

解冻介质对秘鲁鱿鱼持水性、蛋白氧化和结构的影响

朱文慧, 郭慧芳, 王雯瑄, 步 营, 励建荣, 李学鹏*, 宦海珍

(渤海大学食品科学与工程学院 辽宁省高校重大科技平台“食品贮藏加工及质量安全控制工程技术研究中心”
辽宁锦州 121013)

摘要 为探讨等离子体活化水、微酸性电解水、NaCl 溶液等不同解冻介质对秘鲁鱿鱼品质的影响,以冻结秘鲁鱿鱼为原料,分别将冻结的秘鲁鱿鱼样品置于等离子体活化水、微酸性电解水和 3% NaCl 溶液中 4℃ 冰箱中解冻,分析不同解冻介质对秘鲁鱿鱼持水性、蛋白氧化和结构的影响。结果表明,等离子体活化水作为解冻介质可显著提高秘鲁鱿鱼的持水性($P < 0.01$),其蒸煮损失率为 28.67%,显著低于其它 3 个处理组。与冷藏解冻、3% NaCl 处理组和微酸性电解水处理组相比,低温等离子体处理组的羰基、二聚酪氨酸含量最低,巯基含量最高,表明对蛋白氧化有良好的抑制作用。从浊度、内源荧光和紫外光谱分析结果可知,等离子体活化水处理组可以降低蛋白变性和维持结构稳定。3% NaCl 处理组和微酸性电解水处理组对秘鲁鱿鱼持水性和抗氧化也有一定作用,等离子体活化水处理组效果最佳。

关键词 等离子体活化水; 微酸性电解水; 秘鲁鱿鱼; 持水性; 蛋白氧化

文章编号 1009-7848(2024)03-0130-09 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.03.013

秘鲁鱿鱼(*Dosidicus gigas*)隶属柔鱼科,其肉质比其它鱿鱼鲜嫩,是一种高蛋白、低脂肪的头足类远洋经济动物,捕捞后需立即冷冻^[1]。水产品冻结过程中形成的冰晶在解冻过程中融化被重新吸收,容易造成蛋白氧化、保水性下降等品质劣变现象,并易遭受微生物污染。解冻过程不仅影响冷冻水产品的关键品质属性,对微生物安全性也有重要影响。

低温等离子体技术和微酸性电解水属于新型的非热杀菌技术,它们均具有绿色环保、高效广谱的优点,且应用广泛。在解冻方面,Liao 等^[2]用等离子体活化水(Plasma activated water, PAW)和微酸性电解水(Slightly acidic electrolyzed water, SAEW)作介质对牛肉解冻,结果表明 PAW 可以更好地延缓牛肉中脂质和蛋白质的氧化,并且提高了微生物安全性。应可沁等^[3]研究了 PAW 作为解冻介质对牛肉微生物安全及生鲜品质的影响,结果表明,随着 PAW 作用时间的延长,杀菌效果显著增强($P < 0.05$),显著增强了牛肉的保水性($P < 0.05$),同时降低了解冻过程中牛肉蛋白的损失和

脂肪氧化。Qian 等^[4]用 PAW 解冻鸡肉,发现 PAW 可以降低鸡肉脂肪氧化速率,而且对鸡肉外观和蛋白质组成没有不良影响,此外还可以减少蛋白质损失,同时起到杀菌作用。蓝蔚青等^[5]用超声联合微酸性电解水处理海鲈鱼,研究表明,SAEW 处理能减缓贮藏期间菌落总数与嗜冷菌数的增长,pH 值与 TVBN 含量上升速率比对照组慢,并且对抑制鱼肉脂肪氧化有较好的作用,还能提升样品的持水性。目前,PAW 和 SAEW 作为解冻介质对水产品品质、蛋白氧化和结构等的影响未见系统报道。

本文以冷冻秘鲁鱿鱼为原料,以 PAW、SAEW、盐水为解冻介质进行解冻处理,通过研究鱿鱼保水性和水分状态分布、蛋白和脂质氧化、蛋白构像和微观结构变化等,探讨不同解冻介质处理对秘鲁鱿鱼品质的影响,为最大程度地保障秘鲁鱿鱼品质提供一定的理论参考。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

冻结的秘鲁鱿鱼由锦州市古塔区海英水产商店提供,冷链运输至实验室,将样品切成 8 cm×8 cm×2 cm 的长方体,质量约 160 g 左右,放于-80℃超低温冰箱备用。

三羟甲基氨基甲烷(Tris)、5,5'-二硫代双(2-

收稿日期: 2023-03-03

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目
(31901763)

第一作者: 朱文慧,女,博士,副教授

通信作者: 李学鹏 E-mail: xuepengli8234@163.com

硝基苯甲酸)、磷酸二氢钠等购自国药集团化学试剂有限公司、乙二胺四乙酸(Ethylene diaminetetraacetic acid, EDTA)、盐酸、三氯乙酸(TCA)和盐酸胍均为分析纯,购自南京圣比奥生物科技有限公司;尿素、氯化钠购自福晨化学试剂有限公司;其它化学试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

