

## 克氏原螯虾尾油炸过程中品质变化的研究

董鑫磊, 易 靓, 董诗瑜, 马舒恬, 刘小玲

**Quality Change of Crayfish (*Procambarus clarkii*) Tail during Frying**

DONG Xinlei, YI Liang, DONG Shiyu, MA Shutian, and LIU Xiaoling

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021070134>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于低场核磁共振分析与成像探究贮藏过程中板栗水分迁移对其质构变化的影响

Based on the Analysis and Imaging of Low Field Nuclear Magnetic Resonance, Explore the Influence of Chestnut Moisture Migration to the Change of Its Texture in the Storage Process

食品工业科技. 2020, 41(24): 44–49

#### 基于低场核磁共振技术检测冷鲜滩羊肉的嫩度

Detection of tan–sheep meat tenderness based on low–field nuclear magnetic resonance

食品工业科技. 2017(02): 69–74

#### 基于低场核磁共振技术监测谷子萌发过程中内部水分变化

Change in Internal Water of Millet During Soaking and Germination Based on LF–NMR Technology

食品工业科技. 2020, 41(14): 65–68,74

#### 即食小龙虾的微波杀菌工艺研究及品质评价

Study on Microwave Sterilization Process and Quality Evaluation of Instant Crayfish (*Procambarus clarkii*)

食品工业科技. 2021, 42(21): 221–230

#### 超微化雷竹笋膳食纤维对火腿肠品质的影响

Effects of superfine dietary fiber of bamboo shoot on the quality of ham sausage

食品工业科技. 2018, 39(6): 59–64,70

#### 卤煮时间对酱卤鸡腿品质的影响

Effect of cooking time on quality of sauce stewed chicken leg

食品工业科技. 2017(21): 26–30



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

董鑫磊, 易靓, 董诗瑜, 等. 克氏原螯虾尾油炸过程中品质变化的研究 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(7): 80–86. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021070134

DONG Xinlei, YI Liang, DONG Shiyu, et al. Quality Change of Crayfish (*Procambarus clarkii*) Tail during Frying [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(7): 80–86. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021070134

· 研究与探讨 ·

# 克氏原螯虾尾油炸过程中品质变化的研究

董鑫磊, 易 靓, 董诗瑜, 马舒恬, 刘小玲\*  
(广西大学轻工与食品工程学院, 广西南宁 530004)

**摘要:** 本研究采用感官评价、质构仪、低场核磁共振 (LF-NMR) 结合扫描电镜等方法, 研究了克氏原螯虾尾油炸过程中的水分、感官品质、色泽、质构、微观结构等的变化, 并分析了弛豫时间与测定指标的相关性。结果表明: 随着油炸温度的提高和油炸时间的延长, 水分含量逐渐下降。LF-NMR 成像反映水分脱除从外向内逐渐递进, 弛豫时间  $T_{22}$  峰面积及相对比例下降, 显示油炸主要脱除的水分为不易流动水。随着炸制虾尾水分的降低, 色泽亮度 ( $L^*$  值) 和红值 ( $a^*$  值) 下降, 黄值 ( $b^*$  值) 上升, 虾肉硬度、弹性和咀嚼性逐渐增大。扫描电镜图像显示肌肉纤维收缩且间隙变致密。当水分含量为 60.5% 时, 虾尾喜好度、咀嚼性等各指标处于较佳值。此时, 硬度为 24.55~25.64 N, 弹性为 3.52~3.57 mm, 内聚性为 0.7 Ratio, 咀嚼性为 54.6~56.5 mJ。相关性分析显示,  $T_{22}$  与硬度、弹性、内聚性和咀嚼性呈显著负相关 ( $P<0.05$ )。可利用低场核磁共振 (LF-NMR) 成像及弛豫时间  $T_{22}$  峰面积比来预测评价炸制小龙虾尾的质地品质, 为小龙虾尾的油炸加工过程提供一定的理论指导。

**关键词:** 小龙虾尾, 油炸, 质构, 低场核磁共振, 相关性

中图分类号: TS254.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)07-0080-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021070134

本文网刊: [http://kns.cnki.net](#)



## Quality Change of Crayfish (*Procambarus clarkii*) Tail during Frying

DONG Xinlei, YI Liang, DONG Shiyu, MA Shutian, LIU Xiaoling\*

(College of Light Industry and Food Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** Sensory evaluation, texture analyzer, low field-nuclear magnetic resonance (LF-NMR) and scanning electron microscope were used in this study for analyzing the changes of moisture, sensory quality, color, texture and microstructure of crayfish tail during frying, and the correlation between relaxation time and related indexes was analyzed. The results showed that: With the increasing of frying temperature and frying time, the moisture content decreased. LF-NMR imaging showed that the water was removed gradually from the outside to the inside. The peak area and relative proportion of relaxation time  $T_{22}$  decreased, which showed that the immobilized water was removed mainly during frying. With the decrease of water content of fried crayfish tail, the brightness of color ( $L^*$  value) and the red value ( $a^*$  value) decreased, and yellow value ( $b^*$  value) rises, at the same time the hardness, elasticity and chewiness of crayfish meat increased gradually. Scanning electron microscope images showed that muscle fibers contracted and the gap became dense. The happiness and chewiness indexes of crayfish tail were best when the water content was 60.5%. At this point, the hardness was 24.55~25.64 N, the elasticity was 3.52~3.57 mm, the cohesion was 0.7 Ratio, and the chewiness was 54.6~56.5 mJ. Correlation analysis showed that,  $T_{22}$  was negatively correlated with hardness, elasticity, cohesiveness and chewiness ( $P<0.05$ ). The texture quality of the fried crayfish tail could be predicted by the LF-NMR imaging and the relaxation time  $T_{22}$  peak area ratio. It would provide some theoretical guidance for the frying process of crayfish tail.

