不同解冻方式对鸢乌贼胴体肌肉品质的影响

李翰卿[1,2,3]，马俪珍[3]，陈胜军[*1,2,4]，王悦齐[1,2]，胡 晓[1,2,4]，黄 卉[1,2]，邓建朝[1,2]

（1. 中国水产科学研究院 南海水产研究所，广东 广州 510300；2. 三亚热带水产研究院，海南 三亚 572018；3. 天津农学院 食品科学与生物工程学院，天津 300384；4. 大连工业大学 海洋食品精深加工关键技术省部共建协同创新中心，辽宁 大连 116034）

摘要：以鸢乌贼胴体肌肉为研究对象，研究高压静电场解冻（4 ℃、3.8 kV）、静水解冻、流水解冻、常温空气解冻 4 种解冻方式对鸢乌贼肌肉品质特性的影响。分析不同解冻方式对解冻速率、解冻损失率、蒸煮损失率、pH、色泽、水分质量分数、挥发性盐基氮（total volatile basic nitrogen，TVB-N）、质构特性、菌落总数（total viable count，TVC）等指标变化对肌肉品质的影响。结果表明：通过高压静电场解冻的鸢乌贼肌肉品质优于其他 3 种，解冻速率 2.89 ℃/min，亨特白度值 24.21，水分质量分数 67.44 g/hg，TVB-N 值 2.76 mg/hg，菌落总数的对数值 2.740，解冻损失率及蒸煮损失率较低。此种方式可降低解冻过程中肌肉汁液流失、延缓肌肉 pH 下降引发的肌肉酸度上升、抑制微生物生长，但高压静电场解冻后的鸢乌贼水分质量分数较高，货架期较短。

关键词：鸢乌贼；高压静电场；解冻方式；肌肉品质

中图分类号：TS 254.2　**文章编号：**1673-1689(2023)05-0020-09　**DOI：**10.3969/j.issn. 1673-1689.2023.05.003

Effect of Different Thawing Methods on Muscle Quality of *Sthenoteuthis oualaniensis*

LI Hanqing[1,2,3]，*MA Lizhen*[3]，*CHEN Shengjun*[*1,2,4]，*WANG Yueqi*[1,2]，*HU Xiao*[1,2,4]，*HUANG Hui*[1,2]，*DENG Jianchao*[1,2]

(1. South China Sea Fisheries Research Institute, China Academy of Fisheries Science, Guangzhou 510300, China; 2. Sanya Tropical Fisheries Research Institute, Sanya 572018, China; 3. College of Food Science and Biological Engineering, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China; 4. Provincial Ministry Collaborative Innovation Centre for Key Marine Food Processing Technologies, Dalian University of Technology, Dalian 116034, China)

Abstract: This experiment focused on the carcass muscle of squid to study the effects of four thawing methods, including high voltage electrostatic field thawing (4 ℃, 3.8 kV), static water thawing, flowing water thawing, and thawing in room temperature air, on the quality characteristics of squid muscle. The effects of different thawing methods on the thawing rate, thawing loss rate,

收稿日期：2021-10-29

基金项目：三亚崖州湾科技城管理局 2020 年度科技计划项目（SKJC-2020-02-013）；广东省现代农业产业技术体系创新团队建设专项项目（2021KJ151）；中国水产科学研究院基本科研业务费专项项目（2020TD69）。

*** 通信作者：**陈胜军（1973—），男，博士，研究员，博士研究生导师，主要从事水产品加工与质量安全控制研究。E-mail：chenshengjun@scsfri.ac.cn

cooking loss rate, pH, color, water content, total volatile basic nitrogen (TVB-N), texture characteristics, total viable count (TVC), and other indices were analyzed on muscle quality. The results showed that the muscle quality of squid thawed by high-voltage electrostatic field was better than the other three methods. The thawing rate was 2.89 ℃/min, and the Hunter whiteness value was 24.21. Water content was 67.44 g/hg, and TVB-N was 2.76 mg/hg. The lg value of total number of colonies was 2.740. Additionally, the thawing loss rate, and cooking loss rate were lower. This method could reduce the loss of muscle juice during thawing, and delay the decline of muscle pH levels, consequently preventing an increase in muscle acidity, and also inhibit the growth of microorganisms. However, the squid thawed by high-voltage electrostatic field had a higher moisture mass fraction but a shorter shelf life.

Keywords: *Sthenoteuthis oualaniensis*, high voltage electrostatic field, thawing method, muscle quality

鸢乌贼(*Sthenoteuthis oualaniensis*)在我国南海中部及南部地区大量分布,易于捕获。胴体肌肉中蛋白质含量高、脂肪含量低,全身可食用范围占比高达 80%。但胴体肌肉质地较硬、酸味过重,使这种优良的水产品原料未得到充分利用[1]。冷冻贮藏常用于鸢乌贼的储运与保藏,低温形成的冰晶刺破胴体肌肉细胞,使细胞液、营养成分流失,影响水产品风味、口感。通过选取不同解冻方式可提升水产品品质,延长水产品的贮藏期,对提升鸢乌贼品质及其商业价值具有极为重要的意义。

