蒋志丽, 吾成龙, 沈玲玲, 等. 微酸性电解水结合 ε-聚赖氨酸盐酸盐处理对大口黑鲈鱼片贮藏品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(6): 328−336. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030277

JIANG Zhili, WU Chenglong, SHEN Lingling, et al. Effect of Slightly Acidic Electrolyzed Water Combined with ε-Polylysine Hydrochloride on Storage Quality of *Micropterus salmoides* Fillets[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(6): 328−336. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030277

· 贮运保鲜 ·

微酸性电解水结合 ε-聚赖氨酸盐酸盐处理对大口黑鲈鱼片贮藏品质的影响

蒋志丽[1], 吾成龙[1], 沈玲玲[2], 吴　震[2], 王阳光[1,*], 陆胜民[3,*]

（1.浙江海洋大学食品与药学学院, 浙江舟山 316022;
2.湖州莼鲈生态农业发展有限公司, 浙江湖州 313008;
3.农产品质量安全全国重点实验室, 全省生鲜食品智慧物流与加工重点实验室, 浙江省农业科学院食品科学研究所, 浙江杭州 310021）

摘　要: 为研究微酸性电解水（slightly acidic electrolyzed water，SAEW）和 ε-聚赖氨酸盐酸盐（ε-polylysine hydrochloride，ε-PLH）结合处理对大口黑鲈鱼片冷藏品质的影响，本文选取重量为 500~800 g 的鲈鱼，将其净化处理后切成 30±3 g/片的鱼片。设置无菌纯净水（CK）、50 mg/L SAEW（SAEW）、0.3% ε-PLH（PLH）、50 mg/L SAEW 与 0.3% ε-PLH 混合（MIX）四组处理，常温下对鱼片按 1:5（w/v）料液比进行 15 min 浸泡处理，沥干后用聚乙烯密封袋包装，于 4 ℃ 冷藏。定期测定冷藏期间鲈鱼片的微生物指标、理化指标和感官评分。结果表明，MIX 组在贮藏第 12 d 时菌落总数（6.58 lg CFU/g）仍低于国际食品微生物规范委员会规定的最高安全限值（7.00 lg CFU/g），而 CK、SAEW 和 PLH 组分别在第 8、12 和 12 d 超标；MIX 组挥发性盐基氮含量（13.42 mg/100 g）和硫代巴比妥酸值（0.55 mg/kg）均显著低于单独处理组（P<0.05），且 pH 上升最缓（7.10）。微生物多样性分析显示，MIX 组腐败菌假单胞菌属相对丰度（78%）较 CK 组（85%）显著降低（P<0.05），且色泽稳定性（L^*值下降 6.9%、a^*值变化最小）和质构特性（硬度保留率 70%）优于单一处理。感官评分证实 MIX 组在贮藏第 12 d 仍保持较高接受度。综上，微酸性电解水与 ε-聚赖氨酸盐酸盐协同作用可有效延缓大口黑鲈鱼片在冷藏期间的品质劣变，为我国淡水鱼预制净菜的加工与销售提供了理论参考和实践技术思路。

关键词: 微酸性电解水, ε-聚赖氨酸盐酸盐, 大口黑鲈鱼片, 贮藏品质, 微生物多样性, 协同作用

中图分类号: TS254.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)06−0328−09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030277　　本文网刊:

Effect of Slightly Acidic Electrolyzed Water Combined with ε-Polylysine Hydrochloride on Storage Quality of *Micropterus salmoides* Fillets

JIANG Zhili[1], WU Chenglong[1], SHEN Lingling[2], WU Zhen[2], WANG Yangguang[1,*], LU Shengmin[3,*]

（1.College of Food and Pharmacy, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China;
2.Huzhou Chun Lu Ecological Agriculture Development Co., Ltd., Huzhou 313008, China;
3.State Key Laboratory for Quality and Safety of Agro-products, Zhejiang Key Laboratory of Intelligent Logistics and Processing of Fresh Products, Institute of Food Science, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China）

Abstract: To investigate the effects of combined treatment with slightly acidic electrolyzed water (SAEW) and ε-polylysine

收稿日期: 2025−03−20

基金项目: 湖州市重点研发计划项目农业“双强”专项（2023ZD2040）。

作者简介: 蒋志丽（2001−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 2062392683@qq.com。

*** 通信作者:** 王阳光（1974−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品加工与贮藏工程, E-mail: 634449563@qq.com。
陆胜民（1969−）, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 1010508971@qq.com。

hydrochloride (ε-PLH) on the refrigerated quality of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) fillets, this study selected bass with a weight of 500~800 g, processed it into fillets weighing 30±3 g fillets after purification. Four treated groups were set up: Sterile purified water (CK), 50 mg/L SAEW (SAEW), 0.3% ε-PLH (PLH), and a mixture of 50 mg/L SAEW and 0.3% ε-PLH (MIX). Fillets were soaked in the solutions at a 1:5 (w/v) ratio for 15 minutes, drip dried, sealed in PVC bags, and stored at 4 ℃. Microbial, physicochemical, and sensory evaluations were done regularly. Results indicated that by day 12 of storage, the total bacterial count in the MIX group (6.58 lg CFU/g) remained below the maximum safety limit (7.00 lg CFU/g) stipulated by International Commission on Microbiological Specifications for Foods (ICMSF), while the CK, SAEW, and PLH groups exceeded this limit by 8, 12, and 12 day, respectively. The MIX group exhibited significantly lower volatile basic nitrogen (TVB-N) content (13.42 mg/100 g) and thiobarbituric acid (TBA) value (0.55 mg/kg) compared to individual treatment groups (P<0.05), along with the slowest pH increase (7.10). Microbial diversity analysis revealed that the relative abundance of the spoilage bacterium *Pseudomonas* in the MIX group (78%) was significantly lower than that in the CK group (85%) (P<0.05). Additionally, the MIX group demonstrated superior color stability (only a 6.9% decrease in L^* value and minimal change in a^* value) and texture properties (70% hardness retention) compared to individual treatments. Sensory evaluation confirmed that the MIX group maintained higher acceptability even on day 12 of storage. In conclusion, the combination of SAEW and ε-PLH effectively delayed quality deterioration in refrigerated *Micropterus salmoides* fillets, offering a valuable reference for processing and marketing freshwater fish ready-to-cook products in China.

Key words: slightly acidic electrolyzed water; ε-polylysine hydrochloride; *Micropterus salmoides* fillets; storage quality; microbial diversity; synergistic effect

大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)属于真鲈科，是我国最主要的淡水鱼种之一。其肉质细嫩，营养丰富，脂肪含量低，蛋白质含量高，还富含矿物质、维生素、必需氨基酸和必需脂肪酸等多种营养物质[1]。随着预制菜市场的兴起和消费者对营养健康食品的需求增加，大口黑鲈因其营养价值高，成为水产品加工企业开发预制净菜的热门选择[2]。然而，大口黑鲈体内酶活性强，宰杀后鱼体自溶速率快，易腐败变质，导致资源浪费[3]。

当前鲈鱼预制净菜工业化生产主要依赖低温冷藏、真空包装及化学保鲜剂等保鲜技术，这些方法虽已形成完善的技术体系[4]，但在实际应用中仍存在显著局限性：低温冷链运输能耗高，真空包装设备投入成本高，而化学合成保鲜剂的潜在健康风险引发消费者担心。因此，开发基于天然抗菌或抗氧化物质的保鲜技术，通过抑制微生物生长和延缓脂质氧化，同时避免有害残留，成为更具潜力的解决方案。

