

低温等离子体活化水发生设备及其应用效果试验

谢焕雄¹, 胡志超¹, 吴惠昌¹, 魏海¹, 万良淏², 戴阳², 王海鸥^{3*}

(1. 农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014; 2. 南京苏曼等离子科技有限公司, 南京 211161;
3. 南京晓庄学院食品科学学院, 南京 211171)

摘要: 等离子体活化水 (Plasma-Activated Water, PAW) 具有广谱杀菌特性, 可有效杀灭生鲜食品上的微生物, 抑制其腐败变质。该研究基于介质阻挡放电等离子体发生原理设计了一套 PAW 发生设备, 主要部件包括介质阻挡放电结构、通风散热通道、活化水流动通道、高压交流电源等。其中, 介质阻挡放电结构采用圆柱形高压放电电极与平板形低压放电电极上下均匀间隙组配, 不锈钢导流板与流动水膜一体化设计低压电极; 圆柱形高压放电电极的散热采用双向逆流、内外散热通风双通道; 高压交流电源的功率电路采用交流-直流-交流电路结构实现介质阻挡放电能量供给, 控制电路可实现频率、电压、电流等参数监测与调控。将鲜切马铃薯片模拟感染大肠杆菌, 并进行 PAW 杀菌保鲜试验, 以验证所研制设备的应用效果。结果表明, 在进水流量 600 mL/min、电极空气间隙 10 mm、物料与活化水质量比 1:20、电源电压 137.4 V、杀菌时间 4.72 min 条件下, PAW 对染菌马铃薯片的大肠杆菌杀菌率达 (98.65±0.59)%, 经过 24 d 贮藏后, 不清洗组、蒸馏水清洗组和 PAW 清洗组染菌马铃薯片硬度分别为 (3.01±0.84)、(3.54±0.81)、(4.70±0.48) N, 色差值分别为 22.08±1.05、13.21±1.43、7.35±0.82, 相对电导率分别为 (28.00±6.43) %、(26.72±2.07) %、(17.19±2.26) %, 可溶性固形物含量分别为 (6.850±0.120) %、(5.430±0.006) %、(3.080±0.006) %, 腐烂率分别为 (87.04±1.63) %、(76.32±1.60) %、(52.09±1.41) %, PAW 清洗组染菌马铃薯片品质优于不清洗组、蒸馏水清洗组, PAW 杀菌保鲜效果良好。该研究可为等离子体活化水杀菌技术研发及产业化应用提供参考。

关键词: 设计; 试验; 等离子体活化水; 介质阻挡放电; 马铃薯片; 杀菌; 保鲜

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.16.032

中图分类号: TS205.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-16-0260-10

谢焕雄, 胡志超, 吴惠昌, 等. 低温等离子体活化水发生设备及其应用效果试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(16): 260-269. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.16.032 http://www.tcsae.org
Xie Huanxiong, Hu Zhichao, Wu Huichang, et al. Low temperature plasma-activated water generator and its application effect test[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(16): 260-269. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.16.032 http://www.tcsae.org

0 引言

等离子体是一种由离子、电子和中性粒子集合组成的电离气体, 被称为固、液、气三态之外的第四种状态, 整体呈电中性^[1-3]。近年来, 低温等离子体作为一种新兴的绿色冷杀菌技术, 在食品杀菌、果蔬保鲜等食品安全领域的研究和应用备受瞩目^[4-6]。低温等离子体发生器产生的等离子体活性成分非常复杂, 其中活性氧被认为是杀菌的主要成分, 其可对细胞 DNA、蛋白质、脂质和糖类生物大分子造成氧化损伤, 从而导致细胞死亡^[7-9]。目前等离子体杀菌的应用方式主要是将产生的电离气体直接作用于处理对象上, 而食品物料的不规则形状会导致杀菌不均匀, 且直接接触的高能粒子可能会对物体表面

造成破坏^[10-11]。

等离子体活化水 (Plasma-Activated Water, PAW) 是通在水中或水表面进行大气压低温等离子体放电处理后而获得富含活性氧成分的水溶液。研究证实^[4-9], 将等离子体活化水作为中间媒质对食品物料进行间接杀菌处理, 对多种食源性致病菌具有良好的杀灭效果, 且溶液处理均匀性和流动性好, 等离子体活化水杀菌体现出高效、简单、便携、安全、低成本等特点, 在食品生产和安全控制领域中具有很大的应用潜力, 未来极有可能辅助甚至替代现有的传统食品杀菌技术, 因而受到国内外学者的广泛关注。郭俭^[7]研究证实 PAW 对禾谷镰孢菌、酵母菌、大肠杆菌等微生物均具有一定的抑制作用; Ma 等^[12]利用 PAW 对杨梅进行杀菌处理, 贮藏期间显著降低了杨梅的细菌和真菌菌群数, 硬度和颜色保持更持久, 腐烂率显著降低。目前, 食品领域关于 PAW 的研究主要集中于其杀菌效果及作用机理方面, 而对 PAW 发生设备的研究较为鲜见。康超娣等^[10]报道的 PAW 发生装置主要为介质阻挡放电、表面介质阻挡放电、大气等离子体射流等结构原理, 目前还主要用于实验室研究, 活化水产生效率低, 液体处理量小, 难以满足食品工业化应用的要求。孙明等^[13]设计了一款用于污水处理的负电晕放电等

收稿日期: 2020-09-02 修订日期: 2021-05-29

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFD0700102); 国家自然科学基金资助 (31872901); 中国农业科学院科技创新工程; 农业农村部现代农业装备重点实验室开放课题

作者简介: 谢焕雄, 研究员, 研究方向为农产品加工技术与装备。

Email: 13913912593@163.com

*通信作者: 王海鸥, 博士, 教授, 研究方向为食品冷冻与干燥技术。

Email: who1978@163.com

中国农业工程学会高级会员: 谢焕雄 (E041200496S); 王海鸥 (E041200664S)

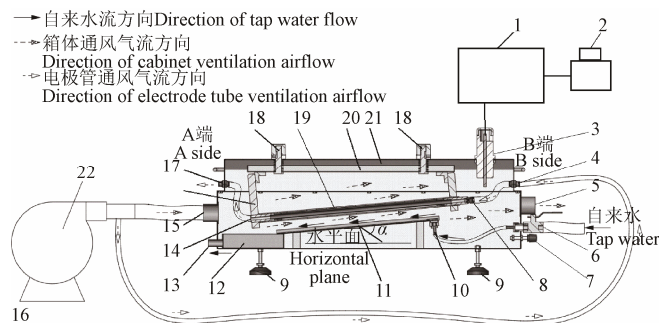
离子体雾化水处理器, 采用放电喷嘴电极将待处理水放电雾化形成小液滴, 以提高等离子体对水中污染物的作用效率。南京农业大学的研究学者^[14]发明了一套低温等离子体活性水连续式发生装置, 通过多台设备串联使用, 实现 PAW 连续生产, 但未见其结构、工作原理和作业效果的研究报道。因此, 充分利用现有研究基础, 系统开展低温等离子体活化水发生设备的开发及其效果验证工作, 推动该技术在食品领域实际应用, 具有重要的意义。

综上,介质阻挡放电是大气压低温等离子体发生设备的最常用方法^[15-18],是将绝缘介质插入放电空间的一种气体放电形式,其放电功率大、频率范围宽、放电均匀、弥散、工作稳定性好,且电极寿命长、设备简单、操作容易,较适合工业化生产。本研究基于介质阻挡放电等离子体发生原理,尝试设计制造一套连续化的等离子体活化水发生设备,并以鲜切马铃薯片为试验原料,开展针对大肠杆菌的等离子体活化水杀菌处理条件优化和贮藏保鲜验证试验,以期等离体子活化水杀菌技术在食品工业中的产业化应用提供依据。