随着食品工业的快速发展,传统解冻技术已无法满足消费者对高品质肉类的需求,需优化新型解冻技术提升肉质品质[2]。近年来,高压静电场解冻技术逐渐成熟,应用于多种食品加工领域。此项技术可提升冷冻水产品的解冻速率,有降低汁液流失率、减少肉类脂肪氧化、抑制微生物生长繁殖和提高肉类品质等特点[3]。较当下水产品传统解冻方式有效率高、成本低、操作简单等优势,适合商业应用[4]。唐梦等探究不同高压电场及不同解冻温度对罗非鱼品质的影响,研究发现在 15 ℃、3.8 kV 的高压静电场中罗非鱼的解冻速度更快,品质更好[5]。Jia 等对 3 种解冻方法进行对比,发现高压静电场解冻处理后,冷冻猪肉蛋白质氧化变性程度低于常温空气解冻和流水解冻,肌原纤维蛋白质结构完整,高压静电场解冻后的猪肉色泽、保水性、汁液流失率等指标为 3 种解冻方式中最佳[6]。何向丽对猪肉冻结基本特性和高压静电场猪肉解冻规律进行了研究,经高压静电场解冻后肌细胞、肌原纤维分布紧密,微生物总数的对数值比流水解冻后的猪肉低 0.5~1.0,挥发性盐基氮含量低,对猪肉解冻、肉质嫩化具有优化作用[7]。

对不同解冻方式(见表 1)进行对比,筛选适宜的解冻方法对鸢乌贼品质提升有重要作用。以鸢乌贼为研究对象,研究鸢乌贼胴体肌肉在高压静电场解冻、常温空气解冻、静水解冻和流水解冻 4 种不同解冻方式下解冻速率、解冻损失率、蒸煮损失率、pH、色泽、水分质量分数、TVB-N、质构特性、菌落总数等指标变化,旨在为鸢乌贼商业化加工提供数据支撑和理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

鸢乌贼胴体样品由中国水产科学研究院南海水产研究所“南锋号”科考船于 2021 年 6 月在我国南海南沙海域捕获。起捕后经冻藏冷链运输至实验室,去除内脏、头部、足部及内壳,将完整胴体肌肉分装于自封袋内。胴体肌肉样品随机分组标记,放置于−20 ℃冰箱冷冻保存;氯化钠、PCA 平板计数琼脂培养基、氧化镁(MgO)、硼酸(H_3BO_3)、体积分数 95%乙醇(C_2H_5OH)(以上均为分析纯)、甲基红指示剂($C_{15}H_{15}N_3O_2$)、溴甲酚绿指示剂($C_{21}H_{14}Br_4O_5S$)等:上海阿拉丁生化科技股份有限公司产品。

表 1　鸢乌贼解冻方式

Table 1　Thawing method for frozen squid

解冻方式	介质	作用机理	优势	不足	实验方法
常温空气解冻	空气	以空气为导热介质，与冷冻肉进行热交换	成本低，适用范围广	解冻肉保水性差，汁液流失率高	将鸢乌贼置于洁净的实验台上进行解冻
静水解冻	水	空气、水、冷冻肉之间热量传递	解冻效率较快	微生物污染，汁液流失率降低	将鸢乌贼放入装满水的自封袋中解冻
流水解冻	水	水的流动将热量传导给冷冻肉	解冻速率快	微生物污染	将鸢乌贼放入自封袋中，流动水冲洗解冻
高压静电场解冻	高压静电场	带电粒子能量被冰表面水分子吸收，提高水分子动能和冰的导热率，加快热量吸收[8]	样品内外同时解冻，抑制微生物生长	食品内部温度波动剧烈	将处理好的鸢乌贼放置于高压静电场内（4 ℃、3.8 kV）解冻

1.2　仪器与设备

D5770-01 数字温度计：上海 Aladdin 公司产品；Ultra Turrax T25D 型均质机：德国 IKA 工业设备公司产品；AvantiJ26XP 高速离心机：美国贝克曼库尔特公司产品；SQ510C 型立式压力蒸汽灭菌器：重庆雅马拓科技有限公司产品；MIR 254 低温恒温培养箱：日本 Sanyo 公司产品；SPX-320 型生化培养箱：宁波江南仪器厂产品；SW-CJ-1FD 超净工作台：苏州安泰空气技术有限公司产品；LFRA-100 质构仪：美国 Brookfield 公司产品；SC-80C 型全自动测色色差计：北京康光仪器有限公司产品；pH 计：上海仪迈仪器科技有限公司产品；多功能静电冷冻/解冻/保鲜实验机：台湾迪弗斯科技股份有限公司产品。

1.3　实验方法

1.3.1　样品前处理　筛选个体完整、体态均一的鸢乌贼样品（约 15 g）。按照表 1 中的方式，以-20 ℃为解冻初温，将温度探测器由鸢乌贼喷嘴探入墨囊，至胴体中心温度为 4 ℃视为解冻终温，进行各指标测定。

1.3.2　解冻损失率　将冷冻鸢乌贼从-20 ℃冰箱取出，称质量并测量解冻初温，此时记录的质量为 m_1，时间为 t_1。按照不同解冻方式到达解冻终温后，用滤纸将鱼片表面的水分吸去，再次称质量并记录此时的质量为 m_2，时间为 t_2，则解冻速率按式(1)计算，解冻损失率按式(2)计算：

$$R_t=\frac{T_2-T_1}{t_2-t_1} \tag{1}$$

$$R_{tl}=\frac{m_1-m_2}{m_1}\times 100\% \tag{2}$$

式中：R_t 为解冻速率，℃/min；R_{tl} 为解冻损失率，%；T_1 解冻初温，℃；T_2 为解冻终温，℃；t_1 为解冻前的时间，min；t_2 为解冻后的时间，min；m_1 为解冻前的质量，g；m_2 为解冻后的质量，g。

