

静电场结合冰温技术对凡纳滨对虾贮藏期品质的影响

Effect of electrostatic field combined with controlled freezing-point storage technology on the quality of *Litopenaeus vannamei* in storage period

段伟文¹ 全沁果¹ 章雪琴¹ 张泽伟¹

DUAN Wei-wen¹ QUAN Qin-guo¹ ZHANG Xue-qin¹ ZHANG Ze-wei¹

陈铭¹ 曾雪鸽¹ 刘书成^{1,2,3,4} 吉宏武^{1,2,3,4}

CHEN Ming¹ ZENG Xue-ge¹ LIU Shu-cheng^{1,2,3,4} JI Hong-wu^{1,2,3,4}

(1. 广东海洋大学食品科技学院, 广东 湛江 524088; 2. 广东省水产品加工与安全重点实验室, 广东 湛江 524088; 3. 广东省海洋食品工程技术研究中心, 广东 湛江 524088; 4. 广东普通高等学校水产品深加工重点实验室, 广东 湛江 524088)

(1. College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang, Guangdong 524088, China; 2. Key Laboratory of Advanced Processing of Aquatic Products of Guangdong Higher Education Institution, Zhanjiang, Guangdong 524088, China; 3. Guangdong Provincial Seafood Engineering Technology Research Center, Zhanjiang, Guangdong 524088, China; 4. Guangdong Provincial Key Laboratory of Aquatic Products Processing and Safety, Zhanjiang, Guangdong 524088, China)

摘要:利用静电场结合冰温技术对凡纳滨对虾进行保鲜,通过不同静电场处理,测定凡纳滨对虾贮藏期间多酚氧化酶(PPO)相对酶活、白度值、感官评分、菌落总数、挥发性盐基氮、pH值、汁液流失率、K值和流变学特性的变化,研究不同静电场(1.5、2.5、3.5 kV)结合冰温 $[(-1\pm 1)^\circ\text{C}]$ 技术对凡纳滨对虾的保鲜效果。结果表明:冰温条件下,静电场处理的凡纳滨对虾的PPO酶活有所抑制,感官色泽等指标明显优于单纯冰温样品。贮藏后期,虾肉中菌落总数因电场的作用得到抑制,TVB-N值与K值都有不同程度的减缓,虾肉的汁液流失率在贮藏后期也保持在较低水平。通过流变学特性的测试,发现静电场对延缓虾肉软化也有一定的效果。总体上,2.5 kV静电场保鲜效果较优,可延长凡纳滨对虾保质期至8 d。

关键词:凡纳滨对虾; 保鲜; 静电场; 冰温

Abstract: Used the electrostatic field combined with controlled freezing-point storage technology to preserve the *Litopenaeus vannamei*,

and examined the effects of different electrostatic field (1.5, 2.5, 3.5 kV) combined with controlled freezing-point storage ($-1^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$) on quality of *Litopenaeus vannamei*. Some quality index changes were compared in Polyphenol Oxidase (PPO) relative enzyme activity, whiteness, sensory, total bacterial counts, TVB-N, pH, drip loss, K value and rheology property. The results showed that electrostatic field inhibited the PPO relative enzyme activity, the sensory and whiteness significantly better than the controlled freezing-point storage. In the late period of storage, the total bacterial counts was inhibited by electrostatic field and TVB-N, K value was all slowed down to different degrees. The drip loss rate remained at a low level. Electrostatic field can significantly delayed muscle protein degradation through the test of rheological properties. In general, the 2.5 kV electrostatic field has a better preservation effect, which can extend the shelf life of the *Litopenaeus vannamei* to 8 days.

Keywords: *Litopenaeus vannamei*; preservation; electrostatic field; controlled freezing-point storage

基金项目:国家虾蟹产业技术体系建设(编号:CARS-48)

作者简介:段伟文,男,广东海洋大学在读硕士研究生。

通信作者:吉宏武(1962—)男,广东海洋大学教授,博士生导师,博士。E-mail: jihw62318@163.com

收稿日期:2018-07-31

凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)又称南美白对虾,营养均衡、味道鲜美,深受消费者的青睐。凡纳滨对虾产量高,主要以鲜活方式进入市场,由于高水分、高肌基质蛋白,极易因不当捕捞而遭机械损失,在贮藏和运输过程中引

起的微生物腐败变质,鲜度难以保持^[1]。目前虾类的保鲜技术主要有冰温保鲜、冷冻保鲜、保鲜剂保鲜、辐照保鲜等,但这些保鲜技术均有不足之处,如冰温保鲜时间短,难以满足日常消费需要;冷冻保鲜由于冰晶的形成和生长破坏肌肉组织,影响虾的口感^[2];化学保鲜剂保鲜,可能因化学残留而引发食品安全的风险;而天然保鲜剂成本高,限制了市场推广应用;辐照保鲜技术操作难度大,辐照剂量难以控制^[3]。为满足消费者日益增长的对高品质物质需求,改良现有的保鲜技术势在必行。

