

生食水产品紫外线杀菌强度智能调控系统研究

王 想¹ 李 由¹ 邢少华² 张小栓¹ 马瑞芹³

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 鲁东大学食品工程学院, 烟台 264025;
3. 中国农业大学模式动物重大设施建设办公室, 北京 100083)

摘要: 生食水产品携带微生物、寄生虫和病菌等危害生食水产品品质的有害副产物,为延长生食水产品的货架期,保证其食用的安全性,杀菌环节至关重要。不同品类水产品需要不同的杀菌强度,过低则会导致杀菌不完全影响其保质期,过高则损害生食水产品的蛋白质质量影响其口感,因此需要对杀菌强度进行智能调控。本文设计适用于生食水产品的紫外线杀菌强度智能调控系统,包括传感层、信号处理层、数据收集整理层和分析执行层,传感层对加工生产线上生食水产品品类信息和环境信息实时采集、存储、上传云端数据库,对比杀菌数据判断杀菌等级,并自动化调节紫外线杀菌强度,实现了自动化生产线水产品分类分级杀菌。在牡蛎加工生产线上对牡蛎进行智能表面杀菌试验,并检测了相同环境下作为牡蛎传统品质指示指标的牡蛎挥发性盐基氮含量的变化,且测得其杀菌前后菌落总数,杀菌水产品平均货架期提升4 d,杀菌率为96.47%。结果表明本智能紫外线杀菌系统杀菌效果好,对生食水产品货架期提升效果显著。

关键词: 水产品保鲜; 货架期; 紫外线杀菌; 强度调控

中图分类号: S983 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)S0-0513-06

Ultraviolet Intelligent Intensity Control Sterilization System for Raw Aquatic Products

WANG Xiang¹ LI You¹ XING Shaohua² ZHANG Xiaoshuan¹ MA Ruiqin³

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. School of Food Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China

3. National Research Facility for Phenotypic and Analysis of Model Animals, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Raw aquatic products carry micro-organisms, parasites and germs that are harmful by-products to the quality of raw aquatic products, in order to extend the shelf life of raw aquatic products and ensure their safety for consumption, sterilization is essential. Different types of aquatic products require different sterilization intensities, too low will result in incomplete sterilization affecting their shelf life, too high will damage the protein quality of raw aquatic products affecting their taste, so the intensity needs to be intelligently regulated. An intelligent UV intensity control sterilization system for raw aquatic products was designed, including a sensing layer, a signal processing layer, a data collection and collation layer and an analysis and execution layer. The sensing layer collected, stored and uploaded real-time information on raw aquatic product categories and environmental information on the processing line to a cloud database, comparing the sterilization data to determine the sterilization level and automatically adjusted the UV sterilization intensity to achieve an automated production line of aquatic product classification and grading sterilization. The oyster processing line was used to sterilize the oyster surface with UV intensity and the changes in the volatile salt nitrogen content of the oyster, a traditional indicator of oyster quality, were measured under the same conditions. The results showed that this intelligent UV sterilization system was effective and had a significant effect on the shelf life of raw aquatic products.

Key words: aquatic preservation; shelf life; UV sterilization; intensity modulation

收稿日期: 2021-08-27 修回日期: 2021-09-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD0901705)

作者简介: 王想(1990—),女,讲师,博士,主要从事物联网与农业信息化研究,E-mail: wxzrjj@cau.edu.cn

通信作者: 马瑞芹(1978—),女,高级工程师,主要从事农村建筑与农业生物环境工程研究,E-mail: maruiqin@cau.edu.cn

0 引言

生食水产品因为其含水量高,天然免疫物质少,更容易发生由微生物引起的腐败现象^[1]。且生食水产品因其食用方法的原因,容易造成细菌性食物中毒。因此对生食水产品进行适当的抑菌杀菌处理,将减少其微生物危害程度,延长水产品货架期,带来一定的经济价值和社会价值。

受生食水产品自身特点的限制,冷杀菌的方法更适用于生食水产品加工过程。目前前沿的冷杀菌技术包括超高压杀菌技术、臭氧和气调的联合作用杀菌技术、 γ 射线辐照杀菌技术、脉冲强光杀菌技术、微波杀菌技术、生物杀菌技术、紫外线杀菌技术等,分别应用于贝类杀菌、虾类加工和鱼类保鲜^[2-7]。然而,鲜有将紫外线杀菌技术应用于生食水产品自动化生产链中的研究报道。

紫外线杀菌属于冷杀菌,操作方便,杀菌效果好,且无二次污染,适用于生食水产品生产流水线杀菌^[8-9]。因各类水产品品类差异、表面复杂情况差异和形状差异等,导致其表面菌群不一,所以相同剂量的紫外线照射会出现杀菌不彻底或者杀菌过量而影响生食水产品货架期和口味的现象^[10]。且不同类别紫外线照射或相同紫外线采用不同照射方式都会有不同的杀菌效果^[11-12]。因此针对生食水产品设计紫外线杀菌强度智能调控系统十分必要。

