

不同解冻方式对早熟蟹蟹肉理化性质及挥发性风味物质的影响

葛孟甜¹, 李肖婵¹, 林琳^{1,2,3}, 姜绍通^{1,2}, 陆剑锋^{1,2,3*}

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

摘要: **目的** 比较自然空气解冻、冰箱冷藏室解冻、静水解冻、微波解冻和超声波解冻对早熟蟹蟹肉理化性质及挥发性风味物质的影响。**方法** 以冷冻早熟蟹蟹肉为原料, 通过分析解冻时间、保水性、挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)、硫代巴比妥酸值(thiobarbituric acid reactive substances, TBARS)和挥发性风味物质指标, 考察 5 种不同解冻方式对蟹肉理化性质及挥发性风味物质的影响。**结果** 不同解冻方式对冷冻蟹肉的品质有一定的影响。自然空气解冻和静水解冻后, 蟹肉的蛋白质降解和脂肪氧化程度较高, 鲜度降低。微波解冻和超声波解冻虽然解冻时间短, 但解冻后的蟹肉保水性降低, 对风味影响较大。与其他解冻方式相比, 冰箱冷藏室解冻后蟹肉的保水性最强, 蛋白质降解和脂肪氧化程度较低, 对蟹肉风味的保持最好, 且检测出的挥发性风味化合物种类同解冻前蟹肉相似度最高。**结论** 冰箱冷藏室解冻是冷冻早熟蟹蟹肉最适宜的解冻方式。本研究数据为今后开展冷冻早熟蟹蟹肉的综合利用提供了必要的依据。

关键词: 解冻方式; 早熟蟹; 理化性质; 挥发性风味物质

Effects of different thawing methods on physico-chemical properties and volatile flavor compounds of precocious crabmeat

GE Meng-Tian¹, LI Xiao-Chan¹, LIN Lin^{1,2,3}, JIANG Shao-Tong^{1,2}, LU Jian-Feng^{1,2,3*}

(1. School of Food and Biology 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: Objective To compare the effects of different thawing methods on physico-chemical properties and volatile flavor compounds of precocious crabmeat, including natural air thawing, chiller thawing in 4°C refrigerator, thawing in static water, microwave thawing and ultrasonic thawing. **Methods** Using frozen precocious crabmeat as raw materials, based on the analysis of thawing time, water holding capacity, total volatile basic nitrogen (TVB-N), thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) and volatile flavor substances, the effects of 5 different thawing methods on the physical and chemical properties of crabmeat were investigated. **Results** The results showed that different thawing methods exerted certain impacts on quality of frozen precocious crabmeat. Samples treated with

基金项目: 国家虾蟹产业技术体系专项资金(CARS-48)、安徽省水产产业技术体系项目(AHCYJSTX-08)

Fund: Supported by the Earmarked Fund for China Agriculture Research System (CARS-48), and Anhui Provincial Modern Agro-industry Technology Research System (AHCYJSTX-08)

*通讯作者: 陆剑锋, 博士, 教授, 主要研究方向为水产品加工及保鲜。E-mail: lujf@sibs.ac.cn

*Corresponding author: LU Jian-Feng, Ph.D, Professor, School of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China. E-mail: lujf@sibs.ac.cn

natural air thawing and thawing in static water showed higher degree of protein deterioration and lipid oxidation, with a lower freshness. Although microwave thawing and ultrasonic thawing were short in thawing time, the water holding capacity of precocious crabmeat after thawing reduced, which had a great impact on the flavor. Among examined thawing methods, chiller thawing in 4 °C refrigerator could keep better quality of precocious crabmeat based on higher water holding capacity, lower degree of protein deterioration and lipid oxidation, and it also had the best volatile flavor. The volatile flavor compounds were similar to the crabmeat before thawing. **Conclusion** Chiller thawing in 4 °C refrigerator is the most appropriate thawing method for frozen precocious crabmeat among these listed methods. Moreover, the information obtained by this study is essential for the development of comprehensive utilizations of frozen precocious crabmeat.

KEY WORDS: thawing methods; precocious crab; physic-chemical properties; volatile flavor components

1 引言

中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis* Milne-Edwards)俗称河蟹,以其螯足密生绒毛得名,是中国最重要的经济类养殖蟹之一,目前养殖区域几乎遍及全国所有省份^[1]。但与同期正常发育的河蟹相比,部分幼蟹可能在当年年底或经1年左右培育之后提前达到性成熟,并停止生长,通常体重约为15~40 g,这种小规格早熟蟹价格较低,比例高者可占河蟹总产量的20%~30%^[2],这对河蟹养殖危害很大,不仅大大降低了河蟹的市场价值,也给河蟹养殖户造成巨大的经济损失^[3]。因此,对早熟蟹蟹肉进行深加工处理或开展综合利用具有重要意义。

蟹肉与其他水产品一样极易腐败变质,且由于受到河蟹生长季节的限制,大量上市时间高度集中,故需冷冻储存以维持品质,再经解冻后进行加工。但水产品在解冻过程中,可能产生汁液流失、蛋白质降解、脂肪氧化、风味劣变等问题^[4],因此选择适宜的解冻方式对蟹肉品质起着至关重要的作用。目前,工厂化解冻方式主要有自然空气解冻、冰箱冷藏室解冻、静水解冻、微波解冻和超声波解冻等^[5]。近年来,国内外已有一些学者采用不同解冻方式对水产品品质的影响进行了研究,Shafieipour等^[6]研究了微波解冻、冰箱冷藏室解冻和静水解冻对桃红对虾(*Penaeus duorarum*)化学性质的影响;陈欢等^[7]研究了自然空气解冻、静水解冻、微波解冻和鼓气流水解冻对日本鲷(*Scomber japonicus*)鲜度及品质的影响。然而,关于不同解冻方式对蟹肉品质影响的理论研究还较少,尤其是专门针对解冻方式对早熟蟹肉理化性质及挥发性风味物质的研究。

