

复炸工艺对预油炸包浆豆腐品质及挥发性风味物质的影响

聂静文^{1,2,3} 陈浩^{1,2,3} 赵聃^{1,2,3} 周小虎^{1,2,3} 杨大军⁴ 赵良忠^{1,2,3}

(1. 邵阳学院食品与化学工程学院, 湖南 邵阳 422000; 2. 豆制品加工与安全控制湖南省重点实验室, 湖南 邵阳 422000; 3. 湘味特色食品绿色加工与装备湖南省工程研究中心, 湖南 邵阳 422000; 4. 四川憨憨豆匠食品有限公司, 四川 成都 611530)

摘要: [目的]探究油炸锅复炸(DFP)、微波炉复炸(MP)和空气炸锅复炸(AFP)对预油炸包浆豆腐品质及香气特征的影响。[方法]以出浆率、水分含量、色差及感官评价为考察指标,筛选最优复炸条件,并通过质构特性、含油量、丙二醛含量、电子鼻及挥发性化合物组成,综合评定最适合消费者的复炸工艺。[结果]3种复炸方式处理下,包浆豆腐出浆率和感官评价均呈先上升后下降趋势,水分含量持续下降,色泽逐渐变黄。各复炸方式的最佳处理条件分别为:170℃油炸30 s(DFP组)、350 W加热60 s(MP组)和170℃炸制180 s(AFP组)。最优条件下,AFP组包浆豆腐外壳酥脆金黄、浆液嫩滑,硬度与弹性分别为2.47 N和0.96 mm,综合质构品质优于其他复炸方式;同时该组包浆豆腐脂肪含量较低,为31.34 g/100 g。风味分析表明,AFP组能较好地还原油复炸的风味品质。此外,在鉴定出的45种挥发性化合物中,空气炸样品富含醇类和酯类物质,呈现油脂香和果香。[结论]AFP在降低油脂和提升食用品质方面具有较大优势。

关键词: 包浆豆腐;复炸工艺;品质;挥发性化合物

Effects of re-frying processes on the quality and volatile flavor compounds of pre-fried coated tofu

Nie Jingwen^{1,2,3} Chen Hao^{1,2,3} Zhao Dan^{1,2,3} Zhou Xiaohu^{1,2,3} Yang Dajun⁴ Zhao Liangzhong^{1,2,3}

(1. College of Food Science and Chemical Engineering, Shaoyang University, Shaoyang, Hunan 422000, China; 2. Hunan Provincial Key Laboratory of Soybean Products Processing and Safety Control, Shaoyang, Hunan 422000, China; 3. Hunan Engineering Research Center of Green Processing and Equipment of Hunan-Style Food, Shaoyang, Hunan 422000, China; 4. Sichuan Han Bean Craftsman Food Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 611530, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effects of deep frying process (DFP), microwave process (MP), and air frying process (AFP) on the quality and aroma characteristics of pre-fried coated tofu. [Methods] The optimal re-frying conditions are selected using slurry exudation rate, moisture content, color difference, and sensory evaluation as indicators. Subsequently, the re-frying method most suitable for consumers is comprehensively determined based on texture properties, oil content, malondialdehyde content, electronic nose analysis, and volatile compound composition. [Results] Under the three re-frying methods, the coated tofu exhibits an increase-then-decrease trend in slurry exudation rate and sensory evaluation, accompanied by a continuous decline in moisture content and a gradual shift to yellow color. The optimal conditions for each re-frying process are: 170 °C for 30 s in oil (the DFP group), 350 W for 60 s (the MP group), and 170 °C for 180 s (the AFP group). Under these optimal conditions, coated tofu in the AFP group exhibits a crispy and golden crust along with a tender

基金项目:邵阳市科技计划项目(编号:2024GZ1001,2025PT6144);湖南省自然科学基金资助项目(编号:2025JJ70243);洞庭实验室专项经费项目(编号:2024-DTKF-009);邵阳学院研究生科研创新项目资助(编号:CX2025SY018)

通信作者:陈浩(1989—),男,邵阳学院副教授,博士。E-mail:spgc13@163.com

赵良忠(1962—),男,邵阳学院教授,学士。E-mail:sys169@163.com

收稿日期:2026-04-26 **改回日期:**2026-07-23

引用格式:聂静文,陈浩,赵聃,等.复炸工艺对预油炸包浆豆腐品质及挥发性风味物质的影响[J].食品与机械,2026,42(8):175-188.

Citation:Nie Jingwen, Chen Hao, Zhao Dan, et al. Effects of re-frying processes on the quality and volatile flavor compounds of pre-fried coated tofu[J]. Food & Machinery, 2026, 42(8): 175-188.

and smooth slurry texture. It exhibits hardness and springiness values of 2.47 N and 0.96 mm, respectively, indicating superior overall texture quality compared to the other re-frying processes. Meanwhile, it shows a relatively low fat content of 31.34 g/100 g. Flavor analysis indicates that the AFP group effectively restores the flavor profile of oil re-frying. Furthermore, among the 45 identified volatile compounds, air-fried samples demonstrate high concentrations of alcohols and esters, imparting characteristic oiliness and fruity aromas. **[Conclusion]** Air frying offers significant advantages in reducing oil content and improving edible quality.

Keywords: coated tofu; re-frying process; quality; volatile compounds

包浆豆腐,又叫爆浆豆腐,是云南传统美食的典型代表,其外层金黄酥脆,内部呈浆液状、质地细腻柔软,风味独特。近年来,该产品受到消费者广泛青睐,市场呈现爆发式增长态势,2025年消费量已超10亿元,成为畅销全国的明星产品^[1]。当前,市售包浆豆腐多以白胚形态经液氮速冻处理后冷链运输与贮藏,家庭及餐饮终端通常采用传统油炸以及微波炉、空气炸锅等方式进行熟制。然而,上述烹饪方式均存在炸制时间较长(通常为10~15 min)的问题,难以适应快节奏生活对便捷性的需求。更为关键的是,包浆豆腐内部浆液的稳定性较差,经常出现“时有时无、时多时少”的现象,严重影响了消费者的食用体验。Xie等^[2]研究表明,包浆豆腐内部浆液的形成与热加工条件(温度、时间)密切相关,这对消费端的炸制工艺提出了较高要求。

为缩短消费终端加工时间并改善产品品质,预油炸—复炸技术作为一种两步热处理方法,已在多种油炸食品中得到应用^[3]。目前,工业化预油炸逐渐成为包浆豆腐新的销售方式。预油炸可使包浆豆腐初步定型,从而减少消费者在家中二次加工所需时间,同时更好地还原产品口感。武燕霓等^[3]发现,预油炸处理能够有效维持并提升鱼头煲等产品的品质。消费终端在复炸技术方面,除传统油炸外,微波炸和空气炸等新型油炸方式亦逐渐普及。传统油炸是以热油为传热介质的脱水过程,能够形成金黄色的酥脆外壳,并赋予食品良好的包浆口感。在复炸过程中,热油将热量传至食品表面并深入内部,促使水分迅速汽化,形成多孔结构。冷却过程中,油脂在负压作用下被吸附并填充于孔隙中,导致食品的含油量升高^[4]。然而,脂肪摄入与肥胖、高血压等健康问题密切相关,长期食用高脂油炸食品存在潜在健康风险。微波加热是消费终端常用的加热技术,其原理是利用微波穿透食物,从内部加热,使内部水分子剧烈振动并快速汽化,产生大量水蒸气。这一过程在食物内部形成较强的正压,阻碍油脂向孔隙中渗入,从而有效降低最终产品的含油量^[5]。空气炸锅是近年来新兴的加工设备,其通过电加热元件和强力风扇共同作用,产生高温循环热空气,这种强制对流不仅能高效地将热量传递到食物表面,还能减少食物整体油脂含量。最终,食物表面发生脱水,并触发美拉德反应,形成金黄酥脆的外壳,与传统油炸效果十分

接近^[6]。然而,微波与空气炸锅复炸包浆豆腐的工艺参数优化,以及最优条件下两种处理方式对产品品质和挥发性化合物的影响,尚缺乏系统性的研究报道,需要进一步的研究来确定它是否能够形成类似于传统油炸方法所产生的金黄色酥脆外皮和良好的口感。

研究拟以预油炸包浆豆腐为研究对象,探究油炸锅复炸、微波炉复炸和空气炸锅复炸对预油炸包浆豆腐品质和挥发性化合物的影响,旨在为预制包浆豆腐产业化开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

非转基因大豆:市售;
大豆油:金健米业股份有限公司;
豆清发酵液:湖南君益福食品有限公司;
碳酸氢钠:河南六月初八食品有限公司;
食用盐:湖南雪天盐业技术开发有限公司;
乙醇、三氯乙酸、乙二胺四乙酸二钠、硫代巴比妥酸:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;
石油醚:分析纯,成都金山化学试剂有限公司;
1,1,3,3-四乙氧基丙烷标准品:分析纯,北京索莱宝科技有限公司。

1.2 仪器与设备

熟浆集成机:SJJ-20型,康得利智能科技(浙江)有限公司;
电热鼓风干燥箱:101-2AB型,北京中兴伟业世纪有限公司;
微生物均质机:Scientz-04型,宁波新芝生物科技股份有限公司;
恒温培养箱:B0I-250型,上海三腾仪器有限公司;
质构仪:TA1H型,英国LLOYD公司;
色差仪:CR-400型,日本Konica Minolta公司;
电热鼓风干燥箱:GZX-9140MBE型,上海博迅实业有限公司医疗设备厂;
紫外分光光度计:T-8型,南京菲勒仪器有限公司;
微波炉:P70F20L-DG(S0)型,广东格兰仕集团有限公司;
电加热恒温油炸锅:WJ-804型,东莞市裕源厨具设备有限公司;