**Key words:** *Procambarus clarkii* tail; deep frying; texture; low field-nuclear magnetic resonance(LF-NMR); relevance

小龙虾, 学名克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*), 属甲壳纲螯虾科。小龙虾的蛋白含量较高, 脂肪和胆

固醇含量极低, 虾肉中的锌、碘、硒等微量元素含量较高, 是一种优质水产品<sup>[1]</sup>。“十三五”以来, 小龙虾

收稿日期: 2021-07-13

基金项目: 广西科技重大专项 (桂科 AA20302019-7)。

作者简介: 董鑫磊 (1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 水产品风味化学, E-mail: 754716534@qq.com。

\* 通信作者: 刘小玲 (1972-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 水产品的开发与利用, E-mail: 1106133912@qq.com。

产业呈现爆发式增长, 消费市场持续升温, 已成为当前我国最火爆的餐饮和网红食品之一。据测算, 2019 年中国小龙虾产业总产值达 4110 亿元, 同比增长 19.28%(未包括港澳台统计)<sup>[2]</sup>。油炸是小龙虾方便制品加工中重要的一环, 油炸可以赋予虾肉特殊的风味和色泽, 同时调整产品的质地和口感。小龙虾油炸过程中质构品质与其微观结构、水分含量密切相关, 水分含量过低会使肌原纤维蛋白发生部分变性、缩短和聚集, 虾肉变硬, 水分含量过高则易发生有害微生物感染<sup>[3-4]</sup>。建立质构品质与水分之间的变化规律, 有利于通过水分监测和控制来提高产品质构品质。

低场核磁共振(LF-NMR)是一种快速、高效的无损检测技术, 能针对性地探测复杂体系中小分子的氢质子信号, 并给出相关小分子含量、运动性能、物理化学环境等相关信息, 现已被广泛应用于医学、化工、材料等领域<sup>[5]</sup>。例如, LF-NMR 已被用于分析薯条中的水分和油脂的含量, 以及评价食用油的品质<sup>[6]</sup>。ZHANG 等<sup>[7]</sup>利用 LF-NMR 和核磁共振成像技术, 研究鲭鱼油炸过程中体内水和油分布的变化。发现随着油炸温度的升高, 组织结构遭到破坏, 蒸煮损失率、含油率、硬度和咀嚼性增加。此外, LF-NMR 还可以检测海参在冻融循环中的特性<sup>[8]</sup>。

克氏原螯虾养殖具有周期性, 因此, 有必要通过深加工调节克氏原螯虾产品的市场供应。预调理小龙虾菜肴或休闲食品是其深加工的一种重要形式, 为探讨虾尾油炸加工过程中的水分迁移与品质变化的关系, 本研究采用感官评价、质构仪、低场核磁共振(LF-NMR)结合扫描电镜等方法, 分析了克氏原螯虾尾油炸过程中的水分、感官品质、色泽、质构、微观结构等的变化, 并分析弛豫时间与相关指标的相关性, 从而为借助低场核磁的弛豫时间的信号表征产品质构等品质特征提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

冷冻克氏原螯虾尾(贮藏于-18℃冰箱, 使用时按照需求拿出) 潜江虾运食品有限公司; 金龙鱼大豆油 南宁市沃尔玛超市; 石油醚、甲醛、无水乙醇均为分析纯试剂。

XJ-6K116 电炸锅 爱思杰电器(深圳)有限公司; SQP 型电子天平 德国 Sartorius 公司; GZX-GF101-3-BS 电热恒温鼓风干燥箱 上海跃进医疗器械有限公司; FD-1D-50 真空冷冻干燥机 北京博医康实验仪器有限公司; MR20-025V-1 核磁共振成像分析仪 上海纽迈电子科技有限公司; F16502 扫描电镜 荷兰 PHENOM 公司; TMS-Pro FTC 质构仪 北京盈盛恒泰科技有限责任公司; CM-3600d 分光测色计 日本柯尼卡·美能达公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 克氏原螯虾尾炸制处理 冷冻克氏原螯虾尾

根据实验需要取出, 于流动水中解冻并清洗干净, 沥干。将 800 g 大豆油倒入电炸锅中, 分别设置 150、170 和 190 ℃ 三种油炸温度。将 120 g 克氏原螯虾尾倒入锅中, 油炸 20、40、60、80、100、120、140、160 和 180 s, 取出后控油。虾尾脱壳后, 分别测定其水分含量、低场核磁共振 T<sub>2</sub> 弛豫时间及核磁成像、质构、色差以及扫描电镜观察虾肉微观结构, 以未油炸的虾尾作为对照。

**1.2.2 水分含量测定** 参照国家标准 GB 50093-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中的方法测定。

**1.2.3 低场核磁共振 T<sub>2</sub> 及核磁成像测定** 将油炸后的虾肉切成方块状样品(约 1.0 g 精确至 0.001 g), 用聚乙烯保鲜膜包住虾肉块, 利用 LF-NMR 进行 T<sub>2</sub> 的测定, 再进行成像分析。

低场核磁共振分析的条件: 采用磁共振成像分析仪, 磁体温度 32 ℃, 射频线圈直径为 1~25 mm, 将标准溶液放入磁体箱射频线圈的中心位置, 利用自由感应衰减序列(FID)序列确定低场核磁共振的中心频率为 22.00 MHz, 自动寻找 90° 和 180° 脉冲宽度。将 CPMG 序列参数设置: 重复采样等待时间 Tw 为 2500 ms, 回波个数 NECH 为 2000, 回波间隔 TE 为 0.6 ms, 重复扫描次数 NS 为 8。样品放入直径 25 mm 的核磁共振专用试管, 置于磁场中心位置的射频线圈中心进行测定, 采集后进行反演。

利用 NMR 成像软件进行成像, 成像参数: 利用多层自旋回波(SE)序列对虾肉进行磁共振成像, 选择矢状面、冠状面和横断面作为定位像显示区, 参数设置: 层数 3, 视野 80 mm×80 mm, 层厚 3.0 mm, 层间隙 1.3 mm, 扫描次数 4 次, 累加次数 16, 回波时间 18.125 ms, 重复等待时间 300 ms, 图像均以 Dicom 格式保存并进行处理。

