

## 低压静电场处理对海鲜菇贮藏品质的影响

黄庆斌, 马艳红, 田艳, 卢旭, 潘金凤

### Effect of Low Voltage Electrostatic Treatment on the Quality of *Hypsizygus marmoreus*

HUANG Qingbin, MA Yanhong, TIAN Yan, LU Xu, and PAN Jinfeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025030247>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

基于低压静电场技术(LVEF)协同低温对舟山杨梅保鲜过程中品质的影响

Effect of Low Voltage Electrostatic Field Combined with Low Temperature on Quality of Zhoushan Bayberry during Fresh-keeping  
食品工业科技. 2020, 41(7): 265-270 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.07.044>

低压静电场辅助解冻对牛肉品质的影响

Effect of Low Voltage Electrostatic Field Assisted Thawing on Beef Quality  
食品工业科技. 2024, 45(17): 48-56 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023090023>

低压静电场处理对竹节虾(*Penaeus japonicus*)微冻贮藏过程中品质的影响

Effect of Low Voltage Electrostatic Field Treatment on the Quality of *Penaeus japonicus* during Microfreezing Storage  
食品工业科技. 2020, 41(7): 1-6,12 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.07.001>

低压静电场处理对带鱼微冻贮藏期间品质变化影响

Effect of Low Voltage Electrostatic Field(LVEF)Treatment on the Quality Changes of *Trichiurus lepturus* during Micro-frozen Storage  
食品工业科技. 2020, 41(23): 277-283 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019110043>

不同温度下低压静电场辅助冷冻对沙棘果品质的影响

Effect of Low Voltage Electrostatic Field-assisted Freezing on Quality of Seabuckthorn Fruit  
食品工业科技. 2025, 46(6): 120-127 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024040219>

低压静电场协同低温高湿解冻对牛肉嫩度和持水性的影响

Effects of Low Voltage Electrostatic Field Combined with Low Temperature and High Humidity Thawing on Beef Tenderness and Water Retention  
食品工业科技. 2024, 45(20): 49-58 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023110149>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

黄庆斌, 马艳红, 田艳, 等. 低压静电场处理对海鲜菇贮藏品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(19): 367–377. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030247

HUANG Qingbin, MA Yanhong, TIAN Yan, et al. Effect of Low Voltage Electrostatic Treatment on the Quality of *Hypsizygus marmoreus*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(19): 367–377. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030247

· 贮运保鲜 ·

# 低压静电场处理对海鲜菇贮藏品质的影响

黄庆斌<sup>1</sup>, 马艳红<sup>1</sup>, 田艳<sup>1</sup>, 卢旭<sup>2,\*</sup>, 潘金凤<sup>1</sup>

(1. 福建林业职业技术学院, 福建南平 353000;  
2. 福建农林大学食品科学学院, 福建福州 350002)

**摘要:** 为探究低压静电场处理对海鲜菇贮藏品质及货架期的影响, 本研究设置 24±1 °C 常温贮藏为对照 (CK), 并采用 4±1 °C 低温冷藏 (RG)、低压静电场 (LVEF) 及其交替处理 (LVEF+RG), 在 18 d 内对海鲜菇的外观、风味及质构变化进行系统研究。三种处理均能有效延缓褐变、减少水分流失并防止萎蔫皱缩。LVEF 在整个贮藏中较好地抑制 31 kDa 和 14.4 kDa 特征蛋白降解, 6 d 内较好维持鲜味、香气和弹性, 但在 18 d 时硬度和弹性显著下降; RG 在质构稳定性方面更具优势, 并在 12 d 内可较好维持风味, 但其失重率最高, 特征蛋白条带减弱甚至消失, 可能导致更多营养物质流失; LVEF+RG 在 6 d 内硬度维持较好, 但在 12 d 时质构劣于 LVEF 和 RG, 其在水分结构 (尤其是结合水) 保持上表现更佳, 维持风味的效果仅次于 RG, 且失重率与 LVEF 相当。综上, 应根据实际贮藏周期合理选择保鲜方式, 第 12 d 可能是关键节点, LVEF+RG 在延缓海鲜菇组织劣变方面展现出良好的应用潜力, 兼顾了节能和保鲜效果, 具有重要的实际应用价值。

**关键词:** 低压静电场, 海鲜菇, 采后品质, 保鲜, 协同保鲜

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)19-0367-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030247

本文网刊:



## Effect of Low Voltage Electrostatic Treatment on the Quality of *Hypsizygus marmoreus*

HUANG Qingbin<sup>1</sup>, MA Yanhong<sup>1</sup>, TIAN Yan<sup>1</sup>, LU Xu<sup>2,\*</sup>, PAN Jinfeng<sup>1</sup>

(1. Fujian Forestry Vocational & Technical College, Nanping 353000, China;  
2. College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** In order to explore the effect of low-voltage electrostatic field treatment on storage quality and shelf life of seafood mushrooms, this study set 24±1 °C room temperature storage as the control (CK), and used 4±1 °C low-temperature refrigeration (RG), low-voltage electrostatic field (LVEF) and its alternating treatment (LVEF+RG) to systematically study the changes in appearance, flavor and texture of seafood mushrooms within 18 days. All three treatments could effectively delay browning, reduce water loss and prevent wilting and shrinkage. LVEF inhibited the degradation of 31 kDa and 14.4 kDa characteristic proteins well during the whole storage, and maintained the freshness, aroma and elasticity well within 6 days, but the hardness and elasticity decreased significantly at 18 days. RG had more advantages in texture stability and could maintain the flavor well within 12 days, but its weight loss rate was the highest, and the characteristic protein bands weakened or even disappeared, which might lead to more nutrient loss. LVEF+RG maintained the hardness well within 6 days, but its texture was inferior to LVEF and RG at 12 days, and it performed better in maintaining the water structure (especially bound water), and the effect of maintaining the flavor was second only to RG, and the weight loss rate was comparable to LVEF. In summary, the preservation method should be reasonably selected according to the actual

收稿日期: 2025-03-18

基金项目: 南平市自然科学基金联合资助项目 (N2023J013); 福建省林业科学技术研究项目 (2024FKJ30); 2025 年中央财政林业科技推广示范项目 (闽【2025】TG29 号); 福建省教育厅中青年教育科研项目 (JAT241277); 福建林业职业技术学院科研项目 (2019YSZ004)。

作者简介: 黄庆斌 (1983-), 男, 硕士, 讲师, 研究方向: 天然产物提取及应用, E-mail: 1053962824@qq.com。

\* 通信作者: 卢旭 (1986-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品加工与营养, E-mail: lxvfst@yeah.net。

storage period, and the 12th day might be the key node. LVEF+RG showed good application potential in delaying the deterioration of seafood mushroom tissues, taking into account both energy consumption and preservation effect, and had important practical application value.

**Key words:** low voltage electrostatic field; *Hypsizygus marmoreus*; postharvest quality; preservation; synergistic preservation

海鲜菇(*Hypsizygus marmoreus*)又名真姬菇、斑玉蕈,是一种药食两用的珍稀菌类,具有抗氧化、抗炎、提升人体免疫力等多种药用价值<sup>[1-3]</sup>。海鲜菇味道鲜美、口感鲜嫩滑脆,同时因其富含多糖、必需氨基酸、维生素等多种营养元素及功能性成分而备受青睐<sup>[4-6]</sup>。但海鲜菇在采收后,由于呼吸强度高、代谢速率快、易出现软化、机械损伤和酶促褐变等问题,菇体极易腐烂并会出现品质迅速下降等问题<sup>[7-8]</sup>。海鲜菇在我国上海、山西、河北、福建、广东等地均有栽培,产量持续增长,已实现规模与商业化生产<sup>[9]</sup>。目前海鲜菇是我国食用菌工厂化栽培的第三大品种(仅次于金针菇和杏鲍菇)<sup>[9-10]</sup>,现有保鲜技术已经远不能满足产业化的需求。此外传统保鲜技术也存在不足之处:传统低温保鲜技术能耗较高且无法长期冷藏;臭氧处理虽能有效抑制微生物的生长,但浓度控制不当容易加速氧化反应<sup>[11]</sup>;富氢水处理虽能调节菇的抗氧化能力,但效果不稳定且易受处理条件限制<sup>[12]</sup>;辐照保鲜虽能较好地保持风味和营养,但消费者对辐照食品的接受能力较差,此技术的推广较为困难<sup>[13]</sup>;涂膜保鲜、阻隔保鲜高效环保,但机械性差、工艺难控<sup>[14]</sup>。因此选择更经济和有效的新型保鲜技术对海鲜菇采后的减损保质和经济效益提升具有重要价值<sup>[15]</sup>。

低温贮藏(Refrigerate, RG)是目前应用较广泛的果蔬保鲜方法,但仅使用低温贮藏对海鲜菇的保鲜效果有限<sup>[16]</sup>。低压静电场(Low Voltage Electrostatic Field, LVEF)作为一种新兴的非热物理高效保鲜技术,具有能耗低、绿色环保等优点<sup>[17]</sup>。LVEF主要通过空间放电形成负离子环境,改变果蔬的水分活度和电荷分布,同时降低了果蔬的呼吸作用和氧化作用(显著降低活性氧(ROS)代谢反应水平,诱导抗氧化相关酶活性),维护细胞膜的完整性,抑制微生物生长,从而延长果蔬的货架期<sup>[18-19]</sup>。此外,LVEF产生的静电波可与细胞内的水分子产生共振,改善持水能力,防止营养物质流失,减轻失重,维持原有品质<sup>[17,20-22]</sup>。

