

低压变频电场结合微冻对鲈鱼保鲜效果的影响

沈俊¹, 吴越¹, 尚子寒¹, 谢超¹, 虞舟^{2*}

(1. 浙江海洋大学 食品与药学学院, 浙江 舟山 310000; 2. 舟山汇丰冷藏物流发展有限公司, 浙江 舟山 316002)

摘要:以鲈鱼(*Pneumatophorus japonicus*)为研究对象,讨论低压变频电场中的电场强度对鲈鱼微冻保鲜效果的影响,采用3 000 V/m 50 Hz、2 000 V/m 50 Hz的低压变频电场设备,对储藏过程中水分、pH值、挥发性盐基氮含量、菌落总数进行研究,通过扫描电镜研究组织微观结构。结果显示,随着微冻储藏时间的延长,2 000 V/m电场组,3 000 V/m电场组与无电场组鲈鱼中的挥发性盐基氮含量逐渐上升,但电场组的挥发性盐基氮含量显著低于无电场组($p < 0.05$),并且上升速度缓慢,场强越大抑制效果越明显;贮藏第20天时,电场组菌落总数显著低于无电场组($p < 0.05$),但随着电场强度增大抑制效果越不明显。低压变频电场可以减缓鱼体pH值变化,第20天时电场组pH值低于无电场组。扫描电镜观察可以发现,贮藏过程中鲈鱼肌肉组织间隙逐渐变大,而电场组鲈鱼肌肉组织间隙较小,说明电场对鱼体肌肉组织也有较好的保护效果。随着贮藏时间的延长,鲈鱼水分含量逐渐降低,电场组的水分含量小于无电场组,说明电场会加速贮藏过程中鲈鱼水分的流失。

关键词: 低压变频电场;微冻;鲈鱼;保鲜;菌落总数

Effect of Low-Voltage Variable Frequency Electric Field Combined with Partial Freezing on Preservation of *Pneumatophorus japonicus*

SHEN Jun¹, WU Yue¹, SHANG Zi-han¹, XIE Chao¹, YU Zhou^{2*}

(1. School of Food Science and Pharmaceutics, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 310000, Zhejiang, China;
2. Zhoushan Huifeng Frozen Logistics Development Co., Ltd., Zhoushan 316002, Zhejiang, China)

Abstract: In this paper, the fish (*Pneumatophorus japonicus*) was studied, and the effect of low-voltage frequency conversion electric field intensity on the preservation of *P. japonicus* was discussed. The electric field equipment (3 000 V/m 50 Hz and 2 000 V/m 50 Hz) was used. The water content, pH value, total volatile basic nitrogen and total bacterial count during storage were measured, and the microstructure was explored by electron microscope scanning. The paper provides a theoretical basis for the safety, quality control and technology research and development of fish partial freezing storage. The results showed that with the extension of storage time, the total volatile basic nitrogen in 2 000 V/m, 3 000 V/m and no electric field groups gradually increased, while the value in 2 000 V/m and 3 000 V/m electric field groups was significantly lower than that in no electric field group ($p < 0.05$), and the rising was slow. And greater field intensity led to more obvious inhibition effect. On the 20th day of storage, the total bacterial count in 2 000 V/m and 3 000 V/m electric field groups was significantly lower than that in no electric field group ($p < 0.05$), while with the increase of field intensity, the inhibition effect was less obvious. On the 20th day, the pH value in electric field groups was lower than that in no electric field group. The electron microscope scanning showed that the muscle tissue gap of *P. japonicus* became larger during storage, and that of *P. japonicus* in electric field groups was smaller, which indicated that electric field had better protection effect on muscle tissue of *P. japonicus*. With the extension of storage time, the water content of *P.*

基金项目:“十三五”国家重点研发计划重点专项(2019YFD0901604)

作者简介:沈俊(1996—),男(汉),硕士,研究方向:食品加工与安全。

*通信作者:虞舟(1964—),男,教授级高工,研究方向:食品工程。

japonicus decreased, and 2 000 V/m and 3 000 V/m electric field groups had less water content than no electric field group, which revealed that electric field would accelerate the water loss of *P. japonicus* during storage. This study could further optimize the preservation process of electric field, and provide reference for the application of low-voltage frequency conversion electric field.

Key words: low-voltage variable frequency electric field; partial freezing; *Pneumatophorus japonicus*; freshness preservation; bacterial count

引文格式:

沈俊, 吴越, 尚子寒, 等. 低压变频电场结合微冻对鲈鱼保鲜效果的影响[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(8): 9-15.

