

# 微波杀菌对果汁品质的影响

韩春然, 薛清卓, 遇世友\*, 王鑫, 黎晨晨

(哈尔滨商业大学食品工程学院, 哈尔滨 150076)

**摘要:** 微波杀菌作为一种新型的杀菌技术, 其利用微波的热效应和非热效应的双重作用抑制或消除微生物, 不仅能够提高果汁的灭菌速率, 还能有效地提升果汁的安全性、稳定性和新鲜度, 使果汁的品质与原汁更接近, 因而受到人们广泛的关注。目前, 微波杀菌是果汁杀菌领域的研究热点, 亦是极具工业化应用前景的杀菌技术之一。因微波参数对果汁的杀菌效果及品质存在较大的影响, 所以在选择微波参数时需要针对不同的果汁通过试验确定最优的杀菌方案。本文介绍了微波杀菌的机制, 综述了微波杀菌对果汁微生物的影响, 微波频率、微波功率、微波时间对微波杀菌效果的影响及微波杀菌对果汁理化指标和感官指标的影响, 并对微波杀菌未来发展趋势进行了展望, 以期为后续微波杀菌的技术发展提供参考。

**关键词:** 微波杀菌; 果汁; 杀菌效果; 理化指标; 感官指标

## Effects of microwave sterilization on fruit juice quality

HAN Chun-Ran, XUE Qing-Zhuo, YU Shi-You\*, WANG Xin, LI Chen-Chen

(College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150076, China)

**ABSTRACT:** As a new type of sterilization technology, microwave sterilization uses the dual effects of microwave thermal effect and non-thermal effect to inhibit or eliminate microorganisms, which can not only improve the sterilization rate of fruit juice, but also effectively improve the safety, stability and freshness of fruit juice. The quality of fruit juice is closer to the original juice, so it has received widespread attention. At present, microwave sterilization is a research hotspot in the field of fruit juice sterilization, and it is also one of the sterilization technologies with great industrial application prospects. Because microwave parameters have a great influence on the sterilization effect and quality of fruit juice, it is necessary to determine the optimal sterilization plan for different fruit juices through experiments when selecting microwave parameters. This paper introduced the mechanism of microwave sterilization, and reviewed the effects of microwave sterilization on fruit juice microorganisms, the effects of microwave frequency, microwave power, and microwave time on the effect of microwave sterilization and the effects of microwave sterilization on physical and chemical indicators and sensory indicators of juice, and prospected the future development trend of microwave sterilization, so as to provide a reference for the subsequent technological development of microwave sterilization.

**KEY WORDS:** microwave sterilization; fruit juice; sterilization effect; physical and chemical indexes; sensory index

基金项目: 黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划项目(UNPYSCT-2018136)、黑龙江省应用技术与开发计划项目(GA20B301)

Fund: Supported by the Heilongjiang Province Ordinary Undergraduate Colleges and Universities Youth Innovative Talents Training Program (UNPYSCT-2018136), and the Heilongjiang Province Applied Technology Research and Development Program (GA20B301)

\*通信作者: 遇世友, 博士, 讲师, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: davidyuhit@163.com

\*Corresponding author: YU Shi-You, Ph.D, Lecturer, Harbin University of Commerce, No.1, Xuehai Street, Songbei District, Harbin 150076, China. E-mail: davidyuhit@163.com

## 0 引言

随着人们生活水平的提高,其对果汁品质的要求也愈加增高。果汁在加工和贮藏过程中易受到微生物的污染,严重影响果汁的安全性,因此杀菌处理是果汁在加工过程中必不可少的一个单元操作。传统的热杀菌方式会导致果汁褐变以及热敏性营养物质大量损失<sup>[1]</sup>,难以满足消费者的需求。而微波、超高压、辐照、高压脉冲电场等新型杀菌方式不仅能有效地杀灭果汁中的微生物,延长果汁的货架期,还能保留果汁中的营养成分及活性物质,更接近于原汁的品质<sup>[2]</sup>。其中,微波杀菌在新型杀菌方式中是唯一获得美国食品药品监督管理局(Food and Drug Administration, FDA)许可的,可用于长货架期食品工业化生产的杀菌技术<sup>[3]</sup>,并且在微波杀菌热效应和非热效应的双重作用下,果汁在杀菌过程中具有加热速度快、杀菌效果好、能耗低等优势,因此微波杀菌成为近年来国内外研究的热点<sup>[4]</sup>。本文针对微波杀菌对果汁微生物的影响、微波参数对杀菌效果的影响及微波杀菌对果汁理化指标和感官指标的影响进行了综述,并探讨了微波杀菌技术未来的发展趋势,为日后果汁微波杀菌工业化进程提供参考。

## 1 微波杀菌概述

微波是频率在 300 MHz~300 GHz 的电磁波,其对应的波长范围为 1 mm~1 m,家用微波设备的频率一般为 2450 MHz,而工业微波设备的频率通常为 915 或 2450 MHz<sup>[5-6]</sup>。目前,微波杀菌主要分为连续微波杀菌、脉冲微波杀菌、多次快速加热和冷却的微波杀菌,为了避免果汁的二次污染,通常先进行微波杀菌处理,再在无菌的环境下进行罐装封口处理<sup>[7]</sup>。微波在杀菌过程中具有热效应和非热效应的双重作用,微波杀菌的热效应是指在微波加热的过程中,食品中的水分、蛋白质、碳水化合物等极性分子在微波电场的

