

解冻方式对炆蟹食用品质的影响

尚佳宇¹, 徐祥¹, 徐大伦¹, 谷贵章², 邹祖全³, 张进杰^{1,*}

(1. 宁波大学食品科学与工程学院, 浙江 宁波 315832; 2. 湖州市食品药品检验研究院, 浙江 湖州 313002;

3. 宁波市北仑区疾病预防控制中心, 浙江 宁波 315899)

摘要: 为研究不同解冻方式对冻藏炆蟹食用品质的影响, 筛选食用前的最佳解冻方式, 对低温解冻、室温解冻、流水解冻、超声解冻和脉冲磁场辅助解冻5种方式的解冻曲线、感官评价、电子舌、蟹肉蛋白质及其降解产物和呈味核苷酸含量变化进行分析。结果表明: 超声和脉冲磁场辅助解冻最具时效性(10.4、26.2 min), 低温解冻最耗时(312.6 min)。脉冲磁场辅助解冻蟹肉的色泽、质地和气味的评分最高, 超声解冻的口感评分最好。电子舌结果表明, 低温解冻、脉冲磁场辅助解冻和超声解冻蟹肉品质较接近, 与流水解冻和室温解冻之间存在较大差异。超声解冻蟹肉的水分质量分数最高(84.37%), 脉冲磁场辅助解冻的蛋白降解指数最低(13.83%), 流水解冻的蟹肉水分质量分数最低(77.36%), 且蛋白降解指数最高(16.64%)。低温解冻蟹肉的总游离氨基酸含量最高(2 885.78 mg/100 g), 脉冲磁场辅助和超声解冻蟹肉中谷氨酸、甘氨酸和丙氨酸的含量相近, 分别为97.50、665.80 mg/100 g和487.20 mg/100 g及92.30、642.40 mg/100 g和490.50 mg/100 g, 显著高于其他3种解冻方式。不同解冻方式对炆蟹蟹肉中呈味核苷酸作用显著, 超声和脉冲磁场辅助解冻蟹肉中呈味核苷酸具有较高的含量, 以脉冲磁场辅助解冻蟹肉中等效鲜味浓度最高(44.38 g/100 g)。因此, 脉冲磁场辅助解冻最适宜作为冻藏炆蟹的解冻方式。

关键词: 炆蟹; 解冻; 超声波; 脉冲磁场; 游离氨基酸; 核苷酸

Effects of Thawing Methods on Eating Quality of Salted Crab

SHANG Jiayu¹, XU Xiang¹, XU Dalun¹, GU Guizhang², ZOU Zuquan³, ZHANG Jinjie^{1,*}

(1. College of Food Science and Engineering, Ningbo 315832, China; 2. Huzhou Institute for Food and Drug Control, Huzhou 313002, China; 3. Ningbo Beilun District Center for Disease Control and Prevention, Ningbo 315899, China)

Abstract: In order to investigate the effects of different thawing methods on the eating quality of frozen salted crab and further to select the best thawing method, this study compared and analyzed the thawing curves using five thawing methods including low temperature thawing, room temperature thawing, running water thawing, ultrasonic thawing and pulsed magnetic field assisted thawing, and tested the quality attributes of the thawed samples by sensory evaluation and electronic tongue. Besides, the contents of proteins and their degradation products as well as flavor nucleotides were measured. The results showed that ultrasonic and pulsed magnetic field assisted thawing were the most time-saving (10.4 and 26.2 min, respectively), and low temperature thawing was the most time-consuming (312.6 min). The sensory scores for color, texture and odor of crab meat thawed by pulsed magnetic field were the highest, and the sensory score for taste of crab meat thawed by ultrasonic was the highest. The results of electronic tongue showed that the quality of salted crab meat treated by low temperature thawing, pulsed magnetic field assisted thawing and ultrasonic thawing was closer to each other, but significantly different from that of salted crab meat treated by running water thawing and room temperature thawing. The moisture content of salted crab meat thawed by ultrasound was the highest (84.37%), while the proteolysis index of salted crab meat thawed by pulsed magnetic field was the lowest (13.83%), and salted crab meat thawed by flowing water had the lowest moisture content (77.36%) and the highest proteolysis index (16.64%). The total free amino acid content of low-temperature thawed salted crab meat was the highest (2 885.78 mg/100 g). The contents of glutamate, glycine and alanine

收稿日期: 2023-05-25

基金项目: 宁波市科技特派员项目(2022S209); 宁波市自然科学基金项目(2022J019);

浙江省医药卫生科技项目(2023XY06); “十三五”国家重点研发计划重点专项(2020YFD0900903)

第一作者简介: 尚佳宇(1999—)(ORCID: 0000-0003-2707-1119), 男, 硕士研究生, 研究方向为水产品加工。

E-mail: 1052322382@qq.com

*通信作者简介: 张进杰(1981—)(ORCID: 0000-0001-5225-1299), 男, 副教授, 博士, 研究方向为水产品加工。

E-mail: jackace@163.com

in salted crab meat thawed by pulsed magnetic field and ultrasonic were similar (97.50 vs 92.30 mg/100 g, 665.80 vs 642.40 mg/100 g, and 487.20 vs 490.50 mg/100 g, respectively, which were significantly higher than those of salted crab thawed by the other three methods. The different thawing methods had significant effects on flavor nucleotides in salted crab meat. Higher contents of flavor nucleotides were detected in salted crab meat thawed by ultrasound and pulsed magnetic field, with the highest equivalent umami concentration (EUC) being found in pulsed magnetic field thawed crab meat (44.38 g/100 g). Therefore, pulsed magnetic field thawing was the most suitable thawing method for frozen salted crab.

