李金洋, 孟秋宇, 王永涛, 等. 猕猴桃汁非热加工技术研究进展 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(17): 15−25. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090119

LI Jinyang, MENG Qiuyu, WANG Yongtao, et al. Research Progress on Non-thermal Processing Technology of Kiwifruit Juice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(17): 15−25. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090119

·特邀主编专栏—果蔬基料制造: 基础理论、新型加工、质量控制与智能制造（客座主编: 徐贞贞、王永涛、李涛; 产业顾问: 李仁杰）·

猕猴桃汁非热加工技术研究进展

李金洋, 孟秋宇[+], 王永涛, 饶　雷[*], 廖小军

（中国农业大学食品科学与营养工程学院, 国家果蔬加工工程技术研究中心, 农业农村部果蔬加工重点实验室, 食品非热加工北京市重点实验室, 北京 100083）

摘　要: 猕猴桃营养价值丰富，但保鲜难、易腐败变质，制汁加工是保留其营养品质的重要途径。传统热加工技术易导致风味劣变和营养损失，非热加工技术为高品质猕猴桃汁的生产提供了新路径。本文综述了超高压、超声和冷等离子体三种非热加工技术的基本原理，系统比较了它们在猕猴桃汁加工过程中对微生物控制、色泽、质构及营养成分的影响。三种技术均能有效杀菌或抑制微生物生长；在色泽方面，超高压和冷等离子体处理具有较好的护色效果，但冷等离子体处理过度可能加剧褐变，超声波处理则易导致果汁在贮藏期间发生褐变；在质构方面，超声波处理能提高果汁的表观粘度和稳定性，冷等离子体处理会降低粘度但提升稳定性，而超高压处理则使粘度呈现先上升后下降的趋势；在营养成分保留方面，冷等离子体处理引起的维生素 C 损失率最低，超声波处理损失率最高，且两者均会导致蔗糖降解，酚类物质的变化则与处理强度、时间及物质种类有关。此外，本文还探讨了上述三种技术对猕猴桃汁致敏性的潜在调控作用。鉴于单一非热加工技术均存在一定的优势与局限性，未来研究应致力于开发多种技术协同应用模式，构建全程非热加工工艺体系，突破单一技术的应用瓶颈，进一步推动非热技术在猕猴桃加工产业中的应用。

关键词: 猕猴桃汁, 制汁加工, 非热技术, 微生物安全, 营养成分, 感官品质

中图分类号: TS255.44　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)17−0015−11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090119　　**本文网刊:**

Research Progress on Non-thermal Processing Technology of Kiwifruit Juice

LI Jinyang, MENG Qiuyu[+], WANG Yongtao, RAO Lei[*], LIAO Xiaojun

（College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, National Engineering Research Center for Fruit & Vegetable Processing, Key Laboratory of Fruit & Vegetable Processing, Ministry of Agriculture and Rual Affairs, Beijing Key Laboratory for Food Non-thermal Processing, Beijing 100083, China）

Abstract: Kiwifruit is rich in nutritional value but is difficult to preserve and prone to spoilage. Processing it into juice is an important approach to retaining its nutritional quality. Traditional thermal processing techniques can easily lead to flavor deterioration and nutrient loss, while non-thermal processing technologies provide a new pathway for producing high-quality kiwifruit juice. This review summarizes the basic principles of three non-thermal processing technologies—high pressure processing, ultrasound, and cold plasma—and systematically compared their effects on microbial control, color, texture, and nutritional components during kiwifruit juice processing. All three technologies can effectively sterilize or inhibit microbial growth. In terms of color, high pressure processing and cold plasma treatments exhibit better color preser-

收稿日期: 2025−09−12　　+并列第一作者

基金项目: “十四五”国家重点研发计划重点专项（2023YFD2100303）。

作者简介: 李金洋（2001−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬非热加工, E-mail: sy20243061529@cau.edu.cn。

孟秋宇（1999−）, 女, 博士研究生, 研究方向: 食品微生物安全控制, E-mail: mengqiuyu6364@163.com。

*** 通信作者:** 饶雷（1989−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 非热加工与微生物安全, E-mail: rao.lei@cau.edu.cn。

vation, although excessive cold plasma treatment is found to potentially accelerate browning, while ultrasound treatment tends to induce browning during storage. Regarding texture, ultrasound treatment is shown to enhance the apparent viscosity and stability of the juice, cold plasma treatment reduces viscosity but improves stability, and high pressure processing treatment demonstrates a trend of initially increasing and then decreasing viscosity. In terms of nutrient retention, cold plasma treatment results in the lowest loss rate of vitamin C, whereas ultrasound treatment leads to the highest loss rate. Both technologies are also observed to cause sucrose degradation, while changes in phenolic compounds depends on treatment intensity, duration, and the specific type of compound. Furthermore, this study explore the potential regulatory effects of these three technologies on kiwifruit juice allergenicity. Given that each individual non-thermal processing technology possesses distinct advantages and limitations, future research should focus on developing synergistic application models integrating multiple techniques. Establishing a comprehensive non-thermal processing system will overcome the application bottlenecks of single technologies and further advance the adoption of non-thermal techniques in the kiwifruit processing industry.

Key words: kiwifruit juice; juice processing; non-thermal technologies; microbial safety; nutritional components; sensory quality

猕猴桃(*Actinidia* spp.)是猕猴桃科多年生藤本攀援植物[1],全球现有品种超过 70 个,其中“中国猕猴桃”(*A. chinensis*)与“美味猕猴桃”(*A. deliciosa*)最具商业栽培价值[2]。自 20 世纪初新西兰成功引入中国猕猴桃种子并培育出‘海沃德’品种后,猕猴桃产业逐步迈向国际市场[3]。据联合国粮食及农业组织 2024 年数据显示,中国是全球最大猕猴桃产区,种植面积达 29.2 万公顷,占全球总种植面积的 68%[4]。猕猴桃营养价值丰富,成人每日食用 1~2 枚即可满足维生素 C 的推荐摄入量[5]。与橙子、苹果和桃子等常见水果相比,猕猴桃总酚含量更高,具有优异的抗炎、抗癌和抗氧化活性[6−7]。在猕猴桃果实中,果肉富含维生素 C、矿物质、可溶性糖、有机酸及多酚类物质,是膳食抗氧化成分和膳食纤维的重要来源[8];胎座作为果实的核心部分,富含猕猴桃蛋白酶和多酚类物质,且作为膳食纤维集中分布区,具有促进消化和补充膳食纤维的功能[8];果皮富含膳食纤维、有机酸、维生素 E 同系物和多酚衍生物[9]。其中,膳食纤维主要包括具有良好的增稠和乳化稳定性的果胶和有助于调节肠道菌群的纤维素,因此,果皮可作为优质的食品加工辅料[9];种子集中贮藏以 α-亚麻酸为主的多不饱和脂肪酸、优质蛋白质以及多酚类物质,是高价值功能性油脂、植物蛋白以及天然抗氧化物质的良好来源[10](图 1)。

随着猕猴桃产量的持续增长和鲜果不易贮藏特性的限制,深加工已成为推动猕猴桃高值化利用、满足现代消费需求的必然选择[11]。猕猴桃主要深加工产品包括果汁、果酱、果干和果酒等[5],其中果汁能最大程度保留新鲜猕猴桃的营养和风味[12]。研究表明,猕猴桃汁可通过提高拟杆菌和疣分枝杆菌的相对丰度,调节肠道菌群、改善菌群失调[13],其抗癌活性物质效果约为柠檬的四倍,表现出更强的综合抗致癌潜力[14]。在猕猴桃汁的生产加工过程中,杀菌是确保产品货架期安全和稳定性的关键环节,其效果直接影响果汁的产品状态和保质期[12]。传统热加工技术虽能有效杀菌,但易引发颜色褐变、维生素 C 损失、生物活性成分降解及风味劣变等,严重影响产品的营养价值和消费接受度[11−14]。

非热加工技术在保证果汁微生物安全性前提下,能更有效保持其营养和品质[15]。因此,超高压(high hydrostatic pressure, HHP)、超声波(ultrasound, US)和冷等离子体(cold plasma, CP)等非热加工技术具有成为替代热加工技术的潜力,能够解决猕猴桃汁热加工中风味劣变和品质损失的问题[16]。研究表明,HHP 处理可增强猕猴桃汁亮度、抑制褐变,有效保持总维生素 C 及还原型维生素 C 活性,同时提升多酚含

