

脉冲电场技术应用于果蔬汁杀菌的研究进展

马亚琴^{1,2}, 李楠楠¹, 张震¹

(1.西南大学柑桔研究所, 重庆 400712; 2.国家柑桔工程技术研究中心, 重庆 400712)

摘要: 脉冲电场作为一种非热加工技术能保持果蔬汁的安全性、稳定性和新鲜度, 同时具有处理时间短、温度低、能耗少等优势, 是目前食品加工领域的研究热点, 亦是最具应用潜力的技术之一。本文综述脉冲电场技术对果蔬汁的杀菌机理、影响因素、处理效果及与其他技术联合应用等方面, 并进一步展望了脉冲电场在果蔬汁加工领域的应用前景。

关键词: 脉冲电场; 果蔬汁; 杀菌

Advances in Application of Pulsed Electric Field in Fruit and Vegetable Juice Sterilization

MA Yaqin^{1,2}, LI Nannan¹, ZHANG Zhen¹

(1. Citrus Research Institute, Southwest University, Chongqing 400712, China;

2. National Citrus Engineering Research Center, Chongqing 400712, China)

Abstract: The application of pulsed electric field (PEF) as a non-thermal pasteurization technology can maintain the safety, stability and fresh quality of fruit and vegetable juice, and PEF is a hot research subject and one of the most promising technologies in the food processing area due to the advantages of short operation time, low temperature and low power consumption. This manuscript reviews the mechanism and efficiency of sterilization of fruit and vegetable juice by PEF, the factors affecting the sterilization efficiency and the combined application of PEF with other technologies. Moreover, future prospects for its application in fruit and vegetable juice processing are discussed.

Keywords: pulsed electric field; fruit and vegetable juice; sterilization

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201821046

中图分类号: TS255.36

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2018) 21-0308-08

引文格式:

马亚琴, 李楠楠, 张震. 脉冲电场技术应用于果蔬汁杀菌的研究进展[J]. 食品科学, 2018, 39(21): 308-315. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201821046. <http://www.spkx.net.cn>

MA Yaqin, LI Nannan, ZHANG Zhen. Advances in application of pulsed electric field in fruit and vegetable juice sterilization[J]. Food Science, 2018, 39(21): 308-315. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-201821046. <http://www.spkx.net.cn>

随着人们对于生活品质需求的提高, 含有丰富营养物质的果蔬汁越来越受到消费者的青睐。果蔬汁含有较高的有机酸、维生素和酚类物质, 已占据饮料市场的主导地位^[1], 膳食类黄酮的摄入量与冠状心脏病死亡率呈负相关, 其有降低心肌梗死发生率的作用; 总黄酮与血浆总胆固醇和低密度脂蛋白胆固醇浓度呈负相关。因此, 较多摄入含抗氧化活性的物质可有效降低癌症、心血管病及炎症等疾病患病率。

果蔬汁在生产加工及贮藏过程中, 微生物的污染问题尤为重要。20世纪末期至21世纪初期, 美国、加拿大和荷兰的多个区域都相继爆发了鲜榨果蔬汁中致病菌所

引发的食物中毒事件^[2]。1995年美国发生了一起因食用未杀菌鲜榨橙汁引起的沙门氏菌感染事件, 62人被确认感染; 1996年美国爆发了由饮用未杀菌苹果汁引起隐孢子虫病事件; 1999年加拿大和美国的一起沙门氏菌感染事件中, 造成至少207人患病, 其原因也是食用了被污染而未杀菌的鲜榨橙汁^[3]。为了控制微生物对果蔬汁安全性和稳定性造成的严重威胁, 食品工业上常用巴氏杀菌等传统热处理方式来灭活果蔬汁中的微生物, 但热杀菌技术在延长保质期的同时也破坏了其营养成分和感官特性, 如蛋白质变性、非酶褐变以及维生素和功能性物质的损失。Saikia等^[4]比较分析非热杀菌与热杀菌后果汁的品质

收稿日期: 2017-07-17

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-26-06B); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(XDJK2017D046)

第一作者简介: 马亚琴(1978—), 女, 副研究员, 博士, 研究方向为食品科学。E-mail: myaya211@163.com

变化,结果表明,热杀菌后5种果汁中酚酸均发生了不同程度的降解,与鲜榨果汁相比,热杀菌后菠萝汁和荔枝汁中的总黄酮发生显著性降解,降解率分别为13.7%、67.1%。赵玉红等^[5]研究巴氏杀菌处理对黑加仑果汁品质的影响,结果表明,伴随着杀菌温度(70~90℃)的升高和处理时间(6~10 min)的延长,果汁红色加深且浊度增大,巴氏杀菌对果汁颜色变化影响显著;果汁中的多酚、单宁、花色苷含量和1,1-二苯基-2-三硝基苯肼自由基清除率,随杀菌温度的升高和杀菌时间的延长而降低,并且温度越高降低越快。此外,还有研究者们报道了热杀菌对橙汁、草莓汁和西瓜汁感官品质和生物活性成分均有不利影响^[6-7]。因此,为满足消费者对天然健康、新鲜和高品质食品的需求,最小加工量已成为现代食品保藏技术的战略目标,这促进了非热加工技术的迅猛发展。脉冲电场(pulsed electric field, PEF)技术作为新兴的非热加工技术,不仅具有良好的杀菌效果,而且处理时间短、能量消耗少、食品理化性质变化小、营养风味变化不显著,在果蔬汁这类高热敏性食品杀菌中具有高度适用性。

PEF技术在食品杀菌中的应用最早可追溯到20世纪初。1925年,有研究者验证了在3~4 kV的电场条件下可以对牛奶进行杀菌,并证实温度不是影响杀菌效果的关键因素^[8]。研究者发现不同能量的PEF对大肠杆菌、链球菌、枯草芽孢杆菌、耐辐射微球菌处理均有一定的灭活效果^[9]。Heinz^[10]研究发现不同电场强度对细胞存活的抑制作用具有显著性差异,其中抑制动物和植物源细胞需要高强度的脉冲,而抑制微生物细胞只需中等强度的脉冲;Sale等^[11]报道了在不同电场强度、电导率、电流密度和能量的条件下,PEF处理对细菌和酵母菌的影响,证实PEF可以将电能转化为脉冲形式作用于微生物并使之失活,但对食品的营养成分及各种特性影响甚微,此外还发现电场强度和处理时间是影响杀菌效果最显著的两个因素。Hülshager等^[12]研究报道,细菌和酵母细胞在20 kV/cm的条件下持续几毫秒的脉冲,其致死率就可以达到99.99%。20世纪80年代以来,PEF的研究包括设备的开发、处理条件的优化、应用范围的扩大,随着各个方面不断成熟完善,PEF成为全球非热加工领域最受关注的技术之一。20世纪末期,将PEF应用于各种液体食品的研究日益增加,涉及果蔬汁、液蛋、茶汤和牛奶^[13]。2005年,PEF技术通过了美国食品药品监督管理局技术认证,极大地推动了其在市场化应用的发展。