1 总体结构与工作原理

1.1 总体结构与活化水发生原理

低温等离子体活化水发生设备总体结构如图 1 所示, 主要由介质阻挡放电结构、通风散热通道、活化水流动通道、高压交流电源等主要部件构成。设备主体为箱体式构造, 由 4 个底座支撑。介质阻挡放电结构主要由高压放电电极和导流板构成, 其中导流板支撑固定在箱体底板上, 高压放电电极由绝缘吊板挂接在箱体顶部的横条板上, 并通过箱体顶部的 2 个电极高度调节旋钮来调整高压放电电极两端的高度位置和倾角, 进而控制高压放电电极与导流板的空气间隙大小。箱体 A、B 两端(图 1 中 A 端和 B 端) 分别设有若干个管道接口, 其中 B 端的进水阀外接自来水管出口, 箱内通过塑胶管与导流板进水口连通, 并在 A 端配置集水盒和出水口, 自来水由 B 端进水阀进入, 流经导流板、集水盒后, 从 A 端出水口流出(图 1 中实心箭头方向)。箱体外配置鼓风机, 其出风口分别通过塑胶管道与 A 端的箱体通风散热入口、B 端的电极散热接入口接通, 向箱体内输送 2 支气流。其中一支气流由 A 端的箱体通风散热入口进入箱体内部, 从高压放电电极管外周穿流通过, 为高压放电提供必需的空气源, 同时也从外部对高压放电电极管进行通风散热, 然后从 B 端箱体通风散热出口排出机外(图 1 中长虚线箭头方向)。另一支气流由箱体 B 端的电极散热接入口进入, 通过塑胶管输送进入电极通风入口, 气流在高压放电电极管内穿过整个管程后, 再通过电极通风出口和塑胶管从箱体 A 端的电极散热排出口排出机外(图 1 中短虚线空心箭头方向)。高压交流电源的高压输出端通过箱体 B 端的高压接线端子与高压放电电极连接, 电源低压输出端通过箱体 B 端的低压接线端子与导流板连接, 并通过调压器来调节高压放电工作频率、电压、电流等工作参数。



1. 高压交流电源 2. 调压器 3. 高压接线端子 4. 电极通风散热接入口 5. 箱体通风散热出口 6. 进水阀 7. 低压接线端子 8. 电极通风入口 9. 底座 10. 导流板进水口 11. 导流板 12. 集水盒 13. 出水口 14. 电极通风出口 15. 箱体通风散热出口 16. 绝缘吊板 17. 电极散热排出口 18. 电极高度调节旋钮 19. 高压放电电极 20. 横条板 21. 箱体 22. 鼓风机

- 1.High voltage alternating current (AC) power supply 2.Voltage regulator
3.High-voltage connection terminal 4.Inlet of ventilation and heat dissipation
in the electrode 5.Outlet of ventilation and heat dissipation in the cabinet
6.Inlet valve of water 7.Low voltage connection terminal 8.Inlet of the
electrode ventilation 9.Base 10. Water inlet of guide plate 11.Guide plate
12.Box for collecting water 13.Water outlet 14.Outlet of the electrode
ventilation 15.Inlet of ventilation and heat dissipation in the cabinet
16.Insulated hanging plate 17. Outlet of ventilation and heat dissipation in the
electrode 18.Knob for adjusting the electrode height 19.High-voltage
discharge electrode 20.Horizontal bar 21.Cabinet 22.Blower

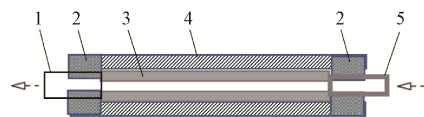
注: α 为导流板倾角, ($^{\circ}$)。

Note: α is inclination angle of guide plate, ($^{\circ}$).

图 1 等离子体活化水发生设备结构示意图

Fig.1 Structural schematic of Plasma-Activated Water (PAW) generating equipment

基于介质阻挡放电的工作原理, 设计了圆柱形结构的高压放电电极(图2)。高压放电电极由电极管和电介质管内、外密封套接而成, 其中电极管采用 304 不锈钢导电性、防腐性好, 电介质管采用刚玉陶瓷管, 管壁厚度为 2~3 mm。电极管两端各装有 1 个绝缘堵头, 电极管两端装有金属气管接头、绝缘气管, 并分别通过塑胶管与箱体上的电极散热接入口和电极散热排出口连通(图1), 鼓风机的一支气流由此通道输送进入电极管内对其进行通风散热。金属气管接头为 304 不锈钢材料, 具有良好导电性, 与高压接线端子连接(图1), 使内部的电极管接通高压电。绝缘堵头和绝缘气管均采用聚四氟乙烯材料, 绝缘性好, 耐高温, 不易氧化。本设备高压放电电极设计成圆柱型构造, 相对于平板型电极而言, 其绝缘要求低、不容易变形开裂、更容易工业化制造应用, 且放电更均匀、稳定。



- 1.绝缘气管 2.绝缘堵头 3.电极管 4.电介质管 5.金属气管接头
1. Insulated gas tube 2. Insulated plug 3. Electrode tube 4. Dielectric tube
5. Metal joint of gas tube

图 2 高压放电电极结构示意图

Fig.2 Structural schematic of the high-voltage discharge electrode

导流板采用 304 不锈钢材料,与低压接线柱连接并接地(图 1),从进水阀通入自来水后,水流在导流板上形成流动水膜,由于水具有良好的导电性,流动水膜与导流板一体化共同组成低压放电电极。高压放电电极与导流板上、下平行配置,可通过电极高度调节旋钮来调整两者之间的

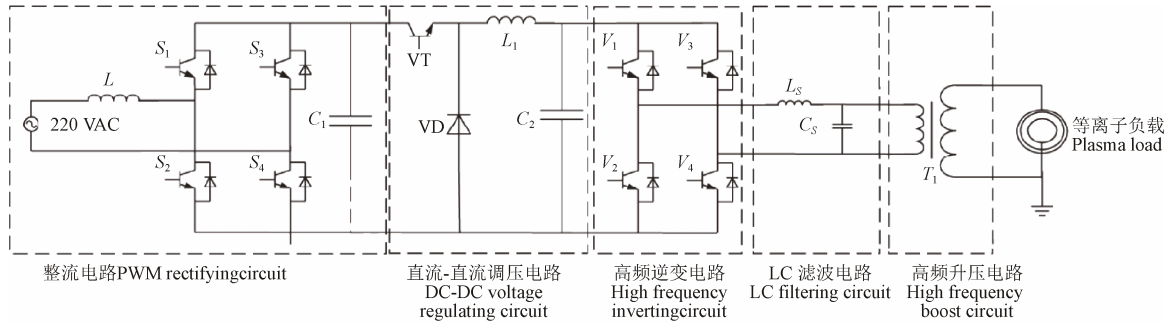
间隙, 刚玉陶瓷材质的电介质管与水膜之间的空气间隙控制在 2~15 mm 范围内, 以保证电介质管的各个部位与水膜之间空气间隙均匀一致, 箱体通风气流从空气间隙穿流而过, 为介质阻挡放电提供气源。因此, 高压放电电极、空气间隙、低压放电电极共同组成介质阻挡放电结构。

导流板倾角 α 为导流板与水平面的夹角 (图 1), 可以通过调节箱体两端的底座高度进行调整。 α 越大, 水流在导流板上流速越快, 水膜分布更薄, 水处理效率越高。 α 太小, 水流容易积攒在导流板上, 形成的水膜过厚、不均匀, 空气间隙不一致, 导致放电会集中于厚水面位置, 容易短路或放电集中, 烧坏电极。 α 可根据试验确定, 通常为 $15^\circ \sim 75^\circ$, 黏度高的液体一般采用较大倾角以便于液体流动。电源开启后, 当高、低压电极上施加足够高的交流电压时, 高压放电电极直接对导流板上的水膜表面进行单介质阻挡放电, 将空气间隙中的气体激发电离, 形成各种低温等离子体, 并从空气中扩散到流动水膜, 在气相、气-液分界处和液相中发生一系列的反应, 在流

