

透明质酸-大豆 β -伴球蛋白涂膜对 微冻鲤鱼的保鲜效果

王 鹏, 郭 丽*, 王红新, 孙梦阳, 马 雪, 柴云雷

(绥化学院食品与制药工程学院, 绥化 152061)

摘 要: **目的** 研究不同比例透明质酸和大豆 β -伴球蛋白复合膜处理对鲤鱼肉微冻贮藏品质的影响。**方法** 用浓度为 0.9% 的透明质酸(hyaluronic acid, HA)分别和 1%、2%、3%大豆 β -伴球蛋白配制 3 种涂膜剂, 涂膜分割鲤鱼肉后进行 -3°C 微冻贮藏, 测定鲤鱼肉持水力、电导率、pH、色度、挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)、硫代巴比妥酸(thiobarbituric reactive substances, TBARS)值、三氯乙酸(trichloroacetic acid, TCA)可溶性肽以及肌原纤维蛋白、表面疏水性、羰基、巯基和钙离子 ATP 酶(calcium-ATPase, Ca^{2+} -ATPase)活性的变化。**结果** 未涂膜鲤鱼肉在微冻贮藏 14 d 后品质显著下降, HA-大豆 β -伴球蛋白复合膜可有效抑制微冻鲤鱼肉持水力、肌原纤维蛋白、巯基和 Ca^{2+} -ATPase 活性的下降($P<0.05$), 延缓 TVB-N、TBARS、TCA 可溶性肽、电导率和羰基的增长速率($P<0.05$)。0.9% HA-2%大豆 β -伴球蛋白复合膜保鲜 28 d 时, 较未涂膜鲤鱼肉电导率、TVB-N、TBARS 和 TCA 可溶性肽分别降低 20.2%、48.9%、62.6%和 20.7%; 肌原纤维蛋白含量和持水力分别高 40.6%、27.9%。**结论** 0.9% HA-2%大豆 β -伴球蛋白复合膜保鲜效果最好, 该复合涂膜剂可有效延缓微冻鲤鱼肉的品质劣变, 延长货架期。

关键词: 鲤鱼; 大豆 β -伴球蛋白; 透明质酸; 微冻

Preservation effects of hyaluronic acid-soybean β -conglobulin coating film on superchilling of *Cyprinus carpio* meat

WANG Peng, GUO Li*, WANG Hong-Xin, SUN Meng-Yang, MA Xue, CHAI Yun-Lei

(College of Food and Pharmaceutical Engineering, Suihua University, Suihua 152061, China)

ABSTRACT: Objective To study the effects of different proportion of hyaluronic acid and soybean β -conglobulin composite film on the quality of *Cyprinus carpio* meat in superchilling storage. **Methods** Three kinds of coating agents were prepared with 0.9% hyaluronic acid (HA) and 1%, 2% and 3% soybean β -conglobulin, respectively. After the *Cyprinus carpio* meat was segmented by the coating agents, the fish meat was stored in micro-freezer at -3°C . The water holding capacity, conductivity, pH, chroma, total volatile basic nitrogen and total volatile basic nitrogen (TVB-N) content of the *Cyprinus carpio* meat were measured, and the change of thiobarbituric reactive substances (TBARS), trichloroacetic acid (TCA) soluble peptides, and myofibrillar protein, surface hydrophobicity, carbonyl, mercapto, and calcium-ATPase (Ca^{2+} -ATPase) activity were determined. **Results** The quality of uncoated *Cyprinus*

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(LH2020C074)

Fund: Supported by the Heilongjiang Provincial Natural Science Foundation of China (LH2020C074)

*通信作者: 郭丽, 博士, 教授, 主要研究方向为农产品加工及贮藏。E-mail: guoli2138@163.com

*Corresponding author: GUO Li, Ph.D, Professor, Suihua University, College of Food and Pharmaceutical Engineering, No.18, Huanghe South Road, Suihua 152061, China. E-mail: guoli2138@163.com

carpio meat was significantly decreased after 14 d superchilling storage. The HA-soybean β -conglycinin composite membrane could effectively inhibit the decline of water holding capacity, myofibrillar protein, thiols and Ca^{2+} -ATPase activities of superchilled fishmeat ($P < 0.05$), and delay the growth rate of TVB-N, TBARS, TCA soluble peptide, conductivity and carbonyl group ($P < 0.05$). When the 0.9% HA-2% soybean β -conglycinin composite membrane was used for 28 d, compared with the uncoated *Cyprinus carpio* meat, the conductivity, TVB-N, TBARS and TCA soluble peptides were decreased by 20.2%, 48.9%, 62.6% and 20.7%, respectively. The myofibrillar protein content and the water holding capacity were 40.6% and 27.9% higher, respectively. **Conclusion** 0.9% HA-2% soybean β -conglycinin composite film has the best fresh-keeping effect. The composite film can effectively delay the quality deterioration superchilled *Cyprinus carpio* meat and prolong the shelf life.

KEY WORDS: *Cyprinus carpio*; soybean β -conglobulin; hyaluronic acid; superchilling

0 引言

鲤鱼(*Cyprinus carpio*)作为传统淡水鱼,因适口性好、营养丰富、价格低等优势,深受广大消费者青睐。2021年,鲤鱼养殖产量为283.17万t,位居全国淡水鱼养殖前列,占全年养殖淡水鱼总量的10.7%^[1]。分割鲤鱼肉方便后续烹饪,可减少生鲜垃圾,符合现代消费者的消费方式和需求。采用低温、真空充氮包装保鲜可延缓鲤鱼肉品质的劣变,但延长货架期较短;低温结合壳聚糖、壳聚糖精油复合物、壳聚糖甘草复合物以及壳聚糖/纳米 TiO_2 涂膜保鲜,可减缓鲤鱼肉水分蒸发与汁液流失,具有较好的隔氧和抑菌作用;但壳聚糖存在溶解性差、对 pH 的依赖性强和机械性能不佳等缺点^[2-4]。如何采用更好的方法和技术来保持鲤鱼肉的高质量,确保产品安全,成为研究人员关注的焦点。

多糖-蛋白质共混膜在气体阻隔性、阻油性以及机械性能方面具有显著的优势,常被用于食品表面的保护^[5-8]。大豆分离蛋白具有良好的成膜性,且来源充足、可再生降解,被广泛应用于牛肉、金枪鱼、草鱼的保鲜^[9-12]。大豆 β -伴球蛋白(soybean β -conglobulin),又称 7S 球蛋白,是大豆分离蛋白的主要组成成分之一。郭宽等^[13]发现,7S 和 11S 大豆蛋白配比不同,其成膜特性有所不同,当 7S 球蛋白比例高时形成的薄膜透明度更好,断裂延伸率更优异。杨晓晴等^[14]发现,大豆分离蛋白的成膜能力受大豆 β -伴球蛋白 α 亚基影响很大,缺失 α 亚基的大豆分离蛋白成膜性被抑制,薄膜的机械强度降低。可见以大豆 β -伴球蛋白作为单一或复合膜材料具有明显的成膜优势,在保鲜领域极具应用潜力。

透明质酸(hyaluronic acid, HA),是由葡萄糖醛酸和 N-乙酰氨基葡萄糖为双糖单位组成的直链高分子多糖,因其在生物相容性、保水性、成膜性等方面具有良好的优势,被广泛地应用于果汁、软糖、果冻、沙拉酱以及保健食品中^[15]。以透明质酸为原料制备的细胞相容性抗菌涂层,对铜绿假单胞菌、金黄色葡萄球菌具有显著的抑制作用^[16];透明质酸智能抗菌纳米纤维应用于牛肉保鲜中,在 4℃处

