

非热加工技术对果蔬功能成分的影响研究进展

刘雪平^{1*}, 赵莉¹, 黄莉¹, 崔晓梅¹, 魏萍¹, 刘林¹, 王港²

(1. 临沂市农业科学院, 山东临沂 276012) (2. 山东国泰食品有限公司, 山东临沂 276300)

摘要: 水果和蔬菜含有丰富的功能成分, 具有抗氧化、抗肿瘤、神经保护、抗炎等功效, 但在加工处理过程中, 采用传统热加工很容易对其中的功能成分造成破坏。近年来, 非热加工技术作为一种新兴的食品加工技术, 因其低温杀菌、钝酶、保持原有营养与功能成分等优势, 逐渐受到广泛关注。本文梳理了果蔬中常见的功能成分(多酚、类胡萝卜素、维生素C、膳食纤维)及其结构、功效, 综述了非热加工技术(高压、超声波、冷等离子体、脉冲电场)对果蔬中功能成分的影响, 同时探讨了其对功能成分的作用机制, 并提出了非热技术在果蔬领域的应用存在的问题及今后的研究方向, 以期果蔬产业的深加工与保鲜技术提供理论基础。

关键词: 多酚; 类胡萝卜素; 维生素C; 膳食纤维; 高压; 超声波; 冷等离子体; 脉冲电场

文章编号: 1673-9078(2026)7-333-342

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.7.0634

Advances in the Effects of Non-thermal Processing Technologies on Functional Components in Fruits and Vegetables

LIU Xueping^{1*}, ZHAO Li¹, HUANG Li¹, CUI Xiaomei¹, WEI Ping¹, LIU Lin¹, WANG Gang²

(1. Linyi Academy of Agricultural Sciences, Linyi 276012, China)

(2. Shandong Guotai Food Company Limited, Linyi 276300, China)

Abstract: Fruits and vegetables are rich in functional components with antioxidant, antitumor, neuroprotective, anti-inflammatory, and other bioactive effects. However, these functional components are highly susceptible to damage during traditional thermal processing. Non-thermal processing technology-a new method for processing fruits and vegetables-has gradually gained widespread attention for its many advantages, including low-temperature sterilization, enzyme inactivation, and preservation of original nutritional and functional components. This paper collates the common functional components (polyphenols, carotenoids, vitamin C, dietary fiber) in fruits and vegetables, along with their structures and effects. The paper also reviews the effects of non-thermal processing technology (high pressure, ultrasound, cold plasma, pulsed electric field) on these functional components, and explores their mechanisms of action. Finally, the paper describes current challenges and future research directions for applying non-thermal technologies to fruits and vegetables, thus providing a theoretical basis for the deep processing and preservation technology in the fruit and vegetable industry.

Key words: polyphenols; carotenoids; vitamin C; dietary fiber; high pressure; ultrasound; cold plasma; pulsed electric field

引文格式:

刘雪平, 赵莉, 黄莉, 等. 非热加工技术对果蔬功能成分的影响研究进展[J]. 现代食品科技, 2026, 42(7): 333-342.

LIU Xueping, ZHAO Li, HUANG Li, et al. Advances in the effects of non-thermal processing technologies on functional components in fruits and vegetables [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(7): 333-342.

收稿日期: 2024-12-29; 修回日期: 2025-04-18; 接受日期: 2025-04-21

基金项目: 山东省重点研发计划(乡村振兴科技创新提振行动计划)项目(2024TZXD0016); 临沂市重点研发计划项目(2023021); 山东省蔬菜产业技术体系(SDAIT-05); 山东省重点研发计划(科技型中小企业创新能力提升工程)项目(2024TSGC0882); 山东省农业重大技术协同推广计划项目(SDNYTTG-2024-29)

作者简介: 刘雪平(1989-), 女, 高级农艺师, 研究方向: 农产品精深加工技术研究, E-mail: liuxp0410@163.com

果蔬产业是我国的重要产业，也是拉动我国乡村振兴的支柱产业。2022年，我国水果产量3.1亿t，蔬菜产量7.99亿t，分别占全球产量的28%、50%，均位居世界第一^[1]。水果和蔬菜中富含丰富的多酚、类胡萝卜素、维生素C、膳食纤维、有机硫、皂苷、柠檬烯类等功能成分^[2]，这些成分具有抗氧化、抗肿瘤、神经保护、抗炎、抗菌等功效^[3,4]，是维持我们人体健康的重要功能因子。非热加工技术作为一类新兴的食品加工技术，其利用声、光、电、磁、压等物理学的原理，应用于果蔬加工过程中^[5]。相较于传统热加工，具有低温杀菌、钝酶、保持原有营养与功能成分等优势，被广泛应用于果蔬贮藏保鲜、果蔬安全防控及高品质果蔬功能产品开发等领域^[6]。本文综述了近年来国内外非热加工技术对果蔬中主要的功能成分（多酚、类胡萝卜素、维生素C、膳食纤维等）的影响，并探讨了其对功能成分的作用机制，为非热加工技术在果蔬产业中的推广应用及未来研究提供理论支撑和技术参考。

1 果蔬中主要的功能成分

1.1 多酚

多酚化合物是植物的次生代谢产物，通常是苯环结构带有一个或多个羟基（-OH），根据苯环的数量和结合到苯环上的元素，可将多酚分为芪类、木质素、黄酮类化合物、鞣花酸、酚酸等。多酚具有抗氧化、

抗炎、抗肿瘤、抗炎、预防心脑血管病等功效^[7,8]。具体结构类型见图1。

黄酮类化合物是一类以苯色酮环为基础的多酚化合物，是多酚中最大的一类，目前共发现4 000多种，主要分为花青素、黄酮醇、黄烷酮、黄酮、异黄酮、黄烷醇、异黄酮等^[9]。其中花青素赋予果蔬的花朵、果实和叶片红色、紫色或蓝色，存在于蓝莓、黑莓、草莓、樱桃等，具有抗氧化作用。黄烷酮类，如柚皮素，比较常见于柑橘类水果中。黄酮醇类，有槲皮素、儿茶素、原花青素B₂等几种代表性结构，结构中通常含有较多的邻苯二酚、邻苯三酚等基团，具有较强的抗氧化特性^[10]。黄酮中木犀草素主要存在于甘蓝、洋葱、芹菜等，有研究证明木犀草素可通过调控Nrf2/Keap1（Kelch-like ECH-associated protein 1/Kelch-like ECH-associated protein 1）信号通路起到抗癌作用^[11]。异黄酮，如大豆异黄酮主要存在于大豆及其制品中，具有激素调节、抗炎、抗衰老等作用^[12]。

