

焦文成, 陈磊, 宋永程, 等. 超声波对果蔬汁品质的影响研究进展 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(8): 471–480. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021050094

JIAO Wencheng, CHEN Lei, SONG Yongcheng, et al. Review on the Effect of Ultrasound on the Quality of Fruit and Vegetable Juice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(8): 471–480. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021050094

· 专题综述 ·

超声波对果蔬汁品质的影响研究进展

焦文成¹, 陈磊¹, 宋永程^{1,2}, 毕秀芳^{1,*}, 刘蕾¹, 王雁¹

(1. 西华大学食品与生物工程学院, 四川成都 610039;

2. 宜宾西华大学研究院, 四川宜宾 644000)

摘要: 本文主要总结了超声波 (Ultrasound, US) 对果蔬汁品质的影响, 讨论了目前 US 对果蔬汁的微生物、酶活、营养成分以及感官特性等的影响。US 处理能在一定程度上对果蔬汁杀菌灭酶, 且对果蔬汁的理化性质和营养成分的影响较小, 但总体上存在杀菌、灭酶效果有限的问题, 并且高功率、长时间的 US 处理, 可能会对果蔬汁的感官特性和营养成分产生不良影响。因此, 本文从 US 对果蔬汁的影响展开综述, 提出了目前 US 在果蔬汁加工研究中存在的问题, 并对 US 在果蔬汁加工的研究进行了展望。

关键词: 果蔬汁, 超声波, 品质, 杀菌效果, 酶活, 营养成分, 感官特性

中图分类号: TS255.36

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)08-0471-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021050094

本文网刊:



Review on the Effect of Ultrasound on the Quality of Fruit and Vegetable Juice

JIAO Wencheng¹, CHEN Lei¹, SONG Yongcheng^{1,2}, BI Xiufang^{1,*}, LIU Lei¹, WANG Yan¹

(1. School of Food and Bioengineering, Xihua University, Chengdu 610039, China;

2. Yibin Xihua University Research Institute, Yibin 644000, China)

Abstract: This article mainly reviews the effects of ultrasound (US) on the quality of fruit and vegetable juices, discusses the current effects of ultrasound on the microorganisms, enzyme activities, nutrients and sensory characteristics of fruit and vegetable juices. US treatment can inactivate microorganism and enzymes to a certain extent in fruit and vegetable juices, and have little influence on the physical, chemical and nutritional properties. However, the microbial and enzyme inactivation effect is limited, besides, high-power, long-term US treatment may have adverse effects on the sensory properties and nutritional components of fruit and vegetable juices. Therefore, this article mainly summarizes the influence of US on the above-mentioned various qualities of fruit and vegetable juice, proposes the problems of US in the research of fruit and vegetable juice processing, and prospects the further research of ultrasonic technology in fruit and vegetable juice in the future.

Key words: fruit and vegetable juice; ultrasound; quality; bactericidal efficacy; enzyme activity; nutrients; sensory characteristics

果蔬汁是由水果蔬菜通过物理方法制得的或由浓缩果汁加入损失的等量水分制得的汁液, 果蔬汁饮料是以果蔬汁、浓缩果蔬汁、水为原料, 添加或不添加其他食品辅料或食品添加剂经加工制成的制品^[1], 两者都因其口感清爽、气味芳香且含有维生素等营

养物质而广受喜爱。目前工业上对果蔬汁及其饮料制品大都采用热杀菌, 主要为巴氏杀菌和超高温瞬时杀菌技术^[2], 巴氏杀菌能较好地杀灭果蔬汁中的酶和微生物并能保留较多的果蔬汁中的热敏成分, 但杀菌后果蔬汁的风味会有较大的变化; 超高温瞬时杀菌技

收稿日期: 2021-05-13

基金项目: 成都市科技局技术创新研发项目 (2019-YF05-00068-SN)。

作者简介: 焦文成 (1994-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬保鲜与果蔬非热加工, E-mail: jwenc1328@qq.com。

* 通信作者: 毕秀芳 (1990-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 果蔬非热加工理论研究、农产品贮藏与加工, E-mail: bxf1221@163.com。

术能彻底灭活果蔬汁中的微生物和酶,且对果蔬汁的风味影响较小,但热敏性营养成分如维生素 C 等会大量损失^[3-4]。随着人们生活水平的提高,果蔬汁的非热加工技术应运而生,非热加工技术不仅能够提高果蔬汁保藏性,还能够较好的保护果蔬汁的营养成分和风味物质^[5],目前主要的非热加工技术有超高压杀菌技术、高密度二氧化碳技术、高压脉冲电场技术等。超高压技术是目前非热加工技术中较为成熟的技术,能有效地杀灭果蔬汁中有害微生物,且处理后的果蔬汁感官和营养成分变化较小,但存在钝酶效果不佳、设备成本高、能耗高等问题^[6];高密度二氧化碳技术是在小于 50 MPa 的压力下,利用 CO₂ 分子效应钝化微生物及酶活性的技术,具有安全无毒,对营养和风味破坏较小的优点,但存在连续化操作困难、不同体系 CO₂ 扩散效率存在差异等问题^[7];高压脉冲电场技术能在达到理想杀菌效果的同时,还能有效保持果蔬汁的营养品质和感官特性,但存在设备昂贵、电极材料释放金属离子易对果蔬汁造成污染等问题^[8]。

超声波(ultrasound, US)技术也是目前研究的主要非热加工技术之一,US 是频率高于 20 kHz 的声波,其中频率在 20~100 kHz,能量密度在 10~1000 W/cm² 的高场强超声波是主要的非热加工技术之一^[9]。US 对果蔬汁的作用主要为机械效应和空化效应,空化效应产生的空穴气泡崩塌时会释放出巨大能量,导致局部产生 5500 K 左右的高温 and 近 1000 MPa 的高压,同时产生高达 10⁸ N/m² 的剪切力和大量高活性自由基^[5],在一定条件下可使果蔬汁中大多数微生物被杀灭,已被确定为符合美国食品药品监督管理局(FDA)要求的减少果汁中相关微生物 5 lg 的潜在技术^[5]。同时,US 能较好地保护果蔬汁中的花色苷、酚类、维生素 C 等营养成分,并且具有很好的护色作用。目前 US 对果蔬汁加工主要处于实验室研究阶段,主要包括对果蔬汁的微生物、酶、营养成分、感官特性等的影响研究。本文主要从以上几个方面对 US 对果蔬汁的品质的影响展开综述,以期 US 在果蔬汁加工研究及应用方面提供参考与指引。

