

辣椒炒制时间对红油辣椒挥发性风味物质的影响

严利强¹ 易宇文² 熊怡玲² 侯智勇² 乔明锋²

(1. 浙江旅游职业学院, 浙江 杭州 311200; 2. 四川旅游学院烹饪科学重点实验室, 四川 成都 610100)

摘要: [目的] 探究辣椒炒制时间对红油辣椒挥发性风味物质的影响。[方法] 采用感官评价、电子鼻、气相色谱—质谱 (GC-MS) 测定不同炒制时间的辣椒 (0, 30, 45, 60, 75, 90 s) 制备的红油辣椒感官特性、色差、挥发性化合物的差异, 并结合相对气味活度值 (ROAV)、偏最小二乘法 (PLS-DA) 分析 6 种红油辣椒的关键风味化合物。[结果] 不同炒制时间的辣椒制备的红油辣椒其整体风味具有明显差异; 经过 GC-MS 共鉴定出 63 种挥发性化合物; 通过 ROAV 分析, 红油辣椒整体香气主要由油脂香、可可香、洋葱香构成; 通过 PLS-DA 共筛选出 24 种差异挥发性化合物, 醇类、醛类是主要的差异挥发性化合物。[结论] 炒制时间对红油辣椒的色差、感官特性与挥发性风味物质影响较大, 炒制 60 s 的辣椒制备的红油辣椒风味整体较佳, 可直接用于后续的生产加工。

关键词: 红油辣椒; 炒制时间; 气相色谱—质谱; 电子鼻; 挥发性风味物质

Effect of different roasting durations on volatile flavor substances of red oil pepper

YAN Liqiang¹ YI Yuwen² XIONG Yiling² HOU Zhiyong² QIAO Mingfeng²

(1. Tourism College of Zhejiang, Hangzhou, Zhejiang 311200, China; 2. Cuisine Science Key Laboratory of Sichuan Province, Sichuan Tourism University, Chengdu, Sichuan 610100, China)

Abstract: [Objective] To explore the effect of different roasting durations on the volatile flavor substances of red oil pepper. [Methods] Sensory evaluation, electronic nose, and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) were used to analyze the sensory characteristics, color difference, and volatile compounds of red oil pepper roasted for different durations (0, 30, 45, 60, 75, and 90 s). Relative odor activity value (ROAV) and partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) were employed to identify the key flavor compounds in the six types of red oil pepper. [Results] The overall flavor of red oil pepper prepared for different durations showed significant differences. A total of 63 volatile compounds were identified by GC-MS. ROAV analysis revealed that the overall aroma of red oil pepper was mainly composed of oily, cocoa, and onion aromas. PLS-DA screening identified 24 differential volatile compounds, with alcohols and aldehydes being the main ones. [Conclusion] Roasting time has a considerable impact on the color difference, sensory characteristics, and volatile flavor substances of red oil pepper. Red oil pepper roasted for 60 s exhibited better overall flavor and can be directly used in subsequent production and processing.

Keywords: red oil pepper; toasting time; GC-MS; e-nose; volatile flavor substance

辣椒 (*Capsicum annum* L.) 隶属于茄科辣椒属, 含有多种营养成分, 如类胡萝卜素、辣椒碱等^[1], 还具有抗肥胖、抗心血管疾病等多种生理功能^[2]。辣椒中的辣椒碱和辣椒红素等成分均属于脂溶性物质, 在油脂中具有良好

的溶解性^[3]。因此在食品加工中, 常利用辣椒的这一特性制备味辣、色红的红油辣椒, 以作为火锅、凉拌菜等菜肴的重要调味料, 增加菜肴的口感与色泽。

炒制干辣椒是红油辣椒制作过程中重要的预处理步

基金项目: 四川旅游学院科技创新团队项目 (编号: 21SCTUTG01); 四川省科技厅资助项目 (编号: 2024NSFSC0371); 国家级大学生创新创业训练计划 (编号: 202311552155, 202311552123)

通信作者: 易宇文 (1980—), 男, 四川旅游学院研究员, 硕士。E-mail: 147684620@qq.com

收稿日期: 2024-06-17 **改回日期:** 2025-07-01

引用格式: 严利强, 易宇文, 熊怡玲, 等. 辣椒炒制时间对红油辣椒挥发性风味物质的影响 [J]. 食品与机械, 2025, 41(11): 168-176.

Citation: YAN Liqiang, YI Yuwen, XIONG Yiling, et al. Effect of different roasting durations on volatile flavor substances of red oil pepper [J]. Food & Machinery, 2025, 41(11): 168-176.

骤之一,在炒制过程中干辣椒会发生美拉德反应等一系列生化反应,从而促使香气前体物质的转化^[4]。黄英等^[5]研究表明,炒制工艺的差异会造成辣椒风味物质及辣椒素类物质的溶出差异。目前对红油辣椒风味的影响因素研究主要集中在辣椒面颗粒度^[6]、辣椒品种^[7]、油温^[8]等,而干辣椒的炒制时间对红油辣椒挥发性风味物质的影响研究尚未见报道。黄英等^[5]研究发现,炒制功率越高,火锅底料中的干辣椒的辣椒素类物质溶出效率越高,最终达到极限值。陈丽兰等^[9]研究发现,随着炒制时间的延长,郫县豆瓣酱的辛香气味减弱,醛类和酯类物质随着炒制时间的延长而增加。目前干辣椒的炒制大多依靠经验操作,导致制备的红油辣椒品质不稳定,过短或过长的炒制时间会造成红油辣椒风味不足或者产生焦糊味等缺点,因此需要探究干辣椒炒制时间对红油辣椒风味的影响,探索最佳炒制时间,满足红油辣椒工业化生产要求。

风味是评定食品食用品质的指标之一。电子鼻(e-nose)是一种利用气敏传感器和模式识别系统从宏观角度识别食品中整体挥发性物质的快速检测技术^[10];气相色谱—质谱联用(chromatography-mass spectrometry, GC-MS)可对食品挥发性风味物质进行高灵敏度的定性和定量分析^[11],二者结合可对食品整体风味有更全面的解析。薛东等^[12]利用GC-MS结合电子鼻技术探究发现,二甲基硫醚是不同品种的植物油制备的红油辣椒的共有关键性化合物。研究拟以不同炒制时间的辣椒制备的红油辣椒为研究对象,采用电子鼻、GC-MS技术结合气味活度值(relative odor activity value, ROAV)、偏最小二乘法(partial least squares discriminant analysis, PLS-DA)识别不同炒制时间的辣椒制备的红油辣椒整体气味轮廓及其关键挥发性化合物,旨在为红油辣椒的工艺改良与品质控制提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

