

对虾低频电场冰温贮藏期间品质的变化

Quality change of prawn during low-frequency electric field ice temperature storage

余 铭^{1,2,3} 许丽娟⁴ 陈海强^{1,2} 梁钻好^{1,2}

YU Ming^{1,2,3} XU Li-juan⁴ CHEN Hai-qing^{1,2} LIANG Zuan-hao^{1,2}

陈姗姗³ 梁凤雪^{1,2} 敖菲菲^{1,2}

CHEN Shan-shan³ LIANG Feng-xue^{1,2} AO Fei-fei^{1,2}

(1. 阳江职业技术学院食品与环境工程系, 广东 阳江 529566; 2. 广东省食品低温加工工程技术研究中心, 广东 阳江 529566; 3. 浙江清华长三角研究院, 浙江 嘉兴 314006; 4. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广东 广州 510640)

(1. Department of Food and Environmental Engineering, Yangjiang Polytechnic, Yangjiang, Guangdong 529566, China; 2. Guangdong Provincial Engineering and Technology Research Center of Food Low Temperature Processing of Guangdong Province, Yangjiang, Guangdong 529566, China; 3. Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University, Jiaxing, Zhejiang 314006, China; 4. School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

摘要:目的:探究低频电场辅助冰温保鲜提高虾肉品质的可行性。方法:在冰温基础上施加低频电场(LFEF+冰温)保鲜对虾,监测贮藏期间对虾的丙二醛含量、盐溶性蛋白含量、Ca²⁺-ATPase 活性、pH 值、剪切力、色差和蛋白质分子量变化规律,并与常规冰温保鲜作对照。结果:相对于常规冰温保鲜处理,LFEF+冰温保鲜处理对虾肉的丙二醛含量、盐溶性蛋白含量、pH 值、剪切力、色泽无显著影响,但贮藏 3 d 后,低频电场辅助冰温保鲜可显著抑制虾肉 Ca²⁺-ATPase 活性的下降,其中贮藏第 15 天时 LFEF+冰温处理组的 Ca²⁺-ATPase 活性是常规冰温保鲜处理组的 2.20 倍。此外,低频电场辅助冰温保鲜可明显抑制肌球蛋白重链、肌动蛋白和原肌球蛋白条带密度的下降。结论:与常规冰温保鲜相比,低频电场冰温保鲜处理可显著抑制 Ca²⁺-ATPase 活性下降和蛋白质降解,维持蛋白质结构和性质的稳定,减缓虾肉品质劣变。

关键词:对虾;低频电场;冰温保鲜;品质

Abstract: Objective: This study aimed to explore the feasibility of

low-frequency electric field assisted controlled freezing-point storage (CFPS) technology improving the quality of shrimp.

Methods: Low-frequency electric field was applied on the basis of controlled freezing-point storage (LFEF + CFPS) to preserve prawns, and the contents of malondialdehyde and salt soluble protein, as well as the changes of Ca²⁺-ATPase activity, pH value, shear force, color difference and protein molecular weight of prawns were monitored. **Results:** Compared with the conventional CFPS, the LFEF+CFPS had no significant effect on the content of malondialdehyde, salt-soluble protein, pH, shear force and color of prawn meat. However, after 3 days of storage, LFEF + CFPS treatment significantly inhibit the decrease of Ca²⁺-ATPase activity, and the Ca²⁺-ATPase activity of LFEF + CFPS treatment group stored for 15 days was 2.20 times that of the CFPS treatment group. In addition, LFEF + CFPS treatment significantly inhibited the decrease in the density of myosin heavy chain, actin and tropomyosin bands. **Conclusion:** Compared with conventional CFPS treatment, LFEF + CFPS treatment significantly inhibited the decrease of Ca²⁺-ATPase activity and protein degradation, maintained the stability of protein structure and properties, and slowed down the deterioration of prawn meat quality.

