



竹叶抗氧化物浸泡结合乳清分离蛋白涂膜对 冷藏富硒虹鳟食用品质的影响

谭玲¹, 陈季旺^{1,2*}, 陈俊杰¹, 廖鄂^{1,2}, 程水源², 夏文水^{1,3*}

(1. 武汉轻工大学食品科学与工程学院, 湖北 武汉 430023;

2. 武汉轻工大学, 国家富硒农产品加工技术研发专业中心, 湖北 武汉 430023;

3. 江南大学食品学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 为延长冷藏富硒虹鳟的货架期, 实验以 3 种浓度的竹叶抗氧化物溶液 (AOBS, 质量浓度分别为 0.5%、1.0% 和 1.5%) 分别浸泡富硒虹鳟鱼块, 再进行乳清分离蛋白溶液 (WPIS) 涂膜, (25±1) °C 下鼓风吹干表面水后置于 4 °C 冰箱贮藏 1、4、7、10 和 13 d, 测定鱼块的 pH 值、TVB-N 值、K 值、菌落总数和嗜冷菌数、结合水分含量和水分状态, 分析涂膜对冷藏富硒虹鳟鱼块品质的影响。结果显示, 随着冷藏时间的延长, 鱼块的 pH 值、TVB-N 值、K 值、菌落总数和嗜冷菌数显著增加, 水分含量显著降低, 结合水和不易流动水向自由水迁移。其中, 1.0% AOBS+WPIS 组的 pH 值、TVB-N 值、K 值、菌落总数和嗜冷菌数的增加速率和水分含量的减少速率最慢, 结合水与不易流动水的比例最高。1.0% 竹叶抗氧化物浸泡结合乳清分离蛋白涂膜, 提升了乳清分离蛋白涂膜的保鲜效果, 可有效抑制富硒虹鳟冷藏过程中品质的劣变, 延长货架期。根据 TVB-N 值、K 值和菌落总数, 1.0% AOBS+WPIS 组可延长富硒虹鳟货架期 3 d。本研究可以为富硒虹鳟的低温贮藏技术提供科学指导。

关键词: 虹鳟; 富硒; 涂膜; 品质; 竹叶抗氧化物; 乳清分离蛋白

中图分类号: TS 254.4

文献标志码: A

虹鳟 (*Oncorhynchus mykiss*) 是一种鲑属冷水性鱼类, 是 FAO 向世界推广的品质优良的四大淡水鱼种之一, 2019 年全国淡水养殖鲑类达到 1 955 t, 仍然无法满足市场需求^[1-2]。虹鳟肉质细嫩, 无肌间刺, 蛋白质含量高, 含有丰富的氨基酸、矿物质和不饱和脂肪酸, 其中有“脑黄金”之称的二十碳五烯酸 (EPA) 与二十二碳六烯酸 (DHA) 的总含量占不饱和脂肪酸的 4.58%~13.19%^[3]。

硒是人体生命必需的微量元素, 具有增强机体免疫力、保护肝脏等作用^[4]。富硒虹鳟鱼肉品质好, 硒含量丰富, 有利于人体补硒, 市场前景广阔。富硒虹鳟以生食鱼片受到年轻消费者的喜爱, 为避免冻藏时冰晶对鱼肉品质的影响, 保持鱼肉的口感, 常采用冷藏方式进行运输和贮藏。然而, 冷藏不能完全抑制微生物的生长繁殖和内源酶活性, 在保鲜效果和时间上有一

收稿日期: 2021-05-10 修回日期: 2021-06-13

资助项目: 恩施州科技计划研究与开发项目 (D20190021)

第一作者: 谭玲 (照片), 从事水产品低温保鲜研究, E-mail: 1471371443@qq.com

通信作者: 陈季旺, E-mail: jiwangchen1970@126.com; 夏文水, E-mail: Xiaws@jiangnan.edu.cn



定局限性^[5-6]。因此,如何有效地延长冷藏富硒虹鳟的货架期,引起了人们的关注。

涂膜处理是用天然生物高分子为基料,添加抑菌剂、抗氧化剂、增塑剂等辅助成分制成的可食用的溶液浸泡食品,待表面形成薄膜后即可起到防止微生物污染和食品变质的作用^[7]。Liu等^[8]研究了脱乙酰壳聚糖(FDCH)涂膜结合曲酸(KA)和丁香精油(CEO)对凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)品质的影响,结果显示,1.0% FDCH结合0.25%的KA和CEO涂膜显著抑制了虾肉中好氧菌总数、TVB-N值和pH值的增加,KA和CEO提高了FDCH涂膜的保鲜效果。Bazargani-Gilani等^[9]研究了添加白藜芦醇的海藻酸钠涂膜对冷藏虹鳟鱼片货架期的影响,结果显示白藜芦醇提高了海藻酸钠涂膜的保鲜效果,同时对鱼肉感官品质未产生负面影响。目前,以壳聚糖、海藻酸盐等作为可食涂膜的基质,结合植物的精油或提取物制备可食用涂膜,虽然已证实对延长水产品的货架期有积极作用,但存在无法使用的问题,主要是受到国家标准GB 2760—2014的限制^[6,10]。因此,在满足现有国家标准要求下开发可食用涂膜尤为重要。

乳清分离蛋白是干酪生产过程中的副产物,本身就是一种食品,具有良好的凝胶性和成膜性^[11]。竹叶抗氧化物是国家标准GB 2760—2014^[10]中唯一允许在水产品及其制品(包括鲜水产)中使用的食品添加剂。目前,竹叶抗氧化物结合流化冰、稳定态二氧化氯、气调包装和壳聚糖等,已证实对延长水产品及其制品的货架期有积极的作用^[12-15]。竹叶抗氧化物结合乳清分离蛋白溶液(solution of whey protein isolate, WPIS)制备可食用保鲜涂膜液,符合国家标准GB 2760—2014,并具有可食用性,符合目前市场环境^[10]。然而,该保鲜涂膜液用于保持鱼肉品质和延长货架期的研究还未见报道。前期预试验发现,将竹叶抗氧化物添加到WPIS中,当竹叶抗氧化物浓度达到1.5%时,WPIS会快速凝固,无法对鱼块进行涂膜处理。因此,本研究以竹叶抗氧化物溶液(antioxidant solution of bamboo leaves, AOBS)浸泡富硒虹鳟鱼块,再进行乳清分离蛋白涂膜,以pH值、TVB-N值、K值、菌落总数和嗜冷菌数为指标,并结合水分含量和水分状态,分析不同组合的保鲜涂膜液对冷藏富硒虹

鳟鱼块品质的影响,为富硒虹鳟的低温贮藏研究提供科学指导。

1 材料与amp;方法

1.1 实验材料

富硒虹鳟[体质量(1.5±0.25) kg,同一鱼池同一批次]购于恩施州国硒冷水渔业开发有限公司,乳清分离蛋白(蛋白质含量>90%)购于美国Hilmar公司,甘油(食品级,含量≥99.0%)、竹叶抗氧化物(食品级,总黄酮含量≥40%)购于上海源叶生物科技有限公司,甲醇(色谱纯)购于德国默克试剂公司,平板计数琼脂(生物分析)购于海博生物科技有限公司。

1.2 仪器与amp;设备

101-1-BS电热恒温鼓风干燥箱,上海跃进医疗器械厂;GL-20-II高速冷冻离心机,上海安亭科学仪器厂;DELTA-320pH计,梅特勒-托利多国际贸易(上海)有限公司;SW-CJ-2FD超净工作台,苏州净化公司;NMI20-040V-I核磁共振成像分析仪,苏州纽迈分析仪器股份有限公司;Polaris5 C₁₈-A反相色谱柱(250 mm×4.66 mm, 5 μm)、1260 Infinity高效液相色谱仪,安捷伦科技有限公司。

