

冻藏三文鱼鱼肉色泽与其品质相关性分析

陈桂斌¹, 马昊鑫¹, 曾庆¹, 李清¹, 张崑^{1*}

(成都大学肉类加工四川省重点实验室, 四川成都 610106)

摘要: 为了建立快速评价冻藏三文鱼鱼肉综合品质的方法, 该研究测定了冻藏 (-18.0 ℃) 三文鱼鱼肉的色差值、菌落总数、挥发性盐基氮值 (TVB-N)、硫代巴比妥酸值 (TBA)、肌红蛋白含量 (Mb)、感官得分和 pH 值等参数, 并对色差值与其他参数的相关性进行分析, 结果发现, 冻藏 39 d 后三文鱼鱼肉的 TVB-N 达 25.20 mg/100 g, 超过生食限制 (≤ 25 mg/100 g)。冻藏 60 d 后, 三文鱼鱼肉的 L^* 、 a^* 、 b^* 和 C^*_{ab} 分别降低了 30.47%、64.63%、63.29% 和 64.01%, 三文鱼鱼肉的菌落总数为 3.2×10^4 CFU/g, 未超过生食安全限值 (10^5 CFU/g)。冻藏三文鱼鱼肉的 L^* 、 a^* 、 b^* 、 C^*_{ab} 与 TVB-N 和菌落总数等指标均呈显著 ($P < 0.05$) 相关, 其中, L^* 、 a^* 、 b^* 、 C^*_{ab} 与 Mb、感官得分和 pH 呈正相关, 与其他指标呈显著 ($P < 0.05$) 负相关。拟合显著性结果显示, L^* 与 pH 的相关性最低 ($P = 0.04 < 0.05$), a^* 与 TVB-N 相关性最高 ($P = 0.000 < 0.01$)。对具有显著相关性的回归方程进行汇总, 共得到 24 个回归方程。总之, 冻藏 39 d 的三文鱼鱼肉不建议生食, 该研究建立的回归模型, 为评价冻藏三文鱼鱼肉的综合品质提供了理论依据。

关键词: 三文鱼; 品质; 色差; 挥发性盐基氮; 回归方程

文章编号: 1673-9078(2025)09-297-304

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.9.0865

Correlation Analysis between the Color and Quality of Salmon Meat during Frozen Storage

CHEN Guibin¹, MA Haoxin¹, ZENG Qing¹, LI Qing¹, ZHANG Yin^{1*}

(Key Laboratory for Meat Processing in Sichuan Province, Chengdu University, Chengdu 610106, China)

Abstract: In order to establish a method rapid assessment of the comprehensive quality of frozen salmon flesh, various parameters of frozen salmon fillets stored at -18.0 ℃ were measured, including color difference, total number of colonies, volatile basic nitrogen (TVB-N) value, thiobarbituric acid (TBA) value, myoglobin (Mb) content, sensory score and pH value, and the correlations between the color difference value and other parameters were analyzed. Results indicated that the TVB-N of salmon meat reached 25.20 mg/100 g after 39 days of frozen storage, which exceeded the limit for eating raw (≤ 25 mg/100 g). After 60 days of frozen storage, the L^* , a^* , b^* , and C^*_{ab} values of the salmon meat decreased by 30.47%, 64.63%, 63.29% and 64.01%, respectively, and the total number of colonies in salmon meat was 3.2×10^4 CFU/g, which did not exceed the safety limit of 10^5 CFU/g for eating raw. The L^* , a^* , b^* , and C^*_{ab} were significantly correlated with the TVB-N and total number of colonies of the frozen salmon meat ($P < 0.05$), with the L^* , a^* , b^* , and C^*_{ab} values being positively correlated with Mb, sensory score and pH, and negatively correlated with other indexes ($P < 0.05$). The results of

引文格式:

陈桂斌,马昊鑫,曾庆,等.冻藏三文鱼鱼肉色泽与其品质相关性分析[J].现代食品科技,2025,41(9):297-304.

CHEN Guibin, MA Haoxin, ZENG Qing, et al. Correlation analysis between the color and quality of salmon meat during frozen storage [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(9): 297-304.

收稿日期: 2024-06-18; 修回日期: 2024-08-29; 接受日期: 2024-09-08

基金项目: 国家现代农业产业技术体系四川创新团队项目 (scxxt-2025-15)

作者简介: 陈桂斌 (1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 农畜产品加工与保藏, E-mail: 1101822167@qq.com

通讯作者: 张崑 (1981-) 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工与保藏, E-mail: zhangyin@cdu.edu.cn

fitting significance showed that the correlation between L^* and pH was the lowest ($P=0.04<0.05$), whilst a^* had the highest correlation with TVB-N ($P=0.000<0.01$). The regression equations with significant correlation were summarized, and a total of 24 regression equations were obtained. In conclusion, salmon meat frozen for 39 days is not recommended to be eaten raw, and the regression model established in this study provides a theoretical basis for evaluating the comprehensive quality of frozen salmon meat.