理 5 d 后,牛肉中大肠杆菌的含量降低了 99.98%,且该材料对牛肉的感官品质无任何影响^[17]。而将透明质酸应用于水产品保鲜的研究还鲜有报道,本实验室前期使用透明质酸涂膜鲤鱼、鲫鱼后微冻贮藏,结果表明 0.9%浓度透明质酸涂膜鱼肉保鲜效果最好^[18-19]。研究发现,以共价键或非共价键结合形成的蛋白质-多糖复合物,与单一组分相比,具有更加优良的机械性能和气体阻隔性,在食品保鲜中应用前景良好^[20]。利用多糖与鱼胶原蛋白制备复合生物保鲜膜,鱼胶原蛋白的添加可改善多糖保鲜膜的理化性能;鱼胶原蛋白加入后,经多糖-蛋白质复合涂膜处理能延缓草鱼肉腐败^[7]。

为了研究 HA 与大豆 β -伴球蛋白复合涂膜对分割鲤鱼的保鲜效果,本研究将两者用不同质量浓度配制后涂膜处理,探究复合涂膜对微冻鲤鱼肉持水力、pH、电导率、挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)、硫代巴比妥酸(thiobarbituric reactive substances, TBARS)值、三氯乙酸(trichloroacetic acid, TCA)可溶性肽,肌原纤维蛋白含量、羰基、巯基含量和钙离子 ATP 酶(calcium-ATPase, Ca^{2+} -ATPase)活性等的影响,以期开发新型、安全的鱼肉保鲜方法提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

鲤鱼:体重 1.5~2.0 kg,体长 35~40 cm,2022 年 5 月购于黑龙江省绥化市大润发超市;大豆 β -伴球蛋白:食品与制药工程学院实验室制备。

透明质酸(分析纯,山东福瑞达生物医药有限公司);硫代巴比妥酸(分析纯,南京都莱生物技术有限公司);福林酚试剂(分析纯,天津市光复精细化工研究所);牛血清白蛋白标准品(纯度 $\geq 98\%$,上海如吉科技发展有限公司);8-苯氨基-1-萘磺酸铵盐(1-anilinonaphthalene-8-sulfonic acid ammonium salt, ANS)(分析纯,阿拉丁试剂有限公司);盐酸胍(分析纯,国药集团化学试剂有限公司);乙二胺四乙酸(ethylene diamine tetraacetic acid, EDTA)(分析纯,天津市滨海科迪化学试剂有限公司);三磷酸腺苷二钠

(adenosine disodium triphosphate, ATP- Na_2)(分析纯, 上海源叶生物科技有限公司)。

1.2 仪器与设备

DC92 数显酸度计(上海伟业仪器厂); DZDS-A 电导率仪(南京多助科技发展公司); K9840 自动定氮仪(海能未来技术集团股份有限公司); EFP307 食品加工机(伊莱克斯电器有限公司); BC/BD-629HK 冰柜(青岛海尔特种电冰柜有限公司); 752 紫外可见分光光度计(上海析谱仪器有限公司); SHB-III 抽滤泵(郑州长城科工贸有限公司); F97Pro12008 荧光分光光度计(上海棱光技术有限公司); Sorvall Lynx 4000 高速离心机(美国赛默飞世尔科技公司); XT120A 电子分析天平(感量 0.0001 g, 瑞士普利赛斯公司); CR-400 色差仪(日本柯尼卡美能达控股株式会社)。

1.3 实验方法

1.3.1 涂膜保鲜设计

将鲤鱼宰杀后, 用手术刀将内脏、鱼皮剔除, 用清水冲洗鱼体表面的污渍, 然后将水沥干。3 种不同比例的涂膜剂: 0.9%透明质酸和 1%大豆 β -伴球蛋白, 0.9%透明质酸和 2%大豆 β -伴球蛋白, 0.9%透明质酸和 3%大豆 β -伴球蛋白。将鲤鱼躯干部从腹鳍向背鳍分割为上下两部分, 除鱼骨, 鱼肉长约 18~20 cm, 宽约 8~10 cm, 分别均匀涂抹上 3 种涂膜剂并放在 -3°C 条件下贮存 28 d, 每隔 7 d 测定鲤鱼肉的各项理化指标, 均质化样品制备时从鲤鱼片上、中、下 3 个位置分别取样后混合均质化后进行测定, 每个指标平行测定 3 次。

1.3.2 持水力测定

称取 5 g 长方体鲤鱼肉块, 放在滤纸上包好, 转入洁净的 50 mL 离心管中, 使其在 20°C 、转速为 3000 r/min 下离心 15 min。离心后将样品取出称重, 通过公式(1)算出鲤鱼肉持水力^[21]。

$$\text{持水力}/\% = \frac{\text{离心后肉的质量}}{\text{离心前肉的质量}} \times 100\% \quad (1)$$

1.3.3 pH 的测定

采用 GB 5009.237—2016《食品安全国家标准 食品 pH 值的测定》测定均质化鲤鱼肉的 pH。

1.3.4 电导率测定

参考郭丽等^[18]的方法, 测定均质化鲤鱼肉的电导率。

1.3.5 TVB-N 含量的测定

采用 GB 5009.228—2016《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》中的自动凯氏定氮仪法测定鲤鱼肉 TVB-N。

1.3.6 TBARS 含量的测定

参考郭丽等^[19]的方法测定鲤鱼肉的 TBARS。

1.3.7 TCA 可溶性肽测定

参考沈妮^[22]的方法测定鲤鱼肉 TCA 可溶性肽。

1.3.8 色度的测定

将鲤鱼肉用食品加工机打碎, 平整的铺展在表面皿上, 利用色差仪测定鱼肉的 L^* 、 a^* 的变化, 测定时保证光线充足, 色差仪要垂直轻压于鲤鱼肉样品, 接触面无空气, 迅速测定^[18]。

1.3.9 肌原纤维蛋白液提取及含量测定

参考 FLORENCE 等^[23]的方法, 略作修改。称取鱼肉 30.0 g 加入 300 mL A 缓冲液(20 mmol/L 磷酸盐缓冲液、pH 7.0, 内含 100 mmol/L KCl 和 1 mmol/L EDTA)混匀。在 13000 r/min 下匀浆 60 s。匀浆后在 4°C 、8000 r/min 条件下进行离心 10 min。将沉淀混匀于 150 mL A 缓冲液中, 洗涤离心, 去上清液, 洗涤两次。最后将 150 mL 缓冲液 B (25 mmol/L 磷酸盐缓冲液、pH 7.0, 内含 0.6 mol/L KCl) 与沉淀进行混合, 在 13000 r/min 下匀浆 60 s, 溶解后置于冰浴 2 h。用抽滤泵在三层纱布下进行抽滤, 滤液为肌原纤维蛋白液。采用福林酚法测定肌原纤维蛋白含量。

1.3.10 肌原纤维蛋白表面疏水性测定

参考 CAO 等^[24]的方法测定肌原纤维蛋白表面疏水性。

1.3.11 肌原纤维蛋白巯基含量测定

参考贡慧等^[25]的方法测定肌原纤维蛋白巯基含量。

1.3.12 肌原纤维蛋白活性巯基和总巯基测定

参考吴满刚^[26]的方法测定肌原纤维蛋白活性巯基和总巯基。

1.3.13 肌原纤维蛋白 Ca^{2+} -ATPase 活性的测定

参考符莎露^[27]的方法测定肌原纤维蛋白 Ca^{2+} -ATPase 活性。

1.4 数据处理

实验结果以平均值 \pm 标准差表示, 采用 Excel 2010、SPSS 22.0 软件统计分析实验数据。

2 结果与分析

2.1 鲤鱼肉在微冻结合涂膜条件下物理指标的测定

2.1.1 持水力的变化

与微冻贮藏初期相比, 不同涂膜处理的鲤鱼肉持水力均在贮藏前 7 d 内快速下降($P < 0.05$), 但在贮藏 7 d 后, 经透明质酸-大豆 β -伴球蛋白涂膜鲤鱼肉持水力呈现略有增加趋势, 而未涂膜鲤鱼肉在贮藏 14 d 后持水力显著下降($P < 0.05$), 见图 1。刘欣荣^[28]研究微冻红鳍东方鲀持水力的

