间的火锅底料电子鼻检测分析

图 1 是不同煮制时间的德庄火锅底料电子鼻检测结果的雷达指纹图。图中,18 根传感器对 4 个不同时间点的火锅底料挥发性物质的响应值不同,样品在 LY 型传感器上的响应值均较低且差异小;在 P 和 T 型传感器上的响应值均较高,且响应值差异明显,表明电子鼻对不同煮制时间的火锅底料的气味轮廓能有效区分。LY 型传感器主要对氧化能力强、有

毒和易燃等物质较敏感,而 P、T 型传感器主要对芳香族化合物敏感。这说明火锅底料挥发性物质中不含或含极少量的对 LY 型传感器敏感的物质,而含大量对 P 和 T 型传感器敏感的物质。有研究表明被检测物质气味越浓郁,电子鼻传感器响应值越高^[13]。图中样品在传感器上的响应值呈现出 A>D>C>B,说明德庄火锅底料在 0 min 时,也即是在刚沸腾时的香味最浓郁,煮制 90 min 时香味次之,煮制 60 min 时香味再次之,煮制 30 min 时香气最为寡淡。雷达指纹图仅能从传感器信号强度的角度区分样品,但无法说明各个样品之间的相似性,故有必要进行主成分分析。

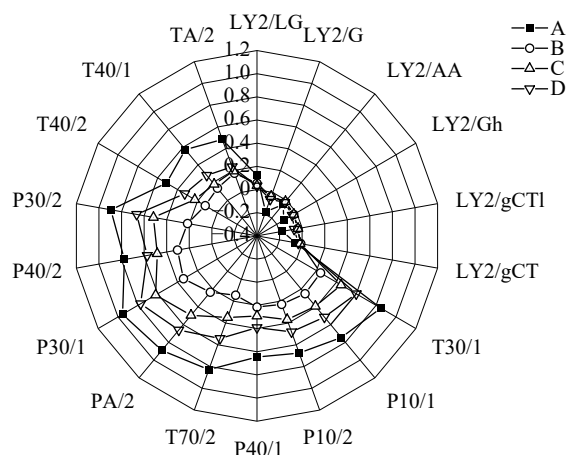


图 1 电子鼻分析雷达图

Fig.1 Radar chart of electronic nose analysis

图 2 是电子鼻检测德庄火锅底料在 95% 的置信区间内的主成分(PCA)分析结果。主成分分析是一种基于线性特征值提取技术,它在降低数据维度时尽最大可能保留原有变量的信息,从而评估样品之间的差异。图中 PC1 和 PC2 分别为 91.3% 和 6.6%,累积为 97.9%。有研究表明 PC1 和 PC2 累积达到 80% 即可说明电子鼻检测结果经 PCA 分析提取的信息较为完整,能够反应样品的主要信息^[14]。A、B 样品分别分布在 PC1(X 轴)的两端(三、四象限),说明 A、B 差异明显。C、D 分布在二维坐标的第一、二象限,且有交叉,说明 C、D 样品在 95% 的置信区间内相似度高。

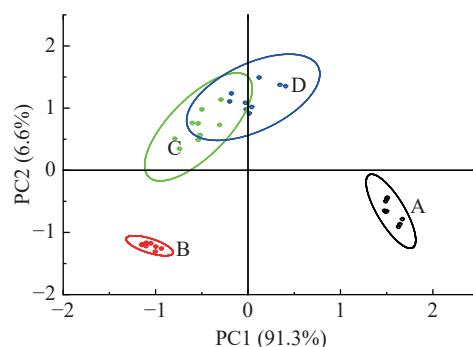


图 2 电子鼻主成分分析

Fig.2 Principal component analysis of electronic nose

表 1 是不同煮制时间的德庄火锅底料电子鼻检测结果的相似度信息。表中距离(马氏距离)、指纹分辨指数的数值越大表示样品差异越大,反之亦然。表中可以看出,A、B 的距离和指纹分辨指数均为最大,说明 A、B 差异明显;C、D 距离和指纹分辨指数的数值最小,说明 C、D 差异较小;这与雷达图和主成分分析结果类似。

表 1 不同煮制时间火锅底料距离及相似性比较
Table 1 Distance and similarity comparison of hotpot base at different cooking times

产品名称	参照品	距离	指纹分辨指数(%)
A	B	1.86	99.63
A	C	1.27	96.95
A	D	0.84	92.09
B	C	0.64	89.02
B	D	1.08	95.05
C	D	0.45	67.34

一般来讲,火锅底料的香气在 0 min(A)时最为浓郁,在 30 min(B)、60 min(C)和 90 min(D)的浓郁程度应该呈线性逐步递减,主成分分析的结果应该是 A、B、C、D 在二维图中沿某一方向依次顺序分布。但试验结果是 A 和 B 的样品差异最大,而 C、D 样品与 A 样品差异小。造成这些情况的原因可能与火锅底料的生产工艺有关。一般而言,生产商在生产火锅底料时会将一部分原料炒制至可直接使用,而另外一部分仅作轻微炒制或者不炒。然后将炒制成熟的底料与轻微炒制或者不炒的原料混合后包装。这样做的目的方面是为了减少能耗、降低成本;另一方面是为了避免火锅底料在煮制时,随着煮制时间的延长而风味越趋寡淡。这种工艺能够解释为什么 A、B 差异最大,而 C、D 与 A 样品差异小。底料加热至沸腾时(0 min)电子鼻响应值最高,这可能是炒制至可直接使用的这一部分原料的原因,而 30 min 后,可直接使用这部分底料中的挥发性物质已经挥发殆尽,而仅作轻微炒制或者不炒的这部分原料还未将其风味物质释放出来,煮制 60 min 和 90 min 时,仅作轻微炒制或者不炒制的这部分底料开始释放挥发性物质。所以香气强度会呈现出 A>D>C>B。电子鼻结合雷达图、主成分分析、马氏距离以及指纹分辨指数表明不同煮制时间的火锅底料在整体气味轮廓上存在差异。

2.2 GC-MS 分析

2.2.1 不同煮制时间的样品香气成分分析 图 3 是不同煮制时间火锅底料香气种类的柱状图。对不同煮制时间的火锅底料的挥发性物质进行 GC-MS 分析,共鉴定出 87 种挥发性物质,分为 8 类,包括烯烃 41 种、酯类 9 种、醇类 12 种、醛类 7 种、酮类 8 种、苯类 4 种、醚类 3 种和其他 3 种。图 3 中可以看出大部分挥发性物质的种类有差异,挥发性物质