空气炸锅:KL55-VF735型,九阳股份有限公司;
风味分析仪:FlavourSpec®25型,德国G.A.S公司;
电子鼻:I-nose型,上海昂申智能感官科技有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 包浆豆腐的预油炸 参照罗鹏鑫等^[1]的方法制作酸浆豆腐,切成豆腐块(3.5 cm×3.5 cm×2.5 cm)后放入4℃冰箱中冷藏排酸8 h,按豆腐块与混合液质量比1:2浸泡于2 g/100 mL碳酸氢钠与0.7 g/100 mL食用盐的混合液中12 h,迅速沥干水分,即得到包浆豆腐白胚。所得白胚于200℃下预油炸3 min,沥干至无明显油滴,冷却至室温。将预油炸包浆豆腐放入气调保鲜盒中,按体积分数充入30% N₂和70% CO₂后封膜,于4℃冰箱中冷藏30 d,备用。

1.3.2 包浆豆腐的复炸 将预炸样品随机分为3组,油炸锅复炸(deep-frying processing, DFP)组:分别放入预热至160, 170, 180℃大豆油中,维持温度炸制10, 20, 30, 40, 50 s;微波炉复炸(microwave processing, MP)组:放入预热的微波炉中,分别在250, 350, 500 W下加热30, 60, 90, 120, 150 s;空气炸锅复炸(air fryer processing, AFP)组:放入预热的空气炸锅中,分别在空气炸锅中160, 170, 180℃下炸制60, 120, 180, 240, 300 s;炸制好的样品冷却至室温,备用。

1.3.3 出浆率测定 参照罗鹏鑫等^[1]的方法,取经复炸的包浆豆腐称重后,沿4个角剪开取出内部浆液并称重,根据式(1)计算出浆率。

$$c = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\%, \tag{1}$$

式中:
c——出浆率,%;
*m*₁——包浆豆腐总质量,g;
*m*₂——包浆豆腐内部浆液质量,g。

1.3.4 水分含量测定 按GB 5009.3—2016中的直接干燥法执行。

1.3.5 色泽测定 使用色差计测定包浆豆腐的色差值,正反面各取5个点分别测定豆腐的亮度值*L*^{*}(0~100)、红度值*a*^{*}(正为红;负为绿)、黄度值*b*^{*}(正为黄,负为蓝),测定前用白色标准板校准。

1.3.6 感官评价 参照贺超等^[7]的方法,稍作修改。评鉴员采用100分制,对样品色泽、气味、滋味、组织状态、整体感受进行评分,按照表1中标准进行感官评价。

1.3.7 质构测定 将包浆豆腐切成1.0 cm×1.0 cm×1.0 cm,分别在上、中、下3个区域测定质构参数。仪器选择TPA模式,P35圆柱型平底探头,设置测前、中、后速度分别为40, 30, 40 mm/s,下压距离40%,中间停留时间5 s,触发力0.05 N。

1.3.8 含油量测定 按GB 5009.6—2025中的索氏提取法执行。

1.3.9 丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量测定 按照GB 5009.181—2016的第二法(分光光度法)执行。

1.3.10 电子鼻测定 参照朱丽君等^[8]的方法,将包浆豆腐切碎并称取2.0 g置于40 mL顶空瓶中,60℃水浴加热

表1 包浆豆腐感官评分标准
Table 1 Sensory evaluation criteria for coated tofu

评价项目	评价标准	评分
色泽(20分)	金黄色,色泽均匀一致,表面富有光泽,无焦糊	16~20
	金黄色或淡黄色,色泽基本均一,光泽一般,无焦糊	10~15
	颜色暗淡、发白或发黑,色泽不均,有焦糊或异常光泽	0~9
气味(20分)	包浆豆腐特有的豆香味和焦香味浓郁,无异味、无酸涩味	16~20
	豆香味和焦香味较淡,略有油脂香,无异味	10~15
	基本无豆香味,有焦糊味、酸败味或其他不良气味	0~9
口感(25分)	外酥里嫩,内部浆液细腻嫩滑,入口润滑,无油腻感	17~25
	外壳较酥脆,内部略有浆液感,稍有油腻感	9~16
	外壳干硬或绵软,内部无浆液,口感粗糙,油腻感重或有焦苦味	0~8
组织状态(20分)	块形完整,外壳酥脆,内部浆液丰富饱满,无外来杂质	16~20
	块形较完整,外壳较酥脆,内部有少量浆液,杂质不明显	10~15
	块形不完整或膨大变形,外壳干硬或软塌,内部无浆液或呈空壳状,有明显杂质	0~9
整体感受(15分)	很好,可以接受	11~15
	一般,勉强可以接受	6~10
	很差,难以接受	0~5

5 min 后待测。参数设置:检测时间 60 s,清洗时间 120 s, 气体流量 0.3 L/min。电子鼻传感器阵列及其性能见表 2。

表 2 I-Nose 型电子鼻传感器阵列及其性能
Table 2 I-Nose-type electronic nose sensor array and its performance

传感器名称	特征化合物
S1	芳香族化合物,如酚、酚醚、芳香醇等
S2	氮氧化合物(低分子胺类),如甲胺、二甲胺等
S3	硫类化合物,如硫醇、硫醚、二丙烯基二硫化合物
S4	有机酸和萜类为主,其次是醇、酮、酸等
S5	生物合成、加热、烘烤等香气成分
S6	香菇精等物质
S7	脂肪烃含氧衍生物类
S8	氨类
S9	氢类
S10	碳氢化合物

1.3.11 挥发性化合物测定 参照代佳慧等^[9]的方法,稍作修改:

(1) GC 条件:色谱柱 MXT-5 (15 m×0.53 mm, 1.0 μm);柱温为 60℃;载气为高纯氮气(纯度≥99.999%);载气流量:0~2 min, 2 mL/min;2~25 min, 2~100 mL/min;25~30 min, 100 mL/min。

(2) IMS 条件:漂移管长度 530 mm;IMS 温度 45℃;流速为 150 mL/min。以 C4~C9 正酮类化合物为外标,以保留指数、漂移时间与软件内置 IMS 数据库进行比对定性。

1.3.12 气味活性值(relative odor activity value, ROAV)测定 采用香气活性值表征挥发性化合物的香气贡献。按式(2)计算 ROAV,ROAV≥1 时认定为香气活性成分。

$$R_{OAV}=\frac{C}{T}\times 100,$$
 (2)

式中:
 R_{OAV} ——ROAV;
 C ——各挥发性化合物的相对含量,%;
 T ——该化合物在水中的嗅觉阈值,mg/kg。

1.4 数据分析

每个试验指标重复 3 次,结果以平均值±标准差表示。采用 SPSS 26.0 软件进行数据分析,Origin 2025 软件进行绘图,通过 Duncan's 进行显著性分析, $P<0.05$ 表示数据间有显著性差异。

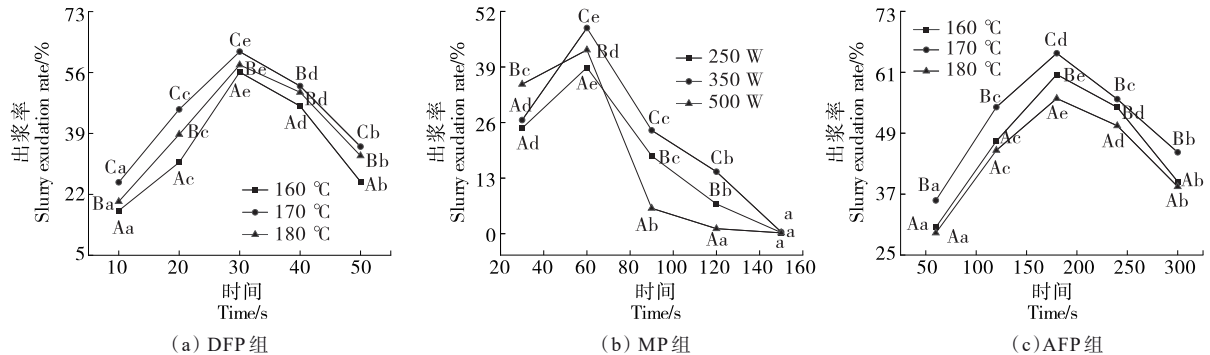
2 结果与分析

2.1 复炸工艺对预油炸包浆豆腐品质的影响

2.1.1 出浆率 如图 1 所示,3 种复炸方式下,随处理温度或微波功率的升高,以及复炸时间的延长,包浆豆腐的出浆率均呈先升后降的趋势,表明“包浆”的形成与维持需要适宜的复炸强度和时间。DFP 组、MP 组和 AFP 组分别在 30,60,180 s 时达到最高出浆率,此时,AFP 组的出浆率与 DFP 组相近,但显著高于 MP 组。

“包浆”的实质是豆腐中的大豆蛋白处于溶胶状态,属于液态胶体体系^[2]。当复炸温度或时间不足时,蛋白质变性不完全,溶解度提升有限, β -折叠结构未明显减少,二硫键与疏水相互作用未能重排,原有凝胶网络得以保持,从而无法形成溶胶状浆液,此时出浆率较低^[1-2]。若复炸温度或时间达到临界值,大豆蛋白由凝胶状态转化为溶胶状态,即由固态胶体转变成液态胶体,宏观上呈现嫩滑的浆液。然而,复炸温度过高或时间过长,大豆蛋白过度聚集,二硫键发生断裂并引发新的疏水交联,微观结构趋于均匀致密,孔隙减少,进而阻碍溶胶释放,导致内部溶胶含量下降,出浆率降低^[2]。

