DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250828002
引用格式: 糜玲霞, 牟怡瑾, 张淼. 空气炸锅复热对预调理小酥肉食用品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(3): 146–154.
MI LX, MOU YJ, ZHANG M. Impact of air fryer reheating on sensory and physicochemical quality of pre-processed crispy porks [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(3): 146–154. (in Chinese with English abstract).

空气炸锅复热对预调理小酥肉食用品质的影响

糜玲霞, 牟怡瑾, 张　淼*

(四川旅游学院烹饪与食品科学工程学院, 成都　610100)

摘　要: 目的　研究不同空气炸锅复热时间和复热温度对预调理小酥肉食用品质的影响。**方法**　本研究分别分析了空气炸锅复热温度 160、180、200 ℃及复热时间 8、10、12 min 对调理小酥肉含油率、水分含量、色差、感官、质构及风味物质的影响。**结果**　在空气炸锅复热温度为 180 ℃、复热时间为 10 min 条件下时, 小酥肉的水分含量约为 40.18%, 含油率约为 19.34%, L^*约为 61.49, a^*约为 11.49, b^*约为 23.16, 感官总分为 83.44 分, 硬度处于适中水平, 约为 12.78 N, 且该试验组小酥肉共含有 33 种挥发性物质, 其中杂环类化合物甲基吡嗪以及醛类化合物 2-甲基丁醛和己醛对小酥肉风味贡献较大, 能赋予小酥肉坚果香、烘焙香、果香和油脂香等香气。**结论**　在该复热条件下小酥肉口感酥脆, 风味独特, 具有较好的食用品质。

关键词: 空气炸锅; 预调理小酥肉; 食用品质; 复热

Impact of air fryer reheating on sensory and physicochemical quality of pre-processed crispy porks

MI Ling-Xia, MOU Yi-Jin, ZHANG Miao*

(*College of Culinary and Food Science Engineering*, *Sichuan Tourism University*, *Chengdu* 610100, *China*)

ABSTRACT: Objective　To investigate the effects of different reheating times and temperatures of air fryer on the edible quality of pre-processed crispy pork. **Methods**　This experiment analyzed the effects of air fryer reheating temperatures (160, 180, 200 ℃) and reheating times (8, 10, 12 min) on the oil content, moisture content, color difference, sensory properties, texture and flavor substances of conditioned crispy pork. **Results**　When the air fryer reheating temperature was 180 ℃ and the reheating time was 10 min, the moisture content of crispy pork was about 40.18%, and the oil content was about 19.34%; the L^* value was about 61.49, a^* value was about 11.49, b^* value was about 23.16; the total sensory score was 83.44; the hardness was at a moderate level, about 12.78 N. There were 33 kinds of volatile substances in this experimental group of crispy pork. Among them, the heterocyclic compound methylpyrazine and the aldehyde compounds 2-methylbutanal and hexanal contributed greatly to the flavor of crispy pork, and could endow it with nutty, baked, fruity and oily aromas. **Conclusion**　Under this reheating condition, the

收稿日期: 2025-08-28
基金项目: 川菜发展研究中心科研项目(CC23Z20); 四川旅游学院大学生创新训练项目(202311552102)
第一作者: 糜玲霞(2004—), 女, 主要研究方向为食品加工技术。E-mail: 3072849947@qq.com
***通信作者:** 张淼(1984—), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为食品加工与检测技术。E-mail: 414137715@qq.com

crispy pork have crispy texture, unique flavor and good edible quality.

KEY WORDS: air fryer; pre-processed crispy pork; edible quality; reheating

0　引　言

小酥肉口感酥脆、色泽诱人, 广受消费者喜爱[1]。小酥肉的口感受多重因素影响, 涉及原料特性、屠宰工艺及加工环节等多个方面。作为肉制品加工的关键步骤, 热处理工艺直接决定最终食用品质。预制小酥肉以冷冻猪肉为原料, 经切条、调味油炸、速冻加工而成, 属于非即食食品, 只需简单复炸就能食用[2]。空气炸锅利用发热管加热空气, 借助高速运转的风扇驱动热空气循环流动, 促使食物表面的水分快速蒸发, 引发美拉德反应使食物形成酥脆的表层。和传统油炸相比, 空气炸锅在效率、多功能性、操作智能化等方面具有显著的优势[3]。

目前对于小酥肉加工品质相关的研究较多, 主要集中在糊料配方优化及油炸工艺研究, 如黄红瑞等[4]研究了油莎豆淀粉在小酥肉制作中的应用研究, 秦知之[5]探究了糖基胶体或变性淀粉对冷冻小酥肉品质的影响; 赵矩阳等[6]研究了微波复热功率及时间对速冻小酥肉品质的影响。空气炸锅在烹饪加工中的应用研究较少, 张慢等[7]探究了空气炸锅加工对秀珍菇营养特性与抗氧化能力的作用; 楼洪献等[8]研究了基于不同烹饪介质的空气炸锅对豇豆及其维生素 C 的影响。相较于现有研究, 本研究首次聚焦空气炸锅复热, 系统解析复热温度与时间的交互效应对预调理小酥肉品质的调控规律, 并结合风味物质鉴定构建多维度评价体系, 为工业化预调理产品的终端复热工艺优化提供了新的理论依据与实践指导。

本研究以预调理小酥肉为研究对象, 旨在探究不同空气炸锅复热时间和温度下的复热效果, 对含油率、水分含量、硬度等理化指标进行测定并进行感官评定, 通过分析以上试验数据, 选择在最优复热条件下的样品并测定风味物质, 以明确小酥肉的风味物质, 为预调理油炸类菜肴的复热工艺选择、开发利用、工业生产提供参考。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

美好农家小酥肉速冻调制食品: 产自成都希望食品有限公司, 购买于永辉超市、盒马鲜生。

石油醚(分析纯, 广东惠普化工科技有限公司)。

1.2　仪器与设备

GCMS-QP2010Ultr 气相色谱质谱联用仪、AUW220 电子分析天平(精度 0.01 mg, 日本岛津公司); GL224l-1SCN 型电子天平(精度 0.1 mg, 深圳市林涛仪器有限公司); TMS-Touch 型质构仪(美国 FTC 公司); DC-P3 新型全自动测色色差计(北京兴光测色仪器有限公司); 101－0 电热鼓风干燥箱(北京中兴伟业仪器有限公司); KZ30E201 空气炸锅(美的集团股份有限公司); DB-5MS 毛细管柱(30 m× 0.25 mm, 0.25 μm)(美国安捷伦科技有限公司)。