1.3.3　蒸煮损失率　将冷冻鸢乌贼从冰箱中取出，通过不同解冻方式至中心温度 4 ℃后用吸水纸吸干表面水分，再将样品置于 80 ℃的恒温水浴中放置 10 min，水浴后将样品放于塑封袋中静置 15 min，吸干胴体肌肉表面水分。蒸煮损失率的计算见公式(3)：

$$R_{cl}=\frac{m_3-m_4}{m_1}\times 100\% \tag{3}$$

式中：R_{cl} 为蒸煮损失率，%；m_3 为解冻后吸干表面水分后的质量，g；m_4 为水浴后吸干表面水分后的质量，g。

1.3.4　pH 的测定　参照 GB 5009.237—2016《食品安全国家标准 食品 pH 值的测定》中的方法，称取 5.00 g 经过不同解冻方式的鸢乌贼样品加到 50 mL 蒸馏水中，高速均质机匀浆后测定 pH。

1.3.5　水分质量分数的测定　参照 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中的方法对经过不同解冻方式的鸢乌贼样品测定水分质量分数。

1.3.6　菌落总数的测定　参照 GB 4789.2—2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》中的方法对经过不同解冻方式的鸢乌贼样品进行菌落总数的测定，结果以 lg N 表示，其中 N 为样品中菌落数（单位为 CFU/g）。

1.3.7　挥发性盐基氮(TVB-N)值的测定　参照 GB 5009.228—2016《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》，按照自动凯氏定氮法对不同解冻

方式的鸢乌贼样品进行测定。

1.3.8 亨特(Hunter)白度值测量 将鸢乌贼按照不同解冻方式解冻完成后,用厨房用纸吸去表面水分,切分为 3 cm × 3 cm 大小,置于白色背景板上,用色差计分别测定其 L^* 值、a^* 值、b^* 值。测定前用标准白板对色差计进行矫正。每组测定 3 个平行,结果取平均值,亨特白度值按式(4)计算:

$$W_{H10}=100-\sqrt{(100-L^*)^2+a^{*2}+b^{*2}} \quad (4)$$

式中:L^* 为亨特明度指数,a^* 为亨特色品指数红绿值,b^* 为亨特色品指数黄蓝值,W_{H10} 为亨特完全白度值。

公式是采用色差原理来衡量白度,即用白点的远近来进行度量。当明度指数 L^* 为 100,a^*、b^* 均为0时,其亨特白度值为 100[9];W_{H10} 越大表示白色程度越高。

1.3.9 质构测定 参考泮凤的测定方法[10],稍有修改。用吸水纸将不同方式解冻后的鸢乌贼样品表面水分吸干,分切成 4 cm × 4 cm 大小,用质构仪测定各质构特性。具体测定参数设置为:探头类型选择 TA44,夹具选择 TA-RT-KIT,测量前速度为 3.0 mm/s,测试中速度为 1.0 mm/s,测量后速度为 1.0 mm/s,压缩程度为 30%,两次压缩间隔时间为 5 s。

1.3.10 数据处理与分析 所有实验数据均平行测量 3 次,并采用 Excel 软件进行数据整理,SPSS 26.0 做方差分析和差异显著性分析,$P<0.05$ 为差异显著。采用 SPSS 26.0 进行相关性分析,计算 Pearson 相关系数,并通过 F 检验计算线性相关的显著性,利用 Origin 2021 进行绘制图像。

2 结果与分析

2.1 不同解冻方式下鸢乌贼的解冻时间及解冻损失率

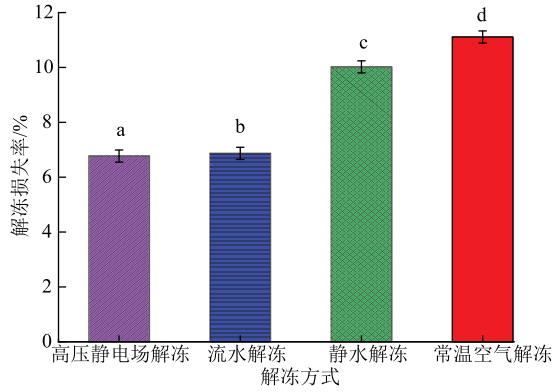
不同解冻方式下鸢乌贼胴体肌肉解冻速率差异显著($P<0.05$)。如表 2 所示,高压静电场解冻鸢乌贼样品效率最高,耗时 8.30 min、解冻速率 2.89 ℃/min。效率最低的解冻方式为常温空气解冻,时间 23.10 min,解冻速率 1.04 ℃/min。当肌肉样品处于高压静电场中,电场促进冰晶定向形成,诱导冰晶成核,冰晶粒径减少,延长相变时间[11]。与常温空气解冻相比,流水解冻、静水解冻具有较快的解冻速率,可能是因为水的比热容比空气大,传热速度比空气快,能大幅缩短解冻时间[12]。高压静电场解冻相比常温空气解冻,可避免长时间解冻造成不规则冰晶对细胞的物理损伤,而导致蛋白质结构改变。解冻速率的快慢与水产品的保水率相关,解冻速率越快,水产品的保水性越好[4-6]。

