

# 罗非鱼臭氧水杀菌技术的工艺优化及其对鱼肉品质的影响

刘恒阁<sup>1</sup>, 王海燕<sup>2</sup>, 吴文锦<sup>3</sup>, 高瑞昌<sup>4</sup>, 弋景刚<sup>5</sup>, 汪金林<sup>6</sup>, 白帆<sup>6\*</sup>, 赵元晖<sup>1\*</sup>

(1. 中国海洋大学 食品科学与工程学院, 山东 青岛 266003; 2. 海信(山东)冰箱有限公司, 山东 青岛 266000; 3. 湖北省农业科学院 农产品加工与核农技术研究所, 湖北 武汉 430064; 4. 江苏大学 食品与生物工程学院, 江苏 镇江 212013; 5. 河北农业大学 机电工程学院, 河北 保定 071066; 6. 衢州鲟龙水产食品科技开发有限公司, 浙江 衢州 324002)

**摘要:** 该文为研究臭氧水清洗杀菌的最佳工艺及其对罗非鱼肉品质的影响, 通过对罗非鱼肉杀菌率、电子鼻分析、蛋白质和脂质氧化程度以及感官品质的考察, 确定臭氧水处理罗非鱼肉的清洗杀菌工艺。结果表明, 当臭氧水浓度为 5.160 mg/L、浸泡时间为 10 min 时, 清洗杀菌效果最佳, 杀菌率可达 (74.000±0.017)%。此条件下, 罗非鱼肉的品质良好, 电子鼻气味成分分析无显著变化, 蛋白质和脂质氧化程度均不强烈。肌原纤维蛋白含量为 2.5 mg/mL、羰基含量为 4.1 nmol/mg、总巯基含量为 0.08 μmol/mg、Ca<sup>2+</sup>-ATPase 活力为 2.6 U/mg、丙二醛含量为 0.36 mg/kg, 鱼肉的感官评分达 17.99 分。

**关键词:** 罗非鱼; 感官品质; 臭氧水; 工艺优化; 清洗杀菌

## Optimization of Ozone Water Sterilization for Tilapia and Its Effect on Fish Quality

LIU Heng-ge<sup>1</sup>, WANG Hai-yan<sup>2</sup>, WU Wen-jin<sup>3</sup>, GAO Rui-chang<sup>4</sup>, YI Jing-gang<sup>5</sup>,  
WANG Jin-lin<sup>6</sup>, BAI Fan<sup>6\*</sup>, ZHAO Yuan-hui<sup>1\*</sup>

(1. College of Food Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266003, Shandong, China; 2. Hisense (Shandong) Refrigerator Co., Ltd., Qingdao 266000, Shandong, China; 3. Institute of Agricultural Products Processing and Nuclear Agriculture, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, Hubei, China; 4. School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China; 5. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei Agricultural University, Baoding 071066, Hebei, China; 6. Quzhou Xunlong Aquatic Products Sci-tech Development Co., Ltd., Quzhou 324002, Zhejiang, China)

**Abstract:** In this paper, the best process of ozone water sterilization and its effect on the quality of tilapia fish were studied. The optimum sterilization process of tilapia with ozone water was determined based on the sterilization rate, electronic nose analysis, oxidation degree of proteins and lipids, and sensory quality of tilapia. The results showed that when the fish was soaked in 5.160 mg/L ozone water for 10 min, the sterilization effect was the best with the sterilization rate reaching (74.000±0.017)%. Under these conditions, the tilapia had good quality, showed no significant change in the electronic nose analysis and weak degree of protein and lipid oxidation. The fish contained 2.5 mg/mL fibrillin, 4.1 nmol/mg carbonyl, 0.08 μmol/mg total sulfhydryl, 0.36 mg/kg malondialdehyde, and had the Ca<sup>2+</sup>-ATPase activity of 2.6 U/mg and a sensory score of 17.99.

**Key words:** tilapia; sensory quality; ozone water; process optimization; cleaning and sterilization

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0700901); 国家现代农业产业技术体系(CARS-46)

作者简介: 刘恒阁(1997—), 男(汉), 硕士, 研究方向: 水产品高值化利用。

\* 通信作者: 白帆(1984—), 男(汉), 工程师, 硕士, 研究方向: 水产品高值化利用; 赵元晖(1979—), 男(汉), 副教授, 博士, 研究方向: 水产品高值化利用。

引文格式:

刘恒阁,王海燕,吴文锦,等.罗非鱼臭氧水杀菌技术的工艺优化及其对鱼肉品质的影响[J].食品研究与开发,2022,43(9):40-47.

LIU Hengge, WANG Haiyan, WU Wenjin, et al. Optimization of Ozone Water Sterilization for Tilapia and Its Effect on Fish Quality[J]. Food Research and Development, 2022, 43(9):40-47.