研究表明,电场能影响食品内部电生物效应而抑制酶活^[4],电场电离空气产生的臭氧与负离子可有效抑制食品表面微生物的生长繁殖^[5-6],因而延长食品的货架期。此外,在低温条件下,电场还可延缓冰晶的形成,减小冰晶的尺寸,从而降低冰晶对猪里脊肉微观结构的破坏^[7]。李里特等^[8-9]将静电场应用到黄瓜和豇豆保鲜中,证明静电场能较好地减缓黄瓜的水分流失,推迟豇豆锈斑的出现。可见,电场技术作为一种新兴的保鲜技术日益得到同行的关注,但将电场与冰温技术结合应用在凡纳滨对虾的贮藏研究未有报道。本试验拟研究不同静电场强度结合冰温对贮藏过程中凡纳滨对虾品质的影响,比较不同静电场结合冰温技术的保鲜效果,旨在为静电场在凡纳滨对虾保鲜中的应用提供依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

鲜活凡纳滨对虾:35~40只/kg,购于湛江市东风市场;
乙腈:色谱纯,赛默飞世尔科技(中国)有限公司;
高氯酸:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;
平板计数琼脂、氯化钠、硼酸、氢氧化钠、轻质氧化镁:分析纯,广州化学试剂厂。

1.1.2 主要仪器设备

多功能静电冷冻实验机:NF-2型,台湾迪弗斯科技股份有限公司;
气调保鲜包装机:MAP-500D型,上海炬钢机械制造有限公司;
电子天平:YP20002型,上海佑科仪器仪表有限公司;
立式压力灭菌器:LDZX-50KBS型,上海申安医疗器械厂;
生化培养箱:SPX-150B-Z型,上海博讯实业有限公司;
冰箱:KK22F57TI型,西门子有限公司;
数显高速分散均质机:T25型,德国IKA公司;
全自动凯式定氮仪:VAP450型,德国格哈特分析仪器有限公司;
台式冷冻离心机:3K-15型,德国Sigma公司;
半制备高效液相色谱仪:Agilent 1200型,美国Agilent公司;
模块化高级流变仪:HAAKE MARS III型,美国Thermo Fisher Scientific公司。

1.2 方 法

1.2.1 样品预处理 鲜活凡纳滨对虾用碎冰猝死,冰水洗净、去头、去肠线,沥水晾干备用。剔除破损和鲜度不够的虾,然后将试样个体随机分组备用。

1.2.2 试验方法 向铝箔袋表面喷洒75%酒精,然后在无菌工作台中使酒精完全挥发,再开启紫外灯照射0.5h后,将备用鲜凡纳滨对虾随机分装入铝箔袋中、封口,再分组标记I、II、III、IV,放入相应静电场中贮藏,贮藏温度为冰温 $[-1\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}]$,试验设计见表1。每组样品于贮藏后第0天开始,每隔2d随机取样测定PPO相对酶活、白度值、感官评分、菌落总数、挥发性盐基氮、pH值、汁液流失率、K值和流变学特性。

表1 试验组设计

Table 1 Design for experiments

试验组编号	处理方式
I	冰箱对照组
II	1.5 kV 静电场
III	2.5 kV 静电场
IV	3.5 kV 静电场

1.2.3 PPO相对酶活 参考Simpson等^[10]方法稍作修改,取100 μL PPO酶液加入0.05 mol/L磷酸盐缓冲液(pH 6.0)400 μL,再加入15 mmol/L L-DOPA溶液(去离子水配置)600 μL,立即在45℃水浴中反应3 min。用紫外可见分光光度计检测475 nm处的吸光度。空白对照:用100 μL去离子水代替PPO酶液,其他按照上述操作执行。酶活定义:每分钟每毫升的酶在475 nm下吸光度值每增加0.001为1 U,按式(1)计算PPO酶活,式(2)计算PPO相对酶活。

$$X = \frac{A_1 - A_2}{V \times t} \times 1\ 000, \quad (1)$$

式中:

X——PPO酶活力,U/(min·mL);

A₁——PPO酶液的吸光度值;

A₂——空白对照的吸光度值;

V——酶液的体积,mL;

t——反应时间,min。

$$Y = \frac{X_1}{X_0} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

Y——相对酶活,%;

X₁——处理后PPO酶活力,U/(min·mL);

X₀——处理前PPO酶活力,U/(min·mL)。

1.2.4 白度值 参考Park^[11]方法稍作修改,采用CIE-L*a*b*法,用便捷式色差仪测定第一二腹节的L*、a*和b*值。每个处理组取10个平行样进行检测,结果取平均值。白度值按式(3)计算:

$$P = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + (a^*)^2 + (b^*)^2}, \quad (3)$$

式中:

- P ——白度值;
 L^* ——黑白(亮)度;
 a^* ——红绿度(a^+ +, 红色; a^+ -, 绿色);
 b^* ——黄蓝度(b^+ +, 黄色; b^+ -, 蓝色)。

1.2.5 感官评分 根据 Nirmal 等^[12]方法稍作修改,将虾样置于白色瓷盘或不锈钢工作台上,在光线充足无气味的环境中,由 10 名感官评定人员组成感官评定小组,按表 2 对凡纳滨对虾进行评分,并给出各自综合评分值,分值在 9 分(新鲜)和 1 分(完全腐败)之间,5 分以下则虾不可食用,评定分数取 3 项平均值后再进行统计分析。气味评定时,剥去虾壳或切开虾体嗅气味。

