

超声波对果蔬汁杀菌和品质影响的研究进展

刘伟¹, 宋弋², 张洁¹, 林琼¹, 吴杰¹, 王凤忠¹, 王志东¹

(1. 中国农业科学院农产品加工研究所, 农业部农产品质量安全收贮运管控重点实验室, 北京 100193) (2. 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, 农业部果蔬加工重点实验室, 果蔬加工教育部工程研究中心, 北京 100083)

摘要: 超声波是以机械振动的形式在媒介中传播的声波, 其频率高于 20 kHz, 超出了人耳听力的范围。超声波作为一种非热加工技术适用于果蔬汁加工, 一方面, 超声波通过空化作用破坏微生物细胞壁, 抑制果蔬汁中微生物繁殖; 另一方面, 超声波与传统热杀菌技术相比较可以减少水和电的消耗, 保留果蔬汁固有的营养品质和感官特性, 提高产品的均一性。目前, 超声波单独作用于食源腐败或致病微生物难以达到完全致死效应, 但是超声波协同其他杀菌技术如: 温和热处理、高压、抑菌剂等可以增加杀菌和钝酶的效果。本文介绍了超声波的作用机制和相关设备, 综述了超声波单独或协同其他技术对于果蔬汁杀菌、降解农药残留, 对果蔬汁营养成分、颜色、香气、稳定性、浊度等品质的研究现状以及该技术的发展趋势进行了分析。

关键词: 超声波; 果蔬汁; 杀菌; 钝酶; 品质

文章编号: 1673-9078(2018)05-276-289

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.05.039

Research Progress on the Effect of Ultrasound on the Microbial Inactivation and Qualities of Fruit and Vegetable Juice

LIU Wei¹, SONG Yi², ZHANG Jie¹, LIN Qiong¹, WU Jie¹, WANG Feng-zhong¹, WANG Zhi-dong¹

(1. Institute of Agro-Products Processing Science and Technology CAAS, Ministry of Agriculture, Key Laboratory of Agro-products Quality and Safety Control in Storage and Transport Process, Ministry of Agriculture, Beijing 100193, China) (2. National Engineering Research Center for Fruit and Vegetable Processing, Key Laboratory of Fruit and Vegetable Processing, Ministry of Agriculture, Research Center of Fruit and Vegetable Processing Engineering, Ministry of Education, College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Ultrasound (US) is a sound wave propagated in the medium based on the mechanical vibrations. The frequency of US is higher than 20 kHz, which exceeds the range of human hearing. US is especially suitable for the processing of fruit and vegetable juice as a non-thermal technology. On the one hand, the ultrasound could destroy microbial cell wall by cavitation and inhibit the growth of microorganisms in fruit and vegetable juice. On the other hand, compared with traditional heat sterilization technology, US could reduce water and energy consumption, maximize the retention of nutritional quality and organoleptic properties of fruit and vegetable juice, and increase the homogeneity of the products. At present, the effects of US alone can't achieve the sufficient lethal effect on the foodborne pathogens or spoilage microorganisms, while US combined with other preservation techniques, such as mild heat treatment, high pressure, bacteriostat, and so on., can effectively improve the microbial inactivation and enzyme inactivation. This paper introduced the action mechanism and the equipment of ultrasound. The paper also summarized the research status of US used alone or in combination with other preservation techniques in fruit and vegetable juice processing for microbial inactivation, pesticide degradation, nutritional quality, colour, aroma, stability, and turbidity improvement, and the analysis of the development trend of the US technology.

Key words: ultrasound; fruit and vegetable juice; microbial inactivation; enzyme inactivation; quality

收稿日期: 2017-11-06

基金项目: 北京市粮经作物产业创新团队 (BAIC09-2017); 中国农业科学院科技创新工程; 国家重点研发计划项目 (2016YFD0400302) 联合资助

作者简介: 刘伟 (1984-), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向: 果蔬贮藏和加工研究

通讯作者: 王志东 (1958-), 男, 本科, 研究员, 研究方向: 农产品贮藏理论与技术研究

随着人们生活水平日益提高,天然、健康的饮食理念逐渐形成,饮料的消费已逐渐由嗜好性饮料向营养性饮料转变,果蔬汁产品的消费市场日益扩大。而且,无防腐剂、香精、色素添加,少加工,具有抗氧化和促消化等功能性的果蔬汁产品越来越受到消费者的青睐。目前,食品工业中普遍采用水或水蒸气直接或间接杀菌、钝酶,但是营养成分和呈味物质经过高温处理容易发生转化或降解,导致品质降低。而非热加工技术通过超高压、电场、磁场、短波紫外线、超声波等手段,既可以杀灭果蔬汁中的微生物,又能较好地保持产品固有的营养成分、色泽、香气、新鲜度、延长货架期,逐渐受到生产者和消费者的重视^[1]。

近年来,超声波作为一种非热技术广泛的应用于不同果蔬汁加工,如:苹果汁、芒果汁、草莓汁、黑莓汁、蓝莓汁、西瓜汁、甜瓜汁、番石榴汁、橙汁、梨汁、菠萝汁、葡萄汁、蔓越橘汁、红毛榴莲汁、番茄汁、胡萝卜汁、葫芦汁和刺梨汁等^[2-28]。超声波在一定条件下可以杀灭果蔬汁中绝大多数微生物,满足美国食品药品监督管理局(U.S. Food and Drug Administration, FDA)对于使用“加热蒸发浓缩”形式加工的浓缩果蔬汁灌装前微生物(如:果汁中的大肠杆菌)减少5个对数值(5 log)的要求^[29]。而且,超声波结合其他杀菌技术(如:温和热处理、高压、抑菌剂、臭氧、微波、激光、电场、高静压和紫外线等)可以提高杀菌和钝酶的效果,降低能耗^[4,7,9,11-13,16,21,22,25,30-35]。本文介绍了超声波的作用机制和相关设备,并综述了超声波对于果蔬汁杀菌、降解农药残留,对果蔬汁营养成分、颜色、香气、稳定性和浊度等品质的研究现状和该技术在果蔬汁加工产业中的发展趋势进行了分析。

1 超声波介绍

1.1 超声波简介

超声波是以机械振动的形式在媒介中传播的声波,其频率高于20 kHz,超出了人耳听力的范围。超声波主要有3种发生方式:通过机械装置产生谐振(频率为20~30 kHz);利用刚磁性材料磁致伸缩现象的电—声转换器发出超声波(频率可以达到上百kHz);利用压电或电致伸缩效应的材料,加上高频电压产生谐振(频率可达到GHz量级)^[36]。按照频率(赫兹Hz)不同,超声波分为低频超声(20 kHz< ν <1 MHz)和高频超声(ν >1 MHz);按照功率不同(声功率W、声强W/m²或声能量密度Ws/m³),超声波也分为低功率(或低能量)超声和高功率(或高能量)超声^[37]。低

功率超声的频率高于1 MHz,能量低于1 W/cm²,因此,超声波通过物料时不会引起物理或化学变化。低功率超声也被称为检测超声,在食品工业中主要应用于食品理化性质如:食品组成、质构、糖分、酸度和流变性质等分析检测^[38]。1970年,超声波技术首次在食品领域应用,用于检测鸡蛋蛋白质量^[39]。高功率超声也称为功率超声,频率为20~100 kHz,功率为10~1000 W/cm²。超声波通过空化作用产生强大压力、剪切力和高温,引起物料发生物理、化学或生物活性改变^[40]。高功率超声适用于食品加工,主要应用的领域包括:杀菌、脱气、渗透、乳化、冷冻、干燥、过滤、提取、切割、解冻和清洗等,与传统的食品加工技术相比较,具有高效、节能和环保等优点^[38]。

1.2 超声波作用机制

超声波通过一系列压缩波和稀疏波在媒质中传播,分别对应形成正负压,并产生正压和负压交替变化的周期,对媒质分子产生交替的压缩和拉伸作用。当声波能量足够高时,稀疏波对应产生足够大的负压,如果负压对气体分子的作用力超过液体分子对气体分子的作用力,原先存在于液体中的气核从液体中脱离,形成空穴气泡。随着超声波的传播,空穴气泡的体积迅速增加上千倍,达到临界半径后发生猛烈的内爆,然后立刻恢复至原来的状态。空穴气泡崩塌时释放出巨大能量,导致局部温度(5500 K)和压力(1000 MPa)迅速升高,产生高达10⁸ N/m²的强大的剪切力,和大量高活性自由基^[1]。当大量气泡崩塌时,高压和高温协同效应产生强烈的冲击波和400 km/h的微射流。另外,超声波在媒质中传播过程中可使媒质质点进入振动状态,加速溶液的质量传递。超声波振动能量被媒质吸收转变为热量而使媒质温度升高,使媒质的组织结构、形状和组成发生改变^[22]。

