岑晓旭,孙光全,余铭,等.不同强度低频电场对微冻罗非鱼鱼肉品质和水分迁移的影响[J].华中农业大学学报,2026,45(1):308-318.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2026.01.028

不同强度低频电场对微冻罗非鱼鱼肉品质和水分迁移的影响

岑晓旭[1],孙光全[1],余铭[2,3],冯耀泽[1,4,5,6],陈海强[2],朱明[1,5],郝馨龙[1]

1.华中农业大学工学院,武汉 430070; 2.阳江职业技术学院食品与环境工程系/广东省食品低温加工工程技术研究中心,阳江 529566; 3.浙江清华长三角研究院,嘉兴 314006; 4.农业农村部水产养殖设施工程重点实验室,武汉 430070; 5.华中农业大学深圳营养与健康研究院,深圳 518000; 6.中国农业科学院深圳农业基因组研究所/岭南现代农业科学与技术广东省实验室深圳分中心,深圳 518120

摘要 为解决淡水鱼常规微冻保鲜过程中品质难以保持的问题,采用电场强度分别为600、1500、3000 V/m的低频电场对微冻罗非鱼鱼肉进行处理,测定其贮藏期内的汁液流失率、持水力、硬度、色泽、总挥发性盐基氮(TVB-N)和水分迁移等指标,以探明电场辅助微冻对鱼肉品质的影响规律。结果显示:低频电场处理能够有效抑制样品贮藏期间汁液流失,保持持水力,且电场强度越高,效果越显著。从贮藏4 d起,电场强度3 000 V/m罗非鱼鱼肉的汁液流失率均显著低于对照组($P<0.05$),持水力均显著高于对照组($P<0.05$)。同时,低频电场能够抑制罗非鱼鱼肉色泽的劣变、硬度的降低和TVB-N含量的增长,延长货架期;到16 d时,对照组TVB-N含量的增长约是低频电场处理组的1.6～3.0倍。低场核磁共振试验结果显示,随着贮藏时间延长,鱼肉中的不易流动水向自由水迁移,而低频电场能够抑制水分迁移,且电场强度越高,效果越显著,尤以电场强度为3 000 V/m的低频电场对微冻罗非鱼鱼肉的品质保持效果最好。研究结果表明,低频电场辅助微冻是一种有效保持罗非鱼鱼肉品质的可行技术,可为提升淡水鱼微冻保鲜效果提供新思路。

关键词 低频电场;罗非鱼鱼肉;微冻保鲜;水分迁移;品质;低场核磁共振技术

中图分类号 TS254.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2026)01-0308-11

罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)由于生长速度快、繁殖能力强、产量高、疾病少、食性杂、肉质厚等特点,具有很大的市场潜力[1]。目前,我国已发展为全球最大的罗非鱼生产国[2-3],其产品流通形式以加工鱼片出口为主,在国际水产品贸易中占据重要地位[4]。然而由于罗非鱼鱼肉具有高营养和高水分的特性,在贮藏和运输的过程中极易发生品质的劣变,造成较大的经济损失[5]。低温保鲜是最常见、应用范围最广的一种保鲜技术,其中发展历程较晚的微冻保鲜因兼顾贮藏品质与货架期而逐渐引起关注。

微冻保鲜,也称为部分冻结保鲜,是指将水产品置于生物体冰点和冰点以下1～2 ℃温度带的轻度冷冻保鲜[6]。其保鲜货架期比冷藏和冰温保鲜更长,且产生的冰晶较少,对组织的机械损伤小,汁液和营养价值损失少[7]。然而,贮藏环境中较小的温度波动都会导致冰晶生长[8],从而破坏微冻样品的组织结构,降低产品品质。因此,为保证微冻产品的品质,贮藏过程中的温度控制至关重要。而能够精确控温的设备价格高昂且运行成本高,制约了微冻保鲜技术的推广应用。因此,亟需探索一种有效维持微冻产品品质的经济型贮藏工艺。

电场辅助保鲜是近年来出现的一种低能耗且无污染的食品处理新技术。研究表明高压静电场能够延长冷藏罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)的货架期[9],保持刀额新对虾(*Metapenaeus ensis*)的鲜度[10],且不同强度的电场产生的效果不同[11]。此外,研究发现电场处理能够显著减小冷冻贮藏的猪里脊肉中冰晶的尺寸,降低组织结构损伤[12]。这表明电场有助于

收稿日期:2024-11-23
基金项目:淡水鱼智能保鲜加工技术与装备创制(2023BBB038);淡水鱼鲜味演变机制及鲜味强度快速分级方法与装备研究(SZYJY2022028);朱明人才启动费
岑晓旭,E-mail:1102973458@qq.com
通信作者:冯耀泽,E-mail:yaoze.feng@mail.hzau.edu.cn;余铭,E-mail:yuming3289@126.com

控制冰晶的形成与生长[13]。因此，电场处理可能有助于维持微冻产品品质，突破水产品微冻保鲜技术产业化应用中的瓶颈难题。笔者所在团队研发了一款能耗低且作用范围广的低频电场设备，该设备产生的电场能够有效抑制冰温贮藏对虾中的微生物生长、总挥发性盐基氮（TVB-N）的增加，且有助于保持虾肉微观结构，抑制水分迁移[14]。然而，根据其电场产生机制，电极板在空间中产生的电场强度会随着与极板间的距离增加而减弱，保鲜效果也会发生变化。因此，本研究采用电场强度分别为 600、1 500、3 000 V/m 的低频电场对微冻罗非鱼鱼肉进行处理，并对其贮藏期内的汁液流失率、持水力、硬度、色泽、TVB-N 含量和水分迁移等指标进行测定，探明不同电场强度的低频电场处理下微冻产品贮藏过程中的品质变化过程和水分迁移的规律，以期为后续开发和优化低频电场辅助微冻保鲜系统提供技术支撑。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

质量为（1.5±0.1）kg 的鲜活罗非鱼购于广东省阳江市江城区木赛市场，打氧保活后运回实验室。敲击头部致晕后，去鳞、去皮、去内脏，取鱼背部长方形肌肉，切成 3 cm×3 cm×2 cm 的均一大小鱼块，装入食品密封袋中备用。

氧化镁、盐酸、甲基红、亚甲基蓝、氢氧化钠、硼酸（均为分析纯）购于天津市福晨化学试剂厂。

1.2　仪器与设备

H2050R 冷冻离心机购于湖南湘仪实验室仪器开发有限公司；IMS-50 全自动雪花制冰机购于常熟雪科电器有限公司；CT3 物性分析仪购于美国 Brookfield 公司；JK5008 温度计购于常州金艾联电子科技有限公司；CR-100 色差仪购于日本柯尼卡美能达控股株式会社；低频电场发生器由笔者所在课题组自主研发设计；MesoMR23-040V-I 核磁共振成像分析仪购于苏州纽迈分析仪器股份有限公司；ATN-300 全自动凯氏定氮仪购于上海洪纪仪器设备有限公司；LAB 254e 电子精密天平购于艾德姆衡器（武汉）有限公司；ZD-85 恒温震荡器购于常州澳华仪器有限公司。

低频电场发生装置为自主研发设计，由低频电场发生器和电场发射极板组成。在冰箱（海尔 BC/BD-142GHEPGD）内腔顶部放置一块 40 cm×20 cm×0.5 cm（长×宽×高）的放电极板。低频交变电压（60 Hz，V_{vrms}=1 920 V）信号由放置在冰箱外的低频电场发生器产生，通过导线与冰箱内的极板连接，使极板在空间内形成交变电场，如图 1 所示。

