

不同解冻方式对熟制小龙虾理化特性的比较分析

郑静静¹, 林琳^{1,2,3}, 张艳凌¹, 陆剑锋^{1,2,3}, 姜绍通^{1,2}

(1. 合肥工业大学食品与生物工程学院, 安徽合肥 230009) (2. 安徽省农产品精深加工重点实验室, 安徽合肥 230009) (3. 农产品生物化工教育部工程研究中心, 安徽合肥 230009)

摘要: 本文比较了超声解冻、微波解冻、静水解冻、空气解冻、冰箱解冻和低压静电场解冻对带壳和去壳小龙虾理化性质的影响。以熟制小龙虾为原料, 通过分析解冻时间、解冻损失率、持水力、硫代巴比妥酸值 (thiobarbituric acid reactive substances, TBARS)、总巯基含量及微观结构指标, 考察 6 种解冻方式对熟制小龙虾理化性质的影响。结果表明, 6 种不同的解冻方式中, 微波解冻所需时间最短, 而冰箱低温解冻时间最长, 去壳小龙虾的解冻时间显著短于带壳小龙虾解冻时间。采用 6 种不同解冻方式解冻的带壳小龙虾的解冻损失率均显著低于去壳小龙虾, 其中超声解冻的去壳虾肉解冻损失率最高 (11.14%)。不同解冻方式对小龙虾虾肉的理化性质有显著影响, 虾肉持水力、TBARS 值和总巯基含量测定结果表明低压静电场解冻效果较好; 经微波解冻和超声解冻的去壳小龙虾肉中总巯基含量较低 (分别为 0.47 和 0.54 $\mu\text{mol/g}$), 表明虾肉蛋白质氧化程度较高; 空气解冻的小龙虾肉的 TBARS 值较高 (去壳和带壳小龙虾肉分别为 0.30 和 0.28 mg/kg); 扫描电镜结果显示小龙虾经低压静电场解冻后, 肌肉组织结构完整性保持最好。说明冷冻小龙虾采用 4 $^{\circ}\text{C}$ 低温解冻 (冰箱解冻、低压静电场解冻), 更有利于其品质保持。本研究对冷冻小龙虾的综合利用提供一些理论依据。

关键词: 熟制小龙虾; 解冻方式; 理化性质; 微观结构

文章编号: 1673-9078(2020)09-188-194

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.9.0209

Comparison Analysis of Physicochemical Properties of Cooked Crayfish by Different Thawing Methods

ZHENG Jing-jing¹, LIN Lin^{1,2,3}, ZHANG Yan-ling¹, LU Jian-feng^{1,2,3}, JIANG Shao-tong^{1,2}

(1. School of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

(2. Key Laboratory for Agriculture Products Processing of Anhui Province, Hefei 230009, China)

(3. Engineering Research Center of Bio-process, Ministry of Education, Hefei 230009, China)

Abstract: To compare the effects of different thawing methods on the physical and chemical properties of crayfish with and without shell, including ultrasonic thawing, microwave thawing, thawing in static water, thawing in air, thawing in refrigerator and thawing in low-voltage electrostatic field. Using frozen cooked crayfish as raw materials, based on the analysis of thawing time, thawing loss rate, water holding capacity, thiobarbituric acid reactive substances (TBARS), total thiol content and microstructure, the effects of 6 different thawing methods on the physical and chemical properties of cooked crayfish were investigated. The results showed that among the six thawing methods, the microwave thawing time was the shortest, and the refrigerator thawing time was the longest. The thawing time of crayfish without shell was significantly shorter than that of shell crayfish. The thawing loss rate of crayfish with shell was lower than the crayfish without shell significantly. The thawing loss rate of crayfish without shell thawed by ultrasonic was the highest (11.14%). The quality of crayfish was significantly affected by thawing methods. It was shown that the effect of thawing in low-voltage electrostatic field was better than the other methods from the water holding capacity, TBARS value and total sulfhydryl content of crayfish meat. After microwave and ultrasonic thawing, the contents of sulfhydryl

引文格式:

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

ZHENG Jing-jing, LIN Lin, ZHANG Yan-ling, et al. Comparison analysis of physicochemical properties of cooked crayfish by different thawing methods [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(9): 188-194

收稿日期: 2020-03-05

基金项目: 国家虾蟹产业技术体系项目 (CARS-48); 安徽水产产业技术体系项目 (NYCYTX-2016-84)

作者简介: 郑静静 (1992-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 水产品加工与保鲜

通讯作者: 林琳 (1978-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 水产品加工与贮藏工程

group in crayfish meat without shell were low (0.47 and 0.54 $\mu\text{mol/g}$, respectively), which indicated that degree of the protein oxidation in the crayfish meat was high. The TBARS values (0.30 and 0.28 mg/kg of crayfish meat without and with shell, respectively) of crayfish thawing in air were high. The scanning electron microscope (SEM) images showed that the integrity of crayfish meat tissue was kept well after thawing in low-voltage electrostatic field. Low temperature thawing at 4 $^{\circ}\text{C}$ (refrigerator thawing, low voltage electrostatic field thawing) was more beneficial to the quality maintenance of frozen crayfish. This study provided theoretical basis for the comprehensive utilization of frozen crayfish.