Keywords: salted crab; thawing; ultrasonic; pulsed magnetic field; free amino acid; nucleotide

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230525-241

中图分类号: TS254.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2024) 06-0192-07

引文格式:

尚佳宇, 徐祥, 徐大伦, 等. 解冻方式对炆蟹食用品质的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(6): 192-198. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230525-241. <http://www.spkx.net.cn>

SHANG Jiayu, XU Xiang, XU Dalun, et al. Effects of thawing methods on eating quality of salted crab[J]. Food Science, 2024, 45(6): 192-198. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230525-241. <http://www.spkx.net.cn>

炆蟹是我国浙东地区一种预制蟹菜品, 是将新鲜三疣梭子蟹 (*Portunus trituberculatus*) 用一定比例的盐和烧酒低温腌制12~36 h而成, 其味道鲜美、营养价值高, 独具地方特色。三疣梭子蟹产量大, 在我国沿海, 特别是渤海和东海地区占有重要经济地位^[1], 由于捕捞和销售具有很强的季节性, 主要集中在每年11月份到次年1月份左右^[2]。在梭子蟹捕获季节生产炆蟹, 是一种有效高值化加工途径, 经组合快速冻结和恒温冻藏保鲜处理^[3], 可以为消费者提供价廉物美的炆蟹产品。有学者研究发现, 由于炆蟹在自然解冻时水分子再结晶、蛋白质降解、油脂氧化以及肌原纤维蛋白质的交联和聚合等过程会使品质迅速变化, 且导致蛋白质降解和油脂氧化严重^[4-5], 而微波解冻则会严重破坏肌肉蛋白组织结构, 出现肌纤维断裂和肌纤维间隙增大等现象^[6]。

目前, 解冻处理方式包括低温解冻、室温解冻、流动水解冻、静水解冻、微波解冻等传统解冻方法, 以及超声解冻和脉冲磁场辅助解冻等新型解冻方法^[7]。现已有许多学者研究了不同解冻方式对食品品质的影响, 如凌胜男等^[8]比较了不同解冻方式对鳃鱼鲜度及挥发性风味物质的影响, 发现超声解冻可以降低样品中饱和直链醛和醇类化合物含量, 较好地保持挥发性风味物质含量; Chu Yuanming等^[9]研究了不同功率的超声波(200、240、280 W和320 W)对冷冻大黄鱼解冻过程中品质的影响, 结果表明超声解冻比自然解冻的冷冻大黄鱼的解冻时间更短, 新鲜度和色泽更好, 油脂氧化程度更低等, 且经综合分析得出240 W超声解冻的冷冻大黄鱼具有更优的品质; Jiang Junbo等^[10]研究了磁场辅助解冻对冷冻牛里脊肉理化质量及组织的影响, 结果表明, 磁场辅助解冻缩短了解冻时间, 适当的磁场强度(10~40 Gs)解冻损失、硫代巴比妥酸反应物值、蒸煮损失和剪切力均显著降低, 在解冻冷冻食品中具有良好的应用前景。然而,

目前关于炆蟹解冻方式的理论研究较少, 特别是关于蛋白质降解和非挥发呈味化合物的研究。

因此, 本研究以解冻曲线、含水率、蛋白降解率、电子舌、感官评价、核苷酸和游离氨基酸为指标, 对比分析低温解冻、室温解冻、流水解冻、超声解冻和脉冲磁场辅助解冻方式对模拟商超售卖的冻炆蟹肌肉品质和风味物质的影响, 以期对炆蟹预制菜的科学食用方法提供一定的理论参考。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

新鲜海捕三疣梭子蟹雌蟹(120只, 体质量约(350±30)g, 蟹脚完整, 活力好)购于宁波东富水产品公司。

53°烧酒、盐购于浙江宁波当地超市; 浓硫酸、盐酸、硼酸、高氯酸、溴甲酚绿、甲基红和三氯乙酸等其他化学试剂(均为分析纯) 国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

SA402B电子舌 日本INSENT公司; KJELTEC 2300凯氏定氮仪 瑞典Foss公司; XO-5200DTD超声波清洗机 南京先欧仪器制造公司; MFI-T2磁场高低温试验箱 江苏秉宏生物科技有限公司; Acquity超高效液相色谱仪 美国Waters公司; L8800自动氨基酸分析仪 日本日立有限公司。

1.3 方法

1.3.1 样品预处理

蟹样在冰中运送到实验室, 用流动的水清洗干净。按浙江沿海地区炆蟹生产工艺, 以0℃腌料(盐质量分数6%, 酒体积分数6%)盐渍36h, 取出沥干, 置于一60℃速冻6h, 转入-20℃冰柜中冻藏, 待解冻处理和指标检测。

1.3.2 解冻方法及解冻曲线的测定

按表1的方法随机取出5组冷冻炆蟹进行解冻。在解冻过程中,将热电偶探针从炆蟹腹部插入到蟹肉中心,实时记录炆蟹蟹肉中心温度,待蟹肉中心温度达到4℃时停止解冻,选取-20℃升高到0℃所需时间为炆蟹的解冻时间。冷冻炆蟹解冻完成后,立即进行切分处理,为避免蟹黄干扰,需小心剥去蟹黄后取出蟹肉部分进行感官评价和理化指标分析。

表1 5种解冻方式
Table 1 Five thawing methods

解冻方法	操作方法
低温解冻	将冷冻的炆蟹放入密封袋中,放在4℃的冰箱中解冻
室温解冻	将冷冻的炆蟹放入密封袋中,置于试验台上,室温(20±2)℃解冻
流水解冻	将装入密封袋的冷冻炆蟹放在自来水流下,水流均匀地清洗螃蟹的表面,其流量约为60 mL/s
超声解冻	将装有冷冻炆蟹密封袋置于超声波清洗机中浸泡解冻,水温为(20±2)℃,工作频率为40 kHz,功率为250 W
脉冲磁场辅助解冻	将装有冷冻炆蟹密封袋置于磁场试验箱中解冻,温度为(20±2)℃,脉冲磁场强度为0~50 MT