芪类主要以白藜芦醇为代表，在葡萄皮、葡萄酒中广泛存在，具有显著的抗氧化、抗炎、抗衰老、降血糖等功效^[13,14]。酚酸主要包括羟基苯甲酸类和羟基肉桂酸类，主要以阿魏酸为代表，存在于谷物、咖啡、胡萝卜等。鞣花酸由鞣花丹宁水解产生，主要存在于石榴、葡萄、芒果、核桃中，有研究表明其可通过调节抑制氧化应激，降低脂肪细胞肥大和脂肪组织细胞炎症损伤^[15]。

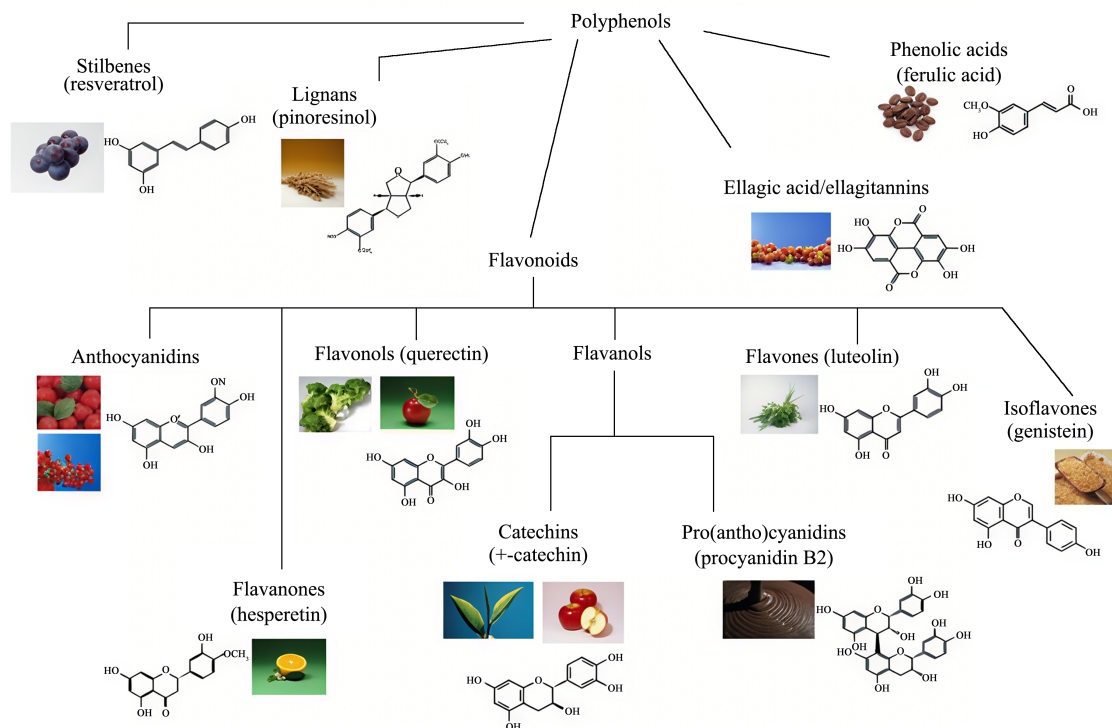


图1 果蔬中常见的多酚结构类型

Fig.1 The common types of polyphenol structures in fruits and vegetables

1.2 类胡萝卜素

类胡萝卜素是一种多烯色素,使果蔬呈现鲜艳的红色、黄色、橙色及紫色等色泽。类胡萝卜素一般由9个共轭双键多烯链与两端基团结合,根据结构是否被氧化可分为两大类,其中一类是纯碳氢化物,即胡萝卜素类,包括 α -、 β -、 γ -、 κ -胡萝卜素和番茄红素等,另一类是氧化的胡萝卜素,一般含有羟基、环氧基、醛基、酮基等基团,被称为叶黄素类,包括叶黄素、玉米黄素、辣椒红素、隐黄素等^[16]。胡萝卜素是动物和人类自身不能合成的一类物质,必须通过外界食物获取。 β -胡萝卜素是合成维生素A的关键前体物质,即维生素A原。维生素A对于维持人体正常生长、组织修复功能至关重要,尤其使在视觉系统和免疫系统方面发挥着重要作用^[17]。番茄红素是一种红色的类胡萝卜素,能够间接作用于细胞代谢过程,展现出强大的抗氧化和抗炎特性,是预防和治疗代谢综合征、肥胖以及II型糖尿病的有效成分^[18]。叶黄素属于含氧类胡萝卜素,能够有效抑制线粒体畸变、兴奋性毒性以及金属过度积累引发的并发症,起着保护神经功能的作用。此外,它还能通过提升GAP-43 (Growth-Associated Protein 43)、NCAM (Neural Cell Adhesion Molecule) 和BDNF (Brain-Derived Neurotrophic Factor) 的水平来促进神经发生,进而改善神经可塑性^[19]。

1.3 膳食纤维

膳食纤维是一种由10个或更多个单体单位组成的碳水化合物聚合物,其庞大的分子链结构难以被人类小肠内的内源性酶分解。膳食纤维分为可溶性膳食纤维 (Soluble Dietary Fiber, SDF) 和不溶性膳食纤维 (Insoluble Dietary Fiber, IDF)^[20]。可溶性膳食纤维是指能够溶于水且可以被人体肠道微生物发酵的非淀粉多糖类物质,主要包括果胶、豆胶、树胶及部分纤维素等,广泛存在于各种果蔬植物中,可溶于水形成黏性溶液,常作为增稠剂、乳化剂添加到食品中。不可溶性膳食纤维则是指既不能够溶解于水,也无法被人体肠道微生物酵解的物质,主要包括纤维素、半纤维素和木质素等,广泛存在于植物的根、茎、叶、皮中,具有良好的持水性和溶胀性。

膳食纤维被誉为人体的第七大营养素,其形成的凝胶体可延长在人体胃部时间,放慢人体消化和吸收营养速度,增加饱腹感,维持人体体重。此外,膳食纤维可以吸附人体摄入的胆固醇、葡萄糖等^[21],从而降低糖尿病、心脑血管疾病的发生。在经过大肠时,膳食纤维有助于粪便短链脂肪酸增加、吸收有害物

质^[22],减少便秘,预防结肠癌、肠癌等风险,维持肠道健康。

1.4 维生素C

维生素C,又称抗坏血酸,是一种水溶性维生素,广泛存在于各种果蔬中,其中猕猴桃、刺梨、枣、辣椒等是典型的富含维生素C的果蔬。维生素C具有较强的抗氧化性,可清除体内自由基,具有抗炎、抗氧化、抗高血压和血管保护作用^[23]。还有研究表明,通过新鲜果蔬获得的维生素C可以降低II型糖尿病患者的甘油三酯、总胆固醇和非高密度脂蛋白水平^[24]。

