

低温等离子体耦合微酸性电解水对三文鱼的保鲜作用

朱文慧¹, 谭桂芝^{1,2}, 步营¹, 李学鹏¹, 励建荣^{1*}, 崔方超¹, 檀茜倩¹,
孟玉琼³, 马睿³, 郭晓华⁴

(¹渤海大学食品科学与工程学院 辽宁省高校重大科技平台“食品贮藏加工及质量安全控制工程技术研究中心”
辽宁锦州 121013

²海洋食品精深加工关键技术省部共建协同创新中心 大连工业大学 辽宁大连 116034

³青海大学 西宁 810016

⁴山东美佳集团有限公司 山东日照 276800)

摘要 采用单因素和 Box-Behnken 响应面试验优化低温等离子耦合微酸性电解水对三文鱼杀菌的工艺条件,通过菌落总数、pH 值、挥发性盐基氮(TVB-N)、硫代巴比妥酸反应产物(TBARS)值、羰基含量和色差等指标比较等离子体活化水、微酸性电解水及低温等离子体耦合微酸性电解水对三文鱼 4℃贮藏的保鲜效果。结果显示,当低温等离子体活化时间 5 min,功率 320 W,浸泡时间 20 min,有效氯质量浓度 50 mg/mL,料液比 1:6 时杀菌效果最优,均可延长三文鱼贮藏期,而低温等离子体耦合微酸性电解水更有利于缓解脂肪和蛋白氧化。本研究为水产品保鲜提供了新思路。

关键词 三文鱼; 杀菌; 低温等离子体; 微酸性电解水; 保鲜

文章编号 1009-7848(2024)02-0228-11 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.02.022

三文鱼被誉为“水中珍品”,营养丰富,在世界各地备受欢迎。然而,在加工、贮藏运输及销售过程中新鲜三文鱼很容易被微生物污染,从而导致其新鲜度变差,营养价值降低或腐败变质^[1]。微生物增殖是造成三文鱼腐败变质的主要原因,因此迫切需要找到能有效灭活三文鱼体的微生物,并能保持其良好品质的方法。热处理虽可以杀死微生物,但会对食品的物理化学性质及感官品质产生不良影响;而高压二氧化碳、超声波、冷等离子体、电子束辐照和脉冲电场技术等非热食品加工技术既可以灭活微生物,延长保质期,又能最大程度上保持肉的良好品质属性^[2]。

近年来,低温等离子体(Cold plasma, CP)已成为国内外食品冷杀菌的研究热点。低温等离子体中产生的多种活性物质,如羟自由基、过氧化氢、活性氧和活性氮等是导致微生物失活的主要原因^[3]。然而,低温等离子体技术不能对产品表面进行均匀处理^[4],产生的活性物质也会加速脂质氧

化^[5]。低温等离子体装置通过在水表面或水面下进行等离子体放电,就可以制出等离子体活化水(Plasma activated water, PAW),当 CP 与不同液体介质相互作用时,会发生各种复杂的化学反应,导致反应物种的产生,处理溶液的 pH 值、氧化还原电位和电导率等物理化学性质会发生巨大变化^[6]。与传统的低温等离子体技术相比,PAW 具有灵活、安全等优点,能对产品表面进行均匀杀菌处理,目前已广泛应用于肉、新鲜农产品和鱼等产品中^[7]。微酸性电解水(Slightly acidic electrolyzed water, SAEW)是通过电解氯化钠溶液或稀盐酸溶液而产生的一种新型的消毒剂^[8],具有强杀菌能力,低成本,方便制取等特点,被广泛用于鸡蛋、肉类、水果和水产品等的杀菌^[9]。于福田等^[10]研究发现有效氯质量浓度为 35.00 mg/L、浸泡时间为 22 min、料液比为 1:6 时,微酸性电解水对新鲜罗非鱼片的杀菌率为(81.59±0.04)%,且对品质的影响最小。另一些研究表明,微酸性电解水可以促进脂肪氧化和蛋白质氧化,这可能与其所含的活性物质(HOCl, Cl₂ 和 OCl⁻)的浓度有关^[11]。对于非热杀菌技术,如何在保证高杀菌效果的前提下,有效防止产品的脂肪氧化和蛋白氧化,是迫切需要解决的问题。

收稿日期: 2023-02-15

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目
(2019YFD0901702)

第一作者: 朱文慧,女,博士,副教授

通信作者: 励建荣 E-mail: lij6491@163.com

本研究以菌落总数为指标,通过单因素实验和响应面优化低温等离子体耦合微酸性电解水对三文鱼的最佳杀菌条件,并对比研究等离子体活化水、微酸性电解水及低温等离子体耦合微酸性电解水对三文鱼冷藏期间的抑菌效果、脂肪氧化、蛋白质氧化及品质变化的影响。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

三文鱼,山东日照鼎好食品有限公司。通过冷链运输至实验室于-80℃冷藏。平板计数琼脂,青岛海博生物技术有限公司。氯化钠、硫代硫酸钠、丙二醛、碘化钾、三氯乙酸、无水乙醇等试剂均为分析纯级。

1.2 仪器与设备

TS-APJ03 低温喷射等离子体,深圳市东信高科自动化设备有限公司;微酸性电解水发生器,丹麦 DCW 公司;PHS-3C pH 计,上海仪电科学仪器股份有限公司;K9840 海能凯氏定氮,海能未来技术集团股份有限公司;CR-400 色差计,日本 Konica-Minolta 公司;UV-2550 紫外-可见分光光度计,日本岛津公司。

1.3 方法

1.3.1 单因素条件对杀菌效果的影响 室温条件下,以菌落总数为指标,以功率(160,220,300,380 W),活化时间(1,3,5,7 min),料液比(1:2,1:4,1:6,1:8),浸泡时间(5,10,15,20,25 min),有效氯质量浓度(10,20,30,40,50 mg/L)为单因素,考察不同条件下低温等离子体耦合微酸性电解水对杀菌效果的影响。

