

新鲜葱姜蒜混合物与炒制后的葱姜蒜油挥发性 风味物质的对比研究

葛怡青¹, 仝涛^{1,2,3*}

[1. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 精准营养与食品质量重点实验室, 教育部功能乳品重点实验室, 北京 100083; 2. 农业农村部转基因生物安全评价重点实验室(食品安全), 北京 100083; 3. 食品质量与安全北京实验室, 北京 100083]

摘要: 目的 确定新鲜葱姜蒜混合物和经油高温炒制后葱姜蒜油中挥发性风味物质的主要成分, 明确新鲜葱姜蒜混合物和葱姜蒜油中的挥发性风味物质差异。**方法** 采用固相微萃取法(solid-phase microextraction, SPME)结合气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)对新鲜葱姜蒜样品和葱姜蒜油样品的挥发性风味物质进行分离鉴定, 并进行气味活度值分析和主成分分析。**结果** 从新鲜葱姜蒜中共检出化合物 81 种挥发性成分, 包括烃类 43 种、醚类 17 种、醇类 3 种、酮类 4 种、酸类 2 种、酯类 4 种、杂环类 8 种。炒制后的葱姜蒜油中检出 19 种挥发性风味物质, 包括烃类 9 种、醚类 2 种、醇类 5 种、醛类 2 种、酸类 1 种, 其中烃类物质减少 10.37%, 醚类物质减少 10.08%, 醇类物质上升 18.43%, 醛类物质上升 4.47%, 酸类物质上升 2.63%。**结论** 葱姜蒜混合物与炒制后的葱姜蒜油的挥发性风味物质存在差异, 醛类、醇类、酸类物质是差异的主要来源, 并可能为炒制后的葱姜蒜油中的风味起到主要贡献作用。

关键词: 葱姜蒜混合物; 葱姜蒜油; 挥发性风味物质; 固相微萃取; 气相色谱-质谱法

Comparative study on volatile flavor substances in fresh scallion-ginger-garlic mixture versus scallion-ginger-garlic oil after frying

GE Yi-Qing¹, TONG Tao^{1,2,3*}

[1. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Key Laboratory of Precision Nutrition and Food Quality, Key Laboratory of Functional Dairy, Ministry of Education, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Safety Assessment of Genetically Modified Organism (Food Safety), the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the P. R. China, Beijing 100083, China; 3. Beijing Laboratory for Food Quality and Safety, Beijing 100083, China]

ABSTRACT: Objective To determine the main components of volatile flavor substances in fresh scallion-ginger-garlic mixture and scallion-ginger-garlic oil after high temperature frying, and clarify the differences of volatile flavor substances in fresh scallion-ginger-garlic and scallion-ginger-garlic oil. **Methods** The volatile flavor substances in fresh

基金项目: 北京市自然科学基金项目(7222249)、山东省自然科学基金项目(ZR2021QC118)、中国农业大学 2115 人才工程资助项目、特殊人群功能性膳食营养补充剂研发项目(SJ2021002006)

Fund: Supported by the Beijing Natural Science Foundation Program (7222249), the Shandong Provincial Natural Science Foundation Program (ZR2021QC118), the 2115 Talent 518 Development Program of China Agricultural University, and the Research and Development Project of Functional Dietary Supplements for Special Populations (SJ2021002006)

*通信作者: 仝涛, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品营养与安全。E-mail: tongtao1028@cau.edu.cn

*Corresponding author: TONG Tao, Ph.D, Associate Professor, College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China. E-mail: tongtao1028@cau.edu.cn

scallion-ginger-garlic samples and scallion-ginger-garlic oil were separated and identified by solid phase microextraction (SPME) coupled with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), odor activity value analysis and principal component analysis were performed. **Results** A total of 81 kinds of volatile compounds, including 43 kinds of hydrocarbons, 17 kinds of ethers, 3 kinds of alcohols, 4 kinds of ketones, 2 kinds of acids, 4 kinds of esters and 8 kinds of heterocyclic compounds, were detected in fresh scallion-ginger-garlic, and 19 kinds of volatile flavor substances, including 9 kinds of hydrocarbons, 2 kinds of ethers, 5 kinds of alcohols, 2 kinds of aldehydes and 1 kind of acid, were detected in the scallion-ginger-garlic oil, including 10.37% decrease in hydrocarbons, 10.08% decrease in ethers, 18.43% increase in alcohols, 4.47% increase in aldehydes and 2.63% increase in acids. **Conclusions** There are differences in volatile flavor substances in the scallion-ginger-garlic mixtures and scallion-ginger-garlic oil after frying, the aldehydes, alcohols, and acids are the main sources of the differences, and may play a major contribution to the flavor of fried scallion-ginger-garlic oil.

KEY WORDS: scallion-ginger-garlic mixture; scallion-ginger-garlic oil; volatile flavor substances; solid-phase microextraction; gas chromatography-mass spectrometry

0 引言

大葱(*Allium fistulosum* L.)是一种在全世界范围内种植的多年生植物,属于百合科多年生草本植物,具有辛辣气味^[1],具有抗氧化^[2]、降血糖、杀菌、促进骨骼发育^[1]等多种生物活性。脂肪酸、含氮类及含硫类化合物是葱属植物的主要挥发性物质^[3-4]。生姜(*Zingiber officinale* Rosc.)属于多年生草本宿根单子叶种子植物,有独特的刺激性风味^[5],具有抗氧化^[6]、缓解炎症^[7]和提高免疫力^[8]等生物活性。姜挥发油中主要成分主要为萜烯类物质与姜辣素衍生物,辣味成分为姜酚^[9-10]。蒜(*Allium sativum* L.)是百合科葱属植物的鳞茎,具有抗氧化特性^[11]、抗癌、心脏保护作用^[12]等功效,含硫化合物是大蒜刺激性风味物质的来源^[13]。

葱、姜、蒜是我国传统的药食兼用性植物,日常生活中经常作为辅料改善风味、增强感官品质^[14]。然而,许多人无法接受新鲜葱、姜、蒜的辛辣刺激味道,但炒制后的葱、姜、蒜调料风味明显改善,刺激性风味减弱^[13]。目前对葱、姜、蒜的研究仅停留在葱、姜、蒜的单独分析阶段^[15-17],或将葱姜蒜整体作为辅料,探究原料食品性质的变化,如 ADEOTI 等^[18]对比了生姜、大蒜和姜黄调味的热带水果果酱的成分、理化和感官特性。单独分析葱、姜、蒜中的香气成分所获得的分析资料不全面,故结论相对较片面单一。葱、姜、蒜是重要的食物佐料,在日常烹饪中主要将葱、姜、蒜混合后进行炒制,且 3 者联合使用后能够明显提高食物风味,然而目前鲜见相关文献对炒制前后葱、姜、蒜混合物的复合香气物质进行详细对比的报道,因此将葱、姜、蒜混合物作为整体,系统研究其在炒制前后挥发性风味物质的变化十分必要。

本研究使用固相微萃取(solid-phase microextraction, SPME)法提取葱、姜、蒜混合物炒制后的挥发性风味物质,采用气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)分析鉴定其化学成分,探究葱、姜、蒜混合物炒制前后挥发性风味物质的变化,为改进葱姜蒜加工方法和探究