因此,本文针对生食水产品生产线设计智能化的紫外线杀菌强度调控系统,由传感层、信号处理层、数据收集整理层和分析执行层4部分组成。实时记录水产品杀菌信息和环境信息,以期实现在生食水产品生产线上自动化杀菌。

1 生食水产品加工调研与系统需求分析

1.1 生食水产品加工调研

为设计出更完备的杀菌系统,课题组对山东省日照市美佳集团进行实地考察,参观水产品加工过程,并整理企业生产记录数据。咨询企业专家关于生食水产品杀菌的信息。

1.2 系统需求分析

基于调研数据,得知生食水产品的加工过程一般包括:原料、初级加工、清洗、浸泡消毒、精加工、消毒、表面水分清洗、消毒和包装^[13]。在加工过程中防止细菌在水生动物中繁殖的关键点是水产品自身微环境控制。因为水产品本身存在大量微生物、原生动物寄生虫和附着在水生动物壳表面或鳃、鳞片上的水生腐败细菌^[14-15],当水生动物的皮肤和腹膜

完好无损处于新鲜状态时,这类微生物不会直接接触到里面的肉,在加工过程中肉暴露在自身的微生物环境中,不进行杀菌处理会加重细菌污染^[16-17]。在加工过程中防止细菌在待加工水产中繁殖的另一个关键点是温度。在从鲜活的水生动物到最后成品的整个过程中,温度必须保持在 $0\sim4^{\circ}\text{C}$ ^[18-19],在此温度范围内细菌繁殖速度较慢。综上所述,生食水产品加工过程需要一种能控制微环境菌群数量,检测环境温度且布置合理的自动化冷杀菌系统。

2 紫外线杀菌系统设计

本研究设计一种紫外线杀菌强度智能调控系统,可以对不同水产品实现动态实时监测,精准杀菌。系统主要包括传感层、信号处理层、数据收集整理层和分析执行层4部分^[20-21]。传感层主要任务是收集水产图像、环境信息,输入已建立的数据库。信号处理层将原始获得的环境信息的模拟信号转换为数字信号,记录这些数据并将可变数据分发到不同的服务器和数据库中,并通过网络将数字信号传输到下一层^[22-23]。数据收集整理层从服务器和数据库接收详细的数据。分析执行层根据数据分析反馈一个执行命令,控制执行器运行^[24]。杀菌系统功能模块构成如图1所示。

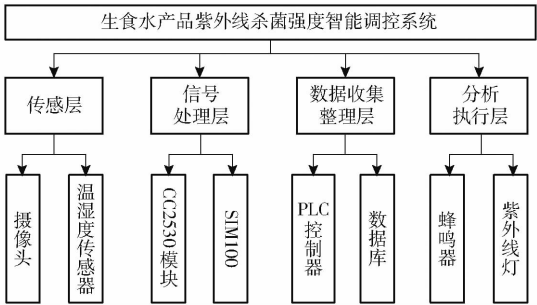


图1 杀菌系统功能模块

Fig.1 Germicidal system functional module diagram

2.1 硬件设计

2.1.1 硬件模块设计

系统硬件模块主要分为中央控制模块、紫外线杀菌灯组模块、蜂鸣器报警模块、人机交互界面、信息采集模块、无线通信模块、电源模块(图2)。中央控制模块负责接收信号运转程序并向执行器发出信号;紫外线模块由多组紫外线灯组成,负责发出不同强度紫外线;报警模块负责在系统出现无法识别水产品时发出警报;人机交互界面采用HMI触摸屏;信息采集模块由温湿度传感器及摄像头负责采集环境信息;便捷式电源为系统供电;无线通信模块4GDTU负责采集和传输传感数据。各硬件模块的型号参数如表1所示。