1.3.2 响应面法优化低温等离子体耦合微酸性电解水杀菌效果的试验设计 利用 Design-Expert 10.0 软件上的 Box-Behnken 功能模块,在单因素实验结果的基础上进行了响应面优化设计,以活化时间、低温等离子体功率、浸泡时间为因变量,菌落总数为响应值,试验因素和水平如表 1 中所示。

1.3.3 低温等离子体耦合微酸性电解水(PASW)的制备和样品处理

1.3.3.1 PAW 的制备 大气压等离子体射流在冰水浴中活化蒸馏水(400 mL)。

表 1 Box-Behnken 试验因素水平

因素	水平		
	-1	0	1
功率(A)/W	220	300	380
浸泡时间(B)/min	15	20	25
活化时间(C)/min	3	5	7

1.3.3.2 SAEW 的制备 由 DCW 微酸性电解水发生器制备,其中 SAEW 的 pH 值、氧化还原电位和有效氯质量浓度分别为 6.09,810 mV 和 50 mg/L。

1.3.3.3 PASW 的制备 大气压等离子体射流在冰水浴中活化 SAEW(400 mL)。

1.3.3.4 样品前处理 将三文鱼浸没在含有不同溶液(PAW、SAEW、PASW)的无菌袋中,置于 4℃ 冰箱贮藏,分别记为 PAW、SAEW、PASW 处理组,PASW 处理组按照响应面最优结果处理,SAEW 与 PAW 的处理条件与 PASW 一致,新鲜三文鱼设为对照组。

1.3.4 菌落总数测定 按照 GB 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》中的方法测定。

1.3.5 pH 值测定 参考 GB 5009.237-2016《食品安全国家标准 食品 pH 值的测定》中的方法测定。

1.3.6 TVB-N 测定 参考 GB 5009.228-2016《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》中的方法测定,样品中 TVB-N 含量(X)按照下式计算^[12]。

$$X(\text{mg}/100\text{ g}) = \frac{V_1 - V_2 \times c \times 14}{m} \times 100 \quad (1)$$

式中, V_1 ——样品消耗盐酸体积,mL; V_2 ——空白消耗盐酸体积,mL; m ——样品质量,g; c ——盐酸浓度,mol/L。

1.3.7 TBARS 值和羰基测定 TBARS 值和羰基含量参考 Zhu 等^[13]的方法测定。

1.3.8 色差测定 取适量的鱼片用色差计进行检测并读取 L^* 、 a^* 、 b^* 值。每组做 6 次平行。

1.3.9 数据处理与分析 数据采用 SPSS 19.0 软件进行显著性分析,多重比较采用 Duncan 检验。响应面模型拟合采用 Design-Expert 10.0 软件统

计分析。

2 结果与分析

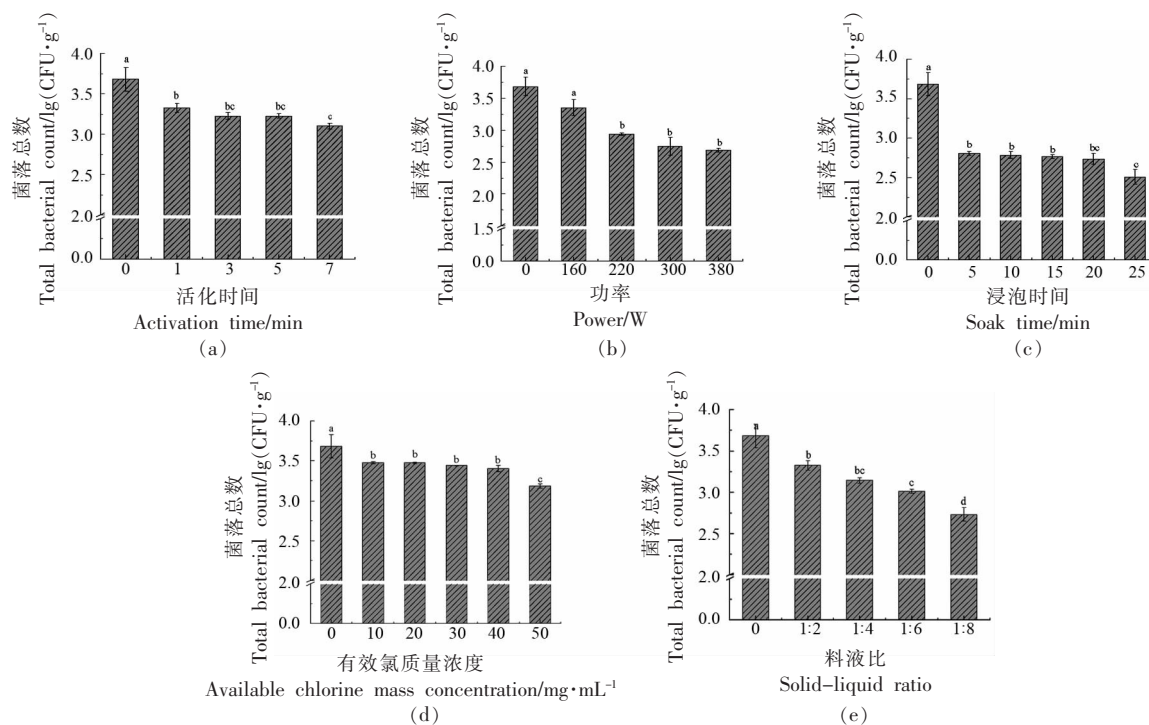
2.1 单因素实验结果与分析

以浸泡时间 20 min、料液比 1:6、有效氯质量浓度 50.00 mg/L 和功率 300 W 为条件进行实验,研究了不同活化时间处理对菌落总数 (Total viable count, TVC) 的影响。如图 1a 所示,随着活化时间的延长, TVC 逐渐减少, 3 min 和 5 min 时 TVC 差异不大, 在 5~7 min 时变化比较平缓。因此,选取 5 min 为 0 水平进行响应面试验。

以料液比 1:6、有效氯质量浓度 50.00 mg/L、浸泡时间 20 min,活化时间 5 min 进行实验,研究不同低温等离子体活化功率影响结果。如图 1b 所示,经不同功率处理的三文鱼的 TVC 明显少于对照组,且随功率的增加, TVC 显著降低,当功率为 300 W 时, TVC 减少了 0.93 lg(CFU/g),当功率为 380 W 时, TVC 减少了 1.00 lg(CFU/g)。因此,选取 300 W 为 0 水平进行响应面试验。