葱、姜、蒜混合物对食品原料的影响提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

新鲜葱、新鲜大蒜、新鲜姜购于美廉美超市即买即用;金龙鱼大豆油(一级,秦皇岛金海食品工业有限公司)。

1.2 仪器与设备

IC-AZ2102 型钛古电磁炉(广东太古科技有限公司); CJTZ-922 型厨具套装组合(拜格日用品有限公司); testo 108 型温度计(德国仪表有限公司); B49704 型炒锅(浙江炊大王炊具有限公司); CZ6370 不锈钢铲(浙江双枪竹木有限公司); 7890B-5977B 气相色谱质谱联用仪、TB-WAX 毛细管色谱柱(30 m×250 μm, 0.25 μm)(美国安捷伦公司); DK-S24 型电热恒温水浴锅(上海森信实验仪器有限公司); 固相微萃取手柄、75 μm CAR/PDMS 萃取头(美国 Supelco 公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 新鲜葱姜蒜和葱姜蒜油的制备

参考陈海涛等^[13]和刘皓月等^[16]的方法,选取初温 120、130、140、150℃,终温为 110、120、130℃进行实验,观察葱姜蒜固形物的外观特征、葱姜蒜油的透明度、香气等,确定葱、姜、蒜油的炒制温度为初温 140℃、终温 120℃。

新鲜葱、姜、蒜分别切成长宽高均为 5 mm 的小块,等质量混合备用。100 g 大豆油置于锅中,电磁炉 800 W 加热到 140℃时,加入 60 g 葱、姜、蒜混合物炒制,炒制过程中不断搅拌,待锅中油温至 120℃时停止加热,沥出葱、姜、蒜所有的固体物质,葱、姜、蒜油晾凉,置于 4℃冰箱中冷藏备用。炒制温度使用电子温度计进行测量和控制。

1.3.2 SPME 萃取葱姜蒜炒制前后挥发性成分

取 6 g 新鲜葱姜蒜混合物或葱姜蒜油加入到 20 mL 固相微萃取瓶中,在 60℃水浴中平衡 30 min。在同样的温度条件下,使用 75 μm CAR/PDMS 萃取头萃取 30 min。萃取结束后,将吸附头收回,再迅速拔出萃取头并直接插入到

气相色谱仪的进样口(250°C), 高温解吸 5 min 后, 取出 SPME 针管。所解吸下来的挥发性组分采用气相色谱质谱联用仪分析鉴定。新鲜葱姜蒜混合物和葱姜蒜油各进行 3 次平行实验, 结果以平均值±标准偏差表示。

1.3.3 GC-MS 分析条件

GC 条件: TB-WAX 毛细管色谱柱(30 m×250 μm, 0.25 μm); 进样口温度为 250°C; 升温程序: 起始温度 40.0°C, 保持 1 min, 以 2.0°C/min 升温至 130.0°C, 保持 1.0 min, 以 10.0°C/min 升温至 220°C, 保持 8 min; 载气(He)流速 1.0 mL/min, 进样量 10 μL; 分流比 30:1。

MS 条件: 电子轰击离子源; 电子能量 70 eV, 离子源温度 230°C, 四极杆温度 150°C; 质量扫描范围 10~700 *m/z*; 全扫描方式扫描; 溶剂延迟 3.0 min。

1.4 气味活度值评价方法

参考 SWIEGERS 等^[19]的方法, 采用气味活度值(odor activity value, OAV)评价各化合物对样品总体风味的贡献, 气味活度值按照公式(1)计算:

$$OAV=C/T \quad (1)$$

式中, *C* 为挥发性香气成分的相对百分含量, %; *T* 为挥发性香气成分感觉阈值, μg/L。

若某挥发性风味物质的 OAV>1, 则认为该物质对总体风味起到主要贡献作用, 若 0.1<OAV<1, 则认为该物质对总体风味起到一定的修饰作用^[20]。

1.5 数据处理

通过 NIST 14.L 数据库检索, 对挥发性物质进行定性分析, 使用峰面积归一化法计算挥发性物质的相对含量。使用 SPSS 22 进行 *t* 检验, 进行显著性分析, Origin 2021 进行绘图、计算峰面积。

2 结果与分析

2.1 葱姜蒜混合物炒制温度的确定

由表 1 可知, 初温(下锅的油温)为 120°C 时, 3 份葱姜蒜油香气均较淡, 说明炒制温度不够, 挥发性物质未完全溶解入油中。初温为 130°C 时, 葱姜蒜油的香气仅能体现

一种或两种物质的香气, 说明挥发性物质仍未完全溶解。初温为 150°C 时, 固体物质表面变色, 出现焦糊状, 葱姜蒜油可能发生碳化, 香气受到焦糊味道的干扰, 不适宜后续分析。终温(炒制停止时的最终温度)达到 110°C 的 4 份固体物质样品中, 香气和颜色表征并无明显差别, 且油中呈现出不同程度的浑浊, 将炒制后的固相物质与新鲜葱姜蒜对比后发现, 香气无明显区别。终温达到 130°C 的 4 份固体物质样品出现焦糊现象, 温度偏高。综上, 以初温 140°C、终温 120°C 作为葱姜蒜混合物炒制温度。

2.2 挥发性风味物质分析鉴定结果

图 1 为新鲜葱姜蒜混合物(A)和葱姜蒜油(B)挥发性风味物质 GC-MS 总离子流图, 由图 1 可知, 新鲜葱姜蒜混合物的挥发性风味物质种类多于炒制后葱姜蒜油, 新鲜葱姜蒜混合物的总离子流图峰面积(5487268.22)大于葱姜蒜油峰面积(242695.60), 说明新鲜葱姜蒜的挥发性风味物质的总含量亦大于葱姜蒜油。

从新鲜葱姜蒜中共检出化合物 81 种挥发性风味物质, 包括烃类 43 种、醚类 17 种、醇类 3 种、酮类 4 种、酸类 2 种、酯类 4 种、杂环类 8 种。详见表 2。新鲜葱姜蒜中含量最多的是烃类化合物(68.47%), 其次是醚类化合物(22.86%), 其中, 相对百分含量最高的挥发性风味物质是 α -姜黄烯(12.46%), 其次是姜烯(11.67%)、1-甲基-4-(6-甲基庚-5-烯-2-基)环己-1,3-二烯(5.59%)、 β -倍半水芹烯(5.31%)、(S)-1-甲基-4-(5-甲基-1-亚甲基-4-己烯基)环己烯(1.65%)等。从葱姜蒜油中共检出 19 种挥发性风味物质, 包括烃类 9 种、醚类 2 种、醇类 5 种、醛类 2 种、酸类 1 种。炒制前后均检测出的物质 9 种, 包括苜烯、2-蒎烯、(-)-苜烯、 α -水芹烯、松油烯、*d*-柠檬烯和邻-异丙基苯 7 种烃类物质和二烯丙基硫醚和二烯丙基二硫醚 2 种醚类物质。其中相对百分含量最高的是烃类化合物(58.11%), 其次是醇类(20.41%)和醚类(12.78%), 其中相对百分含量最高的挥发性风味物质为 1-亚甲基-4-(1-甲基乙炔基)-环己烷(20.92%), 其次为邻-异丙基苯(13.36%)、(-)-苜烯(11.19%)、2-丙-1-醇(10.34%)、二丙基二硫醚(8.77%)等。

