

遵义市不同品种朝天椒中香气成分比较

李航¹, 张季^{1*}, 蔡砚芳¹, 杨华¹, 段志斌², 胡引¹

(1. 遵义市产品质量检验检测院(遵义市综合检验检测中心), 贵州遵义 563000)

(2. 遵义医科大学公共卫生学院, 贵州遵义 563000)

摘要: 为探究遵义市不同品种朝天椒的香气差异, 利用固相微萃取-气相色谱-质谱联用(HS-SPME-GC-MS)技术对遵义市 23 种朝天椒品种的挥发性香气成分进行定量分析, 并结合香气活度值(OAV)、主成分分析(PCA)及正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)系统解析其风味特征。结果表明: 共鉴定出 45 种香气成分, 分属 9 类化合物, 总含量为 400~700 mg m⁻³, 其中醛类为优势组分(占总量 40.51 wt.%~72.23 wt.%)。OAV 分析筛选出 28 种关键呈香组分, 其中 17 种为共有香气成分, 11 种为非共有; 结合香气轮廓雷达图显示, 所有品种均以花香为主要香型, 但次级香型分化明显。OPLS-DA 结合变量重要性投影(VIP)与 t 检验共鉴定出 12 种关键差异香气成分(VIP>1, P<0.05), 其中醛类 3 种、烃类 2 种、酯类 2 种, 酸类、醇类、酮类、呋喃类和酚类均为 1 种。本研究有助于阐明不同品种朝天椒的香气特征, 为风味导向的品种精准选育、高附加值产品开发提供理论依据与技术支持。

关键词: 朝天椒; 固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术; 香气成分; 香气活度值; 正交偏最小二乘判别分析

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.6.0265

Comparison of Aroma Components in Different Varieties of Chaotian Chili Peppers of Zunyi City

LI Hang¹, ZHANG Ji^{1*}, CAI Yanfang¹, YANG Hua¹, DUAN Zhibin², HU Yin¹

(1. Zunyi Institute of Products Quality Inspection and Testing, Zunyi Comprehensive Inspection and Testing Center, Zunyi 563000, China)(2. College of Public Health, Zunyi Medical University, Zunyi 563000, China)

Abstract: To investigate the aroma differences among different varieties of Chaotian pepper in Zunyi, volatile aroma components of 23 Chaotian pepper varieties from Zunyi were quantitatively analyzed using headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS). Their flavor characteristics were systematically analyzed combined with odor activity value (OAV), principal component analysis (PCA) and orthogonal partial least squares-discriminant analysis (OPLS-DA). The results showed that a total of 45 aroma components were identified, belonging to 9 categories, with total contents ranging from 400 to 700 mg m⁻³, among which aldehydes were the dominant components (accounting for 40.51 wt.%~72.23 wt.% of the total). OAV analysis screened out 28 key aroma-active components, including 17 common aroma components and 11 non-common components. The aroma profile radar chart showed that all varieties were dominated by floral aroma, with obvious differentiation in secondary aromas. A total of 12 key differential aroma components (VIP>1, P<0.05) were identified by OPLS-DA combined with variable importance in projection (VIP) and t-test, including 3 aldehydes, 2 hydrocarbons, 2 esters, and 1 each of acids, alcohols, ketones, furans and phenols. This study helps to clarify the aroma characteristics of different Chaotian pepper varieties, and provides a theoretical basis and technical support for flavor-oriented precise breeding and the development of high value-added products.

Keywords: chaotian chili peppers; headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry; aroma compounds; odor activity value; orthogonal partial least squares discriminant analysis

辣椒(*Capsicum annuum* L.)作为一种全球广泛种植的重要辛辣类蔬菜和调味品, 在世界农业生产与食品加

收稿日期: 2026-02-24; 修回日期: 2026-06-02; 接受日期: 2026-06-02

基金项目: 遵义市科技计划项目[遵市科合 HZ 字(2026) 222 号]; 遵义市科技创新团队(遵 KCTD(2025) 31 号); 遵义市农业科技攻关项目[遵市科合 HZ 字(2023) 8 号]

作者简介: 李航(1993-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 产品质量检验检测, E-mail: 1508124278@qq.com

通讯作者: 张季(1989-), 男, 硕士, 副高级工程师, 研究方向: 食品检验检测, E-mail: 228712078@qq.com

工中占据重要地位。根据联合国粮农组织（FAO）统计，2023 年全球辣椒种植面积达 180.3 万公顷，总产量为 582.2 万吨。辣椒果实富含营养物质和生物活性化合物，主要包括酚类化合物、维生素 C、类胡萝卜素和辣椒素等，因而具备抗氧化和抗炎等生理益处^[1]。目前，辣椒广泛应用于日常烹饪及食品加工领域，形成了以鲜食消费和加工利用为主的消费形态。

辣椒作为调味品，香气和辣味是其对食品风味的主要贡献。香气是辣椒重要的品质性状之一，其挥发性成分的特征香气对辣椒独特的风味有着重要贡献，其挥发性成分的特征差异不仅决定了辣椒的独特风味，更直接影响消费者偏好和品种市场竞争力^[2,3]。目前，辣椒中已经鉴定出数百种挥发性化合物，且不同品种间香气成分差异显著：Rodriguez 等^[4]对 16 个辣椒品种的挥发性物质进行分析发现，23 种香味活性成分的浓度差异决定了品种香气特异性；Sosa 等^[5]研究认为不同品种的特征香味物质不同，如 Mayapan 和 Jaguar 的特征香味物质为 3-甲基丁酸己酯、3,3-二甲基环己醇、3-甲基丁酸己酯等；Zhang 等^[6]发现皱皮辣椒挥发物平均含量比表皮光滑的辣椒高 39.79%。可见，挥发性物质种类和浓度差异是不同辣椒品种香味独特性的核心决定因素。近年研究进一步表明，关键香气成分的生物合成通路受多基因协同调控，其表达丰度直接关联挥发性物质积累动态。因此，解析不同品种辣椒的香气成分，不仅有助于精准选育高香优质品种，也为风味定向调控提供理论依据与技术支持。

贵州是我国的辣椒种植大省，遵义市更是位居国内辣椒主产区首位^[7]，其主栽的辣椒种类，以“品味温醇、香辣协调”的品质特征著称，于 2017 年获批国家地理标志产品，是众多辣椒制品的核心原料，其香气特征直接影响下游加工产品的品质。作为高香型辣椒，朝天椒挥发性风味组分丰富，其香气特征受品种、产地、成熟度等因素影响显著^[8]，且同一辣椒种类的不同品种间也可能存在显著香气差异^[9]。然而，遵义市朝天椒种系繁多，品种丰富，其相关研究主要集中在抗逆性、新品种选育等方面^[10,11]，针对遵义不同品种朝天椒干品的香气特征研究存在明显空白：尚未明确不同品种遵义朝天椒干品的挥发性香气成分种类、含量差异，无法区分各品种的专属香气特征，也缺乏对其香气特异性的系统表征。这一研究缺口直接阻碍了遵义朝天椒这一优良种质资源在香气品质改良、专用加工品种筛选及深加工产品开发中的高效利用，也难以给朝天椒育种及加工产业发展提供针对性理论支撑。基于此，本研究以遵义市不同品种朝天椒干品为研究对象，采用固相微萃取-气相色谱-质谱联用（Solid Phase Microextraction-Gas Chromatography-Mass Spectrometry, HS-SPME-GC-MS）结合外标法，明确测定不同品种朝天椒干品的香气成分种类及含量，系统表征各品种的香气特征并进行品种间区分，核心解决“遵义不同品种朝天椒干品香气特征不明、无法为育种及加工提供支撑”的具体问题，最终为朝天椒加工产业提质、专用品种育种及优良种质资源高效利用提供明确的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

1.1.1 样品采集及分类

于 2023 年 8 月 31 日-2023 年 9 月 4 日（朝天椒红果采摘期内），在中国辣都（虾子）辣椒智慧产业园采集朝天椒样品。根据朝天椒实际果长分布特征，预先设定果长分类标准，具体品种及分类情况见表 1。每个品种采集约 2.5 kg（鲜重）。采样时同一个辣椒品种进行随机取样，挑选成熟度一致（纯红果）、大小均匀、无破损的辣椒果，将采集的样品封装于聚乙烯样品袋中常温保存。为获得代表性样本，试验采取“间隔”取样法进行取样，即每间隔 2 株进行取样，且每株朝天椒采摘红果数量 10~15 个。将采集的样品置于自封袋中，排尽空气后密封，并记录样品信息（包括：辣椒品种、采集日期等）。将密封后的样品带回实验室，置于搪瓷盘上，在 50 ℃条件下烘干（含水率<5 wt.%），于冰箱储藏室（-2~0 ℃）中保存。进行分析前，将辣椒样品（干品）中发霉、花壳的辣椒去掉，剪去辣椒果柄，用破壁机粉碎，过 1 mm 筛后制成辣椒面，作为待测样品（约 100 g）。

表 1 朝天椒品种及果型特征

Table 1 Cultivars and fruit shape characteristics of chili peppers

样品名称（简写）	划分类别/cm	果型	果长/cm
骄阳 1 号（JY1）	a（>7）	指形	7.5~9.0
骄阳 2 号（JY2）		指形	8.5~10.7
骄阳 6 号（JY6）		指形	8.5~9.0

样品名称 (简写)	划分类别/cm	果型	果长/cm
遵辣 9 号 (ZL9)	b (5~7)	指形偏圆锥	7.5~8.2
遵辣 10 号 (ZL10)		指形偏圆锥	7.3~8.0
义研艳椒 (YYYJ)		羊角形	10.0~10.5
朝天 8 号 (CT8)		指形	6.0~8.0
卓椒 16 (ZJ16)		羊角形	6.8~8.5
艳椒 808 (YJ808)		指形	6.7~8.5
湘辣 54 (XL54)		羊角形或指形	5.5~6
遵椒 111 (ZJ111)		指形	6.6~7.2
黔辣 8 号 (QL8)		指形	6.5~8.7
满天星 (MTX)		锥形	5.5~6.4
朝天 730 (CT730)	c (3.5~5)	锥形	5.4~6.2
遵椒 222 (ZJ222)		锥形	4.5~4.9
赤艳 3 号 (CY3)		锥形	4.1~4.5
朝天 6 号 (CT6)		羊角形	4.0~7.4
遵椒子弹头 (ZJZ)		锥形	4.6~5.5
明艳 (MY)	d (1~3.5)	锥形	3.5~4.4
圆珠 6 号 (YZ6)		圆珠形	2.1~3.7
黔辣 10 号 (QL10)		圆珠形	1.5~2.2
卓椒圆珠 (ZJYZ)		圆珠形	2.1~3.5
卓椒草莓 (ZJCM)		短圆锥形	3.1~3.6

注：表中类别划分以果长为依据。

1.1.2 仪器与设备

8890-5977B 型气相色谱-质谱联用仪，美国 Agilent 公司；HB-5MS（30.0 m×0.25 mm×0.25 μm）弹性石英毛细管柱，美国 Agilent 公司；固相微萃取装置（57330-U，50/30 μm PDMS/CAR/DVB），美国 Supelco 公司。

1.1.3 试剂及标准品

去离子水符合 GB/T 6682-2008《分析实验室用水规格和试验方法》的一级水；乙腈（HPLC），美国 KNOWLES 公司；标准物质 3-甲硫基丙醛，购于成都乐美天医药科技有限公司；苯甲醛，购于北方伟业计量集团有限公司；苯乙醛和（+）-香橙烯，购于 Stanford Chemicals-Stanford Analytical Chemicals Inc.；其余标准物质，均购于坛墨质检科技股份有限公司，详细信息见表 2。

