

微波加热对小龙虾品质的影响

范海龙^{1,2}, 朱华平³, 范大明^{1,2,4,*}, 黄建联^{4,5}, 焦熙栋^{1,2}, 闫博文^{1,2}, 周文果^{4,5}, 赵建新^{1,2}, 张灏^{1,2}

(1. 江南大学食品学院, 江苏无锡 214122;

2. 江南大学食品科学与技术国家重点实验室, 江苏无锡 214122;

3. 中国农村技术开发中心, 北京 100045;

4. 农业农村部冷冻与调理水产品加工重点实验室, 福建厦门 361022;

5. 福建安井食品股份有限公司, 福建厦门 361022)

摘要:为了挖掘微波在小龙虾热加工中的应用潜力, 本文以水煮小龙虾为对照, 通过热成像温度分析、摄影图像色泽分析、质构和脱壳完整率分析以及感官分析等方法, 全面地分析了不同功率密度的微波加热对小龙虾品质(色泽、质构、脱壳完整率、质量损失等)的影响。结果表明, 小龙虾在微波加热过程中的温度和表壳色泽分布不均, 但高功率密度和长时间的微波加热有利于小龙虾温度和橘红色泽分布趋于均匀, 其中 5 W/g 微波加热 4.5 和 5.5 min 的小龙虾外观评分分别与水煮 4.5 和 5.5 min 的小龙虾无显著性差异。随微波加热时间和功率密度的增加, 小龙虾的质量损失和虾肉的水分流失随之增加, 进而影响了虾肉的质构特性、剪切特性、挤压损失和口感。对于不同功率密度的微波加热, 小龙虾虾尾的口感与其质构特性和剪切特性间的相关性存在差异, 其中虾尾的口感与虾尾表面硬度、紧实度、含水量和挤压损失呈正相关, 与虾尾剪切力、剪切能呈负相关。此外, 3 W/g 微波加热 3.5 min 的虾尾口感评分最高, 且与水煮 3.5 min 的虾尾口感无显著差别, 但非水环境下微波加热的小龙虾比水煮小龙虾更容易脱水且更难脱壳, 这使得微波加热的小龙虾虾尾的形态和色泽较水煮更差。随着微波加热时间或功率密度的增加, 微波小龙虾虾尾的 L^* 和 b^* 值有所增加, 但虾尾的 a^* 值下降且脱壳完整率的改善不明显。综上, 微波在小龙虾的热加工中具有一定应用潜力。

关键词: 小龙虾, 微波加热, 品质, 感官评价

Effects of Microwave Heating on the Quality of Crayfish

FAN Hai-long^{1,2}, ZHU Hua-ping³, FAN Da-ming^{1,2,4,*}, HUANG Jian-lian^{4,5},
JIAO Xi-dong^{1,2}, YAN Bo-wen^{1,2}, ZHOU Wen-guo^{4,5}, ZHAO Jian-xin^{1,2}, ZHANG Hao^{1,2}

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. State Key Laboratory of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

3. China Rural Technology Development Center, Beijing 100045, China;

4. Key Laboratory of Refrigeration and Conditioning Aquatic Products Processing,
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Xiamen 361022, China;

5. Fujian Anjoyfood Share Co., Ltd., Xiamen 361022, China)

Abstract: To reveal the potential application of microwave in the thermal processing of crayfish, the effects of microwave heating with different power densities on the qualities (color, texture, shelling integrity, mass loss, etc.) of crayfish were investigated by the thermal imaging analysis, photographic image analysis, texture and shelling integrity analysis and sensory analysis, etc.. The results showed that the temperature and shell color of crayfish were non-uniform during microwave heating, but the uniformity could be improved by increasing the heating time or microwave power. There was no significant difference between the appearance scores of crayfish heated for 4.5 and 5.5 min at 5 W/g and those boiled with water for 4.5 and 5.5 min. However, the mass loss and moisture loss of crayfish increased with the power density and time of microwave heating, and thus affected the texture, shear properties, expressible moisture and taste of crayfish tail. There were different correlations between the taste of crayfish tail and the texture or shear properties for the microwave heating with different power density. Among them, the taste of crayfish tail was positively related to the surface hardness, compactness, moisture content and expressible moisture of crayfish tail, and negatively related to the shear force and shear energy of crayfish tail. Furthermore, the crayfish tail heated for 3.5 min at 3 W/g had the highest taste score and no significant difference with the crayfish boiled for 3.5 min, but it was more difficult for the crayfish heated by microwave in non-aqueous environment to shuck and keep moisture than boiled crayfish, and

收稿日期: 2019-12-17

作者简介: 范海龙(1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工及生物技术, E-mail: 2360618195@qq.com。

* 通讯作者: 范大明(1983-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品加工及生物技术, E-mail: fandm@jiangnan.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目(31822038); 国家十三五重点研发计划(2018YFD0400600); 农业农村部冷冻调理水产品加工重点实验室开放课题(KLRCAPP2018-08); 食品科学与工程一流学科建设项目(JUFSTR20180102)。

thus the tail shape and skin color of the former were worse than the latter. Although the value of L^* and b^* of crayfish tail increased with the increasing of microwave heating time or power density, the value of a^* of the crayfish tail decreased and the ratio of intact tail did not improve significantly. In a word, microwave had potential application in the thermal processing of crayfish, but it also exposed some shortcomings.

Key words: crayfish; microwave heating; quality; sensory evaluation

中图分类号: TS254.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2020)18-0008-09

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020.18.002

引文格式: 范海龙, 朱华平, 范大明, 等. 微波加热对小龙虾品质的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(18): 8-16.

小龙虾(克氏原螯虾)是一种肉质鲜美、营养丰富的淡水类螯虾, 现已成为中国发展最快的主要养殖品种之一^[1-3]。近年来, 随着小龙虾养殖业发展迅猛, 消费热度不断攀升, 小龙虾加工产品也得到快速发展, 目前主要有速冻熟虾尾、速冻熟制整肢小龙虾和速冻调理小龙虾^[4-6]。但无论是哪种熟制产品在加工过程中都需经过加热过程, 一方面对虾肉进行一定程度的熟化, 另一方面杀灭虾肉组织中的内源性蛋白水解酶和致病微生物^[6-7]。传统的小龙虾加热方式主要包括水煮、油炸、烤等, 其中水煮是最常用的小龙虾加热方式^[8]。水煮(99 ± 1 °C)基本能够在3~4 min内完成小龙虾(30 ± 5 g)的熟化并杀灭致病微生物, 同时赋予小龙虾均匀的橘红色外观以及细嫩多汁的质感^[9-10]。然而, 小龙虾在水煮过程中需要大量水作为传热介质, 这不但耗费了大量水资源, 而且会产生大量的生产废水并增加生产成本。此外, 水煮过程中虾肉与水直接接触, 大量的水溶性蛋白、矿物质和脂肪会转移到水煮液中, 造成大量营养损失并影响虾肉口感^[11-12]。