表 1 不同炒制温度下的样品特征

Table 1 Sample characteristics at different frying temperatures

初温/°C	终温/°C	葱姜蒜的颜色特征	是否出现焦糊	油的色泽	油的香气
120	110	无明显变化	否	显出乳白色, 略浑浊	较淡, 葱味道明显
120	120	葱无明显变化, 姜蒜显黄色	否	较澄清	较淡, 姜味明显
120	130	葱无明显变化, 蒜呈金黄色, 姜蒜体积减小	否	澄清	略淡, 姜的香味突出
130	110	无明显变化	否	略呈乳白色	葱姜味较明显
130	120	葱无明显变化, 姜蒜呈金黄色	否	澄清	浓郁, 葱姜香气突出
130	130	焦黄色, 部分葱发黑	是	澄清	浓郁, 有姜的苦味
140	110	无明显变化, 姜显黄绿色	否	乳白色, 略浑浊	较淡, 葱姜蒜味
140	120	无明显变化	否	澄清	较浓的葱姜蒜香气
140	130	蒜呈金黄色, 姜无明显变化, 部分葱显焦糊的黑色	是	澄清	浓郁香气
150	110	葱姜蒜稍微变色	否	乳白色, 略浑浊	较浓葱姜蒜香气, 略苦
150	120	蒜呈金黄色, 葱体积缩小, 姜无明显变化	否	澄清	浓郁香气
150	130	部分蒜呈现焦褐色, 葱变成金黄色, 姜体积缩小	是	澄清	浓郁焦香味, 姜苦味

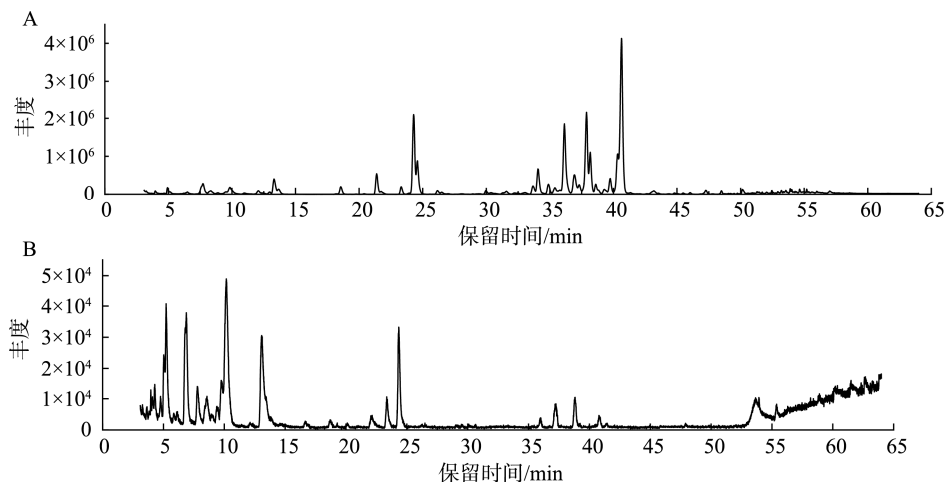


图1 新鲜葱姜蒜(A)和葱姜蒜油(B)挥发性风味物质 GC-MS 总离子流图

Fig.1 GC-MS total ion chromatograms of volatile flavor components of scallion-ginger-garlic (A) and scallion-ginger-garlic oil (B)

表2 葱姜蒜混合物炒制前后挥发性风味物质相对百分含量(n=3)

Table 2 Relative percentages of volatile flavor substances of scallion-ginger-garlic mixtures before and after frying (n=3)

序号	化合物名称	CAS 号	相对百分含量/%		P
			新鲜葱姜蒜	葱姜蒜油	
烃类					
1	(+)- α -蒎烯	007785-70-8	-	1.74±0.28	/
2	莰烯	000079-92-5	0.39±0.16	4.58±0.77*	0.01
3	桉烯	003387-41-5	1.15±0.00	-	/
4	(S)-1-甲基-4-(5-甲基-1-亚甲基-4-己烯基)环己烯	000495-61-4	1.65±1.98	-	/
5	α -姜黄烯	000644-30-4	12.46±8.72	-	/
6	卡达萘	000483-78-3	0.32±0.08	-	/
7	2-蒎烯	000080-56-8	0.27±0.13	2.23±0.73*	0.02
8	(-)-莰烯	005794-04-7	0.50±0.00	11.19±3.04*	0.02
9	α -水芹烯	000099-83-2	0.64±0.26	4.13±0.59*	0.03
10	松油烯	000099-86-5	0.50±0.28	4.53±0.41***	<0.001
11	d-柠檬烯	005989-27-5	0.48±0.14	1.94±0.62*	0.02
12	3-异丙基-6-亚甲基-1-环己烯	000555-10-2	1.33±0.01	-	/
13	邻-异丙基苯	000527-84-4	0.16±0.09	13.36±0.02***	<0.001
14	2,6-二甲基-6-(4-甲基-3-戊烯基)双环[3.1.1]庚-2-烯	017699-05-7	0.76±0.72	-	/
15	2,4a,5,6,7,8,9,9a-八氢-3,5,5-三甲基-9-亚甲基-,(4aS-顺式)-1H-苯环庚烯	003853-83-6	0.07±0.00	-	/
16	1,2,3,4,5,6,7,8-八氢-1,4,9,9-四甲基-,[1S-(1 α ,4 α ,7 α)]-4,7-甲基萘	000514-51-2	0.22±0.04	-	/
17	(1R,4R,4aS,8aR)-4,7-二甲基-1-(丙烯基)-1,2,3,4,4a,5,6,8a-八氢萘	092692-39-2	1.44±0.38	-	/
18	(1,1,2-三甲基丙基)-苯	026356-11-6	1.25±0.00	-	/
19	(1R,3aR,4aR,8aR)-1,4,4,6-四甲基-1,2,3,3a,4,4a,7,8-八氢环戊[1,4]环丁[1,2]苯	094482-89-0	0.96±0.00	-	/
20	甲腈(3R,3aR,7R,8aS)-3,8,8-三甲基-6-亚甲基八氢-1H-3a	079120-98-2	0.49±0.00	-	/
21	1-甲基-4-(6-甲基庚-5-烯-2-基)环己-1,3-二烯	000451-55-8	5.59±3.45	-	/
22	γ -茂丁烯	030021-74-0	2.45±0.51	-	/
23	十氢-1,1,3a-三甲基-7-亚甲基-,[1aS-(1 $\alpha\alpha$,3 $\alpha\alpha$,7 $\alpha\beta$,7 $\beta\alpha$)]-1H-环丙烷[a]萘	020071-49-2	1.16±0.00	-	/
24	姜烯	000495-60-3	11.67±2.25	-	/
25	2,6-二甲基-6-(4-甲基-3-戊烯基)-双环[3.1.1]庚-2-烯	017699-05-7	1.48±0.00	-	/
26	(-)- α -帕纳森森	056633-28-4	0.70±0.08	-	/
27	(Z)-1-甲基-4-(6-甲基庚-5-烯-2-亚烷基)环己-1-烯	013062-00-5	1.87±0.00	-	/

