

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240914007

低温等离子体在果蔬保鲜中的应用研究进展

黄桂丽, 闫 肃, 邵千朔, 全鑫瑶, 马佳佳, 李昊聪, 隋思瑶, 孙灵湘, 王毓宁*

(苏州市农业科学院, 苏州 215105)

摘 要: 低温等离子体作为一种新兴非热加工技术, 在果蔬保鲜领域展现出巨大的应用潜力。研究表明, 该技术能够有效调节果蔬的生理活动, 维持其营养价值和感官品质; 通过直接或间接抑制微生物生长, 显著降低腐烂率; 同时, 还能有效减少农药残留和有害物质, 提升果蔬安全性, 从而延长其保鲜期。本文系统回顾了低温等离子体在各类果蔬保鲜中的应用研究进展, 深入探讨了等离子体处理对果蔬贮藏品质、代谢平衡及安全控制的影响机制, 并针对现有研究中的不足之处, 提出了未来研究方向, 旨在推动低温等离子体技术在果蔬保鲜领域的安全、高效应用。

关键词: 低温等离子体; 果蔬; 保鲜

Research progress on application of low temperature plasma in fruit and vegetable preservation

HUANG Gui-Li, YAN Su, SHAO Qian-Shuo, QUAN Xin-Yao, MA Jia-Jia,
LI Hao-Cong, SUI Si-Yao, SUN Ling-Xiang, WANG Yu-Ning*

(Suzhou Academy of Agricultural Sciences, Suzhou 215105, China)

ABSTRACT: Low temperature plasma, as an emerging non-thermal processing technology, has demonstrated tremendous potential in fruit and vegetable preservation. Studies have shown that this technology can effectively regulate the physiological activities of fruits and vegetables, maintain their nutritional value and sensory qualities; significantly reduce decay rates through direct or indirect inhibition of microbial growth; and effectively reduce pesticide residues and harmful substances, thereby enhancing food safety and significantly extending shelf life. This paper systematically reviewed the research progress of cold plasma applications in various fruits and vegetables preservation, thoroughly discussed the mechanisms of plasma treatment on storage quality, metabolic balance, and safety control of fruits and vegetables, and addressed the limitations in current research while proposing future research directions. The aim is to promote the safe and efficient application of cold plasma technology in fruit and vegetable preservation.

KEY WORDS: low temperature plasma; fruit and vegetable; preservation

基金项目: 苏州市科技计划项目(SNG2022069)、姑苏乡土人才项目(23045)

Fund: Supported by the Science and Technology Foundation of Suzhou (SNG2022069), and the Local Talent Project of Gusu (23045)

*通信作者: 王毓宁, 硕士, 研究员, 主要研究方向为果蔬保鲜与加工。E-mail: wyn705@163.com

*Corresponding author: WANG Yu-Ning, Master, Professor, Suzhou Academy of Agricultural Sciences, No.2351, Dongshan Road, Wuzhong District, Suzhou 215105, China. E-mail: wyn705@163.com

0 引言

果蔬是人类饮食中不可或缺的重要组成部分,它们以其多样的外观、丰富的口感和全面的营养价值,为人体健康奠定了坚实的基础。果蔬富含维生素、矿物质、膳食纤维和抗氧化物质,对增强免疫力、促进消化、预防慢性疾病等方面具有重要作用。果蔬采后容易腐烂变质、商品性差、货架期短,为了最大限度保持果蔬的营养价值,国内外科研工作者利用一系列非热加工技术与装备,深入研究果蔬保鲜从传统“热加工”向“冷加工”的变革与创新。目前的化学、生物保鲜技术容易有残留,存在安全风险,研究人员正寻求一种新型的物理保鲜技术来满足消费者对食品新鲜度和安全性的要求。

