

基于电子鼻和GC-IMS技术对不同干辣椒籽挥发性化合物分析

朱开宪¹, 侯智勇¹, 易宇文¹, 张思思², 吴华昌^{1,2*}

(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. 四川旅游学院烹饪与食品科学工程学院, 四川成都 610100)

摘要: 为比较辣椒籽在干辣椒中对风味呈现的影响, 实验以 4 种常见干辣椒籽 (石柱红、天鹰小椒、灯笼椒、条子椒) 为研究对象, 采用电子鼻 (Electronic Nose, E-nose)、气相色谱-离子迁移谱 (Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry, GC-IMS) 检测化合物变化, 通过多元化学计量法分析化合物特征变化。研究表明: 电子鼻能区分 4 种辣椒籽气味特征, 条子椒响应值最突出, 样品间差异大。GC-IMS 检出 69 种化合物, 包括醛类 13 种, 醇类 15 种, 酯类 11 种, 酮类 8 种, 烯炔类 6 种, 酸类 4 种, 杂环、含硫类 6 种, 其他类 2 种, 还有 4 种无法识别。辣椒籽乙酸含量最高 19.20%~31.53% 是干燥晾晒中因温度发酵形成。3-甲硫基丙醛、4-羟基-2,5-二甲基-3(2H) 呋喃酮 (M) 使石柱红呈现烤土豆香、焦糖香; 乙酸、4-异丙基苯甲醛、3-甲基-1-丁醇 (M、D)、乙醇等使天鹰小椒呈现酸味、威士忌、麦芽香、甜香; 苯乙烯使灯笼椒呈现汽油、香脂醋味; 2,3-二乙基吡嗪使条子椒呈现水果甜香, 这些化合物构成不同辣椒籽风味特征。研究结果对今后干辣椒风味特征研究、品质鉴别有参考作用。

关键词: 干辣椒籽; 电子鼻; 气相色谱-离子迁移谱; 风味化合物; 呈味特征

文章编号: 1673-9078(2026)2-293-304

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.2.1662

Analysis of Volatile Compounds in Different Dried Chili Seeds using Electronic Nose and GC-IMS Technology

ZHU Kaixian¹, HOU Zhiyong¹, YI Yuwen¹, ZHANG Sisi², WU Huachang^{1,2*}

(1. Sichuan Tourism College, Key Laboratory of Cooking Science, Chengdu 610100, China)

(2. College of Culinary and Food Science Engineering, Sichuan Tourism University, Chengdu 610100, China)

Abstract: To compare the influence of chili seeds on the flavor of dried chili peppers, four common types of dried chili seeds, namely Shizhu Red, Tianying Small Chili, Lantern Chili, and Tiaozi Chili, were subjected to electronic nose (e-nose) and gas chromatography-ion mobility spectroscopy (GC-IMS) measurements to detect changes in their compounds. The changes in compound characteristics were also analyzed using multivariate chemometrics. The results indicated that the e-nose distinguished the odor characteristics of the four types of chili seeds. Tiaozi Chili had the highest response value, and marked differences were

引文格式:

朱开宪, 侯智勇, 易宇文, 等. 基于电子鼻和GC-IMS技术对不同干辣椒籽挥发性化合物分析[J]. 现代食品科技, 2026, 42(2): 293-304.

ZHU Kaixian, HOU Zhiyong, YI Yuwen, et al. Analysis of volatile compounds in different dried chili seeds using electronic nose and GC-IMS technology [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(2): 293-304.

收稿日期: 2024-11-07; 修回日期: 2025-02-06; 接受日期: 2025-02-14

基金项目: 四川省自然科学基金项目 (2024NSFSC0371); 肉类加工四川省重点实验室开放基金科研项目 (22-R-06); 川菜人工智能重点实验室基金项目 (CR25Y07)

作者简介: 朱开宪 (1984-), 女, 硕士, 副教授, 研究方向: 食品科学, E-mail: 63669601@qq.com

通讯作者: 吴华昌 (1970-), 男, 硕士, 教授, 研究方向: 食品发酵与加工, E-mail: 694549215@qq.com

observed between samples. GC-IMS identified 69 compounds, including 13 aldehydes, 15 alcohols, 11 esters, eight ketones, six olefins, four acids, six heterocyclic and sulfur-containing compounds, and two compounds of other types. Four compounds could not be identified. The highest acetic acid content in the chili seeds ranged from 19.20% to 31.53% and was formed through temperature-induced fermentation during sun-drying. 3-(methylthio)propionaldehyde and 4-hydroxy-2,5-dimethyl-3(2H)furanone (M) imparted roasted potato-like and caramel-like aromas to Shizhu Red. Acetic acid, 4-isopropylbenzaldehyde, 3-methyl-butan-1-ol (M, D), and ethanol conferred sour, whiskey-like, malty, and sweet aromas to Tianying Small Chili. Styrene imparted gasoline-like and balsamic vinegar-like aromas to Lantern Chili, and 2,3-diethylpyrazine provided a fruity sweet aroma to Tiaozi Chili. These compounds constituted the flavor characteristics of the different types of chili seeds. The results of this study will facilitate future research on flavor characteristics and the quality discrimination of dried chili peppers.

Key words: dried chili seeds; electronic nose; gas chromatography-ion mobility spectroscopy; flavor compounds; taste characteristics

我国辣椒种植面积超过 133 万 hm^2 ，约占全球的 35%，是我国最大的蔬菜产业^[1]，受气候、土壤等因素影响，各地种植的辣椒品种多样。将新鲜辣椒制作成为干辣椒是常见的加工、存储方式，不同产地、品种的干辣椒风味以及加工特性存在较大差异^[2]，而辣椒品种是影响干辣椒最终品质的重要因素^[3]，目前市场常见的是采用石柱红辣椒、天鹰小椒、灯笼辣椒、条子椒等制作干辣椒。其中，石柱红干辣椒香味突出、天鹰小椒辣度较高、灯笼干辣椒香辣口感较好，而四川地区常见的条子椒其综合辣度、香气、香味等突出，产量较大。干辣椒中的辣椒籽具有抗氧化性、抗肥胖活性、抗菌活性等作用^[4]，也是辣椒辣味和香气的主要来源。有研究指出辣椒籽、肉含量是影响干辣椒品质的重要指标^[5]，目前对辣椒籽中关键风味成分的解析和对比研究尚显不足。辣椒籽作为干辣椒加工的副产物，并未被有效利用开发，并且系统解析辣椒籽中的风味成分，具有十分重要的现实意义，通过对比不同品种干辣椒籽风味特征差异，可以为辣椒原料品质的评价和生产的标准化管理提供理论支撑。

目前国内外对干辣椒的研究主要集中在辣椒生产体系、干辣椒风味、干辣椒品质^[6-8]等方面。比如，高佳等^[9]通过聚类分析对 16 个品种朝天椒干制加工的适宜性进行了评价；杨创创等^[10]检测了 13 份干辣椒的挥发性物质，发现柠檬烯、香橙烯、乙酸乙酯是多数干辣椒的主要优良挥发性物质。而对于辣椒籽对干辣椒风味特征影响研究很少，仅有屠大伟等^[11]采用理化分析结合气相色谱-质谱联用 (Gas Chromatography-Mass Spectrometer, GC-MS) 对 6 个不同品种干辣椒及其皮、籽的品质及挥发性成分进行比较分析，发现干辣椒皮与籽对其整体香气的贡献不同。GC-IMS 与电子鼻检测技术常用于分析食品挥发性风味化合物特征变化与辨别^[12]。GC-IMS 能检测出小分子、低含量化合物^[13]，结合化合物气味特征描述可以辨别化合物