微酸性电解水(slightly acidic electrolyzed water, SAEW)和 ε-聚赖氨酸盐酸盐(ε-polylysine hydrochloride, ε-PLH)是两种具有良好应用前景的水产绿色保鲜剂。SAEW 通过在无隔膜电解槽中电解 NaCl 或稀盐酸溶液制得，其主要活性成分为 HClO，具有安全性高、成本低且使用后无残留等优点[5]，在 pH5.0~6.5 范围内会导致微生物死亡[6]。Li 等[7] 研究发现，ε-PLH 是一种均聚物。ε-PLH 易溶于水，在自然环境下能够被生物降解，对人体没有毒性[8]。目前 ε-PLH 已被我国获批为食品添加剂[9]。蓝蔚青等[10] 发现 ε-PLH 在低浓度下可有效抑制特定腐败菌的生长。

大口黑鲈鱼片作为非即食预制水产品，需经加工方可食用，因此在筛选保鲜方案时，除考量抑菌效果外，还需确保不影响鱼片的质量。研究表明[11]，单一抑菌剂难以实现完全抑菌效果，而复合保鲜技术通过多靶点协同作用可抑制腐败变质，能更好地保持鱼片的质构特性等关键品质指标，在预制水产品加工中具有重要应用价值[12]。如 Zheng 等[13] 研究表明，姜黄素介导的光动力灭活与 ε-PLH 联合处理大黄鱼能显著抑制其菌数总数和假单胞菌数量。

目前，关于 SAEW 和 ε-PLH 对大口黑鲈鱼冷藏品质的联合效果研究还鲜有报道。本研究旨在探讨 SAEW 和 ε-PLH 单一处理及复合处理对大口黑鲈鱼片冷藏期间品质特性的影响，为二者在抑制鱼片的腐败和改善品质方面提供理论参考，对淡水鱼预制净菜的发展有促进意义。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

500~800 g 大口黑鲈鱼　杭州农发城市厨房；微酸性电解水　烟台方心水处理设备有限公司；ε-聚赖氨酸盐酸盐　食品级，浙江银象生物工程有限公司；硼酸、碳酸钾、阿拉伯胶、甘油、甲基红指示剂、甲基蓝指示剂、磷酸二氢钾、氯化钠、盐酸、无水乙醇等均为分析纯，上海麦克林生化有限公司；PCA 平板计数琼脂培养基　上海源叶生物科技有限公司；Fast Lee DNA 土壤试剂盒　杭州利贞生物制药科技有限公司；Gene JET 凝胶提取试剂盒　美国 Thermo Scientific 公司；New England Biolabs Library Prep Kit　美国 NEB公司。

PHS-2F 实验室 pH 计　梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司；FA124C 电子分析天平　上海力辰邦西仪器有限公司；TMS-Pro 均质机　北京盈盛恒泰科技有限公司；SW-CJ-2FD 洁净工作台　苏州安泰空气技术有限公司；DHG-9240A 鼓风干燥机　上海

皓庄仪器有限公司; 902GP-ULTS 超低温冰箱　赛默飞世尔科技有限公司; DS-200 色差仪　彩谱科技有限公司; FSH-2A 高速匀浆机　金坛区西城新瑞仪器厂; FE28-Standard 台式压力蒸汽灭菌器　上海博讯实业有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　原料预处理　选取大小、规格较一致的大口黑鲈鱼, 先将其击昏后去头、鱼鳞、内脏和腹内黑膜, 清洗干净胴体, 再沿着脊椎骨切至鱼尾位置, 取鱼片长 10 cm、宽 5 cm、厚 2±1 cm, 30±3 g/片, 并用清水将鱼片表面的残血、脏污清洗干净, 沥干备用[14]。

1.2.2　最佳有效氯浓度筛选　将鱼片按 1:5(w/v)料液比在不同有效氯浓度(20、30、40、50、60 mg/L)的 SAEW 中浸泡 15 min 作为处理组; 用无菌纯净水浸泡作为对照组。浸泡后用滤纸吸去鱼片上残余料液或水分, 使用聚乙烯密封袋包装, 于 4 ℃ 冰箱避光贮藏。通过测定鱼肉 pH、白度和菌落总数确定 SAEW 对维持鱼片品质的最佳有效氯浓度。

1.2.3　鱼片分组及保鲜处理　将预处理好的鱼片随机分为 4 组, 按 1:5(w/v)料液比分别在无菌纯净水(CK)、50 mg/L 微酸性电解水(SAEW)、0.3% ε-聚赖氨酸盐酸盐(PLH)、50 mg/L 微酸性电解水与 0.3% ε-聚赖氨酸盐酸盐混合液(MIX)中浸泡 15 min 后使用滤纸吸去多余溶液, 使用聚乙烯密封袋对鱼片分别进行包装, 于 4 ℃ 冰箱内贮藏。通过定期测定菌落总数、挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)值、pH、硫代巴比妥酸(thiobarbituric acid, TBA)、白度值、质构和感官评分, 确定保持鱼片品质的最佳处理方案。

1.2.4　指标测定

1.2.4.1　菌落总数测定　测定方法参照 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》进行操作[15]。

1.2.4.2　pH 测定　称取 2 g 鱼片样品, 打碎后于 20 mL 无菌纯净水中浸泡 30 min, 过滤, 测定 pH, 每组滤液做 3 个平行, 取平均值。

1.2.4.3　白度的测定　将 5 g 鱼肉片平铺于色差杯的底部, 使用色差计测定肉片的明度值(L^*值)、红绿色值(a^*值)和黄蓝色值(b^*值)。每组样品取 3 次分别进行检测, 每次测得 3 组数据, 取平均值[16]。白度值(whiteness)的计算方法如下:

$$W = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}}$$

式中: W 表示为白度值; L^*为明度值; a^*和 b^*分别为色度值, 即红绿色值和黄蓝色值。

1.2.4.4　TVB-N 值测定　测定方法参考 GB 5009.228-2016《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》[17] 进行操作。

1.2.4.5　硫代巴比妥酸值(Thiobarbituric acid, TBA)测定　测定参照 GB 5009.181-2016《食品安全国家标准 食品中丙二醛的测定》[18] 进行操作。称取 5 g 搅碎均匀的鲈鱼片样品, 加入 50 mL 三氯乙酸混合液后, 均质过滤。取 5 mL 滤液与 5 mL TBA 溶液混匀后, 于 90 ℃ 水浴反应 30 min, 取出冷却至室温后, 在 532 nm 处测量吸光度, 重复测量 3 次。

1.2.4.6　质构的测定　参照张艳等[19] 的方法, 先将冷藏中的鱼片于室温下放置 30 min, 防止温度波动对鱼片质构的影响, 再将鱼片切成 1.5 cm×1.5 cm×1.5 cm 的正方体。使用 P/50R 测试探头, 将每个样品两次压缩, 压缩 50%, 测前速率、测试速率、测后速率均为 1 mm/s, 探头 2 次测定时间间隔为 2 s, 测定模式和选项为 TPA。

1.2.4.7　微生物多样性分析　使用 Fast Lee DNA 土壤试剂盒从鲈鱼片中提取样本总基因组 DNA, 在 1% 琼脂糖凝胶上监测其 DNA 浓度和纯度, 然后根据浓度用无菌纯净水将 DNA 稀释至 1 ng/μL。对细菌的 16S rDNA V3~V4 区段进行聚合酶链式反应(polymerase chain reaction, PCR)扩增[20]。其上游引物为 341F(5'-CCTAYGGGRBGCASCAG-3'), 下游引物为 806R(5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3'), 并且使用带有条形码的特异性引物扩增 16 s 基因[21]。将等体积的缓冲液(含有 SYB green 荧光探针)与 PCR 产物混合, 并在 2% 琼脂糖凝胶上进行电泳检测, 再选择具有 400~450 pb 之间明亮主条带的样品进行进一步实验。将 PCR 产物按等密度比例混合后, 使用 Gene JET 凝胶提取试剂盒纯化混合物 PCR 产物。产物纯化后使用 NEB Library Prep Kit for Illumina 生成测序文库, 经过实时荧光定量 PCR 分析合格后, 基于 Illumina MiSeq 平台进行测序。

