

低温等离子体对蓝圆鲹在冷藏过程中的品质影响

徐迪莎¹, 丁怡萱¹, 廖月琴¹, 贾俊琦¹, 董儒仪¹, 苏浩恩¹, 张 宾^{1,2}, 林慧敏^{1*}

(1. 浙江海洋大学食品与药学院, 舟山 316022; 2. 浙江海洋大学中意比萨海洋研究生学院, 舟山 316022)

摘要: **目的** 研究低温等离子体(atmospheric cold plasma, ACP)对蓝圆鲹在冷藏过程中品质变化的影响。**方法** 以蓝圆鲹为研究对象, 采用介质阻挡放电低温等离子体设备对其进行处理(处理组), 新鲜蓝圆鲹为对照组, 4°C±1°C的条件下分别贮藏0、2、4、6、8、10 d, 通过样品pH、持水力(water holding capacity, WHC)、菌落总数、挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)、硫代巴比妥酸反应物(thiobarbituric acid reactive substances, TBARS)、组胺含量、感官评价等指标来分析蓝圆鲹在冷藏期间的品质变化。**结果** 随着贮藏时间的延长, 两组样品pH呈先下降后上升的趋势; 菌落总数由初始值2.97 lg CFU/g和3.00 lg CFU/g分别上升到6.10 lg CFU/g和6.72 lg CFU/g, 处理组菌落总数上升速度较缓; TVB-N值和组胺含量均呈上升的趋势, 且随着贮藏时间的延长, 对照组比处理组上升速度更为明显; WHC和感官评分随着贮藏时间的延长而明显下降; TBARS值随着贮藏时间的延长而增加, 且处理组的TBARS值始终高于对照组。**结论** 低温等离子体处理能够有效地保持蓝圆鲹的鲜度, 尤其是在抑制微生物的增殖方面有较大优势, 能够延长蓝圆鲹的货架期至少2 d。本研究为延长蓝圆鲹的货架期提供了一定的理论基础。

关键词: 低温等离子体; 蓝圆鲹; 品质; 冷藏

Effects of atmospheric cold plasma on the quality of *Decapterus maruadsi* in cold storage process

XU Di-Sha¹, DING Yi-Xuan¹, LIAO Yue-Qin¹, JIA Jun-Qi¹, DONG Ru-Yi¹,
SU Hao-En¹, ZHANG Bin^{1,2}, LIN Hui-Min^{1*}

(1. College of Food Science and Pharmacy, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China;
2. Zhejiang Ocean University-University of Pisa Marine Graduate School, Zhoushan 316022, China)

ABSTRACT: Objective To analyze the effects of atmospheric cold plasma on the quality change of *Decapterus maruadsi* during cold storage. **Methods** *Decapterus maruadsi* was used as the research object and treated with a dielectric barrier discharge atmospheric cold plasma device (treatment group), fresh *Decapterus maruadsi* was used as the control group, and then stored at 4°C±1°C for 0, 2, 4, 6, 8, 10 d, respectively. The samples pH, water holding capacity (WHC), total viable count, total volatile basic nitrogen (TVB-N), thiobarbituric acid reactive substances (TBARS), histamine content, sensory evaluation and other indicators were used to analyze the quality change of *Decapterus maruadsi* during cold storage. **Results** With the increase of storage time, the pH of *Decapterus maruadsi* decreased first and then increased; the total viable count increased from the initial values of 2.97 lg CFU/g

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFD0900900)、浙江省特支计划科技创新项目(2020R52027)

Fund: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2020YFD0900900), and the Zhejiang Provincial Special Support Plan Technology Innovation Project (2020R52027)

*通信作者: 林慧敏, 教授, 主要研究方向为海洋生物资源的加工与综合利用、水产品精深加工。E-mail: lin.huimin@zjou.edu.cn

*Corresponding author: LIN Hui-Min, Professor, Zhejiang Ocean University, No.1 Haida South Road, Dinghai District, Zhoushan 316022, China. E-mail: lin.huimin@zjou.edu.cn

and 3.00 lg CFU/g to 6.10 lg CFU/g and 6.72 lg CFU/g, respectively, and the total viable count increased slowly in the treatment group; the TVB-N value and histamine content showed an increasing trend, and with the extension of storage time, the increase rate of control group was more obvious than that of treatment group; the WHC and sensory scores decreased significantly with the extension of storage time; In addition, TBARS increased with the extension of storage time, and TBARS in the treatment group were always higher than those in the control group. **Conclusion** Atmospheric cold plasma treatment can effectively maintain the freshness of *Decapterus maruads*, especially in terms of inhibiting the proliferation of microorganisms, which can extend the shelf life of *Decapterus maruads* for at least 2 d. This study provides a theoretical basis for extending the shelf life of *Decapterus maruads* trevally.

KEY WORDS: atmospheric cold plasma; *Decapterus maruads*; quality; cold storage

0 引 言

蓝圆鲈(*Decapterus maruads*)又称黄占鱼、巴浪鱼、池鱼等,按生物学分类为鲈形目、鲈科、圆鲈属的一种,属于暖水性中上层洄游鱼类。在我国主要分布在东海南部(台湾海峡、浙江近海)至南海北部(海南省)一带,是我国沿海地区主要的鱼类资源之一^[1]。据中国渔业统计年鉴显示,2021年我国蓝圆鲈捕捞量约为41.6万t,比2020年增长了1632t,捕捞量高居我国海洋捕捞主要鱼类第3位^[2]。在我国浙江南部近海,蓝圆鲈的捕捞季节主要集中在春季^[3]。蓝圆鲈含有丰富的蛋白质且脂肪含量较低,有研究将野生蓝圆鲈与带鱼、草鱼肌肉中的营养成分进行了比较,发现野生蓝圆鲈粗蛋白含量为22.25 g/100 g,高于带鱼和草鱼;其粗脂肪含量为1.33 g/100 g,低于带鱼和草鱼^[4]。蓝圆鲈肉质鲜美,价格低廉,捕捞量大且集中,但由于其捕捞高峰期集中在春夏季,肉质极易发生腐败变质,具有“离水烂”之称,故蓝圆鲈在市场上很少以鲜售的方式出现,销售方式多以加工成鱼糜、鱼露或腌干鱼制品为主。目前,在食品科学方向的研究主要集中在生物活性肽的制备^[5]、营养成分分析^[6]、鱼糜制品加工^[7]等领域。随着人们生活水平和对食品质量要求的不断提高,延长新鲜蓝圆鲈的货架期已成为当前食品方向的研究重点。目前市面上已有许多保鲜技术,常见的有低温保鲜、冷杀菌保鲜、臭氧杀菌、化学生物保鲜剂等等^[8]。

