

青辣椒酱熬制过程中挥发性风味物质的变化

张露^{1,2}, 王修俊^{1,2,3*}, 陈颜红^{1,2}, 胡荣念^{1,2}, 李佳敏^{1,2}, 许九红^{1,2}

(¹ 贵州大学酿酒与食品工程学院 贵阳 550025

² 贵州省发酵工程与生物制药重点实验室 贵阳 550025

³ 贵州大学辣椒产业技术研究院 贵阳 550025)

摘要 为探究青辣椒酱熬制过程中挥发性风味物质的变化,通过气相色谱-质谱联用技术(GC-MS)对其挥发性风味物质的种类及含量进行分析,并通过主成分分析和层级聚类分析判别各阶段挥发性风味物质的差异,最后利用正交偏最小二乘法判别分析结合热图统计分析确定熬制过程对青辣椒酱风味差异性具有重要影响的特征性风味物质。结果表明:从新鲜青椒以及熬制温度分别为 50,60,80,100 ℃ 的青辣椒酱中分别检出 54,52,57,53,71 种挥发性风味物质。由主成分分析和聚类分析得出熬制终温的升高对青辣椒酱挥发性风味特征的形成具有正向影响。将筛选出来的挥发性风味物质绘制成热图并通过聚类分析得出:随着熬制终温的升高,各阶段青辣椒酱的挥发性风味特征明显丰富于新鲜青椒,尤其是醇类、酮类、醛类物质含量显著增加($P<0.05$),其中芳樟醇、4-萜烯醇、1-戊醇、罗勒烯、桉烯、1-辛烯-3-酮等可作为熬制温度 100 ℃ 时区分其它阶段的关键差异物质。本研究结果可为后续研究青辣椒酱风味形成机理、风味品质调控等提供理论依据。

关键词 青辣椒酱; 熬制; 气相色谱-质谱法; 挥发性风味物质; 主成分分析

文章编号 1009-7848(2024)11-0335-13 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.11.031

辣椒 (*Capsicum annuum* L.) 属于茄科辣椒属,是一年或多年生茄科草本植物,原产于墨西哥等中、南美洲地区,目前种植范围已遍布全球^[1]。维 C 含量为蔬菜之冠的青辣椒中富含叶绿素、碳水化合物、蛋白质、有机酸、类胡萝卜素、辣椒碱以及钙、磷等生命必需营养物质^[2-4],因其色泽鲜艳、果肉脆嫩且具有独特芳香滋味,可以增强食欲而深受消费者喜爱^[5]。贵州省是全国优质辣椒的主产区,拥有唯一的国家级辣椒市场^[6]。2022 年贵州省辣椒种植面积 333 335 hm²,产销规模继续位列全国首位^[7]。由于青辣椒的加工技术及贮藏技术均未能跟进青辣椒产量激增的速度,导致青辣椒价格大幅下降,出现增产不增收的现象。同时,如果暂缓采摘又会降低后续的青椒结果率,也会对辣椒产业发展带来不利影响。青辣椒制品的开发成为亟待解决的关键问题。

青辣椒酱的挥发性风味物质对其整体风味的形成具有决定性作用。在熬制过程中,其风味物质种类和含量不断变化。与红辣椒品种相比,青辣椒含有更丰富的挥发性成分^[8]。目前,辣椒的风味分析主要集中在对不同品种辣椒的自然发酵辣椒酱^[9-10]、糟辣椒、辣椒油挥发性成分进行对比分析方面^[11-15],而针对青辣椒酱熬制过程中风味物质的变化鲜有涉及,特别是对于构成青辣椒酱独特风味的关键成分尚不明确。探寻产生青辣椒酱独特风味的重要物质,对于青辣椒酱品质的进一步改善具有重要意义。

本文采用 GC-MS 技术分析青辣椒酱熬制过程中的挥发性风味物质,结合主成分分析和层级聚类分析判别熬制过程中挥发性风味成分的差异,利用正交偏最小二乘法判别分析结合热图统计分析筛选出导致青辣椒酱差异性的特征挥发性风味物质,以期为青辣椒酱加工技术改进及风味的精准控制提供理论参考。

收稿日期: 2023-11-19

基金项目: 贵州省科技计划重点项目(黔合科支撑[2022]重点 010 号);贵州省朝天椒产业集群建设项目(黔农财[2022]89 号);贵州省科技平台项目(黔科合平台人才[2022]2102 号)

第一作者: 张露,女,硕士生

通信作者: 王修俊 E-mail: 775298123@qq.com

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

试验所用青线椒、食用油、调味品全部购买于贵州省贵阳市花溪区沃尔玛超市。

95%乙醇(分析纯级),天津市富宇精细化工有限公司;盐酸(分析纯级),磺基水杨酸,成都金山化学试剂有限公司;正己烷(分析纯级),天津大茂化学试剂厂;碘化钾(分析纯级),天津市北联精细化学品开发有限公司;混合氨基酸标准品,日本和光药业株式会社。

1.2 主要设备与仪器

XHF-D 高速匀浆机,宁波新芝生物科技股份有限公司;PHS-3C pH 计,上海鸿盖仪器有限公司;FA2002B 分析天平,上海越平科学仪器有限公司;SIGMA2-16K 高速离心机,德国西格玛公司;50/30 μm CAR/PDMS/DVB 手动固相萃取装置,美国 Supelco 公司;SCIONSQ-456-GC 气相色谱-质谱联用仪,美国布鲁克公司。

1.3 试验方法

1.3.1 青辣椒酱加工工艺流程 青辣椒酱加工工艺流程如图 1 所示。

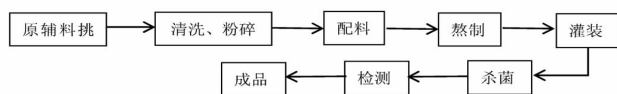


图 1 青辣椒酱工艺流程图

Fig.1 Green pepper sauce process flow chart

在熬制容器中依次加入食用油、已搅碎的青辣椒(包括姜、蒜等)和食盐等香辛料,然后进行加热熬制,并不停搅拌。熬制过程中控制以下工艺条件:油料比、食盐添加量、初始油温、升温速度,熬制终温分别控制为 50,60,80,100 $^{\circ}\text{C}$ 。将未进行加热熬制的新鲜青辣椒酱(添加相同配料)作为对照。

1.3.2 青辣椒酱挥发性风味成分测定 将青辣椒酱样品匀浆粉碎后,称取 5.0 g 青辣椒酱样品置于 20 mL 顶空瓶中,将老化后的 50/30 μm CAR/PDMS/DVB 萃取头插入样品瓶顶空部分,于 60 $^{\circ}\text{C}$ 吸附 30 min,吸附后的萃取头取出后插入气相色谱进样口,于 250 $^{\circ}\text{C}$ 热解析 3 min,同时启动仪器采集数据。

1.3.3 色谱条件 色谱柱为 DB-Wax, (30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μm) 毛细管柱;载气为高纯 He (99.999%);恒流,载气流速 1.0 mL/min;升温程序,初始 40 $^{\circ}\text{C}$,保持 3 min,10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温至 230

$^{\circ}\text{C}$,保持 5 min;汽化室温度 250 $^{\circ}\text{C}$ 。

离子源为 EI 源;发射电流 1.0 mA;电子能量 70 eV;界面温度 250 $^{\circ}\text{C}$;离子源温度 200 $^{\circ}\text{C}$;检测电压 2 000 V。

