



# 低压静电场对凡纳滨对虾保鲜效果的研究

张 珊, 林慧敏\*, 邓尚贵

(浙江海洋大学食品与医药学院, 浙江 舟山 316022)

**摘要:** 以冰鲜凡纳滨对虾为研究对象, 低压静电场与冰箱为保鲜介质, 探究相同温度下( $-7^{\circ}\text{C}$ )二者对凡纳滨对虾保鲜效果的差异, 测定凡纳滨对虾贮藏期间pH值、TVB-N值、蒸煮损失率、质构的变化、色差、氨基酸含量、微观结构和感官评分。实验结果表明, 低压静电场处理后凡纳滨对虾的感官评分更优; 低压静电场通过抑制虾肉中腐败微生物的生成, 使凡纳滨对虾pH值与TVB-N值、蒸煮损失率都始终比对照组的虾更低。质构测试发现低压静电场也能减缓蛋白质的降解, 能较好地维持虾肉原本的口感。通过苏木精-伊红染色和扫描电镜观察凡纳滨对虾微观结构, 发现低压静电场中凡纳滨对虾的肌纤维束更紧密, 结构组织更加完整光滑。普通冰箱微冻保鲜添加低压静电场能更好地保持凡纳滨对虾的品质, 延长对虾的货架期, 为未来凡纳滨对虾的贮藏保鲜方法提供可行的技术条件。

**关键词:** 凡纳滨对虾; 低压静电场; 微冻保鲜; 微观结构

中图分类号: TS 254.4

文献标志码: A

文章编号: 1005-9989(2020)10-0141-07

DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2020.10.024

## Effect of Low Voltage Electrostatic Field on Fresh-Keeping of *Litopenaeus Vannamei*

ZHANG Shan, LIN Huimin\*, DENG Shanggui

(College of Food and Medicine, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China)

**Abstract:** The effects of low-voltage electrostatic field and refrigerator on the preservation of *Litopenaeus vannamei* at the same temperature ( $-7^{\circ}\text{C}$ ) were studied. The pH value, TVB-N value, cooking loss rate, texture change, color difference, amino acid content, microstructure and sensory score of *Litopenaeus vannamei* during storage were determined. The results showed that the sensory scores of *Litopenaeus vannamei* treated by low-voltage electrostatic field were better. The pH value, TVB-N value and cooking loss rate of *Litopenaeus vannamei* were always lower than those of the control group. Texture test showed that low-voltage electrostatic field can also slow down the degradation of protein, which can better maintain the original taste of shrimp meat. The microstructure of *Litopenaeus vannamei* was observed by

收稿日期: 2020-06-10

\*通信作者

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0400105-05)。

作者简介: 张珊(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品加工与贮藏。

hematoxylin eosin staining and scanning electron microscope. It was found that the muscle fiber bundles of *Litopenaeus vannamei* were more compact and the structure was more complete and smooth in the low-voltage electrostatic field. Adding low-voltage electrostatic field to ordinary refrigerator can better maintain the quality of *Litopenaeus vannamei*, and extend the shelf life of shrimp, which provides feasible technical conditions for the future storage and preservation methods of *Litopenaeus vannamei*.

**Key words:** *Litopenaeus vannamei*; low voltage electrostatic field; micro-frozen preservation; microstructure

随着生活水平的不断提高, 虾类以其肉嫩鲜美的口感与营养丰富特点赢得世界各地人们的广泛热爱。虾体的蛋白质含量高且含有缬氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、赖氨酸等多种必需氨基酸, 脂肪的含量比较低, 具有极高的营养价值<sup>[1]</sup>。近年来全球各地虾类养殖业迅速发展, 虾的产量大幅度提高, 但由于虾含水量高、肌肉组织柔软, 且含有大量的酶和酪氨酸, 极易发生氧化反应使虾体发生褐变, 加速虾体内的微生物腐败, 从而减少或失去了食用和营养价值, 因此新型虾类保鲜技术的研发是食品科学研究的重要课题<sup>[2]</sup>。目前低温保鲜技术应用在凡纳滨对虾中主要分为冷藏保鲜、冰温保鲜、微冻保鲜、冻藏保鲜四大类, 但都存在解冻时损耗过大、保鲜效果不理想等问题。

