

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2025.09.008

王梅英, 黄琳杉, 陈艺晖, 等. 微酸性电解水对低温冷藏大黄鱼保鲜效果的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(9): 77-88.

# 微酸性电解水对低温冷藏大黄鱼保鲜效果的影响

王梅英<sup>1</sup>, 黄琳杉<sup>2</sup>, 陈艺晖<sup>3</sup>, 林明佑<sup>4</sup>, 陈慧斌<sup>2</sup>

1. 福建船政交通职业学院, 福州 350007; 2. 福建师范大学 生命科学学院, 福州 350117;

3. 福建农林大学 食品科学学院, 福州 350002; 4. 旺旺集团水神事业部, 上海 201103

**摘要:** 为研究微酸性电解水(Slightly Acidic Electrolytic Water, SAEW)对冷藏大黄鱼保鲜效果的影响, 采用有效氯浓度为 40 mg/L 和 80 mg/L, pH 值为 6.4~6.5 的 SAEW 浸泡大黄鱼 10 min, 并置于(4±0.5) °C 冷藏, 冷藏期每隔 2 d 对大黄鱼的微生物、生化指标、质构、持水率、色度和感官指标进行测定。结果表明: 40 mg/L 和 80 mg/L SAEW 对菌落总数的抑制差异无统计学意义, 与空白组相比, 两个浓度的 SAEW 处理均能使冷藏大黄鱼贮藏期延长 2 d; SAEW 处理对冷藏大黄鱼总挥发性盐基氮(TVB-N)生成具有显著的抑制作用, 与空白组相比, SAEW 处理能通过延缓 TVB-N 的生成而延长冷藏大黄鱼贮藏期 3~4 d; SAEW 处理可减缓大黄鱼冷藏期间 pH 值的急剧变化, 并能适度保持冷藏期间大黄鱼的硬度、弹性与咀嚼性; SAEW 处理可提高冷藏大黄鱼的持水力 4~6 d; SAEW 处理能延缓冷藏大黄鱼色度的劣变, 其中 80 mg/L SAEW 在冷藏前 4 d 对其色度的保持具有显著作用, 40 mg/L SAEW 对其色度的保持作用表现在冷藏 4 d 后; 在冷藏大黄鱼的皮肤色泽、眼睛、鳃部、气味和肌肉弹性 5 个感官指标中, 空白组鳃部品质变化最大, 通过 SAEW 处理可以明显减缓冷藏大黄鱼的感官劣变, 并使鳃部劣变延迟 2~4 d。综合表明, 40 mg/L SAEW 处理冷藏大黄鱼可以达到 80 mg/L SAEW 的保鲜效果, 与空白组相比, 40 mg/L SAEW 处理能延长大黄鱼冷藏时间 2 d 并保持新鲜品质。

**关键词:** 大黄鱼; 微酸性电解水; 保鲜品质; 菌落总数; 质构;

感官评价

中图分类号: TS254.4

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2025)09-0077-12

## The Effect of Slightly Acidic Electrolytic Water Treatment on the Preservation of Large Yellow Croaker (*Larimichthys crocea*) under Low-Temperature

WANG Meiyong<sup>1</sup>, HUANG Linshan<sup>2</sup>, CHEN Yihui<sup>3</sup>,  
LIN Mingyou<sup>4</sup>, CHEN Huibin<sup>2</sup>

收稿日期: 2024-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(31401564); 福建船政交通职业学院校科教发展基金项目(20230105; 20220204)。

作者简介: 王梅英, 博士, 副教授, 主要从事水产品保鲜与加工和环境工程技术研究。

通信作者: 陈慧斌, 博士, 研究员, “闽江学者”特聘教授。

1. Fujian Chuanzheng Communications College, Fuzhou 350007, China;
2. School of Life Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China;
3. College of Food Science, Fujian Agriculture and Forest University, Fuzhou 350002, China;
4. Water God Development, Want Want Group, Shanghai 201103, China

**Abstract:** To study the effect of slightly acidic electrolytic water (SAEW) on the preservation of refrigerated large yellow croaker, large yellow croaker was soaked in SAEW with effective chlorine concentrations of 40 mg/L and 80 mg/L at pH 6.4 to 6.5 for 10 minutes, and then stored at  $(4 \pm 0.5) ^\circ\text{C}$ . Every 2 days during the refrigeration period, microbial, biochemical indicators, texture, water-holding capacity, color, and sensory indicators of the large yellow croaker were measured. The results showed that there was no significant difference in the inhibition effect of 40 mg/L and 80 mg/L SAEW on total bacterial count. Compared to the control group, both concentrations of SAEW treatment extended the storage period of refrigerated large yellow croaker by 2 days. SAEW treatment significantly inhibited the production of TVB-N in refrigerated large yellow croaker, extending the storage period by 3 to 4 days by delaying the formation of TVB-N compared to the control group. SAEW treatment slowed down the drastic changes of pH during refrigeration and moderately maintained the hardness, elasticity, and chewiness of the large yellow croaker during storage. SAEW treatment improved the water-holding capacity of refrigerated large yellow croaker for 4 to 6 days. SAEW treatment delayed the deterioration of color of refrigerated large yellow croaker, with 80 mg/L SAEW showing significant effects on color retention during the first 4 days of refrigeration, while the 40 mg/L SAEW had a significant effect on color retention after 4 days of refrigeration. Among the five sensory indicators of skin color, eyes, gills, odor, and muscle elasticity of refrigerated large yellow croaker, the gill quality in the control group showed the most significant changes. SAEW treatment could significantly slow down the sensory deterioration of refrigerated large yellow croaker, delaying gill deterioration by 2 to 4 days. In summary, treating refrigerated large yellow croaker with 40 mg/L SAEW can achieve the same preservation effect as 80 mg/L SAEW, and compared to the control group, 40 mg/L SAEW treatment can extend the refrigeration time of large yellow croaker by 2 days while maintaining its freshness.

**Key words:** large yellow croaker; slightly acidic electrolytic water; preservation quality; total bacterial count; texture; sensory evaluation

大黄鱼, 黄鱼属, 身体延长而侧扁, 背部灰黄, 体侧金黄, 为我国传统“四大海产”之一。据统计, 2022 年大黄鱼产量达 25.77 万 t, 约占全国海鱼养殖总量的 14%, 成为我国近海经济养殖规模最大的鱼种之一<sup>[1]</sup>。大黄鱼属于高蛋白、多脂鱼种, 养殖大黄鱼的粗蛋白质量分数高达 18%, 脂肪约为 1.87%~8.73%<sup>[2]</sup>。受高脂高蛋白和高含水量的影响, 大黄鱼在冷藏期间容易繁殖腐败微生物<sup>[3]</sup>, 因此, 保持冷藏大黄鱼的品质, 对延长货架期具有重要意义。

低温保鲜是大黄鱼捕捞后最常用的方式, 通过低温减缓微生物的生长繁殖速度和降低鱼肉组织内源酶的活性, 从而达到保鲜的目的。低温保鲜的具体方法有冷藏保鲜、微冻保鲜、冷冻保鲜等。冷藏保鲜是大黄鱼保鲜的主要方式, 将捕捞的新鲜大黄鱼贮藏在 0~5 °C 环境中, 保藏期约为 6~9 d, 该保鲜方法在保鲜鱼体内未形成冰晶, 对鱼肉肌纤维蛋白的破坏性小, 因此受到人们的青睐。有研究