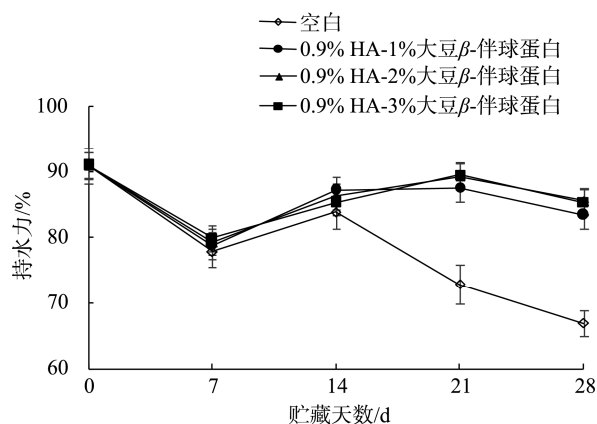


图 1 涂膜鲤鱼肉在微冻条件贮藏过程中持水力的变化(n=3)
Fig.1 Changes in water-holding capacity of coated *Cyprinus carpio* meat during superchilling storage (n=3)

变化,发现随微冻贮藏时间延长,红鳍东方鲀的持水力逐渐下降,与本实验未涂膜样品变化趋势相近。造成持水力下降的原因是微冻使鱼体内水分结成冰晶,机体细胞受到冰晶损伤;同时随贮藏时间延长,鱼肉中蛋白质被酶和微生物分解从而破坏鲤鱼肌肉细胞结构,进而使持水力降低。

在微冻结合涂膜条件下,随着贮藏时间的延长,涂膜鲤鱼的持水力比未涂膜鲤鱼(空白)的持水能力更高。在贮藏至 28 d 时,0.9% HA-2%大豆 β -伴球蛋白涂膜鲤鱼的持水力为 85.6%,与空白鲤鱼持水力相比高 27.9%,可见未涂膜的鲤鱼持水力下降较快,而涂膜后鲤鱼的持水力降低速度会变慢。课题组前期采用不同浓度透明质酸涂膜对微冻鲤鱼进行保鲜,鲤鱼的持水力变化也呈现相近趋势,但 0.9% HA 涂膜鲤鱼在贮藏 24 d 时,持水力为 77%^[19],而 0.9% HA-大豆 β -伴球蛋白涂膜鲤鱼在贮藏 28 d 时,持水力均高于 HA 涂膜鲤鱼,可见 HA 复合涂膜后保鲜效果更优。

2.1.2 色度的变化

在微冻贮藏期间,未涂膜的鲤鱼 L^* 随贮藏时间延长逐渐升高,透明质酸-大豆 β -伴球蛋白涂膜鲤鱼在贮藏前 14 d L^* 变化较平缓,贮藏 14~28 d 期间先下降后升高,见图 2A。与涂膜鲤鱼相比,未涂膜的鲤鱼 L^* 在整个贮藏期内明显增加,差异显著($P<0.05$)。

不同处理的鲤鱼贮藏前 14 d 时 a^* 整体呈显著下降趋势($P<0.05$),在贮藏 14 d 后变化幅度变小($P>0.05$),见图 2B。未涂膜的鲤鱼 a^* 下降幅度最大,在贮藏 28 d 时降幅达 55.1%,与涂膜鲤鱼相比差异显著($P<0.05$);0.9% HA-2%大豆 β -伴球蛋白涂膜鲤鱼 a^* 在贮藏 14~28 d 期间一直保持稳定的状态。在贮藏过程中,当鱼肉肌红蛋白发生氧化生成高铁肌红蛋白,会导致 a^* 下降;贮藏时间增加,冰晶形成的数量随之增多,导致细胞受损,蛋白质变性,

进而也会引起色泽变化^[29]。贮藏 14 d 后未涂膜的鲤鱼 a^* 降低与持水力的下降呈正相关,这也进一步证实了上述变化过程。张含昆^[30]研究鲟鱼肉冻融稳定性发现,添加海藻糖可有效抑制鱼片颜色变化,添加海藻糖的鱼片色差变化小于空白组 18.6%。本研究涂膜剂透明质酸和大豆 β -伴球蛋白两者共同作用,可以防止脂肪氧化,减少鲤鱼肉褐变发生,组织质地劣化,从而减少鲤鱼肉色度的变化。

2.2 鲤鱼肉在微冻结合涂膜条件下化学指标的测定

2.2.1 pH 和电导率的变化

微冻结合涂膜条件下,贮藏期间 4 组不同处理鲤鱼肉 pH 的变化呈现先下降后上升,在贮藏前 7 d 呈现显著下降趋势($P<0.05$),7 d 后鲤鱼肉 pH 开始增长,见图 3A。俞静芬^[31]研究淡水鳊鱼在微冻贮藏下 pH 的变化趋势,与本研究相近。贮藏前期鲤鱼肉的糖酵解反应产生乳酸并累积引起 pH 降低,贮藏过程鱼肉中微生物活动,蛋白质等营养物质分解产生碱性含氮物质,使 pH 上升。

未涂膜的鲤鱼肉在贮藏至 28 d 时, pH 达到最高,与涂膜鲤鱼肉相比, pH 增幅最大($P<0.05$),而 0.9% HA-3%大豆 β -伴球蛋白、0.9% HA-2%大豆 β -伴球蛋白涂膜鲤鱼肉 pH 升高相对缓慢。李娜^[32]研究微冻结合复合可食性膜对半滑舌鳎鱼片保鲜效果发现,复合涂膜组可在一定程度上延缓 pH 的变化。

不同处理组的鲤鱼肉电导率在整个贮藏期间是逐渐升高的,未涂膜鲤鱼肉电导率在贮藏末期增幅最高($P<0.05$),经 HA-大豆 β -伴球蛋白涂膜的鲤鱼肉电导率均呈缓慢升高,3 组涂膜组处理鲤鱼肉电导率变化差异显著($P<0.05$),见图 3B。电导率的上升是由于蛋白质等营养物质在贮藏期间会降解为小分子物质,提高了水产品浸出液的导电性^[32]。

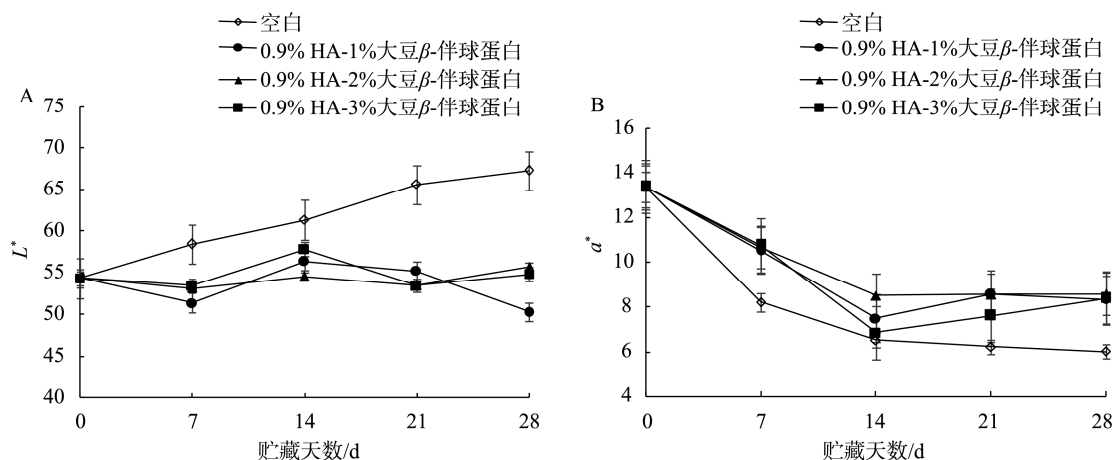


图 2 涂膜鲤鱼在微冻条件贮藏过程中色度的变化($n=3$)

