

# 用臭氧漂洗处理的鱼糜在贮藏过程中的品质变化

张冬梅<sup>1</sup>, 张顺治<sup>1</sup>, 尹涛<sup>1,2</sup>, 胡杨<sup>1,2</sup>, 刘茹<sup>1,2</sup>, 刘友明<sup>1,2</sup>, 杜红英<sup>1,2</sup>, 熊善柏<sup>1,2</sup>, 尤娟<sup>1,2\*</sup>

(1. 华中农业大学食品科学技术学院/国家大宗淡水鱼加工技术研发分中心(武汉), 湖北武汉 430070)

(2. 长江经济带大宗水生生物产业绿色发展教育部工程研究中心, 湖北武汉 430070)

**摘要:** 该研究探讨了用清水+臭氧水漂洗的鱼糜在-18℃贮藏期间凝胶强度、持水性、色泽、羰基、巯基、硫代巴比妥酸(TBA)、风味等的变化。研究得出, 在0~24周贮藏期间, 臭氧漂洗组羰基含量增加了4倍, TBA含量增加了约2倍, 总巯基与游离巯基含量分别下降至原来的63.50%、66.61%。且相同贮藏时间臭氧漂洗组的羰基含量较对照组高, 巯基含量较对照组低。随着贮藏时间的延长, 臭氧漂洗组和对照组的鱼糜及鱼糜凝胶亮度与白度增大, 凝胶持水性和凝胶强度缓慢下降, 但前3周臭氧漂洗组的凝胶强度强于对照组。贮藏中鱼糜的腥味、鲜味和咸味降低。综上, 在贮藏中臭氧漂洗虽然会一定程度上促进蛋白质与脂质的氧化, 不过在贮藏终点时与对照组无显著性差异, 而且清水+臭氧水漂洗可以在贮藏前一个月控制鱼糜凝胶强度的下降并一定程度上提高鱼糜白度。另外, 一级动力学模型在贮藏前一个月可较好地反应其品质变化。该研究为臭氧在鱼糜贮藏稳定性上的应用提供了参考。

**关键词:** 臭氧漂洗; 鱼糜; 贮藏特性; 动力学分析

文章编号: 1673-9078(2023)05-137-147

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.5.0717

## Quality Changes of Ozone-rinsed Surimi during Storage

ZHANG Dongmei<sup>1</sup>, ZHANG Shunzhi<sup>1</sup>, YIN Tao<sup>1,2</sup>, HU Yang<sup>1,2</sup>, LIU Ru<sup>1,2</sup>, LIU Youming<sup>1,2</sup>, DU Hongying<sup>1,2</sup>,  
XIONG Shanbai<sup>1,2</sup>, YOU Juan<sup>1,2\*</sup>

(1.College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University/National R & D Branch Center for Conventional Freshwater Fish Processing (Wuhan), Wuhan 430070, China)

(2.Engineering Research Center of Green Development for Conventional Aquatic Biological Industry in the Yangtze River Economic Belt, Ministry of Education, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Changes in the gel strength, water holding capacity, color, carbonyl groups, thiobarbituric acid (TBA), and flavor of surimi rinsed with water and ozone water and stored at -18℃ were investigated. During storage period from week 0 to 24, the carbonyl content increased four times, TBA content increased approximately two times, but the total and free sulfhydryl contents decreased to respectively 63.50% and 66.61% of the original level in the ozone-rinsed group. As such, carbonyl and sulfhydryl contents in the ozone-rinsed group were higher and lower than that in the control group, respectively. With the extension of storage period, the brightness and whiteness of surimi and surimi gel in both ozone-rinsed and control groups increased, whereas the water holding capacity and strength of the gel decreased gradually. However, gel strength in the ozone-rinsed group was higher than that in the control group during the first 3 weeks. The fishy smell, umami taste, and saltiness of surimi were reduced during storage. In conclusion, although the oxidation of proteins and lipids was promoted by ozone rinsing during storage, there were no significant differences from the control group at the end of storage period. Moreover, rinsing with clean and ozone water 1 month before storage can control the decline in surimi gel strength and improve its whiteness to a certain extent. In addition, the first-order kinetic model can better reflect quality changes a month before storage. This study provides a reference for the application of ozone to improve the storage stability of surimi.

引文格式:

张冬梅,张顺治,尹涛,等.用臭氧漂洗处理的鱼糜在贮藏过程中的品质变化[J].现代食品科技,2023,39(5):137-147.

ZHANG Dongmei, ZHANG Shunzhi, YIN Tao, et al. Quality changes of ozone-rinsed surimi during storage [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(5): 137-147.

收稿日期: 2022-06-06

基金项目: 国家现代农业产业技术体系专项(CARS-45); 华中农业大学自主科技创新基金(2662020SCP006)

作者简介: 张冬梅(1998-),女,硕士,研究方向:水产品加工及贮藏工程, E-mail: 2353403804@qq.com

通讯作者: 尤娟(1985-),博士,副教授,研究方向:水产品加工及贮藏工程, E-mail: juanyou@mail.hzau.edu.cn

**Key words:** ozone rinsing; surimi; storage characteristics; kinetic analysis

目前鱼肉香肠、鱼肉丸、鱼糕、鱼豆腐以及模拟蟹棒等鱼糜制品在市场上的需求不断增加<sup>[1]</sup>,而作为主原料的鱼糜在加工、运输及贮藏中存在着耗水量大、腥味重以及凝胶强度低等问题,制约着淡水鱼糜产业的增效和绿色高质量发展<sup>[2]</sup>。所以淡水鱼糜生产工艺优化和品质改善研究显得尤为重要。鱼糜漂洗是关系耗水量及鱼糜品质的重要工艺之一,常用的方法有清水漂洗、盐水漂洗、金属离子水漂洗以及臭氧漂洗等<sup>[3,4]</sup>。目前相关的研究主要集中在探究漂洗条件对鱼糜品质的影响,而组合不同漂洗方式对鱼糜贮藏过程中品质变化的研究较少。臭氧漂洗是目前的研究热点,已有研究证明通过一定浓度的臭氧漂洗淡水鱼糜能够起到很好的脱腥、漂白和改善凝胶强度的作用,同时能够减少耗水量。以前的学者研究了臭氧水漂洗对鲢鱼<sup>[5]</sup>、鲢鱼<sup>[4,6,7]</sup>鱼糜品质的影响,但均未进一步探讨臭氧漂洗对鱼糜的贮藏稳定性。由于臭氧可以在水中生成较高反应活性的多种活性氧自由基,如羟自由基、超氧阴离子自由基等。这些活性自由基可对多种氨基酸进行侧链修饰、改变蛋白构象、促进蛋白质交联或降解,这种改变可能会影响鱼糜的贮藏特性。所以探讨臭氧处理过的鱼糜在贮藏中品质特性的改变是非常有必要的,本团队前期采用羟基自由基氧化商业购买的鲢鱼鱼糜,研究冷冻鱼糜贮藏过程中的品质变化<sup>[8]</sup>,但商业冷冻鱼糜原料组成成分相对复杂,且羟基自由基模拟氧化与臭氧水漂洗制备鱼糜的氧化存在较大差异。本文在前期研究的最佳漂洗鱼糜方式(清水漂洗后再用臭氧水漂洗)的基础上<sup>[6]</sup>,研究清水+臭氧水处理的鱼糜在-18℃贮藏过程中,其羰基、巯基、水溶性蛋白、盐溶性蛋白含量、TBA含量、持水性、凝胶强度、白度及风味的变化,并建立品质指标随贮藏时间变化的动力学方程,以期鱼糜贮藏品质稳定提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与试剂

白鲢(每条2 000~3 000 g)购于农贸市场,活鱼存放于有足够水和氧气的塑料盒中半小时内运至实验室。

NaCl、H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>、NaOH、二硝基苯肼(Dinitrophenylhydrazine, DNPH)、十二烷基硫酸钠(Sodium Dodecyl Sulfate, SDS)、二硫二硝基苯甲酸(Dithiobis-(2-Nitrobenzoic Acid), DTNB), 国药集团