发现 0~5 °C 对微生物尤其是嗜冷微生物的抑制效果有限<sup>[4]</sup>,而微冻保鲜的温度为-2~-3 °C,保藏期可达到 20~30 d,但该方法的贮藏成本高,同时捕捞的新鲜鱼体表面的盐分可混入鱼体血液和黏液中,鱼体经过微冻后会出现泡沫。冷冻保鲜温度为-18~-30 °C,保藏期约为 6 个月至 1 年。虽然冷冻保鲜可以完全抑制微生物和内源酶活性,但是不能完全抑制鱼体内脂肪的氧化酸败,同时鱼体容易出现析液、干耗和蛋白质变性等问题。因此,为改善低温保鲜的不足,研究低温保鲜与其他保鲜方法的栅栏技术,已引起广泛关注<sup>[5]</sup>。

微酸性电解水(Slightly Acidic Electrolytic Water, SAEW)是一种新型的保鲜技术,它是通过在低压直流电解槽中电解稀氯化钠或盐酸溶液生成具有杀菌能力的有效氯 HClO、ClO<sup>-</sup>和 Cl<sub>2</sub>,其中 HClO 对细菌的致死率是 ClO<sup>-</sup>的 80 倍<sup>[6]</sup>。已有报道显示,SAEW 能有效杀灭与水产品腐败和致病有关的微生物,如希瓦氏菌、单核细胞增多性李斯特菌、大肠杆菌、金黄色葡萄球菌等<sup>[7-10]</sup>。刘阳等<sup>[11]</sup>用 10 mg/L SAEW 浸泡接种了副溶血性弧菌和希瓦氏菌的海虾 10 min 后,菌落总数分别下降 1.6 log(CFU/mL)和 1.25 log(CFU/mL)。低温保鲜存在一定的不足之处,因此,国内外学者将 SAEW 技术应用于水产品的低温保鲜中。Tantratian 等<sup>[12]</sup>将新鲜牡蛎在 40 mg/L SAEW 中浸泡 30 min 后耦合 4 °C 冷藏保鲜,结果表明 40 mg/L SAEW 抑制了牡蛎中大肠杆菌、沙门氏菌、金黄色葡萄球菌和乳酸菌的生长繁殖。朱文慧等<sup>[13]</sup>采用 50 mg/mL SAEW 耦合低温等离子体技术延缓脂肪和蛋白质氧化,使三文鱼的保藏期较空白组延长 2 d。Kim 等<sup>[14]</sup>制备 SAEW 冰,耦合冰藏保鲜,使秋刀鱼保藏期延长约 4~5 d。Yan 等<sup>[15]</sup>将 SAEW 和抗坏血酸进行耦合以改善冻藏对虾的品质,结果表明该耦合技术能有效延缓对虾黑变病并延长了对虾的保藏期。此外,有研究表明,40~80 mg/L SAEW 能抑制水产品冷藏期间总挥发性盐基氮(TVB-N)和硫代巴比妥酸(TBA)含量的增加<sup>[16]</sup>。吴雨轩等<sup>[17]</sup>研究表明,80 mg/L SAEW 能够减少 3-羟基-2-丁酮和 2,3-戊二酮等呈现腐败特征的物质生成,但也有研究表明 SAEW 有效氯浓度会影响脂肪和蛋白质氧化,对鱼肉的色泽产生一定的影响<sup>[18]</sup>。因此,在保证 SAEW 高效杀菌的前提下,有效防止脂肪氧化、蛋白质酸败和颜色变化是鱼肉冷藏保鲜的一项重要内容。本文研究 SAEW 前处理对冷藏保鲜大黄鱼微生物、TVB-N、TBA、pH、色度、质构、持水力、感官品质的影响,旨在为大黄鱼低温保鲜耦合 SAEW 技术开发提供一定的理论参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与试剂

新鲜大黄鱼由福建省宁德市三都澳的养殖场提供,捕捞的新鲜大黄鱼采用冷海水冷却,全程冷链 4 h 内运抵福建师范大学食品保鲜与加工实验室。

三氯乙酸、氢氧化钠、EDTA、氯仿、硫代巴比妥酸、冰乙酸、无水乙醇、碳酸钠、盐酸、硫酸等试剂均为分析纯,购自国药集团化学试剂有限公司。平板计数培养基(PCA)、假单胞菌琼脂基础培养基、MRS 肉汤培养基、嗜冷菌计数琼脂(乳平板计数琼脂)购自青岛海博生物技术有限公司。

### 1.2 仪器与设备

BD-600L 微酸性次氯酸水发生器,上海富强旺卫生用品有限公司;RC-3F 有效氯测定仪,日本笠原理化工业株式会社;A57-B 氧化还原电位仪,广州家贝水处理有限公司;HC-2518R 高速冷冻离心机,安徽中科中佳科学仪器有限公司;Infinite M Plex 型酶标仪,奥地利 Tecan 有限责任公司;TA-XY plus,英国 Stable Micro System Co., LTD;CP2102 电子天平,上海奥豪斯仪器有限公司;NS810-3nh 分光测色仪,深圳市三恩时科技有限公司;HH-4 数显恒温水浴锅,国华电器有限公司;T600 紫外/可见分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司;TESTO-205 pH 计,德图仪器国际贸易有限公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 电解水的制备

BD-600L 微酸性次氯酸水发生器制备微酸性电解水方法参考文献[19]。本试验使用 SAEW 有效氯浓度分别为 40 mg/L(SAEW40)和 80 mg/L(SAEW80)。微酸性电解水 pH 值为 6.4~6.5, 氧化还原电位大于 850 mV。

#### 1.3.2 样品处理

捕捞的新鲜大黄鱼经冷海水冷却后, (4±0.5) °C 冷链运至福建师范大学食品保鲜与加工实验室, 挑选色泽金黄、大小一致的大黄鱼, 经流水冲洗处理后进行分组试验。

SAEW 组: 将经过挑选的大黄鱼分别浸泡于 SAEW40 和 SAEW80 电解水中 10 min, 浸泡完毕, 使用电风扇风干鱼体表面水分后, 平放于托盘中并覆盖保鲜膜, 置于(4±0.5) °C 冰箱中进行低温冷藏保鲜。空白组: 将经过挑选的大黄鱼分别浸泡于无菌蒸馏水中 10 min, 浸泡完毕, 使用电风扇风干鱼体表面水分后, 平放于托盘中并覆盖保鲜膜, 置于(4±0.5) °C 冰箱中进行低温冷藏保鲜。每组设定 3 个生物学重复, 低温冷藏期间每隔 2 d 取样进行微生物、理化、质构和感官测定。

#### 1.3.3 微生物数量测定

微生物数量测定参照《食品微生物学检验 菌落总数测定》(GB 4789.2—2022)和 Chen 等<sup>[20]</sup>的方法, 假单胞菌、乳酸菌、嗜冷菌分别采用选择性培养基进行培养, 菌落总数以 Log (CFU/g) 为单位报告。

#### 1.3.4 TVB-N、TBA 和 pH 值的测定

大黄鱼的 TVB-N 测定采用微量扩散法, 参照《食品中挥发性盐基氮的测定》(GB 5009.228—2016)。pH 值的测定参照《食品 pH 值的测定》(GB 5009.237—2016)。丙二醛测定采用 TBA 显色反应, 参考 Chen 等<sup>[21]</sup>的方法略作修改。

#### 1.3.5 质构测定

使用质构分析仪对大黄鱼样品的组织结构进行 2 次压缩质地多面剖析(TPA)模式测试。参照杨欣然等<sup>[22]</sup>的方法略作修改, 将样品放置室温后, 去皮, 取鱼背部肌肉, 切成长(4±0.1) cm、宽(3±0.1) cm、高(1±0.1) cm 的鱼片, 进行质构指标测定, 记录所测得硬度、弹性和咀嚼性数值, 其中硬度用剪切力(g)表示。