二荆条干辣椒、一级精炼菜籽油:市售。

1.2 主要仪器设备

色差仪:NH310型,深圳市三恩时科技有限公司;

电子鼻:FOX 4000型,法国Alpha MOS公司;

气相色谱:Clarus680型,配Elite-5MS(30 m×0.25 mm,0.25 μm)色谱柱,美国珀金埃尔默公司;

质谱仪:SQ8T型,美国珀金埃尔默公司;

电磁炉:C22-1A812型,浙江苏泊尔股份有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品制备

(1) 红油辣椒制备:参考文献^[13]的方法并进行修改。通过前期试验,确定 $m_{\text{辣椒面}}:V_{\text{菜籽油}}=1:5$ (g/mL),并采用两段式淋油方式。铁锅加热至90℃后加入200 g剪断的二荆条干辣椒进行炒制,分别炒制30,45,60,75,

90 s,粉碎过筛,等量分两次淋入熬制好的菜籽油搅拌均匀,静置自然浸提48 h,取上清油液编号待测。

(2) 样品编号:未经炒制的对照组样品编号为CK,炒制时间30,45,60,75,90 s的样品对应编号依次为A、B、C、D、E。

1.3.2 感官评价 挑选11名熟悉感官评价流程的食品专业学生,相关人员保持一定距离,禁止相互交谈商议。取10 g红油辣椒倒入洁净纯白色小陶瓷碗中,根据表1感官评价标准,评价员分别对红油辣椒的辣味、香气、色泽3个指标进行感官评分,各指标满分为20分。

表1 红油辣椒感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation criteria of red oil pepper

分值	感官指标		
	辣味(20分)	香气(20分)	色泽(20分)
16~20	辣味适中,无异味	辣香味浓郁、香醇,略有糊香味	亮红
11~15	辣度较小或过大,无异味	辣香味较浓郁、香纯,夹杂焦糊味	较亮红
6~10	辣度太小或太大,味感不适	辣香味不浓郁,夹杂焦糊味	暗红
0~5	辣味太小或太大,有异味	辣香味不足,或焦糊味过浓	暗红,有褐变

1.3.3 色差测定 采用色差仪对红油辣椒样本的色泽属性进行量化分析,具体测定样本的亮度(L^*)、红色度(a^*)和黄色度(b^*)3个指标。为确保结果的准确性和可重复性,每个样本均进行3次独立测定。

1.3.4 电子鼻检测

(1) 样品前处理:取2.0 mL红油辣椒上清油液装入10 mL顶空瓶,70℃孵化器内孵化5 min,手动进样,单次进样量1 000 μL/s。

(2) 电子鼻检测条件:载气流量150 mL/s,数据采集时间120 s,每次进样前检测器清洁150 s。每个样品进行10次重复。

1.3.5 GC-MS检测

(1) 萃取条件:取红油辣椒上清油液5 mL装入20 mL顶空瓶。顶空加热温度70℃,萃取时间30 min,进样针温度75℃,传输线温度80℃,萃取时间180 s,干吹120 s,解析10 s,捕集阱保持240 s。

(2) 气相条件:载气为He(>99.999%),恒流流量1.0 mL/min。起始温度40℃,保持3 min,然后以5℃/min升至90℃,最后以10℃/min升至230℃,保留7 min。

(3) 质谱条件:EI离子源,电子轰击能量70 eV,离子源温度230℃;扫描范围45~550(m/z)。

1.3.6 ROAV 红油辣椒中各类挥发性成分的ROAV按文献^[14]的方法进行计算,ROAV>1的挥发性化合物被认为

是对样品整体风味贡献度较大的特征性风味化合物。

1.4 数据处理

采用 Origin 2023 软件进行数据统计分析和绘图;参考 NIST 2011 谱库对挥发性化合物进行定性定量;采用 SPSS 26.0 软件对样品间进行 ANOVA 显著性差异分析,采用 R 语言软件进行主成分分析(principal component analysis, PCA)与偏最小二乘法分析(Partial least squares analysis, PLS-DA)。

2 结果与分析

2.1 感官评价结果

不同炒制时间的辣椒制备的红油辣椒感官评价结果见表 2。在辣味维度上,样品 CK 与样品 A、B、D 并无显著差异,但显著低于样品 C 与样品 E;在香气维度上,所有样品评分均无显著性差异($P>0.05$),样品 A、B、C、D 香气评分略高于样品 CK 与样品 E,其中样品 C 的香气评分最高;在色泽维度上,样品 A、E 显著低于其他样品。感官评价结果表明,不同炒制时间的辣椒对红油辣椒的感官特性有显著影响,尤其是香气维度。综合表明,样品 C 的辣味适中,辣而不燥,香气最为浓郁,色泽最亮红,呈现出最佳的感官品质。原因可能是适宜的炒制时间会使辣椒中的辣椒红素溶出量增加,并形成丰富的香气,导致红油辣椒香气更浓郁,色泽亮红;但炒制时间过长,辣椒会出现焦糊现象,最终降低红油辣椒的感官品质。

2.2 色差分析

不同炒制时间的辣椒制备的红油辣椒色差分析结果见表 3。由表 3 可知, L^* 值总体差异较小, a^* 值、 b^* 值随炒制时间增加呈先增加后降低趋势, a^* 值最大的为样品 C, b^* 值最大的为样品 A,原因可能为随着炒制时间的延长,温度升高,辣椒中辣椒红素、 β -胡萝卜素等红色与黄色色素溶出量增加。辣椒红素、 β -胡萝卜素、玉米黄质等辣椒色素均属于类胡萝卜素^[15],辣椒中类胡萝卜素具有氧化不稳定性,易受氧化而降解,加热等条件会使类胡萝卜素发生

表 2 红油辣椒感官评价结果[†]

样品	辣味	香气	色泽
CK	13.30±2.06 ^c	14.30±2.06	15.90±1.66 ^{abc}
A	13.90±2.73 ^{bc}	14.70±1.89	15.20±1.81 ^{bc}
B	13.60±2.22 ^{bc}	15.20±1.48	16.00±1.33 ^{abc}
C	15.50±1.96 ^{ab}	16.20±1.23	16.70±1.34 ^a
D	12.90±2.13 ^c	15.80±1.48	16.30±1.25 ^{ab}
E	16.10±1.66 ^a	14.00±1.83	14.80±1.55 ^c

