

石亦璁, 董丽, 陈芳, 等. 高压均质技术在果蔬制品中的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(18): 404–412. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023100263

SHI Yicong, DONG li, CHEN Fang, et al. Research Progress of High-pressure Homogenization Technology in Fruit and Vegetable Products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(18): 404–412. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023100263

· 专题综述 ·

高压均质技术在果蔬制品中的研究进展

石亦璁, 董丽, 陈芳, 张泽群, 崔天琳, 胡小松*
(中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100190)

摘要: 果蔬制品的营养品质与安全性保障是其加工领域亟待解决的难题与研究热点, 而高压均质作为一种非热加工技术在杀菌、钝酶的同时能最大限度地保留果蔬制品的营养品质以及色泽风味, 有望代替热加工技术。本文综述了高压均质处理对果蔬制品的色泽、稳定性和营养成分等品质的影响, 并总结了高压均质处理对微生物的杀灭效果和作用机制, 从设备、技术方面讨论了高压均质技术在果蔬制品应用中的前景和挑战, 为高压均质技术的创新和设备的革新提供了理论参考。

关键词: 高压均质, 果蔬制品, 营养品质, 杀菌, 理化性质

中图分类号: TS255.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)18-0404-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023100263

本文网刊:



Research Progress of High-pressure Homogenization Technology in Fruit and Vegetable Products

SHI Yicong, DONG li, CHEN Fang, ZHANG Zequn, CUI Tianlin, HU Xiaosong*

(China Agricultural University, College of Food Science and Nutritional Engineering, Beijing 100190, China)

Abstract: The nutritional quality and safety of fruit and vegetable products are the urgent problems and research hotspots in the processing field. High-pressure homogenization, a non-thermal processing technology, can maximize the preservation of the nutritional quality, color and flavor of fruit and vegetable products while sterilizing and inactivating enzymes, and is expected to replace thermal processing technology. This article reviews the effects of high-pressure homogenization on the color, stability and nutritional components of fruit and vegetable products, and summarizes the killing effect and mechanism of high-pressure homogenization on microorganisms. It discusses the prospects and challenges of high-pressure homogenization technology in the application of fruit and vegetable products from two aspects of equipment and technology, providing a theoretical reference for the innovation of high-pressure homogenization technology and equipment.

Key words: high pressure homogenization; fruit and vegetable products; nutritional quality; sterilization; physical and chemical properties

随着现今生活水平的不断提高, 消费者对食品营养与安全性的要求也日渐提高, 尤其是对食品活性成分保留、保质期延长和质量提高等方面的要求。传统的热处理通过使用高温 ($\geq 90\text{ }^{\circ}\text{C}$) 进行杀菌处理, 会使食品在加热过程中发生美拉德反应, 引起颜色变化、气味改变、香气逸散、味道损失, 并破坏营养成分^[1]。非热加工技术可以较大程度地保存食品

原有的营养和风味^[2], 因此非热加工技术逐渐在食品行业中受到追捧。

高压均质技术 (high pressure homogenization, HPH) 是一种新兴的非热加工技术, 与常见热处理和高静压的处理方式相比, 它具有使食品中热敏性成分损失小、可连续生产、能耗较低等诸多优势^[3]。其原理是通过施加高压使物料获得较大的速度, 在物料通

收稿日期: 2023-10-31

基金项目: 十四五国家重点研发项目 (2022YFD2100404)。

作者简介: 石亦璁 (1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 高压均质及其应用, E-mail: 492745703@qq.com。

* 通信作者: 胡小松 (1961-), 男, 硕士, 教授, 研究方向: 农产品加工理论与技术, E-mail: huxiaosong@263.net。

过狭窄的缝隙时,会受到强大的剪切力,被剪切后的流体会以较快的速度冲击内壁,产生强大的撞击力,造成空穴、剪切以及湍流等多种效应,在多种效应的复合作用下达到均质效果,并且具有一定的杀菌作用^[4]。目前 HPH 技术使用的压力最高可达 450 MPa,其中>200 MPa 的 HPH 处理又被称为超高压均质(Ultra-high Pressure Homogenization, UHPH)^[5]。

1994 年, Lanciotti 等^[6]首次报道了 HPH 对食品中腐败和致病微生物的杀灭作用,并且发现 HPH 处理可以延长牛奶、果汁等食品的货架期。目前, HPH 技术主要应用于化工、化妆品、食品等多个领域,但在工业化生产过程中由于压力条件不够,使得杀菌效果有限,在食品行业中主要用于样品处理环节,其发展受到一定的限制^[7-8]。

本文介绍了 HPH 的作用原理及其设备,从理化性质、对微生物的影响等多方面总结其研究进展,并分析该技术的应用前景。以期改进 HPH 设备,提高其技术的利用率提供理论参考。

1 HPH 设备及产业化现状

HPH 的研究最早可追溯到 19 世纪末由 Gaulin 发明的针对牛乳的均质设备,使用的最高压力为 50 MPa,直到上个世纪 90 年代, HPH 才开始被作为一种破坏细胞结构、提取有效成分的方式使用,它主要由高压腔体和增压系统组成(图 1A)^[9]。高压均质腔的内部是经过特别设计的几何形状,其工作原理如图 1B 所示。HPH 技术适用于处理流体食品,压力作用流体通过狭窄缝隙后,压力下降到大气压,阀两端会形成一定的压力差,使得流体的流速急剧增加,产生均质效应和热效应,进而影响产品的理化特性^[10]。

近 30 年来, HPH 技术在食品行业中广泛使用并升级改造,可以生产乳制品、果蔬汁等,既解决了液体分层的问题又较好地保持了原有的风味,显露出广阔的应用前景^[11]。

2 HPH 对果蔬制品品质的影响

目前, HPH 技术主要应用于果蔬汁的加工,可以

使其中的微生物和酶失活,同时保持在贮藏期及货架期内良好的浑浊稳定性,并且提高其生物利用度^[12]。

食品的品质特性是影响消费者购买的重要原因之一,色泽直接影响消费者对食品的喜好程度,其他理化性质例如可滴定酸、pH 等可以影响味道、黏度等食品口感, HPH 技术的应用对这些食品品质特性也有一定的影响^[13]。