1 超声波对果蔬汁杀菌效果的影响

1.1 超声波对果蔬汁杀菌效果的影响因素

US 对果蔬汁杀菌的相关研究如表 1 所示。US 对微生物的杀灭效果受多种因素的影响,包括 US 处理条件、食品基质、微生物种类等。

1.1.1 超声波处理条件对果蔬汁杀菌的影响 目前研究表明,在较小的频率范围下(22~26 kHz),US 频率的增加对微生物的灭活无显著影响^[10],但振幅的增大(50~120 μm)有利于果蔬汁中微生物的灭活^[11-12]。除频率和振幅外,前人用 US 处理苹果汁^[13]、柠檬汁^[14]、黑桑葚汁^[15]、橙汁^[16]、李子饮料^[17]、蓝莓汁^[18]等发现增大处理时间和超声强度也利于 US 对微生物的灭活^[19],但也有研究显示,当达到一定杀菌程度

后(约 2 lg),继续增加处理时间和超声强度,杀菌效果的变化不显著,这可能是由于体系中存在 US 耐受力较高的微生物^[20]。在较低的温度下(≤25 °C)单独的 US 处理对果蔬汁的杀菌效果并不理想(<2 lg)^[20-21],而温和的热作用(35~70 °C)下的 US 对微生物具有较好的杀灭效果(>4 lg)^[16,22],Tremarin 等^[23]研究了 US(35 kHz)结合热处理对嗜酸芽孢杆菌孢子杀灭的影响,发现超声波和热处理有协同效应,在 95 °C 下超声处理 20 min,芽孢减少 5.5 lg。可以看出,不同研究中的 US 处理频率、超声强度、处理温度等条件均对 US 对果蔬汁的杀菌效果有一定的影响,处理温度、超声强度可能是其中的主要影响条件。

1.1.2 果蔬汁与微生物种类对超声波杀菌效果的影响 食品基质也是影响 US 杀菌的主要因素,通常果蔬汁的渗透压越大、pH 越低,越利于 US 对微生物的灭活^[24-25];而当体系固体颗粒含量越高,US 对微生物的杀灭效果减弱^[25-26]。不同的微生物对 US 表现出不同的敏感性,有研究表明,大细胞比小细胞更敏感,球菌比棒状细菌更敏感,需氧菌比厌氧菌更敏感^[12];Monsen 等^[27]、Drakopoulou 等^[28]的研究均发现革兰氏阳性菌对 US 的耐受能力大于革兰氏阴性菌,但 Scherba 等^[29]的研究表明两类菌对 US 的耐受力无显著差异,可以看出,微生物对 US 的敏感性不同,可能与其形态、细胞膜和细胞壁等结构不同有关。US 主要通过空化效应使微生物细胞内容物剧烈振荡,产生局部的高温高压使细胞结构被破坏^[30];同时自由基的产生使细胞膜的通透性增加、DNA 分子的磷酸酯链断裂、细胞的磷酸己糖途径被抑制,使微生物失活^[31]。

1.2 超声波与其他技术结合对果蔬汁的灭菌效果

由于单独的 US 对果蔬汁的杀菌效果有限,目前已有大量与其他技术结合处理果蔬汁的研究。Park 等^[32]发现富马酸与 US 结合处理苹果汁,可使大肠杆菌 O157:H7、伤寒沙门氏菌、单核增生李斯特菌减少量分别增加 1.55、2.37、0.57 lg。此外还有 US 与脉冲电场^[33-34]、热处理^[17,35]、超高压^[36]、热处理和超高压^[19]、超临界二氧化碳^[37]、微波^[38]、化学保藏^[24]等技术结合处理果蔬汁的研究,不同研究灭菌效果差异较大,虽然能在一定程度提高杀菌效果,但其中大部分研究的杀菌效果与温和热处理下的 US 杀菌效果相比优势不明显。总体来看,结合化学保藏、温和热处理等技术,可能是提高 US 杀菌效果的有效手段,但是目前缺乏各种因素对 US 杀菌效果的综合影响的研究。

2 超声波对果蔬汁酶活的影响

天然果蔬汁中含有大量影响其品质的酶,主要有多酚氧化酶(Polyphenol Oxidase, PPO)、多聚半乳糖醛酸酶(polygalacturonase, PG)、果胶甲基酯酶(Pectin Methylesterase, PME)、过氧化物酶(Peroxidase, POD)、脂肪氧合酶(Lipoxygenase, LOX)和抗

表 1 US 对果蔬汁微生物的影响

Table 1 Effect of ultrasound on the microorganism of fruit and vegetable juice

果蔬汁种类	US处理条件	其他处理条件	微生物	杀菌效果(lg)	理化性质	参考文献
芒果汁	(槽式)25 ℃, 15、30、60 min, 40 kHz, 130 W	加热: 90 ℃, 30、60 s	菌落总数 大肠菌群 霉菌酵母	<1 >1 <1	pH4.62 TSS 14.7	[35]
苹果汁 (浊汁)	(槽式)25 kHz, 20 ℃, 90 min		菌落总数 霉菌酵母	1.12 1.22	pH3.99 TSS 12.0	[13]
蓝莓汁 (清汁)	连续超声: 20 kHz, 流速 93.5 mL/min, 25±0.5 ℃		大肠菌群 霉菌酵母	1.28 1.36	pH3.12	[18]
柠檬汁 (浊汁)	(槽式)25 kHz, 70%功率, 20 ℃, 60 min		菌落总数 霉菌酵母	1.9 0.5	pH2.68 TSS 6.6	[14]
草莓汁 (浊汁)	20 kHz, 968 W/cm ² , 2 s开2 s关, 25 ℃, 10 min		菌落总数 霉菌酵母	2.07 1.13	pH3.69 TSS 5.02	[20]
西柚汁 (浊汁)	(槽式)28 kHz, 振幅70%, 20 ℃, 90 min		菌落总数 霉菌酵母	2 2	/	[21]
仙人掌梨	20 kHz, 2 s开4 s关, 15、25 min(无温度控制)		菌落总数 大肠菌群	>4.07 >4.40	pH5.09 TSS 12.52	[39]
桑椹汁 (清汁)	22、24、26 kHz, 10 s开3 s关, 60 W, 6±2 ℃, 20 min		好氧菌总数 霉菌 酵母菌	>4.62 >4.87 >4.92	pH3.98 TSS 14.0	[10]
黑桑椹汁 (清汁)	20 kHz, 5 s开5 s关, 1.63 W/mL, 30、40、50 ℃		大肠菌群	5.14	TSS 14.7	[15]
胡萝卜汁 (浊汁)	24 kHz, 120 μm, 400 W, 58 ℃, 2 min		大肠杆菌ATCC 11775	>5	pH6.82 TSS 8.5	[22]
苹果汁 (清汁)	35 kHz; 120~480 W, 95 ℃, 20 min		嗜酸芽孢杆菌孢子	5.5	/	[23]
橙汁 (浊汁)	24 kHz, 105 μm, 33.31 W/mL, 43~45 ℃, 30 min		菌落总数 霉菌酵母	不能检出 不能检出	pH4.00 TSS 10.3	[16]
西柚汁 (浊汁)	600 W, 28 kHz, 20 ℃, 30 min	脉冲电场: 80 mL/min, 1 kHz, 20 kV/cm, 40 ℃, 600 μs	菌落总数 霉菌酵母	1.91 1.72	/	[33]
菠菜汁 (浊汁)	(槽式)40 kHz, 200 W, 30±2 ℃, 21 min	脉冲电场: 1 kHz, 60 mL/min, 30±2 ℃, 335 μs, 9 kV/cm	菌落总数 大肠菌群 霉菌酵母	1.86 1.15 2.01	/	[34]
胡萝卜汁 (浊汁)	20 kHz, 605 W/cm ² , 30 ℃, 2 s开2 s关, 10 min	Nisin: 16 IU/mL	菌落总数 霉菌酵母	2.39 3.99	/	[24]
李子饮料	20 kHz	加热: 60 ℃下7.5 min、70 ℃下5 min	霉菌酵母	>3.83 4.26±0.32	pH3.69 TSS 4.9	[17]
橙汁 (浊汁)	20 kHz, 35 ℃, 5 s开10 s关	姜黄素; 蓝光: 6.34±0.05 mW/cm ²	大肠杆菌ATCC 11775 金黄色葡萄球菌ATCC 12600	2.35±0.16	/	[40]
菠萝汁 (浊汁)	40±5 W	超临界二氧化碳: 100 bar, 31 ℃, 3.06 min	大肠菌群 霉菌酵母	>3.84 >4.15	pH3.60 TSS 12.5	[37]
橙汁 (清汁)	48 μm, 50±0.2 W, 20 kHz, 25±2 ℃	高压储存: 10.9 MPa, 48 h	沙门氏菌	5	pH3.40	[41]
苹果汁 (清汁)	40 kHz, 25 μm, 最大功率 700 W, 5 min	富马酸: 0.05%、0.1%、0.15%	大肠杆菌O157:H7 伤寒沙门氏菌 单增李斯特菌	5.67 6.35 3.47	TSS 12.0	[32]
橙汁 (清汁)	778.2 W, 11 min	微波: 350 W, 35 ℃	霉菌酵母	不能检出	/	[38]

