

低压变频电场对蒸煮贻贝冰温保鲜效果的影响

吴 越, 易 冲, 沈 俊, 罗红宇*

(浙江海洋大学食品与药学学院, 浙江省海产品健康危害因素关键技术研究重点实验室, 舟山 316022)

摘 要: **目的** 探究低压变频电场对蒸煮贻贝冰温保鲜效果的影响。**方法** 将蒸煮贻贝放置于安装有电场发生装置的冰箱中冰温($-1\text{ }^{\circ}\text{C}$)贮藏, 每天取样测定贻贝的 pH、挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)含量、菌落总数、质构指标, 并进行感官评分。基于变异系数权重法对所有指标数据进行标准化处理, 通过加权评分计算各组样品的总分作为保鲜效果的综合评价依据。**结果** 随着贮藏时间的延长, 各组样品的 pH 呈现先下降后上升的趋势, TVB-N、菌落总数均呈现不同程度的上升趋势, 同时感官评分逐渐下降; 与空白对照组相比, 低压变频电场可以显著延缓贻贝的 TVB-N、菌落总数的变化速率和感官指标的劣变($P<0.05$), 且 3000 V/50 Hz 组的效果优于 1500 V/50 Hz 组; 贮藏至第 7 d, 两个电场组样品的硬度、咀嚼性、胶黏性、弹性、内聚性均优于空白对照组, 且电场强度越大样品的质构特性越好; 空白组、1500 V/50 Hz 组、3000 V/50 Hz 组样品第 7 d 的综合评分分别为-11.36、-5.76、-0.35。**结论** 低压变频电场能更好地保持蒸煮贻贝冰温贮藏的鲜度和品质, 经 3000 V/50 Hz 处理的蒸煮贻贝综合评分最高, 品质最优。

关键词: 蒸煮贻贝; 低压变频电场; 冰温保鲜; 变异系数权重法

Effect of low voltage variable frequency electric field on the ice temperature preservation effect of steamed *Mytilus edulis*

WU Yue, YI Chong, SHEN Jun, LUO Hong-Yu*

(Key Laboratory of Key Technology Research on Health Risk Factors of Seafood in Zhejiang Province, College of Food and Pharmacy, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the effects of low voltage variable frequency electric field on the ice temperature preservation effect of steamed *Mytilus edulis*. **Methods** The steamed *Mytilus edulis* were stored at ice temperature ($-1\text{ }^{\circ}\text{C}$) in a refrigerator with an electric field generator. *Mytilus edulis* were sampled daily to determine pH, total volatile basic nitrogen (TVB-N) content, colony count, texture indexes, and sensory scores were performed. The data of all indexes were standardized based on the coefficient of variation weighting method, and the total score of each group of samples was calculated by weighted scoring as the comprehensive evaluation basis of freshness preservation effect. **Results** The pH of each group showed a trend of decreasing first and then increasing, and the TVB-N and colony count of the samples in each group showed different degrees of increase with the extension of storage time, while the sensory scores gradually decreased; compared with the blank control group, the low voltage variable frequency

基金项目: 浙江舟山群岛新区“5313”行动计划科技创业领军人才项目、国家海洋公益性行业科研项目(201305016)

Fund: Supported by the Zhejiang Zhoushan Archipelago New Area “5313” Plan Science and Technology Entrepreneurship Leading Talent Project, and the Public Science and Technology Research Funds Projects of Ocean (201305016)

***通信作者:** 罗红宇, 教授, 主要研究方向为水产品贮藏与加工。E-mail: lisa8919@163.com

***Corresponding author:** LUO Hong-Yu, Professor, College of Food and Pharmacy, Zhejiang Ocean University, No.1, Haida South Road, Lincheng Street, Dinghai District City, Zhoushan 316022, China. E-mail: lisa8919@163.com

electric field could significantly delay the change rates of pH, TVB-N and colony count and the deterioration of sensory index of *Mytilus edulis*, and the effect of the 3000 V/50 Hz group was better than that of the 1500 V/50 Hz group; the hardness, chewiness, adhesion, elasticity, and cohesiveness of the samples in both electric field groups were better than those in the blank control group up to 7 d ($P<0.05$), and the greater the electric field intensity, the better the textural properties of the samples; the overall scores of the samples in the blank, 1500 V/50 Hz, and 3000 V/50 Hz groups at 7 d were classified as -11.36, -5.76, -0.35, respectively. **Conclusion** Low voltage variable frequency electric field can better maintain the freshness and quality of steamed *Mytilus edulis* stored at ice temperature, and the steamed *Mytilus edulis* treated with 3000 V/50 Hz has the highest overall score and have the best quality.

KEY WORDS: steamed *Mytilus edulis*; low voltage variable frequency electric field; ice temperature preservation; coefficient of variation weighting method

0 引言

贻贝(*Mytilus edulis*)亦称海虹,分布于中国黄海、渤海及东海沿岸^[1],具有低脂肪、高蛋白的特点,营养价值很高。我国是全球最大的贻贝养殖产地,年产超过80万t^[2]。因贻贝高水分、高蛋白的特点,采收之后的加工、保鲜、贮藏至关重要。目前除鲜销外,贻贝主要加工成冷冻品和干制品等初级产品。采收旺季来不及鲜销的贻贝,常采用蒸煮后冷藏或冻藏方式保存,可以在当季或反季作为深加工制品的原料^[3],因此蒸煮贻贝的贮藏品质决定了终端产品的质量,对其保鲜方法的研究十分重要。目前贻贝保鲜主要采用冷冻保鲜、气调保鲜、辐射保鲜、化学保鲜等^[4],如朱士臣等^[5]发现茶多酚-姜黄素复配液可作为改善贻贝肉冻藏品质的有效手段并可延长其冻藏期;肖林等^[6]使用NFZ-10/4.0-1000电子直线加速器对密闭罐装鲜贻贝实施15和25 kGy两种剂量的双向辐照,发现高剂量辐照密闭的罐装鲜贻贝肉可有效杀灭各类微生物。这些保鲜方法虽然可延长贻贝的保质期,但也存在问题,如冷冻和解冻过程中贻贝的汁液流失,鲜度和口感变差^[7];辐照保鲜采用的短波射线辐照会造成食品中的一些有益成分分解,易使脂肪氧化、蛋白质变质,产生色变和异味,射线辐照也可能对操作人员造成伤害^[8];化学保鲜可能对人体健康有潜在未知的风险,甚至有致癌、致畸的可能^[9]。气调保鲜由于前期投入大、气调库无法移动、可能存在气害等缺点,消费者接受度不高,目前并未得到广泛使用^[10]。因此,寻求更高效安全的贻贝保鲜方法是亟待解决的问题。

