

香菇风味高内相乳/液体油涂层应用下 空气油炸鱿鱼的品质特征比较

罗晓林, 潘锦锋, 徐献兵*

(大连工业大学食品学院, 国家海洋食品工程技术研究中心, 辽宁大连 116034)

摘要: 该研究旨在将香菇风味油高内相乳作为涂层代替香菇风味油应用于空气油炸鱿鱼中, 研究其对空气油炸鱿鱼制品品质的影响。质构和色泽分析表明, 涂有香菇风味油高内相乳的空气油炸鱿鱼制品有适宜的质地(硬度为 9,419.46 g, 咀嚼性为 7,131.27)和更好的色泽品质。对鱿鱼制品的挥发性风味物质检测表明, 在空气油炸 10 和 15 min 时涂高内相乳涂层的鱿鱼制品中挥发性化合物的总含量(404.91~544.65 $\mu\text{g}/\text{kg}$)均高于液体油涂层(381.132~472.28 $\mu\text{g}/\text{kg}$)。经偏最小二乘法判别分析(PLS-DA), 空气油炸时间和涂油条件对鱿鱼空气油炸过程中挥发性化合物的形成有交互作用。综上可知, 高内相乳涂层相对于液体油涂层有利于改善空气油炸鱿鱼的品质特性, 高内相乳涂层与液体油涂层对空气油炸鱿鱼制品中挥发性风味物质含量的影响具有差异性, 高内相乳能有效减缓鱿鱼制品中挥发性风味物质的损失。

关键词: 香菇风味油; 高内相乳(HIPE); 空气油炸鱿鱼; 风味物质; 偏最小二乘法判别分析(PLS-DA)

文章编号: 1673-9078(2022)12-51-58

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.12.0562

Comparison of Quality Characteristics of Air-fried Squid with Application of Shiitake-flavored High Internal Phase Emulsion/Liquid Oil Coating

LUO Xiaolin, PAN Jinfeng, XU Xianbing*

(School of Food Science and Technology, Dalian Polytechnic University, National Marine Food Engineering and Technology Research Center, Dalian 116034, China)

Abstract: Shiitake-flavored oil high internal phase emulsion was applied as a coating instead of Shiitake-flavored oil on an air-fried squid to investigate its effect on the quality of air-fried squid products. The texture and color of the air-fried squid products coated with Shiitake-flavored oil high internal phase emulsion had suitable texture (hardness 9 419.46 g, chewiness 7 131.27) and better color quality. The total contents of volatile flavor substances in the squid products coated with high internal phase emulsion were 404.91 and 544.65 $\mu\text{g}/\text{kg}$ at 10 and 15 min of air-frying, whereas those in the squid products coated with liquid oil were 381.132 and 472.28 $\mu\text{g}/\text{kg}$. The formation of volatile compounds during air-frying of squid was affected by the air-frying duration and oil-coating conditions as calculated and analyzed by partial least squares discriminant analysis. The study provides an efficient method to improve the quality characteristics and volatile flavor substances of air-fried squid by high internal phase emulsion coating relative to liquid oil coating. In addition, the loss of volatile flavor substances in squid products was effectively decelerated by the high internal phase emulsion coating.

Key words: shiitake-flavored oil; high internal phase emulsion; air-fried squid; flavor substance; partial least squares discriminant analysis
引文格式:

罗晓林,潘锦锋,徐献兵.香菇风味高内相乳/液体油涂层应用下空气油炸鱿鱼的品质特征比较[J].现代食品科技,2022,38(12):51-58

LUO Xiaolin, PAN Jinfeng, XU Xianbing. Comparison of quality characteristics of air-fried squid with application of shiitake-flavored high internal phase emulsion/liquid oil coating [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(12): 51-58

收稿日期: 2022-05-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(32072261)

作者简介: 罗晓林(1998-),女,硕士研究生,研究方向:食品风味化学, E-mail: lx11617010328@163.com

通讯作者: 徐献兵(1986-),男,博士,副教授,研究方向:食品风味化学, E-mail: xianbingxu@dlpu.edu.cn

相对于传统鱿鱼干制品,通过煮沸或油炸热处理的鱿鱼通常具有更丰富的风味品质,更受人们欢迎^[1]。其中油炸作为一种有效的烹饪技术通常被用来改善产品的风味和质地^[2,3]。然而,油炸食品的高含油量可能对人体健康有害,并诱发心血管疾病、肥胖症和糖尿病^[4]。此外,油炸过程中将通过美拉德反应产生一些有害化合物,如杂环芳香胺等^[5,6]。因此,有必要通过改善油炸技术和油炸传热介质来改善油炸产品的质量。

近年来真空油炸和微波辅助油炸等技术已被应用于生产含油量低的油炸产品^[7,8]。然而,这些技术需要很高的安装成本,还需要与预干燥和微波加热等技术的结合^[9]。“空气油炸”是近几年开发的一种便捷、成本较低的油炸技术,该技术通过大功率循环热空气来确保高传热率,获得与传统油炸产品相似的外观和质地特性^[10,11]。与传统油炸方法相比,空气油炸可以显著减少用油量进而减少产品的浸油量^[12]。一些低脂肪含量的食物,如鱿鱼、贻贝等,需要涂抹适量大豆油、玉米油等食用液体油作为涂层来空气油炸,以获得具有酥脆质地和金黄色外观的油炸产品。然而液体油在循环热空气驱动下中容易流动并且分布不均匀,进而易对食品品质产生不良影响。因此,亟需开发一种适合于空气油炸鱿鱼的固定油涂层技术。

