

基于气相色谱—离子迁移谱、感官、电子鼻分析 不同贮藏时间辣椒油风味成分

葛艳争¹ 孙晓雪¹ 安永强¹ 冻梓杰¹ 谢颢阳¹
张玉玉² 常记华³ 陈历水¹ 张康逸⁴

(1. 中原食品实验室, 河南 漯河 462300; 2. 北京工商大学, 北京 100048; 3. 河南畅翔生物科技有限公司, 河南 漯河 462300; 4. 河南省农业科学院农副产品加工研究中心, 河南 郑州 450000)

摘要: [目的] 探究辣椒油贮藏期间风味物质变化规律, 为辣椒油货架期预测及品质调控提供理论依据。[方法] 采用气相色谱—离子迁移谱(GC-IMS)、感官、电子鼻技术对贮藏 0, 45, 90, 135 d 的辣椒油的挥发性风味成分进行分析和检测。[结果] 辣椒油中共有 93 种挥发性物质, 主要包括醛类、酮类、烯烃类、醇类物质及含氮类化合物。利用相对气味活性值(ROAV)筛选出关键香气化合物, 在辣椒油贮藏 0, 45, 90, 135 d 时分别筛选出 18, 21, 21, 20 种关键挥发性风味物质, 主要包括醇类、醛类、酮类、烯烃类、酯类及含硫类化合物。感官结果显示, 不同贮藏时间的辣椒油色泽和整体可接受度差异不显著, 香味和滋味差异显著($P < 0.05$)。电子鼻结果表明, 贮藏 90, 135 d 的样品无显著差异, 辣椒油气味在 90 d 后趋于稳定。[结论] 贮藏时间显著影响辣椒油风味物质组成及感官特性, 90 d 后气味成分趋于稳定, 此临界点为货架期判定提供重要依据。

关键词: 辣椒油; 挥发性风味物质; 气相色谱—离子迁移谱; 电子鼻; 感官评价

Flavor components of chili oil with different storage durations based on gas chromatography-ion mobility spectrometry, sensory evaluation, and electronic nose analysis

GE Yanzheng¹ SUN Xiaoxue¹ AN Yongqiang¹ DONG Zijie¹ XIE Haoyang¹
ZHANG Yuyu² CHANG Jihua³ CHEN Lishui¹ ZHANG Kangyi⁴

(1. Food Laboratory of Zhongyuan, Luohe, Henan 462300, China; 2. Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China; 3. Henan Changxiang Biotechnology Co., Ltd., Luohe, Henan 462300, China; 4. Center of Agricultural Products Processing, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou, Henan 450000, China)

Abstract: [Objective] To investigate the changes in flavor compounds during chili oil storage and provide a theoretical basis for predicting its shelf life and quality control. [Methods] Gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS), sensory evaluation, and electronic nose techniques were used to analyze and detect the volatile flavor components of chili oil stored for 0, 45, 90, and 135 days. [Results] A total of 93 volatile compounds were identified in chili oil, mainly including aldehydes, ketones, olefins, alcohols, and nitrogen-containing compounds. Using the relative odor activity value (ROAV) method, 18, 21, 21, and 20 key volatile flavor compounds were identified at 0, 45, 90, and 135 days of storage, respectively, primarily consisting of alcohols, aldehydes, ketones, olefins, esters, and sulfur-containing compounds. Sensory evaluation results indicated that color and overall acceptability showed no significant differences across different storage periods, while aroma and taste exhibited significant differences ($P < 0.05$). Electronic nose analysis revealed no significant difference between samples stored for 90 and 135 days, indicating that the odor profile of chili oil stabilized after 90 days. [Conclusion] Storage time significantly affects the composition of flavor compounds and sensory characteristics of chili oil, with odor components tending to stabilize after 90 days. This critical point provides an important reference for determining the shelf life of chili oil.

基金项目: 河南省重点研发专项(编号: 241112110100)

通信作者: 陈历水(1974—), 男, 中原食品实验室正高级工程师, 博士。E-mail: chlishui@sina.com

收稿日期: 2024-09-11 改回日期: 2025-01-06

Keywords: chili oil; volatile flavor substances; gas chromatography-ion mobility spectrometry; electronic nose; sensory evaluation

辣椒是茄科一年生草本植物,广泛存在于北美、欧洲、亚洲和非洲,因其独特的颜色、辛辣度和香气被用作食品中的天然着色剂和调味剂^[1]。辣椒富含类胡萝卜素、辣椒素和生育酚^[2],具有缓解疼痛、抗炎症、抗心血管疾病和代谢健康方面的药理作用^[3]。此外,辣椒还可以抑制脂质氧化和微生物生长,激发食欲并促进血液循环^[4]。

辣椒油受到不同年龄段人群的喜爱,年龄的差异会影响消费者对辣椒油的偏好。为了满足消费者对辣椒油产品多元化的感官需求,需采用复合辣椒原料来制作^[5]。杨慧等^[6]研究了不同油温下制备的辣椒油中挥发性有机化合物的差异。结果表明,油温对辣椒油中挥发性有机物种类无显著影响,但辣椒油香气特异性明显。杨芳等^[7]基于 GC-IMS 对不同品种植物油制备的辣椒油进行分析发现,不同品种植物油制备的辣椒油中挥发性有机化合物具有明显差异,菜籽辣椒油香气最丰富且具有良好的稳定性。Li 等^[5]研究表明,不同品种辣椒所制备的辣椒油品质存在一定的相似性和差异性,石柱红和子弹头因其含有 3-甲基丁醛而具有更突出的巧克力香味特征;甲基醚为灯笼椒和子弹头中的关键风味物质,因此其具有更突出的熟土豆和烤肉香味特征。目前,有关辣椒油风味的研究主要涉及工艺过程^[8-9]、制备方法等对辣椒油挥发性成分的影响,以及不同品种辣椒^[5]、不同品种植物油对辣椒油挥发性成分的影响,而有关贮藏期间辣椒油挥发性成分变化的研究较少。

作为一种新兴的快速灵敏技术,GC-IMS 可以提供可变的进样量,能够检测液体或固体样品中的挥发性物质,且无需对样品进行预处理^[10]。GC-IMS 已被用于分析食品样品的气味,例如东北大酱^[11]、花椒^[12]和大蒜^[13]等。电子鼻是利用传感器阵列模拟人的嗅觉,能够有效识别样品的气味特征,从而实现对食品质量的精准评估,已被广泛应用于食品、医药等领域^[14]。研究拟通过 GC-IMS、感官、电子鼻技术对不同贮藏时间的辣椒油挥发性成分进行分析,比较货架期内不同贮藏时间辣椒油的风味差异及动态变化规律,并对不同贮藏时间的辣椒油样品进行判别分析,旨在明确其风味物质的变化趋势,为辣椒油的货架期预测和品质控制提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

大豆油:嘉里粮油(营口)有限公司;

朝天椒粉、魔鬼椒粉、红花椒粉、青花椒粉、灯笼椒、二荆条、白砂糖、豆瓣酱、葱、姜、蒜:市售;

2-丁酮、2-戊酮、2-己酮、2-庚酮、2-辛酮和 2-壬酮:分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

氮气:99.999%,漯河永益气体有限公司;

顶空瓶:20 mL,山东海能科学仪器有限公司;

MXT-WAX 毛细管色谱柱:30 m×0.53 mm,1.0 μm,美国 Restek 公司。

1.2 仪器与设备

电子分析天平:ME20 型,梅特勒—托利多仪器(上海)有限公司;