表 2 凡纳滨对虾感官评分表

Table 2 Sensory evaluation standard of *Litopenaeus vannamei*

感官得分	色泽	气味	肌肉组织
8~10	体表有光泽,虾体透明发亮	无异味,鲜虾特有鲜味	肉质紧密,弹性好,肉与壳连接紧密
5~8	色泽稍有变化,外壳光泽变暗	虾特有气味减弱,略有氨味或氯味	肉质较紧密,肌肉弹性略差,
3~5	色泽变化较大(变红或变黑),出现轻微可见黑斑	虾特有气味消失,氨味或氯味明显	肌肉弹性较差,肌肉与壳连接松弛
0~3	色泽发生明显变化,虾壳出现明显黑斑,外壳无光泽	有强烈的氨味或氯味	肌肉组织松软,没弹性,肌肉与壳分离严重

1.2.6 菌落总数 按 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》执行。

1.2.7 挥发性盐基氮 按 GB 5009.228—2016《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》执行。

1.2.8 pH 值 随机取样 3 组各 10.0 g,加 0.85% 无菌生理盐水 90 mL 均质 2 min,然后在室温 $[(20 \pm 2)^\circ\text{C}]$ 下静置 30 min,用精密数显酸度计测定 pH 值。

1.2.9 汁液流失率 根据岑剑伟等^[13]的方法,汁液流失率按式(4)计算:

$$D = \frac{W_2 - W_0}{W_1 - W_0} \times 100\%, \quad (4)$$

式中:

D ——汁液流失率, %;

W_0 ——贮藏前称量包装袋质量, g;

W_1 ——样品、包装袋及残留在袋内渗出汁液总质量, g;

W_2 ——取出虾肉后,包装袋及袋内渗出汁液质量, g。

1.2.10 K 值 参考 Li 等^[14]方法稍作改进。取 20 mL 预先冷却的 10% 高氯酸(PCA)溶液,加入 5.0 g 绞碎的虾肉中,均质,用 5% PCA 溶液 5 mL 冲洗,然后 4 $^\circ\text{C}$ 离心(8 000 r/min) 15 min,收集上清液。分别用 10 mol/L NaOH、1 mol/L NaOH 调节 pH 至 6.5~6.8,定容至 50 mL,滤膜(0.45 μm)

过滤, -30 $^\circ\text{C}$ 保存滤液,用 K 值测定。

1.2.11 流变学特性 参考郑鸯鸯等^[15]方法稍作修改,将已到期取样时间的凡纳滨对虾去头、壳和肠线,切碎后用匀浆机把虾肉绞碎。用干净的药匙将样品均匀涂布于测试台。流变仪设定条件:转子型号 P35 Ti L,振荡模式(Osc),频率 0.1 Hz,应变 1%,平行板间距 2.5 mm;温度范围 10~100 $^\circ\text{C}$,升温速率 2 $^\circ\text{C}/\text{min}$,测定其弹性模量 G' 的变化。

1.3 数据处理

每个试验重复 3 次,数据用“平均值 \pm 标准差”表示,用 JMP10.0 软件进行方差分析(ANOVA)和 Tukey's HSD 多重比较,采用 Origin 2017 软件绘制图形。

2 结果分析

2.1 电场强度对凡纳滨对虾 PPO 酶活的影响

对虾死后,蛋白质被降解的酪氨酸在 PPO 的催化作用下进行酶促反应,并形成大分子黑色物质,致使虾黑变,因此 PPO 酶活是黑变速率的关键因素^[16]。由图 1 所示,由于提取的新鲜酶液含有部分酶原,贮藏过程中被激活,致使各试验组 PPO 相对酶活总体呈先小幅上升后下降再上升的趋势,12 h 内各试验组均呈上升趋势,与黄万有等^[17]研究结果一致。I、II、III、IV 组相对酶活各组最大值分别达到 130.01%, 126.21%, 118.51%, 125.64%。贮藏第 2 天, PPO 酶活急剧降低, I 组相对酶活只有 75.21%, II、III、IV 组相对酶活略低于 I 组为 70.21%, 64.21%, 71.25%。各处理组 PPO 酶活均有下降,这是由于对虾死亡后体内糖原的无氧酵解生成乳酸等酸类物质使得 pH 值降低影响了 PPO 酶活^[18]。贮藏第 4 天起 PPO 相对酶活逐渐回升,贮藏过程中 II、III、IV 组始终低于 I 组, III 组始终低于其他试验组。说明静电场能有效抑制 PPO 活性,这应该与电场破坏了酶的二级结构,改变酶活中心的催化基团局部构象有关^[19-20]。

2.2 电场强度对凡纳滨对虾白度值的影响

白度是表示物体表面白色的程度,作为评价食品感官的重要指标,食品内水分流失、肌球蛋白变性均可影响食品表面散射度从而改变白度值。食品表面反射率低,白度值低,也可以说明食品感官品质下降^[21]。从图 2 可得,贮藏期间 I 组略低于电场各组,且在第 4 天有明显下降,并显著低于

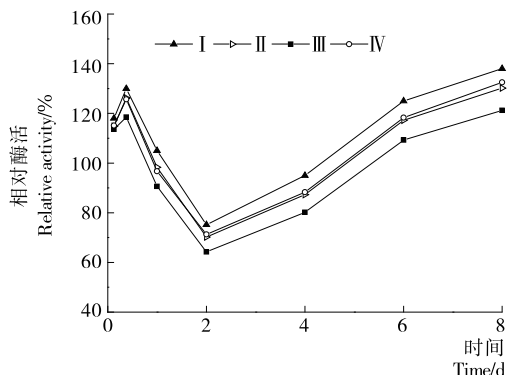
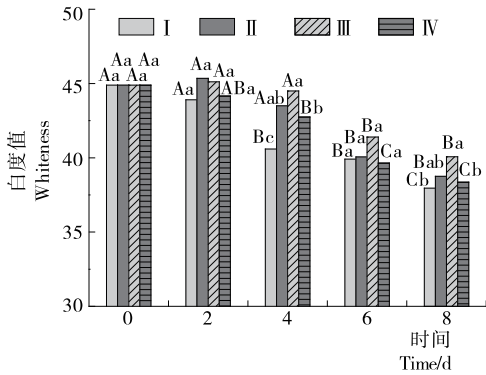


