

DOI: 10.12161/j.issn.1005-6521.2024.10.004

低压静电场对红虾微冻贮藏过程中品质的影响

高飞¹, 杨水兵², 夏宇³, 余海霞^{4*}, 张小军^{1,5}, 蔡勇⁴

(1. 浙江海洋大学 食品与药学院, 浙江 舟山 316022; 2. 滁州学院 生物与食品工程学院, 安徽 滁州 239000; 3. 舟山市越洋食品有限公司, 浙江 舟山 316021; 4. 浙江大学 舟山海洋研究中心, 浙江 舟山 316021; 5. 浙江省海洋水产研究所, 浙江 舟山 316021)

摘要: 为研究添加低压静电场对红虾微冻贮藏保鲜过程中品质的影响, 以舟山海捕红虾为研究对象, 通过测定 0~25 d 内 -3 °C 普通微冻及电场微冻条件下虾肉的各项指标, 包括持水力 (water-holding capacity, WHC)、挥发性盐基氮 (total volatile basic nitrogen, TVB-N) 值、盐溶性蛋白 (salt soluble protein, SSP) 含量、硫代巴比妥酸 (thiobarbituric acid, TBA) 值、总巯基含量、菌落总数 (total viable count, TVC) 等, 并通过十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶 (sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis, SDS-PAGE) 电泳探究红虾蛋白构象变化, 比较分析有无低压静电场添加时舟山红虾品质的差异。结果表明, 在 25 d 贮藏期内, -3 °C 普通微冻组样品的持水力大幅下降, TVB-N 值和 TBA 值分别高达 32.39 mg/100 g 和 1.03 mg/kg, TVC 增加至 7.98 lg(CFU/g), 蛋白质变性程度高, 已处于不可食用状态; 相较之下, -3 °C 电场微冻组样品的持水力高达 82.82%, TVB-N、TBA 值和 TVC 均远低于对照组产品, 肌原纤维蛋白受破坏程度低, 虾肉仍能食用。综上所述, 低压静电场与微冻技术叠加应用能够更长时间保持舟山海捕红虾的营养价值。

关键词: 红虾; 低压静电场; 微冻贮藏; 品质; 保鲜

Effect of Low-Voltage Electrostatic Field on the Quality of Red Shrimp during Micro-Freezing Storage

GAO Fei¹, YANG Shuibing², XIA Yu³, YU Haixia^{4*}, ZHANG Xiaojun^{1,5}, CAI Yong⁴

(1. Food and Medicine School of Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, Zhejiang, China; 2. School of Biological Science and Food Engineering, Chuzhou University, Chuzhou 239000, Anhui, China; 3. Zhoushan Yueyang Food Co., Ltd., Zhoushan 316021, Zhejiang, China; 4. Ocean Research Center of Zhoushan, Zhejiang University, Zhoushan 316021, Zhejiang, China; 5. Marine Fisheries Research Institute of Zhejiang Province, Zhoushan 316021, Zhejiang, China)

Abstract: In order to study the influence of low-voltage electrostatic field on the quality of the red shrimp during micro-freezing storage, this study focused on the red shrimp caught from Zhoushan sea. Various indicators of shrimp meat within 0 to 25 d under -3 °C micro-freezing conditions and electrostatic micro-freezing conditions, including water-holding capacity (WHC), total volatile basic nitrogen (TVB-N), salt soluble protein (SSP), sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE), thiobarbituric acid (TBA), total sulfhydryl content and total viable count (TVC) were measured to compare and analyze the differences in quality of Zhoushan red shrimp with or without low-voltage electrostatic fields. The results indicated that during the 25 d storage period, the WHC of the red shrimp samples in -3 °C micro-freezing group decreased significantly. The TVB-N value and the TBA values have been as high as 32.39 mg/100 g and 1.03 mg/kg respectively, and the TVC value has increased to 7.98 lg (CFU/g). Protein is in a fundamentally denatured state and the red shrimp was no longer edible. In contrast, the WHC of the red shrimp in -3 °C low-voltage electrostatic field was as high as 82.82%, and TVB-N, TBA and TVC values were also much lower than the control products. The destruction of myofibrillar protein was minimal and the shrimp was still edible. To sum up, the combined

基金项目: 浙江省科技计划项目 (2022C04016); 舟山市定海区科技计划项目 (2022C1104); 安徽省高等学校自然科学研究重点项目 (2022AH051089)

作者简介: 高飞 (1998—), 女 (汉), 硕士研究生, 研究方向: 水产品加工与贮藏。

*通信作者: 余海霞 (1981—), 女 (汉), 高级工程师, 硕士, 研究方向: 水产品加工与贮藏。

application of low-voltage electrostatic field and micro-freezing technology can maintain the nutritional value of Zhoushan sea-caught red shrimp for a longer time, providing a new idea for the storage and preservation of other aquatic products.

Key words: red shrimp; low-voltage electrostatic field; micro-freezing storage; quality; preservation

引文格式:

高飞, 杨水兵, 夏宇, 等. 低压静电场对红虾微冻贮藏过程中品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(10): 21-28.

GAO Fei, YANG Shuibing, XIA Yu, et al. Effect of Low-Voltage Electrostatic Field on the Quality of Red Shrimp during Micro-Freezing Storage[J]. Food Research and Development, 2024, 45(10): 21-28.