对总离子流图中的各峰经质谱计算机数据系统检索及核对 Nist 14 和 Wiley 275 标准质谱图,以相似指数大于 800 为定性依据,确定挥发性化学成分的种类,用峰面积归一化法测定各化学成分的相对含量。每组试验做 3 个平行,计算平均值和标准偏差,数据以平均值 \pm 标准差的形式表示。

1.4 数据分析

采用 Excel 2019、SPSS 26.0 进行统计分析,利用 SIMCA-9、TBtools 绘制试验数据图形。

2 结果与分析

2.1 青辣椒酱熬制过程中挥发性风味成分组成及含量分析

青辣椒酱的挥发性风味物质总相对含量变化与种类数变化见表 1。由表 1 可知,5 个阶段中挥发性成分相对含量较高的物质为烯烃类、醇类、醛类,其中主要包括月桂烯、罗勒烯、桉烯、 α -侧柏烯、茴香烯、姜烯、3-己烯-1-醇、芳樟醇、4-萜烯醇、壬醛、2-己烯醛、2-甲基十三烷、2-甲基四癸烷、水杨酸甲酯等。新鲜青椒共检出 54 种挥发性风味物质,相较于其它阶段的挥发性风味物质具有较大差异,主要体现于烷烃类含量较高,烯烃类含量较低;熬制温度 50 $^{\circ}\text{C}$ 检出 52 种,熬制温度 60 $^{\circ}\text{C}$ 检出 57 种,熬制温度 80 $^{\circ}\text{C}$ 检出 53 种,熬制温度从 50 $^{\circ}\text{C}$ 到 80 $^{\circ}\text{C}$ 阶段的挥发性风味物质数量变化平缓,且各类风味物质含量具有一定变化趋势,而总含量差异较小;而最佳熬制温度 100 $^{\circ}\text{C}$ 阶段检出 71 种挥发性成分,相较于新鲜青椒及其它熬制阶段含有的挥发性风味物质数量增多,风味较为丰富,说明熬制至 100 $^{\circ}\text{C}$ 可使青辣椒酱产生新的挥发性风味成分。

青辣椒酱挥发性风味物质 GC-MS 检测结果见表 2。由表 2 可知,不同阶段下青辣椒酱的醇类挥发性风味物质种类和含量存在一定差异,部分醇类物质随熬制终温升高而增加,主要原因是在加工中使用的食用油在高温条件下经氧化分解生成醇类物质,并且青辣椒原料在加热条件下由美

表 1 青辣椒酱熬制过程中挥发性风味物质类别总相对含量与种类数变化

Table 1 Changes of total relative content and species number of volatile flavor compounds in the boiling process of green pepper

	新鲜青椒	熬制温度/°C			
		50	60	80	100
醇类数量/种	6	8	8	9	12
醇类相对含量/%	24.639	27.374	28.738	31.283	38.792
酮类数量/种	0	3	3	3	5
酮类相对含量/%	0.000	0.348	1.400	2.256	1.762
醛类数量/种	8	15	16	15	19
醛类相对含量/%	9.721	10.544	8.972	12.489	11.538
醚类数量/种	4	1	1	1	1
醚类相对含量/%	1.121	0.098	0.107	0.117	0.076
酸类数量/种	4	4	4	3	3
酸类相对含量/%	4.791	3.497	2.982	0.301	0.235
酚类数量/种	3	4	4	2	3
酚类相对含量/%	0.503	0.231	0.256	0.293	0.228
烷烃类数量/种	4	1	1	0	3
烷烃类相对含量/%	20.702	4.121	0.090	0.000	0.695
烯烃类数量/种	11	10	11	11	14
烯烃类相对含量/%	26.908	50.710	49.162	48.189	41.262
酯类数量/种	4	4	5	4	3
酯类相对含量/%	4.311	1.884	4.310	1.193	0.757
芳香族类数量/种	4	0	0	0	0
芳香族相对含量/%	1.744	0.000	0.000	0.000	0.000
其它类数量/种	6	2	4	5	8
其它类相对含量/%	5.593	0.548	3.984	3.880	3.425
总计数量/种	54	52	57	53	71
总计相对含量/%	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000

拉德反应生成具有辣椒清香味的羰基化合物,也会还原形成醇类物质^[16]。醇类挥发性化合物主要是源于脂肪的氧化分解或羰基化合物还原而形成^[17]。醇类不仅是芳香酯类前体物质,还能够抑制腐败微生物生长。新鲜青辣椒中天然存在的 3-己烯-1-醇含量较高,主要呈新鲜草叶的青香味以及苹果香味,且还含有 1-戊烯-3-醇、1-十七烷醇等其它阶段没有的醇类物质。随着熬制温度升高各阶段中芳樟醇相对含量最高、增长最快,主要呈铃兰花、绿茶香、柑橘类的香气以及木质香调。此外,香叶醇、橙花醇、4-萜烯醇等具有令人愉快的玫瑰花和柑橘类香气,可能与加入的香辛辅料有关^[18]。

醛类物质的阈值较低,对青辣椒酱产品风味的形成具有一定的贡献作用。青辣椒中所含的氨基酸、还原糖类和加工所用的食用油及其裂变产

物在高温条件下会发生美拉德反应和 Strecker 降解反应,生成青辣椒酱醛类挥发性物质^[19-20]。由表 1 可知,青辣椒酱中主要检测到己醛、壬醛、2-己烯醛、苯甲醛、辛醛等醛类化合物,其中己醛被认为是不愉快的气味,是不饱和脂肪酸过氧化物降解的主要产物^[21],然而其含量较低时会呈现出清香、木香等气味,己醛含量随熬制终温的升高呈下降变化,这有利于青辣椒酱良好风味的形成。壬醛具有花香和柑橘香,2-己烯醛具有愉快的草叶香,芳香醛中如苯甲醛等具有坚果、樱桃、风信子香气,而长链的脂肪醛如辛醛则具有很浓的水果香味^[22]。

由表 1 和 2 可知,在新鲜青辣椒及青辣椒酱熬制各阶段检测出的的酮类、醚类、酸类、酚类、酯类挥发性风味化合物的种类较少且相对含量偏

表2 熬制过程中青辣椒挥发性风味物质GC-MS检测结果
Table 2 GC-MS test results of volatile flavor compounds during the boiling of green pepper sauce

