

空气炸鱼皮工艺优化及其风味分析

孙慧娟, 李璐, 马凯华, 马俪珍, 任小青

Technology Optimization and Flavor Analysis of Air Fried Fish Skin

SUN Huijuan, LI Lu, MA Kaihua, MA Lizhen, and REN Xiaoqing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021110225>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于均匀设计和主成分分析的即食捻转加工及灭菌工艺优化

Optimization of Processing and Sterilization Technology for Instant Nianzhuang Based on Uniform Design and Principal Component Analysis

食品工业科技. 2020, 41(23): 149-154

基于电子鼻、气相-离子迁移谱(GC-IMS)法分析广西螺蛳粉与螺蛳鸭脚煲风味

Analysis of the Flavor of Guangxi Luosi-Noodle and Luosi-Hot-Pot by Electronic Nose and Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry (GC-IMS)

食品工业科技. 2021, 42(9): 281-288

基于气相-离子迁移谱技术分析烤羊肉串的挥发性风味成分

Analysis of Volatile Flavor Substances in Mutton Shashlik Based on GC-IMS Technology

食品工业科技. 2021, 42(8): 256-263

基于GC-IMS技术分析不同酵母菌发酵蓝莓酒风味物质

Volatile Compounds Analysis in Blueberry Wine Fermented with Different Yeasts by Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry

食品工业科技. 2021, 42(8): 235-241

基于气相离子迁移谱黄酒产地识别的研究

Origin Identification of Yellow Wine Based on Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry

食品工业科技. 2019, 40(22): 273-276,281

基于静态顶空气相离子迁移谱技术的果啤种类判别

Identification of Fruit Beers Based on Static Headspace-Gas Chromatography-Ion Mobility Spectroscopy (SH-GC-IMS)

食品工业科技. 2021, 42(7): 296-301



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

孙慧娟,李璐,马凯华,等.空气炸鱼皮工艺优化及其风味分析[J].食品工业科技,2022,43(17):212-222. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021110225

SUN Huijuan, LI Lu, MA Kaihua, et al. Technology Optimization and Flavor Analysis of Air Fried Fish Skin[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(17): 212-222. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021110225

· 工艺技术 ·

空气炸鱼皮工艺优化及其风味分析

孙慧娟,李璐,马凯华,马俐珍,任小青*

(天津农学院食品科学与生物工程学院,国家大宗淡水鱼加工技术研发分中心,天津市水产品加工及质量安全校企协同创新重点实验室,天津 300384)

摘要:为开发空气炸鱼皮产品,对鱼皮进行空气炸制工艺优化并对其风味进行分析。在单因素的基础上结合混水平均匀设计研究烫漂时间、盐水质量分数、盐水浸泡时间、腌制时间、预干燥温度及时间、空气炸温度及时间对空气炸鱼皮的影响。结果表明:空气炸鱼皮的最佳配方为烫漂时间 8 s、盐水质量分数为 1%、盐水浸泡时间为 20 min、腌制时间 36 min、预干燥温度为 55 ℃、预干燥时间 25 min、空气炸温度为 190 ℃、空气炸时间为 16 min。利用气相色谱-离子迁移谱(GC-IMS)技术,对最佳工艺条件下的空气炸鱼皮风味物质进行了分析,已定性的挥发性物质有 40 种,其中,己酸乙酯、己酸、反-2-辛烯醛、(E,E)-2,4-己二烯醛、2-庚酮、2,5-二甲基吡嗪、(E)-2-己烯醛、2-甲基吡嗪、异戊酸、2-甲基丁醛、1-辛醇、异戊醇、2-丙基-1-戊醇、2-乙基呋喃等含量较高,整体呈愉悦气味。本研究结果对空气炸系列产品的工艺和风味提供了一定的理论参考。

关键词:空气炸,鱼皮,均匀设计,主成分分析,气相色谱-离子迁移谱(GC-IMS),工艺优化

中图分类号:TS254.9

文献标识码: B

文章编号:1002-0306(2022)17-0212-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021110225



本文网刊:

Technology Optimization and Flavor Analysis of Air Fried Fish Skin

SUN Huijuan, LI Lu, MA Kaihua, MA Lizhen, REN Xiaoqing*

(Tianjin Aquatic Product Processing and Quality Safety School Enterprise Synergy Innovation Key Laboratory, National R & D Branch Center for Conventional Freshwater Fish Processing, College of Food Science and Bioengineering, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China)

Abstract: In order to develop air fried fish skin products, the air frying process of fish skin was optimized and its flavor was analyzed. The effects of blanching time, brine mass fraction, brine immersion time, marinating time, pre-drying temperature and time, air frying temperature and time on air-frying fish skin were studied on the basis of single factor and mixed-level uniform design. The results showed that the best formula of air fried fish skin as follows: blanching time was 8 s, salt water mass fraction was 1%, salt water immersion time was 20 min, marinating time was 36 min, pre drying temperature was 55 ℃, pre drying time was 25 min, air explosion temperature was 190 ℃, air explosion time was 16 min. The flavor compounds of air fried fish skin under the optimum process conditions were analyzed by gas chromatography ion mobility spectrometry (GC-IMS). There were 40 volatile substances that had been identified, including ethyl caproate, caproic acid, trans-2-octenal, (E,E)-2,4-hexadienal, 2-heptanone, 2,5-Dimethylpyrazine, (E)-2-hexenal, 2-methylpyrazine, isovaleric acid, 2-methylbutanal, 1-octanol, isoamyl alcohol, 2-propyl-1-Pentanol, 2-ethylfuran were high in content, and overall of them had a pleasant odor. The results of this study provide a theoretical reference for the process and flavor of air frying products.

Key words: air frying; fish skin; uniform design; principal component analysis; gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS); process optimization

鱼皮富含胶原蛋白和营养物质,包括多种氨基 酸和大量微量元素^[1],对人体颇有益处。随着生活节

收稿日期: 2021-11-19

基金项目: 天津市淡水养殖产业技术体系创新团队-水产品加工岗位(ITTFRS2021000-012)。

作者简介: 孙慧娟(1996-) (ORCID:0000-0001-6571-1565),女,硕士研究生,研究方向:水产品加工品质与安全,E-mail: 754089064@qq.com。

* 通信作者: 任小青(1976-) (ORCID:0000-0002-0091-449X),女,博士,副教授,研究方向:面制品及水产品加工,E-mail: 57750008@qq.com。

奏的加快, 市面上出现了各种类型的鱼皮小产品, 如水发鱼皮^[2]、泡椒鱼皮^[3]、鱼皮胶冻^[4]和油炸鱼皮^[5]等, 其中, 油炸鱼皮因具有特殊的风味, 深受消费者的喜爱。但随着消费观念的提升, 油炸食品因含油量较高已经不能满足人们的日常需求, 因此, 需要研发新的炸制方式。

空气炸主要是利用热空气循环技术, 在少油或无油的前提下, 通过热空气和食物共同作用, 使其快速脱水^[6], 自身的油脂被激发出来, 极大地降低食品的含油量, 同时又具有和油炸食品类似的风味。目前, 已有少量研究者对空气炸技术加以应用, 发现空气炸罗非鱼片的挥发性风味物质较水煮和气蒸更多^[7]; 对白鲑鱼肌肉进行空气炸和传统油炸对比分析发现, 空气炸白鲑鱼含油量更低^[8]; 而对马铃薯空气炸制发现, 其风味物质种类介于沸水蒸煮和传统炭烤之间^[9]。但空气炸鱼皮未见报道, 因此, 利用空气炸技术对鱼皮进行工艺研究, 是很有意义的。随着人们消费水平的提升, 对食品的风味有了更高的要求, 风味在一定程度上也影响着消费者对产品的接受度。GC-IMS 是近年来出现的一种新型气相分离和检测技术, 结合了气相色谱的高分离能力和离子迁移谱的快速响应能力^[10], 具有样品制备简单、灵敏度高、分辨率高、操作简便、分析高效和风味物质可视化等特点, 适合食品中挥发性有机化合物的痕量分析与检测^[11], 在很多行业中都有广泛应用。

因此, 本文以革胡子鲶鱼皮为研究对象, 在前期研究(烫漂温度 70 °C)的基础上, 通过单因素和均匀设计优化试验得到空气炸鱼皮的最佳工艺条件, 并对最佳工艺条件下的空气炸鱼皮进行挥发性风味物质分析, 以期对空气炸类型的食品提供理论依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