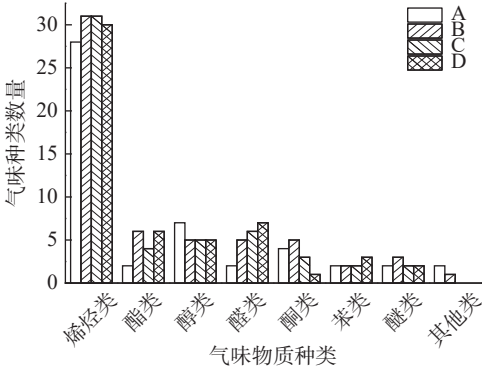


图 3 不同煮制时间的火锅底料香气种类分析

Fig.3 Analysis of aroma types in hotpot base at different cooking times

的种类除醇类和其他类外,大多随煮制时间的延长而呈递增趋势。

2.2.2 不同煮制时间的火锅底料挥发性物质分析

表 2 是 GC-MS 定性及定量分析结果。4 个时间点取样的德庄火锅底料的挥发性物质定性和定量(峰面积归一法)及分类见表 2。4 个时间点取样的样品分别鉴定出 49、58、53、54 种物质,共计 87 种。烯烃、醇类和醚类物质是德庄火锅底料在不同煮制时间的主要挥发性物质。共有物质 18 种: 苡烯、3-异丙基-6-亚甲基-1-环己烯、3-萜烯、 γ -松油烯、D-柠檬烯、罗勒烯、蒎品油烯、 δ -榄香烯、水芹烯、松油烯、 β -蒎烯、(+)-环苜蓿烯、 β -石竹烯、 β -榄香烯、芳樟醇、2-甲基丁醛、草蒿脑、茴香脑;其中烃类 14 种,醇类 1 种,醛类 1 种,醚类 2 种。GC-MS 检测到的物质种类及含量的差异,从细节上反映了不同煮制时间的德庄火锅底料的风味差异。

烃类物质是香辛料的主要挥发性物质^[15],其主要来源于香辛料中脂肪酸烷氧化自由基断裂的产物^[16],是不同煮制时间样品的主要挥发性物质。其在 A、B、C、D 中的含量分别为 75.87%、44.72%、43.94%、57.47%,是相对含量最高的物质种类。在煮制初期(0 min)烯烃类物质含量高,占总比的 70% 以上,其他煮制时间的含量均大于 40%。检测到 14 种烃类共有物质,含量大于 1% 的有: 3-萜烯、D-柠檬烯、蒎品油烯,共计 3 种,其中 D-柠檬烯的含量均大于 5%。 α -蒎烯(均大于 1%)、月桂烯(均大于 5%)、桉烯、别罗勒烯等是 A、C、D 中共有物质,在样品 B 中未检测到,这些烃类物质的存在与否可能是 B 样品在电子鼻检测中在 T、P 型传感器上响应值较低的原因之一。杨莉等^[8] 研究结果显示检测到烯烃类物质 18 种(是含量最多的种类),其含量在 5%~23%(折合含量),本试验检测到烯烃类物质 41 种,含量在 43%~76% 之间。共检测到 12 种醇类物质,含量在 5%~16% 之间。芳樟醇(含量均大于 4%)为共有主要挥发性物质。异戊醇在 C、D 样品中含量较高(均大于 3%),A 样品中含量低于 0.1%,

表 2 不同煮制时间的火锅底料挥发性物质分析
Table 2 Analysis of volatile compounds in hotpot base at different cooking times

种类	化合物	相对含量(%)			
		A	B	C	D
烯烃类	3,3,4,4-四氟-1,5-己二烯	0.11±0.01	—	—	—
	β -水芹烯	0.98±0.04	1.01±0.06		0.04±0.00
	α -蒎烯	1.58±0.04	—	1.35±0.06	1.25±0.05
	苈烯	0.15±0.01	0.57±0.01	0.45±0.03	0.77±0.02
	3-异丙基-6-亚甲基-1-环己烯	4.85±0.23	0.41±0.04	1.45±0.05	2.90±0.14
	桉烯	0.48±0.03	—	0.62±0.03	1.16±0.07
	月桂烯	10.34±0.73	—	6.63±0.38	8.37±0.09
	α -侧柏烯	1.21±0.01	0.98±0.04	—	0.35±0.01
	3-萹烯	1.35±0.27	1.05±0.03	1.14±0.06	1.18±0.02
	γ -松油烯	2.14±0.25	0.53±0.02	0.04±0.00	1.02±0.02
	D-柠檬烯	38.77±2.21	5.95±0.43	9.31±0.17	16.82±0.37
	罗勒烯	1.14±0.07	0.67±0.05	0.26±0.01	0.22±0.01
	萹品油烯	2.58±0.22	1.91±0.04	1.76±0.05	1.82±0.06
	2-萹烯	1.60±0.04	1.60±0.02	0.06±0.00	—
	2,5-二甲基苯乙烯	0.10±0.01	—	—	—
	δ -榄香烯	0.04±0.00	0.14±0.01	0.10±0.00	0.11±0.00
	水芹烯	0.07±0.00	0.52±0.04	0.69±0.02	0.44±0.01
	1,3,5,5-四甲基-1,3-环己二烯	0.37±0.03	0.28±0.02	0.12±0.01	—
	别罗勒烯	0.34±0.02	—	0.14±0.00	0.06±0.00
	松油烯	0.68±0.01	0.49±0.02	0.55±0.01	0.22±0.01
	β -蒎烯	4.65±0.17	0.85±0.07	2.41±0.01	3.67±0.23
	(+)-环苜蓿烯	0.02±0.00	0.11±0.01	0.06±0.00	0.06±0.00
	(+)-1,7-二表- β -雪松烯	0.09±0.01	—	—	—
	β -石竹烯	1.43±0.02	0.41±0.02	1.05±0.04	1.18±0.08
	正戊烯	—	0.06±0.00	—	0.53±0.01
	(-)- α -萹澄茄油烯	—	1.14±0.10	—	—
	左旋- α -蒎烯	0.54±0.05	0.93±0.05	—	—
	1-甲基-5-(1-甲基乙基)-环己烯	0.16±0.01	15.73±1.01	3.44±0.11	—
	3,6,6-三甲基-双环(3.1.1)庚-2-烯	—	0.60±0.04	0.7±0.02	1.59±0.06
	α -石竹烯	—	0.14±0.01	0.10±0.00	0.11±0.00
	α -姜黄烯	—	0.34±0.02	0.34±0.01	0.45±0.01
	γ -杜松烯	—	0.05±0.01	0.04±0.00	0.06±0.00
	(-)- β -蒎烯	—	7.61±0.42	9.99±0.67	11.96±0.16
	(E)- β -罗勒烯	—	—	0.43±0.01	—
	β -榄香烯	0.04±0.00	0.17±0.01	0.14±0.00	0.13±0.00
	γ -依兰油烯	—	0.05±0.00	0.05±0.00	0.06±0.00
	(1S)(+)-3-萹烯	—	—	0.21±0.00	—
	2,4-二甲基己烷	0.09±0.00	—	—	—
醇类	2,3-环氧-2-甲基丁烷	—	0.15±0.01	—	0.34±0.01
	2-硝基-2-氯丙烷	—	0.24±0.00	0.29±0.01	0.56±0.01
	2-甲基-2-苯基十三烷	—	0.05±0.00	0.05±0.00	0.07±0.00
	丙烯醇	0.09±0.01	—	—	—
	1-甲基环丙烷甲醇	0.08±0.01	—	—	—
	异戊醇	0.06±0.01	—	3.75±0.18	5.92±0.34
	二氢香芹醇	0.08±0.01	—	—	—
	2-茨醇	0.05±0.00	—	—	—
	芳樟醇	7.63±0.24	4.20±0.29	5.21±0.33	6.18±0.18
	L-香芹醇	0.09±0.01	—	—	—
	乙醇	—	0.05±0.00	0.28±0.02	0.43±0.01
	1,3-丙二醇	—	0.18±0.01	0.09±0.00	—
	(R)-2-甲基丁醇	—	0.41±0.01	1.16±0.04	2.9±0.09
	α -松油醇	—	0.51±0.03	—	—
	环丙基甲基甲醇	—	—	—	0.22±0.01