1.3 超声波设备

目前,超声波加工果蔬汁的研究主要采用超声波清洗机,超声波探头或连续超声波探头系统,其中超声波清洗机 and 超声波探头可进行分批式加工;连续超声波探头系统可进行连续式加工,其结构示意图分别如图1中(a)、(b)、(c)所示^[41]。超声波清洗机主要由超声发生器和清洗槽组成。清洗槽由弹性好、耐腐蚀的优质不锈钢制成。清洗槽底部安装有超声波发生器,超声发生器将高频电能转换成机械能之后,产生振幅极小的高频震动并传播到清洗槽内的溶液中发生空化作用。超声清洗机的工作频率一般为40~60 kHz,功率和温度可以在一定范围内进行调节。采用超声清

洗仪时, 果蔬汁原料需要置于清洗槽中, 使其受到均匀的超声波作用。

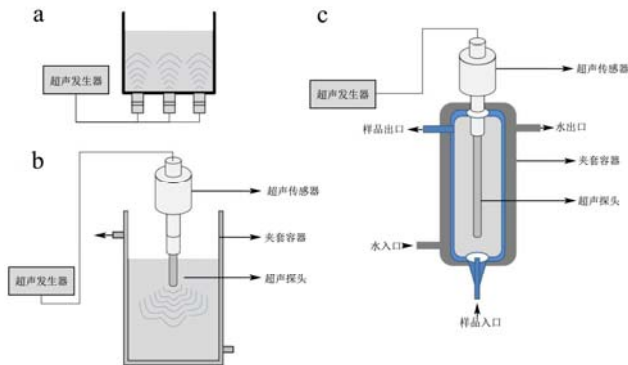


图1 超声波设备示意图

Fig.1 Schematic illustration of ultrasonic equipment

注: a 超声波清洗仪; b 超声波探头系统; c 连续超声波探头系统^[41]

超声波探头系统又称为超声波萃取仪, 或超声波细胞破碎仪, 主要由超声发生器、超声传感器、超声探头、夹套容器组成。超声波探头通过浸没在反应容器中释放超声波能量, 产生空化作用。由于超声波探头末端表面积非常狭小, 超声波探头可在短时间内释放大量能量, 使液体媒质快速升温。超声波细胞破碎仪的工作频率为 20~60 kHz, 功率调节一般不得超过 70%, 否则会造成探头损坏。另外, 超声波探头需要浸没在果蔬汁原料中, 并置于反应容器底部以上一定的距离, 通常是几厘米。超声波清洗仪和超声波探头系统仅能够进行非连续的果蔬汁超声加工, 而连续探头系统中超声探头内嵌于封闭的腔体中, 果蔬汁原料可进行连续化加工处理。

表1 超声波单独作用杀灭果蔬汁中微生物的研究汇总

Table 1 Summary of microorganism inactivation of fruit and vegetable juice by ultrasound individually

果蔬汁	微生物	微生物减少数量 (Log ₁₀ CFU/mL)	超声波设备	频率 /kHz	功率 /W
苹果汁	<i>Alicyclobacillus acidoterrestris</i> ATCC 49025 孢子	0	Vibra-Cell, VC 600, Sonic Materials Inc.	20	600
苹果汁	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> KE162	2.5	Vibra-Cell, VC 600, Sonic Materials Inc.	20	600
浓缩苹果汁	<i>Alicyclobacillus acidoterrestris</i> 孢子	<0.12	--	--	330
苹果汁	菌落总数	1.14	Ultrasonic cleaner, SB-500 DTY, Ningbo Scientz Biotechnology Co., Ltd.	25	500
苹果汁	酵母和真菌	1.30	Ultrasonic cleaner, SB-500 DTY, Ningbo Scientz Biotechnology Co., Ltd	25	500
苹果汁, 草莓汁, 橙汁	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> , <i>Pichia membranifacies</i> , <i>Wickerhamomyces Anomalous</i> , <i>Zygosaccharomyces bailii</i> , <i>Zygosaccharomyces rouxii</i> , <i>Candida norvegica</i>	2.0~2.5	Vibra-Cell, VC130, Sonic Materials Inc.	20	130

2 超声波杀灭果蔬汁中微生物的研究

2.1 超声波单独作用杀灭果蔬汁中微生物的研究

1920年, Harvey 等首次报道了超声波抑制发光细菌的作用^[42]。随后, 超声波对于不同食品中的腐败和致病微生物(如: 李斯特单胞菌、沙门氏菌、大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌、酿酒酵母和芽孢等)在模拟体系和食品体系中的抑制或杀灭作用的研究逐步展开^[42]。

Ugarte-Romero 等发现超声波(20 kHz、0.46 W/mL、40 °C、3 min)使 *Escherichia coli* K12 细胞表面发生凹陷^[44]。超声波通过空化作用在液体媒质中产生大量微小气泡, 气泡在运动过程中产生强剪切力, 协同气泡瞬间爆破产生局部高温和高压, 破坏微生物细胞结构, 导致细胞溶解^[45]。

另外, 超声波空化作用使水分子分解产生 H 和 OH, 并与氢原子重组形成过氧化氢, 攻击微生物细胞壁和细胞膜, 造成生物膜变薄、渗透性增加^[46]。而且, H 可与泄露的 DNA 链的磷酸骨架反应并造成磷酸酯链断裂, 在分子水平抑制微生物分裂繁殖^[47]。近二十年, 随着超声波技术和设备的进步和革新, 超声波对果蔬汁杀菌的研究和应用得到进一步提升, 表1汇总了部分超声波单独作用杀灭果蔬汁中微生物的研究。总的来说, 超声波的杀菌作用主要受到微生物种类、工作参数、物料环境等因素的影响。

接上页					
橙汁	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	1	Vibra-Cell, VC 600, Sonic Materials Inc.	20	600
橙汁	嗜温需氧菌	1.38	Ultrasonic unit, CPX 500, Cole-Parmer Instruments.	20	500
番茄汁	<i>Pichia fermentans</i>	5	Vibra-Cell, VC 1500, Sonic Materials Inc.	20	1500
胡萝卜汁	菌落总数	1.5	Vibra-Cell, VC 750, Sonic Materials Inc.	20	750
胡萝卜汁	酵母和真菌	1.8	Vibra-Cell, VC 750, Sonic Materials Inc.	20	750
蓝莓汁	菌落总数	0.8	Ultrasonic unit, CPX 500, Cole-Parmer Instrumental Company.	20	500
蓝莓汁	总大肠杆菌	1.1	Ultrasonic unit, CPX 500, Cole-Parmer Instrumental Company.	20	500
刺梨汁	<i>Escherichia coli</i>	2.3	Vibra-Cell, VCX 1500, Sonic Materials Inc.	20	1500
刺梨汁	<i>Escherichia coli</i>	7	Vibra-Cell, VCX 1500, Sonic Materials Inc.	20	1500

果蔬汁	振幅/($\mu\text{m}/\%$)	温度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/min	参考文献
苹果汁	95.2 μm	30 \pm 1 或 44 \pm 1	30	[4]
苹果汁	95.2 μm	30 \pm 1	30	[4]
浓缩苹果汁	--	--	10	[3]
苹果汁	70%	20	60	[7]
苹果汁	70%	20	60	[7]
苹果汁, 草莓汁, 橙汁	61 μm	40	10	[48]
橙汁	95.2 μm	20	40	[33]
橙汁	89.25 μm	10	8	[15]
番茄汁	61 μm	10	7.5	[23]
胡萝卜汁	70%	15	5	[20]
胡萝卜汁	70%	15	5	[20]
蓝莓汁	80%	25	8.3	[11]
蓝莓汁	80%	25	8.3	[11]
刺梨汁	60%	30~38.60	1	[17]
刺梨汁	60%	30~50.25	5	[17]

注: “--”表示未报道。

2.1.1 微生物种类对超声波杀菌作用的影响

超声波的杀菌作用与微生物的种类、形态相关。一般来说,芽孢对超声波的抗性强于微生物营养体,真菌的抗性强于细菌,需氧微生物的抗性强于厌氧微生物,球状细菌的抗性强于棒状细菌^[49,50]。目前,超声波对于革兰氏阴性细菌和革兰氏阳性细菌的作用存在争议。Monsen等比较了超声波(40 kHz、350 W、35 $^{\circ}\text{C}$ 、5 min)对革兰氏阴性细菌*Escherichia coli*大肠杆菌, *Haemophilus influenzae*流感嗜血杆菌, *Pseudomonas aeruginosa*绿脓杆菌和革兰氏阳性细菌*Staphylococcus aureus*金黄色葡萄球菌, *Enterococcus faecalis*粪肠球菌, *Staphylococcus epidermidis*表皮葡萄球菌的作用,结果表明革兰氏阳性细菌比革兰氏阳性