罗非鱼(*Oreochromis mossambicus*)属于辐鳍鱼纲鲈形目丽鱼科罗非鱼属,原产于非洲,是联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)向全球推广的优良养殖淡水鱼类。据《中国渔业统计年鉴 2020》统计,2019年,我国罗非鱼养殖产量高达164万吨<sup>[1]</sup>。罗非鱼肉质鲜嫩、鱼刺较少、价格低廉、营养丰富,含有多种蛋白质、不饱和脂肪酸与微量元素<sup>[2]</sup>。因此,罗非鱼被广泛应用于鱼类加工产业,产品类型主要包括整条罗非鱼、罗非鱼片、罗非鱼罐头、罗非鱼鱼糜制品等<sup>[3-4]</sup>。

臭氧水是一种安全、环保、高效、广谱的杀菌剂,其杀菌机理主要是 $O_3$ 分子产生氧自由基( $O\cdot$ ),通过自由基链式反应引起膜蛋白的氧化损伤,从而改变细胞膜的通透性,最终导致微生物裂解死亡<sup>[5-6]</sup>。通过臭氧水对水产品进行清洗杀菌处理,在国内罗非鱼加工与贮藏领域逐渐普及应用<sup>[7]</sup>。然而,臭氧的强氧化性可能导致蛋白质与脂质的氧化<sup>[8]</sup>,从而会对产品的营养成分产生不良影响。根据Bao等<sup>[9]</sup>的研究发现,其强氧化性可能还会导致蛋白质的溶解性与交联聚集特性下降,从而影响产品的弹性与嫩度。目前,水产品加工过程中的杀菌处理仍是大多数加工企业的难题,而现有文献对于臭氧水处理罗非鱼的报道,大多为探究臭氧水杀菌的优缺点以及对罗非鱼杀菌后品质的探究,针对罗非鱼臭氧杀菌适宜杀菌工艺条件的报道仍较少。

基于以上问题,本文以臭氧水清洗杀菌装置对罗非鱼肉进行处理,确定臭氧水浓度后,通过对不同浸泡时间下罗非鱼肉气味成分差异、杀菌率、蛋白质和脂质氧化程度以及感官品质的考察,探究臭氧水处理罗非鱼的最佳工艺条件及其对鱼肉品质的影响,以期臭氧水对罗非鱼清洗杀菌技术的进一步优化提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

吉富罗非鱼:市售;牛血清白蛋白(生物试剂):上海源叶生物科技有限公司;羰基含量检测试剂盒、总巯基含量检测试剂盒、 $Ca^{2+}$ -ATPase 检测试剂盒:北京索莱

宝科技有限公司;脂肪酸标准品、丁基羟基甲苯(均为优级纯):西格玛奥德里奇贸易有限公司;碘化钾、硫酸、硫代硫酸钠、氯化钾、三羟甲基氨基甲烷盐酸盐、碳酸氢钠、氢氧化钠、硫酸铜、酒石酸钾钠、十二烷基硫酸钠、乙二醇四乙酸、三氯乙酸、乙二醇四乙酸二钠、硫代巴比妥酸(均为分析纯):国药集团化学试剂有限公司。

### 1.2 仪器与设备

去鱼鳞设备(JL-10 GY)、去鱼内脏设备(JL-70 KF):青岛建亮科技有限公司;臭氧发生器(CF-G-3-20 g):青岛国林环保科技股份有限公司;酶标仪(Powerwave XS):美国 Biotek 仪器有限公司;多功能氮吹仪(SZ-N-20):山东桑泽仪器仪表有限公司;气相色谱仪(Agilent 7890 A):安捷伦科技有限公司;电子鼻(iNose):上海瑞玢智能科技有限公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 臭氧水的制备及浓度测定

##### 1.3.1.1 臭氧水的制取

采用臭氧发生器制取臭氧,将新制取的臭氧气体持续通入20 L、25℃的无菌蒸馏水中,并使气体流速保持在2.0 L/min。通过改变臭氧气体通入时间(1 min~5 min),即可制得不同浓度的臭氧水<sup>[10]</sup>。

##### 1.3.1.2 臭氧水浓度的确定

取100 mL新制得的臭氧水,加入20 mL 2%碘化钾溶液与3 mL 0.5 mol/L硫酸,避光反应5 min。反应结束后加入1%淀粉溶液,此时溶液显蓝色。采用0.01 mol/L硫代硫酸钠溶液进行滴定,滴定终点为蓝色刚好消失并且30 s后不恢复蓝色。

#### 1.3.2 鱼片的臭氧水处理

选取体表颜色、尺寸相近的鲜活罗非鱼,采用高压水去鱼鳞和去鱼内脏设备对其进行处理。按图1所示方法取鱼肉,鱼肉尺寸为3 cm×2 cm×0.5 cm。将鱼肉片置于6倍体积的臭氧水中浸泡(容器为无菌的密闭容器),设定浸泡时间为5、10、15 min。同时以蒸馏水浸泡5 min作为对照。浸泡结束后,倒掉臭氧水,将鱼肉片用封口袋封装并标记,放入-4℃冰箱贮藏备用<sup>[7,10]</sup>。

#### 1.3.3 杀菌率的测定

取新制得的鱼片样品测定菌落总数。参考GB

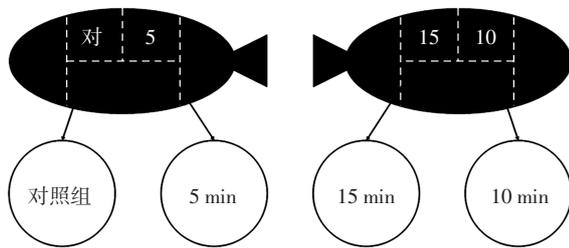


图1 取鱼片方法示意图

Fig.1 Schematic diagram of method of taking fish fillets

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》测定。杀菌率计算公式如下<sup>[14]</sup>。

$$\text{杀菌率}/\% = \frac{(\text{对照组菌落总数} - \text{试验组菌落总数})}{\text{对照组菌落总数}} \times 100$$

