

# UVC-GA 抑菌液对罗非鱼皮在 0 °C 贮藏下微生物区系及品质的影响

吕敏<sup>1</sup>, 甘晖<sup>2</sup>, 何金钊<sup>3</sup>, 冯鹏霏<sup>1</sup>, 付玉春<sup>4</sup>, 陈秀荔<sup>2</sup>, 赵永贞<sup>2</sup>, 覃良举<sup>5</sup>, 马华威<sup>1</sup>

(1. 广西壮族自治区水产科学研究院, 广西南宁 530036) (2. 广西水产畜牧学校水产系, 广西南宁 530035) (3. 广西壮族自治区水产引育种中心, 广西南宁 530031) (4. 广西农业职业技术学院食品工程系, 广西南宁 530073) (5. 广西鲜之益投资有限公司, 广西南宁 530044)

**摘要:** 紫外短波 (UV-C) 辐照没食子酸 (GA) 溶液 12 h 形成一种新的抑菌液 (UVC-GA), 与 GA 和去离子无菌水 (DI) 分别处理鱼皮后在 0 °C 贮藏, DI 组、GA 组和 UVC-GA 组的贮藏期感官评价货架期分别为 5 d、7 d 和 8 d。对优势菌属测定结果发现, 1D 组 5 d (以下简称 DI5) 的优势菌属是 *Pseudoalteromonas* (31.31%)、*Candidatus-Bacilloplama* (21.50%) 和 *Litorimicrobium* (17.11%), GA 组 7 d (以下简称 GA7) 的优势菌属是 *Aliivibrio* (42.40%)、*Pseudoalteromonas* (20.51%) 和 *Psychrobater* (10.32%), UVC-GA 组 8 d (以下简称 UVC-GA8) 的优势菌属 *Aliivibrio* (29.81%)、*C. Bacilloplama* (20.90%) 和 *Moritella* (11.11%), UVC-GA8 的 *Vibrio* 和 *Pseudoalteromonas* 相对含量均较低。对鱼皮品质相关指标检测发现, UVC-GA 组的 TVB-N、TVC、腐胺、尸胺、次黄嘌呤核苷 (HxR) 和次黄嘌呤 (Hx) 的含量均比较 DI 组和 GA 组低, 但 5'-单磷酸肌苷 (IMP) 含量高于其它组; UVC-GA8 的 K 值显著低于 DI5 和 GA7, 随着贮藏时间延长 UVC-GA 组的 pH 值呈下降线性趋势, 而 DI 组和 GA 组则呈“V”形。以上结果表明, UVC-GA 组影响了罗非鱼皮在 0 °C 贮藏下的微生物区系、TVB-N、TVC、生物胺、ATP 复合物、K 值等变化, 应用 UVC-GA 抑菌液保鲜使得鱼皮货架期变长。

**关键词:** 罗非鱼皮; 没食子酸; 紫外; 微生物区系; 品质; 生物胺

文章编号: 1673-9078(2021)08-142-151

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.8.0918

## Effects of UVC-GA on the Microflora and Quality of Tilapia Skin Stored at 0 °C

LYU Min<sup>1</sup>, GAN Hui<sup>2</sup>, HE Jin-zhao<sup>3</sup>, FENG Peng-fei<sup>1</sup>, FU Yu-chun<sup>4</sup>, CHEN Xiu-li<sup>2</sup>, ZHAO Yong-zhen<sup>2</sup>, QIN Liang-ju<sup>5</sup>, MA Hua-wei<sup>1</sup>

(1. Guangxi Academy of Fishery Sciences, Nanning 530036, China) (2. Guangxi Aquatic Animal and Husbandry College Aquaculture, Nanning 530035, China) (3. Guangxi Aquaculture Breeding Center, Nanning 530031, China) (4. Guangxi Agricultural Vocational and Technical College Food Engineering, Nanning 530073, China) (5. Guangxi Xianyi Investment Co. Ltd., Nanning 530044, China)

**Abstract:** A new antibacterial solution, UVC-GA was prepared by exposing gallic acid (GA) to UV-C for 12 h. Tilapia skins were treated with UVC-GA, GA, or deionized water (DI), and then stored at 0 °C. Results showed that the sensory shelf-lives of the skin samples treated with DI, GA, and UVC-GA were five, seven, and eight days, respectively. The dominant bacterial genera in the DI-treated skins on day five (DI5) were *Pseudoalteromonas* (31.31%), *Candidatus-Bacilloplama* (21.5%), and *Litorimicrobium* (17.11%). The dominant genera in the GA-treated

引文格式:

吕敏,甘晖,何金钊,等.UVC-GA 抑菌液对罗非鱼皮在 0 °C 贮藏下微生物区系及品质的影响[J].现代食品科技,2021,37(8): 142-151

LYU Min, GAN Hui, HE Jin-zhao, et al. Effects of UVC-GA on the microflora and quality of tilapia skin stored at 0 °C [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(8): 142-151

收稿日期: 2020-10-08

基金项目: 广西重点研发计划项目 (桂科 AB19245013); 广西重点实验室自主研究课题 (19-A-02-04)

作者简介: 吕敏 (1977-), 女, 工程师, 研究方向: 水产加工与贮藏工程; 共同第一作者: 甘晖 (1976-), 女, 高级工程师, 研究方向: 水产品加工与贮藏

通讯作者: 马华威 (1986-), 男, 博士, 工程师, 研究方向: 水产食品生物技术与加工贮藏

skins on day seven (GA7) were *Aliivibrio* (42.4%), *Pseudoalteromonas* (20.51%), and *Psychrobacter* (10.32%). The dominant bacterial genera in the UVC-GA-treated skins on day eight (UVC-GA8) were *Aliivibrio* (29.81%), *Candidatus-Bacilloplama* (20.9%) and *Moritella* (11.11%). The relative abundance of *Aliivibrio* and *Pseudoalteromonas* in UVC-GA8 was lower than that in DI5 and GA7. In addition, the amounts of quality-related chemical indicators, including TVB-N, TVC, putrescine, cadaverine, inosine, and hypoxanthine were lower in the UVC-GA-treated samples than those in the DI- and GA-treated samples; whereas inosine-5'-monophosphate content was higher in the UVC-GA-treated skins. The K value of UVC-GA8 was significantly lower than that of DI5 and GA7. V-shaped pH-time curves were obtained for both the DI and GA groups, whereas the pH decreased with time in the UVC-GA group. These results suggested that UVC-GA inhibited the deterioration of tilapia skin quality. The prolongation of the shelf life of tilapia skins might be attributed to UVC-GA-induced alterations in the microflora, changes in the contents of TVB-N, TVC, biogenic amines, and ATP complexes, and decrease in the K value of the skins stored at 0 °C.

**Key words:** tilapia skin; gallic acid (GA); ultraviolet; microbiota composition; quality; biogenic amine

罗非鱼 (*Tilapia mossambica*), 是世界及我国重要经济淡水鱼类, 随着罗非鱼养殖和加工出口量与日俱增, 对其进行鱼片加工或鱼糜加工时需要剥离的鱼皮也随之逐年增多<sup>[1,2]</sup>。鱼皮是渔业加工的副产品, 蛋白质含量很高, 较鱼肌肉中蛋白质还要高, 其中胶原蛋白的含量占其蛋白质总量的 80%以上<sup>[3]</sup>。然而, 具有健脾止痢、润肺止咳、补肾益肝、补胃催乳、营养滋补、去湿等功能的罗非鱼皮, 往往被作为水产品加工的下脚料不被人们重视<sup>[4]</sup>。近几年鱼皮的价值逐渐被许多国家认识, 鱼皮是食品工业、医药及化工生产的重要原料, 充分利用鱼皮资源, 开发鱼皮制品, 已经成为淡水鱼下脚料综合利用的重要方面<sup>[5]</sup>。在食品加工领域, 鱼皮常常被开发成即食食品、调理食品、水发预制品等, 鱼皮食品加工产业前景十分广阔。