种类	化合物名称	保留指数	化学式	鲜椒				
				50 °C	60 °C	80 °C	100 °C	
醇类	3-己烯-1-醇	1 385.2	C ₆ H ₁₂ O	14.002 ± 1.335 ^a	12.977 ± 1.379 ^a	14.826 ± 1.084 ^a	14.897 ± 1.566 ^a	12.917 ± 1.635 ^a
	1-己醇	1 353.2	C ₆ H ₁₄ O	1.638 ± 0.127 ^c	2.858 ± 0.325 ^b	2.911 ± 0.911 ^b	3.181 ± 0.361 ^{ab}	4.159 ± 1.012 ^a
	芳樟醇	1 544.3	C ₁₀ H ₁₈ O	7.364 ± 1.361 ^b	7.426 ± 1.244 ^b	7.089 ± 1.896 ^b	8.143 ± 0.067 ^b	13.522 ± 0.482 ^a
	反-3-己烯醇	1 385.4	C ₆ H ₁₂ O	—	—	—	—	1.499 ± 0.212 ^a
	1-戊醇	1 249.2	C ₅ H ₁₂ O	—	—	—	0.655 ± 0.043 ^b	1.216 ± 0.540 ^a
	4-萜烯醇	1 604.8	C ₁₀ H ₁₈ O	—	2.947 ± 0.269 ^b	2.872 ± 0.308 ^b	3.341 ± 0.448 ^{ab}	4.278 ± 0.988 ^a
	顺-2-戊烯醇	1 320.2	C ₅ H ₁₀ O	—	0.376 ± 0.076 ^a	0.206 ± 0.009 ^b	0.204 ± 0.007 ^b	0.234 ± 0.123 ^b
	呋喃甲醇	1 664.1	C ₅ H ₈ O ₂	—	0.469 ± 0.054 ^a	0.487 ± 0.049 ^a	0.532 ± 0.041 ^a	0.478 ± 0.039 ^a
	1-戊烯-3-醇	1 160.9	C ₅ H ₁₀ O	0.539 ± 0.037 ^a	—	—	—	—
	香叶醇	1 850.5	C ₁₀ H ₁₈ O	—	0.173 ± 0.059 ^{bc}	0.225 ± 0.030 ^{ab}	0.243 ± 0.030 ^a	0.137 ± 0.004 ^c
	1-十七烷醇	1 523.7	C ₁₇ H ₃₆ O	0.623 ± 0.012 ^a	—	—	—	—
	2-辛烯-1-醇	1 617.2	C ₈ H ₁₆ O	—	—	—	—	0.088 ± 0.008 ^a
	反式-9-十二碳烯-1-醇	1 687.6	C ₁₂ H ₂₄ O	0.474 ± 0.069 ^a	—	—	—	—
	橙花醇	1 804.4	C ₁₀ H ₁₈ O	—	0.113 ± 0.004 ^b	0.121 ± 0.010 ^b	0.087 ± 0.010 ^c	0.057 ± 0.024 ^a
	正辛醇	1 560.0	C ₈ H ₁₈ O	—	—	—	—	0.106 ± 0.007 ^a
	羧基丙酮	1 305.3	C ₃ H ₆ O ₂	—	—	—	—	0.174 ± 0.020 ^a
	醛类	(-)-宁酮	1 446.0	C ₁₀ H ₁₆ O	—	0.645 ± 0.158 ^b	0.889 ± 0.112 ^{ab}	1.234 ± 0.345 ^a
2-庚酮		1 183.5	C ₇ H ₁₄ O	—	—	—	—	0.116 ± 0.006 ^c
甲基庚烯酮		1 340.2	C ₈ H ₁₄ O	—	0.081 ± 0.007 ^b	0.075 ± 0.026 ^b	0.204 ± 0.096 ^a	0.211 ± 0.011 ^a
1-辛烯-3-醇		1 303.2	C ₈ H ₁₄ O	—	0.267 ± 0.022 ^d	0.435 ± 0.020 ^c	0.819 ± 0.018 ^b	1.261 ± 0.002 ^a
3-甲基-2-丁烯醛		996.9	C ₅ H ₈ O	—	—	—	—	0.303 ± 0.024 ^a
壬醛		1 395.7	C ₉ H ₁₈ O	6.431 ± 0.292 ^a	3.416 ± 0.127 ^b	1.311 ± 0.111 ^d	1.804 ± 0.131 ^c	1.148 ± 0.100 ^b
反式-2-癸烯醛		1 649.9	C ₁₀ H ₁₈ O	—	0.270 ± 0.019 ^b	0.220 ± 0.022 ^c	0.379 ± 0.030 ^a	0.274 ± 0.014 ^b
辛醛		1 289.9	C ₈ H ₁₆ O	0.581 ± 0.063 ^a	0.443 ± 0.149 ^{ab}	0.426 ± 0.013 ^{ab}	0.526 ± 0.072 ^a	0.355 ± 0.057 ^a
苯甲醛		1 536.0	C ₇ H ₆ O	0.041 ± 0.002 ^d	0.373 ± 0.029 ^c	0.559 ± 0.061 ^b	0.537 ± 0.078 ^b	1.332 ± 0.121 ^a
5-甲基呋喃醛		1 584.1	C ₆ H ₈ O ₂	—	0.145 ± 0.021 ^b	0.088 ± 0.011 ^c	0.337 ± 0.038 ^a	0.149 ± 0.009 ^b
13-甲基十四烷醛		1 982.4	C ₁₅ H ₃₀ O	1.366 ± 0.065 ^a	—	—	—	—
2-己烯醛		1 221.3	C ₆ H ₁₀ O	—	1.967 ± 0.509 ^b	1.784 ± 0.185 ^b	3.696 ± 1.616 ^a	1.360 ± 0.059 ^{bc}
(E)-丁-2-烯醛		1 046.7	C ₄ H ₆ O	—	0.624 ± 0.068 ^b	0.562 ± 0.039 ^b	0.782 ± 0.129 ^a	0.615 ± 0.039 ^b

(续表 2)

种类	化合物名称	保留指数	化学式	鲜椒			
				50 °C	60 °C	80 °C	100 °C
醛类	2-辛烯醛	1 434.5	C ₈ H ₁₄ O	—	0.623 ± 0.244 ^a	0.497 ± 0.022 ^a	0.455 ± 0.042 ^a
	(E)-2-庚烯醛	1 328.1	C ₇ H ₁₂ O	—	1.610 ± 0.032 ^c	2.366 ± 0.221 ^a	1.917 ± 0.029 ^b
	正庚醛	1 185.6	C ₇ H ₁₄ O	—	0.112 ± 0.001 ^a	0.126 ± 0.031 ^a	0.090 ± 0.309 ^b
	2,4-二烯醛	955.9	C ₆ H ₈ O	—	—	—	0.819 ± 0.082 ^a
	反-2-辛烯醛	1 434.4	C ₈ H ₁₄ O	0.281 ± 0.010 ^a	0.301 ± 0.095 ^a	—	—
	苯乙醛	1 654.0	C ₈ H ₈ O	—	0.221 ± 0.021 ^c	0.335 ± 0.020 ^b	0.227 ± 0.027 ^c
	香茅醛	1 482.6	C ₁₀ H ₁₈ O	—	0.128 ± 0.002 ^a	0.117 ± 0.014 ^a	0.036 ± 0.010 ^b
	十四烷醛	1 876.8	C ₁₄ H ₂₈ O	0.220 ± 0.031 ^a	—	—	—
	5-羟甲基糠醛	2 439.6	C ₆ H ₆ O ₃	0.025 ± 0.003 ^d	0.379 ± 0.011 ^a	0.374 ± 0.023 ^{ab}	0.312 ± 0.010 ^c
	己醛	1 081.8	C ₆ H ₁₂ O	0.777 ± 0.023 ^{ab}	0.286 ± 0.010 ^c	0.442 ± 0.070 ^{bc}	0.929 ± 0.390 ^a
	2,4-癸二烯醛	1 819.3	C ₁₀ H ₁₆ O	—	0.163 ± 0.013 ^a	0.151 ± 0.050 ^a	0.139 ± 0.019 ^a
	3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛	1 688.5	C ₁₀ H ₁₆ O	—	—	—	0.092 ± 0.012 ^a
	(E)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛	1 739.2	C ₁₀ H ₁₆ O	—	—	—	0.186 ± 0.020 ^a
	二乙二醇单乙基醚	1 623.7	C ₆ H ₁₄ O ₃	0.233 ± 0.023 ^a	0.107 ± 0.007 ^b	0.117 ± 0.017 ^b	0.076 ± 0.010 ^c
	二丁醚	966.1	C ₈ H ₁₈ O	0.789 ± 0.021 ^a	—	—	—
	苯甲醚	1 348.6	C ₇ H ₈ O	0.008 ± 0.001 ^a	—	—	—
	2-甲基苯甲醚	1 415.5	C ₈ H ₁₀ O	0.091 ± 0.012 ^a	—	—	—
	己酸	1 843.2	C ₆ H ₁₂ O ₂	0.936 ± 0.063 ^a	0.452 ± 0.219 ^b	0.237 ± 0.018 ^c	0.134 ± 0.066 ^c
	壬酸	2 162.6	C ₉ H ₁₈ O ₂	1.057 ± 0.048 ^a	0.130 ± 0.008 ^b	0.038 ± 0.012 ^c	0.068 ± 0.020 ^c
脱氢乙酸	2 242.7	C ₈ H ₈ O ₄	2.676 ± 0.176 ^a	3.002 ± 1.036 ^a	2.431 ± 0.444 ^a	—	
辛酸	2 056.6	C ₈ H ₁₆ O ₂	0.122 ± 0.018 ^a	0.046 ± 0.012 ^b	0.025 ± 0.005 ^b	0.034 ± 0.009 ^b	
苯酚	2 009.7	C ₆ H ₆ O	0.164 ± 0.022 ^a	0.075 ± 0.015 ^b	0.143 ± 0.023 ^a	0.085 ± 0.014 ^b	
2-甲氧基-3-甲基苯酚	1 965.0	C ₈ H ₁₀ O ₂	0.152 ± 0.026 ^a	—	—	—	
4-乙氧基-2-甲氧基苯酚	2 206.0	C ₉ H ₁₀ O ₂	—	0.101 ± 0.054 ^{ab}	0.150 ± 0.020 ^a	0.123 ± 0.012 ^{ab}	
甲基麦芽酚	1 977.1	C ₆ H ₆ O ₃	—	0.028 ± 0.007 ^a	—	0.020 ± 0.020 ^a	
2,4-二叔丁基苯酚	2 306.3	C ₁₄ H ₂₂ O	0.187 ± 0.003 ^a	0.051 ± 0.011 ^b	—	—	
十九烷	1 459.9	C ₁₉ H ₄₀	—	—	—	0.035 ± 0.012 ^a	
3-甲基戊烷	1 159.5	C ₆ H ₁₄	—	0.090 ± 0.024 ^a	—	—	
2-甲基十三烷	1 360.7	C ₁₄ H ₃₀	10.839 ± 1.240 ^a	—	—	—	
2-甲基四癸烷	1 459.9	C ₁₅ H ₃₂	5.947 ± 0.946 ^a	—	—	—	
2-甲基十五烷	1 559.0	C ₁₆ H ₃₄	2.721 ± 0.266 ^a	—	—	—	