1.3.3 感官分析

邀请10名经过一定感官评定培训的人员组成评定小组,对切分后蟹肉的色泽、质地、气味、口感依据表2进行评价。

表2 炆蟹的感官评价标准
Table 2 Sensory evaluation criteria for salted crab

评价	色泽	质地	气味	口感
好 (8~10分)	外壳亮青色,表面光亮; 蟹肉雪白;蟹黄金黄	肉质饱满,富有弹性; 蟹黄蟹肉分离	蟹香味浓郁,有海水的 咸腥香,且醇香淡雅	蟹肉嫩滑有质感,咸度 适中,鲜美;蟹黄软糯
较好 (5~7分)	外壳青色,表面较为光亮; 蟹肉白色;蟹黄黄色	肉质饱满,富有弹性; 蟹黄蟹肉相连,但易分离	蟹香味浓郁,海水的咸 腥味较浓,有醇香味	蟹肉较软,咸度适中, 较鲜美;蟹黄较为软糯
一般 (2~4分)	外壳暗色;蟹肉白色; 蟹黄暗黄色	肉质饱满度一般, 略显糊状; 蟹黄蟹肉相连不易分离	蟹香味较淡, 咸腥味重	蟹肉软,咀嚼感差, 偏咸或偏淡,鲜味较差; 蟹黄略糊
差 (0~1分)	外壳发黑,表面无光亮, 蟹肉蟹黄暗褐色	肉质软塌,呈糊状; 蟹黄蟹肉交融, 不易分离	无蟹香味, 呈腥臭味	蟹肉无咀嚼感, 蟹黄稀糊, 过咸或过淡、鲜味差

1.3.4 电子舌检测

准确称取(10.0±0.1)g蟹肉样品,放入250 mL烧杯中,加入20.0 mL纯水,匀浆2 min,离心10 min(10 000 r/min、4℃),过滤上清液,并重复一次上述步骤。将两种上清液混合,使其达到100 mL。滤液装入专用的电子舌杯中,放置在自动注射分析装置上,每个样品重复3次。

1.3.5 水分含量测定

采用烘箱法测定水分含量。取2.00 g蟹肉样品,置于105℃的烘箱中,烘干至恒定质量,并计算含水量。

1.3.6 蛋白质降解测定

总氮(total nitrogen, TN)含量根据凯氏定氮法进行测定。称取(0.50±0.01)g的样品,用12 mL浓硫酸消化1 h,得到透明的消化溶液。消化液用凯氏定氮仪进行测

试。吸收指示剂为硼酸溶液、溴甲酚绿和甲基红,标准滴定溶液为0.1 mol/L盐酸,根据标准溶液酸的消耗量计算样品中的氮质量分数。

非蛋白氮(non protein nitrogen, NPN)含量的测定参照Wu Yanyan等^[11]的方法,称取(0.50±0.01)g样品,并与50 mL超纯水混合,40℃加热搅拌,然后加入40 mL 150 g/L的三氯乙酸溶液。混合液均质2 min,离心10 min(10 000 r/min、4℃),然后过滤得到上清液。消化液用凯氏定氮仪进行测试。后续步骤与检测TN相同。

蛋白质降解指数(protein degradation index, PI)通过式(1)计算:

$$PI/\% = \frac{\omega_{NPN}}{\omega_{TN}} \times 100 \quad (1)$$

式中: ω_{NPN} 为NPN质量分数/%; ω_{TN} 为氮质量分数/%。

1.3.7 游离氨基酸检测

参照Zhuang Kejin等^[12]的方法并稍作修改。称量(0.50±0.01)g的样品,与15 mL的5%三氯乙酸溶液混合,然后超声波萃取15 min。将新的混合溶液匀浆2 min,离心10 min(10 000 r/min、4℃),然后在4℃的冰箱中保存4 h。取5 mL上清液,调整pH值至2.0,用超纯水定容至10 mL,并用0.22 μm水相过滤膜进行过滤。最后用氨基酸分析仪进行分析。

1.3.8 核苷酸的检测

称量(2.00±0.10)g样品,与15 mL的5%高氯酸溶液混合,均质1 min。离心10 min(10 000 r/min、4℃),过滤得到上清液,并且重复一次上述步骤。最后,结合两部分上清液,调整pH值至6.7~7.0,稀释至50 mL,4℃保存,用0.22 μm注射器过滤器过滤进行实验。

HPLC条件:液相色谱柱为Xbrige C₁₈(4.6 mm×250 mm, 5 μm);柱温度:40℃;流速:0.2 mL/min;注入体积:20 μL;紫外检测器波长:254 nm。流动相A为单磷酸钾,流动相B为甲醇。

1.3.9 等效鲜味浓度(equivalent umami concentration, EUC)的计算

EUC指在100 g物质中用谷氨酸钠量衡量呈鲜物质的总量,单位为g/100 g,通过式(2)计算:

$$EUC/(g/100g) = \sum a_i b_i + 1.218 (\sum a_j b_j) \quad (2)$$

式中: a_i 为鲜味氨基酸含量/(mg/100 g); b_i 为鲜味氨基酸转化系数(天冬氨酸:0.077;谷氨酸:1); a_j 为5'-核苷酸含量/(mg/100 g); b_j 为5'-核苷酸转化系数(腺苷单磷酸(adenosine monophosphate, AMP):0.18;肌苷单磷酸(inosine monophosphate, IMP):1;鸟苷单磷酸(guanosine monophosphate, GMP):2.3);1.218为协同常数。