红虾(*Solenocera crassicornis*)属于管鞭虾科,因通体呈深红色而得名,也被称作中华管鞭虾,在我国广泛分布于舟山群岛周边海域、南海以及黄海南部^[1]。舟山海捕红虾壳薄体肥、肉质鲜嫩,体内含有大量的蛋白质、脂质及多种矿物质,蕴含的虾青素具有抗氧化、抗肿瘤、调节机体免疫等功效^[2],适于各类人群食用。然而,受禁渔期的限制,每年5~8月无法获得新鲜的舟山海捕红虾,且红虾死后极易滋生细菌,造成虾体变黑,因此选择适宜的保藏方法对延缓红虾品质的下降尤为重要。目前水产品的贮藏方法主要以低温贮藏为主,分为冷藏法、冰鲜法、微冻法、冷冻法及其他新型保鲜技术,辐照保鲜、臭氧保鲜技术等也在逐渐探索中^[3]。

微冻保鲜指的是将贮藏温度降至略低于水产品细胞液冻结点以下的温度范围内进行保藏的方法。这种保鲜方法可以将水产品局部冻结,降低体内自由水的流动速度,从而减少重结晶对产品肌肉造成的损伤,减缓腐败速率,弥补传统保鲜方法的缺陷,延长产品货架期的同时还能保证产品风味。郑稳等^[4]通过比较微冻贮藏、冷藏和两种方式叠加对大口黑鲈鱼贮藏过程中菌落总数、质构特性、巯基含量等的影响,发现-2℃微冻贮藏更能保持鲈鱼品质。但是微冻保鲜对于环境温度的要求也很严格^[5],较小的温度波动就能造成水产品体内冰晶大量生长。庄文静等^[6]指出微冻保鲜技术对鱼类持水性的影响较大,微冻过程产生的冰晶破坏鱼体细胞膜,使得其体内的自由水被释放。同时水分子对维持蛋白质二级结构具有重要作用,微冻贮藏可能会进一步造成蛋白质变性,具体表现为二硫键数目增多、巯基数量下降、Ca²⁺-ATPase活性降低等。

贮藏温度降低到冰点以下时,加入电场可以延缓水产品体内冰晶的形成,更大程度保持产品品质^[7]。根据输出电压的不同,静电场可分为高压静电场(>2.5 kV)和低压静电场(≤2.5 kV)。高压静电场技术起步较早,目前国内对电场的研究还仍以高压静电场为主。高压静电场的作用机理为电离空气产生负离子和臭氧,负离子具有抑制水产品体内酶活性的作用,也能降低新陈代谢速率,而臭氧具备良好的杀菌效果^[8]。

Ko等^[9]比较有无添加300 kV高压静电场对罗非鱼冷藏保鲜过程品质的影响,结果发现在第8天时罗非鱼的挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)值仅为20.47 mg/100 g,而未添加电场的罗非鱼在贮藏第6天就达到限量标准25 mg/100 g,不可食用。Xu等^[10]在研究中发现,冷藏干腌牛肉在添加3 000 V电场后,其pH值、水分和肉色较未添加组下降缓慢,而苯甲醛和麦芽酚等挥发性化合物含量在贮藏10 d后急剧增加,说明高压静电场叠加保鲜处理可以促进干腌牛肉贮藏期间的颜色稳定性,增强特征风味。但是高压静电场在实际应用中存在安全隐患,电压强度高,对于设备及环境的要求十分严苛^[11],较难实现大规模使用。低压静电场保鲜技术是一种新型非热辅助保鲜技术,低压静电场由电场发生装置和放电板组成,通过空间放电的方式在一定空间内形成负离子环境,使水分子发生同频共振后于阳极富集从而转化成液态水,影响细胞内源酶促反应^[12-13]。李甜等^[14]考察加入低压静电场对凡纳滨对虾微冻过程中品质的影响,结果发现添加低压静电场的样品中总巯基、总蛋白含量和Ca²⁺-ATPase活性的下降趋势明显低于未添加电场组。低压静电场的好处是物料不与放电板直接接触,亦能达到保鲜效果,操作便捷,安全性高。采用空间放电在冷冻库内形成负离子环境,低压静电场保鲜技术与微冻技术组合使用,可形成完美的“先冻后藏”冰晶控制锁鲜体系,降低汁液流失率,延缓产品品质的劣变。国外已在肉制品领域得到应用,为水产品的保鲜、冻结与解冻等技术革新方面提供了新的思路。

本文以新鲜舟山海捕红虾为原料,通过比较-3℃普通微冻和电场微冻两种贮藏条件下虾的持水力、挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)值、盐溶性蛋白含量、硫代巴比妥酸(thiobarbituric acid, TBA)值、总巯基含量及菌落总数(total viable count, TVC)等理化指标,并通过十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶(sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis, SDS-PAGE)电泳探究红虾肌原纤维蛋白构象变化,探究低压静电场对红虾微冻贮藏过程中品质的影响,

以期为其他水产品的保鲜应用提供理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

新鲜舟山海捕红虾:市售,用装有碎冰的冰盒包装好在 20 min 内快速运回实验室。

三氯乙酸、KCl、NaOH、NaH₂PO₄、Na₂HPO₄、乙二胺四乙酸(ethylene diamine tetraacetic acid, EDTA)、NaCl(均为分析纯):国药集团化学试剂有限公司;SDS-PAGE 变性聚丙烯酰胺凝胶快速制备试剂盒、考马斯亮蓝染色试剂盒、三羟甲基氨基甲烷(tris hydroxymethyl aminomethane, Tris)、蛋白质上样缓冲液:生工生物工程(上海)股份有限公司;总巯基测试盒(微板法):南京建成生物工程研究所。

1.2 仪器与设备

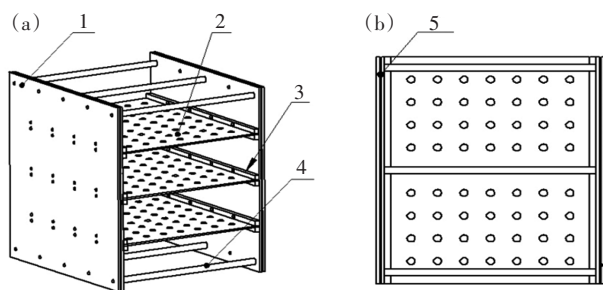
电子天平(SQP):赛多利斯科技仪器有限公司;电场发生器(SE&BA)、静电场输出装置:浙江驰力科技股份有限公司;海尔冰箱(BCD-206STPQ):青岛海尔股份有限公司;高速冷冻离心机(CF16RXII):日立工业株式会社;旋涡混合器(VORTEX-5):海门市其林贝尔仪器制造有限公司;可调高速匀浆机(FSH-2):常州国华电器有限公司;紫外分光光度计(UV-2550):日本岛津制作公司;绞肉机(QSJ-D03P3):小熊电器股份有限公司;垂直电泳仪(DY CZ-24DN):北京六一生物科技有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品处理与电场设置