呈现的风味特征；电子鼻则是对风味化合物特征判断。通过二者结合检测不同品种干辣椒中的辣椒籽挥发性风味化合物的变化，分析风味呈现特征，可以了解辣椒籽对干辣椒风味呈现的影响，并引导干辣椒加工企业关注辣椒籽利用价值。

本实验以 4 种常见干辣椒中的辣椒籽（石柱红、天鹰小椒、灯笼椒、条子椒）为研究对象，采用电子鼻 (E-nose)、气相色谱-离子迁移谱 (GC-IMS) 技术检测化合物变化，通过主成分 (Principal Component Analysis, PCA)、热图聚类 (Heatmap) 分析，结合偏最小二乘法判别分析 (Partial Least Squares Discrimination Analysis, PLS-DA) 的变量重要性 (Variable Important for the Projection, VIP) 值等多元化学计量法研究不同品种干辣椒中的辣椒籽挥发性化合物的变化，通过呈味特征辨别辣椒籽对干辣椒风味的影响。研究结果可以对今后干辣椒风味特征研究、品质鉴别、辣椒品质评价提供参考和指导。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

石柱红干辣椒，天鹰小椒，灯笼椒，条子椒干辣椒均购于京东商城，真空包装、常温保存，邮寄至实验室。

1.2 仪器设备

BT 423 S 型电子天平，德国赛多利斯公司；FlavourSpec® 气相离子迁移谱仪，德国 G.A.S 公司；MXT-WAX 色谱柱 (30 m, ID:0.53 mm)，美国 RESTEK 公司；FOX 4000 电子鼻，法国 Alpha MOS 公司；DFY-400 C 型 400 g 摇摆式高速粉碎机，温岭市林大机械有限公司；L18-P132 破壁机，广东九阳电器。

1.3 实验方法

1.3.1 样品处理

将干辣椒分别洗净，去除泥沙及杂物，晾干后切开，去皮取籽。在 60 ℃ 烘箱中烘干后，用破壁机粉碎，过 100 目筛，编号待检^[14]。以每种干辣椒的中文拼音缩写为标准进行编号：石柱红（SZH），天鹰小椒（TYXJ）灯笼椒（DLJ）条子椒（TZJ）。

1.3.2 电子鼻分析

样品处理：称量不同品种的辣椒籽 2.0 g，移至 10 mL 顶空进样瓶中，密封，进行电子鼻测定。

检测条件：样品在孵化器（70 ℃）内孵化 5 min，进样量 500 mL，进样速度 500 mL·s，手动进样。每个样品检测 120 s，检测器清洁 180 s。样品平行检测 10 次，取 3 次稳定数据进行分析。电子鼻传感器类型及性能描述^[15]情况详见表 1。

表 1 电子鼻系统的传感器类型及性能描述
Table 1 Sensor type and performance description of electronic nose system

序号	传感器名称	性能	参考物质
1	LY2/LG	对氧化能力较强的气体灵敏	2-甲基-3-呋喃硫醇
2	LY2/G	对胺类物质灵敏	甲胺
3	LY2/AA	对有机化合物灵敏	戊醛
4	LY2/Gh	对苯胺有选择性	苯胺
5	LY2/gCTI	对胺类物质灵敏	正丁胺
6	LY2/gCT	对烷烃、芳香成分灵敏	丙烷
7	T30/1	对极性化合物灵敏	丙醇
8	P10/1	对非极性化合物灵敏	正辛烷
9	P10/2	对烷烃灵敏	正庚烷
10	P40/1	对氧化能力较强的气体灵敏	甲基糠基二硫醚
11	T70/2	对芳香族化合物灵敏	二甲苯
12	PA/2	对有机化合物灵敏	乙醛、胺类化合物
13	P30/1	对有机化合物灵敏	乙醇
14	P40/2	对氧化能力较强的气体灵敏	甲硫醇
15	P30/2	对有机化合物灵敏	α -松油醇
16	T40/2	对氧化能力较强的气体灵敏	糠硫醇
17	T40/1	对氧化能力较强的气体灵敏	二甲基二硫醚
18	TA/2	对有机化合物灵敏	己醇

1.3.3 气相离子迁移色谱仪分析

GC-IMS 条件：色谱柱 MXT-WAX，30 m，ID:0.53 mm（美国 RESTEK 公司）；参考吴昭庆等^[16]的方法略作修改，分别取 1.0 g 辣椒籽置于 20 mL

顶空进样瓶，编号待检；样品平行 3 次。

分析时间：30 min；柱温：60 ℃；自动顶空进样；进样体积：200 mL；

孵化时间：15 min；孵化温度：60 ℃；

载气流量：初始流速 2 mL·min⁻¹，保持 0~2 min；2~5 min 内线性升至 10 mL·min⁻¹；5~15 min 内线性升至 15 mL·min⁻¹；15~20 min 内线性升至 50 mL·min⁻¹；20~30 min 内线性升至 100 mL·min⁻¹；IMS 温度 45 ℃，进样针温度 65 ℃。

数据处理：采用设备配置的 Laboratory Analytical Viewer 分析软件及 GC×IMS Library Search Software 软件对辣椒籽中的风味组分进行数据采集，对比 NIST 和 IMS 数据库定性；VOCal 用于分析谱图和数据的定性定量，Gallery Plot 生成指纹图谱。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Office Excel 2016 进行数据统计分析；采用 Origin 21 绘制雷达图、主成分图、柱状图；Metabo Analyst.ca（V6.0）绘制热图；采用 Gallery Plot 绘制指纹图谱。

2 结果与讨论

2.1 不同干辣椒中的辣椒籽电子鼻传感器数据分析结果

2.1.1 不同辣椒籽样品电子鼻感应器数据雷达图分析

为明确不同辣椒籽样品的风味特征，采用电子鼻传感器数据绘制雷达图，其结果如图 1 所示。电子鼻的 18 个传感器对气味的敏感程度都不一样，导致辣椒样品对传感器的响应强度不同，表明电子鼻能够区分不同样品之间风味物质差异。综合分析 4 种样品，PA/2（有机化合物、有毒气体敏感）、P30/1（可燃气体、有机化合物敏感）响应强度均高于其他 16 个传感器。然而 LY2/LG（氧化能力较强的气体）、LY2/G（氮氧化合物）、LY2/AA（乙醇、氨）、LY2/Gh（氨、胺类化合物）、LY2/gCTI（硫化物）、LY2/gCT（烷烃，芳香物质）传感器对应敏感类物质的响应值较低。4 个样品之间差异性较大，其中条子椒（TZJ）样品的响应值均高于其他 3 种样品，并且相差较为明显。有研究发现样品对应的电子鼻响应值越高，其对应的挥发性风味物质的种类和含量越多^[17]。实验表明：条子椒（TZJ）样品中含有的挥发性风味物质响应值最高，石柱红（SZH）、灯笼椒（DLJ）样品次之，且响应值相似，表明气味特征相似，天鹰小椒（TYXJ）样品中含有的挥发性风味物质响应值最低。