1.3 实验方法

WPIS制备 参照Shokri^[16]和杨坤^[17]的方法,略作修改。将12 g乳清分离蛋白加入100 mL蒸馏水中,磁力搅拌至乳清分离蛋白完全溶解于水中。采用1 mol/L的NaOH溶液调pH值至8,在80℃的水浴中加热20 min,迅速冷却至室温,纱布过滤除去凝固物。然后加入4 g甘油,并磁力搅拌5 min,制得WPIS。

AOBS制备 分别加入0.5、1.0和1.5 g的竹叶抗氧化物于100 mL蒸馏水中,磁力搅拌5 min,使竹叶抗氧化物充分溶解于水中,分别制得0.5%、1.0%和1.5% AOBS。

鱼块样品的制备 将鲜活的富硒虹鳟敲击头部快速致死,去除内脏,冰藏运送至实验室。在实验室去除富硒虹鳟的表皮和鱼骨,富硒虹鳟鱼肉用清水冲洗并沥干,按图1将鱼肉分为头部和尾部两部分,再分别纵向切分成60 mm×20 mm×12 mm的鱼块。将富硒虹鳟鱼块均分为6组,第1组(对照)鱼块用蒸馏水浸泡5 min,

置于灭菌的金属网上, (25±1) °C 自然沥干 50 min; 第 2 组 (AOBS 组) 鱼块用 1.5% AOBS 浸泡 5 min, 沥水 1 min, 二次浸泡 5 min, 置于灭菌的金属网上, (25±1) °C 下自然沥干 50 min; 第 3~6 组 (WPIS 组、0.5% AOBS+WPIS 组、1.0% AOBS+WPIS 组和 1.5% AOBS+WPIS 组) 分别在 0%、0.5%、1.0% 和 1.5% 的 AOBS 中浸泡 5 min, 沥水 1 min, 重复以上操作 1 次。用 WPIS 浸泡 1 min, 沥水 2 min, 再次浸泡 1 min, 置于预先灭菌的金属网上, (25±1) °C 下鼓风 [风速 (2.5±0.5) m/s] 吹 50 min。每组鱼块以 1:5 (W/V, 质量浓度) 的比例浸泡在相应的溶液中。将处理好的鱼块放在聚丙烯塑料托盘中, 每个托盘中头部和尾部鱼肉各 3 块, 并用聚乙烯保鲜膜包裹做好标记, 在 (4±1) °C 下分别贮藏 1、4、7、10 和 13 d。随机抽取鱼块样本, 将头部和尾部鱼块混合均匀并进行分析。

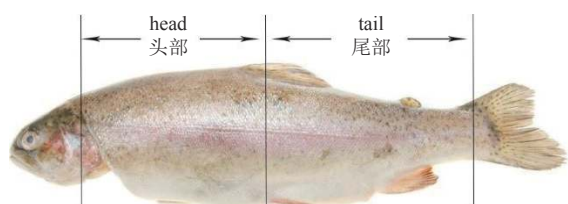


图 1 富硒虹鳟鱼肉分割图

Fig. 1 Cutting diagram of Se-rich *O. mykiss*

感官评价 参照沈秋霞等^[18]的方法稍作修改。选择 9 名感官评分员 (5 男 4 女), 参照富硒虹鳟的感官评分表 (表 1), 对富硒虹鳟鱼块的色泽、气味及组织状态进行评分, 结果取感官评分员评分的平均值。以 10 分为最好, 6 分以上为可接受品质, 6 分以下为不可接受品质。

pH 值 参照国家标准 GB 5009.237—2016《食品安全国家标准 食品中 pH 值的测定》^[19]。

TVB-N 值 参照国家标准 GB 5009.288—2016《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》中半微量定氮法^[20]。

K 值 参照水产行业标准 SC/T 3048—2014《鱼类新鲜度指标 K 值的测定 高效液相色谱法》^[21]。

水分含量 参照国家标准 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中直接干燥法^[22]。

水分状态 核磁共振分析仪于检测前 12 h 打开预热, 使温度稳定在 32 °C, 质子共振频率为 20 MHz。测定时, 取大小为 10 mm×10 mm×10 mm 的正方体鱼块, 平整放入圆柱形玻璃管中, 依次插入探测口中测定。使用 CPMG 序列测定样品, 各参数设定: 探头为 NMI20-040 V-40 mm、SW=200 kHz、RFD=0.002 ms、RG1=20.0、DRG1=3、PRG=2、TE=0.100 ms、Tw=2 500 ms、NECH=8 000、NS=4。测定所得曲线使用 SIRT 方式进行数据反演。

菌落总数 (TVC) 和嗜冷菌数 (TPC) 菌落总数的测定参照 GB 4789.2—2016《食品微生物学检验 菌落总数测定》^[23]。

嗜冷菌数测定的操作步骤同菌落总数, 培养温度为 (7±0.5) °C, 培养 10 d^[24]。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Office Excel 2016 和 SPSS 19.0 软件进行数据分析, 采用 Origin 软件作图, 每次实验重复 3 次, 实验结果以平均值±标准差表示, 数据采用 SPSS 软件进行方差分析 (ANOVA) 和 Duncan 氏检验, 以 $P < 0.05$ 为差异显著, $P > 0.05$ 为差异不显著。

2 结果

2.1 感官评价

6 组鱼块在冷藏期间感官评分均呈下降趋势, 但下降速率有轻微区别 (表 2)。在冷藏 1 d 时, AOBS

表 1 富硒虹鳟的感官评价标准

Tab. 1 Criteria for sensory quality of Se-rich *O. mykiss*

评分 sensory score	色泽 colour	气味 smell	组织状态 textural state
8~10	呈橘红色, 色泽明亮, 白色条纹清晰	具有虹鳟特有的鲜味和香味	肌肉紧实、有弹性, 肉质坚实饱满
6~8	呈橘红色, 颜色较明亮, 纹理可辨	鲜味变淡, 鱼腥味较重	肌肉弹性较差, 肉质较坚实饱满
4~6	呈浅黄色, 无光泽, 纹理模糊	无鲜味, 腥味浓且带不愉快气味	肌肉弹性差, 肉质较松软, 稍微发黏
2~4	呈棕黄色, 色泽发暗	稍有异味, 略带腐臭味	有浑浊液体流出, 肌肉无弹性、松软、发黏

组、WPIS组和AOBS+WPIS组的感官评分均低于对照组,主要原因是AOBS和WPIS分别呈现棕色和乳白色,对鱼块本身的色泽有一定的影响

(图2)。随着AOBS浓度的升高,色泽的改变程度加重,但这种影响在冷藏初期为可接受范围。随冷藏时间的延长,6组鱼块的感官评分均呈下

表2 涂膜对冷藏富硒虹鳟感官品质的影响

Tab. 2 Effect of coating on sensory quality for Se-rich *O. mykiss* during cold storage