#### 1.3.6 持水力测定

参考 Wang 等<sup>[23]</sup>的方法略作修改。3 个大黄鱼样品组各取 3 g, 用吸水纸擦干鱼肉表面水分后称质量得到  $m_1$ , 此后将鱼肉用定性滤纸包裹并置于 50 mL 的离心管内, 放置于离心机中, 以 5 000 r/min 的速度离心 10 min, 取出滤纸, 再次擦干鱼肉表面水分后称质量得到  $m_2$ , 持水力(C)计算公式:

$$C = \left(1 - \frac{m_1 - m_2}{m_1}\right) \times 100 \quad (1)$$

式中:  $m_1$  为大黄鱼离心前的质量(g);  $m_2$  为大黄鱼离心后的质量(g)。

#### 1.3.7 色度测定

大黄鱼样品取长、宽各为 1.0 cm, 高为 2.0 cm 的鱼体背部肌肉, 用吸水纸吸干表面水分, 用色差仪进行测定, 参照林靖莹等<sup>[24]</sup>的方法, 以标准白板为基准检测样品色泽, 其中  $L^*$  表示样品的亮度、 $b^*$  表示样品的黄度。若  $L^*$  值越大, 则表示样品亮度越大, 即  $L^*=0$  表示黑色,  $L^*=100$  表示白色; 若  $b^*$  为正, 此时值越大, 则表示样品越黄, 若  $b^*$  值为负, 此时值越大, 则表示样品越蓝。

#### 1.3.8 感官评价

参考金素莱曼<sup>[25]</sup>的方法并略作修改, 对 3 个样品组大黄鱼的皮肤、眼睛、鳃部、气味和肌肉弹性进行感官评价。评价小组由 10 名经过评估训练的人员组成, 评价得分标准如表 1。

表 1 冷藏大黄鱼感官评分

感官指标	分值			
	好(5)	较好(4)	一般(3)	较差(2)
皮肤	腹部金黄色;黏液清晰而不凝结;鳞片紧致	头部金黄色,腹部不那么金黄色;黏液乳白色,略有凝结;鳞片紧致	头部和腹部颜色不那么金黄;黏液黄色,略有凝结;鳞片松垮	腹部颜色暗淡;黏液黄色,且凝结;鳞片脱落
眼睛	透明,黑色,金属光泽;眼睛饱满平整;角膜清晰	黑灰色;眼睛一点凹陷;角膜比较清晰	灰色;眼睛一点凹陷;角膜有一点浑浊	灰色;眼睛凹陷;角膜浑浊
鳃部	红褐色;黏液透明	淡红褐色;黏液透明	淡红褐色;黏液黄色且凝结	灰棕色、灰色、绿色;黏液棕色
气味	新鲜海草味	金属味,与新鲜大黄鱼气味略有不同	酸味,与新鲜大黄鱼有比较大的气味差别	恶臭味
肌肉弹性	肌肉紧实,手指印记立即消失	肌肉较紧实,手指印记能在 3 s 消失	肌肉组织有一点绵软,手指印记维持超过 3 s	肌肉绵软,手指印记不回弹

#### 1.4 数据处理

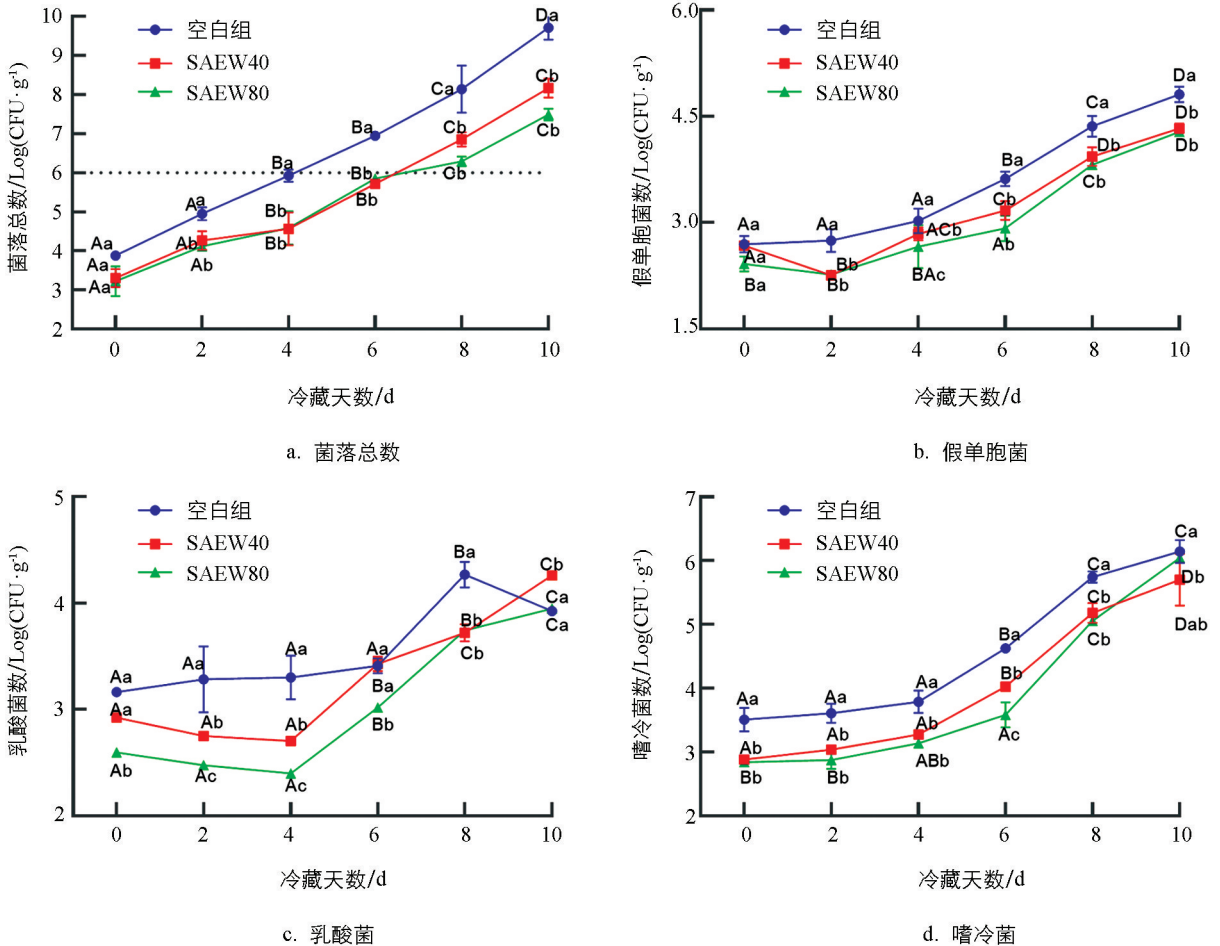
设置 3 组生物学重复,采用 Excel 进行数据处理,GraphPad Prism 9.0.0 软件进行 two-way ANOVA 多重比较和制图,R 语言 cor() 命令进行 Spearman 相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 微酸性电解水对冷藏大黄鱼微生物数量的影响