(续表2)

种类	化合物名称	保留指数	化学式	鲜椒				相对含量/%		
				50 °C	60 °C	80 °C	100 °C			
烯烃类	7-甲基十五烷	1 502.7	C ₁₆ H ₃₄	—	—	—	—	—	—	
	2,3-二甲基十二烷	1 360.7	C ₁₄ H ₃₀	—	—	—	—	—	0.163 ± 0.008 ^a	
	辛烷	814.0	C ₈ H ₁₈	—	—	—	—	—	0.496 ± 0.024 ^a	
	β-蒎烯	1 095.2	C ₁₀ H ₁₆	—	0.452 ± 0.041 ^b	0.436 ± 0.013 ^b	0.378 ± 0.039 ^b	—	1.100 ± 0.352 ^a	
	3-环己烯	1 115.6	C ₁₀ H ₁₆	—	—	—	—	—	1.460 ± 0.009 ^a	
	苯乙烯	1 260.0	C ₈ H ₈	2.899 ± 0.112 ^a	—	—	—	—	—	
	(+)-柠檬烯	1 192.9	C ₁₀ H ₁₆	1.174 ± 0.075 ^a	—	—	—	—	—	
	桉烯	1 111.7	C ₁₀ H ₁₆	0.062 ± 0.007 ^c	14.982 ± 2.228 ^a	11.006 ± 1.793 ^b	10.525 ± 0.980 ^b	9.838 ± 0.847 ^b	—	
	茴香烯	1 838.9	C ₁₀ H ₁₂ O	—	2.346 ± 0.291 ^a	2.944 ± 0.587 ^a	2.345 ± 0.419 ^a	3.012 ± 0.626 ^c	—	
	月桂烯	1 167.0	C ₁₀ H ₁₆	—	13.521 ± 1.388 ^a	10.928 ± 1.583 ^b	15.269 ± 0.883 ^a	14.362 ± 1.826 ^a	—	
	罗勒烯	1 250.9	C ₁₀ H ₁₆	6.923 ± 0.577 ^b	5.765 ± 0.365 ^b	6.897 ± 0.603 ^b	6.103 ± 0.483 ^b	8.314 ± 0.926 ^c	—	
	β-榄香烯	1 595.5	C ₁₅ H ₂₄	0.998 ± 0.102 ^a	0.018 ± 0.012 ^b	0.032 ± 0.008 ^b	0.094 ± 0.005 ^b	0.047 ± 0.007 ^b	—	
	1-甲基-4-(1-甲基乙基)-1,4-环己二烯	1 244.3	C ₁₀ H ₁₆	—	3.840 ± 0.340 ^a	6.858 ± 0.358 ^a	5.612 ± 0.388 ^b	1.856 ± 0.144 ^d	—	
	α-侧柏烯	1 025.4	C ₁₀ H ₁₆	—	7.314 ± 1.614 ^a	6.506 ± 0.389 ^a	6.482 ± 0.777 ^a	1.606 ± 0.094 ^b	—	
	(5E)-5-十四碳烯	1 377.8	C ₁₄ H ₂₈	0.776 ± 0.096 ^a	—	—	—	—	—	
	别罗勒烯	1 398.3	C ₁₀ H ₁₆	0.684 ± 0.066 ^a	0.295 ± 0.105 ^b	0.270 ± 0.050 ^b	0.246 ± 0.036 ^b	0.054 ± 0.003 ^c	—	
	2-甲基-1-十四烯	1 472.1	C ₁₅ H ₃₀	8.934 ± 0.396 ^a	—	—	—	—	—	
(+)-长叶环烯	1 505.9	C ₁₅ H ₂₄	2.113 ± 0.113 ^a	—	—	—	—	—		
左旋-β-蒎烯	1 098.1	C ₁₀ H ₁₆	—	—	—	—	0.091 ± 0.011 ^a	—		
α-丁子香烯	1 176.3	C ₁₅ H ₂₄	—	—	—	—	—	—		
反式-1-苯基-1-丁烯	1 508.2	C ₁₀ H ₁₂	0.296 ± 0.024 ^a	—	—	—	—	—		
α-长叶蒎烯	1 473.9	C ₁₅ H ₂₄	2.018 ± 0.182 ^a	—	—	—	—	—		
姜烯	1 725.7	C ₁₅ H ₂₄	—	2.178 ± 0.032 ^a	2.183 ± 0.385 ^a	0.196 ± 0.016 ^b	0.203 ± 0.017 ^b	—		
α-蒎烯	1 719.2	C ₁₅ H ₂₄	—	—	—	—	—	0.060 ± 0.011 ^a		
水杨酸甲酯	1 790.9	C ₈ H ₈ O ₃	3.729 ± 0.351 ^a	0.302 ± 0.038 ^b	0.120 ± 0.025 ^b	0.094 ± 0.004 ^b	0.048 ± 0.004 ^b	—		
γ-丁内酯	1 645.2	C ₄ H ₆ O ₂	0.299 ± 0.020 ^a	0.129 ± 0.011 ^c	0.145 ± 0.015 ^c	0.191 ± 0.031 ^b	—	—		
甲酸乙酯	1 353.3	C ₇ H ₁₄ O ₂	—	1.365 ± 0.088 ^b	3.571 ± 0.753 ^a	—	—	—		
2-羟基丁酸甲酯	1 111.7	C ₃ H ₁₀ O ₃	0.223 ± 0.015 ^a	—	—	—	—	—		
4-羟基丁酸乙酯	1 645.2	C ₄ H ₈ O ₃	—	—	—	—	—	0.138 ± 0.012 ^a		
3,7-二甲基-1,6-辛二烯-3-醇乙酯	1 558.4	C ₁₂ H ₂₀ O ₂	—	—	0.361 ± 0.011 ^c	0.798 ± 0.022 ^a	0.491 ± 0.109 ^b	—		