Fig.2 Changes in chromaticity of coated *Cyprinus carpio* meat during superchilling storage ($n=3$)

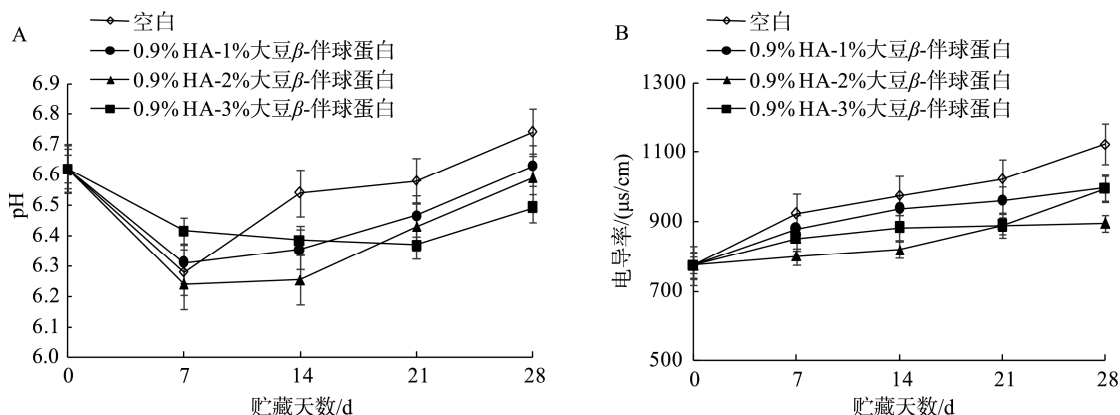


图 3 涂膜鲤鱼在微冻条件贮藏过程中 pH 和电导率的变化(n=3)
Fig.3 Changes in pH and conductivity of coated *Cyprinus carpio* meat during superchilling storage (n=3)

在贮藏 28 d 时, 未涂膜鲤鱼肉电导率为 1122 $\mu\text{s}/\text{cm}$, 与贮藏初期相比, 增幅为 45.1%。1%、2%、3% HA-大豆 β -伴球蛋白涂膜的鲤鱼肉电导率增幅分别为 28.8%、15.7%、26.8%。经 0.9% HA-2%大豆 β -伴球蛋白涂膜鲤鱼肉在贮藏至 28 d 时电导率值最低($P<0.05$), 表现出明显的优势, 与空白鲤鱼肉电导率相比低 20.2%。

2.2.2 TVB-N 和 TBARS 的变化

在微冻贮藏期间, 4 组不同处理鲤鱼肉随贮藏时间延长, 其 TVB-N 呈现显著增加趋势($P<0.05$), 见图 4A。TVB-N 上升的原因是由于微生物酶的作用下, 使蛋白质分解产生挥发性碱性含氮物质^[31]。

与未涂膜鱼肉相比, 在微冻 14 d 内, 涂膜鲤鱼肉 TVB-N 保持平稳的状态。未涂膜鲤鱼肉在微冻贮藏 14 d 时 TVB-N 为 19.98 mg/100 g, 而在此期间未涂膜鲤鱼肉 pH 增幅较大, 二者呈显著正相关; 0.9% HA-1%大豆 β -伴球蛋白涂膜鲤鱼肉在微冻贮藏 21 d 时 TVB-N 为 21.75 mg/100 g。0.9% HA-2%大豆 β -伴球蛋白、0.9% HA-3%大豆 β -伴球蛋白涂膜鱼肉在微冻贮藏 28 d 时 TVB-N 分别为 19.10、20.03 mg/100 g, 与空白鲤鱼肉 TVB-N 相比分别低 48.9%、46.3%。GB 2733—2015《食品安全国家标准 鲜、冻动物性水产品》理化指标要求中明确规定, 淡水鱼的 TVB-N 应

$\leq 20 \text{ mg}/100 \text{ g}$, 由此可见 HA-大豆 β -伴球蛋白复合涂膜剂对延缓淡水鱼腐败变质具有明显的效果。

微冻贮藏期间 4 组不同处理鲤鱼肉 TBARS 的含量变化均呈现上升趋势($P<0.05$), 见图 4B。薛鹏^[33]在 -1°C 条件下贮藏鲟鱼, 研究贮藏期 TBARS 的整体变化趋势也是逐渐升高的。TBARS 升高的原因可能是贮藏过程中鲤鱼肉中不饱和脂肪酸氧化降解产物丙二醛增多, 其与 TBARS 溶液反应生成红色化合物^[34]。

与未涂膜鲤鱼肉 TBARS 含量变化相比, 经 HA-大豆 β -伴球蛋白涂膜鱼肉升高趋势相比缓慢($P<0.05$)。微冻贮藏 28 d 时, 未涂膜鲤鱼肉 TBARS 含量最大, 为 4.38 mg/kg, 0.9% HA-2%大豆 β -伴球蛋白涂膜鱼肉 TBARS 含量与空白鲤鱼肉相比低 62.6%; 复合涂膜中, 随大豆 β -伴球蛋白配比的增加, 涂膜鲤鱼肉 TBARS 含量依次为未涂膜鲤鱼肉的 73.2%、37.4%、54.3%。0.9% HA-2%大豆 β -伴球蛋白涂膜鱼肉 TBARS 含量升高幅度最小, 与其他两组涂膜数据相比差异显著($P<0.05$)。在贮藏期间, 不同处理鲤鱼肉 TBARS 的含量变化与电导率的增加呈显著正相关, 可见随着鲤鱼肉的氧化程度增加, 营养物质分解程度增大, 小分子物质含量增多, 进而提高了鱼肉浸出液的电导率。

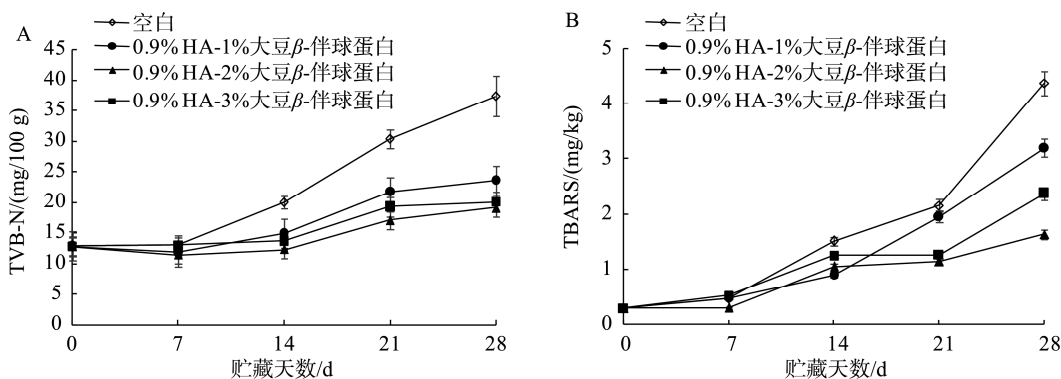


图 4 涂膜鲤鱼在微冻条件贮藏过程中 TVB-N 和 TBARS 的变化(n=3)
Fig.4 Changes in TVB-N and TBARS of coated *Cyprinus carpio* meat during superchilling storage (n=3)

