

高压静电场结合制冷对刀额新对虾的保鲜作用

熊宇飞¹, 王立爽¹, 王津¹, 尹云厚², 王启军¹

(1. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510640) (2. 贵州民族大学传媒学院, 贵州贵阳 550025)

摘要: 为探究高压静电场技术对刀额新对虾冷藏期间品质的影响, 本研究在实验条件下选取三种高压 (8 kV、12 kV、16 kV) 在 4 °C 低温贮藏条件下连续处理刀额新对虾, 于贮藏第 0 d、2 d、4 d 和 6 d 测定其色差、质构、pH 值、TVB-N 值、TBA 值和菌落总数等鲜度指标的变化。研究表明, 高压静电场处理组样品表现出更好的颜色和质构特性, 有效延缓硬度的降低。虾肉中微生物生长得到有效抑制, 与对照组相比, HVEF 处理可以减少 0.51~1.03 log-cfu/g。对照组第 4 d 时 TVB-N 值超过 30 mg/100 g, 而 16 kV 电场组在第 6 d 时仅为 24.67 mg/100 g, 这表明高压静电场处理能够有效延缓蛋白质的降解。电场处理组样品的其他鲜度指标如 pH 值和 TBA 值在整个贮藏期内均显著低于对照组 ($p < 0.05$)。此外, 随着电压值的增加, 保鲜效果越好。综合比较分析, 高压静电场对刀额新对虾有较好的保鲜作用, 高压静电场结合冷藏能够延长刀额新对虾货架期 2 d 以上。本研究为静电场保鲜刀额新对虾及静电场保鲜设备的改进提供科学依据。

关键词: 高压静电场 (HVEF); 对虾; 理化性质; 保鲜

文章编号: 1673-9078(2020)12-125-132

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.12.0177

Preservative Effect of High-Voltage Electrostatic Field Combined with Refrigeration on Fresh Prawn (*Metapenaeus ensis*)

XIONG Yu-fei¹, WANG Li-shuang¹, WANG Jin¹, YIN Yun-hou², WANG Qi-jun¹

(1. College of Food Science and Engineering South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

(2. College of Communication Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to explore the effect of high-voltage electrostatic field (HVEF) technology on the quality of prawns (*Metapenaeus ensis*) during cold storage, three high voltages (8 kV, 12 kV, 16 kV) were selected under the experimental conditions of this study to treat the prawn continuously under low temperature storage conditions at 4 °C, and the changes in of freshness indices such as color, texture, pH value, TVB-N value, TBA value and total number of colonies were measured on day 0, 2, 4, and 6 of the storage. The results showed that the samples in the HVEF treatment group showed better color and texture characteristics, and delayed effectively the decrease in hardness. Compared with the control group, HVEF treatment inhibited effectively the microbial growth in prawn and led to a decrease by 0.51~1.03 log-cfu/g. The TVB-N value of the control group exceeded 30 mg/100 g on the 4th day, while that of the 16 kV electric field group was only 24.67 mg/100 g on the 6th day, indicating that the HVEF treatment can effectively delay protein degradation. Other freshness indicators such as pH and TBA of the HVEF treatment group were significantly lower than those of the control group during the whole storage period ($p < 0.05$). In addition, as the voltage value increased, the preservative effect was better. Comprehensive comparative analysis shows that the high-voltage electrostatic field has a good preservation effect on prawn, and its combination with refrigeration can extend the shelf life of the prawn by more than 2 days. This study provides a scientific basis for the improvement of high-voltage electrostatic field preservation equipment for keeping prawn fresh.

引文格式:

熊宇飞,王立爽,王津,等.高压静电场结合制冷对刀额新对虾的保鲜作用[J].现代食品科技,2020,36(12):125-132

XIONG Yu-fei, WANG Li-shuang, WANG Jin, et al. Preservative effect of high-voltage electrostatic field combined with refrigeration on fresh prawn (*Metapenaeus ensis*) [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(12): 125-132

收稿日期: 2020-02-25

基金项目: 广东省乡村振兴战略专项资金省级项目 (2018 LM2171)

作者简介: 熊宇飞 (1994-), 男, 研究生在读, 研究方向: 食品保鲜技术

通讯作者: 王启军 (1972-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 食品冷冻、食品保鲜及食品发酵; 尹云厚 (1965-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 动物生理学及动物营养

Key words: high-voltage electrostatic field (HVEF); prawn; physicochemical properties; preservation

作为海产品中一个重要的代表, 蛋白含量高且肉质鲜美, 但是由于内源性酶和腐败微生物的活动, 对虾很海产品因为其高营养价值深受消费者的喜欢, 同时也具有高经济价值。刀额新对虾 (*Metapenaeus ensis*) 容易失去营养价值^[1]。货架期是衡量海产品质量的重要指标, 如何延长海产品的货架期成为一个摆在全世界研究者面前的问题。目前, 对虾保鲜的技术包括了气调保鲜技术、低温保鲜技术和保鲜剂保鲜等。以上的保鲜方法虽然各有优势但也都存在不足。气调保鲜技术虽然能较好保持感官特性但技术要求高, 操作复杂, 所以在我国尚未能很好推广^[2]。低温保鲜技术是最常用的对虾保鲜技术, 但由于对温度控制有较高要求, 且费用较高, 因此限制其发展^[3]。添加保鲜剂对抑制对虾黑变有较好的效果但其安全性和成本等问题也是不可忽视的^[4]。2019年的统计显示全球虾产量约470万t, 中国虾产量在110万t, 仍需进口60万t。此外, 专家预测2020年全球虾产量将超过500万t^[5]。随着对虾消费需求的增加, 一种低能耗、高安全保鲜技术需要被研究和应用。