表 1(续)

序号	化合物名称	CAS 号	相对百分含量/%		P
			新鲜葱姜蒜	葱姜蒜油	
28	β -倍半水芹烯	020307-83-9	5.31±1.07	-	/
29	(+)-喇叭烯	021747-46-6	0.04±0.02	-	/
30	1,2,3,4-四氢-1,6-二甲基-4-(1-甲基乙基)-(1S-顺式)-萘	000483-77-2	0.92±0.22	-	/
31	(E)-1-甲基-4-(6-甲基庚-5-烯-2-亚烷基)环己-1-烯	053585-13-0	0.10±0.00	-	/
32	(8R,8aS)-8,8a-二甲基-2-(丙烷-2-亚烷基)-1,2,3,7,8,8a-六氢萘	027840-40-0	0.06±0.00	-	/
33	A-二去氢菖蒲烯	021391-99-1	0.44±0.07	-	/
34	8-异丙基-2,5-二甲基四氢萘	001460-96-4	0.06±0.01	-	/
35	2,3,3a,4-四氢-3,3a,6-三甲基-1-(1-甲基乙基)-1H-茛	059742-39-1	0.06±0.00	-	/
36	(2S,4R,7R,8R)-3,3,7,11-四甲基三环[6.3.0.0.2.4]十一碳-1(11)-烯	000489-40-7	0.04±0.00	-	/
37	α -脱氢芳基萘	078204-62-3	0.37±0.14	-	/
38	1,2,3,4,5,6,7,8-八氢-9-甲基蒽	004948-51-0	0.17±0.00	-	/
39	(+)-香橙烯	000489-39-4	0.05±0.00	-	/
40	八氢-1,9,9-三甲基-4-亚甲基-(1 α ,3 $\alpha\alpha$,7 α ,8 $\alpha\beta$)-1H-3a,7-甲腈	000508-55-4	0.10±0.00	-	/
41	1-(15-二甲基己基)-4-甲基-苯	001461-02-5	0.16±0.00	-	/
42	愈创兰油烃	000489-84-9	0.16±0.03	-	/
43	(1R,4R,5S)-1,8-二甲基-4-(丙烯基)螺癸烯	729602-94-2	0.16±0.00	-	/
44	(2R,8R,8aS)-8,8a-二甲基-2-(prop-1-en-2-yl)-1,2,3,7,8,8a-六氢萘	005090-61-9	0.13±0.00	-	/
45	1-亚甲基-4-(1-甲基乙烯基)-环己烷	000499-97-8	-	20.92±0.00	/
醚类					
46	烯丙基丙基硫醚	010152-76-8	0.29±0.00	-	/
47	二烯丙基硫醚	000592-88-1	1.47±0.82	2.84±1.11	0.23
48	甲基丙基二硫醚	002179-60-4	0.24±0.16	-	/
49	烯丙基甲基二硫醚	002179-58-0	4.61±3.71	-	/
50	二丙基二硫醚	000629-19-6	0.85±0.39	8.77±1.83*	0.02
51	1-烯丙基-2-异丙基二硫醚	067421-85-6	3.54±2.82	-	/
52	(Z)-1-烯丙基-2-(丙-1-烯-1-基)二硫醚	122156-03-0	1.16±0.26	-	/
53	二烯丙基二硫醚	002179-57-9	8.71±4.22	-	/
54	3H-12-二硫醚	000288-26-6	0.66±0.56	-	/
55	烯丙基甲基三硫醚	034135-85-8	0.82±0.33	-	/
56	(E)-1-(丙-1-烯-1-基)-2-丙基二硫醚	023838-21-3	0.35±0.33	-	/
57	(甲氧基甲氧基甲基)苯	031600-55-2	0.05±0.00	-	/
58	(Z)-1-甲基-2-(丙-1-烯-1-基)二硫醚	023838-18-8	0.46±0.21	-	/
59	(E)-1-烯丙基-2-(丙-1-烯-1-基)二硫醚	122156-02-9	5.89±2.11	-	/
60	18-冠醚-6	017455-13-9	0.04±0.01	-	/
61	15-冠醚-5	033100-27-5	0.08±0.00	-	/
62	12-冠醚-4	000294-93-9	0.02±0.01	-	/
醇类					
63	3,7-二甲基-6-辛烯-1-醇	040607-48-5	0.25±0.00	-	/
64	橙花醇	000106-25-2	0.13±0.00	-	/
65	香根草醇	057422-86-3	0.05±0.00	-	/
66	2-丙-1-醇	000107-18-6	-	10.34±3.45	/
67	4,7,7-三甲基-双环[2.2.1]庚-2-醇	022336-76-1	-	2.57±0.00	/
68	3-甲基-2-丁醇	000598-75-4	-	2.62±0.00	/
69	三甘醇	000112-27-6	-	0.75±0.00	/
70	3,6,9,12-四氧十四烷-1-醇	005650-20-4	-	1.55±0.00	/
醛类					
71	柠檬醛	005392-40-5	-	2.96±1.33	/
72	甲基丙烯醛	000078-85-3	-	1.73±0.01	/

表1(续)

序号	化合物名称	CAS号	相对百分含量/%		P
			新鲜葱姜蒜	葱姜蒜油	
酮类					
73	1,2,4,5-四噻-3,6-二硫酮	036239-33-5	0.10±0.00	-	/
74	2-十一烷酮	000112-12-9	0.54±0.06	-	/
75	1-乙基萹-9,10-二酮	024624-29-1	0.07±0.00	-	/
76	2,3-二羟基-2,4,6-环庚三烯-1-酮	033739-50-3	0.25±0.00	-	/
酸类					
77	3,3,4,7a-四甲基-1H-五环戊烯-7-氧-4-甲基苯磺酸	058003-47-7	0.04±0.00	-	/
78	2-甲基-二甲酯-2,3-环氧乙烷羧酸	140925-23-1	0.08±0.00	-	/
79	乙酸	000064-19-7	-	2.81±0.08	/
酯类					
80	(3S)-3-[(2-硝基苯基)氨基]-1-吡咯烷羧酸-1,1-二甲基乙酯	1000370-77-3	0.03±0.00	-	/
81	十四酸乙酯	000124-06-1	0.14±0.08	-	/
82	十六酸乙酯	000628-97-7	0.32±0.11	-	/
83	3-环戊基丙酸乙酯	017931-64-5	0.06±0.00	-	/
杂环类					
84	反式-3,6-二乙基-1245-四噻吩	934273-77-5	0.19±0.03	-	/
85	3,4-二甲基噻吩	000632-15-5	0.84±0.15	-	/
86	2-巯基噻唑啉	000096-53-7	0.29±0.00	-	/
87	2-噻吩甲胺	027757-85-3	0.16±0.00	-	/
88	5-(2-甲氧乙基)-1,2,3,4-四甲基-1,3-环戊二烯	151226-45-8	0.13±0.00	-	/
89	2,4-二甲基噻啉	001198-37-4	0.19±0.00	-	/
90	(1S,3aR,4R,8R,8aS)-1-异丙基-3a-甲基-7-亚甲基十氢-4,8-表硫杂氮烯	072445-42-2	0.27±0.00	-	/
91	1,3,6,8-四甲基吡啶[3,4-d]嘧啶-2,4(1H,3H)-二酮	022389-81-7	0.08±0.00	-	/