2 非热加工技术对果蔬功能成分的影响

2.1 高压处理对果蔬功能成分的影响

高压处理 (High Pressure Processing, HPP), 也称高静水压力处理或超高压处理,其压力范围通常在50~1 000 MPa之间,压力超过100 MPa时称为超高压。高压加工技术是将样品置于密闭的超高压容器中,用液体作为介质对样品施以压力。这种处理方式会对高分子的立体结构产生影响,如氢键、离子键和疏水键等非共价键^[25],但不会对低分子量的成分物质,如维生素、氨基酸、多酚等造成破坏。因此,这种技术可以使果蔬在加工时保持良好的营养价值、色泽和风味,属于非热加工技术 (图2)^[25]。

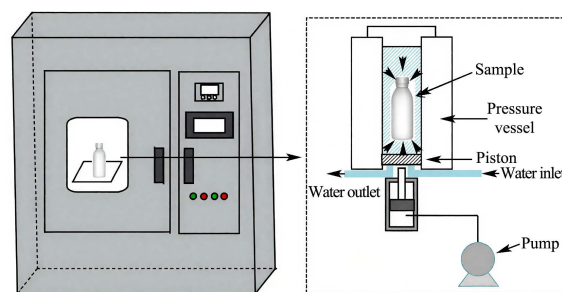


图2 高压处理技术处理样品示意图

Fig.2 Schematic diagram of high-pressure processing technology for sample treatment

高压处理可以破坏细胞中的大分子结构,有利于酚类化合物等小分子渗透到细胞内部,从而提高酚类化合物的产率。崔燕等^[26]以高压均质处理非浓缩还原水蜜桃浊汁时,发现未处理样品的总酚含量为37.37 mg GAE/100 mL。经过20、30、40 MPa处理后,多酚含量分别为48.15、45.70、41.29 mg GAE/100 mL,果汁多酚含量得到显著提升,但并未涉及高压处理时间对多酚含量的影响。Huang等^[27]分别使用高压、高温短时间处理杨桃汁,发现使用高压处理总酚增加了约2.4%。但不同果蔬中由于总酚的种类及含量不

同,经高压处理后多酚含量会呈现出不同变化。使用 450 MPa 处理番茄 5 min,发现酚类物质呈现不同程度的降低,其中阿魏酸和对香豆酸损失超过了近一半^[28]。然而,Kumar 等^[29]经超高压处理苹果汁后发现,总酚含量并未受到显著影响。高压处理后贮藏过程中也会因氧化或酶促反应导致酚类物质的减少。Zhang 等^[30]用高压处理胡萝卜汁后,总酚含量在初期没有明显变化,贮藏 20 d 后,胡萝卜汁的总酚含量减少了 35.8%。因此,为最大程度保留果蔬中多酚成分,需要综合考虑处理样本、处理参数、贮藏条件等多重因素,从而预测和调控果蔬品质变化。

高压处理会一定程度提升果蔬中类胡萝卜素水平。Hu 等^[31]使用 20~80 MPa 压力处理芒果 10 min 后,发现会增加类胡萝卜素的转录水平,胡萝卜素、卵隐黄质和玉米黄质分别是未经处理的 1.42~1.67、1.56~2.00、1.38~2.73 倍。以高静水压处理木瓜时,也可显著提高类胡萝卜素水平,2 d 后,番茄红素含量上升至 11 倍^[32]。Aadil 等^[33]使用不同条件的超高压处理柚子汁后,在 250 MPa、60 °C、3 min 处理条件下的类胡萝卜素含量提升了 136%。

高压处理对果蔬维生素 C 含量的影响,会因均质条件、样品特性的不同而产生不同的维生素 C 保留率。权帆等^[34]处理 (P-200、P-400、P-600 MPa) 复合芹菜果蔬汁时,发现 CK 组样品和 P-200 组样品的维生素 C 含量呈显著下降趋势,P-400 组和 P-600 组变化不明显 ($P > 0.05$),说明高压需达到一定强度才能有效抑制与维生素 C 降解相关的酶活或微生物代谢。Monika 等^[35]统计了高压处理对水果和蔬菜产生的影响,发现与热处理产品相比,高压处理有更好的维生素 C 保留率 (水果产品 79%~99%,蔬菜产品 67%~93%),有效避免了热加工导致的维生素 C 分解。

不同果蔬经高压处理后,因含有的膳食纤维类型、结构、含量及处理压力不同会产生不同变化^[36]。如将水蜜桃油汁高压处理后,以高于 20 MPa 压力处理后,可溶性果胶含量显著提高,含量为未处理组的 1.07~1.25 倍^[26]。以 20~100 MPa 处理 NFC 橙汁,纤维素等大物质分子量 (Molecular Weight, M_w) 降低 1.45%~21.9%,果胶等可溶性膳食纤维的 M_w 降低 9.1%~76.4%^[37],但作者并未从分子层面去分析施加压力后对纤维网状结构的影响。将鲜切胡萝卜高压处理后,碱性果胶含量增加,水溶性果胶含量下降;当压力 < 300 MPa 时,螯合性果胶含量增加,水溶性果胶含量下降;当压力 > 300 MPa 时,水溶性果胶含量增加,螯合性果胶含量下降^[38]。

2.2 超声波处理对果蔬功能成分的影响

超声波 (Ultrasound) 是频率高于 20 kHz 的机械波,能够穿透气体、液体或固体介质。超声波根据能量强度分为低强度超声 (20 kHz~1 MHz) 和高强度超声 (> 1 MHz)。低强度超声主要用于食品理化性质检验方面。高强度超声会产生机械作用场、声热作用场、声化学作用场等 3 个声场^[39],从而对果蔬的理化特性、功能特性产生影响。

超声波处理果蔬可通过空化作用破坏细胞壁结构,从而提高酚类物质的提取率。Lucia 等^[40]采用 40 kHz 超声辅助处理高益生元草莓汁后,与对照组相比,总酚含量显著提升 ($P < 0.05$);在储存过程中,总酚含量持续保持高水平,较未处理组提高 25% 以上。Nayak 等^[41]利用 44 kHz, 30 °C 超声处理苹果汁,随着处理样品时间的延长 (15、30、45、60 min),多酚的含量分别为 401.25、441.19、449.29、456.34 mg GAE·L⁻¹ (对照为 407.91 mg CE·L⁻¹),总类黄酮含量为 330.14、352.18、360.14、367.27 mg CE·L⁻¹ (对照为 331.84 mg CE·L⁻¹)。利用超声能够促进活性成分释放的原理,也有研究从如茄子皮^[42]、椰子皮^[43]等副产物实现酚类化合物的快速高效提取。

超声波处理会提高类胡萝卜素的提取效率。Carvalho 等^[44]用 0、0.9、1.8、2.7、3.6 kJ·cm⁻³ 能力密度的超声波处理布里提果汁,结果显示类胡萝卜素浓度显著提高,且随着超声波能量密度的增加,类胡萝卜素的浓度也相应提高。Gao 等^[45]利用超声波 (20~25 kHz、87.52 W·cm⁻²、10 °C、15 min) 处理番茄汁时发现,总类胡萝卜素、总番茄红素、总 β -胡萝卜素和总叶黄素的含量显著增加,在 10 min 时增幅最大,为 7.97%,随后 30 min 逐渐下降。在整个超声波处理过程中,9,13-双-顺式-和 9'-顺式-番茄红素含量基本没有变化;而 5'-顺式-番茄红素含量在处理为 5 min 时有所降低,但当处理时间延长至 30 min 时又回升至对照样品水平。说明超声波处理会导致类胡萝卜素发生单体特异性的降解。同样地,当研究超声对番石榴汁中番茄红素的影响时发现,以 15 W·cm⁻² 超声处理 9 min 后番茄红素含量降低了 46.26%^[39]。