1.2.4.8　感官评价　由来自实验室的 10 名科研组成员(男女各 5 名, 年龄 25±2 岁)进行感官评价[22]。对鲈鱼片样品外观、色泽、气味和质地按百分制(表 1, 0 分-极度不喜欢, 100 分-极度喜欢)进行评分。满

表 1　感官评定标准

Table 1　Sensory assessment standards

分数(分)	外观(25%)	色泽(25%)	气味(25%)	质地(25%)
81~100	非常明亮	肌肉切面富有光泽, 色泽鲜亮	鱼肉固有的鲜味	坚实富有弹性
61~80	明亮	肌肉切面有关泽, 色泽较亮	鲜味消失, 略带异味	坚实有弹性
41~60	微暗	肌肉切面无光泽, 色泽较暗淡	鲜味消失, 有腥臭味	稍有弹性
0~40	发暗	肌肉切面无光泽, 色泽暗淡	较大的腥臭味	无弹性

分 100 分被认定为是单项指标的最高质量，各项指标评分按 25% 的权重比例综合计算得出，其值越高表示总体品质越高。

1.3　数据处理

所有实验重复 3 次，结果以平均值±标准差表示。采用 Excel 2019 软件对数据进行统计分析，使用 SPSS 27.0 软件分析差异显著性，$P<0.05$ 表示差异显著。采用 Origin 2021 软件绘图。

2　结果与分析

2.1　最佳有效氯浓度的确定

菌落总数（total viable count，TVC）是评估水产品新鲜度的重要微生物指标。如图 1A 所示，经

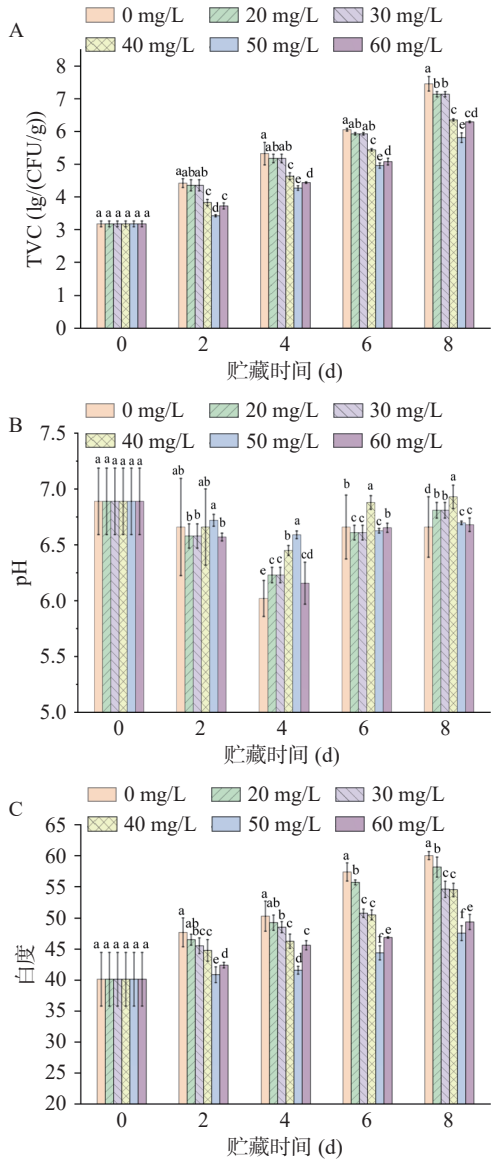


图 1　不同次氯酸浓度处理对鲈鱼片冷藏期间菌落总数（A）、pH（B）和白度（C）变化的影响

Fig.1　Effect of different hypochlorous acid concentrations on the changes of total viable count (TVC) (A), pH (B) and whiteness (C) of *Micropterus salmoides* fillets during refrigeration

注：不同小写字母表示在相同的贮藏时间下不同处理样品的数据存在显著差异（$P<0.05$），图 2~图 5、图 8 同。

SAEW 处理的各组鲈鱼片的 TVC 值总体呈上升趋势。鲜鲈鱼片的初始 TVC 值为 3.17 lg CFU/g，而在贮藏后期（第 8 d），对照组的 TVC 值达到 7.45 lg CFU/g。国际食品微生物规范委员会规定食品微生物最高安全限为 7.0 lg CFU/g[23]，因此贮藏后期对照组的鲈鱼片已超出可食用范围。其中 50 mg/L 次氯酸浓度处理的鲈鱼片 TVC 值最低（5.81 lg CFU/g），说明该浓度控制鲈鱼片中微生物数量增长的效果最佳。因此，选择 50 mg/L 次氯酸浓度的 SAEW 进行后续的试验。

pH 是评估鱼肉品质的重要指标之一[24]。如图 1 B 所示，随贮藏时间的延长，各组鲈鱼片的 pH 呈先下降后上升的趋势，这一结果与吴怡等[25] 在研究微酸性电解水结合迷迭香提取物对冷藏鲈鱼片品质影响时的 pH 变化趋势一致。这可能是由于肌肉中糖原在无氧条件下酵解生成乳酸，同时 ATP 分解产生磷酸[26]，这些酸性产物的积累导致了鱼肉 pH 降低，然后上升可能是由于蛋白质发生分解而产生挥发性盐基氮组成的化合物。随贮藏时间延长，与对照组相比，50 mg/L 次氯酸处理的鱼肉在贮藏第 4 d 的 pH 显著最高（$P<0.05$），第 8 d 时的 pH 亦显著最低（$P<0.05$），表明该浓度抑制鱼肉中微生物的生长，减缓其腐败速率效果最好。

颜色是影响水产品可接受性的一个重要参数[27]。如图 1C 所示，贮藏当天的白度值约为 40。随着贮藏时间的延长，鲈鱼肌肉中的蛋白质（尤其是肌原纤维蛋白和肌浆蛋白）会发生变性，导致光散射增强，从而使肌肉表面反射更多的光，即表现为白度值升高。而 50 mg/L 次氯酸处理组的白度值变化最小，说明用次氯酸水浸泡鲈鱼片可以控制其颜色改变。

2.2　不同处理后鲈鱼片菌落总数的变化

如图 2 所示，随着贮藏时间的延长，各组鲈鱼片的微生物数量均呈现上升趋势。MIX 组在贮藏 12 d 时的菌落总数为 6.58 lg CFU/g，未超过国际食品微生物规范委员会规定的最高安全限，而其他三组均高于 7 lg CFU/g。从作用机制来看，SAEW 能够破坏细菌细胞壁，导致微生物死亡，而 ε-PLH 则通过离子吸附作用干扰细胞膜功能，导致微生物细胞的生理损

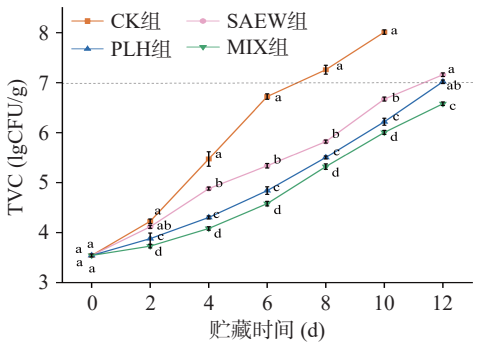


图 2　贮藏期间鲈鱼片的菌落总数的变化

Fig.2　Changes in the total viable count (TVC) of *Micropterus salmoides* fillets during storage

