DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240609003

低温等离子体处理对华容大叶芥菜贮藏品质的影响

方镇洲, 杨体园, 赵玲艳, 邓洁红*

(湖南农业大学食品科技学院, 长沙 410128)

摘 要: 目的 探究低温等离子体(cold plasma, CP)对华容芥菜的保鲜适用性。**方法** 采用不同工作电压的 CP 对芥菜进行处理, 测定处理后芥菜的 pH、还原糖含量、维生素 C 含量、菌落总数及过氧化物(peroxide, POD)酶活性。**结果** 随着放电电压的升高, 芥菜的 pH 呈下降趋势, 还原糖和维生素 C 含量则先上升后下降。色差实验中, 芥菜的 a^*和 ΔE 随放电电压升高而上升, b^*和 L^*随放电电压升高而逐渐下降。CP 处理对芥菜抑菌作用随电压升高而加强, 贮藏期间处理组的菌落总数显著低于对照组(P<0.05), 第 8 d 对照组的菌落总数为 7.27 lg(CFU/g), 30 kV 的处理组菌落总数为 6.15 lg(CFU/g)。贮藏期 POD 酶活性呈先升后降的趋势, 第 4 d 各组芥菜的 POD 酶活性达到最大值, 其中放电电压为 30 kV 的处理组 POD 酶活性最高为 84.56 U/(min·g)。**结论** 适当的 CP 处理能有效抑制微生物生长, 延长芥菜的保鲜时间, 30 kV 电压的 CP 处理更适用于新鲜芥菜的保鲜贮藏。

关键词: 芥菜; 低温等离子体; 抑菌; 保鲜

Effects of cold plasma treatment on storage quality of Huarong large leaf *Brassica juncea*

FANG Zhen-Zhou, YANG Ti-Yuan, ZHAO Ling-Yan, DENG Jie-Hong*

(*College of Food Science and Technology*, *Hunan Agricultural University*, *Changsha* 410128, *China*)

ABSTRACT: Objective To explore the applicability of cold plasma (CP) treatment for the preservation of Huarong *Brassica juncea*. **Methods** *Brassica juncea* was treated with CP of different working voltages. The pH, reducing sugar content, vitamin C content, total bacterial count, and peroxide (POD) enzyme activity of processed mustard were measured. **Results** As the discharge voltage increased, the pH of *Brassica juncea* showed a downward trend, while the content of reducing sugars and vitamin C first increased and then decreased. In the color difference experiment, the a^* and ΔE of *Brassica juncea* increased with the increasing discharge voltage, while the b^* and L^* gradually decreased with the increasing discharge voltage. The antibacterial effect of CP treatment on *Brassica juncea* increased with the increase of voltage. During the storage period, the total bacterial count of the treatment group was significantly lower than that of the control group (P<0.05). On the 8th day, the total bacterial count of the control group was 7.27 lg(CFU/g), and the total bacterial count of the 30 kV treatment group was 6.15 lg(CFU/g). The POD enzyme activity showed a trend of first increasing and then decreasing. On the 4th day, the POD enzyme activity of

基金项目: 国家特色蔬菜产业技术体系发酵加工岗位科学家项目(CARS-24-E-02)

Fund: Supported by the Earmarked Fund for China Agriculture Research System (CARS-24-E-02)

***通信作者:** 邓洁红, 教授, 主要研究方向为园艺产品深加工理论与技术。E-mail: hongjiedeng@163.com

***Corresponding author:** DENG Jie-Hong, Professor, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China. E-mail: hongjiedeng@163.com

each group of *Brassica juncea* reached its maximum value, with the highest POD enzyme activity observed in the treatment group with a discharge voltage of 30 kV [84.56 U/(min·g)]. **Conclusion** Appropriate CP treatment can effectively inhibit microbial growth and prolong the preservation time of mustard, CP treatment at a voltage of 30 kV is more suitable for the preservation and storage of fresh *Brassica juncea*.