表 2 标准品信息

Table 2 Information of standard

化合物	CAS 号	批号	纯度/质量浓度	化合物	CAS 号	批号	纯度/质量浓度
糠醛	98-01-1	23100074	99.9 wt. %	棕榈酸甲酯	112-39-0	24040507	98.7 wt. %
3-甲硫基丙醛	3268-49-3	DST230904-474	98.1 wt. %	异戊酸	503-74-2	24110136	99.9 wt. %
苯甲醛	100-52-7	BWJ5255-2016	99.0 wt. %	2-甲基丁酸	116-53-0	23070150	99.6 wt. %
5-甲基糠醛	620-02-0	24030791	1 000 μg·mL ⁻¹	4-甲基戊酸	646-07-1	24030393	99.0 wt. %
苯乙醛	122-78-1	AL231207-31	98.0 wt. %	2-乙基己酸	149-57-5	24050499	99.9 wt. %
2-甲基苯甲醛	529-20-4	24010247	98.3 wt. %	壬酸	112-05-0	22070195	97.3 wt. %
1-甲基-2-吡咯甲醛	1192-58-1	24050541	97.1 wt. %	5-甲基-2-呋喃甲醇	3857-25-8	23080724	95.8 wt. %
藏红花醛	116-26-7	DST230927-236	98.0 wt. %	芳樟醇	78-70-6	23110840	99.0 wt. %
(E,E)-2,4-癸二烯醛	25152-84-5	24030408	93.9 wt. %	苯乙醇	60-12-8	22110148	98.7 wt. %
香兰素	121-33-5	22030581	99.9 wt. %	1-十六醇	36653-82-4	24050680	99.9 wt. %
2-甲基茶	91-57-6	23020941	98.5 wt. %	对甲基苯乙酮	122-00-9	22100386	98.9 wt. %
十四烷	629-59-4	24010461	1 000 μg·mL ⁻¹	香叶基丙酮	3796-70-1	23070431	99.3 wt. %

<i>β</i> -石竹烯	87-44-5	24040167	95.8 wt. %	<i>β</i> -紫罗兰酮	79-77-6	23120014	94.9 wt. %
<i>β</i> -金合欢烯	18794-84-8	24031134	98.9 wt. %	呋喃酮	3658-77-3	G22110042	98.8 wt. %
(+)-香橙烯	489-39-4	PY240425-06	98.0 wt. %	2-乙酰基呋喃	1192-62-7	G24040301	97.7 wt. %
十五烷	629-62-9	23110670	99.3 wt. %	2-戊基呋喃	3777-69-3	G24030158	99.2 wt. %
十六烷	544-76-3	A23050313	100.0 wt. %	2,5-二甲酰基呋喃	823-82-5	23070240	98.0 wt. %
十七烷	629-78-7	22110069	99.4 wt. %	麦芽酚	118-71-8	24050503	99.9 wt. %
菲	85-01-8	A23120443	1 000 μg·mL ⁻¹	4-乙烯基愈创木酚	7786-61-0	23110939	99.9 wt. %
<i>γ</i> -丁内酯	96-48-0	24020313	99.0 wt. %	2-乙酰基吡咯	1072-83-9	24020265	99.8 wt. %
水杨酸甲酯	119-36-8	24040116	99.9 wt. %	2-乙酰基吡嗪	22047-25-2	23070725	99.7 wt. %
二氢猕猴桃内酯	17092-92-1	22070118	99.7 wt. %	吡啶	120-72-9	23070362	99.9 wt. %
十四烷酸甲酯	124-10-7	24030284	99.7 wt. %	/			

1.2 实验方法

1.2.1 混合标准工作液配制

混合标准储备溶液：分别称取适量标准物质（按标准品实际含量折算）于 10 mL 容量瓶，用乙腈定容，配制成单个标准品在混合标准储备溶液中的质量浓度均为 1 000 μg·mL⁻¹ 的标准储备液，置于冰箱中保存（0~4 ℃），有效期内使用。

混合标准工作液：分别移取适量上述标准储备溶液，用乙腈逐级稀释，配制成质量浓度分别为 0.0、5.0、10.0、20.0、30.0、40.0 和 50.0 μg·mL⁻¹ 的混合标准工作液，所有工作液均现用现配，避免浓度偏差影响测定结果。

1.2.2 样品制备

将采集的朝天椒样品均匀平铺于搪瓷盘上，置于 50 ℃ 恒温干燥箱中烘干至含水率<5 wt. %，烘干后迅速转移至冰箱储藏室中密封保存，防止吸潮和香气成分挥发。分析前，人工剔除破损、发霉、花壳及杂质污染的辣椒个体，剪去果柄，放入破壁机中粉碎，粉碎后过 1 mm 标准筛，收集筛下辣椒面作为待测样品（每份样品量约 100 g），充分混匀后备用。

1.2.3 固相微萃取

准确称取 2.0 g 待测样品置于 15 mL 萃取瓶（标准工作系列溶液均移取 5 μL 加入萃取瓶中进行测定），立即用带有聚四氟乙烯隔垫的样品瓶盖拧紧密封，避免香气成分泄漏。将萃取瓶置于 95 ℃ 恒温水浴中加热 15 min，使样品中挥发性香气成分充分释放至顶空部分；同时将 PDMS/CAR/DVB 萃取头置于 250 ℃ 条件下活化 5 min，去除萃取头表面残留杂质。活化完成后，迅速将萃取头插入样品瓶顶空区域，控制萃取头底部距离样品表面约 0.5 cm，于 95 ℃ 恒温条件下萃取 60 min。萃取结束后，立即取出萃取头，快速插入气相色谱仪进样口（温度 250 ℃），解吸 4 min 后完成进样测定。本研究中各香气成分的含量均以该固相萃取条件下，15 mL 萃取瓶顶空中的质量浓度（mg m⁻³）表示。

1.2.4 仪器参数

GC-MS 条件设置参照王永晓等^[12]的方法，结合本实验样品特性优化后，具体参数如下：

色谱条件：色谱柱为 HB-5MS（30.0 m×0.25 mm×0.25 μm）弹性石英毛细管柱，柱初始温度 40 ℃（保留 3 min），以 3 ℃ min⁻¹ 的速率升温至 150.0 ℃（保留 4 min），继续以 10 ℃ min⁻¹ 的速率升温至 250 ℃，保持 5 min；载气为高纯氦气纯度 99.999%（φ），载气流量 1.0 mL min⁻¹；进样口温度 250 ℃，不分流进样。

质谱条件：离子源为电子轰击电离源（Electron ionization, EI）；电子能量 70 eV，离子源温度 230 ℃；四极杆温度 150 ℃；接口温度 240 ℃；发射电流 34.6 μA；倍增器电压 1 037 V，质量扫描范围为 30~500 *m/z*。

1.2.5 香气成分含量计算

样品中各香气组分含量计算公式如下：

$$C = V_1 C_i / V \tag{1}$$

式中：

C——某一化合物在空气中的质量浓度，mg m⁻³；
*V*₁——表示标准工作系列溶液加入在样品瓶中的体积，μL，*V*₁=5；

C_i ——某一化合物在标准曲线上测得的浓度, $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$;

V ——样品瓶的体积, $V=15\text{ cm}^3$ 。

1.2.6 香气活度值 (Odor activity value, OAV) 计算

OAV 能反映某一化合物对辣椒整体香气的贡献度, 以测定的萃取瓶中挥发性成分含量与化合物香气阈值的比值计算 OAV, 按公式 (2) 计算挥发性成分的香气活度值^[13]:

$$OAV_i = C_i / T_i \quad (2)$$

式中:

OAV_i ——某一化合物在空气中香气活度值;

C_i ——某一化合物在空气中的质量浓度, mg m^{-3} ;

T_i ——某一化合物在空气中的气味阈值, mg m^{-3} 。

结合后续结果分析需求, 本研究预先设定 $OAV>50$ 作为关键香气组分的筛选标准。

1.3 数据处理

为保证实验数据的可靠性和准确性, 每个样品均设置 3 个平行实验, 测定数据取平均值作为最终有效数据, 同时计算相对标准偏差 (RSD), 验证实验重复性 ($RSD<20\%$ 视为实验重复性良好)。采用 MassHunter Workstation Software Qualitative Analysis (10.1), Microsoft Excel 2020 进行数据整理、计算及基础统计; 采用 Origin 2021 绘制总离子流图、雷达图、主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 图、热图, PCA 中选取累计方差贡献率 ($PC1+PC2$) $>60\%$ 的组分作为主要差异变量。采用 SPSS 软件进行单因素方差分析 (one-way ANOVA), 检验不同分组朝天椒香气成分含量及 OAV 的差异显著性, 显著性水平设定为 $P<0.05$ 。采用 SIMCA 14.1 软件进行正交偏最小二乘判别分析 (Orthogonal Partial Least Squares-Discrimination Analysis, OPLS-DA), OPLS-DA 中以变量重要性投影 (Variable Importance in Projection, VIP 值) >1.0 且 $P<0.05$ 作为差异香气组分的筛选标准。OPLS-DA 模型采用 200 次置换检验验证模型验证, 以解释变量 (R^2Y) >0.7 与预测能力参数 (Q^2) >0.6 作为模型可靠性评价指标。

2 结果与讨论

2.1 不同品种朝天椒香气成分及含量分析

在 23 个朝天椒样品中共定量检测出 9 类 45 种挥发性香气成分 (表 3), 其中醛类 10 种, 烃类 9 种, 酯类 5 种, 酸类 5 种, 醇类 4 种, 酮类 4 种, 呋喃类 3 种, 酚类 2 种, 其他类 3 种。GC-MS 总离子流图如图 1 所示。

总体来看 (图 2), 各品种朝天椒的香气成分呈现出明显的品种差异。在 23 个朝天椒样品中, CT6、YJ808 和 ZL9 的挥发性香气成分总含量较高, 均超过 700 mg m^{-3} , 其中 CT6 最高, 为 752.00 mg m^{-3} ; CT730、ZL10、ZJZ、JY2 和 ZJCM 的总含量均低于 500 mg m^{-3} , 其中 ZJZ 最低, 为 411.82 mg m^{-3} 。醛类在所有朝天椒中的含量均较高, 为 $220.89\sim 499.53\text{ mg m}^{-3}$, 占挥发性香气成分总含量的 $40.51\sim 72.23\text{ wt.}\%$; 其次为醇类, 为 $49.13\sim 172.20\text{ mg m}^{-3}$, 占挥发性香气成分总含量的 $10.04\sim 24.56\text{ wt.}\%$ 。

由表 3 可知, 醛类物质是朝天椒挥发性香气成分种类最多、含量最高的一类化合物。YYYJ 的醛类含量最高, 达 499.53 mg m^{-3} , ZJZ 和 MTX 较低, 分别为 221.49 mg m^{-3} 和 220.89 mg m^{-3} 。苯乙醛和糠醛在朝天椒中含量较高, 其中 CT6 的苯乙醛含量最高 (284.68 mg m^{-3}), 显著高于其他品种 (如 ZJZ 仅为 135.95 mg m^{-3}), 其可赋予朝天椒类似风信子的花香, 这一差异导致 CT6 的花香特征更突出; 糠醛在 YYYJ 中含量最高 (280.54 mg m^{-3}), 是 ZJZ 的 5.5 倍, 高含量糠醛为 YYYJ 带来更浓郁的坚果香, 与醛类其他组分协同提升香气复杂度。1-甲基-2-吡咯甲醛和藏红花醛虽然在朝天椒中含量较低。烃类化合物在朝天椒中的含量为 $2.19\sim 87.33\text{ mg m}^{-3}$, 在 ZJ111 中的含量最高。

表 3 不同品种朝天椒中各香气成分含量

Table 3 Concentrations of volatile aroma compounds of different cultivars of chili peppers