革胡子鲶鱼 天津德仁农业发展有限公司, 平均质量 1500 g, 30 min 内运回实验室后立即清洗、宰杀, 宰杀后用钳子撕下鱼皮, 立即放入-80 °C 冰箱贮藏备用; 食盐、十三香、香辣风味粉、鸡精、生抽、天妇罗粉 市售; 石油醚(分析纯) 国药集团化学试剂有限公司。

ATO-EAF26A 空气炸锅 美国 ACA 北美电器; TA-Xtplus 物性测定仪 英国 Stable Micro System 公司; HP-2132 便携式色差仪 汉谱光彩科技; DZF-6020 真空干燥箱 上海博讯实业有限公司; DZKW-S-6 恒温水浴锅 北京市永光明医疗仪器有限公司; Flavour Spec[®]风味分析仪 德国 G.A.S 公司; CTC-PAL 自动顶空进样器 瑞士 CTC Analytics 公司; SE-54 毛细管柱(规格: 15 m×0.53 mm×1.0 μm) 德国 CS-Chromatographie Service 设备供应商。

1.2 实验方法

1.2.1 制备工艺 在前期烫漂工艺条件(烫漂→空气

炸)下, 结合李玉龙等^[12]的研究, 得到如下工艺:

清洗剪片沥水→烫漂→清洗、沥水→盐水浸泡后沥水→腌制→裹糊→预干燥→抹油→炸制→冷却→装袋

操作要点: 鱼皮经解冻、清洗后剪成 5 cm×8 cm 的小块; 在 70 °C 的热水中烫漂 5~25 s 后, 立即用流动水冲洗并沥干水分; 接着在 1%~9% 的盐水中浸泡 10~30 min 后在腌制液(盐 1%、十三香 0.25%、鸡精 0.78%、生抽 5%、香辣风味粉 0.75%)中浸泡 10~50 min; 然后将腌制好的鱼皮放入混匀的裹糊液(裹粉和水质量配比为 1:1.6)中 10 s 后取出; 再将鱼皮平铺在 40~60 °C 的烘箱中, 控制预干燥时间在 20~60 min, 预干燥过程中要定时翻转鱼皮, 保证鱼皮均匀干燥; 最后在鱼皮表面均匀涂抹少量大豆油(油和鱼皮的质量配比为 1:42.9), 将空气炸锅 150~190 °C 预热 15 min 后, 炸制 8~16 min 即成品。

1.2.2 单因素实验 实验在烫漂温度 70 °C, 烫漂时间 15 s, 盐水质量分数 5%、盐水浸泡时间 30 min、腌制时间 30 min、预干燥温度 50 °C、预干燥时间 50 min、空气炸温度 170 °C、空气炸时间 12 min 等因素固定的情况下, 考察烫漂时间(5、10、15、20、25 s)、盐水质量分数(1%、3%、5%、7%、9%)、盐水浸泡时间(10、15、20、25、30 min)、腌制时间(10、20、30、40、50 min)、预干燥温度(40、45、50、55、60 °C)、预干燥时间(20、30、40、50、60 min)、空气炸温度(150、160、170、180、190 °C)、空气炸时间(8、10、12、14、16 min)等因素对空气炸鱼皮色差和脆度的影响。为使得到的实验结果更为准确, 每一次的单因素实验都将上一次的最好结果带入其中, 依次类推, 从而完成每一步的工艺优化。

1.2.3 均匀设计试验 在单因素实验的基础上采用混合水平均匀设计方案 $U_{10}(5^7 \times 2^1)$, 通过含水量、含油量、感官评价、脆度、 L^* 值、 b^* 值等作为指标进行分析, 将烫漂时间、盐水浸泡时间、腌制时间、盐水质量分数、预干燥时间、空气炸温度、空气炸时间等 7 个因素的第 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10 水平分别合并为第 1、2、3、4、5 混合水平, 将预干燥温度的第 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10 水平合并为 1、2 水平, 均匀设计方案 $U_{10}(5^7 \times 2^1)$ 见表 1。对所得试验数据进行逐步回归、主成分、聚类等统计分析。

1.2.4 色差的测定 用便携式色差仪测定, 依次读取 L^* 值、 b^* 值, 其中, L^* 值表示亮度, b^* 值表示黄度, 测定 3 次取平均值。

1.2.5 脆度的测定 参考 Su 等^[13]的方法。采用 P/0.25 s 探头, 测前速度 2 mm/s, 测量速度 1 mm/s, 测后速度 1 mm/s, 本文用形变距离表示鱼皮的脆度, 形变距离越小, 脆度越大, 平行测定 5 次取平均值。

1.2.6 水分含量的测定 水分含量采用 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中的直接干燥法测定。

表1 均匀设计试验因素水平 $U_{10}(5^7 \times 2^1)$ Table 1 Factors and levels of uniform design $U_{10}(5^7 \times 2^1)$

实验号	X_1 烫漂时间 (s)	X_2 盐水浸泡时间 (min)	X_3 腌制时间 (min)	X_4 盐水质量分数 (%)	X_5 预干燥时间 (min)	X_6 空气炸温度 ($^{\circ}\text{C}$)	X_7 空气炸时间 (min)	X_8 预干燥温度 ($^{\circ}\text{C}$)
1	1(6)	1(12)	2(24)	2(2)	3(30)	3(185)	4(15)	2(55)
2	1	2(16)	3(28)	4(4)	5(40)	1(175)	2(13)	2
3	2(8)	3(20)	5(36)	1(1)	2(25)	4(190)	5(16)	2
4	2	4(24)	1(20)	3(3)	5	1	3(14)	2
5	3(10)	5(28)	2	5(5)	2	4	1(12)	2
6	3	1	4(32)	1	4(35)	2(180)	5	1(45)
7	4(12)	2	5	3	1(20)	5(195)	3	1
8	4	3	1	5	4	2	1	1
9	5(14)	4	3	2	1	5	4	1
10	5	5	4	4	3	3	2	1

1.2.7 含油量的测定 含油量采用 GB 5009.6-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》中的索氏抽提法测定。

1.2.8 感官评价 选取 10 名食品学院经过感官培训的学生,采用 100 分方法评定,外观形态占 20%、质地占 30%、风味占 25%、可接受度占 25%,具体按照表 2 评分标准对空气炸鱼皮进行评价。

表 2 空气炸鱼皮感官评价标准

Table 2 Sensory evaluation criteria of air fried fish skin

感官指标	总分	评价(分)
外观	20	色泽一致,明亮度高呈亮黄色(16~20)
		色泽偏暗呈淡黄色(10~15)
		色泽暗淡呈白色(<10)
质地	30	硬度适中,口感酥脆度较好(23~30)
		较硬,酥脆度一般(15~22)
		入口硬,口感粗糙,咀嚼困难(<15)
风味	25	具有浓郁的脂肪香味,无油腻感(18~25)
		有脂肪香味但不浓郁,无油腻感(10~17)
		有腥味,油腻感重(<10)
可接受度	25	口感很好,可接受度高(18~25)
		口感较好,可接受(10~17)
		口感不好,可接受度低(<10)

1.2.9 GC-IMS 测定 自动进样条件:准确称取 3.0 g 样品置于 20 mL 顶空瓶中,鱼皮孵育温度 90°C ,转速 500 r/min,孵育时间 10 min,采用顶空自动进样的方式,进样量为 500 μL ,进样针温度 85°C ,不分流模式进样。

GC 条件:采用石英毛细管色谱柱 FS-SE-54-CB-1(15 m \times 0.53 mm, 1 μm),柱温 60°C ,载气为氮气($\geq 99.999\%$),载气的流速程序为:ISM 温度 45°C ,分析时间 30 min,载气/漂移气为 N_2 。

1.3 数据处理

采用 SPSS 24.00、Excel、Origin 2018 等软件进行数据处理与统计分析,结果用平均值 \pm 标准差来表示,并进行单因素方差分析(ANOVA) $P < 0.05$ 表示差异显著,采用逐步回归分析、主成分分析、聚类分析等进行分析,挥发性风味物质用 LAV(Laboratory

Analytical Viewer)和 Reporter、Gallery Plot 等插件分析,通过 GC \times IMS Library Search 定性软件内置的 NIST 气相保留指数数据库和 IMS 迁移时间数据库对采集的 VOCs 进行定性分析。

2 结果与分析

2.1 单因素实验结果

2.1.1 烫漂时间对空气炸鱼皮 L^* 、 b^* 、脆度的影响

通过前期实验发现,烫漂是预处理中关键的一步,而烫漂时间的选择对最终产品的形成也有一定的影响,其中,烫漂时间过短,鱼皮太软;烫漂时间过长,鱼皮变厚,不利于脆度的形成。由图 1A 可知,随着烫漂时间的延长,空气炸鱼皮的 L^* 和 b^* 值呈现先增大后减小的趋势,在 15 s 时 L^* 和 b^* 值最大,即亮度值和黄

