

游刚, 谢福瑜, 蓝曼宁, 等. 复合涂膜剂对冷藏罗非鱼片肌原纤维蛋白理化特性及熟化鱼肉品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(7): 291-300. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024040338

YOU Gang, XIE Fuyu, LAN Manning, et al. Effects of Composite Coatings on the Physicochemical Properties of Myofibrillar Protein and the Cooked Quality of Tilapia Fillets during Refrigeration[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(7): 291-300. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024040338

· 贮藏保鲜 ·

复合涂膜剂对冷藏罗非鱼片肌原纤维蛋白理化特性及熟化鱼肉品质的影响

游刚, 谢福瑜, 蓝曼宁, 黄晓雯, 王昌宇, 陈小芳, 彭家俊, 罗珍玲, 黄一支, 牛改改*

(广西高校北部湾海产品高值化利用与预制食品重点实验室, 广西壮族自治区海洋食品营养与加工技术创新工程研究中心, 北部湾大学食品工程学院, 广西钦州 535000)

摘要: 为探究复合涂膜剂对冷藏罗非鱼片品质的影响, 本文研究了冷藏 (4 °C) 过程中 (0、2、4、6、8 d) 茶多酚-壳聚糖 (T-Ch)/茶多酚-海藻酸钠 (T-SA) 复合涂膜剂对鱼片肌原纤维蛋白 (Myofibrillar protein, MP) 理化性质 (溶解度、浊度、总巯基/活性巯基、Ca²⁺-ATPase 活性和表面疏水性) 及熟化鱼肉品质变化 (红外光谱、凝胶形成作用力、质构、体外消化性和感官评价) 的影响。结果表明, 两种涂膜剂均能减缓冷藏鱼片 MP 溶解度、总巯基/活性巯基含量、Ca²⁺-ATPase 活性的降低幅度, 减缓 MP 浊度和表面疏水性的增加幅度, 延缓冷藏鱼肉 MP 变性聚集, 改善冷藏鱼片品质。其中 T-Ch 处理对 MP 溶解性、活性巯基、表面疏水性和 Ca²⁺-ATPase 活性的维持效果优于 T-SA 处理, 而 T-SA 处理则可较好保持 MP 的总巯基含量。尽管涂膜剂处理降低了冷藏后熟化鱼肉消化率, 但涂膜处理增加鱼肉 MP 的疏水作用力和二硫键含量, 增强鱼肉凝胶特性, 改善鱼肉感官特性和质构劣化程度, 且 T-Ch 处理效果由于 T-SA 处理。因此, 复合涂膜剂处理能够有效延缓冷藏鱼片品质下降, 提高其保鲜效果。

关键词: 罗非鱼片, 复合涂膜剂, 冷藏, 肌原纤维蛋白, 品质变化

中图分类号: TS254.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)07-0291-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024040338

本文网刊:



Effects of Composite Coatings on the Physicochemical Properties of Myofibrillar Protein and the Cooked Quality of Tilapia Fillets during Refrigeration

YOU Gang, XIE Fuyu, LAN Manning, HUANG Xiaowen, WANG Changyu, CHEN Xiaofang, PENG Jiajun, LUO Zhenling, HUANG Yizhi, NIU Gaigai*

(Guangxi College and University Key Laboratory of High-value Utilization of Seafood and Prepared Food in Beibu Gulf, Guangxi Zhuang Autonomous Region Engineering Research Center of Marine Food Nutrition and Processing Technology Innovation, College of Food Engineering, Beibu Gulf University, Qinzhou 535000, China)

Abstract: This study explored the impact of tea polyphenol-chitosan (T-Ch) and tea polyphenol-sodium alginate (T-SA) composite coatings on the quality of refrigerated tilapia fillets during storage at 4 °C. The research focused on the changes in myofibrillar protein (MP) physicochemical properties, such as solubility, turbidity, total and active thiol groups, Ca²⁺-ATPase activity, and surface hydrophobicity and the effects on cooked fish quality, including infrared spectroscopy, gel strength, texture, *in vitro* digestibility, and sensory assessment, over storage periods of 0, 2, 4, 6, and 8 d. The findings demonstrated that both coatings effectively mitigated the extent of reductions in MP solubility, total and active sulfhydryl content, and Ca²⁺-ATPase activity, while also decreased the extent of increases in MP turbidity and surface hydrophobicity

收稿日期: 2024-04-24

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目 (32360632); 广西自然科学基金资助 (2025GXNSFAA069201); 国家自然科学基金青年科学基金资助项目 (32001688); 北部湾大学大学生创新创业训练计划资助项目 (S202411607194, S202411607195)。

作者简介: 游刚 (1989-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 水产品加工与贮藏, E-mail: yougang8901@163.com。

* 通信作者: 牛改改 (1989-), 女, 硕士, 副教授, 研究方向: 水产品加工与利用, E-mail: gaigainiu@163.com。

in refrigerated fish fillets. These slowed down the denaturation and aggregation of MP in refrigerated fish fillets, thereby enhancing their overall quality. Notably, the T-Ch treatment showed superior maintenance of MP solubility, active sulfhydryl levels, surface hydrophobicity, and Ca^{2+} -ATPase activity compared to the T-SA treatment. Conversely, the T-SA treatment was more effective in preserving the total sulfhydryl content of MP. Although the coating treatment reduced the digestibility of the cooked fish after refrigeration, it increased the hydrophobic interactions and disulfide bond content of the fish myofibrillar protein (MP), thereby enhancing the gel characteristics of the fish and improving its sensory attributes and degree of textural deterioration. Moreover, the T-Ch treatment was found to be more effective than the T-SA treatment in these aspects. Consequently, the application of composite coatings can effectively delay the decline in quality of refrigerated fish fillets and enhance their preservation efficacy.

Key words: tilapia fillets; composite coating agent; refrigeration; myofibrillar protein; quality changes

罗非鱼(*Oreochromis mossambicus*)的骨刺少且肉厚,是中国淡水养殖的重要水产品^[1]。罗非鱼在储存和运输过程中极易受到微生物、内源酶活性和环境条件的影响,导致其新鲜度、质地、持水性和其他食用品质下降。目前,关于罗非鱼鱼肉品质变化和品质控制的研究主要集中在常用品质指标、化学/生物防腐剂的使用上^[2],其中开发可食用涂膜以抑制食品中致病菌的生长是食品科学领域的研究热点^[3-4]。

壳聚糖、海藻酸钠和茶多酚等生物涂膜剂由于其无毒、可生物降解和生物相容性的优势而被广泛应用于鱼类保鲜,且被证实可有效延缓鱼肉品质劣化^[5-6]。然而,单一涂膜处理对鱼肉的保鲜效果有限,为了提高其整体性能,许多科研工作者已经进行了一些复合涂膜剂的尝试。Zhao等^[7]将不同水溶性多酚提取物(石榴皮、葡萄籽和绿茶)与壳聚糖复配涂膜处理草鱼鱼片,显著缓解鱼片品质的劣化;Jalali等^[8]研究表明丁香精油-海藻酸钠-羧甲基纤维素钠复合涂膜可延长冷藏鲤鱼鱼片的货架期;郝子娜等^[9]的研究发现茶多酚-海藻酸钠复合涂膜可提升草鱼储藏品质。目前复合涂膜保鲜的研究主要集中在新型复合涂膜剂开发和保鲜效果提升上,而关于茶多酚-壳聚糖/茶多酚-海藻酸钠复配涂膜剂对冷藏罗非鱼片品质影响及其作用机制的探索研究较少。

肌原纤维蛋白(Myofibrillar protein, MP)是鱼肉蛋白质的主要组分,其理化特性直接影响鱼肉的质地、口感和加工适宜性^[10]。冷藏过程中MP会发生变性,导致熟化鱼肉持水力降低、质地变硬、口感变差^[11]。因此,阐明涂膜处理冷藏鱼肉MP理化特性和熟化肉品质变化是明确涂膜剂调控鱼肉品质的作用基础,对涂膜保鲜技术理论的完善及其应用具有重要意义。然而,茶多酚-壳聚糖/茶多酚-海藻酸钠复配涂膜剂对冷藏罗非鱼片MP理化特性及熟化鱼片品质的影响缺乏系统性研究。因此,本研究以罗非鱼片为研究对象,通过茶多酚-壳聚糖/茶多酚-海藻酸钠复配涂膜处理,研究冷藏过程中罗非鱼片MP理化性质及熟化鱼肉品质变化,以期对罗非鱼片冷藏过程中质量控制技术的开发和应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜罗非鱼(1300±50 g/条) 广西钦州市商业