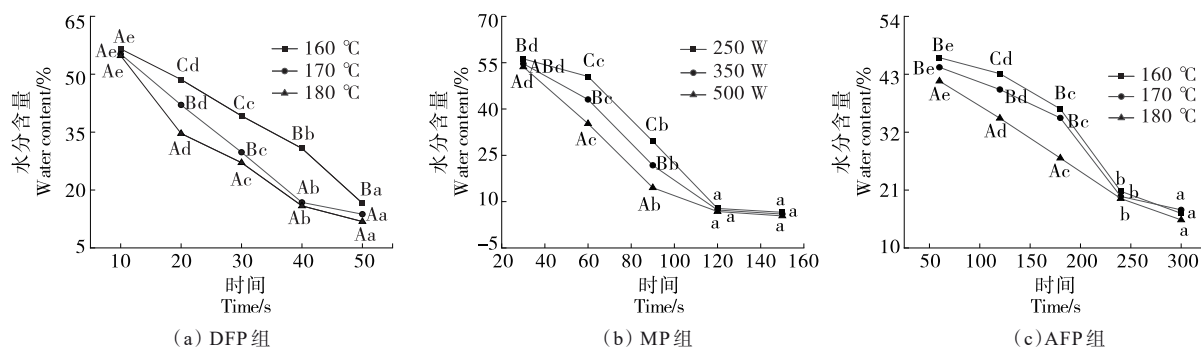
2.1.2 水分含量 如图 2 所示,3 种复炸方式下,随处理温



小写字母不同表示相同处理温度或功率下不同处理时间的样品之间差异显著($P<0.05$);大写字母不同表示相同处理时间下不同处理温度或功率的样品之间差异显著($P<0.05$)

图 1 复炸方式对包浆豆腐出浆率的影响

Figure 1 Effects of different re-frying methods on slurry exudation rate of coated tofu



小写字母不同表示相同处理温度或功率下不同处理时间的样品之间差异显著($P<0.05$);大写字母不同表示相同处理时间下不同处理温度或功率的样品之间差异显著($P<0.05$)

图2 复炸方式对包浆豆腐水分的影响

Figure 2 Effects of different re-frying methods on moisture content in coated tofu

度或微波功率的升高,以及复炸时间的延长,包浆豆腐的水分含量均呈下降趋势,与吕款款等^[10]的研究结果基本一致。就水分降低速率而言,DFP组要显著高于MP组和AFP组。各组包浆豆腐水分含量降低的原因可能是,预炸处理通过低温短时间油炸使产品外部形成脆皮以达到定型目的,该阶段产品外部失水较多,而内部大部分水分仍保留在大豆凝胶网络之中;在3种复炸方式下,随处理温度或微波功率的升高,以及复炸时间的延长,产品温度升高,大豆蛋白热变性程度加剧,空间结构增大,从而使内部水分更易汽化逃逸。进一步分析DFP组水分降低速率高于AFP组的原因,可从热传导和热对流两方面解释:① DFP以油脂为传热介质,AFP以空气为传热介质,油脂的热传导速率远高于空气,因此油复炸时热量能更快地从外部传递至产品内部,导致内部水分迅速汽化并迁移至表面蒸发;② DFP组中,热油可借助豆腐微孔结构渗入内部,使产品快速受热熟化,进一步加速水分的散失^[11-12]。此外,MP组的水分损失呈现出明显的阶段性变

化:前60 s内水分损失程度较小,而60~120 s水分损失急剧增大。Shah等^[4]研究发现,无论是家用微波炉(2.45 GHz)还是工业微波油炸锅(5.8 GHz),微波油炸约50 s时物料中心温度达到100 °C,此时水分蒸发速率达到最大,这为上述阶段性变化提供了合理解释。结合图1分析,DFP组和AFP组在出浆率最大时所对应的包浆豆腐水分含量相近,均处于29%~35%范围内,这在一定程度上说明出浆率与水分含量具有较大关联。

2.1.3 色泽 随着复炸时间的延长,DFP组和AFP组的亮度值 L^* 呈下降趋势, a^* 值、 b^* 值及 ΔE 均呈上升趋势(见图3),同时两组包浆豆腐的表面颜色逐渐转变为金黄色(见图4)。Teruel等^[13]也发现,随着油炸时间延长,薯条的 L^* 值变低, a^* 值和 b^* 值升高。从变化速率来看,与DFP组相比,AFP组在复炸后期色泽变化趋于平缓。结合图2可知,各油炸组在复炸后期水分含量为5%~20%,恰处于美拉德反应的最适水分区间,会加速还原糖与氨基酸的羰氨反应,生成类黑精等大分子色素,使包浆豆腐表面褐变

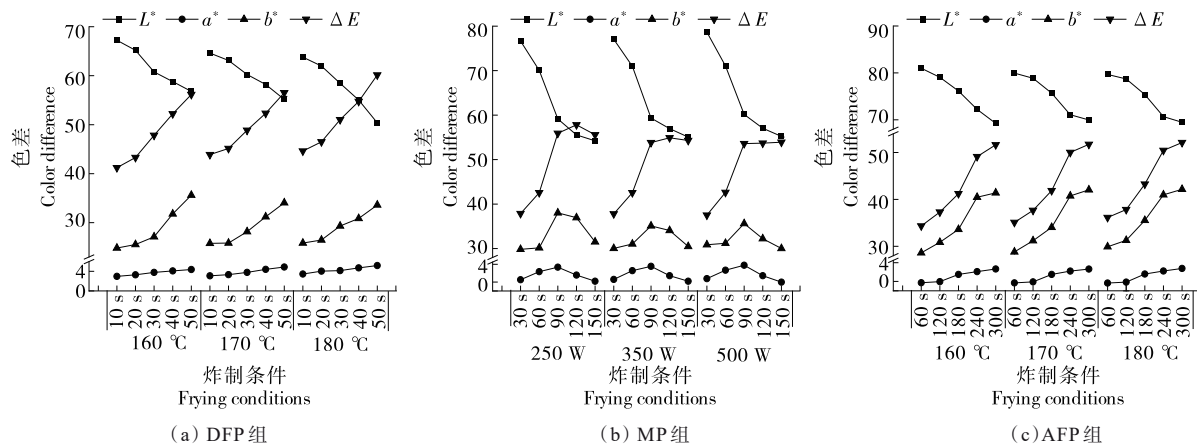


图3 复炸方式对包浆豆腐色泽的影响

Figure 3 Effects of different re-frying methods on the color of coated tofu

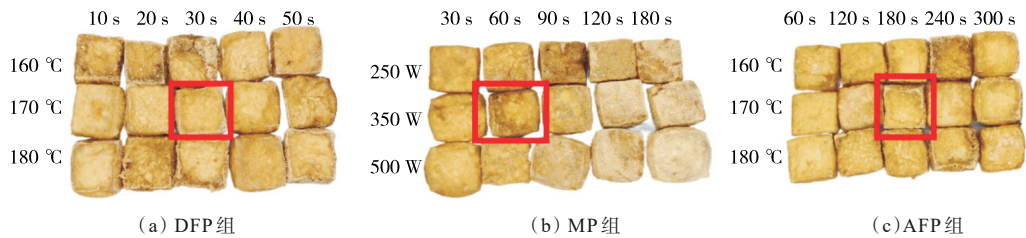


图 4 不同复炸工艺下包浆豆腐的外观

Figure 4 Appearance of coated tofu under different re-frying processes

程度加深^[6]。复炸后期 AFP 组色泽变化趋于平缓的原因:DFP 的热流密度约为 AFP 的 3.7 倍。在复炸后期,DFP 组能够以更高的热流密度持续向食品传递能量,因此包浆豆腐温度在水沸点之后仍呈现渐进式显著升高。由于美拉德反应速率高度依赖于温度,DFP 组更高的温度环境促进了还原糖与氨基酸之间的反应,导致色泽持续加深^[14]。MP 组的 a^* 值和 b^* 值先上升后下降,且 ΔE 在 90 s 后趋于平缓。结合图 4(b) 可知,微波复炸包浆豆腐先变金黄色,最后稳定趋于白色,该现象有待深入研究。

2.1.4 感官评价 如图 5 所示,3 种复炸方式下,随着油炸时间的延长,样品感官评分均呈先升高后降低的趋势。这是因为在较高温度下,食品中的蛋白质、糖类和脂肪发生一系列反应,生成香味物质并改善色泽;适当延长油炸时间可提高包浆豆腐表面的酥脆程度及油炸香气,但时间过长则会使表面过于干硬、色泽变黑,从而降低感官评分^[6]。其中,DFP 组的包浆豆腐相较于其他两组含油量更高,用手挤压其外皮、有油滴流出,口感偏油腻。其原因可能是:预炸后的包浆豆腐表面形成了呈蜂窝状的干硬膜,复炸过程中干硬膜加厚、毛细微孔增多,有利于油脂渗入^[15]。MP 组在 90 s 后,包浆豆腐内部呈现空壳状态,

外壳较脆硬,体积膨大,感官评分大幅下降。结合前文水分含量结果分析,较长时间的微波复炸,微波的体积加热作用持续驱动内部水分快速汽化并逃逸,导致内部彻底脱水,形成干燥脆弱的空壳;同时外壳也在过度加热中失去韧性,变得干硬^[16]。综上,油炸锅、微波炉和空气炸锅分别在 170 °C 30 s、350 W 60 s 和 170 °C 180 s 的复炸条件下获得最高感官评分。

2.1.5 相关性分析 由图 6 可知,各指标间多呈显著相关。感官评分与出浆率呈极显著正相关($P<0.0001$),与 L^* 值及水分含量均呈正相关,与 ΔE 呈负相关,表明出浆率、色泽及水分含量能够有效反映包浆豆腐的感官品质。