高压静电场技术是一种能耗低、操作简单、环保安全的非热加工技术, 已经广泛应用于干燥、解冻、冷冻、保鲜等领域。但高压静电场保鲜技术的研究多集中于果蔬, 在海产品保鲜方面的文献较少。Liu^[6]等用不同强度的高压静电场处理柿子, 结果表明高压静电场处理能够抑制柿子中果胶的降解和软化过程, 同时延缓贮藏期间柿子的氧化组织老化, 有效延长柿子的保质期。Zhao^[7]等的研究也表明高压静电场能够延缓番茄在贮藏期间硬度的下降以及颜色、可滴定酸和总可溶性糖的变化, 延长货架期达到8d。高压静电场在水产品保鲜的研究主要是鱼类上面, ko^[8]等研究在低温贮藏条件下, 高压静电场对罗非鱼肉的保鲜效果, 结果表明高压静电场能够有效减少鱼肉的菌落总数, 明显延缓鱼眼的不透明度。Bai^[9]等人的研究也表明高压静电场能够显著抑制微生物的生长和TVB-N的产生, 延长贮藏时间。然而, 高压静电场结合冷藏应用在虾类保鲜的研究鲜见报道。

本文以刀额新对虾为原料, 在4℃储藏条件下, 选取三种电压条件(8kV、12kV、16kV)连续处理, 比较未经处理对虾与施加高压静电场处理对虾冷藏期间在色差、质构、pH值, 硫代巴比妥酸(TBA)值、挥发性盐基氮(TVB-N)值和菌落总数的差异, 以期在实际生产提供一定的理论依据, 同时对对虾的保鲜提供新思路。

1 材料和方法

1.1 原料

刀额新对虾, 购于广州新造水产市场。挑选体长 8 ± 1 cm、色泽和气味正常、虾体完整、肉质紧密的鲜活样品。将样品置于装有冰袋的保温箱内运回实验室。

试剂: 氯化钠、三氯乙酸、2-硫代巴比妥酸、高氯酸、硼酸、甲基红、溴甲酚绿、氢氧化钠及浓盐酸等, 购于国药化学试剂有限公司, 均为分析纯; 蛋白胨, 北京奥博星生物技术有限责任公司。

1.2 主要仪器设备

CR-400型彩色色差计, 日本Konica Minolta公司; UV-1800型紫外分光光度计, 日本岛津公司; FJ-200型高速均质机, 上海标本模型厂; PHSJ-4F型pH计, 上海仪电科学仪器; H2050R型高速冷冻离心机, 湘仪离心机仪器有限公司; QIQIAN-08型拍打式无菌均质器, 上海启前电子科技有限公司; SW-CJ-1FD型单人超净工作台, 苏州智净净化设备有限公司; HR2864型绞肉机, 飞利浦公司; 5944型质构仪, 美国Instron Engineering Corporation; KjeltacTM 8100型凯氏定氮仪, 福斯分析仪器有限公司; LRH型恒温恒湿箱, 上海一恒科技有限公司; BCD-330WTV型冰箱, 合肥美的电冰箱有限公司; MT-305D型低压直流电源, MAISHEN公司; TPFRC-50kV型交直流高压测量仪, 扬州拓普电气科技有限公司; FOTS-DINA-2060型荧光光纤温度采集器, 英迪戈精密光电科技有限公司; 高压发生器, 本实验室自制。

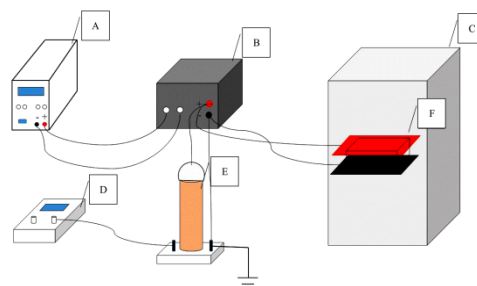


图1 高压静电场结合制冷辅助保鲜平台示意图

Fig.1 Scheme of HVEF combined with refrigeration-assisted preservation equipment

注: A、低压直流电源; B、高压发生器; C 冰箱; D 电压表; E 高压测量仪; F 处理室。

本研究所构建的高压静电场结合制冷辅助保鲜系统如图1所示, 主要有高压静电场发生模块、高压测

量模块和制冷模块三个部分组成。其中, 高压静电场发生模块主要包含了低压直流电源和高压发生装置。低压直流电源提供 0~30 V 直流电压, 经高压发生器转换输出为 0~16 kV 连续可调直流高压, 施加到平行板电极上, 可产生均匀的高压静电场。高压发生器是由整流、滤波、多谐振变缓和多级倍压整流电路等一系列电路组成。高压测量模块由电压表和直流高压测量仪组成。直流高压测量仪可以测量平行板电极两端外加的电压值。电压表可以显示实时的电压。制冷模块由美的冰箱提供。

1.3 实验方法

将活虾置于冰水混合物中 20 min 猝死, 沥干后放置于高压静电场保鲜装置中。实验组采用 8、12、16 kV 高压连续处理, 极板间距为 2 cm, 分别在 0、2、4、6 天测定各鲜度指标。以不施加电场处理 (0 kV) 为对照。储藏温度条件均为 4 °C。实验过程中采用荧光光纤温度采集器连续记录贮藏期间处理室的温度变化。