注: 杀菌效果为处理后的微生物减少量(lg), “不能检出”指处理后样品中相应的微生物不能检出; 理化性质中TSS即为可溶性固形物含量(Total soluble solids TSS), 单位: °Brix; 理化性质中“/”表示该研究中没有测定相应指标; 表中没有特别注明的为探针式超声波设备; 表3同。

坏血酸过氧化物酶(Ascorbate peroxidase, APX)等, 这些酶或使果蔬汁颜色改变(PPO、POD、APX)、或能破坏体系稳定性使果蔬汁分层(PME、PG)、或产生不良风味(LOX), 使果蔬汁的营养价值和感官品质降低^[5]。

US 对果蔬汁中酶活影响的研究如表 2 所示, 前人研究了 US 对草莓汁^[20]、黑莓汁^[42]、菠萝汁^[43]、甜瓜汁^[44]、木瓜汁^[45]、红薯汁^[46]、椰汁^[47] 酶活的影响发现, 在一定条件下单独的 US 处理只能使果蔬汁中的酶部分失活。Iqbal 等^[45] 研究发现, 与未处理相比,

US 处理(20 kHz, 400 W, 20 min)使木瓜汁中 PPO 活性降低 65%, 且发现 PPO 的 α -螺旋明显丢失, 二级结构发生重组, 三级结构被破坏, 同时 PPO 蛋白分子发生聚集, 但 Sun 等^[48] 的研究发现, US 处理后鲜榨苹果汁中的 PPO 活性显著升高, POD 的活性变化不显著。不同研究中 US 钝酶效果的差异, 与 US 处理条件、酶的来源、基质成分等因素有关。在一定的处理条件范围内, 随处理时间和超声强度的增加, 残留酶活力逐渐下降, 但通常不能使酶完全失活^[20,49], 同时由于 US 的提取作用能使细胞中的酶释放, 或激

表 2 US 对果蔬汁酶活影响

Table 2 Effect of ultrasound on enzyme activity of fruit and vegetable juice

果蔬汁种类	US处理条件	其他处理条件	酶	酶残余活力(%)或主要变化	参考文献
菠萝汁	19 kHz, 376 W/cm ² , 10 min		PPO	80	[43]
桑椹汁	60 W, 10 s开3 s关, 6±2 °C		PPO	54.96	[10]
			POD	89.86	
红薯汁	26 kHz, 0.66 W/cm ² , 8 min		PPO	71.62	[46]
			POD	53.72	
黑莓汁	1500 W, 20 kHz, 28 μm, 40~50 °C, 2 s开4 s关, 25 min		PME	53.5	[42]
			PPO	1.50	
草莓汁	20 kHz, 2 s开2 s关, 25 °C, 968 W/cm ² , 10 min		PME	10.89	[20]
			PPO	55.1	
番荔枝汁	20 kHz, 85 W, 5 min, 无温度控制		POD	0	[59]
木瓜汁	20 kHz, 400 W, 5 s开5 s关, 20 min		PPO	35	[45]
酸橙汁	超声波均质: 80 W, 65 °C, 9.8 min		PME	0	[60]
橙汁	20 kHz, 5 s和5 s, 1.05 W/mL, 45 °C, 10 min		PME	38	[49]
橙汁	550 W, 20 kHz, 25 °C, 8 min	欧姆加热: 40 V/cm, 68 °C, 60 s	PME	4	[55]
椰子汁	20 kHz, 286 W/L, 25 °C, 30 min		POD	73	[47]
苹果汁	20~25 kHz, 2.0 W/cm ² , 180 W, 15 °C, 2 s开2 s关, 10 min		PPO	活性升高	[48]
			POD	变化不显著	
			PPO	70.48(10 min)	
			POD	23.29(10 min)	
甜瓜汁	19 kHz, 376 W/cm ²		POD	127.30(6 min)	[44]
			APX	1.56(10 min)	
芒果汁	20 kHz, 799.31 W/cm ² , 45 °C, 15 min		PPO	84.13	[54]
			POD	78.18	
			PPO	56.10(3.8 W/mL, 10 min)	
			POD	先增大(最大值 114.95%), 后减小	
胡萝卜汁	20 kHz, 0.95、2.38、3.80 W/mL, 4 °C, 2~10 min		PME	126.40: 0.95 W/mL, 10 min 62.05: 3.8 W/mL, 10 min	[50]
胡萝卜汁	20 kHz, 70%振幅, 48 W/cm ² , 15 °C, 5 min	超高压: 250、350和450 MPa, 室温, 10 min	PME	32.05	[57]
			PPO	29.10	
			LOX	31.09	
			POD	33.31	
蓝莓汁	24 kHz, 400 W, 96 μm,	脉冲电场: 5 kW, 示波器(600 MHz、50 S/s), 流速: 300 mL/min	PPO	55	[58]
红莓汁	28 W/cm ² , 25 °C, 20 min		PPO	<20	