微波加热是一种不需要任何传热介质便可对加热对象内外同时加热的绿色环保型加热方式, 已被广泛应用于食品的热加工^[13-14]。当食品置于微波电磁场中时, 受到快速交变电场的影响, 食品中极性组分也随电场不断发生取向变化而产生剧烈的转动摩擦, 进而对食品进行快速加热^[15]。因此, 微波加热是一种介电加热, 它与加热对象的介电特性直接相关。水作为一种强极性电介质, 它在电磁场下具有较强的介电响应, 因而高含水量的食品能够被微波快速加热^[16]。新鲜虾肉组织的含水量在80%左右^[17], 因此虾肉组织在微波场下能够不需任何传热介质而被快速、高效地加热。这种无需加水、不产废水并最大程度保留虾肉营养的加热方式, 对于处理量较大的小龙虾工业加工将很大程度上降低生产成本并提高产品质量。

Gundavarapu等^[18-19]对采用不同微波处理条件烹调的对虾的消费者可接受性和微生物安全性进行了评估, 结果表明, 其消费者可接受性和品质存在差异, 但几乎均可接受, 接近80%的消费者表示愿意购买微波烹饪的对虾, 而且合适的微波处理能够完全抑制最大接种量为 5×10^5 CFU/g的5种混合李斯特菌。郭力^[20]将微波加热技术引入水煮小龙虾的后续加工, 降低了水煮小龙虾的含水量并赋予了虾肉更加韧实的口感。然而, 有关完全采用微波对整只小龙虾进行热加工的研究还没有, 因此该技术在小龙虾热加工中的应用, 还存在诸多认识局限。本研究采用微波加热技术对小龙虾进行加热并对其品质变

化进行探究, 进而揭露小龙虾在微波加热过程中的品质变化规律, 为进一步优化小龙虾的微波热加工工艺提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

鲜活小龙虾 购买于江苏省无锡市雪浪水产市场, 共5.5 kg, 单只质量(30 ± 3) g, 体长(8 ± 1) cm均一、体色一致(红壳)、活力较好。

NN-T251W 微波炉 日本 Panasonic 公司; MWS-8微波工作站 包括光纤探针和 FISO 测试软件, 加拿大 Fiso 公司; IRI4010 红外热成像仪 英国 Irisys 公司; D7200 数码相机 日本尼康公司; MP2000D 电子天平 上海第二天平厂; ME204E 分析天平、5 kg 砝码 上海梅特勒-托利多有限公司; WhatmanNo.1 滤纸 青岛圣吉仪器系统有限公司; 摄影棚 配有 D65 标准光源, 广东深圳尖端摄影器材店; TA-XT2 质构分析仪 英国 Stable Micro System 公司; FD115 电热鼓风干燥箱 德国 binder 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 小龙虾预处理和分组 将质量、大小和体色均一的鲜活小龙虾置于冰浆中 60 min 快速致晕, 随后分成5组(每组180只)分别用于不同微波功率密度和水煮加热。

1.2.2 小龙虾加热 将4组预处理的小龙虾在2、3、4和5 W/g的功率密度下分别加热1.5、2.5、3.5、4.5、5.5 min, 作为实验组。第五组预处理小龙虾在(99 ± 1) °C的沸水中分别水煮1.5、2.5、3.5、4.5、5.5 min, 作为对照组。微波和水煮的每组加热时间各处理36只小龙虾, 分12次处理(每次处理3只)。加热后的小龙虾立即装入自封袋浸没于冰水中快速冷却至室温。

1.2.3 小龙虾温度分布的测定 1.2.2 加热结束后(冷却前), 立即使用红外热成像仪对整只小龙虾进行热成像, 该操作在10 s内完成。

1.2.4 小龙虾表壳色泽的测定 将加热冷却至室温的小龙虾表面水分擦干后置于摄影棚内, 在D65标准光源的照射下使用数码相机采集每只小龙虾的RGB图像。随后, 通过 Matlab 分析软件分别提取小龙虾的RGB图像的R、G、B值。最后采用 My Color tell 颜色转换工具将R、G、B值在D65光源和10°视场条件下转换为 L^* 、 a^* 、 b^* 值。实验组与对照组表壳的色差 ΔE 通过式(1)进行计算:

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad \text{式(1)}$$

式中: ΔE 为实验组(微波处理组)与对照组(水煮

处理组)的表壳色差, ΔE 越大表明实验组和对照组在加热相同时间时的色差越大; L^* 为实验组小龙虾的亮度, L_0^* 为对照组的亮度; a^* 表示实验组的红绿度, 正直越大表示越红, a_0^* 为对照组的 a^* ; b^* 表示实验组的黄蓝度, 正直越大表示越黄, b_0^* 为对照组的 b^* 。

1.2.5 小龙虾质量损失和虾尾脱壳完整率的测定 小龙虾加热前后的质量损失根据式(2)进行计算。虾尾脱壳完整率定义为经加热的小龙虾虾尾脱壳后虾尾形态保持完整(不出现粘壳损伤)的比例, 由式(3)表示。

$$ML(\%) = \frac{M_i - M_j}{M_i} \times 100 \quad \text{式(2)}$$

$$C(\%) = \frac{N_i}{N_0} \times 100 \quad \text{式(3)}$$

式中: ML 表示质量损失, %; M_i 和 M_j 分别表示加热前和加热后小龙虾的质量, g; C 表示虾尾脱壳完整率, %; N_i 表示形态保持完整的虾尾数; N_0 表示总虾尾数。

1.2.6 小龙虾虾尾表皮色泽的测定 加热脱壳后的虾尾按 1.2.4 中描述的关于整虾表壳色泽测定的方法测定虾尾表皮的 L^* 、 a^* 、 b^* 和 ΔE 值。

1.2.7 小龙虾虾尾质构特性的测定 虾尾质构特性的测定方法参照本课题组先前申请的国家专利(CN109270231A)中描述的一次压缩一次穿刺非连续测试方法, 获得经不同加热后虾尾的表面硬度、弹性、内部硬度和紧实度(相关定义参考专利描述)^[21]。

1.2.8 小龙虾虾尾剪切测试 虾尾剪切测试 参考 Sriket 等^[22]所描述的测定方法。剪切方向为垂直于虾尾方向, 位置为第二尾节; 剪切曲线的峰值为剪切力, N; 曲线与 X 轴所围面积为剪切能, N·s。

1.2.9 小龙虾虾尾含水量和挤压损失测定 虾尾含水量的测定参考 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准食品中水分的测定》, 由式(4)表示^[23]。虾尾肉挤压损失的测定参考 Quan 等^[24]所描述的方法。沿垂直于去壳虾尾第二尾节方向, 用刀片切下厚度约 3 mm 的虾肉薄片, 准确称取质量后, 置于上下各 3 层的滤纸中间, 在 5 kg 的标准砝码下压 2.0 min。随后取出虾肉再次准确称量其质量, 则挤压损失可由式(5)表示。

$$MC(\%) = \frac{m_i - m_j}{m_i} \times 100 \quad \text{式(4)}$$

$$EM(\%) = \frac{W_i - W_j}{W_i} \times 100 \quad \text{式(5)}$$

式中: MC 表示虾尾含水量, %; m_i 和 m_j 分别表示干燥前和干燥至恒重的虾肉质量, g; EM 表示虾肉的挤压损失, %; W_i 和 W_j 分别表示挤压前和挤压后的虾肉质量, g。