Key words: cooked crayfish; thawing methods; physicochemical properties; microstructure

小龙虾是克氏原螯虾 (*Procambarus clarkii*) 的俗称, 是中国最重要的淡水经济类水生物种之一^[1]。因其肉质鲜美, 富含大量蛋白质、维生素 B 和矿物质而深受人们喜爱^[2]。近年来小龙虾养殖规模逐年扩大, 2018 年, 我国小龙虾产量 163.87 万 t, 其中年加工量为 40.9 万 t, 比 2017 年增加了 32.2%^[3]。小龙虾死后极易腐败, 产生组胺等有害物质, 因此小龙虾的贮藏和保鲜在水产加工行业至关重要。

冻藏是目前水产品储运保藏最常用的方式之一^[4], 而解冻是冻藏产品进一步使用或加工前的重要工序。解冻方法直接影响冻藏食品的品质, 不合适的解冻方式, 可能会引起汁液流失、变色、风味及质地改变、脂质氧化以及蛋白质聚集丧失结合水的能力, 导致食品质量降低^[5]。因此, 采用适宜的解冻方式对小龙虾的品质起着至关重要的作用。目前, 冷冻水产品常用的解冻方法主要包括静水解冻、自然空气解冻、超高压解冻等的外部解冻法和超声解冻、微波解冻等的内部解冻法。Cai^[6]等研究了超声联合微波解冻、远红外解冻对大口黑鲈鱼 (*Micropterus salmonides*) 品质的影响; 朱文慧^[7]等研究了室温解冻、静水解冻、流水解冻、盐水解冻、超声解冻、冷藏解冻、微波解冻及 10 $^{\circ}\text{C}$ 空气解冻对秘鲁鱿鱼品质和风味特性的影响, 然而, 关于不同解冻方式对小龙虾品质影响的研究还较少, 亟需寻求一种有效的小龙虾解冻方式, 以保证小龙虾营养品质, 从而满足多元化市场的消费需求。本文研究超声解冻 (15 $^{\circ}\text{C}$)、静水解冻 (15 $^{\circ}\text{C}$)、空气解冻 (15 $^{\circ}\text{C}$)、冰箱解冻 (4 $^{\circ}\text{C}$)、低压静电场解冻 (4 $^{\circ}\text{C}$) 和微波解冻 6 种解冻方式对冷冻的熟制去壳和带壳小龙虾的解冻时间、解冻损失率和虾肉持水力、TBARS 值、总巯基含量和虾肉微观结构的影响, 以期对熟制小龙虾解冻方式的选择提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

鲜活淡水小龙虾 (*Procambarus clarkii*), 重量 18.00 ± 2.00 g (2019 年 9 月), 购自安徽省合肥市周

谷堆水产市场。

盐酸、三氯乙酸、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠, 国药集团化学试剂有限公司; 无水乙醇, 江苏强盛功能化学股份有限公司; 硫代巴比妥酸, 上海科丰实业有限公司; 乙二胺四乙酸钠, 天津博迪化工股份有限公司 (以上试剂均为分析纯 AR); 总巯基含量检测试剂盒, Solarbio 公司。

1.2 仪器与设备

FJ-200 高速分散均质机, 上海标本模型厂; TU-1901 分光光度计, 北京普析公司; PZ1000 多路温度记录仪, 华知科电子科技有限公司; 真空冷冻干燥机, 北京博医康实验仪器有限公司; Regulus 8230 场发射扫描电子显微镜, 日立高新技术公司; NJL07-3 型实验室微波炉, 南京杰全微波设备有限公司; KQ-300VDE 型三频数控超声波清洗器, 昆山市超声仪器有限公司; 低压静电场装置, 日本 AUGU 商事株式会社; YC-260L 中科美菱医用冷藏箱, 中科美菱低温科技有限责任公司。

1.3 实验方法

1.3.1 样品处理

取鲜活小龙虾清洗干净, 在沸水中煮制 10 min, 煮制期间间歇搅拌 3 次。熟制后的小龙虾去头、冷却, 取一部分直接沥干后冷冻, 另一部分沥干、手工去壳后进行冷冻。

冷冻处理: 将沥干后的带壳和去壳小龙虾于 -18 $^{\circ}\text{C}$ 下进行冷冻处理, 将温度记录仪探头插入虾体测定温度, 至虾体中心温度达到 -15 $^{\circ}\text{C}$ 。贮藏: 将冷冻后的小龙虾每 10 g 放于一个聚乙烯塑料袋中并密封, 置于 -18 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱下贮藏。