1.3　试验方法

根据预试验确定空气炸锅复热温度梯度和复热时间梯度。将速冻的小酥肉进行空气炸锅复热处理, 复热温度分别为 160、180、200 ℃, 复热时间分别为 8、10、12 min, 进行相应的感官评定和理化指标检测及最优条件下风味物质的测定(每个试验组重复进行 3 次, 并将结果取平均值±标准偏差)。

1.4　检测方法

1.4.1　水分含量的测定

参考 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》测定小酥肉的水分含量, 将小酥肉的肉芯及整体分别粉碎成粉末状, 对每个样品进行 3 次平行测定, 最终取测定所得的水分含量数据的平均值作为结果。

1.4.2　脂肪含量的测定

参考 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》测定小酥肉的粗脂肪含量, 将小酥肉的肉芯及整体分别粉碎成粉末状, 对每个样品进行 3 次平行测定, 最终取测定所得的脂肪含量数据的平均值作为结果。

1.4.3　色差的测定

使用全自动色度计测定复热样品的亮度(L^*)、红度(a^*)及黄度(b^*)。具体操作如下: 称取 5 g 样品, 放置于色差计底板上, 在测量前先利用黑白板对仪器进行校正。针对同一工艺参数下的 3 个不同样品, 各进行 1 次测定, 分别记录每次测得的 L^*、a^*、b^*, 并计算 3 次测量结果的平均值作为最终数据。

1.4.4　质构的测定

采用质构分析法(texture profile analysis, TPA)对小酥肉进行二次压缩测试, 通过力学和触觉手段检测食品流变特性的综合指标, 主要包含硬度、弹性、凝聚性、黏附性、咀嚼度等参数。参考王林[9]研究方法做适量调整: 将肉样改刀成 1 cm×1 cm×1 cm 的肉块进行剪切力测定。测定设备选用 TMS-Touch 质构仪, 探头型号为 HDP/BS (W 型刀具), 具体设定参数: 起始力为 0.375 N, 测试速率为 30.0 mm/s, 回程速率为 60.0 mm/s, 回程距离为 50 mm。

1.4.5　感官评定

根据 GB 2726—2016《食品安全国家标准 熟肉制品》

和王纯等[10]的方法并作改动。选取 10 名经专业训练的食品质量与安全专业的学生(男女比例为 1:1)组成感官评价小组, 评价标准见表 1, 从外观形态、色泽表现、气味特征和口感质地 4 个维度, 对小酥肉进行感官评分。

表 1 小酥肉感官评价表

Table 1 Sensory evaluation form for crispy pork bites

项目	评价标准	分值/分
色泽(25 分)	色泽均匀金黄, 有色泽	20~25
	色泽暗黄, 无色泽	12~19
	色泽焦黑, 无色泽	0~11
气味(25 分)	香味浓郁, 无焦糊味或异味	20~25
	无香味或香味淡, 有焦糊味或异味	12~19
	有焦糊味及异味	0~11
口感(30 分)	口感酥脆, 硬度适中, 肉质鲜嫩, 无渣	24~30
	口感较酥脆, 硬度过硬或者过软, 肉质较柴, 有少量渣	12~23
	不酥脆, 很硬, 肉质很柴, 有大量渣	0~11
组织状态(20 分)	有明显膨胀, 形状规则	16~20
	轻微膨胀, 形状较规则	11~15
	不膨胀, 形状不规则	0~10

1.4.6 气相色谱-质谱技术的测定

(1)顶空-固相微萃取法条件

称取 3 g 复热后的样品置于 10 mL 顶空瓶中, 准确加入 20 μL 内标物 2-甲基, 3-庚酮(质量浓度为 5 μL/mL), 并置于 60 ℃的水浴环境中, 平衡 10 min。紧接着进行 30 min 的顶空萃取操作, 萃取完成后, 使用手动进样方式, 将萃取所得成分注入相关仪器, 并在仪器内进行 5 min 的解析。

(2)气相色谱-质谱技术条件

色谱条件: DB-5MS 毛细管柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm), 进样口 250 ℃, 高纯氦气作为载气(恒定流速 1.0 mL/min)。色谱柱初始温度 40 ℃维持 2 min, 按 5 ℃/min 升至 160 ℃保持 2 min, 再以 10 ℃/min 升至 250 ℃保持 2 min。

质谱条件: 电子轰击电离源(70 eV), 离子源与传输线温度均为 250 ℃, 质量扫描范围 30~500 amu, 设置 3 min 溶剂延迟时间。

(3)定性定量分析

定性分析: 将样品中检测出的挥发性风味物质谱图通过 NIST 2011 标准谱库中进行检索、计算其保留指数并与其文献值进行比对为主, 同时结合人工解析质谱图进行确定。

定量分析: 采用内标法进行定量分析, 以质量浓度为 5 μL/mL 的 2-甲基 3-庚酮为内标物, 按照以下公式(1)对各组分进行定量分析[11]。

$$C_x = \frac{S_x \times V_0 \times C_0}{S_0 \times m} \quad (1)$$

式中: C_x 为未知化合物的含量, μg/g; V_0 为内标物的进样体积, μL; C_0 为内标物的质量浓度, μg/mL; S_x 为未知化合物的峰面积; S_0 为添加的内标物峰面积; m 为试样的质量, g。

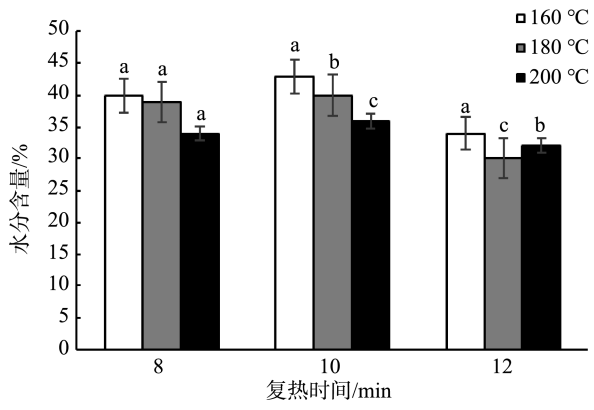
1.5 数据处理

采用 EXCEL 2016、SPSS 20.0、Origin 2024 等专业数据处理、画图软件对数据进行处理。并进行显著性分析, 结果均以“平均值±标准偏差”来表示, P<0.05 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 不同空气炸锅复热条件对小酥肉水分含量的影响