续表 2

种类	化合物	相对含量(%)			
		A	B	C	D
酯类	乙酸异丁酯	0.02±0.00	—	0.09±0.00	—
	丙酸异戊酯	—	0.10±0.01	—	—
	乙酸乙酯	—	0.43±0.02	7.15±0.47	3.31±0.04
	丙酸乙酯	—	0.04±0.00	—	0.57±0.05
	异丁酸乙酯	—	0.07±0.00	0.09±0.00	0.10±0.00
	3-甲基戊酸乙酯	0.08±0.01	0.06±0.00	—	—
	5-甲基-2-(1-甲基乙烯基)-4-己烯-1-醇乙酸酯	—	0.15±0.01	—	0.09±0.00
	乙酸异戊酯	—	—	0.15±0.01	0.05±0.00
	癸酸乙酯	—	—	—	0.08±0.00
醛类	2-甲基丁醛	0.09±0.01	0.19±0.01	0.13±0.00	0.27±0.01
	庚醛	0.08±0.00	—	0.04±0.00	0.04±0.00
	正己醛	—	0.15±0.01	0.25±0.00	0.56±0.05
	苯乙醛	—	0.18±0.01	0.21±0.01	0.20±0.00
	糠醛	—	—	—	0.07±0.00
	壬醛	—	0.1±0.01	0.07±0.00	0.08±0.00
	肉桂醛	—	0.43±0.03	0.24±0.00	0.27±0.01
	1-甲氧基-2-丙酮	0.07±0.01	—	—	—
	丙酮	0.09±0.01	—	—	—
酮类	侧柏酮	0.1±0.01	0.05±0.01	—	—
	香芹酮	0.05±0.00	—	0.06±0.00	—
	4-羟基-2-丁酮	—	3.42±0.25	6.19±0.06	—
	葑酮	—	0.57±0.04	0.62±0.02	0.31±0.01
	4-(1-甲基乙基)-2-环己烯-1-酮	—	0.18±0.01	—	—
苯类	(Z)-二氢香芹酮	—	0.09±0.01	—	—
	对二甲苯	0.03±0.00	—	—	0.29±0.01
	邻-异丙基苯	2.12±0.11	2.05±0.2	3.44±0.15	—
	4-乙烯基-1,2-二甲基苯	—	0.13±0.01	0.07±0.00	0.09±0.00
	P-伞花烃	—	—	—	1.27±0.03
醚类	草蒿脑	3.37±0.06	0.57±0.03	4.39±0.16	5.24±0.15
	甲基异戊基醚	—	1.79±0.12	—	—
	茴香脑	5.7±0.28	1.74±0.03	8.51±0.41	6.58±0.60
其他类	2-戊酰呋喃	0.01±0.00	—	—	—
	二烯丙基二硫	0.11±0.01	—	—	—
	2,6-二羟基苯甲酸	—	11.06±0.67	—	—

注: “—”表示未检测到该物质。

在 B 样品中并未检出。(R)-2-甲基丁醇在 C、D 样品中含量较高(均大于 1%),A 样品中未检测到,B 样品中含量较低(<0.5%)。杨莉等^[8]的研究表明醇类物质是不同煮制时间的火锅底料的主要挥发性物质,共检测到 8 种醇类物质,其含量在 39%~58%(折合含量)之间,主要醇类物质为乙醇、芳樟醇和桉叶油素。共检测到 9 种酯类物质,无共有物质。酯类物质主要是酸类和醇类物质酯化反应的产物^[17],对火锅底料香气的形成贡献较大,其具有水果、花香、酒香等气息。有研究表明短链酯具有花果的气味,而长链酯有脂肪的香味^[18]。酯类物质中乙酸乙酯含量较高(C、D 中大于 3%),其他物质含量均较低。共检测到 7 种醛类物质,共有物质 1 种(2-甲基丁醛)。醛类物质含量均较低(<0.6%)。一般认为醛类物质是脂肪自动氧化形成^[19-20],也有研究认为氨基酸的

Strecker 降解反应也可能形成小分子醛类物质^[21]。共检测到 8 种酮类物质,无共有物质。除 4-羟基-2-丁酮(仅在 B、C 中检测到)外,其他物质的含量均低于 1%。酮类物质的阈值相对较高,且含量大多较低,故对火锅底料香气的形成贡献不大。有研究表明酮类物质主要是不饱和脂肪酸的热降解、氧化以及氨基酸降解产生,一般具有花香和水果香^[22]。共检测到 3 种醚类物质,其中共有物质两种(草蒿脑、茴香脑)。草蒿脑、茴香脑在 A、C、D 中的含量均大于 3%,B 样品中茴香脑含量在 1.70% 左右,而草蒿脑在 0.50% 左右。草蒿脑和茴香脑都是具有大茴香、甘草等气息的物质,主要来源于八角、小茴香等香辛料^[23]。杨莉等^[8]的研究结果仅检测到草蒿脑、茴香脑 2 种醚类物质,含量差异较大(1%~37% 之间);本试验也仅检测到 3 种醚类物质,主要为草蒿脑和茴

香脑, 含量有差异(0.5%~10% 之间)。在检测到的其他物质中 2,6-二羟基苯甲酸是 B 样品中含量较高的物质。

本研究表明, 烯烴类、醇类和醚类化合物是主要的挥发性物质, 与杨莉等^[8]的研究成果基本相吻合, 但杨莉等^[8]的研究结果表明烯烴类物质含量很低, 造成这种结果的原因可能是: 烯烴类化合物主要源自香辛料, 其含量受到香辛料的品质、产地、配方及加工工艺的影响。蒋莹^[24]指出, 香辛料的品质和风味差异与其产地、采摘期、干燥工艺、储存条件及时间等