作用下发生定向移动,将微波能转化成热能,使食品温度升高达到灭菌的效果<sup>[8-9]</sup>。微波杀菌的热效率与物料的形状、介电性能、位置、自身吸收和损失能量的性质等都有关系<sup>[10]</sup>。非热效应是指在微波辐照下,细胞膜的结构和功能发生改变,诱导磷脂双层膜发生不可逆电穿孔,使细胞的通透性增大,细胞内的物质流出,最终导致细胞的生长受到抑制或者死亡<sup>[11-12]</sup>。关于微波非热效应的理论模型有电穿孔、细胞膜破裂、磁场耦合等<sup>[7]</sup>。但由于食品结构的复杂性,微波场对食品中的脂质、维生素、矿物质等物质和食品品质的非热效应影响研究还不够深入,仍需要进一步的深入探索。

## 2 微波杀菌对果汁微生物指标的影响

微生物含量是评价果汁品质的一个重要指标,GB 7101—2015《食品安全国家标准 饮料》中列出了微生物限量要求。ALEXANDROS 等<sup>[13]</sup>研究了微波杀菌和传统热杀菌对番茄汁中微生物含量的影响,主要包括对总活菌、乳酸菌、大肠杆菌、酵母菌及霉菌数的影响,研究表明两种杀菌方式均能有效地杀灭果汁中的微生物,达到国家微生物的限量标准,但微波杀菌对微生物的失活速率高于传统的热杀菌方式。SIGUEMOTO 等<sup>[14]</sup>在研究微波杀菌和常规热处理在苹果汁中大肠杆菌和单核增生李斯特菌失活动力学的影响中发现,微波杀菌对大肠杆菌和单核增生李斯特菌的失活速率高于常规热处理,并认为微波杀菌是常规热处理的一种很有前景的替代方法。微波杀菌对不同果汁中微生物的影响如表 1 所示,可以看出:通常情况下,当微波功率在 600~800 W、杀菌时间在 60~120 s 时,可使果汁达到国家微生物限量要求。在微波杀菌工业化进程中,可以通过增加功率的方式减少杀菌时间,达到快速杀菌的效果。此外,为了开发和利用微波杀菌生产出更高品质的果汁,还要进一步研究不同微生物在不同种类果汁中的失活机制。

表 1 微波杀菌对果汁中微生物的影响  
Table 1 Effects of microwave sterilization on microorganisms in fruit juice

果汁种类	微波功率/W; 微波时间/s	微生物种类	杀菌前微生物含量 /(CFU/mL)	杀菌后微生物含量 /(CFU/mL)	参考文献
南果梨黄秋葵复合汁	750; 120	菌落总数	46000	未检出	[15]
		霉菌和酵母菌	26500	未检出	
苹果汁	700; 60	菌落总数		<1	[16]
	600; 105	大肠杆菌	9 log	7.66 log	[17]
柑桔汁	800; 70	好氧菌	3.75 log	1.24 log	[18]
甘蔗汁	120; 350	菌落总数	6.83 log	未检出	[19]
		霉菌和酵母菌	6.13 log	未检出	

经微波杀菌处理后的果汁,在贮藏过程中也能有效地抑制微生物的生长繁殖。李根等<sup>[20]</sup>研究了微波杀菌和巴氏杀菌对苹果汁品质的影响,研究表明两种杀菌方式均能使果汁达到国家饮料卫生的标准(菌落总数 $\leq 100$  CFU /mL),在贮藏过程中,随着温度的升高,微生物的生长速率不断增加,但经微波处理的果汁微生物增长速率较慢,在 4°C 下贮藏保质期可达 10~11 d,而经巴氏杀菌处理的果汁保质期为 7~8 d。马晓玉等<sup>[21]</sup>研究了巴氏杀菌和微波处理对哈密瓜汁处理后和在贮藏过程菌落总数的变化,研究表明,两种杀菌方式都能有效地杀灭果汁中的微生物,在贮藏 20 d 后,经巴氏杀菌处理的果汁菌落总数是对照组的 41%,而经微波杀菌处理的果汁菌落总数是对照组的 28%,说明微波杀菌能有效地抑制微生物生长,较长时间地保证果汁的品质。主要是因为微波杀菌热效应与非热效应的双重作用,使其对果汁中耐热微生物的杀灭效果优于巴氏杀菌,对果汁中的微生物杀灭的更彻底,减缓了微生物的生长繁殖,进而延长了果汁的保质期。

### 3 微波参数对杀菌效果的影响

#### 3.1 微波频率

在不同微波频率下,单位时间内分子的转动及碰撞次数不同,从而会影响样品的升温速度,导致其杀菌能力不同。微波频率会对样品的介电性能产生一定的影响,介电性能是指在电场作用下,表现出对静电能的储蓄和损耗的性质,通常用介电常数和介质损耗来表示<sup>[22]</sup>。雷玉洁<sup>[23]</sup>研究了菠萝汁在不同频率下的介电特性,在 915 MHz 下,介电常数为 38.95 $\pm$ 1.09、介电损耗因子为 18.92 $\pm$ 0.37,而在 2450 MHz 下,介电常数为 38.25 $\pm$ 1.08、介电损耗因子为 6.68 $\pm$ 0.22。研究表明,随着频率的升高,样品的介电常数和介电损耗因子均降低。样品介电性能的差异影响着样品对微波能的吸收能力。此外,微波频率和样品的介电性能影响着微波对样品的穿透深度,如公式(1)所示<sup>[22]</sup>,微波频率和介电损耗因子越大穿透深度越小。穿透深度的差异影响着微波杀菌的均匀性。HENRIQUE 等<sup>[24]</sup>在研究不同微波频率和温度对紫果浆穿透能力影响时发现,样品在 915 MHz、20~120°C 下微波的穿透深度为 11~29 mm,而在 2450 MHz、20~120°C 下微波的穿透深度为 8~11 mm。研究表明,在 915 MHz 下微波的穿透能力更强,但在 2450 MHz 下微波的穿透深度受温度的影响更小,对样品的加热更均匀。两种微波频率各有利弊,因此在果汁微波杀菌的工业化进程中,可根据实际需求,选择合适的频率,以达到更好的杀菌效果。