伤[28], 两者的复合使用表现出协同增效作用, 能够更有效地抑制微生物生长。

2.3 不同处理后鲈鱼片 pH 的变化

pH 是判断其新鲜度的重要指标。如图 3 可知, 四组鱼肉的 pH 在贮藏期都呈先下降后上升的趋势。鱼片初始 pH 为 6.89, 贮藏初期 pH 下降的原因可能是鱼肉中糖原发生糖酵解反应产生乳酸, 也可能是微生物代谢产生的二氧化碳进入鱼肉后形成碳酸使得 pH 下降[28]。随着贮藏时间的延长, pH 上升主要是由于蛋白质在这一阶段发生分解而产生三甲胺、二甲胺以及氨等挥发性盐基氮组成的化合物[29]。MIX组在贮藏第 2 d 显著高于其他组(P<0.05), 在贮藏第 6~10 d 上升的最慢, 可能是 SAEW 和 ε-PLH 复合使用明显抑制了由微生物引起的碱性化合物的增长, 比单独使用更有效。

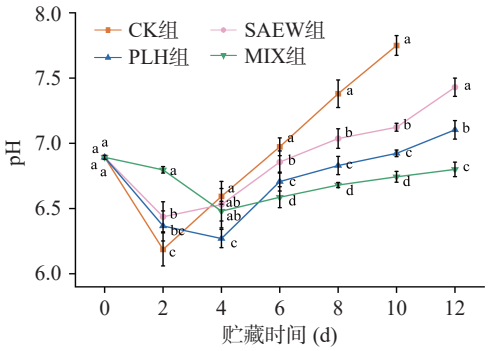


图 3 贮藏期间鲈鱼片的 pH 的变化

Fig.3 Changes in the pH of *Micropterus salmoides* fillets during storage

2.4 不同处理后鲈鱼片白度的变化

色泽也是评价鱼肉类产品新鲜程度的一个重要参考标准[30]。如表 2 所示, 随着贮藏时间的延长, 鲈鱼的亮度(L^*)和红度值(a^*)逐渐降低且差异显著(P<0.05), 黄度值(b^*)逐渐上升。鱼片色泽从贮藏初期较为鲜亮到后期变为暗淡, 这可能是肌肉组织中高铁血红蛋白和高铁肌红蛋白在鲈鱼肉表面累积导致的。MIX 组在一定程度上延缓了鱼体的色变, 表现为 a^*值下降幅度最小, 而 b^*值上升幅度最小, 说明 SAEW 和 ε-PLH 对稳定颜色也有协同作用。

2.5 不同处理后鲈鱼片 TVB-N 值的变化

由图 4 可知, 各组鲈鱼片的初始 TVB-N 含量相同。随着贮藏时间的延长, 各组的 TVB-N 含量均有不同程度的提高。鲈鱼片在腐败过程中因酶活性和细菌作用使蛋白质分解而产生氨和胺类从而使 TVB-N 含量增加[31], 其含量越高表明腐败程度越高。我国食品安全国家标准规定一级鲜肉的 TVB-N 值应低于 15 mg/100 g[17]。贮藏到第 10 d 时, CK 组的 TVB-N 值为 15.24 mg/100 g, 已经超过了可接受限值, 而其他三组显著低于 CK 组(P<0.05)。贮藏至第 12 d 时, MIX 组的 TVB-N 含量显著低于 SAEW 组和 PLH 组(P<0.05), 表明两者结合使用可

表 2 贮藏期间鲈鱼片的颜色变化

Table 2 Color changes of *Micropterus salmoides* fillets during storage

指标	贮藏时间 (d)	CK组	SAEW组	PLH组	MIX组
L^*值	0	59.48±0.02^{Aa}	59.48±0.02^{Aa}	59.48±0.02^{Aa}	59.48±0.02^{Aa}
	2	58.28±0.15^{Bb}	58.59±0.26^{Bb}	58.68±0.24^{Bb}	59.19±0.12^{Aa}
	4	54.82±0.23^{Cc}	56.11±0.12^{Cc}	57.48±0.22^{Bc}	58.25±0.23^{Aa}
	6	53.14±0.40^{Cd}	55.41±0.23^{Bc}	56.65±0.29^{Ad}	57.47±0.23^{Aa}
	8	51.51±0.22^{De}	52.74±0.26^{Cd}	55.34±0.28^{Be}	56.51±0.12^{Aa}
	10	50.68±0.32^{Cf}	52.57±0.20^{Be}	53.44±0.32^{Bf}	54.33±0.24^{Aa}
	12	–	51.30±0.14^{Bf}	51.82±0.32^{Bg}	52.55±0.24^{Aa}
a^*值	0	−0.35±0.47^{Aa}	−0.35±0.47^{Aa}	−0.35±0.47^{Aa}	−0.35±0.47^{Aa}
	2	−1.04±0.38^{Cb}	−0.52±0.04^{Ab}	−0.71±0.32^{Bb}	−0.43±0.21^{Aa}
	4	−1.11±0.68^{Ab}	−1.06±0.33^{Ac}	−1.12±0.23^{Ac}	−0.99±0.51^{Ab}
	6	−1.95±0.29^{Dc}	−1.36±0.15^{Bd}	−1.55±0.66^{Cd}	−1.21±0.11^{Ac}
	8	−2.55±0.12^{Dd}	−1.84±0.49^{Be}	−2.09±0.41^{Ce}	−1.45±0.54^{Ad}
	10	−3.3±0.31^{De}	−2.11±0.32^{Bf}	−2.23±0.48^{Cf}	−1.7±0.28^{Ae}
	12	–	−2.44±0.12^{Bg}	−2.59±0.025^{Bg}	−2.22±0.059^{Af}
b^*值	0	−3.43±0.97^{Af}	−3.43±0.97^{Ae}	−3.43±0.97^{Ae}	−3.43±0.97^{Ae}
	2	−3.30±0.49^{Ae}	−3.38±0.02^{Ae}	−3.34±0.08^{Ae}	−3.43±0.26^{Be}
	4	−2.96±0.52^{Ad}	−3.11±0.04^{Bd}	−3.07±0.39^{Bd}	−3.23±0.34^{Bd}
	6	−2.54±0.39^{Ac}	−2.99±0.92^{Cd}	−2.77±0.32^{Bc}	−3.05±0.05^{Cc}
	8	−1.86±0.38^{Ab}	−2.83±0.08^{Cc}	−2.53±0.23^{Bb}	−3.01±0.05^{Dc}
	10	−0.71±0.20^{Aa}	−2.33±0.20^{Cb}	−1.56±0.16^{Ba}	−2.55±0.26^{Db}
	12	–	−1.68±0.73^{Aa}	−1.38±0.32^{Aa}	−2.07±0.24^{Ba}

注: 不同大写字母表示在相同的贮藏时间, 不同处理样品的数据存在显著差异(P<0.05), 不同小写字母表示相同处理组, 不同贮藏时间存在显著差异(P<0.05); −表示未检测(因CK组微生物已超标)。