因素相关。

2.3 不同煮制时间火锅底料 OAV 分析

为进一步确定不同煮制时间的火锅底料中香气物质对整体的贡献, 需对样品进行 OAV 分析。一般认为香气物质对整体的贡献取决于物质的含量和呈味阈值。有研究表明 $OA\geq 1$ 的物质是贡献大的关键香气物质, $1>OA\geq 0.1$ 的物质被认为对样品有重要的修饰作用的物质^[25]。如表 3 中可以看出 $OA\geq 1$ 的物质共有 32 种, 其中以烴类物质为主(13 种), 酯类 6 种、醇类 2 种、醛类 5 种、酮类 2 种、苯类

表 3 不同煮制时间的火锅底料挥发性物质的 OAV 分析

Table 3 OAV analysis of volatile compounds in hotpot base at different cooking times

化合物	相对含量(%)				阈值 (mg/kg)	OAV				香气描述
	A	B	C	D		A	B	C	D	
α -蒎烯	1.58		1.35	1.25	0.041	38.58	—	32.84	30.37	松香、松节油的典型香气
β -水芹烯	4.85	0.41	1.45	2.9	0.036	134.64	11.26	40.23	80.66	薄荷、松树味
桉烯	0.48		0.62	1.16	0.98	0.49	—	0.63	1.19	胡椒味、松脂香、木香
月桂烯	10.34		6.63	8.37	0.0012	8618.13	—	5522.78	6970.83	花香
γ -松油烯	2.14	0.53	0.04	1.02	1	2.14	0.53	0.04	1.02	柑橘味
D-柠檬烯	38.77	5.95	9.31	16.82	0.034	1140.39	175.02	273.82	494.61	柑橘味
蒎品油烯	2.58	1.91	1.76	1.82	0.2	12.88	9.53	8.8	9.11	松木香
水芹烯	0.07	0.52	0.69	0.44	0.04	1.68	12.98	17.25	10.88	黑胡椒香、薄荷香
松油烯	0.68	0.49	0.55	0.22	0.085	8	5.76	6.42	2.62	
β -蒎烯	4.65	0.85	2.41	3.67	0.14	33.18	6.05	17.19	26.24	松油味及香辛料气味
β -石竹烯	1.43	0.41	1.05	1.18	0.064	22.32	6.4	16.4	18.45	留兰香、丁香油脂味、芳香和辛香
正戊烯		0.06		0.53	0.29	—	0.2	—	1.83	
左旋- α -蒎烯	0.54	0.93			0.1	5.38	9.34	—	—	
α -石竹烯		0.14	0.1	0.11	0.16	—	0.89	0.6	0.66	辛香、木香、柑橘香味
(-)- β -蒎烯		7.61	9.99	11.96	4.16	—	1.83	2.4	2.88	松木香、树脂香
(E)- β -罗勒烯			0.43		0.034	—	—	12.52	—	草香、花香味
(1S)-(+)-3-萜烯			0.21		0.044	—	—	4.77	—	甜香味
乙酸异丁酯	0.02		0.09		0.025	0.76	—	3.75	—	花果香
丙酸异戊酯		0.1			0.043	—	2.26	—	—	杏和菠萝香
乙酸乙酯		0.43	7.15	3.31	0.005	—	86.13	1429.2	661.93	果酒香
丙酸乙酯		0.04		0.57	0.01	—	4.2	—	56.83	苹果香味
异丁酸乙酯		0.07	0.09	0.1	0.00002	—	3633.33	4516.67	4833.33	苹果、热带水果味
3-甲基戊酸乙酯	0.08	0.06			0.000008	10622.34	7458.33	—	—	呈菠萝和蓝莓似香气
乙酸异戊酯			0.15	0.05	0.00015	—	—	1011.11	322.22	水果香、酯香
癸酸乙酯				0.08	2	—	—	—	0.04	花香、水果香
丙烯醇	0.09				5	0.02	—	—	—	
异戊醇	0.06		3.75	5.92	0.004	14.43	—	936.42	1479.25	苹果白兰地香
二氢香芹醇	0.08				0.3	0.26	—	—	—	留兰香气,有胡椒辛辣味
2-茨醇	0.05				0.18	0.27	—	—	—	臭味和刺鼻醇味
芳樟醇	7.63	4.2	5.21	6.18	0.00022	34660.04	19095.45	23683.33	28095.45	柑橘、铃兰香、花香、青香及木香
乙醇		0.05	0.28	0.43	950	—	0	0	0	酒香
α -松油醇		0.51			1.2	—	0.43	—	—	樟脑、辛辣味
2-甲基丁醛	0.09	0.19	0.13	0.27	0.0843	1.07	2.25	1.53	3.21	苦杏仁香
庚醛	0.08		0.04	0.04	0.001	76.11	—	38.67	38.67	水果香味
正己醛		0.15	0.25	0.56	0.005	—	29.4	50.33	111.73	生油脂和青草气及苹果味
苯乙醛		0.18	0.21	0.2	0.0063	—	28.04	33.33	32.22	呈强烈风信子香气,低浓度时有杏仁、樱桃香味
糠醛				0.07	9.562	—	—	—	0.01	苦杏仁味
壬醛		0.1	0.07	0.08	0.0011	—	94.24	61.52	70.3	有强烈的脂肪气息,稀释时具有橙子及玫瑰香调
肉桂醛		0.43	0.24	0.27	0.75	—	0.57	0.31	0.36	桂皮、肉桂油味
丙酮	0.09				0.832	0.11	—	—	—	果香

续表 3

化合物	相对含量(%)				阈值 (mg/kg)	OAV				香气描述
	A	B	C	D		A	B	C	D	
香芹酮	0.05		0.06		0.027	2.02	—	2.15	—	留兰香
葑酮		0.57	0.62	0.31	0.44	—	1.3	1.42	0.7	
对二甲苯	0.03			0.29	1	0.03	—	—	0.29	塑料、绿色、辛辣气味
邻-异丙基苯	2.12	2.05	3.44		0.005	424.19	409.53	688.13	—	
P-伞花烃				1.27	0.8	—	—	—	1.58	新鲜得柑橘气息、木香
草蒿脑	3.37	0.57	4.39	5.24	0.016	210.46	35.75	274.25	327.19	
茴香脑	5.7	1.74	8.51	6.58	0.0018	3164.22	969.07	4725.19	3655.56	甘草味、茴香味
二烯丙基二硫	0.11				0.08	1.34	—	—	—	