本文以解冻时间、保水性、挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)、硫代巴比妥酸值(thiobarbituric acid reactive substances, TBARS)和挥发性风味物质为指标,研究5种不同解冻方式(自然空气解冻、冰箱冷藏室解冻、静水解冻、微波解冻和超声波解冻)对早熟蟹蟹肉理化性质及其挥发性风味物质的影响,以期及早熟蟹蟹肉解冻方式的选择提供理论依据。

2 材料与方法

2.1 材料与仪器

冷冻早熟蟹蟹肉于2018年7月购自安徽当涂县安徽福恩食品科技有限公司,以(125±2) g为一组,用聚乙烯真空包装袋包装好,置于-18 °C冰箱中贮存备用。

KQ-300VDE 三频数控超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司); WD800CTL23-2H 微波炉(佛山市格兰仕公司); TU-1901 分光光度计(北京普析公司); K9840 自动凯氏定氮仪(烟台海能仪表科技有限公司); 萃取头(碳分子筛(CAR)/二甲基硅氧烷(PDMS)/75 μm)、手动进样手柄(德国Sigma公司); 5975C-7890A 气相色谱-质谱联用仪、DB-5MS 色谱柱(60 m×0.32 mm, 1 μm)(美国Agilent公司); M-9202C 长探头数显温度计(华福有限公司)。

2.2 方法

2.2.1 解冻

将冷冻早熟蟹蟹肉样品从-18 °C的冰箱中取出,按如下方法进行解冻,将数显温度计的探头插入蟹肉中心,待蟹肉中心温度达到4 °C时停止解冻,记录解冻时间,并进行指标测定。

自然空气解冻:将冷冻蟹肉外包装袋去除之后,置于洁净托盘上,以15 °C左右空气为介质进行解冻;冰箱冷藏室解冻:将冷冻蟹肉外包装袋去除之后,置于4 °C冰箱冷藏室进行解冻;静水解冻:将冷冻蟹肉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 °C,控制水温(15±1) °C;微波解冻:将冷冻蟹肉外包装袋去除之后,置于洁净托盘上,放入微波炉,调至“按质量解冻”,选择质量为0.1 kg;超声波解冻:将冷冻蟹肉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 °C,控制水温(15±1) °C。

2.2.2 保水性的测定

(1) 解冻损失率

精确称量解冻前及解冻后蟹肉的质量,计算公式如

式(1)所示。

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

式中: m_1 为解冻前蟹肉质量, g; m_2 为解冻后蟹肉质量, g。

(2) 蒸煮损失率

精确称取 5 g 蟹肉, 将数显温度计的探头插入蟹肉中心, 扎紧袋口, 置于 80 °C 的水浴锅中加热, 直至中心温度升到 70 °C 后取出, 待蟹肉冷却至室温, 用滤纸吸干表面水分, 再次称量。计算公式如式(2)所示。

$$\text{蒸煮损失率(\%)} = \frac{m_3 - m_4}{m_3} \times 100 \quad (2)$$

式中: m_3 为蒸煮前蟹肉质量, g; m_4 为蒸煮后蟹肉质量, g。

(3) 持水力测定

参考陈欢等^[7]的测定方式。称取 10 g 左右蟹肉, 用脱脂棉包好放入 50 mL 离心管中, 4 °C、9000 r/min 条件下离心 10 min, 离心后剥去脱脂棉, 再次称量。计算公式如式(3)所示。

$$\text{持水力(\%)} = \left(1 - \frac{s}{v}\right) \times 100 \quad (3)$$

式中: s 为离心后蟹肉质量, g; v 为离心前蟹肉质量, g。

2.2.3 挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)测定

参照 GB/T 5009.228-2016《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》, 按凯氏定氮法测定^[8]。

2.2.4 硫代巴比妥酸值(thiobarbituric acid reactive substances, TBARS)测定

根据赵淑娥^[9]的方法, 略微改动: 取 5 g 绞碎混匀的蟹肉置于锥形瓶中, 加入 25 mL、7.5% 的三氯乙酸(含 0.1% EDTA), 摇床震荡 0.5 h, 双层滤纸过滤 2 次, 取上述滤液 5 mL, 加入 5 mL、0.02 mol/L 的 TBA 溶液, 封口, 90 °C 水浴 40 min, 取出冷却 1 h, 1500 r/min 离心 5 min, 倾出上清液, 加入 5 mL 氯仿振荡, 静置分层后, 吸取上清液分别在 532 nm 和 600 nm 处比色, 记录吸光度值, 计算公式如式(4)所示。

$$\text{TBA(mg/100 g)} = \frac{A_{532} - A_{600}}{155} \times \frac{1}{10} \times 72.6 \times 100 \quad (4)$$

式中: 与 TBA 反应的物质的量以每 100 g 肉中丙二醛的毫克数来表示, mg/100 g; $A_{532 \text{ nm}}$ 为样液在 532 nm 处的吸光度值; $A_{600 \text{ nm}}$ 为样液在 600 nm 处的吸光度值。