1.2.10 小龙虾感官评价 小龙虾的感官评价包括 3 个部分: 整虾表壳、虾尾外观和虾尾口感, 其中虾尾口感评价只对已熟化的虾尾(2 W/g 加热 4.5 和 5.5 min; 3 W/g 加热 3.5、4.5 和 5.5 min; 4 W/g 加热 2.5、3.5、4.5 和 5.5 min; 5 W/g 加热 1.5、2.5、3.5、4.5 和 5.5 min) 进行评价, 该过程参考 Gundavarapu 等^[18]所描述的方法。参加本实验的感官评价的人员为从食品学院征集到的经常食用小龙虾(频率 > 8 次/年)的 20 位同学, 其中男女各 10 人。评价原则采用 9 点喜好评分法, 喜好程

度随评分的高低分别对应为: 1 = 极不喜欢, 2 = 很不喜欢, 3 = 不喜欢, 4 = 不太喜欢, 5 = 一般, 6 = 稍喜欢, 7 = 喜欢, 8 = 很喜欢, 9 = 极喜欢。

1.3 数据处理

本研究每个实验测定至少 7 个平行, 应用 Microsoft Excel 2010 对本实验数据的均值和方差进行计算, 实验结果表示为均值 ± 方差, 图形绘制采用 Origin 7.0 分析软件。小龙虾的品质特性和感官评分(3 部分: 整虾表壳、虾尾外观、虾尾口感)的皮尔逊(Pearson)相关性以及差异性分析采用 IBM SPSS Statistics 19.0 进行分析, $P < 0.05$ 表示显著相关或差异显著, $P < 0.01$ 表示极显著相关或差异极显著。

2 结果与分析

2.1 微波加热对整虾温度分布的影响

加热的不均匀性是微波加热过程中常见的现象^[25]。如图 1 所示, 经不同微波功率密度加热的小龙虾的表面温度随加热时间的增加而增加, 但均较水煮小龙虾分布不均匀。然而, 随着微波加热时间的增加, 这种温度分布不均的现象会得到缓解, 而且微波加热的功率密度越高温度趋于均匀的时间越短。这可能归因于虾尾和虾螯(含水量高, 尺寸合适)在加热前期较虾头和胸腔具有更强的微波响应而被微波优先加热, 但随加热的进行, 虾尾和虾螯的蛋白变性和水分流失引起了介电特性(介电常数和介电损耗)和微波选择性加热的变化^[26], 最终各部分的温度经热传导逐渐趋于均匀。此外, 经 2 W/g 微波加热 4.5 min 以上, 3 W/g 加热 3.5 min 上, 4 W/g 加热 2.5 min 以及 5 W/g 加热 1.5 min 以上的小龙虾平均温度能够达到 80 °C 以上。

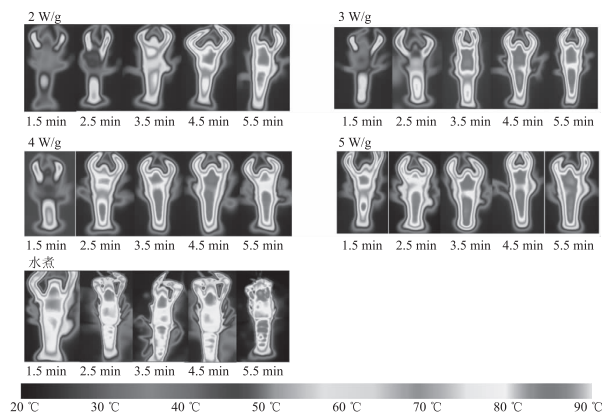


图 1 微波加热和水煮对小龙虾温度分布的影响

Fig.1 Effect of microwave heating and boiling on the temperature distribution of crayfish

2.2 微波加热对小龙虾表壳色泽的影响

如图 2a 所示, 经不同微波功率密度加热的小龙虾的表壳色泽随加热的进行逐渐由棕褐色变成橘红色, 但其色泽分布在微波加热前期较水煮小龙虾更不均匀。然而, 随微波加热时间和功率密度的增加, 小龙虾的表壳色泽均匀性逐渐得到改善并接近水煮, 这和小龙虾在微波加热过程中的温度变化和分布趋势相一致。小龙虾具有极不规则的形状和不均匀的颜色分布, 采用传统的颜色分析方法(色差仪分

析)无法准确定量描述整虾的表壳颜色变化^[27]。本研究基于摄影图像分析技术对小龙虾在加热过程中的表壳色泽变化进行了定量解析。如图 2b~2e 所示,整虾的 L^* 、 a^* 、 b^* 值随微波加热时间的增加逐渐增加,而 ΔE 随时间逐渐减小,微波功率密度越大变化速率也越快。这表明小龙虾在微波加热过程中的表壳橘红色随时间增加逐渐变得鲜艳且逐渐接近水煮小龙虾。当 3 和 5 W/g 微波加热小龙虾 5.5 min 时,其表壳色泽和水煮 5.5 min 较接近 (ΔE 接近 0, 图 2e),这和图 2a 结果相一致。

2.3 微波加热对小龙虾质量损失和虾尾脱壳完整率的影响

质量损失是食品在微波加热过程中的重要变化^[11]。如图 3a 所示,小龙虾在微波加热过程中的质量损失明显高于水煮(负值可能归因于胸腔对水分的夹带)且随加热时间的增加而增加,而且微波功率

密度越大质量损失越快。微波是一种脱水的介电加热,它不同于依靠内外温差传导加热的水煮,因此虾尾在加热过程中的壳肉分离存在差异。如图 3b 所示,小龙虾在微波加热过程中的脱壳完整率明显低于水煮且随加热时间的增加而降低,但微波功率密度越大脱壳完整率下降越慢。这说明具有高质量损失和非水环境特性的微波加热不利于小龙虾虾尾的脱壳,但高功率密度的微波加热与低功率相比,能够在一定程度提高虾尾的脱壳完整率,这可能归因于虾尾的快速升温 and 脱水加速了虾肉的皱缩和壳肉分离^[28]。

2.4 微波加热对小龙虾虾尾表皮色泽的影响

如图 4a 所示,微波加热的小龙虾虾尾的表皮橘红色泽明显低于水煮,且随加热时间和功率密度的增加,橘红色略有降低,但 RGB 图像表现不明显。虾尾和整虾一样具有不规则的形状和不均匀的颜色分布,因此虾尾色泽的定量分析同样需要借助摄影图