不同空气炸锅复热温度和时间对小酥肉水分含量的影响如图 1 所示。参考王纯等[10]的试验可知, 生肉的水分含量为 74.61%。由图 1 可看出, 在复热温度一定时, 随着复热时间的延长, 小酥肉的水分含量整体上呈下降趋势, 且在复热时间为 10 min 和 12 min 时, 复热温度对水分含量的影响存在显著性(P<0.05)。有研究表明, 随着复热时间的延长, 猪肉肌纤维网络内的固定水逐渐转化为细胞间隙的自由水, 导致样品内部的水分梯度持续增大[12]。这种水分分布的变化促使水分更易从细胞间隙向食品表面迁移, 而食品表面与热空气的直接接触, 使得水分蒸发速率加快, 最终导致大量水分从食品表面迅速散失。在复热时间相同的条件下, 当复热温度为 160 ℃时小酥肉水分含量最高, 复热温度为 200 ℃时小酥肉水分含量最低, 这可能是温度以及温差的增加会导致空气流速加快、空气压力变大, 进一步加速小酥肉表面水分流失。在复热温度相同条件下,初期水分含量上升, 可能是因为短时间复热使小酥肉内部的冰结晶逐步融化, 水分得以释放; 而后期由于复热时间的延长, 水分蒸发速率有所减缓。当复热温度为 200 ℃时, 水分呈先上升后下降的趋势, 这是因为水分通过多分子吸附和毛细管凝聚作用留存于小酥肉内部, 并且复热过程中形成的酥脆表皮, 如同天然屏障,



注: 不同字母表示相同复热时间不同复热温度组间具有显著性差异(P<0.05), 下图同。

图 1 不同空气炸锅复热条件下小酥肉的水分含量分析

Fig.1 Moisture content analysis of crispy pork bites under different air fryer reheating conditions

进一步阻碍了内部水分的向外扩散与蒸发, 水分蒸发速率降低, 最终导致小酥肉整体水分含量增加[12]; 复热温度过高, 随着复热时间的延长, 导致样品水分含量下降。综合上述分析, 在复热温度 180 ℃、复热时间 10 min 的条件下, 小酥肉的水分含量最优, 约为 40.18%, 适口性更强。

2.2　不同空气炸锅复热条件对小酥肉含油率的影响

不同空气炸锅复热时间和温度对小酥肉含油率的影响变化规律如图 2 所示。在复热时间一定时, 复热温度对含油率的影响随时间变化: 8 min 时 200 ℃组含油率显著低于 160 ℃、180 ℃组(P<0.05); 12 min 时 160 ℃组含油率显著低于 180 ℃、200 ℃组(P<0.05)。这一现象可能归因于: 在更高的复热温度与更长的处理时间下, 小酥肉内部水分蒸发速率显著加快。随着水分快速散失, 原本被水分占据的孔隙空间逐渐暴露, 促使油脂更易渗透进入小酥肉内部, 加快了水油置换进程, 最终导致小酥肉含油率明显增加[13]。从图 2 可以看出, 在复热温度一定时, 复热时间对含油率的影响存在温度特异性, 160 ℃和 180 ℃条件下, 8 min 与 12 min 组含油率高于 10 min。在复热时间为 10 min 时, 随着复热温度的增加, 小酥肉的含油率呈现出先下降后上升的变化趋势。前期含油率降低, 这可能是由于在特定复热温度条件下, 小酥肉中的淀粉发生糊化反应, 糊化后的淀粉分子相互交联, 在小酥肉表面及内部形成一层致密的保护膜, 该膜结构有效阻隔了外部油脂的渗透路径, 从而减少了油脂的吸收量, 使得含油率出现下降[14]。油炸食品的油脂含量是健康关注焦点, 由于淀粉具备独特的持水、持油特性, 这使其成为影响小酥肉品质的关键因素。小酥肉的含油率对其食用品质起着决定性作用: 当含油率过高时, 食用时会产生强烈的油腻感; 而含油率过低, 则难以形成醇厚的风味, 两者都会破坏口感的平衡, 降低消费者的食用体验。参考张璐等[15]的试验结果可知, 当选择复热温度为 180 ℃、复热时间为 10 min, 含油率约为 19.34%, 复热后能的小酥肉含油率处于较高水平, 更倾向于消费者的偏好。

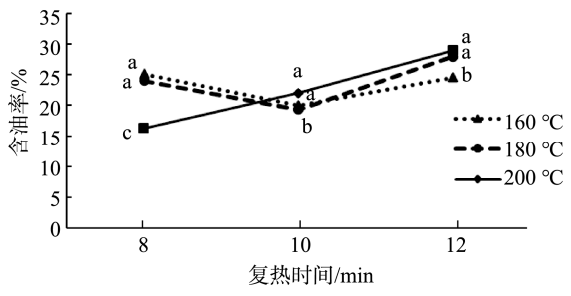


图 2　不同空气炸锅复热条件下小酥肉的含油率分析
Fig.2　Oil content analysis of crispy pork bites under different air fryer reheating conditions