水产品由于保鲜不当会导致其在加工、贮藏、销售和流通过程中极易引起微生物繁殖, 造成腐败变质, 产生异味和肉质恶化<sup>[6,7]</sup>。微生物主要在水产品体表面和肠道繁殖, 其生长和代谢是水产加工过程中造成腐败变质的主要原因<sup>[8]</sup>。致腐微生物区系的改变能引起水产品腐败形态和化学性质变化, 特别是优势腐败菌繁殖所产生的代谢物能造成水产品体内大分子破坏和肌肉自溶, 导致组织失去弹性和产生异味<sup>[9]</sup>。当前, 利用传统培养方法培养的食品腐败菌占总菌群的比例小, 不足以揭示导致食品腐败的总菌群, 而新一代高通量测序技术不断应用为深入研究水产品贮藏过程的微生物区系提供了技术支撑<sup>[10]</sup>。16S rRNA 高通量测序技术是当前研究食品腐败或食品发酵的常用方法, 可获得易于分析的数千个序列, 能快速、可靠地识别数量较多的食品微生物<sup>[11,12]</sup>。不同的鱼皮由于脂肪、水份、蛋白质、多糖等组成组分差异, 导致微生物丰度和多样性也不同, 分析微生物区系在时间轴演变规律是研究鱼皮食品加工与保鲜的首要任务, 为研究与罗非鱼皮贮存条件相关的腐败菌群及抑制鱼皮腐败变

质提供有价值信息<sup>[13-15]</sup>。因此, 研究罗非鱼皮贮藏过程中微生物区系, 分析其腐败菌群演变规律, 有针对性实施有效保鲜技术, 对品质控制具有重要研究价值。

没食子酸 (GA, 3,4,5-三羟基苯甲酸), 又称五倍子酸, 是从各种植物、水果和蔬菜中提取的一种天然多羟基苯酚化合物, 对人体安全无害<sup>[16,17]</sup>。紫外线 (以下简称 UV) 能抑制多种浮游细菌、生物膜和真菌, 这与它产生活性氧 (ROS) 和分解细菌膜的能力有关<sup>[18-20]</sup>。然而, GA 对大肠杆菌 (*Escherichia coli*) O157:H7 等食品常见菌的抑制作用较弱, 因为需要 GA 浓度高、处理时间长, 并且无法灭活高密度稳定期菌群。据研究称, 稳定期 *E. coli* CETE 434 在 15 mM GA 暴露 60 min 后, 仅减少 1 log(CFU/mL)<sup>[21]</sup>。另有研究表明, GA 抑制稳定期的 *Staphylococcus aureus* 和 *E. coli* O157:H7 的最小抑制浓度均为 2500 mg/L<sup>[22]</sup>。因此, 单独使用 GA 保鲜食品有局限性, 为了提高酚类物天然抑菌活性物的抑菌杀菌效力, 目前, 常采用多种保鲜方式相结合的协同抑菌杀菌方法<sup>[23]</sup>。基于光动力增强生物活性保鲜剂抗菌活性是一种新型非热杀菌方法, 包括紫外线、蓝光及其它光谱动力辐照增强天然生物活性保鲜剂<sup>[24]</sup>。Nakamura 等人采用不同类型光辐照多种酚类溶液, 获得高杀菌抑菌的新型抗菌液, 如咖啡酸、GA 和花青素均与蓝光结合能有效抑制革兰氏阴性菌和革兰氏阳性菌<sup>[25]</sup>。Cossu 等人建立了 GA 和紫外线长波 UV-A 协同杀菌技术, 能破坏菠菜表面的 *E. coli* O157:H7 生物膜<sup>[26]</sup>。苯甲酸或姜黄素被 UV-A 或可见光辐射 24 h 后, 抑制菠菜表面细菌总菌群数显著高于未经任何辐射的苯甲酸或姜黄素<sup>[27,28]</sup>。然而, 鱼皮的组成成分与果蔬、肉质差异很大, 微生物区系和腐败变质情况不相同, 基于光谱学的杀菌技术是否有效抑制鱼皮表面腐败菌并保持其新鲜尚未知。

本研究在光谱学非热杀菌方法与 GA 相结合的杀菌技术基础上, 采用 UV-C 辐照 GA 生成 UVC-GA 抗

菌液, 处理罗非鱼皮后 0 °C 冷藏 8 d, 采用 16S rRNA Illumina-MiSeq 高通量测序方法研究冷藏过程中罗非鱼皮微生物区系在时间轴演变规律, 分析指示鱼皮品质的化学指标, 如感官指标、总挥发性盐基氮 (Total volatile base nitrogen, TVB-N) 含量、ATP 复合物、K 值、pH、生物胺和菌落总数 (Total viable colony, TVC) 变化, 为 UVC-GA 抗菌液应用于 0 °C 冷藏罗非鱼皮的品质控制奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

大小均一的新鲜罗非鱼皮由广西小研人生物有限公司提供, 每张鱼皮平均重量为 20.14±3.32 g。GA (食品级), 北京博奥拓达科技有限公司; EX1800 琼脂糖凝胶 (纯度 99%), 北京金克隆生物技术有限公司; ATP 复合物, 美国 Sigma 公司; AxyPrep DNA 凝胶提取试剂盒, 美国 Axygen 生物科学公司; QuantiFluor™-ST 微型荧光剂, 美国 Promega 公司; 高氯酸溶液, 上海紫一试剂厂; PCA 溶液, 青岛海博生物科技有限公司。

### 1.2 仪器与设备

1100 高效液相色谱仪, 美国 AGILENT 公司; Mastercycler X50 梯度聚合酶链式反应 (polymerase chain reaction, PCR) 仪, Eppendorf 中国有限公司; Illumina-MiSeq 测序仪, 美国 Illumina 公司; 2500XP 数显 pH 计, 上海生工生物工程公司; 凯氏定氮仪, 山东盛泰仪器有限公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 制备 UVC-GA 抗菌液

实验采用台式 UV-C 间歇式光源, 波长为 254 nm, 平均强度为 4540 μW/cm<sup>2</sup>, 最大液体穿透力为 17 cm。将 GA 用去离子水 (DI) 稀释至 0.15 mol/L 的标准浓度, 转移至灭菌晶体培养皿, 在 UV 室中以 4 J/cm<sup>2</sup> 强度持续辐照 12 h。采用 0.25 μm 孔径的无菌过滤器过滤辐照后的 GA, 获得 UVC-GA 抗菌液并黑暗处室温储存, 为保证 UVC-GA 抗菌活性的稳定性, 储存不超过 4 周<sup>[25]</sup>。

#### 1.3.2 鱼皮样品处理

新鲜罗非鱼皮清洗去污, 随机均匀分为 3 组, 每组 28 张鱼皮, 即去离子无菌水 (DI)、GA、UVC-GA 三个处理组。每组鱼皮样品分别在对应处理组和对照组按 2:1 (m/V) 的比例浸泡 10 min, 随后将 3 组样品

从溶液中取出, 分别用聚氯乙烯袋包装后冰箱 0 °C 冷藏, 随机在 0、2、4、5、6、7、8 d 选取样品进行指标测定。

#### 1.3.3 指标测定

##### 1.3.3.1 Illumina-MiSeq 技术分析微生物区系组成

参考 Liu 等的方法<sup>[12]</sup>提取细菌 DNA, 取 5 g 鱼皮样品, 用 PCR 方法扩增了 16S rRNA 基因的 V3~V4 区, PCR 条件: 95 °C 变性 3 min; 95 °C 退火 30 s, 55 °C 30 s, 72 °C 30 s 循环 27 次; 72 °C 延伸 10 min。引物为 338F (5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCA-3') 和 806R (5'-GGACTACHVGGGTWTCTAA-3')。用质量分数 2% 琼脂糖凝胶提取扩增产物后, AxyPrep DNA 凝胶提取试剂盒进行纯化, QuantiFluor™-ST 微型荧光剂定量分析 DNA 含量。然后, 等摩尔量样品利用 Illumina-MiSeq 配对测序 (2×300 bp), 初始读数导入 NCBI 序列读取存档 (SRA) 数据库, 利用 QIIME (version 1.17) 对初始 fastq 文件进行多路分解和质量过滤。随后用 UPARSE (version 7.1) (<http://drive5.com/uparse/>) 以 97% 的相似性进行聚类分析可操作分类单位 (英文全称, OTUs), 再采用 UCHIME 识别和删除嵌合序列, 基于 Silva (SSU115), 置信阈值设为 70%, 用 RDP 分类器 (<http://rdp.cme.msu.edu/>) 对每个 16S rRNA 基因序列进行分类。最后采用 Unifrac 距离加权法进行主坐标分析 (Principal coordinate analysis, PCoA), 研究菌群差异。