图 1 贮藏过程中静电场对 PPO 酶活的影响

Figure 1 Effects of different voltage electrostatic on PPO activity during storage



不同大写字母表示同试验组不同贮藏天数间差异显著 $P < 0.05$ ；不同小写字母表示同贮藏天数不同试验组间差异显著 $(P < 0.05)$

图2 贮藏过程中不同静电场对白度值的影响

Figure 2 Effects of different voltage electrostatic on whiteness value during storage

其他试验组,这与微生物生长大量繁殖以及 PPO 酶活回升产生的黑变有关。贮藏第 2 天 IV 组样品略低于 II、III 组,静电场强度越大样品的白度值越低,可能是电场作用下部分汁液的流失导致散射强度减弱而使虾样白度值降低^[22]。贮藏第 6 天起,静电场各组白度值迅速下降,各试验组之间差异不显著。这应该与静电场长时间作用导致大量汁液流失,使得微生物繁殖加速导致的虾肉腐败有关。总体来看,III 组样品白度值在贮藏第 4 天起一直优于其他试验组,可能是一定电场强度范围内 PPO 酶活得到抑制的作用。

2.3 电场强度对凡纳滨对虾感官评分的影响

由图 3 可知,在贮藏过程中,各试验组样品感官品质均有不同程度的下降,静电场各组相比 I 组感官评分下降较缓慢,这应该是静电场对 PPO 酶活和微生物的生长繁殖有抑制作用有关。贮藏第 2 天各组间差异不明显,各组间无显著差异,色泽、气味均保持良好。贮藏第 4 天,III 组表现出显著差异,I 组发生轻微黑变。贮藏后期 I 组出现明显的氨臭味。同时,虾壳变薄变软并且肉壳分离严重。这是由于微生物生长繁殖加速导致肌肉组织结构松散以及恶臭气味的产生,与汁液流失率和白度值的变化结果相一致。贮藏第 8 天,III 组异味明显较 I 组弱,且组织结构较好,黑变程度较弱。III 组样品的感官评分最高。

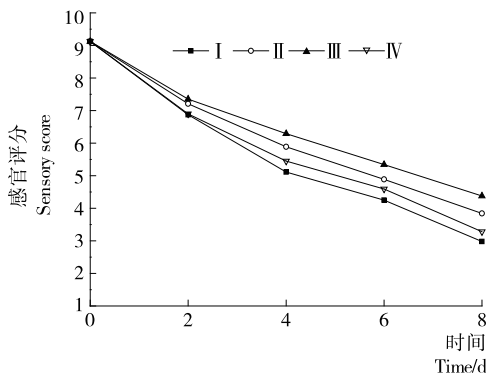
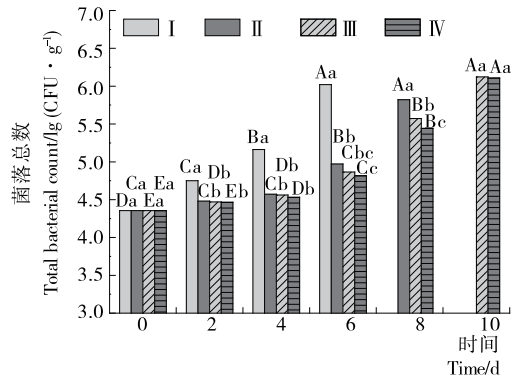


图3 贮藏过程中不同静电场对感官评分的影响

Figure 3 Effects of different voltage electrostatic on sensory score during storage

2.4 电场强度对凡纳滨对虾菌落总数的影响

如图 4 所示,整个贮藏过程中各试验组的菌落总数均呈上升趋势。贮藏期间电场组各组与空白组差异显著 $(P < 0.05)$,第 4 天空白组已达到 $5.16 \lg(\text{CFU/g})$ 。有研究^[23]表明,菌落总数达到 $5.0 \lg(\text{CFU/g})$ 以上即认为开始腐败。贮藏第 6 天,空白组样品菌落总数已达到 $6.03 \lg(\text{CFU/g})$,不可食用,电场组的菌落总数均低于 $5.0 \lg(\text{CFU/g})$,说明电场可抑制虾肉中细菌的生长。贮藏前 4 d,各电场组组间菌落总数差异不显著,原因可能是贮藏前期冰温环境严重抑制微生物的生长,使得静电效果相对不明显。贮藏第 6 天菌落总数开始迅速上升;第 8 天 II、III、IV 组菌落总数分别达到了 $5.82, 5.57, 5.44 \lg(\text{CFU/g})$,电场各组间呈显著性差异 $(P < 0.05)$,II 组达到贮藏终点。这可能是贮藏后期部分微生物已适应冰温环境,而电场通过改变了细胞膜的内外电位,影响正常跨膜运输从而扰乱了微生物的生长代谢,达到抑制或者杀灭微生物的作用^[24]。并且随着电场电压的升高,微生物的抑制效果越佳。贮藏第 10 天,III、IV 组菌落总数均已超过 10^6 CFU/g 。