低温等离子体(atmospheric cold plasma, ACP)是一种新型非热杀菌技术,具有处理时间短、灭菌能力强、无害无残留、不会破坏食品原有品质等传统保鲜技术无法具备的优点^[9]。等离子体(plasma)又称“等离子态”,是除了固态、气态、液态以外的第4种物质状态,是由中性气体在高电压的作用下激发产生的大量带电粒子、中性粒子、电子和自由基组成的中性混合性气体^[10]。ACP利用空气作为激发气体,空气中的O₂、N₂可产生大量活性氧(reactive oxygen species, ROS)、活性氮(reactive nitrogen species, RNS)以及带电粒子、紫外光子等具有杀菌作用的物质,可以有效抑制微生物的生长,其中紫外线和ROS自由基能够直接使微生物的化学键断裂,达到安全、高效、无残留的杀菌目的^[11]。目前,ACP技术已广

泛应用于食品领域,在CHEN等^[12]的研究中,利用60 kV、60 s的ACP对鲈鱼进行处理,发现经ACP处理后能延长水产品的货架期至14 d,对保持鱼肉的品质有积极作用;MSC等^[13]将ACP作用于黑嘴鲈鱼表面,分别处理1、5、10、20、30 min,研究发现能有效减少黑嘴鲈鱼表面金黄色葡萄球菌和蜡芽孢杆菌的数量,且处理时间越长,抑制效果越明显;ZOUELM等^[14]研究发现,ACP处理能有效降低南美白对虾在冷藏过程中的多酚氧化酶活性,并且150 s的处理时间会使酶活性降低50%。

基于此,本研究将以蓝圆鲈为研究对象,通过测定pH、持水力(water holding capacity, WHC)、菌落总数、挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)、硫代巴比妥酸反应物(thiobarbituric acid reactive substances, TBARS)、组胺含量、感官评价等指标,分析ACP对蓝圆鲈在冷藏过程中的品质影响,以期延长蓝圆鲈的货架期提供理论基础。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

新鲜蓝圆鲈:购于舟山市新城老碇海鲜市场(4月),平均体长15~25 cm,将其置于泡沫箱中,30 min内运回实验室,放置在-80℃冰箱中备用。

氧化镁、硼酸、三氯乙酸、无水乙醇、甲基红-溴甲酚绿指示剂(分析纯,国药集团化学试剂有限公司);0.1 mol/L盐酸标准滴定液(广州和为医药科技有限公司);组胺试剂盒(江苏菲亚生物科技有限公司)。

1.2 仪器与设备

Phenix BK130/36 ACP处理仪、CF-16RN高速冷冻离心机(日本日立公司);751UVGD型紫外-可见光分光光度计(上海第三分析仪器厂);iMARK酶标仪(杭州宝诚生物技术有限公司);海能K9840全自动凯氏定氮仪(山东海能仪器科学仪器有限公司);FJ200-S数显高速均质机(上海力辰邦西仪器科技有限公司);MAP-H360复合气调保鲜包装机(苏州森瑞保鲜设备有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 蓝圆鲹的前处理

将新鲜的蓝圆鲹去头、去尾、去内脏,用去离子水冲洗干净血渍和残留脏物,沿脊背分为两半。随后将样品放入聚丙烯盒(135 mm×210 mm×35 mm)中,并用包装机进行空气密封包装。

1.3.2 介质阻挡放电 ACP 处理

本研究所用 ACP 设备如图 1 所示,该装置的等离子体产生器是由高压电极和接地电极两个铝电极组成,两个电极之间相隔 38 mm 左右,将放有样品的聚丙烯盒置于两个电极之间,进行 ACP 处理,而交流电控制系统用于控制处理电压。等离子体系统的输入电压 220 V、频率 50 Hz,最高可产生 130 kV 的处理电压。将样品随机分为两组,处理组样品放置在 ACP 处理装置中通过菌落总数、TVB-N、感官评定等大量预实验结果综合比较出最佳处理条件为 50 kV、5 min。对照组不做 ACP 处理作为空白对照。最后将样品放置在 4℃冰箱中保存,贮藏期为 10 d,分别于 0、2、4、6、8、10 d 取样测定各项指标,每项指标做 3 次平行。

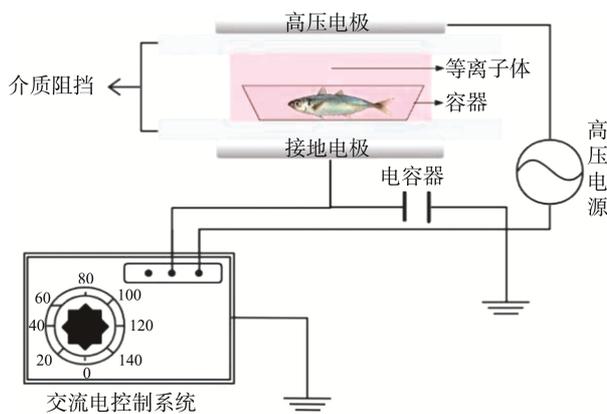


图1 介质阻挡放电低温等离子体设备图

Fig.1 Dielectric barrier discharge atmospheric cold plasma device equipment

1.3.3 pH 的测定

准确称取 2.00 g 鱼肉搅碎,随后将样品放置于 50 mL 离心管中,加入 18 mL 去离子水,用均质机均质 1 min,静置 30 min 后,用 pH 计测定均质液的 pH,平行测定 3 次。

1.3.4 WHC 的测定

称取 2.00 g 鱼肉,记为 W_1 ,在 4℃下以 1500 r/min 离心 10 min,离心后称重 W_2 ,平行测定 3 次。WHC 计算公式如式(1)。

$$\text{WHC}/\% = \frac{W_2}{W_1} \times 100\% \quad (1)$$

1.3.5 菌落总数的测定

菌落总数测定方法参考 GB 4789.2—2022《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》。