[†] 同列字母不同表示组间数值差异性($P<0.05$)。

异构化反应^[16],但炒制时间过长,加热程度超过类胡萝卜素受热氧化降解的条件^[17],从而使辣椒色素溶出量降低,因此随着炒制时间延长,红油辣椒黄度与红度值总体呈先增加后降低趋势。

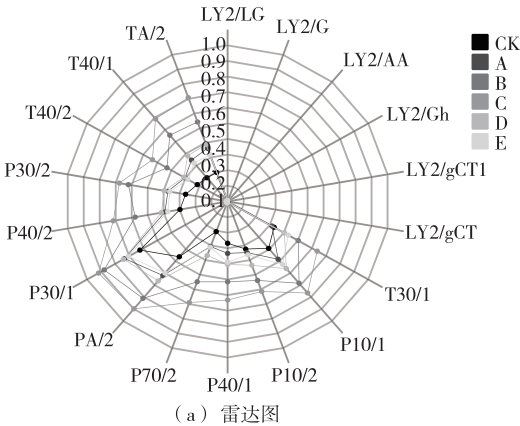
表 3 红油辣椒色差分析结果[†]

样品	L^*	a^*	b^*
CK	49.95±0.04 ^a	6.73±0.02 ^c	6.25±0.10 ^c
A	50.37±0.31 ^a	6.01±0.04 ^d	7.42±0.20 ^a
B	49.43±0.25 ^b	7.01±0.02 ^a	6.97±0.05 ^b
C	49.14±0.44 ^b	7.08±0.12 ^a	7.09±0.11 ^b
D	50.00±0.07 ^a	7.03±0.05 ^a	6.13±0.04 ^c
E	49.93±0.03 ^a	6.84±0.03 ^b	5.89±0.05 ^d

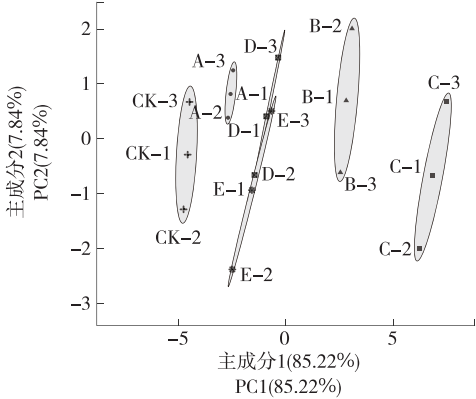
[†] 同列字母不同表示组间数值差异性($P<0.05$)。

2.3 电子鼻检测结果分析

利用电子鼻对红油辣椒的整体气味轮廓进行分析,传感器响应值数据如图 1(a)所示。由图 1(a)可知,所有样品在 LY2/G、LY2/GT、LY2/gCT1、LY2/Gh 和 LY2/AA 传感器上响应值较小,表明氮氧化物、胺类化合物在所有红油辣椒样品中含量很小。炒制后的辣椒制备的红油辣椒在 TA/2、T40/1、T40/2、P30/2、P40/2、P30/1、PA/2、T70/2、



(a) 雷达图



(b) 主成分分析

图 1 红油辣椒电子鼻雷达图与主成分分析

Figure 1 E-nose radar map and principal component analysis of red oil pepper

P40/1、P10/2、P10/1 和 T30/1 传感器的响应值均高于样品 CK,说明经过炒制后,红油辣椒的中极性化合物、芳香族化合物和强氧化性物质含量增加。其次,样品 C 在 12 个传感器中响应值均高于其他样品,推测适宜的炒制时间可以使红油辣椒香气更为浓郁。

利用 PCA 对红油辣椒的整体风味进行分析。如图 1(b)所示,PC1 和 PC2 分别为 85.22% 和 7.84%,累计占总方差的 93.06%。这表明 PCA 模型囊括了红油辣椒样品的所有信息特征,可以有效反映整体风味^[18]。不同炒制时间的辣椒油样本间相互独立,说明炒制改变了红油辣椒的整体香气,且不同炒制时间的红油辣椒的整体香气有显著差异。样品 C 和样品 B 与其他样品尤其是样品 CK

相距较远,处于不同象限,说明炒制 45,60 s 对红油辣椒的整体香气影响最大。样品 D 与样品 E 的距离较近,说明在炒制 75,90 s 时,红油辣椒的香气具有一定相似性。

2.4 GC-MS 检测结果分析

为进一步从微观角度探究不同炒制时间的辣椒对红油辣椒香气的影响,采用 GC-MS 进行检测分析,结果表明:6 种红油辣椒样品中共鉴定出 63 种挥发性化合物,其中样品 CK 18 种,样品 A 23 种,样品 B 26 种,样品 C 26 种,样品 D 27 种,样品 E 27 种。共含有醛类 18 种、醇类 16 种、烃类 9 种、酮类 6 种、酯类 3 种、呋喃类 3 种和其他物质 8 种,6 种红油辣椒样品的挥发性化合物定性定量结果见表 4。

表 4 红油辣椒 GC-MS 定性定量结果[†]