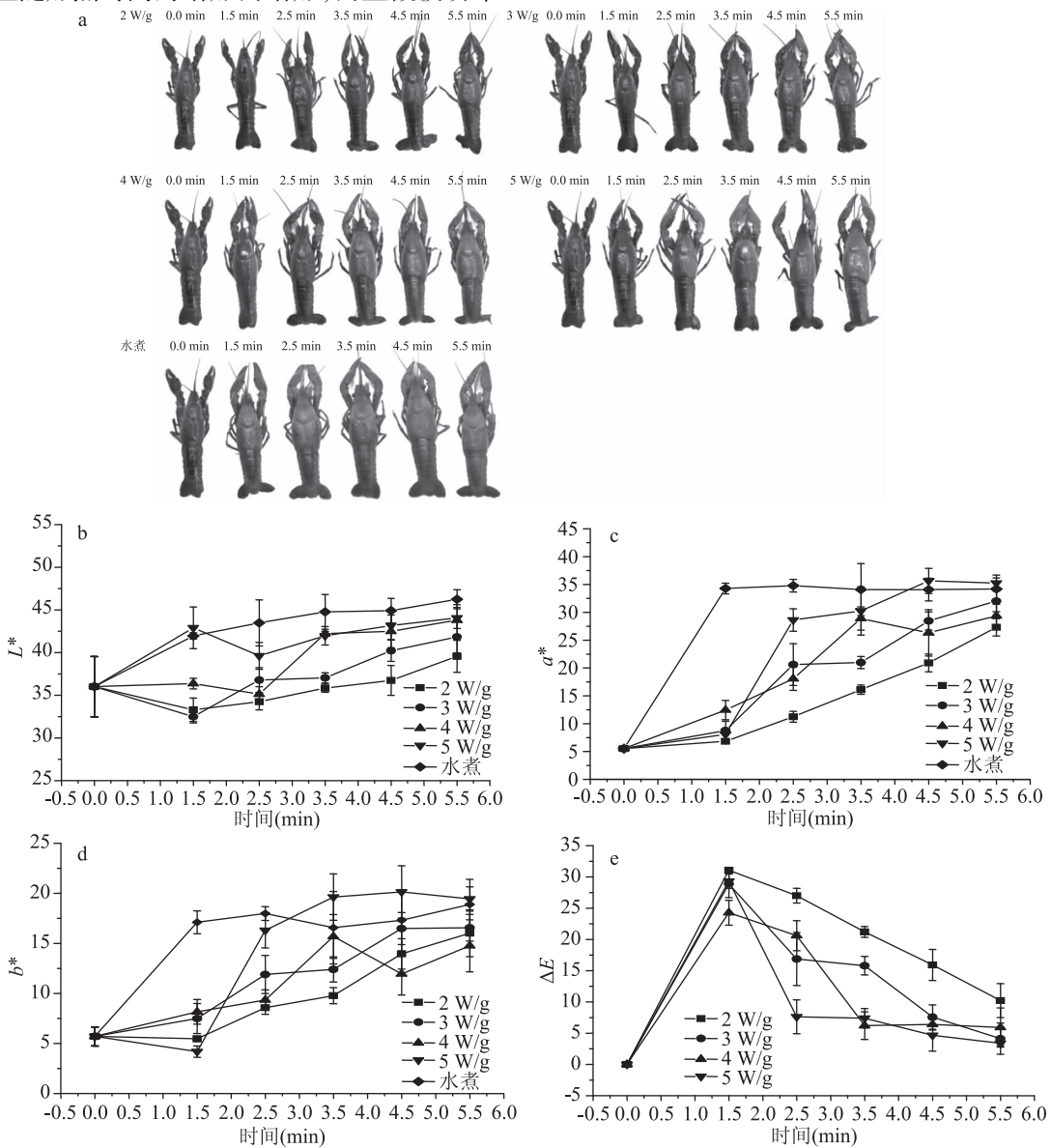


图2 微波加热对小龙虾表壳色泽的影响

Fig.2 Effect of microwave heating on the shell color of crayfish

注:a:小龙虾的 RGB 实物图;b:整虾表壳 L^* ; c:整虾表壳 a^* ; d:整虾表壳 b^* ; e:微波加热整虾表壳与水煮整虾的色差 ΔE 。

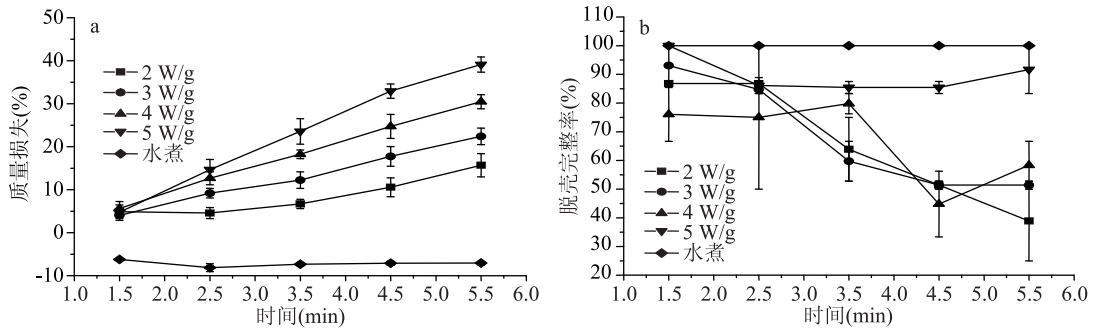


图3 微波加热对小龙虾质量损失(a)和虾尾脱壳完整率(b)的影响

Fig.3 Effects of microwave heating on the mass loss of crayfish(a) and ratio of intact tail in the shucking(b)

像分析技术。如图4b、4c和4d所示,虾尾表皮的 L^* 和 b^* 值随微波加热时间的增加逐渐增加且基本高于水煮;2和3 W/g微波加热的虾尾的 a^* 值随时间的增加而减小,而4和5 W/g的变化不明显,但 a^* 值均低于水煮虾尾。此外, ΔE (除2 W/g)随微波加热时间的增加先减小后增加(图4e)。这表明小龙虾在微波加热过程中虾尾表皮橘红色降低但亮度和黄度有所增加,而且高功率密度的微波加热有利于保持虾尾表皮的橘红色但效果不显著。这可能归因于小

龙虾尾的脱壳损伤和美拉德反应或虾黄在虾尾肉中的迁移。

2.5 微波加热对小龙虾虾尾质构特性和剪切特性的影响

如图5a所示,经3、4、5 W/g微波加热和水煮的小龙虾虾尾的表面硬度随加热时间的增加略有下降,这可能归因于小龙虾虾尾脱壳对表层肌肉的破坏以及表层肌肉组织的熟化。对于2 W/g微波加热的小龙虾,其虾尾表面硬度表现出先增加后减小的