气相离子迁移谱:FlavourSpec®型,德国 GAS 公司;

静态顶空自动进样装置:CTC-PAL3 型,瑞士 CTC Analytics AG 公司;

电子鼻:PEN3 型,德国 Airsense 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 辣椒油的制备 将大豆油加热至 145℃,按质量比 3:1:2:1 加入朝天椒粉、魔鬼椒粉、红花椒粉和青花椒粉,搅拌均匀,熬制 10 min,过滤得到辣椒油 1,4℃贮藏备用。将大豆油加热至 160℃,按质量比 1:1:1 加入葱、姜、蒜,搅拌均匀,熬制 5 min,将灯笼椒和二荆条按质量比 4:1 称量,切段,待油温降至 120℃时加入,待油温降低至 100℃时按质量比 1:1 加入豆瓣酱和白砂糖,搅拌均匀,升温至 110℃,熬制 60 min,过滤得到辣椒油 2,4℃贮藏备用。将辣椒油 1 和辣椒油 2 按质量比 4:3 混合,得到辣椒油。

1.3.2 挥发性风味成分分析 参考文献[15-16]的方法。称取 2 g 样品于 20 mL 顶空瓶中,60℃孵育 20 min 后进样,每个样品测定 3 组平行。

(1) 顶空进样条件:孵化温度 60℃;孵化时间 20 min;进样体积 500 μL;不分流进样;孵化转速 500 r/min;进样针温度 85℃。

(2) GC 条件:色谱柱温度 60℃;载气为高纯氮气(纯度≥99.999%);程序升压:初始流量 2.0 mL/min,保持 2 min,8 min 内线性增至 10.0 mL/min,10 min 内线性增至 100.0 mL/min,保持 30 min,色谱运行时间 50 min;进样口温度 80℃。

(3) IMS 条件:电离源为氦源(³He);迁移管长度 53 mm;电场强度 500 V/cm;迁移管温度 45℃;漂移气为高纯氮气(纯度≥99.999%);流速 75.0 mL/min;正离子模式。

(4) 定性定量方法:使用 GC-IMS 配套的 Gallery Plot 插件以及 VOCal 软件内置的美国国家标准与技术研究院(NIST)2014 数据库和 IMS 数据库对挥发性化合物进行定性分析,利用面积归一化法进行相对定量分析。

1.3.3 电子鼻分析 取 2 g 样品于 50 mL 离心管中,密封 30 min 后进行顶空进样检测。采样时间为 1 s;传感器自清洗时间 80 s;样品进样时间 5 s;进样流量 400 mL/min;分析采样时间 80 s。取 69~71 s 数据进行汇总与分析。

1.3.4 感官评价分析 参考文献[17]的方法,感官评价小组由 30 名从事食品行业的科研人员组成,试验前按表 1 对参评人员进行专业培训。均匀量取 5 mL 4 组辣椒油样品于 20 mL 透明玻璃器皿中。感官品评过程中提供纯净

表 1 感官评价评分表

Table 1 Sensory evaluation scoring table

分值	香味	滋味	色泽	整体可接受度
0~3	熟辣椒香气和酱香气很淡,有轻微酸败味	熟辣椒风味和酱香味弱,保留时间短	淡红色,光泽暗淡	较差
3~6	熟辣椒香气和酱香气明显,无异味	熟辣椒风味和酱香味明显,但保留时间不持久	深红色稍暗,透明度一般	一般
6~10	熟辣椒香气和酱香气浓郁纯正,无异味	熟辣椒风味和酱香味较浓重且纯正,保留时间较持久	棕红色有光泽,透明度较好	极好

水、苏打饼干避免品评过程中样品之间的风味相互影响。

1.3.5 数据处理 采用 SPSS Statistics 26.0 软件进行数据处理,Origin 2018 软件制图和多元统计学分析。结果以“平均值±标准差”表示,基于单因素方差分析(ANOVA)中的 Duncan 检验法分析数据差异显著性, $P<0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 辣椒油的 GC-IMC 图谱分析

由图 1 可知,不同样品中挥发性有机物存在差异。

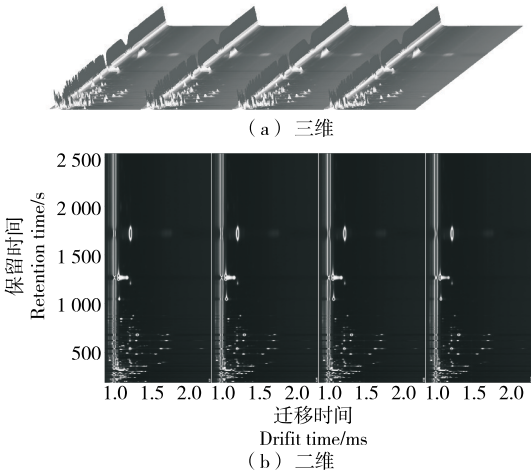


图 1 不同贮藏时间辣椒油中挥发性成分 GC-IMS 三维、二维谱图

Figure 1 GC-IMS three-dimensional spectra and two-dimensional spectra of volatile components in chili oil under different storage durations

为进一步直观对比样品中挥发性成分差异,将样品 0 的谱图作为参比,其余样品的谱图均扣减参比,得到不同样品的差异对比图如图 2 所示。当目标样品与参比样品中的挥发性有机物含量相同时,扣减后的背景为白色;如果目标样品中该物质的浓度高于参比样品,则显示为红色;反之,呈现为蓝色。

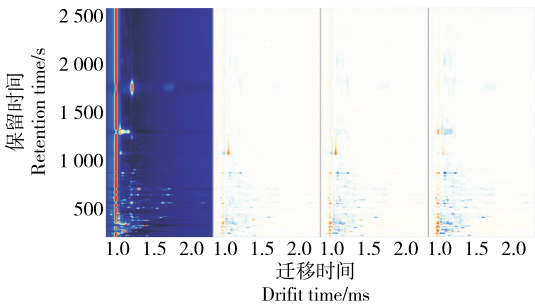


图 2 不同贮藏时间辣椒油中挥发性成分 GC-IMS 差异谱图
Figure 2 GC-IMS differential spectra of volatile components in chili oil under different storage durations

图 3 中每一行表示一个样品选取的全部信号峰;每一列对应同一种挥发性有机物在不同样品中的信号峰。由图 3 可知,4 组样本间挥发性组分存在差异。贮藏 0 d 辣椒油样品中,丁酸、水杨醛、苯乙醛、5-甲基糠醛等物质含量较高,这通常与辣椒油的典型辛辣香气特征相关^[8];贮藏 45 d 辣椒油样品中,乙酸、苯甲醛、E-2-庚烯醛、E-2-戊烯醛等物质含量较高;贮藏 90 d 辣椒油样品中,丙酸、氧化芳樟醇、3-呋喃甲醇、1-丁醇等物质含量高;随着贮藏时间的延长,乙酸、丙酸、丙烯醛等的变化