研究和开发无害、高效的保鲜介质, 在社会经济的可持续发展过程中具有积极的促进作用。与上述保鲜技术相比, 低压静电场技术具有冻结效率高、设备成本低、操作简单等优点。电场通过影响食品的内部游离电子效应而抑制酶活, 该方法还释放臭氧, 臭氧通过氧化活性使微生物失活或减少并杀死腐败和致病微生物。随着静电场强度的增加, 更多的空气被离子化, 从而增强了抗菌性能<sup>[3]</sup>。在低温条件下, 电场还可延缓冰晶的形成, 减小冰晶的尺寸, 从而降低冰晶对肌肉微观结构的破坏作用<sup>[4]</sup>。静电场作用可使食品中常见的腐败菌如大肠杆菌、李斯特菌等细胞表面的平整度降低, 进而抑制其生物膜的形成以及生长繁殖, 且抗菌性能与电场强度正相关<sup>[5]</sup>。例如李里特等<sup>[6]</sup>将低压静电场作为一种保鲜介质应用到黄瓜和豇豆的保鲜中, 证明低压静电场能较好地延缓果实中水分的减少及推迟豇豆感官品质的降低。李侠等<sup>[7]</sup>研究了在低压静电场中对解冻牛肉的品质影响, 发现在此条件下能极大缓解冷冻条件下冰晶生成对牛肉品质的破坏。将微冻条件

下添加低压静电场技术对贮藏过程中凡纳滨对虾的品质影响, 与普通冰箱微冻保鲜效果做对比, 旨在研究低压静电场保鲜效果的优势, 为低压静电场在凡纳滨对虾微冻保鲜的应用提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 主要材料与试剂

大小均匀的鲜活凡纳滨对虾: 市售; 盐酸标准溶液、氧化镁、硼酸: 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; 电镜固定液、苏木素-伊红染液: 武汉谷歌生物科技有限公司; 甲基红、溴甲酚绿: 分析纯, 天津市福晨化学试剂厂; 混合指示剂: 分别配制0.1%甲基红乙醇溶液和0.5%溴甲酚绿乙醇溶液, 两溶液等体积混合, 阴凉处保存期为3个月以内。

### 1.2 主要仪器与设备

低压静电场试验机: 浙江驰力科技公司; Hair变温冰箱: 海尔集团公司; PHS-25型酸度计: 梅特勒-托利多公司; FSH-2型可调高速匀浆机: 常州国华电器公司; Kjeltac 8400全自动凯氏定氮仪: 美国FOSS公司; TMS-PRO型质构仪: 美国FTC公司; CM-5分光测色仪: 日本柯尼卡美能达公司; BR4I离心机: 美国Thermo公司; 液相色谱仪: 美国Agilent公司; JJ-12J脱水机、JB-P5包埋机: 武汉俊杰电子有限公司; RM2016病理切片机: 上海徕卡仪器有限公司; 正置光学显微镜: 日本尼康公司; U8010扫描电子显微镜: 美国HITACHI公司。

### 1.3 实验方法

**1.3.1 材料预处理** 将市售鲜活凡纳滨对虾充氧加冰在30 min内保活运送到实验室, 剔除死亡、变色、不完整的个体后用超纯水冲洗2次, 再加碎冰使其猝死, 挑选体表有光泽、肢体完整、个体差异不大的对虾, 用冰水(0~4℃)清洗后沥干。

实验分组: 将清洗好的凡纳滨对虾装入无菌

密封袋中再放入保鲜盒内,写好标签分为2组:一组为放入在低压静电场条件下贮藏的LVEF(Low voltage electrostatic field)组,一组为放入在冰箱条件下贮藏的对照组,2组样品贮藏温度均为-7℃。将购买虾的当天记作实验第0天,每隔4 d对虾的各项指标取样检测,各鲜度指标分别进行3次检测,从而对2组保鲜效果进行科学的评价分析。

1.3.2 pH测定 参考GB 5009.237—2016<sup>[8]</sup>国标中食品pH值的测定方法。用研钵捣碎去头去虾线去壳后的虾肉,称取5 g(精确到0.01 g),再倒入45 mL的蒸馏水,高速匀浆1 min后,放置30 min充分浸出,再将pH计放入过滤后的滤液中测定pH值。每隔4 d取样检测,每个条件平行3次,取平均值。

1.3.3 蒸煮损失率测定 采集解冻后虾的背部肌肉称取质量30 g( $w_0$ ),装入自封袋中,在76℃恒温水浴锅中蒸煮至中心温度达到70℃,继续保持15 min,冷却至室温,用滤纸吸干虾肉表面水分,称量虾肉质量( $w_1$ ),每隔4 d取样检测,每个条件平行3次,取平均值。蒸煮损失率计算公式为:

$$\text{蒸煮损失率}(\%) = [(w_0 - w_1) / w_0] \times 100$$

1.3.4 TVB-N测定 利用Kjeltec 8400自动凯氏定氮仪器进行测定,实验时按GB 5009.228—2016的方法测定TVB-N<sup>[9]</sup>,每隔4 d取样检测,每组做3个平行样,取平均值。

1.3.5 质构特性的测定 使用TMS-PRO物性分析仪(平底柱形探头直径5 mm)测定对虾虾仁第二腹节背部肌肉(去壳后)。参数设定为:上升高度15 mm,起始力度0.6 N,形变量30%,感应力量程为60 N,探头速度为60 mm/min。每隔4 d取样检测,每个条件平行3次,以平均值作为该样品的质构特性值。