将红虾在低温流水中快速洗净,去除头尾,选取体表完整有光泽的虾肉样品,沥干后平均分成两组,用聚乙烯保鲜袋(14 cm×16 cm)分装,每个保鲜袋装 5 只红虾样品,样品均平铺在袋中,彼此不挤压,抽真空后分别放入-3℃普通微冻冰箱(CK 组)和-3℃电场微冻冰箱(EF 组)中。

向 EF 组冰箱内部安装静电场发生装置,结构如图 1 所示。



(a) 低压静电场发生装置等轴图;(b) 低压静电场发生装置上视图;

1. 耐高压绝缘板;2. 储物隔板;3. 隔板支架;4. 横梁;5. 电极板。

图 1 低压静电场发生装置结构图

Fig.1 Structure diagram of the low-voltage electrostatic field generating device

装置主要由耐高压绝缘板、储物隔板、隔板支架、横梁和电极板组成,方便组装和空间叠加。电极板位于电场发生装置的两侧,两边由耐高压绝缘板进行隔离。储物隔板位于两极板的中间,中间布满孔洞。两个电极板间距离为 50 cm,场强为 5 000 V/m,发射器输入电压 220 V,输出电流 0.2 mA,样品与极板间距离保持 15~25 cm。

每次测定前从 CK 组和 EF 组各取出 10 只红虾样品,用流水解冻 20 min,去壳,取腹部肌肉并绞碎,于 1、4、7、10、13、16、19、22、25 d 时测定各项理化指标。

1.3.2 TVC 的测定

TVC 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》进行。

1.3.3 持水力测定

称取约 2.0 g 红虾碎肉样品,用滤纸包裹并放入离心管中,记录下离心前的质量。样品于 5 000 r/min 离心 10 min(4℃),离心结束后再次记录质量。持水力计算公式如下^[15]。

$$X = \frac{W_2 - W_0}{W_1 - W_0} \times 100 \quad (1)$$

式中: X 为持水力,%; W_1 为离心前样品和离心管的总质量,g; W_2 为离心后样品和离心管的总质量,g; W_0 为离心管的质量,g。

1.3.4 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》半微量定氮法测 TVB-N 值。

1.3.5 盐溶性蛋白含量的测定

参考岳开华等^[16]的方法。精确称取两份 2.0 g 虾肉,分别加入 20 mL 的高盐离子磷酸缓冲溶液(0.5 mol/L KCl, 20 mmol/L NaH₂PO₄-Na₂HPO₄)和低盐离子磷酸缓冲溶液(0.05 mol/L KCl, 20 mmol/L NaH₂PO₄-Na₂HPO₄),均质 5 min 后将低、高盐匀浆液置于 4℃环境中分别抽提 1 h 和 3 h,之后放入离心机中离心(4 000 r/min, 10 min)。取上清液,加入 15% 三氯乙酸沉淀蛋白质,用 1 mol/L 的 NaOH 溶解虾肉蛋白,分别以低、高磷酸盐缓冲液定容至 50 mL。以上操作均在 4℃下进行。

盐溶性蛋白含量使用双缩脲法测定,结果为高盐离子蛋白质含量减去低盐离子蛋白质含量。蛋白质标准曲线的制备以牛血清蛋白为标准品,取 4 mg/mL 的牛血清蛋白溶液分别配成 1、2、3、4、5 mg/mL 的蛋白溶液,各加双缩脲试剂 5 mL,另外空白对照用 5 mL 蒸馏水,充分涡旋振荡后于 540 nm 处测定各管吸光度并绘制标准曲线。

1.3.6 肌原纤维蛋白的提取

参考李苑等^[17]的方法并稍作修改。将 2.0 g 左右

的红虾碎肉加入 20 mL 预冷的缓冲液 (100 mmol/L KCl-1 mmol/L EDTA-20 mmol/L 磷酸缓冲液, pH7.0) 中,混合均匀后在 4 °C 下离心 10 min (4 000 r/min)。弃去上清液,沉淀按相同条件重复离心过滤 3 次,向全部沉淀物中加入 10 mL 50 mmol/L 磷酸缓冲液,均质离心 10 min。取出上层清液,即得到肌原纤维蛋白溶液,分装冷藏备用。

1.3.7 SDS-PAGE 电泳

参照 Abe 等^[18]的方法并稍作改动。向 1.3.6 所得肌原纤维蛋白溶液中加入 50 mmol/L 磷酸缓冲液 (1 mol/L NaCl, pH7.0) 并调整浓度至 4 mg/mL。再加入 4 倍体积的蛋白上样缓冲液,100 °C 加热 3 min,高速离心 (8 000 r/min, 15 min) 后取上清液备用。取 15 μ L 样品放至由 10% 分离胶和 5% 浓缩胶组成的聚丙烯酰胺凝胶上,电泳结束后用考马斯亮蓝染色 4 h,脱色后观察蛋白质条带变化。

1.3.8 总巯基含量的测定

总巯基含量的测定使用总巯基测试盒。

1.3.9 TBA 值的测定

TBA 值的测定参考 Cai 等^[19]的方法进行,并稍作改动。将 10 g 虾肉绞碎后,加入 50 mL 7.5% 的三氯乙酸 (含 0.1% EDTA) 振荡 30 min,过滤后取 5 mL 上清液,加入 5 mL 0.02 mol/L TBA 溶液,混匀后放入沸水浴中反应 40 min,取出冷却至室温。取上清液加入 5 mL 氯仿摇匀,静置后取上清液分别在 532 nm 和 600 nm 波长处比色,记录吸光度,并用以下公式计算 TBA 值。

$$X = \frac{A_{532} - A_{600}}{155} \times 72.6 \times m \times 1000 \times 1/10 \quad (2)$$