大厦;茶多酚、海藻酸钠、壳聚糖 上海麦克林生化科技有限公司; Ca^{2+} -ATPase 活性测定试剂盒 南京建成生物科技有限公司;胃蛋白酶(>400 U/mg)、胰蛋白酶(1.65 U/mg) 阿拉丁生化科技股份有限公司; Tris-HCl、氯化钠、尿素、乙二胺四乙酸(EDTA)等试剂均为国产分析纯 国药集团化学试剂北京有限公司。

Evolution201 紫外分光光度计 赛默飞世尔科技(中国)有限公司; icolet iS 10 傅里叶变换红外光谱仪 美国 Thermo Fisher Scientific 公司; CT3 质构仪 美国 Brookfield 公司; PD500-TP 高剪切分散匀浆机 英国 PRIMASCI 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 复合涂膜剂的制备 参考 Zarandona 等^[12]和 Sáez 等^[13]的方法并结合预实验确定涂膜剂配比。T-Ch 涂膜剂:称取一定量的壳聚糖,加入一定量乙酸,在 60 °C 的水浴中不断搅拌 10 min 后,静置 12 h,得到壳聚糖分散液;称取一定量茶多酚配制成水溶液,将茶多酚水溶液与壳聚糖分散液混合均匀,制成 T-Ch 涂膜剂,其中壳聚糖和茶多酚浓度为 1.5%(m/v),乙酸浓度为 1%(v/v),备用。T-SA 涂膜剂:称取一定量的海藻酸钠,加入一定量甘油做增塑剂,在 60 °C 的水浴中不断搅拌 25 min 后,静置 12 h,得到海藻酸钠分散液;称取一定量茶多酚配制成水溶液,将茶多酚水溶液与海藻酸钠分散液混合均匀,制成 T-SA 涂膜剂,其中海藻酸钠浓度为 1.5%(m/v),茶多酚浓度为 2.5%(m/v),甘油浓度为 4%(v/v),备用。

1.2.2 涂膜鱼片的制备 参考 Chen 等^[14]的方法,并稍作修改。将宰杀后的罗非鱼去头、去鳞、去内脏,冰水冲洗后取脊骨两侧肌肉切成约 3.0 mm 厚,1.0 cm 宽,2.0 cm 长的薄片,冰水漂洗 3 次后,将鱼片随机分为三组:空白对照组(CK 组)、茶多酚-壳聚糖复合涂膜剂组(T-Ch 组)和茶多酚-海藻酸钠复合涂膜剂组(T-SA 组)。CK 组鱼片直接置于聚乙烯袋中于 4 °C 贮藏,T-Ch 组和 T-SA 组鱼片分别置于对应涂膜剂中浸泡 1 min 后置于聚乙烯袋中于 4 °C 贮藏,分别于 0、2、4、6、8 d 取样分析鱼片 MP 理化性质(溶解度、浊度、总巯基/活性巯基、 Ca^{2+} -ATPase 活性和表面疏水性)变化。另外,取不同冷藏时间的鱼片

置于水浴锅(90 ℃)煮 5 min, 分析熟化鱼片品质特性(红外光谱、凝胶形成作用力、质构、体外消化性、感官评价)变化。

1.2.3 肌原纤维蛋白的提取 参考陈旭等^[15]的方法并稍作修改。称取鱼肉, 加入 10 倍体积 Tris-HCl 缓冲液(50 mmol/L NaCl, 20 mmol/L Tris-HCl, pH7.0)充分匀浆后离心(4 ℃, 10000 r/min, 10 min), 弃去上清液, 加入 10 倍体积 Tris-HCl 缓冲液(0.6 mol/L NaCl, 20 mmol/L Tris-HCl, pH7.0), 充分匀浆, 置于 4 ℃ 提取 1 h, 离心(4 ℃, 10000 r/min, 10 min)收集上清液, 即为 MP 溶液。采用双缩脲法测定蛋白质浓度。

1.2.4 肌原纤维蛋白理化性质测定

1.2.4.1 溶解度的测定 参考 Weinbreck 等^[16]和周昕仪等^[17]的方法, 将样品于 4 ℃ 放置 30 min 后, 于 10000 r/min 4 ℃ 下离心 10 min, 用双缩脲法测上清液蛋白质含量, 式(1)计算溶解度。

$$S(\%) = \frac{C1}{C2} \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

式中, S 表示溶解度, C1 为离心后上清液蛋白质浓度, C2 为原始(离心前)蛋白质浓度。

1.2.4.2 浊度的测定 参照 Weinbreck 等^[16]方法, 用紫外-可见分光光度计在 600 nm 处测定吸光度, 以吸光度代表样品的浊度。

1.2.4.3 总巯基和活性巯基的测定 依据 Gao 等^[18]和 Wei 等^[19]的实验方法。总巯基测定: 取 0.5 mL 2 mg/mL MP 溶液, 加入 4.5 mL 的 Tris-HCl(0.2 mol/L Tris, 8 mol/L 尿素, 2% SDS, 10 mmol/L EDTA, pH6.8)缓冲液于 412 nm 测定吸光度; 活性巯基测定: 取 5.5 mL 2 mg/mL MP 溶液, 加入 100 μL Ellman 试剂(含 0.1% DTNB, 0.2 mol/L Tris-HCl, pH6.8)混合均匀, 于 4 ℃ 下放置 1 h 后测定其在 412 nm 处的吸光度。总巯基和活性巯基(-SH)的计算公式如下:

$$-\text{SH}(\text{mol/g}) = \frac{A}{\varepsilon \times C} \times D \quad \text{式 (2)}$$

式中: A 为 412 nm 处的吸光值; D 为稀释倍数; C 为蛋白质浓度(2 mg/mL); ε 为摩尔消光系数 13600 L/(mol·cm)。

1.2.4.4 Ca²⁺-ATPase 活性的测定 严格按照试剂盒说明书测定 Ca²⁺-ATPase 活性, 以每小时每毫克鱼肉 MP 中 ATP 酶分解 ATP 产生 1 μmol 无机磷为一个 ATP 酶活力单位。

1.2.4.5 表面疏水性的测定 参考 Huang 等^[10]的方法并略加修改。将 1 mL MP 溶液(2 mg/mL)与 200 μL 溴酚蓝溶液(1 mg/mL)混匀后室温反应 10 min, 4000 r/min 离心 15 min, 取上清液稀释 10 倍后在 595 nm 处测定吸光度(样品), 用 1 mL Tris-HCl 缓冲液(0.6 mol/L NaCl, 20 mmol/L Tris-HCl, pH7.0)代替 MP 溶液, 同上述操作, 得空白对照吸光

值(空白), 表面疏水性以溴酚蓝结合量(μg BPB)表示。

$$\text{表面疏水性}(\mu\text{g BPB}) = \frac{200 \times (\text{空白组吸光度值} - \text{样品组吸光度值})}{\text{空白组吸光度值}} \quad \text{式 (3)}$$

1.2.5 熟化鱼片品质分析 称取冷藏不同天数(0、2、4、6、8 d)的鱼肉(200 g), 于 90 ℃ 加热 5 min, 冷却至室温, 测定鱼肉品质变化。

1.2.5.1 红外光谱扫描 熟化样品冻干后, 采用红外光谱仪扫描。测定参数^[20]: 扫描范围 4000~400 cm⁻¹、分辨率 4 cm⁻¹、扫描 32 次、温度 25 ℃。利用 Peakfit 软件对 1700~1600 cm⁻¹ 进行去卷积、拟合, 计算蛋白质二级结构的相对含量。