本文综述近年来国内外PEF杀菌技术在果蔬汁中的研究应用,主要从杀菌机理、影响因素、处理效果及与其他技术联合应用等方面进行叙述,并探讨了PEF技术未来的发展趋势。

1 PEF技术杀菌机理

PEF杀菌技术的研究表明,PEF处理过程中引起细胞膜不可逆破损而导致细胞失活是该技术杀菌作用的关键。目前,关于细胞膜破损的机制有以下几种假说:电穿孔假说、电击穿假说、空穴假说、臭氧效应、电磁机理模型和黏弹性形成模型等,其中电穿孔假说和电击穿假说得到研究者的普遍认可。

1.1 电穿孔假说

电穿孔假说认为,脉冲电场会使细胞膜上形成亲水孔和强制打开蛋白质通道而造成细胞膜半渗透功能的破坏,最终导致细胞死亡^[14]。外加电场的存在使细胞膜上的磷脂构象发生变化,导致膜分子的重排和亲水孔的形成,同时跨膜电位还影响细胞膜蛋白质通道的开启和闭合。在施加电场期间,蛋白质通道不仅打开,而且通过局部焦耳加热或官能团的电修饰造成其变性。细胞膜形成小孔导致其通透性增强,从而使小分子物质透过细胞膜进入细胞内部,导致细胞逐渐膨胀破裂,胞内的物质外泄,最终造成微生物死亡。

近年来,国内外学者们致力于验证电穿孔假说。王翠华等^[14]在研究脉冲放电对铜绿微囊藻细胞超微结构的影响中发现,在PEF作用下,绝大多数细胞发生电穿孔现象,产生不可逆变性,仅少数细胞虽然外围结构完整,但细胞内含物受到破坏,导致程序性死亡。宋艳波等^[15]基于电子显微镜观察结果及介质理论分析高压PEF处理果蔬机理认为,因PEF为重复周期信号,这种周期性的策动力对细胞膜结构产生某种谐振,或是与蛋白质的构象振荡同步,从而形成电穿孔,振荡形成的作用力超过某一阈值时,在膜上形成一定半径的穿孔,膜上微孔量增大,大量的离子通过膜的离子通道,打破了细胞内外的离子平衡,引起各种细胞破裂等现象的发生。Vernier^[16]、Kotnik^[17]等利用分子动力学模拟研究了电脉冲对细胞膜磷脂双分子层的作用,结果发现水分子在该过程中起着重要作用,初期水分子有效降低了磷脂双分子层“能垒”,从而诱导磷脂分子重新排列并形成亲水性小孔。这些研究结果证实了电穿孔理论,说明PEF处理可使细胞膜形成大量小孔,进而胞内物质外流,导致微生物死亡,起到杀菌作用。

1.2 电击穿假说

细胞膜类似于一个充满电解质的电容器,细胞质的介电常数远大于细胞膜(细胞质的介电常数是细胞膜的6~8倍),细胞膜两侧不同的介电常数使其产生10 mV的跨膜电位。当外部电场施加在细胞两端时,跨膜电位增加,并且在膜两侧相反极性的离子产生相互吸引力,这种力挤压膜两侧会使膜的厚度减小,即膜两侧电荷间的距离减小^[18]。随着电场继续作用,跨膜电位持续增加,相应的电荷吸引作用也随之增大,细胞膜压缩程度

的增加势必会造成其产生相反方向的弹性回复力, 假定挤压力比细胞膜产生的弹性回复力增加得快很多, 则细胞膜厚度显著降低, 其结果是造成细胞膜局部被破坏。根据处理强度是否超过临界电场强度, 形成可逆或不可逆的细胞膜击穿孔。可逆的细胞膜击穿孔可以自我愈合, 同时利于促进细胞对胞外大分子的吸收; 而不可逆的细胞膜击穿孔如继续增大会造成细胞内大分子物质外泄, 造成微生物死亡, 进而实现杀菌作用。

近年来, 国内外学者们通过研究细胞膜结构的变化来验证PEF作用微生物的灭活机理。曾新安等^[19]研究了沙门氏菌对PEF的抵抗性作用, 结果表明, PEF技术在有效杀菌的同时, 不仅增大了细胞膜的通透性, 还造成细胞膜流动性降低, 最终引起微生物的死亡。刘志伟^[20]采用脂质体模拟细胞来研究PEF致死微生物的机理, 结果表明, PEF杀菌效果与细胞形态、细胞膜流动性及其细胞膜组成直接相关。目前, PEF杀菌机理研究还处于理论计算推测和分子模拟阶段, 因此实现PEF作用微生物细胞膜在线实时观测对PEF杀菌机理研究具有突破意义。

2 影响PEF杀菌效果的因素

影响PEF杀菌效果的因素主要分为处理参数因素、微生物因素、样品因素, 具体参数见表1。在使用PEF技术处理果蔬汁时, 应综合考虑多种因素的影响作用, 以确定最佳的PEF参数, 从而获得理想的杀菌效果。PEF对果蔬汁中常见微生物的处理效果见表2。

表1 影响PEF杀菌效果的因素
Table 1 Factors affecting the bactericidal effect of PEF

处理参数因素	微生物因素	样品因素
电场强度、作用时间、脉冲参数	种类和形态、含菌量、生长条件、生长周期	酸碱度、电导率、物料浓度

表2 PEF对果蔬汁中常见微生物的处理效果
Table 2 Effect of PEF on killing common microorganisms in fruit and vegetable juice