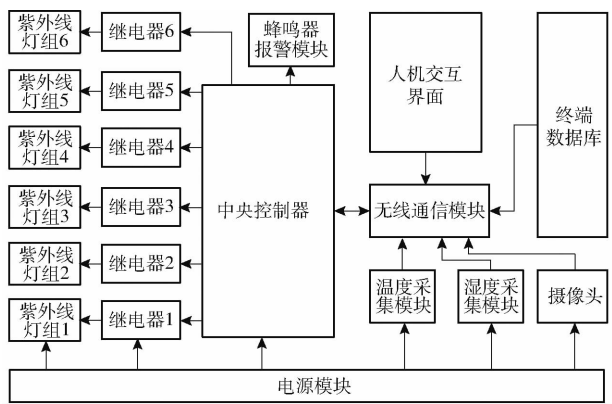


图 2 系统硬件模块图

Fig. 2 Sterilization system hardware module diagram

表 1 硬件型号和参数

Tab. 1 Hardware models and parameters

名称	型号	功能	参数
PLC 控制器	SIMATICS7-200SMART-ST20	核心控制器	24VDC-1/I/O-12/8、RS485
UVC 杀菌灯	GPL18W/4P2G11254nm	执行杀菌部件	辐照强度 15 μW/cm ²
继电器	CDZ9-52PL	开关电路	24VDC
镇流器	PLI5-425-18D24	启动杀菌灯	输入 21.4~26.4 V
蜂鸣器	AD16-16SM	报警	24 V
触摸屏	mcgsTpcTPC7062Ti	执行手动控制	RS485
温湿度变送器	卡轨式 CR-TTH01	监控温湿度	9~30 VDC、0.001 5 mA、485 (Modbus 协议)、-40℃~+120℃
摄像头	HT-SUA502C-T	采集图像	500 万像素、帧率 59FPS
DTU	USR-G780V2	远程通信	RS485、5 V~36 VDC
电源	CDKU-35-24	供电	24 V

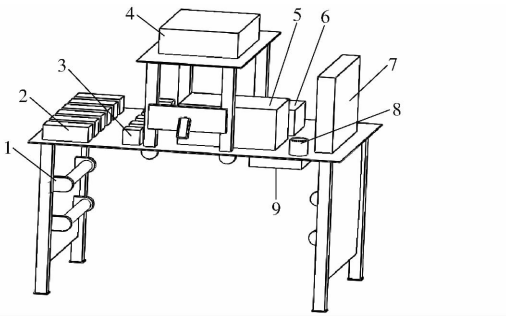


图 3 紫外线杀菌设备硬件结构图

Fig. 3 UVC sterilization equipment hardware structure diagram

1. 紫外线灯 2. 镇流器 3. 继电器 4. 电源 5. PLC 控制器
6. DTU 7. 触摸屏 8. 蜂鸣器 9. 温湿度变送器

2.2 软件设计

2.2.1 系统等级决策模型设计

在生食水产品加工过程中,不同类别的海鲜其表面复杂程度不同。为了保证水产品精准杀菌,根据已知的水产品品类、杀菌条件等信息运用多属性决策模型,对其中部分杀菌方案进行等级排序,最终形成了杀菌等级的分级。主要由两部分组成:①获取杀菌决策信息(包括属性权重和属性值)。②对杀菌决策信息进行分析计算并对方案进行排序。

根据水产品本身属性和杀菌环境,考虑了3项评

2.1.2 紫外线杀菌系统结构设计

水产品加工车间常用传送带对待处理的水产品进行转移,为保证系统在加工过程中的普适性,且保证水产品表面的均匀杀菌,将整个杀菌设备设计为拱门形。拱形内壁6只灯两两一组,分为3组布置其中,紫外线灯与水产品之间距离为200 mm^[25-26]。水产识别模块布置于拱门正上方朝向水产品进入杀菌室方向,便于水产品在进入杀菌室前识别其种类。PLC处理器和继电器等装置均集成布置于拱形门的上方平台。紫外线杀菌系统硬件结构见图3。

价指标(属性): u_1 为水产品品类(鱼1,贝2,虾3); u_2 为表面复杂程度(简单1,复杂2); u_3 为待杀菌面积(小1,中2,大3)。将各类评价指标列出,形成等级决策表,如表2所示。杀菌等级为 X ,形成决策矩阵

$$A = (a_{ij})_{n \times m} \tag{1}$$

规范化得到矩阵

$$R = (r_{ij})_{n \times m} \tag{2}$$

归一化矩阵 R ,得到

$$\dot{R} = (\dot{r}_{ij})_{n \times m} \tag{3}$$

其中

$$\dot{r}_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^n r_{ij}} \tag{4}$$

计算属性 u_j 的输出信息熵

$$E_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n (\dot{r}_{ij} \ln \dot{r}_{ij}) \quad (j=1,2,\cdots,m) \tag{5}$$

计算属性权重向量 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_n)$,其中

$$\omega_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^m (1 - E_j)} \quad (j=1,2,\cdots,m) \tag{6}$$

利用公式

$$Z_i = \sum_{j=1}^m r_{ij} \omega_j \tag{7}$$

计算方案 X 的综合属性值 $Z_i(\omega) (i=1,2,\cdots,6)$,利

用 $Z_i(\omega)$ 对等级进行排序,得到杀菌等级分布(表3), I 级为各组亮 1 只灯 50 s, II 级为各组亮 1 只灯 60 s, III 级为各组亮 1 只灯 70 s, IV 级为各组亮 2 只灯 50 s, V 级为各组亮 2 只灯 60 s, VI 级为各组亮 2 只灯 70 s。其具体杀菌等级见表 3。