Lissant^[13]于1974年首次提出分散相体积分数高于74.05%的高内相乳液(HIPEs)。近年来研究者通过各种物理方法来制备HIPEs以固定化液体油,替代了含有害反式脂肪酸的氢化油^[14]。理论上开发高油含量的HIPEs作为空气油炸介质是可行的,因为它们具有高粘弹性模量、显著的凝胶流变行为和良好的可塑性^[15,16],可作为固定化液体油的技术手段应用于空气油炸中。

风味是食品品质特性的主要组成部分,而常见的食用油味道清淡,无法起到调味的作用。为了进一步改善食品的风味品质,在食品加工中经常加入风味油来进行调味^[17]。本研究采用风味油制备了风味油高内相乳,通过最终产品的颜色和质地来检测HIPEs的适用性,对不同条件下的空气油炸鱿鱼中挥发性风味物质含量的动态变化做进一步研究,分析了液体油和高内相乳涂层对挥发性风味物质在空气油炸中释放的影响。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

鱿鱼(*Illex argentinus*)购于大连长兴市场;香菇油,市购;酪蛋白(生化试剂),美国Sigma公司;环己酮(分析纯),上海Aladdin生化科技股份有限公司。

1.2 主要仪器设备

UltraScan Pro 测色仪,美国HunterLab; TA.XT.plus 型物性测试仪,英国SMS; PEN3 便携式电子鼻,德国Airsense公司; T10 匀浆器,德国IKA; 7890A/5975C 气相色谱-质谱联用,美国Agilent。

1.3 试验方法

1.3.1 香菇风味高内相乳的制备

将酪蛋白与水混合配制3% (m/V)的酪蛋白水溶液,室温下磁力搅拌2 h后使用质量分数50%氢氧化钾溶液调节pH值至11,继续搅1 h直至酪蛋白完全溶解;继续搅拌,用浓盐酸调节pH值稳定至6,得酪蛋白水溶液^[15]。

香菇油与大豆油以质量比1:10混合为具有香菇风味的香菇风味油,将水相酪蛋白溶液(5 mL)加入到20 mL香菇风味油中,由T10 IKA匀浆器在8 000 r/min下高速匀浆2 min制备得到香菇风味油高内相乳液,在4℃条件下保存备用。

1.3.2 香菇风味油空气油炸鱿鱼的制备及品质特性检测

1.3.2.1 香菇风味油空气油炸鱿鱼的制备

将冷冻鱿鱼(每条大约0.50 kg)泡至含有3%氯化钠的盐水中,去除鱿鱼内脏及表皮。将中间胴体取出后再次用盐水清洗,并将其切成直径为6.0 cm、厚度为0.8 cm的薄片。将0.40 g的香菇风味油,以及与香菇风味油具有相同油含量的香菇风味油高内相乳(0.50 g)分别均匀涂抹在鱿鱼薄片上,在空气炸锅说明书的推荐温度180℃下分别空气油炸10和15 min。

1.3.2.2 香菇风味油空气油炸鱿鱼类质的测定

采用物性测试仪测定不同涂油条件下(不涂油、涂香菇风味油、涂香菇风味油高内相乳)分别空气油炸10 min和15 min鱿鱼制品的硬度、弹性、粘结性和咀嚼性。将空气油炸鱿鱼切成2.0 cm×2.0 cm×0.6 cm(长×宽×高)的长方体进行测试,选择P/50 TPA探头;试验前、中、后速度均为1 mm/s;试验返回速度为15.00 mm/s;下降距离15 mm;试样压缩应变为50%;两次压缩间隔为5.0 s。

1.3.2.3 香菇风味油空气油炸鱿鱼色泽的测定

通过测色仪检测空气油炸鱿鱼的色度参数 L^* 、 a^* 、 b^* 值。 WI 表示白色指数,空气油炸鱿鱼与生鱿鱼的 WI 值差体现了该鱿鱼制品的颜色变化,将不同涂油条件下的鱿鱼分别空气油炸10 min和15 min,测定其色度。白色指数(WI)计算公式如下^[18]:

$$WI = 100 - \left[(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中:

WI ——白色指数;

L^* ——样品亮度值;

a^* ——由绿色到红色的 CIE 值;

b^* ——由蓝色到黄色的 CIE 值。

1.3.2.4 香菇风味油空气油炸鱿鱼风味轮廓的测定

利用 PEN3 电子鼻分析不同涂油条件下(不涂油、涂香菇风味油、涂香菇风味油高内相乳)空气油炸 15 min 后鱿鱼制品的风味强度。将 2.00 g 空气油炸鱿鱼放入 20 mL 的电子鼻样品瓶中, 盖上盖子密封。将电子鼻的吸口插入样品瓶中; 测定时间为 100 s, 测定后在空气中清洗探针的时间为 20 s。

1.3.3 不同空气油炸条件下鱿鱼制品中挥发性风味物质的检测

将不同涂油条件下空气油炸 10、15 和 20 min 的鱿鱼制品切碎后放入 20 mL 的顶空进样小瓶中, 加入 10 μ L 浓度为 50 mg/L 的内标环己酮, 用封口膜将瓶口密封。

采用顶空固相萃取技术对空气油炸鱿鱼中的挥发性风味物质进行萃取收集, 结合气相色谱(GC-MS)对萃取物进行分离检测。将进样小瓶放置在水浴锅内 60 $^{\circ}$ C 水浴加热孵育 20 min 后, 插入 SPME 并将萃取纤维头推出, 在萃取温度为 60 $^{\circ}$ C 的条件下对空气油炸鱿鱼中的挥发性物质进行萃取吸附 40 min。萃取完成后将 SPME 萃取头收回拔出并快速插入 GC-MS 进样口中开始分离检测。

色谱柱: Agilent 19091S-433HP-5MS 毛细管柱(30 m \times 250 mm \times 0.25 μ m); 升温程序: 40 $^{\circ}$ C 保持 0 min,