**1.2.4 感官评价** 将不同处理组的油炸克氏原螯虾尾置于白色透明自封袋中, 随机编号样品并以随机的顺序分发给感官评价员。由 15 名经过培训的感官鉴评员, 对研究的各样品进行评价打分。虾壳外形、虾肉颜色、硬度、弹性和咀嚼性作为感官鉴评的评价指标, 分值设置 0~10 分, 根据评价指标进行打分, 感官评定标准如表 1。

**1.2.5 色差测定** 使用色差仪对虾肉中心部位测量 L\*、a\*、b\* 值。

**1.2.6 质构测定** 将油炸后虾肉切成 8 mm×8 mm×6 mm 方块, 选用直径 75 mm 圆盘探头和 100 N 力量感应元, 安装 TMS-Pro 质构仪上, 打开电脑 TL-Pro 软件, 调用 TPA 程序。参数设置: 起始力 0.5 N, 形变量 50%, 检测速度 60 mm/min, 两次测定时间间隔为 5 s, 测试完成后利用 TL-Pro 软件自动计算分析实验结果。

**1.2.7 扫描电镜观察虾肉组织结构** 参照 MELLEMA 等<sup>[9]</sup>的方法并进行稍加修改。将虾肉切成 5 mm×5 mm×

表 1 油炸克氏原螯虾尾感官评定标准  
Table 1 Sensory evaluation standard of fried crayfish tail

项目与权重	评分标准及分数
虾壳外形(0.10)	严重收缩/干瘪(0~4), 虾壳松散(5~6), 虾壳较完整(7~8), 虾壳完整(9~10)
虾肉颜色(0.15)	略微发白/变黑(0~4), 略微发暗(5~6), 浅红色(7~8), 深红色(9~10)
硬度(0.25)	肉质差(0~4), 肉质软(5~6), 肉质一般(7~8), 肉质好(9~10)
弹性(0.25)	无弹性/弹性差(0~4), 弹性软(5~6), 弹性一般(7~8), 弹性好(9~10)
咀嚼性(0.25)	无嚼劲(0~4), 咀嚼差(5~6), 咀嚼一般(7~8), 咀嚼好(9~10)
喜好度	很差(0~4), 差(5~6), 一般(7~8), 很好(9~10)

1 mm 的小块置于烧杯内, 加入石油醚浸泡 3 h, 用磷酸缓冲液 (pH7.4) 清洗 5 min, 重复 3 次; 再用 2.5% 的戊二醛溶液在 4 ℃ 条件下固定 5 h; 再次用磷酸缓冲液 (pH7.4) 清洗 5 min, 重复 3 次; 然后依次用体积分数为 50%、60%、70%、80%、90% 和 100% 的乙醇溶液进行脱水, 脱水后在 -80 ℃ 条件下预冻 12 h, 然后置于冷冻干燥机中干燥 24 h; 采用离子溅射对样品表面喷金。扫描电镜放大 500 倍观察喷金处理的干燥样品并拍照。

### 1.3 数据处理

采用 Excel 2010 软件进行数据分析。用 SPSS 20.0 版软件进行邓肯氏单因素显著性差异分析, 并用 Origin 2021 软件作图, Correlation Plot 插件进行皮尔逊相关系数分析。每组试验均进行 3 次平行, 用平均数±标准差 (Mean±SD) 表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 克氏原螯虾尾油炸过程水分含量的变化

克氏原螯虾尾油炸过程的水分含量变化如图 1 所示。可见, 随着油炸时间的延长, 克氏原螯虾尾水分含量逐渐下降, 从炸制前的 78.24% 降低至 190 ℃ 180 s 时的 57.13%。而随着油炸温度的提高, 水分含量下降速率增大, 水分脱除加快。190 ℃ 加热 20 s, 水分含量降低近 10%, 继续加热则水分脱除的速率减慢。与 PAN 等<sup>[10]</sup>的研究结果相类似。这可能由于食用油温度越高传热效果越好, 虾尾在热油中其表面水分不断蒸发。表面水分与虾尾中心处水分出现水分含量差异(即传质推动力是水分梯度), 所以虾尾高水分区水分子向低水分区扩散或转移。另一方面

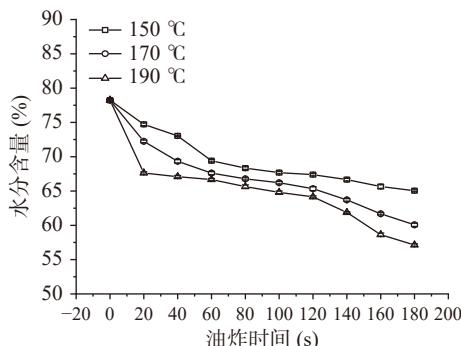


图 1 克氏原螯虾尾油炸过程水分含量的变化

Fig.1 Changes of water content of crayfish tail with frying conditions

原因主要是温度高导致水分子运动加快, 并导致蛋白变性, 肌肉保水性下降<sup>[11]</sup>。150 ℃ 油温油炸 180 s, 虾肉的水分含量与 190 ℃ 加热 20 s 相当。可见, 为提高处理效率, 选择 190 ℃ 加热有助于缩短热处理时间。

### 2.2 克氏原螯虾尾油炸过程水分变化的 LF-NMR 分析

2.2.1 油炸克氏原螯虾尾的  $T_2$  弛豫图谱 根据食品中的水分子与其他组分结合的紧密程度, 将食品中的水区分为自由水、不易流动水和结合水三种结合状态, 不同结合状态可通过样品的 LF-NMR 的横向弛豫图谱( $T_2$ )三个弛豫时间的相对峰面积大小加以反映。其中的弛豫时间  $T_{21}$  表示与蛋白质紧密结合的水, 其通过化学反应严格按照比例关系牢固地同纤维间体结合, 只有在强烈的热处理或特定化学作用下才可除去;  $T_{22}$  表示不易流动的吸附结合水, 在物料外表面及肌原纤维内部通过分子吸附作用结合在一起;  $T_{23}$  表示内部自由水分, 它与油炸食品内部非水组分的结合力几乎为零, 主要依靠表面附着和毛细管作用等吸附力而存在于产品中<sup>[12-15]</sup>。