水中生成亚硝酸根离子 (NO^{2-})、硝酸根离子 (NO^{3-})、过氧化氢 (H_2O_2)、过氧亚硝基离子 ($\text{ONOO}\cdot$)、亚硝酰离子 ($\text{NO}\cdot$)、氢氧根离子 ($\text{OH}\cdot$) 等多种活性杀菌物质, 最终形成等离子体活化水^[10-11]。

1.2 高压交流电源

高压交流电源是实现介质阻挡放电的能量供给单元, 由功率电路和控制电路 2 部分组成。功率电路采用交流-直流-交流电路结构, 如图 3 所示, 主要包括脉宽调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 整流电路、直流-直流调压电路、高频逆变电路、LC 滤波电路和高频升压电路等。高压交流电源输入为单相 220 V 交流电, 首先通过单相 PWM 可控硅整流, 得到稳定的 400 V 直流电压, 并且电网侧保持单位功率因数, 然后经过 DC-DC 调压电路得到 100~400 V 的直流电压, 再经过全桥高频逆变电路和 LC 滤波电路得到 20 000 Hz 的高频低压正弦交流电, 再通过高频高压变压器获得 5 000~20 000 V 的高频高压交流电, 用于激发低温等离子体。

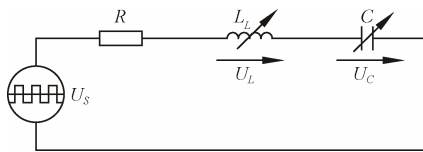


注: L 、 L_1 、 L_5 分别为输入滤波电感、LC 串联谐振电感和输出滤波电感, H; S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 为构成全桥整流电路的单向可控硅; V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 为调制高频交流电的单向可控硅; C_1 、 C_2 、 C_3 分别为输入滤波电容、LC 串联谐振电容和输出滤波电容, F; VT 为开关场效应管; VD 为续流二极管; T_1 为升压变压器。
Note: L , L_1 , L_5 are input filter inductor, LC series resonant inductor, and output filter inductor, respectively, H; S_1 , S_2 , S_3 , S_4 are one-way silicon-controlled rectifiers for forming a full-bridge rectifier circuit; V_1 , V_2 , V_3 , V_4 are one-way silicon-controlled rectifiers for modulating high frequency alternating current; C_1 , C_2 , C_3 are input filter capacitors, LC series resonant capacitors, and output filter capacitors, respectively, F; VT is switch field effect transistor; VD is freewheeling diode; T_1 is step-up transformer.

图 3 高压交流电源功率电路图

Fig.3 Power circuit diagram of high voltage Alternating Current (AC) power supply

功率电路及负载的等效电路如图 4 所示,



注: R 为逆变负载电路的等效电阻, Ω ; L_L 为逆变负载电路的等效电感, H; C 为逆变负载电路的等效电容, F; U_s 为逆变器的交流侧输出电压, V; U_C 为等效电容 C 两端的电压, V; U_L 为等效电感 L 两端的电压, V。

Note: R is the equivalent resistance of the inverter load circuit, Ω ; L_L is the equivalent inductor of the inverter load circuit, H; C is the equivalent capacitor of the inverter load circuit, F; U_s is the output voltage of Alternating Current (AC) side in the inverter, V; U_C is the voltage across the equivalent capacitor C , V; U_L is the voltage across the equivalent inductor L , V.

图 4 高压交流电源功率电路与负载等效电路

Fig.4 Power circuit of high voltage AC power supply and equivalent circuit of load

其中, 逆变负载电路的等效电阻 (R , Ω)、等效电感 (L , H)、等效电容 (C , F)、逆变器的交流侧输出电压 (U_s , V)、等效电容 C 两端的电压 (U_C , V)、等效电感 L 两端的电压 (U_L , V) 的关系如式 (1) 所示。

$$\begin{cases} U_2 = kU_0 \\ U_d = \sqrt{2}U_2 \cos \theta \\ U_s = \frac{4U_d}{\pi} \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{i=1}^n \sin(2i-1)\omega t \right), \omega = 2\pi f_s \end{cases} \quad (1)$$

整理式 (1) 可得:

$$LC \frac{d^2 U_C}{dt^2} + RC \frac{dU_C}{dt} + U_C = U_s \quad (2)$$

式中 U_2 为可控硅整流电路交流侧电压, V; U_0 为电路输入的工频电源电压, V; k 为可调常数; U_d 为高频逆变电路直流侧直流电压, V; θ 为可控硅整流电路的控制角, ($^\circ$); i 为谐振电流, A; f_s 为高频逆变电路工作频率, Hz; ω 为角频率, rad/s; t 为时间, s。控制电路原理如图 5 所示, 主要由电流、电压和温度等信号采集电路、信号调制电路、数字信号处理器 (Digital Signal Processor, DSP)、可控硅驱动电路、故障报警与保护电路等构成。其中 DSP 通过采集电路工作参数, 分析处理后输出开关管驱动信号, 驱动整流和逆变等电路中可控硅动作, 同时实时监控各部分工作状态, 及时输出故障报警信号等。

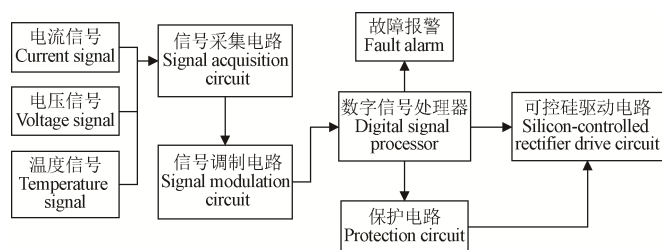


图 5 高压交流电源控制电路原理图

Fig.5 Principle diagram for control circuit of high voltage AC power supply

1.3 设备操作过程及主要技术参数

低温等离子体活化水发生设备主要操作过程如下：

1) 开启鼓风机，从外界向箱体内的通风散热通道和高压放电电极管内的通风散热通道输送气流。

2) 调节箱体顶部的电极高度调节旋钮，使高压放电电极与导流板保持平行，保证两者空气间隙大小均匀（高压放电电极与导流板间距范围为 2~15 mm）。打开高压交流电源，将调压器调节到 150 V，调节频率旋钮直至观察到空气间隙出现稳定放电，高压放电电极预热 1 min 后关闭高压交流电源。

3) 缓慢打开进水阀，将自来水引入设备中，待出水口水流稳定后打开高压交流电源，并观察空气间隙的放电情况，再微调频率旋钮，使放电达到稳定状态。

4) 工作过程中，通过调压器调节输入电压和输入功率，通过进水阀调节进水流量，获取不同效果的等离子体活化水。

5) 活化水制取结束后，先关闭调压器，再关闭电源。设备主要技术参数如表 1 所示。

表 1 等离子体活化水发生设备主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of the Plasma-Activated Water (PAW) generating equipment

参数 Parameters	数值 Values
箱体尺寸 Cabinet dimension/mm×mm×mm	840×250×410
放电电极长度 Length of discharge electrode/mm	520
导流板倾角 Inclination angle of guide plate/(°)	15~75, 连续可调
放电空气间隙 Discharge air gap/mm	2~15, 连续可调
活化水流量 Activated water flow rate/(mL·min ⁻¹)	0~800, 连续可调
电源功率 Supply power/W	0~1 000, 连续可调
工作电压 Working voltage/V	0~220, 连续可调
工作电流 Working current/A	0~5, 连续可调

2 等离子体活化水发生设备应用效果验证试验

PAW 具有广谱杀菌特性，在食品杀菌保鲜领域具有广阔的应用前景^[10]。大量研究证实，对生鲜果蔬产品进行 PAW 浸泡处理后，既能有效杀灭消除果蔬产品上的微生物，又能抑制并延缓果蔬产品腐败变质^[4,9]。为了验证研制的等离子体活化水发生设备使用效果，以鲜切马铃薯片为试验材料，人工模拟感染大肠杆菌，优化离子体活化水清洗处理的杀菌条件，并在此基础上进行不同清洗处理的染菌马铃薯片贮藏对比试验，试验现场如图 6 所示。