超声处理可以有效保留果蔬汁中的维生素 C。Gao 等^[45]研究发现采用超声处理 (10 °C, 5 min) 鲜榨番茄汁,其中维生素 C 含量由 13.76 mg/100 mL 增加到 16.66 mg/100 mL;但继续延长超声时间,其维生素 C 含量没有显著变化 ($P < 0.05$)。但维生素 C 也易受到体系中溶解氧及超声波的功率、时间、温度等因素影响。Nayak 等^[40]超声 (30 °C, 15 min) 处理苹果汁时,

发现维生素 C 含量 $5.67 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 较未处理组 $6.24 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 低, 在此条件下超声处理维生素 C 比未处理组低, 可能超声引起的气泡爆炸导致维生素的降解; 当以 40°C 处理 60 min 时, 维生素 C 含量 $6.83 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 达到最高, 在此条件下果汁中氧分子被消除, 从而有利于维生素的提取。

超声处理可以通过钝化果蔬多聚半乳糖醛酸酶、果胶甲基酯酶等活性, 减少膳食纤维成分的降解。Abid 等^[46]、郑炯等^[47]用超声分别处理苹果汁、西瓜汁均发现样品粘度增大, 论证了超声处理技术可有效降低果蔬中果胶等膳食纤维成分的降解。此外, 超声技术可作为辅助手段提取果蔬副产物中的果胶等膳食纤维。白小东等^[48]采用超声辅助提取南瓜皮中果胶发现, 得到果胶提取率为 13.89% , 提取效率显著提升。

2.3 冷等离子体处理对果蔬功能成分的影响

冷等离子体 (Cold Plasma) 是一种温度接近室温 ($30\sim 60^\circ\text{C}$) 的等离子体状态^[49]。等离子体是一种高度活跃且独特的物质状态, 通过使用高度电压使气体分子电离, 从而产生各种活性物质, 包括电子、离子 (带正电荷和负电荷)、自由基、基态和激发态, 发生装置原理如图 3 所示^[50]。尽管等离子体包含带电粒子, 但整体呈电中性。根据等离子体是否处于热力学平衡状态及电离程度, 可以将其分为高温等离子体和低温等离子体。高温等离子体呈完全电离状态, 整体温度可达 $100\sim 10\,000$ 万 K。低温等离子体则处于部分电离或未电离状态, 可进一步分为热等离子体 (2 万 K) 和冷等离子体。在食品加工领域中通常采用冷等离子体技术。

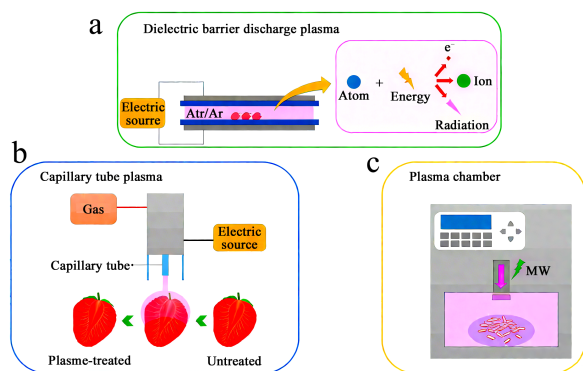


图 3 等离子体技术处理样品示意图

Fig.3 Schematic diagram of plasma technology treatment sample

注: a 为介质屏障放电, b 为等离子体, c 为等离子室。

从冷等离子体处理对果蔬多酚成分的影响研究来看, 处理之后可在一定程度上诱导酚类物质生成。

Herceg 等^[51]发现用等离子体处理新鲜果汁, 多酚含量高于未处理组 33.03% 。Dong 等^[52]研究表明, 用冷等离子体设备处理的蓝莓通过增加处理时间 (高达 10 min), 在储存前期可诱导多酚合成, 花青素含量较对照组提高 2.2 倍; 但在贮藏过程中, 增加的酚类物质含量逐渐降低。Li 等^[53]利用冷等离子体处理鲜切火龙果, 发现该处理可诱导酚类物质相关基因的表达, 从而促使其中的多酚成分增加。但采用 He 等离子体处理洋葱粉, 其中槲皮素的含量不受影响^[54]。也有研究发现, 随着冷等离子体激发频率的增加 (从 200 Hz 到 960 Hz) 花青素含量的显著降低^[55]。说明等离子气体组成、激发频率也会影响多酚的变化。此外需要根据样品的特性, 选择合适的等离子体处理条件。当样品体积、气体流量和处理时间分别设置为 4 cm^3 、 $0.75 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 和 5 min 时, 石榴汁中的鞣花酸增加幅度最大。当气体流量为 $20 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 处理时间为 15 min 时, 紫红果中酚类物质的含量最高^[56]。对混合果蔬汁的研究发现, 处理时间为 90 和 120 s 时, 总酚含量均会出现增加^[57]。冷等离子体处理对果蔬多酚的影响如表 1 所示。

果蔬类胡萝卜素含量与冷等离子体处理时的气体流量、处理时间等有关。Silveira 等^[58]对番石榴风味乳饮料进行冷等离子体处理后, 发现巴氏杀菌后类胡萝卜素含量为 $0.33 \text{ mg}/100 \text{ mL}$, 经等离子体处理后类胡萝卜素为 $0.34\sim 0.85 \text{ mg}/100 \text{ mL}$, 随着气体流速的增加和处理时间的延长, 类胡萝卜素的含量呈现出显著的上升趋势。

采用冷等离子体处理果蔬能够更好保留维生素 C 含量, 但受处理时间、激发频率等因素导致保留率不同。Chen 等^[59]对鲜切梨进行空白、 NaClO 、 6 、 8 和 10 kV 冷等离子体发现抗坏血酸含量分别降低了 55.58% 、 43.16% 、 51.56% 、 59.28% 和 28.52% , 说明使用冷等离子体处理能更好保留维生素 C。同样地, Mehta 等^[60]对比了热加工与超声、紫外、大气冷等离子体对番茄基饮料的影响, 发现所有的加工技术均会对维生素 C 造成降解, 其中冷等离子体维生素 C 保留率最高, 为 95% 。Silveira 等^[58]使用巴氏杀菌时维生素 C 含量 $36.77 \text{ mg}/100 \text{ mL}$, 冷等离子体处理维生素 C 为 $51.27\sim 84.35 \text{ mg}/100 \text{ mL}$, 处理时间为 10 min 时含量最高, 10 min 后含量降低。Castro 等^[55]发现冷等离子体处理的果汁维生素 C 浓度均升高, 其中 200 、 420 、 582 和 698 Hz 中, 维生素 C 含量无显著差异, 960 Hz 处理的果汁维生素 C 含量较高, 说明更高的激发频率能够有更好的等离子体稳定性和反应性。