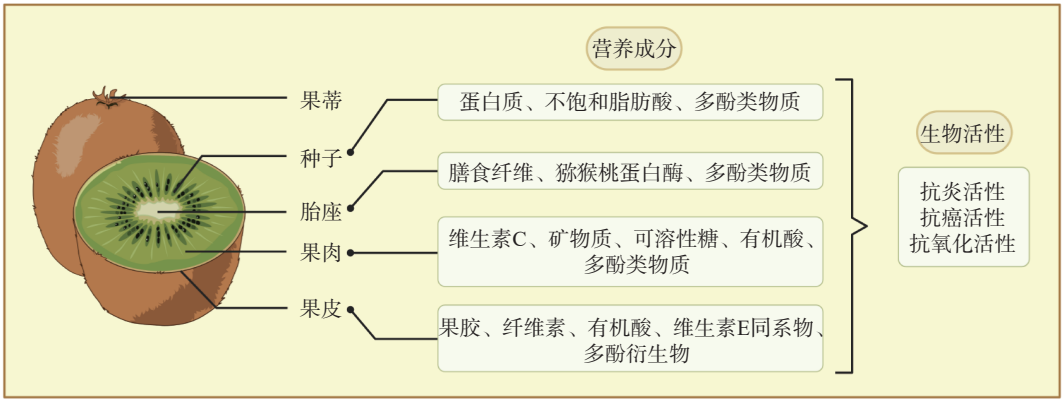


图 1 猕猴桃果实剖面及其主要营养物质与生物活性成分

Fig.1 Kiwifruit anatomy and its principal nutritional and bioactive components

量，增强降血糖、降血压等生理活性[17−19]。CP 处理在优化条件下可有效抑制过氧化物酶活性，从而避免维生素 C 和类黄酮等功能性成分的降解[20]。US 处理不仅能有效保留猕猴桃汁中的主要营养成分和生物活性物质，还能降低腐败乳酸菌数量，满足美国 FDA 对果汁加工安全性的要求[21]。此外，US 处理还可降解果汁中的氯吡脲等农药残留，提高产品安全性[22]。本文旨在归纳总结非热加工技术在猕猴桃汁加工中的应用现状，重点解析超高压、超声波、冷等离子体等非热加工技术对猕猴桃汁中微生物的杀灭效果，阐明其对维生素 C、多酚类物质等关键营养组分与感官品质的影响规律，为开发高品质、高安全性的猕猴桃汁绿色加工新工艺提供理论依据与技术支撑。

1　猕猴桃汁非热加工技术原理

目前常见的非热加工技术包括超高压（HHP）、超声波（US）、冷等离子体（CP）、紫外线以及感应电场等。其中，在猕猴桃汁加工领域研究较多的是 HHP、US 和 CP 技术，下文将对这三类加工技术的作用原理进行详细介绍。

1.1　超高压技术

HHP 是一种基于多重物理原理的非热加工技术，将食品经柔性包装密封后置于传压介质中，在 100~1000 MPa 压力下进行处理，其核心作用机制遵循勒夏特列原理、帕斯卡原理和分子有序原理[23]。从微观层面，HHP 作用的本质在于通过压缩效应减小分子间的距离，从而影响原子或分子间的化学键。非共价键键程长、易被 HHP 压缩而破坏；而共价键键程极短，HHP 提供的能量不足以对其进行压缩，因此不受 HHP 处理影响（图 2a）。上述理论构成了 HHP 杀菌和维持食品品质的核心理论基础。微生物的细胞膜结构与功能蛋白的空间构象主要由氢键、疏水相互作用等非共价键维持，因此容易被 HHP 破坏而实现杀菌[24−25]。而色素、糖类、有机酸、维生素等与品质相关的小分子物质主要由共价键构成，不易受到 HHP 影响。因此，超高压在实现“冷杀菌”的同时，可以较好地保持食品品质[26−27]。

在 HHP 作用下，微生物细胞膜磷脂双分子层首先发生相变与压缩，导致膜通透性急剧增加，膜蛋白功能丧失，进而引发胞内离子外泄和 ATP 含量降低，最终破坏微生物代谢链使其死亡[28]。此外，微生物中的蛋白质是维持其结构和生理功能的重要组分，在超高压处理下蛋白质变性致使微生物结构被破坏、代谢紊乱，从而杀灭微生物[27]。对于具有较强抗性的芽孢，可通过中等压力诱导其萌发为营养细胞后，再施以更高压力实现彻底灭活[27]。在酶失活过程中，低压

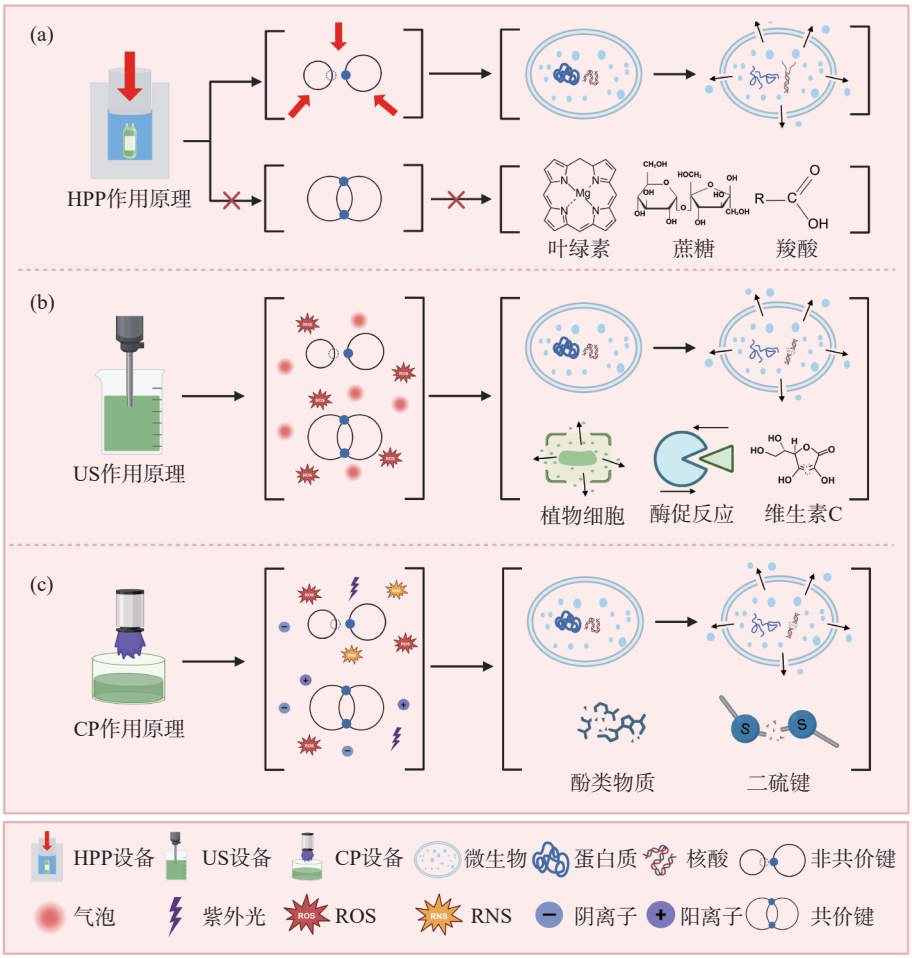


图 2　非热加工技术作用原理

Fig.2　Principles of non-thermal processing technologies

区域分子体积收缩可能短暂激活酶活性，但随着压力持续升高，酶的活性中心疏水核心发生解体，三级结构遭到破坏，从而导致活性丧失且不可逆[29]。HHP 杀菌灭酶效果受压力强度、处理时间、环境温度以及物料含水状态等多重因素的协同影响[23]。

1.2 超声波技术

US 的作用原理主要依赖于空化效应，即超声波在液体中传播时产生的高频振动引发微小气泡的剧烈形成、振荡和崩溃[30]。这一过程伴随瞬时高温、高压和强烈的机械剪切力，直接破坏微生物细胞膜结构，导致胞内物质泄漏和细胞死亡[31]。同时，空化效应会促使水分子裂解生成羟基自由基、超氧阴离子等活性氧（reactive oxygen species，ROS）物质，ROS 与空化效应可协同破坏微生物细胞膜和功能蛋白中的非共价键，致使细胞膜氧化、酶失活及 DNA 断裂[32]（图 2b）。此外，空化微射流和微流体扰动可增强传质效率，提升杀菌效果[32]。US 技术常与其他物理化学方法联用，通过多机制协同实现高效杀菌[32]。

在品质保持方面，US 处理利用相同的细胞膜破坏机制选择性作用于细胞壁和液泡，使细胞内的酚类物质释放至果汁中，从而使果汁中的总酚含量上升[33]。同时，US 处理通过增强底物与酶活性位点的接触，促进蔗糖水解等一系列酶促反应[34]。然而，过度处理积累的 ROS 可能破坏分子结构中含有不饱和键的化合物，例如具有烯二醇结构的维生素 C 等，引起其氧化降解，从而降低抗氧化活性[35]（图 2b）。