SHEN Jun, WU Yue, SHANG Zihan, et al. Effect of Low-Voltage Variable Frequency Electric Field Combined with Partial Freezing on Preservation of *Pneumatophorus japonicus*[J]. Food Research and Development, 2022, 43(8): 9-15.

鲈鱼(*Pneumatophorus japonicus*), 鲈形目, 鲈科, 鲈属, 又名青花鱼, 是典型的远洋暖水性鱼类。鲈鱼在中国的各个海域均有产出, 其中以中国东海的产量最多。2018年鲈鱼捕捞量达到43万吨^[1], 随着大黄鱼、小黄鱼以及带鱼资源的减少, 鲈鱼现在已经成为中国主要的经济鱼类之一^[2]。微冻是一种新型贮藏方式, 该法采用略低于冰点的温度进行贮藏保鲜, 能够在一定程度上保证食品自身品质, 还能明显抑制食品中大部分微生物的生长繁殖, 延长微冻产品的货架期, 是一种在不同区域之间流通的新型食品保鲜方式^[3-5]。现阶段对于鲈鱼保鲜的研究主要在冻鲜鲈鱼制品的贮藏以及运输过程中的品质控制方面^[6-12], 在新型保鲜技术, 例如低压变频电场保鲜鲈鱼等海水鱼方面鲜有研究。因此研究一种新型保鲜装置对于保证食品质量, 提升经济效益具有重大意义。

目前电场保鲜装置主要分为低压静电场、高压静电场、低压变频电场、高压变频电场等, 研究主要集中于果蔬、禽肉、瘦肉等方面。Hsieh等^[13]、郭衍银等^[14]在冬枣与胡萝卜中应用了低压静电场技术成功延长了水果的保质期。Bajgai等^[15]对蔬菜水果保鲜过程进行研究也得到相似结论, 低压静电场的处理能提高水果蔬菜的保质时间, 营养价值和新鲜度。Zhao等^[16]试验结果显示, 低压静电场的处理能够提高西红柿的抗氧化能力。贾红玲等^[17]发现, 电场在肉制品保鲜的应用中也能起到积极的作用。Hsieh等^[18]发现, 通过低压静电场的处理, 能够缩短冷冻鸡胸肉的解冻时间。孙芳等^[19]的研究发现, 相比于常温的对照组, 使用低压静电场技术能够使牛肉的解冻时间明显缩短, 降低汁液流失率。He等^[20]认为低压静电场处理能够提高肉制品在储藏过程中的嫩度。文献[21-22]研究显示, 低压静电场能明显提升冰冻鱼块的解冻速率, 并且明显降低挥发

性盐基氮含量。赵良等^[23]研究发现, 低压静电场能延长淡水鱼鱼片保质期。

低压变频电场(low-voltage variable frequency electric field)能够产生3 000、2 000 V/m的空间电场, 并以50 Hz的频率进行变向。低压变频电场可以影响食品内部水分子, 使之产生振动, 对食品冻结解冻速率产生影响。该方法能够一定程度上明显增快食品的冻结速率, 并且减少食品通过最大冰晶生成带的时间, 使食品中冰晶以较小形式存在, 能够明显提升食品冻藏品质。而且电场可以影响食品内部组织细胞的生物活性, 为了抵消外部电场达到平衡, 食品内部离子受到电场库仑力的作用发生定向转移, 在食品内部形成类似反向电场的状态, 能够达到延长食品货架期的目的^[24-25]。关于低压变频电场对海水鱼保鲜方面研究较少。为了探究低压变频电场对鲈鱼保鲜过程中理化指标、鲜度指标的影响, 本试验研究3 000、2 000 V/m频率都为50 Hz的低压电场环境下, 鲈鱼水分、挥发性盐基氮含量、菌落总数、pH值的变化, 为微冻储藏海水鱼品质控制和技术开发提供相关的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜鲈鱼: 市售。每次购买质量约500 g的新鲜鲈鱼, 全程无冻结情况产生。选用外观新鲜, 鱼体完整, 鱼鳃鲜红的鲈鱼; 随机分成3组置于冷库-4℃微冻储藏并进行试验。

氧化镁、甲基红、溴甲酚绿、氯化钠(均为分析纯): 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 平板计数琼脂: 上海博微生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