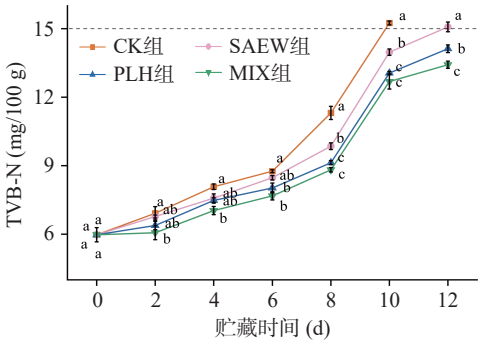


图 4 贮藏期间鲈鱼片的 TVB-N 的变化

Fig.4 Changes in TVB-N of *Micropterus salmoides* fillets during storage

进一步延缓鲈鱼片 TVB-N 含量的升高, 表现出协同增效作用。Lan 等[32] 在研究 SAEW 联合 D-聚赖氨酸-壳寡糖美拉德反应产物处理对真空包装鲈鱼品质的影响时, 发现处理组的 TVB-N 含量增加缓慢。这表明联合处理能有效延缓蛋白质分解。

2.6 不同处理后鲈鱼片 TBA 值的变化

TBA 值代表了脂质氧化产生的次级产物的程度, 当水产品肌肉的 TBA 值达到 1.0~2.0 mg/kg 时, 脂质氧化后形成的酮类和酮类小分子会产生恶臭的味道, 使水产品失去其食用价值[33]。随着贮藏时间的延长, 各组的 TBA 值均逐渐增加(图 5)。贮藏到第 10 d 时, 其他三组的 TBA 值显著低于 CK 组(P<0.05), 这是因为 SAEW 中含有次氯酸(HClO)和少

量活性氧（如羟基自由基等），这些成分能清除自由基，从而抑制氧化反应的发生[34]。ε-PLH 分子中含有多个氨基，能够与金属离子（如 Fe^{2+}、Cu^{2+}等）发生螯合作用。这些金属离子是脂质氧化的催化剂，而 ε-PLH 通过螯合作用可以阻断金属离子催化的氧化反应，从而延缓鱼肉制品的氧化。第 12 d MIX 组的 TBA 值最低，说明两者结合使用可进一步延缓鲈鱼片 TBA 值的升高，表现出协同增效作用。

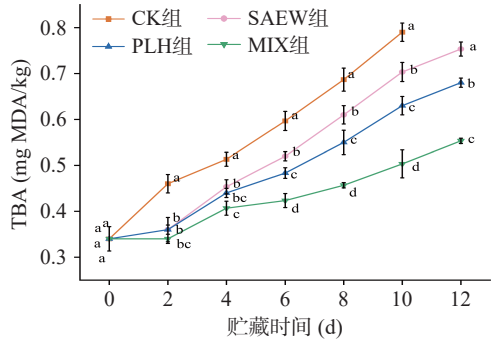


图 5　贮藏期间鲈鱼片的 TBA 值的变化

Fig.5　Changes in TBA value of *Micropterus salmoides* fillets during storage

2.7　不同处理后鲈鱼片质构的变化

全质构分析（texture profile analysis，TPA）是研究食品质构特性最常用的一种方法[35]。TPA 的测定过程是模仿人口腔咀嚼食物的过程，通过探头在压缩和回弹过程中所受的力随时间的变化进行分析，可以得到硬度、弹性、凝聚性等指标[22]。如表 3 所示，鱼片的初始硬度为 27.54 N，随着贮藏时间的增加，各组的硬度均呈下降趋势，其中 CK 组的下降速率最显著（$P<0.05$），各组下降幅度分别为 62%、41%、36% 和 30%。硬度值下降的原因可能是鱼体僵硬期后，随着糖原和 ATP 的减少，肌质网中的钙离子释放增加，激活肌肉内源性蛋白酶（如钙蛋白酶），这些蛋白酶水解肌球蛋白 Z 线部位而使肌节断裂，肌原纤维结构变得松散，从而使肌肉从僵直状态逐渐软化[36]。

内聚性是鱼肉质构分析中的重要指标，反映了鱼肉内部结构的结合强度和稳定性。弹性是指当有外力施加在样品上时，样品出现形变，而在去掉外力之后，样品恢复形变的程度。咀嚼性是指在口腔中反复咀嚼时所需的能量[37]。三者均随着贮藏时间延长而减小，这可能是由于鱼肉中内源酶使蛋白质发生降解，并造成蛋白质之间的共价交联结构遭到破坏以及肌纤维逐渐被破坏，使间隙增大，从而导致了内聚性和弹性下降[38]。此外，贮藏后期鱼肉中微生物的生长繁殖使鱼肉发生腐败变质，而鱼肉组织中胶原分子结构遭到的破坏也使胶原纤维变得无序间隙增大，结构因而变得比较疏松和软化，从而导致了咀嚼性下降。

2.8　不同处理后鲈鱼片微生物多样性的变化

利用 Illumina Miseq 高通量测序技术，选择四组鲈鱼片的贮藏中期和贮藏末期进行对比分析。

表 3　贮藏期间鲈鱼片硬度、内聚性、弹性和咀嚼性的变化

Table 3　Changes in hardness, cohesion, elasticity and chewiness of *Micropterus salmoides* fillets during storage

指标	贮藏时间(d)	CK组	SAEW组	PLH组	MIX组
硬度(N)	0	27.54±0.863^{a}	27.54±0.863^{a}	27.54±0.863^{a}	27.54±0.863^{b}
	2	26.62±1.111^{a}	28.13±0.372^{a}	27.95±0.166^{a}	28.42±0.224^{a}
	4	17.44±0.289^{b}	25.23±0.942^{b}	25.73±0.154^{b}	25.91±0.174^{c}
	6	15.22±0.41^{c}	23.25±0.382^{c}	23.49±0.444^{c}	22.63±0.426^{d}
	8	11.29±1.277^{d}	21.22±0.533^{d}	21.54±0.511^{d}	22.1±0.224^{d}
	10	10.44±0.285^{d}	20.38±0.433^{d}	19.92±0.429^{e}	20.54±0.322^{e}
	12	–	16.11±0.13^{e}	17.45±0.311^{f}	19.19±0.223^{f}
内聚性	0	0.68±0.04^{a}	0.68±0.04^{a}	0.68±0.04^{a}	0.68±0.04^{a}
	2	0.57±0.08^{b}	0.58±0.05^{b}	0.64±0.07^{ab}	0.65±0.03^{ab}
	4	0.53±0.07^{bc}	0.56±0.07^{b}	0.61±0.05^{b}	0.63±0.06^{b}
	6	0.50±0.04^{c}	0.55±0.05^{b}	0.57±0.03^{c}	0.61±0,02^{bc}
	8	0.45±0.08^{d}	0.51±0.03^{c}	0.54±0.08^{c}	0.59±0.03^{c}
	10	0.34±0.09^{e}	0.45±0.06^{d}	0.47±0.03^{d}	0.55±0.08^{cd}
	12	–	0.40±0.01^{d}	0.44±0.07^{d}	0.53±0.04^{d}
弹性	0	4.01±0.215^{a}	4.01±0.215^{a}	4.01±0.215^{a}	4.01±0.215^{a}
	2	3.18±0.138^{b}	3.46±0.105^{b}	3.57±0.106^{b}	3.63±0.098^{b}
	4	2.69±0.157^{c}	2.74±0.075^{c}	2.88±0.145^{c}	3.25±0.1^{c}
	6	2.24±0.254^{d}	2.38±0.083^{d}	2.57±0.09^{d}	2.99±0.051^{d}
	8	1.79±0.032^{e}	1.94±0.06^{e}	2.22±0.041^{e}	2.78±0.065^{e}
	10	1.55±0.075^{e}	1.81±0.05^{f}	2.18±0.065^{e}	2.41±0.062^{f}
	12	–	1.71±0.058^{f}	2.06±0.191^{e}	2.32±0.049^{f}
咀嚼性(mJ)	0	45.3±1.847^{b}	45.3±1.847^{a}	45.3±1.847^{a}	45.3±1.847^{a}
	2	27.1±1.374^{c}	32.5±1.106^{b}	35.4±0.709^{c}	41.9±0.986^{b}
	4	25.3±1.552^{c}	31.9±0.416^{b}	32±0.208^{d}	37.2±0.435^{c}
	6	24.6±0.665^{c}	26.5±0.230^{c}	28.8±0.608^{e}	32.7±0.305^{d}
	8	13.7±1.769^{d}	20.3±0.85^{e}	26.6±0.55^{f}	30.1±0.907^{e}
	10	52.7±2.706^{a}	18.3±0.416^{f}	26.1±0.519^{f}	28.6±0.611^{f}
	12	–	22.4±1.514^{d}	37.2±0.378^{b}	31.4±0.757^{d}