1.3 冷等离子体技术

CP 是一种含有大量活性物质的电离气体，通常在常温或接近常温下产生，其杀菌机制主要归为以下 4 点[36]：a.电离激发的 ROS 和活性氮（reactive nitrogen species，RNS）可破坏微生物细胞膜的完整性、氧化其蛋白质与 DNA，导致功能丧失与死亡；b.等离子体在放电过程中可释放短波紫外光，具有杀菌效果，能破坏微生物的核酸结构，诱导突变或细胞死亡；c.电子、离子等带电粒子可直接撞击细胞表面，引起膜破裂、蛋白质变性等物理损伤；d.等离子体在空气中与水分作用时会产生生成硝酸、亚硝酸等酸性物质，使局部环境 pH 降低，进一步破坏细胞膜蛋白的结构与功能[37]（图 2c）。

在品质保持与提升方面，适量的 ROS 能够作为信号分子激活苯丙烷代谢途径中的关键酶，从而激活鲜切果蔬的防御反应，促进酚类化合物的合成[38]。更重要的是，ROS 和 RNS 可以通过氧化含硫氨基酸和破坏二硫键结构，有效抑制果汁加工中多酚氧化酶和过氧化物酶等有害酶的酶活性[39]，从而抑制脂质和酚类氧化，阻止风味恶化和表面褐变引起的变色[40]（图 2c）。然而，ROS 浓度过高时也会攻击果汁中酚类物质的芳香环结构，导致酚类物质的降解[41−43]。降解程度与处理参数正相关，延长处理时间和提高气体流速均加剧酚类物质损失，保留率可降至 70%[44]。因此，在 CP 处理时需要优化其工艺参数、控制 ROS 浓度，减少酚类物质的降解。

2 非热加工对猕猴桃汁微生物的影响

霉菌、酵母菌及细菌均有可能导致猕猴桃汁的腐败。霉菌作为好氧微生物，在低 pH 和高糖环境中易于繁殖，如丝衣霉属[45]；酵母菌具有高耐酸性和厌氧适应性，能够利用果汁中的糖分进行发酵，导致产品浑浊、产气和风味劣变，如接合酵母属[45]。细菌污染中，芽孢形成菌是果汁工业的主要威胁，特别是酸土脂环酸芽孢杆菌等耐热嗜酸芽孢杆菌[46]。病原菌同样对果汁安全构成威胁，尽管果汁长期被认为是相对安全的食品，但未经充分杀菌处理的产品仍存在食源性疾病风险，如大肠杆菌 O157:H7、沙门氏菌和金黄色葡萄球菌是主要病原菌[47−49]。此外，单核细胞增生李斯特菌虽未直接引起果汁相关疫情，但因其在生产线中的强存活能力，仍需重点关注[50]。研究表明，非热加工技术可有效杀灭猕猴桃汁中的微生物（表 1）。

2.1 霉菌和酵母菌

HHP 处理可有效灭活猕猴桃汁中的霉菌和酵母菌（yeasts and molds，YM）[51]。在 500 MPa/10 min 条件下可完全灭活猕猴桃汁中的 YM，产品在 42 d 贮藏期内维持良好的微生物学稳定性[52]。然而，HHP 处理过程中可能产生微生物亚致死损伤现象，损伤的微生物在适宜条件下存在复苏风险。Patrignani 等[51] 研究表明，在 5 ℃ 贮藏条件下，200 MPa 处理 3 次循环可以有效抑制酵母菌复苏，使果汁稳定储存超过 40 d；而处理强度不足可能导致微生物复苏，使酵母菌在贮藏期内恢复生长。CP 处理也可以有效灭活 YM，在 18 kV/4 mm/240 s 处理条件下，可实现扩展青霉 6 log CFU/mL 的杀菌效果，同时对猕猴桃汁品质影响较小[53]。CP 处理的杀灭效率与电压呈正相关，电压的提升可增强酵母菌的失活效果，YM 失活率从 35.91% 提升至 66.66%[54]。相比之下，US 处理在 YM 控制方面效果有限。虽然能一定程度抑制酵母菌的生长，且抑制效果随处理时间延长而增强，但其主要作用在于抑制而非彻底灭活[55]。

2.2 细菌

HHP 处理（550~600 MPa、1~3 min）可对酸性果汁中的大肠杆菌、沙门氏菌和单核细胞增生李斯特菌达到 5 log CFU/mL 以上的灭活效果[56]。在猕猴桃汁的实际应用中，350 MPa，60 s×5 次循环处理即可完全灭活大肠杆菌和无害李斯特菌，杀菌效果优于菠萝汁，这主要归因于猕猴桃汁较低的 pH 与 HHP 处理形成的协同杀菌效应[57]。影响 HHP 杀菌效果的关键因素包括处理方式、介质成分和温度条件。罗仓学等[1] 指出连续加压与间歇加压对猕猴桃汁中微生物灭活效果差异不显著，而向果汁中添加蔗糖会降低微生物致死率，高糖环境可能通过渗透保护效应增强细菌耐压性，因此高糖度果汁需适当增加保压时

表 1　非热加工技术对猕猴桃汁中微生物的影响

Table 1　Impact of non-thermal processing technologies on microorganisms in kiwifruit juice

加工技术	微生物种类	处理条件	杀菌效果	参考文献
HHP	霉菌和酵母菌	500 MPa/10 min	处理后未检出；贮藏期42 d后未检出	[52]
HHP	酵母菌	200 MPa/3次循环，5 ℃贮藏	处理后未检出；贮藏期40 d后未检出	[51]
HHP	酵母菌	200 MPa/2次循环，5 ℃贮藏	处理后未检出；贮藏40 d后：4 log CFU/mL	[51]
HHP	大肠杆菌、沙门氏菌、单核细胞增生李斯特菌	550~600 MPa，1~3 min	均能达到5 log CFU/mL以上	[56]
HHP	大肠杆菌、无害李斯特菌	350 MPa/60 s×5	完全灭活	[57]
US	霉菌和酵母菌	30 min	处理组：2.63 log CFU/mL，对照组：3.06 log CFU/mL；贮藏7 d后，处理组：3.08 log CFU/mL，对照组：4.48 log CFU/mL	[55]
热辅助US	菌落总数	420 W/60 ℃/30 min	杀菌率达到95.68%	[58]
热辅助US	无害李斯特菌	20 kHz/55 ℃/3 min	达到6.2 log CFU/mL以上	[21]
US联合山苍子精油	鼠伤寒沙门氏菌	276 W/cm^2/8 min，0.16 μL/mL山苍子精油	减少6.4 log CFU/mL	[59]
CP	扩展青霉	18 kV/4 mm/240 s	减少6 log CFU/mL	[53]
CP	需氧嗜温菌、酵母和霉菌	30 kV/2 mm/4 min	分别减少3.08 log CFU/mL、2.32 log CFU/mL	[54]
CP	菌落总数	12 kV/18 mm/1 min	杀菌率达到83.97%	[60]
感应电场	霉菌和酵母菌	1800 V/45 kHz/7.7 s	处理后未检出；4 ℃ 贮藏30 d后：0.84 log CFU/mL	[7]
超临界二氧化碳/一氧化二氮	酿酒酵母	10 MPa/35 ℃/15 min	减少5 log CFU/mL	[63]
紫外杀菌	大肠杆菌、霉菌和酵母菌	40 W/16 ℃/53.67 min	杀菌率达到100%	[64]

间，增强杀菌效果。此外，温度与 HHP 协同作用能够提高灭菌效果，猕猴桃汁在 300 MPa/15 min 处理时，30 ℃ 处理组的菌落总数可达到商业无菌要求（GB 19297-2003），而 10 ℃ 处理组仍有 3.9 log CFU/mL 的残留菌[23]。

热辅助 US 利用热效应与空化效应的协同作用，在 420 W/60 ℃/30 min 条件下，可实现高达 95.68% 的杀菌率，且猕猴桃汁的品质保持优于热处理[58]。类似的，Bhutkar 等[21] 进一步证实，温度升高会破坏细胞外膜结构、增强空化效应，在 20 kHz/55 ℃/3 min 条件下，可实现对无害李斯特菌超过 6.2 log CFU/mL 的灭活，且所需的杀菌时间短于热处理。此外，US 处理产生的空化效应能够形成微射流和瞬时高压，有效破坏细菌细胞膜结构，从而为抗菌物质渗透入胞内提供通道，实现协同杀菌作用[32]。研究表明，US 联合山苍子精油处理可对猕猴桃果汁中鼠伤寒沙门氏菌实现高达 6.4 log CFU/mL 的杀菌效果，降低活的不可培养（viable but non-cultivable，VBNC）态细菌的残留水平，但需控制山苍子精油浓度，以免产生不良气味[59]。