2.2.5 挥发性风味物质测定

根据 Gu 等^[10]的方法, 略微改动: 将样品充分绞碎混

匀, 精确称取每份质量为(5.00±0.01) g 的蟹肉, 放入 20 mL 的顶空瓶中, 旋紧瓶盖, 经 100 °C 水浴加热萃取 40 min 预处理后, 萃取针由气相色谱质谱联用(gas chromatography-mass spectrometer, GC-MS)注射口进样, 解析 5 min。

色谱条件: 色谱柱为 DB-5MS 毛细管柱(60 m×0.32 mm, 1 μm); 升温程序: 初始温度为 40 °C, 以 5 °C/min 升至 100 °C, 然后以 3 °C/min 升至 180 °C, 最后以 5 °C/min 升至 240 °C 并保持 5 min; 汽化室温度 240 °C, 不分流进样; 载气为氦气(99.999%), 流速为 1 mL/min。对于每种解冻方式蟹肉样品, GC-MS 检测重复 3 次。

质谱条件: 检测器接口温度 250 °C; 电子轰击(electron impact, EI)离子源, 离子源温度 230 °C; 电子能量 70 eV; 电子倍增器电压 1576 V; 质量扫描范围 40~450 amu/s; 扫描速度 1.8 s⁻¹。

2.3 数据分析

GC-MS 数据采用 NIST2008 数据库进行定性分析, 仅报道化合物正反匹配度大于 80(最大值为 100)的鉴定结果; 其他试验结果均采用 SPSS 19.0 和 Origin 8.5 软件进行计算和作图。单因素方差(one-way ANOVA)分析, 采用 LSD 检验组内的差异, 以 $P < 0.05$ 作为差异显著的标志。实验结果以平均值±标准差(mean±sd)表示。

3 结果与分析

3.1 不同解冻方式对蟹肉解冻时间的影响

采用 5 种不同的解冻方式对蟹肉进行解冻, 记录样品中心温度从 -18 °C 上升至 4 °C 所需要的时间, 结果见表 1。不同解冻方式所需要的解冻时间差异较大, 其解冻机制也各不相同。冰箱冷藏室解冻法所需时间最长, 其次为自然空气解冻、静水解冻、超声波解冻、微波解冻。空气传热性能较差, 且冰箱冷藏室温度较低, 因而冰箱冷藏室的解冻时间最长。水的比热是空气的 4 倍, 相比于自然空气解冻, 静水解冻缩短了 58.89% 的解冻时间。微波解冻仅需 2.75 min, 由于蟹肉在微波场中从内到外同时吸收微波能量, 水等极性分子剧烈摩擦产生热量, 使得整体发热, 从而达到快速解冻^[11]。40 kHz 的低频超声波在传播时可与介质产生热机制、空化机制和机械机制, 使其振动能量不断被周围的水和蟹肉吸收, 蟹肉温度升高, 解冻速度加快^[12], 超声波解冻时间仅大于微波解冻。

表 1 不同解冻方式对蟹肉解冻时间的影响($n=3$)
Table 1 Effects of different thawing methods on thawing time of crabmeat ($n=3$)

解冻方式	自然空气解冻	冰箱冷藏室解冻	静水解冻	微波解冻	超声波解冻
解冻时间/min	180.51±10.16 ^b	405.02±25.11 ^a	74.76±4.58 ^c	2.75±0.55 ^e	34.47±2.04 ^d

注: 同行不同字母表示有显著性差异($P < 0.05$)。

表 2 不同解冻方式对蟹肉保水性的影响($n=3$)
Table 2 Effects of different thawing methods on water holding capacity of crabmeat ($n=3$)

解冻方式	自然空气解冻	冰箱冷藏室解冻	静水解冻	微波解冻	超声波解冻
解冻损失率	11.01±0.91 ^c	10.03±0.87 ^c	11.34±0.32 ^c	13.80±0.44 ^b	17.26±1.10 ^a
蒸煮损失率	23.05±2.49 ^b	19.31±1.29 ^b	22.10±2.00 ^b	21.14±2.12 ^b	28.91±2.03 ^a
持水力	48.75±0.63 ^{ab}	50.35±2.80 ^{ab}	54.86±3.96 ^a	47.24±1.87 ^b	48.17±2.8 ^{ab}

注: 同行不同字母表示有显著性差异($P < 0.05$)。

3.2 不同解冻方式对蟹肉保水性的影响

不同解冻方式对蟹肉保水性的影响如表 2 所示。在各种解冻方式中, 冰箱冷藏室解冻的解冻损失率和蒸煮损失率最低, 持水力仅略低于静水解冻, 但无显著性差异($P > 0.05$), 这可能是由于冰箱冷藏室解冻的解冻温度较低, 降低了冻品中心与表面的温差, 且有利于解冻汁液重新回渗入细胞^[13]。超声波解冻的解冻损失率和蒸煮损失率最高, 分别为 17.26% 和 28.91%, 显著高于其他处理组($P < 0.05$), 但持水力与其他处理组并无显著性差异, 或许是由于超声波在冻品组织中大幅度衰减, 而且随着组织温度的升高衰减程度会明显增大, 即其振动能量不断被蟹肉吸收转变为热量, 蟹肉内部的水分受热膨胀和汽化, 向表面扩散和蒸发, 导致内部汁液损失严重^[14]。微波解冻的解冻损失率虽然显著低于超声波解冻($P < 0.05$), 但显著高于自然空气解冻、冰箱冷藏室解冻和静水解冻($P < 0.05$), 持水力显著低于静水解冻, 是由于解冻温度过高且受热不均匀, 导致蟹肉蛋白质的热变性^[15], 使得肌原纤维和蛋白网状结构遭到破坏, 蛋白质的水合作用降低, 部分细胞内液及外液流出, 蟹肉不能很好的吸收冰晶融化的水^[13]。综合来说, 经冰箱冷藏室解冻蟹肉的保水性能力较强, 而微波解冻和超声波解冻对蟹肉的保水性影响较大。通常情况下, 解冻时间与解冻速率成反比, 解冻时间越短, 解冻速率越快^[16], 但并非解冻速率越快, 解冻效果就越好, 因为解冻速率与解冻损失率可能不成比例。余小岭等^[17]的研究结果与本文相似, 解冻速率与解冻损失率呈非线性关系, 解冻速率越大对于肉品超微结构的破坏作用也越大。