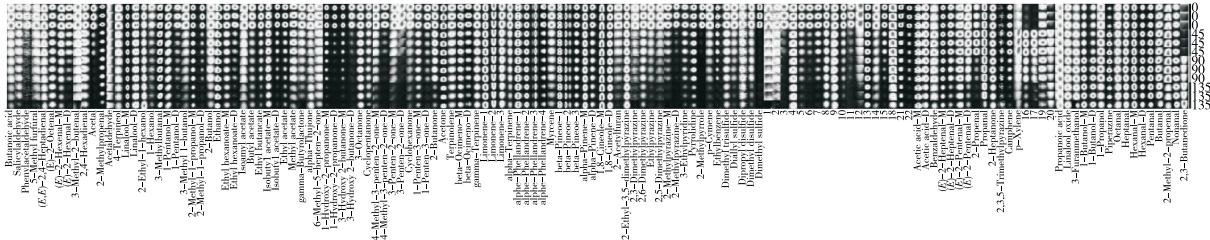


图 3 不同贮藏时间辣椒油中挥发性成分指纹图谱

Figure 3 Fingerprint of volatile components in chili oil under different storage durations

可能与脂质的氧化降解有关^[18];贮藏 135 d 辣椒油样品中,壬醛、2,3-丁二酮等物质含量较高。综上,挥发性物质的动态变化能直接反映辣椒油在贮藏过程中的品质变化规律。

2.2 辣椒油中挥发性化合物的定性分析

由图 4 和表 2 可知,不同贮藏时间辣椒油中共鉴定出 93 种挥发性物质,包括醇类 13 种、醛类 25 种、酸类 3 种、酮类 14 种、烯炔类 14 种、酯类 8 种、含氮类化合物 10 种、含氧类化合物 6 种。其中,醛类物质种类最多,随着贮藏时间的延长无显著性差异;醇类和含氧类化合物种类呈先下降后上升趋势;烯炔类物质种类呈先上升后下降趋势;酮类、酯类、含氮类物质种类随着贮藏时间的延长呈下降趋势;酸类物质种类随贮藏时间的延长而上升。

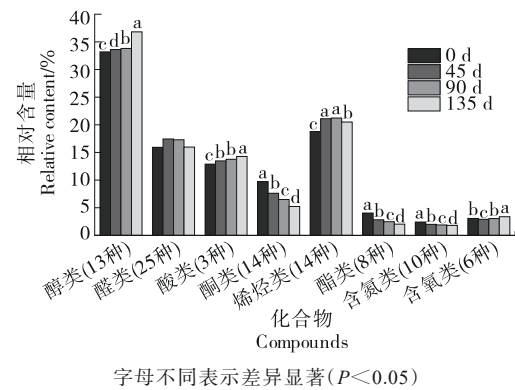


图 4 不同贮藏时间辣椒油各类挥发性有机化合物的相对含量

Figure 4 Relative content of volatile organic compounds in chili oil under different storage durations

表 2 辣椒油中的挥发性有机化合物[†]
Table 2 Volatile organic compounds in chili oil

种类	名称	保留指数	0 d	45 d	90 d	135 d
醇类	3-呋喃甲醇	1 802.9	0.48±0.026 ^c	0.52±0.017 ^{bc}	0.56±0.025 ^b	0.63±0.047 ^a
	4-萜烯醇	1 732.7	0.34±0.013	0.32±0.006	0.32±0.032	0.32±0.009
	芳樟醇	1 642.9	26.14±0.047 ^c	26.42±0.062 ^c	27.49±0.079 ^b	30.59±0.765 ^a
	2-乙基-1-己醇	1 541.7	0.18±0.001 ^b	0.17±0.015 ^b	0.19±0.007 ^b	0.23±0.032 ^a
	氧化芳樟醇	1 458.6	0.08±0.004 ^b	0.08±0.006 ^b	0.09±0.006 ^{ab}	0.10±0.003 ^a
	1-己醇	1 372.2	0.03±0.003 ^a	0.03±0.003 ^a	0.02±0.003 ^b	0.03±0.001 ^a
	正戊醇	1 267.3	0.45±0.001 ^a	0.39±0.003 ^b	0.39±0.002 ^c	0.37±0.006 ^d
	异戊醇	1 222.7	0.12±0.001 ^a	0.09±0.001 ^b	0.08±0.002 ^c	0.07±0.002 ^d
	正丁醇	1 160.9	0.36±0.013 ^c	0.37±0.003 ^c	0.47±0.011 ^b	0.55±0.016 ^a
	异丁醇	1 109.8	1.47±0.002 ^a	1.06±0.004 ^b	1.01±0.003 ^c	0.84±0.031 ^d
	正丙醇	1 056.6	0.12±0.001 ^c	0.14±0.002 ^b	0.15±0.003 ^a	0.15±0.005 ^b
	乙醇	945.2	3.35±0.041 ^a	2.96±0.026 ^b	2.97±0.035 ^b	2.88±0.340 ^b
	2-丁醇	1 038.8	0.06±0.002 ^b	0.07±0.001 ^a	0.07±0.003 ^a	0.06±0.004 ^b
醛类	水杨醛	1 777.2	0.32±0.022	0.31±0.011	0.31±0.007	0.32±0.019
	苯乙醛	1 768.2	0.13±0.010 ^a	0.11±0.001 ^b	0.10±0.011 ^b	0.11±0.015 ^{ab}
	5-甲基糠醛	1 734.0	0.22±0.010 ^a	0.20±0.015 ^{ab}	0.20±0.007 ^{ab}	0.19±0.017 ^b
	苯甲醛	1 554.2	0.10±0.005 ^b	0.11±0.003 ^{ab}	0.12±0.005 ^a	0.12±0.009 ^a
	2-乙酰基呋喃	1 543.3	0.14±0.001 ^a	0.10±0.008 ^b	0.09±0.008 ^b	0.07±0.006 ^c
	(E,E)-2,4-庚二烯醛	1 521.4	0.18±0.003 ^a	0.16±0.004 ^b	0.15±0.005 ^b	0.16±0.003 ^b
	(E)-2-辛烯醛	1 442.2	0.11±0.002	0.11±0.005	0.11±0.006	0.11±0.008
	壬烷醛	1 405.4	0.08±0.005 ^c	0.09±0.005 ^c	0.10±0.002 ^b	0.12±0.007 ^a
	(E)-2-庚烯醛	1 334.4	0.80±0.001 ^c	0.88±0.007 ^a	0.83±0.003 ^b	0.76±0.015 ^d
	辛醛	1 302.6	0.03±0.000 ^b	0.03±0.003 ^b	0.03±0.001 ^b	0.04±0.001 ^a
	(E)-2-己烯醛	1 234.2	0.25±0.001 ^a	0.21±0.001 ^b	0.18±0.004 ^c	0.14±0.004 ^d
	庚醛	1 198.5	0.10±0.001 ^d	0.10±0.002 ^c	0.11±0.001 ^b	0.12±0.000 ^a
	3-甲基-2-丁烯醛	1 217.2	0.06±0.003	0.06±0.003	0.06±0.001	0.06±0.002
	(E)-2-戊烯醛	1 150.3	0.48±0.004 ^c	0.56±0.003 ^a	0.52±0.004 ^b	0.45±0.005 ^d
	己醛	1 104.0	2.03±0.013 ^c	2.38±0.014 ^b	2.55±0.025 ^a	2.56±0.014 ^a