低温等离子体技术作为一种新兴的物理保鲜技术,利用放电产生的活性物质,如电子、离子、自由基、中性粒子等活性物质,有效地抑制果蔬微生物生长并降解化学农药残留,从而确保食品的新鲜度和安全性。其独特的冷杀菌特性,兼具高效、安全、无残留的优势^[1],尤其适用于生鲜食品的保鲜处理。已有研究证实低温等离子体技术能够有效维持草莓^[2]、香蕉^[3]、蓝莓^[4]等果品的营养品质,保持其新鲜度并延长其货架期,为果蔬产品的跨季节供需、稳定市场供应以及平抑价格波动提供了关键的技术支撑。

本文旨在系统阐述低温等离子体技术的概念、产生机制,并梳理其在多种果蔬保鲜中的应用案例,深入剖析其维持果蔬营养品质和新鲜度的作用机制。同时,本文将展望该技术的未来发展趋势,为推动低温等离子体技术在果蔬产业的广泛应用提供理论基础和实践指导。

1 低温等离子体技术的原理特点

1.1 低温等离子体概念

自然界中的物质可以存在于不同的形态,主要分为 3 种基本状态:固态、液态和气态。这些状态之间的转换彼此相连,受温度和压力条件的影响。除了这 3 种基本状态,科学家还发现了其他一些特殊的物质形态,如等离子态和玻璃态等。等离子体是物质的第 4 种状态,是由中性原子形成的碰撞并被电离,产生电子,带正电的离子、自由基和中性粒子^[5]。就温度而言,等离子体可分为两类:高温等离子体和低温等离子体^[6]。高温等离子体的特点是气体和粒子的温度完全电离温度高达 $10^6 \sim 10^8$ kcal,没有任何对流热损失。低温等离子体,也被称为非热等离子体,是处于非平衡态的充电粒子集合体,包括电子、正离子、负离子、中性原子、分子和自由基等多种粒子^[7]。相较于高温等离子体,低温等离子体的特点是电子温度远高于重粒子(如离子和中性粒子)的温度^[8]。电子温度可以达到几千到几万开尔文,而重粒子的温度则接近室温,这一特性使得低温

等离子体广泛应用于材料处理和表面改性、环境净化和废物处理、生物医学、农业、能源、电子制造等领域^[9-11],具有重要的科研和应用价值。

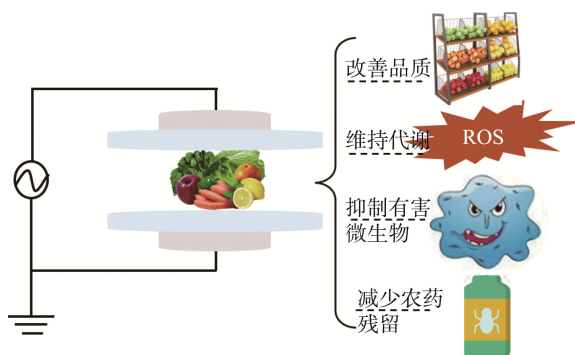
1.2 低温等离子体的产生方式

低温等离子体的形成主要是通过对气体施加能量的方式来实现的^[12]。在常温常压下,气体通常处于非电离状态,但是当气体分子吸收足够的能量时,分子之间的电子会从原子核中脱离,生成带负电的自由电子和带正电的离子,从而形成等离子体。对于低温等离子体,其形成过程主要涉及以下几个关键步骤。①能量输入,能量可以通过多种方式输入气体中,包括电场(直流电、射频电、微波电),磁场,激光照射,或者通过化学方法(如放电)来引入。其中,电场是最常用的方式,通过在气体中建立一个强电场,使气体分子在电场力的作用下加速并碰撞^[13]。最常用的产生低温等离子体的方式为介质阻挡放电。多数情况下,在 50 Hz~10 MHz 和 $10^4 \sim 10^6$ Pa 条件下,介质阻挡放电是最常用的^[14]。②电子冲击,加速的电子会与气体分子发生碰撞,这种碰撞可以是弹性碰撞(只改变方向和速度,不发生能量转移)或非弹性碰撞(部分动能转化为内部能量)。当电子具有足够的动能与气体分子碰撞时,可以将其内部电子打出,导致气体分子电离形成自由电子和正离子。③等离子体的形成,随着电子和离子数量的增加,系统中会形成大量携带电荷的粒子。同时,碰撞过程还会产生激发态分子和原子,光子等。当这些带电粒子的浓度足够高时,气体就转变为电导性的等离子体状态。在低温等离子体中,电子与重粒子(原子核、分子、离子等)的温度呈现出显著差异,电子质量极轻,它们在电场作用下极易被加速至高速度,从而获得极高的动能,表现出很高的“温度”;与之形成鲜明对比的是,重粒子由于质量较大,在电场中加速相对缓慢,获得的动能较低,因此其温度相对较低,接近于室温甚至更低。尽管电子温度很高,但由于重粒子温度较低,整体上等离子体呈现出“低温”的特性,这就是“低温”等离子体^[15]。