综上所述,低压静电场技术对果蔬产品具有良好的保鲜效果,其作用机制可能同样适用于鲜食食用菌领域,具有一定的应用潜力,但目前鲜见低压静电场技术对海鲜菇进行采后保鲜处理效果的研究报道。本研究从海鲜菇失重率、褐变程度、水分迁移情况以及蛋白组分变化等多维度体系入手,探究低温贮藏、低压静电场及两者协同交替保鲜3种方式对海鲜菇品质的影响。明确低压静电场保鲜技术对海鲜

菇的作用机制,进而为采后海鲜菇的贮藏保鲜技术的开发提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

海鲜菇 由福建顺昌森农菇业有限公司提供,选取菇体洁白、菌柄菌盖无气生菌丝、无斑点及无褐变、无机械损伤、大小均匀的子实体;盐酸(HCl)、氢氧化钠(NaOH) 分析纯,国药集团化学试剂有限公司;考马斯亮蓝 G-250 试剂 南京奥多福尼生物有限公司;P1200-50T型 SDS-PAGE 凝胶试剂盒、Marker(14.4~97.4 kDa) 北京索莱宝科技有限公司。

SHA-C 型数显水浴恒温振荡器 常州国华电器有限公司;FA2104 型电子天平 天津方瑞仪器生产有限公司;Avanti J-E 型多用途高效离心机 美国 Beckman Coulter 公司;MZsoMR23-60H-I 型核磁共振仪 苏州纽迈分析仪器股份有限公司;SA402B 型电子舌 日本 Insent 公司;HD-3A 型快速水分活度测定仪 无锡市华科仪器仪表有限公司;PEN3 型电子鼻 德国 Airsense 公司;170-3930 电泳仪 美国 BIO-RAD 公司;24-25-0R 型凝胶成像仪 以色列 Bio-Imaging Systems 公司;DENBA+型鲜度保持电场装置 德恩伯亚(中国)有限公司;ADCI 系列全自动测色色差计 北京辰泰克仪器技术有限公司;ENS-TDV 质构仪 北京盈盛恒泰科技有限责任公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 样品处理及贮藏条件 本实验选取菇体洁白、菌柄菌盖无气生菌丝、无斑点及无褐变、无机械损伤、大小均匀的海鲜菇作为试验对象。将样品置于塑料保鲜盒中,保鲜盒外包裹食品保鲜膜。试验样品随机分成四组,每组各 500 g 海鲜菇样品。CK(空白)组:将样品放置于恒温培养箱(24±1)℃ 内贮藏。RG(冷藏)组:将样品放置于鲜度保持电场装置中的低温贮藏室贮藏(此装置不施加电场),温度(4±1)℃。LVEF(电场)组:将样品放置于 DENBA+型鲜度保持电场装置内贮藏,温度(4±1)℃,输入电压:AC 220~240 V。LVEF+RG(冷藏结合电场)组:在(4±1)℃ 条件下,将样品置于 DENBA+型鲜度保持电场装置中,进行低温与低温电场的交替循环方式贮藏(在鲜度保持电场装置中的低温贮藏室放置 3 d,随后将样品转入 DENBA+装置(施加电场的环境)处理 3 d(此 6 d 为一个时间循环,属于间歇电场处理)),分别于 0、6、12、18 d 的贮藏时间点在各组中取样并进行后续测试。

1.2.2 褐变指数测定 褐变指数(BI)代表棕色纯

度。参考 Yan 等<sup>[22]</sup>的方法, 选取海鲜菇子实体进行测试, 利用全自动测色色差计测定  $L^*$ 、 $a^*$  和  $b^*$  值, 计算褐变指数(Browning Index, BI)。

$$BI=100(X-0.310)/0.172$$

$$X = (a^* + 1.750L^*) / (5.645L^* + a^* - 3.012b^*)$$

1.2.3 失重率测定 采用称重法对贮藏期的海鲜菇进行测定<sup>[23]</sup>。失重率按下式计算:

$$L(\%) = \frac{M_0 - M}{M_0} \times 100$$

式中:  $L$ -失重率, %;  $M_0$ -海鲜菇样本初始质量, g;  $M$ -取样当天海鲜菇样本质量, g。

1.2.4 水分活度测定 在 0、6、12、18 d 的贮藏时间下各组分别取 5 g 海鲜菇的鲜样, 置于快速水分活度仪中进行测定<sup>[24]</sup>。

1.2.5 电子舌测定 取适量海鲜菇各样品在 4000 r/min, 25 °C 条件下离心 10 min, 每个样品移取 30 mL 上清液置于电子舌专用测量杯中, 采用 C00、AE1、CA0、CT0、AAE、GL1、BT0 共 7 个传感器, 传感器经活化和校正后, 进行常温下检测。每个样品检测时间为 30 s, 两个样品之间电子舌清洁时间为 5 min。

1.2.6 电子鼻测定 取适量海鲜菇样品置于 60 mL 棕色顶空瓶中, 25 °C 下水浴平衡 30 min 后进行测定。测定参数设置: 自洁时间和检测时间均为 100 s, 传感器归零时间 5 s; 样品准备时间为 5 s。选择 97~100 s 之间的传感器信号值进行数据分析。传感器性能描述见表 1。

表 1 电子鼻传感器性能描述

Table 1 Electronic nose sensor performance description

阵列序号	传感器名称	传感器性能描述
1	W1C	芳香成分, 苯类
2	W5S	灵敏度大, 对氮氧化物很灵敏
3	W3C	氨水, 对芳香成分灵敏
4	W6S	主要对氢气有选择性
5	W5C	烷烃芳香成分
6	W1S	对甲烷等短链烷烃灵敏
7	W1W	对无机硫化物灵敏
8	W2S	对醇醚醛酮类灵敏
9	W2W	芳香成分, 对有机硫化物灵敏
10	W3S	对烷烃灵敏, 长链烷烃类

1.2.7 质构特性测定 选取菇柄(菌盖下 2 cm 处)直径为 1.0~1.2 cm 的海鲜菇进行测定<sup>[25]</sup>。使用质构仪测定, 测试条件为: 探头类型: 10 mm 圆柱形探头; 测定前和测定后速率 200 mm/min, 测定中速率 90 mm/min, 探头插入海鲜菇的中心部位, 样品形变程度设置为 30%, 间隔时间 5 s; 数据采集速率 200 次/s。

1.2.8 低场核磁共振成像与水分子弛豫信息采集 采用低场核磁共振光谱仪中的 CPMG 脉冲序列测定横向弛豫时间( $T_2$ ), 将(4.0±0.1)g 样品放入玻璃管

中, 操作参数: 等待时间 3500 ms、回波时间 0.5 ms、回波数 5000。成像: 中心频率 21 MHz, 信号采样点数 400, 采样频率 200 kHz, 重复采样等待时间 800 ms, 回波时间 20 ms, 采样点数 2048, 累加次数 2。利用 MultiExp Inv 分析软件, 采用多指数拟合和联合迭代重建算法对 CPMG 衰变曲线进行拟合, 得到相应的核磁共振参数。

1.2.9 凝胶电泳测定 采用聚丙烯酰胺凝胶电泳系统(SDS-PAGE), 根据试剂盒配制 12% 分离胶和 5% 浓缩胶, 电泳分别在 80 V(分离胶)和 120 V(浓缩胶)的恒定电压下进行。Marker 上样量为 5 μL, 海鲜菇蛋白质溶液上样量 5 μL, 凝胶在考马斯亮蓝中染色 2 h 后, 使用脱色液进行脱色处理, 随后置于凝胶成像仪内拍照并记录。

### 1.3 数据处理

实验平行测定 3 次, 结果以平均值±标准差的形式表示。采用 Origin 2024 绘图, SPSS 26 软件内的 Duncan 多重比较法进行显著性分析( $P < 0.05$  为差异性显著), 并以不同小写字母表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 低压静电场处理对贮藏期海鲜菇颜色的影响

海鲜菇属于呼吸跃变型植物, 采后仍会进行较

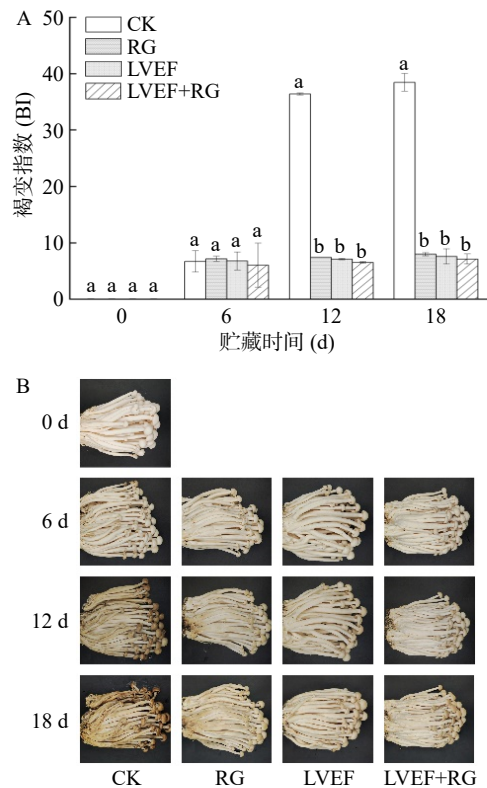


图 1 低压静电场处理对海鲜菇贮藏期间褐变指数与外观的影响

Fig.1 Effect of low voltage electrostatic field treatment on browning index and surface of *Hypsizygos marmoreus* during storage