以 5 $^{\circ}$ C/min 升至 220 $^{\circ}$ C, 保持 0 min; 以 5 $^{\circ}$ C/min 的速度增加到 220 $^{\circ}$ C, 保持 0 min, 以 10 $^{\circ}$ C/min 的速度升到 280 $^{\circ}$ C, 并维持 10 min。载气(He)流量 1 mL/min, SPME 手动进样; 采用不分流模式进样。质谱条件: 离子源为 EI 源; 离子源温度为 230 $^{\circ}$ C, 四极杆温度为 150 $^{\circ}$ C, 扫描模式为标准扫描, 扫描质量范围为 40~400 u。

1.4 数据统计分析

采用内标法对空气油炸鱿鱼中的挥发性风味化合物定量。每个实验重复三次, 每次使用三片鱿鱼进行空气油炸处理, 计算每个条件下处理数据的平均值和标准偏差。采用 OriginPro 9.0 对数据制图。利用 MetaboAnalyst 5.0 进行挥发性风味物质的主成分分析。

2 结果与讨论

2.1 香菇风味油高内相乳在空气油炸鱿鱼中的适用性研究

2.1.1 香菇风味油高内相乳涂层对空气油炸鱿鱼质构的影响

质构是评价食品品质特性的重要参数。为了研究不同表面涂层对空气油炸鱿鱼制品质构的影响, 测定了不同涂油条件下的质构参数, 如硬度、咀嚼性、弹性和粘聚性。

表 1 不同涂油条件下空气油炸鱿鱼的质构参数

Table 1 Texture parameters of air-fried squid under different oiling conditions

时间/min	涂油情况	TPA 参数			
		硬度	弹性	粘聚性	咀嚼性
10	不涂油	8 833.85 \pm 740.79 ^c	0.89 \pm 0.05 ^c	0.83 \pm 0.03 ^b	7 139.85 \pm 786.42 ^c
	涂香菇风味油	6 764.45 \pm 179.17 ^d	0.90 \pm 0.02 ^c	0.85 \pm 0.04 ^b	5 174.28 \pm 154.97 ^d
	涂香菇风味油高内相乳	6 397.55 \pm 227.28 ^d	0.96 \pm 0.00 ^a	0.92 \pm 0.01 ^a	5 607.60 \pm 284.43 ^d
15	不涂油	11 651.22 \pm 314.29 ^b	0.95 \pm 0.00 ^{ab}	0.91 \pm 0.01 ^a	10 135.92 \pm 380.47 ^b
	涂香菇风味油	17 329.49 \pm 375.58 ^a	0.95 \pm 0.00 ^{ab}	0.92 \pm 0.02 ^a	15 212.40 \pm 642.17 ^a
	涂香菇风味油高内相乳	9 419.46 \pm 347.84 ^c	0.89 \pm 0.02 ^c	0.85 \pm 0.01 ^b	7 131.27 \pm 384.76 ^c

注: 所有值都用均值 \pm 标准差表示, 每列中的上标字母(a~d)表示统计上显著的差异($p < 0.05$)。

如表 1 所示, 鱿鱼制品的硬度和咀嚼性受空气油炸时间和涂油条件的影响。在空气油炸过程中鱿鱼在循环的热空气中不断运动, 快速脱水, 鱿鱼肌肉也由于水分的损失而变得更加紧致^[19], 这使得鱿鱼制品获得更硬的外壳, 相应的咀嚼度也会有所增加。在空气油炸 10 min 时, 涂香菇风味油与香菇风味油高内相乳涂层的空气油炸鱿鱼硬度和咀嚼性无显著性差异($p < 0.05$); 空气油炸 15 min 时, 不涂油或涂香菇风味油的空气油炸鱿鱼硬度和咀嚼性显著($p < 0.05$)高

于涂香菇风味油高内相乳。其中涂香菇风味油的空气油炸鱿鱼硬度(17 329.49)和咀嚼度(15 212.40)达到了最高值。这可能是因为相对于不涂油, 涂有香菇风味油的鱿鱼片所处环境中油的存在, 使得空气炸锅中循环热空气的温度更高。在温度更高的热空气作用下鱿鱼制品的硬度和咀嚼性更大, 这造成了鱿鱼制品口感干硬、难以咀嚼的缺点, 这一缺陷在赵文宇等人^[20]的研究中也有体现, 研究中在相同条件下空气油炸处理后的鱼块熟化损失率、硬度和剪切力均显著高

于传统油炸制品。香菇风味油高内相乳涂层虽然含有与香菇风味油涂层相同的油含量，但高内相乳中的蛋白质具有成膜能力，它可以减少空气油炸鱿鱼表面的空隙^[21]。因此，高内相乳涂层可以像其他油炸涂层（如面糊）^[22]一样用作防止水分流失的屏障，进而防止鱿鱼因肉质收缩而造成的干硬口感。结果表明香菇风味油高内相乳作为油炸涂层可以有效改善空气油炸食品口感干硬的缺陷。

2.1.2 香菇风味油高内相乳涂层对空气油炸鱿鱼色泽的影响

除了质构外，在热加工下色泽参数也是空气油炸鱿鱼制品品质特征的重要指标。由表 2 可知，随着空气油炸时间的增加，三种涂油条件下空气油炸鱿鱼的亮度 L^* 值在逐渐减小， a^* 值与 b^* 值逐渐增大。这与赵文字等^[20]研究的空气油炸高白鲑鱼块色泽参数变化趋势一致，表明随着加热时间的增大，美拉德和焦糖化