以料液比 1:6、功率 300 W、有效氯质量浓度 50.00 mg/L、活化时间 5 min 进行实验,研究不同浸泡时间影响。结果如图 1c 所示,随着浸泡时间的延长 TVC 逐渐减少,在 0~5 min TVC 的量明显降低,而在 5~20 min 变化比较平缓,在浸泡时间为 20 min 时,细菌总数减少了 0.95 lg(CFU/g),在浸泡时间为 25 min 时, TVC 减少了 1.17 lg(CFU/g)。因此,20 min 为 0 水平进行响应面试验。

以料液比 1:6、浸泡时间 20 min、功率 300 W、活化时间 5 min 进行实验,研究不同有效氯质量浓度的影响。结果如图 1d 所示,随着有效氯质量浓度的不断增加,鱼肉中的 TVC 不断减少,在有效氯质量浓度为 10~40 mg/L 时 TVC 变化不明显,可能是因为等离子体的激发过程中对微酸性电解水中的活性物质产生了一定的消减。有研究表明随着微酸性电解水有效氯浓度的增大,会对鱼肉的颜色产生一定的影响。在本试验中有效氯质量浓度为 50.00 mg/L 时,未发现低温等离子体活化微酸性电解水对三文鱼颜色有影响,因而选择



注:不同小写字母表示组间差异显著($P < 0.05$),下同。

图1 活化时间(a)、功率(b)、浸泡时间(c)、有效氯质量浓度(d)、料液比(e)对三文鱼菌落总数的影响
Fig.1 Effects of activation time (a), power (b), soak time (c), available chlorine concentration (d), solid-liquid ratio (e) on total viable counts of salmon

有效氯质量浓度为 50.00 mg/L 进行后续试验。

以活化时间 5 min、功率 300 W、浸泡时间 20 min、有效氯质量浓度 50.00 mg/L 进行实验,研究不同料液比的影响。如图 1e 所示,随料液比量的不断增大,鱼肉的 TVC 逐渐减少($P < 0.05$),当料液比为 1:6 和 1:8 时,TVC 分别减少了 0.67 lg(CFU/g)和 0.98 lg(CFU/g)。随着料液比的增大,鱼片可充分地活化水接触,从而有助于减菌,而比例增大会对导致三文鱼产生一定的褪色,因而选择 1:6 进行后续试验。

2.2 Box-Behnken 试验结果分析

2.2.1 模型建立与方差分析

低温等离子体耦合微酸性电解水杀菌 Box-Behnken 试验结果如表 2 所示,对表 2 中的数据分析,得到二次多项式拟回归方程: $Y = 2.91 - 0.09A + 0.01B - 0.1C - 0.03AB + 0.07AC + 0.01BC + 0.15A^2 - 0.04B^2 + 0.13C^2$ (其中, Y :杀菌对数值, A :功率, B :浸泡时间, C :活化时间)。在响应面建模、拟合和优化过程中所产生的误差会影响模型的可行性,当模型中的 $P < 0.05$,并且失拟项值 > 0.05 时证明该模型可行^[14]。由表 3 可知,试验模型极显著($P < 0.01$),失拟项 P 值为 0.173 > 0.05 ,不显著,说明该模型与实际情况拟合良好;模型的 $R^2 = 0.97$, $R^2_{adj} = 0.97$,证明该模型拟合程度良好,适用于优化菌落总数杀菌效果^[15]。

由表 3 方差分析可知,各因素对菌落总数指标的影响顺序依次为:功率(A) $>$ 活化时间(C) $>$ 浸

泡时间(B)。一次项 A 、 C ,二次项 A^2 、 C^2 ,交互项 AC 对菌落总数影响极显著($P < 0.01$),交互项 AB 对菌落总数影响显著($P < 0.05$);而浸泡时间(B)、浸泡时间与活化时间(BC)之间的交互性对其响应值影响不显著($P > 0.05$)。

2.2.2 交互作用分析

图 2 为低温等离子体耦合微酸性电解水功率、浸泡时间、活化时间的两两交互项对试验结果的影响图。各因素及其交互作用对 TVC 含量的影响可以通过响应面及其等高线图直观的反映出来,响应面图的曲线越陡峭,说明这 3 个因素的相互作用就越显著^[16]。由图 2 可知,功率与浸泡时间(AB)、功率与活化时间(BC)响应面坡度较为陡峭,说明功率与浸泡时间、功率与活化时间之间交互作用大,对试验结果的影响显著;浸泡时间与活化时间的响应面坡度较为平缓,说明浸泡时间与活化时间之间的交互作用对试验结果的影响不显著。

2.2.3 回归模型最优解的确定与验证

通过响应面模型优化低温等离子体耦合微酸性电解水杀菌条件,预测得最优参数为:功率 318 W,浸泡时间 19.33 min,活化时间 5.44 min。结合实际将模型最优解修正为:功率 320 W,浸泡时间 20 min,活化时间 5 min。在此条件下经过 3 次平行试验,试验结果与预测值基本一致(见表 4),说明采用响应面优化得到的低温等离子体耦合微酸性电解水处理三文鱼鱼片的杀菌工艺参数准确可靠,具有可行性。

表 2 Box-Behnken 试验设计结果

Table 2 Box-Behnken test design and results

编号	功率/ W	浸泡时间/ min	活化时间/ min	菌落总数/lg (CFU·g ⁻¹)	编号	功率/ W	浸泡时间/ min	活化时间/ min	菌落总数/lg (CFU·g ⁻¹)
1	380	20.0	7.00	3.10	10	300	15.0	3.00	3.10
2	300	20.0	5.00	2.89	11	380	25.0	5.00	2.90
3	300	20.0	5.00	2.90	12	220	20.0	7.00	3.13
4	300	20.0	5.00	2.91	13	380	20.0	3.00	3.09
5	300	25.0	3.00	3.09	14	220	15.0	5.00	3.07
6	300	20.0	5.00	2.90	15	300	15.0	7.00	2.89
7	300	25.0	7.00	2.91	16	380	15.0	5.00	2.94
8	220	25.0	5.00	3.16	17	220	20.0	3.00	3.39
9	300	20.0	5.00	2.94					