注: 不同英文小写字母代表相同时间下不同技术处理的海鲜菇间差异显著( $P < 0.05$ ); 图 2 同。

强的呼吸作用和代谢活动,在呼吸跃变后期会加快衰老速度并导致过度软化和褐变的现象,进而失去商品价值<sup>[8]</sup>。海鲜菇褐变与多酚氧化酶、过氧化物酶等酶活性的变化密切相关<sup>[26]</sup>。如图 1A 所示,在贮藏 6 d 后,各组之间的褐变指数 BI 均同步增加,且无显著性差异( $P>0.05$ ),BI 范围为 6.02~7.16。然而,随着贮藏天数的进一步增加,CK 组的 BI 值显著升高( $P<0.05$ ),并在第 18 d 达到最高值 38.45,这可能是由常温储藏下海鲜菇较活跃的呼吸作用所导致<sup>[27]</sup>。而 RG、LVEF 和 LVEF+RG 组的 BI 值则在 6 d 后基本趋于稳定,在 18 d 时 RG、LVEF 和 LVEF+RG 组较 CK 组的 BI 值分别降低了 79.2%、80.30%、和 81.51%。这一结果表明,冷藏、低压静电场和交替处理工艺能够有效延缓海鲜菇在贮藏期(6~18 d)的褐变进程。

图 1B 展示了不同贮藏天数对海鲜菇外观变化的影响。结果表明,CK 组在贮藏 12 d 时,其菌盖、菌柄和菌托均出现褐变且呈现暗沉的黄褐色;而经过冷藏或低压静电场处理的海鲜菇,其菌盖和菌柄未见显著褐变,仅在菌托部位少许褐变,表现褐变相对程度为:RG 组>LVEF+RG 组>LVEF 组。其中, RG 和 LVEF+RG 组菌托上出现的斑点可能由微生物活动加剧引起,而 LVEF 组并未见明显斑点,说明低压静电场处理可能有效地抑制微生物活动<sup>[28]</sup>。至贮藏 18 d 时,CK 组的颜色进一步加深,形态明显萎蔫皱缩,这可能是由于大量水分的流失所致。相比之下, RG、LVEF 和 LVEF+RG 组整体外观保持良好,未出现较明显的色泽暗淡及萎蔫现象,但 LVEF 和 LVEF+RG 组的海鲜菇体积依然略有缩小,这可能与周围环境湿度较低所导致的水分流失有关<sup>[16]</sup>。综上所述,低压静电场单独处理和与冷藏结合处理对抑制海鲜菇贮藏过程中的褐变具有较好的效果。

## 2.2 低压静电场处理对贮藏期海鲜菇失重率、水分活度的影响

失重率是反映海鲜菇采后品质变化和新鲜程度的重要指标之一,其变化与呼吸作用和蒸腾作用导致的水分及营养物质损失密切相关<sup>[29]</sup>。如图 2A 所示,所有海鲜菇的失重率随贮藏天数的延长整体上呈逐渐上升趋势,尤其在贮藏 12 d 后,各组失重率的涨幅显著增加。这一现象可能由水分蒸腾作用增强、微生物活动和菇体组织分解加剧所导致<sup>[27]</sup>,这也与第 12 d 后菇体出现褐变加重及斑点增多的表观试验结果一致。此外, RG 组在整个贮藏中失重率始终显著高于其他处理组( $P<0.05$ ),这可能由于其在较强的空气对流环境进行处理,这加快了菇体表面水分的蒸发速度并导致较高失重率<sup>[23]</sup>。相比之下, LVEF 和 LVEF+RG 组在贮藏 6 d 内的失重率始终保持较低水平,尤其是 LVEF+RG 组在贮藏 12 d 时的失重率仅为 0.91%,这表明引入交替低压静电场处理有助于减缓海鲜菇在贮藏中组织降解和营养物质流失,能更

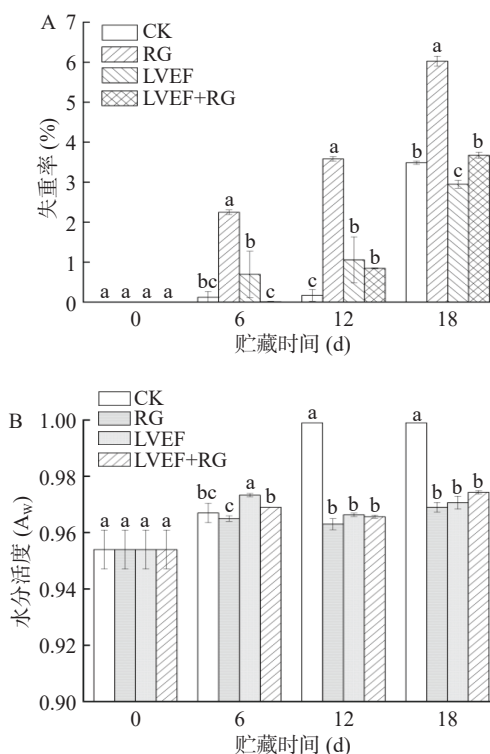


图 2 低压静电场处理对海鲜菇贮藏期间失重率、水分活度的影响

Fig.2 Effect of low voltage electrostatic field treatment on weight loss rate and water activity of *Hypsizygus marmoreus* during storage

好地维持菇体完整性<sup>[16]</sup>,还可降低单独低压静电场处理所带来的能耗成本。

图 2B 显示,贮藏 6 d 以后,海鲜菇的水分活度整体与失重率呈反比关系,其中高失重率的 RG 组水分活度始终处于较低水平,表明此组的细胞壁可能依然处于完整状态。贮藏时间在 12 d 时,海鲜菇的蒸腾作用可能大于呼吸作用,导致菇体水分的流失,使 RG、LVEF 和 LVEF+RG 组的水分活度均有所下降<sup>[12]</sup>。贮藏 18 d 后,与 CK 组相比, RG、LVEF 和 LVEF+RG 组水分活度分别降低了 3.00%、2.84% 和 1.58%。CK 组在 12 d 时相较于 6 d 时水分活度提高可能由于室温空气中湿度较高,海鲜菇吸湿和组织瓦解而引起水分活度骤增,在 18 d 时水分活度趋于稳定。高水分活度通常伴随着微生物活动加剧及更快的腐败过程,从而显现出显著的褐变和萎蔫,这在 CK 组第 12 d 的褐变指数及外观观察中也得到了验证。综上所述,虽然低压静电场与冷藏循环处理与低压静电场单独贮藏相比在能耗成本方面具有一定优势且在维持水分活度方面具有相似的效果,但在贮藏中可能还需要适当的包装措施(如使用保湿包装材料)来维持海鲜菇的水分活度,延缓品质下降。

## 2.3 低压静电场处理对贮藏期海鲜菇滋味的影响

电子舌可测定酸味、苦味、涩味、鲜味、咸味、味道丰富度和苦味回味、涩味回味等指标,这些滋味可还原海鲜菇滋味特征变化<sup>[30]</sup>。试验结果如图 3 所示,贮藏初期涩味、酸味和咸味的无味点均为负值,

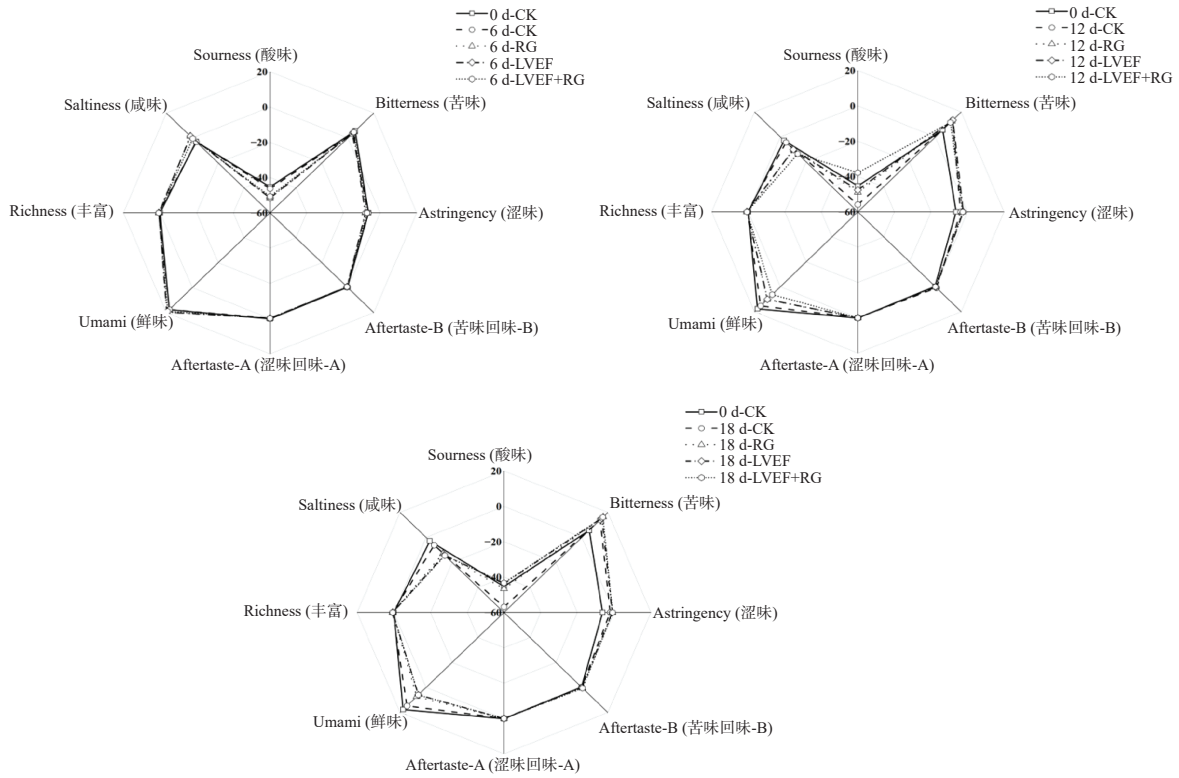


图 3 低压静电场处理对海鲜菇贮藏期间滋味的影响

Fig.3 Effect of low voltage electrostatic field treatment on the flavor of *Hypsizygos marmoreus* during storage