Keywords: prawn; low-frequency electric field; controlled freezing-point storage; quality

基金项目:广东省省级(基础研究及应用研究)重大科研项目(编号:2017GKZDXM015);广东省教育厅普通高校重点科研平台(编号:2021GCZX017);阳江职业技术学院院级科研项目(编号:2021kjzd01)

作者简介:余铭(1973—),男,阳江职业技术学院教授级高级工程师,博士。E-mail:yuemin1973@126.com

收稿日期:2022-02-06 **改回日期:**2022-10-10

冰温保鲜是指将食品置于 0℃~冻结点温度区域保

持不冻结状态^[1]的一种中间温度带保鲜方法,常被用于水产保鲜,其优点是避免因过度冻结导致的质构劣变的同时延长食品的保鲜时间^[2,7]。但由于冰温保鲜的温度设置介于冻结和非冻结的临界点,当设备温度波动范围达不到要求时,可能会导致食品表面产生冰晶,表面冰晶在温度波动情况下极易融化,且冰晶对细胞造成的机械破坏会加速食品的汁液流失,进而导致食品质构劣变。因此,冰温保鲜技术对设备的温控要求非常严格^[1],这一方面导致该技术推广成本高,另一方面较高的温控精度要求会使压缩机频繁启停,能耗增加,设备使用寿命缩短,限制了冰温保鲜技术的大规模推广应用。

近年来,科研学者们专注于各种创新型辅助冷藏冷冻方式,如在冷藏冷冻系统中附加电场^[3-4]、磁场^[5]、超声波^[6-7]或微波^[8-9]等,通过控制冰核在食品中的形成方式和冰晶的生长^[10]达到促进过冷、提高食品冷藏冷冻质量。低频的频率范围为 ≤ 300 kHz^[11]。试验团队^[12]自主研发的低频电场(Low Frequency Electric Field, LFEF)技术,利用低频电场与食品中的水分子之间的共振干扰水分子氢键形成及稳定,从而抑制食品内部水分结冰,可应用于辅助食品低温保鲜。低频电场环境下,纯水在 $-8\sim 0$ °C贮藏不结冰;猪肉在 $-9\sim -2$ °C保鲜效果较佳,冰晶细小均匀,无需解冻直接可用刀切割;黄鱼在 $-6\sim -2$ °C下贮藏15 d,鱼眼保持清晰透亮,鱼体色泽光亮无异味。南美白对虾是中国重要养殖经济虾类,产量大,营养丰富,但由于南美白对虾冷藏保鲜时间相对较短,而冷冻贮藏又会导致虾肉口感变差,因此这类高值水产品适宜采用冰温保鲜^[13]。研究拟采用低频电场辅助冰温保鲜对虾,探究保鲜过程中虾肉品质变化规律,为低频电场在水产低温保鲜中的应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

南美白对虾:海水养殖,市售;

牛血清白蛋白、 Ca^{2+} -ATP酶测试盒:南京建成生物工程研究所;

氯化钾、三氯乙酸、硫代巴比妥酸(TBA)、硫酸铜、酒石酸钾钠、氢氧化钠、氯化钠:分析纯,天津市福晨化学试剂厂;

SDS-PAGE电泳液(Tris-Gly,10X)、考马斯亮蓝染色脱色液(常规法)、考马斯亮蓝染色液(常规法)、SDS-PAGE蛋白上样缓冲液(5X)、BeyoColor™彩色预染蛋白分子量标准(6.5~270 kD)、BeyoGel™ Plus PAGE预制胶(Tris-Gly,4%~20%,10孔):上海碧云天生物技术有限公司;

低频电场发生装置:根据文献^[12]实验室自主设计;

质构仪:CT3型,美国博勒飞公司;

彩色色差仪:CR-10型,柯尼卡美能达(中国)投资有限公司;

pH计:PHSJ-3F型,上海仪电科学仪器股份有限公司;

恒温恒湿箱:LHS-250CL型,上海齐欣科学仪器有限公司;

低温离心机:H2050R型,湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;

紫外可见分光光度计:SP-752型,上海光谱仪器有限公司;

脱色摇床:TS-100型,海门市其林贝尔仪器制造有限公司;

高电流电源:BeyoPower™型,上海碧云天生物技术有限公司;

蛋白制胶与电泳系统:MiniProGel™型,上海碧云天生物技术有限公司;

凝胶成像系统:Tanoon-1600型,上海天能科技有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 对虾保鲜 选取大小一致(质量12~16 g)的鲜活对虾4 °C预冷1 h后随机分成两组保鲜贮藏:①冰温,采用普通恒温恒湿箱作对照,进行常规冰温保鲜;②LFEF+冰温,采用自主改造的低频电场恒温恒湿箱(图1)进行低频电场辅助冰温保鲜,低频电场工作频率50 Hz,工作电压3 000 V。根据虾的冻结点 $-2.5\sim -2.0$ °C^[14-15],两组试验的保鲜温度均设置为 (-1 ± 1) °C,即0 °C至冻结点的温度区域,温控精度均为0.1 °C,温度波动 ± 1 °C,定期取样检测。