KEY WORDS: *Brassica juncea*; cold plasma; microbial inactivation; fresh-keeping

0 引 言

芥菜(*Brassica juncea*)是十字花科芸薹, 属一年生草本植物[1–2], 可以分为叶用芥菜、茎用芥菜和根用芥菜等[3], 其含有多种营养成分以及硫代葡萄糖苷、花青素等挥发性风味物质, 特别是华容芥菜, 作为优选芥菜品种, 其主要特点为植株叶脉和叶片呈绿色、叶柄宽厚、质地脆嫩。新鲜的大叶芥菜是冬、春两季的具有鲜明特色的时令蔬菜, 经过腌制加工后的芥菜质地鲜嫩、纤维细短、质脆味香, 深受消费者欢迎[4–5]。然而, 芥菜采后易发生腐烂损耗, 因此研究其贮藏保鲜技术对于产业发展意义重大。

低温等离子体(cold plasma, CP)处理是一种新型绿色保鲜方法, 其产生的多种活性物质, 如活性氧(reactive oxygen species, ROS)、活性氮(reactive nitrogen species, RNS)、自由基、紫外光子和冷等离子体产生的带电粒子已被报道为抗菌剂, 是能够破坏细菌细胞膜、DNA 和蛋白质的活性物质。通过对食品表面的微生物细胞膜的氧化损伤, 可以实现较好的抑菌效果[6–11]。与传统热杀菌方法相比, CP 技术具有显著优势。传统热杀菌方法依赖于高温杀灭微生物, 在杀菌过程中往往会导致食品营养成分的流失, 如维生素和其他热敏性营养素被破坏。而 CP 作为一种冷杀菌技术, 在杀菌过程中不会引起这些营养成分的热降解, 既避免了食品营养成分因加热而流失, 又能最大限度地保留食品本身的色、香、味等[12–16]。

近年来, CP 技术在肉类以及果蔬类产品保鲜的研究逐渐增加。王艺静[17]、郭依萍等[18]利用气调技术与 CP 技术相结合, 探究了肉类产品的保鲜条件; 任洁等[19]利用 CP 对番茄在贮藏期的品质进行了研究; 张禾等[20]、高影[21]根据 CP 的抑菌特性, 为杨梅和鲜切火龙果的保鲜提供了理论支撑。现阶段采用 CP 技术对芥菜进行保鲜的研究较少, 因此本研究以新鲜华容大叶芥菜为材料, 利用CP技术进行处理, 探究其对芥菜理化及微生物指标的影响, 为芥菜采后保鲜新方法提供理论及技术基础。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与仪器设备

1.1.1 材 料

大叶芥菜, 产地湖南华容。挑选无病虫害和机械损伤, 新鲜绿色的芥菜, 同一测定指标实验所用芥菜均为同一批购买样品。

1.1.2 试 剂

磷酸二氢钾、磷酸二氢钠、邻苯二甲酸氢钠、氢氧化钠、硫酸铜、酒石酸钾钠、乙酸锌、亚铁氰化钾、葡萄糖标准品(纯度≥99.9%)、草酸、碳酸氢钠、氯化钠(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 亚甲蓝、冰乙酸(分析纯, 天津市致远化学试剂有限公司); 2,6-二氯靛酚盐(分析纯, 上海瑞永生物科技有限公司); 维生素 C 标准品(纯度≥99.9%)、碳酸二氢钠(分析纯)(西陇化工股份有限公司); 平板计数琼脂(广东环凯生物科技有限公司)。

1.1.3 仪器设备

BCD-269WDGB 冰箱(青岛海尔股份有限公司); HR2095 破壁料理机、HR1884 慢速榨汁机(荷兰皇家飞利浦公司); PHS-3C pH 计(上海仪电科学仪器股份有限公司); TP-520A 电子天平(精度 0.01 g)、AE2204 电子分析天平(精度 0.1 mg)、TDZ5-WS 多管架自动平衡离心机(湘仪天平仪器设备有限公司); LMQ.C-50EJ 立式压力蒸汽灭菌器(山东新华医疗器械股份有限公司); WGL-230B 电热鼓风干燥箱、DK-98-II 电子调温万用电炉、SYG-2-6 恒温水浴锅(天津市泰斯特仪器有限公司); SPL-250 生化培养箱(天津市莱玻特瑞仪器设备有限公司); WFJ-7200 可见分光光度计[尤尼柯(上海)有限公司]; TDGC2-1 接触调压器(浙江正泰电器股份有限公司); CTP-2000K 等离子体反应器(上海 PLASMA GENERATOR 有限公司); HUSVIS64 测色仪(上海信联创作电子有限公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 样品预处理

