

等离子体活化水联合介质阻挡放电处理对鲜切莴苣杀菌效果及品质的影响

李 夏, 钱 婧, 章建浩, 严文静

Effect of Combined Plasma-activated Water and Dielectric Barrier Discharge Treatment on the Sterilization and Quality of Fresh-cut Lettuce

LI Xia, QIAN Jing, ZHANG Jianhao, and YAN Wenjing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023100188>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

等离子体活化水对鲜切生菜杀菌效能及贮藏品质影响

Effect of Plasma Activated Water on Microbial Decontamination and Storage Quality of Fresh-cut Lettuce

食品工业科技. 2020, 41(21): 281-285,292 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019120106>

低温等离子体冷杀菌对盐水鸭货架期及风味品质的影响

Effects of Cold Plasma Sterilization on Shelf Life and Flavor Quality of Salted Duck

食品工业科技. 2021, 42(17): 70-77 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021010031>

等离子体活化水作为解冻介质对牛肉杀菌效能及品质的影响

Effect of Plasma-activated Water as Thawing Media on the Sterilization and Quality of Beef

食品工业科技. 2022, 43(2): 338-345 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021060219>

大气压冷等离子体在鲜切果蔬保鲜中的应用研究进展

Research Progress of Atmospheric Cold Plasma in Fresh-cut Fruits and Vegetables Preservation

食品工业科技. 2021, 42(1): 368-372 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020030152>

等离子体活性水对生鲜黄鱼杀菌效果及品质的影响

Effects of Plasma-activated Water on the Microbial Decontamination and Quality of Yellow Croaker Slices

食品工业科技. 2020, 41(10): 277-283 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.10.046>

高压电场低温等离子体对红枣干果的冷杀菌工艺优化及其对品质的影响

Optimization of Cold Sterilization Process and Its Effect on Quality of Dried Jujube by High Voltage Electric Field Cold Plasma

食品工业科技. 2021, 42(16): 317-324 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020120235>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李夏, 钱婧, 章建浩, 等. 等离子体活化水联合介质阻挡放电处理对鲜切莴苣杀菌效果及品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(19): 196–205. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023100188

LI Xia, QIAN Jing, ZHANG Jianhao, et al. Effect of Combined Plasma-activated Water and Dielectric Barrier Discharge Treatment on the Sterilization and Quality of Fresh-cut Lettuce[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(19): 196–205. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023100188

· 工艺技术 ·

等离子体活化水联合介质阻挡放电处理对鲜切莴苣杀菌效果及品质的影响

李 夏¹, 钱 婧², 章建浩^{1,*}, 严文静^{1,*}
(1.南京农业大学食品科技学院, 江苏南京 210095;
2.东南大学公共卫生学院, 江苏南京 210003)

摘 要:为开发适用鲜切莴苣的新型杀菌保鲜技术, 本文采用等离子体活化水 (Plasma-activated water, PAW) 联合介质阻挡放电 (Dielectric barrier discharge, DBD) 等离子体技术, 通过响应面法确定最佳杀菌工艺参数, 并以微生物数量、色泽、褐变度、硬度及失重率为指标, 探究低温等离子体联合处理对鲜切莴苣贮藏期间品质的影响。结果表明: 在 PAW 制备时间 130 s、PAW 浸泡时间 5 min、DBD 等离子体处理时间 135 s 的最佳处理条件下, 鲜切莴苣表面菌落总数为 (0.48 ± 0.07) lg CFU/g。在贮藏 7 d 内, 低温等离子体联合处理能够有效抑制微生物的生长, 维持鲜切莴苣良好的色泽及硬度, 延缓失重率的上升, 抑制褐变的发生, 有效延长货架期。

关键词:鲜切莴苣, 低温等离子体, 杀菌, 品质, 货架期

中图分类号: TS255.36

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2024)19-0196-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023100188

本文网刊:



Effect of Combined Plasma-activated Water and Dielectric Barrier Discharge Treatment on the Sterilization and Quality of Fresh-cut Lettuce

LI Xia¹, QIAN Jing², ZHANG Jianhao^{1,*}, YAN Wenjing^{1,*}

(1. College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;

2. School of Public Health, Southeast University, Nanjing 210003, China)

Abstract: To develop a new method for the sterilization of fresh-cut lettuce, plasma-activated water (PAW) combined with dielectric barrier discharge (DBD) plasma technology was applied in this study. Response surface methodological approach was performed to determine the optimal sterilization process parameters. Meanwhile, the microbial count, color, browning degree, firmness and weight loss rate were evaluated to investigate the effects of combined cold plasma treatments on the qualities of fresh-cut lettuce during the storage. Results showed that the total viable bacteria count on the surface of fresh-cut lettuce was (0.48 ± 0.07) lg CFU/g under the optimal treatment conditions when PAW preparation time was 130 s, PAW soaking time was 5 min, and DBD plasma treatment time was 135 s. Moreover, during 7 days of storage, the combined cold plasma treatments could effectively inhibit the growth of microorganisms, maintain the color and firmness of fresh-cut lettuce, delay the increase of weight loss rate, and inhibit the occurrence of browning, which would effectively prolong the shelf life of fresh-cut lettuce.

Key words: fresh-cut lettuce; cold plasma; sterilization; quality; shelf life

收稿日期: 2023-10-25

基金项目: 海南省重点研发项目 (ZDYF2022XDNY272); 南京市国际联合研发项目 (202201021)。

作者简介: 李夏 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: 2021108068@stu.njau.edu.cn。

* 通信作者: 章建浩 (1961-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 畜产品加工与质量控制, E-mail: nau_zjh@njau.edu.cn。

严文静 (1986-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品安全, E-mail: ywj1103@njau.edu.cn。

莴苣(*Lactuca sativa* L.)属菊科莴苣属,富含维生素、膳食纤维素、 β -胡萝卜素等营养物质,具有抗氧化、抗炎症、抗肿瘤、改善消化系统等功效,深受广大消费者的喜爱^[1]。莴苣叶容易损伤腐烂,茎内表皮易纤维化,食用前需去皮,非常适合鲜切加工^[2]。但莴苣经鲜切处理后,易受微生物侵染,造成品质劣变和货架期缩短^[3],甚至可能会带来食品安全风险^[4],因此寻求一种能够有效延长鲜切莴苣货架期并保证其良好品质的杀菌保鲜技术,已成为该领域的研究热点。