1.2.2 低频电场恒温恒湿箱 低频电场发生装置依据专利^[12]进行组装,装置由输入控制模块、电场信号发生模块、输出控制模块、电场发生模块和安全保护模块等组成。由两块发射器平衡固定在恒温恒湿箱舱体内部上下端并通过传导线与放置在恒温恒湿箱外部的低频电场发生装置(带开关)连接。低频电场发生装置通电后即可运行。

1.2.3 指标测定

(1) 盐溶性蛋白含量:根据文献^[16]。

(2) Ca^{2+} -ATPase活性:根据文献^[16]。

(3) 剪切力:根据文献^[17]。

(4) pH值:参照GB 5009.237—2016。

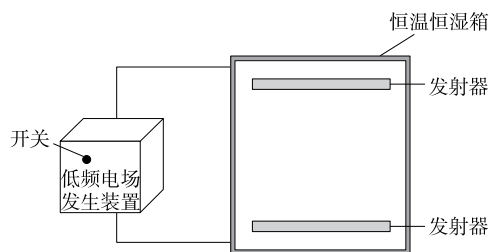


图1 低频电场恒温恒湿箱设计图

Figure 1 Design chart of constant temperature and humidity box with low voltage electrostatic field

(5) 丙二醛含量: 参照 GB 5009.181—2016。

(6) 色差: 对虾去头去壳, 取靠近虾头位置 1~3 腹节的虾肉, 纵向切开两瓣(尽量确保切面平整), 用色差计测定切面的亮度 L 值。

(7) 聚丙烯酰胺凝胶电泳(SDS-PAGE): 根据文献[18]测定。

1.2.4 数据处理 所有试验重复 3 次, 数据用平均值±标准差表示, 采用 Exce1 2010 处理试验数据。

2 结果与分析

2.1 LFEF+冰温保鲜对虾肉丙二醛含量的影响

由图 2 可知, 常规冰温保鲜 0~6 d, 虾肉丙二醛含量较低, 基本检测不出; 第 6 天后丙二醛含量明显增加, 以约 0.043 mg/(kg·d) 的速率直线上升, 第 16 天的丙二醛含量升至 0.41 mg/kg, 但仍远低于水产品中的建议最高限值(8 mg/kg^[19])。贮藏期间, LFEF+冰温组的虾肉丙二醛含量增加趋势与常规冰温组的一致, 二者之间无显著差异。

对虾保鲜第 6 天, 丙二醛含量明显增加, 与虾肉中微生物含量的变化密切相关, 贮藏前期微生物增加不明显, 又是脂肪氧化酸败诱导期, 故丙二醛含量较低, 贮藏后期微生物繁殖加速, 微生物作用可加速细胞脂肪氧化速率^{[20]18-29[21]}, 表现为脂肪氧化产生的丙二醛含量增加。这与刘欣荣^{[20]28-29}的结论一致, 只是样品种类不同, 贮藏期间丙二醛含量增加的时间略有差异。

2.2 LFEF+冰温保鲜对虾肉盐溶性蛋白含量的影响

由图 3 可知, 贮藏期间, 两种保鲜方式的对虾虾肉盐溶性蛋白含量均呈先平稳后下降趋势, 且两种保鲜方式之间无显著性差异。张龙腾等^[22]研究鲢鱼片在 -3℃ 贮藏, 其盐溶性蛋白含量在贮藏后期开始稍有下降。盐溶性蛋白含量下降速率与贮藏温度有显著关系^[23], 表明冰温条件对虾肉盐溶性蛋白的影响较小, 且主要影响在贮藏后期。

2.3 LFEF+冰温保鲜对虾肉 Ca^{2+} -ATPase 活性的影响

Ca^{2+} -ATPase 活性源于肌球蛋白的球状头部区域,

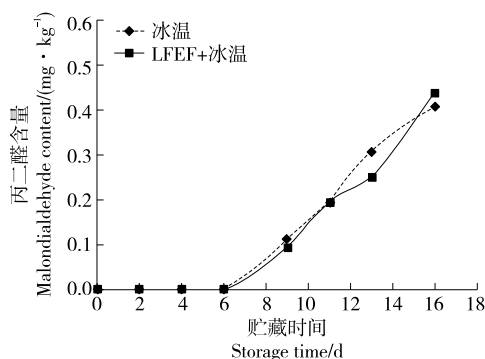


图 2 冰温保鲜过程中虾肉丙二醛含量的变化

Figure 2 Changes of MDA content on shrimp during controlled freezing-point storage