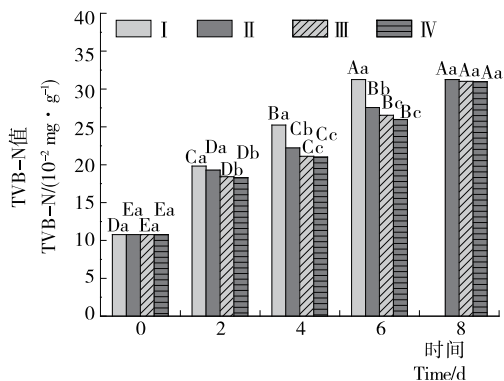
不同大写字母表示同试验组不同贮藏天数间差异显著 $P < 0.05$ ；不同小写字母表示同贮藏天数不同试验组间差异显著 $(P < 0.05)$

图4 贮藏过程中不同静电场对菌落总数的影响

Figure 4 Effects of different voltage electrostatic on total bacterial count during storage

2.5 电场强度对凡纳滨对虾挥发性盐基氮(TVB-N 值)的影响

TVB-N 主要是蛋白质分解产生的氨、胺类等碱性含氮物质的统称,其含量越高,表明氨基酸破坏得越大^[25]。如图 5 所示,凡纳滨对虾 TVB-N 初始值为 $10.77 \text{ mg}/100 \text{ g}$,在贮藏期间各试验组 TVB-N 值快速增长。第 2 天起各试验组 TVB-N 值呈近翻倍增长趋势,空白对照(I 组)与 II 组样品的 TVB-N 上升较快,与 III、IV 组有显著性差异 $(P < 0.05)$ 。第 4 天时, I 组 TVB-N 值已经从第 2 天的 $19.82 \text{ mg}/100 \text{ g}$ 升至 $25.24 \text{ mg}/100 \text{ g}$, II、III、IV 组上升速度减缓,这是由于静电场对微生物生长繁殖及内源酶的抑制作用,从而延缓因细菌生长导致的虾肉蛋白分解。贮藏第 6 天, I 组 TVB-N 值已达到 $31.24 \text{ mg}/100 \text{ g}$,超过生鲜水产品 TVB-N 安全限量 $30 \text{ mg}/100 \text{ g}$ 。II、III、IV 组 TVB-N 值分别达到了 $27.54, 26.54, 25.97 \text{ mg}/100 \text{ g}$,这与菌落总数趋势一致。除第 0 天



不同大写字母表示同试验组不同贮藏天数间差异显著 $P < 0.05$); 不同小写字母表示同贮藏天数不同试验组间差异显著 ($P < 0.05$)

图 5 贮藏过程中静电场对 TVB-N 的影响

Figure 5 Effects of different voltage electrostatic on TVB-N during storage

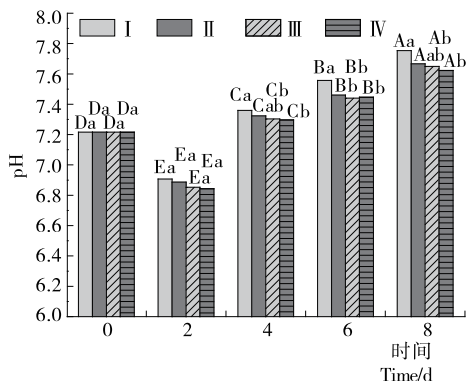
之外贮藏前 6 d 内, II 组 TVB-N 值显著高于 III、IV 组 ($P < 0.05$), 但 III、IV 组无显著性差异。

2.6 电场强度对凡纳滨对虾 pH 值的影响

pH 值可以作为虾肉鲜度的一项重要参考指标。一般来说, 水产动物死亡后 pH 值呈现先降后升的趋势^[26]。如图 6 所示, 各组的样品都在第 2 天达到最低值, 这是虾死后体内糖原的无氧酵解生成乳酸等酸类物质使 pH 值降低的结果。随后各组样品 pH 值开始持续增加, 这是由于贮藏后期内源酶和微生物的作用, 蛋白质被分解产生含氮类物质导致 pH 值上升^[27]。贮藏第 8 天, II、III、IV 组 pH 值分别达到了 7.67, 7.65, 7.62, 显著低于 I 组的 7.75 ($P < 0.05$)。贮藏前期电场各组与空白组无明显差距, 证明静电场对贮藏前期 pH 值无显著作用, 第 4 天起 II、III、IV 组与 I 组差异显著, 可能是部分微生物和内源酶的活性得到抑制。

2.7 电场强度对凡纳滨对虾汁液流失率的影响

贮藏期间用汁液流失率来反映虾肉品质的变化状况。汁液流失率高, 则肉质口感差, 产品色泽暗淡, 营养成分流失大, 这都会影响市场销售。而且流失的汁液为微生物生长繁

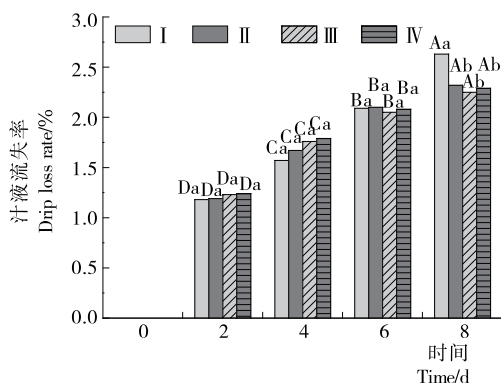


不同大写字母表示同试验组不同贮藏天数间差异显著 $P < 0.05$); 不同小写字母表示同贮藏天数不同试验组间差异显著 ($P < 0.05$)