3.3 不同解冻方式对蟹肉 TVB-N 的影响

TVB-N 是指动物性食物在腐败过程中, 蛋白质被酶和微生物分解而产生的氨以及胺类等碱性含氮物质。水产品中 TVB-N 含量与鲜度有很大的相关性, 可以反映出蛋白质分解程度和腐败程度^[18], 因此其为评判水产品新鲜度的重要指标之一。根据 GB 2733-2015《食品安全国家标准 鲜、冻动物性水产品》的规定, TVB-N 值应低于 20 mg/100 g 为适。由图 1 可知, 在 5 种不同解冻方式中, 微波解冻和超声波解冻蟹肉的 TVB-N 含量最低, 显著低于其他处理组($P < 0.05$)。Boonsomrej 等^[19]利用不同解冻方式对冻结斑

节对虾(*Penaeus monodon*)进行解冻, 测得微波解冻后 TVB-N 含量低于其他实验组, 这与本试验结果一致。自然空气解冻条件下蟹肉 TVB-N 含量最高, 其次为静水解冻, 2 组无显著性差异($P > 0.05$)。冰箱冷藏室解冻条件下的蟹肉 TVB-N 含量显著低于自然空气解冻和静水解冻($P < 0.05$), 说明温度越低, 越有利于抑制微生物生长繁殖, 可以减缓微生物对蛋白质的分解作用, 抑制 TVB-N 上升。

3.4 不同解冻方式对蟹肉 TBARS 值的影响

TBARS 值是评价冷冻水产品品质变化一个较好的指标^[20,21]。TBARS 值即脂质二级氧化产物丙二醛的含量, 反映了脂肪的氧化程度, TBARS 值越高, 说明氧化酸败越严重。水产品中的脂肪多为不饱和脂肪酸, 通过自动氧化或脂肪氧合酶的作用被分解成小分子物质(醛、酮、酸等), 具有特殊气味, 导致风味和营养价值严重损失^[22], 故 TBARS 值可对水产品品质变化做出准确的评价, 但目前我国对水产品 TBARS 值阈值还没有明确规定, 有报道建议人类可食用水产品的 TBARS 最高限量为 8 mg/100 g^[23]。由图 2 可知, 在 5 种解冻方式中, 微波解冻蟹肉的 TBARS 值最低, 显著低于其他处理组($P < 0.05$), 其次为超声波解冻, 且 2 组并无显著性差异。自然空气解冻条件下的蟹肉 TBARS 值最高, 显著高于除静水解冻外的其他处理组($P < 0.05$), 这可能是由于自然环境条件下, 温度适宜, 且与氧气直接接触, 加剧了脂肪的氧化^[14]。此外, 冰箱冷藏室解冻条件下的蟹肉 TBARS 值显著低于自然空气解冻($P < 0.05$)。总体来说, TBARS 值检测结果与 TVB-N 测定结果基本一致, 两者具有较好的相关性。

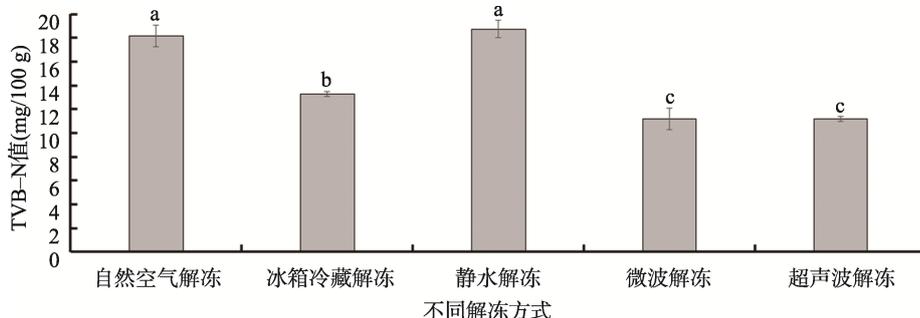
3.5 不同解冻方式对蟹肉挥发性风味的影响

风味是食品最重要的质量指标之一, 主要包括烃、醇、醛、酮、醚和含 N 化合物等挥发性风味物质, 是风味前体物质在加工过程中发生的一系列复杂生化反应所产生^[24]。表 3 为经 5 种不同解冻方式解冻蟹肉中的挥发性风味物质, 共检测到 76 种化合物: 烃类芳香族 21 种, 醇类 13 种, 醚类 4 种, 醛类 18 种, 酮类 8 种, 含 N 类 7 种, 酚类 2 种, 其他化合物 3 种。表 4 为 5 种不同解冻方式处理蟹肉的挥发性风味物质种类相对含量的对比。冰箱冷藏室解冻蟹肉烃类芳香族的相对含量最高, 为 17.53%, 但该类化合物气味阈值较高, 需要在高浓度下才能引起嗅觉反应, 推