2.1 HPH 对果蔬制品理化性质的影响

HPH 处理可以使在一定条件下贮藏的果汁的 pH、可滴定酸、可溶性固形物以及糖度等理化特征保持不变,保持果汁在贮藏期内的良好品质。Patrignani 等^[14]分别在 100、200 MPa/20 ℃ 条件下对胡萝卜汁进行 HPH 处理,发现与未处理组相比, 10 ℃ 条件下贮藏 0 和 22 d 的胡萝卜汁 pH 与色泽均没有显著性差异。Velázquez-Estrada 等^[15]分别采用压力为 100、200、300 MPa,进料温度为 10 ℃ 和 20 ℃ 的条件处理橙汁,发现其 pH、糖度等理化指标均未与对照组存在显著区别。此外, Silva 等^[16]对苹果汁进行 20 ℃ 100~300 MPa 的 HPH 处理,也发现其 pH、糖度等理化指标未与对照组存在显著区别。同样地,刘琪等^[17]用 200 MPa/60 ℃ 处理菠萝汁后,其 pH、可滴定酸、可溶性固形物没有显著变化,且 4 ℃ 贮藏期间酸度和糖度保持稳定。

此外,稳定性也是果蔬汁贮藏期评价的一个重要指标, HPH 处理可以显著提高混浊型果汁的稳定性与混浊度,有效防止混浊型果汁出现分层现象。Liu 等^[18]研究发现,混浊型果汁的不稳定性主要是由于果胶甲基化酯酶对果胶的去酯化造成较大较粗的颗粒下沉,从而产生沉淀,而 HPH 处理的橙汁稳定性优于巴氏杀菌与未处理组,这可能是由于 HPH 处理使得颗粒破碎成较小的尺寸。崔燕等^[19]研究发现,相较于未经处理的 NFC 水蜜桃浊汁,经过 20、30、40 MPa 的 HPH 处理的水蜜桃浊汁的混浊度显著提高($P<0.05$),其混浊度由 1.43 上升至 1.48~1.51,表明 HPH 处理可显著提高其悬浮稳定性。Bi 等^[20]使用 0~70 MPa 的 HPH 对混浊银杏汁进行处理,发

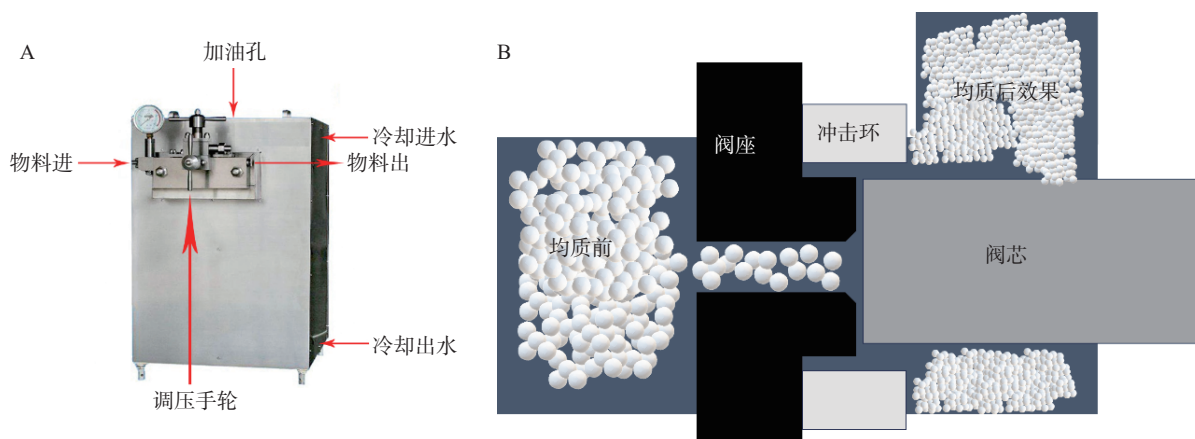


图 1 高压均质机的结构和流程图

Fig.1 Structure and flowchart of high-pressure homogenizer

现随着 HPH 压力的提高,混浊银杏汁的稳定性会随之得到明显改善。

色泽也是消费者是否具有购买欲望的决定性因素之一,HPH 处理可以很好地降低食品组分的粒径,进而更好地维持食品的色泽等品质特征^[21]。刘琪等^[17]研究发现,经 HPH(200 MPa/60 ℃)处理后的菠萝汁粒径大小曲线(Particle Size Distribution, PSD)与对照组相比发生显著变化,同时样品体积平均粒径 D[4,3] 的减少量(43.2%)高于表面积平均粒径 D[3,2] 的减少量(22.4%),样品体积平均粒径 D[4,3] 受菠萝汁中的大颗粒影响较大,表面积平均粒径 D[3,2] 受菠萝汁中的小颗粒影响较大,因此说明 HPH 处理后菠萝汁中小粒径颗粒显著增加,流动性增加,色泽得到改善。同时周林燕等^[22]也有相似的发现,经过 20 MPa 的 HPH 处理的橙汁,其果肉颗粒的平均直径由 1 mm 降低至 100 μm;经过 200 MPa 的 HPH 处理的苹果汁,其颗粒平均直径降低至 100 μm 以下,颗粒直径大部分集中在 20 μm,这说明处理过程中的均质压力会影响液体粒径。此外,香蕉汁经过 150 MPa 的 HPH 处理后,其光泽度变好,这可能是因为 HPH 减小其粒径使其稳定性提高,且 4 ℃ 条件下贮存 20 d 后,与对照组相比,HPH 处理的香蕉汁褐变程度明显偏弱,可能的原因是 HPH 处理使得多酚氧化酶活性降低,从而不容易发生酶促褐变^[23]。

HPH 处理还可以通过增加细胞的破碎率,提高溶液中活性成分的含量,增加葡萄酒、发酵果汁等食品的风味物质。Benito 等^[24]研究发现,通过 20 ℃/350 MPa 的 HPH 处理 10 min 得到的白葡萄酒比自然发酵和添加亚硫酸盐(35 mg/L SO₂)处理获得的白葡萄酒果香更加浓郁,原因可能是 HPH 过程对细胞起到了更好的破碎效果。Comuzzo 等^[25]发现,与热处理相比,HPH 处理后的葡萄酒风味更多样,异味更少,这可能是 HPH 过程温度较低,对风味物质的保存效果更好。Dos 等^[26]研究发现,经过 HPH 加工(500 MPa/5 min/20 ℃)的红葡萄酒中单体花青素、

酚酸、黄酮醇含量较低,吡喃花青素浓度较高,即单宁聚合程度较大,HPH 加工获得的红葡萄酒中的营养物质显著高于热处理获得的红葡萄酒,并且其口感更好,涩味更少。Puig 等^[27]发现 20 ℃ 条件下,425 和 500 MPa 的 HPH 均能够使得葡萄酒在陈酿过程中出现更明显的橙红色色调(相较于未经处理的葡萄酒),使其更具有陈年葡萄酒的颜色,并且经过感官评价发现经过 HPH 处理的葡萄酒拥有更多的香气。

