

高压均质对果蔬汁品质与安全的影响

邵璐阳, 张泽群, 董丽, 陈芳, 胡小松*

(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 北京 100083)

摘要 随着消费者对新鲜、无添加的高质量食品需求的增加,食品非热加工技术开始快速发展。高压均质技术是一种连续式的非热加工技术,在保证食品安全的同时,还能有效保持食物的感官特性和营养价值。它主要通过压力、剪切、碰撞、空穴和加热等效应实现对液体食品的质构改变,并能杀灭其中的微生物,进而延长食品货架期。为了更好地改进和应用高压均质技术,需了解其作用机理和应用情况。本文对高压均质技术在果蔬汁杀菌、灭酶、护色等方面的研究进行综述,为其在果蔬汁工业上的应用提供理论依据。

关键词 高压均质; 杀菌; 果蔬汁; 品质; 酶

文章编号 1009-7848(2024)03-0432-14 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.03.041

近年来,消费者对高质量、少添加、低成本、有营养的果蔬产品需求不断增长。由于传统的热处理会导致果蔬等热敏性食品中的营养和风味损失,因此寻找能更好地保持其营养和感官品质的非热加工技术显得尤为重要^[1]。高压均质技术(High Pressure Homogenization, HPH)是一种基于动态高压的新兴非热加工技术,允许连续加工流体食品,压力在 100~600 MPa 之间。由于其处理时间短,对微生物杀灭效果较好,对营养价值和感官特征的负面影响小,可以实现连续化等优势,因此被提议作为具有热敏特性的液体食品巴氏杀菌的替代方案^[2]。其中,压力超过 300 MPa 的 HPH 又被称为超高压均质(Ultra-High-Pressure Homogenization, UHPH)^[3]。近年来,得益于高压技术的发展,如增压器的开发、耐高压材料(不锈钢、陶瓷等)的研究和新型均质阀的设计,目前 UHPH 在实验室规模上可以达到 400~600 MPa 的工作压力。

HPH 通过机械力破坏细胞结构,可有效灭活果蔬汁中的致病和腐败微生物,并改变食品质构,导致果蔬汁色泽、均一性、稳定性、流变特性和生物活性化合物的生物可及性发生改变。本文综述高压均质对果蔬汁杀菌、灭酶及食品理化、营养特性的影响,分析在果蔬汁工业应用的前景和未来

挑战。

1 HPH 技术的工作原理

HPH 是在处理过程中,流体先达到预定压力,然后经过均质阀,在压力释放的过程中产生剪切、碰撞、空穴和温度上升等效应^[4-5],实现微生物的杀灭和食品品质改善。如图 1 所示,HPH 包括一个或者两个阶段来限制流体流动,这取决于所需的应用和最终产品的性能。高压均质机通常配备高压阀(HP 阀或第一级阀)、低压阀(LP 阀或第二级阀)、压力泵和热交换器等^[3]。根据不同的加工目标(乳化均质、杀菌),流体通过热交换器进行预冷或预热至所需的人料温度。然后,通过压力泵将其加压至所需压力之后,流体通过第一个均质阀后压力减少。由于压力下降,部分动能转化为热量,也会导致温度升高。第二个均质阀将流体压力降低到大气压左右,并破坏流体在第一个均质阀排放过程中可能形成的团聚物^[6]。由于类似于静水压的压缩热和均质化效应,流体温度会升高,为了防止最终产品温度过高,因此在均质化后通常采用热交换器立即冷却,以最大限度地减少对热敏性物质的破坏。

均质阀的设计和几何形状是高压均质设备的核心,是影响最终产品工艺性能和特性的关键参数。常见的阀门几何形状主要有 3 种,分别是孔型阀、活塞阀和微射流阀^[2,8,10],如图 2 所示。孔型阀是利用阀门直径减小,流体速度增加,剧烈撞击阀

收稿日期: 2023-03-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1602202)

第一作者: 邵璐阳,女,硕士生

通信作者: 胡小松 E-mail: huxiaos@263.net

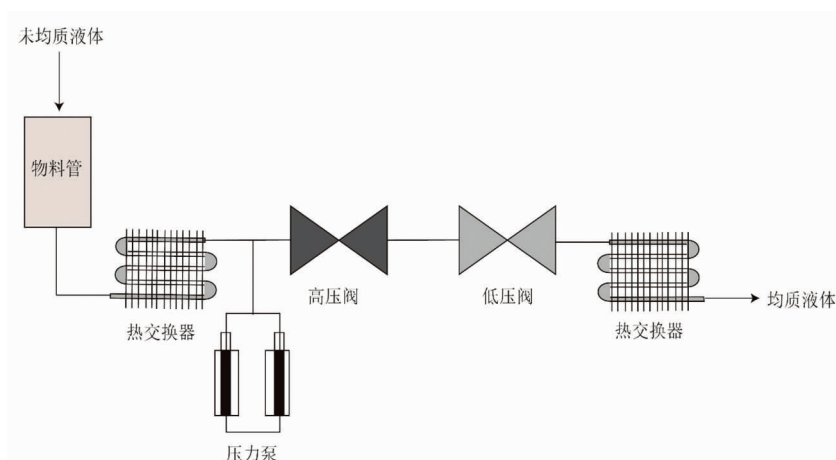


图 1 高压均质工艺示意图

Fig.1 Schematic diagram of high-pressure homogenization process

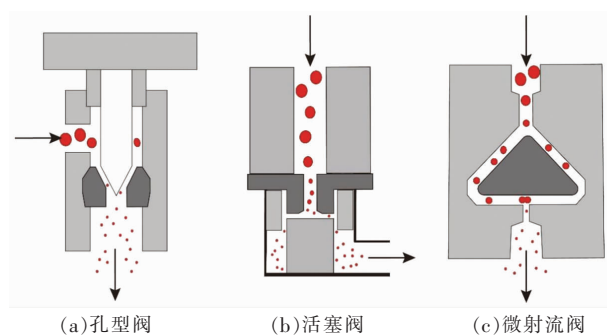


图 2 高压均质机中常见的均质阀示意图

Fig.2 Schematic diagram of common homogenizing valve in high pressure homogenizer

门内部，可使产品在设定压力下保持恒定流量运行，但由于剧烈碰撞和摩擦会减少使用寿命^[10]。活塞阀是在孔型阀的基础上引入碰撞阀和碰撞环结构，降低磨损程度从而延长阀门的使用寿命。高压微射流(High Pressure Jet, HPJ)就是一种利用微射流阀的特殊形式的高压均质技术，该技术是通过使用特殊材料(钻石、蓝宝石或红宝石)制成的喷嘴限制液体流动，迫使流体形成射流，其压力最高可达 600 MPa^[8-9]。不同几何形状的阀门会影响设备的均质和杀菌效果^[8,10]。Pang 等^[11]通过计算流体动力学模拟结果表明锯齿型的阀头形状比光滑型具有更高的间隙应变速率，可以导致液体获得更高的剪切应力，提高乳化均质效率。阀门的几何形状也会影响均质化过程中温度升高的程度，并且这种温度升高是不可逆的^[12]。研究发现，即使使用相同的压力，不同几何形状的阀门设计会影响

微生物的灭活，与孔型阀相比，使用活塞阀灭活营养微生物更有效^[13]。这可能是因为不同几何形状的阀门会导致不同的流动特性，如气蚀、撞击固体壁和流体射流碰撞。因此，食品工业上可以通过改变阀门设计、调整初始流体温度和压力来实现产品所需的技术效果。