Key words: salmon; quality; chromatic aberration; volatile salt basic nitrogen; regression equations

三文鱼 (Salmon), 又称大西洋鲑、挪威鲑, 是一种冷水鱼类^[1], 在我国的四川雅安、新疆尼勒克县等地, 已实现人工规模化养殖。三文鱼鱼肉具有色泽艳丽、肌间刺少且容易剔除、口感细腻又富有弹性等特点, 其肌肉组织中蛋白质含量较高, ω -3 系不饱和脂肪酸含量丰富, 非常适合切片后生食, 经常作为西餐菜肴出现在餐桌上^[2]。但是, 由于三文鱼主要产自高纬度或高海拔的低温水域, 从产地捕捞宰杀后运输到销售市场过程中, 如果不对其进行低温贮藏, 鱼肉容易受外界因素影响而发生腐败变质, 严重影响鱼肉的食用安全性和营养价值。因此, 三文鱼鱼肉的贮藏保鲜技术, 成为影响该产业大规模发展和实现经济效益高增长的关键。为此, 国内外研究人员, 对三文鱼鱼肉的贮藏保鲜技术开展了广泛研究。

Al-Jeddawi 等^[7]通过研究不同冻藏温度 (-7 、 -12 、 -18 、 -29 和 -77 $^{\circ}\text{C}$) 对大西洋三文鱼的品质影响, 得出更低温度冻藏有利于三文鱼鱼肉品质的保持和节能。张德福等^[8]研究发现, 加工方式和储藏温度对三文鱼鱼肉新鲜度的影响较大, 并采用一级动力学模型和 Arrhenius 方程对各项指标进行分析, 建立了准确度较高的预测三文鱼鱼肉货架期的模型。杨虎^[9]基于电子鼻, 开发了一款三文鱼鱼肉新鲜度的检测系统, 对冰鲜三文鱼鱼肉的新鲜度进行识别, 准确率达 97%。但是目前有关冻藏过程中三文鱼鱼肉的色泽与其品质指标相关性的研究较少。为了建立通过色差快速评价三文鱼鱼肉综合品质的方法, 本研究测定了冻藏过程中三文鱼鱼肉的色差、挥发性盐基氮值 (TVB-N)^[10]、硫代巴比妥酸值 (TBA)、菌落总数等参数, 并对鱼肉的色差参数与其他品质指标的相关性进行拟合分析, 以期在三文鱼鱼肉在冻藏条件下的贮藏稳定性和综合品质评价提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

挪威进口三文鱼 (800.0 g), 购于成都市锦江区润大鲜水产品经营部; 亚甲基蓝 (20230812)、甲基红 (20231115) (均为分析纯), 成都市科龙化工试剂厂; 磷酸二氢钾 (20230708), 天津市津东天正精细化学试剂厂; 乙二胺四乙酸二钠 (20231022), 成都市科龙化工试剂厂; 氧化镁 (20230816), 天津市职员化学试剂有限公司; 平板计数琼脂 (20231107), 北京奥博星生物技术有限责任公司。

1.2 主要仪器设备

BCD-649 WDCE 冰箱, 青岛海尔股份有限公司; Tgl-1650 台式冷冻离心机, 四川蜀科仪器有限公司; Mettler-Toledo 电子天平, 梅特勒-托利多仪 (上海) 有限公司; Testo 205 便携式 pH 计, 德图仪 (深圳) 有限公司; SPL-150 恒温培养箱, 天津市莱玻特瑞仪器设备有限公司; HH-W 2 I.600 S 电热恒温水箱, 上海百典仪器设备有限公司; 3 nh 高精度色差仪, 深圳市三恩时科技有限公司; SCIENTZ-11 无菌均质器, 宁波新芝生物科技股份有限公司; 1550 酶标仪, 赛默飞世尔 (上海) 仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品处理

取三文鱼背部两侧肌肉, 去刺、去皮, 分切成块 ($15\text{ mm}\times 15\text{ mm}\times 90\text{ mm}$), 称重后分别装于无菌袋密封, 置于冷冻 ($-18.0\text{ }^{\circ}\text{C}$) 条件下冻藏, 根据实验需要, 在测定前将用无菌袋密封的鱼肉样品置于室温 ($15.0\text{ }^{\circ}\text{C}$) 下, 解冻 60 min 后测定鱼肉的品质指标参数。

表 1 感官评价表
Table 1 The sensory evaluation table

评分	气味	色泽	组织形态	回弹性
优(10~9)	鱼肉本身固有清香，无不良气味	鱼肉本色橙红，色泽明显	纹理清晰，肌肉组织饱满紧密	肌肉弹性极佳，按压凹陷消失，即刻回弹
良(8~6)	固有本香减少，鱼腥味加重，无不良气味	色泽正常，逊色于前一阶段	肌肉较紧实，纹理较清晰	按压可快速回弹
中(5~3)	腥味较重，略带不良气味	颜色略暗淡，肌肉切面有光泽	部分肌肉组织松散，但纹理可辨	按压仍可回弹，但回弹速度较慢
差(2~0)	腐臭等不良气味明显	颜色暗淡，肌肉切面无光泽	肌肉按压即松散，纹理模糊	鱼肉无弹性，凹陷不消失，肌肉不回弹

1.3.2 感官评价

参照田继源^[11]的方法，组建 6 人（年龄 23~26 岁；男女各 3 人）的感官评定小组，并对小组成员进行培训，根据表 1 感官评价，分别对三文鱼鱼肉的气味、色泽、组织形态和肌肉回弹性进行评价和打分，最高 10 分，最低 0 分，综合评分 24 以下为不可接受。

1.3.3 菌落总数

取三文鱼肉样品 5 g，装入盛有 45 mL 的无菌均质袋中，用均质拍打器拍打 2 min，制成 1:10 的样品匀液备用。参照 GB 4789.2-2022^[12]测定菌落总数。