1.2.5.2 凝胶形成作用力分析 参考 Gómez-Guillen 等^[21]的方法并略有改动。称取 2 g 样品于 10 mL 离心管中, 分别加入 5 mL SA 溶液(0.05 mol/L NaCl)、SB 溶液(0.6 mol/L NaCl)、SC 溶液(0.6 mol/L NaCl+1.5 mol/L 尿素)、SD 溶液(0.6 mol/L NaCl+8 mol/L 尿素)和 SE 溶液(0.6 mol/L NaCl+8 mol/L 尿素+0.05 mol/L β-巯基乙醇), 涡旋混匀 4 min, 于 4 ℃ 冰柜中静置 1 h 后 5000 r/min 离心 10 min, 用双缩脲法测定上清液中蛋白质的含量。离子键的贡献: 以溶解于 SB 与 SA 中蛋白质含量之差表示; 氢键的贡献: 以溶解于 SC 与 SB 中蛋白质含量之差表示; 疏水作用力的贡献: 以溶解于 SD 与 SC 中蛋白质含量之差表示; 二硫键含量: 以溶解于 SE 与 SD 中蛋白质含量之差表示。

1.2.5.3 质构(TPA)测定 采用全质构模式测定鱼肉的硬度、弹性、咀嚼性和内聚性, 具体参数如下: TA11/1000 柱形探头、测试速度 1 mm/s、压缩距离 10 mm、触发值 5 g^[22]。

1.2.5.4 体外消化性 参考 Semedo 等^[23]的方法并稍作修改。取 1.0 g 样品(干基)加入 25 mL 去离子水, 10000 r/min 均质 1 min。用 1 mol/L HCl 将样品调至 pH2.0, 根据样品质量, 以 1:100 加入胃蛋白酶(>400 U/mg), 37 ℃ 振荡消化 2 h, 用 1 mol/L NaOH 调 pH 至 7.2, 以 1:50 添加胰蛋白酶(1.65 U/mg), 37 ℃ 下振荡消化 2 h, 调节 pH>9 灭酶, 离心收集沉淀(10000 r/min, 20 min)并在 105 ℃ 烘箱中烘至恒重。鱼肉类体外消化率采用式(4)计算:

$$\text{DT}(\%) = \left(1 - \frac{W_i}{W_t}\right) \times 100 \quad \text{式 (4)}$$

式中, DT: 样品的体外消化率(%), W_i: 消化后鱼肉干重(g), W_t: 消化前鱼肉干重(g)。

1.2.5.5 感官评定 参考 Qian 等^[24]和 Zhang 等^[25]的方法并稍作修改。具有食品感官评定经验的 10 名食品专业大三学生组成感官评定小组(5 男 5 女), 所有成员在感官评定前参加培训, 熟悉熟化鱼肉风味和质地描述词汇、定义及参照物(表 1)。鱼片(长

表 1 熟化鱼肉风味和质地描述词汇、定义及参照物
Table 1 Description, definitions and references for fish flavor and texture

感官属性	定义	参照物
咸度	盐味水平	NaCl 7.5 g/L(9分); 3.0 g/L(5分); 1.0 g/L(1分)
腥味	水产品的腥味	腥味弱(9分), 生鱼片(5分), 腥味强(1分)
鲜味	令人愉悦、开胃的鲜美滋味	谷氨酸钠10.0 g/L(9分); 2.5 g/L(5分); 0.6 g/L(1分)
硬度	咬合样品并将其转换为可吞咽状态所需的力	鱼豆腐(9分), 相较于鱼豆腐, 硬度减小, 分数降低。
嫩度	很容易切碎或嚼烂的食品, 咀嚼样品所需的最小力	新鲜鱼肉90 °C蒸煮8 min(9分), 嫩度减小, 分数降低
多汁性	牙齿咬合时汁水的释放量	新鲜虾仁(9分), 多汁性减少, 分数降低
纤维性	咀嚼过程感知到纤维的程度	新鲜鱼肉90 °C蒸煮20 min(9分), 纤维性增大, 分数降低

2 cm×宽 2 cm×高 2 cm) 单次呈现, 小组成员之间的样本顺序按照拉丁方设计, 两个产品之间间隔 1 min, 以确保没有残留效应。小组成员以“不是很强烈”和“非常强烈”为基础依次对鱼片质地和风味的各个属性分别进行评分(1~9 分), 以纯净水用作口腔清洁剂, 所有测试均在标准感官评价室(20±1 °C) 独立进行, 感官分析依据标准《感官分析 定量响应标度使用导则》(GB/T 39501-2020) 和《感觉分析-建立感觉轮廓的方法学指南》(GB/T 39625-2020) 进行, 结果以平均值±标准偏差的形式呈现。

1.3 数据处理

采用 IBM SPSS Statistics 19 软件进行数据处理, Duncan 多重比较检验进行显著性差异分析 (n=3), 差异显著水平为 0.05。采用 Origin 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同涂膜剂对冷藏鱼片肌原纤维蛋白理化性质的影响

2.1.1 溶解度和浊度的变化 不同涂膜剂对冷藏鱼片 MP 溶解度的影响如图 1 所示。随着冷藏时间的增加, 所有样品的 MP 溶解度均呈下降趋势, 这是由于冷藏过程中 MP 变性聚集, 溶解性下降^[10]。T-Ch 和 T-SA 组的 MP 溶解度降低程度显著小于 CK 组 (P<0.05); 冷藏第 8 d, T-Ch 组 MP 溶解度较 0 d 时降低 6.4%, T-SA 组降低 9.4%, 而 CK 组降低 50.5%; 冷藏 4~8 d, T-Ch 组 MP 溶解度均高于 T-SA 组, 说明 T-Ch 和 T-SA 均可延缓冷藏鱼肉 MP 溶解性的降低, 且 T-Ch 效果优于 T-SA。鱼肉储藏过程中易发生蛋白质氧化聚集, 持水力下降, 亲水性多糖(壳聚糖、海藻酸钠)联合茶多酚可减缓低温下蛋白质氧化和变性的程度, 同时, 壳聚糖可抑制腐败微生物繁殖, 保护蛋白质空间结构^[5]。

不同涂膜剂对冷藏鱼片 MP 浊度的影响见图 1。随着冷藏时间的增加, CK 组 MP 浊度呈增加趋势, 而 T-Ch 组和 T-SA 组 MP 浊度与 0 d 相比变化不显著 (P>0.05); 冷藏 8 d 时 CK 组 MP 浊度较 T-Ch 组和 T-SA 组分别增加 22.73% 和 44.64%, 说明复合涂膜剂可明显改善冷藏鱼肉 MP 变性聚集的程度, 维持 MP 浊度。冷藏 8 d, T-SA 组 MP 浊度较 T-Ch

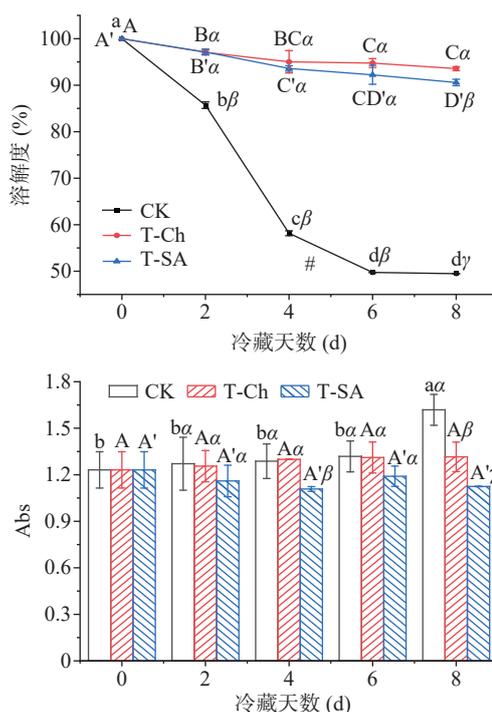


图 1 不同涂膜剂对冷藏鱼片 MP 溶解度和浊度的影响

Fig.1 Effects of different coatings on solubility and turbidity of MP extracted from fish fillets during refrigeration

注: 相同涂膜剂组不同冷藏天数标注不同字母表示差异显著 (P<0.05), 相同冷藏天数不同涂膜剂组标注不同符号 (α, β, γ) 表示差异显著 (P<0.05), 图 2~图 4、图 6~图 8 同。

组降低 14.5%, 可能与海藻酸钠抑制桥联絮凝作用, 提高 MP 分散性, 形成相对稳定的可溶性复合物有关, 进而降低 MP 浊度^[26]。此外, Zhang 等^[27] 发现添加适量多糖可降低蛋白质浊度, 支持本研究结果。