CP 在 12 kV 电压下对猕猴桃汁进行 1 min 处理可实现 83.97% 的杀菌率，杀菌效率随电压升高而提升，但液体厚度增加会削弱活性粒子的穿透能力，导致杀菌效率降低[60]。此外，猕猴桃汁中由耐热嗜酸菌属造成的污染仍构成潜在风险[61]。Zhao 等[62] 发现 CP 可对酸土耐热嗜酸芽孢杆菌中的细菌营养体和芽孢实现有效灭活，在 30 kV/6 min 处理下，产生的自由基、带电粒子和紫外光子会破坏细胞膜完整性，导致大量蛋白质（3.12 mg/mL）和核酸泄漏（90.42 ng/mL），使细菌营养体失活，但芽孢外层结构坚固，需联合温和热处理诱导芽孢萌发进入萌发态，随后 CP 可破坏芽孢外层，使吡啶-2,6-二羧酸大量释放，实现对芽孢的杀灭。

非热杀菌技术可在保留猕猴桃汁营养与风味的同时实现高效杀菌，不同技术间可通过协同作用提升灭菌效果。未来应继续关注非热加工技术对耐热耐压菌与 VBNC 态微生物的控制能力及其在工业应用中的优化。

3　非热加工对猕猴桃汁品质的影响

3.1　物理特性

3.1.1　颜色　猕猴桃果肉颜色由所含叶绿素、类胡萝卜素及花青素的种类与比例决定[5]。热杀菌过程中施加的高温会引起由酶促褐变、非酶促褐变和叶绿素降解引起的猕猴桃汁颜色变差，导致果汁原来的亮绿色变成深黄色，严重影响猕猴桃汁感官品质[65]。何易雯等[66] 的研究表明，在 350 MPa/20 min，脱气 18 min 的优化工艺参数下，猕猴桃汁的叶绿素保留率可达 79.1%，说明 HHP 能通过有效保持叶绿素来实现护色效果。邓红等[67] 的后续研究进一步验证了 HHP 的护色效果，其研究显示经 497 MPa 处理的冷破碎猕猴桃果浆总色差 ΔE<0.5，证实了 HHP 处理在维持果浆天然色泽方面的有效性。然而，研究进一步发现，HHP 的护色效果会在贮藏期间发生变化，且低

温贮藏更利于猕猴桃汁的护色。−20 ℃ 冷冻条件下 7 周内褐变度仅增长 8.8%, 优于 4 ℃ 冷藏条件下的 23.5%。这可能是由于贮藏期内 pH 的下降加速叶绿素脱镁反应, 生成褐色脱镁叶绿素, 从而对猕猴桃汁的色泽产生影响。CP 处理在 30 kV/5 mm/6.7 min 条件下也表现出良好的颜色保护效果, 叶绿素 a 和类胡萝卜素降解率分别仅为 9% 和 5%, ΔE 为 2.64, 显著低于 90 ℃ 处理样品 ΔE=6.52[68]。但 Liu 等[60] 指出当处理电压过高或时间过长时, 活性自由基与臭氧的生成会导致叶绿素降解, 反而加剧色泽劣变, 在放电时间 3 min、电压提升时, 叶绿素含量呈先升后降的趋势, 说明需精准控制 CP 处理条件才能在杀菌与护色之间取得最佳平衡。US 处理的空化效应可破坏细胞结构, 促进色素释放, 短期内提升猕猴桃汁的绿度、黄度及整体视觉品质[69]。但 US 诱导产生的自由基及机械应力会促进酚类氧化, 使猕猴桃汁在贮藏期内出现明显褐变[55]。因此, 从长期颜色保护效果看, HHP 和 CP 处理均优于 US 处理, 但都需关注 pH 调控以优化护色稳定性。

3.1.2 表观粘度、稳定性 经 Herschel-Bulkley 方程拟合发现, HHP 处理猕猴桃汁的速率指数 n 值(0.9035~0.9420)小于 1, 确证其假塑性特征, 该特征是理想的食品流变特性[23,70]。根据赵玉生等[71] 研究表明, 在 100~500 MPa 范围内, 猕猴桃汁表观粘度在 300 MPa 处呈现峰值, 从 3.41 mPa·s 略微上升至 3.65 mPa·s, 这是因为中等压力促进原果胶向可溶性果胶转化并抑制果胶酶活性, 增加大分子果胶含量和聚合度, 从而提高黏度和悬浮稳定性[71]; 但当压力超过 400 MPa 时, 由于机械应力导致果胶链断裂、分子量降低, 粒子过度聚集或破碎, 猕猴桃汁表现为稳定性下降, 表观粘度下降至 3.48 mPa·s[71]。动态流变分析进一步表明, 大于 400 MPa 时储能模量持续下降而损耗模量上升, 体系流变行为由弹性主导转为粘性主导, 并出现明显触变环, 说明体系在剪切中发生结构破坏, 结合储能模量持续下降等现象, 可推断部分结构化为不可逆[23]。因此, 适度 HHP(≤400 MPa)可优化果胶结构以提升悬浮稳定性, 而过高压力则削弱体系稳定性。适度 HHP 处理协同低温贮藏的猕猴桃汁表现出良好的稳定性[72]。US 处理则是通过强烈空化效应破坏细胞结构, 释放果胶和糖类等大分子物质并减小颗粒粒径, 通过果胶链的缠结和氢键形成流体网络结构, 提升猕猴桃汁表观粘度和稳定性[69,73]。CP 处理虽然同样具有破坏细胞结构和减小粒径的作用, 但与 US 处理截然不同的是, CP 处理表现为破坏颗粒聚集体和大分子物质, 从而削弱颗粒间摩擦和网络结构, 降低猕猴桃汁表观粘度[68]。在稳定性方面, 粒径减小与分布均一化提升了悬浮颗粒的分散性, 降低了猕猴桃汁的沉淀风险[68]。同时, CP 处理通过钝化果胶甲酯酶活性, 减少果胶去甲基化, 抑制其与钙离子形成不溶性复合物, 维持果胶-蛋白复合物的亲水保护层, 进一步增强了猕猴桃汁的稳定性[74]。

3.2 化学特性

3.2.1 风味 新鲜猕猴桃汁中含有 15 种主要香气活性化合物, 包括 5 种酯、3 种醇、6 种醛和 1 种酮, 其中, 以己醛、(E)-2-己烯醛和 1-己醇为代表的 C6 醛和 C6 醇赋予了猕猴桃青草香、清新和果香[75]。热处理会导致这些挥发性组分降解, 破坏猕猴桃的原始风味[30]。相比之下, HHP 处理能增加挥发性醛的含量, 从而增强猕猴桃汁的风味[30]。在 500 MPa/15 min 处理下, 丁酸乙酯和丁酸甲酯等果香类酯类的保留率提升超过 200%, 青草香类 C6 醛/醇的保留率提升 20%~80%, 均显著高于热处理[75]。这是由于 HHP 处理通过激活脂氧合酶和糖苷酶促进 C6 醛类化合物的生物合成增强特征性青草香气, 同时抑制氧化反应减少醛类和酯类风味物质的降解损失[17]。CP 处理虽然同样具有破坏细胞结构释放香气前体的作用, 但其产生的 ROS、RNS 会氧化或裂解酯类、醛类、萜烯等关键香气分子, 导致果香减弱, 这与 HHP 处理的香气增强效应形成鲜明对比[68]。Kumar 等[68] 通过模糊逻辑感官评估发现, 30 kV/5 mm/6.7 min 处理的样品香气相似度优于极端处理及热处理, 表明温和条件下 CP 对香气的破坏较小。电压越高、时间越长, RON 和 RNS 对香气分子的氧化破坏越严重, 如槲皮素、儿茶素等的酚类物质会降解 5%~23%, 从而削弱抗氧化保护, 间接加速香气劣变, 并产生更多酸类、呋喃及硫化物等异味成分, 因此需精确控制参数以平衡杀菌效果与香气保留[68]。