2.1.6 最佳复炸条件 出浆率高、硬度和弹性适中的包浆豆腐,外酥里嫩特征明显、色泽金黄诱人,是筛选最佳复炸条件的核心依据。各复热方式的较优工艺范围汇总如下:DFP 组为 170 °C、20~40 s,该范围内出浆率较高、水分含量适中、色泽金黄;MP 组为 350 W、30~90 s,出浆率约 30%~35%、水分含量约 32%~39%,但以 60 s 时色泽和感官品质最佳;AFP 组为 170 °C、120~240 s,出浆率约 35%~40%、水分含量约 22%~35%、色泽金黄。

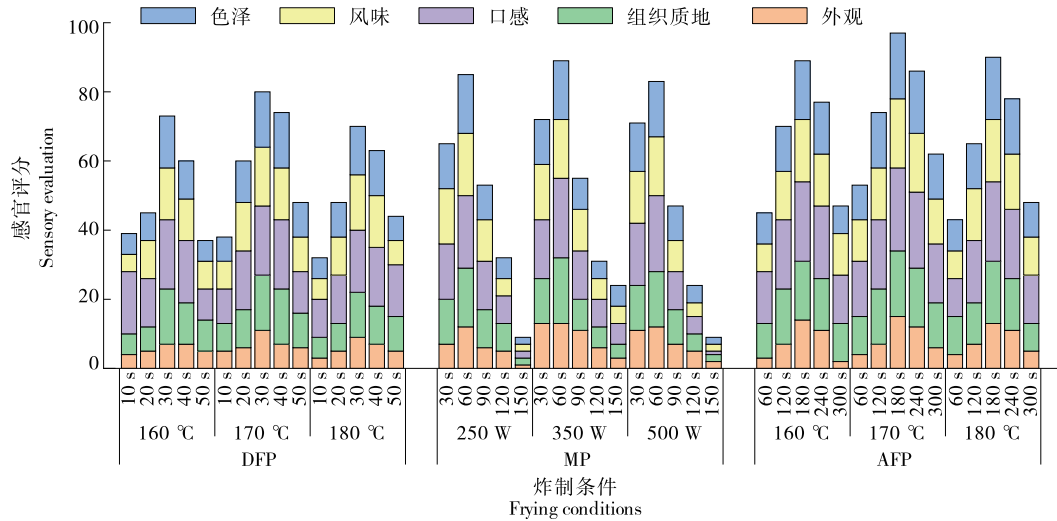


图 5 复炸方式对包浆豆腐感官评分的影响

Figure 5 Effects of different re-frying methods on sensory scores of coated tofu

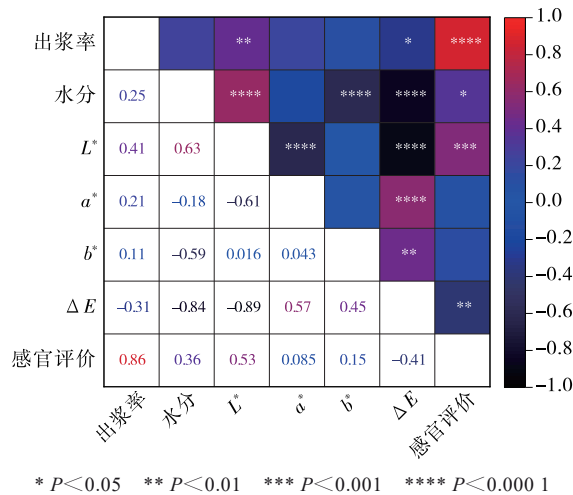
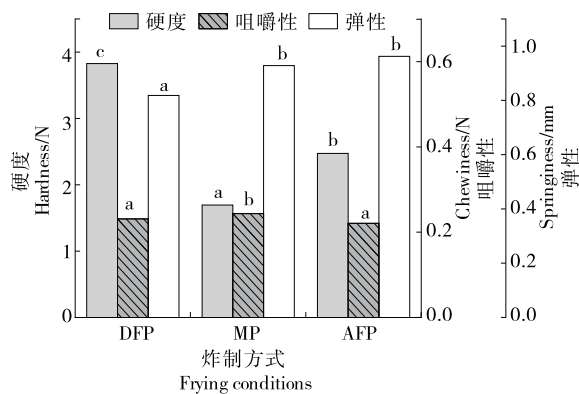


图6 不同复炸方式下包浆豆腐品质各指标的相关性分析
Figure 6 Correlation analysis of various quality indicators of coated tofu under different re-frying methods

结合感官评价结果,分别从油炸锅、空气炸锅、微波炉3种复炸方式的包浆豆腐中选择一组感官得分最高的包浆豆腐作为最佳条件,DFP组、MP组和AFP组的复炸条件分别是170℃ 30 s、350W 60 s、170℃ 180 s。

2.2 复炸方式对预油炸包浆豆腐质构的影响

由图7可知,DFP组的包浆豆腐硬度最大,咀嚼性最高,弹性最差,表明包浆豆腐外壳变厚失去弹性,内部浆液硬化,品质大幅下降。而AFP组和MP组包浆豆腐的硬度、弹性和咀嚼性均显著改善($P < 0.05$)。这可能是由于油脂作为油炸过程的传热介质,具有较高的热传导速率,能使热量迅速传递至食品内部,引起内部水分急剧汽化,产生内压差,驱动水分快速向外迁移并蒸发。随着水分的快速散失,食品原本疏松的孔隙结构逐渐塌陷或收缩,形成更为致密的质地^[17]。因此,经微波炉和空气炸锅复



小写字母不同表示不同复炸方式之间差异显著($P < 0.05$)

图7 复炸方式对包浆豆腐质构的影响

Figure 7 Effects of different re-frying methods on the texture of coated tofu

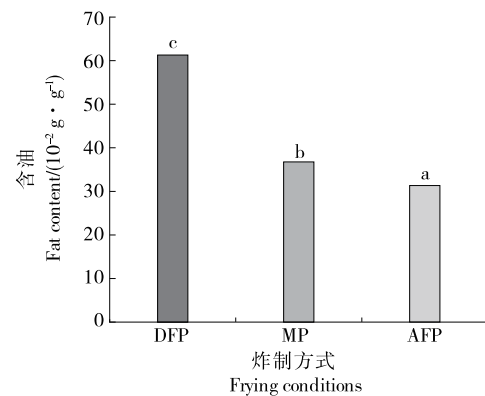
炸的包浆豆腐在硬度、弹性和咀嚼性方面均有所提升。此外,与MP组相比,AFP组的包浆豆腐硬度和弹性明显增加,而咀嚼性则呈下降趋势。这可能是由于空气炸锅采用高速循环的热风进行加热,使包浆豆腐表面受热均匀、内部水分均匀流失,外壳硬度适中,弹性保留较好^[16]。詹珺等^[18]研究发现,空气炸锅复炸预制小酥肉后,其弹性、咀嚼性和硬度均为最佳。综上,空气炸锅复炸处理能够赋予包浆豆腐良好的咀嚼性、硬度与弹性,从而带来更优的口腔感官体验。

2.3 复炸方式对预油炸包浆豆腐含油量的影响

如图8所示,DFP组、MP组、AFP组含油量分别为61.28, 36.75, 31.34 g/100 g。与其他两组相比,DFP组含油量显著提高了59.97%和51.14%($P < 0.05$)。Teruel等^[13]在研究传统油炸与空气炸对薯条品质的影响时也发现,传统油炸薯条的含油量显著高于空气炸锅制作的薯条。其原因是在高温环境下,包浆豆腐内部的孔隙以及表面的干硬膜水分快速蒸发,致使包浆豆腐表面的干硬膜进一步增厚。在此过程中,油脂得以渗入呈现蜂窝状的干硬膜中,并且内部孔隙在负压作用下大量吸收油脂^[19]。因此,采用新型复炸方式可以有效减少包浆豆腐含油量。此外,与MP组相比,AFP组的含油量明显较低。试验过程中发现,AFP组包浆豆腐复炸后,硅油纸有油液残留。这可能是空气炸锅以热空气为介质,高速循环的热空气难以渗入豆腐内部,主要依靠无物质交换的热传导进行加热,因此油脂不易被带入包浆豆腐中,使得含油量最低^[20]。由此可见,空气炸锅和微波炉复炸包浆豆腐都可以有效降低含油量,更符合消费者减油健康饮食的趋势。

2.4 复炸方式对预油炸包浆豆腐MDA含量的影响

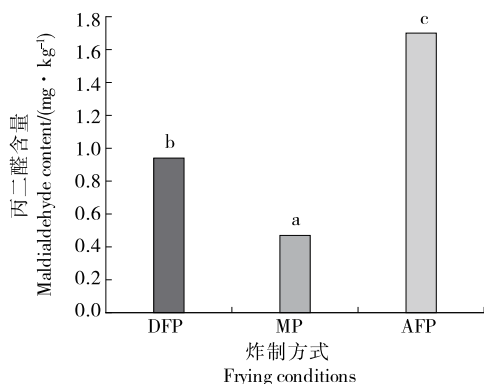
由图9可知,各复炸组中,AFP组丙二醛含量显著高于DFP组和MP组的($P < 0.05$)。Negara等^[21]在研究油



小写字母不同表示不同复炸方式之间差异显著($P < 0.05$)

图8 复炸方式对包浆豆腐的含油量的影响

Figure 8 Effects of different re-frying methods on the fat content of coated tofu



小写字母不同表示不同复炸方式之间差异显著 ($P < 0.05$)