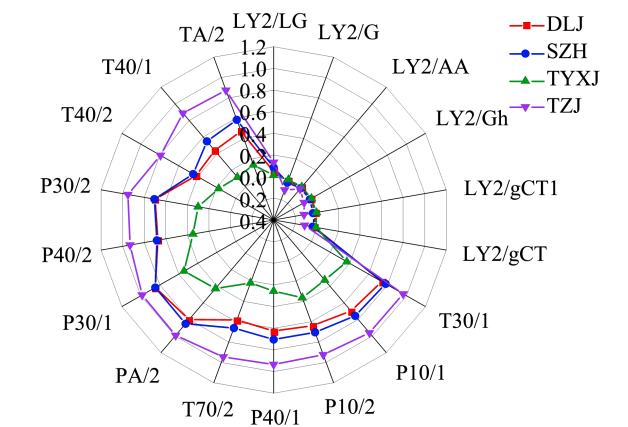


图 1 辣椒籽样品电子鼻传感器雷达图

Fig.1 Radar image of chili seed sample electronic nose sensor

2.1.2 辣椒籽主成分分析

为了更直观的比较不同辣椒籽中存在的成分和其风味物质之间存在的差异，将电子鼻感应器数据做PCA分析，其结果如图2所示。图2可见第一主成分贡献率为92.8%，第二主成分贡献率为5.70%，累积贡献率达97.8%，表明降维后主成分可以表征大多数样本信息^[18]。主成分图可以较好的反映辣椒籽样品的主要特征信息以及总体风味轮廓^[19]，可以直观展示出不同品种的辣椒籽气味特征差异明显。石柱红（SZH）样品距离靠近灯笼椒（DLJ）样品，表明样品风味相似^[20]。条子椒（TZJ）差异较大，位于第四象限，化合物响应值独立于其他样品。天鹰小椒（TYXJ）样品位于第三象限化合物响应值区别于其他样品。

电子鼻仅能检测分析挥发性化合物气味特征差异，具体化合物的影响需要进行GC-IMS检测分析。

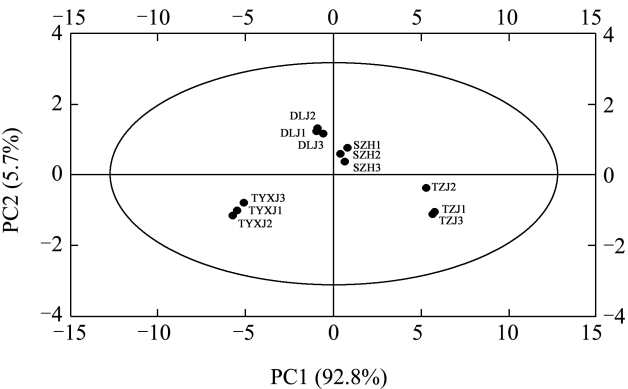


图 2 辣椒籽样品电子鼻传感器数据主成分图

Fig.2 Principal component diagram of electronic nose sensor data for chili seed samples

2.2 不同干辣椒中的辣椒籽GC-IMS检测结果

2.2.1 不同干辣椒中的辣椒籽GC-IMS二维图、差异性对比图分析

为明确辣椒籽中化合物对风味的影响，对GC-IMS检测结果得到的二维图、差异性对比图进行分析。图3二维图谱横坐标是离子迁移时间，表征物质浓度的光斑大多在0.75 ms时间内出现，纵坐标是保留时间，可见在200~1 200 s之间出现较多。差异性对比图中对相同物质进行抵消，如果某个物质浓度含量高则显现红色，含量低则呈现蓝色^[21]。黄色方框内直观可见样品化合物浓度差异较大，需待对化合物定性、定量后分析。

2.2.2 辣椒籽样品挥发性化合物定性和指纹图谱分析

使用仪器Library Search搜索定性软件，查询NIST、IMS数据库，对化合物进行定性，再使用Gallery Plot绘制指纹图谱可以分辨样品间化合物浓度差异。每一列中的点代表检测到的化合物浓度信号峰，每个样品平行检测3次的结果^[22]。图4可见：A区化合物样品浓度相似，表明这些化合物是共有化合物；B区化合物则是石柱红（SZH）干辣椒区别于其他样品的特征标志；C区化合物是条子椒（TZJ）干辣椒区别于其他样品的特征标志；D区化合物是天鹰小椒（TYXJ）区别于其他样品的特征标志；E区化合物是灯笼椒（DLJ）干辣椒区别于其他样品的特征标志。指纹图谱可见天鹰小椒（TYXJ）化合物浓度含量与其他样品差异最大，表明其风味特征与其他干辣椒差异明显。而石柱红（SZH）干辣椒与灯笼椒（DLJ）干辣椒最相似，条子椒（TZJ）与天鹰小椒（TYXJ）差异较大。

综合来看，指纹图谱化合物浓度特征可以作为区分4种干辣椒籽样品的依据。其中，天鹰小椒（TYXJ）化合物特征差异最大，其次是条子椒（TZJ）化合物差异明显，而石柱红（SZH）与灯笼椒（DLJ）干辣椒化合物特征差异较小，判断风味相似。这与电子鼻检测结果一致，但具体对风味特征的呈现影响需要对化合物进行定性、定量汇总分析。

2.2.3 辣椒籽样品挥发性化合物定量分析

2.2.3.1 辣椒籽样品挥发性化合物定量结果

为进一步探寻辣椒籽化合物含量对风味特征呈现的影响，采用检测峰信号值强度进行半定量分析^[23]，其结果如表2、图5所示。GC-IMS共检出69种化合

物（单聚体和双聚体），包括醛类 13 种，醇类 15 种，酯类 11 种，酮类 8 种，烯烃类 6 种，酸类 4 种，杂环、含硫类 6 种，其他类 2 种，还有 4 种无法识别；其中，醛类 8.63%~12.72%，醇类 14.95%~29.63%，酯类 5.35%~7.91%，酮类 7.28%~10.33%，酸类 32.27%~44.03%，烯烃类 5.55%~7.62%，杂环、含硫类 3.46%~7.21%，其他杂类 1.53%~2.31%。