Table 4 Qualitative and quantitative results of red oil pepper by GC-MS

分类	化合物名称	CAS	相对含量/%					
			CK	A	B	C	D	E
醛类	异丁醛	78-84-2	—	—	—	—	—	12.01±3.36
	巴豆醛	123-73-9	—	—	—	0.01±0.01	—	—
	2-甲基庚醛	16630-91-4	4.24±0.75	5.03±0.36	4.24±0.14	6.08±1.38	4.33±1.30	5.85±0.64
	2-甲基丁醛	96-17-3	5.41±0.84	6.16±1.92	6.10±0.93	11.67±1.21	7.10±1.01	9.63±0.68
	4-羟基-3-甲基丁醛	56805-34-6	—	—	—	—	—	0.03±0.01
	反式-2-戊烯醛	1576-87-0	0.52±0.07	0.39±0.09	0.52±0.09	0.40±0.06	0.53±0.08	0.40±0.04
	糠醛	1998-1-1	0.59±0.09	0.51±0.07	0.50±0.07	0.76±0.12	0.62±0.11	0.81±0.21
	庚醛	111-71-7	—	0.19±0.03	0.23±0.04	0.17±0.01	0.32±0.02	0.15±0.03
	3-甲硫基丙醛	3268-49-3	—	—	—	—	0.04±0.01	0.04±0.01
	2-庚醛	57266-86-1	0.68±0.11	0.65±0.18	0.58±0.15	0.43±0.09	0.73±0.17	0.48±0.09
	苯甲醛	100-52-7	—	0.09±0.01	—	0.08±0.02	0.09±0.02	—
	正辛醛	124-13-0	—	0.10±0.01	0.10±0.02	0.09±0.01	0.20±0.03	0.05±0.01
	(E,E)-2,4-庚二烯醛	4313-3-5	0.81±0.14	0.93±0.11	0.99±0.18	0.91±0.24	2.01±0.26	0.63±0.09
	苯乙醛	122-78-1	0.45±0.11	0.60±0.06	0.69±0.09	0.74±0.12	0.65±0.11	0.71±0.03
	反-2-十一烯醛	53448-07-0	—	0.03±0.01	—	0.03±0.01	0.15±0.03	—
	反-2-辛烯醛	2548-87-0	—	—	0.06±0.01	—	—	—
	(Z)-2-癸-1-醛	2497-25-8	—	—	—	—	0.05±0.02	—
	壬醛	124-19-6	0.26±0.06	0.42±0.05	0.47±0.02	0.49±0.03	1.21±0.31	0.28±0.06
醇类	丙烯醇	107-18-6	—	—	—	—	0.11±0.02	—
	2-环丙基乙醇	2566-44-1	1.39±0.19	1.72±0.48	2.07±0.55	2.46±0.75	1.91±0.26	0.82±0.19
	4-甲基环己醇	589-91-3	1.15±0.10	1.17±0.14	1.78±0.29	2.10±0.52	2.12±0.40	—
	正戊醇	71-41-0	—	0.46±0.14	0.56±0.18	0.40±0.08	0.71±0.10	—
	(S)-(+)-1,3-丁二醇	24621-61-2	1.06±0.26	1.59±0.47	4.99±0.93	2.90±0.44	2.44±0.34	2.74±0.80
	4-戊炔-2-醇	2117-11-5	—	—	—	—	—	0.07±0.02
	(R)-(-)-1,3-丁二醇	6290-3-5	4.18±0.66	1.10±0.29	0.86±0.18	1.23±0.32	4.34±1.42	0.82±0.11
	2,3-丁二醇	513-85-9	1.98±0.44	1.13±0.30	—	3.09±0.25	—	—
	(2R,3R)-(-)-2,3-丁二醇	24347-58-8	2.06±0.20	2.55±0.32	2.49±0.41	1.08±0.16	—	2.63±0.54
	(S,S)-(+)-2,3-丁二醇	19132-06-0	—	—	—	—	—	3.17±0.54
	1,3-丁二醇	107-88-0	—	4.96±1.05	—	—	—	—
	反式-2,4-己二烯-1-醇	111-28-4	0.34±0.07	0.40±0.13	0.52±0.07	0.49±0.03	0.60±0.07	—
	糠醇	98-00-0	—	—	—	—	—	0.52±0.11
	十一醇	112-42-5	—	—	—	—	0.04±0.01	—

续表 4

分类	化合物名称	CAS	相对含量/%					
			CK	A	B	C	D	E
醇类	正庚醇	111-70-6	—	—	—	0.02±0.00	—	—
	(Z)-2-辛烯-1-醇	26001-58-1	—	0.10±0.04	0.09±0.02	0.10±0.01	0.13±0.01	0.07±0.00
烃类	一氯甲烷	74-87-3	1.65±0.24	1.89±0.29	2.38±0.53	1.91±0.25	2.99±1.06	3.15±0.44
	1-丙氧基-1-丙烯	3424-89-3	—	—	—	—	—	1.24±0.38
	2,4-二甲基己烷	589-43-5	2.50±0.19	2.74±0.86	2.89±0.51	2.55±0.25	3.55±0.48	2.25±0.17
	二氢月桂烯	2436-90-0	—	—	—	—	0.08±0.03	—
	4-乙酰环己烯	7353-76-6	—	—	—	—	—	0.05±0.01
	1-异丙基-1-环己烯	4292-04-0	—	—	—	0.07±0.01	—	—
	2,4-辛二烯	13643-08-8	0.26±0.01	0.33±0.03	0.36±0.09	0.29±0.01	0.45±0.12	0.24±0.04
	3-乙基-2-甲基-1,3-己二烯	61142-36-7	—	—	—	—	0.14±0.01	—
	亚乙基环庚烷	10494-87-8	—	—	0.07±0.02	0.09±0.03	—	0.06±0.01
	3-己烯-2-酮	763-93-9	—	—	—	0.05±0.01	0.09±0.03	—
酮类	4-环戊烯-1,3-二酮	930-60-9	0.06±0.01	0.04±0.01	0.06±0.00	0.05±0.01	0.04±0.00	0.07±0.02
	正戊基 2-呋喃酮	14360-50-0	—	—	0.12±0.01	0.19±0.03	—	0.24±0.03
	(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮	30086-02-3	—	—	0.05±0.01	—	—	—
	3-乙烯基环己酮	1740-63-2	—	0.05±0.01	0.12±0.02	—	—	0.05±0.01
	2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4(H)-吡喃-4-酮	28564-83-2	—	—	—	—	—	0.21±0.04
	亚硝酸乙酯	109-95-5	11.75±0.72	—	—	—	—	19.27±1.20
酯类	甲酸甲酯	107-31-3	—	18.24±1.96	18.29±5.14	12.64±2.88	16.19±3.14	—
	L-去亮氨酸甲酯	21754-55-2	—	0.12±0.02	0.04±0.01	—	—	0.12±0.03
	2-戊酰呋喃	3194-17-0	—	—	—	—	0.15±0.02	—
呋喃	2-乙烯基呋喃	1487-18-9	0.07±0.01	0.06±0.01	0.07±0.01	0.12±0.02	0.09±0.02	0.14±0.03
	2-戊基呋喃	3777-69-3	—	0.12±0.01	0.14±0.04	0.07±0.01	0.15±0.02	0.08±0.02
	其他							
其他	二甲基硫醚	75-18-3	40.92±2.32	39.93±3.08	39.13±5.30	39.53±5.68	35.76±5.12	20.72±4.38
	N-甲基吡咯	96-54-8	0.14±0.00	0.18±0.01	0.16±0.00	0.13±0.01	0.15±0.02	0.18±0.07
	六氟苯	592-56-3	—	—	—	0.04±0.00	—	—
	异己酸	646-07-1	—	—	—	—	—	0.64±0.10
	二甲胺	124-40-3	—	—	—	—	1.72±0.27	—
	1,2,4-苯三甲酸	54699-35-3	—	—	—	—	0.07±0.01	—
	对二甲苯	106-42-3	—	0.06±0.01	0.10±0.02	0.12±0.02	0.08±0.02	0.18±0.02
	3-乙酰基吡咯	1072-82-8	—	0.01±0.00	0.01±0.00	0.08±0.01	0.07±0.01	—