微生物名称	果汁种类	PEF参数	菌落总数 (lg (CFU/mL))	参考文献
大肠杆菌	蓝莓汁	35 kV/cm、90 μs	5.12	[21]
大肠杆菌	葡萄汁	24 kV/cm、180 μs、30 ℃	3.06	[22]
大肠杆菌	花椒果汁	0.4 kV、300 μF	2.42	[23]
大肠杆菌	胡萝卜汁	33.33 kV/cm、684 μs	7.40	[10]
大肠杆菌	苹果汁	30 kV/cm、54.4 μs	3.60	[24]
大肠杆菌	草莓汁	18.6 kV/cm、150 ms、55 ℃	3.79	[25]
大肠杆菌	胡萝卜汁	30 kV/cm、500 μs、4 ℃	5.90	[26]
酿酒酵母	蓝莓汁	35 kV/cm、90 μs	5.30	[21]
酿酒酵母	葡萄汁	24 kV/cm、180 μs、30 ℃	6.01	[22]
酿酒酵母	荔枝汁	20 kV/cm、1 000 μs	4.13	[27]
接合酵母	余甘子汁	26 kV/cm、500 μs、10 Hz	5.10	[28]
金黄色葡萄球菌	蓝莓汁	35 kV/cm、90 μs	4.64	[11]
金黄色葡萄球菌	葡萄汁	24 kV/cm、180 μs、30 ℃	2.69	[22]
菌落总数	草莓汁	35 kV/cm、280 μs、30 ℃	1.94	[29]
菌落总数	卷心菜汁	60 kV/cm、40 ℃	6.33	[30]
菌落总数	番茄汁	50 kV/cm、40 ℃	6.09	[31]
李斯特氏菌	苹果汁	20 kV/cm、36 ℃、87 kJ/kg	3.50	[32]

2.1 处理参数因素

2.1.1 电场强度

大量研究表明, 电场强度是影响PEF杀菌效果的主要因素, 增大电场强度, 对象处理物料中微生物的存活率明显下降。田野^[29]研究PEF对鲜榨草莓汁杀菌效果的影响中得出, 当其他条件一定时, 电场强度从15 kV/cm增加到30 kV/cm时, 草莓汁中大肠杆菌致死率从0.72增加到1.22, 这说明随着电场强度的增大, PEF对草莓汁中大肠杆菌的钝化效果也增强。Huang Kang等^[22]利用数值模拟比较不同电场强度下PEF对葡萄汁中微生物的影响, 研究结果表明, 在电场强度12~24 kV/cm的条件下, 微生物对PEF处理的耐受力由强到弱依次为: 金黄色葡萄球菌>大肠杆菌>酿酒酵母, 并随着电场强度的增加抑菌效果增强。在产生电场强度的同时, 电流对杀菌可能产生的影响也被关注, 目前电流对PEF杀菌作用的影响鲜有报道, Sepulveda等^[33]的研究发现, 在其他影响因素不变的情况下, 电流对PEF杀菌几乎不起作用, 但这方面的研究作为一个新的研究点值得深入探究。

2.1.2 作用时间

作用时间是指各次放电释放脉冲时间的总和, 其长短决定微生物灭活的程度。随着作用时间的延长, 对象处理物料中微生物的存活率急剧降低, 随后趋于平缓, 再延长作用时间杀菌效果不再显著。田野^[29]在研究PEF对鲜榨草莓汁杀菌效果的影响中得出, 当其他条件一定时, 处理时间从100 μs延长到400 μs时, 草莓汁中大肠杆菌致死率从0.28增加到0.35, 结果表明, PEF对草莓汁中大肠杆菌的钝化效果随作用时间的延长而增强。Xiang等^[34]研究了PEF技术对胡萝卜汁理化性质及微生物灭活效果的影响, 发现不同作用时间对大肠杆菌具有不同的杀菌效果, 在一定时间范围内, 延长作用时间可表现出较好的杀菌效果。李静等^[35]在研究PEF对苹果汁中的微生物钝化效果中也得出类似的研究结论。

2.1.3 脉冲参数

关于脉冲的研究仅局限于动力学模型中, 建立杀菌效果与这些参数的函数关系, 实际上, 脉冲参数对于PEF技术的处理效果具有重要影响。

2.1.3.1 脉冲能量

输入脉冲能量密度的高低与PEF钝化微生物的效果呈正相关, 输入能量越高, PEF处理效果也相对较好。Timmermans等^[32]研究相同温度下PEF处理对苹果汁的影响, 当输入脉冲能量从0 kJ/kg增大到100 kJ/kg, 苹果汁中巴拿马沙门氏菌和酿酒酵母的致死率分别提高了7、5 (lg (CFU/mL))。刘新雨等^[27]研究PEF处理荔枝汁中酿酒酵母的效果得出了相一致的结论, 即输入脉冲能量越高, PEF处理效果越好。尽管增强脉冲能量输入能够

提高杀菌效果,但是提高能量也随之引起物料温度的升高,进而影响食品的感官品质和营养成分,同时也会增加成本的消耗。因此,脉冲能量的选择应根据物料理化性质和感官品质的需求进行综合考虑。

2.1.3.2 脉冲宽度

脉冲宽度可以在一定程度上影响PEF抑制微生物的活性。Korolczuk等^[36]研究发现,电场强度为50 kV/cm的条件下,脉冲宽度从0.05 μ s增加到3 μ s时,肠炎沙门氏菌的致死率也逐渐增大。Zhang Ruobing等^[37]研究了PEF处理过程中脉冲上升时间对金黄色葡萄球菌杀菌的影响,研究表明,上升时间较短的方形波脉冲对金黄色葡萄球菌的钝化效果更好,可提高0.5 (lg (CFU/mL))。

2.1.3.3 脉冲波形

PEF电路系统的差异导致脉冲波形的不同,常见的脉冲波形有方形波、衰减波和振荡波。相关研究表明,方形波对微生物的致死性最好且能量利用效率高,衰减波其次,振荡波最差^[41]。目前,研究者们所选用的脉冲波形也多为方形波^[29-31]。

2.1.3.4 脉冲个数、频率

在其他条件固定的情况下,增加脉冲个数、频率可以显著提高PEF技术的杀菌效果。刘珂舟等^[38]研究脉冲频率分别为1、10、100 Hz时,增大脉冲频率,大肠杆菌存活率降低。Mosqueda-Melgar等^[39]研究PEF对大肠杆菌灭菌优化条件时,发现脉冲频率越大,振荡效应越明显,灭菌效果相应越好。