低压变频电场(low voltage variable frequency electric field)一般能够产生不超过3000 V/m的空间电场,具有对环境要求较小、安全性高、设备要求低、节能环保等特点^[11]。低压变频电场设备与市面上常见的静电场设备、脉冲电场设备相比,投入运行时耗电率低,设备成本小,便于携带运输。低压变频电场以50 Hz的频率周期性地改变电场方向,使得食品内部的分子能够更均衡地受到电场力

的影响^[12],从而产生更强的振动,在一定程度上明显提升食品的冻结速率,减少食品通过最大冰晶生成带的时间,使食品中的冰晶以更小的形式存在,食品冻藏品质更佳^[13]。另一方面,微生物细胞内部的离子、极性粒子等受到电场力的作用可能会发现周期性的偏移或偏转^[14],从而影响正常的生化反应,从而抑制食品的腐败变质速率。同时,基于电场作用于细胞膜的电穿孔模型,外加电场作用下细胞膜跨膜电压将增加,超过其自身绝缘强度时会在膜上形成微孔^[15];跨膜电压大过临界值,微孔变大,细胞膜穿孔至无法愈合,膜通透性增强,细胞内质流出导致细胞死亡^[16]。史恬恬等^[17]研究了低压变频电场技术对带鱼保鲜过程中微生物群落的影响,发现经3000 V/m电场强度处理对带鱼的抑菌保鲜效果最好,表现为在贮藏过程中杂菌种类最少、样本微生物群落物种丰度和多样性均最低、腐败程度最低。NUNEZ等^[18]发现2000 V/m的低压变频电场处理缩短了盐渍腌制鲑鱼的加工时间,增加了鲑鱼的盐渍度。

目前,国内外关于低压变频电场对贝类保鲜方面的研究较少。为了探究低压变频电场对蒸煮贻贝在冰温保鲜过程中理化指标、鲜度指标、感官和品质的影响,本研究在预实验基础上,分别采用3000 V/50 Hz、1500 V/50 Hz的低压电场对蒸煮贻贝进行处理,考察低压变频电场对蒸煮贻贝冰温贮藏期间的pH、挥发性盐基氮值(total volatile basic nitrogen, TVB-N)、菌落总数、感官评分和质构特性,为低压变频电场在水产品保鲜方面的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜贻贝购买于浙江省舟山市丰茂菜场。贻贝采集后当日凌晨运送至码头,全程冷链运输至菜场,贻贝无冻结现象。

平板计数琼脂(plate count agar, PCA)培养基(北京陆桥公司);氧化镁、硼酸、稀盐酸、甲基红指示剂、溴甲酚绿指示剂、95%乙醇(分析纯,国药集团化学试剂有限公司);实验用水为蒸馏水。

1.2 仪器与设备

BSA124S 电子天平(精度为 0.1 mg, 北京赛多利斯科学仪器有限公司); RC-4HC 温度记录仪(江苏精创电气股份有限公司); 明鉴 SPX 型智能生化培养箱(宁波江南仪器厂); FJ200-SH 高速分散均质机(上海沪析实业有限公司); VORTEX-5 涡旋混合器(海门市其林贝尔仪器制造有限公司); LDZX-75KBS 型立式压力蒸汽灭菌器(上海申安医疗器械厂); 雷磁 PHS-3C 数显台式 pH 计(上海仪电科学仪器股份有限公司); 海能 K9840 凯氏定氮仪(山东海能科学仪器有限公司); SW-CJ-1B 净化工作台(海力辰邦西仪器科技有限公司); TA.XTC-18 质构仪(上海保圣实业发展有限公司); 鲜霸 BX-2000 商用型空间电场发生器(浙江驰力科技股份有限公司)。

1.3 方 法

1.3.1 样品处理

将 5 kg 新鲜贻贝清洗干净, 吐沙 24 h, 于 100 ℃沸水中煮 15 min, 在无菌工作台内采集贻贝肉, 用 75%乙醇喷涂透明聚乙烯袋, 并自然挥发完全后, 贝肉装袋密封, 放置于安装电场发生仪的冰箱中冰温(-1 ℃)保存。I 组样品为空白对照组, 不施加低压变频电场; II 组样品电场设为 1500 V/50 Hz; III 组样品电场设为 3000 V/50 Hz, 电场组样品距离电场板均为 15 cm。贮藏期间, 每天取样测定 pH、TVB-N 含量、菌落总数, 并进行感官评价, 取第 7 d 的样品进行质构分析, 并计算综合评分。

1.3.2 蒸煮贻贝冷藏温度的确定

将温度记录仪的温度探针插入贻贝肉的中心, 并将其放入-18 ℃的冰柜中, 每隔 10 s 记录贻贝肉的中心温度,

绘制时间-温度曲线, 即贻贝冻结曲线。根据贻贝冻结曲线的拐点和冰柜的温度波动, 确定蒸煮贻贝的冰温保藏温度^[19]。

1.4 指标的检测

1.4.1 pH 测定

依据 GB 5009.237—2016《食品安全国家标准 食品中 pH 值的测定》并结合实际稍做修改, 称取 10.0 g 贻贝肉进行匀浆处理, 加入蒸馏水到 100 mL, 充分摇匀后室温静置 30 min, 取上清液平行测定 3 次 pH。

1.4.2 挥发性盐基氮 TVB-N 含量测定

依照 GB 5009.228—2016《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》中的自动凯氏定氮仪法进行检测。