2.1.2 总巯基和活性巯基的变化 冷藏鱼片 MP 总巯基和活性巯基的变化如图 2 所示。随着冷藏时间的延长, MP 活性巯基和总巯基总体呈下降趋势, T-Ch 和 T-SA 组的总巯基和活性巯基降低程度明显小于 CK 组; 冷藏 8 d, T-Ch 组 MP 总巯基和活性巯基较 0 d 时分别降低了 50.6% 和 26.9%; T-SA 组降低了 50.6% 和 37.3%, 而 CK 组降低了 56.4% 和 49.0%。涂膜剂在鱼片的表面可形成致密的薄膜, 减少氧气与鱼片 MP 的接触和 MP 氧化作用的发生。Jia 等^[28] 的研究也表明, 壳聚糖可先与自由基反应, 从而对巯基基团起到保护作用; 另外, 茶多酚能够与巯基竞争,

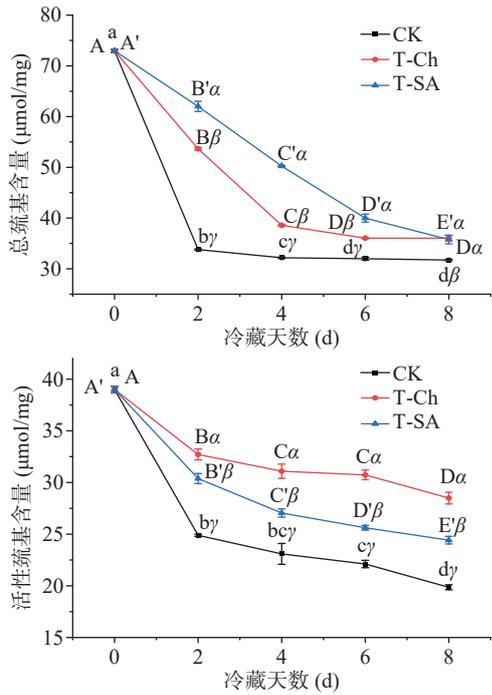


图 2 不同涂膜剂对冷藏鱼片 MP 总巯基和活性巯基的影响
Fig.2 Effects of different coatings on total sulfhydryl group and active sulfhydryl group of MP extracted from fish fillets during refrigeration

进而抑制巯基被氧化^[29]。冷藏 2~6 d, 涂膜组(T-Ch 和 T-SA)显著延缓 MP 总巯基下降($P<0.05$), 且 T-SA 组优于 T-Ch 组($P<0.05$); 但冷藏 8 d 时, T-Ch 组和 T-SA 组 MP 总巯基含量差异不显著($P>0.05$), 推测由于壳聚糖和海藻酸钠的凝胶作用、茶多酚的抗氧化作用, 阻碍部分巯基氧化, 维持 MP 空间结构^[30]。冷藏 2~8 d, 涂膜组的活性巯基均显著大于 CK 组, 且 T-Ch 组显著大于 T-SA 组($P<0.05$), 说明 T-Ch 处理对 MP 结构的保护作用优于 T-SA 处理。在贮藏期间, 巯基氧化生成二硫键, 导致 MP 的空间结构遭到破坏, 总巯基和活性巯基含量下降。

2.1.3 Ca^{2+} -ATPase 活性变化 不同涂膜剂对冷藏鱼片 MP 的 Ca^{2+} -ATPase 活性影响如图 3 所示。所有样品 MP 的 Ca^{2+} -ATPase 活性均随冷藏时间增加呈下降趋势, ATP 消耗增加, 造成 Ca^{2+} -ATPase 转移

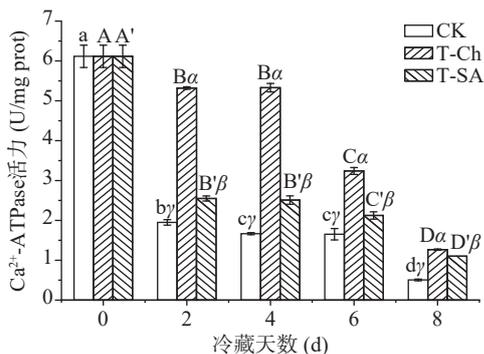


图 3 不同涂膜剂对冷藏鱼片 MP 的 Ca^{2+} -ATPase 活性影响
Fig.3 Effects of different coatings on Ca^{2+} -ATPase activity of MP extracted from fish fillets during refrigeration

Ca^{2+} 的能力下降, 从而使细胞内钙离子浓度升高, 最终激活钙蛋白酶并降解 MP, 增加 MP 碎片化的程度^[31]。冷藏期内 T-Ch 和 T-SA 组 MP 的 Ca^{2+} -ATPase 活性降低程度显著小于 CK 组($P<0.05$); 冷藏 2~4 d, T-Ch 和 T-SA 组 MP 的 Ca^{2+} -ATPase 活性均变化不显著($P>0.05$), 说明涂膜剂处理延缓了 Ca^{2+} -ATPase 活性的降低, 但 T-Ch 组显著高于 T-SA 组($P<0.05$), 说明 T-Ch 处理对 Ca^{2+} -ATPase 活性的保持效果优于 T-SA 组; 冷藏 6~8 d, 各组 MP 的 Ca^{2+} -ATPase 活性持续降低, 与巯基含量变化结果一致(图 2), 且 T-Ch 组>T-SA 组>CK 组; 冷藏 8 d, T-Ch 组 MP 的 Ca^{2+} -ATPase 活性较 0 d 时降低 79.3%, T-SA 组降低 82.0%, 而 CK 组降低 91.7%, 说明复合涂膜剂可显著降低 Ca^{2+} -ATPase 活性的下降程度, 且 T-Ch 处理效果更好。

2.1.4 表面疏水性变化 不同涂膜剂对冷藏鱼片 MP 的表面疏水性影响如图 4 所示。所有样品 MP 的表面疏水性均呈增加趋势, 这是由于在冷藏过程中, 蛋白质的三级或四级结构可能发生重排或解折叠, 导致埋藏在分子内部的疏水性氨基酸侧链(如芳香族氨基酸)暴露, 使 MP 表面疏水性增加。冷藏 0~6 d, 与 CK 组相比, T-Ch 或 T-SA 涂膜处理均可有效延缓 MP 表面疏水性增加, 且 T-Ch 处理效果显著优于 T-SA($P<0.05$)。多糖分子中的羟基等基团可以取代水分子与蛋白质极性残基结合, 形成强氢键, 从而稳定冷藏期间蛋白质的结构^[32]; 另外茶多酚可有效抑制蛋白质巯基氧化, 进而延缓或阻止蛋白质变性, 保持其结构和功能的稳定性^[33]。Hill 等^[34]认为巯基(-SH)作为蛋白质中重要的功能基团, 巯基氧化会导致蛋白质交联或构象改变, 进而增加其疏水性, 这与本实验的 MP 氧化导致总巯基含量下降, 疏水性增加的结果相互印证。冷藏第 8 d 时, 三组鱼片 MP 表面疏水性差异不显著($P>0.05$), 这可能是由于贮藏后期复合涂膜处理对鱼肉蛋白质变性、降解的保护作用小于鱼片腐败变质导致的蛋白质结构变化(表面疏水性增加)。

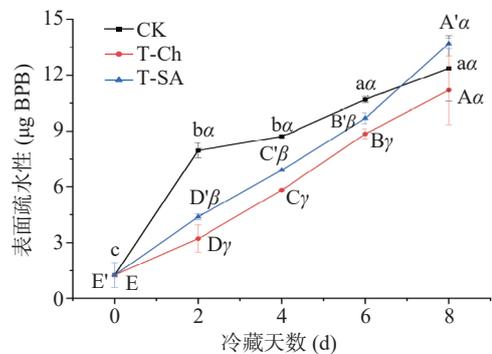


图 4 不同涂膜剂对冷藏鱼片 MP 表面疏水性的影响
Fig.4 Effect of different coatings on surface hydrophobicity of MP extracted from fish fillets during refrigeration