除了鲜味和苦味外,其他滋味指标的无味点均接近 0。其中样品中低于各滋味无味点的视为无效味觉,因此海鲜菇中主要特征性滋味是鲜味和苦味。随着贮藏天数的增加,所有处理组的海鲜菇鲜味均降低,同时苦味有所增加。在贮藏 6 d 后,较 CK 组,其他各处理组鲜味响应值较高。说明在贮藏前期(<6 d)采用冷藏或低压静电场技术可较大限度维持海鲜菇的鲜味。12 d 储藏后这些特征性滋味均变化显著,苦味响应值为: LVEF 组>CK 组>RG 组>LVEF+RG 组,鲜味响应值: CK 组>RG 组>LVEF 组>LVEF+RG 组。此结果表明,4 ℃ 冷藏处理可能有利于 12 d 储存时间下海鲜菇特征滋味的维持,而低压静电场改变了海鲜菇内部氧化还原稳态,虽然抑制了海鲜菇的褐变进程,但可能导致鲜味成分降解及贮藏过程中代谢产物内苦味物质的积累<sup>[30]</sup>。贮藏至 18 d,各处理组的苦味响应值甚至持续增加,而鲜味响应值随之降低,这在秀珍菇贮藏中也发现类似滋味变化趋势<sup>[31]</sup>。综上,冷藏或低压静电场技术在贮藏前期(<6 d)可最大限度地维持海鲜菇的鲜味。然而在贮藏 12 d 后,也会导致海鲜菇苦味有所增加和鲜味部分下降。

2.4 低压静电场处理对贮藏期海鲜菇气味的影响

如图 4 所示,所有组样品的整体气味轮廓相似,表明尽管经过不同方式贮藏后海鲜菇的挥发性成分种类总体一致,但各气味成分占比有所差异。其中 0 d-CK 组海鲜菇依次对 W1W、W5S、W2S 和 W1S 传感器的响应值较高,说明其挥发性组分主要由无机硫化物、氢氧化物、醇醚醛酮类和甲烷等短链烷烃组成。贮藏 6 d 后海鲜菇香气发生显著变化,CK 组的

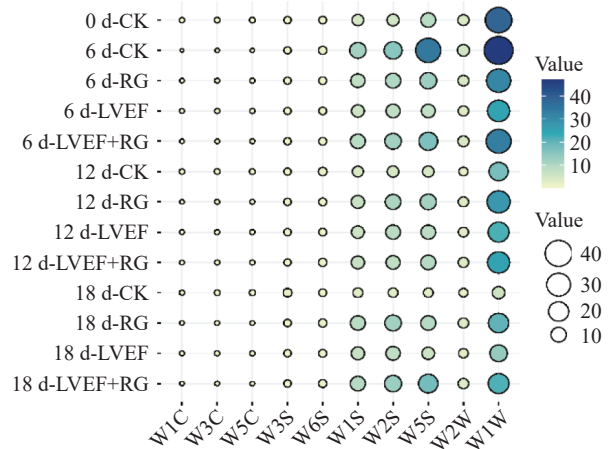


图 4 低压静电场处理对海鲜菇贮藏期间气味变化气泡图  
Fig.4 Bubble map of low voltage electrostatic field treatment of *Hypsizygos marmoreus* during storage

W1W、W5S、W2S 和 W1S 响应值进一步升高,表明在贮藏中微生物活动加速及复杂的生化反应可能导致了这些主要挥发性组分(尤其是无机硫化物)的大量转化与积累<sup>[32]</sup>。与 6 d-CK 组相比,低温与电场贮藏处理后整体上降低了海鲜菇中四种主要传感器的响应值,降低程度为: LVEF+RG 组>RG 组>LVEF 组。这表明这些处理可能通过抑制微生物活动及氧化褐变进程,进而在短期内有效减少了上述因素对气味的不利影响。贮藏时间延长至 12 或 18 d 后,CK 组的主要特征香气逐渐减弱,这可能是由于菇内组织腐败所致<sup>[18]</sup>。相反, RG、LVEF 和 LVEF+RG 组的特征香气在贮藏后期(12、18 d)显示出较高的响

应值。在贮藏 12 d 时,特征香气响应值为:RG 组>LVEF+RG 组>LVEF 组,其中较高失重率的 12 d-RG 组其较高响应值可能归因于此时更多组织及成分的降解从而形成了更多香气物质<sup>[31]</sup>。而在贮藏 18 d 时,特征香气响应值为:LVEF+RG 组>RG 组>LVEF 组。这表明低压静电场单独处理可在贮藏 6 d 内,较大幅度地保留海鲜菇香气,在贮藏 18 d 内,采用低压静电场与冷藏交替循环的处理方式在维持海鲜菇特征香气方面总体优于单独低压静电场和冷藏处理。

利用 PCA 分析方法将电子鼻数据进行降维处理,并提取样品主要特征进行线性分析<sup>[32]</sup>。由图 5A 可知,所有样品在 PC1 和 PC2 上的贡献率分别为 87.32% 和 10.49%,累计贡献率为 97.81%,能够有效反映样品气味的整体信息。CK 组在贮藏第 0 d 和第 6 d 之间离散程度较大,而在第 12 d 和第 18 d 之间差异较小。这表明 CK 组的海鲜菇在第 6 d 时可能产生了一些新的挥发性物质,丰富了海鲜菇的风味<sup>[32]</sup>;而在第 12 d 后的贮藏中,海鲜菇可能发生劣变,并导致不良气味的产生。在所有处理组中,6 d-LVEF 组和 12 d-LVEF+RG 组的图形具有部分重叠,且二者与 0 d-CK 组之间的离散程度较小,说明在这两个阶段单独低压静电场和低压静电场与冷藏交替循环的处理方式能够较好地维持贮藏中海鲜菇原有的香气特征。进一步分析发现,在 12 d 及以后贮藏期内,12 d-RG 组与 6 d-CK 组的离散程度仅次于 6 d-LVEF+RG 组,这说明在此阶段挥发性物质经历了降解与合成,并引发了较强的气味变化。因此,若选择 12 d 作为目标贮藏时间,采用单独 4 °C

冷藏方式可能更有利于海鲜菇特征香气组分的维持。18 d 处理组的所有样品的离散程度加强,而这三种处理的样品则更倾向于 6 d-CK 组,其中接近程度依次为:18 d-LVEF+RG 组>18 d-RG 组>18 d-LVEF 组。结果表明,长期贮藏下采用低压静电场结合冷藏交替的方式比低压静电场单独处理更能有效地抑制海鲜菇的气味劣变。

运用 LDA 分析法可进一步聚焦样品在空间的分布状态,提高分类的准确性。由图 5B 可知,LDA1 和 LDA2 的贡献率分别为 70.69% 和 14.40%,累计贡献率达到 85.09%。结果表明,与其他低温处理相比,12 d-LVEF+RG 组与 0 d-CK 组离散程度最小。在贮藏 6 d 的所有处理组中,6 d-LVEF 组与 0 d-CK 组离散程度较小。结合 PCA 分析结果可知,低压静电场单独处理可适用于短期(<6 d)贮藏,能够较好地维持海鲜菇原有的特征香气。而低压静电场结合冷藏循环的处理方式适用于 12 d 的贮藏周期,在该周期下该技术可显著延缓海鲜菇气味的劣变过程。