(续表 2)

种类	化合物名称	保留指数	化学式	相对含量/%				
				鲜椒	50 °C	60 °C	80 °C	100 °C
芳香族类	乙酸苯乙酯	1 824.1	C ₁₀ H ₁₂ O ₂	—	0.088 ± 0.003 ^b	0.112 ± 0.010 ^a	0.109 ± 0.009 ^a	—
	丁酸乙酯	1 038.2	C ₆ H ₁₂ O ₂	0.059 ± 0.003 ^b	—	—	—	0.080 ± 0.003 ^a
	1,4-二甲苯	1 131.4	C ₈ H ₁₀	0.615 ± 0.062 ^a	—	—	—	—
	3-乙基甲苯	1 283.1	C ₉ H ₁₂	0.283 ± 0.017 ^a	—	—	—	—
	乙苯	1 122.2	C ₈ H ₁₀	0.768 ± 0.033 ^a	—	—	—	—
其它类	三甲苯	1 340.5	C ₉ H ₁₂	0.078 ± 0.002 ^a	—	—	—	—
	2-甲基萘	1 870.6	C ₁₁ H ₁₀	0.061 ± 0.005 ^a	—	—	—	—
	茴香脑	1 838.9	C ₁₀ H ₁₂ O	—	—	3.482 ± 0.118 ^a	3.209 ± 0.040 ^a	1.703 ± 0.096 ^b
	2-戊基呋喃	1 230.5	C ₉ H ₁₄ O	2.543 ± 0.044 ^a	0.141 ± 0.011 ^b	0.035 ± 0.007 ^b	0.085 ± 0.005 ^b	0.056 ± 0.005 ^b
	二甲硫醚	766.1	C ₂ H ₆ S	—	—	—	—	1.021 ± 0.139 ^a
	苯并噻唑	1 974.4	C ₇ H ₅ NS	0.488 ± 0.032 ^a	—	—	—	—
	2-乙酰基吡咯	1 980.2	C ₆ H ₇ NO	—	—	—	—	0.190 ± 0.012 ^a
	2-正戊基噻吩	1 462.5	C ₉ H ₁₄ S	1.361 ± 0.039 ^a	—	—	—	—
	萘	1 757.3	C ₁₀ H ₈	1.058 ± 0.041 ^a	—	—	—	—
	3-乙酰基吡咯	1 980.0	C ₆ H ₇ NO	—	—	0.118 ± 0.004 ^{ab}	0.109 ± 0.002 ^b	0.125 ± 0.037 ^a
(E)-1-丙烯基烯丙基二硫化物	1 492.0	C ₈ H ₁₀ S ₂	—	0.407 ± 0.014 ^a	0.350 ± 0.050 ^a	0.331 ± 0.024 ^a	0.121 ± 0.023 ^b	
盐酸精胺	2 278.0	C ₈ H ₈ O ₄	—	—	—	—	0.167 ± 0.012 ^a	
亚联苯	2 222.2	C ₁₂ H ₈	0.083 ± 0.007 ^a	—	—	—	—	
2-甲氧基-3-异丁基吡嗪	1 528.8	C ₉ H ₁₄ N ₂ O	—	—	—	0.146 ± 0.006 ^a	0.049 ± 0.010 ^b	

注:同行不同小写字母表示差异显著(P<0.05);“—”表示未检出。

低。酮类和醚类物质主要来自美拉德反应、脂肪氧化等反应生成,由于含量较少且香气较弱,对青辣椒酱风味贡献较低^[23]。酚类物质阈值较低对青辣椒酱的风味有着一定的影响,所有熬制阶段检测出苯酚、2-甲氧基-3-甲基苯酚、4-乙炔基-2-甲氧基苯酚、甲基麦芽酚、2,4-二叔丁基苯酚,共 5 种酚类物质,且含量差异较低,检测出酚类物质基本均为苯酚类物质,苯酚及其衍生物具有强大的芳香成分,并具有抗菌性和抗氧化性^[24]。酸类化合物主要由辣椒酱加工过程中脂肪的水解与氧化所产生,己酸、辛酸等具有不愉快气味。大部分酯类化合物具有让人愉快的香味,内酯类具有奶油和脂肪香的气味,乙酯类如苯甲酸乙酯

具有较弱的水果气味^[25]。芳香族类以及烷烃类物质如 2-甲基十三烷、2-甲基四癸烷、2-甲基十五烷等只存在于新鲜青辣椒中,烷烃类物质的香气阈值较高,无明显气味且对青辣椒酱的香气作用贡献较小,在进行高温熬制后分解转化为其它物质。

大部分烯烴类化合物阈值较低,具有特殊香气,对青辣椒酱风味贡献较高,新鲜青辣椒及青辣椒酱熬制各阶段检测出的挥发性成分总相对含量最高的均为萜烯类物质,各阶段均检测出超过 10 种烯烴类物质,均为具有特殊的香气的挥发性成分,例如,桉烯具有辛辣味;茴香烯具有香甜味;柠檬烯具有柠檬香气;月桂烯具有清淡的令人愉快

的香脂气味;罗勒烯具有花香、青草香并伴有橙花油的气味等。刘艳敏等^[26]通过研究 8 中油辣椒挥发性成分,认为烯炔类物质是贵州油辣椒的主效风味物质,此外,桉烯、 α -蒎烯、罗勒烯等物质是热反应过程中添加的辛香料的主要成分。桉烯、 α -侧柏烯、姜烯等随熬制温度的不断升高而呈下降趋势,罗勒烯、茴香烯等呈上升趋势,而月桂烯则在熬制中期时含量最高,达到 15.269%,不同物质具有不同的变化趋势,主要原因是在熬制过程中添加的香辛料中的不同类别挥发性风味物质的释放速率和其在青椒中积累速率不同而导致的^[27]。青辣椒原料以及香辛料对熬制过程中青辣椒酱特征香气的具有很大的贡献作用。

2.2 青辣椒酱熬制过程中挥发性风味物质主成分分析及聚类分析

主成分分析 (Principal component analysis, PCA) 是对样品中原有的多个变量通过降维、降噪转化为几个新的综合变量用于反映原来变量的信息的统计方法^[28]。聚类分析 (Hierarchical cluster analysis, HCA) 是将研究对象按照相似度进行自然聚集的一种统计分析技术^[29]。为了更好地说明各个阶段青辣椒酱挥发性风味成分的差异性,分别对新鲜青辣椒、熬制温度 (50, 60, 80, 100 °C) 阶段的样品进行主成分分析和聚类分析,结果如图 2、3 所示。