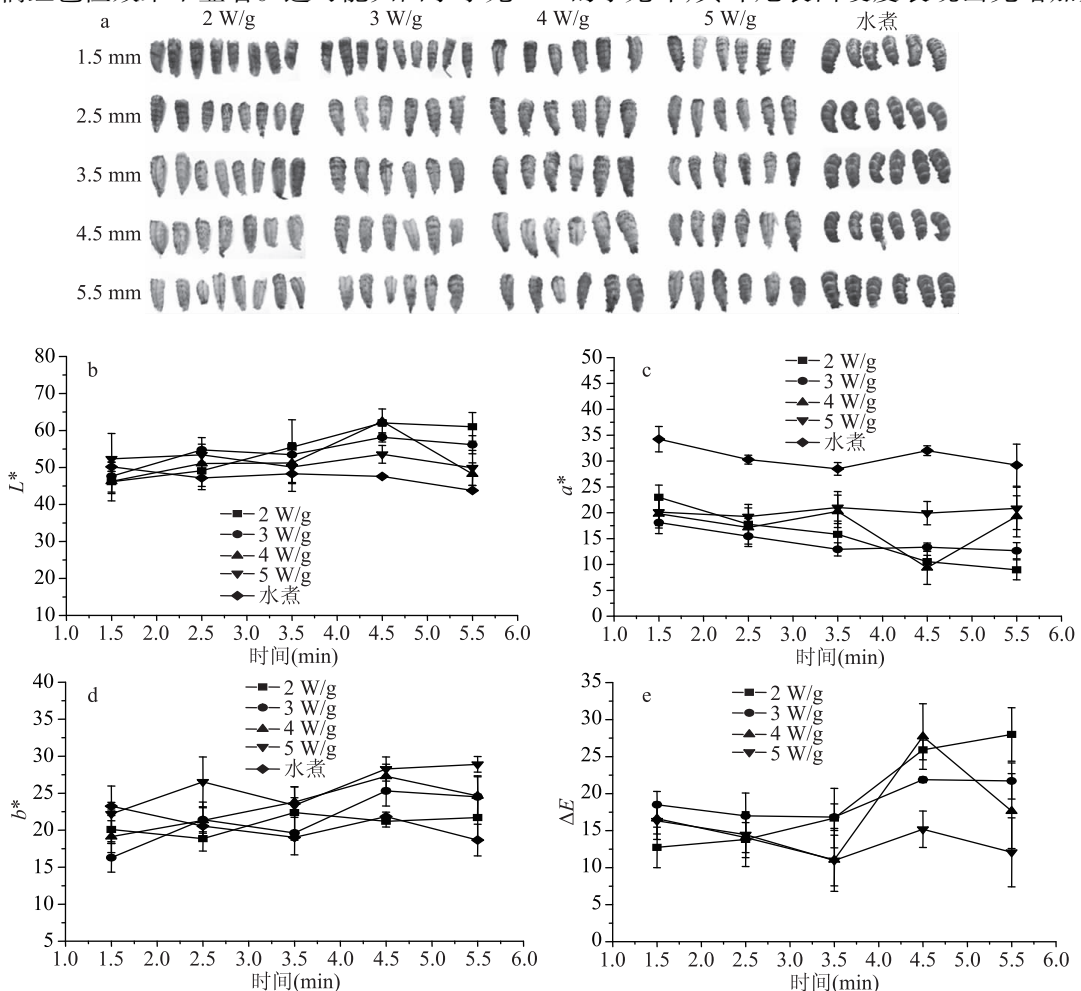


图4 微波加热对小龙虾虾尾表皮色泽的影响

Fig.4 Effect of microwave heating on the color of crayfish tail skin

注:a:小龙虾虾尾的RGB实物图;b:虾尾表皮的 L^* ;c:虾尾表皮的 a^* ;d:虾尾表皮的 b^* ;e:微波加热与水煮小龙虾虾尾的表皮色差 ΔE 。

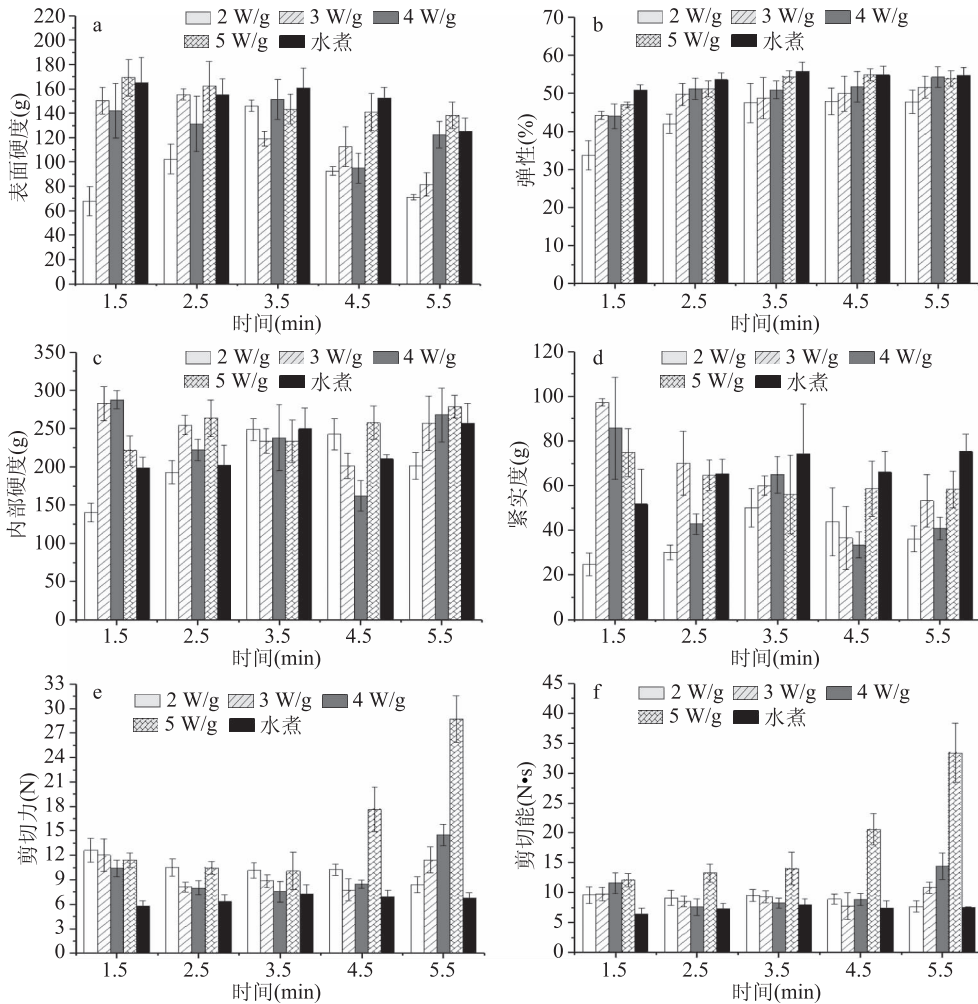


图5 微波加热对小龙虾虾尾质构特性和剪切特性的影响

Fig.5 Effects of microwave heating on the texture and shear properties of crayfish tail

注:a:表面硬度;b:弹性;c:内部硬度;d:紧实度;e:剪切力;f:剪切能。

趋势,这与虾尾表层虾肉在前期没有完全熟化和后期的脱壳损伤有关。尽管表面硬度的变化有所不同,但虾尾弹性随加热时间的增加而逐渐增加,且不受加热方式的影响(图5b),这和王仕钰^[29]用微波加热鸡胸肉糜凝胶的弹性变化结果相一致。此外,小龙虾经3、4 W/g微波加热后,虾尾内部硬度均随加热时间的增加先减小后增大,而经2和5 W/g微波加热的虾尾分别呈现先增加后减小再逐渐增加的趋势(图5c)。这可能归因于不同微波功率密度加热的小龙虾虾尾在相同时间下的熟化阶段不同。虾尾内部硬度随蛋白热诱导变性和交联而增加(微波加热前期),随局部过加热引起的凝胶劣化而减小(3和4 W/g前4.5 min以及2 W/g 4.5~5.5 min),随过度脱水引起的肌肉组织收缩而增加(3和4 W/g 5.5 min以及5 W/g 4.5~5.5 min)。对于处于水环境下的水煮处理,虾尾受凝胶劣化和脱水收缩的影响较小,因此其内部硬度随加热时间的增加而增加。如图5d所示,经3、4和5 W/g微波加热的小龙虾虾尾的紧实度随微波加热时间的增加逐渐减小,而2 W/g表现为先增加后减小,水煮加热则表现为逐渐增加的趋势。