目前关于鲜切莴苣的杀菌保鲜主要集中在物理、化学和生物保鲜方面^[5],物理保鲜如气调保鲜、臭氧保鲜^[6]等,虽然具有安全、成本低等优点,但可能会对感官品质和营养价值等造成不利影响;化学保鲜如可食性涂膜、化学保鲜剂等^[7],虽然操作简单、适用范围广,但易造成化学成分残留,对人体健康造成威胁;生物保鲜技术存在局限性,难以大规模推广应用^[8]。低温等离子体作为一种新型非热杀菌技术,具有杀菌效率高、温升低、处理时间短、无残留等优点^[9],近年来在鲜切果蔬的杀菌保鲜领域得到广泛应用^[10-11]。Kumar 等^[12]发现低温等离子体在 100 kV 电压下处理鲜切胡萝卜 5 min,可使其表面霉菌和酵母总数减少约 2 lg CFU/g;董闪闪^[13]利用介质阻挡放电(Dielectric barrier discharge, DBD)等离子体处理鲜切苹果,在 32.6 W 条件下处理 120 s,鲜切苹果表面的单增李斯特菌和大肠杆菌分别降低了 2.43 和 2.68 lg CFU/g; Schnabel 等^[14]采用等离子体活化水(Plasma-activated water, PAW)清洗鲜切生菜,结果表明与自来水清洗相比,其表面菌落总数减少 5 lg CFU/g。研究发现,单独 DBD 或 PAW 处理鲜切果蔬,保鲜效果有限^[15],无法满足鲜切果蔬市场延长货架期的需求,因此 PAW 联合 DBD 将成为提高保鲜效果的新趋势。利用 PAW 对鲜切果蔬进行清洗杀菌,再利用 DBD 进行二次处理,不仅提高了杀菌率,而且可以最大限度地维持原有品质并延长货架期,在鲜切果蔬保鲜方面具有广阔的应用前景。

本研究采用 PAW 联合 DBD 的方式对鲜切莴苣进行杀菌处理,通过响应面试验优化杀菌条件,并探究 PAW 联合 DBD 对鲜切莴苣贮藏期间微生物及品质的影响,以期延缓鲜切莴苣品质劣变提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

“科兴 11 号”莴苣 南京苏果超市,挑选无机械损伤、无病害、颜色成熟度基本一致的新鲜莴苣,购买后立即运回实验室,于 4 ℃ 预贮;平板计数琼脂培养基、玫瑰红钠琼脂培养基 青岛海博生物技术有限公司;氯化钠 分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

PG-1000ZD 低温等离子体喷枪 南京苏曼等离

子科技有限公司;DBD 等离子体设备 南京农业大学协同苏州屹润食品科技有限公司;CR-400 型全自动测色色差仪 柯尼达美能达控股公司;UV-2600 型紫外分光光度计 日本岛津公司;TA-XT 2i 型质构仪 英国 Stable Micro System 公司;Allegra 64R 型台式冷冻离心机 美国 Beckman 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品制备与处理 样品制备:将新鲜莴苣去叶清洗后,晾干削皮,用消毒的不锈钢刀切成厚度约为 5 mm 的片状,待用。

PAW 处理:采用低温等离子射流装置^[16]制备 PAW,该装置以空气为工作气体,流速为 22.5 L/min,工作电流为 0.024 mA、电压为 19 kV,频率为 20 kHz。将 300 mL 去离子水置于 1 L 烧杯中,待放电稳定后,将射流装置的出口端置于去离子水液面下方 15 mm,处理一定时间后,立即置于密闭容器中,冷却至室温。将制备好的鲜切莴苣按一定液料比放置于 PAW 中浸泡一定时间。

DBD 等离子体处理:将 PAW 浸泡过的鲜切莴苣沥干水分,并在超净台用无菌纱布擦干多余水分,然后放置于聚丙烯包装盒(140 mm×85 mm×52 mm)中密封包装。包装后的样品放入 DBD 装置上下两极板中间进行杀菌处理^[17],每个处理组重复三次。将处理后的样品放置在室温 2 h 后,进行微生物测定。

1.2.2 单因素实验 固定单因素条件:PAW 制备时间 120 s、浸泡时间 7 min、液料比 6 mL/g、DBD 等离子体工作电压 50 kV 和 DBD 等离子体处理时间 120 s,分别考察不同 PAW 制备时间(0、60、90、120、150 和 180 s)、PAW 浸泡时间(0、3、5、7、9 和 11 min)、液料比(0、4、6、8、10 和 12 mL/g)、DBD 等离子体工作电压(0、30、40、50、60 和 70 kV)以及 DBD 等离子体处理时间(0、60、90、120、150 和 180 s)对鲜切莴苣菌落总数及霉菌和酵母总数的影响,并结合鲜切莴苣感官品质确定最佳因素水平。

1.2.3 Plackett-Burman 试验 在单因素实验基础上,采用 Plackett-Burman 试验^[18]对 PAW 制备时间、PAW 浸泡时间、液料比、DBD 等离子体工作电压和 DBD 等离子体处理时间进行试验研究,以菌落总数为响应值,筛选出对其影响显著的因素,试验因素与水平设计见表 1。

表 1 Plackett-Burman 试验因素与水平
Table 1 Factors and levels of Plackett-Burman test

因素	水平	
	-1	1
A: PAW制备时间(s)	90	150
B: PAW浸泡时间(min)	3	7
C: 液料比(mL/g)	6	10
D: DBD等离子体工作电压(kV)	40	60
E: DBD等离子体处理时间(s)	90	150

1.2.4 响应面试验设计 根据 Plackett-Burman 试验结果,选择 PAW 制备时间、PAW 浸泡时间和 DBD 等离子体处理时间为自变量,以菌落总数为因变量,进行三因素三水平响应面优化试验。试验因素及水平见表 2。

表 2 响应面试验因素水平设计
Table 2 Factors and levels of response surface design

因素	水平		
	-1	0	1
A: PAW制备时间(s)	90	120	150
B: PAW浸泡时间(min)	3	5	7
C: DBD等离子体处理时间(s)	90	120	150

1.2.5 微生物测定 参照 GB 4789.2-2022《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》进行菌落总数的测定^[19],参照 GB 4789.15-2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 霉菌和酵母计数》进行霉菌和酵母总数的测定^[20]。

1.2.6 贮藏期微生物及品质测定

1.2.6.1 样品处理 根据响应面试验得到最佳杀菌参数,将样品分为 4 组,分别记为 CK、PAW、DBD 和 PAW+DBD。其中 CK 组:使用去离子水按照液料比 8 mL/g 浸泡 5 min 后,沥干水分后密封包装;PAW 组:等离子体活化水制备时间 130 s,按液料比 8 mL/g 浸泡 5 min 后,沥干水分后密封包装;DBD 组:去离子水按液料比 8 mL/g 浸泡 5 min 后,沥干水分后密封包装,再用 50 kV 处理 135 s;PAW+DBD 组:将样品放在制备好的 PAW 中按液料比 8 mL/g 浸泡 5 min 后,沥干水分后密封包装,再用 50 kV 处理 135 s。在 4 ℃、相对湿度 85%~90% 条件下贮藏 7 d,分别于第 0、1、3、5、7 d 进行微生物和品质指标的测定。

1.2.6.2 色泽测定 采用手持色差仪进行测定,每个样品随机选取赤道边缘 6 个不同的点进行 L^* 、 a^* 和 b^* 的测定,并取平均值。

1.2.6.3 褐变度测定 采用消光值法^[21]测定。取 0.5 g 样品于 5 mL 预冷蒸馏水中,在冰浴条件下匀浆,在 4 ℃、10000 r/min 条件下离心 10 min。取上清液于 25 ℃ 保温 5 min 后,在 410 nm 处测定吸光度,褐变度以 $OD_{410} \times 10$ 表示,每个样品重复 3 次。