1.3.4 色泽

参照许铭强等^[13]的方法，用色差仪对每个样品 6 个点进行测量。 L^* 表示物体的明亮度（0~100 表示从黑色到白色）， a^* 表示物体的红绿色，“+”表示红色，“-”表示绿色， b^* 表示物体的黄蓝色，“+”表示黄色，“-”表示蓝色。色度值（ C^*_{ab} ）计算公式如下：

$$C^*_{ab} = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \tag{1}$$

1.3.5 pH和挥发性盐基总氮测定

将鱼肉分切成 15 mm×15 mm×15 mm 块，用便手持型 pH 计测定，每组 6 个平行，结果取平均值。挥发性盐基总氮（TVB-N）测定方法参照 GB 5009.228-2016 中半微量定氮法^[14]，每组测试 6 个平行。

1.3.6 肌红蛋白的测定

参照柳艳霞等^[15]方法，称取鱼肉样品 5 g 于烧杯中，加入 25 mL 的磷酸盐缓冲液（PBS，0.04 mol/L，pH 值 6.8），搅拌后在 10 000 r/min 均质 1 min，0 ℃ 下静置 1 h 后，在 4 ℃ 下 12 000 r/min 离心 30 min，用双层滤纸过滤上清液，使用相同 PBS 定容

至 25 mL，所得溶液即为肌红蛋白粗提液。分别在 525、545、565、572 nm 处测定吸光值。肌红蛋白总量（mmol/L）、脱氧肌红蛋白含量（Deoxymyoglobin, DMb）、氧合肌红蛋白含量（Oxymyoglobin, OMb）、高铁肌红蛋白含量（Metmyoglobin, MMb）计算公式如下：

$$B = -0.166A_{572} + 0.086A_{545} + 0.099A_{525} \tag{2}$$

$$B_1 = (0.0369R_1 + 1.140R_2 - 0.941R_3 + 0.015) \times 100\% \tag{3}$$

$$B_2 = (0.882R_1 - 1.267R_2 + 0.809R_3 - 0.361) \times 100\% \tag{4}$$

$$B_3 = (-2.541R_1 + 0.77R_2 + 0.800R_3 + 1.098) \times 100\% \tag{5}$$

式中：

A_{525} 、 A_{545} 、 A_{565} 、 A_{572} ——在 572、545、565、525 处的吸光度；

R_1 ——吸光度比值 A_{572}/A_{525} ；

R_2 ——吸光度比值 A_{565}/A_{525} ；

R_3 ——吸光度比值 A_{545}/A_{525} ；

B ——肌红蛋白总量（Mb），mmol/L；

B_1 ——脱氧肌红蛋白（DMb）含量，%；

B_2 ——氧合肌红蛋白（OMb）含量，%；

B_3 ——高铁肌红蛋白（MMb）含量，%。

1.3.7 硫代巴比妥酸的测定（TBA）

参照蒋凡^[16]的方法，称取 5 g 鱼肉，加入 50 mL 三氯乙酸混合液均质 1 min，置于 50 ℃ 恒温振荡器振摇 30 min，冷却至室温后过滤 2 次。移取 5 mL 滤液至 25 mL 比色管中，加入 5 mL 硫代巴比妥酸水溶液，于 90 ℃ 恒温水浴锅中反应 40 min。将最终溶液分别在 532 nm 和 600 nm 处进行吸光度测定，每组测试 6 个样品，按以下公式进行计算，结果取平均值：

$$D = \frac{A_{532} - A_{600}}{155 \times 10} \times 100\% \tag{6}$$

式中：

D ——硫代巴比妥酸（TBA）含量，%；

A_{532} 、 A_{600} ——在 532、600 处吸光度。

1.3.8 数据处理

采用 SPSS 和 Origin 2024 对数据进行方差和回归分析。

2 结果与分析

2.1 鱼肉色泽

三文鱼鱼肉在冻藏过程中色泽的变化见表 2。在贮藏初期，三文鱼鱼肉的 L^* 、 a^* 、 b^* 和 C^*_{ab} 分别为 58.19、16.88、15.80 和 23.12；但冻藏 60 d 后，三文鱼鱼肉的 L^* 、 a^* 、 b^* 和 C^*_{ab} 分别降低了 30.47%、64.63%、63.29% 和 64.01%。 C^*_{ab} 值越大，表示三文鱼的色彩饱和度越高，越受消费者青睐，商品价值也越高。从表 2 中数据看出， C^*_{ab} 值随着冻藏时间增加，呈现显著 ($P<0.05$) 降低趋势。由此可见，随着冻藏时间增加，三文鱼鱼肉的色泽变差。许铭强等^[13]的研究也发现，三文鱼鱼肉在贮藏期间， L^* 值和 C^*_{ab} 值逐渐降低，且 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的色泽劣变速度慢于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

三文鱼鱼肉中含有虾青素和类胡萝卜素类呈色物质，由于这些物质中不饱和键的数量高，容易因为氧化而使其分子结构破坏，进而导致其含量下降。三文鱼鱼肉在冻藏过程中，在生成冰晶的穿刺作用下，使其天然的肌肉组织破坏，更多的虾青素和类胡萝卜素类物质暴露在空气中，因此更容易遭到氧化破坏。这些因素可能是导致三文鱼鱼肉的色泽，随着冻藏时间的增加而降低的主要原因。