化合物		含量/(mg m ⁻³)											
		CT6	CT8	CT730	ZL9	ZL10	ZJ111	ZJ222	ZJZ	JY1	JY2	JY6	QL8
糠醛	4.059	146.82±4.06	77.97±10.57	33.29±1.78	101.23±1.74	94.24±2.30	142.83±7.56	87.49±5.19	51.2±4.69	85.45±12	119.30±10.18	107.99±3.77	178.95±7.36
3-甲硫基丙醛	8.272	3.02±0.31	3.51±0.35	-	4.43±0.25	24.5±0.31	25.89±2.91	34.07±2.78	19.78±2.52	28.18±4.46	26.08±0.61	3.54±1.24	25.20±1.81
苯甲醛	12.944	2.91±0.02	2.49±0.38	4.97±0.17	5.30±0.06	0.8±0.04	0.84±0.13	1.05±0.09	0.97±0.13	1.02±0.07	0.88±0.03	2.85±0.35	0.78±0.03
5-甲基糠醛	13.171	11.06±0.67	4.88±0.24	3.58±0.64	7.20±0.08	4.01±0.28	4.8±0.17	3.83±0.38	2.82±0.28	3.69±0.45	5.16±0.13	3.76±0.41	5.90±0.39
苯乙醛	16.092	284.79±1.34	162.06±1.35	165.48±4.13	202.73±2.04	151.5±0.77	169.31±2.9	173.99±1.15	135.95±2.76	134.33±2.16	186.95±0.31	186.81±1.97	149.71±5.23
2-甲基苯甲醛	17.356	3.17±0.09	1.74±0.07	2.34±0.45	4.87±0.06	1.11±0.08	0.99±0.32	1.26±0.11	1.08±0.13	0.84±0.19	0.95±0.03	2.17±0.27	1.01±0.05
1-甲基-2-吡咯甲醛	13.984	0.52±0.06	-	-	0.76±0.09	-	0.76±0.15	0.73±0.05	0.96±0.17	-	1.05±0.12	0.54±0.09	-
藏红花醛	24.170	1.31±0.09	1.02±0.05	0.72±0.13	1.22±0.18	1.95±0.24	-	-	-	-	-	1.55±0.02	-
(E,E)-2,4-癸二烯醛	29.738	11.61±0.65	6.99±0.36	11.5±1.11	18.41±1.21	5.72±0.11	7.52±1.50	22.69±1.99	6.81±0.12	4.69±0.78	0.35±0.18	9.3±0.67	6.87±0.07
香兰素	33.218	3.61±0.19	4.49±0.48	4.16±0.05	8.12±0.31	2.06±0.06	2.43±0.06	1.53±0.10	1.93±0.10	2.16±0.38	1.17±0.10	4.41±0.1	2.20±0.32
2-甲基萘	28.547	0.24±0.02	0.17±0.01	0.20±0.09	0.32±0.01	-	-	-	-	-	-	0.28±0.03	-
十四烷	33.344	0.83±0.06	0.85±0.05	1.02±0.24	1.24±0.18	0.87±0.03	0.80±0.08	0.41±0.03	0.55±0.02	1.08±0.03	0.41±0.06	0.85±0.04	1.21±0.05
β -石竹烯	34.089	0.28±0.03	0.22±0.10	-	0.43±0.15	-	-	0.28±0.02	-	-	-	0.35±0.04	0.41±0.05
β -金合欢烯	35.741	0.19±0.02	-	1.58±0.29	0.25±0.04	-	1.14±0.04	1.23±0.07	-	0.23±0.01	-	-	1.73±0.08
(+)-香橙烯	35.232	4.26±0.4	5.12±0.36	3.63±0.76	5.92±0.47	3.41±0.66	5.59±0.24	3.52±0.20	4.73±0.23	5.30±0.26	-	2.03±0.33	7.37±0.51
十五烷	37.462	6.44±0.34	8.77±0.77	7.35±0.40	12.09±0.3	10.99±0.40	17.85±0.91	3.34±0.06	2.67±0.05	10.89±0.22	4.75±0.11	10.03±0.44	14.5±0.24
十六烷	41.500	2.87±0.3	4.56±0.78	2.66±0.09	7.11±0.57	3.74±0.43	6.42±0.64	0.85±0.06	1.41±0.04	4.6±0.04	0.88±0.05	2.59±0.11	5.95±0.25
十七烷	45.858	14.46±2.04	28.04±0.90	14.69±2.27	34.71±1.04	21.89±3.71	55.53±1.15	5.55±0.25	7.58±0.38	28.3±0.08	6.97±0.79	19.12±0.36	38.04±0.71
菲	47.627	0.81±0.22	1.44±0.67	0.10±0.07	0.87±0.37	-	-	0.05±0.02	-	-	-	1.09±0.35	0.08±0.01
γ -丁内酯	8.681	13.45±0.58	17.69±0.78	17.15±0.44	12.00±0.14	9.14±0.43	9.21±0.43	17.47±0.18	17.5±0.38	21.24±0.47	14.74±0.63	20.85±0.58	9.80±0.03
水杨酸甲酯	23.901	3.88±0.10	4.09±0.07	2.10±0.06	5.57±0.28	1.29±0.10	1.15±0.02	2.24±0.05	1.19±0.07	1.68±0.09	0.97±0.09	3.45±0.25	0.64±0.05
二氢猕猴桃内酯	38.515	8.79±0.39	4.63±0.52	6.26±0.05	9.00±0.16	1.57±0.11	1.23±0.12	1.22±0.08	1.12±0.03	0.90±0.08	0.65±0.03	6.60±0.15	1.11±0.13
十四烷酸甲酯	46.592	0.52±0.13	0.48±0.08	1.22±0.36	0.37±0.07	0.08±0.00	0.16±0.01	-	0.10±0.01	0.07±0.01	-	0.62±0.06	0.13±0.01
棕榈酸甲酯	50.309	2.08±0.38	2.73±0.15	3.45±0.08	2.22±0.71	0.67±0.06	0.7±0.06	0.65±0.06	0.83±0.11	1.20±0.09	0.50±0.06	4.53±0.95	0.69±0.06
异戊酸	4.678	13.18±1.73	11.62±1.02	11.94±1.35	20.08±0.62	-	13.67±1.21	15.55±0.68	-	14.35±0.67	-	16.78±1.81	-

2-甲基丁酸	5.235	4.88±0.56	8.66±0.32	8.35±0.69	12.76±0.37	4.26±0.50	5.19±0.61	3.62±0.29	3.76±0.31	7.71±0.94	3.43±0.46	9.86±0.84	3.95±0.2
4-甲基戊酸	12.737	3.11±0.24	-	3.84±0.06	3.06±0.39	-	-	-	-	-	-	2.12±0.29	-
2-乙基己酸	21.252	0.52±0.13	0.53±0.16	0.23±0.07	1.06±0.17	1.96±0.20	1.31±0.12	2.30±0.09	1.81±0.38	1.96±0.14	2.00±0.13	0.57±0.02	1.63±0.08
壬酸	27.625	0.48±0.03	0.45±0.08	0.47±0.13	0.79±0.10	-	-	-	-	-	-	0.85±0.07	-
5-甲基-2-呋喃甲醇	11.279	15.25±0.27	11.74±0.39	4.59±0.38	15.45±0.13	11.21±0.40	13.6±0.22	16.55±0.29	13.8±0.24	13.74±0.32	14.76±0.41	13.96±0.54	10.83±0.10
芳樟醇	19.264	-	-	-	-	-	-	-	1.52±1.12	-	1.97±0.06	-	-
苯乙醇	20.259	1.14±0.10	0.98±0.12	1.50±0.13	1.39±0.06	0.73±0.07	0.56±0.04	0.48±0.11	0.52±0.09	0.48±0.06	0.47±0.04	1.39±0.03	0.59±0.03
1-十六醇	49.513	93.3±0.88	50.22±0.97	52.89±0.39	39.71±1.24	11.22±0.09	107.25±0.19	9.08±0.32	41.54±0.13	24.5±0.66	1.33±0.03	34.46±1.32	72.28±0.71
对甲基苯乙酮	23.657	3.51±0.34	3.23±0.14	6.97±0.04	5.85±0.38	1.03±0.06	1±0.12	1.76±0.14	1.29±0.24	1.99±0.11	0.68±0.12	5.93±0.20	1.17±0.06
香叶基丙酮	35.543	9.66±0.08	4.27±0.14	5.26±0.05	9.05±0.14	2.23±0.05	2.20±0.07	1.52±0.02	2.06±0.05	1.64±0.21	1.28±0.13	8.27±0.05	1.29±0.03
β -紫罗兰酮	36.886	3.80±0.03	3.24±0.12	3.10±0.10	7.39±0.09	3.24±0.10	5.52±0.12	0.99±0.08	0.66±0.04	2.24±0.15	-	3.63±0.05	1.88±0.02
呋喃酮	16.867	14.69±0.76	17.33±0.4	19.96±0.04	21.18±0.09	42.05±1.86	25.01±0.32	59.48±0.18	43.75±0.07	44.30±0.23	30.60±0.22	21.93±0.23	32.03±1.25
2-乙酰基呋喃	10.766	0.78±0.03	0.82±0.09	0.65±0.11	1.1±0.05	2.28±0.04	2.18±0.37	1.88±0.18	0.95±0.04	2.2±0.07	1.69±0.17	0.80±0.01	3.42±0.10
2-戊基呋喃	13.318	8.52±1.02	4.19±0.39	4.68±0.06	13.82±0.07	-	-	3.97±0.17	-	3.93±0.21	-	6.88±0.71	-
2,5-二甲酰基呋喃	18.607	9.22±0.12	6.44±0.18	1.83±0.02	10.18±0.53	4.23±0.32	4.11±0.20	2.22±0.06	1.85±0.12	3.77±0.21	4.26±0.07	5.09±0.12	5.54±0.17
麦芽酚	19.703	3.08±0.17	3.24±0.09	3.85±0.15	7.49±0.07	2.18±0.14	1.99±0.04	3.27±0.12	3.01±0.05	2.74±0.10	2.12±0.10	4.20±0.20	2.44±0.05
4-乙烯基愈创木酚	29.509	13.89±0.42	26.91±0.66	24.03±0.06	50.58±0.19	24.75±0.09	32.28±0.38	16.06±0.86	20.55±0.13	26.32±0.84	29.07±0.6	33.11±0.08	27.24±0.90
2-乙酰基吡咯	17.727	25.04±0.67	32.33±0.66	28.35±0.36	38.4±0.11	22.69±0.32	12.46±0.08	21.44±0.44	15.57±0.04	18.73±0.14	14.79±0.21	26.48±0.16	20.50±0.12
2-乙酰基吡嗪	15.853	-	-	0.14±0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
吡啶	28.651	0.11±0.01	-	0.12±0.01	0.13±0.01	-	-	-	-	-	-	0.09±0.03	-

续表 3

化合物	含量/(mg m ⁻³)											
	QL10	ZJ16	ZJCM	ZJYZ	YZ6	MY	CY3	YYYJ	YJ808	XL54	MTX	
糠醛	4.059	64.85±3.00	147.24±1.5	75.78±4.13	80.27±5.21	129.97±11.28	56.15±1.14	77.17±5.04	280.54±12.06	119.69±2.78	77.7±5.52	37.37±3.18
3-甲硫基丙醛	8.272	33.18±0.77	2.72±0.10	27.39±2.43	-	23.49±1.07	-	2.95±0.48	29.79±2.49	2.44±0.29	1.45±1.22	-
苯甲醛	12.944	1.31±0.10	1.94±0.26	0.97±0.03	1.96±0.06	0.95±0.08	3.05±0.30	2.66±0.07	0.49±0.05	3.15±0.10	2.22±0.46	3.64±0.06
5-甲基糠醛	13.171	4.02±0.30	11.20±0.10	1.49±0.35	9.09±0.24	5.85±0.52	6.77±1.07	7.47±0.55	4.17±0.20	10.04±0.42	8.84±0.05	3.85±0.43
苯乙醛	16.092	231.29±2.80	214.08±3.90	187.52±3.67	210.9±0.88	147.02±6.31	214.02±2.14	265.43±3.93	175.95±1.30	243.2±0.67	193.97±2.58	159.84±4.10
2-甲基苯甲醛	17.356	0.9±0.06	1.82±0.34	2.26±0.11	1.3±0.02	1.06±0.14	1.93±0.25	1.42±0.07	0.98±0.13	2.85±0.07	2.79±0.17	2.78±0.31