表 2 杀菌等级决策矩阵

Tab. 2 Sterilization level decision matrix

	u_1	u_2	u_3
I	1	1	2
II	2	2	1
III	1	2	2
IV	2	2	2
V	3	1	3
VI	3	2	3

表 3 紫外线杀菌等级分布

Tab. 3 UVC sterilization level distribution table

	鱼类	贝类	虾类
表面简单光滑表面积小	I 级	II 级	III 级
表面简单光滑表面积中	II 级	III 级	IV 级
表面简单光滑表面积大	III 级	IV 级	V 级
表面不规则凸起多表面积小	II 级	III 级	IV 级
表面不规则凸起多表面积中	III 级	IV 级	V 级
表面不规则凸起多表面积大	IV 级	V 级	VI 级

2.2.2 系统软件流程

整个杀菌系统的工作流程为:启动装置,系统初始化,首先摄像头拍摄收集水产品的图像数据,上传到数据库,在数据库对比生食水产品杀菌决策模型,决策出杀菌等级,然后按照杀菌等级控制紫外线灯进行杀菌,整个系统的杀菌流程图见图 4。

2.2.3 水产品属性计算方法

2.2.3.1 水产品品类计算方法

摄像头采集水产品图像,灰度化和二值化处理,提取水产品轮廓,在轮廓图上提取水产品短轴、长轴等特征。通过 Excel 软件对数据进行统计分析,获得水产品的长短轴之比分布规律,比较可知虾类的长轴短轴之比主要分布在 7.2~8.4 之间,鱼类的长轴短轴之比主要分布在 2.9~4.1 之间,贝类的长轴短轴之比主要分布在 0.5~1.8 之间。据此分析得到水产品品类。

2.2.3.2 水产品表面结构复杂程度和表面积计算方法

摄像头采集水产品图像,灰度化处理降低图像数据量后进行图像增强,突出图像中的复杂凸起处,再通过阈值分割和边缘检测法对图像进行分割,得到水产品的外轮廓面积和凸出表面的区域特征数量。通过 Excel 软件对数据进行统计分析,获得水

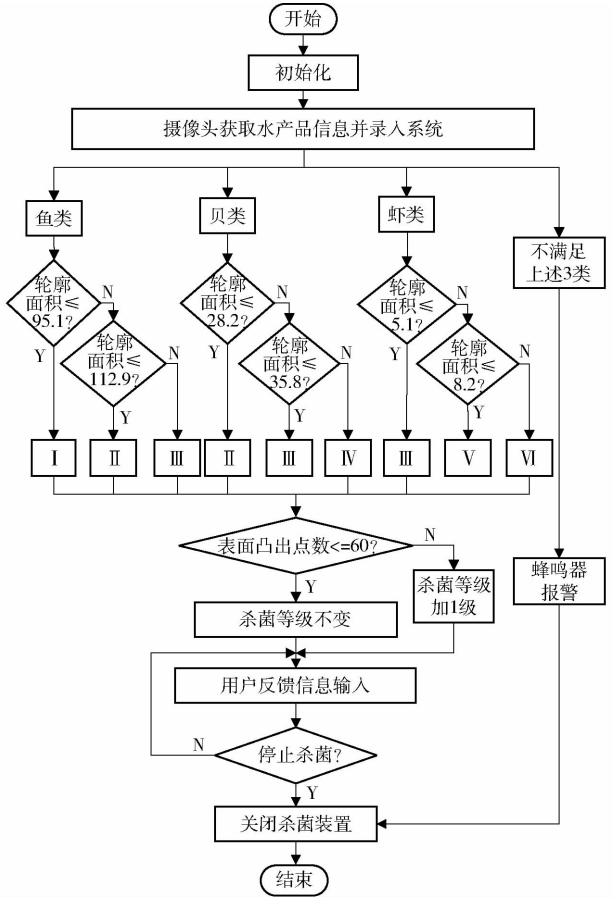


图 4 系统杀菌流程图

Fig. 4 Sterilization flow chart of system

产品的表面积分布规律,比较可知:小虾的轮廓面积在 3.4~5.1 cm² 之间,中虾的轮廓面积在 5.1~8.2 cm² 之间,大虾的轮廓面积在 8.2~11.4 cm² 之间。据此分析得到虾的 3 个表面积区间等级。小贝类的轮廓面积在 19.1~28.2 cm² 之间,中贝类的轮廓面积在 28.2~35.8 cm² 之间,大贝类的轮廓面积在 35.8~42.5 cm² 之间。据此分析得到贝类的 3 个表面积区间等级。小鱼的轮廓面积在 80.2~95.1 cm² 之间,中鱼的轮廓面积在 95.1~112.9 cm² 之间,大鱼的轮廓面积在 112.9~129.3 cm² 之间。据此分析得到鱼的 3 个表面积区间等级。