活潜在的同工酶,使酶活提高^[48-50]。Chen 等^[50]的研究发现,冰浴下 US(20 kHz)对胡萝卜汁中 PME、POD 有提取和破坏双重作用,短时间、低功率密度的 US 处理主要表现出提取作用,高功率、长时间的 US 处理主要表现出对酶的钝化作用。不同种类^[42-43]、相同种类不同来源^[42,44]的酶对 US 的敏感性有差异;基质体系中的可溶性固形物^[51]、固体颗粒^[52]、蛋白质、生物活性物^[53]等含量越高,体系粘度越大^[54],US 的钝酶效果越差;体系中 pH 的变化也会改变酶对 US 的敏感性,酶敏感性的变化可能与酶的最适 pH 有关^[52-54]。

US 诱导介质空化产生的热、化学和机械效应能破坏酶蛋白结构的完整性,产生的高压梯度能导致蛋白质分子断裂或其他结构修饰,温度梯度能导致蛋白质氢键的裂解,从而导致酶失活^[49]。由于单独 US 钝酶效果并不理想,前人研究了 US 与欧姆加热技术^[55]、紫外光处理^[56]、超高压技术^[57]、脉冲电场技术^[58]等结合钝酶,发现虽然能在一定程度上提高钝酶效果,但处理后的酶仍不能完全失活。在 US 与其他技术

结合钝酶的研究中,结合 50 °C 以上的温度处理表现出相对较好的钝酶效果(残余酶活力<20%)^[59-60],毕秀芳等^[61]研究发现,US 和温度对 PG 的钝化有协同作用,且联合处理使 PG 的钝化由部分转化模型转变为一级动力学模型,US 结合温和的热处理可能是较好的灭酶方法^[62]。

同时目前还缺乏不同食品基质、不同超声条件等因素对 US 钝酶的综合影响的研究,因此 US 对果蔬汁中各种酶的钝化效果仍有较大的不确定性,将 US 运用于果蔬汁的工业加工还有一定距离。

3 超声波对果蔬汁理化性质的影响

前人用 US 处理杨梅汁^[63]、番石榴汁^[64]、橙汁芹菜混合汁^[65]、苹果汁^[66-67]、西瓜汁^[68]等后发现,样品的 pH、可滴定酸度和可溶性固形物含量均无显著变化。这可能是由于常规的榨汁、打浆等操作流程可以破坏绝大多数细胞,已使绝大部分小分子糖类、有机酸等物质释放。但由于 US 空化过程能产生传质效应,提高扩散速率,使果胶与纤维素等结合的有机酸、可溶性糖类等释放,部分果蔬汁经 US 处理后也

存在可溶性固形物含量增加^[69-70], pH 降低^[16]等现象。Bhat 等^[14]发现 US 处理能降低鲜榨柠檬汁的可溶性固形物含量, US 处理能促使果蔬汁发生非酶褐变, 可溶固形物的减少可能与非酶褐变有关^[20,63]。

4 超声波对果蔬汁生物活性物质含量的影响

果蔬汁含有丰富的天然活性物质, 如花青素、酚类、维生素、黄酮等, 这些天然活性物质大都对热敏感^[71], 因此热杀菌会使其大量损失, 而 US 处理温度较低可以较好地保护果蔬汁中的热敏性营养成分。

US 处理对果蔬汁中生物活性物质的影响如表 3 所示。Aadil 等^[21]发现 US 处理对西柚汁的花青素含量没有显著影响; 但 Nguye 等^[72]用 US 处理桑椹汁、Gomes 等^[36]用 US 结合超高压处理蔓越莓汁, 均发现 US 处理使样品的花青素含量升高, 也有研究发现 US 处理能降低果蔬汁的花青素含量, 但保留率仍超过 70%^[10,73]。Ruiz-DeAnda 等^[65]用 US 处理橙子芹菜汁、Aadi 等^[13]用 US 处理苹果汁、Guerrouj 等^[16]用 US 处理橙汁后均发现 US 能不同程度地提高样品总黄酮和总酚的含量, 但 Sun 等^[48]发现 US 处理显著降低了鲜榨苹果汁的总酚、总黄酮含量。Cheng 等^[64]用 US 处理番石榴汁发现, 与未处理相比 V_C 含量增加 8.2%, 但 Cao 等^[63]的研究发现 US 处理能降低杨梅汁的 V_C 含量, 与未处理相比 V_C 降低 19.61%。Rios-Romero 等^[46]用 US 处理红薯汁、Aadil 等^[21]用 US 处理西柚汁、Guerrouj 等^[16]用 US 处理橙汁均发现类胡萝卜素的含量升高。

总体来看 US 对果蔬汁生物活性的影响表现两方面的作用, 一方面 US 能破坏细胞壁, 并通过周围胶体颗粒空泡塌陷促进其内容物的释放, 使花青素等生物活性物含量升高^[16,72], 同时由于 US 的脱气作用使体系中溶解氧减少, 降低了氧气对生物活性物的氧化^[74], 对于酚类物质, 除提取作用外, US 作用产生的羟基自由基, 可能使酚羟基的数量和位置发生变化, 进而使酚类物质活性增加^[75]。另一方面, US 处理产生的局部的高温和大量自由基会使生物活性物被破坏^[48]。因此 US 处理对生物活性物有提取和破坏双重作用, 同时处理前后的变化也与原材料种类、成熟度、生物活性物的稳定性等条件有关, 但总体上看 US 处理后果蔬汁的生物活性物质保留率较高。

5 超声波对果蔬汁感官特性的影响

5.1 超声波对果蔬汁颜色的影响

果蔬汁的颜色受天然色素影响, 天然色素含量与果蔬的种类、成熟度有关, 同时加工方法也会影响色素进而影响果蔬汁颜色。

在前人的一些研究中 US 处理后的芒果汁^[35]、杨梅汁^[63]、石榴汁^[77]、蔓越莓汁^[36]、橙汁^[40]、木瓜汁^[45]、番石榴汁^[64]的颜色变化均肉眼不可辨, US 对胡萝卜素、花色苷等色素的影响较小, 且由于处理温度较低非酶褐变的程度较小, 因而处理后果蔬汁颜色变化较小^[35]。同时 US 处理能破坏细胞壁, 使果蔬汁中花色

