

解冻方式对冷冻鱼丸理化与质构性质的影响

盛倩茹, 王娟*

(华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510640)

摘要: 采用空气、低温、热水、流水、超声和微波解冻, 探究不同解冻方式对鱼丸品质的影响。通过分析解冻时间、保水性、色泽、pH值、挥发性盐基氮(TVB-N)、硫代巴比妥酸(TBARS)、质构和微观结构, 评价解冻方式对鱼丸的影响。结果表明: 微波能快速解冻冷冻鱼丸, 但处理后鱼丸保水性、质构指标差, 局部过热现象明显。超声解冻后鱼丸保水性好, 解冻损失仅为2.60%, 且TVB-N(3.85 mg/100 g)和TBARS值(0.54 mg MDA/kg)偏低。与其他解冻方式相比, 低温解冻鱼丸的解冻损失和蒸煮损失最低(分别为2.24%、1.97%), 硬度、弹性、胶着性与咀嚼性较好, 扫描电镜结果显示鱼丸肌肉结构紧密, 损伤最小。空气解冻鱼丸蛋白质降解程度高, TVB-N值最高(5.60 mg/100 g)。流水解冻同样会加重蛋白质降解, 其TVB-N与空气解冻无差异。不同方式解冻后鱼丸色泽、pH值没有明显差异。综合比较而言, 超声波处理能维持鱼丸保水性, 对蛋白质与脂质影响较小, 是比较理想的鱼丸解冻方式, 但其操作参数仍需要进一步探索。低温解冻的质构性质较好, 适合普通消费者使用。

关键词: 鱼丸; 解冻方式; 理化性质; 质构

文章编号: 1673-9078(2024)01-224-232

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.1.1410

Effects of Thawing Methods on the Physicochemical and Textural Properties of Frozen Fish Balls

SHENG Qianru, WANG Juan*

(School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Six different thawing methods, air thawing, low-temperature thawing, hot water thawing, running water thawing, ultrasound thawing and microwave thawing were used, in order to investigate the effects of different thawing methods on the quality of frozen fish ball. In this study, the thawing time, water holding capacity, color, pH, total volatile basic nitrogen (TVB-N) content, thiobarbituric acid-reactive substance (TBARS) content, texture characteristics and microstructure were measured to evaluate the effects of thawing on frozen fish balls. The results showed that the microwave thawing could make the balls thawed rapidly, but the water holding capacity and texture index of the balls after thawing were poor, with local overheating being obvious. Ultrasound thawing led to a better water holding capacity, and its thawing loss, TVB-N content and TBARS content were being lower (only 2.60%, 3.85 mg/100 g and 0.54 mg MDA/kg, respectively). Compared with other thawing methods, low-temperature thawing had the lowest thawing loss and cooking loss (2.24% and 1.97%, respectively), with the hardness, springiness, gumminess and chewiness value being better than others. The results of

引文格式:

盛倩茹,王娟.解冻方式对冷冻鱼丸理化与质构性质的影响[J].现代食品科技,2024,40(1):224-232.

SHENG Qianru, WANG Juan. Effects of thawing methods on the physicochemical and textural properties of frozen fish balls [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(1): 224-232.

收稿日期: 2023-01-19

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2022ZYGXZR102); 云南省科技厅科技计划项目(202304BU090005)

作者简介: 盛倩茹(1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: Ruerqian@163.com

通讯作者: 王娟(1981-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: wangjuan@scut.edu.cn

scanning electron microscopy showed that the muscle structure of the fish balls thawed at a low-temperature was compact, with minimal damage. Air thawing promoted a high degree of protein degradation, with the TVB-N content being the highest (5.60 mg/100 g). The running water thawing also enhanced protein degradation and its TVB-N content was insignificantly different from that for air thawing. There were no significant differences in the color and pH among the fish balls thawed by different methods. Taken together, ultrasound thawing could maintain the water holding capacity and had a relatively smaller effect on protein and lipid, thus it was an ideal thawing method for defrosting fish balls. However, the parameters of ultrasound thawing still need to be studied. The low-temperature thawing led to a texture property, thus, may be suitable for normal cooking by consumers.

Key words: fish ball; thawing methods; physicochemical properties; texture

预制菜、预制食品以其方便性、经济性和可口性受到众多青睐,成为近年来消费市场火爆的商品。其中,冷冻食品市场占有率颇高,具有广阔的前景。冷冻食品的冻结过程对产品的质量影响很大,但是解冻环节同样会影响产品品质,却常常被忽视。因此,本文选择冷冻食品中的代表产品鱼丸为研究对象,考察解冻对它的影响。

鱼丸是以鱼肉为主要原料加以适量的淀粉和调味品加工而成的鱼糜制品^[1],具有口感良好、方便食用等优点。鱼丸常出现于家庭、餐厅等各类消费场景,成为消费者最喜爱的鱼糜制品。但是由于不饱和脂肪酸、蛋白质、水分含量高,鱼丸不易储存。冷冻能够保证产品品质,克服鱼丸销售过程中长时间贮藏与长距离运输的问题,是储存、延长鱼丸货架期的最常用方式。

