

# 不同炸制方式对克氏原螯虾脂肪氧化和挥发性风味物质的影响

杜柳<sup>1,2</sup>, 谌玲薇<sup>1,2</sup>, 荣幸<sup>1</sup>, 熊光权<sup>2</sup>, 乔宇<sup>2\*</sup>, 汪兰<sup>2</sup>, 汪超<sup>1</sup>

(1. 湖北工业大学生物工程与食品学院, 湖北武汉 430064) (2. 农业农村部农产品冷链物流技术重点实验室, 湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 湖北武汉 430064)

**摘要:** 通过测量过氧化值、酸值、茴香胺值、多稀释指数、脂肪酸和挥发性成分, 研究了常压油炸 (DF) 和空气炸 (AF) 小龙虾在不同温度下 (160、170、180、190 °C) 对脂肪氧化和挥发性风味物质的影响。结果表明: 随着油炸温度的上升, 过氧化值、酸价、多稀指数值都有上升趋势。在 190 °C 时, 常压油炸的过氧化值、酸价、茴香胺值、多稀指数显著高于空气炸制。特别是酸值达到了 5.05 g/100 g。新鲜虾肉内存在大量不饱和脂肪酸, 主要以油酸、亚油酸、DHA 为主, 通过常压油炸, 虾肉内不饱和脂肪酸含量显著增长, 空气炸虾肉内不饱和脂肪酸含量显著降低。在常压油炸虾肉中分别检测出 17 种、15 种、20 种、20 种风味物质, 而在空气炸油炸虾肉中分别检测出 16 种、13 种、14 种、17 种风味物质, 油炸虾肉风味主要是醛、醇类物质结合的贡献, 而空气炸虾肉风味主要是醛类和烯烃类物质的贡献。常压油炸风味比空气炸制风味更为丰富, 但从健康方面选择低温空气炸制方式较为可靠。该研究为优化克氏原螯虾炸制方式和温度的选择提供了理论依据。

**关键词:** 克氏原螯虾; 脂肪氧化; 脂肪酸; 挥发性风味物质

文章编号: 1673-9078(2023)07-280-287

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.7.0740

## Effects of Different Frying Methods on Fat Oxidation and Volatile Flavor Substances of *Procambarus clarkii*

DU Liu<sup>1,2</sup>, CHEN Lingwei<sup>1,2</sup>, RONG Xing<sup>1</sup>, XIONG Guangquan<sup>2</sup>, QIAO Yu<sup>2\*</sup>, WANG Lan<sup>2</sup>, WANG Chao<sup>1</sup>

(1.School of Bioengineering and Food, Hubei University of Technology, Wuhan 430064, China)

(2.Key Laboratory of Cold Chain Logistics Technology for Agro-product, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, P.R.China, Institute of Agro-Product Processing and Nuclear Agricultural Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China)

**Abstract:** The effects of atmospheric fried (DF) and air fried (AF) on fat oxidation and volatile flavor substances of *Procambarus clarkii* (crayfish) at different temperatures (160 °C, 170 °C, 180 °C or 190 °C) were investigated by measuring peroxide value, acid value, anisidine value, multiple dilution index, fatty acids and volatile components. The results showed that the peroxide value, acid value, and polydilute index value showed an increasing trend with the increase of fried temperature. At 190 °C, the peroxide value, acid value, anisidine value, and multiple dilution index of the atmospheric fried crayfish were significantly higher than those of the air fried crayfish. In particular, the acid value reached 5.05 g/100 g. There were large amounts of unsaturated fatty acids in fresh crayfish, mainly oleic acid, linoleic acid, and DHA. After atmospheric frying, the total content of unsaturated fatty acids in crayfish meat increased significantly, whilst the total content of unsaturated fatty acids in the air-fried crayfish meat decreased significantly. 17, 15, 20, and 20 flavor substances were detected in the atmospheric fried crayfish meat, whilst

引文格式:

杜柳,谌玲薇,荣幸,等.不同炸制方式对克氏原螯虾脂肪氧化和挥发性风味物质的影响[J].现代食品科技,2023,39(7):280-287.

DU Liu, CHEN Lingwei, RONG Xing, et al. Effects of different frying methods on fat oxidation and volatile flavor substances of *Procambarus clarkii* [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(7): 280-287.

收稿日期: 2022-06-11

基金项目: 湖北省技术创新专项重大项目 (2019ABA087)

作者简介: 杜柳 (1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: 1787600487@qq.com

通讯作者: 乔宇 (1981-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: qiaoyu412@sina.com

16, 13, 14, and 17 flavor substances were detected in the air fried crayfish meat, respectively. The flavor of the atmospheric fried crayfish was mainly attributed to the combination of aldehydes and alcohols, while aldehydes and olefins were the main contributors to the flavor of air fried crayfish. The flavor of atmospheric fried crayfish was more abundant than the air fried crayfish. From a health perspective, it is more reliable to choose low-temperature air frying. This study provided a theoretical basis for optimizing the method and temperature for frying *Procambarus clarkii*.