2.2 微生物因素

微生物对PEF处理的敏感度主要依赖于其细胞特征,例如微生物种类、生长条件、生长时期及微生物最初的污染程度。微生物种类的不同造成其对PEF的抗性不同,所处不同生长周期的微生物对PEF的敏感程度也不尽相同,生长条件也会影响PEF的杀菌效果。

2.2.1 种类和形态

迄今为止,很少有学者系统地研究微生物种类对PEF杀菌作用的影响。微生物种类的差异决定了其组织结构的差异,最终造成对电场的敏感性不同^[40]。陶晓贇^[41]比较分析了PEF处理对革兰氏阳性菌(大肠杆菌)、革兰氏阴性菌(金黄色葡萄球菌)和真菌(酵母菌)的钝化效果,金黄色葡萄球菌细胞壁较厚,约为20~80 nm;大肠杆菌细胞壁较薄,约为10~15 nm;酵母菌细胞壁虽厚,约为0.1~0.3 μ m;又因细胞壁中的组成成分不同,酵母菌细胞壁虽厚,但不含肽聚糖,因此PEF的灭活效果依次为:酵母菌>大肠杆菌>金黄色葡萄球菌。

微生物形态对于PEF的杀菌效果同样具有显著影响,一般情况下,杆形细胞的跨膜电势和电场强度均大于拥有相同长径和短径的椭圆形细胞。在具有相同长径和短径的微生物细胞中,杆形细胞的跨膜电势和电场强度均大于球形细胞^[41]。

2.2.2 含菌量

原料中最初的污染物水平是影响处理后残菌量的最重要参数,在相同处理条件下,不同的微生物含量造成不同的处理效果。刘志伟^[20]发现,在相同的电场强度、处理时间和脉冲条件下,经PEF分别处理不同含菌量的样品,结果表明,含菌量多的样品残菌量下降的对数值比含菌量低的更显著。

2.2.3 生长条件

微生物生长条件影响微生物的生长状态,进而影响PEF技术的杀菌效果,其中微生物的生长条件包括温度、生长培养基的成分、氧浓度和恢复期的条件等。Ohshima等^[42]研究PEF处理不同温度培养的大肠杆菌时得出,大肠杆菌的致死率受到培养温度的影响,且最佳培养温度为37 $^{\circ}$ C时大肠杆菌对PEF处理的抗逆性最强。刘志伟^[20]探索了培养温度对大肠杆菌对PEF致死抗性影响机理,研究表明,不同生长温度下,不同生长周期的大肠杆菌对PEF表现出截然不同的抗性。稳定期时,大肠杆菌对PEF抗性受培养温度的影响显著;对数期时,培养温度对对数期大肠杆菌的杀菌效果几乎无影响,PEF对不同培养温度大肠杆菌保持一致的高杀灭效果。

2.2.4 生长周期

对象处理物料中微生物的生长周期不同导致其对电场的敏感程度具有差异性。有研究报道,处于稳定期的细菌比对数期的对PEF处理更具抵抗性^[43],但也有研究发现,PEF处理荔枝汁中不同生长周期的酿酒酵母时,酿酒酵母对电场敏感程度由强到弱依次为:稳定期>对数期>衰亡期>调整期^[27]。针对不同种类的微生物,PEF的灭活效果有所不同,其生长周期对PEF杀菌效果的影响有待进一步研究。

2.3 样品因素

2.3.1 酸碱度

目前,样品酸碱度对PEF技术杀菌效果的影响尚不清晰,有研究者报道酸碱度对微生物无影响作用,也有研究者报道微生物在酸性环境下PEF的灭菌效果较好。Timmermans等^[32]采用连续流动PEF系统,在电场强度为20 kV/cm的条件下,对苹果汁(pH 3.5)、橙汁(pH 3.7)和西瓜汁(pH 5.3、3.6)中的李斯特氏菌进行灭活,结果表明,与高pH值的西瓜汁微生物的失活曲线相比,低pH值的西瓜汁中微生物的失活曲线形状与苹果汁和橙汁的相似,说明该差异是由酸碱效应引起的,即果汁pH值降低时,李斯特氏菌对PEF的抵抗性降低。根据微生物的种类不同,产品的酸碱性对于微生物失活的影响表现出一定的差异性。

2.3.2 电导率

物料电导率的高低一定程度上影响PEF处理过程中物料的发热程度,且在较低电场强度下,PEF处理电导率

低的物料时其能量利用率较高,可达到较好的处理效果。Wouters等^[43]分别在不同电导率条件下处理植物乳酸杆菌,结果表明在相同能量输出的情况下,对低电导率液体的微生物灭活效果比高电导率的液体更好。但是也有研究发现,在相同的电场强度下,电导率并不会增强PEF对微生物的灭活效果,电导率增大会降低PEF对微生物的钝化效果。电导率本身受很多条件的影响,例如果汁浓度及温度等。电导率对杀菌效果的影响相对比较复杂,有待深入研究。

2.3.3 物料浓度

物料浓度的变化会影响处理室内物料的流动特性,进而影响PEF的处理效果。Ferrer等^[44]研究PEF对橙汁和胡萝卜汁混合饮料进行杀菌作用时发现,在电场强度为20 kV/cm时,胡萝卜汁含量的多少对大肠杆菌的作用效果具有重要影响,即果汁浓度越高杀菌效果越低。造成的原因可能是因为加大物料浓度,营养物质更加充足导致微生物含量增加,影响高浓度物料的杀菌效果。

3 PEF对果蔬汁品质的影响

PEF技术可有效杀灭果蔬汁中的腐败菌和致病菌,同时可最大限度维持原汁的品质特性,扩大果蔬汁的消费市场,以满足消费者对果蔬汁的需求。大量研究表明,PEF处理对果蔬汁的pH值和可溶性固形物、总酸、总糖含量及电导率均无显著性影响^[8,28,45]。

3.1 对果蔬汁中生物活性成分的影响

已有的研究表明PEF处理对果蔬汁中生物活性成分没有显著性影响。Bansal等^[28]用PEF和热杀菌处理余甘子汁,结果表明果汁的pH值和可溶性固形物含量均无显著性变化,其中PEF能够保留果汁中63% VC和88.9%的抗氧化活性,而热杀菌后的余甘子果汁中VC和抗氧化活性发生显著降解。Leong等^[46]研究发现,经PEF处理后葡萄汁中的总酚、VC含量和抗氧化性均有所增加。Agcam等^[45]利用PEF与热处理橙汁中的酚酸,发现经PEF和热处理后的橙汁,总酚含量均有所增加,除丁香酸和新橙皮苷外,其他酚酸含量也有所增加。因此,PEF处理果蔬汁对其生物活性没有显著性影响,在一定条件下还有利于提升生物活性成分的含量。