已有的研究显示，HPH 是一种绿色、低碳、节能、环保的加工技术。Bot 等^[6]对比了高压均质和超声对番茄汁加工的工艺效率，发现在试验规模上，高压均质机(150 MPa)的能耗比超声设备低 4 倍以上。Valsasina 等^[7]开展了 UHPH 和超高温瞬时均质(Ultra-high temperature homogenisation, UHTH)对牛奶的生命周期影响评估试验(Life cycle impacts assessment, LCA)，结果显示，中试规模下 UHPH(360 L/h)的碳足迹比超高温瞬时灭菌降低了 31%。因此，与热加工处理相比，HPH 正在被发展成为一种用于果蔬汁等热敏性液体食品的加工技术。

2 HPH 对果蔬汁中微生物的影响

微生物的灭活是食品工业化生产的关键环节。HPH 可以利用高压、剪切、碰撞、空穴和温度等效应有有效杀灭微生物，但会受多种因素的影响，包括压力水平、循环次数、入料温度、出料温度、微生物种类等。研究表明 HPH 处理可以使果蔬汁中的微生物水平降低到检测水平以下，并且可以在 4℃ 储存 1~2 个月，并保持其感官品质^[14-15]。表 1 总结了 HPH 技术对果蔬汁中各种微生物的灭活

表1 高压均质对果蔬汁微生物的灭活效果

Table 1 Inactivation effect of HPH on microorganism in fruit and vegetable juice

食品基质	微生物种类	条件			杀菌效果/ lg(CFU·mL ⁻¹)	参考文献		
		进料温度/ ℃	压力/ MPa	次数				
苹果汁	pH 3.8	大肠杆菌	25	50	1	0.67	[16]	
		大肠杆菌	25	100	1	1.3		
		大肠杆菌	25	150	1	2.27		
		大肠杆菌	25	200	1	4.11		
		大肠杆菌	25	250	1	7		
		大肠杆菌	4	250	1	5		[17]
		李斯特氏菌	4	300	1	5		
杏汁	14 °Brix, pH 3.26	酿酒酵母子囊孢子	20	300	1	>6	[24]	
		丝状真菌分生孢子	20	300	1	>6		
		黑酵母分生孢子	20	300	1	>6		
香蕉汁	pH 4.8	菌落总数	4	150	1	1	[25]	
		菌落总数	4	200	1	4		
胡萝卜汁	pH 5.2	大肠杆菌	4	250	1	5	[17]	
		李斯特氏菌	4	300	1	5		
		百合酵母	10	100	1	0.8		[22]
猕猴桃汁	13 °Brix	酵母	10	100	8	2.6		
		酵母	4	200	2	2.4(5 °C储藏 16 d)	[26]	
芒果汁	-	菌落总数	4	200	3	2.4(5 °C储藏 40 d)		
		菌落总数	20	190	1	0.54	[27]	
		菌落总数	20	190	5	3.21		
橙汁	12° Brix, pH 3.8	菌落总数	60	190	1	2.32(5 °C储藏 60 d)		[18]
		大肠杆菌	25	200	5	6		
		植物乳杆菌	25	200	5	2.34		
		肠系膜明串珠菌	25	200	5	1.64		
		酿酒酵母	25	200	5	>2		
		青霉菌	25	200	5	4		
		大肠杆菌	25	200	5	>2		
	pH 3.6	大肠杆菌	6	300	1	3.57	[19]	
		大肠杆菌	20	300	1	3.88		
		大肠杆菌	6	300	1	3.37		
	- 10.5 °Brix, pH 4.1	大肠杆菌	20	300	1	3.69	[20]	
		李斯特氏菌	20	300	1	2.7		
		酿酒酵母	20	300	1	2.7		
		酿酒酵母	20	300	1	2.7		
酿酒酵母		10	200	1	4.9	[21]		
酿酒酵母		10	250	1	>5.6			
酿酒酵母		10	300	1	>5.6			
- 10.5 °Brix, pH 4.1	植物乳杆菌	10	200	1	2.1	[23]		
	植物乳杆菌	10	250	1	>7			
	植物乳杆菌	10	300	1	>7			
	脂环酸芽孢杆菌	20	300	1	/			
	脂环酸芽孢杆菌	50	300	1	<1			
	脂环酸芽孢杆菌	60	300	1	<2			
	脂环酸芽孢杆菌	70	300	1	<5			
凤梨汁	12.9 °Brix, pH 3.87	酿酒酵母	80	300	1	5.3	[14]	
		大肠杆菌	2	150	4	8		
		大肠杆菌	2	150	4	6		
		德式乳酸杆菌	2	150	5	2		

效果,不同的温度、pH 值和压力条件对微生物的杀灭效果影响较大,且温度越高、压力越大,微生物的杀灭效果越好。

不同的均质条件会影响果蔬汁中的微生物灭活效果。一般来说,在较低压力(<100 MPa)的处理对食品中几乎所有微生物的影响都可忽略不计,而在较高压力(>200 MPa)的均质条件下,微生物可以被杀灭^[16,25]。压力较低时,活塞式均质阀间隙可以让细胞通过而不造成细胞壁损伤,随着压力增加,间隙减小,进而会指数级地增加对细胞的剪切应力和空化效应,造成细胞壁损伤^[2],且相同均质压力下,均质次数增加,影响微生物细胞完整性的机械破坏次数随之增加,使其杀灭效果增强^[27-28]。Kumar 等^[16]研究还发现,在 100~200 MPa 压力范围内,导致微生物失活的主要因素是均质压力,压力 ≥ 250 MPa 则会带来显著的热失活。同样的,Pathanibul 等^[17]认为,在>200 MPa 压力条件下,细菌失活是均质和短期高温暴露共同导致的结果。这可能是因为 UHPH 处理过程中很大一部分机械能在加工中转化为热能,进一步提高了流体温度^[32-33],从而对微生物的细胞结构产生了一定的影响。

此外,流体的入料温度会影响 HPH 对果蔬汁中微生物的灭活。Brñez 等^[29]发现相比于 4 °C,入料温度为 20 °C 时,300 MPa 处理的橙汁中金黄色葡萄球菌比肉葡萄球菌的杀灭数目至少增加 0.3 lg(CFU/mL)。Carreño 等^[30]研究表明,相比于 15 °C,植物乳杆菌在入料温度为 30 °C 时的杀灭数目显著增加。这可能是因为随着入料温度的升高,流体黏度降低,流体的流动模式表现出更强的湍流作用,流体的空化效应增强,导致微生物失活的增强^[31]。

微生物的类型也是影响 HPH 对微生物的杀灭效果的重要因素。革兰氏阳性菌比革兰氏阴性菌的细胞壁具有更厚、更紧密的肽聚糖层,因此对压力、温度等外界环境具有更强的抗性^[17,34]。植物乳杆菌和酿酒酵母对高压均质化处理具有较高的敏感性,在 250 MPa 的压力下,两种微生物的灭活数目均高于 5 lg(CFU/mL)^[21]。Mckay 等^[24]研究发现在 300 MPa 的条件下,UHPH 可杀灭苹果汁中超过 5 lg(CFU/mL)的酿酒酵母子囊孢子、丝状

真菌分生孢子以及黑酵母孢子。但是,灭活抗性极强的细菌芽孢则需要更高的入料温度。研究发现,在 300 MPa 的均质压力下,入料温度为 50 °C 时,脂环酸芽孢杆菌芽孢杀灭不到 1 lg (CFU/mL),而当入料温度提高到 70 °C 以上,可杀灭接近 5 lg (CFU/mL)的芽孢^[23]。这种动态高压结合较高的入料温度(导致阀门温度为 120~150 °C)也可有效灭活果蔬汁中的芽孢^[12]。