表3 回归模型的方差分析

Table 3 Analysis of variance for regression models

变异来源	平均和	自由度	均方	F值	P值
模型	0.303	9	0.034	51.5	< 0.0001
功率(A)	0.065	1	0.065	99.0	< 0.0001
浸泡时间(B)	0.000	1	0.000	0.7	0.4340
活化时间(C)	0.051	1	0.051	78.3	< 0.0001
AB	0.004	1	0.004	6.5	0.0390
AC	0.018	1	0.018	27.9	0.0010
BC	0.000	1	0.000	0.3	0.576
A ²	0.088	1	0.088	135.0	< 0.0001
B ²	0.005	1	0.005	8.0	0.0260
C ²	0.066	1	0.066	100.0	< 0.0001
残差	0.004	7	0.001		
失拟值	0.003	3	0.001	2.8	0.1730
纯误差	0.001	4	0.000		
总和	0.308	16			
相关系数	0.985				
校正后相关系数	0.966				
预测相关系数	0.831				

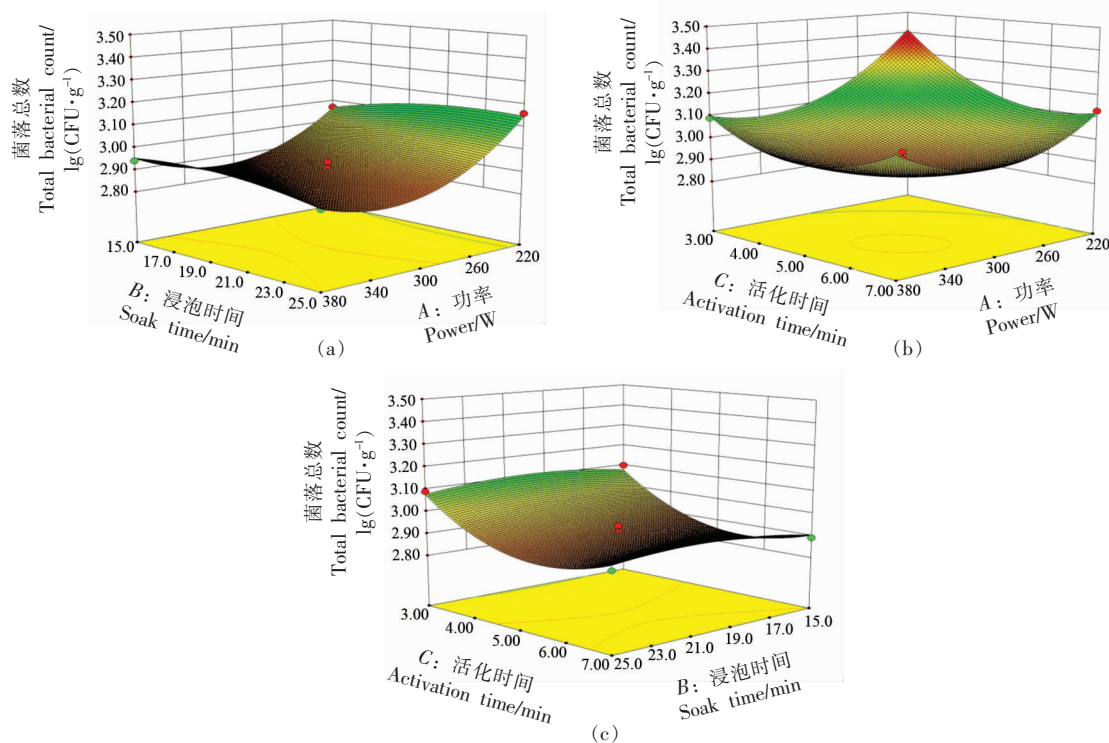


图2 试验因素间的交互作用对三文鱼表面减菌效果的影响

Fig.2 Effect of interaction of experimental factors on the decontamination of salmon surface

表4 最优条件下的预测值及实际值

Table 4 The predicted and experimental values under the optimum process conditions

条件	功率/W	浸泡时间/min	活化时间/min	菌落总数/lg(CFU·g ⁻¹)
模型预测值	318	19.33	5.44	2.89
实际测定值	320	20.00	5.00	2.85

2.3 低温等离子体耦合微酸性电解水处理对三文鱼贮藏期间 TVC 的影响

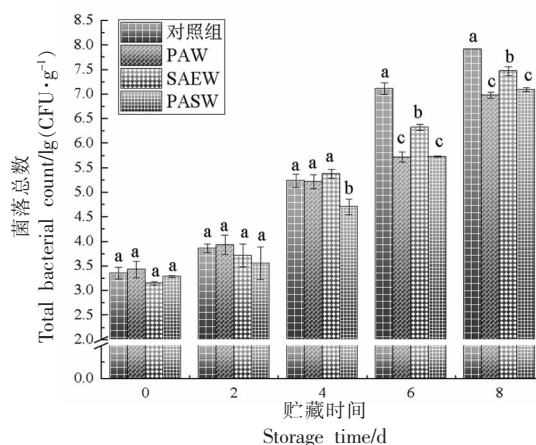
PASW 处理对三文鱼贮藏期间 TVC 的影响如图 3 所示。由图 3 可知,随着贮藏时间延长,各处理组间三文鱼 TVC 持续上升;在贮藏初期,对照组的 TVC 值为 $(3.35 \pm 0.20)\lg(\text{CFU}/\text{g})$,说明样品较新鲜;在贮藏过程中,其它 3 组样品 TVC 值的增长速度明显比对照组的慢;在第 6 天,对照组的菌落总数含量超过了菌落总数的上限值 $6.00 \lg(\text{CFU}/\text{g})$ 。一般来说,TVC 值为 $5.00 \lg(\text{CFU}/\text{g})$ 表示海鲜产品的新鲜度阈值,TVC 值低于 $6.00 \lg(\text{CFU}/\text{g})$ 表示质量可接受^[17]。此外,PASW、SAEW 和 PAW 组样品在第 8 天的菌落总数为 (7.09 ± 0.04) 、 $(7.47 \pm 0.09)\lg(\text{CFU}/\text{g})$ 和 $(6.98 \pm 0.06)\lg(\text{CFU}/\text{g})$,说明 PAW、PASW 能够显著延缓对三文鱼微生物的生长,这可能是由于低温等离子体产生了丰富的活性物质 ROS 或 RNS,如 H_2O_2 。