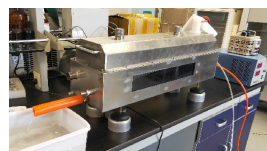
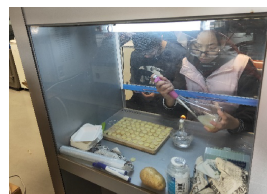
a. 制取等离子体活化水
a. Preparation of plasma activated waterb. 对鲜切马铃薯片添加菌悬液
b. Adding bacterial suspension to fresh-cut potato slicesc. 马铃薯片贮藏对比试验
c. Comparison experiments of potato slices storage

图 6 马铃薯片等离子体活化水杀菌及贮藏试验现场照片

Fig.6 Site photos for experiments of plasma activated water sterilization and preservation of potato slices

2.1 试验材料

新鲜马铃薯购于南京苏果超市，利用自行研制的等离子体活化水发生设备在实验室制取等离子体活化水；无菌蒸馏水为实验室自制；LB 肉汤培养基、LB 营养琼脂培养基、氯化钠（NaCl）购于南京晶格化学科技有限公司（中国）；大肠杆菌（*Escherichia coli*）菌种购于中国工业微生物菌种保藏管理中心。

2.2 菌悬液制备

采用无菌接种环挑取大肠菌菌种于事先准备好的平板上分区划线，然后将平板置于 37 °C 培养 18~24 h；刮取培养好的大肠杆菌放入适量 LB 肉汤培养基中，置于 37 °C 摇床中培养 18 h，制备菌悬液浓度为 10⁸ cfu/mL。

2.3 染菌马铃薯片的制备

挑选新鲜和成熟度一致的马铃薯，用无菌水清洗干净，在无菌环境中利用切片机和打孔器制得直径 20 mm、厚度 4 mm 的马铃薯圆片，在每片上接种制备好的大肠杆菌菌悬液 50 μL，在无菌环境中干燥 30 min，获得染菌的马铃薯片。

2.4 染菌马铃薯片等离子体活化水杀菌条件响应面优化

电源电压影响等离子体活化水发生设备电极间隙空气放电效果和 PAW 理化特性，较宽的电压调节范围更有利于 PAW 杀菌条件优化研究。根据前期预试验，进水流量 600 mL/min、导流板倾角 20°、高压放电电极与导流板的空气间隙 10 mm 时，在 100~200 V 电源工作电压范围内可确保高压放电电极全段形成均匀稳定的放电电离状态，连续稳定制取等离子体活化水。取制取的活化水对染菌马铃薯片进行杀菌清洗试验，各处理组的物料与活化水质量比均为 1 : 20。清洗条件优化试验采用中心组合设计法，选取对染菌马铃薯片杀菌率影响较为显著的杀菌时间（A，min）和电源电压（B，V）作为试验因素，以杀菌率（Y，%）为评价指标设计二因素五水平响应面试验，因素水平编码表如表 2 所示，每组试验重复 3 次。通过响应面试验对等离子体活化水处理的杀菌时间、电

源电压进行优化。

表 2 响应面试验因素水平编码表

Table 2 Coding table for factors and the levels of response surface experiment

试验因素 Experiment factors	不同编码水平下各试验因素值 Values of experiment factors at different coding levels				
	-1.414	-1	0	1	1.414
杀菌时间 Sterilization time /min	1.2	2.0	4.0	6.0	6.8
电源电压 Power voltage /V	107.6	120.0	150.0	180.0	192.4

2.5 不同清洗处理的染菌马铃薯片贮藏对比试验

将染菌马铃薯片进行 3 组不同清洗处理, 第一组为不清洗组, 染菌马铃薯片不进行清洗处理, 作为对照组; 第二组为蒸馏水清洗组, 利用实验室自制的无菌蒸馏水对染菌马铃薯片进行清洗; 第三组为等离子体活化水 (PAW) 清洗组, 按照响应面优化试验获得的 PAW 最优杀菌条件对染菌马铃薯片进行清洗处理。将清洗后的染菌马铃薯片沥干表面水分, 每组取 6 片平铺于无菌托盘中并用无菌塑料薄膜密封, 置于温度 20 ℃、相对湿度 70% 的恒温恒湿箱中贮藏 24 d。

2.6 考察指标及测试方法

PAW 杀菌条件响应面优化试验以杀菌率为考察指标。在染菌马铃薯片贮藏对比试验过程中, 对染菌马铃薯片样品的色泽、硬度、相对电导率、可溶性固形物、腐烂率进行跟踪测定, 每 3 d 测定 1 次, 至贮藏 24 d 后结束。

2.6.1 杀菌率

杀菌率 (Y , %) 是指等离子体活化水清洗处理对染菌马铃薯片菌落的杀灭程度。PAW 杀菌条件响应面优化试验时, 在每组 PAW 处理结束后, 随机取 25 g 未经 PAW 清洗的染菌马铃薯片样品及 PAW 清洗后的染菌马铃薯片样品各 3 份, 分别装入无菌袋中, 将生理盐水倒入无菌匀质器中制成 1:10 的稀释液, 然后从中取 1 mL 溶液, 稀释成 1:10⁴、1:10⁵、1:10⁶ (V:V) 3 个浓度梯度, 再分别取稀释液 10 mL 于培养皿上, 倒入冷却至 45 ℃ 左右的无菌 LB 营养液琼脂 20 mL 混合均匀, 待凝固后倒置放在 37 ℃ 培养箱中培养 18~24 h。各处理组样品重复 3 次, 根据式 (3) 计算等离子体活化水对染菌马铃薯片的杀菌率 (Y , %), 取平均值。

$$Y = \frac{N_0 - N_1}{N_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中 N_0 为未经 PAW 清洗的马铃薯片上的菌落总数; N_1 为经 PAW 清洗后的马铃薯片上的菌落总数。

2.6.2 色泽

根据 CIELAB 表色系统, 描述物料色泽的指标有明暗度指数 L^* 、红绿度指数 a^* 、黄蓝度指数 b^* 。在贮藏试验期间, 采用电脑色差仪 (NH310, 深圳市三恩时科技有限公司, 中国) 定期测定 3 个处理组马铃薯片的色泽, 记录 L^* 、 a^* 、 b^* , 并根据式 (4) 计算色差 ΔE , 每组样品重复 6 次, 取平均值。

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (4)$$

式中 L_0^* 、 a_0^* 、 b_0^* 分别为未经处理的马铃薯片原始明暗度指数、红绿度指数、黄蓝度指数。

2.6.3 硬度

马铃薯片样品硬度 (N) 定义为探头在穿刺过程感应到的最大压力峰值, 采用质构仪 (TMS-PRO 型, FTC 公司, 美国) 对贮藏马铃薯片样品定期进行穿刺测试, 圆柱型探头直径为 2 mm, 测试速度为 1 mm/s, 穿刺距离为 2 mm。每组样品重复 10 次, 取平均值。