注: “—”表示未检出; 阈值均来自文献[26]; 风味描述来自网站(<http://www.odour.org.uk>)。

1 种、硫醚类 3 种。OAV≥500 的物质有月桂烯、D-柠檬烯、乙酸乙酯、异丁酸乙酯、3-甲基戊酸乙酯、乙酸异戊酯、异戊醇、芳樟醇、邻-异丙基苯和茴香脑, 共计 10 种。500>OAV>10 的物质有 α -蒎烯、 β -水芹烯、蒎品油烯、水芹烯、 β -蒎烯、 β -石竹烯、(E)- β -罗勒烯、丙酸乙酯、庚醛、正己醛、苯乙醛、壬醛、草蒿脑, 共计 13 种。OAV>10 的物质共计 23 种, 这些物质对样品整体香气有重要贡献。月桂烯(典型的花香)在 A、C、D 样品中的 OAV 值均大于 5000, 具有消毒杀菌、使人镇静和镇痛等功效^[27]。月桂烯一般来源于香料, 也可由 β -蒎烯在高温裂解而来^[28], 芳樟醇在适当条件下合成, 也是月桂烯的来源之一^[29]。月桂烯对 A、C、D 样品香气的形成有重要贡献。D-柠檬烯是四个样品都检测到的物质, 其在 A 样品中的 OAV 值达 1140, 在 B、C 和 D 中分别为 175、273 和 494; D-柠檬烯是一种具有新鲜橙子香味和柠檬气息的物质, 具有抗氧化和消炎的功效^[30-31], 是香辛料(如花椒、八角、砂仁)中的常见物质, 因而其来源于香辛料的概率较大^[32-33], 也有研究表明 α -蒎烯在受热时也会转化成 D-柠檬烯^[34]。3-甲基戊酸乙酯因其阈值极低(0.000008 mg/kg), 尽管在 A、B 样品中的含量较低, 但 OAV 值仍高达 7000 以上, 是酯类物质中对 A、B 样品香气有重要贡献的物质。异丁酸乙酯在 B、C、D 样品中有检测到, 其 OAV 值均在 3000 以上, 对 B、C、D 样品香气的形成有较大贡献。芳樟醇是 4 个样品均检测到的物质, 在 4 个样品中的含量较高(>4%), 且阈值较低, 4 个样品的 OAV 值分别为 34660、19095、23683、28095, 是样品的主要香气物质。芳樟醇呈柑橘、铃兰香、花香、青香及木香等气息, 具有抗癌、止痛、消炎、镇静和睡眠的物质^[35]。有研究表明^[36] 芳樟醇是由芳樟醇合成酶从香叶酰焦磷酸前体中释放出来而形成。茴香脑在 4 个样品中的含量较高(>1.7%), 阈值较低, 在 4 个样品中的 OAV 值分别为 3164、969、4725、3655, 是样品香气的重要组成成分。茴香脑是八角的主要挥发性物质, 其含量不低于 50%^[37], 具有甘草味、茴香味。

综上, 月桂烯、D-柠檬烯、3-甲基戊酸乙酯、芳

樟醇、茴香脑对 A 样品香气的形成有重要贡献; 异丁酸乙酯、3-甲基戊酸乙酯、芳樟醇、茴香脑对 B 样品香气的形成有重要贡献; 月桂烯、乙酸乙酯、异丁酸乙酯、乙酸异戊酯、异戊醇、芳樟醇、邻-异丙基苯、茴香脑对 C 样品香气的形成有重要贡献; 月桂烯、乙酸乙酯、异丁酸乙酯、异戊醇、芳樟醇、茴香脑对 D 样品香气的形成有重要贡献。芳樟醇和茴香脑是不同煮制时间的样品共有关键挥发性物质。

2.4 不同煮制时间火锅底料香气成分差异分析

2.4.1 OPLS-DA 分析 试验利用 OAV 分析结果, 选取 OAV>0.1 的物质为自变量, 以不同煮制时间的样品为因变量, 结合 OPLS-DA 分析各化合物与煮制时间的联系。图 4 是关键香气物质的主成分分析得分图, 可以看出 4 个样品差异明显, 且 A 样品独立于 B、C、D, 位于二维图第一、四象限, 说明 A 与 B、C、D 差异大。通过交互残差验证方差分析得到 OPLS-DA 预测模型的解释变量 R^2X 为 0.991, R^2Y 为 0.999, 预测能力 Q^2 为 0.998, 说明建立的模型区分效果良好, 预测能力强, 不同煮制时间的火锅底料在关键香气上有明显差异。一般认为自变量拟合指数和因变量指数大于 0.5 即可接受^[38]。

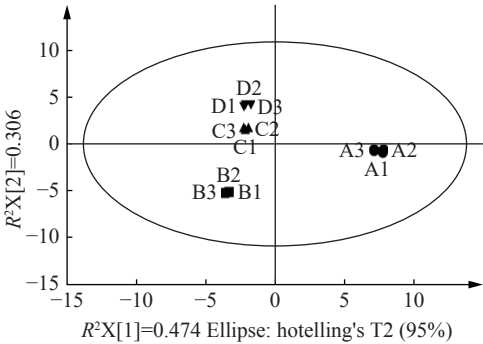


图 4 不同煮制时间的火锅底料关键性化合物主成分得分图
Fig.4 Principal component score plot of key compounds in hotpot base at different cooking times

图 5 是判别模型经过 200 次置换实验的结果。图中, 所有方形和圆形点横坐标均在大于 0 的位置, Q^2 回归线与 Y 轴的交点小于 0。这说明模型拟合效果好, 模型验证有效。一般认为截距小于 0 时, 统计

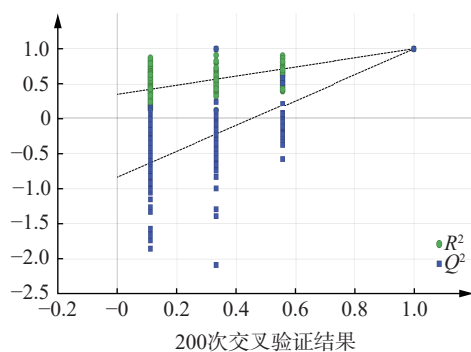


图5 模型交叉验证结果

Fig.5 Cross-Validation results of the model

模型拟合效果好, 没有过拟合^[39]。

图6是以各挥发性物质的 OAV 值(>0.1)为自变量(X), 不同煮制时间的样品为因变量(Y)绘制的主成分二维坐标载荷图。载荷图反应的是各个挥发

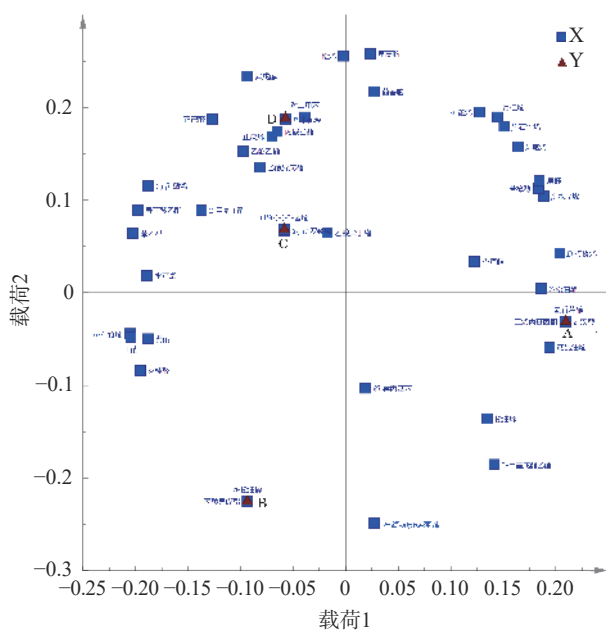


图6 不同煮制时间的火锅底料重要化合物主成分载荷图

Fig.6 Principal component loadings plot of important compounds in hotpot base at different cooking times