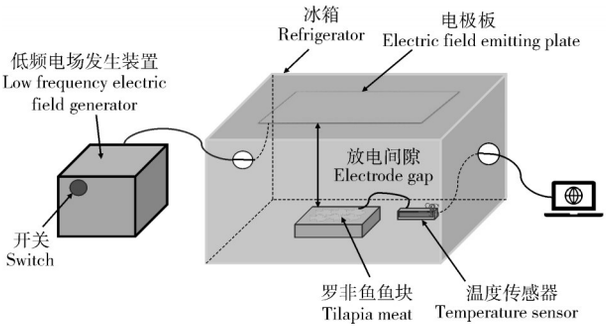


图 1　低频电场试验装置示意图

Fig.1　Schematic diagram of the experimental set-up for low-frequency electric field

极板获取由低频电场发生器产生的电信号，并在空间中产生电场。采用 Comsol Multiphysics 有限元仿真软件分析并确定电场强度的空间分布情况规律。综合考虑试验冰箱尺寸、电场发生器性能及样本贮藏空间要求，本试验采用与极板平行但距离分别为 20、27.5 和 39.5 cm 的 3 个试验平面，对应电场强度为 3 000、1 500、600 V/m。

1.3　方法

1）样品处理。将处理好的鱼块普通冷藏（4 ℃）预冷 3 h 后，随机分为 4 组，分别放置在无电场的（−3±1）℃冰箱微冻，以及电场强度为 3 000、1 500、600 V/m 的（−3±1）℃冰箱中微冻。试验采用 4 台相同型号的冰箱，一台冰箱只用于一种电场强度的试验，鱼肉不累加叠放。样品制备后立即对新鲜样品（0 d）进行取样检测。根据预试验，对照组样本在贮藏 16 d 时已腐败，故所有样本在第 4 、8 、12 、16 天进行取样检测。

2）冰点的测定。取已处理鱼块放入 −18 ℃冰箱中，将温度传感器的敏感元件插入样品几何中心用于监测样品温度，数据以 5 s 为间隔进行采集和传输。温度随时间变化的曲线即罗非鱼鱼肉的冻结曲线，根据冻结曲线分析可得罗非鱼鱼肉的冰点。

3）汁液流失率的测定。参照 Liu 等[15]的方法并稍作修改，在试验前称量罗非鱼鱼块质量（M_0）并记录，贮藏后用滤纸擦掉经解冻的样品表面多余的水分，称量样品最终质量（M_T）并记录，流失率（drip loss rate，R_{dl}）计算公式如下：

$$R_{dl}=(M_0-M_T)/M_0\times 100\% \quad (1)$$

4）持水力的测定。参考 NYT 1333−2007《畜禽

肉质的测定》，取罗非鱼鱼块，用脱脂棉和滤纸将鱼肉样品包好，放入50 mL的离心管中（底部塞有脱脂棉），4 ℃，9 000 r/min，离心10 min，取出样品，剥去脱脂棉，称量样品质量，重复3次，取平均值。持水力（water holding capacity，C_w）计算方法如下公式：

$$C_w=(1-(M_1-M_2)/M_1)\times 100\% \quad (2)$$

式（2）中：M_1表示样品的初始质量，g；M_2表示样品离心后的质量，g。

5）色差的测定。参考Jiang等[16]的方法并稍作修改，用滤纸吸去罗非鱼鱼块表面的水分。将鱼块放在平整的操作台上，用校准后的手持式色差仪（CR-100）对鱼块侧面4个不同位置进行测量并对结果取平均。色差值采用以下公式计算：

$$\Delta E=[(L_0^*-L^*)^2+(a_0^*-a^*)^2+(b_0^*-b^*)^2]^{1/2} \quad (3)$$

式（3）中：ΔE为总色差；L^*和L_0^*分别是不同贮藏时间和新鲜罗非鱼鱼块的亮度；a^*和a_0^*分别是不同贮藏时间和新鲜罗非鱼鱼块的红绿值；b^*和b_0^*分别是不同贮藏时间和新鲜罗非鱼鱼块的黄蓝值。

6）硬度的测定。参照Lee等[17]的方法并稍作修改，采用物性分析仪（CT3）平底圆柱形探头（6 mm）测定硬度。参数设定：测量前探头下降速度1.5 mm/s，测试速度为1 mm/s，测量后探头回程速度1 mm/s，触发点负载为5.0 g，下压距离20 mm。每个样品测量1次，每组重复测量3个样品。硬度单位用牛顿（N）表示。

7）TVB-N含量的测定。TVB-N含量测定参照GB 5009.288—2016《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》中的半微量定氮法测定。

8）低场核磁共振的测定。参照Zhao等[18]的方法并稍作修改，采用核磁共振成像分析仪（MesoMR23-040V-I）测定。用滤纸吸干罗非鱼鱼块表面水分并称质量，用保鲜膜包装，放入核磁检测管中。参数设置如下：线圈温度32 ℃；重复采样等待时间3 000 ms；重复采样8次；回波时间0.2 ms；回波个数7 000；采样带宽200 kHz。模拟增益20 db；数字增益3；前置放大器增益1。根据衰减曲线图，采用分析软件进行迭代反演得到各成分水的单位质量峰面积、峰比例和弛豫时间。单位质量峰面积和峰比例表示鱼块中各形态水分的含量，弛豫时间表示水分与鱼块组织结合的紧密程度。

1.4 数据处理与分析

本试验中每组重复3次。使用Excel 2013对试验数据进行整理，利用Origin 8.5软件作图。采用SPSS 27软件通过正态性检验和单因素方差分析（ANOVA）方法进行显著性分析，结果以平均值±标准差的形式表示。通过Duncan's检验，以确定在95%置信区间下试验结果是否存在显著性差异（$P<0.05$）。

2 结果与分析

2.1 罗非鱼鱼肉的冰点

图2展示了罗非鱼鱼肉在冷冻过程中样品中心的温度变化。与一般的冻结曲线一样，罗非鱼鱼肉的冷冻曲线可以主要被分为3个阶段[19]。第一阶段是指罗非鱼鱼肉从初始温度降低至初始成核温度的冷却过程。在这个过程中，罗非鱼鱼肉中的显热被释放[20]。由于图2中未发现罗非鱼鱼肉存在明显过冷现象，故此时初始成核温度与冻结温度（即冰点）相同，约为−1.5 ℃。随即进入第二阶段，即相变阶段，也被称为最大冰晶生成区。该阶段的一段时间内，罗非鱼鱼肉温度保持在冻结温度，此时内部逐渐形成大量冰晶[21]。相变阶段的终点温度被定义为冻结温度以下5 ℃，此处即−6.5 ℃左右。在该过程中，罗非鱼鱼肉中的潜热被释放，到第二阶段结束，罗非鱼鱼肉已基本冻结。第三阶段，是指罗非鱼鱼肉中心温度由相变终点温度降至环境温度的过程。在该过程中，罗非鱼鱼肉中剩余的显热被释放[22]。