##### 1.3.3.2 TVB-N、TVC 和 pH 值测定

用半微量水蒸气蒸馏法测定 TVB-N 含量<sup>[29]</sup>, 将 5 g 鱼皮和 50 mL 蒸馏水倒入匀浆机, 匀浆破碎 30 min 获得混合液体, 混合液在 1600 r/min 离心 3 min 后收集上清液, 以凯氏定氮仪测定其中的氮含量, 并以此表示 TVB-N 含量, 单位为 mg/100 g。

采用 Hong Hui 等<sup>[30]</sup>的方法测定 TVC, 取 5 g 鱼皮样品, 加入 50 mL 无菌 0.90% NaCl 溶液, 匀质器均化 30 s, 0.9 g/100 mL NaCl (1:10) 稀释一次, 取 100 μL 稀释样品均匀涂抹平板计数琼脂上, 30 °C 下孵化 72 h 后计数, 以 lg(CFU/g) 表示。

取 5 g 鱼皮经匀浆破碎后放入锥形瓶中, 加入 45 mL 无菌蒸馏水, 静置 30 min 过滤, 测定 pH 值。

##### 1.3.3.3 感官评价

本实验由 9 名有经验的感官评定人员组成感官评定小组, 评估冷藏过程鱼皮颜色、气味、质地、可接受性。本实验采用 Amerine 等感官保质期 9 分制评分标准<sup>[31]</sup>, 4 种指标满分均是 9 分, 每组样品采样后, 按照颜色、气味、质地、可接受性进行单项评分, 得分为 9 表示品质优, 4.0~6.9 表示品质良好, 1.0~3.9

表示腐败。

### 1.3.3.4 ATP 复合物和 K 值测定

采用 Huang 等<sup>[32]</sup>的方法提取 ATP(三磷酸腺苷)、ADP(二磷酸腺苷)、AMP(磷酸腺苷)、IMP(次黄嘌呤核苷酸)、HxR(肌苷)、Hx(次黄嘌呤),取鱼皮 1 g,加入 2 mL 10%高氯酸溶液(Perchloric acid solution, PCA, 浓度 0.6 mmol/L 和 pH 6.4)在匀浆机进行匀浆,4 °C 下 5 000 r/min 离心 3 min 后收集上清液,沉淀物再重复上述操作。所有上清液 pH 值用 1、10 mol/L 氢氧化钾溶液调整至 6.5,4 °C 下 5000 r/min 离心 3 min,随后上清液用 PCA 定容至 10 mL,-20 °C 保存。采用高效液相色谱仪(内置 SPD-10A 检测器和 COSMOSIL 5C18-PAQ 柱)(4.6 mm I.D.×250 mm),以硼酸缓冲液为 pH 调节剂,以邻苯二甲醛(OPA)和 9-芴甲基氯甲酸酯(FMOC)为柱前衍生化试剂,磷酸氢二钠、甲醇、乙腈和水为流动相,柱温 40 °C 条件下分离目标化合物,分析含量 ATP、ADP、AMP、IMP、HxR、Hx, K 值按下式计算。

$$K/\% = [(HxR+Hx)/(ATP+ADP+AMP+IMP+HxR+Hx)] \times 100$$

式中: ATP、ADP、AMP、IMP、HxR、Hx 表示相应物质的含量/( $\mu\text{mol/g}$ )。

### 1.3.3.5 生物胺含量测定

按照采用 HPLC 分析冷藏过程中生物胺变化。取 5 g 鱼皮,与 50 mL 蒸馏水匀浆混合,加入 10 mL PCA (0.6 mmol/L, pH 6.4), 10 000 r/min 离心 10 min,重复两次离心,收集所有上清液,用 PCA 溶液(0.6 mmol/L, pH 6.4)定容至 25 mL,按照 Jia Shiliang 等<sup>[33]</sup>的高效液相色谱法测定生物胺含量。

## 1.4 数据处理与统计分析

所有实验平行 3 次,数据以平均值 $\pm$ 标准差表示,利用采用 Origin 9.0 软件进行实验数据分析和作图,采用单因素方差分析(ANOVA)和 Duncan's 多组极差法检验差异性, $p < 0.05$  表示差异显著。

## 2 结果与分析

### 2.1 微生物区系分析

本实验基于主坐标分析(PCoA)的  $\beta$ -多样性分析,利用加权 unifracc 距离法描述所有样品的 PCoA 相似性分析,距离越大表示相似性差。如图 1a 菌群相对丰富度所示,DI 组(5 d)、GA 组(7 d)、UVC-GA 组(8 d)主要受到 13 类细菌属污染。DI0、GA0 和 UVC-GA0 的主要优势菌属按从多到少排列顺序是

*Vibrio*、*Photobacterium* 和 *Candidatus-Bacilloplasma*, DI0 组主要优势菌属分别占比为 34.81%、28.72%和 20.90%,GA0 组分别占比为 36.11%、26.61%和 18.22%,UVC-GA0 组分别占比 31.51%、17.70%和 12.40%。在保质期,DI5 组的主要优势菌属按从多到少排列顺序是 *Pseudoalteromonas*、*C. Bacilloplasma* 和 *Litorimicrobium*, 占总菌群分别为 31.31%、21.50%和 17.11%,GA7 的主要优势菌属按从多到少排列顺序是 *Aliivibrio*、*Pseudoalteromonas* 和 *Psychrobater*, 分别占比为 42.40%、20.51%、10.32%。UVC-GA8 的主要优势菌属按从多到少排列顺序是 *Aliivibrio*、*C. Bacilloplasma* 和 *Moritella*, 分别占比为 29.81%、20.90%、17.62%。货架期后 *Vibrio* 和 *Photobacterium* 占比显著降低,DI5 分别为 1.11%和 0.92%,GA7 分别为 2.40%和 1.50%,UVC-GA8 分别为 3.20%和 0.80%。UVC-GA8 和 GA7 的 *C. Bacilloplasma* 分别占比 1.51%和 0.92%。图 1b 所示为微生物区系组成相似性和差异性。

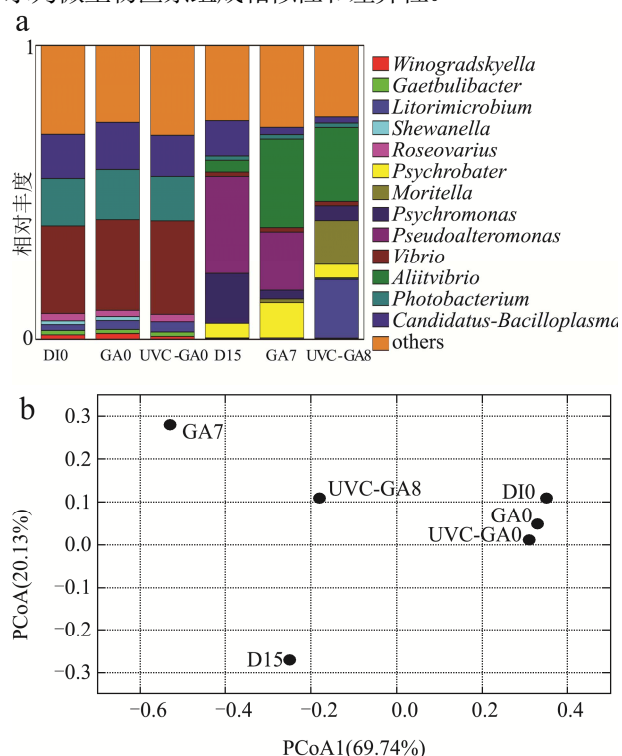


图 1 冷藏中罗非鱼皮菌群相对丰度(a)和主坐标分析(PCoA)(b) of microbiota from tilapia skin during refrigerated storage