菌落总数是评判水产品污染程度的重要指标,一般认为鱼肉的菌落总数达到 6.00 Log(CFU/g)时,鱼肉被视为不可食用<sup>[26]</sup>。由图 1a 可以看出,空白组大黄鱼初始菌落总数为 3.88 Log(CFU/g),SAEW40 和 SAEW80 初始菌落总数分别为 3.30 Log(CFU/g)和 3.22 Log(CFU/g),可见 SAEW 具有明显的减菌效果。冷藏第 4 d,空白组大黄鱼菌落总数为 5.92 Log(CFU/g),已非常接近可食用上限,而 SAEW40 和 SAEW80 菌落总数到冷藏第 6 d 时菌落总数分别为 5.71 Log(CFU/g)和 5.85 Log(CFU/g),且与空白组差异有统计学意义( $p < 0.05$ ),说明 SAEW 处理能通过抑制细菌增殖延长冷藏大黄鱼贮藏期 2 d。值得一提的是,在整个冷藏期间,SAEW40 和 SAEW80 对菌落总数的抑制差异无统计学意义( $p > 0.05$ ),说明 SAEW 浓度大于 40 mg/L 时,对菌落总数抑制不会有显著变化,此结果与姜晓东等<sup>[27]</sup>采用 SAEW 对虹鳟进行冷藏保鲜预处理的研究结果基本一致。SAEW 的酸性 pH 会破坏细胞膜上的脂多糖,高氧化还原电位会吸收细胞膜上的电子,从而破坏细菌细胞膜和细胞壁的通透性,使有效氯更容易到达细菌内部,从而达到杀菌的效果<sup>[28]</sup>。由图 1b 可以看出,在冷藏前 2 d,SAEW 组假单胞菌数呈现下降趋势,其中 SAEW40 下降更明显,说明低浓度 SAEW 比高浓度 SAEW 更具有控制假单胞菌增殖的短暂优势。虽然冷藏 2 d 后,空白组和 SAEW 组假单胞菌数都快速上升,但在整个冷藏期间,空白组假单胞菌数量始终显著高于 SAEW 组( $p < 0.05$ )。SAEW40 和 SAEW80 假单胞菌数仅在冷藏第 4 d 时出现显著性差异( $p < 0.05$ ),其他冷藏期间,SAEW 的两个处理组的假单胞菌数差异无统计学意义( $p > 0.05$ )。图 1c 乳酸菌数量变化表明,相较于其他菌,乳酸菌数量较低,总体数量为 2.5~4.2 Log(CFU/g)。冷藏前 4 d,SAEW40 和 SAEW80 乳酸菌数量呈下降趋势,说明 SAEW 对乳酸菌具有暂时抑制作用。冷藏 4 d 后,SAEW40 和 SAEW80 乳酸菌数量均快速增长,在整个冷藏期间,SAEW80 乳酸菌数量最低。由图 1d 可以看出,冷藏 4 d 后,3 个处理组的嗜冷菌总数都快速上升。相对空白组,SAEW 处理表现出明显的抑制嗜冷菌优势( $p < 0.05$ ),而 SAEW40 和 SAEW80 仅在冷藏第 6 d 出现显著差异( $p < 0.05$ )。

因此,相对空白组,SAEW 处理可有效抑制冷藏大黄鱼的菌落总数、假单胞菌、乳酸菌和嗜冷菌数量。值得一提,SAEW 处理能通过抑制细菌增殖延长冷藏大黄鱼贮藏期 2 d,且在整个冷藏期间 SAEW40 和 SAEW80 对细菌菌落总数的抑制差异无统计学意义( $p>0.05$ )。



小写字母不同表示相同冷藏天数不同处理方式之间差异有统计学意义( $p<0.05$ ),大写字母不同表示相同处理方式不同冷藏天数之间差异有统计学意义( $p<0.05$ )。

图 1 微酸性电解水处理对冷藏大黄鱼微生物数量的影响( $n=3$ )

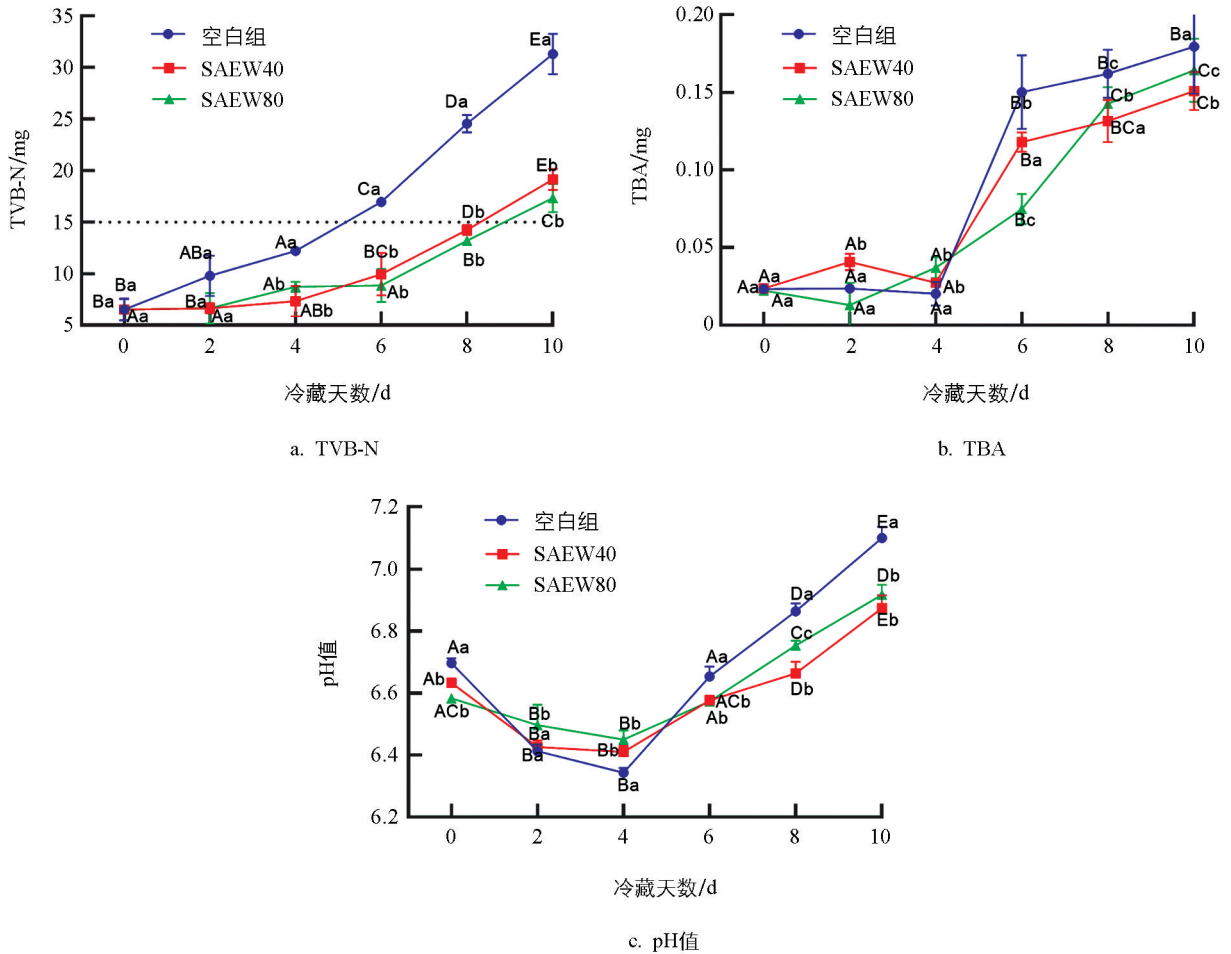
## 2.2 微酸性电解水对冷藏大黄鱼 TVB-N、TBA 和 pH 值的变化

SAEW 处理延缓了冷藏大黄鱼 TVB-N 的增加(图 2a),空白组冷藏 5 d,TVB-N 每 100 g 达到 15 mg,超过 GB 5009.228—2016 的标准限值,而 SAEW40 和 SAEW80 组可持续 8~9 d。冷藏第 4 d 开始,空白组 TVB-N 急剧上升,且与 SAEW 组差异有统计学意义( $p<0.05$ )。在整个冷藏期间,SAEW40 和 SAEW80 对 TVB-N 的抑制差异无统计学意义( $p>0.05$ )。通过 TVB-N 与微生物的相关性分析(图 3)表明,3 个处理组的 TVB-N 变化与菌落总数均呈现极显著差异( $p<0.001$ ),说明鱼肉在冷藏期间,TVB-N 与微生物代谢活动产生生物胺之间有重要关系。以上研究结果表明,与空白组比较,SAEW 处理能通过延缓 TVB-N 生成延长冷藏大黄鱼贮藏期 3~4 d。