1.3.1 色差的测定

参照 Wu^[10]等人方法并略作修改。将虾去虾壳虾线, 用吸水纸吸取表面多余水分。采用 Chroma Meter CR-400 便携式色差仪测定不同冷藏天数虾的色差变化。以标准白色样板校准, 每组样品取虾体上中下三个位置平行测定 3 次, 以 L^* 、 a^* 、 b^* 值作为样品的亮度值、红度值、黄度值。利用测得的 L^* 、 a^* 、 b^* 值计算色泽偏差 ΔE , 计算公式如下:

$$\Delta E = \sqrt{(L_t^* - L_0^*)^2 + (a_t^* - a_0^*)^2 + (b_t^* - b_0^*)^2}$$

式中: L_t^* 、 a_t^* 、 b_t^* 分别为储藏期第 t 天的亮度值、红度和黄度值; L_0^* 、 a_0^* 、 b_0^* 分别为第 0 天的亮度值、红度和黄度值。

1.3.2 质构的测定

参照 Kaur^[11]等人的方法并稍作修改。样品采用 Instron 质构仪进行 TPA 测试。测试条件如下: 以虾仁第二肢节为测量位置, 采用直径 6 mm 的平底圆柱形探头, 测试前和测试时的速率设置为 1 mm/s, 测试后速率为 6 mm/s, 压缩形变率为 40%, 两次下压间隔时间为 5.00 s, 触发值大小为 5 g。每组样品平行测定 6 次, 记录硬度、弹性、粘聚性、咀嚼型、恢复性等参数, 并取平均值。

1.3.3 pH 值的测定

取对虾肉 5.00 g, 绞碎后加入 45 mL 蒸馏水, 10000 r/min 均质 1 min, 浸泡 20 min, 滤纸过滤, 用酸度计测定滤液 pH 值。相同样品进行 3 次重复, 取平均值为该样品 pH 值。

1.3.4 菌落总数的测定

菌落总数测定参照 GB 4789.2-2010 《食品安全国家标准食品微生物学检验菌落总数测定》的方法进行, 每组样品平行测定 3 次。

1.3.5 TVB-N 值的测定

参考 Cheng^[12]等人的方法略作修改, 将处理好的对虾置于绞肉机中绞碎并混合均匀, 称取 5.00 g 于 100 mL 离心管中, 加入 45 mL, 0.6 mol/L 高氯酸溶液, 用玻璃棒搅匀后静置 30 min, 再 10000 r/min 离心 5 min, 过滤, 取滤液 10 mL 于消化管中, 加入 10 mL, 30 g/L 氢氧化钠溶液, 30 mL 蒸馏水在反应室蒸馏 5 min, 馏出液收集于装有 20 mL, 40 g/L 硼酸溶液和 2~3 滴甲基红-溴甲酚绿混合指示剂的锥形瓶中。用 0.005 mol/L 盐酸溶液滴定, 当溶液颜色变为微红色且 30 s 内不变色为滴定终点。记录滴定消耗盐酸体积 V , 平行测定三组, 取平均值。样品中 TVB-N 含量的计算方法如下:

$$X = \frac{(V_1 - V_2) \times C \times 14 \times 100}{M \times 10 / 45}$$

式中: X 为品中 TVB-N 的含量, mg/100 g; V_1 为虾仁样品滤液消耗盐酸标准溶液体积, mL; V_2 为高氯酸溶液消耗盐酸标准溶液体积, mL; C 为盐酸标准溶液的浓度, mol/L; M 为样品的质量, g。

1.3.6 TBA 的测定

参考 Nirmal^[13]等人的方法略作修改, 称取 5.00 g 绞碎虾仁于离心管中, 向离心管中依次加 25 mL, 20% 三氯乙酸, 20 mL 蒸馏水, 10000 r/min 条件下离心 5 min。过滤得滤清液, 并加蒸馏水定容至 50 mL, 摇匀静置, 取 5.00 mL 上清液于比色管中, 然后加入 10 mL, 0.02 mol/L 的硫代巴比妥酸溶液。将上述混合液放置于沸水浴加热 40 min, 冷却至室温后, 在 532 nm 测定吸光值 A 。平行测定三组取平均值。TBA 值用丙二醛 (MDA) 的质量分数表示。

1.4 数据统计与分析

数据统计分析采用统计软件 SPSS 19.0 进行显著性分析, 结果用平均值 \pm 标准偏差表示。作图采用 origin 8.0。

2 结果与讨论

2.1 不同电压处理对刀额新对虾色差的影响

颜色是海产品新鲜度最直观的属性, 也是被消费者考虑最重要的因素。通常情况下, L^* 值表示颜色的深浅, L^* 值越大则颜色越浅, 虾体越新鲜。反之, L^*

值越小则颜色越暗, 虾体趋于腐败^[14]。从表 1 可知, 随着贮藏时间的增加, 四个组的 L* 值均呈现下降趋势, 但电场处理组的下降速率显著低于对照组 ($p < 0.05$), 并且随着电压的增大, 下降速率越缓慢。12 kV 和 16 kV 电场组在第 6 d 时的 L* 值分别为 46.67 和 45.47, 均高于对照组第 4 d 时的 45.36。这表明 HVEF 处理对刀额新对虾 L* 值的保持效果显著。Hsieh^[15]等人也发现相似的结论, 电场组的罗非鱼的鱼眼浑浊度和表面湿润度均优于对照组, 且电场组和对照组的鱼肉分别第 7 d 和第 5 d 超过了可接受的标准。

a* 和 b* 分别表示红度和黄度, 也是表征颜色的重要参数。由表 1 可知, 随着贮藏时间的延长, 4 组的 a* 值下降趋势明显。这是由于在贮藏过程中, 虾体内的多酚氧化酶倾向于将酚类物质氧化成醌类物质, 然后聚合形成黑色素^[16]。随着黑色区域的扩大, 导致红度减少。然而, 4 组的 b* 值在贮藏期间均呈上升趋势,

