

基于气相色谱-质谱技术与多元统计分析 咸蛋黄热加工中的异味组分

李祥雨, 熊雅婷, 滕建文, 韦保耀, 黄丽, 夏宁*
(广西大学轻工与食品工程学院, 广西南宁 530004)

摘要: 为明确热加工中咸蛋黄产生的异味化合物, 采用感官评价、气相色谱-质谱联用技术结合聚类分析、正交偏最小二乘判别分析和主成分分析等多元统计分析方法对咸蛋黄在热加工中的异味物质展开研究。通过感官定量描述分析明确无异味咸蛋黄和异味咸蛋黄样品具有风味轮廓差异, 确定部分咸蛋黄在热加工中存在明显异味。聚类分析显示6组咸蛋黄样品被清晰地分成两类, 与感官评价结果一致。进一步对无异味和异味咸蛋黄挥发性物质相对含量采用正交偏最小二乘判别分析, 得到33种变量投影重要性值大于1的主要差异组分, 其中以醛类及醇类差异最为显著。最后, 通过主成分分析筛选出咸蛋黄中和酸臭味正相关的挥发性化合物, 并结合香气活度值大于1确定正己醛、正戊醛、1-辛烯-3-醇、反,反-2,4-癸二烯醛、苯乙烯、二甲基二硫醚以及2-壬酮为咸蛋黄热加工中的主要异味化合物。该结果为热加工后咸蛋黄的风味特征及可能产生的异味组分解析提供参考, 并为咸蛋黄风味评价提供科学依据。

关键词: 咸蛋黄; 气相色谱-质谱联用; 多元统计分析

Analysis of Odor Components in Salted Egg Yolk during Thermal Processing Using Gas Chromatography-Mass Spectrometry and Multivariate Statistical Analysis

LI Xiangyu, XIONG Yating, TENG Jianwen, WEI Baoyao, HUANG Li, XIA Ning*
(College of Light Industry and Food Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Odor compounds produced in salted egg yolk during thermal processing were identify by sensory evaluation and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) combined with multivariate statistical analysis such as hierarchical cluster analysis (HCA), orthogonal partial least squares-discriminant analysis (OPLS-DA) and principal component analysis (PCA). By using quantitative descriptive sensory analysis, it was found that there was a significant difference in the flavor profile between egg yolk samples with and without unpleasant odor, and it was determined that some egg yolks had obvious off-flavor during hot processing. Cluster analysis showed that the six groups of salted egg yolk samples were clearly divided into two categories, which was consistent with the sensory evaluation results. Furthermore, OPLS-DA identified 33 major differential components with variable importance in the projection (VIP) scores greater than one between samples with and without unpleasant odor, and aldehydes and alcohols were the most significant differential components. Finally, the volatile compounds showing a positive correlation with sour odor were screened by PCA, and *n*-hexanal, *n*-valeraldehyde, 1-octen-3-ol, *trans,trans*-2,4-decadienal, styrene, dimethyl disulfide and 2-nonone were identified due to their odor activity values (OAV) greater than one as the major odor compounds of salted egg yolk during thermal processing. The results provide a reference for analysis of the flavor characteristics and possible off-flavor components of salted egg yolk after thermal processing and provide a scientific basis for accessing the quality of salted egg yolk.

Keywords: salted egg yolk; gas chromatography-mass spectrometry; multivariate statistical analysis

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220919-175

中图分类号: TS201.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2023)16-0292-09

收稿日期: 2022-09-19

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目(31760433)

第一作者简介: 李祥雨(1999—)(ORCID: 0000-0001-6513-3347), 女, 硕士, 研究方向为农副产品深加工。

E-mail: 17864733415@163.com

*通信作者简介: 夏宁(1977—)(ORCID: 0000-0001-9875-9266), 女, 副教授, 博士, 研究方向为农副产品深加工。

E-mail: xianing@gxu.edu.cn

引文格式:

李祥雨,熊雅婷,滕建文,等.基于气相色谱-质谱技术与多元统计分析咸蛋黄热加工中的异味组分[J].食品科学,2023,44(16):292-300. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220919-175. <http://www.spkx.net.cn>

LI Xiangyu, XIONG Yating, TENG Jianwen, et al. Analysis of odor components in salted egg yolk during thermal processing using gas chromatography-mass spectrometry and multivariate statistical analysis[J]. Food Science, 2023, 44(16): 292-300. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220919-175. <http://www.spkx.net.cn>

咸蛋是以鲜鸭蛋、鸡蛋等禽蛋为原料,经盐水或含盐的黄泥、红泥、草木灰等腌制而成,是一种传统加工食品。近年来,其蛋黄因独特的风味受到广大消费者的喜爱,并作为原料应用到月饼等烘焙领域。未经加工的咸蛋黄含有程度各异的蛋腥味,经过热加工后的咸蛋黄产生多种挥发性成分例如醛类、酮类、醇类、吡嗪以及呋喃等^[1],共同组成咸蛋黄的特殊风味。

咸蛋黄风味的形成主要包括腌制和熟制2个阶段,蛋黄经腌制后挥发性化合物种类和相对含量均发生变化,酯类、噻啉、噻唑含量增加^[2],2,2-二氯丙烷、3-丁烯-2-酮、丙酸甲酯、四氢呋喃会在腌制后的蛋黄中检出^[3]。加热熟化促使蛋黄的挥发性物质增加,其中醛类的种类和含量最多,而呋喃类和硫化物是熟蛋黄特有的风味物质^[4]。余平莲^[1]通过对生鲜蛋黄、生腌蛋黄和熟咸蛋黄的挥发性物质进行鉴定,发现只有煮熟的咸蛋黄才具有乙醇、2-甲基丁醛、2-戊醛、吡嗪等风味物质。这主要是由于蛋黄在热处理过程中,卵黄球颗粒的破裂、脂质迁移和脂肪氧化生成了醛、酮、酸等风味物质^[5]。由于脂质氧化的最终产物(醛、醇、酮等)具有较高的挥发性和较低的阈值,对食品特征风味的形成起关键作用,其种类和数量决定了产品风味的好坏,直接影响着消费者对相关产品的接受程度^[3]。Goldberg等^[6]报道脂质氧化会导致鸡蛋产生不良风味,Matumoto-Pintro等^[7]研究发现鸡蛋的异味主要是多不饱和脂肪酸氧化酸败导致,并发现煮熟鸡蛋样品在腐烂阶段的主要风味化合物为甲硫醇、硫化氢和异戊醛。任柳阳^[8]通过感官评价和气相色谱-质谱-嗅闻相结合的方式对加热后的蛋黄凝胶挥发性成分研究发现游离脂质氧化产物己醛、反-2-辛烯醛、反,反-2,4-癸二烯醛、1-辛烯-3-醇和2-戊基呋喃为蛋黄腥味的关键风味成分。总之,咸蛋黄风味的变化很大程度上与脂质氧化有关,并受热加工方式的影响。由于咸蛋黄在食品领域应用范围不断扩大,目前咸蛋黄的利用更倾向于采用高温热处理后作为风味基料或直接赋予产品特征风味,这与传统蒸煮的热加工方式有较大不同,也可能是导致部分咸蛋黄存在异味的原因之一。烘烤过程中脂肪受高温的直接影响不断氧化水解,氧化程度逐渐加深,对丰富咸蛋黄香气有重要意义,但过度的脂质氧化使1-辛烯-3-醇等挥发性化合物浓度过高等,给咸蛋黄带来酸败味等不良风味^[9-10]。然而,目前国内外对烘烤后