2.2 不同涂膜剂对冷藏鱼片熟化品质的影响

2.2.1 红外光谱分析 蛋白质在红外区有多个吸收

带,酰胺 I、II 和 III 带是反映蛋白质肽链骨架结构的最重要吸收峰,酰胺 I 带的吸收峰(1700~1600 cm⁻¹) 归属于 C=O 的振动伸缩,与肽链骨架的有序程度紧密相关,吸收峰波数与蛋白质结构有序度正相关;酰胺 II 吸收峰(1600~1500 cm⁻¹) 归属于 C-N 和 N-H 变形振动;酰胺 III 吸收峰(1300~1200 cm⁻¹) 是甘氨酸和脯氨酸残基的-CH₂ 特征振动峰^[35]。由图 5 可知,随着冷藏时间的增加,CK 组酰胺 I 带发生轻微蓝移(1627 cm⁻¹→1625 cm⁻¹),说明冷藏期间鱼片蛋白结构有序度降低;T-Ch 组和 T-SA 组酰胺 I 带波数无明显变化,这意味着复合涂膜剂处理对冷藏鱼片蛋白质结构具有保护作用。在贮藏期内,所有处理组鱼片酰胺 II 和 III 带均发生蓝移,说明蛋白二级结构发生了变化。

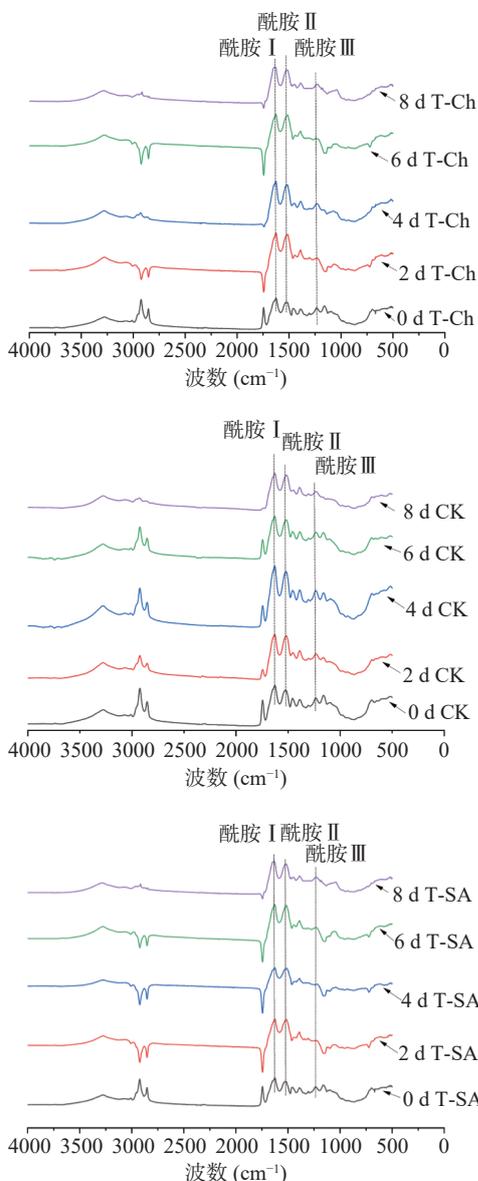


图 5 不同涂膜剂处理对冷藏鱼肉熟化后红外光谱的影响
Fig.5 FTIR spectrum of cooked fish meat with different coatings during refrigeration

为明晰涂膜剂处理对冷藏鱼肉熟化后蛋白质结构的影响,对酰胺 I 带进行去卷积、拟合计算蛋白质

二级结构相对含量,结果如表 2 所示。罗非鱼肉经熟化处理,蛋白质二级结构主要是 β -折叠,其次是 α -螺旋。随着冷藏时间的增加,CK 组熟化鱼肉蛋白质的 α -螺旋和 β -转角比例降低, β -折叠和无规则卷曲比例增加;说明冷藏过程鱼肉蛋白质发生变性或降解,导致熟化鱼肉蛋白质 α -螺旋结构减少^[36]。与 CK 组相比,在相同冷藏时间下,涂膜组鱼肉蛋白质的 α -螺旋和 β -折叠相对含量变化相对较慢,且涂膜组 α -螺旋比例更高,证实涂膜剂可以延缓蛋白质变性,维持蛋白质的网络结构稳定。

表 2 不同涂膜剂处理对冷藏鱼肉熟化后蛋白质二级结构相对含量变化

Table 2 Changes in relative contents of secondary structure of cooked fish meat with different coatings during refrigeration

冷藏天数(d)	处理方法	β -折叠 (%)	无规则卷曲 (%)	α -螺旋 (%)	β -转角 (%)
0	CK	36.4±1.1	20.3±1.2	22.3±0.9	21.0±1.3
	CK	36.5±1.5	22.2±0.9	20.5±1.1	20.8±1.0
2	T-Ch	36.4±1.7	21.2±0.8	21.5±1.0	20.9±1.4
	T-SA	36.4±1.8	21.4±1.1	21.3±1.2	20.9±1.3
4	CK	36.7±0.8	22.7±0.9	20.1±1.0	20.5±0.8
	T-Ch	36.4±1.3	21.6±1.1	21.1±1.2	20.9±1.4
	T-SA	36.5±1.9	21.9±0.9	20.8±0.8	20.8±0.5
	CK	37.1±1.4	23.3±1.3	19.4±0.7	20.2±0.6
6	T-Ch	36.7±1.9	21.8±1.5	20.7±1.1	20.8±1.2
	T-SA	36.9±1.8	22.4±0.7	20.1±0.6	20.6±0.9
	CK	37.9±1.9	23.6±1.3	18.7±0.8	19.8±0.7
8	T-Ch	37.5±1.2	22.1±1.1	19.9±0.4	20.5±0.5
	T-SA	37.7±2.0	22.7±0.9	19.3±0.7	20.3±0.6

2.2.2 凝胶形成作用力的变化 涂膜处理对冷藏鱼肉熟化后凝胶形成作用力的影响如图 6 所示。经 90 °C 加热 5 min, 鱼肉凝胶形成作用力中氢键含量整体较低,说明加热后的蛋白质二级结构被破坏,而疏水作用力和二硫键的含量明显高于离子键和氢键,这两种力是维持凝胶结构的关键力。三个实验组鱼肉蛋白质的离子键和氢键均随冷藏时间增加显著减小($P<0.05$),这是因为冷藏时间的增加会使溶解度不断降低(图 1),维持蛋白天然结构的离子键和分子间氢键不断被破坏,导致蛋白分子结构发生变化。所有样品的疏水作用力和二硫键含量均随冷藏时间的增加显著增加($P<0.05$),较高含量的疏水作用力和二硫键与凝胶网络结构的牢固程度和有序度呈正相关^[37]。冷藏 8 d 时,与 CK 组相比,T-Ch 组疏水作用力和二硫键分别增加了 36.48% 和 36.19%,T-SA 组分别增加了 28.22% 和 29.84%。涂膜处理鱼片熟化后疏水作用力和二硫键增强是因为涂膜处理对鱼肉蛋白质结构变化具有低温保护作用,减弱冷藏过程蛋白质发生变性或降解的程度,有利于加热条件下蛋白质分子间相互作用,蛋白质分子结构伸展、暴露疏水性基团而聚集^[38],两种主要作用力共同促使蛋白质分子间交联^[39],改善鱼肉凝胶特性^[40]。

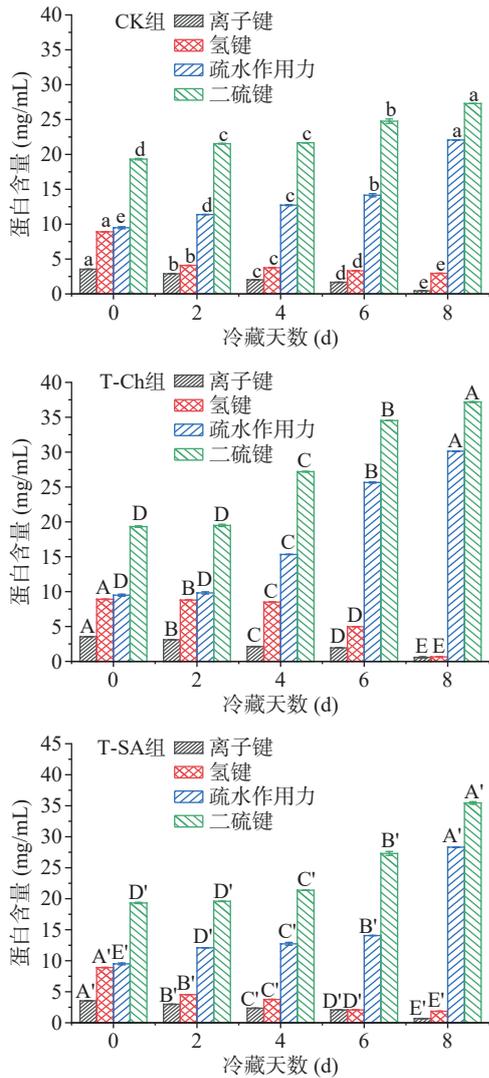


图 6 不同涂膜剂对冷藏鱼肉熟化后凝胶形成作用力的影响

Fig.6 Effects of different coatings on gel formation force of cooked fish meat during refrigeration