图 6 贮藏过程中静电场对 pH 的影响

Figure 6 Effects of different voltage electrostatic on pH during storage

殖提供了良好的营养条件。从图 7 可以看出, 随贮藏时间的延长, 各组样品的汁液流失率缓慢升高。前 4 d, 电场各组略高于 I 组, 而且随着电场电压的升高汁液流失率有上升趋势。这可能与静电场使水发生共鸣现象, 引起水结构及结合状态发生变化, 使得食品中部分水更易流失^[28]。贮藏第 6 天起, 电场各组汁液流失率与 I 组持平, 而且贮藏前 6 d 各试验组间均无明显差异 ($P < 0.05$), 但贮藏第 8 天电场各组明显低于 I 组 ($P < 0.05$)。这可能是在贮藏后期空白组微生物大量繁殖破坏细胞结构导致大量汁液流失, 而电场组抑制了部分微生物的繁殖。



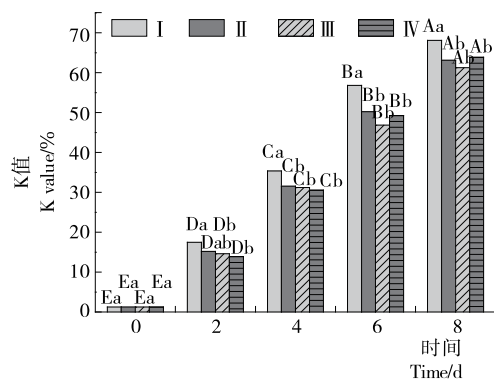
不同大写字母表示同试验组不同贮藏天数间差异显著 $P < 0.05$); 不同小写字母表示同贮藏天数不同试验组间差异显著 ($P < 0.05$)

图 7 贮藏过程中静电场对汁液流失率的影响

Figure 7 Effects of different voltage electrostatic on drip loss rate during storage

2.8 电场强度对凡纳滨对虾 K 值的影响

K 值是以核苷酸的分解产物为计算依据的一种水产品鲜度指标。一般 K 值低于 20% 作为优良鲜度, K 值 $> 60\%$ 则不能作为加工原料被食用^[29]。由图 8 可见, 贮藏过程中各组样品的 K 值均呈线性增长, 总体上 II、III、IV 组略低与 I 组。贮藏第 2 天, 各试验组无明显差距, 并且保持在较新鲜的水平。随着贮藏时间的延长各组 K 值快速上升, 贮藏第 6 天, I 组样品 K 值为 56.82%, 接近不可食用加工标准。II、



不同大写字母表示同试验组不同贮藏天数间差异显著 $P < 0.05$); 不同小写字母表示同贮藏天数不同试验组间差异显著 ($P < 0.05$)

图 8 贮藏过程中静电场对 K 值的影响

Figure 8 Effects of different voltage electrostatic on K value score during storage

