

不同加工技术对西瓜汁风味影响研究进展

王哲, 董丽*, 胡小松, 陈芳

(中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083)

摘要: 西瓜由于具有较高的营养价值和优良的感官品质, 深受广大消费者的喜爱。作为西瓜生产大国, 西瓜类产品尤其是西瓜汁的开发和应用在我国有着广阔的前景。作为果汁加工的优质原料, 西瓜的酸度低且水分活性高, 这使其容易受到腐败微生物的污染。因此, 西瓜汁的保质期往往较短。传统的热加工技术如巴氏杀菌的应用, 可以在一定程度上延长西瓜汁的保质期。但西瓜作为一种热敏性水果, 西瓜汁的营养品质和感官特性也极易因受热而被严重影响。相比之下, 包括超高压 (High Hydrostatic Pressure, HHP)、高压二氧化碳 (High Pressure Carbon Dioxide, HPCD)、超声波、辐射杀菌、高压脉冲电场 (High Intensity Pulsed Electric Field, HIPEF) 和膜技术等在内的非热加工技术在西瓜汁的应用方面彰显出更大的优势。此外, 根据现有的研究, 大多数加工技术都更加侧重于灭菌和钝酶效果, 极少关注对西瓜汁风味的影响。为了对西瓜汁风味有更清晰的认识并推动其产业化发展, 该研究综述了西瓜汁中的特征风味、不同加工技术对风味的影响, 并针对加工后西瓜汁的风味保留提出了一系列的改良手段。

关键词: 西瓜; 西瓜汁; 热加工技术; 非热加工技术; 风味

文章编号: 1673-9078(2023)11-310-322

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.11.1285

Research Progress on the Effect of Different Processing Techniques on Watermelon Juice Flavor

WANG Zhe, DONG Li*, HU Xiaosong, CHEN Fang

(College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Watermelon is very popular with consumers owing to its high nutritional value and excellent sensory quality. As a big watermelon-producing country, the development and application of watermelon products, especially watermelon juice, have a broad prospect in China. As a high-quality raw material for juice processing, watermelon has a low acidity and high water activity thereby making it susceptible to microbial contamination. Therefore, the shelf life of watermelon juice is often very short. The application of traditional thermal processing technology, such as pasteurization, can extend the shelf life of watermelon juice to a certain extent. However, as a heat-sensitive fruit, the nutritional quality and sensory characteristics of watermelon juice are also easily damaged due to heating. In comparison, non-thermal processing technologies, including high hydrostatic pressure (HHP), high pressure carbon dioxide (HPCD), ultrasound, radiation sterilization, high-intensity pulsed electric field (HIPEF) and membrane technology, show greater advantages in the application of watermelon juice. Moreover, according to the existing research, most processing technologies focus more on sterilization and enzyme inactivation effects, with little attention to the impact on the flavor of watermelon juice. In order to understand better the flavor of watermelon juice and promote its industrial development, this paper provides an overview of the characteristic flavor of watermelon juice and the influences of different processing technologies on the flavor. Furthermore, a series of methods/means for improvements are proposed for preserving the flavor of processed watermelon juice.

Key words: watermelon; watermelon juice; thermal processing technology; non-thermal processing technology; flavor

引文格式:

王哲,董丽,胡小松,等.不同加工技术对西瓜汁风味影响研究进展[J].现代食品科技,2023,39(11):310-322

WANG Zhe, DONG Li, HU Xiaosong, et al. Research progress on the effect of different processing techniques on watermelon juice flavor [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(11): 310-322

收稿日期: 2022-10-10

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFD2100404; 2018YFC1602202)

作者简介: 王哲 (1997-), 男, 硕士生, 研究方向: 果蔬加工, E-mail: 1121477860@qq.com

通讯作者: 董丽 (1984-), 女, 博士, 实验师, 研究方向: 食品微生物方面, E-mail: li_dong127@163.com

西瓜,一种葫芦科西瓜属的蔓生草本植物,在中国拥有悠久的种植历史,有学者推测,早在西汉年间西瓜就由“海上丝绸之路”传入中国^[1]。西瓜是一种重要的经济作物,近几年全球每年产量超过 1.03×10^8 t^[2]。作为世界第一的西瓜种植国,2018年,我国西瓜种植面积为 1.518×10^6 hm²,产量为 6.1537×10^7 t,占比超过全球总产量的60%^[3]。

西瓜由于其甘甜清爽的口感,被誉为夏季水果之王。西瓜营养价值极高,富含除脂肪外的糖类、蛋白质、维生素、水及矿物元素等其他人体所必需的营养素,是夏日清热解暑、生津止渴的利器^[4]。此外,西瓜富含天然抗氧化剂,包括番茄红素、抗坏血酸、瓜氨酸以及其他生物活性化合物,具有预防癌症和心血管疾病等功效^[5]。西瓜含水量极高,约为其质量的93%,是加工果汁的优质原料^[6,7],同时,口味清甜细腻的西瓜汁也是人们最受欢迎的西瓜产品。

但是,西瓜酸度低(pH值5.2~6.7)且水分活度高(0.97~0.99),因此西瓜汁也易受微生物污染,从而引发腐败变质^[8]。除微生物外,酶促反应也是引起西瓜汁颜色和滋味发生不良变化的重要原因之一。其中,多酚氧化酶(Polyphenol Oxidase, PPO)、果胶甲基酯酶(Pectinmethyl Esterase, PME)和过氧化物酶(Peroxidase, POD)是导致西瓜汁劣变的主要酶^[9]。此外,西瓜富含醇醛酮等风味物质,如(E,Z)-2,6-壬二烯醇、(E,Z)-2,6-壬二烯醛和(Z)-6-壬烯醛。这些风味物质不稳定,一旦在加热过程中挥发、氧化还原,西瓜便会失去其清香的风味,甚至产生蒸煮味道。魏利军等^[10]对三种不同品种的西瓜汁进行不同条件的热处理来确定其热变临界温度点,发现三个品种的西瓜汁均在55℃发生热变性,导致蒸煮味道的产生。正是由于西瓜的易腐性和热敏性,西瓜汁在室温下的保质期非常短,最长仅有4 d^[11],因此目前在市场上很难找到商业化的西瓜汁产品。

然而,人们对西瓜汁加工方式和加工工艺的探索从未停止。在延长西瓜汁保质期的尝试中,人们曾对西瓜汁进行巴氏杀菌,但该过程中涉及的处理温度导致了西瓜汁营养成分和呈色物质的降解^[12]。随着研究者们对新鲜果汁加工兴趣的日益浓厚以及科学技术的进步,科学工作者们研究并开发了新型热加工和非热加工果汁的方法。目前果汁的热加工技术主要包括超高温瞬时灭菌(Ultra-High Temperature Instantaneous Sterilization, UHT)和微波加热技术,非热加工技术有超高压、脉冲电场、电离辐射、超声波和高压二氧

化碳等技术。在西瓜汁的加工方面,大多数研究更加关注这些加工技术的灭菌或钝酶效果,而忽略了对西瓜汁风味的影响。由于西瓜汁中的风味成分极易发生变化,探究如何保留西瓜汁的特征风味,对推动西瓜汁的商业化进程有着极大的意义。因此本文主要综述了热加工技术及非热加工技术在加工过程中引起的西瓜汁风味的变化,并提出了一系列改良手段,以期对西瓜汁的产业化做出贡献。