化学试剂有限公司; HCl, 信阳化学试剂厂; 三羟甲基氨基甲烷(Tris), 北京浮博生物科技有限公司; 以上试剂均为分析纯。

### 1.2 仪器与设备

HZ250 采肉机, 厦门英博机械有限公司; GCQJ-1-3 电解式高浓度臭氧气机, 武汉威蒙环保科技有限公司; TA-XTPlus 质构仪, 英国 Stable Micro Surrey 公司; FOX-4000 电子鼻、ASTREE II 电子舌, 法国 Alpha M.O.S 公司; CR-400 色差仪, 日本柯尼卡-美能达公司。

### 1.3 实验与方 法

#### 1.3.1 鱼糜漂洗及贮藏

两次清水漂洗为对照, 实验组清水+臭氧水组, 首先用鱼肉2倍质量的清水漂洗10 min, 静置5 min, 然后用1 800 r/min离心5 min后再用鱼肉2倍质量的臭氧水漂洗10 min, 静置5 min, 离心(1 800 r/min, 5 min)得到鱼糜, 其中臭氧水的质量浓度为8 mg/L。将制好的鱼糜在-18℃条件下分别贮藏0、1、2、3、4、12、24周。

#### 1.3.2 鱼糜凝胶的制备

将含水量76.00%的鱼糜切成小块在料理机中空斩3 min, 再添加 $m=2.50\%$ 的NaCl后盐斩5 min, 放入裱花袋抽真空后于塑料肠衣中进行封装, 在40℃加热60 min, 90℃加热30 min, 然后实验室流水冷却鱼肠30 min。

#### 1.3.3 羰基含量测定

参考 Mesquita 等<sup>[9]</sup>的方法, 稍作修改。2 mL DNPH(溶于0.50 mol/L H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>)和2 mL 肌原纤维蛋白混合均匀, 室温静置10 min后, 加入6 mol/L的NaOH溶液1 mL, 继续室温下反应10 min, 之后在450 nm处测吸光值, 以高盐缓冲液代替肌原纤维蛋白加入DNPH作为空白组。以22 308 L/(mol cm)消光系数计算蛋白羰基衍生物含量, 单位nmol/mg。

$$M_1 = \frac{A \times 106}{C \times 22308} \quad (1)$$

式中:

$M_1$ —羰基含量, nmol/mg;

$A$ —450 nm处的吸光值;

$C$ —蛋白浓度, mg/mL。

#### 1.3.4 巯基含量测定

参考 Zhang 等<sup>[10]</sup>的方法, 略作修改。活性巯基含

量测定: 将肌原纤维蛋白质量浓度调至 1 mg/mL, 在 0.50 mL 的肌原纤维蛋白溶液中添加 5 mL 蒸馏水, 将 5.50 mL 蛋白溶液与 100  $\mu$ L Ellman 试剂 (10 mmol/L DTNB 溶解于 Tris-HCl 缓冲液, 调整 pH 值 8) 混匀, 4  $^{\circ}$ C 下静置 60 min, 在 412 nm 处测吸光值。总巯基含量测定: 在 0.50 mL 的肌原纤维蛋白溶液中添加 5 mL 缓冲液 A (2% SDS, 8 mol/L 尿素、10 mmol/L EDTA, 调整 pH 值 8), 将 5.50 mL 的蛋白溶液与 100  $\mu$ L Ellman 试剂 (10 mmol/L DTNB 溶解于 Tris-HCl 缓冲液, 调整 pH 值 8) 混匀, 40  $^{\circ}$ C 下放置 25 min, 在 412 nm 处测吸光值。

对照组用 0.60 mol/L NaCl (pH 值 7) 溶液替换肌原纤维蛋白溶液, 摩尔消光系数为 13 600 L/(mol cm)。

$$M_2 = \frac{A \times D}{C \times 13600} \quad (2)$$

式中:

$M_2$ —巯基含量,  $\mu$ mol/mg;

$A$ —412 nm 处的吸光值;

$D$ —稀释倍数;

$C$ —蛋白浓度, mg/mL。

### 1.3.5 水、盐溶性蛋白含量测定

参考蒋文馨等<sup>[11]</sup>的方法略作修改。称取两份 5 g 鱼糜样品分别溶解在 0.05 mol/L NaCl 低盐缓冲溶液和 0.50 mol/L NaCl 高盐缓冲溶液中, 4 000 r/min 均质 1 min, 调整体积至 50 mL, 在 4  $^{\circ}$ C 下混合搅拌 30 min。随后将均质液在 4  $^{\circ}$ C 下离心 20 min, 取上清液, 采用福林酚法测定水溶性和盐溶性蛋白浓度。

### 1.3.6 TBA 含量的测定

参照 GB 5009.181-2016《食品国家安全标准 食品中丙二醛的测定》分光光度法测定样品中丙二醛含量, 计算 TBA 含量。

### 1.3.7 鱼糜凝胶强度测定

用 TA-XTPlus 质构分析仪的 TA39 探头测定鱼肠凝胶强度, 参数设置为: 测速 (前、中、后), 1 mm/s, 触发力 5 g, 距离 15 mm。计算公式:

$$S = F \times H \quad (3)$$

式中:

$S$ —凝胶强度, g cm;

$F$ —破断力, g;

$H$ —凹陷深度, cm。

### 1.3.8 鱼糜、鱼糜凝胶色度测定

采用色差计测定样品的色泽。用标准白板校准后, 每个样品随机测定 3 个位置的色泽。 $L^*$ 为亮度值;  $a^*$ 为红绿值;  $b^*$ 为黄蓝值, 白度值  $W$  由公式 (4) 计算得出。

$$W = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}} \quad (4)$$

式中:

$W$ —白度值;

$L^*$ —亮度值;

$a^*$ —红绿值;

$b^*$ —黄蓝值。

### 1.3.9 鱼糜凝胶持水性测定

将鱼肠切为 5 mm 的圆片称重 ( $W_1$ ), 采用三折叠法滤纸包裹, 然后用硬度计施加 5 kg 的力持续 2 min, 拿下滤纸, 再将样品称重 ( $W_2$ ), 持水性 (WHC) 计算公式:

$$WHC = \frac{W_2}{W_1} \times 100\% \quad (5)$$

式中:

$WHC$ —持水性, %;

$W_1$ —实验前鱼肠质量, g;

$W_2$ —实验后鱼肠质量, g。

### 1.3.10 电子鼻分析

参照陈东清等<sup>[12]</sup>的方法进行电子鼻分析。样品制备: 称取样品 2 g 于 10 mL 样品瓶中, 密封备用。参数设置: 产生时间 120 s; 顶空产生温度 50  $^{\circ}$ C; 振荡速度 500 r/min。总获取时间 120 s; 获取间隔时间 1 s; 获取延滞时间 300 s。注射体积 1.50 mL; 注射速度 1.50 mL/s; 进样针温度 60  $^{\circ}$ C。载气为合成干燥空气, 流速为 150 mL/min。

### 1.3.11 电子舌分析

参照 Qiu 等<sup>[13]</sup>的方法进行电子舌分析。称取样品 15 g, 加入 100 mL 去离子水混匀; 静置 30 min 后 10 000 r/min 离心 10 min, 取上清液滤液, 密封待用。参数设置: 传感器每秒采集一个数据, 采集时间共 120 s, 选取每根传感器第 120 s 的响应值进行分析。

### 1.3.12 鱼糜品质变化动力学分析

对鱼糜品质在贮藏期间的变化进行一级动力学拟合, 得到相对质构参数 ( $T/T_0$ ) 和贮藏时间 ( $t$ ) 之间的关系。

一级动力学方程为:

$$T = T_0 \times e^{-kt} \quad (6)$$

式中:

$T$ — $t$  周时鱼糜各项质构的参数值;

$T_0$ —贮藏期 0 周时鱼糜各项质构参数值;

$t$ —贮藏时间, 周;