1.2.6.4 失重率及硬度测定 失重率采用称重法^[22]测定,根据以下公式计算失重率:

$$W(\%) = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100$$

式中:W 表示失重率,%; m_0 表示贮藏前质量,g; m_1 表示贮藏后质量,g。

硬度采用质构仪进行测定^[23],选择平底柱形探头 P/20,设定形变量为 40%,检测速度为 60 mm/min,起始力为 0.7 N,测定鲜切莴苣中心部位的硬度值,

每组随机测 10 个样品,结果以 N 表示。

1.3 数据处理

所有实验均独立重复三次,结果以平均值±标准差表示,用 SPSS 26 进行单因素方差分析,选择 Duncan 多重比较进行显著性分析, $P < 0.05$ 为差异显著。用 Origin 2021 绘图,用 Design-Expert v 8.06 进行 Plackett-Burman 以及响应面试验设计。

2 结果与分析

2.1 单因素实验结果

2.1.1 PAW 制备时间对鲜切莴苣微生物的影响 如图 1 所示,与 CK 组相比,随着 PAW 制备时间从 0 s 增加至 120 s,鲜切莴苣表面的菌落总数及霉菌和酵母总数显著降低($P < 0.05$),菌落总数从 2.63 lg CFU/g 降至 0.83 lg CFU/g,霉菌和酵母总数从 2.47 lg CFU/g 降至 0.59 lg CFU/g,表明 PAW 杀菌效果随着制备时间的延长不断提高,与 Zhang 等^[24]的研究结果相一致,这可能是随着制备时间的延长,促进了气相中等离子体的扩散溶解,导致 PAW 中活性氧(Reactive oxygen species, ROS)含量逐渐增加^[25]。ROS 积聚可诱导细胞氧化应激,破坏细胞膜完整性和细胞内部结构^[26],从而导致细胞死亡。但当制备时间延长至 180 s 时,菌落总数与霉菌和酵母总数均无显著性差异($P > 0.05$),可能是此时 PAW 体系中的活性物质趋于饱和状态,进一步延长制备时间也不能继续提高杀菌效果。综上,PAW 制备时间的选取范围为 90~150 s。

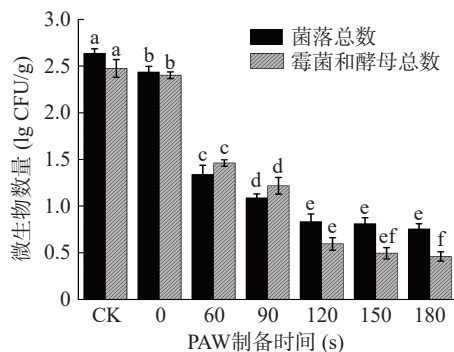


图 1 PAW 制备时间对鲜切莴苣表面菌落总数及霉菌和酵母总数的影响

Fig.1 Effects of PAW preparation time on the total bacterial count, mold and yeast on the surface of fresh-cut lettuce

注:图中不同小写字母表示同组数据差异显著($P < 0.05$),图 2~图 5 同。

2.1.2 PAW 浸泡时间对鲜切莴苣微生物的影响 从图 2 可知,随着 PAW 浸泡时间的延长,鲜切莴苣表面的微生物数量整体呈下降趋势。当浸泡时间从 0 min 增加至 5 min 时,菌落总数及霉菌和酵母总数分别降低了 1.36 和 1.54 lg CFU/g,可能是随着浸泡时间的延长,PAW 中的活性物质与微生物接触时间延长,诱导菌体发生氧化应激,加剧了细胞内 DNA、蛋白质等生物大分子氧化损伤,使微生物无法正常生

长繁殖,促使杀菌效果提高^[27]。当浸泡时间延长至 7 min 时,菌落总数及霉菌和酵母总数的变化趋于平缓,与丁甜等^[28]的研究结果一致。在保证杀菌的同时,为缩短操作时间以及减少长时间浸泡对鲜切莴苣品质产生的不良影响,因此 PAW 浸泡时间的选取范围为 3~7 min。

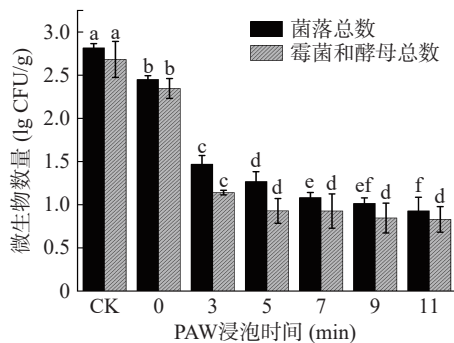


图 2 PAW 浸泡时间对鲜切莴苣表面菌落总数及霉菌和酵母总数的影响

Fig.2 Effects of PAW soaking time on the total bacterial count, mold and yeast on the surface of fresh-cut lettuce

2.1.3 液料比对鲜切莴苣微生物的影响 如图 3 所示,随着液料比的增加,鲜切莴苣表面的菌落总数及霉菌和酵母总数呈现先降低后趋于平缓的趋势。液料比从 0 mL/g 增加至 8 mL/g,与 CK 组相比,微生物数量显著降低 ($P<0.05$),菌落总数从 2.79 lg CFU/g 降至 0.96 lg CFU/g,霉菌和酵母总数从 2.80 lg CFU/g 降至 0.98 lg CFU/g。当液料比超过 8 mL/g 时,微生物数量并未显著降低 ($P>0.05$),可能是 PAW 与鲜切莴苣的接触面积有限,此后再增加液料比,杀菌效果不会显著提高^[29]。因此液料比的选取范围为 6~10 mL/g。

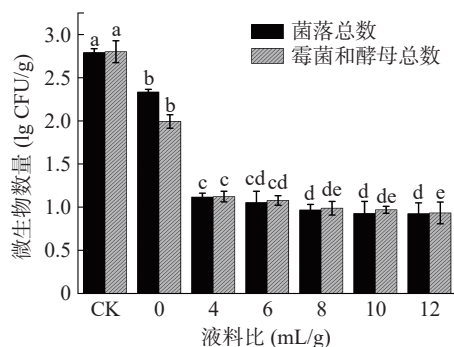


图 3 液料比对鲜切莴苣表面菌落总数及霉菌和酵母总数的影响

Fig.3 Effects of liquid-solid ratio on the total bacterial count, mold and yeast on the surface of fresh-cut lettuce

2.1.4 DBD 等离子体工作电压对鲜切莴苣微生物的影响 由图 4 可知,随着 DBD 等离子体工作电压从 0 增加至 50 kV 时,鲜切莴苣菌落总数及霉菌和酵母总数显著下降 ($P<0.05$),这可能归因于随着工作电压的升高,活性氧和活性氮等物质含量增加,杀菌效果有所增强^[30-31]。当电压超过 60 kV 时,菌落总