1.4.3 菌落总数测定

依照 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》进行测定。

1.4.4 感官评价

根据 SC/T 3209—2012《淡菜》标准略做修改, 制定蒸煮贻贝的感官评分标准, 见表 1。由 6 名经过训练的感官评价成员组成感官评定小组, 对样品的色泽、组织形态、气味、滋味进行评价打分。

1.4.5 质构分析

参考李锐等^[20]方法, 从每组中挑选质量、大小基本一致, 无破损的贻贝肉作为测试样品。采用 P/44 平底圆柱形探针进行测量, 测试模式设置为质地多面剖析(texture profile analysis, TPA)模式, 力量感应元量程为 250 N, 探头提升高度为 20 mm, 形变百分量为 30, 检测速度为 60 s, 起始力为 0.6 N, 每组试验重复 6 次, 去掉最大值和最小值后取平均值。

表 1 贻贝感官评分的标准
Table 1 Criteria for sensory evaluation of *Mytilus edulis*

感官描述	分数/分	评价准则
色泽	7~10	橘红、杏黄或黄色, 呈贻贝固有光泽
	4~6	黄色, 略显贻贝光泽
	0~3	黄褐色, 光泽暗淡
组织形态	7~10	体型饱满, 肉质紧密厚实, 个体均匀, 无足丝
	4~6	体型较饱满, 肉质略瘦, 个体较均匀, 有些许足丝
	0~3	体型较瘪, 肉质不厚实, 个体较均匀, 允许有少量破碎个体和足丝存在
气味	7~10	具有贻贝固有的气味, 香味清淡, 无异味
	4~6	具有贻贝的气味, 无香味, 有些许异味
	0~3	无贻贝的气味, 有异味
滋味	7~10	口感醇厚清香, 鲜味明显
	4~6	口感一般醇厚, 清香味、鲜味较淡
	0~3	无醇厚感, 无清香感, 无鲜味

1.4.6 贻贝品质的综合评价方法

参考牛改改等^[21]的方法稍做修改。采用变异系数权重法综合评价不同电场强度处理下贻贝的品质差异。首先通过计算各项指标的算数平均值和标准偏差得出各项指标的变异系数,然后利用变异系数得出各项指标的权重值,依此对所有数据进行标准化处理,将标准化后的数据通过加权平均的方法得出不同电场处理条件下贻贝的综合评分。指标的变异系数按照公式(1)计算:

$$V_i = \frac{\sigma_i}{X_i} \quad (1)$$

式中: V_i 表示第 i 项指标的变异系数; σ_i 表示第 i 项指标的标准差; X_i 表示第 i 项指标的算术平均数。

其中贻贝各指标的权重按照公式(2)计算:

$$W_i = \frac{v_i}{\sum_{i=2}^n v_i} \quad (2)$$

采用 Z-score 标准化法将各项指标的数据进行标准化处理,如公式(3)所示:

$$Z_{ij} = \frac{x_{ij} - x_i}{\sigma_i} \quad (3)$$

式中: Z_{ij} 为标准化的变量值; x_{ij} 为实际变量值; x_i 为第 i 项指标的算数平均值; σ_i 为第 i 项指标的标准差。

TVB-N 含量、菌落总数等指标越小越好。因此,标准化后,需要在前面加上负号,用加权法对不同电场处理条件下的归一化数据进行乘法,计算总和,得到综合得分。

1.5 数据统计

每组实验平行测定 3 次,数据以平均值±标准偏差表示;采用 Origin 2022 软件绘图,SPSS 21.0 统计分析软件对实验数据进行分析,采用单因素方差分析中的最小显著差法(least significant difference, LSD), $P < 0.05$ 为有显著性差异。

2 结果与分析

2.1 蒸煮贻贝冰点的确定

蒸煮贻贝的冷冻曲线如图 1 所示。冷冻曲线下降至平缓处相对应的温度即为蒸煮贻贝的冰点温度,冰点之前曲线的最低点为蒸煮贻贝的过冷点。由此可知蒸煮贻贝的冰点温度为 $-1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,冰柜的温度波动为 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。因此,确定冰温保藏贻贝的温度为 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2.2 低压变频电场对冰温保藏贻贝 pH 的影响

pH 可作为衡量贻贝新鲜度的重要参考指标。如图 2 所示,经过蒸煮处理后的贻贝 pH 先下降后上升,各组样品的初始 pH 为 7.13,贮藏至 2 d 时,经过电场处理的 II 组的 pH 为 6.87,III 组的 pH 为 6.88,至此以后, pH 一直小幅降低,至第 4 d, pH 达到贮藏期间的最低值,分别为 6.80、6.77,均显著高于对照组的 6.73,说明蒸煮贻贝在贮藏过程中糖

原酵解产物的产量达到峰值。而对照组在整个贮藏期的 pH 变化幅度更大,且贮藏实验结束时的 pH 更高。这是因为高温处理后贻贝的正常细胞组织被破坏,其中的一些嗜冷菌微生物死亡,贻贝体内糖原在无氧条件下经过糖酵解产生酸性物质,如琥珀酸等,致使 pH 的水平降低^[22],但贮藏后期,贻贝的肌原纤维中 Z 线脆弱,断裂,组织中胶原分子结构改变,胶原纤维变得脆弱,使肌肉组织变软和解僵;另外,肌肉中的蛋白质分解产物、游离氨基酸的增加和氨基酸的脱氨作用^[23],导致贻贝的 pH 又逐渐升高。电场强度越大,微生物生长速率越慢, pH 上升速率越低,故 III 组的 pH 显著低于 II 组,且在整个储藏期内变化最小。可见,在低压变频电场的作用能有利于延缓贻贝内蛋白质的降解,阻止碱性物质继续生成,电场能够在一定程度上抑制变质过程,而且随着电场强度的增大,抑制效果更加明显。本研究结果与 KO 等^[24]对罗非鱼的研究一致。