1.3.6 TVB-N 的测定

TVB-N 的测定方法参照 GB 5009.228—2016《食品安全国家标准 食品挥发性盐基氮的测定》中的第二法。

1.3.7 TBARS 值的测定

TBARS 值的测定方法参考 GB 5009.181—2016《食品安全国家标准 食品中丙二醛的测定》。

1.3.8 组胺含量的测定

采用组胺试剂盒测定蓝圆鲹的组胺含量。称取 2.00 g 鱼肉,加入 18 mL 生理盐水,用匀浆机将样本充分匀浆,在 4℃下以 5000 r/min 离心 15 min,取上清液待检测。根据说明书操作加样、温育、配液、洗涤、显色、终止等步骤后,用酶标仪以 450 nm 波长,依序测各个孔的吸光度。结果由标准曲线的直线回归方程计算出样品的组胺含量。

1.3.9 感官评定

随机邀请 10 位(3 男 7 女)经过培训的食品专业同学,依次对处理组和对照组的蓝圆鲹的气味、色泽、组织形态、肌肉弹性 4 项进行打分。每一项满分为 5 分,总分 20 分,将每一项的平均分相加获得最终感官评分。感官评分如表 1 所示。

表 1 蓝圆鲹鱼肉感官评分表
Table 1 Sensory score of *Decapterus maruadii*

指标	分值				
	4.00~5.00	3.00~3.99	2.00~2.99	1.00~1.99	0~0.99
气味	海水鱼固有气味,无明显腥臭味	固有气味较淡,略有鱼腥味	鱼腥味较重,但无氨味	较重的腥臭味,氨味较浓	强烈的氨臭味和腥臭味
色泽	表面红润有光泽	表面呈深红色,稍有光泽	表面光泽度下降,色泽较深	鱼肉呈暗灰色,表面无光泽	鱼肉表面发黑,暗淡无光
组织形态	肌肉组织致密,表面光滑,纹理清晰	肌肉组织较致密,纹理较清晰	肌肉组织不紧密,纹理局部松散	肌肉组织松散发粘,纹理模糊	肌肉组织松软发粘,看不清纹理
肌肉弹性	肌肉坚实有弹性,按压后凹陷消失	肌肉较有弹性,按压凹陷缓慢消失	肌肉稍有弹性,按压凹陷消失较慢	肌肉弹性较小,按压后凹陷消失很慢	没有弹性,按压后不回弹

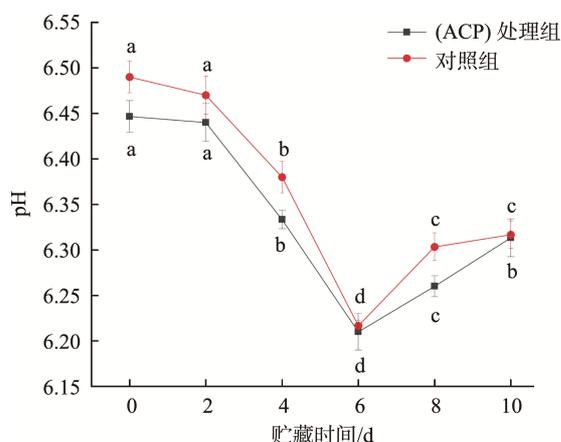
1.4 数据处理

所有指标进行 3 次平行实验。实验数据采用 Excel 2016 和 SPSS Statistics 23 进行整理统计, Origin 2022 进行绘图, 以单因素方差分析(one-way analysis of variance, one-way ANOVA)及新复极差法(Duncan's new multiple range test)比较不同样品组间差异。

2 结果与分析

2.1 ACP 处理对蓝圆鲈贮藏期间 pH 的影响

pH 是反映鱼肉酸度的指标, 也是反映鱼体新鲜程度的指标之一。水产品死后会经历 3 个阶段: 僵直期、自溶期和腐败期, 3 个阶段通常会产生不同的生化反应, 而 pH 也会随着不同的阶段而发生趋势变化^[15]。经 ACP 处理前后的蓝圆鲈在贮藏期间 pH 的变化如图 2 所示, 在整个贮藏期间, 处理组和对照组的 pH 均呈先下降后上升的趋势。贮藏初期即僵直期时, 新鲜鱼肉的 pH 为 6.49 左右, 到第 6 d 时 pH 下降到整个贮藏过程的最低点为 6.22, 鱼肉在前 6 d 呈现下降的趋势主要是因为鱼体死后 ATP 酶活力增强, 以及糖原发生酵解产生生化反应, 从而形成乳酸等一系列酸性物质, 随着 ATP 酶活力的增强和乳酸的堆积, 使得鱼体酸性增加, pH 呈现下降趋势^[16]。在贮藏末期即自溶阶段, 鱼肉的 pH 从第 6 d 至第 10 d 贮藏终点时上升至 6.32 左右, pH 的上升是因为鱼体蛋白质、氨基酸等物质在内源性蛋白酶的作用下分解产生挥发性碱性含氮物质, 这些物质在鱼体内堆积, 使得鱼肉碱性增强^[17]。故在贮藏过程中, 蓝圆鲈的 pH 呈现先下降后上升的趋势。这与王艺月等^[18]、王晨等^[19]的研究相似。经 ACP 处理后的蓝圆鲈的 pH 整体低于对照组, 这是因为 ACP 利用空气作为激发气体, 空气中的 O₂、N₂ 可产生大量 ROS、RNS 等活性基团, 而这些活性基团与鱼肉



注: 不同小写字母表示同一组不同贮藏时间之间具有显著差异 ($P < 0.05$), 下同。

图 2 蓝圆鲈在贮藏期间 pH 的变化

Fig.2 Changes in pH of *Decapterus maruadsi* during storage

中的 H₂O 发生一系列反应, 能够参与硝酸根和亚硝酸根的生成形成酸性物质, 使得处理组鱼肉的 pH 低于对照组^[20]。陈家盛等^[21]研究 ACP 冰鲜鱿鱼贮藏期间的品质影响, 结果也表明 ACP 处理后的 pH 低于对照组。