$$d_p = \frac{c}{2\pi f \sqrt{2\epsilon' \left[ \sqrt{1+(\epsilon''/\epsilon')^2} - 1 \right]}} \quad (1)$$

式(1)中: $d_p$ 为穿透深度, $c$ 为光速: $3 \times 10^8$  m/s, $f$ 为微波频率(Hz), $\epsilon'$ 为样品介电常数, $\epsilon''$ 为样品介电损耗因子。

#### 3.2 微波功率

微波杀菌过程中,食品在单位时间内吸收的微波能与电场强度即微波功率的关系如公式(2)所示<sup>[25]</sup>,可以看出,食品的升温速度与电场强度的平方成正比,因而电场强度是影响微波杀菌效果的重要因素之一。陈小同<sup>[26]</sup>研究了龙葵汁在不同微波功率下处理 90 s 后菌落总数的变化,研究表明在 4 W/mL 条件下处理检测出菌落总数为 (3.2 $\pm$ 5.6) CFU /mL,在 6 和 8 W/mL 条件下处理,均未检测出菌落总数。李梦丽<sup>[27]</sup>以红树莓果汁为原料,研究了果汁在 3.9、5、7 W/mL 微波条件下处理 2 min 后果汁中菌落总数、霉菌数和酵母菌数的情况。3.9 和 5 W/mL 处理 2 min 后,分别检测出果汁中含有(6.7 $\pm$ 2.9)和(33 $\pm$ 57.7) CFU /mL 的菌落总数,7 W/mL 处理 2 min 后未检出菌落总数;3.9、5、7 W/mL 3 种条件处理 2 min 后均未检测出霉菌和酵母菌。因此,在杀菌时间相同时,可以通过增大微波功率的方式,提高微生物的灭活速率与程度,以达到更好的杀菌效果。

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' E^2 \quad (2)$$

式(2)中: $\rho$ 为食品密度(kg/m<sup>3</sup>), $C_p$ 为食品的比热容[J/(kg·°C)], $T$ 为食品温度(°C), $t$ 为时间(min), $f$ 为微波频率(Hz), $\epsilon_0$ 为真空中介电常数: $8.8534 \times 10^{-12}$  F/m, $\epsilon''$ 为介电损耗因子, $E$ 为电场强度(V/m)。

#### 3.3 微波时间

微波杀菌时间影响着果汁品质的变化和微生物的灭活程度<sup>[28]</sup>。毛雪杰等<sup>[29]</sup>研究了不同杀菌时间对西瓜汁杀菌效果的影响,研究发现杀菌时间为 60 s 时,灭菌率为 36.1%,与对照组(未杀菌)相比微生物含量变化较显著;当杀菌时间为 120 和 180 s 时,微生物含量变化不显著;当杀菌时间为 240 s 时,灭菌率可达 82.8%,已符合国家微生物限量标准;当杀菌时间为 300 s 时,未检测出菌落总数。余秀丽等<sup>[30]</sup>研究了杀菌时间对芒果原浆中菌落总数的影响,研究发现杀菌 30 s 时,菌落总数与未杀菌对照组相比变化不明显,可能是由于微波杀菌时间太短,未达到微生物的致死温度,微生物也没有吸收太多的微波能;当杀菌时间为 60 s 时,菌落总数迅速下降,灭菌率达 99.75%,已符合国家微生物限量标准,此时芒果原浆中热敏性营养成分含量为(20.50 $\pm$ 0.28) mg/hg;当杀菌时间为 120 s 时,未检出菌落总数,此时芒果原浆中热敏性营养成分含量为(15.38 $\pm$ 0.50) mg/hg,综合考虑选择 60 s 作为芒果原浆最佳微波处理时间。说明杀菌时间越长,微生物杀灭的越彻底,杀菌效果越好,但杀菌时间过长,微波的热效应使果汁不断升温,会影响果汁中的热敏性营养成分,因此合理的控制杀菌时间尤为重要。