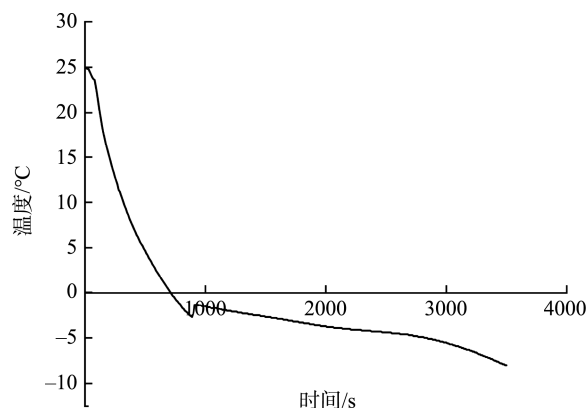
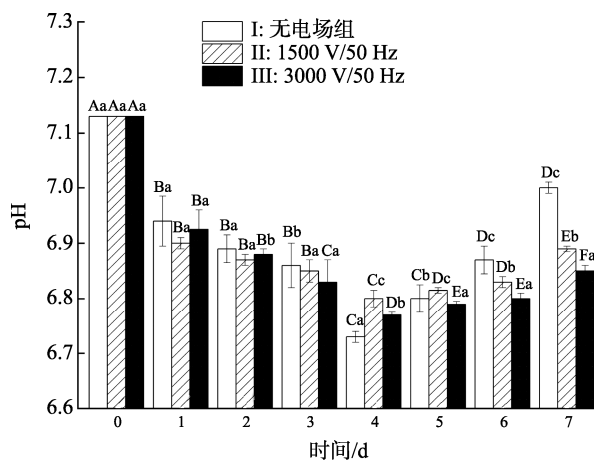


图 1 蒸煮贻贝 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻结曲线图

Fig.1 Freezing temperature curve of cooked *Mytilus edulis* at $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$



注: 不同小写字母表示同一天不同处理组差异显著, 不同大写字母表示同一处理组不同时间差异显著, $P < 0.05$, 下同。

图 2 不同处理条件对贻贝 pH 的影响($n=3$)

Fig.2 Effects of different treatment conditions on pH values of *Mytilus edulis* ($n=3$)

2.3 低压变频电场对冰温保藏贻贝挥发性盐基氮含量的影响

贻贝含水量高, 在贮藏过程中易发生微生物生长、腐败等品质变化。贻贝贮藏过程中, 在细菌和酶作用下, 蛋白质分解产生氨及胺类碱性含氮物质, 致使 TVB-N 含量升高, 实验期间各组样品的 TVB-N 含量的结果如图 3 所示。蒸煮贻贝储藏开始时的 TVB-N 含量为 7.00 mg/100 g, 在 0~2 d 时, 3 组样品的 TVB-N 值变化趋势平缓, 这是因为贻贝经过蒸煮处理后, 内源性蛋白酶失去活性, 微生物生长速率缓慢, 从而抑制了贻贝蛋白质的分解, 降低了腐败变质速率^[25]。从 4 d 开始, 3 组样品的 TVB-N 含量均开始上升, II、III 组的上升速度比对照组的上升速度慢, 5 d 时 3 组贻贝 TVB-N 含量分别为 17.85、15.00、10.00 mg/100 g, 差异显著($P<0.05$)。根据 GB 2733—2015《食品安全国家标准 鲜、冻动物性水产品》对 TVB-N 含量的规定, TVB-N 含量应小于 15.00 mg/100 g, I 组和 II 组样品均超标; 贮藏第 7 d 时, III 组贻贝的 TVB-N 含量为 15.80 mg/100 g, 已超标。这可能是由于电场对微生物生长繁殖的抑制作用, 电场不仅能够抑制需氧菌的生长, 还能降低细菌的非蛋白氮物质氧化脱氨能力, 从而延缓微生物对蛋白质的分解速率^[26]。魏国平等^[27]在研究电场对猪肉冻结解冻特性及机制中发现, 电场能减缓解冻后猪肉冷藏期间 TVB-N 含量增加的速率。说明低压变频电场可以一定程度上阻碍蛋白质腐败, 保持蒸煮贻贝新鲜度。

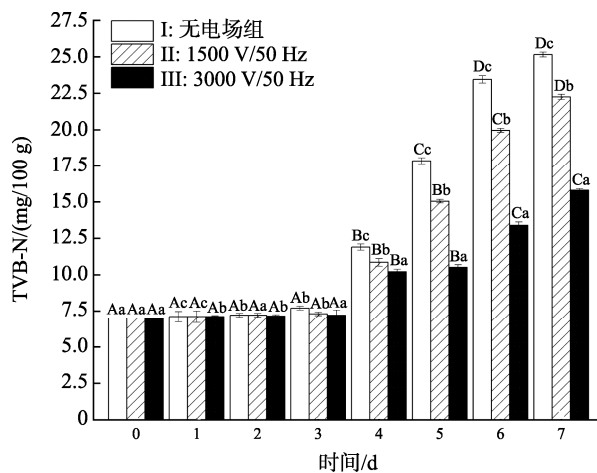


图 3 不同处理条件对贻贝 TVB-N 含量的影响($n=3$)

Fig.3 Effects of different treatment conditions on TVB-N content of *Mytilus edulis* ($n=3$)

2.4 低压变频电场对冰温保藏贻贝菌落总数的影响

微生物是造成水产品腐败变质的主要原因之一, 从图 4 可知, 各组贻贝菌落总数在整个贮藏期间均明显增加。贻贝的初始菌落总数为 1.48 lg CFU/g, 在贮藏的前 2 d, 各组贻贝的微生物均处于适应期, 生长缓慢。从第 3 d

开始, 微生物处于对数生长期, 菌落总数呈对数增加。贮藏至第 4 d 时, I、II、III 组的菌落总数值分别为 6.00、4.85、4.62 lg CFU/g, 两个电场组的菌落总数均显著低于无电场组($P<0.05$)。根据 GB 10136—2015《食品安全国家标准 动物性水产制品》规定, 菌落总数应小于 6.00 lg CFU/g, 因此 I 组样品菌落总数已超标。II 组样品贮藏至 5 d 时, 菌落总数为 6.90 lg CFU/g, 已超标; III 组样品贮藏至第 6 d 时, 菌落总数为 6.56 lg CFU/g, 已超标。这与电场作用导致微生物细胞膜结构发生改变、膜内外电位差异常, 从而干扰微生物的生长和代谢有关^[28], 随着电场强度的增加, 抑菌效果越好, 这与赵良等^[29]的结论一致。