细菌对于超声波的耐受性更强,可能与细胞壁的厚度有关^[51]。革兰氏阳性细菌的细胞壁由多层肽聚糖组成,厚度为20~80 nm,而革兰氏阴性菌细胞壁肽聚糖层厚度仅为1~7 nm^[52,53]。但是,也有研究表明超声波对于两类细菌的作用没有显著差异^[54]。

2.1.2 工作参数对超声波杀菌作用的影响

超声波的杀菌作用与振幅、处理时间、功率密度、工作模式(连续或脉冲)、频率、物流流速等工作参数也有关系。一般而言,随着振幅、功率密度增加,处理时间延长,环境温度升高,超声波的杀菌作用逐渐增强。当环境温度低于50 $^{\circ}\text{C}$ 时,微生物数量的减少主要归因于超声波的空化作用,热效应对于微生物的抑制作用可以忽略不计;当环境温度大于50 $^{\circ}\text{C}$ 时,

热效应与超声波发生协同作用破坏微生物细胞壁,加速细胞溶解^[14]。Wu 等比较了不同功率密度(10、24 和 39 W/cm²)对于微生物细胞壁和细胞膜的破坏作用,发现 10 W/cm²作用下微生物细胞壁多糖比胞内蛋白释放速度快,而高强度 24 或 39 W/cm²作用下趋势相反,低功率密度超声在一定程度上提高了微生物细胞膜的通透性,加速营养成分运输,促进了细胞的新陈代谢^[55,56]。

Yamamoto 等比较了不同频率(20、585、864 和 1146 kHz)对于藻类微生物 *Chlamydomonas concordia* 和 *Dunaliella salina* 的作用,发现高频超声波对于微生物的破坏作用显著高于低频超声波,可能是频率升高使变压器传输能量增加,机械共振效率提升加剧了空化作用对于微生物的损伤^[57]。Bermúdez-Aguirre 等发现超声波(400 W, 24 kHz, 120 μm)在初始温度 60 °C 条件下对菠萝汁连续模式工作 10 min,环境温度达到 62.5 °C, *Saccharomyces cerevisiae* 酿酒酵母数量减少 6.5 个对数值;而同样条件下,采用脉冲模式(工作 5 s, 停止 5 s)工作 10 min,环境温度为 47.5 °C,微生物减少 5.2 个对数值。脉冲模式延迟了超声波的杀菌作用,连续模式更有利于空化气泡在爆破过程中积累能量,导致媒质温度升高,从而提高杀菌效率^[5]。

另外,在连续超声波探头系统的研究中发现物料流速对于超声波杀菌也有影响。Mohideen 等比较了不同流速(24 或 93.5 mL/min)条件下连续超声波(20 kHz, 500 W, 40%振幅)的杀菌作用,蓝莓汁中残留微生物的数量随着流速增加显著减少,可能是高流速使物料与超声波探头充分接触,从而提高了微生物受到高强度超声波作用的几率^[11]。

2.1.3 物料环境对超声波杀菌作用的影响

超声波的杀菌作用与果蔬汁的组分及环境因素也有关系。果蔬汁中的果肉颗粒和果胶等大分子组分对于微生物具有保护作用,可以不同程度降低空化作用 and 高温对于微生物的破坏作用^[5]。Valero 等发现向橙汁中加入果肉增加了微生物对于超声波的抗性,导致杀菌作用减弱^[14]。pH 对于超声波杀菌作用的影响目前仍存在争议,一些研究认为微生物在不同 pH 环境中对于超声波的抗性没有显著变化,有的研究认为酸性 pH 使微生物对于超声波的空化作用更加敏感,可以提高杀菌效率^[58]。Guerrero 等比较了超声波(20 kHz, 71.4 μm, 45 °C)在不同 pH(3.0 或 5.6)条件下对于酿酒酵母的作用,发现在 pH 3.0 条件下超声波的杀菌作用增加,可能是较低振幅作用下超声波杀菌作用减弱,而 pH 3.0 和环境温度产生协同杀菌作用^[58]。

另外,超声波可以利用环境因素提高杀菌效率。Carmen 等研究了低频超声(30 kHz, 40±5 W, 2 min)协同超临界二氧化碳(350 bar, 36 °C)对酿酒酵母的杀灭作用,发现超声波空化作用加速 CO₂ 溶解并破坏微生物细胞膜(磷脂双分子层),致使胞膜的渗透性发生严重改变,酵母数量减少 7 个对数值,而对照组经过 140 min 处理仅减少 6.7 个对数值^[60]。

2.1.4 超声波杀菌的模型拟合研究

超声波杀菌过程不完全符合反应级数动力学方法,杀菌动力学往往呈现出非线性,存在“肩部”(shoulder)或“拖尾”(tailing)现象,Weibull 模型、Gompertz 模型及 Log-linear+shoulder 模型等非线性的经验模型被用来分析超声波的杀菌过程^[5,43,61]。Gómez-López 等研究了超声波(20 kHz, 89.25 μm)在 10 °C 经过 10 min 处理对橙汁的杀菌作用,以残留微生物数量、处理时间为变量,采用 GinaFIT 软件提供的 8 种模型进行筛选,发现 Weibull 模型和 Log-linear+shoulder 模型对于需氧嗜温菌和酵母的杀菌作用拟合效果最好,两种模型的拟合度 R² 均达到 0.95 以上。Weibull 模型的形状参数 P>1,表明曲线向下凹,两种微生物的抑制速率指数 K_{max}(min⁻¹)较为接近,表明超声波对于细菌和酵母对于超声波的抗性没有显著差异。在 Log-linear+shoulder 模型中,需氧嗜温菌和酵母的对数曲线“肩部”分别处于 6.16 和 5.30 min,表明微生物在该时间点以前未受到显著的超声波抑制作用,与 Weibull 模型的特征相一致^[15]。

2.2 超声波结合其他技术杀灭果蔬汁中微生物的研究

目前,超声波技术单独应用于果蔬汁中的腐败菌和致病微生物难以达到完全致死效应^[61]。而超声波与其他杀菌技术同时或交替加工果蔬汁可以增强杀菌作用,如:温和热处理、高压、抑菌剂、臭氧、微波、激光、电场、高静压和紫外线等^[4,8,10,12,16,18,20,31~35]。表 2 汇总了部分超声波协同其他技术杀灭果蔬汁中微生物的研究,其中超声波与压力、热处理或者与两者联合应用的研究最为广泛,分别称为热超声波(thermo-ultrasonication)、压力超声波(manosonication)以及压热超声波(manothermosonication)^[62],超声波与热处理、压力产生协同作用,有效提高杀菌效率^[12]。

芽孢是某些细菌在生长发育后期,在细胞内部形成的圆形或椭圆形、厚壁、含水量低抗逆性强的休眠构造,菌体芽孢对高温、高渗透压、极端 pH、机械振动等许多理化因子有很强的抵抗力,如果不能有效的

杀灭或控制芽孢，芽孢萌发后会导致食品腐败^[3-4]。*Alicyclobacillus acidoterrestris* 嗜酸耐热菌是导致果汁酸败的主要菌种，其芽孢的抗热性非常强，可以抵抗常规果汁加工工艺中巴氏灭菌的温度。超声波单独处理 *A. acidoterrestris* 孢子的杀菌效果并不显著^[3,4,35]，Djas 等发现浓缩苹果汁经过 330 W 处理 10 min，*A. acidoterrestris* 孢子仅减少 0.12 个对数值^[3]。而超声波

结合短波紫外线、脉冲光等物理方法，可以有效提高杀灭孢子的效率^[4,35]。苹果汁连续经过 35 kHz、480 W 超声波处理 25 min 和短波紫外线（13.44 W/m²）处理 5 min，*A. acidoterrestris* 孢子减少 4 个对数值^[35]；连续经过 20 kHz、600 W 超声波处理 10 min 和脉冲光（3 pulses/s，71.6 J/cm²）处理 1 min，苹果汁中的 *A. acidoterrestris* 孢子减少 5.8 个对数值^[4]。

表 2 超声波结合其他技术杀灭果蔬汁中微生物的研究汇总

Table 2 Summary of microorganism inactivation of fruit and vegetable juice by ultrasound combined with other techniques