因此,从对果蔬制品理化性质影响角度来看,HPH 是一种良好的非热加工技术,基于不同的均质压力,可以满足果蔬制品加工过程中稳定性的需要,并且选择合适的处理条件可以有效防止果汁出现分层、色泽改变等影响消费者购买欲望的现象。

2.2 HPH 对果蔬制品营养成分的影响

果蔬制品中的营养成分通常包括维生素、多酚、类胡萝卜素以及蛋白质等,对增进人体健康具有十分重要的作用,因此在加工过程中营养物质含量的变化情况应当受到重视。如表 1 所示,HPH 处理对不同果汁的不同种类营养成分的影响差异较大,需要综合各种因素来深入分析,因此在生产过程中需要根据处理果汁类型调整参数,以减少营养成分的损失以及达到预期的贮藏期要求。

2.2.1 维生素 HPH 处理过程会对果汁中维生素含量造成一定的损失,但仍优于所有热处理。Tribst 等^[34]研究发现,橙汁经过 HPH 和巴氏杀菌处理均会降低橙汁中维生素 C 的含量,橙汁经过 20 ℃/200 MPa 和 20 ℃/300 MPa 的 HPH 处理后,其维生素 C 含量分别下降 5% 和 11%,但仍好于 90 ℃/1 min 的热处理(维生素 C 损失 17.4%)。Kruszewski 等^[33]在黑加仑汁中也有相似的发现,使用巴氏杀菌(90 ℃/1 min)对黑加仑汁处理,其维生素 C 会损失 29.7%,而 4 ℃ 220 MPa 的 HPH 处理仅损失 5.3%,HPH 处理远小于热加工维生素 C 的损失。并且随着 HPH 处理次数的增加,抗坏血酸的损失增加,在 40 ℃/200 MPa 条件下对桑椹汁进行 HPH 处理,发

表 1 HPH 对果蔬汁中营养成分含量的影响

Table 1 Effects of HPH on nutrient content in fruit and vegetable juice

果蔬汁	营养成分	HPH处理条件	初始含量	处理后含量	参考文献
铁棍山药汁	氨基酸	80 MPa/均质4次/室温	780 μg/mL	800 μg/mL	[28]
铁棍山药汁	还原糖	80 MPa/均质4次/室温	480 μg/mL	420 μg/mL	[28]
铁棍山药汁	总酸含量	室温80 MPa/均质4次/室温	0.4%	0.37%	[28]
胡萝卜橙汁	维生素C	150 MPa/均质4次/25℃	220 mg/L	210 mg/L	[29]
胡萝卜橙汁	总酚	150 MPa/均质4次/25℃	120 mg/L	130 mg/L	[29]
胡萝卜橙汁	总类胡萝卜素	150 MPa/均质4次/25℃	200 mg/L	210 mg/L	[29]
蓝莓汁	维生素C	150 MPa/均质2次/室温	660 mg/L	630 mg/L	[30]
芒果汁	抗坏血酸	190 MPa/均质1次/60℃	14.52 mg/L	15.70 mg/L	[31]
芒果汁	抗坏血酸	190 MPa/均质3次/60℃	14.52 mg/L	16.43 mg/L	[31]
石榴汁	抗坏血酸	150 MPa/均质1次/55 ℃	3.50 mg/L	3.61 mg/L	[32]
石榴汁	总酚	150 MPa/均质1次/55 ℃	3990 mg/L	4300 mg/L	[32-33]
黑加仑汁	维生素C	220 MPa/均质1次/4℃	1786 mg/L	1692.7 mg/L	[33]

现经过 HPH 处理一次后, 桑椹汁中的抗坏血酸含量下降 41.3%, 经过 HPH 处理三次后抗坏血酸含量下降 64.7%^[35]。HPH 处理对维生素 A 也会造成一定的损失, 并且其损失率随着处理压力升高而增加。Suarez-Jacobo 等^[36] 研究发现, HPH 还会造成维生素 A 的损失。在 4 ℃ 条件下, 使用 100/200 MPa 对苹果汁进行 HPH 处理, 维生素 A 损失率都达到 18%, 4 ℃/300 MPa 处理的苹果汁维生素 A 损失 33%。因此, 在 HPH 处理果汁的过程中, 应选择合适的压力和循环次数, 避免对营养物质的过分损耗。

2.2.2 多酚 果蔬类食物均含有丰富的生物活性成分, 如类黄酮、单宁等多酚类化合物, 对神经退行性疾病、心血管疾病等有重要的预防作用, 热处理会使得果汁中多酚类物质显著降低^[37]。而 HPH 可以更好地保护多酚类物质, 并且 HPH 处理过程中破碎细胞结构, 使内容物流出, 进而增加多酚、黄酮类物质的含量, 并且可以提高食品的抗氧化性^[38]。Martinez-Sanchez 等^[39] 研究表明, 热处理(80 ℃)橙汁中原花青素、紫绀素、绿原素的活性降低 12%~23%, 而 20 ℃/80 MPa 的 HPH 处理对它们的含量和活性并无显著影响, 这可能是由于 HPH 处理时的温度较低, 对热敏性成分的影响较小。此外, 崔燕等^[19] 发现, 未经处理的 NFC 水蜜桃浊汁中总酚含量为 37.37 mg GAE/100 mL, 经过 20、30、40 MPa 的 HPH 处理后, 水蜜桃浊汁的多酚含量分别提高了 28.86%、22.29% 和 10.5%($P<0.05$), 这可能是由于 HPH 处理对细胞壁组织进行更加彻底的破坏, 使细胞组织中的结合态多酚在物理剪切等多种效应的作用下被更多地释放出来, 从而提高了水蜜桃浊汁中的多酚等营养物质的含量。

2.2.3 类胡萝卜素 许多研究发现 HPH 处理会起到提高果蔬汁中类胡萝卜素含量的效果。卢薇等^[29] 研究发现, 在 150 MPa/25 ℃ 条件下进行四次 HPH 处理, 胡萝卜橙汁的总类胡萝卜素从处理前的 200 mg/L 提高至 210 mg/L, 之后在 37 ℃ 条件下避光储存 20 d 之后发现, 经过 HPH 处理的胡萝卜橙汁