## 4 微波杀菌对果汁理化指标的影响

### 4.1 微波杀菌对果汁褐变度的影响

#### 4.1.1 微波杀菌对酶促褐变的影响

果汁褐变主要分为酶促褐变和非酶促褐变。酶促褐变主要是指多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)、过氧化物酶(peroxidase, POD)和酚类底物发生反应,使酚类物质氧化成醌类物质,醌类物质进一步发生氧化聚合最终形成褐色色素<sup>[31]</sup>。有研究表明,经微波杀菌后酶的构象发生了改变,使酶的活性降低,抑制了酶促褐变反应的发生<sup>[32]</sup>。微波杀菌对果汁中酶活性的影响如表 2 所示。张婷婷等<sup>[33]</sup>对比了传统热处理和微波两种方式对果汁中多酚氧化酶酶活及褐变指数的影响,果汁经传统热处理后的酶活为(488.57±56.20) U/L,褐变指数为 75.10±4.35,而经微波处理后的酶活为(285.71±4.37) U/L,褐变指数为 39.15±1.56,研究发现酶的活性与褐变指数呈正相关,且与传统的杀菌方式相比,微波杀菌可以有效地降低酶的活性和果汁的褐变程度。此外,HENRIQUE 等<sup>[24]</sup>和 SIGUEMOTO 等<sup>[37]</sup>在研究微波杀菌对浆果和苹果汁中多酚氧化酶和过氧化物酶失活动力学的影响中同样发现,与常规热杀菌方式相比,微波杀菌在加工过程中更容易达到酶的失活水平。因此,可以采用微波杀菌的方式代替传统的热杀菌,加快酶的失活速率,减少酶促褐变的发生。

表 2 微波杀菌对果汁中酶活性的影响

Table 2 Effects of microwave sterilization on enzyme activity in fruit juice

研究对象	微波条件 功率/W; 时间/s	研究结果	参考文献
PPO(苹果)	800; 140	酶活力为 (285.71±4.37) U/L	[33]
PPO(葡萄)	500; 480	酶活力下降 39.58%	[34]
	770; 34	酶残留活性约为 50%	
PPO(桃)	770; 50	酶残留活性约为 5%	[35]
	510; 805	酶残留活性为 15.80%	
POD(番茄)	1640; 300	酶残留活性为 14.03%	[36]
	2700; 160	酶残留活性为 12.26%	

#### 4.1.2 微波杀菌对非酶促褐变的影响

果汁的非酶褐变主要包括抗坏血酸氧化分解反应、多元酚氧化缩合反应、美拉德反应和焦糖化反应<sup>[38]</sup>。不同类型的果汁在灭菌过程中,非酶褐变的主要类型是不同的。XU 等<sup>[39]</sup>发现沙棘汁在杀菌过程中发生的非酶褐变类型主要为抗坏血酸氧化分解反应。PARAVISINI 等<sup>[40-41]</sup>研究发现苹果汁和橙汁的非酶褐变类型主要为多元酚氧化缩合反应和美拉德反应。

辛明等<sup>[42]</sup>研究了不同杀菌方式对龙眼原汁品质的影响,经巴氏杀菌处理后龙眼原汁中总糖含量降低了 13.32%,而经微波杀菌处理后的龙眼原汁总糖含量降低了 11.87%,研究表明微波杀菌比巴氏杀菌对总糖含量影响小,减少了美拉德反应的发生。AMARO 等<sup>[43]</sup>研究了不同温度和时间(70~90℃, 1~180 s)下微波辅助巴氏杀菌橙汁中抗坏血酸的降解动力学,研究表明,采用微波辅助巴氏杀菌橙汁后,抗坏血酸的保留率均高于 85%。与传统的巴氏杀菌相比,微波辅助巴氏杀菌可以更好地保留果汁中抗坏血酸的含量,减少抗坏血酸氧化分解反应,降低非酶促褐变的程度,进而提高果汁的品质。

### 4.2 微波杀菌对果汁活性成分的影响

果汁中的活性成分具有预防疾病等重要的作用。例如:花色苷<sup>[44]</sup>、黄酮<sup>[45]</sup>、单宁<sup>[46]</sup>等具有抗衰老、保护视力、预防冠心病、抑菌消炎、抗肿瘤、预防糖尿病等作用。果汁经微波杀菌和热杀菌处理后,对其中的活性成分具有不同的影响。潘浪<sup>[47]</sup>在研究不同杀菌方式对脐橙全果浊汁品质的影响时发现,与巴氏杀菌相比,微波杀菌能更好地保留脐橙全果浊汁中总酚和总黄酮的含量。CHENG 等<sup>[18]</sup>研究了不同杀菌方式对柑桔汁活性成分的影响,研究发现经传统杀菌处理的柑桔汁酚类物质的保留率为 51.39%,而经微波杀菌处理的柑桔汁酚类物质的保留率为 66.62%。张婷婷等<sup>[48]</sup>和 KUMAR 等<sup>[49]</sup>在研究微波杀菌对苹果汁和柚子汁活性成分的影响时也得出了相似的结论,即微波杀菌能够有效避免活性成分的损失。但施伽等<sup>[50]</sup>在研究微波杀菌对刺梨果汁活性成分的影响时发现,当微波杀菌时间较短时(小于 1 min),维生素 C 和 黄酮含量显著降低,可能是由于微生物杀灭不彻底,其产生的次级代谢物不断消耗维生素 C 和 黄酮等营养成分;当杀菌时间为 2~4 min 时,刺梨果汁中维生素 C 和 黄酮含量相对较高;当杀菌时间持续增加,维生素 C 和 黄酮含量再次降低,说明微波杀菌条件的选择对果汁活性成分具有显著的影响。不同种类果汁具有不同的特性,所需的微波杀菌参数不同,可在实验数据的基础上,建立微波杀菌的数学模型,为不同种类果汁选择最佳的杀菌参数,提高果汁的品质。