解冻是冷冻鱼丸进行后续加工或烹饪前的步骤,即将鱼丸从冷冻状态升温至冰点(0℃)附近的过程^[2]。然而,不恰当的解冻方式会造成产品品质不可逆的损失,特别是汁液和营养成分的流失、质地和风味的破坏、微生物污染等问题^[3,4],为后续的加工带来负面影响甚至造成不必要的经济损失。目前常使用的解冻方式主要有空气解冻、低温解冻、微波解冻、超声解冻以及射频解冻、欧姆解冻和红外解冻等^[5]。由于不同解冻方式依赖的传热介质与参数设置不同,解冻时间以及对肉制品结构、持水性、蛋白质和脂质氧化的影响存在差异。Lv等^[3]研究了静水、流水、盐水、超声、微波以及低温解冻对墨鱼品质影响,确定盐水和超声解冻适合于解冻墨鱼。Cai等^[4]对比了常规解冻、微波解冻、超声真空解冻、远红外解冻等6种方式,发现微波联合真空解冻和远红外解冻是解冻大黑口鲈鱼的较佳方式。此外鸡胸肉^[6]、鲳鱼^[7]、鱼片^[8]等多种肉制品适宜解冻方式均有研究。而针对冷冻鱼丸解冻的研究

较少,探寻适合于冷冻鱼丸的解冻方式具有一定的必要性。另一方面,鱼类蛋白质在解冻时发生变性会引起鱼丸色泽变化、凝胶强度降低,这已成为制约鱼丸加工产业发展的最大问题^[9]。同时解冻过程中的水分流失更是直接影响鱼丸的质构特性与稳定性^[10]。因此,研究解冻方式对冷冻鱼丸的品质影响,从而优选出一些适宜的解冻方法,这对鱼丸产业具有积极意义。本研究采用空气、低温、流水、热水、超声及微波解冻6种方式,对比不同方式解冻后鱼丸保水性、色泽、质构、蛋白质降解与脂质氧化等品质的变化,为鱼丸的后续烹饪、加工或食用选择适合的解冻方法,减少因解冻造成的营养损失和质量损失,并为肉糜类冷冻制品的解冻提供数据参考。

1 材料与方法

1.1 原料与试剂

鱼丸,购买于福建安井食品股份有限公司,-18℃冷冻运输到达实验室后,于-18℃的条件下贮藏、备用。

盐酸、乙二胺四乙酸二钠,广东广试试剂科技有限公司;硼酸,江苏强盛功能化学股份有限公司;甲基红、三氯乙酸,福晨(天津)化学试剂有限公司;亚甲基蓝,天津市天新精细化工开发中心;碳酸钾,上海润捷化学试剂有限公司;硫代巴比妥酸、1,1,3,3-四乙基丙烷,上海麦克林生化科技有限公司;戊二醛,天津市科密欧化学试剂有限公司;磷酸盐缓冲溶液,上海源叶生物科技有限公司;无水乙醇,天津市富宇精细化工有限公司。

1.2 主要仪器设备

BSA124S-CW分析天平,赛多利斯科学仪器有限公司;食品中心温度计,得力集团有限公司;KQ-

300DE 型数控超声波清洗器, 昆山市超声仪器有限公司; M1-L213B 美的微波炉, 广东美的厨房电器制造有限公司; WR-10 色差仪, 威福光电; pHB-3 笔式 pH 计, 上海三信仪表厂; FSH-2A 高速均质机, 江苏东鹏仪器制造有限公司; 721 型可见分光光度计, 上海菁华科技仪器有限公司; SHA-B 水浴恒温振荡器, 常州澳华仪器有限公司; HH-4 数显恒温水浴锅, 常州普天仪器制造有限公司; LGJ-10 真空冷冻干燥机, 北京松源华兴科技发展有限公司; EM-30AX 扫描电子显微镜, 韩国库塞姆; TA.XT.plus 物性测定仪, 英国 SMS 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 解冻方式

将鱼丸取出随机分为 6 组, 每组 4 颗。分别采用表 1 中 6 种方式解冻。以食品中心温度计测定鱼丸中心温度, 将中心温度达到 0 °C 时视为解冻终点。记录不同解冻方式所需时间 (即为解冻时间), 并进行后续指标测定。

表 1 鱼丸解冻方式及其操作方法

Table 1 Thawing methods and operation methods of fish balls

解冻方式	操作方法
空气解冻	将鱼丸置于洁净的培养皿中, 于室温 (23~25 °C) 环境下解冻, 以鱼丸中心温度达到 0 °C 为解冻终点
低温解冻	将鱼丸装入密封袋, 置于 4 °C 的冰箱中解冻, 以鱼丸中心温度达到 0 °C 为解冻终点
流水解冻	将鱼丸装入密封袋, 置于恒定流速的自来水中解冻, 水温约为 27 °C, 以鱼丸中心温度达到 0 °C 为解冻终点
热水解冻	将鱼丸装入密封袋, 置于 40 °C 恒温水浴锅中解冻, 以鱼丸中心温度达到 0 °C 为解冻终点
超声解冻	鱼丸装入密封袋, 置于装有一定水的超声波清洗机中解冻 (超声功率 300 W, 频率 40 kHz), 先解冻 1 min, 之后每隔 30 s 取出测量中心温度, 温度达到 0 °C 为终点
微波解冻	将鱼丸装入烧杯中, 选择微波炉“解冻模式”解冻 (微波功率 700 W, 频率 2 450 MHz), 以鱼丸中心温度达到 0 °C 为解冻终点

1.3.2 解冻损失率与蒸煮损失

参考余力等^[11]的方法, 计算解冻损失与蒸煮损失。

准确称量鱼丸解冻前质量, 解冻后用吸水纸擦干再次称量, 按照下式计算鱼丸解冻损失率:

$$A = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

A —解冻损失率, %;

m_1 —解冻前鱼丸质量, g;

m_2 —解冻后鱼丸质量, g。

准确称取一定质量解冻后鱼丸, 放入 80 °C 水浴锅中蒸煮至鱼丸中心温度达到 70 °C, 其冷却后用吸水纸擦干再次称量, 按照下式计算鱼丸蒸煮损失率:

$$B = \frac{m_3 - m_4}{m_3} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

B —蒸煮损失率, %;

m_3 —蒸煮前鱼丸质量, g;

m_4 —蒸煮后鱼丸质量, g。

1.3.3 pH 值

取 5.0 g 解冻后鱼丸样品, 研磨捣碎后加入 50 mL 煮沸后冷却的水高速匀浆 30 s, 浸渍 30 min。用慢速定量滤纸过滤后取滤液, 利用 pH 计测定。