图 2 为 190 ℃ 不同油炸时间的克氏原螯虾尾的横向弛豫图谱( $T_2$ )。可以看出, 与未油炸虾尾相比, 油炸后  $T_{21}$  和  $T_{23}$  信号强度随加热时间的延长逐渐上升, 可能是因为结合水存在于细胞内部, 由分子间作用力将其束缚, 油炸使蛋白质结合水的含量增加。 $T_{22}$  横向弛豫时间变短和弛豫峰的峰高下降。SUN 等<sup>[16]</sup> 对鲅鱼进行油炸、蒸煮、烘烤和水煮热加工, 研究发现油炸加工使鱼肉中水分损失最大。不易

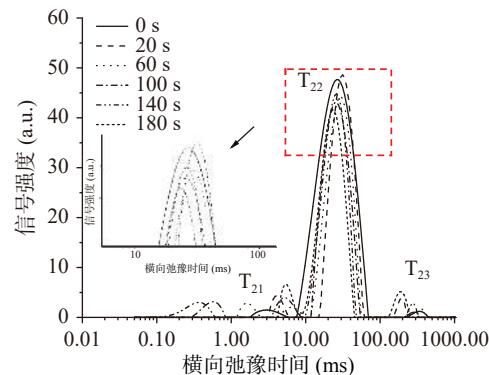


图 2 油炸克氏原螯虾尾的横向弛豫图谱随油炸时间变化(190 ℃)

Fig.2 Changes of transverse relaxation spectra of fried crayfish tail with frying time (190 °C)

流动水峰面积下降, 自由水峰面积在所有加工方式中呈现增加的趋势。

将 LF-NMR 的  $T_{21}$ 、 $T_{22}$ 、 $T_{23}$  三个弛豫峰面积比转化为相对比例, 得到三种结合状态水分的相对比例, 结果如图 3。可见, 随着加热时间的延长, 不易流动水在整个食品体系中的水分分布比例下降, 而由于结合水相对稳定, 导致其相对比例提高, 自由水的相对比例也增加。虾肉内部水分子与蛋白质等大分子之间结合的氢键遭到破坏, 导致肌肉纤维外部空间变大, 不易流动水减少, 自由水增加<sup>[17]</sup>。由此说明油炸过程中水分的脱除主要为不易流动水。

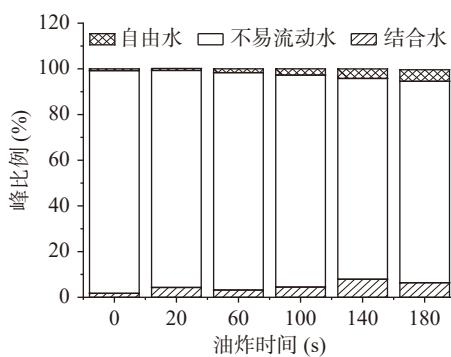


图 3 油炸克氏原螯虾尾过程中三种状态水比例变化(190 °C)

Fig.3 Changes of water proportion in three states during frying crayfish tail (190 °C)

2.2.2 油炸克氏原螯虾尾的水分变化的 MRI 成像  
采用 MRI 成像技术, 可以观察到样品水分分布的变化, 如图 4 所示。在伪彩色图像中, 红色表示高氢质子密度, 蓝色表示低氢质子密度<sup>[18]</sup>。由图 4 可见, 与未油炸虾肉相比, 随着油炸时间的延长, 先是虾肉表面的亮度下降, 随后内部亮度逐渐下降, 说明虾肉的水分先从表面向环境迁移, 造成表面水分下降。随着表面水分的降低, 形成水分梯度, 在水分梯度作用下, 内部水分向表面不断扩散, 造成内部水分的降低。在水分梯度和温度梯度作用下, 最终内外水分降低并达到平衡<sup>[19-20]</sup>。

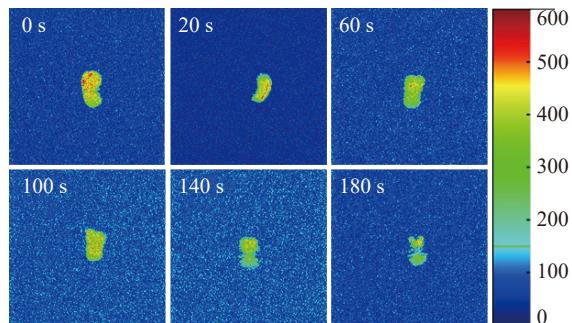


图 4 油炸克氏原螯虾尾的伪彩图随油炸时间变化(190 °C)

Fig.4 Change of pseudo color pattern of fried crayfish tail with frying time (190 °C)

## 2.3 油炸克氏原螯虾尾的感官评价

将 190 °C 炸制不同时间的虾肉进行感官评价。

其中感官喜好度评分与其油炸时间与水分含量的关系如表 2 所示。可见, 190 °C 炸制 155 s 时, 水分含量达到 60.5%, 此时的虾肉的感官喜好度得分最高 (7.3±1.69 分)。

表 2 油炸不同时间的虾尾水分含量及感官评价喜好度得分 (190 °C)

Table 2 Moisture content and sensory evaluation preference score of fried crayfish tail at different time (190 °C)

油炸时间(s)	60	130	155	180	200
水分含量(%)	66.7±0.19 <sup>a</sup>	63.9±0.16 <sup>b</sup>	60.5±0.26 <sup>c</sup>	57.1±0.18 <sup>d</sup>	54.3±0.15 <sup>e</sup>
喜好度得分(分)	5.8±1.09	6.88±1.84	7.3±1.69	6.67±2.16	6.22±2.48