1 西瓜风味研究

1.1 西瓜中的特征风味

关于西瓜的风味,学者们认为西瓜被切开后,风味通过一个动态的酶系统迅速形成,其风味特点是浓郁、持续时间短且不稳定^[14]。以往的研究发现,葫芦科植物的风味物质均是由亚油酸和亚麻酸氧化形成的,氧化产物包括C6和C9醛、酮和醇,这些物质的浓度不高但阈值极低,在很大程度上决定着果实的整体风味^[15,16]。研究表明,醛和醇在西瓜的整体风味中占主导地位,其中,醇的含量最为丰富,是决定西瓜风味的关键因子^[17]。它们与酮及呋喃等其他化合物一起,共同组成了西瓜复杂的风味系统^[18]。在酮类物质中,甲基庚烯酮和香叶基丙酮被认为是西瓜独特风味的重要贡献者^[19]。1975年,Kemp从西瓜中分离出具有“西瓜或西瓜皮风味”的(Z,Z)-3,6-壬二烯醇,其阈值低至1 ng/mL;此后,Kemp又从西瓜中分离出18种风味化合物,其中包含10种C9醇和醛类物质^[20,21]。西瓜中的C9醇和C9醛类是西瓜风味的典型风味化合物,在C9醛类化合物中,(E,Z)-2,6-壬二烯醛是具有西瓜风味的代表物质^[18,20,22]。Palma等^[23]发现,(E,Z)-2,6-壬二烯醛的阈值低至0.01 ng/mL。Liu等^[24]从5种不同品种的新鲜西瓜汁中提取了55种挥发性化合物,这些西瓜中的主要挥发性成分有香叶基丙酮、(E,Z)-3,6-壬二烯醇、己醛、(E)-2-庚烯醛、壬醛、(Z)-3-壬烯醛、2-辛醇和(Z)-2-壬烯醇等。杨帆等^[25]鉴定出鲜榨西瓜汁中的44种风味物质,其中的关键风味化合物是壬醛、(E)-2-壬烯醛、(E,Z)-2-壬二烯醛、(E,Z)-3,6-壬二烯醇、(E,Z)-2,6-壬二烯醇和香叶基丙酮。此外,Aboshi等^[26]在经加热的西瓜中鉴定出甲基硫和二甲基硫等含硫化物,它们被认为是热加工过程中异味的主要来源。鲜榨西瓜中的主要挥发性风味物质^[25,27,28]见表1。

表1 鲜榨西瓜中的主要挥发性风味成分

Table 1 Main volatile flavor components in fresh watermelon

序号	化合物名称	香味特征	CAS号	阈值/(ng/mL)
醛类 (17)				
1	椰子醛	椰子香	104-61-0	0.000 000 8
2	(E)-2-壬烯醛	瓜味、清香	18829-56-6	0.000 09
3	2-壬烯醛	黄瓜味、清香	2463-53-8	0.000 1
4	(Z)-6-壬烯醛	清香、黄瓜味	2277-19-2	0.000 14
5	(E,Z)-2, 6-壬二烯醛	黄瓜味	557-48-2	0.000 11
6	(E)-6-壬烯醛	甜瓜味	2277-20-5	0.000 14
7	辛醛	水果香、脂味	124-13-0	0.000 88
8	庚醛	柑橘香	111-71-7	0.000 9
9	(E)-2-辛烯醛	绿色坚果香、清香	2548-87-0	0.002 7
10	(E)-2-己烯醛	清香	6728-26-3	0.003 1
11	β -环柠檬醛	果香、花香	432-25-7	0.003
12	壬醛	清香、动物脂味	124-19-6	0.003 1
13	(E)-柠檬醛	柠檬味	141-27-5	0.012
14	己醛	青草香	66-25-1	0.043
15	(E,E)-2,4-庚二烯醛	水果味、香甜味	4313-03-5	0.057
16	苯甲醛	杏仁味	100-52-7	0.085
17	(E)-2-庚烯醛	水果香、清香	18829-55-5	2.8
醇类 (7)				
18	(E,Z)-2,6-壬二烯醇	清香	28069-72-9	0.000 07
19	(E, Z)-3,6-壬二烯醇	黄瓜味	56805-23-3	0.003
20	1-戊烯-3-醇	清香	616-25-1	0.01~0.1
21	1-壬醇	玫瑰花香、脂蜡香	143-08-8	0.018
22	(E)-2-辛烯醇	动物脂味	18409-17-1	0.02
23	己醇	花香、清香	111-27-3	0.034
24	(Z)-3-壬烯醇	清香、动物脂味	10340-23-5	/
酮类 (3)				
25	紫罗兰酮	紫罗兰香	127-41-3	0.001 6
26	香叶基丙酮	清香、果香、蜡香	3796-70-1	0.06
27	甲基庚烯酮	柠檬味、苹果味	110-93-0	0.018 89
呋喃 (1)				
28	2-戊基呋喃	水果香、清香	3777-69-3	0.019

1.2 风味物质检测技术

在人对食品的感知中,嗅觉占比达80%,因此风味物质的种类及含量是衡量水果感官品质的重要标准。水果中挥发性风味物质种类复杂,且除了一些主要物质外,其余物质含量较低,因此选择合适的检测手段对水果风味物质定性定量起着至关重要的作用。在目前的水果风味检测中,基于不同的研究需要,将气相色谱与其他分析仪器联用成为常用的检测手段,如气相色谱与质谱联用(Gas Chromatography-Mass

Spectrometry, GC-MS)、气相色谱与嗅闻仪联用(Gas Chromatography Mass Spectrometry-Olfactometry, GC-MS-O)、气相色谱与离子迁移谱联用(Gas Chromatography Ion Mobility Spectrometry, GC-IMS)等。GC-MS是目前应用最广泛的风味测量方法,它将样品中分离的挥发性物质与质谱库进行比对,从而对未知物进行定性,并通过内标法或外标法对物质定量,具有定性能力强,灵敏度高,选择性好的优点^[29]。GC-MS-O以人的鼻子为检测器,通过检测员对风味物质气味性质和强度的描述,并结合香气活性值(Odor

Activity Value, OAV) 来反映各风味物质对总体风味的贡献度, 是 GC-MS 检测技术的良好补充^[30]。GC-IMS 将气相色谱的分离能力和离子迁移色谱快速响应的特性相结合, 具有高灵敏性和低检测的优点, 目前被广泛应用于常压下挥发性化合物的分析^[31]。此外, 人工感官评价、电子舌、电子鼻等技术也是常用的水果风味评价方法。

2 不同加工技术对西瓜汁风味的影响

2.1 热加工技术

2.1.1 传统热加工技术

传统热加工技术按处理温度和时间不同, 可分为巴氏杀菌(低于 100 °C)^[32]、高温杀菌技术(100~130 °C)^[33]和超高温瞬时杀菌(Ultra-High Temperature Instantaneous Sterilization, UHT)(120 °C 以上热处理 2 s~20 s)^[34]。其中, 巴氏杀菌主要用于牛奶的灭菌, 高温杀菌主要用于罐头类食品的杀菌, UHT 主要用于流体和半流体食品。UHT 处理时间短, 因此能极大程度上保留食品的原有风味。目前, 热杀菌技术是最有效和应用范围最广的食品加工技术, 也是评价其他加工技术处理效果的基本参照^[35]。Wang 等^[36]以 110、120、135 °C 的条件分别处理西瓜汁 2 s, 与未处理西瓜汁相比, 处理组中典型挥发性物质含量显著低, 降低率分别为 15.4%、10.9%和 10.1%。Wang 等^[37]对比了未处理和热处理后西瓜汁风味的变化, 发现经 100 °C、5 min, 60 °C、30 min 和 135 °C、2 s 处理后西瓜汁的醇醛总含量分别为 74.0%、72.0%和 69.3%, 显著低于未处理西瓜汁的 87.5%。Liu 等^[38]以 126 °C、15 s 的条件对西瓜汁进行 UHT 处理, UHT 处理后西瓜汁的整体风味不协调, 壬醛、3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛和香叶基丙酮含量分别下降了 74.4%、94.4%和 63.9%。杨潇等^[39]发现, 西瓜汁在 70 °C 水浴条件下加热 20 min 后, 一些异味物质, 如二乙基二硫醚、二丙基二硫醚等含量显著上升。综上, 西瓜作为一种热敏性水果, 当处理温度高于其热变临界温度点(一般在 55 °C 左右^[12])时, 处理时间也会成为影响西瓜汁风味的一个重要因素。

2.1.2 微波加热技术

微波是电磁波频谱的一部分, 频率在 300 MHz 到 300 GHz 之间, 杀菌机制包括热效应和非热效应^[40]。热效应指食品材料吸收的微波能量在其体内被转化为热能, 使物料温度升高, 达到加热效果; 同时, 微波可以提高水分的扩散和蒸发速度, 因此微波加热还具有干燥效果^[41]。微波的非热效应又称为生物效应, 指