2.3　不同空气炸锅复热条件下小酥肉色差对比分析

不同空气炸锅复热时间和温度对小酥肉色差的影响变化规律如表 2 所示, 复热过程中美拉德反应和焦糖化反应会影响食品表面的色泽[16], 食物表面的色泽直接影响消费者对食品的选择[17]。由表 2 可知, 在复热时间一定时, 温度对 L 的影响仅在 12 min 时显著(P<0.05), 对 a 的影响随时间变化呈现不同特征, 而 b^*随时间延长整体呈上升趋势, 其中 200 ℃组黄度始终最高。在复热温度一定时, 随着复热时间的延长, 小酥肉的 L^*、a^*、b^*均逐渐升高(除 200 ℃外)。说明随着复热时间的延长, 小酥肉逐渐变红、变黄、色泽变深, 可能是在复热过程中随着时间的延长, 还原糖和氨基酸反应产生棕色或黑色的拟黑素, 拟黑素累积使小酥肉表皮颜色加深; a^*随着肌肉色素含量以及光反射氧化的变化而变化, 故可能是由于肌红蛋白氧化变性为含氧肌红蛋白导致 a^*的增加[18–19]。在相同的复热时间下, 随着复热温度的升高, 小酥肉的 L^*、a^*逐渐升高(P<0.05), b^*在 10 min 复热条件下先升高后轻微降低; 在 8 min 和 12 min 的复热条件下逐渐升高(P<0.05)。在合适的条件下复热的小酥肉往往具有色泽金黄的特点。过度的加热处理将会对小酥肉的色泽产生不利的影响, 如小酥肉表皮呈焦黄色甚至边缘处呈黑色[10], 导致肉品的 a^*、b^*有所升高。而小酥肉的色泽则不呈规律变化, 可能是空气炸锅复热的过程中存在一些不可控的因素, 如非酶褐变、水分活度、油脂氧化等。结果表明, 当空气炸锅复热时间为 10 min、复热温度为 180 ℃时, 小酥肉的 L^*约为 61.49、a^*约为 11.49、b^*约为 23.16, 较符合消费者对挂糊油炸食品颜色的偏好。

表 2　不同空气炸锅复热条件下小酥肉色差分析
Table 2　Color value analysis of crispy pork bites under different air fryer reheating conditions

复热时间/min	复热温度/℃	L^*	a^*	b^*
8	160	59.09±0.09^a	9.67±0.34^a	19.63±0.54^a
	180	59.22±0.94^a	10.89±0.18^b	20.94±1.09^a
	200	60.26±1.58^a	13.1±0.65^c	22.55±1.54^b
10	160	60.73±1.35^a	10.36±0.12^b	21.95±0.99^a
	180	61.49±1.06^a	11.49±0.41^{ab}	23.16±0.79^a
	200	61.55±0.75^a	12.52±1.09^a	22.75±1.79^c
12	160	58.24±1.63^b	9.22±2.39^b	20.75±4.96^a
	180	59.75±2.00^b	12.26±0.22^a	22.25±1.75^a
	200	59.75±0.68^a	14.24±0.56^a	22.67±1.36^a

注: 不同字母表示相同复热时间不同复热温度组间具有显著性差异(P<0.05), 下表同。

2.4　不同空气炸锅复热条件下小酥肉质构对比分析

不同空气炸锅复热温度和时间对小酥肉质构影响结果见表 3。由表 3 可知, 在 160 ℃与 180 ℃条件下, 随复

热时间延长硬度呈显著上升趋势(P<0.05)，而 200 ℃条件下时间对硬度无显著影响(P>0.05)；从温度效应来看，8 min 与 10 min 时 200 ℃组硬度高于 160 ℃、180 ℃组，12 min 时 200 ℃组硬度仍高于 160 ℃组，与 180 ℃组差异较小。可能是在复热过程中，肌纤维受热紧密，组织失水，引起硬度增加[11]；蛋白质氧化也会影响其溶解性能；与此同时，交联反应会促使蛋白质分子相互聚合并生成一些络合物，使蛋白质体系的硬度显著增加[20]。在 160 ℃和 180 ℃条件下，随复热时间延长咀嚼性显著上升(P<0.05)，而 200 ℃条件下 8 min 时咀嚼性最高，随时间延长显著下降(P<0.05)；从温度效应看，8 min 时 200 ℃组咀嚼性最高，12 min 时则转为 160 ℃和 180 ℃组更高。可能是小酥肉面糊中的淀粉颗粒会随着温度上升而不断吸水膨胀，并且复热时间越久，淀粉颗粒的膨胀程度就越高。在此过程中，小酥肉表面因淀粉颗粒的变化[21]，逐渐形成了形态各异的保护壳，与此同时，内部肉条的水分不断流失，使得肌肉组织逐渐收缩紧实，最终导致小酥肉的口感和质地发生改变。160、180 及 200 ℃条件下复热时间对弹性无显著影响(P>0.05)；各时间点下，160 ℃和 180 ℃组的弹性均显著高于 200 ℃组。可能是在较高的复热温度和时间下，细胞结构受到破坏，细胞分离，弹性略微下降[22]。空气炸锅复热温度和时间对内聚性的影响较小，均稳定在 0.40 左右，说明小酥肉在口腔内易结成食团，不易分散。160 ℃和 180 ℃条件下随复热时间延长胶黏性显著上升，200 ℃条件下 8 min 时胶黏性最高并随时间延长显著下降(P<0.05)；从温度效应看，8 min 和 10 min 时 200 ℃组胶黏性最高，12 min 时则转为 160 ℃和 180 ℃组更高。主要源于蛋白质热变性及淀粉凝胶化反应的综合作用：当复热温度超过临界值时，蛋白质分子间作用力增强，使蛋白质固化并形成黏性；同时淀粉受热膨胀引发凝胶化反应。随着复热温度和时间增加，蛋白质与淀粉的结构重组与交联作用加强，共同推动胶黏性增加。

结果表明，当空气炸锅复热温度为 180 ℃、复热时间为 10 min 时，样品硬度适中，约为 12.78 N，且咀嚼性约为 19.79 mJ、弹性约为 3.99 mm、胶黏性约为 5.30 N，均属于较优品质小酥肉的范畴中，此工艺条件下小酥肉食用品质及适口性最优。