反应加剧，鱿鱼表面的色素不断积累，颜色不断加深。鱿鱼制品在热加工前后的颜色变化由空气油炸前后鱿鱼的白度值 WI 差值来表示^[18]，鱿鱼制品表面的褐变程度直接反映在颜色参数 a^* 的逐渐增加中，在 Feng 等^[23]的研究中也体现出了这一变化特征，鲍鱼随着热加工处理时间的增加，其表面黑色沉淀物不断积累，色泽参数 a^* 值由 3.42 增加至 6.56。在本研究中空气油炸 10 min 后涂油层的空气油炸鱿鱼制品色泽参数没有显著差异，空气油炸 15 min 后，涂高内相乳空气油炸的鱿鱼制品相比于不涂油和涂液体油具有更高 L^* 值（64.09），更低的 a^* 值（-2.02）与 b^* 值（26.33），白度值 WI （55.33）也显著高于另外两种涂油条件。这可能是由于高内相乳可通过固定化液体油形成乳液膜屏障，保证了在热空气循环加热时空气油炸鱿鱼表面的油滴仍能均匀分布，防止了鱿鱼表面受热不均匀，进而减缓了黑褐色色素在空气油炸鱿鱼表面的积累分布。

表 2 不同涂油条件下空气油炸鱿鱼的质构参数

Table 2 Color parameters of air-fried squid under different oiling conditions

时间/min	涂油情况	色度参数			
		L^*	a^*	b^*	WI
0	生鱿鱼	64.10±1.02 ^{bc}	-0.49±0.11 ^c	-3.72±1.25 ^f	64.90±1.09 ^b
	不涂油	79.47±2.19 ^a	-5.29±0.06 ^e	7.39±0.71 ^e	79.91±0.86 ^a
10	涂香菇风味油	70.11±3.51 ^b	-4.91±0.07 ^e	21.75±1.44 ^{cd}	58.06±1.80 ^b
	涂香菇风味油高内相乳	69.87±1.54 ^b	-5.17±0.81 ^e	19.02±0.47 ^d	65.00±1.94 ^b
15	不涂油	53.54±0.95 ^d	10.89±0.49 ^a	48.40±2.96 ^a	33.90±1.63 ^c
	涂香菇风味油	53.09±3.28 ^d	4.88±1.25 ^b	36.35±6.70 ^b	42.35±2.84 ^d
	涂香菇风味油高内相乳	64.09±0.36 ^c	-2.02±0.13 ^d	26.33±0.01 ^c	55.33±0.26 ^c

注：所有值都用均值±标准差表示，每列中的上标字母（a~f）表示统计上显著的差异（ $p < 0.05$ ）。

2.1.3 香菇风味油高内相乳涂层对空气油炸鱿鱼风味轮廓的影响

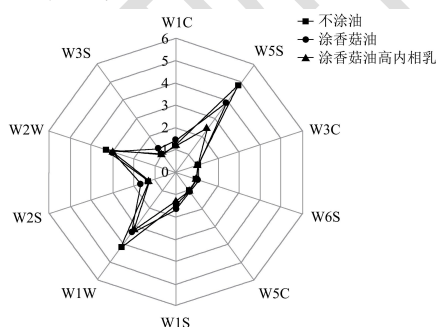


图 1 不同涂油条件下空气油炸鱿鱼的风味强度

Fig.1 Flavor intensity of air-fried squid under different oiling conditions

在空气油炸过程中，鱿鱼制品中除了质构和色泽，其他的品质特性也会发生显著变化。风味是食品的另一重要品质特性，各种食品因特征风味而呈现出各自的特征^[24]。对三种不同涂油条件下空气油炸鱿鱼制品

的风味轮廓进行检测分析，电子鼻的 10 个传感器对空气油炸鱿鱼风味响应的雷达图如图 1 所示。

由图 1 可知，在不同的涂油条件下，对氮氧化物敏感的金属传感器 W5S 的信号强度存在明显的差异，即不同涂油条件下氮氧化物含量存在显著差异。在 W5S 传感器信号强度：不涂油 > 涂香菇风味油 > 涂香菇风味油高内相乳，这表明不涂油时空气油炸鱿鱼中氮氧化物的含量最多，而涂抹香菇风味油高内相乳涂层时含量最少。相关研究表明鱿鱼制品中氮氧化物类的挥发性风味物质主要包括 2-甲基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪、甲基吡嗪、2,6-二甲基吡嗪等吡嗪类物质^[25]。为了进一步研究香菇风味油高内相乳涂层对空气油炸鱿鱼风味物质具体含量的影响，需要对鱿鱼制品中的挥发性风味物质进行进一步的检测。

2.2 空气油炸鱿鱼中挥发性风味物质成分分析

为了进一步确认不同涂油条件下空气油炸鱿鱼中

挥发性风味物质的差异,使用顶空固相萃取结合气相质谱对不同空气油炸条件的鱿鱼制品进行检测。图2是样品经气相色谱串联质谱分离解析后得到的色谱图,通过质谱图的测定结果,对比物质分子与谱库的保留指数RI值、精确分子量以及解卷积的匹配度来对挥发性物质准确定性。如表1所示,在空气油炸鱿鱼中共鉴定得到33种挥发性风味化合物,包括4种醇类物质、5种醛酮类物质、7种烷烃和烯烃类物质、11种杂环类物质、6种酯类物质。其中2种醇类物质(如图2中1、2鉴定峰):1-辛烯-3-醇、3-辛醇;5种酯类物质(如图2中3~7鉴定峰):3-(甲硫基)丙酸甲酯、3-(甲硫基)丙酸乙酯、1-辛烯-3-基乙酸酯、辛酸乙酯、癸酸乙酯,是香菇风味油中特有的风味化合物,在不使用香菇风味油时并未检测到。有研究发现,1-辛烯-3-醇具有浓烈的蘑菇甜香味,也被称作蘑菇醇,是香菇柄中主要的特征风味物质^[26]。空气油炸鱿鱼制品的挥发性风味物质中含有大量杂环类物质。王晓媛等^[27]和解薇等^[25]在鱿鱼干中检测到了2,6-二甲基吡嗪和三甲基吡嗪;Huang等^[28]在冷熏鲑鱼中检测到了1,2,4-三甲基苯、壬醛等物质,上述物质均可在本实验中检测得出。