3.2.2 酸度、可溶性固形物 果实理化成分的动态变化主要表现为糖分积累与有机酸降解的协同作用, 直接决定了最终风味品质, 热处理可能因高温下抗坏血酸降解释放氢离子而导致 pH 显著降低[21,76]。HHP 处理对猕猴桃汁的 pH、总酸度和可溶性固形物含量影响甚微[1], 且猕猴桃汁的 pH 和可溶性固形物含量在冷藏 40 d 内变化不显著[11], 这表明 HHP 处理能够在有效延长货架期的同时保持其原有的酸甜风味与营养成分。热辅助 US 处理在保持猕猴桃汁酸度和可溶性固形物方面也优于热处理, 主要归因于低温高效灭菌和空化效应的机械作用, 减少了长时间高温对化学成分的破坏[21]。尽管 CP 处理过程中产生的 ROS 和 RNS 可能生成微量硝酸和亚硝酸, 但猕猴桃中丰富的抗坏血酸可作为缓冲剂中和酸性产物, 可以防止 pH 下降[60]。同时, 由于 ROS 和 RNS 短时间内难以渗透糖分子, 因此未引起可溶性固形物的明显降解, 保持了可溶性固形物的稳定性[68]。

4 非热加工对猕猴桃汁营养和活性成分的影响

4.1 糖类

200~500 MPa、10 min 处理对猕猴桃汁中还原糖和总糖含量无显著影响, 能较好保留原有甜味和

风味[1]。但也有研究发现在 500 MPa/3 min 处理后糖类物质含量下降达 50%，贮藏 5 d 后糖类水平趋于稳定，与未处理样品差异缩小[11]。二者的差异可能是由于高压促使蔗糖分子断裂生成葡萄糖和果糖，同时灭活糖代谢相关酶类阻断后续消耗，使糖类含量在短暂下降后趋于稳定[11]。US 处理通过空化效应同样促进蔗糖水解为葡萄糖和果糖，随处理时间延长蔗糖含量先降低后小幅回升，而果糖和 β-葡萄糖含量增加，α-葡萄糖因分子结构稳定性较高而保持稳定[34,69,77−78]。CP 处理同样具有破坏糖苷键的作用，但其 ROS、RNS 的强氧化性使蔗糖降解更为显著，在 30 kV/5 mm/6.7 min 处理下蔗糖减少 54%，葡萄糖和果糖均增加约 17%，且电压越高、时间越长降解效果越明显[68]。

4.2　维生素 C

维生素 C 作为热敏性营养成分，在高温条件下会因热氧化与酶促反应的双重作用而加速降解[68]。Chen 等[17] 和马婧[79] 研究表明，相比于热处理，在适宜压力范围内 HHP 处理使维生素 C 保留率提高了 35.8%，且在 4 ℃ 贮藏时也能够维持较低的降解速率。然而，当压力参数过高时，维生素 C 含量反而急剧下降，甚至低于热处理样品[17]。CP 处理在维生素保护方面同样显示出良好效果。Kumar 等[68] 的研究表明，在 30 kV/5 mm/6.7 min 的优化条件下，CP 处理的猕猴桃汁维生素 C 含量达 71.36 mg/100 g，仅使其损失约 9%，高于 90 ℃/5 min 极端条件处理的 64.36 mg/100 g。相比之下，Wang 等[80] 研究发现，US 处理会因自由基生成和声能转化为热能导致维生素 C 含量降低，16 min 处理后维生素 C 损失率高达 55.09%，这表明在三种非热加工技术中，US 处理对于维生素 C 的保留能力最低。

4.3　酚类

猕猴桃富含原儿茶酸、阿魏酸、没食子酸等多种生物活性酚类物质[81]。HHP 处理在 200 MPa 时可能因激活多酚氧化酶促进酶促氧化而导致猕猴桃汁中总酚含量下降；然而，在 300~500 MPa 条件下，HHP 可以通过破坏细胞结构促进酚类释放的同时抑制多酚氧化酶活性，使总酚含量上升[1,51]。US 处理通过空化效应破裂细胞壁、形成微通道，使束缚的酚类物质大量释放[80]，猕猴桃汁的总酚、儿茶素、没食子酸[80]、总黄酮[80] 含量均显著上升。但 Mai 等[82] 研究发现，过高的功率、温度或过长的处理时间会因热降解或氧化反应导致多酚降解，从而引起猕猴桃汁中总酚含量的下降。CP 处理与前两者不同，一方面通过细胞壁多糖的解聚促进结合态酚类物质释放；另一方面，其产生的 ROS 和 RNS 会攻击多酚化合物的芳香环结构使其氧化降解[60]。例如，CP 处理可促进结合态酚类的释放，使没食子酸、绿原酸等含量增加，且增幅随处理强度的提高而增大[68]。然而，黄酮类化合物如儿茶素和槲皮素却出现不同程度的降解[68]。适当增加样品体积可以稀释单位体积内 ROS 和 RNS 的浓度，从而在一定程度上形成物理屏蔽效应，抑制氧化降解反应，提高总酚保留率[60]。

5　非热加工对猕猴桃汁致敏性的影响

5.1　过敏原特征

绿肉猕猴桃中共鉴定出 13 种过敏原蛋白，其中 Act d 1、Act d 2、Act d 8、Act d 11 和 Act d 12 是主要过敏原[83−84]。其中，Act d 2 的含量与水果的成熟度密切相关，成熟水果中的 Act d 2 含量最高，在 20 ℃ 下贮藏 10 d 后含量增加 50%，而未成熟和过熟水果中的 Act d 2 含量较低[85]。自 1981 年首次报道以来，猕猴桃过敏被发现可引起多种临床表现，其症状范围从口腔过敏综合征到可能危及生命的全身性过敏性休克不等，且在成人中的发病率显著高于儿童。大多数患者具有特应性体质，常伴有花粉或乳胶过敏，三者间存在相关性[86]。交叉反应是该类过敏的主要特征之一，其中，绿肉猕猴桃中含量最高的蛋白 Act d 1 因其与花粉和乳胶蛋白在氨基酸序列及结构上的高度相似性，而成为重要的交叉反应介质[83]。这种分子同源性不仅解释了“乳胶水果综合症”的病理基础，还阐明了多过敏症患者的易感性[84]。

5.2　非热加工对猕猴桃汁致敏与过敏原调控机制

猕猴桃过敏是一种 IgE 介导的异常免疫反应，源于免疫系统对果肉蛋白的错误识别[87−88]。猕猴桃致敏机制主要可分为两个阶段：a.过敏原首次进入人体穿透皮肤或黏膜等上皮屏障后，被树突状细胞捕获并加工处理，与细胞内的 MHC Ⅱ类分子结合形成“抗原-MHC Ⅱ复合物”，从而激活初始 T 细胞，诱导其分化为 Th2 细胞[89]。Th2 细胞通过分泌 IL-4 和 IL-13 等细胞因子驱动 B 细胞产生特异性 IgE 抗体，随后 IgE 抗体与肥大细胞紧密结合，使机体进入致敏状态[89]；b.当个体再次接触过敏原时，过敏原会迅速交联肥大细胞上相邻的 IgE 抗体，立即激活肥大

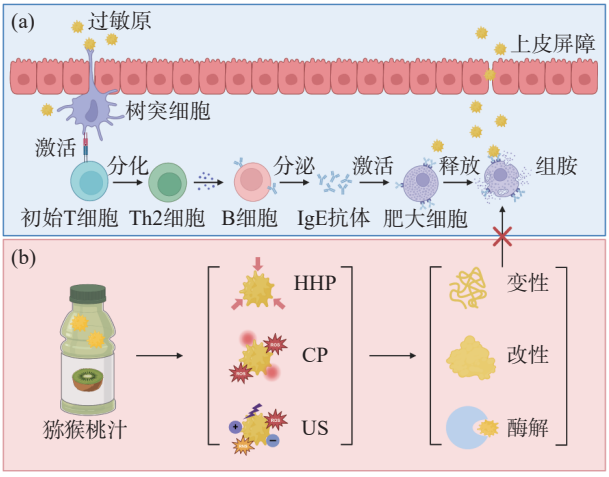


图 3　非热加工技术调控猕猴桃汁致敏性机制

Fig.3　Mechanism of allergenicity regulation of kiwifruit juice by non-thermal processing technologies

注：(a)致敏机制；(b)过敏原调控机制。

细胞，导致其脱颗粒并释放出大量组胺等炎症介质[90]（图 3a）。

HHP、US 和 CP 等非热加工技术在调控猕猴桃过敏原方面展现出巨大潜力[84]。这些技术均能引起过敏原蛋白空间构象改变，导致其发生去折叠化，进而通过疏水作用或氧化修饰引发交联与聚集，形成不溶性大分子聚集体，从而掩蔽或破坏原有的线性及构象表位，降低其与 IgE 抗体的结合能力[91−96]；同时，三种加工技术均能破坏细胞膜结构，促进内源蛋白酶和过敏原蛋白的释放与扩散，增强对过敏原蛋白的水解作用[96−98]，降低猕猴桃致敏性。这些技术的核心机制在于通过破坏或改变过敏原蛋白的结构，削弱其与 IgE 抗体的结合能力，从而阻断后续的肥大细胞活化及过敏介质释放级联反应，为开发高品质、低致敏性的猕猴桃汁产品提供了理论基础（图 3b）。