中的总类胡萝卜素保留率仅为 12.75%, 而未处理组总类胡萝卜素保留率为 22.39%, 可能是由于经过 HPH 处理之后, 果蔬汁的粒径变小, 导致类胡萝卜素与氧气的接触面积增大, 加剧其氧化现象。此外, 刘嘉宁等^[40] 进一步研究发现随着均质压力、均质次数和进料温度的增加, β -胡萝卜素和 α -胡萝卜素含量均增加, 在进料温度 25 ℃, 均质次数 3 次, 均质压力 60 MPa 时 β -胡萝卜素和 α -胡萝卜素含量最高, 分别为 44.86 $\mu\text{g/mL}$ 和 22.39 $\mu\text{g/mL}$ 。关云静^[41] 发现, 经过 190 MPa/60 ℃ 条件 HPH 处理一次的芒果汁中的类胡萝卜素含量从 5.91 mg/L 提高至 6.61 mg/L。Svelander 等^[42] 也有相似的发现。此外, Liu 等^[43] 研究发现 HPH 不仅增加了胡萝卜汁中的类胡萝卜素含量, 并且提高了其生物利用度。

HPH 在类胡萝卜素、多酚等营养物质的保留方面具有独特优势, 可满足消费者对于营养、健康等绿色消费观念的追求。

3 HPH 对果蔬制品中微生物的影响

在 2009 年, Betoret 等^[44] 证明 HPH 处理可以杀灭果汁中天然存在或外源接入的致病性微生物。因为 HPH 处理过程中高压腔体内的液体溶液在高压条件下会出现剪切、空穴、湍流等物理作用, 在对食品原料进行均质的同时, 也可以破坏其中微生物的形态和细胞膜结构, 从而起到杀灭微生物的作用^[45]。HPH 处理对果蔬汁中的微生物具有一定的杀灭效果, HPH 处理的杀菌效果受到微生物种类和食品体系的影响, 如表 2。

3.1 HPH 对不同菌种的杀灭效果

HPH 对食品体系中微生物的杀灭效果的研究当前主要集中在革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌、霉菌以及酵母菌。不同的菌种对同等压力的 HPH 处理具有不同的敏感性。程银棋等^[53] 发现, 经过 200 MPa 的 HPH 处理三次后, 荔枝汁中的菌落总数、乳酸菌数仍残留 3 个对数以上, 而霉菌和酵母菌数已下降至 1.5 个对数以下, 说明霉菌和酵母菌对 HPH 处理的敏感性均高于乳酸菌。Patrignani 等^[14] 进一步研

表 2 HPH 对果蔬制品中微生物的杀灭效果

Table 2 Effects of HPH processing on microorganism of fruit and vegetable juice

果蔬汁	微生物种类	HPH处理条件	初始菌数(lg CFU/mL)	残余菌数(lg CFU/mL)	参考文献
杏汁	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> SPA	100 MPa/均质8次/室温	4.20	1.20	[14]
杏汁	<i>S. cerevisiae</i> 635	100 MPa/均质3次/15 ℃	3.00	<1.00	[46]
胡萝卜汁	<i>S.cerevisiae</i> 635	100 MPa/均质3次/15 ℃	3.30	<1.00	[47]
荔枝汁	Colonies number	200 MPa/均质1次/4 ℃	7.04	5.26	[48]
荔枝汁	<i>Lactobacillus</i>	200 MPa/均质1次/4 ℃	7.13	5.04	[48]
荔枝汁	Yeast and molds	200 MPa/均质1次/4 ℃	3.08	2.08	[48]
苹果汁	Aerobic mesophilic	200 MPa/均质1次/4 ℃	4.30	0.70	[49]
苹果汁	Psychrotrophs	200 MPa/均质1次/4 ℃	3.9	<1.00	[49]
香蕉汁	Colonies number	150 MPa/均质1次/4 ℃	4.45	<1.00	[50]
Moscato葡萄酒	Colonies number	400 MPa/均质1次/20 ℃	6	<1.00	[51]
红葡萄酒	<i>L. acidophilus</i>	350 MPa/均质10 min/20 ℃	5.46	<1.00	[52]

究发现革兰氏阴性菌比革兰氏阳性菌对 HPH 处理更加敏感,这可能和革兰氏阳性菌的细胞壁更厚有关,经过 15 °C/100 MPa 的 HPH 处理三次后,发现无论在杏汁还是胡萝卜汁中 *S.aureus* 数量均下降一个对数,而 *Escherichia coli* 数量均下降两个对数。董鹏^[54]也有相似的发现,HPH 处理导致 *E. coli* 细胞形态和结构发生变化。进料 20 °C,经 200 MPa 处理 1.15 s 后,部分 *E. coli* 细胞塌陷,出现孔洞或完全崩溃;而相同的处理条件下,HPH 处理对 *S. aureus* 的细胞形态和结构没有显著的影响。同样地, Velázquez-Estrada 等^[55-56]研究 HPH 处理对混浊橙汁中不同微生物的影响,发现混浊橙汁中的好氧菌在 300 MPa 的 HPH 处理后下降了 4.3 个对数,而乳酸菌在处理后将降低了 4.6 个对数。此外,HPH 对芽孢的杀灭效果也会受芽孢种类的影响,但因不同种类的芽孢热抗性具有较大差异,所以杀灭效果不同^[57]。Blanco 等^[58]研究发现,在 300 MPa,均质阀温度为 103 °C 的条件下,*Bacillus cereus* 芽孢降低了 1.1 lg CFU/mL,而 *B. subtilis* 芽孢在相同条件下处理后芽孢仅下降 0.67 lg CFU/mL。

因此,在选择 HPH 处理条件之前,应先了解此食品物料中主要致病菌,并根据致病菌对压力的耐受程度选择合适的 HPH 处理条件。

3.2 HPH 对不同食品体系的杀菌效果

3.2.1 HPH 对果汁中微生物的杀灭效果 有研究表明食品成分对于高压均质的杀菌效果具有影响,可能是由于食品体系中某些抗菌类物质含量不同或不同体系中 pH 以及其他条件不同。Campos 等^[59]研究发现 HPH 处理对不同果汁中相同的微生物具有不同的杀菌效果。20 °C/250 MPa 的 HPH 处理橙汁中 *S. cerevisiae* 数量下降 6 个对数,*Lactiplantibacillus plantarum* 下降 7 个对数,而相同条件处理后的苹果汁中 *S. cerevisiae* 和 *L. plantarum* 数量分别下降 4 个对数和 5 个对数,这可能是不同果汁环境体系不同而引起的。此外,另有研究发现经过 200 MPa/20 °C 进行 HPH 处理一次后的苹果汁中的嗜温好氧菌下降 3.6 个对数^[49],而经过 200 MPa/20 °C 进行 HPH 处理一次后的橙汁中的嗜温好氧菌下降 4.58 个对数^[60]。可能由于两种果汁中的 pH 不同所导致的杀菌效果差异。Patrignani 等^[51]也有相似的发现,猕猴桃浊汁在常温条件下 200 MPa 的 HPH 循环两次后酵母菌已无法检出(<1.00 lg CFU/mL),而经过相同的温度和压力条件下 HPH 处理的苹果汁,其酵母菌为 1.8 lg CFU/mL。在 Velázquez-Estrada 等^[55-56]研究中,经过 400 MPa 的 HPH 处理的混浊橙汁中 *L. monocytogenes* 仍有部分残留,然而在相同的高压均质条件加工葡萄浊汁,发现 *L. monocytogenes* 无法检出(<1.00 lg CFU/mL),可能是因为葡萄汁基质中含有抑制其活性的抗菌类物质。因此,实际生产过程中需根据处理的物料选定合适的参数。