表 2 鸢乌贼不同解冻方式下的解冻速率

Table 2 Thawing rates of squid under different thawing methods

解冻方式	解冻时间/min	解冻速率/(℃/min)
高压静电场解冻	8.30	2.89
流水解冻	15.00	1.60
静水解冻	22.85	1.05
常温空气解冻	23.10	1.04

图 1 表示不同解冻方式下鸢乌贼的解冻损失率,不同解冻方式下解冻损失率的差异性显著($P<0.05$)。其中高压静电场解冻损失率最低,仅为 6.77%,流水解冻和静水解冻的解冻损失率为 6.87% 和 10.02%,解冻损失率最高的为常温空气解冻(11.11%)。在高压静电场解冻时,微波使极性水分子振动,使水分子聚集微小化[13]。鸢乌贼在高压静电场内解冻,极性水分子分布不均导致肉质受热不均匀,致使鸢乌贼的蛋白质结构发生变化,加速冰中氢键断裂,使冰以小冰晶的形式存在,再过渡到小分子的液态状态,减少了肌肉组织的机械破坏以及细胞间隙扩大导致的汁液流失[14]。综合对比,高压静电场解冻速率最快且对鸢乌贼胴体肌肉细胞损伤最小,为最优解冻方式。



不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$)。

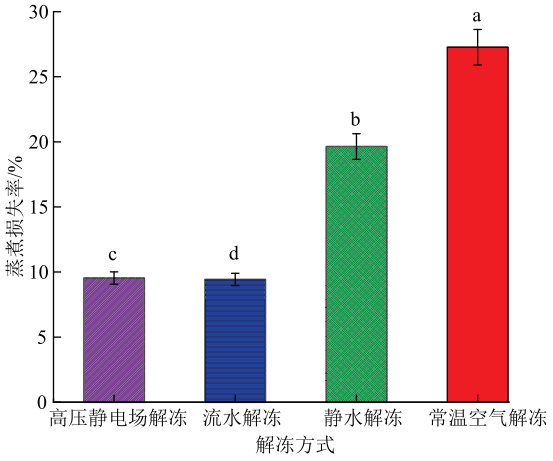
图 1 鸢乌贼不同解冻方式下的解冻损失率

Fig. 1 Thawing loss rates of squid under different thawing methods

2.2 不同解冻方式下鸢乌贼的蒸煮损失率

蒸煮损失是评价水产品品质的重要指标。图 2 为不同解冻方式下鸢乌贼的蒸煮损失率变化,不同

解冻方式下蒸煮损失率差异性显著(P<0.05)。根据蒸煮损失率的大小,解冻方式排序为常温空气解冻(27.27%)>静水解冻 (19.64%)>高压静电场解冻(9.54%)>流水解冻(9.43%)。这可能是解冻速率的差异化导致蒸煮损失率的不同,解冻过程中鸢乌贼肌肉纤维蛋白质发生变性, 脂肪发生氧化反应,肉品蛋白质氧化导致其内部发生聚集和交联,影响其平均粒径的变化[15]。也可能是解冻过程的温度变化对肌原纤维蛋白质的聚集、蛋白质的平均粒径造成影响,导致肌肉组织松散,空间结构被破坏,汁液流失逐渐增大,肌肉保水能力不断降低,导致蒸煮损失率随解冻环境温度升高而不断升高。在常温空气解冻状态下,鸢乌贼体内结合力较差的水分基本排出,肌原纤维蛋白质变性[16],其蒸煮损失率与解冻损失率呈正相关。



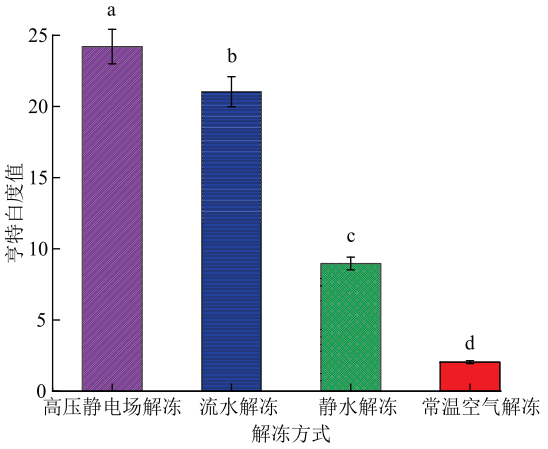
不同小写字母表示组间差异显著(P<0.05)。

图 2 鸢乌贼不同解冻方式下的蒸煮损失率

Fig. 2 Steaming loss rate of squid under different thawing methods

2.3 不同解冻方式下鸢乌贼的亨特白度值

白度是消费者衡量水产品新鲜程度的重要指标[17]。图 3 为不同解冻方式鸢乌贼的亨特白度值变化,鸢乌贼亨特白度值差异性显著(P<0.05),根据亨特白度值的大小,解冻方式排序为高压静电场解冻(24.21)>流水解冻(21.04)>静水解冻(8.97)>常温空气解冻(2.04)。造成亨特白度值差异的原因,可能是高压静电场电离空气生成臭氧和负离子,负离子对胴体内的肌红蛋白 Fe^{2+}产生一定影响的结果。常温空气解冻时间长、速率慢,室温下鸢乌贼胴体肌肉中的脂肪与氧气充分反应, 导致亨特白度值降低;同时,肌肉细胞被冰晶破坏,造成水分流失,释放助氧剂,加速脂肪氧化[18],导致红度偏高。流水解冻和静水解冻因水阻隔了脂肪与氧气的接触,亨特白度值高于常温空气解冻。静水解冻时间较长,水温升高导致蛋白质变性,亨特白度值低于流水解冻。综合对比 4种解冻方式, 高压静电场解冻后的鸢乌贼亨特白度值最高,经过此种解冻方式的鸢乌贼新鲜程度最好。