1.3.6 色差测定 在室温环境下,选用CM-5型分光测色仪测定凡纳滨对虾第二腹节侧面的L、a、b值,仪器测定前需要进行标准的白板校正和零校准。每隔4 d取样检测,每个条件取3个样品,取平均值作为最终色差值的结果。

$$\Delta E^* = \sqrt{(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2}$$

式中: L为测定样品的L值;

$L_0$ 为新鲜样品的L值;

a为测定样品的a值;

$a_0$ 为新鲜样品的a值;

b为测定样品的b值;

$b_0$ 为新鲜样品的b值。

1.3.7 水解氨基酸的含量测定 参照国标GB 5009.124—2016<sup>[10]</sup>食品中氨基酸的测定,以L-8900型氨基酸自动分析仪对样品进行氨基酸的含量测定和分析。

1.3.8 苏木精-伊红染色法观察组织结构 取凡纳滨对虾背部第二节肌肉,切成长宽为2 mm的长条肉块,放入4%多聚甲醛溶液固定24 h以上,梯度乙醇脱水,包埋机内进行包埋并切片,放入二甲苯和梯度乙醇中脱蜡,切片放入Harris苏木素染液和伊红染液中染色3~8 min,随后将切片置于梯度酒精及二甲苯中脱水至透明并封片,用电子显微镜观察切片微观组织(显微镜放大倍数为200倍)。

1.3.9 扫描电镜观察微观组织结构 试样用3%戊二醛固定3 h,再用蒸馏水冲洗1 h,之后用乙醇脱水。干燥后的样品被安装在一个青铜短柱上,并用离子溅射仪镀金。用扫描电子显微镜在500倍率下观察样品的纤维横截面。

1.3.10 感官评定 根据对虾的感官鉴定标准,参考Wei-Hsuan Hsu<sup>[11]</sup>的方法,根据表1凡纳滨对虾感官评定标准,由6名小组成员进行感官评价,分别从各组虾的气味、虾肉组织以及体表色泽3个特征进行评价打分,每一项各占3分,鲜度评分最高值可达9分(很新鲜)、低至0分(彻底腐败)、6分为是否可食用的分界点。

表1 南美白对虾感官评定标准

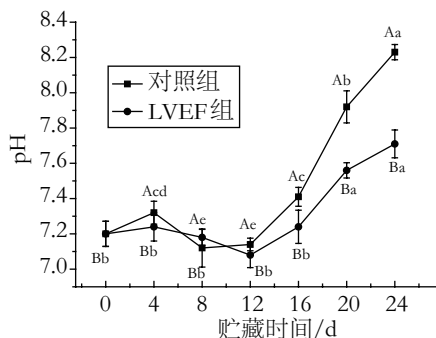
| 项目   | 3分                  | 2分                  | 1分                | 0分             |
|------|---------------------|---------------------|-------------------|----------------|
| 虾肉组织 | 虾肉纹理清晰且有弹性,虾肉与壳连接紧密 | 虾肉弹性、色泽较好,肉与壳连接稍微松弛 | 虾肉弹性较差,肉与壳连接松弛    | 虾肉组织松软,肉质发黄    |
| 体表色泽 | 体表有关泽,头胸甲与体节紧密连接    | 壳出现轻微红色或黑色,头尾部出现黑斑  | 虾体无原有色泽,体表出现大面积黑斑 | 体表色泽灰暗,甲壳与虾体分离 |
| 气味   | 具有海虾固有气味、无异味        | 略有异味                | 异味较强              | 异味强烈           |

#### 1.4 数据处理

采用Excel 2007进行数据处理,采用Origin 8.5对数据作图,采用SPSS Statistics 20分析数据, $P < 0.05$ 差异显著, $P > 0.05$ 无显著差异,所有样品进行3次平行实验。

## 2 结果与分析

### 2.1 凡纳滨对虾贮藏期间pH变化



注：图中不同字母表示数据之间有显著性差异 ( $P < 0.05$ )，其中大写字母表示同1 d内对照组与LVEF组之间比较，小写字母表示同一贮藏条件下0~24 d内比较。图1~图7同。