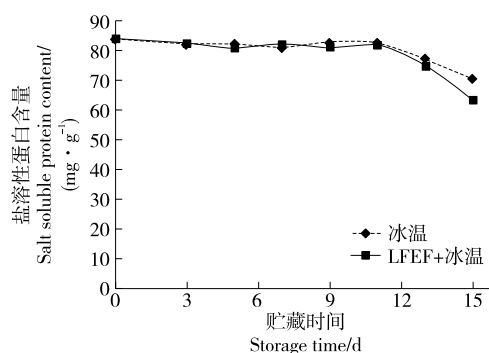


图 3 冰温保鲜过程中虾肉盐溶性蛋白含量的变化

Figure 3 Changes of salt soluble protein content on shrimp during controlled freezing-point storage

是衡量蛋白质冷冻变性的另一个重要指标^[16], 其活性值越高, 蛋白质冷冻变性程度越小, 品质越好^[23]。由图 4 可知, 冰温贮藏期间, 虾肉的 Ca^{2+} -ATPase 活性不断降低。贮藏 0~3 d, 虾肉 Ca^{2+} -ATPase 活性迅速降低了 44%, 此后平缓下降。贮藏 3 d 后, LFEF+冰温组的虾肉 Ca^{2+} -ATPase 活性下降程度显著小于对照组, 贮藏第 15 天, LFEF+冰温保鲜虾肉 Ca^{2+} -ATPase 活性是对照组的 2.21 倍, 说明 LFEF+冰温保鲜有利于减缓贮藏后期虾肉 Ca^{2+} -ATPase 活性的降低。

电场处理改变(提高或降低)酶活力的影响机制尚不清楚, 有可能是电场作用下电偶极矩的形成对分子结构的极化是影响生物大分子构象转变的原因^[24], 也有可能是电场对水分子作用的影响进而影响蛋白功能和构象, 电场也可能影响酶分子活性中心的次级键^[25]。岑剑伟^{[2]51}研究证明, 高压静电场可有效延缓罗非鱼片的 Ca^{2+} -ATPase 活性下降。此外, 尚柯等^[26]研究表明静电场辅助冷冻牛肉的蛋白冷冻变性程度小于常规冷冻组, 静电场处理可有助于维持牛肉肌球蛋白、肌浆蛋白的稳定性和抗变性能力。

2.4 LFEF+冰温保鲜对虾肉 SDS-PAGE 的影响

由图 5 可知, 不同处理组的虾肉样品均呈典型的肌

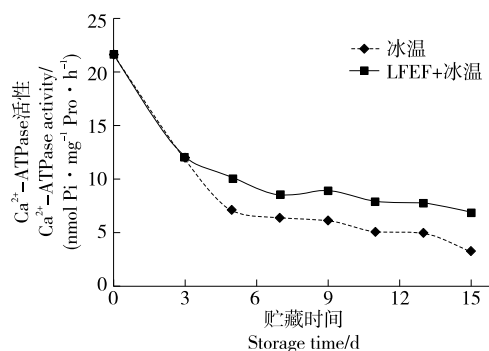


图 4 冰温保鲜过程中虾肉 Ca^{2+} -ATPase 活性的变化

Figure 4 Changes of Ca^{2+} -ATPase activity on shrimp during controlled freezing-point storage