通过 Excel 软件对数据进行统计分析,获得水产品的表面复杂程度分布规律,比较可知:突出点个数为 0~120 之间,据此设定突出点 0~60 个的水产品为表面简单的水产品,突出点 61~120 个的水产品为表面复杂的水产品,据此分析得到水产品的 2 种表面复杂等级。

2.2.3.3 杀菌强度计算方法

本文使用的紫外线杀菌灯的辐照强度为 15 μW/cm²,整体的杀菌强度计算方法为:紫外线灯数量×杀菌灯辐照强度×杀菌时间。I 级为各组亮 1 只灯 50 s,整体杀菌强度为 2 250 μW·s/cm²,II 级为

各组亮 1 只灯 60 s,整体杀菌强度为 $2\,700\ \mu\text{W}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$,Ⅲ级为各组亮 1 只灯 70 s,整体的杀菌强度为 $3\,150\ \mu\text{W}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$,Ⅳ级为各组亮 2 只灯 50 s,整体的杀菌强度为 $4\,500\ \mu\text{W}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$,Ⅴ级为各组亮 2 只灯 60 s,整体的杀菌强度为 $5\,400\ \mu\text{W}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$,Ⅵ级为各组亮 2 只灯 70 s,整体的杀菌强度为 $6\,300\ \mu\text{W}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ 。

3 试验

3.1 试验方案

在山东省威海市捕捞新鲜及生命力旺盛(体长 100~150 mm)的太平洋牡蛎 20 个作为样本,暂养后迅速运往烟台实验室(冷藏车,温度 0~4℃,2 h),取出生蚝,将选取的生蚝均分为 4 组进行处理,第 1 组为空白对照组:置于常温(25℃)下保存;第 2 组置于常温并使用Ⅳ级杀菌强度 $4\,500\ \mu\text{W}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ 杀菌处理;第 3 组置于冷链保存;第 4 组置于冷链保存并使用Ⅳ级杀菌强度 $4\,500\ \mu\text{W}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ 进行杀菌处理。

3.2 杀菌效果检测方法

挥发性盐基氮(TVB-N)含量的检测方法:精准称取出打好的肉末,加入 20% 的三氯乙酸溶液,定容置于 100 mL 容量瓶中,使其自主形成 10% 的浸出液,均匀混合后静置沉浸 30 min,将其过滤,滤液备测。并将康威皿的外侧小室磨口上均匀涂抹凡士林,其内侧空室加入 1 mL 的硼酸吸收液,在外侧小室的其中一边加入 1 mL 样品过滤液,然后加入 1 mL 40% 碳酸钾溶液摇匀,放置在 37℃ 的恒温箱内保温 2 h 后取出,逐渐冷却至室温,用盐酸标准溶液滴定硼酸吸收液,当其显示为蓝紫色停止。

菌落总数的测定按照 GB/T 4729.2—2005 规定进行。

3.3 数据处理方法

采用 OriginPro 2018 软件,对采集到的各组挥发性盐基氮和菌落数据进行统计分析,做出折线图,直观得到杀菌效果对照数据。

3.4 结果分析

不同处理对储存牡蛎 TVB-N 含量的影响如图 5 所示,随着保存时间的延长,TVB-N 含量呈缓慢上升趋势。储存前期 TVB-N 含量增长较为缓慢,后期增长加快。第 1 组相较于第 2 组增长明显,第 3 组相较于第 4 组增长明显。按照 GB 2733—2005《鲜、冻动物性水产品卫生标准》规定活体牡蛎 TVB-N 含量小于或等于 $10\ \text{mg}/(100\ \text{g})$ 为可接受限,在第 26 天左右第 3 组 TVB-N 含量超过 $10\ \text{mg}/(100\ \text{g})$,达到货架期终点,在第 30 天左右第

4 组 TVB-N 含量超过 $10\ \text{mg}/(100\ \text{g})$,达到货架期终点。由此可知在冷链环境下杀菌处理,生食水产品的货架可以提升 4 d。