芥菜清洗干净沥干表面水。取芥菜叶片 10 g 平铺在玻璃皿中, 玻璃皿放置在等离子体反应器的两个电极板之间, 设定处理时间 150 s、放电频率 1 kHz, 以不同的放电电压(0、20、25、30、35、40 kV)进行处理。处理后叶片样品于 4 ℃冰箱贮藏待用。

1.2.2 pH、还原糖、抗坏血酸的测定

从各组取 10 g 叶片样品进行匀浆, 3000 r/min 离心 15 min 弃渣。取 5 mL 芥菜汁于无菌玻璃培养皿中。根据 GB 5009.237—2016《食品安全国家标准 pH 值的测定》、

GB 5009.7—2016《食品安全国家标准 食品中还原糖的测定》、GB 5009.86—2016《食品安全国家标准 食品中抗坏血酸的测定》的方法, 对处理后芥菜的 pH、还原糖含量、维生素 C 含量进行测定。

1.2.3　色差的测定

从各组取适量的芥菜叶片剪成适合测色仪探头的尺寸, 用 HUSVIS64 测色仪测定各组叶片的 L^*、a^*、b^*, L^*为明亮度; a^*代表样品的红绿度; b^*代表样品的黄蓝度。利用公式(1)计算芥菜叶片色差的变化。

$$\Delta E=\sqrt{(L_0-L^*)^2+(a_0-a^*)^2+(b_0-b^*)^2} \quad (1)$$

式中, L_0、a_0、b_0 分别为对照组芥菜叶片的明亮度、红绿度、黄蓝度; L^*、a^*、b^*分别为各处理组芥菜叶片的明亮度、红绿度、黄蓝度的平均值。

1.2.4　菌落总数、POD 酶活性的测定

将处理后的芥菜叶片于 4 ℃冰箱贮藏, 每隔 2 d 从各组取 10 g 叶片样品进行匀浆(3000 r/min 离心 15 min), 弃渣, 取得芥菜汁。根据 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》以及王楠[22]的方法, 测定各组菌落总数和过氧化物(peroxide, POD)酶活性。

1.3　数据处理

实验设置 3 个平行, 实验数据处理采用 Excel 2007 整理, 使用 IBM SPSS Statistics 25 软件进行统计分析, 运用 Origin 2019 软件进行制图, 采用最小显著差异 t 检验(least significant difference, LSD)、Duncan 多重比较法进行单因素方差分析(P<0.05 表示差异显著)。

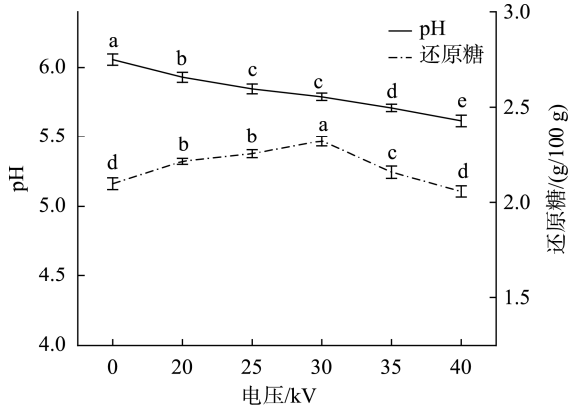
2　结果与分析

2.1　CP 处理对芥菜 pH 的影响

如图 1 所示, 芥菜的 pH 随着 CP 的放电电压的增大而下降, 当放电电压大于等于 20 kV 时, 处理组 pH 与对照组差异显著(P<0.05)。这可能是由于在处理过程中, CP 激发空气产生 NO、NO_3^-、NO_2^-等活性成分, 这些物质呈酸性, 从而引起 pH 的降低[23]。