3.2 对果蔬汁感官品质的影响

食品的天然芳香化合物是最重要的品质指标之一,消费者的选择和可接受性通常取决于食品的风味和外观。陶晓赞^[41]采用电子鼻、电子舌技术客观分析鲜榨、热处理及PEF处理的蓝莓汁气味及味道,利用软独立模型分析可知热处理后的蓝莓汁与对照组、PEF处理的蓝莓汁具有显著性差异;雷达图谱和散点图的分析结果显示经热处理后的蓝莓汁味道变化最大,PEF处理的蓝莓汁与对照组接近。同样,应用PEF处理樱桃汁,处理时间

分别为0、66、131、210 μ s时,随着作用时间的延长,樱桃汁的色泽和味道都未发生显著性变化($P>0.05$)^[47]。Garde-Cerdán等^[48]采用电场强度7.4 kV/cm,作用时间分别为10、20 μ s的PEF处理不同品种(‘Grenache’、‘Tempranillo’、‘Graciano’)的葡萄汁,结果表明,PEF处理对‘Grenache’的芳香组成及其单萜类的含量有积极影响;对‘Tempranillo’和‘Graciano’的(E)-4-(2,6,6-三甲基环己烯-1-基)、丁-3-烯-2-酮、总酯和苯类化合物含量也有积极影响,但没有显著改变C6化合物以及挥发性成分的含量。

3.3 对果蔬汁货架期的影响

PEF杀菌技术在处理过程中能最大限度地保留果蔬汁的营养品质和感官特性,进而延长了果蔬汁的贮藏期限。Kayalvizhi等^[49]研究PEF对甘蔗汁的影响中发现,未经处理的新鲜甘蔗汁的感官特征只能保持2 d,但经PEF处理后的甘蔗汁,其保质期延长至7 d。Guo Mingming等^[50]研究了经PEF技术处理的石榴汁微生物稳定性、生物活性物质、理化性质及消费者接受度,发现在4 $^{\circ}$ C为期12周的贮藏条件下,总菌落数小于2.5 (lg (CFU/mL)),且没有检测出酵母和霉菌。Vallverdú-Queralt等^[51]研究发现,与未处理和热处理的番茄汁相比较,经过PEF处理后的番茄汁在贮藏期间依然能够维持较高的类胡萝卜素含量。PEF处理还可抑制或缓解褐变程度,有效降低褐变产物的生成。Vervoort等^[52]研究报道,经PEF处理后的混合橙汁-胡萝卜汁在贮藏期间没有检测出5-羟甲基糠醛。Agcam等^[53]研究了PEF与热处理对橙汁中酚酸含量的影响,结果表明,贮藏期间,PEF处理后橙汁中酚酸的含量无显著性变化,但热处理后橙汁中的酚酸含量则随着贮藏时间的延长而显著降解。赵瑾^[54]通过分析PEF处理前后梨汁多项指标的变化,发现PEF处理对梨汁的理化性质、营养成分和挥发性香气成分几乎没有影响,处理后梨汁基本保留了原有风味和品质;贮藏实验结果表明,PEF处理与4 $^{\circ}$ C低温结合,可使梨汁的货架期达到2个月以上。

综上所述,PEF技术作用于果蔬汁,不仅杀菌效果好,还可降低果蔬汁贮藏期间的营养品质及风味成分的损耗,并减少有害物质的生成。

4 PEF与其他技术的结合应用

在果蔬汁加工过程中,各种处理技术都存在着一定的不足,为了达到更好的处理效果,获得更佳的果蔬汁品质,近几年来,研究者们致力于将PEF与其他技术相结合来提高处理效果,以期为消费者提供满足需求的果蔬汁。

4.1 热处理的协同作用

尽管PEF杀菌技术是非热加工技术的一种,温度也是影响其处理效果的重要参数,将PEF与温和热相结合,

更有利于发挥二者的优点,提高杀菌效果。PEF处理样品之前,将温度从室温提高到35~60℃之间,此时PEF与温度可以产生协同效应,更有利于灭活果蔬汁中的微生物^[55]。刘珂舟等^[56]采用PEF和热杀菌相结合的方式,将大肠杆菌在45℃条件下预热5 min后,再进行PEF灭菌,大肠杆菌的存活率已降至13.69%;该杀菌方式既节约能源,又适用于一些热敏性高的食物灭菌,互补了两种杀菌方法的不足,继而达到更好的处理效果。温度对微生物的影响是基于对细胞膜通透性的改变。当温度低于30℃时,细胞膜的磷脂双分子结构紧密有序,并具有凝胶结构;随着温度的升高,结构变得不那么有序,失去它的弹性性质,并转化成液晶状态。PEF与热处理的结合作用于微生物细胞膜的磷脂双分子层,使细胞膜变薄导致穿孔,最终造成微生物的死亡^[20]。

4.2 联合其他非热加工技术

4.2.1 集成冷冻浓缩技术

PEF强度的强弱受果蔬汁电导率的直接影响,冷冻浓缩后的果蔬汁电导率降低,有利于提高PEF的杀菌效果^[57]。钟海荣^[58]采用Wilcoxon Test方法对PEF+热处理的枇杷汁进行感官分析,结果表明,冷冻浓缩+PEF处理的枇杷汁的感官品质更接近于原汁,从温升角度比较,冷冻浓缩果汁甚至优于枇杷原汁。PEF与冷冻浓缩相结合的处理技术,相对减少了能量耗散,能得到更高的经济效益。

4.2.2 联合超声作用

将PEF的电穿孔效应与超声的空穴效应相结合也可以有效灭活果蔬汁中的微生物,并一定程度上降低果蔬汁理化品质的变化。Aadil等^[59]将PEF技术与超声作用联合在一起,研究了其对葡萄柚果汁的处理作用,结果表明,与未处理果汁相比,经PEF与超声联用处理后果汁的pH值、可滴定酸质量分数、可溶性固形物含量及色差值均未发生显著性变化,但是经联合处理后果汁的浊度和非酶褐变值均增加。