1.3.4 白度测定

利用色差仪测定鱼丸白度, 以冷冻鱼丸为标准比色物质。每颗鱼丸选择 3 个测量位点, 取测量结果的平均值作为该鱼丸的色泽值。以本组 4 颗鱼丸色泽值的平均值作为该解冻方式的色泽结果。尽量使得各鱼丸样品之间测量位点一致, 减少误差。按照以下公示计算鱼丸的白度值^[12]:

$$W = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}} \quad (3)$$

式中:

L^* —亮度;

a^* —红度;

b^* —黄度。

1.3.5 蛋白质降解的评估

蛋白质被酶和微生物分解产生氨及胺类碱性含氮物质, 此类物质含量常用挥发性盐基氮表征。按照国标 GB5009.228-2016《食品安全国家标准食品中挥发性盐基氮的测定》中微量扩散法测定。

1.3.6 脂肪氧化的评估

丙二醛为脂质氧化的次级产物, 其含量常用硫代巴比妥酸值表征。按照国标 GB5009.181-2016《食品安全国家标准食品中丙二醛的测定》测定。

1.3.7 质构测定

参考殷俊^[13]的方法并稍作修改。将鱼丸切成直径 2.0 cm, 高度 2.0 cm 的圆柱体, 采用质构剖面分析法 (Texture Profile Analysis, TPA) 模式测定解冻后鱼丸质构特性。测试条件如下: P/36R 平底

柱形探头；测前速率 2 mm/s；测试速率 5 mm/s；测后速率 5 mm/s；压缩程度 50%；两次压缩之间停留时间 5 s；触发类型自动；触发力 10 g。选择硬度 (Hardness)、弹性 (Springiness)、内聚性 (Cohesiveness)、胶着性 (Gumminess)、咀嚼性 (Chewiness)、回复性 (Resilience) 为评价指标。

1.3.8 微观结构观察

参考刘骁等^[14]的方法并稍作改动。将鱼丸切成 4 mm×4 mm×4 mm 小块，放入 2.5% (V/V) 戊二醛溶液中 4 ℃ 固定 24 h。分别使用 PBS 缓冲液 (0.1 mol/L, pH 值 7.0)、蒸馏水漂洗 3 次，每次 15 min。依次用体积分数 50%、70%、90% 乙醇洗脱 3 次，每次 15 min。最后使用无水乙醇脱水三次，每次 10 min。将处理好的样品冷冻干燥，喷金镀膜，在 500 倍电子显微镜下观察并拍照。

表 2 不同解冻方式对鱼丸解冻时间的影响

Table 2 Effects of different thawing methods on the thawing time of fish balls

解冻方式	空气解冻	低温解冻	热水解冻	流水解冻	超声解冻	微波解冻
时间/min	26.00±0.89 ^b	186.24±6.01 ^a	8.06±0.62 ^c	9.65±0.37 ^e	3.60±0.37 ^d	0.29±0.04 ^e

注：不同小写字母代表该指标下不同解冻方式之间差异显著 ($P < 0.05$)，下表同。

解冻时间的差异主要来源于各解冻方式间传热介质的导热系数不同。空气解冻依靠空气对流传热实现解冻，是最为传统，简单常用的方式，其需要的时间较长。低温解冻由于所处温度 (4 ℃) 低于室温，使得温度差异小，传热速度低，因此时间显著多于空气解冻。流水解冻以传热性更好的水作为介质，缩短导热时间，因此解冻快于空气。鱼丸冻结表面和冻结处对超声波有良好的吸收，能够将其转化为热能，依靠热效应实现对冷冻产品的解冻^[15]。同时超声诱导的空化作用，使鱼丸内部液体产生微流，对热传递和冰晶融化具有改善作用^[15,16]。因此相较于空气解冻，超声解冻将时间缩短近 86.15%。微波解冻借助于微波作为传热介质，通过鱼丸中极性分子 (尤其是水分子) 对于微波的吸收，从而引起极性分子在电场中的旋转、振动、碰撞等摩擦生热，达到升温解冻的目的。本实验中微波解冻需要时间最短，相较于传统的空气解冻而言，能将时间缩短 98.88%，是一种快捷的解冻方式。然而微波加热的不均匀性，会使鱼丸局部过热和部分熟化。

2.2 解冻方式对鱼丸保水性的影响

保水性是指肌肉在诸如加热、冷冻、解冻等不同加工或贮藏条件下保持其原有水分及补充水分的

1.4 数据处理

所得数据均以平均值 ± 标准差 (mean ± SD) 表示，每组实验平行 4 次。数据采用 Microsoft Excel 2019 软件整理，SPSS statistics 27.0 做显著性分析，由单因素方差分析法 (One-way ANOVA) 完成，采用 Turkey 多重比较法，显著性水平设置为 $P < 0.05$ ，利用 Origin 18.0 软件作图。

2 结果与讨论

2.1 解冻方式对解冻时间的影响

如表 2 所示，6 种解冻方式所需要的解冻时间存在显著差异 ($P < 0.05$)，快慢顺序依次为微波解冻 > 超声解冻 > 热水解冻 > 流水解冻 > 空气解冻 > 低温解冻。