3.2.2 HPH 对发酵产品中微生物的影响 近年来,由于 HPH 处理具有一定的杀灭微生物的能力,因此被提议用于酒类产品制造时用于加速酵母自溶或生产酵母自溶衍生物(YDs, yeast derivatives)^[61]。Patrignani 等^[14]的研究证明了这一点,将不同的酵母菌株(*S.cerevisiae* 和 *S.bayanus*)进行 90 MPa 的 HPH 处理后,按照起泡酒的传统方法进行制作,发现该处理对酵母的活性影响很小,扫描电镜发现 HPH 过程加快了酵母自溶的进程,可能是由于 HPH 处理激活了某些细胞酶的活性。此外,Voce 等^[61]研究发现,使用通过 HPH 处理制造的 YDs 相对于通过热辅助酵母自溶获得的 YDs,总体上具有更好的酿酒性能。并且其研究发现较低压力的 HPH 处理能够提高酵母菌在发酵溶液中释放糖质胶体、蛋白质和氨基酸的能力,从而提高其发酵效率,而这种效应与施加的压力成正比。

较低压力的 HPH 起到辅助发酵或生产 YDs 的作用,而较高压力的 HPH 可以应用于发酵产品中微生物的杀灭^[62]。Taylor 等^[63]将 6 lg CFU/mL 的 *Lactobacillus acidophilus*、*Staphylococcus aureus* 等 13 种微生物加到 Moscato 葡萄酒中,20 °C/400 MPa 的 HPH 处理 2 min 可以灭活所有的微生物。同样地, Puligundla 等^[52]研究发现,20 °C/300 MPa/30 min 和 20 °C/350 MPa/10 min 的处理条件可以完全灭活红葡萄酒中的总酵母(5.46 lg CFU/mL),20 °C/350 MPa/5 min 可以灭活 *L. acidophilus*(5.46 lg CFU/mL)。HPH 处理不仅影响葡萄酒中微生物的活性,也对其他发酵饮品中的微生物产生相似的影响。Bevilacqua 等^[64]发现,HPH 处理会失活苹果发酵汁中的酵母和发酵橙汁中的 *S. cerevisiae* 和 *L. plantarum*,并且发现高于 250 MPa 的 HPH 处理可以使酵母完全失活,而低于 250 MPa 的 HPH 处理一般需要多次加工或与其他处理方式结合才能产生相同的效果。

3.3 HPH 联合其他技术对微生物的杀灭效果

单独使用 HPH 会存在部分缺陷及不足,其中最重要的问题是在杀菌方面的表现,因此单独使用 HPH 可能会带来一定的食品安全隐患。因此有部分研究人员选择使用 HPH 联合其他技术对果蔬制品中的微生物进行杀灭。

Yu 等^[65]的研究证明了 HPH 联合二碳酸二甲酯处理的杀菌表现优于单独使用 HPH 处理。其研究发现单独使用 35 °C/200 MPa 的 HPH 处理后桑椹汁中 *Alicyclobacillus Wistzkey* 等嗜酸耐热菌下降了 3 个对数,而联合二碳酸二甲酯处理后嗜酸耐热菌数量下降了 4 个对数。同样地,Du 等^[66]发现单独使用 35 °C/150 MPa 的 HPH 处理可以灭活 4.5 个对数 *S. cerevisiae*,而联合高压二氧化碳(8 MPa)处理可以使 *S. cerevisiae* 下降 5.5 个对数。

此外,有许多研究人员发现单独使用 HPH 处理

对芽孢的杀灭效果并不理想, 因为芽孢的抗性较高, 如果不能有效地杀灭或控制芽孢, 芽孢萌发之后会导致食品腐败, 因此 Guerzoni 等^[67] 使用 HPH 联合非等温热处理技术对芽孢的杀灭效果进行探究, 发现 HPH 和非等温热处理结合可以杀灭一定数目的芽孢, HPH 结合非等温热处理可以使蜡样芽孢杆菌芽孢的 DPA 释放量从 28.3% 提高至 46.8%, 数量减少 2.2 lg CFU/mL。原因可能是 HPH 处理导致芽孢释放 DPA, 而缺少 DPA 的芽孢可能耐热性降低, 所以 HPH 结合热处理会有更好的杀灭芽孢效果。同样地, Martinez-Garcia 等^[68] 将 HPH (100~300 MPa) 与紫外辐照技术联合处理苹果汁, 发现 300 MPa 的 HPH 结合 21.5 J/mL 的紫外辐照剂量, 可以减少 3.5 个对数的 *Alicyclobacillus Wistkey* 芽孢, 显著优于单独使用 300 MPa 的 HPH, 说明 HPH 结合紫外辐照技术对耐热的芽孢具有协同杀灭作用。

HPH 联合其他技术对果汁中的微生物具有良好的杀灭效果, 并且其中使用的 HPH 压力可相对于单独使用 HPH 处理降低, 因此可以对营养物质有更好的保留效果, 因此 HPH 联合其他技术具有良好的发展前景, 也是未来研究的热点方向。

3.4 HPH 的杀菌机制

目前的研究认为, HPH 过程对食品中微生物的杀灭的主要原因来自机械应力以及温度的升高, 但具体的杀菌机制有待进一步探究^[58]。研究人员通过对比热处理和 HPH 处理杀菌的结果发现, 在完整的 HPH 过程中温度约上升 16~22 °C/100 MPa, 并且当设定压力低于 200 MPa 时, 机械应力造成的杀菌影响大于温度升高的影响, 当设定压力高于 200 MPa 时, 杀灭微生物的主要影响是由温度升高造成的^[67]。