经微波处理后, 微生物的细胞膜会发生电穿孔, 通透性改变, 使微生物不能新陈代谢。同时, 电穿孔的细胞膜还会使微生物体内的生物大分子, 如 DNA 和蛋白质暴露出来, 进而引发各种生理生化的改变, 最终导致微生物生长受到抑制并凋亡^[42]。与巴氏杀菌相比, 微波加热不需要介质, 因此更快、更有效、更经济。但当样品水分含量较多时, 微波加热会造成营养物质的大量流失^[43,44]。

毛雪杰等^[45]通过响应面试验, 验证不同微波条件处理对西瓜汁灭菌效果、品质及感官的影响, 得到的最优试验条件为微波处理时间 180 s, 微波功率 3 kW。经该条件处理后的西瓜汁与热处理相比, 一定程度上保持了原有的风味, 但滋味略带酸味。

2.2 非热加工技术

2.2.1 超高压技术

超高压技术, 又称为高静压技术(High Hydrostatic Pressure, HHP), 是现阶段研究最多、应用最广的非热加工技术^[46]。HHP 通常以水为介质, 在不加热系统的情况下均匀、迅速地使压力(100~1 000 MPa 范围内)转移到食物中^[47]。与热加工不同, HHP 压力的传导与样品的大小和形状无关, 因此可以使处理时间最小化^[48]。超高压的灭菌机制为通过压力使细胞膜和蛋白质的结构发生改变, 从而影响细胞功能, 最终导致细胞死亡^[49]。其优势在于超高压主要作用于生物大分子中的非共价键, 而对食品中的色素、维生素和风味物质等小分子化合物的共价键无明显影响, 因此可以在保障杀菌效果的同时, 使食品色泽、营养物质及感官品质得到保留^[50]。近年来, 超高压加工设备发展日趋成熟, 包括美国、日本及中国在内的多国已经具备生产超高压加工设备的能力, 且在美国、欧洲和加拿大等地, 超高压技术在经过政府批准后, 已应用于果汁及相关行业^[51,52]。

刘野等^[53]发现, 经过 600 MPa、60 min 的超高压处理后, 西瓜汁中特征香味物质的整体浓度基本不变, 其中己醛、(E)-2-壬烯醛、(Z)-2-壬烯醇、香叶基丙酮的浓度呈上升趋势, 分别升高了 69.0%、12.3%、10.4%和 91.0%。Liu 等^[38]采用超高压(400 MPa、20 min)对西瓜汁进行处理, 结果表明: 与对照组(未经任何处理的新鲜西瓜汁)相比, 西瓜汁中醛类物质的相对含量显著增加。贮藏 8 周后, 壬醛、3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛、香叶基丙酮的含量分别为 1.8%、2.12%和 0.25%, 与对照组西瓜汁中的含量相比仍较接近, 在很大程度上保留了西瓜的原有风味。Aganovic 等^[54]采用 600 MPa、5min 的条件对西瓜汁进行高压处理,

与对照组相比,己醛和(E)-2-己烯醛含量均有所上升。包洪亮等^[55]研究发现,经400 MPa、20 min超高压处理后的西瓜汁,在4℃的温度条件下冷藏10 d,(E,Z)-2,6-壬二烯醇、香叶基丙酮、2-戊基呋喃、壬醛等主要风味物质含量变化无显著差异。柳青^[56]也在研究中发现,400~600 MPa的超高压处理可以使西瓜汁的2,6-二甲基-5-庚烯醛及壬醛含量上升,从而使西瓜汁的清香味更浓郁。总体来看,超高压可以很好地保留西瓜汁的风味,且不同的压力条件均会导致醛类物质相对含量增加。这可能是在超高压的条件下,其他物质经氧化还原形成醛类物质,或是高压下与风味有关的酶活性发生改变,从而使风味物质含量发生变化。

2.2.2 高压二氧化碳

高压二氧化碳(High Pressure Carbon Dioxide, HPCD)是近年来应用于果汁加工的一种新型非热技术。该技术将无毒无害的二氧化碳(CO₂)与压力结合,可以在较温和的条件下(低于50 MPa、低于60℃)实现杀菌钝酶并保持果汁品质^[57]。目前,有关HPCD杀菌的具体机制尚不清楚,已有的假说主要有两种。一种为机械性破裂,该假说认为加压后CO₂进入微生物内部,使微生物内外产生压力差,在瞬间泄压的过程中微生物会因压力差发生机械性破裂,使微生物失活^[58]。另一种假说认为HPCD会引起微生物的生理性失活,整个过程可以分为以下7个步骤:(1)CO₂在压力条件下溶于外部液体环境中;(2)细胞膜改性;(3)微生物内部pH值降低;(4)关键酶失活;(5)分子态的CO₂和离子态的HCO₃⁻抑制了微生物的代谢;(6)微生物内的电解质平衡被打破;(7)细胞及细胞膜的重要组成部分被破坏^[59]。

刘野等^[60]发现,经30 MPa、60 min的HPCD处理后,西瓜汁中的主要风味物质含量大多呈下降趋势,但总体水平仍高于热处理组,如己醛、(Z)-2-壬烯醛、(E)-2-壬烯醛、壬醛、(E,Z)-2,6-壬二烯醇、香叶基丙酮等风味物质,经HPCD处理后含量为5.69%、22.07%、1.27%、0.60%、0.37%、1.17%,高于热处理组的4.77%、11.25%、0.22%、0.36%、0%、0.73%。侯志强等^[61]在哈密瓜的研究中,也发现2.5~4.5 MPa、8 min的HPCD处理会导致鲜切哈密瓜的风味物质含量明显下降。因此,有关HPCD的研究虽然已经在果蔬汁、啤酒等液体体系中广泛展开,但是由于其杀菌机理尚不明确,难以精准控制工艺参数(压力、温度和时间),因此在加工过程中易导致食品品质发生变化。

2.2.3 超声波处理

超声波是一种频率大于20 kHz的声波,通常作为辅助杀菌手段来降低杀菌强度,减少加工过程对食品

品质的损坏^[62]。目前,超声波已作为巴氏杀菌的替代技术而被广泛应用于果汁的加工^[63]。用超声波处理果汁,会导致果汁中的微生物细胞膜破裂并产生自由基。这是因为声波在液体介质中传播时会引起压力的变化,压力的改变易引起空穴现象,并在液体介质中产生微小气泡核,微小气泡核在收缩破碎的瞬间会产生局部的高压和高温,从而起到灭菌的作用^[64]。

郑炯等^[65]发现超声波处理西瓜汁可有效降低西瓜汁中PPO和POD的活性,且酶的存活率与超声波功率及处理时间呈负相关。Ykm等^[66]以26 kHz的频率、50%的振幅、80 W的功率对红瓢和黄瓢西瓜汁分别进行4、8、12、16 min的超声波处理,结果表明超声波处理后的西瓜汁在味道、风味和整体可接受性评价方面均高于热处理。张仲阳等^[67]采用超声波协同ClO₂处理西瓜汁,其中ClO₂添加量为77 mg/L、超声波功率为120 W、杀菌时间为2 min,在达到灭菌效果的同时,避免了因热处理产生蒸煮味等问题的发生。在同样是热敏性水果的甜瓜中,Yang等^[68]采用探针超声波处理对西瓜汁进行超声处理,经325 W处理20 min后,挥发性风味物质的种类和含量分别增加了82.50%和111.84%,其中己醛、壬醛、(Z)-6-壬烯醛、(E)-2-壬烯醛、(E,Z)-2,6-壬二烯醛、(E,Z)-3,6-壬二烯醇等风味物质含量显著上升。此外,经超声处理后的西瓜汁还产生了新的风味物质 α -蒎烯和 β -紫罗兰酮。目前的研究表明,超声波杀菌效果有限,因此在加工过程中更多是作为一种辅助手段,来提高热、压力、紫外线、脉冲电场及杀菌剂的杀菌效果^[69]。

2.2.4 辐射杀菌

辐射作为一种食品非热杀菌技术,包括两种形式,即非电离辐射(Non Ionizing Radiation, NIR)和电离辐射(Ionizing Radiation, IR),这两种形式均可以在室温下作用于食品,达到灭活病原体和延长货架期的目的。非电离辐射包括可见光、红外及紫外线(Ultraviolet, UV)辐射,紫外光在灭菌的同时还可钝化酶的活性。按波长可将紫外光分为UV-A(320~400 nm)、UV-B(280~320 nm)和UV-C(200~280 nm)三种,其中灭菌效果最好的是UV-C,它主要应用于果汁的加工^[70]。UV-C的杀菌机制可以解释为DNA有吸收紫外光的倾向,这会使微生物的DNA发生交联,造成微生物的死亡^[71]。目前,紫外杀菌已因其杀菌效果良好、无化学污染残留和能保留食品的原有品质等优势,被广泛应用于果汁加工的研究^[72]。辐射杀菌的另一种形式为电离辐射,包括高能电子束、X射线和 γ 射线,这些射线频率高、强度大,可使与其接触的微生物内部产生带电离子,进而对微

