

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*

周卓颖¹ 谢超^{1①} 俞群娣¹ 张家玮¹ 郑霖波¹ 郑炜² 叶常青²

(1. 浙江海洋大学食品与药学院 浙江舟山 316022; 2. 舟山市常青海洋食品有限公司 浙江舟山 316021)

摘要 为探究东海带鱼(*Trichiurus lepturus*)在低压核磁共振(LF-NMR)技术下的品质变化及水分迁移特性,以挥发性盐基氮(TVB-N)含量、pH、水分含量为指标,并分析 NMR 横向弛豫时间 T_2 反演谱图和 MRI 成像,研究不同电场强度(DY₁~DY₄ 分别为 0, 2, 2.5, 3 kV/m)对带鱼内部水分迁移及品质的影响。分析 TVB-N 数据发现, DY₃ ($E=2.5$ kV/m)、DY₄ ($E=3$ kV/m)在贮藏后期表现出更佳的保鲜优势。在 0~40 d 贮藏期内,不同电场强度条件下的带鱼 pH 值均呈先降后升趋势。电场的添加能降低自由水的流动性,抑制微生物生长,减少带鱼体内水分流失。分析 NMR 横向弛豫时间 T_2 反演谱图发现, T_{21} 、 T_{22} 、 T_{23} 峰面积均有不同程度减小,其中 T_{22} 信号幅度变化最大,表明电场的添加能改变带鱼体内水分迁移路径,维持较高的水分含量,增加带鱼持水性和保水性。MRI 成像图表明在贮藏期间,电场处理后带鱼水分保有率得到了提升,保鲜效果优于未施加电场带鱼,且电场强度越大,体外迁移水分越少。实验表明低压核磁共振(LF-NMR)技术对东海带鱼具有良好的保鲜效果,对低压核磁共振(LF-NMR)技术的保鲜应用提供一定的理论指导作用。

关键词 低压静电场; 东海带鱼(*Trichiurus lepturus*); 水分迁移特性; 低压核磁共振(LF-NMR)

中图分类号 TS254 doi: 10.11693/hyhz20210900210

带鱼(*Trichiurus lepturus*)在海洋水产品中是相对产量较高的一种鱼类,为暖温性近底层重要经济鱼类,是我国海洋四大海产之一,广泛分布于东亚大陆架海域(吴仁协等, 2019)。带鱼自身富含多种营养物质,营养成分全面,食用后对人体有很多功效,如有益于脾胃虚寒,增进食欲而达到很好的健体补虚功效,可以为机体提供丰富的蛋白质;可有效预防癌症,对血癌、胃癌等有防治作用;不饱和脂肪酸含量丰富,具有增强机体免疫力等功效(郭艳利等, 2018; 邵颖, 2019)。

水产品中水分的含量最高,而且水分作为水产品中非常重要的组分,其存在形式和各区域分布状

况对水产品品质和贮藏期间的稳定性等有着显著的影响。这些影响包括蛋白质变性、酶活性下降、弹性硬度变化等物化反应,都与水有密切关系。带鱼具备水产品的易腐特性,微生物能在其组织结构中获得良好的生存环境从而大量繁殖,同时产生一系列生化反应,从而使得带鱼在贮运中品质迅速下降。其中关于水分的表现有鱼肉发生大量结构膨胀,结合水和肌间截留水转变成自由水,导致水产品质量变差。证明了水产品质量的改变与水分的移动有一定的联系(王尊等, 2017)。为了监测研究带鱼物理化学性质可以成为水产品新鲜度的判断标准(Horigane *et al.*, 2013),因此,采取适当的处理方式延长其贮藏期,可

* 2019 年浙江省省级重点研发项目, 2019C02077 号。周卓颖, 硕士研究生, E-mail: 18857092767@163.com

通信作者: 谢超, 博士, 副教授, E-mail: xc750205@163.com

收稿日期: 2021-09-12, 收修改稿日期: 2021-10-08

显著提升水产品的贮藏品质。

低场核磁共振(low field nuclear magnetic resonance, LF-NMR)是近年来开发的一种高科技检测技术。大多研究者将其灵活运用在食品学、医学、生物学各个领域。在检测中,它具备了多种优势,如操作便捷、稳定性高,得出结果效率高等,除此之外,加设磁场检测肌肉中氢原子核的弛豫特性可以得到被检样品水分的变化,能为判断肌肉损伤腐烂幅度提供准确可靠的判断依据(房鹏祥等, 2021)。分析水分的不同活跃形态以及水分与肌肉组织间纤维致密程度,可以分成多个水分类型。通过测定氢原子核在磁场中的纵向弛豫时间 T_1 和横向弛豫时间 T_2 , 分析所得物理特性; T_2 测定结果能将食品中的三种类型水(结合水、不易流动水、自由水)加以区分,同时得出三种类型水分的转换关联,因此通常用它来表征水分的迁移特性(钱韻芳等, 2018)。