式中: X 为硫代巴比妥酸值, mg/100 g; A_{532} 为样品在 532 nm 处的吸光度; A_{600} 为样品在 600 nm 处的吸光度; m 为虾肉质量, g。

1.4 数据处理

以上每组试验重复测定 3 次,数据均应用 Microsoft Excel 2007 整理,结果以平均值 \pm 标准差表示,并采用 Origin 2018 64Bit 软件绘图, $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 电场叠加微冻对红虾 TVC 的影响

水产品体内的微生物在贮藏过程中不断生长繁殖,产生醛类、酮类、硫化物等易造成肉体腐败变质的物质,因此 TVC 可以用来衡量水产品的新鲜程度^[20],一般来说, TVC 越高,水产品新鲜程度越低。

图 2 为舟山海捕红虾在添加静电场微冻和普通微冻条件下的 TVC 变化情况。

由图 2 可知,两组的 TVC 在整个贮藏过程中均不断上升,但是 EF 组样品的 TVC 始终低于 CK 组,这与沈俊^[21]的研究结论一致,说明电场的加入能够在一定

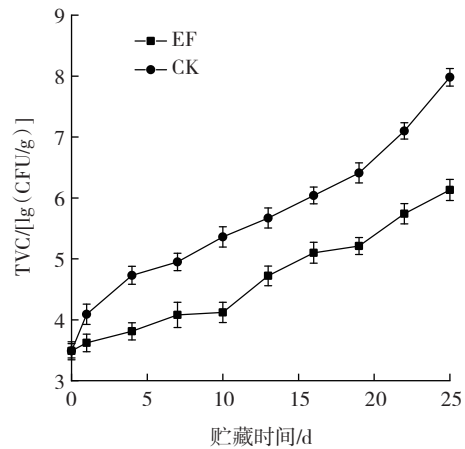


图 2 不同微冻贮藏条件下红虾 TVC 的变化

Fig.2 Changes of TVC in red shrimp under different micro-freezing storage conditions

程度上抑制虾体内腐败微生物的繁殖和增长。CK 组的 TVC 从贮藏开始便呈上升趋势,贮藏第 22 天时, CK 组红虾的 TVC 已经达到 7.10 lg (CFU/g),处于变质状态;而 EF 组红虾由于低压静电场的加入,细胞膜的跨膜电位发生改变^[22],破坏了腐败微生物的细胞结构,起到了一定的杀菌作用, TVC 的增加明显减慢,贮藏第 25 天时的 TVC 仅为 6.13 lg (CFU/g),产品尚能食用。由此可见,低压静电场与微冻技术联合应用,更能有效延长红虾的贮藏期。

2.2 电场叠加微冻对红虾持水力的影响

红虾的持水力是指红虾在冻结和解冻等加工过程中保持自身水分的能力,可用于评价虾肉的色泽、口味、嫩度、弹性和咀嚼性等指标。冻藏过程中虾肉的持水力有所下降,使得解冻后的红虾汁液严重流失,造成红虾品质下降,因此测定不同贮藏条件下红虾的持水力变化具有重要意义。

电场微冻和普通微冻对舟山海捕红虾持水力的影响如图 3 所示。

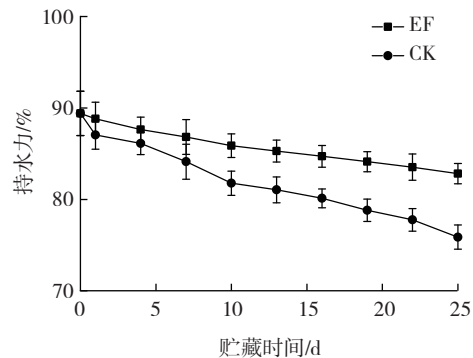


图 3 不同微冻贮藏条件下红虾持水力的变化

Fig.3 Changes of water-holding capacity of red shrimp under different micro-freezing storage conditions

由图 3 可知,随着贮藏时间的延长,两组持水力均

下降,而EF组下降速率较CK组更缓慢,在相同时间下,EF组产品的持水力都高于CK组。可能是叠加低压静电场后,水分子间氢键振动,抑制了冰点以下冰晶的生成,减少了冰晶对肌肉纤维的挤压^[23],从而降低了冰晶对肌肉组织的破坏。除此以外,由于低压静电场的杀菌作用能够延缓腐败菌对肌肉组织的破坏,减缓细胞汁液流失,表现出了更高的持水力。段伟文等^[24]的研究也证实了这一点,在研究冰温贮藏过程中添加2.5 kV 低压静电场对凡纳滨对虾的影响时,发现未添加低压静电场组的虾肉在贮藏期间由于微生物的生长繁殖以及冰温保鲜过程冰晶的形成会破坏肌肉组织结构,造成汁液流失;而加入低压静电场的虾肉样品在贮藏期内汁液流失明显减少,持水力上升。由此可以得出结论,在红虾的微冻贮藏过程中添加低压静电场能有效提高其持水力。

2.3 电场叠加微冻对红虾 TVB-N 值的影响

挥发性盐基氮指动物性食品由于酶和细菌的作用,在腐败过程中使蛋白质分解产生氨及胺类等碱性含氮物质,可当作衡量水产品新鲜程度的重要指标之一。通常,TVB-N 值越高,表明水产品体内蛋白质被破坏的程度越严重,水产品的新鲜程度越低。

