刘峰屹, 吕浩然, 冯洁, 等. 介质阻挡放电低温等离子体处理对黄鳍金枪鱼肉冷藏过程中品质变化的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(17): 446−453. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090056
LIU Fengyi, LÜ Haoran, FENG Jie, et al. Yellowfin Tuna Meat Quality Changes during Cold Storage Using Dielectric Barrier Discharge Cold Plasma[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(17): 446−453. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090056

· 贮运保鲜 ·

介质阻挡放电低温等离子体处理对黄鳍金枪鱼肉冷藏过程中品质变化的影响

刘峰屹, 吕浩然, 冯　洁, 邓昱辰, 林慧敏*, 邓尚贵
（浙江海洋大学食品与药学院, 浙江舟山 316000）

摘　要: 本研究旨在评估介质阻挡放电低温等离子体（Dielectric Barrier Discharge-Cold Plasma，DBD-CP）处理对黄鳍金枪鱼在冷藏过程中的品质影响。以黄鳍金枪鱼为研究对象，分别采用 30 kV 和 50 kV 电压、3 min 和 5 min 处理时间进行 DBD-CP 处理，并设未处理的对照组（Control Check，CK）。样品在 4 ℃ 下贮藏 0、2、4、6、8 d，测定其感官、色差、总挥发性盐基氮、菌落总数、pH、持水力、硫代巴比妥酸值及质构特性。结果表明，DBD-CP 处理改善了感官质量，显著抑制了微生物生长，延缓了总挥发性盐基氮上升和质构劣化，有效延长了黄鳍金枪鱼的货架期。然而，处理组样品的亮度和红度显著降低，脂质氧化加剧。综上所述，DBD-CP 在延长黄鳍金枪鱼冷藏货架期方面具有良好应用潜力，但其对鱼肉颜色和脂质稳定性的负面影响仍需通过工艺优化等方法予以改善。

关键词: 黄鳍金枪鱼, 低温等离子体, 品质变化, 色泽劣化, 脂质氧化
中图分类号: TS254.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)17−0446−08
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090056
本文网刊:

Yellowfin Tuna Meat Quality Changes during Cold Storage Using Dielectric Barrier Discharge Cold Plasma

LIU Fengyi，LÜ Haoran，FENG Jie，DENG Yuchen，LIN Huimin*，DENG Shanggui
（College of Food Science and Pharmacy, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316000, China）

Abstract: In this study, we aimed to evaluate how dielectric barrier discharge-cold plasma (DBD-CP) treatment affects yellowfin tuna quality during cold storage. We treated yellowfin tuna samples with DBD-CP at voltages of 30 and 50 kV for 3 and 5 min, respectively, with untreated samples serving as controls. We stored all samples at 4 ℃ for 0, 2, 4, 6, and 8 days, and analyzed their sensory properties, color, total volatile basic nitrogen, total bacterial count, pH, water-holding capacity, thiobarbituric acid value, and texture. Rresults indicated that the DBD-CP treatment significantly improved sensory quality, inhibited microbial growth, delayed total volatile basic nitrogen increase and texture deterioration, and effectively extended the shelf life of yellowfin tuna. However, the treatment markedly reduced lightness and redness, along with enhanced lipid oxidation, as indicated by the higher thiobarbituric acid values compared to those of the control. In conclusion, DBD-CP exhibits strong potential for extending the refrigerated shelf life of yellowfin tuna, although processing condition optimization would be required to minimize its adverse effects on color and lipid stability.

Key words: yellowfin tuna; cold plasma; quality changes; color deterioration; lipid oxidation

金枪鱼富含 DHA、EPA 等 n-3 多不饱和脂肪酸和蛋白质, 营养价值丰富是一种高经济价值鱼类[1]。金枪鱼的种类包括蓝鳍金枪鱼、马苏金枪鱼、大眼金枪鱼、黄鳍金枪鱼等[2]。黄鳍金枪鱼是除鲣鱼之外产

收稿日期: 2025−09−05
基金项目: 基于多组学的低温等离子体技术调控冰鲜鱿鱼品质稳定的作用机制（32072291）。
作者简介: 刘峰屹（1998−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 水产品加工与贮藏, E-mail: 568639340@qq.com。
*** 通信作者:** 林慧敏（1979−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 水产品加工及贮藏研究, E-mail: linhuixiaomin@126.com。

量最大的一种，占全球金枪鱼产量 35% 左右；生鱼片是新鲜黄鳍金枪鱼最主要的食用方式[3]。然而，传统低温冷藏对金枪鱼保鲜作用仍然有限，已有研究报道，金枪鱼在 4 ℃ 冷藏条件下于第 4 d 即达到生食标准下的货架期终点[4]，难以满足对高品质生食金枪鱼的保鲜需求。因此，亟需开发能够进一步抑制微生物生长、延长货架期的保鲜新技术。

低温等离子体（Cold Plasma, CP）是一种环保、高效、非热的技术。CP 已被广泛用于通过内源性酶灭活、食品包装条件改良、微生物去污和毒素去除来改善食品。CP 的一个重要特征是其产生多种生物活性剂的能力，包括活性氧（ROS）和活性氮（RNS）（例如臭氧、过氧化物、羟基自由基、一氧化氮）、紫外线（UV）和带电粒子，这些生物活性剂可以有效抑制微生物生长[5−6]。低温等离子体可以通过多种放电产生，例如辉光（Direct Current, DC）放电、射频（Radio Frequency, RF）放电、介质阻挡放电（Dielectric Barrier, DBD）、大气压等离子体射流（Atmospheric Pressure Plasma Jet, APPJ）、微波和脉冲功率放电[7]。不同的研究表明，食品工业中应用最好的等离子体类型是 DBD，因为其运行和维护成本低，并且其中的活性物质含量比其他类型的低温等离子体更高[8]。目前，CP 技术已广泛应用于食品保鲜领域。已有研究表明，CP 处理能够显著抑制蓝圆鲹在贮藏过程中微生物数量的增长，延缓菌落总数的上升，从而在一定程度上保持其品质和新鲜度，然而，CP 处理会产生诱导脂质过氧化的副作用[9]。此外，其他研究发现，CP 处理可在贮藏过程中改善红色肉质的牛肉整体品质，但同时可能引起牛肉颜色劣化的问题[10]。然而，目前关于介质阻挡放电冷等离子体（DBD-CP）处理对高值、高脂且具有红色肉质特征的黄鳍金枪鱼品质影响的研究尚存在空白。