## 2.5 低压静电场处理对海鲜菇贮藏期间硬度、弹性的影响

硬度是评价海鲜菇采后贮藏品质的关键指标之一,其变化直接反映了菌菇体内代谢活动和水分含量的动态变化,这在很大程度上决定海鲜菇采后货架期的时间长短<sup>[23]</sup>。如表 2 所示,CK 组在室温贮藏至第 12 d 时,海鲜菇的硬度值最低。这一变化与其在此阶段水分活度骤增、苦味显著增强、主要香气特征减弱以及褐变和萎蔫现象密切相关。此时,剧烈的微生物活动与复杂的生物化学反应进一步加剧了菇内细胞结构的破坏,导致组织软化,并使海鲜菇硬度显著降低<sup>[23]</sup>。室温贮藏至第 18 d,海鲜菇的硬度出现上升趋势。这与此时失重率骤增至最高值密切相关,同时观察到海鲜菇出现严重皱缩并趋于干枯紧实<sup>[10]</sup>。与之不同的是,三种处理技术在 12 d 的贮藏时间内均表现出减缓海鲜菇软化趋势的能力,对维持其质构特性具有潜在的积极作用,在此期间硬度呈缓慢下降趋势。在贮藏第 6 d,硬度排序为:LVEF+RG 组>RG 组>LVEF 组;而在第 12 d,硬度排序变为:RG 组>LVEF 组>LVEF+RG 组;第 18 d,硬度排序变为:LVEF+RG 组>LVEF 组>RG 组。这表明在贮藏 6 d 内,冷藏结合低压静电场处理对海鲜菇硬度的维持效果最显著,优于高能耗的低压静电场单独处理。而在 12 d 贮藏阶段,低温贮藏的海鲜菇可能开始出现轻微冷害,而此时采用低压静电场处理可能会进一步导致冷害的加剧,单独使用冷藏或低压静电场处理更具有优势。4 °C 冷藏处理在 12 d 贮藏期内对海鲜菇硬度的保持均表现出良好效果,这可能与处理环境中较强的空气对流促进菇体表面水分蒸发,导致组织趋于紧实有关<sup>[28]</sup>。然而在贮藏至第 18 d 时,三种处理组海鲜菇的硬度均出现骤降的情况,此时低压静电场结合冷藏的效果更好,这可能与有效抑制微

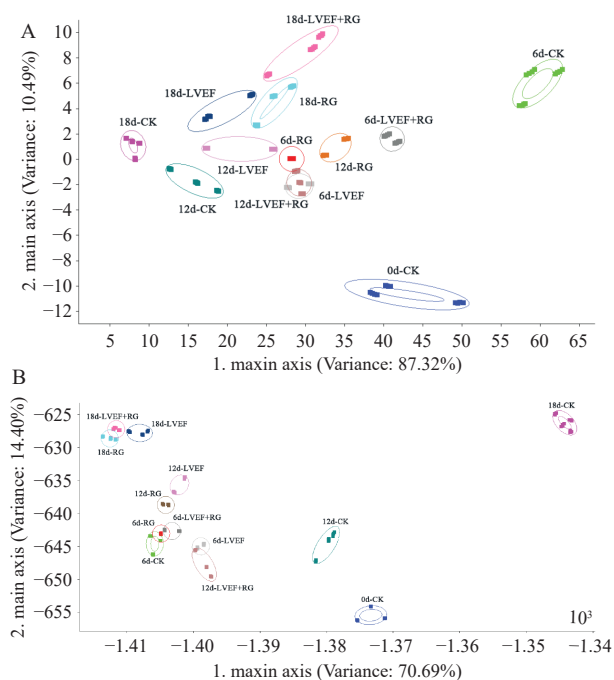


图 5 低压静电场处理贮藏对海鲜菇贮藏期间气味 PCA 主成分分析(A)及 LDA 线性判别分析(B)

Fig.5 PCA (A) and LDA (B) of the odor of *Hypsizygos marmoreus* during storage with low voltage electrostatic field treatment

表 2 低压静电场处理中海鲜菇贮藏期间硬度的变化(N)  
Table 2 Changes in hardness of *Hypsizygyus marmoreus* under low voltage electrostatic field treatment during storage (N)

处理组	0 d	6 d	12 d	18 d
CK	4.90±0.53 <sup>a</sup>	3.86±0.59 <sup>b</sup>	1.65±0.21 <sup>d</sup>	2.04±0.37 <sup>a</sup>
RG	4.90±0.53 <sup>a</sup>	4.43±0.46 <sup>a</sup>	4.32±0.44 <sup>a</sup>	1.53±0.39 <sup>b</sup>
LVEF	4.90±0.53 <sup>a</sup>	4.25±0.14 <sup>a</sup>	3.43±0.25 <sup>b</sup>	1.63±0.12 <sup>b</sup>
LVEF+RG	4.90±0.53 <sup>a</sup>	4.62±0.58 <sup>a</sup>	2.19±0.32 <sup>c</sup>	1.92±0.12 <sup>a</sup>

注: 不同小写字母表示相同时间下不同样品间差异显著(P<0.05); 表3同。

生物活动的的能力密切相关<sup>[16]</sup>。两者协同处理缓解了由微生物造成的海鲜菇组织分解加剧和软化加重的现象。

弹性是评价海鲜菇质构特性的另一重要指标, 反映了其组织对外力作用后的恢复能力。如表 3 所示, 随着室温贮藏时间延长至第 18 d, 海鲜菇的弹性整体呈下降趋势, 这可能归因于微生物活动和酶促褐变等因素逐渐破坏了细胞组织的结构完整性, 导致质地劣化<sup>[10]</sup>。其中在三种处理方式中, 贮藏第 6 d 时, LVEF 组表现出较好的弹性, 这与其显著抑制微生物活动密切相关。该处理有效减缓了组织细胞的破坏, 内部结构较紧实, 从而维持了较高弹性<sup>[16]</sup>。然而, 贮藏至 12 和 18 d 时, 长期的低压静电场作用可能通过电荷效应影响海鲜菇内部代谢过程<sup>[15]</sup>, 导致组织结构趋于松散, 弹性明显下降, 尤其是 LVEF+RG 组。相比之下, RG 组在贮藏超过 6 d 更能维持海鲜菇较好的弹性, 表明其在延缓组织劣变方面可能更具优势。综上所述, 采用低能耗的低压静电场与冷藏循环处理方式虽然有助于节能, 但在抑制质构(包括硬度和弹性)劣化方面效果并不显著, 甚至在长期贮藏中可能加速弹性的下降。因此, 在实际应用中需根据贮藏周期合理选择保鲜技术, 以实现品质与能耗之间的最佳平衡。

表 3 低压静电场处理中海鲜菇贮藏期间弹性的变化(mm)  
Table 3 Changes in elasticity of *Hypsizygyus marmoreus* under low voltage electrostatic field treatment during storage (mm)

处理组	0 d	6 d	12 d	18 d
CK	3.49±0.23 <sup>a</sup>	2.58±0.24 <sup>a</sup>	2.79±0.16 <sup>a</sup>	2.37±0.52 <sup>a</sup>
RG	3.49±0.23 <sup>a</sup>	2.26±0.21 <sup>b</sup>	2.57±0.26 <sup>ab</sup>	2.40±0.19 <sup>a</sup>
LVEF	3.49±0.23 <sup>a</sup>	2.71±0.21 <sup>a</sup>	2.45±0.27 <sup>b</sup>	2.09±0.20 <sup>a</sup>
LVEF+RG	3.49±0.23 <sup>a</sup>	2.36±0.10 <sup>b</sup>	2.29±0.34 <sup>b</sup>	2.05±0.14 <sup>a</sup>

### 2.6 低压静电场处理对贮藏期海鲜菇水分分布的影响

低场核磁共振(LF-NMR)及其成像技术能够反映海鲜菇贮藏期间的不同水分成分的分布与状态变化<sup>[33-34]</sup>。食用菌采后的生理过程如蒸腾作用等, 常导致菇组织出现脱水、萎蔫及新鲜度下降等现象, 其品质特性直接受到水分状态的影响<sup>[35-36]</sup>。由图 6A~C 可知, 海鲜菇的 T<sub>2</sub> 弛豫图谱经拟合后主要呈现三种典型的水分状态: 与生物大分子紧密结合的结合水(T<sub>21</sub>, 0.01~25 ms)、细胞质中的非流动水(T<sub>22</sub>, 25~102 ms)和液泡中流动性较强的游离水(T<sub>23</sub>, 102~

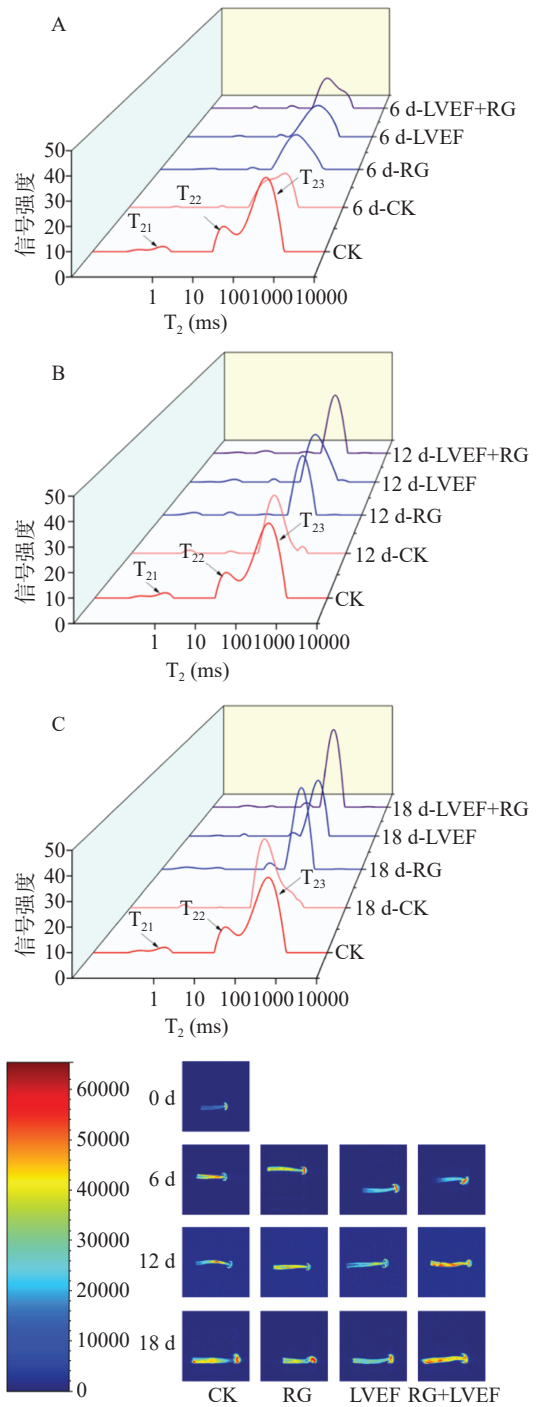


图 6 低压静电场处理的海鲜菇贮藏期间的 T<sub>2</sub> 谱图和低场核磁共振成像伪彩图

Fig.6 T<sub>2</sub> spectra and magnetic resonance imaging pseudo-color maps of *Hypsizygyus marmoreus* during storage with low voltage electrostatic field treatment