果蔬汁	微生物	微生物减少数量/ (Log ₁₀ CFU/mL)	结合的技术及处理条件	频率/kHz	功率/W
橙汁	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	>4.35	微波(350 W)	20	778.2
黑莓汁	真菌和酵母	1.56	微波(453 W, 60 s) 柠檬酸(500 mg/kg)	20	300
苹果汁	<i>Alicyclobacillus acidoterrestris</i> 孢子	3.5	紫外辐照(13.44 W/m ²)	35	120~480
苹果汁	<i>Escherichia coli</i> ATCC 35218	3.5	紫外辐照(18.7 kJ/m ²)	20	600
菠萝汁	<i>Wickerhamomyces anomalus</i> 孢子	2.07	苯甲酸钠(200×10 ⁻⁶) 柑橘提取物(50×10 ⁻⁶)	20	130
蓝莓汁	<i>Escherichia coli</i> O157:H7	5.85	压力(350 MPa)	40	700
芒果汁	<i>Escherichia coli</i> O157:H7	5	热处理(60 °C)	25	200
芒果汁	<i>Salmonella Enteritidis</i>	9	热处理(60 °C)	25	200
梨汁	菌落总数, 真菌和酵母	3.4~4.0	热处理(65 °C)	20	750
苹果汁	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> KE 162	6.4	脉冲光(3 pulses/s, 71.6 J/cm ² , 60 s)	20	600
苹果汁	<i>Alicyclobacillus acidoterrestris</i> ATCC 49025 孢子	5.8	脉冲光(3 pulses/s, 71.6 J/cm ² , 60 s)	20	600
胡萝卜汁	菌落总数, 真菌和酵母	2.2~2.6	高静压(250 MPa, 10 min)	20	750
橙汁	<i>Staphylococcus aureus</i>	6.8	热处理(55 °C), 高压脉冲电场 (40 kV/cm, 150 μs)	30	500
葫芦汁	菌落总数	0.18	漂烫(90 °C, 5 min)	50	500
果蔬汁	振幅/(μm/%)	温度/°C	时间/min	参考文献	
橙汁	--	35	11	[16]	
黑莓汁	40%	20	10	[10]	
苹果汁	--	25	25	[35]	
苹果汁	95 μm	40±1	20	[33]	
菠萝汁	80%	--	4	[34]	
蓝莓汁	80%	40	5	[12]	
芒果汁	--	60	7	[8]	
芒果汁	--	60	3	[8]	
梨汁	70%	65	10	[18]	
苹果汁	95.2 μm	44~56	10	[32]	
苹果汁	95.2 μm	44~56	30	[4]	
胡萝卜汁	70%	15	5	[20]	
橙汁	--	55	10	[31]	
葫芦汁	70%	25	20	[21]	

注：“-”表示未报道。

3 超声波降解果蔬汁中农药残留的研究

农药残留是影响果蔬汁质量水平的一个重要因素，为保障消费者的健康与安全，降低果蔬汁中的农药残留显得日益重要^[69]。超声波可以不同程度降解果蔬汁中的农药残留，表3汇总了相关研究。

浓缩苹果汁是我国果汁类产品国际贸易的主导项目，而农药残留是制约苹果汁国际化发展的关键问题之一。

惠卫甲研究了超声波降解苹果汁中虫菊酯类和氨

基甲酸酯类农药的作用，300 W、55 °C处理45 min，虫菊酯类农药氯菊酯、氟氯氰菊酯、氟氰戊菊酯、溴氰菊酯分别降解了96.42%、92.97%、91.76%、100.00%；240 W、50 °C处理30 min 氨基甲酸酯类农药灭多威、抗蚜威、克百威分别降解了66.74%、77.51%、75.84%。结果表明超声波通过空化作用可以有效降低苹果汁中的农药残留，而且超声波处理对苹果汁品质影响不大，对色值略有影响，对果汁的可溶性固形物含量、总糖含量、总酸含量和透光率几乎没有影响^[68]。

表3 超声波降解果蔬汁中农药的相关研究汇总

Table 3 Summary of pesticide and mycotoxin degradation of fruit and vegetable juice by ultrasound

果蔬汁	农药	初始浓度/(mg/L)	降解率/%	频率/kHz	功率/W	温度/°C	时间/min	参考文献
苹果汁	甲拌磷	2.7	71	20	650	15±1	30	[2]
苹果汁	毒死蜱	0.163	85.8	20	900	65	85	[63]
苹果汁	拟除虫菊酯	10	62.17	--	416	37	18	[64]
玉米汁	甲草胺	0.01	83.22	--	1900	--	60	[65]
苹果汁	甲胺磷	--	9.91	40	300	30±2	60	[66]
苹果汁	乙酰甲胺磷	--	10.06	40	300	30±2	60	[67]
苹果汁	乐果	5	8.53	40	300	30±2	60	[67]
苹果汁	甲基对硫磷	5	10.98	40	300	30±2	60	[67]
苹果汁	马拉硫磷	5	8.75	40	300	30±2	60	[67]
苹果汁	杀螟硫磷	5	24.07	40	300	30±2	60	[67]
苹果汁	对硫磷	5	26.24	40	300	30±2	60	[67]
苹果汁	氯菊酯	5	96.42	40	300	55	45	[68]
苹果汁	氟氯氰菊酯	5	92.97	40	300	55	45	[68]
苹果汁	氟氰戊菊酯	5	91.76	40	300	55	45	[68]
苹果汁	溴氰菊酯	5	100	40	300	55	45	[68]
苹果汁	灭多威	5	66.74	40	240	50	45	[68]
苹果汁	抗蚜威	5	77.51	40	240	50	45	[68]
苹果汁	克百威	5	75.84	40	240	50	45	[68]

注：“-”表示未报道。

4 超声波对果蔬汁中酶的作用

多酚氧化酶 (Polyphenol Oxidase, PPO)、过氧化物酶 (Peroxidase, POD)、抗坏血酸过氧化物酶 (Ascorbate peroxidase, APX)、果胶甲基酯酶 (Pectin Methylsterase, PME) 和脂肪氧合酶 (Lipoxygenase, LOX) 等与果蔬汁的品质密切相关，PPO、POD和APX是果蔬汁褐变的主要影响因素；PME可以降解果胶，破坏果蔬汁混浊体系；LOX可以催化果蔬汁中不饱和脂肪酸氧化形成共轭氢过氧化物，产生难闻的脂氧化气味。超声波通过空化作用改变果蔬汁中酶的活性、底物的组成和酶促反应速率，酶的钝化作用可以降低

果蔬汁在加工过程中营养成分和风味的损失，保持稳定性，延长货架期。表4列出了超声波单独或结合其他技术对于果蔬汁中酶活性的作用研究。Dias等研究了超声波 (19 kHz, 500 W) 对于红毛榴莲汁中PPO的影响，结果表明随着振幅增加 (20%~100%)、处理时间延长 (2~10 min)，超声波对于酶钝化作用逐渐增强，PPO残余活性逐渐降低。超声波可能通过空化作用破坏了多肽结构中的范德华力和氢键，导致酶发生不可逆的抑制和破坏^[24]。同样，Fonteles等发现超声波 (19 kHz, 500 W, 20%~60%，2~10 min) 可以抑制甜瓜汁中PPO、POD、APX的活性^[28]。但是，超声波单独作用对于果蔬汁中的酶钝化作用有限，而超声波

结合其他技术如：热处理、高静压、干冰处理等可以提高酶的钝化作用^[7,18-20,70]。Abid等发现超声波（25 kHz, 500 W, 70%振幅）单独处理 60 min对于苹果汁中POD、PME、PPO的活性无显著影响；高静压（250 MPa）单独处理 10 min酶的活性显著降低，残留活性

依次为 81.93%、75.46%、77.63%；超声波与高静压依次处理苹果汁使酶的活性进一步降低，残留活性依次为 70.99%、63.87%、66.12%，表明超声波与高静压对酶的钝化产生协同作用^[7]。

表 4 超声波单独或结合其他技术对于果蔬汁中酶活性的作用的汇总

Table 4 Summary of the effect of ultrasound used alone or combined with other techniques on the enzyme activity of fruit and vegetable juice

果蔬汁	酶	残留活性/%	结合的技术及处理条件	频率/kHz	功率/W	振幅/($\mu\text{m}/\%$)	温度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/min	参考文献
红毛榴莲汁	PPO	85.27 \pm 1.71	无	19	500	90%	43.9	9	[24]
甜瓜汁	POD	114.34 \pm 2.67	无	19	500	20%	--	2	[28]
甜瓜汁	PPO	88.18 \pm 1.80	无	19	500	20%	--	2	[28]
甜瓜汁	APX	43.26 \pm 1.83	无	19	500	20%	--	2	[28]
苹果汁	PPO	1.91 \pm 0.23	热处理(65 $^{\circ}\text{C}$)	20	750	12.7 μm	65	10	[18]
番茄汁	PME	94.38	热处理(70 $^{\circ}\text{C}$)	24	400	75 μm	60	20	[70]
苹果汁	POD	32.67 \pm 0.06	高静压(450 MPa, 10 min)	25	500	70%	20	60	[7]
苹果汁	PME	23.93 \pm 0.05	高静压(450 MPa, 10 min)	25	500	70%	20	60	[7]
苹果汁	PPO	21.13 \pm 0.05	高静压(450 MPa, 10 min)	25	500	70%	20	60	[7]
胡萝卜汁	POD	63.26 \pm 0.17	高静压(250 MPa, 10 min)	20	750	70%	15	5	[20]
胡萝卜汁	PPO	53.18 \pm 0.17	高静压(250 MPa, 10 min)	20	750	70%	15	5	[20]
胡萝卜汁	PME	58.45 \pm 0.16	高静压(250 MPa, 10 min)	20	750	70%	15	5	[20]
胡萝卜汁	LOX	55.17 \pm 0.35	高静压(250 MPa, 10 min)	20	750	70%	15	5	[20]
番石榴汁	PPO	200	干冰处理(1 g/mL)	35	700	--	--	30	[19]