不同小写字母表示组间差异显著(P<0.05)。

图 3 鸢乌贼不同解冻方式下的亨特白度值

Fig. 3 Hunter whiteness values of squid under different thawing methods

2.4 不同解冻方式下鸢乌贼全质构分析

全质构可系统体现水产品胴体肌肉品质。对不同解冻方式下鸢乌贼胴体肌肉的硬度、黏性、弹性、内聚力、胶着性、咀嚼性进行分析。由图 4 可知,高压静电场解冻后的鸢乌贼在硬度、咀嚼性、胶着性、内聚力方面为 4 种解冻方式中最高。硬度体现解冻后肌原纤维的破坏程度[19],高压静电场通过较短的解冻时间,对鸢乌贼肌肉质构影响较少。电场中对肌原纤维电刺激, 可能导致其蜂窝状结构的翘曲,比其他解冻方式硬度更高, 肌肉细胞间更加紧实,高压静电场解冻可完整保留乌贼形态,解冻后的鸢乌贼肌肉可用于休闲食品加工。咀嚼性是肉样硬度、弹性及黏性的综合体现,在一定范围内值越大对应的口感越好[20],高压静电场解冻的鸢乌贼咀嚼性较高。咀嚼性、胶着性、内聚力体现鸢乌贼细胞间结合能力,通过高压静电场解冻后鸢乌贼胴体肌肉咀嚼性和胶着性均远高于其余 3 种解冻方式,可能是高压静电场解冻造成样品中水分子运动,使样品内外同时解冻,较少的温度差造成肌纤维结构整齐

致密,组织间隙最小,使其具有较强的结合能力。这说明,经过高压静电场解冻的鸢乌贼较其他解冻方式具有更优良的质构特性。

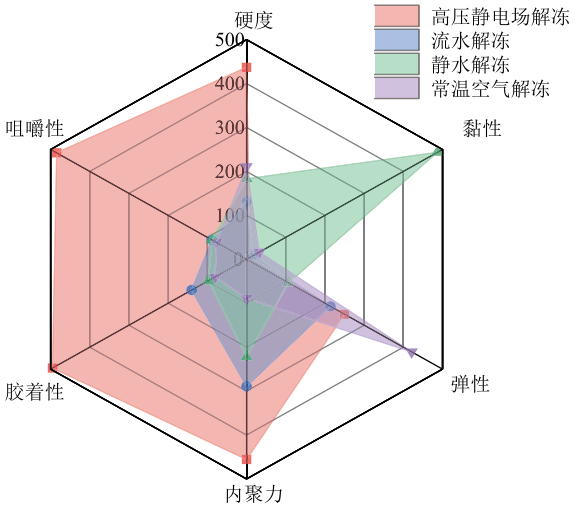


图 4 鸢乌贼不同解冻方式下的全质构

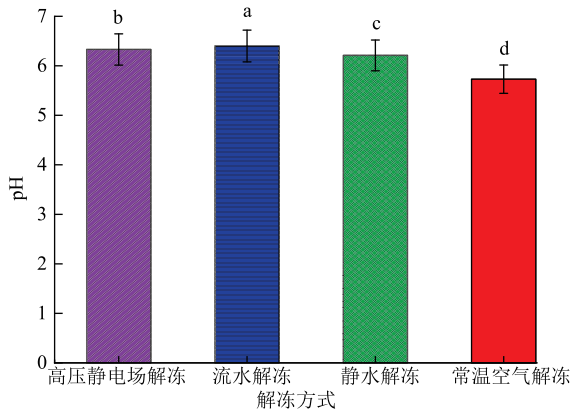
Fig. 4 Texture profile analysis of squid under different thawing methods

2.5 不同解冻方式下鸢乌贼的 pH

pH 对水产品的色泽、风味、货架期等均有影响。水产品死亡后,体内物理、化学反应引起肌肉品质的降低。胴体肌肉的低 pH 导致鸢乌贼肉质酸涩、发硬,是鸢乌贼商业化价值低的主要原因。由图 5 可知,不同解冻方式之间 pH 差异性显著(P<0.05),流水解冻、高压静电场解冻 pH 均高于其他解冻方式。鲜活鸢乌贼肌肉 pH 为 6.17~6.23,鱼体死后,随着糖原的酵解、乳酸的积聚以及 ATP 酶活力的增强,鱼体的 pH 会降低[21]。高压静电场解冻可能是鸢乌贼胴体在电场作用下,其肌肉中的水分子受到电场力的作用,产生热量,导致解冻速率加快,同时自身温度升高催化化学反应,导致 pH 降低。流水解冻时,胴体外流动水构造出低温环境,降低反应速率[21]。故流水解冻及高压静电场解冻相比于其他解冻方式,可避免 pH 过低导致鸢乌贼肌肉发酸,影响肌肉品质。