### 1.3.4 电子鼻试验气味成分分析

将相同浸泡时间下的鱼肉分为两组,分别进行生肉绞碎和蒸制3 min后的熟肉绞碎处理,处理后的鱼肉称取2 g置入50 mL棕色瓶中,采用封口膜密封,待气体富集2 h后检测。电子鼻采用顶空抽样的方法取样并检测,同时获取并记录数据,检测时间设定为90 s。取样前后,软件自动对传感器进行清洗,清洗时间设定为120 s,每组设8个平行<sup>[12-13]</sup>。

### 1.3.5 蛋白质和脂质氧化指标的测定

#### 1.3.5.1 蛋白质氧化指标的测定

1)肌原纤维蛋白的提取:提取方法参考Zhang等<sup>[14]</sup>的方法并适当修改。称取鱼肉样品5 g,加入50 mL蒸馏水均质1 min,于4℃下10 000 r/min离心15 min,弃上清,留沉淀。向沉淀中加入50 mL Tris-HCl缓冲液1(0.05 mol/L氯化钾,0.02 mol/L三羟甲基氨基甲烷盐酸盐,pH 7.0),4℃搅拌30 min后于10 000 r/min离心15 min,弃上清,留沉淀。向沉淀中加入50 mL Tris-HCl缓冲液2(0.6 mol/L氯化钾,0.02 mol/L三羟甲基氨基甲烷盐酸盐,pH 7.0),4℃搅拌30 min后于10 000 r/min离心15 min,取上清液,即为肌原纤维蛋白样液<sup>[14-19]</sup>。

2)肌原纤维蛋白含量的测定:测定方法参考福林酚法<sup>[15-16]</sup>。向7支试管中分别加入0、0.1、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mL牛血清白蛋白溶液(0.25 mg/mL),用蒸馏水补足至1 mL,即为标准曲线溶液。取0.2 mL稀释20倍的样液,向其中加入1 mL试剂1(50 mL碳酸氢钠+1 mL硫酸铜),即刻混匀,常温反应10 min。再向其中加入0.1 mL试剂2(福林酚),即刻混匀,于25℃下反应30 min后,测定500 nm处吸光度。同时测定标准溶液与空白。绘制标准曲线,计算肌原纤维蛋白样液浓度。

3)羰基含量的测定:参照羰基含量检测试剂盒指导方法测定。

4)总巯基含量的测定:参照总巯基含量检测试剂盒指导方法测定。

5)活性巯基含量的测定:参考薛勇<sup>[10]</sup>的方法并适当修改。取0.5 mL样液,加入4.5 mL Tris-HCl缓冲液3(2%十二烷基硫酸钠,0.01 mol/L乙二胺四乙酸,0.2 mol/L三羟甲基氨基甲烷盐酸盐,pH 6.8),于4℃下12 000 r/min离心10 min,取1 mL上清液,加入0.1 mL Tris-HCl缓冲液4(0.1%二硝基苯甲酸,0.2 mol/L三羟甲基氨基甲烷盐酸盐,pH 8.0),混匀,40℃反应25 min,冷却至常温,测定412 nm处吸光度。空白管采用0.5 mL Tris-HCl缓冲液2替代样液进行测定。计算活性巯基含量公式如下。

$$\text{活性巯基含量}/(\mu\text{mol}/\text{mg prot}) = (A \times 10) / (\varepsilon \times C_{pr})$$

式中:A为吸光度; $\varepsilon$ 为吸光系数,13 600 mL/(mol·cm); $C_{pr}$ 为蛋白质样液浓度,mg/mL。

6)Ca<sup>2+</sup>-ATPase活力的测定:参照Ca<sup>2+</sup>-ATPase检测试剂盒指导方法测定。

#### 1.3.5.2 脂质氧化指标的测定

硫代巴比妥酸值(thiobarbituric acid reactive substances, TBARS)的测定参照GB 5009.181—2016《食品安全国家标准 食品中丙二醛的测定》中第二法<sup>[20]</sup>。称取鱼肉样品5 g,准确加入50 mL三氯乙酸(trichloroacetic acid, TCA)混合液(7.5%三氯乙酸,0.1%乙二胺四乙酸二钠),加塞密封,50℃振摇30 min,10 000 r/min离心5 min。取2 mL上清液,向其中加入2 mL 0.02 mol/L硫代巴比妥酸(thiobarbituric acid, TBA)水溶液,加塞密封,混匀,90℃水浴30 min,冷却至常温,测定532 nm处吸光度。同时测定标准溶液与空白。丙二醛含量计算公式如下。

$$X = (c \times V \times 1\ 000) / (m \times 1\ 000)$$

式中:X为试样中丙二醛含量,mg/kg;c为标准曲线测得的样液中丙二醛浓度, $\mu\text{g}/\text{mL}$ ;V为试样溶液定容体积,mL;m为最终试样溶液所代表的试样质量,g;1 000为换算系数。