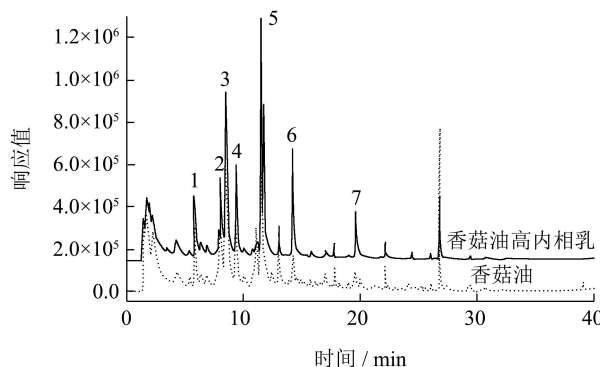


图2 不同涂油情况下空气油炸鱿鱼的GC-MS总离子流图

Fig.2 GC-MS total ion chromatograms of air-fried squid under different oiling conditions

注:1~7为香菇风味油中的特征风味物质的鉴定峰。

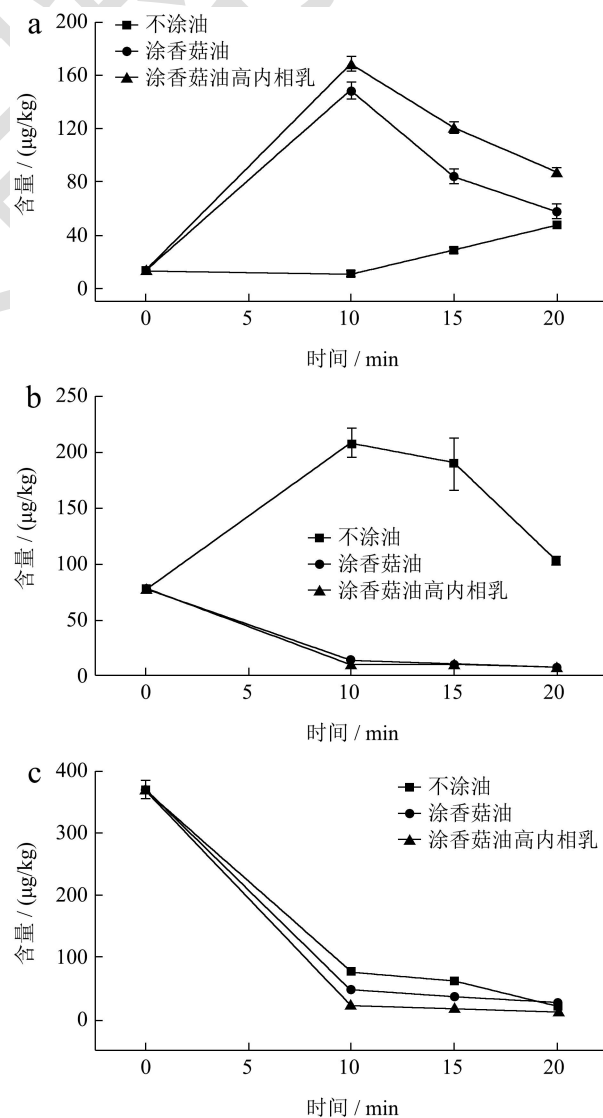
2.3 空气油炸鱿鱼中挥发性风味物质的动态变化分析

为了进一步研究上述挥发性风味物质在空气油炸中含量的动态变化,采用内标法对不同条件下的空气油炸鱿鱼中鉴定到的风味化合物进行准确定量。如表1所示,对不同空气油炸时间(10、15、20 min)下不同涂油条件(不涂油、涂香菇风味油、涂香菇风味油高内相乳)空气油炸鱿鱼制品中的各类风味物质含量都有所变化。将各类物质(醇类、醛酮类、烷烃和烯烃类、杂环类、酯类)进行汇总,分析其总含量随着空

气油炸时间而发生的动态变化(图3)。

醇类物质:不涂油的空气油炸鱿鱼中醇类物质含量在加热过程中先减少后增加。涂抹香菇风味油和香菇风味油高内相乳的空气油炸鱿鱼中醇类物质总含量在空气油炸过程先增加后减少。其中具有青香和坚果香气^[29]的2,4-己二烯-1-醇在加热过程中逐渐生成,含量增多;香菇风味油中含量最高的两种醇类物质1-辛烯-3-醇和3-辛醇因为受温度敏感程度大,加热容易挥发降解。相比于涂香菇风味油,涂香菇风味油高内相乳的空气油炸鱿鱼中醇类物质总含量在10~20 min都更高一些。

醛酮类物质:不同涂油条件下空气油炸鱿鱼中的醛酮类物质最终都有含量减少的趋势。苯甲醛是其中含量最多的一种物质,具有杏仁和坚果的气味^[29]。在不涂油条件下,空气油炸10 min后苯甲醛含量达到最大值,10~15 min内苯甲醛含量迅速降低;而涂油条件下苯甲醛含量在10~15 min内增大。其余醛酮类物质如壬醛、十四醛也被证实广泛存在于与鱼类制品中(鳀鱼酱^[30]、鱿鱼干^[25]和熏鱼^[31]等)。