2.6.4 相对电导率

相对电导率 (E , %) 是描述被测样品组织内电解质渗透到水溶液中的能力, 其测定方法为: 用直径 1 cm 的打孔器对贮藏期间各组马铃薯片样品进行取样, 每组制取 5 个圆片样品, 用蒸馏水将样品清洗干净, 放入烧杯中, 加入 100 mL 蒸馏水, 用电导率仪 (DDS-12DW, 上海般特仪器制造有限公司, 中国) 测定初始电导率 (E_0 , mS/cm); 用保鲜膜将烧杯封口, 静置 1 h 后, 再用电导率仪测定密封静置后的电导率 (E_1 , mS/cm), 将烧杯放在电炉上加热煮沸 0.5 h, 冷却后再加蒸馏水至 100 mL, 测定煮沸后的电导率 (E_2 , mS/cm); 并根据式 (5) 计算马铃薯片的相对电导率 E [19], 每组样品重复 3 次, 取平均值。

$$E = \frac{E_1 \times E_0}{E_2} \times 100\% \quad (5)$$

2.6.5 可溶性固形物含量

可溶性固形物是指被测样品中能溶解于水的化合物, 在果蔬样品中主要指可溶性糖、有机酸等物质, 其测定方法为: 称取染菌马铃薯片样品 5 g, 用研钵将样品捣碎, 再用 4 层纱布挤出匀浆汁液, 用阿贝折光仪 (2WAJ, 上海光学仪器设备五厂, 中国) 测定汁液中可溶性固形物含量 [20], 每组样品重复 3 次, 取平均值。

2.6.6 腐烂率

腐烂率 (%) 是指马铃薯片样品在贮藏期间的腐烂程度。定期观察各组马铃薯片的腐烂片数, 根据式 (6) 计算腐烂率 (R , %), 每组重复 3 次, 取平均值。

$$R = \frac{F}{Z} \times 100\% \quad (6)$$

式中 F 为腐烂样品数; Z 为样品总数。

2.7 数据处理

利用 Design-Expert 7.0 软件设计响应面试验方案, 并进行模型回归和方差分析, 计算回归模型的平方和、自由度、均方、检验 F 值、显著性 P 值以及决定系数 R^2 等统计指标。使用 Excel 2010 进行贮藏对比试验数据的处理及图表绘制, 差异显著性用 SPSS 19.0 的 Duncan's 法进行多重比较分析。

3 结果与分析

3.1 染菌马铃薯片等离子体活化水杀菌条件响应面优化结果

响应面优化试验方案和结果如表 3 所示, 一共开展 13 组试验, 其中杀菌率最高为 (98.63±0.62) %, 最低为 (26.01±0.34) %。根据表 3 的试验结果, 利用 Design-Expert

软件进行数据拟合，得到杀菌率（ Y ，%）的二次多项式回归模型为

$$Y=95.31+14.37A-6.13B+0.93AB-21.14A^2-8.53B^2 \quad (7)$$

式中 A 为杀菌时间的水平值， B 为电源电压的水平值。

回归模型表明染菌马铃薯片的杀菌率与杀菌时间、电源电压呈现非线性关系。

表 3 响应面试验方案和结果
Table 3 Testing plan and results of the response surface experiment

试验号 Test No.	杀菌时间 Sterilization time A	电源电压 Power voltage B	杀菌率 Sterilization rate $Y/\%$
1	1	-1	93.99±0.52
2	0	1.414	70.78±0.40
3	0	0	95.95±0.44
4	0	-1.414	75.23±0.55
5	0	0	97.12±0.43
6	0	0	96.21±0.56
7	0	0	88.64±0.50
8	-1.414	0	26.01±0.34
9	1.414	0	69.55±0.38
10	1	1	74.49±0.49
11	0	0	98.63±0.62
12	-1	-1	69.14±0.47
13	-1	1	45.93±0.35

注：杀菌率数据表示为平均值±标准偏差， A 、 B 分别为杀菌时间和电源电压的水平值。
Note: Data of sterilization rate is presented as mean ± standard deviation. A and B are respectively the level value of sterilization time and power voltage.

回归模型的方差分析结果如表 4 所示。由表 4 可知，杀菌时间和电源电压对杀菌率的影响均极显著（ $P<0.01$ ），一次交互项对杀菌率影响不显著（ $P>0.01$ ），杀菌时间的二次项对杀菌率影响极显著（ $P<0.01$ ），电源电压对杀菌率影响显著（ $P<0.05$ ）。回归模型失拟项不显著（ $P=0.061\ 2$ ），决定系数 R^2 为 0.921 1，模型极显著。

表 4 方差分析表
Table 4 Variance analysis table

方差来源 Source of variance	平方和 Sum of square	自由度 Degrees of freedom	均方 Mean square	F 值 F values	P 值 P values	显著性 Significance
模型 Model	5 301.24	5	1 060.25	16.330	0.001 0	**
A	1 652.69	1	1 652.69	25.460	0.001 5	**
B	300.16	1	300.16	4.620	0.008 6	**
AB	3.44	1	3.44	0.053	0.824 5	—
A^2	3 109.23	1	3 109.23	47.900	0.000 2	**
B^2	506.01	1	506.01	7.800	0.026 8	*
失拟项 Mismatch item	394.40	3	131.47	8.760	0.061 2	—
纯误差 Pure error	60.01	4	15.00			
总差 Total difference	5 755.64	12				

注：**表示极显著（ $P<0.01$ ），*表示显著（ $P<0.05$ ），—表示影响不显著（ $P>0.05$ ）。
Note: ** means the effect is extremely significant ($P<0.01$), * means the effect is significant ($P<0.05$), — means the effect is not significant ($P>0.05$).

杀菌时间和电源电压对染菌马铃薯片杀菌率的响应面图如图 7 所示。可以看出，杀菌时间一定时，杀菌率随着电源电压的增大而增大，之后逐渐减小；电源电压

一定时，杀菌效果随着杀菌时间的增大而增大，之后又慢慢减小。对杀菌率 Y 的二次多项式回归方程进行最优求解，确定最佳杀菌条件为电源电压 137.4 V、杀菌时间 4.72 min，理论预测杀菌率可达 98.74%，以最佳组合的杀菌条件进行 3 次验证试验，实测杀菌率达（98.65±0.59）%，表明模型具有较好的预测功能。

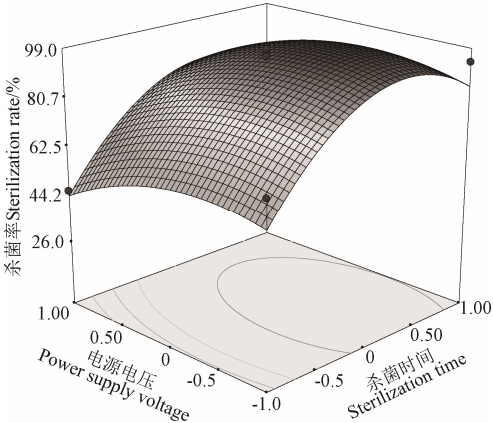


图 7 杀菌时间与电源电压对杀菌率的响应面图
Fig.7 Response surface plot of sterilization rate effected by sterilization time and power supply voltage

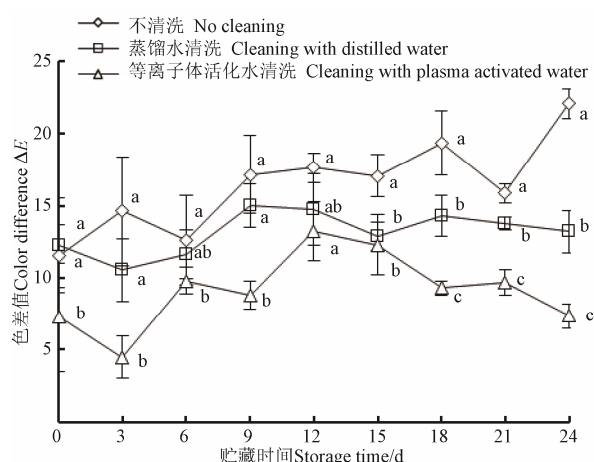
3.2 马铃薯片色泽测试结果

染菌马铃薯片贮藏期间色泽变化如图 8 所示。各组马铃薯片在贮藏初期（前 3 d）色泽保持较好，随后色差开始呈现波动变化。不清洗组和蒸馏水清洗组变化趋势相近，不清洗组的色差在 15 d 后显著高于蒸馏水清洗组和等离子体活化水清洗组（ $P<0.05$ ）。分析认为，马铃薯鲜切后其表面组织受到严重的机械损伤，细胞内营养物质流出并暴露在空气中，更容易被微生物侵染而发生腐败变质，同时还会引发多酚氧化酶系催化酚类物质氧化生成邻醌导致褐变，影响表观色泽^[21-22]。而水洗处理可以清理因组织损伤而流露在表面的营养物质，可在一定程度上降低低温贮藏期间微生物污染和褐变的发生。在贮藏期间，等离子体活化水清洗组的色差值整体低于其他组，随着贮藏时间增加而增加，15 d 后出现下降趋势。这可能是由于等离子体活化水处理一定程度上抑制了马铃薯片中的内源酶如过氧化物酶等酶活性，从而延缓了马铃薯片酶促褐变，同时等离子体活化水清洗组的大肠杆菌含量要远低于不清洗组、蒸馏水清洗组，也有利于保护马铃薯片色泽^[21]。经过 24 d 贮藏后，不清洗组、蒸馏水清洗组和活化水清洗组染菌马铃薯片色差 ΔE 分别为 22.08±1.05、13.21±1.43、7.35±0.82。