图9 不同最佳复炸方式下包浆豆腐的丙二醛含量

Figure 9 Maltol content in coated tofu under different optimal re-frying methods

炸、空气炸等加工鲭鱼时也发现,空气炸锅脂质氧化最大。其原因可从热传导和复炸时间两方面分析:①空气炸锅的加热介质为高温热空气,食物表面的油脂直接暴露于高温且循环的氧气环境中,提高了产品表面的氧含量,加剧了脂质的氧化^[22];②空气炸锅的传热系数较低,热空气作为流动相传热速率较缓慢,包浆豆腐所需加热时间较长,加剧了脂质氧化^[6]。综上,采用空气炸锅复炸包浆豆腐会显著加剧其脂质氧化程度,空气炸的包浆豆腐在贮藏期间的氧化稳定性及品质变化规律,有待后续结合加速贮藏试验进一步探明。

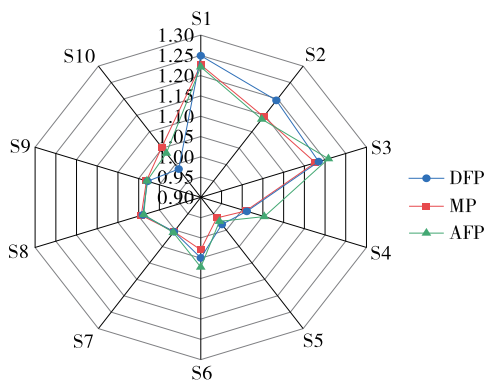
2.5 复炸方式对预油炸包浆豆腐整体香气轮廓的影响

为了评价不同复炸方式对包浆豆腐整体气味特性的影响,采用电子鼻测定不同样品之间的风味。由图10(a)可以看出,S1(芳香族化合物)、S2(氮氧化物)以及S3(硫化物)受体的反应强烈,表明包浆豆腐可能含有高浓度的硫化物和氮氧化物。然而,不同样本之间的信号强度有所差异。AFP组在S4传感器的测定结果上大于

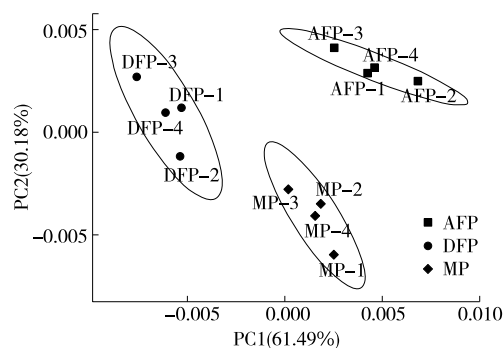
其他两组,表明AFP组的包浆豆腐醛酮类化合物含量较高,因为AFP组的包浆豆腐暴露在高温循环氧气环境中,促进脂质氧化和美拉德反应^[21]。另一方面,DFP组在S2传感器的测定结果上大于其他两组,说明DFP组的包浆豆腐氮氧化物含量较高。如图10(b)所示,PC1贡献率为61.49%、PC2贡献率为30.18%,累计贡献率为91.67%。从PCA图的分布来看,3组样品沿PC1和PC2方向呈现出明显的分离趋势,因此经3种复炸方式处理后的包浆豆腐挥发性分布有显著差异。此外,DFP组和AFP组在PC2上差距相对较小,表明经油炸和空气炸后的包浆豆腐整体香气轮廓比较相似,与图4感官评价结果相印证。值得注意的是,AFP组和MP组在PC2上差距较大,表面微波炸组和空气炸组整体香气轮廓相差较大。综上,空气炸锅可以很好地达到油复炸的风味品质。

2.6 不同复炸方式对预油炸包浆豆腐整体香气轮廓的影响

通过GC-IMS技术,对3种复炸方式的最佳工艺条件下的包浆豆腐的挥发性化合物进行深入研究。结果(图11)表明,不同复炸方式下包浆豆腐反应离子峰强度差异较大,AFP组的强度最大,且3种不同复炸方式中化合物种类也有差异性,这些挥发性化合物的差异主要体现在迁移行为和保留行为上,其中化合物漂移时间在6.00~10.00 ms完成,保留时间在100~800 s完成。图11(c)显示了不同复炸条件包浆豆腐的挥发性差异,以MP组的二维谱图为对照组,DFP组和AFP组样品的挥发性化合物含量高于对照组,则化合物为红色显示,而当样品含量低于对照组时,化合物显示为蓝色。3组复炸方式,挥发性化合物变化集中在保留时间190~300 s,漂移时间6.00~9.55 ms,AFP组化合物含量更多;保留时间350~420 s,漂移时间7.25~9.50 ms,AFP组的化合物含量更高,DFP组大幅减少;保留时间490~679 s,漂移时间7.00~



(a) 风味雷达图



(b) PCA图

图10 不同复炸方式下包浆豆腐的风味雷达图和PCA图

Figure 10 Flavor radar chart and PCA plot of coated tofu under different re-frying methods

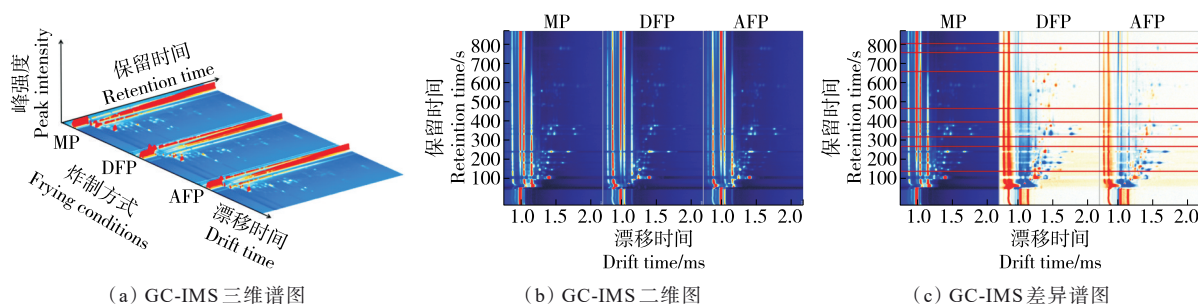


图 11 不同复炸方式下包浆豆腐中挥发性化合物的 GC-IMS 三维谱图、GC-IMS 二维图和 GC-IMS 差异谱图

Figure 11 3D GC-IMS, 2D GC-IMS, and differential GC-IMS spectra of volatile compounds in coated tofu under different re-frying methods

8.50 ms, DFP 组化合物种类更多, 颜色更深; 保留时间 760~800 s, 漂移时间 8.00~9.00 ms, DFP 组颜色更深, 表明不同复炸方式下的包浆豆腐挥发性化合物组成有较大差异。由 GC-IMS 差异谱图可知, AFP 组的包浆豆腐挥发性化合物更多。这一结果表明, 空气炸锅复炸包浆豆腐具有更丰富的挥发性化合物。

2.7 不同复炸方式对预油炸包浆豆腐 GC-IMS 风味成分谱图分析

为进一步区分不同复炸方式对挥发性化合物的差异。结合图 12 和表 3 可知, 3 种复炸方式共鉴别出 45 种挥发性化合物, 大致分为酯类 12 种、酮类 7 种、醇类 5 种、醛类 3 种、杂环化合物 3 种、酚类 3 种、萜烯类 4 种、其他挥发性物质 7 种。醇类物质、醛类物质和酮类物质是影响油炸食品整体风味的主要成分。复炸后形成一些挥发性化合物可能是美拉德反应的结果, 美拉德反应是形成醛、酮、吡嗪、呋喃和其他风味化合物的复杂反应^[23]。

图 12 指纹图谱自上而下复炸方式依次为: MP 组、DFP 组、AFP 组, 3 种不同复炸方式的包浆豆腐挥发性化

合物表现出一些差异性。A 区中, AFP 组挥发性化合物含量高于 MP 组和 DFP 组, 其中 6-甲基庚-3, 5-二烯-2-酮、3-甲基-1-戊醇散发着果香与青草香, 这些都是空气炸锅脂质氧化所产生的风味物质。在 B 区中, 相较于其他两组, DFP 组的挥发性化合物含量更为丰富。其中, *N*-亚硝基二甲胺和 (*Z*)-4-庚烯醛对健康存在危害, 尤其是 *N*-亚硝基二甲胺属于强致癌物, 可能是 DFP 组油脂反应所产生的风味物质所致^[24]。C 区中, AFP 组的挥发性化合物含量显著高于其他两组, 其中 2-甲基丁酸、乙酸戊酯、(*Z*)-2-戊烯醇这些化合物具有令人愉悦的香气, 表明空气炸锅复炸包浆豆腐具有清新植物香和果香, 有效降低油炸食品的油腻感。总体来看, 空气炸锅挥发性化合物具有丰富的令人愉悦的气味。

2.8 不同复炸方式下预油炸包浆豆腐整体香气轮廓影响的差异分析

为了进一步评估不同方式复炸预油炸包浆豆腐整体香气轮廓的影响差异, 对 DFP、MP、AFP 3 组的挥发性化合物进行了聚类分析。从图 13 可以看出, 不同复炸方式