注: -表示未检出; * $P<0.05$, *** $P<0.001$, 表示葱姜蒜油与新鲜葱姜蒜中挥发性风味物质相对百分含量存在显著差异; /表示未做统计学分析。

2.3 新鲜葱姜蒜与葱姜蒜油挥发性成分变化比较

结合表2~3可知,新鲜葱姜蒜混合物与炒制后葱姜蒜油在风味物质存在差异,炒制后挥发性物质种类明显减少,差异集中在烃类、醚类、杂环类物质上。与新鲜葱姜蒜相比,炒制后的葱姜蒜油挥发性风味物质中醚类和烃类相对百分含量明显减少,其中烃类物质减少10.37%,醚类物质减少10.08%,酮类、酯类、杂环类物质未被测出,而葱姜蒜油中的醇类、醛类、酸类物质相对百分含量均有上升,分别上升18.43%、4.47%和2.63%。炒制后葱姜蒜油中的乙酸(2.81%)相对百分含量远高于新鲜葱姜蒜中酸类物质之和(0.12%),炒制后的葱姜蒜油中新检测出的醇类挥发性风味物质为:2-丙-1-醇、4,7,7-三甲基-双环[2.2.1]庚-2-醇、3-甲基-2-丁醇、三甘醇、3,6,9,12-四氧十四烷-1-醇。新鲜葱姜蒜混合物中未检出醛类物质,而在葱姜蒜油中出现柠檬醛和甲基丙烯醛。其他物质为胍类、胺类和氧硅化合物,其中胍类和胺类物质数量较少且相对百分含量极低,氧硅化合物不属于葱姜蒜的挥发性物质,出现此杂峰的原因可能为色谱柱固定相的轻微流失^[21],因此将这3类物质归入其他物质中。

2.4 新鲜葱姜蒜与葱姜蒜油挥发性风味物质气活值分析

根据表4可知,新鲜葱姜蒜混合物中OAV>1的挥发性风味物质有 α -水芹烯、*d*-柠檬烯、3-异丙基-6-亚甲基-1-环己烯、二烯丙基硫醚、二丙基二硫醚、2-十一烷酮,为新鲜葱姜蒜混

合物的关键性香气成分。炒制后的葱姜蒜油中OAV>1的挥发性风味物质有烃类物质如(+)- α -蒎烯、2-蒎烯、 α -水芹烯、二烯丙基硫醚、二丙基二硫醚、4,7,7-三甲基-双环[2.2.1]庚-2-醇、柠檬醛、乙酸,为新鲜葱姜蒜混合物的关键性香气成分。

研究表明,醛类物质具有较低的阈值且多数为焦香和脂肪香,醚类物质如二烯丙基硫醚具有葱、蒜香气和淡臭味^[13,22]。葱姜蒜油中,二丙基二硫醚、柠檬醛和二烯丙基硫醚的OAV值为前3,分别为2742.08、71.39、56.89,葱姜蒜油中醛、酸类物质及大部分醚类物质的OAV值明显比炒制前高。醛类、醚类化合物和乙酸均具有易挥发,阈值低的特点^[23-24],这说明醚、醛、酸类物质是葱、姜、蒜油的特有香气主要来源,并对葱姜蒜油特征风味具有一定贡献^[13]和协同作用。

表3 葱姜蒜混合物炒制前后各类物质相对百分含量和数量
Table 3 Relative percentages and amount of various substances of scallion-ginger-garlic mixtures before and after frying

类别	相对百分含量/%		挥发性风味物质数量	
	新鲜葱姜蒜	葱姜蒜油	新鲜葱姜蒜	葱姜蒜油
烃类	68.47	58.11	43	9
醇类	0.43	20.41	3	5
醚类	22.86	12.78	17	2
醛类	0.00	4.47	0	2
酮类	1.01	0.00	4	0
酸类	0.12	2.81	2	1
酯类	0.50	0.00	4	0
杂环类	2.09	0.00	8	0
其他	4.51	1.48	-	-

注: -表示未检出。

表 4 葱姜蒜混合物炒制前后挥发性风味物质的 OAVs
Table 4 OAVs of volatile flavor substances of scallion-ginger-garlic mixtures before and after frying

挥发性风味物质	香气阈值 ($\mu\text{g/L}$)	OAVs	
		新鲜葱姜蒜	葱姜蒜油
(+)- α -蒎烯	0.03	0.00	52.62
桉烯	600.00	0.00	0.00
2-蒎烯	1.01	0.22	2.16
(-)-蒎烯	581.00	0.00	0.02
α -水芹烯	0.20	3.03	16.44
<i>d</i> -柠檬烯	0.21	1.42	0.00
3-异丙基-6-亚甲基-1-环己烯	0.04	36.85	0.00
姜烯	717.00	0.02	0.00
二烯丙基硫醚	0.05	29.32	56.89
甲基丙基二硫醚	6.30	0.04	0.00
二丙基二硫醚	0.00	265.42	2742.08
18-冠醚-6	132.00	0.00	0.00
15-冠醚-5	440.00	0.00	0.00
12-冠醚-4	2100.00	0.00	0.00
橙花醇	0.50	0.25	0.00
4,7,7-三甲基-双环[2.2.1]	1.70	0.00	1.51
庚-2-醇	1400.00	0.00	0.00
三甘醇	0.04	0.00	71.39
柠檬醛	0.45	1.20	0.00
2-十一烷酮	1.37	0.00	2.05
乙酸	1.50	0.21	0.00
十六酸乙酯	1.30	0.64	0.00
3,4-二甲基噻吩	54.00	0.01	0.00
2-巯基噻唑啉			

值得注意的是,新鲜葱姜蒜混合物中 *d*-柠檬烯、3-异丙基-6-亚甲基-1-环己烯、2-十一烷酮等物质的 OAV 值减少可能是炒制使其刺激性气味减小的重要原因。此外,新鲜葱姜蒜主要挥发性物质与炒制后的葱姜蒜油均含有多种物质,因此其香味并非单独来源于某一种物质,可能由美拉德反应、脂质氧化或多种物质的协同作用共同产生^[25]。

2.5 新鲜葱姜蒜与葱姜蒜油挥发性风味物质主成分分析

对葱姜蒜混合物与葱姜蒜油挥发性风味物质的种类进行主成分分析,结果如图 2 所示,其中主成分 1 的方差贡献率为 72.3%,主成分 2 的方差贡献率为 16.2%,二者相加为 88.5%,累计贡献率大于 80%,能反映挥发性风味物质种类的绝大部分信息。新鲜葱姜蒜主要集中在第一、第四象限,而葱姜蒜油主要集中在第二、第三象限,说明新鲜葱姜蒜和葱姜蒜油的挥发性风味物质种类存在差异。样品的分布区域和某种挥发性风味物质的分布越接近,则说明该物质对此样品的风味贡献越大^[26]。酮类、醚类、杂环类和酯类与新鲜葱姜蒜分布较为接近,因此推测酮类、醚类、杂环类和酯类对新鲜葱姜蒜的风味起到主要贡献作用。醛类、酸类和醇类物质与炒制后的葱姜蒜油分布较接近,因此推测醛类、酸类和醇类这 3 种物质对葱姜蒜油的香气起到主要贡献作用,是炒制前后葱姜蒜混合物风味物质差异化的主要影响因素,这与 OVA 分析结果较为一致。