基于此，本研究将以黄鳍金枪鱼为研究对象，通过测定色差、总挥发性盐基氮、菌落总数、pH、持水力、硫代巴比妥酸值、质构等指标，分析 DBD-CP 对黄鳍金枪鱼在冷藏过程中的品质影响，为延长黄鳍金枪鱼的货架期提供理论基础。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

黄鳍金枪鱼中段　购于深圳市渔有家贸易有限公司；平板计数琼脂　北京陆桥技术股份有限公司；氯化钠、硼酸、乙二胺四乙酸（Ethylenediaminetetraacetic Acid, EDTA）、盐酸、三氯乙酸　均为分析纯，国药集团化学试剂有限公司。

Phenix BK130/3 低温等离子体处理仪　Phenix Technologies 有限公司；E-201 pH 计　上海虹益仪器仪表有限公司；K9840 全自动凯氏定氮仪　山东海能仪器科学仪器有限公司；NR10QC 高品质电脑色差仪　深圳市三恩时科技有限公司；751UVGD 型紫外-可见光分光光度计　上海第三分析仪器厂；Micro 17 高速冷冻离心机　赛默飞世尔科技有限公司；TMS-PRO 型质构仪　美国 FTC 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　金枪鱼预处理　将购买的金枪鱼肉中段切分为每块为 10 g（30 mm×30 mm×30 mm）的立方体，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。

1.2.2　DBD-CP 处理　本研究中使用的低温等离子体放电方式为介质阻挡放电（DBD），仪器如图 1 所示，DBD 等离子体源由两块平行的圆形铝板组成，外径为 155 mm，两个电极之间的距离为 75 mm。两端的聚苯乙烯板（2 mm）的介电屏障将样品和电极分开。使用高压变压器提供从大气气体产生反应性氧化等离子体物质所需的能量。将装有样品的聚丙烯盒置于两个电极之间，进行 CP 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。将样品随机分为四组放置在 DBD-CP 处理装置中进行处理，处理条件：30 kV 3 min、30 kV 5 min、50 kV 3 min、50 kV 5 min。对照组（Control Check, CK）以不做 DBD-CP 处理作为空白对照。最后将样品放置在 4 ℃ 冰箱中贮存，分别于 0、2、4、6、8 d 取样测定。

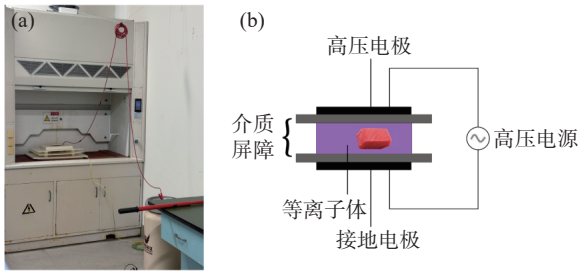


图 1　介质阻挡放电低温等离子体设备

Fig.1　Dielectric barrier discharge atmospheric cold plasma device equipment

1.2.3　感官评价的测定　选取 10 名（6 名男性，4 名女性）经过系统培训的食品科学专业学生作为评价小组成员，对处理组和对照组黄鳍金枪鱼样品的气味、色泽、组织形态和肌肉弹性四个感官指标进行评价。每个指标满分为 5 分，总评分为 20 分。各评价指标的得分取平均值后相加，作为样品的最终感官评分。感官评分表见表 1。

1.2.4　色泽的测定　使用色差仪进行测定，测定同一样品的同一部位，每组样品测定 3 次平行，取其平均值，并记录 L^*、a^*和 b^*值。

1.2.5　质构的测定　根据李念文等[11] 的方法将鱼肉切成 20 mm×15 mm×10 mm 的长方体，使用平底柱形探头 P/6（6 mm 直径）。测定参数如下：测试前速率 3 mm/s，测试速率 1 mm/s，测试后速率 1 mm/s，压缩程度 50%，停留间隔 5 s。每次测 3 个样品，每个样品测 1 次，取平均值。分别测定其硬度（Hardness）和弹性（Springiness）。

表 1 黄鳍金枪鱼肉感官评分标准

Table 1 Sensory score standards for yellowfin tuna

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, 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

1.2.6 pH 的测定 称取 2 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。

1.2.7 持水力(Water Hold Capacity, WHC)的测定 称取 2 g 鱼肉, 记为 W_1, 在 4 ℃ 下以 1500 r/min 离心 10 min, 离心后称重, 记为 W_2, 平行测定 3 次。WHC 计算公式:

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

1.2.8 硫代巴比妥酸(Thiobarbituric Acid, TBA)的测定 称取切碎的 5.00 g 金枪鱼肉置于烧杯中, 加入 7.5%、含 0.1%EDTA 的三氯乙酸溶液 50 mL, 用匀浆机高速匀浆 2 min, 搅拌 30 min, 然后过滤除去沉淀, 量取 5 mL 上清液于试管中, 加入 5 mL 用 1-丁醇溶解配制的 0.02 mol/L TBA 溶液, 在 90 ℃ 恒温水浴锅加热 30 min。冷却至室温后, 加入 5 mL 氯仿并摇匀, 待溶液分层后。用移液枪吸取上清液分别在 532 nm 和 600 nm 波长下测定其吸光值。TBA 计算公式:

$$TBA(mg/kg) = \frac{(A_{532} - A_{600}) \times 0.05 \times 72.6}{155 \times m} \times 1000$$

式中: A_{532}、A_{600}: 样品于 532、600 nm 波长处的吸光值; m: 样品质量(g)。

1.2.9 总挥发性盐基氮(Total Volatile Basic Nitrogen, TVB-N)的测定 将 10 g 鱼肉绞碎置于 75 mL 水中, 加入 1 g 氧化镁振荡摇匀, 静置 30 min 后, 将溶液蒸馏, 用含有甲基红和亚甲基蓝混合试剂的硼酸溶液吸收, 用 0.01 mol/L 的盐酸滴定硼酸吸收液, TVB-N 值由消耗的盐酸量来测定。TVB-N 计算公式:

$$TVB\text{-}N(mg/100\,g) = \frac{(V_1 - V_0) \times c \times 14 \times 100}{m}$$

式中: V_1: 样品滴定所消耗的盐酸体积(mL); V_0: 空白滴定所消耗的盐酸体积(mL); c: 盐酸标准溶液的浓度(mol/L); 14: 氮原子的摩尔质量(mg/mmol); m: 样品质量(g)。