咸蛋黄挥发性风味成分分析及呈现异味挥发性成分的研究却鲜有报道。

感官风味是评价食品品质的重要指标,同时结合仪器分析是对食品风味物质研究的重要途径。定量描述分析(quantitative descriptive analysis, QDA)是一种具有剖析和描述功能的综合性感官分析方法,在剖析食品的感官品质、判断缺陷等方面具有定量效果^[11]。而仪器分析方面,近年来主要采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱(headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS)联用技术,该方法能较真实地反映食品中挥发性物质的基本组成^[12]。目前,感官评价结合HS-SPME-GC-MS已在鸡精^[13]、清香型白酒^[14]、腊肉^[15]等食品的风味分析方面进行应用。因此,本研究通过感官评价确定咸蛋黄存在异味属性,借助仪器分析和化学计量学工具,全面解析异味咸蛋黄中的特征风味化合物,以无异味的咸蛋黄为对照,对异味咸蛋黄特征风味化合物进行多元统计分析如聚类分析、正交偏最小二乘判别分析(orthogonal partial least squares-discrimination analysis, OPLS-DA)及主成分分析(principal component analysis, PCA)并结合香气活度值(odour activity value, OAV),以期找出目标差异化合物,为咸蛋黄风味评价提供科学依据。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

咸鸭蛋购于广西北海市苏氏蛋品厂。

正构烷烃(C₇~C₄₀) (均为色谱级) 美国Sigma公司;
环己酮(色谱级) 上海麦克林生化科技有限公司。

1.2 仪器与设备

FA2004电子天平 上海舜宇恒平科学仪器有限公司;
50/30 μm DVB/CAR/PDMS萃取头 美国Supelco公司; HHS-2
恒温水浴锅 常州国华电器有限公司; 7890B-5977A型气
相色谱-质谱联用仪 美国Agilent公司。

1.3 方法

1.3.1 咸蛋黄样品制备

将腌制成熟的咸蛋黄样品置于旋转烤炉中,320℃
烘烤18 min后进行感官评价。

1.3.2 QDA

感官评价小组成员由经过专业感官培训的15名学生组成(男性5人,女性10人,年龄20~25岁),评估符合ISO标准。首先,感官评价员通过嗅闻将咸蛋黄分为无异味的咸蛋黄(记为F)和异味的咸蛋黄(记为OF),并通过会议讨论确定咸蛋黄样品的8个风味描述词、定义和参比样(表1)。其次,根据表1对感官评价员进行感官培训,直到所有成员都能正确识别参比样的风味属性和风味强度。最后,将5 g样品放入30 mL棕色细口瓶中随机编码,分别提供给小组成员,并通过嗅闻量化属性。为了确保挥发性物质在顶空中积累,容器在60 °C的水浴中保存30 min。感官评价在(25±2) °C的感官评价实验室中进行,风味的强度范围为0~5级(0表示无,5表示非常强烈)。

表1 咸蛋黄感官描述词及其定义

描述词	定义	参比样
黄油味	加热后的黄油散发的气味	黄油
烤鸡肉味	生鸡肉在经过200 °C、15 min烘烤后的气味	烤鸡肉
肉松味	市售纯肉松的气味	肉松
烤面包味	市售烘烤纯面包的气味	面包
烤扁桃仁味	生扁桃仁经过180 °C、5 min烘烤后的气味	烤扁桃仁
热牛奶味	纯牛奶加热后的气味	热牛奶
蛋腥味	咸蛋清室温下放置1周的气味	咸蛋清
酸臭味	丁酸水溶液的气味	丁酸水溶液

1.3.3 挥发性化合物检测

1.3.3.1 HS-SPME条件

准确称取经感官评价确定后的F和OF样品各2.00 g置于20 mL顶空瓶中,并加入1 μL质量浓度为0.473 9 μg/mL的环己酮,用带有聚四氟乙烯隔垫的盖子密封,置于60 °C水浴中平衡10 min待用。将30/50 μm DVB/CAR/PDMS白色萃取头在GC进样口老化(老化温度250 °C,时间20 min),将老化好的SPME针插入顶空瓶静态吸附40 min后进行GC-MS分析,其中进样口温度250 °C,解吸时间5 min。

1.3.3.2 GC-MS条件

GC条件:VF-WAX色谱柱(60 m×0.25 mm,0.25 μm);升温程序:40 °C保持10 min,以2 °C/min升至60 °C,保持2 min,以3 °C/min升至120 °C,保持2 min,以5 °C/min升至230 °C,保持5 min;载气(He)流速1.0 mL/min,压力2.4 kPa,进样量0.5 μL;不分流。

MS条件:电子电离源;电子能量70 eV;传输线温度280 °C;离子源温度230 °C;母离子 m/z 285;四极杆温度150 °C;激活电压1.5 V;质量扫描范围 m/z 35~500。

1.3.4 挥发性化合物分析

定性分析:未知分子在一定的电子能量下,其离子碎片是固定的。实验数据通过GC-MSD化学工作站处

理,利用NIST14谱库进行未知物与已知物的比对,当正反匹配度大于80时,可基本判断该未知化合物。化合物在一定环境下,如载气速度、色谱柱长度和温度一定时,其保留时间是一定的。但保留指数(retention indices, RI)是一个相对常数,其不会随仪器条件的改变而改变,根据未知物的RI与标准RI对比,相差位于±50内即可。其中待测组分出峰时间和线性RI的换算公式(1)如下:

$$RI=100 \times n+100 \times \frac{t_a-t_n}{t_{n+1}-t_n} \quad (1)$$

式中: t_a 为组分a的保留时间/min; t_n 为饱和系列烷烃 C_n 的保留时间/min; t_{n+1} 为 C_{n+1} 的保留时间/min;组分a的保留时间必须在 C_n 和 C_{n+1} 之间。

定量分析:采取内标半定量的方法,针对无异味的咸蛋黄和异味的咸蛋黄风味组分的出峰面积按式(2)计算相对含量:

$$C_x=\frac{A_x}{A_i} \times C_i \quad (2)$$

式中: A_x 为待测组分的峰面积; A_i 为内标峰面积; C_x 为待测组分含量/(μg/kg); C_i 为内标含量/(μg/kg)。

1.3.5 OAV计算

按式(3)计算OAV:

$$OAV=\frac{C_i}{OT_i} \quad (3)$$

式中: C_i 为化合物含量/(μg/kg); OT_i 为通过文献查得化合物阈值/(μg/kg)。

OAV>1,表明该物质对总体香气有直接贡献,OAV<1,表明该物质对总体香气无实质性贡献,OAV越大则说明该物质对总体香气的贡献越大。

1.4 数据处理

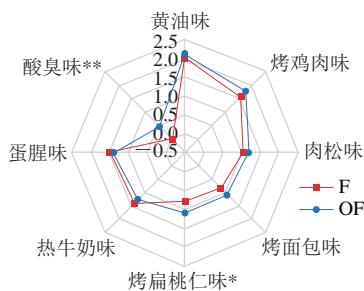
采用Microsoft Office Excel 2016对感官数据开展感官风味轮廓差异图分析并利用SPSS 22.0软件对感官数据进行方差分析;通过Origin 2022b对咸蛋黄样品挥发性风味物质相对含量进行聚类热图分析以及对感官属性和挥发性化合物进行PCA;采用SIMAC 14.1软件对样品进行OPLS-DA,筛选潜在差异化合物。