由图2可知，罗非鱼鱼肉的冻结温度约为−1.5 ℃，这与金枝等[23]研究结果相似。根据微冻保鲜的定义，将本研究的微冻贮藏温度设为−3 ℃。

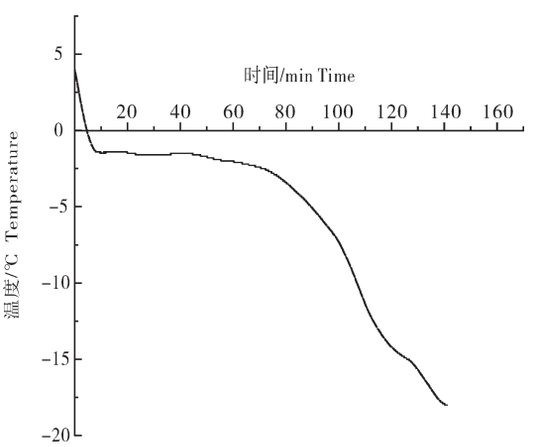


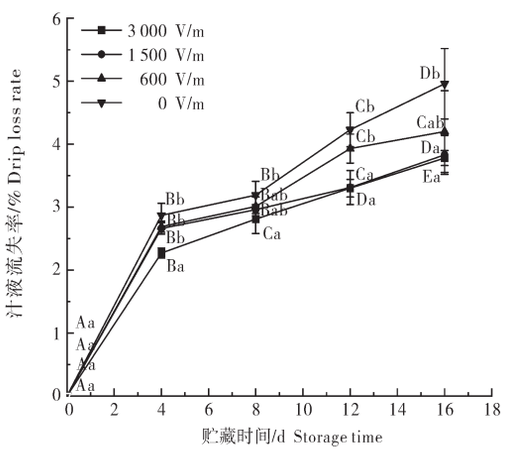
图2 罗非鱼鱼肉冻结曲线

Fig.2 Frozen curve of tilapia meat

2.2 微冻罗非鱼鱼肉贮藏期间汁液流失率的变化

由图3可知，随着贮藏时间的延长，罗非鱼鱼肉

的汁液流失率均显著增加($P<0.05$)。其中,对照组的汁液流失率在贮藏期间始终高于有低频电场处理的样品,且电场强度越大,样品的汁液流失率越低。从贮藏期的第4天开始,低频电场3 000 V/m的处理组均显著低于对照组($P<0.05$)。直至试验结束(16 d),对照组的汁液流失率为4.96%,略高于低频电场600 V/m处理组的4.20%($P>0.05$),显著高于低频电场1 500和3 000 V/m处理组的3.83%和3.78%($P<0.05$)。



不同字母表示差异显著($P<0.05$),小写字母表示相同时间不同处理间的比较,大写字母表示同一处理不同时间的比较,下同。Different letters indicate significant difference ($P<0.05$), lowercase letter means the comparison between different treatments at the same time, and the capital letter means the comparison between different time points in the same treating group, the same as below.

图3　微冻罗非鱼鱼肉贮藏期间汁液流失率的变化

Fig.3　Changes of tilapia meat in drip loss rate during superchilling storage

2.3　微冻罗非鱼鱼肉贮藏期间持水力的变化

由图4可知,在不同的处理条件下,罗非鱼鱼肉的持水力均随着贮藏时间的延长而显著降低($P<0.05$)。持水力的减小整体呈现先快后慢的趋势,这与王鹏等[24]的研究结果类似。新鲜罗非鱼鱼肉持水力与第4天罗非鱼鱼肉的持水力有显著差异,但从第8天开始,无论电场强度大小,有低频电场处理的各组间持水力均无显著差异($P>0.05$),可见低频电场能够在微冻贮藏中后期抑制罗非鱼鱼肉持水力的减小。

此外,贮藏时间相同,低频电场强度越大,罗非鱼鱼肉的持水力越大,且从贮藏期的第4天开始,低频电场3 000 V/m的处理组均显著大于对照组($P<0.05$)。到试验结束(16 d),对照组的持水力为64.20%,小于低频电场600 V/m处理组的66.11%($P>0.05$),显著小于低频电场1 500和3 000 V/m处理组的67.76%和69.13%($P<0.05$),与罗非鱼鱼肉的汁液流失率结果相似。

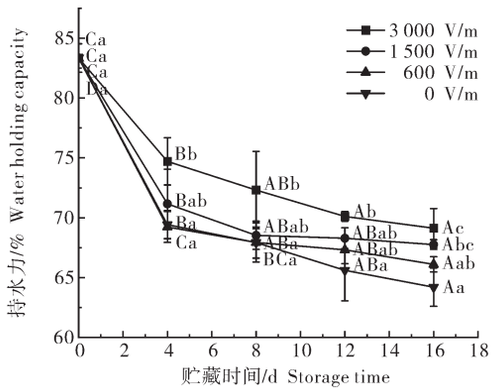


图4　微冻罗非鱼鱼肉贮藏期间持水力的变化

Fig.4　Changes of tilapia meat in water holding capacity during superchilling storage

2.4　微冻罗非鱼鱼肉贮藏期间色度的变化

分析试验数据发现,不同低频电场强度处理对鱼肉的a^*、b^*值影响并不显著,因此,本研究仅展示低频电场对罗非鱼鱼肉的L^*(鱼肉的亮度)和$\triangle E$(色差值)影响规律。由表1可知,随着贮藏时间的增加,罗非鱼鱼肉的L^*值减小。新鲜罗非鱼鱼肉L^*值为52.16,经过16 d的微冻贮藏,对照组、600、1 500和3 000 V/m电场处理组的罗非鱼鱼肉L^*值分别减少至48.42、50.31、50.41和51.13,分别减少了3.74、1.85、1.75和1.03。且在贮藏期(16 d)内,无论电场强度,有电场处理组的L^*值均无显著差异($P>0.05$),而对照组的L^*值在贮藏到第12天时就产生了显著差异($P<0.05$)。由此可以看出,低频电场辅助微冻保鲜有助于延缓罗非鱼鱼肉变暗。

随着贮藏时间的延长,$\triangle E$值显著增加($P<0.05$),说明鱼肉在逐渐劣变[25]。由表1可知,贮藏期内,3 000 V/m电场处理组的$\triangle E$值仅略小于1 500 V/m电场处理组($P>0.05$),但显著小于对照组($P<0.05$)。600 V/m电场处理组与对照组前期差异不大($P>0.05$),直到第16天才产生显著差异($P<0.05$)。到第16天时,无论电场大小,电场处理组鱼肉$\triangle E$值均显著小于对照组($P<0.05$),3 000、1 500、600 V/m电场处理组与对照组的$\triangle E$值分别为2.28、2.36、3.15、4.23,说明对照组鱼肉色泽变化最大,3 000 V/m电场处理组鱼肉色泽变化最小,1 500和600 V/m电场处理组处于二者之间,且更接近于3 000 V/m电场处理组。试验结果表明低频电场辅助有助于延缓罗非鱼鱼肉色泽劣变,且电场强度越