3292 ms)。T<sub>2</sub> 图谱中峰面积可反映不同状态水分的相对含量。图 6D 所示的 MRI 伪彩图直观地揭示了海鲜菇内部水分空间分布的变化趋势。其中红色代表高氢质子密度, 蓝色则表示低氢质子密度, 样品颜色越红表明该区域可移动的自由水的含量越高<sup>[37]</sup>。从量化结果来看, 游离水是海鲜菇中占比最高的水分状态(表 4)。贮藏至第 6 d 时, 所有组中游离水比例较刚开始贮藏均出现明显上升, 其中相对大小依次为: CK 组>LVEF 组>LVEF+RG 组>RG 组。这表明

表 4 低压静电场处理海鲜菇贮藏期间的峰比例  
Table 4 Peak ratio of *Hypsizygus marmoreus* under low voltage electrostatic field treatment during storage

海鲜菇样品	A <sub>21</sub> (%)	A <sub>22</sub> (%)	A <sub>23</sub> (%)
0 d-CK	4.15±0.21	16.71±0.38	79.13±0.49
6 d-CK	2.32±0.05 <sup>d</sup>	1.36±0.03 <sup>b</sup>	96.32±0.75 <sup>a</sup>
6 d-RG	5.67±0.12 <sup>a</sup>	0.89±0.02 <sup>c</sup>	93.44±0.94 <sup>c</sup>
6 d-LVEF	3.29±0.08 <sup>c</sup>	1.86±0.06 <sup>a</sup>	94.85±0.33 <sup>b</sup>
6 d-LVEF+RG	4.19±0.14 <sup>b</sup>	1.39±0.04 <sup>b</sup>	94.42±0.25 <sup>bc</sup>
12 d-CK	1.26±0.05 <sup>d</sup>	0.13±0.01 <sup>d</sup>	98.61±0.81 <sup>a</sup>
12 d-RG	4.29±0.12 <sup>a</sup>	3.60±0.11 <sup>a</sup>	92.11±0.73 <sup>c</sup>
12 d-LVEF	1.95±0.06 <sup>c</sup>	2.57±0.02 <sup>c</sup>	95.48±0.78 <sup>b</sup>
12 d-LVEF+RG	2.34±0.13 <sup>b</sup>	2.82±0.05 <sup>b</sup>	94.83±0.07 <sup>b</sup>
18 d-CK	0.62±0.01 <sup>c</sup>	0.72±0.03 <sup>c</sup>	98.66±0.67 <sup>a</sup>
18 d-RG	1.44±0.05 <sup>a</sup>	1.34±0.05 <sup>b</sup>	97.22±0.91 <sup>ab</sup>
18 d-LVEF	1.03±0.04 <sup>b</sup>	1.29±0.03 <sup>b</sup>	97.68±0.78 <sup>ab</sup>
18 d-LVEF+RG	0.98±0.03 <sup>b</sup>	2.22±0.06 <sup>a</sup>	96.80±0.75 <sup>b</sup>

注: A<sub>21</sub>、A<sub>22</sub>、A<sub>23</sub>依次为三种状态的水分T<sub>21</sub>、T<sub>22</sub>、T<sub>23</sub>所对应的峰比例,不同小写字母表示相同时间下不同技术处理的海鲜菇T<sub>2</sub>峰面积差异显著(P<0.05)。

贮藏前 6 d 是海鲜菇内结合水流失的主要阶段,且流失主要在菌柄部位。此时 CK 组菇体组织结构松散(弹性下降),部分结合水和非流动水向游离水转化,并进一步扩散至表面蒸发。低压静电场或与冷藏交替处理能够有效减缓水分流失(水分主要集中于菌盖部位),从而防止组织软化,延长保鲜期,这一结论也与褐变指数的测试结果较一致。其中, LVEF+RG 组在维持水分状态方面表现出较优的效果,可能与其对微生物活动的有效抑制以及电荷效应(抑制内部组织降解与抑制氧化反应导致自由水的生成)有关<sup>[15]</sup>。

贮藏至 12 d 时, CK 组的 A<sub>23</sub> 的峰面积比例增加, A<sub>21</sub> 和 A<sub>22</sub> 的峰面积比例有所下降。这表明此时 CK 组海鲜菇可能进入到腐败阶段,表现为萎蔫皱缩和斑点增多,硬度和弹性显著下降。在此阶段,细胞结构破坏,液泡破裂导致菌盖中大量游离水释放。同时结合水和非流动水因细胞成分降解而重新分布<sup>[37]</sup>,微生物代谢和酶促反应也改变了水分与组织之

间的相互作用。相比之下, RG 组对游离水回升趋势表现出一定的抑制作用,说明其在延缓水分流失和维持组织结构方面具有一定效果。然而,与 12 d-CK 相比,此时结合水含量却骤增,可能是冷藏导致组织内部的冷应激反应<sup>[38]</sup>。另外两个处理组中, LVEF 组游离水含量增加较多,这可能与促进水分迁移或增强细胞膜通透性的短暂效应有关,促使原本束缚于细胞结构中的水分释放出来,表现为游离水比例有所上升<sup>[35,38]</sup>。LVEF+RG 组采用低压静电场与冷藏循环两次的低能耗复合处理方式更有利于维持细胞成分的稳定性,减少蛋白质、多糖等大分子的降解,从而保留更多结合水<sup>[15]</sup>,此现象在图 6C 中也可观察到。继续贮藏至 18 d 时,各组水分状态发生进一步演变。游离水含量三个处理组中均有所上升,游离水主要由结合水和固定水转变而来,其中 RG 组上升较多(主要集中于菇盖部分)。这可能导致海鲜菇组织脱水加剧,影响感官品质<sup>[20]</sup>。18 d-RG+LVEF 组菇体整体水分分布更均匀,说明该处理方式在整体上更有利于维持海鲜菇水分结构的平衡与完整性,可能是通过抑制微生物活动及酶促反应,延缓组织自溶过程。综上所述, LVEF+RG 组合处理在维持海鲜菇水分分布、延缓组织劣变方面展现出良好的应用潜力,尤其在结合水保留和整体水分结构稳定性方面优于单一处理方式。

### 2.7 低压静电场处理对贮藏期海鲜菇蛋白质组分的影响

SDS-PAGE 通过添加 SDS 使蛋白质变性并根据分子量大小实现分离<sup>[39]</sup>。结果如图 7 和表 5 所示,新鲜海鲜菇(0 d-CK 组)的蛋白质分子量主要集中在 31 kDa 和 14.4 kDa。随着室温贮藏时间的延长,这些小分子蛋白逐渐发生降解,表现为对应条带光密度值的持续下降,尤其是在第 12 d 时, 31 kDa 蛋白条带几乎完全消失。这可能与褐变指数升高,活性氧积累引起蛋白质的氧化修饰和断裂有关<sup>[19]</sup>。另外,随着菇体组织结构严重破坏呈现萎蔫皱缩,细胞

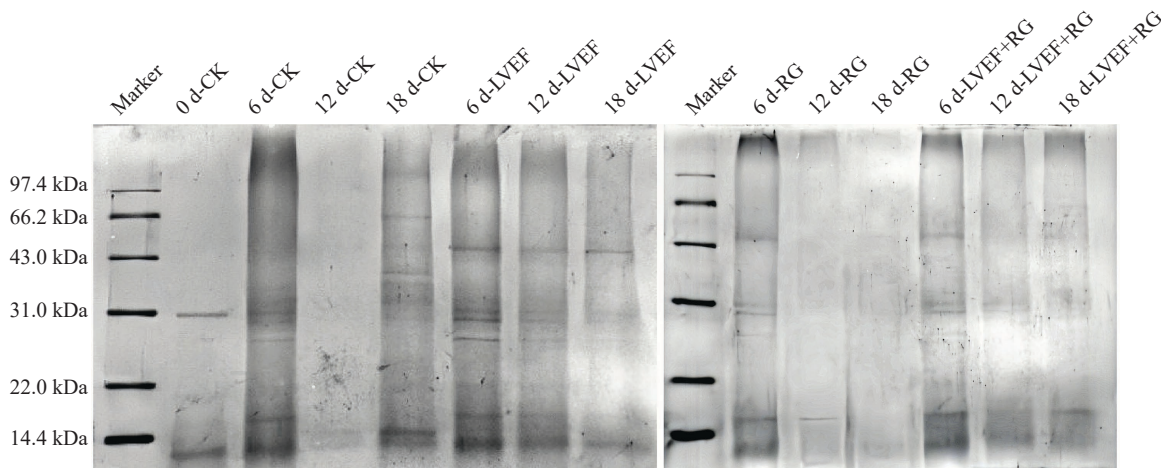


图 7 低压静电场处理的海鲜菇贮藏期间的 SDS-PAGE 图

Fig.7 SDS-PAGE plots of low voltage electrostatic field treatment on *Hypsizygus marmoreu* during storage