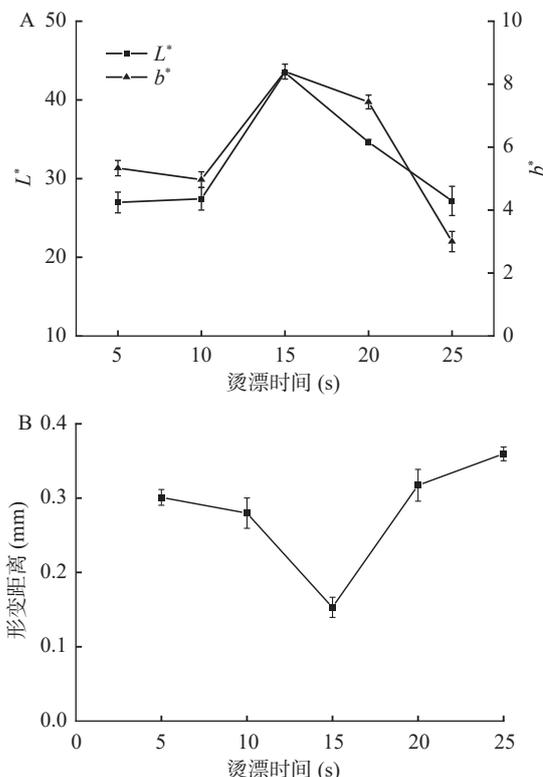


图1 烫漂时间对空气炸鱼皮 L^* 、 b^* 值、脆度的影响
Fig.1 Influence of blanching time on L^* , b^* values and brittleness of air fried fish skin

度值最高, 由图 1B 可知, 随着烫漂时间的延长, 形变距离呈先减小后增大的趋势, 在 15 s 时形变距离最小, 即脆度最大。若烫漂时间间隔过短, 试验存在误差较大, 且为了增加鱼皮的脆度, 综合三个指标, 选取烫漂时间为 5~15 s 较合适。

2.1.2 盐水质量分数对空气炸鱼皮 L^* 、 b^* 、脆度的影响
 盐水质量分数对产品的色泽有一定的影响^[14], 由图 2A 可知, 盐水质量分数对空气炸鱼皮的色泽影响较小, 随着盐水质量分数的增加, L^* 、 b^* 值呈先缓慢增大后降低的趋势, 由图 2B 可知, 形变距离呈先增大后减小再增大的趋势, 在 5% 时形变距离值最小, 由图 2B 可知, 1% 的盐水质量分数形变距离低于 7% 的形变距离, 考虑到盐水质量分数过高, 会使 Na^+ 增加, 导致空气炸鱼皮口感偏咸^[12], 综合考虑, 盐水质量分数选择 1%~5% 左右较好。

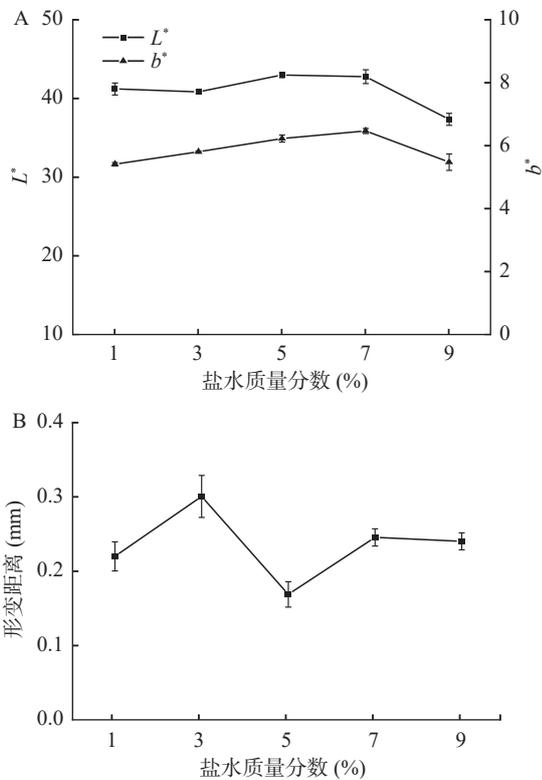


图 2 盐水质量分数对空气炸鱼皮 L^* 、 b^* 、脆度的影响
 Fig.2 Influence of mass fraction of brine on L^* 、 b^* and brittleness of air fried fish skin

2.1.3 盐水浸泡时间对空气炸鱼皮 L^* 、 b^* 、脆度的影响
 盐水浸泡时间对产品的色泽也有一定的影响^[15], 由图 3A 可知, 随着盐水浸泡时间的延长, L^* 、 b^* 值呈逐渐减小的趋势, 由图 3B 可知, 形变距离呈先增大后减小再增大的趋势, 综合考虑盐水浸泡时间选择 10~25 min 较为适合。

2.1.4 腌制时间对空气炸鱼皮 L^* 、 b^* 、脆度的影响
 腌制可以改变产品的颜色和质地^[16], 由图 4A 可知, 随着腌制时间的延长, L^* 值基本保持不变, b^* 值呈先减小后增大而后又减小的趋势, 由图 4B 可知, 形变距离呈先减小后增大的趋势, 30 min 时形变距离最

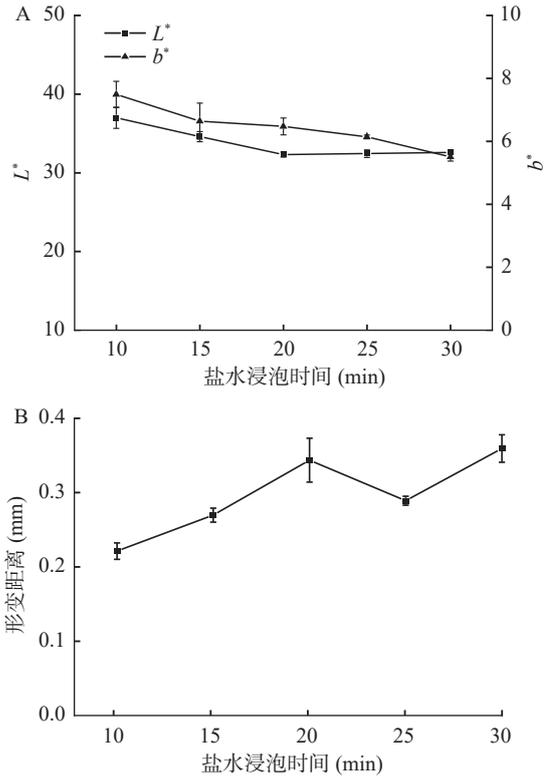


图 3 盐水浸泡时间对空气炸鱼皮 L^* 、 b^* 、脆度的影响

Fig.3 Influence of brine immersion time on L^* 、 b^* and brittleness of air fried fish skin

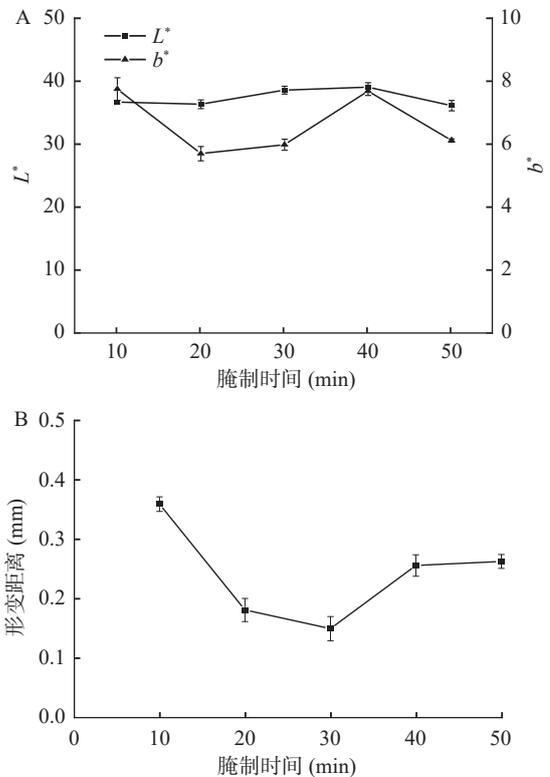


图 4 腌制时间对空气炸鱼皮 L^* 、 b^* 值、脆度的影响
 Fig.4 Effect of curing time on L^* 、 b^* and crispness of air fried fish skin