表 1 冷等离子体处理对果蔬功能成分的影响

Table 1 Effect of cold plasma treatment on fuctional compounds in fruits and vegetables

处理样品	电离气体	处理条件	测试条件	对功能成分的影响	参考文献
石榴汁	Ar	4 W, 气体流量 (0.75、1 和 1.25 dm ³ ·min ⁻¹), 时间 (3、5 和 7 min)	—	酚类物质增加了 33.03%	[51]
蓝莓 (完整)	空气	电压 36 V, 电流 1.8 A, 时间 10 min	25 ℃, 20 d	在 6~8 min 维持在较高水平, 总花青素含量较对照提高 2.2 倍	[52]
火龙果 (鲜切)	空气	电压 60 kV, 5 min	15 ℃, 48 h	酚类化合物和多酚合成相关基因有所增加	[53]
洋葱粉	He	400 W, 2.45 GHz, 气体流量 1 L·min ⁻¹ , 0.7 kPa, 40 min	4、25 ℃处理 28 d	对槲皮素的含量无影响	[54]
木瓜汁	空气	200~960 Hz, 15 min	—	随着等离子体激发频率的增加, 酚类和单体花青素含量降低	[55]
紫红果汁	N2	气体流量 (10、20、30 mL·min ⁻¹), 时间 (5、10、15 min)	—	总酚含量有所增加	[56]
橙子、番茄、苹果、樱桃汁	干空气	25 kHz, 650 W, 时间 30~120 s	—	酚类含量提高 10%~15%	[57]
番石榴饮料	N2	400 W 和 50 kHz, 5 m ³ ·min ⁻¹	10、20 和 30 mL·min ⁻¹ 处理 5、10 和 15 min	类胡萝卜素含量比巴氏杀菌乳饮料高出 24% 至 157%	[58]
鲜切梨	空气	空白、NaClO、6、8 和 10 kV 冷等离子体	4 ℃, 12 d	等离子体处理, 抗坏血酸保留率最高	[59]
番茄基饮料	空气	260 V、60 kV、50 Hz 条件下处理 10、15 min	4~8 ℃	维生素 C 保留率达 95%	[60]
木瓜汁	空气	200~960 Hz, 15 min	—	高激发频率维生素 C 保留率更高	[55]
杏	空气	750 W, 0、20、40 和 60 s	4 ℃, 7 d	能有效抑制果胶组分的降解, 延缓水溶性果胶 (WSP) 和铁溶性果胶 (ISP) 含量的增加	[61]

冷等离子体能够有效减少果胶成分的降解, 从而延缓果蔬质地软化。Liu 等^[61]对杏采用冷等离子体发现, 与对照组相比, 处理 20、40 和 60 s 后, 杏果实硬度分别增加了 49%、31% 和 30%。这是因为冷等离子体处理延缓了杏中水溶性果胶和铁溶性果胶含量的上升, 同时减少共价性果胶含量的下降, 使果实硬度增强。

2.4 脉冲电场处理对果蔬功能成分的影响

脉冲电场技术 (Pulsed Electric Field) 的基本原理是利用高强度电场产生的短暂脉冲, 持续时间从微秒到毫秒, 电场强度一般在 10~80 kV·cm⁻¹ 之间^[62]。脉冲电场对于处理样品的作用机制有电穿孔、电崩解和自由基理论等观点 (如图 4 所示)^[63]。Tsong^[64]认为当样品两端被施加瞬时、高频、高强的电压差时, 组织细胞膜内外的跨膜电压如果超过膜的承受极限, 就会产生细胞电穿孔效应 (如图 4a 所示)。Zimmerann^[65]等将细胞看作一个电容器, 在施加外电场时, 细胞膜两端会积累大量电荷相反的离子而产生挤压力, 当电位达到崩解电位差 (0.5~1.5 V), 此时挤压力大于膜的恢复力, 细胞膜破裂 (如图 4b 所示)。自由基理论则认

为, 电极间的水分子会通过电解产生大量超氧阴离子自由基, 形成的羟基自由基会破坏细胞膜的脂质, 细胞膜在这种电场持续作用下, 从而细胞膜破裂, 促进细胞内容为的释放 (如图 4c 所示)。其中电穿孔的作用机制被多数学者认可。总之, 与传统热加工方式相比, 脉冲电场技术具有非热、高效、低能耗、高营养保留率等特点。

脉冲电场技术由于改变了细胞膜的渗透性, 能够使功能成分更容易转移到果蔬汁液中, 从而增加多酚等功能成分的含量。分别使用脉冲电场处理蓝莓 (1.32 bar, 8 min)^[66]、橙汁^[67], 发现蓝莓汁花青素总含量增加了 55%, 橙汁酚类物质增加了 13.95%。但酚类成分的保留情况受到脉冲电场极性影响。Odriozola 等^[68]研究表明, 与单极模式相比, 采用双极模式脉冲电场处理草莓汁, 总花青素的保留量更高。

脉冲电场处理可有效促进果蔬类胡萝卜素的溶出。Muhammad 等^[69]发现, 当菠菜汁在脉冲频率 1 kHz、流速 60 mL·cm⁻¹、电场强度 9 kV·cm⁻¹、时间 335 μs 条件下处理后, 其类胡萝卜素含量较对照组显著提升。Fakhreddin^[70]发现经电场处理的西柚汁中胡萝卜素含