不同贮藏过程中舟山海捕红虾 TVB-N 值变化情况如图 4 所示。

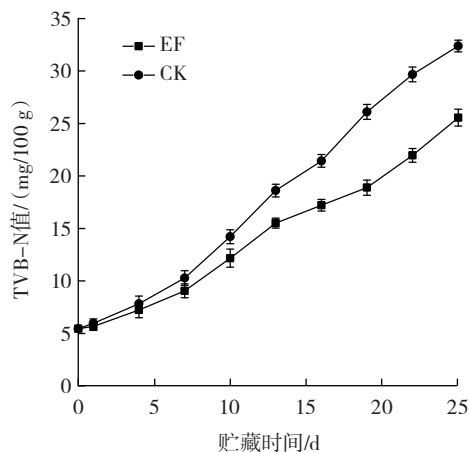


图 4 不同微冻贮藏条件下红虾 TVB-N 值的变化

Fig.4 Changes of TVB-N value in red shrimp under different micro-freezing storage conditions

由图 4 可知,随着贮藏时间的延长,两组的 TVB-N 值均不断上升,这是因为在贮藏期内,虾体内的内源酶和微生物会将蛋白质分解为氨及胺类等具有挥发性的含氮化合物^[25]。贮藏第 13 天时,EF 组和 CK 组的 TVB-N 值分别增加 10.07 mg/100 g 和 13.17 mg/100 g。根据 GB 2733—2015《食品安全国家标准 鲜、冻动物性水产品》规定,海水鱼虾的 TVB-N 值不应超过 30 mg/100 g,贮藏第 25 天时,CK 组虾肉的 TVB-N 值已高达 32.39 mg/100 g,超出可食用范围,而此时 EF 组的红虾

TVB-N 值仅为 25.56 mg/100 g,仍然为可食用状态,两组样品中 TVB-N 值有明显差异。这是因为在低压静电场作用下,EF 组红虾体内腐败微生物的繁殖速度变缓,内源酶活性也被抑制^[26],使得虾肉蛋白质的降解速率下降,从而延缓变质;而 CK 组红虾由于未添加低压静电场,腐败菌繁殖较快,TVB-N 值的的增长速率始终大于 EF 组。

2.4 电场叠加微冻对红虾盐溶性蛋白含量的影响

盐溶性蛋白存在于肌肉细胞中,又名肌原纤维蛋白,占总蛋白含量的 40%~60%,可分为肌球蛋白、肌动蛋白、肌动球蛋白和肌钙蛋白等。蛋白质变性导致盐溶性蛋白含量降低,盐溶性蛋白与肌动球蛋白杆部性质的改变相关^[27],因此盐溶性蛋白含量的变化能够为肌原纤维蛋白是否变性提供依据。

电场叠加微冻和普通微冻贮藏过程中舟山海捕红虾的盐溶性蛋白含量变化如图 5 所示。

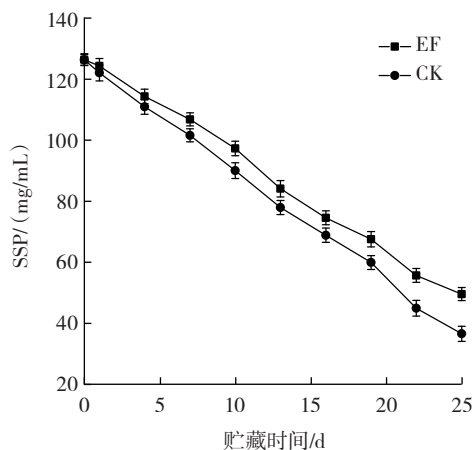


图 5 不同微冻贮藏条件下红虾 SSP 含量的变化

Fig.5 Changes of SSP content in red shrimp under different micro-freezing storage conditions

由图 5 可知,随着贮藏过程进行,CK 组和 EF 组的红虾盐溶性蛋白含量均持续下降,这是由于在贮藏过程中,红虾体内的腐败菌和内源酶会不断分解虾肉蛋白质,微冻产生的冰晶也会挤压肌肉纤维,破坏肌原纤维蛋白的结构^[28]。其中,CK 组的盐溶性蛋白含量下降较快,贮藏第 25 天时的盐溶性蛋白含量为 36.54 mg/mL,比贮藏开始时下降了 71.08%,而 EF 组红虾在贮藏中后期,盐溶性蛋白含量下降速率较 CK 组明显变缓,第 25 天时才降至 49.57 mg/mL。这与吴玉婷等^[26]的结论一致,表明盐溶性蛋白含量的下降与低压静电场的加入密不可分。张珊^[29]通过在凡纳滨对虾的微冻贮藏过程中施加低压静电场,发现在贮藏第 24 天时,电场微冻与普通微冻贮藏的虾肉总蛋白含量分别下降 30.64% 和 42.52%。这说明低压静电场的加入能够在一定程度上抑制盐溶性蛋白的变性程度,减缓蛋白质被分解的速度。

2.5 电场叠加微冻对红虾 SDS-PAGE 图谱的影响

红虾体内含有多种酶,能够催化其肌肉组织中的蛋白发生降解和变性,导致红虾在贮藏过程中不断软化,肉质腐败,最终无法食用。肌球蛋白重链、原肌球蛋白和肌动蛋白等都属于高盐溶性蛋白,随贮藏时间的延长降解程度最为强烈,所以红虾产品在贮藏过程中肌原纤维蛋白的变性程度可以作为评价其品质与新鲜度的重要指标。