1.2.10 菌落总数(Total Bacterial Count, TBC)的测定 称取 25 g 鱼肉在室温下于 225 mL 生理盐水中以 250 r/min 均质 1~2 min, 进行 10 倍系列梯度稀释, 取 100 μL 于平板计数琼脂培养基上涂布涂匀, 置于 30 ℃ 培养 72 h 后计数, 菌落数量采用 CFU/g 计数。

1.3 数据处理

实验数据通过 IBM SPSS Statistics 20 统计软件进行方差分析(ANOVA), 结果表示为平均值±标准偏差(显著性水平为: $P<0.05$); 作图采用 Origin Pro 8 绘图软件。所有指标进行 3 次平行实验。

2 结果与分析

2.1 DBD-CP 处理对黄鳍金枪鱼感官评价的影响

感官评价是鱼肉贮藏过程中重要的质量评价指标之一, 能够直观反映样品的新鲜程度及其消费者可接受性。由经过系统培训的评定人员依据预先制定的感官评价标准表, 对金枪鱼肉的气味、色泽、组织状态及肌肉弹性等四项指标进行逐项打分。各指标评分取平均值后相加, 所得结果作为样品的感官评分。

图 2 所示为 CK 组和不同条件处理组金枪鱼肉在 4 ℃ 条件下储藏 0、2、4、6、8 d 时的感官评分结果。图中评估的四项感官指标为气味、色泽、组织形态和肌肉弹性。以气味评分低于 3.0, 组织形态和肌肉弹性评分低于 2.0 作为感官评价货架期终点。结果显示, 随着储藏天数增加, 各组的所有感官评分均呈逐渐下降趋势。CK 组的气味、肌肉弹性和组织形态相对于处理组评分下降更为明显; 在 4 d 时, 气味得分为 2.48; 组织形态和肌肉弹性得分为 1.53 和 1.98, 已经超过感官评价货架期终点, 但在色泽保持方面相对较好。而所有 DBD-CP 处理组在 6 d 时才超过感官评价货架期终点。总体而言, DBD-CP 处理能够在一定程度上延缓金枪鱼肉气味、肌肉弹性和组织形态品质的劣变并将超过感官评价货架期终点的时间延长至 6 d, 尤其高电压长时间处理具有更明显的效果, 但是也会造成加剧颜色劣化的副作用。