3.3 马铃薯片硬度测试结果

硬度是影响果蔬品质的一个主要的因素，过分软化会降低食品的食用价值。果蔬贮藏过程中，呼吸作用会产生大量乙烯，加速细胞的衰老。3 种处理的染菌马铃薯片贮藏期间硬度变化如图 9 所示。3 组样品整体均呈现硬度随贮藏时间而下降的趋势，且等离子体活化水清洗的马铃薯片硬度整体高于不清洗组和蒸馏水清洗组。分析其可能的原因，一方面等离子体活化水处理降低了马铃薯片细胞壁水解酶的活性，贮藏期间纤维素等物质的水

解受到了抑制,从而延缓细胞组织软化,抑制硬度快速下降^[9,22];另一方面由于等离子体能消除乙烯、乙醇等代谢物,诱导气孔减小,马铃薯片呼吸作用减弱,降低了对马铃薯保鲜效果的不利影响,使组织硬度下降变慢^[23];此外,活化水处理后的马铃薯片大肠杆菌杀灭率高,微生物腐败引起的品质衰变过程减缓,也有利于保持硬度。经过 24 d 贮藏后,不清洗组、蒸馏水清洗组和活化水清洗组染菌马铃薯片硬度分别为 (3.01 ± 0.84) 、 (3.54 ± 0.81) 、 (4.70 ± 0.48) N。



注:不同小写字母表示同一贮藏时间不同处理间差异显著, $P<0.05$,下同。
Note: Different letters at the same storage time indicate significant differences in the different treatments. The same below.

图 8 不同处理的马铃薯片贮藏期间色差值变化

Fig.8 Changes of color difference of potato slices in different treatment groups during storage

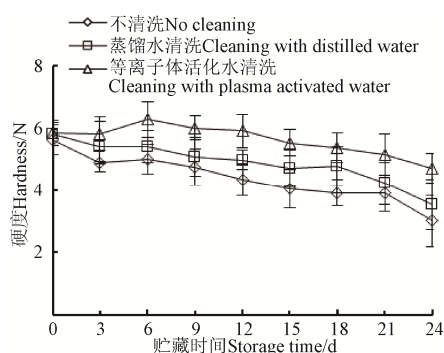


图 9 不同处理的马铃薯片贮藏期间硬度变化

Fig.9 Changes of hardness of potato slices with different treatments during storage

3.4 马铃薯片相对电导率测试结果

相对电导率反映细胞透性,相对电导率越高,电解质渗透量越大,细胞通透性越大,细胞受损程度也就越严重^[24]。3种处理的染菌马铃薯片贮藏期间相对电导率测定结果如图 10 所示。可以看出,在贮藏前 6 d 3 组样品的相对电导率快速增加,6 d 后等离子体活化水清洗组相对电导率基本维持稳定,而不清洗组和蒸馏水清洗组则仍缓慢增加;在整个贮藏过程中,等离子体活化水清洗组相对电导率显著低于同期的不清洗组和蒸馏水清洗组 ($P<0.05$),表明其细胞受损和通透性处于相对较低水平,这是由于等离子体活化水处理能有效杀灭马铃薯片上的

大肠杆菌,降低微生物对组织破坏作用,具有保护细胞膜、抑制细胞损伤的作用。经过 24 d 贮藏后,不清洗组、蒸馏水清洗组和活化水清洗组染菌马铃薯片相对电导率分别为 $(28.00\pm6.43)\%$ 、 $(26.72\pm2.07)\%$ 、 $(17.19\pm2.26)\%$ 。

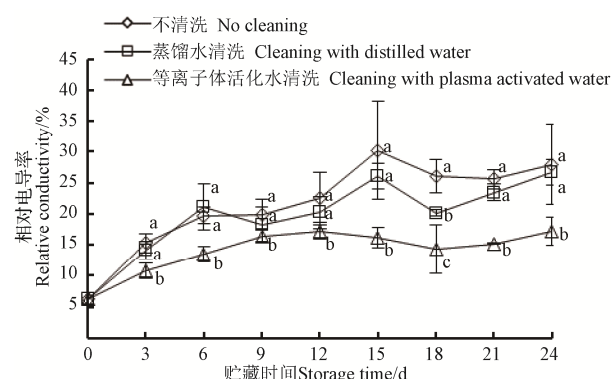


图 10 不同处理的马铃薯片贮藏期间相对电导率变化

Fig.10 Changes of relative conductivity of potato slices in different treatment groups during storage

3.5 马铃薯片可溶性固形物含量测试结果

可溶性固形物测定结果如图 11 所示,3组样品的可溶性固形物含量均先下降后逐渐增加,这是由于马铃薯在贮藏前期可溶性固形物发生降解或作为底物被消耗,质量分数有所下降,贮藏后期由于组织软化,可溶性固形物含量增加^[9,22]。等离子体活化水清洗处理组在贮藏后期可溶性固形物含量呈下降趋势,且从第 18 天开始显著低于不清洗组、蒸馏水清洗组 ($P<0.05$),通常果蔬的可溶性固形物与其含糖量成正比,随着贮藏时间的延长,淀粉不断转化为糖类,马铃薯片经过离子体活化水处理后,受到臭氧和一些自由基的抑制作用,生物代谢能力降低,抑制了大分子物质的降解,淀粉转化为糖分的速率下降,马铃薯软化组织得到缓解,使得可溶性固形物含量相对较低^[21]。经过 24 d 贮藏后,不清洗组、蒸馏水清洗组和活化水清洗组染菌马铃薯片可溶性固形物含量分别为 $(6.850\pm0.120)\%$ 、 $(5.430\pm0.006)\%$ 、 $(3.080\pm0.006)\%$ 。

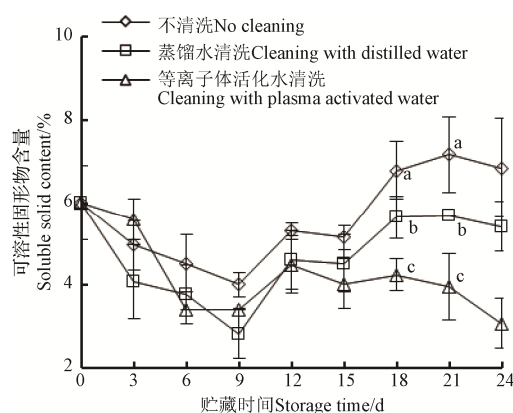


图 11 不同处理的马铃薯片贮藏期间可溶性固形物含量变化

Fig.11 Changes of soluble solids content of potato slices in different treatment groups during storage