性物质对样品贡献程度, 对应的载荷值越大, 则该变量对得分图的贡献越大。图6中2-苧醇、二氢香芹醇、丙酮、二烯丙基二硫等是A样品(0 min)区别于其他样品的特征风味物质; 丙酸异戊酯、 α -松油醇等是B样品(30 min)区别于其他样品的特征风味物质; (1S)-(+)-3-萜烯、(E)- β -罗勒烯等是C样品(60 min)区别于其他样品的特征风味物质; P-伞花烃、丙酸乙酯、正戊烯、对二甲苯等物质是D样品(90 min)区别于其他样品的特征风味物质。

OPLS-DA 重要性变量投影(VIP)值可以反应出 OPLS-DA 的每个变量对分类的贡献值, 便于筛选重要特征化合物^[40]。有研究表明可选取 VIP>1 的物质作为判别样品差异的重要物质^[41], VIP 值大则表明该物质是区别样品差异的重要物质, 即 VIP 越大, 该物质越重要。图7是 OPLS-DA 关键挥发性物质重要性变量投影图, 经 OPLS-DA 分析发现乙酸异丁酯、(1S)-(+)-3-萜烯、(E)- β -罗勒烯、邻-异丙基苯、乙酸异戊酯、对二甲苯、正戊烯、P-伞花烃、丙酸乙酯、香芹酮、乙酸乙酯、茴香脑、左旋- α -蒎烯、2-甲基丁醛、桉烯、草蒿脑、松油烯、丙酸异戊酯、 α -松油醇、异戊醇、正己醛, 共计 21 种物质是判别样品间差异的重要物质, 这些物质的存在是导致不同煮制时间的样品差异的重要原因。

结合 OPLS-DA 载荷图综合 VIP 值考量, 丙酸异戊酯、 α -松油醇等(OAV 值明显高于其他样品)是B样品有别于其他样品存在明显差异的物质, 对B样品气味差异的风味贡献程度高于其他样品, 是煮制 30 min 样品与其他煮制时间样品出现差异的重要差异性化合物。同理, (1S)-(+)-3-萜烯、(E)- β -罗勒烯等化合物对C样品区别于其他样品有重要贡献; P-伞花烃、丙酸乙酯、正戊烯、对二甲苯等化合物对D样品区别于其他样品有重要贡献。GC-MS 检测结果结合 OAV 及 OPLS-DA 分析表明不同煮制时间的火锅底料在挥发性物质上存在差异。

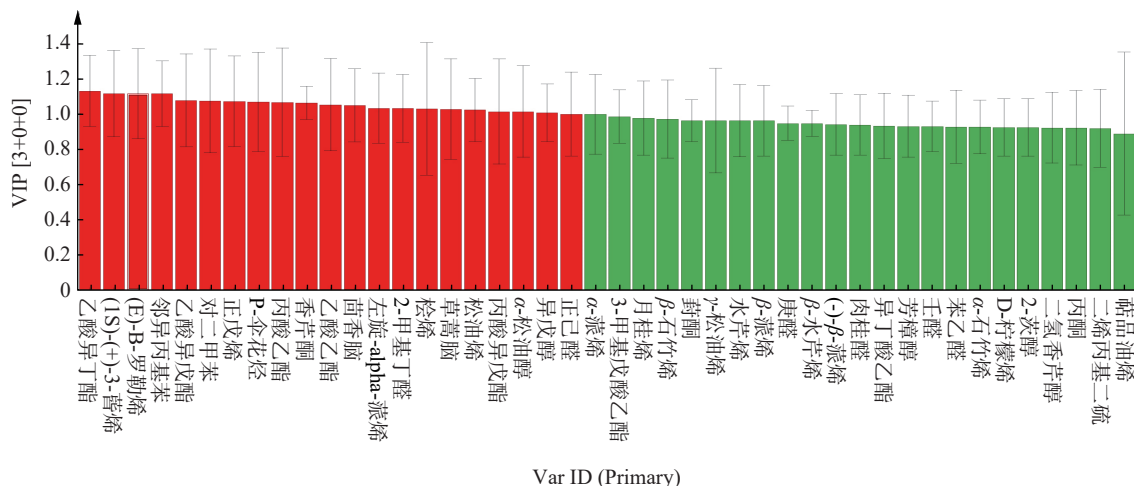


图7 OPLS-DA 关键挥发性物质重要性变量投影图

Fig.7 OPLS-DA variable importance projection of key volatile compounds

3 结论

通过对德庄火锅底料在不同煮制时间下的挥发性物质进行研究,电子鼻检测结果表明煮制时间对火锅底料的气味特性具有显著影响。不同煮制时间的火锅底料在整体气味轮廓强度依次为 A>D>C>B。GC-MS 分析共检测到 87 种挥发性物质,包括烯烃类、酯类、醇类、醛类、酮类、苯类、醚类和其他类别。其中,烯烃、醇类和醚类物质是德庄火锅底料在不同煮制时间下的主要挥发性成分。这些物质共同构成了火锅底料的特征香气和风味。进一步的 OAV 分析发现芳樟醇和茴香脑是不同煮制时间下的共有关键挥发性物质,它们对火锅底料的整体风味具有重要影响。最后,结合 OPLS-DA 分析,研究识别出不同煮制时间下火锅底料的差异性特征风味物质。其中,丙酸异戊酯和 α -松油醇是 B 样品的特征风味物质;(1S)-(+)-3-萜烯和(E)- β -罗勒烯是 C 样品的特征风味物质;而 P-伞花烃、丙酸乙酯、正戊烯和对二甲苯则是 D 样品的特征风味物质。这些差异性特征风味物质的存在,使得不同煮制时间的火锅底料在风味上呈现出独特的个性。不同煮制时间的德庄火锅底料整体气味轮廓及具体特征气味物质均存在差异。本研究结果可为火锅底料的开发、品控和指导消费提供参考。