**Key words:** *Procambarus clarkii*; fat oxidation; fatty acid; volatile flavor substances

小龙虾，学名为克氏原螯虾（*Procambarus clarkii*），也称 Red Swamp Crayfish，为淡水小龙虾的其中一种<sup>[1]</sup>。克氏原螯虾属于可食用的甲壳类动物，肉内含有人类必需的诸多元素<sup>[2]</sup>，近年来，小龙虾深受广大人群的喜爱，对小龙虾产品需求量也急剧增大，淡季小龙虾的加工产品数量迅速增长，主要产品包括冷冻小龙虾尾和调味小龙虾<sup>[3]</sup>，大多数产品在调味包装上市前，加工过程中通常需要热处理来煮肉类<sup>[4]</sup>。历经 10 多年的快速发展，小龙虾产业发展成为水产行业中的朝阳产业<sup>[5]</sup>。小龙虾加工主要集中在冷冻虾尾、虾仁、调味整虾等，产品形式单一<sup>[6]</sup>，传统的小龙虾热处理方法主要包括热烫、油炸、烘烤等，常压油炸（DF）是即食小龙虾制品加工工艺中必不可少的一环，极大的改善了即食小龙虾制品的风味与口感，同时赋予了即食小龙虾制品一定的热量值<sup>[7]</sup>，但高温油炸过程会产生醛、酮、酸等低分子量次级分解产物，对人体健康造成影响<sup>[8]</sup>。空气炸（AF）原理是通过在原料周围喷洒热空气，热空气中油滴雾与食物的均匀接触，是一种无油或少油类似于油炸效果的加工方式<sup>[9]</sup>。Zhou 等<sup>[10]</sup>研究了不同空气油炸条件对小龙虾品质的影响，结果表明空气炸能够提高虾肉食品品质；Chen 等<sup>[11]</sup>研究发现随着常压油炸温度和时间的增加，小龙虾水分含量降低，硬度、弹性、咀嚼性均有所增加。大多数研究表明常压油炸和空气炸都会对小龙虾的品质具有不同的影响。但对其挥发性风味物质的影响鲜有报道。

本研究以新鲜克氏原螯虾剥壳虾尾为原料，研究不同温度（160、170、180、190℃）处理的油炸和空气炸方式对虾仁脂肪氧化、脂肪酸含量和挥发性风味物质的影响规律，探讨不同温度和炸制方式处理后脂肪氧化、气味成分和脂肪酸变化之间的相关性，为克氏原螯虾食品加工提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

实验小龙虾购于湖北省武汉市白沙洲海鲜市场。乙醇、乙醚、异丙醇、石油醚、冰乙酸、三氯甲烷、硫代硫酸钠、氢氧化钾、邻苯二甲酸氢钾、茴香

胺、异辛烷、环己烷、碘化钾，国药集团化学试剂有限公司；酚酞、淀粉，上海源叶生物科技有限公司；实验使用试剂均为分析纯。

### 1.2 仪器与设备

KQ5200DE 超声波清洗器，昆山市超声仪器有限公司；722N 可见分光光度计，上海仪电分析仪器有限公司；JHK-A 净化工作台，天津市中环实验电炉有限公司；GD 系列冷冻干燥机，江阴市新申宝科技有限公司；7890A-5975C GC-MS，美国 Agilent Technologies 公司；TGL-24MC 台式高速冷冻离心机，长沙平凡仪器仪表有限公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 样品处理

预处理：挑选鲜活质量 25~30 g/只清水刷洗干净，去头、去虾线和尾部外壳，最后再次清洗（蒸馏水）、沥干。

处理方式：将预处理样品分别在 160、170、180、190℃ 条件下选用大豆油进行常压油炸（150 s）和空气炸（10 min），以未处理组作对照组。

#### 1.3.2 过氧化值的测定

参照 GB 5009.227-2016141《食品安全国家标准食品中过氧化值的测定》，采用第一法滴定法进行测定。

#### 1.3.3 茴香胺值的测定

参照 GB/ 24304-2009/ISO 6885: 2006《动植物油脂茴香胺值的测定》，用异辛烷在 350 nm 处校正分光光度计零点，测定反应溶液，未反应溶液和空白溶液的吸光度，进行计算。

#### 1.3.4 多烯指数的测定

参照 Wan 等<sup>[12]</sup>方法加以修改，准确称取样品 0.2 g，用少量环己烷溶解，定容至刻度，以环己烷为空白调零，在 232 和 270 nm 下分别测定吸光度，计算共轭二烯和共轭三烯的含量。

#### 1.3.5 酸价的测定

参考国标 GB 5009.229-2016《食品安全国家标准食品中酸价的测定》，采用第一法冷溶剂滴定法进行测定。

#### 1.3.6 脂肪酸的测定

参考国标 GB5009.168-2016《食品国家安全标准食

品中脂肪酸的测定》，采用第一法内标法进行测定分析。

### 1.3.7 GC-MS 测定挥发性物质

参考 Zhou 等<sup>[13]</sup>的方法并加以修改。准确称取样品 0.3 g，用活化好的萃取头顶空吸附 40 min。吸附完毕插入 GC-MS 进样口解吸 5 min，每个样品做三个平行。

GC 条件：进样口温度 250 °C，起始柱温 45 °C，保持 2 min，10 °C/min 升温至 100 °C；5 °C/min 升温至 200 °C；8 °C/min 升温至 250 °C，保持 5 min。