本文通过水分含量对带鱼 40 d 内水分迁移情况进行初探,再结合低场核磁共振技术进行 NMR 横向弛豫时间 T_2 反演谱图分析、MRI 成像分析,旨在得出不同时期带鱼内部不同水分状态和不同部位的水分迁移情况,探究电场强度对带鱼微冻贮藏期水分迁移的影响。研究水分在食品内的含量及分布情况,以及各种条件下水分迁移形式和特点,运用低温贮藏、外加电场等方法食品水分迁移进程,对提升食品贮藏品质和保鲜效果有一定指导意义。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

新鲜舟山东海带鱼(*Trichiurus lepturus*), 采购自浙江舟山渔港,挑选鱼皮湿滑、无破损品质完好(体长约 0.8~1.0 m, 厚约 2~3 cm)、通体银白铮亮的个体,经过处理后进行包装袋封装,设定温度为 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 分别进行电场保存。

1.2 试验试剂

本试验所用试剂包括氧化镁(MgO)、硼酸(H_3BO_3)、盐酸(HCl)、三氯乙酸($\text{C}_2\text{HCl}_3\text{O}_2$)等,具体见表 1 所示。

表 1 实验试剂
Tab.1 The experimental reagents

名称	规格	厂家
氧化镁(MgO)	AR	国药集团化学试剂有限公司
硼酸(H_3BO_3)	AR	国药集团化学试剂有限公司
盐酸(HCl)	AR	国药集团化学试剂有限公司
三氯乙酸($\text{C}_2\text{HCl}_3\text{O}_2$)	AR	国药集团化学试剂有限公司

1.3 仪器与设备

本试验所用仪器与设备包括水分含量仪、品质分析成像仪、分析天平、电热恒温干燥箱、自动温度记录仪等,具体见表 2 所示。

表 2 仪器与设备
Tab.2 Instruments and equipment

名称	厂家
LXT-120 水分含量仪	Recht 公司
HT-MRSI20-40A 食品品质分析成像仪	上海寰彤科教设备有限公司
BSA224S 分析天平	赛多利斯公司
DHG-9073A 电热恒温干燥箱	上海精其公司
冰箱	海尔公司
RC-4 自动温度记录仪	厦门宇电公司
LB-KDN-5 凯氏定氮仪	青岛路博公司
FS-2 匀浆机	常州凯航仪器公司
Agilent 1220 高效液相色谱仪	Agilent 公司
BSA224S-CW 天平	赛多利斯公司
PHS-3C 电极 pH 计	雷磁仪器
CTX 质构仪	Brookfield 公司
TS7600 色差仪	泰双仪器
5804/R 高速大容量冷冻离心机	Eppendorf 中国有限公司
DZKW-S-6 水浴锅	上海楚柏设备
MLS-3750 灭菌锅	日产三洋
VT6060 干燥烘箱	赛默飞公司
电场装置	浙江驰力科技股份有限公司
放电板	浙江驰力科技股份有限公司

1.4 方法

1.4.1 样品处理 新鲜带鱼冰袋装箱 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 从码头运至实验室,即刻进行清洗、称重、分装等工作,沥水晾干后使用封口机套袋封口,对封口袋进行个体随机分组后放入 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱备用。

1.4.2 分组与电场设置 处理好的带鱼分为 4 组,具体贮藏条件见表 3。

表 3 样品分组与贮藏条件
Tab.3 Sample grouping and storage conditions

组别	贮藏条件
DY ₁	$E=0\text{ kV/m}$, $T=-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $f=0\text{ Hz}$, $D=40\text{ d}$
DY ₂	$E=2\text{ kV/m}$, $T=-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $f=50\text{ Hz}$, $D=40\text{ d}$
DY ₃	$E=2.5\text{ kV/m}$, $T=-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $f=50\text{ Hz}$, $D=40\text{ d}$
DY ₄	$E=3\text{ kV/m}$, $T=-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $f=50\text{ Hz}$, $D=40\text{ d}$

注:表中 E 代表电场强度, T 代表温度, f 代表电场频率, D 代表贮藏时间

1.4.3 总挥发性盐基氮的测定 参考国标

GB 5009.228—2016。为防止管路堵塞, 上机前将氧化镁用量从 1 g 减少至 0.25 g。采用 0.01 mol/L 盐酸滴定, 加入 5 滴溴甲酚绿和 1 甲基红作为指示剂, 当滴定出现红紫色即停止。计算公式见式(1)。

定氮仪参数设定: 硼酸 30 mL、蒸馏时间 180 s、淋水量 10 mL、自动加碱功能 OFF。

$$X = \frac{(V_1 - V_2) \times c \times 14}{m} \times 100, \quad (1)$$

式中, X 为挥发性盐基氮含量(mg/100 g); m 为样品质量(g); V_1 为测定值(mL); V_2 为空白值(mL); c 为盐酸浓度(mol/L); 100 为换算系数。