苷等色素含量升高, 因而能使部分果蔬汁处理后的颜色加深^[20,55]; 但是, 高功率密度、长时间下的 US 处理, 由于局部的高温 and 自由基的大量产生, 会使果蔬汁的非酶褐变和色素的破坏更明显, 进而可能对果蔬汁的色泽产生不良影响。

5.2 超声波对果蔬汁粘度的影响

粘度是果蔬汁状态的重要指标, 适当的粘度可以赋予果蔬汁好的口感。有研究发现, US 处理能降低西柚汁^[21]、菠菜汁^[34]、菠萝汁^[43]、树莓汁和蓝莓汁^[58]的表观粘度, US 的空化作用产生的剪切力和冲击波能使果蔬汁中的大颗粒减小, 使其流动阻力减弱, 同时使纤维素、果胶、蛋白质分子等被破坏成更小的片段, 使分子量降低, 分子间的作用减弱, 粘度降低^[34,78]。但 Abid 等^[69]用 US 处理苹果汁、郑炯等^[68]用 US 处理西瓜汁均发现 US 处理能使样品粘度增大, 粘度增大可能是由于 US 能使 PG、PME 的钝化, 使果胶降解降低, 形成的网状结构强度更高^[68]。

5.3 超声波对果蔬汁稳定性的影响

良好的稳定性可以使果蔬汁在储藏运输过程中保持良好的状态, 不产生沉淀, 不分层。US 处理能显著提高苹果汁^[13]、橙汁^[49]、橙子芹菜混合汁^[65]、番石榴汁^[77]的浊度, 浊度的增大可能是由于空化作用产生的高压梯度引起胶体的溶解、分散和大分子的分解, 使果蔬汁均匀化^[13], 同时超声波导致 PME 酶钝化, 使果胶的分解减弱, 形成的网状结构更加稳定, 粒子的沉降阻力变大^[49]。Ertugay 等^[11]观察到超声波处理使苹果汁中 58% 沉降的颗粒悬浮, 储藏 4 个月后苹果汁仍然稳定, Fonteles 等^[44]也发现超声波处理后的甜瓜汁储存 6 周后未见明显分层, 可以看出超声波处理能显著提高果蔬汁的稳定性。

5.4 超声波对果蔬汁香气与感官评价的影响

果蔬汁的香味是重要的感官品质, 香味赋予不同果蔬汁各自的特点, 也是影响消费者偏好的重要因素。US 处理能使果蔬汁中一些原本的香味成分消失, 同时产生新的香味成分, 但香味物质的总量在处理前后变化不大^[79-80], 同时由于变幅杆的腐蚀等因素, 处理后的样品可能会产生金属味^[12]。

Jambrak 等^[81]对 US 处理前后的蔓越莓汁进行感官评价, 结果处理组低于未处理, 但整体可接受; Guerrouj 等^[16]发现短时间 (<10 min) 的 US 处理对橙汁的感官特性没有显著影响, 但长时间的 US 处理会使橙汁感官品质降低, 处理超过 20 min 后感官评价为不可接受; Lin 等^[31]发现, US 处理对苦瓜和黄瓜汁的感官特性没有显著影响。US 处理对不同果蔬汁感官特性的影响不同可能是体系基质、香味成分的种类和含量、色素的种类和含量及其营养成分的不同造成的。

总体上, US 对果蔬汁的感官特性影响较小, 能提高果蔬汁的稳定性, 但长时间、高功率密度的 US 处理会对果蔬汁的颜色、香气等产生不良影响,

表 3 US 对果蔬汁生物活性物影响

Table 3 Effect of ultrasound on the bioactive substances in fruit and vegetable juice

果蔬汁种类	US处理条件	其他处理条件	生物活性成分	主要变化	参考文献
西柚汁	(槽式)28 kHz, 70%振幅, 20 °C, 30、60、90 min		花青素	不显著	[21]
西柚汁	600 W、28 kHz、20 °C	脉冲电场:80 mL/min、1 kHz、20 kV/cm、40 °C、600 μ s	花青素 V _C 类胡萝卜素	增加 增加 增加 增加	[33]
苹果汁	(槽式)25 kHz, 20 °C, 30、60、90 min		总黄酮 总酚	增加(最大增幅9.5%)	[13]
苹果汁	20 kHz, 65 $\pm$ 2 °C, 10 min		总酚	增加	[76]
苹果汁	20~25 kHz, 2.0 W/cm ² , 180 W, 15 °C, 2 s开2 s关		总黄酮 总酚	降低 降低 降低	[48]
苹果汁	25 kHz, 振幅70%, 20 °C		花青素 总酚 类胡萝卜素	不显著 增加 增加	[69]
苹果汁	24 kHz, 40、50、60 °C	254 nm紫外光6 $\times$ 4.4 mW/cm ²	总酚	降低(最大降幅15%)	[56]
柠檬汁	(槽式)25 kHz, 70%功率, 20 °C, 30、60 min		总黄酮 V _C	增加 增加 增加(最大增幅36.34%)	[14]
杨梅汁	20 kHz, 5 s开5 s关		花青素 V _C	先增加后降低 降低	[63]
桑椹汁	22、24、26 kHz, 160 W, 6 $\pm$ 2 °C		花青素	降低	[10]
桑椹汁	(槽式)40 kHz, 265 W, 45 °C, 60 min		花青素 总酚 V _C	增加 增加 降低 降低	[72]
黑桑椹汁	20 kHz, 冰浴, 25 °C, 5 s开5 s关		花青素	降低	[15]
红薯汁	0.24、0.66 W/cm ² , 2、4、6、8、10 min		总酚 类胡萝卜素	降低 增加	[46]
葡萄汁	20 kHz, 24.4~61.0 μ m, 5 s开5 s关		花青素	降低	[73]
橙子芹菜汁	20 kHz, 5.57 $\pm$ 0.87 kW/m ³ , 20 $\pm$ 5 °C		总黄酮 总酚 V _C	增加 增加 不显著 升高	[65]
橙汁	20 kHz, 35 °C, 5 s开10 s关	添加姜黄素, 蓝光 6.34 $\pm$ 0.05 mW/cm ²	总黄酮 总酚 V _C	增加 增加 降低	[40]
橙汁	43~45 °C, 24 kHz; 105 μ m; 33.31 W/mL		总黄酮 总酚 V _C 类胡萝卜素	增加 增加 增加 增加	[16]
蓝莓汁	280、420、560、700 W	温度: 30、40、50、60、70、80 °C 超高压: 350 MPa	花青素	降低(最大降幅14.75%)	[66]
蓝莓汁	20 kHz, 流速24 mL/min、93.5 mL/min, 25 $\pm$ 0.5 °C		总酚	增加	[18]
胡萝卜汁	24 kHz, 120 μ m, 400 W, 50、54、58 °C, 0~10 min		总酚 V _C 类胡萝卜素	不显著 不显著 不显著	[22]
李子饮料	20 kHz, 40、50、60、70 °C, 2.5、5、7.5、10 min		总黄酮 总酚	增加 不显著	[17]
草莓汁	20 kHz, 总功率950 W: 20%、50%和80%功率, 2 s开2 s关, 25 °C, 10 min		花青素 总酚	降低(最大降幅19.91%) 增加 增加	[20]
紫仙人掌果汁	20 kHz, 总功率1500 W, 2 s开4 s关		总酚	增加	[39]
西瓜汁	100、200、300 W, 5 s开5 s关, 10、20、30 min		总酚 V _C	不显著 降低	[68]
蔓越莓汁	18 kHz, 600、1200 W/L, 室温, 5 min	超高压450 MPa, 11.5 °C, 5 min	花青素	增加	[36]
葡萄胡萝卜混合汁	20 kHz, 525 W, 5 s开5 s关, 15 °C, 5 min	添加K ₂ S ₂ O ₅	总黄酮 总酚	增加 增加 增加	[70]
番石榴汁	(槽式)35 kHz, 15~20 °C, 30 min	碳酸化	V _C	增加	[64]