MS 条件：接口温度 280 °C，四极杆温度 150 °C，离子源温度 230 °C；

定性分析：以仲辛醇作为内标，采用 GC-MS 仪进行分析鉴定。分析结果在计算机谱库 (NIST08) 进行初步检索，最后确认挥发性物质的化学组成。

## 1.4 数据处理

实验数据采用 DPS 进行数据的处理和显著性分析， $P < 0.05$  为有显著性差异，用 Origin 2017 软件作图。

## 2 结果分析

### 2.1 过氧化值的变化

不同炸制方式及温度的变化如图 1 所示，常压油炸和空气油炸的虾仁过氧化值均高于对照组，表明加热是促进氧化的过程，在同种温度下，测定油炸处理的虾肉的过氧化值也都明显高于空气炸组，表明油炸处理虾肉更易发生初级氧化，并且空气炸处理组和油炸处理组的过氧化值也随温度的升高而增大，与 Xiong 等<sup>[14]</sup>的实验结果趋势相一致，这是可能因为空气炸处理的克氏原螯虾肉的水分含量很低从而抑制氧化，并且炸制温度越高越易于氧化。过氧化值表示油脂和脂肪酸等被氧化程度<sup>[15]</sup>，一般过氧化值越大，表征腐败程度越深，通过测定过氧化值可以衡量其氧化程度，从而判定食品品质 and 安全性<sup>[16,17]</sup>。并且样品中不饱和脂肪酸在储存、加热过程中均易发生氧化、酸

败，热加工处理后虾肉内脂肪酸含量降低，可能是随着温度的升高被氧化而降低，在表 5 中的脂肪酸含量测定表中得以验证。因此空气炸较常压油炸可显著抑制过氧化值的升高。

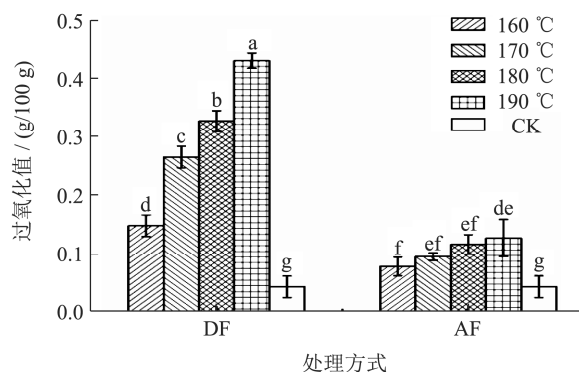


图 1 不同炸制方式对克氏原螯虾过氧化值的影响

Fig.1 Effects of different frying methods on peroxide value of *Procamburus clarkii*

注：小写字母不同，表示不同样品、同一指标间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

### 2.2 茴香胺值、多烯指数及酸值的变化

表 1 不同炸制方式对克氏原螯虾内共轭二烯的影响

Table 1 Effects of different frying methods on conjugated diene in *Procamburus clarkia* ( $10^{-3}$  mmol/kg)

加工方式	160 °C	170 °C	180 °C	190 °C	未处理
油炸	0.66±0 <sup>d</sup>	0.71±0 <sup>c</sup>	0.77±0 <sup>b</sup>	0.88±0 <sup>a</sup>	0.34±0 <sup>g</sup>
空气炸	0.34±0 <sup>g</sup>	0.39±0 <sup>f</sup>	0.40±0 <sup>f</sup>	0.55±0 <sup>e</sup>	

注：小写字母不同表示不同样品同一指标间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下表同。

表 2 不同炸制方式对克氏原螯虾内共轭三烯的影响

Table 2 Effects of different frying methods on conjugated triene in *Procamburus clarkia* ( $10^{-4}$  mmol/kg)

加工方式	160 °C	170 °C	180 °C	190 °C	未处理
油炸	0.71±0 <sup>d</sup>	0.76±0 <sup>c</sup>	0.80±0 <sup>b</sup>	0.94±0 <sup>a</sup>	0.32±0 <sup>h</sup>
空气炸	0.41±0 <sup>g</sup>	0.43±0 <sup>f</sup>	0.43±0 <sup>f</sup>	0.56±0 <sup>e</sup>	

表 3 不同炸制方式对克氏原螯虾茴香胺值的影响

Table 3 Effects of different frying methods on anisidine value of *Procamburus clarkii*

加工方式	160 °C	170 °C	180 °C	190 °C	未处理
油炸	6.14±0.02 <sup>c</sup>	7.16±0.11 <sup>a</sup>	6.64±0.05 <sup>b</sup>	6.50±0.32 <sup>b</sup>	5.20±0.05 <sup>e</sup>
空气炸	5.19±0.04 <sup>e</sup>	6.09±0.04 <sup>c</sup>	5.97±0 <sup>cd</sup>	5.79±0.04 <sup>d</sup>	

表 4 不同炸制方式对克氏原螯虾酸值的影响

Table 4 Effects of different frying methods on acid value of *Procamburus clarkii* (g/100 g)

加工方式	160 °C	170 °C	180 °C	190 °C	未处理
油炸	2.54±0.28 <sup>d</sup>	2.66±0.36 <sup>d</sup>	3.36±0.22 <sup>b</sup>	5.05±0.34 <sup>a</sup>	1.12±0.45 <sup>f</sup>
空气炸	1.68±0 <sup>e</sup>	2.02±0.22 <sup>e</sup>	2.81±0 <sup>cd</sup>	3.25±0.11 <sup>bc</sup>	