† “—”表示该化合物未检测到。

不同炒制时间的辣椒制备的红油辣椒的挥发性化合物分类数目与占比差异如图 2 所示。由图 2(a)可知,醛类是所有红油辣椒样品中检出数目最多的化合物,其次为醇类。与样品 CK 相比,辣椒经炒制后制备的红油辣椒挥发性化合物尤其是醛类化合物的数量更多,说明干辣椒炒制步骤为红油辣椒贡献了较多的醛类物质。由图 2(b)可知,醛类、醇类、酯类是红油辣椒中相对含量较高的挥发性化合物。醛类化合物赋予红油辣椒坚果气味与油脂气味,被认为是红油辣椒整体香气的重要主体成分^[19],主要来源于植物油中油酸、亚油酸等不饱和脂肪酸的氧化降解、氨基酸的 Strecker 降解反应以及辣椒原料中醛类物质的迁移等^[20-21]。2-甲基丁醛是 6 种红油辣椒中含量最

高的醛类化合物,在炒制后的红油辣椒样品中其含量高于样品 CK,且在样品 E 中最高。2-甲基丁醛属于支链醛,可能来源于异亮氨酸的转氨作用^[22],在低浓度下具有可香气,浓度过高时会产生强烈刺激性风味^[23]。醇类物质一般由脂质氧化、氨基酸代谢等途径产生^[24],不饱和醇具有较低的阈值,对红油辣椒的整体香气贡献较大。酯类化合物主要由酯化反应与不饱和脂肪酸氧化降解产生^[25],通常具有花果香气,也是红油辣椒香气的重要组成部分。在不同炒制时间的辣椒制备的红油辣椒中亚硝酸乙酯与甲酸甲酯是含量较高的酯类物质,但其阈值较大,对红油辣椒的整体香气贡献较小。其次,在所有红油辣椒样品中检测到了高含量的二甲基硫醚,二甲基硫醚被

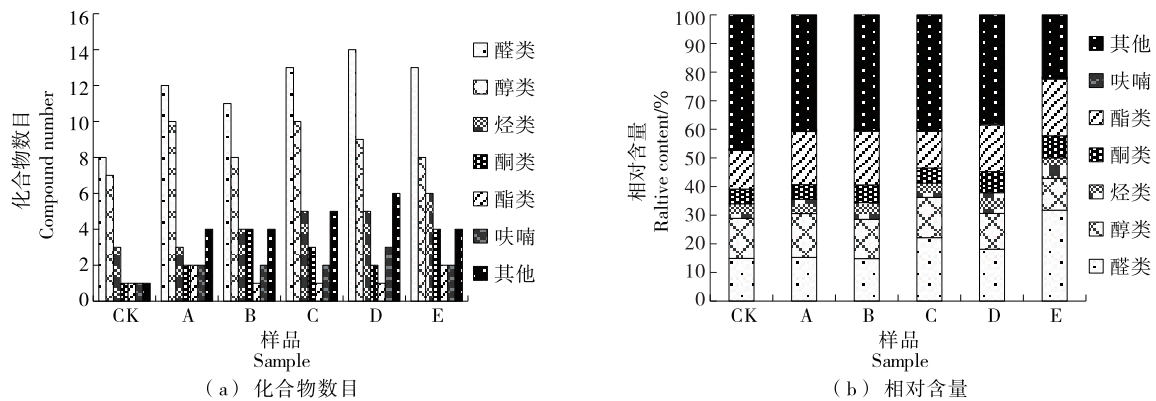


图2 红油辣椒挥发性化合物分类数目及相对含量占比

Figure 2 Number and proportion of volatile compounds in red oil pepper

认为是辣椒油中的关键差异标志物^[26],由蛋氨酸诱导的美拉德反应产生,其阈值较低^[27],具有洋葱味、大蒜味等辛辣香气,是辣椒油辛辣气味的来源之一。

2.5 关键化合物分析

为深入探究各挥发性化合物对红油辣椒整体香气的贡献程度,根据每种化合物在水中的气味阈值计算其ROAV。一般认为 $ROAV \geq 1$ 的风味物质为关键性风味成分, $0.1 \leq ROAV < 1$ 的物质对整体风味起修饰作用^[28]。分析发现,二甲基硫醚阈值较低且含量较高,说明对红油辣椒中的挥发性风味物质具有较大的贡献作用,因此设二甲基硫醚为红油辣椒中贡献最大的关键风味物质,即

ROAV为100。红油辣椒整体香气主要由油脂香、可可香、洋葱香构成。由表5可知,共有5种化合物的 $ROAV > 1$,苯乙醛是样品C与样品E共有的关键挥发性物质,具有可可香气,苯乙醛由苯丙氨酸的Strecker降解形成,是苯丙氨酸的典型降解产物^[29],被证实是辣椒油中的关键挥发性物质^[30]。与其他红油辣椒样品相比,样品E的关键挥发性物质数量最多,具有刺激性气味的异丁醛对样品E的贡献较大,异丁醛被证实是鹰嘴桃油的主要风味化合物^[31],在样品E中其ROAV值仅次于二甲基硫醚,推测过长的炒制时间可能会增加刺激性气味对红油辣椒的贡献。

表5 红油辣椒挥发性物质ROAV分析[†]

Table 5 ROAV analysis of volatile substances of red oil pepper

化合物名称	阈值/ ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	ROAV值						风味描述
		CK	A	B	C	D	E	
异丁醛	0.001	—	—	—	—	—	72.31	刺激气味
(E,E)-2,4-庚二烯醛	0.057	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	4.436	脂香、青香、果香
苯乙醛	0.001 7	0.869	0.948	0.896	1.304	0.985	2.311	巧克力、可可味
壬醛	0.003 1	0.261	0.309	0.377	0.488	0.932	0.562	脂香、甜香
二甲基硫醚	0.001	100	100	100	100	100	100	洋葱香
异己酸	0.001 9	—	—	—	—	—	1.543	似红糖味、花香味