但是电场组增加速率显著低于对照组 ($p < 0.05$), 且高电压对于抑制 b* 值增加效果显著。贮藏末期, 8 kV、12 kV 和 16 kV 的 b* 值 (4.32、4.97、5.64) 均低于对照组 (6.27)。Bindu^[17]等人认为, 虾体中颜色的变化是由于类胡萝卜素在内源性蛋白酶作用下从肌肉蛋白质基质中释放出来, 导致脂质氧化。本研究中 b* 的变化趋势与 TBA 值一致。

色差是综合衡量虾体颜色变化的指标。从表 1 中可以看出, 随着贮藏时间的延长, 4 组的色差值均呈显著上升趋势。其中, 贮藏至第 6 d 时, 对照组 8 kV、12 kV、16 kV 高压静电场组的色差值分别为 7.01、6.27、4.70、4.11。数据结果显示, 与对照组相比, 高压静电场处理可以延迟色差值的生长, 而且随着电压值的升高, 色差值的变化就越小。Ko^[8]等人的研究也得出相似的结论。贮藏第 8 d 时, 经过高压静电场处理的罗非鱼的色差比对照组降低 0.7~0.8 倍。

表 1 不同电压处理对刀额新对虾色差的影响

Table 1 Effects of different voltage treatments on the color differences of prawn

色差参数	贮藏时间/d	对照组	8 kV 组	12 kV 组	16 kV 组
L*	0	48.82±0.66 ^{Aa}	48.82±0.66 ^{Aa}	48.82±0.66 ^{Aa}	48.82±0.66 ^{Aa}
	2	47.41±0.32 ^{Bb}	47.65±0.69 ^{ABb}	47.29±0.35 ^{Cb}	47.79±0.63 ^{Ab}
	4	45.36±0.65 ^{Cc}	46.96±0.55 ^{ABc}	46.23±0.11 ^{Bc}	46.98±0.47 ^{Abc}
	6	44.46±0.31 ^{Dd}	44.85±0.83 ^{Cd}	45.47±0.53 ^{Bd}	46.67±0.22 ^{Ac}
a*	0	2.74±0.10 ^{Aa}	2.74±0.10 ^{Aa}	2.74±0.10 ^{Aa}	2.74±0.10 ^{Aa}
	2	1.13±0.07 ^{Bb}	1.17±0.14 ^{ABb}	1.19±0.17 ^{ABb}	1.32±0.11 ^{Ab}
	4	0.69±0.35 ^{Cc}	0.86±0.11 ^{Bc}	0.87±0.06 ^{ABc}	0.91±0.05 ^{Ac}
	6	-0.35±0.27 ^{Cd}	-0.16±0.07 ^{BCd}	-0.08±0.25 ^{Bd}	0.37±0.17 ^{Ad}
b*	0	1.75±0.16 ^{Ad}	1.75±0.16 ^{Ad}	1.75±0.16 ^{Ad}	1.75±0.16 ^{Ad}
	2	3.45±0.14 ^{Ac}	3.15±0.27 ^{Bc}	2.43±0.71 ^{Cc}	2.10±0.07 ^{Dc}
	4	5.24±0.21 ^{Ab}	4.32±0.54 ^{Bb}	3.88±0.23 ^{Cb}	3.45±0.11 ^{Db}
	6	6.27±0.10 ^{Aa}	5.64±0.19 ^{Ba}	4.97±0.15 ^{BCa}	4.32±0.34 ^{Ca}
ΔE	0	-	-	-	-
	2	2.73±0.17 ^{Ac}	2.41±0.11 ^{Bc}	2.28±0.22 ^{Cc}	1.79±0.14 ^{Dc}
	4	5.33±0.36 ^{Ab}	3.69±0.23 ^{BCb}	3.84±0.41 ^{Bb}	3.10±0.18 ^{Cb}
	6	7.01±0.24 ^{Aa}	6.27±0.29 ^{Ba}	4.70±0.33 ^{Ca}	4.11±0.17 ^{Da}

注: 大写字母不同表示同一贮藏时间不同处理间存在显著差异 ($p < 0.05$)。小写字母不同表示同一处理不同天数的样品差异显著 ($p < 0.05$)。下同。

2.2 不同电压处理对刀额新对虾质构特性的影响

质构特性(硬度、弹性、咀嚼性、黏粘性)是全面评估食品可食性的重要参数。对虾死亡后, 肌肉组织的质地和特性会发生改变。不同电压处理对刀额新对虾质构特性的影响如表 2 所示。硬度被认为是决定

肉制品可被消费的首要因素。从表 2 可知, 随着贮藏时间的延长, 不同组对虾的硬度显著下降 ($p < 0.05$)。这是因为在组织蛋白酶的作用下, 肌原纤维蛋白发生降解, 从而导致硬度的降低^[18]。16、12 和 8 kV 电场组和对照组在第 6 d 时硬度比初始分别减少 1.57、1.76、2.27 和 2.60 N。这表明电场组与对照组相比可以显著延缓对虾的硬度的下降, 而且随着电压的增大, 抑制效果越好。Mousakhani-Ganjeh^[19]等人的研究结果也表

明, HVEF 处理对罗非鱼弹性和粘聚性没有明显的影 响,但随着电压的增加,硬度和咀嚼性也增加。

表 2 不同电压处理对刀额新对虾质构参数的影响

Table 2 Effects of different voltage treatments on the texture parameters of prawn