图6为电场叠加微冻和普通微冻条件下,贮藏1、10、19 d 舟山海捕红虾的肌原纤维 SDS-PAGE 电泳图谱。

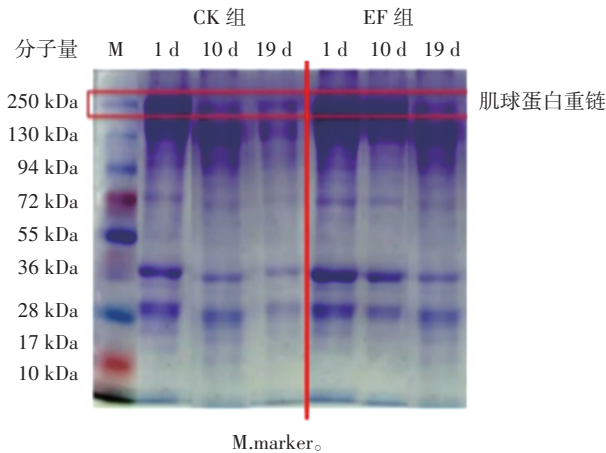


图6 不同微冻贮藏条件下红虾肌原纤维 SDS-PAGE 电泳图谱
Fig.6 SDS-PAGE profiles of red shrimp myofibrillar protein under different micro-freezing storage conditions

由图6可知,随着贮藏时间的延长,CK组肌球蛋白重链(250 kDa)发生了明显的降解,说明肌原纤维蛋白在贮藏过程中发生了降解,产生更多的小分子蛋白片段,而EF组红虾的肌球蛋白重链降解得较为缓慢,有研究表明肌球蛋白较不稳定,低压静电场的加入能够减少肌球蛋白重链的降解,维持肌球蛋白的稳定性^[30]。同时,CK组中30 kDa左右的原肌球蛋白也发生了一定程度的溶解,而EF组却表现出了较慢的降解趋势。李苑等^[17]分析三疣梭子蟹在普通微冻和电场微冻过程中的蛋白质变化情况,认为添加电场能有效减慢肌原纤维蛋白降解速度。一方面,电场的加入降低了腐败微生物的生长速度^[31],抵御了部分内源酶对蛋白质的破坏;另一方面,电场的加入会减缓冰晶的形成速率,可以减少对红虾肌肉细胞的挤压和破坏,有利于降低蛋白质的变性程度。

2.6 电场叠加微冻对红虾总巯基含量的影响

巯基是蛋白质分子中具有较高反应活性的一个基团,游离的巯基易氧化,多肽内部或多肽间形成二硫键,造成蛋白分子内部或蛋白间发生交联,降低蛋白质溶解性和消化率,产品劣变^[32],因此可以用巯基含量的增减反映蛋白质的变性程度。巯基含量越高,蛋白质

变性程度越低。

图7为电场微冻和普通微冻过程中舟山海捕红虾总巯基含量变化。

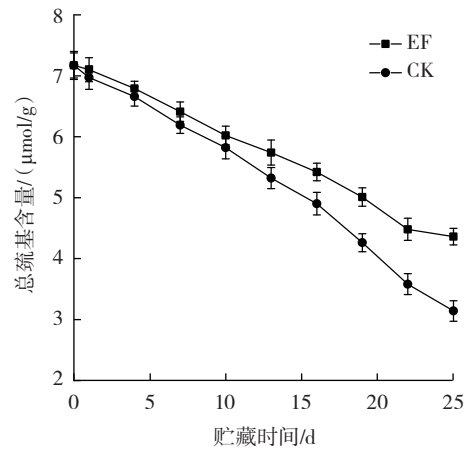


图7 不同微冻贮藏条件下红虾总巯基含量的变化

Fig.7 Changes of total sulfhydryl content in red shrimp under different micro-freezing storage conditions

由图7可知,EF组和CK组在贮藏期间,红虾样品的总巯基含量持续降低。贮藏前10 d两组总巯基含量相差不大,从第10天开始CK组红虾的总巯基含量下降幅度明显大于EF组。贮藏第25天时,EF组总巯基含量仍维持在初始水平的60.81%,CK组却只有初始水平的43.79%。这个结果证明红虾贮藏过程中总巯基含量的变化与是否施加低压静电场有密切联系。吴玉婷等^[26]在红虾低温贮藏过程中分别添加2 kV和3 kV的电场,贮藏前期电场对红虾巯基含量的影响不大,而到中后期3 kV组的红虾巯基含量高于2 kV组,两组均低于未添加电场组。这表明低压静电场的加入能够抑制微生物的生长和氧化还原酶活性,减少巯基酶偶联反应和氧化分解^[33],有助于保持红虾贮藏期间蛋白质不变性。

2.7 电场叠加微冻对红虾 TBA 值的影响

红虾具有很高的营养价值,体内含有大量的多不饱和脂肪酸,这些脂肪酸极不稳定,容易发生不同程度的氧化,使得虾肉的颜色、风味、质构和营养价值等发生变化。TBA值能够反映脂质氧化的程度,超过限量标准会使产品产生不愉快的挥发性气味,因此可作为判定红虾质量的重要指标之一。

电场叠加微冻和普通微冻对舟山海捕红虾 TBA 值的影响如图8所示。

由图8可知,在整个贮藏期间,两组红虾的TBA值均不断升高,这主要是由于红虾体内酶和微生物对虾肉的破坏作用,造成了脂肪氧化^[34]。贮藏前10 d,两组的TBA值比较接近。从第10天开始到贮藏结束,未添加低压静电场的CK组TBA值上升速度明显加快。第25天时,CK组和EF组的TBA值分别为

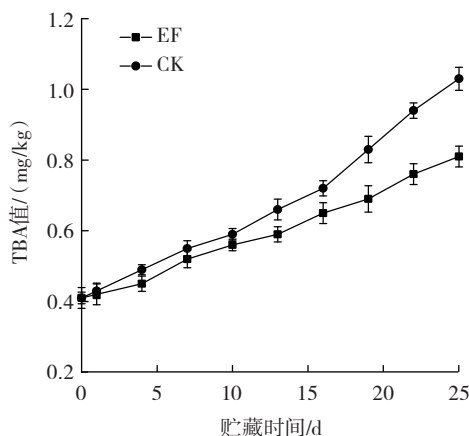


图8 不同微冻贮藏条件下红虾 TBA 值的变化

Fig.8 Changes of TBA value in red shrimp under different micro-freezing storage conditions