量有所增加。Rybak 等^[71]对甜椒进行脉冲电场预处理后,发现处理后的甜椒经过喷雾干燥后具有更高的类胡萝卜素保留率。

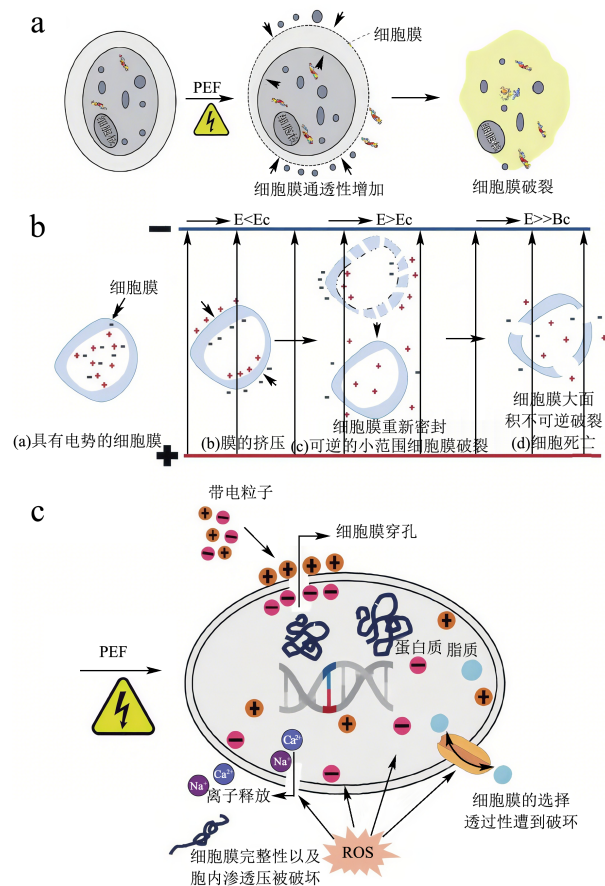


图4 脉冲电场作用机理

Fig.4 Mechanism of pulsed electric field

脉冲电场处理较其他热处理方式,能更有效保留果蔬中维生素C的活性。Elez 等^[72]对柑橘汁分别采用脉冲电场、巴氏杀菌处理后发现,两种处理方式均会使维生素C含量降低,但脉冲电场处理的维生素C含量仅下降了8%,显著低于巴氏杀菌的17.2%。此外,维生素C的保留率还与电场的极性模式、强度、脉冲频率和脉宽等参数密切相关。Pena 等^[73]发现,在双极模式下,采用较低的电场强度、处理时间、脉冲频率和宽度进行处理,样品的维生素C浓度保留率可达到84.5%~97.1%;Torregrosa 等^[74]在处理橙子-胡萝卜混合汁时发现,随着电场的增强和时间的延长($25\sim 40\text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$, $30\sim 340\text{ ms}$),维生素C含量呈现下降趋势。

脉冲电场处理能够提升细胞组分的渗透性,从而使果胶含量增加。对橙子进行脉冲电场后发现,果汁中的果胶含量增加了18.4%^[75]。Rayman 使用脉冲电场生产胡萝卜汁,果胶含量较对照增加了14.78%^[76]。

3 总结与展望

非热技术处理相较于热处理技术,能够在不破坏果蔬细胞结构的前提下,对果蔬中的多酚、类胡萝卜素、维生素C、膳食纤维等成分产生显著影响。高压处理通过破坏细胞大分子结构,促使小分子化合物渗透,总体上可提高果蔬中酚类化合物、类胡萝卜素水平,对维生素C的保留效果优于热处理,对膳食纤维的影响因果蔬种类和压力条件而异;超声波处理通过空化作用破坏细胞壁,提高酚类物质和类胡萝卜素的提取效率,有效保留维生素C,还能减少膳食纤维成分的降解;冷等离子体通过高压电离空气产生活性物质,可在一定程度上诱导酚类物质生成,提升类胡萝卜素含量,更好地保留维生素C,延缓果蔬质地软化;脉冲电场处理通过电穿孔机制改变细胞膜渗透性,增加多酚等功能成分的含量,促进类胡萝卜素的溶出,有效保留维生素C活性,提升果胶含量。几种非热加工技术在果蔬保鲜、贮藏、加工等领域都具有较好的应用前景。

但在该领域还存在着一系列问题与挑战:1) 非热技术对果蔬活性成分的影响受多种因素的制约,因此还需要更多研究人员深入探究果蔬种类、果蔬功能成分、结构及含量、非热技术处理方式及相应参数设置等因素,对果蔬功能成分的影响规律,以形成更加系统全面的结论,从而实现非热加工技术的正向化利用;2) 非热处理对果蔬功能成分的影响机制大多是基于基础理论的推理,在分子学、基因组学、代谢组学、物理学、生物化学等方面缺乏更加具体有力、系统科学的论证,有待于今后开展更多该方向的研究;3) 非热技术在果蔬领域展现的优势不言而喻,今后应探索非热技术与其他物理或化学方式联合协同应用机制,从而满足果蔬功能品质的全面提升;4) 非热技术目前大多处于实验室研究阶段,在工业层面应用还面临设备成本高昂、物料普适性差、样品处理量少等问题,且后续大规模应用就要考虑参数优化、节能降耗以及安全风险等。因此,非热加工技术的推广和应用还需要大量的科学理论和装备技术作基础。

参考文献

- [1] 联合国粮食及农业组织.粮农组织统计数据库[DB/OL].(2024-03-25)[2024-04-15]. <https://www.fao.org/faostat/zh/#data/WCAD>.
- [2] SAUD S, TANG X, FAHAD S. The consequences of fermentation metabolism on the qualitative qualities and biological activity of fermented fruit and vegetable juices [J]. Food Chemistry: X, 2024,