时间/d time	组名 group name	色泽 colour	气味 smell	组织状态 textural state	感官评分 sensory score
1	对照	9.33±0.29 ^a	8.50±0.10 ^a	9.50±0.10 ^a	9.11±0.54 ^a
	AOBS	7.00±0.17 ^c	7.67±0.19 ^b	9.67±0.29 ^a	8.11±1.39 ^b
	WPIS	8.57±0.09 ^b	8.67±0.28 ^a	9.83±0.19 ^a	9.02±0.70 ^a
	0.5% AOBS+WPIS	8.37±0.20 ^b	8.83±0.29 ^a	9.67±0.28 ^a	8.96±0.66 ^a
	1.0% AOBS+WPIS	8.33±0.21 ^b	8.67±0.18 ^a	9.67±0.18 ^a	8.89±0.70 ^a
	1.5% AOBS+WPIS	7.17±0.12 ^c	7.83±0.29 ^b	9.67±0.18 ^a	8.22±1.30 ^b
4	对照	8.03±0.29 ^a	6.67±0.29 ^b	7.83±0.29 ^c	7.10±0.78 ^b
	AOBS	6.67±0.58 ^b	6.63±0.38 ^b	8.80±0.10 ^a	7.03±0.66 ^b
	WPIS	7.50±0.50 ^{ab}	6.67±0.58 ^b	8.67±0.18 ^b	7.06±0.12 ^b
	0.5% AOBS+WPIS	7.83±0.58 ^a	7.17±0.29 ^{ab}	9.03±0.18 ^a	7.68±0.45 ^a
	1.0% AOBS+WPIS	8.00±0.50 ^a	7.67±0.58 ^a	9.00±0.08 ^a	7.89±0.19 ^a
	1.5% AOBS+WPIS	7.07±0.29 ^b	6.83±0.29 ^b	8.83±0.29 ^{ab}	7.24±0.52 ^{ab}
7	对照	5.50±0.19 ^c	5.50±0.26 ^c	5.57±0.29 ^c	5.57±0.60 ^c
	AOBS	6.00±0.20 ^b	6.00±0.50 ^{ab}	6.50±0.160 ^a	6.17±0.29 ^b
	WPIS	6.00±0.23 ^b	5.53±0.58 ^b	6.23±0.18 ^b	5.92±0.60 ^b
	0.5% AOBS+WPIS	6.63±0.29 ^a	6.37±0.29 ^a	6.80±0.18 ^a	6.60±0.22 ^a
	1.0% AOBS+WPIS	6.80±0.10 ^a	6.40±0.29 ^a	7.13±0.29 ^a	6.78±0.37 ^a
	1.5% AOBS+WPIS	6.00±0.20 ^b	6.17±0.29 ^b	6.17±0.29 ^b	6.11±0.54 ^b
10	对照	3.40±0.18 ^d	2.10±0.18 ^d	3.63±0.16 ^d	3.04±0.83 ^d
	AOBS	4.83±0.16 ^b	3.50±0.30 ^c	5.17±0.36 ^b	4.50±0.88 ^b
	WPIS	4.12±0.16 ^c	3.83±0.26 ^c	4.03±0.26 ^c	3.99±0.15 ^c
	0.5% AOBS+WPIS	5.67±0.29 ^a	5.33±0.29 ^{ab}	5.83±0.58 ^a	5.61±0.26 ^a
	1.0% AOBS+WPIS	5.80±0.50 ^a	5.67±0.36 ^a	6.23±0.28 ^a	5.90±0.29 ^a
	1.5% AOBS+WPIS	4.50±0.10 ^b	4.83±0.46 ^b	5.00±0.30 ^b	4.78±0.25 ^b
13	对照	2.00±0.29 ^e	2.00±0.00 ^e	2.00±0.00 ^e	2.00±0.00 ^e
	AOBS	2.00±0.00 ^e	2.00±0.00 ^e	2.87±0.29 ^b	2.29±0.50 ^e
	WPIS	2.33±0.29 ^e	2.00±0.00 ^e	2.17±0.29 ^e	2.17±0.17 ^e
	0.5% AOBS+WPIS	2.83±0.26 ^a	3.33±0.29 ^a	3.20±0.29 ^a	3.12±0.26 ^a
	1.0% AOBS+WPIS	3.17±0.29 ^a	3.50±0.10 ^a	3.50±0.50 ^a	3.39±0.19 ^a
	1.5% AOBS+WPIS	2.67±0.18 ^b	2.50±0.18 ^b	2.83±0.29 ^b	2.67±0.17 ^b

注: 同一行数据的不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。AOBS. 竹叶抗氧化物溶液, WPIS. 乳清分离蛋白溶液。下同

Notes: different small letters in each line indicate a statistically significant difference ($P<0.05$). AOBS. antioxidant solution of bamboo leaves, WPIS. solution of whey protein isolate. The same below

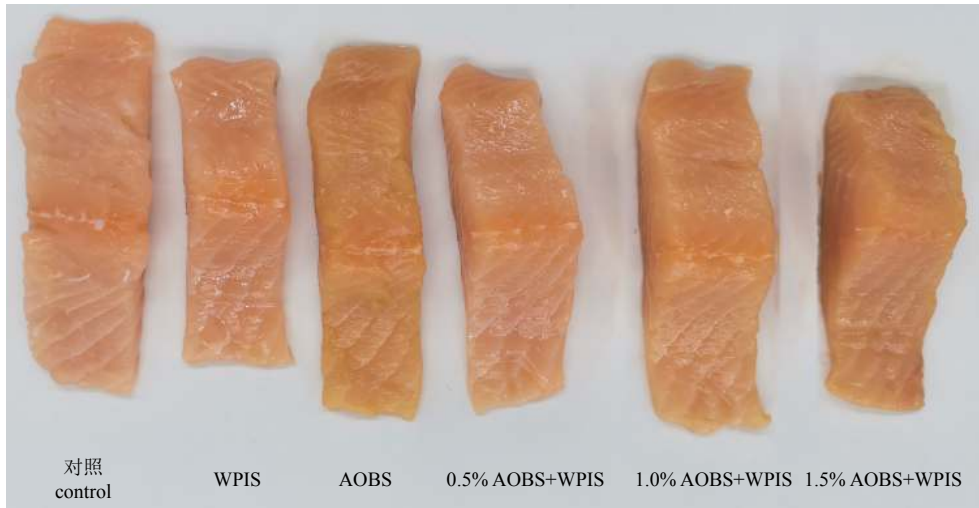


图2 涂膜对富硒虹鲢鱼块外观的影响

Fig. 2 Effect of coating on the appearance of Se-rich *O. mykiss*

降的趋势。在冷藏第7天时, 对照鱼块的颜色已由橘黄色变成浅黄色, 色泽偏暗, 鱼腥味加重, 出现汁液流失现象, 肌肉弹性差、肉质较松软, 对照的感官评分为5.39分, 处于不可接受品质。AOBS组、WPIS组和AOBS+WPIS组鱼块的颜色较明亮, 无明显异味, 肉质较紧实, 品质较好, 感官评分均高于6分, 处于可接受品质。冷藏第10天时, 6组鱼块的感官评分均低于6分, 处于不可接受品质, 但1% AOBS+WPIS组的感官评分仍高于其他组。

2.2 pH 值

6组鱼块在冷藏期间的pH值呈先下降后上升的趋势(图3)。冷藏1d时, 6组鱼块的pH值均在6.6左右, 没有显著性差异($P>0.05$), 说明竹叶抗氧化物浸泡和乳清分离蛋白涂膜均未影响鱼块的初始pH值。冷藏4d时, 6组鱼块的pH值均显著下降($P<0.05$), 这是由于鱼肉内的糖原通过糖酵解途径生成乳酸等物质, 导致pH值下降^[24]。AOBS组在冷藏4d时, pH值下降量最低, 可能是实验过程中取样部位、鱼块浸泡等因素造成的误差。冷藏4d后, 6组鱼块的pH值显著增加($P<0.05$), 这是由于在内源酶和微生物的作用下, 蛋白质等含氮物质不断被降解, 生成氨基酸和含氮碱性物质, 导致pH值上升^[25]。冷藏7d后, AOBS组和WPIS组鱼块的pH值显著低于对照组($P<0.05$)。冷藏13d时, AOBS+WPIS这3组鱼块的pH值低于其他组, 说明竹叶抗氧化物浸泡结合乳清分离蛋白涂膜可有效减缓蛋白质等含氮物质的分解速率, 延长货架期。