1.4 数据处理

实验数据均为3次重复测定后所得平均值,以 $\bar{x} \pm s$ 表示,采用SPSS 22.0软件进行单因素方差分析

(ANOVA), $P < 0.05$ 表示差异显著, 采用Origin 8.0软件对数据进行分析并绘制图表。

2 结果与分析

2.1 解冻曲线

如图1所示, 不同解冻方式的样品中心温度达到 0°C 的时间不同, 从快到慢依次为超声解冻、脉冲磁场辅助解冻、流水解冻、室温解冻、低温解冻, 所需时间分别为10.4、26.2、64.9、88.7 min和312.6 min。水比空气具有更高的传热效率^[13], 相比于室温解冻和低温解冻, 流水解冻消耗的时间更短, 超声解冻焯蟹所需的时间最短, 这是由于超声解冻可以将超声波作用于水产生空化气泡, 提高传热效率, 从而缩短解冻时间^[14]。脉冲磁场辅助解冻时间长于超声解冻, 但明显短于其他3种解冻方法, 这是由于在解冻时, 样品自身温度低, 会发生再结晶现象, 而脉冲磁场抑制了大冰晶的形成, 减少了冰晶融化所需要的热量, 加快了解冻过程^[15]。有研究表明, 缩短解冻时间有助于降低水产品质量的解冻损失, 获得更好风味品质^[16], 本实验中脉冲磁场辅助解冻和超声解冻的所需时间更短, 推测脉冲磁场辅助解冻和超声解冻的焯蟹具有较好的品质和滋味。

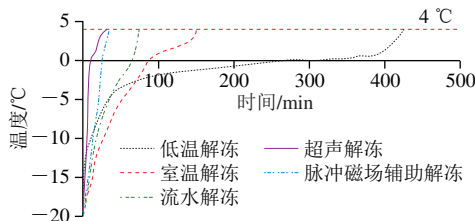


图1 不同解冻方式下焯蟹的时间-温度曲线
Fig. 1 Time-temperature curves of different methods for thawing salted crabs

2.2 不同解冻方式对感官评定结果的影响

如图2所示, 超声解冻和脉冲磁场辅助解冻的焯蟹蟹肉色泽评分高于其他3种解冻方式, 流水解冻的色泽评分最低。在质地评分方面, 5种解冻方式的焯蟹蟹肉之间存在显著差异, 脉冲磁场辅助解冻质地评分最高, 其次是超声解冻、低温解冻、流水解冻和室温解冻。曹荣等^[17]在研究不同解冻方式(流水解冻、静水解冻、室温空气解冻和低温空气解冻)对三疣梭子蟹的感官影响中也发现, 室温解冻和流水解冻的质地评分最低。气味评分最高的是脉冲磁场辅助解冻, 显著高于其他解冻方式, 其次是超声解冻和低温解冻, 两者无显著差异, 室温解冻的气味评分最低。在口感方面, 超声解冻的感官评分最高, 脉冲磁场解冻和低温解冻也能够较好地保留焯蟹蟹肉的口感, 但室温解冻和流水解冻的评分

较低。牛改改等^[18]研究了自然解冻、静水解冻、冷藏解冻、超声波解冻和微波解冻对近江牡蛎肉感官特征的影响, 得到相似结果, 超声解冻的感官评分较高, 自然解冻的感官评分较低。综合感官评分表明, 脉冲磁场辅助解冻和超声解冻的蟹肉具有更好的色泽、质地、气味和口感, 能够被消费者接受, 而室温解冻和流水解冻对蟹肉感官品质有较大影响。

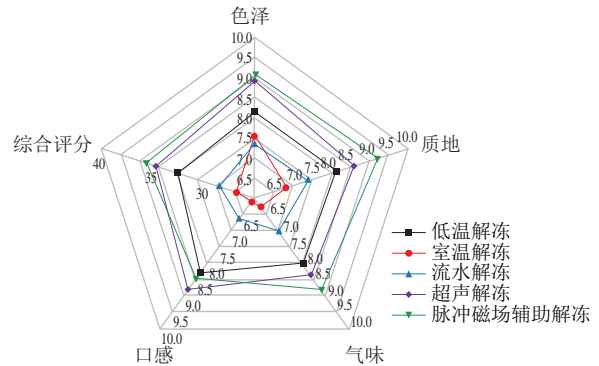


图2 不同解冻方式对焯蟹蟹肉感官评价结果
Fig. 2 Sensory evaluation results of salted crab meat with different thawing methods

2.3 电子舌分析结果

电子舌是一种有效的定性和定量分析仪器, 具有优秀的辨别食物味道和香气的的能力, 已被广泛应用于水产品、畜产品和果蔬等的风味评价^[19]。如图3所示, PC1和PC2的总贡献率为98.937%, 大于85%, 这说明电子舌能够区分5种方式解冻后的焯蟹蟹肉的味道变化信息^[20]。

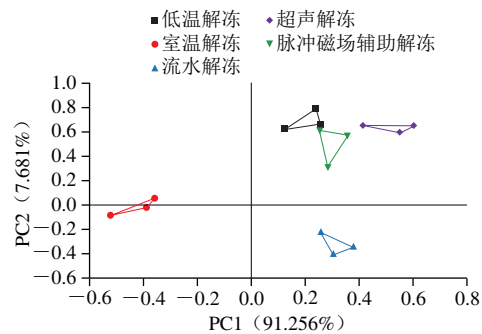


图3 不同解冻方式下焯蟹蟹肉电子舌结果
Fig. 3 Electronic tongue responses to salted crab meat with different thawing methods

由图3可知, 5种解冻方法的蟹肉之间没有重叠区域, 说明不同解冻方式间焯蟹蟹肉的味道存在差异。电子舌检测味道接近的样品趋向于聚集分布, 室温解冻和流水解冻均与其他解冻方式之间存在较远的距离, 说明室温解冻和流水解冻与其他解冻方式蟹肉味道差异较大; 而低温解冻、脉冲磁场辅助解冻和超声解冻的距离较接近, 说明3种方式解冻蟹肉的味道上接近。

2.4 含水量和蛋白质降解分析

蛋白质虽然是非呈味化合物，却是梭子蟹中重要的营养成分和主要的肌肉成分，占梭子蟹蟹肉干质量的84%左右^[21]。在解冻过程中，焯蟹蟹肉会受到微生物、酶和氧自由基的作用，造成蛋白质生化特性的改变和肌凝蛋白的降解，进一步影响焯蟹肌肉的保水能力、蛋白结构和风味等。不同解冻方法对焯蟹蟹肉含水量、TN、PI和NPN的影响如表3所示。