按如下方法进行解冻, 将数显温度计的探头插入虾肉中心, 待虾肉中心温度达到 0 $^{\circ}\text{C}$ 时停止解冻, 记录解冻时间, 取虾肉进行指标检测。

A 空气解冻: 将冷冻小龙虾外包装袋去除之后, 以 15 $^{\circ}\text{C}$ 左右空气为介质进行解冻;

B 冰箱冷藏解冻: 将冷冻小龙虾外包装袋去除之

后,置于4℃冰箱冷藏室解冻;

C 静水解冻:将冷冻小龙虾用聚乙烯真空包装袋重新包装好,浸没在静水中进行解冻,初始水温为15℃,控制水温(15±1)℃;

D 微波解冻:将冷冻小龙虾外包装袋去除之后,放入微波炉,解冻功率设置为300 W,以虾肉中心温度达到0℃为解冻终点;

E 超声波解冻:将冷冻小龙虾用聚乙烯真空包装袋重新包装好,置于频率40 kHz,功率400 W的超声波清洗机中解冻,初始水温为15℃,控制水温(15±1)℃;

F 低压静电场解冻:将冷冻小龙虾外包装袋去除之后,置于条件为2.5 kV、50 Hz的低压静电场中解冻(4℃)。

1.3.2 理化指标的测定

1.3.2.1 解冻损失率

精确称量解冻前及解冻后虾肉的质量,按公式(1)计算解冻损失率。

$$\text{解冻损失率}/\% = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_1 为解冻前虾肉质量, g; m_2 为解冻后虾肉质量, g。

1.3.2.2 持水力

称取10 g左右虾肉,用脱脂棉包好放入50 mL离心管中,4℃、9000 r/min条件下离心10 min,离心后剥去脱脂棉,再次称量,按公式(2)计算持水力。

$$\text{持水力}/\% = \left(1 - \frac{m_2}{m_1}\right) \times 100\% \quad (2)$$

式中: m_1 为离心前虾肉质量, g; m_2 为离心后虾肉质量, g。

1.3.2.3 硫代巴比妥酸值的测定

称取样品5 g(精确到0.01 g)置入100 mL具塞锥形瓶中,准确加入50 mL三氯乙酸混合液,摇匀,加塞密封,置于恒温振荡器上50℃振摇30 min,取出,冷却至室温,用双层定量慢速滤纸过滤,弃去初滤液,续滤液备用。准确移取上述滤液和标准系列溶液各5 mL分别置于25 mL具塞比色管内,另取5 mL三氯乙酸混合液作为样品空白,分别加入5 mL硫代巴比妥酸(TBA)水溶液,加塞,混匀,置于90℃水浴内反应30 min,取出,冷却至室温。以样品空白调节零点,于532 nm处1 cm光径测定样品溶液和标准系列溶液的吸光度值,绘制标准曲线。TBARS值以每千克脂质氧化样品溶液中丙二醛(MDA)的质量(mg)表示。

1.3.2.4 总巯基含量的测定

参考试剂盒说明书进行测定。称取0.1 g样品,加入1 mL的提取液,制备成10%的匀浆,常温下8000 r/min离心10 min,取上清液待测。对照管加入0.2 mL样品、空白管加入0.2 mL标准品,分别加入0.75 mL试剂一和0.5 mL蒸馏水。测定管加入0.2 mL样品、测定管加入0.2 mL标准品,分别加入0.75 mL试剂一和0.75 mL试剂二。混匀,室温10 min,双蒸水调零,于412 nm下测定吸光值。

1.3.2.5 扫描电镜

将样品切成5 mm×5 mm×5 mm的小块置于具塞离心管内,加入5 mL电镜固定液在4℃条件下放置24 h;用pH7.2的磷酸缓冲液(0.1 mol/L)清洗4次,每次15 min;再用50%、70%、80%、90%、95%、100%的乙醇溶液依次脱水,每次15 min,再经真空冷冻干燥(15 h左右)后,用真空离子溅射仪喷金,最后用扫描电镜观察并拍照^[8]。

1.3.3 数据处理

实验重复做三次平行来检测不同解冻方法对小龙虾品质的影响。所有数据以“平均值±标准差”表示,采用Office 2017进行数据处理,SPSS 17.0进行显著性分析($p < 0.05$ 表示差异显著),Origin 8.5软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同解冻方式对熟制小龙虾解冻时间的影响

表1 不同解冻方式对小龙虾解冻时间的影响

Table 1 Effect of different thawing methods on the thawing time of crayfish

处理方式	解冻时间/min	
	去壳小龙虾	带壳小龙虾
空气解冻	20.38±2.69 ^{aA}	31.24±1.48 ^{cB}
冰箱解冻	112.94±8.99 ^{aA}	202.47±7.07 ^{aB}
低压静电场解冻	101.01±2.18 ^{bA}	173.76±10.74 ^{bB}
静水解冻	12.63±0.77 ^{cdA}	18.29±1.36 ^{cdB}
超声解冻	7.00±0.47 ^{dA}	10.21±0.77 ^{dB}
微波解冻	2.17±0.11 ^{dA}	3.28±0.26 ^{dA}