小, 这可能是由于随着腌制时间的延长, 少许水分子进入鱼皮内部, 使得空气炸过程中水分不易扩散而导致的, 综上可得, 腌制时间在 20~40 min 左右较为合适。

2.1.5 预干燥温度对空气炸鱼皮 L^* 、 b^* 、脆度的影响

预干燥是加工过程中关键的一步,研究发现干燥对鱼皮的色泽和质地都有的很大影响^[17],由图 5A 可知,随着预干燥温度逐渐升高, L^* 、 b^* 值和形变距离都呈先增大后减小再增大的趋势, L^* 、 b^* 值在 50 °C 时最大,这可能是由于随着温度的升高,鱼皮中氨基酸和还原糖或鱼皮油脂氧化产生的醛类物质发生美拉德反应的结果^[18],由图 5B 可知,随着预干燥温度的升高,蛋白质性质也发生改变,使脆度发生变化^[19],综上可得,预干燥温度在 45~55 °C 时较合适。

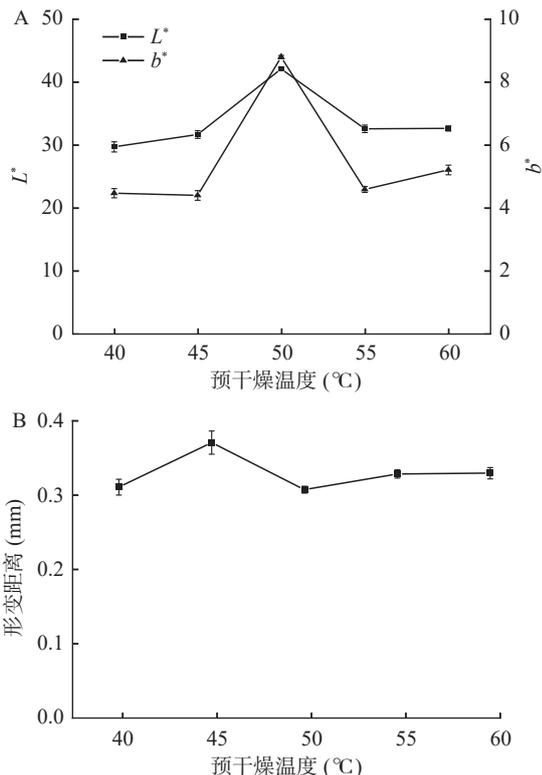


图 5 预干燥温度对空气炸鱼皮 L^* 、 b^* 值、脆度的影响
Fig.5 Influence of pre-drying temperature on L^* 、 b^* values and brittleness of air fried fish skin crispiness

2.1.6 预干燥时间对空气炸鱼皮 L^* 、 b^* 、脆度的影响

由图 6A 可知,随着预干燥时间逐渐延长, L^* 、 b^* 值呈先逐渐增大后减小的趋势,这可能是因为随着预干燥时间的延长,鱼皮表面裹糊逐渐凝固,形成一层白色的涂层导致的。由图 6B 可知,形变距离呈先逐渐减小后增大的趋势,这是因为随着预干燥时间的延长,鱼皮内部水分逐渐蒸发,鱼皮表面逐渐形成硬壳造成的,但因预干燥时间过长鱼皮边缘脱水硬化严重,不利于鱼皮后期炸制。综上所述,预干燥时间在 20~40 min 比较合适。

2.1.7 空气炸温度对空气炸鱼皮 L^* 、 b^* 、脆度的影响

炸制温度和时间是影响色泽变化的主要因素,色泽的变化主要是因为炸制过程中焦糖化反应和美拉德反应^[20],随着炸制温度的升高,美拉德反应速度迅速升高而使食品的金黄色泽迅速形成^[21],进而影响色泽的变化,炸制温度同样也影响着质构的变化^[22]。由图 7 可知,随着空气炸温度的升高, L^* 、 b^* 值逐渐增

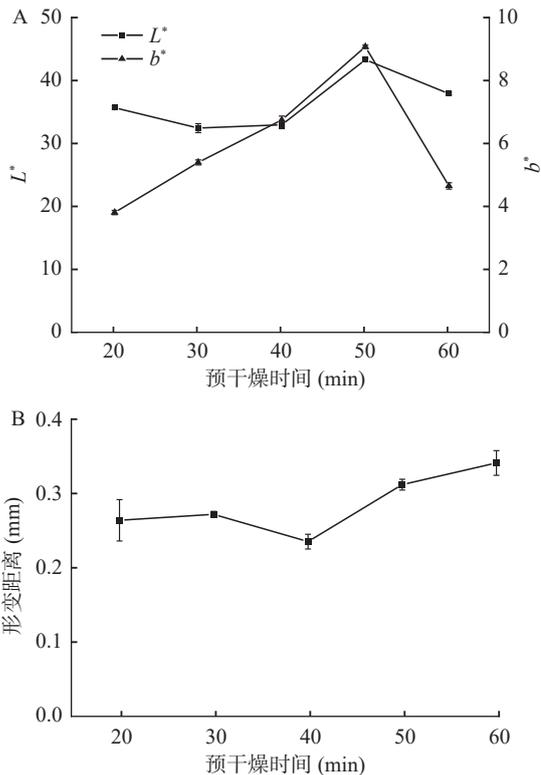


图 6 预干燥时间对空气炸鱼皮 L^* 、 b^* 、脆度的影响
Fig.6 Influence of pre-drying time on L^* 、 b^* and brittleness of air fried fish skin

大,形变距离逐渐减小,综上可得,随着温度的升高,空气炸鱼皮的色泽和脆度越理想,即选择 170~190 °C 较好。

2.1.8 空气炸时间对空气炸鱼皮 L^* 、 b^* 、脆度的影响

炸制时间也是导致空气炸鱼皮颜色和质构变化的原因之一^[23],由图 8A 可知,随着空气炸时间的延长, L^* 、 b^* 值在空气炸后期都呈逐渐升高的趋势,这主要是由于裹糊的鱼皮暴露在油和空气中,随着空气炸时间的延长,氧化褐变、焦糖化反应加剧导致的,由图 8B 可知,形变距离都呈先减小后增大的趋势,这主要是因为随着空气炸时间的延长,鱼皮表面微孔结构形成,鱼皮慢慢由软到硬而后变酥脆。综上所述,空气炸时间在 12~16 min 较合适。

2.2 均匀设计结果

2.2.1 指标模型建立 通过单因素实验,以含水量、含油量、脆度、 L^* 值和 b^* 值和感官评价为指标,采用混水平均匀设计方案 $U_{10}(5^7 \times 2^1)$ 进行试验,研究各因素与含水量、含油量、脆度、 L^* 值和 b^* 值之间的关系,结果见表 3。由表 3 可知,含水量、含油量和脆度的误差较小,感官评价、 L^* 值和 b^* 值的误差较大,说明空气炸工艺可能导致产品基本指标一致性较好,但外观一致性较差。

对试验数据进行逐步回归分析,并建立指标模型,由表 4 可知。含水量(Y_1)在一次回归中达到极显著水平($P < 0.01$),相关系数 r 为 0.924,方程模型具有很好的拟合度,影响含水量的主要因素是预干燥时

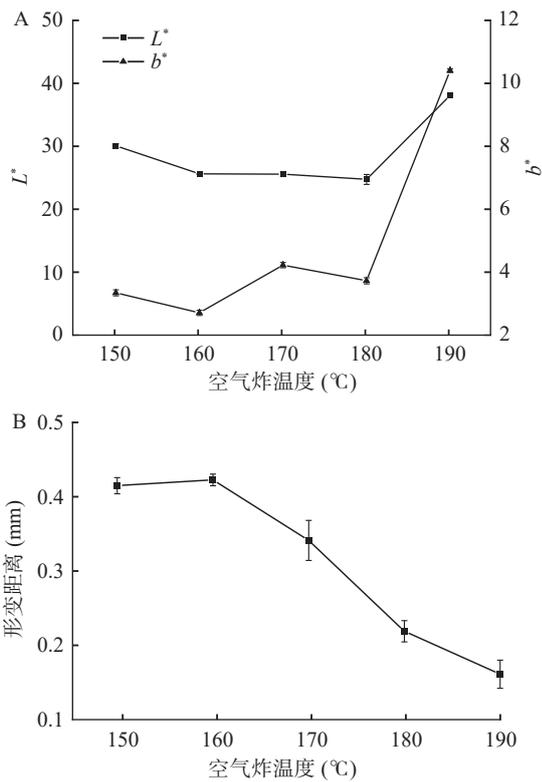


图 7 空气炸温度对空气炸鱼皮 L^* 、 b^* 、脆度的影响
Fig.7 Influence of air frying temperature on L^* , b^* and brittleness of air fried fish skin