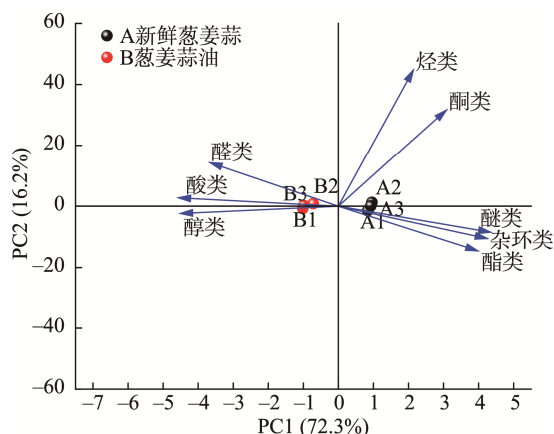


图 2 新鲜葱姜蒜与葱姜蒜油的主成分分析图

Fig.2 Principal component analysis chart of fresh scallion-ginger-garlic and scallion-ginger-garlic oil

3 讨论与结论

本研究采用 SPME-CG-MS 分析在新鲜葱姜蒜和炒制后的葱姜蒜油中分别鉴定出 81 和 19 种挥发性风味物质,其中烃类物质和醚类物质在炒制前后相对百分含量均最多。炒制后的葱姜蒜油挥发性风味物质种类和相对百分含量明显减少,尤其是烃类、醚类和杂环类物质,但醛类、醇类和酸类相对含量有所上升。VARGA 等^[27]采用静态顶空结合 GC-MS 技术分析了热处理后大蒜中的挥发物,发现热处理可导致挥发物含量下降,尤其是含硫挥发物;ZHANG 等^[28]采用溶剂辅助风味蒸发结合 GC-MS 检测,发现经过油炸后的大葱中挥发性物质的总数量减少,这均与本研究结果一致。然而陈海涛等^[13]采用溶剂辅助风味蒸发结合 GC-MS 对新鲜大蒜和炸蒜油中的挥发性成分进行对比分析,发现新鲜大蒜中挥发性成分明显少于炸蒜油,推测原因可能与大蒜品种和检测方法有关。对于葱姜蒜混合物炒制后醚类物质的减少,比如在新鲜葱姜蒜中检测到高含量的二烯丙基二硫醚(8.71%)、烯丙基甲基二硫醚(4.61%)、1-烯丙基-2-异丙基二硫醚(3.54%)却未在葱姜蒜油中检测到,推测原因为热处理使挥发性风味物质挥发,或风味物质的结构经高温被破坏、发生裂解,发生美拉德或脂质氧化反应,转变为其他风味物质^[25]。胡兴鹏等^[29]采用 GC-MS 检测蒜氨酸水溶液在不同反应温度条件下的热分解产物,发现随着反应温度的升高,二烯丙基二硫醚等硫醚类物质的含量有所减少,此现象是因为热加工对硫醚类物质有一定的破坏作用,促使硫醚类化合物的断裂和重排^[29]。此外,大蒜素在加热过程中会发生分解与重排,产生二烯丙基二硫醚等一系列挥发性产物^[28,30],蒜和葱^[31]中的主要香气物质受热分解,同样生成挥发性含硫化合物,这些硫醚类化合物在炒制过程中挥发亦可导致其相对含量减少^[28]。炒制后的葱姜蒜油中烃类物质和杂环类物质明显减少,烃类物质减少 10.365%,杂环类物质未被检测出。然而陈海涛等^[13]使用溶剂辅助风味蒸发提取油炸后的大蒜油,采用 GC-MS 在其中检

测出比油炸前更多的杂环类物质和烃类物质,出现这种差异的原因可能为研究对象和提取方法不同,陈海涛等^[13]仅以大蒜单一物质作为研究对象并采用溶剂辅助风味蒸发提取法,而本研究以葱姜蒜混合物作为主体进行研究并采用 SPME 萃取法。研究表明,油炸加工过程对烃类与杂环类物质的存在具有一定的破坏作用^[32],因此烃类化合物和杂环类物质的减少可能是由于加热过程中高温使部分物质发生降解^[33]。同样地,葱姜蒜混合物炒制后醇类、醛类和酸类物质的增加可能与葱姜蒜中原有物质经高温加工处理生成了新的醇类、醛类和酸类有关,比如在葱姜蒜油中检测到的 2-丙-1-醇、4,7,7-三甲基-双环[2.2.1]庚-2-醇、3-甲基-2-丁醇、柠檬醛、乙酸等。CHU 等^[34]采用 GC-MS 检测大葱在油炸过程中的风味变化,同样发现醛类和酸类物质有所增加,与本研究结果一致。醇类、醛类、酸类可能是由于其他化合物高温分解或氧化后产生,也有可能是植物细胞破裂释放挥发性物质或部分物质异构化、降解重排产生^[35]。另外,酮类、酯类、杂环类物质在炒制后的葱姜蒜油中未被测出,推测相关物质被降解或水解为新的成分,这在一定程度上可以缓解新鲜葱姜蒜混合物中刺激性^[13],但具体的反应机制还需更加深入的研究。

此外, TIAN 等^[24]采用 SPME 结合 GC-MS 和 GC-O 在油炸大葱的挥发油中检测出了 2-戊基呋喃、2-乙基-3,5-二甲基吡嗪和 2-甲氧基苯酚等物质,王皓等^[36]采用溶剂萃取结合 GC-MS 在糖蒜挥发性风味物质中检测出了二甲基吡嗪、糠醛、呋喃酮等物质。然而本研究并未在炒制前后的葱姜蒜混合物中检测出呋喃类、吡嗪类、糠醛类和苯酚类化合物,这可能与原料产地、检测方法和加工方法有关。值得注意的是,耿宇凤^[7]在 120 和 150°C 的加热条件下采用 SPME 法萃取、GC-MS 测定大豆油的挥发性成分,其中含量最高的均为己醛,未检出本研究在葱姜蒜油中检出的 19 种挥发性风味物质,推测炒制工艺能使葱姜蒜大部分挥发性呈香物质溶解到油脂中^[38],故葱姜蒜在炒制过后的挥发性风味物质含量明显多于大豆油经加热后的挥发性风味物质,或大豆油经加热后挥发性风味物质的含量较低,未达到检出限。因此可以认为,大豆油经过煎炸热加工处理后的挥发性成分不影响炒制葱姜蒜油挥发性风味物质成分。吡嗪类化合物风味透散性好、阈值较低,呈现强烈的烘烤风味和坚果风味,是高温压榨花生油中坚果风味和烘焙风味的主要呈香物质^[39]。炒制后的花生油中检测出 20 种吡嗪类物质,占总含量的 49.53%,是花生油高温加热后的主要风味物质^[40],故若采用花生油对葱姜蒜进行炒制,则葱姜蒜油中吡嗪类物质含量可能增加。苏晓霞等^[41]研究了 3 种植物油在不同烹饪方式下的风味成分,发现硫甙降解产物是菜籽油自身独特的风味成分,菜籽油在热加工中硫甙产物含量下降,醛类、酸类等风味成分含量增加,且菜肴感官协调感有所提升,尤其是爆炒的烹饪方式下表现更加突出。因此若采用菜籽油对葱姜蒜进行炒制,则葱姜蒜油中醛类、酸类物质增加,硫甙类物质下降,总体风味协调性增加。噻唑类是芝麻油高温加工下特有的挥发性物质^[42],对菜肴表现出的硫味