因此,为了更好实现 HPH 处理果蔬汁等产品的高效性,需要综合考虑压力、温度、处理次数等因素对微生物的杀灭效果,进而对其进行相关参数的改进和优化。

3 HPH 对果蔬汁中酶活的影响

果蔬中天然存在的内源酶的活性与果蔬汁品质特性密切相关。内源性果胶酶,包括果胶甲酯酶(PME)、聚半乳糖醛酸酶(PG)和果胶裂解酶(PL)会导致果肉水解从而使果蔬汁稳定性下降,而氧化酶主要是过氧化物酶(POD)和多酚氧化酶(PPO),会导致酶促褐变、非特征风味形成和营养物质损失^[3]。对于大多数以水果为基础的产品,加工参数(压力、时间、温度)是根据最耐热的酶而不是微生物的杀灭来选定的,因为灭酶比保证产品微生物安全所需的能量更多^[35]。许多研究表明,HPH 会对果蔬汁内源酶的活性产生影响,如表 2 所示。

高压均质处理对果蔬汁中内源酶有较好的灭活效果。Velázquez-Estrada 等^[36]研究发现 PME 活性随着均质压力的增加而降低,也比较了中试规模 UHPH(120 L/h)和巴氏杀菌处理对橙汁中 PME 的失活影响,发现 300 MPa(入料温度为 20 °C)与热巴氏杀菌(90 °C、1 min)产生相同的 PME 失活水平(96%)。Suárez-Jacobo 等^[38]研究发现,300 MPa(入料温度为 4 °C)处理后和贮藏期间的苹果汁均未检测到 PPO 和 PME 活性。Welti-Chanes 等^[37]研究了 UHPH 中入料温度和循环次数对 PME 活性的影响,在 250 MPa 压力、入料温度分别为 22,35 °C 和 45 °C 单次通过后,PME 活性分别降低了 50.4%,49.4% 和 37.8%,而 250 MPa(入料温度为 22 °C)通过 5 次后,PME 活性大大降低(超过 80%)。Calligaris 等^[25]研究表明当均质压力大于

表2 HPH对果蔬汁中内源酶活性的影响

Table 2 Effect of HPH on endogenous enzyme activity in fruit and vegetable juice

食品基质	酶	条件			酶活性变化	参考文献
		进料温度/℃	压力/MPa	次数		
香蕉汁	果胶裂解酶	4	150	1	果胶裂解酶完全失活	[25]
橙汁	果胶甲酯酶	10	100	1	果胶甲酯酶活性降低了10%	[36]
		20	100	1	果胶甲酯酶活性降低了28%	
		10	200,300	1	果胶甲酯酶活性降低了90%以上	
橙汁	果胶甲酯酶	22,35,45	250	1	果胶甲酯酶活性分别降低了50.4%, 49.4%和37.8%。	[37]
		22	250	5	果胶甲酯酶活性降低了80%以上	
苹果汁	果胶甲酯酶	4	300	1	果胶甲酯酶活性低于检测值	[38]
	多酚氧化酶	4	300	1	多酚氧化酶活性低于检测值	
梨汁	多酚氧化酶	室温	180	3	多酚氧化酶活性可达182%	[39]
苹果汁	多酚氧化酶	4	200	1	多酚氧化酶活性降低了21.5%	[40]
	过氧化物酶				过氧化物酶活性降低了16.4%	

150 MPa时,香蕉汁中的PL会完全失活,在4℃保存1d后,PL活性也没有得到恢复。此外,与单独使用HPH相比,HPH和超声的联用提高了苹果汁中PPO的失活率,但工艺设计上还需考虑二者联用所需的能量消耗^[41]。

近来的研究表明,HPH处理对果蔬汁内源酶活的影响主要是由于改变了酶的构象^[39,42]。Liu等^[39]使用带有微射流通道阀的HPH均质化梨汁,发现多酚氧化酶(PPO)的活性随均质压力的增加逐渐增加,在180 MPa和3次循环后达到最大活性(182%)。类似地,Liu等^[42]研究发现在110 MPa下单次通过后PPO活性提高到110%,通过圆二色光谱表明PPO的二级结构被破坏,通过荧光光谱分析表明PPO的三级和四级结构部分展开,暴露其亲水基团。

总之,均质压力、入料温度、循环次数都会对酶的活性产生影响^[10]。HPH可能部分诱导蛋白酶的二级,三级和四级结构变化,暴露或阻碍其活性位点,从而增加或减少其活性。但是,关于酶的结构变化如何影响酶的活性仍不清楚,HPH影响酶活的机制还需进一步研究。

4 HPH对果蔬汁理化特性的影响

果蔬汁的流变特性是影响产品开发和优化过程的重要因素,并决定了产品的外观、味道、质地

和保质期,还会影响产品的感官质量和消费者接受度^[43]。在HPH处理过程中,剪切应力、湍流、空化和高速撞击导致悬浮颗粒的破碎、颗粒尺寸的减小和产品微观结构的其它变化,最终体现为产品流变学特性发生变化。因此,HPH有助于提高液体食品的均匀性和稳定性,在果蔬汁产品的工业生产和应用中被广泛关注。

研究表明,HPH处理可有效降低番茄汁^[44]、橙汁^[45-46]、草莓汁^[47]、腰果梨汁^[48]、芒果汁^[49]、百合浆^[50]、菠萝汁^[51]等果蔬汁的粒径,并且HPH对颗粒破碎的影响遵循渐进行为:在较高的压力下,增加压力时,粒径分布变化减小。这可能是因为均质破坏优先发生在较大的颗粒和细胞中,而小颗粒和细胞碎片不太容易受到后续破坏。Leite等^[48]研究了不同压力下的均质处理对腰果梨汁中颗粒的影响,发现 $D_{[4,3]}$ (表面积体积平均径)和 $D_{[3,2]}$ (长度表面积平均径)均随着压力的增加而减少,减少量分别相当于初始直径(对照)的35%(25 MPa)和18%(150 MPa),对照样品粒径分布范围为20~1 000 μm ,150 MPa处理后为0.5~150 μm 。Liu等^[50]研究发现HPH处理后百合浆的粒径分布在0~60 MPa之间的变化比60~100 MPa之间更为明显。这表明了HPH会减小平均粒径,并且HPH对悬浮颗粒的影响遵循渐进行为。此外,均质次数的增加也能显著降低颗粒直径。Leite等^[52]研究了多次均质处

理对冷冻浓缩果汁的影响,50 MPa 时通过 2 次或 3 次的粒径分布接近于 100 MPa 时通过 1 次,说明可以通过增加均质次数减少均质压力来达到减小粒径的效果。