1-甲基-2-吡咯甲醛	13.984	0.93±0.03	-	0.57±0.11	0.7±0.07	0.68±0.01	0.50±0.03	0.86±0.05	-	-	-	-
藏红花醛	24.170	0.52±0.08	1.24±0.06	0.31±0.00	1.5±0.09	0.68±0.07	0.60±0.03	0.84±0.03	-	0.99±0.07	0.78±0.06	1.5±0.10
(E,E)-2,4-癸二烯醛	29.738	14.85±0.24	12.15±0.71	6.88±0.25	5.3±0.23	22.78±1.27	8.19±1.14	7.65±0.27	6.01±0.18	15.12±0.54	17.88±1.66	7.82±0.35
香兰素	33.218	1.48±0.13	5.07±0.05	0.98±0.04	3.49±0.13	1.50±0.05	4.49±0.29	4.38±0.13	1.60±0.03	4.24±0.23	4.83±0.12	4.09±0.10
2-甲基萘	28.547	-	0.09±0.00	-	0.05±0.01	-	0.13±0.03	0.11±0.01	-	0.17±0.02	0.16±0.01	0.15±0.01
十四烷	33.344	0.23±0.02	0.77±0.06	0.25±0.03	0.18±0.03	0.28±0.03	1.30±0.04	0.71±0.05	1.42±0.05	1.09±0.01	0.7±0.01	0.77±0.02
β -石竹烯	34.089	-	0.37±0.08	-	0.22±0.02	-	0.37±0.12	0.41±0.04	-	0.43±0.07	0.38±0.03	0.34±0.10
β -金合欢烯	35.741	-	-	-	-	-	4.24±0.08	3.14±0.02	0.60±0.08	2.36±0.11	7.65±0.11	2.24±0.08
(+)-香橙烯	35.232	-	1.53±0.09	0.92±0.08	-	-	7.35±0.21	4.22±0.39	5.34±0.32	4.43±0.18	6.65±0.63	5.15±0.13
十五烷	37.462	2.14±0.05	7.20±0.33	1.54±0.03	1.03±0.04	0.70±0.06	13.22±0.13	4.86±0.02	14.11±1.85	6.59±0.07	8.24±0.24	8.00±0.17
十六烷	41.500	0.91±0.11	2.84±0.24	0.56±0.02	0.56±0.06	0.22±0.05	4.43±0.27	2.79±0.17	3.97±0.15	3.69±0.12	4.36±0.25	4.10±0.18
十七烷	45.858	4.08±0.34	34.27±0.43	2.47±0.33	1.66±0.06	0.99±0.12	32.11±0.81	12.08±1.40	34.33±0.80	27.83±0.44	33.81±1.48	35.49±0.74
菲	47.627	0.13±0.03	2.03±0.24	-	2.82±1.13	-	0.21±0.04	1.83±0.45	-	1.18±0.48	1.97±0.21	0.51±0.12
γ -丁内酯	8.681	20.06±0.29	9.95±0.61	20.04±0.52	10.83±0.45	15.90±0.58	11.13±0.42	15.25±0.03	7.39±0.20	7.79±0.09	7.76±0.37	10.73±0.79
水杨酸甲酯	23.901	1.59±0.09	1.73±0.10	0.6±0.05	1.99±0.04	4.40±0.09	5.53±0.08	6.22±0.13	0.60±0.03	2.18±0.04	1.52±0.08	2.45±0.18
二氢猕猴桃内酯	38.515	1.18±0.01	6.99±0.06	1.68±0.15	5.87±0.08	1.73±0.11	4.09±0.20	4.05±0.39	0.92±0.06	6.42±0.24	9.56±0.11	11.69±0.07
十四烷酸甲酯	46.592	-	0.51±0.04	-	0.29±0.02	-	0.35±0.07	0.60±0.07	-	0.67±0.08	0.53±0.06	1.27±0.12
棕榈酸甲酯	50.309	1.2±0.1	2.13±0.19	0.21±0.02	2.91±0.24	0.60±0.04	1.85±0.06	2.15±0.35	0.33±0.03	2.15±0.17	1.39±0.03	5.92±0.11
异戊酸	4.678	22.37±0.73	13.77±0.74	-	26.02±3.17	30.87±0.98	14.04±2.07	13.74±0.80	-	-	19.44±0.66	14.72±0.44
2-甲基丁酸	5.235	6.85±0.03	9.33±0.32	2.83±0.27	8.89±0.47	7.21±0.09	6.75±0.06	7.01±0.68	2.75±0.29	5.31±0.44	12.51±0.14	8.27±0.21
4-甲基戊酸	12.737	1.57±0.25	-	-	2.39±0.19	-	-	-	-	2.54±0.26	1.59±0.20	3.43±0.12
2-乙基己酸	21.252	1.65±0.22	0.96±0.07	2.46±0.25	0.73±0.04	1.88±0.05	0.71±0.04	0.65±0.06	2.12±0.01	0.62±0.10	0.61±0.03	0.39±0.05
壬酸	27.625	-	0.61±0.05	-	1.16±0.08	-	-	0.76±0.03	-	0.59±0.07	0.46±0.02	0.39±0.03
5-甲基-2-呋喃甲醇	11.279	16.25±0.42	20.18±0.18	11.24±0.20	17.33±0.28	17.53±0.17	16.4±0.23	14.73±0.09	15.45±0.58	14.88±0.56	12.36±0.33	6.21±0.28
芳樟醇	19.264	2.96±0.12	-	-	6.81±0.68	5.30±0.05	-	-	-	-	-	-
苯乙醇	20.259	0.85±0.09	0.48±0.04	0.38±0.07	1.18±0.11	1.00±0.10	0.79±0.08	1.33±0.16	0.18±0.01	0.64±0.07	0.64±0.12	1.01±0.05
1-十六醇	49.513	23.68±0.27	46.98±0.11	30.13±0.15	16.58±0.29	12.01±0.09	43.95±0.36	83.86±0.60	23.63±0.11	138.8±0.45	69.4±0.66	92.84±0.89
对甲基苯乙酮	23.657	2.96±0.13	1.61±0.08	1.15±0.08	3.24±0.21	2.72±0.11	2.92±0.08	3.07±0.12	0.53±0.02	2.18±0.13	2.74±0.09	5.37±0.18
香叶基丙酮	35.543	2.27±0.19	6.38±0.21	5.21±0.18	8.48±0.15	6.78±0.20	21.38±0.07	2.88±0.14	1.78±0.15	4.82±0.07	7.04±0.15	11.25±0.12

β -紫罗兰酮	36.886	0.42 ±0.13	2.87 ±0.19	1.37 ±0.04	2.32 ±0.16	1.13 ±0.03	3.29 ±0.06	2.31 ±0.12	2.70 ±0.11	3.65 ±0.13	14.78 ±0.58	9.97 ±0.11
呋喃酮	16.867	57.95 ±0.19	21.34 ±0.89	60.71 ±0.50	26.04 ±0.41	49.1 ±0.16	19.53 ±0.23	25.02 ±0.27	30.17 ±1.13	17.88 ±0.52	18.31 ±0.42	19.11 ±0.01
2-乙酰基呋喃	10.766	2.42 ±0.31	0.72 ±0.07	2.31 ±0.06	0.86 ±0.03	1.59 ±0.17	0.90 ±0.02	0.87 ±0.05	2.27 ±0.08	0.71 ±0.04	0.86 ±0.05	0.88 ±0.11
2-戊基呋喃	13.318	11.62 ±0.23	6.07 ±0.15	-	10.62 ±0.42	10.23 ±0.15	-	5.45 ±0.59	-	7.85 ±0.85	6.89 ±0.21	5.37 ±0.09
2,5-二甲酰基呋喃	18.607	1.96 ±0.11	11.49 ±0.72	1.83 ±0.03	6.93 ±0.06	3.62 ±0.18	3.77 ±0.06	6.09 ±0.23	11.05 ±0.09	7.38 ±0.03	7.47 ±0.43	2.16 ±0.12
麦芽酚	19.703	3.56 ±0.07	3.28 ±0.07	2.44 ±0.06	3.42 ±0.04	2.83 ±0.16	3.48 ±0.08	5.43 ±0.06	1.86 ±0.07	2.65 ±0.16	3.76 ±0.14	3.26 ±0.07
4-乙烯基愈创木酚	29.509	14.94 ±1.16	25.19 ±0.13	16.03 ±0.30	48.46 ±0.30	30.37 ±0.18	27.8 ±0.14	24.54 ±0.08	6.33 ±0.32	41.16 ±0.11	21.16 ±0.70	29.65 ±0.09
2-乙酰基吡咯	17.727	23.26 ±0.18	24.41 ±0.23	21.78 ±0.50	25.96 ±0.24	19.38 ±0.18	37.11 ±0.70	37.41 ±0.15	22.21 ±0.17	27.2 ±0.16	18.66 ±0.14	21.23 ±0.30
2-乙酰基吡嗪	15.853	-	-	-	-	-	-	0.06 ±0.01	-	-	-	-
吡啶	28.651	-	0.05 ±0.01	-	0.08 ±0.01	-	-	0.07 ±0.01	-	-	-	0.07 ±0.01

注：“-”表示未检出或痕量。

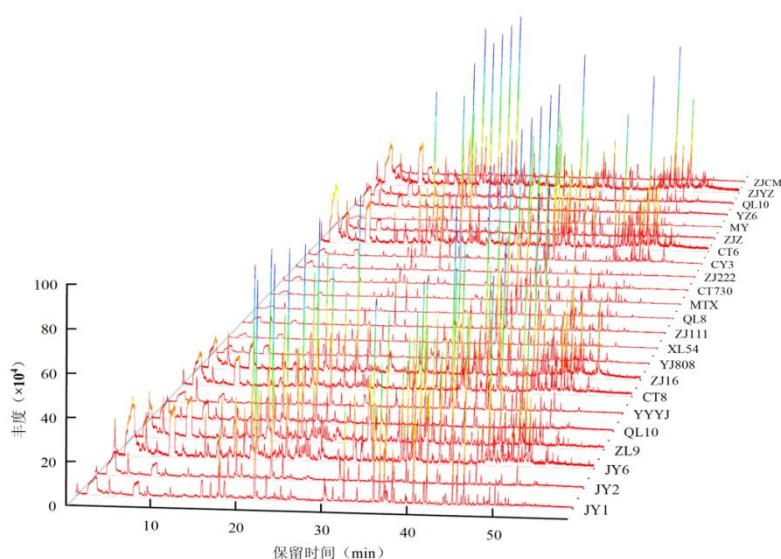


图1 不同品种朝天椒挥发性成分总离子流色谱对比图

Fig.1 Total ion current chromatogram comparison of volatile components in different cultivars of chili peppers

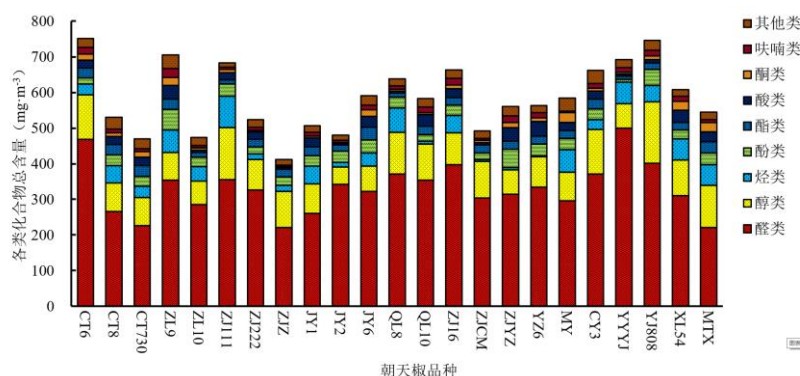


图2 不同品种朝天椒中各类化合物含量

Fig.2 contents of various compounds in different cultivars of chili peppers

本研究在朝天椒中检出的烯烃类化合物主要为 β -石竹烯、 β -金合欢烯和 (+)-香橙烯等, 占烃类化合物总含量的 0.00 wt.%~33.03 wt.%. 烯烃类组分虽占比不高, 但其低阈值特性使其成为花香与果香的重要修饰成分, 是提升香气层次的关键微量物质。其中 β -石竹烯在各品种中含量均较低, β -金合欢烯在 MY 中含量最高, (+)-香橙烯在 QL8 和 MY 中含量较高, 在 JY2、QL10、ZJYZ 和 YZ6 中未检出。酯类化合物在 JY6 中含量较高, 在 YYYJ 中最低。辣椒样品中含量较高的酯类化合物主要为 γ -丁内酯、二氢猕猴桃内酯和水杨酸甲酯, 其中 γ -丁内酯具有焦糖奶油香味, 二氢猕猴桃内酯带有浓郁的果香, 水杨酸甲酯则具有冬青油香味特征。酸类化合物在各朝天椒品种中总含量差别较大, 以 YZ6、ZJYZ 和 ZL9 中含量较高。异戊酸和 2-甲基丁酸是朝天椒中含量较高的酸类化合物。