和烤糊味有着重要的贡献,若采用芝麻油对葱姜蒜进行炒制,则葱姜蒜油中噻唑类物质含量增加,菜肴的焦糊味明显,整体协调性下降^[41]。

在后续的研究中,可以考虑使用溶剂辅助蒸发法与 SPME 法相结合,也可考虑采用内标法测得挥发性物质的具体含量,以得到更加全面的风味成分数据,同时可以进一步探索葱姜蒜油炒后香味物质产生机制,从而为改善葱姜蒜混合物作为调味料提供风味,为葱姜蒜混合物在食品中的应用提供更多理论依据。

参考文献

- [1] RYUK JA, KIM HJ, HWANG JT, et al. Effect of *Allium fistulosum* extracts on the stimulation of longitudinal bone growth in animal modeling diet-induced calcium and vitamin D deficiencies [J]. Appl Sci, 2021, 11(17): 7786.
- [2] OLA MFK, ABDUL WA, MOSHOOD AI, et al. Comparative evaluation of antioxidant properties of methanol extracts of *Allium cepa* Bulb, *Allium cepa* Bulb peels and *Allium fistulosum* [J]. Kragujevac J Sci, 2018, (40): 131-141.
- [3] 李肖,蔡依,周天天,等. 大葱的生物活性及化学成分研究进展[J]. 中国调味品, 2018, 43(8): 196-200.
- [4] LI X, CAI Y, ZHOU TT, et al. Research progress of bioactivity and chemical composition of *Allium fistulosum* [J]. China Cond, 2018, 43(8): 196-200.
- [5] FUKAYA M, NAKAMURA S, NAKAGAWA R, et al. Cyclic sulfur-containing compounds from *Allium fistulosum* 'Kujou' [J]. J Nat Med, 2019, 73(2): 397-403.
- [6] ZHANG M, ZHAO R, WANG D, et al. Ginger (*Zingiber officinale* Rosc.) and its bioactive components are potential resources for health beneficial agents [J]. Phytother Res: PTR, 2020, 35(2): 711-742.
- [7] AMBER K, BADAWY NA, EL-SAYD AEA, et al. Ginger root powder enhanced the growth productivity, digestibility, and antioxidative capacity to cope with the impacts of heat stress in rabbits [J]. J Therm Biol, 2021, 100(8): 103075.
- [8] ZHANG Y, SHEN J, ZHAO J, et al. Cedrol from ginger ameliorates rheumatoid arthritis via reducing inflammation and selectively inhibiting JAK3 phosphorylation [J]. J Agric Food Chem, 2021, 69(18): 5332-5343.
- [9] CHOWDHURY DK, SAHU NP, SARDAR P, et al. Feeding turmeric in combination with ginger or garlic enhances the digestive enzyme activities, growth and immunity in *Labeorohita* fingerlings [J]. Anim Feed Sci Technol, 2021, 29(1): 67-73.
- [10] JOHNSON JB, MANI JS, WHITE S, et al. Pungent and volatile constituents of dried Australian ginger [J]. Curr Res Food Sci, 2021, 4(3): 612-618.
- [11] 黄雪松,陈雅雪. GC-MS 法比较鲜姜与干姜的风味物质[J]. 中国食品学报, 2007, (5): 133-138.
- [12] HUANG XS, CHEN YX. Comparison of the flavor material between fresh and dried ginger by GC-MS [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2007, (5): 133-138.
- [13] SHAGN A, CAO SY, XU XY, et al. Bioactive compounds and biological functions of garlic (*Allium sativum* L.) [J]. Foods, 2019, 8(7): 246.
- [14] SHARMA S, SINGH DD. Investigations on the biological activity of *Allium sativum* agglutinin (ASA) isolated from garlic [J]. Protein Peptide Lett, 2022. DOI: 10.2174/0929866529999220509122720
- [15] 陈海涛,李萌,孙杰,等. 新鲜大蒜与炸蒜油挥发性风味物质的对比分析[J]. 精细化工, 2018, 35(8): 1355-1362.
- [16] CHEN HT, LI M, SUN J, et al. Analysis of volatile flavor constituents of fresh garlic and fried garlic oil [J]. Fine Chem, 2018, 35(8): 1355-1362.
- [17] 王瑞花,姜万舟,汪倩,等. 葱姜蒜混合物对炖煮猪肉感官品质、脂肪氧化及脂肪酸组成的影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(9): 238-243.
- [18] WANG RH, JIANG WZ, WANG Q, et al. Effects of ginger, and garlic mixtures on the sensory quality, lipid oxidation, and fatty acid composition of stewed pork [J]. Mod Food Sci Technol, 2015, 31(9): 238-243.
- [19] SCHALLER T, SCHIEBERLE P. Comparison of the key aroma compounds in fresh, raw ginger (*Zingiber officinale* Roscoe) from China and roasted