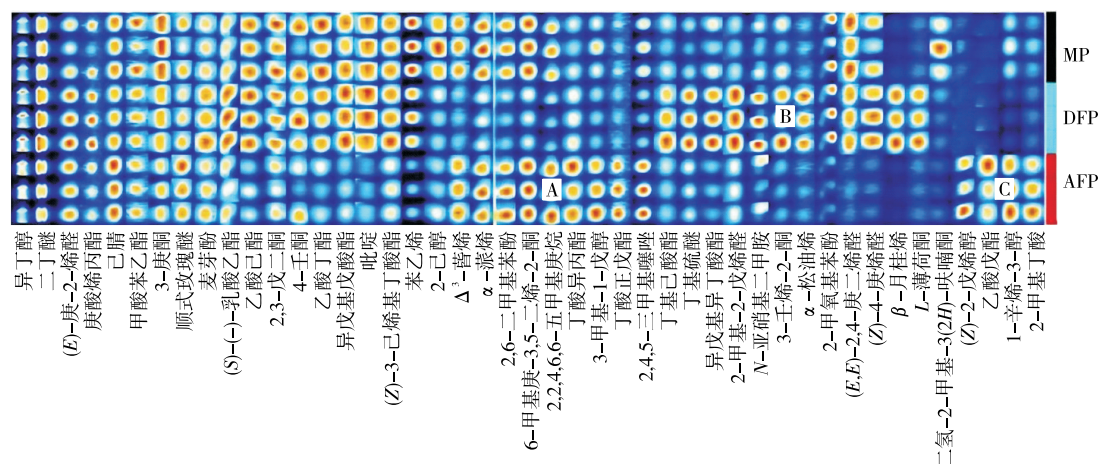


图 12 不同复炸方式下包浆豆腐中挥发性化合物的指纹图谱对比图

Figure 12 Fingerprints of volatile compounds in coated tofu under different re-frying methods (comparative figure)

表 3 不同复炸方式下包浆豆腐的挥发性化合物的定性分析

Table 3 Qualitative analysis of volatile compounds in coated tofu under different re-frying methods

种类	挥发性化合物	CAS	保留 指数	保留时 间/s	迁移时 间/s	相对含量/%		
						MP	DFP	AFP
醇类	(Z)-2-戊烯醇	C1576950	760.5	194.025	1.407 56	0.28±0.03	0.20±0.02	0.68±0.09
	1-辛烯-3-醇	C3391864	984.8	356.249	1.583 39	1.50±0.19	0.46±0.08	2.71±0.29
	3-甲基-1-戊醇	C589355	847.8	241.677	1.283 47	1.84±0.24	1.32±0.10	2.66±0.26
	2-甲基-1-丙醇	C78831	627.7	143.818	1.167 66	21.58±0.74	24.22±0.39	24.20±1.58
	2-己醇	C626937	802.7	215.703	1.272 33	3.00±0.42	1.77±0.17	2.09±0.22
酯类	乙酸戊酯	C628637	908.5	283.769	1.300 87	0.18±0.02	0.16±0.01	0.61±0.07
	丁酸正戊酯	C540181	1 101.8	535.417	1.414 50	0.45±0.05	0.36±0.02	0.62±0.09
	丁酸异丙酯	C638119	847.8	241.698	1.235 48	0.86±0.01	0.98±0.01	1.38±0.12
	异戊基异丁酸酯	C2050013	1 018.5	398.721	1.349 81	2.26±0.21	2.84±0.10	1.76±0.10
	乙酸己酯	C142927	1 018.6	398.821	1.379 96	1.80±0.03	1.75±0.04	1.22±0.16
	庚酸烯丙酯	C142198	1 178.5	702.360	1.400 51	0.57±0.05	0.60±0.01	0.62±0.03
	异戊基戊酸酯	C2050091	1 133.6	599.185	1.444 30	0.85±0.03	0.90±0.03	0.62±0.08
	(Z)-3-己烯基丁酸酯	C16491364	1 208.2	780.062	1.419 96	1.29±0.07	1.25±0.06	1.05±0.06
	丁基己酸酯	C626824	1 208.3	780.472	1.455 52	0.82±0.04	1.08±0.11	0.83±0.06
	(S)-(-)-乳酸乙酯	C687478	809.2	219.279	1.152 64	2.15±0.02	2.95±0.05	2.37±0.06
	乙酸丁酯	C123864	801.1	214.882	1.230 12	1.98±0.04	1.65±0.09	1.32±0.24
	甲酸苯乙酯	C104621	1 177.8	700.436	1.283 26	0.36±0.02	0.34±0.01	0.34±0.01
酮类	L-薄荷酮	C14073973	1 157.8	652.671	1.318 75	0.21±0.01	0.41±0.03	0.20±0.02
	3-壬烯-2-酮	C14309570	1 133.7	599.307	1.406 12	1.34±0.22	1.85±0.15	1.10±0.06
	3-庚酮	C106354	891.7	269.940	1.214 46	2.32±0.08	1.98±0.04	1.94±0.12
	2,3-戊二酮	C600146	697.8	165.785	1.215 12	1.57±0.01	1.27±0.04	1.23±0.02
	6-甲基庚-3,5-二烯-2-酮	C1604280	1 119.8	570.524	1.205 97	1.81±0.04	1.16±0.05	2.05±0.08
	4-壬酮	C4485090	1 035.3	423.104	1.338 84	0.62±0.16	0.64±0.10	0.55±0.14
	(E,E)-2,4-庚二烯醛	C4313035	1 018.6	398.788	1.634 26	0.30±0.02	0.25±0.01	0.13±0.02
醛类	2-甲基-2-戊烯醛	C623369	828.6	230.293	1.175 85	1.27±0.02	2.06±0.03	1.61±0.07
	(E)-庚-2-烯醛	C18829555	960.6	331.468	1.251 18	1.47±0.09	1.82±0.02	1.82±0.07
酚类	2-甲氧基苯酚	C90051	1 085.2	504.832	1.236 41	2.23±0.26	2.24±0.04	1.43±0.04
	2,6-二甲基苯酚	C576261	1 109.6	550.306	1.116 39	1.17±0.05	0.80±0.04	1.38±0.07
萜烯类	α-松油烯	C99865	1 158.2	653.734	1.217 44	0.21±0.00	0.34±0.02	0.23±0.01
	β-月桂烯	C123353	1 142.2	617.731	1.274 48	0.24±0.04	0.98±0.04	0.20±0.02
	α-蒎烯	C80568	1 007.4	383.394	1.215 20	1.76±0.08	1.16±0.04	1.84±0.16
	Δ ³ -葑烯	C13466789	1 131.0	593.737	1.613 50	0.64±0.03	0.40±0.03	0.69±0.01
	苯乙烯	C100425	892.4	270.492	1.507 38	5.81±0.13	4.90±0.24	2.84±0.26
杂环类	麦芽酚	C118718	1 208.9	782.160	1.507 38	0.55±0.02	0.62±0.05	0.61±0.04
	二氢-2-甲基-3(2H)-呋喃酮	C3188009	802.1	215.412	1.447 69	0.94±0.22	0.37±0.06	0.34±0.03
	吡啶	C110861	745.7	186.966	1.248 11	1.52±0.03	1.62±0.05	0.86±0.08
	2,4,5-三甲基噻唑	C13623115	1 006.6	382.314	1.568 03	2.44±0.15	1.61±0.09	3.39±0.23
其他类	N-亚硝基二甲胺	C62759	748.4	188.209	1.220 52	3.88±0.31	5.33±0.14	4.17±0.97
	丁基硫醚	C544401	1 080.7	496.943	1.325 92	0.96±0.13	1.62±0.05	1.17±0.04
	2,2,4,6,6-五甲基庚烷	C13475826	985.7	357.117	1.347 13	4.11±0.42	2.21±0.22	5.38±0.30
	2-甲基丁酸	C116530	847.3	241.405	1.463 05	0.26±0.03	0.17±0.01	0.49±0.05
	己腈	C628739	876.6	259.902	1.244 95	2.19±0.01	1.95±0.02	2.53±0.08
	顺式玫瑰醚	C3033236	1 109.7	550.503	1.379 79	0.86±0.06	0.82±0.06	1.05±0.07
	二丁醚	C142961	891.0	269.497	1.300 40	17.28±0.13	18.24±0.14	15.56±0.22

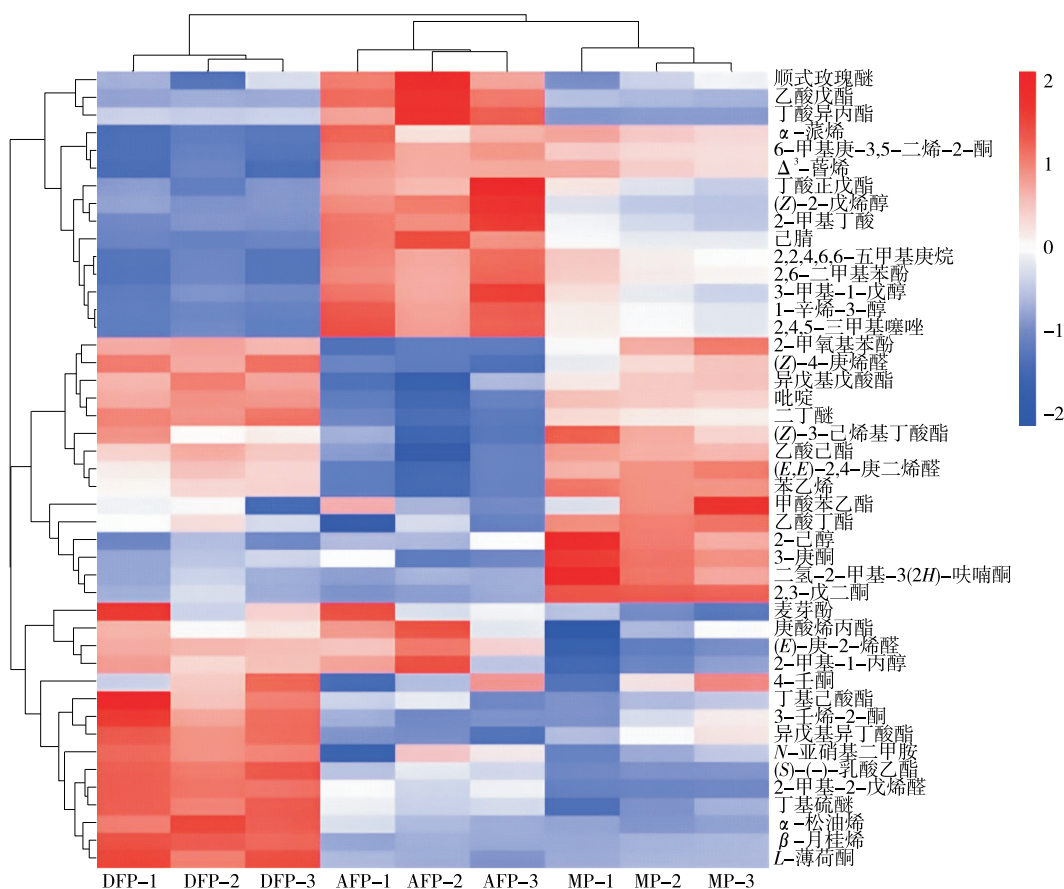


图 13 不同复炸方式下包浆豆腐中挥发性化合物的聚类热图

Figure 13 Cluster heat map of volatile compounds in coated tofu under different re-frying methods