醇、酮、呋喃、酚和其他类化合物所占朝天椒挥发性成分种类较少, 但由于部分化合物风味阈值较低, 仍可能对其整体风味产生重要影响。本研究共检测出 4 种醇类化合物, 如 5-甲基-2-呋喃甲醇、芳樟醇等, 其中 5-甲基-2-呋喃甲醇在各品种朝天椒中含量均偏高。芳樟醇仅在 ZJYZ、YZ6、QL10 和 ZJZ 中检出, 其含量高低可作为评价朝天椒青香、木青香风味的重要指标。朝天椒中检出的酮类化合物主要包括香叶基丙酮、 β -紫罗兰酮等。

2.2 不同品种朝天椒挥发性成分差异分析

已有研究发现, 遵辣 9 号朝天椒的醛类含量高于其它辣椒, 相对含量高达 58%, 其次为呋喃、醇类等; 而安集海、宝鸡、北京红和千斤红辣椒的优势组分为烯烃类; 高台辣椒的吡嗪类的相对含量最高, 丘北辣椒酮类的相

对含量最高^[14-16]。可见, 遵义朝天椒以醛类为优势组分的香气构成, 显著区别于国内其他主产区辣椒, 呈现出鲜明的地域风味特征, 这可能是形成遵义朝天椒地理标志品质的重要物质基础。

挥发性物质种类和含量差异构成了品种特殊香味^[17]。朝天椒中醛类物质可能与美拉德反应、酶水解、热降解以及不饱和脂肪酸降解有关^[18], 不同品种间醛类物质的含量差异可能与朝天椒中脂肪氧合酶 (LOX)、脂肪酸去饱和酶 (FAD) 等关键代谢酶的表达差异相关, 进而调控醛类物质的合成积累^[9], 苯乙醛和糠醛是辣椒中高频检出的香气成分^[19,20], 表明控制这两种物质合成的酶在大部分辣椒中均存在。1-甲基-2-吡咯甲醛和藏红花醛分别可赋予其坚果香气及草药、草本味, 且藏红花醛被认为是主要的生物活性物质, 其抗氧化、抗炎活性可提升朝天椒的功能价值, 为功能性辣椒制品开发提供潜力^[21,22]。饱和烷烃类化合物的香气阈值高, 对辣椒整体香气的贡献度较小; 而多数烯烃类化合物阈值较低, 对辣椒的赋香作用更为显著^[23]。本研究中 β -石竹烯、 β -金合欢烯和 (+)-香橙烯等烯烃类化合物含量在不同品种朝天椒中差异显著 ($P<0.05$), 这种差异可能源于不同品种朝天椒中甲羟戊酸代谢途径的活性差异, 该途径是萜烯类 (含烯烃) 化合物合成的核心通路^[24]。酯和酸类化合物亦是构成朝天椒香气成分的重要成分, 二者与醛类、烯烃类化合物协同作用, 共同塑造朝天椒的风味轮廓; 酯类化合物多具有水果香气, 是评判果实成熟度的重要指标之一, 其合成高峰通常出现在果实完熟之前^[25], 其中二氢猕猴桃内酯是红茶和烟草中的重要香气化合物^[26,27]。异戊酸和 2-甲基丁酸分别赋予辣椒酸香和奶酪风味; 其中异戊酸是二荆条辣椒的特征香味物质, 2-甲基丁酸不仅对辣椒整体香气起重要修饰作用, 还可与辣椒素类物质协同增强其辛辣刺激感^[14]。酸类组分的品种间大幅波动, 直接影响朝天椒的香气清爽度与回味感, 也是区分鲜食型与加工型朝天椒的重要依据。醇类化合物由羰基化合物还原或脂肪氧化分解生成, 多数醇类化合物具有令人愉快的香气^[20], 酮类化合物多兼具花香和果香, 香味优异持久, 对辣椒整体风味贡献较大^[28]。其中 β -紫罗兰酮为辣椒的天然成分, 是重要的天然香料, 在绿熟期朝天椒中占比更高, 可与醛类物质协同形成清新花果香, 同时还具有抗癌、抗炎、抗氧化等多种生物活性^[29]。

2.3 香气成分的香气活度值分析

朝天椒的香气成分复杂, 单一香气成分的含量高低并不能直接反映其对整体风味的贡献^[30]。香气成分对整体香气的贡献度由其含量与香气阈值的比值决定, 即 OAV 值^[31]。当挥发性化合物的 OAV >1 时, 该化合物被认为是对整体风味有直接贡献的关键香气成分, 且 OAV 值越高, 其对风味的贡献度越大^[32]。通过对 23 种朝天椒中各挥发性化合物的 OAV 值进行综合分析, 共鉴定出 28 种 OAV >1 的关键香气成分 (表 5), 说明这些香气成分可能更易于通过嗅觉感知到, 是朝天椒中的主要风味物质^[33]。

由表 4 可知, CY3 的关键香气成分最丰富, 达 27 种, CT6、CT730 和 ZL9 次之, 均为 26 种, JY2 的最为单一, 仅 18 种, 说明不同品种朝天椒的关键香气成分数量存在明显差异。在 28 种关键香气成分中, 共鉴定出 17 种共有香气成分 (表 5), 其中 (*E,E*)-2,4-癸二烯醛、苯乙醛和 β -紫罗兰酮等组分的 OAV 值在所有样品中普遍较高, 主要赋予朝天椒花香。不同品种朝天椒的主要呈香组分不同, QL10 中 OAV 最高的香气化合物是 (*E,E*)-2,4-癸二烯醛, 苯乙醛次之; JY2 则是苯乙醛最高, 其次为呋喃酮和 4-乙基愈创木酚; 其余多数品种则以 β -紫罗兰酮最高, 范智义等^[21]在对朝天椒中的研究中也发现 β -紫罗兰酮含量较高。除此以外, 还分析出 11 种非共有香气成分 (部分品种共有), 这些组分是形成不同品种朝天椒独特香气, 区分不同品种朝天椒香气差异的核心物质。例如, 2-乙酰基吡嗪是 CT730 和 CY3 的特有香气成分, 可赋予其坚果、爆玉米花及类似肉类的特殊风味。本研究鉴定的关键香气化合物, 在以往的研究中也多有报道^[34,35]。由此可见, 不同品种朝天椒香气的差异不仅源于关键香气成分的数量差异, 更取决于特有组分的有无及核心组分的 OAV 贡献水平, 这种“共性基础+个性差异”的特征, 构成了不同品种朝天椒的风味多样性。

表 4 不同品朝天椒的关键香气组分及其气味活度值

Table 4 Key aroma-active compounds and their odor activity values (OAVs) of different cultivars of chili peppers

类别	香气阈值 ^[36] /(mg m ⁻³)	香气活度值 (OAV)											
		CT6	CT8	CT730	ZL9	ZL10	ZJ111	ZJ222	ZJZ	JY1	JY2	JY6	QL8
2-甲基萘	0.004	61	43	49	79	0	0	0	0	0	0	70	0
β -金合欢烯	0.007	28	0	225	36	0	163	176	0	33	0	0	248
(+)-香橙烯	0.016	266	320	227	370	213	349	220	296	331	0	127	461
十六烷	0.5	6	9	5	14	7	13	2	3	9	2	5	12
菲	0.055	15	26	2	16	0	0	1	0	0	0	20	1
水杨酸甲酯	0.02	243	256	131	348	81	72	140	74	105	60	216	40
二氢猕猴桃内酯	0.000 1	87 867	46 274	62 614	90 017	15 671	12 322	12 192	11 216	9 050	6 505	65 985	11 147
糠醛	2.8	52	28	12	36	34	51	31	18	31	43	39	64
3-甲基丙醛	0.06	50	59	0	74	408	432	568	330	470	435	59	420
苯甲醛	0.750 89	4	3	7	7	1	1	1	1	1	1	4	1
苯乙醛	0.001 7	167 461	95 394	97 341	119 319	89 119	99 595	102 348	79 973	79 019	109 969	109 822	88 066
2-甲基苯甲醛	0.038	83	46	62	128	29	26	33	28	22	25	57	27
(E,E)-2,4-癸二烯醛	0.000 077	150 805	90 774	149 362	239 129	74 333	97 664	294 695	88 377	60 864	4 580	120 789	89 231
香兰素	0.000 6	6 024	7 489	6 935	13 529	3 437	4 057	2 555	3 214	3 605	1 950	7356	3 664
异戊酸	0.001 8	7 321	6 454	6 636	11 154	0	7 593	8 639	0	7 975	0	9 323	0
2-甲基丁酸	0.02	244	433	417	638	213	259	181	188	386	172	493	197
壬酸	0.12	4	4	4	7	0	0	0	0	0	0	7	0
芳樟醇	0.002 4	0	0	0	0	0	0	0	633	0	820	0	0
苯乙醇	0.012	95	82	125	116	61	47	40	43	40	39	116	49
呋喃酮	0.002	7 343	8 665	9 982	10 590	21 027	12 504	29 738	21 874	22 152	15 299	10 964	16 682
对甲基苯乙酮	0.001	3 511	3 228	6 970	5 849	1026	996	1 757	1 289	1 994	677	5 929	1 175
β -紫罗兰酮	0.000 007	543 214	462 443	443 390	1 055 686	463 052	788 386	141 895	93 621	319 829	0	519 087	268 633
麦芽酚	0.03	103	108	128	250	73	66	109	100	91	71	140	81
4-乙基愈创木酚	0.002 8	4 961	9 612	8 584	18 066	8 839	11 530	5 734	7 338	9 402	10 383	11 827	9 730
2-戊基呋喃	0.019	448	221	246	727	0	0	209	0	207	0	362	0

2-乙酰基吡咯	2.0	13	16	14	19	11	6	11	8	9	7	13	10
2-乙酰基吡嗪	0.000 4	0	0	361	0	0	0	0	0	0	0	0	0
吡啶	0.001	112	0	115	131	0	0	0	0	0	0	86	0

续表 4

类别	香气阈值 ^[36] /(mg m ⁻³)	香气活度值 (OAV)											
		QL10	ZJ16	ZJCM	ZJYZ	YZ6	MY	CY3	YYYJ	YJ808	XL54	MTX	
2-甲基萘	0.004	0	23	0	13	0	33	27	0	42	40	37	
β -金合欢烯	0.007	0	0	0	0	0	605	149	86	113	364	319	
(+)-香橙烯	0.016	0	96	58	0	0	459	264	334	277	416	322	
十六烷	0.5	2	6	1	1	0	9	6	8	7	9	8	
菲	0.055	2	37	0	51	0	4	33	0	22	36	9	
水杨酸甲酯	0.02	99	108	37	124	275	345	389	37	136	95	153	
二氢猕猴桃内酯	0.000 1	11 774	69 877	16 751	58 731	17 273	40 879	40 524	9 195	64 192	95 553	116 926	
糠醛	2.8	23	53	27	29	46	20	28	100	43	28	13	
3-甲硫基丙醛	0.06	553	45	457	0	392	0	49	497	41	24	0	
苯甲醛	0.750 89	2	3	1	3	1	4	4	1	4	3	5	
苯乙醛	0.001 7	136 053	125 929	110 308	124 056	86 481	125 894	156 135	103 499	143 126	114 098	94 021	
2-甲基苯甲醛	0.038	24	48	59	34	28	51	37	26	75	73	73	
(E,E)-2,4-癸二烯醛	0.000 077	192 813	157 789	89 320	68 848	295 851	106 337	99 351	78 073	196 358	232 202	101 601	
香兰素	0.000 6	2 468	8 448	1 636	5 809	2 506	7 488	7 302	2 661	7 074	8 047	6 818	
异戊酸	0.001 8	12 429	7 648	0	14 456	17 152	7 798	7 633	0	0	10 798	8 179	
2-甲基丁酸	0.02	342	467	142	445	360	337	351	137	265	625	413	
壬酸	0.12	0	5	0	10	0	0	6	0	5	4	3	
芳樟醇	0.002 4	1 233	0	0	2 836	2 207	0	0	0	0	0	0	
苯乙醇	0.012	71	40	32	99	83	66	110	15	53	54	84	
呋喃酮	0.002	28 977	10 669	30 355	13 021	24 552	9 763	12 509	15 083	8 941	9 155	9 554	
对甲基苯乙酮	0.001	2 956	1 608	1 147	3 236	2 720	2 916	3 068	528	2 177	2 743	5 372	
β -紫罗兰酮	0.000 007	60 003	410 300	196 030	332 122	161 981	470 230	330 021	385 673	522 057	2 111 692	1 424 073	
麦芽酚	0.03	119	109	81	114	94	116	181	62	88	125	109	