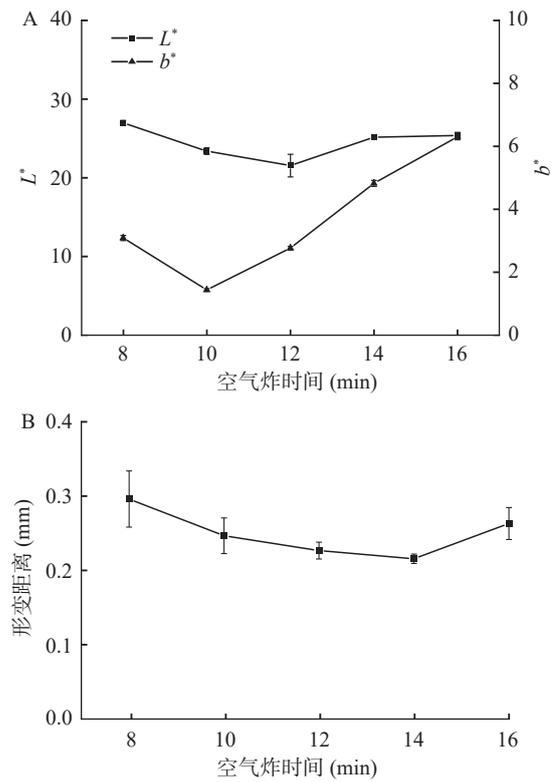


图 8 空气炸时间对空气炸鱼皮 L^* 、 b^* 、脆度的影响
Fig.8 Influence of air frying time on L^* , b^* and brittleness of air fried fish skin

表 3 均匀设计试验结果

Table 3 Experimental results of uniform design

实验号	Y_1 含水量(%)	Y_2 含油量(%)	Y_3 脆度(mm)	Y_4 感官评价(分)	$Y_5 L^*$	$Y_6 b^*$
1	1.60±0.00	18.01±2.41	0.17±0.13	78.40±1.36	27.57±1.27	5.67±0.62
2	2.03±0.00	19.26±1.42	0.20±0.35	67.90±7.08	26.97±3.64	1.38±1.52
3	1.36±0.00	18.74±0.31	0.22±0.22	81.50±2.62	30.63±1.19	7.93±1.37
4	2.02±0.01	12.83±0.15	0.13±0.11	75.80±2.89	21.03±0.82	3.33±1.11
5	1.60±0.00	12.47±0.82	0.13±0.07	84.50±3.04	33.10±1.10	8.47±3.79
6	1.83±0.02	13.76±0.26	0.13±0.10	77.50±1.63	23.30±3.32	4.07±1.60
7	1.61±0.01	13.10±1.97	0.14±0.10	80.80±2.23	29.63±2.13	7.23±5.42
8	1.90±0.02	20.04±2.28	0.14±0.09	70.40±7.03	23.80±2.91	5.00±1.19
9	1.40±0.01	14.17±1.01	0.22±0.19	80.20±2.82	28.93±1.95	7.50±0.93
10	1.94±0.01	10.62±0.88	0.29±0.21	71.30±2.00	24.40±0.93	7.50±1.35

表 4 指标模型概况

Table 4 Summary of the model parameters

指标	模型	相关系数 r	P 值	显著性
Y_1	$1.728+0.098X_1+0.262X_5$	0.924	0.001	**
Y_2	$15.997-1.743X_1+2.736X_3X_8$	0.904	0.003	**
Y_3	$0.177-0.043X_2X_8$	0.757	0.011	*
Y_4	$80.657-4.526X_5+2.113X_8+5.011X_1X_8$	0.940	0.017	*
Y_5	$26.936-3.358X_5+1.924X_8$	0.893	0.013	*
Y_6	$6.438+0.715X_2+1.897X_6-1.143X_1X_6+0.257X_3X_4$	0.998	0.000	**

注: 0.01< P <0.05即达到显著水平,用*表示; P <0.01即达到极显著水平,用**表示。

间和烫漂时间;含油量(Y_2)在二次回归中达到极显著水平(P <0.01),相关系数 r 为 0.904,方程模型具有很好的拟合度,影响含油量的主要因素为烫漂时间、腌制时间和预干燥温度;脆度(Y_3)在二次回归时达到显著水平(P <0.05),相关系数 r 为 0.757,影响脆度的主要因素是盐水浸泡时间和预干燥温度;感官评价(Y_4)

在二次回归中达到显著水平(P <0.05),相关系数 R 为 0.940,方程模型具有很好的拟合度,影响感官评价的主要因素是烫漂时间、预干燥时间和预干燥温度; L^* 值(Y_5)在一次回归中达到显著水平(P <0.05),相关系数 r 为 0.893,影响 L^* 的主要因素是预干燥时间和预干燥温度; b^* (Y_6)在二次回归时达到极显著水

平($P < 0.01$), 相关系数 r 为 0.998, 影响 b^* 的主要因素是盐水浸泡时间、腌制时间、盐水质量分数和空气炸温度。

2.2.2 空气炸鱼皮品质主成分分析 一般认为方差特征值大于 1 的为主成分, 由表 5、表 6 可知, 有 3 个方差特征值大于 1, 达到了累计贡献率大于 85% 的原则^[24], 其他成分的特征值远小于 1, 且贡献率趋于平坦, 代表性弱, 不纳入主成分提取。即提取的 3 个主成分累计贡献率为 92.112%, 说明 3 个主成分基本能够反映空气炸鱼皮的品质信息。

表 5 6 个主成分的特征值、贡献率及累计贡献率
Table 5 Eigenvalues contribution rates and cumulative contribution rates of six principal components

成份	初始特征值		
	特征值	方差贡献率(%)	累积贡献率(%)
1	3.185	53.085	53.085
2	1.209	20.157	73.241
3	1.132	18.870	92.112
4	0.281	4.680	96.792
5	0.169	2.821	99.613
6	0.023	0.387	100.000

表 6 特征值对应的成分矩阵

Table 6 Coefficient matrix corresponding to eigenvalues

项目	成分		
	1	2	3
1	-0.914	0.146	-0.246
2	0.892	-0.227	-0.334
3	0.886	0.314	-0.019
4	0.841	-0.170	0.266
5	0.075	0.804	0.574
6	-0.235	-0.602	0.748

由表 7 可知, 第 3 组的综合得分最高为 1.29, 第 4 组的综合得分最低为 -1.33。因此, 选取均匀设计表中第 3 组作为最优的因素组合, 即烫漂时间 8 s、盐水质量分数为 1%、盐水浸泡时间为 20 min、腌制时间 36 min、预干燥温度 55 °C、预干燥时间 25 min、空气炸温度为 190 °C、空气炸时间为 16 min。

表 7 主成分得分和综合得分

Table 7 Principal component score and comprehensive score

实验号	主成分1	主成分2	主成分3	综合得分	排名
1	0.36	-0.71	0.57	0.15	6
2	-2.52	-0.38	1.33	-1.16	9
3	2.01	-0.25	1.45	1.29	1
4	-1.9	-0.1	-1.57	-1.33	10
5	2.38	-0.46	-1	0.98	3
6	-0.95	-0.42	-1.15	-0.81	7
7	1.32	-0.29	-0.78	0.49	4
8	-1.74	-0.9	0.63	-0.98	8
9	1.68	0.58	0.42	1.09	2
10	-0.63	2.92	0.09	0.27	5

2.2.3 聚类热图分析结果 根据 10 组试验 6 个指标的测定数据, 通过聚类分析得出聚类热图, 由图 9 可知, 10 组试验 6 个指标呈现出一定的聚类性特征,

在欧氏距离 2 处指标可以划分为 2 类: 第 I 类为含水量, 第 II 类为含油量、感官评价、脆度、 L^* 值和 b^* 值, 5 项指标相关性较强, 在欧氏距离 1 处, 10 组试验可以划分为 3 类, 第 I 类为 10 号, 第 II 类为 6 号、2 号、8 号和 4 号, 第 III 类为 9 号、7 号、5 号、3 号和 1 号, 聚类结果与主成分分析结果基本一致。