因此,在保证安全性和保藏性的前提下应尽量降低处理功率密度和处理时长,同时研发新型的变幅杆材料,以改善变幅杆腐蚀问题。

6 结论与展望

综上所述,单独的 US 处理果蔬汁虽然对果蔬汁的理化性质营养成分影响较小,但对提高果蔬汁的安全性和保藏性还达不到工业加工的要求,并且存在长时间、高功率 US 处理会对果蔬汁感官特性产生不良影响的问题,此外缺乏各种影响因素对 US 杀菌、灭酶的综合影响的研究,因此 US 技术应用于食品工业加工中还有一定距离。在今后的研究中 US 对果蔬汁杀菌、灭酶机理有待进一步研究,同时果蔬汁理化成分、体系介质特性等影响因素对 US 杀菌、灭酶效果的影响机理方面的研究可能也是今后的研究方向之一,这将对 US 的杀菌、灭酶效果的改善提供理论指导。此外,US 技术与其他技术如温和热处理技术结合处理果蔬汁能在一定程度上提高部分果蔬汁的安全性和保藏性,同时达到保持果蔬汁的营养和感官品质的效果,因此 US 技术与其他技术结合,运用栅栏技术处理果蔬汁可能也是今后研究的重点之一,达到既能对果蔬汁灭菌、灭酶,提高保藏性、安全性,也能保持其营养和感官品质的目的。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 31121-2014 果蔬汁类及其饮料[S]. 北京:中国标准出版社,2014: 1-2. [The General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Management Committee. GB/T 31121-2014 Fruit & vegetable juices and fruit & vegetable beverage (nectars) [S]. Beijing: China Standard Press, 2014: 1-2.]
- [2] 曾小峰,商桑,高伦江,等. 橙汁杀菌技术研究进展[J]. 南方农业,2018,12(28): 124-127. [ZENG Xiaofeng, SHANG Sang, GAO Lunjiang, et al. Research progress on orange juice sterilization technology[J]. South China Agriculture, 2018, 12(28): 124-127.]
- [3] 吴雅静. 非热杀菌技术在食品加工中的应用研究[J]. 安徽农业科学,2015,43(1): 242-243. [WU Yajing. Application of non-thermal sterilization technology in food processing[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(1): 242-243.]
- [4] 田瑾,罗潇潇,马媛,等. 柑橘汁杀菌方法研究进展[J]. 西华大学学报(自然科学版),2021,40(4): 72-79. [TIAN Jin, LUO Xiaoxiao, MA Yuan, et al. Research progress on sterilization methods of citrus juice[J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2021, 40(4): 72-79.]
- [5] 刘伟,宋弋,张洁,等. 超声波对果蔬汁杀菌和品质影响的研究进展[J]. 现代食品科技,2018,34(5): 276-289. [LIU Wei, SONG Yi, ZHANG Jie, et al. Research progress on the effect of ultrasound on the microbial inactivation and qualities of fruit and vegetable juice[J]. Modern Food Science and Technology, 2018, 34(5): 276-289.]
- [6] 贾蒙,成传香,王鹏旭,等. 超高压技术在果蔬汁杀菌中的应用[J]. 食品与发酵工业,2019,45(12): 257-264. [JIA Meng, CHENG Chuangxiang, WANG Pengxu, et al. Application of ultra-high pressure in sterilizing fruit and vegetable juices[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(12): 257-264.]
- [7] 顾丰颖,卢嘉,王晓拓,等. 高密度二氧化碳技术的杀菌机制及其在食品工业中的应用[J]. 中国农业科技导报,2013,15(6): 162-166. [GU Fengying, LU Jia, WANG Xiaotuo, et al. Sterilization mechanisms and application of dense-phase carbon dioxide in food processing[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2013, 15(6): 162-166.]
- [8] 马亚琴,李楠楠,张震. 脉冲电场技术应用于果蔬汁杀菌的研究进展[J]. 食品科学,2018,39(21): 308-315. [MA Yaqin, LI Nannan, ZHANG Zhen. Advances in application of pulsed electric field in fruit and vegetable juice sterilization[J]. Food Science, 2018, 39(21): 308-315.]
- [9] 马亚琴,叶兴乾,吴厚玖,等. 超声波辅助提取植物活性成分的研究进展[J]. 食品科学,2010,31(21): 459-463. [MA Yaqin, YE Xingqian, WU Houjiu, et al. Advances in ultrasound-assisted extraction of bioactive compounds from plants[J]. Food Science, 2010, 31(21): 459-463.]
- [10] ENGMANN F N, MA Y, TCHABO W, et al. Ultrasonication treatment effect on anthocyanins, color, microorganisms and enzyme inactivation of mulberry (*Moraceae nigra*) juice[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2015, 39(6): 854-862.
- [11] ERTUGAY M F, BAŞLAR 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.
- [12] REZEK JAMBRAK A, SIMUNEK M, EVACIC S, et al. Influence of high power ultrasound on selected moulds, yeasts and *Ali-cyclobacillus acidoterrestris* in apple, cranberry and blueberry juice and nectar[J]. Ultrasonics, 2018, 83: 3-17.
- [13] 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.
- [14] BHAT R, KAMARUDDIN N S, MIN-TZE L, et al. Sonication improves kasturi lime (*Citrus microcarpa*) juice quality[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2011, 18(6): 1295-300.
- [15] DINÇER C, TOPUZ A. Inactivation of *Escherichia coli* and quality changes in black mulberry juice under pulsed sonication and continuous thermosonication treatments[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2015, 39(6): 1744-1753.
- [16] GUERROUJ K, SÁNCHEZ-RUBIO M, TABOADA-RODRÍGUEZ A, et al. Sonication at mild temperatures enhances bioactive compounds and microbiological quality of orange juice[J]. Food and Bioprocesses, 2016, 99: 20-28.
- [17] IRKILMEZ M U, BAŞLAR M, SAĞDIÇ O, et al. The effect of ultrasonic treatments on turbidity, microbial load, and polyphenol oxidase (PPO) activity of plum nectar[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2016, 11(2): 380-387.
- [18] 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(1): 563-570.