能力^[11]。解冻损失与蒸煮损失是衡量肉及肉制品保水性的重要指标，对于鱼丸而言持水性对鱼丸嫩度、品质至关重要。图 1 比较了 6 种不同解冻方式对鱼丸保水性造成的影响。结果可见，因解冻机制的不同，各方法对鱼丸保水性造成不同程度的影响。

解冻损失流出的汁液是指肌肉组织中与蛋白质结合最不紧密的水，它与肌肉结构、蛋白质的变性与降解相关^[17]。解冻损失作为判断冷冻鱼丸保水性好坏的标志，其值越小则鱼丸保水性越好，说明该种解冻方式对鱼丸肌肉组织的损伤越小^[18]。在 6 种方式中，微波解冻产生的解冻损失最大 (5.46%)，显著高于其他 5 种方式 ($P < 0.05$)。微波加热迅速，鱼丸温度瞬间升高，冰晶快速融化，造成鱼丸中肌原纤维结构性损伤，导致保水性降低，表现为高解冻损失^[8]。低温解冻产生的解冻损失最小 (2.24%)，表明 4 ℃ 环境中解冻时鱼丸内部冰晶以缓慢的速率融解，对鱼丸组织造成的损失小。空气、热水、流水以及超声解冻之间不存在显著差异 ($P > 0.05$)，但是解冻损失率表现为热水解冻 > 空气解冻 > 超声解冻 > 流水解冻，与解冻速率变化基本一致。与 Backi^[19] 结论相似，即解冻速率越快则造成的解冻损失越大，缓慢解冻可以降低汁液损失。

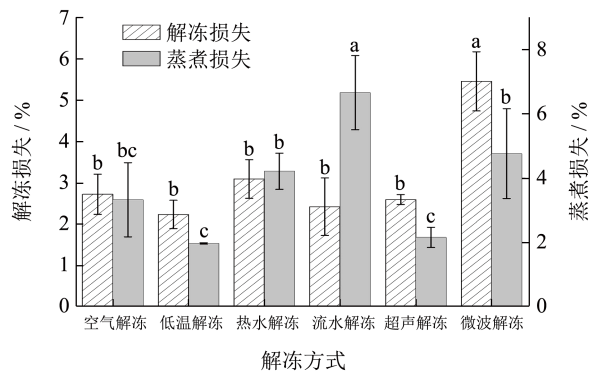


图1 不同解冻方式对鱼丸保水性的影响

Fig.1 The effects of different thawing methods on the water holding capacity of fish balls

注: 不同小写字母表示该指标下不同解冻方式之间差异显著 ($P < 0.05$), 下图同。

蒸煮损失是指加热导致的肌肉结构性损伤, 引起肉类内部液体和少量可溶性物质流出的现象^[20]。就蒸煮损失而言, 流水解冻造成的蒸煮损失 (6.67%) 显著高于其他各方式 ($P < 0.05$), 这可能是由于此过程中部分流水渗入鱼丸肌纤维间隙所致^[11]。低温解冻的蒸煮损失率最小 (1.97%), 显著低于热水解冻、微波解冻 ($P < 0.05$), 这得益于该方式下冰晶的缓慢融化。超声解冻蒸煮损失较低, 且与低温解冻无显著差异, 体现了超声解冻能够保证产品品质和营养的优势, 在解冻伊拉兔肉^[11]、竹荚鱼^[21]实验中也得到相似结论。然而一些研究中表明采取超声解冻造成的蒸煮损失偏大, 对保水性存在比较大的影响。这种结果的差异可能源于超声波功率的不同。高强度的超声波会导致冷冻产品内冰晶振动, 在一定程度上改变产品组织空间构象, 从而引起汁液流失增多, 保水性降低^[22]。在探究解冻方式对冷冻白牦牛肉品质的影响时, Guo 等^[15]发现, 当超声波功率由 400 W 增至 600 W 时, 牦牛肉肌原纤维受损严重, 解冻损失显著增加 ($P < 0.05$)。另一项鸡肉解冻实验中同样发现, 200 W 超声解冻时鸡肉的持水性降低, 解冻损失极显著大于 180 W 条件下的结果 ($P < 0.01$)^[23], 这表明超声功率对冷冻产品持水性有极大影响。此外解冻肉制品本身的种类以及结构对超声解冻效果也存在一定程度的影响^[22]。

2.3 解冻方式对鱼丸白度的影响

白度, 反映颜色具有反射率和饱和度的属性, 是鱼丸色泽评价的重要指标^[1]。鱼丸色泽不仅能够反映产品的新鲜程度, 更是消费者选购产品时最为

直观的因素。研究表明解冻后水产品色泽与脂质氧化、蛋白质变性、色素降解有关^[3]。

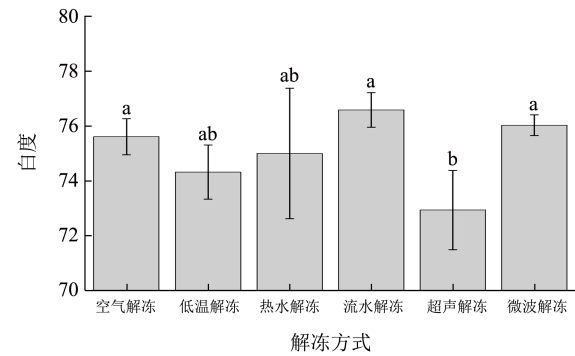


图2 不同解冻方式对鱼丸色泽的影响

Fig.2 The effects of different thawing methods on the color of fish balls

不同解冻方式对鱼丸白度的影响见图2所示, 各解冻方式对于鱼丸白度存在一定影响。超声解冻后鱼丸白度显著低于空气、流水、微波解冻 ($P < 0.05$), 但各解冻方式引起的白度差异肉眼无法辨别。超声解冻后白度最低, 这可能是由于此频率下超声波处理产生的热量使水分子裂解产生自由基而造成肌肉色素降解^[5]。而微波解冻中由于存在较多的解冻损失, 使鱼丸表面光反射增强, 因此白度较高^[24]。李锦锦等^[25]的结果也表明微波解冻后猪肝色泽最佳。空气、低温以及流水解冻3种方式相较于微波解冻而言, 鱼丸长时间暴露在空气中导致蛋白质氧化加重, 其氧化形成的羰基化合物与游离氨基酸反应生成深色物质^[3], 这在一定程度上使得白度稍有降低。