- 21: 101209.
- [3] LAN T, WANG J Q, BAO S H, et al. Effects and impacts of technical processing units on the nutrients and functional components of fruit and vegetable juice [J]. Food Research International, 2023 ,168: 112784.
- [4] GIAMPIERI F, BATTINO M. Bioactive phytochemicals and functional food ingredients in fruits and vegetables [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2020, 21(9): 3278.
- [5] 毛相朝,李娇,陈昭慧.非热加工技术对食品内源酶的控制研究进展[J].中国食品学报,2021,21(12):1-13.
- [6] IQBAL A, MURTAZA A, HU W, et al. Activation and inactivation mechanisms of polyphenol oxidase during thermal and non-thermal methods of food processing [J]. Food and Bioproducts Processing, 2019, 117: 170-182.
- [7] HE X, CHEN L, PU Y, et al. Fruit and vegetable polyphenols as natural bioactive inhibitors of pancreatic lipase and cholesterol esterase: Inhibition mechanisms, polyphenol influences, application challenges [J]. Food Bioscience, 2023, 55: 103054.
- [8] ALEXIS M, JESSICA T, JEANPAUL C, et al. *Ex vivo* antioxidant capacities of fruit and vegetable juices. potential *in vivo* extrapolation [J]. Antioxidants, 2021, 10(5): 770.
- [9] ZAGOSKINA V N, ZUBOVA Y M, NECHAEVA L T, et al. Polyphenols in plants: structure, biosynthesis, abiotic stress regulation, and practical applications (review) [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(18): 25.
- [10] AGUIAR J, GONCALVES L J, ALVES L V, et al. Chemical fingerprint of free polyphenols and antioxidant activity in dietary fruits and vegetables using a non-targeted approach based on quechers ultrasound-assisted extraction combined with UHPLC-PDA [J]. Antioxidants, 2020, 9(4): 305.
- [11] 赖灯妮,覃思,赵玲艳,等.果蔬中多酚类化合物双向调控Nrf2/Keap1信号通路的研究进展[J].食品科学,2018,39(5):311-320.
- [12] WOJCIAK M, DROZDOWSKI P, KAMINSKA SA, et al. Protective, anti-inflammatory, and anti-aging effects of soy isoflavones on skin cells: an overview of *in vitro* and *in vivo* studies [J]. Molecules, 2024, 29(23): 5790.
- [13] MOHD C J A C Z, WAN I M W M, KARIM A N K, et al. Effects of fruit and vegetable polyphenols on the glycemic control and metabolic parameters in type 2 diabetes mellitus: A review [J]. Preventive Nutrition and Food Science, 2022, 27(3): 257-264.
- [14] BEJENARU E L, BITA A, BELU I, et al. Resveratrol: A review on the biological activity and applications [J]. Applied Sciences, 2024, 14(11): 14114534.
- [15] CLAUDIA D, IVAN T, G L N, et al. Pecans and its polyphenols prevent obesity, hepatic steatosis and diabetes by reducing dysbiosis, inflammation, and increasing energy expenditure in mice fed a high-fat diet [J]. Nutrients, 2023, 15(11): 15112591.
- [16] 任建敏.类胡萝卜素结构及在动植物中的功能与生理活性[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2021,38(2):102-107.
- [17] KHAZAEI M, KHAZAEI R M, KADIVARIAN S, et al. Vitamin A-loaded decellularized kidney capsule promoted wound healing in rat [J]. Regenerative Therapy, 2024, 26: 867-878.
- [18] KULAWIK A, PIONTEK C J, CZERNY B, et al. The relationship between lycopene and metabolic diseases [J]. Nutrients, 2024, 16(21): 3708.
- [19] JAYAKANTHAN M, MANOCHKUMAR J, EFFERTH T, et al. Lutein, a versatile carotenoid: insight on neuroprotective potential and recent advances [J]. Phytomedicine, 2024, 135: 156185.
- [20] 周元,张船,孙雪阳,等.乳酸菌发酵对猕猴桃果渣可溶性膳食纤维制备和理化性质的影响[J].现代食品科技,2025,41(10):64-73.
- [21] 何玲玲,刘彩华,胡秦佳宝,等.乳酸菌发酵辅助酶法制备香蕉皮可溶性膳食纤维及功能性质分析[J].现代食品科技,2025, 41(10):109-117.
- [22] 何大杓,孙若男,刘坡,等.桃渣膳食纤维消化与发酵特性研究[J].食品科技,2025,50(4):100-108.
- [23] NARRA F, PIRAGINE E, BENEDETTI G, et al. Impact of thermal processing on polyphenols, carotenoids, glucosinolates, and ascorbic acid in fruit and vegetables and their cardiovascular benefits [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2024, 23(6): e13426.
- [24] TOFFALINI A, VIGOLO N, ROLLI N, et al. Association of low vitamin C concentrations and low consumption of fresh fruit and vegetables with cardiovascular disease in type 2 diabetes [J]. BMC Nutrition, 2025, 11(1): 68.
- [25] SAFWA M S, AHMED T, TALUKDER S, et al. Applications of non-thermal technologies in food processing industries-a review [J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2024, 18: 100917.
- [26] 崔燕,郭加艳,宣晓婷,等.高压均质对NFC水蜜桃浊汁稳定性及品质的影响[J].食品工业科技,2022,43(18):322-330.
- [27] HUANG H W, CHEN B Y, WANG CY. Comparison of high pressure and high temperature short time processing on quality of carambola juice during cold storage [J]. Journal of Food Science&Technology, 2018, 55(5): 1-10.
- [28] JEZ M, WICKZKOWSKI W, ZIELINSKA D, et al. The impact of high pressure processing on the phenolic profile, hydrophilic antioxidant and reducing capacity of purée obtained from commercial tomato varieties [J]. Food Chemistry, 2018, 261: 201-209.
- [29] KUMAR P N, KALPANA R, KESAVAN K R. Quality comparison of elephant apple juices after high-pressure processing and thermal treatment [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(5): 1404-1411.
- [30] ZHANG Y, LIU X C, WANG Y T, et al. Quality comparison of carrot juices processed by highpressure processing and high-temperature short-time processing [J]. Innovative Food Science&Emerging Technologies, 2016, 33: 135-144.
- [31] HU K, PENG D, WANG L, et al. Effect of mild high hydrostatic pressure treatments on physiological and physicochemical characteristics and carotenoid biosynthesis in postharvest mango [J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 172: 111381.
- [32] PERLA A, RAMOS P, CAROLINA G S, et al. High hydrostatic pressure treatments trigger de novo carotenoid biosynthesis in papaya fruit (*Carica papaya* cv. Maradol) [J]. Food Chemistry, 2019, 277: 362-372.