2 低温等离子体处理对果蔬的保鲜效果

果蔬富含维生素、矿物质和膳食纤维,在维持人体饮食平衡中发挥了关键的作用^[16]。果蔬货架期短,果蔬采后亟需绿色安全贮藏保鲜技术。低温等离子体,是一种新型的非热加工技术^[17],具有很好的应用前景。低温等离子体技术凭借其低温、高效、环保的特性^[18-19],以及显著的杀菌、酶失活和果蔬营养维持功能^[20-22],已在果蔬保鲜领域广泛开展研究,且效果显著。该技术通过产生的活性物质如臭氧、自由基等,可以有效杀灭果蔬表面的微生物,延缓果蔬的老化和腐烂过程,从而达到保鲜的目的^[15]。更重要的是,低温等离子体处理过程温和,纯物理保鲜,不会

对果蔬的色、香、味造成不良影响, 确保了果蔬的新鲜度、安全和品质。近年来的研究表明, 低温等离子体不仅可以有效延长果蔬的保质期, 还能维持果蔬的营养价值, 是一种极具潜力的物理果蔬保鲜技术(图 1)。



注: 活性氧(reactive oxygen species, ROS)。

图 1 等温等离子体保鲜果蔬模式图

Fig.1 Isothermal plasma fresh-keeping fruit and vegetable model

2.1 低温等离子体处理改善果蔬贮藏品质

低温等离子体处理能够改善果蔬的贮藏品质, 主要是通过非热效应产生的活性物质, 这些活性物质有助于减缓果蔬的生理代谢过程, 保持了其新鲜度和营养价值。低温等离子体处理能够降解苹果汁还原性糖类和还原性蔗糖^[23]; 延长果汁的货架期^[24]; 减缓苹果褐变进程^[25]; 改善了苹果的品质, 并延长了贮藏期^[26]; 提高了青柠果汁中的酚类化合物、抗氧化活性和维生素 C 的含量^[27]; 增加了蘑菇干燥过程中抗氧化活性、总酚含量和维生素 C 保留率^[28]; 降低百香果果汁内源酶的活性, 保持其新鲜度^[29]; 维持鲜香菇的颜色和质地^[30]; 延缓香椿的品质劣变, 保持良好的外观品质和风味^[31]; 保持较好的蓝莓果实硬度、颜色、可溶性固形物和花青素含量等品质, 较完整的表皮蜡质和细胞壁结构^[32]; 显著提高了蓝莓汁中酚类物质的含量, 并能较好地保持蓝莓汁的原色^[33-34]; 增加了鲜切火龙果酚类物质的积累, 增强了其抗氧化活性^[35]。以上研究表明低温等离子体处理能够改善果蔬贮藏品质。

2.2 低温等离子体处理维持果蔬代谢平衡

低温等离子体产生的活性物质有助于减缓果蔬的生理代谢过程, 遏制呼吸作用和乙烯的产生, 有助于维持其代谢平衡, 从而延长果蔬的货架期。低温等离子体处理方式能够有效减缓果蔬成熟和衰老过程, 延缓细胞壁的分解, 保持果蔬的结构和质地, 减少营养成分的损失, 确保果蔬在贮藏过程中保持最佳的食用品质。低温等离子体可以激活蓝莓抗氧化系统清除组织内 ROS, 降低活性氧引起的质量损失, 且能延长货架时间^[36]。以上研究结果表明低温等