Testo 106 型高精度食品温度计、TS-APJ03 型低温喷射等离子体、ORVALL Stratos 型冷冻高速离心机,美国 Thermo 公司;970CRT 荧光分光光度计,上海棱光公司;UV-2550 紫外-可见分光光度计,岛津仪器(苏州)有限公司;NM2012 低场核磁共振分析仪,上海纽迈科技有限公司;Niko80i 光学显微镜,日本尼康株式会社。

1.3 试验方法

1.3.1 样品处理 冻结秘鲁鱿鱼购自当地水产品市场,冷链运输至实验室后切成 8 cm×8 cm×2 cm(质量为 160 g±0.5 g)的长方体,然后包装在聚乙烯袋中抽真空,-80 °C 储存备用。

本研究设置 4 个处理组,对照组(CT)为 4 °C 冷藏解冻,其余 3 组分别将冷冻秘鲁鱿鱼样品浸泡在 PAW、SAEW 和 3% NaCl 溶液中置于 4 °C 冰箱中解冻,分别记为 PAW 组、SAEW 组和 3% NaCl 组,所有解冻直至中心温度为 0 °C 定为解冻终点。

1.3.2 肌原纤维蛋白的提取 根据宦海珍^[1]方法略作修改。将鱿鱼肉搅碎,加 4 倍质量的 20 mmol/L Tris-HCl(pH 7.2),均质 20 s 后离心 5 000 r/min 离心 15 min,重复 2 次。去上清液,加入 4 倍沉淀质量的 20 mmol/L Tris-HCl-NaCl(含 0.6 mol/L NaCl,pH 7.2)混匀均质,然后 5 000 r/min 离心 15 min,取上清液置于-20 °C 冰箱中保存备用(3 d 内用完)。蛋白浓度采用双缩脲法测定。

1.3.3 挥发性盐基氮 挥发性盐基氮(Total volatile basic nitrogen, TVBN)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》^[6]的方法进行测定。

1.3.4 保水性的测定 蒸煮损失率和离心损失率参考宦海珍^[1]的方法进行测定。

1.3.5 低场核磁共振 参考宦海珍^[1]的方法进行测定,通过脉冲低场核磁分析仪测定核磁共振弛

豫时间。

1.3.6 肌原纤维蛋白和脂质氧化的测定 根据 Oliver 等^[7]的方法,通过与 2,4-二硝基苯肼(DNPH)反应形成蛋白质脎来评估羰基含量。根据 Cui 等^[8]的方法,总巯基(Total sulfhydryl, -SH)通过与 5,5'-二硫代双(2-硝基苯甲酸)反应测定。参考 Davies 等^[9]的方法,在 325/420 nm 的激发/发射下测定荧光强度,结果以任意单位(A.U.)表示。

参考 Benjakul 等^[10]的方法并略微改动,称取解冻好的鱿鱼 10.00 g,依次加 25 mL 蒸馏水、25 mL 5%TCA 溶液,均质后搅拌混匀过滤。取过滤后的溶液 5 mL,加入同体积 0.02 mol/L 的硫代巴比妥酸溶液,80 °C 水浴 40 min,冷却至室温,在 532 nm 测吸光度,单位为 mg MDA/kg 样品。

1.3.7 内源荧光的测定 参考 Liu 等^[11]的方法稍微改动,用 50 mmol/L 的磷酸盐缓冲液(pH 7.0)将肌原纤维蛋白质量浓度配制成 0.1 mg/mL,采用荧光分光光度计进行光谱测定。激发波长 295 nm,狭缝宽度(激发光 2.5 nm,发射光 5 nm),扫描范围 320~460 nm。

1.3.8 紫外光谱的测定 将蛋白溶液用 20 mmol/L Tris-HCl-NaCl 缓冲液(含 0.6 mol/L NaCl,pH 7.2)调到 0.4 mg/mL,测定紫外吸收光谱,范围为 220~360 nm。

1.3.9 浊度和表面疏水性的测定 将蛋白调到 1 mg/mL,25 °C 水浴 20 min,在 340 nm 处测吸光度,计算样品的浊度。参考 Chelh 等^[12]的方法,由结合溴酚蓝的含量表示表面疏水性。

1.3.10 微观结构观察 将鱿鱼块用冷冻切片机制好,黏在载玻片上,然后用购买的试剂盒染色(苏木素、分化液、伊红染液),之后在显微镜上观察。

1.3.11 数据分析 采用 SPSS19.0 统计软件进行 ANOVA 分析, $P<0.05$ 代表差异显著, $P<0.01$ 代表差异极显著。采用 Origin 进行作图,试验均最少重复 3 次。