如表 1~4 所示, 在相同温度下, 测定油炸处理的虾肉的茴香胺值、多烯指数、酸值都显著高于空气炸组, 表明油炸处理虾肉更易发生脂肪氧化, 并且空气炸处理组和常压油炸处理组的多烯指数、酸值都随温度的升高而增大。

茴香胺值可以衡量油脂内部的醛、酮、醌等二级产物的含量, 在高温加热过程中容易产生这类物质, 对人产生危害, 且产生不良气味, 也就是哈喇味<sup>[18]</sup>, 需要严格把控。2 种炸制方式均使虾肉中茴香胺值呈现先升高后降低的趋势, 分析是因为开始加热产生了醛、酮类物质, 但随着温度的持续上升而使得醛、酮类物质分解为其他更小类物质, 导致测定的茴香胺值下降, 与表 6 中风味物质测定中, 空气炸虾内醛类物质随温度升高的变化趋势基本趋于一致。多烯指数是衡量油脂在加工过程中不饱和脂肪酸发生氢过氧化的程度, 部分油脂在加工过程中生成次级氧化产物, 次级氧化产物在高温中不稳定又产生了共轭二烯与共轭三烯, 一般以两者含量评判食品内部次级氧化状况, 常温油炸的多烯指数值显著高与空气炸, 归因于通过常压油炸后的小龙虾富含不饱和脂肪酸, 在油炸过程中产生了更多的共轭二烯与共轭三烯; 酸值是对食品中游离脂肪酸基团数量的一个计量标准, 是衡量油脂变质程度的晚期指标<sup>[19]</sup>, 一般酸值越低表明油脂精炼程度越高, 品质越佳<sup>[20]</sup>, 并且如表 4 所示, 常压油炸 190 °C 组的酸值最大 (5.05 g/100 g)。综上所述, 对于虾尾热加工安全和耐贮藏方面选择低温空气炸的加工方式更为可靠。

### 2.3 脂肪酸分析

炸制虾肉共检测出 15 种脂肪酸 (如表 5), 其中饱和脂肪酸 6 种, 单不饱和脂肪酸 4 种, 多不饱和脂肪酸 5 种, 不同炸制方式和温度处理的虾肉脂肪酸含量也不一样, 部分脂肪酸未检出, 特别是未处理组的脂肪酸含量比较低, 说明通过不同加工方式明显提高了虾肉内的脂肪酸含量。

新鲜虾中不饱和脂肪酸含量在 56.1% 以上, 与 Zhou 等<sup>[21]</sup>测定结果相似, 值得注意的是, 不饱和脂肪酸是风味形成的重要前体物质<sup>[22]</sup>, 虾内单不饱和脂肪酸主要为油酸 (C18:1n9c), 多不饱和酸主要为亚油酸 (C18:2n6c), 此结果与 Abdel 等<sup>[23]</sup>报道情况一致。亚油酸是人体不能自身合成的必需脂肪酸, 需从食物中直接摄取, 摄取部分亚油酸有利于预防心血管疾病, 对维持人体健康具有非常良好的作用<sup>[24]</sup>, 虾肉中亚油酸占比为 15.0%, DHA 占比为 6.0%, 而新鲜虾肉中饱和脂肪酸主要为棕榈酸 (C16:0)、硬脂酸 (C18:0)、

二十四烯酸 (C24:0)。

本研究采用不同炸制方式对小龙虾虾仁脂肪酸含量有不同的影响。通过常压油炸方式加工的虾仁的饱和脂肪酸含量普遍显著升高, 并且随着加工温度的上升饱和脂肪酸的含量也呈上升的趋势, 当温度超过 180 °C 时饱和脂肪酸含量又开始普遍降低, 而通过空气炸方式加工的虾仁饱和脂肪酸含量普遍降低。在油炸过程中, 虾仁内单不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸的含量也遵循先上升后下降的趋势, 在 180 °C 时, 特别是油酸 (C18:1n9c) 和亚油酸 (C18:2n6c) 的含量上升幅度较大, 且含量达到最大值, 可能是因为菜籽油内本身含有大量油酸和亚油酸, 与茴香胺变化趋势大径相同, 含量占比分别达到了 24.1% 和 48.8%。但不论通过空气炸还是油炸方式 DHA 的含量明显降低, 在空气炸 160 °C 加工条件下损失最少, 占比为 6.1%。脂肪氧化的难易程度与脂肪酸的饱和程度具有很大的相关性<sup>[25]</sup>, 因此常压油炸处理的小龙虾相比于空气炸的小龙虾更易氧化。