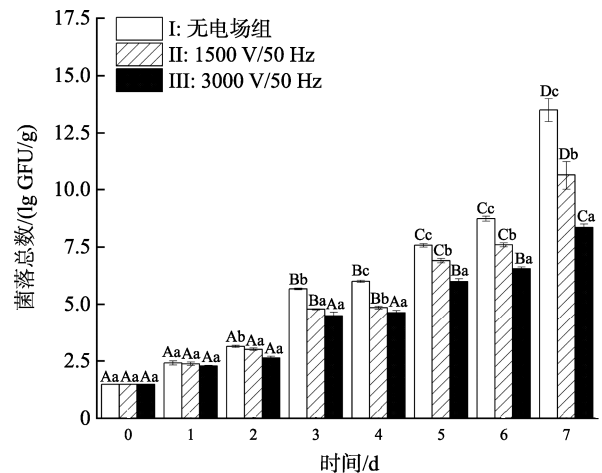


图 4 不同处理条件对贻贝菌落总数的影响($n=3$)

Fig.4 Effects of different treatment conditions on total bacterial counts of *Mytilus edulis* ($n=3$)

2.5 低压变频电场对冰温保藏贻贝感官评分的影响

本研究的感官评价指标包括颜色、气味、滋味和组织质地。从表 2 可知, 各组样品的感官评分在贮藏期间中都有不同程度的下降。经低压变频电场处理的样品组均比对照组的感官评分下降较缓慢, 第 2 d 开始各组间已出现差异, 但色泽、滋味等指标仍保持良好。贮藏第 4 d, I 组样品感官评分较低, 主要表现在贻贝肉变薄、不饱满、开始渗出汁液并散发出臭味。贮藏到第 5 d, I 组样品出现了明显的氨臭味, 此时, II、III 组的样品也出现了异味, 但明显弱于 I 组, 组织形态保持良好, 变色程度较弱, 有少许汁液渗出。贮藏第 7 d 时, 3 组样品与第 0 d 时的样品相比色泽变化不大, 但仍具有显著性差异。各组的贻贝肉变瘪, 不饱满, 均散发氨臭味, 其中 I 组的氨臭味最大, 滋味最差, 渗出大量汁液, II、III 组样品也存在不同程度的劣变。

整个贮藏期间, III 组样品的感官评分总分最高, 均显著高于对照组($P<0.05$), 从第 2 d 开始, 与 II 组样品的感官评分总分开始出现显著差异($P<0.05$)。由此可以得出, 经过低压变频电场处理后的蒸煮贻贝感官评价最好, 且电压越大, 感官评分越高。

表 2 不同处理条件对贻贝感官评分的影响(n=6)
Table 2 Effects of different treatment conditions on sensory quality scores of *Mytilus edulis* (n=6)

天数	组别	色泽	组织	形态气味	滋味	总分
0	I	9.98±0.02 ^{Aa}	9.95±0.04 ^{Aa}	9.81±0.11 ^{Aa}	9.78±0.03 ^{Aa}	39.52±0.03 ^{Aa}
	II	10.00±0.05 ^{Aa}	9.97±0.02 ^{Aa}	9.90±0.01 ^{Aa}	9.93±0.04 ^{Aa}	39.80±0.05 ^{Aa}
	III	10.00±0.02 ^{Aa}	9.98±0.04 ^{Aa}	9.95±0.05 ^{Aa}	9.98±0.03 ^{Aa}	39.91±0.05 ^{Aa}
1	I	9.93±0.09 ^{Aa}	9.90±0.08 ^{Ba}	9.00±0.36 ^{Ba}	9.03±0.40 ^{Ba}	37.87±0.76 ^{Ba}
	II	9.95±0.04 ^{Ab}	9.90±0.08 ^{Aa}	9.87±0.12 ^{Ab}	9.82±0.06 ^{Bb}	39.53±0.22 ^{Bb}
	III	9.95±0.04 ^{Ab}	9.90±0.04 ^{Aa}	9.94±0.04 ^{Ab}	9.95±0.05 ^{Ab}	39.70±0.07 ^{Bb}
2	I	9.00±0.08 ^{Aa}	8.92±0.08 ^{Ba}	8.93±0.12 ^{Da}	8.48±0.13 ^{Da}	35.33±0.24 ^{Da}
	II	9.32±0.14 ^{Ab}	9.83±0.06 ^{Bb}	9.23±0.08 ^{Bb}	9.13±0.11 ^{Db}	37.40±0.43 ^{Db}
	III	9.91±0.08 ^{Ab}	9.90±0.08 ^{Ab}	9.61±0.11 ^{Bc}	9.08±0.14 ^{Bc}	38.54±0.32 ^{Dc}
3	I	8.87±0.33 ^{Ba}	8.97±0.37 ^{Ba}	8.52±0.13 ^{Ea}	7.97±0.12 ^{Ea}	34.32±0.25 ^{Ea}
	II	9.07±0.13 ^{Ab}	9.13±0.22 ^{Bb}	9.12±0.18 ^{Db}	8.18±0.23 ^{Eb}	35.62±0.55 ^{Eb}
	III	9.12±0.09 ^{Ab}	9.90±0.06 ^{Bc}	9.24±0.17 ^{Dc}	8.91±0.09 ^{Dc}	37.19±0.12 ^{Ec}
4	I	7.00±0.41 ^{Ba}	7.23±0.17 ^{Da}	6.20±0.22 ^{Fa}	5.93±0.26 ^{Fa}	26.37±0.95 ^{Fa}
	II	8.15±0.12 ^{Bb}	8.17±0.08 ^{Db}	7.93±0.11 ^{Eb}	6.31±0.41 ^{Fb}	30.56±0.54 ^{Fb}
	III	9.11±0.18 ^{Ac}	8.31±0.38 ^{Db}	8.53±0.08 ^{Ec}	7.09±0.12 ^{Ec}	33.03±0.62 ^{Fc}
5	I	6.97±0.17 ^{Da}	5.98±0.18 ^{Ea}	4.77±0.21 ^{Ga}	4.43±0.12 ^{Ga}	22.15±0.25 ^{Ga}
	II	7.95±0.11 ^{Bb}	6.99±0.19 ^{Eb}	6.98±0.25 ^{Fb}	5.08±0.16 ^{Gb}	26.98±0.45 ^{Gb}
	III	8.11±0.12 ^{Ac}	8.06±0.12 ^{Ec}	7.82±0.11 ^{Fc}	5.98±0.35 ^{Fc}	29.96±0.45 ^{Gc}
6	I	6.17±0.17 ^{Da}	6.00±0.22 ^{Fa}	4.85±0.25 ^{Ha}	2.98±0.14 ^{Ha}	19.96±0.62 ^{Ha}
	II	7.05±0.15 ^{Db}	7.05±0.08 ^{Fb}	6.95±0.11 ^{Gb}	3.70±0.51 ^{Hb}	25.07±0.07 ^{Hb}
	III	7.17±0.25 ^{Bc}	7.13±0.26 ^{Fc}	7.58±0.49 ^{Gc}	4.01±0.12 ^{Gc}	25.59±1.35 ^{Hc}
7	I	6.13±0.26 ^{Ea}	5.87±0.12 ^{Ga}	3.97±0.17 ^{Ia}	2.45±0.19 ^{Ia}	18.45±0.25 ^{Ia}
	II	7.03±0.22 ^{Db}	5.99±0.12 ^{Gb}	5.97±0.17 ^{Hb}	2.98±0.20 ^{Ib}	22.01±0.21 ^{Ib}
	III	7.07±0.24 ^{Dc}	7.27±0.17 ^{Gc}	6.58±0.12 ^{Hc}	3.05±0.12 ^{Hc}	23.96±0.25 ^{Ic}