表 2 三文鱼鱼肉的色差值				
Table 2 The chromatic aberration change table				
时间 /d	L^*	a^*	b^*	C^*_{ab}
0	58.19 ± 0.17 ^a	16.88 ± 0.21 ^a	15.80 ± 0.04 ^a	23.12 ± 0.11 ^a
6	56.32 ± 0.45 ^b	15.88 ± 0.18 ^b	14.66 ± 0.50 ^b	21.61 ± 0.24 ^b
12	53.39 ± 1.02 ^c	14.31 ± 0.09 ^c	13.40 ± 0.38 ^c	19.60 ± 0.57 ^c
18	50.99 ± 0.25 ^d	13.25 ± 0.65 ^d	12.82 ± 0.88 ^d	18.44 ± 0.67 ^d
24	48.28 ± 0.07 ^e	12.59 ± 0.37 ^e	12.31 ± 0.93 ^e	17.61 ± 0.85 ^e
30	47.45 ± 0.28 ^f	11.46 ± 0.48 ^f	11.69 ± 0.55 ^f	16.37 ± 0.09 ^f
36	46.02 ± 0.36 ^g	10.10 ± 0.04 ^g	10.19 ± 0.71 ^g	14.35 ± 0.27 ^g
42	44.91 ± 0.05 ^h	8.82 ± 0.11 ^h	8.73 ± 0.03 ^h	12.41 ± 0.35 ^h
48	43.45 ± 0.41 ⁱ	8.02 ± 0.33 ⁱ	8.01 ± 0.34 ⁱ	11.33 ± 0.61 ⁱ
54	42.24 ± 0.58 ^j	7.09 ± 0.85 ^j	7.14 ± 0.08 ^j	10.06 ± 0.24 ^j
60	40.46 ± 0.14 ^k	5.97 ± 0.44 ^k	5.80 ± 0.46 ^k	8.32 ± 0.04 ^k

注：表中数值后面的小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

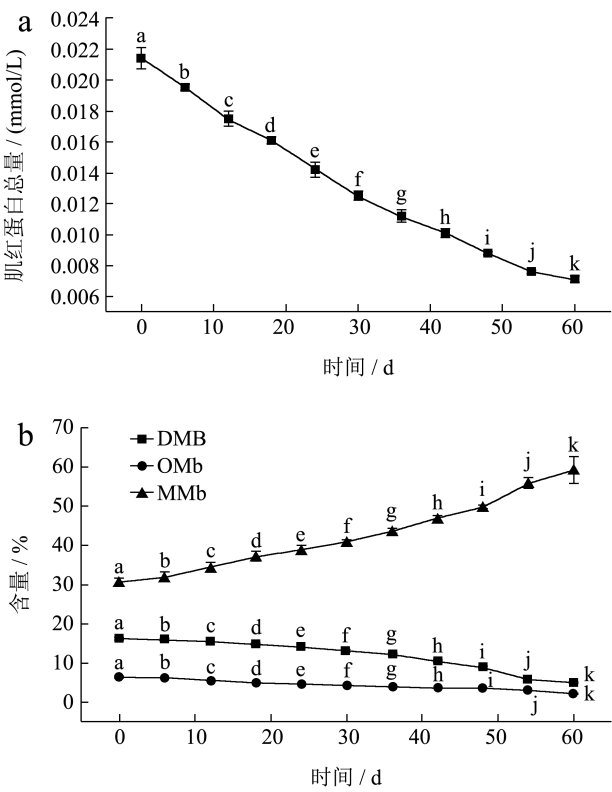


图 1 肌红蛋白含量的变化
Fig.1 Changes in the myoglobin

注：图中误差线上的小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)，下同。

2.2 肌红蛋白含量的变化

三文鱼鱼肉贮藏过程中，肌红蛋白总量（图 1a）及三种肌红蛋白（OMb、DMb、MMb）含量（图 1b）变化结果显示，在冻藏初期，OMb、DMb、MMb 的占比分别为 16.29%、6.33%、30.59%；随着冻藏时间增加，三文鱼鱼肉中肌红蛋白总量呈现显著 ($P<0.05$) 下降趋势；高铁肌红蛋白（MMb）的含量呈现显著 ($P<0.05$) 上升趋势；脱氧肌红蛋白（DMb）和氧合肌红蛋白（OMb）均呈现显著 ($P<0.05$) 下降趋势。贮藏末期，OMb、DMb、MMb 分别是 4.89%、2.15%、59.11%，其变化与 2.1 中鱼肉的 a^* 和 b^* 值变化趋势一致。

鱼肉在宰杀后，血红蛋白大量损失，肌红蛋白成为肉品呈现红色的主要原因，肌红蛋白含量越高，肉色红度值 (a^*) 越大，而肌红蛋白一般以 OMb、DMb 和 MMb 三种形式存在^[17]。在贮藏前期，肌红蛋白主要以 OMb 与 DMb 形态呈现，随着贮藏时间推移，肌红蛋白分解产生血红素和 Fe^{3+} ，OMb 逐渐被氧化成 MMb，并不断堆积。这可能是随着冻藏时间增加，鱼肉中肌红蛋白总量、OMb、DMb 呈

下降趋势,而MMb呈上升趋势的主要原因。肌红蛋白总量、OMb、DMb和MMb含量的变化,可能进而导致肉的亮度(L^*)和饱和度(C^*_{ab})下降。肌红蛋白与肉色变化^[18]的研究中也认为肌肉呈现褐色是OMb氧化成MMb导致的。

2.3 pH值

pH值是辨识食品腐败变质程度的重要参考因素,因为食品在可食用期有特定的氢离子浓度范围,随着贮藏时间增加,微生物会大量繁殖,导致肉的pH发生变化。三文鱼鱼肉在冷冻贮藏期间pH值变化见图2。图中数据显示,三文鱼鱼肉的pH值,在冻藏18d时由初期的6.29显著($P<0.05$)降至5.96,随后显著($P<0.05$)上升至6.71,高于贮藏初期的6.29,总体呈现先降后增的变化趋势。丁婷^[20]在0℃条件贮藏三文鱼片,研究发现第12天时,三文鱼片的pH降至6.70,随后又呈上升趋势。