断其对蟹肉风味品质影响不大^[25]。

解冻前蟹肉中醇类的相对含量最高, 为 17.90%, 经解冻处理后蟹肉醇类相对含量均呈下降趋势。醇类是一种高阈值化合物, 但有些不饱和的烯醇阈值较低, 也可能对

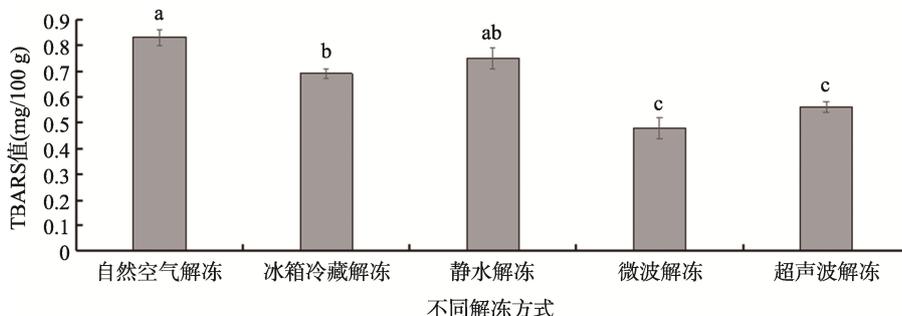
食品风味有较大贡献^[26]。如本次实验检测到的 1-辛烯-3-醇, 阈值为 1.5 ng/g, 是存在于甲壳类动物的主要挥发性醇, 具有蘑菇、青草气味^[27], 而在静水解冻和超声波解冻蟹肉中均未检测到该物质。



注: 不同字母表示有显著性差异 ($P < 0.05$)。

图 1 不同解冻方式对蟹肉 TVB-N 的影响 ($n=3$)

Fig.1 Effects of different thawing methods on TVB-N value of crabmeat ($n=3$)



注: 不同字母表示有显著性差异 ($P < 0.05$)。

图 2 不同解冻方式对蟹肉 TBARS 值的影响 ($n=3$)

Fig.2 Effects of different thawing methods on TBARS value of crabmeat ($n=3$)

表 3 不同解冻方式对蟹肉挥发性风味的影响 ($n=3$)

Table 3 Effects of different thawing methods on volatile flavor components of crabmeat ($n=3$)

类别	保留时间 /min	化学物名称	相对含量/%					
			解冻前	自然解冻	4 °C 解冻	静水解冻	微波解冻	超声波解冻
类 芳 香 族	13.014	甲苯	4.21	—	2.30	—	—	—
	18.431	<i>p</i> -二甲苯	—	—	0.56	—	—	—
	22.79	2,3,7-三甲基-2-辛烯	—	—	1.68	0.47	—	—
	27.187	1-甲基-5-(1-甲基乙基)环己烯	1.40	—	1.13	1.27	0.41	—
	27.450	β -水芹烯	1.71	—	3.16	4.57	1.63	—
	29.708	1-乙基-1,5-环辛二烯	—	0.29	—	—	—	—
	35.867	1,3-环辛二烯	—	0.84	—	0.69	0.62	0.84
	36.725	萘	—	—	0.52	0.39	0.31	—
	38.876	1-十五碳炔	—	2.44	0.76	0.80	0.79	2.87
	38.922	<i>o</i> -薄荷-8-烯	—	—	—	0.81	0.50	—
	44.217	2,6,10-三甲基-十二烷	1.01	0.48	0.35	—	0.64	0.34
	45.239	十七烷	—	1.26	—	0.89	1.20	—
	47.56	二十一烷	1.67	3.30	3.08	3.60	4.63	4.11