2.4 解冻方式对鱼丸pH值的影响

解冻过程中, 肌肉细胞中蛋白质、矿物质离子等成分随着汁液一同流出, 破坏了肌肉细胞中电解质平衡, 从而引起产品 pH 值的变化^[26]。同时在贮存过程中, 糖酵解产生乳酸、ATP 降解过程中产生无机磷酸盐以及含氮碱性物质的积累都会对肉类产品的 pH 值存在影响^[27]。pH 值的高低与产品色泽、新鲜度、持水力、货架期相关, 常被用作阐明鱼类产品腐败程度。

图3反映了各种解冻方式引起的 pH 值变化。低温解冻 pH 值显著高于空气、超声、微波解冻 ($P < 0.05$), 而与流水解冻和热水解冻并无显著性差异 ($P > 0.05$)。低温解冻耗时最长, 这期间鱼丸中蛋白质等含氮物质被分解为碱性物质, 比如氨基酸、氨、吲哚等。这可能是最终导致低温解冻

pH 值升高的原因。在对南极磷虾^[28]、伊拉兔肉^[11]解冻方式的探究中也得到了相似结论。超声解冻 pH 值显著低于其他各组,这可能是超声环境中会引起蛋白质的变性与结构的破坏,释放出 H⁺, 汁液流出后 H⁺ 浓度升高所致^[29]。超声波功率对解冻产品 pH 值变化有决定性影响,当功率较低时超声不足以引起细胞内电解质失衡, pH 值不会产生显著性变化;随着超声波功率的增加, pH 值会呈现降低趋势^[30]。

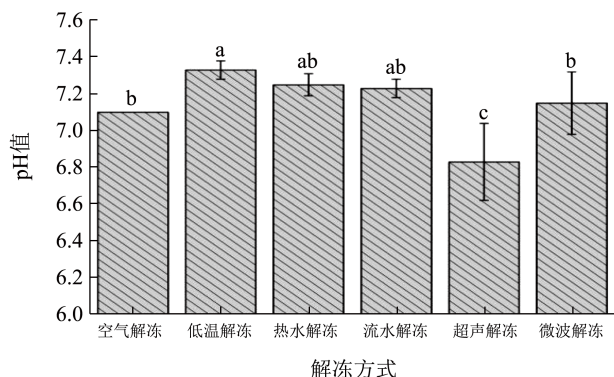


图3 不同解冻方式对鱼丸 pH 值的影响

Fig.3 Effects of different thawing methods on the pH of fish balls

2.5 解冻方式对鱼丸营养品质的影响

挥发性盐基氮 (Total Volatile Basic Nitrogen, TVB-N) 是在微生物和酶的作用下, 动物性食品

中蛋白质和非蛋白质含氮化合物降解产生的氨及胺类碱性物质, 是常用于评价肉类食品在加工或储藏过程中蛋白质降解程度的重要指标^[31]。由表 3 可知, 空气解冻鱼丸 TVB-N 含量最高, 与低温、流水解冻无显著性差异 ($P>0.05$)。微波、超声解冻 TVB-N 含量最小, 均为 3.85 mg/100 g。空气、低温、流水解冻时间长, 蛋白质降解程度增加。空气解冻处于一种与空气完全接触, 且温度较高的环境, 这均有利于微生物活动和生物酶 (钙蛋白酶、组胺脱羧酶等) 活性^[24], 因此鱼丸蛋白质被分解产生更多的碱性含氮物质, 表现为高 TVB-N 水平。而低温解冻时 4 °C 的温度对微生物、酶活性发挥抑制, 即使解冻时间长, 但其 TVB-N 含量仍低于空气解冻。在流水解冻方式中, 流水涌动增加了鱼丸表面的氧气含量, 这对蛋白质分解在一定程度上也是有利的。超声波处理能够减缓肌肉蛋白和氨基酸的分解速度, 极大程度地保持肉的新鲜度^[22], 因此该方法解冻后鱼丸 TVB-N 含量低。微波能快速解冻鱼丸, 避免解冻期间微生物和酶对蛋白质的大量分解, 因而产生的碱性物质少^[32]。王琳琳等^[33]在解冻耗牛肉的研究中发现, 微波解冻耗牛肉 TVB-N 和菌落总数最低, 推测这可能与微波具有一定杀菌、抑制肉类腐败等能力有关。

表 3 不同解冻方式对鱼丸 TVB-N、TBARS 值的影响

Table 3 Effects of different thawing methods on TVB-N, TBARS of fish balls

解冻方式	空气解冻	低温解冻	热水解冻	流水解冻	超声解冻	微波解冻
TVB-N/(mg/100 g)	5.60±0.49 ^a	4.55±0.35 ^{ab}	4.02±1.15 ^b	4.38±0.76 ^{ab}	3.85±0.35 ^b	3.85±1.16 ^b
TBARS/(mg MDA/kg)	0.60±0.01 ^{bc}	0.65±0.05 ^a	0.51±0.02 ^d	0.65±0.02 ^{ab}	0.54±0.01 ^d	0.57±0.02 ^{cd}