续表 2

种类	名称	保留指数	0 d	45 d	90 d	135 d
醛类	戊醛	1 001.9	1.83±0.015 ^b	2.28±0.022 ^{ab}	2.51±0.019 ^a	2.37±0.504 ^a
	3-甲基丁醛	927.9	3.09±0.016 ^a	3.11±0.009 ^{ab}	3.21±0.014 ^{ab}	2.84±0.300 ^b
	丁醛	887.0	0.32±0.002 ^b	0.40±0.003 ^a	0.44±0.002 ^a	0.44±0.066 ^a
	2-丙烯醛	863.3	0.61±0.006 ^b	0.92±0.006 ^a	0.39±0.001 ^c	0.27±0.050 ^d
	2-甲基丙醛	824.7	0.34±0.001	0.28±0.001	0.34±0.001	0.28±0.063
	丙醛	815.8	2.27±0.012	2.66±0.007	2.63±0.035	2.16±0.707
	乙醛	767.0	1.11±0.007 ^c	1.15±0.020 ^{bc}	1.18±0.037 ^b	1.31±0.040 ^a
	2-甲基-2-丙烯醛	893.4	0.38±0.003 ^b	0.45±0.003 ^a	0.47±0.003 ^a	0.32±0.026 ^c
	2,4-己二烯醛(山梨醛)	1 415.5	0.35±0.005 ^b	0.39±0.005 ^a	0.39±0.004 ^a	0.34±0.011 ^b
	缩醛	906.8	0.60±0.011 ^a	0.40±0.007 ^b	0.28±0.019 ^d	0.31±0.002 ^c
酸类	丁酸	1 714.2	0.27±0.015 ^a	0.21±0.005 ^b	0.21±0.005 ^b	0.18±0.011 ^c
	丙酸	1 636.7	0.46±0.005 ^c	0.52±0.019 ^b	0.54±0.025 ^{ab}	0.58±0.027 ^a
	乙酸	1 502.9	12.16±0.065 ^c	12.74±0.022 ^b	13.01±0.104 ^b	13.52±0.342 ^a
酮类	α -苧酮	1 420.7	0.08±0.001 ^a	0.06±0.004 ^b	0.06±0.003 ^b	0.07±0.006 ^a
	6-甲基-5-庚烯-2-酮	1 349.9	0.03±0.001 ^{ab}	0.03±0.001 ^b	0.03±0.002 ^b	0.03±0.002 ^a
	1-羟基-2-丙酮	1 317.3	2.67±0.022 ^a	1.66±0.025 ^b	1.08±0.007 ^c	0.59±0.025 ^d
	3-羟基-2-丁酮	1 301.2	0.75±0.025 ^a	0.46±0.006 ^b	0.36±0.009 ^c	0.26±0.010 ^d
	3-辛酮	1 248.8	0.19±0.000 ^a	0.18±0.001 ^b	0.18±0.003 ^b	0.18±0.003 ^b
	2-庚酮	1 194.3	0.08±0.002 ^b	0.09±0.000 ^a	0.09±0.002 ^a	0.08±0.001 ^b
	环戊酮	1 191.1	0.11±0.005 ^a	0.08±0.002 ^{bc}	0.08±0.001 ^c	0.09±0.006 ^b
	甲基戊烯酮	1 152.1	0.51±0.002 ^a	0.31±0.002 ^b	0.25±0.006 ^c	0.16±0.005 ^d
	3-戊烯-2-酮	1 146.8	0.13±0.086 ^a	0.04±0.000 ^b	0.02±0.001 ^b	0.01±0.001 ^b
	1-戊烯-3-酮	1 044.9	0.37±0.002 ^a	0.27±0.001 ^b	0.26±0.000 ^c	0.2±0.006 ^d
	2-丁酮	914.3	0.66±0.001 ^a	0.57±0.003 ^b	0.48±0.006 ^c	0.26±0.001 ^d
	丙酮	834.1	3.96±0.014 ^a	3.72±0.010 ^b	3.43±0.040 ^c	3.13±0.107 ^d
	2,3-丁二酮	994.0	0.02±0.001 ^c	0.02±0.001 ^c	0.04±0.002 ^b	0.07±0.006 ^a
	环己酮	1 300.0	0.06±0.005 ^a	0.04±0.001 ^b	0.04±0.004 ^{bc}	0.03±0.001 ^c
烯烃类	呋喃	1 416.9	2.73±0.039 ^d	5.68±0.024 ^b	5.97±0.021 ^a	4.79±0.121 ^c
	萜品油烯	1 291.6	0.05±0.003 ^a	0.04±0.001 ^b	0.04±0.002 ^b	0.04±0.003 ^b
	<i>p</i> -甲异丙苯(4-异丙基甲苯)	1 280.5	0.08±0.001 ^a	0.05±0.003 ^b	0.05±0.001 ^c	0.04±0.003 ^d
	β -罗勒烯	1 264.5	0.71±0.004 ^a	0.64±0.008 ^b	0.63±0.010 ^b	0.63±0.023 ^b
	γ -萜烯	1 248.8	0.20±0.001 ^a	0.18±0.001 ^d	0.18±0.004 ^c	0.19±0.003 ^b
	柠檬烯	1 206.4	2.08±0.009 ^a	2.09±0.003 ^b	2.15±0.009 ^c	2.34±0.052 ^c
	α -萜烯	1 188.6	0.16±0.002 ^a	0.13±0.001 ^b	0.12±0.001 ^c	0.12±0.006 ^c
	α -水芹烯	1 177.0	4.08±0.018 ^b	3.93±0.014 ^c	4.03±0.009 ^b	4.26±0.068 ^a
	月桂烯	1 159.7	0.05±0.001 ^a	0.04±0.001 ^{bc}	0.04±0.001 ^b	0.04±0.003 ^c
	β -蒎烯	1 135.3	5.74±0.031 ^b	5.58±0.018 ^c	5.83±0.022 ^b	6.35±0.162 ^a
	乙苯(苯乙烷)	1 131.0	1.00±0.006 ^a	0.83±0.010 ^b	0.55±0.005 ^c	0.31±0.005 ^d
	茨烯(樟脑萜)	1 065.8	0.64±0.003 ^b	0.78±0.001 ^a	0.46±0.004 ^c	0.21±0.017 ^d
	α -蒎烯	1 040.9	1.18±0.007 ^a	1.04±0.005 ^d	1.07±0.002 ^c	1.11±0.025 ^b
	<i>p</i> -二甲苯	1 143.6	0.06±0.002 ^d	0.10±0.001 ^a	0.09±0.000 ^b	0.08±0.001 ^c
酯类	γ -丁内酯	1 712.4	0.75±0.013 ^a	0.62±0.007 ^b	0.53±0.003 ^c	0.43±0.020 ^d
	乙基己酸酯	1 247.1	0.20±0.002 ^a	0.17±0.002 ^b	0.15±0.002 ^c	0.14±0.001 ^d