在食品工业中,HPH 技术被用于改变产品的流变特性以提高其品质。Liu 等^[50]研究发现 HPH 处理降低了百合浆的黏度,提高了其可溶性固形物(TSS)和明亮程度,60 MPa 以上处理的百合浆具有良好的悬浮稳定性。刘琪等^[51]研究了 HPH (200 MPa,入料温度 60 ℃)处理后菠萝汁贮藏期间(4 ℃)的剪切力与黏度,发现其没有发生显著变化,说明 HPH 有助于在贮藏期内保持菠萝汁的稳定性。Bot 等^[9]发现 150 MPa 的均质压力处理的番茄汁凝胶性增加,黏弹性(10.0°Brix)增加 2~4 倍。这可能是由于加工过程中悬浮颗粒的破坏,增加了颗粒表面积和颗粒间的相互作用力。此外,Santiago 等^[54]研究了 HPH 对番茄泥中分散相的影响,发现与对照样品相比,HPH 处理后样品的 Bostwick 均一性指数低,表明均质后分散相具有更强的流动阻力,也证实了 HPH 显著提高了番茄泥的稠度。Palmero 等^[55]认为 HPH 期间释放的不溶性果胶可以形成凝胶结构,进而导致稠度增加。这表明 HPH 技术可用于增加果蔬汁的稠度,提高其感官接受度,降低添加亲水胶体的需要,减少颗粒沉淀和汁液分离^[53]。但是,Leite 等^[48]发现 HPH 处理的腰果梨汁稠度降低为原来的 50%,流动特性指数增加到初始值的近 2 倍,果汁触变性略有降低,这表明采用 HPH 工艺可以降低腰果梨汁中果肉的沉降速度。这些研究表明 HPH 对不同的果蔬汁体系中流变特性的变化是存在差异的。这可能是因为不同果蔬基质在高剪切作用下呈现不同的组成和结构排列,导致不同产品在高剪切作用下的抗性分布不同^[8]。另一方面,对于不同的食物基质来说,HPH 过程释放的细胞内容物和/或细胞碎片都是独特的,导致颗粒-颗粒和颗粒-液体相互作用也是不同的^[56]。因此,可根据果蔬特性利用 HPH 处理改善其流变特性,有效防止分层,增强稳定性,从而促进产业的发展^[57]。

HPH 对果蔬汁色泽也具有较好的保护作用,这在很大程度上取决于食物基质和处理条件。研究发现在 150,200,300 和 400 MPa 的 HPH 处理

下,香蕉汁的色泽有明显的改善, L^* 值和 b^* 值都有所增加,表明得到的均质样品比原果汁更明亮、更淡^[29]。此外,研究发现高压处理能够增强猕猴桃汁的典型绿色,当均质压力为 200 MPa 时,3 次均质处理后的猕猴桃汁在整个储存期间呈现相似的色泽,这表明均质处理后的猕猴桃汁的色泽得到改善,其稳定性也得到了提高^[26]。但在一些研究中,HPH 对果蔬汁的色泽虽没有显著性影响^[14,27,52,58],但优于热加工处理。Wellala 等^[58]研究了 HPH 对混合果汁(胡萝卜汁、桃汁、苹果汁)的影响,发现 HPH 处理对混合果汁样品的色泽没有显著影响。Zhou 等^[49]研究发现 HPH 处理后芒果汁的 L^* 值减小, a^* 值随着压力、入料温度和循环次数的增加而增加,但是由于 ΔE 值均 <2 ,总体上色泽的变化肉眼不可见。但是,研究发现,HPH 对一些果蔬汁的色泽具有改善作用。此外,HPH 处理对果蔬汁中总可溶性固形物(TSS)、可滴定酸度(TA)、pH 值、总糖和还原糖等方面影响较小,具有保留果蔬汁特性的优点^[27,43,59-61]。

HPH 还有助于改善果酒等产品的风味品质^[62-66]。Vaquero 等^[62]研究了 UHPH(300 MPa)处理 1 次后的葡萄汁对葡萄酒的影响,发现与对照相比,UHPH 处理的葡萄酒中 2-苯乙基乙酸酯的浓度和感官阈值都更高。而 2-苯乙基乙酸酯是葡萄酒发酵香气中的关键化合物^[64]。同样的,段卫朋等^[63]研究了 HPH 对葡萄酒风味的影响,通过香气轮廓图发现经过 200 MPa/1 次处理后,葡萄酒的香气化合物含量改变,花香、果香、焦糖味、脂肪味都极大升高,泥土味与植物味大幅度降低,风味品质得到改善。此外,刘丹丹等^[65]研究了 HPH 对猕猴桃酒风味的影响,发现随着均质压力(30~120 MPa)的增加,W1W(有机硫化物、萜类物质)、W2S(乙醇)、W3S(烷烃类物质)等缺陷型气味降低,而在 120 MPa 压力下鲜味增加。

5 HPH 对果蔬汁营养特性的影响

HPH 技术不仅可以提高果蔬汁的稳定性和质量,还可以释放生物活性物质,从而增强果汁的营养和功能特性。表 3 总结了 HPH 处理对不同果蔬汁的理化特性和营养成分的研究。研究发现 HPH 处理通过更好地破碎细胞,可以更多地保留

表3 HPH对果蔬汁理化和营养特性的影响

Table 3 Effects of HPH on physicochemical and nutritional properties of fruit and vegetable juice

食物基质	条件			结果
	进料温度/°C	压力/MPa	次数	
香蕉汁 (pH 4.8) ^[25]	4	150, 200, 300, 400	1	黏度降低; L^* 和 b^* 增加, a^* 减少
腰果苹果汁 (10°Brix, pH 5.0) ^[48]	25	25~150	1	粒径减小; Zeta 电位没有显著性变化; 稠度降低
冷冻浓缩橙汁 (pH 3.8) ^[52]	25	50, 100, 150	1~3	粒径减小; 色泽没有显著性变化; 稠度降低
苹果汁 ^[3]	20	150	3	pH 值、白利糖度、维生素 C 含量和色泽没有显著性变化
百合浆 (质量分数 15%) ^[50]	-	20~100	1	粒径减小; 黏度降低; TSS 增加; L^* 增加, b^* 和 a^* 降低
芒果汁 ^[49]	20, 40, 60	190	1~5	pH 值、TSS 没有显著性变化; L^* 减小, a^* 增加; 粒径降低; 表观黏度增加; 压力增加对 WSP 没有显著影响, 入料温度和循环次数的增加显著增加了 WSP 含量
非浓缩橙汁 ^[57]	25	50~150	1~3	浊度增加; 粒径减小; 黏度降低
玫瑰果花蜜 (11.1°Brix, pH 3.68) ^[67]	4	75, 100, 125	1~3	pH 值没有显著性变化; 平均粒径降低; 表观黏度和稠度增加; L^* 、 a^* 和 b^* 值增加; TPC 和抗坏血酸含量显著下降; TCC 和总抗氧化能力显著增加
草莓汁 (9.8°Brix, pH 3.79) ^[47]	-	60	2, 5	TPC、抗氧化能力没有显著性变化; 平均粒径减小; 5 次之后 TSS 增加; L^* 增加, b^* 和 a^* 降低
		100	2, 5	TPC、抗氧化能力增加; 粒径减小; 均质 2 次后黏度增加, 5 次后黏度减小; TSS 没有显著性变化; L^* 增加, b^* 和 a^* 降低
苹果汁 ^[59]	4, 20	100, 200, 300	1	黏度增加; TSS、TA、pH 值、总糖和还原糖含量、TPC、抗氧化能力、抗坏血酸和脱氢抗坏血酸没有显著性变化; β -胡萝卜素含量下降, 与热处理 (90 °C, 30 min) 没有显著性差异
猕猴桃汁 (13°Brix) ^[26]	4	200	2, 3	pH 降低; 黏度增加; L^* 增加, b^* 和 a^* 降低; TPC、抗氧化活性增加
胡萝卜、苹果、桃子混合汁 ^[58]	25	140	1	色泽、TSS、TA、干物质含量、TCC 没有显著性变化; 悬浮固体含量、粒径减小; 贮存模量 (G') 和损耗模量 (G'') 降低; TPC、抗氧化活性增加
芒果汁 ^[27]	20~60	40~190	1~5	与热处理 (90 °C/5 min) 相比, pH 值、TSS、TA、抗坏血酸没有显著性变化; HPH 处理后 L^* 和 b^* 下降, a^* 值增加, ΔE 值均小于 2, 无明显色差
橙汁 ^[45]	-	150	1	抗坏血酸没有显著差异; 胡萝卜素和视黄醇当量降低了 1.37 和 1.35 倍, 粒径减小, 增强了类胡萝卜素的生物可及性 (约 5 倍)
柑橘汁 ^[69]	31	150	1	类胡萝卜素含量降低; 类胡萝卜素和视黄醇活性当量的生物可及性提高了 6 倍和 4 倍; 总黄酮含量没有显著性差异, 总黄酮生物可及性似乎得到改善
蓝莓汁 ^[70]	-	60, 100, 150, 200	1~4	维生素 C 和花青素含量略有下降, 粒径显著降低, TA 没有显著性变化