生物造成损伤并使其凋亡^[73]。同时, 电离辐射也会使食品体系中的水分子产生自由基等活性粒子, 这些活性粒子会与微生物体内的核酸和蛋白质等物质发生作用, 抑制其遗传和代谢^[74]。目前, 电离辐射已经因其操作简单、能耗低、色香味及营养成分破坏程度小等优势而被应用于果汁加工的研究^[75]。

Pendyala 等^[76]使用 40 mJ/cm²、120 mJ/cm² 的 UV-C 强度对西瓜汁进行了灭菌。在 40 mJ/cm² 的条件下, 西瓜汁中醛的含量为 67.1%, 与新鲜西瓜汁的 68.8% 相比无显著差异。经 120 mJ/cm² 的 UV-C 处理后, 西瓜汁中的总醛含量降为 64.9%, 其中(E,Z)-2,6-壬二烯醛和癸醛含量分别降低了 36.22% 和 33.88%。此外, 总醇量在经 UV-C 处理后同样显著降低, 但在不同条件下, UV-C 处理后的醇含量差异不明显。与新鲜西瓜汁相比, 经 40 mJ/cm² 的 UV-C 处理后, 西瓜汁样品中酮含量显著增加, 但处理组间酮含量差异不明显。Botros 等^[77]将西瓜汁分别在室温 (25±1) °C 下进行 1 kGy、3 kGy 和 5 kGy 的 γ 射线照射, 辐照室内温度为 18 °C。在辐照处理中, 大多数芳香物质的含量随辐射剂量的增加而降低, 主要风味物质 2-甲基丁酸乙酯在对照组、1 kGy 和 3 kGy 处理组中的含量分别为 60.7%、58.7% 和 56.96%。当辐射剂量从 3 kGy 增至 5 kGy 时, 2-甲基丁酸乙酯含量变为 40.01%, 显著降低; 其他影响水果风味的活性化合物, 如(E)-3-己烯基乙酸酯和 2-甲基丙醛等, 其百分比含量也随着辐照剂量的增加而降低; 而 2-甲基-1-丁醇、(E)-2-戊二烯、苯甲醇等芳香化合物则均未检出; 但是辐照过程也导致西瓜汁中产生轻微的辐照异味。在相对温和的处理条件下, 辐照处理可以在较大程度上保留食品的原有风味, 但是杀菌效果相对有限。而随着辐照强度的增大, 西瓜汁中醇醛酮的总含量出现了不同程度的降低, 导致西瓜汁的整体风味失调。

2.2.5 高压脉冲电场

近年来, 高压脉冲电场 (High Intensity Pulsed Electric Field, HIPEF) 作为一种新型非热加工技术, 已经广泛应用于与食品有关的研究^[78]。高压脉冲电场灭菌的过程会产生一定的热量, 但其最高温度不超过 40 °C, 远低于热处理的温度。HIPEF 的灭菌机制可以解释为, 放置在两个电极之间的水果汁, 会在短时间内 (μs ~ ms) 受到高压脉冲 (通常为 50 kV/cm)。这个过程会导致微生物的细胞壁发生不确定性改变, 并在细胞膜上形成电穿孔, 使细胞膜的通透性增加, 造成微生物死亡^[79-81]。HIPEF 的灭菌效果取决于场强、脉冲宽度、脉冲频率、处理时间、极性和处理温度等因素^[82]。

Aguilo-Aguayo 等^[83]以 35 kV/cm 的电场强度,

1,727 μs 的处理时间, 4 μs 的两极脉冲和 188 Hz 的电场频率处理了西瓜汁。经 HIPEF 处理后的西瓜汁, 己醛、(E)-2-壬烯醛、壬醛、甲基庚烯酮和香叶基丙酮的浓度上升了 20% 左右, 且与 90 °C、60 s 的热处理组相比, 风味物质的保留量更高。尽管在储藏过程中, 处理组的西瓜汁风味化合物总体含量有所下降, 但其感官仍然优于热处理组。Aganovic 等^[54]发现经 HIPEF (11 kV/cm, 175 kJ/kg) 处理后的西瓜汁, 其庚醛含量显著上升。Mosqueda 等^[84]发现, 经 HIPEF (35 kV/cm, 1 682 μs , 193 Hz 和 4 μs) 处理的西瓜汁在感官评价上与未处理组无显著差异, 二者评分均远高于热处理组。叶丽珠等^[85]在研究中发现, 经 (26.7 kV/cm, 680 μs , 512 Hz 和 5 μs) 处理后的冷冻浓缩西瓜汁感官上更接近原汁, 远优于热处理西瓜汁。HIPEF 处理时间极短, 引发的化学反应较少, 可以在很大程度上保留西瓜的原有风味。

2.2.6 膜技术

膜技术已因其人力需求少、效率高和加工时间短等可降低操作成本的优势, 成为代替传统热技术加工果汁的另一个选择^[86]。膜加工技术主要应用于果汁的澄清和浓缩, 包括微滤 (Microfiltration, MF)、超滤 (Ultrafiltration, UF)、纳滤 (Nanofiltration, NF)、反向渗透 (Reverse Osmosis, RO) 和正向渗透 (Forward Osmosis, FO) ^[87,88]。MF 可以除去 0.1~10 μm 的悬浮颗粒和细菌, 在澄清果汁的同时可以达到延长货架期的目的。其中, UF 膜孔径较小, 能够截留直径在 1~20 nm 之间的蛋白质等大分子有机物; NF 膜孔径更小, 直径在 0.5~2 nm 之间, 可以有效截留分子量在 200~1 000 之间的低分子量有机物和高价无机盐。RO 是利用渗透差使小分子物质和溶剂分离的一种膜分离技术, 能够有效地浓缩果汁并保留其风味。FO 的工作原理是根据两种液体的渗透压差异, 使高浓缩的渗透剂 (抽取溶剂) 通过半渗透膜并从果汁中抽取水。经 FO 浓缩后的果汁浓度可达 60 °Brix 以上^[88,89]。FO 可以在常温和常压下进行, 这极大程度保留了果汁的原有风味^[90]。在膜技术中, 膜材料可以分为有机膜和无机膜。有机膜材料来源广泛、成本低, 但是稳定性较差; 无机膜耐热、耐压、稳定性良好, 但是制造困难、成本较高^[91]。膜技术及膜材料对果汁的分离效果起着至关重要的作用, 因此要根据实际需求选择合适的分离技术和分离材料。

Milczarek 等^[92]对比了 FO 处理、热处理和对照组 (新鲜西瓜汁) 西瓜汁的风味感官, 结果显示 FO 浓缩物与新鲜西瓜的感官评分无显著差异, 二者均有浓郁的香味。在西瓜风味的描述评价中, FO 浓缩物同

新鲜西瓜一样, 具有典型的西瓜风味, 而热浓缩物则出现了类似鱼和蘑菇的气味。因此, FO 可以在浓缩西瓜汁的同时较大程度上保留其原有风味和品质。膜技术几乎不涉及温度反应和化学变化, 可以在极大程度上保留西瓜的原有风味, 但是在浓缩过程中, 膜易受污染, 从而导致膜的分离功能降低。

上述检测手段中, 除 UHT 部分学者研究结果不一致外, 热加工仍是对西瓜汁风味破坏最大的加工技术, 经过热处理的西瓜汁整体风味不协调, 风味物质含量会明显降低, 并产生二乙基二硫醚、二丙基二硫醚等异味物质。在非热加工技术中, 经 HPCD 处理后的西瓜汁整体风味虽优于热处理, 但是其主要风味物质含量大多呈下降趋势, 这可能是 HPCD 处理会在一定程度上破坏西瓜汁的质构, 进而影响西瓜汁的整体风味。超声波处理和虽然对西瓜汁的整体风味影响较小, 但是有限的杀菌效果只能让其作为一种辅助手段。