续表3

类别	保留时间 /min	化学物名称	相对含量/%					
			解冻前	自然 解冻	4℃ 解冻	静水 解冻	微波 解冻	超声波 解冻
	49.306	4,6-二甲基-十二烷	—	0.79	—	—	—	—
	49.318	3,3,8-三甲基-癸烷	—	—	—	—	—	0.44
	49.405	5-(1,5-二甲基-4-己烯基)-1,3-环己二烯	—	0.62	3.08	—	—	—
	49.893	7,11-二甲基-1,8,10-十二碳三烯	—	—	—	1.07	—	—
	49.921	1,6,10-十二碳三烯	—	—	—	—	0.74	—
	50.547	3-(1,5-二甲基-4-己烯基)-6-甲基-环己烯	1.49	1.35	—	—	—	—
	50.943	4-甲基-十五烷	—	—	0.91	0.67	—	0.26
	52.373	十六烷	0.32	0.58	—	—	—	—
醇类	23.792	1-辛烯-3-醇	7.05	7.55	7.28	—	8.81	—
	26.42	2-乙基己醇	—	0.31	—	—	—	—
	28.617	2-乙基环己醇	—	0.55	—	—	—	0.50
	31.287	2-亚甲基-环戊丙醇	—	—	—	—	—	0.39
	35.100	2,3-二甲基-十一碳-1-烯-3-醇	—	0.69	—	—	—	0.62
	35.711	2-己基-1-癸醇	—	—	—	—	—	1.02
	36.398	3-环己烯-1-甲醇	0.63	—	0.85	—	—	—
	39.553	4-环辛烯-1-甲醇	—	1.01	—	—	—	0.65
	39.932	叶绿醇	—	1.35	1.11	1.00	0.97	0.97
	40.181	顺-9-十四碳烯-1-醇	2.62	2.84	3.64	2.55	2.52	3.37
	45.802	环十二烷醇	—	—	—	0.70	—	—
	48.175	1-十六烷醇	7.60	—	0.40	—	—	—
	50.263	顺-1,2-环己二甲醇	—	1.41	1.25	1.20	—	0.89
	醛类	14.441	己醛	2.01	2.78	2.93	2.77	1.20
17.718		2-丁基丙烯醛	—	—	—	0.53	—	—
19.723		3-甲基-己醛	—	1.62	—	1.63	—	2.02
23.658		苯甲醛	9.24	13.36	10.81	26.13	20.18	24.44
25.246		辛醛	0.95	1.05	2.28	1.51	2.09	0.75
25.862		2,4-庚二烯醛	1.96	0.69	2.11	1.51	—	—
28.067		苯乙醛	—	1.34	—	0.84	0.54	1.15
28.358		2-辛烯醛	1.08	0.51	2.24	0.82	—	0.32
30.810		壬醛	6.22	8.39	7.34	5.18	8.39	—
33.910		2-壬烯醛	—	—	0.65	—	—	—
36.275		癸醛	—	—	—	2.00	2.25	1.72
39.627		3-7-二甲基-2-6-辛二烯醛	—	—	—	1.07	—	—
39.746		4-甲基-苯甲醛	8.27	0.36	0.43	0.47	0.35	0.34
41.427		正十五碳醛	—	0.25	—	—	0.27	0.21
42.205		2,4-癸二烯醛	3.94	1.00	2.76	1.15	0.35	—
44.025		7-十六碳烯醛	—	—	—	0.85	—	—
45.827		十四烷醛	0.63	0.31	0.48	—	0.41	—
53.093		十五烷醛	0.74	—	0.45	—	—	—
酮类		19.008	2-庚酮	—	0.52	—	—	—
	24.134	6-甲基-5-庚烯-2-酮	1.42	—	—	—	0.87	—
	24.425	2-辛酮	—	0.36	—	—	0.50	0.34
	29.954	2-壬酮	—	1.00	1.11	1.11	0.89	0.50

续表 3

类别	保留时间/min	化学物名称	相对含量/%					
			解冻前	自然解冻	4 °C 解冻	静水解冻	微波解冻	超声波解冻
	30.310	3,5-辛二烯-2-酮	1.58	2.02	1.94	—	—	0.83
	32.602	3-壬烯-2-酮	0.54	—	0.62	—	—	—
	34.768	1-苯基-1-丙酮	1.85	—	0.39	—	—	—
	35.417	2-癸酮	—	0.43	—	0.61	0.54	0.44
醚类	30.396	7,9-甲基-十三碳二烯基醚	—	—	—	—	1.86	—
	35.706	1-1-氧代二-辛烷	—	1.04	—	1.11	—	—
	35.729	1,1-二氧化癸烷	2.01	1.14	0.48	—	0.81	—
	41.008	4-烯丙基苯甲醚	16.99	11.93	17.19	17.47	29.05	23.45
含 N 类	20.026	2-乙基-吡啶	—	—	0.45	—	—	—
	20.538	4,6-二甲基嘧啶	—	1.23	0.56	0.94	0.43	1.07
	24.578	2-戊基-咪喃	2.30	5.43	4.79	3.56	—	9.99
	29.427	2-6-二乙基-吡嗪	—	—	—	1.83	—	—
	35.000	2-正丙基咪喃	—	—	—	—	—	0.34
	36.181	2-丁基-吡啶	8.56	3.74	7.42	—	—	—
	41.628	5H-1-吡啶	—	—	0.54	0.82	0.97	0.47
酚类	28.925	4-甲基-苯酚	—	—	—	1.11	1.05	—
	49.688	2,6-二叔丁基对甲酚	—	11.84	—	1.35	1.43	10.51
其他	26.417	2-乙基己基乙酸酯	—	—	—	—	—	0.26
	28.732	甲酸辛基酯	—	—	—	2.19	1.51	—
	38.459	壬酸	—	—	—	0.40	0.29	—

注: “—”表示未检出。

表 4 不同解冻方式处理蟹肉的挥发性风味物质种类相对含量对比(n=3)

Table 4 Comparison of contents of volatile flavor components from crabmeat with different thawing methods (n=3)

解冻方式	相对含量/%								同解冻前种类
	烃类	醇类	醛类	酮类	醚类	含 N 类	酚类	其他	
解冻前	11.81	17.90	35.04	5.39	19.00	10.86	—	—	30
自然空气解冻	11.96	15.72	31.65	4.33	14.11	10.40	11.84	—	20
冰箱冷藏室解冻	17.53	14.52	32.47	4.05	17.67	13.75	—	—	27
静水解冻	15.23	5.45	46.82	1.71	18.58	7.16	2.46	2.59	14
微波解冻	11.47	12.30	36.03	2.79	31.71	1.41	2.48	1.80	16
超声波解冻	8.86	8.41	33.98	2.66	23.45	11.87	10.51	0.26	11

注: “—”表示未检出。

解冻前和 5 组处理组蟹肉中的醛类含量均大于 30%, 且醛类是由不饱和和脂肪酸氧化以及氨基酸斯特雷克(Strecker)降解产生的一类低阈值呈味物质, 具有气味叠加效应^[28], 可见醛类是蟹肉挥发性风味物质的主体。静水解冻蟹肉醛类物质相对含量最高, 为 46.82%, 且醇类相对含量最低, 为 5.45%, 可能是由于大量的醇类物质氧化为醛^[27]。饱和的直链醛常有令人不愉快的气味, 如壬醛具有鱼