2.2 DBD-CP 处理对金枪鱼肉色泽的影响

肉的颜色是肉制品新鲜度和卫生性的重要指标。这也是消费者在购买肉类时考虑的主要质量属性[12]。L^*值反映了样品的亮度, 值越高代表颜色越亮。从

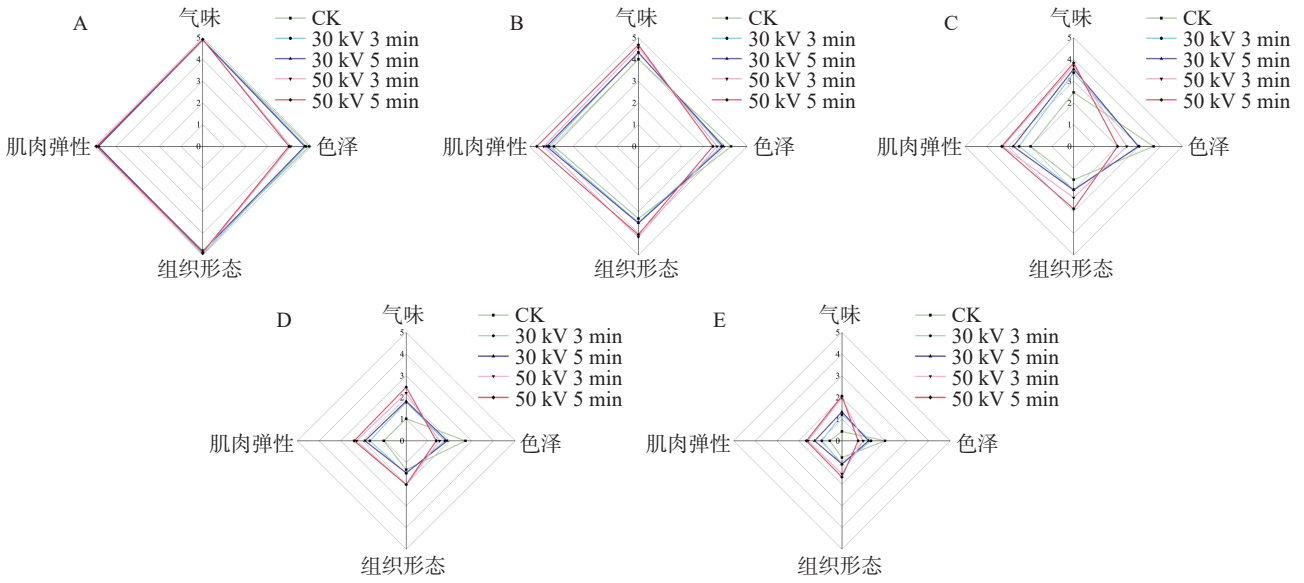


图 2　黄鳍金枪鱼在贮藏期间感官评价的变化

Fig.2　Changes in sensory evaluation of yellowfin tuna during storage

注：A~E 分别表示贮藏 0、2、4、6、8 d 的感官评价。

表 2　黄鳍金枪鱼在贮藏期间色泽的变化

Table 2　Changes in color of yellowfin tuna during storage

色差参数	处理条件	贮藏天数(d)				
		0	2	4	6	8
L^*	CK	33.10±0.08^{Ad}	32.66±0.06^{Bbc}	32.45±0.17^{BCc}	32.26±0.24^{Ca}	31.89±0.13^{Da}
	30 kV 3 min	32.81±0.03^{Ae}	31.81±0.03^{Bc}	31.48±0.01^{Ce}	31.12±0.09^{Db}	30.98±0.09^{Ec}
	30 kV 5 min	33.56±0.08^{Ac}	32.56±0.01^{Bbc}	32.09±0.09^{Cd}	31.34±0.04^{Db}	31.03±0.20^{Ec}
	50 kV 3 min	34.40±0.03^{Ab}	33.35±0.16^{Bab}	32.75±0.01^{Cb}	31.36±0.18^{Db}	31.47±0.20^{Db}
	50 kV 5 min	35.21±0.01^{Aa}	34.32±0.02^{Ba}	33.25±0.16^{Ca}	32.34±0.17^{Da}	31.77±0.20^{Eb}
a^*	CK	7.44±0.15^{Ab}	6.82±0.14^{Ba}	6.03±0.08^{Ca}	5.87±0.06^{Ca}	5.23±0.04^{Da}
	30 kV 3 min	7.49±0.13^{Ab}	6.53±0.02^{Bb}	5.52±0.07^{Cb}	5.07±0.11^{Db}	4.35±0.10^{Eb}
	30 kV 5 min	7.43±0.07^{Ab}	6.61±0.01^{Bb}	5.21±0.17^{Cc}	4.83±0.02^{Db}	4.06±0.12^{Ec}
	50 kV 3 min	7.15±0.10^{Ac}	6.58±0.03^{Bb}	5.17±0.23^{Cc}	4.16±0.02^{Dc}	3.58±0.18^{Ed}
	50 kV 5 min	7.97±0.04^{Aa}	6.46±0.12^{Bb}	4.63±0.02^{Cd}	3.94±0.81^{Dc}	3.16±0.05^{Ee}
b^*	CK	2.72±0.18^{Da}	2.99±0.15^{Cc}	3.42±0.08^{Bd}	3.86±0.03^{Ad}	3.98±0.08^{Ad}
	30 kV 3 min	2.69±0.19^{Da}	3.25±0.12^{Cb}	3.65±0.06^{Bc}	4.23±0.08^{Ac}	4.35±0.17^{Ac}
	30 kV 5 min	2.78±0.17^{Da}	3.14±0.10^{Cbc}	3.73±0.03^{Bc}	4.36±0.19^{Ac}	4.43±0.08^{Ac}
	50 kV 3 min	2.90±0.08^{Ea}	3.45±0.02^{Da}	4.56±0.20^{Cb}	4.97±0.10^{Bb}	5.54±0.12^{Ab}
	50 kV 5 min	2.88±0.01^{Ea}	3.57±0.01^{Da}	5.03±0.05^{Ca}	5.84±0.02^{Ba}	6.02±0.02^{Aa}

注：表中数据以平均值±标准差表示。同一行中A~E表示在同一处理在不同贮藏时间差异显著(P<0.05)，同一列中a~e表示同一贮藏时间内不同处理间差异显著(P<0.05)。

表 2 中可以看出，在 0 d 时 DBD-CP 处理对黄鳍金枪鱼肉的亮度 L^*值产生显著影响(P<0.05)。与 CK 组相比，30 kV 5 min、50 kV 3 min 和 50 kV 5 min 处理组的 L^*值均有所提高，而 30 kV 3 min 处理组的 L^*值略低于 CK 组。这说明高强度的放电处理可能导致肌肉表面光散射增强，使鱼肉表面更为明亮。这一变化可能与等离子体产生的活性粒子瞬时引起表面蛋白质轻微氧化或微观结构变化有关，从而增加光的反射率。CK 组的 L^*值在贮藏期间逐渐下降，从 0 d 的 33.10 降至 8 d 的 31.89，下降了 1.21。所有 DBD-CP 处理组的 L^*值也出现下降趋势，但下降的程度有所不同。特别是 50 kV 5 min 组的初始 L^*值较高(35.21)，但在 8 d 降至 31.77，下降了 3.44。相比之下，30 kV 3 min、30 kV 5 min 和 50 kV 3 min 组的 L^*值变化相对温和，分别从 32.81 降至 30.98、33.56 降至 31.03 和 34.40 降至 31.47，下降了 1.89、2.53 和 2.93。这说明 DBD-CP 处理会加剧金枪鱼肉的 L^*值下降，这与 DBD-CP 处理后会使猪里脊肉的 L^*值降低的研究结果相似[13]。

a^*值表示样品的红色(正值)或绿色(负值)。从表 1 中可以看出，CK 组的 a^*值随着贮藏时间的推移逐渐降低，从 0 d 的 7.44 降至 8 d 的 5.23，下降了 2.21。DBD-CP 处理组在贮藏期间的 a^*值也呈下降趋势，但下降速率有所不同。30 kV 3 min、30 kV 5 min 和 50 kV 3 min 组的 a^*值变化较为温和，30 kV 3 min 组从 0 d 的 7.49 降至 8 d 的 4.35，下降了 3.14；

30 kV 5 min 组从 0 d 的 7.43 降至 8 d 的 4.06, 下降了 3.37; 50 kV 3 min 组从 0 d 的 7.15 降至 8 d 的 3.58, 下降了 3.57。而 50 kV 5 min 组的 a^*值降幅最大, 从 0 d 的 7.97 降至 8 d 的 3.16, 下降了 4.81, 其红度的衰减最为明显。这与 DBD-CP 处理牛肉饼 a^*值下降的结果相似[14]。

b^*值表示样品的黄色(正值)或蓝色(负值)。从表 1 中可以看出, 在 CK 组中, b^*值呈现轻微的上升, 从 0 d 的 2.72 增至 8 d 的 3.98, 上升了 1.26; 50 kV 5 min 组的 b^*值显著上升(P<0.05), 从 0 d 的 2.88 增至 8 d 的 6.02, 上升了 3.14。其它 DBD-CP 处理组的 b^*值呈现相对缓和上升趋势。

肌红蛋白(Myoglobin, Mb)存在于肌肉纤维细胞中, 是金枪鱼中最重要的色素物质[15]。总体来看, DBD-CP 处理显著影响了金枪鱼肉的颜色变化, 这可能是因为 DBD-CP 处理改变了金枪鱼肉中 Mb 的结构, 使金枪鱼肉颜色发生改变。不同的处理条件对颜色的影响有所差异, 特别是 50 kV 的处理条件下, 颜色变化最为显著。这些结果表明, DBD-CP 处理, 特别是在较高电压和较长处理时间下, 会导致金枪鱼肉颜色的明显劣化, 从而影响其外观和消费者的购买意愿。

2.3 DBD-CP 处理对金枪鱼肉质构的影响

如图 3 所示, 所有样品的硬度均随贮藏时间的延长而升高。与 CK 组相比, DBD-CP 处理组硬度值的升高更为明显, 且处理电压和时间越大, 硬度上升越快。其中, 50 kV 5 min 组在 8 d 时硬度最高并显著高于其他组(P<0.05), 这可能是因为 DBD-CP 处理促进肌原纤维蛋白氧化、聚集和交联, 使肌肉纤维结构更加紧密, 这与其它研究人员使用 CP 处理会使带鱼硬度上升的结果相似[16]。