1.03 mg/kg 和 0.81 mg/kg, 较第 0 天分别增长了 0.62 mg/kg 和 0.40 mg/kg。由此可以看出添加低压静电场后红虾的 TBA 值增长速度放缓。梁瑞萍等^[11]测定不同贮藏条件下蓝点马鲛鱼的 TBA 值,第 28 天时电场微冻和普通微冻贮藏条件下的鱼体内 TBA 值分别为 1.30 mg/100 g 和 1.81 mg/100 g,尤其在贮藏中后期普通微冻组样品的 TBA 值上升速率明显加快,这与本研究得出的结果一致。随着微冻时间延长,虾体内结成的冰晶体积增大,破坏虾肉组织和细胞。低压静电场的加入一方面能够降低红虾体内腐败微生物的生长速率,抑制酶活性,减缓脂肪氧化^[16];另一方面,低压静电场可以抑制冰晶的形成速率,降低其对肌肉组织的破坏程度。因此,低压静电场联合微冻贮藏能够有效延长红虾的保存期。

3 结论

相较于普通微冻贮藏,低压静电场叠加微冻贮藏方式能够更好地保持舟山海捕红虾的鲜度品质,延缓微生物生长,控制酶活性,降低其对肌肉组织的破坏,减少脂肪氧化和汁液流失。经低压静电场处理后,虾肉样品体内的冰晶形成速率下降,达到贮藏终点时持水力仍能达到 82.82%,肌原纤维蛋白也有较慢的降解与聚集,有助于保持虾肉的蛋白活性和功能特性。TVB-N 值和 TVC 均未超出限量标准,脂肪氧化程度明显降低,红虾仍能食用。在微冻贮藏过程中添加低压静电场可以降低红虾的劣变速度,延长保存期,该结果为水产品保鲜提供了新的思路。

参考文献:

[1] 薛利建,贺开挺,徐开达,等.东海中华管鞭虾种群动态及持续渔获量分析[J].福建水产,2009,31(4):48-54.
XUE Lijian, HE Zhouting, XU Kaida, et al. Population dynamics and estimation of sustainable yield for *Solenocera crassicornis* in the

East China Sea[J]. Journal of Fujian Fisheries, 2009, 31(4): 48-54.

[2] 贾喆,刘欣妍,张肖瑕,等.中华管鞭虾不同部位虾青素的提取及特征分析[J].食品工业,2021,42(4):184-187.
JIA Zhe, LIU Xinyan, ZHANG Xiaoxia, et al. Extraction and evaluation of astaxanthin extracted from different parts of *Penaeus sinensis*(*Solenocera crassicornis*)[J]. The Food Industry, 2021, 42(4): 184-187.

[3] 胡晓梦.低温等离子体对中华管鞭虾品质影响及保鲜机理的研究[D].舟山:浙江海洋大学,2021.
HU Xiaomeng. Effect of low temperature plasma on the quality of *Penaeus chinensis* and its preservation mechanism[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2021.

[4] 郑稳,庄文静,宫萱,等.冷藏和微冻贮藏对大口黑鲈鱼品质的影响[J].食品与发酵工业,2024,50(5):218-225.
ZHENG Wen, ZHUANG Wenjing, GONG Xuan, et al. Effect of chilling and superchilling storage on quality of *Micropterus salmoides*[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(5): 218-225.

[5] DIBIRASULAEV M A, BELOZEROV G A, DIBIRASULAEV D M, et al. Stepwise cooling and thickness of sliced pineapple fruit in subcooling tolerance[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, 1052(1): 012023.

[6] 庄文静,包建强,郑稳,等.微冻复合保鲜技术在水产品中的应用研究进展[J/OL].食品与发酵工业:1-11[2023-05-23].https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.035506.
ZHUANG W J, BAO J Q, ZHENG W, et al. Research progress on application of superchilling composite preservation technology in aquatic products[J/OL]. Food and Fermentation Industries: 1-11 [2023-05-23]. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.035506.

[7] 张家玮.低压静电场协同低温对舟山带鱼保鲜效果的研究[D].舟山:浙江海洋大学,2021.
ZHANG Jiawei. Study on preservation effect of low-voltage electrostatic field combined with low temperature on hairtail in Zhoushan [D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2021.

[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.
YAN Xiaojing. Study on the effect of high voltage electrostatic field on the quality change of beef during ripening[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021.

[9] KO W C, YANG S Y, CHANG C K, et al. Effects of adjustable parallel high voltage electrostatic field on the freshness of tilapia (*Oreochromis niloticus*) during refrigeration[J]. LWT - Food Science and Technology, 2016, 66: 151-157.

[10] XU C C, YU H, XIE P, et al. Influence of electrostatic field on the quality attributes and volatile flavor compounds of dry-cured beef during chill storage[J]. Foods, 2020, 9(4): 478.

[11] 梁瑞萍,谢超,王益男.低压静电场协同低温保鲜技术对蓝点马鲛贮藏过程中品质变化的影响[J].浙江海洋大学学报(自然科学版),2020,39(6):517-525,537.
LIANG Ruiping, XIE Chao, WANG Yinan. The effect of low-voltage electrostatic field and low-temperature preservation technology on the quality changes of *Scorpaenopsis niphonius* during storage [J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2020, 39(6): 517-525, 537.

[12] XIE Y, ZHOU K, CHEN B, et al. Synergism effect of low voltage electrostatic field and antifreeze agents on enhancing the qualities of frozen beef steak: Perspectives on water migration and protein aggregation[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 84: 103263.

[13] 徐纯.低压静电场结合低温对草莓保鲜机理研究[D].无锡:江南大学,2022.