### 2.4 挥发性风味物质含量变化

由表 6 可知, 新鲜虾肉中含有的风味物质较少, 仅检测出 7 种挥发性物质, 其中醛类 1 种、醇类 1 种、酮类 1 种、烯炔类 3 种、烷炔类 1 种, 其中 2,6-二叔丁基对甲酚含量特别高, 具有抗氧化作用, 但不耐高温, 因此新鲜虾仁氧化程度是最低的, 与前期测定的理化指标值相对应。通过不同加工方式和温度处理后都赋予了虾肉特殊的风味, 绝大多数低分子有机化合物都是能贡献有香味的化合物, 常见的有醛类、酮类、羧酸类、醇类、醚类、吡嗪类等, 160~170 °C 常压油炸虾肉中分别检测出 17 种、15 种、20 种、20 种风味物质, 160~190 °C 空气炸虾肉中分别检测出 16 种、13 种、14 种、17 种风味物质, 己醛、庚醛、壬醛、少量烷炔等在两种热加工方式虾肉含量明显升高, 空气炸 170 °C 时壬醛含量达到最大值, 单独的醛类具有刺激性气味, 而微量的醛类在食品中促使香气更加醇厚, 在空气炸 160、170 °C 处理的虾肉香气确实更加醇厚, 随着温度升高醛类物质有降低的趋势, 在 170 °C 上升到 180 °C 处最为明显, 这可能是因为原有的一些挥发性物质随着温度的上升降解成为其他小分子物质, 也有可能是与其他物质发生了进一步反应<sup>[26]</sup>。并且这些醛类、烷炔和烯炔类是属于脂类在热降解过程中的产物, 这些产物赋予食品比较特殊的风味<sup>[27]</sup>。而苯甲醛含量是在空气炸 190 °C 处理时最高, 苯甲醛的气味特征是杏仁类似的香气, 在进行嗅闻和品尝时, 尤其是空气炸 190 °C 组最为明显, 具有一丝苦味。

表 5 不同炸制方式对克氏原螯虾脂肪含量的影响

Table 5 Effects of different frying methods on fattyacid composition of *Procambarus clarkii*

序列	脂肪酸	保留时间/min	脂肪酸含量/(g/100 g)												
			DF 160	DF 170	DF 180	DF 190	AF 160	AF 170	AF 180	AF 190	CK				
1	棕榈酸 (C16:0)	36.700	1.85±0.01 <sup>c</sup>	2.02±0.01 <sup>b</sup>	2.18±0.02 <sup>a</sup>	1.38±0.01 <sup>d</sup>	0.34±0 <sup>f</sup>	0.29±0 <sup>g</sup>	0.33±0 <sup>f</sup>	0.30±0 <sup>g</sup>	0.49±0 <sup>e</sup>				
2	棕榈油酸 (C16:1)	38.563	0.05±0 <sup>e</sup>	0.07±0.02 <sup>abc</sup>	0.06±0.01 <sup>bc</sup>	nd	0.06±0 <sup>bc</sup>	0.05±0.01 <sup>bc</sup>	0.06±0 <sup>bc</sup>	0.08±0.01 <sup>a</sup>	0.07±0 <sup>ab</sup>				
3	十七烷酸 (C17:0)	39.266	0.04±0 <sup>b</sup>	2.27±0.03 <sup>a</sup>	0.09±0.08 <sup>b</sup>	nd	nd	nd	nd	nd	nd				
4	硬脂酸 (C18:0)	42.147	0.81±0 <sup>b</sup>	0.80±0 <sup>c</sup>	0.91±0 <sup>a</sup>	0.55±0 <sup>d</sup>	0.23±0.01 <sup>g</sup>	0.17±0 <sup>i</sup>	0.23±0 <sup>f</sup>	0.22±0 <sup>h</sup>	0.36±0 <sup>e</sup>				
5	油酸 (C18:1n9t)	43.538	nd	0.24±0.01 <sup>a</sup>	nd	nd	nd	0.09±0.01 <sup>b</sup>	nd	nd	nd				
6	油酸 (C18:1n9c)	44.200	3.95±0.02 <sup>e</sup>	4.17±0.01 <sup>b</sup>	4.58±0.02 <sup>a</sup>	2.72±0.01 <sup>d</sup>	0.45±0.01 <sup>g</sup>	0.38±0 <sup>h</sup>	0.52±0 <sup>f</sup>	0.45±0 <sup>g</sup>	0.79±0.01 <sup>e</sup>				