3.6 马铃薯片腐烂率测试结果

腐烂率测试结果如图 12 所示。3 组马铃薯片在贮藏

前 6 d 均未发生腐烂, 随后腐烂率均增加, 从第 15 天开始呈现出显著差异, 不清洗组最大, 蒸馏水清洗组次之, 等离子体活化水清洗组最小 ($P<0.05$), 表明等离子体活化水处理可有效杀灭马铃薯片上的大肠杆菌, 抑制了贮藏过程中的微生物生长, 减轻了马铃薯片因受微生物侵染造成的腐败变质。经过 24 d 贮藏后, 不清洗组、蒸馏水清洗组和活化水清洗组染菌马铃薯片腐烂率分别为 (87.04 ± 1.63)%、(76.32 ± 1.60)%、(52.09 ± 1.41)%。

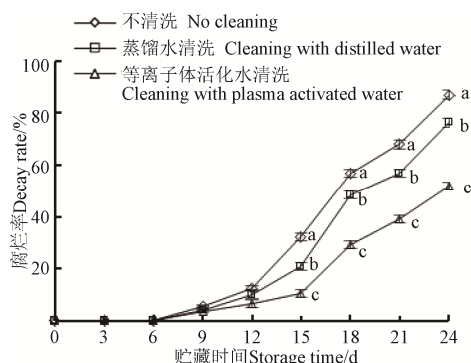


图 12 不同处理的马铃薯片贮藏期间腐烂率变化

Fig.12 Changes of decay rate of potato slices in different treatment groups during storage

等离子体活化水杀菌响应面优化试验表明, 在优化条件下等离子体活化水发生设备可以有效杀灭鲜切马铃薯片上的微生物。3 组染菌马铃薯片样品贮藏对比试验表明, 经过 24 d 贮藏后, 等离子体活化水清洗组样品的硬度最高, 色差值、相对电导率、可溶性固形物含量、腐烂率均最低, 其综合品质优于不清洗组和蒸馏水清洗组样品, 证明 PAW 可以有效抑制和延缓染菌马铃薯片的腐败变质。

4 结 论

1) 本研究基于介质阻挡放电等离子体发生原理设计了一种连续式等离子体活化水发生设备, 其中介质阻挡放电结构采用圆柱形高压放电电极与平板形低压放电电极均匀间隙组配, 不锈钢导流板与流动水膜一体化构成低压电极。高压放电电极的散热采用双向逆流、内外散热通风双通道, 高压交流电源系统包括功率电路、控制电路 2 部分, 功率电路采用交流-直流-交流 (AC-DC-AC) 结构实现介质阻挡放电能量供给, 控制电路可实现频率、电压、电流等参数监测与调控。

2) 对鲜切马铃薯片模拟感染大肠杆菌, 并进行等离子体活化水杀菌响应面优化试验, 结果表明, 在进水流量 600 mL/min、电极空气间隙 10 mm、物料与活化水质量比 1:20、电源电压 137.4 V、杀菌时间 4.72 min 条件下, 等离子体活化水对马铃薯片大肠杆菌杀菌率达 (98.65 ± 0.59)%。

3) 利用上述优化条件制备的等离子体活化水清洗染菌马铃薯片, 置于温度 20 °C、相对湿度 70 % 的恒温恒湿条件下贮藏 24 d 后, 马铃薯片硬度为 (4.70 ± 0.48) N、色差值为 7.35 ± 0.81 、相对电导率为 (17.19 ± 2.26)%、可

溶性固形物含量为 (3.080 ± 0.006)%, 腐烂率为 (52.09 ± 1.41)%, 综合品质优于不清洗组和蒸馏水清洗组样品。因此, 本等离子体活化水发生设备所产生的 PAW 可以有效抑制和延缓染菌马铃薯片的腐败变质。

[参 考 文 献]

- [1] 蔡忆昔, 樊润林, 施蕴曦, 等. 低温等离子体对柴油机排放颗粒物组分净化效果的热重分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(16): 57-64.
Cai Yixi, Fan Runlin, Shi Yunxi, et al. Purification effect of non-thermal plasma on particulate matters from diesel exhaust using thermogravimetric analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(16): 57-64. (in Chinese with English abstract)
- [2] 李小华, 李伟俊, 蔡忆昔, 等. 氧气/空气源低温等离子体发生器的性能对比分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(11): 103-108.
Li Xiaohua, Li Weijun, Cai Yixi, et al. Comparative analysis on characteristics in non-thermal plasma reactor with oxygen and air[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(11): 103-108. (in Chinese with English abstract)
- [3] 李可, 田金凤, 郑思雨, 等. 等离子体对鹰嘴豆分离蛋白溶解性和乳化特性的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(4): 31-39.
Li Ke, Tian Jinfeng, Zheng Siyu, et al. Effect of plasma on solubility and emulsifying properties of chickpea protein isolates[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(4): 31-39. (in Chinese with English abstract)
- [4] 徐文慧, 周锦云, 蔡静, 等. 基于低温等离子体技术的果蔬生鲜杀菌保鲜研究进展[J]. 浙江农业科学, 2020, 61(1): 121-124.
Xu Wenhui, Zhou Jinyun, Cai Jing, et al. Research progress in sterilization and preservation of fresh fruits and vegetables based on low-temperature plasma technology[J]. Zhejiang Agricultural Sciences, 2020, 61(1): 121-124. (in Chinese with English abstract)
- [5] 韩格, 陈倩, 孔保华. 低温等离子体技术在肉品保藏及加工中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(3): 286-292.
Han Ge, Chen Qian, Kong Baohua. Recent advances in application of cold plasma technology in meat preservation and processing[J]. Food Science, 2019, 40(3): 286-292. (in Chinese with English abstract)
- [6] 章建浩, 黄明明, 王佳媚, 等. 低温等离子体冷杀菌关键技术装备研究进展[J]. 食品科学技术学报, 2018, 36(4): 8-16.
Zhang Jianhao, Huang Mingming, Wang Jiamei, et al. Development of sterilization technology and equipment of cold plasma cold sterilization[J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 36(4): 8-16. (in Chinese with English abstract)
- [7] 郭俭. 低温等离子体杀菌机理与活性水杀菌作用研究[D].