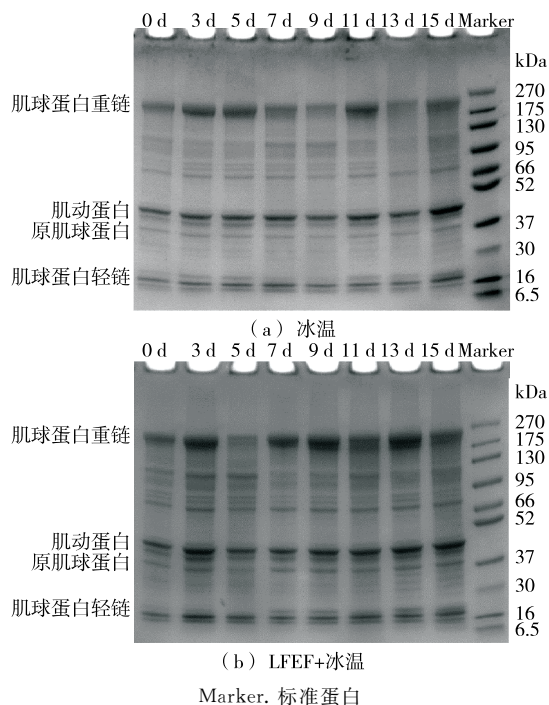


图5 冰温保鲜过程中虾肉 SDS-PAGE 图谱的变化
Figure 5 Changes of SDS-PAGE pattern of shrimp during controlled freezing-point storage

原纤维蛋白谱图模式,包括肌球蛋白重链(约 250 kDa)、肌动蛋白(约 45 kDa)、原肌球蛋白(约 38 kDa)和肌球蛋白轻链(约 20 kDa)。在低温保鲜贮藏 7 d 以上,LFEF+冰温处理虾肉蛋白质的肌球蛋白重链、肌动蛋白和原肌球蛋白条带密度均明显高于对照组,说明低频电场可有效抑制虾肉大分子蛋白质在冰温贮藏期间的降解,减缓虾肉品质劣变。

肌肉蛋白质结构和性质的稳定决定着低温保鲜贮藏期间肌肉品质的变化^[27]。低温保鲜贮藏过程中,蛋白质的变性影响因素是多方面的,内源性蛋白酶、微生物作用^[28]、水分迁移、冰晶形成^[29]等均会导致蛋白质变性。低频电场有助于维持虾肉蛋白质稳定性的原因可能归结于:① 电场对微生物的抑制作用或对内源代谢酶的钝化作用^[30];② 大冰晶的形成与重结晶会对细胞和肌纤维形成机械破坏并导致肌纤维横向收缩、水合作用减弱^[31],电场通过抑制冰晶的形成可减少蛋白变性程度。

2.5 LFEF+冰温保鲜对虾肉 pH 值的影响

由图 6 可知,保鲜贮藏期间,虾肉 pH 值不断上升,贮藏初期上升速率较快,后期上升速率相对缓慢。水产品死后,肌肉组织 pH 值一般会下降,但试验未检测到虾肉 pH 值下降,这与水产品的捕获和致死方式有关。捕获后猝死的水产品体内含有高浓度糖原,糖原和 ATP 的分解产生乳酸、磷酸,这些酸性物质的积累会导致肌肉 pH 值下降。尤其是回游性鱼类死后 pH 值下降较明显,较低

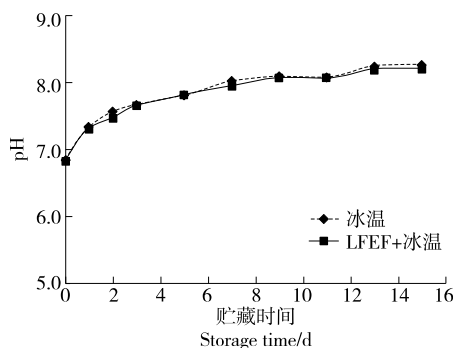


图6 冰温保鲜过程中虾肉 pH 值的变化

Figure 6 Changes of pH on shrimp during controlled freezing-point storage

pH 会导致蛋白质变性、品质劣变^[32]。试验所用对虾原料是在鲜活状态下直接进行冰温保鲜,对虾在保鲜过程中经过长时间挣扎,糖原被分解,死后肌肉中的糖原含量较低,后期厌氧酵解产生的乳酸较少,pH 值下降不明显。有研究^[33-34]表明,水产肌肉维持较高的 pH 值有利于肌原纤维晶格的扩展和蛋白质的稳定,从而保持原有的持水性、质构和色泽。

2.6 LFEF+冰温保鲜对虾肉剪切力的影响

由图 7 可知,贮藏期间,虾肉的剪切力持续下降,且贮藏 3~11 d,常规冰温组的虾肉剪切力略低于 LFEF+冰温组的,但二者之间无显著差异。保鲜过程中 pH 值、微生物和内源性蛋白酶的作用都会导致水产品质构的变化。