2.3 鲤鱼肉在微冻结合涂膜条件下蛋白质的变化规律研究

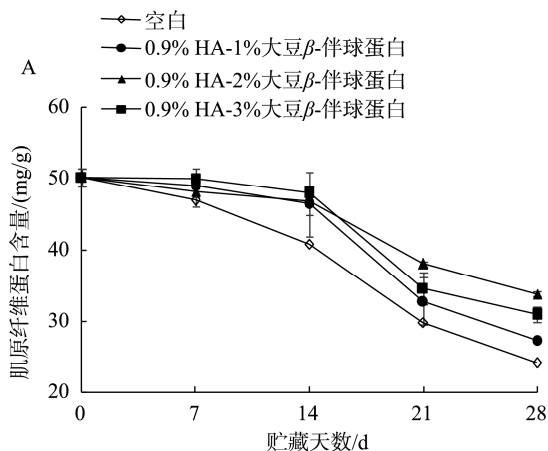
2.3.1 肌原纤维蛋白和 TCA 可溶性肽的变化

肌原纤维蛋白的变化通常用来反映鱼肉蛋白质变性程度^[35]。鲤鱼肉肌原纤维蛋白含量在微冻贮藏 14 d 内呈缓慢下降趋势,在 14~28 d 内下降幅度增大,见图 5A。胡玥^[35]将带鱼置于-3℃贮藏,前 15 d 肌原纤维蛋白含量缓慢下降,变化趋势与本研究相近。在贮藏前期,肌原纤维蛋白细胞内的水分被部分冻结,形成冰晶量较少,对肌原纤维蛋白的影响不大,部分冻结同时还可以抑制微生物生长,所以前期含量下降较缓。微冻贮藏后期,肌原纤维蛋白内部及细胞组织间冻结的冰晶发生重结晶,使肌原纤维蛋白结构发生损坏,导致蛋白变性,因此贮藏后期肌原纤维蛋白含量快速下降。在微冻过程中,蛋白质的氧化变性形成大分子量蛋白质的不溶性聚集体,减少肌原纤维蛋白溶解量,肌原纤维蛋白含量降低^[36]。

在贮藏期间,与未涂膜鲤鱼肉相比,涂膜鲤鱼肉肌原纤维蛋白含量下降幅度较小($P<0.05$)。0.9% HA-1%大豆 β -伴球蛋白涂膜鲤鱼肉肌原纤维蛋白含量变化与其他两组涂膜处理相比差异显著($P<0.05$)。与新鲜样品相比,在贮藏 28 d,未涂膜鲤鱼肌原纤维蛋白含量下降了 51.99%,0.9% HA-2%大豆 β -伴球蛋白涂膜鲤鱼下降了 32.49%,下降幅度最小。0.9% HA-2%大豆 β -伴球蛋白涂膜鲤鱼在贮藏 28 d 时肌原纤维蛋白含量保持较高水平,与空白鲤鱼肉相比高 40.6%。

在微冻贮藏条件下,不同处理组鲤鱼肉 TCA 可溶性肽含量随贮藏时间延长均呈上升趋势($P<0.05$),见图 5B。TCA 可溶性肽含量升高的原因是由于鲤鱼体中蛋白质在内源性酶以及微生物的作用下降解,水解为多肽、小分子肽。

未涂膜鲤鱼肉 TCA 可溶性肽含量增幅最大,在微冻贮藏 28 d 时,达到 10.9 $\mu\text{mol/g}$;1%、2%、3% HA-大豆 β -伴球蛋白涂膜的鲤鱼肉在贮藏 28 d, TCA 可溶性肽含量比未涂膜鲤鱼肉组分别降低了 10.7%、20.7%、17.6%。未涂膜与涂膜鱼肉 TCA 可溶性肽含量变化差异显著($P<0.05$)。



壳聚糖涂膜银鲱鱼在微冻贮藏下 TCA 可溶性肽的变化与本研究结果相近,涂膜壳聚糖的银鲱鱼相较于未涂膜壳聚糖的银鲱鱼 TCA 可溶性肽含量降低了 38%^[37]。

而 0.9% HA-1%大豆 β -伴球蛋白涂膜鲤鱼肉 TCA 可溶性肽含量变化与其他两组涂膜处理相比差异显著($P<0.05$),经 0.9% HA-2%、3%大豆 β -伴球蛋白涂膜后,鲤鱼肉 TCA 可溶性肽增幅较小。在贮藏 14 d 后,不同涂膜处理鲤鱼肉肌原纤维蛋白含量变化与 TCA 可溶性肽含量变化呈显著负相关。

2.3.2 羰基、巯基和表面疏水性的变化

蛋白质发生氧化会导致肽键或者氨基酸侧链断裂,蛋白质羰基化,羰基含量增加,所以贮藏过程中蛋白质羰基含量的变化也可以用来判断蛋白质氧化变性的程度^[38]。微冻贮藏过程中,鲤鱼肉肌原纤维蛋白的羰基含量总体呈现明显上升趋势($P<0.05$),在 0~14 d 内羰基含量保持平缓,在第 14~28 d 出现大幅度上升,见图 6A。卢涵^[39]将鲮鱼置于微冻贮藏实验中,羰基含量在前 10 d 内保持平缓,之后随着时间的延长羰基含量明显上升。在微冻贮藏过程中,肌原纤维蛋白氧化后,氨基酸侧链和肽键断裂形成羰基化合物,导致其含量增加^[40]。0~14 d 羰基含量小幅度下降可能是由于在贮藏期间生成的羰基与其他细胞成分发生反应,造成羰基含量略有下降。

在微冻贮藏过程中,随着时间的延长,与未涂膜鲤鱼肉相比,涂膜鲤鱼肉肌原纤维蛋白羰基含量增幅较小($P<0.05$)。与贮藏初期相比,在贮藏 28 d,未涂膜鲤鱼羰基增加了 6.11 倍,0.9% HA-2%大豆 β -伴球蛋白涂膜鲤鱼羰基增加了 4.99 倍,增幅最小。崔旭海等^[41]将 6%浓度乳清分离蛋白水解物加入草鱼鱼糜进行冷藏,所测得羰基含量保持较低水平。

肌原纤维蛋白表面疏水性微冻贮藏前 7 d 内出现上升,贮藏 7 d 后呈现下降趋势,涂膜处理鱼肉贮藏 21 d 时表面疏水性最低,见图 6B。沈妮^[22]将带鱼置于 0℃低温贮藏,在 0~6 d 表面疏水性明显上升,与本研究变化趋势相似。微冻贮藏期间,肌原纤维蛋白变性,导致蛋白空间结构改变,隐藏的疏水基团暴露,造成表面疏水性升高。疏水侧链聚集于蛋白内部,疏水基团聚集,发生疏水相互作用,导致表面疏水性降低。

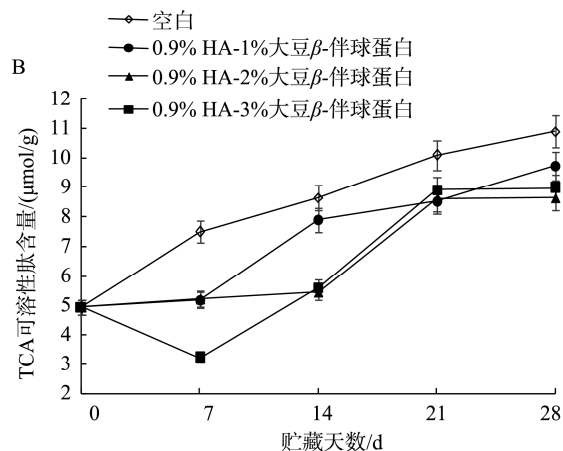


图 5 涂膜鲤鱼在微冻条件贮藏过程中肌原纤维蛋白和 TCA 可溶性肽的变化($n=3$)