PCA 结果如图 2 所示,以新鲜青辣椒和青辣椒酱不同熬制阶段共 5 个阶段的所有挥发性风味成分相对含量为变量,对数据进行标准化处理,新鲜青辣椒、熬制温度 100 °C、熬制温度 (50, 60, 80 °C) 分别位于 3 个象限,且随着熬制温度的递增,挥发性风味物质从第 4 象限 (新鲜青辣椒) 沿逆时针方向移动至第 3 象限 (熬制温度 100 °C),存在代谢物迁移现象,说明熬制温度的升高对辣椒制品挥发性风味特征的形成具有重要意义,且熬制温度 50, 60, 80 °C 属于同一象限,差异性较小。其层级聚类分析如图 3 所示,青椒 5 个阶段的挥发性风味物质被聚成 3 大类,分别是新鲜青辣椒、熬制温度 100 °C、熬制温度 (50, 60, 80 °C),且此 3 类具有显著性差异,相同阶段的挥发性物质均单独聚集为一类,这与 PCA 得到的结果一致,PCA 和 HCA 两者相互验证。

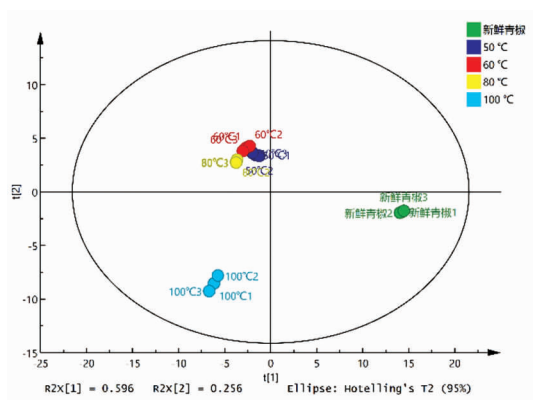


图 2 不同阶段 PCA

Fig.2 Different stages of PCA

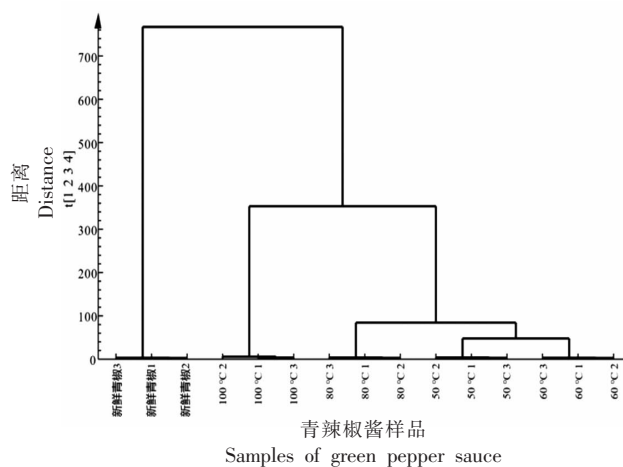


图 3 不同阶段聚类分析图

Fig.3 Different stages of HCA

2.3 青辣椒酱熬制过程中潜在差异物质确定

为更好地说明不同阶段青辣椒酱样品间挥发性风味物质含量的差异,利用正交偏最小二乘判别法 (Orthogonal partial least squares discriminant analysis, OPLS-DA) 进行分析,可弥补 PCA 的不足,强化不同阶段的差异性^[30]。OPLS-DA 变量的重要性因子 (Variable importance in projection, VIP) 可以量化 OPLS-DA 的每个变量对样品分类的贡献度,有利于筛选重要的特征挥发性风味物质^[31]。

如图 4 所示, OPLS-DA 的结果与前期 HCA 和 PCA 的分析结果一致。VIP > 1 的成分可判别为潜在差异物质, VIP 值越大说明该挥发性成分在不同阶段的差异越显著^[32], 结果如图 5 所示。为筛选对各个阶段的青辣椒酱的差异性具有重要影响

的挥发性风味物质,以 $VIP>1$ 和 $P<0.05$ 为指标,确定对不同阶段有重要贡献的关键差异物质 23 种,具体包括:醛类 7 种(壬醛、反-2-癸烯醛、5-甲基呋喃醛、2-己烯醛、2-辛烯醛、反-2-辛烯醛、苯乙醛)、烯炔类 5 种[桉烯、罗勒烯、 α -丁子香烯、姜烯、1-甲基-4-(1-甲基乙基)-1,4-环己二烯]、醇类 3 种(芳樟醇、1-戊醇、4-萜烯醇)、酯类 3 种(甲酸己酯、3,7-二甲基-1,6-辛二烯-3-醇乙酸酯、丁酸乙酯)、酮类 2 种(甲基庚烯酮、1-辛烯-3-酮)、酸类 1 种(脱氢乙酸)、酚类 1 种(苯酚)、烷烃类 1 种(3-甲基戊烷)。将筛选出来的挥发性风味物质绘制热图并聚类分析,结果如图 6 所示。

如图 6 所示,筛选过后的挥发性成分中新鲜青辣椒与熬制温度(50,60,80,100 °C)聚为两大支,熬制温度 50 °C 和 60 °C 聚为一类、熬制温度 80 °C 和 100 °C 聚为一类。且熬制温度(50,60,80,100 °C)的挥发性风味特征明显丰富于新鲜青椒。新鲜青椒相较于其它阶段主要特征风味为壬醛、苯酚,壬醛呈花香和橘子类香气。熬制温度 50 °C 和 60 °C 阶段生成新的关键差异物质,主要为醛类、酯类、烯炔类、烷烃类及少量酮类物质,其中反-2-辛烯醛具有脂肪和肉类香气,并伴有黄瓜香味,2-己烯醛具有愉快的草叶香,烷烃类物质的香气阈值较高,无明显气味,苯乙醛具有类似风信子香气,甲酸己酯除了菠萝香气外具有强烈的酒香, α -丁子香烯呈黑胡椒的辛辣味等。在熬制温度(50 °C 和 60 °C)阶段的基础上,随着熬制终温的升高,熬制温度(80 °C 和 100 °C)阶段醇类、酮类、醛类物质含量增加,而桉烯、罗勒烯、姜烯等 5 种烯炔类物质随熬制温度的升高具有不同的变化趋势,推测主要原因是由于新鲜青椒和香辛料在高温熬制过程中由于加热会释放出游离的链状或环状烯炔类物质,使青辣椒酱呈现出丰富的香味,这些物质中的一部分在热的作用下还会继续的环化、脱水和异构化,生成大量的风味物质^[33]。熬制温度 100 °C 阶段关键差异物质含量较高的为:芳樟醇、4-萜烯醇、1-戊醇、罗勒烯、桉烯、1-辛烯-3-酮、丁酸乙酯。芳樟醇呈铃兰花、绿茶香、柑橘类的香气;4-萜烯醇呈玫瑰花和橘子香气;罗勒烯呈花草香并伴有橙花油的气味;桉烯呈辛辣味;1-辛烯-3-酮呈