经微波杀菌和热杀菌处理后的果汁在贮藏过程中活性成分的变化也不相同。曾小峰等<sup>[51]</sup>研究了血橙汁经微波和热处理两种杀菌方式处理后,在贮藏过程中黄酮、花色苷、抗坏血酸等活性成分的变化,血橙汁经 80℃处理后贮藏 6 周时,总黄酮、花色苷、抗坏血酸分别下降了 5.80%、56.21%、71.53%,而经微波处理后贮藏 6 周时,总黄酮、花色苷、抗坏血酸分别下降了 3.76%、36.95%、50.83%,研究表明在贮藏过程中,经两种方式处理的血橙汁中活性成分均有所下降,但经微波处理的血橙汁中活性成分下降速率较慢,保留率更高。

### 4.3 微波杀菌对果汁抗氧化性的影响

人体在正常代谢中产生的活性氧化剂会对细胞或器官产生破坏性的功能, 最终诱发癌症、动脉粥样硬化、心血管等慢性疾病, 果汁中含有丰富的抗氧化活性物质, 定期摄入有利于降低患慢性疾病的风险<sup>[52-53]</sup>。微波杀菌是通过电磁场效应和生物效应改变微生物细胞膜的通透性, 进而使微生物死亡达到灭菌的效果, 避免了温度过高导致抗氧化活性物质的损失, 可以较好地保留果汁的抗氧化能力<sup>[54]</sup>。

ARHMANDI 等<sup>[36]</sup>研究了传统杀菌方式和微波杀菌对番茄抗氧化活性的影响, 研究表明经传统杀菌方式处理的番茄抗氧化能力下降了约 28%, 而经微波处理的番茄抗氧化能力仅下降了 6%。SIGUEMOTO 等<sup>[55]</sup>研究了常规热处理和微波处理对苹果汁抗氧化活性的影响, 结果表明, 经微波杀菌处理后的苹果汁能更好地保留其抗氧化能力。SAIKIA 等<sup>[56]</sup>利用 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)法测定了菠萝汁经热

杀菌和微波杀菌后的抗氧化活性, 结果表明经传统热杀菌处理后的菠萝汁 DPPH 自由基清除能力为 41.80%, 而经过 600 W 微波杀菌处理后的菠萝汁 DPPH 自由基清除能力为 75.49%。高思美等<sup>[57]</sup>研究了不同杀菌方式对浓缩汁品质的影响, 研究发现经热杀菌处理的浓缩汁 DPPH 自由基清除率为 44.23%, 而经微波处理的浓缩汁 DPPH 自由基清除率为 50.91%。微波杀菌能较好地保持果汁中 DPPH 自由基的清除能力, 使果汁具有较高的抗氧化活性。

### 5 微波杀菌对果汁感官指标的影响

色泽、气味和口感等都是评价果汁好坏的重要感官指标, 果汁感官评价的好坏直接影响着消费者的喜爱程度。所以, 在果汁的加工过程中, 要尽可能地保持果汁的色泽、气味和口感等。表 3 对比了微波杀菌与常规热杀菌对果汁感官品质的影响, 可以看出, 微波杀菌对果汁色泽的影响更小, 且能更好地保留果汁中的香气成分。因此, 微波杀菌在果汁杀菌领域中具有广阔的应用前景。

表 3 微波杀菌与常规热杀菌对果汁感官品质的影响  
Table 3 Effects of microwave sterilization and conventional thermal sterilization on sensory quality of fruit juice

果汁种类	热杀菌温度/°C; 热杀菌时间/min	微波杀菌功率/W; 微波杀菌时间/s	研究结果	参考文献
刺梨汁	80; 25	400; 80	微波杀菌处理的果汁对色泽的影响小于巴氏杀菌处理的果汁	[58]
沙棘果浆	85; 15	400; 240	微波杀菌和热杀菌处理后果汁的色差值 $\Delta E$ 分别为 59.06 和 61.64	[59]
甘蔗汁	90; 1	120; 300	微波杀菌和热杀菌处理后果汁的色差值 $\Delta E$ 分别为 4.76 和 4.22	[19]
柑桔汁	90; 0.5	800; 70	微波杀菌和热杀菌处理后果汁的色差值 $\Delta E$ 分别为 0.61 和 2.69, 香气成分含量分别为 76.1 和 43.97 $\mu\text{g/g}$	[18]
西番莲果汁	85; 15	500; 60	微波杀菌对果汁中香气成分的保留优于巴氏杀菌	[60]

### 6 结束语

近年来, 微波杀菌作为一种新型的杀菌技术, 在杀灭果汁微生物和保持果汁的品质方面均具有良好的效果, 显示了其在果汁杀菌领域中的潜在应用价值, 是果汁巴氏杀菌的一种可行的替代方法。但目前微波杀菌技术仍存在一些不足, 相比于传统巴氏杀菌, 微波杀菌技术主要处于实验阶段, 且在工业化应用中为了提高果汁的生产效率, 通常会采用大功率微波快速加热的方法, 但这将会加剧微波杀菌的不均匀性, 因此为了实现微波杀菌的工业化应用, 研究提高微波杀菌均匀性的方法仍是今后关注的热点。同时, 今后应加大微波杀菌工业化设备研发的力度, 更好地利用微波杀菌热效应与非热效应双重作用的优势, 还应完善果汁在工业生产中的安全卫生标准, 为微波杀菌技术的工业化推广奠定基础。

### 参考文献

- [1] 毕延娣, 王纪华, 田晓琴, 等. 微波杀菌对草莓罐头的杀菌效果研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(17): 4577-4580.  
BI YD, WANG JH, TIAN XQ, *et al.* Sterilization effect of microwave on canned strawberry [J]. *J Food Saf Qual*, 2018, 9(17): 4577-4580.
- [2] 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.  
TIAN J, LUO XX, MA Y, *et al.* Research progress on sterilization methods of citrus juice [J]. *J Xihua Univ (Nat Sci Ed)*, 2021, 40(4): 72-79.
- [3] SONI A, SMITH J, THOMPSON A, *et al.* Microwave-induced thermal sterilization-a review on history, technical progress, advantages and challenges as compared to the conventional methods [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2020, 97(3): 433-442.
- [4] 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.  
ZHANG JK, BAO QP, SUN ZF, *et al.* Research progress of new sterilization technology in food processing [J]. *J Food Saf Qual*, 2017, 8(8): 3099-3103.