2 结果与分析

2.1 无异味和异味的咸蛋黄样品风味轮廓比较

采用感官评价的方法,确定烘烤后咸蛋黄的8个风味描述词,分别为黄油味、烤鸡肉味、肉松味、烤面包味、烤扁桃仁味、热牛奶味、蛋腥味和酸臭味。经过一段时间的风味强度标准训练,培训感官小组成员参比样区分能力、重复性及一致性均较好。然后感官评价员对

咸蛋黄的8个风味属性进行风味强度打分,根据打分结果得到风味轮廓图。如图1所示,两类咸蛋黄样品风味轮廓相似,其中黄油味和烤鸡肉味感官评分在1.5~2.2之间,相对较高,为烘烤后咸蛋黄的主要风味属性。F样品中咸蛋黄风味轮廓丰富且较为浓郁,无不良气味,而OF样品中除正常香气属性外,还存在明显酸臭味,且两个样品中烤扁桃仁味与酸臭味存在显著差异。



*.差异显著 ($P < 0.05$) ; **.差异极显著 ($P < 0.01$) 。

图1 无异味咸蛋黄和异味咸蛋黄风味轮廓图

Fig. 1 Flavor profiles of salted egg yolk without and with off-flavor

2.2 咸蛋黄挥发性物质聚类热图分析

为明确无异味和异味咸蛋黄样品间风味物质差异,采用无监督聚类热图统计对咸蛋黄中挥发性物质进行分析,将GC-MS检测到的物质使用内标法计算相对含量后绘制热图,以观察无异味和异味咸蛋黄的风味物质差异。为更直观比较同一物质在不同样品间的差异情况,绘制热图过程利用热图软件自带功能对GC-MS数据进行数对转换处理。热图中蓝色和红色代表物质含量由高到低,蓝色越深含量越低,红色越深含量越高。从图2可知,2组样品分别聚类,表明两组咸蛋黄挥发性物质相对含量间存在显著差异,与感官评价结果一致;各样品的3个平行检测均分别聚类,说明本研究的实验条件和方法具有较好的稳定性。在2组样品中,正己醛、正壬醛、正辛醛、2-戊基呋喃、3-甲基丁醛、苯甲醛、苯乙醛和1-辛烯-3-醇的相对含量较高,结合醛类阈值可知醛类化合物为咸蛋黄的主要风味物质;2组样品中相对含量差异较大的风味化合物有异戊醇、吡嗪、反-2-壬烯醛、8-壬烯-2-酮、2-庚酮、异辛醇、1,3-二甲基苯和对二甲苯,其中异戊醇、吡嗪、反-2-壬烯醛、8-壬烯-酮仅出现在OF样品中,且分别具有化学试剂味、臭味、陈腐味、蓝纹干酪的异味属性,但对风味的整体贡献,仍需结合阈值分析。该结果说明咸蛋黄样品中挥发性化合物种类和含量差异对于咸蛋黄风味轮廓和品质具有重要的影响,也为后续的风味组学分析提供了前提。

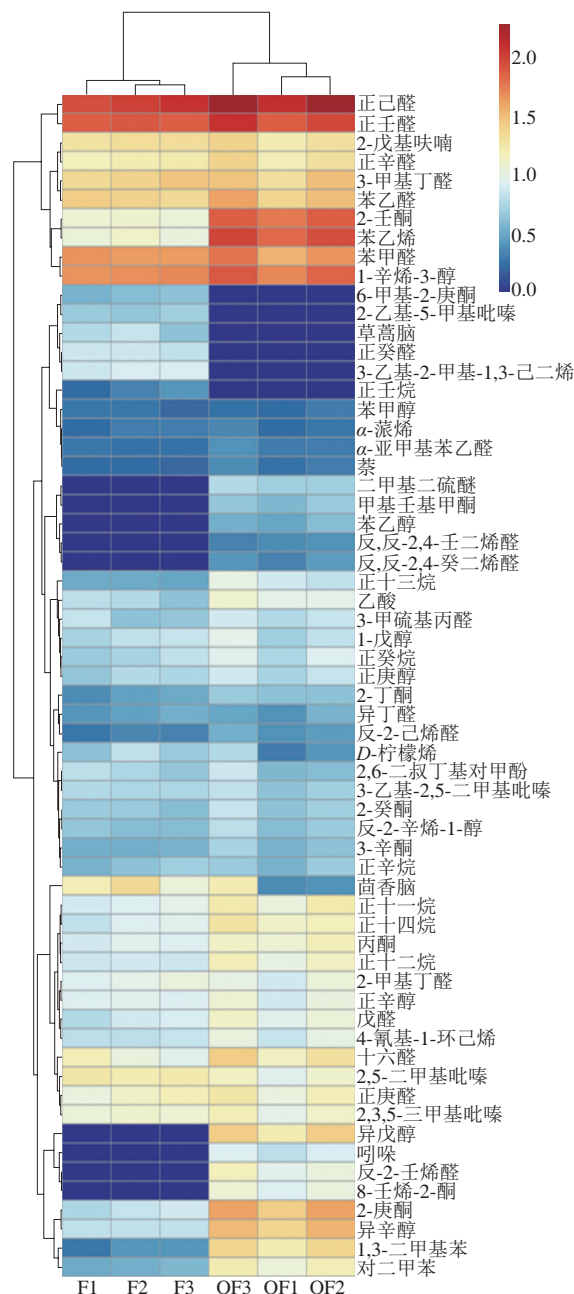


图2 异味和无异味咸蛋黄风味组分差异成分热图

Fig. 2 Heatmap of differential flavor components between salted egg yolk with and without off-flavor

2.3 F和OF挥发性成分比较分析

GC-MS检测图谱经提取和匹配后,通过NIST数据库比对和RI值鉴定,最后在2种咸蛋黄样品中共鉴定出62种风味化合物,其中包括醛类18种、酮类9种、醇类9种、烷烃类7种、烯烃类5种、杂环化合物5种、芳香化合物6种以及其他类化合物3种,并对不同种类化合物的数量和相对含量进行比较统计分析,如表2、图3所示。

醛类化合物由于其气味阈值低和分子质量低,且在咸蛋黄样品中的种类和含量最多,被认为是咸蛋黄风味

表 2 异味和无异味咸蛋黄挥发性成分GC-MS鉴定结果
Table 2 Results of GC-MS identification of volatile components in salted egg yolk without and with off-flavor