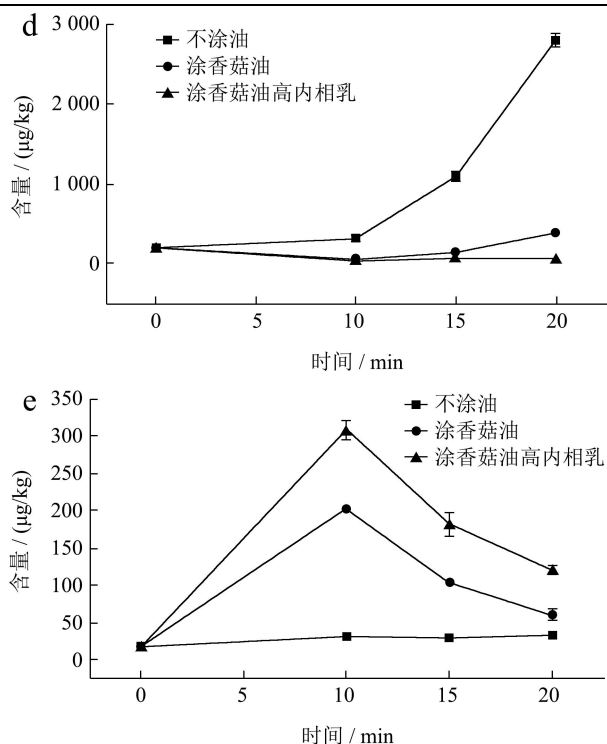


图3 在不同涂油条件下空气油炸鱿鱼中的挥发性化合物总含量变化

Fig.3 Changes of total volatile compounds in air-fried squid under different oiling conditions

注：(a) 醇类化合物，(b) 醛酮类化合物，(c) 烷烃、烯烃类化合物，(d) 杂环类化合物，(e) 酯类化合物。

杂环类物质是空气油炸鱿鱼中挥发性化合物的主要组成部分。除 2,4,6-三甲基吡啶外，其余物质含量都随着空气油炸时间的增加而增多。尤其三甲基吡啶和 2-乙基-3,5-二甲基吡啶，这两类物质含量都在 10~20 min 内显著上升，在不涂油条件下含量能达到 1.96 mg/kg。由结果可知，杂环类风味化合物主要由吡啶类物质组成，氮氧化物主要分布在杂环类物质组别中。不同涂油条件下杂环类风味物质的总含量：不涂油 > 涂香菇风味油 > 涂香菇风味油高内相乳，这一结果也与电子鼻中 WSS 传感器所检测的信号强度比较：不涂油 > 涂香菇风味油 > 涂香菇风味油高内相乳的结果相对应。

烷烃和烯烃类物质含量变化趋势与醛酮类相似，其中含量最多的是 2,6,10,14-四甲基十五烷，在加热过程中有逐渐减少的趋势。

酯类物质：由于香菇风味油中含有 5 种特征酯类物质，所以在涂香菇风味油和涂香菇风味油高内相乳条件时，酯类物质总含量比不涂油时高。这些特有的酯类化合物在空气油炸过程中含量都逐渐减少。

在空气油炸 10 min 和 15 min 时间时，涂香菇风味油高内相乳的空气油炸鱿鱼制品中检测到挥发性化合物总含量（含量范围为 544.65~404.91 μg/kg）均高于涂

香菇风味油（含量范围为 472.28~381.13 μg/kg），尤其是含有香菇风味油特征风味物质的醇类和酯类物质的总含量在涂高内相乳时都比涂香菇风味油时高。这说明高内相乳在一定加热时间范围内能作为风味油保护体系，减少风味油中特征挥发性风味物质的损失。

2.4 基于 PLS-DA 分析不同空气油炸条件下鱿鱼制品中的挥发性风味物质

通过聚类热图分析（图 4），空气油炸处理使得鱿鱼具有了丰富的味觉层次。其中样品组别 0、1 和 2 分别表示不同涂层：不涂油、涂液体油、涂高内相乳，10、15 和 20 表示空气油炸时间。杂环类物质随着加热时间的增加颜色由冷色调转为暖色调，含量有所增加。部分醛酮与烷烃类物质以及香菇风味油中特有的醇类、酯类物质含量有所减少，这与图 3 对挥发性物质含量的动态分析折线图结果一致。

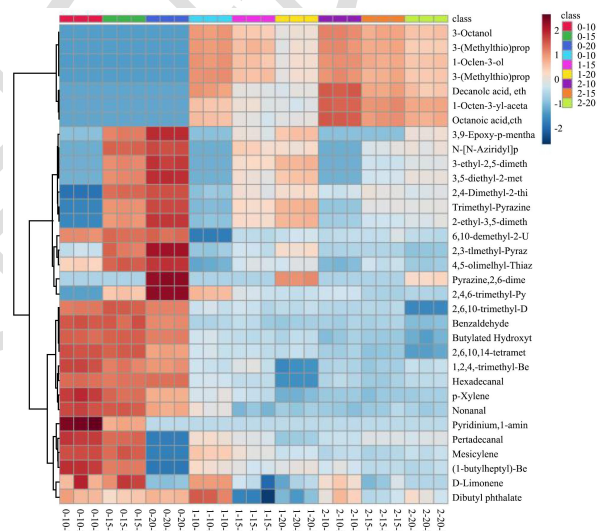


图4 不同空气油炸条件下鱿鱼制品中的挥发性化合物含量聚类热图

Fig.4 Cluster heatmap of volatile compound content in squid products under different air frying conditions