2.2　CP 处理对芥菜还原糖含量的影响

由图 1 可知, 随放电电压的增加, CP 处理的芥菜中的还原糖含量呈现先升高后下降趋势。20~35 kV 条件下, 芥菜中的还原糖含量显著高于对照组(P<0.05); 当放电电压达到 40 kV 时, 芥菜还原糖含量与对照组无显著差异(P>0.05)。这可能是在 CP 处理过程中产生的活性物质促进组织细胞的呼吸作用, 使有机物被分解消耗, 但过高的放电电压会使细胞内酶活性降低, 阻碍葡萄糖的产生[24]。



注: 不同字母表示具有显著性差异(P<0.05), 图2同。

图1　不同放电电压下CP处理对芥菜pH以及还原糖的影响

Fig.1　Effects of CP treatment on pH and reducing sugar of *Brassica juncea* under different discharge voltages

2.3　CP 处理对芥菜维生素 C 含量的影响

维生素 C 含量是果蔬中重要的具有抗氧化活性的成分, 在水溶液中容易被空气及其他氧化剂氧化, 在碱性及光照条件下易分解, 弱酸性条件下相对比较稳定[25], 如图 2 所示, 芥菜中维生素 C 含量随放电电压的增加呈现先升高再下降的趋势。当放电电压为 20~35 kV 时, 处理组的维生素 C 含量都显著高于对照组(P<0.05), 30 kV 时芥菜汁中维生素C的含量最高。适当的CP处理会钝化芥菜汁中POD酶活性, 减缓维生素 C 的氧化, 提高维生素 C 的保存率。当放电电压过大时, CP 处理会破坏组织结构, 使维生素 C 暴露, 从而加速维生素 C 的氧化, 这也与萧文宇等[26]的研究结果相似。

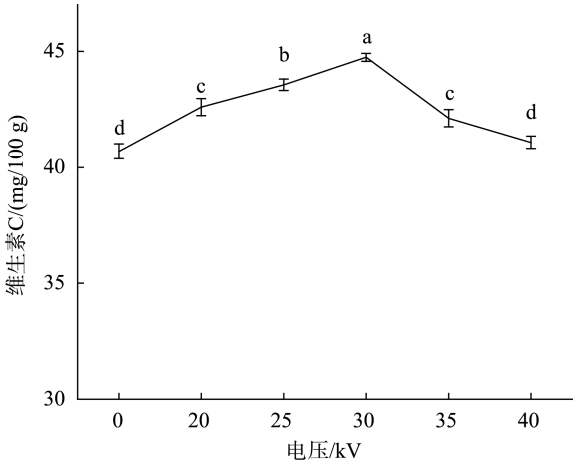


图2　不同放电电压下CP处理对芥菜维生素C含量的影响

Fig.2　Effects of CP treatment on the vitamin C content of *Brassica juncea* under different discharge voltages

2.4　CP 处理对色差的影响

果蔬的色泽是消费者在购买时评判其品质好坏的重要指标之一。如表 1 所示, 当放电电压大于 20 kV 时, 各处理

组芥菜叶片的 a^*、b^*和 L^*均与对照组存在显著差异(P<0.05), 这表明芥菜叶片在经过 CP 处理后正在逐渐变红变蓝, 亮度也在逐渐降低, ΔE 随着放电电压的增大而增大。这可能是因为在 CP 处理过程中增强了叶绿素降解酶活性, 加上处理过程中两放电电极间区域温度升高以及叶片 pH 的降低, 加速了叶绿素的降解和类胡萝卜素的合成, 导致 a^*逐渐升高。此外, CP 处理时过高的放电电压会破坏芥菜的组织结构, 使芥菜叶片发生氧化褐变, 亮度降低。

2.5 CP 处理对菌落总数的影响

如图3所示, 第0 d时, 对照组的菌落总数为5.42 lg(CFU/g), 而经 20、25、30、35、40 kV 电压的 CP 处理后, 芥菜菌落总数分别为 5.15、5.02、4.93、4.70、4.43 lg(CFU/g), 表明放电电压升高, 芥菜的菌落总数随之下降。贮藏期间, 处理组与对照组的菌落总数均不断增加, 但各处理组的菌落总数显著小于对照组(P<0.05)。第 8 d 时, 对照组的菌落总数为 7.27 lg(CFU/g), 而经 20、25、30、35、40 kV 电压的 CP 处理的各组的菌落总数分别为 6.63、6.34、6.15、6.03 和 5.79 lg(CFU/g)。在整个实验期间, 对照组的菌落总数呈明显的增长趋势, 且菌落总数始终高于处理组。结果表明适当的 CP 处理能有效抑制新鲜芥菜表面的微生物生长, 延长芥菜的货架期[27–28]。