2.7 LFEF+冰温保鲜对虾肉色差的影响

由图 8 可知,低温保鲜贮藏期间虾肉亮度呈下降趋势,即虾体逐渐失去光泽,颜色变暗。对照组虾肉亮度持续下降,贮藏第 15 天的亮度值已下降了 25%;而 LFEF+冰温组的虾肉在贮藏 9 d 后亮度下降速率明显减缓,即低频电场有利于延缓冰温贮藏后期的虾肉色泽黑变。

虾肉色泽变化的主要原因是在氧化酶的作用下,虾体内的酚类物质和氧气反应形成醌类物质,进一步与蛋

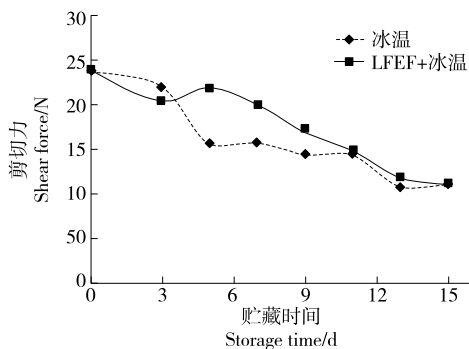


图7 冰温保鲜过程中虾肉剪切力的变化

Figure 7 Changes of shear force on shrimp during controlled freezing-point storage

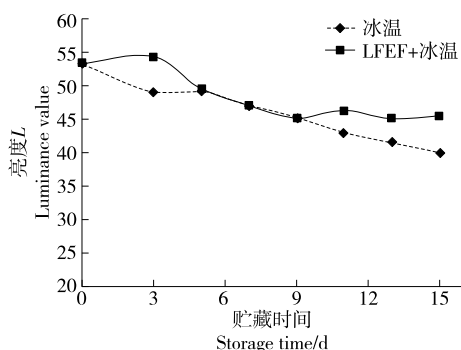


图 8 冰温保鲜过程中虾仁亮度的变化

Figure 8 Changes of luminance on shrimp during controlled freezing-point storage

白质或者氨基酸类物质结合成褐色的复合物^[35]。张珊等^[3]采用低压静电场保鲜凡纳滨对虾(−7℃)的贮藏过程中,虾的亮度也逐渐下降,且低压静电组的黑变速率明显小于对照组,与试验结果一致;其认为电场可能通过抑制多酚氧化酶酶活而延缓虾肉黑变。段伟文等^[30]也认为电场的保鲜原理是利用了其对于微生物抑制和对内源代谢酶钝化的作用。

3 结论

以常规冰温保鲜作为对照,考察了低频电场辅助冰温保鲜对虾贮藏过程中的品质变化。结果表明,两种处理方式下的虾肉丙二醛含量在贮藏第 6 天均开始明显增加,pH 值持续上升,盐溶性蛋白含量则在贮藏后期才开始下降,剪切力和亮度持续下降,但两种处理组间的丙二醛、pH 值、盐溶性蛋白含量、剪切力和亮度无显著性差异。贮藏 3 d 后,低频电场+冰温处理相对于常规冰温保鲜处理可有效延缓虾肉 Ca^{2+} -ATPase 活性的下降。此外,低频电场+冰温处理可明显抑制肌球蛋白重链、肌动蛋白和原肌球蛋白条带密度的下降,维持蛋白质结构和性质的稳定,减缓虾肉品质劣变。低频电场技术主要是通过干扰冰晶的形成,其影响主要作用于冰温贮藏期间虾肉的微观结构,肌纤维微观结构的变化直接影响到虾肉的口感、汁液流失率和蛋白的持水性,后续将侧重于该方面的研究以及其影响机制的探讨。

参考文献

- [1] 侯博玉, 王金庆, 徐鸣, 等. 黑鱼香肠冰温贮藏期品质的变化[J]. 食品与机械, 2022, 38(8): 136-143, 221.
HOU B Y, WAN J Q, XU M, et al. Study on quality change of snakehead sausage during the frozen storage[J]. Food & Machinery, 2022, 38(8): 136-143, 221.
- [2] 岑剑伟. 冰温气调结合高压静电场对罗非鱼片保鲜及其机理研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
CHEN J W. Effect of high voltage electrostatic field combined with modified atmosphere packaging and controlled freezing-point