HPH 过程中所指的机械应力包括撞击、拉伸应力、湍流、剪切等, 对微生物的杀灭均具有一定影响, 这些应力也可能会共同作用微生物被杀灭。Mouton 等^[69] 通过研究发现, 在液体物料进入均质阀时, 其流速可达 100 m/s 可产生剧烈的流速梯度, 进而产生拉伸应力导致微生物死亡。Kleinig 等^[70] 经过数学建模计算, 得出撞击是 HPH 过程中导致微生物死亡的重要因素之一。Kelly 等^[71] 研究发现在 HPH 过程中存在的剪切力也足以造成部分微生物的死亡。Diels 等^[72] 研究发现湍流也是微生物失活的原因之一, 在 HPH 过程中, 当物料高速通过均质阀的时候会产生湍流现象, 并且湍流与物料的黏度呈负相关, 即较高黏度流体不容易出现湍流现象, 而较低黏度流体湍流现象较为明显, 发现 HPH 处理随着 PBS 黏度增加, 对 *E. coli* 的杀菌效果减弱, 因此湍流也被认为是造成微生物死亡的重要因素。HPH 处理过程中还会出现空化效应, 物料高速流过均质阀时, 如果液体压强小于饱和蒸汽压, 液体中的气泡会不断膨胀, 随着流体的流动, 在低流速下气泡会爆裂, 进而使细胞死亡^[73]。

由于 HPH 过程中会产生复杂的机械应力以及温度变化, 其与流体性质以及均质阀的材质等许多因素相关。目前的研究过程主要基于流体力学的研究方法, 目前没有得出统一的结论, 但可以明确 HPH 处理过程中, 不同的机械应力并非简单的共存关系, 难以判断单一因素对微生物杀灭的影响, 因此 HPH 具体的杀菌机制是目前的研究难点之一。

4 结论与展望

HPH 技术的优势在于可以通过均质作用, 一方面能更好地释放果蔬等食品原料中的活性成分, 提升产品的营养功效; 另一方面可以减小液态食品中的颗粒粒径, 保持产品的稳定性。HPH 技术作为一种非热加工技术, 相比于热加工, 还能更大程度地保存果蔬等热敏性食品原有的营养成分与口感, 具有一定的杀菌效果, 可以延长货架期。HPH 技术还具有连续化生产的可操作性, 也为食品杀菌提供了新思路。

同时, HPH 在食品加工中的应用仍存在较多的局限性, 如其仅适合加工流态食品; 对芽孢的杀灭效果还有待提高; 单独使用 HPH 时杀菌和钝酶效果不如热杀菌处理效果好, 从而引发安全隐患; 果汁杀菌所需的较高压力参数使设备成本增加。此外, 在 HPH 处理过程中会对例如维生素 A 等营养物质造成一定损失。因此, 选择 HPH 联合其他技术处理, 选择使用较低的压力获得期望的杀菌效果为目的, 是 HPH 技术未来发展方向之一。

HPH 的创新和发展, 在技术方面可以选择与更多技术联合使用, 以达到期望的杀菌效果, 在实际生产过程中可以针对不同的果汁所需要的加工参数进行不断优化, 更好地满足消费者对于果蔬产品天然、营养和绿色消费理念的追求。并且 HPH 的发展也离不开设备的不断改革和完善, 在设备方面可以选择具有抗压、抗温、延展性好、密封性好等特性的材料。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] HUANG H, CHEN B, WANG C. Comparison of high pressure and high temperature short time processing on quality of carambola juice during cold storage[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2018, 16: 326-334.
- [2] AGUAYO E, TARAZONA-DÍAZ M P, MARTÍNEZ-SÁNCHEZ A, et al. Influence of moderate high-pressure homogenization on quality of bioactive compounds of functional food supplements[J]. *Journal of Food Quality*, 2017: 1-11.
- [3] 艾德平. 高压均质技术在化工行业中的应用[J]. *江西化工*, 2008(4): 194-196. [AI D P. Application of high-pressure homogenization technique in chemical industry[J]. *Jiangxi Chemical Journal*, 2008(4): 194-196.]
- [4] AMADOR-ESPEJO G G, GALLARDO-CHACÓN J J, JUAN B, et al. Effect of ultra-high-pressure homogenization at moderate inlet temperatures on volatile profile of milk[J]. *Journal of Food*

Process Engineering, 2017, 40: e12548.

[5] BELMIRO R H, TRIBST A, CRISTIANINI M. Application of high-pressure homogenization on gums[J]. J Sci Food Agric, 2018, 98(6): 2060–2069.

[6] LANCIOTTI R, GARDINI F, SINIGAGLIA M, et al. Effects of growth conditions on the resistance of some pathogenic and spoilage species to high pressure homogenization[J]. Letters in Applied Microbiology, 1996, 22(2): 165–168.

[7] CHEN Y R, WU S J. Effects of high-hydrostatic pressure and high-pressure homogenization on the biological activity of cabbage dietary fiber[J]. J Sci Food Agric, 2022, 102(14): 6299–6308.

[8] PATRIGNANI F, LANCIOTTI R. Applications of high and ultra high pressure homogenization for food safety[J]. Frontiers in Microbiology, 2016, 7: 1132.

[9] BO J, YAN G, YANBIN S, et al. Numerical simulation analysis and structural optimization design of microspheres prepared by a high-pressure homogenizer[J]. Separation and Purification Technology, 2021, 277: 119374.

[10] VALSASINA L, PIZZOL M, SMETANA S, et al. Life cycle assessment of emerging technologies: The case of milk ultra-high pressure homogenization[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 142: 2209–2217.

[11] CORRALES M, TOEPFL S, BUTZ P, et al. Extraction of anthocyanins from grape by-products assisted by ultrasonics, high hydrostatic pressure or pulsed electric fields: A comparison[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2008, 9(1): 85–91.

[12] FRANCHI M A, TRIBST A A L, CRISTIANINI M. High-pressure homogenization: A non-thermal process applied for inactivation of spoilage microorganisms in beer[J]. Journal of the Institute of Brewing, 2013, 119(4): 237–241.

[13] 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: 121–130.

[14] PATRIGNANI F, SIROLI L, BRASCHI G, et al. Combined use of natural antimicrobial based nanoemulsions and ultra high pressure homogenization to increase safety and shelf-life of apple juice[J]. Food Control, 2020, 111: 107051.

[15] 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 & Emerging Technologies, 2012, 13: 100–106.

[16] SILVA J L, OLIVEIRA A C, VIEIRA T C, et al. High-pressure chemical biology and biotechnology[J]. Chem Rev, 2014, 114(14): 7239–7267.

[17] 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. The 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.]

[18] LIU J, BI J, LIU X, et al. Modelling and optimization of high-pressure homogenization of not-from-concentrate juice: Achieving better juice quality using sustainable production[J]. Food Chemistry, 2022, 370: 131058.

[19] 崔燕, 郭加艳, 宣晓婷, 等. 高压均质对 NFC 水蜜桃浊汁稳定性及品质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(18): 322–330.