续表 2

种类	名称	保留指数	0 d	45 d	90 d	135 d
酯类	乙酸丁酯	1 091.1	0.07±0.001 ^a	0.04±0.001 ^b	0.04±0.000 ^{bc}	0.04±0.002 ^c
	丁酸乙酯	1 056.0	0.44±0.002 ^a	0.27±0.001 ^b	0.26±0.001 ^c	0.18±0.004 ^d
	乙酸异丁酯	1 029.0	1.43±0.009 ^a	1.02±0.009 ^b	0.89±0.003 ^c	0.69±0.034 ^d
	乙酸乙酯	895.8	0.92±0.007 ^a	0.52±0.003 ^b	0.44±0.005 ^c	0.4±0.008 ^d
	乙酸甲酯	848.3	0.17±0.000 ^a	0.15±0.002 ^b	0.12±0.003 ^c	0.09±0.003 ^d
	乙酸异戊酯	1 141.1	0.06±0.000 ^a	0.04±0.001 ^c	0.04±0.002 ^b	0.04±0.002 ^{bc}
含氮类化合物	2-乙基-3,5-二甲基吡嗪	1 481.2	1.05±0.012 ^b	1.03±0.009 ^b	1.05±0.016 ^b	1.14±0.036 ^a
	3-乙基吡啶	1 388.8	0.12±0.003 ^a	0.09±0.004 ^b	0.08±0.002 ^c	0.07±0.006 ^d
	2,3-二甲基吡嗪	1 371.3	0.03±0.003 ^a	0.03±0.004 ^b	0.02±0.004 ^b	0.03±0.004 ^b
	乙基吡嗪	1 362.6	0.09±0.002 ^a	0.06±0.003 ^b	0.05±0.001 ^c	0.03±0.003 ^d
	2,6-二甲基吡嗪	1 353.1	0.09±0.004 ^a	0.07±0.002 ^b	0.07±0.002 ^b	0.06±0.003 ^c
	2,5-二甲基吡嗪	1 336.6	0.09±0.001 ^a	0.06±0.001 ^b	0.05±0.002 ^c	0.04±0.003 ^d
	2-甲基吡嗪	1 278.6	0.30±0.005 ^a	0.18±0.002 ^b	0.14±0.005 ^c	0.10±0.005 ^d
	吡咯烷(四氢吡咯)	1 032.1	0.25±0.002 ^a	0.22±0.002 ^b	0.22±0.003 ^c	0.14±0.005 ^d
	2,3,5-三甲基吡嗪	1 419.6	0.03±0.004 ^b	0.04±0.002 ^a	0.05±0.005 ^a	0.05±0.002 ^a
	1-甲基吡咯	1 162.6	0.36±0.008 ^a	0.21±0.008 ^b	0.16±0.015 ^c	0.15±0.004 ^c
	三硫化二甲基(甲基三硫醚)	1 360.8	0.07±0.002 ^a	0.07±0.005 ^b	0.06±0.003 ^b	0.06±0.000 ^b
含氧类化合物	1,8-桉树脑(桉油醇,醚类)	1 214.2	2.55±0.011 ^c	2.60±0.007	2.75±0.010 ^b	3.11±0.067 ^a
	二烯丙基硫醚	1 145.0	0.16±0.001 ^a	0.10±0.001 ^b	0.08±0.002 ^c	0.05±0.003 ^d
	二甲基二硫醚	1 087.9	0.05±0.002 ^a	0.04±0.001 ^c	0.04±0.001 ^b	0.03±0.002 ^d
	二甲基硫醚	791.3	0.21±0.004 ^a	0.08±0.001 ^c	0.09±0.002 ^{bc}	0.10±0.015 ^b
	二丙基二硫醚	1 383.3	0.03±0.002	0.03±0.002	0.03±0.002	0.03±0.006

† 同行小写字母不同表示组间差异显著($P<0.05$)。

醇是脂质氧化的二次产物,主要来自不饱和脂肪酸的氧化降解^[8]。芳樟醇是辣椒油样品中第一大挥发性物质,为花椒中的主要特征化合物,可能是在花椒内合成,在炸制过程中从花椒中浸出到油中^[19-20]。随着贮藏时间的延长,醇类物质中芳樟醇、3-呋喃甲醇、正丁醇含量呈上升趋势,4-萜烯醇、正戊醇、异丁醇、乙醇含量呈下降趋势。醛类物质阈值较低,是油脂氧化的主要产物,一定程度上可以反映油脂的品质。随着贮藏时间的延长,5-甲基糖醛、(E)-2-庚烯醛、3-甲基丁醛、丙醛、缩醛含量呈下降趋势;己醛、戊醛、丁醛、乙醛含量呈上升趋势。

酸类物质主要来源于脂质的氧化降解^[18]。乙酸在水中的阈值较低,挥发性强,呈醋酸味^[21],是辣椒油样品中第二大挥发性物质。随着贮藏时间的延长,酸类物质中乙酸、丙酸含量呈上升趋势,丁酸含量呈下降趋势。随着贮藏时间的延长,1-羟基-2-丙酮、3-羟基-2-丁酮、甲基戊烯酮、2-丁酮、丙酮含量均呈下降趋势。酮类物质主要通过脂质氧化、美拉德反应和氨基酸降解产生,对食品的香气特性有重要影响,一般具有花香味、果香味,其中不饱和酮类物质是动物特征味和植物油脂味的来源^[22]。

随着贮藏时间的延长,呋喃、柠檬烯、 β -蒎烯含量呈上

升趋势, β -罗勒烯、 γ -萜烯、乙苯(苯乙烷)、苈烯(樟脑萜)、 α -蒎烯含量呈下降趋势。烯烃是不饱和脂肪酸氧化分解的主要产物,由不饱和烯烃自由基和氢自由基结合形成。烯烃主要提供一些花香、甜味、木制和柑橘味^[23]。酯类物质中 γ -丁内酯、乙基己酸酯、丁酸乙酯、乙酸异丁酯、乙酸乙酯和乙酸甲酯含量随着贮藏时间的延长均呈下降趋势。酯的合成有两种方式,一种是游离脂肪酸与醇酯化,另一种是酯醇解合成^[24]。大多数酯类都有水果味和花香味。

随着贮藏时间的延长,含氮化合物2-乙基-3,5-二甲基吡嗪含量呈上升趋势,3-乙基吡啶、2-甲基吡嗪、吡咯烷(四氢吡咯)、1-甲基吡咯含量呈下降趋势。吡嗪通常与非酶褐变反应有关,通常会产生烘烤坚果般的香气^[25]。含硫化合物1,8-桉树脑(桉油醇,醚类)含量随着贮藏时间的延长呈上升趋势,二烯丙基硫醚、二甲基硫醚含量呈下降趋势。含硫化合物一般阈值较低,具有刺激性气味。二烯丙基硫醚为大蒜的主要挥发性成分,对蒜香风味的形成具有重要作用^[26]。

2.3 辣椒油挥发性化合物 ROAV 值分析

将对样品整体风味贡献最大的成分的 ROAV 定义成 100,采用 ROAV 法分析各挥发性风味物,ROAV 越大,化

合物对整体香气的贡献越大。挥发性风味物质 ROAV $\geq$ 1, 认为其对整体风味有直接影响, 为关键挥发性风味物质。除 9 种未查到感觉阈值的挥发性风味物质外, 随着不同贮藏时间辣椒油中挥发性风味物质的 ROAV 值如表 3 所示, 该表仅列举了 ROAV $\geq$ 1 的挥发性风味物质的结果。

由表 3 可知, 4 组中 ROAV $>$ 1 的挥发性风味物质有芳樟醇、(E)-2-庚烯醛、戊醛、异戊醛、丁醛、2-丙烯醛、2-甲基丙醛、丙醛、乙醛、缩醛、3-辛酮、1-戊烯-3-酮、2,3-丁二酮、柠檬烯、 β -蒎烯、 α -蒎烯、丁酸乙酯、乙酸乙酯、甲基三硫醚、桉油醇、二烯丙基硫醚、二甲基硫醚共 22 种。贮藏 0, 45, 90, 135 d 的辣椒油分别有 18, 21, 21, 20 种关键挥发性风味物质, 主要包括醇类、醛类、酮类、烯炔类、酯类及含硫类化合物。