图1 凡纳滨对虾贮藏期间pH变化

pH值变化被当作与海鲜新鲜度密切相关的可靠指标。pH下降是由糖酵解反应产生乳酸和磷酸等酸性成分引起，它是由ATP和相关产物的降解而产生。pH值升高可能归因于碱性产物的存在，包括氨、三甲胺、吲哚和组胺<sup>[12]</sup>。如图1所示，鲜虾的初始pH为7.20，虾总体呈先下降后上升的趋势，与凌萍华等<sup>[13]</sup>的研究结果相同。在0~12 d内，2组凡纳滨对虾的pH值差异不显著 ( $P > 0.05$ )，在12~24 d内，2组对虾pH值有显著性差异 ( $P < 0.05$ )。虾类产品随着贮藏时间品质变劣，pH先略微上升，原因可能是低温使微生物生长受限，与新鲜时差别不大。对照组在第8天明显变小，后变大。而LVEF组的这一现象则向后推移，在第12天pH降至最小值，后再变大。造成这一现象的原因可能是低压静电场抑制了凡纳滨对虾体内微生物生长繁殖速率，减缓了乳酸、磷酸及胺类物质的生成速率。这一结果表明，低压静电场对凡纳滨对虾的保鲜效果优于普通冰箱的保鲜效果，能较好地保持凡纳滨对虾的品质。

### 2.2 凡纳滨对虾贮藏期间蒸煮损失率变化

虾肉中的水分在微冻条件下形成冰晶，对肌肉组织造成机械损伤，大量可溶性蛋白解冻时随汁液流失，使虾肉的营养价值下降。如图2所示，新鲜虾的蒸煮损失率为10.67%，LVEF组与对照组的蒸煮损失率都呈逐渐稳定升高的趋势。第20天的时候LVEF组的蒸煮损失率为18.21%，对照组为23.4%，可以看出凡纳滨对虾在低压静电场贮藏至

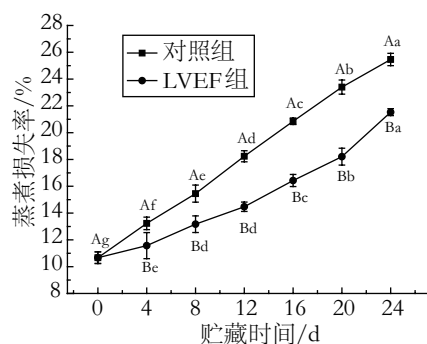


图2 凡纳滨对虾贮藏期间蒸煮损失率变化

20 d时对其蒸煮损失率影响有显著差异 ( $P < 0.05$ )。第20天之后，LVEF组的蒸煮损失率斜率大于对照组。原因可能是在冻藏后期，虾肉中微生物大量繁殖，使得虾肉细胞间隙增大，到某一程度时，与静电场电子发生共振作用，引起水结构及结合状态发生变化，从而增加了水分的流失，使得后期LVEF组的蒸煮损失率斜率增大。但总的结果表明，虾肉在低压静电场的贮藏过程中受到冰晶机械损伤的破坏程度最小，使得解冻时较好地抑制了汁液流失。

### 2.3 凡纳滨对虾贮藏期间TVB-N的变化

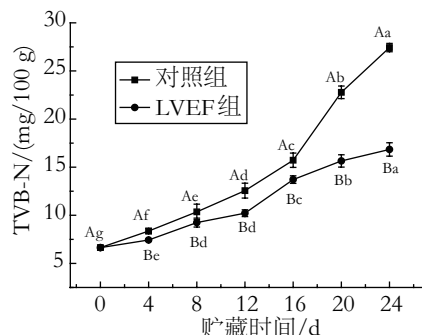


图3 凡纳滨对虾贮藏期间TVB-N的变化

水产品存在自身酶和腐败细菌，所含蛋白质被分解为氨和胺等挥发性含氮物质，导致水产品的劣变。当鲜度下降时，TVB-N会随之上升。TVB-N是南美白对虾质量的参考指标，海虾一级、二级、三级鲜度的TVB-N值上限分别为15、20、30 mg/100 g，当TVB-N值超过规定的三级鲜度时，一般认为不可食用<sup>[14]</sup>。测得新鲜凡纳滨对虾的初始TVB-N值为6.64。与孔巧香等<sup>[15]</sup>研究结果类似，在本实验贮藏过程中，随着储存时间的延长，凡纳滨对虾TVB-N的变化均有所增加。其中对照组上升最快，第24天为27.43 mg/100 g，临近二级鲜度上限。LVEF组在研究中上升缓慢，第24天为16.84 mg/100 g，仍在安全可食用范