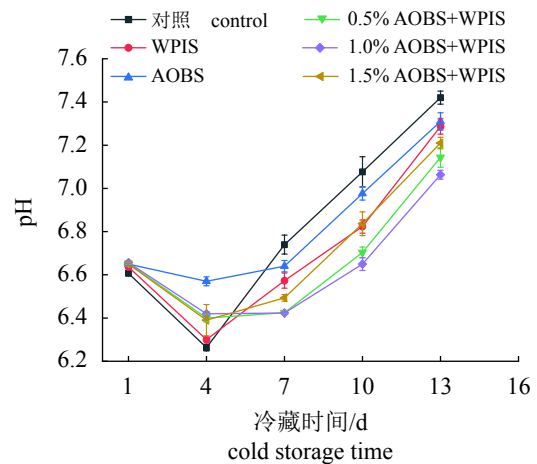


图3 涂膜对冷藏富硒虹鲢pH值的影响

Fig. 3 Effect of coating on pH value for Se-rich *O. mykiss* during cold storage

2.3 TVB-N 值

6组鱼块的TVB-N值随着冷藏时间的延长显著增加($P<0.05$)(图4)。冷藏初期TVB-N值增加相对缓慢, 冷藏后期急速增加, 主要是由于微生物生长繁殖活动加剧, 这与Tokur等^[26]的研究结果一致。冷藏期间, AOBS组和WPIS组的TVB-N值均低于对照组, 说明竹叶抗氧化物浸泡和乳清分离蛋白涂膜均可以降低富硒虹鲢鱼肉TVB-N值。对照组的TVB-N值由冷藏1d时的7.37 mg/100 g显著增加到冷藏13d时的33.21 mg/100 g ($P<0.05$), 但AOBS组和WPIS组的TVB-N值冷藏4d后才显著增加, 1.0% AOBS+WPIS组和1.5% AOBS+WPIS组直到冷藏7d时才显著

增加 ($P<0.05$)。虽然 0.5% AOBS+WPIS 组的 TVB-N 值在冷藏期间持续显著增加, 但 TVB-N 值显著低于对照组 ($P<0.05$)。冷藏 10 d 时, 对照组的 TVB-N 值为 22.75 mg/100 g, 超过国家标准对鱼肉 TVB-N 值设定的上限 (20 mg/100 g), WPIS 组为 19.88 mg/100 g, 非常接近国家标准限量值, 但 AOBS 组和 AOBS+WPIS 这 3 组的 TVB-N 值均低于国家标准限量, 并且 1.0% AOBS+WPIS 组 (10.04 mg/100 g) 显著低于 0.5% AOBS+WPIS 组 (11.15 mg/100 g) 和 1.5% AOBS+WPIS 组 (13.80 mg/100 g), 同时 0.5% AOBS+WPIS 组和 1.5% AOBS+WPIS 组的 TVB-N 值低于 AOBS 组 (14.13 mg/100 g)、WPIS 组 (19.88 mg/100 g) 和对照组 (22.75 mg/100 g)。这说明竹叶抗氧化物浸泡结合乳清分离蛋白涂膜对富硒虹鳟鱼块的 TVB-N 值有显著的抑制作用。冷藏结束时, 0.5% AOBS+WPIS 组和 1.0% AOBS+WPIS 组的 TVB-N 值最低, 其次是 1.5% AOBS+WPIS 组、AOBS 组和 WPIS 组, 对照组的 TVB-N 值最高。0.5% AOBS+WPIS 组和 1.0% AOBS+WPIS 组 TVB-N 值较低, 可能与竹叶抗氧化物的抑菌性能有关。

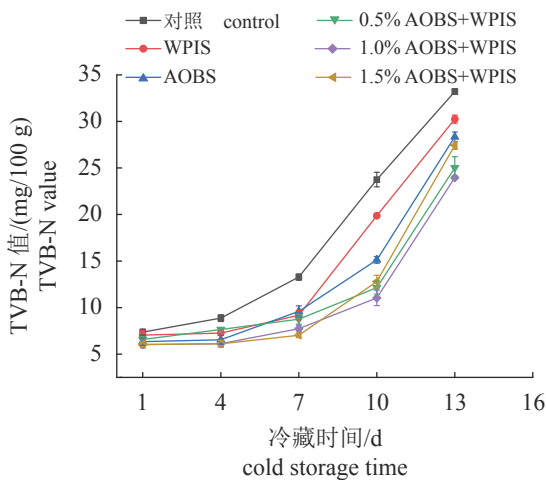


图 4 涂膜对冷藏富硒虹鳟 TVB-N 值的影响

Fig. 4 Effect of coating on TVB-N value for Se-rich *O. mykiss* during cold storage

2.4 K 值

鱼肉的 K 值低于 20% 时被认为处于一级鲜度, 也是生食鱼片的限值, K 值在 20%~40% 为二级鲜度, K 值大于 60% 被认为是处于腐败初期, 不可食用^[27]。冷藏 1 d 时, 6 组鱼块的 K 值为 10.06%~14.63%, 处于一级鲜度范围。随着冷藏时间的延长, 6 组鱼块 K 值显著增加 ($P<0.05$) (图 5)。冷藏

4 d 时, 6 组鱼块的 K 值为 25.92%~37.74%, 处于二级鲜度。冷藏 7 d 时, 对照组鱼块的 K 值为 59.74%, 非常接近腐败限值, 而其他 5 组显著低于对照组 ($P<0.05$)。冷藏 10 d 时, 6 组鱼块的 K 值均超过 60%, 处于腐败状态。冷藏 13 d 时, 对照组的 K 值最高, 其次是 WPIS 组、AOBS 组和 1.5% AOBS+WPIS 组, 0.5% AOBS+WPIS 组和 1.0% AOBS+WPIS 组的 K 值最低。0.5% AOBS+WPIS 组和 1.0% AOBS+WPIS 组无显著性差异 ($P>0.05$), 对 K 值的抑制作用优于其他 4 组。对照组、WPIS 组、AOBS 组、0.5% AOBS+WPIS 组、1.0% AOBS+WPIS 组和 1.5% AOBS+WPIS 组 K 值与冷藏时间呈现线性正相关关系, 线性回归方程分别为 $y=6.306x+11.500$, $R^2=0.978$; $y=6.146x+10.342$, $R^2=0.983$; $y=5.788x+9.644$, $R^2=0.992$; $y=5.356x+7.586$, $R^2=0.988$; $y=5.572x+5.194$, $R^2=0.993$; $y=5.779x+6.405$, $R^2=0.988$ 。以 K 值大于 60% 作为鱼块腐败评判标准, 对照组、0.5% AOBS+WPIS 组、1.0% AOBS+WPIS 组和 1.5% AOBS+WPIS 组货架期分别为 7、9.7、9.8 和 9.3 d, AOBS+WPIS 这 3 组的货架期较对照组可以延长 2~3 d。

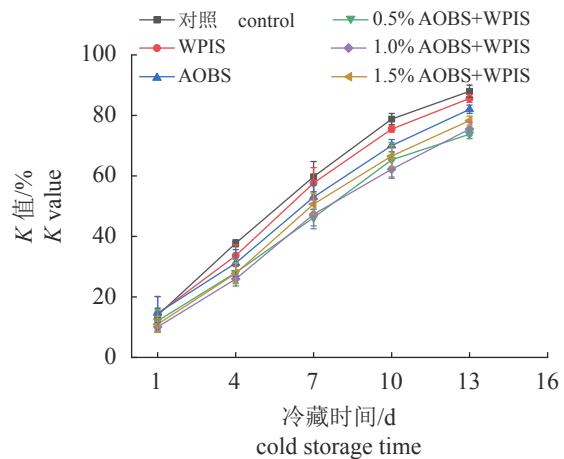


图 5 涂膜对冷藏富硒虹鳟 K 值的影响

Fig. 5 Effect of coating on K value for Se-rich *O. mykiss* during cold storage

2.5 水分含量

冷藏初期, 6 组鱼块的水分含量均为 79.00% 左右, 说明富硒虹鳟是一种含水量较高的鱼类 (图 6)。随着冷藏时间的延长, 6 组鱼块水分含量均显著下降 ($P<0.05$), 其中 1.0% AOBS+WPIS 组的鱼块水分含量下降速率最慢, 水分含量最高。这是因为竹叶抗氧化物具有抑菌作用, 抑

制了微生物对鱼肉组织结构的破坏, 延缓了鱼肉汁液流失。同时, WPIS 在鱼块表面形成一层薄膜, 可延缓鱼肉水分的损失。冷藏 13 d 时, 1.5% AOBS+WPIS 组水分损失量(3.17%) 高于 1.0% AOBS+WPIS 组(2.26%), 可能是高浓度的竹叶抗氧化物对乳清分离蛋白膜结构产生了消极影响, 降低了保水性。