注: 仅显示相对丰富>1.5%的菌群, other 表示相对丰富 $\leq$ 1.5%的菌群。基于每个样品的加权 unifracc 距离得出主坐标分析(PCoA), DI0 表示 DI 处理第 0 d 的样品; DI5: 表示 DI 处理第 5 d 的样品; GA0: GA 处理 0 d 的样品; GA7: GA 处理 7 d 的样品; UVC-GA0: UVC-GA 处理 0 d 的样品; UVC-GA8: UVC-GA 处理 8 d 的样品。

本研究发现, 罗非鱼皮在 0 °C 冷藏下, UVC-GA 组、DI 组和 GA 组在初始贮藏 (0 d) 的微生物区系组成变化不大, 且相似性相对高。而货架期 DI5、GA7 和 UVC-GA 8 组的微生物区系组成发生明显改变。微生物在食品表面生长繁殖是导致食品腐败的主要原因, 不同食品表面的微生物区系变化能导致食品变质模式与化学性质发生变化<sup>[11]</sup>。Photobacterium 是气调包装鱼片的优势腐败菌, 在冷鲜鲑鱼 *Salmo salar* 和挪威龙虾 *Nephrops norvegicus* 的 Photobacterium 繁殖生长最快, 是冷藏期产生腐败胺类和异味的主要诱发菌<sup>[33]</sup>。Photobacterium 也是鱼类产品形成腐胺和尸胺的主要因素, 在鱼类消化腺内繁殖引起腐败, 所产生的挥发性物质和胺类扩散至体表<sup>[34,35]</sup>。本研究 0 d 时 Photobacterium 为第二大优势菌, 但到货架期该菌未形成优势菌。C. Bacilloplama 也是水产品中重要致腐菌, 在 0 °C 条件下的生存能力较强, 生存 pH 值范围较广<sup>[11,36]</sup>。本研究结果发现, 所有样品组在冷藏期间均发现 C. Bacilloplama 存在, 在 GA 组受到抑制, 而 UVC-GA 组不能抑制该菌生长繁殖, 类似结果也在 0 °C 冷藏的 *P. vannamei*<sup>[11]</sup>、七鳃鳗 (*Lampetra morii*)<sup>[36]</sup> 和中华绒螯蟹 (*Eriocheir sinensis*)<sup>[37]</sup> 发现。GA 和 UVC-GA 均能抑制罗非鱼皮表面 C. Bacilloplama 生长, 但是 UVC-GA 比 GA 效果好, 可能是该菌对 UVC-GA 中生成的醌和活性氧的敏感性比 GA 较强。UVC-GA 组比其它组抑制 Pseudoalteromonas 和 C. Bacilloplama 显著强。说明 UVC-GA 抑制 Pseudoalteromonas 繁殖生长效果最强。本研究结果显示, Pseudoalteromonas 是 DI5 的第一优势腐败菌, 在 UVC-GA8 中受到抑制, 在 GA5 成为了第二优势腐败菌, 说明该菌在罗非鱼皮腐败变质起到主要角色, 对 UVC-GA 敏感而对 GA 几乎不敏感。

## 2.2 TVC 变化

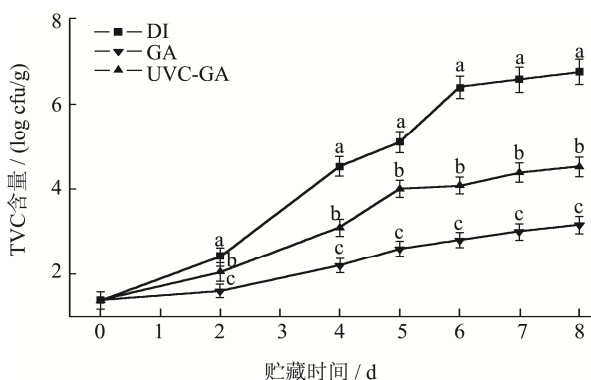


图 2 冷藏中罗非鱼皮 TVC 进程变化

Fig.2 Progress in TVC of tilapia skin during refrigerated storage

TVC 变化检测比较相同处理天数不同处理条件下的显著性差异, 如图 2 所示, DI、GA 和 UVC-GA 组的初始 TVC 分别为 1.38、1.38、1.37 log(CFU/g), 随着冷藏时间延长, TVC 不断增加。ICMSF<sup>[38]</sup> 提出水产品的 TVC 变质阈值是 7 log(CFU/g)。第 2 d, UVC-GA 组的 TVC 显著低于 DI 组、GA 组 ( $p < 0.05$ ), GA 组显著低于 DI 组 ( $p < 0.05$ )。第 8 d, UVC-GA 组 3.16 log(CFU/g) 比 DI 组 6.74 log(CFU/g) 和 GA 组 4.52 log(CFU/g) 分别显著减少 3.58、1.36 log(CFU/g) ( $p < 0.05$ )。DI 组的 TVC 在第 5 d 为 5.37 log(CFU/g), 与 Jia 等人<sup>[29]</sup> 0 °C 和 5 d, 5.66 log(CFU/g) 和 WYSOKA 等人<sup>[39]</sup> 0 °C 和 5 d, 5.24 log(CFU/g) 研究结果相似。DI 组、GA 组和 UVC-GA 组的感官评价货架期分别为 5 d、7 d 和 8 d, 在第 8 d, UVC-GA 组的 TVC 比 DI 组和 GA 组显著减少 3.58、1.36 log(CFU/g) ( $p < 0.05$ )。Cai 等人<sup>[6]</sup> 研究发现 UVC-GA 抗菌液能使鲈鱼 *Lateolabrax japonicas* 的 TVC 减少 1.47 log(CFU/g)。Liu 等采用 UVC-GA 抗菌液处理鳙鱼 *Aristichthys nobilis*, 使 TVC 减少 1.33 log (CFU/g)<sup>[7]</sup>。这些结果表明 UVC-GA 具有显著抑菌保鲜效果。

## 2.3 TVB-N 值变化

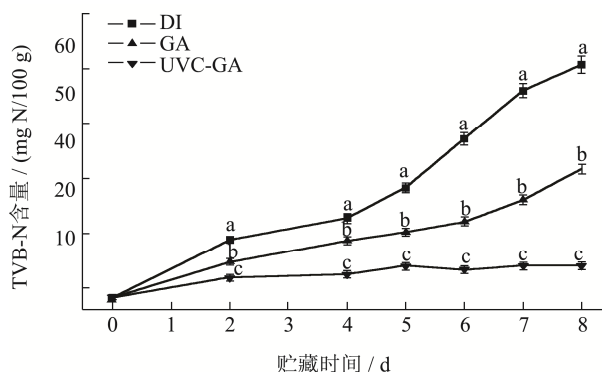


图 3 冷藏中罗非鱼皮 TVB-N 进程变化

Fig.3 Progress in TVB-N of tilapia skin during refrigerated storage

TVB-N 值变化检测比较相同处理天数不同处理条件下的显著性差异, 图 3 所示, 所有样品组的 TVB-N 值在冷藏期间不断增加, DI 组、GA 组和 UVC-GA 组的初始 TVB-N 值分别为 8.10、8.09 和 8.11 mg N/100 g, 自第 2 d 起, TVB-N 值一直是 UVC-GA 组 < GA 组 < DI 组 ( $p < 0.05$ )。Goncalves 等<sup>[40]</sup> 报道称 20 mg N/100 g 是水产品新鲜度的限值, 本实验 DI 组第 4 d TVB-N 值达到临界值, GA 组第 6 d 达临界值, 而 UVC-GA 组的 TVB-N 一直在 20 以下。第 8 d, UVC-GA 组比 GA 组和 DI 组显著低 23.53% 和 58.82% ( $p < 0.05$ )。说明 GA 和 UVC-GA 能显著抑制 TVB-N 增加, 且 UVC-GA