2.6 CP 处理对芥菜 POD 酶活性的影响

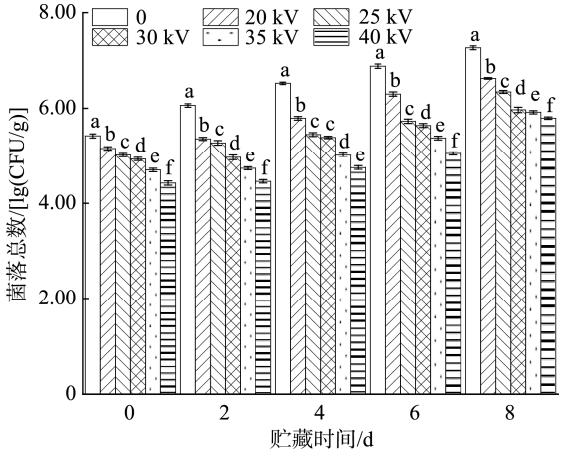
芥菜经 CP 处理后 POD 酶活性的变化如图 4 所示, 贮藏期内, 各组芥菜的 POD 酶活性呈现明显的先升高后降低的趋势。在第 4 d 时, POD 酶活性达到最大值, 其中放电电压为 30 kV 的处理组的 POD 酶活性最高[84.56 U/(min·g)]。这可能是因为在第 0~4 d 间, 芥菜中 ROS 的生成速率大于 POD 酶的降解速率, 为提高 H_2O_2 的降解速率, POD 酶活性得以增强。在第 5~8 d 时, ROS 的含量逐渐减少, POD 酶活性逐渐下降, 直至 ROS 的生成速率与 POD 酶的降解速率达到动态平衡[29–30]。

表 1 不同放电电压下 CP 处理对芥菜色差的影响

Table 1 Effects of CP treatment on the color difference of *Brassica juncea* under different discharge voltages

放电电压/kV	L^*	a^*	b^*	ΔE
0	40.06±0.190^a	–14.44±0.211^a	19.24±0.186^a	-
20	39.65±0.414^a	–14.25±0.226^a	19.21±0.135^a	0.51±0.240^a
25	38.86±0.309^b	–13.15±0.280^b	18.40±0.241^b	2.00±0.298^b
30	38.35±0.314^b	–12.94±0.163^b	18.01±0.274^c	2.59±0.300^c
35	37.45±0.363^c	–12.29±0.287^c	17.32±0.218^d	3.92±0.220^d
40	36.90±0.250^c	–11.85±0.293^c	16.97±0.125^e	4.68±0.157^e

注: 同列数据后不同小写字母表示不同放电电压下 CP 处理的样品间差异显著(P<0.05), -表示无此项。



注: 不同字母表示同一贮藏时间内, 不同放电电压下数据具有显著性差异(P<0.05), 图4同。

图3 不同放电电压下CP处理对芥菜菌落总数的影响

Fig.3 Effects of CP treatment on the total bacterial count of *Brassica juncea* under different discharge voltages

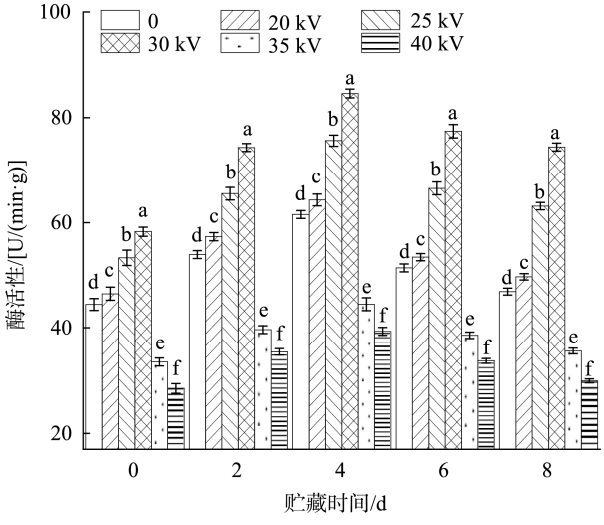


图4 不同放电电压下CP处理对芥菜POD酶活性的影响

Fig.4 Effects of CP treatment on the POD enzyme activity of *Brassica juncea* under different discharge voltages