硫代巴比妥酸 (Thiobarbituric Acid-reactive Substance, TBARS) 是评价脂质氧化的指标之一, 其值常用来反应肉制品中多不饱和脂肪酸降解产生的次级脂质氧化产物含量^[4]。鱼丸中含有较高的不饱和脂肪酸, 容易发生氧化, 造成腐败, 有损鱼丸鲜味^[12]。TBARS 值与脂肪氧化酸败程度呈正相关, 其值愈大, 说明脂质氧化酸败程度愈大。

低温解冻和流水解冻后的 TBARS 值最大, 均为 0.65 mg MDA/kg, 空气解冻后的含量次之。超声、微波解冻后鱼丸的 TBARS 值较低, 热水解冻后 TBARS 值最低, 且与前两者无显著性差异 ($P>0.05$)。低温、流水、空气解冻的时间长, 鱼丸与空气接触较充分, 可能加剧了脂质氧化。

依据表 3 可以看出, 6 种不同解冻方式处理后, 鱼丸的 TVB-N 和 TBARS 变化规律基本是吻合的, 这体现了蛋白质降解与脂质氧化酸败是紧密关联的。脂质的氧化变质不仅会加速蛋白质的氧化, 同时对蛋白质的结构、溶解性以及功能特性存在一定程度影响^[20]。研究发现脂肪氧化中间体, 如初级产物过氧化氢、次级产物丙二醛 (Malondialdehyde, MDA), 都会与组织中蛋白质结合生成复合物, 并进一步促进脂质与蛋白质发生氧化反应^[34]。此外, 在冷冻-解冻过程中冰晶形成与消融会破坏肌肉组织细胞, 释放胞内酶和 Fe²⁺ 等促氧化剂, 加速脂质氧化^[35]。各解冻方式中冰晶融化速率不一, 脂质氧化相关的酶类受

到不同程度影响,外在表现为脂质氧化程度上的差异。

2.6 解冻方式对鱼丸质构的影响

质构特性是反映鱼丸质地和品质的重要指标。图4反映了不同方式解冻后鱼丸的质构变化,可见解冻方式对鱼丸质地有重要影响。整体而言,解冻后鱼丸与 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻藏鱼丸相比,硬度、内聚力、胶着性、咀嚼性与回复性发生显著改变($P<0.05$),而弹性的变化并不显著($P>0.05$)。这种差异的产生来源于解冻期间水分流失、蛋白质变性、交联与降解,以及解冻时间与温度等因素^[6]。

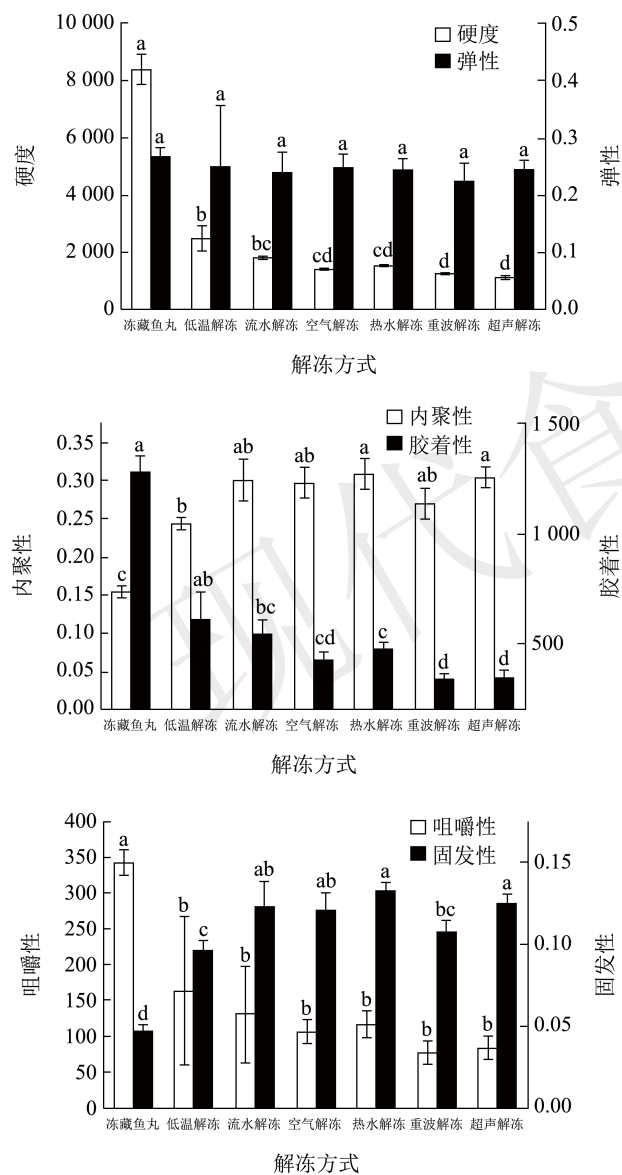


图4 不同解冻方式对鱼丸质构的影响

Fig.4 Effects of different thawing methods on the texture of fish balls

硬度是指第一次压缩样品时达到一定变形所必须的力,能够反映产品的坚实度。超声解冻后鱼丸硬度最低(1117.02 g),低温解冻硬度最大(2489.94 g),是前者的2.23倍。弹性是样品受外力形变后去除外力之后的恢复能力,不同方法解冻后鱼丸弹性降低,但是这种变化并不显著。微波解冻后弹性最低,较冻藏鱼丸下降了18.52%。低温解冻与空气解冻后弹性与冻藏鱼丸最为接近。咀嚼性即咬劲,通常是由硬度、弹性综合确定。咀嚼性与胶着性呈现出与鱼丸硬度一致的变化趋势,与Huang等^[36]对于鱼糜凝胶的研究结果相似。这可能是因为硬度大的鱼丸肉质更为紧实,增加了胶着性与咬劲。解冻后鱼丸内聚性,回复性均呈现增加趋势。其中微波解冻后鱼丸各项质构指标均发生了显著性变化,其硬度低,弹性差,胶着性偏低,回复性小,表明鱼丸质地不佳,这是由于微波解冻温度高并且存在加热的不均匀性,导致了鱼丸的过度熟化。