围。对照组和LVEF组变化相对一致,都随时间变化而上升,但LVEF组后期TNB-N值变化呈缓慢上升趋势,原因可能是后期低压静电场的游离电子与微冻结合,具有较强的腐败抑制作用。

#### 2.4 凡纳滨对虾贮藏期间质构变化

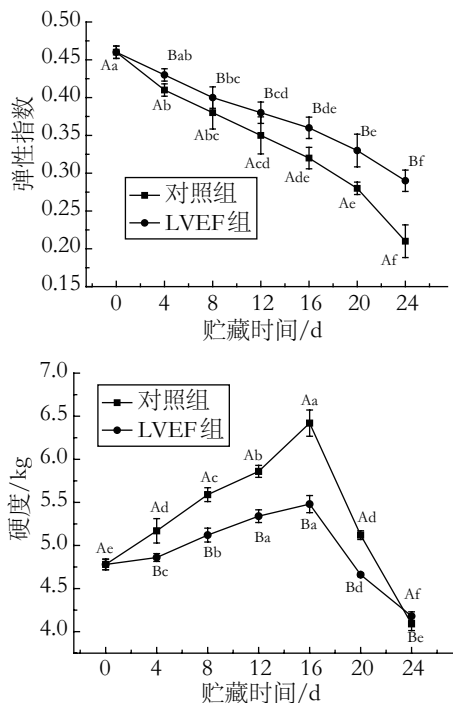


图4 凡纳滨对虾贮藏期间弹性和硬度变化

质构测定对海产品而言至关重要,与主要结构蛋白的降解密切相关。弹性是样品第一次被压缩发生形变的弹性指数<sup>[16]</sup>。在贮藏期间,2组样品的弹性指数呈下降的趋势,LVEF组的弹性指数高于对照组,且下降趋势较对照组更为稳定。原因可能是贮藏过程中虾体内肌原纤维蛋白、肌动蛋白被微生物分解,使虾体内蛋白质结构发生变化,从而使虾体变软<sup>[18]</sup>。硬度是指样品首次被压缩受到的最大峰压力<sup>[16]</sup>。2组样品都在第16天达到硬度的最大值,对照组为6.42 kg,LVEF组为5.48 kg。在贮藏期间,虾的硬度呈先上升后下降的趋势,原因可能是虾在死后有僵直、自溶及腐败3个阶段<sup>[17]</sup>。可以看出对照组硬度值比LVEF组硬度值的波动幅度更大,二者有显著差异( $P<0.05$ )。

2组数据表明了低压静电场通过抑制微生物的生长繁殖,延缓了虾体的腐败变质程度,降低了虾体内蛋白质的降解程度,使LVEF组的弹性指数高于对照组;同时减缓了虾体的僵直、自溶及腐败程度,从而使LVEF组的硬度值低于对照组。

#### 2.5 凡纳滨对虾贮藏期间色差变化

凡纳滨对虾发生自溶现象时也伴随着虾体颜色的变化,而虾体颜色的变化是消费者判断虾品质好坏的主要依据之一。凡纳滨对虾发生黑变的

表2 凡纳滨对虾贮藏期间色差变化

| 贮藏时间/d |     | 0                        | 4                        | 8                        | 12                       | 16                       | 20                       | 24                       |
|--------|-----|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 对照组    | L*  | 39.07±0.19 <sup>a</sup>  | 37.67±0.32 <sup>a</sup>  | 35.49±0.33 <sup>ab</sup> | 31.69±0.27 <sup>bc</sup> | 29.37±0.31 <sup>bc</sup> | 28.47±0.17 <sup>bc</sup> | 26.49±0.17 <sup>cd</sup> |
|        | a*  | -1.57±0.13 <sup>cd</sup> | -1.21±0.10 <sup>cd</sup> | -0.78±0.06 <sup>cd</sup> | -0.48±0.10 <sup>cd</sup> | 0.05±0.04 <sup>c</sup>   | 1.03±0.10 <sup>b</sup>   | 1.87±0.14 <sup>a</sup>   |
|        | ΔE* | 0                        | 1.69±0.22 <sup>e</sup>   | 4.66±0.46 <sup>d</sup>   | 8.17±0.43 <sup>bc</sup>  | 11.38±0.39 <sup>bc</sup> | 13.28±0.52 <sup>ab</sup> | 15.85±0.65 <sup>a</sup>  |
| LVEF组  | L*  | 39.07±0.19 <sup>a</sup>  | 38.35±0.26 <sup>a</sup>  | 37.79±0.38 <sup>a</sup>  | 36.87±0.44 <sup>a</sup>  | 34.65±0.29 <sup>ab</sup> | 33.83±0.12 <sup>ab</sup> | 33.17±0.32 <sup>ab</sup> |
|        | a*  | -1.57±0.13 <sup>cd</sup> | -1.49±0.11 <sup>cd</sup> | -1.38±0.08 <sup>c</sup>  | -1.25±0.07 <sup>c</sup>  | -1.02±0.14 <sup>c</sup>  | -0.34±0.08 <sup>ab</sup> | 0.42±0.07 <sup>a</sup>   |
|        | ΔE* | 0                        | 0.74±0.38 <sup>d</sup>   | 1.32±0.33 <sup>cd</sup>  | 2.29±0.48 <sup>c</sup>   | 4.58±0.28 <sup>ab</sup>  | 5.59±0.48 <sup>a</sup>   | 6.50±0.58 <sup>a</sup>   |