1.4.4 pH 的测定 pH 计双点法校正, 校正点选定为 pH 6.86、pH 4.00。

1.4.5 水分含量的测定 截取小片带鱼背部肌肉, 使用 101~105 °C 直接干燥法, 每隔 30 min 测定一次, 重复操作至误差 ≤ 2 mg 达到恒重。

1.4.6 NMR 横向弛豫时间 T_2 反演谱图分析 通过低场核磁共振技术(NMR)测定, 原理是利用原子核跃迁产生核磁共振, 静磁场中射频自旋体系(T_1)引发内源性能量反转, 微观体系达到内平衡的时间即为横向弛豫时间(T_2) (Nishimura *et al.*, 2018)。 T_2 谱反演参数: 磁体温度(35 °C); 主频(SF=20.8 MHz); 90°脉冲(6 μ s); 180°脉冲(12 μ s); 采样点数(131 072); 重复时间(5 000 ms); 累加次数(NS=2 次); 回波时间(0.26 ms); 回波个数(4 096) (蓝蔚青等, 2019)。

1.4.7 MRI 成像分析 参考谢小雷等(2013)的方法并作适当修改, 通过磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)将 T_2 参数三维坐标化, 以图像形式提供水分空间信息(陈成等, 2015)。MRI 成像参数: 磁体温度(35 °C); 主频(20.8 MHz); 90°脉冲(6 μ s); 180°脉冲(12 μ s); 采样点数(128×128); 回波时间(TE=0.36 ms); 重复时间(TR=5 000 ms); 序列(SE 序列); 累加次数(1 次) (Wang *et al.*, 2018)。

1.4.8 数据处理 采用 Origin 和 Excel 整合数据, 制作数据关系图, 采用 SPSS 21 做误差分析, $P < 0.05$ 则差异显著, $P > 0.05$ 则无显著差异, 指标进行 3 次平行实验。

2 结果与讨论

2.1 总挥发性盐基氮含量

挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N) 包括食品中碱性的胺及氨类等分解产物, 是水产品、肉类新鲜程度指标中最具代表性的指标(吴迪迪等,

2019), 其值越大代表氨基酸被破坏程度越大。高蛋白食品贮藏终点会散发臭味多是因为 TVB-N 含量过高所致。如图 1 所示, 在低压静电场协同低温的贮藏条件下, 0~40 d 带鱼 TVB-N 值逐渐增大, 整体呈现上升趋势。0 d 时测得新鲜带鱼 TVB-N 为 9.84 mg/100 g, 符合 SC/T 3102-2010 中一级品质带鱼(TVB-N ≤ 13 mg/100 g)的定义。10 d 时 DY₁ 的 TVB-N 上升了 7.12 mg/100 g, 其余三组上升幅度不大, 保持在同一水平。30 d 时 DY₁ 带鱼有轻微腥臭味, 鱼眼发黄, 测得 TVB-N 为 35.64 mg/100 g, 已不符合新鲜带鱼(TVB-N ≤ 30 mg/100 g)的标准, 电场处理带鱼的 TVB-N 则在 30 mg/100 g 以下。由此可见电场可通过抑制生物体内蛋白质的降解来减慢 TVB-N 上升速度。40 d 时 DY₂、DY₃ 组 TVB-N 分别为 28.94、28.15 mg/100 g, 未超出合格品范围限定, DY₄ 组带鱼 TVB-N 值为 32.44 mg/100 g, 出现轻微腐败。这表明 3 kV/m 电场强度的持续施加虽然能在前中期延缓 TVB-N 上升, 但随贮藏时间延长, 过高的电场强度并不能继续抑制碱性物质的增加, 故 DY₄ 组 TVB-N 值在保鲜结束时已超过标准。

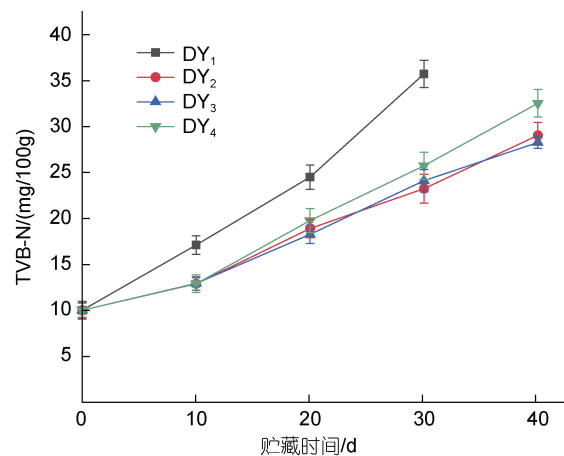


图 1 电场强度对微冻贮藏带鱼 TVB-N 的影响

Fig.1 The TVB-N of micro-frozen *T. lepturus* under different electric field intensities

2.2 pH 值

pH 值指酸碱度, 贮藏过程中 pH 值的变化能直观地反映出样品的酸碱性(胡云峰等, 2021), pH 的波动幅度代表了鱼体蛋白质被微生物和酶分解的速率和解析程度。新鲜带鱼 pH 为 7.11, 随贮藏时间的延长, pH 值呈先降后升趋势。如图 2 所示, 带鱼 pH 在 10 d 有最低值, 究其原因与带鱼出水后进入死僵状态有关, 糖原、ATP 被分解为乳酸, 乳酸比例上升使得 pH