$k$ —鱼糜各质构参数的降解速率常数。

### 1.4 数据分析

每组实验无特殊说明均做 3 个平行。采用 Excel 2016 软件处理, 进行方差分析, 结果表示采取平均值 ± 标准差的形式。采用 Origin 9.0 软件与 SAS 8.0 统计分析软件分别作图并进行显著性分析, 采用 SPSS 22.0 进行相关性分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 贮藏时间对鱼糜肌原纤维蛋白羰基含量的影响

由图 1 可知, 在 -18 °C 贮藏条件下, 随着时间的延长两组鱼糜中羰基含量均呈上升趋势, 臭氧漂洗组羰基含量增加了 4 倍。这主要是鱼糜中蛋白质侧链或主链被自由基攻击氧化, 如侧链蛋氨酸与精氨酸的 -NH 或 -NH<sub>2</sub> 等氨基很容易通过氧化脱氨反应转化为羰基<sup>[14,15]</sup>。对照组羰基含量在贮藏前 4 周始终显著低于臭氧漂洗组 ( $P < 0.05$ ), 说明前 4 周臭氧漂洗组在贮藏中蛋白质的氧化损伤更大。其他研究也发现鱼糜贮藏过程中羰基含量逐渐升高的趋势<sup>[16,17]</sup>, 但前 4 周增加速率比本研究中的增加速率慢, 可能是因为大部分研究漂洗次数是 3 次, 且用水量为 1:4, 可以除去更多脂肪和自由基。但在贮藏 4 周后两组的羰基含量差异不明显。另外, 两组羰基含量均表现出在前 4 周有较快的上升速率, 贮藏 12 周后趋于平缓。所以臭氧漂洗组虽在前 4 周氧化程度较大, 但在 4 周后与对照组氧化程度差异不大。

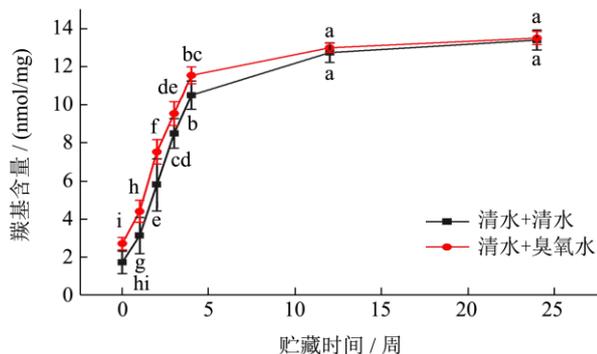


图 1 贮藏时间对鱼糜羰基含量的影响

Fig.1 Effect of storage time on the content of carbonyl in surimi

注: 不同小写字母表示具有显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 下同。

### 2.2 贮藏时间对鱼糜蛋白巯基含量的影响

巯基是半胱氨酸的特征基团, 而半胱氨酸对氧化环境较灵敏, 因此巯基含量变化常用作蛋白质氧化的

标志<sup>[18]</sup>, 总巯基包括游离巯基和蛋白质分子未暴露出来的内部巯基。如图 2 所示, 贮藏期间, 两组鱼糜中蛋白总巯基和游离巯基含量均显著性降低 ( $P < 0.05$ )。这是因为随着贮藏时间的延长, 原本处于蛋白质分子内部的活性巯基由于空间构象的缓慢变化暴露出来, 被氧化形成二硫键, 造成总巯基含量的下降。

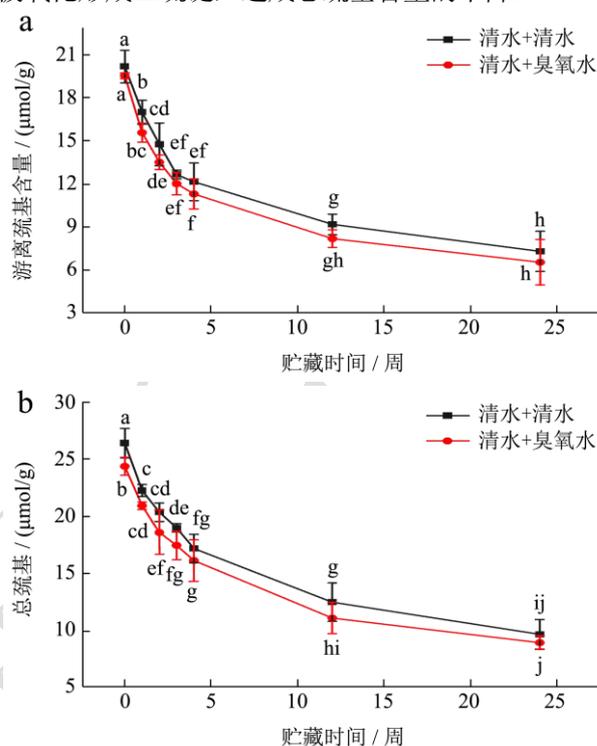


图 2 贮藏时间对鱼糜游离巯基 (a)、总巯基 (b) 含量的影响  
Fig.2 Effects of storage time on the content of free sulfhydryl (a) and total sulfhydryl (b) in surimi

另外, 鱼糜蛋白的总巯基和游离巯基均在前 4 周有较快的下降速率, 在 4 周以后下降趋势逐渐平缓, 这与任丽娜等<sup>[19]</sup>的研究相似。其中臭氧漂洗组总巯基含量第 4 周降至原含量的 66.41%, 对照组下降至原含量的 64.70%; 第 24 周降至原含量的 36.12%, 对照组下降至原含量的 37.22%。而 Lian 等<sup>[20]</sup>发现鳕鱼在 -20 °C 下冻藏总巯基含量第 4 周降至原含量的 82.00%, Benjakul 等<sup>[19]</sup>发现石首鱼在 -18 °C 下冻藏 2 周后总巯基含量下降了 22.20%, 24 周后总巯基含量下降了 29.60%, 而狗母鱼 -18 °C 下冻藏 2 周后总巯基含量下降了 17.40%, 24 周后总巯基含量下降了 67.30%, 这种总巯基含量降低幅度的差异, 可能是不同鱼种活性巯基的稳定性差别导致在冻藏中被氧化的难度不一样。在同一贮藏时间, 臭氧处理组的游离巯基和总巯基含量略低于对照组, 但无显著性差异 ( $P > 0.05$ ), 说明此浓度下的臭氧水对肌原纤维蛋白的氧化属于轻度氧化, 与 Jiang 等<sup>[21]</sup>的结论类似。而张红杰等<sup>[22]</sup>的研究发现臭氧处理的鱼糜在贮藏中硫

基的下降与清水处理组有显著差异,这是由于他们采用的是臭氧水持续流动处理 30 min,其氧化程度较高。

### 2.3 贮藏时间对鱼糜水溶性蛋白、盐溶性蛋白含量的影响

根据表 1 所示,臭氧处理组鱼糜最初的水溶性蛋白含量为 15.32 mg/g,略高于对照组 13.98 mg/g。水溶性蛋白含量在贮藏中呈上升趋势,与盐溶性蛋白含量下降是对应的<sup>[23]</sup>。整个贮藏过程中两组的盐溶性蛋白均呈下降趋势,且在贮藏 4 周后下降更明显。鲟鱼、鳙鱼的盐溶性蛋白含量随贮藏时间的变化也呈类似情况<sup>[24,25]</sup>。引起贮藏中盐溶性蛋白含量下降的原因主要有两点:一是鱼肉的內源性酶及微生物产生的外源酶在贮藏低温下仍有导致盐溶性蛋白降解的能力<sup>[26]</sup>;二是由于蛋白质间相互作用的增强影响盐溶性蛋白的溶解度<sup>[27]</sup>。

表 1 冻藏时间对鱼糜水溶性蛋白、盐溶性蛋白含量的影响

Table 1 Effects of storage time on the content of water-soluble protein and salt-soluble protein in surimi