- [33] AADIL R M, ZENG X, JABBAR S, et al. Quality evaluation of grapefruit juice by thermal and high pressure processing treatment [J]. Pakistan Journal of Agricultural Research, 20170, 30(3): 257.
- [34] 权帆,肖志剑,李游,等.超高压技术对芹菜复合果蔬汁品质影响研究[J].中国食品添加剂,2024,35(11):187-193.
- [35] MONIKA M, KAROLIN C, WITOLD P. Impact of innovative technologies on the content of Vitamin C and its bioavailability from processed fruit and vegetable products [J]. Antioxidants, 2021, 10(1): 54.
- [36] LIU J N, BI J F, MCCLEMENTS J D, et al. Impacts of thermal and non-thermal processing on structure and functionality of pectin in fruit- and vegetable- based products: a review [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 250(15): 116890.
- [37] 王子宇. 基于高压均质-超高压联合处理的NFC橙汁流变特性及其贮藏变化研究[D].重庆:西南大学,2024.
- [38] JOSEPHINE A, MICHAEL N. Ultrasound-assisted processing: science, technology and challenges for the plant-based protein industry [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022: 84: 105955.
- [39] 高瑞萍,朱建飞,周文斌,等.超声加工技术对果蔬汁品质影响及其作用机制研究进展[J].食品科学,2022,43(7):326-338.
- [40] LUCIA C, BARBARA T, ROSARIO D M M. Green ultrasound-assisted processing for extending the shelf-life of prebiotic-rich strawberry juices [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(15): 5518-5526.
- [41] NAYAK K P, BASUMATARY B, CHANDRASEKAR M C, et al. Impact of thermosonication and pasteurization on total phenolic contents, total flavonoid contents, antioxidant activity, and vitamin C levels of elephant apple (*Dillenia indica*) juice [J]. Journal of Food Process Engineering, 2020, 43(8): 13447.
- [42] SHIVA M S, MOHAMMAD G, SARA T N. Optimization of bioactive compound extraction from eggplant peel by response surface methodology: ultrasound-assisted solvent qualitative and quantitative effect [J]. Foods, 2022, 11(20): 3263.
- [43] LULUM L, W IDIASTUTI S, MIGUEL P, et al. Optimization of ultrasound-assisted extraction from young coconut mesocarp in the rapid extraction of phenolic compounds and antioxidant activity [J]. Agronomy, 2022, 12(11): 2798.
- [44] CARVALHO S D M L, LEMOS M C M, SANCHES A E, et al. Improvement of the bioaccessibility of bioactive compounds from Amazon fruits treated using high energy ultrasound [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 67: 105148.
- [45] GAO R, YE F, Wang Y, et al. The spatial-temporal working pattern of cold ultrasound treatment in improving the sensory, nutritional and safe quality of unpasteurized raw tomato juice [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 56: 240-253.
- [46] ABID M, JABBAR S, WU T, et al. Sonication enhances polyphenolic compounds, sugars, carotenoids and mineral elements of apple juice [J]. Ultrasonics-Sonochemistry, 2021, 21(1): 93-97.
- [47] 郑炯,龚瑜,曾瑞琪,等.超声波处理对西瓜汁品质的影响[J].食品与发酵工业,2018,44(10):168-174.
- [48] 白小东,程超,牛黎莉,等.响应面法优化超声波辅助提取南瓜皮中果胶的工艺[J].中国食品添加剂,2021,32(4):50-56.
- [49] 王俊鹏,贺稚非,李敏涵,等.冷等离子体技术在蛋白质改性中的应用研究进展[J].食品科学,2021,42(21):299-307.
- [50] MUNEKATA S E P, DOMINGUEZ R, PATEIRO M, et al. Influence of plasma treatment on the polyphenols of food products—a review [J]. Foods, 2020, 9(7): 929.
- [51] HERCEG Z, KOVACEVIC B D, KLJUSURIC G J, et al. Gas phase plasma impact on phenolic compounds in pomegranate juice [J]. Food Chemistry, 2016, 190: 665-672.
- [52] DONG X Y, YANG Y L. A novel approach to enhance blueberry quality during storage using cold plasma at atmospheric air pressure [J]. Food and Bioprocess Technology, 2019, 12(8): 1409-1421.
- [53] Li X A, LI M L, JI N N, et al. Cold plasma treatment induces phenolic accumulation and enhances antioxidant activity in fresh-cut pitaya (*Hylocereus undatus*) fruit [J]. LWT, 2019, 115: 108447.
- [54] KIM E J, OH J Y, WON Y M, et al. Microbial decontamination of onion powder using microwave-powered cold plasma treatments [J]. Food Microbiology, 2017, 62: 112-123.
- [55] CASTRO D G R D, MAR M J, SILVA D S L, et al. Dielectric barrier atmospheric cold plasma applied on camu-camu juice processing: effect of the excitation frequency [J]. Food Research International, 2020, 131: 10904.
- [56] PAIXAO N M L, FONTELES V T, OLIVEIRA S V, et al. Cold plasma effects on functional compounds of siriguela juice [J]. Food and Bioprocess Technology, 2019, 12(1): 110-121.
- [57] GUNAYDIN B D, HAKKI I B. Effect of cold atmospheric plasma on inactivation of escherichia coli and physicochemical properties of apple, orange, tomato Juices, and sour cherry nectar [J]. Food and Bioprocess Technology, 2018, 11(2): 334-343.
- [58] SILVERIA R M, COUTINHO M N, ESMERINO A E, et al. Guava-flavored whey beverage processed by cold plasma technology: bioactive compounds, fatty acid profile and volatile compounds[J]. Food Chemistry, 2018, 279120-279127.
- [59] CHEN C, LIU C, JIANG A L, et al. The effects of cold plasma-activated water treatment on the microbial growth and antioxidant properties of fresh-cut pears [J]. Food and Bioprocess Technology, 2020, 12(11): 1842-1851.
- [60] MEHTA D, ShHANRMA N, BANSAL V, et al. Impact of ultrasonication, ultraviolet and atmospheric cold plasma processing on quality parameters of tomato-based beverage in comparison with thermal processing [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2019, 52: 343-349.
- [61] LIU M P, LI G, ZHANG L B, et al. Cold plasma treatment delays the texture softening of apricot fruit through PAPL-PL-pectin changes [J]. Food Bioscience, 2024, 61: 104693.
- [62] ARSHAD N R, ABDUL Z, MUNIR A, et al. Electrical systems for pulsed electric field applications in the food industry: an engineering perspective [J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 104: 1-13.
- [63] 罗诗茵,聂菁,韩文敏,等.脉冲电场回收农产品加工废料中生物活性物质的研究进展[J].食品工业科技,2024,45(19):392-398.
- [64] TSONG T Y. Voltage modulation of membrane permeability and energy utilization in cells [J]. Bioscience Reports, 1983, 3(6): 487-

- 505.
- [65] ZIMMERMANN U, PILWAT G, BRESGEN D. Dielectric breakdown of cell membranes [J]. *Biophysics of Structure and Mechanism*, 1980, 6(1): 113.
- [66] STUBLER A, LESMES U, JUDJUR A, et al. Impact of pilot-scale processing (thermal, PEF, HPP) on the stability and bioaccessibility of polyphenols and proteins in mixed protein- and polyphenol-rich juice systems [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2020, 64: 102426.
- [67] DEMIRDOVEN A, BAYSAL T. Effects of electrical pre-treatment and alternative heat treatment applications on orange juice production and storage [J]. *Food and Bioprocess Processing*, 2015, 94: 443-452.
- [68] ODRIOZOLA S I, A GUILO A I, SOLIVA F R, et al. Pulsed electric fields processing effects on quality and health-related constituents of plant-based foods [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2013, 29(2): 98-107.
- [69] MUHAMMAD M F, ZAHOR A, NAZIR A, et al. Probing the combined impact of pulsed electric field and ultra-sonication on the quality of spinach juice [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 45: e15475
- [70] FAKHREDDIN S. Physico-chemical properties of fruit and vegetable juices as affected by pulsed electric field: a review [J]. *International Journal of Food Properties*, 2020, 23(1): 1036-1050.
- [71] RYBAK K, SAMBORSKA K, JEDLIŃSKA A, et al. The impact of pulsed electric field pretreatment of bell pepper on the selected properties of spray dried juice [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2020, 65: 102446.
- [72] ELEZ M P, SOLIVA F C R, MARTIN B O. Comparative study on shelf life of orange juice processed by high intensity pulsed electric fields or heat treatment [J]. *European Food Research and Technology*, 2006, 222(3-4): 321-329.
- [73] PENA L M M, WELTI C J, MARTIN B O, et al. Application of novel processing methods for greater retention of functional compounds in fruit-based beverages [J]. *Beverages*, 2016, 2(2): 14.
- [74] TORREGROSA F, ESTEVE M, FRIGOLA A, et al. Ascorbic acid stability during refrigerated storage of orange-carrot juice treated by high pulsed electric field and comparison with pasteurized juice [J]. *Journal of Food Engineering*, 2005, 73(4): 339-345.
- [75] 袁佳璐, 林敏, 周佳, 等. 脉冲电场技术在果蔬汁加工中的研究进展及应用[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(13): 367-376.
- [76] ASLIHAN D T B A R. Optimisation of electroporation application for increased juice yield in carrot juice production [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2021, 46(4): 781-786.