- storage on the quality of tilapia fillet and its mechanism research [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016.
- [3] 张珊, 林慧敏, 邓尚贵. 低压静电场对凡纳滨对虾保鲜效果的研究[J]. 食品科技, 2020, 45(10): 141-147.
ZHANG S S, LIN H M, DENG S G. Effect of low voltage electrostatic field on fresh-keeping of *Litopenaeus Vannamei* [J]. Food Science and Technology, 2020, 45(10): 141-147.
- [4] 张亚瑾, 焦阳. 冷冻和解冻技术在水产品中的应用研究进展[J]. 食品与机械, 2021, 37(1): 215-221, 236.
ZHANG Y J, JIAO Y. Research status and prospect of freezing and thawing technologies of aquatic products [J]. Food & Machinery, 2021, 37(1): 215-221, 236.
- [5] OKUDA K, KAWAUCHI A, YOMOGIDA K. Data of the freezing curves of tuna blocks with or without the weak oscillating magnetic fields[J]. Data in Brief, 2020, 31: 105852.
- [6] TIAN Y, CHEN Z, ZHU Z, et al. Effects of tissue pre-degassing followed by ultrasound-assisted freezing on freezing efficiency and quality attributes of radishes[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 67: 105162.
- [7] ASTRAIN-REDIN L, ABAD J, RIEDER A, et al. Direct contact ultrasound assisted freezing of chicken breast samples [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 70: 105319.
- [8] SADOT M, CURET S, CHEVALLIER S, et al. Microwave assisted freezing part 2: Impact of microwave energy and duty cycle on ice crystal size distribution[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 62: 102359.
- [9] JHA P K, CHEVALLIER S, XANTHAKIS E, et al. Effect of innovative microwave assisted freezing (MAF) on the quality attributes of apples and potatoes [J]. Food Chemistry, 2020, 309: 125594.
- [10] 甄欠, 苏格毅, 张雪, 等. 静电场对冷冻食品冰晶生长影响的相场法模拟[J]. 食品与机械, 2022, 38(2): 143-147.
ZHEN B, SU G Y, ZHANG X, et al. Phase field simulation of the effect from electrostatic field on frozen food ice crystal growth[J]. Food & Machinery, 2022, 38(2): 143-147.
- [11] 庞小峰. 生物电磁学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 66.
PANG X F. Bioelectromagnetis [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 66.
- [12] 余铭. 低频交变电场发生装置及系统: CN201720224494.0[P]. 2017-09-29.
YU M. Low frequency alternating electric field generator and system: CN201720224494.0[P]. 2017-09-29.
- [13] 郭芳, 周铭懿, 张抒爱, 等. 冰温技术结合生物保鲜剂对中国对虾品质的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(15): 274-280.
GUO F, ZHOU M Y, ZHANG S A, et al. Effects of ice temperature technology combined with biological preservatives on the quality of Chinese shrimp[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(15): 274-280.
- [14] RAHMAN M S, DRISCOLL R H. Freezing points of selected seafoods (invertebrates) [J]. International Journal of Food Science & Technology, 1994, 29(1): 51-61.