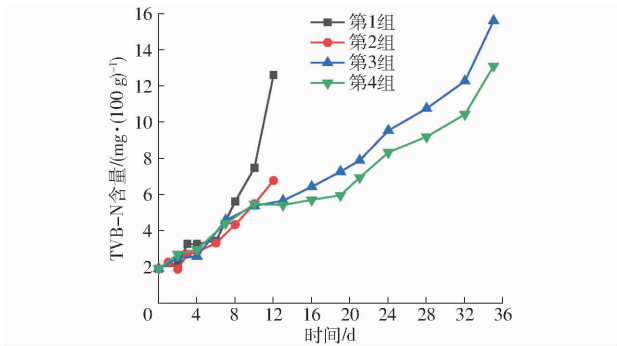


图 5 不同处理对储存牡蛎 TVB-N 含量的影响
Fig. 5 Effect of different treatments on TVB-N content of stored oysters

牡蛎贮藏期间菌落总数变化如图 6 所示。所有处理组菌落总数均呈现先下降后上升的趋势。按照 GB 2733—2005《鲜、冻动物性水产品卫生标准》规定,活体牡蛎菌落总数小于或等于 $6\ \text{lgCFU}/\text{g}$ 为可接受限。在第 8 天第 1 组菌落数便达到上限,第 2 组第 12 天达到上限,第 3 组在 28 天达到上限,第 4 组在第 32 天达到上限。由此可知常温 and 冷链环境下杀菌处理生食水产品的货架期可以提升 4 d。在常温环境下杀菌前的平均菌落数为 $4.25\ \text{lgCFU}/\text{g}$,杀菌后的平均菌落数为 $0.15\ \text{lgCFU}/\text{g}$,杀菌率为 96.47%。

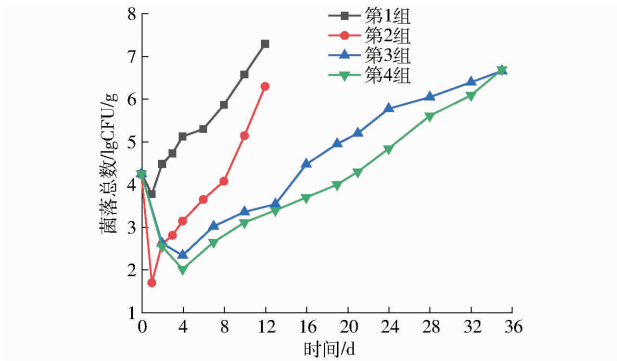


图 6 不同处理对储存牡蛎菌落总数的影响
Fig. 6 Effect of different treatments on total number of colonies of stored oyster

4 结论

(1)开发了用于生食水产品加工生产线杀菌的杀菌强度智能调控系统,由传感层、信号处理层、数据收集整理层和分析执行层 4 部分组成。设计了生食水产品等级决策模型,用于系统杀菌决策控制。系统可以实现从水产品品类信息采集到智能化调节紫外线灯杀菌强度等级,实现自动化生产线水产品分类分级杀菌的功能。

(2)在牡蛎加工生产线使用本系统进行表面杀菌试验,对比试验测得的相同环境下作为牡蛎传统品质指示指标的牡蛎挥发性盐基氮含量的变化和其杀菌前后菌群数据,其平均测试数据表明:该智能系统杀菌效果好,平均延长货架期 4 d,杀菌率为 96.47%。该智能紫外线杀菌系统可以满足对整个杀菌状态的实时智能控制,且系统性能稳定,提高了生食水产品生产线的安全性。

参 考 文 献

[1] 陈宏靖,李鑫.鲜活水产品氨基酸成分分析及营养评价[J].海峡药学,2020,32(1):76-78.
CHEN Hongjing, LI Xin. Analysis of amino acid composition and nutritional evaluation of fresh aquatic products[J]. Strait Pharmacology, 2020,32(1):76-78. (in Chinese)

[2] LÓPEZ-CABALLERO M E, PÉREZ-MATEOS M, BORDERÍAS J A, et al. Extension of the shelf life of prawns (*Penaeus japonicus*) by vacuum packaging and high-pressure treatment[J]. Journal of Food Protection, 2000,63(10):1381-1388.

[3] 李桂芬,娄永江.微波能对带鱼杀菌保鲜的研究[J].中国水产,2001(3):64-66.
LI Guifen, LOU Yongjiang. Study on microwave energy for sterilization and preservation of scallop[J]. China Fisheries, 2001(3):64-66. (in Chinese)

[4] YI-CHENG S, JINGYUN D, MICHAEL T M. Electron beam irradiation for reducing listeria monocytogenes contamination on cold-smoked salmon[J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2004,13(1):3-11.

[5] 罗志刚,杨连生.脉冲强光技术在食品工业中的应用[J].食品工业,2002(5):44-46.
LUO Zhigang, YANG Liansheng. The application of pulsed intense light technology in the food industry[J]. Food Industry, 2002(5):44-46. (in Chinese)

[6] GONCALVES A A, LIRA S T C. Improving quality and shelf-life of whole chilled Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) by ozone technology combined with modified atmosphere packaging[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019,99:568-575.