4-乙烯基愈创木酚	0.002 8	5 334	8 996	5 725	17 305	10 846	9 928	8 765	2 262	14 698	7 555	10 588
2-戊基呋喃	0.019	612	319	0	559	538	0	287	0	413	362	283
2-乙酰基吡咯	2.0	12	12	11	13	10	19	19	11	14	9	11
2-乙酰基吡嗪	0.000 4	0	0	0	0	0	0	149	0	0	0	0
吲哚	0.001	0	53	0	82	0	0	72	0	0	0	74

表 5 关键香气成分及其香气特征

Table 5 Key aroma-active compounds and their corresponding odor descriptors				
	序号	化合物	香气类型	香气特征 ^[37-41]
共有香气组分	1	十六烷	油气息	类似石油的气味
	2	水杨酸甲酯	薄荷香	薄荷香、冬青味
	3	二氢猕猴桃内酯	麝香	香豆素样香气、麝香
	4	糠醛	坚果香	类似苦杏仁味
	5	苯甲醛	坚果香	特殊的杏仁气味
	6	苯乙醛	花香	花果香、蜜香
	7	2-甲基苯甲醛	果香	樱桃香味
	8	(E,E)-2,4-癸二烯醛	花香	花香, 油脂香
	9	香兰素	花香	甜香
	10	2-甲基丁酸	果香	羊乳干酪气味、果香气味
	11	苯乙醇	花香	玫瑰花香
	12	呋喃酮	焦香	烤香、烹调香及焦糖香气
	13	对甲基苯乙酮	花香	类似山查子花的芳香
	14	β -紫罗兰酮	花香	紫罗兰花香
	15	麦芽酚	焦香	甜的、焦糖、棉花糖香气
	16	4-乙基愈创木酚	果香	烟熏气息
	17	2-乙酰基吡咯	焦香	鱼样、焦糖样香气
非共有香气组分	1	2-甲基萘	樟脑香	花香、木香
	2	β -金合欢烯	花香	花香、果香
	3	(+)-香橙烯	果香	柑橘香气
	4	菲	花香	类似桂花香
	5	3-甲硫基丙醛	食品香气	肉香、烤土豆香气
	6	异戊酸	果香	甜润的果香
	7	壬酸	果香	呈淡的脂肪和椰子香气
	8	芳樟醇	花香	花香
	9	2-戊基呋喃	果香	果香, 蔬菜香
	10	2-乙酰基吡嗪	坚果香	烤香、爆玉米花香气
	11	吡啶	花香	花果香

2.4 基于 OAV 值的朝天椒香气质量评估

参考何少华等^[42]的方法, 对 OAV>1 的共有与非共有香气成分进行了系统归类, 根据各成分香气特征将其划分为果香、花香、焦香、坚果香、薄荷香、麝香、食品香气、樟脑香和油气息共 9 个类别, 并对共有和非共有香气组分分别绘制香气轮廓雷达图(图 3)。

从图 3A 可知, 各品种朝天椒的整体香气轮廓相似, 主要包括果香、花香、焦香、坚果香和薄荷香息等多种香气属性, 其中花香是所有品种的主要香型, 这一特征与芳樟醇、 β -紫罗兰酮等花香型成分有关, 也进一步验证了中国辣椒以花香为主的香气特征^[43]。CT6、CT8、CT730、ZL9、ZJ16、ZJYZ、MY、CY3、YJ808、XL54 和 MTX 以麝香型香气为次要特征, 这主要与二氢猕猴桃内酯有关, 其余品种则以焦香为次要香型, 而在果香、坚果香、薄荷香等香型在各品种朝天椒的表现水平相当。结合图 2 和表 4 分析可知, XL54、MTX 和 ZL9 的香气成分整体含量虽较低, 但 β -紫罗兰酮、(E,E)-2,4-癸二烯醛、苯乙醛和二氢猕猴桃内酯等低阈值香气成分的含量较高, 在一定程度上提升了其花香与麝香的 OAV 值, 进而呈现出浓郁的花香与麝香香气特征, 其中 XL54 的花香更浓郁。

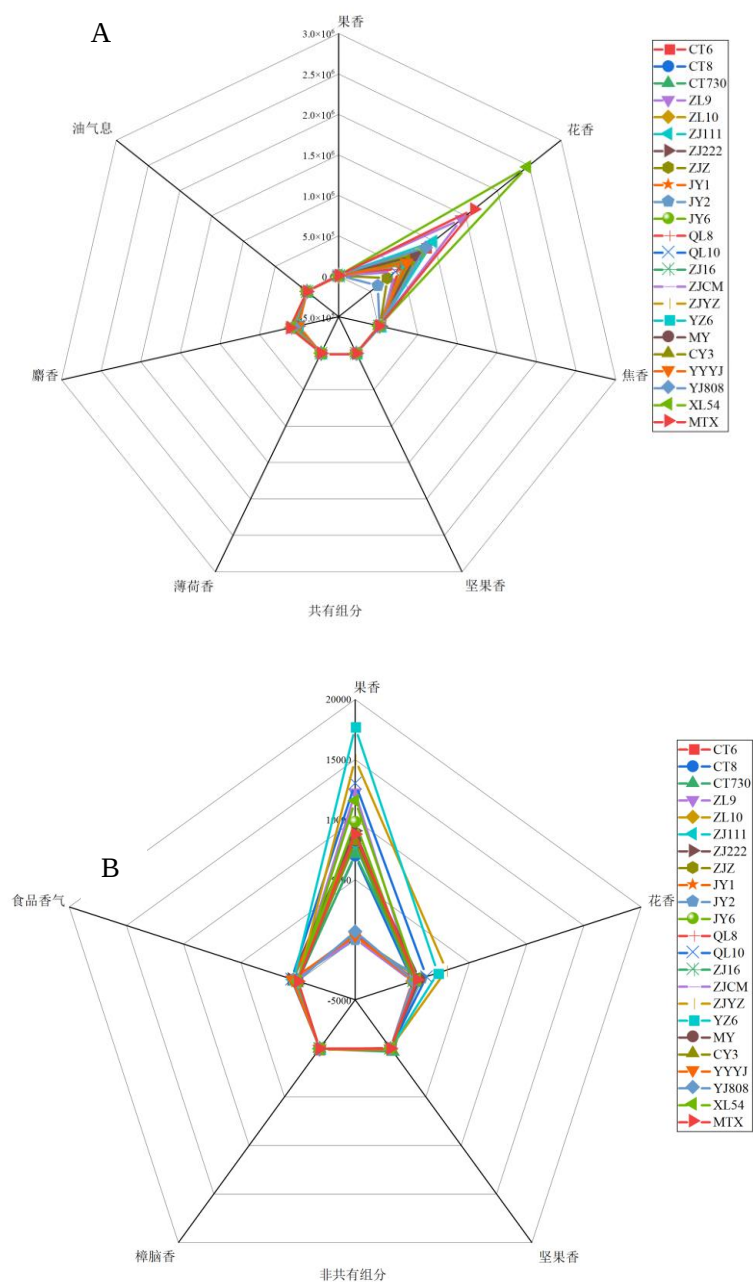


图 3 不同品种朝天椒的香气轮廓图

Fig.3 Aroma profiles of different cultivars of chili peppers

注：图 A 为共有香气组分的香气轮廓雷达图；图 B 为非共有香气组分的香气轮廓雷达图。

从图 3B 可知，非共有香气成分主要赋予朝天椒果香、花香、坚果香、樟脑香和食品香气。虽然各非共有香气组分在不同品种中 OAV 值差异较大，但均以果香贡献最为突出，尤其是 YZ6、ZJYZ 和 QL10 这类珠型椒，这主要与异戊酸和 2-戊基呋喃有关。研究显示，珠型椒果实中还原糖含量可达 6.2 wt.%，可为 2-戊基呋喃等脂肪酸降解产物提供丰富的底物，加之其特有的 AAT 基因会促进 2-戊基呋喃等物质的生成^[44]。ZJCM、ZL10 和 YYYJ 则以食品香气为主，JY2 和 ZJZ 以花香为主。果型与香气特征高度关联，珠形、锥形小果型品种果香更突出，指形、羊角形品种花香与焦香更占优，这一规律可为加工用途定向选种提供直观参考。上述研究表明，各品种朝天椒的整体香气轮廓较为相似，均以花香为主；但各组分的强度因品种差异而有所不同，非共有香气成分的存在进一步丰富了品种间的香气层次与多样性。

2.5 不同品种朝天椒香气成分差异比较

由于朝天椒中香气成分复杂多样,难以通过单一的香气成分和简易的数据分析获得有效变量,主成分分析(PCA)可将高维数据降维,从而直观展示样品间的整体差异与关联^[40]。为了更好地体现不同品种朝天椒之间香气成分的差异,本研究选取对整体香气有实质贡献的核心香气成分($OAV>50$),并依据果长这一关键农艺性状将品种分为四类(表1)分别进行PCA分析^[45],结果如图4所示。

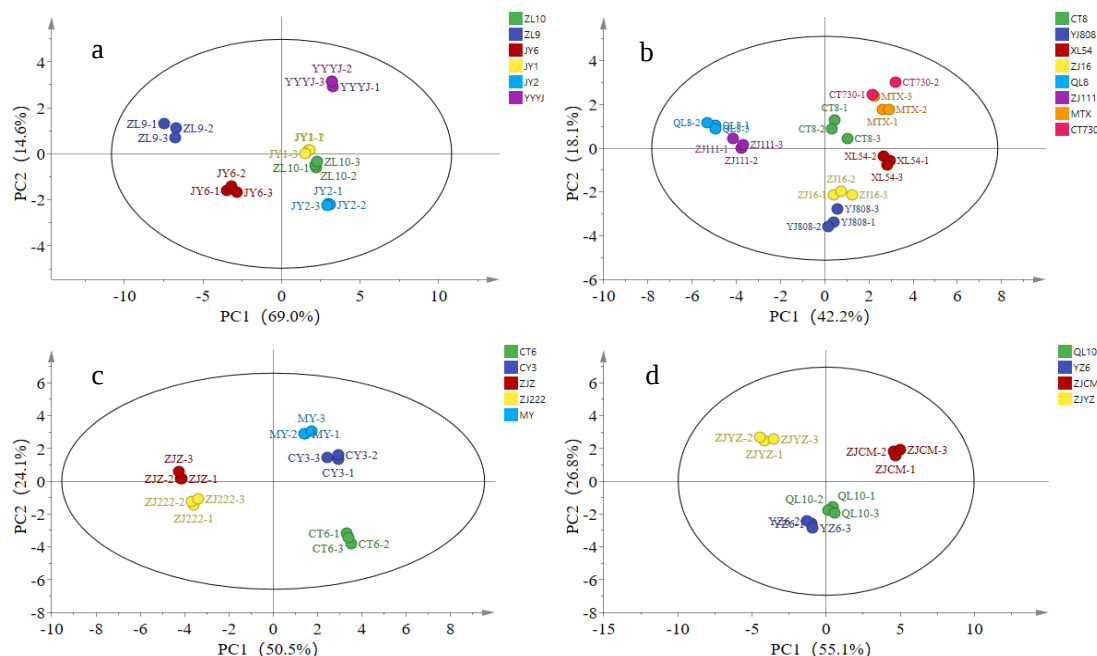


图4 不同品种朝天椒香气成分PCA分析结果

Fig.4 PCA analysis results of aroma components in different cultivars of chili peppers