注：“--”表示未报道。

5 超声波对果蔬汁品质的作用

5.1 超声波对果蔬汁营养成分的作用

果蔬汁富含膳食纤维、维生素、有机酸、糖和矿物质元素等营养成分，对人体健康具有重要意义。传统热加工造成果蔬汁营养损失导致品质降低，超声波作为一种非热杀菌技术可以在加工和贮藏过程中能够最大程度保留果蔬汁中糖、酸、维生素、多酚和胡萝卜素等固有的营养成分，以及抗氧化水平^[7,11,15,18,20,21,24,27,71-75]。

5.1.1 可溶固形物和可滴定酸

糖和酸是果蔬汁中的基本营养成分，糖酸比值与果蔬汁产品的口感和保质期密切相关。部分研究表明超声波对于果蔬汁 pH、可滴定酸和可溶固形物含量没有显著影响^[11,18,20,71]；也有研究得出相反的结论，超声波可以显著提高苹果汁中蔗糖、果糖和葡萄糖的含量^[76]，以及刺梨汁中的可滴定酸的含量^[17]。

5.1.2 维生素 C

维生素 C 是人体必需的营养元素，在高温和有氧

条件下容易发生降解。Saeduddin 等发现超声波（20 kHz, 750 W, 10 min）在 45~65 $^{\circ}\text{C}$ 显著降低了梨汁中维生素 C 的含量，在 25 $^{\circ}\text{C}$ 显著提高了维生素 C 的含量，可能与空化作用去除果汁中的溶解氧有关^[18]。同样，超声波（20 kHz, 400 W, 50~58 $^{\circ}\text{C}$, 2 min）可以显著抑制胡萝卜汁在贮藏过程中维生素 C 发生降解，未经处理的胡萝卜汁在 4 $^{\circ}\text{C}$ 经过 10 d 贮藏后维生素 C 降解了 35%，而超声波处理使维生素 C 的降解率控制在 17% 以内^[77]。

5.1.3 多酚

花青素、黄酮、黄烷醇和单宁酸等多酚类化合物参与形成食品中感官品质形成，受到环境 pH、温度、光照、氧气、多酚氧化酶和金属离子等因素的影响，容易发生降解、生物活性降低。青柠汁经过超声波（25 kHz, 700 W, 20 $^{\circ}\text{C}$, 30~60 min）处理后总酚、总黄酮和总黄酮醇的含量显著增加^[73]。一方面，可能是超声波产生强剪切力导致细胞壁破坏，多酚类化合物从细胞内释放；另一方面，空化作用产生的羟基自由基加入到酚类化合物的芳香环的临位或对位上，结构发生改变^[71]。同样，Saeduddin 等发现梨汁经过超声波

(20 kHz, 750 W, 25 °C, 10 min) 处理, 总酚和总黄酮的含量显著增加, 而在 45~65 °C 条件下多酚类化合物的含量显著降低, 表面温度升高导致多酚发生降解^[11,18]。

5.1.4 类胡萝卜素

类胡萝卜素是体内维生素 A 的主要来源, 还具有抗氧化、免疫调节、抗癌和延缓衰老等功能。光、热、金属离子和酶等均会破坏类胡萝卜素的稳定性, 导致氧化降解。Jabbar 等发现超声波 (20 kHz, 750 W, 70% 振幅, 15 °C, 5 min) 可以显著增加胡萝卜汁中总胡萝卜素、β-胡萝卜素和番茄红素的含量^[20]。同样, Rawson 等发现不同的工艺参数 (20 kHz, 1500 W, 24.1~60 μm, 25~45 °C, 2~10 min) 对于西瓜汁中的番茄红素含量有显著影响, 随着振幅、温度增加, 处理时间延长, 番茄红素发生降解^[78]。

5.1.5 抗氧化水平

果蔬汁中的维生素 C、多酚类化合物、类胡萝卜

素等活性成分具有抗氧化活性, 能够清除体内有害自由基, 从而服用有害自由基带来的氧化损伤。Saeeduddin 等比较了巴氏杀菌 (65 °C, 10 min 或 95 °C, 2 min) 和超声波 (20 kHz, 750 W, 70% 振幅, 25~65 °C, 10 min) 对梨汁抗氧化活性的影响, 巴氏杀菌处理显著降低了梨汁的抗氧化活性, 而超声波杀菌显著增加了梨汁的抗氧化活性, 25 °C 处理时活性最高, 结果表明抗氧化活性与梨汁中维生素 C 和多酚类化合物的含量相关^[18]。

5.2 超声波对果蔬汁颜色的作用

颜色是消费者评价果蔬汁产品品质的主要指标, 也是果蔬汁在加工和贮藏过程中的重要的质量控制参数。果蔬汁中富含花青素、胡萝卜素、叶绿素和番茄红素等天然色素, 但是在热加工过程中天然色素容易发生热降解或异构化, 在果蔬汁贮藏过程中容易发生酶促褐变。

表 5 超声波单独或结合其他技术对于果蔬汁颜色的作用的汇总

Table 5 Summary of the effect of ultrasound used alone or combined with other techniques on the colour of fruit and vegetable juice

果蔬汁	颜色的变化	结合的技术及处理条件	超声波工艺条件	参考文献
橙汁	略微变亮, 变绿, 变黄。	无	20 kHz, 500 W, 89.25 μm, 6 min	[15]
番茄汁	略微变暗, 变绿, 变蓝。	无	20 kHz, 1500 W, 61 μm, 10 min, 32~45 °C	[23]
苹果汁	略微变暗, 变绿, 变黄。	无	25 kHz, 500 W, 70%, 30~90 min	[71]
菠萝汁	略微变暗, 变红, 变蓝。	无	24 kHz, 400 W, 40 °C, 10 min	[5]
蔓越莓汁	略微变暗, 变绿, 变蓝。	无	24 kHz, 400 W, 40 °C, 10 min	[5]
葡萄汁	略微变暗, 变红, 变黄。	无	24 kHz, 400 W, 40 °C, 10 min	[5]
草莓	略微变亮, 变绿, 变蓝。	无	20 kHz, 1500 W, 70%, 5 min	[79]
黑莓	略微变暗, 变红, 变绿。	无	20 kHz, 1500 W, 70%, 10 min	[80]
菠萝汁	略微变亮, 变红, 变黄。	热处理(60 °C)	24 kHz, 400 W, 60 °C, 10 min	[5]
蔓越莓汁	略微变亮, 变绿, 变蓝。	热处理(60 °C)	24 kHz, 400 W, 60 °C, 10 min	[5]
葡萄汁	略微变亮, 变绿, 变蓝。	热处理(60 °C)	24 kHz, 400 W, 60 °C, 10 min	[5]
蔓越莓汁	略微变亮。	450 MPa, 5 min	18 kHz, 600 W/L, 5 min	[85]
胡萝卜汁	略微变暗, 变绿, 变蓝。	250 MPa, 10 min	20 kHz, 750 W, 70%, 15 °C, 5 min	[20]

表 5 总结了超声波单独或结合其他技术对于果蔬汁颜色的作用。Tiwari 等研究了超声波 (20 kHz, 0.30~0.81 W/mL, 24.4~61 μm, 25~39.9 °C, 0~10 min) 对于橙汁、草莓汁、葡萄和黑莓汁的作用, 结果表明颜色参数 (L* (lightness, 0=黑色, 100=白色)、a* (-a*=绿色, +a*=红色) 和 b* (-b*=蓝色, +b*=黄色)) 呈现不同的变化规律^[79-83]。随着振幅水平增加、处理时间延长, 橙汁和草莓汁 a*、b* 逐渐降低, L*、褐变指数和总色差逐渐增加。但是, 经过超声波处理的葡萄汁 a*、L* 显著增加, 而 b* 显著减少。随着处理时间延长, 黑莓汁 a* 和总色差逐渐增加, 而振幅水平对于 a* 和总色差没有显著影响。而且, 超声波处理时间对