下降。从 20 d 开始, DY_1 、 DY_2 、 DY_3 、 DY_4 的 pH 却出现意外的上升, 贮藏至 30 d 时 pH 值波动较小, 波动维持在 ± 0.16 之内, 40 d 时 pH 达到最大值, DY_1 、 DY_2 、 DY_3 、 DY_4 分别为 7.67、7.30、7.24、7.47, 均比贮藏初期 7.11 高。这可能是因为贮藏后期微生物数量上升, 腐败菌和内源酶联合作用将带鱼肌肉组织中的肌球蛋白、肌浆蛋白等蛋白质分解成碱性含氮物质, 因此 pH 才会上升。水产品新鲜度和 pH 波动幅度大小相关, 波动幅度越大, 自分解反应越激烈, 不利于储运保鲜(李来好等, 2009)。与 DY_1 相比, DY_2 、 DY_3 、 DY_4 的 pH 波动幅度更小, 表明电场对 pH 波动幅度有显著作用。电场能改变细胞膜跨膜电位差, 以此降低微生物活性和水解酶活性, 使 pH 维持在初始水平附近(Schottroff *et al.*, 2019)。

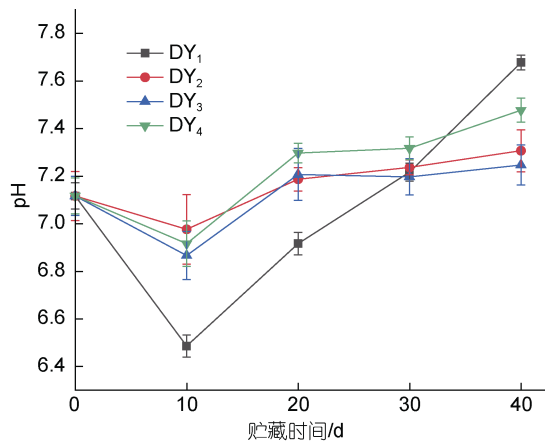


图2 电场强度对微冻贮藏带鱼 pH 的影响

Fig.2 The pH of micro-frozen *T. lepturus* under different electric field intensities

2.3 水分含量的测定

图 3 展示了 0~40 d 电场结合微冻贮藏带鱼水分含量的变化情况, 在贮藏期间水分含量总体呈现出不断的下降。新鲜带鱼水分含量为 78.49%, 贮藏至 20 d, DY_1 、 DY_2 、 DY_3 、 DY_4 水分含量分别为 50.14%、53.16%、54.23%、57.10%, DY_1 降幅最大。贮藏至 40 d 四组样品水分含量分别为 34.25%、38.24%、41.05%、44.56%, 组间、组内差异显著($P < 0.05$)。组内差异显著说明水分会随贮藏时间延长流失, 这可能与蛋白质结构改变和微生物增长有关。组间差异显著说明外加电场可能引起肌肉内水分子的共振, 使水分子结构发生改变, 从而降低了自由水的流动性, 同时电场抑制微生物生长, 减缓微生物繁殖破坏细胞结构的速率(段伟文, 2019)。

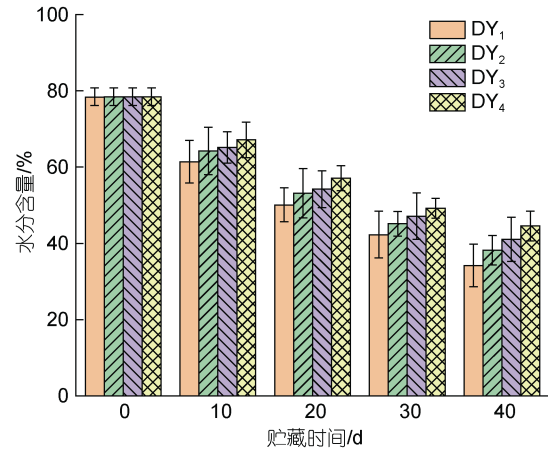


图3 电场强度对微冻贮藏带鱼水分含量变化的影响

Fig.3 The influence of four electric field strengths on the moisture content of *T. lepturus* in micro-frozen storage

2.4 新鲜带鱼 T_2 谱图

通过低场核磁共振技术(NMR)测定的新鲜带鱼 T_2 横向弛豫时间光谱如图 4 所示。按照自由流动程度将生物体水分称为结合水、不易流动水和自由水。图中第一个峰代表结合水横向弛豫时间 T_{21} , 这部分水通过偶极作用与带鱼体内大分子结合十分紧密; 第二个峰代表不易流动水横向弛豫时间 T_{22} , 这部分水存在于细胞膜结构和亚显微结构, 流动性强于 T_{21} 结合水; 第三个峰代表自由水横向弛豫时间 T_{23} , 这部分水流动性最强, 是贮藏过程中最容易损失和最先损失的部分(宋伟等, 2015)。经过归一化处理 T_{21} 、 T_{22} 、 T_{23} 峰面积分别为 32 575 907.5、1 673 423 122.1、437 205 362.3, 峰占比分别为 1.5%、78.0%、20.5%, 不易流动水占新鲜带鱼水分分布比例最高, 只有 1.5% 的结合水。