注: 同行不同字母表示各组间差异显著 ( $P<0.05$ )。

其他感官指标与水分含量的关系如图 5 所示。油炸时间延长, 虾壳形状得分下降, 其外形收缩明显。虾肉颜色则在水分含量为 63.9%~57.1% 之间表现较佳, 油炸时间过长或过短, 色泽变暗或变白。虾肉水分含量在 66.7% 时, 虾肉质地较软, 得分较低外, 其余水分含量样品硬度得分差异不大。当 190 °C 油炸 155 s, 水分含量在 60.5% 时, 虾壳完整, 颜色浅红色, 虾肉硬度、弹性和咀嚼性得分较高。水分含量降低 54.3% 时, 虾肉颜色变焦变暗, 外形严重收缩并变得酥脆、坚硬, 失去虾肉特有的肉质感。瞿桂香等<sup>[21]</sup>研究发现油炸温度 170 °C, 油炸时间 2.5 min 时, 即食椒盐小龙虾感官评分较高。水分含量与食品质地、感官和消费者的接受度这些参数密切相关, 是油炸食品重要的质量参数。

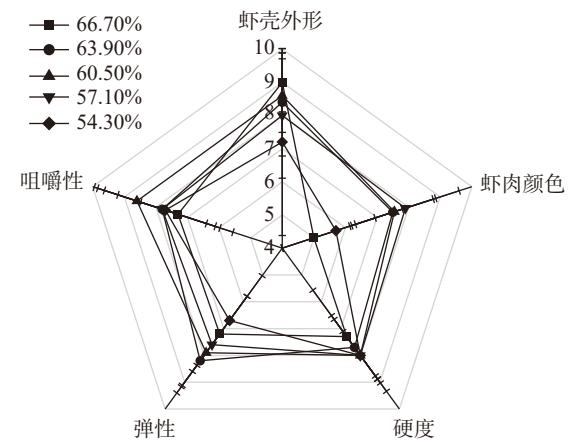


图 5 油炸至不同水分含量的克氏原螯虾尾的感官评价

Fig.5 Sensory evaluation of crayfish tail fried to different moisture content

## 2.4 油炸克氏原螯虾尾色泽变化

不同油炸条件下虾肉的颜色,  $L^*$  值、 $b^*$  值和  $a^*$  值的变化如图 6 所示。随着炸制时间延长, 颜色加深 (图 6A)。油炸过程  $L^*$  值 (图 6B) 变化是先上升后下降,  $a^*$  值 (图 6C) 下降,  $b^*$  值 (图 6D) 上升。该结果与杨海琦等<sup>[22]</sup>研究油炸工艺对即食小龙虾品质的影响, 与  $L^*$  值、 $a^*$  值均呈先上升后下降的趋势, 而  $b^*$  值先明显上升后趋于稳定的结果相类似。造成炸制过程的色泽变化, 可能与其炸制过程蛋白和虾青素热变

性有关,也与虾肉水分降低,发生美拉德反应有关。THIANSILAKUL 等<sup>[23]</sup>研究发现,60 ℃以上的热处理会使东方鮰肌红蛋白发生变性。色泽参数的变化反映了油炸过程中虾肉颜色的加深,与其他研究人员的结果一致<sup>[24-25]</sup>。

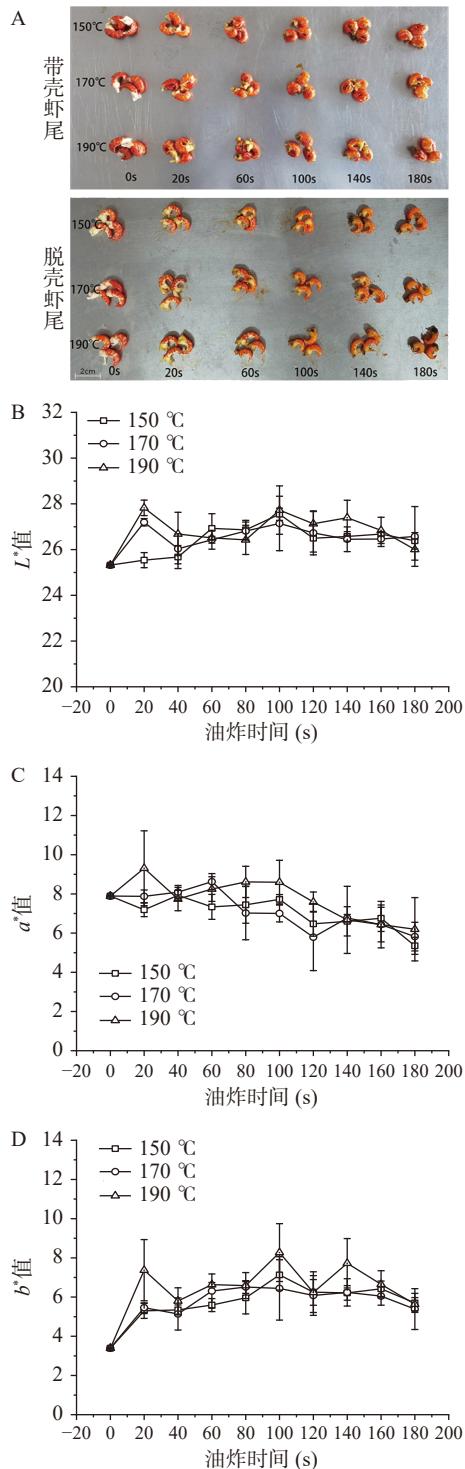


图 6 克氏原螯虾尾的色泽随油炸时间的变化

Fig.6 Changes of color of crayfish tail with frying time  
注: A 为克氏原螯虾尾色泽变化图; B 为  $L^*$  值的变化; C 为  $a^*$  值的变化; D 为  $b^*$  值的变化。