注:不同小写字母表示不同解冻方式之间差异显著,不同大写字母表示带壳和去壳小龙虾样品差异显著($p < 0.05$)。

表1中列出了采用6种不同解冻方法对去壳和带壳小龙虾进行解冻,虾体中心温度达到0℃所需要的时间。从表中可以看出,采用不同的解冻方法,小龙虾虾肉的解冻时间差异显著,其中微波解冻时间最短,去壳和带壳小龙虾的解冻时间分别为2.17和3.28

min。在 15℃ 条件下的 3 种解冻方法中, 超声解冻的时间最短, 其次为静水解冻, 空气解冻时间最长。一方面超声在传播过程中产生的空化效应能显著增大传热系数^[9]; 另一方面超声衰减的声能被虾肉内部组织吸收转化为热, 从而加快解冻速率。4℃ 条件下的 2 种解冻方法 (冰箱解冻和低压静电场解冻) 所需的解冻时间显著长于 15℃ 条件下的 3 种解冻方法及微波解冻, 其中冰箱解冻所需时间最长, 去壳和带壳小龙虾的解冻时间分别为 112.94 和 202.47 min。与冰箱解冻相比, 低压静电场解冻较快, 可能是由于在静电场的作用下, 利用电晕电极产生离子风, 加快水分的蒸发, 使解冻速率加快^[10]。李侠等^[11]研究认为静电场解冻过程中加速了冰层结构中氢键的断裂, 解冻速度加快, 增强了蛋白质水和能力, 从而解冻汁液流失降低。

2.2 不同解冻方式对小龙虾解冻损失率的影响

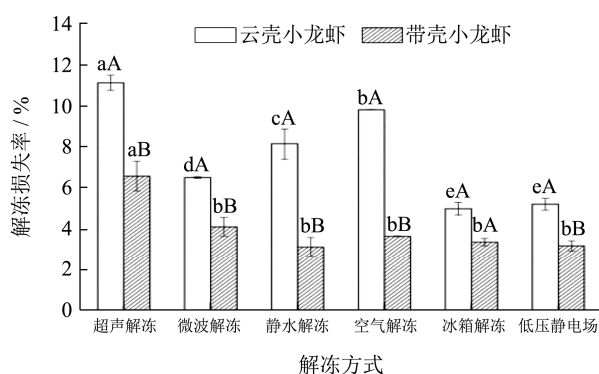


图 1 不同解冻方式对小龙虾解冻损失率的影响

Fig.1 Effects of different thawing methods on the thawing loss rate of crayfish

注: 不同小写字母表示不同解冻方式之间差异显著, 不同大写字母表示带壳和去壳小龙虾样品差异显著 ($p < 0.05$)。

冷冻后的肉类产品在解冻时, 内部冰晶融化的水若不能回到组织中, 会变成汁液流出, 造成较多的重量损失, 同时也会影响肉的品质^[12]。不同解冻方式对带壳小龙虾及去壳小龙虾解冻损失率的影响见图 1。从图 1 中可以看出, 6 种解冻方法均会产生一定的解冻损失, 而除冰箱解冻外, 其他解冻方法的带壳小龙虾的解冻损失率均显著低于去壳小龙虾 ($p < 0.05$), 可能由于虾壳的保护作用, 能一定程度防止虾肉中水分的流失。超声解冻的带壳小龙虾的解冻损失率最高 (11.14%), 这可能是由于在冻结的虾肉组织中超声波大幅度衰减, 且衰减程度会随组织温度升高而明显增加, 即超声振动产生的能量被虾体吸收, 能量传递过程中导致虾体内外温度不均匀, 内部汁液流失。相比微波、静水和空气解冻, 低压静电场解冻和冰箱解冻的解冻损失率均较低, 可能是由于低温解冻, 降低