图 5 可见辣椒籽主要挥发性化合物是酸类、醇类、醛类，以及酮类、酯类、杂环含硫类化合物，构成辣椒籽风味特征。

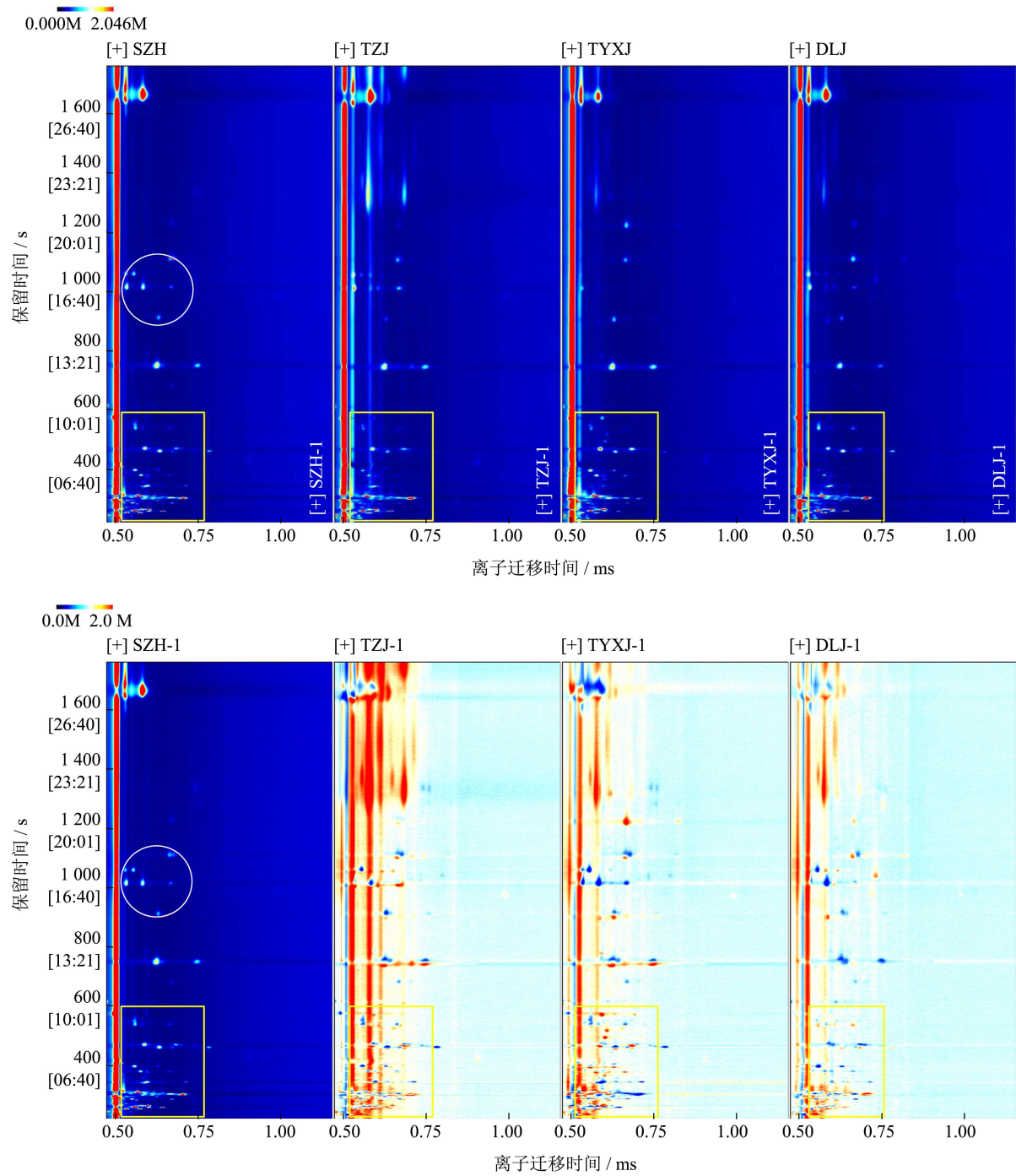


图 3 干辣椒籽样品 GC-IMS 二维图谱和差异性对比图

Fig.3 Two dimensional GC-IMS spectra and of different dried chili seed samples

注：上图为二维图谱，下图为差异性对比图；图中方框是差异性较大部分，白色圆圈是差异明显部分。

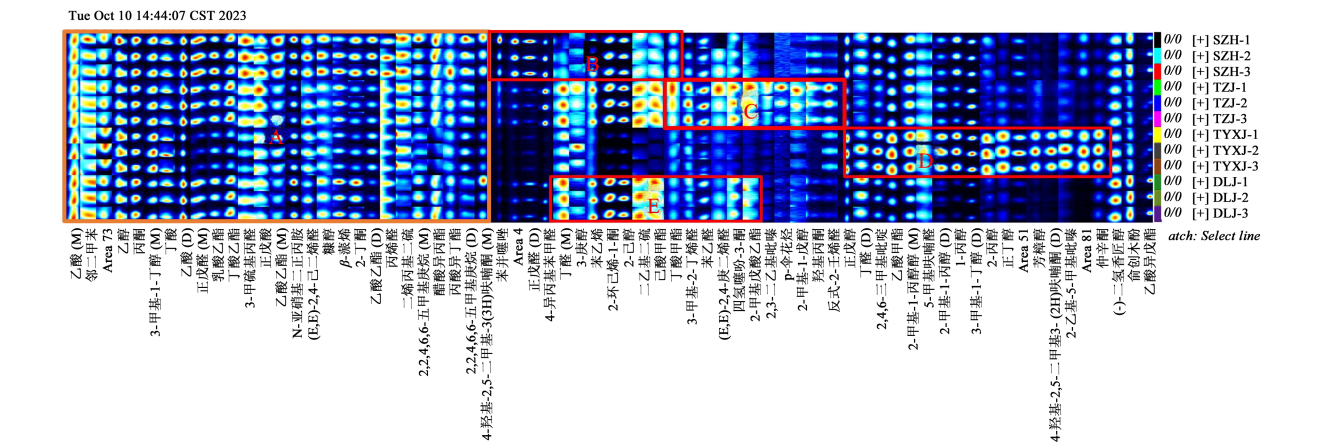


图 4 不同干辣椒籽样品 GC-IMS 指纹图谱

Fig.4 GC-IMS fingerprint spectra of different dried chili seed samples

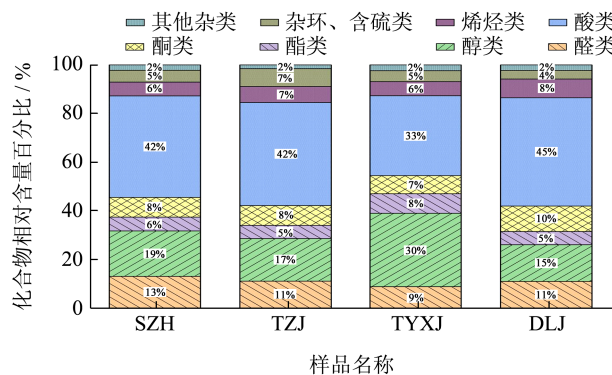


图 5 干辣椒籽样品化合物类别相对含量图

Fig.5 Relative content of compound categories in dried chili seed samples

2.2.3.2 辣椒籽样品挥发性化合物主成分分析 (PCA)

主成分分析 (PCA) 是对样本之间的相似性分析, 通过对样本进行降维、重新分组, 适用于初步的、探索性的和定性的分析^[24]。将辣椒籽样品化合物类别含量进行主成分分析, 其结果如图 6 所示。PC1 贡献率 58.23%, PC2 贡献率 28.98%, 两者相加大于 80%, 表明主成分分析有效^[25]。图 6 可见 DLJ (灯笼椒) 样品位于第一象限, 靠近酮类、烯炔类化合物, 表明其风味构成受酮类和烯炔类化合物影响较大; TYXJ (天鹰小椒) 样品位于第二象限, 靠近酯类、醇类, 表明其风味构成受酯类、醇类影响较大; SZH (石柱红) 样品与 TZJ (条子椒) 样品均位于第四象限, 且靠近 Y 轴, 表明 PC2 的信息是这两个样品主要构成。石柱红 (SZH)、条子椒 (TZJ) 样品距离相近, 均位于同一象限, 表明风味相似度较高。但石柱红 (SZH) 样品靠近醛类, 表明醛类对其风味影响较大, 而条子椒 (TZJ) 样品靠近杂环、含硫类化合物, 表明杂环、含硫类化合物对其风味影响较大。

化合物类别数据主成分分析表明: 石柱红

(SZH)、条子椒 (TZJ) 风味相似, 灯笼椒 (DLJ) 与天鹰小椒 (TYXJ) 样品差异较大。主成分分析结果与电子鼻响应值分析有一定的差异, 需要对化合物呈味特征进行分析, 进一步确定不同地区辣椒籽风味特征。

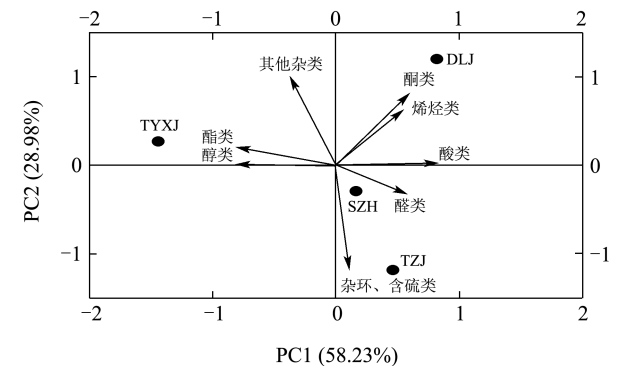


图 6 辣椒籽化合物类别含量主成分分析图

Fig.6 Principal component analysis of compound categories and content in chili seeds