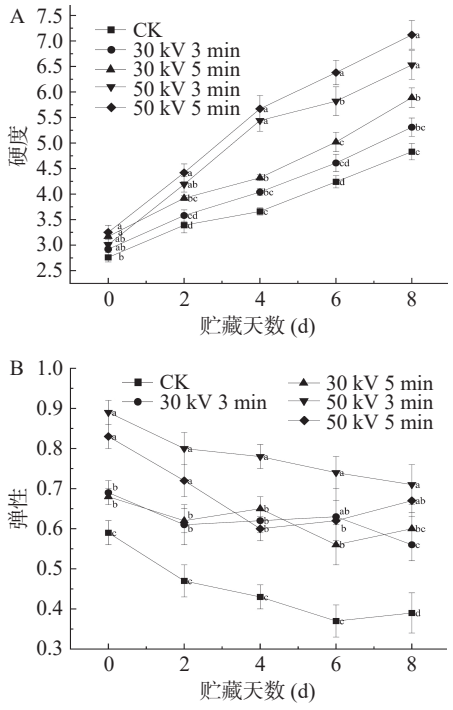


图 3 黄鳍金枪鱼在贮藏期间质构的变化

Fig.3 Changes in texture of yellowfin tuna during storage

注: 不同小写字母表示同一贮藏时间内不同处理间差异显著(P<0.05); 图 4~图 8 同。

所有样品的弹性值随贮藏时间延长整体呈下降趋势, 但 DBD-CP 处理组的弹性下降幅度明显小于 CK 组, 这与其他研究人员使用低温等离子体处理金鲳鱼延缓了鱼肉弹性下降的结果相似[17]。CK 组弹性值在 6 d 降至最低并维持稳定, 而处理组的弹性值在储藏期间仍能维持在较高水平。这可能与贮藏过程中微生物与内源酶的共同作用相关, 微生物的生长代谢不仅加速了肌肉蛋白质的降解, 还伴随水分的消耗, 从而破坏肌肉组织结构, 导致弹性下降, 而 DBD-CP 处理通过抑制微生物繁殖和降低内源酶活性, 延缓了蛋白质降解与组织结构破坏的过程, 从而减缓了弹性的下降[18]。

总的来说, DBD-CP 处理增加了储藏期间硬度的上升速率, 并有效延缓了弹性的下降, 改善了金枪鱼肉的质构稳定性。处理电压和时间的不同对质构变化的调节作用也表现出一定规律: 高电压、长时间处理在保持弹性方面效果更优, 同时能适度促进硬度上升, 从而提升储藏期的整体食用品质。

2.4 DBD-CP 处理对金枪鱼肉 pH 的影响

pH 是反映鱼肉酸碱程度的指标, 也是反映鱼肉品质的指标之一。如图 4 所示, CK 组和 DBD-CP 处理组的 pH 在贮藏期间均呈先下降后上升的趋势, 这与其它的研究结果相似[19]。从 0 d 到 2 d CK 组与 DBD-CP 处理组 pH 下降可能是因为鱼肉中糖原经酵解代谢产生乳酸, 随着乳酸在组织中的逐渐积累, 以及 ATP 酶活性的增强, 促使 ATP 水解释放出 H^+, 从而导致 pH 下降[20]。DBD-CP 处理组的 pH 下降更为剧烈的原因可能是低温等离子体处理会在处理介质中产生多种活性氧(ROS)和氮(RNS)物质, 如 O_3、NO、NO_2、H_2O_2 等。这些物质在肉类表面水分作用下, 可形成酸性化合物(如硝酸和亚硝酸等), 从而导致鱼肉 pH 下降[21−22]。从贮藏的 2 d 至 8 d pH 上升的原因可能是鱼肉中的蛋白质、氨基酸等物质分解产生挥发性碱性含氮物质, 这些物质使得鱼

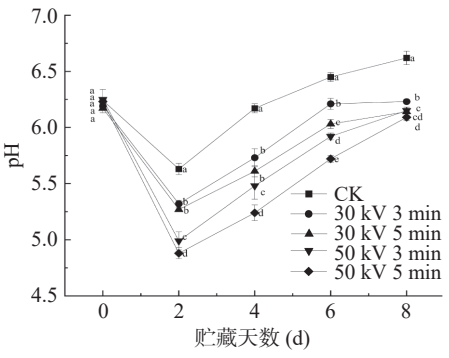


图 4 黄鳍金枪鱼在贮藏期间 pH 的变化

Fig.4 Changes in pH of yellowfin tuna during storage

肉的 pH 上升。在整个贮藏期间 DBD-CP 处理组 pH 都低于 CK 组，其中 50 kV 5 min 的 pH 最低，这可能是由于更大电压和处理时间的 DBD-CP 处理能产生更多的活性物质从而更能抑制微生物的生长，使微生物对蛋白质的分解作用减缓，从而降低了挥发性碱性氮物质的生成。

2.5　DBD-CP 处理对金枪鱼肉持水力的影响

持水力（WHC）是指肌肉组织在不受或在受外力作用下，保持其内在水分或结合外来水分的能力，产品的持水性会影响质构等性质，是反映鱼肉品质的重要指标之一。如图 5 所示，所有 CK 组和 DBD-CP 处理组的持水力均呈现随贮藏时间延长而逐渐下降的趋势，这可能是因为鱼肉的持水力与其汁液流失率密切相关，随着贮藏时间的延长，鱼肉中的水分逐渐流失或挥发，导致组织保水能力下降，从而引起持水力降低，此外，蛋白质在蛋白酶活性及微生物增殖的共同作用下发生变性与水解反应，破坏肌肉组织的结构完整性，减少肌纤维间水分的结合与储存空间，进一步加剧了持水力的下降[23]。但处理组的下降幅度显著小于对照组（P<0.05），尤其在贮藏后期（6~8 d）表现出更好的持水能力，这可能是因为 DBD-CP 处理会对鱼肉组织产生直接或间接作用。有实验表明，DBD-CP 处理可导致肌原纤维结构破坏和退化，如猪肉经过 DBD-CP 处理后，肌原纤维断裂指数升高，这种结构破坏使得肌肉纤维间隙增大，为肌肉组织保留更多的游离水提供空间，从而提高了持水能力[24]。也有研究表明 CP 处理能使带鱼保持更好的持水力[16]。