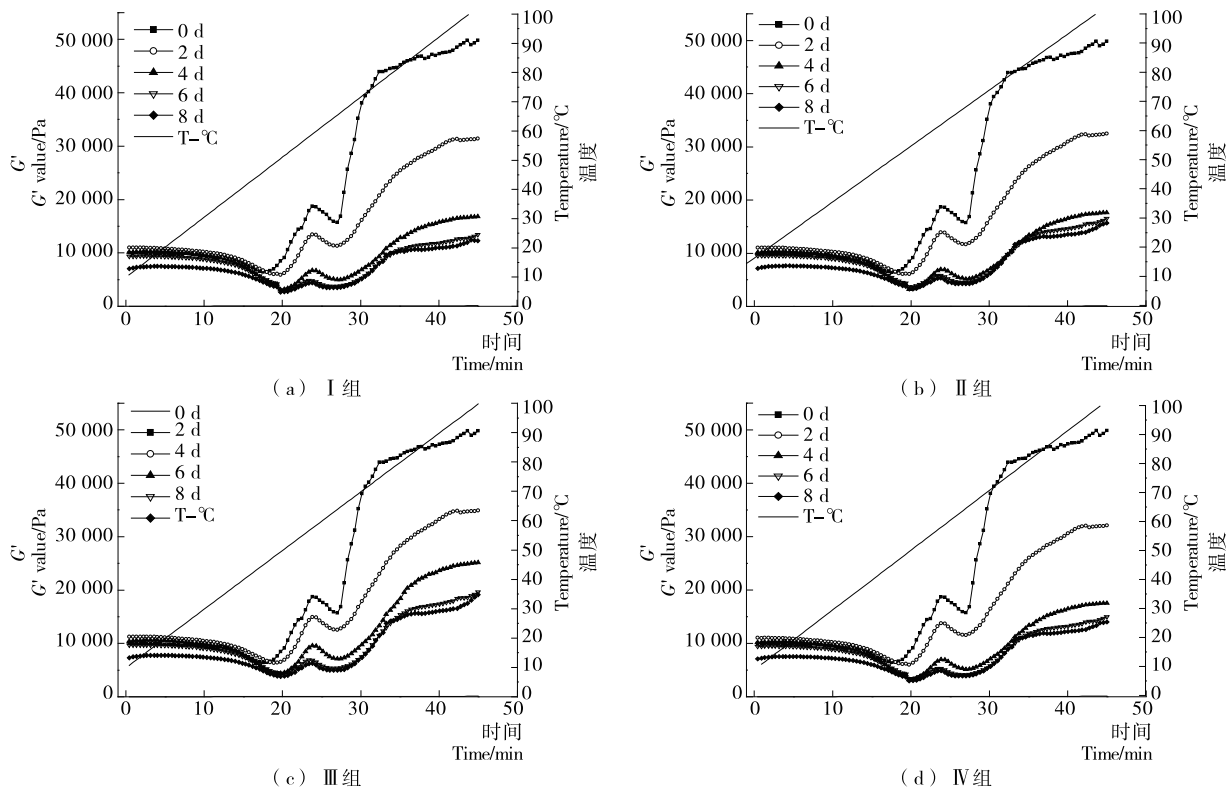


图9 贮藏过程中静电场对G'值的影响

Figure 9 Effects of different voltage electrostatic on G' value during storage

Ⅲ、Ⅳ组均显著低于Ⅰ组($P < 0.05$),且Ⅲ组样品效果最佳,这一趋势与PPO相对酶活相同。贮藏第8天,各组鲜度均超过60%,说明静电场可在一定程度上抑制核苷酸的降解速度。

2.9 电场强度对凡纳滨对虾流变学特性的影响

对虾死后肌肉在微生物和内源蛋白酶的作用下会逐渐软化,这是因为肌球蛋白重酶解肌球蛋白和轻酶解肌球蛋白有关,而肌球蛋白又是形成热诱导凝胶的主要蛋白质,在温度扫描过程中,虾肉肌球蛋白形成热诱导凝胶,发生了向凝胶态的转变,致使虾肉蛋白的流变学特性也随之发生改变^[30]。加热过程中G'值随着温度上升呈波浪式增长,此过程可划分为凝胶预备区、凝胶弱化区和凝胶加强区。由图9可以发现,相同贮藏时间下Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ组虾肉蛋白G'值总体大于Ⅰ组,说明电场处理下虾肉的凝胶弹性比空白组好,从而说明电场一定程度上抑制了虾肉的软化。但贮藏第4天,各试验组G'值下降迅速,Ⅲ组略优于其他各组,Ⅱ、Ⅳ组间无明显差异但略优于Ⅰ组。可能是静电场的作用力效果较弱无法有效抑制微生物的大量繁殖,同时静电场组汁液流失率较高都不利于虾肉蛋白热诱导凝胶的形成。贮藏第6天起,Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ组虾肉蛋白G'值与Ⅰ组无明显差异。总体上看,Ⅲ组样品G'值最优。

3 结论

本试验研究了静电场结合冰温对凡纳滨对虾贮藏期间品质的影响,发现静电场与冰温作用可改善虾肉色泽,延缓黑变,减缓肌肉组织结构及感官品质的下降。同时,静电场与冰温还可延缓核苷酸的降解,抑制pH值的上升。在贮藏

后期,静电场结合冰温对微生物的生长繁殖有所抑制,并能显著抑制凡纳滨对虾的腐败和不良气味的产生。

因此,静电场结合冰温技术在凡纳滨对虾保鲜上存在一定的应用前景,可为凡纳滨对虾保鲜技术的开发提供一条新的思路。但静电场是通过何种途径改善贮藏期间凡纳滨对虾的品质,在贮藏期间对腐败微生物与内源酶的作用机理尚不清楚,有待进一步研究。

参考文献

- [1] 张高静,韩丽萍,孙剑锋,等. 南美白对虾营养成分分析与评价[J]. 中国食品学报, 2013, 13(8): 254-260.
- [2] 赵金红,胡锐,刘冰,等. 几种冷冻新技术对食品冻结过程中冰晶形成的影响[J]. 食品与机械, 2012, 28(6): 241-245.
- [3] 彭玲,徐远芳,张祺玲,等. ⁶⁰Co γ 射线辐照对酱卤鸡爪杀菌效果及品质的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(12): 110-114.
- [4] TOEPFL S, HEINZ V, KNORR D. High intensity pulsed electric fields applied for food preservation[J]. Chemical Engineering & Processing Process Intensification, 2007, 46(6): 537-546.
- [5] ARONSSON K, BORCH E, STENLÖF B, et al. Growth of pulsed electric field exposed Escherichia coli in relation to inactivation and environmental factors[J]. International Journal of Food Microbiology, 2004, 93(1): 1-10.
- [6] WOUTERS P C, BOS A P, UECKERT J. Membrane permeabilization in relation to inactivation kinetics of Lactobacillus species due to pulsed electric fields[J]. Applied & Environmental Microbiology, 2001, 67(7): 3 092-3 101.
- [7] XANTHAKIS E, HAVET M, CHEVALLIER S, et al. Effect