了冷冻产品的表面温差, 对解冻汁液重新渗入细胞有促进作用^[13]。

2.3 不同解冻方式对小龙虾持水力的影响

不同解冻方式对小龙虾持水力的影响如图 2 所示, 从图中可以看出, 与新鲜虾肉 (75.91%) 相比, 经冷冻再解冻的虾肉样品的持水力均有一定程度的降低; 超声解冻、空气解冻、静水解冻和冰箱解冻的带壳和去壳小龙虾虾肉的持水力无显著差异, 而微波解冻和低压静电场解冻的带壳小龙虾虾肉的持水力显著高于去壳小龙虾虾肉 ($p < 0.05$)。持水力是肌肉组织以物理方式阻止肌肉内水分渗出的能力, 持水力越高, 说明解冻后对肌肉细胞组织完整性保持越好^[14]。虾肉在冷冻过程中形成的冰晶挤压肌肉组织, 使其发生形变, 导致肌原纤维失水收缩, 持水能力下降^[15]。6 种解冻方法中, 微波解冻的去壳虾肉持水力最低 (55.14%), 可能是由于解冻过程产生大量的热量, 破坏蛋白质网络结构, 导致其持水力下降。与新鲜样品比较, 带壳小龙虾经冰箱解冻和低压静电场解冻的持水力均无显著性差异 (分别为 73.28 和 74.46%), 可能是由于低温解冻时, 周围环境温度较低, 与虾体内温差较小, 虾肉内冰晶融化缓慢, 对虾肉细胞造成的损伤最小, 同时, 低压静电场通过电离作用产生负离子, 使蛋白质纤维间的负电荷增加, 肌原纤维溶胀, 间隙变小, 从而提高了其持水能力^[16]。

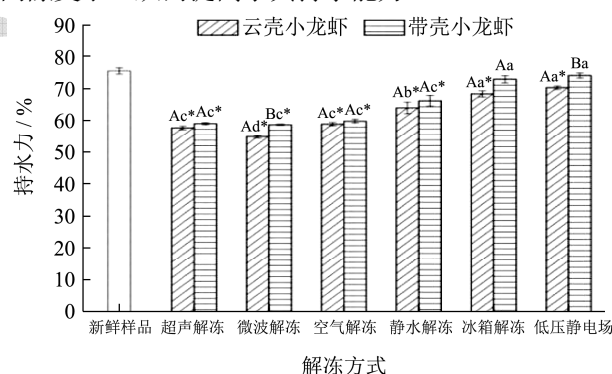


图 2 不同解冻方式对小龙虾肉持水力的影响

Fig.2 Effects of different thawing methods on the water holding capacity of crayfish meat

注: 不同小写字母表示不同解冻方式之间差异显著, 不同大写字母表示带壳和去壳小龙虾样品差异显著, *表示与新鲜虾肉样品之间差异显著 ($p < 0.05$)。

2.4 不同解冻方式对小龙虾脂肪氧化情况的影响

硫代巴比妥酸值 (TBARS) 值常用来反映肉中脂

肪氧化酸败的程度^[17,18]。研究表明,水产品中的脂肪酸容易发生氧化酸败,生成酮、醛、酸等具有挥发性气味的物质,使水产品的感官、风味、营养价值等受损^[19]。TBARS 值通过对脂质氧化产物丙二醛的定量检测,可以准确反映水产品的脂质氧化程度^[20]。由图 3 可知,不同解冻方式对小龙虾 TBARS 值的影响存在显著性差异 ($p<0.05$)。空气解冻的小龙虾的 TBARS 值最高(去壳和带壳小龙虾分别为 0.30 和 0.28 mg/kg),这可能是由于解冻过程小龙虾暴露在空气中时间较长,加剧了脂肪氧化。冰箱解冻和低压静电场解冻条件下的虾肉 TBARS 值显著低于其他解冻方式 ($p<0.05$),与新鲜样品 (0.11 mg/kg) 无显著差别,这可能是由于低温可以抑制酶的活性,降低脂肪氧化程度。在微波解冻和超声解冻的过程中,温度升高会加速蛋白质氧化中间产物发生反应,促进脂质氧化反应的发生^[21], Boonsumrej 等^[22]的研究结果与本文相似。同时超声解冻和微波解冻的去壳小龙虾的 TBARS 值显著高于带壳小龙虾的 TBARS 值 ($p<0.05$),而其他 4 种解冻方法,带壳小龙虾的 TBARS 值与去壳小龙虾的 TBARS 值无显著性差异,这说明在解冻速度较快的解冻过程中,虾壳对虾肉的保护作用更明显。