当放电电压为 20~30 kV 时, 处理组的 POD 酶活性高于对照组, 说明适当的 CP 处理可以有效地清除芥菜中 ROS, 减少芥菜的腐烂, 这可能是由于在处理过程中产生的活性物质使得芥菜中 ROS 的含量升高, 刺激 POD 酶活性增大; 当放电电压为 35~40 kV 时, 处理组的 POD 酶活性显著低于对照组(P<0.05), 这是因为处理过程中放电电压过大导致部分POD酶失活。经过适当电压的CP处理, 可以有效提升芥菜中 POD 酶活性, 有助于保持芥菜采摘后的品质。

3　结　论

本研究以新鲜的华容大叶芥菜作为研究对象, 探究了 CP 处理对芥菜贮藏保鲜品质的影响。结果表明, 适当条件下的 CP 处理可以有效提升芥菜中可溶性总糖、维生素 C 含量和 POD 酶活性, 能有效抑制芥菜汁中菌落总数。色差实验中, 各处理组在经过 CP 处理后正在逐渐变红变蓝, 亮度也在逐渐降低。实验过程中, 处理组菌落总数显著低于对照组。当处理电压大于 35 kV 时, 在实验第 8 d 的菌落总数低于 6 lg(CFU/g)。此外, 各处理组的 POD 酶活性呈现明显的先升高后降低的趋势, 各组均在贮藏第 4 d 达到峰值。放电电压小于等于 30 kV 时, 处理组 POD 酶活性高于对照组; 放电电压大于 30 kV 时, 处理组的 POD 酶活力显著小于对照组。经过适当电压的 CP 处理能有效诱导 POD 酶活性, 清除芥菜汁内的自由基, 有助于维持芥菜的品质。综合本研究各项数据, 工作电压为 30 kV 的 CP 处理更适用于新鲜芥菜保鲜。本研究为芥菜的采后保鲜提供了新思路, 为 CP 处理提高芥菜的抑菌和保鲜效果奠定理论和应用基础。

参考文献

[1] LIN LZ, SUN JH, CHEN P, *et al*. UHPLC-PDA-ESI/HRMS/MSn analysis of anthocyanins, flavonol glycosides, and hydroxycinnamic acid derivatives in red mustard greens (*Brassica juncea* coss variety) [J]. J Agric Food Chem, 2011, 59(22): 12059−12072.

[2] 任锡亮, 王毓洪, 孟秋峰, 等. 高菜无公害栽培技术[J]. 中国瓜菜, 2009, 22(4): 47−48.
REN XL, WANG YH, MENG QF, *et al*. Non-pollution cultivation technology for *Brassica juncea* var. *integlifolia* [J]. China Cucurb Veget, 2009, 22(4): 47−48.

[3] 陈艳, 蒋依琳, 唐玉娟, 等. 大叶芥菜发酵过程中挥发性成分变化研究[J]. 食品科技, 2019, 44(11): 90−96.
CHEN Y, JIANG YL, TANG YJ, *et al*. Study on the change of volatile components in leaf mustard during fermentation [J]. Food Sci Technol, 2019, 44(11): 90−96.

[4] 徐俐, 胡伯凯, 吴康云, 等. 八种高盐腌制芥菜挥发性风味物质的对比分析[J]. 食品与机械, 2013, 29(5): 10−14.
XU L, HU BK, WU KY, *et al*. Comparative analysis on volatile flavour compounds from eight kinds of high salt picked *Brassica juncea* [J]. Food Mach, 2013, 29(5): 10−14.

[5] 徐丹萍, 蒲彪, 陈安均, 等. 传统四川泡菜中挥发性成分分析[J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(11): 227−232.
XU DP, PU B, CHEN ANJ, *et al*. Analysis of volatile component in traditional Sichuan Paocai [J]. Food Ferment Ind, 2014, 40(11): 227−232.