电子天平(BSA6202S): 赛多利斯科学仪器(北京)

有限公司;pH计(PHSJ-4F):上海仪电科学仪器股份有限公司;水分仪(SZ-GY):深圳冠亚水分仪科技有限公司;凯氏定氮仪(海能 K9840):山东海能科学仪器有限公司;高速冷冻离心机(TGL-16.5M):上海卢湘仪离心机仪器有限公司;涡旋混合器(HEC658):广州颂联伯图电子有限公司;净化工作台:上海力辰邦西仪器科技有限公司;低压变频电场发生装置:浙江驰力科技股份有限公司。

1.3 方法

1.3.1 样品处理

本试验所使用的低压变频电场装置由放电板与低压变频电场发生装置组成,放电板在试验冷库中产生稳定的低压变频电场,食品物料不与放电板进行直接接触,输出电压为 3 000 V 或 2 000 V 频率为 50 Hz。

将 21 条鲈鱼随机平均分成 3 组,使用透明聚乙烯包装袋进行包装,分别在 3 000 V/m 50 Hz、2 000 V/m 50 Hz 与不施加低压变频电场的条件下进行储藏,鱼体距离电场板均为 15 cm。

将鲈鱼放置于-4℃微冻冷库中储藏 5、10、15、20 d 后解冻(温度 4℃),测定解冻鲈鱼的水分、pH 值、挥发性盐基氮含量。

1.3.2 指标测定

1.3.2.1 水分含量测定

依据 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》^[26],结合实际进行略微修改,称取切碎的鱼肉 1.0 g,使用快速水分测定仪测定。将鱼肉放置于归零的样本盘中,开启自动水分测定仪,测定结束时读取数据并记录含水量,平行测定 3 次,取平均值。

1.3.2.2 pH 值测定

依据 GB 5009.237—2016《食品安全国家标准 食品 pH 值的测定》^[27],结合实际进行略微修改,选取 10.0 g 鱼肉,搅碎,加入蒸馏水至 100 mL,充分摇匀后室温静置 30 min,取上层液体使用 pH 计测定 pH 值,测定 3 次并取平均值。

1.3.2.3 挥发性盐基氮含量测定

鲈鱼的挥发性盐基氮含量测定依照 GB 5009.228—2016《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》^[28]中的第二法全自动凯氏定氮仪法进行检测。准确称取 10.0 g 搅碎的样品,加入 75 mL 蒸馏水,充分振摇后常温浸渍 30 min,连接到仪器之前加入 1 g 氧化镁,按照标准运行仪器。

1.3.2.4 菌落总数测定

鲈鱼菌落总数测定依照 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》^[29]进行。

1.3.2.5 肌肉组织微观结构观测

参考黄琼等^[30]的方法,对肌肉组织和肌纤维进行观测,将冷冻鱼肉的样品取出后,迅速垂直于肌肉纤维切成横截面 3 mm²,厚度 1 mm 的长方体肉柱,立刻放入电镜固定液中,在 4℃下固定 2 h 后通过扫描电镜进行观测。

1.4 数据统计分析

本试验使用 Origin2018 软件进行数据处理并分析制作图片,除特殊说明外,本次试验数据结果为 3 次平行测定的结果,采用 SPSS 统计分析软件进行显著性分析, $p<0.05$ 表示差异显著。

2 低压变频电场对鲈鱼微冻贮藏的影响

2.1 低压变频电场对水分含量的影响

不同电场强度对微冻鲈鱼保鲜中鲈鱼肌肉组织水分含量的影响如图 1 所示。

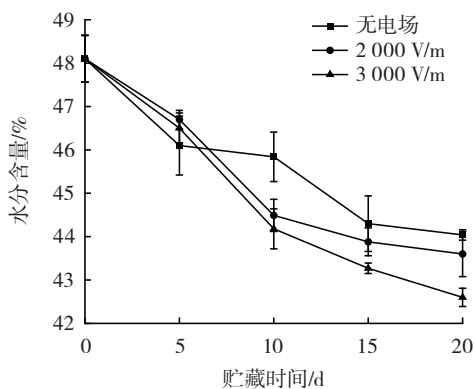


图1 不同处理条件对鲈鱼水分含量的影响

Fig.1 Effects of different treatment conditions on water content of *Pneumatophorus japonicas*