2.3 辣椒籽样品挥发性化合物呈味特征分析

表 2 可见辣椒籽样品之间化合物相对含量差异较大, 表明不同辣椒中的辣椒籽风味差异较大。样品中含量最高的是乙酸 (M、D), 天鹰小椒 (TYXJ) 含量 19.20%, 但条子椒 (TZJ)、灯笼椒 (DLJ)、石柱红 (SZH) 干辣椒含量均接近或超过 30%。杨芳等^[26]采用 GC-IMS 在研究辣椒产地对辣椒油理化性质和挥发性风味物质的影响中也发现筛选出 10 种风味关键差异标志物就包括乙酸、丁酸; 屠大伟等^[1]对干辣椒的研究中也发现 D-柠檬烯、2,3-丁二醇、4-甲基-1-戊醇、乙酸、二甲醚等的相对含量较高。

醛类通常阈值较低, 通常具有脂肪味、青草气味。石柱红 (SZH) 样品中 3-甲硫基丙醛含量为 7.17%, 而其他样品含量为 4.16%~5.77%, 相对含量差异较大,

表明石柱红的辣椒籽因较高的 3-甲硫基丙醛含量,相对于其他样品会呈现较好的烤土豆香气。研究认为 3-甲硫基丙醛在 Strecker 降解和发酵过程中产生^[27],且含硫化合物通常阈值很高,对风味呈现的影响很大。天鹰小椒(TYXJ)样品中 4-异丙基苯甲醛含量仅 0.54%,低于其他辣椒 0.94%~1.61%,4-异丙基苯甲醛呈现的较尖锐的酸气也会低于其他样品。再次验证了天鹰小椒的辣椒籽酸味较低。

醇类脂肪经氧化分解生成或由羰基化合物还原得到,通常具有香脂醋香气、青草味、花香味、麦芽威士忌、脂肪味等感官风味,一般为样品的关键挥发性风味物质^[28]。相对含量差异较大的 3-甲基-1-丁醇(M、D),天鹰小椒(TYXJ)含量 6.52%,而石柱红(SZH)、条子椒(TZJ)含量 4.52%、4.65%,灯笼椒(DLJ)仅含有 3.47%,3-甲基-1-丁醇呈现的麦芽威士忌焦香明显差异较大。乙醇呈现的甜香味同样是天鹰小椒(TYXJ)含量 5.59%高于其他样品 3.69%、3.31%、3.73%。

酯类是醇类和酸类之间的酯化反应形成的^[29],通常具有水果香气、果蔬的甜香味。天鹰小椒(TYXJ)样品中乙酸甲酯含量 4.61%,而其他样品含量 1.31%~1.64%,表明天鹰小椒中乙酸甲酯呈现的水果香气优于其他样品。

酮类源自不饱和脂肪氧化和氨基酸降解产生,是食品风味呈现的主要因素^[30]。样品中 2-环己烯-1-酮呈现出杀虫剂的气味,在天鹰小椒(TYXJ)中很低 0.74%,而其他样品在 3.19%~5.28%,表明天鹰小椒辣椒籽气味特征与其他样品差异较大。4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)呋喃酮(M)具有焦糖味,其阈值低、特征性强,石柱红(SZH)、灯笼椒(DLJ)含量 0.46%,表明这两个样品辣椒籽呈现的焦糖风味对辣椒籽风味特征影响很大,明显区别于条子椒(TZJ)样品含量 0.19%。

烷烃类中烃类物质主要来自脂肪酸烷氧自由基的均裂^[31],烷烃类一般是无气味或者气味较弱,对风味影响不大。含量差异较大的主要是苯乙烯呈现的汽油、香脂醋味。灯笼椒(DLJ)样品含量 4.25%,略高于石柱红(SZH)样品含量 2.14%。

杂环、含硫化合物广泛存在于多种食品中,具有阈值极低的特点,是对食品感官品质有重要贡献的特征风味组分,在形成食品独特风味特征中也起着至关重要的作用^[32]。辣椒籽样品中检测到 2,4,6-三甲基吡啶、2,3-二乙基吡嗪、2-乙基-5-甲基吡嗪、二烯丙基二硫、二乙基二硫、3-甲硫基丙醛。其中差异最大的 2,3-二乙基吡嗪在条子椒(TZJ)样品中含量 4.17%,

远高于其他样品 1.10%~1.58%,表明条子椒(TZJ)呈现的水果甜香特征明显区别于其他样品。

总的来看,辣椒籽中呈现酸味的化合物含量最高,应该是样品采集地区多为川渝地区,空气中相对湿度较高,在晾晒过程中辣椒内部湿润发酵对辣椒籽的影响造成的。4 个辣椒籽样品风味特征差异较明显。其中:3-甲硫基丙醛、4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)呋喃酮(M)会使石柱红(SZH)呈现烤土豆香气、焦糖香气;乙酸、4-异丙基苯甲醛、3-甲基-1-丁醇(M、D)、乙醇会使天鹰小椒(TYXJ)呈现酸味、威士忌、麦芽香味、甜香味;苯乙烯会使灯笼椒(DLJ)呈现的汽油、香脂醋味;2,3-二乙基吡嗪会使条子椒(TZJ)呈现水果甜香味。分析认为:辣椒籽化合物含量是使不同辣椒籽呈现风味特征差异的重要因素,也是电子鼻主成分分析与化合物类别分析出现差异的原因。

2.4 辣椒籽样品聚类热图结果分析

聚类热图(Heatmap)是一种被广泛应用在食品化合物分析的统计方法,通过将大量数据进行聚类分析,最后将结果以各种色带展现出来^[33],颜色深浅代表样品之间的相关性,红色代表正相关,蓝色代表负相关^[34],热图分析具有直观可视化的优点,可以使香气成分差异具象化展示出来^[35]。将 GC-IMS 检测到的化合物相对含量数据采用 Metabo Analyst.ca(V6.0)软件绘制聚类热图,其结果如图 7 所示。聚类热图可以直观的辨别样品间差异以及相似性,图 7 明显可见 TYXJ 样品化合物区别于其他样品,表明风味独立于其他样品。DLJ 样品与 SZH 样品聚类,化合物相对含量相似度较高,表明风味相似。TZJ 样品与 SZG、DLJ 样品聚一类。化合物聚类热图结果与电子鼻主成分分析结果相似。

2.5 辣椒籽样品变量重要性值(VIP)结果

VIP 值通常用于衡量化合物对风味影响强度和解释能力,VIP 值>1 为差异挥发性化合物筛选标准^[36],通常认为 VIP 值越大对样品的影响力越大,其解释力越强^[37]。采用 Metabo Analyst.ca(V6.0)软件对 GC-IMS 数据进行偏最小二乘法判别分析(PLS-DA),得到图 8 变量重要性图。图 8 可见:醋酸-D、2,3-二乙基吡嗪、3-甲硫基丙醛、2-环己烯-1-酮、醋酸-M、3-甲基-1-丁醇-D、3-甲基-1-丁醇-M、乙酸甲酯、2-甲基-1-丙醇-M、丙酮、愈创木酚、2-甲基-1-丙醇-D、反式-2-壬烯醛、苯并噻唑、N-亚硝基-N-丙胺等 15 种化合物 VIP 值>1,表明其对样品风味有较大的影响。