## 2.5 油炸克氏原螯虾尾的质构变化

炸制虾尾的质地除了感官评价外,还可通过质构仪的参数进行量化。油炸虾尾的质构变化如图 7

所示。硬度和弹性表现为人体对食品感到柔软或坚硬,并且使食品达到一定变形时所需要的力,即食品保持初始形状的内部结合力<sup>[26]</sup>。咀嚼性是一项综合质地分析参数,由硬度与胶粘性共同决定,而胶粘性由硬度和内聚性决定,其中硬度影响较大<sup>[27]</sup>。由图 7 可知,与未炸制的虾尾相比,炸制后,虾肉的硬度

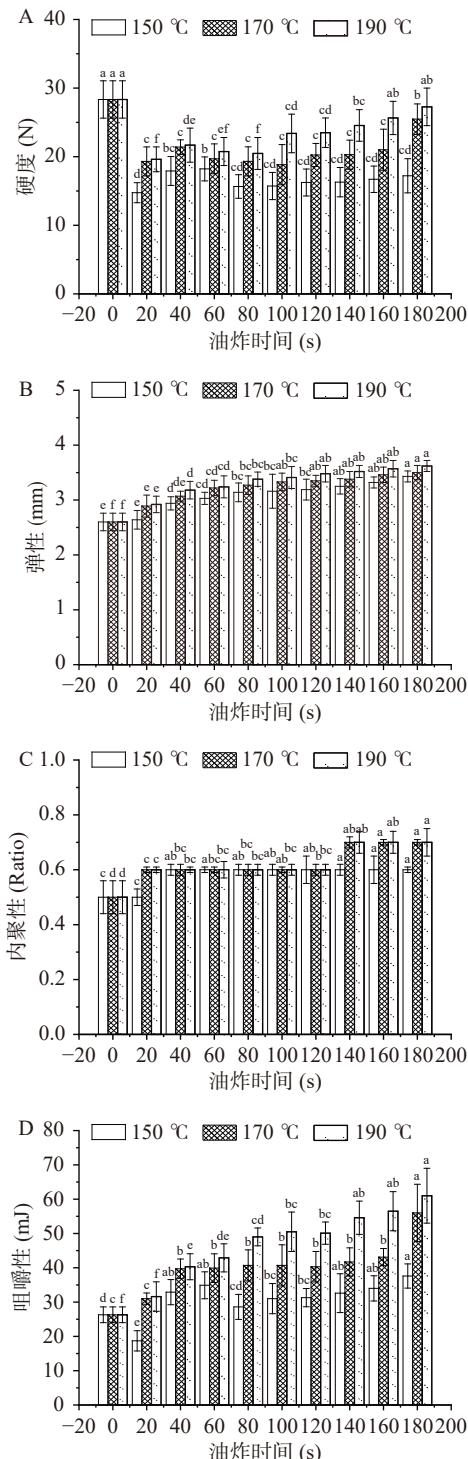


图 7 克氏原螯虾尾油炸过程中硬度、弹性、内聚性和咀嚼性的变化

Fig.7 Changes of hardness, springiness, cohesiveness and chewiness of crayfish tail with frying

注: A 为虾尾硬度的变化; B 为虾尾弹性的变化; C 为虾尾内聚性的变化; D 为虾尾咀嚼性的变化; 不同字母表示同一温度下不同油炸时间之间差异显著( $P<0.05$ )。

先下降, 后缓慢回升(图 7A); 弹性随油炸时间逐渐提高直至相对稳定(图 7B); 内聚性随炸制时间延长呈现梯度提高(图 7C); 咀嚼性则随油炸时间逐渐提高(图 7D)。150~190 °C 油炸, 温度越高, TPA 的四个质构指标的变化越显著, 同等炸制时间下, 190 °C 油炸的硬度、弹性和咀嚼性均显著高于 170 °C 和 150 °C 油炸样品( $P<0.05$ )。三种炸制温度对内聚性的影响不大, 三者基本保持一致, 在油炸后期有了一些差别, 170 °C 和 190 °C 油炸样品高于 150 °C 样品。加热过程中虾肉的肌原纤维缩短, 导致肌肉收缩<sup>[28]</sup>。水分损失虾肉质皱缩、紧致, 因此硬度和咀嚼度增大。由于 190 °C 油炸 155 s 水分含量(60.5%)时, 感官评分较高。此时, 虾尾油炸 140~160 s 的硬度为 24.55~25.64 N, 弹性为 3.52~3.57 mm, 内聚性为 0.7 Ratio, 咀嚼性为 54.6~56.5 mJ。

## 2.6 油炸克氏原螯虾尾的微观结构变化

虾尾肌肉主要由肌原纤维组成<sup>[29]</sup>。油炸小龙虾尾肌肉肌纤维的扫描电镜图如图 8 所示。与未炸制样品相比, 190 °C 油炸 20~60 s 时, 肌纤维致密; 随着炸制时间延长至 100 s 起, 肌纤维间隙变大, 纤维变粗, 且出现断裂。结合油炸过程的水分变化及质构变化, 油炸至 155 s 时, 虾尾的质地口感评价较高, 且 TPA 模式分析中, 硬度、弹性和咀嚼性、内聚性均呈现较大值。此时, 虾尾肌纤维的微观结构呈现纤维较粗, 纤维间隙较大的特征, 这可能与水分脱除后的细胞结构压缩改变有关, 从而也导致虾尾质地和感官的变化。研究还发现食物油炸过程中内部水分会蒸发产生蒸汽, 减少油的进入。当组织结构空隙较多时, 会导致吸油现象发生<sup>[30]</sup>。