鲈鱼肌肉组织的含水量比较高,含水量与蛋白质含量、蛋白质品质特性有着直接的联系,鱼体的含水量变化与贮藏环境有着直接联系,水分含量的降低会影响食品的稳定性。所以,水分含量是评价鲈鱼鲜度的重要指标之一。鲈鱼在冷冻储藏的过程中细胞汁液会流失,导致水分含量降低^[31]。由图 1 可知,鲈鱼初始含水量为 48.14%,但是随着鲈鱼贮藏时间延长,2 000 V/m 电场组,3 000 V/m 电场组与无电场组中所有鲈鱼含水量都逐步下降,贮藏结束时分别降低至 43.67%、42.62%、44.04%。电场组水分含量下降的幅度均大于无电场组,水分含量下降可能是由于施加了低压变频电场后,鲈鱼鱼体中的水分子随着电场发生定向的振动,并对微冻情况下鲈鱼中冰晶的形成产生影响,进而影响鲈鱼在贮藏过程中水分的流失。随着电场强度的增大,水分含量降低明显,说明电场强度增大会降

低贮藏过程中鲈鱼的水分含量。

2.2 低压变频电场对 pH 值的影响

不同电场强度对微冻鲈鱼保鲜中鲈鱼肌肉组织 pH 值的影响如图 2 所示。

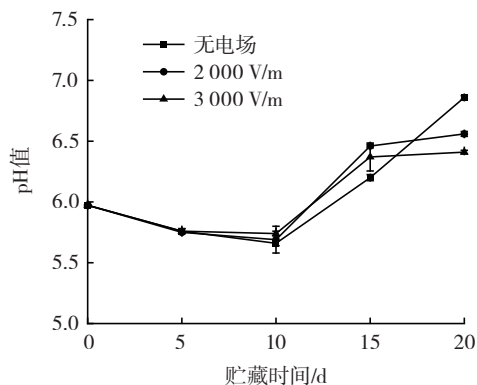


图 2 不同处理条件对鲈鱼 pH 值的影响

Fig.2 Effects of different treatment conditions on pH value of *Pneumatophorus japonicus*

鲈鱼死亡后,组织细胞呼吸模式转变为无氧糖酵解,鱼体内的糖原开始分解产生乳酸,使鱼体肌肉组织 pH 值下降,但随着贮藏时间延长,鱼体内糖原消耗殆尽,蛋白质在内源酶的作用下开始分解产生氨类等碱性物质,使得鱼体 pH 值上升。本试验贮藏前期 3 组 pH 值的差别不明显,贮藏第 10 天时 pH 值达到最低值,说明鲈鱼保鲜过程中的乳酸产量在此时达到峰值。从第 10 天开始鱼体 pH 值开始快速上升,这与顾赛麒等^[32]研究中 pH 值变化曲线趋势相似。第 15 天开始 2000 V/m,3000 V/m 的 pH 值趋于平缓,第 20 天时电场组 pH 值低于无电场组,而无电场组的 pH 值则继续上升,说明在低压变频电场的作用下有利于延缓鱼体内蛋白质的降解,阻止碱性物质继续生成,这与段伟文等^[33]研究电场对水产品 pH 值变化趋势相似,说明电场能够在一定程度上抑制变质过程,而且随着电场强度的增大,抑制效果更加明显。

2.3 低压变频电场对挥发性盐基氮含量的影响

不同电场强度对微冻鲈鱼保鲜中挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVBN)含量的影响如图 3 所示。

由于鲈鱼体内的细菌与内源性酶共同对蛋白质产生作用,导致鱼肉蛋白质一定程度的分解,产生具有碱性的含氮物质,如氨及胺类等。挥发性盐基氮含量的进一步上升,说明鱼肉的氨基酸受到更为严重的破坏。本试验得出新鲜鲈鱼中的 TVBN 含量为 10.60 mg/100 g,但随着贮藏时间延长,2000 V/m 电场组,3000 V/m 电场组与无电场组的 TVBN 含量进一步提升,电场组的上升速度比无电场组的上升速度慢,这与 Barba 等^[34]