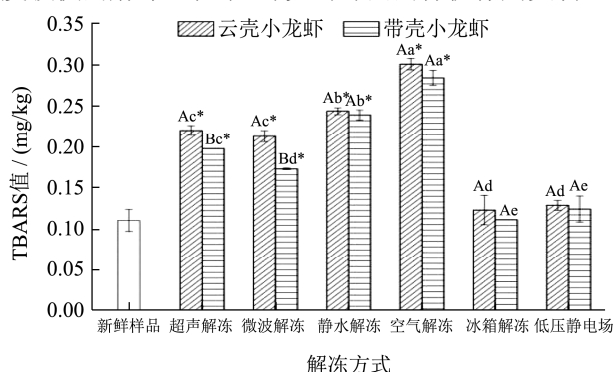


图 3 不同解冻方式对小龙虾肉 TBARS 值的影响

Fig.3 Effects of different thawing methods on the TBARS value of crayfish meat

注:不同小写字母表示不同解冻方式之间差异显著,不同大写字母表示带壳和去壳小龙虾样品差异显著,*表示与新鲜虾肉样品之间差异显著 ($p<0.05$)。

2.5 不同解冻方式对小龙虾总巯基含量的影响

解冻方式对小龙虾总巯基含量的影响如图 4 所示,与新鲜虾肉样品 ($0.97 \mu\text{mol/g}$) 相比,经冷冻再解冻的虾肉中的总巯基含量均显著下降 ($p<0.05$);低压静电场解冻、冰箱解冻和静水解冻的带壳小龙虾的总巯基含量显著高于其他几种解冻方法(分别为 0.85 、 0.79 和 $0.73 \mu\text{mol/g}$),而微波解冻和超声解冻的去壳小龙虾的总巯基含量较低(分别为 0.47 和 0.54

$\mu\text{mol/g}$)。相同解冻方法处理的带壳和去壳小龙虾,除低压静电场解冻和空气解冻外,其他 4 种方法处理的带壳小龙虾肉中总巯基含量均显著高于去壳小龙虾 ($p<0.05$)。空气解冻中去壳的小龙虾总巯基含量明显高于带壳小龙虾的总巯基含量,这可能是由于带壳小龙虾受虾壳保护,冻结时形成冰晶的速率较慢,冰晶较大,解冻过程中受时间和温度影响使虾肉蛋白变性程度增加。巯基含量是表征蛋白氧化的一个重要指标,蛋白质中巯基会随着氧化条件的增强生成亚砷等氧化产物^[23]。高泽磊等^[24]表明,蛋白质交联和二硫键聚集作用均可导致巯基含量降低,因此,巯基含量越高,说明蛋白氧化程度越低。实验结果表明,虾肉的蛋白质氧化作用可能主要与温度相关,低温解冻能有效降低虾肉的蛋白氧化程度,解冻温度高,可能会导致肌球蛋白头部结构发生改变,巯基之间生相互作用,使蛋白质分子之间的聚集作用更强烈。

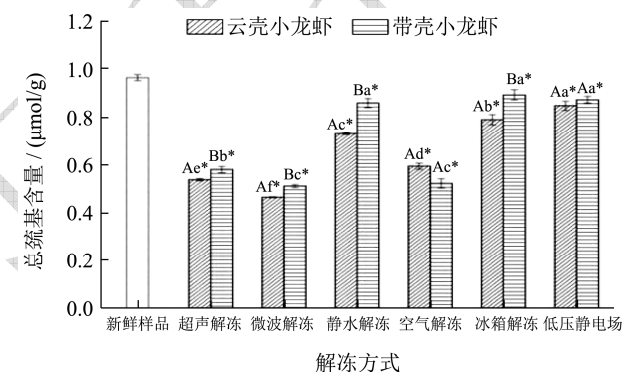


图 4 不同解冻方式对小龙虾肉总巯基含量的影响

Fig.4 Effects of different thawing methods on the total thiol content of crayfish meat

注:不同小写字母表示不同解冻方式之间差异显著,不同大写字母表示带壳和去壳小龙虾样品差异显著,*表示与空白之间差异显著 ($p<0.05$)。

2.6 不同解冻方式对小龙虾微观结构的影响

对不同解冻方式下去壳小龙虾和带壳小龙虾虾肉的微观组织结构进行观察,结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,不同解冻方式对虾肉的组织结构有显著影响。低压静电场解冻后的虾肉肌束排列紧密,肌肉微观组织结构保持完整。Qian 等^[10]研究表明,肌纤维束缝隙变大,肌肉持水性下降,直接影响解冻时汁液渗出的多少,这与电场解冻降低解冻损失的结果相一致。冰箱解冻小龙虾微观结构仅次于低压静电场解冻,可能是由于低温抑制蛋白酶活性及肌纤维降解^[25]。与其它几种解冻方式相比,空气解冻对小龙虾肌肉结构影响最大,肌纤维束变得松弛,间隙变大,这可能是由于小龙虾暴露在空气中时间较长,使蛋白质变性,破