表 5 低压静电场处理的海鲜菇贮藏期间的条带光密度值

Table 5 Band optical density plots of low voltage electrostatic field treatment on *Hypsizygos marmoreu* during storage

分子量 (kDa)	0 d-CK	6 d-CK	12 d-CK	18 d-CK	6 d-LVEF	12 d-LVEF	18 d-LVEF	6 d-RG	12 d-RG	18 d-RG	6 d-LVEF+RG	12 d-LVEF+RG	18 d-LVEF+RG
97.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
66.2	-	-	-	2172	-	-	-	-	-	-	-	-	-
43.0	-	-	-	3098	4784	3623	3335	3851	-	-	2973	-	-
31.0	4007	3089	-	-	5228	3079	-	4151	-	-	4325	2571	-
22.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14.4	15059	9342	7849	14796	10712	9738	10015	7713	4228	4552	8113	7265	6729

注:“-”代表对应电泳条带位置未有电泳条带。

内容物被释放并暴露于多种酶促环境中,进一步加剧了蛋白质的分解<sup>[29]</sup>。因此,海鲜菇自身特征性蛋白的降解及消失,标志着其已进入明显的品质劣化阶段,提示第 12 d 是保鲜措施需要重点关注的关键时间节点。在贮藏至 18 d 时,腐败的海鲜菇中出现了新的蛋白条带,分子量主要集中在 66.2、43 和 14.4 kDa。该变化可能源于蛋白交联、微生物代谢及应激蛋白的产生<sup>[40]</sup>。其中,31 kDa 蛋白条带的减弱乃至消失,同时伴随 66.2 kDa 和 43 kDa 蛋白新条带的出现,可能是海鲜菇由新鲜状态向腐败状态转变的重要分子表征。

经过冷藏、低压静电场等方式贮藏至第 6 d 时,43 kDa 条带开始出现,其光密度值大小为:LVEF 组>RG 组>LVEF+RG 组。这可能与环境干预后海鲜菇的初期组织应激反应有关<sup>[40]</sup>。31 kDa 特征蛋白条带的光密度值在各处理组中均有所增加,相对大小为:LVEF 组>LVEF+RG 组>RG 组。而 14.4 kDa 条带光密度值则均有所降低,相对大小为:LVEF 组>LVEF+RG 组>RG 组。这表明低压静电场单独处理在海鲜菇前 6 d 的贮藏保鲜中发挥了重要作用,其可能通过有效抑制微生物活动,减缓蛋白质降解和重构,从而维持海鲜菇关键蛋白的稳定性,在分子层面体现出较好的保鲜潜力<sup>[4]</sup>。贮藏至第 12 d, RG 组海鲜菇的蛋白质分子量分布呈现出与 12 d-CK 组相似的趋势,蛋白条带仅集中在 14.4 kDa,且其光密度值低于 12 d-CK 组,表明该处理组在此阶段已表现出与对照组相近的蛋白降解特征。从分子层面来看,海鲜菇组织可能已进入腐败阶段。而另外两组中,43 kDa 蛋白条带的光密度值有所下降,尤其在 LVEF+RG 组中该条带几乎完全消失。尽管如此,这两组仍保留了新鲜海鲜菇的特征蛋白条带 31 kDa 和 14.4 kDa,且其光密度值:LVEF 组>LVEF+RG 组。这说明低压静电场(LVEF)处理在延缓蛋白质降解、维持原有蛋白结构完整性方面优于组合处理(LVEF+RG),可能与其在抑制氧化应激反应或减缓微生物侵染等方面的作用机制有关。而 LVEF+RG 组虽然整体保鲜效果良好,但冷藏过程可能引起冷应激反应,导致部分蛋白功能状态发生改变,从而影响其在 SDS-PAGE 图谱中的表达强度<sup>[39]</sup>。贮藏至第 18 d 时,所有处理组中原本存在于新鲜海鲜菇中的特征蛋白条带-31 kDa 蛋白均已消失,表明这些海鲜

菇已开始腐败。同时,在第 18 d,除对照组(18 d-CK)外其他处理组中 14.4 kDa 蛋白条带的光密度相对大小具体为:LVEF 组>LVEF+RG 组>RG 组,表明 LVEF 处理的海鲜菇的保鲜效果相对较好;18 d 的 CK 组相比前三个处理组,此条带附近的光密度虽然有所增加,但 14.4 kDa 蛋白条带推测是腐败微生物来源的蛋白(因为第 12 d 并未出现)。然而,43 kDa 的蛋白条带仅在 LVEF 组中仍可被检测到,而在其他组中均消失。这说明 LVEF 处理的海鲜菇 18 d 内在维持该蛋白稳定性方面仍表现出一定优势,而 LVEF+RG 处理的效果仅次于 LVEF 处理。

### 3 结论

海鲜菇属于呼吸跃变型食用菌,采后海鲜菇呼吸代谢强,货架期短。本研究以 24±1 °C 常温贮藏为对照(CK),比较了 4±1 °C 下低温冷藏(RG)、低压静电场(LVEF)及其组合处理(LVEF+RG)对海鲜菇保鲜效果的影响。结果表明,三种低温处理均能有效延缓褐变、减少水分流失、防止萎蔫皱缩,在 6~18 d 贮藏期内表现出良好的保鲜效果。其中,LVEF 单独处理在抑制微生物和维持关键蛋白稳定性方面表现突出,可较好保持 6 d 内的风味(鲜味和特征气味)品质及弹性,但在 18 d 贮藏中质构劣化明显,甚至加速弹性下降,最大降幅为 11.81%;相比之下, RG 在硬度和弹性维持上更具优势,且在 12 d 内较好地维持了风味,但失重率最高,为 3.77%,蛋白质降解显著(关键蛋白分子量 31 kDa 和 14.4 kDa 密度值显著降低,甚至条带消失),可能导致较多营养物质流失。LVEF+RG 组合处理兼具节能与保鲜优势,在 6 d 内的硬度维持上具有一定优势,尽管在 12 d 贮藏下对质构品质的维持弱于 LVEF 和 RG 单独处理,但在整体水分结构(尤其结合水保留)稳定方面表现更优,并且在 12 d 内较好地维持香气,效果仅次于 RG,其失重率低于 RG,与 LVEF 单独处理相当。综上,应根据贮藏周期合理选择保鲜方式,第 12 d 可能是海鲜菇保鲜管理的关键节点,LVEF+RG 节能且保鲜效果稳定,在延缓海鲜菇组织劣变、兼顾节能与品质方面具有良好的应用潜力。