7	亚油酸 (C18:2n6c)	47.483	7.55±0.02 <sup>e</sup>	8.62±0.03 <sup>b</sup>	9.27±0.05 <sup>a</sup>	5.69±0.02 <sup>d</sup>	0.28±0.01 <sup>f</sup>	0.25±0.01 <sup>fg</sup>	0.25±0.01 <sup>fg</sup>	0.23±0 <sup>g</sup>	0.43±0 <sup>e</sup>				
8	花生酸 (C20:0)	57.721	0.08±0 <sup>b</sup>	0.07±0 <sup>c</sup>	0.09±0 <sup>a</sup>	nd	nd	nd	nd	nd	nd				
9	亚麻酸 (C18:3n6)	50.123	0.08±0 <sup>b</sup>	0.10±0 <sup>a</sup>	0.10±0 <sup>a</sup>	nd	nd	nd	nd	nd	nd				
10	二十碳一烯酸 (C20:1)	51.243	0.12±0 <sup>b</sup>	0.12±0 <sup>b</sup>	0.14±0.01 <sup>a</sup>	0.08±0 <sup>c</sup>	nd	nd	nd	nd	nd				
11	亚麻酸 (C18:3n3)	51.751	0.85±0 <sup>e</sup>	0.98±0.01 <sup>b</sup>	1.03±0.01 <sup>a</sup>	0.67±0 <sup>d</sup>	0.12±0.04 <sup>g</sup>	0.13±0 <sup>g</sup>	0.15±0.01 <sup>ef</sup>	0.11±0 <sup>g</sup>	0.17±0 <sup>e</sup>				
12	二十二烷酸 (C22:0)	57.721	0.08±0 <sup>b</sup>	nd	0.09±0 <sup>a</sup>	nd	nd	nd	nd	nd	nd				
13	花生四烯酸 (C20:4n6)	62.454	0.16±0.006 <sup>b</sup>	0.11±0.01 <sup>c</sup>	0.14±0.01 <sup>d</sup>	0.13±0 <sup>d</sup>	0.18±0.01 <sup>a</sup>	0.18±0 <sup>a</sup>	0.15±0.01 <sup>c</sup>	0.14±0.01 <sup>d</sup>	nd				
14	二十四烯酸 (C24:0)	69.824	0.28±0 <sup>d</sup>	0.18±0.01 <sup>i</sup>	0.27±0 <sup>e</sup>	0.23±0.01 <sup>h</sup>	0.34±0 <sup>b</sup>	0.24±0 <sup>g</sup>	0.30±0.01 <sup>c</sup>	0.25±0.01 <sup>f</sup>	0.41±0.01 <sup>a</sup>				
15	DHA (C22:6n3)	81.144	0.13±0 <sup>b</sup>	nd	0.09±0 <sup>c</sup>	nd	0.13±0 <sup>b</sup>	0.08±0 <sup>d</sup>	0.08±0.01 <sup>d</sup>	0.08±0 <sup>d</sup>	0.17±0 <sup>a</sup>				
16	饱和脂肪酸	-	3.11±0.05 <sup>b</sup>	4.59±1.31 <sup>a</sup>	3.63±0.08 <sup>b</sup>	2.16±0.01 <sup>c</sup>	0.90±0.01 <sup>d</sup>	0.70±0 <sup>d</sup>	0.86±0.01 <sup>d</sup>	0.78±0.01 <sup>d</sup>	1.26±0 <sup>d</sup>				
17	不饱和脂肪酸	-	12.9±0 <sup>e</sup>	14.4±0 <sup>b</sup>	15.38±0.09 <sup>a</sup>	9.29±0.03 <sup>d</sup>	1.23±0.05 <sup>f</sup>	1.16±0.01 <sup>g</sup>	1.21±0.01 <sup>fg</sup>	1.09±0.01 <sup>h</sup>	1.61±0.01 <sup>e</sup>				
18	总脂肪酸	-	16.02±0.09 <sup>b</sup>	19.00±1.32 <sup>a</sup>	19.01±0.01 <sup>a</sup>	11.43±0.06 <sup>c</sup>	2.13±0.05 <sup>de</sup>	1.86±0.01 <sup>e</sup>	2.08±0.01 <sup>de</sup>	1.87±0.01 <sup>e</sup>	2.87±0.01 <sup>d</sup>				