2.5 不同空气炸锅复热条件对小酥肉感官品质的影响

不同空气炸锅复热温度和时间对小酥肉感官品质影响结果见表 4。在一定范围内，随着复热温度和时间增加，风味物质含量与种类均会增加[23]，使小酥肉香气更加浓郁，外皮变得酥脆，感官评分增加，但温度和时间超过一定值后，小酥肉的水分含量降低，肉质变老，硬度过大不易咀嚼，影响感官总分。当空气炸锅复热温度为 180 ℃、200 ℃时，小酥肉的各项指标得分呈先升高后降低的趋势，并于复热时间为 10 min 达到最大值；而复热温度为 160 ℃时的小酥肉各项指标得分呈升高趋势。当空气炸锅复热时间为 8 min 时，复热温度增加使小酥肉的各项指标得分呈升高的趋势，并于 200 ℃处达到最大值，而复热时间为 10 min、12 min 时的小酥肉各项指标得分呈先升高后略微降低的趋势。当肉品复热温度和时间较低时，其感官评分较低。可能是由于在较低的复热温度下，肉品表面的水分较多，难以形成酥脆外壳；且温度不足使焦糖化反应不充分，无法产生诱人的金黄色泽[10]；且表面易快速糊化，生成致密硬壳导致内部受热不充分。随着温度的升高，肉里的冰块慢慢融化，水分渗进肉使肉变得鲜嫩多汁、香气四溢。若持续加热，肉中的水分持续蒸发，使肉的质地变得干柴，表面出现焦黑色，导致感官评分下降。由感官数据结果分析可知，需要掌握适当的复热温度和复热时间，以保证其外脆内嫩、金黄酥脆的效果。

综合以上试验结果，在 180 ℃下复热 10 min 时效果理想，小酥肉色泽均匀金黄，口感酥脆，硬度适中，肉质鲜嫩，香味浓郁，口感最佳因此选择本研究条件进行小酥肉风味物质分析。

表 3 不同空气炸锅复热条件下小酥肉质构测定

Table 3 Texture properties determination of crispy pork bites under different air fryer reheating conditions

复热温度/℃	复热时间/min	硬度/N	内聚性	弹性/mm	胶黏性/N	咀嚼性/mJ
160	8	6.26±0.14^{c}	0.51±0.01^{c}	4.93±0.78^{c}	3.48±0.09^{c}	15.61±1.03^{c}
	10	12.34±1.99^{b}	0.42±0.13^{c}	4.37±0.61^{c}	5.60±1.19^{b}	24.49±5.80^{b}
	12	16.13±1.08^{a}	0.49±0.03^{c}	4.99±0.72^{c}	8.37±0.98^{a}	41.52±4.41^{a}
180	8	11.85±1.70^{c}	0.44±0.05^{c}	4.19±0.34^{c}	4.77±0.00^{c}	22.58±0.84^{c}
	10	12.78±1.81^{c}	0.45±0.09^{c}	3.99±0.56^{c}	5.30±0.67^{c}	19.79±0.14^{c}
	12	17.95±3.49^{b}	0.44±0.05^{c}	4.06±0.28^{c}	8.37±2.16^{b}	39.09±3.01^{b}
200	8	27.59±1.15^{c}	0.36±0.61^{b}	3.28±0.93^{c}	13.1±3.32^{b}	55.34±8.39^{a}
	10	24.58±4.10^{c}	0.36±0.40^{b}	2.98±0.10^{c}	9.51±0.56^{b}	28.02±2.34^{b}
	12	27.58±9.99^{c}	0.36±0.40^{c}	2.1±0.51^{c}	4.20±0.24^{c}	8.24±1.47^{c}

表 4　不同空气炸锅复热条件下小酥肉感官品质

Table 4　Sensory attributes evaluation of crispy pork bites under different air fryer reheating conditions

复热时间/min	复热温度/℃	色泽/分	气味/分	组织状态/分	口感/分	总分/分
8	160	13.55±0.35^{c}	14.44±0.31^{a}	11.43±1.58^{c}	15.48±0.09^{c}	54.90±1.53^{c}
	180	14.34±1.55^{b}	17.45±1.23^{c}	14.13±2.34^{a}	17.60±1.19^{b}	63.52±3.40^{b}
	200	15.41±1.08^{a}	16.11±0.73^{c}	15.11±0.92^{c}	18.37±0.98^{a}	65.00±0.91^{a}
10	160	17.25±1.70^{c}	19.44±0.05^{c}	13.19±0.34^{c}	17.50±0.73^{b}	67.38±0.54^{c}
	180	20.78±1.81^{c}	20.45±0.09^{c}	16.99±0.56^{a}	24.22±1.67^{c}	83.44±0.67^{a}
	200	20.95±3.49^{b}	17.44±0.05^{c}	14.06±0.28^{c}	20.51±2.37^{b}	73.02±4.61^{b}
12	160	18.53±1.24^{c}	18.36±0.61^{b}	14.28±0.93^{c}	17.17±3.32^{b}	68.34±6.33^{a}
	180	19.18±4.10^{c}	19.36±0.40^{b}	15.98±0.10^{a}	18.51±0.56^{b}	73.03±3.04^{b}
	200	19.78±1.78^{c}	17.36±0.40^{c}	13.10±0.51^{c}	19.23±1.24^{c}	69.47±1.47^{c}

2.6　最优空气炸锅复热条件下小酥肉风味物质分析

使用气相色谱-质谱联用技术检测最优空气炸锅复热工艺下小酥肉挥发性化合物分析如表 5、6 所示。由表 5、6 可知, 试验组中共检测出 33 种挥发性物质, 其中含有 2 种酯类化合物、5 种醇类化合物、8 种酮类化合物、2 种醛类化合物、1 种杂环类化合物、11 种烯烃类化合物和 4 种其他类化合物。

表 5　最优空气炸锅复热条件下小酥肉风味物质分析

Table 5　Analysis of flavor compounds in crispy pork bites under optimal air fryer reheating conditions