2.6 不同解冻方式下鸢乌贼的水分质量分数

水分质量分数与鸢乌贼商业化产品的保质期相关。图 6 为不同解冻方式下鸢乌贼肌肉中水分质量分数变化,其差异性显著(P<0.05)。高压静电场解冻后的鸢乌贼水分质量分数最高(67.44 g/hg),这可能是因为解冻速率快,缩短肌肉组织暴露在室温下

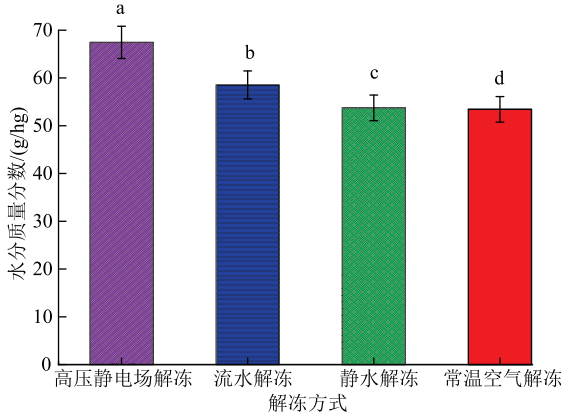


不同小写字母表示组间差异显著(P<0.05)。

图 5 鸢乌贼不同解冻方式下的 pH

Fig. 5 pH of squid under different thawing methods

的时间,降低了细胞中汁液流失,从而降低品质损失[20]。通过 Deng 等的研究也同样证明解冻时间与水分质量分数呈负相关,解冻时间越长结合水会向自由水转变,最终导致汁液流失,水分质量分数降低[22]。但高压静电场解冻也有弊端,胴体肌肉水分质量分数高会导致大多数霉菌及酵母菌生长,缩短产品保存期。不同鸢乌贼制品对水分质量分数有不同要求,鸢乌贼刺身或副食需高水分质量分数以提升口感;干制品则需要低水分质量分数,水分质量分数过高会导致干制品随着货架期的延长而产生大量霉菌,故需添加水分降低剂,以延长食品保质期[23]。因此,需根据不同商业产品需求,选取不同的解冻方式。



不同小写字母表示组间差异显著(P<0.05)。

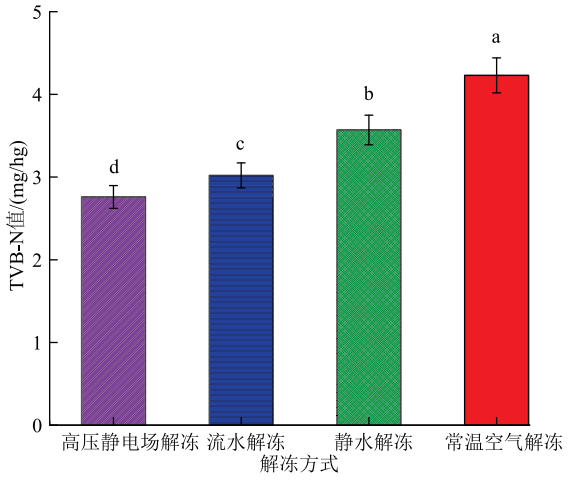
图 6 鸢乌贼不同解冻方式下的水分质量分数

Fig. 6 Moisture mass fraction of squid under different thawing methods

2.7 不同解冻方式下鸢乌贼的 TVB-N 值

TVB-N 值是衡量水产品解冻后新鲜程度的一个重要评价指标。由图 7 可知,不同解冻方式下鸢

乌贼的 TVB-N 值差异性显著(P<0.05)。4 种解冻方式下的挥发性盐基氮值为 2.76~4.23 mg/hg,均远低于现行国家标准 GB 2733—2015《食品安全国家标准 鲜、冻动物性水产品》中对于鲜、冻动物性水产品的规定(TVB-N 值≤30 mg/hg)。可能是因为解冻效率不同导致数据的差异性[24],其中高压静电场解冻时间最短,经此种方式解冻后的鸢乌贼肌肉挥发性盐基氮值最小。作为评价胴体肌肉品质常用的指标,微生物的代谢及内源酶的活性对挥发性盐基氮值影响较大,高温和解冻效率则会对以上两种因素造成直观的影响[24]。故高压静电场解冻可降低解冻对胴体肌肉的影响,避免鸢乌贼样品腐败对产品品质造成影响。