注: nd 表示未检测出。

表6 不同炸制方式对克氏原螯虾挥发性风味物质的影响

Table 6 Effects of different frying methods on flavorsubstance of *Procambarus clarkii*

挥发性物质	保留时间/min	相对含量/(ng/g)								
		DF 160	DF 170	DF 180	DF 190	AF 160	AF 170	AF 180	AF 190	CK
苯甲醛	10.25	2.44	1.92	2.00	4.17	2.93	2.23	2.31	6.68	-
苯乙醛	12.72	-	-	-	-	1.32	0.96	3.80	7.68	-
3-甲基丙醛	8.31	-	0.08	1.62	0.67	1.64	-	-	2.58	-
2-甲基丁醛	3.15	-	-	-	-	-	-	-	0.15	-
3-甲基丁醛	2.32	-	-	-	-	0.19	-	-	2.82	-
戊醛	2.94	-	-	-	-	0.14	-	0.99	7.00	-
己醛	5.74	33.95	10.55	4.53	3.85	38.70	11.21	2.27	0.78	-
庚醛	8.67	3.80	6.29	1.64	11.40	27.24	25.67	-	2.47	-
正辛醛	11.98	17.90	-	-	-	67.98	50.11	12.63	-	-
壬醛	15.14	48.86	44.78	23.77	50.52	251.44	315.73	50.78	47.44	17.97
癸醛	18.24	-	-	11.41	11.17	5.61	6.97	5.36	6.15	-
醛类总和	-	106.95	63.63	44.98	81.78	397.20	412.88	78.13	83.76	17.97
2-乙基己醇	13.073	185.76	136.61	50.56	36.12	-	-	-	1.71	2.87
醇类总和	-	185.76	136.61	50.56	36.12	0.00	0.00	0.00	1.71	2.87
苯乙酮	13.63	3.60	2.48	1.38	3.18	1.42	-	0.94	1.32	1.30
1,2-环己二酮	18.23	12.94	-	-	-	-	-	-	-	-
2,3-辛二酮	11.30	-	-	1.37	-	-	-	1.92	-	-
酮类总和	-	16.54	2.48	2.75	3.18	1.42	0.00	2.86	1.32	1.30
苯乙烯	8.460	-	0.83	-	-	3.70	-	0.40	3.84	0.57
2-苯基-1-丙烯	14.40	42.30	32.50	28.23	-	46.78	46.92	17.37	-	66.44
苯并环丁烯	8.48	-	-	-	-	-	-	-	-	0.60
双戊烯	13.21	14.87	-	-	2.05	-	-	4.22	-	-
右旋萜二烯	13.22	-	-	-	-	-	1.15	-	-	-
烯烃总和	-	57.17	33.33	28.23	2.05	50.47	48.07	21.99	3.84	67.61
2,5-二甲基吡嗪	8.92	-	-	-	2.01	-	-	-	2.85	-
2,6-二甲基吡嗪	9.09	-	-	-	0.86	-	-	-	0.26	-
3,3-二甲基吡啶	11.68	-	-	-	0.51	-	1.15	-	-	-
2,3,5-三甲基吡嗪	11.79	-	-	0.45	24.84	-	-	-	30.19	-
2-乙烷基-3,5-二甲基吡嗪	14.49	-	-	-	-	-	-	-	8.64	0.00
吡嗪总和	-	0.00	0.00	0.45	28.23	0.00	1.15	0.00	41.94	0.00
2,2,4,6,6-五甲基庚烷	12.39	13.16	33.03	4.32	4.60	-	-	-	-	-
癸烷	12.61	13.97	31.58	5.22	4.50	0.55	0.00	0.71	-	-
3,6-二甲基癸烷	15.88	-	9.44	9.42	3.17	-	-	-	-	-
十一烷	15.74	4.17	4.87	-	-	-	-	-	-	-
十二烷	18.7	5.70	-	24.81	25.48	1.75	1.59	1.56	-	-
十三烷	21.47	-	-	2.32	2.57	-	-	-	-	-
十四烷	24.09	7.27	9.44	7.32	8.35	-	-	-	-	-
正十五烷	26.75	1.06	-	2.21	1.99	-	-	-	-	-
2,6-二叔丁基对甲酚	26.48	3.83	3.00	4.76	4.86	-	-	-	-	388.47
烷烃总和	-	49.16	91.36	60.37	55.52	2.30	1.59	2.27	0.00	388.47

注: -表示未检测出。

油炸处理组中醇类和酮含量随温度上升而下降,且醇类物质大部分通过油炸方式产生,而空气炸处理组基本无醇类风味物质存在,醇类可能是由脂肪酸的二级氢过氧化物在加热过程中分解后形成的,随着温度上升可能又与其他物质发生化合反应导致含量降低,大部分醇类化合物含有令人愉快的香气,特别是不饱和醇类物质阈值较低,对风味贡献比较大<sup>[28]</sup>,分析油炸小龙虾的特殊风味可能是醇类而贡献的,与空气炸小龙虾产生风味的差异性;而酮类风味物质具有清香感觉,但它的阈值较高,对气味的贡献比较小;吡嗪类化合物主要在热加工的过程中产生,贯穿在美拉德反应中,吡嗪类化合物主要给食物带来烧烤和坚果的香气,这些杂环类化合物虽然含量少,但阈值低,对虾肉香味的生成是具有显著贡献的,一般热加工食品中的吡嗪类物质往往是通过氨基酸 Strecker 反应生成的<sup>[29]</sup>,而美拉德反应又与温度存在很强的关联,所以吡嗪风味物质的含量随着温度的升高而增加,油炸和空气炸 190 °C 处理的虾肉烧烤香气较其他处理组更明显。油炸虾肉风味主要是醛、醇类物质结合的贡献,而空气炸虾肉风味主要是醛类和烯烃类物质的贡献,因此不同炸制方式和温度对虾肉内挥发性风味物质含量变化的影响较大。

### 3 结论

本文探讨了常压油炸和空气炸小龙虾在不同温度下的理化性质变化和挥发性风味物质的变化,研究发现炸制后小龙虾较新鲜组更易发生脂肪氧化,且常压油炸相比空气炸也更易发生脂肪氧化,在同等温度下,常压油炸组的过氧化值、多烯指数、酸值均大于空气炸组,且随温度升高而增大,表明高温会促进氧化;研究发现新鲜虾肉内含有大量不饱和脂肪酸,如油酸、亚油酸、DHA 等,通过常压油炸会增大不饱和脂肪酸的含量,而空气炸会降低不饱和脂肪酸含量,因此常压油炸虾仁较空气炸虾仁更易发生脂肪氧化;炸制后虾肉内产生大量风味物质,油炸虾仁的主要风味贡献是醛类和醇类物质,而空气炸虾仁的主要风味贡献是醛类和烯烃类,随着温度上升吡嗪类物质含量增大,在 190 °C 最为明显,且发现茴香胺值变化趋势与空气炸小龙虾内醛类物质含量变化趋势一致,以壬醛含量变化趋势最为明显;相关性分析表明部分挥发性风味物质与脂肪酸含量具有相关性,发现 2-苯基-1-丙烯与 DHA 存在相关性,癸烷与油酸、亚油酸、亚麻酸也存在相关性。从消费者健康角度选择空气炸方式更有益健康,本研究为进一步明确不同热加工方式对小龙虾品质的影响提供了理论依据和参考。