Fig.5 Changes in myofibrilla protein and TCA-soluble peptides of coated *Cyprinus carpio* meat during superchilling storage ($n=3$)

贮藏末期鲤鱼表面疏水性与初期相比上升变化平缓, 未涂膜鲤鱼表面疏水性明显高于涂膜鲤鱼($P<0.05$)。丁一等^[42]研究骨蛋白水解物溶液对鲤鱼肉糜表面疏水性的影响, 添加组表面疏水性明显低于未添加组, 趋势与本研究相似。0.9% HA-1%大豆 β -伴球蛋白涂膜鲤鱼肉表面疏水性变化与其他两组涂膜处理相比差异显著($P<0.05$), 经 0.9% HA-2%、3%大豆 β -伴球蛋白涂膜后, 鲤鱼肉表面疏水性增幅较小。

在微冻贮藏过程中, 随贮藏时间的延长, 鲤鱼肉总巯基和活性巯基含量总体呈现下降趋势($P<0.05$), 见图 6C、6D。鲤鱼肉总巯基在贮藏 0~14 d 内下降幅度较大, 后期下降速度缓慢。邱恒恒^[43]研究白斑狗鱼冷藏和微冻贮藏, 贮藏期间总巯基含量显著下降, 与本研究结果相似。在鱼肉蛋白质发生氧化时, 蛋白内部的巯基会因活性巯基的不稳定性形成二硫键, 伴随时间的延长, 肌原纤维蛋白结构发生变化, 巯基位置也随之发生改变, 使巯基暴露于蛋白质外部, 氧化形成二硫键, 总巯基与活性巯基含量下降^[37,44]。

微冻贮藏期间, 未涂膜鲤鱼肉肌原纤维蛋白总巯基及活性巯基含量下降速率要明显高于涂膜处理组($P<0.05$)。研究人员将鲮鱼肌原纤维蛋白与蛋清蛋白/ β -环糊精混合冷冻贮藏, 发现较高浓度处理下巯基含量变化幅度越小^[45]。贮藏末期, 未涂膜鲤鱼肉总巯基含量为 $2.04 \text{ mol}/10^5 \text{ g}$, 0.9% HA-2%大豆 β -伴球蛋白涂膜鲤鱼肉肌原纤维蛋白总巯基为 $2.84 \text{ mol}/10^5 \text{ g}$ 。0.9% HA-2%大豆 β -伴球蛋白涂膜处理组下降速度最小, 因此 0.9% HA-2%大豆 β -伴球蛋白涂膜效果最佳, 更有益于防止蛋白结

构发生改变, 防止蛋白变性。透明质酸与大豆 β -伴球蛋白复合涂膜可使肌原纤维蛋白组织结构紧密, 改善了肌原纤维蛋白的性能, 防止肌原纤维蛋白发生变性。

2.3.3 Ca^{2+} -ATPase 活性的变化

Ca^{2+} -ATPase 活性是表示肌球蛋白头部性质的指标, 是指示蛋白变性的一个重要指标, 贮藏期间, 鱼肉蛋白质的 Ca^{2+} -ATPase 活性越低, 蛋白质变性程度越高^[35,46]。微冻贮藏期间, 未涂膜和涂膜处理鲤鱼肉 Ca^{2+} -ATPase 活性均明显下降($P<0.05$), 见图 7。鲮鱼在 -3°C 贮藏中, Ca^{2+} -ATPase 活性呈下降趋势, 这与本研究结果相似。当巯基发生氧化和蛋白交联时, 使肌球蛋白的 Ca^{2+} -ATPase 活性发生下降^[39]。

在贮藏期间, 未涂膜鲤鱼肉 Ca^{2+} -ATPase 活性下降幅度明显大于 0.9% HA-2%、3%大豆 β -伴球蛋白涂膜鲤鱼肉 ($P<0.05$)。2%壳聚糖复合涂膜银鲱鱼, 贮藏期间 Ca^{2+} -ATPase 活性保持较高水平^[37]。贮藏末期, 0.9% HA-2%大豆 β -伴球蛋白涂膜鲤鱼肉肌原纤维蛋白的 Ca^{2+} -ATPase 活性相比其他两个涂膜组处于较高水平。

3 结 论

鲤鱼肉营养丰富, 结缔组织少, 水分含量高, 分割后质地劣化、微生物繁殖是导致其品质降低的主要原因。本研究发现鲤鱼肉随微冻贮藏时间延长, 持水力、肌原纤维蛋白含量不断下降, TCA 可溶性肽、TVB-N、TBARS、电导率不

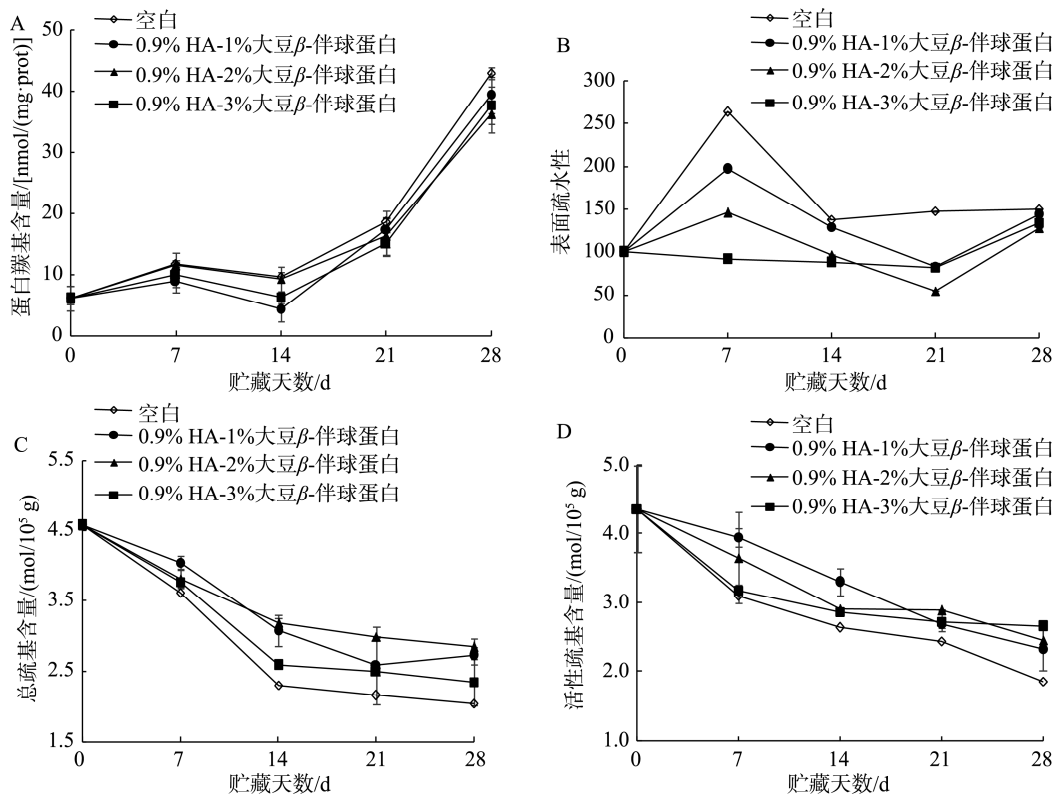


图 6 涂膜鲤鱼在微冻贮藏过程中羰基、巯基和表面疏水性变化($n=3$)

Fig.6 Changes in carbonyl, sulfhydryl content and surface hydrophobicity of coated *Cyprinus carpio* meat during superchilling storage ($n=3$)