序号	挥发性成分	CAS编号	RI		阈值/ (µg/kg)	含量/(µg/kg)		OAV		鉴定 方法	风味描述
			文献	计算		F	OF	F	OF		
1	异丁醛	78-84-2	—	—	3.4	2.07±0.46	2.12±0.53	<1	<1	MS	麦芽香、脂肪味、青味、坚果味、酸臭味
2	2-甲基丁醛	96-17-3	912	—	23	8.82±1.22	8.92±1.9	<1	<1	MS	甜味、烧烤味
3	3-甲基丁醛	590-86-3	910	—	2	25.03±3.7	26.34±5.57	12.51	13.17	MS	水果香、杏仁香、烤香、麦芽香
4	正戊醛	110-62-3	935	—	9	6.39±1.3	10.29±2.21	<1	1.29	MS	坚果香、烤香
5	正己醛	66-25-1	1084	1074	5	102.56±13.85	168.73±39.34	20.51	33.75	MS, RI	脂肪味、青草味
6	正庚醛	111-71-7	1174	1182	5	12.23±2.36	13.97±3.81	2.45	2.79	MS, RI	水果味、脂肪味、甜味
7	反-2-己烯醛	6728-26-3	1220	1213	40	1.15±0.16	1.99±0.56	<1	<1	MS, RI	苦杏仁味
8	正辛醛	124-13-0	1280	1287	56	19.91±1.61	20.05±4.46	<1	<1	MS, RI	清新、橘子皮味、肥皂味
9	正壬醛	124-19-6	1385	1392	3.5	75.04±3.7	94.6±23.05	21.44	27.03	MS, RI	甜味、脂肪味、新鲜气味
10	3-甲基丙醛	3268-49-3	1458	1454	10	4.34±1.5	6.04±0.97	<1	<1	MS, RI	热牛奶味、熟土豆味
11	正癸醛	112-31-2	1484	1498	5	6.22±0.46	ND	1.24	—	MS, RI	清新味、坚果味
12	苯甲醛	100-52-7	1495	1525	50	43.48±0.68	45.81±11.45	<1	<1	MS, RI	杏仁味
13	苯乙醛	122-78-1	1625	1647	4	24.25±2.29	31.4±8.86	6.06	7.85	MS, RI	玫瑰味、蜂蜜味
14	α -亚甲基苯乙醛	4411-89-6	—	1938	—	0.87±0.11	1.23±0.25	—	—	MS	蜂蜜、可可、坚果
15	十六醛	629-80-1	2153	2138	0.91 ^[16]	10.92±3.35	19.42±5.52	12.00	21.34	MS	木香、玉米甜香、香橙味
16	反,反-2,4-壬二烯醛	5910-87-2	1709	1702	460	ND	1.39±0.22	—	<1	MS, RI	脂肪味、油炸味
17	反,反-2,4-癸二烯醛	25152-84-5	—	1768	0.5	ND	1.6±0.37	—	3.20	MS	脂肪味、鱼腥味
18	反-2-壬烯醛	18829-56-6	1527	1537	50	ND	10.55±2.96	—	<1	MS, RI	生花生味、干草味、陈腐味
19	丙酮	67-64-1	—	—	50 000	7.56±0.81	12.73±2.13	<1	<1	MS	辛辣味
20	2-丁酮	78-93-3	945	—	15 000	1.97±0.47	3.53±0.32	<1	<1	MS	乙醚味、奶油味
21	2-庚酮	110-43-0	1170	1178	80 ^[17]	5.80±0.99	34.95±8.31	<1	<1	MS, RI	葡萄柚味、柠檬香
22	6-甲基-2-庚酮	928-68-7	—	1235	50 ^[18]	3.08±0.32	ND	<1	—	MS	丁香、薄荷醇、鱼腥味
23	3-辛酮	106-68-3	1244	1253	—	2.61±0.04	3.53±0.85	—	—	MS, RI	水果味、坚果味
24	2-壬酮	821-55-6	1388	1387	50	10.76±0.64	67.86±10.73	<1	1.36	MS, RI	热牛奶、酸臭气味
25	2-癸酮	693-54-9	—	1491	9	3.61±0.42	4.47±1.29	<1	<1	MS	水果香、土霉味
26	8-壬烯-2-酮	5009-32-5	1160	1441	—	ND	9.48±1.81	—	—	MS, RI	蓝纹干酪味
27	甲基壬基甲酮	112-12-9	1543	1598	10	ND	4.39±0.47	—	<1	MS, RI	牛油味
28	1-辛烯-3-醇	3391-86-4	1394	1447	7.5	47.53±2.88	65.73±14.64	6.34	8.76	MS, RI	蘑菇味
29	1-戊醇	71-41-0	1255	1249	470	4.71±1	6.84±1.8	<1	<1	MS, RI	温和的气味、燃油味、水果味、香膏味
30	正庚醇	111-70-6	1467	1451	10 000	4.37±0.67	5.75±1.39	<1	<1	MS, RI	油脂味
31	异辛醇	104-76-7	1487	1485	150 ^[19]	5.75±0.15	29.46±5.36	<1	<1	MS, RI	特殊刺激性异味
32	正辛醇	111-87-5	1553	1557	12 000	7.87±0.23	9.11±2.02	<1	<1	MS, RI	芳香味、脂肪味、蜡味、柑橘味
33	反-2-辛烯-1-醇	18409-17-1	1610	1610	—	3.21±0.27	4.11±1.14	—	—	MS, RI	塑料味、油脂伴有腥臭味
34	苯甲醇	100-51-6	1865	1878	5 500	0.86±0.15	0.89±0.14	<1	<1	MS, RI	葵花籽味
35	异戊醇	123-51-3	1205	1203	225	ND	22.43±5.91	—	<1	MS, RI	化学气味
36	2-苯乙醇	1960/12/8	1925	1914	45	ND	2.59±0.58	—	<1	MS, RI	红酒味、花香
37	正辛烷	111-65-9	800	—	940	3.42±0.75	3.48±0.63	<1	<1	MS	—
38	正壬烷	111-84-2	900	—	—	1.21±0.49	ND	—	—	MS	—
39	正癸烷	124-18-5	1000	—	—	5.37±0.92	6.16±2.26	—	—	MS	油味、试剂味
40	正十一烷	1120-21-4	1100	1088	1170	7.87±1.10	14.21±3.96	<1	<1	MS, RI	肌肉味
41	正十二烷	112-40-3	1200	1196	2 040 ^[20]	6.60±0.32	12.56±2.75	<1	<1	MS, RI	爆米花样气味
42	正十三烷	629-50-5	1300	1297	2 140 ^[20]	2.26±0.14	7.32±1.91	<1	<1	MS, RI	烷烃味
43	正十四烷	629-59-4	1400	1398	—	7.26±1.39	15.03±3.14	—	—	MS, RI	烷烃味
44	α -蒎烯	80-56-8	1032	1010	1	0.95±0.19	1.01±0.26	<1	1.01	MS, RI	松木味、清香
45	D-柠檬烯	5989-27-5	1201	1191	210	4.40±1.21	2.57±2.08	<1	<1	MS, RI	柑橘味、薄荷味、水果甜香味、柠檬味
46	苯乙烯	100-42-5	1241	1255	5	10.75±1.36	81.76±14.36	2.15	16.35	MS, RI	香脂味、汽油味
47	3-乙基-2-甲基-1,3-己二烯	61142-36-7	—	1412	—	7.00±0.52	ND	—	—	MS	—
48	4-氰基-1-环己烯	100-45-8	—	1566	—	5.64±0.39	8.31±2.05	—	—	MS	香味
49	冰乙酸	64-19-7	1450	1458	1 050	4.46±1.00	9.73±1.79	<1	<1	MS, RI	酸味、醋味
50	2,6-二叔丁基对甲酚	128-37-0	—	1915	—	4.56±0.86	4.2±1.95	—	—	MS	芳香味
51	草蒿脑	140-67-0	1655	1674	7.5	4.86±1.46	ND	<1	—	MS, RI	茴香
52	茴香脑	104-46-1	—	1832	15 ^[21]	15.68±5.57	6.13±8.08	1.05	<1	MS	茴香
53	二甲基二硫醚	624-92-0	—	1063	3	ND	3.5±0.52	—	1.17	MS	硫味、蒜味、酸味、腐臭味
54	2,5-二甲基吡嗪	123-32-0	1253	1315	20	16.37±0.83	11.05±2.69	<1	<1	MS, RI	可味味、烤坚果味、烤牛肉味
55	2-乙基-5-甲基吡嗪	13360-64-0	1341	1386	1 000	3.87±0.23	ND	<1	—	MS, RI	水果味
56	2,3,5-三甲基吡嗪	14667-55-1	1395	1397	10	11.09±0.75	12.11±3.01	1.11	1.21	MS, RI	烘烤香、坚果香
57	3-乙基-2,5-二甲基吡嗪	13360-65-1	1435	1439	79	4.78±0.27	4.44±1.27	<1	<1	MS, RI	熟土豆味、脂肪坚果味、焦糖、烧烤味
58	2-戊基呋喃	3777-69-3	1240	1231	5.8 ^[20]	15.21±1.56	19.6±4.57	2.62	3.38	MS, RI	水果味
59	吡嗪	120-72-9	2450	2463	20	ND	6.8±1.31	—	<1	MS, RI	发霉味、臭味
60	蒽	91-20-3	1718	1747	360	0.74±0.06	1.13±0.27	<1	<1	MS, RI	焦油味、柏油味
61	1,3-二甲基苯	108-38-3	1150	1126	5 500	1.45±0.43	20.86±4.28	<1	<1	MS, RI	天竺葵
62	对二甲苯	106-42-3	—	1133	8 700	2.56±0.30	13.56±2.89	<1	<1	MS	油脂味、酸奶酪样香气伴有肉香