离子体处理能够维持果蔬代谢平衡。

2.3 低温等离子体处理减少致病微生物的产生

低温等离子体处理具有显著的杀菌效果, 研究表明其对食源性致病微生物有效^[37], 如单核细胞增生李斯特菌和鼠伤寒沙门氏菌、大肠杆菌 O157:H7、空肠弯曲杆菌^[38], 能有效减少果蔬表面和内部的致病微生物数量^[39]。低温等离子体处理产生的活性物质直接作用于微生物细胞, 通过使 DNA 变性和破坏化学键结构, 破坏细胞壁和细胞膜, 从而抑制微生物的生长和繁殖^[40]。许多农产品在贮存的过程中会产生真菌毒素, 低温等离子体技术不仅能杀死真菌, 还能分解真菌毒素^[41]。低温等离子体处理能够有效杀灭苹果表面的单核细胞增生乳杆菌^[42], 降低蓝莓果实腐败霉菌的数量^[37], 抑制橙汁沙门氏菌的生长^[43], 抑制长叶莴苣上大肠杆菌、沙门氏菌、单核细胞增生李斯特菌的生长^[44], 减少青柠果实中指状青霉的数量^[27], 抑制柑橘果实中指状线虫的生长^[45], 降低贮藏期间草莓果实酵母和霉菌数量^[46], 控制鲜切梨微生物的生长和保持鲜切梨的品质^[47], 消除新鲜核桃表面的黄曲霉^[48], 减少新鲜椰子汁微生物的数量^[49], 抑制甜瓜腐败微生物的生长, 延长其货架期^[50]。低温等离子体处理蓝莓 10 min, 细菌和真菌的数量分别下降了 93.0% 和 25.8%^[34]。研究表明低温等离子体处理对多种微生物有效果, 减少致病微生物的数量, 保持果蔬的新鲜度。

2.4 低温等离子体处理对果蔬的安全控制

低温等离子体技术在保证果蔬安全方面发挥了重要作用。除了具有良好的杀菌效果之外, 这种技术还能够对果蔬进行表面消毒, 去除农药残留, 降低有害物质含量, 从而显著提高果蔬的安全水平。研究表明低温等离子体处理能够降解蓝莓果实农药残留^[51], 降解番茄果实中杀菌剂百菌清^[52], 降解番茄汁中苯胺嘧啶类杀菌剂的含量^[53]。低温等离子体处理不仅提高了果蔬的卫生安全性, 降低了食源性疾病的风险, 同时也减少了果蔬的腐烂率, 提高了贮藏效率。

3 低温等离子体应用面临的问题与挑战

低温等离子体技术在果蔬保鲜和杀菌方面展现出了巨大潜力, 但作为一项新兴技术, 其实际应用仍面临多方面挑战。首先, 在处理效果方面, 等离子体可能会对某些果蔬的质地、色泽和营养成分产生不良影响, 需要针对不同种类果蔬优化处理参数。虽然研究表明该技术能有效灭活产生真菌毒素的镰刀菌、曲霉和青霉等^[54-55], 并能通过断裂 C₈=C₉ 双键降低真菌毒素黄曲霉毒素 B₁ 的毒性^[56], 但关于处理后副产物的安全性评估仍需进一步深入研究。其次, 在技术实施层面, 低温等离子体装备的设计和应用面临较大挑战。设备的高额初始投资可能会制约其在小型企业和农户中的推广。同时, 处理的均匀性和渗透深度问题