2.2 ACP 处理对蓝圆鲈贮藏期间 WHC 的影响

WHC 反映了鱼体肌肉的保水能力, 在一定程度上能够体现鱼肉的新鲜程度。ACP 对蓝圆鲈贮藏期间 WHC 的影响变化如图 3 所示, 处理组和对照组的 WHC 初始值分别为 80.35% 和 79.13%, 随着贮藏时间的延长, 两组样品的 WHC 均呈逐渐下降趋势, 到贮藏终点第 10 d 时, WHC 分别下降到 76.1% 和 74.55%, 分别下降了 4.25% 和 4.58%。鱼肉的 WHC 与汁液流失率相关, 随着贮藏时间的延长, 鱼肉的汁液随之流失、挥发, 导致鱼肉保水性下降, WHC 降低。另外, 蛋白质在蛋白酶的作用下发生了变性, 与微生物增殖同时发生水解反应, 破坏了鱼肉的肌肉组织结构, 使得鱼体肌肉间可存储水分的能力减小, 也会导致 WHC 下降^[22]。在整个贮藏期间, 处理组的持水力始终略高于对照组, 分析原因可能是 ACP 能够抑制蛋白质的变性和微生物的生长繁殖, 维持细胞膜的完整性和膜透性, 使得鱼肉中的水分状态更加稳定, 减少了组织液的流失, 从而增强了鱼肉的保水性^[23]。

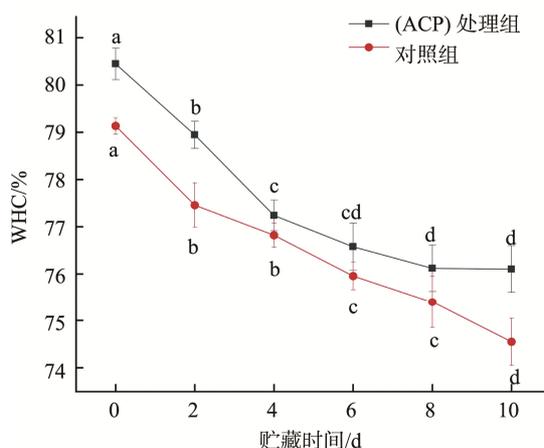


图 3 蓝圆鲈在贮藏期间 WHC 的变化

Fig.3 Changes in WHC of *Decapterus maruadsi* during storage

2.3 ACP 处理对蓝圆鲈贮藏期间菌落总数的影响

微生物的增殖是引起鱼肉腐败变质的主要原因之一, 而菌落总数是反映鱼肉微生物生长情况和水产品品质的重要指标之一。蓝圆鲈经 ACP 处理后菌落总数的变化由图 4 可知, 两组样品在贮藏期内菌落总数的生长趋势相同, 随着贮藏时间的延长而上升。在贮藏初期, 处理组和对照组的菌落总数初始值分别为 2.97 lg CFU/g 和 3.00 lg CFU/g, 没有显著差异。随着贮藏时间的延长, 菌落总数均呈上升趋势。根据 GB 10136—2015《食品安全国家标准 动物性

水产制品》，动物性水产品中菌落总数超过 6.00 lg CFU/g 时水产品不可食用。贮藏第 8 d 时，对照组的菌落总数达到 6.08 lg CFU/g，比初始值增加了 3.08 lg CFU/g，超过了国家标准中的阈值，不可食用，处理组的菌落总数为 5.04 lg CFU/g，比初始值增加 2.07 lg CFU/g，未超过限量，且相比于对照组，微生物生长较缓。到贮藏终点时，对照组样品的菌落总数达到了 6.72 lg CFU/g，鱼体已经腐败变质，处理组样品的菌落总数为 6.10 lg CFU/g，也超过了国家标准中的阈值。结果表明，ACP 能有效延长蓝圆鲈的货架期 2 d 左右，且在贮藏期间，处理组的菌落数量始终低于对照组，对比结果来看，ACP 从很大程度上降低了微生物的生长速率。该生长趋势与胡晓梦等^[24]的研究相似，在其研究中，ACP 对中华管鞭虾的微生物生长有明显的抑制作用，且延长了货架期 4 d 左右。分析原因可能是 ACP 利用空气作为激发气体，空气中的 O₂、N₂ 可产生大量 ROS、RNS 以及带电粒子、紫外光子等具有杀菌作用的物质，可以有效抑制微生物的生长，其中紫外线和 ROS 自由基能够使微生物的化学键断裂，从而产生挥发性物质(二氧化碳、碳氢化合物等)^[11]。本研究结果表明，ACP 能有效抑制微生物的生长，延缓蓝圆鲈的腐败变质。

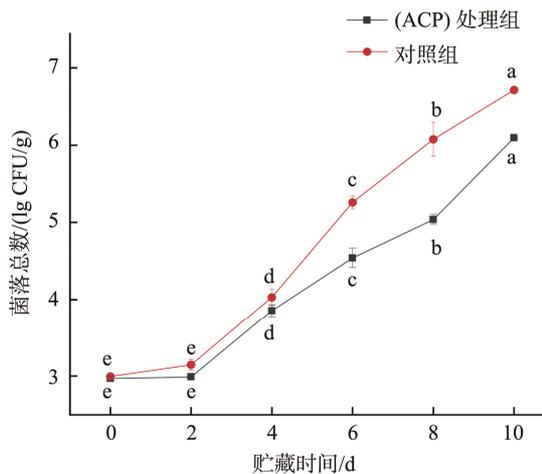


图 4 蓝圆鲈在贮藏期间菌落总数的变化

Fig.4 Changes in total bacterial count of *Decapterus maruadsi* during storage

2.4 ACP 处理对蓝圆鲈贮藏期间 TVB-N 的影响

TVB-N 是判断水产品新鲜程度的重要指标之一，水产品贮藏过程中，在酶分解和微生物生长的共同作用下，会产生氨和胺类等挥发性碱性含氮物质，而这些物质就是鱼肉腐败气味的来源^[25]。ACP 处理对蓝圆鲈 TVB-N 的影响如图 5 所示，处理组和对照组新鲜蓝圆鲈的 TVB-N 的初始值分别为 12.74 mg/100 g 和 12.64 mg/100 g。整个贮藏期间，TVB-N 随着贮藏时间的延长而呈上升趋势。第 8 d 时，对照组的 TVB-N 为 29.93 mg/100 g，比初始值增长了 17.29 mg/100 g，