注：ND.未检出；—未检索到相关报道或无法得到相关数值；除特殊标记外，其他化合物阈值均来自文献[22]；MS.质谱定性；RI.保留指数定性。

的重要贡献者。在无异味咸蛋黄和异味咸蛋黄样品中醛类分别占比57.10%和45.55%，化合物种类分别为15种和17种，正癸醛仅出现在F样品中，而反-2-壬烯醛、反,反-2,4-壬二烯醛与反,反-2,4-癸二烯醛仅出现在OF样品中，且反-2-壬烯醛、反,反-2,4-癸二烯醛分别存在陈腐味和鱼腥味等异味属性。在F样品和OF样品中正己醛含量分别为102.56 μg/kg与168.73 μg/kg，由于正己醛的含量较低时呈现出令人愉悦的青草香，在较高含量时则会出现油脂味，因此，蛋黄中该物质含量增高可能是导致咸蛋黄出现不愉快风味的原因之一^[23]，这与Pastorelli等^[24]对坚果中正己醛浓度的升高与异味有密切相关的研究结论一致。

酮类物质是脂质氧化以及美拉德反应产物的又一类代表物质，如2-丁酮、2-辛酮、2-壬酮等物质被认为是美拉德反应尤其是Amadori重排过程中产生的重要产物^[25]。与无异味咸蛋黄相比，酮类物质在异味咸蛋黄样品中的种类和含量均有增加。其中2-庚酮和2-壬酮在F样品中含量分别为5.80 μg/kg与10.76 μg/kg，而在OF样品中增加到34.95 μg/kg与67.86 μg/kg，含量差异较大，且2-壬酮与酒糟发酵后的酸糟味相关性较大^[26]，这也可能和咸蛋黄中的酸臭味密切相关。由于甲基酮类化合物是饱和脂肪酸氧化的产物^[27]，在一些食品中是食物酸败味道的来源。而甲基壬基甲酮（牛油味）与8-壬烯-2-酮（蓝纹干酪味）仅出现在OF样品中，也可能为异味化合物。

醇类物质的产生也与脂质氧化密切相关，低分子量饱和及不饱和链状醇的挥发性强，特有的官能团羟基的气味比较强烈，并随着碳链的增长其气味也由果实香型向清香型，最后向脂肪臭型方向转变^[2]。醇类化合物在2种样品中含量占比分别为12.35%与14.43%，化合物数量分别为7种与9种，其中2-苯乙醇和异戊醇仅出现在OF样品中，含量差异较大的化合物有异辛醇、1-辛烯-3-醇和异戊醇。其中异辛醇在草莓汁中呈现特殊刺激性异味物质^[28]，1-辛烯-3-醇被认为是由酶促或非酶降解亚油酸的产物，呈现出典型的蘑菇味，为蛋黄加热的异味物质之一^[29]。

烷烃类化合物和烯烃类化合物阈值较高，对咸蛋黄风味贡献均不大。烷烃类化合物的相对含量和数量在2种样品中无显著差异，烯烃类化合物在无异味和异味咸蛋黄样品中相对含量分别为4.77%和9.24%。OF样品中烯烃类化合物含量较高主要由苯乙烯导致，在F和OF样品中苯乙烯相对含量分别为1.79%与8.09%，且苯乙烯曾在炒蛋中被发现呈刺激气味^[30]，可能为咸蛋黄加热后产生异味的化合物之一。

杂环类化合物是咸蛋黄中的一类重要香气物质，主要包括吡嗪和呋喃，在无异味咸蛋黄和异味咸蛋黄中该

类化合物相对含量分别为8.54%与4.62%。化合物种类差异不大，含量的差异可能是由于在异味咸蛋黄样品中异味化合物的增多，使该类化合物占比相对减少。其中，吡嗪是美拉德反应过程中产生的主要挥发性风味化合物，大多呈现出烤香、坚果香、爆米花香等香气特征并能够在嗅闻口闻到香气，它们的存在丰富了咸蛋黄的香气轮廓，这些物质在一些其他烘烤制品以及花生、坚果中也被检测到^[31]。

芳香类化合物包括对二甲苯、1,3-二甲基苯、萘、吡啶、草蒿脑和茴香脑，该类化合物在两组样品中相对含量和种类差异较小。对二甲苯和1,3-二甲基苯具有油脂味，但阈值较高对咸蛋黄风味贡献不大。草蒿脑和茴香脑呈现茴香味，是八角茴香的特征风味成分^[32]。萘本身呈现焦油味，吡啶在臭豆腐和羊膻味食品等中均被检出^[33-34]，呈现发霉味、臭味，且仅在异味咸蛋黄中出现，这2种化合物可能是异味咸蛋黄中的异味化合物。

其他类化合物包括酸类、酚类、醚类，其中冰乙酸和2,6-二叔丁基对甲酚在两组样品中都存在，冰乙酸阈值较高，对咸蛋黄风味贡献不大，2,6-二叔丁基对甲酚呈芳香味，对咸蛋黄香气有一定贡献。二甲基二硫醚仅在异味咸蛋黄中出现，呈现硫味、酸味、腐臭味等不良气味。马永昆^[35]在加热后的“金皇后”瓜汁中发现新生成的二甲基二硫醚是导致“煮熟味”的异味化合物之一，故二甲基二硫醚可能为引起咸蛋黄异味的化合物之一。