于黑莓汁的 L* 没有显著影响, 但是当振幅增加时, L* 逐渐增加。颜色参数 L* 主要与褐变色素的含量相关, 5-羟甲基糠醛 (5-hydroxymethylfurfural, HMF) 是主要的组成成分; a* 主要与花青素的降解和美拉德反应产物的含量相关。同样, Cheng 等发现经过超声波 (35 kHz, 20 °C, 30 min) 处理的番石榴汁 a* 和 b* 显著增加, L* 显著减少^[19]。而超声波 (28 kHz, 20 °C, 30~90 min) 使葡萄柚汁的 L*、a* 和 b* 均减少, 但是通过肉眼观察难以发现果汁的颜色发生了改变^[72]。

经过超声波处理与未经处理的果蔬汁的颜色差异的量级可以通过总色差 ($\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$) 来表示, 根据肉眼对于颜色差异的感知可以

分为：不可感知（0~0.5），稍微感知（0.5~1.5），显而易见（1.5~3.0），可以感知（3.0~6.0），极大感知（6.0~12.0）^[84]。Rawson 等^[62]研究了超声波（20 kHz，24.4~61 μm ，25~45 $^{\circ}\text{C}$ ，0~10 min）对西瓜汁颜色的影响，当温度和振幅分别为 25 $^{\circ}\text{C}$ 和 24.1 μm 时，西瓜汁的 L* 较低；当处理时间和振幅分别增加至 10 min 和 61 μm 时，L* 值增加。而且，L* 和 a* 值随着温度的增加而增加。在最高的振幅和最长的处理时间作用下，可以通过肉眼辨别颜色的差异，总色差 $\Delta E > 3$ ^[78]。Adekunte 等研究了超声波（20 kHz，1500 W）对于番茄汁颜色的影响，发现随着振幅增加（24.4~61.0 μm ）和处理时间延长（2~10 min），L*、a* 和 b* 逐渐减少，总色差从 0 增加到 6^[23]。总的来说，超声波通过空化作用钝化果蔬汁中多酚氧化酶、去除溶解氧，抑制酶促褐变；同时，超声波在一定程度上破坏细胞壁、释放天然色素化合物，使果蔬汁在加工及贮藏过程中保持较好的颜色水平。

5.3 超声波对果蔬汁香气的作用

香气品质是判断和评价果蔬汁产品的关键指标之一。香气成分保留得较好意味着产品的新鲜度、感官质量较好。传统的热杀菌对果蔬汁香气成分影响较大，容易导致热敏性香气成分分解以及不良风味物质的产生，果蔬汁的品质降低。林雯雯等发现橙汁经过超声波（20~25 kHz，900 W，10%~50% 振幅，15 $^{\circ}\text{C}$ ，10 min）处理后产生两种新的物质（芹子烯、古芸烯），同时有些原有香气物质（如壬醛、香茅醛）消失，大部分香气物质种类不变，而其含量发生变化。超声波处理使橙汁中的醇类、醛类等更好地转化为酯类物质，使得香气更加突出。但是，橙汁中香芹酮等不良组分的含量有所增加^[86]。同样，Jambrak 等发现蔓越莓果汁和饮料（含 30% 果汁）经过超声波（20 kHz，600 W，60~90 μm ，20~60 $^{\circ}\text{C}$ ，10 min）处理后产生了癸醛、月桂酸异丙酯、2-乙基己酸-2-乙基己基酯等新的化合物，同时超声波处理使样品中 D-柠檬烯、蒎品烯、苯甲酸等芳香族化合物含量显著减少。随着功率密度增加（33.94~63.9 W/cm^2 ），果汁香气物质组成受到的影响逐渐增加。超声波空化作用产生的极端物理环境（温度 5500 K、压力 1000 MPa）和自由基的形成是芳香族香气成分发生一系列解聚和聚合反应的主要原因。另外，羟基自由基可能参与芳香族化合物降解、酯化、开环、查尔酮合成的过程。通过感官评价表明果汁的香气品质经过超声波处理后略有降低，但是在消费者可接受范围内^[87]。

5.4 超声波对果蔬汁浊度和稳定性作用

果蔬汁在贮藏的过程中悬浮颗粒受到重力作用发生沉降导致固液相分离，破坏产品的稳定性，浊度降低。根据 Stokes 定律，果肉的沉降速度与颗粒直径、颗粒密度与流体密度之差成正比，与流体粘度成反比。栗星发现橙汁的粒径经过超声波（20 kHz，750 W，70%，5~20 min）处理时间延长，分布范围逐渐变窄。橙汁经过 20 min 超声波处理，粒径分布范围由 150~600 μm 降低至 100~400 μm 。可能是超声波通过空化作用使聚合粒子发生机械振动，进而导致解聚、粒径变小^[88]。同样，Ertugay 等发现随着振幅（50~100 μm ）和温度（40~60 $^{\circ}\text{C}$ ）增加，超声波（24 kHz，400 W，5~10 min）可以显著提高苹果汁的浊度和稳定性，可能是高温有利于空化气泡发生内爆使聚合粒子发生分解^[89]。桃汁经过超声波（20 kHz，1000 W，22 \pm 3 $^{\circ}\text{C}$ ，6~15 min）处理浊度和稳定性显著提高，产品在贮藏期不发生沉降。桃汁经过超声波处理表观粘度减小，可能与果胶分子降解有关^[90]。总的来说，超声波处理对于果蔬汁具有均质作用，对于提高果蔬汁的浊度和稳定性具有积极的作用。

6 展望

近年来，超声波作为一种非热加工技术广泛的应用于果蔬汁加工，研究表明超声波可以在一定程度上抑制或杀灭果蔬汁中的腐败和致病微生物，但是还不能达到完全致死的杀菌效果。为此，许多研究者将超声波与其他技术有机结合，进一步提升超声波的杀菌效率。总的来说，超声波单独或协同其他技术能够较好的保持果蔬汁的营养品质，改善理化特性，降解农药残留。但是，目前超声波对果蔬汁的加工技术还不成熟，从实验室走向商业化应用面临很多挑战。首先，超声波的杀菌作用很大程度取决于果蔬汁基质的组成和性质，需要针对不同品种的果蔬汁开发相应的加工工艺和技术参数；其次，提升超声波设备的杀菌效率和加工能力，开发工业化规模的连续化、自动化生产设备；最后，将超声波技术与现有的成熟技术协同使用，降低能耗，提高生产效率。

参考文献

- [1] Soria A C, Villamiel M. Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: A review [J]. Trends in Food Science and Technology, 2010, 21(7): 323-331
- [2] Zhang Y, Zhang Z, Chen F, et al. Effect of sonication on eliminating of phorate in apple juice [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2012, 19(1): 43-48