表1 微冻罗非鱼鱼肉贮藏期间色度的变化

Table 1 Color changes of tilapia meat during superchilling storage

色差 Color	电场强度/(V/m) Electric field intensity	贮藏时间/d Storage time				
		0	4	8	12	16
L^*	0	52.16±0.93Ca	51.26±0.84BCa	50.59±1.15BCa	49.85±1.48ABa	48.42±1.14Aa
	600	52.16±0.93Aa	50.76±0.61Aa	51.62±1.16Aa	50.80±1.22Aa	50.31±1.10Aab
	1 500	52.16±0.93Aa	51.68±1.20Aa	51.92±0.91Aa	51.16±0.47Aa	50.41±1.08Ab
	3 000	52.16±0.93Aa	52.30±1.95Aa	52.15±0.73Aa	51.87±1.27Aa	51.13±0.67Ab
ΔE	0	00.00±0.00Aa	02.21±0.34Bb	02.95±0.70BCb	03.48±0.97CDb	04.23±0.50Db
	600	00.00±0.00Aa	02.21±0.52Bb	02.93±0.21Cb	02.80±0.31Cab	03.15±0.14Ca
	1 500	00.00±0.00Aa	01.98±0.45Bab	01.71±0.43Ba	02.09±0.26Ba	02.36±0.38Ba
	3 000	00.00±0.00Aa	01.24±0.33Ba	01.51±0.55BCa	02.17±0.29CDa	02.28±0.47Da

注：不同字母表示差异显著($P<0.05$)，小写字母表示相同时间不同处理间的比较，大写字母表示同一处理不同时间的比较。Note: Different letters indicate significant difference ($P<0.05$), the lower case letter means the comparison between different treatments at the same time, and the capital letter means the comparison between different time points in the same treating group.

大，效果越显著。

2.5 微冻罗非鱼鱼肉贮藏期间硬度的变化

从图5可以看出，在罗非鱼鱼肉微冻贮藏的过程中，随着贮藏时间的增加，硬度显著降低($P<0.05$)。然而，在贮藏过程中有低频电场处理组的罗非鱼鱼肉硬度始终高于对照组，且到贮藏期的第12天，低频电场3 000 V/m处理组的硬度为7.11 N，显著高于1 500、600 V/m和对照组的5.23、4.85和4.56 N($P<0.05$)。直到试验结束(16 d)，低频电场3 000、1 500、600 V/m和对照组的罗非鱼鱼肉硬度分别降低了39.51%、41.75%、49.95%和56.02%。这表明低频电场可以抑制微冻罗非鱼鱼肉硬度的降低，且电场强度3 000 V/m的效果最为显著。

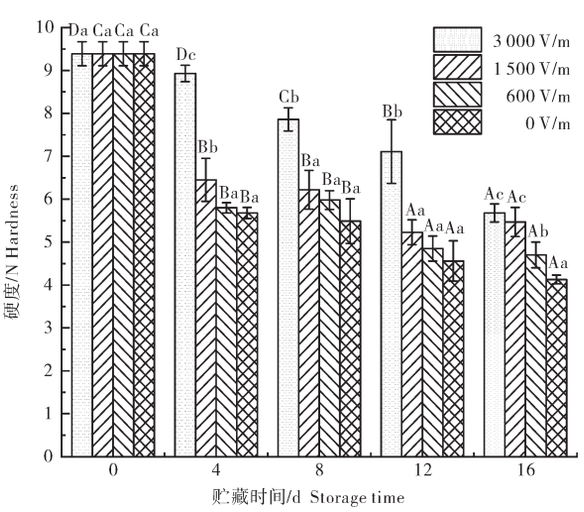


图5 微冻罗非鱼鱼肉贮藏期间硬度的变化

Fig.5 Changes of tilapia meat hardness during superchilling storage

2.6 微冻罗非鱼鱼肉贮藏期间TVB-N含量的变化

由图6可知，随着贮藏时间延长，所有处理组的TVB-N值均显著升高($P<0.05$)。从贮藏的第4天起，有无电场以及电场的不同强度都对罗非鱼鱼肉TVB-N含量的影响显著($P<0.05$)。直到第16天，3 000、1 500、600 V/m以及对照组的TVB-N含量分别上升了12.80%、19.46%、24.97%、39.95%。对照组TVB-N含量的增长约是3 000、1 500和600 V/m电场处理组TVB-N含量增长的3倍、2倍和1.6倍。且随着电场强度的增大，抑制效果越明显。

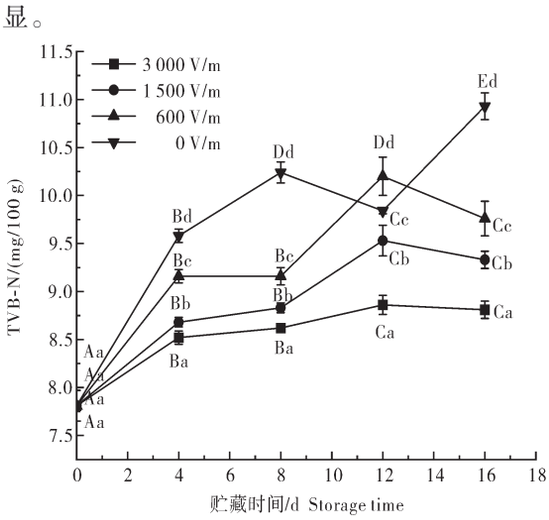


图6 微冻罗非鱼鱼肉贮藏期间TVB-N含量的变化

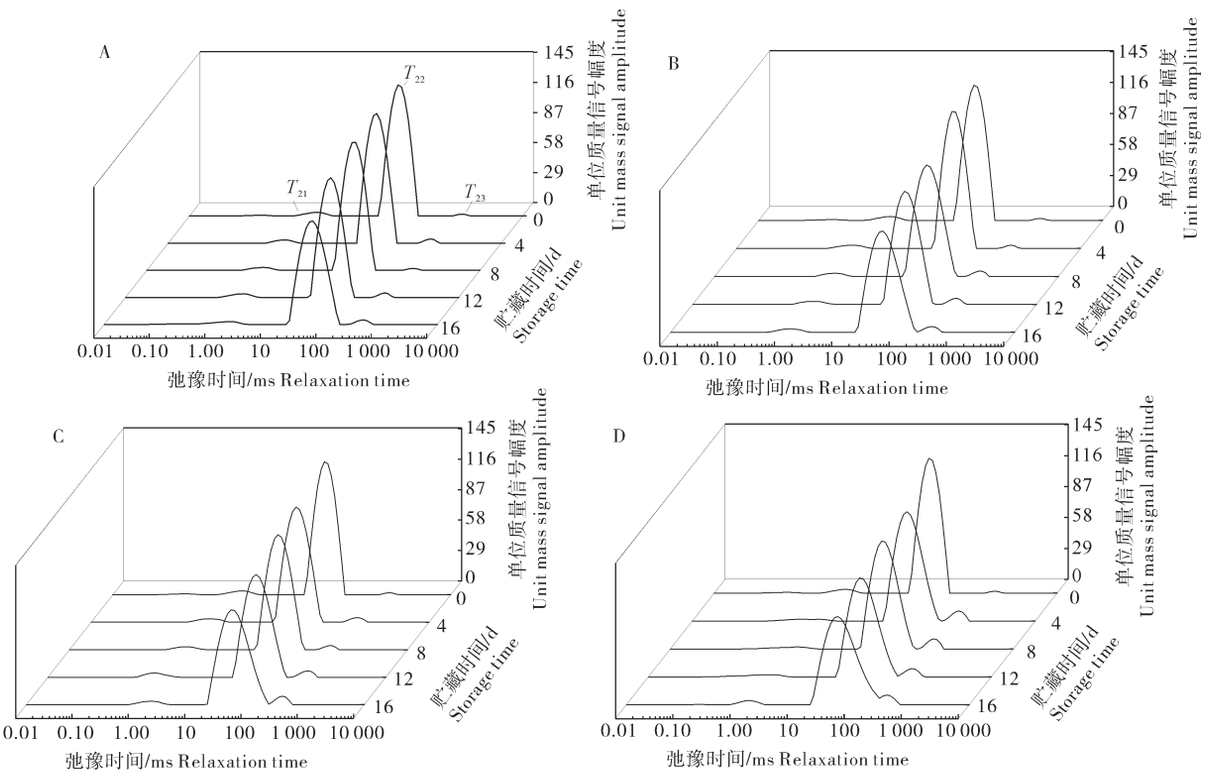
Fig.6 Changes of tilapia meat in TVB-N during superchilling storage