2.4 低温等离子体耦合微酸性电解水处理对三文鱼贮藏期间 pH 值的影响

pH 值的变化被认为是反映贮藏过程中理化性质的一个指标^[18]。由图 4 可知,所有组别样品的 pH 值变化趋势基本一致,均呈先降后升的趋势,且各组之间 pH 值差异不显著,样品 pH 值降低的原因可能与 CO_2 的溶解或乳酸的积累有关;而 pH 值升高则与蛋白质等含氮类物质在微生物和内源酶的作用下被分解为胺、三甲胺等挥发性碱有关^[19-20]。

2.5 低温等离子体耦合微酸性电解水处理对三文鱼贮藏期间 TVB-N 的影响

挥发性盐基氮(TVB-N)被用作检测鱼类新鲜度的重要指标,鱼死后腐败细菌的迅速生长导致含氮化合物分解代谢产生氨从而使 TVB-N 值迅速增加^[21]。图 5 所示,随着贮藏时间的延长,4 组三文鱼鱼片的 TVB-N 含量值均呈上升的趋势。4℃贮藏期间,PAW、SAEW、PASW 组三文鱼 TVB-N 含量明显低于对照组,说明 PAW、SAEW、PASW 处理能延缓鱼肉腐败变质的程度。贮藏第 0 天时,与对照组相比,PAW、SAEW、PASW 组三文鱼 TVB-N 含量分别下降 3.62,4.39,4.32 mg/100 g,说明贮藏初期 PAW、SAEW、PASW 对腐败



注:不同小写字母表示组间差异显著($P < 0.05$)。

图 3 不同处理方式下三文鱼菌落总数随贮藏时间的变化

Fig.3 Changes of the total bacterial account of salmon with storage time under different treatments

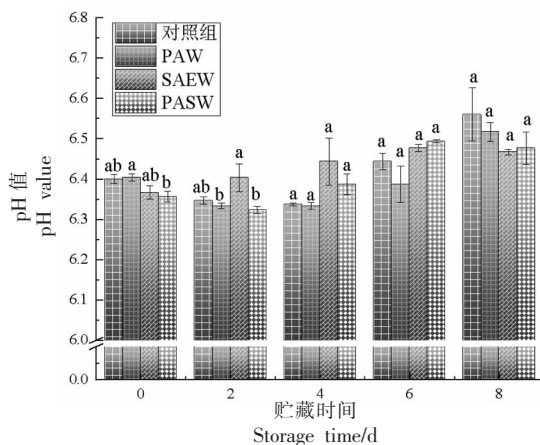


图 4 不同处理方式下三文鱼 pH 值随贮藏时间的变化

Fig.4 Changes of pH value of salmon with storage time under different treatments

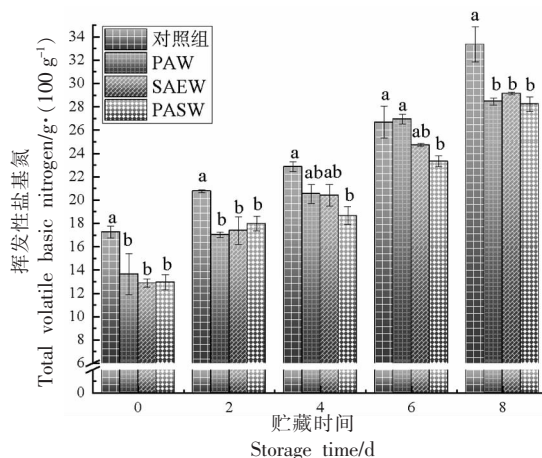


图 5 不同处理方式下三文鱼 TVB-N 含量随贮藏时间的变化

Fig.5 Changes of TVB-N content in salmon with storage time under different treatments

细菌及内源酶有一定的抑制作用。有研究表明海水鱼 TVB-N 的上限值为 30 mg/100 g^[22], 贮藏至第 8 天时, 对照、PAW、SAEW、PASW 组 TVB-N 值分别为 33.36, 28.47, 29.15, 28.23 mg/100 g。其中, 对照组的三文鱼已超过食用限度值, 达到了腐败程度。结果表明, PAW、SAEW、PASW 可以显著减少三文鱼片中 TVB-N 的形成, 从而提高了三文鱼的新鲜程度。

2.6 低温等离子体耦合微酸性电解水处理对三文鱼贮藏期间 TBARS 值和羰基含量的影响

脂质氧化是由氢的提取触发的一种自由基链式反应, 过氧化氢是第一个稳定的产物, 然而过氧化氢分解后可能产生二级脂质氧化产物, 如脂质过氧自由基的各种加成、重排或错位反应形成的醛或酮^[23]。因此, 充分评估脂质氧化并测定脂质过

氧化产物显得尤为重要。硫代巴比妥酸反应产物可被用作衡量脂质氧化的指标。低温等离子体产生的硝酸盐及亚硝酸盐(RONS)可能在猪肉、牛肉、鸡肉和海鲜等表面引发脂质氧化^[24]。三文鱼在贮藏期间 TBARS 含量的变化如图 6a 所示, 随着贮藏期的延长, 各组的 TBARS 值均呈现上升趋势。PAW 组与 SAEW 组的 TBARS 值明显高于对照组, 而经 PASW 处理后的三文鱼 TBARS 值最低。TBARS 值为 8 mg MDA/kg 通常被认为是鱼类可接受的极限, 有研究表明, TBARS 在大于 3 mg MDA/kg 时就有明显的酸味^[25]。上述数据表明, 将三文鱼浸泡在 PAW、SAEW 和 PASW 中, 对三文鱼的 TBARS 值产生较小的影响, 而且这些值都在可接受的范围内。