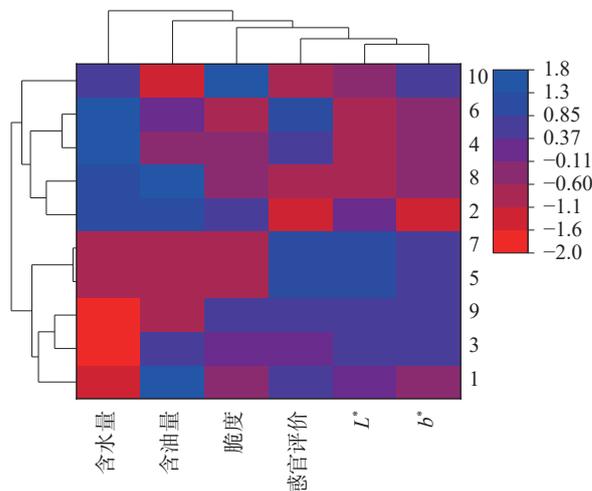


图 9 10 个试验因素 6 项指标聚类热图

Fig.9 Clustering heat map of 6 indicators of 10 experimental factors

2.3 最佳工艺下空气炸鱼皮的风味分析

2.3.1 空气炸鱼皮 GC-IMS 挥发性气味成分谱图分析

本文利用 FlavourSpec[®] 风味分析仪对上述工艺中最佳条件的空气炸鱼皮进行挥发性物质分析, 以油炸鱼皮作为对照, 采用相同的工艺参数, 根据仪器自带的程序得到挥发性物质二维谱图。A 为原始平面谱图, B 为去掉蓝色背景的差异对比谱图, 图中 1.0 处红色竖线为反应离子峰(RIP 峰)^[25], 图中每一个点代表一种挥发性有机物质, 颜色的深浅和面积的大小代表物质含量的高低^[26]。从图 10 可知, 油炸鱼皮的斑点数量较少, 而空气炸鱼皮的红色斑点和浅蓝色斑点数量较多, 且红色斑点的颜色明显加深, 即空气炸鱼皮的挥发性风味物质含量更丰富。

2.3.2 空气炸鱼皮 GC-IMS 挥发性气味成分定性分析

为了进一步对空气炸鱼皮的挥发性风味物质进行定性分析, 根据挥发性物质的气相色谱保留时间和离子迁移时间, 以 $C_4 \sim C_9$ 的正酮类作为外标物计算每种挥发性物质的保留指数, 通过 GC-IMS 数据库进行匹配从而对挥发性物质进行定性分析, 如表 8 所示, 可以明确性的化合物有 40 种(一个化合物可以产生质子化单体, 质子结合二聚体, 或者两者都有的情况)^[27], 其中, 醛类 15 种, 醇类 5 种, 酸类 5 种, 酮类 3 种, 吡嗪类 5 种, 酯类 3 种, 呋喃类 2 种, 醚类化合物 1 种, 胺类化合物 1 种, 另有 20 种物质未定性。

2.3.3 空气炸鱼皮挥发性成分指纹图谱 为了更好地体现空气炸鱼皮的挥发性成分, 平行测试 3 次后获得 GC-IMS 二维图谱中所有信号峰, 生成空气炸

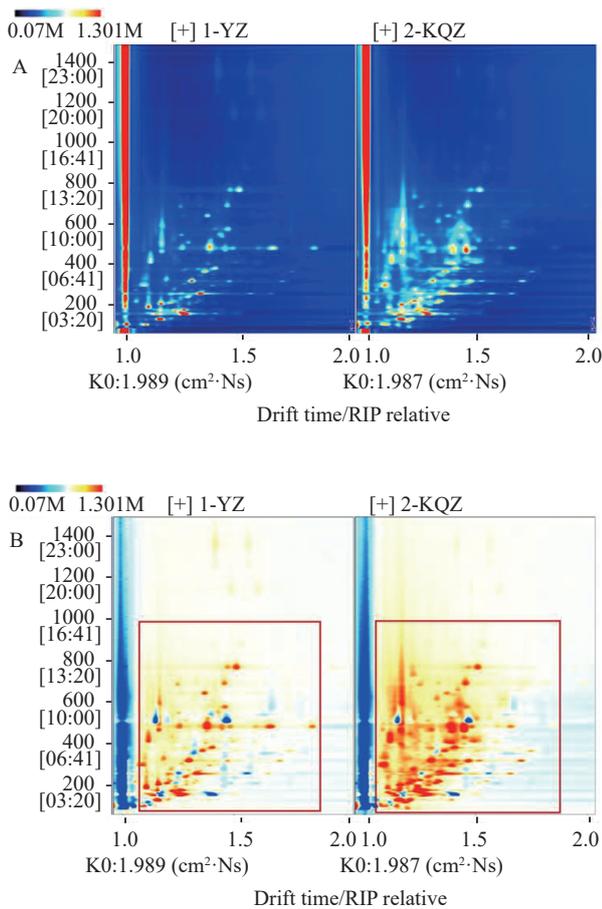


图 10 鱼皮特征风味二维 GC-IMS 谱图

Fig.10 Two-dimensional GC-IMS spectra of fish skin characteristic flavors

注: 以油炸鱼皮为空白对照, 从左到右分别是油炸鱼皮、空气炸鱼皮; A: 原始谱图; B: 差异对比谱图。

鱼皮挥发性成分指纹图谱, 如图 11 所示, 每一行代表一个样品(从上至下分别是油炸和空气炸), 每一列代表不同样品中相同挥发性成分, 指纹图谱上有两个相同名字的分别是化合物单体(D)和二聚体(M), 从图中可知, 颜色的亮度变化非常明显, 即不同挥发性物质的含量变化也较明显。A 区域是油炸鱼皮的特征风味物质, B 区域是油炸鱼皮和空气炸鱼皮所共有的风味物质, C 区域是空气炸的特征风味物质, 且空气炸的特征风味物质最多, C 区域的主要挥发性物质分别是己酸乙酯、己酸、反-2-辛烯醛、(E,E)-2,4-己二烯醛、2-庚酮、2,5-二甲基吡嗪、(E)-2-己烯醛、2-甲基吡嗪、异戊酸、2-甲基丁醛、1-辛醇、异戊醇、2-丙基-1-戊醇、2-乙基呋喃, B 区域的主要挥发性风味物质分别是 3-甲硫基丙醛、二丙基硫醚、2,3-戊二酮、乙酸丙酯、壬醛、2-丙醇、2-正戊基呋喃。

从 B 和 C 区域可看出化合物种类非常丰富, 在一定程度上构成了空气炸鱼皮特殊的风味, 这些风味主要由两方面组成, 一是由低级的、不饱和的醇类和醛类构成的油脂香, 二是吡嗪、呋喃、酮等含氧、含氮的杂环化合物所构成的焦糖、烘烤香^[28]。其中, 醛类化合物是由脂肪氧化、降解及氨基酸 Strecker 反应产生的, 支链短链醛和不饱和醛分别是由氨基酸的脱氨基和脂酸(亚油酸和亚麻酸)的降解生成的^[29-30], 醛类化合物较多, 对鱼皮的整体风味贡献较大。酮类和醇类物质一般来源于脂肪酸的氧化降解^[31], 具有独特的花香、水果香等令人愉悦的风味。酸类是脂肪氧化裂解或脂肪水解过程中变为低级脂肪酸而产生的^[32]。吡嗪类来源于高温下的焦糖化反应、美拉德