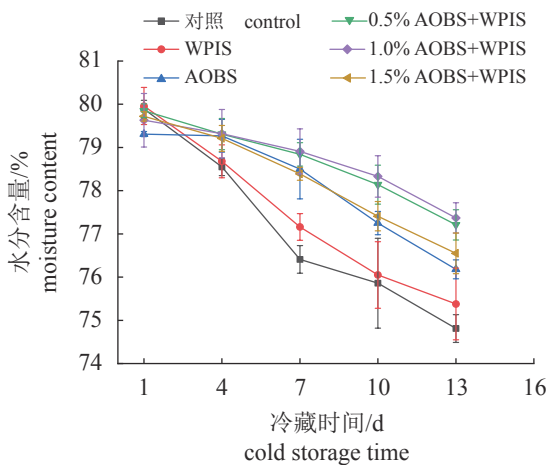


图 6 涂膜对冷藏富硒虹鳟水分含量的影响

Fig. 6 Effect of coating on moisture content for Se-rich *O. mykiss* during cold storage

2.6 水分状态

在低场核磁的研究中, 质子弛豫用弛豫时间常量 T_1 (纵向) 和 T_2 (横向) 来表示。横向弛豫时间 T_2 更能准确区分样品中不同状态的水分, 因此食品中弛豫时间多用横向弛豫时间 T_2 表示^[28]。根据 T_2 曲线的波峰位置可判断出鱼肉中水的存在状态, 鱼块 T_2 曲线分布图显示出 4 组不同的峰, 由左到右分别为结合水 T_{21} (0.1~10 ms, 占比少于 10%), 不易流动水 T_{22} (10~100 ms, 富硒虹鳟鱼肉肌原纤维内及间隙的水(图 7, 所占比例最大), 自由水 T_{23} (100~1 000 ms, 肌原纤维束以外的水, 占比少于 2%)^[29-30]。其中结合水 T_{21} 又分为强结合水 T_{21a} (0~0.1 ms, 与氨基和羧基结合的单分子层水) 和弱结合水 T_{21b} (0.1~10.0 ms, 与蛋白质中酰胺基等基团结合的多分子层水)。3 种状态水所占比例由大到小依次为不易流动水、结合水和自由水。

T_{21a} 和 T_{21b} 所占水分信号总量较低, 分别在 4.2% 和 5.6% 左右(图 8)。在冷藏过程中, 6 组鱼块中 T_{21a} 水分含量略有上升, 而 T_{21b} 略有下降。由于强结合水与蛋白质结合的氢键非常牢固、

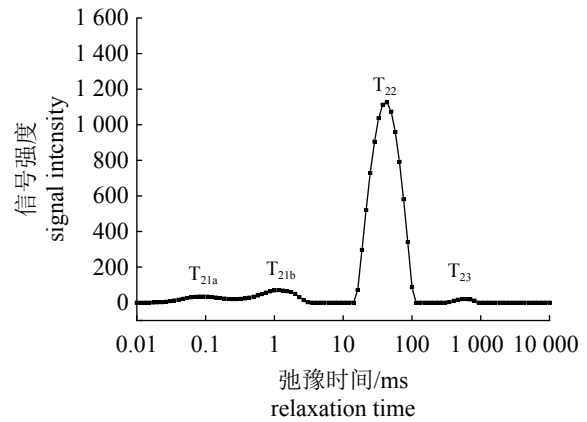


图 7 富硒虹鳟 T_2 曲线分布图

Fig. 7 T_2 fitting curve of Se-rich *O. mykiss*

结构稳定, 难以被拆开, 因此 T_{21a} 水分含量略有上升可能与鱼块冷藏过程中总水分含量减少有关^[31]; T_{21b} 水分含量略有下降可能是冷藏过程中鱼肉发生自溶, 蛋白质被降解, 导致部分弱结合水游离, 转化成其他状态的水^[32]。冷藏 1 d 时, 6 组鱼块中 T_{22} 水分含量在 89% 左右, 占比最大, 说明不易流动水比结合水和自由水对鱼肉品质的影响要大(图 8-c, d)。冷藏期间, 6 组鱼块的 T_{22} 水分含量均呈下降趋势, 而 T_{23} 水分含量的变化趋势与之相反。这可能是在内源酶和微生物的作用下, 鱼肉的肌原纤维结构被破坏, 对水的结合能力降低, 不易流动水向自由水转化, 导致不易流动水含量逐渐降低, 自由水含量逐渐升高^[33]。冷藏 13 d 时, 对照组、WPIS 组、AOBS 组、0.5% AOBS+WPIS 组、1.0% AOBS+WPIS 组和 1.5% AOBS+WPIS 组的 T_{22} 水分含量相比第 1 天分别下降了 5.31%、3.40%、4.87%、2.28%、2.63% 和 3.16%; T_{23} 水分含量相比第 1 天分别增加了 5.76%、3.72%、5.10%、2.48%、2.94% 和 3.13%, 6 组鱼块中 T_{23} 水分的增加量大于 T_{22} 水分的减少量, 说明冷藏期间少量的结合水转化成自由水。6 组鱼块中 0.5% AOBS+WPIS 组、1.0% AOBS+WPIS 组的 T_{22} 水分含量损失较少, 说明 0.5% AOBS+WPIS 组和 1.0% AOBS+WPIS 组对保持鱼块水分状态的效果要优于其他 4 组。

2.7 TVC 和 TPC

6 组鱼块的 TVC 和 TPC 在冷藏期间均呈上升趋势, 其中对照组微生物的增加速率比其他组快。冷藏初期, TVC 和 TPC 上升缓慢, 这是由于大量微生物处于适应期, 生长繁殖较为缓