† “—”表示未确定该化合物气味。

2.6 偏最小二乘判别分析

为进一步探究不同炒制时间的辣椒对红油辣椒香气化合物的影响,以GC-MS鉴定出的63种香气化合物为因变量,以不同炒制时间制备的红油辣椒样品为自变量,进行PLS-DA。如图3(a)所示,不同炒制时间的辣椒制备的红油辣椒样品均得到较好分离,说明不同炒制时间的辣椒制备的红油辣椒风味具有显著差异。采用200次随机重分类进行建模,结果如图3(b)所示, R^2 为0.139 2, Q^2 为-1.002 1,表明该模型稳定可靠,不存在过拟合现象,模型能较好地预测红油辣椒整体风

味情况。

变量投影重要性(variable importantfor the projection, VIP)可以量化PLS-DA的每个变量对分类的贡献,一般来说,VIP分值 >1.0 表示在判别过程中对模型贡献具有重要作用^[32]。共筛选出25种VIP >1.0 的差异性香气物质,包括5种醛类、9种醇类、3种烃类、3种酮类、2种呋喃类、3种其他类,如:对二甲苯、2-戊基呋喃、2,3-丁二醇、4-戊炔-2-醇、糠醇、庚醛等。2,3-丁二醇是红油辣椒样品中VIP值最高的差异香气物质,具有洋葱香气。Cecchi等^[33]研究表明,辣椒橄榄油中2,3-丁二醇含量的显著变化可

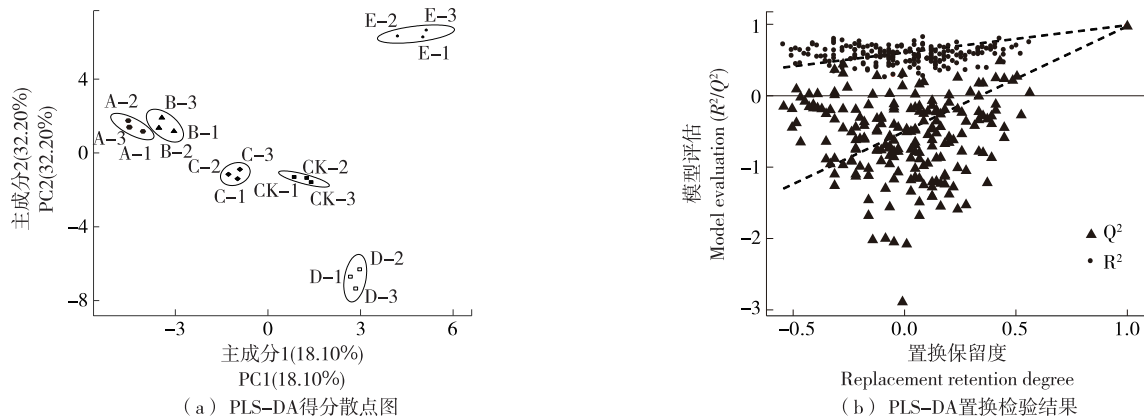


图3 红油辣椒 PLS-DA 模型的散点图和排列检验结果
Figure 3 Scatter plot and permutation test results of the PLS-DA model of red oil pepper

能与辣椒粉的干燥程度有关。

为了更直观区分差异性香气物质(VIP>1.0)在不同炒制时间辣椒制备的红油辣椒中的变化,根据筛选出的25种差异性香气物质的相对含量绘制分层聚类热图,结果如图4所示。分层聚类分析直观地将25种差异挥发性风味物质分开,表明通过25种差异香气物质可以有效区分不同炒制时间的辣椒制备的红油辣椒。样品D和样品

E与其他红油辣椒样品的差异香气物质组成具有明显不同,如具有氨臭味的二甲胺以及具有草木香味的反式-2,4-己二烯-1-醇在样品D中浓度高于其他样品,具有刺激性气味的异丁醛、具有黄油气味的(2R,3R)-(-)-2,3-丁二醇在样品E中的浓度高于其他样品,这些化合物可作为鉴别不同炒制时间的辣椒制备的红油辣椒的潜在标志物。