漂洗方式	冻藏时间/周	水溶性蛋白/(mg/g)	盐溶性蛋白/(mg/g)
清水+清水	0	13.98±0.05 <sup>e</sup>	73.67±1.58 <sup>b</sup>
	1	15.64±0.12 <sup>f</sup>	70.31±2.32 <sup>bc</sup>
	2	16.03±0.53 <sup>f</sup>	69.07±1.49 <sup>bc</sup>
	3	16.78±0.18 <sup>de</sup>	70.87±1.53 <sup>bc</sup>
	4	16.07±0.41 <sup>ef</sup>	71.93±1.32 <sup>b</sup>
	12	18.73±0.12 <sup>c</sup>	59.53±3.74 <sup>d</sup>
	24	19.59±0.35 <sup>bc</sup>	48.77±4.70 <sup>e</sup>
清水+臭氧水	0	15.32±0.36 <sup>f</sup>	81.51±3.03 <sup>a</sup>
	1	17.49±0.28 <sup>d</sup>	74.59±2.12 <sup>ab</sup>
	2	19.75±0.74 <sup>b</sup>	72.81±2.01 <sup>b</sup>
	3	17.40±0.03 <sup>d</sup>	70.96±1.02 <sup>bc</sup>
	4	16.75±0.18 <sup>de</sup>	72.77±1.33 <sup>b</sup>
	12	21.02±0.10 <sup>a</sup>	63.88±2.74 <sup>cd</sup>
	24	20.78±0.21 <sup>a</sup>	51.39±1.45 <sup>e</sup>

注:同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ( $P<0.05$ );下表同。

### 2.4 贮藏时间对 TBA 含量的影响

图 3 显示了两组鱼糜贮藏 0~24 周期间脂质的氧化情况,两组 TBA 含量都随贮藏时间延长而增加,臭氧漂洗组 TBA 含量增加了 2.11 倍。鱼糜中脂质氧化是常见现象,这主要是多不饱和脂肪酸的双键易被

氧化断裂生成醛、酮、酸等物质,使 TBA 值升高<sup>[28]</sup>。实验中两组鱼糜 TBA 值均上升,但始终低于 2.20 mg/kg,在正常阈值范围内<sup>[29]</sup>。对照组初始 TBA 值比清水+臭氧处理鱼糜要低很多,仅为 0.51 mg/kg,且在贮藏前期,臭氧处理组 TBA 含量较对照组高 ( $P<0.05$ )。这表明臭氧处理后鱼糜在贮藏过程中脂质氧化程度较对照组高,可能是由于臭氧处理产生的自由基的强氧化性加速了鱼糜中脂质氧化,但贮藏后期两组 TBA 含量无显著性差异。谢三都等<sup>[30]</sup>的研究也表明,在贮藏前期,臭氧漂洗鱼糜 TBA 含量高于对照组。

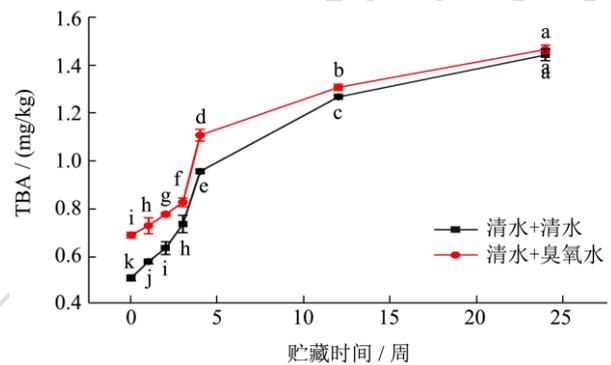
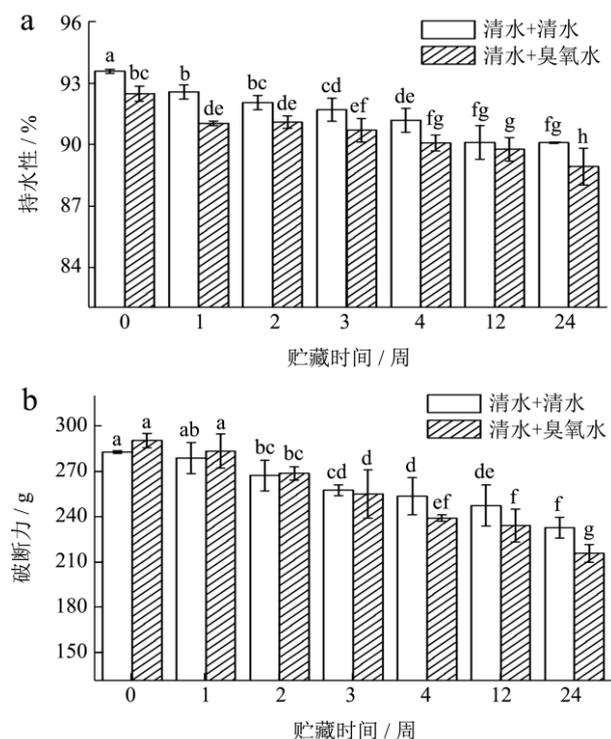


图 3 贮藏时间对鱼糜 TBA 含量的影响

Fig.3 Effect of storage time on the content of TBA in surimi

### 2.5 贮藏时间对鱼糜凝胶持水性和凝胶性能的影响

的影响



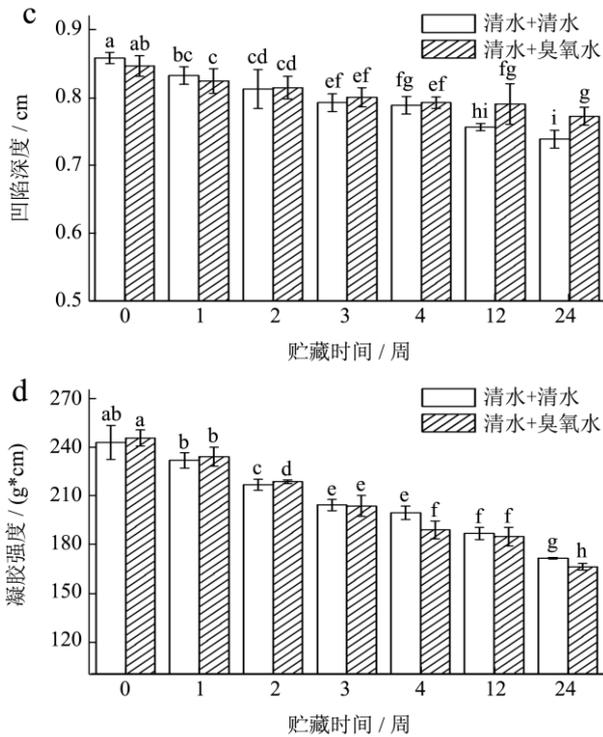


图4 贮藏时间对鱼糜凝胶持水性(a)、破断力(b)、凹陷深度(c)、凝胶强度(d)的影响

Fig.4 Effects of storage time on water holding capacity (a), breaking force (b), dent depth (c) and gel strength (d) of surimi gel

持水性是指鱼肌肉在不同条件下保持原有水分的能力。持水性的高低直接关系到鱼糜制品的质地,可以反映凝胶结构的致密程度<sup>[31]</sup>。贮藏时间对鱼糜凝胶持水性的影响如图4所示,两组新鲜鱼糜凝胶的持水

性存在显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 随贮藏时间的增加, 两组持水性均呈下降趋势, 许多关于蛋白质氧化与鱼糜凝胶持水性的研究结果均表明, 氧化剂可能会破坏凝胶网络结构的形成, 进而导致凝胶失水<sup>[15,32]</sup>, 所以臭氧处理组较对照组低。

凝胶强度能够反应鱼糜凝胶内部结构的牢固性。随贮藏时间的延长, 鱼糜凝胶破断力总体呈下降趋势, 贮藏4周内对照组和臭氧处理组的鱼糜凝胶破断力没有显著性差异 ( $P > 0.05$ ), 4周之后存在显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 可能是因为鱼肉蛋白轻度氧化, 臭氧产生的自由基在后期积累过多而致。尽管在贮藏前后对照组和臭氧漂洗组在凹陷深度水平上分别存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 但是在数值上差异不大。因此, 可以推断破断力的变化对于臭氧处理有效地提高鱼糜的凝胶形成能力起到了重要作用。臭氧处理组新鲜鱼糜凝胶的破断力相对较大, 表明臭氧的轻度氧化增加了鱼糜凝胶的硬度。这与 Zhang 等<sup>[10]</sup>用臭氧处理鳙鱼鱼糜凝胶的研究结果类似。由凝胶强度结果显示新鲜鱼糜凝胶清水+臭氧水组的凝胶强度高于对照组, 与李学鹏等<sup>[33]</sup>臭氧漂洗鱼糜的凝胶强度变化趋势一致, 可能是由于臭氧诱导的轻度氧化并没有强烈改变肌球蛋白结构, 而是促进了肌球蛋白部分伸展, 以促进鱼糜的胶凝<sup>[34]</sup>。在整个贮藏过程中, 前3周臭氧处理组的鱼糜凝胶强度略高于对照组, 而后低于对照组。