2.5 NMR 横向弛豫时间 T_2 反演谱图分析

图 5 展示了 20 d 带鱼 90° 脉冲和 180° 脉冲的 T_2 横向弛豫时间反演谱图, 可以看出贮藏一段时间后带鱼产生水分迁移, T_{21} 、 T_{22} 、 T_{23} 峰面积均有不同程度减小。其中 T_{22} 信号幅度变化最大, T_{21} 、 T_{23} 次之, 且三个峰有向右移动的趋势, $DY_4 \rightarrow DY_1$ 峰面积及比例呈递减趋势, DY_1 、 DY_2 、 DY_3 、 DY_4 的 T_{22} 峰面积分别为 613 285 530.7、736 884 414.5、843 959 697.5、976 446 178.8, 峰占比分别为 74.68%、79.36%、81.94%、84.12%。图 6 展示了 40 d 时四组带鱼 T_2 横向弛豫时间反演谱图, T_{22} 峰面积分别为 145 619 368.6、292 459 342.0、361 152 881.5、747 460 174.9, 峰占比分别为 68.14%、75.44%、78.12%、81.11%, T_{22}

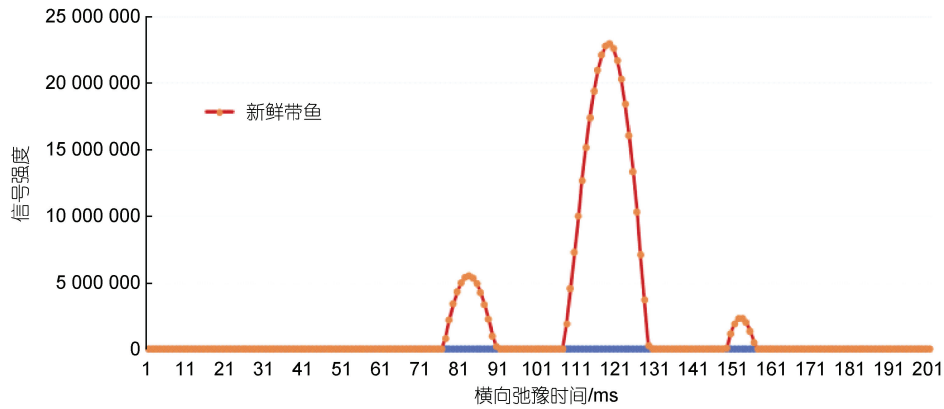


图 4 新鲜带鱼 T_2 谱

Fig.4 The T_2 spectrum of fresh *T. lepturus*

注: 图中的峰主要反馈新鲜带鱼中不同种类水的存在, 峰面积表示其含量。黄色和红色(带黄点)为同一曲线, 黄色曲线表示信号值为 0, 红色(带黄点)曲线表示该横向弛豫时间下出峰, 蓝色部分表示与红色曲线(带黄点)的出峰进行明显区别

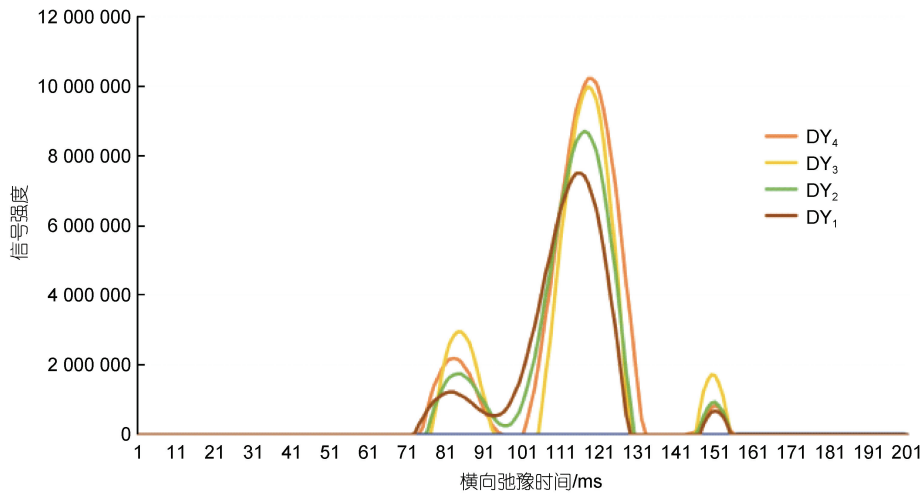


图 5 第 20 天带鱼横向弛豫时间 T_2 谱

Fig.5 The T_2 inversion spectrum of the horizontal relaxation time of each group of *T. lepturus* on the 20th day