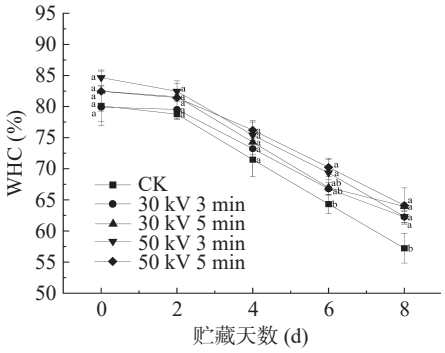


图 5　黄鳍金枪鱼在贮藏期间持水力的变化

Fig.5　Changes in WHC of yellowfin tuna during storage

2.6　DBD-CP 处理对金枪鱼肉硫代巴比妥酸值（TBA）的影响

TBA 反映鱼肉在贮藏期间脂肪酸被氧化产生的丙二醛等二级氧化产物含量，可以用于衡量脂质的氧化程度[25]，也是反映鱼肉品质的重要指标之一。如图 6 所示，所有 CK 组和 DBD-CP 处理组的 TBA 值均随贮藏时间延长而显著增加，反映出鱼肉在贮藏过程中不断发生脂质氧化。但是 DBD-CP 处理组的 TBA 值总体高于对照组，且随着处理电压和处理时间的增加，TBA 值升高更加明显。其中，50 kV 5 min组的 TBA 值在整个贮藏期间均为最高，在 0 d 时为 0.55 mg/kg，到 8 d 时达到 2.27 mg/kg，上升了 1.72。其他处理组的 TBA 值上升趋势相对温和，30 kV 3 min、30 kV 5 min 和 50 kV 3 min 分别从 0 d 时的 0.30、0.28 和 0.38 mg/kg 上升到 8 d 时的 1.73、1.64 和 1.89 mg/kg，上升了 1.43、1.36 和 1.51。而 CK 组在 0 d 时仅为 0.22 mg/kg 到 8 d 时达到 1.33 mg/kg，仅上升了 1.11。这表明 DBD-CP 处理强度越高，脂质氧化速度越快。这可能是因为 DBD-CP 处理产生的活性氧（ROS）和氮（RNS）物质促进脂质氧化[26]。也有研究表明 CP 处理会使三文鱼寿司的 TBA 值上升[27]。

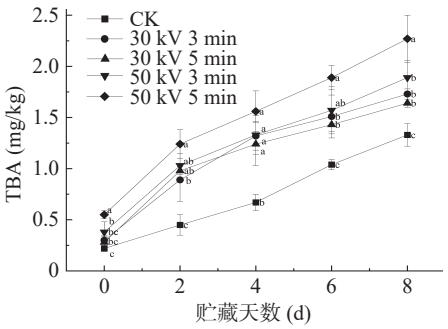


图 6　黄鳍金枪鱼在贮藏期间 TBA 值的变化

Fig.6　Changes in TBA of yellowfin tuna during storage

2.7　DBD-CP 处理对金枪鱼肉总挥发性盐基氮值（TVB-N）的影响

总挥发性盐基氮值（TVB-N）是评价水产品新鲜度的关键指标之一。在贮藏过程中，受内源性酶促水解及微生物代谢的共同作用，鱼肉中会产生氨、胺等挥发性碱性含氮化合物，这些化合物是引发腐败异味的主要原因[28]。TVB-N 含量越高，腐败程度越严重，TVB-N 含量达到 25 mg/100 g 以上则不可生食[29]。

如图 7 所示，所有 DBD-CP 处理组及 CK 组的 TVB-N 含量均随贮藏时间的延长呈上升趋势，表明在贮藏期间，金枪鱼肉发生了蛋白质分解和氨基酸脱氨作用，产生了更多挥发性盐基氮类物质。CK 组的 TVB-N 增长幅度最高，到 8 d 时 TVB-N 含量达到最高值（50.16 mg/100 g），显著高于各处理组（P<0.05）。根据金枪鱼肉可生食的标准（TVB-N 小于 25 mg/

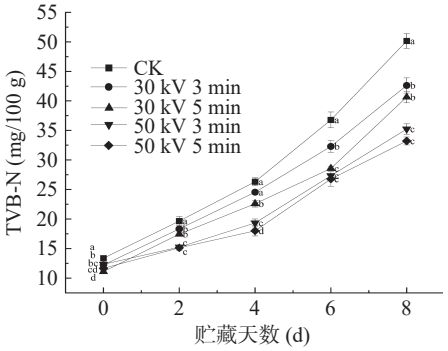


图 7　黄鳍金枪鱼在贮藏期间 TVB-N 的变化

Fig.7　Changes in TVB-N of yellowfin tuna during storage

100 g)，CK 组的 TVB-N 含量在 4 d 就超过了该限值，而经过 DBD-CP 处理的各组则有效延缓了 TVB-N 的上升速度，所有处理组的 TVB-N 在 4 d 仍保持在 25 mg/100 g 以下。所有处理组的 TVB-N 在 6 d 时才超过该限值，这表明就 TVB-N 这单一指标而言，DBD-CP 处理能够延长金枪鱼肉的货架期。

随着处理电压和时间的增加，TVB-N 含量的增长速率进一步减缓。其中，50 kV 5 min 组效果最佳，在整个储藏期内 TVB-N 均保持最低水平。这可能是由于高电压、长时间 DBD-CP 处理更有效地抑制了鱼肉中的微生物的生长繁殖，从而降低了挥发性碱性氮物质的生成[30]。

综上所述，低温等离子体处理在延缓金枪鱼肉腐败、降低 TVB-N 含量及延长可生食货架期方面具有应用潜力，且增加处理电压与时间可进一步增强保鲜效果。

2.8 DBD-CP 处理对金枪鱼肉菌落总数（TBC）的影响

菌落总数(TBC)是衡量水产品微生物污染水平及其新鲜度和安全性的关键指标，能够直接反映贮藏期间微生物生长繁殖情况。根据 SC/T 3117-2006《生食金枪鱼》标准，生食金枪鱼中菌落总数超过 4.00 lg CFU/g 时不可食用。如图 8 所示，所有 DBD-CP 处理组及 CK 组的 TBC 均随储藏时间延长而显著上升(P<0.05)，表明随着储藏进程的推进，鱼肉中微生物持续繁殖。然而，相比 CK 组，DBD-CP 处理组菌落总数增长速率明显减缓，显示出一定的抑菌效果。具体而言，CK 组的 TBC 在 8 d 时达到最高值(7.12 lg CFU/g)，并且在 2 d(4.46 lg CFU/g)就达到了 4.00 lg CFU/g 的限值。就 TBC 这个单一指标而言，30 kV 3 min 组在 4 d 时(4.42 lg CFU/g)超过了可生食的限值，而 30 kV 5 min 和 50 kV 3 min 组能将超过可生食的限值的时间延后至 6 d，50 kV 5 min 组则可将超过限值的时间延后至 8 d。这表明就 TBC 这单一指标而言，DBD-CP 处理能够延长金枪鱼肉的货架期。