类别	序号	化合物	分子式	风味特征	CAS 号	含量/(μL/g)
						180 ℃ 10 min
醇类	1	环丙基甲基甲醇	$C_5H_{10}O$	醇类淡香	765-42-4	0.060
	2	3-氯-4-甲基-2-戊醇	$C_6H_{11}ClO$	-	74685-48-6	0.003
	3	2-甲基-1,5-庚二烯-4-醇	$C_8H_{14}O$	青草香、油脂香	926-98-7	0.364
	4	2,4-二甲基环己醇	$C_8H_{16}O$	醇香、轻微木香	69542-91-2	0.002
	5	2,2-二乙基-1,3-丙二醇	$C_7H_{16}O_2$	甜香、轻微油味	115-76-4	0.045
醛类	6	2-甲基丁醛	$C_5H_{10}O$	果香、青草香	96-17-3	0.050
	7	己醛	$C_6H_{12}O$	青草香、果香	66-25-1	0.033
酮类	8	2,5-二甲基-3-己酮	$C_8H_{16}O$	甜香、木香	1888-57-9	0.881
	9	5-甲基-3-己酮	$C_7H_{12}O$	木香、甜香	623-56-3	0.277
	10	3,5-二甲基-2-辛酮	$C_{10}H_{20}O$	脂肪香、果香	19781-14-7	0.010
	11	2-甲基-2-环戊烯酮	C_6H_8O	焦糖香、甜香	1120-73-6	0.001
	12	2-甲基-4-庚酮	$C_8H_{16}O$	果香、奶油香	626-33-5	0.027
	13	3-乙基环戊酮	$C_7H_{12}O$	果香、甜香	10264-55-8	0.064
	14	2-甲基-4-辛酮	$C_9H_{18}O$	果香、奶油香	7492-38-8	0.105
	15	2-羟基-1-苯基乙酮	$C_8H_8O_2$	甜香、杏仁香	582-24-1	0.015
酯类	16	戊酸甲酯	$C_6H_{12}O_2$	果香、苹果香	624-24-8	0.003
	17	苯甲酸甲酯	$C_8H_8O_2$	花香、果香	93-58-3	0.001
烯烃类	18	2-丙烯亚基环丁烯	C_6H_6	刺激性气味	52097-85-5	0.010
	19	1,3,8-对薄荷三烯	$C_{10}H_{14}$	薄荷香、清凉感	18368-95-1	0.093
	20	3,6,6-三甲基双环[3.1.1]庚-2-烯	$C_{10}H_{16}$	松木香、树脂香	4889-83-2	0.069
	21	莰烯	$C_{10}H_{16}$	松木香、樟脑香	79-92-5	0.111
	22	顺式-4-癸烯	$C_{10}H_{20}$	脂肪香、轻微果香	19398-88-0	0.003
	23	*α*-蒎烯	$C_{10}H_{16}$	松木香、清新香	127-91-3	0.323

表 5(续)

类别	序号	化合物	分子式	风味特征	CAS 号	含量/(μL/g)
						180 ℃ 10 min
烯烃类	24	4-亚甲基-1-异丙基双环[3.1.0]己-2-烯	$C_{10}H_{14}$	松木香、树脂香	36262-09-6	0.021
	25	1-甲基-4-异丙叉环己烯	$C_{10}H_{14}$	木香、脂香	586-62-9	0.044
	26	(R)-1-甲基-5-异丙烯基环己烯	$C_{10}H_{14}$	松木香、树脂香	1461-27-4	0.296
	27	*β*-蒎烯	$C_{10}H_{16}$	松木香、树脂香	80-56-8	0.020
	28	3-萜烯	$C_{10}H_{16}$	松木香、辛辣香	13466-78-9	0.020
杂环类	29	甲基吡嗪	$C_5H_6N_2$	坚果香、烘焙香	109-08-0	0.020
其他类	30	三甲基环氧乙烷	$C_5H_{10}O$	刺激性气味	5076-19-7	0.254
	31	邻伞花烃	$C_{10}H_{14}$	柑橘香、木香	527-84-4	0.028
	32	桉油精	$C_{10}H_{18}O$	清凉薄荷香	470-82-6	0.084
	33	2-甲基癸烷	$C_{11}H_{24}$	石蜡香	6975-98-0	0.003

注: -表示未表现出可明确描述的显著风味特征, 或现有公开的风味物质数据库与文献中, 缺乏对其风味特征的权威记载。

表 6 最优空气炸锅复热条件下小酥肉风味物质种类与相对含量
Table 6 Species and relative content of flavor compounds in crispy pork bites under optimal air fryer reheating conditions

类别	180 ℃, 10 min	
	种类	含量/(μL/g)
醇类	5	0.474
醛类	2	0.083
酮类	8	1.380
酯类	2	0.004
烯烃类	11	1.010
杂环类	1	0.020
其他	4	0.369

醛类化合物便是在大多数煎炸油热解过程中产生的一类物质, 脂肪酸部分的烷氧基在这一复杂的热解过程中, 会发生裂解反应, 进而产生醛类化合物 , 醛类化合物的产生不仅影响着煎炸食品的风味, 如赋予食品特定的气味, 同时其含量变化也反映着油脂在煎炸过程中的品质劣变情况[24], 醛类化合物具有极低的感觉阈值, 极少量存在便能被嗅觉敏锐感知。由于脂肪香气的形成与醛类物质的感官特性紧密相连, 这类化合物对食品整体风味的构建起着关键作用。在本研究中, 共检测出 2 种醛类化合物, 分别是 2-甲基丁醛与己醛。其中 2-甲基丁醛能够赋予食品独特的果香气息, 而己醛则贡献出清新的青草香气, 二者共同交织, 丰富了小酥肉的风味层次。

相比醛类化合物, 醇类化合物的气味阈值较高, 不易被嗅觉感知, 因此对酥肉风味的贡献相对较小, 但醇类化合物具有独特的香气特征, 还具有良好的溶剂作用, 能够溶解其他的挥发性化合物[25]。试验组中检测出的醇类化合物有 5 种, 分别为环丙基甲基甲醇、3-氯-4-甲基-2-戊醇、2-甲基-1,5-庚二烯-4-醇、2,4-二甲基环己醇和 2,2-二乙基-1,3-丙二醇, 这些化合物都是由脂肪的氧化分解产生[22], 会产生油脂香、醇香、轻微木香等香气。

试验组中共检测出酮类化合物 8 种, 酮类化合物与醛类化合物相同, 都是美拉德反应系统中重要的前体物质, 它的生成和转化受到脂质氧化过程的显著影响。酮类化合物的来源颇为多样, 大部分情况下, 饱和脂肪酸在热作用下发生过氧化反应, 氢过氧化物经历酮-烯醇互异构化过程, 碳氢化合物进一步氧化, 不饱和脂肪酸过氧化物的分解以及分子内电子重排[26]等反应, 都会促使酮类化合物的产生。它们通常与奶油和水果的风味特征紧密相连, 能够赋予食品浓郁的奶香以及清新的果香。在肉类食品中, 酮类化合物在提升肉香方面扮演着举足轻重的角色。它们通过与其他风味物质相互作用, 协同增强肉类的香气, 使其更加醇厚诱人, 但其感觉阈值较高, 不易被嗅觉感知, 对风味的贡献不大, 仍会产生果香、奶油香等轻微香气。