表 8 空气炸鱼皮挥发性成分定性分析

Table 8 Qualitative analysis of volatile components of air fried fish skin

类别	化合物名称	分子式	保留指数	保留时间(s)	迁移时间(ms)	风味描述	
醛类	(E)2-辛烯醛二聚体2-octenal (E)M	C ₈ H ₁₄ O	1066	689.308	1.33583	脂肪、黄瓜, 香蕉	
	(E)2-辛烯醛单体2-octenal (E)D	C ₈ H ₁₄ O	1066	689.747	1.81388		
	(E,E)-2,4-己二烯醛Hexadienal	C ₆ H ₈ O	926.5	427.273	1.4522	清新的甜瓜香气	
	2-甲基丁醛二聚体2-Methyl-butanal M	C ₅ H ₁₀ O	584.8	130.561	1.15583	巧克力香气	
	2-甲基丁醛单体2-Methyl-butanal D	C ₅ H ₁₀ O	583.9	130.196	1.39121		
	壬醛二聚体n-Nonanal M	C ₉ H ₁₈ O	1105	766.941	1.4705	柑橘、黄瓜, 生土豆, 坚果, 椰子	
	壬醛单体n-Nonanal D	C ₉ H ₁₈ O	1104	766.299	1.51186		
	(E)-2-庚烯醛二聚体2-heptenal (E)M	C ₇ H ₁₂ O	957	481.38	1.25509	辛辣, 绿色蔬菜, 脂肪	
	(E)-2-庚烯醛单体2-heptenal (E)D	C ₇ H ₁₂ O	955.6	478.76	1.66775		
	3-甲硫基丙醛Methional	C ₄ H ₈ OS	898.4	377.615	1.39469	奶油, 面包, 洋葱, 牛肉	
(E)-2-己烯醛二聚体(E)-2-hexenal M	C ₆ H ₁₀ O	856.8	327.767	1.18548	带有草药和香料的果香		
(E)-2-己烯醛单体(E)-2-hexenal D	C ₆ H ₁₀ O	846.6	316.485	1.52259			
醇类	糠醛furfural	C ₅ H ₄ O ₂	791.7	256.116	1.33725	甜味, 面包, 坚果味, 焦糖味的, 涩味	
	十一醛undecanal	C ₁₁ H ₂₂ O	1292	1142.171	1.61288	脂肪, 柑橘, 肥皂	
	戊醛pentanal	C ₅ H ₁₀ O	670.5	164.794	1.18049	发酵, 果浆, 面包	
	1-辛醇1-Octanol	C ₈ H ₁₈ O	1066	689.943	1.45797	柑橘类, 花香, 脂肪, 椰子	
	2-丙醇2-propanol	C ₃ H ₈ O	516.3	103.186	1.09214	霉味	
	异戊醇二聚体Isopentyl alcohol M	C ₅ H ₁₂ O	738	211.153	1.24123	发酵, 青草味, 面包, 酒味, 甜味	
	2-辛醇2-Octanol	C ₈ H ₁₈ O	956.8	480.917	1.85059	辛辣, 泥土味, 香蕉, 蘑菇	
	2-丙基-1-戊醇Octan-3-ol	C ₈ H ₁₈ O	989.2	538.193	1.39872	泥土味, 蘑菇味, 乳制品味, 霉味, 奶油味	
	酸类	丙酸Propanoic acid	C ₃ H ₆ O ₂	651.4	157.128	1.26577	刺鼻, 酸味, 乳制品

续表 8

类别	化合物名称	分子式	保留指数	保留时间(s)	迁移时间(ms)	风味描述
酮类	癸酸decanoic acid	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	1397	1351.905	1.56322	令人不愉快的酸味, 水果
	己酸Hexanoic acid	C ₆ H ₁₂ O ₂	948.2	465.699	1.29892	酸味, 脂肪味, 水果香
	异戊酸isopentanoic acid	C ₅ H ₁₀ O ₂	810.1	276.367	1.22076	酸味, 刺激, 奶酪
	庚酸Heptanoic acid	C ₇ H ₁₄ O	526.3	638.511	1.36913	腐败的脂肪气味
	2,3-戊二酮2,3-pentanedione	C ₇ H ₁₄ O	890.6	173.323	1.2222	黄油, 坚果, 烤制, 焦糖
	2-庚酮二聚体2-Heptanone M	C ₇ H ₁₄ O	888.7	364.954	1.2617	果味, 辛辣, 奶油味
	2-庚酮单体2-heptanone D	C ₆ H ₈ N ₂	916.3	362.844	1.63059	
吡嗪类	2,5-二甲基吡嗪二聚体2,5-dimethylpyrazine M	C ₆ H ₈ N ₂	916.5	409.245	1.1138	坚果, 花生, 霉味, 烘烤, 泥土
	2,5-二甲基吡嗪单体2,5-Dimethylpyrazine D	C ₅ H ₆ N ₂	828.6	409.668	1.49641	
	2-甲基吡嗪二聚体Methylpyrazine M	C ₅ H ₆ N ₂	826.2	296.688	1.08201	
	2-甲基吡嗪单体methylpyrazine D	C ₇ H ₁₀ N ₂	1017	294.077	1.39412	
	2,3,5-三甲基吡嗪Trimethylpyrazine	C ₅ H ₁₀ O ₂	727.1	591.117	1.16785	
酯类	乙酸丙酯n-Propyl acetate	C ₈ H ₁₆ O ₂	1004	202.508	1.15975	香蕉, 蜂蜜
	己酸乙酯二聚体Ethyl hexanoate M	C ₈ H ₁₆ O ₂	1004	567.029	1.33926	菠萝, 脂肪, 香料
	己酸乙酯单体Ethyl hexanoate D	C ₆ H ₈ O	745.8	565.899	1.79853	
呋喃类	2-乙基呋喃2-Ethylfuran	C ₉ H ₁₄ O	992.6	217.339	1.05042	面包, 泥土味
	2-正戊基呋喃2-Pentylfuran	C ₆ H ₁₄ S	911.9	544.348	1.25362	果香, 泥土味, 霉味, 焦糖味
其他类	二丙基硫醚Propylsulfide	C ₃ H ₉ N	510.3	401.606	1.16688	有特殊气味
	三甲胺Trimethylamine	C3H9N	510.3	100.804	1.14764	鱼腥味

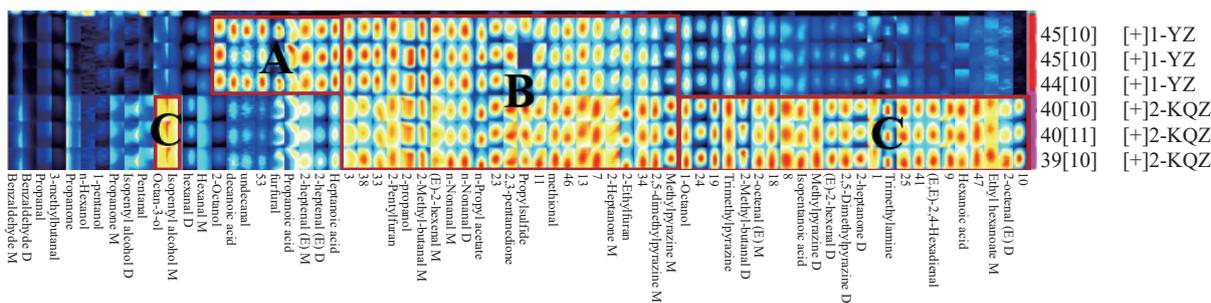


图 11 空气炸鱼皮挥发性气味成分指纹图谱

Fig.11 Fingerprint of volatile odor components of air fried fish skin

反应等^[33]。这些化合物共同作用赋予了空气炸鱼皮特有的风味。

3 结论

通过单因素和均匀设计试验对空气炸鱼皮的工艺进行了优化,发现单因素实验中预干燥时间、空气炸温度及时间对空气炸鱼皮的最终品质影响最大,通过主成分分析得到最佳工艺条件为:烫漂时间 8 s、盐水质量分数为 1%、盐水浸泡时间 20 min、腌制时间 36 min、预干燥温度 55 ℃、预干燥时间 25 min、空气炸温度为 190 ℃、空气炸时间为 16 min,得到的空气炸鱼皮具有较低的含油量、较好的色泽和脆度。而以油炸鱼皮为对照,对最佳工艺条件的空气炸鱼皮挥发性风味物质进行分析,发现空气炸鱼皮的风味物质种类和含量更多、更丰富,脂肪香味更浓郁,且大多呈愉悦气味。

参考文献

[1] 张慈军, 杨建新, 金华, 等. 津新红镜鲤肌肉和鱼皮营养成分分析与品质评定[J]. 河北渔业, 2020(8): 5-9, 32. [ZHANG Ci-jun, YANG Jianxin, JIN Hua, et al. Analysis and quality evaluation of nutrient components in muscle and skin of Jinxin red mirror

carp[J]. Hebei Fisheries, 2020(8): 5-9, 32.]
 [2] 余文海, 马海霞, 梁珀钊. 一种水发罗非鱼鱼皮的工艺[J]. 肉类工业, 2020(12): 28-30. [SHE Wenhai, MA Haixia, LIANG Bochuan. A process for water-stable tilapia skin[J]. Meat Industry, 2020(12): 28-30.]
 [3] 钟威, 万刚, 汤徐英, 等. 动力学模型预测泡椒鱼皮产品货架寿命[J]. 肉类工业, 2011(1): 35-38. [ZHONG Wei, WAN Gang, TANG Xuying, et al. The kinetic model predicts the shelf life of pickled pepper and fish skin products[J]. Meat Industry, 2011(1): 35-38.]
 [4] 王雅菲, 祁立波, 白帆, 等. 熬胶工艺对鲟鱼鱼皮胶冻品质的影响[J]. 中国食品学报, 2019, 19(9): 137-146. [WANG Yafei, QI Libo, BAI Fan, et al. The effect of boiling glue technology on the quality of sturgeon skin jelly[J]. Chinese Journal of Food Science, 2019, 19(9): 137-146.]
 [5] 周婉君, 吴燕燕, 李来好, 等. 即食型休闲食品“油炸鱼皮”工艺研究[J]. 南方水产, 2006(1): 62-65. [ZHOU Wanjun, WU Yanyan, LI Laihao, et al. Research on "Fried fish skin" process of instant snack food[J]. Southern Fisheries, 2006(1): 62-65.]
 [6] FANG M C, HUANG G J, SUNG W C. Mass transfer and texture characteristics of fish skin during deep-fat frying, electrostatic frying, air frying and vacuum frying[J]. LWT, 2021, 137: 110494.