表3 不同解冻方式下焯蟹蟹肉的水分质量分数、TN、NPN和PI
Table 3 Moisture content, TN, NPN and PI of salted crab meat with different thawing methods

指标	低温解冻	室温解冻	流水解冻	超声解冻	脉冲磁场辅助解冻
水分质量分数/%	82.92±0.71 ^a	80.17±0.23 ^b	77.36±1.58 ^c	84.37±2.14 ^d	83.25±1.54 ^d
TN质量分数/%	89.75±2.83 ^a	88.34±1.72 ^a	87.61±0.93 ^b	89.35±1.37 ^a	90.23±2.60 ^a
NPN质量分数/%	12.65±0.41 ^b	13.52±0.56 ^a	14.58±1.00 ^a	12.97±0.23 ^b	12.48±0.44 ^b
PI/%	14.09	15.30	16.64	14.52	13.83

注：同行不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。下同。

超声解冻的蟹肉水分质量分数最高 (84.37%)，这是由于超声解冻速度快，相对其他解冻方式焯蟹肌肉蛋白质更加稳定，肌肉纤维更加完整，而蛋白质的结构对保水能力有重要的影响^[22]。脉冲磁场辅助解冻的水分质量分数为83.25%，低于超声解冻，但二者无显著差异 ($P>0.05$)。单亮亮等^[23]研究得出在磁场的作用下，水分子冻结形成的冰晶尺寸更小，整体分布更均匀、更稠密，减小了在解冻过程中水分子再结晶对肌肉组织的损伤，提高了保水能力，此外，磁场还可以促进蛋白质-水与蛋白质-蛋白质之间的结合^[24]，所以脉冲磁场辅助解冻焯蟹能较好地保持蟹肉水分含量。低温解冻焯蟹蟹肉的水分质量分数为82.92%，虽然低温缓慢解冻有利于肌肉组织吸收冰晶融化的水，且在低温条件下氧化反应在一定程度上被抑制，但随着时间延长蛋白质氧化生成的羰基和二硫键也会对肌肉蛋白结构造成一定的损伤，导致肌肉的持水能力下降^[25]。因此，低温解冻焯蟹蟹肉含水量低于超声和脉冲磁场辅助解冻。由于室温解冻和流水解冻的环境温度较高，解冻过程中水分子再结晶形成的冰晶形状不规则，导致肌细胞破裂并且汁液流失^[26]，同时流水解冻带走螃蟹表面析出的可溶物，加速了水溶性成分的流失。因此，流水解冻焯蟹肉的水分质量分数 (77.36%) 低于室温解冻 (80.17%)。

焯蟹蟹肉TN质量分数最高的是脉冲磁场辅助解冻 (90.23%)，流水解冻的TN质量分数最低 (87.61%)，低温解冻 (89.75%)、超声解冻 (89.35%) 和室温解冻 (88.34%) 的TN质量分数无显著差异 ($P>0.05$)。5种解冻方式中脉冲磁场辅助解冻的NPN质量分数最低 (12.48%)，推测可能是磁场减少了在解冻过程中水分子再结晶形成的冰晶，减轻了冰晶对肌原纤维的损伤，进而减轻了肌原纤维蛋白变性的程度^[27]。流水解冻的NPN质量分数最高 (14.58%)，且和室温解冻无显著差

异 ($P>0.05$)。5种解冻方式中脉冲磁场辅助解冻蟹肉的PI最低 (13.83%)，其次是低温解冻 (14.09%)、超声解冻 (14.52%)、室温解冻 (15.30%)，流水解冻蟹肉的蛋白降解最为严重 (16.64%)。

综上所述，5种方式解冻后的焯蟹蟹肉品质有较大的差异，脉冲磁场辅助解冻和超声解冻对样品品质的破坏较小，能够保持焯蟹的水分和蛋白含量，流水解冻和室温解冻对焯蟹的品质有较大的影响，低温解冻也能够较好保持焯蟹的水分和蛋白质，但是低温解冻的耗时较长，因此脉冲磁场辅助解冻和超声解冻的效果最好。

2.5 游离氨基酸分析

由表4可知，焯蟹蟹肉中共检出17种氨基酸，含量较高的氨基酸为甘氨酸、精氨酸、丙氨酸和脯氨酸，分别约占总游离氨基酸的21.16%、18.62%、16.64%和13.36%。不同方式解冻后的蟹肉中总游离氨基酸含量之间存在显著差异 ($P<0.05$)，从高到低依次为低温解冻、脉冲磁场辅助解冻、超声解冻、室温解冻、流水解冻，分别为2 885.78、2 840.21、2 794.80、2 758.65 mg/100 g和2 733.78 mg/100 g。

表4 不同解冻方法下焯蟹蟹肉的游离氨基酸含量

Table 4 Free amino acid contents of salted crab meat with different thawing methods