(续表 3)

食物基质	条件			结果
	进料温度/°C	压力/MPa	次数	
赤霞珠葡萄酒 ^[63]	-	100,200	1~3	花香、果香、焦糖味、脂肪味升高,泥土味与植物味降低
猕猴桃果酒 ^[65]	-	30~120	1	随着压力增加, b^* 值增加,酒体色泽改善,趋向红-黄色;缺陷型气味有效减少;120 MPa 均质压力下鲜味增加
黑醋栗汁 ^[71]	4, 20	50,150,220	1,3,5	TA、抗坏血酸、脱氢抗坏血酸和维生素 C 没有显著性差异;TSS、花青素、浊度降低; L^* 值增加, a^* 值减小;压力为 220 MPa,1 次循环增加抗氧化能力,3 次和 5 次后会降低抗氧化能力
葡萄汁 ^[62]	-	300	1	pH 值增加;抗氧化活性增加;对花青素具有保护作用

注:TSS:可溶性固形物;WSP:水溶性果胶;TPC:总酚含量;TCC:类胡萝卜素总含量;TA:可滴定酸度。

果蔬中的抗氧化活性成分^[47,59,72,79],如抗坏血酸^[14,59,72-73]、多酚^[27,47,59,72]、类胡萝卜素^[59,74,80,82]、类黄酮^[45,68,75-76]和维生素^[59,77]等,并增加它们的生物可及性^[45,69],从而提高其市场价值。

HPH 有助于提高果蔬汁的抗氧化活性,但不同的压力条件、循环次数对不同食物基质的抗氧化活性影响有所差异。Karacam 等^[47]研究发现,与对照样品相比,在 100 MPa 压力下均质 2 次的草莓汁的抗氧化活性提高了约 22%。Saricaoğlu 等^[67]结果表明,在 75~125 MPa 压力范围内,随着压力的增加,玫瑰果花蜜的抗氧化能力增加,通过次数对其无显著性影响。但是,Kruszewski 等^[71]研究了不同循环次数对黑醋栗汁的抗氧化能力的影响,发现压力为 220 MPa,1 次均质处理后抗氧化能力增加,而 3 次和 5 次循环后会降低了果汁的抗氧化能力。并且,Suárez-Jacobo 等^[38]研究了 HPH 和热处理(90 °C,4 min)对苹果汁的抗氧化能力的影响,使用 DPPH 和 FRAP 法检测果汁中的抗氧化活性,发现 HPH 处理的果汁中抗氧化活性高于热处理果汁。

果蔬汁的抗氧化活性主要是来源于其中生物活性化合物的含量,如抗坏血酸、多酚、类胡萝卜素、花青素等。与传统的高温巴氏杀菌法相比,HPH 降低了果蔬汁中生物活性化合物的损失。研究发现,HPH(300 MPa)处理不会降低苹果汁中原有的抗坏血酸和脱氢抗坏血酸含量,而且 HPH 处理的苹果汁中总维生素 C 含量比热处理的样品高 8 倍左右^[59]。经过 100 MPa 压力的均质处理后,草莓汁的总酚类物质含量增加^[47]。200 MPa 均质处理

后的猕猴桃果汁的总酚含量从 35 mg/100 mL 增加到 42 mg/100 mL,相较于对照(0.1 MPa)样品明显增加^[26]。这种现象可能与 HPH 增加了多酚等物质从细胞组织中的流出或从复合物中解聚有关^[40]。此外,均质压力的增加(20 MPa 到 100 MPa)会导致柑橘汁中生物活性化合物在储存期间更好地保留^[78]。Patrignani 等^[26]使用 200 MPa 进行 3 个循环处理猕猴桃汁,发现在储存期间猕猴桃汁中总多酚的减少速度较慢^[59]。刘嘉宁等^[82]研究了 HPH 对胡萝卜汁中类胡萝卜素含量的影响,当压力为 60 MPa,入料温度为 25 °C,3 次循环处理后 β -胡萝卜素(44.86 $\mu\text{g/mL}$)和 α -胡萝卜素(22.39 $\mu\text{g/mL}$)的含量最高。Liu 等^[81]研究对比了 HPH(180 MPa,入料温度为 60 °C)和热处理(20 MPa,入料温度为 25 °C,联合 90 °C,5 min)对胡萝卜汁中类胡萝卜素的影响,发现贮藏期间 HPH(180 MPa)处理的类胡萝卜素含量高于热处理,这说明适度入料温度辅助下的 HPH 处理对胡萝卜中类胡萝卜素的保存效果优于较低压力均质联合高温处理。此外,研究发现苹果汁中 β -胡萝卜素在热处理后损失了 40%,而压力 300 MPa(入料温度 4 °C)的均质处理后只损失了 33%,降低了 β -胡萝卜素的损失^[59]。这表明类胡萝卜素等活性物质的稳定性与各种因素有关,不仅包括热处理程度、有无光照、储存温度、包装材料等外部因素,也包括食品基质、食品氧含量、粒径大小、活性成分形态等内部因素^[78]。

果蔬汁中活性物质的生物可及性也会受到食品加工条件和食品基质成分等不同因素的影响。

生物可及性被认为是潜在生物利用度的衡量标准,可以定义为消化过程中从食物基质中释放并可能可用于吸收的化合物的量^[78]。与巴氏杀菌法相比,HPH 处理后可以获得更好的类胡萝卜素的生物可及性。在新鲜和巴氏杀菌果汁中,总类胡萝卜素的生物可及性相似(~15%),相比之下,HPH 样品的总类胡萝卜素的生物可及性增加了 5 倍,其中 α -胡萝卜素的生物可及性为 92%,玉米黄质素为 79%^[69]。同样的,Stinco 等^[45] 研究发现使用 150 MPa 的均质处理后的橙汁中胡萝卜素和视黄醇当量降低了 1.37 和 1.35 倍,但是类胡萝卜素(包括环氧类胡萝卜素)的生物可及性增加了约 5 倍。目前,研究人员通过对比分析不同处理条件下粒径分布的结果,发现 HPH 处理后 $D_{[4,3]}$ 和 $D_{[3,2]}$ 显著降低,比表面积值(Specific Surface Area, SSA)显著升高,认为颗粒的减小和 SSA 的增加可以使含类胡萝卜素的果肉颗粒更容易被消化酶吸收,促进其在消化过程中的释放,这表明均质处理的破坏作用是 HPH 处理果汁中类胡萝卜素生物可及性增加的关键^[69]。