2 结果与分析

2.1 不同解冻介质对秘鲁鱿鱼 TVBN 的影响

挥发性盐基氮是衡量蛋白质新鲜度的指标,与外源性腐败微生物及其所分泌的酶对蛋白质降

解有关^[13],含量越高,表明解冻过程中蛋白破坏程度越高,新鲜度越低。等离子体暴露后水中会产生活性氧(ROS)和活性氮(RNS)等活性杀菌成分。如图1所示,4个不同处理组间TVBN含量差异显著($P<0.05$),其中PAW解冻处理组TVBN值最低为1.17 mg/100 g,可能是PAW浸泡过程中促使微生物脂质适度氧化且诱导细胞凋亡,另外,还能通过氧化改变胞内遗传物质造成微生物失活^[14],使得TVBN含量最低。有研究表明PAW中含有的自由基、活性氧、活性氮等多种成分可以破坏微生物细胞,从而具有高效的杀菌作用^[15]。Astorga等^[16]在PAW对牛肉营养成分、微生物安全的研究中表明,PAW具有显著的致病菌灭活能力,是提高生肉微生物安全性的一种非常有效的处理方法。3% NaCl处理组微生物含量可能低于SAEW,降低对蛋白质和非蛋白质氮化合物降解,所以TVBN含量相对低于SAEW处理组。微酸性电解水中含有的次氯酸和自由基能破坏微生物细胞结构,但是SAEW处理组的新鲜度不如PAW和3% NaCl处理组。

2.2 不同解冻介质对秘鲁鱿鱼保水性的影响

水分对产品的结构、功能和质量至关重要。造成滴水损失的原因有两个,一是解冻使蛋白质变性,导致水与蛋白质的结合能力下降;其次是解冻会对组织造成机械损伤,细胞外水不能被吸收并沿滴水通道流出^[17]。如图2所示,各处理组间的蒸煮损失率和离心损失率差异显著($P<0.01$),PAW、3% NaCl、SAEW处理组的蒸煮损失率分别为28.67%、35.91%和36.20%。PAW处理组蒸煮损失最小,可能是因为等离子体活化水正负离子含量丰富,使得蛋白质之间静电荷效应加强,提高了蛋白质和水的结合能力,从而提高了持水性^[3]。Qian等^[18]用PAW代替普通水来制备鸡肉肌原纤维蛋白凝胶显著提高了凝胶的持水性。NaCl溶液使得肌纤维肿胀,改善了蛋白质与水之间的结合能力^[19]。SAEW处理组水分损失最高,可能是由于溶液中的活性物质导致蛋白质变性,不能再次与流失的水分结合,导致持水力下降。

2.3 不同解冻介质对秘鲁鱿鱼水分分布与组成的影响

T_2 弛豫时间可以直接反映水的流动性,与肌

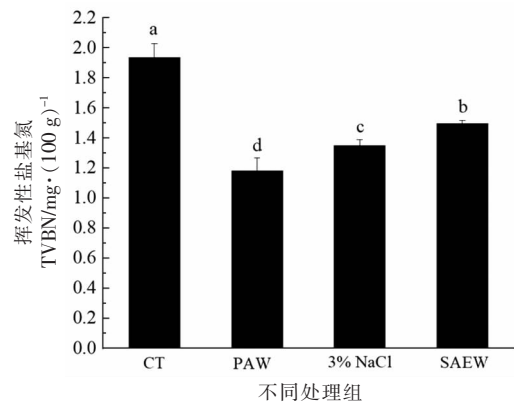
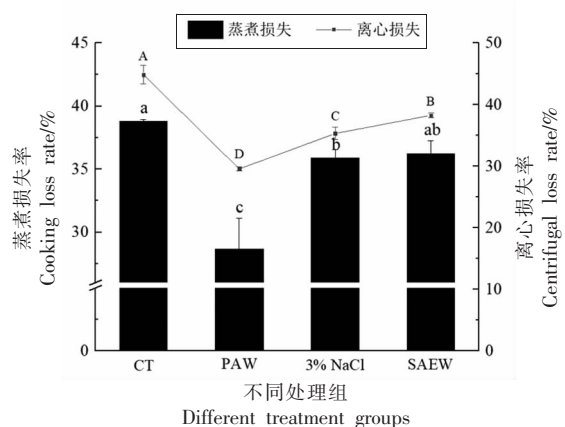


图1 不同解冻介质对秘鲁鱿鱼TVBN的影响
注:不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$),下同。

图1 不同解冻介质对秘鲁鱿鱼TVBN的影响
Fig.1 Effect of different thawing media on TVBN of jumbo squid



注:不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$)。

图2 不同解冻介质对秘鲁鱿鱼蒸煮损失和离心损失的影响

Fig.2 Effect of different thawing media on cooking loss and centrifugal loss of jumbo squid