根据 GB 2733—2015《食品安全国家标准 鲜、冻动物性水产品》规定，海水虾的 TVB-N 的阈值为 30 mg/100 g，此时对照组已经非常接近阈值，而处理组的 TVB-N 为 25.69 mg/100 g，比初始值增长了 12.95 mg/100 g。到贮藏终点第 10 d 时，处理组和对照组的 TVB-N 值分别为 30.70 mg/100 g 和 34.36 mg/100 g，相比初始值分别增长了 17.96 mg/100 g 和 21.72 mg/100 g，均超过了阈值，且整个贮藏期间处理组相比对照组，TVB-N 生长速率较缓，意味着 ACP 在很大程度上延缓了鱼肉 TVB-N 的增长速率。在徐慧倩等^[26]的研究中，经 ACP 处理后的南美白对虾的 TVB-N 较对照组的生长速率较缓，且始终低于对照组。这表明 ACP 能有效抑制 TVB-N 的增长，达到延长货架期的目的。其原因可能是 ACP 通过抑制酶活力以及破损微生物细胞，从而抑制了氨和胺类等挥发性碱性含氮物质，因此减缓了鱼肉的腐败变质^[27]。本研究结果表明 ACP 对蓝圆鲈中 TVB-N 的增长有明显的抑制作用。

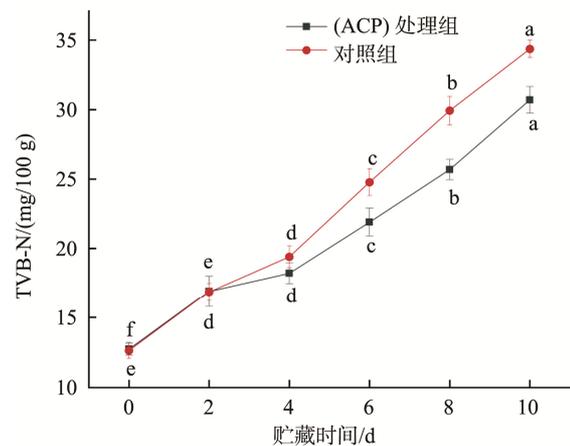


图 5 蓝圆鲈在贮藏期间 TVB-N 的变化

Fig.5 Changes in TVB-N of *Decapterus maruadsi* during storage

2.5 ACP 处理对蓝圆鲈贮藏期间 TBARS 值的影响

TBARS 值是能够反映肉类脂肪氧化程度的一项重要指标，在捕捞、运输和销售的过程中，鱼肉极易发生不同程度的氧化变质。杨小斌等^[28]对蓝圆鲈鱼油的脂肪酸组成进行了分析，研究发现蓝圆鲈鱼油中含有丰富的不饱和脂肪酸。而不饱和脂肪酸被氧化分解后会产生二级代谢产物丙二醛，丙二醛与 TBARS 发生反应生成粉色物质，其含量可以反映出鱼肉脂肪氧化劣变情况。丙二醛含量越高，说明脂肪氧化程度越大^[29]。如图 6 所示，随着贮藏时间的增加，TBARS 值呈现逐渐上升的趋势，说明贮藏时间与脂肪氧化程度成正比。贮藏初期时，处理组和对照组的 TBARS 值分别为 0.33 mg/kg 和 0.24 mg/kg，两者之间仅相差 0.09 mg/kg，没有显著差异。第 6 d 时，处理组 TBARS 值明显高于对照组，两组分别为 1.51 mg/kg 和 1.05 mg/kg，

相差了 0.46 mg/kg, 且与新鲜样品相比分别增加了 1.18 mg/kg 和 0.81 mg/kg, 与处理组相比, 对照组 TBARS 值上升速度较为缓慢。到达贮藏终点时, 两组 TBARS 值分别为 2.06 mg/kg 和 1.55 mg/kg, 相比 0 d 时分别增加了 1.73 mg/kg 和 1.31 mg/kg。在整个贮藏期间, 对照组 TBARS 值始终低于处理组, 分析原因可能是将空气作为等离子体激发气体, 能够产生具有高氧化活性的自由基, 而这些自由基可以促进鱼肉中不饱和脂肪酸的氧化, 且处理电压越大, 时间越长, 氧化作用越明显^[30]。根据国内外研究, 鱼肉的 TBARS 值小于 5 mg/kg 比较适合食用, 不能被加工或者食用的 TBARS 限值为 8 mg/kg^[31]。研究结果与 ALBERTOS 等^[32]相似, 经 70 kV ACP 处理后的鲑鱼 TBARS 值在第 9 d 后高于对照组。KULAWIK 等^[33]也发现 ACP 能够促进三文鱼寿司的 TBARS 值。因此, 平衡脂肪氧化程度和延长货架期的关键在于控制 ACP 的处理条件。

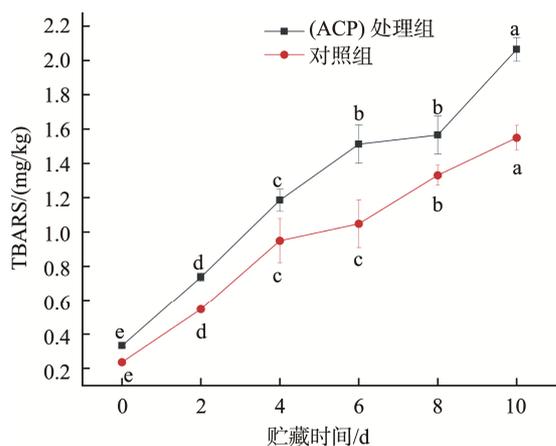


图 6 蓝圆鲈在贮藏期间 TBARS 的变化

Fig.6 Changes in TBARS of *Decapterus maruadsi* during storage

2.6 ACP 处理对蓝圆鲈贮藏期间组胺含量的影响

鱼肉中的组胺含量能直观地反映出鱼肉的劣变程度, 其产生的原因主要是微生物产生的组氨酸脱羧酶催化了鱼肉组织中的游离氨基酸产生了脱羧反应, 从而生成组胺^[34-36]。若人体摄入了组胺过量的水产品则会引起中毒现象, 根据 GB 2733—2015《食品安全国家标准 鲜、冻动物性水产品》规定, 水产品的组胺含量不能超过 20 mg/100 g, 而蓝圆鲈属于高组胺鱼类, 其含量不能超过 40 mg/100 g^[37]。如图 7 所示, 蓝圆鲈的组胺含量随着贮藏时间的增加而逐渐上升, 两组样品的初始值分别为 5.88 mg/100 g 和 6.02 mg/100 g, 在贮藏初期无明显差异。对照组组胺含量在第 6 d 之后显著上升, 第 8 d 时达到 74.73 mg/100 g, 已经超出国家标准中的限值。而处理组在第 8 d 以后开始显著上升, 第 10 d 时达到 59.03 mg/100 g, 超出国家标准限值。在整个贮藏期间, 处理组的增长速率明显低于对照组,