- [15] 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(7): 1-12.
- WANG X D, XIE C, LIANG R P, et al. Effect of low voltage electrostatic field treatment on the quality of *Penaeus japonicus* during microfreezing storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(7): 1-12.
- [16] 梁钻好, 陈海强, 梁凤雪, 等. 液浸速冻对牡蛎水分迁移及品质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(23): 233-238.
- LIANG Z H, CHEN H Q, LIANG F X, et al. Impact of immersion freezing on oyster quality and water migration[J]. Food Science, 2019, 40(23): 233-238.
- [17] 梁钻好, 陈海强, 梁凤雪, 等. 基于水分迁移分析热风—热泵联合干燥对虾肉品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(22): 134-141.
- LIANG Z H, CHEN H Q, LIANG F X, et al. Effect of hot air and heat pump combined drying on prawn meat quality based on water migration analysis[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(22): 134-141.
- [18] CHEN H Q, ZHOU A M, BENJAKUL S, et al. The mechanism of low-level pressure coupled with heat treatment on water migration and gel properties of *Nemipterus virgatus* surimi[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 150: 112086.
- [19] ERSOY B, AKSAN E, ÖZEREN A. The effect of thawing methods on the quality of eels (*Anguilla anguilla*) [J]. Food Chemistry, 2008, 111(2): 377-380.
- [20] 刘欣荣. 不同贮藏方式对红鳍东方鲀品质的影响研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2020.
- LIU X R. Study on the effects of different storage methods on the quality of *Takifugu rubripes* [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2020.
- [21] 郑静静. 冷冻加工对小龙虾品质影响的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020: 11-15.
- ZHENG J J. Study on the effect of frozen processing on the quality of crayfish [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020: 11-15.
- [22] 张龙腾, 吕健, 李清正, 等. 鲢鱼片在微冻贮藏中品质、ATP 关联物及关联酶活性变化规律研究[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(11): 77-83.
- ZHANG L T, LU J, LI Q Z, et al. Changes of quality, ATP-related compounds and enzyme activities in silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) fillets during partial freezing[J]. Journal of China Agricultural University, 2016, 21(11): 77-83.
- [23] 余璐涵, 陈旭, 蔡茜茜, 等. 鱼糜蛋白冷冻变性规律及调控方法研究进展[J]. 食品与机械, 2020, 36(8): 1-8.
- YU L H, CHEN X, CAI X X, et al. Research progress of change rules in freezing denaturation of surimi protein and its regulatory methods[J]. Food & Machinery, 2020, 36(8): 1-8.
- [24] 黄艺, 李丹丹, 杨卿, 等. 电场处理对酶活力的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(11): 377-388.
- HUANG Y, LI D D, YANG N, et al. The effects of electric field treatments on enzyme activity[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(11): 377-388.
- [25] WOO M W, MUJUMDAR A S. Effects of electric and magnetic field on freezing and possible relevance in freeze drying[J]. Drying Technology, 2010, 28(4): 433-443.
- [26] 尚柯, 杨方威, 李侠, 等. 静电场辅助冻结—解冻对肌肉保水性及蛋白理化特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(3): 157-162.
- SHANG K, YANG F W, LI X, et al. Effect of electrostatic field-assisted freezing-thawing on water-holding capacity and physicochemical characteristics of beef muscle proteins[J]. Food Science, 2018, 39(3): 157-162.
- [27] 陈赛, 刘永乐, 俞健, 等. 壳聚糖复合保鲜对草鱼肌肉蛋白质变化的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(11): 207-212.
- CHEN S, LIU Y L, YU J, et al. Effect of a natural preservative combination containing chitosan on changes in muscle proteins from grass carp during cold storage[J]. Food Science, 2019, 40(11): 207-212.
- [28] 黄昊, 何涓源, 赖思婷, 等. 复配天然保鲜剂对青虾冷藏保鲜效果的影响[J]. 保鲜于加工, 2021, 21(8): 15-20.
- HUANG H, HE J Y, LAI S T, et al. Influence of compound natural preservative on preservation effect of *Macrobrachium nipponense* during refrigeration[J]. Storage and Process, 2021, 21(8): 15-20.
- [29] 谢晶, 程浩. 冻藏水产品蛋白质变化与控制措施研究进展[J]. 上海海洋大学学报, 2021, 30(5): 905-912.
- XIE J, CHENG H. Effect of frozen storage on the myofibrillar protein of aquatic products [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2021, 30(5): 905-912.
- [30] 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 W W, QUAN Q G, GAO J, 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.
- [31] ZHANG Y, ERTBJERG P. On the origin of thaw loss: Relationship between freezing rate and protein denaturation[J]. Food Chemistry, 2019, 299(30): 125104.
- [32] LEYGONIE C, BRITZ T J, HOFFMAN L C. Impact of freezing and thawing on the quality of meat: Review[J]. Meat Science, 2012, 91(2): 93-98.
- [33] ERTBJERG P, PUOLANNE E. Muscle structure, sarcomere length and influences on meat quality: A review[J]. Meat Science, 2017, 132: 139-152.
- [34] CHAN J T Y, OMANA D A, BETTI M. Effect of ultimate pH and freezing on the biochemical properties of proteins in turkey breast meat[J]. Food Chemistry, 2011, 127(1): 109-117.
- [35] 汤夕瑶, 张旭飞, 任惠峰, 等. 冷藏过程中凡纳滨对虾颜色变化与鲜度指标间的相关性研究[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(9): 170-178.
- TANG X Y, ZHANG X F, REN H F, et al. Study on the correlation between the color change and freshness indexes of *Litopenaeus vannamei* during cold storage [J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(9): 170-178.