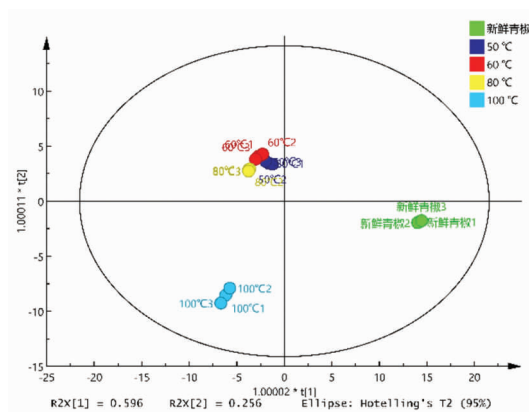


图 4 OPLS-DA 得分图

Fig.4 OPLS-DA score chart

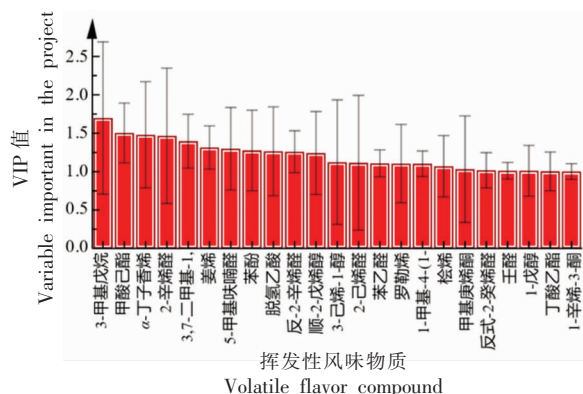


图 5 基于 OPLS-DA 模型分析的 VIP>1 的预测值分布图

Fig.5 Distribution of VIP>1 forecast values based on OPLS-DA

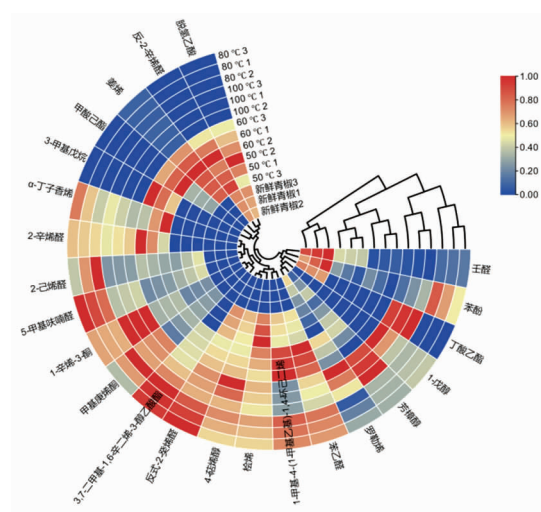


图 6 潜在差异物质聚类热图

Fig.6 Clustering heat map of potential difference compounds

果香风味;丁酸乙酯呈有菠萝、香蕉、苹果香气。

3 结论

通过 GC-MS 检测分析新鲜青辣椒及熬制过程中青辣椒酱的挥发性风味物质得出:新鲜青辣椒酱以及熬制温度为 50,60,80,100 °C 的青辣椒酱分别检出 54,52,57,53,71 种挥发性风味物质,其中烯烃类、醇类、醛类是主体风味贡献化合物。通过对熬制过程中各阶段进行主成分分析和聚类分析得出熬制终温的升高对辣椒制品挥发性风味特征的形成具有正向意义。基于正交偏最小二乘法判别分析(VIP>1 和 $P<0.05$)筛选出对各阶段青辣椒酱风味差异性具有重要影响的特征性挥发性成分,确定了壬醛、反式-2-癸烯醛、桉烯、罗勒烯等 23 种对不同阶段有重要贡献的关键差异物质。将筛选出来的挥发性风味物质绘制热图并进一步通过聚类分析得出:随着熬制终温的升高各阶段青辣椒酱的挥发性风味特征明显丰富于新鲜青椒,新鲜青椒的主体特征风味为壬醛、苯酚;随着熬制温度的升高,青辣椒酱的挥发性风味特征更加丰富,尤其是醇类、酮类、醛类物质含量显著增加($P<0.05$),使青辣椒酱总体风味得到改善。芳樟醇、4-萜烯醇、1-戊醇、罗勒烯、桉烯、1-辛烯-3-酮、丁酸乙酯等可作为熬制温度 100 °C 区分其它阶段的关键差异物质,研究结果可为后续研究青辣椒酱风味形成机理、指导青辣椒酱风味品质调控等提供理论依据。

参 考 文 献

- [1] PUGLIESE A, LOIZZO M R, TUNDIS R, et al. The effect of domestic processing on the content and bioaccessibility of carotenoids from chili peppers (*Capsicum* species)[J]. Food Chemistry, 2013, 141(3): 2606-2613.
- [2] 李阳, 邓伶俐, 徐晓卉, 等. 月桂酰精氨酸乙酯盐酸复配保鲜剂对青椒保鲜效果的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(11): 201-206.
LI Y, DENG L L, XU X H, et al. Effect of compound *N*-lauroyl-*L*-arginate ethylester preservative on the preservation of green bell pepper[J]. Food Science, 2020, 41(11): 201-206.
- [3] SAMBAIAH K, SATYANARAYANA M N. Hypocholesterolemic effect of red pepper & capsaicin[J]. Indian Journal of Experimental Biology, 1980, 18(8): 898-899.
- [4] LUCIC M, MILETIC A, SAVIC A, et al. Dietary intake and health risk assessment of essential and toxic elements in pepper (*Capsicum annuum*)[J]. Journal of Food composition and Analysis, 2022, 111: 104598.
- [5] XU H S, WANG Y R, DING S H, et al. Effect of hydrothermal-calcium chloride treatment on pectin characteristics and related quality in green peppers during storage[J]. Journal of Food Science And Technology-Mysore, 2021, 58(10): 3712-3724.
- [6] 牟玉梅, 毛妃凤, 张绍刚. 贵州省辣椒产业现状与发展建议[J]. 中国蔬菜, 2020(2): 10-12.
MOU Y M, MAO F F, ZHANG S G. Current situation and development suggestion of chili industry in Guizhou Province[J]. China Vegetables, 2020(2): 10-12.
- [7] 杜涛. 高新技术支撑贵州辣椒制品高质量发展[N]. 中国食品报, 2022-08-24(8).
DU T. High-tech supports the high-quality development of guizhou pepper products[N]. China Food Newspaper, 2022-08-24(8).
- [8] YE Z, SHANG Z X, LI M Q, et al. Effect of ripening and variety on the physiochemical quality and flavor of fermented Chinese chili pepper (Paojiao)[J]. Food Chemistry, 2022, 368: 130797.
- [9] 郑君花, 王修俊, 王丽芳, 等. 响应面法优化醋酸发酵辣椒的配方工艺[J]. 中国调味品, 2013, 38(8): 62-66.
ZHENG J H, WANG X J, WANG L F, et al. Optimization of the formula of acetic acid fermented chili by response surface methodology[J]. China Condiment, 2013, 38(8): 62-66.
- [10] 张二康, 王修俊, 王丽芳, 等. 栅栏技术在发酵辣椒保藏中的应用研究[J]. 中国酿造, 2019, 38(6): 54-58.
ZHANG E K, WANG X J, WANG L F, et al. Application of hurdle technology in preservation of fermented chilli [J]. China Brewing, 2019, 38(6): 54-58.
- [11] 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.