在贮藏终点时, 处理组和对照组的组胺含量分别增加了 53.15 mg/100 g 和 107.88 mg/100 g。组胺含量与水产品中的微生物紧密相关, 而 ACP 处理能够有效抑制微生物的生长繁殖, 尤其是能够减少产组胺能力较强的肠杆菌科细菌^[38]。因此, ACP 处理能够有效地降低蓝圆鲈中的组胺含量。

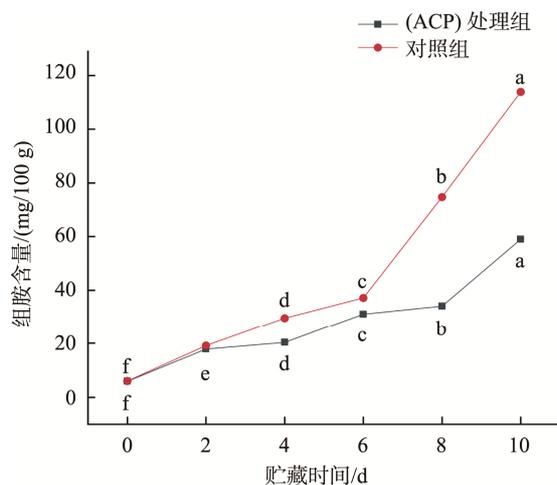


图 7 蓝圆鲈在贮藏期间组胺含量的变化

Fig.7 Changes in histamine content of *Decapterus maruadsi* during storage

2.7 ACP 处理对蓝圆鲈贮藏期间感官品质的影响

感官评定是鱼肉贮藏期间较为重要的评价指标之一, 也是最能直接反映鱼肉的新鲜程度以及消费者的可接受度的一项指标。借助 10 位经过培训的感官评定人员, 通过建立感官评价表, 对蓝圆鲈的气味、色泽、组织状态、肌肉弹性 4 项逐一进行评分, 将每一项的平均值相加得出结果。由图 8 所示, 在贮藏初期 0 d 时, 两组样品的感官评分分别为 19.03 和 18.93, 无明显差异, 说明 ACP 对蓝圆鲈 0 d 的感官指标没较大的影响。两组感官评分随着贮藏时间的延长而显著下降, 说明两组样品鱼肉的品质都出现了不同程度的劣变。从第 6 d 开始, 对照组的评分为 12.03 且下降速率增加, 鱼肉开始出现腥味, 表面开始发黑。到贮藏终点时, 对照组评分下降到 7.36, 鱼肉中水分渗出, 表面已经氧化发黑, 肌肉组织松散, 散发出腐败变质的腥臭味, 处理组评分为 8.51, 略高于对照组, 但两组总体被认为不可接受。在整个贮藏期间, 处理组的感官品质总体优于对照组, 尤其是气味的劣变情况, 可能是因为 ACP 处理能够通过抑制微生物生长和蛋白质分解, 从而减少挥发性碱性含氮物质的生成。从蓝圆鲈的整体品质变化情况来看, 低温等离子体对保持蓝圆鲈的品质状况有积极的作用。但感官评价具有主观性, 对蓝圆鲈的品质状况还需要结合理化指标等进行综合评价。

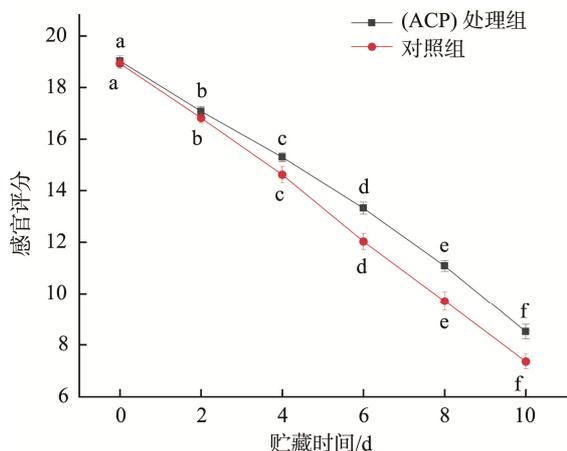


图 8 蓝圆鲈在贮藏期间感官品质的变化

Fig.8 Changes in sensory quality of *Decapterus maruadsi* during storage

3 结 论

本研究探讨了 ACP 处理(50 kV、5 min)对蓝圆鲈在 4°C 冷藏条件下的品质影响, 分析评价了贮藏期间品质指标的变化。研究发现, 随着贮藏时间的延长, 两组样品的菌落总数、TVB-N 值、TBARS 值和组胺含量均呈上升趋势, 且感官评分和 WHC 显著下降, pH 呈现先下降后上升的趋势, 但相较于对照组, 处理组的变化速率较缓。本研究发现, ACP 能有效缓解微生物的增殖, 抑制菌落总数的增长, 对保持蓝圆鲈的新鲜程度具有一定积极作用。但与此同时, ACP 处理也会促进脂质氧化, 对蓝圆鲈的品质产生不良影响, 因此, 在应用过程中也要将脂质氧化控制在可接受范围内。以上结果显示, ACP 能有效延长蓝圆鲈 4°C 冷藏条件下的货架期, 可以在蓝圆鲈保鲜方面发挥重要作用。