坏肌肉的紧密结构^[26]；微波解冻和超声解冻对虾肉微观结构的影响较静水解冻对虾肉微观结构的影响小。总体来看，低温条件下的解冻处理对虾肉组织结构影响较小。

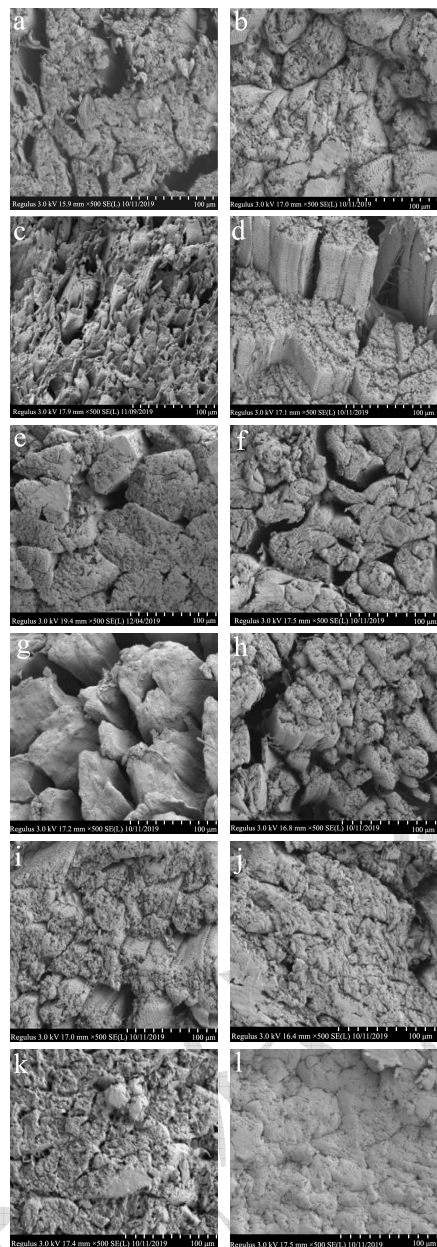


图5 不同解冻方式对小龙虾肉微观结构的影响

Fig.5 Effects of different thawing methods on the micro-structure of crayfish meat

注：a：微波（去壳）；b：微波（带壳）；c：超声（去壳）；d：超声（带壳）；e：静水（去壳）；f：静水（带壳）；g：空气（去壳）；h：空气（带壳）；i：冰箱（去壳）；j：冰箱（带壳）；k：低压静电场（去壳）；l：低压静电场（带壳）。

3 结论

不同解冻方式会对小龙虾的解冻损失率、持水力、总巯基含量和 TBARS 值产生不同的影响。6 种解冻方

式中，空气解冻和微波解冻后，小龙虾品质较差。虽然微波解冻时间最短，但解冻后总巯基含量较低，说明蛋白质氧化严重，其中带壳小龙虾的总巯基含量值显著高于去壳小龙虾的总巯基含量值。超声解冻后小龙虾解冻损失率最高，TBARS 值较高。冰箱解冻、低压静电场解冻和静水解冻的带壳小龙虾的总巯基含量和持水力显著高于其他几种解冻方法；经低压静电场解冻和冰箱解冻的带壳小龙虾的解冻损失率和 TBARS 值无显著性差异；分析小龙虾微观结构可知，低压静电场解冻对小龙虾肌肉完整性损伤最小，其次为冰箱解冻，而空气解冻后小龙虾肌纤维束变得松弛，间隙变大。低压静电场解冻和冰箱解冻虽然时间较长，但对保持小龙虾品质效果较好，且带壳小龙虾品质保持优于去壳小龙虾。综上所述，4℃低温解冻对解冻后小龙虾的品质影响较小，是冷冻熟制小龙虾较为理想的解冻方式，对于普通消费者，建议采用冰箱低温解冻小龙虾产品，工厂可采用低压静电场解冻设备，以保证小龙虾的加工品质。

参考文献

- [1] Yi S, Li Y, Shi L, et al. Characterization of population genetic structure of red swamp crayfish, *Procambarus clarkii*, in China [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 5586
- [2] Dai L S, Abbas M N, Kausar S, et al. Transcriptome analysis of hepatopancreas of *Procambarus clarkii* challenged with polyriboinosinic polyribocytidylic acid (poly I:C) [J]. Fish and Shellfish Immunology, 2017, 71: 144-150
- [3] 农业部渔业局.中国渔业统计年鉴[M].北京:中国农业出版社,2019
- [4] Bureau of Fisheries of Ministry of Agriculture of China. China fisheries Yearbook [M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2019
- [5] 李银,孙红梅,张春晖,等.牛肉解冻过程中蛋白质氧化效应分析[J].中国农业科学,2013,46(7):1426-1433
- [6] LI Yin, SUN Hong-mei, ZHANG Chun-hui, et al. Analysis of protein oxidation effect during beef thawing [J]. Chinese Agricultural Sciences, 2013, 46(7): 1426-1433
- [7] 关志强,张珂,李敏,等.不同解冻方法对冻藏罗非鱼片理化性能的影响[J].渔业现代化,2016,43(4):38-43
- [8] GUAN Zhi-qiang, ZHANG Ke, LI Min, et al. Effects of different thawing methods on physicochemical properties of frozen tilapia fillets [J]. Fishery Modernization, 2016, 43(4): 38-43
- [9] Cai L, Zhang W, Cao A, et al. Effects of different thawing methods on the quality of largemouth bass (*Micropterus*