在贮藏 0, 45, 90 d 时辣椒油中丁酸乙酯的 ROAV 值最高, 其对辣椒油风味的影响最大, 具有菠萝似果香, 油脂香气。芳樟醇和异戊醛为 4 个样品整体风味的贡献者, 其中芳樟醇在辣椒油贮藏 135 d 时 ROAV 值最高。李锦等^[27]研究发现, 花椒风味油中挥发性风味成分主要为烯炔类和醇类, 含量较高的醇类物质为桉叶油醇、芳樟醇。芳樟醇具有清甜的花香、木香与玫瑰花香, 是影响花椒椒麻气味的主要因素。Miao 等^[28]在豆豉中检测到异戊醛, 该物质使豆豉散发出蘑菇香气, 潜在地增强了豆豉整体感官风味。乙酸乙酯和 (E)-2-庚烯醛呈现出浓郁的菠萝香味和油脂香气^[29]。二甲基硫醚具有硫味、甜玉米味和蔬菜味, 是许多发酵食品中特有的风味化合物, 在产生更复杂的芳香族化合物的反应中充当芳香化合物和前体^[30]。1-戊烯-3-酮具有辛辣、胡椒、大蒜和洋葱的气味^[31]。

2.4 辣椒油的感官品质分析

由表 4 可知, 各贮藏时间的辣椒油色泽、整体可接受度无显著性差异。对于辣椒油的香味, 贮藏 0, 45 d 的香味无显著性差异, 但与贮藏 90, 135 d 的样品差异显著, 贮藏 0 d 辣椒油有浓郁纯正的熟辣椒香气和酱香气, 随着贮藏时间的延长, 辣椒油的酱香气会减弱, 在贮藏 45 d 后香气趋于稳定。对于辣椒油的滋味, 贮藏 0, 45, 90 d 的滋味无显著性差异, 均有熟辣椒风味和酱香风味较浓重且纯正。

2.5 辣椒油的电子鼻分析

电子鼻技术旨在模拟人类的嗅觉系统, 能够对气味进行高敏感的分析。该设备能检测挥发性有机化合物的微小变化, 这些变化会引起传感器响应的差异^[32-33]。为比较不同贮藏时间辣椒油的风味变化, 利用电子鼻的 10 个传感器响应值绘制雷达图, 4 组辣椒油样品的雷达图轮廓表现出相似的信号, 主要体现在传感器 W1W、W5S 响应。采用无监督的主成分分析 (PCA) 和有监督的偏最小二乘判别分析 (PLS-DA) 对不同贮藏时间辣椒油的电子鼻数据进行多元统计学分析, 贮藏 90, 135 d 的样品未

表 3 辣椒油中挥发性有机化合物的 ROAV 值

Table 3 ROAV of volatile organic compounds in chili oil						
类别	名称	气味阈值	0 d	45 d	90 d	135 d
醇类	芳樟醇	6.00	52.72	86.81	94.08	100.00
醛类	(E)-2-庚烯醛	13.00	0.75	1.33	1.31	1.15
	戊醛	12.00	1.84	3.74	4.29	3.88
	异戊醛	1.10	34.03	55.81	59.86	50.64
	丁醛	9.00	0.44	0.87	1.01	0.96
	2-丙烯醛	8.30	0.89	2.19	0.96	0.64
	2-甲基丙醛	1.00	4.15	5.56	6.89	5.53
	丙醛	37.00	0.74	1.42	1.46	1.14
	乙醛	11.00	1.22	2.05	2.20	2.34
	缩醛	4.90	1.48	1.60	1.15	1.25
	3-辛酮	1.30	1.80	2.73	2.84	2.76
酮类	1-戊烯-3-酮	1.50	2.97	3.59	3.57	2.55
	2,3-丁二酮	0.18	1.07	1.70	5.05	7.25
烯炔类	柠檬烯	10.00	2.52	4.12	4.42	4.59
	β -蒎烯	60.00	1.16	1.83	1.99	2.08
	α -蒎烯	14.00	1.02	1.46	1.57	1.55
酯类	丁酸乙酯	0.05	100.00	100.00	100.00	66.28
	乙酸乙酯	5.00	2.23	2.05	1.81	1.56
含硫类	甲基三硫醚	0.10	8.86	12.92	12.32	11.88
	桉油醇	2.67	11.55	19.20	21.14	22.85
	二烯丙基硫醚	1.00	1.93	1.95	1.62	1.06
	二甲基硫醚	0.30	8.28	5.33	5.99	6.44

表 4 不同贮藏时间辣椒油样品的感官评价[†]

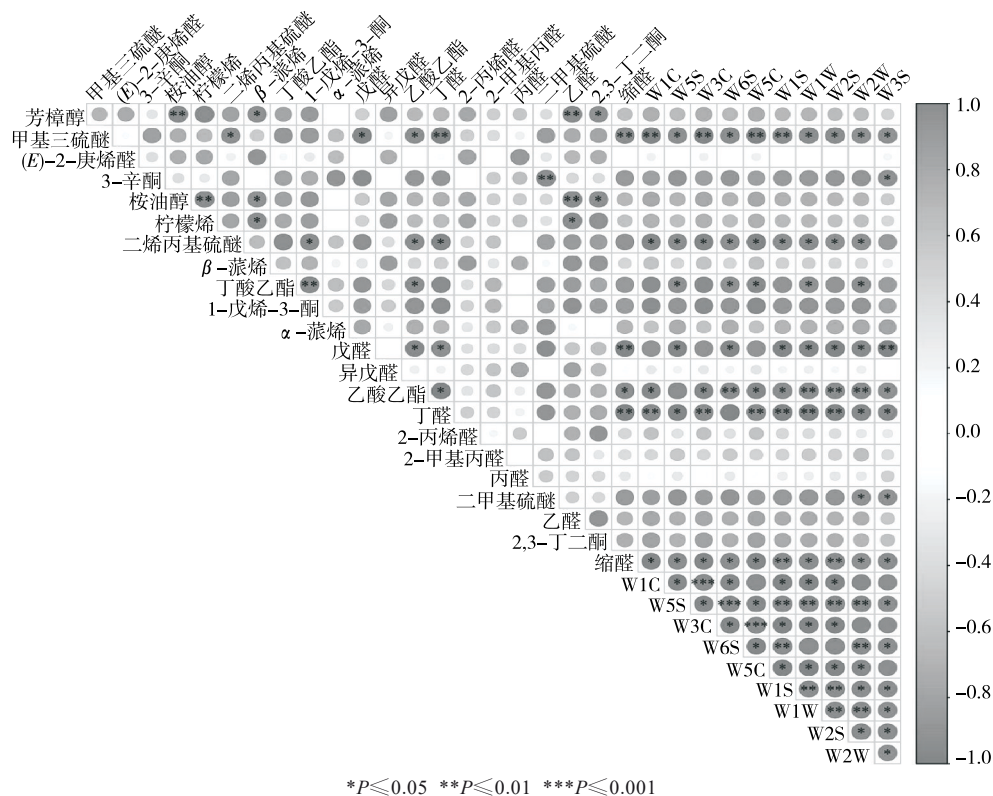
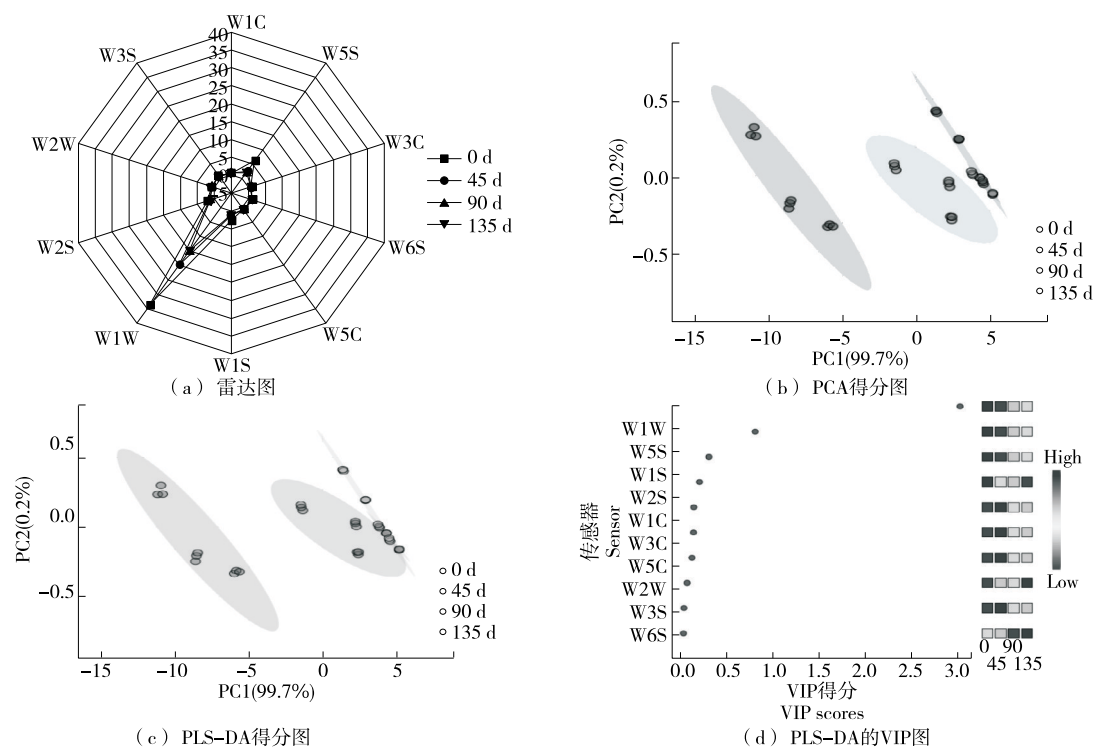
Table 4 Sensory evaluation of chili oil samples under different storage durations				
指标	0 d	45 d	90 d	135 d
香味	7.68 $\pm$ 0.67 ^a	7.16 $\pm$ 0.60 ^{ab}	6.95 $\pm$ 0.78 ^b	6.74 $\pm$ 1.09 ^b
滋味	7.52 $\pm$ 0.61 ^a	7.26 $\pm$ 0.73 ^{ab}	7.05 $\pm$ 0.85 ^{ab}	6.95 $\pm$ 0.62 ^b
色泽	6.58 $\pm$ 0.90	6.37 $\pm$ 0.70	6.32 $\pm$ 1.05	6.31 $\pm$ 0.73
整体可接受度	6.89 $\pm$ 1.02	6.63 $\pm$ 1.42	6.53 $\pm$ 1.07	6.42 $\pm$ 0.96