由图 2b 可知,冷藏 4 d 后,SAEW 组和空白组的 TBA 值都急剧增加,第 6 d 时,空白组和 SAEW40 TBA 质量分数每 100 g 达到 0.135 mg 和 0.117 mg,而 SAEW80 到第 8 d 才结束快速增长,TBA 达到 0.153 mg。3 个处理组对冷藏大黄鱼 TBA 的影响在冷藏 4 d 后开始出现显著性差异( $p<0.05$ )。通过相关性分析(图 3)表明,3 个处理组的 TBA 变化与菌落总数、假单胞菌、乳酸菌和嗜冷菌数量变化呈现一定差异。以上研究结果表明,SAEW 处理对大黄鱼冷藏期间 TBA 的抑制作用没有显著优势。

由图 2c 可知,在冷藏前 4 d,3 个处理组 pH 值均呈现下降趋势,符合鱼体僵直后体内糖原通过糖酵解

生成乳酸, 同时鱼体内生成磷酸、脂肪酸等酸性物质导致 pH 值的变化, 其中, 空白组 pH 值变化最大, 在第 4 d 时, pH 值达到最低, 为 6.34, 而 SAEW40 和 SAEW80 pH 值最低分别为 6.41 和 6.58, 这与 SAEW 可以控制蛋白质和 ATP 降解速度, 从而减缓冷藏大黄鱼 pH 值变化有关。冷藏 4 d 后, SAEW 组和空白组 pH 值均快速上升, 这可能与冷藏后期细菌导致的氨基酸持续分解生成氨、胺类、吲哚等碱性物质有关<sup>[26]</sup>, 但从第 5 d 开始, 空白组 pH 值陡然上升, 显著高于 SAEW 组, 可能与 SAEW 呈酸性, 可中和部分碱性物质有关。以上研究结果表明, SAEW 处理可减缓大黄鱼冷藏期间 pH 值的急剧变化。

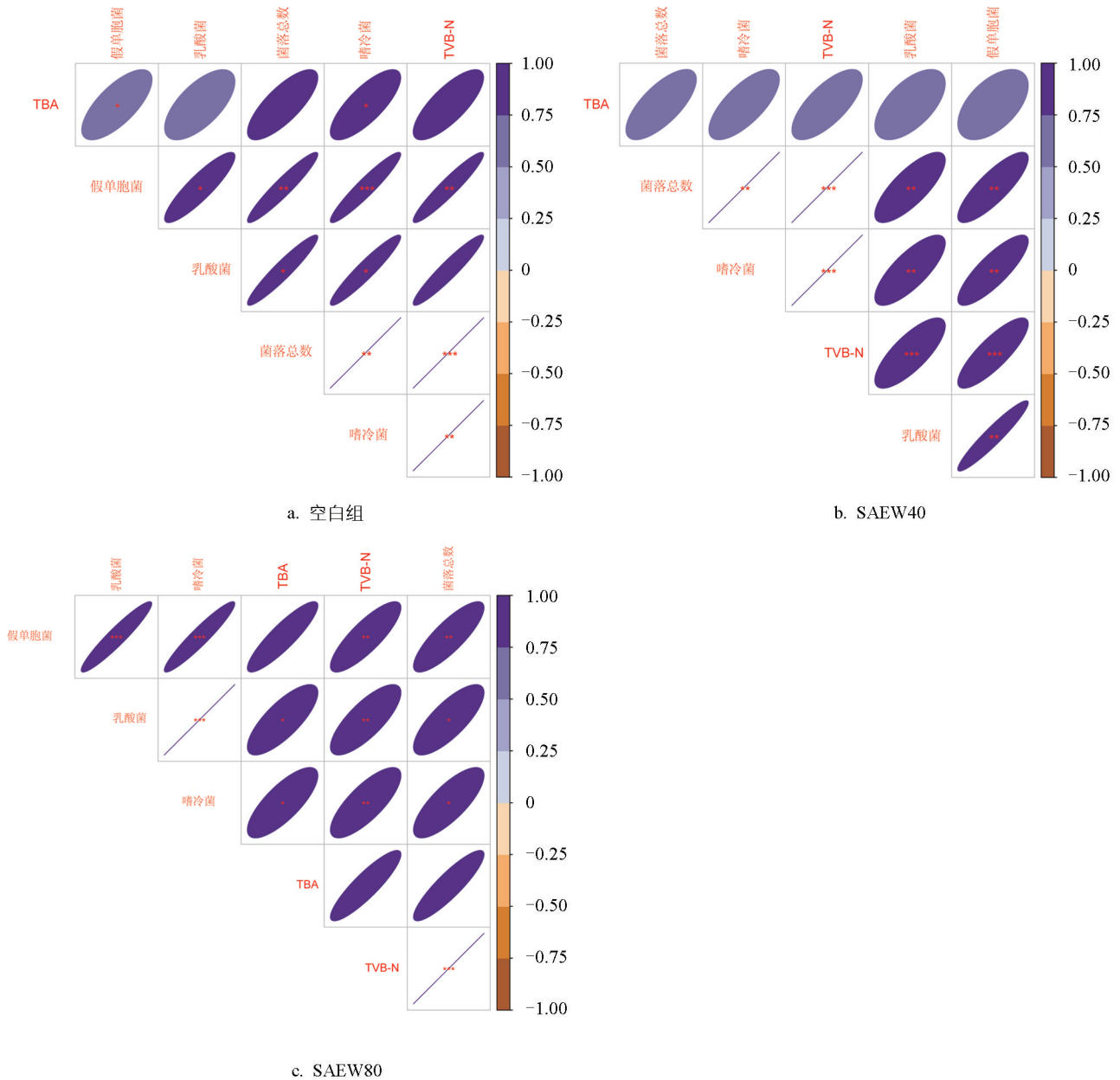


小写字母不同表示相同冷藏天数不同处理方式之间差异有统计学意义 ( $p < 0.05$ ), 大写字母不同表示相同处理方式不同冷藏天数之间差异有统计学意义 ( $p < 0.05$ )。

图 2 微酸性电解水处理对冷藏大黄鱼生化指标的影响

### 2.3 微酸性电解水对大黄鱼质构特性的影响

由图 4 可以看出, 3 个处理组冷藏大黄鱼的硬度、弹性和咀嚼性均随着冷藏时间的延长而下降, 说明大黄鱼在冷藏期间鱼肉肌肉纤维都会不同程度地分解。空白组硬度、弹性和咀嚼性在整个冷藏期间都低于 SAEW 组。从图 4a 可以看出, 空白组在第 4 d 相对第 0 d 出现硬度明显下降。由于高浓度有效氯和微酸性刺激, SAEW 组在冷藏前 4 d 出现硬度略有提高的趋势, 冷藏 4 d 后才开始缓慢下降。从冷藏大黄鱼的弹性变化看, 3 个处理组大黄鱼弹性均表现出下降趋势, 但下降差异无统计学意义 (图 4b,  $p > 0.05$ )。从冷藏大黄鱼的咀嚼性变化看, 空白组冷藏大黄鱼咀嚼性呈现下降趋势, 与硬度变化趋势基本一致, SAEW40 大黄鱼冷藏前 4 d 咀嚼性略有提高, 冷藏 4 d 后缓慢下降 (图 4c)。以上研究结果表明, SAEW 组大黄鱼硬度、弹性和咀嚼性均略高于空白组, 说明 SAEW 处理能适度保持冷藏期间大黄鱼的质构。