数及霉菌和酵母总数变化不显著 ($P>0.05$),且前期通过预实验发现工作电压超过 60 kV 时,鲜切莴苣表面会发生局部褐变,可能是因为电压过高,对鲜切莴苣的细胞造成破坏^[32],致使细胞内的酚类物质流出,在酶的作用下发生褐变。因此综合考虑,DBD 等离子体工作电压的选取范围为 40~60 kV。

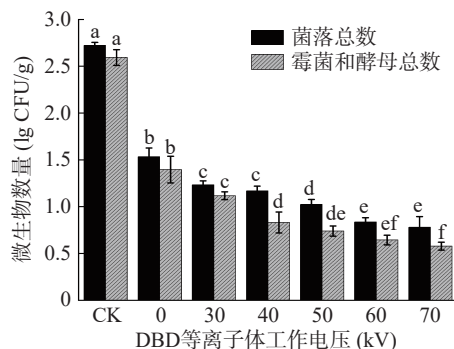


图 4 DBD 等离子体工作电压对鲜切莴苣表面菌落总数及霉菌和酵母总数的影响

Fig.4 Effects of DBD plasma working voltage on the total bacterial count, mold and yeast on the surface of fresh-cut lettuce

2.1.5 DBD 等离子体处理时间对鲜切莴苣微生物的影响 由图 5 可知,随着处理时间从 0 s 延长至 120 s,鲜切莴苣表面的菌落总数及霉菌和酵母总数显著降低 ($P<0.05$)。当处理时间超过 120 s 后,微生物数量趋于平稳,这与徐艳阳等^[33]应用低温等离子体处理鲜参切片得到的研究结果一致,可能是包装盒内的活性物质由空气被电离产生,随着处理时间的延长,盒内空气含量逐渐减少,导致活性物质趋于饱和,无法继续产生新的活性物质^[34]。综上,DBD 等离子体处理时间的选取范围为 90~150 s。

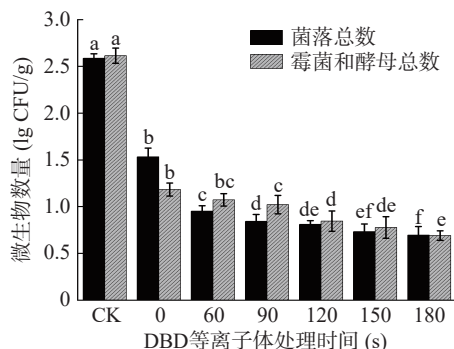


图 5 DBD 等离子体处理时间对鲜切莴苣表面菌落总数及霉菌和酵母总数的影响

Fig.5 Effects of DBD plasma treatment time on the total bacterial count, mold and yeast on the surface of fresh-cut lettuce

2.2 Plackett-Burman 试验设计结果

在单因素实验结果基础上,以 PAW 制备时间、PAW 浸泡时间、液料比、DBD 等离子体工作电压和 DBD 等离子体处理时间为自变量,菌落总数为响应值,进行显著因素筛选试验。试验设计及结果见表 3。

表 3 Plackett-Burman 试验设计及结果
Table 3 Design and result of Plackett-Burman test

试验号	A: PAW制备时间	B: PAW浸泡时间	C: 液料比	D: DBD等离子体工作电压	E: DBD等离子体处理时间	菌落总数(lg CFU/g)
1	1	-1	1	1	1	0.53±0.07
2	-1	1	1	-1	1	0.85±0.09
3	1	1	-1	1	-1	0.87±0.12
4	-1	-1	1	1	1	0.68±0.11
5	-1	1	-1	-1	1	1.01±0.12
6	-1	-1	-1	1	-1	1.25±0.06
7	1	-1	-1	-1	1	0.79±0.07
8	1	-1	1	-1	-1	0.65±0.05
9	1	1	1	-1	-1	0.58±0.15
10	-1	1	1	1	-1	0.92±0.14
11	1	1	-1	1	1	0.61±0.05
12	-1	-1	-1	-1	-1	1.26±0.09

由表 4 方差分析结果可知: 实验模型项 $P<0.01$, 说明建立的模型是极显著的; $R^2=0.9542$, 说明模型拟合程度良好, 能较好地预测实验的实际结果^[35]。其中 PAW 制备时间、PAW 浸泡时间和 DBD 等离子体处理时间对菌落总数的影响是极显著的($P<0.01$), 液料比和 DBD 等离子体工作电压的影响是不显著的($P>0.05$)。因此, 选取 PAW 制备时间、PAW 浸泡时间和 DBD 等离子体处理时间三个因素进行响应面试验。

表 4 Plackett-Burman 试验方差分析
Table 4 Variance analysis of Plackett-Burman test

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值
模型	0.6305	5	0.1261	24.98	0.0006**
A: PAW制备时间	0.3159	1	0.3159	62.59	0.0002**
B: PAW浸泡时间	0.2090	1	0.2090	41.41	0.0007**
C: 液料比	0.0087	1	0.0087	1.72	0.2374
D: DBD等离子体工作电压	0.0061	1	0.0061	1.22	0.3122
E: DBD等离子体处理时间	0.0907	1	0.0907	17.97	0.0054**
残差	0.0303	6	0.0050		
总和	0.6608	11			
$R^2=0.9542$		$R^2_{adj}=0.9160$			

注: *表示差异显著($P<0.05$), **表示差异极显著($P<0.01$), 表6同。

2.3 响应面试验结果

2.3.1 试验设计及结果 在 Plackett-Burman 试验结果基础上, 以 PAW 制备时间、PAW 浸泡时间和 DBD 等离子体处理时间为自变量, 以菌落总数为响应值, 进行响应面优化试验, 试验设计及结果见表 5。

2.3.2 回归方程及方差分析 经 Design-Expert v 8.0.6 软件拟合得到二次多项式回归方程: $Y=0.4753-0.1363A-0.0772B-0.0509C+0.1270AB+0.0174AC+0.0876BC+0.1591A^2+0.2603B^2+0.0500C^2$ 。由表 6 方差分析可知, 回归模型极显著($P<0.01$), 失拟项不显著($P>0.05$), 说明该模型具有统计学意义, 拟合度较好。模型决定系数 $R^2=0.9889$, 校正系数 $R^2_{adj}=0.9746$, 说明模型相关性较好, 能有效反映响应值与 PAW 制备时间、PAW 浸泡时间和 DBD 等离子体处理时间

表 5 响应面试验设计方案及结果

Table 5 Design scheme and result of response surface test

试验号	A: PAW制备时间	B: PAW浸泡时间	C: DBD等离子体处理时间	菌落总数(lg CFU/g)
1	0	0	0	0.45±0.07
2	0	1	1	0.77±0.03
3	1	0	1	0.49±0.10
4	-1	-1	0	1.24±0.05
5	0	-1	-1	0.97±0.05
6	-1	1	0	0.83±0.08
7	-1	0	1	0.71±0.04
8	-1	0	-1	0.90±0.04
9	0	0	0	0.44±0.07
10	1	-1	0	0.70±0.07
11	0	0	0	0.47±0.09
12	1	0	-1	0.61±0.06
13	0	0	0	0.50±0.08
14	0	1	-1	0.64±0.08
15	0	-1	1	0.75±0.06
16	1	1	0	0.80±0.11
17	0	0	0	0.49±0.04