2.7 微冻罗非鱼鱼肉贮藏期间水分分布情况与迁移规律

4种处理条件下，随着贮藏时间的延长，罗非鱼

鱼肉横向弛豫时间 T_2 反演图如图 7 A～D 所示。鱼肉中的水可大致分为 3 种形式：结合水（T_{21}）、不易流动水（T_{22}）和自由水（T_{23}）。不同形式的水所处的弛豫时间不同，也代表着与组织结构结合的紧密程度不同。横向弛豫时间越大，则水分的自由度越高。结合水、不易流动水和自由水的弛豫时间分别为 0～10、10～100 和 100～1 000 ms[26-27]。由图 7 可知，随着贮藏时间的延长，T_{22} 峰面积逐渐降低，不易流动水的含量逐渐减少，T_{23} 峰面积变化不大，但总体呈升高趋势。在贮藏后期，鱼肉中不易流动水的峰逐渐与自由水的峰相连。

根据表 2 可知，到贮藏期的第 16 天，电场处理组的不易流动水含量显著高于对照组（$P<0.05$），而自由水的含量也显著低于对照组（$P<0.05$）。这表明低频电场能够有效抑制鱼肉中的水分迁移，保持鱼肉的持水力，减少汁液流失，且随着电场强度的增加，对水分迁移的抑制作用越大。这与持水力和汁液流失率的试验结果一致。



A：3 000 V/m；B：1 500 V/m；C：600 V/m；D：0 V/m.

图 7　微冻罗非鱼鱼肉贮藏期间 T_2 水分分布图

Fig.7　T_2 moisture distribution of tilapia meat during superchilling storage

3　讨　论

3.1　低频电场对罗非鱼鱼肉微冻期间汁液流失率和持水力的影响

鱼肉在贮藏期间的汁液流失情况会影响鱼肉的色泽、口感和风味[28]。罗非鱼鱼肉的汁液流失随贮藏时间的延长而增加的原因主要是贮藏过程中的温度波动导致罗非鱼鱼肉中的冰晶生长，造成鱼肉组织结构的破坏与水分的迁移[29]。而低频电场处理能够有效抑制微冻罗非鱼鱼肉的汁液流失，与王津[30]研究发现极低频脉冲电场处理组的冷藏罗非鱼汁液流失率均小于非电场处理组的结论类似。这可能是由于外加的能量场作用于水分子，从而导致水的结构和结合状态发生改变[30]。Zhan 等[31]也提到电场、磁场和电磁场等能量场可能会影响水分子的耦合结构和氢键稳定。

持水力是指肌肉能够束缚住水分的能力，持水力越大，品质越好[32]。随着贮藏时间的增加，持水力的减小可能是由于冰晶的形成与生长对罗非鱼鱼肉的组织细胞造成了不可逆的损伤，如肌原纤维断裂、细胞的破裂等[33]。本研究中低频电场辅助微冻保鲜能够保持持水力，维持鱼肉纤维结构的完整，与罗非鱼鱼肉的汁液流失率结果相似。且电场强度越大，对罗非鱼鱼肉的持水力保持效果越显著。

表2 微冻罗非鱼鱼肉贮藏期间各形态水分相对含量的变化

Table 2 Changes in tilapia meat relative moisture content during superchilling storage

电场强度/(V/m) Electric field intensity	相对水分含量/% Relative moisture content	贮藏时间/d Storage time				
		0	4	8	12	16
0	P_{21}	2.84±0.16CDa	2.26±0.10ABa	2.10±0.21Aa	3.07±0.20Db	2.57±0.18BCa
	P_{22}	96.97±0.36Ca	93.97±0.24Ba	94.08±0.30Ba	92.87±0.31Aa	92.44±0.41Aa
	P_{23}	0.20±0.03Aa	3.77±0.15Bc	3.82±0.16Bc	4.05±0.23Bb	4.99±0.19Cc
600	P_{21}	2.84±0.16Ca	2.06±0.12Aa	2.19±0.12ABa	2.18±0.14ABa	2.34±0.16Ba
	P_{22}	96.97±0.36Da	94.79±0.23Cb	94.59±0.29BCa	93.65±0.26Ab	94.09±0.33ABb
	P_{23}	0.20±0.03Aa	3.16±0.10Bb	3.23±0.15Bb	4.17±0.12Db	3.57±0.15Cb
1 500	P_{21}	2.84±0.16Ca	3.17±0.19Db	2.01±0.13Aa	2.27±0.11ABa	2.34±0.14Ba
	P_{22}	96.97±0.36Ca	95.22±0.31Ab	95.89±0.31Bb	95.27±0.21Ac	95.12±0.31Ac
	P_{23}	0.20±0.03Aa	1.62±0.10Ba	2.10±0.14Ca	2.46±0.12Da	2.54±0.12Da
3 000	P_{21}	2.84±0.16Ca	3.05±0.14Cb	2.16±0.11Aa	2.91±0.13Cb	2.52±0.12Ba
	P_{22}	96.97±0.30Ca	95.24±0.20ABb	95.59±0.30Bb	94.80±0.20Ac	95.18±0.33ABc
	P_{23}	0.20±0.03Aa	1.72±0.12Ba	2.25±0.16Ca	2.30±0.13Ca	2.30±0.14Ca

注：P_{21}表示结合水的相对含量；P_{22}表示不易流动水的相对含量；P_{23}表示自由水的相对含量。Note: P_{21} indicates the relative moisture content of bound water; P_{22} indicates the relative moisture content of immobilized water; P_{23} indicates the relative moisture content of free water.

3.2 低频电场对罗非鱼鱼肉微冻期间色差的影响

鱼肉的色泽作为品质评价的重要指标之一，很大程度上影响消费者的购买欲[34]。本研究结果表明低频电场辅助微冻能够减少贮藏8 d罗非鱼鱼肉的L^*和$\triangle E$值，有助于延缓罗非鱼鱼肉色泽劣变，保持罗非鱼鱼肉新鲜的色泽。该研究结果与Ko等[11]研究的高压静电场对冷藏罗非鱼品质的影响结果相似。造成这一现象的原因是电场处理能够抑制微生物生长、蛋白质变性和脂质氧化。且从罗非鱼鱼肉L^*值的变化来看，低频电场有助于延缓罗非鱼鱼肉在微冻贮藏过程中色泽变暗。亮度与食品表面的光反射率有关，同时也反映出食品内水分含量与蛋白质状态[35]。本研究中不同电场强度处理下的微冻罗非鱼鱼肉的亮度不同，可能是由于电场影响了水分子结构与结合状态，从而影响散射强度，使得鱼肉亮度产生差异。