质构属性	处理	贮藏时间/d			
		0	2	4	6
硬度/N	对照组	5.74±0.55 ^{Aa}	4.54±0.13 ^{Cb}	3.61±0.21 ^{Dc}	3.14±0.24 ^{Cd}
	8 kV 组	5.74±0.55 ^{Aa}	4.83±0.25 ^{Bb}	3.98±0.20 ^{Cc}	3.47±0.43 ^{Bd}
	12 kV 组	5.74±0.55 ^{Aa}	5.08±0.07 ^{ABb}	4.54±0.31 ^{Bc}	3.98±0.30 ^{ABd}
	16 kV 组	5.74±0.55 ^{Aa}	5.26±0.19 ^{Ab}	4.85±0.23 ^{Ac}	4.15±0.39 ^{Ad}
弹性/mm	对照组	0.13±0.01 ^{Aa}	0.06±0.01 ^{Bb}	0.04±0.01 ^{Cbc}	0.03±0.01 ^{Cc}
	8 kV 组	0.13±0.01 ^{Aa}	0.08±0.01 ^{Ab}	0.06±0.01 ^{Bc}	0.04±0.01 ^{BCd}
	12 kV 组	0.13±0.01 ^{Aa}	0.09±0.01 ^{Ab}	0.08±0.01 ^{Abc}	0.06±0.01 ^{Ac}
	16 kV 组	0.13±0.01 ^{Aa}	0.09±0.01 ^{Ab}	0.07±0.01 ^{ABc}	0.06±0.01 ^{Acd}
粘聚性/J	对照组	0.53±0.01 ^{Aa}	0.46±0.01 ^{ABab}	0.38±0.01 ^{Cb}	0.38±0.02 ^{Cb}
	8 kV 组	0.53±0.01 ^{Aa}	0.46±0.02 ^{ABb}	0.41±0.01 ^{Bc}	0.39±0.02 ^{BCd}
	12 kV 组	0.53±0.01 ^{Aa}	0.48±0.02 ^{Ab}	0.44±0.02 ^{ABc}	0.44±0.01 ^{Ac}
	16 kV 组	0.53±0.01 ^{Aa}	0.48±0.01 ^{Ab}	0.46±0.02 ^{Abc}	0.42±0.01 ^{ABc}
咀嚼性/N	对照组	0.36±0.05 ^{Aa}	0.12±0.13 ^{Cb}	0.08±0.01 ^{Cc}	0.06±0.03 ^{Bcd}
	8 kV 组	0.36±0.05 ^{Aa}	0.16±0.02 ^{Bb}	0.08±0.01 ^{Cc}	0.07±0.03 ^{Bcd}
	12 kV 组	0.36±0.05 ^{Aa}	0.19±0.03 ^{ABb}	0.17±0.01 ^{ABbc}	0.16±0.01 ^{Ac}
	16 kV 组	0.36±0.05 ^{Aa}	0.22±0.02 ^{Ab}	0.18±0.04 ^{Ac}	0.16±0.02 ^{Ad}

弹性反映了肌肉在外力作用下发生形变,去力后的恢复程度。肌肉弹性的变化肌肉之间的结合力大小密切相关。肌肉组织破坏越小,肌肉之间的结合力越大,则弹性越大^[20]。由表 2 可知,贮藏期间,各处理组弹性均下降,但是电场处理组比对照组下降趋势缓慢。第 6 d 时,16 kV、12 kV、8 kV 电场组的弹性值(0.06 mm、0.06 mm、0.04 mm)相当于对照组第 2 d 和第 4 d 的弹性值。由此可见,HVEF 处理对虾体肌肉弹性保持作用显著($p<0.05$)。这是因为 HVEF 处理可以有效抑制肌肉组织中的内源酶,从而减少虾体中肌动球蛋白变性。Jia^[21]等人研究 HVEF 解冻对兔肉质构的影响,结果表明 HVEF 处理减少肌原纤维蛋白的降解,从而保持更好地肌肉结构。

咀嚼性是肌肉硬度、粘聚性和弹性综合作用效果,是指将虾肌肉咀嚼成可吞咽时所需要的能量。如表 2 所示,不同处理组对虾的咀嚼性随着贮藏时间延长而显著性降低($p<0.05$)。其中,对照组下降幅度最大,8 kV 电场组次之,12 kV 和 16 kV 电场组下降较缓慢。咀嚼性降低与肌肉硬度降低、肌肉弹性减小和肌肉细胞间作用力减弱相一致。主要是在腐败微生物和内源水解酶的作用下,肌肉蛋白质降解和肌肉组织结构崩解^[22]。

2.3 不同电压处理对刀额新对虾 pH 值的影响

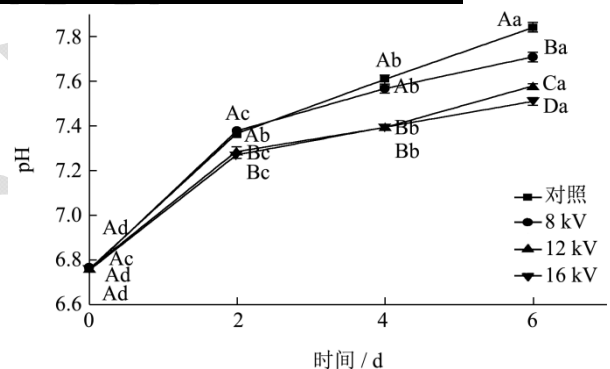


图 2 不同电压处理对刀额新对虾 pH 值的影响

Fig.2 Effects of different voltage treatments on the pH value of prawn

pH 值通常被视为评价水产品新鲜度的重要指标,Shamshad^[23]等认为虾的 pH 值与新鲜度有很好的相关性,并指出 pH 7.80 为虾类可被接受的临界值。不同处理对虾 pH 值的影响如图 2 所示。新鲜刀额新对虾 pH 值为 6.73,随着储藏时间的增加,各组 pH 值均显著增加($p<0.05$)。这是因为对虾死亡后,在虾体表面微生物和虾体内源酶的作用下,虾体蛋白分解成氨基酸、三甲胺和吲哚等含氮碱性物质,从而使 pH 值上升^[14]。对照组在第 6 d 时(7.84)超过食用临界值,而电场处理组在整个储藏期内 pH 值均低于 7.80。此外,8 kV 电场组与对照组无显著性差异,随着电压的升高,12 kV 组和 16 kV 组 pH 值显著低于同一天的对