2.7 鱼丸微观结构

在冷冻与解冻的过程中冰晶的生长与融化对鱼丸肌肉组织的完整性会产生破坏。在不同的解冻方式中,冰晶的融化速率、解冻温度与时间,以及蛋白质交联或是降解、变性均会对鱼丸凝胶结构产生不同程度的机械损伤^[3,7]。

鱼丸经不同方式解冻处理后微观结构样貌如图5所示。冰晶融化会导致肌原纤维断裂或收缩,造成鱼丸凝胶网络结构的不均匀和纤维间隙的出现^[7]。流水、热水解冻对鱼丸结构的影响较空气解冻的影响小,可能是由于后者在空气中暴露时间长,蛋白质变性程度大。低温解冻对组织结构影响小,鱼丸的凝胶网络结构致密。相反,微波解冻后鱼丸组织结构受损严重,纤维间出现大量空隙,这与其局部温度过高、解冻不均匀和肌肉纤维结构被破坏相关。

上述研究发现解冻方式对冷冻鱼丸解冻品质存在影响。首先,6种方式在时间上差异显著。其次,6种解冻方式会造成鱼丸白度上的差异,但这种变化从外观上无法肉眼分辨。最后,相较其他方法而言低温解冻与超声解冻能降低鱼丸的解冻损失。空气解冻与流水解冻会促进蛋白质降解、脂质氧化。微波解冻对鱼丸质构、微观结构破坏性最大。

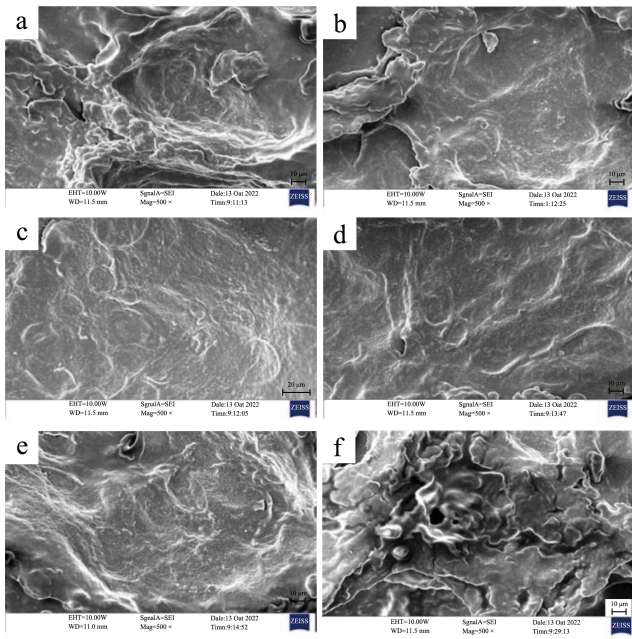


图5 不同方式解冻后鱼丸的微观结构

Fig.5 Microstructure of fish balls after thawing in different ways

注: (a) 空气解冻; (b) 低温解冻; (c) 流水解冻; (d) 热水解冻; (e) 超声解冻; (f) 微波解冻。

3 结论

通过比较空气、低温、热水、流水、超声和微波解冻6种解冻方式对冷冻鱼丸解冻后保水性、色泽、蛋白质降解、脂质氧化、质构、微观结构的影响,显示出:微波能实现鱼丸快速解冻,但是会造成大量汁液流失、局部过热、质地品质显著下降的问题;低温解冻对鱼丸组织结构破坏最小,可降低鱼丸水分流失,处理后鱼丸的质构特性优于其他解冻方式,但是解冻时间长;空气解冻、流水解冻时间较短,却会加剧蛋白质降解与脂质氧化程度;超声解冻有助于保持鱼丸的持水性以及营养品质特征,鱼丸的解冻损失、蒸煮损失显著低于其他方式($P < 0.05$)。因此,通过综合比较,超声解冻是本实验所用的方法中比较适合鱼丸解冻的方式,在实际生产中具有应用的可能性,然而超声处理的频率与强度等参数仍需要探索优化。而在生活中,消费者可以采用冰箱冷藏室进行适时的低温解冻,获得口感质地更佳