3.3 低频电场对罗非鱼鱼肉微冻期间硬度的影响

鱼肉的质构特性是评价鱼肉新鲜程度的重要指标，也是评价鱼类高经济价值的一项特征性指标，直接影响着消费者的接受程度[36]，而其中硬度是鱼肉质构特性中最重要的指标[30]。本研究中，罗非鱼鱼肉的硬度随贮藏时间的延长而降低。主要原因是在贮藏期间，随着微生物的生长繁殖和蛋白质的降解，肌肉组织结构变化，使得鱼肉变软。而低频电场可以抑制微冻罗非鱼鱼肉硬度的降低，且电场强度3 000 V/m的效果最为显著。这可能是由于电场对微生物的生长繁殖起到抑制作用，进而延缓了蛋白分解速度，对蛋白质结构起到保护作用[37]。另一方面，冰晶的形成会破坏肌肉组织的结构，导致硬度下降[38-39]，所以可以推断电场也可能对冰晶的形成和生长产生影响。

3.4 低频电场对罗非鱼鱼肉微冻期间TVB-N含量的影响

TVB-N是评价水产品腐败变质的指标之一，指在酶和微生物的作用下，水产品中的蛋白质等物质分解，产生具有挥发性的氨及胺类碱性物质[40-41]。本研究结果表明低频电场能够有效抑制TVB-N含量的增加。Zhang等[33]使用低压静电场处理大黄鱼也得出相似结论，微冻处理组的TVB-N含量在贮藏第18天时为20.09 mg/100 g，而低压静电场处理组的TVB-N含量到贮藏第18天时只有15.27 mg/100 g。Hsieh等[42]在研究高压静电场处理对冷藏罗非鱼鱼肉TVB-N含量的影响时，也得出电场处理能够抑制TVB-N含量增加的结论。导致这一现象产生的原因，一方面是由于电场处理可能抑制了鱼肉中内源性蛋白酶活性和腐败微生物的生理活性，减少了氨及胺类碱性物质的形成[9]；另一方面，由于鱼肉组织结构破坏而产生的汁液流失为微生物的生长繁殖提供了良好的培养基。而低频电场处理导致的低汁液流失也限制了微生物的生长[43]。然而，本研究表明低频电场能够有效抑制微冻罗非鱼鱼肉贮藏期间

的TVB-N含量增长，同时还得出随着电场强度的增大，抑制效果越明显的结论。

3.5　低频电场对罗非鱼鱼肉微冻期间水分分布情况与迁移规律的影响

低场核磁共振（LF-NMR）是一种通过测定肌肉中氢原子的弛豫特性来反映肌肉中水分状态、水分含量和水分分布的检测技术，具有准确、快速且无损等优点[44]。罗非鱼肉的水分含量高，而水分含量和分布情况等会直接影响鱼肉的质地等特性。不易流动水是指肌原纤维网络空隙中的水，罗非鱼鱼肉中的水绝大多数都是以这种形式存在。本研究发现随着贮藏时间的延长，不易流动水逐渐向自由水迁移。这是由于鱼肉的肌原纤维空间结构发生变化，导致蛋白与水分结合能力减弱，从而使得不易流动水转化为自由水[45]。汪春玲等[46]在研究微冻气调罗非鱼片水分迁移情况时，也得到随着贮藏时间延长，不易流动水含量降低，自由水含量升高的相似现象。周卓颖等[47]在对东海带鱼的研究中也得到相似结论。不易流动水的损失以及自由水含量的升高表明贮藏过程中鱼肉内部正发生蛋白质降解等各种生化反应，导致鱼肉的纤维结构受到破坏，品质降低[14]。然而，本研究结果表明低频电场能够有效抑制微冻罗非鱼鱼肉的水分迁移情况，且随着电场强度的增加，对水分迁移的抑制作用越大。

综上所述，本研究探明了不同电场强度的低频电场对微冻产品贮藏过程中的品质变化过程和水分迁移的影响规律。研究结果表明低频电场辅助微冻保鲜能够有效维持罗非鱼鱼肉品质，抑制水分迁移，并且电场强度为3 000 V/m的低频电场对微冻罗非鱼鱼肉的品质保持效果最好。当前试验仅为本研究方向的初步探索性试验，后续将通过改进电场发生装置、更换试验场景等方式进行更加深入的研究，进一步优化工艺参数，开发低频电场辅助微冻保鲜设备和系统，更全面探索其对水产品品质的影响规律，为电场辅助微冻保鲜技术的产业化应用提供思路。

参考文献 References

[1] 姜鹏飞，于文静，朱凯悦，等. 多糖对罗非鱼鱼糜凝胶化行为的影响[J]. 中国食品学报，2023，23(1)：87-99.JIANG P F，YU W J，ZHU K Y，et al. Effect of polysaccharides on gelation behavior of tilapia surimi[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology，2023，23(1)：87-99(in Chinese with English abstract).

[2] 方康. 重要外来养殖鱼类生物入侵风险评估[D]. 荆州：长江大学，2023.FANG K.Risk assessment of biological invasion of important alien cultured fishes[D]. Jinzhou：Yangtze University，2023(in Chinese with English abstract).

[3] 郑欣灶，贺梅英，杨暹. 中国罗非鱼出口美国受阻的原因分析及对策建议[J]. 中国渔业经济，2023，41(1)：87-93.ZHENG X Z，HE M Y，YANG X.Analysis on the reasons and countermeasures for the obstruction of China's tilapia exports to the United States[J]. Chinese fisheries economics，2023，41(1)：87-93(in Chinese with English abstract).

[4] 闫玉红，黄卉，李来好，等.5种氧化型减菌剂对罗非鱼片品质及蛋白质的影响[J]. 食品科学，2024，45(6)：15-23.YAN Y H，HUANG H，LI L H，et al.Effects of five oxidative decontaminating agents on the quality and proteins of tilapia fillets[J]. Food science，2024，45(6)：15-23(in Chinese with English abstract).

[5] 凌胜男，刘特元，陈雪叶，等. 不同解冻方式对鳀鱼鲜度及挥发性风味物质的影响[J]. 食品工业科技，2022，43(5)：322-330.LING S N，LIU T Y，CHEN X Y，et al.Effect of different thawing methods on the freshness and volatile flavor compounds of anchovy (*Engraulis encrasicholus*)[J]. Science and technology of food industry，2022，43(5)：322-330 (in Chinese with English abstract).

[6] 廖鄂，武雨鑫，李倩，等. 小龙虾微冻贮藏过程中特定腐败菌的分离鉴定及致腐产胺能力分析[J]. 食品安全质量检测学报，2023，14(16)：32-41.LIAO E，WU Y X，LI Q，et al.Isolation and identification of specific spoilage organisms and analysis of saprogenic amine production capacity during micro-frozen storage of *Procambarus clarkii*[J]. Journal of food safety and quality，2023，14(16)：32-41 (in Chinese with English abstract).

[7] 叶剑，徐仰丽，吴士专，等. 冷链流通过程中水产品低温保鲜技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报，2018，9(8)：1769-1775.YE J，XU Y L，WU S Z，et al.Research progress on low-temperature preservation technology of aquatic products during cold chain circulation[J].Journal of food safety and quality，2018，9(8)：1769-1775(in Chinese with English abstract).

[8] KAALE L D，EIKEVIK T M. The development of ice crystals in food products during the superchilling process and following storage，a review[J]. Trends in food science & technology，2014，39(2)：91-103.