[7] FAN Wenjiao, CHI Yuanlong, ZHANG Shuo. The use of a tea polyphenol dip to extend the shelf life of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) during storage in ice[J]. Food Chemistry, 2007,108(1):148-153.

[8] 刘骁,李云菲,杨茜,等.紫外线在肉品杀菌保鲜应用中的研究进展[J].包装工程,2021,42(13):42-48.
LIU Xiao, LI Yunfei, YANG Xi, et al. Research progress on the application of ultraviolet light in meat sterilization and preservation[J]. Packaging Engineering, 2021,42(13):42-48. (in Chinese)

[9] 翁玲,刘锦芳,高彦祥,等.饮料包装材料灭菌技术研究进展[J].饮料工业,2021,24(2):67-72.
WENG Ling, LIU Jinfang, GAO Yanxiang, et al. Review of different sterilization technologies for beverage packaging material[J]. Beverage Industry, 2021,24(2):67-72. (in Chinese)

[10] 徐飞飞,代林林,陈晓红,等.不同紫外线杀菌灯辐照强度及其作用范围研究[J].护理研究,2020,34(22):4122-4124.
XU Feifei, DAI Linlin, CHEN Xiaohong, et al. Study on the irradiation intensity of different UVC germicidal lamps and their range of action[J]. Nursing Research, 2020,34(22):4122-4124. (in Chinese)

[11] LU Y, YANG B, ZHANG H, et al. Inactivation of foodborne pathogenic and spoilage bacteria by single and dual wavelength UV-LEDs: synergistic effect and pulsed operation[J]. Food Control, 2021,125(7):107999.

[12] 黄海燕,林丹,肖春华,等.即食卤制巴沙鱼鱼鳔加工工艺优化研究[J].现代食品,2020(4):71-75.
HUANG Haiyan, LIN Dan, XIAO Chunhua, et al. Optimization of the processing of ready-to-eat brined balsa fish bladder[J]. Modern Food, 2020(4):71-75. (in Chinese)

[13] PEDROS G, SCONDON A, CLEMENTE L, et al. Efficacy of ultraviolet light (UV-C) and pulsed light (PL) for the microbiological decontamination of raw salmon (*Salmosalar*) and food contact surface materials[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2018,50:124-131.

[14] LONE G, HANS H H. Microbiological spoilage of fish and fish products[J]. International Journal of Food Microbiology, 1996,33(1):121-137.

[15] DALGAARD P, MEJHOLM O, CHRISTIANSEN T J, et al. Importance of photobacterium phosphorous in relation to spoilage of modified atmosphere-packed fish products[J]. Letters in Applied Microbiology, 1997,24(5):373-378.

[16] 王欣. HACCP 在肉制品生产中的应用[J]. 食品安全导刊, 2020(15):35.
WANG Xin. The application of HACCP in meat production[J]. Food Safety Guide, 2020(15):35. (in Chinese)

[17] 黄洪玲. HACCP 在生食冰鲜三文鱼肉加工中的应用[J]. 山东食品科技, 2002(5):3-5.
HUANG Hongling. Application of HACCP in the processing of raw chilled salmon meat[J]. Shandong Food Science and Technology, 2002(5):3-5. (in Chinese)

[18] 雷乙,陈竟豪,涂金金,等.鱼肉加工过程特征气味物质变化研究进展[J].食品研究与开发,2020,41(15):201-210.
LEI Yi, CHEN Jinghao, TU Jinjin, et al. Advances in the study of characteristic odor changes during fish processing[J]. Food Research and Development, 2020,41(15):201-210. (in Chinese)

[19] 高培.生食水产品食用安全性研究[J].食品研究与开发,2005(5):202-205.
GAO Pei. Study on the safety of raw aquatic products for consumption[J]. Food Research and Development, 2005(5):202-205. (in Chinese)

[20] WANG X, FENG H, CHEN T, et al. Gas sensor technologies and mathematical modelling for quality sensing in fruit and vegetable cold chains: a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021,110:483-492.

[21] 王想,高乾钟,肖新清,等.保活运输河蟹品质感知生物信号检测与建模[J].农业机械学报,2020,51(10):268-277.
WANG Xiang, GAO Qianzhong, XIAO Xinqing, et al. Quality inspection and modeling for crab transportation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(10):268-277. (in Chinese)