注：不同小写字母表示在相同处理组中不同贮藏时间存在显著差异（$P<0.05$）；–表示未检测（因CK组微生物已超标）。

表 4　冷藏鲈鱼片细菌 α 多样性指数的影响

Table 4　Effect of bacterial α diversity index in refrigerated *Micropterus salmoides* fillets

组别	OTUs指标	Shannon指标	Chao 1指标	Ace指标	Coverage指标
Day0	392	6.10	392	392	1.0
CK4	111	4.08	111	111.36	0.999967
SAEW4	142	4.66	143	143.33	0.999871
PLH4	140	4.21	140	140.36	0.9999667
MIX4	247	4.70	249.8	254.55	0.999451
CK10	95	4.19	98.5	98.3	0.999774
SAEW12	100	4.18	100.42	101.09	0.999903
PLH12	83	3.96	83.12	83.83	0.999935
MIX12	74	3.44	74.37	75.37	0.999903

注：SAEW12表示在鲈鱼片贮藏第12 d进行SAEW处理的组，其余组同理。

如表 4 所示，所有样品的覆盖率均高于 99%，表明测序结果的高度完整性。贮藏期间，4 组的 OTUs、Shannon 指数、Ace 指数和 Chao 1 指数呈现下降趋势，表明微生物群落的多样性和丰度均有所降低。

基于鲈鱼片样本门水平，本研究选取相对丰度大于 1% 的菌进行了分析（图 6）。在贮藏第 0 d 时，假单胞菌门（Pseudomonas）作为主要菌门，相对丰度处于 62%~70% 区间范围；拟杆菌门（Bacteroides）次

之, 相对丰度约为 25%; 厚壁菌门(Firmicutes)和放线菌门(Actinobacteriota)也占有一定比例, 而其他菌门相对丰度均小于 1%。这一结果与马慧敏等[39] 研究相似。随着贮藏时间的延长, 假单胞菌门和拟杆菌门的相对丰度逐渐增加。贮藏末期 SAEW12 中主要菌门为假单胞菌门和厚壁菌门, 其相对丰度约为 57% 和 25%; PLH12 中主要菌门为假单胞菌门和拟杆菌门, 其相对丰度约为 85% 和 12%; 而 MIX12 组中假单胞菌门的相对丰度为 78%, 拟杆菌门的相对丰度约为 19%。对菌落组成的分析结果表明, 假单胞菌门和拟杆菌门的相对丰度均随冷藏时间延长而增加, 说明二者在鲈鱼腐败变质过程中的作用逐渐增强, 尤其是假单胞菌门。

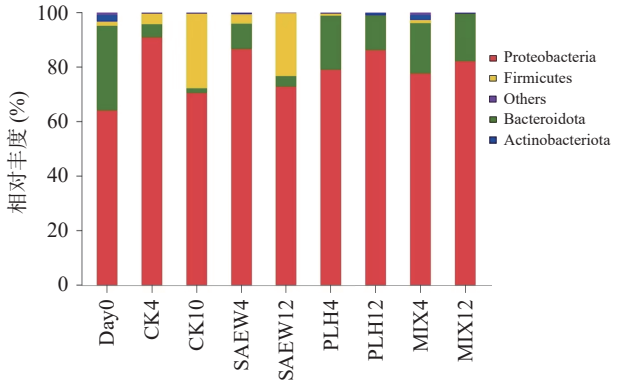


图 6 冷藏鲈鱼片腐败过程中的微生物组动态门水平变化

Fig.6 Variation of microbial biome dynamic gate level during the spoilage process of refrigerated *Micropterus salmoides* fillets

注: SAEW12 表示在鲈鱼片贮藏第 12 d 进行 SAEW 处理的组, 其余组同理, 图 7 同。

图 7 描述了属水平上四组鲈鱼片贮藏期间的细菌分布。在贮藏初期(day 0), 样品中微生物种类丰富且多样性较高, 其中假单胞菌属(*Pseudomonas*)、紫色杆菌属(*Janthinobacterium*)等腐败菌群较少。在贮藏中期, CK4 中假单胞菌属和气单胞菌属(*Aeromonas*)成为优势菌属, 而在 SAEW4 组和 PLH4 组中, 假单胞菌属的相对丰度低于对照组(CK4), 表明 SAEW 和 PLH 处理能够有效抑制假单胞菌属的

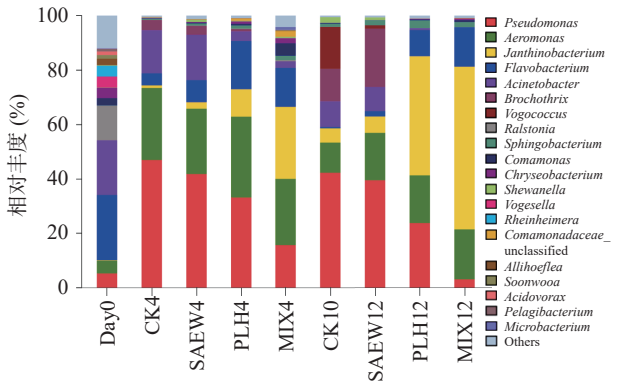


图 7 冷藏鲈鱼片腐败过程中的微生物组动态属水平变化

Fig.7 Diagram of the level of microbiome dynamics during the spoilage process of refrigerated *Micropterus salmoides* fillets

生长。MIX 组在贮藏第 4 d 仍保持了较高的微生物多样性, 导致鱼肉腐败的假单胞菌属相对丰度低。在贮藏末期, MIX12 的微生物组成与 CK10相比存在明显差异, 其中紫色杆菌属成为优势菌属, 其次为气单胞菌属, 而前期占优势的假单胞菌属相对丰度明显降低。结果表明, SAEW 与 ε-PLH 联合处理能够有效抑制假单胞菌属的生长, 并明显改变鱼片中微生物群落的结构。这一现象可能是 MIX 组对鲈鱼保鲜的主要原因。

2.9 不同处理后鲈鱼片的感官评价

如图 8 所示, 在贮藏初期鲈鱼片的感官评分可达 99 分, 表明其初始品质优良[40]。随着贮藏时间的延长, CK 组的感官评分显著下降(P<0.05)。第 10 d 时, 其评分降至 44 分, 样品出现强烈异味和明显色变。相比之下, 处理组样品仅表现出轻微异味, 且体表仍保持良好的光泽。第 12 d 时, MIX 组的感官评分显著高于 SAEW 组和 PLH 组(P<0.05), 说明 MIX 组通过其抗菌作用抑制微生物腐败, 两者联合使用可表现出协同增效作用。

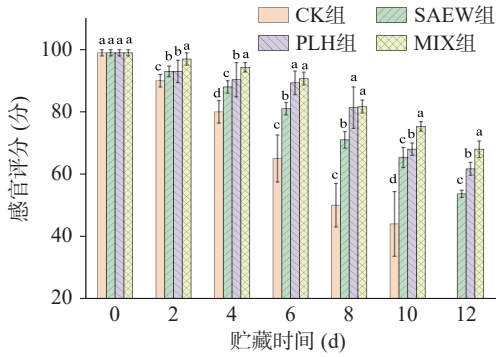


图 8 贮藏期间鲈鱼的感官评分的变化

Fig.8 Changes in sensory scores of *Micropterus salmoides* fillets during storage