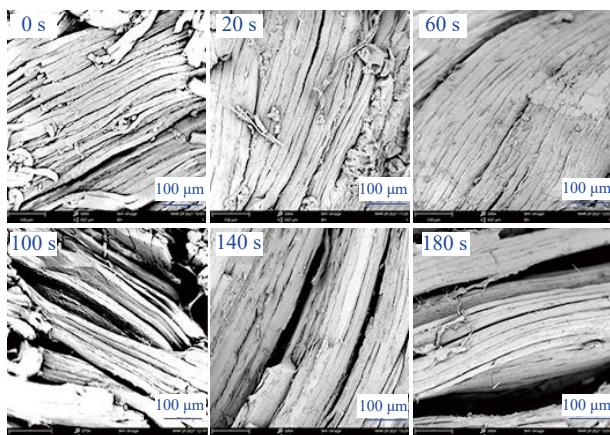


图 8 不同油炸时间处理的虾尾样品的微观结构图(190 °C)

Fig.8 Microstructure of crayfish tail samples treated with different frying time (190 °C)

## 2.7 油炸克氏原螯虾尾品质指标的相关性分析

对油炸克氏原螯虾各指标进行相关性分析, 结果如图 9 所示。表中的数字表示相关系数, 红色表示正相关, 蓝色表示负相关。由图 9 可见, 水分含量与弹性、内聚性和咀嚼性的相关系数大于-0.9, 呈高度显著负相关( $P<0.001$ ), 与此同时,  $T_{22}$  与弹性、内

聚性和咀嚼性的相关系数大于-0.7, 也呈现负相关, 其中  $T_{22}$  与内聚性相关系数为-0.94, 呈现高度显著负相关( $P<0.001$ )。相反,  $T_{21}$  与弹性、内聚性和咀嚼性的相关系数大于 0.7, 呈现极显著正相关( $P<0.01$ )。相关性分析结果表明, LF-NMR 的参数值可作为分析评价虾尾质构的有效方法。

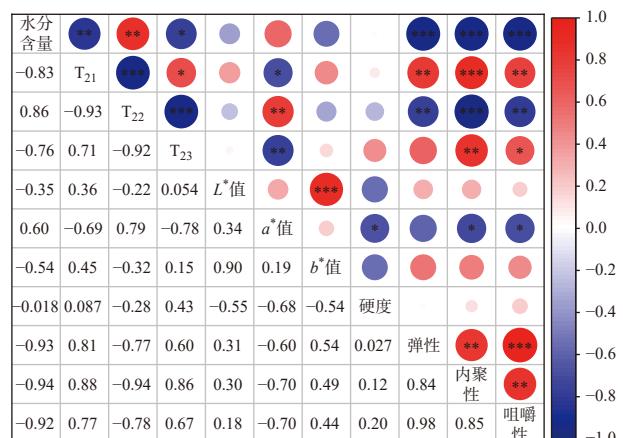


图 9 油炸克氏原螯虾尾的色值和质构与核磁共振参数之间的相关性分析

Fig.9 Correlation analysis between the color value, texture and NMR parameters of fried crayfish tail

注: \*表示显著相关,  $P<0.05$ ; \*\*表示极显著相关,  $P<0.01$ ; \*\*\*表示高度显著相关,  $P<0.001$ 。

## 3 结论

本研究表明: 随着油炸温度提高和油炸时间的延长, 水分含量下降。LF-NMR 成像反映水分脱除从外向内逐渐递进, 弛豫时间  $T_{22}$  峰面积及相对比例下降, 显示油炸主要脱除的水分不易流动水。随着炸制虾尾水分的降低, 色泽亮度( $L^*$ 值)和红值( $a^*$ 值)下降, 黄值( $b^*$ 值)上升, 虾肉硬度、弹性和咀嚼性逐渐增大。扫描电镜图像显示肌肉纤维收缩, 间隙变大, 纤维不松散。其中当水分含量为 60.5% 时, 虾尾喜好度、咀嚼性等各指标处于较佳值。此时, 虾尾的硬度为 24.55~25.64 N, 弹性为 3.52~3.57 mm, 内聚性为 0.7 Ratio, 咀嚼性为 54.6~56.5 mJ。相关性分析显示, 水分含量以及  $T_{22}$  与虾尾的弹性、内聚性和咀嚼性呈显著负相关( $P<0.05$ )。综上所述, LF-NMR 可用于监测虾尾在油炸过程中的水分迁移变化和评估产品质构品质。本文未对油炸过程中虾尾的含油量及油的降解进行探讨, 只采用传统大豆油, 不同食用油对虾尾品质的影响, 还需进一步研究。

## 参考文献

- [1] 易瑞恺, 胡火庚, 王尚洪, 等. 鄱阳湖克氏原螯虾肌肉营养成分分析与评价[J]. 南昌大学学报(理科版), 2013, 37(3): 255~258. [ YI R K, HU H K, WANG S H, et al. Analysis and evaluation of muscle nutrients of *Procambarus clarkii* in Poyang Lake [J]. Journal of Nanchang University (Science Edition), 2013, 37(3): 255~258. ]
- [2] 2020 中国小龙虾产业发展报告 [J]. 中国水产, 2020(7): 8~17. [ 2020 China crayfish industry development report [J]. China Fisheries, 2020(7): 8~17. ]