腥味^[29], 在此次实验中自然解冻和微波解冻蟹肉检测到的该物质相对含量最高, 均为 8.39%。

解冻前蟹肉中的酮类相对含量最高, 为 5.39%, 与自然空气解冻和冰箱冷藏室解冻相近, 酮类是一种低阈值化合物, 其中烯酮类是加热期间生成的一类脂质氧化的产物, 伴有浓郁的近似玫瑰液的香味, 对食品风味有较大影响^[30]。

微波解冻蟹肉中的醚类相对含量最高,其他组较解冻前变化不大。酚类化合物是芳烃的含羟基衍生物,赋予食品特殊香味,但在解冻前和冰箱冷藏室解冻中均没有检出,其具体风味特征需要进一步的研究。

冷冻蟹肉经过 5 种不同解冻方式处理后的风味物质存在差异,主要与解冻机制有关,不同解冻方式因解冻条件的差异,如温度、氧分压、水分等对肌肉中风味前体物质破坏程度不同,导致其风味成分发生变化。与解冻前蟹肉挥发性风味物质种类的相对含量相比,自然空气解冻和冰箱冷藏室解冻对蟹肉风味保持最好,且冰箱冷藏室解冻蟹肉中有高达 27 种挥发性风味化合物与解冻前蟹肉相同,故冰箱冷藏室解冻可作为蟹肉最适的解冻方式。

4 结 论

研究表明,不同解冻方式对冷冻早熟蟹蟹肉的理化性质和挥发性风味物质有一定的影响。就解冻时间看,微波解冻时间最短,超声波解冻次之;就保水性而言,经冰箱冷藏室解冻蟹肉的保水性能力较强,微波解冻和超声波解冻对蟹肉的保水性影响较大;微波解冻和超声波解冻蟹肉的 TVB-N 含量和 TBARS 值显著低于其他处理组,此外,自然空气解冻仅高于微波解冻和超声波解冻。分析挥发性风味物质可知,自然空气解冻和冰箱冷藏室解冻对蟹肉风味的保持最好,且后者检测出的挥发性风味化合物种类同解冻前蟹肉相似度最高。综上所述,冰箱冷藏室解冻是早熟蟹蟹肉最适宜的解冻方式。

参考文献

- [1] Sun S, Qin J G, Yu N, *et al.* Effect of dietary copper on the growth performance, non-specific immunity and resistance to *Aeromonas hydrophila* of juvenile Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis* [J]. Fish Shellfish Immunol, 2013, 34(5): 1195–1201.
- [2] 王新革. 河蟹性早熟的原因及预防[J]. 黑龙江水产, 2015, (5): 40–41.
Wang XG. Causes and prevention of precocity in the Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* [J]. Fish Heilongjiang, 2015, (5): 40–41.
- [3] Chang G, Wu X, Cheng Y, *et al.* Reproductive performance, offspring quality, proximate and fatty acid composition of normal and precocious Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* [J]. Aquaculture, 2017, 469(20): 137–143.
- [4] Sriket P, Benjakul S, Visessanguan W, *et al.* Comparative studies on the effect of the freeze-thawing process on the physicochemical properties and microstructures of black tiger shrimp (*Penaeus monodon*) and white shrimp (*Penaeus vannamei*) muscle [J]. Food Chem, 2007, 104(1): 113–121.
- [5] Li B, Sun DW. Novel methods for rapid freezing and thawing of foods-A review [J]. J Food Eng, 2002, 54(3): 175–182.
- [6] Shafieipour A, Sami M. The effect of different thawing methods on chemical properties of frozen pink shrimp (*Penaeus duorarum*) [J]. Iranian J Vet Med, 2015, 9(1): 1–6.
- [7] 刘欢, 陈雪, 宋立玲, 等. 不同解冻方式对鲈鱼鲜度及品质的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(10): 259–265.
- [8] Liu H, Chen X, Song LL, *et al.* Effect of different thawing methods on freshness and quality of *Scomberjaponicus* [J]. Food Sci, 2016, 37(10): 259–265.
- [9] GB/T 5009.228-2016 食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定[S].
GB/T 5009.228-2016 National food safety standard-Determination of the total volatile basic nitrogen in food [S].
- [9] 赵淑娥. 硫代巴比妥酸法(TBA 模型)预测鱼糜制品冷藏货架期研究[J]. 江西食品工业, 2012, (2): 26–27.
Zhao SE. TBA model for surimi shelf life predicting [J]. Jiangxi Food Ind, 2012, (2): 26–27.
- [10] Gu S, Wang X, Tao N, *et al.* Characterization of volatile compounds in different edible parts of steamed Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) [J]. Food Res Int, 2013, 54(1): 81–92.
- [11] 马燕, 田少君. 微波技术在食品解冻中的研究进展[J]. 粮食与食品工业, 2014, 21(6): 35–38.
Ma Y, Tian SJ. Research progress of microwave techniques in food thawing [J]. Cere Food Ind, 2014, 21(6): 35–38.
- [12] 马空军, 金思, 潘言亮. 超声波技术在食品研究开发中的应用现状与展望[J]. 食品工业, 2016, (9): 207–211.
Ma KJ, Jin S, Pan YL. Application status and prospect of ultrasonic technology in food research and development [J]. Food Ind, 2016, (9): 207–211.
- [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 MF, Xun YJ, Fan MM, *et al.* Influence of different thawing methods on the quality of shrimp pieces meat [J]. Sci Technol Food Ind, 2015, 36(16): 162–166.
- [14] 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.
Guan ZQ, Zhang K, Li M, *et al.* Effects of various thawing methods on the physicochemical characteristics of frozen tilapia fillets [J]. Fish Mod, 2016, 43(4): 38–43.
- [15] Xia X, Kong B, Liu J, *et al.* Influence of different thawing methods on physicochemical changes and protein oxidation of porcine longissimus muscle [J]. LWT- Food Sci Technol, 2012, 46(1): 280–286.
- [16] 朱文慧, 宦海珍, 步营, 等. 不同解冻方式对秘鲁鲉鱼肌肉保水性和蛋白质氧化程度的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(11): 6–11.
Zhu WH, Huan HZ, Bu Y, *et al.* Effect of different thawing methods on water holding capacity and protein oxidation in *Dosidicus gigas* [J]. Food Sci, 2017, 38(11): 6–11.
- [17] 余小领, 李学斌, 闫利萍, 等. 不同冻结和解冻速率对猪肉保水性和超微结构的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(8): 261–265.
Yu, XL, Li XB, Yan LP, *et al.* Effects of different freezing and thawing rate on water-holding capacity and ultrastructure of pork [J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2007, 23(8): 261–265.
- [18] Kuswandi B, Larasati TS, Abdullah A, *et al.* Real-time monitoring of shrimp spoilage using on-package sticker sensor based on natural dye of curcumin [J]. Food Anal Methods, 2012, 5(4): 881–889.
- [19] Boonsumrej S, Chaiwanichsiri S, Tantratrian S, *et al.* Effects of freezing and thawing on the quality changes of tiger shrimp (*Penaeus monodon*) frozen by air-blast and cryogenic freezing [J]. J Food Eng, 2007, 80(1):