6 结论

HPH 是一种可应用于食品工业的非热加工技术,主要是在压力条件下,通过剪切、空穴等作用破坏病原体和腐败微生物,使酶失活,提高食品的营养和功能质量。HPH 可以促进果蔬汁向理想的物理性质变化,使悬浮在液体中的果蔬颗粒在压力作用下通过专门设计的均质阀使粒径分布均匀,增加一致性,减少颗粒沉降和汁液分离,从而提高消费者的感官接受度。此外,HPH 操作简单、扩展性大、吞吐量高,又具有可再现性,是一种特别适合工业应用的技术,其成功应用将会提供新一代的最低限度加工产品,在感官和营养特性上更接近新鲜的产品,并且与巴氏杀菌的产品一样安全和持久。但是,HPH 技术还面临诸多挑战。比如,单独的 HPH 不足以灭活果蔬汁中所有微生物,尤其是芽孢,需要结合温度灭活或者采用冷链运输抑制生长;需要考虑设备成本问题,设备成本较高,并且设备腐蚀会对产品造成不良影响,后续也涉及到高昂的设备维护成本,需要以提高能量效率和减少磨损为目的,持续对设备及工艺进行

研究和开发。此外,HPH 技术缺乏大规模应用和验证,大多数研究都是在实验室规模,需要更多证据证明该技术可在中试规模上进一步放大。最后,HPH 的作用高度依赖于食物基质,工业和商业应用前需要仔细评估特定产品,以确保达到预期的结果。并且,其设备的投产也需要根据产品原料特点,不断开发在感官和结构特性或营养和功能特性上区别于传统产品的新产品,提高消费者喜爱度,增加市场竞争力。

参 考 文 献

- [1] KUBO M T K, TRIBST A A L, AUGUSTO P E D. High pressure homogenization in fruit and vegetable juice and puree processing: Effects on quality, stability and phytochemical profile[M]. Oxford: Elsevier, 2020: 337-358.
- [2] SEVENICH R, MATHYS A. Continuous versus discontinuous ultra-high-pressure systems for food sterilization with focus on ultra-high-pressure homogenization and high-pressure thermal sterilization: A review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2018, 17(3): 646-662.
- [3] DUMAY E, CHEVALIER -LUCIA D, PICART -PALMADE L, et al. Technological aspects and potential applications of (ultra) high-pressure homogenisation[J]. Trends in Food Science & Technology, 2013, 31(1): 13-26.
- [4] DONSI F, FERRARI G, LENZA E, et al. Main factors regulating microbial inactivation by high-pressure homogenization: Operating parameters and scale of operation[J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(3): 520-532.
- [5] KLEINIG A R, MIDDELBERG A P J. On the mechanism of microbial cell disruption in high-pressure homogenization[J]. Chemical Engineering Science, 1998, 53(5): 891-898.
- [6] BOT F, CALLIGARIS S, CORTELLA G, et al. Effect of high pressure homogenization and high power ultrasound on some physical properties of tomato juices with different concentration levels[J]. Food Engineering, 2017, 213: 10-17.
- [7] VALSASINA L, PIZZOL M, SMETANA S, et al. Life cycle assessment of emerging technologies: The

- case of milk ultra-high pressure homogenization[J]. *Cleaner Production*, 2017, 142(4): 2209–2217.
- [8] LEVY R, OKUN Z, SHPIGELMAN A. High-pressure homogenization: Principles and applications beyond microbial inactivation[J]. *Food Engineering Reviews*, 2021, 13(3): 490–508.
- [9] TRAN M, ROBERTS R, FELIX T L, et al. Effect of high-pressure-jet processing on the viscosity and foaming properties of pasteurized whole milk[J]. *Dairy Science*, 2018, 101(5): 3887–3899.
- [10] MARTÍNEZ-MONTEAGUDO S I, YAN B, BALASUBRAMANIAM V M. Engineering process characterization of high-pressure homogenization—from laboratory to industrial scale[J]. *Food Engineering Reviews*, 2017, 9: 143–169.
- [11] PANG H, NGAILE G. Modeling of a valve-type low-pressure homogenizer for oil-in-water emulsions[J]. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, 2021, 160: 108249.
- [12] 刘伟, 宋弋, 廖小军, 等. 高压均质在液态食品杀菌中的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(23): 306–313.
- LIU W, SONG Y, LIAO X J, et al. Review of high pressure homogenization in liquid food sterilization[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(23): 306–313.
- [13] DONSI F, ANNUNZIATA M, FERRARI G. Microbial inactivation by high pressure homogenization: Effect of the disruption valve geometry[J]. *Food Engineering*, 2013, 115(3): 362–370.
- [14] MARESCA P, DONSI F, FERRARI G. Application of a multi-pass high-pressure homogenization treatment for the pasteurization of fruit juices[J]. *Food Engineering*, 2011, 104(3): 364–372.
- [15] SUÁREZ-JACOBO A, GERVILLA R, GUAMIS B, et al. Effect of UHPH on indigenous microbiota of apple juice. A preliminary study of microbial shelf-life[J]. *Food Microbiology*, 2010, 136(3): 261–267.
- [16] KUMAR S, THIPPAREDDI H, SUBBIAH J, et al. Inactivation of *Escherichia coli* K-12 in apple juice using combination of high-pressure homogenization and chitosan[J]. *Food Science*, 2009, 74(1): 8–14.
- [17] PATHANIBUL P, TAYLOR T M, DAVIDSON P M, et al. Inactivation of *Escherichia coli* and *Listeria innocua* in apple and carrot juices using high pressure homogenization and nisin[J]. *Food Microbiology*, 2009, 129(3): 316–320.
- [18] TAHIRI I, MAKHLOUF J, PAQUIN P, et al. Inactivation of food spoilage bacteria and *Escherichia coli* O157:H7 in phosphate buffer and orange juice using dynamic high pressure[J]. *Food Research International*, 2006, 39(1): 98–105.
- [19] BRIÑEZ W J, SAGUÉS A X, HERRERO M M H, et al. Inactivation by ultrahigh-pressure homogenization of *Escherichia coli* strains inoculated into orange juice[J]. *Food Protection*, 2006, 65(5): 984–989.
- [20] BRIÑEZ W J, ROIG-SAGUÉS A X, HERRERO M M H, et al. Inactivation of *Listeria innocua* in milk and orange juice by ultrahigh-pressure homogenization[J]. *Food Protection*, 2006, 69(1): 86–92.
- [21] CAMPOS F P, CRISTIANINI M. Inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* and *Lactobacillus plantarum* in orange juice using ultra high-pressure homogenization[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2007, 8(2): 226–229.
- [22] PATRIGNANI F, VANNINI L, KAMDEM S L S, et al. Potentialities of high-pressure homogenization to inactivate *Zygosaccharomyces bailii* in fruit juices[J]. *Food Science*, 2009, 75(2): 116–120.
- [23] ROIG-SAGUÉS A X, ASTO E, ENGERS I, et al. Improving the efficiency of ultra-high pressure homogenization treatments to inactivate spores of *Alicyclobacillus* spp. in orange juice controlling the inlet temperature[J]. *LWT – Food Science and Technology*, 2015, 63(2): 866–871.
- [24] MCKAY A M. Inactivation of fungal spores in apple juice by high pressure homogenization[J]. *Food Protection*, 2009, 72(12): 2561–2564.
- [25] CALLIGARIS S, FOSCHIA M, BARTOLOMEOLI I, et al. Study on the applicability of high-pressure homogenization for the production of banana juices[J]. *LWT – Food Science and Technology*, 2012, 45(1): 117–121.
- [26] 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.
- [27] GUAN Y, ZHOU L, BI J, et al. Change of microbial and quality attributes of mango juice treated by high pressure homogenization combined with moderate inlet temperatures during storage[J]. *Innovative*