参考文献

- 蒋日进, 徐汉祥, 金海卫, 等. 东海蓝圆鲈的摄食习性[J]. 水产学报, 2012, 36(2): 216-227.
JIANG RJ, XU HX, JIN HW, *et al.* The feeding habits of the East China Sea *Decapterus maruadsi* [J]. J Fish Chin, 2012, 36(2): 216-227.
- 袁晓初, 王丹, 吴反修. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2022.
YUAN XC, WANG D, WU FX. China fishery statistical yearbook [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2022.
- 马稳, 秦松, 高春霞, 等. 基于 Tweedie-GAM 探究浙江南部近海蓝圆鲈资源分布及与环境因子的关系[J/OL]. 渔业科学进展: 1-13. [2023-04-15]. DOI: 10.19663/j.issn2095-9869. 20220224002
MA W, QIN S, GAO CX, *et al.* Exploring the distribution of *Decapterus maruadsi* resources and its relationship with environmental factors in the southern coastal areas of Zhejiang Province based on Tweedie-GAM [J/OL]. Prog Fish Sci: 1-13. [2023-04-15]. DOI: 10.19663/j.issn2095-9869. 20220224002.
- 黄茂坤, 赖谱富. 人工养殖蓝圆鲈肌肉营养成分的分析与评价[J]. 武汉轻工大学学报, 2022, 41(6): 44-52.

- HUANG MK, LAI PF. Analysis and evaluation of the nutrient composition of the muscle of artificially cultivated *Decapterus maruadsi* [J]. J Wuhan Polytech Univ, 2022, 41(6): 44-52
- 周雅, 胡晓, 李来好, 等. 蓝圆鲈黄嘌呤氧化酶抑制肽的制备及其活性分析[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(13): 146-153.
ZHOU Y, HU X, LI LH, *et al.* Preparation and activity analysis of xanthine oxidase inhibitory peptide from *Decapterus maruadsi* [J]. Food Ferment Ind, 2021, 47(13): 146-153.
- 陈晓婷, 吴靖娜, 路海霞, 等. 蓝圆鲈肌肉中营养成分分析与评价[J]. 渔业现代化, 2016, 43(1): 56-61.
CHEN XT, WU JN, LU HX, *et al.* Analysis and evaluation of nutrient components in the muscle of *Decapterus maruadsi* [J]. Fish Ind Mod, 2016, 43(1): 56-61.
- 劳敏军, 付莹莹, 冉刚, 等. 漂洗对蓝圆鲈鱼糜凝胶特性的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(12): 3803-3810.
LAO MJ, FU YY, RAN G, *et al.* Effect of rinsing on the gel properties of *Decapterus maruadsi* [J]. J Food Saf Qual, 2022, 13(12): 3803-3810.
- 吴锁连, 康怀彬, 李冬姣. 水产品保鲜技术研究现状及应用进展[J]. 江西水产科技, 2019, (3): 46-50.
WU SL, KANG HB, LI DJ. Research status and application progress of preservation technology for aquatic products [J]. Jiangxi Fish Sci Technol, 2019, (3): 46-50.
- LACOMBE A, NIEMIRA BA, GURTNER JB, *et al.* Atmospheric cold plasma inactivation of aerobic microorganisms on blueberries and effects on quality attributes [J]. Food Microbiol, 2015. DOI: 10.1016/j.fm.2014.09.010
- 史莹莹, 杨晴丽, 柳雅丽, 等. 低温等离子体在食品中应用的研究[J]. 农产品加工, 2020, (14): 63-66, 70.
SHI YY, YANG QL, LIU YL, *et al.* Research on the application of low-temperature plasma in food [J]. Farm Prod Process, 2020, (14): 63-66, 70.
- 章建浩, 黄明明, 王佳媚, 等. 低温等离子体冷杀菌关键技术装备研究进展[J]. 食品科学技术学报, 2018, 36(4): 8-16.
ZHANG JH, HUANG MM, WANG JM, *et al.* Research progress on key technology and equipment for low-temperature plasma cold sterilization [J]. J Food Sci Technol, 2018, 36(4): 8-16.
- CHEN J, WANG SZ, CHEN JY, *et al.* Effect of cold plasma on maintaining the quality of chub mackerel (*Scomber japonicus*): Biochemical and sensory attributes [J]. J Sci Food Agric, 2019, 99(1): 39-46
- MSC A, EBJ A, JI Y, *et al.* Impact of non-thermal dielectric barrier discharge plasma on *Staphylococcus aureus* and *Bacillus cereus* and quality of dried blackmouth angler (*Lophiomus setigerus*) [J]. J Food Eng, 2020, 278.
- ZOUELM F, ABHARI K, HOSSEINI H, *et al.* The effects of cold plasma application on quality and chemical spoilage of pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during refrigerated storage [J]. J Aquat Food Prod, 2019, 28(6): 624-636.
- 沈云. 鲢鱼主要致病菌与腐败关系及保鲜技术研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2017.
SHEN Y. Research on the relationship between the main pathogenic fungi and spoilage of *Mitichthys miiui* and its preservation techniques [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2017.
- 白姐姐, 白锴凯, 何建林, 等. 鱼露生物胺研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(24): 271-277.
BAI NN, BAI KK, HE JL, *et al.* Research progress of biogenic amine in fish sauce [J]. Food Ferment Ind, 2020, 46(24): 271-277.
- HOUCHE A, BENSID A, REGENSTEIN JM, *et al.* Control of biogenic