也需要技术突破,以确保处理效果的一致性。此外,在大规模商业化应用中,能耗问题的解决对提高经济效益至关重要。最后从长远发展来看,该技术仍处于发展早期阶段,需要更多科学研究来证实其有效性和安全性,目前研究的广度和深度还有待加强,部分局限性尚未充分显现。尽管低温等离子体技术具有诸多优势,但设备成本高、操作要求严格等问题仍需解决。克服这些技术瓶颈和实际应用障碍,将是推动低温等离子体技术在果蔬行业更广泛应用的关键。

4 结束语

近年来,低温等离子体技术在果蔬保鲜与安全控制领域崭露头角,展现出令人瞩目的潜力,并预示着其广阔的应用前景。研究表明,低温等离子体技术在果蔬保鲜和安全控制方面具有独特优势。首先,该技术能有效减缓果蔬的生理代谢进程,抑制呼吸作用和乙烯释放,从而延长保鲜期。其次,等离子体处理可显著控制微生物的生长繁殖,降低腐败变质风险。此外,该技术还能降解农药残留等有害物质,提高果蔬的安全性。与传统保鲜方法相比,低温等离子体处理具有无残留、环保、高效等特点,为解决果蔬流通损耗问题提供了创新性解决方案。然而,要进一步推广低温等离子体技术在果蔬保鲜中的应用,仍需在以下几个方面继续深入研究:(1)优化处理参数,针对不同种类果蔬的特性,建立最佳处理工艺参数,提高处理效果的精准性和适用性;(2)提升设备性能,开发新型等离子体源,改进设备结构设计,提高处理均匀性和穿透深度,同时降低能耗,提升经济效益;(3)探索协同应用,研究低温等离子体与其他保鲜技术的组合应用,如与气调保鲜、臭氧处理等技术结合,实现协同增效;(4)完善评估体系,建立科学的安全性评估方法和标准化处理流程,确保处理后果蔬的品质和安全性;(5)深化机制研究,进一步阐明低温等离子体对果蔬品质的影响机制,为技术优化提供理论支撑。

低温等离子体技术作为一门融合物理学、化学、生物学等多个学科的前沿科技,其在果蔬保鲜领域的应用将持续推动相关科学研究和技术创新。随着研究的深入和技术的完善,低温等离子体有望成为果蔬产业中的核心保鲜技术,为提升果蔬品质、延长保质期、保障食品安全做出重要贡献,并为农产品贮运领域的可持续发展提供有力支撑。