表 6 响应面试验方差分析

Table 6 Variance analysis of response surface test

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值
模型	0.7476	9	0.0831	69.19	<0.0001**
A: PAW制备时间	0.1486	1	0.1486	123.77	<0.0001**
B: PAW浸泡时间	0.0476	1	0.0476	39.69	0.0004**
C: DBD等离子体处理时间	0.0207	1	0.0207	17.26	0.0043**
AB	0.0645	1	0.0645	53.73	0.0002**
AC	0.0012	1	0.0012	1.01	0.3486
BC	0.0307	1	0.0307	25.56	0.0015**
A ²	0.1066	1	0.1066	88.81	<0.0001**
B ²	0.2854	1	0.2854	237.72	<0.0001**
C ²	0.0105	1	0.0105	8.77	0.0211*
残差	0.0084	7	0.0012		
失拟项	0.0060	3	0.0020	3.37	0.1356
纯误差	0.0024	4	0.0006		
总残差	0.7560	16			
$R^2=0.9889$		$R^2_{adj}=0.9746$			

的关系。一次项 A、B、C、交互项 AB、BC 和二次项 A²、B² 对响应值影响是极显著的($P<0.01$), 二次

项 C^2 对响应值影响显著 ($P < 0.05$)。根据 F 值大小可知, 各因素对菌落总数的影响程度顺序为: A (PAW 制备时间) > B (PAW 浸泡时间) > C (DBD 等离子体处理时间)。

2.3.3 交互作用分析 如图 6(a) 和 (b) 所示, PAW 制备时间和 PAW 浸泡时间的响应面图表现较陡峭, 等高线呈椭圆形, 表明二者之间交互作用极显著, PAW 制备时间比 PAW 浸泡时间的曲面斜率更大, 说明制备时间比浸泡时间对菌落总数的影响更大。从图 6(c) 和 (d) 看出, PAW 浸泡时间和 DBD 等离子体处理时间的等高线图倾斜程度大, 等高线近似椭圆, 说明二者之间交互作用显著, 与响应面方差分析结果相吻合。

2.3.4 回归优化结果 经软件分析得到鲜切莴苣最佳杀菌参数: PAW 制备时间 133.06 s, PAW 浸泡时间 4.89 min, DBD 等离子体处理时间 136.91 s, 在此条件下菌落总数达到 0.45 lg CFU/g, 考虑设备实际参数可操作性, 将最佳条件调整为 PAW 制备时间 130 s, PAW 浸泡时间 5 min, DBD 等离子体处理时间 135 s, 三次重复验证实验得到菌落总数为 (0.48 ± 0.07) lg CFU/g, 实际值与理论值基本相符, 表明该模型拟合度较高, 响应面优化试验结果可靠。

2.4 贮藏期实验结果

2.4.1 微生物的变化 由图 7 可知, 在整个贮藏期间, 各组鲜切莴苣表面的微生物数量呈上升趋势。贮藏第 0 d, 等离子体处理组菌落总数及霉菌和酵母菌总数均显著低于 CK 组 ($P < 0.05$), 其中 PAW+DBD 组菌落总数降低 1.69 lg CFU/g, 霉菌和酵母菌总数

降低 1.20 lg CFU/g。随着贮藏时间的延长, 对照组和处理组微生物数量不断增加, 但增长速率不同。贮藏至第 7 d 时, PAW、DBD 处理组菌落总数分别为

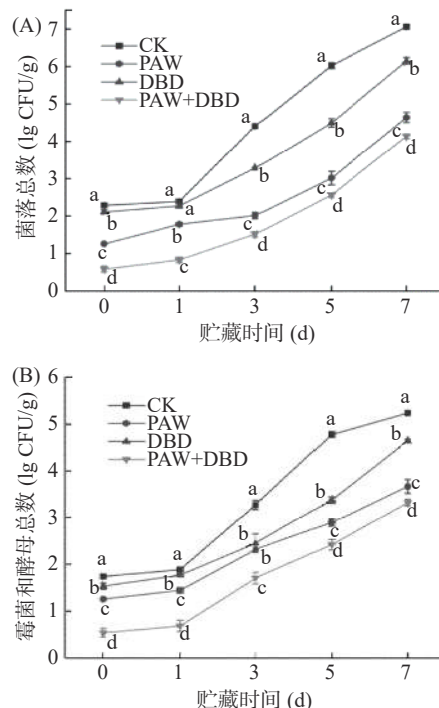


图 7 贮藏期内鲜切莴苣表面菌落总数(A)、霉菌和酵母总数(B)变化

Fig.7 Changes of total number of colonies (A), total number of mold and yeast (B) on the surface of fresh-cut lettuce during storage