作用最好, 可能是 UVC-GA 抑制 *Pseudoalteromonas* 和 *Psychromonas* 效果最好。

### 2.4 pH 值变化

pH 值变化检测比较相同处理天数不同处理条件下的显著性差异, 如图 4 所示, DI 组、GA 组和 UVC-GA 组的初始 pH 值无显著差异, 分别是 6.81、6.81 和 6.80。DI 组第 5 d 出现最低 pH 值, 随后显著上升。GA 组第 7 d 出现最低 pH 值, 随后显著上升。两组的 pH 值变化呈 V 字形, 而 UVC-GA 组的 pH 值变化呈线性下降趋势 (6.74~6.88), UVC-GA 组的 pH 先高于 GA 组和 DI 组, 分别自第 5 d 和第 7 d 始低于 DI 组和 GA 组。实验结束后, DI 组、GA 组和 UVC-GA 组的 pH 值分别为 8.02、7.81 和 6.74。相关文献称, pH 值大小与冷藏过程中肉质表面上微生物增长多少有关<sup>[29]</sup>。水产品在贮藏过程中 pH 值的增加主要是由于蛋白质和其他含氮物质在微生物和内源酶的作用下分解成挥发性碱, 如胺和三甲胺<sup>[40,41]</sup>。研究称, 一般食品中 pH 变化多呈 V 字形改变, 在腐败开始是略微降低, 随后升高, 水产品保持良好品质的 pH 值不超

过 7.7, 新鲜水产品的 pH 值范围为 6.6~7.8<sup>[42]</sup>, 这与本研究结果相似。说明 UVC-GA 能改变罗非鱼皮腐败变质, 能保持鱼皮 pH 稳定在新鲜范围, 而 GA 和 DI 效果不佳, 可能是 UVC-GA 通过抑制 *Pseudoalteromonas* 和 *C. Bacilloplama* 等腐败菌显著影响罗非鱼皮的 pH, 使 pH 值保持在新鲜范围。

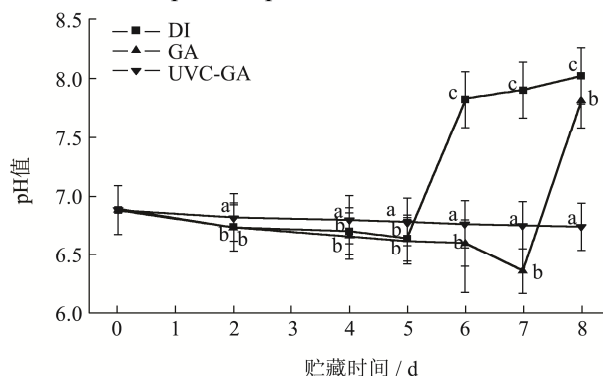


图 4 冷藏中罗非鱼皮 pH 进程变化

Fig.4 Progress in pH value of tilapia skin during refrigerated storage

### 2.5 感官评价结果

表 1 冷藏中罗非鱼皮感官评分

Table 1 Sensory scores of tilapia skin during refrigerated storage

感官指标	分组	贮藏时间/d						
		0	2	4	5	6	7	8
颜色	UVC-GA	9.00±0.00 <sup>Aa</sup>	8.86±0.35 <sup>Aa</sup>	7.75±0.33 <sup>Ba</sup>	7.53±0.35 <sup>BCa</sup>	7.05±0.31 <sup>CDa</sup>	6.85±0.29 <sup>DEa</sup>	6.12±0.05 <sup>Ea</sup>
	GA	9.00±0.00 <sup>Aa</sup>	7.81±0.27 <sup>Bb</sup>	6.55±0.27 <sup>Cb</sup>	5.44±0.20 <sup>Db</sup>	4.05±0.39 <sup>Eb</sup>	3.22±0.09 <sup>Fb</sup>	2.06±0.05 <sup>Gb</sup>
	DI	9.00±0.00 <sup>Aa</sup>	6.47±0.38 <sup>Bc</sup>	4.24±0.18 <sup>Cc</sup>	1.09±0.10 <sup>Dc</sup>	1.01±0.14 <sup>DEc</sup>	0.71±0.06 <sup>Ec</sup>	0.15±0.04 <sup>Gc</sup>
气味	UVC-GA	9.00±0.00 <sup>Aa</sup>	8.75±0.41 <sup>Aa</sup>	7.53±0.44 <sup>BCa</sup>	7.02±0.32 <sup>CDa</sup>	6.87±0.35 <sup>DEa</sup>	6.35±0.29 <sup>Efa</sup>	6.01±0.23 <sup>Fa</sup>
	GA	9.00±0.00 <sup>Aa</sup>	8.35±0.20 <sup>Aa</sup>	6.03±0.39 <sup>Cb</sup>	5.47±0.20 <sup>Db</sup>	4.10±0.31 <sup>Eb</sup>	3.10±0.29 <sup>Fb</sup>	2.69±0.16 <sup>Gb</sup>
	DI	9.00±0.00 <sup>Aa</sup>	6.50±0.31 <sup>Bb</sup>	4.63±0.30 <sup>Cc</sup>	1.48±0.17 <sup>Dc</sup>	0.75±0.09 <sup>Ec</sup>	0.21±0.01 <sup>Fc</sup>	0.10±0.00 <sup>Fc</sup>
质地	UVC-GA	9.00±0.00 <sup>Aa</sup>	8.85±0.22 <sup>Aa</sup>	7.72±0.36 <sup>Ba</sup>	7.32±0.37 <sup>BCa</sup>	7.07±0.29 <sup>CDa</sup>	6.84±0.19 <sup>DEa</sup>	6.63±0.25 <sup>Ea</sup>
	GA	9.00±0.00 <sup>Aa</sup>	7.50±0.11 <sup>Bb</sup>	6.31±0.25 <sup>Cb</sup>	5.14±0.23 <sup>Db</sup>	4.53±0.20 <sup>Eb</sup>	3.00±0.11 <sup>Fb</sup>	2.35±0.06 <sup>Gb</sup>
	DI	9.00±0.00 <sup>Aa</sup>	5.75±0.33 <sup>Bc</sup>	4.14±0.17 <sup>Cc</sup>	3.96±0.28 <sup>Dc</sup>	1.15±0.08 <sup>Ec</sup>	0.66±0.10 <sup>Fc</sup>	0.20±0.05 <sup>Gc</sup>
可接受性	UVC-GA	9.00±0.00 <sup>Aa</sup>	8.57±0.30 <sup>ABa</sup>	7.91±0.31 <sup>BCa</sup>	7.44±0.35 <sup>CDa</sup>	6.86±0.23 <sup>Ea</sup>	6.33±0.17 <sup>Efa</sup>	6.37±0.05 <sup>Fa</sup>
	GA	9.00±0.00 <sup>Aa</sup>	7.62±0.32 <sup>Bb</sup>	6.03±0.24 <sup>Cb</sup>	5.33±0.19 <sup>Db</sup>	4.35±0.17 <sup>Eb</sup>	3.21±0.23 <sup>Fb</sup>	2.56±0.06 <sup>Gb</sup>
	DI	9.00±0.00 <sup>Aa</sup>	6.15±0.45 <sup>Bc</sup>	4.05±0.15 <sup>Cc</sup>	2.27±0.26 <sup>Dc</sup>	1.10±0.15 <sup>Ec</sup>	0.01±0.00 <sup>Fc</sup>	0.01±0.00 <sup>Fc</sup>

注: 同行肩标大写不同字母表示显著差异 ( $p < 0.05$ ); 相同指标同列肩标小写字母不同表示显著差异 ( $p < 0.05$ )。

食品腐败主要是腐败菌滋生造成食品品质下降, 主要是颜色、气味、质地、可接受性下降。U 细菌在肉质品表面大量繁殖生长过程中产生大量代谢产物, 这些代谢产物导致食品腐败, 引起肉质变色、理化性质劣变, 结构破坏、异味产生, 造成感官指标下降<sup>[29]</sup>, 如表 1 所示, 随贮藏时间的延长, 所有样品感官评分均显著下降 ( $p < 0.05$ )。第 2 d, 与 DI 组相比, GA 组和 UVC-GA 组在颜色、气味、组织、可接受性评分显

著高 ( $p < 0.05$ ), GA 组与 UVC-GA 组在颜色、组织、可接受性评分差异显著 ( $p < 0.05$ ), 而在气味上无显著差异 ( $p < 0.05$ )。总的来说, DI 组和 GA 组分别自第 5、7 d 起均处于 1.0~3.9 范围, 说明鱼皮发生腐败, DI 组和 GA 组的感官评价货架期分别是 5 d 和 7 d。UVC-GA 组在第 8 d 各项评分均大于 6, 说明鱼皮一直处在新鲜状态, UVC-GA 组的感官评价货架期超过 8 d。 *Pseudoalteromonas* 是肉质的腐败核心菌属, 能产