- [ 3 ] KHLOR Y P, SIM B I, ABAS F, et al. Influence of carbohydrate- and protein-based foods on the formation of polar lipid fraction during deep-frying [J]. *Food Control*, 2020, 107: 106781.
- [ 4 ] ADEDEJI A A, LIU L, NGADI M O. Microstructural evaluation of deep-fat fried chicken nugget batter coating using confocal laser scanning microscopy [J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 102(1): 49–57.
- [ 5 ] LUO J, LI M, ZHANG Y, et al. The low-field NMR studies the change in cellular water in tilapia fillet tissue during different drying conditions [J]. *Food Science & Nutrition*, 2021, 9(5): 2644–2657.
- [ 6 ] WANG C, SU G, WANG X, et al. Rapid assessment of deep frying oil quality as well as water and fat contents in french fries by low-field nuclear magnetic resonance [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(8): 2361–2368.
- [ 7 ] ZHANG W, CHENG S, WANG S, et al. Effect of pre-frying on distribution of protons and physicochemical qualities of mackerel [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, 101(11): 4838–4846.
- [ 8 ] TAN M, LIN Z, ZU Y, et al. Effect of multiple freeze-thaw cycles on the quality of instant sea cucumber: Emphatically on water status of by LF-NMR and MRI [J]. *Food Research International*, 2018, 109: 65–71.
- [ 9 ] MELLEMA M. Mechanism and reduction of fat uptake in deep-fat fried foods [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2003, 14(9): 364–373.
- [ 10 ] PAN G, JI H, LIU S, et al. Vacuum frying of breaded shrimps [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 62(1): 734–739.
- [ 11 ] 赵钜阳, 于海龙, 王雪, 等. 油炸温度对孜然羊肉片品质与水分分布相关性的研究 [J]. 食品研究与开发, 2015, 36(16): 4–9.
- [ 12 ] CHENG S, WANG X, YANG H, et al. Effects of frying temperature on the quality and water distribution of cumin mutton slices [J]. *Food Research and Development*, 2015, 36(16): 4–9. ]
- [ 13 ] CHITRAKAR B, ZHANG M, BHANDARI B. Novel intelligent detection of safer water activity by LF-NMR spectra for selected fruits and vegetables during drying [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2019, 12(7): 1093–1101.
- [ 14 ] EZEANAKA M C, NSOR-ATINDANA J, ZHANG M. Online low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) and magnetic resonance imaging (MRI) for food quality optimization in food processing [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2019, 12(9): 1435–1451.
- [ 15 ] LALAM S, SANDSU J S, TAKHAR P S, et al. Experimental study on transport mechanisms during deep fat frying of chicken nuggets [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2013, 50(1): 110–119.
- [ 16 ] SUN S, WANG S, LIN R, et al. Effect of different cooking methods on proton dynamics and physicochemical attributes in Spanish mackerel assessed by low-field NMR [J]. *Foods*, 2020, 9(3): 364.
- [ 17 ] TORNBERG E. Effects of heat on meat proteins—Implications on structure and quality of meat products [J]. *Meat Science*, 2005, 70(3): 493–508.
- [ 18 ] 蓝蔚青, 孙雨晴, 肖蕾, 等. 冻融循环对大目金枪鱼质构与蛋白质特性变化的影响 [J]. 食品科学, 2021, 42(7): 240–246.
- [ 19 ] NAWAZ A, JOSÉ M, LORENZ O, et al. Effect of different processing methods on quality, structure, oxidative properties and water distribution properties of fish meat-based snacks [J]. *Foods*, 2021, 10(10): 2467–2467.
- [ 20 ] 杨帆, 万金庆, 厉建国. 微冻贮藏虾仁的水分迁移与品质变化 [J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(20): 68–74. [ YANG F, WANG J Q, LI J G. Water migration and quality changes of shrimp stored in micro freezing [J]. *Food and Fermentation Industry*, 2019, 45(20): 68–74. ]
- [ 21 ] 瞿桂香, 钱文霞, 董志俭, 等. 响应面优化即食椒盐小龙虾的加工工艺 [J]. 保鲜与加工, 2020, 20(6): 131–136. [ QU G X, QIAN W X, DONG Z J, et al. Optimization of processing technology of instant pepper and salt crayfish by response surface methodology [J]. *Storage and Process*, 2020, 20(6): 131–136. ]
- [ 22 ] 杨海琦, 陈季旺, 楚天奇, 等. 油炸工艺对即食小龙虾品质的影响 [J]. 武汉轻工大学学报, 2020, 39(6): 9–16. [ YANG H Q, CHEN J W, CHU T Q, et al. Effect of frying technology on the quality of instant crayfish [J]. *Journal of Wuhan University of Light Industry*, 2020, 39(6): 9–16. ]
- [ 23 ] THIANSILAKUL Y, BENJAKUL S, RICHARDS M P. Isolation, characterisation and stability of myoglobin from Eastern little tuna (*Euthynnus affinis*) dark muscle [J]. *Food Chemistry*, 2011, 124(1): 254–261.
- [ 24 ] YANG D, WU G, LU Y, et al. Comparative analysis of the effects of novel electric field frying and conventional frying on the quality of frying oil and oil absorption of fried shrimps [J]. *Food Control*, 2021, 128: 108195.
- [ 25 ] YANG Y, ACHAERANDIO I, PUJOLA M. Influence of the frying process and potato cultivar on acrylamide formation in French fries [J]. *Food Control*, 2016, 62: 216–223.
- [ 26 ] 张刘蕾, 姜启兴, 许艳顺, 等. 油炸和真空渗透对冻藏风味小龙虾品质的影响 [J]. 郑州轻工业学院学报(自然科学版), 2013, 28(4): 40–44. [ ZHANG L L, JIANG Q X, XU Y S, et al. Effects of frying and vacuum infiltration on the quality of frozen crayfish [J]. *Journal of Zhengzhou Institute of Light Industry (Natural Science Edition)*, 2013, 28(4): 40–44. ]
- [ 27 ] 王雪松, 谢晶. 不同解冻方式对冷冻竹荚鱼品质的影响 [J]. 食品科学, 2020, 41(23): 137–143. [ WANG X S, XIE J. Effects of different thawing methods on the quality of frozen bamboo pod fish [J]. *Food Science*, 2020, 41(23): 137–143. ]
- [ 28 ] BARBUT S. Frying—effect of coating on crust microstructure, color, and texture of lean meat portions [J]. *Meat Science*, 2013, 93(2): 269–274.
- [ 29 ] 郑静静, 林琳, 张艳凌, 等. 不同解冻方式对熟制小龙虾理化特性的比较分析 [J]. 现代食品科技, 2020, 36(9): 188–194.
- [ 30 ] DANA D, SAGUY I S. Review: Mechanism of oil uptake during deep-fat frying and the surfactant effect-theory and myth [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2006, 128–130: 267–272.