注:不同小写字母表示同一天不同处理组差异显著,不同大写字母表示同一处理组不同时间差异显著, $P<0.05$ 。

2.6 低压变频电场对冰温保藏贻贝质构特性的影响

本研究测定了经过电场处理后的贮藏末期第 7 d 的贻贝的各种 TPA 特性,并与空白对照组进行比较,结果如表 3 所示。经过低压变频电场处理后贻贝的硬度、咀嚼性、弹性、胶黏性均优于空白对照组。III 组咀嚼性、硬度、胶黏性低于 I 组和 II 组,咀嚼性和硬度表现为将样品咀嚼至吞咽所需的能量,当食品咀嚼至吞咽状态所需的能量超出了消费者所能接受的范围时,说明品质较差^[30]。因此咀嚼性和硬度越大,食品品质越差;胶黏性与贻贝的表面状态有关。品质好的贻贝表面干爽、不发黏、不会有汁液渗出的现象^[31]。在贮藏过程中,由于酶及微生物作用会造成贻

贝体内汁液渗出,体表发黏的现象^[32],因此胶黏性越高,贻贝品质越差。弹性表现为触碰贻贝时其柔软性以及组织结实状态^[33]。弹性比较大的贻贝柔软性和组织状态相对较好;内聚性反映的是贻贝肌肉组织间结合力的大小^[34]。内聚性越高,贻贝总体越完整,咀嚼时越细腻,贻贝品质越高。I 组和 II 组内聚性无显著性差异($P>0.05$),但显著性低于 III 组($P<0.05$),且 III 组弹性显著高于 I 和 II 组。由此可知,低压变频电场对冰温保藏的贻贝质构特性具有正面的影响,且电场强度越高,质构特性越好。与张婷等^[35]对咸鱼品质的质构与感官相关性进行分析的研究结果类似,咸鱼的咀嚼性、硬度、胶黏性与咸鱼品质呈负相关关系,弹性和内聚性与咸鱼品质呈正相关关系。

表 3 不同处理条件对贻贝质构特性的影响(n=3) Table 3 Effects of different treatment conditions on texture indexes of <i>Mytilus edulis</i> (n=3)					
组别	弹性/mm	内聚性	胶黏性/g	咀嚼性/g	硬度/g
I	2.33±0.18 ^a	0.58±0.02 ^a	3.14±1.11 ^c	7.89±3.57 ^c	5.35±1.69 ^c
II	2.34±0.29 ^b	0.58±0.04 ^a	3.03±0.73 ^b	7.09±2.75 ^b	5.09±1.04 ^a
III	2.43±0.36 ^c	0.62±0.03 ^b	3.01±0.92 ^a	7.07±1.72 ^a	5.04±1.29 ^b

注: 不同字母表示组间差异显著, $P<0.05$, 相同字母表示组间差异不显著, $P>0.05$ 。

2.7 蒸煮贻贝鲜度品质的综合评分

由于不同电场强度处理后的贻贝的鲜度指标、微生物指标、质构性能的变化趋势各异, 用单一指标来评价贻贝的贮藏品质不够客观、全面, 因此在保证贻贝食用安全的前提下, 采用变异系数权重法对所有指标进行综合评价。首先计算 3 组样品贮藏第 7 d 的各指标的平均值、标准偏差、变异系数, 由此得出各指标的权重值, 然后对所有数据进行标准化处理, 最后通过加权评分得出不同电场处理条件下的综合评分, 综合评分越高, 保鲜效果越好。数据处理结果见表 4、5。由表 5 可知, 3000 V/50 Hz 处理组的贻贝综合评分最高, 为-0.35, 无电场组的综合评分最低为-11.36。由此可以看出, 低压变频电场对蒸煮贻贝具有保鲜作用, 能在一定程度上保持蒸煮贻贝的鲜度品质, 且电压越大, 综合评分越高。