主要原因是,虾体在多酚氧化酶的催化作用下产生醌类物质,醌类物质会快速与氨基酸结合生成黑褐色的化合物,从而使对虾产生黑变<sup>[19]</sup>。凡纳滨对虾的色差变化如表2所示。对照组和LVEF组的 $\Delta E^*$ 值和 $a^*$ 值逐渐上升,而 $L^*$ 值呈逐渐下降的趋势。在24 d时对照组中 $L^*$ 、 $a^*$ 和 $\Delta E^*$ 分别为26.49、1.87和15.85,而LVEF组的 $L^*$ 、 $a^*$ 和 $\Delta E^*$ 分别为33.17、0.42和6.5,二者具有显著差异( $P<0.05$ )。对照组的 $a^*$ 和 $\Delta E^*$ 数值上升比LVEF组的数值快,故对照组的黑变情况较LVEF组严重,腐败变质较快,说明低压静电场能有效抑制多酚氧化酶酶

活<sup>[4]</sup>,减轻凡纳滨对虾在贮藏期间的黑变情况,对虾的色差变化有明显的改善。

#### 2.6 凡纳滨对虾贮藏期间游离氨基酸含量变化

在贮藏过程中,虾体内微生物不断生长繁殖,当微生物数量达到一定程度时,虾体会释放出大量蛋白水解酶,使蛋白质降解为游离氨基酸。表3为贮藏第16天时不同贮藏条件下的游离氨基酸含量比较,可以看出与各组别氨基酸含量对照组>LVEF组>新鲜,原因可能是凡纳滨对虾内部电子与低压静电场中的游离电子发生共鸣作用,使微生物生长繁殖受到抑制,减少了虾体释放的

表3 凡纳滨对虾贮藏第16天时游离氨基酸含量变化

| 氨基酸种类     | 单位    | 对照组      | LVEF组    | 鲜虾       |
|-----------|-------|----------|----------|----------|
| 天冬氨酸(Asp) | mg/kg | 34253    | 33599.69 | 29431.65 |
| 谷氨酸(Glu)  | mg/kg | 26744.51 | 25327.84 | 22908.58 |
| 丝氨酸(Ser)  | mg/kg | 6139.73  | 6029.48  | 5242.76  |
| 甘氨酸(Gly)  | mg/kg | 11286.52 | 11083.94 | 11825.38 |
| 组氨酸(His)  | mg/kg | 4084.24  | 3840.12  | 3024.07  |
| 精氨酸(Arg)  | mg/kg | 15394.25 | 14103.35 | 14451.66 |
| 苏氨酸(Thr)  | mg/kg | 7160.20  | 6317.41  | 6255.04  |
| 丙氨酸(Ala)  | mg/kg | 9379.29  | 9938.20  | 8293.50  |
| 脯氨酸(Pro)  | mg/kg | 18080.35 | 17221.52 | 14752.54 |
| 酪氨酸(Tyr)  | mg/kg | 6147.09  | 5981.48  | 5304.09  |
| 缬氨酸(Val)  | mg/kg | 7430.70  | 7347.78  | 6346.87  |
| 蛋氨酸(Met)  | mg/kg | 4463.12  | 4456.38  | 3618.26  |
| 异亮氨酸(Ile) | mg/kg | 6979.47  | 6900.26  | 6087.45  |
| 亮氨酸(Leu)  | mg/kg | 11931.82 | 11764.85 | 10372.37 |
| 苯丙氨酸(Phe) | mg/kg | 7234.57  | 7064.17  | 6182.63  |
| 赖氨酸(Lys)  | mg/kg | 12829.71 | 12872.80 | 11185.81 |
| 总量        | g/kg  | 189.54   | 183.85   | 165.28   |