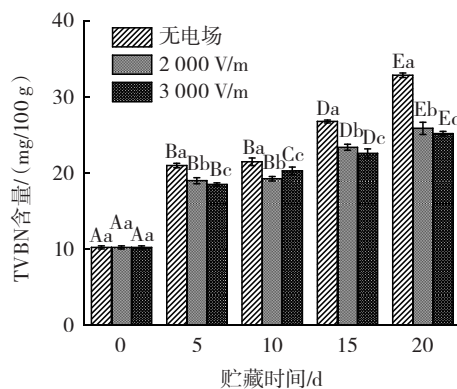


图 3 不同处理条件对鲈鱼挥发性盐基氮值的影响

Fig.3 Effects of different treatment conditions on total volatile

basic nitrogen of *Pneumatophorus japonicus*

研究结果一致。贮藏第 20 天时无电场组的挥发性盐基氮含量已经高达 32.90 mg/100 g,电场组的 TVBN 含量均显著低于无电场组($p<0.05$),并且随着电场强度的增加抑制效果愈发明显。根据 GB 2733—2015《食品安全国家标准 鲜、冻动物性水产品》中的规定,海鱼中的 TVBN 含量不应超过 30 mg/100 g,这表明无电场组的鲈鱼含量超标已经不可食用。据此可以推测,电场在一定程度上可以抑制鲈鱼体内酶以及细菌对蛋白质分解,减缓挥发性盐基氮的上升速率,并且电场越强,抑制效果越明显。

2.4 低压变频电场对菌落总数的影响

不同电场强度对微冻鲈鱼保鲜中菌落总数的影响如图 4 所示。

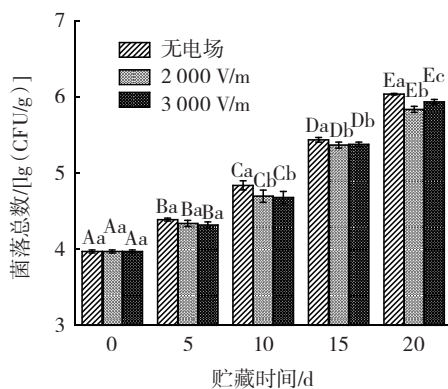


图 4 不同处理条件对鲈鱼菌落总数的影响

Fig.4 Effects of different treatment conditions on total bacterial count of *Pneumatophorus japonicus*

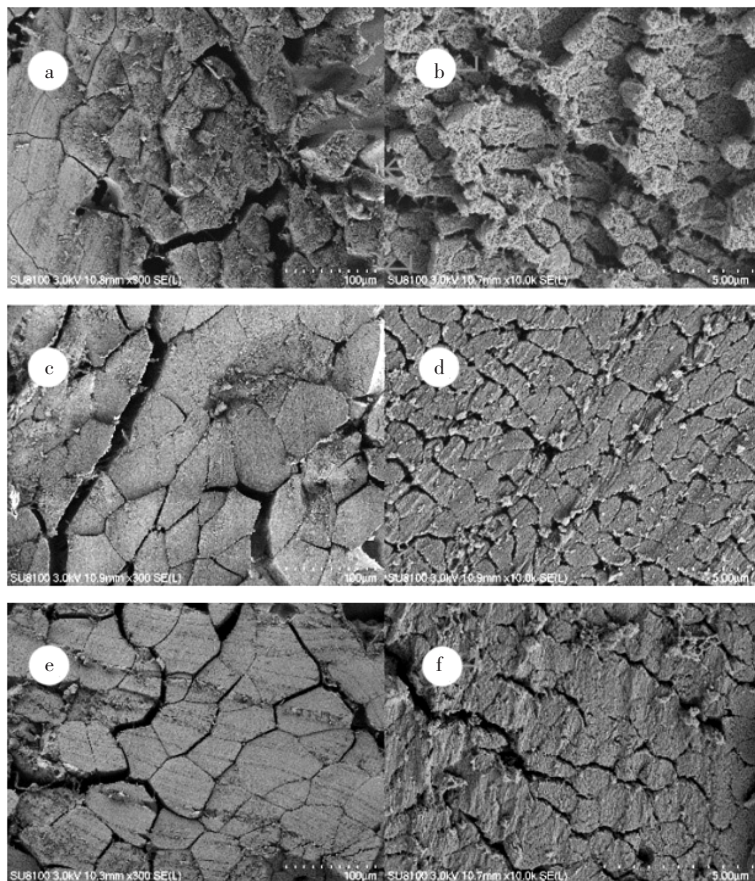
菌落总数是判断鱼鲜度的重要指标之一。从图 4 可以看出,整个贮藏期内鲈鱼菌落总数呈明显增长的趋势。