表 4 评定贻贝品质的各项指标的权重 Table 4 Weights of various indicators for comprehensive evaluation of <i>Mytilus edulis</i>				
指标	平均值	标准偏差	变异系数	权重值
pH	6.84	0.01	0.002	0.01
TVB-N/(mg/100 g)	11.77	0.01	0.001	0.01
菌落总数/(lg CFU/g)	6.70	0.15	0.022	0.14
感官评分	28.27	0.93	0.032	0.20
质构特性	3.68	0.37	0.101	0.64

表 5 贻贝品质评价指标的标准化处理结果及综合评分 Table 5 Standardized data and comprehensive score of <i>Mytilus edulis</i> quality evaluation index			
名称	I 组	II 组	III 组
pH	2.62	2.81	6.81
TVB-N/(mg/100 g)	-183.33	13.33	163.33
菌落总数/(lg CFU/g)	-76.85	-47.62	-13.40
感官评分	4.02	5.14	5.57
质构特性	-0.38	-0.28	0.47
综合评分	-11.36	-5.76	-0.35

3 结 论

本研究考察了低压变频电场对蒸煮贻贝冰温保藏期间品质的影响, 与未经电场处理组相比, 低压变频电场能够显著减缓蒸煮贻贝贮藏过程中 TVB-N 上升的速率, 延缓贮藏后期 pH 的升高, 抑制腐败细菌的生长, 降低贻贝变质速率, 抑制感官品质的劣变, 且 3000 V/50 Hz 处理组保鲜效果优于 1500 V/50 Hz 处理组。后续将从低压变频电场对贻贝蛋白质特性变化的影响及抑菌机制方面开展研究。

本研究可以在一定程度上推动解决贻贝冷藏后品质不佳、安全性降低等问题, 也可以为低压变频电场用于食品保鲜的研究提供一定的理论支持。低压变频电场的运用能够使得食品的物流辐射范围扩大, 更加有利于产品的推广, 提高产品的市场竞争力。

参考文献

[1] 程海, 袁跃峰, 李德然. 贻贝养殖及加工综述[J]. 农村经济与科技, 2019, 30(17): 81-85.
CHENG H, YUAN YF, LI DR. Review of mussel breeding and processing [J]. Rural Econ Scitech, 2019, 30(17): 81-85.

[2] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站. 中国水产学会. 2018 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018.
Department of Agriculture, Ministry of Fisheries and Fisheries Administration, National Aquatic Products Technology Promotion Station, China Fisheries Association. China Fishery Statistic Yearbook 2018 [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2018.

[3] 王红, 王少华, 熊光权, 等. 水产品保鲜技术研究及发展趋势[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(12): 15-18.
WANG H, WANG SH, XIONG GQ, et al. Research and development trend of aquatic product fresh-keeping technology [J]. Hubei Agric Sci, 2019, 58(12): 15-18.

[4] 赵启蒙, 许澄, 包建强, 等. 贝类保鲜技术研究进展[J]. 广东农业科学, 2014, 41(6): 117-121.
ZHAO QM, XU C, BAO JQ, et al. Research progress in shellfish preservation technology [J]. Guangdong Agric Sci, 2014, 41(6): 117-121.

[5] 朱士臣, 曾曦, 龙官誉, 等. 茶多酚-姜黄素复配液对冻藏贻贝肉品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(15): 198-205.
ZHU SC, ZENG X, LONG GY, et al. The effect of tea polyphenol and curcumin on the quality of frozen mussel meat [J]. Food Ferment Ind, 2021, 47(15): 198-205.

[6] 肖林, 陆锐锋, 胡华超, 等. 电子束高剂量辐照新鲜贻贝肉制品的试验研究[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2011, 29(3): 179-182.
XIAO L, LU RF, HU HC, et al. Experimental research on fresh mussel meat irradiated by high-dose electron beam [J]. J Radiat Res Radiat Process, 2011, 29(3): 179-182.

[7] XIU XL, PAN S, JING ZJ, et al. Effect of low frequency ultrasound thawing method on the quality characteristics of Peru squid (*Dosidicus gigas*) [J]. Food Sci Technol Int, 2019, 25(2): 171-181.

[8] JAYATHILAKAN K, KHUDSIA S. Irradiation preservation of meat and meat products and its effect-A review [J]. J Meat Sci, 2018, 13(1): 1-17.

[9] NAGMA M, YOGESH G, SHALINI A, et al. Combined effect of chemical preservative and different doses of irradiation on green onions to enhance shelf life [J]. J Saud Soc Agric Sci, 2020, 19(3): 207-215.

[10] 余小亮. 复合生物保鲜剂保鲜机理及对鲈鱼冷藏过程中品质变化的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2018.