的包浆豆腐可分为两类:其中MP组和AFP组具有较高的相关性,可以聚为一类,但是它们在挥发性化合物含量上具有较大差异,可能是因为空气炸则利用循环中的热空气作为加热源。由于热传递效率低于油,烹饪时间更长。这种长时间暴露促进脂质氧化、美拉德反应和酯化,产生更多芳香活性化合物^[21]。而DFP组单独聚为一类,与其他两组具有显著性差异。值得注意的是,虽然DFP组单独聚为一类,但其主要挥发性化合物的种类与AFP组仍有一定的相似性,表明空气炸锅复炸包浆豆腐延续了传统油炸整体香气轮廓的同时,可显著提升包浆豆腐的香气品质。

2.9 不同复炸方式下包浆豆腐整体香气品质的关键标志化合物

为了进一步观察不同复炸方式包浆豆腐之间的挥发性差异,采用正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)对不同复炸方式包浆豆腐香气活性化合物进行分析。如图14(a)所示,3个样本组之间的分离程度明显。样本点之间的距离通常表示它们在变量空间中的相似度。距离越近,样本越相似,距离越远,样本之间的差异越大。

$RX^2=0.939>0.5$ 、 $Q^2=0.875>0.5$,说明模型具有较好的拟合准确性和预测能力。此外,通过图14(b)可知, $R^2=0.464$, $Q^2=-0.725$, $|Q^2|>0.5$,且 Q^2 的回归线与Y轴的交点均位于负半轴,说明该模型不存在过拟合现象,置换验证是可靠和有效的,可进一步用于探索不同复炸方式包浆豆腐的风味差异。通过变量投影重要度(VIP)分析来衡量OPLS-DA模型中各挥发性化合物中的贡献。VIP>1,代表该挥发性化合物为标志性风味物质。VIP值越大,代表该物质对整体风味的贡献越大。由图14(c)可知,2-甲基-1-丙醇、二丁醚、苯乙烯、2,2,4,6,6-五甲基庚烷、2-己醇、1-辛烯-3-醇、N-亚硝基二甲胺、2,4,5-三甲基噻唑、异戊基异丁酸酯、2-甲氧基苯酚、(S)-(-)-乳酸乙酯、2-甲基-2-戊烯醛、二氢-2-甲基-3(2H)-呋喃酮、3-甲基-1-戊醇、乙酸丁酯、吡啶、β-月桂烯、丁基硫醚、乙酸己酯、3-壬烯-2-酮,共筛选出VIP>1的20种化合物,主要为酯类物质和醇类物质,因此它们可以作为区分不同复炸方式的包浆豆腐整体香气轮廓的关键标志化合物。其中醇类是通过乳糖代谢、酮体还原、氨基酸代谢和脂肪酸降解形成,可赋予肉制品清香气味^[25],酯类主要通过酸类和

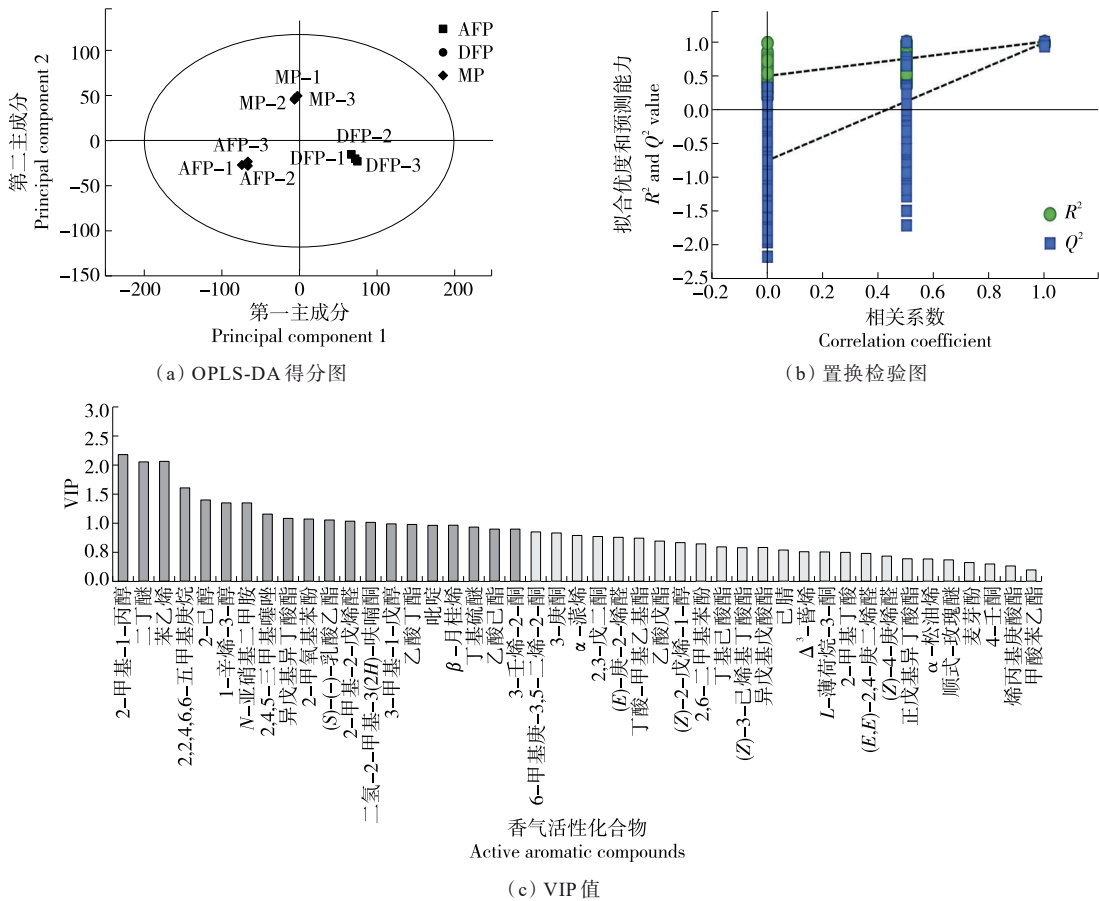


图 14 不同复炸方式下包浆豆腐挥发性化合物的元统计分析

Figure 14 Meta-statistical analysis of volatile compounds in coated tofu under different re-frying methods

醇类的酯化反应生成,赋予包浆豆腐果香味,因此在包浆豆腐中酯类与醇类备受关注。

2.10 不同复炸方式下包浆豆腐整体香气品质的差异特征化合物分析

将不同复炸方式下包浆豆腐的香气成分进行差异分析,共筛选出 29 种化合物,见表 4。包括 3 种醇类、9 种脂类、6 种酮类、3 种醛类、1 种酚类、4 种萜烯类、1 种杂环类和 2 种其他类。为了进一步确定不同复炸方式下包浆豆腐的关键风味物质,采用 ROAV 分析($ROAV > 1$)。其中 *N*-亚硝基二甲胺是风味贡献最高的化合物,DFP 组的 ROAV 值为 213.20 显著高于其他两组。其次对风味贡献较大的是 4-壬酮、苯乙烯和 1-辛烯-3-醇,DFP 组中 4-壬酮的 ROAV 值为 78.05,MP 组中苯乙烯的 ROAV 值为 89.38,1-辛烯-3-醇是油脂香的主要来源,AFP 组的 ROAV 值为 87.42。

3 结论

研究系统比较了油炸锅复炸、微波炉复炸和空气炸锅复炸 3 种复炸方式对预油炸包浆豆腐食用品质及香气

特征的影响,明确了各自的最佳工艺参数及其对产品品质的差异化作用。结果表明,3 种复炸方式下,包浆豆腐的出浆率与感官评分均随处理强度增加呈先升后降趋势,水分含量持续下降,色泽逐渐加深;最优条件下,空气炸锅复炸不仅出浆率与油炸组相近,且外壳酥脆金黄、浆液嫩滑,质构品质优于其他两组。在营养健康方面,空气炸锅复炸的含油量(31.34 g/100 g)显著低于油炸锅复炸(61.28 g/100 g)和微波炉复炸(36.75 g/100 g)的,证实了空气炸锅复炸技术在减油方面的明显优势,但同时也发现其丙二醛含量最高(1.70 mg/kg),表明高温循环热空气环境加剧了脂质氧化程度,这是该工艺需重点关注的品质短板。风味层面,空气炸锅复炸样品中鉴定出的醇类和酯类物质最为丰富,赋予产品油脂香和果香,且电子鼻主成分分析显示其香气轮廓与油炸锅复炸的较为接近,说明空气炸锅复炸能够较好地还原油炸的风味特征,并通过富集愉悦香气成分实现风味提升。该研究不仅拓展了空气炸锅复炸技术在预油炸豆制品复炸中的应用依据,也印证并补充了前期关于不同加热介质对油炸食品质构和风味影响的认识,尤其揭示了空气炸锅复炸