注:图a、b、c、d依次代表a、b、c、d类朝天椒的PCA分析结果。

由图4a可知,各品种分布于不同象限,YYYJ和JY1在第一象限,ZL9在第二象限,JY6在第三象限,JY2和ZL10在第四象限,JY1和ZL10虽然分布在不同象限,但互相聚拢。图4b显示,CT730、MTX和CT8在第一象限,其中CT730和MTX相互聚拢,QL8和ZJ111在第二象限相互聚拢,XL54、ZJ16和YJ808均在第四象限,其中ZJ16和YJ808相互聚拢。由图4c可知,MY和CY3位于第一象限,ZJZ位于第二象限,ZJ222和CT6分别位于三、四象限。由图4d可知,ZJCM、ZJYZ、YZ6和QL10分别位于第一、二、三、四象限,其中YZ6和QL10相互聚拢。整体而言,PCA累计方差贡献率($PC1+PC2$)均高于60%,表明二维图能有效反映原始数据信息^[46]。PCA结果证实,基于果长分组的香气差异分析具有统计学可靠性,说明果长农艺性状可作为朝天椒香气特征快速分类的形态指标。不同品种在香气构成上存在明显差异,但部分品种(如JY1与ZL10、QL8与ZJ111)在得分图上位置邻近,表明其香气特征具有一定相似性,这可能与品种的遗传背景或代谢通路相近有关。

为更精准地筛选导致品种间差异的关键香气组分,本研究进一步采用OPLS-DA进行分析。OPLS-DA能有效分离组内变异与组间变异,并通过变量重要性投影(VIP)值量化各成分对分类的贡献度,常用于风味组学中差异标志物的筛选^[44],分析结果如图5所示。所有模型的解释变量(R^2Y)与预测能力参数(Q^2)均表现良好,且经200次置换检验验证模型未发生过拟合,表明模型稳健可靠。VIP值大于1通常被认为是关键差异贡献者,结合t检验($P<0.05$)^[47],本研究最终鉴定出12种在品种间存在显著差异的关键香气活性物质($P<0.05$)(表6),包括异戊酸、3-甲硫基丙醛、 β -金合欢烯等。这些物质主要呈现花香、果香、坚果香、麝香及薄荷香等特征(表3),是构成不同品种朝天椒独特香气风格的核心成分。已有研究表明,辣椒果实的形态性状(如果长、果形)与其次级代谢产物的积累可能存在一定关联,因为控制果实发育的基因往往与部分代谢路径存在协同调控^[48]。本研究不同果长组别能筛选出不同的关键差异组分(表6),间接支持了这种分类在香气分析中的有效性。

为可视化上述12种关键差异成分在不同品种间的含量分布规律,本研究绘制了热图(图6)。结果显示:各成分含量在不同品种间存在明显波动。具体而言,呈现花香的 β -紫罗兰酮、芳樟醇、(E,E)-2,4-癸二烯醛、 β -金合欢烯在XL54、ZJYZ、ZJ222、YZ6及MY中含量相对较高;赋予果香的2-戊基呋喃、4-乙基愈创木酚、异戊酸、(+)-香橙烯在ZL9、ZJYZ、YZ6、QL8和MY中含量较高;赋予薄荷香的水杨酸甲酯在ZL9、MY和CY3

中含量较高,呈麝香的二氢猕猴桃内酯在 MTX 中含量最高;呈坚果香的糠醛在 YYYY 中含量较高;呈食品香气的 3-甲硫基丙醛在 ZJ222、QL10 和 YYYY 中含量较高。不同品种朝天椒间表现出的香气成分差异性,可能与不同品种间代谢类型的多样性有关,如 β -紫罗兰酮、芳樟醇及 β -金合欢烯等萜烯类化合物的合成依赖于质体 MEP 或细胞质 MVA 途径,并由特定的萜类合酶(TPS)催化生成, (*E,E*)-2,4-癸二烯醛是亚油酸经 LOX 和 HPL 酶作用的典型产物,2-戊基呋喃、异戊酸主要来源于脂质氧化降解(LOX 途径)及氨基酸代谢^[49]。XL54、ZJYZ、ZJ222 等品种中花类香组分含量较高,可能与这些品种的 TPS 的酶活性更强有关。3-甲硫基丙醛是甲硫氨酸的降解产物,表明在 ZJ222、QL10 和 YYYY 中可能拥有更为活跃的氨基酸转化代谢途径^[50]。正是这些关键香气物质在种类和含量上的特异性组合,最终导致了不同朝天椒品种独具特色的香气特征,这也为风味导向的品种选育与产品开发提供了直接依据。

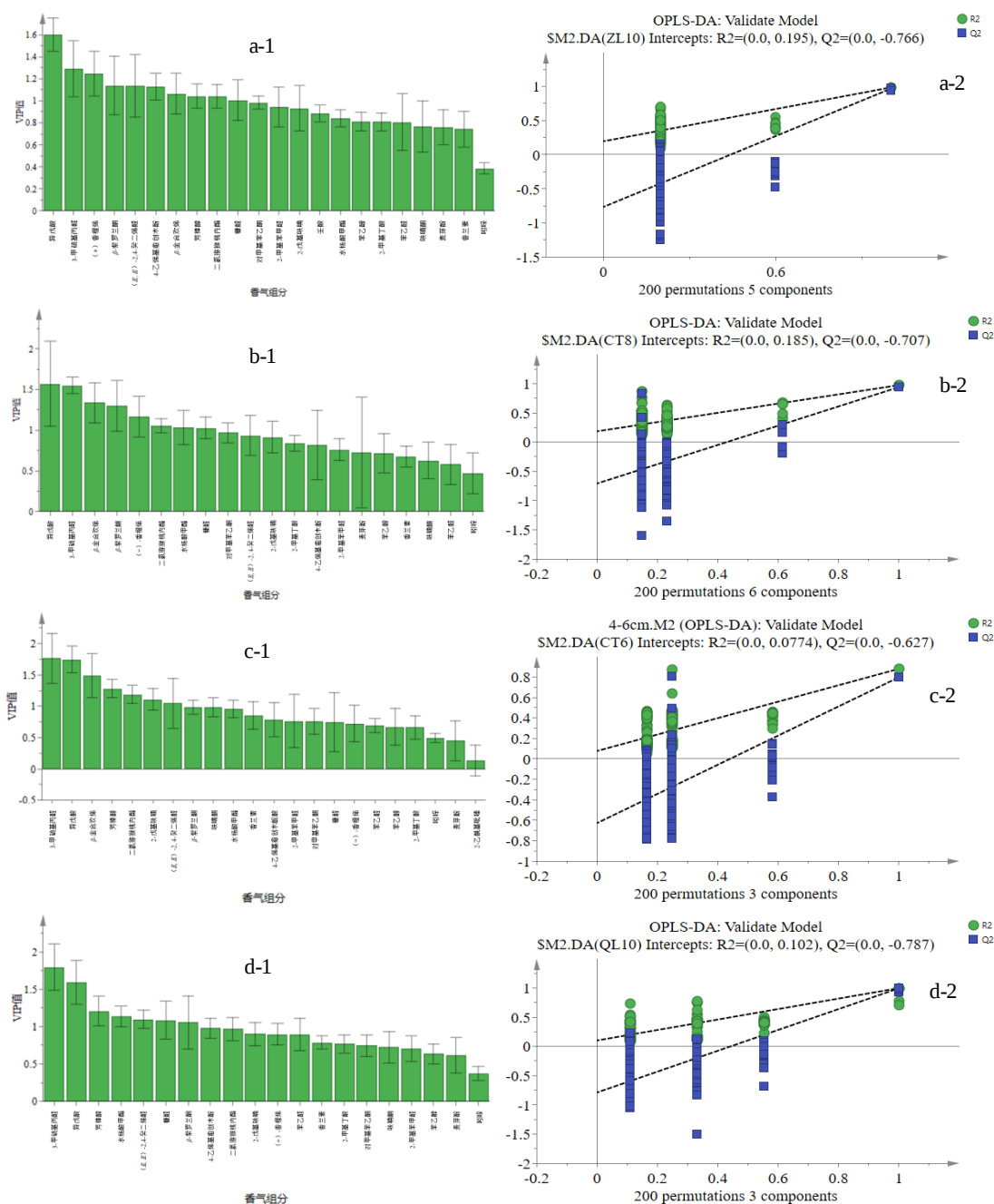


图5 不同品种朝天椒香气成分正交偏最小二乘判别分析结果

Fig.5 Results of orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA) on aroma components of different cultivars of chili peppers

注: 图 a、b、c、d 依次代表 a、b、c、d 类朝天椒的 OPLS-DA 分析结果。

表 6 基于 OPLS-DA 的不同品种朝天椒关键差异香气成分

Table 6 Key Differential aroma components in different cultivars of chili peppers based on OPLS-DA				
类别/cm	VIP > 1 且 P < 0.05	R ² Y	Q ²	差异性化合物
> 7	异戊酸、3-甲硫基丙醛、(+)-香橙烯、 β -紫罗兰酮、(E,E)-2,4-癸二烯醛、4-乙基愈创木酚、 β -金合欢烯、芳樟醇、二氢猕猴桃内酯、糠醛	0.990	0.979	
6~7	异戊酸、3-甲硫基丙醛、 β -金合欢烯、 β -紫罗兰酮、(+)-香橙烯、二氢猕猴桃内酯、水杨酸甲酯、糠醛	0.838	0.667	β -金合欢烯、(+)-香橙烯、水杨酸甲酯、二氢猕猴桃内酯、糠醛、3-甲硫基丙醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、异戊酸、芳樟醇、 β -紫罗兰酮、4-乙基愈创木酚、2-戊基呋喃
4~6	3-甲硫基丙醛、异戊酸、 β -金合欢烯、芳樟醇、二氢猕猴桃内酯、2-戊基呋喃、(E,E)-2,4-癸二烯醛	4~6	3-甲硫基丙醛、异戊酸、 β -金合欢烯、芳樟醇、二氢猕猴桃内酯、2-戊基呋喃、(E,E)-2,4-癸二烯醛	
2~3	3-甲硫基丙醛、异戊酸、芳樟醇、水杨酸甲酯、(E,E)-2,4-癸二烯醛、糠醛、 β -紫罗兰酮、	2~3	3-甲硫基丙醛、异戊酸、芳樟醇、水杨酸甲酯、(E,E)-2,4-癸二烯醛、糠醛、 β -紫罗兰酮、	

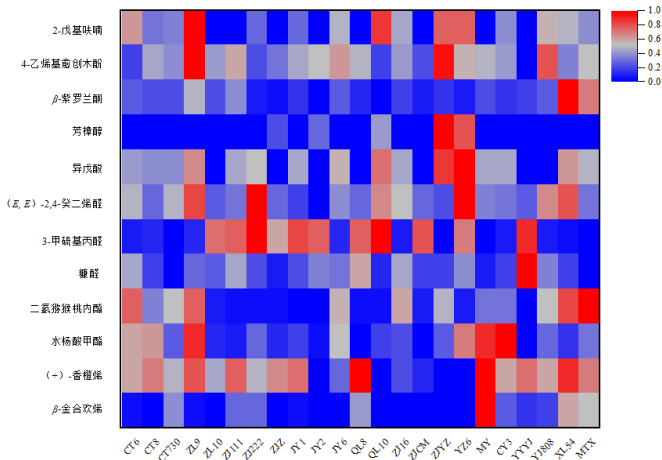


图 6 不同品种朝天椒关键香气成分热图

Fig.6 Heat map of key aroma components in different cultivars of chili peppers

本研究系统解析了遵义市 23 个朝天椒品种（干品）的香气成分差异，但仍存在一定局限性：其一，仅选取成熟期干制朝天椒为材料，未涉及不同成熟度、不同干燥方式、贮藏工艺对香气成分的影响，而加工与贮藏方式是影响辣椒香气的重要外部因素；其二，研究聚焦挥发性香气成分，未结合辣味、口感、滋味等感官指标与消费者偏好进行关联验证，香气品质的实际应用评价有待完善；其三，样本均取自同一产业园同一栽培条件，未纳入不同生态区、不同栽培模式的对比，地域生态因子对香气的影响仍需进一步验证。后续可围绕上述局限开展系统性研究，进一步完善遵义朝天椒香气品质调控理论，为产业应用提供更全面支撑。