- YU XL. Preservation mechanism of compound biological preservatives and the changes in quality of perch during chilled storage [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2018.
- [11] 李颖, BING SONG, 殷涛, 等. 低频变化电场促进细胞定向移动的研究[J]. 生物医学工程研究, 2021, 40(2): 105–113.
- LI Y, BING S, YIN T, *et al.* Study on the effect of low frequency varying electric field on cell directional movement [J]. J Biol Eng Res, 2021, 40(2): 105–113.
- [12] HE GD, YAN XX, WANG XD, *et al.* Extraction and structural characterization of collagen from fishbone by high intensity pulsed electric fields [J]. J Food Process Eng, 2019, 42(6): e13214.
- [13] SUI YM, HUANG WC, WU YF, *et al.* Lipid extraction from Greenland halibut (*Reinhardtius hippoglossoides*) by-product in low-voltage DC electric field and its mechanism [J]. J Clean Prod, 2021, 283: 124673.
- [14] BARBA FJ, GRIMI N, VOROBIEV E. New approaches for the use of non-conventional cell disruption technologies to extract potential food additives and nutraceuticals from microalgae [J]. Food Eng Rev, 2014, 7(1): 45–62.
- [15] HUO ZY, LI GQ, YU TF, *et al.* Cell transport prompts the performance of low-voltage electroporation for cell inactivation [J]. Sci Rep-UK, 2018, 8(1): 15832.
- [16] ZITUNI D, SCHUTTG H. The growth of *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* in low-direct current electric fields [J]. Int J Oral Sci, 2014, 6(7): 14.
- [17] 史恬恬, 周卓颖, 虞舟. 基于低压变频电场技术对带鱼(*Trichiurus lepturus*)保鲜过程中微生物群落影响分析[J]. 海洋与湖沼, 2022, 53(1): 133–140.
- SHI TT, ZHOU ZY, Y Z, *et al.* Effect of low-voltage variable-frequency electric field on microbial community of *Trichiurus lepturus* during preservation [J]. Oceanologia, 2022, 53(1): 133–140.
- [18] NUNEZ H, CAVADA G, MORENO J, *et al.* Effect of a moderate electric field on the salting of Atlantic salmon (*Salmo salar*): An experimental study and phenomenological understanding [J]. Food Res Int, 2020, 137: 109475.
- [19] 胡金鑫, 李军生, 黄国霞, 等. 水产品鲜度表征与评价方法的研究进展[J]. 食品工业, 2014, 35(3): 225–228.
- HU JX, LI JS, HUANG GX, *et al.* Research progress of characterization and evaluation methods for freshness of aquatic products [J]. Food Ind, 2014, 35(3): 225–228.
- [20] 李锐, 孙祖莉, 杨贤庆, 等. 加热方式对罗非鱼片质构特性和蛋白质理化特性的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2020, 35(4): 577–583.
- LI R, SUN ZL, YANG XQ, *et al.* Effects of heating methods on texture and physicochemical properties of tilapia fillets [J]. J Dalian Ocean Univ, 2020, 35(4): 577–583.
- [21] 牛改改, 游刚, 王培, 等. 基于变异系数权重法评价三种干燥方法对牡蛎干品质的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(14): 68–73, 77.
- NIU GG, YOU G, WANG P, *et al.* Evaluation of the effect of three drying methods on oyster dry quality based on coefficient of variation weight method [J]. Sci Technol Food Ind, 2019, 40(14): 68–73, 77.
- [22] ZHOU YG. Effects of acid and alkaline treatments on physicochemical and rheological properties of tilapia surimi prepared by pH shift method during cold storage [J]. Food Res Int, 2021, 145: 110424.
- [23] 李培迪, 李欣, 张德权, 等. 冰温贮藏对宰后肌肉成熟进程的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(3): 554–562.
- LI PD, LI X, ZHANG DQ, *et al.* Effects of ice-temperature storage on postmortem muscle maturation [J]. Sci Agric Sin, 2016, 49(3): 554–562.
- [24] KO WC, YANG SY, CHANG CK, *et al.* Effects of adjustable parallel high voltage electrostatic field on the freshness of tilapia (*Oreochromis niloticus*) during refrigeration [J]. LWT-Food Sci Technol, 2016, 66: 151–157.
- [25] WANG N, TIAN YS, ZHANG JJ, *et al.* Involvement of glycolysis activation in flatfish sexual size dimorphism: Insights from transcriptomic analyses of *Platichthys stellatus* and *Cynoglossus semilaevis* [J]. Comp Biochem Phys D, 2021, 39: 100832.
- [26] 陈新梅, 薛文静, 赵元. 高压脉冲电场对微生物的灭活作用研究进展[J]. 中国药师, 2016, 19(9): 1737–1740.
- CHEN XM, XUE WJ, ZHAO Y. Research progress on inactivation of microorganisms by high-voltage pulsed electric field [J]. China Pharm, 2016, 19(9): 1737–1740.
- [27] 魏国平, 冯志刚, 熊双丽, 等. DENBA+静电场猪肉保鲜效果研究[J]. 现代食品, 2019, 12(23): 99–102, 105.
- WEI GP, FENG ZG, XIONG SL, *et al.* Fresh-keeping Effect of DENBA+electrostatic field on pork [J]. Mod Food, 2019, 12(23): 99–102, 105.
- [28] OHSHIMA T, TANINO T, GUIONET A, *et al.* Mechanism of pulsed electric field enzyme activity change and pulsed discharge permeabilization of agricultural products [J]. Jpn J Appy Phys, 2021, 60(6): 060501.
- [29] 赵良, 岑剑伟, 李来好, 等. 高压静电场结合冰温气调保鲜技术对罗非鱼鱼片品质的影响[J]. 南方水产科学, 2016, 12(3): 91–97.
- ZHAO L, CEN JW, LI LH, *et al.* Effect of high voltage electrostatic field combined with controlled atmosphere at ice temperature on the quality of tilapia fillets [J]. South China Fish Sci, 2016, 12(3): 91–97.
- [30] NINOMAE S, HIROYUKI N, FUTOSHI K. Food texture quantification using a magnetic food texture sensor and dynamic time warping [J]. Food Sci Technol Res, 2018, 24(2): 257–263.
- [31] HELEN SJ. Explaining food texture through rheology [J]. Curr Opin Food Sci, 2018, 21: 7–14.
- [32] 王丽平, 李苑, 余海霞, 等. 高压电场对生鲜食品保鲜机理研究进展[J]. 食品科学, 2017, 38(3): 278–283.
- WANG LP, LI Y, YU HX, *et al.* Research progress on mechanism of high voltage electric field for fresh food preservation [J]. Food Sci, 2017, 38(3): 278–283.
- [33] NISHINARI K, FANG YP. Perception and measurement of food texture: Solid foods [J]. J Texture Stud, 2018, 49(2): 160–201.
- [34] ROSENTHAL AJ, THOMPSON P. What is cohesiveness?-A linguistic exploration of the food texture testing literature [J]. J Texture Stud, 2021, 52(3): 294–302.
- [35] 张婷, 吴燕燕, 李来好, 等. 咸鱼品质的质构与感官相关性分析[J]. 水产学报, 2013, 37(2): 303–310.
- ZHANG T, WU YY, LI LH, *et al.* Correlation between texture and sensory characteristics of salted fish [J]. J Fish China, 2013, 37(2): 303–310.

(责任编辑: 郑丽于梦娇)

作者简介



吴越, 硕士研究生, 主要研究方向为食品加工与安全。
E-mail: 573544697@qq.com



罗红宇, 教授, 主要研究方向为水产品贮藏与加工。
E-mail: lisa8919@163.com