### 1.3.6 感官评定

挑选12名经过专业训练的感官评定员组成评判小组,于感官评价室内对臭氧水浸泡0、5、10、15 min后的样品进行评分,评分标准参考文献[21-24]的方法并适当修改,其中滋味评定需提前将各组杀菌后的鱼肉进行3 min的蒸制,评分标准见表1,4项指标各5分,总分为4项指标分数的平均值总和,满分20分。

### 1.4 数据处理

采用SPSS 21.0软件进行数据分析,试验计量数据采用平均值±标准差表示,使用Origin 2019软件进行

表1 感官评定标准

Table 1 Criteria of sensory evaluation table

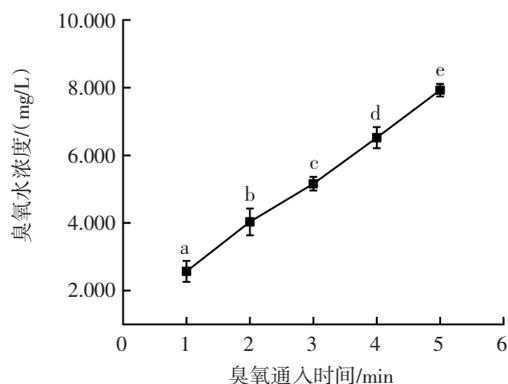
评分指标	评价标准	分值
气味(5分)	生鱼特有的腥味和清香味	4.1~5
	生鱼特有的腥味和清香味略淡,略带臭氧水的刺鼻味	3.1~4
	腥味较淡,略带臭氧水的刺鼻味	2.1~3
	腥味很淡,刺鼻的臭味较明显	1.1~2
	腥味完全被掩盖,臭氧的刺鼻臭味较浓	0~1
滋味与口感(5分)	鱼肉特有的鲜咸味,口感清爽	4.1~5
	鱼肉特有的鲜咸味略淡,口感稍油腻	3.1~4
	鲜味与咸味较淡,口感稍油腻	2.1~3
	鲜味与咸味很淡,口感较油腻	1.1~2
外观(5分)	色泽为白色且均匀,切面纹理清晰	4.1~5
	色泽稍暗淡且较均匀,切面纹理较清晰	3.1~4
	色泽稍暗淡且较不均匀,切面纹理较不清晰	2.1~3
	色泽暗淡且不均匀,切面纹理不清晰	1.1~2
	色泽很暗,切面无纹理排列	0~1
质地(5分)	肉质柔软不松散,有弹性	4.1~5
	肉质较柔软不松散,略带弹性	3.1~4
	肉质较柔软且较松散,弹性略差	2.1~3
	肉质略柔软且较松散,弹性较差	1.1~2
	肉质略柔软且很松散,无弹性	0~1

数据处理,通过单因素和双因素方差分析进行比较,差异显著水平为0.05。

## 2 结果与分析

### 2.1 臭氧水浓度的测试结果

臭氧水浓度是影响臭氧杀菌效果、操作环境及成本的关键因素,不同的臭氧通入时间对臭氧水浓度的影响见图2。



小写字母不同表示各处理组间差异显著( $P<0.05$ )。

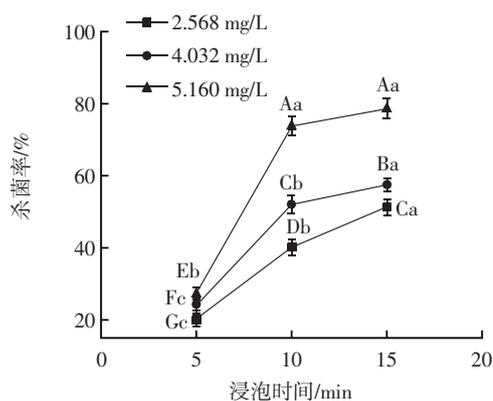
图2 不同臭氧通入时间下的臭氧水浓度

Fig.2 Ozone water concentrations at different ozone entry times

由图2可知,随着臭氧通入时间的延长,臭氧水浓度增大。根据相关研究<sup>[7,10,12]</sup>,在通过臭氧水进行杀菌和脱腥的过程中,臭氧水浓度在0~6.000 mg/L,杀菌率提升较快,而当臭氧水浓度高于6.000 mg/L后,杀菌率随溶液浓度变化不显著,且操作过程中臭氧水浓度过高会导致操作环境气味刺鼻、成本高以及耗时长等缺点。因此,本文选择将臭氧水浓度控制在6.000 mg/L以内,结合实际操作选择采用臭氧通入时间为1、2、3 min的臭氧水,对应浓度分别为(2.568±0.142)、(4.032±0.268)、(5.160±0.086) mg/L。