肉的持水能力密切相关。如图3a所示,肌肉中的水分为结合水、固定水和自由水,其中 T_{22} (10~100 ms)代表位于肌纤维网络中的固定水, T_{23} (100~1 000 ms)具有最长的松弛时间,表征肌原纤维晶格中的自由水。图3b是每个组件所占的水分百分比,从图上看,各部分水分有不同程度的迁移,在冷冻过程中,水形成冰晶破坏了肌肉细胞,导致水分重新分布。随后的解冻过程水分不能再回到原位被吸收,从而导致了水分的迁移与流失。PAW处理组自由水含量最少,说明水分流失最少,PAW中的活性物质减少了微生物的活动,使蛋白质分

解速率下降,缓减了水分的迁移。研究表明,适当的等离子处理不仅不会破坏牛肉肌肉纤维的完整性,而且还能维持组织结构稳定,减少水分的流失^[3]。3% NaCl 处理组中适当的盐离子可能有助于维持

肌肉细胞的渗透压,从而减少水损失^[20]。SAEW 处理组自由水最多,说明水分流失最多,与上述离心损失和蒸煮损失的结果一致。

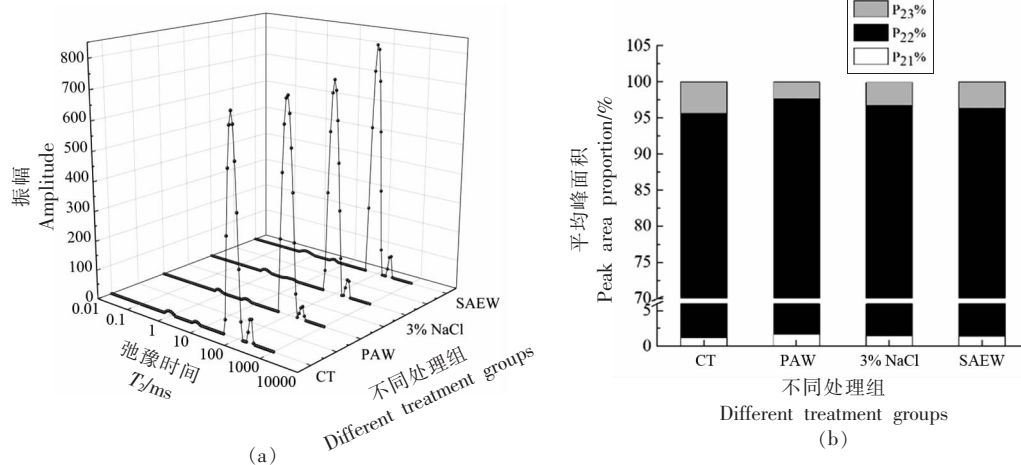


图 3 秘鲁鱿鱼 T_2 弛豫时间图谱和水分分布及组成

Fig.3 Transverse relaxation time T_2 of water, water distribution and composition in jumbo squid

2.4 不同解冻介质对秘鲁鱿鱼肌原纤维蛋白和脂质氧化的影响

羰基是蛋白质氧化最重要的指标之一。羰基通过攻击氨基酸的侧链转化和肽链的断裂形成羰基^[21]。羰基含量的增加使 MP 聚集和交联,并引起肽链结构的变化。如图 4 所示,各处理组秘鲁鱿鱼都有不同程度的氧化。等离子体活化水本身就会导致秘鲁鱿鱼氧化,但 PAW 处理组羰基含量最低,这可能归因于亚硝酸盐的抗氧化作用^[22]。应可沁等^[3]研究发现,用等离子体活化水浸泡牛肉后亚硝酸盐含量升高,它不仅抑制微生物,也可以抑制脂肪和蛋白氧化。SAEW 处理组羰基含量低于对照组,说明对抑制蛋白氧化有一定的作用^[23],但它的解冻效果不如等离子体和 3% NaCl 处理组。

总巯基是指分布在蛋白质网络内部和表面的巯基^[24]。在蛋白质解冻过程中,裸露的巯基易被氧化为二硫键(S-S),导致-SH 含量下降。图 4a 为不同解冻介质对秘鲁鱿鱼的巯基氧化情况,PAW 处理组蛋白-SH 含量最高为 77.55 nmol/mg,PAW 的活性物质保持了解冻时间和氧化速率之间的平衡,降低了蛋白氧化^[4]。SAEW 处理组-SH 含量最低为 52.38 nmol/mg MP,可能是 SAEW 中的活性物质把巯基基团氧化,生成二硫键。Liao 等^[2]用