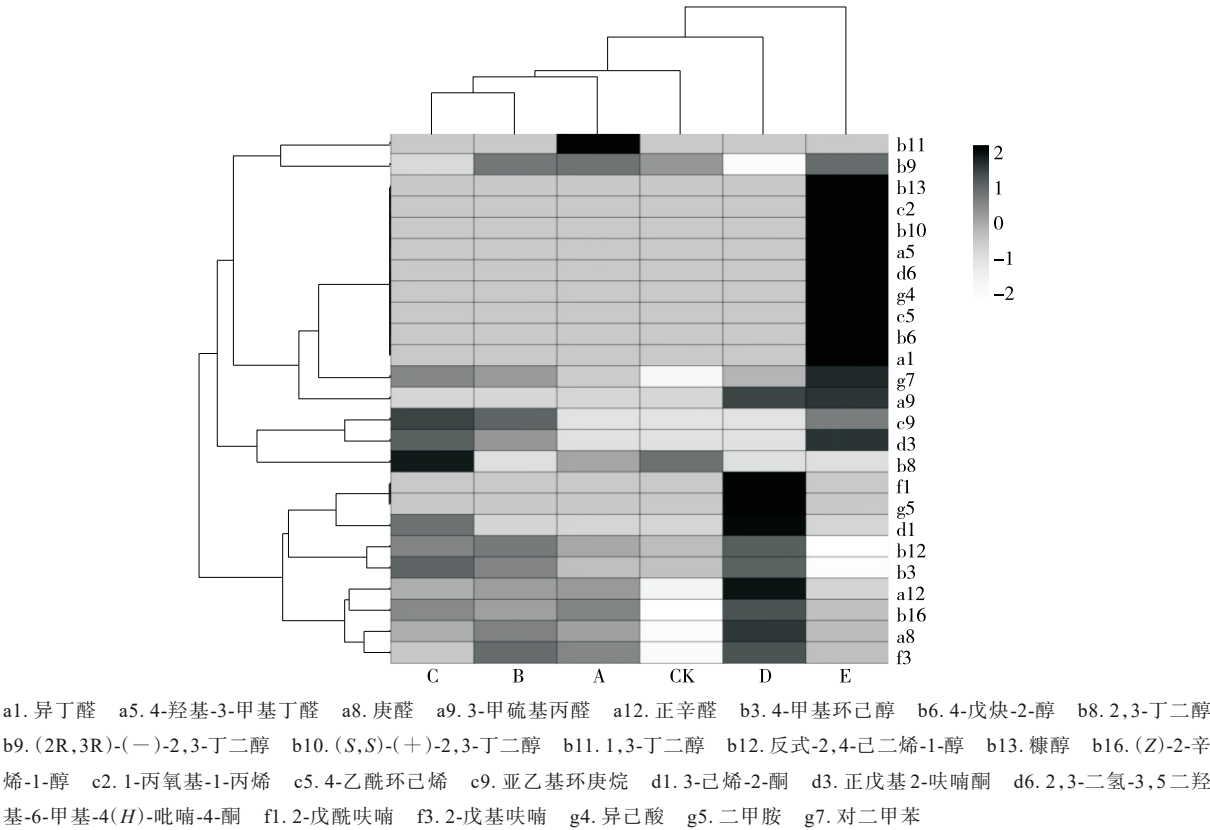


图4 红油辣椒差异性香气物质聚类分析热图
Figure 4 Heatmap for clustering of differential aroma substances in red oil pepper

3 结论

炒制时间对红油辣椒的感官特性有显著影响,尤其是香气维度。经电子鼻检测,不同炒制时间的辣椒制备的红油辣椒其整体风味具有明显差异,炒制 60 s 的辣椒制备的红油辣椒在 12 个传感器中的响应值均高于其他样品。经气相色谱—质谱联用检测,不同炒制时间的辣椒制备的红油辣椒共鉴定出 63 种挥发性化合物,醛类为红油辣椒的主要挥发性物质。通过相对气味活度值分析,红油辣椒整体香气主要由油脂香、可可香、洋葱香构成,二甲基硫醚、苯乙醛、异丁醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛、异己酸是红油辣椒的关键挥发性物质。通过偏最小二乘法分析筛选出 25 种差异挥发性化合物,醇类、醛类物质是主要的差异挥发性化合物,这些化合物可作为鉴别不同炒制时间的辣椒制备的红油辣椒的潜在标志物。综合感官评价与挥发性风味物质检测结果,选择炒制 60 s 的辣椒制备的红油辣椒品质较佳,可直接用于后续的生产加工。然而,炒制时间如何影响干辣椒的挥发性物质导致最终红油辣椒的风味差异尚不明确,因此后续可进一步对红油辣椒的关键风味化合物的影响途径进行研究。

参考文献

- [1] OU L J, LIU Z B, ZHANG Z Q, et al. Noncoding and coding transcriptome analysis reveals the regulation roles of long noncoding RNAs in fruit development of hot pepper (*Capsicum annuum* L.) [J]. Plant Growth Regulation, 2017, 83(1): 141-156.
- [2] ASHAOLU T J, REALE A. A holistic review on euro-asian lactic acid bacteria fermented cereals and vegetables[J]. Microorganisms, 2020, 8(8): 1 176.
- [3] 范智义, 王俏君, 邓维琴, 等. 辣椒素类物质辣味的研究进展 [J]. 食品科学, 2023, 44(7): 363-371.
FAN Z Y, WANG Q J, DENG W Q, et al. Research progress on the pungency of capsaicinoids[J]. Food Science, 2023, 44(7): 363-371.
- [4] PLAGEMANN I, ZELENKA K, KRINGS U, et al. Volatile flavours in raw egg yolk of hens fed on different diets[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2011, 91(11): 2 061-2 065.
- [5] 黄英, 杨莉, 贾洪峰, 等. 炒制方式对火锅底料中辣椒素类物质含量的影响[J]. 食品工业, 2021, 42(4): 133-137.
HUANG Y, YANG L, JIA H F, et al. Effect of stir-frying methods on the content of capsaicinoids in hot pot seasoning[J]. The Food Industry, 2021, 42(4): 133-137.
- [6] 杨芳, 邓琳琳, 贾洪峰, 等. 辣椒面颗粒度对辣椒油理化性质和挥发性风味物质的影响[J]. 食品与机械, 2023, 39(10): 157-165.
YANG 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.
- [7] 何新超, 马文婧, 钟剑, 等. 基于主成分分析评价辣椒品种对辣椒油香气品质的影响[J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(1): 254-265.
HE X C, MA W Q, ZHONG J, et al. Evaluation of effects of chili pepper varieties on volatile aroma components of chili oil based on principal component analysis[J]. China Food Additives, 2024, 35(1): 254-265.
- [8] 叶梦宇, 王嘉昊, 徐怀德, 等. 油温对辣椒油品质的影响[J]. 中国调味品, 2022, 47(1): 124-127, 132.
YE M J, WANG J H, XU X D, et al. Effect of oil temperature on the quality of chili oil[J]. China Condiment, 2022, 47(1): 124-127, 132.
- [9] 陈丽兰, 陈祖明, 袁灿. 气相色谱—离子迁移谱结合化学计量法分析不同炒制时间对郫县豆瓣酱挥发性化合物的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(14): 283-290.
CHEN L L, CHEN Z M, YUAN C. Effect of cooking time on volatile compounds of Pixian bean paste determined by gas chromatography-ion mobility spectrometry combined with chemometrics[J]. Food Science, 2023, 44(14): 283-290.
- [10] CHEN H, HUO D X, ZHANG J L. Gas recognition in e-nose system: a review[J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 2022, 16(2): 169-184.
- [11] XU J Y, ZHANG Y, YAN F, et al. Monitoring changes in the volatile compounds of tea made from summer tea leaves by GC-IMS and HS-SPME-GC-MS[J]. Foods, 2023, 12(1): 146.
- [12] 薛东, 易宇文, 夏翠群, 等. 基于电子鼻和气相色谱—质谱法结合相对气味活度值分析植物油对红油辣椒气味的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(22): 241-251.
XUE D, YI Y W, XIA C Q, et al. Analysis of the effects of plant oil on the odor of red pepper based on electronic nose and gas chromatography-mass spectrometry combined with relative odor activity value[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(22): 241-251.
- [13] 冯勇. 辣椒油制作规范和运用探讨[J]. 中国调味品, 2016, 41(3): 114-117.
FENG Y. Discussion on the making standard and application of pepper oil[J]. China Condiment, 2016, 41(3): 114-117.
- [14] XIONG Y L, GUAN J, WU B Z, et al. Exploring the profile contributions in meyeromyza guilliermondii YB4 under different NaCl concentrations using GC-MS combined with GC-IMS and an electronic nose[J]. Molecules, 2023, 28(19): 6 979.
- [15] 修伟业, 黎晨晨, 遇世友, 等. 类胡萝卜素生物学功能及其生物利用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(10): 406-415.
XIU W Y, LI C C, YU S Y, et al. Research progress on the biological function and bioavailability improvement of carotenoids[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(10): 406-415.
- [16] XIAO Y D, HUANG W Y, LI D J, et al. Thermal degradation kinetics of all-trans and cis-carotenoids in a light-induced