- amine production and bacterial growth in fish and seafood products using phytochemicals as biopreservatives: A review [J]. *Food Biosci*, 2020, 39(2): 100807.
- [18] 王艺月, 姜竹茂, 钱婧, 等. 等离子体处理对生鲜鱼肉杀菌效能及贮藏品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(8): 166–172.
WANG YY, JIANG ZM, QIAN J, *et al*. The effect of plasma treatment on the bactericidal efficacy and storage quality of fresh fish meat [J]. *Food Ferment Ind*, 2022, 48(8): 166–172.
- [19] 王晨, 钱婧, 盛孝维, 等. 低温等离子体冷杀菌对盐水鸭货架期及风味品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(17): 70–77.
WANG C, QIAN J, SHENG XW, *et al*. The effect of low-temperature plasma cold sterilization on the shelf life and flavor quality of salted duck [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(17): 70–77.
- [20] 倪思思, 樊丽华, 廖新浴, 等. 冷等离子体技术替代肉制品中亚硝酸盐的研究进展[J]. *食品科学*, 2020, 41(11): 233–238.
NI SS, FAN LH, LIAO XY, *et al*. Research progress on replacing nitrite in meat products with cold plasma technology [J]. *Food Sci*, 2020, 41(11): 233–238.
- [21] 陈家盛, 宫玉婷, 董依雪, 等. 低温等离子体处理对冰鲜鲑鱼品质特性的影响[J]. *食品工业*, 2021, 42(5): 231–235.
CHEN JS, GONG YT, DONG YX, *et al*. The effect of low-temperature plasma treatment on the quality characteristics of chilled squid [J]. *Food Ind*, 2021, 42(5): 231–235.
- [22] 孙颖瑛, 许艳顺, 夏文水, 等. 发酵酸鱼贮藏过程中理化与感官品质变化研究[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(17): 286–291.
SUN YY, XU YS, XIA WS, *et al*. Study on the changes in physicochemical and sensory qualities of fermented sour fish during storage [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2020, 41(17): 286–291.
- [23] 唐玲玲. 低温等离子体对凡纳滨对虾肌肉自溶的控制及机制研究[D]. 杭州: 浙江海洋大学, 2022.
TANG LL. Study on the control and mechanism of low temperature plasma on muscle autolysis in *Litopenaeus vannamei* [D]. Hangzhou: Zhejiang Ocean University, 2022.
- [24] 胡晓梦, 陈静, 邓尚贵, 等. 低温等离子体对中华管鞭虾(*Solenocera crassicornis*)菌相变化及品质特性的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(19): 141–147.
HU XM, CHEN J, DENG SG, *et al*. The effect of low-temperature plasma on the microbial changes and quality characteristics of *Solenocera crassicornis* [J]. *Food Sci*, 2021, 42(19): 141–147.
- [25] 周龙安, 许学勤, 许艳顺, 等. 贮藏温度对鲜食鳙鱼品质的影响[J]. *食品科技*, 2016, 41(7): 163–168.
ZHOU LAN, XU XQ, XU YS, *et al*. The effect of storage temperature on the quality of fresh bighead carp [J]. *Food Sci Technol*, 2016, 41(7): 163–168.
- [26] 徐慧倩, 严金红, 唐玲玲, 等. 低温等离子体对南美白对虾冷藏期间品质保持的效果[J]. *现代食品科技*, 2021, 37(4): 116–123, 138.
XU HQ, YAN JH, TANG LL, *et al*. The effect of low-temperature plasma on maintaining the quality of South American white shrimp during cold storage [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2021, 37(4): 116–123, 138.
- [27] OCAÑO-HIGUERA VM, MAEDA-MARTÍNEZ AN, MARQUEZ-RÍOS E, *et al*. Freshness assessment of ray fish stored in ice by biochemical, chemical and physical methods [J]. *Food Chem*, 2011, 125(1): 49–54.
- [28] 杨小斌, 周爱梅, 王爽, 等. 低温连续相变萃取蓝圆鲹鱼油及其脂肪酸组成分析[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(23): 291–297.
YANG XB, ZHOU AIM, WANG S, *et al*. Low temperature continuous phase change extraction and fatty acid composition analysis of bluefin catfish oil [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2016, 37 (23): 291–297.
- [29] 周雅琪. 亚牛磺酸对南美白对虾黑变抑制机理及品质的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
ZHOU YQ. Study on the inhibition mechanism and quality effect of taurine on black transformation of *Penaeus vannamei* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [30] 王佳媚, 彭菲, 符腾飞. 不同低温等离子体处理条件对金鲳鱼品质影响[J]. *食品工业*, 2020, 41(9): 30–34.
WANG JM, PENG F, FU TF. The effect of different low-temperature plasma treatment conditions on the quality of golden pomfret [J]. *Food Ind*, 2020, 41(9): 30–34.
- [31] 卞瑞姣, 曹荣, 刘洪, 等. 去头/内脏处理对秋刀鱼冷藏特性的影响[J]. *食品科学*, 2016, 37(22): 269–273.
BIAN RJ, CAO R, LIU Q, *et al*. The effect of decapitation/visceral treatment on the cold storage characteristics of autumn saury [J]. *Food Sci*, 2016, 37(22): 269–273.
- [32] ALBERTOS I, MARTIN-DIANA AB, CULLEN PJ, *et al*. Shelf-life extension of herring (*Clupea harengus*) using in-package atmospheric plasma technology [J]. *Innov Food Sci Emerg*, 2019, 53: 85–91.
- [33] KULAWIK P, ALVAREZ C, CULLEN PJ, *et al*. The effect of non-thermal plasma on the lipid oxidation and microbiological quality of sushi [J]. *Innov Food Sci Emerg*, 2017, 45: 412–417.
- [34] LIPP EK, ROSE JB. The role of seafood in foodborne diseases in the United States of America [J]. *Rev Sci Technol Oie*, 1997, 16(2): 620–640.
- [35] KIM MK, MAH JH, HWANG HJ. Biogenic amine formation and bacterial contribution in fish, squid and shellfish [J]. *Food Chem*, 2009, 116(1): 87–95.
- [36] PRESTER, LJERKA. Biogenic amines in fish, fish products and shellfish: A review [J]. *Food Addit Contam B*, 2011, 28(11): 1547–1560.
- [37] PATANGE SB, MUKUNDAN MK, KUMAR KA. A simple and rapid method for colorimetric determination of histamine in fish flesh [J]. *Food Control*, 2005, 16(5): 465–472.
- [38] JIANG QQ, DAI ZY, ZHOU T, *et al*. Histamine production and bacterial growth in mackerel (*Pneumatophorus japonicus*) during storage [J]. *J Food Biochem*, 2013, 37(2): 246–253.

(责任编辑: 于梦娇 韩晓红)

作者简介



徐迪莎, 硕士研究生, 主要研究方向为水产品的贮藏与加工。
E-mail: 826120242@qq.com



林慧敏, 教授, 主要研究方向为海洋生物资源的加工与综合利用、水产品精深加工。
E-mail: lin.huimin@zjou.edu.cn