[6] 吴志豪, 张富强, 吴彩娥, 等. 低温等离子处理对采后雷竹笋贮藏品质的影响[J]. 包装与食品机械, 2023, 41(5): 1−8.
WU ZH, ZHANG FQ, WU CE, *et al*. Effect of atmospheric cold plasma treatment on storage quality of post-harvest bamboo shoots [J]. Packag Food Mach, 2023, 41(5): 1−8.

[7] 许童桐, 党庆秋. 低温等离子体杀菌技术研究现状[J]. 现代食品, 2021(4): 51−53.
XU TT, DANG QQ. Research status of low-temperature plasma sterilization technology [J]. Mod Food, 2021(4): 51−53.

[8] LI XA, LI ML, JI NN, *et al*. Cold plasma treatment induces phenolic accumulation and enhances antioxidant activity in fresh-cut pitaya (*Hylocereus undatus*) fruit [J]. LWT-Food Sci Technol, 2019, 115: 108447.

[9] 胡晓敏, 黄彭, 刘雯欣, 等. 非热物理技术在鲜切果蔬保鲜中的应用研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(10): 278−284.
HU XM, HUANG P, LIU WX, *et al*. Application of non-thermal physical technologies in fresh-cut fruits and vegetables preservation [J]. Food Ferment Ind, 2021, 47(10): 278−284.

[10] 乔维维. 低温等离子体对牛肉杀菌效能特性及品质的影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.
QIAO WW. Influence of cold plasma on sterilization an quality of fresh beef [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017.

[11] 黄明明. 低温等离子体对金黄色葡萄球菌和鼠伤寒沙门氏菌杀菌机理及应用研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2019.
HUANG MM. Mechanisms of *Staphylococcus aureus* and *Salmonella typhimurium* inactivation and applications of cold plasma [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019.

[12] WANG JM, FU TF, WANG YY, *et al*. Effects of high-voltage atmospheric cold plasma treatment on microbiological and quality characters of tilapia fillets [J]. Foods, 2022, 11(16): 2398.

[13] 张志伟. 常压低温等离子体对鲜切胡萝卜表面金黄色葡萄球菌的杀菌效果及品质影响[J]. 粮油食品科技, 2018, 26(3): 50−55.
ZHANG ZW. Effect of atmospheric Pressure low-temperature plasma on sterilization rate of staphylococcus aureus on sliced carrot surface and quality attributes [J]. Sci Technol Cere Oils Foods, 2018, 26(3): 50−55.

[14] PANKAJ SK, WAN Z, KEENER KM. Effcets of cold plasma on food quality: A review [J]. Foods, 2018, 7(1): 4.

[15] 马新雨, 毕秀芳, 任书凝, 等. 蓝莓复合果泥超高压和热杀菌的比较分析[J]. 现代食品科技, 2024, 40(4): 206−214.
MA XY, BI XF, REN SN, *et al*. Comparative analysis of ultra-high pressure and thermal sterilization of a blueberry-strawberry-apple puree [J]. Mod Food Sci Technol, 2024, 40(4): 206−214.

[16] 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): 2090−3097.
XU YY, LU HL, CHEN YJ, *et al*. Effects of low temperature plasma treatment on sterilization effects and surface color of fresh-cut ginseng slices [J]. J Food Saf Qual, 2022, 13(10): 2090−3097.

[17] 王艺静. 气调等离子体处理对罗非鱼片保鲜的研究[J]. 包装与食品机械, 2021, 39(2): 22−27.
WANG YJ. Study on preservation of tilapia slices by controlled atmosphere and plasma treatment [J]. Packag Food Mach, 2021, 39(2): 22−27.

[18] 郭依萍, 李冉, 叶可萍, 等. 气调包装协同低温等离子体杀菌对狮子头保鲜效果的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(9): 1815−1825.
GUO YP, LI R, YE KP, *et al*. Effect of modified atmosphere packaging-cold plasma sterilization on the preservation of meatballs [J]. J Nucl Agric Sci, 2022, 36(9): 1815−1825.