生大量的硫化物和丙酮,可水解蛋白质,导致质地劣化,严重影响肉质感官<sup>[43]</sup>。本研究中,这可能是由于UV-C 辐射 GA 后产生了醌和活性氧,对 *Pseudoalteromonas* 有较好抑制效果。使得 UVC-GA 组的气味、颜色和质地评分显著高于 DI 组和 GA 组 ( $p<0.05$ )。

## 2.6 ATP 化合物降解变化

图 5 为 ATP 复合物 (IMP、HxR、Hx) 和 K 值变化。如图所示所有样品组随着冷藏时间延长, IMP 和 HxR 含量先增加后减少, K 值和 Hx 含量不断增加。各样品组的 HxR 含量在实验初期第 0 d 没有显著差异,DI 组和 GA 组的 HxR 含量在第 4 d 达到最大值(分别是 3.63 和 2.55  $\mu\text{mol/g}$ ),而 UVC-GA 组在第 5 d 达到最大值,为 0.88  $\mu\text{mol/g}$ 。DI 组、GA 组和 UVC-GA 组的 IMP 最大值分别为 3.05、4.11 和 5.43  $\mu\text{mol/g}$ ,UVC-GA 组的 IMP 含量显著高于其它组 ( $p<0.05$ ),说明 UVC-GA 组能有效抑制 IMP 降解。此外,自第 2 d 起, Hx 含量随着贮藏时间延长而逐渐增加,但 UVC-GA 组的 Hx 含量显著低于 GA 组和 DI 组 ( $p<0.05$ ),而 UVC-GA 组的 K 值从第 2 d 起显著低于其它组 ( $p<0.05$ )。DI 组和 GA 组的 K 值分别在自第 5 d、第 7 d 起均大于 40%,UVC-GA 组第 8 d 才接近 20%。有研究表明肉质的 ATP 降解通过“ATP→ADP→AMP→IMP→HxR→Hx”复杂转化途径实现,并且转化至中间物 IMP 的途径为完全自溶过程<sup>[29]</sup>。本研究中,可能 UVC-GA 内的醌和活性氧阻断了“IMP→HxR”转化途径,UVC-GA 组较另两组更能显著抑制罗非鱼皮的 IMP 进一步降解,避免鱼皮口感质量下降,新鲜度得以维持。Hx 的形成与腐败菌产生的核苷磷酸化酶有关<sup>[44]</sup>。研究称,IMP 在自溶酶和细菌酶作用下转化为 HxR,HxR 再转化为 Hx,过多的 Hx 积累使水产品产生苦味<sup>[29]</sup>。本研究发现,自第 2 d 起,UVC-GA 组的 Hx 显著低于 GA 组和 HxR,但 HxR 高于两组,可能是 UVC-GA 能显著抑制腐败菌群繁殖生长,减少细菌酶作用于 HxR 所产生的其降解作用。K 值指 ATP 分解的低级产物 HxR 和 Hx 占 ATP 系列分解产物的百分比,主要适用于鱼类早期腐败的鉴定,若  $K\leq 20\%$ 说明鱼体绝对新鲜, $K\geq 40\%$ 说明鱼体开始有腐败迹象<sup>[29]</sup>。本研究发现,UVC-GA 的 K 值在第 8 d 才接近 20%,而 GA 组和 DI 组分别在第 7 d 和第 5 d 均大于 40%,进一步证实了 UVC-GA 抑制 ATP 降解效果好。此外,鱼皮含有大量胶原蛋白,胶原蛋白是具有稳定三螺旋结构的生物大分子,比肌肉中其它蛋白抗降解能力高<sup>[45]</sup>,因此鱼皮中 ATP 降解转化慢可能

与鱼皮胶原蛋白含量高有关。

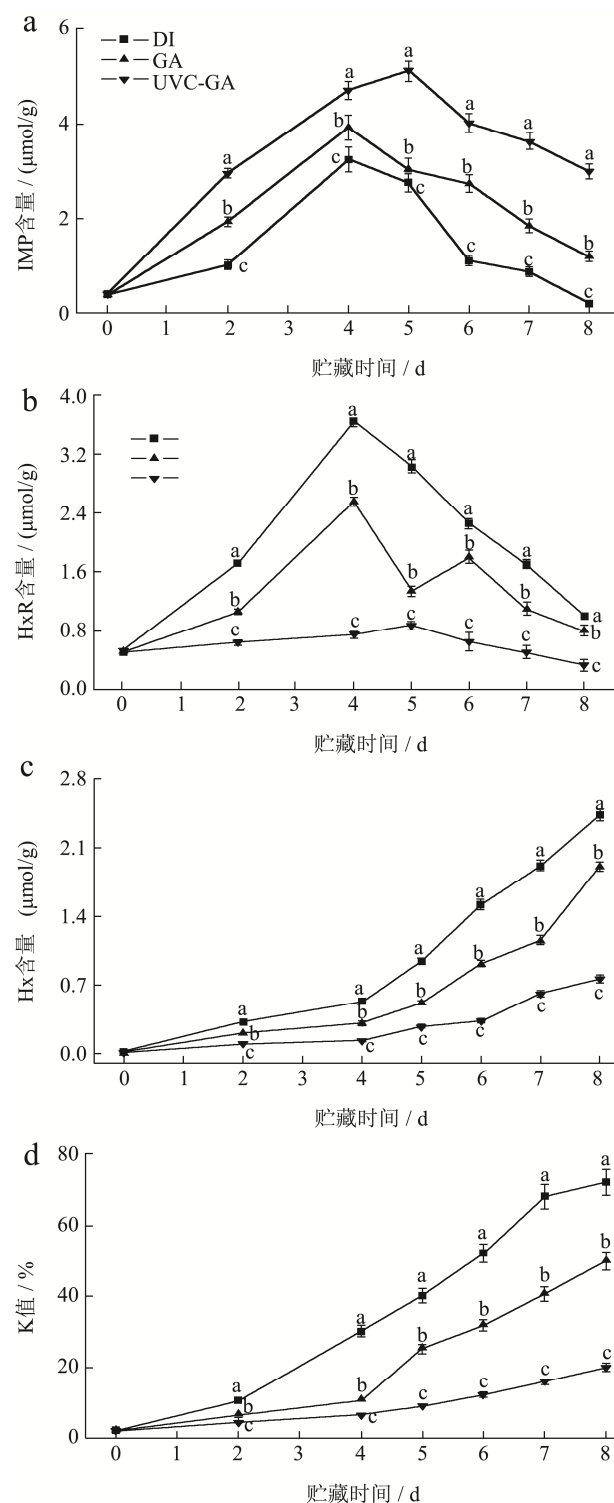


图 5 冷藏中罗非鱼皮 IMP (a)、HxR (b)、Hx (c) 和 K-值 (d) 变化  
Fig.5 Progress in IMP (a), HxR (b), Hx (c), K-value (d) of tilapia skin during refrigerated storage

## 2.7 腐胺和尸胺含量变化

水产品腐败产生的生物胺主要是腐胺和尸胺,是一类非挥发性的低分子量含氮化合物,主要由细菌脱羧酶作用于游离氨基酸脱羧而形成,均是指示水产品

在不同温度贮藏下的降解指标<sup>[46]</sup>。如表 2 所示,第 0 d 时腐胺含量样品组中未检测,但其含量随着贮藏时间增加而增加,DI 组、GA 组、UVC-GA 组在第 8 d 达到最大值,分别高达 23.15、10.86 和 4.96 mg/kg。自第 2 d 起,UVC-GA 组的腐胺其含量显著低于 DI 组和 UVC-GA 组 ( $p<0.05$ )。第 0 d 时尸胺同样的在所有样品未检出,但其含量随着贮藏时间增加而增加,尸胺在第 8 d DI 组、GA 组、UVC-GA 组的分别达到 18.27、6.46 和 3.06 mg/kg。UVC-GA 组含量均显著低于 GA