势,电场组与无电场组增长趋势比较相似。鲈鱼样本最初的菌落总数值为 $3.95 \lg(\text{CFU/g})$,这主要是因为鱼体中自身携带的内源性微生物与在船舶捕捞车辆运输过程中从外界环境中接触的外源性微生物一起作用导致的。在贮藏期间电场组的菌落总数始终低于无电场组,说明低压变频电场能够对食品中部分微生物的生长繁殖起到一定抑制作用。根据 GB 4789.2—2016 的规定,当菌落总数值大于 $6 \lg(\text{CFU/g})$ 时说明鲈鱼已经

变质不可食用。3 组贮藏条件下鲈鱼菌落总数均随着时间延长而增长,贮藏至第 20 天时 $2\,000 \text{ V/m}$ 组菌落总数最低,为 $5.84 \lg(\text{CFU/g})$,说明 $2\,000 \text{ V/m}$ 电场对微生物的生长繁殖抑制作用比 $3\,000 \text{ V/m}$ 电场更优,这与魏国平等^[35]的研究结果相似。

2.5 低压变频电场对肌肉组织微观结构的影响

不同电场强度对微冻鲈鱼保鲜中肌肉组织微观结构的影响如图 5 所示。



a~f 分别为无电场组 300 倍、无电场组 10 000 倍、 $2\,000 \text{ V/m}$ 组 300 倍、 $2\,000 \text{ V/m}$ 组 10 000 倍、 $3\,000 \text{ V/m}$ 组 300 倍、 $3\,000 \text{ V/m}$ 组 10 000 倍。

图 5 不同处理条件对鲈鱼肌肉组织微观结构的影响

Fig.5 Effects of different treatment conditions on microstructure of muscle tissue of *Pneumatophorus japonicus*

通过观察鲈鱼肉肌纤维之间的间隙大小和肌肉纤维完整性,可以看出低压变频电场对鲈鱼长期微冻贮藏的过程中肌肉组织结构的影响。由图 5 可以看出,电场组肌肉组织完整,肌纤维之间的空隙较小并且均匀,鲈鱼肌肉组织整体状况良好。这可能是由于低压静电场对食品中冰晶的生长有抑制作用。Kaale 等^[36]认为,外接低压静电场能使水分子在平行于电场方向的时候受到外加的位能,比起其他朝向的水分子更加容易打破水冰固液界面之间的阻力,完成从水到冰晶的转变。所以不平行电场线方向的冰晶的形成在一定程度上受到抑制。由图 5b 可以发现,无电场组肌肉组

织松散,空洞较多,肌肉组织间隙较大并且不规则。施加了低压变频电场之后,可以在一定程度上减弱冻结过程与长期微冻过程中冰晶对肌肉组织的破坏。

3 结论

低压变频电场能够在一定程度上降低鲈鱼贮藏过程中挥发性盐基氮的产生,减缓贮藏后期 pH 值的上升,在挥发性盐基氮含量与 pH 值这两个指标上 $3\,000 \text{ V/m}$ 50 Hz 处理组效果好于 $2\,000 \text{ V/m}$ 50 Hz 处理组,低压变频电场也能降低菌落总数,在贮藏第 20 天时菌落总数上 $2\,000 \text{ V/m}$ 50 Hz 处理组好于 $3\,000 \text{ V/m}$ 50 Hz 组。

但同时也发现在电场处理下鲈鱼水分降低速度加快,并且水分降低速度随着场强增大而增大。本试验可以在一定程度上减缓鲈鱼微冻过程中的品质变化,提高安全性,提升企业的经济效益。

参考文献:

- [1] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 中国渔业统计年鉴-2019[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019: 9.
- Fishery Administration of the Ministry of Agriculture and Rural Areas, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. 2019 China Fisheries Statistical Yearbook[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2019: 9.
- [2] 吴奇子, 陈雪, 刘欢, 等. 不同贮藏温度条件下鲈鱼货架期预测模型的构建[J]. 食品科学, 2015, 36(22): 232-236.
- WU Qizi, CHEN Xue, LIU Huan, et al. Predictive modelling of shelf life for *Scomber japonicus* stored at different temperatures[J]. Food Science, 2015, 36(22): 232-236.
- [3] 胡玥, 吴春华, 姜晴晴, 等. 微冻技术在水产品保鲜中的研究进展[J]. 食品工业科技, 2015, 36(9): 384-390.
- HU Yue, WU Chunhua, JIANG Qingqing, et al. Research progress in superchilling of aquatic products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(9): 384-390.
- [4] WU C H, YUAN C H, YE X Q, et al. A critical review on super-chilling preservation technology in aquatic product[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(12): 2788-2806.
- [5] MAGNUSSEN O M, HAUGLAND A, TORSTVEIT HEMMINGSEN A K, et al. Advances in superchilling of food-process characteristics and product quality[J]. Trends in Food Science & Technology, 2008, 19(8): 418-424.
- [6] 郑平安, 孙静, 全晶晶, 等. 贮藏温度对鲈鱼品质的影响研究[J]. 核农学报, 2013, 27(1): 75-80.
- ZHENG Pingan, SUN Jing, QUAN Jingjing, et al. Effect of temperature on fresh quality of mackerel[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2013, 27(1): 75-80.
- [7] CROPOTOVA J, MOZURAITYTE R, STANDAL I B, et al. A non-invasive approach to assess texture changes in sous-vide cooked Atlantic mackerel during chilled storage by fluorescence imaging[J]. Food Control, 2018, 92: 216-224.
- [8] 陈晶晶, 邓尚贵, 林雪, 等. 中性电解水对鲈鱼的保鲜效果[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2013, 32(6): 494-498.
- CHEN Jingjing, DENG Shanggui, LIN Xue, et al. Efficacy of *pneumatophorus japonicus* on preservation with neutral electrolyzed water[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2013, 32(6): 494-498.
- [9] 刘露, 施文正, 王锡昌, 等. 鲈鱼不同部位的营养评价及风味物质分析[J]. 现代食品科技, 2016, 32(4): 210-217.
- LIU Lu, SHI Wenzheng, WANG Xichang, et al. Nutritional assessment and analysis of flavor substances in different parts of *pneumatophorus japonicus*[J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(4): 210-217.
- [10] PETTY H T. Effects of low and high pH on lipid oxidation in Spanish mackerel[D]. Gainesville: University of Florida, 2008: 37-51.
- [11] ROMOTOWSKA P E, GUDJÓNSDÓTTIR M, KRISTINSÓTTIR T B, et al. Effect of brining and frozen storage on physicochemical properties of well-fed Atlantic mackerel (*Scomber scombrus*) intended for hot smoking and canning[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 72: 199-205.
- [12] YARNPAKDEE S, BENJAKUL S, KRISTINSSON H G, et al. Effect of pretreatment on lipid oxidation and fishy odour development in protein hydrolysates from the muscle of Indian mackerel[J]. Food Chemistry, 2012, 135(4): 2474-2482.
- [13] HSIEH C W, KO W C. Effect of high-voltage electrostatic field on quality of carrot juice during refrigeration[J]. LWT-Food Science and Technology, 2008, 41(10): 1752-1757.
- [14] 郭衍银, 朱艳红, 赵向东, 等. 高压静电对速冻冬枣解冻品质的影响[J]. 制冷学报, 2009, 30(2): 45-48.
- GUO Yanyin, ZHU Yanhong, ZHAO Xiangdong, et al. Effect of high voltage electrostatic field on quality of thawing "Dongzao" jujube[J]. Journal of Refrigeration, 2009, 30(2): 45-48.
- [15] BAJGAI T R, HASHINAGA F, ISOBE S, et al. Application of high electric field (HEF) on the shelf-life extension of emblic fruit (*Phyllanthus emblica* L.)[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 74(3): 308-313.
- [16] ZHAO R P, HAO J X, XUE J, et al. Effect of high-voltage electrostatic field pretreatment on the antioxidant system in stored green mature tomatoes[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2011, 91(9): 1680-1686.
- [17] 贾红玲, 周振勇, 阿曼古丽·朱马汉, 等. 高压静电场(HVEF)在肉类保鲜中的应用研究进展[J]. 草食家畜, 2019(2): 19-22.
- JIA Hongling, ZHOU Zhenyong, OMANGULI ·Zhumahan, et al. Study on the application of high voltage electrostatic field(HVEF) in meat preservation[J]. Grass-Feeding Livestock, 2019(2): 19-22.
- [18] HSIEH C W, LAI C H, HO W J, et al. Effect of thawing and cold storage on frozen chicken thigh meat quality by high-voltage electrostatic field[J]. Journal of Food Science, 2010, 75(4): M193-M197.
- [19] 孙芳, 李培龙, 孟繁博, 等. 高压静电解冻技术对牛肉品质的影响研究[J]. 中国牛业科学, 2011, 37(6): 13-17.
- SUN Fang, LI Peilong, MENG Fanbo, et al. Effect of high-voltage electrostatic field thawing beef on beef quality[J]. China Cattle Science, 2011, 37(6): 13-17.
- [20] HE X L, 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.
- [21] 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.