表 2 辣椒籽GC-IMS定性、定量结果

Table 2 Qualitative and quantitative results of chili seed GC-IMS

类别	化合物名称	CAS#	保留指数 RI	保留时间 Rt/s	迁移时间 Dt/ms	样品化合物相对含量/%				气味描述词
						SZH	TZJ	TYXJ	DLJ	
醛类	4-异丙基苯甲醛	C122-03-2	1 244	1 019	1.332	1.19	1.61	0.54	0.94	较尖锐的酸气
	3-甲硫基丙醛	C3268-49-3	1 434	1 668	1.092	7.17	4.74	4.16	5.77	烤土豆的香气
	正戊醛 (M)	C110-62-3	981.8	342.4	1.186	1.40	1.01	0.47	1.17	杏仁、麦芽、辛辣气味
	(E,E)-2,4-庚二烯醛	C4313-03-5	1012	379.5	1.193	0.46	0.39	0.54	0.35	坚果香气
	正戊醛 (D)	C110-62-3	982.9	343.1	1.421	0.25	0.10	0.09	0.14	杏仁、麦芽、辛辣气味
	丙烯醛	C107-02-8	837.9	270.9	1.062	0.29	0.30	0.32	0.34	NF
	3-甲基-2-丁烯醛	C107-86-8	767.3	242.1	1.092	0.26	0.56	0.41	0.36	NF
	(E,E)-2,4-己二烯醛	C142-83-6	1 349	1 376	1.111	0.73	0.87	0.59	0.76	NF
	苯乙醛	C122-78-1	1 029	402.4	1.254	0.14	0.16	0.12	0.14	山楂、蜂蜜的甜香
	5-甲基呋喃醛	C620-02-0	981.8	342.4	1.128	0.13	0.11	0.20	0.12	杏仁、焦糖香气
	反式-2-壬烯醛	C18829-56-6	1 175	745.7	1.411	0.54	0.93	0.99	0.47	黄瓜、草香
	丁醛 (D)	C123-72-8	896	294.6	1.283	0.05	0.03	0.07	0.06	刺鼻的清香气味
	丁醛 (M)	C123-72-8	837.9	270.9	1.107	0.11	0.15	0.14	0.19	刺鼻的清香气味
	正戊醇	C71-41-0	1 217	911.8	1.253	1.43	0.97	2.25	1.09	香脂醋香气
醇类	3-甲基-1-丁醇 (D)	C123-51-3	1 176	751.7	1.493	2.17	2.44	3.94	1.29	焦香的麦芽威士忌
	3-甲基-1-丁醇 (M)	C123-51-3	1 177	753.8	1.246	4.65	4.52	6.52	3.47	焦香的麦芽威士忌
	(-)-二氢香芹醇	C20549-47-7	1 271	1 110	1.326	1.27	1.15	1.45	1.77	NF
	2-甲基-1-丙醇 (D)	C78-83-1	1 076	470.5	1.362	0.75	0.82	1.99	0.44	苦味酒，溶剂气味
	2-甲基-1-丙醇 (M)	C78-83-1	1 076	471.1	1.172	1.68	1.76	2.92	1.22	苦味酒，溶剂气味
	1-丙醇	C71-23-8	1 024	395.8	1.112	1.05	0.52	1.85	0.29	刺激性酒精气味
	乙醇	C64-17-5	926	311.1	1.129	3.69	3.31	5.59	3.73	甜香味
	2-丙醇	C67-63-0	914.2	304.5	1.221	0.46	0.31	1.24	0.27	NF
	糠醇	C98-00-0	867.3	282.9	1.125	0.20	0.10	0.17	0.15	烧焦的气味
	2-己醇	C626-93-7	807.7	258.6	1.281	0.61	0.84	0.23	0.88	NF
	正丁醇	C71-36-3	1 117	573.3	1.185	0.19	0.25	0.92	0.19	药品、水果香气
	2-甲基-1-戊醇	C105-30-6	822.4	264.6	1.296	0.04	0.09	0.07	0.05	NF
	芳樟醇	C78-70-6	1 096	520.6	1.214	0.10	0.12	0.44	0.09	薰衣草花香
	3-庚醇	C589-82-2	894.9	294.1	1.318	0.02	0.02	0.04	0.03	香草香气
酯类	醋酸异丙酯	C108-21-4	907.9	301	1.164	0.74	0.55	0.41	0.64	NF
	乙酸异戊酯	C123-92-2	1 099	527	1.303	0.55	0.43	0.56	0.78	香蕉香气
	乙酸乙酯 (D)	C141-78-6	874.7	285.9	1.337	0.27	0.15	0.24	0.11	菠萝香气
	乙酸甲酯	C79-20-9	822.4	264.6	1.195	1.52	1.64	4.64	1.31	水果香气
	乳酸乙酯	C97-64-3	794.5	253.2	1.147	1.09	1.17	0.88	1.10	水果香气
	乙酸乙酯 (M)	C141-78-6	877.6	287.1	1.096	0.44	0.29	0.45	0.28	菠萝香气
	丙酸异丁酯	C540-42-1	872.1	284.8	1.279	0.07	0.07	0.08	0.06	NF
	己酸甲酯	C106-70-7	928.2	312.4	1.28	0.08	0.12	0.03	0.13	新鲜水果香气
	2-甲基戊酸乙酯	C39255-32-8	942.4	320.3	1.292	0.03	0.07	0.02	0.06	NF
	丁酸乙酯	C105-54-4	807.3	258.4	1.198	0.58	0.69	0.46	0.71	苹果香气
	丁酸甲酯	C623-42-7	994.9	357.9	1.159	0.14	0.15	0.10	0.10	乙醚，水果甜香

续表2

类别	化合物名称	CAS#	保留指数 RI	保留时间 Rt/s	迁移时间 Dt/ms	样品化合物相对含量/%				气味描述词
						SZH	TZJ	TYXJ	DLJ	
酮类	2-环己烯-1-酮	C930-68-7	909.9	302.1	1.402	3.19	4.15	0.74	5.28	杀虫剂气味
	2-丁酮	C78-93-3	895.3	294.3	1.247	0.19	0.11	0.13	0.21	乙醚甜香
	丙酮	C67-64-1	812.9	260.7	1.113	3.26	2.55	2.84	3.32	NF
	四氢噻吩-3-酮	C1003-04-9	942.3	320.3	1.183	0.09	0.11	0.06	0.12	NF
	羟基丙酮	C116-09-6	1 243	1 014	1.233	0.27	0.37	0.15	0.21	NF
	4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)呋喃酮(M)	C3658-77-3	1 086	495.6	1.198	0.09	0.08	0.57	0.07	焦糖香气
	仲辛酮	C111-13-7	1 305	1 225	1.332	0.41	0.44	2.46	0.66	肥皂、汽油味
酸类	4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)呋喃酮(D)	C3658-77-3	1 072	459.6	1.56	0.46	0.19	0.33	0.46	焦糖香气
	乙酸(D)	C64-19-7	1 439	1 684	1.056	29.66	31.53	19.20	31.27	酸味
	丁酸	C107-92-6	821.7	264.3	1.156	0.98	0.91	1.34	0.96	腐臭、奶酪臭味
	正戊酸	C109-52-4	923	309.4	1.23	0.46	0.44	0.54	0.40	汗味
烯炔类	乙酸(M)	C64-19-7	1 435	1 669	1.158	9.76	9.05	11.19	11.40	酸味
	苯乙烯	C100-42-5	1 256	1 057	1.057	2.14	3.89	2.96	4.25	汽油、香脂醋香
	愈创木酚	C90-05-1	1 104	539.5	1.114	1.15	0.60	1.00	1.45	烟熏、甜香
	2,2,4,6,6-五甲基庚烷(M)	C13475-82-6	919.6	307.5	1.042	0.39	0.38	0.36	0.45	NF
含硫、杂环类	2,2,4,6,6-五甲基庚烷(D)	C13475-82-6	912.6	303.6	1.325	1.61	1.28	1.12	1.14	NF
	β -蒎烯	C127-91-3	983.7	343.5	1.294	0.18	0.17	0.16	0.21	松木、松油香气
	p-伞花烃	C99-87-6	1 256	1 057	1.299	0.09	0.18	0.12	0.12	溶剂, 汽油, 柑橘气味
	苯并噻唑	C95-16-9	1 244	1 017	1.16	2.34	2.01	0.97	0.98	汽油、橡胶味
其他	2,4,6-三甲基吡啶	C108-75-8	1 012	380.1	1.149	0.77	0.59	1.30	0.53	NF
	2,3-二乙基吡嗪	C15707-24-1	1 435	1 672	1.23	1.10	4.17	1.47	1.58	水果甜香味
	2-乙基-5-甲基吡嗪	C13360-64-0	1 001	365.8	1.196	0.09	0.07	0.29	0.06	水果甜香味
	二烯丙基二硫	C2179-57-9	1 074	465.6	1.199	0.36	0.25	0.35	0.18	NF
	二乙基二硫	C110-81-6	916.9	306	1.282	0.08	0.14	0.04	0.14	NF
	N-亚硝基二正丙胺	C621-64-7	1 073	463	1.263	1.79	1.22	1.87	1.80	NF
	邻二甲苯	C95-47-6	896.8	294.9	1.066	0.35	0.32	0.45	0.41	天竺葵花臭