© The Author(s) 2024. 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] 马丽娅,张晓乐,吕南,等. 火锅底料常用花椒主要挥发性物质分析[J]. 食品科技, 2022, 47(11): 244-249. [MA L Y, ZHANG X L, LÜ N, et al. Analysis of main volatile substances in commonly used Sichuan peppercorns for hot pot base[J]. Food Technology, 2022, 47(11): 244-249.]
- [2] 曾朝懿,张丽珠,田伟,等. 川渝地区特色红油火锅底料挥发性风味物质的比较及主成分分析[J]. 食品工业科技, 2016, 37(7): 283-287. [ZENG C Y, ZHANG L Z, TIAN W, et al. Comparative analysis and principal component analysis of volatile flavor substances in Sichuan-Chongqing style spicy red oil hot pot base[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(7): 283-287.]
- [3] 王强,王睿,熊政委,等. 火锅底料炒制工艺条件对其货架期的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(17): 84-89. [WANG Q, WANG R, XIONG Z W, et al. The impact of frying process conditions on the shelf life of hot pot base ingredients[J]. Food Science, 2016, 37(17): 84-89.]
- [4] 古霞,闫天龙,邓维泽,等. 牛油火锅底料冷藏储存过程中品质变化[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(8): 220-223. [GU X, YAN T L, DENG W Z, et al. Quality changes in beef tallow hot pot base during cold storage[J]. Food and Fermentation Industries, 2015, 41(8): 220-223.]
- [5] 周州,刘平,车振明,等. 一种药膳火锅底料制备工艺及挥发性香气电子鼻分析[J]. 中国调味品, 2020, 45(4): 162-167. [ZHOU Z, LIU P, CHE Z M, et al. A study on the preparation process of medicinal hot pot base and analysis of volatile aromas by electronic nose[J]. China Condiment, 2020, 45(4): 162-167.]

- [6] 宁静,许耀鹏,马丽娅,等. 牛油麻辣味火锅底料的制作[J]. 中国调味品, 2019, 44(6): 150-153. [NING J, XU Y P, MA L Y, et al. Preparation of beef tallow spicy flavor hot pot base[J]. China Condiment, 2019, 44(6): 150-153.]
- [7] 王浩文,王传明,王红强,等. 四川火锅底料加工过程中风味变化规律[J]. 中国调味品, 2022, 47(11): 173-177. [WANG H W, WANG C M, WANG H Q, et al. Pattern of flavor changes during the processing of Sichuan hot pot base[J]. China Condiment, 2022, 47(11): 173-177.]
- [8] 杨莉,贾洪锋,杨芳,等. HS-SPME 结合 GC-MS 分析麻辣火锅底料炒制和熬煮过程中挥发性物质的变化[J]. 食品工业科技, 2020, 41(19): 52-59. [YANG L, JIA H F, YANG F, et al. Analysis of volatile compounds changes in spicy hot pot base during frying and boiling process by HS-SPME and GC-MS[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(19): 52-59.]
- [9] 薛东,易宇文,夏翠群,等. 基于电子鼻和气相色谱-质谱法结合相对气味活度值分析植物油对红油辣椒气味的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(22): 241-251. [XUE D, YI Y W, XIA C Q, et al. Analysis of the effect of vegetable oil on the aroma of red chili peppers based on electronic nose and gas chromatography-mass spectrometry combined with relative odor activity value[J]. Journal of Food Safety and Quality Testing, 2023, 14(22): 241-251.]
- [10] 夏亚男,赵赞,王俊林,等. 基于 GC-MS、智鼻、智舌评价川味火锅调料的风味特征[J]. 食品科技, 2021, 46(3): 267-275. [XIA Y N, ZHAO Y, WANG J L, et al. Evaluation of flavor characteristics of Sichuan hot pot seasoning based on GC-MS, electronic nose, and electronic tongue[J]. Food Technology, 2021, 46(3): 267-275.]
- [11] HE Y X, LIU Z P, QIAN M, et al. Unraveling the chemosensory characteristics of strong-aroma type Baijiu from different regions using comprehensive two-dimensional gas chromatography-time-of-flight mass spectrometry and descriptive sensory analysis[J]. Food Chemistry, 2020, 331: 127335.
- [12] 刘登勇,周光宏,徐幸莲. 确定食品关键风味化合物的一种新方法:“ROAV”法[J]. 食品科学, 2008, 34(7): 370-374. [LIU D Y, ZHOU G H, XU X L. A new method for determining key flavor compounds in food: "ROAV" method[J]. Food Science, 2008, 34(7): 370-374.]
- [13] WANG S Y, ZHAO F, WU W X, et al. Comparison of volatiles in different jasmine tea grade samples using electronic nose and automatic thermal desorption-gas chromatography-mass spectrometry followed by multivariate statistical analysis[J]. Molecules, 2020, 25(2): 380.
- [14] 易宇文,刘阳,彭毅泰,等. 东坡肘子风味电子鼻分析与感官评价相关性探究[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(1): 238-244. [YI Y W, LIU Y, PENG Y Q, et al. Analysis of Dongpo elbow flavor using electronic nose and its correlation with sensory evaluation[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(1): 238-244.]
- [15] 林婉玲,曾姣,郑秋纯,等. 不同卤料处理方式对卤味鹅肝挥发性风味物质的影响[J]. 现代食品科技, 2024, 40(6): 243-251. [LIN W L, ZENG J, ZHENG Q C, et al. The impact of different marinade treatments on the volatile flavor compounds of marinated goose liver[J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(6): 243-251.]
- [16] 张逸君,郑福平,张玉玉,等. MAE-SAFE-GC-MS 法分析道口烧鸡挥发性成分[J]. 食品科学, 2014, 35(22): 130-134. [ZHANG Y J, ZHENG F P, ZHANG Y Y, et al. Analysis of volatile components in Daokou roast chicken by MAE-SAFE-GC-MS method[J]. Food Science, 2014, 35(22): 130-134.]