- [5] YAN P, STANKIEWICZ AI, EGHBAL SF, *et al.* Microwave heating in heterogeneous catalysis: Modelling and design of rectangular traveling-wave microwave reactor [J]. *Chem Eng Sci*, 2021, 232(11): 116–124.
- [6] CANSIZ M, ALTINEL D, KURT GK. Efficiency in RF energy harvesting systems: A comprehensive review [J]. *Energy*, 2019, 174(5): 292–309.
- [7] 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.  
FU TT, QIN XL, LIU X. New progress in microwave processing of food [J]. *J Cere Oils Ass*, 2020, 35(4): 187–194.
- [8] TIAN T, ZHANG B, CHEN S, *et al.* Characterization of differences between microwave and traditional thermal sterilization to prevent fungal spoilage during storage of high moisture paddy rice [J]. *Cere Chem*, 2020, 98(1): 154–163.
- [9] SATOSHI H, ROBERT FS, JUN F, *et al.* Microwave chemical and materials processing [M]. Singapore: Tutoriala, 2018.
- [10] SARAH M. Heat transfer evaluation on microwave sterilization: Case study of oil palm fruit [J]. *IOP Conference Series: Mat Sci Eng*, 2019, 543(1): 234–243.
- [11] 胡蕾琪, 郭长凯, 潘志海, 等. 微波场对食品的非热效应研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(16): 270–275.  
HU LQ, GUO CK, PAN ZH, *et al.* Research progress on athermal effects of microwave fields on food [J]. *Food Ferment Ind*, 2020, 46(16): 270–275.
- [12] LIU Y, GUO D, GAO Y, *et al.* Non-thermal effect of microwave on the chemical structure and luminescence properties of biomass-derived carbon dots via hydrothermal method [J]. *Appl Surf Sci*, 2021, 552(6): 133–141.
- [13] ALEXANDROS CS, GONZALO DP, MARK L, *et al.* Industrial scale microwave processing of tomato juice using a novel continuous microwave system [J]. *Food Chem*, 2016, 190(11): 622–628.
- [14] SIGUEMOTO ÉS, GUT J, MARTINEZ A, *et al.* Inactivation kinetics of *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* in apple juice by microwave and conventional thermal processing [J]. *Innov Food Sci Emerg*, 2018, 45(18): 84–91.
- [15] 段腊梅, 黄威, 纪秀凤, 等. NFC 南果梨黄秋葵复合汁配方优化及杀菌方式对其品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(12): 145–150.  
DUAN LM, HUANG W, JI XF, *et al.* NFC nanguo pear and okra compound juice formulation optimization and effects of sterilization methods on its quality [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(12): 145–150.
- [16] ZHU DS, ZHANG YY, KOU CC, *et al.* Ultrasonic and other sterilization methods on nutrition and flavor of cloudy apple juice [J]. *Ultrason Sonochem*, 2022, 84(3): 975–983.
- [17] CHEN M, FAN DM, LI TF, *et al.* Synergistic bactericidal effects of basic amino acids and microwave treatment on *Escherichia coli* [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2017, 84(10): 99–105.
- [18] CHENG CX, MENG J, YAO G, *et al.* Comparison of the effects of novel processing technologies and conventional thermal pasteurisation on the nutritional quality and aroma of Mandarin (*Citrus unshiu*) juice [J]. *Innov Food Sci Emerg*, 2020, 64(20): 258–294.
- [19] ADULVITAYAKORN S, AZHARI S, HASAN H. The effects of conventional thermal, microwave heating, and thermosonication treatments on the quality of sugarcane juice [J]. *J Food Process Pres*, 2020, 44(2): 322–330.
- [20] 李根, 赵岩, 马寅斐, 等. 微波和巴氏杀菌后 NFC 苹果汁品质变化动力学分析[J]. *食品科技*, 2019, 44(10): 37–43.  
LI G, ZHAO Y, MA YF, *et al.* Quality change kinetics analysis of microwave and pasteurization processed NFC apple juice [J]. *Food Sci Technol*, 2019, 44(10): 37–43.
- [21] 马晓玉, 冯作山. 杀菌方式对哈密瓜汁贮藏中品质变化的影响[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(17): 332–336.  