2.2.3 质构特性的变化 冷藏鱼肉熟化后质构特性变化如表 3 所示。随着冷藏时间的增加, CK 组鱼片

表 3 不同涂膜剂对冷藏鱼肉熟化后质构特性的影响

Table 3 Effects of different coatings on texture characteristics of cooked fish meat during refrigeration

质构特性	处理	冷藏时间(d)				
		0	2	4	6	8
硬度(g)	CK	769.00±57.99 ^{aA}	627.50±20.94 ^{bA}	541.00±26.87 ^{bA}	383.50±26.87 ^{cB}	400.50±20.20 ^{cB}
	T-Ch	769.00±57.99 ^{aA}	688.50±46.37 ^{abA}	610.50±34.05 ^{abA}	623.50±31.82 ^{abA}	633.00±19.57 ^{ba}
	T-SA	769.00±57.99 ^{aA}	565.50±31.82 ^{bA}	507.50±28.29 ^{bcA}	430.00±13.6 ^{bcB}	446.00±9.90 ^{cB}
弹性(mm)	CK	6.04±0.15 ^{aA}	5.30±0.11 ^{bB}	5.10±0.01 ^{bcB}	5.11±0.08 ^{bcB}	4.92±0.09 ^{cB}
	T-Ch	6.04±0.15 ^{aA}	5.86±0.17 ^{aA}	5.60±0.18 ^{aA}	5.60±0.04 ^{aA}	5.55±0.02 ^{aA}
	T-SA	6.04±0.15 ^{aA}	5.69±0.14 ^{baB}	5.32±0.04 ^{cAB}	5.35±0.07 ^{cAB}	5.25±0.07 ^{cA}
咀嚼性(mJ)	CK	13.80±1.76 ^{aA}	9.90±0.07 ^{ba}	9.65±0.50 ^{ba}	7.6±0.67 ^{bcA}	6.30±0.41 ^{cB}
	T-Ch	13.80±1.76 ^{aA}	12.45±1.48 ^{aA}	10.4±1.26 ^{aA}	10.6±1.40 ^{aA}	10.70±0.67 ^{aA}
	T-SA	13.80±1.76 ^{aA}	10.45±0.77 ^{abA}	9.98±0.38 ^{abA}	8.60±0.56 ^{ba}	8.90±1.26 ^{baB}
内聚性(mJ)	CK	0.32±0.56 ^{aA}	0.32±0.01 ^{aA}	0.36±0.00 ^{aA}	0.40±0.02 ^{aA}	0.32±0.07 ^{aA}
	T-Ch	0.32±0.56 ^{aA}	0.34±0.07 ^{aA}	0.35±0.01 ^{aA}	0.37±0.03 ^{aA}	0.33±0.09 ^{aA}
	T-SA	0.32±0.56 ^{aA}	0.31±0.00 ^{aA}	0.40±0.04 ^{aA}	0.39±0.05 ^{aA}	0.34±0.02 ^{aA}

注: 同行标注不同小写字母表示同一涂膜剂组不同冷藏时间之间具有显著差异 ($P < 0.05$); 不同大写字母表示同一冷藏时间不同组别之间具有显著差异 ($P < 0.05$)。

内聚性变化不显著 ($P > 0.05$), 而硬度、弹性和咀嚼性显著降低 ($P < 0.05$), 说明冷藏期内鱼片质构品质下降。在冷藏期内, T-SA 组鱼片质构的变化趋势与 CK 组一致, 且同一时间点硬度、咀嚼性和内聚性与 CK 组无显著性差异 ($P > 0.05$), 但冷藏第 8 d 时, 弹性显著大于 CK 组 ($P < 0.05$), 说明 T-SA 处理可以改善鱼片的质地劣化。郝子娜等^[9] 研究发现涂膜处理可以保持草鱼的质构特性, 支持本研究结果。T-Ch 组鱼片硬度在冷藏期内亦出现下降趋势, 但弹性、咀嚼性和内聚性与 0 d 时差异不显著 ($P > 0.05$); 另外, 冷藏 8 d 时, T-Ch 组鱼片硬度和咀嚼性显著大于 CK 组和 T-SA 组 ($P < 0.05$), 弹性与 T-SA 组差异不显著 ($P > 0.05$), 但显著大于 CK 组 ($P < 0.05$), 因此, T-Ch 处理对鱼片质构特征的改善程度大于 T-SA 处理。质构特征中的硬度、弹性和咀嚼性分别对应感官评价中的硬度、嫩度、多汁性和纤维性, 感官评价结果 (图 8) 显示冷藏 8 d 时, T-Ch 处理鱼片的感官评分 (硬度、嫩度、多汁性和纤维性) 显著大于 T-SA 处理 ($P < 0.05$), 与质构结果一致。

2.2.4 体外消化性的变化 冷藏后熟化鱼肉体外消化率的变化如图 7 所示。鱼肉体外消化率随冷藏时

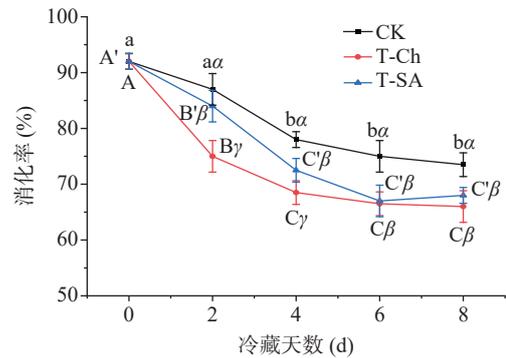


图 7 不同涂膜剂对冷藏鱼肉熟化后体外消化的影响

Fig.7 Effects of different coatings on *in vitro* digestion of cooked fish meat during refrigeration

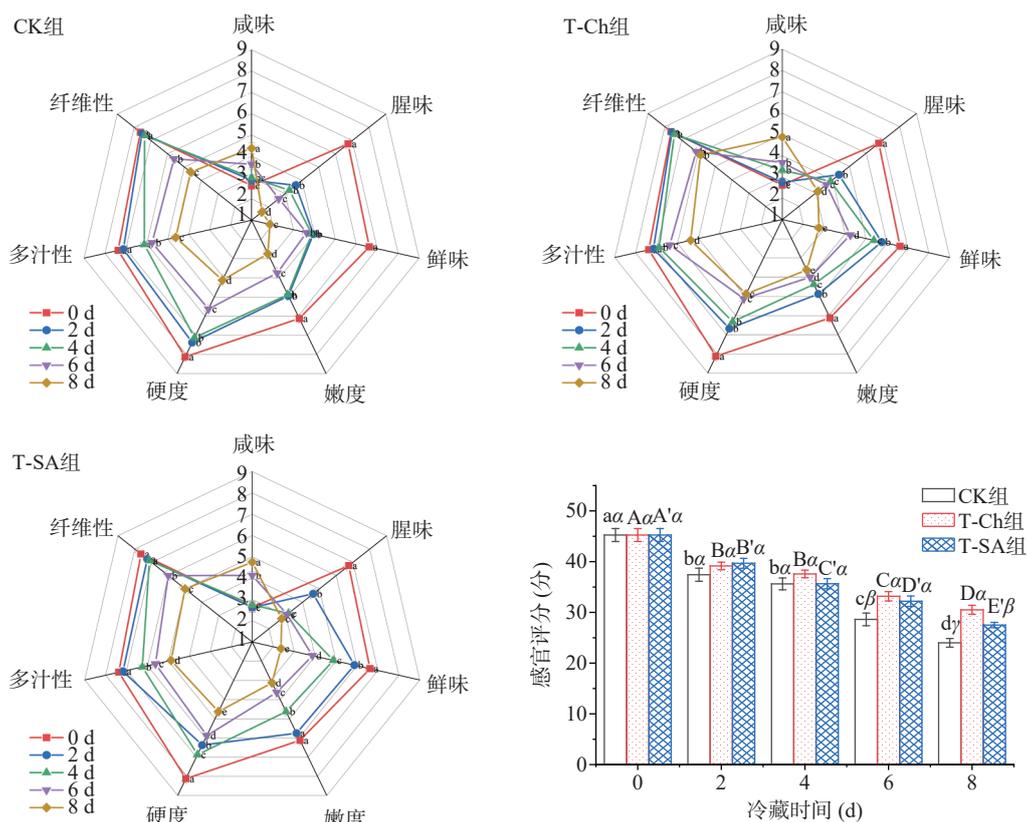


图8 不同涂膜剂对冷藏鱼肉熟化后感官特征的影响

Fig.8 Effects of different coatings on the sensory characteristics of cooked fish meat during refrigeration