### 2.2 杀菌率测定结果

相同浓度下,不同浸泡时间对杀菌率的影响见图3。



小写字母不同表示各处理组内差异显著( $P<0.05$ );大写字母不同表示各处理组间差异显著( $P<0.05$ )。

图3 不同浸泡时间下的杀菌率

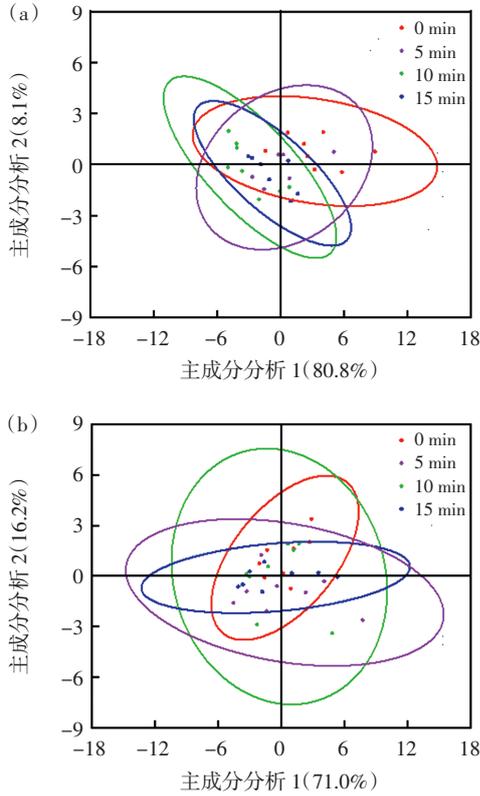
Fig.3 Sterilization rate at different soaking times

由图3可知,在同一臭氧水浓度下,杀菌率与浸泡时间呈正相关,并且浸泡时间5 min~10 min的增长速率明显高于10 min~15 min。出现增长速率减缓这一现象的原因可能是随着浸泡时间的延长,臭氧水浓度逐渐衰减,导致杀菌效果愈发微弱,从而杀菌率的增长速率愈发缓慢。而在同一浸泡时间下,杀菌率随着臭氧水浓度的增大而升高,且不同浓度对应的杀菌率具有显著性差异( $P<0.05$ )。综上所述,浸泡时间越长,臭氧水浓度越高,杀菌率也就越高,这与文献<sup>[7,25]</sup>报道的结果相似。因此,为保证杀菌效果,后续指标的测定选择采用浓度为5.160 mg/L的臭氧水对罗非鱼片进行浸泡处理,此时鱼肉的杀菌率为(74.000±0.017)%。

### 2.3 电子鼻分析

臭氧水浸泡杀菌可能对生、熟鱼肉的气味造成影响,通过电子鼻对不同臭氧水浸泡时间下的生、熟鱼肉气味成分分析,结果见图4。

由图4可知,主成分1和2的总和均大于85%,说明两者可代表主要的样品信息。图中不同浸泡时间下



(a)不同浸泡时间下罗非鱼生肉的气味主成分分析图;  
(b)不同浸泡时间下罗非鱼熟肉的气味主成分分析图。

图4 电子鼻气味主成分分析图

Fig.4 Principal component analysis diagram of electronic nose odor

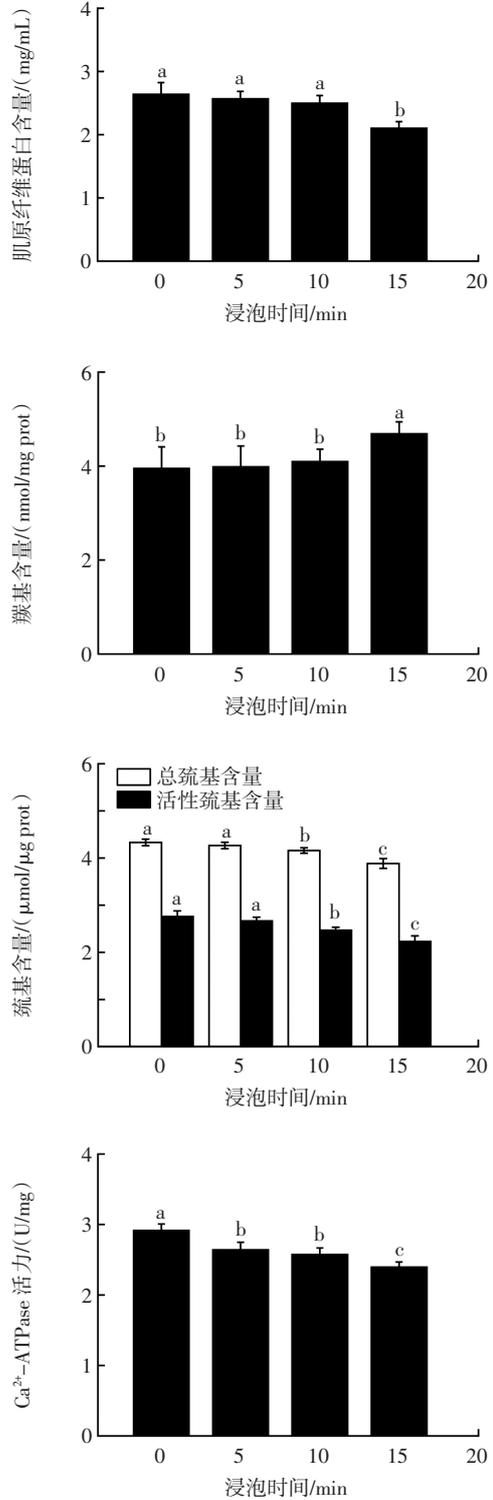
的代表各组分布区域均未分开。这说明在不同浸泡时间下的生鱼肉、熟鱼肉的气味成分总体情况均无显著性差异,即臭氧水处理对生罗非鱼肉及熟制后的罗非鱼肉气味成分均无显著性影响,这与文献[13]报道的结果相似。