注: 图中不同小写字母表示同一贮藏时间内不同处理组之间存在显著性差异 ($P < 0.05$), 图 9~图 10 同。

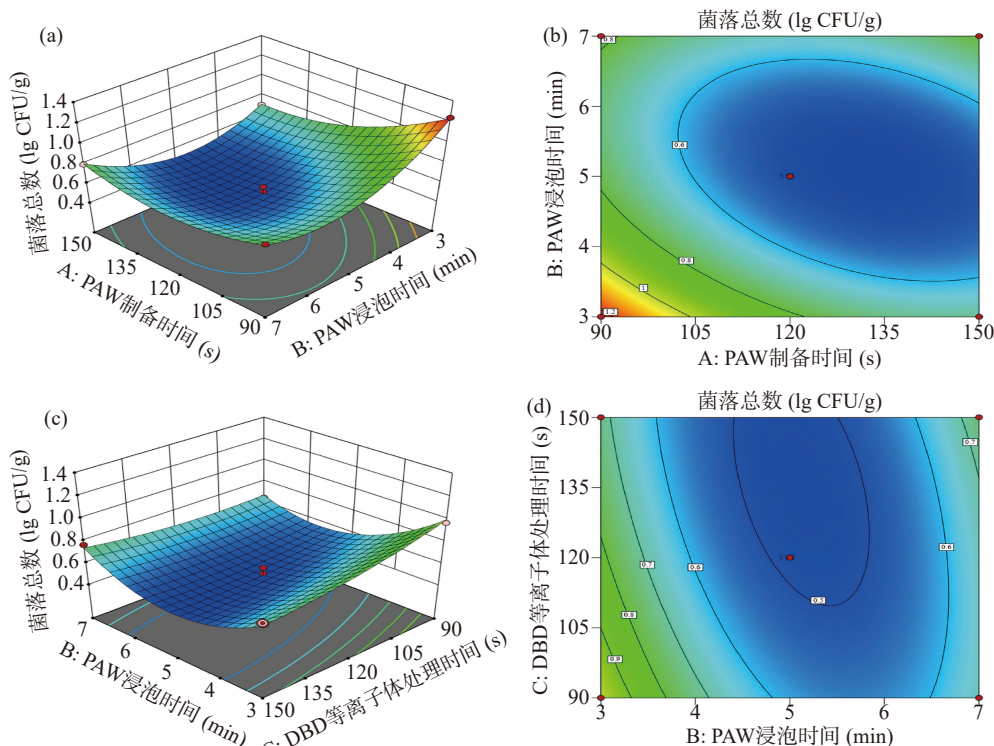


图 6 响应面交互作用分析

Fig.6 Response surface interaction analysis

4.70 lg CFU/g 和 6.14 lg CFU/g, 霉菌和酵母总数分别为 3.67 lg CFU/g 和 4.64 lg CFU/g, 均显著低于 CK 组 ($P<0.05$)。与 PAW 和 DBD 单独处理相比, PAW+DBD 组具有更低的菌落总数及霉菌和酵母总数, 说明联合处理能够有效抑制贮藏过程中微生物的生长。此外, 鲜切果蔬表面菌落总数超过 6 lg CFU/g 时^[36], 会对人体健康造成威胁, 对照组在第 5 d 已达到不可食用阶段, 而联合处理组在第 7 d 仍未超过微生物安全限值。综上可知, 联合处理组可有效确保鲜切莴苣贮藏期间的微生物安全。

2.4.2 色泽及褐变度的变化 如图 8 所示, 各组鲜切莴苣贮藏 1 d 后, 其外观品质均保持相同水平。但贮藏至第 3 d 时, CK 组表面发生明显褐变, 失去商业价值。随着贮藏时间的延长, CK 组褐变程度不断加深, DBD 组则在第 5 d 开始出现褐变, PAW 组第 7 d 发生轻微褐变, PAW+DBD 组始终保持良好的色泽, 在 7 d 贮藏期内均未发生褐变, 说明低温等离子体联合处理能有效延缓鲜切莴苣的褐变速度, 维持其良好的感官品质, 这可能是低温等离子体处理抑制了鲜切莴苣中多酚氧化酶、过氧化物酶、苯丙氨酸解氨酶等褐变相关酶的活性, 进而延缓了酶促褐变反应的

速率^[37]。

莴苣的褐变与 L^* 、 a^* 和 b^* 值变化密切相关, 当 L^* 值越小、 a^* 值越大和 b^* 值越小时, 表明褐变越严重^[38]。由表 7 可知, 在贮藏前 3 d, CK 组与处理组 L^* 值差异不显著 ($P>0.05$); 当贮藏至 5~7 d 时, CK 组鲜切莴苣 L^* 值显著低于 PAW+DBD 组 ($P<0.05$)。鲜切莴苣 b^* 值与 L^* 值呈现相似的变化趋势, 其中 PAW+DBD 组可显著抑制 b^* 值的下降。鲜切莴苣 a^* 值在贮藏期间呈增加趋势, 但与 CK 组相比, PAW、DBD 以及 PAW+DBD 处理组 a^* 值的增加相对缓慢, 其中 PAW+DBD 组 a^* 值始终保持最低。综上可知, 低温等离子体联合处理具有良好的护色效果。

为量化各组的褐变程度, 对鲜切莴苣的褐变度进行测定。如图 9 所示, 在整个贮藏过程中, 鲜切莴苣的褐变度不断上升, 其中 CK 组在前 5 d 上升趋势明显, 在第 5~7 d 上升趋势相对缓慢。与 CK 组相比, 单独处理和联合处理均显著抑制了褐变度的上升, 其中 PAW+DBD 组上升趋势较平缓, 并显著低于对照组和单独处理组 ($P<0.05$)。当贮藏至第 7 d 时, PAW+DBD 组褐变度仅为对照组的 59.33%, 说明联合处理能有效延缓鲜切莴苣的褐变, 抑制颜色的劣变。

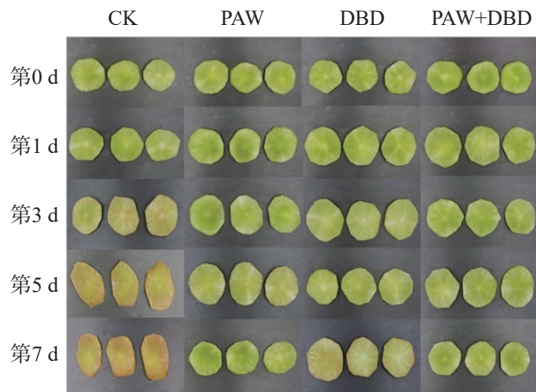


图 8 不同处理贮藏期间鲜切莴苣的外观变化

Fig.8 Changes of appearance of fresh-cut lettuce during storage under different treatments

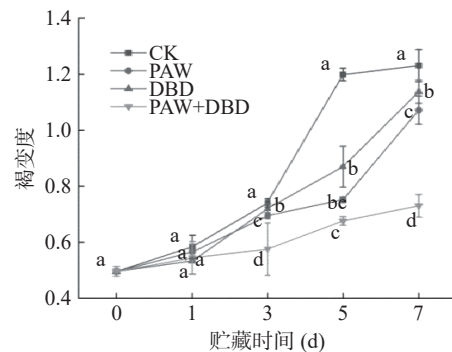


图 9 不同处理对鲜切莴苣贮藏期间褐变度的影响

Fig.9 Effects of different treatments on the browning degree of fresh-cut lettuce during storage

表 7 不同处理对鲜切莴苣贮藏期间色泽的影响

Table 7 Effects of different treatments on the color of fresh-cut lettuce during storage

测定指标	组别	贮藏时间(d)				
		0	1	3	5	7
L^*	CK	53.08±6.26 ^a	51.21±7.01 ^a	48.92±4.63 ^a	46.78±1.93 ^a	41.70±1.53 ^a
	PAW	53.08±6.26 ^a	52.11±4.60 ^a	50.17±3.74 ^a	49.86±2.86 ^b	44.19±3.85 ^a
	DBD	53.08±6.26 ^a	51.75±5.52 ^a	49.07±5.05 ^a	47.72±3.05 ^{ab}	42.87±3.61 ^a
	PAW+DBD	53.08±6.26 ^a	52.44±4.95 ^a	51.64±4.89 ^a	50.24±2.61 ^b	46.72±1.47 ^b
a^*	CK	-11.08±6.26 ^a	-9.76±0.53 ^a	-8.90±0.34 ^a	-3.71±1.75 ^a	-2.74±0.72 ^a
	PAW	-11.08±6.26 ^a	-10.16±0.31 ^{ab}	-9.67±0.48 ^b	-8.38±0.50 ^c	-7.59±0.47 ^c
	DBD	-11.08±6.26 ^a	-10.12±0.51 ^{ab}	-9.32±0.26 ^b	-7.29±0.71 ^b	-5.62±0.95 ^b
	PAW+DBD	-11.08±6.26 ^a	-10.18±0.36 ^b	-9.71±0.45 ^b	-9.49±0.65 ^d	-8.07±0.45 ^c
b^*	CK	19.40±0.61 ^a	17.71±0.80 ^a	16.72±0.79 ^a	15.72±0.54 ^a	13.48±0.66 ^a
	PAW	19.40±0.61 ^a	18.11±0.65 ^a	17.45±1.24 ^a	16.68±1.05 ^{bc}	15.37±1.13 ^{bc}
	DBD	19.40±0.61 ^a	17.97±1.09 ^a	17.25±1.38 ^a	15.97±0.89 ^{ab}	14.60±1.22 ^b
	PAW+DBD	19.40±0.61 ^a	18.23±0.80 ^a	17.69±0.87 ^a	16.93±1.00 ^c	16.01±0.48 ^c