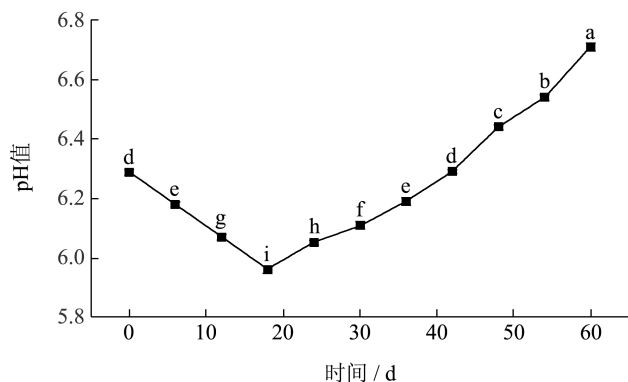


图2 pH值的变化

Fig.2 Changes of pH value

三文鱼在宰杀后,肌肉中的糖原降解会产生大量乳酸及丙酮酸^[21]等物质,同时在产酸微生物和ATP酶作用下,造成大量酸性物质积聚,这些因素可能是导致三文鱼肉的pH值在冻藏18d内显著降低的主要原因。在冻藏后期,随着鱼肉中的脂肪氧化产生羟基化合物,蛋白质在微生物的作用下分解产生氨基酸、硫化氢等含氮碱性化合物^[22],这些物质部分中和了前期积聚的酸性物质,这可能是导致其pH值逐渐上升的主要原因。丁婷认为是前期乳酸菌大量繁殖,致使乳酸堆积,pH呈下降趋势。

2.4 TVB-N值

三文鱼鱼肉的挥发性盐基氮(TVB-N)值变化如图3。根据《鲜海水鱼通则》规定,鲜海水鱼

TVB-N ≤ 15 mg/100 g为优级品,TVB-N ≤ 30 mg/100 g为合格品。图中数据显示,在三文鱼鱼肉的贮藏过程中,TVB-N值持续增加,第15d时,鱼肉样品已经超过优质品限定值,为15.63 mg/100 g;到39d时达25.20 mg/100 g,超过生食限制(≤ 25 mg/100 g)^[23];贮藏至54d时,TVB-N值为31.03 mg/100 g,超出国标规定。因此,生食三文鱼鱼肉在-18.0℃的最长贮藏时间不宜超过39d。温度波动对冻藏三文鱼品质的影响^[11]研究发现-18℃条件下贮藏三文鱼,其TVB-N值显著提高,还发现增长速度快于-50℃。

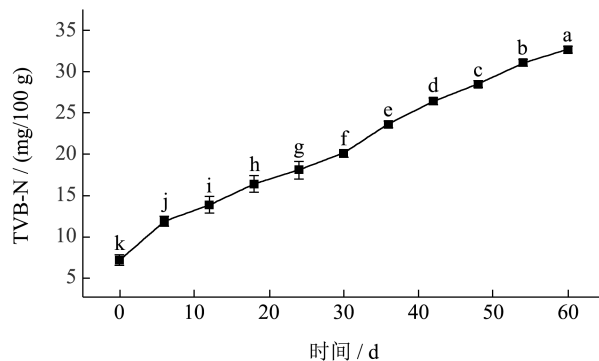


图3 TVB-N值的变化

Fig.3 Changes of TVB-N value

挥发性盐基氮(TVB-N)是衡量食品腐败变质的重要指标,经常被用于评估水产品的贮藏品质和货架期。GB 2733-2015中规定,海水鱼虾类水产品的挥发性盐基氮含量应不超过30 mg/100 g^[23]。三文鱼肉TVB-N值的变化受多方面因素影响,其主要原因是内源酶对含氮化合物的催化,以及微生物的增殖,对鱼肉内蛋白质和脂肪的代谢分解,生成有氨、胺类及其他碱性含氮物质,这些物质累积,可能导致贮藏期间TVB-N值不断增大。此外,含氮物质积累也是鱼肉气味恶化的原因之一。田继源^[11]也认为冻藏后期鱼肉在酶和细菌作用下,使蛋白质分解产生氨及胺类等碱性含氮物质越来越多,使TVB-N值越来越大。

2.5 TBA值

TBA值主要是用于描述食品脂质氧化程度的指标。当油脂发生氧化反应时会产生丙二醛,丙二醛能够与硫代巴比妥酸发生反应而使其颜色呈现红色,丙二醛浓度越高则TBA值越大。图4为三文鱼鱼肉在冻藏期间的TBA值,图中数据显示,三文鱼鱼肉的TBA值随着冻藏时间的延长逐渐升