## 2.4 蛋白质和脂质氧化程度

### 2.4.1 蛋白质氧化程度

在蛋白质氧化过程中,羰基化反应是该过程的重要标志,羰基含量是评判蛋白质氧化程度的重要指标<sup>[26-27]</sup>。含有半胱氨酸的蛋白质或肽,其活性巯基中的氢原子易被自由基等活性基团取代,因此巯基含量也可直接体现蛋白质氧化程度<sup>[28]</sup>。肌球蛋白是肌原纤维蛋白中的重要组成部分,其分子构象极易发生改变,这会导致  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活力降低。此外,蛋白质分子重排也会导致  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活力降低。因此在蛋白质氧化过程中,往往会伴随  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活力的降低,其变化可从侧面体现蛋白质氧化程度<sup>[29]</sup>。蛋白质氧化程度结果见图5。

由图5可知,随着浸泡时间的延长,肌原纤维蛋白



小写字母不同表示各处理组间差异显著( $P < 0.05$ )。

图5 不同浸泡时间对蛋白质氧化指标的影响

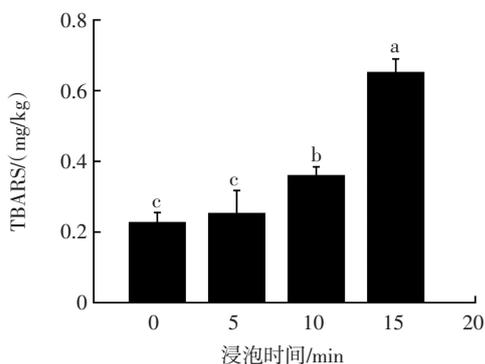
Fig.5 Effect of different soaking time on protein oxidation index

含量、巯基含量以及  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活力呈减小趋势,羰基含量呈增大趋势。其中 15 min 组的各项指标均与对照组具有显著差异,而 10 min 组仅在巯基含量与  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活力方面与对照组具有显著差异,5 min

组仅在  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活力方面与对照组具有显著差异。综上所述,15 min 组的蛋白质氧化损伤情况最为严重,这与文献[14]报道的结果相似。结合 2.2 中不同浸泡时间下的杀菌率变化情况,推测臭氧水处理最优浸泡时间为 10 min。

#### 2.4.2 脂质氧化程度

在脂质氧化过程中,最具有代表性的产物是丙二醛。通过 TBARS 的测定,可得知丙二醛的含量,从而推测脂质氧化的程度<sup>[30-31]</sup>。脂质氧化程度结果见图 6。



小写字母不同表示各处理组间差异显著( $P < 0.05$ )。

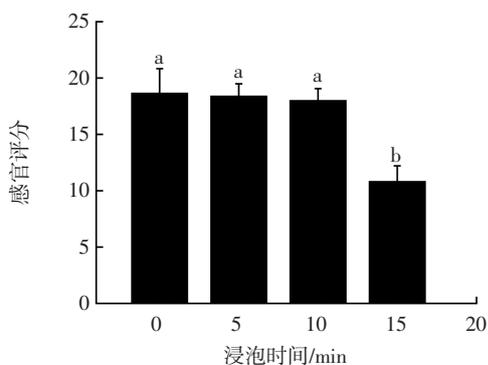
图 6 不同浸泡时间对 TBARS 的影响

Fig.6 Effect of different soaking time on TBARS

由图 6 可知,随着浸泡时间的延长,TBARS 含量呈现出增大的趋势。浸泡时间为 10 min 及以上时,脂质氧化指标与对照组的差异显著,脂质氧化的程度也逐渐强烈。其中 15 min 组的脂质氧化损伤情况最为严重,这与文献[14,25]报道的结果相似。结合 2.2 和 2.4.1 中不同浸泡时间下的杀菌率变化以及蛋白质氧化程度,推测臭氧水处理最优浸泡时间为 10 min。

#### 2.5 感官分析

臭氧水处理对罗非鱼肉感官品质的影响见图 7。



小写字母不同表示各处理组间差异显著( $P < 0.05$ )。

图 7 不同浸泡时间对罗非鱼肉感官品质的影响

Fig.7 Effects of different soaking time on sensory quality of tilapia fish

由图 7 可知,随着浸泡时间的延长,鱼肉的感官品质逐渐下降,其中浸泡 0~10 min 的鱼肉感官评分下降不显著( $P > 0.05$ );而当浸泡时间大于 10 min 时,鱼肉的感官品质显著降低( $P < 0.05$ ),综合上述杀菌率、蛋白质以及脂质氧化程度结果,这可能是由于蛋白质、脂质等物质氧化程度加剧,影响了鱼肉的滋味、外观及质地等品质,这与文献[2,7]报道结果相似。综上所述,确定臭氧水处理最优浸泡时间为 10 min。