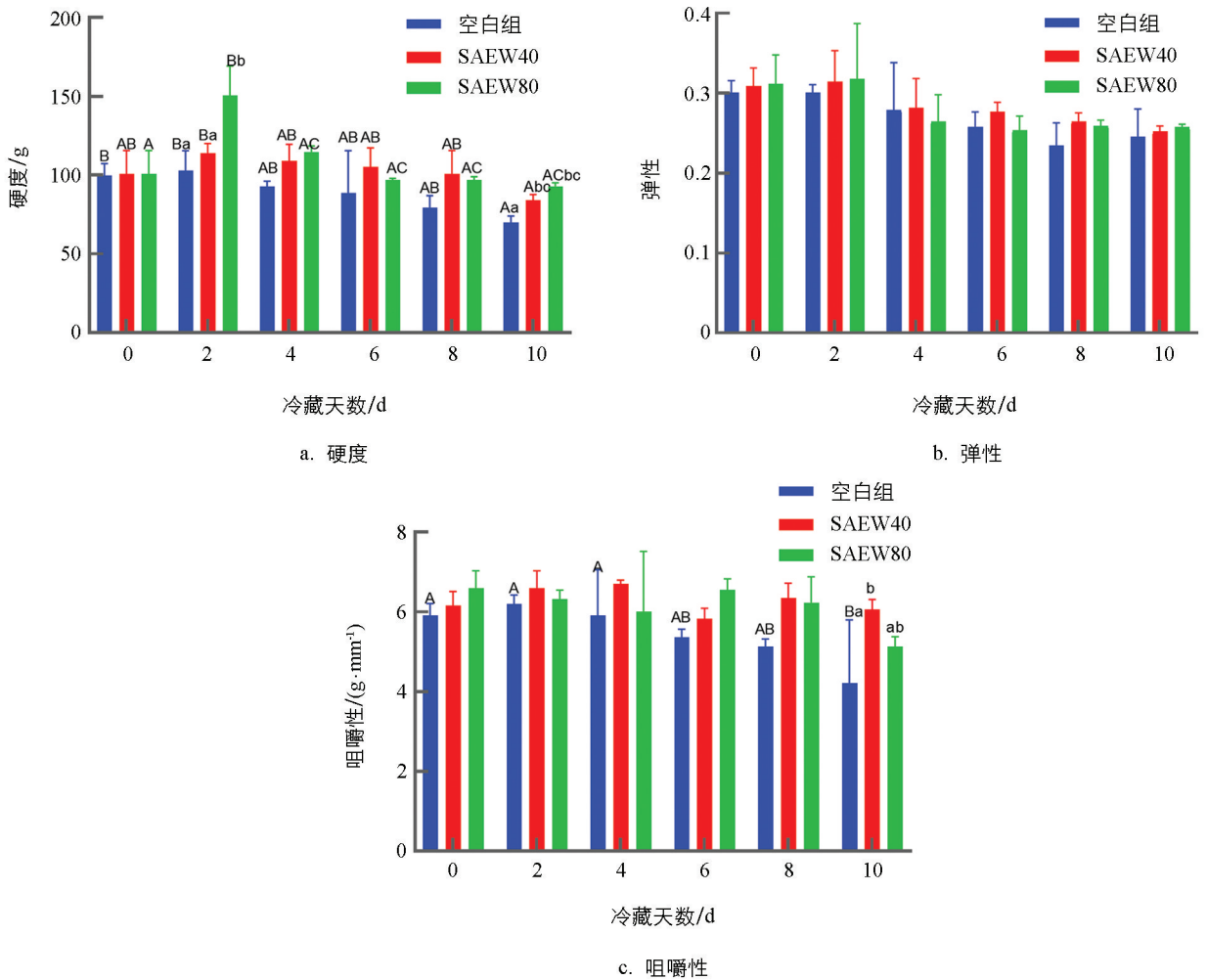


相关性分析采用 Spearman 方法；椭圆小代表相关性强，反之弱；紫色代表正相关；\*、\*\*和\*\*\*分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 水平上差异显著。

图 3 微生物指标与品质指标相关性分析

## 2.4 微酸性电解水对大黄鱼持水力的影响

由图 5 可知，随着冷藏时间的延长，SAEW 组和空白组大黄鱼的持水力均呈下降趋势，其中空白组大黄鱼持水力下降程度较 SAEW 组明显。空白组在第 4 d 时持水力为 86%，与第 0 d 的持水力形成显著性差异 ( $p < 0.05$ )，SAEW40 和 SAEW80 分别在第 8 d 和第 10 d 时持水力约为 85%。SAEW 对持水力的影响与本研究中 SAEW 对硬度、弹性和咀嚼性的影响基本一致。持水力下降可能与鱼肉内源蛋白酶作用和鱼肉僵直有关，随着冷藏时间的延长，微生物分泌的内源性蛋白酶会导致组织肌源蛋白降解，从而影响肌源蛋白的水结合能力。另外，鱼被捕捞后会经历僵直期，僵直期鱼肉肌纤维中的粗丝和细丝结合紧密，导致纤维之间的保水能力减弱，持水力下降。以上研究结果说明，SAEW 处理可短时间内提高鱼肉肌源蛋白的韧性，从而提高冷藏大黄鱼的持水力 4~6 d。

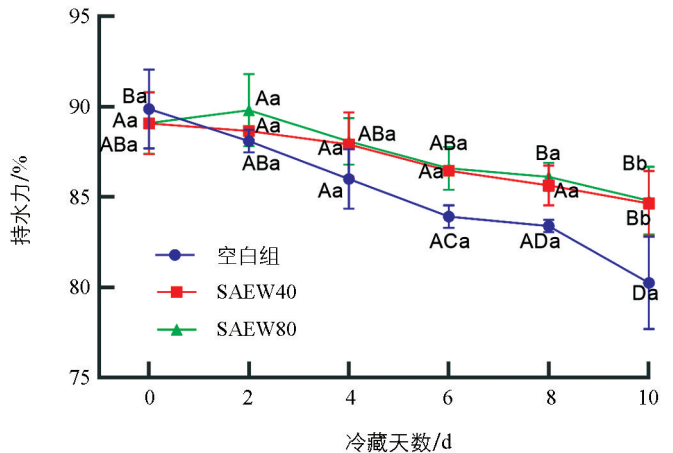


小写字母不同表示相同冷藏天数不同处理方式之间差异有统计学意义 ( $p < 0.05$ ), 大写字母不同表示相同处理方式不同冷藏天数之间差异有统计学意义 ( $p < 0.05$ )。

图 4 微酸性电解水处理对冷藏大黄鱼质构的影响

### 2.5 微酸性电解水对冷藏大黄鱼色度的影响

冷藏大黄鱼色度与黄度 ( $b^*$ ) 值和亮度 ( $L^*$ ) 值密切相关, SAEW 处理对冷藏大黄鱼色度的影响如表 2。冷藏前 4 d, 3 个处理组大黄鱼的  $L^*$  值均呈下降趋势, 其中空白组与 SAEW80 的  $L^*$  值在整个冷藏期间均呈现显著下降趋势 ( $p < 0.05$ ), 而 SAEW40 组冷藏第 4 d 开始到试验结束,  $L^*$  值变化不明显, 且到冷藏第 8 d 时,  $L^*$  值为 75.96, 显著高于空白组第 4 d 的 72.79 和 SAEW80 第 6 d 的 74.29。SAEW80 在冷藏前 4 d 的  $L^*$  值始终高于 SAEW40 和空白组, 这可能与 SAEW80 高浓度有效氯快速破坏大黄鱼体内的多酚氧化酶有关。多酚氧化酶可催化