MA XY, FENG ZS. Effects of sterilization methods on quality changes of cantaloupe juice during storage [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2014, 35(17): 332–336.
- [22] GEZAHEGN YA, TANG J, SABLANI SS, *et al.* Dielectric properties of water relevant to microwave assisted thermal pasteurization and sterilization of packaged foods [J]. *Innov Food Sci Emerg*, 2021, 74(10): 268–279.
- [23] 雷玉洁. 大肠杆菌菌悬液和菠萝汁射频杀菌技术研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2016.  
LEI YJ. Research on *Escherichia coli* bacteria suspension and radio frequency sterilization technology of pineapple juice [D]. Xianyang: Northwest Agriculture & Forestry University, 2016.
- [24] HENRIQUE C, ÉRICA SS, TIAGO AB, *et al.* Effect of microwave-assisted processing on polyphenol oxidase and peroxidase inactivation kinetics of aai-berry (*Euterpe oleracea*) pulp [J]. *Food Chem*, 2020, 341(1): 347–356.
- [25] 阎若萍, 王易芬, 涂桂飞, 等. 工业微波灭菌技术在食品加工领域的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(8): 302–308.  
YAN RP, WANG YF, TU GF, *et al.* Research progress of industrial microwave sterilization technology in the field of food processing [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2018, 39(8): 302–308.
- [26] 陈小同. 加工方式对龙葵汁品质及功能性成分的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.  
CHEN XT. Effects of processing methods on the quality and functional components of nightshade juice [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020.
- [27] 李梦丽. 红树莓和桑椹果汁贮藏期间花色苷的稳定性及抗氧化活性变化的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.  
LI ML. Study on the stability and antioxidant activity of anthocyanins during storage of red raspberry and mulberry juice [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018.
- [28] 周永升, 覃浩锋, 谭凯丹, 等. 4种杀菌方式对桑葚露酒品质的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(20): 8105–8112.  
ZHOU YS, QIN HF, TAN KD, *et al.* Effect of four sterilization methods on the quality of mulberry dew wine [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(20): 8105–8112.
- [29] 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.  
MAO XJ, WU JF, LI XW, *et al.* Effect of microwave technology on the sterilization effect of freshly squeezed watermelon juice [J]. *J Chin Agric Mech*, 2022, 43(1): 109–115.
- [30] 余秀丽, 施瑞城. 微波处理对芒果原浆杀菌效果和品质的影响研究[J]. *热带作物学报*, 2017, 38(3): 572–579.  
YU XL, SHI RC. Effects of microwave treatment on the bactericidal effect and quality of mango puree [J]. *Chin J Trop Crop*, 2017, 38(3): 572–579.
- [31] PARK SY, KANG TM, KIM MJ, *et al.* Enzymatic browning reaction of apple juices prepared using a blender and a low-speed masticating household juicer [J]. *Biosci Biotechnol Biochem*, 2018, 82(11): 296–303.
- [32] 候增超, 原江锋, 赖钰婷, 等. 微波对没食子酸和 PPO 相互作用特性的影响[J]. *河南科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(6): 68–75, 83, 8–9.  
HOU ZC, YUAN JF, LAI YT, *et al.* Effect of microwave on the interaction characteristics of gallic acid and PPO [J]. *J Henan Univ Sci Technol (Nat Sci)*, 2021, 42(6): 68–75, 83, 8–9.
- [33] 张婷婷, 蒲云峰, 侯福荣, 等. 微波预处理对苹果汁褐变及品质的影响[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(5): 166–173.  
ZHANG TT, PU YF, HOU FR, *et al.* Effects of microwave pretreatment on browning and quality of apple juice [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2020, 20(5): 166–173.
- [34] YUAN JF, HOU ZC, WANG DH, *et al.* Microwave irradiation: Effect on activities and properties of polyphenol oxidase in grape maceration stage