注: 不同小写字母表示相同指标, 同一贮藏时间内不同组别之间差异显著 ($P<0.05$)。

2.4.3 失重率及硬度的变化 由图 10(A)可知,在整个贮藏期间,鲜切莴苣失重率逐渐增加,但处理组的失重率显著低于 CK 组($P<0.05$)。当贮藏至第 7 d 时,与 CK 组相比,PAW、DBD 和 PAW+DBD 组失重率分别降低了 1.63%、1.35% 和 1.74%,表明低温等离子体处理能够减缓鲜切莴苣贮藏过程中的失重情况。由图 10(B)可知,随着贮藏时间的延长,鲜切莴苣的硬度逐渐下降,可能是与细胞壁组分在多种水解酶作用下的降解有关^[39],与对照组和单独处理组相比,联合处理更能显著延缓硬度的下降,可能是联合处理抑制了细胞壁水解酶的活力,减缓了果胶、半纤维素等物质的水解^[40]。

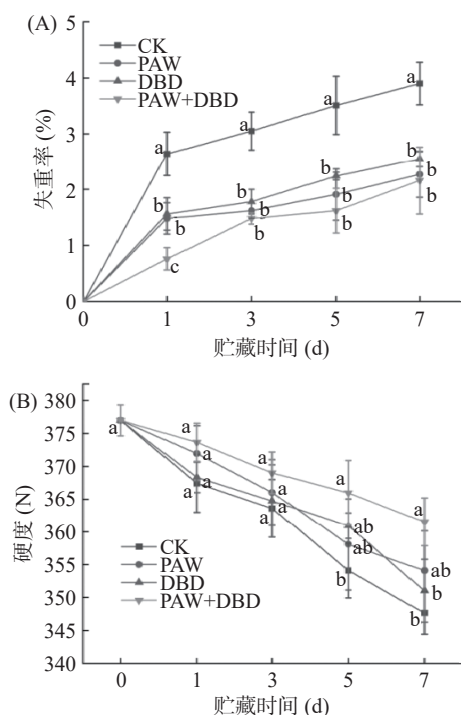


图 10 不同处理对鲜切莴苣贮藏期间失重率(A)及硬度(B)的影响

Fig.10 Effects of different treatments on the weight loss rate (A) and firmness (B) of fresh-cut lettuce during storage

3 结论

本文探究了 PAW 联合 DBD 处理对鲜切莴苣的杀菌效果及贮藏品质的影响,通过响应面优化试验得到最佳杀菌参数:PAW 制备时间 130 s、PAW 浸泡时间 5 min 和 DBD 等离子体处理时间 135 s,在最佳杀菌条件下,鲜切莴苣表面菌落总数为 (0.48 ± 0.07) lg CFU/g。贮藏期实验结果表明,与 CK 组相比,PAW 联合 DBD 等离子体处理能够显著降低微生物数量($P<0.05$);同时延缓褐变的发生,显著降低褐变度($P<0.05$)并保持良好的色泽;降低失重率,维持贮藏过程中的硬度。综上,PAW 联合 DBD 等离子体作为一种新型非热杀菌技术,弥补了传统热杀菌可能带来的不良品质影响,在鲜切莴苣杀菌保鲜方面具有良好的应用前景,但仍有很多问题有待深入研究和解决,包括以下几个方面: a.本实验目前仅局限于

实验室研究阶段,应尝试用于实际生产中,提高操作性; b.初步发现联合处理能有效延缓鲜切莴苣的褐变,需要进一步探究其抑制机理; c.该技术是否适用于其他鲜切果蔬杀菌保鲜,待进一步研究。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] YU R, SONG H, CHEN Y, et al. Incorporation of ascorbic acid and L-cysteine in sodium carboxymethyl cellulose coating delays color deterioration and extends the shelf-life of fresh-cut asparagus lettuce (*Lactuca sativa* var. *angustata*) [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2023, 204: 112419.
- [2] 李静, 李悦, 李美琳, 等. 切割方式对鲜切莴苣品质及抗氧化活性的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(3): 268–273. [LI J, LI Y, LI M L, et al. Effect of cutting styles on quality and antioxidant activity of fresh-cut lettuce [J]. *Food Science*, 2018, 39(3): 268–273.]
- [3] PENG X, YANG J, CUI P, et al. Influence of allicin on quality and volatile compounds of fresh-cut stem lettuce during cold storage [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 60(1): 300–307.
- [4] 李健, 徐艳聪, 李丽萍, 等. 鲜切果蔬安全及质量控制研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2014, 35(21): 137–140. [LI J, XU Y C, LI L P, et al. A review: Food safety and quality control of fresh-cut fruits and vegetables [J]. *Food Research and Development*, 2014, 35(21): 137–140.]
- [5] 杨晓哲, 胡文忠, 姜爱丽, 等. 鲜切莴苣生理生化变化及其保鲜技术的研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2018, 44(2): 278–283. [YANG X Z, HU W Z, JIANG A L, et al. Progress in physiological and biochemical change and fresh-keeping technique of fresh-cut lettuce [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2018, 44(2): 278–283.]
- [6] ALEXOPOULOS A, PLESSAS S, CECIU S, et al. Evaluation of ozone efficacy on the reduction of microbial population of fresh cut lettuce (*Lactuca sativa*) and green bell pepper (*Capsicum annuum*) [J]. *Food Control*, 2013, 30(2): 491–496.
- [7] FIRDOUS N, MORADINEZHAD F, FAROOQ F, et al. Advances in formulation, functionality, and application of edible coatings on fresh produce and fresh-cut products: A review [J]. *Food Chemistry*, 2023, 407: 135186.
- [8] MA L, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Recent developments in novel shelf life extension technologies of fresh-cut fruits and vegetables [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2017, 64: 23–38.
- [9] BIRANIA S, ATTKAN A K, KUMAR S, et al. Cold plasma in food processing and preservation: A review [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2022, 45(9): e14110.
- [10] 相启森, 张嵘, 范刘敏, 等. 大气压冷等离子体在鲜切果蔬保鲜中的应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(1): 368–372. [XIANG Q S, ZHANG R, FAN L M, et al. Research progress of atmospheric cold plasma in fresh-cut fruits and vegetables preservation [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(1): 368–372.]