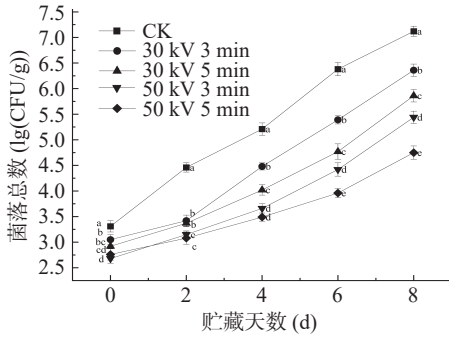


图 8 黄鳍金枪鱼在贮藏期菌落总数的变化

Fig.8 Changes in TBC of yellowfin tuna during storage

从不同处理强度来看，随着处理电压和处理时间的增加，菌落总数的上升速率进一步被抑制，其中 50 kV 5 min 组效果最佳，在整个储藏期间菌落总数始终最低。这可能与较高强度 DBD-CP 处理能产生更多的活性物质对微生物细胞壁、细胞膜结构有更强的破坏使微生物灭活有关[31]。

综上所述，DBD-CP 处理能够有效抑制金枪鱼肉冷藏过程中的微生物生长，减缓菌落总数的上升趋势，延缓产品腐败，延长货架期，且 50 kV 5 min 灭菌效果最好。

3 结论

本研究系统评估了介质阻挡放电低温等离子体(DBD-CP)对黄鳍金枪鱼肉冷藏品质的影响。结果表明，DBD-CP 处理显著改善了金枪鱼在贮藏期间的感官品质，抑制了鱼肉中微生物的生长，延缓了总挥发性盐基氮(TVB-N)和菌落总数的上升，因而有效地将超过货架期终点的时间延长 2 d。处理组样品在整个贮藏过程中水分流失减缓，持水力下降幅度明显小于对照组，处理组硬度增加，弹性保持较高水平，改善了质构稳定性。然而，DBD-CP 处理也带来了不可忽视的负面影响。与 CK 组相比，处理组金枪鱼肉的颜色发生了明显劣化：亮度(L^*)和红度(a^*)显著下降，黄色(b^*)则呈上升趋势，尤其是 50 kV 5 min 组效果最为显著。同时，处理组的硫代巴比妥酸值(TBA)显著升高，反映出脂质氧化程度加剧。由此可见，尽管 DBD-CP 在抑菌保鲜方面表现出色，但其引发的颜色变化和脂质氧化等副作用需予以重视。在不同处理参数比较上，较高电压与更长处理时间(50 kV 5 min)组获得了最佳抑菌和保鲜效果，在整个储藏期内 TVB-N 和菌落总数均保持最低水平。相比之下，30 kV 组虽然抑菌效果稍差，但肉色保留较好，氧化程度较低。因此，综合考虑保鲜效果与感官品质，50 kV 5 min 处理条件虽抑菌保鲜效果最佳，但应权衡其较强的负面影响。

综上所述，DBD-CP 技术作为一种非热、高效且环境友好的保鲜手段，在延长黄鳍金枪鱼货架期方面具有显著优势和应用潜力，但其在一定条件下可能加剧金枪鱼肉的颜色劣化和脂质过氧化。因此，后续研究有必要在优化处理参数的基础上，结合抗氧化工艺与包装方式，并引入组胺含量及特定致病菌的监测，以更加全面地评估低温等离子体技术在生食金枪鱼保鲜中的安全性与工业应用可行性。

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

参考文献

[1] 程静安, 王迪, 于刚, 等. 不同减菌处理对黄鳍金枪鱼贮藏期间品质的影响[J]. 广东海洋大学学报, 1−9[2025-09-01]. https://link.cnki.net/urlid/44.1635.N.20250812.1109.002. [CHENG Jingan, WANG Di, YU Gang, et al. Effects of different bacterial reduction treatment on quality of *Thunnus albacares* during storage [J]. Journal of Guangdong Ocean University, 1−9[2025-09-01].