间增加呈下降趋势,CK组冷藏4 d后消化率显著降低($P<0.05$),在8 d时达最低值73.5%,较0 d时降低20.1%,表明冷藏后鱼肉蛋白质变性导致消化率降低。冷藏2 d后,涂膜组鱼肉消化率均显著低于CK组($P<0.05$),这是由于涂膜剂中的多糖和茶多酚使鱼肉蛋白有较高的溶解度(图1),易与多糖结合产生羧甲基物质,对消化具有抗崩解作用^[5]。冷藏2 d时,T-SA组鱼肉消化率显著大于T-Ch组($P<0.05$),冷藏4~8 d,T-SA组与T-Ch组鱼肉消化率差异不显著($P>0.05$),冷藏8 d时T-Ch和T-SA组鱼肉消化率较0 d分别降低28.3%和26.2%,较CK组分别降低8.2%和6.1%,这是因为壳聚糖-茶多酚复合膜具有稳定鱼肉蛋白质组分的作用,影响了消化率^[38],海藻酸钠与蛋白质的氨基酸残基结合,形成空间位阻较大的网状结构^[40],阻碍了鱼肉蛋白与消化酶的接触,影响鱼肉体外消化。此外,涂膜处理改变鱼肉蛋白质结构(图2和图4),阻碍蛋白质与消化酶接触,进而影响鱼肉体外消化率。

2.2.5 感官评价 CK组、T-Ch组和T-SA组鱼肉熟化后的感官评分见图8,其中咸味、腥味和鲜味表征鱼肉的风味,嫩度、硬度、多汁性和纤维性表征鱼肉的质地。三个组鱼肉的咸味均随冷藏时间的增加而增加,腥味、鲜味、嫩度、硬度、多汁性和纤维性均随冷藏时间的增加而减小,说明冷藏期内熟化鱼片的质地和风味均呈下降趋势。冷藏2 d时,三个组鱼肉的咸味、纤维性和多汁性均与0 d时差异不显著,而

腥味、鲜味、嫩度和硬度均显著低于0 d($P<0.05$),涂膜组降低的幅度明显小于CK组,说明冷藏第2 d时,鱼肉的感官品质已开始降低,涂膜剂处理组降低幅度较小。冷藏4~6 d,各组鱼肉的感官品质逐步下降,6 d时,CK组鱼肉出现轻微腥臭味,质地弹性不足,而涂膜组未出现腥臭味。冷藏8 d时,CK组鱼肉恶臭味明显,腐败现象严重,涂膜剂处理组出现轻微腥臭味,说明涂膜剂处理可有效延缓鱼片感官品质的劣变。图8中柱状图为冷藏期内各组鱼肉感官评价的总分,随着冷藏时间的增加三个组鱼肉的感官评分均随冷藏时间的增加而显著降低($P<0.05$),冷藏第8 d时,CK组、T-Ch组和T-SA组鱼片感官评分较0 d时(45.25 ± 1.27)分别降低了46.96%、32.60%和39.23%,表明复合涂膜剂处理可延缓鱼肉感官品质的下降。冷藏0~4 d,三个实验组鱼肉感官评分间差异不显著($P>0.05$);冷藏第6 d时,T-Ch组和T-SA组鱼片感官评分显著大于CK组($P<0.05$),但二者间无显著性差异($P>0.05$);冷藏第8 d时,三组感官评分如下:T-Ch组(30.50 ± 0.88)>T-SA组(27.50 ± 0.53)>CK组(24.00 ± 0.85),说明在冷藏后期,复合涂膜剂处理鱼肉感官品质保持得较好,且T-Ch效果优于T-SA。

3 结论

随着冷藏时间的增加,罗非鱼片MP的溶解度、总巯基/活性巯基含量、 Ca^{2+} -ATP酶活性显著降低($P<0.05$),浊度和表面疏水性显著增加($P<0.05$),T-Ch和T-SA处理均能减缓罗非鱼片MP理化特性的