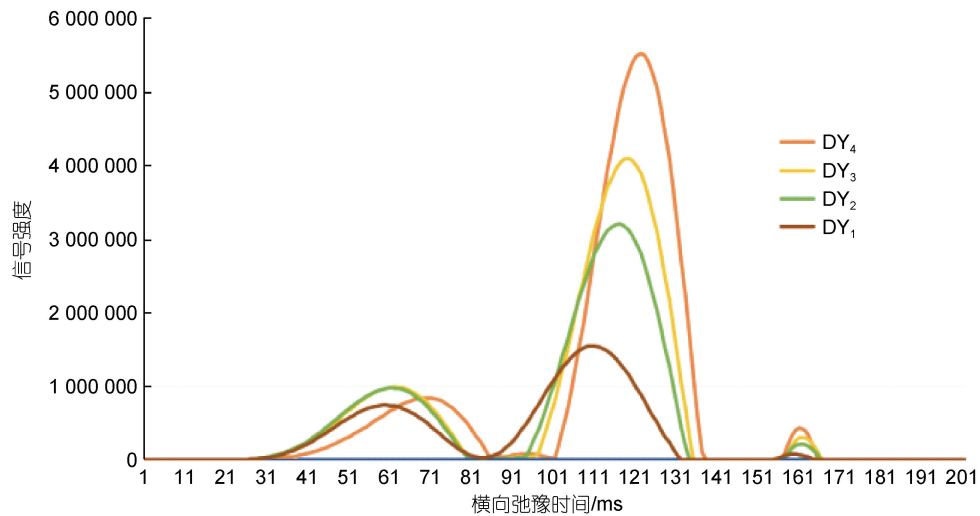


图 6 第 40 天带鱼横向弛豫时间 T_2 谱

Fig.6 The T_2 inversion spectra of the horizontal relaxation time of each group of *T. lepturus* on the 40th day

峰面积和峰占比下降的同时 T_{23} 峰面积和峰占比却出现了上升趋势, T_{21} 峰面积也有明显增大。对内来说, 峰占比的变化说明三种形态水在进行相互的转换, 构成细胞膜和亚显微结构的不易流动水比例会下降; 对外来说, 峰面积减小说明带鱼水分含量减少, 新鲜度降低。组间差异说明电场能改变带鱼体内水分迁移路径, 维持较高的水分含量, 增加带鱼持水性和保水性, 电场强度越高持水力越强, 这与水分含量的结果一致。

2.6 MRI 成像分析

MRI 成像图可以直观体现样品内部水分分布。暖色越深, 数值越高, H 质子密度越大, 水分含量越高 (Tan *et al.*, 2018); 冷色越深, 数值越低, H 质子密度越

小, 水分含量越低(胡斐斐等, 2021)。图 7 分别展示了 0、20、40 d 各组带鱼 MRI 的 H 质子分布情况, 新鲜带鱼肉片中心区域颜色深厚且鲜艳, 随着贮藏时间延长, 红色区域逐渐减少, 红色由中心向外部扩散, 直观地表征出了带鱼贮藏时的汁液流失和水分迁移现象。贮藏至 20 d, DY_1 和 DY_2 组 MRI 黄色增多, 红色减少, DY_3 和 DY_4 组中心区域仍有部分红色。贮藏至 40 d, DY_1 组图像完全变成了蓝绿色, 水分流失严重, DY_2 和 DY_3 大部分区域为黄色, 红色消失, 仅 DY_4 组有零星红色, 印证了 NMR 横向弛豫时间 T_2 趋势走向。实验表明电场处理后带鱼水分保有率得到了提升, 保鲜效果优于未施加电场带鱼, 且电场强度越大, 体外迁移水分越少。