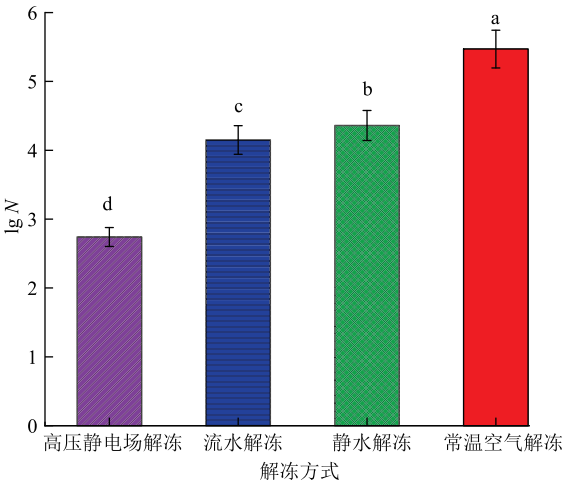
不同小写字母表示组间差异显著(P<0.05)。

图 7 鸢乌贼不同解冻方式下的 TVB-N 值

Fig. 7 TVB-N values of squid under different thawing methods

2.8 不同解冻方式下鸢乌贼的菌落总数

鸢乌贼胴体肌肉水分质量分数高,细胞中含有丰富的蛋白质和含氮化合物,并且不饱和脂肪酸易氧化,适宜微生物的生长与繁殖。不同的解冻方式可有效隔绝鸢乌贼肌肉与氧气、好氧型细菌及空气中微生物接触。图 8 为不同解冻方式下鸢乌贼菌落总数的对数值(lg N)的变化,鸢乌贼菌落总数的对数值在不同解冻方式下差异性显著(P<0.05)。其中常温空气解冻为 5.470、静水解冻 4.362,流水解冻为 4.150、高压静电场解冻为 2.740。高压静电场解冻后鸢乌贼肌肉菌落总数的对数值低于其他解冻方式,可能是解冻时间短, 缩短了微生物生长繁殖的时间。常温空气解冻时间长,冰晶刺破细胞膜导致汁液流失,细胞液中溶有氨基酸、可溶性蛋白、盐类、维生素等成分, 为微生物的生长繁殖提供了营养。高压静电场中可电离空气,产生的臭氧改变细胞通透性,不利于微生物生长。高压静电场解冻是 4 种解冻方式中最绿色、可有效抑制微生物生长的解冻方法[25]。



不同小写字母表示组间差异显著(P<0.05)。

图 8 鸢乌贼不同解冻方式下的菌落总数

Fig. 8 Total number of colonies of squid under different thawing methods

2.9 不同指标间相关性分析

由表 3 可知,在解冻过程中解冻速率对于蒸煮损失率、硬度、胶着性、咀嚼性、水分质量分数、挥发性盐基氮(TVB-N)等指标有极其显著的影响(P<0.01),对解冻损失率、弹性、pH 相关性显著(0.01<P<0.05),与解冻损失率、蒸煮损失率、黏性、菌落总数呈负相关。这可能是鸢乌贼胴体肌肉在解冻时能迅速通过最大冰晶生成带区域,对理化性质、感官特性破坏较小,快速解冻也可降低黏性增大、菌落生成。并且在解冻过程中,鸢乌贼胴体肌肉被氧化,导致肌肉组织机械破坏,细胞汁液流失,影响鸢乌贼胴体的口感与品质。在鸢乌贼解冻时,解冻速率对鸢乌贼胴体肌肉的影响极为显著。

3 结 语

作者探究了高压静电场解冻、流水解冻、静水解冻、常温空气解冻 4 种解冻方式对鸢乌贼解冻速率、解冻损失率、蒸煮损失率、pH、色泽、水分质量分数、质构特性、菌落总数等指标的影响,对鸢乌贼前处理解冻进行工艺优化。由高压静电场解冻的鸢乌

表 3　解冻指标相关性分析

Table 3　Correlation analysis of thawing indices

指标	解冻速率	解冻损失率	蒸煮损失率	亨特白度	硬度	黏性	弹性	内聚力	胶着性	咀嚼性	pH	水分质量分数	TVB-N	菌落总数
解冻速率	1.00	−0.44*	−0.829**	0.498	0.904**	−0.554	0.643*	0.367	0.952**	0.850**	0.874*	0.912**	0.990**	−0.351
解冻损失率		1.00	0.865	−0.996**	0.780**	0.502	−0.734*	0.485	0.684*	0.784**	−0.194	0.439	0.472	−0.995**
蒸煮损失率			1.000	−0.894**	0.987**	0.005	−0.810**	0.498	0.955**	0.962**	−0.648*	0.781**	0.846**	−0.812**
亨特白度				1.000	−0.819**	−0.444	0.747**	−0.509	−0.731*	−0.808**	0.254	−0.486	−0.526	0.985**
硬度					1.000	−0.147	−0.778**	0.493	0.988**	0.960**	−0.741**	0.831	0.915**	−0.716*
黏性						1.000	−0.050	0.097	−0.283	−0.092	0.708*	−0.465	−0.510	−0.584
弹性							1.000	−0.414	−0.755**	−0.758**	0.432	−0.659*	−0.606*	0.693*
内聚力								1.000	0.486	0.330	−0.230	0.144	0.384	−0.464
胶着性									1.000	0.936**	−0.816**	0.869**	0.955**	−0.611*
咀嚼性										1.000	−0.689*	0.860**	0.862**	−0.726*
pH											1.000	−0.871**	−0.943**	0.104
水分质量分数												1.000	0.896**	−0.361
TVB-N													1.000	−0.386
菌落总数														1.000

注:** 表示相关性极其显著(P<0.01),* 表示相关性显著(0.01<P<0.05)。

贼,胴体肌肉解冻速率 2.89 ℃/min,亨特白度值24.21,水分质量分数 67.44 g/hg,TVB-N 值 2.76 mg/hg,菌落总数对数值 2.740。相比于常温空气解冻,高压静电场解冻可改善鸢乌贼生鲜产品外观品质,提升商业价值,延长鸢乌贼生鲜产品贮藏时间,延长即食鸢乌贼产品货架期;同时,较低蒸煮损失率和解冻损失率可优化鸢乌贼胴体肌肉产品口感。