3 结论

本研究对不同品种朝天椒的香气成分进行系统分析，发现香气成分的构成及含量存在显著品种差异性，可能是不同品种朝天椒呈现差异化香气特征的重要原因。主要表现为：所有品种均以醛类含量最高（220.89~499.53 mg m⁻³），但其含量在品种间差异较为明显；此外，部分品种可检测到特有香气成分。通过 OAV 值筛选出 28 种 OAV>1 的关键香气成分，其中 17 种为共有香气成分，共同构成朝天椒的核心香气基础，而 11 种

非共有成分有助于丰富品种间的香气层次与多样性。不同品种朝天椒的核心香气成分(OAV>50)在PCA得分图中呈现明显分离趋势($P<0.05$),累计方差贡献率(PC1+PC2)均高于60%;在此基础上,通过OPLS-DA初步鉴定出12种VIP>1且 $P<0.05$ 的关键差异香气成分,主要涵盖花香、果香、薄荷香、麝香及坚果香等;热图分析进一步表明这些成分具有明显的品种特性,如花香类萜烯(β -紫罗兰酮、芳樟醇等)相对富集于XL54、ZJYZ等品种,而3-甲硫基丙醛、异戊酸等组分在YYYJ、ZJ222等品种中含量相对更高。综上,不同品种朝天椒的香气成分及香气特征存在较为明显的差异,该结果可为差异化辣椒制品开发、实现风味资源高值化利用提供参考。

参考文献

- [1] SINISGALLI C, VEZZA T, DIEZ-ECHAVE P, et al. The beneficial effects of red sun-dried *Capsicum annum* L. cv senise extract with antioxidant properties in experimental obesity are associated with modulation of the intestinal microbiota [J]. Molecular Nutrition and Food Research, 2021, 65(3): 2000812.
- [2] CHENG G T, LI Y S, QI S M, et al. Slc1A enhances the aroma quality of tomato fruits by promoting the synthesis of carotenoid derived volatiles [J]. Foods, 2021, 11: 2678.
- [3] WANG R C, SHU P, ZHANG C, et al. Integrative analyses of metabolome and genome-wide transcriptome reveal the regulatory network governing flavor formation in kiwifruit (*Actinidia chinensis*) [J]. New Phytologist, 2021, 233: 373-389.
- [4] RODRIGUEZ-BURRUEZO A, KOLLMANNSEBERGER H, GONZALEZ-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 annum-chinense-frutescens complex [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58 (7): 4388-4400.
- [5] SOSA-MOGUEL O, PINO J A, AYORA-TALavera G, et al. Biological activities of volatile extracts from two varieties of Habanero pepper (*Capsicum chinense* Jacq.) [J]. International Journal of Food Properties, 2018, 20 (9): 1-10.
- [6] ZHANG J, WANG C, WANG J W, et al. Comprehensive fruit quality assessment and identification of aroma-active compounds in green pepper (*Capsicum annum* L.) [J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 9: 1027605.
- [7] 郭淼.发酵辣椒原料酱的研究[D].天津:天津科技大学,2023.
- [8] 刘波,冯树涛,李航,等.辣椒中香气成分分析技术及影响因素研究进展[J].蔬菜,2025,4:19-25.
- [9] XU Y, GONG X F, CHEN X, et al. Integrated metabolome and transcriptome analysis reveals volatile aroma compounds and their regulatory mechanisms in chili pepper fruits [J]. Food Bioscience, 2025, 72: 107419.
- [10] 吴家琪.遵义市辣椒产业发展的评价研究[D].贵阳:贵州大学,2023.
- [11] 吕梦瑶,王盼乔,李纪锁,等.不同朝天椒品种果实性状评价及聚类分析[J].中国瓜菜,2024,37(8):67-75.
- [12] 王永晓,詹萍,田洪磊,等.基于GC-MS结合化学计量学方法探究特征清香味辣椒粉的香气特点[J].食品科学,2019,40(8):162-168.
- [13] SWIEGERS J H, BARTOWSKY E J, HENSCHKE P A, et al. Yeast and bacterial modulation of wine aroma and flavour [J]. Australian Journal of Grape and Wine Research, 2010, 11(2): 139-173.
- [14] 刘贞丽.贵州辣椒干主效特征香味物质分析与鉴定[D].贵阳:贵州大学,2023.
- [15] 彭黎,黄钧,黄家全,等.不同产地和品种辣椒的特性差异分析[J].食品研究与开发,2021,42(13):159-167.
- [16] 陶兴林,朱惠霞,王晓巍,等.基于SPME-GC-MS技术分析不同地理标志辣椒粉香气成分差异[J].食品工业科技,2023,44(21):275-284.
- [17] 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.
- [18] 王海帆,郭梦嫣,王玉洁,等.辣椒、花椒等辛辣香料对肉制品风味影响的研究进展[J].食品科学,2022,43(15):389-395.
- [19] KORKMAZ A, HAYALOLU A A, ATASOY A F. Evaluation of the volatile compounds of fresh ripened *Capsicum annum* and its spice pepper (dried red pepper flakes and isot) [J]. LWT- Food Science and Technology, 2017, 84 (1): 842-850.
- [20] 杜勃峰,丁筑红,李达,等.基于SPME-GC-MS结合ROAV分析评价不同加工方式下皱椒辣椒粉风味品质[J].中国调味品,2019,44(8):76-80.
- [21] 范智义,张敏,邓维琴,等.不同产地辣椒挥发性成分的对比研究[J].食品与发酵科技,2022,58(3):113-118.
- [22] 郭双飞.藏红花花瓣风味分析与生物活性的研究[D].上海:上海应用技术大学,2023.
- [23] 熊学斌,夏延斌,张骁,等.不同品种辣椒挥发性成分的GC-MS分析[J].食品工业科技,2012,33(16):161-164.
- [24] 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(12):1-13.
- [25] ZHOU H, XU X W, XU X M, et al. Integrated transcriptomic and metabolomic analysis of chili pepper fruits provides new insight into the

- regulation of the branched chain esters and capsaicin biosynthesis [J]. Food Research International, 2023, 169: 112856.
- [26] 王浩雅,王乃定,张强,等.水孔蛋白正渗透膜浓缩烟草香料的品质分析[J].中国烟草科学,2021,42(6):86-91.
- [27] 王立磊,杨艳芹,谢佳灵,等.基于电子鼻与 GC-MS 融合技术的优质红茶和缺陷红茶香气品质评价[J].食品科学,2024,45(2):274-282.
- [28] ZHAO Q, HO C T, HUANG Q R. Effect of ubiquinol-10 on citral stability and off-flavor formation in oil-in-water (O/W) nanoemulsions [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61: 7462-7469.
- [29] 祝纤纤,全涛, β -紫罗兰酮的生物活性与其衍生物的构效关系研究进展[J].食品安全质量检测学报,2023,14(8):101-108.
- [30] ARAGUEZ I, VALPUESTA V. Metabolic engineering of aroma components in fruits [J]. Biotechnology Journal, 2013, 8: 1144-1158.
- [31] ZHANG J, ZHAO J, XU Y, et al. Genome-wide association mapping for tomato volatiles positively contributing to tomato flavor [J]. Frontiers in Plant Science, 2015, 6: 1042.
- [32] XU L, YU X, LI M, 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, 2018, 20: 1-13.
- [33] 李应霞,王进英,董国鑫,等.辣椒品种对辣椒油挥发性风味物质的影响[J].食品科技,2023,48(8):257-263.
- [34] DHAR M K, MISHRA S, BHATT A, et al. Plant carotenoid cleavage oxygenases: structure-function relationships and role in development and metabolism [J]. Briefings in Functional Genomics, 2019, 19(1): 1-9.
- [35] 郭添荣,张崑,吴文林,等.油酥干辣椒中特征挥发性香气成分分析[J].中国调味品,2021,46(4):148-152.
- [36] VAN GEMERT L J. Odour thresholds compilations of odour threshold values in air, water and other media (second enlarged and revised edition) [M]. Netherlands: Oliemans Punter and Partners BV, 2011.
- [37] 孙宝国,陈海涛.食用调香术(第三版)[M].北京:化学工业出版社,2015.
- [38] 颜宇鸽,段桂媛,唐鑫静,等.不同品种辣椒制作的辣椒酱品质对比分析[J].食品与发酵工业,2023,49(11):225-232.
- [39] FORERO M D, QUIJANO C E, PINO J. Volatile compounds of chile pepper (*Capsicum annum L. var. glabriusculum*) at two ripening stages [J]. Flavour and Fragrance Journal, 2009, 24 (1): 25-30.
- [40] BOGUSZ S, TAVARE A M, TEIXEIRA J, et al. Analysis of the volatile compounds of Brazilian chilli peppers (*Capsicum spp.*) at two stages of maturity by solid phase micro-extraction and gas chromatography-mass spectrometry [J]. Food Research International, 2012, 48 (1): 98-107.
- [41] KEVRESAN Z, MASTILOVIC J, SINADINVIC-FISER S, et al. Spice paprika volatiles as affected by different postharvest ripening treatments of red pepper (*Capsicum annum L.*) variety aleva NK [J]. Acta Periodica Technologica, 2013, 44: 75-86.
- [42] 何少华,商华,都振江,等.贺兰山东麓砾石土壤下不同品种葡萄品质和葡萄酒香气特征[J].酿酒科技,2025,4:17-26.
- [43] TROVATO E, VENTO F, CRETI D, et al. Elucidation of analytical-compositional fingerprinting of three different species of chili pepper by using headspace solidphase microextraction coupled with gas chromatographymass spectrometry analysis, and sensory profile evaluation [J]. Molecules, 2022, 27(7): 2355.
- [44] WU Z, WEI H, QIU Y, et al. Flavoromics integrated with machine learning to elucidate key aroma compounds in aroma-directed chili peppers and predict sensory quality [J]. Current Research in Food Science, 2026, 12: 101274.
- [45] 韩畅,蒋琪,张相春,等.贵州省辣椒品种成熟期果实品质评价[J].农业工程,2026,16(1):123-129.
- [46] SOUZA A S, BEZERRA M A, CERQUEIRA U M F M, et al. An introductory review on the application of principal component analysis in the data exploration of the chemical analysis of food samples [J]. Food Science and Biotechnology, 2024, 33(6): 1323.
- [47] GRANATO D, SANTOS J S, ESCHER G B, et al. Use of principal component analysis (PCA) and hierarchical cluster analysis (HCA) for multivariate association between bioactive compounds and functional properties in foods: A critical perspective [J]. Trends Food Science & Technology, 2018, 72: 83-90.
- [48] ZHANG R H, LI M J, LU J H, et al. Characterization of Thirty Germplasms of Millet Pepper (*Capsicum frutescens L.*) in Terms of Fruit Morphology, Capsaicinoids, and Nutritional Components [J]. Metabolites, 2025, 15(1): 47.
- [49] GONG C S, GUO G J, PAN B G, et al. Integrating transcriptome and metabolome to explore the formation of fruit aroma in different types of pepper [J]. Food Bioscience, 2024, 62: 105157.
- [50] DU R, LIU J, JIANG J, et al. Construction of a synthetic microbial community for the biosynthesis of volatile sulfur compound by multi-module division of labor [J]. Food Chemistry, 2021, 347: 129036.