4.3 添加抗菌素

添加抗菌素等物质可以提高PEF灭活微生物的效果。陈婧等^[60]研究了柚皮苷与PEF对酿酒酵母的协同致死作用,柚皮苷与PEF对酿酒酵母细胞分别有一定的抑制或致死作用,当二者相结合时,其致死效果得到显著提升。Saldaña等^[24]研究PEF技术结合 N^{α} -月桂酰乙酯对苹果汁中大肠杆菌的抑制效果,结果表明,添加 N^{α} -月桂酰乙酯后PEF的杀菌效果显著提高。Gurtler等^[25]研究证明,与单独使用PEF技术相比,结合使用防腐剂(苯甲酸钠、山梨酸钾或质量分数2.7%柠檬酸)可更好地杀灭草莓汁中的大肠杆菌,并减少微生物的亚致死性损伤的产生。

5 结 语

基于已有的文献报道,应用PEF技术能达到理想杀菌效果的同时,还能有效保持果蔬汁的营养品质和感官特

性。同样,利用PEF处理酒的研究发现,PEF处理不仅可以提高酒中多酚、花色苷、有机酸等功能性物质含量,而且还能有效提升其物理化学特性和感官品质,PEF较其他非热技术在提高物料功能性物质(特别是多酚)含量方面有明显的优势^[61]。但PEF工业化推广还面临着一些难题,具体表现在以下几个方面:1)研究方向多局限于处理效果和理论推测方面,对于PEF处理微生物致死的机理尚不清楚,尤其是微生物亚致死性损伤有待深入研究;2)国内PEF设备处于实验室阶段,处理室装置不完善,不适用于果蔬汁的商业化生产,同时PEF设备价格昂贵,不利于推广应用;3)PEF设备的金属电极材料释放金属离子对处理的果蔬汁易造成污染;4) Dalvi-Isfahan等^[62]认为PEF技术在食品加工领域产生的积极作用在保持一致性和重复性方面需要标准化并确保安全,同时也要证明在工业化生产过程中高压PEF技术的可持续性、成本效率、对企业投资者产生吸引力等。此外,PEF技术和其他非热技术如微波、紫外线照射、高强度光脉冲等技术联合处理对杀菌有很好的效果,同样,PEF技术联合热处理也能达到灭菌效果^[63]。因此,PEF技术联合其他非热处理或热处理技术提升杀菌效果是未来研究的趋势之一,研究各种方法联合作用的互作机理有助于克服在工业化应用中的局限性。

我国研究PEF杀菌技术相对滞后,果蔬汁杀菌的研究处于起步阶段,但PEF杀菌技术在工业生产上的巨大应用潜力引起了科研工作者和企业家的广泛关注,发展势头迅猛。未来PEF杀菌技术的发展趋势:1)实现PEF作用微生物细胞膜在线实时观测其杀菌机理;2)研制功率大、精度高、可操控性强的PEF发生器及能够实现均匀而稳定处理环境的动态处理室,有效监测PEF处理过程,从而使大规模生产果蔬汁成为可能;此外,研发廉价的PEF发生装置,降低生产成本;3)寻找合适的电极材料,避免在加工过程中由于电极腐蚀而造成食品污染,对PEF处理的果蔬汁进行食品安全性检测。

总之,随着PEF技术的不断突破和PEF在食品领域的深入研究,可以预见PEF杀菌技术在果蔬汁工业化生产中有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] LIU R H. Dietary bioactive compounds and their health implications[J]. Journal of Food Science, 2013, 78(Suppl 1): A18-A25. DOI:10.1111/1750-3841.12101.
- [2] NOËL H, HOFHUIS A, DE J R, et al. Consumption of fresh fruit juice: how a healthy food practice caused a national outbreak of *Salmonella* Panama gastroenteritis[J]. Food Borne Pathogens and Disease, 2010, 7(4): 375-381. DOI:10.1089/fpd.2009.0330.
- [3] 焦中高, 刘杰超, 王思新. 果蔬汁非热加工技术及其安全性评析[J]. 食品科学, 2004, 25(11): 340-345. DOI:10.3321/j.issn:1002-6630.2004.11.091.