表 4 不同复炸方式下包浆豆腐的挥发性化合物的 ROAV 值

Table 4 ROAVs of volatile compounds in coated tofu under different re-frying methods

种类	挥发性化合物	阈值/(mg·kg ⁻¹)	ROAV		
			DFP	MP	AFP
醇类	1-辛烯-3-醇	0.031	14.84	48.39	87.42
	3-甲基-1-戊醇	1	1.32	1.84	2.66
	2-己醇	1.51	1.17	1.99	1.38
酯类	乙酸戊酯	0.35	0.46	0.51	1.74
	丁酸正戊酯	0.015	24.00	30.00	41.33
	丁酸异丙酯	0.086	11.40	10.00	16.05
	异戊基异丁酸酯	1.6	1.78	1.41	1.10
	乙酸己酯	15	0.12	0.12	0.08
	(Z)-3-己烯基丁酸酯	0.5	2.50	2.58	2.10
	(S)-(-)-乳酸乙酯	50	0.06	0.04	0.05
	乙酸丁酯	58	0.03	0.03	0.02
	甲酸苯乙酯	0.27	1.26	1.33	1.26
	L-薄荷酮	0.35	1.17	0.60	0.57
酮类	3-壬烯-2-酮	0.8	2.31	1.68	1.38
	3-庚酮	0.16	12.38	14.50	12.13
	2,3-戊二酮	0.3	4.23	5.23	4.10
	6-甲基庚-3,5-二烯-2-酮	0.38	3.05	4.76	5.39
	4-壬酮	0.008 2	78.05	75.61	67.07
醛类	(E,E)-2,4-庚二烯醛	0.8	0.31	0.38	0.16
	2-甲基-2-戊烯醛	0.25	8.24	5.08	6.44
	(E)-庚-2-烯醛	0.4	4.55	3.68	4.55
酚类	2,6-二甲基苯酚	0.263	3.04	4.45	5.25
萜烯类	α -松油烯	80	0.00	0.00	0.00
	β -月桂烯	13	0.08	0.02	0.02
	α -蒎烯	6	0.19	0.29	0.31
	苯乙烯	0.065	75.38	89.38	43.69
杂环类	麦芽酚	1.24	0.50	0.44	0.49
其他类	N-亚硝基二甲胺	0.025	213.20	155.20	166.80
	2-甲基丁酸	5.8	0.03	0.04	0.08

在减油与保香方面的潜力及其氧化风险。鉴于包浆豆腐体系的复杂性,后续研究仍需深入探讨水分状态与大豆蛋白凝胶转变之间的关联机制,以及不同复炸方式对产品消化率和营养生物利用度的影响;同时,可针对空气炸锅复炸工艺中脂质氧化的调控策略开展研究,如添加天然抗氧化剂或优化热风循环参数,以期在低脂化基础上进一步提升产品的整体品质与贮藏稳定性。

参考文献

[1] 罗鹏鑫,刁欣蕊,李梦,等.不同凝固剂对包浆豆腐品质影响及其体外模拟消化研究[J].食品与发酵工业,2025,51(15): 226-232.

Luo P X, Diao X R, Li M, et al. Effects of different coagulants on the quality of coated tofu and its *in vitro* simulated digestion [J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(15): 226-232.

[2] Xie X, Li M, Diao X R, et al. The heat-induced gel-sol transition in coated tofu: a study on protein conformation and microstructural changes[J]. Gels, 2025, 11(4): 237.

[3] 武燕霓,张晗玮,党美琪,等.油炸预处理对鱼头煲品质的影响[J].华中农业大学学报,2025,44(1): 255-264.

Wu Y N, Zhang H W, Dang M Q, et al. Effect of frying pretreatment on quality of fish head pot[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2025, 44(1): 255-264.

[4] Shah Y, Zhou X, Tang J M, et al. The effect of conventional and microwave frying on the quality characteristics of french fries

- [J]. Journal of Food Science, 2025, 90(8): e70441.
- [5] 张慢, 邢苏徽, 千春录, 等. 不同加工方式对秀珍菇营养成分和抗氧化性的影响[J]. 食品科技, 2022, 47(12): 67-73.
- Zhang M, Xing S H, Qian C L, et al. Effects of different processing methods on nutritional components and antioxidant activity of *Pleurotus geesteranus*[J]. Food Science and Technology, 2022, 47(12): 67-73.
- [6] 王喜波, 刘竞男, 崔强, 等. 全籽粒大豆制备油豆腐工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 292-299.
- Wang X B, Liu J N, Cui Q, et al. Parameter optimization of preparation technology of fried whole-soybean tofu[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(6): 292-299.
- [7] 贺超, 尹乐斌, 邹文广, 等. 响应面法优化“神仙豆腐”生产工艺[J]. 邵阳学院学报(自然科学版), 2023, 20(3): 77-85.
- He C, Yin L B, Zou W G, et al. Response surface optimization of "fairy tofu" production process[J]. Journal of Shaoyang University (Natural Sciences), 2023, 20(3): 77-85.
- [8] 朱丽君, 陈凤真, 张成爽, 等. 预处理方法对亚麻籽油中挥发性化合物及活性成分的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(6): 29-38.
- Zhu L J, Chen F Z, Zhang C S, et al. Effects of pretreatment methods on volatile compounds and active ingredients in flaxseed oil[J]. Food & Machinery, 2026, 42(6): 29-38.
- [9] 代佳慧, 王亚楠, 康效宁, 等. 酱香型白酒陈酿过程中挥发性风味组分动态演变规律[J]. 食品与机械, 2026, 42(7): 1-10.
- Dai J H, Wang Y N, Kang X N, et al. Dynamic evolution law of volatile flavor components during the aging process of sauce-flavored Baijiu[J]. Food & Machinery, 2026, 42(7): 1-10.
- [10] 吕款款, 林慧敏, 邓尚贵, 等. 预炸—复炸工艺对大黄鱼排品质和风味的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(5): 213-226.
- Lu K K, Lin H M, Deng S G, et al. Effect of pre-fried and re-fried crafts on the quality and flavor of *Pseudosciaena crocea* steak[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(5): 213-226.
- [11] Fang W 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-Food Science & Technology, 2021, 137: 110494.
- [12] Fang M C, Chin P S Y, Sung W C, et al. Physicochemical and volatile flavor properties of fish skin under conventional frying, air frying and vacuum frying[J]. Molecules, 2023, 28(11): 4376.
- [13] Teruel M D R, Gordon M, Linares M B, et al. A comparative study of the characteristics of french fries produced by deep fat frying and air frying[J]. Journal of Food Science, 2015, 80(2): E349-E358.
- [14] Baik O D, Mittal G S. Kinetics of tofu color changes during deep-fat frying[J]. LWT-Food Science and Technology, 2003, 36(1): 43-48.
- [15] 江连洲, 朱颖, 陈惠惠, 等. 真空低温油炸工艺对豆腐泡品质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(18): 242-248.
- Jiang L Z, Zhu Y, Chen H H, et al. Influence of low-temperature vacuum frying on the quality of tofu puffs[J]. Food Science, 2018, 39(18): 242-248.
- [16] Mizrahi S. Mechanisms of objectionable textural changes by microwave reheating of foods: a review[J]. Journal of Food Science, 2012, 77(1/2/3): R57-R62.
- [17] Sivaranjani S, Jayasree J T, Mukta S S, et al. A comprehensive review of the mechanism, changes, and effect of deep fat frying on the characteristics of restructured foods[J]. Food Chemistry, 2024, 450: 139393.
- [18] 詹珺, 曹蒙, 陈森, 等. 不同复热方式对预制小酥肉食用品质及风味变化的影响[J]. 肉类研究, 2025, 39(11): 16-24.
- Zhan J, Cao M, Chen S, et al. Effects of different reheating methods on the eating quality and flavor changes of prepared deep-fried battered meat strips[J]. Meat Research, 2025, 39(11): 16-24.
- [19] 普晓燕, 马兴胜, 于传龙, 等. 虾夷扇贝真空油炸过程中的传质规律及品质特性研究[J]. 中国食品学报, 2025, 25(5): 379-395.
- Pu X Y, Ma X S, Yu C L, et al. Mass transfer law and quality characteristics of *Patinopecten yessoensis* during vacuum frying[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25(5): 379-395.
- [20] Fadzil N S M, Nasir N S M, Anuar M R, et al. An innovative air fryer with variable fan speed study towards the change of moisture and lipid content in chicken flesh[J]. AIP Conference Proceedings, 2024, 3130: 020015.
- [21] Negara B F S P, Lee M J, Tirtawijaya G, et al. Application of deep, vacuum, and air frying methods to fry chub mackerel (*Scomber japonicus*) [J]. Processes, 2021, 9(7): 1225.
- [22] Oliveira D S V, Viana B S D, Keller M L, et al. Impact of air frying on food lipids: oxidative evidence, current research, and insights into domestic mitigation by natural antioxidants[J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 147: 104465.
- [23] Chang L L, Lin S Y, Zou B W, et al. Effect of frying conditions on self-heating fried spanish mackerel quality attributes and flavor characteristics[J]. Foods, 2021, 10(1): 98.
- [24] 刘月如, 路索, 尹涛, 等. 油炸风味鱼饼的空气炸制工艺优化[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(6): 247-254.
- Liu Y R, Lu S, Yin T, et al. Optimization of air-frying process for fried flavored fish cake[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(6): 247-254.
- [25] Wu H, He Z F, Yang L, et al. Generation of key aroma compounds in fat and lean portions of non-smoked bacon induced via lipid pyrolysis reaction[J]. Food Chemistry, 2024, 437: 137684.