变化程度, 延缓 MP 变性聚集, 改善冷藏鱼片品质。尽管涂膜剂处理降低了冷藏鱼肉熟化后的体外消化率, 但涂膜剂可延缓鱼肉感官和质构品质的劣变, 增强鱼肉凝胶强度, 进而改善冷藏鱼肉的熟化品质。另外, T-Ch 处理对鱼片品质的改善效果优于 T-SA 处理。综上所述, T-Ch 和 T-SA 涂膜剂可通过减缓冷藏鱼肉 MP 理化性质变化和维持 MP 结构稳定, 增强鱼肉凝胶特性, 改善熟化鱼肉感官和质构特性, 具有延缓冷藏鱼肉品质劣变效果, 下一步在分子水平上探讨涂膜剂处理改善冷藏鱼肉品质的作用机理。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] LI R, SUN Z, ZHAO Y, et al. Effect of different thermal processing methods on water-soluble taste substances of tilapia fillets[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2022, 106: 104298.
- [2] YU Y, WEI Y, CHEN S, et al. Correlation analysis of phosphorylation of myofibrillar protein and muscle quality of tilapia during storage in ice[J]. *Food Chemistry*, 2024, 451: 139502.
- [3] CHAKRABORTY P, NATH D, HOQUE M, et al. Biopolymer - based antimicrobial coatings for aquatic food products: A review[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 46(4): e16465.
- [4] BHAGATH Y B, MANJULA K. Influence of composite edible coating systems on preservation of fresh meat cuts and products: A brief review on their trends and applications[J]. *International Food Research Journal*, 2019, 26(2): 377-392.
- [5] RATHOD N B, BANGAR S P, ŠIMAT V, et al. Chitosan and gelatine biopolymer-based active/biodegradable packaging for the preservation of fish and fishery products[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2023, 58(2): 854-861.
- [6] SOW L C, TOH N Z Y, WONG C W, et al. Combination of sodium alginate with tilapia fish gelatin for improved texture properties and nanostructure modification[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 94: 459-467.
- [7] ZHAO W, YU D, XIA W. Vacuum impregnation of chitosan coating combined with water-soluble polyphenol extracts on sensory, physical state, microbiota composition and quality of refrigerated grass carp slices[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 193: 847-855.
- [8] JALALI N, ARIHAI P, FATTAHI E. Effect of alginate/carboxyl methyl cellulose composite coating incorporated with clove essential oil on the quality of silver carp fillet and *Escherichia coli* O157:H7 inhibition during refrigerated storage[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2016, 53(1): 757-765.
- [9] 郝子娜, 冯硕, 赵凯, 等. 茶多酚-海藻酸钠涂膜处理对草鱼储藏品质的影响[J]. *保鲜与加工*, 2022, 22(7): 31-36. [HAO Zina, FENG Shuo, ZHAO Kai, et al. Effects of tea polyphenol-sodium alginate coating on grass carp quality during storage[J]. *Storage and Process*, 2022, 22(7): 31-36.]
- [10] HUANG J, QUE F, XIONG G, et al. Physicochemical and functional properties changes in myofibrillar protein extracted from channel catfish by a high-voltage electrostatic field[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2023, 16(2): 395-403.
- [11] 高可安, 钟湘, 蓝曼宁, 等. 冻藏对鱼糜熟化过程中品质变化的影响[J]. *食品科技*, 2023, 48(12): 104-112. [GAO Kean, ZHONG Xiang, LAN Manning, et al. Effects of frozen storage on the quality changes of surimi during the ripening process[J]. *Food Science and Technology*, 2023, 48(12): 104-112.]
- [12] ZARANDONA I, LÓPEZ-CABALLERO M E, MONTERO M P, et al. Horse mackerel (*Trachurus trachurus*) fillets biopreservation by using gallic acid and chitosan coatings[J]. *Food Control*, 2021, 120: 107511.
- [13] SÁEZ M I, SUÁREZ M D, MARTÍNEZ T F. Effects of alginate coating enriched with tannins on shelf life of cultured rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillets[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 118: 108767.
- [14] CHEN J, DENG T, WANG C, et al. Effect of hydrocolloids on gel properties and protein secondary structure of silver carp surimi[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100(5): 2252-2260.
- [15] 陈旭, 余璐涵, 蔡茜茜, 等. 低温冷链贮藏对鱼糜凝胶化学作用力和肌原纤维蛋白结构及功能特性的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(23): 194-201. [CHEN Xu, YU Luhan, CAI Qianqian, et al. Effect of cold chain storage on chemical interactions of surimi gel and structural and functional properties of myofibrillar protein[J]. *Food Science*, 2022, 43(23): 194-201.]
- [16] WEINBRECK F, de VRIES R, SCHROOYEN P, et al. Complex coacervation of whey proteins and gum arabic[J]. *Biomacromolecules*, 2003, 4: 293-303.
- [17] 周昕仪, 游刚, 高可安, 等. 凉粉草多糖对鱼肌球蛋白理化性质和结构特征的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(4): 48-56. [ZHOU Xinyi, YOU Gang, GAO Kean, et al. Effects of *Mesona chinensis* Benth polysaccharide on the physicochemical properties and structural characteristics of myosin[J]. *Food Science*, 2023, 44(4): 48-56.]
- [18] GAO W, HOU R, ZENG X A. Synergistic effects of ultrasound and soluble soybean polysaccharide on frozen surimi from grass carp[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 240: 1-8.
- [19] WEI L, CAO L, XIONG S, et al. Effects of pH on self-assembly of silver carp myosin at low temperature[J]. *Food Bioscience*, 2019, 30(4): 100420.
- [20] 林婉玲, 杨贤庆, 李来好, 等. 浸渍冻结对调理草鱼冻藏过程中肌原纤维蛋白特性的影响[J]. *南方水产科学*, 2016, 12(3): 67-73. [LIN Wanling, YANG Xianqing, LI Laihao, et al. Immersion freezing effect on myofibrillar protein characteristics of prepared grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) fillets during frozen storage[J]. *South China Fisheries Science*, 2016, 12(3): 67-73.]
- [21] GÓMEZ-GUILLÉN M C, BORDERÍAS A J, MONTERO P. Chemical interactions of *Nonmuscle* proteins in the network of sardine (*Sardina pilchardus*) muscle gels[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 1997, 30(6): 602-608.
- [22] 米红波, 王聪, 赵博, 等. 大豆油、亚麻籽油和紫苏籽油对草鱼鱼糜品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(18): 60-73. [MI Hongbo, WANG Cong, ZHAO Bo, et al. Effects of soybean, flaxseed and perilla seed oils on the quality of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) surimi gels[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(18): 60-73.]
- [23] SEMEDO TAVARES W P, DONG S, YANG Y, et al. Influence of cooking methods on protein modification and *in vitro* digestibility of hairtail (*Thichiurus lepturus*) fillets[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 96: 476-481.

- [24] QIAN S, LIU K, WANG J, et al. Capturing the impact of oral processing behavior and bolus formation on the dynamic sensory perception and composition of steamed sturgeon meat[J]. *Food Chemistry*; X, 2023, 17: 100553.
- [25] ZHANG D, YANG N, FISK I D, et al. Impact of cooking on the sensory perception and volatile compounds of *Takifugu rubripes*[J]. *Food Chemistry*, 2022, 371: 131165.
- [26] 祝瑞博, 马丽莉, 姚开, 等. 木薯淀粉与海藻酸钠对速冻鲢鱼肉面条品质的影响[J]. *食品与发酵科技*, 2009, 45(6): 66-68,71. [ZHU Ruibo, MA Lili, YAO Kai, et al. Effects of tapioca starch and sodium alginate on the quality of quickly-frozen silver carp noodles[J]. *Sichuan Food and Fermentation*, 2009, 45(6): 66-68,71.]
- [27] ZHANG Z, ZHANG R, DECKER E A, et al. Development of food-grade filled hydrogels for oral delivery of lipophilic active ingredients: pH-triggered release[J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 44: 345-352.
- [28] JIA N, KONG B, LIU Q, et al. Antioxidant activity of black currant (*Ribes nigrum* L.) extract and its inhibitory effect on lipid and protein oxidation of pork patties during chilled storage[J]. *Meat Science*, 2012, 91(4): 533-539.
- [29] 程懂坤. 可食性涂膜液的制备及其在冷藏卤蛋中的保鲜研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2023. [CHENG Dongkun. Preparation of edible coating solution and its preservation effects on refrigerated marinated eggs [D]. Jilin: Jilin University, 2023.]
- [30] ZHANG H, LI X, SUN S, et al. Effects of carboxymethyl chitosan on the oxidation stability and gel properties of myofibrillar protein from frozen pork patties[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023(234): 123720.
- [31] 徐德峰, 廖威龙, 李彩虹, 等. 冷藏凡纳滨对虾肌肉软化的生化特性及生物标记物[J]. *广东海洋大学学报*, 2024, 44(1): 125-132. [XU D F, LIAO W L, LI C H, et al. Biochemical properties and biomarker of muscle softening of shrimp *Litopenaeus vannamei* during cold storage[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2024, 44(1): 125-132.]
- [32] TAN M, DING Z, XIE J. Freezing-induced myofibrillar protein denaturation: Contributions of freeze-concentration and role of cellobiose[J]. *Journal of Food Engineering*, 2022, 329: 111076.
- [33] 鞠健, 乔宇, 李冬生, 等. 茶多酚对冷藏鲈鱼鲜度变化及肌原纤维蛋白氧化的影响[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(2): 290-294. [JU Jian, QIAO Yu, LI Dongsheng, et al. Effect of tea polyphenols on the freshness and the oxidation of myofibrillar protein of weever during cold storage[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(2): 290-294.]
- [34] HILL A R, IRVINE D M, BULLOCK D H. Precipitation and recovery of whey proteins: A review[J]. *Canadian Institute of Food Science & Technology Journal*, 1982, 15(3): 155-160.
- [35] 刘芳芳, 林婉玲, 李来好, 等. 金鲳肌球蛋白在不同处理条件下的理化性质变化[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(12): 37-43. [LIU Fangfang, LIN Wanling, LI Laihao, et al. Physicochemical properties of *Trachinotus ovatus* myosin under different treatment conditions[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(12): 37-43.]
- [36] LI Z, WANG J, ZHENG B, et al. Effects of high pressure processing on gelation properties and molecular forces of myosin containing deacetylated konjac glucomannan[J]. *Food Chemistry*, 2019, 291: 117-125.
- [37] LIU H, XU Y, ZU S, et al. Effects of high hydrostatic pressure on the conformational structure and gel properties of myofibrillar protein and meat quality: A review[J]. *Foods*, 2021, 10(8): 1872.
- [38] RONGRONG M H L Y L. Effects of high hydrostatic pressure treatment: characterization of eel (*Anguilla japonica*) surimi, structure, and angiotensin-converting enzyme inhibitory activity of myofibrillar protein[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2021: 1-9.
- [39] CHEN B, LIU X, ZHOU K, et al. Differentiating the effects of hydrophobic interaction and disulfide bond on the myofibrillar protein emulsion gels at the high temperature and the protein interfacial properties[J]. *Food Chemistry*, 2023, 412: 135472.
- [40] WANG H, ZHANG W, LIU X, et al. Effects of chickpea and peanut protein isolates on the gelling properties of hairtail (*Trichiurus haumela*) myosin[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 163: 113562.