为了简化涂油条件和空气油炸时间对挥发性化合物的影响，通过 PLS-DA 分析方法对不同空气油炸条件下的挥发性物质含量的变化进行区别分析。其中图 5a 是挥发性风味物质的得分图，B 是载荷图，C 是 VIP 图。空气油炸鱿鱼制品中的挥发性风味物质得分图中 PC1 的贡献率为 52.0%，PC2 的贡献率为 35.2%。由图可知，空气油炸时间和不同涂油条件对鱿鱼空气油炸过程中挥发性化合物的形成起交互作用；随着空气油炸时间的增加，不同涂油条件下的空气油炸鱿鱼样品在图中的距离越来越远，这代表鱿鱼制品中的挥发性化合物含量发生了显著的变化。

尽管在电子鼻检测中显示涂液体油和涂高内相乳的挥发性化合物风味轮廓相似，但经 PLS-DA 分析确定不同涂油条件的样品分别对应一个明确的组。在空气油炸时间为 15 min 和 20 min 时，涂香菇风味油和涂香菇风味油高内相乳的空气油炸鱿鱼中挥发性物质在图 PC1 处区分明显。这说明在风味油的应用中高内相乳涂层与液体油涂层对鱿鱼制品中挥发性物质影响具有差异性。

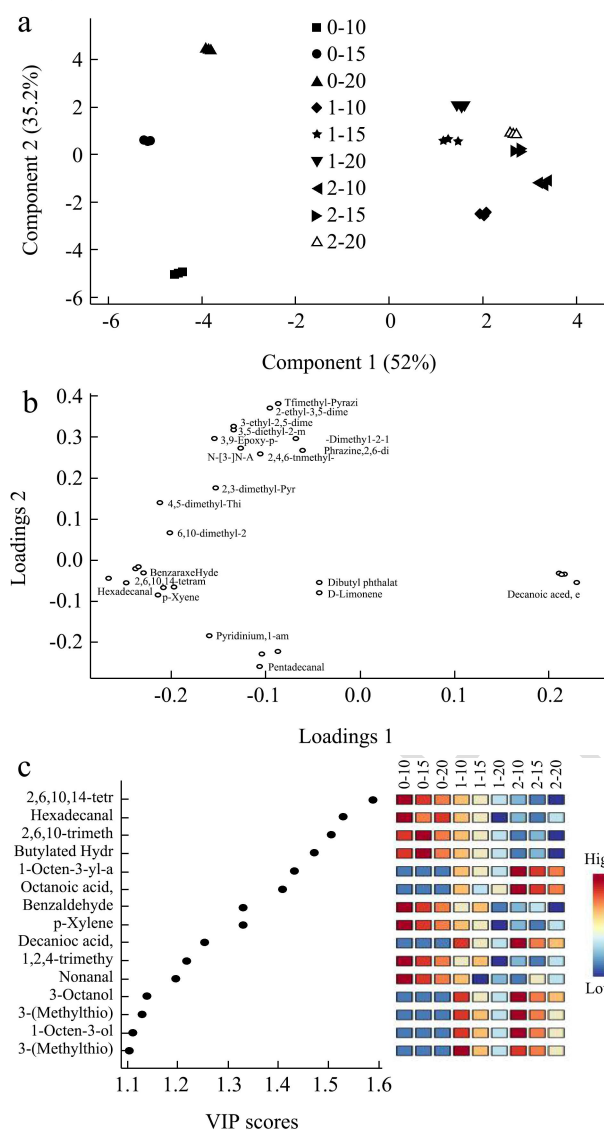


图5 不同空气油炸条件下鱿鱼制品中的挥发性化合物含量的 PLS-DA 分析

Fig.5 PLS-DA analysis of volatile compound content in squid products under different air frying conditions

图 5b 是挥发性风味物质的位置分布的信息。含有油涂层时空气油炸的鱿鱼制品中的挥发性风味物质多分布于图的第四象限中，该象限中的主要化合物是醇类风味物质（1-辛烯-3-醇以及 3-辛醇）和酯类风味化合物（3-(甲硫基)丙酸甲酯、3-(甲硫基)丙酸乙酯以及癸酸乙酯）。结合图 5c 中 PLS-DA 鉴定的重要挥发性

化合物 (VIP>1.0)，上述具有区分样本组别差异作用的化合物大部分都是 VIP>1.0 的重要挥发性化合物。

3 结论

香菇风味油高内相乳可作为涂层代替液体香菇风味油应用于空气油炸鱿鱼制品中，有助于改善空气油炸制品口感干硬的缺陷，避免了黑褐色色素在空气油炸鱿鱼表面的产生，可以有效改善空气油炸鱿鱼的品质。对不同涂油条件下的空气油炸鱿鱼中的挥发性风味物质进一步检测分析，共检测到 33 种挥发性风味物质。其中杂环类风味物质随着空气油炸时间的增加而不断增加，醛酮类与烷烃、烯烃类风味物质呈下降趋势。在一定加热时间范围内，高内相乳涂层能减少风味油中特征挥发性风味物质（1-辛烯-3-醇、3-辛醇、3-(甲硫基)丙酸甲酯、3-(甲硫基)丙酸乙酯以及癸酸乙酯）的损失。经 PLS-DA 进一步简化分析可知：不同空气油炸条件下制备的鱿鱼制品中挥发性风味物质的分布具有显著差异，其中区分明显的区域其挥发性成分主要是醇类和酯类风味物质，这些物质大多为 PLS-DA 分析 (VIP>1.0) 鉴定出的关键挥发性化合物，是香菇风味油中的特征挥发性风味物质。