- XU Chun. Study on the fresh-keeping mechanism of strawberry by low voltage electrostatic field combined with low temperature[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.
- [14] 李甜, 张珊, 李孟华, 等. 低压静电场对凡纳滨对虾多酚氧化酶性质影响[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(19): 52-58.
- LI Tian, ZHANG Shan, LI Menghua, et al. Effect of low voltage electrostatic field on polyphenol oxidase of *Litopenaeus vannamei* [J]. Food Research and Development, 2022, 43(19): 52-58.
- [15] 韩毅, 林可情, 王纪鹏, 等. 不同破碎工艺对低脂肉糜品质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(19): 68-77.
- HAN Yi, LIN Keqing, WANG Jipeng, et al. Comparison of different crushing processes on the quality of low fat minced meat[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(19): 68-77.
- [16] 岳开华, 张业辉, 刘学铭, 等. 冻藏温度对海鲈鱼鱼糜蛋白生化指标及其凝胶特性的影响[J]. 现代食品科技, 2016, 32(6): 225-232.
- YUE Kaihua, ZHANG Yehui, LIU Xueming, et al. Effect of storage temperature on biochemical indicators and gel properties of sea bass surimi[J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(6): 225-232.
- [17] 李苑, 王丽平, 余海霞, 等. 电场对三疣梭子蟹微冻贮藏过程中品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(5): 192-197.
- LI Yuan, WANG Liping, YU Haixia, et al. Effect of electric field on the quality of *Portunus trituberculatus* during superchilling[J]. Food Research and Development, 2018, 39(5): 192-197.
- [18] ABE B T, WESSELHOEFT R A, CHEN R, et al. Circular RNA migration in agarose gel electrophoresis[J]. Mol Cell, 2022, 82(9): 1768-1777.
- [19] CAI L Y, LENG L P, CAO A L, et al. The effect of chitosan-essential oils complex coating on physicochemical, microbiological, and quality change of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) fillets[J]. Journal of Food Safety, 2018, 38(1): e12399.
- [20] REZAEI F, SHEKARFOROUSH S S, HOSSEINZADEH S, et al. The effect of carboxymethyl cellulose coating incorporated with clove oil nanoemulsion on quality of shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during refrigerated storage[J]. Iranian Journal of Veterinary Research, 2021, 22(2): 129-135.
- [21] 沈俊. 空间电场协同低温对鲈鱼保鲜效果及机理研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2022.
- SHEN Jun. Study on the effect and mechanism of space electric field combined with low temperature on the preservation of mackerel[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2022.
- [22] OHSHIMA T, TANINO T, GUIONET A, et al. Mechanism of pulsed electric field enzyme activity change and pulsed discharge permeabilization of agricultural products[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2021, 60(6): 060501.
- [23] 李志鹏. 中华管鞭虾内源酶活性变化及其作用机制研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2022.
- LI Zhipeng. Changes of endogenous enzyme activities and their mechanism of action in *Penaeus chinensis*[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2022.
- [24] 段伟文, 全沁果, 高静, 等. 低压静电场结合气调包装对凡纳滨对虾冰温贮藏期品质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(13): 252-259.
- DUAN Weiwen, QUAN Qinguo, GAO Jing, et al. Effect of low-voltage electrostatic field combined with modified atmosphere packaging on the quality of *Litopenaeus vannamei* during controlled freezing-point storage[J]. Food Science, 2019, 40(13): 252-259.
- [25] OLATUNDE O O, DELLA TAN S L, AHMAD SHIEKH K, et al. Ethanolic guava leaf extracts with different chlorophyll removal processes: Anti-melanosis, antibacterial properties and the impact on qualities of Pacific white shrimp during refrigerated storage[J]. Food Chemistry, 2021, 341: 128251.
- [26] 吴玉婷, 郑炜, 邱意忠, 等. 空间电场-微冻贮藏过程中红虾蛋白质特性的变化[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(20): 6569-6576.
- WU Yuting, ZHENG Wei, QIU Yizhong, et al. Changes of protein characteristics of *Solenocera crassicornis* during space electric field-partial freezing storage[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(20): 6569-6576.
- [27] 胡玥, 杨水兵, 余海霞, 等. 微冻保鲜方法对带鱼品质及组织结构的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(18): 290-297.
- HU Yue, YANG Shuibing, YU Haixia, et al. Effect of superchilling on the quality and muscle tissue structure of *Trichiurus haumela*[J]. Food Science, 2016, 37(18): 290-297.
- [28] SOMJIT K, RUTTANAPORNWAREESAKUL Y, HARA K, et al. The cryoprotectant effect of shrimp chitin and shrimp chitin hydrolysate on denaturation and unfrozen water of lizardfish surimi during frozen storage[J]. Food Research International, 2005, 38(4): 345-355.
- [29] 张珊. 低压静电场对凡纳滨对虾保鲜效果研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2021.
- ZHANG Shan. Study on preservation effect of low voltage electrostatic field on *Litopenaeus vannamei*[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2021.
- [30] 谢菲菲. 电场辅助(超)冰温贮藏对生鲜肉品质的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2022.
- XIE Feifei. Effect of electric field assisted (super) ice temperature storage on the quality of raw meat[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022.
- [31] MURTHY L N, PANDA S K, SHAMASUNDAR B A. Physico-chemical and functional properties of proteins of tilapia (*Oreochromis mossambicus*)[J]. Journal of Food Process Engineering, 2011, 34(1): 83-107.
- [32] ÖZALP ÖZEN B, SOYER A. Effect of plant extracts on lipid and protein oxidation of mackerel (*Scomber scombrus*) mince during frozen storage[J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 55(1): 120-127.
- [33] PAN C, SUN K T, YANG X Q, et al. Insights on *Litopenaeus vannamei* quality deterioration during partial freezing storage from combining traditional quality studies and label-free based proteomic analysis[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 112: 104655.
- [34] 石径. 中华管鞭虾冻藏过程中品质变化规律及机理研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- SHI Jing. Study on the law and mechanism of quality change during the freezing of *Solenocera crassicornis*[D]. Beijing: China Agriculture University, 2018.