https://link.cnki.net/urlid/44.1635.N.20250812.1109.002.］
［2］ 高飞, 徐剑宏, 王晋, 等. 金枪鱼营养价值及加工现状研究进展[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(15): 212−218. ［GAO Fei, XU Jianhong, WANG Jin, et al. Research progress on the nutritional value and processing status of tuna[J]. Food Research and Development, 2023, 44(15): 212−218.］
［3］ 马锦涛, 霍健聪. 普通冻藏温度下金枪鱼生鱼片中特定腐败菌筛选及货架期预测模型研究[J]. 浙江海洋大学学报(自然科学版), 2020, 39(5): 409−414. ［MA Jintao, HUO Jiancong. Study on special putrid bacteria during common cold storage and predictive model of shelf-life tuna sashimi[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2020, 39(5): 409−414.］
［4］ 王馨云. 冷藏条件下金枪鱼品质变化与水分迁移的相关性研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020. ［WANG Xinyun. Correlation analysis between quality changes and water migration of tuna during cold storage[D] Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020.］
［5］ HAN L, ZIUZINA D, HESLIN C, et al. Controlling microbial safety challenges of meat using high voltage atmospheric cold plasma[J]. Frontiers in Microbiology, 2016, 7: 977.
［6］ JAYASENA D D, KIM H J, YONG H I, et al. Flexible thin-layer dielectric barrier discharge plasma treatment of pork butt and beef loin: Effects on pathogen inactivation and meat-quality attributes[J]. Food Microbiology, 2015, 46: 51−57.
［7］ ALBERTOS I, MARTÍN-DIANA A B, CULLEN P J, et al. Effects of dielectric barrier discharge (DBD) generated plasma on microbial reduction and quality parameters of fresh mackerel (*Scomber scombrus*) fillets[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 44: 117−122.
［8］ BARJASTEH A, KAUSHIK N, CHOI E H, et al. Cold atmospheric pressure plasma solutions for sustainable food packaging[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2024, 25(12): 6638.
［9］ 徐迪莎, 丁怡萱, 廖月琴, 等. 低温等离子体对蓝圆鲹在冷藏过程中的品质影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(13): 266−273. ［XU Disha, DING Yixuan, LIAO Yueqin, et al. Effects of atmospheric cold plasma on the quality of *Decapterus maruadsi* in cold storage process[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2023, 14(13): 266−273.］
［10］ CHEN J, WANG S Z, CHEN J Y, et al. Effect of cold plasma on maintaining the quality of chub mackerel (*Scomber japonicus*): Biochemical and sensory attributes[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(1): 39−46.
［11］ 李念文, 汤元睿, 谢晶, 等. 物流过程中大眼金枪鱼(*Thunnus obesus*)的品质变化[J]. 食品科学, 2013, 34(14): 319−323. ［LI Nianwen, TANG Yuanrui, XIE Jing, et al. Physicochemical quality properties of *Thunnus obesus* during logistical process[J]. Food Science, 2013, 34(14): 319−323.］
［12］ MANCINI R A, HUNT M C. Current research in meat color[J]. Meat Science, 2005, 71(1): 100−121.
［13］ KIM H J, YONG H I, PARK S, et al. Effects of dielectric barrier discharge plasma on pathogen inactivation and the physicochemical and sensory characteristics of pork loin[J]. Current Applied Physics, 2013, 13(7): 1420−1425.
［14］ WANG X, WANG Z, ZHUANG H, et al. Changes in color, myoglobin, and lipid oxidation in beef patties treated by dielectric barrier discharge cold plasma during storage[J]. Meat Science, 2021, 176: 108456.
［15］ SINGH A, BENJAKUL S, ZHOU P, et al. Effect of squid pen chitooligosaccharide and epigallocatechin gallate on discoloration and shelf-life of yellowfin tuna slices during refrigerated storage[J]. Food Chemistry, 2021, 351: 129296.
［16］ KODDY J K, MIAO W, HATAB S, et al. Understanding the role of atmospheric cold plasma (ACP) in maintaining the quality of hairtail (*Trichiurus lepturus*)[J]. Food Chemistry, 2021, 343: 128418.
［17］ CAI Z, WANG J, LIU C, et al. Effects of high voltage atmospheric cold plasma. Treatment on the number of microorganisms and the quality of *Trachinotus ovatus* during refrigerator storage[J]. Foods, 2022, 11(17): 2706.
［18］ 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]. 舟山: 浙江海洋大学, 2022. ［TANG Lingling. Study on the control and mechanism of atmospheric cold plasma on muscle autolysis of *Litopenaeus vannamei*[D] Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2022.］
［19］ 陈家盛, 宫玉婷, 董依雪, 等. 低温等离子体处理对冰鲜鱿鱼品质特性的影响[J]. 食品工业, 2021, 42(5): 231−235. ［CHEN Jiasheng, GONG Yuting, DONG Yixue, et al. Effect of plasma treatment on quality characteristics of chilled squid[J]. The Food Industry, 2021, 42(5): 231−235.］
［20］ ERIKSON U, MISIMI E, GALLART-JORNET L. Superchilling of rested Atlantic salmon: Different chilling strategies and effects on fish and fillet quality[J]. Food Chemistry, 2011, 127(4): 1427−1437.
［21］ JOHNSON ESUA O, CHENG J H, SUN D W. Novel technique for treating grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) by combining plasma functionalized liquids and ultrasound: Effects on bacterial inactivation and quality attributes[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 76: 105660.
［22］ 岑南香, 刘宸成, 陈姑, 等. 低温等离子体处理对羊肉脂质与蛋白质氧化性质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(14): 85−93. ［CEN Nanxiang, LIU Chencheng, CHEN Gu, et al. Effects of cold plasma treatments on lipids and protein oxidation properties of mutton[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(14): 85−93.］
［23］ 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 Yingying, XU Yanshun, XIA Wenshui, et al. Changes in physicochemical and sensory quality of fermented fish during storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(17): 286−291.］
［24］ LUO J, XU W, LIU Q, et al. Dielectric barrier discharge cold plasma treatment of pork loin: Effects on muscle physicochemical properties and emulsifying properties of pork myofibrillar protein [J]. LWT, 2022, 162: 113484.
［25］ GUO J, HUANG K, WANG J. Bactericidal effect of various non-thermal plasma agents and the influence of experimental conditions in microbial inactivation: A review[J]. Food Control, 2015, 50: 482−490.
［26］ JOSHI S G, COOPER M, YOST A, et al. Nonthermal dielectric-barrier discharge plasma-induced inactivation involves oxidative DNA eamage and membrane lipid peroxidation in *Escherichia coli*[J]. Antimicrobial Agents and Chemotherapy, 2011, 55(3): 1053−1062.
［27］ KULAWIK P, ALVAREZ C, CULLEN P J, et al. The effect of non-thermal plasma on the lipid oxidation and microbiological quality of sushi[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018, 45: 412−417.
［28］ FAN W, SUN J, CHEN Y, et al. Effects of chitosan coating on quality and shelf life of silver carp during frozen storage[J]. Food Chemistry, 2009, 115(1): 66−70.
［29］ 朱文嘉, 郭莹莹, 姚琳, 等. 生食金枪鱼行业标准解读[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(24): 9590−9596. ［ZHU Wenjia, GUO Yingying, YAO Lin, Interpretation for the industrial standard of the *Thunnus obesos* Forraw consumption[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2021, 12(24): 9590−9596.］
［30］ OCAÑO-HIGUERA V M, MAEDA-MARTÍNEZ A N, MARQUEZ-RÍOS E, et al. Freshness assessment of ray fish stored in ice by biochemical, chemical and physical methods[J]. Food Chemistry, 2011, 125(1): 49−54.
［31］ 蓝蔚青, 陈雪宁, 谢晶. 低温等离子体技术在水产品保鲜中的应用研究进展[J]. 肉类研究, 2022, 36(6): 60−66. ［LAN Weiqing, CHEN Xuening, XIE Jing. Recent progress of cold plasma technology in the preservation of aquatic products[J]. Meat Research, 2022, 36(6): 60−66.］