6 结论与展望

本综述系统分析了 HHP、US 及 CP 三种非热加工技术对猕猴桃汁杀菌及关键品质指标的影响，研究结果证实了非热加工技术相较于传统热处理的优势，为高品质猕猴桃汁的开发提供了理论基础。然而，不同非热技术间存在差异，单一非热加工技术难以在理化特性、营养成分、感官风味及微生物安全性等所有关键指标上同时达到最优效果。例如，CP 在保留维生素 C 方面表现优异，但可能导致风味损失；HHP 能有效保留猕猴桃汁的营养品质，但单独作用对耐压菌的灭活能力有限；US 可增强猕猴桃表观粘度，但其色泽保持能力相对较弱。因此，在工业生产中应根据产品的核心需求选择适宜的加工技术并系统优化其工艺参数。鉴于不同非热加工技术在作用机制、处理强度及时间等参数上存在差异，未来研究亟需在统一的处理基准下进行系统性比较。例如，可在实现等效杀菌效果的前提下，系统评估不同技术对猕猴桃汁品质特性的影响。另外，单一非热加工技术具有局限性，例如，酸性果汁中的酸土脂环酸芽孢杆菌难以被彻底杀灭，可联合多种技术协同处理，如利用 HHP 预处理先诱导芽孢萌发，再通过二次 HHP 或 CP 等将其杀灭以保证其货架期。这种协同应用能够突破单一技术的瓶颈，在维持猕猴桃汁的感官品质、保障微生物安全性的前提下，有效延长货架期。此外，加工过程中被破坏的猕猴桃籽会通过释放酚类物和酶类加剧猕猴桃汁的褐变，其释放的脂类物质在加工贮藏中的氧化也会影响风味，因此不同非热加工条件下籽的定量影响及控制策略尚待深入研究。最后，应系统构建涵盖原料预冷、低温清洗、隔氧制汁、非热杀菌及冷链储运等环节的全程非热加工工艺，以实现猕猴桃汁加工技术的整体升级，推动产业高质量发展。

© The Author(s) 2026. 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] 罗仓学, 王凌云, 卢亚婷, 等. 超高压对猕猴桃果肉饮料理化特性及微生物的影响[J]. 陕西科技大学学报(自然科学版), 2016, 34(2): 128−133. [LUO Cangxue, WANG Lingyun, LU Yating, et al. Effect of high pressure processing on physicochemical and microbiological characteristics of kiwi fruit pulp[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 2016, 34(2): 128−133.]

[2] GARCIA C V, QUEK S Y, STEVENSON R J, et al. Kiwifruit flavour: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2012, 24(2): 82−91.

[3] FERGUSON A R. 1904—The year that kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) came to New Zealand[J]. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 2004, 32(1): 3−27.

[4] 李大卫, 黄文俊, 钟彩虹. 中国猕猴桃产业现状及“十五五”发展建议[J]. 果树学报, 2024, 41(11): 2149−2159. [LI Dawei, HUANG Wenjun, ZHONG Caihong. Current status of China's kiwifruit industry and development recommendations for the "15th Five-Year Plan"[J]. Journal of Fruit Science, 2024, 41(11): 2149−2159.]

[5] LI K, LIU L, MCCLEMENTS D J, et al. A review of the bioactive compounds of kiwifruit: Bioactivity, extraction, processing and challenges[J]. Food Reviews International, 2024, 40(3): 996−1027.

[6] PODSĘDEK A, MAJEWSKA I, REDZYNIA M, et al. *In vitro* inhibitory effect on digestive enzymes and antioxidant potential of commonly consumed fruits[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(20): 4610−4617.

[7] JIN Y M, FU Y Q, ZHOU S J, et al. Exploration of induced electric field on physicochemical, nutritional and microbiological quality of kiwifruit juice during storage[J]. LWT, 2025, 215: 117262.

[8] WANG Sunan, QIU Yi, ZHU Fan. Kiwifruit (*Actinidia* spp.): A review of chemical diversity and biological activities[J]. Food Chemistry, 2021, 350: 128469.

[9] CHAMORRO F, CARPENA M, NUÑEZ-ESTEVEZ B, et al. Valorization of kiwi by-products for the recovery of bioactive compounds: Circular economy model[J]. Proceedings, 2020, 70(1): 9.

[10] SANZ V, LÓPEZ-HORTAS L, TORRES M D, et al. Trends in kiwifruit and byproducts valorization[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 107: 401−414.

[11] FERNÁNDEZ-SESTELO A, de SAÁ R S, PÉREZ-LAMELA C, et al. Overall quality properties in pressurized kiwi purée: Microbial, physicochemical, nutritive and sensory tests during refrigerated storage[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2013, 20: 64−72.

[12] CHEN L N, WANG T N, SUI Y H, et al. Effects of different sterilisation methods on the quality and flavor of non from concentrate (NFC) *Actinidia arguta* juice[J]. Food Chemistry: X, 2025, 27: 102354.

[13] WANG X N, REN Y P, LI S Q, et al. Development of a polyphenol-enriched whole kiwifruit dietary supplement and its potential in ameliorating hyperlipidemia[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2024, 104(4): 2142−2155.

[14] 苑翠柳. 抗癌食果研究的新进展[J]. 林业科技通讯, 1999(6): 20−22. [YUAN Cuiliu. New progress in research on anticancer fruit eating[J]. Forest Science and Technology, 1999(6): 20−22.]