- [4] SAIKIA S, MAHNOT N K, MAHANTA C L. A comparative study on the effect of conventional thermal pasteurisation, microwave and ultrasound treatments on the antioxidant activity of five fruit juices[J]. Food Science and Technology International, 2016, 22(4): 288-301. DOI:10.1177/1082013215596466.
- [5] 赵玉红, 刘瑞颖, 张立钢. 巴氏杀菌对黑加仑果汁特性和DPPH自由基清除能力的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(15): 140-144; 217. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2016.15.019.
- [6] RAWSON A, TIWARI B K, PATRAS A, et al. Effect of thermosonication on bioactive compounds in watermelon juice[J]. Food Research International, 2011, 44(5): 1168-1173. DOI:10.1016/j.foodres.2010.07.005.
- [7] PATRAS A, BRUNTON N P, O'DONNELL C, et al. Effect of thermal processing on anthocyanin stability in foods; mechanisms and kinetics of degradation[J]. Trends in Food Science & Technology, 2010, 21(1): 3-11. DOI:10.1016/j.tifs.2009.07.004.
- [8] BUCKOW R, NG S, TOEPFL S. Pulsed electric field processing of orange juice: a review on microbial, enzymatic, nutritional, and sensory quality and stability[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2013, 12(5): 455-467. DOI:10.1111/1541-4337.12026.
- [9] GILLILAND S E, SPECK M L. Inactivation of microorganisms by electrohydraulic shock[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1967, 15(5): 1031-1037.
- [10] HEINZ D. Verfahren und vorrichtung zur gewinnung der einzelnen phasen aus dispersen systemen: DE1237541[P]. 1967-03-30[2017-06-20]. https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=DE&NR=1237541B&KC=B&FT=D&ND=4&date=19670330&DB=EPODOC&locale=en_EP#.
- [11] SALE A J H, HAMILTON W A. Effects of high electric fields on microorganisms: I. killing of bacteria and yeasts[J]. Biochemistry and Biophysics, 1967, 148: 781-788. DOI:10.1016/0304-4165(67)90052-9.
- [12] HÜLSHEGER H, PÖTEL J, NIEMANN E G. Electric field effects on bacteria and yeast cells[J]. Radiation and Environmental Biophysics, 1983, 22(2): 149-162. DOI:10.1007/BF01338893.
- [13] MISRA N N, MARTYNENKO A, CHEMAT F, et al. Thermodynamics, transport phenomena and electrochemistry of external field assisted non-thermal food technologies[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 58(11): 1832-1863. DOI:10.1080/10408398.2017.1287660.
- [14] 王翠华, 吴彦, 李国锋. 脉冲放电对铜绿微囊藻细胞超微结构的影响[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2010, 30(5): 547-550. DOI:10.3969/j.issn.1000-1565.2010.05.023.
- [15] 宋艳波, 刘振宇, 郭玉明. 基于电镜观察及介质理论分析高压脉冲电场处理果蔬机理[J]. 核农学报, 2012, 26(1): 91-94; 106. DOI:10.11869/hnxb.2012.01.0091.
- [16] VERNIER P T, LEVINE Z A, GUNDERSEN M A. Water bridges in electroporabilized phospholipid bilayers[J]. Proceedings of the IEEE, 2013, 101(2): 494-504. DOI:10.1109/JPROC.2012.2222011.
- [17] KOTNIK T, KRAMAR P, PUCIHAR G, et al. Cell membrane electroporation-part 1: the phenomenon[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2012, 28(5): 14-23. DOI:10.1109/MEI.2012.6268438.
- [18] JEYAMKONDAN S, JAYAS D, HOLLEY R, et al. Pulsed electric field processing of foods: a review[J]. Journal of Food Protection, 1999, 62(9): 1088-1096. DOI:10.4315/0362-028X-62.9.1088.
- [19] 曾新安, 欧赞, 王满生. 脉冲电场对沙门氏菌细胞膜流动性的影响及其机理[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016, 44(10): 132-136. DOI:10.3969/j.issn.1000-565X.2016.10.019.
- [20] 刘志伟. 基于脂质体细胞膜模拟脉冲电场致死微生物研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016: 1-15.
- [21] TAO X Y, CHEN J, LI L L, et al. Influence of pulsed electric field on *Escherichia coli* and *Saccharomyces cerevisiae*[J]. International Journal of Food Properties, 2015, 18(7): 1416-1427. DOI:10.1080/10942912.2014.917098.
- [22] HUANG Kang, JIANG Ting, WANG Wen, et al. A comparison of pulsed electric field resistance for three microorganisms with different biological factors in grape juice via numerical simulation[J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(7): 1981-1995. DOI:10.1007/s11947-014-1272-3.
- [23] 王艳丽, 朱宁, 于宁, 等. 低电压脉冲电场对花椒果汁大肠杆菌灭活工艺优化[J]. 食品工业科技, 2017, 38(2): 246-250. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2017.02.039.
- [24] SALDAÑA G, PUÉRTOLAS E, MONFORT S, et al. Defining treatment conditions for pulsed electric field pasteurization of apple juice[J]. International Journal of Food Microbiology, 2011, 151(1): 29-35. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2011.07.033.
- [25] GÜRTLER J B, BAILEY R B, GEVEKE D J, et al. Pulsed electric field inactivation of *E. coli* O157:H7 and non-pathogenic surrogate *E. coli* in strawberry juice as influenced by sodium benzoate, potassium sorbate, and citric acid[J]. Food Control, 2011, 22(10): 1689-1694. DOI:10.1016/j.foodcont.2011.03.029.
- [26] 陈拓, 杨瑞金, 张莎, 等. 高压脉冲电场对胡萝卜汁的杀菌效果及类胡萝卜素含量的影响[J]. 食品与发酵工业, 2010, 36(7): 41-44. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.2010.07.014.
- [27] 刘新雨, 曾新安, 贾晓. 脉冲电场对荔枝汁中酿酒酵母的杀灭效果[J]. 食品科学, 2011, 32(3): 91-94. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201103022.
- [28] BANSAL V, SHARMA A, GHANSHYAM C, et al. Influence of pulsed electric field and heat treatment on *Embelia officinalis* juice inoculated with *Zygosaccharomyces bailii*[J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 95: 146-154. DOI:10.1016/j.fbp.2015.05.005.
- [29] 田野. 高压脉冲电场对杀菌草莓汁加工工艺及品质研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2014: 18-50.
- [30] 裴长达. 卷心菜汁高压脉冲电场非热杀菌研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013: 48-51.
- [31] 金声琅, 殷涌光, 王莹, 等. 高压脉冲电场对番茄汁杀菌效果的研究[J]. 食品工业科技, 2010, 31(11): 91-93. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2010.11.027.
- [32] TIMMERMAN R A H, GROOT N N M, NEDERHOFF A L, et al. Pulsed electric field processing of different fruit juices: impact of pH and temperature on inactivation of spoilage and pathogenic microorganisms[J]. International Journal of Food Microbiology, 2014, 173: 105-111. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2013.12.022.
- [33] SEPULVEDA D R, GUERRERO J A, BARBOSA-CÁNOVAS G V. Influence of electric current density on the bactericidal effectiveness of pulsed electric field treatments[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 76(4): 656-663. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2005.06.022.
- [34] XIANG B, SUNDARARAJAN S, SOLVAL K M, et al. Effects of pulsed electric fields on physicochemical properties and microbial inactivation of carrot juice[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2014, 38(4): 1556-1564. DOI:10.1111/jfpp.12115.
- [35] 李静, 肖健夫, 陈杰, 等. 高压脉冲电场对苹果汁中大肠杆菌与金黄色葡萄球菌的钝化效果[J]. 食品与发酵工业, 2010, 36(8): 41-45. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.2010.08.025.
- [36] KOROLCZUK J, MCKEAG J R, FERNANDEZ J C, et al. Effect of pulsed electric field processing parameters on *Salmonella enteritidis* inactivation[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 75(1): 11-20. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2005.03.027.