- [19] 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.
- [20] CHEN L, BI X, CAO X, et al. Effects of high-power ultrasound on microflora, enzymes and some quality attributes of a strawberry drink[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(14): 5378–5385.
- [21] AADIL R M, ZENG X A, WANG M S, et al. A potential of ultrasound on minerals, micro-organisms, phenolic compounds and colouring pigments of grapefruit juice[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2015, 50(5): 1144–1150.
- [22] POKHREL P R, BERMUDEZ A D, MARTINEZ F H E, et al. Combined effect of ultrasound and mild temperatures on the inactivation of *E. coli* in fresh carrot juice and changes on its physico-chemical characteristics[J]. *Journal of Food Science*, 2017, 82(10): 2343–2350.
- [23] TREMARIN A, CANBAZ E A, BRANDÃO T R S, et al. Modelling *Alicyclobacillus acidoterrestris* inactivation in apple juice using thermosonication treatments[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 102: 159–163.
- [24] 毕秀芳, 陈丽伊, 潘泓桦, 等. 超声波结合 nisin 对胡萝卜汁的杀菌效果[J]. *中国食品学报*, 2018, 18(1): 211–216. [BI Xiufang, CHEN Liyi, PAN Honghua, et al. Inactivation of naturally occurring microorganisms in carrot juice by ultrasound combined with nisin[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2018, 18(1): 211–216.]
- [25] 栗星, 包海蓉. 超声波对橙汁的杀菌特性研究[J]. *食品科学*, 2008(8): 346–350. [LI Xing, BAO Hairong. Study on sterilization characteristics of ultrasound for orange juice[J]. *Food Science*, 2008(8): 346–350.]
- [26] VALERO M, RECROSIO N, SAURA D, et al. Effects of ultrasonic treatments in orange juice processing[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 80(2): 509–516.
- [27] MONSEN T, LOVGREN E, WIDERSTROM 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): 2496–501.
- [28] DRAKOPOULOU S, TERZAKIS S, FOUNTOLAKIS 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.
- [29] SCHERBA G, WEIGEL R M, O'BRIEN W D J R. Quantitative assessment of the germicidal efficacy of ultrasonic energy[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1991, 57(7): 2079–2084.
- [30] 刘丽艳, 张喜梅, 李琳, 等. 超声波杀菌技术在食品中的应用[J]. *食品科学*, 2006(12): 778–780. [LIU Liyan, ZHANG Ximei, LI Lin, et al. Application of ultrasound sterilization technique in food industry[J]. *Food Science*, 2006(12): 778–780.]
- [31] LIN L, WANG X, LI C, et al. Inactivation mechanism of *E. coli* O157: H7 under ultrasonic sterilization[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 59: 104751.
- [32] PARK J S, HA J W. Ultrasound treatment combined with fumaric acid for inactivating food-borne pathogens in apple juice and its mechanisms[J]. *Food Microbiology*, 2019, 84: 103277.
- [33] AADIL R M, ZENG X A, HAN Z, et al. Combined effects of pulsed electric field and ultrasound on bioactive compounds and microbial quality of grapefruit juice[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2019, 56(5): 2355–2364.
- [34] MANZOOR M F, AHMED Z, AHMAD N, et al. Novel processing techniques and spinach juice: Quality and safety improvements[J]. *Journal of Food Science*, 2020, 85(4): 1018–1026.
- [35] 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.
- [36] GOMES W F, TIWARI B K, RODRIGUEZ O, et al. Effect of ultrasound followed by high pressure processing on prebiotic cranberry juice[J]. *Food Chemistry*, 2017, 218: 261–268.
- [37] PANIAGUA-MARTINEZ I, MULET A, GARCIA-ALVARADO M A, et al. Inactivation of the microbiota and effect on the quality attributes of pineapple juice using a continuous flow ultrasound-assisted supercritical carbon dioxide system[J]. *Food Science & Technology International*, 2018, 24(7): 547–554.
- [38] 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 & Emerging Technologies*, 2015, 32: 110–115.
- [39] ZAFRA-ROJAS Q Y, CRUZ-CANSINO N, RAMIREZ-MORENO E, et al. Effects of ultrasound treatment in purple cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) juice[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2013, 20(5): 1283–1288.
- [40] BHAVYA M L, HEBBAR H U. Sono-photodynamic inactivation of *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* in orange juice[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 57: 108–115.
- [41] WONG E, VAILLANT-BARKA F, CHAVES-OLARTE E. Synergistic effect of sonication and high osmotic pressure enhances membrane damage and viability loss of *Salmonella* in orange juice[J]. *Food Research International*, 2012, 45(2): 1072–1079.
- [42] CERVANTES-ELIZARRARAS A, PILONI-MARTINI J, RAMIREZ-MORENO E, et al. Enzymatic inactivation and antioxidant properties of blackberry juice after thermoultrasound: Optimization using response surface methodology[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, 34: 371–379.
- [43] COSTA M G M, FONTELES T V, DE JESUS A L T, et al. High-intensity ultrasound processing of pineapple juice[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2011, 6(4): 997–1006.
- [44] FONTELES T V, COSTA M G M, DE 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.
- [45] IQBAL A, MURTAZA A, MARSZALEK K, et al. Inactivation and structural changes of polyphenol oxidase in quince (*Cydonia oblonga* Miller) juice subjected to ultrasonic treatment[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100(5): 1000–1008.

2065–2073.

[46] RIOS-ROMERO E A, OCHOA-MARTÍNEZ L A, MORALES-CASTRO J, et al. Ultrasound in orange sweet potato juice: Bioactive compounds, antioxidant activity, and enzymatic inactivation[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2018, 42(6): e13633.

[47] TREVILIN, HELLMEISTER J, AUGUSTO D, et al. Using ultrasound technology for the inactivation and thermal sensitization of peroxidase in green coconut water[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, 36: 173–181.

[48] SUN Y, ZHONG L, CAO L, et al. Sonication inhibited browning but decreased polyphenols contents and antioxidant activity of fresh apple (*Malus Pumila* Mill, cv. Red Fuji) juice[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52(12): 8336–8342.