[9] WANG J，WANG Q J，XU L，et al.Effects of extremely low frequency pulsed electric field (ELF-PEF) on the quality and microstructure of tilapia during cold storage[J/OL]. LWT，2022，169：113937[2024-11-23]. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113937.

[10] 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 Y F，WANG L S，WANG J，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(in Chinese with English abstract).

[11] KO W C,YANG S Y,CHANG C K,et al. Effects of adjustable parallel high voltage electrostatic field on the freshness of tilapia (*Orechromis niloticus*) during refrigeration[J]. LWT-food science and technology,2016,66:151-157.

[12] JIA G L,HE X L,NIRASAWA S,et al. Effects of high-voltage electrostatic field on the freezing behavior and quality of pork tenderloin[J]. Journal of food engineering,2017,204:18-26.

[13] ORLOWSKA M,HAVET M,LE-BAIL A. Controlled ice nucleation under high voltage DC electrostatic field conditions [J]. Food research international,2009,42(7):879-884.

[14] 余铭,梁钻好,陈海强,等.低频电场冰温保鲜对虾的水分迁移规律及品质变化的影响[J].食品工业科技,2022,43(19):372-378.YU M,LIANG Z H,CHEN H Q,et al.Water migration and quality change of prawn preserved under controlled freezing-point storage combined with low frequency electric field technology [J].Science and technology of food industry,2022,43 (19):372-378(in Chinese with English abstract).

[15] LIU F,YANG N,ZHANG L T,et al.Effect of weak magnetic field on the water-holding properties,texture,and volatile compounds of pork and beef during frozen storage [J/OL]. Food bioscience,2023,53:102667[2024-11-23].https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102667.

[16] JIANG J W,WANG H L,GUO X Q,et al.Effect of radio frequency tempering on the color of frozen tilapia fillets[J/OL]. LWT, 2021, 142: 110897 [2024-11-23]. https://doi. org/10.1016/j.lwt.2021.110897.

[17] LEE D,YOU Y,HO K K H Y,et al.Impact of supercooling storage on physical and chemical properties of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) [J/OL]. Journal of food engineering, 2024, 373: 111818 [2024-11-23]. https://doi. org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111818.

[18] ZHAO Y N,LAN W Q,SHEN J L,et al.Combining ozone and slurry ice treatment to prolong the shelf-life and quality of large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*)[J/OL].Food science and technology, 2022, 154: 112615 [2024-11-23]. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112615.

[19] JIANG Q Y,ZHANG M,MUJUMDAR A S,et al.Comparative freezing study of broccoli and cauliflower:effects of electrostatic field and static magnetic field[J/OL].Food chemistry, 2022, 397: 133751 [2024-11-23]. https://doi. org/10.1016/j.foodchem.2022.133751.

[20] ZHANG L,YANG Z,DENG Q J.Effects of pulsed magnetic field on freezing kinetics and physical properties of water and cucumber tissue fluid [J/OL]. Journal of food engineering, 2021, 288: 110149 [2024-11-23]. https://doi. org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110149.

[21] BAINY E M,CORAZZA M L,LENZI M K. Measurement of freezing point of tilapia fish burger using differential scanning calorimetry (DSC) and cooling curve method[J]. Journal of food engineering,2015,161:82-86.

[22] ZHAO H X,ZHANG F,HU H Q,et al. Experimental study on freezing of liquids under static magnetic field[J]. Chinese journal of chemical engineering,2017,25(9):1288-1293.

[23] 金枝,关志强,李敏.预冷温度对冰温罗非鱼片品质的影响[J].食品与机械,2019,35(9):135-140.JIN Z,GUAN Z Q,LI M.Effect of pre-cooling conditions on fresh-keeping to ice-temperature tilapia fillets [J]. Food and machinery, 2019, 35 (9):135-140 (in Chinese with English abstract).

[24] 王鹏,郭丽,于文婷,等.透明质酸-大豆β-伴球蛋白复合膜对鲢鱼片微冻贮藏品质影响[J].食品研究与开发,2023,44(7):67-76.WANG P,GUO L,YU W T,et al.Effect of hyaluronic acid-β-conglycinin composite film on quality of silver carp fillet during preservation by partial freezing[J].Food research and development,2023,44(7):67-76(in Chinese with English abstract).

[25] 韩春阳,黎芊芊,张丽芳,等.壳聚糖/肉桂精油复合涂膜对罗非鱼肉的保鲜效果研究[J].包装工程,2023,44(11):20-26.HAN C Y,LI Q Q,ZHANG L F,et al.Effects of chitosan/cinnamon essential oil composite coating on preservation of tilapia meat in chilled storage[J].Packaging engineering,2023,44(11):20-26(in Chinese with English abstract).

[26] LI H Y,WANG L,WANG J X,et al.Effects of ultrasound - assisted freezing on the quality of large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) subjected to multiple freeze-thaw cycles[J/OL]. Food chemistry, 2023, 404: 134530 [2024-11-23]. https://doi.org/10.1016/j.fo-odchem.2022.134530.

[27] SUN K T,PAN C,CHEN S J,et al.Effect of water change on quality deterioration of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during partial freezing storage [J/OL].Food chemistry, 2023, 416: 135836 [2024-11-23]. https://doi. org/10.1016/j.foodchem.2023.135836.

[28] 郝淑贤,黄卉,李来好,等.宰前预冷联合微冻对罗非鱼片品质的影响[J].广东海洋大学学报,2022,42(6):11-16.HAO S X,HUANG H,LI L L,et al.Effects of precooling before slaughter and micro freezing on quality of tilapia fillets[J].Journal of Guangdong Ocean University,2022,42(6):11-16(in Chinese with English abstract).

[29] 孙康婷,潘创,陈胜军,等.水产品微冻贮藏过程中冰晶形成与品质特性研究进展[J].广东海洋大学学报,2021,41(6):147-152.SUN K T,PAN C,CHEN S J,et al.Research progress on formation and properties of ice crystals during partial freezing storage of aquatic products[J].Journal of Guangdong Ocean University,2021,41(6):147-152(in Chinese with English abstract).

[30] 王津.极低频脉冲电场对冷藏罗非鱼保鲜及其作用机理的研究[D].广州:华南理工大学,2022.WANG J.Effect of ex-

tremely low frequency pulsed electric field on preservation of refrigerated tilapia and its mechanism[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022(in Chinese with English abstract).

[31] ZHAN X M, ZHU Z W, SUN D W. Effects of extremely low frequency electromagnetic field on the freezing processes of two liquid systems[J]. LWT, 2019, 103: 212-221.

[32] ZHOU J Q, DONG X P, KONG B H, et al. Effects of magnetic field-assisted immersion freezing at different magnetic field intensities on the muscle quality of golden pompano (*Trachinotus ovatus*)[J/OL]. Food chemistry, 2023, 407: 135092[2024-11-23]. https://doi.org/10.1016/ j.foodchem.2022.135092.

[33] ZHANG J Y, FEI L F, CUI P B, et al. Effect of low voltage electrostatic field combined with partial freezing on the quality and microbial community of large yellow croaker [J/OL]. Food research international, 2023, 169: 112933[2024-9-10]. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112933.