组和 DI 组 ( $p<0.05$ )。表明冷藏过程中鱼皮产生腐胺和尸胺被 UVC-GA 抑制效果最好,可能因为细菌脱羧酶活性或冷藏起始腐败菌 *Pseudoalteromonas* 被 UVC-GA 内的高抗菌物醌和活性氧抑制,增强单用 GA 的抑菌效果。有研究表明,醌和活性氧能引起细菌的核酸损伤、蛋白质氧化、多糖结构破坏,抑制细菌生长繁殖<sup>[46]</sup>。生物胺是氨基酸被多种氨基酸脱羧酶脱羧产生,筛选脱羧酶抑制剂对于抑制由水产品腐败所产生的生物胺具有重要意义<sup>[47]</sup>。

表 2 冷藏中罗非鱼皮生物胺变化

Table 2 Changes in biogenic amines content of tilapia skin during refrigerated storage

生物胺/(mg/kg)	分组	贮藏时间/d						
		0	2	4	5	6	7	8
腐胺	UVC-GA	ND	0.20±0.08 <sup>Aa</sup>	1.95±0.16 <sup>Ba</sup>	2.10±0.13 <sup>Ca</sup>	3.02±0.81 <sup>Da</sup>	4.58±1.02 <sup>Ea</sup>	4.96±0.80 <sup>Ea</sup>
	GA	ND	1.19±0.07 <sup>Ab</sup>	3.08±0.17 <sup>Bb</sup>	4.78±0.22 <sup>Cb</sup>	5.90±0.97 <sup>Db</sup>	6.23±0.68 <sup>Eb</sup>	10.86±1.10 <sup>Eb</sup>
	DI	ND	4.21±0.17 <sup>Ab</sup>	8.83±0.35 <sup>Bc</sup>	9.66±0.21 <sup>Cc</sup>	12.57±1.23 <sup>Dc</sup>	17.66±2.37 <sup>Ec</sup>	23.15±4.33 <sup>Fc</sup>
尸胺	UVC-GA	ND	0.23±0.07 <sup>Aa</sup>	1.50±0.12 <sup>Ba</sup>	1.99±0.06 <sup>BCa</sup>	2.46±0.27 <sup>Da</sup>	2.84±0.21 <sup>DEa</sup>	3.06±0.38 <sup>Ea</sup>
	GA	ND	0.92±0.05 <sup>Ab</sup>	2.98±0.19 <sup>Ab</sup>	3.36±0.18 <sup>Bb</sup>	4.24±0.14 <sup>Cb</sup>	5.79±0.16 <sup>Cb</sup>	6.46±0.24 <sup>Ea</sup>
	DI	ND	3.13±0.15 <sup>Ac</sup>	6.41±0.22 <sup>Bc</sup>	8.11±0.19 <sup>Cc</sup>	10.21±0.13 <sup>Dc</sup>	12.57±1.05 <sup>Ec</sup>	18.27±1.33 <sup>Fb</sup>

注: ND 为未检出,不同上标大写字母表示行间显著差异 ( $p<0.05$ ),不同上标小写字母表示列间显著差异 ( $p<0.05$ )。

### 3 结论

通过对 0 °C 冷藏的罗非鱼皮的微生物区系、感官指标、TVB-N、ATP 复合物、K 值、生物胺、TVC 研究发现,在初始贮藏 (0 d) 时,鱼皮 DI 组、GA 组和 UVC-GA 组的微生物区系、TVB-N、ATP 复合物、K 值、生物胺、TVC 组成变化不大,且相似性极高。而随着时间推移,DI 组、GA 组和 UVC-GA 组的感官保质期发生改变,综合评价分别为 5 d、7 d、8 d。货架期 DI5、GA7 和 UVC-GA 8 组的微生物区系组成发生明显改变。UVC-GA 对 *Photobacterium* 和 *Pseudoalteromonas* 有较好的抑制作用。UVC-GA 组的 TVB-N、TVC、腐胺、尸胺、次黄嘌呤核苷 (HxR) 和次黄嘌呤 (Hx) 的含量均比较低 DI 组和 GA 组低,但 5'-单磷酸肌苷 (IMP) 含量高于其它组;UVC-GA8 的 K 值显著低于 DI 5 和 GA 7,随着贮藏时间延长 UVC-GA 组的 PH 值呈下降线性趋势,而 DI 组和 GA 组则呈“V”形。而通过对各样品组的罗非鱼皮样品对比分析结果发现,与 DI 组相比,UVC-GA 组和 GA 组的罗非鱼皮品质较好,其中 UVC-GA 组的品质最佳,感官保质期最长。罗非鱼皮在 0 °C 冷藏过程中的优势腐败菌引起品质变化的潜在机制和 UVC-GA 抑菌机理需进一步深入研究。

### 参考文献

[1] Paiva-dos S K, Mellinger-silva C, Iraidy S B A, et al.

Modifying alcalase activity and stability by immobilization onto chitosan aiming at the production of bioactive peptides by hydrolysis of tilapia skin gelatin [J]. Process Biochemistry, 2020, 97: 27-36

[2] 李雪,白新鹏,曹君,等.罗非鱼各个部位研究应用进展[J].食品工业,2018,39(11):276-281

LI Xue, BAI Xin-peng, CAO Jun, et al. Progress in the research and application of various parts of tilapia [J]. The Food Industry, 2018, 39(11): 276-281

[3] Zhang T, Sun R, Ding M, et al. Effect of extraction methods on the structural characteristics, functional properties, and emulsion stabilization ability of Tilapia skin gelatins [J]. Food Chemistry, 2020, 328: 127114

[4] Ge B, Wang H, Li J, et al. Comprehensive assessment of Nile tilapia skin (*Oreochromis niloticus*) collagen hydrogels for wound dressings [J]. Marine Drugs, 2020, 18(4): 178

[5] 王文勇,张英慧.罗非鱼下脚料的综合利用研究进展[J].肉类工业,2016,11:46-49

WANG Wen-yong, ZHANG Ying-hui. Research progress on comprehensive utilization of tilapia leftover materials [J]. Meat in Dusty, 2016, 11: 46-49

[6] Ercolini D. High-throughput sequencing and metagenomics: moving forward in the culture-independent analysis of food microbial ecology [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2013, 79(10): 3148-3155