辐照处理的杀菌效果虽然随着辐照强度的提升, 能够使新鲜西瓜汁中菌落总数达到国标要求, 但是高强度的射线会导致西瓜汁中产生辐照异味, 因此目前的辐照处理在食品行业大多应用在对食品器械的消毒方面。经过膜技术处理后的浓缩西瓜汁含有较多的糖分, 这不仅会导致西瓜汁的保质期大为降低, 而且与非浓缩还原果汁的大健康潮流相悖。经过 HHP 和 HIPEF 处理后的西瓜汁既可以保证原有的良好风味, 又可以在极大程度上降低腐败微生物的含量, 同时 HIPEF 处理时间极短, 达到微秒级, 但是由于 HIPEF 成本高昂, 在与西瓜汁加工有关的研究中, HHP 仍然是应用最广泛的非热加工技术。目前, HHP 对西瓜汁的加工流程仍以先罐装再施压为主, 这使得该技术对罐装材质要求较高, 且一次处理的西瓜汁样品数量较少。未来可通过调整加工工艺, 先将西瓜汁注入超高压处理室, 经高压处理后再进行罐装, 从而节约成本, 提高产量。

表 2 不同加工方式的优缺点及主要应用

Table 2 Advantages, disadvantages and main applications of different processing methods

杀菌方式	优点	缺点	主要应用	对西瓜汁风味的影响	参考文献
巴氏杀菌	操作简单, 能耗低	杀菌效果有限, 货架期一般为一周左右, 且贮藏、运输、销售需要冷链进行	牛奶, 发酵产品	二乙基二硫醚、二丙基二硫醚等异味物质含量显著上升(70 °C、20 min)	[39] [93] [94]
高温杀菌	杀菌彻底, 货架期长	通常会影响到食品的品质及风味	低酸性食品及罐头类食品	/	[32]
热杀菌	杀菌效果良好, 处理时间短, 降低了温度对食品品质和风味的影响	对应用目标的选择性高, 通常要求目标物粒径低于 1 cm; 影响蛋白质结构, 限制人体吸收	流体和半流体食品	挥发性物质含量降低 15.4%、10.9%和 10.1% (110 °C、120 °C 和 135 °C 分别处理 2 s) 壬醛、3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛和香叶基丙酮含量降 74.4%、94.4%和 63.9% (126 °C、15 s)	[33] [36] [38] [95]
微波加热	加热速度快, 效率高	杀菌机制尚不清晰, 杀菌效果有限; 应用目标水分含量不能过高	应用于食品杀菌、保鲜、辅助提取	整体风味略带酸味 (180 s, 3 kW)	[43] [44] [45] [96]
HHP	杀菌效果好, 可以有效保留食品的原有风味	设备昂贵; 对包装材料要求高 (防水耐压)	果蔬汁、肉及肉制品、乳及乳制品	己醛、(E)-2-壬烯醛、(Z)-2-壬烯醇、香叶基丙酮上升 69.0%、12.3%、10.4% 和 91.0% (600 MPa、60 min); 醛类物质含量显著增加 (400 MPa、20 min); 己醛和(E)-2-己烯醛含量均有所上升 (600 MPa、5 min)	[38] [53] [54] [97]
非热杀菌	能耗低, 适用范围广; CO ₂ 无毒无害无味、造价低廉, 材料来源广泛;	杀菌机理不明确, 难以精准控制工艺参数; CO ₂ 具有酸效应	液体食品	多数风味物质含量下降, 己醛、(Z)-2-壬烯醛、(E)-2-壬烯醇、壬醛、(E,Z)-2,6-壬二烯醇、香叶基丙酮等含量上升 (30 MPa、60 min)	[60] [98]
超声波处理	安全性高, 营养损失少	杀菌效果有限, 多作为辅助杀菌手段	矿泉水、牛奶、酱油等液体产品	西瓜汁在味道、风味和整体可接受度高于热处理 (26 kHz 的频率、50% 的振幅、80 W 的功率); 避免了蒸煮等异味的产生 (120W、2 min、ClO ₂ 添加量为 77 mg/L)	[67] [68] [99]

续表 2

杀菌方式	优点	缺点	主要应用	对西瓜汁风味的影响	参考文献
辐照杀菌	操作简单, 无残留, 成本低	辐照射线穿透力较弱, 杀菌效果有限; 高剂量的辐照会影响人体健康	食品生产场所、食品包装及食品的表面杀菌	总醛含量无明显差异, 总酮含量升高 (40 mJ·cm ⁻² 的 UV-C), 总醛含量降为 64.9%, (E,Z)-2,6-壬二烯醛和癸醛含量分别降低了 36.22% 和 33.88% (120 mJ·cm ⁻² 的 UV-C); 2-甲基丁酸乙酯、(E)-3-己烯基乙酸酯、2-甲基丙醛含量降低, 2-甲基-1-丁醇、(E)-2-戊二烯、苯甲醇未检出 (5 kGy 的 γ 射线)	[76] [77] [100]
非热杀菌				己醛、(E)-2-壬烯醛、壬醛、甲基庚烯酮和香叶基丙酮的浓度上升了 20% 左右 (1727 μ s 的处理时间, 4 μ s 的两极脉冲和 188 Hz 的电场频率); 庚醛含量上升 (11 kV/cm, 175 kJ/kg); 整体感官区别不大 (35 kV/cm, 1 682 μ s, 193 Hz 和 4 μ s)	[53] [83] [84] [101] [102]
HIPEF	操作简便、低能耗、杀菌时间极短	设备昂贵、难以工业化	果蔬汁、牛奶和红酒等液体食品、肉制品、鲜切水果、紫菜和茶叶等固体食品		
膜技术	操作简单、能耗少、效率高、无二次污染、可以有效保留原有风味	膜易堵塞、易污染, 多数膜寿命较低	果汁、乳制品、油脂、调味品及食品中功能性成分的提取	保留了西瓜原有风味和品质 (FO)	[92] [103] [104]

3 西瓜汁中风味保留的改良手段

相比于传统的热加工技术, 新型热加工技术及非热加工技术虽然在较大程度上保留了西瓜的原有风味, 但这些加工技术仍存在着一定缺陷。如微波加热会导致西瓜汁发酸, 超高压和高压脉冲电场的成本过高, 经辐照杀菌后的西瓜汁会产生辐照味道, 超声波处理的西瓜汁感官虽然与鲜榨西瓜汁无明显区别, 但是杀菌效果有限, 高压二氧化碳也会一定程度上破坏西瓜汁的原有风味。因此需要在现有的技术基础上对西瓜汁的加工方式进行工艺优化, 以达到改良风味的效果。

3.1 抑制异味的产生

为了抑制异味的产生, 可以在加工过程中添加抗氧化物质, 这些抗氧化物质会在一定程度上避免风味物质氧化为异味物质。吕真真等^[105]在西瓜榨汁过程中添加维生素 C (Vitamin C, Vc), 并比较了经热处理后对照组及添加组中风味物质的含量。研究发现, Vc 添加组的(E,Z)-2,6-壬二烯醇和(E)-3-壬烯醇含量明显高于未添加组。孙钰清等^[106]研究了儿茶素、染料木黄酮、黄豆苷元、海藻多酚及邻苯三酚对热处理甜瓜汁挥发性异味的抑制作用, 发现这些多酚物质会在不同

程度上抑制热处理甜瓜汁的异味, 其中儿茶素的抑制效果最佳, 此外不同多酚会协同抑制热处理甜瓜汁中的异味。

3.2 异味的去除

在加工完成后使用吸附剂去除异味也不失为一种有效的方法。Yang 等^[107]以 β -环糊精、黄原胶、羧甲基纤维素钠和糖/酸吸附剂来去除热加工西瓜汁的异味。研究表明, β -环糊精能有效去除热处理西瓜汁中的异味化合物, 使热处理西瓜汁中的异味物质, 如癸醇、辛醇、(E)-2-辛醇和(E)-2-癸醇的浓度分别降低了 50.82%、22.81%、36.43% 和 28.19%。