## 2.6 贮藏时间对鱼糜及鱼糜凝胶色度的影响

表2 贮藏时间对鱼糜及鱼糜凝胶色度的影响

Table 2 Effects of storage time on surimi and surimi gel color

漂洗方式	贮藏时间/周	鱼糜				鱼糜凝胶			
		$L^*$	$a^*$	$b^*$	W	$L^*$	$a^*$	$b^*$	W
清水+清水	0	64.66±1.06 <sup>g</sup>	-1.16±0.07 <sup>a</sup>	3.09±0.31 <sup>cd</sup>	64.51±1.07 <sup>f</sup>	74.29±0.47 <sup>h</sup>	-1.96±0.16 <sup>d</sup>	4.68±0.53 <sup>a</sup>	73.79±0.52 <sup>h</sup>
	1	65.08±0.65 <sup>g</sup>	-1.11±0.04 <sup>c</sup>	2.91±0.27 <sup>d</sup>	64.94±0.64 <sup>f</sup>	76.06±0.65 <sup>h</sup>	-2.34±0.07 <sup>fg</sup>	3.93±0.83 <sup>bc</sup>	75.62±0.76 <sup>h</sup>
	2	65.65±0.88 <sup>fg</sup>	-1.55±0.05 <sup>bc</sup>	5.38±0.30 <sup>c</sup>	65.20±0.87 <sup>ef</sup>	78.84±0.43 <sup>fg</sup>	-1.54±0.05 <sup>b</sup>	4.16±0.22 <sup>b</sup>	78.38±0.45 <sup>fg</sup>
	3	66.37±0.38 <sup>ef</sup>	-1.06±0.12 <sup>d</sup>	3.26±0.21 <sup>ef</sup>	66.19±0.38 <sup>de</sup>	79.42±0.36 <sup>de</sup>	-2.28±0.13 <sup>ef</sup>	4.12±0.26 <sup>b</sup>	78.89±0.36 <sup>f</sup>
	4	66.80±0.91 <sup>e</sup>	-1.41±0.08 <sup>d</sup>	1.87±0.16 <sup>ef</sup>	66.72±0.90 <sup>d</sup>	79.86±0.46 <sup>d</sup>	-1.69±0.08 <sup>c</sup>	4.00±0.20 <sup>b</sup>	79.40±0.44 <sup>d</sup>
	12	68.64±0.51 <sup>d</sup>	-1.60±0.08 <sup>de</sup>	2.35±0.30 <sup>d</sup>	68.51±0.49 <sup>c</sup>	80.92±0.50 <sup>c</sup>	-1.65±0.09 <sup>bc</sup>	3.52±0.19 <sup>cd</sup>	80.53±0.53 <sup>c</sup>
	24	72.93±0.74 <sup>b</sup>	-1.53±0.10 <sup>de</sup>	6.70±0.20 <sup>b</sup>	72.07±0.23 <sup>b</sup>	82.21±0.30 <sup>ab</sup>	-1.55±0.07 <sup>b</sup>	3.77±0.19 <sup>bcd</sup>	81.75±0.29 <sup>ab</sup>
清水+臭氧水	0	66.25±1.04 <sup>ef</sup>	-1.01±0.06 <sup>bc</sup>	3.31±0.33 <sup>d</sup>	66.07±1.03 <sup>de</sup>	76.36±0.34 <sup>h</sup>	-1.93±0.11 <sup>d</sup>	4.91±0.42 <sup>a</sup>	74.60±0.69 <sup>h</sup>
	1	66.79±0.31 <sup>e</sup>	-1.24±0.14 <sup>ab</sup>	5.50±0.37 <sup>d</sup>	66.31±0.31 <sup>d</sup>	78.44±0.41 <sup>g</sup>	-2.38±0.11 <sup>fg</sup>	1.83±0.39 <sup>f</sup>	78.03±0.47 <sup>g</sup>
	2	68.29±0.64 <sup>d</sup>	-1.16±0.13 <sup>e</sup>	3.70±0.41 <sup>b</sup>	68.05±0.62 <sup>c</sup>	79.05±0.63 <sup>ef</sup>	-2.20±0.10 <sup>e</sup>	1.98±0.34 <sup>f</sup>	78.84±0.61 <sup>ef</sup>
	3	68.54±0.65 <sup>d</sup>	-1.42±0.05 <sup>ab</sup>	2.08±0.18 <sup>d</sup>	68.43±0.65 <sup>c</sup>	79.58±0.28 <sup>d</sup>	-1.86±0.09 <sup>d</sup>	3.43±0.26 <sup>d</sup>	79.21±0.27 <sup>de</sup>
	4	68.91±0.44 <sup>d</sup>	-1.41±0.02 <sup>d</sup>	2.09±0.16 <sup>f</sup>	68.80±0.45 <sup>c</sup>	80.61±0.17 <sup>c</sup>	-2.46±0.06 <sup>g</sup>	2.59±0.11 <sup>e</sup>	80.28±0.17 <sup>c</sup>
	12	71.62±0.49 <sup>c</sup>	-1.50±0.02 <sup>e</sup>	3.09±0.53 <sup>e</sup>	71.41±0.48 <sup>b</sup>	82.06±0.15 <sup>b</sup>	-1.64±0.11 <sup>bc</sup>	4.04±0.30 <sup>b</sup>	81.54±0.17 <sup>b</sup>
	24	74.07±0.80 <sup>a</sup>	-1.50±0.10 <sup>e</sup>	5.53±0.41 <sup>a</sup>	73.44±0.76 <sup>a</sup>	82.70±0.41 <sup>a</sup>	-1.37±0.05 <sup>a</sup>	3.77±0.37 <sup>bcd</sup>	82.24±0.41 <sup>a</sup>

色泽是衡量鱼糜品质的重要参数,影响消费者的购买欲望。白度值是亮度 ( $L^*$ )、红绿度 ( $a^*$ ) 和黄蓝度 ( $b^*$ ) 的综合评价指标。由表 2 知,随贮藏时间延长,两组鱼糜及鱼糜凝胶亮度和白度呈上升趋势。这可能是由于凝胶持水力不断下降导致汁液渗出,提高了反射光的强度,使凝胶表面折射率增加,从而导致更高的亮度<sup>[35]</sup>。与对照组相比,臭氧处理后鱼糜白度显著增加 ( $P<0.05$ ),说明臭氧漂洗有助于鱼糜色泽的改善。这是由于第一次清水漂洗时将部分脂肪洗去,使鱼糜蛋白可以更大程度的接触臭氧,臭氧具有强氧化作用,不仅能够除去鱼糜中的大部分水溶性色素,而且也能够使鱼糜中肌红蛋白和血红蛋白的卟啉结构被破坏<sup>[36]</sup>,从而漂洗后色泽较对照组好。Zhang 等<sup>[7]</sup>在用臭氧处理的鲑鱼鱼糜时也得到了类似的结果。而对于鱼糜凝胶,其白度值显著高于鱼糜的白度 ( $P<0.05$ ),说明鱼糜加工过程中加热使蛋白质变性或聚集,形成了具有一定强度且致密性较好的凝胶,增加了光的色散从而赋予凝胶良好的白度<sup>[2]</sup>。