[19] 任洁, 董成虎, 纪海鹏, 等. 低温等离子体对番茄保鲜效果的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(18): 53—59.
REN J, DONG CH, JI HP, *et al*. Application of cold plasma in preservation of tomatoes [J]. Food Res Dev, 2023, 44(18): 53—59.

[20] 张禾, 陈烨芝, 孙翠, 等. 低温等离子体对杨梅采后致病菌—桔青霉的抑制作用[J]. 中国食品学报, 2022, 22(7): 183—192.
ZHANG H, CHEN YZ, SUN C, *et al*. Inhibitory effect of cold plasma on the postharvest pathogen *Penicillium citrinum* of Chinese bayberry [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2022, 22(7): 183—192.

[21] 高影. 鲜切火龙果的低温等离子体杀菌保鲜技术研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2022.
GAO Y. Study on low temperature plasma sterilization and fresh-keeping technology of fresh-cut pitaya [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2022.

[22] 王楠. 基于低温等离子体技术的黄花菜保鲜技术研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2021.
WANG N. Study on preservation technology of daylily based on low temperature plasma technology [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2021.

[23] 岑南香, 刘宸成, 陈姑, 等. 低温等离子体处理对羊肉脂质与蛋白质氧化性质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(14): 85—93.
CEN NX, LIU CC, CHEN G, *et al*. Effects of clod plasma treatment on lipids and protein oxidation properties of mutton [J]. Sci Technol Food Ind, 2022, 43(14): 85—93.

[24] 解梦梦, 赵武奇, 贾梦科, 等. 低温等离子体处理对鲜切猕猴桃片质构及理化特性的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(10): 133—142.
XIE MM, ZHAO WQ, JIA MK, *et al*, Effects of low temperature plasma treatment on texture and physicochemical properties of fresh-cut kiwi slices [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2021, 21(10): 133—142.

[25] 陈秋佳. 华容芥菜和高菜主要营养成分分析及高菜乳酸发酵过程中营养成分变化规律研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2020.
CHEN QJ. Analysis of main nutrients of Huarong mustard and *Brassica juncea* var. integlifolia and study on the variation of nutritional components in lactic acid fermentation in *Brassica juncea* var. Integlifolia [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2020.

[26] 萧文宇, 吴迅, 黄显斌, 等. 低温等离子体活化水对蓝莓表面微生物抑制作用及其贮藏品质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(8): 359—365.
XIAO WY, WU X, HUANG XB, *et al*. Inhibitory effect of low temperature plasma-activated water on the surface microorganisms and the quality attributes of blueberry [J]. Sci Technol Food Ind, 2023, 44(8): 359—365.

[27] 袁园, 黄明明, 魏巧云, 等. 等离子体活化水对鲜切生菜杀菌效能及贮藏品质影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(21): 281—285.
YUAN Y, HUANG MM, WEI QY, *et al*. Effect of plasma activated water on microbial decontamination and storage quality of fresh-cut lettuce [J]. Sci Technol Food Ind, 2020, 41(21): 281—285.

[28] 柴雨行, 徐艳阳, 鲁海玲, 等. 酸性氧化电位水和低温等离子体处理对鲜参微生物群落的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(1): 189—196.
CHAI YX, XU YY, LU HL, *et al*. Influences of acidic electrolyzed-oxidizing water and low temperature plasma treatment on microbial flora of fresh *Panax ginseng* [J]. J Food Saf Qual, 2024, 15(1): 189—196.

[29] 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 Z, ZHOU DD, PENG J, *et al*. Efficacy of cold plasma on microbial decontamination and storage quality of blueberries [J]. Food Sci, 2018, 39(15): 101—107.

[30] ZHOU DD, WANG Z, TU SC, *et al*. Effects of cold plasma, UV-C or aqueous ozone treatment on *Botrytis cinerea* and their potential application in preserving blueberry [J]. J Appl Microbiol, 2019, 127: 175—185.

(责任编辑: 于梦娇 安香玉)

作者简介

方镇洲, 硕士研究生, 主要研究方向为食品加工与安全。
E-mail: 364453012@qq.com

邓洁红, 教授, 主要研究方向为园艺产品深加工理论与技术。
E-mail: hongjiedeng@163.com