[CUI Y, GUO J Y, XUAN X T, et al. Effect of high pressure ho-

mogenization on the stability and quality of not-from-concentrate cloudy honey peach juice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(18): 322–330.]

[20] BI C H, YAN Z M, WANG P L, et al. Effect of high pressure homogenization treatment on the rheological properties of citrus peel fiber/corn oil emulsion[J]. J Sci Food Agric, 2020, 100(9): 3658–3665.

[21] ZHU D, SHEN Y, WEI L, et al. Effect of particle size on the stability and flavor of cloudy apple juice[J]. Food Chemistry, 2020, 328: 126967.

[22] 周林燕, 关云静, 毕金峰, 等. 超高压均质技术在鲜榨果蔬汁加工中应用的研究进展[J]. 高压物理学报, 2016, 30(1): 78–88.

[ZHOU L Y, GUAN Y J, BI J F, et al. Progress in application of ultra-high pressure homogenization in not-from-concentrate juice processing[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2016, 30(1): 78–88.]

[23] LOPEZ-GAMEZ G, ELEZ-MARTINEZ P, MARTIN-BELLOSO O, et al. Recent advances toward the application of non-thermal technologies in food processing: An insight on the bioaccessibility of health-related constituents in plant-based products[J]. Foods, 2021, 10(7): 1538.

[24] BENITO S, PALOMERO F, MORATA A, et al. Minimization of ethylphenol precursors in red wines via the formation of pyranoanthocyanins by selected yeasts[J]. Int J Food Microbiol, 2009, 132(2-3): 145–152.

[25] COMUZZO P, CALLIGARIS S, IACUMIN L, et al. Potential of high pressure homogenization to induce autolysis of wine yeasts[J]. Food Chem, 2015, 185: 340–348.

[26] DOS S C, ISMAIL M, CASSINI A S, et al. Effect of thermal and high pressure processing on stability of betalain extracted from red beet stalks[J]. J Food Sci Technol, 2018, 55(2): 568–577.

[27] PUIG A, OLMOS P, QUEVEDO J M, et al. Microbiological and sensory effects of musts treated by high-pressure homogenization[J]. Food Science and Technology International, 2008, 14: 5–11.

[28] 刘梦培, 郭晓君, 赵光远, 等. 超高压微射流均质技术对铁棍山药汁营养成分的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(17): 24–27.

[LIU M P, GUO X J, ZHAO G Y, et al. Effect of high-pressure microfluidization technology on nutritional ingredients and antioxidant activity of iron yam juice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(17): 24–27.]

[29] 卢薇, 鲁江. 高压均质灭菌对胡萝卜橙汁理化性质及类胡萝卜素生物利用率的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(6): 295–301. [LU W, LU J. Effects of high-pressure homogenization sterilization on physicochemical properties and carotenoid bioaccessibility of carrot-orange juices[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(6): 295–301.]

[30] 卢薇, 邵昕, 鲁江. 高压灭菌工艺对蓝莓汁品质的影响[J]. 饮料工业, 2023, 26(4): 12–17. [LU W, SHAO X, LU J, et al. Effects of high-pressure sterilization on the quality of blueberry juice[J]. Beverage Industry, 2023, 26(4): 12–17.]

[31] 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 & Emerging Technologies, 2016, 36: 320–329.

[32] BENJAMIN O, GAMRASNI D. Microbial, nutritional, and organoleptic quality of pomegranate juice following high-pressure homogenization and low-temperature pasteurization[J]. Journal of Food Science, 2020, 85(3): 592–599.