### 参考文献

- [1] 余磊.小龙虾的生物学特性及其主要养殖模式[J].湖北农业科学,2018,57(17):75-78.
- [2] Nedzarek A, Czerniejewski P, Torz A. Macroelements and trace elements in invasive signal crayfish (*Pacifastacus leniusculus*) from the Wieprza River (Southern Baltic): human health implications [J]. Biological Trace Element Research, 2020, 197(1): 304-315.
- [3] Gillespie J, Nyaupane N, Boucher R. Changes in crawfish production costs and current production practices used [J]. Aquaculture Economics & Management, 2012, 16(3): 250-265.
- [4] Cao X, Tian Y, Wang Z, et al. Protein denaturation kinetic processes of a simple and a complex reaction mechanism analyzed by an iso-conversional method [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2014, 117(3): 1489-1495.
- [5] 于晓慧.即食小龙虾保鲜剂的复配及其抑菌机理的初步研究[D].合肥:合肥工业大学,2017.
- [6] 汪兰,何建军,贾喜午,等.超高压增压次数对小龙虾脱壳及虾仁品质影响的研究[J].食品工业,2017,38(5):49-52.
- [7] He D B, Xu F, Hua T C, et al. Oil absorption mechanism of fried food during cooling process [J]. Journal of Food Process Engineering, 2013, 36(4): 412-417.
- [8] 杨铭铎,邓云,石长波,等.油炸过程与油炸食品品质的动态关系研究[J].中国粮油学报,2006,5:93-97.
- [9] Xina Yu, Linqiu Li, Jing Xue, et al. Effect of air-frying conditions on the quality attributes and lipidomic characteristics of surimi during processing [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2020, 60(C): 102305.
- [10] 周高慧,马霖,吉宏武,等.空气油炸条件对凡纳滨对虾品质影响[J].广东海洋大学学报,2021,41(6):82-90.
- [11] 陈东清,李新,汪兰,等.即食小龙虾加工与杀菌工艺研究[J].辐射研究与辐射工艺学报, 2020,38(5):46-53.
- [12] 万俊,艾民珉,周佳,等.皮蛋加工过程中油脂氧化及抗氧化特性研究[J].食品工业,2018,39(9):126-131.
- [13] 周明珠,熊光权,乔宇,等.克氏原螯虾不同可食部位风味成分分析[J].肉类研究,2020,34(9):52-58.
- [14] 熊颖,钟海雁,周波.低共熔溶剂杏仁种皮提取物对油茶籽油氧化稳定性的影响[J].中国粮油学报,2021,36(5):102-107.
- [15] 卿云光,罗在粉.油脂的提取方法对酸价和过氧化值测定的影响[J].广州化工,2015,41(5):147-148.
- [16] Monika S, Aneta J, Eva H, et al. Relationship between the composition of fats and oils and their oxidative stability at

- different temperatures, determined using the oxipres apparatus [J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2017, 119(9): 1600454.
- [17] 朱向荣,李高阳,江靖,等.煎炸油品质快速检测新方法研究进展[J].*中国食品学报*,2019,19(6):293-301.
- [18] 解久莹,张翔宇,吴永强,等.煎炸油使用安全及有害成分控制研究进展[J].*食品工业科技*,2019,40(15):333-338,344.
- [19] 黄玉坤,田红媚,陈芳,等.三种香型食用牛油的挥发性风味物质分析及鉴定[J].*食品与发酵工业*,2019,45(3):196-205.
- [20] 王钰,倪继龙,李敏杰,等.鲈鱼低温冻藏过程中脂肪氧化特性[J].*肉类研究*,2021,35(6):63-68.
- [21] 周莉,丛宝磊,侯双,等.4种虾脂肪的提取及其脂肪酸组成的气相色谱分析[J].*食品科学*,2015,36(20):152-156.
- [22] 龙斌,王锡昌,张凤枰,等.川鲶挥发性风味成分和脂肪酸分析[J].*食品科学*,2013,34(22):250-256.
- [23] Abdel Naeem Heba H S, Sallam Khalid Ibrahim, Zaki Hamdy M B A. Effect of different cooking methods of rabbit meat on topographical changes, physicochemical characteristics, fatty acids profile, microbial quality and sensory attributes [J]. *Meat Science*, 2021, 181(2): 108612.
- [24] 于彩云,王述彬,刘金兵,等.辣椒籽脂肪的快速提取与脂肪酸分析[J].*食品科学*,2012,33(12):259-263.
- [25] CAI Qiuxing, WU Yanyan, LI Laihao, et al. Lipid oxidation and fatty acid composition in salt-dried yellow croaker (*Pseudosciaena polyactis*) during processing [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2017, 16(5): 855-862.
- [26] Frankel E N. Volatile lipid oxidation products [J]. *Progress in Lipid Research*, 1983, 22(1): 1-33.
- [27] Mottram D S. Flavour formation in meat and meat products: a review [J]. *Food Chemistry*, 1998, 62(4): 415-424.
- [28] 赵亮,马凌云.GC-MS 法分析南湾鱮鱼鱼肉挥发性成分的组成[J].*食品与机械*,2011,27(6):80-82.
- [29] 金燕.蟹肉风味的研究[D].杭州:浙江工商大学,2011.