- [22] 白亚乡, 栾忠奇, 李新军, 等. 高压静电场解冻机理分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 347-350.
BAI Yaxiang, LUAN Zhongqi, LI Xinjun, et al. Thawing mechanism of high voltage electrostatic field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(4): 347-350.
- [23] 赵良, 岑剑伟, 李来好, 等. 高压静电场结合冰温气调保鲜技术对罗非鱼鱼片品质的影响[J]. 南方水产科学, 2016, 12(3): 91-97.
ZHAO Liang, CEN Jianwei, LI Laihao, et al. Effect of high voltage electrostatic field combined with modified atmosphere packaging technology on quality of tilapia fillets[J]. South China Fisheries Science, 2016, 12(3): 91-97.
- [24] 刘雪芳, 郝利平. 高压静电场处理对鲜核桃保鲜效果的影响[J]. 保鲜与加工, 2018, 18(3): 33-37.
LIU Xuefang, HAO Liping. Storage effects of high voltage electrostatic field treatment on fresh walnut [J]. Storage and Process, 2018, 18(3): 33-37.
- [25] 沈莹杰, 杨水兵, 蔡勇, 等. 高压交变电场在水产品保鲜中的应用[J]. 现代农业科技, 2017(22): 243-245.
SHEN Yingjie, YANG Shuibing, CAI Yong, et al. Application of high voltage alternating electric field in preservation of aquatic products[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2017(22): 243-245.
- [26] 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 食品中水分的测定: GB 5009.3—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
The National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard Determination of Moisture in Food: GB 5009.3—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [27] 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, 2017.
The National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard Determination of pH value in Food: GB 5009.237—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [28] 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, 2017.
The National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard Determination of TVB-N in Food: GB 5009.228—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [29] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定: GB 4789.2—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
The National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, the State Food and Drug Administration. National food safety standard. Food microbiological examination: Aerobic plate count: GB 4789.2—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [30] 黄琼, 方旭波, 李莹, 等. 鳊鱼下脚料酶解物对冷冻鳊鱼的保水作用[J]. 中国食品学报, 2020, 20(1): 222-229.
HUANG Qiong, FANG Xubo, LI Ying, et al. The water binding capacity of frozen mandarin fish with by-products hydrolysates[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(1): 222-229.
- [31] 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 Ke, YANG Fangwei, LI Xia, et al. Effect of electrostatic field-assisted freezing-thawing on water-holding capacity and physico-chemical characteristics of beef muscle proteins[J]. Food Science, 2018, 39(3): 157-162.
- [32] 顾赛麒, 张晨超, 张月婷, 等. 舟山渔场三种海鱼冰藏过程中品质和风味的变化[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(11): 244-251.
GU Saiqi, ZHANG Chenchao, ZHANG Yueting, et al. Quality and flavor changes of three kinds of marine fish in Zhoushan fishing ground during ice storage[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(11): 244-251.
- [33] 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.
DUAN Weiwen, QUAN Qinguo, ZHANG Xueqin, et al. Effect of electrostatic field combined with controlled freezing-point storage technology on the quality of *Litopenaeus vannamei* in storage period [J]. Food & Machinery, 2018, 34(12): 101-107.
- [34] BARBA F J, GRIMI N, VOROBIEV E. New approaches for the use of non-conventional cell disruption technologies to extract potential food additives and nutraceuticals from microalgae[J]. Food Engineering Reviews, 2015, 7(1): 45-62.
- [35] 魏国平, 冯志刚, 熊双丽, 等. DENBA+静电场猪肉保鲜效果研究[J]. 现代食品, 2019(23): 99-102, 105.
WEI Guoping, FENG Zhigang, XIONG Shuangli, et al. Fresh-keeping effect of ENBA+ electrostatic field on pork[J]. Modern Food, 2019 (23): 99-102, 105.
- [36] KAALE L D, EIKEVIK T M, KOLSAKER K, et al. Modeling and simulation of food products in superchilling technology[J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2014, 23(4): 409-420.

加工编辑: 孟琬星

收稿日期: 2021-07-26