参考文献

- [1] 魏丽娜, 张艳, 吴玉茜, 等. 不同气源低温等离子体在食品杀菌及毒素降解领域的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(15): 269–277.
WEI LN, ZHANG Y, WU YX, *et al.* Advance in the application of cold plasmas with different gas sources in the field of food sterilization and toxin degradation [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, 14(15): 269–277.
- [2] 任翠荣, 刘金光, 王世清, 等. 常压低温等离子体处理对草莓保鲜效果的影响[J]. 青岛农业大学学报 (自然科学版), 2017, 34(3): 228–234.
REN CR, LIU JG, WANG SQ, *et al.* Effect of strawberry preservation by atmospheric pressure low temperature plasma [J]. *J Qingdao Agric Univ (Nat Sci)*, 2017, 34(3): 228–234.
- [3] 陈姝伊, 曾筠婷, 袁洋, 等. 低温等离子体处理减轻采后香蕉果实冷害作用的研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(5): 245–249.
CHEN SY, ZENG JT, YUAN Y, *et al.* Effect of cold plasma treatment on alleviating chilling injury of banana fruit after harvest [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2020, 41(5): 245–249.
- [4] 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.
- [5] RAMEZAN Y, KAMKARI A, LASHKARI A, *et al.* A review on mechanisms and impacts of cold plasma treatment as a non-thermal technology on food pigments [J]. *Food Sci Nutr*, 2024, 12(3): 1502–1527.
- [6] OZEN E, SINGH RK. Atmospheric cold plasma treatment of fruit juices: A review [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2020, 103: 144–151.
- [7] QIN L, LIO L. Recent progress of low-temperature plasma technology in biorefining process [J]. *Nano Converge*, 2023, 10(1): 38.
- [8] MISRA NN, PANKAJ SK, SEGAT A, *et al.* Cold plasma interactions with enzymes in foods and model systems [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2016, 55: 39–47.
- [9] TSUTSUMI T, ISHIKAWA K, TAKEDA K, *et al.* Real-time temperature monitoring of Si substrate during plasma processing and its heat-flux analysis [J]. *Jap J Appl Phys*, 2015, 55: 01AB04.
- [10] MIYAMOTO K, IKEHARA S, TAKEI H, *et al.* Red blood cell coagulation induced by low-temperature plasma treatment [J]. *Arch Biochem Biophys*, 2016, 605: 95–101.
- [11] ISHIKAWA K, HORI M. Diagnostics of plasma-biological surface interactions in low pressure and atmospheric pressure plasmas [J]. *Int J Mod Phys*, 2014, 32: 1460318.
- [12] THIRUMDAS R, TRIMUKHE A, DESHMUKH RR, *et al.* Functional and rheological properties of cold plasma treated rice starch [J]. *Carbohydr Polym*, 2017, 157: 1723–1731.
- [13] BOOTH JP, MOZETIĆ M, NIKIFOROV A, *et al.* Foundations of plasma surface functionalization of polymers for industrial and biological applications [J]. *Plasma Sources Sci*, 2022, 31: 103001.
- [14] SEKIMOTO S, FUJII K, ANYOJI M, *et al.* Flow control around NACA0015 airfoil using a dielectric barrier discharge plasma actuator over a wide range of the Reynolds number [J]. *Actuators*, 2023, 12(1): 43.
- [15] HARIKRISHNA S, ANIL PP, SHAMS R, *et al.* Cold plasma as an emerging nonthermal technology for food processing: A comprehensive review [J]. *J Agric Food Res*, 2023, 14: 100747.
- [16] WU J, TANG R, FAN K. Recent advances in postharvest technologies for reducing chilling injury symptoms of fruits and vegetables: A review [J]. *Food Chem X*, 2024, 21: 101080.
- [17] ZHAO N, GE L, HUANG Y, *et al.* Impact of cold plasma processing on quality parameters of packaged fermented vegetable (*Radish paocai*) in