- [17] 刘雪, 何英兰, 胡月英, 等. 3-萜烯对铜绿假单胞菌的抑菌活性及机理初探[J]. 热带作物学报, 2019, 40(3): 601–608. [LIU X, HE Y L, HU Y Y, et al. Preliminary investigation of the antibacterial activity and mechanism of 3-carene against pseudomonas aeruginosa[J]. Journal of Tropical Crops, 2019, 40(3): 601–608.]
- [18] TANG X P, GUO X H, GENG D, et al. D-Limonene protects PC12 cells against corticosterone-induced neurotoxicity by activating the AMPK pathway[J]. Environmental Toxicology and Pharmacology, 70: 103192.
- [19] ZHANG C P, WANG Y T, DING D Y, 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: 1–7.
- [20] HANIF A Medhia, XIE Bojie, WEI Shouhui, et al. Characterization of volatile profile from six different varieties of Chinese chives by HS-SPME/GC-MS coupled with E. NOSE[J]. Journal of King Saud University-Science, 2022, 34(4): 101971.
- [21] ZHOU Q, JIA X, YAO Y, et al. Characterization of the aroma-active compounds in commercial fragrant rapeseed oils via monolithic material sorptive extraction[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(41): 11454–11463.
- [22] 刘建林, 孙学颖, 张晓蓉, 等. GC-MS 结合电子鼻/电子舌分析发酵羊肉干的风味成分[J]. 中国食品学报, 2021, 21(5): 348–354. [LIU J L, SUN X Y, ZHANG X R, et al. Analysis of flavor components in fermented dried mutton using GC-MS combined with electronic nose/tongue[J]. Journal of Chinese Food, 2021, 21(5): 348–354.]
- [23] 李萍, 舒展, 中晓霞, 等. 贮藏时间和贮藏方式对八角茴香油质量及抑菌活性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(2): 232–238. [LI P, SHU Z, SHEN X X, et al. Effects of storage time and method on the quality and antibacterial activity of star anise oil[J]. Food and Fermentation Industries, 2017, 43(2): 232–238.]
- [24] 蒋莹. 基于电化学传感器阵列的几种香辛料主效成分的快速检测研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022. [JIANG Y. Rapid detection of main active ingredients in several spices based on electrochemical sensor arrays[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022.]
- [25] 周志帅, 李娇, 林德贤, 等. HS-SPME-GC-MS 结合 OAV 分析不同产地青花椒浸提前、后的关键香气成分[J]. 中国食品学报, 2023, 23(10): 315–325. [ZHOU Z S, LI J, LIN D X, et al. Analysis of key aroma components of green Sichuan pepper extracts from different origins using HS-SPME-GC-MS combined with OAV[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(10): 315–325.]
- [26] 里奥·范海默特. 化合物嗅觉阈值汇编[M]. 北京: 科学出版社, 2018. [LEO V H. Compilation of compound olfactory thresholds[M]. Beijing: Science Press, 2018.]
- [27] 韩丛聪, 荀守华, 姜天华, 等. 刺槐属 6 种材料鲜花芳香成分分析[J]. 园艺学报, 2017, 44(3): 557–565. [HAN C C, XUN S H, JIANG T H, et al. Analysis of floral fragrance components in six species of robinia[J]. Journal of Horticulture, 2017, 44(3): 557–565.]
- [28] 张松波. 苯乙烯/二烯烃橡胶设计合成及其复合材料性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021. [ZHANG S B. Design synthesis of styrene/diene rubber and its composite material properties[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.]
- [29] PROF A B, JOHNEN L. Myrcene as a natural base chemical in sustainable chemistry: A critical review[J]. John Wiley & Sons, Ltd, 2009(12): 1072–1095.
- [30] 黄振阳, 江汉美, 何嘉伟, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 和主成分分析蒲公英、夏枯草及其药对挥发性成分[J]. 药物流行病学杂志, 2023, 32(10): 1135–1143. [HUANG Z Y, JIANG H M, HE J W, et al. Analysis of volatile components in dandelion and prunella vulgaris and their herb pairs based on HS-SPME-GC-MS and principal component analysis[J]. Journal of Pharmaceutical Epidemiology, 2023, 32(10): 1135–1143.]
- [31] ZHANG Yu, LIANG Shuang, ZHANG Jiashi, et al. Preparation of whey protein isolate nanofibrils by microwave heating and its application as carriers of lipophilic bioactive substances[J]. LWT, 125, 109213.
- [32] 黄巧娟, 孙志高, 龙勇, 等. D-柠檬烯抗癌机制的研究进展[J]. 食品科学, 2015, 36(7): 240–244. [HUANG Q J, SUN Z G, LONG Y, et al. Research progress on the anticancer mechanism of D-limonene[J]. Food Science, 2015, 36(7): 240–244.]
- [33] WANG Z, XU Z, SUN L, et al. Dynamics of microbial communities, texture and flavor in Suanzuoyu during fermentation[J]. Food Chemistry, 2020, 332: 127364.
- [34] 刘小鹏, 杨高东, 张锋, 等. α -蒎烯水合反应动力学研究[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 2014, 50(1): 103–112. [LIU X J, YANG G D, ZHANG F, et al. Study on the hydration reaction kinetics of Alpha-Pinene[J]. Journal of Nanjing University: Natural Sciences Edition, 2014, 50(1): 103–112.]
- [35] 姜冬梅, 朱源, 余江南, 等. 芳樟醇药理作用及制剂研究进展[J]. 中国中药杂志, 2015, 40(18): 4. [JIANG D M, ZHU Y, YU J N, et al. Advances in the pharmacological effects and formulations of linalool[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2015, 40(18): 4.]
- [36] LI Q, LI Y, LUO Y, et al. Characterization of the key aroma compounds and microorganisms during the manufacturing process of Fu brick tea[J]. LWT- Food Science and Technology, 2020, 127(3): 109355.
- [37] 郑燕菲, 张强, 蓝亮美, 等. 八角茴香壳与籽中挥发油成分分析及抗氧化性研究[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(5): 83–86. [ZHENG Y F, ZHANG Q, LAN L M, et al. Analysis of volatile oil components and antioxidant study of star anise shell and seed[J]. Grain and Oil, 2022, 35(5): 83–86.]
- [38] YUN J, CUI C J, ZHANG S H, et al. Use of headspace GC/MS combined with chemometric analysis to identify the geographic origins of black tea[J]. Food Chemistry, 2021, 360: 130033.
- [39] 黄浩, 余鹏辉, 赵熙, 等. 不同季节保靖黄金茶 1 号工夫红茶挥发性成分的 HS-SPME-GC-MS 分析[J]. 食品科学, 2020, 41(12): 188–196. [HUANG H, YU P H, ZHAO X, et al. HS-SPME-GC-MS analysis of volatile components of Baojing Golden Tea No. 1 Gongfu Black Tea in different seasons[J]. Food Science, 2020, 41(12): 188–196.]
- [40] 魏松丽, 孙晓静, 张丽霞, 等. 模糊数学评价优化浓香花生油脂体的预处理参数及香气成分分析[J]. 食品科学, 2020, 41(16): 202–209. [WEI S L, SUN X J, ZHANG L X, et al. Fuzzy mathematical evaluation and optimization of pre-treatment parameters and aroma component analysis of strong-flavored peanut oil[J]. Food Science, 2020, 41(16): 202–209.]
- [41] 周一鸣, 魏佳南, 朱思怡, 等. 不同产地苦荞挥发性物质测定及其特征香气分析[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(7): 214–220. [ZHOU Y M, WEI J N, ZHU S Y, et al. Determination of volatile compounds and characteristic aroma analysis of tartary buckwheat from different regions[J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2023, 38(7): 214–220.]