注: NF 表示未查阅; 风味描述来源于 :<http://www.flavornet.org/flavornet.html> ; M 表示单聚体、D 表示二聚体。

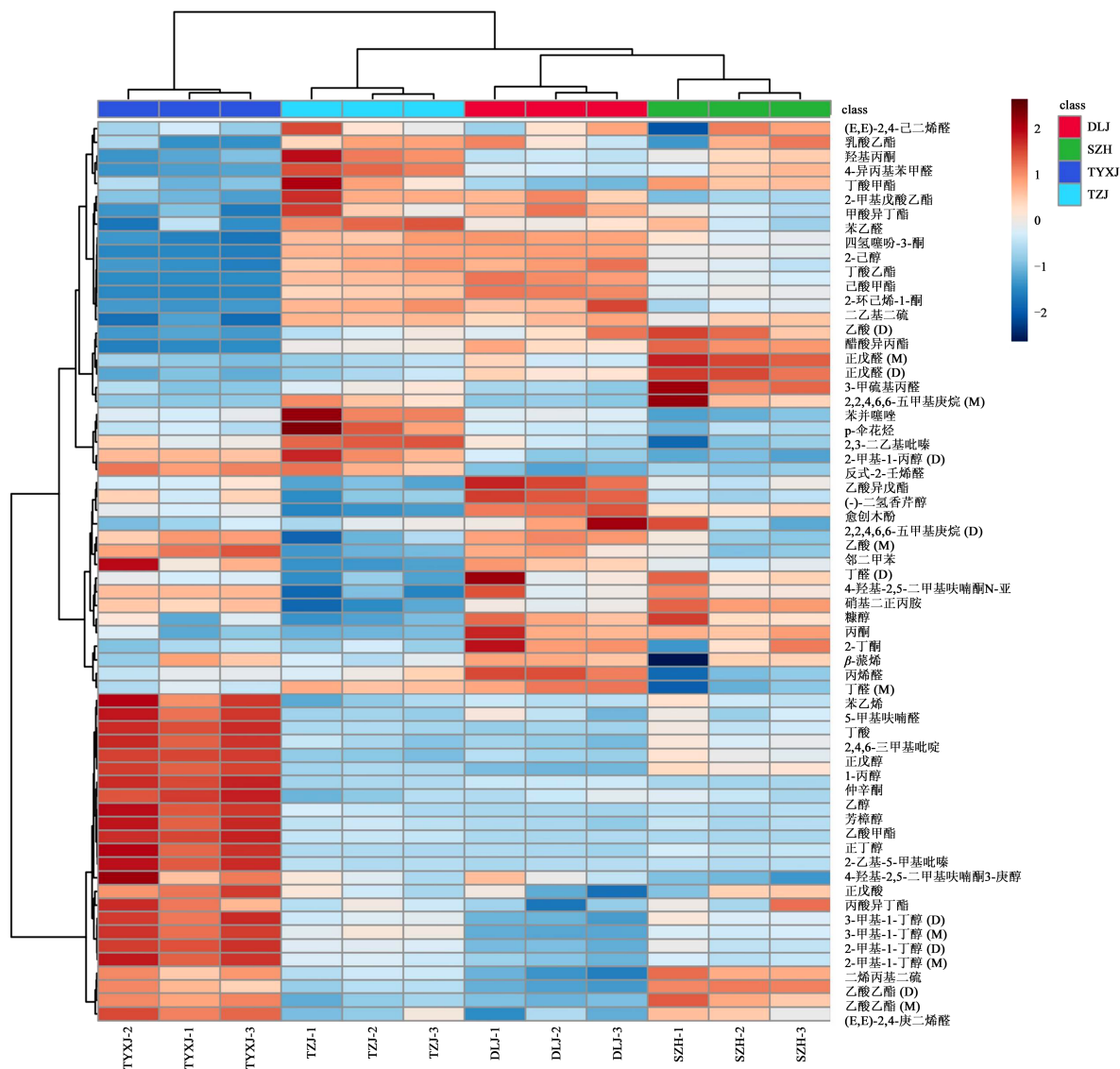


图 7 辣椒籽样品化合物相对含量热图聚类图

Fig.7 Heat map clustering diagram of relative compound content in chili seed samples

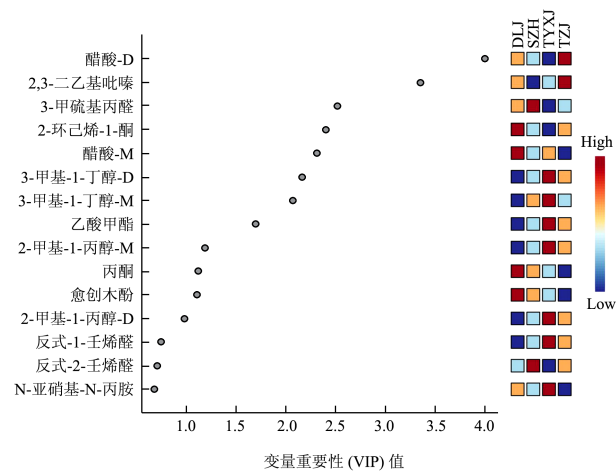


图 8 辣椒籽最小二乘法判别结果变量重要性值图

Fig.8 The importance value of variables in the least squares discriminant results of chili seeds

3 结论

本实验以 4 种常见干辣椒中的辣椒籽为研究对象，采用电子鼻与 GC-IMS 检测化合物变化。研究表明电子鼻能够区分 4 种辣椒籽的气味特征，条子椒化合物响应值最突出，样品间差异较大。GC-IMS 共检出 69 种化合物，包括醛类 13 种、醇类 15 种、酯类 11 种、酮类 8 种、烯炔类 6 种、酸类 4 种、杂环及含硫类 6 种、其他类 2 种，还有 4 种无法识别。PCA 分析表明：石柱红、条子椒风味相似，灯笼椒与天鹰小椒样品差异较大。3-甲硫基丙醛、4-羟基-2,5-二甲基-3(2H) 呋喃酮 (M) 会使石柱红呈现烤土豆香气、焦糖香气；乙酸、4-异丙基苯甲醛、3-甲基-1-丁醇 (M、D)、乙醇会使天鹰小椒呈现酸味、威士忌、麦芽香味、甜香味；苯乙烯会使灯笼椒呈现的汽油、香脂醋味；2,3-二乙基吡