剪切力常用于表征肉制品的嫩度^[30-31],但有时也容易受到硬度的干扰。本研究同时评价了小龙虾虾

尾在加热过程中的剪切力和剪切能的变化,更准确地表征了虾尾嫩度的变化。如图5e和5f所示,水煮和2、3 W/g微波加热的小龙虾虾尾的剪切力和剪切能随时间的增加变化不大或略有减小且微波加热略高于水煮;4和5 W/g分别在前4.5和3.5 min的加热过程中,小龙虾的虾尾剪切力和剪切能变化不大或略有减小,但随后开始快速增加且明显高于水煮。这说明2和3 W/g加热5.5 min对小龙虾虾尾的嫩度影响不大且嫩度略低于水煮,4和5 W/g微波加热小龙虾4.5或3.5 min以上容易使虾肉变老或变柴。

2.6 微波加热对小龙虾虾尾含水量和挤压损失的影响

如图6a所示,经不同微波功率密度加热的小龙虾虾尾的含水量随加热时间的增加均有不同程度的降低,而且微波功率密度越高水分减少越快也越多。挤压损失常用于表征肉制品的持水力(在相同含水量下,挤压损失越大说明样品的持水力越低),而持水力是体现肉制品多汁性和适口性的一个重要指标^[32]。如图6b所示,经不同微波功率密度加热的小龙虾虾尾的挤压损失均随加热时间的增加而减小,这和虾尾含水量的变化趋势相一致,而且微波功率密度越大挤压损失越小,但这不能说明虾尾在加热

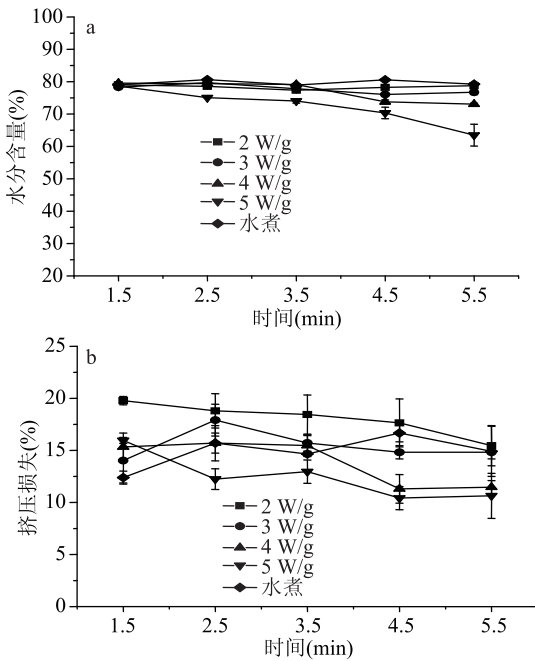


图6 微波加热对小龙虾虾尾含水量(a)和挤压损失(b)的影响

Fig.6 Effect of microwave heating on the

moisture content(a) and expressible moisture(b) of crayfish tail

过程中的持水力随加热时间或微波功率密度的增加逐渐增加,因为它们的含水量不同,而且虾尾在微波加热过程中的脱水可能是引起虾尾挤压损失随加热时间和微波功率密度增加而减小的重要原因。

2.7 微波加热对小龙虾感官评价的影响

色泽和口感是影响消费者购买意愿和食用体验的重要因素。小龙虾的表壳色泽、虾尾表皮色泽和虾肉口感随微波加热时间和功率密度的变化而变化,同时也会影响消费者感官评价^[33]。如表1的感官评价结果所示,小龙虾表壳的感官评分随加热时

间和微波功率密度的增加而增加,而且微波功率密度越大感官评分随时间的增加速度越快,这与小龙虾表壳橘红色的变化趋势相一致。其中5 W/g微波加热4.5和5.5 min的小龙虾外观评分分别与水煮4.5和5.5 min的小龙虾无显著性差异($P > 0.05$),这与其 ΔE 接近0的结果相一致。然而,微波加热的小龙虾虾尾外观评分均显著低于水煮,其中5 W/g微波加热的小龙虾虾尾的外观感官评分高于其他功率密度,但随加热时间的变化不明显,这和图4a观察到的小龙虾虾尾橘红色变化趋势相一致。此外,当采用不同微波功率密度加热小龙虾至可食用状态时,虾尾的口感评分随加热时间的增加逐渐减小,其中3 W/g微波加热3.5 min的虾尾口感评分最高且与水煮3.5 min的虾尾口感无显著差别($P > 0.05$)。

2.8 感官评价与小龙虾品质的相关性

尽管消费者对食品的感官评价常取决于食品品质的综合表现,但不同的品质特性对消费者的感官贡献存在差异。如表2所示,小龙虾的表壳色泽评分与 L^* 、 a^* 、 b^* 和 ΔE 的相关性分析表明,除表壳色泽随加热时间变化较小的水煮以及4 W/g对应的 b^* 和5 W/g对应的 L^* 外,整虾表壳的感官评分与 L^* 、 a^* 和 b^* 值具有显著的正相关性,与 ΔE 具有显著负相关性,这表明小龙虾表壳的橘红色越鲜艳或越接近水煮小龙虾越受消费者喜爱。另外,虾尾外观评分与虾尾表皮色泽(L^* 、 a^* 、 b^* 和 ΔE)以及脱壳完整率有一定相关性(特别是与 ΔE 的负相关性较高),但没有表现出普遍的显著相关,这可能归因于微波加热的小龙虾虾尾的色泽随微波功率密度和时间的增加变化不明显,无法显著体现这种相关性。此外,虾尾口感评分与质量损失、脱壳完整率、含水量、挤压损失、质构特性和剪切特性的相关性大小因微波功率密度不同而不同,这可能与不同强度的加热对虾尾品质的影响程度不一样有关。但一般的相关性