3 结论

微酸性电解水(SAEW)与 ε-聚赖氨酸盐酸盐(ε-PLH)联合处理可有效延缓大口黑鲈鱼片在冷藏期间的品质劣变。微生物分析结果表明, 对照组(CK 组)和 SAEW 组的菌落总数分别在第 10 d 和第 12 d 达到国际食品微生物规范的最高安全限值(7.00 lg CFU/g), 而 PLH 组和 MIX 组在第 12 d 仍未超过该上限值, 其中 MIX 组的菌落总数最低, 仅为 6.58 lg CFU/g。理化指标分析表明, 与对照组相比, MIX 组的 pH 变化小, 并且抑制了 TVB-N 含量和 TBA 值的上升, 其 pH、TVB-N 值和 TBA 值在贮藏末期分别为 7.1、13.42 mg/100 g 和 0.55 mg/kg。在贮藏第 12 d 时, 与其他处理组相比, MIX 组处理的鲈鱼片颜色保持最为鲜亮, 同时腐败菌假单胞菌属的相对丰度低于其他组。此外, 50 mg/L SAEW 与 3% ε-PLH 联合处理的鲜鲈鱼片感官评分和可接受度也显著高于其他组(P<0.05)。综上所述, SAEW 与 ε-PLH 联合处理可协同发挥其抑菌作用, 提升鲈鱼片预制菜的品

质与安全性，减少因保鲜不当导致的损失。为预制菜市场提供了更优质、安全的水产品预制菜，能够满足消费者对便捷、美味且安全食品的需求。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

［1］ 黄佳珺, 李美锦, 陈亚楠, 等. EVOH-植酸复合活性包装膜对鲈鱼肉的保鲜效果[J]. 现代食品科技, 2023, 39(4): 146−153. ［HUANG Jiajun, LI Meijin, CHEN Yanan, et al. Fresh-keeping effect of EVOH-phytic acid composite active packaging films on bass (*Lateolabrax japonicus*) meat[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(4): 146−153.］

［2］ 贾平. 预制菜红烧鲈鱼加工工艺研究[J]. 农产品加工, 2023(11): 24−26. ［JIA Ping. Study on processing technology of braised sea bass with prefabricated dish[J]. Agricultural Products Processing, 2023(11): 24−26.］

［3］ 周磊. 饲料镁水平对淡水与海水环境中鲈鱼生长和生理影响的比较研究[D]. 厦门: 集美大学, 2012. ［ZHOU Lei. Effects of dietary magnesium levels on the growth and physiology response of Japanese seabass (*Lateolabrax japonicus*) cultured in freshwater and seawater: a comparative study[D]. Xiamen: Jimei University, 2012.］

［4］ 田凤. 冷藏南美白对虾生物防腐保鲜技术的研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2013. ［TIAN Feng. Study on biological preservation technology of refrigerated *Penaeus vannamei*[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2013.］

［5］ 李坤, 张俊磊, 申羽婷, 等. 微酸性电解水和超高压并行联合对三七块茎表面大肠杆菌杀菌效果研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(1): 223−233. ［LI Kun, ZHANG Junlei, SHEN Yuting, et al. Study on synergistic effects of slightly acidic electrolyzed water and ultra-high pressure parallel on *Escherichia coli* on the surface of *Panax notoginseng* tubers[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(1): 223−233.］

［6］ 杨佳, 吴俊杰, 郭全友, 等. 微波联合微酸性电解水处理对轻腌大黄鱼品质及风味的影响[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(13): 261−268. ［YANG Jia, WU Junjie, GUO Quanyou, et al. Effects of microwave combined with slightly acidic electrolytic water treatment on the quality and flavor of lightly salted large yellow croaker[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(13): 261−268.］

［7］ LI Chunsheng, SUN Wanqing, LIU Shucheng, et al. Efficient aluminum removal and microorganism inhibition in ready-to-eat jellyfish by slightly acidic electrolyzed water[J]. Food Bioscience, 2023, 53: 102599.

［8］ WANG Debao, FAN Simin, LI Xin, et al. Carboxymethyl chitosan/polyvinyl alcohol hydrogel films by incorporating MSNs as ε-PL carrier with pH-responsive controlled release and antibacterial properties[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2024, 46: 101360.

［9］ LIU Chenxia, LIU Hongru, WANG Chunfang, et al. Antifungal activity and mechanisms of ε-poly-l-lysine (ε-PL) against *Colletotrichum* lagenarium in marrow squash[J]. LWT, 2024, 199: 116057.

［10］ 蓝蔚青, 陈雪宁, 冯豪杰, 等. ε-聚赖氨酸盐酸盐对腐败希瓦氏菌的作用机制初探[J]. 上海海洋大学学报, 2022, 31(6): 1562−1569. ［LAN Weiqing, CHEN Xuening, FENG Haojie, et al. Preliminary research on the antibacterial mechanism of ε-polylysine hydrochloride against *Shewanella putrefaciens*[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2022, 31(6): 1562−1569.］

［11］ 吴昕宁, 李鸣泽, 梁释介, 等. 茶多酚-壳聚糖复合液对虹鳟鱼肉贮藏品质和菌群结构的影响[J]. 肉类研究, 2023, 37(2): 20−25. ［WU Xinning, LI Mingze, LIANG Shijie, et al. Effects of mixed solution of tea polyphenols and chitosan on storage quality and microbial community structure of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillets[J]. Meat Research, 2023, 37(2): 20−25.］

［12］ 杨旭. 新型生物保鲜剂在食品微生物防控中的应用[J]. 中外食品工业, 2024(18): 34−36. ［YANG Xu. Application of new biological preservative in food microbial prevention and control[J]. Global Food Industry, 2024(18): 34−36.］

［13］ ZHENG Shuangzhi, YAN Han, DENG Peiwei, et al. Enhancement of curcumin-mediated photodynamic inactivation against *Pseudomonas fluorescens* on fish fillets combined with ε-polylysine hydrochloride[J]. LWT, 2025, 217: 117344.

［14］ 李金星, 吴燕燕, 王悦齐, 等. 响应面法优化海鲈鱼小片的品质改良工艺技术[J]. 上海海洋大学学报, 2022, 31(5): 1283−1294. ［LI Jinxing, WU Yanyan, WANG Yueqi, et al. Response surface methodology to optimize the quality improvement technology of *Lateolabrax japonicus* small slices[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2022, 31(5): 1283−1294.］

［15］ 马群飞, 林坚. GB 4789.2-2016《菌落总数测定》应用现状[J]. 海峡预防医学杂志, 2021, 27(5): 79−81. ［MA Qunfei, LIN Jian. Application status of GB 4789.2-2016 Determination of total colonies[J]. Strait Journal of Preventive Medicine, 2021, 27(5): 79−81.］

［16］ 朱文慧, 范茂梅, 韩梦琳, 等. 绿原酸对蓝鳍金枪鱼肌肉品质及肌红蛋白构象的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(9): 398−408. ［ZHU Wenhui, FAN Maomei, HAN Menglin, et al. Effect of chlorogenic acid on quality and myoglobin conformation of bluefin tuna[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(9): 398−408.］

［17］ 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: 12. ［National Health and Family Planning Commission. GB 5009.228-2016 Determination of volatile basic nitrogen in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017: 12.］

［18］ 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中丙二醛的测定: GB 5009.181-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 1-6. ［National Health and Family Planning Commission. GB 5009.181-2016 Determination of malondialdehyde in foods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017: 1-6.］

［19］ 张艳, 王圣开, 聂青玉, 等. 不同原料预制烤鱼的营养成分及质构特性分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(22): 233−240. ［ZHANG Yan, WANG Shengkai, NIE Qingyu, et al. Analysis on the nutritional components and texture characteristics of prefabricated grilled fish with different fish species[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(22): 233−240.］

［20］ TAKANO A, UMALI D V, WARDHANA A H, et al. An ultra-simplified protocol for PCR template preparation from both unsporulated and sporulated *Eimeria* oocysts[J]. Poultry Science, 2025, 104(3): 104810.