游离氨基酸	低温解冻	室温解冻	流水解冻	超声解冻	脉冲磁场辅助解冻	呈味阈值
天冬氨酸	7.53±0.23 ^d	17.93±0.61 ^a	14.27±0.21 ^b	12.33±0.40 ^e	12.20±0.36 ^e	100
赤氨酸	67.54±0.45 ^c	74.80±0.79 ^b	83.25±1.80 ^a	65.44±0.32 ^d	72.48±0.63 ^c	260
丝氨酸	23.81±0.27 ^e	17.72±0.56 ^e	21.25±0.36 ^d	17.42±0.79 ^b	15.82±1.09 ^a	150
谷氨酸	81.70±0.71 ^f	67.60±0.25 ^e	77.40±0.83 ^d	92.30±0.67 ^a	97.50±0.82 ^a	30
甘氨酸	610.50±0.01 ^f	576.80±0.45 ^d	535.30±0.54 ^c	642.40±0.66 ^b	665.80±0.20 ^a	130
丙氨酸	480.30±0.76 ^e	425.90±0.40 ^e	435.20±0.32 ^d	490.50±0.39 ^a	487.20±0.17 ^b	60
半胱氨酸	54.20±0.26 ^e	64.70±0.78 ^e	56.30±0.53 ^b	51.30±0.61 ^d	47.60±0.63 ^c	40
缬氨酸	62.50±0.36 ^e	75.80±0.89 ^e	65.80±0.17 ^b	50.20±0.45 ^e	52.30±0.29 ^d	40
蛋氨酸	37.20±0.78 ^e	36.80±0.23 ^e	35.20±0.21 ^b	33.80±0.15 ^b	34.20±0.77 ^b	30
异亮氨酸	51.40±0.16 ^e	34.50±0.12 ^e	45.60±0.29 ^b	46.80±0.80 ^b	33.70±0.23 ^c	90
亮氨酸	113.50±0.03 ^b	107.40±0.66 ^e	124.30±0.97 ^e	99.50±0.18 ^d	87.50±0.35 ^c	190
酪氨酸	123.10±0.23 ^e	86.40±0.94 ^e	95.30±0.21 ^d	143.40±0.77 ^b	158.20±0.68 ^a	90
苯丙氨酸	70.30±0.03 ^e	65.60±0.43 ^d	54.20±0.75 ^e	76.70±0.46 ^c	85.90±0.99 ^a	90
赖氨酸	111.20±0.88 ^e	108.50±0.96 ^e	88.40±0.48 ^e	93.20±0.74 ^d	105.80±0.78 ^b	50
组氨酸	68.40±1.16 ^e	76.30±0.36 ^e	52.10±0.21 ^d	55.50±0.94 ^e	56.20±1.06 ^e	20
精氨酸	537.20±3.51 ^f	572.60±8.92 ^b	595.20±5.66 ^c	502.40±2.29 ^e	522.60±9.10 ^d	50
脯氨酸	385.40±5.52 ^e	349.30±4.31 ^e	354.70±3.70 ^e	321.60±4.47 ^d	305.20±6.27 ^c	30
游离氨基酸总量	2 885.78±14.04 ^a	2 758.65±15.56 ^d	2 733.78±12.68 ^e	2 794.80±14.10 ^b	2 840.21±14.11 ^b	

谷氨酸和天冬氨酸是鲜味氨基酸，不同方式解冻后蟹肉的谷氨酸含量大于呈味阈值，而天冬氨酸含量低于呈味阈值，说明谷氨酸对焯蟹蟹肉的呈味有重要作用，天冬氨酸对焯蟹的鲜味贡献较小。5种方式解冻后焯蟹蟹肉的谷氨酸含量之间存在显著差异 ($P<0.05$)，其中脉冲磁场辅助解冻的谷氨酸含量最高 (97.50 mg/100 g)，其次为超声解冻 (92.30 mg/100 g)、低温解冻 (81.70 mg/100 g)、流水解冻 (77.40 mg/100 g)、室温解冻 (67.60 mg/100 g)。

丙氨酸、甘氨酸是甜味氨基酸，能为水产品提供鲜甜味^[28]，不同方式解冻后蟹肉的丙氨酸和甘氨酸含量均大于呈味阈值，说明丙氨酸和甘氨酸对炆蟹蟹肉的甜味有重要贡献。甘氨酸也是炆蟹中含量最高的游离氨基酸，不同解冻方式蟹肉的甘氨酸含量之间存在显著差异 ($P<0.05$)，从高到低依次为脉冲磁场辅助解冻 (665.80 mg/100 g)、超声解冻 (642.40 mg/100 g)、低温解冻 (610.50 mg/100 g)、室温解冻 (576.80 mg/100 g) 和流水解冻 (535.30 mg/100 g)；超声解冻的丙氨酸含量最高 (490.50 mg/100 g)，其次是脉冲磁场辅助解冻 (487.20 mg/100 g)、低温解冻 (480.30 mg/100 g)、流水解冻 (435.20 mg/100 g) 和室温解冻 (425.90 mg/100 g)。

脯氨酸是一种苦味氨基酸^[29]，5种解冻方式蟹肉的脯氨酸含量均大于呈味阈值。脉冲磁场辅助解冻的蟹肉中脯氨酸含量最低 (305.20 mg/100 g)，其次是超声解冻 (321.60 mg/100 g)、室温解冻 (349.30 mg/100 g)、流水解冻 (354.70 mg/100 g)、低温解冻 (385.40 mg/100 g)，说明脉冲磁场辅助解冻和超声解冻处理有助于维持炆蟹的鲜甜味，在一定程度上减少了苦味。

徐志善等^[30]研究发现针对冻藏早熟蟹的解冻方式中，微波解冻和流水解冻的甘氨酸、丙氨酸、精氨酸含量大于低温解冻和自然解冻两种解冻方法，且综合滋味品质分析得出，微波解冻和流水解冻适宜作为冻藏早熟蟹的解冻。针对本研究的冻藏炆蟹，低温解冻、脉冲磁场辅助解冻和超声解冻处理炆蟹蟹肉的呈味氨基酸含量更高，具有更好的滋味。

2.6 呈味核苷酸和EUC分析

呈味核苷酸主要包括GMP、IMP和AMP，AMP和IMP不仅能够提供鲜味和甜味、抑制苦味^[31]，还能够与氨基酸之间协同增强水产品的风味^[32]。因此，通过测定低温解冻、室温解冻、流水解冻、超声解冻和脉冲磁场辅助解冻的蟹肉核苷酸含量，以期比较不同解冻方法对炆蟹品质的影响。如表5所示，5种解冻方式的炆蟹蟹肉中AMP和IMP含量比较丰富，均大于其呈味阈值，对炆蟹蟹肉的滋味有重要贡献，但GMP的含量较少，除低温解冻外，均低于呈味阈值，这与王慧等^[33]在三疣梭子蟹中检测到呈味核苷酸含量相似。