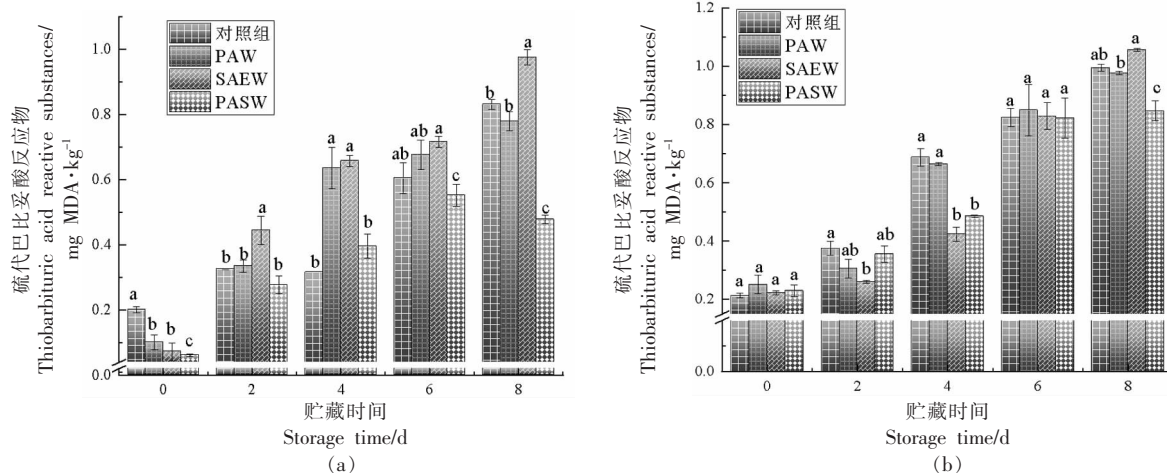


图 6 不同处理条件下三文鱼 TBARS(a)和羰基(b)含量随贮藏时间的变化

Fig.6 Changes of TBARS (a) and carbonyl content (b) of salmon with storage time under different treatments

在蛋白质的变性过程中, 蛋白质主链通过 α -酰胺化和 β -剪断以及脯氨酸、精氨酸、赖氨酸和苏氨酸等氨基酸侧链的直接或间接氧化而发生断裂, 从而形成羰基衍生物, 羰基含量的增加与蛋白氧化呈正相关^[26]。不同处理组的三文鱼鱼片羰基含量的变化如图 6b 所示, 随着贮藏期的延长, 羰基含量逐渐增加, 对照组的羰基含量从第 0 天的 0.21 nmol/mg 增加到第 8 天的 1.00 nmol/mg。在贮藏初期, 各处理组的羰基含量无明显差异 ($P > 0.05$), 随着时间的延长, 可观察到经 PAW 与 SAEW 处理的三文鱼蛋白氧化程度与对照接近或

略高于对照组, 而经 PASW 处理过的三文鱼羰基含量显著低于对照, 说明 PASW 组能抑制蛋白的氧化。

2.7 低温等离子体耦合微酸性电解水处理对三文鱼贮藏期间色差的影响

色泽是评价肉制品品质的重要指标之一, 它直接影响消费者对其的接受程度^[27-28]。其中, L^* 表示亮暗, +表示偏亮, -表示偏暗; a^* 表示红绿, +表示偏红, -表示偏绿; b^* 表示黄蓝, +表示偏黄, -表示偏蓝。经不同杀菌处理的三文鱼在 4 °C 贮藏后 L^* 、 a^* 、 b^* 值变化如表 5 所示, 各处理组之间 L^* 、 a^*

值逐渐增大,而 b^* 没有明显的变化;此外,在贮藏期的前4 d,各处理组之间的 L^* 、 a^* 、 b^* 值差异不显著,至贮藏第8天,其差异显著。其中,经过PASW处理的 L^* 值为49.45,较对照组(44.42)、PAW组(48.00)、SAEW组(46.58)均要大,说明亮度高。经过PASW处理的 a^* 值为8.85,较对照组(6.57)、PAW组(7.46)、SAEW组(7.01)均要大,说明三文鱼片颜色偏红,并且PASW组红度值最高,颜色最红。

肌红蛋白(Mb)存在于肌肉纤维细胞中,是三文鱼体内最重要的色素物质。一般来说,三文鱼肌肉的鲜红色主要与氧合肌红蛋白(OxyMb)有关。在长时间的低温冷冻保存下,OxyMb极易氧化为

棕色的高铁肌红蛋白(MetMb)^[29],从而导致三文鱼的褐变,大大影响其商业价值。三文鱼富含不饱和脂肪酸,因此其在储存过程中特别是随着温度的波动容易发生脂肪氧化^[30]。有学者提出脂质氧化和肌红蛋白氧化是相互促进的:一方面铁可以在肌红蛋白变性后从血红素中释放出来,促进脂质氧化;另一方面,脂质氧化的中间产物(如自由基)可以破坏肌肉中的色素,使其易于褐变^[31]。在本试验中低温等离子体耦合微酸性电解水组三文鱼颜色最好,也说明低温等离子体耦合微酸性电解水缓解了Mb氧化,减少了棕色的高铁肌红蛋白生成,这也与低温等离子体耦合微酸性电解水可以缓解脂肪氧化和蛋白氧化的结果相对应。

表5 不同处理方式对三文鱼色泽随贮藏时间的变化

Table 5 Changes of the color of salmon with storage time under different treatments