[15] SINGH S, MISHRA S, N A N G, et al. A comprehensive

review on advances in sustainable non-thermal technologies for liquid food safety and quality retention[J]. Journal of Food Process Engineering, 2025, 48(7): e70177.
[16] LÓPEZ-GÁMEZ G, ELEZ-MARTÍNEZ P, MARTÍN-BELLOSO O, et al. Enhancing carotenoid and phenolic contents in plant food matrices by applying non-thermal technologies: Bioproduction vs improved extractability[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 112: 622−630.
[17] CHEN Yajing, FENG Xiaoping, REN Hong, et al. Changes in physicochemical properties and volatiles of kiwifruit pulp beverage treated with high hydrostatic pressure[J]. Foods, 2020, 9(4): 485.
[18] BŁASZCZAK W, LATOCHA P, JEŻ M, et al. The impact of high-pressure processing on the polyphenol profile and anti-glycaemic, anti-hypertensive and anti-cholinergic activities of extracts obtained from kiwiberry (*Actinidia arguta*) fruits[J]. Food Chemistry, 2021, 343: 128421.
[19] 赵玉生, 赵俊芳. 超高压杀菌对鲜榨猕猴桃汁中 V_C 含量变化的影响[J]. 食品研究与开发, 2006, 27(11): 24−25. [ZHAO Yusheng, ZHAO Junfang. Effect of the vitamin C content in fresh kiwi juice by ultra-high pressure sterilization[J]. Food Research and Development, 2006, 27(11): 24−25.]
[20] KUMAR S, PIPLIYA S, SRIVASTAV P P. Effect of cold plasma processing on physicochemical and nutritional quality attributes of kiwifruit juice[J]. Journal of Food Science, 2023, 88(4): 1533−1552.
[21] BHUTKAR S, BRANDÃO T R S, SILVA C L M, et al. Application of ultrasound treatments in the processing and production of high-quality and safe-to-drink kiwi juice[J]. Foods, 2024, 13(2): 328.
[22] LI Minghe, GUO Xiaodan, CHEN Yajing, et al. The degradation of forchlorfenuron in the model kiwifruit juice by ultrasonic treatment[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(5): e14424.
[23] 方亮. 超高压处理对猕猴桃果汁杀菌钝酶效果和品质的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2008. [FANG Liang. Effects of ultra-high-pressure treatment on enzyme inactivation and quality of kiwifruit juice[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.]
[24] PATTERSON M F. Microbiology of pressure-treated foods[J]. Journal of Applied Microbiology, 2005, 98(6): 1400−1409.
[25] MARTÍNEZ-MONTEAGUDO S I, SALDAÑA M D A, TORRES J A, et al. Effect of pressure-assisted thermal sterilization on conjugated linoleic acid (CLA) content in CLA-enriched milk[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2012, 16: 291−297.
[26] HUANG H W, WU S J, LU J K, et al. Current status and future trends of high-pressure processing in food industry[J]. Food Control, 2017, 72: 1−8.
[27] 姜志东, 张君怡, 马嘉欣, 等. 超高压杀菌效果及机制研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(5): 145−154. [JIANG Zhidong, ZHANG Junyi, MA Jiaxin, et al. Research progress on the microbial inactivation effect and mechanism of high hydrostatic pressure[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(5): 145−154.]
[28] PILAVTEPE-ÇELIK M, BALABAN M O, ALPAS H, et al. Image analysis based quantification of bacterial volume change with high hydrostatic pressure[J]. Journal of Food Science, 2008, 73(9): M423−M429.
[29] RIVALAIN N, ROQUAIN J, DEMAZEAU G. Development of high hydrostatic pressure in biosciences: Pressure effect on biological structures and potential applications in Biotechnologies[J]. Biotechnology Advances, 2010, 28(6): 659−672.
[30] BEVILACQUA A, PETRUZZI L, PERRICONE M, et al. Nonthermal technologies for fruit and vegetable juices and beverages: Overview and advances[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2018, 17(1): 2−62.
[31] LI J, AHN J, LIU D H, et al. Evaluation of ultrasound-induced damage to *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* by flow cytometry and transmission electron microscopy[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2016, 82(6): 1828−1837.
[32] 沈谦君, 潘佳能, 孙晋跃, 等. 超声协同气体杀菌技术在果蔬产品质量安全控制中的应用[J]. 浙江农业科学, 2023, 64(9): 2243−2250. [SHEN Qianjun, PAN Jianeng, SUN Jinyue, et al. Combined treatment of ultrasound with gas sterilization in ensuring the quality and safety of fruit and vegetables[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2023, 64(9): 2243−2250.]
[33] GHAFOOR K, CHOI Y H, JEON J Y, et al. Optimization of ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds, antioxidants, and anthocyanins from grape (*Vitis vinifera*) seeds[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(11): 4988−4994.
[34] de SOUZA S A, AUGUSTO P E D, de CASTRO L B R J, et al. Ultrasound assisted enzymatic hydrolysis of sucrose catalyzed by invertase: Investigation on substrate, enzyme and kinetics parameters[J]. LWT, 2019, 107: 164−170.
[35] TIWARI B K, O'DONNELL C P, PATRAS A, et al. Effect of ozone processing on anthocyanins and ascorbic acid degradation of strawberry juice[J]. Food Chemistry, 2009, 113(4): 1119−1126.
[36] MISRA N N, YADAV B, ROOPESH M S, et al. Cold plasma for effective fungal and mycotoxin control in foods: Mechanisms, inactivation effects, and applications[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2019, 18(1): 106−120.
[37] TANG Y Z, LU X P, LAROUSSI M, et al. Sublethal and killing effects of atmospheric-pressure, nonthermal plasma on eukaryotic microalgae in aqueous media[J]. Plasma Processes and Polymers, 2008, 5(6): 552−558.
[38] LI Xiaoan, LI Meilin, JI Nana, et al. Cold plasma treatment induces phenolic accumulation and enhances antioxidant activity in fresh-cut pitaya (*Hylocereus undatus*) fruit[J]. LWT, 2019, 115: 108447.
[39] HAN Yongxu, CHENG Junhu, SUN Dawen. Activities and conformation changes of food enzymes induced by cold plasma: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(5): 794−811.
[40] MISRA N N, PANKAJ S K, SEGAT A, et al. Cold plasma interactions with enzymes in foods and model systems[J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 55: 39−47.
[41] HOU Yanan, WANG Ruixue, GAN Zhilin, et al. Effect of cold plasma on blueberry juice quality[J]. Food Chemistry, 2019, 290: 79−86.
[42] STALTER D, MAGDEBURG A, WAGNER M, et al. Ozonation and activated carbon treatment of sewage effluents: Removal of endocrine activity and cytotoxicity[J]. Water Research, 2011, 45(3): 1015−1024.
[43] PÉREZ M, TORRADES F, DOMÈNECH X, et al. Fenton and photo-Fenton oxidation of textile effluents[J]. Water Research, 2002, 36(11): 2703−2710.
[44] FERNANDES F A N, SANTOS V O, RODRIGUES S. Effects of glow plasma technology on some bioactive compounds of

acerola juice[J]. Food Research International, 2019, 115: 16−22.
[45] SOURRI P, TASSOU C C, NYCHAS G E, et al. Fruit juice spoilage by *Alicyclobacillus*: Detection and control methods-a comprehensive review[J]. Foods, 2022, 11(5): 747.
[46] LIMA T A A, de SOUZA SANT'ANA A, de MASSAGUER P R. Review: Microbiological quality and safety of fruit juices: Past, present and future perspectives[J]. Critical Reviews in Microbiology, 2009, 35(4): 310−339.
[47] DANYLUK M D, GOODRICH-SCHNEIDER R M, SCHNEIDER K R, et al. Outbreaks of foodborne disease associated with fruit and vegetable juices, 1922–2010: FSHN12-04/FS188, rev. 1/2012[J]. EDIS, 2012, 2012(3): 1−7.
[48] HARRIS L J, FARBER J N, BEUCHAT L R, et al. Outbreaks associated with fresh produce: Incidence, growth, and survival of pathogens in fresh and fresh-cut produce[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2003, 2(s1): 78−141.
[49] ANEJA K R, DHIMAN R, AGGARWAL N K, et al. Microbes associated with freshly prepared juices of *Citrus* and carrots[J]. International Journal of Food Science, 2014, 2014: 408085.
[50] CAGGIA C, SCIFÒ G O, RESTUCCIA C, et al. Growth of acid-adapted *Listeria monocytogenes* in orange juice and in minimally processed orange slices[J]. Food Control, 2009, 20(1): 59−66.
[51] PATRIGNANI F, MANNOZZI C, TAPPI S, et al. (Ultra) High pressure homogenization potential on the shelf-life and functionality of kiwifruit juice[J]. Frontiers in Microbiology, 2019, 10: 246.
[52] XU Xinxing, DENG Jingjing, LUO Dongsheng, et al. Comparative study of high hydrostatic pressure and high temperature short time processing on quality of clear and cloudy Se-enriched kiwifruit juices[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018, 49: 1−12.
[53] ZHAI Yafei, SUN Jiaqi, YE Shuo, et al. Principal antifungal factors and underlying mechanisms of dielectric barrier discharge plasma against *Penicillium expansum* spores as well as its application in kiwi-fruit juice[J]. LWT, 2023, 185: 115089.
[54] KUMAR S, PIPLIYA S, SRIVASTAV P P, et al. Non-linear models for microbial inactivation kinetics in kiwifruit juice using cold plasma treatment: The combined impact of applied voltage, juice depth and treatment time[J]. Journal of Food Science and Technology, 2025, 62(6): 1076−1088.
[55] TOMADONI B, del ROSARIO M M, ESPINOSA J P, et al. Individual and combined effects of pomegranate extract and ultrasonic treatments on kiwifruit juice quality parameters[J]. Journal of Food Process Engineering, 2017, 40(1): e12339.
[56] USAGA J, ACOSTA Ó, CHUREY J J, et al. Evaluation of high pressure processing (HPP) inactivation of *Escherichia coli* O157: H7, *Salmonella enterica*, and *Listeria monocytogenes* in acid and acidified juices and beverages[J]. International Journal of Food Microbiology, 2021, 339: 109034.
[57] BUZRUL S, ALPAS H, LARGETEAU A, et al. Inactivation of *Escherichia coli* and *Listeria innocua* in kiwifruit and pineapple juices by high hydrostatic pressure[J]. International Journal of Food Microbiology, 2008, 124(3): 275−278.
[58] 叶青, 赵武奇, 白斯可, 等. 热辅助超声波处理对猕猴桃浊汁的杀菌效果及品质影响研究[J]. 核农学报, 2021, 35(12): 2776−2786. [YE Qing, ZHAO Wuqi, BAI Sike, et al. Study on the sterilization effect and quality of cloudy kiwifruit juice treated by thermalassisted ultrasonic[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2021, 35(12): 2776−2786.]
[59] SUN Runyang, LI Yimeng, SU Ruiying, et al. Antibacterial effect of ultrasound combined with *Litsea cubeba* essential oil nanoemulsion on *Salmonella typhimurium* in kiwifruit juice[J]. International Journal of Food Microbiology, 2025, 426: 110898.
[60] LIU Zhenrong, ZHAO Wuqi, ZHANG Qingan, et al. Effect of cold plasma treatment on sterilizing rate and quality of kiwi turbid juice[J]. Journal of Food Process Engineering, 2021, 44(6): e13711.
[61] ZHANG Jiangbo, YUE Tianli, YUAN Yahong. *Alicyclobacillus* contamination in the production line of kiwi products in China[J]. PLoS One, 2013, 8(7): e67704.
[62] ZHAO Siqi, CHEN Lin, YAN Bing, et al. Inactivation of *Alicyclobacillus acidoterrestris* vegetative cells and spores induced by atmospheric cold plasma[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 89: 103461.
[63] SPILIMBERGO S, CIOLA L. Supercritical CO_2 and N_2O pasteurisation of peach and kiwi juice[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2010, 45(8): 1619−1625.
[64] 李子龙. 紫外杀菌对猕猴桃汁品质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014. [LI Zilong. The effects of ultraviolet sterilization on quality of kiwifruit juice[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2014.]
[65] ZHANG Min, WANG Haoli, BAO Shihan, et al. Using multi-criteria decision-making method to select the optimal color fixative for cloudy kiwi juice during thermal sterilization processing[J]. LWT, 2023, 187: 115266.
[66] 何易雯, 王志勇, 吴泽宇, 等. 超高压处理对猕猴桃汁叶绿素保留率的影响[J]. 包装与食品机械, 2018, 36(6): 7−9,49. [HE Yiwen, WANG Zhiyong, WU Zeyu, et al. Effect of ultra high pressure treatment on chlorophyll retention rate in kiwifruit juice[J]. Packaging and Food Machinery, 2018, 36(6): 7−9,49.]
[67] 邓红, 马婧, 李涵, 等. 超高压杀菌处理冷破碎猕猴桃果浆贮藏期的品质变化[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(8): 123−129,135. [DENG Hong, MA Jing, LI Han, et al. Quality changes in cold crushed kiwi fruit pulp treated with ultra-high pressure sterilization during storage[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(8): 123−129,135.]
[68] KUMAR S, PIPLIYA S, SRIVASTAV P P, et al. Cold plasma processing of kiwifruit juice: Effect on physicochemical, nutritional, microstructure, rheological properties and sensory attributes[J]. Journal of Food Science, 2024, 89(10): 6127−6141.
[69] WANG J, WANG J, VANGA S K, et al. High-intensity ultrasound processing of kiwifruit juice: Effects on the microstructure, pectin, carbohydrates and rheological properties[J]. Food Chemistry, 2020, 313: 126121.
[70] SALEHI F. Rheological and physicochemical properties of vegetable juices and concentrates: A review[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(4): e15326.
[71] 赵玉生, 姚二民, 赵俊芳. 超高压处理对猕猴桃汁品质的影响[J]. 食品科学, 2008, 29(1): 60−63. [ZHAO Yusheng, YAO Ermin, ZHAO Junfang. Effects of UHP treatment on kiwi juice quality[J]. Food Science, 2008, 29(1): 60−63.]
[72] 谢慧明, 王颖, 周典飞. 超高压处理对猕猴桃汁品质的影响[J]. 食品科学, 2012, 33(11): 17−20. [XIE Huiming, WANG Ying, ZHOU Dianfei. Effect of UHP treatment on the quality of kiwi juice[J]. Food Science, 2012, 33(11): 17−20.]
[73] TIWARI B K, MUTHUKUMARAPPAN K, O'DONNELL C P, et al. Inactivation kinetics of pectin methylesterase and cloud retention in sonicated orange juice[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2009, 10(2): 166−171.