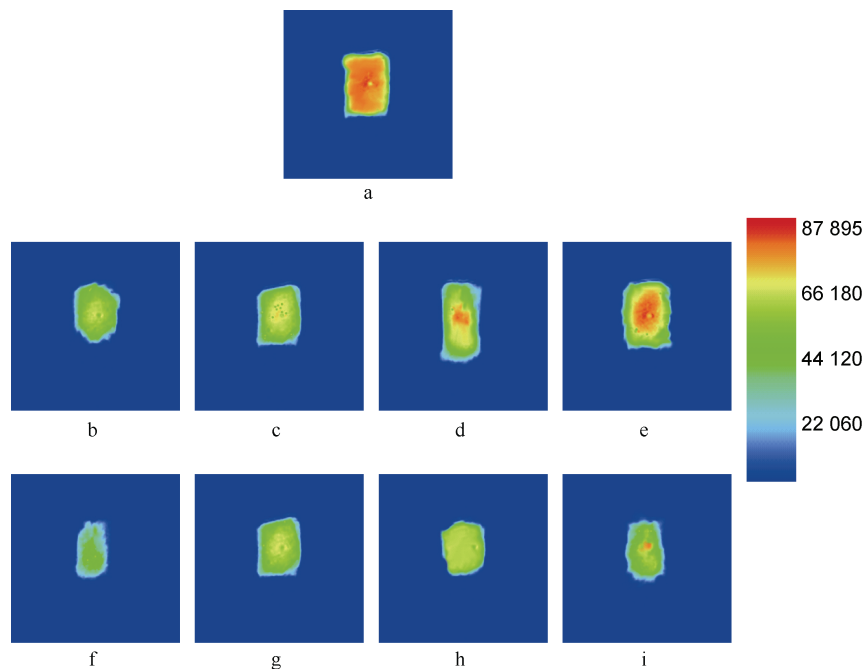


图 7 带鱼 MRI 成像图

Fig.7 MRI image of *T. lepturus*

注: a. 新鲜带鱼 MRI; b. DY_1 -20 d MRI; c. DY_2 -20 d MRI; d. DY_3 -20 d MRI; e. DY_4 -20 d MRI; f. DY_1 -40 d MRI; g. DY_2 -40 d MRI; h. DY_3 -40 d MRI; i. DY_4 -40 d MRI。图例数值表示该部位信号值, 中心颜色越接近红色表示该部位含水量较高, 水分流失情况较少; 反之则表示该部位含水量较低, 水分流失严重

3 结论

本文通过测定 TVB-N、pH、水分含量、分析 NMR 横向弛豫时间 T_2 反演谱图和 MRI 成像, 得出不同时期带鱼内部不同水分状态和不同部位的水分迁移情况, 研究电场强度(0, 2, 2.5, 3 kV/m)对带鱼内部水分迁移的影响, 得到了以下主要结论: 贮藏前期 TVB-N 数据均相差不大, 贮藏中期电场组 DY_2 、 DY_3 、

DY_4 相对于对照组有着明显的保鲜效果, DY_3 、 DY_4 ($E=3$ kV/m)在贮藏后期具有更佳的保鲜优势。在 0~40 d 贮藏期内, DY_1 、 DY_2 、 DY_3 、 DY_4 带鱼 pH 值均呈先降后升趋势。

(1) 带鱼体内水分会随贮藏时间延长流失, 电场能降低自由水的流动性, 抑制微生物生长, 减缓微生物繁殖破坏细胞结构的速率, 未施加电场处理的带鱼水分含量最低。

(2) T_2 横向弛豫时间由三个峰组成, 分别代表结合水、不易流动水和自由水。 T_{21} 、 T_{22} 、 T_{23} 峰面积在贮藏期间均有不同程度的减小, 其中 T_{22} 信号幅度变化最大, 结合三种类型水相互转换, 构成细胞膜结构和亚显微结构的不易流动水比例会下降。电场能改变带鱼体内水分迁移路径, 维持较高的水分含量, 增加带鱼持水性和保水性, 电场强度越高持水力越强。