- YAN Y G, DUAN G Y, TANG X J, et al. Comparative analysis of the quality of chili sauce made from different varieties of peppers[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(11): 225-232.
- [12] 杨芳, 袁海彬, 贾洪锋, 等. 基于 GC-IMS 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. Analysis of the effects of chili varieties on the 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.
- [13] 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, 2023, 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, 2023, 50(1): 286-292.
- [14] 黄春蓉, 李万琪, 黄蓓蓓. 对比干鲜辣椒酱的品质分析及其产业效益研究[J]. 中国调味品, 2022, 47(10): 127-130.
- HUANG C R, LI W Q, HUANG B B. Study on comparison of quality analysis and industrial benefits of dry and fresh chili sauces[J]. China Condiment, 2022, 47(10): 127-130.
- [15] 张东亚, 胡伯凯, 李伟岸, 等. 两种加工方法对糟辣椒风味及产品质量的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(3): 168-175.
- ZHANG D Y, HU B K, LI W A, et al. Effects of two processing methods on flavor and product quality of Zao-peppers[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(3): 168-175.
- [16] 牛琛. 沙拉酱对青椒风味的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019.
- NIU C. Effect of mayonnaise on flavor of green peppers[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019.
- [17] 蔡艳梅, 孙金沅, 陈海涛, 等. 美拉德反应制备酱牛肉香精的挥发性成分分析[J]. 食品科学, 2012, 33(8): 199-202.
- QI Y M, SUN J Y, CHEN H T, et al. Analysis of volatile compounds in sauced beef essence prepared by Maillard reaction[J]. Food Science, 2012, 33(8): 199-202.
- [18] 熊学斌, 夏延斌, 张晓, 等. 不同品种辣椒粉挥发性成分的 GC-MS 分析[J]. 食品工业科技, 2012, 33(16): 161-164.
- XIONG X B, XIA Y B, ZHANG X, et al. Gas chromatography-mass spectrometric analysis of volatile components in capsicum powder from different cultivars[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(16): 161-164.
- [19] HIDALGO F J, ZAMORA R. Amino acid degradations produced by lipid oxidation products[J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2016, 56(8): 1242-1252.
- [20] 秦早. 芝麻油风味物质分析研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2012.
- QIN Z. Analysis research of the volatile compounds in sesame oil[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2012.
- [21] WANG H L, ZHU Y Z, ZHANG J J, et al. Characteristic volatile compounds in different parts of grass carp by comprehensive two-dimensional gas chromatography/time-of-flight mass spectrometry[J]. International Journal of Food Properties, 2020, 23(1): 777-796.
- [22] JAFFE T R, WANG H W, CHAMBERS E. Determination of a lexicon for the sensory flavor attributes of smoked food products[J]. Journal of Sensory Studies, 2017, 32(3): e12262.
- [23] 叶陵. 植物乳杆菌 W-4 的分离鉴定及其发酵制辣椒研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2017.
- YE L. Isolation, identification of *Lactobacillus plantarum* W-4 and its application in chopped pepper[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2017.
- [24] WANG H W, CHAMBERS E. Sensory characteristics of various concentrations of phenolic compounds potentially associated with smoked aroma in foods[J]. Molecules, 2018, 23(4): 780.
- [25] 娄本, 刘善宇. 酯类与酮类烟用香料的化学合成与加香应用研究进展[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(29): 14496-14499.
- LOU B, LIU S Y. Research progress on chemical synthesis and application of esters and ketones tobacco spices[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(29): 14496-14499.
- [26] 刘艳敏, 吴拥军, 王亚娟, 等. 贵州油辣椒挥发性

- 风味物质分析[J]. 食品科学, 2013, 34(20): 221–227.
- LIU Y M, WU Y J, WANG Y J, et al. Volatile flavor components analysis of fried pepper sauce in Guizhou Province[J]. Food Science, 2013, 34(20): 221–227.
- [27] 王海帆, 郭梦嫣, 王玉洁, 等. 辣椒、花椒等辛辣香辛料对肉制品风味影响的研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(15): 389–395.
- WANG H F, GUO M Y, WANG Y J, et al. A review on the effects of pungent spices including chili and prickly ash on the flavor of meat products [J]. Food Science, 2022, 43(15): 389–395.
- [28] AI Y J, LIANG P, WU Y X, et al. Rapid qualitative and quantitative determination of food colorants by both Raman spectra and Surface-enhanced Raman Scattering (SERS)[J]. Food Chemistry, 2018, 241(15): 427–433.
- [29] HOU H Q A D. Colorimetric artificial nose for identification of Chinese liquor with different geographic origins[J]. Food Research International, 2012, 45(1): 45–51.
- [30] 唐平, 卢君, 毕荣宇, 等. 赤水河流域不同地区酱香型白酒风味化合物分析[J]. 食品科学, 2021, 42(6): 274–281.
- TANG P, LU J, BI R Y, et al. Analysis of flavor compounds of Maotai-flavor Baijiu produced in different regions of the Chishui River Basin[J]. Food Science, 2021, 42(6): 274–281.
- [31] 赵秋龙, 杨沛文, 钱大玮, 等. 不同加工干燥方法对白芍药材中化学成分的影响研究[J]. 中国中药杂志, 2021, 46(22): 5839–5847.
- ZHAO Q L, YANG P W, QIAN D W, et al. Effects and evaluation of different processing and drying methods on components in *Paeoniae radix Alba* [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2021, 46(22): 5839–5847.
- [32] 张晨霞, 王国成, 王超, 等. 普洱市不同产区普洱茶香气成分差异性分析[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(1): 177–184.
- ZHANG C X, WANG G C, WANG C, et al. Comparative study on the aroma components of raw Pu-erh tea among different producing areas of Pu'er City[J]. Food Research and Development, 2020, 41(1): 177–184.
- [33] 马军辉. HS-SPME-GC-MS 检测茶叶内挥发性组分方法的建立及应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- MA J H. HS-SPME-GC-MS in the establishment and application of methods to the determination of tea volatile components[D]. Hanzhou: Zhejiang University, 2008.

The Changes of Volatile Flavor Compounds in Green Pepper Sauce during Boiling

Zhang Lu^{1,2}, Wang Xiujun^{1,2,3*}, Chen Yanhong^{1,2}, Hu Rongnian^{1,2}, Li Jiamin^{1,2}, Xu Jiuhong^{1,2}

¹School of Brewing and Food Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025

²Key Laboratory for Fermentation Engineering and Biopharmaceuticals of Guizhou Province, Guiyang 550025

³Chili Industry Technology Research Institute, Guizhou University, Guiyang 550025)

Abstract In order to explore the variation rule of volatile flavor compounds in green pepper sauce during the boiling process, the types and contents of volatile flavor compounds were analyzed by gas chromatography-mass spectrometry, and the differences of volatile flavor compounds at different stages were identified by principal component analysis and hierarchical cluster analysis. Finally, orthogonal partial least square discriminant analysis combined with statistical analysis of heat map was used to determine the characteristic flavor substances which had important influence on the flavor difference of green pepper sauce in the cooking process. The results showed that 54, 52, 57, 53 and 71 volatile flavor compounds were detected in fresh green pepper and green pepper sauce at 50, 60, 80 °C and 100 °C, respectively. The results of principal component analysis and cluster analysis showed that the increase of final cooking temperature had positive significance on the formation of volatile flavor characteristics of green chili sauce. Heat map was drawn and cluster analysis showed that with the increase of final temperature, the volatile flavor characteristics of green pepper sauce in each stage were significantly richer than those of fresh green pepper, especially the contents of alcohols, ketones and

aldehydes increased significantly ($P < 0.05$). Linalol, 4-terpenol, 1-amyl alcohol, basil, sabinene, 1-octene-3-one could be used as the key difference compounds to distinguish other stages of cooking temperature 100 °C. The results could provide theoretical basis for the subsequent research on the formation mechanism and flavor quality control of green pepper sauce.

Keywords green pepper sauce; boil; gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS); volatile flavor compounds; principal component analysis