表5 不同解冻方式下炆蟹蟹肉的核苷酸含量

Table 5 Nucleotide contents of salted crab meat with different thawing methods

指标	低温解冻	室温解冻	流水解冻	超声解冻	脉冲磁场辅助解冻	呈味阈值
GMP含量/(mg/100g)	15.30±0.93 ^a	8.95±0.48 ^b	10.92±2.77 ^b	9.49±1.22 ^b	10.46±1.27 ^b	12.5
IMP含量/(mg/100g)	126.93±9.09 ^c	76.71±1.19 ^d	117.76±6.20 ^c	257.34±10.44 ^b	325.36±13.27 ^a	25
AMP含量/(mg/100g)	283.71±12.12 ^a	167.53±7.05 ^c	228.35±13.22 ^b	144.76±7.26 ^d	116.24±7.11 ^e	50
EUC/(g/100g)	21.45	10.78	17.67	34.65	44.38	

AMP对苦味有抑制作用，能够使食品产生甜味与鲜味，良好的风味增强剂，即使是低浓度的AMP也具有甜味^[34]。由表5可知，5种解冻方法的炆蟹蟹肉的AMP含量之间存在显著差异 ($P<0.05$)，其中低温解冻的AMP含量最高，其次是流水解冻、室温解冻、超声解冻、脉冲磁场辅助解冻。

IMP主要由AMP在AMP脱氨酶作用下生成，是一种主要呈味核苷酸，是鲜味极强的风味增强剂，还可以和谷氨酸一起协同增强风味^[35]。5种方法解冻的炆蟹蟹肉IMP含量之间存在显著差异 ($P<0.05$)，其中脉冲磁场辅助解冻的IMP含量最高，其次是超声解冻、低温解冻、流水解冻、室温解冻。除此之外，IMP与AMP还能够一起协同增鲜^[36]，炆蟹蟹肉中AMP和IMP总含量最高的是脉冲磁场辅助解冻、其次是低温解冻、超声解冻、流水解冻、室温解冻，分别为441.60、410.64、402.10、346.11、244.24 mg/100 g。

EUC是评价水产鲜味水平的主要味觉评价指标，揭示了呈味核苷酸与呈味氨基酸的直接协同作用^[37]。如表5所示，脉冲磁场辅助解冻的EUC最高，为44.38 g/100 g，超声解冻的EUC仅次于脉冲磁场辅助解冻，为34.65 g/100 g，其次是低温解冻、流水解冻、室温解冻，分别为21.45、17.67、10.78 g/100 g，说明脉冲磁场辅助解冻和超声解冻中的核苷酸和氨基酸的相互作用较好，对炆蟹的鲜味品质有重要影响。

以上结果表明，低温解冻、超声解冻和脉冲磁场辅助解冻对炆蟹的呈味核苷酸破坏小，能够保留炆蟹的滋味。

3 结论

本研究采用5种解冻方式处理冻藏炆蟹，其中流水解冻和室温解冻对炆蟹品质影响较大，感官品质差，水分含量低，蛋白和鲜味物质降解严重；低温解冻后炆蟹的品质虽然比室温解冻和流水解冻好，但解冻耗时很长，不适用于团膳式和社区前置仓销售等较大规模的食用前解冻；超声解冻的解冻效率和水分质量分数最高，感官评价较好，但蛋白质降解程度高于脉冲磁场辅助解冻，鲜味品质略逊色于脉冲磁场辅助解冻；脉冲磁场辅助解冻具有较快的解冻速率，感官品质最好，水分含量高，蛋白降解程度最低，能够最大程度地保持鲜味氨基酸和呈味核苷酸的含量，具有最高的鲜味品质，适宜作为炆蟹的解冻方式，但仍存在的一些问题，如针对炆蟹解冻的脉冲磁场解冻专用装置可以根据团膳单位、大型酒店或者社区前置仓销售规模需要进行定制，但是家庭配套的冻炆蟹解冻设备尚无。

参考文献:

- [1] SONG J, WANG H, WU X G, et al. The flavor of gonad and meat of female *Portunus trituberculatus* cultured in indoor and outdoor[J]. Journal of Food Biochemistry, 2019, 43(10): e12743. DOI:10.1111/jfbc.12743.
- [2] 刘雅. 基于贝叶斯方法的东海北部海域三疣梭子蟹资源评估和管理策略分析[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2022: 4. DOI:10.27747/d.cnki.gzjhy.2022.000028.
- [3] 李常笛. 低温技术在水产品加工中的应用探究[J]. 南方农业, 2017, 11(21): 103-104. DOI:10.19415/j.cnki.1673-890x.2017.21.058.
- [4] ZHOU P C, XIE J. Effect of different thawing methods on the quality of mackerel (*Pneumatophorus japonicus*)[J]. Food Science and Biotechnology, 2021, 30(9): 1213-1223. DOI:10.1007/S10068-021-00966-0.
- [5] XIA X F, KONG B H, LIU J, et al. Influence of different thawing methods on physicochemical changes and protein oxidation of porcine longissimus muscle[J]. LWT-Food Science and Technology, 2012, 46(1): 280-286. DOI:10.1016/j.lwt.2011.09.018.
- [6] 梁诗惠, 冯钰敏, 邓华荣, 等. 解冻方式对鸡腿肉蛋白氧化特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(5): 223-229. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.030331.
- [7] CAI L Y, CAO M J, REGENSTEIN J, et al. Recent advances in food thawing technologies[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2019, 18(4): 953-970. DOI:10.1111/1541-4337.12458.
- [8] 凌胜男, 刘特元, 陈雪叶, 等. 不同解冻方式对鲢鱼鲜度及挥发性风味物质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(5): 322-330. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2021050273.
- [9] CHU Y M, TAN M, BIAN C, et al. Effect of ultrasonic thawing on the physicochemical properties, freshness, and protein-related properties of frozen large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*)[J]. Journal of Food Science, 2022, 87(1): 52-67. DOI:10.1111/1750-3841.15983.
- [10] JIANG J B, ZHANG L, YAO J, et al. Effect of static magnetic field assisted thawing on physicochemical quality and microstructure of frozen beef tenderloin[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 914373. DOI:10.3389/FNUT.2022.914373.
- [11] WU Y Y, CAO S M. Study on endogenous protease and protein degradation of dry-salted *Decapтерus maruadsi*[J]. CyTA-Journal of Food, 2018, 16(1): 350-356. DOI:10.1080/19476337.2017.1406006.
- [12] ZHUANG K J, WU N, WANG X C, et al. Effects of 3 feeding modes on the volatile and nonvolatile compounds in the edible tissues of female Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*)[J]. Journal of Food Science, 2016, 81(4): S968-S981. DOI:10.1111/1750-3841.13229.
- [13] 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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20191105-050.
- [14] LV Y, XIE J. Quality of cuttlefish as affected by different thawing methods[J]. International Journal of Food Properties, 2022, 25(1): 33-52. DOI:10.1080/10942912.2021.2019269.
- [15] TANG J Y, SHAO S Q, TIAN C Q. Effects of the magnetic field on the freezing process of blueberry[J]. International Journal of Refrigeration, 2020, 113: 288-295. DOI:10.1016/j.ijrefrig.2019.12.022.
- [16] YANYUN Z, ROLANDO A F, DENNIS G O. High hydrostatic pressure effects on rapid thawing of frozen beef[J]. Journal of Food Science, 1998, 63(2): 272-275. DOI:10.1111/j.1365-2621.1998.tb15724.x.
- [17] 曹荣, 卞瑞姣, 赵玲, 等. 解冻方式对三疣梭子蟹感官特征和理化指标的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(5): 1704-1708. DOI:10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.2017.05.030.
- [18] 牛改改, 秦成丰, 游刚, 等. 解冻方式对近江牡蛎肉感官特征和理化指标的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(16): 271-278. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020.16.043.
- [19] LU L, HU Z Q, HU X Q, et al. Electronic tongue and electronic nose for food quality and safety[J]. Food Research International, 2022, 162: 112214. DOI:10.1016/j.foodres.2022.112214.
- [20] GARCIA-HERNANDEZ C, SALVO-COMINO C, MARTIN-PEDROSA F, et al. Analysis of red wines using an electronic tongue and infrared spectroscopy. Correlations with phenolic content and color parameters[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 118: 108785. DOI:10.1016/j.lwt.2019.108785.
- [21] 黄琳, 张莉, 武丹露. 三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)冻藏过程中肌肉蛋白质生化特性的变化[J]. 海洋科学, 2017, 41(6): 41-47. DOI:10.11759/hyxx20151224003.
- [22] LI X X, MA Y Y, SUN P, et al. Effect of ultrasonic thawing on protein properties and muscle quality of Bonito[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 45(1): e14930. DOI:10.1111/JFPP.14930.
- [23] 单亮亮, 刘斌. 电磁场对水及其盐溶液的冻结影响[J]. 制冷, 2017, 36(1): 29-35. DOI:10.3696/j.issn.1005-9180.2017.01.006.
- [24] YANG K, WANG L M, GUO J J, et al. Structural changes induced by direct current magnetic field improve water holding capacity of pork myofibrillar protein gels[J]. Food Chemistry, 2021, 345: 128849. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.128849.
- [25] 李慢, 马晓彬, 王文骏, 等. 解冻方式对中国对虾品质的影响[J]. 中国食品学报, 2019, 19(5): 182-190. DOI:10.16429/j.1009-7848.2019.05.023.
- [26] YU D W, JING D T, YANG F, et al. The factors influencing the flavor characteristics of frozen obscure pufferfish (*Takifugu obscurus*) during storage: ice crystals, endogenous proteolysis and oxidation[J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 122: 147-155. DOI:10.1016/j.ijrefrig.2020.10.028.
- [27] HIGASHITANI K, OKUHARA K, HATADE S. Effects of magnetic fields on stability of nonmagnetic ultrafine colloidal particles[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1992, 152(1): 125-131. DOI:10.1016/0021-9797(92)90013-C.
- [28] IWONA C, WIADYSŁAW M, KINGA T, et al. Changes of amino acid and fatty acid profile in freshwater fish after smoking[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, 42(1): e13357. DOI:10.1111/jfpp.13357.
- [29] 付娜, 王锡昌. 电子舌分析和感官评价在游离氨基酸对中华绒螯蟹整体滋味贡献评价中的研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(20): 91-96. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2014.20.011.
- [30] 徐志善, 孙钦军, 王锡念, 等. 不同解冻方式对早熟中华绒螯蟹品质和滋味的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(1): 275-280. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2019.01.049.
- [31] LIU C S, MENG F T, TANG X M, et al. Comparison of nonvolatile taste active compounds of wild and cultured mud crab *Scylla paramamosain*[J]. Fisheries Science, 2018, 84(5): 897-907. DOI:10.1007/s12562-018-1227-0.
- [32] CHEN D W, ZHANG M. Non-volatile taste active compounds in the meat of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*)[J]. Food Chemistry, 2007, 104(3): 1200-1205. DOI:10.1016/j.foodchem.2007.01.042.
- [33] 王慧, 施文正, 吴旭干, 等. 饲料对雌体三疣梭子蟹不同部位滋味的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(19): 356-362. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2016.19.061.
- [34] QIU J F, LUO C, REN L H, et al. Black soldier fly larvae replace traditional iced trash fish diet to enhance the delicious flavor of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*)[J]. Frontiers in Marine Science, 2023, 9: 1089421. DOI:10.3389/fmars.2022.1089421.
- [35] 宋雪. 冷藏条件下中华绒螯蟹与三疣梭子蟹ATP降解途径的探究及品质变化的评价[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016: 22.
- [36] 付娜, 王锡昌. 滋味物质间相互作用的研究进展[J]. 食品科学, 2014, 35(3): 269-275. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201403053.
- [37] XU Y M, LIU W C, LI L L, et al. Dynamic changes of non-volatile compounds and evaluation on umami during infrared assisted spouted bed drying of shiitake mushrooms[J]. Food Control, 2022, 142: 109245. DOI:10.1016/J.FOODCONT.2022.109245.