［21］ 姚清, 潘创业, 姚伦广, 等. 大口黑鲈铜绿假单胞菌的分离鉴定与抗菌药物筛选[J]. 江苏农业科学, 2024, 53(1): 231−237. ［YAO Qing, PAN Chuangye, YAO Lunguang, et al. Isolation, identification, and antimicrobial drug screening of pseudomonas aeruginosa in largemouth Bass[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,

2024, 53(1): 231−237.]
[22] 陈俪锟, 王成, 詹炜君, 等. 发酵海鲈鱼工艺优化及品质控制研究[J]. 中国调味品, 2024, 49(12): 1−7. [CHEN Likun, WANG Cheng, ZHAN Weijun, et al. Study on process optimization and quality control of fermented sea bass[J]. China Condiment, 2024, 49(12): 1−7.]
[23] CARROLL M B, PAULSON A S. Micro-organisms in foods 2: Sampling for microbiological analysis; principles and specific applications[J]. Technometrics, 1977, 19(2): 221.
[24] FAISAL M, JACOBSON T, MEINERET L, et al. Development of pH indicator composite films based on anthocyanins and neutral red for monitoring minced meat and fish in modified gas atmosphere (MAP)[J]. Coatings, 2024, 14(6): 725.
[25] 吴怡, 蓝蔚青, 刘嘉莉, 等. 微酸性电解水结合迷迭香提取物对冷藏鲈鱼片品质变化的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(4): 47−55. [WU Yi, LAN Weiqing, LIU Jiali, et al. Effects of slightly acidic electrolyzed water combined rosemary extract on the quality change of sea bass fillets (*Lateolabrax japonicas*) during refrigerated storage[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(4): 47−55.]
[26] 张宇婷, 金玉颜, 彭斌, 等. 涂抹紫苏粉末对草鱼块贮藏品质的影响[J]. 中国食品学报, 2025, 25(4): 326−335. [ZHANG Yuting, JIN Yuyan, PENG Bin, et al. Effect of smearing *Perilla powder* on the storage quality of grass carp block[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25(4): 326−335.]
[27] 殷泽生, 戴振庭, 周瑜, 等. 基于鲜度指示剂的水产品新鲜度快速检测方法的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(18): 329−336. [YIN Zesheng, DAI Zhenting, ZHOU Yu, et al. Research progress of rapid freshness detection method of aquatic products based on freshness indicators[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(18): 329−336.]
[28] FENG Haojie, LAN Weiqing, SUN Xiaohong, et al. Effects of slightly acidic electrolyzed water pretreatment combined with biopreservatives on the shelf life of refrigerated obscure pufferfish (*Takifugu obscurus*)[J]. Journal of Food Science, 2021, 86(2): 484−494.
[29] NGUYEN H T, HILMARSDÓTTIR G S, TÓMASSON T, et al. Changes in protein and non-protein nitrogen compounds during fishmeal processing: Identification of unoptimized processing steps[J]. Processes, 2022, 10(4): 621.
[30] 罗丽, 许粟, 扶胜, 等. 肉及肉制品新鲜度影响因素及控制方法研究进展[J]. 肉类研究, 2025, 39(2): 55−66. [LUO Li, XU Su, FU Sheng, et al. A review of factors influencing the freshness of meat and meat products and methods for its control[J]. Meat Research, 2025, 39(2): 55−66.]
[31] LIU Chang, LI Ning, AN Xinyu, et al. A smart food freshness indicator film for shrimp and pork with the higher visuality, barrier, flame retardancy, and antibacterial effects[J]. Food and Bioprocess Technology, 2025, 18(5): 4805−4825.
[32] LAN Weiqing, SHAO Zhe, LANG Ai, et al. Effects of slightly acidic electrolyzed water combined with ε-polylysine-chitooligosaccharide Maillard reaction products treatment on the quality of vacuum packaged sea bass (*Lateolabrax japonicas*)[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 260(Pt 2): 129554.
[33] FENG Lifang, JIANG Tianjia, WANG Yanbo, et al. Effects of tea polyphenol coating combined with ozone water washing on the storage quality of black sea bream (*Sparus macrocephalus*)[J]. Food Chemistry, 2012, 135(4): 2915−2921.
[34] 何辉, 乔勇进, 柳洪入, 等. 次氯酸协同富氢水处理对绿豆芽生长特性、营养品质及抗氧化能力的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(15): 59−67. [HE Hui, QIAO Yongjin, LIU Hongru, et al. Effect of hypochlorous acid combined with hydrogen-rich water treatment on growth characteristics, nutritional quality and antioxidant capacity in mung bean sprouts[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(15): 59−67.]
[35] 刘艳, 汪友仁, 毛群芳, 等. 山药茯苓曲奇感官评定与质构评价相关性分析[J]. 粮食科技与经济, 2023, 48(2): 102−108. [LIU Yan, WANG Youren, MAO Qunfang, et al. Correlation analysis between sensory and texture evaluation of yam *Poria* cookie[J]. Grain Science and Technology and Economy, 2023, 48(2): 102−108.]
[36] 黄卉, 郑陆红, 李来好, 等. 不同预冷温度对鲈鱼冰藏期间质构和色差的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(24): 302−308. [HUANG Hui, ZHENG Luhong, LI Laihao, et al. Effects of different precooling temperature on texture and color of *Micropterus salmoides* during ice storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(24): 302−308.]
[37] 邵俊杰, 徐宇, 李佳佳, 等. 不同规格克氏原螯虾肌肉营养成分和品质特性的比较研究[J]. 天津农业科学, 2025, 31(1): 52−59. [SHAO Junjie, XU Yu, LI Jiajia, et al. Comparative study on muscle nutritional components and quality characteristics of different sizes of *Procambarus clarkii*[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2025, 31(1): 52−59.]
[38] 朱士臣, 张忠正, 周绪霞, 等. 去刺鱼肉的低温仿真成型工艺优化及其品质评价[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(23): 218−225,241. [ZHU Shichen, ZHANG Zhongzheng, ZHOU Xuxia, et al. Deboned fish cold-reconstituted technology mimicking natural fish and quality assessments[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(23): 218−225,241.]
[39] 马慧敏, 杨建远, 余诚玮, 等. 草鱼肉在 4 ℃ 冷藏中微生物多样性演变的研究[J]. 食品工业科技, 2026, 47(4): 1−12. [MA Huimin, YANG Jianyuan, YU Chengwei, et al. Study on the evolution of microbial diversity in grass carp meat during refrigeration at 4℃[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(4): 1−12.]
[40] 陈乐乐, 陈嘉澍, 黄桂颖, 等. 感官分析在广式传统肉品研制与品控中的应用研究进展[J]. 肉类研究, 2021, 35(12): 64−69. [CHEN Lele, CHEN Jiashu, HUANG Guiying, et al. Application of sensory analysis in development and quality control of Cantonese-style traditional meat products[J]. Meat Research, 2021, 35(12): 64−69.]