- 杭州: 浙江大学, 2016.
- Guo Jian. The Inactivation Mechanism of Non-thermal Plasma Agents and Bactericidal Effect of Plasma Activated Water[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [8] 乔维维, 黄明明, 王佳媚, 等. 低温等离子体对生鲜牛肉杀菌效果及色泽的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(23): 237-242.
- Qiao Weiwei, Huang Mingming, Wang Jiamei, et al. Effect of cold plasma on sterilization and color of fresh beef[J]. Food Science, 2017, 38(23): 237-242. (in Chinese with English abstract)
- [9] 王卓, 周丹丹, 彭菁, 等. 低温等离子体对蓝莓果实的杀菌效果及对其品质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(15): 101-107.
- Wang Zhuo, Zhou Dandan, Peng Jing, et al. Efficacy of cold plasma on microbial decontamination and storage quality of blueberries[J]. Food Science, 2018, 39(15): 101-107. (in Chinese with English abstract)
- [10] 康超娣, 相启森, 刘骁, 等. 等离子体活化水在食品工业中应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2018, 39(7): 348-352.
- Kang Chaodi, Xiang Qisen, Liu Xiao, et al. A review of application of plasma-activated water in food industry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(7): 348-352. (in Chinese with English abstract)
- [11] 李嘉慧, 成军虎, 韩忠. 低温等离子体活性水在食品领域的应用进展[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(4): 207-214.
- Li Jiahui, Cheng Junhu, Han Zhong. Applications of plasma-activated water in food field: A review[J]. Storage and Process, 2020, 20(4): 207-214. (in Chinese with English abstract)
- [12] Ma R N, Yu S, Tian Y, et al. Effect of non-thermal plasma activated water on fruit decay and quality in postharvest Chinese bayberries[J]. Food and Bioprocess Technology, 2016, 9(11): 1825-1834.
- [13] 孙明, 蔡丽俊, 闵静. 负电晕放电等离子体雾化水处理器的设计[J]. 河北大学学报: 自然科学版, 2010, 30(5): 490-493.
- Sun Ming, Cai Lijun, Min Jing. Design of water atomization treatment device with negative corona discharge plasma[J]. Journal of Hebei University: Natural Science Edition, 2010, 30(5): 490-493. (in Chinese with English abstract)
- [14] 南京农业大学. 一种高压电场低温等离子体活性水连续式发生装置: 202010462402. 9[P]. 2020.
- [15] 季慧, 于娇娇, 张金, 等. 介质阻挡低温等离子体处理对花生蛋白持水性及溶解性的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 299-304.
- Ji Hui, Yu Jiaojiao, Zhang Jin, et al. Effects of dielectric barrier discharge cold plasma treatment on solubility and water holding capacity of peanut protein[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(4): 299-304. (in Chinese with English abstract)
- [16] 禹晓, 聂成镇, 秦晓鹏, 等. 等离子体处理对亚麻籽胶结构和功能特性的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(3): 269-277.
- Yu Xiao, Nie Chengzhen, Qin Xiaopeng, et al. Effects of plasma treatment on the structure and functional properties of flaxseed gum[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(3): 269-277. (in Chinese with English abstract)
- [17] 李小华, 李伟俊, 蔡忆昔, 等. 氧气/空气源低温等离子体发生器的性能对比分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(11): 103-108.
- Li Xiaohua, Li Weijun, Cai Yixi, et al. Comparative analysis on characteristics in non-thermal plasma reactor with oxygen and air[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(11): 103-108. (in Chinese with English abstract)
- [18] 濮晓宇, 蔡忆昔, 施蕴曦, 等. 排气余热辅助低温等离子体再生柴油机颗粒捕集器试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 70-77.
- Pu Xiaoyu, Cai Yixi, Shi Yunxi, et al. Test on diesel particulate filter regeneration using non-thermal plasma technology aided by exhaust waste heat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(14): 70-77. (in Chinese with English abstract)
- [19] 王海鸥, 扶庆权, 陈守江, 等. 热烫处理苹果片真空冻结特性[J]. 食品科学, 2016, 37(23): 57-63.
- Wang Haiou, Fu Qingquan, Chen Shoujiang, et al. Vacuum freezing properties of blanched apple slices[J]. Food Science, 2016, 37(23): 57-63. (in English with Chinese abstract)
- [20] 谢丹丹, 郭文川, 高梦杰, 等. 草莓的光学特性及其与可溶性固形物含量和含水率的关系[J]. 食品科学, 2021, 42(1): 41-46.
- Xie Dandan, Guo Wenchuan, Gao Mengjie, et al. Optical properties of strawberry fruit and their relationship with soluble solids content and moisture content[J]. Food Science, 2021, 42(1): 41-46. (in Chinese with English abstract)
- [21] Misra N N, Pankaj S K, Segat A, et al. Cold plasma interactions with enzymes in foods and model systems[J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 55(7): 39-47.
- [22] 孙艳, 张志伟, 王世清. 常压低温等离子体对黄瓜表面大肠杆菌杀菌效果及品质的影响[J]. 粮油食品科技, 2018, 26(1): 61-67.
- Sun Yan, Zhang Zhiwei, Wang Shiqing. Effect of atmospheric pressure low temperature plasma on sterilization rate of *Escherichia coli* on sliced cucumber surface and quality attributes[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2018, 26(1): 61-67. (in Chinese with English abstract)
- [23] Min S C, Roh S H, Niemira, B A, et al. In-package atmospheric cold plasma treatment of bulk grape tomatoes for microbiological safety and preservation[J]. Food Research International, 2018, 108: 378-386.
- [24] 凌晨, 谢兵, 洪羽婕, 等. 外源钙和钙调素拮抗剂对冷藏桃果实耐冷性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(1): 240-248.

Ling Chen, Xie Bing, Hong Yujie, et al. Effects of exogenous calcium and calmodulin antagonist treatments on chilling

tolerance of cold-stored peach fruit[J]. Food Science, 2019, 40(1): 240-248. (in Chinese with English abstract)

Low temperature plasma-activated water generator and its application effect test

Xie Huanxiong¹, Hu Zhichao¹, Wu Huichang¹, Wei Hai¹, Wan Lianghao², Dai Yang², Wang Haiou^{3*}

(1. Nanjing Research Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China; 2. Nanjing Suman Plasma Technology Co., Ltd., Nanjing 211161, China; 3. School of Food Science, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing 211171, China)

Abstract: Plasma-activated water (PAW) has widely been accepted and proven to have broad-spectrum bactericidal properties. It can also effectively kill microorganisms on fresh foods, further inhibiting spoilage. The emerging low-temperature PAW sterilization has presented great potential for application in food production and safety control. However, the systematic design of PAW generating equipment is still lacking in recent years. In this study, a piece of novel equipment to produce low-temperature PAW was developed using the plasma generation via dielectric barrier discharge, in order to improve the level of PAW equipment development and application. The system of this equipment included the components of dielectric barrier discharge, ventilation channels of heat dissipation, flow channels of activated water, and the high-voltage alternating current power supply. The components of dielectric barrier discharge were composed of a cylindrical high-voltage discharge electrode and a flat-shaped low-voltage discharge electrode in an upper-down parallel configuration with the uniform gas gap. Among them, the flowing water film was integrated to be used as the low-voltage electrode, thereby realizing the uniform plasma generation, particularly for the continuous and stable production of activated water. Furthermore, the heat dissipation of high-voltage discharge electrode was employed two bidirectional-countercurrent ventilation channels inside and outside the electrode tube. A typical Alternating Current-Direct Current-Alternating Current (AC-DC-AC) structure was also designed as the power circuit of a high-voltage alternating current power supply, further to realize the energy supply of three dielectric barrier discharge. In addition, the control circuit was utilized to monitor and adjust the operational parameters, such as frequency, voltage, and current. Some structural and working parameters of equipment were designed to be continuously adjustable within a certain range, including the inclination angle of stainless-steel plate for water flow, the air gap between the high-voltage discharge electrode and the stainless-steel plate, water flow rate, discharge power, and discharge voltage, in order to meet the diversified requirements for the application of plasma-activated water. Furthermore, an experiment was performed on the PAW equipment to verify the effect of PAW treatment on the vegetables. The fresh-cut potato slices were simulated to be infected with *Escherichia coli* before the PAW sterilization cleaning and preservation. An optimal sterilization rate was $(98.65 \pm 0.59)\%$ for the sterilizing of PAW on *Escherichia coli* in the potato slices, in which the water flow was 600 mL/min, the air gap was 10 mm, the mass ratio of material to activated water was 1:20, the power supply voltage was 137.4 V, and the sterilization time was 4.72 min. More excellent performance was achieved under the optimal condition than before, thereby greatly contributed to relatively higher hardness, lower color difference, lower relative conductivity, lower soluble solid content, and lower decay rate in the bacteria-contaminated potato slices during storage. After 24 d of storage, the bacteria-infected potato slices without cleaning, with distilled water cleaning, and with PAW cleaning achieved a hardness of (3.01 ± 0.84) , (3.54 ± 0.81) , (4.70 ± 0.48) N, respectively, a color difference of 22.08 ± 1.05 , 13.21 ± 1.43 , 7.35 ± 0.81 , respectively, a relative conductivity of $(28.00 \pm 6.43)\%$, $(26.72 \pm 2.07)\%$, $(17.19 \pm 2.26)\%$, respectively, a soluble solid content of $(6.850 \pm 0.120)\%$, $(5.430 \pm 0.006)\%$, $(3.080 \pm 0.006)\%$, respectively, and a decay rate of $(87.04 \pm 1.63)\%$, $(76.32 \pm 1.60)\%$, $(52.09 \pm 1.41)\%$, respectively, indicating better advantages of sterilization and preservation. This finding can provide a sound reference on the development and industrial application for the sterilization technology of plasma-activated water.

Keywords: design; experiments; plasma-activated water; dielectric barrier discharge; potato slices; sterilization; preservation