[49] 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.

[50] CHEN L, BI X, GUO D, et al. The effect of high-power ultrasound on the quality of carrot juice[J]. *Food Science and Technology International*, 2019, 25(5): 394–403.

[51] VERCET A, LOPEZ P, BURGOS J. Inactivation of heat-resistant pectinmethylesterase from orange by manothermosonication[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1999, 47(2): 432–437.

[52] THAKUR B R, NELSON P E. Inactivation of lipoxygenase in whole soy flour suspension by ultrasonic cavitation[J]. *Food Nahrung*, 1997, 41(5): 299–301.

[53] TARUN E I, KURCHENKO V P, METELITSA D I. Flavonoids as effective protectors of urease from ultrasonic inactivation in solutions[J]. *Russian Journal of Bioorganic Chemistry*, 2006, 32(4): 391–398.

[54] 刘洪, 周亨乐, 陈磊, 等. 介质特性对超声波钝化芒果多酚氧化酶和过氧化物酶的影响[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(4): 42–48. [LIU Hong, ZHOU Hengle, CHEN Lei, et al. Influence of medium properties on the inactivation effect of polyphenol oxidase and peroxidase of mango by ultrasound[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2020, 20(4): 42–48.]

[55] ABDELMAKSoud T G, MOHSEN S M, DUEDAHL-OLESEN L, et al. Impact of ohmicsonication treatment on pectinmethylesterase in not-from-concentrate orange juice[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2019, 56(8): 3951–3956.

[56] BAŞLAR M, ERTUGAY M F. The effect of ultrasound and photosonication treatment on polyphenoloxidase (PPO) activity, total phenolic component and colour of apple juice[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2013, 48(4): 886–892.

[57] 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.

[58] MEDINA-MEZA I G, BOIOLI P, BARBOSA-CÁNOVAS G V. Assessment of the effects of ultrasonics and pulsed electric fields on nutritional and rheological properties of raspberry and blueberry

purees[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2015, 9(3): 520–531.

[59] DABIR M P, ANANTHANARAYAN L. Effect of heat processing and ultrasonication treatment on custard apple peroxidase activity and vitamin C[J]. *International Journal of Food Engineering*, 2017, 13(1).

[60] KOSHANI R, ZIAEE E, NIAKOUSARI M, et al. Optimization of thermal and thermosonication treatments on pectin methyl esterase inactivation of sour orange juice (*Citrus aurantium*)[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2015, 39(6): 567–573.

[61] 毕秀芳, 陈丽伊, 赵彩霞, 等. 热与超声波对多聚半乳糖醛酸酶的钝化动力学[J]. *食品科学*, 2018, 39(19): 90–95. [BI Xiufang, CHEN Liyi, ZHAO Caixia, et al. Inactivation kinetics of polygalacturonase after heat and ultrasonic treatments[J]. *Food Science*, 2018, 39(19): 90–95.]

[62] RAVIYAN P, ZHANG Z, FENG H. Ultrasonication for tomato pectinmethylesterase inactivation: Effect of cavitation intensity and temperature on inactivation[J]. *Journal of Food Engineering*, 2005, 70(2): 189–196.

[63] CAO X, CAI C, WANG Y, et al. Effects of ultrasound processing on physicochemical parameters, antioxidants, and color quality of bayberry juice[J]. *Journal of Food Quality*, 2019: 1–12.

[64] CHENG L, SOH C, LIEW S, et al. Effects of sonication and carbonation on guava juice quality[J]. *Food Chemistry*, 2007, 104(4): 1396–1401.

[65] RUIZ-DE ANDA D, VENTURA-LARA M G, RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ G, et al. The impact of power ultrasound application on physicochemical, antioxidant, and microbiological properties of fresh orange and celery juice blend[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2019, 13(4): 3140–3148.

[66] YUAN Y H, HU Y C, YUE T L, et al. Effect of ultrasonic treatments on thermoacidophilic *Alicyclobacillus acidoterrestris* in apple juice[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2009, 33: 370–383.

[67] 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.

[68] 郑炯, 裴瑜, 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. [ZHENG Jiong, GONG Yu, ZENG Ruiqi, et al. Effect of ultrasonic treatment on the quality of watermelon juice[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2018, 44(10): 168–174.]

[69] 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.

[70] NADEEM M, UBAID N, QURESHI T M, et al. Effect of ultrasound and chemical treatment on total phenol, flavonoids and antioxidant properties on carrot-grape juice blend during storage[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 45: 1–6.

[71] 阚健全, 谢笔钧. 食品化学[M]. 第2版. 北京: 中国农业大学出版社, 2008. [KAN Jianquan, XIE Bijun. *Food chemistry*[M]. 2nd. Beijing: China Agricultural University Press, 2008.]

[72] NGUYEN C, NGUYEN H. Ultrasonic effects on the quality of mulberry juice[J]. *Beverages*, 2018, 4(3): 56–56.

- [73] 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.
- [74] 栗星, 包海蓉. 超声波在食品杀菌中的研究现状[J]. 农业工程技术(农产品加工业), 2008(6): 25–28. [LI Xing, BAO Hairong. Ultrasound in food sterilization: A review[J]. *Agriculture Engineering Technology (Agricultural Product Processing Industry)*, 2008(6): 25–28.]
- [75] ASHOKKUMAR M, SUNARTIO D, KENTISH S, et al. Modification of food ingredients by ultrasound to improve functionality: A preliminary study on a model system[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2008, 9(2): 155–160.
- [76] ALONGI M, VERARDO G, GORASSINI A, et al. Phenolic content and potential bioactivity of apple juice as affected by thermal and ultrasound pasteurization[J]. *Food Function*, 2019, 10(11): 7366–7377.
- [77] CAMPOLIS S, ROJAS M L, DO AMARAL J, et al. Ultrasound processing of guava juice: Effect on structure, physical properties and lycopene *in vitro* accessibility[J]. *Food Chemistry*, 2018, 268: 594–601.
- [78] BI X, HEMAR Y, BALABAN M O, et al. The effect of ultrasound on particle size, color, viscosity and polyphenol oxidase activity of diluted avocado puree[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2015, 27: 567–575.
- [79] 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 Wenwen, LOU Shuting, SUN Yujing, et al. Effects of ultrasonic treatment on main aroma compounds in freshly squeezed orange juice[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2016, 16(5): 245–251.]
- [80] 钟烈洲. 超声波对现榨苹果汁的品质影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 37. [ZHONG Liezhou. Effect of ultrasound on qualities of squeezed fresh apple juice[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013: 37.]
- [81] JAMBRAK A R, SIMUNEK M, PETROVIC M, et al. Aromatic profile and sensory characterisation of ultrasound treated cranberry juice and nectar[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, 38: 783–793.