3.3 降低灭菌条件

在较高强度的灭菌条件下, 会使西瓜汁中风味物质损失的风险增大, 因此可以通过添加一些天然的抗菌物质来降低灭菌条件。Tchuenchieu 等^[108]使用了一种天然的抗菌药物 (香芹酚), 提高了在温和条件下的灭菌效率。西瓜汁经 55 °C 处理 5 min 后, 大肠杆菌数量减少了 0.58~3.73 log。按 30 mL/L 的比例加入香芹酚再进行同样条件的热处理后, 大肠杆菌数量减少了 1.92~4.33 log。Siddiqua 等^[109]研究了两种天然植物油 (肉桂代酯和丁香油) 单独或组合使用的抗菌活性,

结果显示两种精油均表现出抑菌作用,而且组合使用的抑菌效果更强,可以有效抑制食品模拟系统中的食源性病原体以及西瓜汁中的天然污染物。

此外, Liu 等^[110]发现加工过程中温度、pH 值、氧气浓度和光照也会对西瓜汁的质量造成影响,因此在加工过程中创造合适的加工条件是必要的。最近,一种新的食品保存方法-高压储存(Hyperbaric Storage, HS)正在引起研究者的广泛兴趣,HS 使用低压和中压(25~220 MPa),可在室温而非冷藏的条件下保藏食品^[111]。据 Álvaro 等^[112]报道,在低于室温(15℃)的温度条件下,50~75 MPa 的 HS 可将西瓜汁的保质期延长至 58 d。

4 展望

作为世界上西瓜第一种植国和生产国,我国西瓜总产量占比超过全球总产量的 60%,因此西瓜汁的工业化对于我国的经济的发展具有举足轻重的意义。但在西瓜汁工业化的道路上,依旧面临着巨大的挑战:1)巴氏杀菌会在很大程度上破坏西瓜汁原有的风味,HHP 和 HIPEF 设备昂贵、成本较高,辐射杀菌和超声波处理杀菌效果有限,HPCD 和微波加热杀菌机制尚不明确。2)西瓜作为一种热敏性水果,在以往的认识中,高温会使西瓜产生蒸煮味,但是有部分学者认为高温瞬时灭菌对西瓜的风味影响不大(加工时间短)。同时,西瓜的热变临界温度虽已知晓,但是热变临界时间点却还未明确。3)目前有关西瓜汁的研究整体不足,且大多忽视了西瓜汁在加工过程中风味的变化。

针对上述问题,在今后的研究中应该注重以下方面:1)开发新型杀菌设备,降低能耗,控制成本;进一步研究不同杀菌技术的杀菌机理,确定最佳工艺参数;联合不同杀菌技术,在保障品质及风味的基础上提高杀菌效率。2)研究西瓜在不同热变温度下的热变时间,确定西瓜的热变临界时间点。3)在西瓜研究过程中注重风味的变化,并探究其变化机理,为工业生产提供理论依据。

参考文献

- [1] 张希宁,胡宝贵.中国西瓜文化探索[J].农学学报,2020,10(5): 72-76.
- [2] 联合国粮农组织.粮食与农业数据[EB/OL].<http://www.fao.org/faostat/en>,2022-1-15.
- [3] 国家统计局.国家统计局数据发布库[EB/OL].<http://data.stats.gov.cn>,2022-5-10.
- [4] 袁云霞,于慧春,吴昊.西瓜椰果粒酸奶的研制[J].中国乳品工业,2020,48(8):5.

- [5] Naz A, Butt M S, Sultan M T, et al. Watermelon lycopene and allied health claims [J]. Excli Journal, 2014, 13(5): 650-660.
- [6] Wan M, Saad M, Shafinaz N, et al. Identification and quantification of fructose, glucose and sucrose in watermelon peel juice (Pengenalan dan Pengkuantitian Fruktosa, Glukosa dan Sukrosa di dalam Jus Kulit Tembikai) [J]. Malaysian Journal of Analytical Sciences, 2020, 24(3): 382-389.
- [7] Lemos L T, Ribeiro A C, Delgadillo I, et al. Preservation of raw watermelon juice up to one year by hyperbaric storage at room temperature [J]. LWT - Food Science and Technology, 2020, 117: 108695.
- [8] Lee B J, Ting A S Y, Thoo Y Y. Impact of ozone treatment on the physico-chemical properties, bioactive compounds, pectin methylesterase activity and microbiological properties of watermelon juice [J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 59(3): 979-989.
- [9] Aguilo-Aguayo I, Soliva-Fortuny R, Martin-Belloso O. Avoiding non-enzymatic browning by high-intensity pulsed electric fields in strawberry, tomato and watermelon juices [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 92(1): 37-43.
- [10] 魏利军,王菊侠,侯丽芳,等.西瓜汁热变性的研究及其解决方法探讨[J].食品工程,2013,2:40-42,52.
- [11] Santos M D, Queiros R P, Fidalgo L G, et al. Preservation of a highly perishable food, watermelon juice, at and above room temperature under mild pressure (hyperbaric storage) as an alternative to refrigeration [J]. LWT - Food Science and Technology, 2014, 62(1): 901-905.
- [12] Amncio A F A, Mar J M, Santos S F, et al. Non-thermal combined treatments in the processing of acai (*Euterpe oleracea*) juice [J]. Food Chemistry, 2018, 265(4-5): 57.
- [13] Bhattacharjee C, Saxena V K, Dutta S. Novel thermal and non-thermal processing of watermelon juice [J]. Trends in Food Science and Technology, 2019, 93.
- [14] Genthner E R. Identification of key odorants in fresh-cut watermelon aroma and structure-odor relationships of cis, cis-3,6-nonadienal and ester analogs with cis, cis-3,6-nonadiene, cis-3-nonene and cis-6-nonene backbone structures [D]. Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2010.
- [15] Aganovic K, Grauwet T, Siemer C, et al. Headspace fingerprinting and sensory evaluation to discriminate between traditional and alternative pasteurization of watermelon juice [J]. European Food Research and Technology, 2016, 242(5): 787-803.
- [16] Xisto A L R P, Boas E V D V, Nunes E E, et al. Volatile