[†] 同行小写字母不同表示组间差异显著 ($P<0.05$)。

能明显分离, 存在显著的交叉重叠, 表明两者无显著性差异, 进一步说明辣椒油的气味在 90 d 后趋于稳定。传感器 W1W 的 VIP 得分 $>$ 1, 表明在特定贮藏条件及样品体系下, 该传感器可能是区分不同贮藏时间辣椒油差异的潜在标志物。

2.6 辣椒油特征香气物质与电子鼻传感器响应值的相关性分析

由图 6 可知, W1C、W3C、W5C 与甲基三硫醚、二烯丙基硫醚、乙酸乙酯、缩醛呈负相关, 与丁醛呈正相关;



W5S、W6S、W1W、W2W 与甲基三硫醚、二烯丙基硫醚、丁酸乙酯、缩醛呈正相关,与戊醛呈负相关;W1S、W2S、W3S 与甲基三硫醚、二烯丙基硫醚、乙酸乙酯、缩醛呈正相关,与戊醛、丁醛呈负相关。

3 结论

通过气相色谱—离子迁移谱、感官及电子鼻综合分析,揭示了辣椒油在 0~135 d 贮藏过程中的风味物质动态变化规律。结果表明,气相色谱—离子迁移谱共鉴定出 93 种物质,相对气味活性值 ≥ 1 的关键化合物有芳樟醇、(E)-2-庚烯醛、戊醛等 22 种构成其核心呈味体系。感官评定及电子鼻结果表明,不同贮藏时间的辣椒油色泽和整体可接受度差异不显著,香味和滋味差异显著。贮藏 90、135 d 的样品无显著性差异,辣椒油的气味在 90 d 后趋于稳定。基于 90 d 后风味稳定性特征,建议将货架期临界点设定为 90 d 以维持感官可接受度。研究分析了辣椒油贮藏过程中挥发性风味物质的变化规律,但尚未解析非挥发性成分的影响及其与理化指标的关联。未来需从多角度评估产品货架期,以更全面保障产品的风味稳定性与食用安全性。

参考文献

- [1] LIU M, HU L, DENG N, et al. Effects of different hot-air drying methods on the dynamic changes in color, nutrient and aroma quality of three chili pepper (*Capsicum annuum* L.) varieties[J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101262.
- [2] NAGY Z, DAOOD H, KONCSEK A, et al. The simultaneous determination of capsaicinoids, tocopherols, and carotenoids in pungent pepper powder[J]. Journal of Liquid Chromatography & Related Technologies, 2017, 40(4): 199-209.
- [3] ZHANG D, SUN X X, BATTINO M, et al. A comparative overview on chili pepper (*Capsicum genus*) and Sichuan pepper (*Zanthoxylum genus*): from pungent spices to pharma-foods[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 117: 148-162.
- [4] GUEVARA M, TEJERA E, GRANDA-ALBUJA M G, et al. Chemical composition and antioxidant activity of the main fruits consumed in the western coastal region of Ecuador as a source of health-promoting compounds[J]. Antioxidants, 2019, 8(9): 387.
- [5] LI D D, CHU B B, LI B, et al. The difference analysis of physicochemical indexes and volatile flavor compounds of chili oil prepared from different varieties of chili pepper[J]. Food Research International, 2024, 190: 114657.
- [6] 杨慧, 黄绿红, 张帆, 等. 基于感官和气相色谱—离子迁移谱分析油温对辣椒油风味的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(9): 328-335.
- [7] YANG H, HUANG L H, ZHANG F, et al. Effect of oil temperature on the flavor of chilli oil by GC-IMS and sensory evaluation[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(9): 328-335.
- [8] 杨芳, 王逊城, 贾洪锋, 等. 基于 GC-IMS 结合多元统计方法对不同品种植物油制备的辣椒油风味品质的比较[J]. 现代食品科技, 2024, 40(10): 338-350.
- [9] YANG F, WANG S C, JIA H F, et al. Comparison of the flavor qualities of chili oils prepared from different types of vegetable oil[J]. Modern Food Science & Technology, 2024, 40(10): 338-350.
- [10] 杨芳, 邓凤琳, 贾洪锋, 等. 辣椒面颗粒度对辣椒油理化性质和挥发性风味物质的影响[J]. 食品与机械, 2023, 39(10): 157-165.
- [11] YANG F, DENG F L, JIA H F, et al. Study on the effects of granularity of paprika on physicochemical properties and volatile flavor compounds of chili oil[J]. Food & Machinery, 2023, 39(10): 157-165.
- [12] BAI X Y, WAN P, LIU J, et al. Investigation on the changes of carotenoids and capsaicinoids in chili oil at different frying temperature by using ^1H NMR[J]. Current Research in Food Science, 2023, 6: 100411.
- [13] YU M J, XIANG X L, TAN H, et al. Potential correlation between volatiles and microbiome of Xiang xi sausages from four different regions[J]. Food Research International, 2021, 139: 109943.
- [14] LING H Z, SHI H L, CHEN X C, et al. Detection of the microbial diversity and flavour components of northeastern Chinese soybean paste during storage[J]. Food Chemistry, 2022, 374: 131686.
- [15] FENG J Z, HAO L F, ZHU H B, et al. Combining with volatilomic profiling and chemometrics to explore the volatile characteristics in five different dried *Zanthoxylum bungeanum* maxim[J]. Food Research International, 2024, 175: 113719.
- [16] BI J C, YANG Z, LI Y, et al. Effects of different cooking methods on volatile flavor compounds in garlic[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2023, 31: 100642.
- [17] 孟凡, 王艺儒, 赵悦辰, 等. 电子鼻结合气相色谱—离子迁移谱联用技术分析松茸货架期间不同部位挥发性风味物质的变化[J]. 食品科学, 2024, 45(23): 232-241.
- [18] MENG F, WANG Y R, ZHAO Y C, et al. Changes of volatile flavor compounds in different parts of *Tricholoma matsutake* during shelf life analyzed by electronic nose combined with gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Food Science, 2024, 45(23): 232-241.
- [19] XU N, LAI Y H, SHAO X F, et al. Different analysis of flavors among soft-boiled chicken: based on GC-IMS and PLS-DA[J]. Food Bioscience, 2023, 56: 103243.
- [20] ZHENG Z J, TIAN M, LIAO G Z, et al. Evaluation of the effects of compound curing agents on the lipid profiles and volatile flavors in Nuodeng ham based on lipidomics and GC-