对照组, 电场处理组 pH 值增长较慢的可能原因是在高压电场的作用下, 细胞膜穿孔致使细菌死亡, 而且改变虾体内源酶活性^[24]。陈建荣^[25]等人也得到相似的结论。用 25 kV 高压静电场处理罗非鱼, 结果表明电场组 pH 值上升的速度明显低于对照组。

2.4 不同电压处理对刀额新对虾菌落总数的影响

微生物的作用是导致海产品质量损失的主要原因, 菌落总数是反应水产品腐败程度的主要指标。一般认为海产品的 TVC 值为 5.00 log(cfu/g) 是新鲜的, 而 TVC 值超过 6.00 log(cfu/g) 的海产品被视为不可食用的阈值^[26]。经过不同处理对虾的菌落总数变化如图 3 所示。鲜虾的初始菌落总数为 2.52 log(cfu/g), 随着贮藏时间的增加, 菌落总数均显著性增加。前 2 d 增速相对缓慢, 随着微生物的累积作用, 微生物增速加快。对照组在第 6 d 超过可食用的阈值, 为 6.24 log(cfu/g), 而电场处理组的 TVC 值在储藏期间均低于阈值。此外, 随着电压值的增加, 微生物的抑制作用显著增强 ($p < 0.05$)。相比较于对照, 8 kV、12 kV 和 16 kV 在第 6 d 时分别减少菌落总数为 0.51、0.84 和 1.03 log(cfu/g)。这表明 HVEF 处理能够有效抑制微生物活动和减缓虾腐败的方法。He^[27]等人用 HVEF 解冻猪里脊肉并观察菌落总数, 结果表明在前三天的储存期内, 电场处理组菌落总数明显低于对照组。但在储存后期, 两组的菌落总数迅速上升。这是由于后期微生物的积累效应导致肉腐败加速。总的来说, HVEF 处理可以减少 0.51~1.03 log(cfu/g)。Li^[28]等人的研究也得出相似的结论。经过 12 kV 电场解冻后的鲫鱼块菌落总数显著低于对照组。此外, 随着电场强度的增加, 对微生物的抑制效果越好。

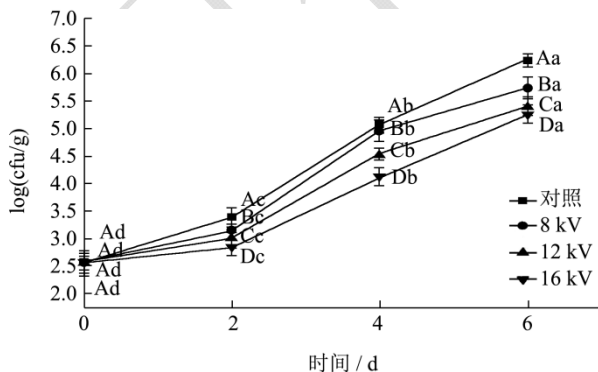


图 3 不同电压处理对刀额新对虾菌落总数的影响

Fig.3 Effects of different voltage treatments on the TVC of prawn

2.5 不同电压处理对刀额新对虾 TVB-N 的影响

TVB-N 是评价水产品腐败程度的重要参数。TVB-N 值的升高是由于虾体内蛋白质在微生物和酶的作用下降解成挥发性氮和三甲胺等胺类化合物^[29]。通常认为 TVB-N 值为 30 mg/100 g 是海虾能否被接受的阈值^[30]。如图 4 所示, 鲜虾的 TVB-N 值为 8.45 mg/100 g, 随着时间的增加, 对照组 TVB-N 值迅速增加并在第 4 d 达到不可食用的程度。电场组蛋白腐败程度显著低于对照组 ($p < 0.05$), 并且随着电压的增加, 保鲜效果越好。8 kV、12 kV 和 16 kV 电场组第 6 d 时 TVB-N 值分别为 30.16、26.41 和 24.67 mg/100 g。这表明, 电场处理能够延缓蛋白质的降解来减少 TVB-N 的产生, 从而延长虾的储存时间 2 d 以上。Ko^[8]等人用 HVEF 处理来保鲜罗非鱼, 结果表明 HVEF 处理能够有效延缓水溶性蛋白、盐溶性蛋白以及总蛋白溶解度, 相比较对照组能够延缓蛋白溶解度下降 0.8 倍以上。这表明 HVEF 可有效保持蛋白结构, 从而保持鱼的新鲜度。此外, 持水力与蛋白质关系密切。不同电场处理后, 鱼肉的保水能力均强于对照组, 这说明 HVEF 有着延迟鱼肉蛋白质变性的可能性。Bai^[31]等人的研究也能得到类似的结论, HVEF 处理能够延缓 TVB-N 的产生, 从而抑制蛋白的降解和延长鱼的保质期。