- 292–299.
- [20] 迟海, 杨峰, 杨宪时, 等. 不同解冻方式对南极磷虾品质的影响[J]. 现代食品科技, 2011, 27(11): 1291–1295.
Chi H, Yang F, Yang XS, *et al.* Effect of different thawing methods on quality of antarctic krill (*Euphausia Superba*) [J]. Mod Food Sci Technol, 2011, 27(11): 1291–1295.
- [21] 郑振霄, 周聃, 冯俊丽, 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 ZX, Zhou D, Feng JL, *et al.* The effect of three preservation methods on the freshness changes of mackerel (*Pneumatophores japonicas*) during storage [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2016, 16(1): 181–187.
- [22] 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.
Mi HB, Liu S, Li XP, *et al.* Research progress of nature antioxidant in inhibiting lipid oxidation of aquatic product during storage [J]. Sci Technol Food Ind, 2016, 37(8): 364–368.
- [23] Beyza E, Emine A, Özeren A. The effect of thawing methods on the quality of eels (*Anguilla anguilla*) [J]. Food Chem, 2008, 111(2): 377–380.
- [24] 蔺佳良, 缪芳芳, 蔡江佳, 等. 中华绒螯蟹不同部位挥发性物质的研究[J]. 核农学报, 2014, 28(2): 259–269.
Lin JL, Miu FF, Cai JJ, *et al.* Volatile substances in different parts of female *Eriocheir sinensis* [J]. J Nuclear Agric Sci, 2014, 28(2): 259–269.
- [25] 顾赛麒, 王锡昌, 陶宁萍, 等. 基于固相微萃取-气-质联用式和电子鼻式检测锯缘青蟹挥发性风味物[J]. 食品工业科技, 2012, 33(14): 140–145.
Gu SQ, Wang XC, Tao NP, *et al.* Study on detection of volatile flavor components in mangrove crab (*Scylla serrate*) by HS-SPME-GC-MS and E-nose methods [J]. Sci Technol Food Ind, 2012, 33(14): 140–145.
- [26] Suzuki J, Ichimura N, Etoh T. Volatile components of boiled scallop [J]. Food Rev Int, 2009, 6(4): 537–552.
- [27] 秦刚, 李洪军, 贺稚非, 等. 荣昌猪肉在不同烤制温度条件下的挥发性风味物质变化[J]. 食品科学, 2011, 32(18): 190–194.
Qing G, Li HJ, He ZF, *et al.* Variation of aroma compounds in Rongchang pork at different roast temperatures [J]. Food Sci, 2011, 32(18): 190–194.
- [28] Yu HZ, Chen SS. Identification of characteristic aroma-active compounds in steamed mangrove crab (*Scylla serrata*) [J]. Food Res Int, 2010, 43(8): 2081–2086.
- [29] Buttery RG, Teranishi R, Ling LC, *et al.* Quantitative and sensory studies on tomato paste volatiles [J]. J Agric Food Chem, 1990, 38(1): 336–340.
- [30] 何珊, 蔺佳良, 张迪骏, 等. 南北中华绒螯蟹挥发性物质的比较研究[J]. 核农学报, 2016, 30(8): 1577–1586.
He S, Lin JL, Zhang DJ, *et al.* Comparative analysis of the volatile compounds in north and south *Eriocheir Sinensis* [J]. J Nuclear Agric Sci, 2016, 30(8): 1577–1586.

(责任编辑: 武英华)

作者简介



葛孟甜, 硕士, 主要研究方向为水产品加工及保鲜。

E-mail: 845725791@qq.com



陆剑锋, 博士, 教授, 主要研究方向为水产品加工及保鲜。

E-mail: lujf@sibs.ac.cn