- model system[J]. Food Chemistry, 2018, 239: 360-368.
- [17] 袁小钧. 不同品种干辣椒在火锅底料制作过程中呈色、辣、香味物质差异研究[D]. 自贡: 四川轻化工大学, 2022: 26.
- YUAN X J. Study on the difference of color, spicy and aroma of different varieties of dry pepper in the process of making hot pot bottom material[D]. Zigong: Sichuan University of Science & Engineering, 2022: 26.
- [18] 白洁, 蒋华彬, 陶国琴, 等. 基于 SPME-GC-MS 和 PCA 分析气流膨化处理对马铃薯方便粥香气成分的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(14): 217-224.
- BAI J, JIANG H B, TAO G Q, et al. Analysis of the aromatic components of potato flour incorporated instant congee processed by explosion puffing by combined use of SPME-GC-MS and PCA[J]. Food Science, 2020, 41(14): 217-224.
- [19] 尹思琪, 陶秀梅, 刘昌树, 等. 菜籽油基辣椒油中挥发性成分的组成及来源分析[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(3): 359-367.
- YIN S Q, TAO X M, LIU C S, et al. Analysis on the composition and source of volatile components of rapeseed oil-based chili oil[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(3): 359-367.
- [20] 余进, 曾艳, 白艳, 等. 香气活性值结合气相色谱—嗅闻技术分析辣椒油的关键挥发性风味化合物[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(1): 286-292.
- YU J, ZENG Y, BAI Y, et al. Analysis of key volatile flavour compounds in chilli oil by odor activity value combined with gas chromatography-olfactometry[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(1): 286-292.
- [21] JIA X, ZHOU Q, HUANG D, et al. Insight into the comparison of key aroma-active compounds between camellia oils from different processing technology[J]. Food Chemistry, 2024, 430: 137090.
- [22] SMIT B A, ENGELS W J M, SMIT G. Branched chain aldehydes: production and breakdown pathways and relevance for flavour in foods[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2009, 81(6): 987-999.
- [23] 丁筑红, 王知松, 郑文宇, 等. 不同包装条件干辣椒风味化合物的主成分分析[J]. 中国食品学报, 2014, 14(1): 285-292.
- DING Z H, WANG Z S, ZHENG W Y, et al. Principal component analysis of volatile flavo compounds of dried peppers with different packaging[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2014, 14(1): 285-292.
- [24] HE J H, WU X H, YU Z L. Microwave pretreatment of camellia (*Camellia oleifera* Abel.) seeds: effect on oil flavor[J]. Food Chemistry, 2021, 364: 130388.
- [25] 彭丝兰, 刘思思, 易有金, 等. 基于气相色谱—离子迁移谱技术分析不同预处理技术对压榨山茶油风味的影响[J]. 中国油脂, 2024, 49(8): 48-55.
- PENG S L, LIU S S, YI Y J, et al. Analysis of effect of different pretreatment technology on the flavor of pressed oil-tea camellia seed oil based on gas chromatography-ion mobility spectroscopy[J]. China Oils and Fats, 2024, 49(8): 48-55.
- [26] 杨芳, 袁海彬, 贾洪锋, 等. 基于气相色谱—离子迁移谱结合多元统计方法分析辣椒品种对辣椒油理化性质和风味物质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(19): 319-328.
- YANG F, YUAN H B, JIA H F, et al. Effects of chili varieties on physicochemical properties and flavor compounds of chili oil based on GC-IMS combined with multivariate statistical methods[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(19): 319-328.
- [27] LI Q, HU H Y, TAN X Y, et al. Effects of storage in an active and spontaneous controlled O₂/CO₂ atmosphere on volatile flavor components and the microbiome of truffles[J]. ACS Omega, 2024, 9(8): 9 331-9 347.
- [28] 高子武, 何金华, 侯馨宁, 等. 顶空—气相色谱—离子迁移谱结合多元统计学解析烤鸭坯冻融次数对烤鸭中香气物质的影响规律[J]. 食品科学, 2025, 46(6): 183-191.
- GAO Z W, HE J H, HOU X N, et al. Effect of varying freeze-thaw cycles on volatile compounds in roast duck: an investigation using headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry combined with multivariate statistical analysis[J]. Food Science, 2025, 46(6): 183-191.
- [29] ZAMORA R, LEÓN M M, HIDALGO F J. Oxidative versus non-oxidative decarboxylation of amino acids: conditions for the preferential formation of either strecker aldehydes or amines in amino acid/lipid-derived reactive carbonyl model systems[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(36): 8 037-8 043.
- [30] 张峰轶, 王浩文, 田浩, 等. 不同温度烫制辣椒油的风味研究[J/OL]. 中国油脂. (2024-02-20) [2024-04-28]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230686>.
- ZHANG F Y, WANG H W, TIAN H, et al. Study on flavor of hot pepper oil at different temperatures[J/OL]. China Oils and Fats. (2024-02-20) [2024-04-28]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230686>.
- [31] 马路凯, 崔芸, 毛国兴, 等. 鹰嘴桃仁油的品质及挥发性成分研究[J]. 中国油脂, 2021, 46(10): 104-109.
- MA L K, CUI W, MAO G X, et al. Quality and volatile components of olecranon peach kernel oil[J]. China Oils and Fats, 2021, 46(10): 104-109.
- [32] AZIZAN A K, BAHARUM N S, RESSOM W H, et al. GC-MS analysis and PLS-DA validation of the trimethyl silyl-derivatization techniques[J]. American Journal of Applied Sciences, 2012, 9(7): 1 124-1 136.
- [33] CECCHI L, BALLI D, URCIUOLI S, et al. Co-milling of sound olives with fresh chili peppers improves the volatile compound, capsaicinoid and sensory profiles of flavoured olive oil with respect to the typical infusion[J]. Food Chemistry, 2023, 404: 134696.