(3) 由 MRI 成像分析结果可知, 电场处理后带鱼水分保有率得到了提升, 保鲜效果优于未施加电场带鱼, 且电场强度越大, 体外迁移水分越少。

参 考 文 献

- 王尊, 谢晶, 钱韻芳, 2017. 带鱼冷藏过程中品质变化与水分迁移相关性研究[C] // 上海市制冷学会 2017 年学术年会论文集. 上海: 上海市制冷学会, 257-263.
- 李来好, 彭城宇, 岑剑伟, 等, 2009. 冰温气调贮藏对罗非鱼片品质的影响[J]. 食品科学, 30(24): 439-443.
- 吴仁协, 张浩冉, 牛素芳, 等, 2019. 东海近岸带鱼(*Trichiurus japonicus*)线粒体控制区序列的群体遗传变异研究[J]. 海洋与湖沼, 50(6): 1318-1327.
- 吴迪迪, 李勇勇, 史咏梅, 等, 2019. 冰藏联用 ClO_2 保鲜对大黄鱼肌肉优势腐败菌及品质的影响[J]. 食品工业科技, 40(13): 236-241.
- 宋伟, 李冬坤, 乔琳, 等, 2015. 对不同含水量粳稻谷 T_2 峰面积和 MRI 图像的定量分析[J]. 中国农业科学, 48(22): 4529-4538.
- 陈成, 王晓曦, 王瑞, 等, 2015. 核磁共振技术在食品中水分迁移状况的研究现状[J]. 粮食与饲料工业(8): 5-8, 13.
- 邵颖, 2019. 壳聚糖-丁香酚乳液的制备表征及其对冷藏期间带鱼的保鲜作用研究[D]. 杭州: 浙江大学: 16-21.
- 房鹏祥, 赵世涛, 2021. 探讨低场核磁共振技术在食品安全快速检测中的应用[J]. 食品界(7): 85-86.
- 胡云峰, 潘悦, 王雅迪, 等, 2021. 基于 pH 值变化的冷藏草鱼肉新鲜度预测模型研究[J]. 食品研究与开发, 42(2): 14-17, 52.
- 胡斐斐, 钱书意, 李侠, 等, 2021. 低压静电场辅助冷藏对牛肉品质的影响[J]. 食品科学, 42(1): 132-138.
- 段伟文, 2019. 应用低压静电场与气调包装进行凡纳滨对虾保鲜的研究[D]. 湛江: 广东海洋大学: 42-53.
- 钱韻芳, 王尊, 王硕, 等, 2018. 模拟冷链物流过程中温度波动对带鱼品质及水分迁移的影响[C] // 中国食品科学技术学会第十五届年会论文集. 青岛: 中国食品科学技术学会: 615-616.
- 郭艳利, 商金颖, 李惠, 等, 2018. 带鱼货架期简约冷链防腐保鲜技术研究[J]. 食品科技, 43(6): 160-164.
- 谢小雷, 李侠, 张春晖, 等, 2013. 中红外-热风组合干燥牛肉干降低能耗提高品质[J]. 农业工程学报, 29(23): 217-226.
- 蓝蔚青, 巩涛硕, 傅子昕, 等, 2019. 不同植物源提取液对冰藏鲳鱼水分迁移及蛋白质特性的影响[J]. 中国食品学报, 19(8): 179-188.
- HORIGANE A K, SUZUKI K, YOSHIDA M, 2013. Moisture distribution of soaked rice grains observed by magnetic resonance imaging and physicochemical properties of cooked rice grains [J]. Journal of Cereal Science, 57(1): 47-55.
- NISHIMURA A, MATSUDA H, TASEI Y, *et al*, 2018. Effect of water on the structure and dynamics of regenerated [$3\text{-}^{13}\text{C}$] Ser, [$3\text{-}^{13}\text{C}$], and [$3\text{-}^{13}\text{C}$] Ala-*Bombyx mori* silk fibroin studied with ^{13}C solid-state nuclear magnetic resonance [J]. Biomacromolecules, 19(2): 563-575.
- SCHOTTROFF F, GRATZ M, KROTTENTHALER A, *et al*, 2019. Pulsed electric field preservation of liquid whey protein formulations-Influence of process parameters, pH, and protein content on the inactivation of *Listeria innocua* and the retention of bioactive ingredients [J]. Journal of Food Engineering, 243: 142-152.
- TAN M Q, LIN Z Y, ZU Y X, *et al*, 2018. Effect of multiple freeze-thaw cycles on the quality of instant sea cucumber: Emphatically on water status of by LF-NMR and MRI [J]. Food Research International, 109: 65-71.
- WANG S, XIANG W, FAN H Z, *et al*, 2018. Study on the mobility of water and its correlation with the spoilage process of salmon (*Salmo solar*) stored at 0 and 4 °C by low-field nuclear magnetic resonance (LF NMR ^1H) [J]. Journal of Food Science and Technology, 55(1): 173-182.

STUDY ON PRESERVATION AND WATER RETENTION IN HAIRTAIL *TRICHIURUS LEPTURUS* FROM THE EAST CHINA SEA IN LF-NMR TECHNOLOGY

ZHOU Zhuo-Ying¹, XIE Chao¹, YU Qun-Di¹, ZHANG Jia-Wei¹, ZHENG Lin-Bo¹, ZHENG Wei²,
YE Chang-Qing²

(1. College of Food and Medicine, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China; 2. Zhoushan Changqing Marine Food Limited Company, Zhoushan 316021, China)

Abstract To understand the quality change and water migration in hairtail *Trichiurus lepturus* under low-pressure nuclear magnetic resonance, the influence of electric field in different intensities (Groups DY₁~DY₄: $E=0, 2, 2.5, 3$ kV/m, respectively) on the internal water migration and quality of hairtail was studied in experiment, in which the content of volatile base nitrogen (TVB-N), pH, and water content were measured, and the T_2 inversion of NMR transverse relaxation time and MRI imaging were analyzed. Results of TVB-N data analysis show that DY₃ ($E=2.5$ kV/m) and DY₄ ($E=3$ kV/m) showed better fresh-keeping advantages in the storage period. During the storage period of 0~40 d, the pH value of hairtail under different electric field intensities decreased at the beginning and then increased in tendency. The application of electric field could reduce the fluidity of free water, inhibit the growth of microorganism, and reduce the water loss in hairtail. By analyzing the T_2 inversion spectra of NMR transverse relaxation time, the T_{22} and T_{23} peak areas decreased to different degrees, and the amplitude of T_{22} signal changed the most, indicating that the application of electric field can change the water migration path in the fish, maintain higher water content, and increase water retention and water retention of the fish. MRI imaging showed that during storage, the water retention rate of hairtail was improved after electric field treatment, and the preservation effect was better than that without the treatment, and the greater the electric field intensity, the less water migrated *in vitro*. The experimental results show that LF-NMR technology had a good effect on the preservation of hairtail of the East China Sea. This study provided a theoretical base for the application of LF-NMR technology in the preservation of ribbonfish and other similar fishes.

Key words low-voltage electrostatic field; *Trichiurus lepturus* in the East China Sea; migration of water; low field nuclear magnetic resonance (LF-NMR)