小写字母不同表示相同冷藏天数不同处理方式之间差异有统计学意义 ( $p < 0.05$ ), 大写字母不同表示相同处理方式不同冷藏天数之间差异有统计学意义 ( $p < 0.05$ )。

图 5 微酸性电解水处理对冷藏大黄鱼持水力的影响

氧分子与酚类化合物生成邻苯醌,而邻苯醌正是大黄鱼形成黑色素的前体物质,由此认为,SAEW80 能有效延缓冷藏大黄鱼黑色素的形成<sup>[29]</sup>。从  $b^*$  值变化上看,3 个处理组大黄鱼  $b^*$  值都随冷藏时间呈现显著性变化( $p < 0.05$ ),但是 SAEW 组大黄鱼的黄度值始终高于空白组,与亮度变化趋势一致。SAEW 的有效氯能够阻止黄色本底物质类胡萝卜素中的共轭双键异构化,从而减缓黄度值下降。以上研究结果表明,SAEW 处理能延缓冷藏大黄鱼色度的劣变,其中 SAEW80 在冷藏前 4 d 对冷藏大黄鱼色度的保持具有显著作用,SAEW40 对色度的保持作用表现在冷藏 4 d 后。

表 2 微酸性电解水处理对冷藏大黄鱼色度的影响

时间/ d	$L^*$ 值			$b^*$ 值		
	空白组	SAEW40	SAEW80	空白组	SAEW40	SAEW80
0	87.20±1.056 6Aa	89.88±0.943 2Aab	90.83±0.416 5Ab	12.07±1.081 3Aa	11.63±1.195 6Fa	11.99±1.256 4Aa
2	80.36±2.069 7Ba	82.71±2.076 5Ba	86.51±2.496 4Bb	7.05±0.572 0Ba	9.71±0.515 1Bb	10.89±0.801 0Abc
4	72.79±2.332 2Ca	79.09±0.902 9Cb	82.36±1.258 2Cc	2.96±0.248 5Ca	7.57±1.075 5Cb	8.80±0.408 6Bbc
6	71.60±1.733 1CDa	78.49±0.553 7Cb	74.29±1.503 6Da	0.28±0.708 1Da	2.67±0.516 2Db	1.47±0.470 6Cab
8	69.19±0.995 2Da	75.96±0.646 9Cdb	69.19±0.995 2Ea	-1.98±0.240 0Ea	-0.29±1.181 2Eb	-2.41±0.308 6Da
10	65.41±1.071 9Ea	73.60±1.260 6Db	69.46±0.716 0Ec	-4.26±0.447 7Fa	-3.83±0.717 9Fa	-3.92±0.623 9Da

注: 同列大写字母不同表示不同冷藏天数之间差异有统计学意义( $p < 0.05$ ), 同行小写字母不同处理方式之间差异有统计学意义( $p < 0.05$ )。

## 2.6 微酸性电解水对大黄鱼冷藏期间感官的影响

SAEW 处理对大黄鱼感官评价结果如图 6。随着冷藏时间延长, SAEW 组和空白组冷藏大黄鱼感官品质均呈现不同程度的下降。皮肤色泽和眼睛在冷藏第 2 d 后, SAEW 组与空白组形成显著性差异( $p < 0.05$ ), 而 SAEW80 与 SAEW40 之间差异无统计学意义( $p > 0.05$ )。当鳃部感官评定分为 2 分, 基本可以认为该品质已经不可接受。空白组在冷藏第 7 d, 鳃部感官评分为 2 分; 而 SAEW40 和 SAEW80 分别到冷藏第 10 d 和第 9 d 时, 鳃部感官评分为 2 分。相对皮肤色泽、眼睛和鳃部, 3 个处理组对冷藏大黄鱼气味和肌肉弹性的影响不显著。在冷藏大黄鱼的 5 个感官指标中, 鳃部品质变化最大, 空白组第 2 d 鱼鳃颜色由红褐色变成淡红褐色, 感官评分平均下降 20%, 而空白组皮肤色泽、眼睛、气味和肌肉弹性在

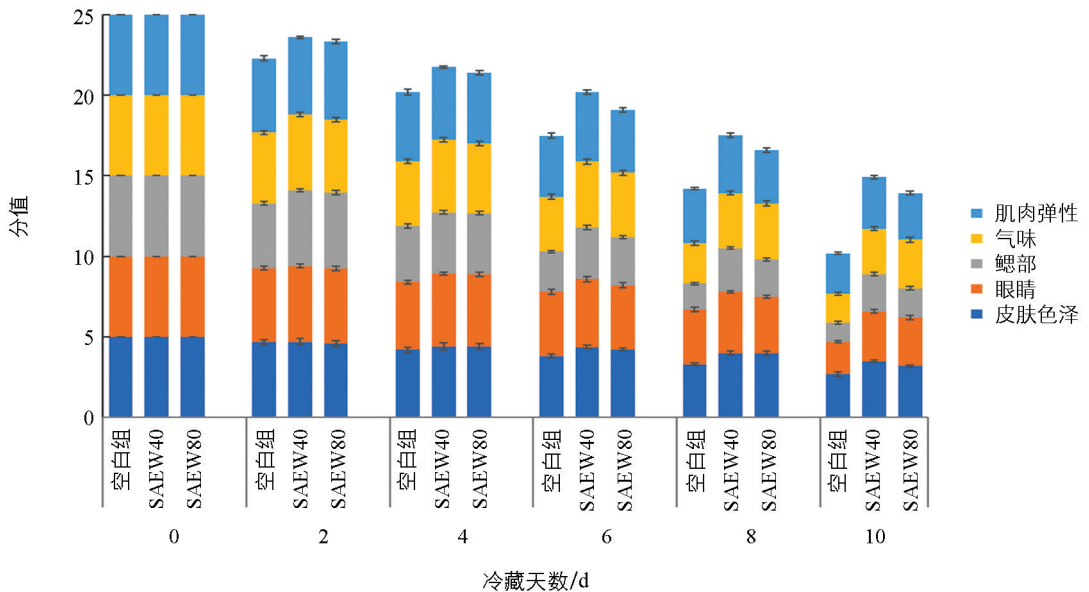


图 6 微酸性电解水处理对冷藏大黄鱼感官的影响

冷藏第2 d时,品质下降分别为6.8%、7.8%、12%和8%。经过SAEW处理后,冷藏第2 d,5个感官指标的变化控制在6%左右。通过分析鳃部变化发现,空白组大黄鱼冷藏第6 d时鳃部感官评分下降50.2%,而SAEW40在冷藏第10 d时鳃部感官评分下降54.1%,SAEW80在冷藏第8 d时鳃部感官评分下降54.2%。以上研究结果表明,SAEW处理可以明显减缓冷藏大黄鱼的感官劣变,可以延迟鱼鳃品质劣变2~4 d。