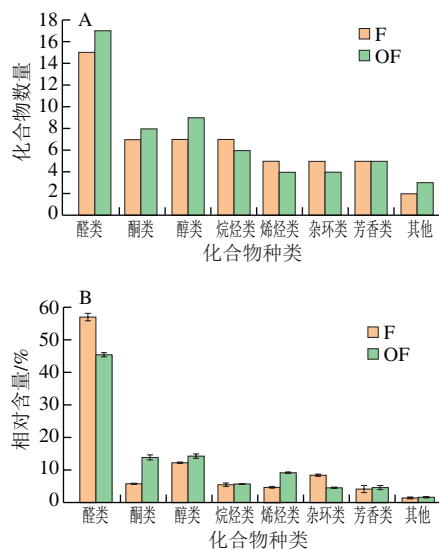


图3 无异味咸蛋黄和异味咸蛋黄化合物数量(A)和相对含量(B)对比

Fig. 3 Comparison of the number (A) and relative contents (B) of volatile compounds in salted egg yolk without and with off-flavor

对无异味和异味咸蛋黄挥发性化合物种类和相对含量分析可知，相比无异味咸蛋黄样品，异味咸蛋黄样品中醛类化合物的相对含量明显降低，但有新增醛类化合

物, 酮类和醇类化合物的种类和相对含量均有所增加, 烷烃类化合物种类和相对含量基本不变, 且该类化合物阈值较高, 对风味贡献不大, 烯炔类化合物个数相对较少, 但在OF样品的相对含量明显高于F样品, 此差异主要是由于苯乙烯导致, 杂环类和芳香类化合物主要对丰富咸蛋黄风味轮廓有重要贡献, 其中吡嗪自身具有一定臭味, 但具体贡献需结合其阈值分析。其他类化合物占比较少, 其中二甲基二硫醚自身具有硫味、酸味、臭味等不良气味。据此可初步推断, 咸蛋黄热加工中的异味主要来自于醛类、酮类和醇类, 此外还可能包括吡嗪、二甲基二硫醚等自身具有令人不愉快气味的化合物。

2.4 OPLS-DA建模与模型评价异味咸蛋黄中的潜在差异标志物

为了进一步筛选出两组样品中的潜在差异化合物, 采用OPLS-DA对两组数据进行分析。由图4A所示, 模型中 $R^2_x=0.98$, $R^2_y=1$, $Q^2=0.998$, 其中 $R^2_x=0.98$ 表明该模型能反映98%数据的变化, R^2 和 Q^2 接近1.0表明该模型具有良好的可解释度和拟合度。2组咸蛋黄样品在OPLS-DA得分散点图上聚类良好, 组内差异小, 不同组间样品实现完全分离, 与聚类热图统计分析结果一致。同时, 采用SIMCA14.1中置换检验功能验证模型的可靠性, 经200次交叉验证后置换检验结果如图4B所示, 所有 R^2 和 Q^2 均低于置换保留等于1.0的值时, 且 Q^2 点回归线与横坐标交叉且小于0, 截距为负值, 统计模型有效, 在拟合范围内有效^[36]。

变量投影重要性 (variable importance in projection, VIP) 是OPLS-DA模型变量的权重值, 可用于衡量各组积分积累差异对各组样本分类判别的影响强度和解释能力, VIP值越大, 贡献率越大, 通常VIP值大于1为常见的差异化合物筛选标准^[37]。由图4C可知, VIP值大于1的化合物有33种, 分别为正癸醛、2-乙基-5-甲基吡嗪、3-乙基-2-甲基-1,3-己二烯、甲基壬基甲酮、6-甲基-2-庚酮、二甲基二硫醚、反,反-2,4-壬二烯醛、2-壬酮、8-壬烯-2-酮、吡嗪、苯乙烯、1,3-二甲基苯、2-苯乙醇、异辛醇、反,反-2,4-癸二烯醛、对二甲苯、异戊醇、反-2-壬烯醛、2-庚酮、草蒿脑、2-丁酮、正十三烷、冰乙酸、正壬烷、正十四烷、丙酮、正十二烷、正己醛、2,5-二甲基吡嗪、正戊醛、正十一烷、萘、反式-2-己烯醛。其中, 反-2-壬烯醛、反,反-2,4-癸二烯醛、8-壬烯-2-酮、甲基壬基甲酮、异戊醇、2-苯乙醇、吡嗪、二甲基二硫醚仅出现在OF样品中, 正己醛、2-庚酮、2-壬酮、异辛醇、苯乙烯、1,3-二甲基苯相对含量差异较大, 且均在OF样品中显著增加。

2.5 异味咸蛋黄中的关键特征风味

为进一步确定与咸蛋黄异味属性 (酸臭味) 相关的挥发性化合物, 本实验采用PCA对两组样品挥发性成分和感官属性之间进行相关性分析。由于1-辛烯-3-醇VIP值为0.96且阈值低, 在F和OF样品中相对含量差异较大, 可能为异味化合物之一。因此, 以VIP值大于1的33种挥发性化合物以及1-辛烯-3-醇为X变量, 以感官属性为