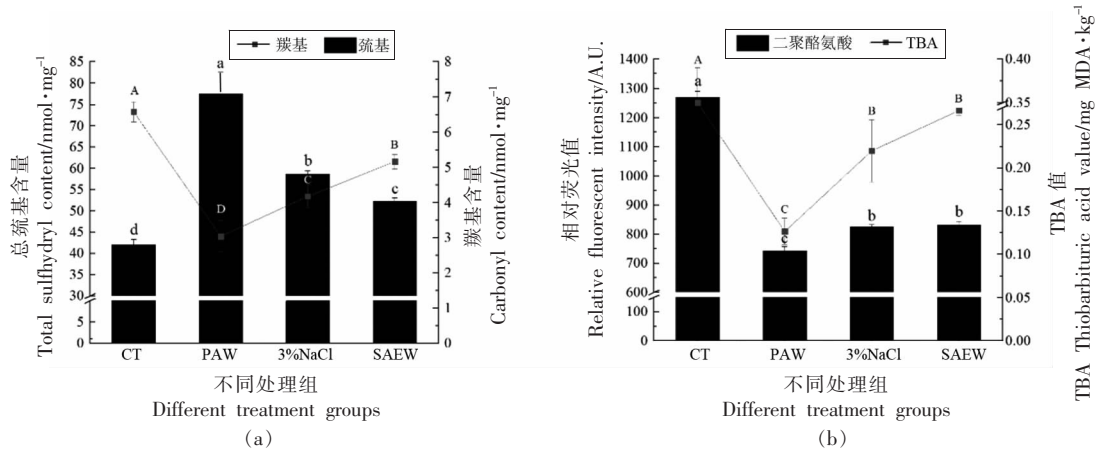
PAW 与 SAEW 对牛肉解冻,结果也证明 PAW 对牛肉氧化程度比较低,与本研究结果一致。

二聚酪氨酸含量可以评估蛋白质一级结构中氨基酸的变化,并且是蛋白质交联的有用参数。PAW 处理组二聚酪氨酸含量最低,可能是等离子体活化水中含有的 NO 易于反应生成 NO₂,亚硝酸盐的抗氧化作用与 O₂ 的隔绝有关^[25]。由于 PAW 的存在,与其它解冻方式相比可以显著降低秘鲁鱿鱼蛋白氧化,与之前对牛肉的解冻结果一致^[2]。SAEW 溶液有一定的氧化性,因此 SAEW 处理组使肌原纤维蛋白发生氧化。刘慧^[23]在不同有效氯浓度的 SAEW 对草鱼保鲜效果的研究中表明,并不是微酸性电解水浓度越高越好,如果太高会对蛋白质造成一定的氧化和分解,并且杀菌效果也会受到限制。

TBA 值用于量化多不饱和脂肪酸降解产生的二次氧化产物,衡量鱿鱼的脂质氧化。由图 4b 可知,PAW、SAEW 和 3% NaCl 处理组的 TBA 值显著低于对照组($P < 0.01$)。PAW 处理组 TBA 值最低为 0.12 mg/kg,这可能与等离子活化水中的 NO·自由基有关,NO·可以结合到肌红蛋白铁的中心,通过减少游离铁的含量,减少脂肪氧化,与此同时,NO·还能通过清除脂质过氧自由基来抑制脂质过

氧化链反应抑制氧化^[22]。此外,等离子体活化水也可以破坏酶的结构^[26],抑制脂氧合酶的活性,从而抑制了脂肪氧化。有研究表明,等离子体处理产品

的脂肪氧化低于其它非热加工处理,表明适当的等离子体处理条件可以有效地抑制脂肪氧化^[27]。



注:不同小写字母表示组间差异显著(P<0.05)。

图4 不同解冻介质对秘鲁鱿鱼肌原纤维蛋白和脂肪氧化的影响

Fig.4 Effect of different thawing media on myofibrillar protein and lipid oxidation of jumbo squid

2.5 不同解冻介质对秘鲁鱿鱼肌原纤维蛋白中内源荧光含量的影响

蛋白质分子荧光基团在紫外光下会发出荧光,称为蛋白质的固有荧光。荧光强度可以用来反映氨基酸中色氨酸(Trp)的强度指数和暴露量,Trp转移到蛋白质的内表面,导致荧光猝灭。如图5所示,PAW处理组荧光强度高于SAEW和3%NaCl处理组,表明PAW溶液可以很好地保持蛋白质的三级结构。对于SAEW处理组,色氨酸残基被暴露产生氧化荧光强度降低。此外,蛋白质的部分去折叠和交联导致蛋白质聚集,从而增加空间

位阻并导致荧光强度猝灭。

2.6 不同解冻介质对秘鲁鱿鱼肌原纤维蛋白紫外吸收光谱的影响

紫外吸收光谱是反映芳香族氨基酸侧链变化和揭示蛋白质构象变化的重要指标之一,蛋白质结构解聚展开,埋在肌原纤维蛋白质中的酪氨酸残基逐渐暴露于表面,向疏水区的移动,导致最大紫外线吸收峰下降^[28]。由图6可知,PAW处理组紫外吸收光谱峰值最高,表明PAW可降低对蛋白质的破坏^[29],稳定蛋白质结构,减缓蛋白氧化。SAEW处理组对肌原纤维蛋白结构造成相对大的破坏,内部