## 2.7 贮藏时间对鱼糜凝胶风味的影响

### 2.7.1 电子鼻分析

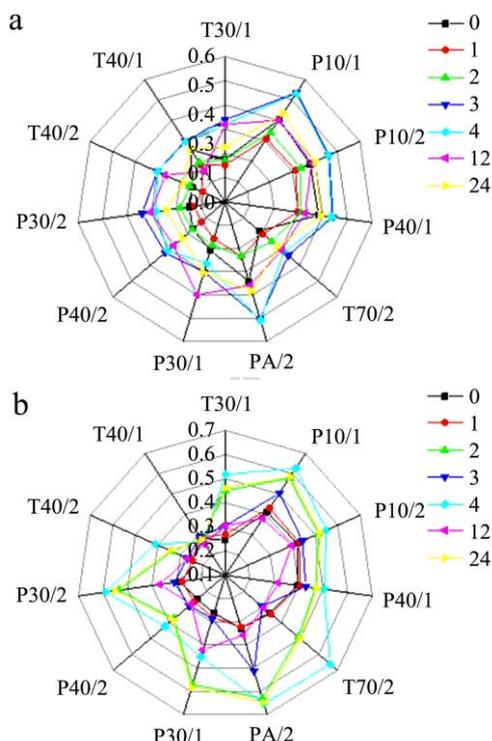


图 5 贮藏时间对对照组 (a)、臭氧漂洗组 (b) 鱼糜凝胶电子鼻响应值的影响

Fig.5 Effect of storage time on the response value of surimi gel electronic nose in control group (a) and ozone rinse group (b)

贮藏时间对鱼糜凝胶电子鼻响应值的影响如图 5 所示, P、T 两种类型的传感器对鱼糜凝胶总挥发性成

分具有较高的响应值。与新鲜鱼糜凝胶对比,两组贮藏过一段时间的鱼糜所制得的鱼糜凝胶中 T70/2、P30/1、P30/2、P40/2 响应值变大,说明在贮藏中芳香族化合物如甲苯和二甲苯、有机化合物如乙醇和酮、氧化气体如硫化氢含量明显升高。与清水漂洗组相比,臭氧漂洗组的新鲜鱼糜凝胶中 PA/2、P10/2、P10/1 响应值较低,表明胺化合物、甲烷等烷烃气体较少,因此臭氧水漂洗对去除鱼糜凝胶中的腥味物质有一定的积极作用<sup>[37]</sup>。随贮藏时间的延长,臭氧漂洗组各挥发性物质的响应值较初始值出现较大差异,这可能是鱼糜中的多种有机物在自由基的作用下氧化分解导致的<sup>[36]</sup>。

PCA 将原来信息中重叠部分进行线性组合,使这些综合指标间互不相关,不过又能反映原来多指标的信息。臭氧漂洗组第一主成分区和第二主成分区贡献率之和为 97.24%,对照组为 95.29%,两组均大于 90.00%,说明两主成分可以较好地反应多种指标信息。由 PCA 分析图 6 可以看出鱼糜凝胶第 1、2 周与第 0 周的气味差异较小,随贮藏时间的延长,气味差异明显,与王立娜等<sup>[38]</sup>的研究结果相似。0 周、4 周、12 周、24 周贮藏的鱼糜凝胶能被电子鼻的 PCA 区分,这意味着随着鱼糜贮藏时间的延长,样品的气味也在发生变化。

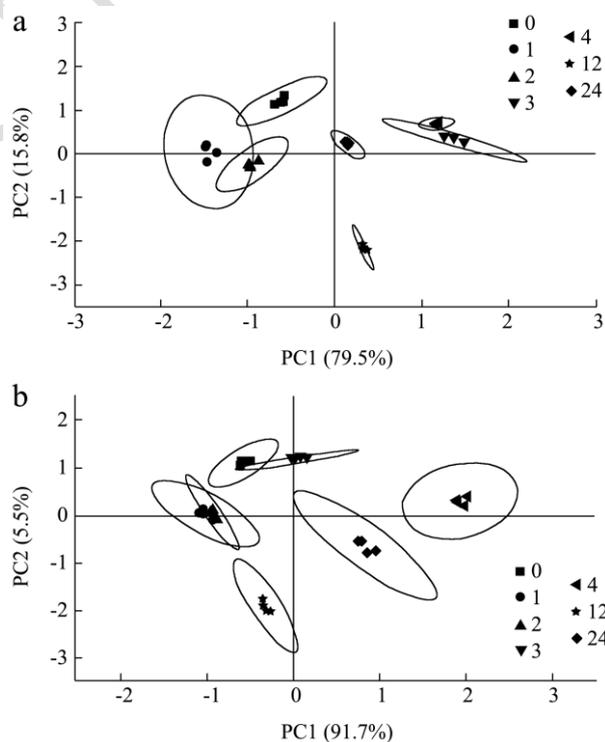


图 6 基于电子鼻响应值不同贮藏时间对照组 (a)、臭氧漂洗组 (b) 鱼糜凝胶 PCA 分析

Fig.6 PCA analysis of surimi gel in control group (a) and ozone rinse group (b) based on electronic nose response values for different storage times

2.7.2 电子舌分析

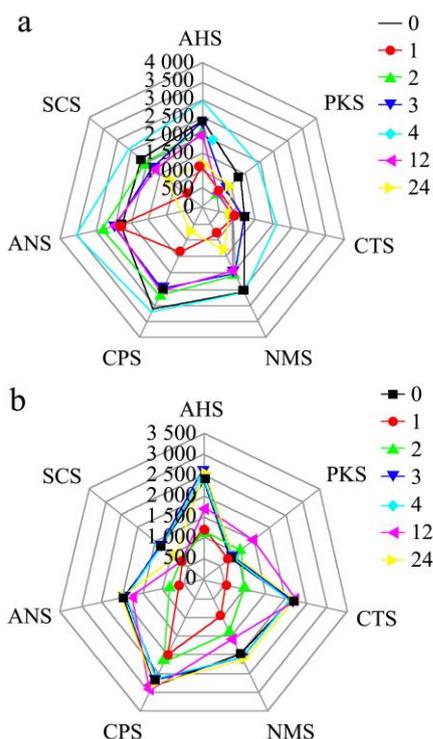


图7 贮藏时间对对照组 (a)、臭氧漂洗组 (b) 鱼糜凝胶电子舌响应值的影响

Fig.7 Effect of storage time on the response value of the surimi gel electronic tongue in the control group (a) and ozone rinse group (b)

电子舌主要用于鲜度评价及味觉测定等。图7是利用电子舌对两组不同贮藏时间的鱼糜所制得的鱼糜凝胶样品进行检测得到的7根传感器的响应值(AHS酸味传感器、CTS咸味传感器、NMS鲜味传感器、ANS甜味传感器、SCS苦味传感器、PKS与CPS通用传感器)。由图7知,臭氧漂洗组的鱼糜凝胶电子舌雷达图与对照组的轮廓并不相似,说明臭氧的轻度氧化作用对鱼糜的滋味影响较大。对照组的各传感器响应值在第四周达到最大,在第12周、第24周下降明显,这可能是在贮藏4周后,鱼糜中发生了复杂的反应使得鱼糜凝胶的滋味发生较大变化。而臭氧漂洗组贮藏第1、2周各滋味传感器的响应值与贮藏第0周的差异明显,可能是残留的臭氧造成的,但在贮藏第12、24周,除苦味传感器的响应值下降外,各滋味传感器的响应值与贮藏第0周差异不大,且咸味、甜味传感器的响应值均比对照组的要大。说明经过臭氧漂洗处理能够较好的保持鱼糜凝胶中滋味物质的稳定性。

在电子舌PCA中,样品间相对距离越大,表明滋味差异越大<sup>[39]</sup>。臭氧漂洗组第一主成分区与第二主成分的贡献率分别为71.15%与23.32%,二者之和为94.47%,对照组达到95.40%,两组均大于90.00%,

该结果涵盖了贮藏时间对鱼糜凝胶滋味成分影响的绝大部分信息,可以全面地说明鱼糜凝胶滋味随贮藏时间变化的信息。两组中第1、2周与第0周间隔较远,说明随着贮藏时间的延长对鱼糜凝胶整体滋味轮廓有影响。