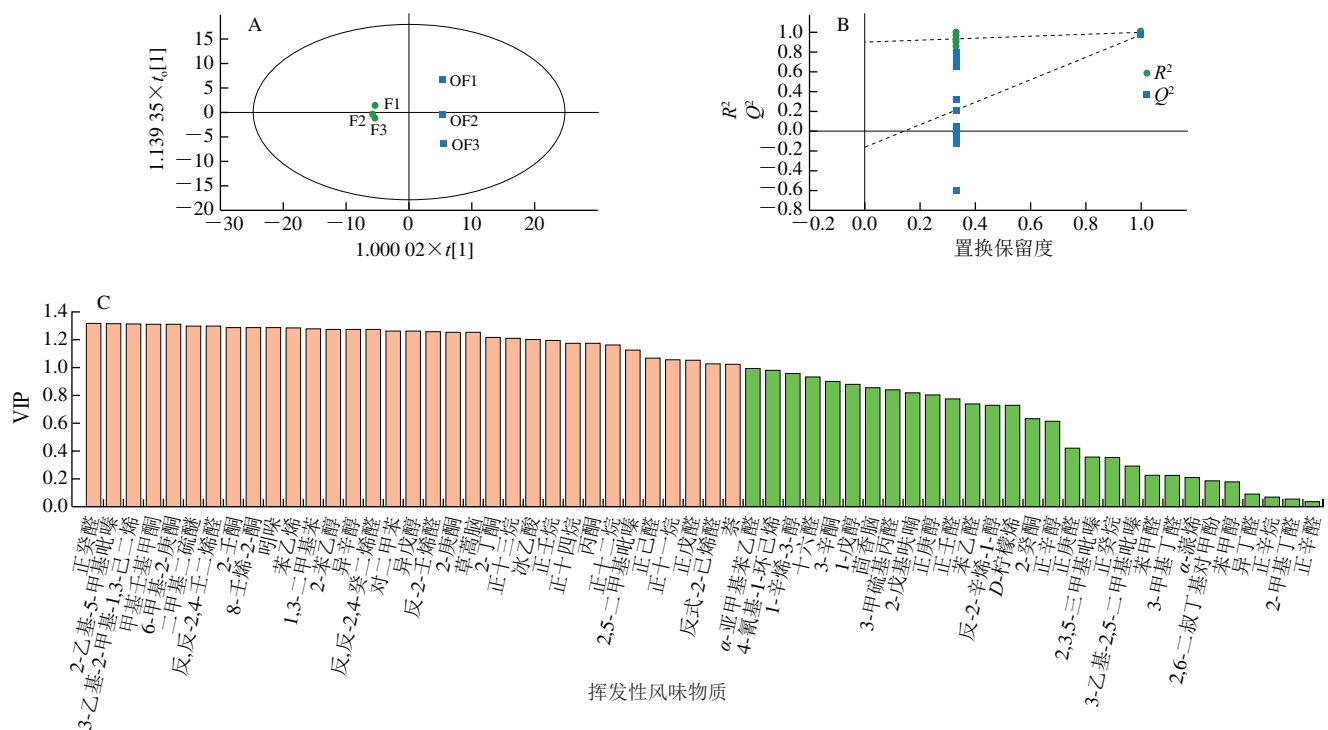


图4 F和OF样品挥发性风味化合物的OPLS-DA得分图(A)、置换检验图(B)和VIP值得分图(C)

Fig. 4 OPLS-DA score plot (A), permutation test plot (B) and VIP score plot (C) of volatile flavor compounds in F and OF sample

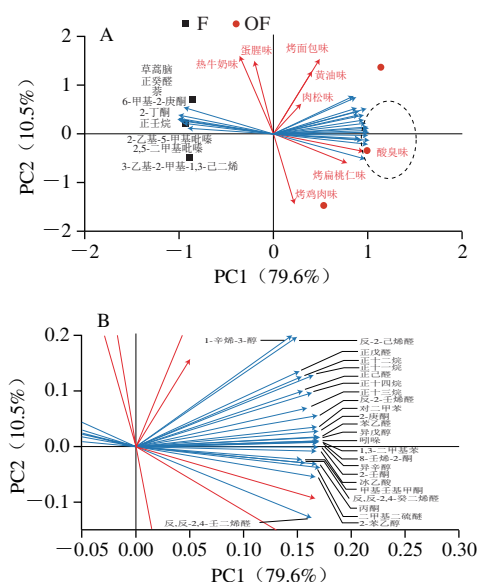
Y变量, 采用PCA得分图反映两者之间的关系。从图5看出, PC1、PC2分别包含了原始信息量的79.6%和10.5%, 从图5B可知, 与酸臭味正相关的挥发性化合物有1-辛烯-3-醇、反-2-己烯醛、正戊醛、正十一烷、正十二烷、正己醛、正十三烷、正十四烷、反-2-壬烯醛、对二甲苯、2-庚酮、苯乙烯、异戊醇、吡啶、1,3-二甲基苯、8-壬烯-2-酮、异辛醇、2-壬酮、冰乙酸、甲基壬基甲酮、反,反-2,4-癸二烯醛、丙酮、二甲基二硫醚、2-苯乙醇、反,反-2,4-壬二烯醛。

OAV是指香气化合物的质量浓度和该化合物香气阈值之比。理论上, 只有质量浓度超过阈值(OAV > 1.0)的化合物才有香气贡献, 并且OAV大的化合物其香气贡献也大^[38]。因此, 异味咸蛋黄中的关键异味化合物主要有正己醛(脂肪味, OAV=33.75)、正戊醛(烤香味、坚果味, OAV=1.29)、反,反-2,4-癸二烯醛(脂肪味、鱼腥味, OAV=3.20)、1-辛烯-3-醇(蘑菇味, OAV=8.76)、苯乙烯(香脂味、汽油味, OAV=16.35)、二甲基二硫醚(硫味、蒜味、酸味、腐臭味, OAV=1.17)、2-壬酮(热牛奶味、酸臭味, OAV=1.36)。其中正己醛和反,反-2,4-癸二烯醛是 ω -6脂肪酸氧化的主要标志化合物^[39], 1-辛烯-3-醇是亚油酸氧化过程二级氢过氧化物降解或者羰基化合物的还原产物^[40]。所以, 烘烤后咸蛋黄异味关键成分的产生可能与不饱和脂肪酸的氧化分解有关。

黄在酸臭味方面具有显著性差异。通过HS-SPME结合GC-MS对两组咸蛋黄挥发性成分鉴定得出分别有53种和56种挥发性化合物, 以醛类、酮类和醇类为主。应用聚类热图发现两组咸蛋黄挥发性化合物含量存在显著差异且分别聚类, 并与感官评价结果一致。在此基础上进一步开展组间挥发性化合物OPLS-DA, 基于VIP值大于1, 共得到正己醛、正癸醛、3-乙基-2-甲基-1,3-己二烯、6-甲基-2-庚酮、反,反-2,4-壬二烯醛、8-壬烯-2-酮、苯乙烯等33个主要差异成分。结合文献以及对两组挥发性成分含量分析发现1-辛烯-3-醇在两样品中相对含量差异较大, 且阈值低, 故将1-辛烯-3-醇和VIP值大于1的33种化合物同感官风味属性进行PCA, 得出1-辛烯-3-醇、反-2-己烯醛、正十一烷、正十二烷、戊醛、冰乙酸、正十三烷、正十四烷、反-2-壬烯醛等25种化合物与酸臭味呈正相关。但在实际样品中, 只有含量高于样品基质下气味阈值的风味物质才对整体香气有贡献。最后通过OAV大于1得出正己醛(脂肪味)、正戊醛(烤香味、坚果味)、反,反-2,4-癸二烯醛(脂肪味、鱼腥味)、1-辛烯-3-醇(蘑菇味)、苯乙烯(香脂味、汽油味)、二甲基二硫醚(硫味、蒜味、酸味、腐臭味)、2-壬酮(热牛奶味、酸臭味)为异味咸蛋黄的关键异味化合物。

参考文献:

- [1] 余平莲. 咸蛋黄加工中风味物质的变化及其成因初探[D]. 天津: 天津科技大学, 2017.
- [2] 周芹. 咸蛋黄质地与风味的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2012.
- [3] 余平莲, 李文钊, 王未, 等. 利用Flash E-Nose方法探究不同处理蛋黄的风味变化[J]. 中国调味品, 2017, 42(2): 24-27.
- [4] 冯月超, 刘美玉, 任发政. 热处理对鸡蛋黄挥发性风味成分的影响[J]. 肉类研究, 2006(10): 31-33.
- [5] XIANG X L, LIU Y Y, LIU Y, et al. Changes in structure and flavor of egg yolk gel induced by lipid migration under heating[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 98: 105257. DOI:10.1016/j.foodhyd.2019.105257.
- [6] GOLDBERG E M, RYLAND D, ALIANI M, et al. Interactions between canola meal and flaxseed oil in the diets of White Lohmann hens on fatty acid profile and sensory characteristics of table eggs[J]. Poultry Science, 2016, 95(8): 1805-1812. DOI:10.3382/ps/pew025.
- [7] MATUMOTO-PINTRO P T, MURAKAMI A E, VITAL A C P, et al. Effects of storage time and temperature on lipid oxidation of egg powders enriched with natural antioxidants[J]. Food Chemistry, 2017, 228: 463-468. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.02.044.
- [8] 任柳阳. 热处理过程中鸭蛋黄腥味物质的鉴定及其形成机制[D]. 北京: 北京农学院, 2021.
- [9] SU Y J, CHEN Z, LI J H, et al. Characterization of salted egg yolk flavoring prepared by enzyme hydrolysis and microwave irradiation[J]. Food Chemistry, 2021, 338: 127913. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.127913.
- [10] 陈正. 微波法快速制备蛋黄风味基料及其风味特性的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020.
- [11] SONG S Q, ZHANG X M, HAYAT K, et al. Contribution of beef base to aroma characteristics of beeflike process flavour assessed by