表1 微波和水煮加热的小龙虾的感官评分

Table 1 Sensory score of crayfish heated by microwave and boiling water

得分(分)	时间(min)	2 W/g	3 W/g	4 W/g	5 W/g	水煮
整虾外观	1.5	1.50 ± 0.59 ^{Cd}	1.68 ± 0.73 ^{Cd}	1.78 ± 0.63 ^{Cd}	2.39 ± 0.68 ^{Bd}	6.72 ± 0.99 ^{Ab}
	2.5	1.75 ± 0.62 ^{Dd}	2.79 ± 0.77 ^{Cc}	2.22 ± 0.71 ^{Dd}	6.06 ± 0.78 ^{Bc}	7.00 ± 0.94 ^{Ab}
	3.5	2.45 ± 0.59 ^{Dc}	2.89 ± 0.79 ^{Dc}	4.83 ± 0.96 ^{Cc}	6.50 ± 0.50 ^{Bbc}	6.94 ± 0.97 ^{Ab}
	4.5	3.85 ± 0.85 ^{Cb}	5.32 ± 0.80 ^{Bb}	5.94 ± 1.18 ^{Bb}	6.94 ± 0.85 ^{Aab}	7.06 ± 1.22 ^{Ab}
	5.5	5.40 ± 0.86 ^{Da}	6.05 ± 1.00 ^{Ca}	6.61 ± 0.95 ^{Ba}	7.06 ± 0.70 ^{Aa}	7.94 ± 0.40 ^{Aa}
虾尾外观	1.5	4.15 ± 1.01 ^{Da}	4.60 ± 0.92 ^{BCab}	4.39 ± 0.76 ^{CDa}	5.22 ± 0.85 ^{Ba}	7.50 ± 0.83 ^{Ab}
	2.5	4.45 ± 0.86 ^{Ca}	4.85 ± 0.85 ^{B^Ca}	4.83 ± 0.76 ^{Ca}	5.28 ± 0.99 ^{Ba}	7.50 ± 0.76 ^{Ab}
	3.5	4.65 ± 0.91 ^{Ca}	4.70 ± 0.78 ^{Cab}	4.78 ± 1.08 ^{Ca}	5.39 ± 0.82 ^{Ba}	7.67 ± 0.75 ^{Ab}
	4.5	4.10 ± 1.04 ^{Ca}	4.50 ± 0.80 ^{Cab}	4.11 ± 1.20 ^{Ca}	5.28 ± 0.76 ^{Ba}	7.44 ± 0.76 ^{Ab}
	5.5	2.90 ± 0.83 ^{Db}	4.35 ± 0.79 ^{Cb}	4.78 ± 0.92 ^{Ca}	5.44 ± 1.07 ^{Ba}	7.78 ± 0.79 ^{Aa}
虾尾口感	1.5	-	-	-	6.67 ± 0.74 ^{Ba}	7.17 ± 0.76 ^{Aa}
	2.5	-	-	6.25 ± 0.89 ^{Ba}	6.17 ± 0.83 ^{Bab}	7.22 ± 0.71 ^{Aa}
	3.5	-	7.00 ± 0.71 ^{Aa}	6.00 ± 1.00 ^{Bab}	5.83 ± 0.90 ^{Bbc}	7.28 ± 0.65 ^{Aa}
	4.5	5.50 ± 0.81 ^{Ca}	6.25 ± 0.89 ^{Bab}	5.65 ± 0.85 ^{Cab}	5.17 ± 0.96 ^{Cc}	7.28 ± 0.73 ^{Aa}
	5.5	5.30 ± 1.00 ^{BCa}	5.60 ± 1.07 ^{Bb}	5.25 ± 0.89 ^{BCb}	4.72 ± 1.15 ^{Cd}	7.39 ± 0.68 ^{Aa}

注:同一评价指标中同列数据右上角标有不同小写字母的数值之间有显著性差异($P < 0.05$),同行数据标有不同大写字母的数值之间有显著性差异($P < 0.05$);“-”表示虾尾未熟化至可食用状态没有进行感官评价。

表2 感官评分与小龙虾品质的相关性

Table 2 Pearson correlations between sensory score and qualities of crayfish

部位	指标	2 W/g	3 W/g	4 W/g	5 W/g	水煮
整虾表壳 外观	L^*	0.98**	0.96**	0.97**	0.02	0.82
	a^*	0.98**	0.95*	0.93*	0.99**	-0.16
	b^*	0.96**	0.96*	0.82	0.99**	0.84
	ΔE	-0.97**	-0.95*	-0.96*	-0.99**	-
虾尾外观	L^*	-0.49	-0.27	-0.63	-0.85	-0.68
	虾尾 a^*	0.59	0.38	0.74	0.75	-0.71
	虾尾 b^*	-0.24	-0.48	-0.31	0.40	-0.83
	虾尾 ΔE	-0.80	-0.89	-0.85	-0.92*	-
	脱壳完整率	0.68	0.62	0.62	-0.32	-
	含水量	-0.61	0.20	0.31	-0.78	-0.63
	脱壳完整率	0.99**	0.94*	0.83	0.36	-
虾尾口感	表面硬度	0.99**	0.85	0.66	0.88*	-0.90*
	弹性	-0.99**	-0.95*	-0.84	-0.77	0.72
	内部硬度	0.99**	0.24	-0.02	-0.79	0.84
	紧实度	0.99**	0.46	0.58	0.72	0.88*
	质量损失	-0.99**	-0.99**	-0.97*	-0.98**	-0.19
	挤压损失	0.99**	0.95*	0.97*	0.89*	0.77
	含水量	0.99**	0.75	0.99**	0.97**	0.19
	剪切力	0.99**	-0.54	-0.78	-0.89*	0.64
	剪切能	0.99**	-0.33	-0.82	-0.92*	0.66

注: *表示在 $P < 0.05$ 的水平显著相关; **表示在 $P < 0.01$ 的水平极显著相关;“-”表示未参与相关性分析。

表现为: 虾尾口感与虾尾的脱壳完整率、含水量、挤压损失、表面硬度和紧实度呈正相关, 与整虾质量损失和虾尾剪切力、剪切能呈负相关。其中虾尾口感与虾尾的含水量、挤压损失的正相关性较强, 与整虾的质量损失负相关性较强, 这说明小龙虾的质量损失越小、含水量越高、挤压损失越大, 虾尾的口感越好。尽管微波加热的虾尾弹性和口感评分呈负相关, 但这可能归因于虾尾熟化后其他质构特性或剪切特性对口感的负面影响远高于弹性(波动幅度小)的正面影响。

3 结论

相较于水煮, 小龙虾在微波加热过程中更容易表现出不均匀的温度和色泽分布, 但随着微波加热时间和功率密度的增加, 小龙虾的温度分布和橘红色泽分布的均匀性得到改善, 其中 5 W/g 微波加热 4.5 和 5.5 min 的小龙虾外观色泽分别与水煮 4.5 和 5.5 min 的小龙虾无显著差异。

微波加热过程中, 小龙虾的水分和质量损失明显高于水煮, 而且加热时间越长损失越多, 微波功率密度越大损失越快。此外, 微波加热的小龙虾比水煮小龙虾更难脱壳, 当虾尾的壳肉分离不完全时, 虾尾的完整性和表皮橘红色在脱壳过程中将被破坏。增加微波功率密度能够一定程度上提高小龙虾虾尾的脱壳完整率, 但对虾尾的橘红色泽改善不明显。相较于微波加热的小龙虾虾尾, 具有鲜艳橘红色的水煮小龙虾虾尾更受消费者喜欢。

不同微波功率密度加热的小龙虾虾尾的质构特性和剪切特性具有不同的表现, 但基本变化规律相

似。虾尾的口感与表面硬度和虾肉紧实度呈正相关, 与虾尾剪切力、剪切能呈负相关, 但对于不同功率密度的微波加热, 其虾尾的口感与质构特性和剪切特性间的相关性存在差异。相较于水煮小龙虾, 微波小龙虾虾尾的含水量和挤压损失更低, 这也是微波加热的小龙虾虾尾整体口感偏差的一个重要原因, 但合适的微波加热能够使小龙虾虾尾口感接近水煮小龙虾, 如 3 W/g 微波加热 3.5 min 的虾尾口感与水煮 3.5 min 的虾尾口感无显著差别。因此, 微波在小龙虾的热加工中具有一定应用潜力, 但要同时实现微波小龙虾在各品质指标(表壳色泽、虾尾色泽、口感等)均接近或优于水煮小龙虾, 还需进一步运用上述品质变化规律指导小龙虾微波热加工工艺的优化。