嗟会使条子椒呈现水果甜香味。

样品辣椒籽中挥发性化合物中乙酸含量19.20%~31.53%，分析是干辣椒在制作过程中，辣椒籽位于辣椒内部，晾晒烘干过程中辣椒籽因温度发酵形成较多的酸类物质，而天鹰小椒样品可能加工条件较好，乙酸含量较正常。据此推断干辣椒中乙酸含量应该与辣椒籽相关性较高，主要因素是干燥过程中辣椒籽发酵呈现较强的酸味。实验表明晾晒过程中干辣椒内部发酵对辣椒籽气味特征影响较大，在今后干辣椒晾晒干燥工艺优化上必须考虑辣椒籽的干燥条件，提高干辣椒品质；石柱红、条子椒气味特征相似，灯笼椒与天鹰小椒气味差异较大，在今后辣椒籽综合加工利用中可以根据辣椒籽风味特征差异，采用不同的分量组合以得到最佳风味。

参考文献

- [1] 郑井元,李雪峰,周书栋,等.2017年度辣椒科学研究进展[J].中国蔬菜,2018,5:9-15.
- [2] ADETOUN M, BABARINDE S O, KALU G M, et al. Effects of sun-drying on the antioxidant potentials of pepper (*Capsicum*) varieties [J]. *Life Journal of Science*, 2021, 23 (2):169-176.
- [3] 薛琰文,胡景娜,敬璞,等.我国11种常见品种辣椒籽成分分析和比较[J].粮食与油脂,2021,34(7):143-149.
- [4] 范智义,张敏,邓维琴等.不同产地辣椒挥发性成分的对比较[J].食品与发酵科技,2022,58(3):113-118.
- [5] 王兴波,饶雷,王永涛,等.9个品种干辣椒的品质分析及评价[J].食品工业科技,2022,43(18):300-310.
- [6] 彭月,马艳青,高风云,等.我国辣椒生产相关标准体系现状分析与展望[J].中国蔬菜,2024,3:7-18.
- [7] GARRUTI D S, PINTO N O F, ALVES V C C, et al. Volatile profile and sensory quality of new varieties of *Capsicum* Chinese pepper [J]. *Food Science and Technology*, 2013, 33 (1): 102-108.
- [8] JIE Y L, YOUNAS D, ALIREZAA A. Flavor components, precursors, formation mechanisms, production and characterization methods: garlic, onion, and chili pepper flavors [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, 62 (30): 8265-8287.
- [9] 高佳,田玉肖,罗芳耀,等.16个优良朝天椒组合干制品品质分析与评价[J].食品安全质量检测学报,2021,12(4):1386-1392.
- [10] 杨创创,何建文,张正海,等.13份干辣椒挥发性风味品质评价[J].中国蔬菜,2023,10:37-49.
- [11] 屠大伟,翁盈秋,李青青,等.火锅常用干辣椒品质及挥发性成分研究[J].食品工业科技,2023,44(16):358-366
- [12] YANG K and HAN X L. Lipidomics: techniques, applications, and outcomes related to biomedicalsciences [J]. *Trends in Biochemical Sciences*, 2016, 41(11): 954-969.
- [13] WANG S, CHEN H, SUN B. Recent progress in food flavor analysis using gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-MS) [J]. *Food Chemistry*, 2020, 315: 126158.
- [14] 王嘉莹,杜勃峰,丁筑红,等.调味辣椒粉“减盐降钠”配方优化及品质分析[J].食品与发酵科技,2022,58(5):57-64.
- [15] 蔡雨静,张振宇,王彩玲,等.电子鼻、电子舌结合SPME-GC-MS对青海玉树牦牛肉挥发性化合物分析[J].食品工业科技,2023,44(16):348-357.
- [16] 吴昭庆,胡萍,王晓宇,等.糍粑辣椒关键工艺对其品质的影响[J].中国食品学报,2022,22(6):209-219.
- [17] 董殊廷,聂加贤,徐怀德,等.辣椒皮与籽在辣椒油香气中的贡献研究[J].中国调味品,2022,47(4):26-31.
- [18] SUN X, YU YUMEI, AHMED S.M. SALEH, et al. Characterization of aroma profiles of Chinese four most famous traditional red-cooked chickens using GC-MS, GC-IMS, and E-nose [J]. *Food Research International*, 2023, 173: 113335.
- [19] DANANG L, DEN P, FANDY A, et al. Quality Classification of Chili Sauce Using Electronic Nose with Principal Component Analysis [C]// 2018 4th International Conference on Science and Technology (ICST). 2018.
- [20] 毛冰冰,王煦松,刘忠思,等.基于动态感官与风味组学方法融合的不同辣条品质特征对比[J].现代食品科技,2025,41(3):329-339.
- [21] HE S, ZHANG B, DONG X, et al. Differentiation of goat meat freshness using gas chromatography with ion mobility spectrometry [J]. *Molecules*, 2023, 28 (9): 3874-3874.
- [22] LIU Y, LI Y, LIU H J, et al. Analysis of the changes of volatile flavor compounds in a traditional Chinese shrimp paste during fermentation based on electronic nose, SPME-GC-MS and HS-GC-IMS [J]. *Food Science and Human Wellness*, 2023, 12 (1): 173-182.
- [23] 张浩,高天珑,易宇文,等.基于电子鼻和气相色谱-离子迁移谱技术分析香辛料对鱼香酱汁风味的影响[J].食品工业科技,2025,46(9):264-274.
- [24] 张牵,韩颖颖,孟繁宇,等.化学计量学在食品风味领域的应用进展[J].食品科学,2024,45(21):307-315.
- [25] YIN H N, WANG L, SU H M, et al. Effects of ultraviolet and infrared radiation absence or presence on the aroma volatile compounds in winegrape during version [J]. *Food Research International*, 2023, 167: 112662.
- [26] 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.
- [27] PRIPIS-NICOLAU L, DE REVEL G, BERTRAND A, et al. Formation of flavor components by the reaction of amino acid and carbonyl compounds in mild conditions [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2000, 48(9): 3761-3766.
- [28] 喻余梅,何金华,孙祥祥,等.基于感官导向的风味分析和多元统计学方法表征传统烤鸡风味[J/OL].食品科学技术学报,1-12 [2024-10-13].
- [29] 白绍赐,杨明源,张群芳等.松花粉醋发酵过程中风味品质差异性分析[J].食品科学,2024,45(17):154-164.
- [30] YANG Z J, HE Y Q, LIAO G Z, et al. Comparative analysis of characteristic volatile compounds in five types of Yunnan dry-cured hams by HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS [J]. *Food Science of Animal Products*, 2023, 1(2): 9240022.

[31] 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.

[32] 王蓓,韩兆盛,杨智杰,等.6类常见食品中含硫化合物风味特征及形成机理研究进展[J].食品科学技术学报,2022,40(6):13-25.

[33] 刘振艳,张微,宋耀新,等.基于热图和聚类分析黑龙江7个产地紫苏梗中氨基酸含量及其营养评价[J].中国食品添加剂,2023,34(10):1-8.

[34] JIA Y, NIU C T, ZHENG F, et al. Development of a defined autochthonous starter through dissecting the seasonal microbiome of broad bean paste [J]. Food Chemistry, 2021, 357: 129625.

[35] 廖国钊,时小东,王嘉,等.基于GC-IMS和GC-MS比较不同桑叶茶的香气成分[J].现代食品科技,2025,41(1):262-272.

[36] 马雪莲,王鹏,耿敬章,等.感官评价联合GC-MS与OPLS-DA解析加热温度对椒麻鸡赋味汤料呈香品质影响规律[J].食品科学,2024,45(17):127-134.

[37] XIE J, LI X J, LI W, et al. Characterization of the key volatile organic components of different parts of fresh and dried perilla frutescens based on headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry and headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry [J]. Arabian Journal of Chemistry, 2023, 16(8): 104867.