B图为A图虚线部分的局部放大图。

图5 无异味咸蛋黄和异味咸蛋黄PCA图

Fig. 5 PCA loading plot of salted egg yolk without and with off-flavor

3 结论

本研究以无异味咸蛋黄为参照, 对咸蛋黄中的异味组分展开研究。通过QDA明确无异味咸蛋黄和异味咸蛋

- descriptive sensory analysis and gas chromatography olfactometry and partial least squares regression[J]. *Journal of Chromatography A*, 2010, 1217(49): 7788-7799. DOI:10.1016/j.chroma.2010.10.046.
- [12] XU X X, WU B B, ZHAO W T, et al. Shifts in autochthonous microbial diversity and volatile metabolites during the fermentation of chili pepper (*Capsicum frutescens* L.)[J]. *Food Chemistry*, 2021, 335: 127512. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.127512.
- [13] 田怀香, 张雅敬, 吴譞, 等. 气相色谱-质谱联用和电子鼻用于鉴别鸡精调味品香气成分[J]. *食品科学*, 2017, 38(2): 191-197. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201702031.
- [14] 马宇, 黄永光. 清香香型白酒挥发性风味组分及香气特征[J]. *食品科学*, 2019, 40(20): 241-248. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180730-363.
- [15] 王洪伟, 索化夷, 张玉, 等. 感官评价和GC-MS结合偏最小二乘回归法分析酚类化合物对腊肉烟熏风味的贡献[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(21): 244-249. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.021083.
- [16] 袁先铃, 彭先杰, 陈崇艳, 等. 高压蒸汽灭菌时间对冷吃兔风味物质的影响[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(3): 257-265. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.3.0677.
- [17] 陈海涛, 孙杰, 蒲丹丹, 等. OAV和GC-MS-O法鉴定内蒙古风干牛肉风味活性物质[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(15): 304-308. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2016.15.050.
- [18] 顾赛麒, 张晶晶, 王锡昌, 等. 不同产地熟制中华绒螯蟹肉挥发性成分分析[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(5): 289-293. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2014.05.025.
- [19] 汪修意, 徐文泱, 陈同强, 等. 气相色谱-质谱联用与相对气味活度值法分析坛子肉风味物质的研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(24): 8450-8455. DOI:10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.2019.24.043.
- [20] 顾赛麒, 王锡昌, 陶宁萍, 等. 顶空固相微萃取-气质联用及电子鼻技术检测中华绒螯蟹不同可食部位中的香气成分[J]. *食品科学*, 2013, 34(18): 239-244. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201318049.
- [21] 黄苓, 孙震, 曾小群, 等. 多食材替代亚硝酸盐对腊肉挥发性风味的影响[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(3): 324-333. DOI:10.16429/j.1009-7848.2021.03.037.
- [22] 奥·范海默特. 化合物香味阈值汇编[Z]. 2版. 刘强, 昌德寿, 汤峨, 译. 北京: 科学出版社, 2015.
- [23] 王彦蓉, 丛懿洁, 崔春, 等. 固相微萃取与气质联用法分析沙琪玛储存过程中挥发性风味成分变化[J]. *现代食品科技*, 2012, 28(2): 218-222. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2012.02.005.
- [24] PASTORELLI S, TORRI L, RODRIGUEZ A, et al. Solid-phase micro-extraction (SPME-GC) and sensors as rapid methods for monitoring lipid oxidation in nuts[J]. *Food Additives & Contaminants*, 2007, 24(11): 1219-1225. DOI:10.1080/02652030701426987.
- [25] RANNOU C, TEXIER F, MOREAU M, et al. Odour quality of spray-dried hens' egg powders: the influence of composition, processing and storage conditions[J]. *Food Chemistry*, 2013, 138(2/3): 905-914. DOI:10.1016/j.foodchem.2012.11.090.
- [26] 马宇. 基于风味组学策略研究酱香型白酒关键成分及其呈香呈味特性[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019.
- [27] CHEN D W, BALAGIANNIS D P, PARKER J K. Egg yolk phospholipids: a functional food material to generate deep-fat frying odorants[J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2019, 99(14): 6638-6643. DOI:10.1002/jsfa.9939.
- [28] 周典飞. 冷冻草莓汁异味成分鉴别与控制技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
- [29] REN L Y, MA J, XU W L, et al. Stability of low density lipoprotein particles affect the formation of off-flavor in thermal egg yolk[J]. *Food Research International*, 2022, 154: 111029. DOI:10.1016/j.foodres.2022.111029.
- [30] FLEMING-JONES M E, SMITH R E. Volatile organic compounds in foods: a five year study[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, 51(27): 8120-8127. DOI:10.1021/jf0303159.
- [31] REGA B, GUERARD A, DELARUE J, et al. On-line dynamic HS-SPME for monitoring endogenous aroma compounds released during the baking of a model cake[J]. *Food Chemistry*, 2009, 112(1): 9-17. DOI:10.1016/j.foodchem.2008.05.028.
- [32] 王琴, 蒋林, 温其标. 八角茴香的研究进展[J]. *中国调味品*, 2005(5): 18-22.
- [33] WATKINS P J, KEARNEY G, ROSE G, et al. Effect of branched-chain fatty acids, 3-methylindole and 4-methylphenol on consumer sensory scores of grilled lamb meat[J]. *Meat Science*, 2014, 96(2): 1088-1094. DOI:10.1016/j.meatsci.2012.08.011.
- [34] 唐辉, 钟瑞敏, 朱建华, 等. 电子鼻结合OAV分析臭豆腐卤水的挥发性成分及风味活性物质[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(3): 351-359. DOI:10.16429/j.1009-7848.2021.03.040.
- [35] 马永昆. 热力、非热力处理对哈密瓜汁香气、酶和微生物的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- [36] 黄浩, 余鹏辉, 赵熙, 等. 不同季节保靖黄金茶1号工夫红茶挥发性成分的HS-SPME-GC-MS分析[J]. *食品科学*, 2020, 41(12): 188-196. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190721-265.
- [37] 李远彬. 基于色谱联用技术的沉香标志性差异成分分析研究[D]. 广州: 广州中医药大学, 2017.
- [38] RAY M. Flavor, fragrance and odor analysis[M]. 2nd ed. Taylor and Francis, CRC Press, 2012. DOI:10.1201/b11446.
- [39] CERNY C, GUNTZ R. Evaluation of potent odorants in heated egg yolk by aroma extract dilution analysis[J]. *European Food Research & Technology*, 2004, 219(5): 452-454. DOI:10.1007/s00217-004-1000-8.
- [40] 郭栋. 利用蛋黄磷脂提高炸鱼和薯条香气的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2020.