- comparison with pasteurization processing: Insight into safety and storage stability of products [J]. *Innov Food Sci Emerg*, 2020, 60: 102300.
- [18] CHEN YQ, CHENG JH, SUN DW. Chemical, physical and physiological quality attributes of fruit and vegetables induced by cold plasma treatment: Mechanisms and application advances [J]. *Crit Rev Food Sci*, 2020, 60(16): 2676–2690.
- [19] CHENG JH, LI J, SUN DW. Effects of dielectric barrier discharge cold plasma on structure, surface hydrophobicity and allergenic properties of shrimp tropomyosin [J]. *Food Chem*, 2023, 409: 135316.
- [20] KHODABANDEH M, AZIZI M, SHOKRI B, *et al.* Optimization of the radiofrequency low-pressure cold plasma conditions for decontamination of saffrons [J]. *Food Biop Technol*, 2023, 17: 271–297.
- [21] SRUTHI NU, JOSNA K, PANDISELVAM R, *et al.* Impacts of cold plasma treatment on physicochemical, functional, bioactive, textural, and sensory attributes of food: A comprehensive review [J]. *Food Chem*, 2022, 368: 130809.
- [22] SARANGAPANI C, SCALLY L, GULAN M, *et al.* Dissipation of pesticide residues on grapes and strawberries using plasma-activated water [J]. *Food Biop Technol*, 2020, 13: 1728–1741.
- [23] RODRÍGUEZ Ó, GOMES WF, RODRIGUES S, *et al.* Effect of indirect cold plasma treatment on cashew apple juice (*Anacardium occidentale* L.) [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2017, 84: 457–463.
- [24] BEVILACQUA A, PETRUZZI L, PERRICONE M, *et al.* Nonthermal technologies for fruit and vegetable juices and beverages: Overview and advances [J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2018, 17(1): 2–62.
- [25] TAPPI S, RAGNI L, TYLEWICZ U, *et al.* Browning response of fresh-cut apples of different cultivars to cold gas plasma treatment [J]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2019, 53: 56–62.
- [26] ILLERA AE, CHAPLE S, SANZ MT, *et al.* Effect of cold plasma on polyphenol oxidase inactivation in cloudy apple juice and on the quality parameters of the juice during storage [J]. *Food Chem X*, 2019, 3: 100049.
- [27] AKABER S, RAMEZAN Y, REZA KM. Effect of post-harvest cold plasma treatment on physicochemical properties and inactivation of *Penicillium digitatum* in Persian lime fruit [J]. *Food Chem*, 2024, 437: 137616.
- [28] ASHTIANI SM, AGHKHANI MH, FEIZY J, *et al.* Effect of cold plasma pretreatment coupled with osmotic dehydration on drying kinetics and quality of mushroom (*Agaricus bisporus*) [J]. *Food Biop Technol*, 2023, 16: 2854–2876.
- [29] CASTRO DG, MAR JM, DA-SILVA LS, *et al.* Dielectric barrier atmospheric cold plasma applied on camu-camu juice processing: Effect of the excitation frequency [J]. *Food Res Int*, 2020, 131: 109044.
- [30] GAVAHIAN M, SHEU FH, TSAI MJ, *et al.* The effects of dielectric barrier discharge plasma gas and plasma-activated water on texture, color, and bacterial characteristics of shiitake mushroom [J]. *J Food Proc Pres*, 2019, 44: e14316.
- [31] 马佳佳, 黄桂丽, 隋思瑶, 等. 微孔包装结合低温等离子体冷杀菌对香椿货架期品质的影响 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11: 3840–3846.
- MA JJ, HUANG GL, SUI SS, *et al.* Effect of microporous packaging combined with cold plasma sterilization on shelf life qualities of *Toona sinensis* [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11: 3840–3846.
- [32] CHENG JH, HE L, SUN DW, *et al.* Inhibition of cell wall pectin metabolism by plasma activated water (PAW) to maintain firmness and quality of postharvest blueberry [J]. *Plant Phys Biochem*, 2023, 201: 107803.
- [33] HOU Y, WANG R, GAN Z, *et al.* Effect of cold plasma on blueberry juice quality [J]. *Food Chem*, 2019, 290: 79–86.
- [34] DONG XY, YANG YL. A novel approach to enhance blueberry quality during storage using cold plasma at atmospheric air pressure [J]. *Food Biop Technol*, 2019, 12: 1409–1421.
- [35] 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.
- [36] WANG J, WU Z. Combined use of ultrasound-assisted washing with in-package atmospheric cold plasma processing as a novel non-thermal hurdle technology for ready-to-eat blueberry disinfection [J]. *Ultrason Sonochem*, 2022, 84: 105960.
- [37] LACOMBE A, NIEMIRA BA, GÜRTLER JB, *et al.* Atmospheric cold plasma inactivation of aerobic microorganisms on blueberries and effects on quality attributes [J]. *Food Microbio*, 2015, 46: 479–484.
- [38] VARILLA C, MARCONE M, ANNOR GA. Potential of cold plasma technology in ensuring the safety of foods and agricultural produce: A review [J]. *Foods*, 2020, 9(10): 1435.
- [39] UCAR Y, CEYLAN Z, DURMUS M, *et al.* Application of cold plasma technology in the food industry and its combination with other emerging technologies [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2021, 114: 355–371.
- [40] ZHANG B, TAN C, ZOU F, *et al.* Impacts of cold plasma technology on sensory, nutri saf qual food: A review [J]. *Foods*, 2022, 11(18): 2818.
- [41] MURTAZA B, WANG L, LI X, *et al.* Cold plasma: A success road to mycotoxins mitigation and food value edition [J]. *Food Chem*, 2024, 445: 138378.
- [42] UKUKU DO, NIEMIRA BA, UKANALIS J. Nisin-based antimicrobial combination with cold plasma treatment inactivate *Listeria monocytogenes* on Granny Smith apples [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2019, 104: 120–127.
- [43] XU L, GARNER AL, TAO B, *et al.* Microbial inactivation and quality changes in orange juice treated by high voltage atmospheric cold plasma [J]. *Food Biopro Tech*, 2017, 10: 1778–1791.
- [44] MIN SC, ROH SH, NIEMIRA BA, *et al.* Dielectric barrier discharge atmospheric cold plasma inhibits *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella*, *Listeria monocytogenes*, and tulane virus in Romaine lettuce [J]. *Int J Food Microbiol*, 2016, 237: 114–120.
- [45] BANG IH, LEE ES, LEE HS, *et al.* Microbial decontamination system combining antimicrobial solution washing and atmospheric dielectric barrier discharge cold plasma treatment for preservation of mandarins [J]. *Postharvest Bio Technol*, 2020, 162: 111102.
- [46] BELAY ZA, NYAMENDE NE, CALEB OJ. Impact of cold plasma-mediated treatment on coated and packaged ‘Monterey’ strawberries during cold storage [J]. *South Afr J Plant Soil*, 2022, 39: 302–307.
- [47] CHEN C, LIU C, JIANG A, *et al.* The effects of cold plasma-activated water treatment on the microbial growth and antioxidant properties of fresh-cut pears [J]. *Food Biop Technol*, 2019, 12(3): 1842–1851.
- [48] AMINI M, GHORANNEVISS M. Effects of cold plasma treatment on antioxidants activity, phenolic contents and shelf life of fresh and dried walnut (*Juglans regia* L.) cultivars during storage [J]. *LWT-Food Sci*