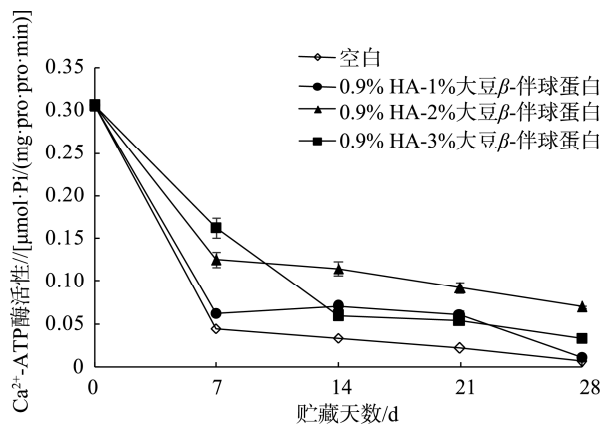


图 7 涂膜鲤鱼在微冻贮藏过程中 Ca^{2+} -ATPase 活性变化($n=3$)
Fig.7 Changes in Ca^{2+} -ATPase activity of coated *Cyprinus carpio* meat during superchilling storage ($n=3$)

断上升。贮藏时间延长, 鱼肌细胞组织间冰晶重结晶, 内源酶及微生物的作用, 鱼肉品质劣变明显。未涂膜鲤鱼肉在微冻贮藏 14 d 后品质显著下降。与未涂膜鲤鱼肉相比, 在微冻贮藏 28 d 内, HA-大豆 β -伴球蛋白复合膜可有效抑制微冻鲤鱼肉持水力、肌原纤维蛋白、巯基和 Ca^{2+} -ATPase 活性的下降($P<0.05$), 延缓 TVB-N、TBARS、TCA 可溶性肽、电导率和羰基的增长速率($P<0.05$), 0.9% HA-2%大豆 β -伴球蛋白复合涂膜结合微冻技术调控效果显著。后续可结合微生物的变化、细胞内冰晶的变化、鱼肉水分迁移、微观结构的变化等深入研究透明质酸与大豆 β -伴球蛋白的保鲜作用机制, 以期获得更好的保鲜技术提高水产品品质, 同时为开发新型天然涂膜保鲜材料提供理论依据。

参考文献

- 农业部渔业渔政管理局. 2022 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2022.
Fisheries and Fisheries Administration of the Ministry of Agriculture. 2022 China Fisheries Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2022.
- 张明莉. 等离子体活化水对腐败希瓦氏菌杀菌机制及鲤鱼片保鲜的研究[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2022.
ZHANG ML. Study on bactericidal mechanism of plasma activated water against *Shewanella putrefaciens* and preservation of carp fillets [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2022.
- SOARES N, OLIVEIRA M, VICENTE AA. Effects of glazing and chitosan-based coating application on frozen salmon preservation during six-month storage in industrial freezing chambers [J]. LWT-Food Sci Technol, 2015, 61(2): 524–531.
- 陶希芹. 壳聚糖/纳米 TiO_2 复合膜最佳配比的研究及其在鲤鱼保鲜中的应用[J]. 山东化工, 2015, 44(6): 20–22, 24.
TAO XQ. The study of best ratio of single factor content in chitosan/nano- TiO_2 and its application on fresh-keeping of carp [J]. Shandong Chem Ind, 2015, 44(6): 20–22, 24.
- ZHENG T, YU X, PILLA S. Mechanical and moisture sensitivity of fully bio-based dialdehyde carboxymethyl cellulose cross-linked soy protein isolate films [J]. Carbohydr Polym, 2017, 157: 1333–1340.
- WANG L, XIAO M, DAI S, et al. Interactions between carboxymethyl konjac glucomannan and soy protein isolate in blended films [J]. Carbohydr Polym, 2014, 101: 136–145.
- 杨攀平, 仲梦园, 徐江南, 等. 复合新型保鲜膜的制备及对低温草鱼质量的影响[J]. 包装工程: 1-11. [2022-11-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1094.tb.20220622.1357.004.html>

detail/50.1094.tb.20220622.1357.004.html

- YANG PP, ZHONG MY, XU JN, et al. Preparation of composition film and its effect on quality of grass carp during low storage [J]. Packag Eng: 1-11. [2022-11-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1094.tb.20220622.1357.004.html>
- 刘津延. 鱼皮胶原蛋白复合可食性抗菌涂膜对真鲷保鲜效果的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020.
LIU JY. Study on the effect of fish skin collagen compound edible antibacterial coating on red porgy preservation [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020.
- GUERRERO P, O'SULLIVAN MG, PKERRY JP, et al. Application of soy protein coatings and their effect on the quality and shelf-life stability of beef patties [J]. RSC Adv, 2015, 5(11): 8182–8189.
- YEMIS GP, CANDOGAN K. Antibacterial activity of soy edible coatings incorporated with thyme and oregano essential oils on beef against pathogenic bacteria [J]. Food Sci Biotechnol, 2017, 26(4): 1113–1121.
- ECHEVERRIA I, LOPEZ-CABALLERO ME, GOMEZ-GUILLEN MC, et al. Active nanocomposite films based on soy proteins-montmorillonite-clove essential oil for the preservation of refrigerated bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) fillets [J]. Int J Food Microbiol, 2018, 266: 142–149.
- 毕会敏, 徐柠檬, 范方宇. 花青素/大豆分离蛋白智能包装膜特性及鱼肉新鲜度监测[J]. 食品与发酵工业: 1-14. [2022-11-08]. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.031580
- BI HM, XU NM, FAN FY. Characteristics and monitoring fish meat freshness of smart packaging films of anthocyanin and soy protein isolate [J]. Food Ferment Ind: 1-14. [2022-11-08]. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.031580
- 郭宽, 张超, 赵晓燕, 等. 11S/7S 比例对大豆蛋白膜性能的影响[J]. 中国粮油学报, 2010, 25(12): 14–17.
GUO K, ZHANG C, ZHAO XY, et al. Effects of 11s/7S ratio on properties of edible film based on soy protein isolate [J]. J Chin Cereals Oils Ass, 2010, 25(12): 14–17.
- 杨晓晴, 李佳芯, 吕博, 等. β -伴大豆球蛋白中 α 、 α' 亚基对大豆分离蛋白薄膜微观结构和功能特性的影响[J]. 食品科学技术学报, 2022, 40(1): 53–64.
YANG XQ, LI JX, LV B, et al. Effects of α and α' subunit of β -conglycinin on microstructure and functional properties of soy protein isolate films [J]. J Food Sci Technol, 2022, 40(1): 53–64.
- 刘硕, 王景召. 透明质酸的特性及其在食品中的应用[J]. 新材料与新技术, 2018, 44(8): 62.
LIU S, WANG JZ. Characteristics of hyaluronic acid and its application in food [J]. New Mater New Technol, 2018, 44(8): 62.
- MARTORANA A, PITARRESI G, PALUMBO FS, et al. Fabrication of silver nanoparticles by a diethylene triamine-hyaluronic acid derivative and use as antibacterial coating [J]. Carbohydr Polym, 2022, 295: 119861.
- LIN L, WU JJ, LI CZ, et al. Fabrication of a dual-response intelligent antibacterial nanofiber and its application in beef preservation [J]. LWT-Food Sci Technol, 2022, 154: 112606.
- 郭丽, 王鹏, 姜喆, 等. 透明质酸涂膜对鲫鱼微冻贮藏保鲜效果的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(12): 120–125.
GUO L, WANG P, JIANG Z, et al. Effect of hyaluronic acid coating on fresh quality of crucian carp (*Carassius auratus*) during the partial-freezing storage [J]. Food Mach, 2017, 33(12): 120–125.
- 郭丽, 丛萃莹, 王鹏, 等. 透明质酸涂膜结合微冻贮藏对鲜切鲤鱼肉保鲜效果的研究[J]. 食品工业科技, 2019, 40(5): 253–258.
GUO L, CONG XY, WANG P, et al. Fresh-keeping effect of hyaluronic acid coating combined with superchilling storage on fresh-cut common carp (*Cyprinus carpio*) [J]. Sci Technol Food Ind, 2019, 40(5): 253–258.
- 汪少芸, 冯雅梅, 伍久林, 等. 蛋白质-多糖多尺度复合物结构的形成机制及其应用前景[J]. 食品科学, 2021, 42(17): 1–9.
WANG SY, FENG YM, WU JL, et al. Formation mechanism of protein-polysaccharide multi-scale complexes and their future applications [J]. Food Sci, 2021, 42(17): 1–9.
- SANCHEZ-ALONSO I, CARECHE M, MORENO P, et al. Testing caffeic acid as a natural antioxidant in functional fish-fibre restructured products [J]. LWT-Food Sci Technol, 2011, 44(4): 1149–1155.
- 沈妮. 带鱼低温贮藏蛋白氧化、组织蛋白酶活性及鱼肉质地结构的变化规律[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.