参考文献

- [1] 陈曦芸. 香菇鱼丸品质特性的研究与应用[D]. 福州:福建农林大学,2017.
- [2] 胡晓亮,王易芬,郑晓伟,等.水产品解冻技术研究进展[J]. 中国农学通报,2015,31(29):39-46.
- [3] LV Y, XIE J. Quality of cuttlefish as affected by different thawing methods [J]. International Journal of Food Properties, 2022, 25(1): 33-52.
- [4] CAI L, WAN J, LI X, et al. Effects of different thawing methods on physicochemical properties and structure of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. Journal of Food Science, 2020, 85(3): 582-591.
- [5] SUN Q, KONG B, LIU S, et al. Ultrasound-assisted thawing accelerates the thawing of common carp (*Cyprinus carpio*) and improves its muscle quality [J]. LWT, 2021, 141: 111080.
- [6] KONG D, QUAN C, XI Q, et al. Study on the quality and myofibrillar protein structure of chicken breasts during thawing of ultrasound-assisted slightly acidic electrolyzed water (SAEW) [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 88: 106105.
- [7] LAN W, ZHAO Y, GONG T, et al. Effects of different thawing methods on the physicochemical changes, water migration and protein characteristic of frozen pompano (*Trachinotus ovatus*) [J]. Journal of Food Biochemistry, 2021, 45(8): e13826.
- [8] LI D, ZHAO H, MUHAMMAD A I, et al. The comparison of ultrasound-assisted thawing, air thawing and water immersion thawing on the quality of slow/fast freezing bighead carp (*Aristichthys nobilis*) fillets [J]. Food Chemistry, 2020, 320: 126614.
- [9] 尹忠慧,王海军,马福敏,等.低值鱼丸冷冻解冻过程中的品质变化研究[J].安徽农业科学,2011,39(34):21345-21347.
- [10] 魏跃胜,张晖,戴涛,等.水分与鱼丸制品质构特性相关性研究[J].食品科技,2019,44(7):173-178.
- [11] 余力,贺雅非,ENKHMAA Batjargal,等.不同解冻方式对伊拉兔肉品质特性的影响[J].食品科学,2015,36(14):258-264.
- [12] SHI R, LI Y, LIU L. Synergistic anti-oxidative and antimicrobial effects of oat phenolic compounds and ascorbate palmitoyl on fish balls during cold storage [J]. Journal of Food Science, 2021, 86(10): 4628-4636.
- [13] 殷俊.即食牛肉丸加工技术研究[D].广州:华南理工大学,2012.
- [14] 刘骁,王莹娟,赵电波,等.鹰嘴豆分离蛋白对黄河鲤鱼丸凝胶品质的影响[J].食品工业科技,2020,41(22):8-13.
- [15] GUO Z, GE X, YANG L, et al. Ultrasound-assisted thawing of frozen white yak meat: Effects on thawing rate, meat quality, nutrients, and microstructure [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 70: 105345.
- [16] CHENG L, SUN D W, ZHU Z, et al. Emerging techniques for assisting and accelerating food freezing processes: A review of recent research progresses [J]. Crit Rev Food Sci

- Nutr, 2017, 57(4): 769-781.
- [17] 张南海.不同冻结方式、贮藏温度和解冻方式对彭泽鲫品质的影响[D].南昌:南昌大学,2018.
- [18] 刘富康,张柔佳,李锋,等.解冻方式对冷冻鱼糜解冻效果和凝胶特性的影响[J].山东农业大学学报(自然科学版),2019,50(4):681-685.
- [19] BACKI C J. Methods for (industrial) thawing of fish blocks: A review [J]. Journal of Food Process Engineering, 2018, 41(1): e12598.
- [20] SUN Q, SUN F, XIA X, et al. The comparison of ultrasound-assisted immersion freezing, air freezing and immersion freezing on the muscle quality and physicochemical properties of common carp (*Cyprinus carpio*) during freezing storage [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 51: 281-291.
- [21] 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.
- [22] 吴平,姚芳,王正云,等.超声波处理对畜肉解冻品质与过程影响的研究进展[J].现代食品科技,2022,38(8):1-12.
- [23] 程天赋,俞龙浩,蒋奕,等.基于低场核磁共振探究解冻过程中肌原纤维水对鸡肉食用品质的影响[J].食品科学,2019,40(9):16-22.
- [24] 万海伦,应晓国,赵波,等.不同解冻方式对生食鱼片解冻品质的影响[J].食品科学,2021,15(43):227-235.
- [25] 李锦锦,莫然,唐善虎,等.不同解冻方式对猪肝理化特性及氧化稳定性的影响[J].食品工业科技,2021,42(14):302-309.
- [26] CHAN J T Y, OMANA D A, BETTI M. Effect of ultimate pH and freezing on the biochemical properties of proteins in turkey breast meat [J]. Food Chemistry, 2011, 127(1): 109-117.
- [27] LIU D, LIANG L, XIA W, et al. Biochemical and physical changes of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) fillets stored at -3 and 0 °C [J]. Food Chemistry, 2013, 140(1-2): 105-114.
- [28] 迟海,杨峰,杨究时,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.
- [29] 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.
- [30] 蒋奕,程天赋,王吉人,等.超声波解冻对猪肉品质的影响[J].肉类研究,2017,31(11):14-19.
- [31] WANG J, POTOROKO I, TSIRULNICHENKO L. Wood vinegar and chitosan compound preservative affects on fish balls stability [J]. Food Bioscience, 2021, 42: 101102.
- [32] BEKHIT A E A, Holman B W B, Giteru S G, et al. Total volatile basic nitrogen (TVB-N) and its role in meat spoilage: A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 109: 280-302.
- [33] 王琳琳,陈炼红,李璐倩,等.解冻方式对牦牛肉蛋白氧化、功能特性及新鲜度的影响[J].农业机械学报,2021, 52(5):342-349.
- [34] 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(4): 1025-1030.
- [35] BENJAKUL S, BAUER F. Biochemical and physicochemical changes in catfish (*Silurus glanis* Linne) muscle as influenced by different freeze-thaw cycles [J]. Food Chemistry, 2001, 72(2): 207-217.
- [36] HUANG T, ZHAO H, FANG Y, et al. Comparison of gelling properties and flow behaviors of microbial transglutaminase (*MTGase*) and pectin modified fish gelatin [J]. Journal of Texture Study, 2019, 50(5): 400-409.