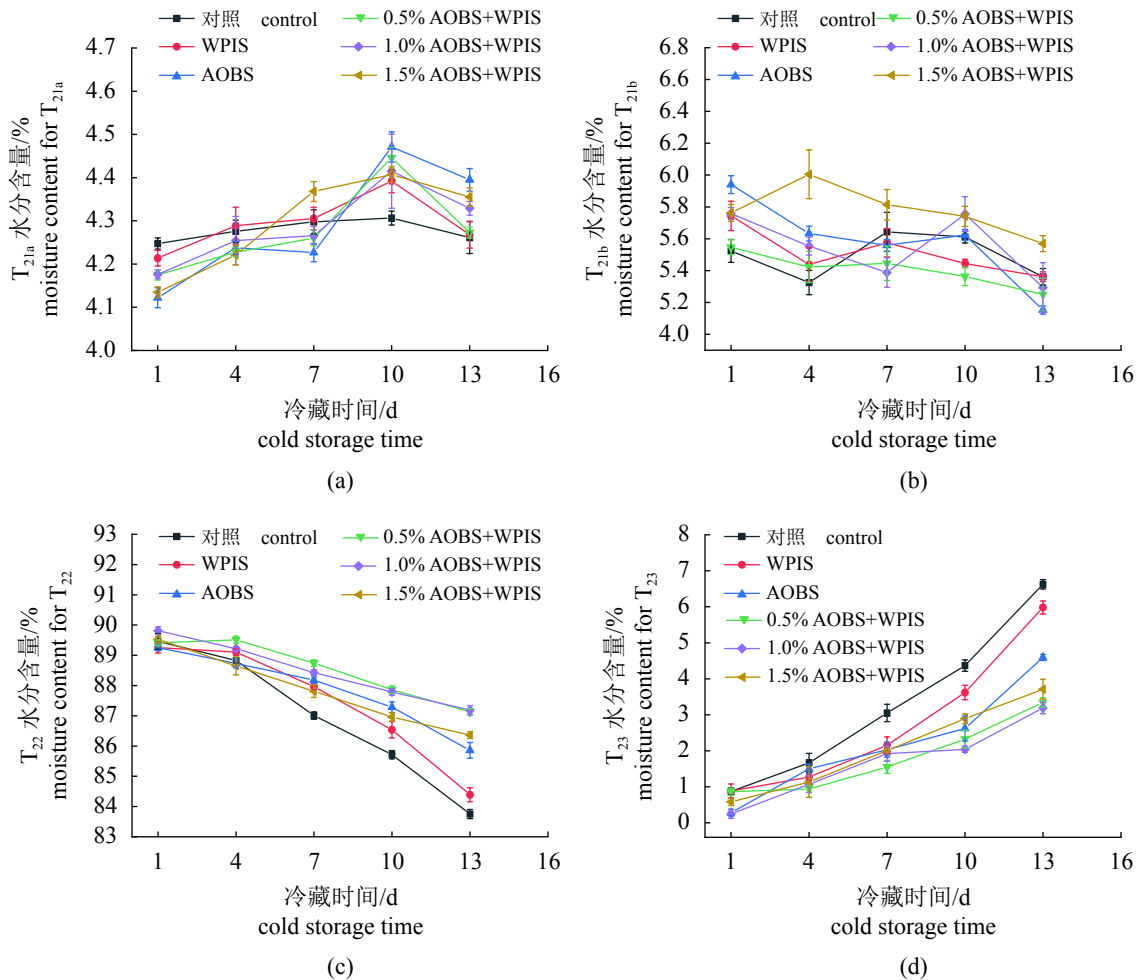


图 8 涂膜对富硒虹鳟水分状态的影响

Fig. 8 Effect of coating on moisture status for Se-rich *O. mykiss* during cold storage

慢(表 3, 表 4)。冷藏 4 d 后, 对照组 TVC 迅速增加, 冷藏 7 d 达到 6.36 lg (CFU/g), 超过淡水鱼最高可接受水平 6.00 lg (CFU/g), 而其他 5 组 TVC 均低于对照组^[34]。这说明竹叶抗氧化物浸泡和乳清分离蛋白涂膜可以抑制微生物的生长繁殖。冷藏 13 d 时, AOBS+WPIS 这 3 组的 TVC 低于对照组、AOBS 组和 WPIS 组, 其中 1.0% AOBS+WPIS 组的 TVC 最低。TPC 的变化与 TVC 类似, 冷藏 13 d 时, 0.5% AOBS+WPIS 组、1.0% AOBS+WPIS 组和 1.5% AOBS+WPIS 组的 TPC 相比对照组分别减少了 1.24、1.41 和 1.04 lg (CFU/g)。对照组、WPIS 组、AOBS 组、0.5% AOBS+WPIS 组、1.0% AOBS+WPIS 组和 1.5% AOBS+WPIS 组的 TVC 与冷藏时间成线性正相关关系, 其回归方程分别为 $y=0.360x+3.819$, $R^2=0.987$; $y=0.349x+3.759$, $R^2=0.987$; $y=0.338x+3.474$, $R^2=0.960$; $y=0.279x+3.489$, $R^2=0.944$; $y=0.268x+3.453$, $R^2=0.960$;

$y=0.311x+3.451$, $R^2=0.961$ 。根据 TVC 评价标准 [6.00 lg (CFU/g)], 对照组、0.5% AOBS+WPIS 组、1.0% AOBS+WPIS 组和 1.5% AOBS+WPIS 组的可食用货架期分别为 6.1、9.0、9.4 和 8.2 d, AOBS+WPIS 这 3 组的货架期较对照组可以延长 2~3 d。

3 讨论

冷藏期间, AOBS 组和 WPIS 组鱼块的 pH 值和 TVB-N 值显著低于对照组 ($P<0.05$), 可能是鱼肉蛋白质降解被乳清分离蛋白膜抑制, 且竹叶抗氧化物具有抗氧化和抑菌作用, 可抑制微生物生长繁殖, 产生的碱性物质更少。Yildiz 等^[35]和庞彩霞^[36]报道了类似的结果。冷藏 13 d 时, AOBS+WPIS 这 3 组鱼块的 pH 值、TVB-N 值、K 值以及 TVC 和 TPC 均低于其他组, 说明竹叶抗氧化物浸泡结合乳清分离蛋白涂膜可有效抑

表3 涂膜对冷藏富硒虹鳟菌落总数的影响
 Tab. 3 Effect of coating on total viable count for Se-rich *O. mykiss* during cold storage lg(CFU/g)

时间/d time	对照 control	WPIS	AOBS	0.5% AOBS+WPIS	1.0% AOBS+WPIS	1.5% AOBS+WPIS
1	4.26±0.07 ^{aA}	4.23±0.03 ^{aA}	3.87±0.13 ^{bA}	3.99±0.18 ^{bA}	3.92±0.10 ^{bA}	3.87±0.09 ^{bA}
4	5.05±0.07 ^{aB}	4.86±0.11 ^{bB}	4.37±0.05 ^{aB}	4.51±0.07 ^{bB}	4.33±0.07 ^{aB}	4.32±0.12 ^{aB}
7	6.36±0.11 ^{aC}	6.31±0.12 ^{aC}	6.13±0.18 ^{aC}	5.10±0.15 ^{cC}	5.32±0.12 ^{cC}	5.68±0.16 ^{cC}
10	7.69±0.13 ^{aD}	7.39±0.15 ^{aD}	7.11±0.09 ^{bD}	6.75±0.13 ^{dD}	6.48±0.08 ^{dD}	6.93±0.17 ^{bD}
13	8.34±0.15 ^{aE}	8.19±0.12 ^{aE}	7.66±0.35 ^{bE}	6.97±0.06 ^{eE}	6.76±0.12 ^{dE}	7.28±0.10 ^{bE}

注: 同一列数据的不同大写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同

Notes: different uppercase letters in each column indicate a statistically significant difference ($P<0.05$). The same below

表4 涂膜对冷藏富硒虹鳟嗜冷菌数的影响
 Tab. 4 Effect of coating on total psychrophilic bacterial count for Se-rich *O. mykiss* during cold storage lg(CFU/g)

时间/d time	对照 control	WPIS	AOBS	0.5% AOBS+WPIS	1.0% AOBS+WPIS	1.5% AOBS+WPIS
1	3.20±0.10 ^{aA}	3.23±0.03 ^{aA}	3.08±0.10 ^{aA}	3.09±0.05 ^{aA}	3.17±0.05 ^{aA}	3.13±0.12 ^{aA}
4	3.95±0.03 ^{aB}	3.85±0.11 ^{abB}	3.44±0.08 ^{bB}	3.60±0.06 ^{bB}	3.42±0.06 ^{bB}	3.34±0.17 ^{aA}
7	5.48±0.11 ^{aC}	5.37±0.10 ^{abC}	5.15±0.10 ^{bC}	4.77±0.25 ^{cC}	4.50±0.12 ^{dC}	4.70±0.05 ^{bB}
10	7.38±0.28 ^{aD}	6.98±0.20 ^{bD}	6.77±0.10 ^{cD}	6.37±0.12 ^{dD}	5.79±0.05 ^{dD}	6.08±0.12 ^{cC}
13	7.93±0.47 ^{aE}	7.77±0.07 ^{aE}	7.56±0.08 ^{bE}	6.69±0.15 ^{eE}	6.52±0.11 ^{dE}	6.89±0.05 ^{cD}

制微生物的生长繁殖并减缓鱼肉蛋白质等含氮物质的分解速率, 延长富硒虹鳟的货架期。Fan等^[37]探究竹叶抗氧化物结合茶多酚对猪肉香肠生物胺积累和脂质氧化影响时发现, 竹叶抗氧化物对微生物生长和肠球菌产生的脱羧酶活性有抑制作用。张晓丽^[13]在探究竹叶抗氧化物抑菌性能时发现, 竹叶抗氧化物对大肠杆菌 (*Escherichia coli*)、枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*) 等细菌有显著的抑制作用, 对霉菌抑制作用稍弱。