高压静电场解冻可维持胴体肌原纤维蛋白质的稳定性,改善鸢乌贼肌肉口感,适用鸢乌贼生鲜市场和即食食品加工,以填补鸢乌贼速食食品市场空白。但此种解冻方式水分质量分数高,不适宜干制品前处理使用,可导致肌体肉质发酸。综合评定,高压静电场解冻对鸢乌贼胴体肌肉品质影响较少,亨特白度值高,蒸煮损失率及菌落总数低,是制作即食或刺身鸢乌贼制品的最佳解冻方式。

参考文献:

[1] 李翰卿,马俪珍,陈胜军,等. 鸢乌贼加工与质量安全控制技术研究进展[J]. 肉类研究,2021,35(7):55-59.
[2] 刘瑜,李保国. 解冻技术在肉制品中的应用研究进展[J]. 包装工程,2021,42(5):65-72.
[3] 赵良,岑剑伟,李来好,等. 高压静电场结合冰温气调保鲜技术对罗非鱼鱼片品质的影响[J]. 南方水产科学,2016,12(3):91-97.
[4] 尚柯,杨方威,李侠,等. 静电场辅助冻结 - 解冻对肌肉保水性及蛋白理化特性的影响[J]. 食品科学,2018,39(3):157-162.
[5] 唐梦,岑剑伟,李来好,等. 静电场解冻对冻罗非鱼片品质的影响[J]. 食品工业科技,2017,38(13):1-6.
[6] JIA G,BERG F,HAO H,et al. Estimating the structure of sarcoplasmic proteins extracted from pork tenderloin thawed by a high-voltage electrostatic field[J]. **Journal of Food Science and Technology**,2020,57(4):122-151.
[7] 何向丽. 猪里脊肉冻结解冻特性及高压静电场(HVEF)解冻机理研究[D]. 北京:中国农业大学,2016:10-12.

[8] 闫晓晶. 高压静电场对牛肉成熟过程中品质变化的影响研究[D]. 北京:中国农业科学院,2021.
[9] 朱克瑞,林金剑,朱科学,等. 混合粉中原料粉含量与混合粉的亨特白度关系分析[J]. 食品工业科技,2008,29(3):66-69.
[10] 泮凤. 除酸剂对秘鲁鱿鱼的除酸效果及对其品质的影响[D]. 舟山:浙江海洋学院,2014.
[11] 张亚瑾,焦阳. 冷冻和解冻技术在水产品中的应用研究进展[J]. 食品与机械,2021,37(1):215-221.
[12] 沈玉,黄卉,吴燕燕. 5 种鸢乌贼解冻方法对品质影响的比较研究[J]. 食品安全质量检测学报,2014,5(12):4092-4096.
[13] WU X F,ZHANG M,ADHIKARI B,et al. Recent developments in novel freezing and thawing technologies applied to foods[J]. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**,2017,57(17):3620-3631.
[14] 孙红霞,黄峰,丁振江,等. 不同加热条件下牛肉嫩度和保水性的变化及机理[J]. 食品科学,2018,39(1):84-90.
[15] HALLIER A,CHEVALLIER S,SEROT T,et al. Freezing-thawing effects on the colour and texture of European catfish flesh[J]. **International Journal of Food Science & Technology**,2008,43(20):1253-1262.
[16] BENJAKUL S,VISESSANGUAN W,THONGKAEW C,et al. Comparative study on physicochemical changes of muscle proteins from some tropical fish during frozen storage[J]. **Food Research International**,2003,36(8):787-795.
[17] SARMA J,VIDYA S R G,SRIKAR L N. Effect of frozen storage on lipids and functional properties of proteins of dressed Indian oil sardine[J]. **Food Research International**,2000,33(10):815-820.
[18] ICIER F,IZZETOGLU G T,BOZKURT H,et al. Effects of ohmic thawing on histological and textural properties of beef cuts[J]. **Journal of Food Engineering**,2010,99(3):360-365.
[19] 李侠,钱书意,杨方威,等. 低压高压静电场下不同隔距冻结 - 解冻对牛肉品质的影响[J].农业工程学报,2017,33(8):278-285.
[20] 尚艳丽,杨金生,霍健聪,等. 不同解冻方式对金枪鱼新鲜度的影响研究[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版),2011,30(5):405-409.
[21] JIANG Q Q,NAKAZAWA N,HU Y Q,et al. Microstructural modification and its effect on the quality attributes of frozenthawed bigeye tuna(*Thunnus obesus*) meat during salting[J]. **Food Science and Technology**,2019,100:213-219.
[22] DENG Q,WANG Y,SUN L,et al. Migration of water in litopenaeus vannamei muscle following freezing and thawing[J]. **Journal of Food Science**,2018,83(7):1810-1815.
[23] LIU Q,YAO Y,IBRAHIM M,et al.Production of dual inhibitory hydrolysate by enzymatic hydrolysis of squid processing by-product[J]. **Marine Biotechnology**,2022,24(2):293-302.
[24] EASTRIDGE J S,BOWKER B C. Effect of rapid thawing on the meat quality attributes of USDA select beef strip loin steaks[J]. **Journal of Food Science**,2015,76(2):156-162.
[25] WEINBERG Z G,REGENSTEIN J M,BAKER R C. Effects of different salts on water retention and heat initiated binding properties of comminuted cod muscle[J]. **Journal of Food Biochemistry**,2010,8(3):215-227.