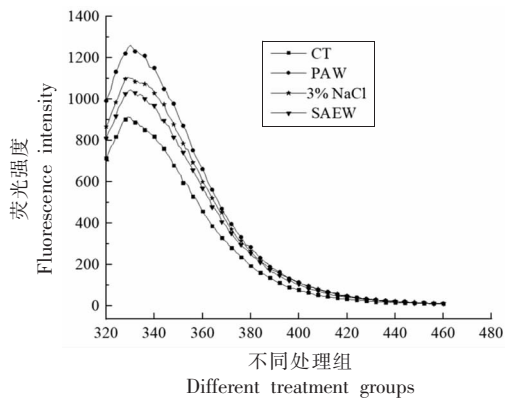


图5 不同解冻介质对秘鲁鱿鱼内源荧光的影响

Fig.5 Effect of different thawing media on endogenous fluorescence content of jumbo squid

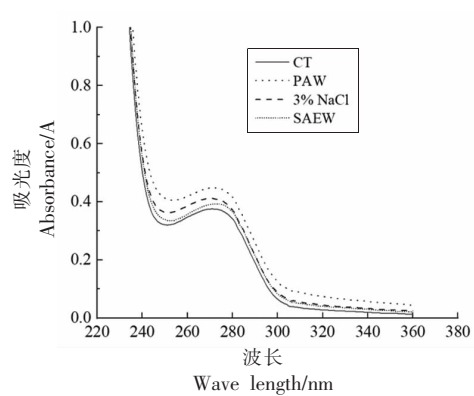


图6 不同解冻介质对秘鲁鱿鱼紫外光谱的影响

Fig.6 Effect of different thawing media on ultraviolet absorption of jumbo squid

发色基团酪氨酸被暴露,荧光强度下降最多,因此在 278 nm 峰值下降最多。

2.7 不同解冻介质对秘鲁鱿鱼肌原纤维蛋白变性的影响

蛋白质分子的去折叠以及通过聚合将单体蛋白质转化为更大的蛋白质可增加 MP 的聚集程度,导致浊度增加。如图所示,各处理组间的浊度差异显著($P < 0.01$),PAW 处理组浊度最低,粒径越小,意味着蛋白有着更大的表面积,蛋白质与水的相互作用也越高,说明 PAW 可以有效抑制肌原纤维蛋白的氧化,与上述保水性结果一致。Qian 等^[18]用 PAW 制备鸡肉肌原纤维蛋白凝胶,发现 PAW 可以促进肌原纤维蛋白的去折叠,从而导致水和蛋白质之间发生更多反应,减少蛋白变性。因此,等离子解冻能更好的维持蛋白结构,利于产品质量的保持。3% NaCl 容易引起蛋白质变性,所以 3% NaCl 处理组浊度变大。

维持蛋白质三级结构最重要的力就是疏水相互作用。表面疏水性是量化肌原纤维蛋白变性的重要指标之一,与蛋白质的功能有关^[30]。表面疏水性的大小表征溴酚蓝与肌原纤维蛋白的反应程度,如图 7 所示,所有处理组的表面疏水性值均低于对照组,PAW、3% NaCl 和 SAEW 处理组的表面疏水性值分别为 2.50、4.37 和 5.82。SAEW 处理组的表面疏水性增大,可能由于次氯酸的氧化特性,肌原纤维蛋白分子展开,内部的疏水残基暴露。有研究表明,也有好的杀菌效果抗氧化效果^[23],但在本研究中 SAEW 抑制蛋白氧化效果不如 PAW。

2.8 不同解冻介质对秘鲁鱿鱼的微观结构的影响

HE 染色可直接反映肌肉结构的完整性。如图 8 所示,白洞主要是由于冰晶的大小和解冻过程中肌原纤维结构损伤造成的。冷藏解冻的鱿鱼组织具有最严重的孔径,可以清楚地看到肌原纤维的无序排列。由于解冻不均匀,3% NaCl 处理组样品的结构松散且断裂。PAW 处理组样品的结构具有较小且均匀的网络间隙分布。这可能是由于等离子体活化水在解冻过程中使微生物大量减少,降低了对肌原纤维蛋白的降解,从而减少了对结构的破坏程度,因此整个结构看起来相对平整光滑。