- profile and physical, chemical, and biochemical changes in fresh cut watermelon during storage [J]. Food Science and Technology, 2012.
- [17] Kyriacou M C, Leskovar D I, Colla G, et al. Watermelon and melon fruit quality: The genotypic and agro-environmental factors implicated [J]. Scientia Horticulturae, 2018, 234: 393-408.
- [18] Yajima I, Sakakibara H, Ide J, et al. Volatile flavor components of watermelon (*Citrullus vulgaris*) [J]. Agricultural and Biological Chemistry, 1985, 49(11): 3145-3150.
- [19] Beaulieu J C, Lea J M. Characterization and semiquantitative analysis of volatiles in seedless watermelon varieties using solid-phase microextraction [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(22): 7789.
- [20] Kemp T R, Knavel D E, Stoltz L P, et al. 3,6-Nonadien-1-ol from *Citrullus vulgaris* and *Cucumis melo* [J]. Phytochemistry, 1974, 13(7): 1167-1170.
- [21] Kemp T R. Identification of some volatile compounds from *Citrullus vulgaris* [J]. Phytochemistry, 1975, 14(12): 2637-2638.
- [22] Tang X W, He H J, Liu Y, et al. Identification of aroma compounds in watermelon juice by SPME-GCMS [J]. Acta Horticulturae, 2012, 944: 183-191.
- [23] Palma-Harris C, Mcfeeters R F, Fleming H P. Fresh cucumber flavor in refrigerated pickles: comparison of sensory and instrumental analysis [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(17): 4875-7.
- [24] Liu Y, He C, Song H L. Comparison of fresh watermelon juice aroma characteristics of five varieties based on gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry [J]. Food Research International, 2018, 107(5): 119-129.
- [25] 杨帆,陈尔豹,牛晓媛,等.GC-O-MS 分析热处理前后西瓜汁挥发性风味成分[J].食品科学技术学报,2020,38(3):35-42.
- [26] Aboshi T, Musya S, Sato H, et al. Changes of volatile flavor compounds of watermelon juice by heat treatment [J]. Bioscience Biotechnology and Biochemistry, 2020, 84: 2157-2159.
- [27] 何聪聪,刘梦雅,刘建彬,等.SPME 和 SAFE 结合 GC-O-MS 分析鲜榨西瓜汁挥发性香气成分[J].食品工业科技,2014, 35(2):49-53,58.
- [28] L J van Gemert. Odour Thresholds [M]. The Netherlands: Oliemans Punter and Partners BV, 2011: 1-486
- [29] 赵璐瑶,王黎明,王婧,等.基于 GC-MS 的大米挥发组分研究进展[J].中国粮油学报,2023,38(4):189-194.
- [30] 刘斌善,魏晓明,邵丹青,等.GC-MS-O 结合 OAV 表征烧麦中关键香气成分及其在储存过程中的变化情况[J/OL].食品科学:1-15[2022-12-03].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20221020.1420.042.html
- [31] Yang F, Liu Y, Wang B, et al. Screening of the volatile compounds in fresh and thermally treated watermelon juice via headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry and comprehensive two-dimensional gas chromatography-olfactory-mass spectrometry analysis - Science Direct [J]. LWT - Food Science and Technology, 2021, 137(1):12.
- [32] 田瑾,罗潇潇,马娜,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.
- [33] 王潇栋,孔阳芷,张艳玲,等.杀菌技术的作用机制及在食品领域中的应用[J].中国酿造,2022,41(2):1-8.
- [34] 姬中伟,衡洋洋,周志磊,等.超高温瞬时杀菌对苏派黄酒风味物质的影响[J].食品与发酵工业,2022,10:16-21.
- [35] LI X, Farid M. A review on recent development in non-conventional food sterilization technologies [J]. Journal of Food Engineering, 2016, 182(8): 33-45.
- [36] Wang Y, Guo X, Ma Y, et al. Effect of ultrahigh temperature treatment on qualities of watermelon juice [J]. Food Science and Nutrition, 2018, 6(3): 594-601
- [37] Wang Y, Li W, Yue M, et al. Effect of thermal treatments on quality and aroma of watermelon juice [J]. Journal of Food Quality, 2018, 2018: 1-7.
- [38] Liu Q, Huang G, Ma C, et al. Effect of ultra-high pressure and ultra-high temperature treatments on the quality of watermelon juice during storage [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(9): 15723.
- [39] 杨潇,刘野,胡蝶,等.热加工西瓜汁关键异味成分的初步鉴定[J].食品工业科技,2019,40(5):219-224.
- [40] 张军凯,包青平,孙志锋,等.食品加工新型杀菌技术研究进展[J].食品安全质量检测学报,2017,8(8):3099-3103.
- [41] Aghajanzadeh S, Ziaifar A M, Verkerk R. Effect of thermal and non-thermal treatments on the color of citrus juice: A review [J/OL]. Food Reviews International, [2023-07-11].
- [42] 付婷婷,覃小丽,刘雄.食品的微波加工研究新进展[J].中国粮油学报,2020,35(4):8.
- [43] Cinquanta L, Albanese D, Cuccurullo G, et al. Effect on orange juice of batch pasteurization in an improved pilot-scale microwave oven [J]. Journal of Food Science, 2010, 75(1): E46-50.
- [44] Vega-Miranda B, Santiesteban-López N A, López-Malo A, et al. Inactivation of *Salmonella typhimurium* in fresh

- vegetables using water-assisted microwave heating [J]. Food Control, 2012, 26(1): 19-22.
- [45] 毛雪杰,吴劲锋,李晓伟,等.微波技术对鲜榨西瓜汁杀菌效果的影响分析[J].中国农机化学报,2022,43(1):109-115.
- [46] Fwm A, Kms B, Jl A, et al. Effect of continuous ultra-sonication on microbial counts and physico-chemical properties of blueberry (*Vaccinium corymbosum*) juice – Science Direct [J]. LWT - Food Science and Technology, 2015, 60(1): 563-570.
- [47] Ks A, Klb C, Mm D, et al. Effect of high-pressure processing on colour, phytochemical contents and antioxidant activities of purple waxy corn (*Zea mays* L. var. *ceratina*) kernels - Science Direct [J]. Food Chemistry, 2018, 243: 328-337.
- [48] 李立,孙智慧,苗卿华,等.超高压加工技术在食品工业中应用的研究进展[J].食品工业科技,2021,42(6):337-342.
- [49] Pita-Calvo C, Guerra-Rodríguez E, Saraiva J A, et al. High-pressure processing before freezing and frozen storage of European hake (*Merluccius merluccius*): Effect on mechanical properties and visual appearance [J]. Zeitschrift Fur Lebensmittel Untersuchung Und Forschung A, 2018, 244(3): 423-431.
- [50] 蓝蔚青,张炳杰,谢晶.超高压联合其他保鲜技术在水产品中应用的研究进展[J].高压物理学报,2022,36(2):195-202.
- [51] 甄宗圆,李志杰,梁迪,等.超高压技术在肉类杀菌及品质改善中的应用进展[J].现代食品科技,2021,37(8):350-356,374.
- [52] Hwh A, Sjw A, Jkl B, et al. Current status and future trends of high-pressure processing in food industry - Science Direct [J]. Food Control, 2017, 72: 1-8
- [53] 刘野,赵晓燕,胡小松,等.超高压对鲜榨西瓜汁杀菌效果和风味的影响[J].农业工程学报,2011,27(7):370-376.
- [54] Aganovic K, Grauwet T, Siemer C, et al. Headspace fingerprinting and sensory evaluation to discriminate between traditional and alternative pasteurization of watermelon juice [J]. European Food Research and Technology, 2016, 242(5): 787-803.
- [55] 包洪亮,马永杰,王瑞杰,等.超高压对西瓜汁香气相关酶的活性影响研究[J].中国果菜,2021,41(11):20-25.
- [56] 柳青.超高压技术对西瓜汁品质影响的研究[D].晋中:山西农业大学,2015.
- [57] 牛力源,张艺林,刘静飞,等.高压二氧化碳在肉品杀菌保鲜中的应用研究进展[J].食品工业科技,2022,21:471-179
- [58] Nakamura K, Enomoto A, Fukushima H, et al. Disruption of microbial cells by the flash discharge of high-pressure carbon dioxide [J]. Journal of the Agricultural Chemical Society of Japan, 2014, 58(7): 1297-1301.
- [59] 赵凤.高压二氧化碳诱导 *Escherichia coli* O157:H7 形成活性的非可培养状态的机制研究[D].北京:中国农业大学,2014.
- [60] 刘野,赵晓燕,邹磊,等.高压二氧化碳对鲜榨西瓜汁杀菌效果和风味的影响[J].食品科学,2012,33(3):82-88.
- [61] 侯志强,黄绪颖,王永涛,等.高压二氧化碳处理对鲜切哈密瓜微生物与品质的影响[J].食品科学,2018,39(7):174-180.
- [62] 吕瑞玲,丁甜,周建伟,等.超声波及其联合技术灭活细菌芽孢的研究进展[J].食品科学,2022,43(1):278-284.
- [63] Silva E K, Arruda H S, Pastore G M, et al. Xylooligosaccharides chemical stability after high-intensity ultrasound processing of prebiotic orange juice [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 63: 8.
- [64] Jiménez-Sánchez C, Lozano-Sánchez J, Segura-Carretero A, et al. Alternatives to conventional thermal treatments in fruit-juice processing. Part I: Techniques and applications [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 57(3): 501-523.
- [65] 郑炯,龚瑜,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.
- [66] Ykm S. Sensory, physicochemical, microbiological and bioactive properties of red watermelon juice and yellow watermelon juice after ultrasound treatment [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2020, 14(3): 1417-1426.
- [67] 张仲阳,张向超,俞龙泉,等.超声波协同 ClO_2 对西瓜汁灭菌效果的影响[J].食品工业科技,2014,35(7):172-177.
- [68] Yang Fan, Shi C H, Yan L C, et al. Low-frequency ultrasonic treatment: A potential strategy to improve the flavor of fresh watermelon juice [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 91.
- [69] 樊丽华,侯福荣,马晓彬,等.超声波及其辅助灭菌技术在食品微生物安全控制中的应用[J].中国食品学报,2020,20(7): 326-336.
- [70] Gayan E, Serrano M J, Raso J, et al. Inactivation of *Salmonella enterica* by UV-C light alone and in combination with mild temperatures [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2012, 78(23): 8353-8361.
- [71] 胡顺爽,邵海燕,吴伟杰,等.响应面法优化草莓鲜榨汁紫外杀菌工艺[J].食品科学,2018,39(22):227-234.
- [72] 范振华.响应面法优化草莓榨汁紫外杀菌工艺的研究与应用[J].大众标准化,2020,17:107-108.
- [73] Mccoll N, Auvinen A, Kesminiene A, et al. European code against cancer 4th edition: Ionising and non-ionising radiation and cancer [J]. Cancer Epidemiology, 2015, 39(Suppl.1):S93-S100.
- [74] 翁玲,刘锦芳,高彦祥,等.饮料包装材料灭菌技术研究进展