［74］ MUNDANAT A S, SINGH V, TALNIYA N C, et al. Plasma modification in fruit juices: Changes in structure, colour, rheological parameters and sensory properties[J]. Food Chemistry: X, 2025, 27: 102445.
［75］ ZHAO Yu, WANG Peng, ZHAN Ping, et al. Aroma characteristics of cloudy kiwifruit juices treated with high hydrostatic pressure and representative thermal processes[J]. Food Research International, 2021, 139: 109841.
［76］ TAO Junjie, WU Mengting, JIAO Xudong, et al. Dynamic changes of fruit physiological quality and sugar components during fruit growth and development of *Actinidia eriantha*[J]. Horticulturae, 2022, 8(6): 529.
［77］ KREŠIĆ G, LELAS V, JAMBRAK A R, et al. Influence of novel food processing technologies on the rheological and thermophysical properties of whey proteins[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 87(1): 64−73.
［78］ ROOBAB U, AADIL R M, MADNI G M, et al. The impact of nonthermal technologies on the microbiological quality of juices: A review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2018, 17(2): 437−457.
［79］ 马婧. 猕猴桃 NFC 果汁的超高压杀菌处理及其贮藏期品质变化[D]. 西安: 陕西师范大学, 2019. ［MA Jing. Ultra-high pressure sterilization treatment of kiwifruit NFC juice and its quality changes during storage[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2019.］
［80］ WANG J, VANGA S K, RAGHAVAN V. High-intensity ultrasound processing of kiwifruit juice: Effects on the ascorbic acid, total phenolics, flavonoids and antioxidant capacity[J]. LWT, 2019, 107: 299−307.
［81］ SAEED K M, YOU L J, CHEN C, et al. Comparative assessment of phytochemical profiles and antioxidant and antiproliferative activities of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) cultivars[J]. Journal of Food Biochemistry, 2019, 43(11): e13025.
［82］ MAI Yinghui, ZHUANG Qiguo, LI Qiaohong, et al. Ultrasound-assisted extraction, identification, and quantification of antioxidants from 'Jinfeng' kiwifruit[J]. Foods, 2022, 11(6): 827.
［83］ PALACIN A, RODRIGUEZ J, BLANCO C, et al. Immunoglobulin E recognition patterns to purified kiwifruit (*Actinidinia deliciosa*) allergens in patients sensitized to kiwi with different clinical symptoms[J]. Clinical & Experimental Allergy, 2008, 38(7): 1220−1228.
［84］ WANG J, VANGA S K, McCUSKER C, et al. A comprehensive review on kiwifruit allergy: Pathogenesis, diagnosis, management, and potential modification of allergens through processing[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2019, 18(2): 500−513.
［85］ WANG Jin, ZHANG Lili, DONG Xin, et al. Effects of variety, maturity and storage conditions on the allergic potential of kiwifruit and its relationship with antioxidant activity[J]. Food Chemistry: X, 2022, 16: 100467.
［86］ LUCAS J S, LEWIS S A, HOURIHANE J O. Kiwi fruit allergy: A review[J]. Pediatric Allergy and Immunology, 2003, 14(6): 420−428.
［87］ YU W, FREELAND D M H, NADEAU K C. Food allergy: Immune mechanisms, diagnosis and immunotherapy[J]. Nature Reviews Immunology, 2016, 16(12): 751−765.
［88］ LIN J, SAMPSON H A. The role of immunoglobulin E-binding epitopes in the characterization of food allergy[J]. Current Opinion in Allergy and Clinical Immunology, 2009, 9(4): 357−363.
［89］ ANVARI S, MILLER J, YEH C Y, et al. IgE-mediated food allergy[J]. Clinical Reviews in Allergy & Immunology, 2019, 57(2): 244−260.
［90］ ZENG Jianhua, WANG Qingfei, YI Huaxi, et al. Recent insights in cow's milk protein allergy: Clinical relevance, allergen features, and influences of food processing[J]. Trends in Food Science & Technology, 2025, 156: 104830.
［91］ AALBERSE R C. Structural biology of allergens[J]. Journal of Allergy and Clinical Immunology, 2000, 106(2): 228−238.
［92］ KATSAROS G I, KATAPODIS P, TAOUKIS P S. Modeling the effect of temperature and high hydrostatic pressure on the proteolytic activity of kiwi fruit juice[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 94(1): 40−45.
［93］ PAN Di, TANG Biling, LIU Huipeng, et al. Effect of high hydrostatic pressure (HHP) processing on immunoreactivity and spatial structure of peanut major allergen Ara h 1[J]. Food and Bioprocess Technology, 2020, 13(1): 132−144.
［94］ ZHU Y, VANGA S K, WANG J, et al. Effects of ultrasonic and microwave processing on avidin assay and secondary structures of egg white protein[J]. Food and Bioprocess Technology, 2018, 11(11): 1974−1984.
［95］ JIANG Lianzhou, WANG Jing, LI Yang, et al. Effects of ultrasound on the structure and physical properties of black bean protein isolates[J]. Food Research International, 2014, 62: 595−601.
［96］ CHENG Junhu, LI Jilin, SUN Dawen. Effects of dielectric barrier discharge cold plasma on structure, surface hydrophobicity and allergenic properties of shrimp tropomyosin[J]. Food Chemistry, 2023, 409: 135316.
［97］ KHAN M U, AHMED I, LIN H, et al. Potential efficacy of processing technologies for mitigating crustacean allergenicity [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(17): 2807−2830.
［98］ DU Meng, LI Yue, ZHANG Qing, et al. The impact of low intensity ultrasound on cells: Underlying mechanisms and current status[J]. Progress in Biophysics and Molecular Biology, 2022, 174: 41−49.