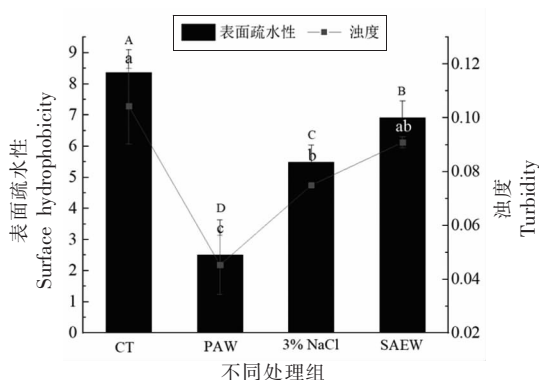


图 7 不同解冻介质对秘鲁鱿鱼变性的影响

Fig.7 Effect of different thawing media on denaturation of jumbo squid

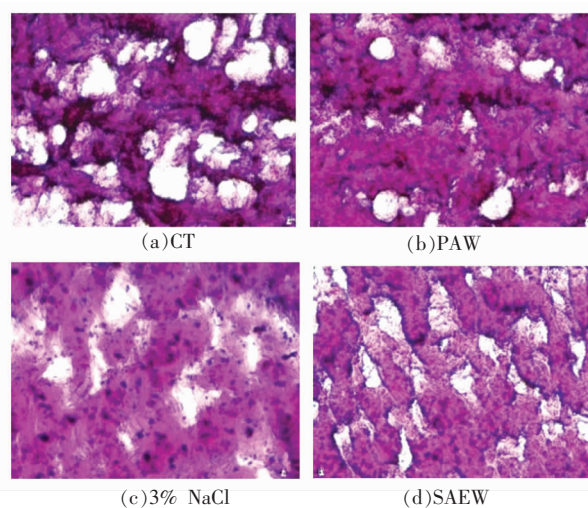


图 8 不同解冻介质对秘鲁鱿鱼微观结构的影响

Fig.8 Effect of different thawing media optical microscopy of jumbo squid

3 结论

本文用不同的解冻介质处理秘鲁鱿鱼,结果发现 PAW 处理组解冻效果优于 3% NaCl 和 SAEW 处理组,具有更高的持水性,蛋白氧化更低,能良好的维持肌原纤维蛋白的结构,因此是一种良好的解冻介质,可用于水产品等的解冻处理。

参 考 文 献

- [1] 宦海珍. 秘鲁鱿鱼解冻过程中蛋白质氧化介导的保水性机制研究[D]. 锦州: 渤海大学, 2019.
HUAN H Z. The mechanism of water holding capacity mediated by protein oxidation in *Dosidicus*

- gigas* during thawing[D]. Jinzhou: Bohai University, 2019.
- [2] LIAO X Y, XIANG Q S, CULLEN P J, et al. Plasma-activated water (PAW) and slightly acidic electrolyzed water (SAEW) as beef thawing media for enhancing microbiological safety[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 117: 108649.
- [3] 应可沁, 李子言, 程序, 等. 等离子体活化水作为解冻介质对牛肉杀菌效能及品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(2): 338-345.
- YING K Q, LI Z Y, CHENG X, et al. Effect of plasma-activated water as thawing media on the sterilization and quality of beef[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(2): 338-345.
- [4] QIAN J, YAN L F, YING K Q, et al. Plasma-activated water: A novel frozen meat thawing media for reducing microbial contamination on chicken and improving the characteristics of protein[J]. *Food Chemistry*, 2022, 375: 131661.
- [5] 蓝蔚青, 张炳杰, 周大鹏, 等. 超声联合微酸性电解水处理对真空包装海鲈鱼冷藏期间品质变化的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(5): 62-68.
- LAN W Q, ZHANG B J, ZHOU D P, et al. Effect of ultrasonic combined with slightly acidic electrolyzed water treatment on quality changes of vacuum-packaged sea bass (*Lateolabrax japonicas*) during refrigerated storage[J]. *Food Science*, 2022, 43(5): 62-68.
- [6] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定: GB 5009.228-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- National Health and Family Planning Commission. National Food Safety Standard Determination of Volatile Basic Nitrogen Compounds in Foods: GB 5009.228-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [7] OLIVER C N, AHN B W, MOERMAN E J, et al. Aged related changes in oxidized proteins[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1987, 262(12): 5488-5491.
- [8] CUI X, XIONG Y L, KONG B H, et al. Hydroxyl radical-stressed whey protein isolate: Chemical and structural properties[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2012, 5(6): 2454-2461.
- [9] DAVIES K J A, DELSIGNORE M E, LIN S W. Protein damage and degradation by oxygen radicals. II: Modification of amino acids[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1987, 262(20): 9902-9907.
- [10] 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.
- [11] LIU Y, ZHAO G L, ZHAO M M, et al. Improvement of functional properties of peanut protein isolate by conjugation with dextran through Maillard reaction[J]. *Food Chemistry*, 2012, 131(3): 901-906.
- [12] CHELH I, GATELLIER P, SANTÉ-LHOUELLIER V. A simplified procedure for myofibril hydrophobicity determination[J]. *Meat Science*, 2006, 74(4): 681-683.
- [13] 岑剑伟, 于福田, 杨贤庆, 等. 微酸性电解水冰对罗非鱼片的保鲜效果[J]. *食品科学*, 2019, 40(19): 288-293.
- CEN J W, YU F T, YANG X Q, et al. Quality preservation of tilapia fillets using slightly acidic electrolyzed water ice[J]. *Food Science*, 2019, 40(19): 288-293.
- [14] 朱士臣, 陈小草, 柯志刚, 等. 低温等离子体技术及其在水产品加工中的应用[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(10): 305-314.
- ZHU S C, CHEN X C, KE Z G. Non-thermal plasma technology and its applications in aquatic products processing[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2021, 21(10): 305-314.
- [15] THIRUMDAS R, KOTHAKOTA A, ANNAPURE U, et al. Plasma activated water (PAW): Chemistry, physico-chemical properties, applications in food and agriculture[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, 77: 21-31.
- [16] ASTORGA J B, HADINOTO K, CULLEN P, et al. Effect of plasma activated water on the nutritional composition, storage quality and microbial safety of beef[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 154: 112794.
- [17] PUOLANNE E, HALONEN M. Theoretical aspects of water-holding in meat[J]. *Meat Science*, 2010, 86(1): 151-165.
- [18] QIAN J, WANG Y Y, ZHUANG H, et al. Plasma activated water-induced formation of compact chicken myofibrillar protein gel structures with intrinsically antibacterial activity[J]. *Food Chemistry*, 2021,