蛋白水解酶,所以LVEF组的游离氨基酸含量较对照组更低。说明微冻低压静电场条件下贮藏的凡纳滨对虾比普通微冻条件下贮藏的凡纳滨对虾品质更优,低压静电场能抑制虾类食品的腐败变质,延长食品的新鲜度。

## 2.7 凡纳滨对虾贮藏期间的苏木精-伊红染色观察组织结构

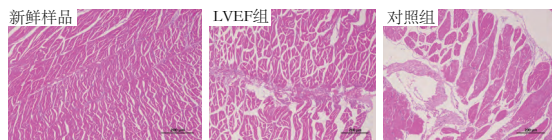


图5 贮藏16 d时新鲜虾肉、LVEF组和对照组的H&E染色图  
(放大倍数: 200×)

贮藏期间,微生物的增长繁殖释放的蛋白水解酶及贮藏期间的机械物理损伤都会对虾的肌肉组织结构造成破坏,但在微冻条件下对凡纳滨对虾肌肉组织危害最大的是虾体内水分凝结成的冰晶。图5为第16天时用苏木精-伊红染色法在电子显微镜下放大200倍观察不同贮藏条件下凡纳滨对虾肌肉组织结构的纵向剖面图。采用苏木精-伊红染色法能更好地观察到不同时期凡纳滨对虾中肌纤维走向与冰晶分布。新鲜的凡纳滨对虾组织结构平整光滑,无大的冰晶生成,组织间隙细小有序。在LVEF组的对虾结构组织间隙增大,有

较细较多冰晶生成,组织间隙相对有序。对照组则组织间隙明显,有较大的冰晶生成,肌肉纤维损伤严重,整体趋向无序性。水产品微冻条件下贮藏,理化性质也会随时间增长而改变。凡纳滨对虾体内理化性质的改变导致冰晶的重结晶现象,对虾体肌肉组织造成新的损伤。在普通微冻条件下添加低压静电场可以缓解凡纳滨对虾理化性质变化的程度,减少冰晶的生成,对微冻条件下贮藏的凡纳滨对虾肌肉结构组织起到了保护作用。

## 2.8 凡纳滨对虾贮藏期间的扫描电镜观察组织结构

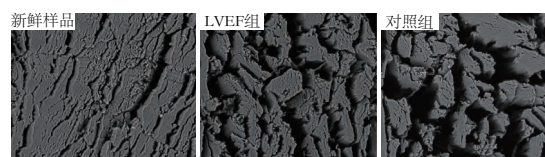


图6 贮藏16 d时新鲜虾肉、LVEF组和对照组的扫描电镜图  
(放大倍数: 500×)

图6为第16天时用扫描电镜放大500倍观察不同贮藏条件下凡纳滨对虾肌肉组织结构的横向剖面图。可以看出,新鲜的凡纳滨对虾肌肉组织整齐完善,肌肉纤维之间联系紧密。与新鲜虾肉样品相比,2组样品肌肉纤维均被拉伸,纤维束结构完整性受损。可以看出,对照组的肌肉间隙更大,被拉伸得更加严重,造成肌内膜大幅度撕裂。松散的肌肉结构导致解冻时蒸煮损失率上升,这与蒸煮损失率的结果相对应(图2)。而LVEF组的肌肉纤维束只发生了轻微拉伸,样品纤维束之间的间隙相对较窄,肌肉的微观结构相对更加完整<sup>[20]</sup>。此结果更好地验证了图5的结论。低压静电场中的电子能与凡纳滨对虾中的电子相互作用,更快形成细小晶核,快速通过最大冰晶生成带,减缓冰晶对肌肉组织的破坏程度,对贮藏期间虾肉品质有保护作用。

## 2.9 凡纳滨对虾贮藏期间的感官评价

图7是凡纳滨对虾的感官评价结果,2组对虾的感官品质随贮藏时间增长呈下降趋势,但评分有一定差异,即LVEF组>对照组。对照组下降较快,感官评分在第8天已发生明显黑变,第12天已经低于6分,虾肉已不可食用,虾色泽暗淡,产生黏液,有浓烈的刺鼻气味;但是LVEF组的评分在第18天时才降至6分左右。原因是低压静电场减缓了微生物的生长繁殖速率,抑制了多酚