烃类化合物主要来自脂质的氧化降解, 而支链烃类来自支链芳香酸的氧化[27], 试验组中共检测出 11 种烃类, 但这类化合物的感官阈值普遍偏高, 通常对风味的影响较小, 会产生樟脑香、松木香和柑橘皮香等轻微气味。

酯类化合物的形成主要与羧酸和醇之间的酯化反应密切相关, 具有令人愉悦的香气, 且部分酯类物质有益于人体健康, 如乙酸乙酯可以促进新陈代谢[28]。试验组中共检测到 2 种酯类化合物, 分别为戊酸甲酯和苯甲酸甲酯, 但其感觉阈值相对较高, 不易被嗅觉感知, 对风味的贡献较小, 会产生果香、花香等轻微香气。

杂环类化合物是油炸食品中另一类典型的挥发性风味物质, 主要通过碳水化合物的热降解、氨基酸与还原糖之间的美拉德反应以及脂质氧化产生[29], 试验组中共检测到 1

种杂环类化合物, 为甲基吡嗪, 吡嗪类物质一般具有低气味阈值, 易被嗅觉灵敏感知, 对美拉德反应产物的整体感官风味有显著作用, 是肉类的烘烤味和坚果味等特征风味的主要香气来源[30], 能赋予小酥肉坚果香、烘焙香。

3　讨论与结论

本研究探究了空气炸锅复热温度和复热时间对预调理小酥肉食用品质的影响。研究表明, 随着复热温度逐步升高、复热时长不断增加, 小酥肉的含水率呈先上升后下降的趋势。与此同时, 其含油率则先经历一段降低过程, 随后转而上升。小酥肉的水分大量散失这一变化显著影响了其质构特性, 致使小酥肉的硬度不断增大, 咀嚼时需耗费更多力气, 咀嚼性明显提升, 胶黏性也有所增强, 在口腔中更具黏着感。此外, 复热引发的非酶促褐变等反应, 改变了小酥肉的外观色泽。小酥肉的亮度逐渐降低, 黄度值也随之减小, 而红度值却显著上升。通过分析具体试验结果可知, 空气炸锅复热温度为 180 ℃、复热时间为 10 min 为最佳复热条件。此条件下小酥肉共含有 33 种挥发性物质, 其中含有 2 种酯类化合物、5 种醇类化合物、8 种酮类化合物、2 种醛类化合物、1 种杂环类化合物、11 种烯烃类化合物和 4 种其他类化合物, 且杂环类化合物甲基吡嗪是小酥肉烘烤味和坚果味的主要来源, 对小酥肉风味贡献较大。此条件下小酥肉色泽金黄, 风味独特, 口感酥脆, 各项数据均显著优于其他试验组。

本研究对空气炸锅复热预调理小酥肉的食用品质进行了探究, 但仍存在一些值得深入挖掘与拓展的方向。在复热工艺优化层面, 可以尝试将空气炸锅复热与其他辅助技术, 如真空低温复热、蒸汽辅助复热等结合, 研究能否在更好保留小酥肉水分、改善质构的同时, 优化风味物质的留存与形成, 突破现有复热技术的局限。从原料与配方改良角度, 研究不同肉类原料及比例, 以及裹粉中淀粉种类、添加剂的合理使用, 如何协同影响小酥肉在空气炸锅复热后的品质, 开发出低脂、高蛋白且风味独特的小酥肉产品, 满足消费者对健康与美味的双重追求。

参考文献

[1] 张欢, 董福家, 陈倩, 等. 面糊组分对预油炸微波复热鸡米花品质及水分分布特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(6): 57–62.
ZHANG H, DONG FJ, CHEN Q, *et al*. Influence of different batter ingredients on the quality characteristics and water distribution of pre-fried microwave reheated popcorn chicken [J]. Food Science, 2018, 39(6): 57–62.

[2] 程慧敏, 赵格, 白莉, 等. 预制小酥肉生产加工过程中沙门菌污染状况及溯源分析[J]. 中国食品卫生杂志, 2024, 36(3): 246–252.
CHENG HM, ZHAO G, BAI L, *et al*. Salmonella contamination and traceability analysis of the production and processing of prefabricated crispy pork [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2024, 36(3): 246–252.

[3] 赵念思. 空气炸锅: 健康美味的新兴烹饪技术掀起厨房新风尚[N]. 安徽科技报, 2025-02-21(13).
ZHAO NS. Air fryer: Healthy and delicious emerging cooking technology sets off a new fashion in the kitchen [N]. Anhui Science and Technology News, 2025-02-21(13).

[4] 黄红瑞, 程文瑾, 廖树强, 等. 油莎豆淀粉在小酥肉制作中的应用研究[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(7): 181–187.
HUANG HR, CHENG WJ, LIAO SQ, *et al*. Application of tigernut starch in the production of fried crispy pork [J]. China Food Additives, 2023, 34(7): 181–187.

[5] 秦知之. 糖基胶体或变性淀粉对冷冻小酥肉品质的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2023.
QIN ZZ. Effect of glycolloid or modified starch on the quality of frozen small crisp meat [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2023.

[6] 赵钜阳, 石长波, 张琪. 微波复热功率及时间对速冻红烧肉品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(9): 3519–3525.
ZHAO JY, SHI CB, ZHANG Q. Effects of different microwave re-heating powers and time on quality of quick-frozen pork braised in brown sauce [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2017, 8(9): 3519–3525.

[7] 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 SH, QIAN CL, *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.

[8] 楼洪献, 叶乾超, 臧浩, 等. 基于不同烹饪介质的空气炸锅对豇豆及其维生素 C 的影响[J]. 家电科技, 2024(5): 68–72.
LOU HX, YE QC, ZANG H, *et al*. Effect of air fryer based on different cooking medium on cowpea and its vitamin C [J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2024(5): 68–72.

[9] 王林. 微波复热对预调理小酥肉食用品质的影响[J]. 中国调味品, 2021, 46(4): 124–128.
WANG L. Effect of microwave reheating on the edible quality of prepared fried pork tenderloin [J]. China Condiment, 2021, 46(4): 124–128.