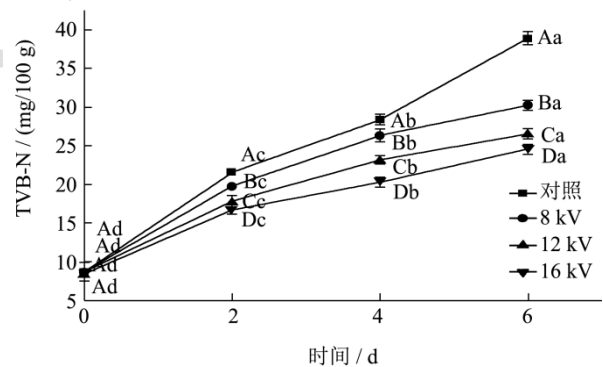


图 4 不同电压处理对刀额新对虾 TVB-N 值的影响

Fig.4 Effects of different voltage treatments on the TVB-N value of prawn

2.6 不同电压处理对刀额新对虾 TBA 值的影响

储藏期间, 水产品中的脂肪在过氧化物酶和微生物的作用下氧化变质。TBA 值是通过测定丙二醛 (MDA) 的产生量而判断脂质氧化程度的一个指标。丙二醛 (MDA) 是食品中多不饱和脂肪酸发生氧化后的一种次级氧化产物^[32]。不同处理刀额新对虾 TBA 值变化如图 5 所示。鲜虾中由于脂肪含量较少显示出

较低的初始 TBA 值为 0.1 mg/kg, 与 LIAO^[26]等人的结果相似。随着贮藏时间的增加, 各处理组 TBA 值均显著增加 ($p < 0.05$)。其中, 8 kV 电场处理组与对照组差异不明显 ($p > 0.05$), 随着电压的增加, TBA 值增加缓慢。贮藏至第 6 d 时, 经 12 kV 和 16 kV 电场处理的 TBA 值 (分别为 0.29、0.28 mg/kg) 约为对照组第 4 d 时的水平。李苑^[33]等人得出相似的结论。通过对比电场微冻和普通微冻条件下梭子蟹贮藏期间 TBA 的变化, 结果表明电场组比对照组呈现出较慢的 TBA 增长趋势, 在贮藏第 35 d, 电场组 TBA 值比对照组低 17%。Ko 等^[34]认为, 由于 HVEF 的静电感应使得材料表面带电, 降低了材料表面与周围氧气的接触频率, 从而减缓海产品脂肪氧化的速度。另一方面, HVEF 能够抑制微生物的生长, 进而阻止虾的脂质氧化。

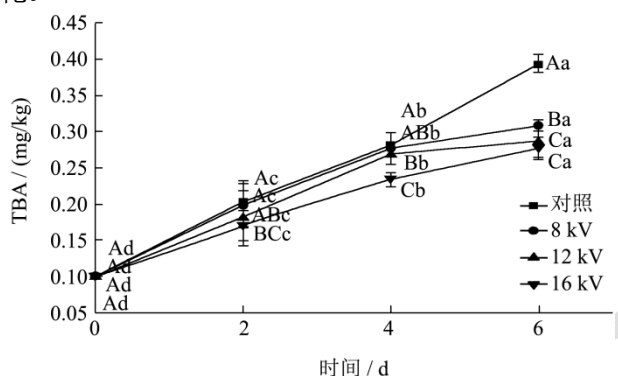


图5 不同电压处理对刀额新对虾 TBA 值的影响

Fig.5 Effects of different voltage treatments on the TBA value of prawn

3 结论

本研究以刀额新对虾为原料, 研究了不同电压处理对刀额新对虾颜色、质构和理化性质 (pH、TVB-N、TBA 和菌落总数等) 的影响。研究表明, 与对照组相比, 电场组样品表现出更好的颜色和质构特性。施加电场有利于抑制贮藏期间发生的蛋白质降解、脂肪氧化和微生物生长等生化反应。此外, 随着电压值得升高, 保鲜效果越好。综上所述, 高压静电场结合冷藏能够有效延长对虾的货架期。在后续的实验中, 将深入研究高压静电场对内源性酶和微生物的作用机制, 以期促进高压静电场在工业上的应用。

参考文献

[1] Yuan G, Lv H, Tang W, et al. Effect of chitosan coating combined with pomegranate peel extract on the quality of Pacific white shrimp during iced storage [J]. Food Control, 2016, 59: 818-823

[2] Young H, Anang D M, Tiwari B K. Shelf life and textural properties of cooked-chilled black tiger prawns (*Penaeus monodon*) stored in vacuum pack or modified atmospheric packaging at 4 or 20 C [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2014, 2(2): 59-64

[3] Okpala C O R, Choo W S, Dykes G A. Quality and shelf life assessment of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) freshly harvested and stored on ice [J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 55(1): 110-116

[4] Nilesh Prakash Nirmal, Soottawat Benjakul. Retardation of quality changes of Pacific white shrimp by green tea extract treatment and modified atmosphere packaging during refrigerated storage [J]. International Journal of Food Microbiology, 2011, 149(3): 247-253

[5] 中国水产流通与加工协会.GOAL:全球虾产量 470 万吨,中国产量 110 万吨,进口 60 万吨 [EB/OL]. (2019) URLhttp://www.cappma.org/view.php?id=3973

[6] Liu C E, Chen W J, Chang C K, et al. Effect of a high voltage electrostatic field (HVEF) on the shelf life of persimmons (*Diospyros kaki*) [J]. LWT, 2017, 75: 236-242

[7] Wang Y, Wang B, Li L. Keeping quality of tomato fruit by high electrostatic field pretreatment during storage [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2008, 88(3): 464-470

[8] Ko W C, Shi H Z, Chang C K, et al. Effect of adjustable parallel high voltage on biochemical indicators and actomyosin Ca^{2+} -ATPase from tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 69: 417-423