- [7] 李锐,孙祖莉,李来好,等.不同热加工方式对罗非鱼片食用品质的影响[J].*食品与发酵工业*,2020,46(14):127-135. [LI Rui,SUN Zuli,LI Laihao,et al. The effect of different thermal processing methods on the eating quality of tilapia fillets[J]. *Food and Fermentation Industries*,2020,46(14):127-135.]
- [8] 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. [ZHAO Wenyu,ZHAO Meiyu,WANG Kexin,et al. Effect of frying method on the eating quality of high whitefish muscle[J]. *Food Science*,2021,42(4):72-79.]
- [9] 李凯峰,周远平,王琼,等.3种烹调方式下马铃薯风味化合物组分构成的品种间差异比较[J].*食品科学*,2020,41(20):159-166. [LI Kaifeng,ZHOU Yuanping,WANG Qiong,et al. Comparison of variety differences in potato flavor compound composition under three cooking methods[J]. *Food Science*,2020,41(20):159-166.]
- [10] CHEN J H,TAO L N,ZHANG T,et al. Effect of four types of thermal processing methods on the aroma profiles of acidity regulator-treated tilapia muscles using E-nose,HS-SPME-GC-MS, and HS-GC-IMS[J].*LWT*,2021,147:111585.
- [11] WANG F,GAO Y Q,WANG H B,et al. Analysis of volatile compounds and flavor fingerprint in Jingyuan lamb of different ages using gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS)[J].*Meat Science*,2021,175:108449.
- [12] 李玉龙,杨焯,陆国权.基于均匀设计和主成分分析的甘薯薯片油炸工艺优化[J].*食品科学*,2017,38(4):223-230. [LI Yulong,YANG Ye,LU Guoquan. Optimization of frying process for sweet potato chips based on uniform design and principal component analysis[J]. *Food Science*,2017,38(4):223-230.]
- [13] SU Y,ZHANG M,ZHANG W M,et al. Application of novel microwave-assisted vacuum frying to reduce the oil uptake and improve the quality of potato chips[J].*LWT-Food Science and Technology*,2016,73:490-497.
- [14] 关熔,林婉玲,曾庆孝,等.盐处理对脆肉鲩冷鲜鱼片贮藏品质的影响[J].*食品与发酵工业*,2009(4):184-188. [GUAN Rong,LIN Wanling,ZENG Qingxiao,et al. The effect of salt treatment on the storage quality of cold crispy carp fillets[J]. *Food and Fermentation Industries*,2009(4):184-188.]
- [15] 刘亚珍.常压油炸条件下降低油炸薯条含油量的工艺研究[D].南京:南京农业大学,2007. [LIU Yazhen. Research on the technology of reducing the oil content of fried French fries under normal pressure frying conditions[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University,2007.]
- [16] JIN G,HE L,WANG Q,et al. Pulsed pressure assisted brining of porcine meat[J].*Innovative Food Science & Emerging Technologies*,2014,22(4):76-80.
- [17] 陆妙灵.金枪鱼鱼皮干制加工技术研究[D].杭州:浙江工业大学,2013. [LU Miaoling. Research on tuna skin drying processing technology[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology,2013.]
- [18] 高昕,张亚琦,许家超,等.不同干燥条件对鲍鱼组织结构及流变特性的影响[J].*中国食品学报*,2008(3):108-115. [GAO Xin,ZHANG Yaqi,XU Jiachao,et al. Effects of different drying conditions on the tissue structure and rheological properties of abalone[J]. *Chinese Journal of Food Science*,2008(3):108-115.]
- [19] 张亚楠.不同油炸技术对猪肉制品品质特性影响的研究[D].上海:上海海洋大学,2018. [ZHANG Yanan. Study on the influence of different frying techniques on the quality characteristics of pork products[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University,2018.]
- [20] 齐颖.油炸肉制品加工过程中多环芳烃的形成及控制研究[D].天津:天津科技大学,2015. [QI Ying. Research on the formation and control of polycyclic aromatic hydrocarbons during the processing of fried meat products[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology,2015.]
- [21] 颜未来,吴卫国,李超.不同工艺对油炸香芋片的品质特性研究[J].*现代食品科技*,2013,29(5):1006-1009. [YAN Weilai,WU Weiguo,LI Chao. Study on the quality characteristics of fried fragrant taro chips by different processes[J]. *Modern Food Science and Technology*,2013,29(5):1006-1009.]
- [22] BORDIN K,KUNITAKE M T,ARACAVA K K,et al. Changes in food caused by deep fat frying-A review[J].*Archivos Latinoamericanos De Nutrición*,2013,63(1):5-13.
- [23] 刘春菊,王海鸥,牛丽影,等.蔗糖调控对气流膨化黄桃片微观结构及品质的影响[J].*食品科学*,2020,41(11):113-120. [LIU Chunju,WANG Haiou,NIU Liying,et al. Effects of sucrose regulation on the microstructure and quality of air-expanded yellow peach slices[J]. *Food Science*,2020,41(11):113-120.]
- [24] 江海,陈小华,杜佳宝,等.基于主成分分析评价陕南地区主栽猕猴桃的品质[J].*陕西理工大学学报(自然科学版)*,2021,37(1):43-49. [JIANG Hai,CHEN Xiaohua,DU Jiabao,et al. Based on principal component analysis to evaluate the quality of main kiwifruit grown in southern Shaanxi[J]. *Journal of Shaanxi University of Technology (Natural Science Edition)*,2021,37(1):43-49.]
- [25] ANDRÉS M G,NATALIA A M,VICENTE R E,et al. Use of a non-destructive sampling method for characterization of Iberian cured ham breed and feeding regime using GC-IMS[J].*Meat Science*,2019,152:146-154.
- [26] DUAN Z L,DONG S L,DONG Y W,et al. Geographical origin identification of two salmonid species via flavor compound analysis using headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry combined with electronic nose and tongue[J].*Food Research International*,2021,385:110385.
- [27] CUI Z K,YAN H,Manoli Tatiana,et al. Changes in the volatile components of squid (*Illex argentinus*) for different cooking methods via headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry[J].*Food Science & Nutrition*,2020,8(10):1-15.
- [28] 张聪,陈德慰.油炸食品风味的研究进展[J].*食品安全质量检测学报*,2014,5(10):3085-3091. [ZHANG Cong,CHEN Dewei. The research progress of fried food flavor[J]. *Journal of Food Safety and Quality Inspection*,2014,5(10):3085-3091.]
- [29] ZHANG Q,DING Y C,GU S Q,et al. Identification of changes in volatile compounds in dry-cured fish during storage using HS-GC-IMS[J].*Food Research International*,2020,137:109339.
- [30] ZHOU X X,CHONG Y Q,DING Y T,et al. Determination

of the effects of different washing processes on aroma characteristics in silver carp mince by MMSE-GC-MS, e-nose and sensory evaluation[J]. *Food Chemistry*, 2016, 207: 205–213.

[31] HAN Y C, CHI W Y, JOOSHIN K, et al. Static headspace analysis-olfactometry (SHA-O) of odor impact components in salted-dried white herring (*Ilisha elongata*)[J]. *Food Chemistry*, 2007, 104(2): 842–851.

[32] 顾赛麒, 唐锦晶, 周绪霞, 等. 腌腊鱼传统日晒干制过程中品

质变化与香气形成[J]. *食品科学*, 2019, 40(17): 36–44. [GU Saiqi, TANG Jinjing, ZHOU Xuxia, et al. Quality changes and aroma formation during traditional sun-dried pickled fish[J]. *Food Science*, 2019, 40(17): 36–44.]

[33] CHEN Y, LI P, LIAO L Y, et al. Characteristic fingerprints and volatile flavor compound variations in Liuyang Douchi during fermentation via HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS[J]. *Food Chemistry*, 2021, 361: 130055.