高,第0天的TBA值为0.018 mg/kg,第60天的TBA值为0.298 mg/kg,是贮藏初期的16倍。这与MMb、TVB-N值的变化趋势一致。

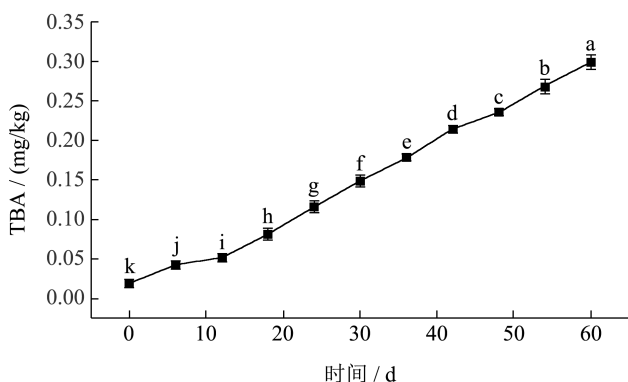


图4 TBA值的变化

Fig.4 Changes of TBA value

三文鱼鱼肉不仅富含蛋白质,还含有丰富的不饱和脂肪酸,而不饱和脂肪酸具有高氧化敏感性,双键结构极易被氧化,会产生脂肪酸、醛等物质。冷冻贮藏产生的冰晶会使鱼肉天然结构遭到破坏,进而会导致肌肉中脂肪成分被氧化几率提高。这可能是在冻藏过程中,三文鱼鱼肉的TBA值随着冻藏时间增加而升高的主要原因。但贮藏期内,TBA值始终保持较低的水平,可能是低温抑制了脂质的氧化所致。薛瑾^[24]研究也发现随着储藏时间增加,TBA含量呈上升趋势,冷藏至第8天时,三文鱼TBA值增加至初始值的7.69倍,而三文鱼中不饱和脂肪酸和氧气反应是呈现此变化的主要原因。

2.6 菌落总数的变化

三文鱼鱼肉的菌落总数(图5)在整个冷冻储存期间,随时间延长而持续缓慢增长,第0天时,新鲜三文鱼的初始菌落总数为 6.0×10^3 CFU/g,第60天时,鱼肉菌落总数为 3.2×10^4 CFU/g,未超过生食三文鱼安全限值(10^5 CFU/g),其变化与TVB-N和TBA趋势一致。但在第39天时,TVB-N值已经超过三文鱼生食的限定范围,因此即使在冻藏39 d后三文鱼鱼肉的微生物总量不超标情况下,也不建议生食。胡云峰等^[26]通过研究发现,鱼肉样品的菌落总数呈不断上升趋势。

三文鱼鱼肉在整个贮藏期间,尽管鱼肉的菌落

总数随着冻藏时间增加而呈现上升趋势,但是在冻藏末期,鱼肉的菌落总数仍然符合生食要求。这可能是因为三文鱼在宰杀后,受到环境微生物污染较小,加上低温冻藏能很好地抑制微生物的生长繁殖,进而导致鱼肉中微生物总量在整个冻藏期间保持在安全限制以内。董浩等^[26]在研究中发现,与 -18°C 相比, -60°C 环境中菌落总数维持在一个更低的水平,说明温度越低,对微生物的生命活动抑制作用更显著。

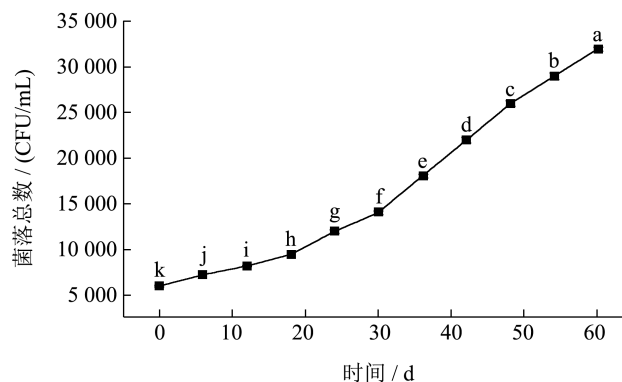


图5 菌落总数的变化

Fig.5 Changes in total mesophilic bacteria count

2.7 感官评价

感官评价是应用最广泛和最直接的食品品质评价方法,可以直接体现出消费者对食品的接受程度^[26]。图6为三文鱼鱼肉的感官评价结果。在整个冻藏过程中,鱼肉的综合评分在30.17~39.75之间,最低未超过24分。在第54天时,有评定成员认为腥味加剧。由感官评分可知,随着储藏时间的延长,鱼肉的感官品质呈降低趋势。

在三文鱼鱼肉冻藏过程中,鱼肉的综合评分和菌落总数、TVB-N值、TBA值变化趋势一致,均随着冻藏时间的增加而增加。菌落总数的增加会导致微生物的代谢产物在鱼肉中蓄积,TVB-N值的增加说明鱼肉的新鲜度降低,TBA值的增加说明鱼肉中脂肪氧化程度升高。这些因素,可能是导致三文鱼鱼肉的感官评分降低的主要原因。王硕等^[24]在研究中发现,鱼肉中微生物和化学变化改变了蛋白质和脂质等特性,从而影响气味、色泽、肉质和组织弹性,最终导致感官评分随着贮藏时间的延长均呈下降趋势。

表 3 三文鱼肉的色差值与各指标之间的相关性

项目	TVB-N/(mg/100 g)	菌落总/(CFU/g)	pH 值	高铁肌红蛋白 MMb	TBA/(mg/kg)	感官评价
与 L^* 的相关性	-0.983**	-0.937**	-0.609*	-0.954**	-0.974**	0.988**
与 a^* 的相关性	-0.997**	-0.976**	-0.704*	-0.982**	-0.993**	0.996**
与 b^* 的相关性	-0.995**	-0.986**	-0.747**	-0.989**	-0.992**	0.990**
与 C^*_{ab} 的相关性	-0.997**	-0.982**	-0.725*	-0.986**	-0.994**	0.994**