- SHEN N. Protein oxidation, cathepsin, activity, texture and structure of muscle changes of hairtail during low-temperature storage [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [23] FLORENCE L, BENOIT F, THOMPSON JW, *et al.* Thermal denaturation and aggregation properties of Atlantic salmon myofibrils and myosin from white and red muscles [J]. *J Agric Food Chem*, 2007, 55(12): 4761–4770.
- [24] CAO YG, AI NS, TRUE AD, *et al.* Effects of (-)-epigallocatechin-3-gallate incorporation on the physicochemical and oxidative stability of myofibrillar protein-soybean oil emulsions [J]. *Food Chem*, 2018, 245: 439–445.
- [25] 贡慧, 史智佳, 陈文华, 等. 关于几种蛋白氧化后巯基含量的对比研究 [J]. *化学试剂*, 2014, 36(11): 1014–1016.
- GONG H, SHI ZJ, CHEN WH, *et al.* A comparative study on the carbonyl content of several proteins after oxidation [J]. *Chem Reagent*, 2014, 36(11): 1014–1016.
- [26] 吴满刚. 脂肪和淀粉对肌原纤维蛋白凝胶性能的影响机理[D]. 无锡: 江南大学, 2010.
- WU MG. Mechanism of relation of myofibrillar protein composites containing emulsified lipid droplets and starch granules [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2010.
- [27] 符莎莎. 绿原酸接枝明胶制备新型水产品生物保鲜剂的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- FU SL. Studies on the preparation of a novel biological preservative for aquatic products [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [28] 刘欣荣. 不同贮藏方式对红鳍东方鲀品质的影响研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2020.
- LIU XR. Study on the effects of different storage methods on the quality of *Takifugu rubripes* [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2020.
- [29] 郭丽, 王鹏, 马丽媛, 等. 透明质酸涂膜对微冻贮藏鲫鱼肉质色泽和质构特性的影响[J]. *食品工业*, 2018, 39(4): 137–140.
- GUO L, WANG P, MA LY, *et al.* Effect of hyaluronic acid coating on color and texture characteristics of crucian carp (*Carassius auratus*) during superchilling storage [J]. *Food Ind*, 2018, 39(4): 137–140.
- [30] 张含昆. 鲟鱼肉冻融稳定性的研究及其调理食品的开发[D]. 大连: 大连工业大学, 2019.
- ZHANG HK. The freezing-thawing stability of sturgeon and its frozen prepared product development [D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2019.
- [31] 俞静芬. 淡水鱼鲢鱼的微冻与冰温保鲜技术研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2007.
- YU JF. The study on partial-freezing and point freezing technology applied to freshwater fish bighead [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2007.
- [32] 李娜. 微冻、复合可食性涂膜及气调包装对半滑舌鳎鱼片保鲜效果的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019.
- LI N. Effects of superchilling, composite edible coating and modified atmosphere packaging on fresh-keeping of half-smooth tongue sole (*Cynoglossus semilaevis*) fillets [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019.
- [33] 薛鹏. 鲟鱼贮藏过程鲜度变化及肌苷酸降解影响因素的研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2019.
- XUE P. Freshness change and factor affecting IMP degradation during sturgeon storage [D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2019.
- [34] TANG SZ, SHEEHAN D, BUCKLEY DJ, *et al.* Anti-oxidant activity of added tea catechins on lipid oxidation of raw minced red meat, poultry and fish muscle [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2001, 36(6): 685–692.
- [35] 胡玥. 带鱼微冻保鲜技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- HU Y. Studies on the superchilling technology of hairtail (*Tricliurus haumela*) [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [36] 任丽娜. 白鲢鱼肉肌原纤维蛋白冷冻变性的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014.
- REN LN. Study an frozen denaturation of miafibrillar protein of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) Muscle [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014.
- [37] 吴春华. 壳聚糖衍生物分子修饰机理及其在银鲳鱼保鲜中的应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- WU CH. Studies on the molecular modification mechanism of chitosan derivatives and its application in preserving of silver pmfret [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [38] 尹蕾丽. 冷冻对鲍鱼肌肉质地的影响及其机理的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020.
- YIN LL. Research on the texture changes and mechanism of abalone muscle during freezing and frozen storage [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020.
- [39] 卢涵. 鲷鱼肉低温贮藏过程中蛋白氧化组织蛋白酶活性与品质变化规律的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- LU H. Protein oxidation, cathepsins activity and the quality changes of bighead carp (*Aristichthys nobilis*) during low-temperature storage [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017.
- [40] 赵金丽. 冻藏鲈鱼蛋白质和脂肪氧化及其控制技术[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2019.
- ZHAO JL. Study on protein oxidation and fat oxidation of frozen mackerel with different antioxidants [D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2019.
- [41] 崔旭海, 毕海丹, 卞雪莲, 等. 乳清分离蛋白水解物对冷藏鱼糜的保鲜作用[J]. *现代食品科技*, 2017, 33(4): 195–200.
- CUI XH, BI HD, BIAN XL, *et al.* Effects of a hydrolysate of whey protein isolate on the preservation of surimi during cold storage [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2017, 33(4): 195–200.
- [42] 丁一, 杨明, 王松, 等. 骨蛋白水解物对冷藏鱼糜品质和蛋白结构特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(12): 145–148.
- DING Y, YANG M, WANAG S, *et al.* Effect of boneprotein hydrolyzates on the quality and structure of surimi protein during cold storage [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2013, 34(12): 145–148.
- [43] 邱恒恒. 白斑狗鱼低温贮藏过程中内源酶活性与品质变化规律的研究 [D]. 石河子: 石河子大学, 2020.
- QIU HH. Effect of endogenous enzyme activity and quality change of northern pike (*Esox lucius*) in low temperature storage [D]. Shihezi: Shihezi University, 2020.
- [44] 王标. 鲶鱼鱼糜在不同低温贮藏下的品质及其蛋白质理化特性的研究 [D]. 太原: 山西农业大学, 2019.
- WANG B. Studies on quality and protein physical and chemical properties of carp surimi under different cold storage conditions [D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2019.
- [45] WALAYAT N. 蛋清蛋白/低聚糖复合物对冻藏鱼肌原纤维蛋白结构与性质的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
- WALAYAT N. Effect of egg white protein and oligosaccharides mixture on the functional and structural properties of fish myofibrillar proteins during frozen storage [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020.
- [46] BENJAKUL S, VISESSANGUAN W, THONGKAEW C, *et al.* Effect of frozen storage on chemical and gel-forming properties of fish commonly used for surimi production in Thailand [J]. *Food Hydrocolloid*, 2005, 19(2): 197–207.

(责任编辑: 张晓寒 韩晓红)

作者简介



王 鹏, 硕士, 教授, 主要研究方向为食品工程。

E-mail: ljdrq@sina.com



郭 丽, 博士, 教授, 主要研究方向为农产品加工及贮藏。

E-mail: guoli2138@163.com