项目	处理组	贮藏时间/d				
		0	2	4	6	8
L^*	对照组	43.14 ± 0.25 ^a	43.12 ± 0.30 ^a	43.55 ± 0.41 ^a	43.15 ± 0.63 ^b	44.42 ± 1.08 ^c
	PAW	44.23 ± 0.92 ^a	45.43 ± 0.53 ^a	45.05 ± 0.25 ^a	44.35 ± 0.86 ^{ab}	48.00 ± 0.94 ^{ab}
	SAEW	44.43 ± 0.27 ^a	44.01 ± 0.97 ^a	45.73 ± 0.57 ^a	45.40 ± 0.47 ^a	46.58 ± 0.47 ^{bc}
	PASW	43.48 ± 0.67 ^a	44.88 ± 0.76 ^a	44.10 ± 1.03 ^a	44.80 ± 0.36 ^{ab}	49.45 ± 0.33 ^a
a^*	对照组	6.18 ± 0.15 ^a	6.00 ± 0.27 ^a	5.46 ± 0.53 ^b	6.50 ± 0.58 ^b	6.57 ± 0.96 ^b
	PAW	6.01 ± 0.63 ^a	6.54 ± 0.49 ^a	6.88 ± 0.41 ^a	7.49 ± 0.57 ^b	7.46 ± 0.22 ^{ab}
	SAEW	6.33 ± 0.32 ^a	5.85 ± 0.45 ^a	7.12 ± 0.19 ^a	6.40 ± 0.62 ^a	7.01 ± 0.56 ^{ab}
	PASW	6.54 ± 0.07 ^a	6.36 ± 0.59 ^a	6.08 ± 0.30 ^{ab}	9.87 ± 0.84 ^b	8.85 ± 0.62 ^a
b^*	对照组	11.06 ± 0.36 ^a	11.99 ± 0.07 ^a	11.32 ± 0.50 ^b	11.34 ± 0.26 ^b	11.27 ± 0.59 ^b
	PAW	11.62 ± 0.38 ^a	12.31 ± 0.77 ^a	12.32 ± 0.46 ^{ab}	10.81 ± 0.33 ^b	11.69 ± 0.31 ^b
	SAEW	11.88 ± 0.25 ^a	12.28 ± 0.48 ^a	13.30 ± 0.36 ^a	12.08 ± 0.62 ^{ab}	12.46 ± 0.51 ^{ab}
	PASW	11.41 ± 0.35 ^a	11.64 ± 0.31 ^a	11.53 ± 0.33 ^b	13.06 ± 0.40 ^a	13.21 ± 0.31 ^a

注:结果用平均值±标准差表示,同一列中,不同的小写字母表示样品间差异显著($P < 0.05$)。

3 结论

本研究以菌落总数为指标,结合单因素实验和响应面试验,确定功率320 W、浸泡时间20 min、活化时间5 min、有效氯质量浓度为50 mg/mL、料液比为1:6为最佳杀菌条件。经等离子体活化水、微酸性电解水及低温等离子体耦合微酸性电解水处理后,研究不同预处理方式对三文鱼冷藏期间抑菌效果、脂肪氧化及品质的影响。结果表明,随着贮藏时间延长,各组样品微生物数量、pH值、TVB-N值均升高,与其它处理组相比,低温等离子体耦合微酸性电解水处理能明显降低三文鱼

鱼片脂肪与蛋白氧化,综合考虑,低温等离子体耦合微酸性电解水处理组保鲜效果最佳。较对照组而言,低温等离子体耦合微酸性电解水处理可使三文鱼鱼片冷藏货架期延长2 d。因此,低温等离子体耦合微酸性电解水的前处理方式可有效延长三文鱼的货架期,为水产品冷藏保鲜工业化应用提供新思路。

参 考 文 献

[1] GUO H, FENG T, QI W, et al. Effects of electron-

- beam irradiation on volatile flavor compounds of salmon fillets by the molecular sensory science technique [J]. *Journal of Food Science*, 2021, 86(1): 184–193.
- [2] LIU J, BI J, MCCLEMENTS D J, et al. Impacts of thermal and non-thermal processing on structure and functionality of pectin in fruit-and vegetable-based products: A review[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 250: 116890.
- [3] LIAO X Y, LIU D H, XIANG Q S, et al. Inactivation mechanisms of non-thermal plasma on microbes: A review[J]. *Food Control*, 2017, 75: 83–91.
- [4] FEIZOLLAHI E, MISRA N N, ROOPESH M S. Factors influencing the antimicrobial efficacy of Dielectric Barrier Discharge (DBD) Atmospheric Cold Plasma (ACP) in food processing applications [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, 61(4): 666–689.
- [5] OLATUNDE O O, SHIEKH K A, BENJAKUL S. Pros and cons of cold plasma technology as an alternative non-thermal processing technology in seafood industry[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 111: 617–627.
- [6] XIANG Q S, FAN L M, LI Y F, et al. A review on recent advances in plasma-activated water for food safety: Current applications and future trends[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022, 62(8): 2250–2268.
- [7] GUO D M, LIU H X, ZHOU L, et al. Plasma-activated water production and its application in agriculture[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, 101(12): 4891–4899.
- [8] SUN J Z, JIANG X J, CHEN Y H, et al. Recent trends and applications of electrolyzed oxidizing water in fresh foodstuff preservation and safety control [J]. *Food Chemistry*, 2021, 369: 130873.
- [9] RAHMAN S M E, KHAN I, OH D H. Electrolyzed water as a novel sanitizer in the food industry: Current trends and future perspectives [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2016, 15(3): 471–490.
- [10] 于福田, 岑剑伟, 李来好, 等. 罗非鱼片微酸性电解水杀菌工艺响应面法优化研究[J]. *南方水产科学*, 2019, 15(1): 77–84.
- YU F T, CHEN J W, LI L H, et al. Response surface methodology for optimization of sterilization effect on tilapia fillet with slightly acidic electrolyzed water[J]. *South China Fisheries Science*, 2019, 15(1): 77–84.
- [11] CICHOSKI A J, FLORES D R M, DE MENEZES C R, et al. Ultrasound and slightly acid electrolyzed water application: An efficient combination to reduce the bacterial counts of chicken breast during pre-chilling[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2019, 301: 27–33.
- [12] 张渤函, 李学鹏, 励建荣, 等. 基于特征挥发性气味物质的冷藏大黄鱼新鲜度预测模型构建[J]. *渤海大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(2): 140–154.
- ZHANG B H, LI X P, LI J R, et al. Construction of freshness prediction model for refrigerated large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) based on the characteristic volatile compounds[J]. *Journal of Bohai University (Natural Science)*, 2022, 43(2): 140–154.
- [13] ZHU W H, BU Y, LI Y, et al. Effects of nanowarming on water holding capacity, oxidation and protein conformation changes in jumbo squid (*Dosidicus gigas*) mantles[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 129: 109511.
- [14] BOUCHON P, AGUILERA J M, PYLEABSTRACT D L. Structure oil-absorption relationships during deep-fat frying[J]. *Journal of Food Science*, 2003, 68(9): 2711–2716.
- [15] LI Y, CUI F J, LIU Z Q, et al. Improvement of xylanase production by *Penicillium moxalicum* ZH-30 using response surface methodology [J]. *Enzyme & Microbial Technology*, 2007, 40(5): 1381–1388.
- [16] 周小双, 王锦旭, 杨贤庆, 等. 响应面法优化合浦珠母贝糖胺聚糖提取工艺[J]. *食品与发酵工业*, 2016, 42(1): 238–243.
- ZHOU X S, WANG J X, YANG X J, et al. Optimization of extraction process for glycosaminoglycans from *Pinctada martensii* by response surface methodology[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2016, 42(1): 238–243.
- [17] LIAO X Y, SU Y, LIU D H, et al. Application of atmospheric cold plasma-activated water (PAW) ice for preservation of shrimps (*Metapenaeus ensis*) [J]. *Food Control*, 2018, 94: 307–314.
- [18] NA S, KIM J H, JANG H J, et al. Shelf life extension of Pacific white shrimp (*Litopenaeus van-*