- 351; 129278.
- [19] JIANG Q Q, NAKAZAWA N, HU Y Q, et al. Microstructural modification and its effect on the quality attributes of frozen-thawed bigeye tuna (*Thunnus obesus*) meat during salting[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 100: 213-219.
- [20] LI F F, BO W, KONG B H, et al. Impact of ultrasound-assisted saline thawing on the technological properties of mirror carp (*Cyprinus carpio* L.)[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 86: 106014.
- [21] WANG H L, LIUC H, QIN, J W, et al. Effects of hydroxyl radical oxidation on physicochemical properties and water-holding capacity of muscle proteins in grass carp [J]. Food Science and Technology, 2018, 43: 134-140.
- [22] YONG H I, LEE S H, KIM S Y, et al. Color development, physicochemical properties, and microbiological safety of pork jerky processed with atmospheric pressure plasma[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2019, 53: 78-84.
- [23] 刘慧. 微酸性电解水对草鱼冷藏期间保鲜效果影响的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.
- LIU H. Effect of the slightly acidic electrolyzed water on preservation of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) during the chilling storage[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021.
- [24] 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.
- [25] HONIKEL K O. The use and control of nitrate and nitrite for the processing of meat products[J]. Meat Science, 2008, 78(1/2): 68-76.
- [26] MISRA N N, PANKAJ S K, SEGAT A, et al. Cold plasma interactions with enzymes in foods and model systems[J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 55: 39-47.
- [27] YONG H I, PARK J, KIM H J, et al. An innovative curing process with plasma-treated water for production of loin ham and for its quality and safety [J]. Plasma Processes and Polymers, 2018, 15(2): 1700050.
- [28] LI F F, WANG B, LIU Q, et al. Changes in myofibrillar protein gel quality of porcine longissimus muscle induced by its structural modification under different thawing methods[J]. Meat Science, 2019, 147(JAN.): 108-115.
- [29] 仇俊, 翟国臻, 孙运金. 等离子体处理对生鲜牛肉杀菌效果及营养品质的影响[J]. 肉类研究, 2022, 36(4): 41-47.
- QIU J, ZHAI G Z, SUN Y J. Effects of plasma treatment on the sterilization and nutritional quality of fresh beef[J]. Meat Research, 2022, 36(4): 41-47.
- [30] 唐玲玲, 严金红, 徐慧倩, 等. 低温等离子体对南美白对虾肌肉蛋白质性质和结构的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(10): 3083-3089.
- TANG L L, YAN J H, XU H Q, et al. Effects of cold atmospheric plasma on protein properties and structure of *Penaeus vannamei* [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2022, 13(10): 3083-3089.

Effects of Thawing Media on the Water Holding Capacity, Protein Oxidation and Structure of Jumbo Squid (*Dosidicus gigas*)

Zhu Wenhui, Guo Huifang, Wang Wenxuan, Bu Ying, Li Jianrong, Li Xuepeng*, Huan Haizhen
(Engineering and Technology Research Center of Food Preservation, Processing and Safety Control of Liaoning Province, College of Food Science and Engineering, Bohai University, Jinzhou 121013, Liaoning)

Abstract To investigate the effects of different thawing media such as plasma activated water (PAW), slightly acidic electrolytic water (SAEW), and 3% NaCl solution on the quality of jumbo squid, the frozen samples were thawed in the three abovementioned media at 4 °C. The effects of different thawing media on water retention, protein oxidation and structure of jumbo squid were analyzed. Results showed that PAW as thawing medium significantly improved the water-holding capacity of sample ($P < 0.01$), and the cooking loss rate was 28.67%, which was significantly lower than that of the other three groups. Compared with other treatment groups, samples treated with PAW had the lowest carbonyl and

dityrosine content and the highest sulfhydryl content, indicating a good inhibition of protein oxidation. The results of turbidity, endogenous fluorescence and UV spectra analysis showed that the PAW treatment group could reduce the degree of protein denaturation and maintain structural stability. Taken together, the PAW treatment had the best effect on water retention and autoxidation of jumbo squid.

Keywords plasma activated water; slightly acidic electrolyzed water; jumbo squid; water holding capacity; protein oxidation