- Food Science and Emerging Technologies, 2016, 36: 320–329.
- [28] ZHANG L, ZHU C, CHEN X, et al. Resistance of detached-cells of biofilm formed by *Staphylococcus aureus* to ultra high pressure homogenization[J]. Food Research International, 2021, 139: 109954.
- [29] BRÍÑEZ W J, ROIG-SAGUÉS A X, HERRERO M M H, et al. Inactivation of *Staphylococcus* spp. strains in whole milk and orange juice using ultra high pressure homogenisation at inlet temperatures of 6 and 20 °C [J]. Food Control, 2007, 18 (10): 1282–1288.
- [30] CARREÑO J M, GURREA M C, SAMPEDRO F, et al. Effect of high hydrostatic pressure and high-pressure homogenisation on *Lactobacillus plantarum* inactivation kinetics and quality parameters of mandarin juice[J]. European Food Research and Technology, 2011, 232(2): 265–274.
- [31] DIELS A M J, CALLEWAERT L, WUYTACK E Y, et al. Moderate temperatures affect *Escherichia coli* inactivation by high-pressure homogenization only through fluid viscosity[J]. Comparative Study, 2004, 20(4): 1512–1517.
- [32] PATAZCA E, KOUTCHMA T, BALASUBRAMANIAM V M. Quasi-adiabatic temperature increase during high pressure processing of selected foods [J]. Food Engineering, 2007, 80(1): 199–205.
- [33] ZAMORA A, GUAMIS B. Opportunities for ultra-high-pressure homogenisation (UHPH) for the food industry[J]. Food Engineering Reviews, 2015, 7(2): 130–142.
- [34] DONG P, ZHOU B, ZOU H, et al. High pressure homogenization inactivation of *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* in phosphate buffered saline, milk and apple juice[J]. Lett Appl Microbiol, 2021, 73(2): 159–167.
- [35] LACROIX N, FLISS I, MAKHLOUF J M. Inactivation of pectin methylesterase and stabilization of opalescence in orange juice by dynamic high pressure[J]. Food Research International, 2005, 38(5): 569–576.
- [36] VELÁZQUEZ-ESTRADA R M, HERNÁNDEZ-HERRERO M M, GUAMIS-LÓPEZ B, et al. Impact of ultra high pressure homogenization on pectin methylesterase activity and microbial characteristics of orange juice: A comparative study against conventional heat pasteurization[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2012, 13: 100–106.
- [37] WELTI-CHANES J, OCHOA-VELASCO C E, GUERRERO-BELTRÁN J Á. High-pressure homogenization of orange juice to inactivate pectin-methylesterase[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2009, 10(4): 457–462.
- [38] SUÁREZ-JACOBO Á, SALDO J, RÜFER C E, et al. Aseptically packaged UHPH-Treated apple juice: Safety and quality parameters during storage[J]. Food Engineering, 2012, 109(2): 291–300.
- [39] LIU W, LIU J, XIE M, et al. Characterization and high-pressure microfluidization-induced activation of polyphenoloxidase from Chinese pear (*Pyrus pyrifolia* Nakai)[J]. Agric Food Chem, 2009, 57(12): 5376–5380.
- [40] SZCZEPAŃSKA J, SKAPSKA S, MARSZAŁEK K. Continuous high-pressure cooling-assisted homogenization process for stabilization of apple juice[J]. Food Bioprocess Technology, 2021, 14(6): 1101–1117.
- [41] BOT F, CALLIGARIS S, CORTELLA G, et al. Study on high pressure homogenization and high power ultrasound effectiveness in inhibiting polyphenoloxidase activity in apple juice[J]. Food Engineering, 2018, 221: 70–76.
- [42] LIU W, LIU J, LIU C, et al. Activation and conformational changes of mushroom polyphenoloxidase by high pressure microfluidization treatment[J]. Innov Food Sci Emerg Technol, 2009, 10(2): 142–147.
- [43] SALEHI F. Physico-chemical and rheological properties of fruit and vegetable juices as affected by high pressure homogenization: A review [J]. International Journal of Food Properties, 2020, 23(1): 1136–1149.
- [44] KUBO M T, AUGUSTO P E D, CRISTIANINI M. Effect of high pressure homogenization (HPH) on the physical stability of tomato juice[J]. Food Research International, 2013, 51(1): 170–179.
- [45] STINCO C M, SENTANDREU E, MAPELLI-BRAHM P, et al. Influence of high pressure homogenization and pasteurization on the *in vitro* bioaccessibility of carotenoids and flavonoids in or-

- ange juice[J]. *Food Chemistry*, 2020, 331: 127259.
- [46] VELÁZQUEZ-ESTRADA R M, HERNÁNDEZ-HERRERO M M, GUAMIS-LÓPEZ B, et al. Influence of ultra-high pressure homogenisation on physicochemical and sensorial properties of orange juice in comparison with conventional thermal processing[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2019, 54(5): 1858-1864.
- [47] KARACAM C H, SAHIN S, OZTOP M H. Effect of high pressure homogenization (microfluidization) on the quality of Ottoman strawberry (*F. Ananassa*) juice[J]. *Lwt*, 2015, 64(2): 932-937.
- [48] LEITE T S, AUGUSTO P E D, CRISTIANINI M. Using high pressure homogenization (HPH) to change the physical properties of cashew apple juice[J]. *Food Biophysics*, 2015, 10(2): 169-180.
- [49] ZHOU L, GUAN Y, BI J, et al. Change of the rheological properties of mango juice by high pressure homogenization [J]. *LWT -Food Science and Technology*, 2017, 82(1): 121-130.
- [50] LIU J, WANG R R, WANG X X, et al. Effects of high-pressure homogenization on the structural, physical, and rheological properties of lily pulp[J]. *Foods*, 2019, 8(10): 472.
- [51] 刘琪, 王冰, 欧雅文, 等. 高压均质对菠萝汁贮藏货架期及品质的影响[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(1): 156-162.
- LIU Q, WANG B, OU Y W, et al. Effect of high pressure homogenization on the shelf life and quality of pineapple juice[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2019, 19(1): 156-162.
- [52] LEITE T S, AUGUSTO P E D, CRISTIANINI M. Structural and rheological properties of frozen concentrated orange juice (FCOJ) by multi-pass high-pressure homogenisation (MP-HPH)[J]. *International Journal of Food Properties*, 2017, 20(2): 2107-2117.
- [53] AUGUSTO P E D, IBARZ A, CRISTIANINI M. Effect of high pressure homogenization (HPH) on the rheological properties of tomato juice: Time-dependent and steady-state shear[J]. *Food Engineering*, 2012, 111(4): 570-579.
- [54] SANTIAGO J S J, KERMANI Z J, XU F, et al. The effect of high pressure homogenization and endogenous pectin-related enzymes on tomato purée consistency and serum pectin structure[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2017, 43: 35-44.
- [55] PALMERO P, PANOZZO A, COLLE I, et al. Role of structural barriers for carotenoid bioaccessibility upon high pressure homogenization[J]. *Food Chemistry*, 2016, 199(15): 423-432.
- [56] LOPEZ-SANCHEZ P, NIJSSE J, BLONK H C G, et al. Effect of mechanical and thermal treatments on the microstructure and rheological properties of carrot, broccoli and tomato dispersions[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2010, 91(2): 207-217.
- [57] YU W T, CUI J F, ZHAO S J, et al. Effects of high-pressure homogenization on pectin structure and cloud stability of not-from-concentrate orange juice [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2021, 8: 647748.
- [58] WELLALA C K D, BI J, LIU X, et al. Effect of high pressure homogenization combined with juice ratio on water-soluble pectin characteristics, functional properties and bioactive compounds in mixed juices[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 60: 102279.
- [59] SUÁREZ-JACOBO A, RÜFER C E, GERVILLA R, et al. Influence of ultra-high pressure homogenisation on antioxidant capacity, polyphenol and vitamin content of clear apple juice[J]. *Food Chemistry*, 2011, 127(2): 447-454.
- [60] WELLALA C K D, BI J, LIU X, et al. Effect of high pressure homogenization on mixed juice stability, rheology, physicochemical properties and microorganism reduction[J]. *Food Science and Technology*, 2020, 57(5): 1944-1953.
- [61] 宁椿源, 周林燕, 毕金峰, 等. 高压均质技术结合VC处理对桃浊汁微生物和品质的影响[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(11): 141-149.
- NING C Y, ZHOU L Y, BI J F, et al. Effect of high pressure homogenization on microorganism and quality of cloudy peach juice with/without VC [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2019, 19(11): 141-149.
- [62] VAQUERO C, ESCOTT C, LOIRA I, et al. Cabernet sauvignon red must processing by UHPH to produce wine without SO₂: the colloidal structure, microbial and oxidation control, colour protection and sensory quality of the wine[J]. *Food Bioprocess Technology*, 2022, 15: 620-634.
- [63] 段卫朋, 马腾臻, 李蔚, 等. 瞬时超高压处理对‘赤