### 3 结论

本文通过臭氧水清洗杀菌装置对罗非鱼肉进行了处理。通过对鱼肉杀菌率、气味成分差异、蛋白质和脂质氧化程度以及感官品质的考察,确定臭氧水处理罗非鱼肉的最佳工艺条件并探究了其对罗非鱼肉品质的影响。结果表明,当臭氧水浓度为 5.160 mg/L、浸泡时间为 10 min 时,清洗杀菌效果最佳,杀菌率可达  $(74.00 \pm 0.017)\%$ 。此时,罗非鱼生肉、熟肉、电子鼻气味成分分布域重叠率高,肌原纤维蛋白、羰基、总巯基、丙二醛含量和  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活力分别为 2.5 mg/mL、4.1 nmol/mg、0.08  $\mu\text{mol/mg}$ 、0.36 mg/kg、2.6 U/mg,说明鱼肉的气味成分变化较小,且蛋白质和脂质氧化程度均不强烈。同时,鱼肉的感官评分保持为 17.99 分,感官品质完好。本文采用的装置还有改进与优化的空间,具体改进思路可参考固态聚合物电解质(solid polymer electrolyte, SPE)电解法,同时还可结合超声处理等技术,从而进一步优化清洗杀菌工艺。此外,对于该技术对鱼肉风味(气味与滋味)影响的研究,还可利用高效液相色谱、气相色谱-质谱联用仪、气相色谱-嗅味计等仪器进行分析,深入考察风味组分在该过程中受到的影响。

#### 参考文献:

- [1] 农业部渔业渔政管理局. 2020 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2020.  
Fisheries Administration of the Ministry of Agriculture. China Fishery Statistical Yearbook 2020[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2020.
- [2] 颜明月. 臭氧水处理对罗非鱼片蛋白质和脂质氧化及品质的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2015.  
YAN Mingyue. Effects of ozone water treatment on protein oxidation and lipid oxidation and quality of tilapia fillets[D]. Nanning: Guangxi University, 2015.
- [3] 石永伦, 郑泽芳, 杨树国, 等. 云南罗非鱼产业发展现状分析及对策[J]. 中国水产, 2016(8): 36-38.  
SHI Yonglun, ZHENG Zefang, YANG Shuguo, et al. Analysis and countermeasures of tilapia industry development in Yunnan[J]. China Fisheries, 2016(8): 36-38.

- [4] 赵志霞, 吴燕燕, 李来好, 等. 我国罗非鱼加工研究现状[J]. 食品工业科技, 2017, 38(9): 363–367, 373.  
ZHAO Zhixia, WU Yanyan, LI Laihao, et al. Current research situation of tilapia processing in China[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(9): 363–367, 373.
- [5] 乔彩云, 李建科, 惠伟, 等. 臭氧技术及其在消毒杀菌和果蔬保鲜方面的应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2012, 33(10): 432–435.  
QIAO Caiyun, LI Jianke, HUI Wei, et al. Research progress of application of ozone technology in the disinfection and preservation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(10): 432–435.
- [6] 蓝蔚青, 赵亚楠, 刘琳, 等. 臭氧水处理在水产品杀菌保鲜中的应用研究进展[J]. 渔业科学进展, 2020, 41(4): 190–197.  
LAN Weiqing, ZHAO Yanan, LIU Lin, et al. Research progress on the applications of ozonated water in the sterilization and preservation of aquatic products[J]. Progress in Fishery Sciences, 2020, 41(4): 190–197.
- [7] 岑剑伟, 于福田, 杨贤庆, 等. 几种杀菌方法对罗非鱼片鱼肉品质的影响比较[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(7): 123–129.  
CEN Jianwei, YU Futian, YANG Xianqing, et al. Comparison of several germicidal methods of tilapia fillet and their effects on fish meat quality[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(7): 123–129.
- [8] 刘慈坤. 臭氧介导的肌原纤维蛋白质氧化对草鱼鱼糜凝胶持水性的影响机制研究[D]. 锦州: 渤海大学, 2019.  
LIU Cikun. Effects of ozone induced myofibrillar protein oxidation on the water-holding capacity in grass carp surimi gel[D]. Jinzhou: Bohai University, 2019.
- [9] BAO Y L, BOEREN S, ERTBJERG P. Myofibrillar protein oxidation affects filament charges, aggregation and water-holding[J]. Meat Science, 2018, 135: 102–108.
- [10] 薛勇. 鳙鱼鱼糜抗冻变性剂及土腥味脱除方法的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.  
XUE Yong. Study on antifreeze denaturing agent and removal method of earthen smell of bighead carp surimi[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2006.
- [11] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定: GB 4789.2—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.  
National Health and Family Planning Commission, State Food and Drug Administration. National food safety standard Food microbiological examination Aerobic plate count: GB 4789.2—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [12] 袁林, 查锋超, 姚烨, 等. 牡蛎酶解产物与还原糖美拉德反应工艺优化及挥发性风味物质分析[J]. 食品科学, 2015, 36(24): 1–9.  
YUAN Lin, ZHA Fengchao, YAO Ye, et al. Optimization of Maillard reaction for oyster enzymatic hydrolysates and reducing sugar by response surface methodology and analysis of volatile flavor compounds in reaction products[J]. Food Science, 2015, 36(24): 1–9.
- [13] 颜明月, 陆玉芹, 陈德慰. 电子鼻技术研究臭氧水处理对罗非鱼鱼片的新鲜度的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(20): 264–269.  
YAN Mingyue, LU Yuqin, CHEN Dewei. Application of electronic nose in freshness evaluation of tilapia fillets as affected by ozone treatment[J]. Food Science, 2015, 36(20): 264–269.
- [14] ZHANG T, XUE Y, LI Z J, et al. Effects of ozone on the removal of geosmin and the physicochemical properties of fish meat from big-head carp (*Hypophthalmichthys nobilis*)[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 34: 16–23.
- [15] 贺建华, 邵纯君, 鹿麟, 等. 福林酚法测定甘露聚糖肽口服溶液中蛋白质的含量[J]. 中国药物评价, 2017, 34(2): 92–94.  
HE Jianhua, SHAO Chunjun, LU Lin, et al. Determination of protein in mannate oral solution by folin-ciocalteu method[J]. Chinese Journal of Drug Evaluation, 2017, 34(2): 92–94.
- [16] LOWRY O H, ROSEBROUGH N J, FARR A L, 等. 福林酚试剂法测定蛋白质[J]. 食品与药品, 2011, 13(3): 147–151.  
LOWRY O H, ROSEBROUGH N J, FARR A L, et al. Determination of protein with folinol reagent[J]. Food and Drug, 2011, 13(3): 147–151.
- [17] SOYER A, ÖZALP B, DALMİS Ü, et al. Effects of freezing temperature and duration of frozen storage on lipid and protein oxidation in chicken meat[J]. Food Chemistry, 2010, 120(4): 1025–1030.
- [18] ZHANG Y Q, YANG R J, ZHAO W. Improving digestibility of feather meal by steam flash explosion[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(13): 2745–2751.
- [19] ZAMAN Z, SNEYERS L, VAN ORSHOVEN A, et al. Elimination of paraprotein interference in determination of plasma inorganic phosphate by ammonium molybdate method[J]. Clinical Chemistry, 1995, 41(4): 609–614.
- [20] 中华人民共和国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.  
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard Determination of malondialdehyde in food: GB 5009.181—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [21] LAZO O, GUERRERO L, ALEXI N, et al. Sensory characterization, physico-chemical properties and somatic yields of five emerging fish species[J]. Food Research International, 2017, 100: 396–406.
- [22] LAZO O, CLARET A, GUERRERO L. A comparison of two methods for generating descriptive attributes with trained assessors: Check-all-that-apply (CATA) vs. free choice profiling (FCP)[J]. Journal of Sensory Studies, 2016, 31(2): 163–176.
- [23] MAHMOUD M A A, BUETTNER A. Characterisation of aroma-active and off-odour compounds in German rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Part II: Case of fish meat and skin from earthen-ponds farming[J]. Food Chemistry, 2017, 232: 841–849.
- [24] 任范伟, 朱兰兰, 周德庆. 秋刀鱼肉质感官评价与质构的相关性分析[J]. 南方农业学报, 2016, 47(11): 1932–1938.
- [25] DE MENDONÇA SILVA A M, GONÇALVES A A. Effect of aqueous