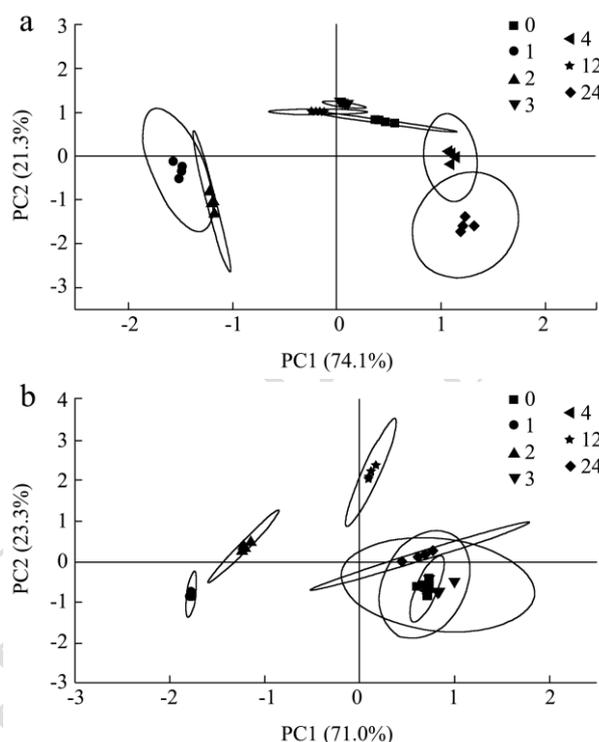


图8 基于电子舌响应值的贮藏时间对对照组(a)、臭氧漂洗组(b)鱼糜凝胶PCA分析

Fig.8 PCA analysis of surimi gel in the control group (a) and ozone rinse group (b) based on the response value of the electronic tongue at different storage times

2.8 贮藏中鱼糜品质变化动力学分析及相关性分析

根据鱼糜品质参数在贮藏期间的变化,对经臭氧处理的鱼糜在贮藏过程中的主要品质参数与贮藏时间的关系进行一级动力学分析,得出在0~4周贮藏过程中,各项参数变化与一级动力学方程具有较好的拟合度(总巯基含量、持水性、凝胶强度、羧基含量、鱼糜白度:  $R^2=0.909\sim0.995$ )。但0~24周贮藏过程中鱼糜品质的各项参数与一级动力学方程的拟合度较差。0~4周贮藏过程中的一级动力学方程,降解速率常数k和回归系数 $R^2$ 结果如表3所示。说明清水+臭氧处理后的鱼糜在前一个月贮藏过程中各项品质参数变化较好地符合一级动力学模型,但在贮藏后期不再符合一级动力学模型。

表3 臭氧处理鱼糜 0~4 周贮藏期间品质变化动力学分析

Table 3 Dynamic analysis of texture changes of surimi during 0~4 week storage

指标	回归方程	初始值 ( $A_0$ )	速率常数 ( $k$ )	回归系数 $R^2$
TBA 含量	$y=0.69e^{0.0909x}$	0.69	0.090 9	0.832
总巯基含量	$y=24.36e^{-0.1120x}$	24.36	-0.112 0	0.970
持水性	$y=92.47e^{-0.0070x}$	92.47	-0.007 0	0.970
凝胶强度	$y=245.51e^{-0.0630x}$	245.51	-0.063 0	0.995
羰基含量	$y=2.67e^{0.4062x}$	2.67	0.406 2	0.929
鱼糜凝胶白度	$y=74.60e^{0.0210x}$	74.60	0.021 0	0.832
鱼糜白度	$y=66.07e^{0.0110x}$	66.07	0.011 0	0.909
盐溶性蛋白含量	$y=81.51e^{-0.0390x}$	81.51	-0.039 0	0.681

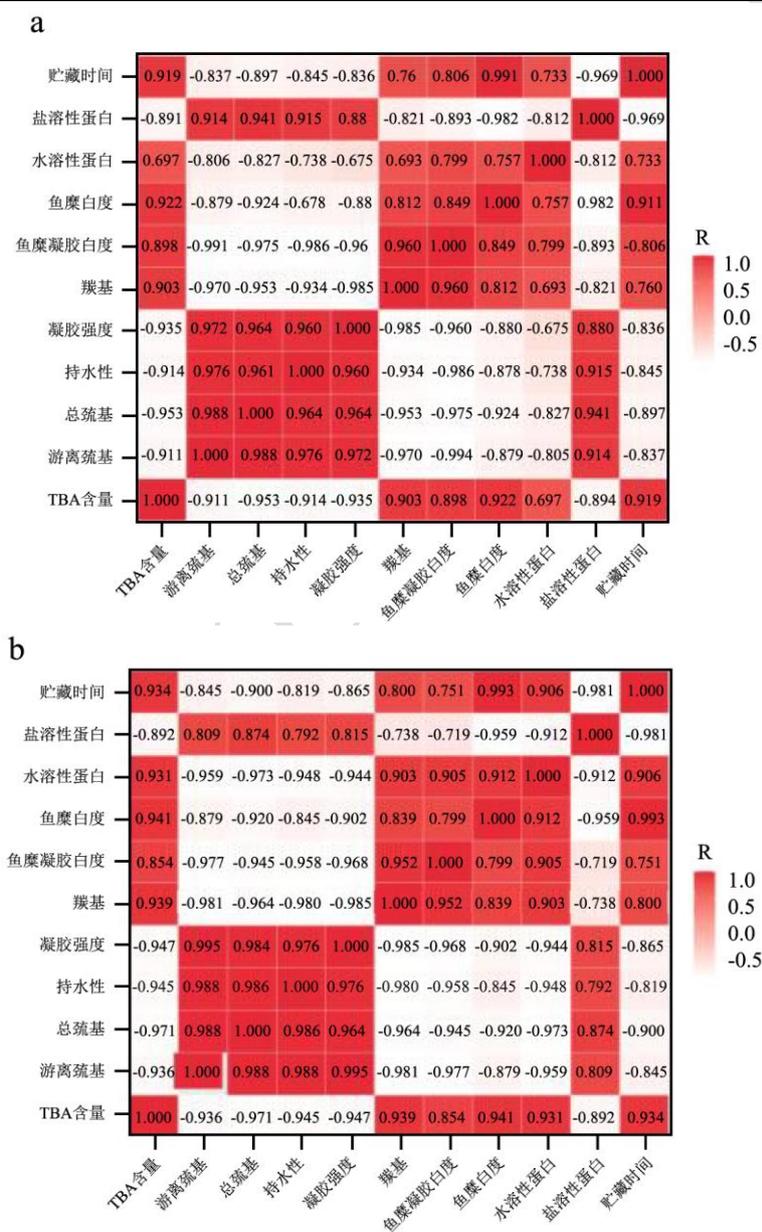


图9 鱼糜贮藏期间对照组 (a)、臭氧漂洗组 (b) 贮藏指标间的相关性分析

Fig.9 Correlation analysis between the storage indicators of the control group (a) and the ozone rinsing group (b) during storage of surimi

为进一步探讨在-18℃贮藏条件下,臭氧漂洗组与对照组的贮藏时间与各品质指标之间的关系,绘制了贮藏过程中各指标间的相关性分析热图,图9中数字为 Pearson 相关系数,颜色的深浅来表征其相关性程度。由图9可知,臭氧漂洗组与对照组各贮藏指标之间均存在显著的相关性( $|r|>0.751$ ,  $P<0.05$ ),其中两组中盐溶性蛋白与贮藏时间存在极显著的负相关性,鱼糜白度与贮藏时间存在极显著的正相关性。这可能是由于贮藏时间的延长,样品中的蛋白质间相互作用形成不溶性蛋白,或蛋白质发生降解,这种变化导致鱼糜的凝胶结构发生改变进而影响鱼糜白度<sup>[40]</sup>。