[9] Bai Y X, Hu Y C, Qu M. Preliminary studies on spanish mackerel fresh-keeping method in high-voltage electric field [J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2015, 24(8): 732-739

[10] Wu D, Sun D W, He Y. Application of long-wave near infrared hyperspectral imaging for measurement of color distribution in salmon fillet [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2012, 16: 361-372

[11] Kaur B P, Rao P S, Nema P K. Effect of hydrostatic pressure and holding time on physicochemical quality and microbial inactivation kinetics of black tiger shrimp (*Penaeus monodon*) [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 33: 47-55

[12] Cheng J H, Sun D W, Zeng X A, et al. Non-destructive and rapid determination of TVB-N content for freshness evaluation of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) by hyperspectral imaging [J]. Innovative Food Science &

- Emerging Technologies, 2014, 21: 179-187
- [13] Nirmal N P, Benjakul S. Effect of ferulic acid on inhibition of polyphenoloxidase and quality changes of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during iced storage [J]. Food Chemistry, 2009, 116(1): 323-331
- [14] 王强,张宾,马路凯,等.流化冰保鲜对冰鲜南美白对虾品质的影响[J].现代食品科技,2014,30(10):134-140
WANG Qiang, ZHANG Bin, MA Lu-kai, et al. Effect of slurry ice treatment on the quality of fresh *Litopenaeus vannamei* [J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(10): 134-140
- [15] Hsieh C W, Lai C H, Lee C H, et al. Effects of high-voltage electrostatic fields on the quality of tilapia meat during refrigeration [J]. Journal of Food Science, 2011, 76(6): M312-M317
- [16] Benjakul S, Visessanguan W, Tanaka M. Properties of phenoloxidase isolated from the cephalothorax of kuruma prawn (*Penaeus japonicus*) [J]. Journal of Food Biochemistry, 2005, 29(5): 470-485
- [17] Bindu J, Ginson J, Kamalakanth C K, et al. Physico-chemical changes in high pressure treated Indian white prawn (*Fenneropenaeus indicus*) during chill storage [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2013, 17: 37-42
- [18] Kaur B P, Kaushik N, Rao P S, et al. Effect of high-pressure processing on physical, biochemical, and microbiological characteristics of black tiger shrimp (*Penaeus monodon*) [J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6(6): 1390-1400
- [19] Mousakhani-Ganjeh A, Hamdami N, Soltanizadeh N. Impact of high voltage electric field thawing on the quality of frozen tuna fish (*Thunnus albacares*) [J]. Journal of Food Engineering, 2015, 156: 39-44
- [20] Zhang B, Deng S G, Lin H M. Changes in the physicochemical and volatile flavor characteristics of *Scorpaenopsis niphonius* during chilled and frozen storage [J]. Food Science and Technology Research, 2012, 18(5): 747-754
- [21] Jia G, Liu H, Nirasawa S, et al. Effects of high-voltage electrostatic field treatment on the thawing rate and post-thawing quality of frozen rabbit meat [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 41: 348-356
- [22] Aubourg S P, Losada V, Prado M, et al. Improvement of the commercial quality of chilled Norway lobster (*Nephrops norvegicus*) stored in slurry ice: Effects of a preliminary treatment with an antimelanotic agent on enzymatic browning [J]. Food Chemistry, 2007, 103(3): 741-748
- [23] Shamshad S I, Riaz M, Zuberi R, et al. Shelf life of shrimp (*Penaeus merguensis*) stored at different temperatures [J]. Journal of Food Science, 1990, 55(5): 1201-1205
- [24] 王丽平,李苑,余海霞,等.高压电场对生鲜食品保鲜机理研究进展[J].食品科学,2017,38(3):278-283
WANG Li-ping, LI Yuan, YU Hai-xia, et al. Progress in the knowledge of the preservation mechanism of raw fresh foods by high voltage electric field [J]. Food Science, 2017, 38(3): 278-283
- [25] 陈建荣.高压静电场对鱼的保鲜研究[J].现代食品科技,2012,28(5):499-501,498
CHEN Jian-rong. Preliminary studies on fish fresh-keeping effect of high voltage electric field [J]. Modern Food Science and Technology, 2012, 28(5): 499-501, 498
- [26] Liao X, Su Y, Liu D, et al. Application of atmospheric cold plasma-activated water (PAW) ice for preservation of shrimps (*Metapenaeus ensis*) [J]. Food Control, 2018, 94: 307-314
- [27] He X, Liu R, Nirasawa S, et al. Effect of high voltage electrostatic field treatment on thawing characteristics and post-thawing quality of frozen pork tenderloin meat [J]. Journal of Food Engineering, 2013, 115(2): 245-250
- [28] Li D, Jia S, Zhang L, et al. Post-thawing quality changes of common carp (*Cyprinus carpio*) cubes treated by high voltage electrostatic field (HVEF) during chilled storage [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 42: 25-32
- [29] Bahmani Z A, Rezai M, Hosseini S V, et al. Chilled storage of golden gray mullet (*Liza aurata*) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2011, 44(9): 1894-1900
- [30] Qian Y F, Xie J, Yang S P, et al. Inhibitory effect of a quercetin-based soaking formulation and modified atmospheric packaging (MAP) on muscle degradation of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 63(2): 1339-1346
- [31] Bai Y X, Hu Y C, Qu M. Preliminary studies on spanish mackerel fresh-keeping method in high-voltage electric field [J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2015, 24(8): 732-739
- [32] Nishimoto J. Estimation of keeping freshness period and practical storage life of mackerel muscle during storage at low temperatures [J]. Memoirs of the Faculty of Fisheries. Kagoshima University, 1985, 34: 89-96

(下转第 292 页)