- [J]. *Food Biosci*, 2021, 44(10): 378–384.
- [35] ZHOU LY, CHIA YT, GOKHAN B, *et al.* Effect of different microwave power levels on inactivation of PPO and PME and also on quality changes of peach puree [J]. *Curr Res Food Sci*, 2022, 5(1): 41–48.
- [36] ARHMANDI M, MARIANO O, FRANCISCO A, *et al.* Microwave flow and conventional heating effects on the physicochemical properties, bioactive compounds and enzymatic activity of tomato puree [J]. *J Sci Food Agric*, 2017, 97(3): 984–990.
- [37] SIGUEMOTO ÉS, PEREIRA LJ, GUT J. Inactivation kinetics of pectin methylesterase, polyphenol oxidase, and peroxidase in cloudy apple juice under microwave and conventional heating to evaluate non-thermal microwave effects [J]. *Food Bioprocess Technol*, 2018, 11(7): 1359–1369.
- [38] 王鑫, 魏婧, 马蕊, 等. 蓝莓果汁贮藏中非酶褐变影响因素评价[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(14): 94–99.
- WANG X, WEI J, MA R, *et al.* Evaluation of non-enzymatic browning factors in blueberry juice storage [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2019, 40(14): 94–99.
- [39] XU H, HAO Q, FANG Y, *et al.* Nonenzymatic browning criteria to sea buckthorn juice during thermal processing [J]. *J Food Process Eng*, 2015, 38(1): 67–75.
- [40] PARAVISINI L, PETERSON DG. Role of reactive carbonyl species in non-enzymatic browning of apple juice during storage [J]. *Food Chem*, 2018, 245(8): 1010–1017.
- [41] PARAVISINI L, PETERSON DG. Mechanisms non-enzymatic browning in orange juice during storage [J]. *Food Chem*, 2019, 289(15): 320–327.
- [42] 辛明, 李昌宝, 孙健, 等. 不同杀菌方式对龙眼原汁品质的影响[J]. *热带作物学报*, 2018, 39(6): 1190–1194.
- XIN M, LI CB, SUN J, *et al.* Effects of different sterilization methods on the quality of longan juice [J]. *Chin J Trop Crop*, 2018, 39(6): 1190–1194.
- [43] AMARO KC, TADINI CC. The optimal time-temperature conditions for orange juice microwave-assisted pasteurization [J]. *Food Sci Technol Brazil*, 2021, 150(10): 165–172.
- [44] KABAKC SA, TURKYLMAZ M, ZKAN M. Changes in the quality of kefir fortified with anthocyanin-rich juices during storage [J]. *Food Chem*, 2020, 326(5): 126–135.
- [45] DA PE, MARINELLA DL, IMMACOLATE F, *et al.* Antioxidant and antisenescence effects of bergamot juice [J]. *Oxid Med Cell Longev*, 2018, 2018: 9395804.
- [46] CHEN Y, CHEN Z, GUO Q, *et al.* Identification of ellagitannins in the unripe fruit of *Rubus chingii* Hu and evaluation of its potential antidiabetic activity [J]. *J Agric Food Chem*, 2019, 67(25): 7025–7039.
- [47] 潘浪. 脐橙全果浊汁加工与贮藏过程中多酚及抗氧化活性的变化[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- PAN L. Changes of polyphenols and antioxidant activities during processing and storage of navel orange whole turbid juice [D]. Changsha: Hunan University, 2019.
- [48] 张婷婷, 蒲云峰, 刘懿, 等. 微波预处理条件对苹果汁品质的影响[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(8): 168–175.
- ZHANG TT, PU YF, LIU Y, *et al.* Effects of microwave pretreatment conditions on the quality of apple juice [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2020, 20(8): 168–175.
- [49] KUMAR S, KHADKA M, MISHRA R, *et al.* Effects of conventional and microwave heating pasteurization on physicochemical properties of pomelo (*Citrus maxima*) juice [J]. *J Food Proc Technol*, 2017, 8(7): 212–216.
- [50] 施伽, 范志平, 陆雅丽, 等. 刺梨果汁饮料的贮藏稳定性及其货架期预测[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(20): 8076–8083.
- SHI J, FAN ZP, LU YL, *et al.* Storage stability and shelf life prediction of prickly pear juice beverage [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(20): 8076–8083.
- [51] 曾小峰, 商桑, 陈爽, 等. 杀菌方式对血橙汁贮藏过程品质及抗氧化活性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(21): 161–166.
- ZENG XF, SHANG S, CHEN S, *et al.* Effects of sterilization methods on the quality and antioxidant activity of blood orange juice during storage [J]. *Food Ferment Ind*, 2019, 45(21): 161–166.
- [52] ZHU MT, HUANG YS, WANG YL, *et al.* Comparison of (poly) phenolic compounds and antioxidant properties of pomace extracts from kiwi and grape juice [J]. *Food Chem*, 2019, 271(1): 425–432.
- [53] 李瑞娟, 梁锦, 王丹, 等. 不同品种猕猴桃抗氧化成分及体外抗氧化活性比较[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(2): 311–318.
- LI RJ, LIANG J, WANG D, *et al.* Comparison of antioxidant components and *in vitro* antioxidant activities of different varieties of kiwifruit juice [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2022, 43(2): 311–318.
- [54] 杨颖, 胡梅, 王望舒, 等. 酱腌菜防腐技术的研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(7): 2044–2049.
- YANG Y, HU M, WANG WS, *et al.* Research progress in preservative technology of pickled vegetables [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(7): 2044–2049.
- [55] SIGUEMOTO ÉS, PURGATTO E, HASSIMOTTO N, *et al.* Comparative evaluation of flavour and nutritional quality after conventional and microwave-assisted pasteurization of cloudy apple juice [J]. *LWT*, 2019, 111(8): 853–860.
- [56] SAIKIA S, MAHNOT NK, MAHANTA CL. A comparative study on the effect of conventional thermal pasteurisation, microwave and ultrasound treatments on the antioxidant activity of five fruit juices [J]. *Food Sci Technol Int*, 2016, 22(4): 288–301.
- [57] 高思美, 郭峰, 夏娜. 杀菌方式对药桑浓缩汁品质指标影响研究[J]. *广州化工*, 2018, 46(23): 89–91.
- GAO SM, GUO F, XIA N. Study on the effect of sterilization methods on the quality indicators of Yaosang concentrated juice [J]. *Guangzhou Chem Ind*, 2018, 46(23): 89–91.
- [58] 王乐乐, 周小顺, 周绍琴. 不同杀菌方式对刺梨果汁品质的影响[J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(33): 144–146.
- WANG LL, ZHOU XS, ZHOU SQ. Effects of different sterilization methods on the quality of prickly pear juice [J]. *Anhui Agric Sci*, 2018, 46(33): 144–146.
- [59] 张琪, 朱丹, 牛广财, 等. 不同杀菌方式对沙棘果浆品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(19): 166–172.
- ZHANG Q, ZHU D, NIU GC, *et al.* Effects of different sterilization methods on the quality of sea buckthorn pulp [J]. *Food Ferment Ind*, 2019, 45(19): 166–172.
- [60] 龙倩倩. 西番莲果汁加工过程中香气成分变化[D]. 广州: 华南农业大学, 2018.
- LONG QQ. Changes of aroma components during processing of passion fruit juice [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2018.

(责任编辑: 张晓寒 于梦娇)

## 作者简介



韩春然, 博士, 教授, 主要研究方向为果蔬加工与贮藏。

E-mail: 13704809512@yeah.net



遇世友, 博士, 讲师, 主要研究方向为食品安全检测。

E-mail: davidyuhit@163.com