1.5% AOBS+WPIS 组冷藏 13 d 的 TVC 高于 0.5% AOBS+WPIS 组和 1.0% AOBS+WPIS 组, 与水分含量和水分状态中 T_{23} 相对含量的结果一致。这可能是较高浓度的竹叶抗氧化物对乳清分离蛋白膜结构产生了消极影响, 降低了保水和抑菌性能。吴春华^[38]研究了壳聚糖-没食子酸衍生物可食膜制备工艺, 结果显示, 没食子酸与壳聚糖质量比为 1:1 时, 可食膜的水蒸气透过率显著低于 10:1 和 2:1。这可能是过多没食子酸的引入, 导致壳聚糖分子内原有的相互作用被破坏, 使得网络结构变得疏松, 通透性提升, 水蒸气透过率变大。此外, 由于没食子酸(羟基含量高)是一种亲水性物质, 在壳聚糖骨架上引入没食子酸会增加其吸水性, 因此没食子酸含

量高的可食膜的水蒸气透过率上升。没食子酸与壳聚糖质量比为 1:1 时, 可食膜的抗氧化和抗菌性能也显著优于 10:1 和 2:1, 主要原因是没食子酸含量的降低, 使壳聚糖-没食子酸衍生物的接枝量增高(接枝量: 单位质量的壳聚糖通过接枝反应引入没食子酸的质量; 接枝: 通过化学反应, 在某些聚合物主链接上结构、组成不同的支链), 衍生物中没食子酸含量增加, 由于没食子酸具有良好的抗氧化和抑菌效果, 致使壳聚糖-没食子酸衍生物可食膜的抗氧化和抑菌性能增强, 本研究结果与其类似。其次, 竹叶抗氧化物含有多酚类物质, 乳清分离蛋白与多酚共价结合后, 多酚羟基的引入可增加乳清分离蛋白膜的亲水性, 亲水性的增加可能增加乳清分离蛋白膜的吸水性, 有利于微生物在乳清分离蛋白膜表面生长繁殖^[39]。

综上所述, 竹叶抗氧化物浸泡结合乳清分离蛋白涂膜, 可有效抑制富硒虹鳟冷藏过程中品质的劣变, 延长货架期, 其中 1.0% AOBS+WPIS 组保鲜效果最好。根据 TVB-N 值、K 值和菌落总数, 1.0% 竹叶抗氧化物浸泡结合乳清分离蛋白涂膜可延长富硒虹鳟货架期 3 d。

参考文献 (References):

- [1] 吴永俊, 王玉涛, 施文正, 等. 不同产地虹鳟鱼肉风味物质的比较[J]. 上海海洋大学学报, 2017, 26(6): 888-899.
Wu Y J, Wang Y T, Shi W Z, *et al.* Comparison of flavor substances of different parts of rainbow trout in different regions[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2017, 26(6): 888-899(in Chinese).
- [2] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 中国渔业统计年鉴 2020[M]. 北京: 中国农业出版社, 2020.
Fisheries and Fisheries Administration Bureau of the Ministry of Agriculture and Rural Areas, National Aquatic Technology Promotion Station, China Society of Fisheries. China Fishery statistical yearbook-2020[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2020 (in Chinese).
- [3] 孙中武, 李超, 尹洪滨, 等. 不同品系虹鳟的肌肉营养成分分析[J]. 营养学报, 2008, 30(3): 298-302.
Sun Z W, Li C, Yin H B, *et al.* Analysis of the nutritional composition in muscle of five varieties of *Oncorhynchus mykiss*[J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2008, 30(3): 298-302(in Chinese).
- [4] 袁丽君, 袁林喜, 尹雪斌, 等. 硒的生理功能、摄入现状与对策研究进展[J]. 生物技术进展, 2016, 6(6): 396-405.
Yuan L J, Yuan L X, Yin X B, *et al.* Physiological function, deficiency and its solutions on selenium: a review[J]. Current Biotechnology, 2016, 6(6): 396-405(in Chinese).
- [5] 阙婷婷, 刘文娟, 陈士国, 等. 水产品低温保鲜技术研究现状[J]. 中国食品学报, 2013, 13(8): 181-189.
Que T T, Liu W J, Chen S G, *et al.* Research progress of low temperature preservation technology in aquatic products[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2013, 13(8): 181-189(in Chinese).
- [6] Yu D W, Regenstein J M, Xia W S. Bio-based edible coatings for the preservation of fishery products: a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 59(3): 2481-2493.
- [7] Tavassoli-Kafrani E, Shekarchizadeh H, Masoudpour-Behabadi M. Development of edible films and coatings from alginates and carrageenans[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 137: 360-374.
- [8] Liu X L, Zhang C H, Liu S C, *et al.* Coating white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) with edible fully deacetylated chitosan incorporated with clove essential oil and kojic acid improves preservation during cold storage[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 162: 1276-1282.
- [9] Bazargani-Gilani B, Pajohi-Alamoti M. The effects of incorporated resveratrol in edible coating based on sodium alginate on the refrigerated trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillets' sensorial and physicochemical features[J]. Food Science and Biotechnology, 2020, 29(2): 207-216.
- [10] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 2760—2014 食品安全国家标准 食品添加剂使用标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015: 1-477.
National Health Commission of the People's Republic of China. GB 2760—2014 Chinese standards for food additives[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015: 1-477 (in Chinese).
- [11] 王耀松. 共价交联对乳清蛋白成膜的影响及作用机理[D]. 无锡: 江南大学, 2012.
Wang Y S. The influence of covalent cross-linking on whey protein film formation and its mode of action[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012 (in Chinese).
- [12] 张皖君, 蓝蔚青, 胡旭敏, 等. 竹叶提取物流化冰与迷迭香提取物流化冰处理对鲈鱼贮藏期间抗氧化活性及微生物作用影响[J]. 中国食品学报, 2020, 20(7): 151-159.
Zhang W J, Lan W Q, Hu X M, *et al.* Effects of antioxidant of bamboo (AOB) slurry ice and rosemary extract (RE) slurry ice on the antioxidant activity and microorganism of *Lateolabrax japonicus* during storage[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(7): 151-159(in Chinese).
- [13] 张晓丽. AOB、稳定态 ClO₂ 对罗非鱼及其制品保鲜效果的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017.
Zhang X L. Effect of AOB and ClO₂: on the quality of tilapia and its products[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017 (in Chinese).
- [14] 王正云, 唐劲松, 祁兴普. 竹叶抗氧化物结合气调包装对鱼丸品质的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 34(23): 319-322.
Wang Z Y, Tang J S, Qi X P. Influence of bamboo leaf antioxidants combined with atmosphere packaging on