### 3 结论

在0~24周贮藏期间,臭氧漂洗组与对照组的蛋白质和脂质均有一定程度上的氧化,但在4周后两组的氧化程度无显著性差异;另外,随贮藏时间的延长,鱼糜及鱼糜凝胶的亮度和白度增大,鱼糜凝胶持水性和凝胶强度缓慢下降,气味和滋味也发生变化,其鲜味和咸味降低。与对照组相比,臭氧漂洗在一定程度上可以增强鱼糜凝胶强度和亮度,但在第3周后与对照组的差异不明显。通过一级动力学分析发现贮藏前1个月品质下降较快且鱼糜品质变化符合一级动力学模型。本研究通过对清水+臭氧鱼糜贮藏中品质变化规律的探讨为臭氧在鱼糜贮藏稳定性上的应用提供了参考。

### 参考文献

- [1] 郭梦,武瑞赞,马丽珍,等.鱼糜制品及其凝胶特性研究进展[J].中国水产,2020,2:83-85.
- [2] 姜鹏飞,于文静,朱凯悦,等.漂洗对罗非鱼鱼糜凝胶特性的影响[J].食品研究与开发,2022,43(2):10-18.
- [3] 方兵,汪之和,施文正.漂洗次数对鳊鱼鱼糜风味物质的影响[J].食品工业科技,2018,39(1):11-16.
- [4] 阮秋凤,蒋文馨,熊善柏,等.臭氧漂洗工艺对鲢鱼糜品质的影响[J].华中农业大学学报,2020,39(6):67-73.
- [5] 李文协,李学鹏,刘慈坤,等.臭氧水漂洗对鲢鱼鱼糜品质及肌原纤维蛋白氧化的影响[J].食品工业科技,2020,41(16):7-15.
- [6] 张顺治,郑文栋,尤娟,等.不同漂洗方式的白鲢鱼糜品质比较[J].现代食品科技,2022,38(6):160-168.
- [7] Zhang R, Xiong S, You J, et al. Effects of ozone treatments on the physicochemical changes of myofibrillar proteins from silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) during frozen storage [J]. Journal of Food Quality, 2017, 1: 1-9.
- [8] 方海砚,刘友明,熊善柏,等.羟自由基氧化对鲢鱼糜凝胶品质影响[J].华中农业大学学报,2019,38(6):9-17.
- [9] Mesquita C S, Oliveira R, Bento F, et al. Simplified 2,4-dinitrophenylhydrazine spectrophotometric assay for quantification of carbonyls in oxidized proteins [J]. Anal Biochem, 2014, 458(5): 69-71.
- [10] Zhang T, Xue Y, Li Z, et al. Effects of ozone induced oxidation on the physicochemical properties of myofibrillar proteins recovered from bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*) [J]. Food Bioprocess Tech, 2015, 8(1): 181-190.
- [11] 蒋文馨.臭氧氧化对白连肌球蛋白结构的影响及氧化位点的鉴定[D].武汉:华中农业大学,2017.
- [12] 陈东清.草鱼片调理处理及其贮藏过程中的品质变化研究[D].武汉:华中农业大学,2015.
- [13] Qiu S S, Wang J, Gao L P. Qualification and quantisation of processed strawberry juice based on electronic nose and tongue [J]. LWT - Food Sci Technol, 2015, 60(1): 115-123.
- [14] Stadtman E R, Levine R L. Free radical-mediated oxidation of free amino acids and amino acid residues in proteins [J]. Amino Acids, 2003, 25(3): 207-218.
- [15] 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.
- [16] Li Y, Kong B, Xia X. Structural changes of the myofibrillar proteins in common carp (*Cyprinus carpio*) muscle exposed to a hydroxyl radical-generating system [J]. Process Biochem, 2013, 48(5): 863-870.
- [17] 宁云霞.革胡子鲶鱼鱼糜及其鱼糜制品在冻藏过程中的品质变化.[D].天津:天津农学院,2020.
- [18] Liu C, Li W, Zhou M, et al. Effect of oxidation modification induced by peroxy radicals on the physicochemical and gel characteristics of grass carp myofibrillar protein [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2021, 15(6): 5572-5583.
- [19] 任丽娜.白鲢鱼肉肌原纤维蛋白冷冻变性的研究.[D].无锡:江南大学,2014.
- [20] Lian P, Lee C M, Hufnagel L. Physicochemical properties of frozen red hake mince as affected by cryoprotective ingredients [J]. J Food Sci, 2000, 65(7): 1117-1123.
- [21] Jiang W X, He Y F, Xiong S B, et al. Effect of mild ozone oxidation on structural changes of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) myosin [J]. Food Bioprocess Tech, 2017, 10(2): 370-378.
- [22] 张红杰.臭氧减菌化处理罗非鱼片冰温贮藏过程中品质变化及蛋白质降解抑制研究.[D].上海:上海海洋大学,2016.
- [23] 卢涵.鲮鱼肉低温贮藏过程中蛋白氧化、组织蛋白酶活性与品质变化规律的研究.[D].北京:中国农业大学,2017.

- [24] 唐淑玮,冯秋凤,陈依萍,等. 鲟鱼鱼糜在冻藏过程中的品质变化[C]//中国食品科学技术学会第十五届年会论文摘要集,2018:779-780.
- [25] Wu H, Wang Z, Luo Y. Quality changes and establishment of predictive models for bighead carp (*Aristichthys nobilis*) fillets during frozen storage [J]. Food Bioprocess Tech, 2014, 7(12): 3381-3389.
- [26] Masniyom P, Benjakul S, Vlsessanguan W. Collagen changes in refrigerated sea bass muscle treated with pyrophosphate and stored in modified atmosphere packaging [J]. Eur Food Res Technol, 2005, 220(34): 322-325.
- [27] Jiang W, He Y, Xiong S, et al. Effect of mild ozone oxidation on structural changes of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) myosin [J]. Food and Bioprocess Technology, 2017, 10(2): 370-378.
- [28] 郭全友,李松,李保国,等.冻藏时间对养殖大黄鱼体色和肌肉品质的影响[J].食品与发酵工业,2020,46(23):99-107.
- [29] 刘奇. 鲟鱼腥味物质特征及其与脂肪酸氧化的关系研究.[D].山东:中国海洋大学,2013.
- [30] 谢三都,陈荔红,郑宝东.臭氧对鲢鱼鱼丸贮藏过程品质影响的研究[J].中国农学通报,2009,25(17):31-35.
- [31] Yi S M, Li Q, Qiao C P. Myofibrillar protein conformation enhance gel properties of mixed surimi gels with *Nemipterus virgatus* and *Hypophthalmichthys molitrix* [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 106: 1-11.
- [32] Zhou F, Zhao M, Su G. Gelation of salted myofibrillar protein under malondialdehyde-induced oxidative stress [J]. Food Hydrocolloid, 2014, 40: 153-162.
- [33] 李学鹏,刘慈坤,励建荣,等.羟自由基氧化对草鱼肌原纤维蛋白结构和凝胶性质的影响[J].食品科学,2017,38(21):30-37.
- [34] Jiang W X, He Y F, Xiong S B, et al. Effect of mild ozone oxidation on structural changes of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) myosin [J]. Food Bioprocess Tech, 2017, 10(2): 370-378.
- [35] Tironi V, De L M, Le Bail A. Quality changes during the frozen storage of sea bass (*Dicentrarchus labrax*) muscle after pressure shift freezing and pressure assisted thawing [J]. Innov Food Sci Emerg, 2010, 11(4): 565-573.
- [36] 吕飞,张静,陈鑫璐,等.光谱法结合分子动力学模拟研究臭氧对肌红蛋白结构的作用机制[J].光谱学与光谱分析,2019,39(10):3115-3121.
- [37] 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.
- [38] 王立娜.淡水鱼贮藏品质分析及脉冲强光技术延长鲤鱼货架期的研究.[D].锦州:渤海大学,2016.
- [39] 周伟,王洋,孙学亮,等.养殖盐度对斑节对虾肌肉品质的影响[J].食品研究与开发,2018,39(22):7-14.
- [40] 韦依依,张涛,李苗苗,等.即食鱼糜制品贮藏过程中的品质稳定性研究[J].食品工业科技,2017,38(16):285-290.