注: C^*_{ab} 表示色度值; “—” 表示负相关; ** 表示极显著, $P<0.01$; * 表示显著, $P<0.05$; 表 4 同。

表 4 色差值与各指标之间的模型

项目	TVB-N/(mg/100 g)	菌落总数/(CFU/g)	pH	高铁肌红蛋白 MMb	TBA/(mg/kg)	感官评价
L^*	$y=-1.414\ 9x+89.211$	$y=-1\ 504.3x+89\ 419$	$y=0.024\ 1x+7.423$	$y=-1.551\ 5x+117.62$	$y=-0.016\ 2x+0.934\ 2$	$y=0.539\ 4x+8.913\ 4$
	$R^2=0.967\ 1$	$R^2=0.878\ 6$	$R^2=0.374\ 3$	$R^2=0.910\ 1$	$R^2=0.948\ 9$	$R^2=0.976\ 7$
	$P<0.01$	$P<0.01$	$P<0.05$	$P<0.01$	$P<0.01$	$P<0.01$
a^*	$y=-2.291\ 2x+46.726$	$y=-2\ 501.8x+44\ 996$	$y=-0.044\ 5x+6.760\ 2$	$y=-2.548\ 5x+71.439$	$y=-0.026\ 4x+0.448\ 8$	$y=0.847\ 9x+25.174$
	$R^2=0.994\ 3$	$R^2=0.952\ 9$	$R^2=0.500\ 1$	$R^2=0.963\ 7$	$R^2=0.986\ 8$	$R^2=0.991\ 4$
	$P<0.01$	$P<0.01$	$P<0.05$	$P<0.01$	$P<0.01$	$P<0.01$
b^*	$y=-2.561\ 4x+48.896$	$y=-2\ 833.2x+47\ 763$	$y=-0.053x+6.837\ 2$	$y=-2.876\ 2x+74.149$	$y=-0.029\ 6x+0.474\ 1$	$y=0.967\ 4x+24.383$
	$R^2=0.989\ 5$	$R^2=0.973$	$R^2=0.563\ 1$	$R^2=0.977\ 3$	$R^2=0.983\ 3$	$R^2=0.980\ 8$
	$P<0.01$	$P<0.01$	$P<0.01$	$P<0.01$	$P<0.01$	$P<0.01$
C^*_{ab}	$y=-1.712\ 2x+47.788$	$y=-1\ 880.9x+46\ 332$	$y=-0.034\ 3x+6.796\ 3$	$y=-1.913x+72.752$	$y=-0.019\ 7x+0.461\ 2$	$y=0.647\ 7x+24.785$
	$R^2=0.994\ 2$	$R^2=0.964\ 2$	$R^2=0.529\ 9$	$R^2=0.972$	$R^2=0.987\ 2$	$R^2=0.988\ 5$
	$P<0.01$	$P<0.01$	$P<0.05$	$P<0.01$	$P<0.01$	$P<0.01$

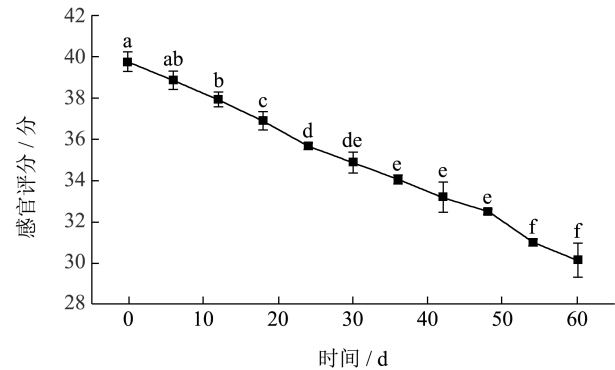


图 6 感官评分的变化

Fig.6 Changes in sensory evaluation

2.8 相关性分析

三文鱼鱼肉的 L^* 、 a^* 、 b^* 及 C^*_{ab} 与各项品质指标的相关性结果见表 3。由表 3 可知, 除 pH 值以外, 三文鱼的 L^* 、 a^* 、 b^* 及 C^*_{ab} 与 TVB-N 值、菌落总数、MMb、TBA 值之间表现出极强的相关性 ($P<0.01$), 感官评价呈现出极强的正相关, 说明通过三文鱼肉的色差变化可以预测出三文鱼肉品质的变化。

2.9 相关性方程

三文鱼鱼肉的色差值与各项指标的相关性方

程如表 4 所示, 从表中决定系数 (R^2)、 P 值可知, 所建立的方程能显著体现 L^* 、 a^* 、 b^* 及 C^*_{ab} 与各项品质指标的相关性。表中所有指标中, pH 值的决定系数 (R^2) 最低, 分别只能体现出 37.43%、50.01%、56.31%、52.99% 的变化; TVB-N 值相关方程决定系数最高, 对应 4 种色差值分别为 0.967 1、0.994 3、0.989 5 和 0.994 2, 其中以 a^* 与 TVB-N 值的决定系数最高, 表示 a^* 的变化最能体现 TVB-N 值的变化。

3 结论

冻藏 39 d 后三文鱼鱼肉的 TVB-N 达 25.20 mg/100 g, 超过生食限制 (≤ 25 mg/100 g)。冻藏 60 d 后, 三文鱼鱼肉的 L^* 、 a^* 、 b^* 和 C^*_{ab} 分别降低了 30.47%、64.63%、63.29% 和 64.01%, 三文鱼鱼肉的菌落总数为 3.2×10^4 CFU/g, 未超过生食三文鱼鱼肉的安全限值 (10^5 CFU/g)。冻藏三文鱼鱼肉的 L^* 、 a^* 、 b^* 和 C^*_{ab} 与挥发性盐基氮和菌落总数等指标均呈显著 ($P<0.05$) 相关, 其中, L^* 、 a^* 、 b^* 和 C^*_{ab} 与肌红蛋白含量、感官得分和 pH 呈正相关, 与其他指标呈显著 ($P<0.05$) 负相关。通过拟合结果的显著性分析发现, L^* 与 pH 的相关