- [11] BAGHERI H, ABBASZADEH S. Effect of cold plasma on quality retention of fresh-cut produce[J]. *Journal of Food Quality*, 2020, 2020: e8866369.
- [12] KUMAR M N, SIYU L P, WAN Z, et al. In-package cold plasma decontamination of fresh-cut carrots: Microbial and quality aspects[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53(15): 154002.
- [13] 董闪闪. DBD等离子体对鲜切苹果微生物及多酚氧化酶的失活作用及机制研究[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2022. [DONG S S. Microorganisms and polyphenol oxidase inactivation in fresh-cut apple by dielectric barrier discharge plasma and the mechanisms for its action[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2022.]
- [14] SCHNABEL U, BALAZINSKI M, WAGNER R, et al. Optimizing the application of plasma functionalised water (PFW) for microbial safety in fresh-cut endive processing[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2021, 72: 102745.
- [15] ASGHAR A, RASHID M H, AHMED W, et al. An in-depth review of novel cold plasma technology for fresh-cut produce[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 46(7): e16560.
- [16] QIAN J, WANG Y, ZHUANG H, et al. Plasma activated water-induced formation of compact chicken myofibrillar protein gel structures with intrinsically antibacterial activity[J]. *Food Chemistry*, 2021, 351: 129278.
- [17] 侯新磊, 赵楠, 葛黎红, 等. 低温等离子体对低盐泡菜生花腐败的抑制及贮藏期品质的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(21): 282–290. [HOU X L, ZHAO N, GE L H, et al. Effect of cold plasma treatment on the inhibition of pellicle-spoilage and the storage quality of low-salt kimchi[J]. *Food Science*, 2022, 43(21): 282–290.]
- [18] GOUPY J. What kind of experimental design for finding and checking robustness of analytical methods?[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2005, 544(1): 184–190.
- [19] 国家食品药品监督管理总局, 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定 GB4789.2-2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022. [State Food and Drug Administration, National Health and Family Planning Commission. National standard for food safety Food microbiology test Total bacterial colony determination GB4789.2-2022[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.]
- [20] 国家食品药品监督管理总局, 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品微生物学检验 霉菌和酵母计数 GB4789.15-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [State Food and Drug Administration, National Health and Family Planning Commission. Food safety national standard Food microbiology test Mold and yeast count GB4789.15-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
- [21] SUN Y, ZHANG W, ZENG T, et al. Hydrogen sulfide inhibits enzymatic browning of fresh-cut lotus root slices by regulating phenolic metabolism[J]. *Food Chemistry*, 2015, 177: 376–381.
- [22] PERINBAN S, ORSAT V, RAGHAVAN V. Influence of plasma activated water treatment on enzyme activity and quality of fresh-cut apples[J]. *Food Chemistry*, 2022, 393: 133421.
- [23] 代羽可欣, 郑鄢燕, 韦雪, 等. 热处理联合不同包装对鲜切马铃薯贮藏品质的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(13): 166–174. [DAI Y K X, ZHENG Y Y, WEI X, et al. Effect of heat treatment combined with different packaging on storage quality of fresh-cut potatoes[J]. *Food Science*, 2023, 44(13): 166–174.]
- [24] ZHANG Q, MA R, TIAN Y, et al. Sterilization efficiency of a novel electrochemical disinfectant against *Staphylococcus aureus* [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(6): 3184–3192.
- [25] TRAYLOR M J, PAVLOVICH M J, KARIM S, et al. Long-term antibacterial efficacy of air plasma-activated water[J]. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 2011, 44(47): 472001.
- [26] PERINBAN S, ORSAT V, RAGHAVAN V. Nonthermal plasma-liquid interactions in food processing: A review[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2019, 18(6): 1985–2008.
- [27] MA R, WANG G, TIAN Y, et al. Non-thermal plasma-activated water inactivation of food-borne pathogen on fresh produce [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 300: 643–651.
- [28] 丁甜, 葛枝, 刘东红. 浸泡时间对弱酸性电位水(SAEW)除菌效率的影响[J]. *中国食物与营养*, 2014, 20(1): 54–57. [DING T, GE Z, LIU D H. Bactericidal activities of acidic electrolyzed water under different dipping time on cherry tomatoes and strawberries[J]. *Food and Nutrition in China*, 2014, 20(1): 54–57.]
- [29] 鲁海玲. 鲜参切片的杀菌工艺及贮藏货架期预测研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022. [LU H L. Research on sterilization progress and storage shelf-life prediction of fresh-cut ginseng slices [D]. Changchun: Jilin University, 2022.]
- [30] WU X, LUO Y, ZHAO F, et al. Influence of dielectric barrier discharge cold plasma on physicochemical property of milk for sterilization[J]. *Plasma Processes and Polymers*, 2021, 18(1): 1900219.
- [31] UMAIR M, JABBAR S, AYUB Z, et al. Recent advances in plasma technology: Influence of atmospheric cold plasma on spore inactivation[J]. *Food Reviews International*, 2022, 38(sup1): 789–811.
- [32] 田方, 徐咏菁, 孙志栋, 等. 低温等离子体处理对鲜切猕猴桃片微观结构及理化特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(21): 167–174. [TIAN F, XU Y J, SUN Z D, et al. Effects of cold plasma treatment on microstructure and physicochemical properties of fresh-cut kiwifruit slices[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(21): 167–174.]
- [33] 徐艳阳, 鲁海玲, 陈云洁, 等. 低温等离子体处理对鲜参切片的杀菌效果及表面色泽的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(10): 3090–3097. [XU Y Y, LU H L, CHEN Y J, et al. Effect of low temperature plasma treatment on sterilization effects and surface color of fresh-cut ginseng slices[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2022, 13(10): 3090–3097.]
- [34] 刘雅夫, 符腾飞, 刘宸成, 等. 低温等离子体对金黄色葡萄球菌和铜绿假单胞菌的杀菌效果及动力学特性[J]. *现代食品科技*, 2021, 37(12): 127–135. [LIU Y F, FU T F, LIU C C, et al. Bactericidal efficacy and kinetic of cold plasma against *Staphylococcus aureus* and *Pseudomonas aeruginosa*[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2021, 37(12): 127–135.]
- [35] 李善瑞, 赵璐玲, 严文静, 等. 低温等离子体对黄曲霉毒素B₁的降解效能[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(4): 271–277. [LI S R, ZHAO L L, YAN W J, et al. Degradation efficiency of aflatoxins B₁ by cold plasma[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(4): 271–277.]

- [36] LEE J Y, PARK H J, LEE C Y, et al. Extending shelf-life of minimally processed apples with edible coatings and antibrowning agents[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2003, 36(3): 323–329.
- [37] PIPLIYA S, KUMAR S, SRIVASTAV P P. Inactivation kinetics of polyphenol oxidase and peroxidase in pineapple juice by dielectric barrier discharge plasma technology[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2022, 80: 103081.
- [38] YAN S, YANG T, LUO Y. The mechanism of ethanol treatment on inhibiting lettuce enzymatic browning and microbial growth[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 63(1): 383–390.
- [39] KARAKURT Y, HUBER D J. Activities of several membrane and cell-wall hydrolases, ethylene biosynthetic enzymes, and cell wall polyuronide degradation during low-temperature storage of intact and fresh-cut papaya (*Carica papaya*) fruit[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2003, 28(2): 219–229.
- [40] YI F, WANG J, XIANG Y, et al. Physiological and quality changes in fresh-cut mango fruit as influenced by cold plasma[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2022, 194: 112105.