- [33] 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): 1802.
- [34] TRIBST A A L, FRANCHI M A, DE MASSAGUER P R, et al. Quality of mango nectar processed by high-pressure homogenization with optimized heat treatment[J]. *Journal of Food Science*, 2011, 76(2): 106–110.
- [35] TRIBST A A, AUGUSTO P E, CRISTIANINI M. The effect of high pressure homogenization on the activity of a commercial beta-galactosidase[J]. *J Ind Microbial Biotechnol*, 2012, 39(11): 1587–1596.
- [36] SUAREZ-JACOBO A, RUFER C E, GERVILLA R, et al. Influence of ultra-high pressure homogenization on antioxidant capacity, polyphenol and vitamin content of clear apple juice[J]. *Food Chem*, 2011, 127(2): 447–454.
- [37] POUNIS G, COSTANZO S, BONACCIO M, et al. Reduced mortality risk by a polyphenol-rich diet: An analysis from the Moli-sani study[J]. *Nutrition*, 2018, 48: 87–95.
- [38] MARSZALEK K, TRYCH U, BOJARCZUK A, et al. Application of high-pressure homogenization for apple juice: an assessment of quality attributes and polyphenol bioaccessibility[J]. *Antioxidants*, 2023, 12(2): 451.
- [39] MARTINEZ-SANCHEZ A, TARAZONA-DIAZ M P, GARCIA-GONZALEZ A, et al. Effect of high-pressure homogenization on different matrices of food supplements[J]. *Food Sci Technol Int*, 2016, 22(8): 708–719.
- [40] 刘嘉宁, 刘璇, 张彪, 等. 高压均质对胡萝卜汁中内源水溶性果胶结构和类胡萝卜素生物利用度的影响[C]//中国食品科学技术学会(Chinese Institute of Food Science and Technology), 美国食品科技学会(Institute of Food Technologists). 2017 中国食品科学技术学会第十四届年会暨第九届中美食品业高层论坛论文摘要集, 2017: 456–457. [LIU J N, LIU X, ZHANG B, et al. Research progress in coix starch structure, physicochemical properties and industrial utilization[C]//Chinese Institute of Food Science and Technology, Institute of Food Technologists in the United States Summary collection of papers from the 14th Annual Conference of the Chinese Society for Food Science and Technology and the 9th China Food Industry Forum in 2017, 2017: 4566–457.]
- [41] 关云静. 高压均质对 NFC 芒果汁微生物和品质的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017. [GUAN Y J. The effect of high-pressure homogenization on the microorganisms and quality of NFC mango juice[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017.]
- [42] SVELANDER C A, LOPEZ-SANCHEZ P, PUDNEY P D A, et al. High pressure homogenization increases the *in vitro* bioaccessibility of α - and β -carotene in carrot emulsions but not of lycopene in tomato emulsions[J]. *Journal of Food Science*, 2011, 76(9): H215–H225.
- [43] LIU X, LIU J, BI J, et al. Effects of high pressure homogenization on pectin structural characteristics and carotenoid bioaccessibility of carrot juice[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 203: 176–184.
- [44] BETORET E, BETORET N, CARBONELL J V, et al. Effects of pressure homogenization on particle size and the functional properties of citrus juices[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 92(1): 18–23.
- [45] MARESCA P, DONSI F, FERRARI G. Application of a multi-pass high-pressure homogenization treatment for the pasteurization of fruit juices[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 104(3): 364–372.
- [46] PATRIGNANI F, MANNOZZI C, TAPPI S, et al. High pressure homogenization potential on the shelf-life and functionality of kiwifruit juice[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10: 246.
- [47] LIU J, BI J, LIU X, et al. Effects of high pressure homogenization and addition of oil on the carotenoid bioaccessibility of carrot juice[J]. *Food & Function*, 2019, 10(1): 458–468.
- [48] WANG D W, LI X W, WANG K, et al. Impact of non-thermal modifications on the physicochemical properties and functionality of litchi pomace dietary fibre[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2023, 182: 114878.
- [49] 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]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 221: 70–76.
- [50] 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.
- [51] PATRIGNANI F, SIROLI L, SERRAZANETTI D I, et al. Microencapsulation of functional strains by high pressure homogenization for a potential use in fermented milk[J]. *Food Research International*, 2017, 97: 250–257.
- [52] PULIGUNDLA P, PYUN Y R, MOK C. Pulsed electric field (PEF) technology for microbial inactivation in low-alcohol red wine[J]. *Food Sci Biotechnol*, 2018, 27(6): 1691–1696.
- [53] 程银棋, 余元善, 吴继军, 等. 超高压均质联合二甲基二碳酸盐对荔枝汁中污染菌及其微生物货架期的影响[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(11): 57–60. [CHENG Y Q, YU Y S, WU J J, et al. Effect of ultra high pressure homogenization and dimethyl decarbonate on the inactivation of indigenous microorganisms in the litchi juice and its microbial shelf-life[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(11): 57–60.]
- [54] 董鹏. 高压均质对细菌营养体及芽孢的杀菌效果及机制研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016. [DONG P. Inactivation mechanisms of vegetative microorganisms and bacterial spores by high pressure homogenization[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016.]
- [55] VELÁZQUEZ-ESTRADA R M, HERNÁNDEZ-HERRERO M M, LÓPEZ-PEDEMONTE T J, et al. Inactivation of *Listeria monocytogenes* and *Salmonella enterica* serovar Senftenberg 775W inoculated into fruit juice by means of ultra high pressure homogenization[J]. *Food Control*, 2011, 22(2): 313–317.
- [56] VELÁZQUEZ-ESTRADA R M, HERNÁNDEZ-HERRERO M M, RUFER C E, et al. Influence of ultra high pressure homogenization processing on bioactive compounds and antioxidant activity of orange juice[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2013, 18: 89–94.
- [57] DONG P, GEORGET E S, AGANOVIC K, et al. Ultra high pressure homogenization (UHPH) inactivation of *Bacillus amyloliquefaciens* spores in phosphate buffered saline (PBS) and milk[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2015, 6: 712.
- [58] BLANCO G, PEREDA A, BRIAN P, et al. A hydroxylase-like gene product contributes to synthesis of a polyketide spore pigment in *Streptomyces halstedii*[J]. *J Bacteriol*, 1993, 175(24): 8043–8048.
- [59] CAMPOS F P, CRISTIANINI M. Inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* and *Lactobacillus plantarum* in orange juice us-

- ing ultra high-pressure homogenisation[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2007, 8(2): 226–229.
- [60] LEITE T S, AUGUSTO P E D, CRISTIANINI M. Frozen concentrated orange juice (FCOJ) processed by the high pressure homogenization (HPH) technology: Effect on the ready-to-drink juice[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2016, 9: 1070–1078.
- [61] VOCE S, CALLIGARIS S, COMUZZO P. Effect of a yeast autolysate produced by high pressure homogenization on white wine evolution during ageing[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2021, 58: 4045–4054.
- [62] LOIRA I, MORATA A, BAÑUELOS M A, et al. Use of ultra-high pressure homogenization processing in winemaking: Control of microbial populations in grape musts and effects in sensory quality[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2018, 50: 50–56.
- [63] TAYLOR T M, ROACH A, BLACK D G, et al. Inactivation of *Escherichia coli* K-12 exposed to pressures in excess of 300 MPa in a high-pressure homogenizer[J]. *J Food Prot*, 2007, 70(4): 1007–1010.
- [64] BEVILACQUA A, CAMPANIELLO D, SPERANZA B, et al. Two nonthermal technologies for food safety and quality-ultrasound and high pressure homogenization: Effects on microorganisms, advances, and possibilities: A review[J]. *J Food Prot*, 2019, 82(12): 2049–2064.
- [65] YU Y, WU J, XU Y, et al. Effect of high pressure homogenization and dimethyl dicarbonate (DMDC) on microbial and physicochemical qualities of mulberry juice[J]. *Journal of Food Science*, 2016, 81(3): M702–M708.
- [66] DU L Y, SUN Y L, HAN L Y, et al. Inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* by combined high pressure carbon dioxide and high pressure homogenization[J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2023, 193: 105816.
- [67] GUERZONI M E, VANNINI L, CHAVES LOPEZ C, et al. Effect of high pressure homogenization on microbial and chemico-physical characteristics of goat cheeses[J]. *Journal of Dairy Science*, 1999, 82(5): 851–862.
- [68] MARTINEZ-GARCIA M, SAUCEDA-GALVEZ J N, CODINA-TORRELLA I, et al. Evaluation of continuous UVC treatments and its combination with UHPH on spores of *Bacillus subtilis* in whole and skim milk[J]. *Foods*, 2019, 8(11): 539.
- [69] MOUTON T L, TONKIN J D, STEPHENSON F, et al. Increasing climate-driven taxonomic homogenization but functional differentiation among river macroinvertebrate assemblages[J]. *Glob Chang Biol*, 2020, 26(12): 6904–6915.
- [70] KLEINIG A R, MIDDELBERG A P J. On the mechanism of microbial cell disruption in high-pressure homogenisation[J]. *Chemical Engineering Science*, 1998, 53(5): 891–898.
- [71] KELLY W J, MUSKE K R. Optimal operation of high-pressure homogenization for intracellular product recovery[J]. *Bioprocess Biosyst Eng*, 2004, 27(1): 25–37.
- [72] DIELS A M, MICHIELS C W. High-pressure homogenization as a non-thermal technique for the inactivation of microorganisms[J]. *Crit Rev Microbiol*, 2006, 32(4): 201–216.
- [73] DONSI F, WANG Y, LI J, et al. Preparation of curcumin sub-micrometer dispersions by high-pressure homogenization[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(5): 2848–2853.