- of static electric field on ice crystal size reduction during freezing of pork meat[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2013, 20(4): 115-120.
- [8] 李里特, 方胜. 对静电场下果蔬保鲜机理的初步分析[J]. *中国农业大学学报*, 1996(2): 62-65.
- [9] 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*, 1999(2): 107-110.
- [10] SIMPSON B K, MARSHALL M R, OTWELL W S. Phenol oxidase from shrimp (*Penaeus setiferus*): purification and some properties[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1987, 35(6): 918-921.
- [11] PARK J W. Functional protein additives in surimi gels[J]. *Journal of Food Science*, 1994, 59(3): 525-527.
- [12] NIRMAL N P, BENJAKUL S. Use of tea extracts for inhibition of polyphenoloxidase and retardation of quality loss of Pacific white shrimp during iced storage[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2011, 44: 924-932.
- [13] 岑剑伟, 蒋爱民, 李来好, 等. 高压静电场结合冰温技术对罗非鱼片贮藏期品质的影响[J]. *食品科学*, 2016, 37(22): 282-288.
- [14] LI Qian, ZHANG Long-teng, LU Han, et al. Comparison of postmortem changes in ATP-related compounds, protein degradation and endogenous enzyme activity of white muscle and dark muscle from common carp (*Cyprinus carpio*) stored at 4 °C [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 78: 317-324.
- [15] 郑鸯鸯, 吉薇, 吉宏武, 等. 大豆胰蛋白酶抑制剂粗提物对凡纳滨对虾冷藏期间肌肉流变学与热学特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2016, 42(8): 214-219.
- [16] GONÇALVES A A. Melanosis in crustaceans; A review[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 65: 791-799.
- [17] 黄万有, 吉宏武, 刘书成, 等. 凡纳滨对虾 PPO 的组织分布和活性与其贮藏过程中黑变的关系[J]. *现代食品科技*, 2014(2): 89-94.
- [18] 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.
- [19] 钟葵, 胡小松, 吴继红, 等. 高压脉冲电场对脂肪氧化酶二级和三级构象的影响效果[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(3): 765-768.
- [20] KO Wen-ching, SHI Huai-zhi, CHANG Chao-kai, et al. Effect of adjustable parallel high voltage on biochemical indicators and actomyosin Ca²⁺-ATPase from tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 69: 417-423.
- [21] JUNG S, GHOUL M, MDE L A. Influence of high pressure on the color and microbial quality of beef meat[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2003, 36(6): 625-631.
- [22] HE Xiang-li, LIU Rui, 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.
- [23] AL-DAGAL M M, BAZARAA W A. Extension of shelf life of whole and peeled shrimp with organic acid salts and bifidobacteria[J]. *Journal of Food Protection*, 1999, 62(1): 51-56.
- [24] ZIMMERMANN U. Electrical breakdown, electropermeabilization and electrofusion [J]. *Rev Physiol Biochem Pharmacol*, 1986, 105(6): 176-256.
- [25] 郭美娟, 柴春祥, 鲁晓翔, 等. 南美白对虾腐败过程中挥发性成分的测定[J]. *食品与机械*, 2013, 29(4): 153-156.
- [26] 段振华. 水产品加工工艺学实验技术[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2009: 88.
- [27] 励建荣, 李婷婷, 丁婷. 水产品新鲜度综合评价与货架期预测模型的构建研究进展[J]. *食品科学技术学报*, 2016, 34(1): 1-8.
- [28] FARIDNIA F, MA Q L, BREMER P J, et al. Effect of freezing as pre-treatment prior to pulsed electric field processing on quality traits of beef muscles[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2015, 29: 31-40.
- [29] VOL N. Rapid method based on ATP catabolites for evaluating the freshness of baltic herring: interlaboratory study [J]. *Journal of Aoac International*, 1996, 79(3): 703-706.
- [30] RIEBROY S, BENJAKUL S, VISESSANGUAN W, et al. Acid-induced gelation of natural actomyosin from Atlantic cod (*Gadus morhua*) and burbot (*Lota lota*) [J]. *Food Hydrocolloids*, 2009, 23(1): 26-39.

(上接第 26 页)

- [24] VAN BOEKEL M A. Formation of flavour compounds in the Maillard reaction[J]. *Biotechnology Advances*, 2006, 24(2): 230-233.
- [25] 孟岳成, 何珊珊, 李延华, 等. 不同加热条件下牛乳美拉德反应程度的研究[J]. *现代食品科技*, 2015, 31(1): 158-165.
- [26] RANNOU C, LAROQUE D, RENAULT E, et al. Mitigation strategies of acrylamide, furans, heterocyclic amines and browning during the Maillard reaction in foods[J]. *Food Research International*, 2016, 90: 154-176.
- [27] 周涛. 热反应鸡汤呈味物质变化研究[D]. 重庆: 西南大学, 2016: 30-31.
- [28] 张艳. 冻结速率对鸡汤品质特性的影响研究[D]. 重庆: 西南大学, 2017: 48-49.
- [29] MOTTRAM D S. Flavour formation in meat and meat products: a review[J]. *Food Chemistry*, 1998, 62(4): 415-424.
- [30] WERKHOFF P, BRUENING J, EMBERGER R, et al. Isolation and characterization of volatile sulfur-containing meat flavor components in model systems[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1990, 38(3): 777-791.
- [31] TAO Hong, LIANG Qi, ZHANG Ming-di. Effect of heat treatment on hydrolysis degree of soybean protein[J]. *China Oils & Fats*, 2003, 28(9): 61-63.
- [32] 杜正莹. 化学反应与动态平衡移动原理[J]. *内蒙师院学报: 自然科学汉文版*, 1964(00): 45-50.
- [33] LIN Jau-tien, LIU Shih-chun C, HU Chao-chin, et al. Effects of roasting temperature and duration on fatty acid composition, phenolic composition, Maillard reaction degree and antioxidant attribute of almond (*Prunus dulcis*) kernel [J]. *Food Chemistry*, 2016, 190(1): 520-528.