参考文献

- [1] Mouritsen O G, Styrbk K. Cephalopod gastronomy - A promise for the future [J]. *Frontiers in Communication*, 2018, 3: 38
- [2] Saguy I S, Dana D. Integrated approach to deep fat frying: engineering, nutrition, health and consumer aspects [J]. *Journal of Food Engineering*, 2003, 56(2/3): 143-52
- [3] Domínguez R, Munekata P, Pateiro M, et al. Heterocyclic aromatic amines in cooked food: Toxicology and analysis [J]. *Food Toxicology and Forensics*. Academic Press, 2021: 421-460
- [4] E, Choe, D B, et al. Chemistry of deep-fat frying oils [J]. *Journal of Food Science*, 2007, 72(5): R77-R86
- [5] Chang C, Wu G, Zhang H, et al. Deep-fried flavor: characteristics, formation mechanisms, and influencing factors [J]. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 2020, 60(9): 1496-1514
- [6] Shchutka T O, Adamchuk T V, Podrushnyak A E, et al. Heterocyclic aromatic amines as a safety criteria for meat and fish products [J]. *One Health and Nutrition Problems of Ukraine*, 2020, 52(1): 64-69
- [7] Song X-j, Zhang M, Mujumdar A S. Effect of vacuum-microwave predrying on quality of vacuum-fried

- potato chips [J]. *Drying Technology*, 2007, 25(12): 2021-2026
- [8] Belkova B, Hradecky J, Hurkova K, et al. Impact of vacuum frying on quality of potato crisps and frying oil [J]. *Food Chemistry*, 2018, 241: 51-59
- [9] Devi S, Zhang M, Ju R, et al. Recent development of innovative methods for efficient frying technology [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, 61(22): 3709-3724
- [10] Arash G, Arash K, Mohebbat M, et al. Effect of deep fat and hot air frying on doughnuts physical properties and kinetic of crust formation [J]. *Journal of Cereal Science*, 2018, 83: 25-31
- [11] Yu X, Li L, Xue J, et al. Effect of air-frying conditions on the quality attributes and lipidomic characteristics of surimi during processing [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 60: 102305
- [12] Mf A, Gjha A, Wcsa B. Mass transfer and texture characteristics of fish skin during deep-fat frying, electrostatic frying, air frying and vacuum frying [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2021, 137: 110494
- [13] Lissant K J. Emulsions and emulsion technology [J]. *Soil Science*, 1975, 120(2): 160
- [14] Puligundla P, Variyar P S, Ko S, et al. Emerging trends in modification of dietary oils and fats, and health implications- a review [J]. *Sains Malaysiana*, 2012, 41(7): 871-877
- [15] Guo Y, Wu C, Du M, et al. In-situ dispersion of casein to form nanoparticles for Pickering high internal phase emulsions [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2020, 139: 110538
- [16] Ya-Qiong, Yin, Shou-Wei, et al. Fabrication and characterization of novel Pickering emulsions and Pickering high internal emulsions stabilized by gliadin colloidal particles [J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 61: 300-310
- [17] Conde-Hernandez L A, Espinosa-Victoria J R, Trejo A, et al. CO₂-Supercritical extraction, hydrodistillation and steam distillation of essential oil of rosemary (*Rosmarinus officinalis*) [J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 200: 81-86
- [18] Hu Y, Xia W, Ge C. Characterization of fermented silver carp sausages inoculated with mixed starter culture [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2008, 41(4): 730-738
- [19] Lorenzo J M, Cittadini A, Munekata P E, et al. Physicochemical properties of foal meat as affected by cooking methods [J]. *Meat Science*, 2015, 108: 50-54
- [20] 赵文宇,赵美钰,王可心,等.油炸方式对高白鲑肌肉食用品质的影响[J].*食品科学*,2021,42(4):72-79
- [21] Huan H E, Amiza M A, Zin Z M, et al. Effect of Yellowstripe scad (*Selaroides leptolepis*) protein hydrolysate in the reduction of oil uptake in deep-fried squid [J]. *Food Research*, 2020, 4(6): 1929-1936
- [22] Fiszman S M, Salvador A. Recent developments in coating batters [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2003, 14(10): 399-407
- [23] Feng T-T, Wu J-H, Liang X, et al. Quality properties and formation of α -dicarbonyl compounds in abalone muscle (*Haliotis discus*) as affected by tenderization and baking processes [J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2018, 12(3): 1503-1512
- [24] 王成忠,任慧贤.食品风味化学进展[J].*中国调味品*,2011,36(5):8-11
- [25] 解薇,姜永江.顶空固相微萃取-气质联用技术分析秘鲁鲑鱼肉的挥发性风味成分[J].*食品工业科技*,2012,33(5):71-75
- [26] Li X, Song L, Xu X, et al. One-step coextraction method for flavouring soybean oil with the dried stipe of *Lentinus edodes* (Berk.) sing by supercritical CO₂ fluid extraction - Science Direct [J]. *LWT - Food Science & Technology*, 2020, 120: 108853
- [27] 王晓媛,梁旭,马云娇,等.传统晒制鱿鱼干热风干燥工艺模拟及其风味一致性评价[J].*食品工业科技*,2021,42(17):30-37
- [28] Huang X-H, Qi L B, Fu B S, et al. Flavor formation in different production steps during the processing of cold-smoked Spanish mackerel [J]. *Food Chemistry*, 2019, 286: 241-249
- [29] Escudero, Carrascon, Ferreira, et al. Characterisation of the key odorants in a squid broth (*Illex argentinus*) [J]. *LWT - Food Science & Technology*, 2014, 57(2): 656-662
- [30] Hamilton-Kem T R, Archbold D D, Loughrin J H, et al. Metabolism of natural volatile compounds by strawberry fruit [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1996, 44(9): 2802-2805
- [31] Cha Y J, Cadwallader K R. Aroma-active compounds in skipjack tuna sauce [J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 1998, 46(3): 1123-112