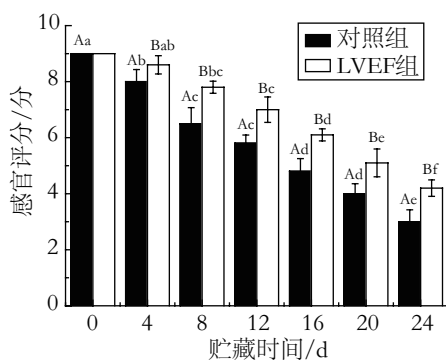


图7 凡纳滨对虾贮藏期间感官评分变化

氧化酶活性及蛋白水解酶的释放,使得LVEF组凡纳滨对虾的感官品质评分较高。说明微冻条件下添加低压静电场对凡纳滨对虾的感官品质改善有显著作用。

### 3 结论

低压静电场对微冻贮藏凡纳滨对虾具有一定的保鲜效果,有利于维持凡纳滨对虾的新鲜度以及延长货架期。与对照组相比,在低压静电场中贮藏的凡纳滨对虾,其pH值、蒸煮损失率和TVB-N含量增加缓慢,延缓了虾在腐败过程中的僵直、自溶和腐败现象,降低了对虾的硬度,较大程度维持了虾肉的弹性,改善了虾肉的颜色,减少了肌原纤维蛋白和肌动球蛋白等的降解,保持了虾肉的口感与品质。在电子显微镜下观察发现LVEF组减少了虾肌肉中较大较多冰晶的生成,维持了肌肉纤维的光滑完整;在扫描电镜图中也可以看到,LVEF组的肌肉纤维束只发生了轻微拉伸,对虾的感官评价亦有明显改善。低压静电场技术具有成本低、安全性高、操作简单的特点,并且保鲜效果优于普通冰箱的微冻保鲜,这项技术可使凡纳滨对虾的货架期增长,具有潜在的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 魏静,崔峰,张永进,等.基于虾类食品的保鲜保藏技术研究进展[J].渔业现代化,2013,40(04):55-60,66.
- [2] 孙一初,戴志远,王宏海,等.虾保鲜技术研究进展[J].现代渔业信息,2009,(12):26-28.
- [3] MOUSAKHANI G A, HAMDAMIAB N, SOLTANI-ZADEH N. Effect of high voltage electrostatic field thawing on the lipid oxidation of frozen tunafish (*Thunnus albacares*)[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies,2016,36:42-47.
- [4] 段伟文,全沁果,章雪琴,等.静电场结合冰温技术对凡纳滨对虾贮藏期品质的影响[J].食品与机械,2018,34

(12):101-107.

- [5] 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.
- [6] 李里特,赵朝辉,方胜.高压静电场下黄瓜和豇豆的保鲜试验研究[J].中国农业大学学报,1998,6(3):107-110.
- [7] 李侠,钱意书,杨方威,等.低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(08):278-285.
- [8] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会.食品安全国家标准 食品pH值的测定:GB 5009.237—2016[S].北京:中国标准出版社,2016.
- [9] 中华人民共和国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.
- [10] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会.食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定:GB 5009.124—2016[S].北京:中国标准出版社,2016.
- [11] WEI H H, YING J L, SHE C W. Effects of the antimicrobial peptide pardaxin plus sodium erythorbate dissolved in different gels on the quality of Pacific white shrimp under refrigerated storage[J]. Food Control,2016,73:712-719.
- [12] ZHANG Z, XIA G, YANG Q, et al. Effects of chitosan-based coatings on storage quality of Chinese shrimp[J]. Food Science & Nutrition,2019,7(12):1-10.
- [13] 凌萍华,谢晶.冰温技术结合保鲜剂对南美白对虾品质的影响[J].食品科学,2010,31(14):280-284.
- [14] 侯伟峰,谢晶.ε-聚赖氨酸、壳聚糖及植酸对南美白对虾的保鲜作用[J].食品科学,2012,33(08):308-312.
- [15] 孔巧香,李仁伟,霍健聪,等.南美白对虾养殖过程中致病微生物生长预测模型的建立[J].食品工业,2013,34(02):134-137.
- [16] WILES J L, GREEN B W, BRYANT R. Texture Profile Analysis and composition of a minced catfish product[J]. Journal of Texture Studies,2004,35(3):325-337.
- [17] 史咏梅,李勇勇,吴迪迪,等.不同冻结方式对南美白对虾品质的影响[J].食品与发酵工业,2019,45(05):94-100.
- [18] 王杏娣,谢超,梁瑞萍,等.低压静电场处理对竹节虾(*Penaeus japonicus*)微冻贮藏过程中品质的影响[J].食品工业科技,2020,41(07):1-6,12.
- [19] 叶日英,孙力军,王雅玲,等.冷藏凡纳滨对虾色差值与若干典型质量性状的灰色关联分析[J].中国食品学报,2018,(3):205-210.
- [20] SHUYI Q, XIA L, HANG W, et al. Effects of low voltage electrostatic field thawing on the changes in physico-chemical properties of myofibrillar proteins of bovine longissimus dorsi muscle[J]. Journal of Food Engineering,2019,(6):140-149.