- [3] Djas M, Bober M, Henczka M. New methods for inactivation of *Alicyclobacillus acidoterrestris* spores in apple juice concentrate [J]. Challenges of Modern Technology, 2011, 2(2): 46-49
- [4] Ferrario M, Alzamora S M, Guerrero S. Study of the inactivation of spoilage microorganisms in apple juice by pulsed light and ultrasound [J]. Food Microbiology, 2015, 46: 635-642
- [5] Bermúdez-Aguirre D, Barbosa-Cánovas G V. Inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* in pineapple, grape and cranberry juices under pulsed and continuous thermo-sonication treatments [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 108(3): 383-392
- [6] Gabriel A A. Microbial inactivation in cloudy apple juice by multi-frequency *Dynashock* power ultrasound [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2012, 19(2): 346-351
- [7] Abid M, Jabbar S, Hu B, et al. Synergistic impact of sonication and high hydrostatic pressure on microbial and enzymatic inactivation of apple juice [J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 59(1): 70-76
- [8] Kiang W, Bhat R, Rosma A, et al. Effects of thermosonication on the fate of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella* Enteritidis in mango juice [J]. Letters in Applied Microbiology, 2013, 56(4): 251-257
- [9] Santhirasegaram V, Razali Z, Somasundram C. Effects of thermal treatment and sonication on quality attributes of Chokanan mango (*Mangifera indica* L.) juice [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2013, 20(5): 1276-1282
- [10] Pérez-Grijalva B, Herrera-Sotero M, Mora-Escobedo R, et al. Effect of microwaves and ultrasound on bioactive compounds and microbiological quality of blackberry juice [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 87: 47-53
- [11] Mohideen F W, Solval K M, Li J, et al. Effect of continuous ultra-sonication on microbial counts and physico-chemical properties of blueberry (*Vaccinium corymbosum*) juice [J]. LWT- Food Science and Technology, 2015, 60: 563-570
- [12] Zhu J, Wang Y, Li X, et al. Combined effect of ultrasound, heat, and pressure on *Escherichia coli* O157:H7, polyphenol oxidase activity, and anthocyanins in blueberry (*Vaccinium corymbosum*) juice [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 37: 251-259
- [13] 张仲阳,张向超,俞龙泉,等.超声波协同 ClO_2 对西瓜汁灭菌效果的影响[J].食品工业科技,2014,35(7):172-177
ZHANG Zhong-yang, ZHANG Xiang-chao, YU Long-quan, et al. Effect of ultrasound assisting ClO_2 on the sterilization of watermelon juice [J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(7): 172-177
- [14] Valero M, Recrosip N, Saura D, et al. Effects of ultrasonic treatments in orange juice processing [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(2): 509-516
- [15] Gómez-López V M, Orsolani L, Martínez-Yépez A, et al. Microbiological and sensory quality of sonicated calcium-added orange juice [J]. LWT-Food Science and Technology, 2010, 43(5): 808-813
- [16] Samani B H, Khoshtaghaza M H, Lorigooini Z, et al. Analysis of the combinative effect of ultrasound and microwave power on *Saccharomyces cerevisiae* in orange juice processing [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2015, 32: 110-115
- [17] Cruz-Cansino N S, Reyes-Hernández I, Delgado-Olivares L, et al. Effect of ultrasound on survival and growth of *Escherichia coli* in cactus pear juice during storage [J]. Brazilian Journal of Microbiology, 2016, 47(2): 431-437
- [18] Saeeduddina M, Abid M, Jabbar S, et al. Quality assessment of pear juice under ultrasound and commercial pasteurization processing conditions [J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 64(1): 452-458
- [19] Cheng L H, Soh C Y, Liew S C, et al. Effects of sonication and carbonation on guava juice quality [J]. Food Chemistry, 2007, 104(4): 1396-1401
- [20] Jabbar S, Abid M, Hu B, et al. Influence of sonication and high hydrostatic pressure on the quality of carrot juice [J]. International Journal of Food Science Technology, 2014, 49(11): 2449-2457
- [21] Bhat S, Sharma H K. Combined effect of blanching and sonication on quality parameters of bottle gourd (*Lagenaria siceraria*) juice [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2016, 33: 182-189
- [22] José J F B S, Vanetti M C D. Effect of ultrasound and commercial sanitizers in removing natural contaminants and *Salmonella enterica* Typhimurium on cherry tomatoes [J]. Food Control, 2014, 24(1-2): 95-99
- [23] Adekunle A O, Tiwari B K, Cullen P J, et al. Effect of sonication on colour, ascorbic acid and yeast inactivation in tomato juice [J]. Food Chemistry, 2010, 122(3): 500-507
- [24] Dias D R C, Barros Z M P, Carvalho C B O, et al. Effect of sonication on soursop juice quality [J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 62(1-2): 883-889
- [25] Tomadoni B, Cassani L, Ponce A, et al. Optimization of ultrasound, vanillin and pomegranate extract treatment for

- shelf-stable unpasteurized strawberry juice [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 72: 475-484
- [26] 栗星,包海蓉.超声波对橙汁的杀菌特性研究[J].食品科学, 2008,29(8):346-350
LI Xing, BAO Hai-rong. Study on sterilization characteristics of ultrasound for orange juice [J]. *Food Science*, 2008, 29(8): 346-350
- [27] 王文宗,李冰,田应娟,等.超声波对胡萝卜汁杀菌效果的研究[J].食品科学,2009,30(22):58-60
WANG Wen-zong, LI Bing, TIAN Ying-juan, et al. Ultrasonic sterilization of carrot Juice [J]. *Food Science*, 2009, 30(22): 58-60
- [28] Foteles T V, Costa M G M, Jesus A L T, et al. Power ultrasound processing of cantaloupe melon juice: Effects on quality parameters [J]. *Food Research International*, 2012, 48(1): 41-48
- [29] USFDA (2000). Kinetics of microbial inactivation for alternative food processing technologies. In U.S. Food, & U. S. Food & D. Administration (Eds.), USFDA CFSAN-FDA (Center for Food Safety and Applied Nutrition.)
- [30] 郭丽娟,丘泰球,范晓丹.超声波协同臭氧处理对梨汁中微生物的影响[J].食品科技,2007,32(5):73-75
GUO Li-juan, QIU Tai-qiu, FAN Xiao-dan. Effect of ultrasonic-ozone treatments on microorganisms in pear juice [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2007, 32(5): 73-75
- [31] Walkling-Ribeiro M, Noci F, Riener J, et al. The impact of thermosonication and pulsed electric fields on *Staphylococcus aureus* inactivation and selected quality parameters in orange Juice [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2008, 2(4): 422-430
- [32] Ferrario M, Guerrero S. Impact of a combined processing technology involving ultrasound and pulsed light on structural and physiological changes of *Saccharomyces cerevisiae* KE 162 in apple juice [J]. *Food Microbiology*, 2017, 65: 83-94
- [33] Char C D, Mitilinaki E, Guerrero S N, et al. Use of high-intensity ultrasound and UV-C light to inactivate some microorganisms in fruit juices [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2010, 3(6): 797-803
- [34] Bevilacqua A, Campaniello D, Sinigaglia M, et al. Combination of ultrasound and antimicrobial compounds towards *Pichia* spp. and *Wickerhamomyces anomalus* in pineapple juice [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 64(2): 616-622
- [35] Tremarin A, Brandão T R S, Silva C L M. Application of ultraviolet radiation and ultrasound treatments for *Alicyclobacillus acidoterrestis* spores inactivation in apple juice [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 78: 138-142
- [36] 张永林,杜先锋.超声波及其在粮食食品工业中的应用[J].西部粮油科技,1999,24(2):14-16
ZHANG Yong-lin, DU Xian-feng. Ultrasonic and its application in food industry [J]. *Western Grain and Oil Technology*, 1999, 24(2): 14-16
- [37] Cárcel J A, García-Pérez J V, Benedito J, et al. Food process innovation through new technologies: use of ultrasound [J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 110(2): 200-207
- [38] 葛飞.超声波技术在食品工业中的应用[J].肉类工业,1999, 9:43-45
GE Fei. The application of ultrasonic technology in food industry [J]. *Meat Industry*, 1999, 9: 43-45
- [39] Povey M J W, Wilkinson J M. Application of ultrasonic pulse-echo techniques to egg albumen quality testing: A preliminary report [J]. *British Poultry Science*, 1980, 21(6): 489-495
- [40] Golmohamadi A, Möller G, Powers J, et al. Effect of ultrasound frequency on antioxidant activity, total phenolic and anthocyanin content of red raspberry puree [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2013, 20(5): 1316-1323
- [41] Zinoviadou K G, Galanakis C M, Brnčić M, et al. Fruit juice sonication: Implications on food safety and physicochemical and nutritional properties [J]. *Food Research International*, 2015, 77(4): 743-752
- [42] Harvey E N, Loomis A. The destruction of luminous bacteria by high frequency sound waves [J]. *Journal of Bacteriology*, 1929, 17(5): 373-376
- [43] 舒国伟,陈合,吕嘉栎,等.超声波在食品灭菌中的研究进展[J].中国调味品,2006,11:11-16
SHU Guo-wei, CHEN He, LV Jia-li, et al. Progress of research on ultrasonic sterilization in food [J]. *China Condiment*, 2006, 11: 11-16
- [44] Ugarte-Romero E, Feng H, Martin S E, et al. Inactivation of *Escherichia coli* with power ultrasound in apple cider [J]. *Journal of Food Science*, 2006, 71(2): 102-108
- [45] Chandrapala J, Leong T. Ultrasonic processing for dairy applications: recent advances [J]. *Food Engineering Reviews*, 2015, 7(2): 143-158
- [46] Sango D M, Abela D, McElhatton A, et al. Assisted ultrasound applications for the production of safe foods [J].