- 霞珠葡萄酒风味品质的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2019, 54(1): 198-208.
- DUAN W P, MA T Z, LI W, et al. Effect of ultra-high pressure homogenization on flavor quality of Cabernet sauvignon wine[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2019, 54(1): 198-208.
- [64] BAÑUELOS M A, LOIRA I, GUAMIS B, et al. White wine processing by UHPH without SO₂. Elimination of microbial populations and effect in oxidative enzymes, colloidal stability and sensory quality [J]. Food Chemistry, 2020, 332: 127417.
- [65] 刘丹丹, 李昕沂, 罗晶晶, 等. 超高压微射流均质技术对猕猴桃果酒品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(8): 165-169.
- LIU D D, LI X Y, LUO J J, et al. Effect of ultra-high pressure microjet homogenization on the quality of kiwifruit wine[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(8): 165-169.
- [66] VOCE S, CALLIGARIS S, COMUZZO P. Effect of a yeast autolysate produced by high pressure homogenization on white wine evolution during ageing [J]. Food Science and Technology, 2021, 58(10): 4045-4054.
- [67] SARICA OGLU F T, ATALAR I, YILMAZ V A, et al. Application of multi pass high pressure homogenization to improve stability, physical and bioactive properties of rosehip (*Rosa canina* L.) nectar[J]. Food Chemistry, 2019, 282: 67-75.
- [68] 冯春连, 杨文侠, 朱博, 等. 不同高压均质条件对脐橙汁稳定性及品质的影响[J]. 食品科技, 2021, 46(11): 109-115.
- FENG C L, YANG W X, ZHU B, et al. Effects of different high pressure homogenization conditions on stability and quality of navel orange juice[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(11): 109-115.
- [69] SENTANDREU E, STINCO C M, VICARIO I M, et al. High-pressure homogenization as compared to pasteurization as a sustainable approach to obtain mandarin juices with improved bioaccessibility of carotenoids and flavonoids[J]. Cleaner Production, 2020, 262: 121325.
- [70] 宿时, 李宗泽, 王贺. 超高压均质对蓝莓汁杀菌效果及品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2012, 47(9): 176-178.
- SU S, LI Z Z, WANG H. Effect of ultra-high pressure homogenization on sterilization and quality of blueberry juice[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 47(9): 176-178.
- [71] KRUSZEWSKI B, ZAWADA K, KARPIŃSKI P. Impact of high-pressure homogenization parameters on physicochemical characteristics, bioactive compounds content, and antioxidant capacity of blackcurrant juice[J]. Molecules, 2021, 26(6): 1820.
- [72] VELÁZQUEZ-ESTRADA R M, HERNÁNDEZ-HERRERO M M, RÜFER C E, et al. Influence of ultra high pressure homogenization processing on bioactive compounds and antioxidant activity of orange juice[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2013, 18: 89-94.
- [73] SHARABI S, OKUN Z, SHPIGELMAN A. Changes in the shelf life stability of riboflavin, vitamin C and antioxidant properties of milk after (ultra) high pressure homogenization: Direct and indirect effects [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018, 47: 161-169.
- [74] LEMMENS L, TCHUENCHE E S, LOEY A M V, et al. Beta-carotene isomerisation in mango puree as influenced by thermal processing and high-pressure homogenization[J]. European Food Research and Technology, 2013, 236: 155-163.
- [75] 崔燕, 郭加艳, 宣晓婷, 等. 高压均质对 NFC 水蜜桃浊汁稳定性及品质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 42(18): 322-330.
- CUI Y, GUO J Y, XUAN X T, et al. Effect of high pressure homogenization on the stability and quality of not-from-concentrate cloudy honey peach (*Prunus persica* L.) juice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 42(18): 322-330.
- [76] BETORET E, BETORET N, CARBONELL J V, et al. Effects of pressure homogenization on particle size and the functional properties of citrus juices[J]. Food Engineering, 2009, 92(1): 18-23.
- [77] BRIVIBA K, GRÄF V, WALZ E, et al. Ultra high pressure homogenization of almond milk: Physico-chemical and physiological effects[J]. Food Chemistry, 2016, 192: 82-89.
- [78] RODRIGUEZ-CONCEPCION M, AVALOS J, BONET M L, et al. A global perspective on carotenoids: Metabolism, biotechnology, and benefits for nutrition and health[J]. Progress in Lipid Research, 2018, 70: 62-93.

- [79] SAUCEDA-G'ALVEZ J N, CODINA-TORRELLA I, MARTINEZ-GARCIA M, et al. Combined effects of ultra-high pressure homogenization and short-wave ultraviolet radiation on the properties of cloudy apple juice[J]. *LWT*, 2021, 136(1): 110286.
- [80] WELLALA C K D, BI J, LIU X, et al. Effect of high pressure homogenization combined with juice ratio on water-soluble pectin characteristics, functional properties and bioactive compounds in mixed juices[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2020, 60: 102279.
- [81] LIU X, LIU J, BI J, et al. Effects of high pressure homogenization on physical stability and carotenoid degradation kinetics of carrot beverage during storage [J]. *Food Engineering*, 2019, 263: 63-69.
- [82] 刘嘉宁, 刘璇, 毕金峰, 等. 高压均质对胡萝卜汁物化特性及类胡萝卜素含量的影响[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(8): 147-156.
- LIU J N, LIU X, BI J F, et al. Effects of high pressure homogenization on physicochemical properties and carotenoid content of carrot juice[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2019, 19(8): 147-156.

Effect of High Pressure Homogenization on the Quality and Safety of Fruit and Vegetable Juices

Tai Luyang, Zhang Zequn, Dong Li, Chen Fang, Hu Xiaosong*

(College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, National Engineering Research Centre for Fruit and Vegetable Processing, Beijing 100083)

Abstract As consumer demand for high quality food products with fresh, non-additive properties increases, non-thermal food processing technologies are beginning to develop rapidly. High Pressure Homogenization (HPH) is a continuous non-thermal processing technology that ensures food safety while maintaining the organoleptic properties and nutritional value of the food. It is used to modify the texture of liquid foods and to kill micro-organisms through pressure, shear, collision, cavitation and heating, thus extending the shelf life of the food. In order to improve and apply HPH better, a detailed understanding of its mechanism of action and application is required. This paper reviews the research on the use of HPH in the sterilization, enzyme inactivation and color protection of fruit and vegetable juices to provide a theoretical basis for the application of HPH in the fruit and vegetable juice industry.

Keywords high pressure homogenization; sterilization; fruit and vegetable juice; quality; enzyme