- [37] ZHANG Ruobing, LIANG Dapeng, ZHANG Nancheng, et al. Effect of rising time of rectangular pulse on inactivation of *Staphylococcus aureus* by pulsed electric field[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2013, 418: 112-114. DOI:10.1088/1742-6596/418/1/012114.
- [38] 刘珂舟, 袁夏冰, 刘露, 等. 高压脉冲电场对大肠杆菌灭菌条件的优化[J]. 核农学报, 2015, 29(8): 1566-1571. DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2015.08.1566.
- [39] MOSQUEDA-MELGAR J, RAYBAUDI-MASSILIA R M, MARTÍN-BELLOSO O. Influence of treatment time and pulse frequency on *Salmonella enteritidis*, *Escherichia coli* and *Listeria monocytogenes* populations inoculated in melon and watermelon juices treated by pulsed electric fields[J]. International Journal of Food Microbiology, 2007, 117(2): 192-200. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2007.04.009.
- [40] TIMMERMANS R A H, NEDERHOFF A L, GROOT N N M, et al. Effect of electrical field strength applied by PEF processing and storage temperature on the outgrowth of yeasts and moulds naturally present in a fresh fruit smoothie[J]. International Journal of Food Microbiology, 2016, 230: 21-30. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2016.04.014.
- [41] 陶晓赞. 高压脉冲电场(PEF)对蓝莓汁品质及杀菌机理探究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015: 21-28.
- [42] OHSHIMA T, OKUYAMA K, SATO M. Effect of culture temperature on high-voltage pulse sterilization of *Escherichia coli*[J]. Journal of Electrostatics, 2002, 55(3/4): 227-235. DOI:10.1016/S0304-3886(01)00206-6.
- [43] WOUTERS P C, ALVAREZ I, RASO J. Critical factors determining inactivation kinetics by pulsed electric field food processing[J]. Trends in Food Science and Technology, 2001, 12(3/4): 112-121. DOI:10.1016/S0924-2244(01)00067-X.
- [44] FERRER C, RODRIGO D, PINA M C, et al. The Monte Carlo simulation is used to establish the most influential parameters on the final load of pulsed electric fields *E. coli* cells[J]. Food Control, 2007, 18(8): 934-938. DOI:10.1016/j.foodcont.2006.05.009.
- [45] AGCAM E, AKYILDIZ A, EVRENDILEK G A. A comparative assessment of long-term storage stability and quality attributes of orange juice in response to pulsed electric fields and heat treatments[J]. Food and Bioproducts Processing, 2016, 99: 90-98. DOI:10.1016/j.fbp.2016.04.006.
- [46] LEONG S Y, BURRITT D J, OEY I. Evaluation of the anthocyanin release and health-promoting properties of Pinot Noir grape juices after pulsed electric fields[J]. Food Chemistry, 2016, 196: 833-841. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.10.025.
- [47] EVRENDILEK G A. Change regime of aroma active compounds in response to pulsed electric field treatment time, sour cherry juice apricot and peach nectars, and physical and sensory properties[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2016, 33: 195-205. DOI:10.1016/j.ifset.2015.11.020.
- [48] GARDE-CERDÁN T, GONZÁLEZ-ARENZANA L, LÓPEZ N, et al. Effect of different pulsed electric field treatments on the volatile composition of Graciano, Tempranillo and Grenache grape varieties[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2013, 20: 91-99. DOI:10.1016/j.ifset.2013.08.008.
- [49] KAYALVIZHI V, PUSHPA A J S, SANGEETHA G, et al. Effect of pulsed electric field (PEF) treatment on sugarcane juice[J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 53(3): 1371-1379. DOI:10.1007/s13197-016-2172-5.
- [50] GUO Mingming, JIN T Z, GEVEKE D J, et al. Evaluation of microbial stability, bioactive compounds, physicochemical properties, and consumer acceptance of pomegranate juice processed in a commercial scale pulsed electric field system[J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(7): 2112-2120. DOI:10.1007/s11947-013-1185-6.
- [51] VALLVERDÚ-QUERALT A, ODRIOZOLA-SERRANO I, OMS-OLIU G, et al. Impact of high-intensity pulsed electric fields on carotenoids profile of tomato juice made of moderate-intensity pulsed electric field-treated tomatoes[J]. Food Chemistry, 2013, 141(3): 3131-3138. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.05.150.
- [52] VERVOORT L, VAN DER PLANCKEN I, GRAUWET T, et al. Comparing equivalent thermal, high pressure and pulsed electric field processes for mild pasteurization of orange juice: part II: impact on specific chemical and biochemical quality parameters[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2011, 12(4): 466-477. DOI:10.1016/j.ifset.2011.06.003.
- [53] AGCAM E, AKYILDIZ A, EVRENDILEK G A. Comparison of phenolic compounds of orange juice processed by pulsed electric fields (PEF) and conventional thermal pasteurisation[J]. Food Chemistry, 2014, 143: 354. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.07.115.
- [54] 赵瑾. 脉冲电场在梨汁加工中的应用[D]. 无锡: 江南大学, 2008: 39-46.
- [55] TOEPFL S, HEINZ V, KNORR D. High intensity pulsed electric fields applied for food preservation[J]. Chemical Engineering & Processing Process Intensification, 2007, 46(6): 537-546. DOI:10.1016/j.ccep.2006.07.011.
- [56] 刘珂舟, 杨勇, 袁夏冰, 等. 高压脉冲电场与热灭菌技术相结合对大肠杆菌的杀菌效果[J]. 食品工业科技, 2014, 35(2): 140-142; 149. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2014.02.082.
- [57] 方婷, 钟海荣, 陈锦权. 高压脉冲电场处理冷冻浓缩枇杷汁的研究[J]. 安徽农学通报, 2011(17): 170-173. DOI:10.16377/j.cnki.issn1007-7731.2011.17.008.
- [58] 钟海荣. 高压脉冲电场技术及其在冷冻浓缩枇杷汁中的应用研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2011: 37-47.
- [59] AADIL R M, ZEND X A, SUN D W, et al. Combined effects of sonication and pulsed electric field on selected quality parameters of grapefruit juice[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 62(1): 890-893. DOI:10.1016/j.lwt.2014.10.025.
- [60] 陈婧, 曾新安, 王满生. 柚皮苷与脉冲电场对酿酒酵母的协同致死作用[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(9): 27-30. DOI:10.16377/j.cnki.issn1007-7731.2011.17.008.
- [61] YANG N N, HUANG K, LYU C A, et al. Pulsed electric field technology in the manufacturing processes of wine, beer, and rice wine: a review[J]. Food Control, 2016, 61: 28-38. DOI:10.1016/j.foodcont.2015.09.022.
- [62] DALVI-ISFAHAN M, HAMDAMI N, LE-BAIL A, et al. The principles of high voltage electric field and its application in food processing: a review[J]. Food Research International, 2016, 89: 48-62. DOI:10.1016/j.foodres.2016.09.002.
- [63] PAN Y Y, SUN D W, HAN Z. Applications of electromagnetic fields for nonthermal inactivation of microorganisms in foods: an overview[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 64: 13-22. DOI:10.1016/j.tifs.2017.02.014.