参考文献

- [1] 闫庆博, 鞠波, 甄理, 等. 出口克氏螯虾制品生产工艺[J]. 食品与药品, 2006(10): 65-68.
- [2] 陈晓明, 成兆友, 赵建民. 盱眙龙虾肌肉营养成分分析与评价[J]. 食品工业科技, 2010, 31(7): 345-349.
- [3] 赵立, 陈军, 邵兴锋, 等. 冷冻方式对熟制克氏原螯虾肉冷冻贮藏(-18℃)条件下品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(10): 232-234.
- [4] Davis J T, Lewis G W, Gilbert R J. Crawfish production[J]. Aquaculture Technical Series(USA), 1994(241): 1-11.
- [5] 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.
- [6] 董志俭, 孙丽平, 张焕新, 等. 盐煮对小龙虾感官和理化品

- 质的影响[J].食品研究与开发,2017,38(18):104-107.
- [7]甄理.蒸煮是控制冻煮小龙虾微生物的有效方法[J].冷饮与速冻食品工业,2006(1):33-35.
- [8]Moody M.Processing of freshwater crawfish:A review[J].J. Shellfish Res,1989,8:293-301.
- [9]Marshall G A,Moody M W,Hackney C R, et al.Effect of blanch time on the development of mushiness in ice-stored crawfish meat packed with adhering hepatopancreas[J].Journal of Food Science,2010,52(6):1504-1505.
- [10]薛雷,许学勤,姜启兴,等.热烫工艺对冻煮小龙虾产品品质的影响[J].食品与生物技术学报,2019,38(5):119-123.
- [11]Lorenz K,Decareau R V.Microwave heating of foods—changes in nutrient and chemical composition[J].Critical Reviews in Food Science & Nutrition,1976,7(4):339-370.
- [12]石长波,王兆宏,刘芳.水传热烹调法最佳工艺条件的研究[J].食品科学,1996(2):48-54.
- [13]Aparna K,Basaka T,Balakrishnan A R.Role of metallic and composite (ceramic-metallic) supports on microwave heating of porous dielectrics [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer,2007,50(15):3072-3089.
- [14]Salazar-González C,Martín-González M F S,López-Malo A, et al.Recent studies related to microwave processing of fluid foods[J].Food & Bioprocess Technology,2012,5(1):31-46.
- [15]Chandrasekaran S,Ramanathan S,Basak T.Microwave food processing—A review[J].Food Research International,2013,52(1):243-261.
- [16]C O,Abioye A E,Y O.Microwave heating applications in food processing[J].IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering,2014,9:29-34.
- [17]丁建英,康璁,徐建荣.东北螯虾和克氏原螯虾肌肉营养成分比较[J].食品科学,2010,31(24):427-431.
- [18]Gundavarapu S,Hung Y C,Reynolds A.Consumer acceptance and quality of microwave-cooked shrimp[J].Journal of Food Quality,1998,21(1):71-84.
- [19]Gundavarapu S,Hung Y C,Brackett R E, et al.Evaluation of microbiological safety of shrimp cooked in a microwave oven[J].Journal of Food Protection,1995,58(7):742-747.
- [20]郭力.小龙虾即食产品的研制[D].无锡:江南大学,2010.
- [21]范大明,黄建联,范海龙,等.一种小龙虾熟虾尾肉的质构特性测定方法:CN109270231A[P].2019-01-25.
- [22]Sriket P,Benjakul S,Visessanguan W, et al.Comparative studies on chemical composition and thermal properties of black tiger shrimp (*Penaeus monodon*) and white shrimp (*Penaeus vannamei*) meats[J].Food Chemistry,2007,103(4):1199-1207.
- [23]国家卫生和计划生育委员会.GB5009.3-2016 食品中水分的测定[S].北京:中国标准出版社,2016:12.
- [24]Quan T H,Benjakul S.Comparative study on the effect of duck and hen egg albumens on proteolysis and gel property of sardine surimi[J].International Journal of Food Properties,2017,20(Sup3):S2786-S2797.
- [25]Vadivambal R,Jayas D S.Non-uniform temperature distribution during microwave heating of food materials—A review[J].Food and Bioprocess Technology,2010,3(2):161-171.
- [26]Bircan C,Barringer S A.Determination of protein denaturation of muscle foods using the dielectric properties[J].Journal of Food Science,2002,67(1):202-205.
- [27]Goñi S M,Salvadori V O.Color measurement:Comparison of colorimeter vs. computer vision system [J]. Journal of Food Measurement and Characterization,2017,11(2):538-547.
- [28]Zayas J F,Naewbanij J O.The influence of microwave heating on the texture propertice of meat and collagen solubilization[J].Journal of Food Processing and Preservation,1986,10(3):203-214.
- [29]王任钰.微波对鸡胸肉糜凝胶特性的影响研究[D].广州:华南理工大学,2013.
- [30]Mora B,Curti E,Vittadini E, et al.Effect of different air/steam convection cooking methods on turkey breast meat:Physical characterization, water status and sensory properties [J]. Meat Science,2011,88(3):489-497.
- [31]姜启兴.鲮鱼肉热加工特性及其机理研究[D].无锡:江南大学,2015.
- [32]Jonsson A,Sigurgisladdottir S,Hafsteinsson H, et al.Textural properties of raw Atlantic salmon (*Salmo salar*) fillets measured by different methods in comparison to expressible moisture [J]. Aquaculture Nutrition,2001,7(2):81-90.
- [33]郭力,过世东,刘海英.盐煮和微波加热对即食龙虾质构的影响[J].食品与生物技术学报,2011,30(3):376-380.
- [34]absorbed by borosilicate glass surface [J].Spectrochemical Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2018, 196: 317-322.
- [32]吴长玲,寻崇荣,刘宝华,等.低温超微粉碎对生物酶法制油豆渣蛋白结构影响的拉曼光谱分析[J].食品科学,2019,40(7):41-47.
- [33]Ellepolá S,Choi S,Phillips D, et al.Raman spectroscopic study of rice globulin[J].Journal of Cereal Science,2006,43(1):85-93.
- [34]Taddei P,Zanna N,Tozzi S.Raman characterization of the interactions between gliadins and anthocyanins [J]. Journal of Raman Spectroscopy,2013,44(10):1435-1439.

(上接第7页)

[28]高文宏,叶瑞森,潘廷跳,等.基于拉曼光谱解析冻藏过程中鱼糜蛋白的结构变化[J].食品科学,2018,39(24):78-84.

[29]Nawrocka A,Szymańska C,Monika M, et al.Aggregation of gluten proteins in model dough after fibre polysaccharide addition [J].Food Chemistry,2017,231:51-60.

[30]Sun W,Zhao Q,Zhao M, et al.Structural evaluation of myofibrillar proteins during processing of Cantonese sausage by Raman spectroscopy [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2011,59(20):11070-11077.

[31]Li F,Li Z,Wang Y, et al.A Raman spectroscopy study on the effects of intermolecular hydrogen bonding on water molecules