- Journal of Applied Microbiology, 2014, 116(5): 1067-1083
- [47] Salleh-Mack S Z, Roberts J S. Ultrasound pasteurization: The effects of temperature, soluble solids, organic acids and pH on the inactivation of *Escherichia coli* ATCC 25922 [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2007, 14(3): 323-329
- [48] Bevilacqua A, Speranza B, Campaniello D, et al. Inactivation of spoiling yeasts of fruit juices by pulsed ultrasound [J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(8): 2189-2197
- [49] Chandrapalaa J, Oliver C, Kentish S et al. Ultrasonics in food processing-Food quality assurance and food safety [J]. Trends in Food Science & Technology, 2012, 26(2): 88-98
- [50] Ananta E, Voigt D, Zenker M, et al. Cellular injuries upon exposure of *Escherichia coli* and *Lactobacillus rhamnosus* to high-intensity ultrasound [J]. Journal of Applied Microbiology, 2005, 99(2): 271-278
- [51] Monsen T, Lövgren E, Widerström M, et al. In vitro effect of ultrasound on bacteria and suggested protocol for sonication and diagnosis of prosthetic infections [J]. Journal of Clinical Microbiology, 2009, 47(8): 2496- 2501
- [52] Drakopoulou S, Terzakis S, Fountoulakis M S, et al. Ultrasound-induced inactivation of gram-negative and gram-positive bacteria in secondary treated municipal wastewater [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2009, 16(5): 629-634
- [53] M Villamiel, PD Jong. Inactivation of *Pseudomonas fluorescens* and *Streptococcus thermophilus* in trypticase soy broth and total bacteria in milk by continuous-flow ultrasonic treatment and conventional heating [J]. Journal of Food Engineering, 2000, 45(3): 171-179
- [54] Scherba G, Weigel R M, O'Brien W D J. Quantitative assessment of the germicidal efficacy of ultrasonic energy [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1991, 57(7): 2079-2084
- [55] Pitt W G, Ross S A. Ultrasound increases the rate of bacterial cell growth [J]. Biotechnology Progress, 2003, 19(3): 1038-1044
- [56] Wu T, Yu X, Hu A, et al. Ultrasonic disruption of yeast cells: underlying mechanism and effects of processing parameters [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2015, 28: 59-65
- [57] Yamamoto K, King P M, Wu X, et al. Effect of ultrasonic frequency and power on the disruption of algal cells [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, 24: 165-171
- [58] Sala F J, Burgos J, Condón S, et al. Effect of heat and ultrasound on microorganisms and enzymes [J]. New Methods of Food Preservation, 1995: 176-204
- [59] Guerrero S, López-Malo A, Alzamora S M, Effect of ultrasound on the survival of *Saccharomyces cerevisiae*: influence of temperature, pH and amplitude [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2001, 2(1): 31-39
- [60] Ortuño C, Martínez-Pastor M T, Mulet A, et al. Application of high power ultrasound in the supercritical carbon dioxide inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* [J]. Food Research International, 2013, 51(2): 474-481
- [61] Bermúdez-Aguirre D, Corradini M G, Mawson R, et al. Modeling the inactivation of *Listeria innocua* in raw whole milk treated under thermo-sonication [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2009, 10(2): 172-178
- [62] Knorr D, Zenker M, Heinz V, et al. Applications and potential of ultrasonics in food processing [J]. Trends in Food Science & Technology, 2004, 15(5): 261-266
- [63] 余振华,韩舜愈,盛文军.超声波处理降解苹果汁中的农药毒死蜱[J].甘肃农大学报,2016,51(1):138-143
- YU Zhen-hua, HAN Shun-yu, SHENG Wen-jun. Decrease of chlorpyrifos in apple juice by ultrasonic treatment [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2016, 51(1): 138-143
- [64] 袁亚宏,王周利,蔡瑞,等.苹果汁中拟除虫菊酯类农药的超声波-TiO₂催化去除[J].农业机械学报,2011,42(11):124-129
- YUAN Ya-hong, WANG Zhou-li, CAI Rui, et al. Catalytic removal of pyrethroid pesticides in apple juice by ultrasonic treatment coupling with TiO₂ [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(11): 124-129
- [65] 徐梦蕾,刘静波,赵颂宁,等.玉米汁中甲草胺的超声波降解[J].食品研究与开发,2015,36(2):14-16
- XU Meng-lei, LIU Jing-bo, ZHAO Song-ning, et al. Effect of sonication treatment on alachlor degradation behaviors in maize beverage [J]. Food Research and Development, 2015, 36(2): 14-16
- [66] 陈冬梅.苹果汁中有机磷农药残留降解技术研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2008
- CHEN Dong-mei. Study of the degradation of organophosphorus pesticides residue in apple juice [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2008
- [67] 张媛媛,杨斯超,张慧.超声波降解苹果汁中的甲胺磷[J].食品与发酵工业,2010,12:80-84
- ZHANG Yuan-yuan, YANG Si-chao, ZHANG Hui. Ultrasonic degradation of methamidophos in apple juice [J]. Food and Fermentation Industry, 2010, 12: 80-84
- [68] 惠卫甲.苹果汁中菊酯类和氨基甲酸酯类农药的降解技术研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2008

- HUI Wei-jia. Study of degradation technologies of pyrethroids and carbamate pesticides in apple juice [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2008
- [69] 陈芳,曾令琴,葛毅强,等.浓缩苹果汁中农药残留去除方法的研究现状及展望[J].食品与发酵工业,2005,31(9):66-69
- CHEN Fang, ZENG Ling-qin, GE Yi-qiang, et al. The present situation and prospect of the method of pesticide residue removal in apple juice concentrate [J]. Food and Fermentation Industries, 2005, 31(9): 66-69
- [70] Wu J, Gamage T V, Vilku K S, et al. Effect of thermosonication on quality improvement of tomato juice [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2008, 9(2): 186-195
- [71] Abid M, Jabbar S, Wu T, et al. Effect of ultrasound on different quality parameters of apple juice [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2013, 20(5): 1182-1187
- [72] Aadil R M, Zeng X-A, Han Z, et al. Effects of ultrasound treatments on quality of grapefruit juice [J]. Food Chemistry, 2013, 141(3): 3201-3206
- [73] Bhat R, Kamaruddin N S B C, Min-Tze L, et al. Sonication improves kasturi lime (*Citrus microcarpa*) juice quality [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2011, 18(6): 1295-1300
- [74] Guerrouj K, Sánchez-Rubio M, Taboada-Rodríguez, et al. Sonication at mild temperatures enhances bioactive compounds and microbiological quality of orange juice [J]. Food and Bioproducts Processing, 2016, 99: 20-28
- [75] Zafra-Rojas Q Y, Cruz-Cansino N C, Ramírez-Moreno, et al. Effects of ultrasound treatment in purple cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) juice [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2013, 20(5): 1283-1288
- [76] Abid M, Jabbar S, Wu T, et al. Sonication enhances polyphenolic compounds, sugars, carotenoids and mineral elements of apple juice [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2014, 21(1): 93-97
- [77] Martínez-Flores H E, Garnica-Romo M G, Bermúdez-Aguirre D, et al. Physico-chemical parameters, bioactive compounds and microbial quality of thermo-sonicated carrot juice during storage [J]. Food Chemistry, 2015, 172: 650-656
- [78] Rawson A, Tiwari B K, Patras A, et al. Effect of thermosonication on bioactive compounds in watermelon juice [J]. Food Research International, 2011, 44(5): 1168-1173
- [79] Tiwari B K, O'Donnell C P, Patras A, et al. Anthocyanin and ascorbic acid degradation in sonicated strawberry juice [J]. European Food Research and Technology, 2009, 228(5): 717-724
- [80] Tiwari B K, O'Donnell C P, Cullen P J. Effect of sonication on retention of anthocyanins in blackberry juice [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 93(2): 166-171
- [81] Gomes W F, Tiwari B K, Rodríguez Ó, et al. Effect of ultrasound followed by high pressure processing on prebiotic cranberry juice [J]. Food Chemistry, 2017, 218: 261-268
- [82] Tiwari B K, O'Donnell C P, Muthukumarappan K, et al. Effects of sonication on the kinetics of orange juice quality parameters [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(7): 2423-2428
- [83] Tiwari B K, Muthukumarappan K, O'Donnell C P, et al. Colour degradation and quality parameters of sonicated orange juice using response surface methodology [J]. LWT-Food Science and Technology, 2008, 41(10): 1876-1883
- [84] Tiwari B K, Patras A, Brunton N, et al. Effect of ultrasound processing on anthocyanins and color of red grape juice [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2010, 17(3): 598-604
- [85] Cserhalmi Z, Sass-Kiss Á, Tóth-Markus M, et al. Study of pulsed electric field treated citrus juices [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2006, 7(1-2): 49-54
- [86] 林雯雯,楼舒婷,孙玉敬,等.超声波处理对鲜榨橙汁中主要香气成分的影响[J].中国食品学报,2016,16(5):245-251
- LIN Wen-wen, LOU Shu-ting, SUN Yu-jing, et al. The effect of ultrasonic treatment on the main aroma components in fresh orange juice [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(5): 245-251
- [87] Jambrak A R, Šimunek M, Petrović M, et al. Aromatic profile and sensory characterisation of ultrasound treated cranberry juice and nectar [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 38: 783-793
- [88] 栗星.橙汁的超声波杀菌及其品质的变化[D].上海:上海海洋大学,2008
- LI Xing. Ultrasonic sterilization on orange juice and quality changes [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2008
- [89] Ertugay M F, Baslar M. The effect of ultrasonic treatments on cloudy quality-related quality parameters in apple juice [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2014, 26: 226-231
- [90] Rojas M L, Leite T S, Cristianini M, et al. Peach juice processed by the ultrasound technology: Changes in its microstructure improve its physical properties and stability [J]. Food Research International, 2016, 82: 22-33