## 参考文献

- [1] GONG M, HUANG T, LI Y, et al. Multi-omics analysis of low-temperature fruiting highlights the promising cultivation application of the nutrients accumulation in *Hypsizygus marmoreus*[J]. *Journal of Fungi*, 2022, 8(7): 695.
- [2] WU Y, PENG Q, KANG Q, et al. Comparative profiling of volatile compounds in white and brown *Hypsizygus marmoreus* during fruiting body development and postharvest storage[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2024, 136: 106800.
- [3] 王红, 刘俊杰, 温浩, 等. 斑玉蕈种质资源评价及遗传多样性分析[J]. 中国食用菌, 2023, 42(6): 41-47. [WANG H, LIU J J, WEN H, et al. Evaluation of germplasm resources and genetic diversity analysis of *Hypsizygus marmoreus*[J]. *Edible Fungi of China*, 2023, 42(6): 41-47.]
- [4] 张京涛. 海鲜菇蛋白质的提取及其特性研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2019. [ZHANG J T. Study on extraction and characteristics of protein from *Hypsizygus marmoreus*[D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2019.]
- [5] ZHOU J, WU J, LIU H, et al. Low voltage electrostatic field combined with ice-temperature to improve the quality of litchi during storage[J]. *Food Research International*, 2024, 196: 115068.
- [6] 李银妹, 林茜, 龚乃霞, 等. 海藻多糖结构、生物活性和提取技术研究进展[J]. 化学试剂, 2025, 47(5): 56-65. [LI Y S, LIN Q, GONG N X, et al. Research progress on structure, bioactivity and extraction techniques of marine algal polysaccharides[J]. *Chemical Reagents*, 2025, 47(5): 56-65.]
- [7] CASTELLANOS-REYES K, VILLALOBOS-CARVAJAL R, BELDARRAIN-IZNAGA T. Fresh mushroom preservation techniques[J]. *Foods*, 2021, 10(9): 2126.
- [8] DAWADI E, MAGAR P B, BHANDARI S, et al. Nutritional and post-harvest quality preservation of mushrooms: A review[J]. *Heliyon*, 2022, 8(12): e12093.
- [9] 邱成书, 林敏, 宋斌. 食用菌斑玉蕈研究进展[J]. 食用菌学报, 2013, 20(4): 78-82. [QIU C S, LIN M, SONG B. Research progress on the edible mushroom *Hypsizygus marmoreus*[J]. *Acta Edulis Fungi*, 2013, 20(4): 78-82.]
- [10] 张婷, 王伟霞, 仝乐涛, 等. 斑玉蕈的研究现状及展望[J]. 现代园艺, 2021, 44(3): 18-20. [ZHANG T, WANG W X, TONG L T, et al. Current Research status and prospects of *Hypsizygus marmoreus*[J]. *Xiandai Horticulture*, 2021, 44(3): 18-20.]
- [11] 汤艺, 周洁, 王义, 等. 臭氧处理对海鲜菇贮藏期防腐保鲜效应的影响[J]. 常熟理工学院学报, 2020, 34(2): 113-117. [TANG Y, ZHOU J, WANG Y, et al. Effect of ozone treatment on preservation and decay control of *Hypsizygus marmoreus* during storage[J]. *Journal of Changshu Institute of Technology*, 2020, 34(2): 113-117.]
- [12] CHEN H, ZHANG J, HAO H, et al. Hydrogen-rich water increases postharvest quality by enhancing antioxidant capacity in *Hypsizygus marmoreus*[J]. *AMB Express*, 2017, 7(1): 221.
- [13] MARÇAL S, SOUSA A S, TAOFIQ O, et al. Impact of postharvest preservation methods on nutritional value and bioactive properties of mushrooms[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 110: 418-431.
- [14] 曾敏, 王军. 低压静电场结合包装对采后樱桃番茄品质的影响[J]. 包装工程, 2023, 44(17): 25-32. [ZENG M, WANG J. Effects of low-voltage electrostatic field combined with packaging on quality of postharvest cherry tomatoes[J]. *Packaging Engineering*, 2023, 44(17): 25-32.]
- [15] ABDELSHAFY A M, LUO Z, BELWAL T, et al. A comprehensive review on preservation of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*): Techniques, research advances and influence on quality traits[J]. *Food Reviews International*, 2023, 39(5): 2742-2775.
- [16] 张旭, 潘先兴, 田一鸣, 等. 食用菌褐变机理及抑制方法研究进展[J]. 中国果菜, 2022, 42(5): 38-44. [ZHANG X, PAN X X, TIAN Y M, et al. Research progress on browning mechanism and inhibition methods of edible fungi[J]. *China Fruits and Vegetables*, 2022, 42(5): 38-44.]
- [17] 陈玥, 朱陈雨, 许钊琿, 等. 低压静电场保鲜技术研究进展[J]. 保鲜与加工, 2023(12): 54-58. [CHEN Y, ZHU C Y, XU Z H, et al. Research progress on preservation technology of low-voltage electrostatic field[J]. *Storage and Process*, 2023(12): 54-58.]
- [18] LIU F, XU Y, ZENG M, et al. A novel physical hurdle technology by combining low voltage electrostatic field and modified atmosphere packaging for long-term stored button mushrooms (*Agaricus bisporus*) [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2023, 90: 103514.
- [19] LANG X, FANG X, MENG X, et al. Role of low-voltage electrostatic field-vacuum in delaying postharvest senescence of white *Hypsizygus marmoreus*[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2025, 18(1): 953-964.
- [20] 徐耀宗, 刘丰怡, 齐元之, 等. 低压静电场处理对双孢蘑菇采后贮藏品质的影响[J]. 包装工程, 2024, 45(11): 88-95. [XU Y Z, LIU F Y, QI Y Z, et al. Effect of low-voltage electrostatic field treatment on postharvest storage quality of *Agaricus bisporus*[J]. *Packaging Engineering*, 2024, 45(11): 88-95.]
- [21] XIE Y, ZHOU K, CHEN B, et al. Synergism effect of low voltage electrostatic field and antifreeze agents on enhancing the qualities of frozen beef steak: Perspectives on water migration and protein aggregation[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2023, 84: 103263.
- [22] YAN M, YUAN B, XIE Y, et al. Improvement of postharvest quality, enzymes activity and polyphenoloxidase structure of postharvest *agaricus bisporus* in response to high voltage electric field[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 166: 111230.
- [23] GAO M, FENG L, JIANG T. Browning inhibition and quality preservation of button mushroom (*Agaricus bisporus*) by essential oils fumigation treatment[J]. *Food Chemistry*, 2014, 149: 107-113.
- [24] 赵伟焱, 曹传爱, 刘骞. 低温慢煮时间对即食鸡肝品质特性及其微观结构的影响[J]. 食品工业科技, 1-18. [2025-07-16]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025030221>. [ZHAO W Y, CAO C A, LIU Q. Effect of sous-vide cooking time on quality characteristics and microstructure of ready-to-eat chicken liver[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2025, 1-18 [2025-07-16]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025030221>.]
- [25] 赵越, 白晋豪, 张素敏, 等. 热处理对海鲜菇质构特性和酶活性的影响[J]. 农产品加工, 2021(12): 1-4,8. [ZHAO Y, BAI J H, ZHANG S M, et al. Effects of heat treatment on texture characteristics and enzyme activity of *Hypsizygus marmoreus*[J]. *Farm Products Processing*, 2021(12): 1-4,8.]
- [26] 王伟霞, 童小嫣, 陈源, 等. 海鲜菇采后贮藏过程的转录组分析及褐变基因的挖掘[J]. 北方园艺, 2025(1): 21-28. [WANG W X, TONG X Y, CHEN Y, et al. Transcriptome analysis during postharvest storage and browning-related genes mining of *Hypsizygus marmoreus*[J]. *Northern Horticulture*, 2025(1): 21-28.]
- [27] 杜金艳. 食用菌采后生理特性与保鲜技术研究进展[J]. 农业开发与装备, 2021(1): 128-129. [DU J Y. Research progress on

- postharvest physiological characteristics and preservation technology of edible fungi[J]. *Agricultural Development & Equipments*, 2021(1): 128–129. ]
- [ 28 ] 饶克诚, 黄文, 王益, 等. 食用菌品质评价因素及保鲜技术研究进展[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(17): 454–462. [ RAO K C, HUANG W, WANG Y, et al. Research progress on quality evaluation factors and preservation technology of edible fungi[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(17): 454–462. ]
- [ 29 ] WEI W, LÜ P, XIA Q, et al. Fresh-keeping effects of three types of modified atmosphere packaging of pine-mushrooms[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2017, 132: 62–70.
- [ 30 ] PHAT C, MOON B, LEE C. Evaluation of umami taste in mushroom extracts by chemical analysis, sensory evaluation, and an electronic tongue system[J]. *Food Chemistry*, 2016, 192: 1068–1077.
- [ 31 ] 张晓玉, 张博, 辛广, 等. 秀珍菇营养成分、生物活性及贮藏保鲜的研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2016, 7(6): 2314–2319. [ ZHANG X Y, ZHANG B, XIN G, et al. Research progress on nutritional components, bioactivity and storage preservation of *Pleurotus geesteranus*[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2016, 7(6): 2314–2319. ]
- [ 32 ] FUJIOKA K, SHIMIZU N, MANOME Y, et al. Discrimination method of the volatiles from fresh mushrooms by an electronic nose using a trapping system and statistical standardization to reduce sensor value variation[J]. *Sensors*, 2013, 13(11): 15532–15548.
- [ 33 ] 高晓倩, 刘瑞玲, 吴来春, 等. 基于 lf-nmr 研究双孢菇远红外辅助热泵干燥过程中水分迁移规律及品质变化[J]. *中国食品学报*, 2024, 24(8): 403–413. [ GAO X Q, LIU R L, WU L C, et al. Study on moisture migration and quality changes in *Agaricus bisporus* during far-infrared assisted heat pump drying based on LF-NMR[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2024, 24(8): 403–413. ]
- [ 34 ] HUO J, ZHANG M, WANG D, et al. New preservation and detection technologies for edible mushrooms: A review[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2023, 103(7): 3230–3248.
- [ 35 ] PU H, YU J, LIU Z, et al. Evaluation of the effects of vacuum cooling on moisture contents, colour and texture of mushroom (*Agaricus bisporus*) using hyperspectral imaging method[J]. *Microchemical Journal*, 2023, 190: 108653.
- [ 36 ] ZHONG Y, CUI Y, YU J, et al. Effect of electron-beam generated X-ray irradiation on water status and microstructure of fresh hericium erinaceus by LF NMR, MRI, SEM and TEM[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2024, 209: 112693.
- [ 37 ] KAMAL T, SONG Y, ZHANG T, et al. Effect of hydrocolloid and processing potentiality on water migration in apple jellies of yinduqing cultivar[J]. *LWT*, 2018, 98: 381–389.
- [ 38 ] 孟晓曼, 孙亚男, 程儒杨, 等. 低压静电场-真空协同保鲜对白玉菇采后品质和抗氧化代谢的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(23): 72. [ MENG X M, SUN Y N, CHENG R Y, et al. Effects of low-voltage electrostatic field-vacuum synergistic preservation on postharvest quality and antioxidant metabolism of white *Hypsizygos marmoreus*[J]. *Food Science*, 2022, 43(23): 72. ]
- [ 39 ] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. *Analytical Biochemistry*, 1976, 72(1): 248–254.
- [ 40 ] DING Y, MO W, DENG Z, et al. Storage quality variation of mushrooms (*Flammulina velutipes*) after cold plasma treatment[J]. *Life*, 2022, 13(1): 70.