性最低 ($P=0.04<0.05$), a^* 与 TVB-N 相关性最高 ($P=0.000<0.01$)。对具有显著相关性的回归方程进行汇总, 共得到 24 个回归方程。总之, 冻藏 39 d 后的三文鱼鱼肉不建议生食, 该研究建立的色差与冻藏三文鱼鱼肉品质的回归模型, 为快速无损评价冻藏三文鱼鱼肉的综合素质提供了理论依据。

参考文献

- [1] MURZINA S A, PROVOTOROV D S, VORONIN V P, et al. Phospholipid composition of fingerlings of Atlantic salmon *Salmo salar* during growth and development in aquaculture: The effect of different lighting and feeding regimes [J]. *Doklady. Biochemistry and Biophysics*, 2023, 509(1): 51-55.
- [2] 孙姗姗, 梁瑞强, 罗娇依, 等. 冰鲜贮存条件下三文鱼蛋白质组变化差异的分析[J]. *生物加工过程*, 2023, 21(1): 107-118.
- [3] BIRKELAND S, SKARA T. Cold smoking of Atlantic salmon (*Salmo salar*) fillets with smoke condensate: An alternative processing technology for the production of smoked salmon [J]. *Journal of Food Science*, 2008, 73(6): S326-S332.
- [4] DE LA FUENTE B, ASPEVIK T, BARBA F J, et al. Mineral bioaccessibility and antioxidant capacity of protein hydrolysates from salmon (*Salmo salar*) and Mackerel (*Scomber scombrus*) backbones and heads [J]. *Marine Drugs*, 2023, 21(5): 294.
- [5] DE LA FUENTE B, PINELA J, MANDIM F, et al. Nutritional and bioactive oils from salmon (*Salmo salar*) side streams obtained by Soxhlet and optimized microwave-assisted extraction [J]. *Food Chemistry*, 2022, 386: 132778.
- [6] BROUGHTON R, TOCHER D R, NAPIER J A, et al. Profiling phospholipids within Atlantic salmon (*Salmo salar*) with regards to a novel terrestrial Omega-3 oil source [J]. *Metabolites*, 2022, 12(9): 851.
- [7] WESAM Al-Jeddawi, P. Dawson. The Effect of frozen storage on the quality of atlantic salmon [J]. *Journal of Food Science and Nutrition Research*, 2022, 5(2): 552-569.
- [8] 张德福, 曲耀天, 张永勤, 等. 不同加工方式的三文鱼货架期预测模型建立与应用[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(16): 40-49.
- [9] 杨虎. 基于电子鼻技术的三文鱼新鲜度检测系统设计与实现[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2022.
- [10] DAVIDEK J, KHAN A W. Estimation of inosinic acid in chicken muscle and its formation and degradation during post-mortem aging [J]. *Journal of Food Science*, 2010, 32(2): 155-157.
- [11] 田继源. 温度波动对冻藏三文鱼品质的影响[D]. 天津: 天津商业大学, 2020.
- [12] 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].
- [13] 许铭强, 苏文贵, 曹双瑜, 等. 不同冻藏温度对新疆高白鲑鱼肉的品质变化[J]. *新疆农业科学*, 2022, 59(12): 3093-3103.
- [14] 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].
- [15] 柳艳霞, 刘纯, 李苗云, 等. 煮制过程中卤煮鸡肉色泽变化的动力学模型构建[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(19): 249-256.
- [16] 蒋凡. 基于海藻多糖的防雾新鲜度指示标签的制备及其在冷鲜三文鱼中的应用[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2023.
- [17] BU Y, HAN M L, TAN G Z, et al. Changes in quality characteristics of Southern bluefin Tuna (*Thunnus maccoyii*) during refrigerated storage and their correlation with color stability [J]. *LWT*, 2022, 154(15): 112715.
- [18] 黄卉, 孙申宇, 魏涯, 等. 红色肉贮藏期间肌红蛋白与肉色变化研究进展[J]. *南方水产科学*, 2020, 16(3): 119-124.
- [19] 丁婷. 三文鱼新鲜度综合评价和货架期模型的建立[D]. 锦州: 渤海大学, 2015.
- [20] ZHANG Y, ZHANG Y J, LI H, et al. Effect of 4 °C and ice temperature on Umami-enhancing nucleotides of conditioned pork [J]. *Food Chemistry*, 2023, 401: 134146.
- [21] 俞滢洁. 三文鱼在冷链物流过程中微生物、脂质氧化及水分迁移变化规律研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021.
- [22] 王一帆, 宋晓燕, 刘宝林. 冷藏期间温度波动对三文鱼片品质的影响[J]. *食品与发酵科技*, 2016, 52(1): 24-27.
- [23] GB 2733-2015, 食品安全国家标准 鲜、冻动物性水产品[S].
- [24] 薛瑾. 基于花青素的三文鱼新鲜度指示型包装材料研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- [25] 胡云峰, 潘悦, 王雅迪, 等. 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*, 2021, 42(2): 14-17, 52.
- [26] 董浩, 周晓东, 鞠晓晨, 等. 三文鱼在冰箱-18 °C、-60 °C条件下的冻藏品质变化研究[J]. *家电科技*, 2020, S1: 170-174.
- [27] ANNAMALAI J, SASIKALA R, DEBBARMA J, et al. Effect of delayed icing on the quality of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during chilled storage [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2015, 39(6): 2878-2885.
- [28] 王硕, 谢晶, 杨凯, 等. 三文鱼冷链流通过程中质构、鲜度及感官品质变化规律与水分迁移相关性[J]. *中国食品学报*, 2018, 18(5): 173-184.