[10] 王纯, 郑钧, 林以琳, 等. 油炸条件对小酥肉食用品质的影响及工艺优化[J/OL]. 现代食品科技, 1-14. [2025-04-08]. DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.5.0530
WANG C, ZHENG J, LIN YL, *et al*. Effects of frying conditions on the edible quality of crispy meat and process optimization [J/OL]. Modern Food Science and Technology, 1-14. [2025-04-08]. DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.5.0530

[11] 张亚楠, 包香香, 樊玉霞, 等. 油炸温度和时间对猪肉块品质的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(13): 19–24.
ZHANG YN, BAO XX, FAN YX, *et al*. Effects of deep-fat frying temperature and time on the quality of pork nuggets [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(13): 19–24.

[12] LI CB, CHEN YJ, XU XL, *et al*. Effects of lowvoltage electrica l stimulation and rapid chilling on meat quality characteristics of Chinese ell ow crossbredbulls [J]. Meat Science, 2010, 72(1): 9–17.

[13] PEDRESCHI F, HERANADEZ P, FIGUROA AC, *et al*. Modeling water loss during frying of potato slices [J]. International Journal of Food Properties, 2005, 8(2): 289–299.

[14] 杨雪欣, 陈可靖. 降低挂糊油炸制品含油量的研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(22): 376–382.
YANG XX, CHEN KJ. Research progress of reducing oil content of fried products after being coated with batter [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(22): 376–382.

[15] 张璐, 熊双丽, 李安林, 等. 油炸温度和时间对小酥肉品质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(7): 68–75.
ZHANG L, XIONG SL, LI ANL, *et al*. Effect of frying temperature and time on the quality of small crispy meat [J]. International Journal of Food Properties, 2024, 45(7): 68–75.

[16] 黄优生, 陆静楠, 李明宇, 等. 油炸工艺对薯条中丙烯酰胺和 5-羟甲基糠醛形成的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(15): 49–56.
HUANG YS, LU JN, LI MY, *et al*. Effect of frying conditions on acrylamide and 5-hydroxymethylfurfural formation in french fries [J]. Food Science, 2023, 44(15): 49–56.

[17] 陈红霞. 伊拉兔生长过程中挥发性风味物质的变化及其定量研究[D]. 重庆: 西南大学, 2014.
CHEN HX. Quantitative study on changes of volatile flavor compounds of hyla rabbit during the growth [D]. Chongqing: Southwest University, 2014.

[18] 应桦, 陈枫. 油炸工艺对牛肉饼营养品质特性的影响[J]. 粮食与油脂, 2018, 31(10): 61–65.
YING H, CHEN F. Effect of frying process on nutritional quality of beef patty [J]. Cereals & Oils, 2018, 31(10): 61–65.

[19] WANG Y, ZHANG WG, ZHOU GH. Effects of ultrasound-assisted frying on the physiochemical properties and microstructureof fried meatballs [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2019, 54(10): 2915–2926.

[20] 王瑞花, 陈健初, 叶兴乾, 等. 配送和贮藏条件及二次加热方式对红烧猪肉脂质氧化、挥发性风味物质和脂肪酸组成的影响[J]. 中国食品学报, 2017, 17(9): 157–167.
WANG RH, CHEN JC, YE XQ, *et al*. Effect of delivery, storage and reheating procedures on the lipid oxidation, volatile flavor compounds and fatty acid compositions [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2017, 17(9): 157–167.

[21] DAI Y, LU Y, WU W, *et al*. Changes in oxidation, color andtexture deteriorations during refrigerated storage of ohmically andwater bath-cooked pork meat [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2014, 26: 341–346.

[22] 康海霞, 宋晓燕, 杨晓明, 等. 自加热茄汁酥肉加工工艺的研究[J]. 食品科技, 2022, 47(1): 152–158.
KANG HX, SONG XY, YANG XM, *et al*. Study on the processing technology of self-heating crispy pork in tomato sauce [J]. Food Science, 2022, 47(1): 152–158.

[23] ABHIPRIYA P, ARUN VP, PRAKASH PS, *et al*. Evaluation of effect of vacuum frying on textural properties of food products [J]. Food Research International, 2022, 162: 112074.

[24] 吴坤龙, 李彦坡, 刘标, 等. 干燥方式对大球盖菇品质及挥发性风味成分的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(2): 168–176.
WU KL, LI YP, LIU B, *et al*. Effects of different drying methods on the quality and volatile flavor components of *Stropharia rugosoannulata* [J]. Food & Machinery, 2024, 40(2): 168–176.

[25] 万景瑞, 蒋鹏飞, 史冠莹, 等. 三种发酵酒活性成分、抗氧化活性及其香气成分对比分析[J]. 食品工业科技, 2020, 41(21): 253–260, 265.
WAN JR, JIANG PF, SHI GY, *et al*. Comparative analysis of active components, antioxidant activity, and aroma components in three types of fermented wines [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(21): 253–260, 265.

[26] TIAN P, ZHAN P, TIAN H, *et al*. Analysis of volatile compound changes in fried shallot (*Alliumcepa* L. var. aggregatum) oil at different frying temperatures by GC-MS, OAV, and multivariateanalysis [J]. Food Chemistry, 2021, 345: 128748.

[27] LUO X, XIAO S, RUAN Q, *et al*. Differences in flavor characteristics of frozen surimi productsreheated by microwave, water boiling, steaming, and frying [J]. Food Chemistry, 2022, 372: 131260.

[28] ROLDÁN AM, SÁNCHEZ-GARCÍA F, PÉREZ-RODRÍGUEZ L, *et al*. Influence of different vinification techniques on volatilecompounds and the aromatic profile of palomino fino wines [J]. Foods, 2021, 10(2): 453.

[29] ZHANG L, BADAR IH, CHEN Q, *et al*. Changes in flavor, heterocyclic aromatic amines, and qualitycharacteristics of roasted chicken drumsticks at different processing stages [J]. Food Control, 2022, 139: 109104.

[30] 李晓朋, 曾欢, 林柳, 等. 不同煎炸用油制备河豚鱼汤挥发性风味成分的差异性[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(7): 251–259.
LI XP, ZENG H, LIN L, *et al*. Volatile compounds of puffer fish soup prepared with different frying oils [J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(7): 251–259.

(责任编辑: 蔡世佳 韩晓红)