- [J]. 饮料工业, 2021, 24(2): 67-72.
- [75] 张良, 高静压与温度协同杀灭芽孢的效果与机制研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [76] Pendyala B, Patras A, Ravi R, et al. Evaluation of UV-C irradiation treatments on microbial safety, ascorbic acid, and volatile aromatics content of watermelon beverage [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2020, 13(1): 101-111.
- [77] Botros M S. Impact of γ -Irradiation on Aroma Flavour, Bio-Active Constituents and Quality Attributes of Water Melon Juice [J]. *Journal of Plant Pathology and Microbiology*, 2014, 5(2): 1-9.
- [78] 骆航, 王文渊, 尹素娟, 等. 响应面法优化高压脉冲电场提取火棘果活性成分[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(2): 373-380.
- [79] Simunek M, Jambrak A R, Petrovic M, et al. Aroma profile and sensory properties of ultrasound-treated apple juice and nectar [J]. *Food Technology and Biotechnology*, 2013, 51(1): 101-111.
- [80] Ferrario M, Alzamora S M, Guerrero S. Study of the inactivation of spoilage microorganisms in apple juice by pulsed light and ultrasound [J]. *Food Microbiology*, 2015, 46: 635-642.
- [81] Belgheisi S, Kenari R E. Improving the qualitative indicators of apple juice by chitosan and ultrasound [J]. *Food Science and Nutrition*, 2019, 7(4): 1214-1221.
- [82] Barba F J, Pamiakov O, Pereira S A, et al. Current applications and new opportunities for the use of pulsed electric fields in food science and industry [J]. *Food Research international*, 2015, 77(NOV.PT.4): 773-798.
- [83] Aguilo-Aguayo I, Montero-Calderon M, Soliva-Fortuny R, et al. Changes on flavor compounds throughout cold storage of watermelon juice processed by high-intensity pulsed electric fields or heat [J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 99(1): 43-49.
- [84] Mosqueda-Melgar J, Raybaudi-Massilia R M, Martin-Belloso O. Combination of high-intensity pulsed electric fields with natural antimicrobials to inactivate pathogenic microorganisms and extend the shelf-life of melon and watermelon juices [J]. *Food Microbiology*, 2008, 25(3): 479-491.
- [85] 叶丽珠, 龚雪梅, 陈锦权. PEF 处理对冷冻浓缩西瓜汁品质影响的研究[J]. *贵州大学学报(自然科学版)*, 2011, 28(6): 52-58.
- [86] Bhattacharjee C, Saxena V K, Dutta S. Fruit juice processing using membrane technology: A review [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2017, 43: 136-153.
- [87] Bhattacharjee C, Saxena V K, Dutta S. Fruit juice processing using membrane technology: A review [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2017, 43: 136-153.
- [88] Milczarek R R, Olsen C W, Sedej I. Quality of watermelon juice concentrated by forward osmosis and conventional processes [J]. *Processes*, 2020, 8(12): 1568.
- [89] 郭浩, 黄钧, 周荣清, 等. 膜分离技术在水果加工中的研究进展[C]//中国化工学会第五届生物化工技术创新及产业发展研讨会暨第二届生物化工青年学者论坛. 2018.
- [90] Trishitman D, Negi P S, Rastogi N K. Concentration of pomegranate juice by forward osmosis or thermal evaporation and its shelf-life kinetic studies [J]. *Food Chemistry*, 2023, 399(Jan.15): 1-9.
- [91] 孙慧, 林强, 李佳佳, 等. 膜分离技术及其在食品工业中的应用[J]. *应用化工*, 2017, 46(3): 559-562, 568.
- [92] Milczarek R R, Sedej I. Aroma profiling of forward-osmosis watermelon juice concentrate and comparison to fresh fruit and thermal concentrate [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2021, 151(1-2): 112147.
- [93] 刘显琦, 丁瑞雪, 毛晋春, 等. 不同贮藏温度对巴氏杀菌乳贮藏期间品质变化的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2019, 50(3): 351-357.
- [94] 罗欢, 张云菲, 余汶君, 等. 不同贮藏温度对几种常见市售巴氏杀菌乳中微生物的影响[J]. *内江科技*, 2018, 39(1): 129-128.
- [95] 戴若平, 王霞. 食品加工中的杀菌技术应用研究[J]. *食品安全导刊*, 2022(3): 130-132.
- [96] 付婷婷, 覃小丽, 刘雄. 食品的微波加工研究新进展[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(4): 187-194.
- [97] 锁冠文, 周春丽, 苏伟, 等. 超高压在果蔬、肉类、乳制品保鲜中的应用[J]. *食品工业*, 2021, 42(6): 338-342.
- [98] Sheng L, Zu L, Ma M. Study of high pressure carbondioxide on the physicochemical, interfacial and rheological properties of liquid whole egg [J]. *Food Chemistry*, 2021, 337: 127989
- [99] 岳军. 食品加工中热杀菌技术及非热杀菌技术探析[J]. *中国食品*, 2021, 15: 114-115.
- [100] 王潇栋, 孔阳芷, 张艳玲, 等. 杀菌技术的作用机制及在食品领域中的应用[J]. *中国酿造*, 2022, 41(2): 1-8.
- [101] 齐梦圆, 刘卿妍, 石素素, 等. 高压电场技术在食品杀菌中的应用研究进展[J]. *食品科学*, 2022, 43(11): 284-292
- [102] 王淑杰, 赵子瑞, 李文龙, 等. 高压脉冲电场技术在食品加工及保藏中的应用[J]. *农业工程*, 2022, 12(2): 63-67.
- [103] 魏诗瑶, 郝丹. 膜分离技术在果汁加工中的应用[J]. *科技创新与应用*, 2015, 23: 94.
- [104] 罗世龙, 张中, 韩坤坤, 等. 膜分离技术在食品工业中的应用

- 研究进展[J].安徽农业科学,2021,49(6):43-45.
- [105] 吕真真,路绪强,刘慧,等.热加工结合添加抗坏血酸对酸味西瓜制汁品质的影响[J].果树学报,2021,38(12):2166-2177.
- [106] 孙钰清,孔凡玉,吴继红,等.多酚对热处理甜瓜汁挥发性关键异味组分的抑制作用[J].食品科学,2020,41(16):21-28.
- [107] Yang X, Yang F, Liu Y, et al. Off-flavor removal from thermal-treated watermelon juice by adsorbent treatment with β -cyclodextrin, xanthan gum, carboxymethyl cellulose sodium, and sugar/acid [J]. LWT - Food Science and Technology, 2020, 131: 109775.
- [108] Tchuenchieu A, Ngang J E, Servais M, et al. Effect of low thermal pasteurization in combination with carvacrol on color, antioxidant capacity, phenolic and vitamin C contents of fruit juices [J]. Food Science and Nutrition, 2018, 6(4): 736-746.
- [109] Siddiqua S, Anusha B A, Ashwini L S, et al. Antibacterial activity of cinnamaldehyde and clove oil: effect on selected foodborne pathogens in model food systems and watermelon juice [J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(9): 5834-5841.
- [110] Liu Y, Song H L, Yang X, et al. Influence of multiple environmental factors on the quality and flavor of watermelon juice [J]. RSC Advances, 2019, 9(27): 15289-15297.
- [111] Pinto C, Moreira S A, Fidalgo L G, et al. Shelf-life extension of watermelon juice preserved by hyperbaric storage at room temperature compared to refrigeration [J]. LWT - Food Science and Technology, 2016, 72: 78-80.
- [112] Lemos A T, Ribeiro A C, Fidalgo L G, et al. Extension of raw watermelon juice shelf-life up to 58 days by hyperbaric storage [J]. Food Chemistry, 2017, 231(Sep.15): 61-69.