- [7] Nirmal N P, Bemjakul S. Effect of catechin and ferulic acid on melanosis and quality of Pacific white shrimp subjected to prior freeze-thawing during refrigerated storage [J]. Food Control, 2010, 21(9): 1263-1271
- [8] Chaillou S, Chaulot-talmon A, Caekebeke H, et al. Origin and ecological selection of core and food-specific bacterial communities associated with meat and seafood spoilage [J]. The ISME Journal, 2015, 9(5): 1105-1118
- [9] Gram L, Huss H H. Microbiological spoilage of fish and fish products [J]. International Journal of Food Microbiology, 1996, 33: 121-137
- [10] Giovannoni S J, Britschgi T B, Moyer C L, et al. Genetic diversity in Saragasso sea bacterioplankton [J]. Nature, 1990, 345: 60-63
- [11] Cai L, Cao A, Bai F, et al. Effect of  $\epsilon$ -polylysine in combination with alginate coating treatment on physicochemical and microbial characteristics of Japanese sea bass (*Lateolabrax japonicus*) during refrigerated storage [J]. LWT - Food Science and Technology, 2015, 62(2): 1053-1059
- [12] Liu X C, Li D P, Li K F, et al. Monitoring bacterial communities in  $\epsilon$ -polylysine-treated bighead carp (*Aristichthys nobilis*) fillets using culture-dependent and culture-independent techniques [J]. Food Microbiology, 2018, 76: 257-266
- [13] 龚婷, 陆利霞, 熊晓辉. 生物保鲜技术在水产品保鲜中的应用研究[J]. 食品工业科技, 2008, 29(4): 311-313  
GONG Ting, LU Li-xia, XIONG Xiao-hui. Application of biopreservation technology on the preservation of aquatic products [J]. Science and Technology of Food Industry, 2008, 29(4): 311-313
- [14] 莫星忱, 伍彬, 吕柏东. 鱼类精深加工技术研究进展[J]. 食品安全导刊, 2020, 12: 160-163  
MO Xing-you, WU Bin, LYU Bai-dong. Research progress of fish intensive processing technology [J]. China Food Safety Magazine, 2020, 12: 160-163
- [15] 沈春玉, 赵玉巧, 颜冬梅. 鱼类产品中优势腐败菌、天然防腐剂及保鲜技术的研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2020, 31(3): 172-178  
SHEN Chun-yu, ZHAO Yu-qiao, YAN Dong-mei. Research progress on specific spoilage organisms, natural preservatives and preservation technology in fish products [J]. China Food Additives, 2020, 31(3): 172-178
- [16] Gaani A, Kumar A, Agrawal A, et al. An electrochemical impedance sensor for monitoring of gallic acid inhibited neuraminidase activity of PPR HN protein [J]. Microchemical Journal, 2020, 158: 105229.
- [17] Varela-lopez A, Bullon P, Giampieri F, et al. Non-nutrient, naturally occurring phenolic compounds with antioxidant activity for the prevention and treatment of periodontal diseases [J]. Antioxidants, 2015, 4(3): 447-481
- [18] 吴佳欣, 周波, 邓萌萌, 等. 加热时间对余甘子水煎液中没食子酸的影响[J]. 中成药, 2020, 42(3): 702-708  
WU Jia-xin, ZHOU Bo, DENG Meng-meng, et al. Effects of heating time on gallic acid in the aqueous decoction of *Phyllanthus emblica* [J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2020, 42(3): 702-708
- [19] Jeon M J, Ha J W. Bactericidal and synergistic effects of X-ray irradiation and gallic acid against foodborne pathogens on lettuce [J]. Food Microbiology, 2020, 92: 103584
- [20] Borges A, Ferreira C, Saavedra M J, et al. Antibacterial activity and mode of action of ferulic and gallic acids against pathogenic bacteria [J]. Microbial Drug Resistance, 2013, 19(4): 256-265
- [21] Nohynek L J, Alakomi H L, Kahkonen M P, et al. Berry phenolics: antimicrobial properties and mechanisms of action against severe human pathogens [J]. Nutrition and Cancer, 2006, 54(1): 18-32
- [22] Xu C, Yagiz Y, Hsu W Y, et al. Antioxidant, antibacterial, and antibiofilm properties of polyphenols from muscadine grape (*Vitis rotundifolia Michx.*) pomace against selected foodborne pathogens [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(28): 6640-6649
- [23] Sanhueza L, Melo R, Montero R, et al. Synergistic interactions between phenolic compounds identified in grape pomace extract with antibiotics of different classes against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* [J]. PLoS One, 2017, 12(2): 1-15
- [24] Yin R, Dai T, Avci P, et al. Light based anti-infectives: ultraviolet C irradiation, photodynamic therapy, blue light, and beyond [J]. Current Opinion in Pharmacology, 2013, 13(5): 731-762
- [25] Nakamura K, Ishiyama K, Sheng H, et al. Bactericidal activity and mechanism of photoirradiated polyphenols against Gram-positive and -negative bacteria [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(35): 7707-7713
- [26] Cossu A, Ercan D, Wang Q, et al. Antimicrobial effect of synergistic interaction between UV-A light and gallic acid against *Escherichia coli* O157:H7 in fresh produce wash water and biofilm [J]. Innovative Food Science and Emerging

- Technologies, 2016, 37: 44-52
- [27] De-oliveira E F, Tosati J V, Tikekar R V, et al. Antimicrobial activity of curcumin in combination with light against *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria innocua*: applications for fresh produce sanitation [J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 137: 86-94
- [28] Ding Q, Alborzi S, Bastarachea L J, et al. Novel sanitization approach based on synergistic action of UV-A light and benzoic acid: Inactivation mechanism and a potential application in washing fresh produce [J]. Food Microbiology, 2018, 72: 39-54
- [29] Corbo M R, Bevilacqua A, Campaniello D, et al. Prolonging microbial shelf life of foods through the use of natural compounds and non-thermal approaches - a review [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2009, 44(2): 223-241
- [30] Hong H, Luo Y, Zhou Z, et al. Effects of low concentration of salt and sucrose on the quality of bighead carp (*Aristichthys nobilis*) fillets stored at 4 °C [J]. Food Chemistry, 2012, 133: 102-107
- [31] Amerine M A, Pangborn R M, Roessler E B. Principles of Sensory Evaluation of Food [M]. Academic Press, New York, USA, 1965: 121-122
- [32] Huang Z, Liu X, Jia S, et al. Antimicrobial effects of cinnamon bark oil on microbial composition and quality of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) fillets during chilled storage [J]. Food Control, 2017, 82: 316-324
- [33] Macé S, Joffraud J J, Cardinal M, et al. Evaluation of the spoilage potential of bacteria isolated from spoiled raw salmon (*Salmo salar*) fillets stored under modified atmosphere packaging [J]. International Journal of Food Microbiology, 2013, 160 (3): 227-238
- [34] Lakshmanan R, Shakila R J, Jeyasekaran G. Survival of amine-forming bacteria during the ice storage of fish and shrimp [J]. Food Microbiology, 2002, 19(6): 617-625
- [35] Paarup T, Sanchez J A, Moral A, et al. Sensory chemical and bacteriological changes during storage of iced squid (*Todaropsis eblanae*) [J]. Journal of Applied Microbiology, 2002, 92(5): 941-950
- [36] Broekaert K, Nosedá B, Heyndrickx M, et al. Volatile compounds associated with *Psychrobacter* spp. and *Pseudoalteromonas* spp., the dominant microbiota of brown shrimp (*Crangon crangon*) during aerobic storage [J]. International Journal of Food Microbiology, 2013, 166(3): 487-493
- [37] Li Y Y, Xie W F, Li Q W. Characterisation of the bacterial community structures in the intestine of *Lampetra morii* [J]. Antonie Van Leeuwenhoek International Journal of General and Molecular Microbiology, 2016, 109(7): 979-986
- [38] Tirloni E, Stella S, Gennari M, et al. American lobsters (*Homarus americanus*) not surviving during air transport: evaluation of microbial spoilage [J]. Italian Journal of Food Safety, 2016, 5(2): 5620
- [39] Iijima S, Washio K, Okahara R, et al. Biofilm formation and proteolytic activities of *Pseudoalteromonas* bacteria that were isolated from fish farm sediments [J]. Microbial Biotechnology, 2009, 2(3): 361-369
- [40] Lauro F M, Stratton T K, Chastain R A, et al. Complete genome sequence of the deep-sea bacterium *Psychromonas* strain CNPT3 [J]. Genome Announcements, 2013, 1(3): e00304-e00313
- [41] Chen H, Wang M, Yang C, 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
- [42] Gonçalves A A, Gindri C S G. The effect of glaze uptake on storage quality of frozen shrimp [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 90(2): 285-290
- [43] Chen X B, Di P P, Wang H M, et al. Bacterial community associated with the intestinal tract of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) farmed in Lake Tai, China [J]. PLoS One, 2015, 10(4): e0123990
- [44] Wang Q, Oliveira E F, Alborzi S, et al. On mechanism behind UV-A light enhanced antibacterial activity of gallic acid and propyl gallate against *Escherichia coli* O157:H7 [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 1-11
- [45] Hernández-cázares A S, Aristoy M C, Toldrá F. Nucleotides and their degradation products during processing of dry-cured ham, measured by HPLC and an enzyme sensor [J]. Meat Science, 2011, 87(2): 125-129
- [46] 梅娜娜,周广运,王东亮.动物胶原及其水解产物的研究进展与应用[J].食品工业,2019,40(7):247-252  
MEI Nn-na, ZHOU Guang-yun, WANG Dong-liang. Research progress and application of animal collagen and its hydrolysate [J]. The Food Industry, 2019, 40(7): 247-252
- [47] Jia S, Huang Z, Lei Y, et al. Application of Illumina-MiSeq high throughput sequencing and culture-dependent techniques for the identification of microbiota of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) treated by tea polyphenols [J]. Food Microbiology, 2018, 76: 52-61