- namei*) using chitosan and ϵ -polylysine during cold storage[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 115: 1103–1108.
- [19] YU D W, LI P Y, XU Y S, et al. Physicochemical, microbiological, and sensory attributes of chitosan-coated grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) fillets stored at 4 °C[J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20(2): 390–401.
- [20] RAMEZANI Z, ZAREI M, RAMINNEJAD N. Comparing the effectiveness of chitosan and nanochitosan coatings on the quality of refrigerated silver carp fillets[J]. Food Control, 2015, 51: 43–48.
- [21] 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]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2019, 28(6): 624–636.
- [22] SARIKA A R, LIPTON A P, AISHWARYA M S. Biopreservative efficacy of bacteriocin GPI of *Lactobacillus rhamnosus* GPI on stored fish filets [J]. Frontiers in Nutrition, 2019, 6: 1–7.
- [23] PÉREZ-ANDRÉS J M, CROPOTOVA J, HARRISON S M, et al. Effect of cold plasma on meat cholesterol and lipid oxidation[J]. Foods, 2020, 9(12): 1786.
- [24] GAVAHIAN M, CHU Y H, KHANEGHAH A M, et al. A critical analysis of the cold plasma induced lipid oxidation in foods[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 77: 32–41.
- [25] ESUA O J, 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.
- [26] 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.
- [27] NAM K C, AHN D U. Carbon monoxide-heme pigment is responsible for the pink color in irradiated raw turkey breast meat[J]. Meat Science, 2002, 60(1): 25–33.
- [28] LERFALL J, BENDIKSEN E Å, OLSEN J V, et al. A comparative study of organic-versus conventional Atlantic salmon. II. Fillet color, carotenoid- and fatty acid composition as affected by dry salting, cold smoking and storage [J]. Aquaculture, 2016, 451: 369–376.
- [29] 孙冲, 王道营, 张牧焱, 等. 氧合肌红蛋白的制备及其稳定性[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(8): 360–362.
- SUN C, WANG D Y, ZHANG M H, et al. Preparation and stability of oxygenated myoglobin [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 44(8): 360–362.
- [30] 高海, 蔡欢欢, 朱志伟. 光照和温度对草鱼和三文鱼鱼肉贮藏品质的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(15): 244–249.
- GAO H, CAI H H, ZHU Z W. Comparative study of effects of light exposure and storage temperature on the quality of grass carp fillets and salmon fillets [J]. Food Science, 2017, 38(15): 244–249.
- [31] 刘文轩, 罗欣, 杨啸吟, 等. 脂质氧化对肉色影响的研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(21): 238–247.
- LIU W X, LUO X, YANG X Y, et al. Recent progress in research on the effect of lipid oxidation on meat color[J]. Food Science, 2020, 41(21): 238–247.

Preservation Effect of Cold Plasma Application Combination with Slightly Acidic Electrolyzed Water on Salmon

Zhu Wenhui¹, Tan Guizhi^{1,2}, Bu Ying¹, Li Xuepeng¹, Li Jianrong^{1*}, Cui Fangchao¹, Tan Xiqian¹, Meng Yuqiong³, Ma Rui³, Guo Xiaohua⁴

(¹Engineering and Technology Research Center of Food Preservation, Processing and Safety Control of Liaoning Province, College of Food Science and Engineering, Bohai University, Jinzhou 121013, Liaoning

²Collaborative Innovation Center of Seafood Deep Processing, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, Liaoning

³Qinghai University, Xining 810016

Shandong Meijia Group Co. Ltd., Rizhao 276800, Shandong)

Abstract In this study, the conditions of low-temperature plasma-coupled slightly acidic electrolyzed water for salmon sterilization were optimized through single factor and Box-Behnken response surface tests. In addition, physicochemical indicators like total viable count (TVC), pH value, total volatile base nitrogen (TVBN), thiobarbituric acid reactive substances (TBARS), carbonyl content, and color were analyzed to compare the preservation effects of plasma-activated water (PAW), slightly acidic electrolyzed water (SAEW) and cold plasma application combination with slightly acidic electrolyzed water (PASW) on salmon at 4 °C. The results showed that the optimal condition for sterilization was slow temperature plasma activation time - 5 min, the power - 320 W, immersion time - 20 min, effective chlorine concentration - 50 mg/mL, and solid-liquid ratio - 1:6. The abovementioned three treatment groups could all prolong the storage time of salmon, but low-temperature plasma coupled with slightly acidic electrolyzed water was more conducive to alleviating lipid and protein oxidation. This study provides a new idea for the preservation of aquatic products.

Keywords salmon fillet; sterilization; cold plasma application; slightly acidic electrolyzed water; preservation