- [17] AKEHURST S, VAUGHAN N D. Modelling of loss mechanisms in a pushing metal v-belt continuously variable transmission; belt slip losses[J]. Drive System Technique, 2004, 218: 1269 – 1306.
- [18] 孙德志, 谭振江, 郭大忠, 等. 金属带式无级变速器传动效率的分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2002, 23(1): 52 – 56.
SUN Dezhi, TAN Zhenjiang, GUO Dazhong, et al. Analysis of transmission efficiency for metal pushing V-Belt type CVT[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2002, 23(1): 52 – 56. (in Chinese)
- [19] 王月文. 大功率拖拉机液压机械无级变速器效率特性研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2018.
- [20] 王光明. 拖拉机液压机械无级变速器的特性、控制与故障诊断研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
- [21] 朱镇, 高翔, 曹磊磊, 等. 泵控马达系统响应特性和效率特性的研究[J]. 机床与液压, 2016, 44(17): 87 – 92.
ZHU Zhen, GAO Xiang, CAO Leilei, et al. Research on response characteristic and efficiency characteristic of pump-control-motor system[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2016, 44(17): 87 – 92. (in Chinese)
- [22] 夏光, 夏岩, 唐希雯, 等. 采用滑转率-阻力区间划分法的拖拉机双流传动系统调速控制[J]. 农业工程学报, 2021, 37(3): 47 – 55.
XIA Guang, XIA Yan, TANG Xiwen, et al. Speed regulation control of the dual-flow transmission system for a tractor using slip rate – resistance interval division[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(3): 47 – 55. (in Chinese)
- [23] CHEN C, LIANG T T. Theoretic study of efficiency of two-DOFs of epicyclic gear transmission via virtual power[J]. Journal of Mechanical Design, 2011, 133(3): 031007 – 031013.
- [24] ENDER I, MEHMET A. On the advantages of the new power-split infinitely variable transmission over conventional mechanical transmissions based on fuel consumption analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 244: 973 – 994.
- [25] MANTRIOTA G. Performances of a series infinitely variable transmission with type I power flow[J]. Mechanism and Machine Theory, 2002, 37(6): 579 – 597.
- [26] MANTRIOTA G. Performances of a parallel infinitely variable transmissions with a type II power flow[J]. Mechanism and Machine Theory, 2002, 37(6): 555 – 578.
- [27] CHEN C. Power flow and efficiency analysis of epicyclic gear transmission with split power[J]. Mechanism and Machine Theory, 2013, 59: 96 – 106.
- [28] PENNESTRI E, FREUDENSTRIN F. The mechanical efficiency of epicyclic gear trains[J]. Journal of Mechanical Design, 1993, 115(9): 645 – 651.
- [29] PENNESTRI E, FREUDENSTRIN F. A systematic approach to power-flow and static-force analysis in epicyclic spur-gear trains[J]. Journal of Mechanical Design, 1993, 115(9): 639 – 644.
- [30] 张明柱, 王界中, 王建华, 等. 提高燃油经济性的拖拉机变速控制策略[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1): 82 – 89.
ZHANG Mingzhu, WANG Jiezhong, WANG Jianhua, et al. Speed changing control strategy for improving tractor fuel economy[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(1): 82 – 89. (in Chinese)

(上接第 518 页)

- [22] 李志刚, 刘丹丹, 张小栓. 基于分簇数据融合的农产品冷链温度监控方法[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 302 – 308.
LI Zhigang, LIU Dandan, ZHANG Xiaoshuan. A method for cold chain temperature monitoring of agricultural products based on fusion of cluster data[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 302 – 308. (in Chinese)
- [23] 胡金有, 王靖杰, 朱志强, 等. 冷链物联网监测数据质量评估与优化研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 1 – 14.
HU Jinyou, WANG Jingjie, ZHU Zhiqiang, et al. Analysis of research progress on quality assessment and optimization of cold chain IoT monitoring data[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 1 – 14. (in Chinese)
- [24] 刘晓东, 李亚荣, 杨宝清. 智能测控系统的基本结构构成[J]. 大连交通大学学报, 2010, 31(5): 82 – 85.
LIU Xiaodong, LI Yarong, YANG Baoqing. The basic structure of intelligent measurement and control system[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2010, 31(5): 82 – 85. (in Chinese)
- [25] 刘振颖, 叶洪伟, 张洪斌, 等. 基于 PLC 时控紫外线消毒装置的设计与应用[J]. 生物医学工程与临床, 2021, 25(1): 97 – 101.
LIU Zhenying, YE Hongwei, ZHANG Hongbin, et al. Design and application of PLC-based time-controlled ultraviolet disinfection device[J]. Biomedical Engineering and Clinical, 2021, 25(1): 97 – 101. (in Chinese)
- [26] 梁飞, 刘娟秀, 栗娟. 基于人体感应的智能紫外线消毒控制系统设计[J]. 电脑知识与技术, 2021, 17(8): 1 – 3.
LIANG Fei, LIU Juanxiu, SU Juan. Design of intelligent UV disinfection control system based on human body induction[J]. Computer Knowledge and Technology, 2021, 17(8): 1 – 3. (in Chinese)