- ozone on microbial and physicochemical quality of Nile tilapia processing[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2017, 41(6): e13298.
- [26] LIU F G, MA C C, MCCLEMENTS D J, et al. A comparative study of covalent and non-covalent interactions between zein and polypeptides in ethanol-water solution[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 63: 625-634.
- [27] 刘昊天, 殷小钰, 汪海棠, 等. 基于蛋白氧化行为的肉及肉制品品质提升及劣变机制研究进展[J]. *食品科学*, 2020, 41(21): 230-237.  
LIU Haotian, YIN Xiaoyu, WANG Haitang, et al. Quality improvement and deterioration of meat and meat products based on the protein oxidation: A review of recent research[J]. *Food Science*, 2020, 41(21): 230-237.
- [28] 李慧芝, 谢含仪, 赵燕芳, 等. 反复冻融过程对肉类氧化关键指标的影响[J]. *食品科技*, 2020, 45(11): 102-109.  
LI Huizhi, XIE Hanyi, ZHAO Yanfang, et al. Effect of multiple freeze-thaw cycles on the key oxidation indicators of meat samples[J]. *Food Science and Technology*, 2020, 45(11): 102-109.
- [29] 赵亚, 石启龙, 曹淑敏. 南美白对虾贮藏期间  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活力变化规律与机制[J]. *食品科学*, 2018, 39(5): 258-264.  
ZHAO Ya, SHI Qilong, CAO Shumin. Variation and underlying mechanisms of  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase activity in *Penaeus vannamei* during storage[J]. *Food Science*, 2018, 39(5): 258-264.
- [30] 曹文明, 王鑫, 包杰, 等. 油脂氧化评价研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2013, 26(4): 1-5.  
CAO Wenming, WANG Xin, BAO Jie, et al. Research progresses on lipids rancidity and oxidation evaluation[J]. *Cereals & Oils*, 2013, 26(4): 1-5.
- [31] 王善宇, 刘鑫, 曹荣, 等. 即食虾干加工过程脂质变化研究[J]. *上海海洋大学学报*, 2021, 30(5): 932-939.  
WANG Shanyu, LIU Xin, CAO Rong, et al. Changes in lipids of dried shrimp products during processing[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2021, 30(5): 932-939.

加工编辑: 刘艳美  
收稿日期: 2021-12-02