### 3 讨论与结论

本研究探讨了SAEW处理对冷藏大黄鱼品质和贮藏期的影响。结果发现,与空白组对比,SAEW处理能有效抑制菌落总数、假单胞菌数、乳酸菌数和嗜冷菌数,其中40 mg/L SAEW和80 mg/L SAEW对菌落总数的抑制差异无统计学意义,均能使贮藏期延长2 d。在生化指标变化方面,SAEW处理可使冷藏大黄鱼TVB-N生成延缓3~4 d,可减缓大黄鱼冷藏前4 d pH值的快速下降和冷藏4 d后pH值的快速上升,但SAEW处理对TBA的抑制效果不显著。在质构、持水力和色度变化方面,SAEW处理可适度提高冷藏大黄鱼的硬度、弹性和咀嚼性,有效减缓冷藏大黄鱼持水率、亮度值和黄度值的下降。在感官指标变化方面,鳃部是冷藏大黄鱼品质变化最快的感官指标,当鱼鳃感官评分为2时,与空白组对比,SAEW处理可延缓鱼鳃变化2 d。综合考虑,SAEW处理可以应用于大黄鱼冷藏保鲜并使冷藏贮藏期延长2 d,40 mg/L SAEW可以达到与80 mg/L SAEW处理同等的效果。

#### 参考文献:

- [1] 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—2023 [M]. 北京:中国农业出版社,2023.
- [2] 陈金玉,杨盈悦,黄家海,等. 4种来源大黄鱼营养成分的比较分析 [J]. 食品安全质量检测学报,2022,13(21): 7020-7027.
- [3] 钱婧,仲安琪,王露丹,等. 等离子体活性水对生鲜黄鱼杀菌效果及品质的影响 [J]. 食品工业科技,2020,41(10): 277-283.
- [4] DONG Z, LUO C, GUO Y M, et al. Characterization of New Active Packaging Based on PP/LDPE Composite Films Containing Attapulgite Loaded with *Allium sativum* Essence Oil and Its Application for Large Yellow Croaker (*Pseudosciaena crocea*) Fillets [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2019(20): 100320.
- [5] 裴聚鑫. 大黄鱼微冻保鲜的品质及表没食子儿茶素没食子酸酯(EGCG)对其微冻品质的影响 [D]. 上海:上海海洋大学,2023.
- [6] LAN W Q, LANG A, ZHOU D P, et al. Combined Effects of Ultrasound and Slightly Acidic Electrolyzed Water on Quality of Sea Bass (*Lateolabrax japonicus*) Fillets during Refrigerated Storage [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 81: 105854.
- [7] 范铭良,郝淑贤,李来好,等. 真空冷藏条件下罗非鱼内源蛋白酶对鱼片质构劣化的作用 [J]. 南方农业学报,2023,54(2): 555-563.
- [8] DIANTY R, HIRANO J, ANZAI I, et al. Electrolyzed Hypochlorous Acid Water Exhibits Potent Disinfectant Activity Against Various Viruses through Irreversible Protein Aggregation [J]. Frontiers in Microbiology, 2023(14): 1284274.
- [9] SUN J Z, JIANG X J, CHEN Y H, et al. Recent Trends and Applications of Electrolyzed Oxidizing Water in Fresh Foodstuff Preservation and Safety Control [J]. Food Chemistry, 2022, 369: 130873.
- [10] LIN J, ZHANG J S, ZHOU R W, et al. Plasma-Enhanced Microbial Electrolytic Disinfection: Decoupling Electro- and Plasma-Chemistry in Plasma-Electrolyzed Oxidizing Water Using Ion-Exchange Membranes [J]. Water Research, 2022, 225: 119174.

- [11] 刘阳, 王程可苒, 杨宇, 等. 低浓度微酸性电解水对纯培养及海虾中副溶血性弧菌与腐败希瓦氏菌的杀灭作用 [J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(4): 51-58.
- [12] TANTRATIAN S, KAEPHEN K. Shelf-Life of Shucked Oyster in Epigallocatechin-3-Gallate with Slightly Acidic Electrolyzed Water Washing under Refrigeration Temperature [J]. LWT, 2020, 118: 108733.
- [13] 朱文慧, 谭桂芝, 步营, 等. 低温等离子体耦合微酸性电解水对三文鱼的保鲜作用 [J]. 中国食品学报, 2024, 24(2): 228-238.
- [14] KIM W T, LIM Y S, SHIN I S, et al. Use of Electrolyzed Water Ice for Preserving Freshness of Pacific Saury (*Cololabis saira*) [J]. Journal of Food Protection, 2006, 69(9): 2199-2204.
- [15] YAN W, ZHANG Y Q, YANG R J, et al. Combined Effect of Slightly Acidic Electrolyzed Water and Ascorbic Acid to Improve Quality of Whole Chilled Freshwater Prawn (*Macrobrachium rosenbergii*) [J]. Food Control, 2020, 108: 106820.
- [16] WALAYAT N, TANG W, WANG X P, et al. Quality Evaluation of Frozen and Chilled Fish: A Review [J]. eFood, 2023, 4(1): e67.
- [17] 吴雨轩, 何瀚文, 张毅, 等. 南美白对虾在酸性电解水减菌处理下鲜度品质及挥发性风味物质的变化 [J]. 现代食品科技, 2022, 38(1): 296-305.
- [18] CICHOSKI A J, FLORES D R M, DE MENEZES C R, et al. Ultrasound and Slightly Acid Electrolyzed Water Application: An Efficient Combination to Reduce the Bacterial Counts of Chicken Breast during Pre-Chilling [J]. International Journal of Food Microbiology, 2019, 301: 27-33.
- [19] 林海潞, 胡兴成, 李帆, 等. 微酸性电解水处理对采后双孢蘑菇贮藏效果的影响 [J]. 福州: 福建农林大学学报(自然科学版), 2024, 53(5): 712-720.
- [20] CHEN H B, WANG M Y, YANG C F, et al. Bacterial Spoilage Profiles in the Gills of Pacific Oysters (*Crassostrea gigas*) and Eastern Oysters (*C. virginica*) during Refrigerated Storage [J]. Food Microbiology, 2019, 82: 209-217.
- [21] CHEN H B, WANG M Y, CHEN S J, et al. Effects of Ozonated Water Treatment on the Microbial Population, Quality, and Shelf Life of Shucked Oysters (*Crassostrea plicatula*) [J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2014, 23(2): 175-185.
- [22] 杨欣然, 陈婷婷, 林靖莹, 等. 鱿鱼滑加工工艺优化及其品质特性研究 [J]. 渔业研究, 2024, 46(5): 468-479.
- [23] WANG X Y, XIE J. Evaluation of Water Dynamics and Protein Changes in Bigeye Tuna (*Thunnus obesus*) during Cold Storage [J]. LWT, 2019, 108: 289-296.
- [24] 林靖莹, 任雯雯, 叶培洁, 等. 鱿鱼-铜盆鱼复合鱼糜凝胶品质和风味特性研究 [J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2024, 40(5): 139-148.
- [25] 金素莱曼. 酸性电解水与流化冰技术在大黄鱼保鲜贮藏中的应用研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2022.
- [26] 刘慧. 微酸性电解水对草鱼冷藏期间保鲜效果影响的研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.
- [27] 姜晓东, 王颖, 侯富晟, 等. 不同预处理方法对虹鳟保鲜品质的影响 [J]. 渔业科学进展, 2024, 45(5): 234-244.
- [28] GHARIBZAHEDI S M T, MOHAMMADNABI S. Effect of Novel Bioactive Edible Coatings Based on Jujube Gum and Nettle Oil-Loaded Nanoemulsions on the Shelf-Life of Beluga Sturgeon Fillets [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 95: 769-777.
- [29] 李佳, 钟洪亮, 丁甜, 等. 超声联合微酸性电解水处理克氏原螯虾条件优化及对其品质影响 [J]. 包装工程, 2024, 45(3): 139-146.