[34] 庄文静，包建强，郑稳，等. 微冻和冰藏期间大菱鲆鲜度及组织结构的变化规律[J]. 食品与发酵工业，2023，50(10)：220-229. ZHUANG W J, BAO J Q, ZHENG W, et al. Changes law of the freshness and microstructure of turbot during superchilling and ice storage[J]. Food and fermentation industries, 2023, 50(10): 220-229(in Chinese with English abstract).

[35] 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(in Chinese with English abstract).

[36] 陈俊杰，陈季旺，谭玲，等. 富硒虹鳟鱼冷藏过程中食用和营养品质的变化[J]. 武汉轻工大学学报，2021，40(3)：1-9. CHEN J J, CHEN J W, TANG L, et al. Change in edible and nutritional qualities of serich rainbow trout during cold storage [J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2021, 40(3): 1-9(in Chinese with English abstract).

[37] 张家玮. 低压静电场协同低温对舟山带鱼保鲜效果的研究[D]. 舟山：浙江海洋大学，2021. ZHANG J W. Study on the effect of low-voltage electrostatic field and low temperature on the preservation of zhoushan *trichiurus lepturus*[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2021(in Chinese with English abstract).

[38] RINWI T G, SUN D W, MA J, et al. Effects of isochoric freezing on freezing process and quality attributes of chicken breast meat [J/OL]. Food chemistry, 2023, 405: 134732[2024-11-23]. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134732.

[39] CAI L Y, WU X S, LI X X, et al. Effects of different freezing treatments on physicochemical responses and microbial characteristics of Japanese sea bass (*Lateolabrax japonicas*) fillets during refrigerated storage[J]. LWT, 2014, 59(1): 122-129.

[40] AFRIN F, ISLAM M M, RASUL M G, et al. Effects of seaweed extracts on the quality and shelf life of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fillets during frozen storage [J/OL]. Food chemistry advances, 2023, 3: 100388[2024-11-23]. https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100388.

[41] BIAN C H, YU H J, YANG K, et al. Effects of single-, dual-, and multi-frequency ultrasound-assisted freezing on the muscle quality and myofibrillar protein structure in large yellow croaker (*Larimichthyscrocea*)[J/OL]. Food chemistry, 2022, 15: 100362 [2024-11-23]. https://doi. org/10.1016/j. fochx.2022.100362.

[42] 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): 312-317.

[43] 杨爽，杨萍，徐琳，等. 超高压处理协同低温贮藏对卤牛肉品质的影响[J]. 食品工业科技，2021，42(21)：334-343. YANG S, YANG P, XU L, et al. Effect of ultra-high pressure combined with low temperature storage on quality of marinated beef [J]. Science and technology of food industry, 2021, 42(21): 334-343 (in Chinese with English abstract).

[44] 蓝蔚青，张炳杰，周大鹏，等. 超声联合微酸性电解水处理对真空包装海鲈鱼冷藏期间品质变化的影响[J]. 食品科学，2022，43(5)：62-68. LAN W Q, ZHANG B J, ZHOU D P, et al. Effect of ultrasonic combined with slightly acidic electrolyzed water treatment on quality changes of vacuum-packaged sea bass (*Lateolabrax japonicas*) during refrigerated storage [J]. Food science, 2022, 43(5): 62-68(in Chinese with English abstract).

[45] LUO Y L, BI Y Z, DU R, et al. The impact of freezing methods on the quality, moisture distribution, microstructure, and flavor profile of hand-grabbed mutton during long-term frozen storage [J/OL]. Food research international, 2023, 173: 113346[2024-11-23]. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113346.

[46] 汪春玲，付仁豪，裴志胜，等. 基于低场核磁共振技术研究新微冻气调罗非鱼片水分迁移与品质变化的相关性[J]. 食品科学，2020，41(21)：182-188. WANG C L, FU R H, PEI Z S, et al. Correlation between water migration analyzed by low-field nuclear magnetic resonance and quality change of modified atmosphere packaged tilapia fillets during superchilled and frozen storage [J]. Food science, 2020, 41(21): 182-188 (in Chinese with English abstract).

[47] 周卓颖，谢超，俞群娣，等. 基于低压核磁共振(LF-NMR)技术对东海带鱼(*Trichiurus lepturus*)保鲜品质及水分迁移特性的研究[J]. 海洋与湖沼，2022，53(2)：440-447. ZHOU Z Y, XIE C, YU Q D, et al. Study on preservation and water retention in hairtail *Trichiurus lepturus* from the east China sea in LF-NMR technology[J]. Oceanologia et limnologia sinica, 2022, 53(2): 440-447 (in Chinese with English abstract).

Effects of low-frequency electric field with different intensities on quality and water migration of tilapia fillets by partial freezing

CEN Xiaoxu[1], SUN Guangquan[1], YU Ming[2,3], FENG Yaoze[1,4,5,6], CHEN Haiqiang[2], ZHU Ming[1,5], HAO Xinlong[1]

1.*College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*;
2.*Department of Food and Environmental Engineering, Yangjiang Polytechnic/ Guangdong Province Engineering and Technology Research Center of Food Low Temperature Processing, Yangjiang 529566, China*;
3.*Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University, Jiaxing 314006, China*;
4.*Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Aquaculture Facilities Engineering, Wuhan 430070, China*;
5.*Shenzhen Institute of Nutrition and Health, Huazhong Agricultural University, Shenzhen 518000, China*;
6.*Shenzhen Branch, Guangdong Laboratory for Lingnan Modern Agriculture, Genome Analysis Laboratory of the Ministry of Agriculture/Agricultural Genomics Institute in Shenzhen, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Shenzhen 518120, China*

Abstract The low-frequency electric fields with intensity of 600 V/m, 1 500 V/m, and 3 000 V/m were used to solve the problems of difficulty in maintaining the quality of freshwater fish during the traditional process of preservation with partial freezing. The indexes including the loss rate of drip, the capacity of holding water, hardness, color, the content of total volatile basic nitrogen (TVB-N), and the water migration of tilapia fillets preserved by partial freezing were measured to study the effects of electric field-assisted partial freezing on the quality of fillets. The results showed that low-frequency electric field effectively suppressed the loss rate of drip and maintained the capacity of holding water during the storage with partial freezing, with greater intensity resulting in more significant effects. The loss rate of drip in samples treated with 3 000 V/m electric field was significantly lower than that in the control group ($P<0.05$) from the 4th day, with significantly higher capacity of holding water ($P<0.05$). Meanwhile, low-frequency electric field inhibited the deterioration of color, decreased the hardness, increased the content of TVB-N, and extended the shelf life of fillets. The increase in the content of TVB-N in the control group at 16th days was about 1.6-3.0 times that in the groups treated with low-frequency electric field. The results of low field-nuclear magnetic resonance (LF-NMR) analysis showed that the water in tilapia fillets migrated from immobilized water to free water as the time of storage prolonged. Low-frequency electric fields suppressed water migration, and the higher the intensity of electric field, the more significant the effect. Especially, the low-frequency electric field with an intensity of 3 000 V/m had the best effect on maintaining the quality of tilapia fillets under partial freezing. It is indicated that low-frequency electric field-assisted partial freezing is a feasible and effective technique for preserving the quality of tilapia fillets. It will provide a new direction for the improvement on the effect of preserving freshwater fish with partial freezing.

Keywords low-frequency electric field; tilapia (*Oreochromis niloticus*) fillets; partial freezing; water migration; quality; low field-nuclear magnetic resonance (LF-NMR) technology

(责任编辑:边书京)