- the preservation quality of fish-ball[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2013, 34(23): 319-322(in Chinese).
- [15] Fan W J, Zhang Y K, Pan D, *et al.* Effects of chitosan coating containing antioxidant of bamboo leaves on qualitative properties and shelf life of silver carp during chilled storage[J]. *Czech Journal of Food Sciences*, 2013, 31(5): 451-456.
- [16] Shokri S, Ehsani A. Efficacy of whey protein coating incorporated with lactoperoxidase and α -tocopherol in shelf life extension of Pike-Perch fillets during refrigeration[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 85: 225-231.
- [17] 杨坤. 可食性乳清蛋白膜工艺及复合膜抑菌性研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2009.
- Yang K. Study on the process technique of whey protein based films and antimicrobia properties of the composite films[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2009 (in Chinese).
- [18] 沈秋霞, 李明元, 朱克永, 等. 3种保鲜剂及其复配对虹鳟鱼片冷藏品质的影响[J]. *食品与机械*, 2019, 35(11): 145-151.
- Shen Q X, Li M Y, Zhu K Y, *et al.* Effects of three kinds of preservatives and their complexation on the refrigerated quality of rainbow trout[J]. *Food and Machinery*, 2019, 35(11): 145-151(in Chinese).
- [19] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.237-2016 食品安全国家标准 食品 pH 值的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 1-4.
- National Health Commission of the People's Republic of China. GB 5009.237-2016 National food safety standard, determination of pH value in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017: 1-4 (in Chinese).
- [20] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.228-2016 食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 1-8.
- National Health Commission of the People's Republic of China. GB 5009.228-2016 National food safety standard, determination of TVB-N value in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017: 1-8 (in Chinese).
- [21] 中华人民共和国农业部. SC/T 3048-2014 鱼类鲜度指标 K 值的测定 高效液相色谱法[S]. 北京: 中国农业出版社, 2014: 1-6.
- The Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. SC/T 3048-2014 Determination of K value in fishes- high performance liquid chromatography (HPLC)[S]. Beijing: China Agricultural Publishing House, 2014: 1-6 (in Chinese).
- [22] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.3—2016 食品安全国家标准 食品中水分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 1-13.
- National Health Commission of the People's Republic of China. GB 5009.3—2016 National food safety standard, determination of moisture content in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017: 1-13 (in Chinese).
- [23] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. GB 4789.2—2016 食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 1-5.
- National Health Commission of the People's Republic of China, China Food and Drug Administration. GB 4789.2—2016 National food safety standard, determination of total viable count[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017: 1-5 (in Chinese).
- [24] 张晓颀. 不同贮藏温度结合真空包装对羊肉品质的影响研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2019.
- Zhang X D. The effect of different storage temperatures combined with vacuum packaging on mutton quality during storage[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2019 (in Chinese).
- [25] Ruan C C, Zhang Y M, Sun Y, *et al.* Effect of sodium alginate and carboxymethyl cellulose edible coating with epigallocatechin gallate on quality and shelf life of fresh pork[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 141: 178-184.
- [26] Tokur B K, Sert F, Aksun E T, *et al.* The effect of whey protein isolate coating enriched with thyme essential oils on trout quality at refrigerated storage (4 ± 2 °C)[J]. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 2016, 25(4): 585-596.
- [27] Li J, Feng H L, Liu W, *et al.* Design of a portable electronic nose system and application in K value prediction for large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*)[J]. *Food Analytical Methods*, 2016, 9(10): 2943-2951.
- [28] 蓝蔚青, 孙雨晴, 肖蕾, 等. 冻融循环对大目金枪鱼组织结构与蛋白质特性变化的影响[J/OL]. *食品科学*: 1-

- 12[2021-06-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20200601.1425.058.html>.
- Lan W Q, Sun Y Q, Xiao L, *et al.* Effects of freeze-thaw cycles on the texture structure and protein properties of big-eye tuna (*Thunnus obesus*) [J/OL]. Food Science: 1-12[2021-06-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20200601.1425.058.html>. (in Chinese).
- [29] 袁丽, 纪秀, 石彤, 等. 拉曼光谱法分析凡纳滨对虾冻藏过程蛋白质与水分结构变化[J]. 食品科学, 2016, 37(18): 202-207.
- Yuan L, Ji X, Shi T, *et al.* Protein and water structural changes in whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during frozen storage as revealed by Raman spectroscopy[J]. Food Science, 2016, 37(18): 202-207(in Chinese).
- [30] García A B C, Rodríguez I C, de Ávila Hidalgo D R, *et al.* Water mobility and distribution during dry-fermented sausages “Spanish type” manufacturing and its relationship with physicochemical and textural properties: a low-field NMR study[J]. European Food Research and Technology, 2017, 243(3): 455-466.
- [31] 李敏. 基于低场核磁共振技术的对虾品质信息的快速检测方法研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2018.
- Li M. Research of rapid and non-destructive determination for quality of prawns based on nuclear magnetic resonance technology[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2018 (in Chinese).
- [32] 朱丹实, 吴晓菲, 徐永霞, 等. 微冻保鲜真鲷的水分迁移规律[J]. 中国食品学报, 2015, 15(2): 237-243.
- Zhu D S, Wu X F, Xu Y X, *et al.* Moisture migration of *Pagrosomus major* during partially frozen storage[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15(2): 237-243(in Chinese).
- [33] 蓝蔚青, 巩涛硕, 傅子昕, 等. 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, 2019, 19(8): 179-188.
- Lan W Q, Gong T S, Fu Z X, *et al.* Effect of different plant-source extracts on the water mobility and protein characteristic in pomfret (*Pampus argenteus*) during ice storage[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(8): 179-188(in Chinese).
- [34] Wu L L, Pu H B, Sun D W. Novel techniques for evaluating freshness quality attributes of fish: a review of recent developments[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 83: 259-273.
- [35] Yildiz P Q, Yangilar F. Effects of different whey protein concentrate coating on selected properties of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) during cold storage (4 °C)[J]. International Journal of Food Properties, 2016, 19(9): 2007-2015.
- [36] 庞彩霞. 竹叶抗氧化物对冷藏三文鱼片新鲜度的影响[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(11): 211-215.
- Pang C X. Quality changes of *Salmonida* slices by antioxidant of bamboo-leaf stored at 0 °C[J]. Food Research and Development, 2017, 38(11): 211-215(in Chinese).
- [37] Fan W J, Yi Y W, Zhang Y K, *et al.* Effect of an antioxidant from bamboo leaves combined with tea polyphenol on biogenic amine accumulation and lipid oxidation in pork sausages[J]. Food Science and Biotechnology, 2015, 24(2): 421-426.
- [38] 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 C H. Studies on the molecular modification mechanism of chitosan derivatives and its application in preserving of silver pomfret[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017 (in Chinese).
- [39] 罗舒茵. 乳清蛋白-多酚复合物及壳聚糖-多酚复合物的制备、表征及对乳液油脂体外消化的影响 [D]. 南昌: 南昌大学, 2020.
- Luo S H. Preparation and characterization of whey protein-polyphenol complex and chitosan-polyphenol complex and their effects on the *in vitro* digestion of emulsion oil[D]. Nanchang: Nanchang University, 2020 (in Chinese).

Effects of whey protein isolate coating combined with bamboo leaf antioxidant soaking on quality attributes of Se-rich *Oncorhynchus mykiss* during cold storage

TAN Ling¹, CHEN Jiwang^{1,2*}, CHEN Junjie¹, LIAO E^{1,2}, CHENG Shuiyuan², XIA Wenshui^{1,3*}

(1. College of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;

2. National R & D Center for Se-rich Agricultural Products Processing, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023 China;

3. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: To prolong the shelf life of Se-rich rainbow trout, the fillets of Se-rich *Oncorhynchus mykiss* were respectively immersed into three antioxidant solutions of bamboo leaves (AOBS, 0.5%, 1.0%, and 1.5%), then coated using whey protein isolate solution (WPIS). The fillets coated were stored at 4 °C for 1, 4, 7, 10, and 13 d after the surface moisture was dried. The pH, TVB-N, and *K* values, total viable count (TVC), and total psychrophilic bacterial count (TPC) were measured, as well as moisture content and moisture state, to investigate the effect of coating on quality attributes of Se-rich *O. mykiss* during cold storage. The results showed that as cold storage time prolonged, the pH, TVB-N, and *K* values, TVC, and TPC of fillets significantly increased, while the moisture content significantly decreased ($P < 0.05$). Besides, the bound water/immobilized water was transferred to free water. The pH, TVB-N, and *K* values, TVC, and TPC of fillets for 1.0% AOBS+WPIS group were lower than those for the other groups, as well as the percentage of bound water/immobilized water was transferred to free water, while the moisture content was higher than that of the other groups. These results suggested that the combination of whey protein isolate and antioxidant of bamboo leaves significantly enhanced the fresh-keeping effect of whey protein isolate coating, inhibited the quality deterioration and prolonged the shelf life of Se-rich *O. mykiss*. Furthermore, according to TVB-N and *K* values and TVC, 1.0% AOBS+WPIS group could prolong the shelf life 3 days for Se-rich rainbow trout at cold storage. The results can provide scientific reference for the low-temperature storage of Se-rich *O. mykiss*.

Key words: *Oncorhynchus mykiss*; Se-rich; coating; quality attributes; antioxidant of bamboo leaves; whey protein isolate

Corresponding authors: CHEN Jiwang. E-mail: jiwangchen1970@126.com;

XIA Wenshui. E-mail: Xiaws@jiangnan.edu.cn

Funding project: R & D Project for Enshi Plan of Science and Technology (D20190021)