- ginger by application of aroma extract dilution analysis [J]. *J Agric Food Chem*, 2020, 68(51): 15292–15300.
- [16] 刘皓月, 李萌, 朱庆珍, 等. 3 种萃取方法炸蒜油特征风味的比较分析 [J]. *食品科学*, 2020, 41(12): 180–187.
LIU HY, LI M, ZHU QZ, *et al.* Comparison of three extraction methods used to determine the characteristic flavor of garlic frying oil [J]. *Food Sci*, 2020, 41(12): 180–187.
- [17] 龙全江, 金欣, 李文涛. 不同加工法干姜片制炮姜、姜炭中挥发油成分 GC-MS 分析 [J]. *现代中药研究与实践*, 2017, 31(5): 34–36.
LONG QJ, JIN X, LI WT. GC-MS analysis on the essential oil from roasted ginger and ginger charcoal processed by *Zingiberisrhizoma* with different processing methods [J]. *Res Pract Chin Med*, 2017, 31(5): 34–36.
- [18] ADEOTI OA, ALABI AO, OGUNJOBI EO, *et al.* Comparative study on the proximate, physicochemical and sensory properties of jams from selected tropical fruits spiced with ginger, garlic and turmeric [J]. *Asian Food Sci J*, 2021, 20(3): 86–99.
- [19] SWIEGERS JH, BARTOWSKY EJ, HENSCHKE PA, *et al.* Yeast and bacterial modulation of wine aroma and flavor [J]. *Aust J Grape Wine R*, 2005, 11(2): 139–173.
- [20] ZHU Y, LV HP, SHAO CY, *et al.* Identification of key odorants responsible for chestnut-like aroma quality of green teas [J]. *Food Res Int*, 2018, 108(6): 74–82.
- [21] 高利芳, 刘其玲, 郭辉, 等. 浅析影响气相色谱-质谱联用仪灵敏度的因素及日常维护 [J]. *农业灾害研究*, 2016, 6(1): 10–12.
GAO LF, LIU QL, GUO H, *et al.* Exploration on the influence factor of GC-MS sensitivity and the method of routine maintenance [J]. *J Agric Catastrophol*, 2016, 6(1): 10–12.
- [22] 沈菲, 罗瑞明, 丁丹, 等. 基于相对气味活度值法的新疆大盘鸡中主要挥发性风味物质分析 [J]. *肉类研究*, 2020, 34(8): 46–50.
SHEN F, LUO RM, DING D, *et al.* Analysis of main volatile flavor compounds in Xinjiang market chicken based on relative odor activity value [J]. *Meat Res*, 2020, 34(8): 46–50.
- [23] 赵颖颖, 李三影, 欧芳兰, 等. 热处理八角茴香对猪排骨挥发性风味的影响 [J]. *中国调味品*, 2021, 46(6): 46–53.
ZHAO YY, LI SY, OU FL, *et al.* Effect of heat-treated star anise on volatile flavor substances of pork ribs [J]. *China Cond*, 2021, 46(6): 46–53.
- [24] TIAN P, ZHAN P, TIAN H, *et al.* Analysis of volatile compound changes in fried shallot (*Allium cepa* L. var. *Aggregatum*) oil at different frying temperatures by GC-MS, OAV, and multivariate analysis [J]. *Food Chem*, 2021, 345(5): 128748.
- [25] 刘兵, 常远, 王瑞芳, 等. 葱属植物中挥发性风味物质研究进展 [J]. *食品科学*, 2022, 43(3): 249–257.
LIU B, CHANG Y, WANG RF, *et al.* Recent progress in research on volatile flavor compounds in *Allium* [J]. *Food Sci*, 2022, 43(3): 249–257.
- [26] DU DD, WANG J, WANG B, *et al.* Ripeness prediction of postharvest kiwifruit using a MOSe-nose combined with chemometrics [J]. *Sensors*, 2019, 19(2): 419.
- [27] VARGA VÉ, JÓCSÁK I, FERENC B, *et al.* Effect of crushing and heating on the formation of volatile organosulfur compounds in garlic [J]. *CyTA-J Food*, 2019, 17(1): 796–803.
- [28] ZHANG N, SUN BG, MAO XY, *et al.* Flavor formation in frying process of green onion (*Allium fistulosum* L.) deep-fried oil [J]. *Food Res Int*, 2019, 21: 296–306.
- [29] 胡兴鹏, 周华, 杜阳敏, 等. 蒜氨酸的热分解及其机理分析 [J]. *食品科学*, 2017, 38(3): 64–68.
HU XP, ZHOU H, DU YM, *et al.* Thermal decomposition of Alliin and mechanism analysis [J]. *Food Sci*, 2017, 38(3): 64–68.
- [30] 范波, 蔡焱, 王鹏, 等. 加热方式对大蒜挥发性物质的影响 [J]. *中国调味品*, 2022, 47(3): 72–77.
FAN B, CAI Y, WANG P, *et al.* Effects of heating methods on volatile compounds in garlic [J]. *Chin Cond*, 2022, 47(3): 72–77.
- [31] 何洪巨, 王希丽, 张建丽. GC-MS 法测定大葱、细香葱、小葱中的挥发性物质 [J]. *分析测试学报*, 2004, (S1): 98–100.
HE HJ, WANG XL, ZHANG JL. Analysis of components of shallots by GC-MS [J]. *J Instrum Anal*, 2004, (S1): 98–100.
- [32] 孟令哈, 雷思佳, 吴迪, 等. 全麦速冻油条复热加工中风味与抗氧化特性 [J]. *食品科学*, 2022, 43(4): 167–174.
MENG LH, LEI SJ, WU D, *et al.* Flavor substances and antioxidant properties of quick-frozen pre-fried whole wheat Youtiao after different reheating methods [J]. *Food Sci*, 2022, 43(4): 167–174.
- [33] ASOKAPANDIAN S, SWAMY GJ, HAJJUL H. Deep fat frying of foods: A critical review on process and product parameters [J]. *Crit Rev Food Sci*, 2020, 60(20): 3400–3413.
- [34] CHU YH, HSU HF. Comparative studies of different heat treatments on quality of fried shallots and their frying oils [J]. *Food Chem*, 2001, 75(1): 37–42.
- [35] 张谦益, 包李林, 熊巍林, 等. 不同产地浓香菜籽油中特征风味物质的研究 [J]. *中国油脂*, 2018, 43(8): 23–28.
ZHANG QY, BAO LL, XIONG WL, *et al.* Characteristic flavor substances of fragrant rapeseed oils from different regions [J]. *Chin Oils Fats*, 2018, 43(8): 23–28.
- [36] 王皓, 王嘉琳, 李丽慧, 等. 糖蒜腌制过程中化学成分的变化研究 [J]. *中国调味品*, 2017, 42(8): 10–14.
WAGN H, WAGN JL, LI LH, *et al.* Research on changes of chemical constituents of sweet garlic during processing [J]. *China Cond*, 2017, 42(8): 10–14.
- [37] 耿宇凤. 半连续加热过程中大豆油挥发性化合物形成机制 [D]. 大连: 大连工业大学, 2018.
GENG YF. Mechanism of volatile compound formation from soybean oils in a semi-continuous heating process [D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2018.
- [38] 张宁. 爆葱油特征风味研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
ZHANG N. Study on characteristic flavor of deep-fried oil of *Allium fistulosum* L. [D]. Beijing: China Agriculture University, 2017.
- [39] 刘云花, 杨颖, 胡晖, 等. 花生油风味物质解析及风味增强研究进展 [J]. *中国油脂*, 2017, 42(3): 30–34.
LIU YH, YANG Y, HU H, *et al.* Advance in flavor compounds analysis and flavor-enhancing technology of peanut oil [J]. *Chin Oils Fats*, 2017, 42(3): 30–34.
- [40] 刘晓君. 炒籽对花生油风味和品质的影响 [D]. 无锡: 江南大学, 2011.
LIU XJ. Effect of roasting on flavor and quality of peanut oil [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2011.
- [41] 苏晓霞, 苏迪, 郭斐, 等. 3 种植物油在不同烹饪方式下的风味成分对比研究 [J]. *中国粮油学报*: 1–14. [2022-08-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2864.TS.20220511.1325.002.html>
SU XX, SU D, GUO F, *et al.* Flavor comparison of three kinds of vegetable oils under different cooking methods [J]. *J Chin Cere Oils*: 1–14. [2022-08-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2864.TS.20220511.1325.002.html>
- [42] 刘鑫, 李睿, 徐漪沙, 等. 不同加工处理方式对芝麻油风味的影响研究 [J]. *保鲜与加工*, 2020, 20(6): 148–156.
LIU X, LI R, XU YS, *et al.* Influence of different processing methods on sesame oil flavor [J]. *Storage Process*, 2020, 20(6): 148–156.

(责任编辑: 郑丽于梦娇)

作者简介



葛怡青, 主要研究方向为食品质量与安全。

E-mail: gyq13011861349@163.com



全涛, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品营养与安全。

E-mail: tongtao1028@cau.edu.cn