- IMS analysis[J]. Food Research International, 2024, 176: 113810.
- [17] CHOI S, LEE Y, JUNG M, et al. Changes in acrylamide content and quality characteristics of red pepper oil by cooking method and conditions[J]. Food Control, 2024, 155: 110091.
- [18] 潘晓倩, 张顺亮, 臧明伍, 等. 即食肉丸短期贮藏过程中脂质氧化产物与挥发性风味物质分析[J]. 食品科学, 2023, 44(12): 244-251.
- PAN X Q, ZHANG S L, ZANG M W, et al. Analysis of lipid oxidation products and volatile flavor compounds in instant meatballs during short-term storage[J]. Food Science, 2023, 44(12): 244-251.
- [19] 倪瑞洁, 詹萍, 田洪磊. 基于GC-IMS结合多元统计方法分析炸制时间对花椒调味油挥发性物质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(6): 279-286.
- NI R J, ZHAN P, TIAN H L. Effects of frying time on volatile flavor compounds in fried pepper (*Zanthoxylum bungeanum*) oil as analyzed by gas chromatography-ion mobility spectrometry and multivariate statistical analysis[J]. Food Science, 2022, 43(6): 279-286.
- [20] NI R J, YAN H Y, TIAN H L, et al. Characterization of key odorants in fried red and green Huajiao (*Zanthoxylum bungeanum* maxim. and *Zanthoxylum schinifolium* sieb. et Zucc.) oils[J]. Food Chemistry, 2022, 377: 131984.
- [21] 陈菊, 孙小静, 黄裕兵, 等. 基于顶空固相微萃取—气相色谱—质谱的糟辣椒挥发性物质非靶标代谢组学分析[J]. 食品科学, 2024, 45(13): 181-189.
- CHEN J, SUN X J, HUANG Y B, et al. Non-target metabolomics analysis of volatile compounds in fermented hot pepper based on headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry[J]. Food Science, 2024, 45(13): 181-189.
- [22] 杨永兴, 孟新涛, 许铭强, 等. 基于GC-IMS技术分析不同提取方式对辣椒籽油挥发性成分的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(6): 184-192.
- YANG Y X, MENG X T, XU M Q, et al. Effects of different extraction methods on the volatile components of pepper seed oil by GC-IMS[J]. Food Research and Development, 2023, 44(6): 184-192.
- [23] JUITA, DLUGOGORSKI B Z, KENNEDY E M, et al. Identification and quantitation of volatile organic compounds from oxidation of linseed oil[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51(16): 5 645-5 652.
- [24] LIU S Q, HOLLAND R, CROW V L. Esters and their biosynthesis in fermented dairy products: a review[J]. International Dairy Journal, 2004, 14(11): 923-945.
- [25] KANTONO K, HAMID N, CHADHA D, et al. Pulsed electric field (PEF) processing of chilled and frozen-thawed lamb meat cuts: relationships between sensory characteristics and chemical composition of meat[J]. Foods, 2021, 10(5): 1 148.
- [26] 何莲, 张浩, 乔明锋, 等. 蒜香烧烤酱配方优化及挥发性风味成分分析[J]. 中国调味品, 2019, 44(4): 57-63.
- HE L, ZHANG H, QIAO M F, et al. Optimization of formula and analysis of volatile flavor components of garlic barbecue sauce[J]. China Condiment, 2019, 44(4): 57-63.
- [27] 李锦, 刘玉兰, 徐晨辉, 等. 花椒风味油的制取及品质研究[J]. 中国油脂, 2020, 45(2): 24-31.
- LI J, LIU Y L, XU C H, et al. Preparation and quality of *Zanthoxylum bungeanum* flavor oil[J]. China Oils and Fats, 2020, 45(2): 24-31.
- [28] MIAO X Q, ZHANG R, JIANG S, et al. Volatile flavor profiles of douchis from different origins and varieties based on GC-IMS and GC-O-QTOF/MS analysis[J]. Food Chemistry, 2024, 460: 140717.
- [29] 张浩, 顾思远, 姜元华, 等. 基于GC-IMS分析不同煸炒温度对郫县豆瓣风味影响及游离氨基酸呈味分析[J]. 中国调味品, 2024, 49(7): 60-68, 85.
- ZHANG H, GU S Y, JIANG Y H, et al. Effects of different stir-frying temperatures on flavor of Pixian bean paste and analysis of taste of free amino acids based on GC-IMS[J]. China Condiment, 2024, 49(7): 60-68, 85.
- [30] CHEN D, WANG S L, LI M Q, et al. The dynamic changes in product attributes of shiitake mushroom pilei and stipes during dehydration by hot air drying[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(7): e15648.
- [31] GUO W K, CHENG M R, DONG X M, et al. Analysis of flavor substances changes during fermentation of Chinese spicy cabbage based on GC-IMS and PCA[J]. Food Research International, 2024, 192: 114751.
- [32] 陈冬, 王瑞雪, 王红莉, 等. 6种天然提取物对油炒香菇颜色、氧化稳定性和风味特征的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(5): 17-29.
- CHEN D, WANG R X, WANG H L, et al. Effects of six natural extracts on the color, oxidative stability and flavor characteristics of oil-fried shiitake mushroom[J]. Food Science, 2025, 46(5): 17-29.
- [33] 张桂云, 谢建华, 杨伟强. 电子鼻在食品掺假鉴定中的应用研究进展[J]. 食品与机械, 2023, 39(4): 211-216, 240.
- ZHANG G Y, XIE J H, YANG W Q. Research progress of electronic nose on identification of food adulteration[J]. Food & Machinery, 2023, 39(4): 211-216, 240.