- Technol, 2016, 73: 178–184.
- [49] CHUTIA H, MAHANTA CL, OJAH N, *et al.* Fuzzy logic approach for optimization of blended beverage of cold plasma treated TCW and orange juice [J]. J Food Meas Charact, 2020, 14: 1926–1938.
- [50] TAPPI S, GOZZI G, VANNINI L, *et al.* Cold plasma treatment for fresh-cut melon stabilization [J]. Innova Food Sci Emerg Technol, 2016, 33: 225–233.
- [51] SARANGAPANI C, O'TOOLE G, CULLEN PJ, *et al.* Atmospheric cold plasma dissipation efficiency of agrochemicals on blueberries [J]. Innova Food Sci Emerg Technol, 2017, 44: 235–241.
- [52] ALI M, SUN DW, CHENG JH, *et al.* Effects of combined treatment of plasma activated liquid and ultrasound for degradation of chlorothalonil fungicide residues in tomato [J]. Food Chem, 2022, 371: 131162.
- [53] ALI M, CHENG JH, SUN DW. Effects of dielectric barrier discharge cold plasma treatments on degradation of anilazine fungicide and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) juice [J]. Int J Food Sci Technol, 2021, 56: 69–75.
- [54] JIANG H, LIN Q, SHI W, *et al.* Food preservation by cold plasma from dielectric barrier discharges in agri-food industries [J]. Nutri Food Sci Technol, 2022, 9: 1015980.
- [55] GODSWILL AC, NYAKUNDI OE, JOSIAH EI, *et al.* Fungal growth and mycotoxins production: Types, toxicities, control strategies, and detoxification [J]. Fungal Reprod Growth, 2022, 11: 13.
- [56] ERNUO T, XIN D, WENHAO C, *et al.* Structure and toxicity analysis of aflatoxin B₁ biodegraded products by culture supernatant of *Cladosporium uredinicola* [J]. Sci Asia, 2020, 46: 308–314.

(责任编辑: 蔡世佳 韩晓红)

作者简介



黄桂丽, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为果蔬保鲜加工。

E-mail: huangg12015@163.com



王毓宁, 硕士, 研究员, 主要研究方向为果蔬保鲜加工。

E-mail: wyn705@163.com