- salmonides) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 120: 108908
- [7] 朱文慧, 宦海珍, 步营, 等. 不同解冻方式对秘鲁鱿鱼肌肉品质和风味特性的影响[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(18): 84-89
- ZHU Wen-hui, HUAN Hai-zhen, BU Ying, et al. Effects of different thawing methods on muscle quality and flavor characteristics of Peru squid [J]. Food Research and Development, 2019, 40(18): 84-89
- [8] 叶韬, 戴慧敏, 林琳, 等. 不同处理条件下鲢鱼糜凝胶水分状态和微观结构的特征[J]. 南方水产科学, 2019, 15(2): 102-109
- YE Tao, DAI Hui-min, LIN Lin, et al. Characteristics of water state and microstructure of mullet gel under different treatment conditions [J]. Southern Fisheries Science, 2019, 15(2): 102-109
- [9] Kiani H, Zhang Z, Sun D W. Experimental analysis and modeling of ultrasound assisted freezing of potato spheres [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, 26: 321-331
- [10] Qian S, Li X, Wang H, et al. Effects of low voltage electrostatic field thawing on the changes in physicochemical properties of myofibrillar proteins of bovine *Longissimus dorsi* muscle [J]. Journal of Food Engineering, 2019, 261: 140-149
- [11] 李侠, 杨方威, 王航, 等. 静电场辅助冻结-解冻对牛肉肌原纤维蛋白二级结构的影响[J]. 核农学报, 2018, 32(9): 1750-1756
- LI Xia, YANG Fang-wei, WANG Hang, et al. Effects of electrostatic field-assisted freeze-thaw on the secondary structure of beef myofibrillar protein [J]. Chinese Journal of Nuclear Agriculture, 2018, 32(9): 1750-1756
- [12] Huff-lonergan E, Lonergan S M. Mechanisms of water-holding capacity of meat: The role of postmortem biochemical and structural changes [J]. Meat Science, 2005, 71(1): 194-204
- [13] 翁梅芬, 邹延军, 樊明明, 等. 不同解冻方式对碎虾仁品质特性的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(16): 162-166
- WENG Mei-fen, XUN Yan-jun, FAN Ming-ming, et al. Influence of different thawing methods on the quality of shrimp pieces meat [J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(16): 162-166
- [14] 杨巨鹏, 胡远辉, 吕春霞, 等. 不同解冻方式对液氮冻结养殖大黄鱼品质特性的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(6): 259-264, 271
- YANG Ju-peng, HU Yuan-hui, LYU Chun-xia, et al. Effects of different thawing methods on quality characteristics of frozen yellow croakers cultured in liquid nitrogen [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(6): 259-264, 271
- [15] Siddaiah D, Reddy G V S, Raju C V, et al. Changes in lipids, proteins and kamaboko forming ability of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) mince during frozen storage [J]. Food Research International, 2001, 34(1): 47-53
- [16] 欧阳杰, 倪锦, 吴锦婷, 等. 解冻方式对大黄鱼解冻效率和品质的影响[J]. 肉类研究, 2016, 30: 30-34
- OUYANG Jie, NI Jin, WU Jin-ting, et al. Effect of thawing methods on thawing efficiency and quality of large yellow croaker [J]. Meat Research, 2016, 30: 30-34
- [17] 郑振霄, 周聃, 冯俊井, 等. 3 种保鲜方法对鲈鱼贮藏期间鲜度的影响[J]. 中国食品学报, 2016, 16(1): 181-187
- ZHENG Zhen-xiao, ZHOU Dan, FENG Jun-jing, et al. Effects of three fresh-keeping methods on freshness of catfish during storage [J]. Chinese Journal of Food Science, 2016, 16(1): 181-187
- [18] 李念文, 谢晶, 周然, 等. 不同真空蒸汽解冻条件对金枪鱼感官的影响[J]. 制冷学报, 2014, 35(5): 76-82
- LI Nian-wen, XIE Jing, ZHOU Ran, et al. Effects of different vacuum steam thawing conditions on the sensory characteristics of tuna [J]. Journal of Refrigeration, 2014, 35(5): 76-82
- [19] 米红波, 刘爽, 李学鹏, 等. 天然抗氧化剂在抑制水产品贮藏过程中脂质氧化的研究进展[J]. 食品工业科技, 2016, 37(8): 364-368, 373
- MI Hong-bo, LIU Shuang, LI Xue-peng, et al. Study on natural antioxidants in inhibiting lipid oxidation during the storage of aquatic products [J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(8): 364-368, 373
- [20] Oliveira F A D, Neto O C, Santos R, et al. Effect of high pressure on fish meat quality - a review [J]. Trends in Food Science and Technology, 2017, 66(1): 1-19
- [21] Soyer A, Özalp B, Dalmiş Ü, et al. Effects of freezing temperature and duration of frozen storage on lipid and protein oxidation in chicken meat [J]. Food Chemistry, 2010, 120: 1025-1030

(下转第 108 页)